

# 고강도콘크리트의 강도추정식 제안

( 최종보고서 )

2002. 9. 18

총괄주관기관 : 기초전력 공학공동연구소

주 관 기 관 : 충남대학교 산업기술연구소

산 업 자 원 부



# 제 출 문

산 업 자 원 부 장관 귀하

본 보고서를 '전력산업연구개발사업'

“고강도콘크리트의 강도추정식 제안”(개발기간 : 2001. 09. 07 ~  
2002. 09. 06) 과제의 최종보고서로 제출합니다.

2002. 09. 18

총괄주관기관명 : 기초전력공학공동연구소

주 관 기 관 명 : 충남대학교 산업기술연구소

총괄책임자 : 김 무 한

연 구 원 : 권 영 진

연 구 원 : 강 석 표

연 구 원 : 김 용 로

연 구 원 : 김 재 환

연 구 원 : 장 종 호

연 구 원 : 심 재 형

전력산업연구개발사업운영요령 제33조에 따라 보고서 내용을  
관련기관에 널리 배포함에 동의합니다.

# 요 약 문

## I. 제 목 :

고강도콘크리트의 강도추정식 제안

## II. 연구개발의 목적 및 필요성

최근 국내에서도 콘크리트 구조물의 대형화, 초고층화에 따라 고강도콘크리트의 수요가 증가되고 있는 상황이지만 현재 고강도콘크리트에 관한 연구는 대부분 배합특성 및 역학적 특성 등에만 집중되고 있어 고강도콘크리트를 사용한 콘크리트 구조물의 유지관리 및 안전진단 측면에서 고강도콘크리트의 비파괴시험에 의한 강도추정이 필요한 실정이다.

또한 고강도콘크리트의 강도추정에 있어서 국내의 경우 체계화된 연구가 없는 상황으로 사용재료나 환경이 다른 일본에서 수십년 전에 제안된 강도추정식을 그대로 사용하고 있어 고강도콘크리트를 사용한 콘크리트 구조물의 품질관리, 유지관리 및 안전진단시 강도추정 결과의 신뢰성 등에 문제점이 제기되고 있다.

따라서 본 연구에서는 기존문헌자료를 수집, 검토 및 분석하고, 사용재료, 물결합재비 및 양생온도에 따른 다양한 고강도콘크리트를 제작한 후 측정된 압축강도와 반발도, 초음파속도의 데이터 및 충남대학교 건설재료·시공학 연구실에서 1990~2001년 사이에 축적된 다양한 고강도콘크리트의 기존데이터를 총합하여 국내 실정에 맞는 고강도콘크리트의 강도추정식을 제안하고자 한다.

## III. 연구개발의 내용 및 범위

본 연구는 국내 실정에 맞는 고강도콘크리트의 강도추정식을 제안하기 위한 것으로 연구의 내용 및 범위는 다음과 같다.

제1장에서는 연구의 배경 및 필요성, 연구의 목적, 연구의 내용 및 범위를 제시하였으며, 제2장에서는 고강도콘크리트 및 비파괴시험법에 관한 이론적 고찰로서 고강도콘크리트의 정의 및 특성, 콘크리트 강도추정을 위한 영향인자 및 비파괴시험법에 관하여 고찰하였다.

제3장은 국내·외 기술개발 현황으로 국내·외 관련 연구동향 및 국내 비파괴 시험법의 활용현황을 검토하고 개선방향을 제시하였다.

제4장은 고강도콘크리트의 강도추정식 제안을 위한 실험적 연구로 사용재료 및 물결합재비에 따른 고강도콘크리트의 강도추정식을 제안하였으며 적산온도에 의한 고강도콘크리트의 강도예측 방법에 관해서 검토하였다. 또한 모의부재를 제작하여 본 연구에서 제안한 고강도콘크리트 강도추정식의 현장적용성을 평가하였다.

제5장에서는 본 연구개발 목표의 달성도 및 연구개발에 따른 대외 기여도에 관하여 기술하였으며, 제6장에서는 본 연구개발결과의 활용 분야 및 활용방안에 대하여 기술하였다.

제7장은 연구개발결과의 종합결론을 기술하였다.

## IV. 연구개발결과 및 활용에 대한 건의

### 1. 연구개발결과

본 연구의 연구개발 결과를 요약하면 다음과 같다.

가. 사용재료에 따른 고강도콘크리트의 강도추정식 제안을 위한 연구의 결과 다음과 같은 강도추정식을 제안하였다.

1) 반발도법 :  $F_c = 12.67R_n + 97.868$  ( $R=0.8563$ )

2) 초음파속도법 :  $F_c = 501.63V_p - 1782$  ( $R=0.8589$ )

3) 복합법 :  $F_c = 11.21R_n + 125.76V_p - 422.91$  ( $R=0.8934$ )

나. 물결합재비에 따른 고강도콘크리트의 강도추정식 제안을 위한 연구의 결과 다음과 같은 강도추정식을 제안하였다.

1) 반발도법 :  $F_c = 14.29R_n + 8.057$  (R=0.7671)

2) 초음파속도법 :  $F_c = 335.27V_p - 1033.8$  (R=0.6269)

3) 복합법 :  $F_c = 11.61R_n + 193.44V_p - 778.64$  (R=0.8322)

다. 적산온도에 의한 고강도콘크리트의 강도예측을 위한 연구의 결과 적산온도와 고강도콘크리트의 관계에 있어서 보다 정확한 강도예측을 위해서는 Freiesleben 함수 및 Gompertz Curve를 이용한 강도예측이 합리적일 것으로 사료된다.

라. 본 연구에서 제안한 강도추정식의 현장적용성 평가 결과 실측 강도와 높은 상관관계를 나타내고 있어 본 연구에서 제안한 고강도 콘크리트 강도추정식의 타당성을 검증할 수 있었다.

## 2. 활용에 대한 건의

국내 실정에 맞는 고강도콘크리트의 강도추정식에 관한 기준 및 지침 제정에 필요한 기초자료로서 활용할 수 있을 것으로 사료되며, 또한 본 연구결과의 확대보급을 통해 국내 관련업계의 기술력 및 경쟁력을 향상시킬 수 있고, 향후 비파괴 검사의 신뢰도 향상을 위한 지속적인 연구에 귀중한 연구자료로 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

## V. 기대효과

### 1) 기술적 측면

국내 실정에 맞는 고강도콘크리트의 강도추정식에 의해 고강도콘크리트의 초기강도의 정확한 예측으로 공기단축 및 시공시 안정성을 확보할 수 있을 뿐만 아니라 실 구조물에서의 콘크리트 강도추정의

간편화·신속화 및 콘크리트 성능저하에 대한 분석으로 노후구조물의 정밀진단을 위한 기초자료로 사용할 수 있을 것으로 사료된다.

## 2) 경제·산업적 측면

본 연구에서 제안한 고강도콘크리트의 강도추정식에 의해 구조물의 안전도를 정확히 평가하여 안전성을 지속적으로 유지할 수 있기 때문에 사회간접자본의 손실을 최소화함으로써 경제·산업적 측면의 이익과 효용을 도모할 수 있을 것으로 사료된다.

# **SUMMARY**

## **I . TITLE**

A Proposal of Presumption Equation for High Strength Concrete Strength

## **II. OBJECTIVES AND SIGNIFICANCE**

Recently, it has been increased the demand on high strength concrete in the country by making the concrete structure much larger and higher. However, because most researches on the high strength concrete were concentrated on properties of mix proportion and mechanics, it is necessary to presume the strength by non-destructive test of high strength concrete in view of maintenance and safety diagnosis of concrete structure using high strength concrete.

Also when presume the strength of high strength concrete in the country, it brings about problems to trust of strength presumption results in case of quality control, maintenance and safety diagnosis of concrete structure using high strength concrete, because there is no systematic research and it has been used the strength presumption equation proposed in japan many years ago which differs from materials and circumstances.

It is the aim of this study to propose the strength presumption equation of high strength concrete which is suitable for domestic situation by collect, investigate and analyze the present references and put together the various past data of high strength concrete which was measured in BMCL(Building Materials & Construction Laboratory)

of CNU(Chungnam National University) from 1990 to 2001 and data including compressive strength, rebound number, ultrasonic pulse velocity of various high strength concrete manufactured and measured according to using materials, W/B ratio and curing temperature.

### **III. CONTENTS AND SCOPE OF THE RESEARCH**

To propose the strength presumption equation of high strength concrete which is suitable for domestic situation, this report consists of seven chapters as follows ;

The 1st chapter is introduction of this study which include background, significance, objective, content and scope of this research.

The 2nd chapter deals with the literature review on high strength concrete and non-destructive strength presumption equation which include definition and property of high strength concrete, effect items for strength presumption and non-destructive test methods.

The 3rd chapter deals with present condition of technical development at home and abroad which include related research trend, application situation and improvement trend of domestic non-destructive test.

The 4th chapter deals with the experimental study on proposal of strength presumption equation of high strength concrete which include proposal of strength presumption equation according to using materials and W/B ratio, and strength prediction by maturity method. Also it is evaluated the site practical application of strength presumption equation of high strength concrete suggested from this research by means of mock-up test.

In the 5th chapter, it is described the achievement degree of research

target and contribution degree according to research development.

The 6th chapter deals with the application field and plan of study results, and in the 7th chapter, it is presented the synthetic conclusions of this research.

## IV. RESULTS AND SUGGESTION FOR APPLICATION

### 1. Results

The principal conclusion in this study are summarized as follows ;

A. From the result of study to propose the strength presumption equation of high strength concrete according to using material, suggested presumption equation are as follows.

1) Rebound number method ;  $F_c = 12.67R_n + 97.868$  (R=0.8563)

2) Ultrasonic pulse velocity method ;  $F_c = 501.63V_p - 1782$  (R=0.8589)

3) Combined method ;  $F_c = 11.21R_n + 125.76V_p - 422.91$  (R=0.8934)

B. From the result of study to propose the strength presumption equation of high strength concrete according to W/B ratio, suggested presumption equation are as follows.

1) Rebound number method ;  $F_c = 14.29R_n + 8.057$  (R=0.7671)

2) Ultrasonic pulse velocity method ;  $F_c = 335.27V_p - 1033.8$  (R=0.6269)

3) Combined method ;  $F_c = 11.61R_n + 193.44V_p - 778.64$  (R=0.8322)

C. From the result of study on strength prediction of high strength concrete by maturity method, it is considered that strength prediction using Freiesleben function and Gompertz Curve is more reasonable for accurate strength prediction in relation maturity and high-strength concrete.

D. From the evaluation result of practical application for strength

presumption equation suggested from this research, it showed high correlation with real measuring strength, so it was certified the propriety of strength presumption equation of high strength concrete proposed in this research.

## **2. Suggestion for application**

It will be able to apply as basis data for establishing the standards and guideline on the strength presumption equation of high strength concrete which is suitable for domestic situation. Also by means of spread and diffuse this research results, it could be improve the technical and competitive power of domestic related company. And it could be apply as important research data on continuous study for improving the trust of non-destructive test.

## **V. EXPECTING EFFECT**

### **1) Technical aspect**

By means of strength presumption equation of high strength concrete which is suitable for domestic situation, it would be able to confirm the construction safety and shorten work period by accurate prediction of early concrete strength, as well as easier and faster the concrete strength presumption of real structures and apply as basis data for exact diagnosis of old structures by analyzing the deterioration of concrete.

### **2) Economic and industrial aspect**

By means of strength presumption equation proposed in this research, it would be able to get economic and industrial profit and usefulness according to minimize the loss of SOC because stability is maintained continuously through an accurate evaluation of structures safety.

# 목 차

<b>제1장 서론</b> .....	<b>1</b>
제1절 연구의 배경 및 필요성 .....	1
제2절 연구의 목적 .....	2
제3절 연구의 내용 및 범위 .....	2
<b>제2장 고강도콘크리트 및 비파괴시험법에 관한 이론적 고찰</b> .....	<b>5</b>
제1절 고강도콘크리트의 이론적 고찰 .....	5
1. 고강도콘크리트의 정의 .....	5
2. 고강도콘크리트의 특성 .....	6
제2절 콘크리트의 강도추정을 위한 비파괴시험법에 관한 이론적 고찰 .....	16
1. 비파괴검사의 영향인자 .....	16
2. 비파괴시험법 .....	31
<b>제3장 국내·외 기술개발 현황</b> .....	<b>49</b>
제1절 비파괴시험의 국내·외 연구동향 .....	49
1. 국내 연구동향 .....	49
2. 국외연구동향 .....	51
제2절 국내 비파괴 시험법의 활용현황 및 개선방향 .....	57
1. 활용현황 .....	57
2. 문제점 및 개선방향 .....	71

**제4장 고강도콘크리트의 강도추정식 제안을 위한 실험적 연구 ..... 72**

제1절 사용재료에 따른 고강도콘크리트의 강도추정식 제안을 위한 연구 ..... 72

- 1. 서 언 ..... 72
- 2. 실험계획 및 방법 ..... 73
- 3. 실험결과 분석 및 검토 ..... 78
- 4. 결 언 ..... 84

제2절 물결합재비에 따른 고강도콘크리트의 강도추정식 제안을 위한 연구 ..... 85

- 1. 서 언 ..... 85
- 2. 실험계획 및 방법 ..... 85
- 3. 실험결과 분석 및 검토 ..... 88
- 4. 결 언 ..... 94

제3절 적산온도에 의한 고강도콘크리트의 강도예측을 위한 연구 ... 95

- 1. 서 언 ..... 95
- 2. 실험계획 및 방법 ..... 95
- 3. 실험결과 및 분석 ..... 99
- 4. 결 언 ..... 110

제4절 고강도콘크리트 강도추정식의 현장적용성 평가에 관한 연구 .. 111

- 1. 서 언 ..... 111
- 2. 실험계획 및 방법 ..... 111
- 3. 실험결과 분석 및 검토 ..... 116
- 4. 결 언 ..... 127

**제5장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도 ..... 128**

제1절 연구개발목표의 달성도 ..... 128

제2절 연구개발에 따른 대외기여도 .....	129
제6장 연구개발결과의 활용계획 .....	130
제7장 종합결론 .....	131
참고문헌 .....	133

# 그림 목 차

그림 1.1 연구의 내용 및 범위 .....	4
그림 2.1 슬럼프와 슬럼프-플로우의 관계 .....	6
그림 2.2 고성능AE감수제첨가량과 응결시간의 관계 .....	8
그림 2.3 물시멘트비와 응결시간의 관계 .....	8
그림 2.4 굵은골재의 최대치수와 압축강도와의 관계 .....	10
그림 2.5 재령에 따른 압축강도의 발현성상 .....	11
그림 2.6 양생조건과 압축강도의 관계 .....	12
그림 2.7 재령 및 양생방법과 압축강도의 관계 .....	13
그림 2.8 적산온도와 압축강도의 관계 .....	14
그림 2.11 골재종류에 따른 반발도의 변화 .....	16
그림 2.12 화강암골재와 현무암골재의 반발도 관계 .....	16
그림 2.13 양생조건에 따른 반발도 관계 .....	17
그림 2.14 양생조건에 따른 압축강도 추정 .....	17
그림 2.15 양생조건 및 재령별 반발도에 따른 압축강도 추정 .....	19
그림 2.16 일반합판 거푸집과 철판거푸집의 반발도 비교 .....	19
그림 2.17 치장합판 거푸집과 철판 거푸집의 반발도 비교 .....	19
그림 2.18 입방형 공시체와 원주형 공시체( $\phi 10 \times 20\text{cm}$ )의 반발도 비교 .....	21
그림 2.19 입방형 공시체와 원주형 공시체( $\phi 15 \times 30\text{cm}$ )의 반발도 비교 .....	21
그림 2.20 기둥부위별 반발도 .....	22
그림 2.21 측정위치의 고저에 따른 반발도와의 관계 .....	22
그림 2.22 압정력에 따른 반발도 비교 .....	23
그림 2.23 재타격 회수별 물시멘트비에 따른 반발도의 변화 .....	23
그림 2.24 골재종류에 따른 초음파속도의 변화 .....	25
그림 2.25 물시멘트비에 따른 초음파속도의 변화 .....	25
그림 2.26 양생조건에 따른 초음파속도 관계 .....	26
그림 2.27 양생조건에 따른 압축강도 추정 .....	26

그림 2.28 콘크리트의 재령에 따른 초음파속도 비교 .....	27
그림 2.29 물시멘트비별 측정위치의 고정에 따른 초음파속도 비교 .....	28
그림 2.30 압정력에 따른 초음파속도 비교 .....	28
그림 2.31 철근콘크리트 기둥의 음속측정결과 .....	29
그림 2.32 기둥부위별 초음파속도 .....	29
그림 2.33 슈미트해머의 내부 구조 .....	33
그림 2.34 압축강도와 반발도의 관계 .....	37
그림 2.35 압축강도와 초음파속도와의 관계 .....	40
그림 2.36 적산온도의 기본개념도 .....	46
그림 3.1 비파괴시험법 관련 발표된 논문 수(~1988) .....	52
그림 3.2 비파괴시험법 관련 발표된 논문 수(1989~1998) .....	53
그림 3.3 강도추정과 관련된 해외 논문 .....	53
그림 3.4 안전진단업체 지역별 분포현황 .....	57
그림 3.5 비파괴시험의 기술력 향상과 신기술 습득 방법 .....	58
그림 3.6 반발도 측정을 위한 비파괴 시험 장비의 보유현황 .....	59
그림 3.7 반발도 측정을 위한 비파괴 시험 장비의 신뢰성 .....	59
그림 3.8 슈미트해머에 의한 반발도 측정자의 경력분포 .....	60
그림 3.9 콘크리트 강도추정에서의 현장측정과 분석방법 .....	60
그림 3.10 반발도 측정에 대한 분석자의 실무경력 .....	61
그림 3.11 콘크리트 강도추정의 방법 .....	61
그림 3.12 콘크리트 강도추정식의 사용빈도 .....	62
그림 3.13 코어 채취수 .....	63
그림 3.14 재령에 의한 영향 고려 .....	63
그림 3.15 1개소 측정에서의 타격회수 .....	64
그림 3.16 수직부재 방향 .....	64
그림 3.17 면적이 큰 부재의 반발도 측정위치 .....	65
그림 3.18 초음파속도 측정을 위한 장비의 보유현황 .....	65
그림 3.19 초음파속도 측정을 위한 장비의 신뢰성 .....	66
그림 3.20 초음파속도 측정자의 경력 분포 .....	67

그림 3.21 초음파속도의 측정과 분석방법 .....	67
그림 3.22 초음파속도 측정에 대한 분석자의 실무경력 .....	68
그림 3.23 초음파속도를 이용한 강도추정 방법 .....	68
그림 3.24 코어 채취수 .....	69
그림 4.1 굵은골재의 입도분포 곡선 .....	75
그림 4.2 압축강도와 반발도와의 관계 .....	81
그림 4.3 실측압축강도와 추정압축강도와의 관계 (반발도법) .....	81
그림 4.4 압축강도와 초음파속도와의 관계 .....	83
그림 4.5 실측압축강도와 추정압축강도와의 관계 (초음파속도법) .....	83
그림 4.6 실측압축강도와 추정압축강도와의 관계 (복합법) .....	84
그림 4.7 압축강도와 반발도와의 관계 .....	90
그림 4.8 실측압축강도와 추정압축강도와의 관계 (반발도법) .....	90
그림 4.9 압축강도와 초음파속도와의 관계 .....	92
그림 4.10 실측압축강도와 추정압축강도와의 관계 (초음파속도법) .....	92
그림 4.11 실측압축강도와 추정압축강도와의 관계 (복합법) .....	93
그림 4.12 골재의 입도분포 곡선 .....	97
그림 4.13 온도에 따른 재령환산계수 .....	101
그림 4.14 재령에 따른 압축강도의 변화 .....	103
그림 4.15(a) 적산온도와 압축강도의 관계 (W/B 30%) .....	105
그림 4.15(b) 적산온도와 압축강도의 관계 (W/B 35%) .....	106
그림 4.16(a) 강도예측모델에 의한 강도예측결과 (W/B 30%) .....	108
그림 4.16(b) 강도예측모델에 의한 강도예측결과 (W/B 35%) .....	109
그림 4.17 모의부재 제작용 거푸집 .....	115
그림 4.18 물결합재비별 재령에 따른 압축강도의 변화 .....	118
그림 4.19 물결합재비별 재령에 따른 코아공시체/표준양생공시체 압축강도 비 .....	118
그림 4.20 물결합재비별 재령에 따른 반발도의 변화 .....	120
그림 4.21 N형 슈미트 해머와 M형 슈미트 해머 반발도의 관계 .....	120
그림 4.22 N형 및 M형 슈미트 해머 반발도와 압축강도의 관계 .....	121

그림 4.23 물결합재비별 재령에 따른 초음파속도의 변화 .....	122
그림 4.24 초음파속도와 압축강도의 관계 .....	122
그림 4.25 실측 압축강도와 반발도법 강도추정식과의 비교 .....	124
그림 4.26 실측 압축강도와 초음파법 강도추정식과의 비교 .....	125
그림 4.27 복합법에 의한 실측압축강도와 추정압축강도와의 관계 .....	126

# 표 목 차

표 2.1(a) 재령에 따른 보정계수( $\alpha$ ) .....	18
표 2.1(b) 재령에 따른 보정계수( $\alpha$ ) .....	18
표 2.2 콘크리트 표면 상태에 따른 반발도 $R_n$ .....	20
표 2.3 1점 연타측정시의 반발도 $R_n$ 의 값 .....	24
표 2.4 각 국의 반발도법에 관한 기준 .....	32
표 2.5 슈미트해머의 종류 .....	35
표 2.6 타격각도 $\alpha$ 와 보정치 $\Delta R$ 의 관계 .....	35
표 2.7 재령계수 $\alpha$ 의 값 .....	35
표 2.8 각 국의 초음파 전파속도법에 관한 기준 .....	39
표 2.9 제조회사별 초음파 측정기의 특징 .....	41
표 3.1 국내 지역별 콘크리트 압축강도 추정식(초음파 속도) .....	50
표 3.2 안전진단업체 지역별 분포현황 .....	57
표 3.3 반발도 측정을 위한 장비 현황 .....	58
표 3.4 반발도에 의한 강도추정식 .....	62
표 3.5 초음파속도법에 사용된 측정장비 .....	66
표 3.6 초음파속도법에 의한 강도추정식 사용빈도 .....	69
표 3.7 복합법에 의한 강도추정식 .....	70
표 4.1 실험계획 .....	74
표 4.2 시멘트의 물리적 성질 .....	74
표 4.3 혼화재의 물리적 성질 .....	74
표 4.4 혼화재의 물리적 성질 .....	74
표 4.5 잔골재의 물리적 성질 .....	74
표 4.6 굵은골재의 물리적 성질 .....	76
표 4.7(a) 사용재료에 따른 고강도콘크리트의 경화성장 측정결과 .....	78
표 4.7(b) 사용재료에 따른 고강도콘크리트의 경화성장 측정결과 .....	79
표 4.8 회귀분석 결과 .....	80

표 4.9 실험계획 .....	86
표 4.10 시멘트의 물리적 성질 .....	86
표 4.11 혼화제의 물리적 성질 .....	86
표 4.12 혼화제의 물리적 성질 .....	86
표 4.13 골재의 물리적 성질 .....	86
표 4.14 물결합재비에 따른 고강도콘크리트의 경화성장 측정결과 .....	88
표 4.15 회귀분석 결과 .....	89
표 4.16 실험계획 .....	96
표 4.17 시멘트의 물리적 성질 .....	97
표 4.18 혼화제의 물리적·화학적 성질 .....	97
표 4.19 혼화제의 물리적 성질 .....	97
표 4.20 골재의 물리적 성질 .....	97
표 4.21 콘크리트 배합 .....	98
표 4.22 굳지않은 콘크리트의 측정결과 .....	99
표 4.23 양생온도별 재령환산계수 .....	101
표 4.24 등가재령과 압축강도 측정결과 .....	102
표 4.25 Plowman식의 계수도출 결과 .....	107
표 4.26 Logistic식의 계수도출 결과 .....	107
표 4.27 Gompertz식의 계수도출 결과 .....	107
표 4.28 실험계획 .....	112
표 4.29 시멘트의 물리적 성질 .....	113
표 4.30 혼화제의 물리적 성질 .....	113
표 4.31 혼화제의 물리적 성질 .....	113
표 4.32 잔골재의 물리적 성질 .....	113
표 4.33 굵은골재의 물리적 성질 .....	114
표 4.34 콘크리트 배합 .....	114
표 4.35 물결합재비별 고강도콘크리트의 경화성장 측정결과 .....	117

# 사 진 목 차

사진 2.1 슈미트해머의 사용전경 .....	34
사진 2.2 초음파 측정기의 형상 (PUNDIT) .....	40
사진 4.1 온도조절장치 .....	98
사진 4.2 항온실 내부 .....	98
사진 4.4 코아채취 장면 .....	115
사진 4.5 M형 반발도 측정장면 .....	115
사진 4.6 슈미트 해머 .....	116

# 제 1 장 서 론

제1절 연구의 배경 및 필요성

제2절 연구의 목적

제3절 연구의 내용 및 범위

## 제2장 고강도콘크리트 및 비파괴 시험법에 관한 이론적 고찰

제1절 고강도콘크리트의 이론적 고찰

제2절 콘크리트의 강도추정을 위한 비파괴  
시험법에 관한 이론적 고찰

## 제3장 국내·외 기술개발 현황

제1절 비파괴시험의 국내·외 연구동향

제2절 국내 비파괴 시험법의 활용현황 및  
개선방향

## 제 4 장 고강도콘크리트의 강도추정식 제안을 위한 실험적 연구

제1절 사용재료에 따른 고강도콘크리트의  
강도추정식 제안을 위한 연구

제2절 물결합재비에 따른 고강도콘크리트의  
강도추정식 제안을 위한 연구

제3절 적산온도에 의한 고강도콘크리트의  
강도예측을 위한 연구

제4절 고강도콘크리트 강도추정식의 현장적용성  
평가에 관한 연구

# 제5장 연구개발목표 달성도 및 대외 기여도

제1절 연구개발목표의 달성도

제2절 연구개발에 따른 대외기여도

## 제 6 장 연구개발결과의 활용계획

## 제 7 장 종합결론

## 참고문헌



# 제1장 서론

## 제1절 연구의 배경 및 필요성

고강도콘크리트는 구조부재의 단면축소 및 경제적인 측면 등에서 많은 장점이 있어 구미 및 일본 등 선진외국에서는 지난 20여 년간에 걸쳐 급속히 발전하여 왔으며, 최근 국내에서도 콘크리트구조물이 초고층화, 대형화, 장대화 됨에 따라 고강도콘크리트의 수요는 더욱 증가될 것으로 기대되고 있다.<sup>1)</sup>

현재 국내의 경우 고강도콘크리트에 대한 연구는 대부분 배합특성 및 역학적 특성 등에만 집중되고 있어 고강도콘크리트를 사용한 콘크리트 구조물의 품질관리, 유지관리 및 안전진단시 고강도콘크리트의 비파괴시험에 의한 강도추정이 필요한 실정이다.<sup>2)</sup>

한편 선진 외국의 경우 고강도 및 초고강도콘크리트에 대한 연구를 바탕으로 고강도콘크리트 구조물에 대한 강도 및 내부탐사를 위하여 비파괴시험에 의한 콘크리트 강도추정에 관한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 이러한 비파괴시험에 대하여 각국마다 기준 및 지침을 제정하고 있다.<sup>3)4)</sup>

그러나 국내의 경우 이에 관한 체계화된 연구 결과가 없는 상태에서 콘크리트에 사용되는 시멘트, 골재, 혼화재료 등 사용재료 및 콘크리트의 배합설계기법 등의 국내 실정을 고려하지 않고 일본에서 수십년전 제안된 강도추정식을 그대로 사용하여 콘크리트구조물의 강도추정결과의 신뢰성 등이 문제점으로 제기되고 있어 국내 실정에 적합한 고강도콘크리트 강도추정식의 제시가 시급히 요구되고 있다.

## 제2절 연구의 목적

고강도콘크리트의 강도추정에 있어서 국내의 경우 체계화된 연구가 없는 상황으로 사용재료나 환경이 다른 일본에서 수십년 전에 제안된 강도추정식을 그대로 사용하고 있어 고강도콘크리트를 사용한 콘크리트 구조물의 품질관리, 유지관리 및 안전진단시 강도추정 결과의 신뢰성 등에 문제점이 제기되고 있다.<sup>5),6)</sup>

따라서 본 연구에서는 기존문헌자료를 수집, 검토 및 분석하고, 사용재료, 물결합재비 및 양생온도에 따른 다양한 고강도콘크리트를 제작한 후 측정된 압축강도와 반발도, 초음파속도의 데이터 및 충남대학교 건설재료·시공학 연구실에서 1990~2001년 사이에 축적된 다양한 고강도콘크리트의 기존데이터를 총합하여 국내 실정에 맞는 고강도콘크리트의 강도추정식을 제안하고자 한다.

## 제3절 연구의 내용 및 범위

본 연구는 국내 실정에 맞는 고강도콘크리트의 강도추정식을 제안하기 위한 것으로 연구의 내용 및 범위는 그림 1.1에서 보는 바와 같다.

제1장에서는 연구의 배경 및 필요성, 연구의 목적, 연구의 내용 및 범위를 제시하였으며, 제2장에서는 고강도콘크리트 및 비파괴시험법에 관한 이론적 고찰로서 고강도콘크리트의 정의 및 특성, 콘크리트 강도추정을 위한 영향인자 및 비파괴시험법에 관하여 고찰하였다.

제3장은 국내·외 기술개발 현황으로 국내·외 관련 연구동향 및 국내 비파괴 시험법의 활용현황을 검토하고 개선방향을 제시하였다.

제4장은 고강도콘크리트의 강도추정식 제안을 위한 실험적 연구로서 제1절에서는 사용재료에 따른 고강도콘크리트의 강도추정식 제안

을 위한 연구, 제2절에서는 물결합재비에 따른 고강도콘크리트의 강도추정식 제안을 위한 연구, 제3절에서는 적산온도에 의한 고강도콘크리트의 강도예측을 위한 연구, 제4절에서는 본 연구에서 제안한 고강도콘크리트 강도추정식의 현장적용성 평가에 관한 연구의 결과를 기술하였다.

제5장에서는 본 연구개발 목표의 달성도 및 연구개발에 따른 대외 기여도에 관하여 기술하였으며, 제6장에서는 본 연구개발결과의 활용 분야 및 활용방안에 대하여 기술하였다.

제7장은 연구개발결과의 종합결론으로 고강도콘크리트의 강도추정식 제안을 위한 일련의 실험·실증적 연구결과를 종합적으로 정리하였다.

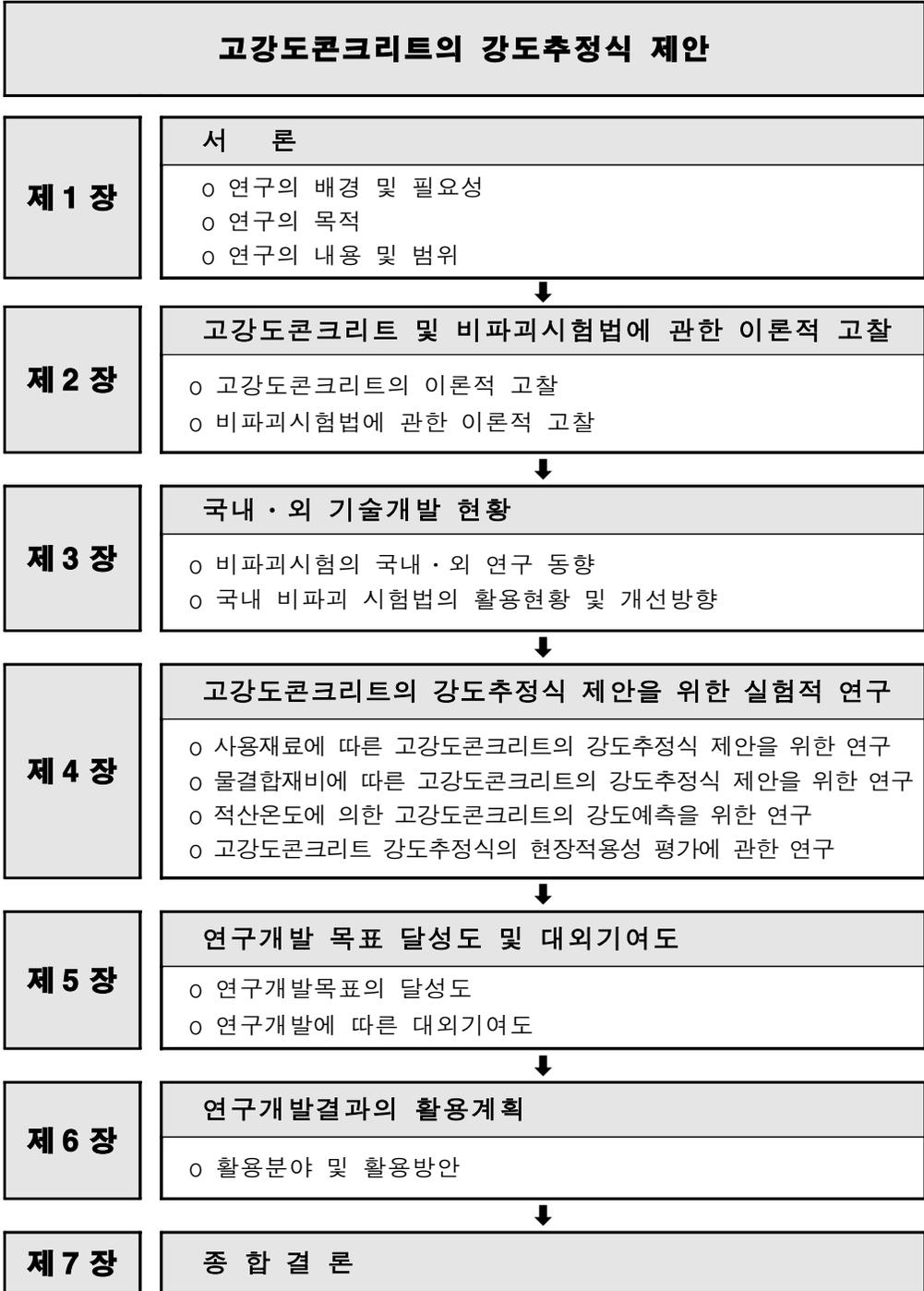


그림 1.1 연구의 내용 및 범위

## 제2장 고강도콘크리트 및 비파괴시험법에 관한 이론적 고찰

### 제1절 고강도콘크리트의 이론적 고찰

#### 1. 고강도콘크리트의 정의

고강도콘크리트의 강도 수준은 지역적 또는 국가적인 기술개발의 정도 및 통상적으로 사용되는 강도 영역에 따라 변화하기 때문에 일정한 범위로 한정하는 것은 매우 어려우며, 국가 또는 연구자에 따라 변화하고 동일 국가에서도 여러 가지 정의를 내리고 있다.<sup>7),8)</sup>

미국의 경우 ACI Committee 363에서는 고강도콘크리트에 관한 강도 수준에 두 가지의 개념을 사용하고 있으며, 첫 번째는 Bertero가 제안한 것으로 고강도콘크리트의 강도 하한선을 보통골재를 사용하는 경우  $420\text{kgf/cm}^2$  이상으로 규정하고 있고, 두 번째는 지역에 따른 편차를 고려하여  $620\text{kgf/cm}^2$  이상의 콘크리트를 고강도콘크리트라고 정의하고 있다.<sup>9)</sup>

일본의 경우 일반적으로 사용되는 고강도콘크리트는 설계기준강도  $360\text{kgf/cm}^2$  이상인 콘크리트로 정의하고 있다. 특히, 1988년도부터 시작된 건설성총합기술개발프로젝트 「철근콘크리트조 건축물의 초경량·초고층화 기술개발」에서는 설계기준강도  $1,200\text{kgf/cm}^2$ 까지를 개발 목표로 하여 연구를 진행하였다.<sup>10),11)</sup>

한편, 국내의 경우 건설교통부 제정 건축공사표준시방서 및 콘크리트표준시방서에 의하면 종래에는 설계기준강도  $360\text{kgf/cm}^2$  이상을 고강도콘크리트로 정의하였으나 1999년도에 전면적으로 개편되어 건축공사 및 토목공사에서  $400\text{kgf/cm}^2$  이상으로 상향조정되었다.<sup>12),13)</sup>

## 2. 고강도콘크리트의 특성

### 가. 굳지않은 콘크리트의 특성

#### (1) 고강도콘크리트의 워커빌리티 평가지표

##### (가) 슬럼프

고강도콘크리트는 점성이 크기 때문에 슬럼프가 큰 콘크리트에서도 재료분리가 적은 균일한 콘크리트를 얻는 것이 가능하다. 따라서 이러한 슬럼프 값만으로 굳지않은 고강도콘크리트의 성질을 대표하는 것은 곤란하며, 펌프에 의한 압송성과 다짐의 용이성 등을 종합적으로 고려한 품질평가방법의 확립이 필요하다.

워커빌리티의 평가방법에 대해서는 여러 가지 면에서 검토가 이루어지고 있으며 점성과 항복치 등의 레오로지 정수를 직접 측정하여 평가의 기준으로 하는 것이 좋다는 제안도<sup>14)</sup> 있지만 현재로서는 슬럼프 18cm 또는 21cm를 목표로 한 콘크리트가 많이 이용되고 있다.

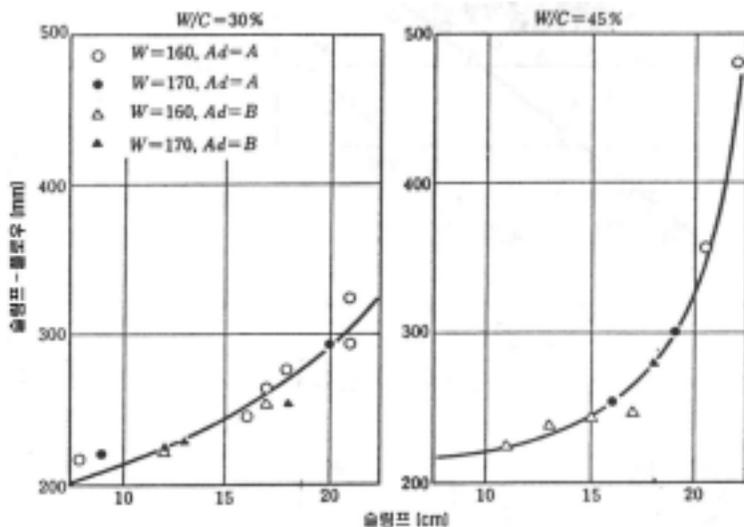


그림 2.1 슬럼프와 슬럼프-플로우의 관계

### (나) 슬럼프-플로우

슬럼프-플로우는 콘크리트의 점성을 나타내는 평가방법 중 하나로서 고강도콘크리트는 보통 콘크리트에 비하여 레오로지적 성질이 크게 다르기 때문에 슬럼프-플로우를 측정하는 것이 시도되고 있다. 그림 2.1은 슬럼프와 슬럼프-플로우의 관계를 나타낸 것으로서 슬럼프가 18cm 이하의 경우에는 물시멘트비가 달라도 슬럼프와 슬럼프-플로우의 관계는 거의 같은 경향을 나타내고 있다. 그러나 슬럼프가 20cm 이상으로 되면 고강도콘크리트가 동일 슬럼프에 있어서 슬럼프-플로우가 작게 되는 경향이 나타났다.

### (2) 슬럼프의 경시변화

고성능AE감수제를 이용한 고강도콘크리트는 고성능감수제에 의해서 시멘트입자가 분산되기 때문에 시간의 경과와 동시에 발생하는 입자간의 응집작용이 강하여 슬럼프의 경시변화가 크게 되는 것으로 알려져 있다. 그러나 최근 개발되고 있는 슬럼프로스 저감형의 고성능AE감수제를 이용한 경우에는 슬럼프의 경시변화가 작게된다는 보고가 많다. 그러나 슬럼프로스 저감형의 고성능AE감수제를 이용하면 슬럼프의 경시변화는 발생하지 않을 것으로 사료되지만 고성능AE감수제의 종류와 골재의 종류 및 사용량 등 여러 가지 요인에 의해서 변화하기 때문에 실제 사용에 있어서는 실험에 의한 확인을 통하여 필요한 성능을 만족하고 있는가를 확인하는 것이 필요하다.

### (3) 응결

고성능AE감수제를 이용한 고강도콘크리트는 일반적으로 응결시간이 지연되는 경향이 있다. 특히 고성능AE감수제를 2% 이상 첨가한 경우에는 응결지연경향이 크게 나타나며 응결시간은 약 15~20시간 이상으로

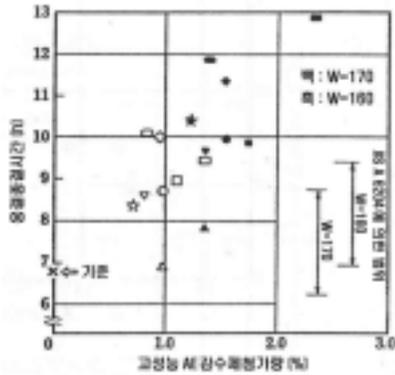


그림 2.2 고성능AE감수제 첨가량과 응결시간의 관계

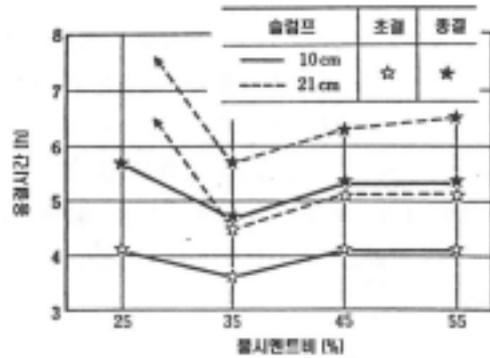


그림 2.3 물시멘트비와 응결시간의 관계  
(물시멘트비 55%는 혼화제 무혼입)

나타나고 있다.<sup>15)</sup> 그러나 리그닌설폰산계와 카르본산계의 감수제에 비하면 지연성이 작다는 보고도 있다.<sup>16)</sup> 또한 고성능AE감수제를 이용한 콘크리트의 응결이 지연되는 원인이 고성능AE감수제 자체의 지연효과가 아니라 그 분산작용에 의해서 유동성(플로우값)이 증대하기 때문이며<sup>17)</sup> 응결시간은 고성능AE감수제의 종류에 따라서 다르게 나타나는 것으로 보고되고 있다. 응결시간에 관한 대표적인 시험결과를 그림 2.2 및 그림 2.3에 나타내었다.

## 나. 경화콘크리트의 특성

### (1) 압축강도

#### (가) 압축강도에 미치는 구성재료의 영향

##### ① 물시멘트(물결합재)비

보통강도의 콘크리트에서는 물시멘트비율이 성립하여 물시멘트(물결합재)비의 감소에 따라 콘크리트의 압축강도는 증가하고 물결합재비와 압축강도의 사이에는 비례관계가 성립한다. 그러나 너무 낮은 물결합재비에서는 비빔이 매우 곤란하며 다짐이 불충분하게 되어 골재강도가 매트릭스강도보다 낮고 시멘트강도가 한계에 도달하는 등의 원인으로 강

도가 저하한다.

물결합재비와 압축강도의 관계는 배합을 결정할 때의 기본사항이지만 고강도콘크리트에서는 사용재료, 양생방법 등의 영향을 크게 받기 때문에 일정한 관계는 정할 수 없으며 시험비범에 의해 물결합재비를 결정하는 것이 현실적으로 바람직하다.

## ② 시멘트

시멘트의 품질·제품이 다르게 되면 동일 물시멘트비의 콘크리트에 있어서도 압축강도는 다르게 나타난다. 그 경향은 초기재령일수록, 물시멘트비가 크게 될수록 현저하며 장기재령에서는 시멘트 종류 및 물시멘트비의 감소에 따른 품질·제품간의 격차는 작게 되는 경향이 있다. 그러나 물시멘트비의 감소에 따라 품질간의 강도차이가 크게 된다는 보고도 있어 고강도 영역에 있어서 시멘트 종류가 압축강도에 미치는 영향에 관하여 더 많은 검토가 요구된다.

## ③ 혼화재

고강도콘크리트용 혼화재로서 실리카흙, 고로슬래그미분말, 플라이애시 등이 이용되고 있으며 시멘트에 대한 혼화재의 치환율이 압축강도에 영향을 미친다는 것은 알려져 있다. 실리카흙의 경우 치환율이 약 10%까지는 압축강도는 증가하지만 그 이상의 범위에서는 강도의 증가는 확인되지 않으며 30% 치환한 경우에는 강도저하를 일으킨다는 보고도 있다.<sup>18)</sup> 고로슬래그미분말의 경우 재령 및 분말도에 따라 압축강도에 미치는 영향이 다르지만 일반적으로 40~50%의 치환율에서 강도증대효과가 크게 나타난다. 또한 플라이애시의 경우에는 15~20%의 치환율이 적당하다. 다만 실리카흙 및 고로슬래그미분말의 경우 강도증가에 최적의 치환율은 양생온도에 따라 다르며 고온으로 될수록 최적의 치환율은 증대한다고 보고되고 있다.<sup>19)</sup>

혼화재의 분말도는 압축강도의 발현성상에 영향을 미치며 고로슬래그 미분말의 경우 분말도가 높을수록 조기재령의 강도발현은 현저하지만 분말도가 너무 높으면 반응이 빨리 진행되어 오히려 장기강도의 개선이 보이지 않기 때문에 분말도 7,000cm<sup>2</sup>/g 정도가 적당할 것으로 보고되고 있다. 플라이애시의 경우 분말도가 높을수록 압축강도는 증대하며, 장기재령일수록 그 경향은 현저하게 나타난다.

#### ④ 골재

콘크리트의 압축강도에 미치는 골재의 영향요인으로서 크게 골재자체의 강도와 골재와 매트릭스의 부착강도 등의 두 가지 요인이 있으며 동일 물시멘트의 콘크리트에서도 사용하는 골재의 암석종류·산지 등에 의해서 압축강도는 다르게 나타난다.

굵은골재 치수가 압축강도에 미치는 영향에 대해서는 그림 2.4에서 보는 바와 같이 굵은골재 치수가 클수록 강도는 저하하고 물시멘트비가 작을수록 그 경향은 현저하다. 또한 굵은골재량이 증가할수록 압축강도는 저하하며 이러한 경향은 굵은골재 종류·물시멘트비에 따라 다르고

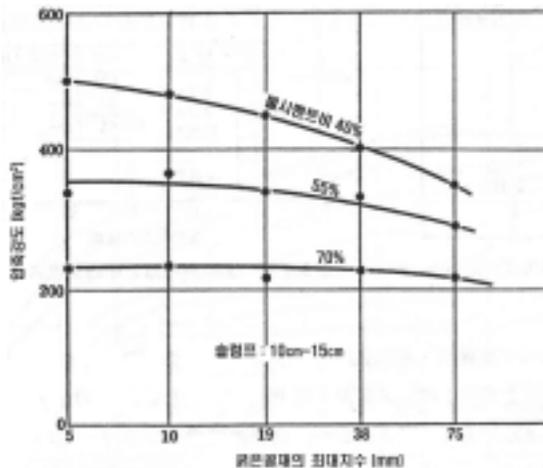


그림 2.4 굵은골재의 최대치수와 압축강도와의 관계

물시멘트비가 작을수록 또한 저품질의 골재일수록 압축강도의 저하는 크다. 이는 골재 총 표면적의 증가에 의한 골재와 페이스트의 표면부착의 차이, 골재와 페이스트의 탄성계수의 차이에 의한 골재주변의 응력집중 정도, 수축변형구속도 차이 등에 의한 복합적인 효과인 것으로 사료된다.<sup>20)</sup>

### ⑤ 혼화제

고성능감수제는 고도의 감수효과를 얻을 수 있으므로 고강도콘크리트의 품질 및 시공성 개선을 위하여 매우 효과적이다.

그러나 고성능감수제는 종류·제조회사에 따라 동일배합 콘크리트에서 압축강도에 차이가 발생하며, 고강도콘크리트일수록 현저한 차이가 발생한다고 보고되고 있다. 따라서 혼화제를 사용함에 있어서 시험비빔을 통해 충분한 검토가 이루어져야 할 것으로 판단된다.

### (나) 압축강도에 미치는 재령 및 양생의 영향

#### ① 재령

고강도콘크리트의 강도발현은 그림 2.5에서 보는 바와 같이 보통 콘크

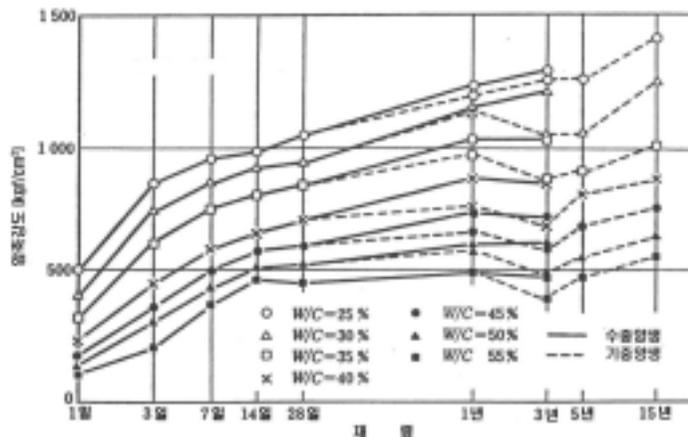


그림 2.5 재령에 따른 압축강도의 발현상

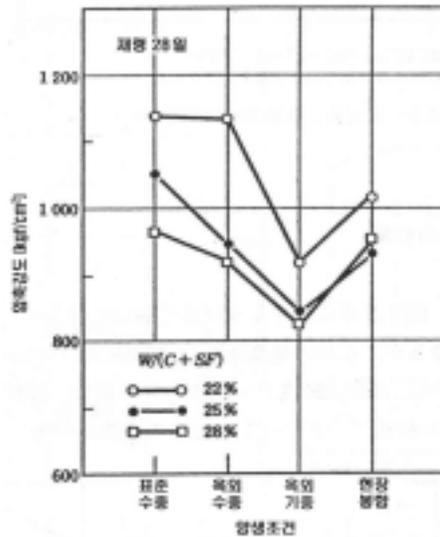


그림 2.6 양생조건과 압축강도의 관계

리트와 동일하게 초기재령에 있어서 크며 그 후에는 완만하게 된다. 장기강도증진은 보통강도의 콘크리트보다도 약간 크게 되는 경향을 나타내고 있다. 그러나 고강도경량콘크리트의 경우 골재강도가 작기 때문에 재령 28일 이후의 강도증진은 보통강도의 경량콘크리트에 비하여 작다.

## ② 건조상태

고강도콘크리트의 압축강도는 건조상태의 영향을 받는다. 그림 2.6에서 보는 바와 같이 표준수중양생에서 약 1,200kgf/cm<sup>2</sup>의 압축강도가 얻어진 콘크리트가 기중양생에서는 20% 정도, 봉함양생에서는 3~8%의 강도저하를 보이고 장기재령이 될수록 양생의 영향을 크게 받는다. 그러나 고강도로 될수록 건조의 영향을 적게 받으며 표준수중양생과의 차이는 보통강도의 콘크리트에 비하여 작게 나타난다. 이것은 고강도콘크리트는 조직이 밀실하며 수분의 확산이 적기 때문이라고 보고되고 있다. 다만 실리카흙을 치환한 고강도콘크리트는 양생조건의 영향을 크게 받으며 특히 기중양생에서는 강도의 저하가 현저하다는 보고도 있다.<sup>21)</sup>

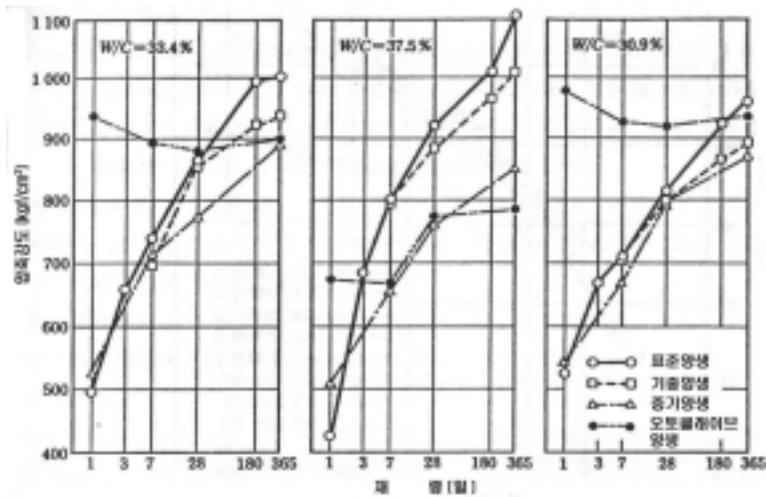


그림 2.7 재령 및 양생방법과 압축강도의 관계

그림 2.7에서 보는 바와 같이 오토클레이브양생에 의한 고강도콘크리트의 강도발현은 초기에 매우 높게 나타나지만 장기재령으로 갈수록 강도증진의 효과는 저하하는 것으로 나타났다.

### ③ 온도이력조건

그림 2.8에서 보는 바와 같이 양생온도 20°C까지의 범위에서는 적산온도와 압축강도 사이에는 높은 상관성이 있으며 양생온도가 높을수록 동일 적산온도에 있어서 압축강도는 낮게 나타난다. 즉 비빔·타설온도와 최고발열온도가 높을수록 장기강도증진은 완만해진다. 이는 발열온도가 높은 경우 페이스트경화체의 결합수량 및 세공용적의 경시변화가 적으며 조직이 치밀하지 않기 때문이라고 사료된다.<sup>22)</sup>

## (2) 그 외의 강도

### (가) 인장강도

시멘트페이스트 인장강도의 한계는 ①잠재결함의 치수, ②응력집중도

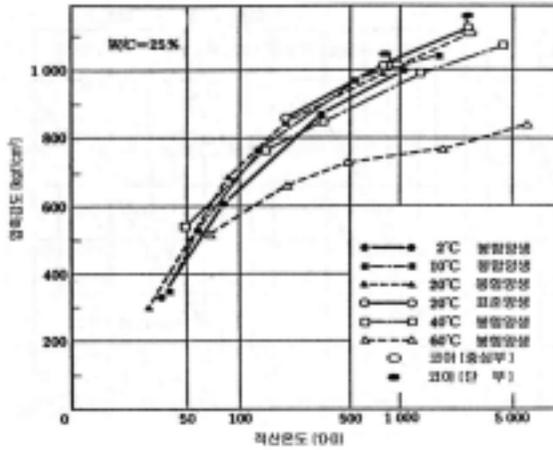


그림 2.8 적산온도와 압축강도의 관계

와 관계하는 결함의 편평도 등에 의존하고 있다. 폴리머 함침에 의해 잠재결함의 치수를 작게 함과 동시에 그 편평도를 저하시켜 인장강도 648kgf/cm<sup>2</sup>의 콘크리트를 얻을 수 있다는 보고도 있다.<sup>23)</sup>

인장강도와 압축강도의 관계는 콘크리트강도가 고강도화됨에 따라 압축강도에 대한 인장강도의 비율은 작게 되며 압축강도 400kgf/cm<sup>2</sup>에서는 인장강도가 압축강도의 1/13정도, 압축강도 1,000kgf/cm<sup>2</sup>에서는 1/18 정도로 된다. 그림 2.9는 압축강도와 인장강도의 관계를 나타낸 것으로 압축강도와 인장강도의 관계는 다음과 같다.

$$f_t = 1.07 \times f_c^{0.566} \quad f_t : \text{인장강도}, \quad f_c : \text{압축강도}$$

인장강도/압축강도에 대한 시멘트 종류의 영향은 나타나지 않으며 시멘트를 혼화재로 치환한 경우 인장강도/압축강도는 작게 되는 경향이 있다. 굵은골재에 의해 인장강도와 압축강도의 관계가 달라진다는 보고도 있다.

#### (나) 휨강도

휨강도와 압축강도의 관계는 콘크리트강도가 고강도화됨에 따라 압축강도에 대한 휨강도의 비율은 작게 되며 압축강도 400kgf/cm<sup>2</sup>에서

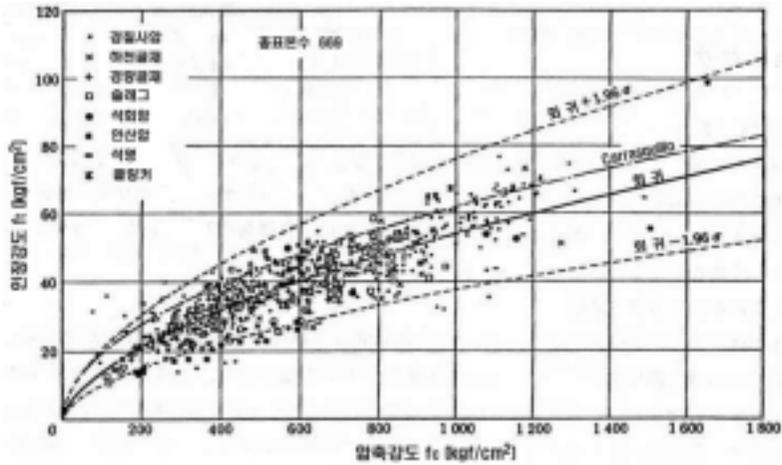


그림 2.9 압축강도와 인장강도의 관계

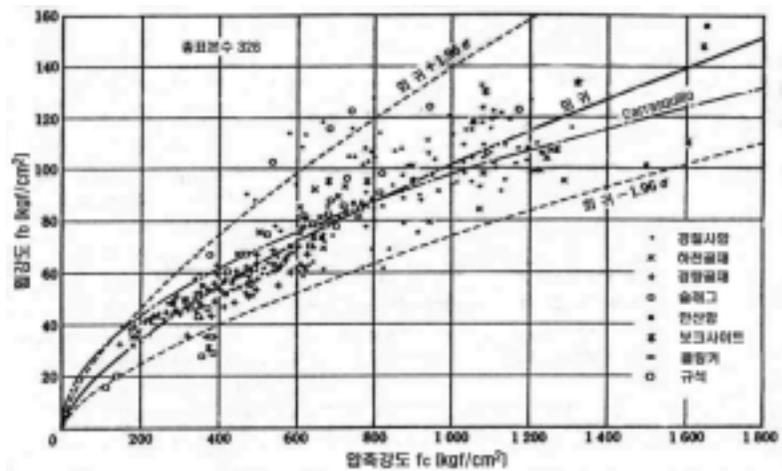


그림 2.10 압축강도와 휨강도의 관계

는 휨강도가 압축강도의 1/7 정도, 압축강도 1,000kgf/cm<sup>2</sup>에서는 1/10 정도이다.

그림 2.10은 압축강도와 휨강도의 관계를 나타낸 것으로 압축강도와 휨강도의 관계식은  $f_b = 0.936 \times f_c^{0.679}$  ( $f_b$  : 휨강도,  $f_c$  : 압축강도)로 회귀되고 있으며 혼화재의 치환율, 사용골재 등의 영향은 거의 없는 것으로 나타났다.

## 제2절 콘크리트의 강도추정을 위한 비파괴시험법에 관한 이론적 고찰

### 1. 비파괴검사의 영향인자

#### 가. 반발도법의 영향인자

##### (1) 콘크리트의 사용재료

특수한 시멘트(알루미나시멘트, 내황산염 포틀랜드시멘트 등)를 제외하고는 시멘트 종류에 의한 영향은 그다지 크지 않은 것으로 보고되고 있다.

또한 보통 골재의 경우 골재의 종류에 의한 영향은 크지 않지만 암질이 다른 골재의 경우는 그 차이가 크게 나타난다. 인공경량골재를 이용한 콘크리트는 보통 콘크리트에 비하여 반발도는 약간 작으며, 골재의 용적비에 따라서도 변화한다.

그림 2.11은 골재종류에 따른 반발도의 변화를 나타낸 것으로 화강암에 비해 적벽돌, 클링커, 천연 강자갈의 반발도가 크고 석회암은

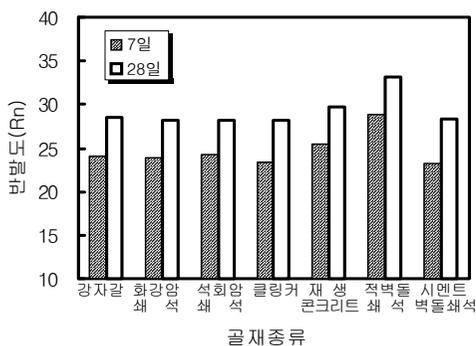


그림 2.11 골재 종류에 따른 반발도의 변화

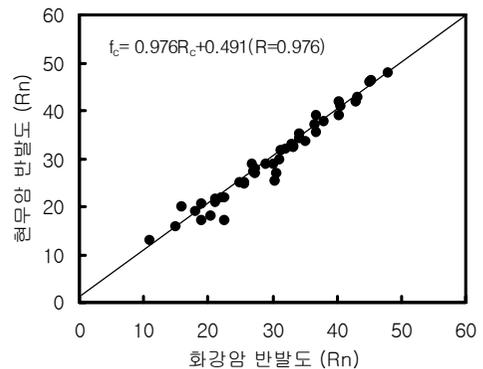


그림 2.12 화강암골재와 현무암골재의 반발도 관계

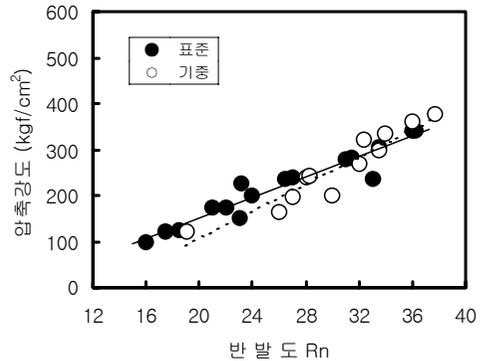
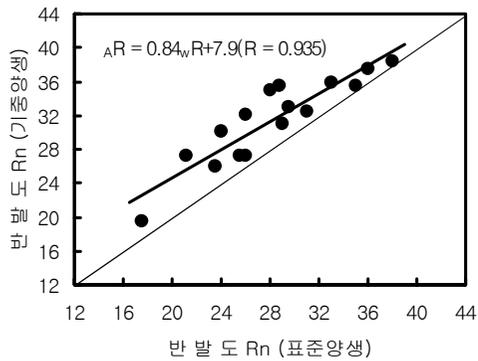


그림 2.13 양생조건에 따른 반발도 관계      그림 2.14 양생조건에 따른 압축강도 추정

유사하고 재생콘크리트 골재 및 시멘트벽돌은 작게 나타났다.

그림 2.12는 화강암골재와 현무암골재의 반발도 관계를 나타낸 것으로 현무암골재의 경우 압축강도는 10% 정도 크게 나타나지만 반발도는 큰 차이가 없는 것을 알 수 있다.

## (2) 콘크리트의 양생방법과 재령

### (가) 양생방법

콘크리트가 습한 상태에서 측정하는 것이 건조한 상태에서 측정한 경우보다도 반발도는 2~5% 또는 20% 정도 적게 나타나 일반적으로는 5% 정도의 차이가 있다고 보고되어 있다. 그림 2.13은 물시멘트비 30~70%인 국내의 화강암골재에 있어 표준수중양생 반발도와 기준양생 반발도를 비교한 것으로서 기준양생의 반발도가 약 10% 정도 크게 나타나고 있다. 또한 그림 2.14는 반발도에 의한 압축강도 추정을 기준과 표준수중으로 구분하여 나타낸 것으로서 표준수중양생의 경우가 동일 반발도에서 약간 높게 추정되는 경향으로 나타나고 있다.

### (나) 재령

콘크리트의 반발도와 강도와의 관계에 있어 재령에 따른 강도추정 시에는 콘크리트의 재령에 의한 보정을 할 필요가 있다. 佐治는 재령 1년 3개월~1년 6개월에 있어서 콘크리트 공시체의 압축강도와 반발도와의 관계를 규명하였으며 재령 28일의 경우에 비하여 같은 압축강도(건조상태)에 대한  $R_n$ 값이 크게 나타나 장기재령의 콘크리트 강도의 추정에는 재령계수(보정계수)를 이용하여 추정강도를 보정할 필요가 있음을 제안하였다.

더욱이 佐治는 15년, 19년, 26년을 각각 경과한 건물을 조사하여 8년 이상을 경과한 콘크리트 강도추정의 예에서 재령계수(보정계수)는 0.63이 되고 그 보다 초기재령시의 추정식에서 구한 강도를 곱해서 추정강도를 감하는 것이 좋다고 보고하고 있다.<sup>24)</sup> 즉, 초기재령의 콘크리트강도 추정식으로부터 장기재령 콘크리트의 강도추정을 위한 재령계수 $\alpha$ 의 값은 표 2.1(a)와 같다. 그러나 일부 안전진단 전문기관의 경우는 표의 데이터를 추가로 확장하여 표 2.1(b)와 같이 확대하여 이용하는 경우도 있는데 이는 그림 2.15와 같이 초기재령에서 큰 차이가 나타나지 않으므로 바람직하지 않다.

표 2.1(a) 재령에 따른 보정계수( $\alpha$ )

재령 (일)	28	100	300	500	1000	3000
$\alpha$	1.00	0.78	0.70	0.67	0.65	0.63

(주) 장기재령의 콘크리트강도추정에 있어 재령 28일의 강도추정식에서 구한 강도에 표시한 재령계수 $\alpha$ 를 곱한다.

표 2.1(b) 재령에 따른 보정계수( $\alpha$ )

재령 (일)	4	5	6	7	8	9	10	20	28	50	100	150	200	300	500	1000	3000
$\alpha$	1.90	1.84	1.78	1.72	1.67	1.61	1.55	1.15	1.00	0.87	0.78	0.74	0.72	0.70	0.67	0.65	0.63

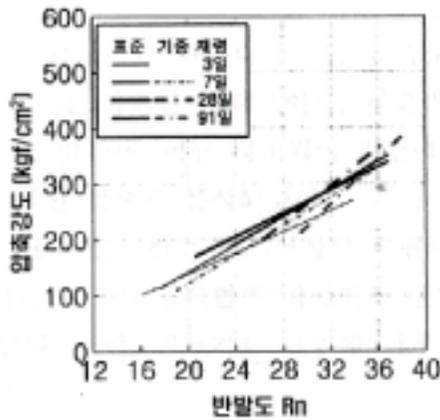


그림 2.15 양생조건 및 재령별 반발도에 따른 압축강도 추정

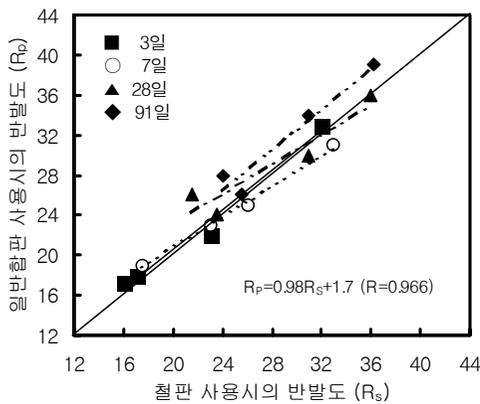


그림 2.16 일반합판 거푸집과 철판 거푸집의 반발도 비교

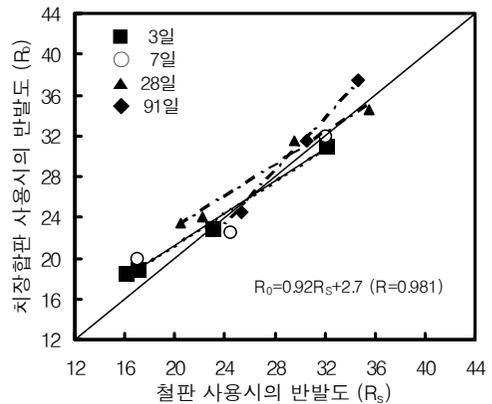


그림 2.17 치장합판 거푸집과 철판 거푸집의 반발도 비교

### (3) 타격면의 상태

#### (가) 표면요철

콘크리트 표면의凹凸이 반발도에 영향을 주기 때문에 카모랜덤 연마석으로 연마하여 평활한 마감을 할 필요가 있다. 목재 거푸집으로 성형한 콘크리트는 강재거푸집(또는 쇠흠손마감)에 의하여 성형한 콘크리트 보다 반발도는 10~25% 정도 적게 나타나는 것으로 보고되고 있다. 그러나 국내의 연구에서는 그림 2.16 및 2.17과 같이 철판거푸집과 비교하여 일반합판의 반발도는 약 4~9%, 치장합판의 반발도

표 2.2 콘크리트 표면 상태에 따른 반발도 Rn

측정 회수	면의 상태	평활면	거친면*
5		33.2	28.6
10		33.9	27.7
15		34.2	28.1
20		34.1	27.4
25			27.5
30			27.0
Rn 총평균		34	28

\*거친면은 카보렌덤 연마석으로 연마하였으나 편의 요철은 시정되지 않음

는 0~11% 정도 크게 나타나고 있어 반발도법에서의 반발도는 피 타격체 표면의 상태에 따라 다소 차이가 있는 것으로 분석되었다.<sup>25)</sup>

반발도는 일반적으로 곡면일수록 평면과 비교하여 타격각을 정확히 유지할 수 없어서 작게 나타나며 또한 표 2.2에 나타난 바와 같이 콘크리트 표면의 상태에 따라서도 그 값이 차이가 있는 것으로 나타났다.

#### (나) 콘크리트 두께

콘크리트의 두께가 10cm 이하인 경우 반발도는 급격히 감소하지만 30cm 이상인 경우는 거의 일정한 것으로 보고되고 있어 벽과 슬래브의 강도추정시 두께를 고려할 필요가 있다.

그림 2.18은 20×20×30cm 입방형 공시체와 ø10×20cm 원주형 공시체의 반발도를 나타낸 것으로 반발도는 입방형 공시체의 반발도가 약 0~17% 정도 큰 것으로 나타났는데 이는 원주형 공시체의 경우 콘크리트 두께가 얇기 때문에 슈미트해머 타격시 피 측정부의 진동 등으로 타격에너지가 산란하여 반발도가 감소된 것으로 사료된다. 또한 그림 2.19는 입방형 공시체와 ø15×30cm 원주형 공시체의 반발도를 재령별로 비교한 것으로 재령에 따라 다소 차이를 보이고 있지만 전반적으로 입방형 공시체와 원주형 공시체의 반발도는 큰 차이가 없는

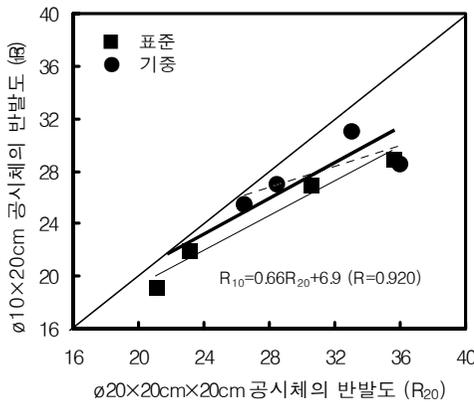


그림 2.18 입방형 공시체와 원주형 공시체 (ø10×20cm)의 반발도 비교

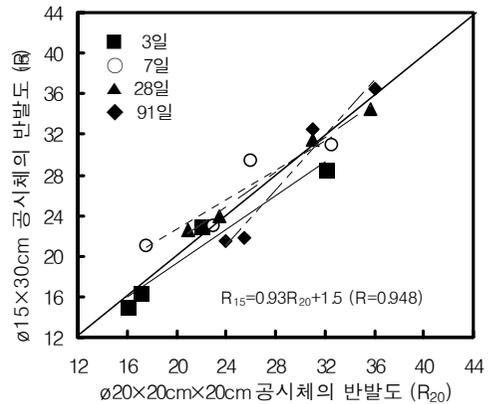


그림 2.19 입방형 공시체와 원주형 공시체(ø15×30cm)의 반발도 비교

것으로 나타나 시험연구 등의 경우 슈미트해머에 의한 반발도 측정은 ø15×30cm 공시체 등으로 소정의 두께 이상을 확보해야 한다.

#### (다) 모서리로부터 이격거리

부재의 모서리 부분은 다른 부분에 비하여 건조의 정도 등이 다르므로 반발도에 영향을 미친다. 이런 경우 모서리 부분에서 3~6cm 이상 떨어진 곳에서 타격 하여야 한다. 그림 2.20은 40cm 각 기둥부위에서 수평면 위치별 반발도를 시험한 것으로 역시 모서리부분의 강도가 중앙부보다 높게 나타났다.

#### (라) 시험체 높이

벽과 기둥을 타격하는 경우에 높이 방향에 의한 콘크리트의 강도가 다를 때에는 측정개수는 될 수 있는 한 많은 것이 좋다. 단 부득이 1개소에서 측정할 때에는 될 수 있는 한 높이를 같게 하는 중앙을 택하는 것이 좋다. 일반적으로 벽, 기둥 등의 측정개소는 바닥에서 130~150cm 정도의 위치가 측정이 용이하다. 그림 2.21은 공시체 높이

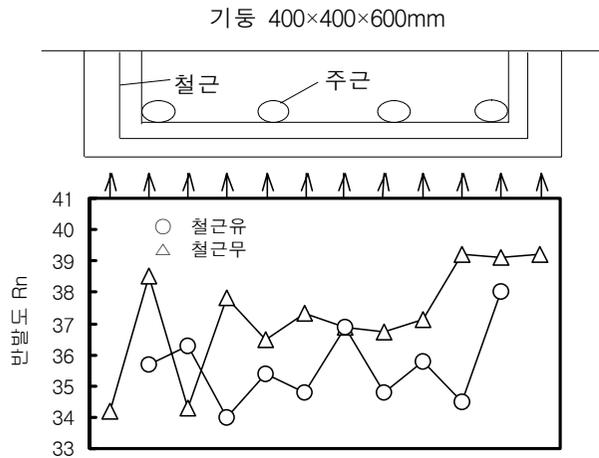


그림 2.20 기둥부위별 반발도

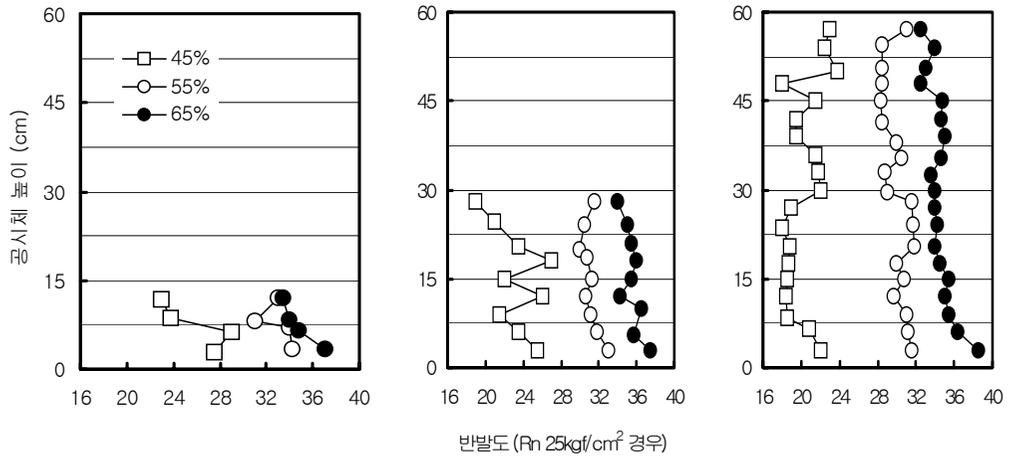


그림 2.21 측정위치의 고저에 따른 반발도와의 관계

를 15, 30, 60cm의 3수준, 물시멘트비를 45, 55, 65% 3수준으로 하여 반발도 시험을 실시한 결과를 나타낸 것으로 공시체의 높이가 높아 질수록 반발도가 작아지는 것으로 나타났다.

(마) 압정력

공시체를 타격하는 경우는 공시체의 구속정도에 따라 반발도가 다

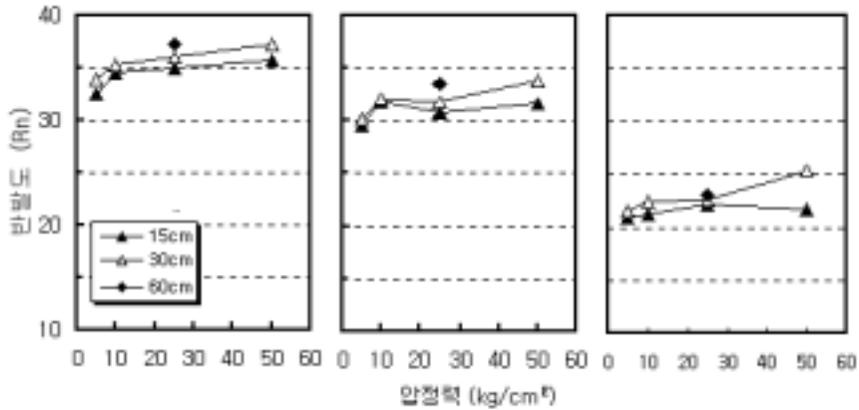


그림 2.22 압정력에 따른 반발도 비교

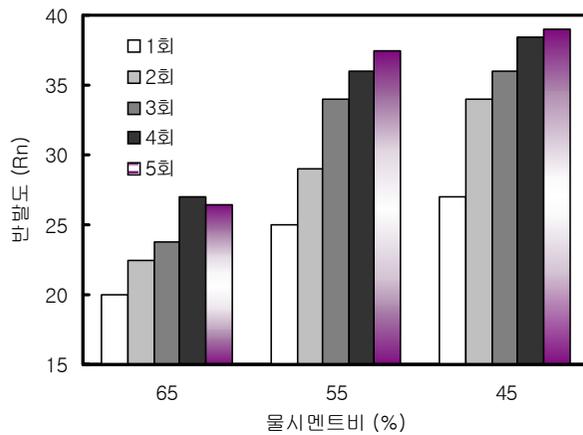


그림 2.23 재타격 회수별 물시멘트비에 따른 반발도의 변화

르기 때문에 구속력은 약  $25\text{kg/cm}^2$  이상으로 할 필요가 있다. 즉  $20\times 20\times 20\text{cm}$  입방형 공시체의 경우라면 약 10t의 가압력으로 고정하여 타격시험을 하면 좋다. 그림 2.22는 압정력 변화에 따른 반발도값을 나타낸 것으로 콘크리트 압밀현상에 의해 압정력이 커짐에 따라 반발도값은 전반적으로 증가하는 경향으로 나타났다.

#### (바) 재타격

동일개소에서 연속하여 타격하는 경우 반발도는 커진다는 보고와

표 2.3 1점 연타측정시의 반발도 Rn의 값

측정부위	지하층(원주) B부		지하층(원주) C부		1층(각주) C부		2층(원주) C부		2층(각주) B부		
	표준 측정	1점 연타 10회	표준 측정	1점 연타 20회	표준 측정	1점 연타 15회	표준 측정	1점 연타 20회	표준 측정	1점 연타 15회	1점 연타 20회
측정회수											
5	34.4	36.4	32.6	35.6	35.4	40.6	40.0	47.6	31.2	37.8	41.0
10	33.8	38.3	31.6	35.6	36.8	41.9	39.5	47.3	33.5	38.9	42.0
15	33.4		31.2	37.1	37.2	41.6	40.4	47.0	33.2	39.3	41.4
20	33.3		31.1	37.1	37.0		40.7	47.0	34.2		42.0
25	32.7		31.0		36.5		41.2		34.3		
30	32.2		30.9		36.5		41.5		34.0		
35	32.5		31.3		36.5		41.8		34.3		
40	32.2		31.2		36.9				35.0		
Rn 총평균	33.0	37.3	31.3	36.3	36.6	41.3	40.7	47.2	33.8	38.6	41.6

적어진다고 하는 보고가 있지만 국내의 연구결과에 따르면 그림 2.23 과 같이 동일부재에 대해 재타격회수가 증가할수록 반발도가 증가하여 물시멘트비 65%의 경우는 4회, 물시멘트비 55, 45%인 경우는 5회가 가장 크게 나타났다. 이는 타격부위가 타격하는 힘에 의해 압밀되어서 점차 반발도가 증가하지만 어느 정도의 타격이 되면 타격하는 힘이 더 이상 압밀시킬 수 없는 상태에 이르러 반발도는 감소하는 것으로 분석되어진다.

표 2.3은 동일개소를 10, 15 및 20회 연속 타격한 경우의 반발도 Rn 을 표시한 것으로 타격 회수의 증가에 따라 반발도는 전반적으로 크게 되어 동일 개소의 연타회수는 1회로 하고 있다.

#### 나. 초음파속도법의 영향인자

##### (1) 콘크리트의 재료 및 배합

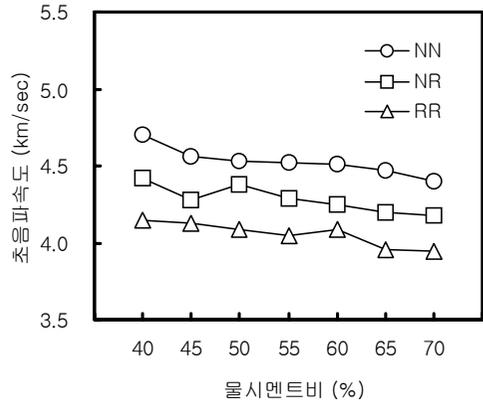
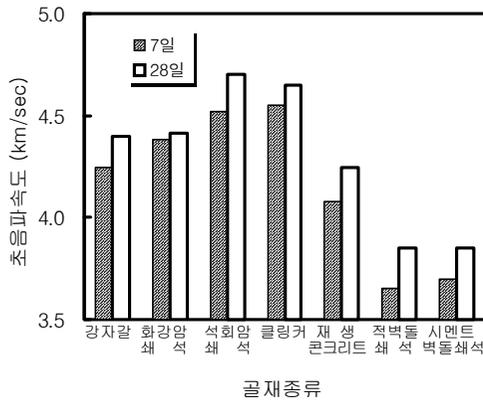


그림 2.24 골재종류에 따른 초음파속도의 변화      그림 2.25 물시멘트비에 따른 초음파속도의 변화

굵은골재의 경우 골재의 종류에 의한 영향은 크지 않지만 굵은골재의 석질은 음속과 강도와의 관계에 큰 영향을 미친다.<sup>26)</sup> 그림 2.24는 골재종류에 따른 초음파속도의 변화를 나타낸 것으로 석회암·클링커 등의 석회암성분의 골재를 사용한 콘크리트의 경우 초음파속도가 가장 크게 나타났으며 재생·시멘트벽돌·적벽돌 등의 부산물 골재는 작게 나타났다. 또한 그림 2.25는 재생잔·굵은골재콘크리트의 경우 물시멘트비에 따른 초음파속도의 변화를 나타낸 것으로 물시멘트비가 증가함에 따라 콘크리트의 밀도가 저하하여 초음파속도가 감소하는 것으로 나타났으며 천연골재(NN), 재생잔골재(NR), 재생굵은골재(RR)를 사용한 순서로 빠르게 나타났다.

## (2) 콘크리트의 양생방법과 재령

### (가) 양생방법

콘크리트 중에 함유수량은 음속에 큰 영향을 미치고 습윤상태에 있는 것만큼 속도는 빠르게 되는데 함유율 1%의 증가에 음속은 50~60m/sec 정도 증가하는 것으로 보고되고 있다<sup>27)</sup>. 그림 2.26은 물시멘트

트

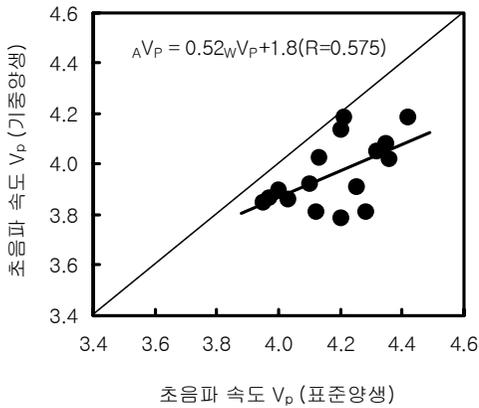


그림 2.26 양생조건에 따른 초음파 속도 관계

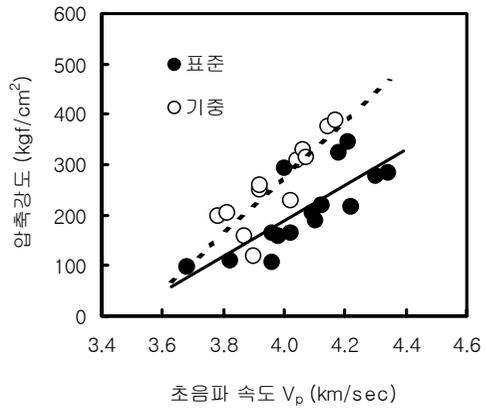


그림 2.27 양생조건에 따른 압축강도 추정

비 30~70%인 우리나라의 화강암골재에 있어 표준수중양생의 초음파속도와 기중양생의 초음파속도를 비교한 것으로 표준양생의 초음파속도가 약 5% 정도 빠르게 나타났다. 또한 그림 2.27은 초음파속도에 의한 압축강도의 추정을 기중양생과 표준수중양생으로 구분하여 나타낸 것으로 표준양생의 경우 동일 초음파속도에서 높게 추정되는 경향으로 나타났다.

#### (나) 재령

3개월 이상의 장기재령의 경우 콘크리트 강도의 증가에 비해 음속의 증가는 그 만큼 증대되지 않으며 또한 강도의 증가가 거의 없는 경우 음속은 저하경향을 나타내기도 한다. 이것은 콘크리트내부의 함유수분의 변화, 미세균열의 발생 등이 영향인자로서 고려되어진다.

그림 2.28(a), (b)는 현무암과 화강암 골재를 사용한 콘크리트의 재령 경과에 따른 초음파속도를 비교한 것으로 골재종류 및 물시멘트 비별로 미소한 차이를 나타내고 있으며 재령이 경과할 수록 약 3개

월까지의 초음파속도는 큰 폭으로 증가되고 있지만 3개월 이후부터

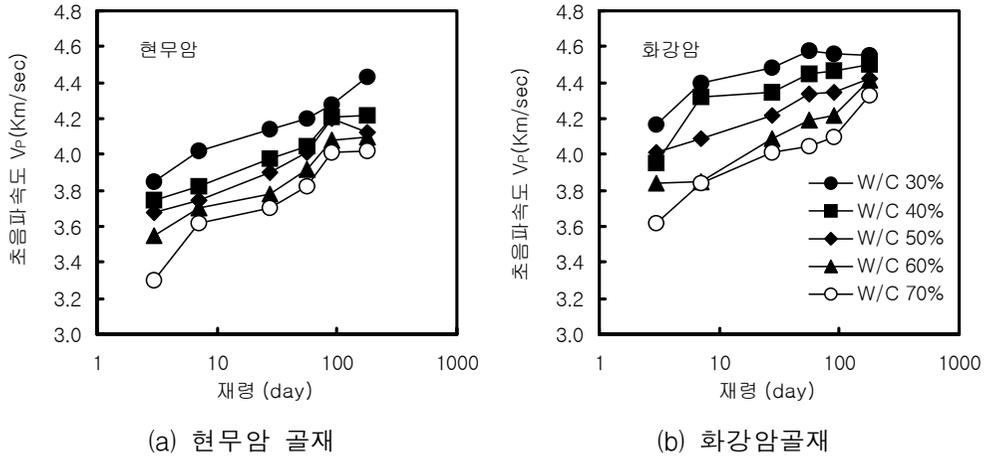


그림 2.28 콘크리트의 재령에 따른 초음파속도 비교

는 증가폭이 다소 작은 것으로 나타났다.

### (3) 측정부위의 상태

#### (가) 이물질 및 미세균열

콘크리트의 표면에 모래입자나 이물질 등이 있는 경우 음파의 감소가 나타나고 수진주파수의 오동 혹은 측정불량의 원인도 된다. 또한 크랙이나 미소공극이 있는 경우도 음속에 영향을 미치기 때문에 측정면은 가능한 평평한 곳으로 하는 것이 요구된다.<sup>28)</sup>

#### (나) 시험체의 높이

그림 2.29는 공시체 높이를 15, 30, 60cm의 3수준, 물시멘트비를 45, 55, 65% 3수준별로 초음파속도를 측정한 결과를 나타낸 것으로 공시체의 높이가 낮을수록 초음파속도가 크게 나타났으며 이는 콘크리트를 부어넣기 할 때 중량에 의해서 아래쪽의 콘크리트가 밀실하기 때문으로 사료된다.

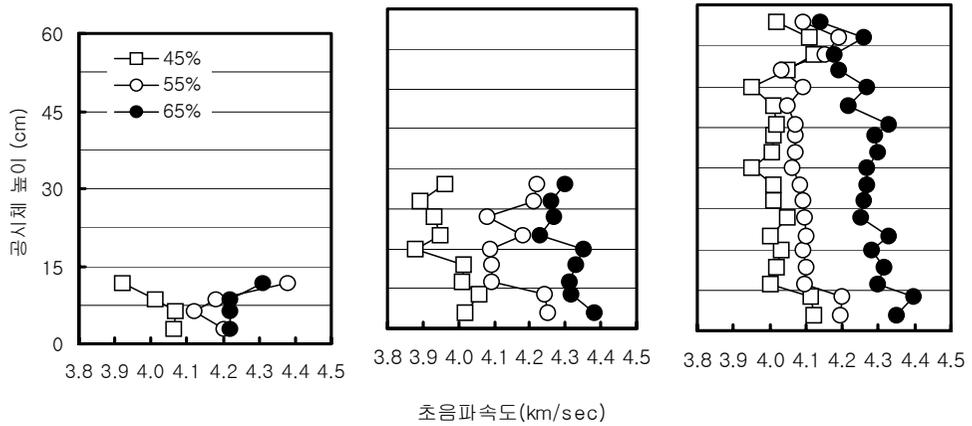


그림 2.29 물시멘트비별 측정위치의 고정에 따른 초음파속도 비교

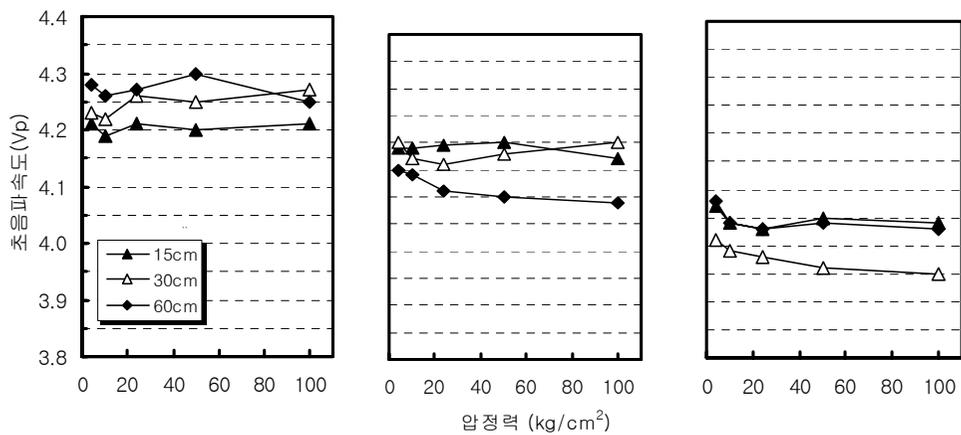


그림 2.30 압정력에 따른 초음파속도 비교

(다) 압정력

그림 2.30은 공시체의 높이 및 압정력의 변화에 따른 초음파속도를 나타낸 것으로 압정력이 증가할수록 초음파속도는 저하하는 경향으로 나타났다.

(라) 내부철근

강재의 음속은 약 5.1km/sec 정도로 콘크리트의 음속보다 크다. 따

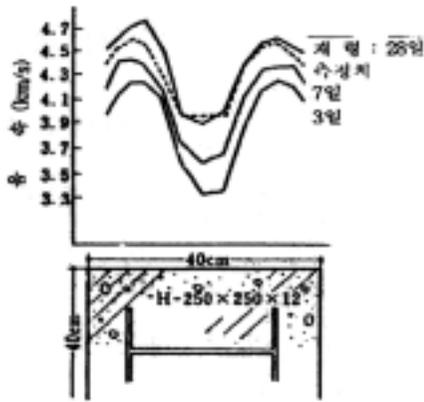


그림 2.31 철근콘크리트 기둥의 음속 측정결과

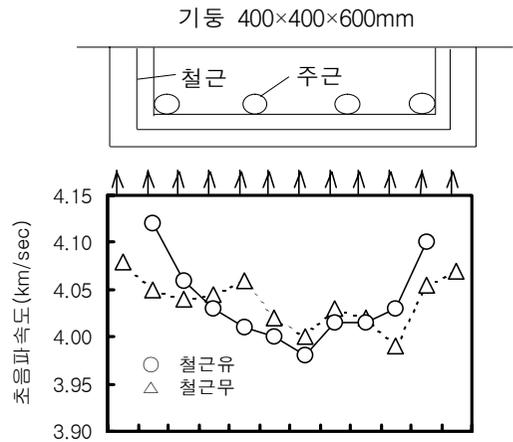


그림 2.32 기둥부위별 초음파속도

라서 철골 및 철근콘크리트 구조부재와 같이 음파의 전달경로 중에 다량의 강재를 포함되었을 때의 음속은 그림 2.31과 같이 크게 된다. 그러나 보통 철근콘크리트 부재에서의 음파전달경로 중에 포함된 강재량이 적은 경우에는 철근의 영향은 무시할 수 있다. 그림 2.32는 기둥부위별 초음파속도를 나타낸 것으로서 초음파의 전파방향으로 띠철근이 배근된 부분의 측정치가 배근되지 않은 부분의 측정치와 비교하여 환산압축강도가  $20\text{kgf/cm}^2$ 으로 비교적 크게 나타났다.

#### (4) 측정기구 및 측정요령

(가) 적용주파수를 크게 한 음파지향성(확산되지 않는 특정 방향에 직진하는 성질)은 항상 있지만 감쇠가 커진다. 건축용 콘크리트의 경우  $200\text{kHz}$  이상이면 측정이 곤란하며  $20\text{kHz}$  이하에서는 지향성이 저하한다.

(나) 측정기본체 및 단자의 온도는 측정치에 영향을 미치고 측정 중에 온도가 변화하면 부정확하게 되므로 기구의 조정을 자주

실시해야할 필요가 있다. 또한 측정기를 저온환경에 방치하거나 또는 여름에 직사일광에 방치하는 것도 고장의 원인이 되므로 주의해야할 필요가 있다.

- (다) 단자(발·수신자)가 콘크리트면과의 접촉이 적당하지 않은 경우 수신이 곤란하므로 측정 오차를 동반한다. 그러므로 측정면에 구리스를 도포하여 단자를 콘크리트에 압착시키며 그 끝에 구리스의 두께는 적당히 하여야 하는데 1mm 이하의 두께가 음속측정치에 미치는 영향은 무관하다. 또한 단자를 콘크리트에 압착시키는 압력은  $\pm 0.25\mu\text{s}$  정도의 오차가 발생한다.

## 2. 비파괴시험법

### 가. 일반사항

콘크리트에서 가장 중요시되는 성능은 압축강도로서 콘크리트구조물의 시공관리나 기존 콘크리트구조물의 내력판정 등을 위해서는 구조물의 콘크리트 강도를 알아야 한다. 그러나 기존의 콘크리트구조물의 경우 미리 준비된 강도시험용 공시체가 없는 것이 보통이고 콘크리트 강도의 확인에는 구조체에서 직접 채취한 코어의 강도시험에 의한다. 그러나 코어의 채취가 가능한 장소는 슬래브, 벽 등 구조체의 일부분에 한정되며 채취 개수에도 한계가 있다.<sup>29)</sup>

따라서 구조체콘크리트의 강도를 비파괴적으로 파악할 수 있으면서 구조체콘크리트의 강도발현 상황의 확인 및 거꾸집 탈형시기의 판정 등에 폭넓게 이용할 수 있는 비파괴시험법인 반발도법, 초음파속도법, 복합법, 적산온도 등을 같이 이용하여 구조체콘크리트의 강도에 관한 많은 정보를 얻는 것이 필수적이다.<sup>30)</sup>

### 나. 반발도법 (Rebound hammer test)

#### (1) 개요

반발도법과 관련하여 각 국의 규정은 콘크리트 공사에 있어서 품질의 균질성 판정 또는 각 부재간에 있어서 콘크리트의 품질 비교 수단으로 규정하고 있으며 콘크리트 강도추정 수단으로는 추정 강도의 신뢰성 때문에 일부국가에서 강도추정의 보조수단으로만 규정하고 있는 실정이다.<sup>31)</sup>

표 2.4는 각 국의 반발도법에 관한 규준을 나타낸 것으로 ASTM 규준에 의하면 반발도법은 콘크리트 강도를 결정하는 수단이 아니라 콘크리트 품질의 균질성을 판정하는 수단 또는 부재간의 품질비교 수단으로 규정하고 있으며 일본건축학회나 RILEM(국제 건설재료 구조연구기관연합)

표 2.4 각 국의 반발도법에 관한 기준<sup>24)</sup>

기준 구분		일본건축학회	ASTM	BSI	DIN	RILEM
적용범위		○ 콘크리트 강도 추정 보조수단	○ 콘크리트 품질의 균질성 판정 ○ 부재간 품질 비교 수단	○ 콘크리트 강도 추정 수단	○ 콘크리트 강도 추정 수단	○ 콘크리트 강도 추정 보조수단 ○ 콘크리트 코어의 강도와 반발도와의 관계를 구하여 구조물의 콘크리트 강도를 추정
측정 방법	부재 두께	10cm 이상	10cm 이상	10cm 이상	12cm 이상	10cm 이상
	모서리	3~6cm 이상	.	2cm 이상 이격	4cm 이상 이격	3cm 이상 이격
	측정 간격	3cm	2.5cm	2~5cm	3cm 이상	3cm 이상
	타격 회수	20타점	10타점	9~25타점	10타점	9~25타점
강도 추정		○ 콘크리트 코어의 강도와 반발도와의 관계를 구하여 구조물의 콘크리트 강도를 추정	○ 콘크리트 강도 추정은 할 수 없음.	○ 콘크리트 코어의 강도와 반발도와의 관계를 구하여 구조물의 콘크리트 강도를 추정	○ 콘크리트 코어의 강도와 반발도와의 관계를 구하여 구조물의 콘크리트 강도를 추정	○ 콘크리트 코어의 강도와 반발도와의 관계를 구하여 구조물의 콘크리트 강도를 추정

의 기준에서도 콘크리트 강도추정의 보조수단이라고 규정하고 있다. 그러나 영국 BSI 및 독일 DIN 기준에서는 콘크리트 강도추정 수단으로 되어 있으며 ASTM에서는 원칙적으로 콘크리트 강도추정은 할 수 없는 것으로 규정하고 있다. 강도추정을 위해서는 대상구조물의 콘크리트 코어강도와 반발도와의 상관관계를 구하여 구조물의 강도를 추정하도록 규정하고 있다.

반발도법은 그림 2.33과 같은 측정기를 이용해서 콘크리트 표면을 타

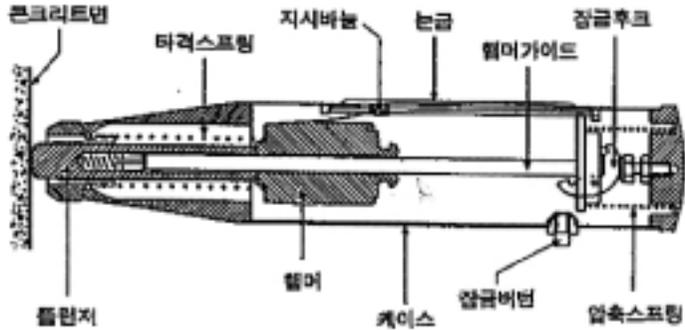


그림 2.33 슈미트해머의 내부 구조

격하여 해머의 반발정도(반발도)로 콘크리트 강도를 추정하는 것으로 현재 세계각국에서 가장 많이 이용되고 있고 있는 비파괴 시험법이다. 측정기가 비교적 저렴하고 시험도 간편하기 때문에 공사검사의 첫단계로 손쉽게 적용되는 경우가 많지만 각종 요인의 영향을 받아 결과의 판정은 쉬운 것만은 아니다.

## (2) 원리

끝부분이 반구모양인 해머로 콘크리트를 타격하여 반발도(rebound number)를 측정한다. 반발도는 탄성계수와 비례관계가 있고 탄성계수와 강도는 상관관계가 있으므로 미리 작성한 반발도와 압축강도와의 관계도표를 이용하여 압축강도를 추정한다.

## (3) 시험방법

구조체콘크리트의 평평한 면이 되도록 측정 부위를 준비한 후 사진 2.1과 같이 슈미트해머를 콘크리트 표면에 눌러 해머를 타격시킨다. 시험기는 어느 정도까지 스프링이 눌려지면 스톱퍼가 풀려져서 해머가 콘크리트를 타격한다.



사진 2.1 슈미트해머의 사용전경

1 개소당 타격회수는 각 기준마다 다르게 규정되어 있으나 20점 정도가 적당하다고 판단되며 반발도의 결정은 20점을 타격한 평균치를 구하고 이 값을 타격방향, 함수율 등에 의한 보정을 하여 대표치로 한다.

#### (4) 시험상 고려해야 할 점

##### (가) 해머의 선정

슈미트해머의 종류에는 표 2.5와 같이 여러 종류의 것이 있으며 이 중 사용목적에 맞는 것을 선정하여야 한다. 측정에는 테스트 앤빌 (Test Anvil)을 이용하여 정기적으로 검증한 것을 사용하여야 한다.

##### (나) 타격방법

수평타격을 표준으로 하며 표 2.6과 같이 아랫방향은 +의 보정, 윗방향은 -의 보정으로 한다.

##### (다) 콘크리트표면의 함수율

콘크리트 표면이 습한 상태는 건조한 상태에 비하여 반발도가 작아 지므로 기건상태의 콘크리트를 표준으로 하고 습윤상태의 경우 보정 값  $\Delta R = +5$ 로 한다.

표 2.5 슈미트해머의 종류

기종	적용콘크리트	타격 에너지 (kgf · cm)	강도측정법위 (kgf/cm <sup>2</sup> )	비고
N형	보통콘크리트	0.225	150~600	반발도값 읽기식
NR형	보통콘크리트	0.225	150~600	반발도값 기록식
L형	경량콘크리트	0.075	100~600	반발도값 읽기식
LR형	경량콘크리트	0.075	100~600	반발도값 기록식
P형	저강도콘크리트	0.09	50~150	진자식
M형	매스콘크리트	3.00	600~1000	반발도값 읽기식

표 2.6 타격각도 α와 보정치 ΔR의 관계

$R_0 \backslash \alpha$	+90°	+45°	-45°	-90°	비고
10	-	-	+2.4	+3.2	각도 앞의 부호에서 +는 윗방향, -는 아랫방향을 의미한다.
20	-5.4	-3.5	+2.5	+3.4	
30	-4.7	-3.1	+2.3	+3.1	
40	-3.9	-2.6	+2.0	+2.7	
50	-3.1	-2.1	+1.5	+2.2	
60	-2.3	-1.6	+1.3	+1.7	

【주】 보정은 다음의 식에 의한다

$$R_n = R_0 + \Delta R$$

R<sub>n</sub> : 보정한 값, R<sub>0</sub> : 측정값, ΔR : 보정값

표 2.7 재령계수 α의 값

재령(일)	28	100	300	500	1000	3000
α	1.0	0.78	0.70	0.67	0.65	0.63

【주】 장기재령 콘크리트의 강도를 추정할 때에는 재령 28일의 강도추정식에 의하여 구한 강도에 표시한 재령계수 α를 곱한다.

(라) 재령

재령이 오래된 콘크리트는 동일 강도라도 반발도가 크게 되므로 표 2.7에 나타난 재령계수  $\alpha$ 를 이용하여 보정한다.

(마) 타격면의 평활도

거친면을 타격하면 반발도는 10~15% 작아진다.

(바) 부재의 두께

10cm 이하에서는 반발도가 급격하게 작아지나 30cm 이상에서는 거의 일정하다.

(사) 벽·기둥에서 높이 방향의 강도

콘크리트구조물은 일반적으로 상부는 중앙부·하부에 비해 강도가 작으므로 반발도가 작다.

(아) 부재의 모서리 부분

모서리부분의 반발도는 중앙부보다 크다는 보고와 작다는 보고가 있어 정확한 측정을 위해서는 모서리에 3~6cm 이상 떨어진 곳을 타격하여야 한다.

(자) 동일위치의 타격

동일위치를 반복하여 타격하면 반발도는 커진다고 한다. 따라서 타격의 실제에서는 각 타격점의 거리를 2~3cm 정도를 하는 것이 적당하다.

(5) 특징

반발도법의 장점으로서는 ①시험방법이 간단, 신속하다. ② 측정 개소를 늘리기가 쉽다. ③시험위치의 보수가 필요 없다. ④시험경비가 적게 든다. 등이 있으며 단점으로는 앞에서 밝힌 "(4) 시험상 고려해야 할 점"과 같은 여러 가지 요인들이 반발도에 영향을 미치므로 압축강도 추정치의 오차를 크게 한다는 것 등이 있다.

(6) 평가

(가) 강도추정식의 작성

반발도법에 의한 콘크리트 강도의 추정식은 실험자 스스로가 같은 종류의 콘크리트를 대상으로 한 일련의 실험을 통하여 작성하는 것을 원칙으로 하고 있다.

(나) 기존의 강도추정식

보통 콘크리트의 압축강도( $F_c$ )와 반발도( $R_n$ )의 관계에 대한 대표적인 강도추정식을 아래에 나타낸다. 다만 타격 방향, 콘크리트의 재령 등 측정시의 여러 조건에 따라 측정 경도 혹은 추정강도의 보정을 한다.

- ① 일본재료학회식 :  $F_c = 13R_n - 184$
- ② 동경도 건축재료 검사소식 :  $F_c = 13R_n - 184$
- ③ 일본건축학회식 :  $F_c = 13R_n - 184$

여기에서  $F_c$  : 압축강도,  $R_0 = R + \Delta R$   
 $R_n$  : 기준경도  
 $R$  : 측정경도  
 $\Delta R$  : 타격방향 등에 의한 보정치

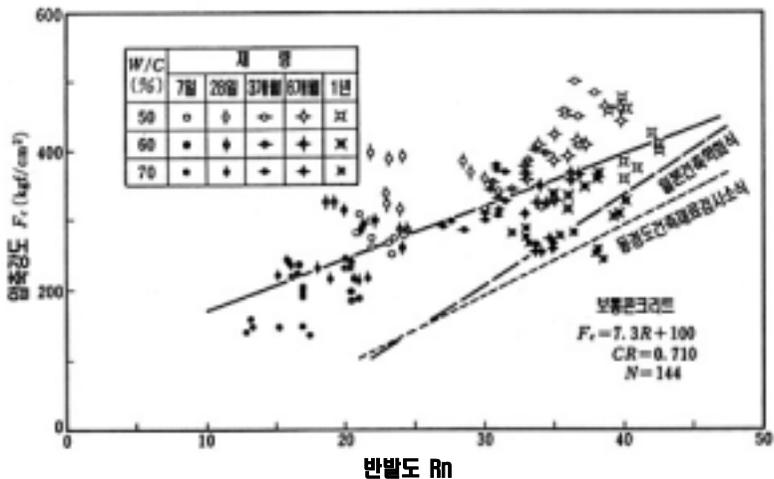


그림 2.34 압축강도와 반발도의 관계<sup>24)</sup>

또한 그림 2.34는 반발도와 압축강도의 관계로서 일본건축학회의 식은 평균을 표시하고 동경도 건축재료시험소의 식은 안전측의 값을 나타내고 있음을 알 수 있다.

콘크리트의 압축강도와 반발도의 관계는 “(4) 시험상 고려해야 할 점”에 나타난 원인 외에 콘크리트의 배합요인(시멘트·골재의 종류, 단위중량, 물시멘트비 등)에 의해서도 다르다. 추정정도의 향상을 위해서는 이들에 관한 많은 정보를 수집하는 것이 중요하다.

#### **다. 초음파속도법 (Ultrasonic pulse velocity test)**

##### **(1) 개요**

초음파속도법은 경화 콘크리트 가운데를 통과하는 초음파(주로 종파)의 전파속도(이하 음속으로 한다.)로부터 콘크리트의 품질, 특히 압축강도를 추정하기 위한 것으로 주된 용도는 구조체콘크리트의 품질관리, 거푸집 제거시기의 결정, 프리캐스트 콘크리트 강도추정 등을 위한 보조수단으로 활용된다.(표 2.8참조)

##### **(2) 원리**

콘크리트에 접촉시킨 발진단자로부터 발진한 초음파 펄스(20~200kHz의 단속음파)가 콘크리트 중을 이동하여 다른 쪽의 수신단자에 도달한 시간을 전파시간으로 하고 양단자간의 거리를 구하여 속도를 구한다. 음속법은 콘크리트 중의 음속과 압축강도 사이에 일정한 상관성이 있다는 경험적 사실에 기초한 것으로 기존의 연구 및 실험결과에 의하면 적용에 적합한 강도 범위는  $100\sim 600\text{kgf/cm}^2$  정도이다.(그림 2.35 참조)

표 2.8 각 국의 초음파 전파속도법에 관한 기준<sup>24)</sup>

명칭		일본건축학회	ASTM	BSI
구분				
적용범위		<ul style="list-style-type: none"> <li>콘크리트 공사 및 콘크리트 강도관리 수단</li> <li>콘크리트 강도 추정 보조수단</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>콘크리트 품질의 균일성을 조사하는 수단</li> <li>콘크리트 강도를 결정하는 대체수단은 아님</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>콘크리트 균질성 판정수단</li> <li>균열 및 공극 검출수단</li> <li>콘크리트 강도 추정수단</li> </ul>
측정 방법	단자 배치	<ul style="list-style-type: none"> <li>단자간의 거리 10cm 이상</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>단자는 서로 다른 위치에 배치 (동일표면의 배치는 피함)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>단자는 서로 다른 위치에 배치 (동일표면의 배치시 20% 오차)</li> </ul>
	측정 위치	<ul style="list-style-type: none"> <li>철근의 영향을 받지 않은 곳</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>측정방향과 동일방향으로 철근이 있는 곳을 피할 것</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>철근의 영향을 고려한 방식을 이용하여 수정할 것</li> </ul>
	측정점	<ul style="list-style-type: none"> <li>가능한 한 많이 선정</li> <li>동일개소에 대하여 2회이상 측정하고 그 평균치를 그 개소의 측정치로 함</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>3대의 측정기를 이용하여 5인의 측정자가 0.3~0.6m의 측정거리에서 같은 측정기를 다른 사람이 사용하여, 같은 사람이 다른 측정기를 사용하여 2%이내의 오차가 나지 않도록 함</li> <li>균열일 많은 열화콘크리트의 경우는 20%이내의 오차가 있음</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>구조물의 크기에 따라 측정점의 수가 변함</li> <li>일반적으로 1m 간격으로 측정을 행함.</li> </ul>
강도추정		<ul style="list-style-type: none"> <li>최소한도의 코어를 채취하여 음속과 강도와의 관계로 추정</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>콘크리트 강도를 추정할 수 없음.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>코어를 채취하여 음속과 강도와의 관계로 추정</li> </ul>

### (3) 시험방법

구조체콘크리트의 평활한 면이 나오도록 측정부위를 준비한 후 발진자 및 수신자를 측정부위에 대어 전파시간을 측정한다. 이때 측정면에 구리스나 고휘 파라핀 등으로 공극을 충전하여 감쇄를 억제시킬 필요가 있다. 측정점은 가능한 한 많이 선정하고 동일부위에 대해 2회 이상 측정하여 그 평균값을 그 부위의 측정값으로 한다. 이 시험방법은 미국(ASTM C 579), 영국(BS 4408 Part 5) 등의 규격에 규정되어 있다.

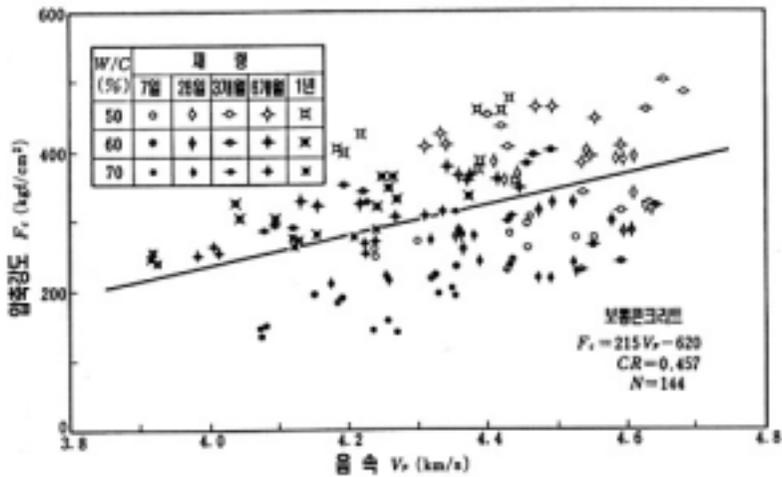


그림 2.35 압축강도와 초음파속도와의 관계<sup>24)</sup>



사진 2.2 초음파 측정기의 형상 (PUNDIT)

#### (4) 시험상 고려해야할 점

##### (가) 측정기의 선정

측정기는 사진 2.2에서 보는 바와 같이 본체 및 양쪽 단자(발전자 및 수신자)를 기본으로 하여 구성되어 있으며 외부 유니트로서 오실로스코프(Oscilloscope) 또는 앰프가 추가로 구성된 것이 있다. 필요

에 따라 적절한 기종을 선정한다. 표 2.9는 각 제조회사별 초음파 측정기의 특징을 나타낸 것이다.

(나) 측정기의 교정

측정에 앞서 각 기종의 사용설명서에 따라 계기를 교정(calibration) 하여야 한다.

(다) 측정에 앞서 10~30분 정도 측정기에 미리 전원을 넣어 충분히 안정된 상태가 되도록 한다.

(라) 측정거리가 과장보다 짧게 되며 정확한 음속의 측정이 곤란하므로 측정거리는 10cm 이상이 되도록 하며 전자를 서로 마주보게 배치하는 직접법으로 측정하는 것이 좋다.

(마) 강재에서의 음속은 약 5.1km/sec로 콘크리트의 음속보다 크므로 음파의 경로중에 강재가 있는 경우 음속은 크게 나타난다. 따라서 철근콘크리트의 경우 철근이 음속에 영향을 미치지 않는 위치로 하는 것을 원칙을 하고 있다.

표 2.9 제조회사별 초음파 측정기의 특징

명 칭	PUNDIT C.N.S (Instrument LTD)	Ultrasoniscope MIN 3335형 (Marui사)	Ultrasoniscope MIX 1105형 (Marui사)	KLD-780 (新奈川電氣)	SO-NA KH-751형 (協榮社)
시간표시	3자리 디지털	3자리 디지털	3자리 디지털	4자리 디지털	5자리 디지털
최소판독 시 간	0.1 $\mu$ s	1 $\mu$ s	0.1 $\mu$ s	0.1 $\mu$ s	0.1 $\mu$ s
시간측정 범 위	0.1~10000 $\mu$ s	1~10000 $\mu$ s	0.1~1000 $\mu$ s	0.1~999 $\mu$ s	0.1~10000 $\mu$ s
투과측정 능 력	0~15m	0~8m	0~8m	0~8m	0~8m
기 타	소형경량화 되고 전원도 충전방식	수동계측	자동, 수동전 환스위치부착	측정거리를 입 력하면 음속이 표시된다.	자동·수동 전환 스위치 부착
크기 (cm)	18×11×16	40×40×20	40×40×20	25×19×40	42×43×18
중량 (kg)	3.2	약 10	약 10	약 10	약 10

(바) 콘크리트 중의 함수상태는 음속에 큰 영향을 미치며 습윤상태일수록 음속은 커지고 기존의 실험결과에 의하면 함수율 1% 증감에 음속을 50~90m/sec 정도가 증감한다.

(사) 동일한 강도에서 석회암질 골재를 사용한 것이 안산암질 골재를 사용하는 것보다 음속이 크게 나타나며 배합에서 굵은골재량이 증가하면 음속이 증대한다.

(아) 단자를 밀착시킨 상태에서 계기의 신호가 안정될 때까지 기다려 유효숫자 3자리를 읽어 전파시간으로 하며 전파거리를 유효숫자 3자리로 구한다.

#### (5) 특징

초음파속도법의 장점으로서는 ①시험방법이 간단, 신속하다. ② 측정개소를 늘리기가 쉽다. ③시험위치의 보수가 필요 없다. ④시험경비가 적게 든다. 등이 있으며 단점으로는 앞에서 밝힌 “(4) 시험상 고려해야 할 점”과 같은 여러 가지요인들이 음속에 영향을 미치므로 압축강도 추정치의 오차를 크게 한다는 것과 진자의 배치를 직접법으로 할 경우 부재의 전·후면에 진자를 접촉시켜야 하므로 적용위치에 제한이 있다는 점등이다.

#### (6) 평가

(가) 음속의 산정 : 실측한 초음파 펄스의 전달시간  $t$  및 측정거리  $L$ 을 이용하여 다음의 식으로 음속  $V_p$ 를 구한다.

$$V_p = L/t \quad (\text{km/sec 또는 m/sec})$$

(나) 강도의 추정 : 구조체콘크리트의 해당부위에 있어서 음속을 측정하고 미리 구해둔 음속과 압축강도의 상관도표 또는 관계식을 이용하여 압축강도를 추정한다.

(다) 강도추정식의 작성

- ① 품질관리를 목적으로 한 경우의 음속과 압축강도의 상관도표 또는 관계식은 강도를 추정하고자 하는 콘크리트와 동일한 배합을 포함한 3종류의 배합강도로 콘크리트 공시체를 제작하고 이들의 음속과 압축강도를 측정하여 구하는 것을 원칙으로 한다.
- ② 내력진단을 목적으로 한 기존 콘크리트의 압축강도를 추정하는 경우 음속과 압축강도의 상관도표 또는 관계식은 사전에 해당 구조물로부터 채취한 콘크리트 코어에 대한 실측 결과에 근거하여 작성한다. 코어 공시체를 채취하는 경우 채취에 앞서 반드시 채취부위의 음속을 측정하고 채취후에도 코어 공시체의 음속을 측정하여 비교·검토한다.
- ③ 위의 (가),(나)에 의해 구조체콘크리트의 강도를 추정할 때에는 구조체콘크리트의 재령, 함수상태, 철근의 유무 및 내부 결함을 고려하여 판정하는 것을 원칙으로 한다.

④ 기존의 강도추정식

다음에 기존의 연구결과에 제시된 강도추정식을 나타내었다. 또한 각 식의 뒷부분에 있는 R은 상관계수를 나타낸다.

- ㉠ 일본건축학회 추정식 :  $F_c=215V_p-620(R=0.475)$
- ㉡ J. Pyszniak의 추정식 :  $F_c=92.5V_p^2-508V_p+782$
- ㉢ 小阪義夫·谷川恭雄·山田和夫의 추정식 :  $F_c=172.5V_p-499.6$
- ㉣ V. M.Malhotra&N.J.Carino의 추정식 :  $F_c=1.46V_p-15913$
- ㉤ 谷川恭雄·山田和夫의 추정식 : 수중양생  $F_c=435.6V_p-1655.3$   
증기양생  $F_c=329.4V_p-1081.$

여기에서  $F_c$ : 추정압축강도  $V_p$ : 종파음속

## 다. 복합법 (Combined non-destructive test)

### (1) 개요

2종류 이상의 비파괴 시험법을 복합하여 사용하는 것으로 단일 시험방법보다 정도가 좋다고 한다. 1980년 RILEM(국제재료구조시험 연구기관연합)은 복합 비파괴 시험법의 조합으로 종파속도, 반발도, 인발력 등 7종의 시험치를 조합해하여 다음과 같은 방법을 제시하였다.<sup>32)</sup>

#### (가) 2종류 시험치의 복합방법

- i. 종파속도 + 반발도
- ii. 종파속도 + 표면요철량
- iii. 종파속도 + 인발력
- iv. 종파속도 + 공진주파수
- v. 종파속도 + 음파감쇠
- vi. 종파속도 + 횡파속도
- vii. 반발도 + 표면요철량
- viii. 반발도 + 인발력
- ix. 반발도 + 적산온도

#### (나) 3종류 시험치의 복합방법

- i. 종파속도 + 반발도 + 인발력
- ii. 종파속도 + 반발도 + 음파감쇠
- iii. 종파속도 + 반발도 + 1선 감쇠
- iv. 종파속도 + 초동파의 기울기 + 종파반사시간

위에 기술한 것 중에서 현재 가장 많이 이용되고 있는 방법은 (1)의 i로 종파속도와 반발도의 복합법이며 RILEM의 CNDT 위원회에 서도 이 조합법에 대해서는 지침안을 작성하였다.

여기에서는 가장 널리 사용되고 있는 종파속도와 반발도의 복합법에 대해서 설명하였다.

## (2) 시험방법

슈미트해머의 시험방법 및 초음파속도 시험방법에 의한다.

## (3) 시험상 고려해야 할 점

두 가지 모두 측정결과 값은 골재량이 많거나 물시멘트비가 작으면 커지는 경향이 있으며 실구조물에서는 콘크리트의 함수율, 철근 등도 음속에 영향을 준다.

## (4) 복합법의 작성방법

(가) 강도추정식의 작성 : 미리 시험할 콘크리트에 가까운 사용재료와 배합범위를 포함한 콘크리트에 대해서 3종류의 물시멘트비로 시험하여 다음과 같은 강도추정식을 작성한다.

$$F_c = k_1 R_n + k_2 V_p + C$$

$$\log F_c = k_1 R_n + k_2 V_p + C$$

여기서  $F_c$  : 압축강도,  $R_n$ :반발도,  $V_p$ :음속,  $k_1, k_2, C$  : 실험상수

(나) 기존의 강도추정식 : 일본건축학회 비파괴검사 매뉴얼의 해설에 다음과 같은 식이 있으며 이러한 식들은 재료나 환경이 다른 외국에서도 작성되었으므로 사용에 있어서 신중을 기하여야 하며 추후 실험에 의해 확인하여야 할 필요가 있다.

$$\text{보통콘크리트} : F_c = 8.2R_n + 269V_p - 1094 (\text{kg/cm}^2)$$

$$\text{경량콘크리트} : F_c = 4.1R_n + 344V_p - 1022 (\text{kg/cm}^2)$$

## (5) 평가

일반적으로 한가지의 시험법만을 사용하는 시험에 비하여 그 추정정도가 높다고 알려져 있으나 구조물에 대한 실제 적용에 있어서는 음속과 반발도의 두 가지 시험결과 모두에 영향을 주는 인자가 많으

므로 이러한 인자에 대한 고려가 불충분하여 잘못된 결과치를 얻을 경우에는 정도가 다른 시험법에 비하여 낮아질 수 있다.

### 라. 적산온도 (Maturity method)

#### (1) 기본개념

적산온도함수는 콘크리트의 실제적인 온도이력을 통해 강도가 얼마나 증가되었는가를 표시하는 수치로 변환하는데에 이용된다. 이러한 온도와 시간의 관계인 적산온도의 기본개념은 “어떤 배합이 이용되더라도 동일 배합, 동일 적산온도의 콘크리트는 비슷한 강도를 갖는다”는 것으로 그림 2.36과 같이 양생온도 및 양생시간이 다르더라도 양생온도와 양생시간의 곱인 적산온도 즉 시간축과 온도응력의 범위까지의 면적이 같다면 동일한 강도가 얻어진다는 것으로 이를 이용하여 임의재령에서의 콘크리트 강도를 예측할 수 있다는 이론이다.<sup>33)</sup>

온도와 시간의 함수인 Nurse-Saul의 기본적인 적산온도의 산정에는 다음과 같은 식을 이용한다.

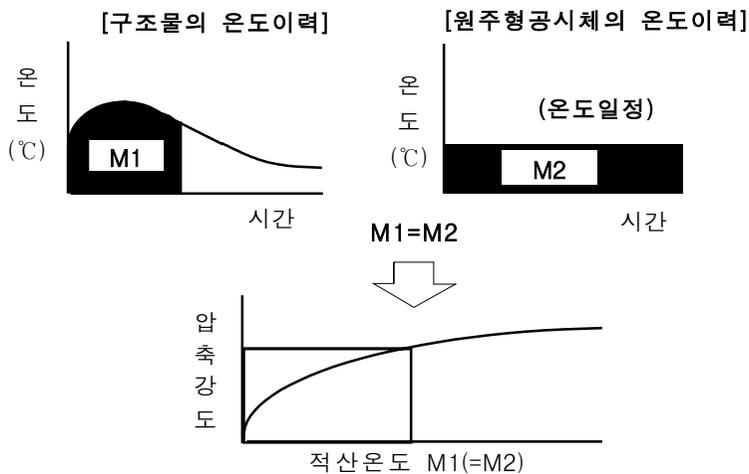


그림 2.36 적산온도의 기본개념도

$$M = \sum_{t_0}^t (T - T_0) \Delta t$$

여기에서            M: 적산온도(°C · h 또는 °C · day)  
                           T: Δt에서의 콘크리트 온도(°C)  
                           T<sub>0</sub>: 기준온도(°C)  
                           Δt: 시간간격(hr 또는 day)

또한 Freiesleben은 시멘트 수화율에 대한 온도의 영향을 이용하여 서로 다른 온도 T<sub>s</sub>와 T<sub>a</sub>에서 속도상수 사이의 관계를 아래와 같은 등가재령 표현식으로 제안하였다.

$$T_e = \sum_{t_0}^t \exp[E_a/R \cdot (1/T_s - 1/T_a)] dt$$

여기에서            T<sub>e</sub>: 표준온도재령과 같은 재령  
                           T<sub>a</sub>: 양생온도(°K)  
                           T<sub>s</sub>: 293(273+20 :°K)  
                           E<sub>a</sub>: 활성화에너지(KJ/mol)  
                           R: 기체상수(8.314 J/mol)

또한 그는 온도에 따른 보다 정확한 재령환산계수를 나타내기 위해 아래와 같은 활성화에너지의 이용을 권장하였다.

$$T \geq 20^\circ\text{C} : E_a = 33.5 \text{ KJ/mol}$$

$$T < 20^\circ\text{C} : E_a = 33.5 + 1.47(20 - T) \text{ KJ/mol}$$

## (2) 시험방법

열전대 등을 구조체콘크리트에 매립하여 자동 기록하는 것과 컴퓨터를 이용하여 적산온도를 계산하는 장치도 있다. 또한 COMA-meter라는 작은 구멍에 삽입하여 적산온도를 추정하는 온도계와 같이 간단한 기구도 있다.

감지기에 연결된 적산온도 실험기거나 온도기록 장치들은 콘크리트 타설직후 작동하게 되며 강도를 추정하기 위해서는 적산온도 실험기기의 적산온도 값을 읽거나 온도기록기에 의해 평가할 수 있다. 적산

온도 값들과 이전에 얻은 강도-적산온도 관계를 이용하여 압축강도를 추정할 수 있다.

### (3) 시험상 고려해야 할 점

현장에서 콘크리트의 온도이력만으로 현장콘크리트의 정확한 배합 비율을 확신할 수가 없기 때문에 ASTM에서는 거푸집의 해체나 포스트텐션 공법과 같은 심각한 구조물의 무리를 야기하는 작업들을 수행하기 전에 현장콘크리트의 잠재적 강도의 확인을 요구한다.

콘크리트의 강도를 추정하기 위해서는 다음과 같은 작업이 포함되어야 한다.

- (가) 현장콘크리트의 실제적인 강도특성을 측정할 수 있는 또 다른 현장시험방법을 사용한다.
- (나) 구조물의 콘크리트 표본들로 성형하여 표준 양생한 시료들의 초기재령 압축강도 실험을 한다.
- (다) 촉진양생을 한 구조물에 사용된 콘크리트 표본들로부터 몰드를 성형하여 압축강도 실험을 한다.

### (4) 평가

평가에는 다음의 조건이 만족될 필요가 있다.

- (가) 배합(특히 물시멘트비)이 계획과 같은 콘크리트로 제조될 것
- (나) 콘크리트의 온도를 대표하는 위치와 동일한 정도의 수로 온도 측정 센서가 매립되어 있을 것
- (다) 정도가 좋은 적산온도와 압축강도의 관계식이 작성되어 있을 것. 이러한 조건이 만족되는 경우 추정정도가 좋게 된다.

이러한 추정식은 물시멘트비 45% 정도 이상의 콘크리트를 대상으로 구한 것으로 물시멘트비 40% 미만의 고강도콘크리트에 대해서는 확인시험을 할 필요가 있다.

## 제3장 국내·외 기술개발 현황

### 제1절 비파괴시험의 국내·외 연구동향

#### 1. 국내 연구동향

콘크리트 구조물의 비파괴시험에 관한 국내의 연구실적을 살펴보면 기술의 도입은 70년대에 이루어져 극소수의 연구자에 의하여 검토되었으며, 80년대 들어오면서 몇몇 연구자에 의해 산발적이고 지엽적인 연구가 이루어져 왔고, 90년대에 들어 몇몇 업체나 단체에서 기술지침서 등이 발행되었으나 거의 외국의 연구사례를 소개하는 정도에 그치고 있으며 국내에서 이루어진 연구결과의 종합적이고 분석적인 작업이 부족한 실정이다. 따라서 현재 국내의 비파괴시험에 대한 실제 활용은 외국에서 만들어진 기준이나 방법을 그대로 적용하고 있는 실정으로 국내 환경에 적합한 기준이나 규격은 정해지지 않은 상태이다.

#### 가. 반발도법

반발도법은 해머로 콘크리트 구조체 표면을 타격하여 반발도로부터 콘크리트의 압축강도를 추정하는 방법이다. 반발도와 압축강도와의 직접적이고 이론적인 규명은 되어있지 않지만 실험에 의한 상관관계식과 보정을 통하여 강도를 추정하는 것이 일반적이다. 대표적인 측정기로는 1948년 개발된 슈미트해머가 있다.

1976년 함성권을 시작으로 김무한, 한천구, 오중식, 김성수 등 여러 연구자들에 의해 반발도법에 의한 콘크리트 압축강도 추정에 있어서 영향인자 분석에 대한 연구들이 이루어져 왔으나 고강도콘크리트의 강도추정식에 대한 연구는 거의 이루어지지 않은 상태이며 따라서

새로운 강도추정식이나 평가기법의 개발이 필요할 것으로 판단된다.

### 나. 초음파속도법

국내에서 비파괴시험관련 논문이 최초로 발표된 분야로서 1973년 제정된 KS F 2418(콘크리트중의 펄스 속도 시험 방법)이 비파괴시험과 관련한 유일한 KS 규격으로 존재하고 있다.

초음파속도법은 발진자-구조물-수신자로 전달되는 초음파의 속도를 측정하는 방법으로 압축강도 추정, 철근탐지, 균열 및 공극 탐사 등에 사용되어지고 있다. 이 방법은 측정구조물의 형상이나 치수에 관계없이 활용가능성이 높은 장점을 지니고 있으나 측정치의 해석이 어려워 전문적인 지식을 요구한다.

국내에서 초음파속도법에 대한 연구는 1971년 오창희의 부순자갈을 사용한 고강도콘크리트를 대상으로 한 초음파속도와 강도와의 관련성을 규명한 것을 시작으로 하여 연구 경향은 크게 콘크리트 압축강도 추정과 균열 및 철근탐사에 관한 연구로 나뉘어진다.

초기에는 콘크리트의 강도 및 품질관리 측면에서 비파괴시험법 적용으로서의 초음파속도법에 대한 기초적인 실험 및 연구 등이 행해졌으며, 80년 중반에 오창희, 반호용 등은 전국 지역별 레미콘을 대상으로 한 압축강도 추정식을 표 3.1과 같이 제안하였다.

표 3.1 국내 지역별 콘크리트 압축강도 추정식(초음파 속도)

구 분	수중양생(kgf/cm <sup>2</sup> )	기중양생(kgf/cm <sup>2</sup> )
서울·경기 강원 지역	$F_c = 172V_p - 451.4$	$F_c = 152V_p - 383.9$
충청 지역	$F_c = 333.4V_p - 1125$	
영남 지역	$F_c = 368.2V_p - 1275$	$F_c = 216.9V_p - 634$
호남 지역	$F_c = 245.6V_p - 733.8$	$F_c = 152.7V_p - 375.4$

또한 인공경량골재 콘크리트의 초음파속도에 의한 강도 추정 연구가 진행되었으며, 콘크리트와 같이 다변량의 복합 성분을 갖는 물질의 강도 평가기법 등에 있어서 중회귀분석과 같은 다변량 해석법의 유용성과 콘크리트의 제시험조건 즉 물시멘트비, 양생방법, 슬럼프, 재령일수, 초음파 음속, 그리고 실측강도 등과의 상관관계에서 최소자승법에 관한 연구가 여러 연구자들에 의해 진행되었다.

#### 다. 복합법

복합법은 콘크리트 압축강도와 상관관계를 가지는 2가지 이상의 비파괴 시험법을 조합하여 각각의 시험법보다 향상된 추정정도를 높이는 방법으로 국내에서는 반발도법과 초음파속도법과의 복합법에 대한 연구들이 김무한, 한천구, 반호용, 오병환, 권영진 등 여러 연구자들에 의해 활발하게 진행되었으며 1998년 주택공사 부설 주택연구소에서는 벽식구조물의 강도추정식 작성을 목표로 국내에서 주로 사용되는 규격의 콘크리트를 대상으로 하여 재령, 양생조건 등을 달리 하여 작성한 강도추정식을 제안하고 실물시험체 및 현장실험을 통하여 측정위치, 두께 및 골재의 영향에 대한 결과를 발표하였다.

## 2.. 국외연구동향

콘크리트의 비파괴시험에 관한 연구는 1934년경부터 현재까지 수많은 방법이 제안되었다. 그중 1945년경 캐나다의 Leslie · Cheesman, 영국의 Jones 등이 개발한 음속법, 1948년 스위스의 Ernest Schmidt가 개발한 반발도법, 1971년 영국의 Elvery가 개발한 휴대용 디지털 초음파측정장치(Potable Ultrasonic Non-destructive Digital Indicating Tester : PUNDIT) 등은 콘크리트의 비파괴시험의 연구에 큰 영향을

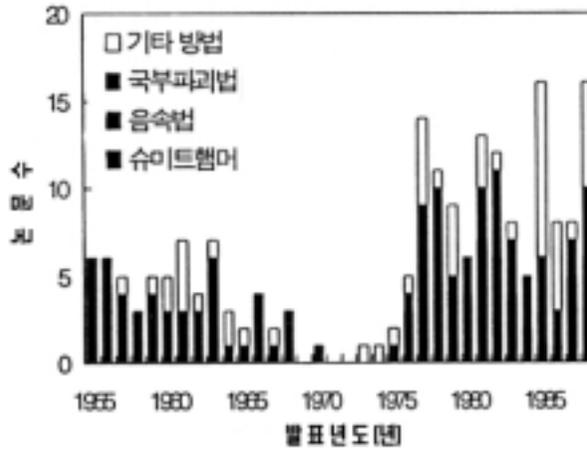


그림 3.1 비파괴시험법 관련 발표된 논문 수(~1988)<sup>28)</sup>

끼친 것들이다.<sup>37)</sup>

그림 3.1은 일본건축학회에서 조사한 내용으로 1955년부터 1988년 사이에 「일본건축학회대회학술강연경개집」, 「시멘트기술연보」, 「ACI Journal」의 3종류에 게재된 콘크리트의 비파괴 시험법에 관한 연구 논문의 수를 연도별, 시험방법별로 나타낸 것이다. 이 그림에서 1963년까지는 반발도법 및 음속법에 관한 논문이 매년 수편이 발표되었으나 그 후 논문 수는 서서히 감소되어 1969~72년 사이에는 비파괴 시험에 관한 논문은 거의 발표되지 않았다. 그러나 일본의 경우 1973년에 발생한 결함이 있는 레미콘사건을 계기로 콘크리트의 비파괴 시험에 관한 연구가 다시 활발하게 진행되어 논문 수도 1973~77년에 걸쳐 급격히 증가하였다. 이 시기의 특징으로는 PUNDIT의 개발에 의해 초음파속도법에 관한 연구논문수가 비약적으로 증가한 것을 들 수 있다.

1980년대 이후 근래의 비파괴시험에 관한 연구의 특징으로는 종래의 반발도법과 인발법, 관입저항법, 전단법 등의 국부파괴시험법에 관한 연구와 콘크리트의 양생상황을 체크하는 적산온도법 등에 관한

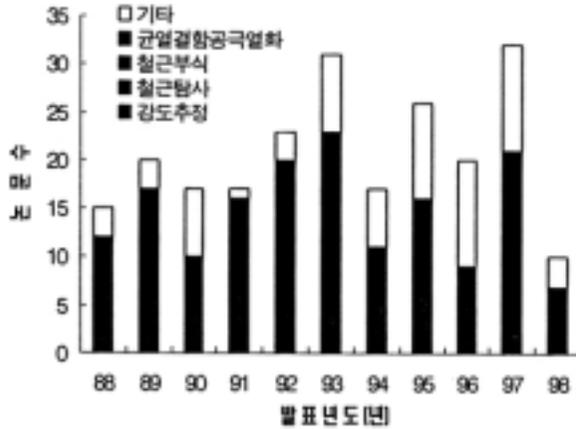


그림 3.2 비파괴시험법 관련 발표된 논문 수(1989~1998)<sup>38)</sup>

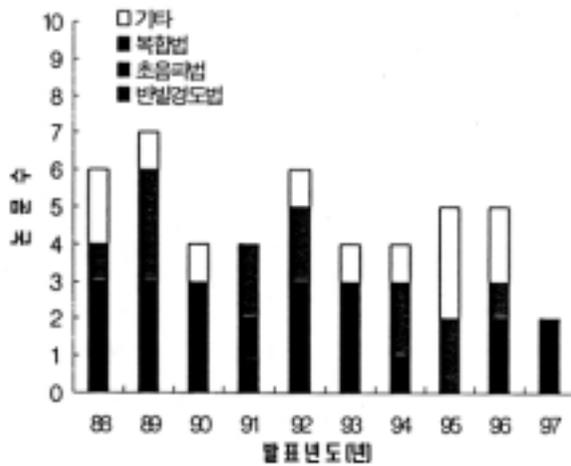


그림 3.3 강도추정과 관련된 해외 논문<sup>38)</sup>

연구가 많이 진행되었다.

그림 3.2는 「일본건축학회대회 학술경개집」, 「시멘트·콘크리트논문집」, 「Magazine of Concrete Research」, 「Cement·Concrete Research」, 「ACI Material Journal」, 「일본건축학회 논문보고집」 등에서 1989년부터 발표된 논문을 중심으로 연구내용을 조사한 결과를 나타낸 것으로 콘크리트구조물의 비파괴시험과 관련된 논문의 수는 80년대와

비교하여 감소된 것으로 파악되며 반발도법의 경우는 1편만이 나타났다. 이 시기에 발표된 연구의 특징은 콘크리트의 강도분야보다 공극, 균열, 열화 등의 탐사 및 평가에 대한 연구가 주류를 이루고 있으며, 이러한 원인은 콘크리트 구조물의 내구성에 대한 관심이 증대함에 따른 것으로 판단된다. 그림 3.3은 이 시기에 발표된 논문들 중 강도추정을 위한 시험법을 분야별로 분류하여 정리한 것이다.

### 가. 반발도법

1991년 尼崎省二는 기존의 강도추정식을 무조건적으로 사용하는 부분에 대한 문제점과 측정하는 기계에 따라 반발도가 다르게 나타난다는 점을 밝히고, 재령 5~8년의 장기재령 콘크리트에 있어서는 초기재령 콘크리트를 이용하여 작성한 강도추정식을 적용할 경우 강도가 과대평가 될 수 있다는 점을 발표하였다.<sup>39)</sup>

### 나. 초음파속도법

R. H. Elvery는 PUNDIT를 사용하여 타설후 3시간에 측정한 초음파속도로 콘크리트강도의 조기추정에 관한 연구결과를 발표하였으며, H.W.Chung는 철근의 직경과 철근의 위치가 초음파의 전파속도에 미치는 영향에 대하여 발표하였다.<sup>40)</sup>

W.N.Raynolds 등은 페이스트, 물, 잔골재, 굵은골재의 전파속도를 기초로 계산한 전파속도와 실측에 의한 콘크리트의 전파속도를 비교한 결과 잘 일치한다는 사실을 발표하였으며, H.N.Tomsett는 콘크리트의 품질을 평가하는데 있어서 초음파속도의 실질적 적용에 대한 연구결과를 발표하였다.<sup>41)</sup>

초음파를 이용한 콘크리트 강도측정의 새로운 방향으로 종래에 사용되던 종파를 대신하여 횡파의 전파속도와 강도의 관계에 대한 연

구결과를 발표하였다.

Sandor Popovics 등은 콘크리트에서의 초음파 전파속도에 있어서 응력, 골재, 측정방향, 주파수 등의 영향에 대한 연구결과를 발표하였으며, K. Tharmaratnam 등은 초음파의 감쇠 및 전파속도와 모르타 압축강도와 상관관계에 대하여 발표하였다.<sup>42)</sup>

野崎喜嗣 등은 함수율, 흡수율, 큰 공극 등이 초음파 전파속도에 미치는 영향에 대한 연구결과를, Yves Bertaud는 초음파속도법에 의한 콘크리트의 열화 평가에 대한 연구를 발표하였다. 또한 Patrick J. E. Sullivan은 초음파의 전파속도와 함수상태에 대한 연구결과를 발표하였으며 坂詰和子 등은 콘크리트의 함수율이 1% 증가함에 따라 초음파전파속도는 38~61m/s 증가한다고 발표하였다.<sup>42)</sup>

근래에 들어 초음파를 활용한 연구로는 계측기술 및 컴퓨터의 발전으로 파동의 주파수영역 특성을 이용하는 스펙트로스코프에 의한 재료변화나 결함을 추정하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 이러한 연구로는 균열의 깊이를 평가하는 연구, 콘크리트의 열화정도 평가연구, 콘크리트 내부의 결함탐지 연구, 굳지않은 콘크리트의 다짐정도 평가에 관한 연구, 그라우트재의 충전도 평가연구 등이 발표되었다.

초음파속도법에 대한 새로운 접근 방법으로 수치해석적 방법을 이용해 초음파 전파특성을 파악하는 방법에 대한 연구결과 또한 많이 발표되었다.

초음파전파속도를 이용하는 새로운 연구방향으로 콘크리트를 전파하는 횡파초음파의 전달파형을 해석하여 굳지않은 콘크리트부터 경화시에 이르기까지의 콘크리트 물성변화 즉 콘크리트의 점탄성적 성질을 연속적으로 평가하는 방법의 확립을 위한 일련의 연구결과가 발표되었으며, 새로운 콘크리트 재료를 대상으로 초음파속도법을 적용하는 연구로 유정에 사용되는 시멘트 슬러리를 대상으로 재령 1일

의 강도와 초음파속도와의 상관관계에 대한 연구, 쌀겨재 콘크리트의 압축강도와 초음파속도에 관한 연구, 폴리머함침 콘크리트에 대한 연구가 발표되었다.

#### 다. 복합법

十代田知三 등은 실물크기의 시험체를 대상으로 비파괴시험 및 파괴시험을 실시하여 강도추정식을 제안하고 그 유효성의 검증에 대한 일련의 연구를 통하여 다음과 같은 결과를 보고하였다.<sup>43)</sup>

반발도법에 의한 강도추정식 :  $F_c = 14R_n - 157$

초음파전파속도법에 의한 강도추정식 :  $F_c = 157V_p - 367$

복합법에 의한 강도추정식 :  $F_c = 12R_n + 63V_p - 352$

또한 장기재령 구조물에 대한 보정계수로 0.49, 초음파속도법에 대한 보정계수로 0.96, 복합법에 대한 보정계수로 0.54 등을 제시하였으며 추정강도의 표준오차로부터 구조체 강도의 편차를 추정할 수 있다고 제안하였다.

木村綾子 등은 비파괴시험에 의한 콘크리트강도의 조기추정에 있어서 초음파속도법은 재령 1일의 음속, 반발도법은 재령 3일의 반발도, 복합법은 이들 양자의 비파괴시험값을 이용하는 것이 28일 압축강도의 추정에 좋은 결과를 나타낸다는 결과를 발표하였다.<sup>45)</sup>

C. Jaegermann은 초기재령에서 콘크리트 강도의 조기추정을 위한 약식 Pull-out 시험법을 제안하였으며 A. M. Leshchinsky 등은 반발도법, 초음파속도법(직접법 및 간접법), 전단리브(Shearing rib)법에 의한 콘크리트 강도추정 결과의 변동에 대한 연구결과를 보고하였다.<sup>46)</sup>

## 제2절 국내 비파괴 시험법의 활용현황 및 개선방향

### 1. 활용현황

#### 가. 일반사항

표 3.2 및 그림 3.4는 국내 안전진단업체의 지역별 분포현황을 나타낸 것으로 서울지역이 전체 안전진단기관의 57%로서 가장 많았고 경기지역이 9%, 부산지역이 6%, 대구지역이 4%, 대전지역 및 강원지역이 3%의 점유율을 차지하고 있었으며 울산 및 제주지역은 현재까지 등록된 안전진단기관이 존재하지 않았다.

또한 그림 3.5는 기술력 향상과 신기술 습득을 위하여 실시하고 있는 방법을 나타낸 것으로 각종 교육이나 세미나 참가하는 경우가

표 3.2 안전진단업체 지역별 분포현황

지역별	서울	부산	대구	인천	광주	대전	울산	경기	강원	충북	충남	전북	전남	경북	경남	합계
업체수	133	15	10	4	6	8	0	22	8	4	1	7	2	7	6	233
	57%	6%	4%	2%	3%	3%	0%	9%	3%	2%	1%	3%	1%	3%	3%	100%

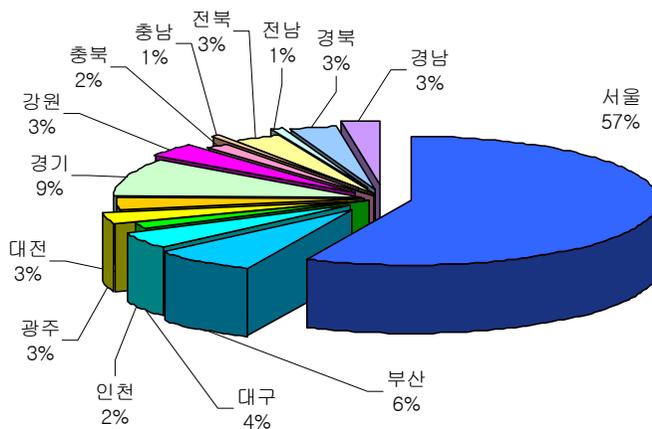


그림 3.4 안전진단업체 지역별 분포현황

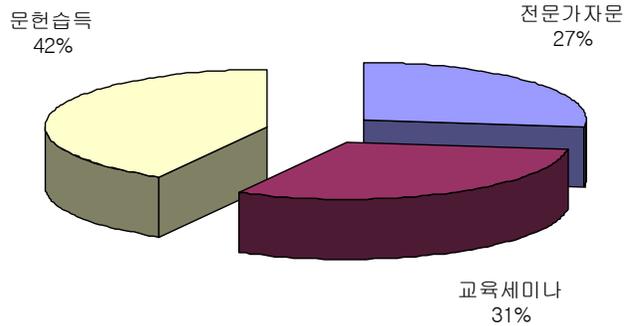


그림 3.5 비파괴시험의 기술력 향상과 신기술 습득 방법

31.0%, 관련 문헌을 통하여 습득하는 경우가 42.0%, 전문가의 자문이나 지도를 통하여 습득하는 경우가 27.0%로 조사되었다.

#### 나. 반발도법

표 3.3 및 그림 3.6은 반발도 측정을 위한 장비의 현황을 나타낸 것으로 PROCEQ-NR형이 전체 조사대상 중 약 50%로서 가장 많은 비율을

표 3.3 반발도 측정을 위한 장비 현황

시험장비명	보유대수	운용상황				비 고
		◎	○	△	×	
PROCEQ N형	11	4	2	3	2	◎ : 상당히 많이 사용하고 있으며 결과 또한 만족스러움 ○ : 많이 사용하고 있으나 결과는 만족치 못함 △ : 가끔 사용함 × : 거의 사용하지 않음
PROCEQ NR형	27	16	9	1	1	
PROCEQ L형	-	-	-	-	-	
PROCEQ LR형	-	-	-	-	-	
PROCEQ P형	-	-	-	-	-	
PROCEQ M형	2	-	-	2	-	
KAMEKURA $\alpha$ 600	-	-	-	-	-	
KAMEKURA $\alpha$ 650	3	-	1	1	1	
KAMEKURA $\alpha$ 700	-	-	-	-	-	
KAMEKURA $\alpha$ 750	11	7	2	2	-	
기 타	-	-	-	-	-	
계	54	27	14	9	4	

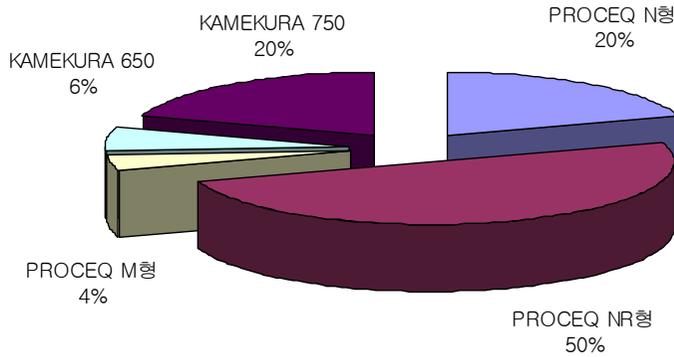


그림 3.6 반발도 측정을 위한 비파괴 시험 장비의 보유현황

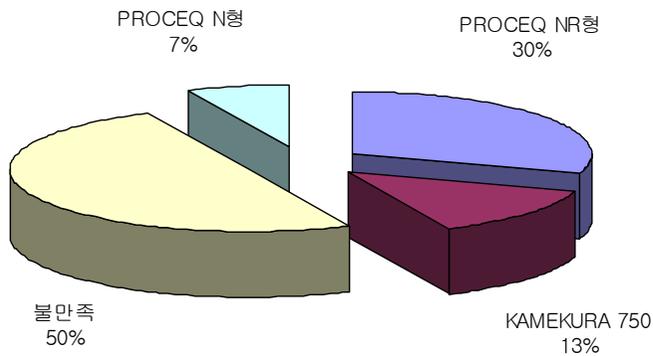


그림 3.7 반발도 측정을 위한 비파괴 시험 장비의 신뢰성

차지하고 있으며, PROCEQ-N형이 20.4%, KAMEKURA-750이 20.4%, KAMEKURA-650이 5.5%, PROCEQ-M형이 3.7%의 비율을 차지하고 있는 것으로 조사되었다. 또한 KAMEKURA-650 과 KAMEKURA-700은 거의 사용하지 않고 있는 것으로 나타났으며, PROCEQ-L형, PROCEQ-LR형, PROCEQ-P형 등은 저장도콘크리트의 강도추정을 위한 비파괴 시험 장비로 거의 사용되지 않는 것으로 나타났다.

또한 그림 3.7은 반발도 측정을 위한 비파괴 시험 장비의 신뢰성을

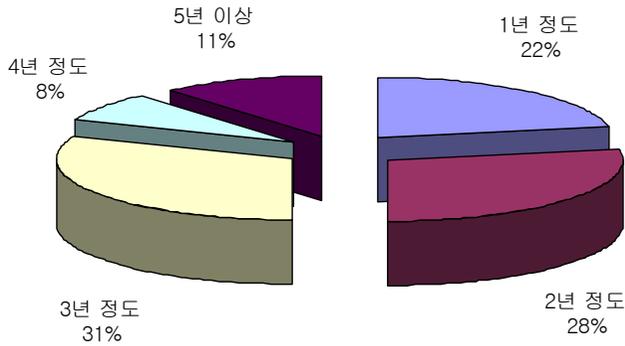


그림 3.8 슈미트해머에 의한 반발도 측정자의 경력분포

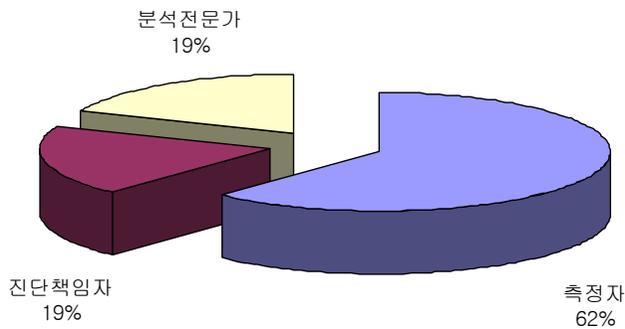


그림 3.9 콘크리트 강도추정에서의 현장측정과 분석방법

나타낸 것으로 가장 많이 사용되고 있는 PROCEQ-NR형의 경우가 비파괴 장비의 신뢰성에 대한 만족이 30%로 가장 높게 나타났으며 KAMEKURA-□750이 13.0%, PROCEQ-N형이 7.4%의 비율을 차지하는 것으로 조사되었다.

그림 3.8은 슈미트해머에 의한 반발도 측정자의 경력분포를 나타낸 것으로 경력이 2년 이하인 기술자가 약 50%를 차지하고 있어 슈미트해머에 의한 반발도 측정자의 경력은 높지 않은 것으로 조사되었다.

그림 3.9는 반발도법을 이용한 콘크리트의 강도추정을 실시함에 있어서 현장 측정과 분석방법을 나타낸 것으로 측정하는 사람이 직접 분석하는 경우가 62.0%, 측정자와 분석자가 따로 있으며 책임자가 분석한 경우가 19.0%, 측정자와 분석자가 따로 있으며 분석전문가가 분석한 경우가 19.0%로 나타났다. 또한 그림 3.10은 측정자와 분석자가 서로 다른 경우 분석자의 비파괴 시험이나 안전진단 관련분야의 실무경력을 나타낸 것으로 3년 미만이 23.0%, 5~9년이 11.0%, 10년 이

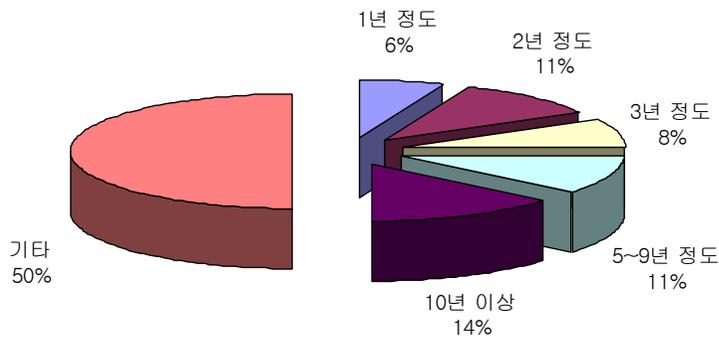


그림 3.10 반발도 측정에 대한 분석자의 실무경력

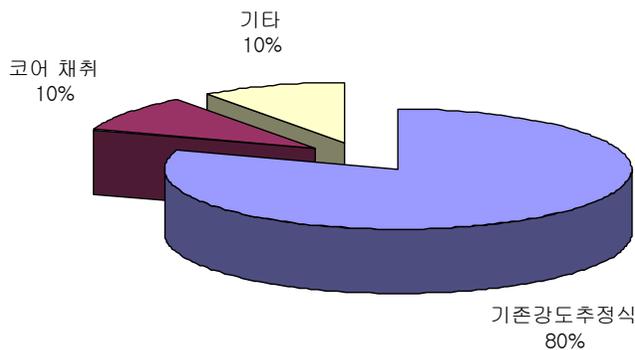


그림 3.11 콘크리트 강도추정의 방법

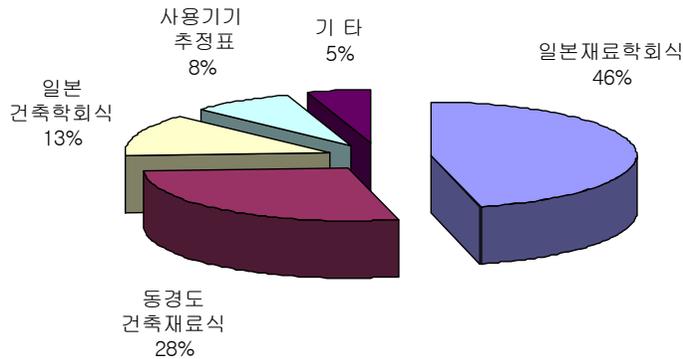


그림 3.12 콘크리트 강도추정식의 사용빈도

상이 14.0%의 비율을 차지하는 것으로 조사되었다.

그림 3.11은 반발도 측정결과를 바탕으로 한 강도추정의 방법을 나타낸 것으로 기존의 강도추정식을 사용하는 경우가 80.0%, 코어를 채취하여 강도를 측정 후 관계식을 만들어 사용하는 경우가 10.0%의 비율을 차지하는 것으로 나타났다.

그림 3.12는 반발도 측정결과를 바탕으로 한 콘크리트 강도추정식의 사용빈도를 나타낸 것으로 일본재료학회의 표준식 46.0%, 일본 동경도 건축재료시험소의 추정식 28.0%, 일본건축학회의 표준식 13.0%,

표 3.4 반발도에 의한 강도추정식

구 분	강 도 추 정 식
1. 일본재료학회의 표준식	$F_C = 13R_0 - 184$
2. 동경도 건축재료 시험소식	$F_C = 10 R_0 - 110$
3. 일본건축학회의 표준식	$F_C = 7.3R_0 + 100(\text{kg/cm}^2)$
4. Boundy 등	$F_C = 9.97R^{1.313}(\Psi)$

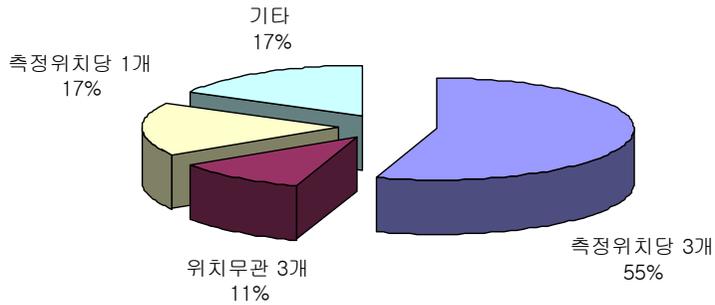


그림 3.13 코어 채취수

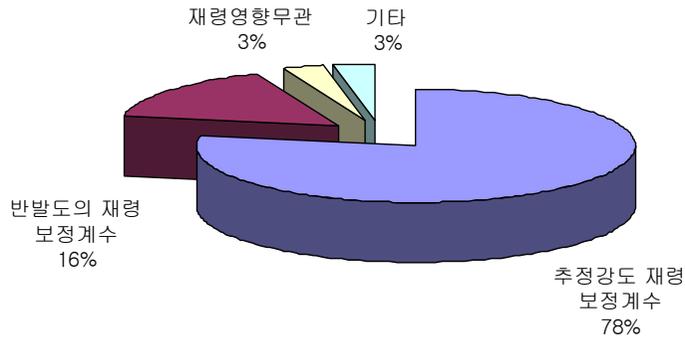


그림 3.14 재령에 의한 영향 고려

사용기기의 성적표에 의한 추정표 8.0%, 기타 5.0%의 비율로 나타나 대부분이 일본의 강도추정식을 사용하는 것으로 조사되었으며 기존의 강도추정식은 표 3.4에서 보는 바와 같다.

그림 3.13은 코어를 채취하여 강도를 측정 후 관계식을 만들어 사용하는 경우에 강도측정용 코어채취수를 나타낸 것으로 각 측정위치당 3개 이상 56.0%, 측정위치에 관계없이 3개 이상 11.0%, 각 측정위치당 1개 이상 17.0%, 기타 17.0% 등의 비율로 나타났으며, 그림 3.14는 재령의 영향에 대한 고려방법을 나타낸 것으로 추정강도의 재

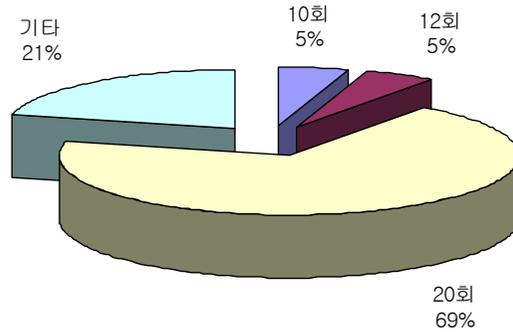


그림 3.15 1개소 측정에서의 타격회수

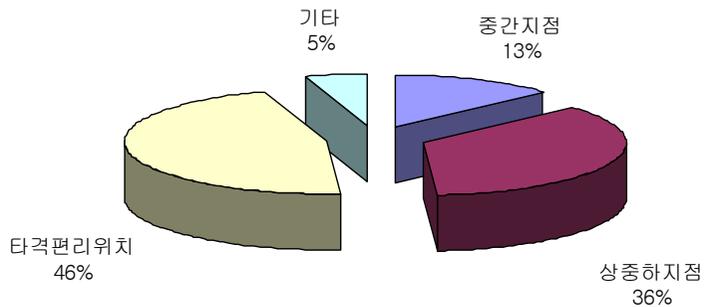


그림 3.16 수직부재 방향

정보정계수를 적용하는 방법은 78.0%, 반발도의 재정보정계수를 적용하는 방법은 16.0%, 재령에 의한 영향을 고려하지 않는 경우는 3.0%, 기타 3.0%의 비율을 차지하는 것으로 나타났다.

그림 3.15는 1개소 측정위치에서 타격회수를 나타낸 것으로 10회 5.0%, 12회 5.0%, 20회 68%, 기타 21.0%의 비율을 차지하는 것으로 나타났으며 그림 3.16은 수직부재 높이방향의 반발도 측정위치를 나타낸 것으로 측정위치는 층고의 중간지점 13.0%, 부재를 3등분하여 상중하 지점 36.0%, 타격하기에 편리한 위치(FL+130~150cm 정도) 46.0%, 기타 5%로 나타났다, 또한 그림 3.17은 면적이 큰 부재의 반

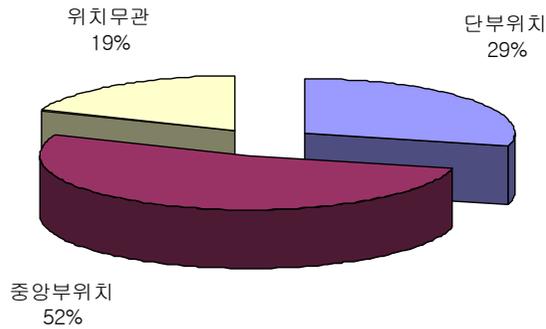


그림 3.17 면적이 큰 부재의 반발도 측정위치

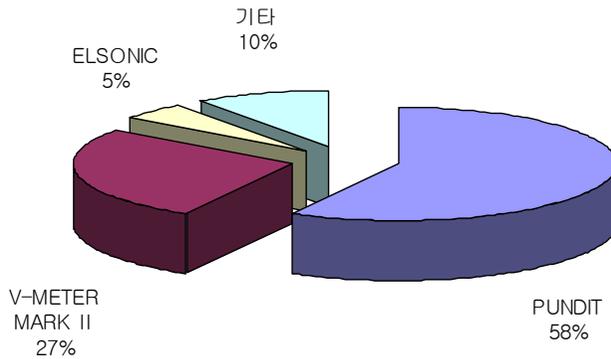


그림 3.18 초음파속도 측정을 위한 장비의 보유현황

발도 측정위치를 나타낸 것으로 측정위치는 단부에서 측정 23.0%, 중앙부에서 측정 41.0%, 위치에 대한 특별한 제한 없이 측정 15.0%, 기타 21.0%의 비율을 차지하는 것으로 나타났다.

#### 다. 초음파속도법

표 3.5 및 그림 3.18은 콘크리트의 강도추정을 위한 비파괴 시험법인 초음파속도법에 사용되고 있거나 보유하고 있는 비파괴 시험장비의 현황을 나타낸 것으로 PUNDIT가 58.5%로 가장 많이 사용되고

표 3.5 초음파속도법에 사용된 측정장비

시험장비명	보유대수	운용상황				비 고
		◎	○	△	×	
PUNDIT (CNS Electronics)	24	10	9	4	1	◎ : 상당히 많이 사용하고 있으며 결과 또한 만 족스러움 ○ : 많이 사용하고 있으나 결과는 만족치 못함 △ : 가끔 사용함 × : 거의 사용하지 않음
V-METER MARK II (James Instrument)	11	2	4	3	2	
ELSONIC	2	-	-	-	2	
기 타	4	2	1	-	1	
계	41	14	14	9	4	

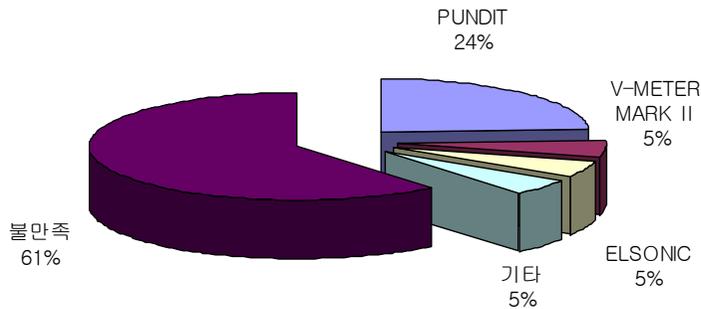


그림 3.19 초음파속도 측정을 위한 장비의 신뢰성

있는 것으로 나타났으며, V-METER MARK II 26.8%, ELSONIC 4.9%, 기타 9.8%의 비율을 차지하는 것으로 나타났다. 또한 그림 3.19는 초음파속도 측정을 위한 장비의 신뢰성을 나타낸 것으로 측정결과에 만족하고 있는 정도가 39.0%의 비율을 차지한 것으로 나타났다.

그림 3.20은 초음파 시험기를 사용하여 전파속도를 측정하는 기술자의 안전진단이나 비파괴 시험 등 관련분야의 경력분포를 나타낸 것으로 대체로 경력이 2년 이하인 기술자가 약 50% 이상을 차지하고 있어 초음파속도 측정자의 경력은 높지 않은 것으로 조사되었으며, 그림 3.21은 초음파 측정기를 이용한 콘크리트의 강도추정을 실시함

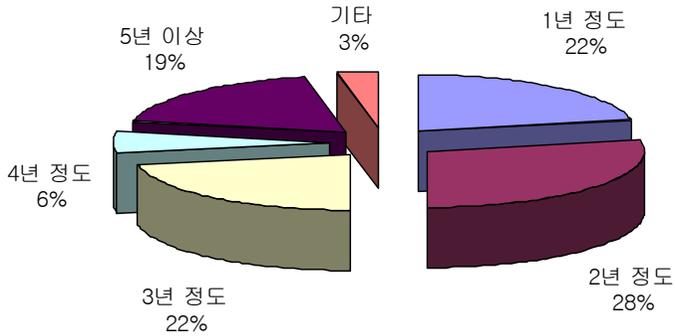


그림 3.20 초음파속도 측정자의 경력 분포

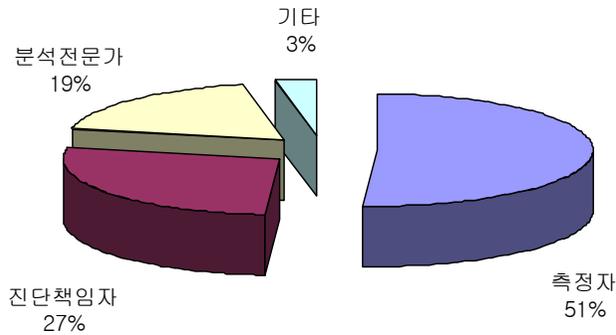


그림 3.21 초음파속도의 측정과 분석방법

에 있어서 현장측정과 분석방법을 나타낸 것으로 측정자가 직접 분석하는 경우가 51.0%, 측정자와 분석자가 따로 있으며 진단책임자가 분석한 경우가 27.0%, 측정자와 분석자가 따로 있으며 분석전문가가 분석한 경우가 19.0%, 기타3.0%의 비율을 차지하는 것으로 나타났다.

또한 그림 3.22는 측정자와 분석자가 서로 다른 경우 분석자의 비파괴시험이나 안전진단 관련분야의 실무경력을 나타낸 것으로 1~5년 정도가 22.0%, 6~10년 정도가 9.0%, 11년 이상이 2.0%의 비율을 차

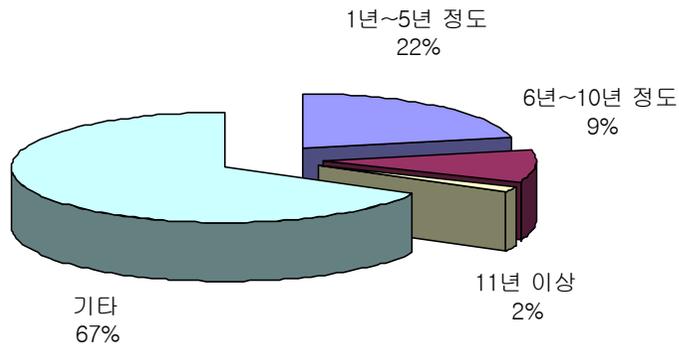


그림 3.22 초음파속도 측정에 대한 분석자의 실무경력

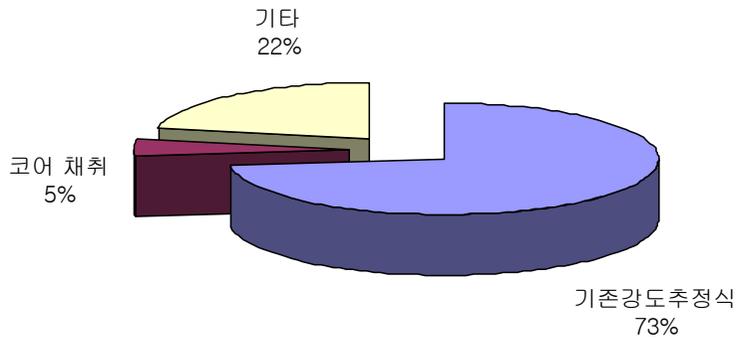


그림 3.23 초음파속도를 이용한 강도추정 방법

지하는 것으로 나타났다.

그림 3.23은 초음파속도 측정결과를 바탕으로 한 강도추정의 방법을 나타낸 것으로 기존의 강도 추정식을 사용하는 경우가 73.0%, 코어를 채취하여 강도를 측정한 후 관계식을 이용하는 경우가 5.0%, 기타 22.0%로 나타났으며, 기존의 강도추정식은 표 3.6과 같다.

그림 3.24는 코어를 채취하여 강도를 측정한 후 관계식을 만들어

표 3.6 초음파속도법에 의한 강도추정식 사용빈도

구분	강도추정식	빈도(%)
1) 일본건축학회 추정식	$F_c = 215V_p - 620$ (R = 0.457)	58
2) J.Pyszniak의 추정식	$F_c = 92.5V_p^2 - 508V_p + 782$	11
3) 小阪義夫·谷川恭雄 ·山田和夫의 추정식	$F_c = 172.5V_p - 499.6$	3
	$f_c = 0.5 \times 10^{0.63V_s}$	
4) V.M. Malhotra & N. J. Carino	$F_c = 1.46V_p - 15913$ 단 $V_p$ 는 ft/sec $F_c$ 는 psi	3
5) 谷川恭雄·山田和夫의 추정식	수중양생 $F_c = 435.6V_p - 1655.3$	3
	증기양생 $F_c = 329.4V_p - 1081.7$	
6) 谷川恭雄·太田福男의 추정식	$F_c = 67V_p - 9$ (R = 0.956)	0
	$\log F_c = 0.525V_p - 1.462$ (R = 0.975)	
7) 기타	제안자, 추정식, 관련근거 또는 참고문헌	22

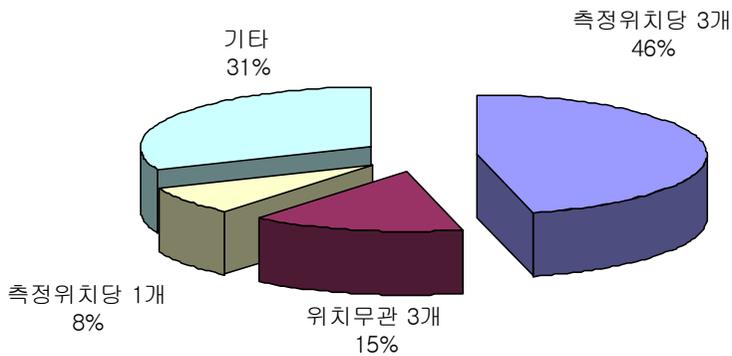


그림 3.24 코어 채취수

사용하는 경우에 강도측정용 코어 채취수를 나타낸 것으로 각 측정 위치당 3개 이상 46.0%, 측정위치에 관계없이 3개 이상 15.0%, 각 측정위치당 1개 이상 8.0%, 기타 4.0% 등으로 나타났다.

## 라. 복합법

표 3.7은 슈미트 해머와 초음파 전파속도의 복합법으로 강도추정을 하는 경우의 추정식 나타낸 것으로 콘크리트의 강도추정을 위한 비파괴시험법으로 가장 많이 사용하는 방법은 슈미트해머에 의한 반발도법, 초음파속도법, 슈미트해머와 초음파속도에 의한 복합법, 기타 등으로 나타났다.

표 3.7 복합법에 의한 강도추정식

구분	강도추정식	빈도(%)
1. RILEM CNDT 위원회 (SORNEB Method) :루마니아 지침	$F_c = R_{ref} C_t$ $C_t = C_c \cdot C_d \cdot C_a \cdot C_o \cdot C_g$ 여기서, $F_c$ : 콘크리트 압축강도 $C_c$ : 전보정계수 $C_d$ : 단위시멘트량에 의한 보정계수 $C_a$ : 골재종류에 의한 보정계수 $C_o$ : 골재최대치에 의한 보정계수 $C_g$ : 0~1mm의 미세물질이 전골재 중에 점유하는 비율에 의한 보정계수	8
2. 일본건축학회식	보통콘크리트 $F_c = 8.2R + 269V_p - 1094$ 경량콘크리트 $F_c = 4.1R + 344V_p - 1022$	45
3. 谷川, 山田, 小阪 식	$F_c = 10.2(kR) + 223V_p - 960$	6
4. 野崎, 山中식	$F_c = 9.9R + 79.2V_p - 273$	3
5. 尼崎, 明石식 건조콘크리트 습윤콘크리트	$V_p/F_c = 195 - 13.2R + 0.316R^2 - 0.00257R^3$ $V_p/F_c = 155 - 11.3R + 0.299R^2 - 0.00268R^3$	0
6. Bellander식	$F_c = 1.11(0.00082R^3 + 11.03V_p - 32.7)^{0.942}$ (MPa)	0
7. Weibinga식	$Lg_e F_c = k_0 + k_1 R + k_2 V_p$	0

## 2. 문제점 및 개선방향

콘크리트의 강도추정을 위한 비파괴시험 방법으로서 반발도 및 초음파전파속도법이 주로 사용되고 있으나 안전진단기관에 따라 보유하고 있는 시험장비가 다르게 나타나고 있으며 슈미트햄머에 의한 반발도 측정시 측정개소와 타격회수에 대한 기준 없이 초급기술자의 판단에 의존하는 것으로 조사되었다.

또한 코어를 채취하지 않고 기존의 강도추정식을 이용하는 방법이 많이 사용되고 있으나 대부분 외국에서 제안된 강도추정식이 그대로 사용되고 있는 실정으로 이러한 강도추정식의 적용은 외국의 사용재료 및 기후 등이 국내와 다르기 때문에 동일한 압축강도에 대하여 추정강도가 다르게 나타나고 안전진단기관마다 다르게 나타났다.

최근 콘크리트 구조물의 고층화, 대형화 등으로 적용되고 있는 고강도콘크리트의 품질관리, 유지관리 및 안전진단 등을 위한 강도추정식 및 강도예측의 체계적인 기준정립이 필요한 상황으로 비파괴 시험법에 대한 체계적인 기준과 국내 실정에 맞는 고강도콘크리트의 강도추정식이 시급히 정립되어야 할 것으로 사료된다.

## 제4장 고강도콘크리트의 강도추정식 제안을 위한 실험적 연구

### 제1절 사용재료에 따른 고강도콘크리트의 강도추정식 제안을 위한 연구

#### 1. 서 언

현재 고강도콘크리트에 대한 연구는 대부분 배합특성 및 역학적 특성 등에만 집중되고 있어 고강도콘크리트를 사용한 콘크리트 구조물의 유지관리 및 안전진단 측면에서 고강도콘크리트의 비파괴시험에 의한 강도추정이 필요한 실정이다.

또한 고강도콘크리트의 품질은 시멘트, 골재, 혼화재료 등의 사용재료에 따라 크게 다르게 되지만 국내의 경우 체계화된 연구가 없는 상태에서 사용재료가 다른 일본에서 수십년 전에 제안된 강도추정식을 그대로 사용하고 있어 고강도콘크리트를 사용한 콘크리트 구조물의 유지관리 및 안전진단 측면에서 강도추정 결과의 신뢰성 등이 문제점으로 대두되고 있다.

따라서 본 절에서는 사용재료에 따른 다양한 고강도콘크리트를 제작한 후 측정된 압축강도와 반발도, 초음파속도의 데이터 및 충남대학교 건설재료·시공학 연구실에서 1990~2001년 사이에 축적된 다양한 고강도콘크리트의 기존데이터를 총합하여 국내 실정에 맞는 사용재료에 따른 고강도콘크리트의 강도추정식을 제안하고자 한다.

## 2. 실험계획 및 방법

### 가. 실험계획

실험계획은 표 4.1에서 보는 바와 같이 사용재료에 따른 고강도콘크리트의 강도추정식을 제안하기 위하여 시멘트 종류를 보통포틀랜드시멘트(O.P.C) 3수준, 비라이트시멘트(H.B.C) 1수준, 굵은골재 종류는 산지별로 수도권, 충청권, 전라권, 경북권, 경남권 5수준, 암종별로 돌로마이트, 응회암, 천매암, 편마암, 화강암 5수준, 고성능감수제 종류는 나프탈렌계, 멜라민계, 폴리카르본산계 3수준으로 설정하였다.

측정항목으로서 경화콘크리트의 압축강도, 반발도, 초음파속도를 재령 3, 7, 28, 56, 91일에 각각 측정하였다.

### 나. 사용재료

본 실험에 사용된 시멘트는 1종 보통포틀랜드시멘트 3종류와 비라이트시멘트 1종류를 사용하였으며 물리적 성질은 표 4.2와 같다. 또한 혼화제는 표 4.3에서 보는 바와 같이 비중 2.13인 보령산 플라이애시를 사용하였다.

혼화제 및 잔골재의 물리적 성질은 표 4.4 및 4.5에 나타낸 바와 같으며 굵은골재는 산지별 5수준, 암종별 5수준의 최대치수 20mm의 부순자갈을 사용하였으며 물리적 성질은 표 4.6과 같으며 입도분포곡선은 그림 4.1에 나타내었다.

표 4.1 실험계획

사용재료	실험요인 및 수준		측 정 항 목
시멘트 <sup>1)</sup>	O.P.C I, O.P.C II, O.P.C III, H.B.C		• 압축강도 (kgf/cm <sup>2</sup> ) • 초음파속도 (km/sec) • 반발도 ※재령 : 7, 28, 56, 91일
고성능 감수제	나프탈렌계(N형), 멜라민계(M형), 폴리카르본산계(P형)		
골재	산지별	수도권, 충청권, 전라권, 경북권, 경남권	
	암종별	돌로마이트, 응회암, 천매암, 편마암, 화강암	

주 1) O.P.C : 보통포틀랜드시멘트, H.B.C : 비라이트시멘트

표 4.2 시멘트의 물리적 성질

시멘트 종류	비중	분말도 (cm <sup>2</sup> /g)	응결도 (h:m)		강열 감량 (%)	안 정 성	압축강도 (kgf/cm <sup>2</sup> )		
			초결	종결			3일	7일	28일
O.P.C I	3.15	3,630	3:35	5:35	1.5	양호	227	298	388
O.P.C II	3.15	3,770	3:30	5:45	1.9	양호	235	294	378
O.P.C III	3.15	3,250	4:30	7:20	1.6	양호	195	290	375
H.B.C	3.20	4,130	6:00	9:40	1.2	양호	180	260	460

표 4.3 혼화제의 물리적 성질

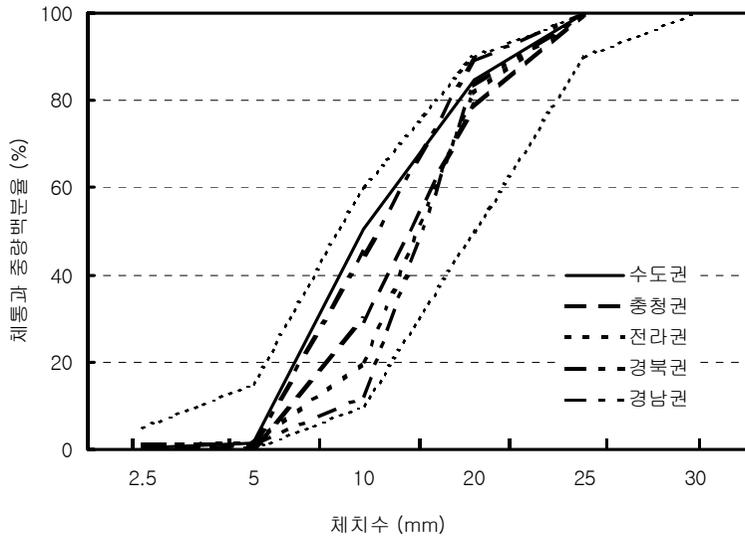
혼화제 종류	비중	분말도 (cm <sup>2</sup> /g)	강열감량 (%)	습분 (%)	단위수량비 (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	압축강도비 (28일) (%)
플라이애시	2.13	2,976	4.0	0.1	101	53.2	93.1

표 4.4 혼화제의 물리적 성질

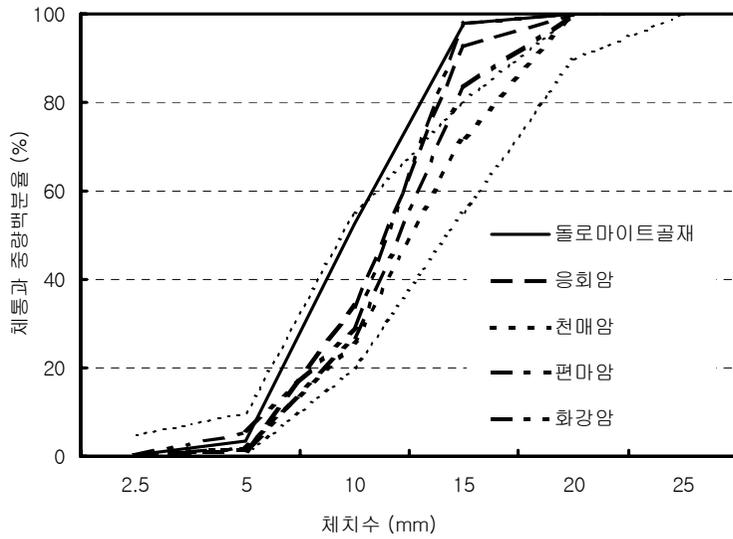
혼화제 종류	유형	색상	주성분	고형분 (%)	독성	pH	점도 (cP)	비중
나프탈렌계	액상	암갈색	나프탈렌계	32.9	없음	6.28	29.7	1.168
멜라민계	액상	담황색	멜라민계	39.4	없음	7.77	148.3	1.228
폴리카르본산계	액상	연황색	폴리카르본산계	30.0	없음	6.84	90.6	1.092

표 4.5 잔골재의 물리적 성질

구분	최대치수 (mm)	조립물 (F.M.)	비중	흡수율 (%)	실적율 (%)	단위용적중량 (kg/ℓ)	비고
잔골재	5	3.04	2.56	1.01	67.45	1.73	인천산 제염사



(a) 산지별



(b) 암종별

그림 4.1 굵은골재의 입도분포 곡선

표 4.6 굵은골재의 물리적 성질

구 분		최대치수 (mm)	조립율 (F.M.)	비중	흡수율 (%)	실적율 (%)	단위용적중량 (kg/ℓ)	비고
산지 별	수도권	20	6.63	2.69	1.16	58.7	1.51	부순 자갈
	충청권	20	6.64	2.60	1.44	59.5	1.43	
	전라권	20	6.69	2.64	1.01	58.0	1.48	
	경북권	20	6.91	2.62	1.44	56.1	1.44	
	경남권	20	7.03	2.69	1.48	56.1	1.51	
암 종 별	돌로마이트	20	6.43	2.72	1.01	60.5	1.61	
	응회암	20	6.64	2.56	1.55	56.9	1.43	
	천매암	20	6.72	2.66	1.23	56.6	1.48	
	편마암	20	6.55	2.60	1.35	59.0	1.51	
	화강암	20	6.65	2.78	0.89	60.0	1.59	

#### 다. 비빔방법 및 공시체 제작

콘크리트 비빔은 용량 100ℓ의 강제식 팬타입 믹서를 사용하여 플라이애시, 시멘트, 잔골재를 투입하여 30초간 건비빔 한 후, 물과 고성능AE감수제를 투입하여 각각 60초씩 비빔을 실시하고, 굵은골재를 투입하여 60초간 비빔을 행한 후, 목표 슬럼프-플로우 55±5cm의 범위를 만족하는 경우 토출하였다.

공시체 제작은 압축강도 및 초음파속도를 측정하기 위하여 ø10×20cm의 원주형 공시체를 KS F 2403의 콘크리트의 강도시험용 공시체 제작방법에 준하여 제작하였으며 반발도를 측정하기 위하여 ø15×30cm의 원주형 공시체를 제작하였다. 또한 약 24시간 후 몰드를 탈형하여 공시체는 20±3℃의 표준양생을 실시하였으며 측정시 상면을 콘크리트용 연마기를 사용하여 평활하게 마감하였다.

#### 라. 시험방법

##### (1) 압축강도 시험방법

경화콘크리트의 압축강도 시험방법은 KS F 2405 「콘크리트의 압

축강도 시험방법」에 준하여 최대하중을 측정한 후 식(4.1)에 의하여 압축강도를 산정 하였으며, 측정장치는 Shimadzu의 UTM(Universal Testing Machine)을 사용하였다.

$$\sigma_c = \frac{P}{A} \text{ (kgf/cm}^2\text{)} \dots\dots\dots \text{식(4.1)}$$

여기서  $\sigma_c$  : 압축강도 (kgf/cm<sup>2</sup>)  
 $P$  : 최대하중 (kgf)  
 $A$  : 공시체의 단면적 (cm<sup>2</sup>)

### (2) 반발도 시험방법

ø15×30cm의 공시체의 표면에 3cm 간격으로 그리드를 표시한 다음 25kgf/cm<sup>2</sup>의 압축하중을 가하여 고정한 후 N형 슈미트 해머를 사용하여 타격각도 0°로 25회 타격한 후 그 평균값으로 반발도를 산정하였다. 단 평균값과 ±20% 이상의 오차가 있는 측정값은 제외하였으며 이에 대한 값을 보정하여 반발도의 평균값을 산정하였다.

### (3) 초음파속도 시험방법

영국의 C.N.S 사의 PUNDIT를 이용하여 50KHz의 단자를 고정시킨 상태에서 계기의 수신호가 안정된 상태로 될 때 유효숫자를 읽어 전파시간(μs)으로 하였으며 측정시에는 측정대상 공시체면에 구리스를 발라서 단자와 공시체면 사이에 공극이 생기지 않도록 하여 각 재령의 3개의 원주형공시체를 길이방향으로 측정하여 평균치로 하였고 전파시간은 식 (4.2)에 의해서 산정하였다.

$$V_c = \frac{L}{T} \dots\dots\dots \text{식(4.2)}$$

여기서  $V_c$  : 초음파속도 (km/sec)  
 $L$  : 공시체 길이(cm)  
 $T$  : 전파시간 (μs)

### 3. 실험결과 분석 및 검토

사용재료에 따른 고강도콘크리트의 경화성상 측정결과를 표 4.7에 나타내었다.

본 연구에서는 기존의 연구결과를 참고하여 다음 식을 이용하여 실험값의 회귀분석을 하였으며 표 4.8에 회귀분석의 결과를 나타내었다.

$$F_c = a R_n + b V_p + C \quad \text{식(4.3)}$$

여기서  $F_c$  : 압축강도 (kgf/cm<sup>2</sup>)  
 $R_n$  : 반발도  
 $V_p$  : 초음파속도 (km/sec)  
 $a, b, C$  : 실험상수

표 4.7(a) 사용재료에 따른 고강도콘크리트의 경화성상 측정결과

측정 항목	사용재료		측 정 재 령 (일)				
			7	28	56	91	
압축강도 (kgf/cm <sup>2</sup> )	시멘트 및 고성능 감수제	OPC I	나프탈렌계	546	697	746	797
			멜라민계	530	650	736	787
			폴리카르본산계	539	689	750	800
		OPC II	나프탈렌계	580	710	796	850
			멜라민계	606	717	800	882
			폴리카르본산계	639	761	850	911
	굵은 골재	산지별	수도권	615	711	760	770
			충청권	544	696	685	690
			전라권	603	755	713	720
			경북권	624	771	756	767
		암종별	경남권	594	773	759	781
			돌로마이트	488	607	651	670
			응회암	487	609	667	652
			천매암	447	552	613	630
		편마암	459	611	650	660	
		화강암	536	676	787	793	

표 4.7(b) 사용재료에 따른 고강도콘크리트의 경화성상 측정결과

측정 항목	사용재료			측 정 재 령 (일)			
				7	28	56	91
초음파 속도 (km/sec)	시멘트 및 고성능 감수제	OPC I	나프탈렌계	4.78	4.83	4.94	4.92
			멜라민계	4.80	4.83	4.93	4.92
			폴리카르본산계	4.69	4.78	4.87	4.95
		OPC II	나프탈렌계	4.89	4.93	5.02	4.97
			멜라민계	4.85	4.86	4.97	4.95
			폴리카르본산계	4.95	4.90	5.01	5.04
	굵은 골재	산지별	수도권	4.90	4.87	4.85	4.93
			충청권	4.89	4.89	4.88	4.96
			전라권	4.94	4.90	4.89	4.91
			경북권	4.92	4.95	4.98	5.03
			경남권	4.90	4.96	5.00	5.06
		암종별	돌로마이트	4.77	4.87	4.92	5.02
			응회암	4.72	4.71	4.82	4.90
			천매암	4.74	4.73	4.80	4.89
			편마암	4.69	4.68	4.77	4.92
			화강암	4.63	4.71	4.94	5.04
반발도 (R <sub>n</sub> )	시멘트 및 고성능 감수제	OPC I	나프탈렌계	40	47	47	48
			멜라민계	41	47	47	48
			폴리카르본산계	40	47	47	48
		OPC II	나프탈렌계	42	47	50	50
			멜라민계	42	47	48	50
			폴리카르본산계	42	46	49	49
	굵은 골재	산지별	수도권	42	46	47	48
			충청권	41	45	45	46
			전라권	40	45	46	46
			경북권	42	45	46	46
			경남권	40	45	46	47
		암종별	돌로마이트	37	43	46	46
			응회암	36	42	45	46
			천매암	36	43	45	45
			편마암	35	39	44	45
			화강암	39	42	46	47

표 4.8 회귀분석 결과

실험상수			다 중 상 관 계 수 (R)	표 준 오 차 (SE)	F비	유의한 F	결 정 계 수 (R <sup>2</sup> )
a	b	C					
12.671	-	97.868	0.8563	84.0187	384.822	5.3E-42	0.7332
-	501.632	-1782.03	0.8589	91.6187	390.982	3.2E-42	0.7377
11.206	125.763	-422.905	0.8934	78.9584	227.308	1.1E-40	0.7981

### 가. 반발도법에 의한 강도추정식

그림 4.2는 슈미트해머에 의한 반발도  $R_n$ 와 압축강도  $F_c$ 와의 관계를 일본재료학회, 일본건축학회, 동경도건축재료검사소에 의한 강도 추정식 및 본 연구의 회귀분석에 의해 얻어진 강도추정식과 비교하여 나타낸 것이며 그림 4.3은 실측압축강도와 회귀분석에 의해 얻은 강도추정식에 의한 추정압축강도의 관계를 나타낸 것이다.

일본건축학회식의 경우 압축강도  $350\text{kgf/cm}^2$  이하의 보통강도수준에서는 어느정도 일치하는 것으로 나타나고 있으나 고강도 영역으로 갈수록 실측데이터를 과소평가하고 있는 것으로 나타났으며 일본재료학회식과 동경도건축재료검사소식은 모든 강도 영역에서 실측치의 분포범위를 크게 하위하고 있어 국내의 현실을 감안하면 적용하기 어려울 것으로 판단된다.

한편 본 연구의 회귀분석에 의해 얻어진 강도추정식의 경우 편차가 다소 보이지만 상관계수가 0.8563으로 높은 강도추정정도가 얻어졌으며 기존 일본재료학회식, 동경도 건축재료검사소식 및 일본건축학회식과 비교하여 값을 높게 예측하는 것으로 나타났다.

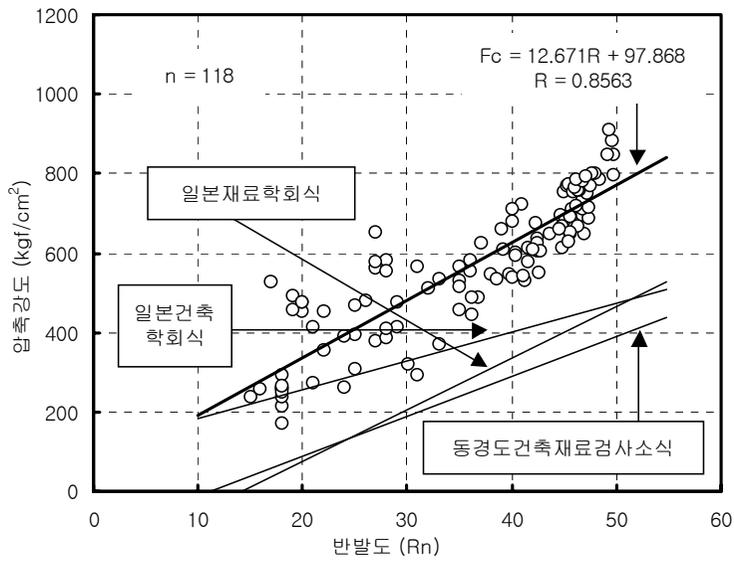


그림 4.2 압축강도와 반발도와의 관계

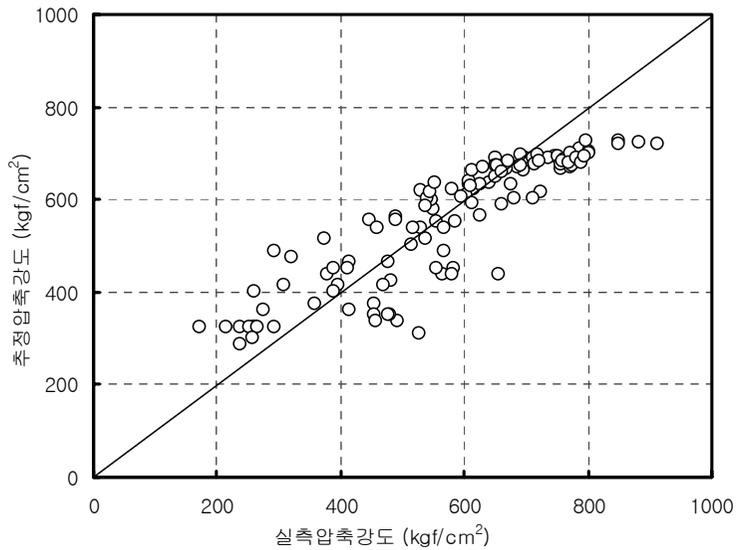


그림 4.3 실측압축강도와 추정압축강도와의 관계 (반발도법)

일본재료학회식 :  $F_c = 13 R_n - 184$  ..... 식(4.4)

동경도 건축재료검사소식 :  $F_c = 10 R_n - 110$  ..... 식(4.5)

일본건축학회식 :  $F_c = 7.3 R_n + 110$  ..... 식(4.6)

본 연구 추정식 :  $F_c = 12.671 R_n - 97.868$  ( $R=0.8563$ ) ..... 식(4.7)

### 나. 초음파속도법에 의한 강도추정식

그림 4.4는 초음파속도  $V_p$ 와 압축강도  $F_c$ 와의 관계를 일본건축학회, J. Pyszniak에 의한 강도추정식 및 본 연구의 회귀분석에 의해 얻어진 강도추정식과 비교하여 나타낸 것이며 그림 4.5는 실측압축강도와 본 연구의 회귀분석에 의해 얻어진 강도추정식에 의한 추정압축강도의 관계를 나타낸 것으로 편차가 다소 보이지만 상관계수가 0.8589로 높게 나타났다.

일본건축학회식 :  $F_c = 215 V_p - 620$  ..... 식(4.8)

J. Pyszniak 식 :  $F_c = 92.5 V_p^2 - 508 V_p + 782$  ..... 식(4.9)

본 연구 추정식 :  $F_c = 501.63 V_p - 1782$  ( $R=0.8589$ ) ..... 식(4.10)

### 다. 복합법에 의한 강도추정식

그림 4.6은 복합법에 의한 회귀식으로 구한 추정압축강도와 실측압축강도의 관계를 일본건축학회의 강도추정식과 비교하여 나타낸 것으로 상관계수  $R$ 은 0.8934로 반발도법과 초음파속도법을 단독으로 사용한 경우보다도 강도추정정도가 다소 향상된 것으로 나타났다.

일본건축학회식 :  $F_c = 8.2 R_n - 269 V_p - 1094$  ..... 식(4.11)

본 연구 추정식 :

$F_c = 11.21 R_n - 125.76 V_p - 422.91$  ( $R=0.8934$ ) ..... 식(4.12)

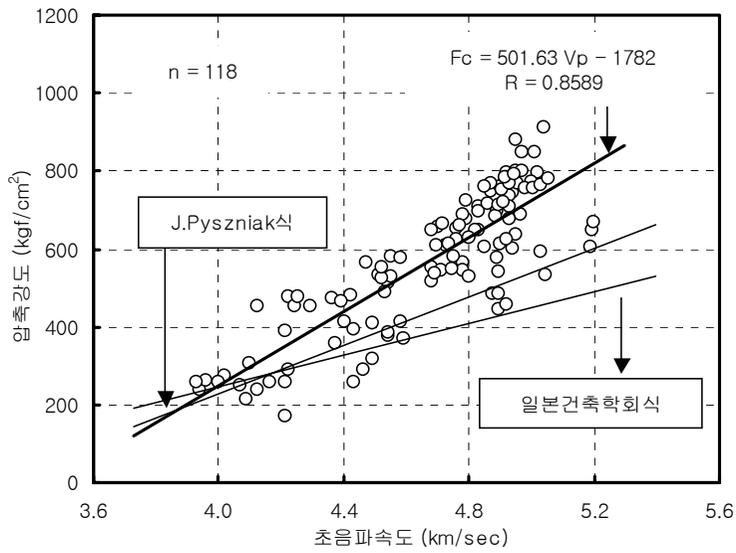


그림 4.4 압축강도와 초음파속도와의 관계

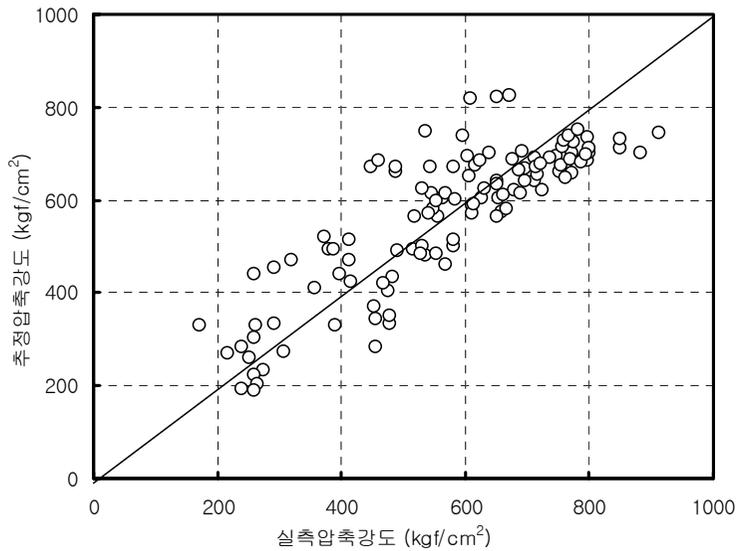


그림 4.5 실측압축강도와 추정압축강도와의 관계 (초음파속도법)

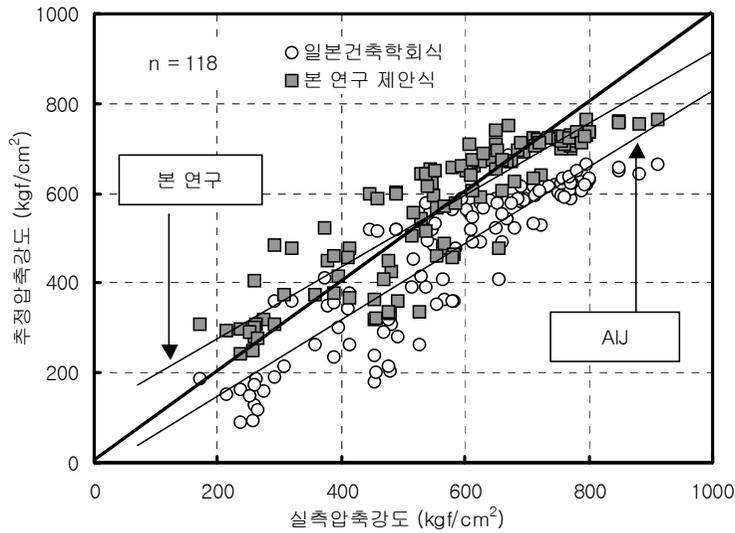


그림 4.6 실측압축강도와 추정압축강도와의 관계 (복합법)

#### 4. 결 언

사용재료에 따른 고강도콘크리트의 강도추정식 제안에 관한 연구를 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

가. 반발도법에 의한 회귀분석 결과 다음과 같은 강도추정식을 제안하였다.

$$F_c = 12.671 R_n - 97.868 \quad (R=0.8563)$$

나. 초음파속도법에 의한 회귀분석 결과 다음과 같은 강도추정식을 제안하였다.

$$F_c = 501.63 V_p - 1782 \quad (R=0.8589)$$

다. 복합법에 의한 회귀분석 결과 다음과 같은 강도추정식을 제안하였으며 반발도법과 초음파속도법을 단독으로 사용한 경우보다 높은 강도추정정도를 얻을 수 있었다.

$$F_c = 11.21 R_n - 125.76 V_p - 422.91 \quad (R=0.8934)$$

## 제2절 물결합재비에 따른 고강도콘크리트의 강도추정식 제안을 위한 연구

### 1. 서 언

고강도콘크리트의 강도는 배합설계시 물결합재비에 의해 큰 영향을 받지만 국내의 경우 체계화된 연구가 없는 상태에서 배합설계 기법이 다른 일본에서 수십년 전에 제안된 강도추정식을 그대로 사용하고 있어 고강도콘크리트를 사용한 콘크리트 구조물의 유지관리 및 안전진단 측면에서 강도추정 결과의 신뢰성 등이 문제점으로 대두되고 있다.

따라서 본 절에서는 물결합재비에 따른 다양한 고강도콘크리트를 제작한 후 측정된 압축강도와 반발도, 초음파속도의 데이터 및 충남대학교 건설재료·시공학 연구실에서 1990~2001년 사이에 축적된 다양한 고강도콘크리트의 기존데이터를 총합하여 국내 실정에 맞는 물결합재비에 따른 고강도콘크리트의 강도추정식을 제안하고자 한다.

### 2. 실험계획 및 방법

#### 가. 실험계획

실험계획은 표 4.9에서 보는 바와 같이 물결합재비에 따른 고강도콘크리트의 강도추정식을 제안하기 위하여 물결합재비를 25~45%의 수준, 단위수량을 165, 175, 185kg/m<sup>3</sup>의 3수준으로 설정하였다.

측정항목으로서는 경화콘크리트의 압축강도, 초음파속도 및 반발도를 재령 3, 7, 28, 56, 91일에 각각 측정하였다.

표 4.9 실험계획

실험요인 및 수준		측 정 항 목
물결합재비 (%)	25~45	· 압축강도 (kgf/cm <sup>2</sup> ) · 초음파속도 (km/sec) · 반발도 ※ 재령 : 3, 7, 28, 56, 91일
단위수량 (kg/m <sup>3</sup> )	165, 175, 185	

표 4.10 시멘트의 물리적 성질

시멘트 종류	비중	분말도 (cm <sup>2</sup> /g)	응결도 (h:m)		강열 감량 (%)	안정성	압축강도 (kgf/cm <sup>2</sup> )		
			초결	종결			3일	7일	28일
O.P.C I	3.15	3,630	3:35	5:35	1.5	양호	227	298	388

표 4.11 혼화재의 물리적 성질

혼화재 종류	비중	분말도 (cm <sup>2</sup> /g)	강열감량 (%)	습분 (%)	단위수량비 (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	압축강도비 (28일) (%)
플라이애시	2.13	2,976	4.0	0.1	101	53.2	93.1

표 4.12 혼화재의 물리적 성질

혼화제 종류	유형	색상	주성분	고형분 (%)	독성	pH	점도 (cP)	비중
나프탈렌계	액상	암갈색	나프탈렌계	32.9	없음	6.28	29.7	1.168
멜라민계	액상	담황색	멜라민계	39.4	없음	7.77	148.3	1.228
폴리카르본산계	액상	연황색	폴리카르본산계	30.0	없음	6.84	90.6	1.092

표 4.13 골재의 물리적 성질

구분	최대치수 (mm)	조립율 (F.M.)	비중	흡수율 (%)	실적율 (%)	단위용적중량 (kg/ℓ)	비고
잔골재	5	3.05	2.56	1.01	67.45	1.73	인천산 제염사
굵은골재	20	6.40	2.65	1.40	62.52	1.66	퇴촌산 부순자갈

## 나. 사용재료

본 실험에 사용된 시멘트는 1종 보통포틀랜드시멘트를 사용하였으며 물리적 성질은 표 4.10과 같다. 또한 혼화제는 표 4.11에서 보는 바와 같이 비중 2.13인 보령산 플라이애시를 사용하였다.

혼화제는 표 4.12에서 보는 바와 같이 나프탈렌계, 멜라민계, 폴리 카르본산계 고성능감수제를 사용하였으며, 잔골재는 인천산 제염사, 굵은골재는 퇴촌산 부순자갈을 사용하였으며 물리적 성질은 표 4.13과 같다.

## 다. 비빔방법 및 공시체 제작

콘크리트 비빔은 용량 100ℓ의 강제식 팬타입 믹서를 사용하여 플라이애시, 시멘트, 잔골재를 투입하여 30초간 건비빔 한 후, 물과 고성능AE감수제를 투입하여 각각 60초씩 비빔을 실시하고, 굵은골재를 투입하여 60초간 비빔을 행한 후, 목표 슬럼프-플로우 55±5cm의 범위를 만족하는 경우 토출하였다.

공시체 제작은 압축강도 및 초음파속도를 측정하기 위하여 ø10×20cm의 원주형 공시체를 KS F 2403의 콘크리트의 강도시험용 공시체 제작방법에 준하여 제작하였으며 반발도를 측정하기 위하여 ø15×30cm의 원주형 공시체를 제작하였다. 또한 약 24시간 후 몰드를 탈형하여 공시체는 20±3℃의 표준양생을 실시하였으며 측정시 상면을 콘크리트용 연마기를 사용하여 평활하게 마감하였다.

## 라. 시험방법

경화콘크리트의 압축강도 시험방법, 반발도 시험방법 및 초음파속도 시험방법은 제4장 1절 『사용재료에 따른 고강도콘크리트의 강도 추정식 제안』과 동일한 방법으로 실시하였다.

### 3. 실험결과 분석 및 검토

물결합재비에 따른 고강도콘크리트의 경화성상 측정결과를 표 4.14에 나타내었다.

표 4.14 물결합재비에 따른 고강도콘크리트의 경화성상 측정결과

측정 항목	W/B (%)	단위수량 (kg/m <sup>3</sup> )	재 령 (일)				
			3	7	28	56	91
압축강도 (kgf/cm <sup>2</sup> )	30	165	462	558	669	699	796
		175	517	588	723	804	851
		185	532	615	412	782	889
	35	165	402	502	606	701	769
		175	406	493	625	708	753
		185	411	486	625	658	705
	40	165	220	360	450	572	618
		175	220	357	473	561	615
		185	213	255	344	402	456
초음파속도 (km/sec)	30	165	4.62	4.81	4.86	5.08	4.96
		175	4.62	4.79	4.85	4.95	4.94
		185	4.51	4.75	4.80	4.92	4.91
	35	165	4.59	4.76	4.85	4.86	4.91
		175	4.52	4.70	4.74	4.90	4.89
		185	4.51	4.68	4.72	4.82	4.90
	40	165	4.25	4.51	4.79	4.74	4.90
		175	4.25	4.50	4.75	4.70	4.91
		185	4.21	4.50	4.72	4.73	4.89
반발도 (Rn)	30	165	31	39	44	51	51
		175	32	41	44	50	51
		185	35	41	45	50	51
	35	165	29	36	42	49	50
		175	30	39	42	49	51
		185	30	38	41	50	50
	40	165	20	26	33	38	42
		175	18	27	34	38	43
		185	18	22	29	37	31

본 연구에서는 기존의 연구결과를 참고하여 다음 식을 이용하여 실험값의 회귀분석을 하였으며 표 4.15에 회귀분석의 결과를 나타내었다.

$$F_c = a R_n + b V_P + C \dots\dots\dots \text{식(4.13)}$$

여기서  $F_c$  : 압축강도 (kgf/cm<sup>2</sup>)  
 $R_n$  : 반발도  
 $V_P$  : 초음파속도 (km/sec)  
 $a, b, C$  : 실험상수

표 4.15 회귀분석 결과

실험상수			다 중 상 관 계 수 (R)	표 준 오 차 (SE)	F비	유의한 F	결 정 계 수 (R <sup>2</sup> )
a	b	C					
14.294	-	8.057	0.7671	108.206	1806.27	8.7E-246	0.5882
-	335.271	-1033.76	0.6269	131.438	815.211	1.2E-138	0.3925
11.605	193.440	-778.642	0.8322	93.6146	1393.99	0	0.6925

### 가. 반발도법에 의한 강도추정식

그림 4.7은 슈미트해머에 의한 반발도  $R_n$ 와 압축강도  $F_c$ 와의 관계를 일본재료학회, 일본건축학회, 동경도건축재료검사소에 의한 강도 추정식 및 본 연구의 회귀분석에 의해 얻어진 강도추정식과 비교하여 나타낸 것이며 그림 4.8은 실측압축강도와 본 연구의 회귀분석에 의해 얻어진 강도추정식에 의한 추정압축강도의 관계를 나타낸 것이다.

일본건축학회식의 경우 저강도수준에서는 실측압축강도와 어느정도 일치하는 것으로 나타나고 있으나 고강도 영역으로 갈수록 실측데이터를 과소평가하고 있는 것으로 나타났으며 일본재료학회식과 동경도건축재료검사소식은 모든 강도 영역에서 실측치의 분포 범위를 하위하고 있어 국내의 현실을 감안하면 적용하기 어려울 것으로 판단된다.

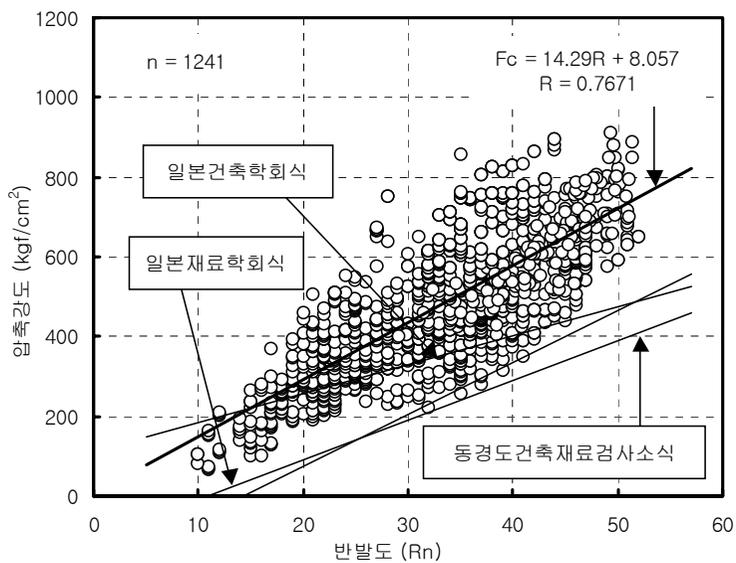


그림 4.7 압축강도와 반발도와의 관계

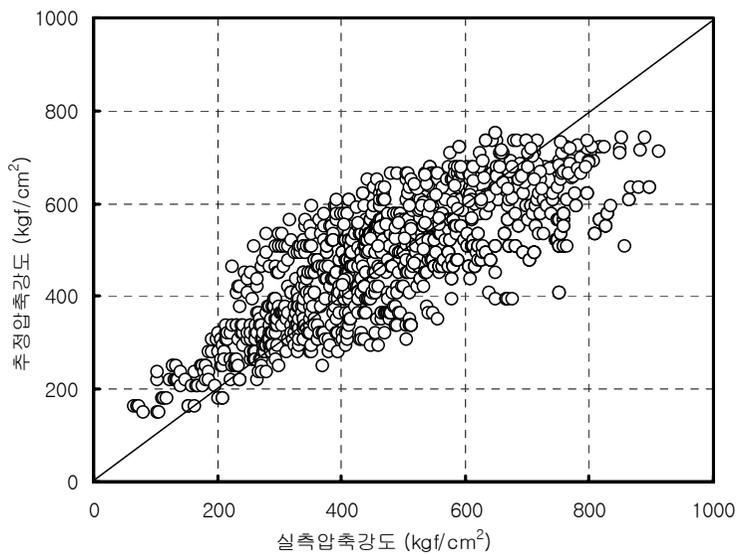


그림 4.8 실측압축강도와 추정압축강도와의 관계 (반발도법)

한편 본 연구의 회귀분석에 의해 얻어진 강도추정식의 경우 편차가 다소 보이지만 상관계수가 0.7671로 높은 강도추정정도가 얻어졌으며 기존 강도추정식과 비교하여 높은 값을 예측하는 것으로 나타났다.

$$\text{일본재료학회식} : F_c = 13 R_n - 184 \dots\dots\dots \text{식(4.14)}$$

$$\text{동경도 건축재료검사소식} : F_c = 10 R_n - 110 \dots\dots\dots \text{식(4.15)}$$

$$\text{일본건축학회식} : F_c = 7.3 R_n + 110 \dots\dots\dots \text{식(4.16)}$$

$$\text{본 연구 추정식} : F_c = 14.29 R_n - 8.057 (R=0.7671) \dots\dots \text{식(4.17)}$$

#### 나. 초음파속도법에 의한 강도추정식

그림 4.9는 초음파속도  $V_p$ 와 압축강도  $F_c$ 와의 관계를 일본건축학회, J. Pyszniak에 의한 강도추정식 및 본 연구의 회귀분석에 의해 얻어진 강도추정식과 비교하여 나타낸 것이며 그림 4.10은 실측압축강도와 본 연구의 회귀분석에 의해 얻어진 강도추정식에 의한 추정압축강도의 관계를 나타낸 것이다.

일본건축학회 및 J. Pyszniak식은 본 연구의 실측치와 다소 일치하는 부분도 있으나 대체적으로 분포범위를 하위하고 있는 것으로 나타났다으며 또한 본 연구의 회귀분석에 의한 강도추정식의 상관계수가 0.6269로 비교적 낮게 나타났고 있어 초음파속도 단독으로 콘크리트의 압축강도를 추정하는 것은 어려울 것으로 판단된다.

$$\text{일본건축학회식} : F_c = 215 V_p - 620 \dots\dots\dots \text{식(4.18)}$$

$$\text{J. Pyszniak 식} : F_c = 92.5 V_p^2 - 508 V_p + 782 \dots\dots\dots \text{식(4.19)}$$

$$\text{본 연구 추정식} : F_c = 335.27 V_p - 1033.8 (R=0.6269) \dots\dots \text{식(4.20)}$$

#### 다. 복합법에 의한 강도추정식

그림 4.11은 복합법에 의한 회귀식으로 구한 추정압축강도와 실측

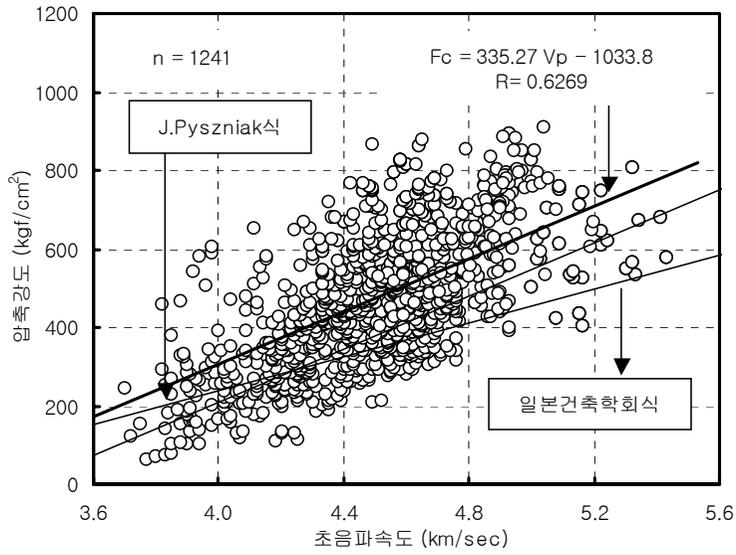


그림 4.9 압축강도와 초음파속도와의 관계

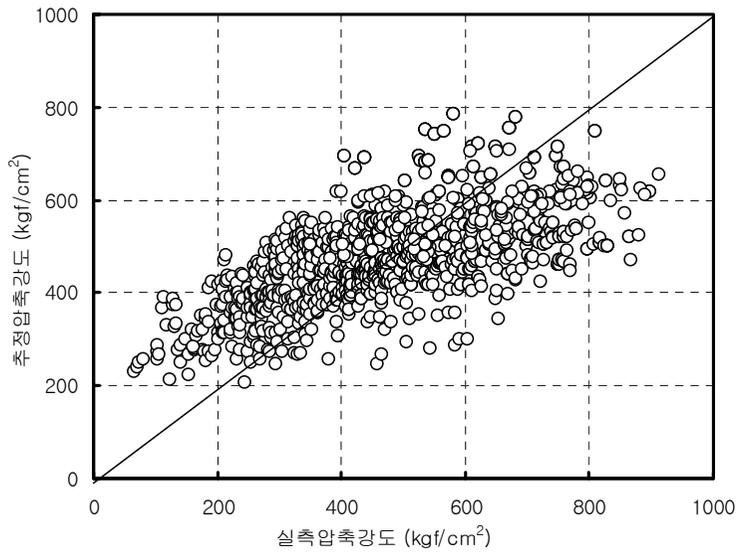


그림 4.10 실측압축강도와 추정압축강도와의 관계 (초음파속도법)

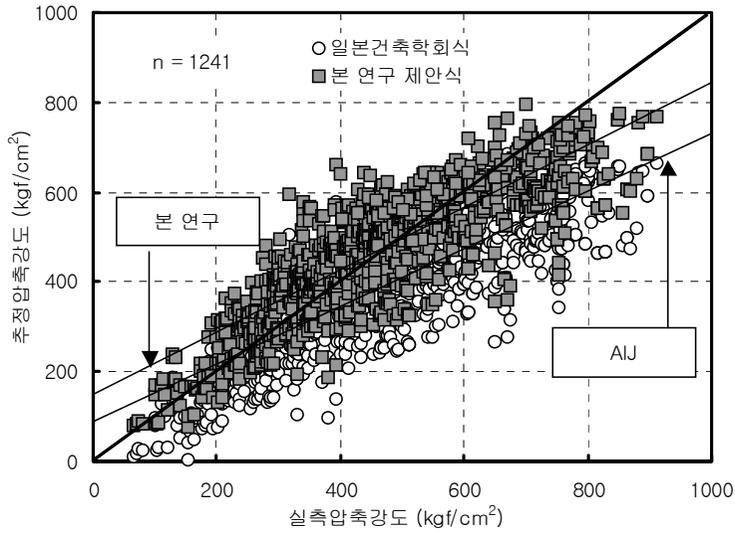


그림 4.11 실측압축강도와 추정압축강도와의 관계 (복합법)

압축강도의 관계를 일본건축학회의 강도추정식과 비교하여 나타낸 것으로 상관계수 R은 0.8322로 반발도법과 초음파속도법을 단독으로 사용한 경우보다도 강도추정정도가 다소 향상된 것으로 나타났다.

일본건축학회식 :  $F_c = 8.2 R - 269 V_P - 1094$  ..... 식(4.21)

본 연구 추정식 :  $F_c = 11.61 R - 193.44 V_P + 778.64 (R = 0.8322)$  ..... 식(4.22)

#### 4. 결 언

물결합재비에 따른 고강도콘크리트의 강도추정식 제안에 관한 연구를 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

가. 반발도법에 의한 회귀분석 결과 다음과 같은 강도추정식을 제안하였다.

$$F_c = 14.29 R_n - 8.057 \quad (R=0.7671)$$

나. 초음파속도법에 의한 회귀분석 결과 다음과 같은 강도추정식을 제안하였다.

$$F_c = 335.27 V_P - 1033.8 \quad (R=0.6269)$$

다. 복합법에 의한 회귀분석 결과 다음과 같은 강도추정식을 제안하였으며 반발도법과 초음파속도법을 단독으로 사용한 경우보다 높은 강도추정정도를 얻을 수 있었다.

$$F_c = 11.61 R_n - 193.44 V_P + 778.64 \quad (R=0.8322)$$



## 제3절 적산온도에 의한 고강도콘크리트의 강도예측을 위한 연구

### 1. 서 언

콘크리트의 강도발현은 시멘트의 수화반응에 의한 것으로 시멘트의 수화반응은 온도와 경과시간에 큰 영향을 받는다. 이러한 온도와 경과시간의 관계를 이용하여 콘크리트의 강도를 예측하기 위한 적산온도 방식에는 강도증진 비율이 온도에 대하여 1차 함수라고 가정하는 Nurse-Saul 함수와 온도가 높아짐에 따라 화학반응속도가 비선형적으로 증가한다는 Arrhenius 식을 응용한 Freiesleben 함수가 있다.

이와 같은 적산온도 방식을 이용하여 보통강도 콘크리트의 강도를 예측하기 위한 연구는 많은 연구자들에 진행되어져 왔으나 고강도콘크리트의 강도예측에 관한 연구는 아직 미비한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 양생온도에 따른 고강도콘크리트의 강도발현 특성과 적산온도와의 관계를 검토한 후 강도예측모델을 이용하여 적산온도에 의한 고강도콘크리트의 강도예측을 비교·평가함으로써 임의 재령에서 보다 정확한 고강도콘크리트의 강도를 예측하기 위한 방안을 제시하고자 한다.

### 2. 실험계획 및 방법

#### 가. 실험계획

본 연구의 실험계획은 표 4.16에서 보는 바와 같이 양생온도를 5, 10, 20, 30℃ 4수준, 물결합재비를 35%, 30% 2수준, 실리카흙 대체율

표 4.16 실험계획

양생 온도 (°C)	W/B (%)	실리카흙 대체율 (%)	목 표 슬럼프 (cm)	측정 항목	분석요인	
					적산온도 함수	강도예측 모델
5 10 20 30	30  35	10	20±3	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 슬럼프 (cm)</li> <li>· 공기량 (%)</li> <li>· 단위용적중량 (kg/ℓ)</li> <li>· 비빔온도 (°C)</li> <li>· 압축강도 (kgf/cm<sup>2</sup>)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Nurse-Saul → Rastrup</li> <li>· Arrhenius → Freiesleben</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Plowman</li> <li>· Logistic</li> <li>· Gompertz</li> </ul>

을 10%로 설정하여 양생온도에 따른 고강도콘크리트의 강도발현 특성과 적산온도와의 관계를 검토한 후 강도예측모델을 이용하여 적산온도에 의한 고강도콘크리트의 강도예측을 비교·평가하고자 하였다.

#### 나. 사용재료

본 실험에 사용된 시멘트는 1종 보통포틀랜드시멘트로 시멘트의 물리적 성질은 표 4.17에서 보는 바와 같으며, 혼화제는 표 4.18에서 보는 바와 같이 비중 2.2의 실리카흙을 사용하였다.

또한 혼화제는 표 4.19에서 보는 바와 같이 나프탈렌계 고성능감수제를 사용하였으며, 골재로서 잔골재는 대평리산 강모래, 굵은골재는 대전산 부순자갈을 사용하였다. 골재의 물리적 성질은 표 4.20, 입도 분포곡선은 그림 4.12에 나타내었다.

#### 다. 콘크리트의 배합

본 실험의 콘크리트배합은 표 4.21에서 보는 바와 같이 물결합재비 30, 35%의 2수준, 실리카흙 대체율을 10%로 설정하였으며 목표슬럼프 20±3cm를 만족시키기 위해서 고성능감수제를 적정 첨가하였다.

표 4.17 시멘트의 물리적 성질

시멘트 종류	비중	분말도 (cm <sup>2</sup> /g)	응결도 (h:m)		안정성	압축강도 (kgf/cm <sup>2</sup> )		
			초결	종결		3일	7일	28일
O.P.C	3.15	3,200	4:50	7:05	양호	200	285	375

표 4.18 혼화재의 물리적·화학적 성질

혼화재 종류	비중	분말도 (cm <sup>2</sup> /g)	주요성분 ( % )							
			H <sub>2</sub> O	SiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
실리카흙	2.2	220,000	0.29	92.36	0.36	0.99	0.63	1.08	0.26	0.73

표 4.19 혼화재의 물리적 성질

유형	상태	색깔	주요 성분	비중
고성능감수제	액체	흑갈색	나프탈렌계	1.20±0.05

표 4.20 골재의 물리적 성질

유형	최대치수 (mm)	비중	조립율	흡수율 (%)	실적율 (%)	단위중량 (kg/l)
잔골재	5	2.55	2.72	1.21	63.01	1.58
굵은골재	19	2.57	6.54	1.96	58	1.50

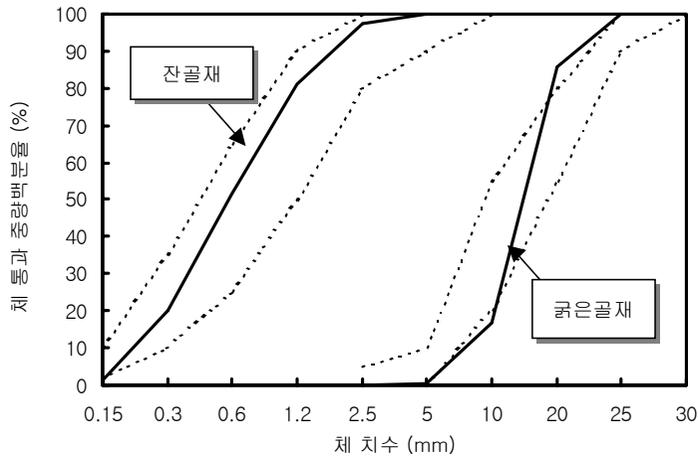


그림 4.12 골재의 입도분포 곡선

표 4.21 콘크리트 배합

W/B (%)	실리카흙 대체율 (%)	목표 슬럼프 (cm)	잔골재율 (%)	단위 수량 (kg/m <sup>3</sup> )	단위중량 (kg/m <sup>3</sup> )			
					시멘트	실리카흙	잔골재	굵은골재
35	10	20±3	40	160	411	46	693	1047
30				140	420	47	710	1073

### 라. 콘크리트의 비빔방법 및 공시체의 제작

콘크리트 비빔은 용량 100ℓ의 강제식 팬타입 믹서를 사용하여 시멘트, 실리카흙, 잔골재를 투입하여 30초간 건비빔 한 후, 물과 고성능감수제를 투입하여 각각 60초씩 비빔을 실시하고, 굵은골재를 투입하여 60초간 비빔을 행한 후, 목표 슬럼프 20±3cm의 범위를 만족하는 경우 토출하였다.

공시체의 제작은 ø10×20cm의 원주형 공시체를 KS F 2403의 콘크리트 강도시험용 공시체 제작방법에 준하여 제작하였다.



사진 4.1 온도조절장치



사진 4.2 항온실 내부

### 마. 공시체의 양생방법

공시체는 사진 4.1 및 사진 4.2에서 보는 바와 같은 온도조절이 가능한 고온, 저온 챔버에서 양생온도 5, 10, 20, 30℃에서 측정재령까지 수중양생하였다.

### 바. 압축강도 시험방법

압축강도 시험방법은 제4장 1절 『사용재료에 따른 고강도콘크리트의 강도추정식 제안을 위한 연구』와 동일한 방법으로 실시하였다.

## 3. 실험결과 및 분석

### 가. 굳지않은 콘크리트

표 4.22는 굳지않은 콘크리트의 측정결과를 나타낸 것으로 물결합재비 35%의 경우 30%에 비해 슬럼프가 크게 나타나고 있으며, 비빔온도의 경우 비빔온도가 높을수록 슬럼프가 크게 나타났다. 또한 비빔온도 및 슬럼프가 증가함에 따라 공기량은 상대적으로 감소하는 경향으로 나타났다.

표 4.22 굳지않은 콘크리트의 측정결과

W/B (%)	고성능감수제 첨가율 (%)	비빔온도 (℃)	슬럼프 (cm)	공기량 (%)	단위용적중량 (kg/ℓ)
35	2.3	12.5	16	2.6	2.346
		23	22	1.9	2.357
		27	23	1.7	2.357
30	3.0	12.5	12	2.9	2.364
		23	20	2.4	2.367
		27	19	2.2	2.363

## 나. 경화콘크리트

### (1) 재령환산계수 검토

본 연구에서는 적산온도 함수와 고강도콘크리트의 압축강도와의 상관성을 검토하기 위해 다음과 같은 Nurse-Saul 함수를 응용한 Rastrup의 재령환산계수식 (4.23)과 Arrhenius식을 응용한 Freiesleben의 재령환산계수식 (4.24)를 이용하였다.

· Rastrup의 재령환산계수식

$$\alpha = \frac{(T - T_0)}{(T_r - T_0)} \quad \dots\dots\dots \text{식 (4.23)}$$

여기서,  $\alpha$ : 재령환산계수  
 T: 양생온도 (°C)  
 T<sub>0</sub>: 기준온도 (°C)  
 T<sub>r</sub>: 기저온도 (20°C) 이다.

· Freiesleben의 재령환산계수식

$$\alpha = e^{\left[ \frac{E_a}{R} \cdot \left( \frac{1}{T_s} - \frac{1}{T_a} \right) \right]} \quad \dots\dots\dots \text{식 (4.24)}$$

여기서,  $\alpha$ : 재령환산계수  
 T<sub>a</sub>: 양생온도 (°K)  
 T<sub>s</sub>: 293 (273+20 ∴ K)  
 E<sub>a</sub>: 활성화에너지(KJ/mol)  
 R: 기체 상수(8.314 J/mol)

또한 활성화에너지 값은 식 (4.25)를 이용하여 구하였다.

$$\begin{aligned} T \geq 20^\circ\text{C} : E &= 33.5 \text{ KJ/mol} \\ T < 20^\circ\text{C} : E &= 33.5 + 1.47(20 - T) \text{ KJ/mol} \quad \dots\dots\dots \text{식 (4.25)} \end{aligned}$$

표 4.23 및 그림 4.13은 Nurse-Saul 함수를 응용한 Rastrup 식 및 Arrhenius 식을 응용한 Freiesleben 식에 의한 재령환산계수를 나타낸 것으로 Nurse-Saul 함수를 응용한 Rastrup 식에 의한 재령환산계수는 온도에 따라 직선적인 형태로 나타났으며, Arrhenius 식을 응용

한 Freiesleben 식에 의한 재령환산계수는 온도에 따라 지수함수 형태를 보이고 있어 20℃ 이상의 온도에서는 온도가 높아짐에 따라 재령환산 계수가 급격한 증가를 나타내고 있다.

또한 Rastrup 식과 Freiesleben 식에 의한 재령환산계수를 비교해 보면 20℃ 이하의 온도에서는 Rastrup 식에 의한 재령환산계수가 Freiesleben 식에 의한 재령환산계수 보다 크게 나타났으며 20℃ 이상에서는 작게 나타나고 있다.

표 4.23 양생온도별 재령환산계수

양생온도 (°C)	$\frac{(T - T_0)}{(T_r - T_0)}$	$\exp\left[\frac{Ea}{R} \left(\frac{1}{T_s} - \frac{1}{T_a}\right)\right]$
5	0.5000	0.292
10	0.667	0.497
20	1.000	1.000
30	1.333	1.574

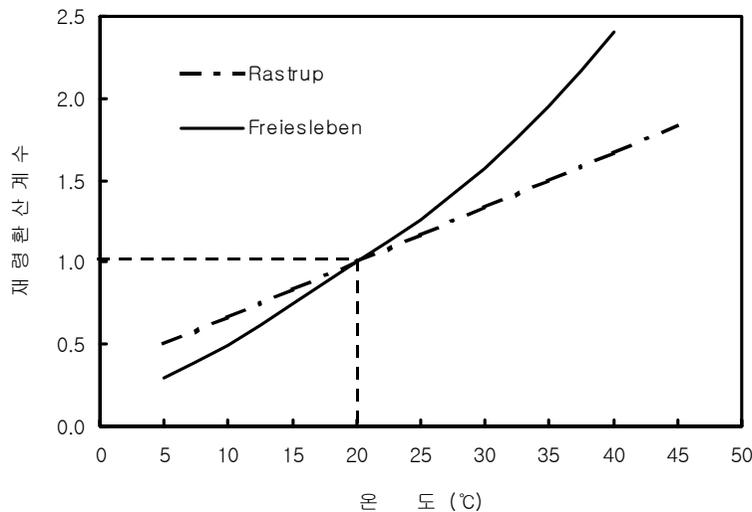


그림 4.13 온도에 따른 재령환산계수

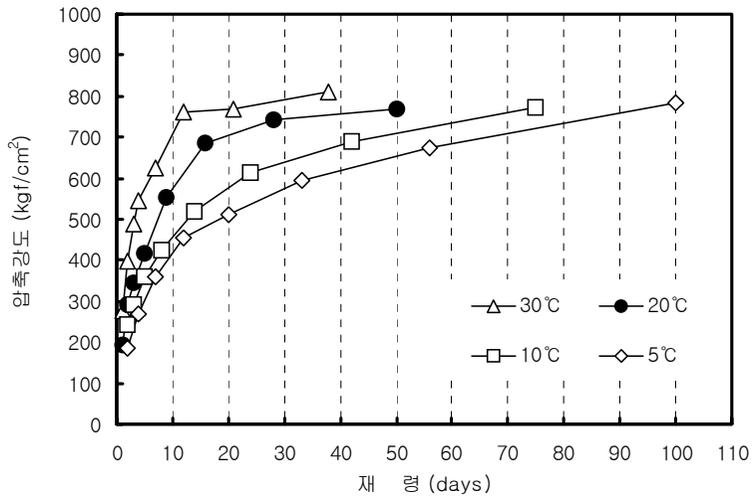
## (2) 압축강도 발현 성상

표 4.24는 양생온도에 따른 등가재령과 압축강도 측정결과를 나타낸 것이며 그림 4.14는 재령에 따른 양생온도별 압축강도를 나타낸 것으

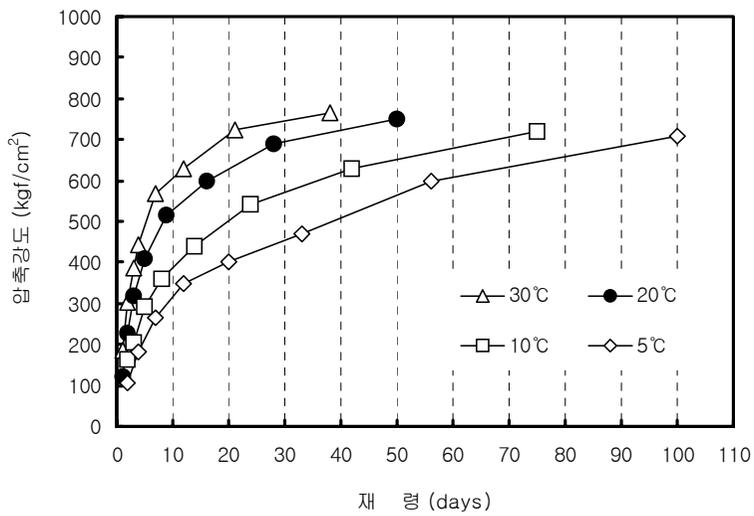
로 동일재령에서 물결합재비 30%가 35%의 경우보다 압축강도가 높게 나타나고 있다. 또한 양생온도가 높을수록 초기재령에서 높은강도 수준을 보여주고 있으며 재령에 따른 강도는 양생온도에 따라 큰 차이를 보이고 있음을 알 수 있다.

표 4.24 등가재령과 압축강도 측정결과

양생온도 5℃					양생온도 10℃				
재령 (일)	등가재령		압축강도 (kgf/cm <sup>2</sup> )		재령 (일)	등가재령		압축강도 (kgf/cm <sup>2</sup> )	
	Rastrup	Freiesleben	W/B 30%	W/B 35%		Rastrup	Freiesleben	W/B 30%	W/B 35%
2	1.00	0.58	185	106	2	1.33	0.99	242	161
4	2.00	1.17	270	182	3	2.00	1.49	291	204
7	3.50	2.05	361	267	5	3.33	2.48	359	292
12	6.00	3.51	454	348	8	5.33	3.98	423	360
20	10.00	5.84	511	400	14	9.33	6.96	520	440
33	16.50	9.64	596	468	24	16.00	11.93	615	540
56	28.00	16.36	675	600	42	28.00	20.87	690	630
100	50.00	29.22	785	710	75	50.00	37.27	771	720
양생온도 20℃					양생온도 30℃				
재령 (일)	등가재령		압축강도 (kgf/cm <sup>2</sup> )		재령 (일)	등가재령		압축강도 (kgf/cm <sup>2</sup> )	
	Rastrup	Freiesleben	W/B 30%	W/B 35%		Rastrup	Freiesleben	W/B 30%	W/B 35%
1	1.00	1.00	194	123	1	1.33	1.57	276	186
2	2.00	2.00	291	228	2	2.67	3.15	398	303
3	3.00	3.00	343	317	3	4.00	4.72	489	387
5	5.00	5.00	418	408	4	5.33	6.30	545	442
9	9.00	9.00	554	517	7	9.33	11.02	625	570
16	16.00	16.00	684	600	12	16.00	18.89	760	629
28	28.00	28.00	742	691	21	28.00	33.06	769	725
50	50.00	50.00	770	749	38	50.00	59.83	811	767



a) 물결합재비 30%



b) 물결합재비 35%

그림 4.14 재령에 따른 압축강도의 변화

### (3) 적산온도-압축강도 관계

그림 4.15는 각각의 재령환산계수를 이용한 양생온도별 적산온도와 압축강도의 관계를 나타낸 것으로 물결합재비에 관계없이 Rastrup 함수의 경우 재령이 증가할수록 양생온도에 따른 강도발현 특성을 정확하게 설명하고 있지 못하나 Freiesleben 함수를 이용한 등가재령의 경우 Rastrup 함수에 비해 강도발현에 관한 온도의 영향을 보다 정확하게 설명하고 있는 것으로 나타나 Freiesleben 함수의 활성화에너지 값을 이용함으로써 임의 재령에서 보다 정확한 고강도콘크리트 강도를 예측할 수 있을 것으로 사료된다.

따라서 본 실험에서는 Freiesleben 함수를 이용하여 고강도콘크리트의 강도를 예측하는 것이 타당할 것으로 판단된다.

### (4) 강도예측

본 실험에서의 강도예측 모델식은 가장 일반적으로 사용되고 있는 Plowman의 예측식과 이를 개선한 Logistic, Gompertz 식을 이용하였다.

#### · Plowman curve

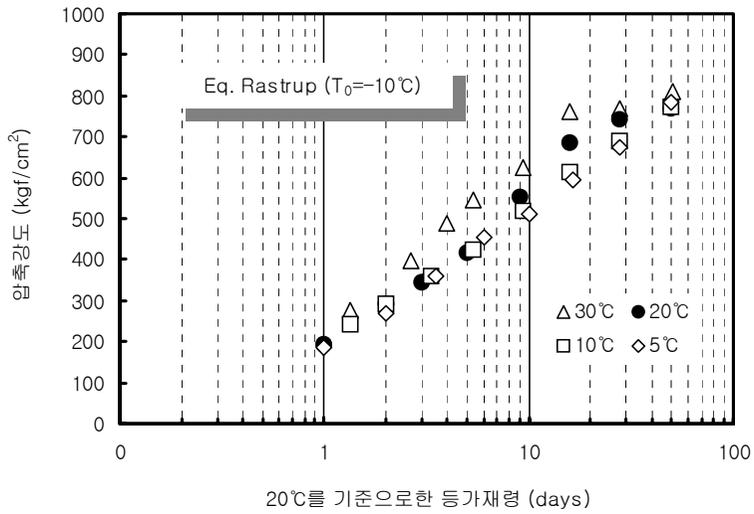
$$S = a + b \ln(M)$$

여기서, S : 콘크리트 강도  
M : 콘크리트의 적산온도  
a, b : 회귀계수

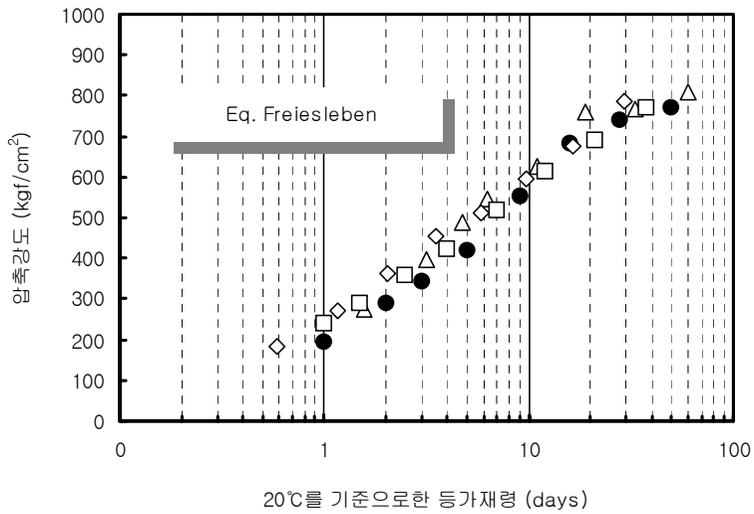
#### · Logistic curve

$$F_c = \frac{F_\infty}{1 + \exp(-K \log M + m)}$$

여기서,  $F_\infty$  : 종국강도  
M : 적산온도  
K, m : 회귀계수

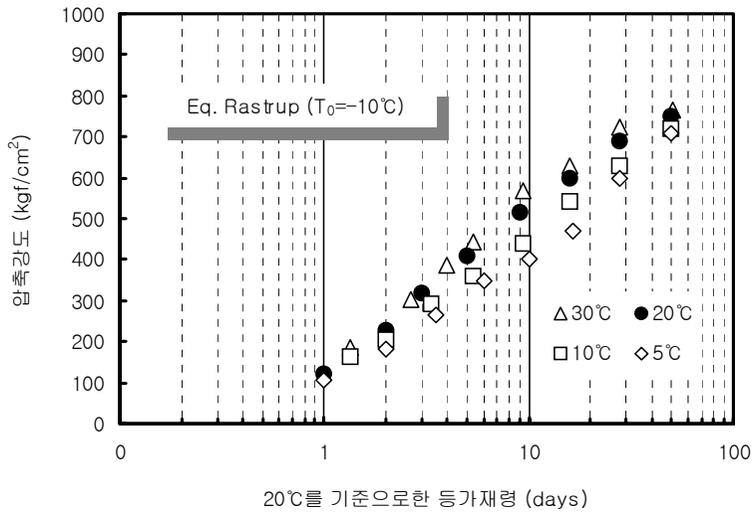


a) Rastrup 함수

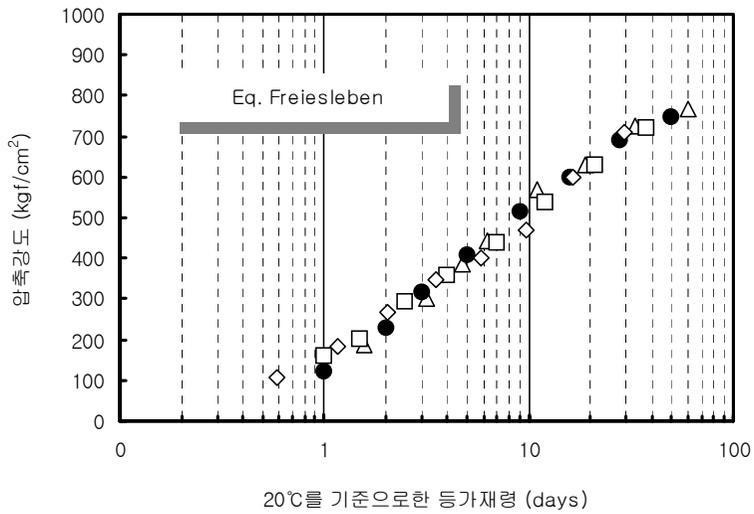


b) Freiesleben 함수

그림 4.15(a) 적산온도와 압축강도의 관계 (W/B 30%)



a) Rastrup 함수



b) Freiesleben 함수

그림 4.15(b) 적산온도와 압축강도의 관계 (W/B 35%)

· Gompertz curve

$$F_c = F_{\infty} \exp(-a(1/M)^b)$$

여기서,  $F_{\infty}$  : 종국강도  
 $M$  : 적산온도  
 $a, b$  : 회귀계수

이를 이용한 각각의 물결합재비별 강도예측 모델식의 계수도출 결과를 표 4.25 및 4.26, 4.27에 제시하였다. 또한 강도예측 모델식에 의한 예측강도와 실측강도와의 관계를 그림 4.16에 나타내었다.

표 4.25 Plowman식의 계수도출 결과

W/B (%)	S = a + b ln(M)		R <sup>2</sup>
	a	b	
30	153.23	230.10	0.9734
35	159.66	144.89	0.9894

표 4.26 Logistic식의 계수도출 결과

W/B (%)	$F_c = \frac{F_{\infty}}{1 + \exp(-K \log M + m)}$			R <sup>2</sup>
	F <sub>∞</sub>	K	m	
30	949.70	0.7401	1.1739	0.9816
35	904.05	0.8170	1.5741	0.9932

표 4.27 Gompertz식의 계수도출 결과

W/B (%)	$F_c = F_{\infty} \exp(-a(1/M)^b)$			R <sup>2</sup>
	F <sub>∞</sub>	a	b	
30	1165.05	1.6587	0.3907	0.9827
35	1152.65	2.0546	0.4094	0.9933

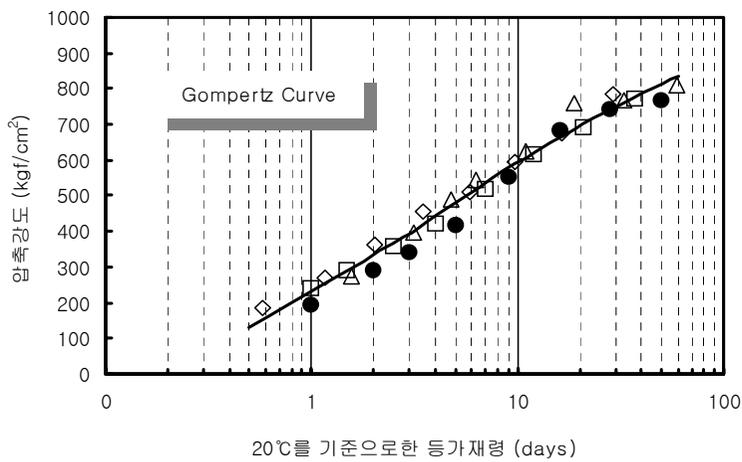
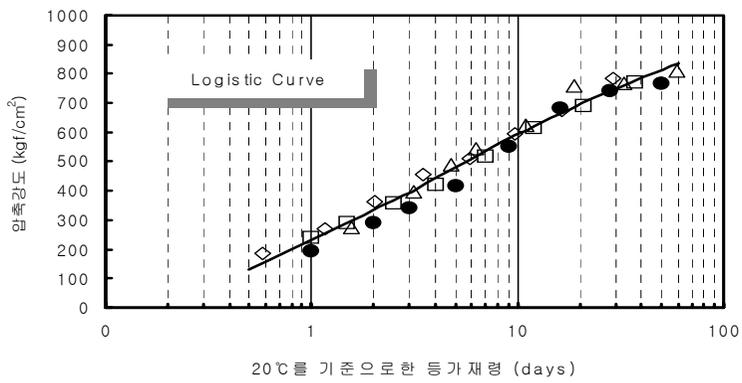
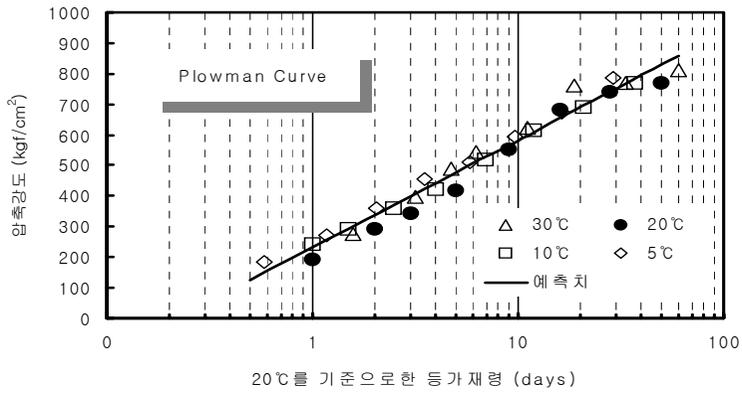


그림 4.16(a) 강도예측모델에 의한 강도예측결과 (W/B 30%)

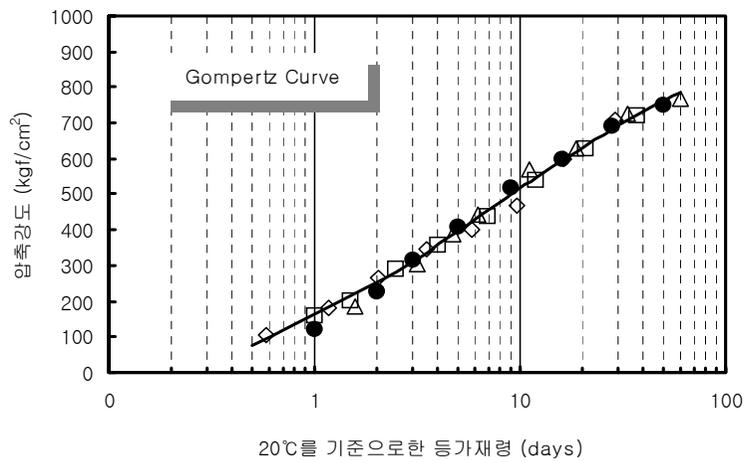
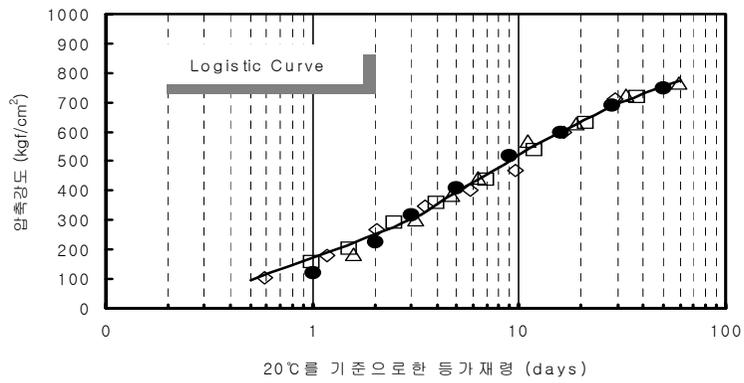
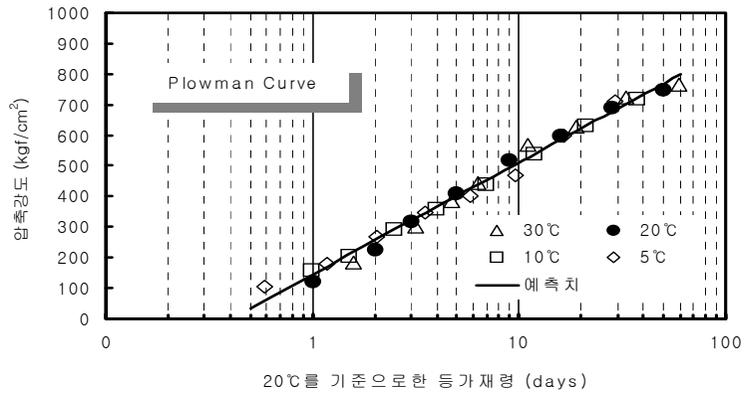


그림 4.16(b) 강도예측모델에 의한 강도예측결과 (W/B 35%)

본 실험에서의 Freiesleben 함수에 의한 적산온도 방식에 의한 임의 재령에서의 강도예측은 모든 모델식에서 높은 결정계수값을 보여주고 있어 이를 이용한 강도예측이 가능할 것으로 사료된다.

특히 Gompertz Curve의 경우 가장 높은 결정계수 값을 보여주고 있어 고강도콘크리트에서는 Gompertz Curve를 이용한 강도예측이 합리적일 것으로 판단된다.

#### 4. 결 언

적산온도 방식에 의한 고강도콘크리트의 강도예측을 위한 연구결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

가. 적산온도와 고강도콘크리트의 관계는 본 연구에서 사용된 두 함수 모두 콘크리트 강도에 대한 온도의 영향을 잘 설명하고 있는 것으로 나타났으나 보다 정확한 강도예측을 위해서는 Freiesleben 함수를 사용하는 것이 타당할 것으로 판단된다.

나. 강도예측모델에 의한 고강도콘크리트의 강도예측 결과 모든 모델 식에서 높은 결정계수 값을 보여주고 있으며, 특히 Gompertz Curve의 경우 가장 높은 결정계수 값을 보여주고 있어 고강도 콘크리트에서는 Gompertz Curve를 이용한 강도예측이 합리적일 것으로 판단된다.



## 제4절 고강도콘크리트 강도추정식의 현장적용성 평가에 관한 연구

### 1. 서 언

최근 고강도콘크리트의 실제 구조물에 대한 적용이 증가함에 따라 선진외국에서는 고강도콘크리트 구조물의 강도 및 내부탐사를 위하여 다양한 비파괴시험을 이용한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 이러한 비파괴시험에 대하여 각국마다 기준 및 지침을 제정시켜 놓고 있다.

그러나 국내에서는 체계화된 연구 결과가 없는 상태에서 외국에서 제안된 강도추정 기법을 그대로 사용하고 있으나, 콘크리트에 사용되는 시멘트, 골재, 혼화재료 등 사용재료 및 콘크리트의 배합설계 기법 등 국내와 상이한 점이 크기 때문에 최근 들어 급증하고 있는 고강도콘크리트에 대한 비파괴 추정식의 제시가 시급히 요구되어지고 있는 실정이다. 또한 반발도 시험법의 경우 사용대상에 대한 슈미트 해머의 종류에 따른 적용성의 검토 없이 무분별하게 사용되고 있어 슈미트 해머의 종류에 따른 연구가 요구되고 있다.

따라서 본 연구에서는 물결합재비에 따른 고강도콘크리트 모의부재를 제작하고 본 연구에서 제안한 강도추정식을 적용하여 고강도콘크리트 강도추정식의 현장적용성과 M형 슈미트 해머의 반발도 데이터를 강도추정식에 적용하여 슈미트 해머의 종류에 따른 고강도콘크리트 강도추정식의 현장적용성을 검토하였다.

### 2. 실험계획 및 방법

#### 가. 실험계획

본 실험의 실험계획은 표 4.28에서 보는 바와 같이 물결합재비에

따른 고강도콘크리트의 강도추정식에 의한 현장적용성을 검토하기 위하여 단위수량을 175kg/m<sup>3</sup>로 고정한 후 물결합재비를 30, 35, 40% 3수준, 혼화재료로서 플라이애시의 대체율을 15%로 설정하였다.

측정항목으로서는 강도추정식의 현장적용성 검토를 위하여 재령 7, 28, 56, 91일에 코아공시체 및 표준양생공시체의 압축강도, 초음파속도 및 모의부재에 대한 N형 슈미트 해머를 사용한 반발도를 측정하였으며, 슈미트 해머의 종류에 따른 강도추정식의 적용성을 비교·검토하기 위하여 M형 슈미트 해머를 사용한 반발도를 측정하였다.

### 나. 사용재료

본 실험에 사용된 시멘트는 1종 보통포틀랜드시멘트로서 물리적 성질은 표 4.29와 같으며 혼화재는 표 4.30에서 보는 바와 같이 비중 2.13인 보령산 플라이애시를 사용하였다.

혼화재는 표 4.31에서 보는 바와 같이 나프탈렌계 고성능감수제를 사용하였으며, 잔골재는 인천산 제염사로 물리적 성질은 표 4.32와 같다. 또한 굵은골재는 최대치수20mm의 퇴촌산 부순자갈로 물리적 성질은 표 4.33과 같다.

표 4.28 실험계획

물결합재비 (%)	플라이애시 대체율 (%)	단 위 결 합 재 량 (kg/m <sup>3</sup> )	잔 골 재 율 (%)	단 위 수 량 (kg/m <sup>3</sup> )	측 정 항 목
30	15	583	43	175	· 압축강도 (kgf/cm <sup>2</sup> ) (재령 7, 28, 56, 70, 91일) · 초음파속도 (km/sec) (재령 7, 28, 56, 70, 91일) · 반발도 (R <sub>n</sub> ) (재령 7, 28, 56, 70, 91일)
35		500			
40		438			

### 다. 콘크리트 배합

물결합재비에 따른 고강도콘크리트 강도추정식의 현장적용성 평가를 위한 콘크리트 배합은 표 4.34와 같이 물결합재비를 30, 35, 40% 수준으로 설정하였으며 플라이애시의 대체율을 15% 수준으로 설정하였다.

표 4.29 시멘트의 물리적 성질

시멘트 종류	비중	분말도 (cm <sup>2</sup> /g)	응결도 (h:m)		강열 감량 (%)	안 정 성	압축강도 (kgf/cm <sup>2</sup> )		
			초결	종결			3일	7일	28일
1종 보통포틀랜드시멘트	3.15	3,630	3:35	5:35	1.5	양호	227	298	388

표 4.30 혼화재의 물리적 성질

혼화재 종 류	비중	분말도 (cm <sup>2</sup> /g)	강열감량 (%)	습분 (%)	단위수량비 (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	압축강도비 (28일) (%)
플라이애시	2.13	2,976	4.0	0.1	101	53.2	93.1

표 4.31 혼화제의 물리적 성질

혼화제 종 류	유 형	색 상	주성분	고형분 (%)	독 성	pH	점도 (cP)	비중
나프탈렌계	액 상	암갈색	나프탈렌계	32.9	없 음	6.28	29.7	1.168

표 4.32 잔골재의 물리적 성질

최대치수 (mm)	조립율 (F.M.)	비 중	흡수율 (%)	실적율 (%)	단위용적중량 (kg/ℓ)	비 고
5	3.04	2.56	0.64	67.45	1.73	인천산 제염사

표 4.33 굵은골재의 물리적 성질

최대치수 (mm)	조립율 (F.M.)	비 중	흡수율 (%)	실적율 (%)	단위용적중량 (kg/ℓ)	비 고
20	6.64	2.60	1.44	59.5	1.43	퇴촌산 부순 자갈

표 4.34 콘크리트 배합

W/B (%)	플라이애시 대체율 (%)	단 위 결합재량 (kg/m <sup>3</sup> )	잔골재율 (%)	단위 수량 (kg/m <sup>3</sup> )	단위중량 (kg/m <sup>3</sup> )			
					시멘트	플라이 애 시	잔골재	굵은 골재
30	15	583	43	175	496	88	657	901
35		500		175	425	75	688	944
40		438		175	372	66	711	976

#### 라. 비빔방법

콘크리트 비빔은 용량 100ℓ의 강제식 팬타입 믹서를 사용하여 플라이애시, 시멘트, 잔골재를 투입하고 30초간 건비빔 한 후, 물과 고성능AE감수제를 투입하여 각각 60초, 굵은골재를 투입하여 60초간 비빔을 행한 후, 목표 슬럼프-플로우 55±5cm의 범위를 만족하는 경우 토출하였다.

#### 마. 시험체 제작

표준양생공시체 제작은 압축강도 및 초음파속도를 측정하기 위하여 ø10×20cm의 원주형 공시체를 KS F 2403의 콘크리트의 강도시험용 공시체 제작방법에 준하여 제작하였다. 또한 약 24시간 후 몰드를 탈형하여 공시체는 20±3℃의 표준양생을 실시하였으며 측정시 상면을 콘크리트용 연마기를 사용하여 평활하게 마감하였다.

고강도콘크리트의 강도추정식에 의한 현장적용성 검토를 위한 모의

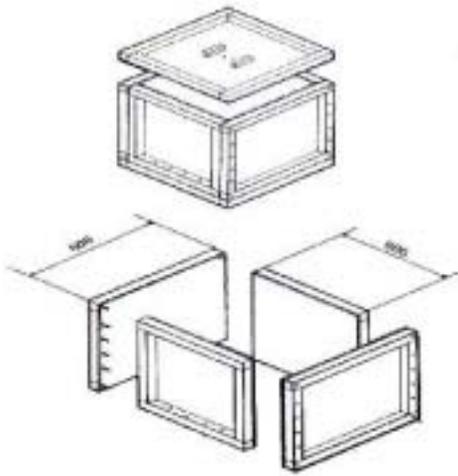


그림 4.17 모의부재 제작용 거푸집



사진 4.3 모의부재 제작 장면



사진 4.4 코아채취 장면



사진 4.5 M형 반발도 측정장면

부재 제작은 그림 4.17 및 사진 4.3과 같은 용량 64ℓ (40×40×40cm)의 거푸집을 제작하여 비빔직후에 콘크리트를 타설하고 재령 3일 후 거푸집을 탈형하였으며, 압축강도 및 초음파속도 측정을 위하여 사진 4.4와 같이 각 재령별로  $\phi 10 \times 20\text{cm}$ 의 코아공시체를 채취하였다.

## 바. 시험방법

### (1) 압축강도 시험방법



(a) N형 슈미트 해머



(b) M형 슈미트 해머

사진 4.6 슈미트 해머

압축강도 시험은 4장 1절에 나타난 압축강도 시험방법과 동일하게 실시하였다.

### (2) 반발도 시험방법

모의부재의 표면에 사진 4.5와 같이 3cm 간격으로 그리드를 표시한 후 사진 4.6과 같은 N형 및 M형 슈미트 해머를 사용하여 타격각도 0°로 25회 타격하여 그 평균값으로 반발도를 산정하였다. 단 평균값과 ±20% 이상의 오차가 있는 측정값은 제외하였으며 이에 대한 값을 보정하여 반발도의 평균값을 산정하였다.

### (3) 초음파속도 시험방법

초음파속도 시험은 4장 1절에 나타난 초음파속도 시험방법과 동일하게 실시하였다.

## 3. 실험결과 분석 및 검토

물결합재비에 따른 고강도콘크리트의 압축강도 및 반발도, 초음파속도 측정결과를 표 4.35에 나타내었다.

표 4.35 물결합재비별 고강도콘크리트의 경화성상 측정결과

측정 항목 및 재령		배합요인		W/B 30%		W/B 35%		W/B 40%	
		표준	코아	표준	코아	표준	코아		
압축강도 (kgf/m <sup>2</sup> )	7일	492	533	450	469	371	420		
	14일	602	642	560	588	480	503		
	28일	686	695	642	623	550	535		
	42일	740	78	665	610	566	548		
	56일	763	721	75	628	596	554		
	70일	790	728	727	642	620	598		
	91일	824	740	760	692	672	607		
반발도 <sup>1)</sup> (R <sub>n</sub> )	7일	N형	39.3		36.1		34.9		
		M형	40.4		34.7		34.2		
	14일	N형	43.2		39.9		35.9		
		M형	42.6		38.5		36.4		
	28일	N형	43.6		40.3		37.3		
		M형	44.6		40.8		36.7		
	42일	N형	44.5		40.6		39.4		
		M형	44.0		39.1		38.5		
	56일	N형	46.3		42.5		40.0		
		M형	45.5		42.1		39.5		
	70일	N형	47.2		42.7		38.7		
		M형	45.4		43.4		39.8		
	91일	N형	48.5		44.6		39.4		
		M형	46.3		45.2		41.2		
초음파속도 (km/sec)	7일	4.80	4.78	4.79	4.74	4.76	4.73		
	14일	4.86	4.80	4.82	4.78	4.82	4.77		
	28일	4.87	4.84	4.83	4.80	4.84	4.78		
	42일	4.86	4.84	4.87	4.79	4.85	4.80		
	56일	4.88	4.87	4.87	4.84	4.83	4.81		
	70일	4.91	4.87	4.88	4.87	4.84	4.84		
	91일	4.92	4.87	4.91	4.90	4.85	4.83		

주 1) 반발도는 모의부재에서만 측정

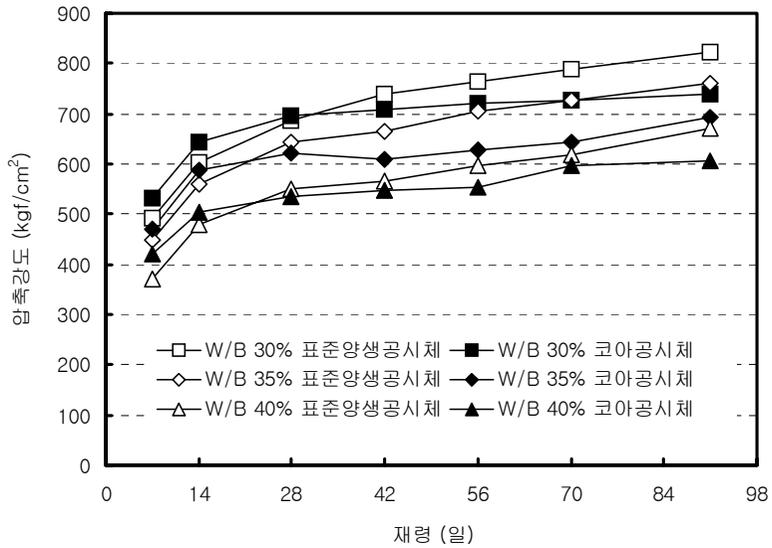


그림 4.18 물결합재비별 재령에 따른 압축강도의 변화

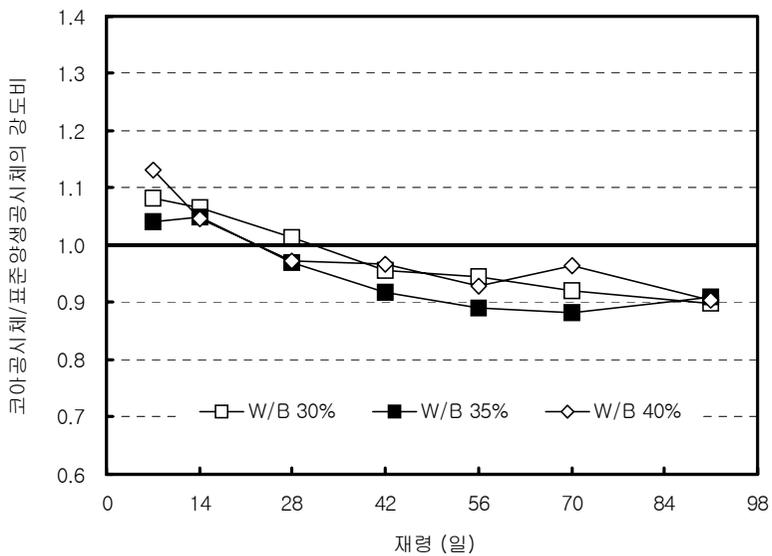


그림 4.19 물결합재비별 재령에 따른 코아공시체/표준양생공시체 압축강도비

### 가. 압축강도 발현성상 검토 및 분석

그림 4.18은 물결합재비별 재령에 따른 표준양생공시체와 코아공시체의 압축강도 발현성상을 나타낸 것으로서 재령 28일 압축강도는 물결합재비 30%의 경우 표준양생공시체는  $686\text{kgf/cm}^2$ , 코아공시체는  $695\text{kgf/cm}^2$ 의 수준으로 나타났으며, 물결합재비 35%의 경우 표준양생공시체는  $642\text{kgf/cm}^2$ , 코아공시체는  $623\text{kgf/cm}^2$ 의 수준으로 나타났다. 또한 물결합재비 40%의 경우 표준양생공시체는  $550\text{kgf/cm}^2$ , 코아공시체는  $535\text{kgf/cm}^2$ 의 수준으로 나타나 물결합재비에 따라 표준양생공시체와 코아공시체간의 압축강도 차이는 다소 있지만 재령 28일 이전에서는 유사한 수준의 압축강도를 발현하고 있는 것으로 나타났다. 그러나 재령이 경과함에 따라 표준양생공시체는 지속적인 강도증진 경향이 나타나고 있는 반면, 코아공시체의 경우 표준양생공시체에 비해 상대적으로 낮은 강도증진 경향을 나타내고 있다.

그림 4.19는 물결합재비별 재령에 따른 코아공시체/표준양생공시체의 압축강도비를 나타낸 것으로서 재령 14일 이전에는 물결합재비에 관계없이 코아공시체의 압축강도가 높게 나타나고 있지만, 재령이 경과할수록 강도발현성상은 대부분 표준양생공시체의 경우가 코아공시체보다 높게 나타나고 있다. 이는 코아공시체의 경우 초기에 수화반응이 활발히 이루어져서 초기재령에서 강도가 높게 나타나지만, 재령이 증가할수록 표준양생공시체의 경우 지속적인 수화의 진행과 플라이애시 대체에 따른 포졸란반응의 활성화에 의해 코아공시체보다 높은 강도를 발현하는 것으로 사료된다.

### 나. N형, M형 슈미트 해머를 이용한 반발도 검토 및 분석

그림 4.20은 물결합재비별 재령에 따른 N형, M형 슈미트 해머를 사용한 반발도의 변화를 나타낸 것으로서 N형, M형 모두 재령이 증

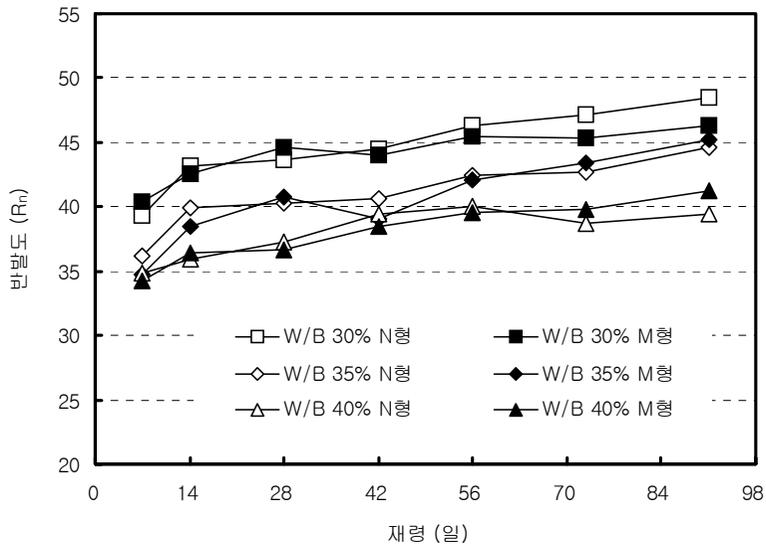


그림 4.20 물결합재비별 재령에 따른 반발도의 변화

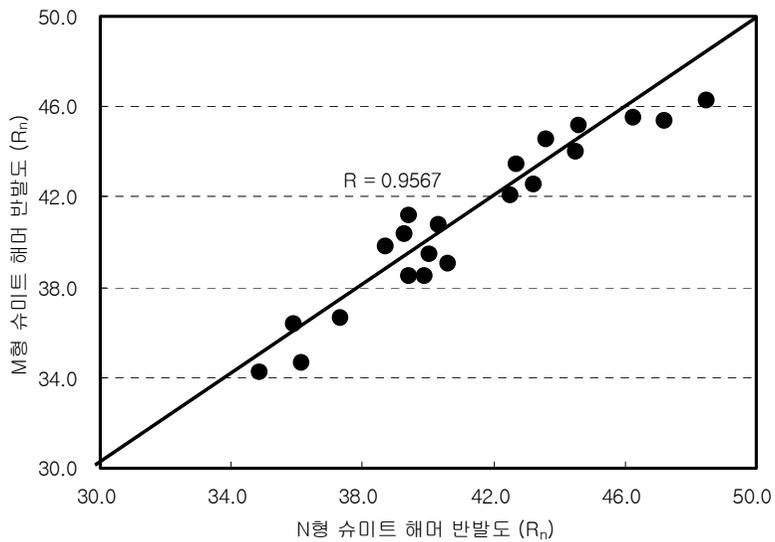


그림 4.21 N형 슈미트 해머와 M형 슈미트 해머 반발도의 관계

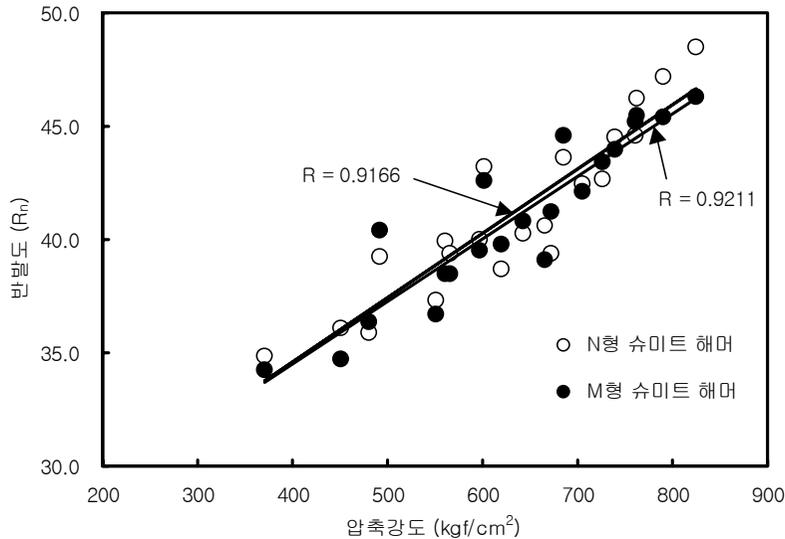


그림 4.22 N형 및 M형 슈미트 해머 반발도와 압축강도의 관계

가함에 따라 반발도가 다소 증가하는 경향을 나타내고 있으며, 동일 재령에 있어서 물시멘트비가 감소함에 따라 N형, M형 모두 반발도가 높아지는 것으로 나타났다. 또한 그림 4.21은 N형 슈미트 해머와 M형 슈미트 해머의 관계를 나타낸 것으로서 그림에서 보는 바와 같이 M형이 N형에 비해 상대적으로 다소 낮은 반발도를 보이고 있지만 상관계수 R은 0.9567로 비교적 높은 상관관계를 나타내고 있어 본 연구의 범위에서는 고강도콘크리트의 압축강도를 추정함에 있어서 N형 및 M형 슈미트 해머에 따른 유의할 만한 차이는 없는 것으로 나타났다.

그림 4.22는 N형 및 M형 슈미트 해머 반발도와 압축강도의 관계를 나타낸 것으로서 압축강도가 증가함에 따라 N형 및 M형 모두 반발도가 증가하는 경향을 나타내고 있으며, 상관계수 R은 N형의 경우 0.9166, M형의 경우 0.9211로 나타나 N형 및 M형 모두 압축강도와 비교적 높은 상관관계를 나타내고 있다. 따라서 본 연구의 범위에서

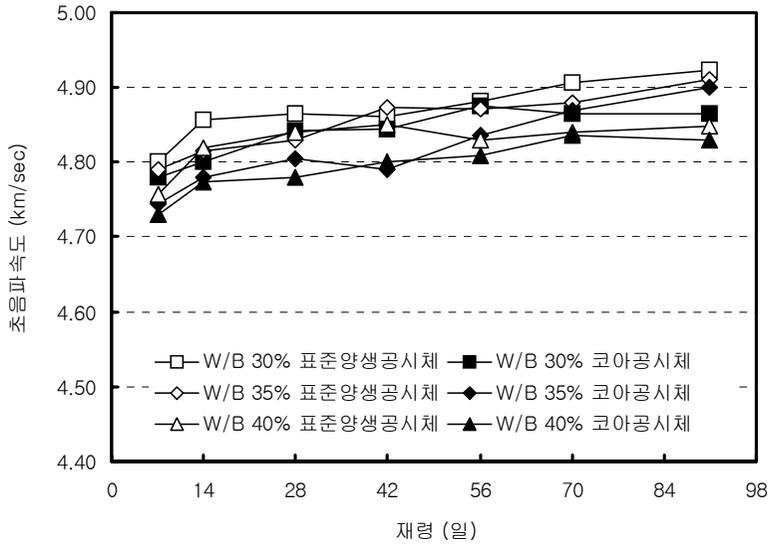


그림 4.23 물결합재비별 재령에 따른 초음파속도의 변화

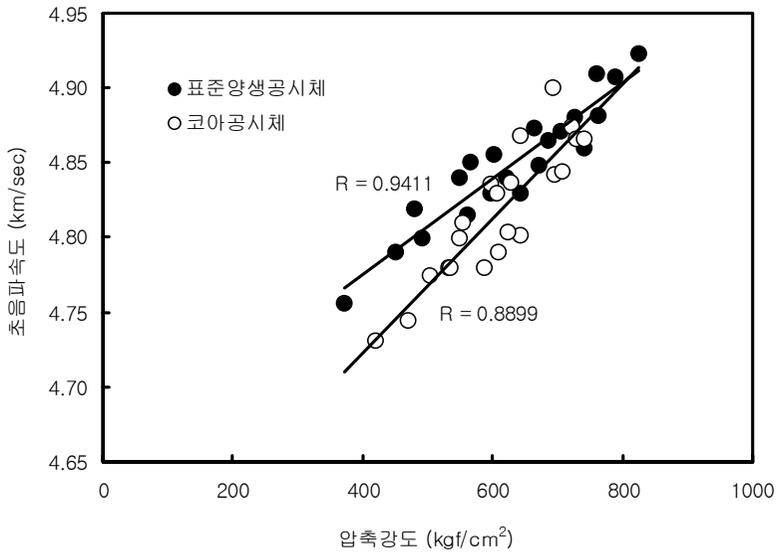


그림 4.24 초음파속도와 압축강도의 관계

는 고강도콘크리트의 압축강도 추정에 있어서 N형 및 M형 슈미트 해머 모두 압축강도 추정에 유용할 것으로 사료된다.

#### 다. 초음파속도의 검토 및 분석

그림 4.23은 물결합재비별 재령에 따른 표준양생공시체와 코아공시체의 초음파속도를 나타낸 것으로서 대부분의 경우 재령이 증가함에 따라 초음파속도는 다소 증가하는 경향을 나타내고 있다. 또한 코아공시체의 경우 초음파속도는 4.73~4.90km/sec 수준, 표준양생공시체의 경우 초음파속도가 4.76~4.92km/sec 수준으로 나타났으며, 동일 물결합재비에 있어서 코아공시체의 초음파속도가 표준양생공시체의 초음파속도에 비해 다소 낮게 나타나고 있다.

그림 4.24는 초음파속도와 압축강도의 관계를 나타낸 것으로서 압축강도가 증가함에 따라 초음파속도도 표준양생공시체 및 코아공시체 모두 증가하는 경향을 나타내고 있으며, 상관계수 R은 표준양생공시체의 경우 0.9411, 코아공시체의 경우 0.8899로 나타나 표준양생공시체가 코아공시체보다 비교적 상대적으로 높은 상관관계를 나타내고 있다.

#### 라. 반발도법에 의한 강도추정식의 현장적용성 검토

그림 4.25는 물결합재비에 따른 고강도콘크리트의 반발도와 압축강도의 관계를 일본재료학회, 일본건축학회, 동경도건축재료검사소에 의한 강도추정식 및 본 연구에서 제안한 강도추정식과 비교하여 나타낸 것으로서 일본건축학회식, 일본재료학회식 및 동경도건축재료검사소식은 모든 강도 영역에서 실측치의 분포 범위를 크게 하위하고 있어 국내의 현실을 감안하면 적용하기 어려울 것으로 판단된다. 그러나 본 연구에서 제안한 강도추정식의 경우 실측치의 데이터 분포

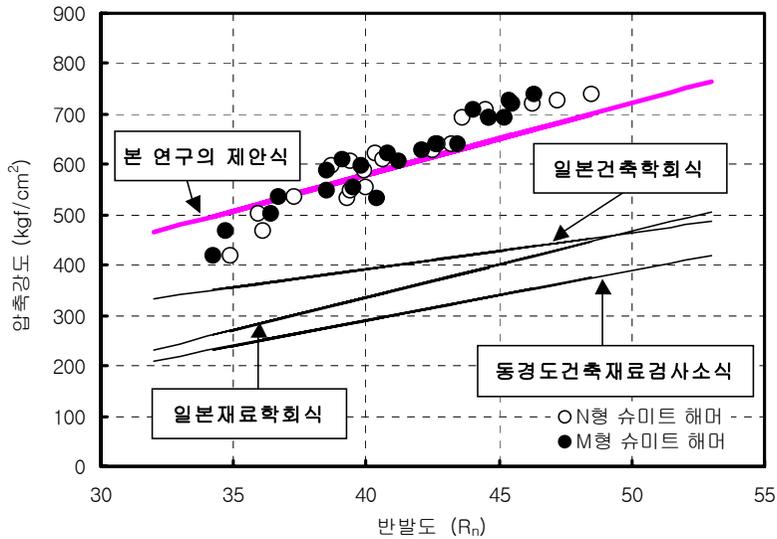


그림 4.25 실측 압축강도와 반발도법 강도추정식과의 비교

범위에 근접한 비교적 높은 상관관계를 나타내고 있어 고강도콘크리트의 압축강도추정에 있어 본 연구에서 제안한 강도추정식을 이용할 경우 유용할 것으로 사료된다.

일본재료학회식 :  $F_c = 13 R_n - 184$  ..... 식(4.29)

동경도 건축재료검사소식 :  $F_c = 10 R_n - 110$  ..... 식(4.30)

일본건축학회식 :  $F_c = 7.3 R_n + 110$  ..... 식(4.31)

본 연구 추정식 :  $F_c = 14.29 R_n - 8.057 (R=0.7671)$  ..... 식(4.32)

**마. 초음파속도법에 의한 강도추정식의 현장적용성 검토**

그림 4.26은 물결합재비에 따른 초음파속도와 압축강도의 관계를 일본건축학회, J. Pyszniak에 의한 강도추정식 및 본 연구에서 제안한 강도추정식과 비교하여 나타낸 것으로 일본건축학회식 및 J. Pyszniak식

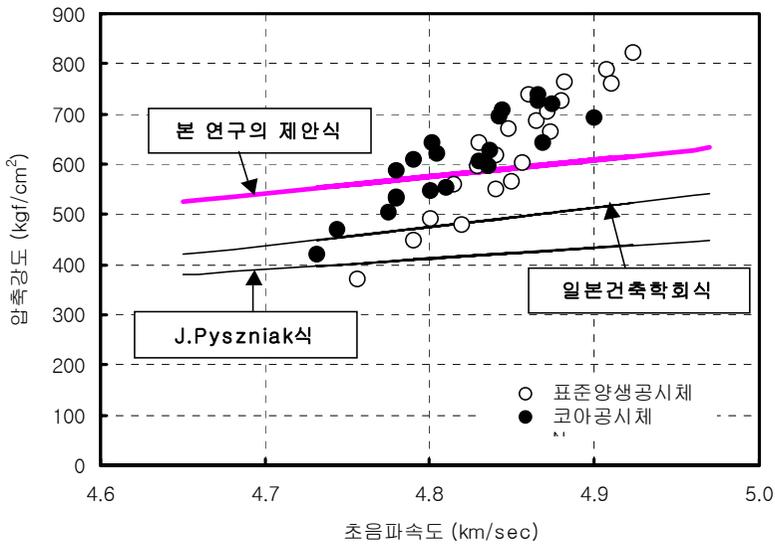


그림 4.26 실측 압축강도와 초음파법 강도추정식과의 비교

은 본 연구의 실측치 분포범위보다 전반적으로 낮게 추정하고 있는 것으로 나타났다. 또한 본 연구에서 제안한 강도추정식의 경우 기존의 강도추정식에 비해 실측치 분포범위와 다소 일치하고는 있으나, 실측치와의 상관성은 비교적 낮게 나타나고 있어 초음파 속도 단독으로 콘크리트의 압축강도를 추정하는 것은 어려울 것으로 판단된다.

일본건축학회식 :  $F_c = 215 V_p - 620$  ..... 식(4.26)

J. Pyszniak 식 :  $F_c = 92.5 V_p^2 - 508 V_p + 782$  ..... 식(4.27)

본 연구 추정식 :  $F_c = 335.27 V_p - 1033.8 (R=0.6269)$  ..... 식(4.28)

**바. 복합법에 의한 강도추정식의 검토**

그림 4.27은 본 연구에서 제안한 강도추정식인 복합법에 의한 추정 압축강도와 실측압축강도의 관계를 나타낸 것으로 일본건축학회식의

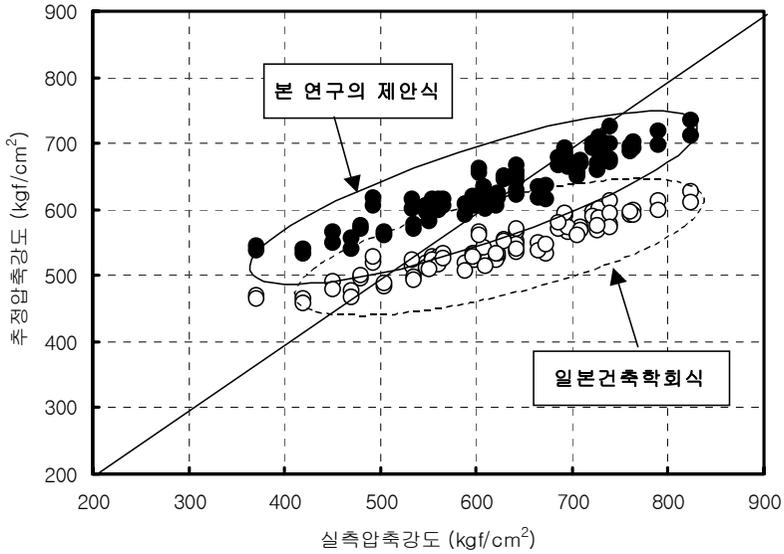


그림 4.27 복합법에 의한 실측압축강도와 추정압축강도와의 관계

경우 압축강도  $500\text{kgf/cm}^2$  이상의 범위에서는 추정압축강도가 실측 압축강도에 비해 낮게 평가되고 있어 고강도화됨에 따라 실측 데이터를 과소평가하는 것으로 나타났다. 한편 본 연구에서 제안한 강도 추정식의 경우 기존의 강도식에 비해 상대적으로 실측압축강도에 근접한 추정압축강도를 나타내고 있지만,  $650\text{kgf/cm}^2$  이하의 범위에서는 추정압축강도가 실측 압축강도에 비해 다소 높게 평가되고 있어 본 연구에서 제안한 복합법에 의한 강도추정식을 현장에 적용함에 있어 향후 보다 많은 데이터 축적을 통해 강도추정의 정밀도를 향상 시켜야 할 것으로 사료된다.

일본건축학회식 :  $F_c = 8.2 R_n - 269 V_P - 1094$  ..... 식(4.33)

본 연구 추정식 :

$F_c = 11.61 R_n - 193.44 V_P + 778.64 (R=0.8322)$  ..... 식(4.34)

## 4. 결 언

고강도콘크리트 강도추정식의 현장적용성 평가에 관한 연구를 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 가. 초음파법에 의한 강도추정의 경우 본 연구에서 제안한 강도추정식이 기존의 강도추정식에 비해 실측치 분포범위와 다소 일치하고는 있으나 실측치와의 상관성이 비교적 낮게 나타나고 있다.
- 나. N형 및 M형 슈미트 해머를 사용한 고강도콘크리트의 압축강도 추정의 경우 M형이 N형에 비해 상대적으로 다소 낮은 반발도를 보이고 있지만 본 연구의 범위에서는 고강도콘크리트의 압축강도를 추정함에 있어서 N형 및 M형 슈미트 해머에 따른 유의할 만한 차이는 없는 것으로 나타났다.
- 다. 반발도법에 의한 강도추정의 경우 본 연구에서 제안한 강도추정식이 기존 강도추정식에 비해 실측치의 데이터 분포 범위에 근접한 비교적 높은 상관관계를 나타내고 있어 고강도콘크리트의 압축강도추정에 있어 본 연구에서 제안한 강도추정식을 이용할 경우 유용할 것으로 사료된다.
- 라. 복합법에 의한 강도추정의 경우 기존 강도추정식은 고강도화됨에 따라 추정압축강도가 실측 압축강도에 비해 낮게 평가되고 있으며, 본 연구에서 제안한 강도추정식의 경우  $650\text{kgf/cm}^2$  이하의 범위에서는 추정압축강도가 다소 실측 압축강도에 비해 높게 평가되고 있는 것으로 나타났다.

## 제5장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

### 제1절 연구개발목표의 달성도

본 연구는 기존문헌자료를 수집, 검토 및 분석하고, 사용재료, 물결합재비 및 양생온도에 따른 다양한 고강도콘크리트를 제작한 후 측정된 압축강도와 반발도, 초음파속도의 데이터 및 충남대학교 건설재료·시공학 연구실에서 1990~2001년 사이에 축적된 다양한 고강도콘크리트의 기존데이터를 총합하여 국내 실정에 맞는 고강도콘크리트의 강도추정식을 제안하고자 하였다.

이를 위하여 수행한 세부적인 연구개발목표에 대한 달성도는 다음과 같다.

- 1) 사용재료에 따른 고강도콘크리트의 강도추정식 제안을 위한 연구의 결과 다음과 같은 강도추정식을 제안하였다.
  - 반발도법 :  $F_c = 12.67R_n + 97.868$  ( $R=0.8563$ )
  - 초음파속도법 :  $F_c = 501.63V_p - 1782$  ( $R=0.8589$ )
  - 복합법 :  $F_c = 11.21R_n + 125.76V_p - 422.91$  ( $R=0.8934$ )
- 2) 물결합재비에 따른 고강도콘크리트의 강도추정식 제안을 위한 연구의 결과 다음과 같은 강도추정식을 제안하였다.
  - 반발도법 :  $F_c = 14.29R_n + 8.057$  ( $R=0.7671$ )
  - 초음파속도법 :  $F_c = 335.27V_p - 1033.8$  ( $R=0.6269$ )
  - 복합법 :  $F_c = 11.61R_n + 193.44V_p - 778.64$  ( $R=0.8322$ )
- 3) 적산온도에 의한 고강도콘크리트의 강도예측을 위한 연구의 결과 적산온도와 고강도콘크리트의 관계에 있어서 보다 정확한 강도예측을 위해서는 Freiesleben 함수 및 Gompertz Curve를 이용한 강도예측이 합리적일 것으로 사료된다.

- 4) 본 연구에서 제안한 강도추정식의 현장적용성 평가 결과 실측 강도와 높은 상관관계를 나타내고 있어 본 연구에서 제안한 고강도콘크리트 강도추정식의 타당성을 검증할 수 있었다.

이상과 같은 연구성과를 이룩하여 국내 실정에 맞는 고강도콘크리트의 강도추정식 제안에 관한 연구개발 목표를 성공적으로 순조롭게 달성하였다.

## 제2절 연구개발에 따른 대외기여도

### 1. 기술적 측면

국내 실정에 맞는 고강도콘크리트의 강도추정식에 의해 고강도콘크리트의 초기강도의 정확한 예측으로 공기단축 및 시공시 안정성을 확보할 수 있을 뿐만 아니라 실 구조물에서의 콘크리트 강도추정의 간편화·신속화 및 콘크리트 성능저하에 대한 분석으로 노후구조물의 정밀진단을 위한 기초자료로 사용할 수 있을 것으로 사료된다.

### 2. 경제·산업적 측면

본 연구에서 제안한 고강도콘크리트의 강도추정식에 의해 구조물의 안전도를 정확히 평가하여 안전성을 지속적으로 유지할 수 있기 때문에 사회간접자본의 손실을 최소화함으로써 경제·산업적 측면의 이익과 효용을 도모할 수 있을 것으로 사료된다.

## 제6장 연구개발결과의 활용계획

최근 국내에서도 콘크리트 구조물의 대형화, 초고층화에 따라 고강도콘크리트의 수요가 증가되고 있는 상황이지만 현재 고강도콘크리트에 관한 연구는 대부분 배합특성 및 역학적 특성 등에만 집중되고 있어 고강도콘크리트를 사용한 콘크리트 구조물의 품질관리, 유지관리 및 안전진단 측면에서 고강도콘크리트의 비파괴시험에 의한 강도추정이 필요한 실정이다.

또한 고강도콘크리트의 강도추정에 있어서 국내의 경우 체계화된 연구가 없는 상황으로 사용재료나 환경이 다른 일본에서 수십년 전에 제안된 강도추정식을 그대로 사용하고 있어 고강도콘크리트를 사용한 콘크리트 구조물의 품질관리, 유지관리 및 안전진단시 강도추정 결과의 신뢰성 등에 문제점이 제기되고 있다.

따라서 본 연구에서는 기존문헌자료를 수집, 검토 및 분석하고, 사용재료, 물결합재비 및 양생온도에 따른 다양한 고강도콘크리트를 제작한 후 측정된 압축강도와 반발도, 초음파속도의 데이터 및 충남대학교 건설재료·시공학 연구실에서 1990~2001년 사이에 축적된 다양한 고강도콘크리트의 기존데이터를 총합하여 국내 실정에 맞는 고강도콘크리트의 강도추정식을 제안하였다.

이러한 본 연구의 결과 국내 실정에 맞는 고강도콘크리트의 강도추정식에 관한 기준 및 지침 제정에 필요한 기초자료로서 활용할 수 있을 것으로 사료되며, 또한 본 연구결과의 확대보급을 통해 국내 관련업계의 기술력 및 경쟁력을 향상시킬 수 있고, 향후 비파괴 검사의 신뢰도 향상을 위한 지속적인 연구에 귀중한 연구자료로 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

## 제7장 종합결론

본 연구의 연구개발목표인 고강도콘크리트의 강도추정식 제안에 관한 연구결과를 정리하면 다음과 같다.

1. 사용재료에 따른 고강도콘크리트의 강도추정식 제안을 위한 연구를 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

가. 반발도법에 의한 회귀분석 결과 다음과 같은 강도추정식을 제안하였다.

$$F_c = 12.671 R_n - 97.868 \quad (R=0.8563)$$

나. 초음파속도법에 의한 회귀분석 결과 다음과 같은 강도추정식을 제안하였다.

$$F_c = 501.63 V_p - 1782 \quad (R=0.8589)$$

다. 복합법에 의한 회귀분석 결과 다음과 같은 강도추정식을 제안하였으며 반발도법과 초음파속도법을 단독으로 사용한 경우보다 높은 강도추정정도를 얻을 수 있었다.

$$F_c = 11.21 R_n - 125.76 V_p - 422.91 \quad (R=0.8934)$$

2. 물결합재비에 따른 고강도콘크리트의 강도추정식 제안을 위한 연구를 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

가. 반발도법에 의한 회귀분석 결과 다음과 같은 강도추정식을 제안하였다.

$$F_c = 14.29 R_n - 8.057 \quad (R=0.7671)$$

나. 초음파속도법에 의한 회귀분석 결과 다음과 같은 강도추정식을

제안하였다.

$$F_c = 335.27 V_p - 1033.8 \quad (R=0.6269)$$

다. 복합법에 의한 회귀분석 결과 다음과 같은 강도추정식을 제안하였으며 반발도법과 초음파속도법을 단독으로 사용한 경우보다 높은 강도추정정도를 얻을 수 있었다.

$$F_c = 11.61 R_n - 193.44 V_p + 778.64 \quad (R=0.8322)$$

3. 적산온도 방식에 의한 고강도콘크리트의 강도예측을 위한 연구 결과 적산온도와 고강도콘크리트의 관계에 있어서 보다 정확한 강도예측을 위해서는 Freiesleben 함수 및 Gompertz Curve를 이용한 강도예측이 합리적일 것으로 사료된다.

4. 고강도콘크리트 강도추정식의 현장적용성 평가에 관한 연구를 검토한 결과 실측 강도와 높은 상관관계를 나타내고 있어 본 연구에서 제안한 고강도콘크리트 강도추정식의 타당성을 검증할 수 있었다.

따라서 본 연구에서 최종목표로 설정한 국내 실정에 맞는 고강도콘크리트 강도추정식 제안의 연구개발 목표를 성공적으로 순조롭게 달성한 것으로 사료된다.

## 참고문헌

1. 김무한, 고강도영역 콘크리트의 경제적 개발과 그 실용화에 관한 연구, 대한건축학회논문집, 제12권, 제7호, pp.313~324, 1996. 7.
2. 日本建築學會, 建築工事標準仕様書・同解説(JASS 5), 1986,
3. 김무한, 콘크리트의 압축강도 추정을 위한 비파괴시험식에 관한 연구, 한국구조물진단학회논문집, 제1권, 제1호, pp.97~105, 1997.6
4. RILEM CNDT-Committee, RILEM Tentative Recommendations for In-situ Concrete Strength Determination by Non-Destructive Combined Methods(First draft), May, 1980
5. 콘크리트의非破壞試驗法研究委員會報告書, 日本콘크리트工學協會, 1992.3
6. 김무한, 화강암 골재를 사용한 콘크리트의 비파괴 시험에 의한 강도 평가, 한국콘크리트학회 가을학술발표회 논문집, 제11권 제2호, pp.651~654, 1992.11
7. 신성우, 김현모 등, "고강도콘크리트 시공지침서", 삼성종합건설기술 연구소, 한양대학교 산업경영연구소, 삼성기연-92006, 1992.
8. 谷川恭雄・森 博嗣・渡辺健治・三輪正保 : 高强度・超高强度コンクリートのコンシステンシー評價試験方法に関する研究, 第 12回コンクリート工學年次論文報告集, 第 12卷第 1號, pp.275~280, 1990.
9. 友澤史紀・岸谷孝一・福士 勳・阿部道彦・橋爪 進 : 高强度コンクリート用高性能減水劑の品質基準および使用規準作成に関する研究(その1~その2), 日本建築學會大會學術講演梗概集(關東), pp.657~660, 1988. 10.
10. 山川肇爾 : 콘크리트用減水劑の新しい使い方-減水劑を用いての高强度コンクリートの製造-, 工業と製品, 最新のシメントコンクリート製品, 1973.
11. 橋 大介・西田 朗・今井 實・鈴木忠彦 : 高强度コンクリートの物性

- に及ばず各種要因の影響, コンクリート工學年次論文報告集, 第10卷第 2號, pp.203~208, 1988.
12. 流田靖博・飛坂基夫・清水昭之・鹽川良治 : 高強度コンクリートの材料分離性に関する一實驗, 日本建築學會大會學術講演梗概集(中國), pp.539~540, 1990. 10.
  13. 長瀧重義 : 高強度コンクリートの諸性質, コンクリート工學, Vol.14, No.3, pp.38~41, 1976. 3.
  14. New RC 總プロ委員會 : 平成元年度高強度コンクリート分科會報告書, (材)國土開發技術研究センター, 1990. 3.
  15. New RC 總プロ委員會 : 平成4年度公法分科會報告書, (材)國土開發技術研究センター, 1993. 3.
  16. 日本建築學會, 建築工事標準仕様書・同解説(JASS 5 鐵筋コンクリート工事) -高強度コンクリート-, pp.422~450, 1997.
  17. 日本建築學會, コンクリートの品質管理指針・同解説, 1999.
  18. 第248回コンクリート講演會テキスト、セメント協會, p.48, 1989.
  19. 日本建築學會, コンクリートの調合設計指針・同解説, 1999.
  20. 大鹽 明 : セメントコンカーを骨材に用いた高強度コンクリートが得られる、コンクリート工學, Vol.14, No.3. pp.34~37, 1976. 3.
  21. 飛坂基夫 : 高強度コンクリートの壓縮強度および靜彈性係數に及ぼす名種要因の影響, セメント・コンクリート、 No.394. pp.30~33, 1979. 12.
  22. 한국표준과학연구원, 콘크리트 강도추정식 제정에 관한 연구, 2001
  23. 한천구, 슈미트해머에 의한 콘크리트 강도 비파괴시험의 영향인자 분석에 관한 실험적 연구, 대한 건축학회 학술발표 논문집, 제7권 1호, pp.429~432, 1987.4
  24. 日本建築學會, コンクリート強度推定のための非破壊試験方法マニュアル, 1983
  25. 김무한, Maturity 방식에 의한 고강도 콘크리트의 강도예측에 관한 실험적 연구, 대한건축학회 춘계학술발표회 논문집, 제19권 제2호,

1999. 4.

26. 콘크리트의非破壞試驗法研究委員會報告書, 日本콘크리트工學協會, 1992.3
27. 尼岐省二, 明石外世, シコミット..ハソマーと超音波による콘크리트の非破壞試驗, セメント・콘크리트, No. 385(1979)
28. 小野竹之助, 콘크리트工學(材料編), 森北出版社
29. 小版義夫, 谷川恭雄 콘크리트의非破壞試驗方法に關する研究の動向, 콘크리트工學, 콘크리트工學, Vol. 18, No. 1(1980)
30. 콘크리트品質의早期判定研究委員會, 콘크리트品質의早期判斷方法に關する概況, 콘크리트工學, Vol. 17, No. 1(1979)
31. 坂靜雄, 松井敏夫, 表面硬度法による實施콘크리트의強度測定法, セメント技術年報, No. 9.(1955)
32. 谷川恭雄, 山田和夫, 複合非破壞試驗法による콘크리트強度의推定, セメント・콘크리트, No. 393(1980)
33. 柏忠二, 콘크리트의非破壞試驗法, (株) 技報堂
34. 김무한, 콘크리트 압축강도추정을 위한 비파괴시험법에 관한 기초적 연구, 대한건축학회 춘계학술발표대회논문집, 제6권 제1호, 1986. 4, pp.473~476
35. 김무한 외, 슈미트햄머에 의한 콘크리트 공시체강도와 비파괴시험법에 관한 기초적 연구, 대한건축학회 추계학술발표대회논문집, 제6권 제1호, 1986. 4, pp.459~462
36. 김무한 외, 굵은골재 크기에 따른 콘크리트의 압축강도 추정에 관한 실험적 연구(II), 대한건축학회 춘계학술발표대회논문집, 제7권 제1호, 1987. 4, pp.425~428
37. 김무한 외, 슈미트햄머에 의한 콘크리트강도 비파괴시험의 영향인자 분석에 관한 실험적 연구, 대한건축학회 춘계학술발표대회논문집, 제7권 제1호, 1987. 4, pp.429~432
38. 김무한 외, 골재의 품질이 콘크리트의 특성에 미치는 영향에 관한 실험적 연구 (제2보, 슈미트햄머법에 의한 비파괴시험), 대한건축

- 학회 춘계 학술 발표 대회 논문집, 제8권, 제1호, 1988. 4, pp.545 ~ 548
39. 김무한 외, 복합법에 의한 콘크리트강도의 조기추정에 관한 실험적 연구, 대한건축학회 논문 보고집, 제4권, 제2호, 1988. 4, pp.141 ~ 152
  40. Stone, W.C. and Carino, N.J. : Comparison of Analytical with Experimental Internal Strain Distribution for the Pullout Test, ACI Journal, Vol.81, No1, pp.3-12, Jan.-Feb. 1984
  41. Keiller, A.P. : Assessing the Strength of In Situ Concrete, an Investigation of Test Methods, concrete International ; Design & Construction, Vol.7, No.2, pp.15-21, Feb. 1985
  42. Jenkins, R.S. : Nondestructive Test - An Evaluation Tool, Concrete International; Design & Construction, Vol.7, No.2, pp.22-26, Feb. 1985
  43. Malhotra, V.M. : Testing Early-Age Strength of Concrete In- Place, Concrete International; Design & Construction, Vol.7, No.4, pp.39-41, April 1985
  44. Krenchel, H. and Shah, S.P. : Fracture Analysis of the Pull-out Test, Materials and Structures, Vol.18, N0.108, pp.439-446, Nov.-Dec. 1985
  45. Ben-Zeitun, A.E. : Use of Pulse Velocity to Predict Compressive Strength of Concrete, The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete, Vol.8, No.1 pp.51-59, Feb. 1986
  46. Reichverger, Z. : Using an Impact device with sliding Drop Collar For In Situ Evaluation of Compressive Strength of Insulating Cellular Concrete, Journal of Testing and Evaluation, Vol.14, No.6, pp.298-302, Nov. 1986
  47. Horiguchi, T., Saeki, N. and Fujita, Y. : Evaluation of Pullout Test

- for Estimating Shear, Flexural, and Compressive Strength of Fiber Reinforced Silica Fume Concrete, *ACI Materials Journal*, Vol.85, No.2, pp.126-132, March-April 1988
48. Sriravindrajah, R., Loo, Y.H. and Tam, C.T. : Strength Evaluation of Recycled aggregate Concrete In Situ Test, *Materials and Structures*, Vol.21, No.124, pp.289-295, July 1988
49. ACI Committee 228 : In-Place Methods for Determination of Strengths of Concrete, *ACI Materials Journal*, Vol.85, No.5, pp.446-471, Sept.-Oct, 1988

이 보고서는 산업자원부  
에서 시행한 전력산업연  
구개발사업의 기술개발  
보고서입니다.

## 주 의

1. 이 보고서는 산업자원부에서 시행한 전력산업연구개발사업의 기술개발 보고서이다.
2. 이 기술개발내용을 대외적으로 발표할 때에는 반드시 산업자원부에서 시행한 전력산업연구개발사업의 기술개발결과임을 밝혀야 한다.
3. 국가 산업기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개 하여서는 아니 됩니다.