





2009年8月

碩士學位論文

혼화재 사용 콘크리트 구조체의 비파괴 실험에 의한 강도 추정

朝鮮大學校大學院

建築工學科

劉 明 煥



혼화재 사용 콘크리트 구조체의 비파괴 실험에 의한 강도 추정

The Estimation of Compressive Strength by the Nondestructive Test of Concrete Structures used Mineral Admixture

2009年 8月 25 日

朝 鮮 大 學 校 大 學 院 建 築 工 學 科

劉 明 煥



혼화재 사용 콘크리트 구조체의 비파괴 실험에 의한 강도 추정

指導教授 金 政 燮

이 論文을 工學碩士學位申請 論文으로 提出함.

2009年 4 月

朝鮮大學校大學院

建築工學科

劉 明 煥



劉明煥의 工學碩士學位論文을 認准함.

委	員長	朝鮮大學校	教授	金義植	印
委	員	朝鮮大學校	教授	梁 永 晟	印
委	員	朝鮮大學校	教授	金政燮	印

2009年 5月

朝鮮大學校大學院

목 차

Abstract

기 호

I.서 론	1
1.1 연구 배경 및 목적	•• 2
1.2 연구 범위 및 방법	•• 3
1.3 기존 연구의 동향	•• 4
1.3.1 기존 연구	·•• 4
1.3.2 외국의 연구동향	··· 5
1.3.3 국내의 연구동향	··· 6
1.4 연구 진행 흐름도	·· 7

2.1 콘크리트 압축강도에 미치는 영향인자
2.1.1 온도가 콘크리트 강도에 미치는 영향
2.1.2 양생의 영향
2.2 코어(core) 채취에 의한 압축강도 측정방법ℚ
2.2.1 코어 채취법의 개요 ···································
2.2.2 코어 공시체의 압축강도 실험
2.2.3 코어실험 강도 추정에 미치는 영향인자
2.3 구조체 콘크리트의 비파괴 강도 추정방법 Б
2.3.1 반발경도법 5
2.3.2 초음파속도법
2.3.3 복합법

3.2.3 혼화재
3.2.4 콘크리트 배합
3.3 실험체 제작
3.4 실험 방법
3.4.1 압축강도
3.4.2 반발경도 측정
3.4.3 초음파속도 측정
3.5 실험기기

IV.	, 실험결과 ····································	3
4.	.1 실험결과	3
	4.1.1 파괴 압축강도 실험결과	3
	4.1.2 반발경도 실험결과	9
	4.1.3 초음파속도 실험결과	2
4.	.2 기존 제안식 적용결과	4∋
	4.2.1 반발경도법에 의한 기존 제안식 적용 결과	•
	4.2.2 초음파속도법에 의한 기존 제안식 적용 결과	- 5
	4.2.3 복합법에 의한 기존 제안식 적용 결과	5

V. 회귀분석에 의한 강도 추정식 제안 -------63

5.1	단순회귀분석결과	6
5.2	중회귀분석결과	Ø

V	N. 기존 제안식과 추정식 비교	73
	6.1 반발경도법에 의한 기존 제안식과 추정식 비교	··· 73
	6.2 초음파속도법에 의한 기존 제안식과 추정식 비교	… 77
	6.3 복합법에 의한 기존 제안식과 추정식 비교	в …

VII.	결	론	85
------	---	---	----

참고문헌	·· 88
부록	92

표 목차

く丑	2.1>	코어 높이와 지름비 변화에 따른 보정계수	12
く丑	2.2>	슈미트햄머(Schmidt Hammer Test)의 종류 및 특성	۰Ð
く丑	2.3>	반발경도에 영향을 미치는 인자	16
く丑	2.4>	타격방향 보정 값	17
く丑	2.5>	반발경도법에 의한 기존 제안식	19
く丑	2.6>	초음파속도법에 의한 기존 제안식	20
く丑	2.7>	콘크리트 온도에 따른 초음파속도 수정계수	21
く丑	2.8>	초음파속도에 의한 품질판정	21
く丑	2.9>	복합법에 의한 콘크리트 강도 추정식	22
17	0.15	기계도이 취치과 서비 미 묘기가 서기	<u>_</u>

く丑	3.1>	시멘트의 화학적 성분 및 물리적 성질	25
く丑	3.2>	골재의 물리적 성질	25
〈丑	3.3>	혼화재의 화학적 성질	26
〈丑	3.4>	콘크리트 배합표	26
く丑	3.5>	실험 변수	28

그림 목차

[그림 1.1] 연구 진행 흐름도
[그림 3.1] 추정식 작성 흐름도
[그림 3.2] 구조체의 평면도, 입면도, 입체도, 배근도
[그림 3.3] 구조체의 코어 채취도 및 코어 채취 전경
[그림 4.1] 보통 콘크리트의 재령에 따른 압축강도
[그림 4.2] FA 치환 콘크리트의 재령에 따른 압축강도6
[그림 4.3] BF 치환 콘크리트의 재령에 따른 압축강도
[그림 4.4] SF 치환 콘크리트의 재령에 따른 압축강도
[그림 4.5] 보통 콘크리트의 재령에 따른 반발경도
[그림 4.6] FA 치환 콘크리트의 재령에 따른 반발경도
[그림 4.7] BF 치환 콘크리트의 재령에 따른 반발경도
[그림 4.8] SF 치환 콘크리트의 재령에 따른 반발경도
[그림 4.9] 보통 콘크리트의 재령에 따른 초음파속도
[그림 4.10] FA 치환 콘크리트의 재령에 따른 초음과속도
[그림 4.11] BF 치환 콘크리트의 재령에 따른 초음파속도
[그림 4.12] SF 치환 콘크리트의 재령에 따른 초음파속도4
[그림 4.13] 반발경도법에 의한 기존 제안식의 추정강도 비교(1)64
[그림 4.14] 반발경도법에 의한 기존 제안식의 추정강도 비교(2)
[그림 4.15] 반발경도법에 의한 기존 제안식의 추정강도 비교(3)
[그림 4.16] 반발경도법에 의한 기존 제안식의 추정강도 비교(4)
[그림 4.17] 초음파속도법에 의한 기존 제안식의 추정강도 비교(1)
[그림 4.18] 초음파속도법에 의한 기존 제안식의 추정강도 비교(2)
[그림 4.19] 초음파속도법에 의한 기존 제안식의 추정강도 비교(3)
[그림 4.20] 초음파속도법에 의한 기존 제안식의 추정강도 비교(4)
[그림 4.21] 복합법에 의한 기존 제안식의 추정강도 비교(1)

 [그림 6.1] 반발경도법에 의한 기존 제안식과 추정식의 오차율 비교(1)
 47

 [그림 6.2] 반발경도법에 의한 기존 제안식과 추정식의 오차율 비교(2)
 47

 [그림 6.3] 반발경도법에 의한 기존 제안식과 추정식의 오차율 비교(3)
 67

 [그림 6.4] 반발경도법에 의한 기존 제안식과 추정식의 오차율 비교(4)
 67

 [그림 6.5] 초음파속도법에 의한 기존 제안식과 추정식의 오차율 비교(1)
 77

 [그림 6.6] 초음파속도법에 의한 기존 제안식과 추정식의 오차율 비교(2)
 77

 [그림 6.7] 초음파속도법에 의한 기존 제안식과 추정식의 오차율 비교(3)
 77

 [그림 6.8] 초음파속도법에 의한 기존 제안식과 추정식의 오차율 비교(4)
 68

 [그림 6.9] 복합법에 의한 기존 제안식과 추정식의 오차율 비교(1)
 78

 [그림 6.10] 복합법에 의한 기존 제안식과 추정식의 오차율 비교(2)
 78

 [그림 6.11] 복합법에 의한 기존 제안식과 추정식의 오차율 비교(2)
 78

 [그림 6.12] 복합법에 의한 기존 제안식과 추정식의 오차율 비교(3)
 78

 [그림 6.11] 복합법에 의한 기존 제안식과 추정식의 오차율 비교(3)
 78

 [그림 6.12] 복합법에 의한 기존 제안식과 추정식의 오차율 비교(4)
 78

 [그림 6.12] 복합법에 의한 기존 제안식과 추정식의 오차율 비교(4)
 78

사진 목차

[사진	2.1]	슈미트햄머의 종류		·Э
[사진	3.1]	파괴 압축강도 실험	전경	• A
[사진	3.2]	반발경도 측정 전경·		·3
[사진	3.3]	초음파속도 측정 전건	령	·B



기 호

- f_{ck} : 설계기준강도
- fc : 콘크리트 파괴 압축강도
- f_{cu} : 콘크리트의 추정 압축강도
- fcu/fc : 추정 압축강도/파괴 압축강도
- R : 반발경도
- R_a : 테스트 앤벌(test anvil)에 따른 하향 타격시(α=-90°)의 반발경도
- V_p : 초음파 속도(km/s)
- CR² : 결정계수(coefficient of determination)

ASTM : 미국 재료 실험 협회(American Society of Testing Materials)

ACI : 미국 콘크리트학회(American Concrete Institute)



Abstract

The Estimation of Compressive Strength by the Nondestructive Test of Concrete Structures used Mineral Admixture

By Yoo, Myung-hwan Adviser : Prof. Kim, Jeong-sup Department of Architectural Engineering, Graduate School of Chosun University

This study made cylindrical specimen and core tube specimen of concrete using admixture and suggested their strength estimation of long-term age (4years) through non-destructive and destructive testings. The results of the research are as follows.

1) As a result of estimating the strength with suggested equation by measuring rebound hardness and ultrasonic speed, rebound hardness method showed 76~118% in the equation of Materials Research Society of Japan and 75~134% in the equation of U.S Army Laboratory, and ultrasonic speed method showed 77~117% in the equation of Architecture Society of Japan and 85~116% in J.Pysziak and these showed similar trend to destructive compressive strength. Complex method showed a great difference in existing equations from destructive compressive strength.

2) In comparison of coefficient of determination between estimation integrating the upper and the lower parts and that dividing the upper and the lower parts, estimation dividing the upper and the lower parts was 2.6% ~ 12.4% higher than that integrating the upper and the lower parts. Thus it is considered that applying the estimation depending on the location of measuring non-destructive testing will be able to estimate more accurate strength.

3) As a result of comparing suggested equations with error rates of the estimation by this research, there was a little great error rate in the 7th and 14th days of age, but as age develops, the error rate was reduced compared to suggested estimation and it is judged that the estimation by this research has higher reliability.

4) As a result of comparing error rates between conventional suggested equations and this estimation equations, there are a little differences by age, but error rate of this study was reduced to 0. 3%~15.5% compared to conventional equations by re-bound hammering, 0.6%~18.6% by ultrasound velocity method and 0.6%~34.2% by complex method and it is judged that it is desirable to be used for concrete using admixture and fiber

5) Since application of existing expression of normal concrete against concrete using admixturescauses error rate, this study suggests the following estimation expression depending on the kind of admixtures of concrete using them and position of non-destructive



experiment.

In addition, the estimation by this study showed higher error rates in $7 \, \tilde{14}$ days of age than other ages and it is considered that a method to reduce the error rate in early age needs to be devised.

I. 서 론

콘크리트의 강도는 콘크리트의 품질과 특성을 가장 잘 나타내는 기준의 척도로 서 콘크리트 공학에 있어서 일반적으로 가장 영향력 있는 요소중의 하나로 취급 되어왔다.

콘크리트는 시멘트와 골재, 물 등과 결합하여 혼합 구성되는 고형(固形)물질로서 역학적으로 요구되는 강도를 발현(發現)하기 위해서는 물시멘트비(W/C)가 큰 영향 을 미치게 되며, 혼합 구성되는 불균일한 재료로 수화반응 및 양생과정에서 수축 (Shringkage)으로 인한 미세한 균열 및 결함을 내포하는 재료로 볼 수 있다.

시멘트의 주재료인 산화칼슘(CaO)은 석회석에서 추출하므로 자원의 한정과 자연 환경의 측면에서 시멘트를 대체자원인 혼화재(admixture)로 치환하여 사용되어 지 기도 한다. 이 콘크리트를 혼화 콘크리트라고 한다. 일반적으로 혼화 콘크리트는 초기장도의 발현이 늦고 장기강도의 발현은 증가하는 재료적 특성을 나타내는 것 으로 알려져 있다.

콘크리트 비파괴 실험은 실제구조물에는 큰 손상을 주지않고 빠르게 콘크리트의 물리적 특성을 파악할 수 있으며 실험용 공시체의 한계를 극복할 수 있다는 점에 서 반발경도법에 의한 강도 추정법과 초음파속도법에 의한 복합법 등을 이용하여 압축강도를 추정하고 있다.

철근콘크리트 건축물에서 콘크리트의 강도에 대한 평가는 유지관리와 구조적 안 전성을 평가함에 있어 중요한 의미를 갖게 된다. 콘크리트 강도에 대한 평가는 구 조 체에서 코어(core)를 채취하여 파괴실험을 하거나, 구조체에서 반발경도법과 초 음 파속도법에 의한 실험값을 기존 강도 추정식에 적용하는 비파괴 실험이 주로 사용 되고 있다. 특히 구조물에는 손상을 전혀 주지않고 쉽게 콘크리트의 압축강 도를 파악할 수 있어 반발경도법과 초음파속도법에 의한 단일법및 복합법 등을 이 용하여 압축강도를 추정하고 있다.

이에 본 연구에서는 보통콘크리트뿐만 아니라 사용이 일반화된 혼화 콘크리트의

벽체 실험체를 제작하여 비파괴 실험법에 의한 강도평가 방법과 비교 분석을 통하 여 혼화 콘크리트 구조체에 적당한 강도 평가식을 제안 하는데 그 목적이 있다.

1.1 연구 배경

지금까지 많은 콘크리트 학자들은 실제 콘크리트 구조물로부터 그 강도를 구하 려 는 많은 노력을 해왔고 이는 콘크리트 공학의 발전과 더불어 계측기술이나 통 계학 및 표준화의 도움으로 실체에 가까울 정도의 추정에 이르게 되었다. 사용성 차원을 넘어 구조물의 붕괴 등의 안전성의 문제가 크게 대두되어 귀중한 생명과 경제적 손실에 대한 보다 구체적인 연구가 필요하여 실존 콘크리트 구조물의 강도 를 더욱 신뢰성있는 추정이 요구되어지고 있다.

사용중인 실제 구조물에는 손상이 없고 사용상태에서 쉽게 콘크리트의 압축강도 의 특성을 파악 및 평가할 수 있는 반발경도법, 초음파 속도법에 의한 단일법과 반 발경도 및 초음파 속도를 병행하는 복합법 등의 비파괴 실험을 이용하여 콘크리트 압축강도를 추정하고 있다.

현재 국내에서 콘크리트의 압축강도를 추정하기 위하여 주로 사용되는 비파괴 실험법은 종류에 따라 반발경도법이 50%로 가장 많고 초음파속도법이 7%, 초음파 속도법과 반발 경도법을 병행하여 사용한 복합법이 39%의 순으로 나타났다. 강도 추정의 방법으로는 대부분 외국의 압축강도 추정식을 이용하고 있다.¹⁾

하지만, 이런 단일법과 복합법에 대한 제안식은 국내 실정에 맞는 제안식이 없어 서 외국의 제안식을 그대로 사용하고 있는 실정이다. 외국의 제안식도 실제 구조체 가 아닌 공시체를 수중양생(水中養生)에 의한 제안식을 작성하고 있어서, 이 제안 식을 현장의 기중양생(氣中養生) 콘크리트 구조물에 적용시키는 것은 양생방법에 따른 추정강도와 파괴강도의 오차가 발생되어지므로 신뢰성에 문제점이 지적되고 있다²⁾

- "콘크리트 구조물 비파괴검사의 신뢰도 향상을 위한 관리체계 구축방안" 표준과학 연구원, 1998.11
- ²⁾ "혼화재 및 섬유사용 콘크리트의 비파괴 시험에 의한 추정강도"
 조선대학교 (김정섭) 박사학위 논문, 2006.08

- 보통콘크리트 압축강도 추정식을 혼화재(混和材) 및 섬유를 사용한 콘크리트
 의 강도를 추정하는데 사용되어지고 있다.
- 2) 콘크리트에 사용되는 골재, 시멘트, 혼화재 등에 따라 외국과 상이한 점이 크지 만 철저한 검증과 비교·검토과정을 없이 외국의 추정식을 사용하는 실정이다.
- 국내에서 연구되어지고 있거나 발표된 추정식은 KS F 2403(콘크리트의 강도 시 험용 공시체 제작방법(2005. 9. 28)에 지정된 원주(圓柱)형 공시체를 제작하여 강도 추정식을 제안함으로써 실제 구조물의 강도와 많은 차이가 있다.
- 4) 추정강도와 실제 기중양생된 파괴강도와의 차이가 발생한다.

이러한 문제점을 내포한 상황에서 콘크리트의 강도를 평가함에 있어 추정강도를 실제 강도보다 낮게 평가하여 불필요한 보강을 초래할 수 있고, 추정강도를 너무 높게 평가하면 안전성을 과대 평가하여 구조물에 손상및 불안전을 초래하게 된다. 따라서 본 연구는 국내 구조물에 사용된 콘크리트의 배합특성 및 실제 구조물과 동일한 기중양생조건과 자원의 재활용 및 각종 장점으로 인해 시멘트의 대체 사용이 일반화 되고 있는 플라이애시(fly ash ; 이하 FA), 고로(高爐)슬래그(blast furnace slag ; 이하 BF), 실리카흄(silica fume ; 이하 SF) 등의 혼화재를 사용한 공시체 및 코어 채취용 벽식 구조체를 제작하여 장기 재령(4년)에 대한 반발경도와 초음파속도 에 의한 비파괴 강도 추정식을 제안함으로써 실제 콘크리트의 강도에 근접한 강도를 추정하는데 목적이 있다.

1.2 연구의 범위 및 방법

철근콘크리트 구조물은 구조적 안전성 및 내구성을 확보하기 위해 유지관리차원 에서 안전점검 및 안전진단시 콘크리트 강도를 평가하는데 혼화재 사용 콘크리트 의 특성에 적정한 비파괴식을 적용하여야 한다. 그러나, 보통콘크리트를 기준으로 하여 제안된 추정식이 일반적으로 사용되고 있다.

콘크리트에 사용되는 골재, 시멘트 및 혼화재료 등에 따라 국내의 여건은 외국과 다른점이 많고 철저한 검증절차 없이 외국의 추정식들을 사용하고 있는 실정이다. 콘크리트 압축강도 추정식은 공시체의 양생조건이 수중양생과 기중양생으로 구분 되어 제안되었으나 기중양생으로 건설되어지는 콘크리트구조물에 무분별하게 추정 식을 사용하는 문제점을 갖고 있다.

따라서 본 연구는 국내 건축물에 사용된 혼화 콘크리트의 배합특성 및 기중조건 에 적정한 비파괴 실험법을 제안함으로써 실제 콘크리트의 압축강도에 근접한 강 도를 추정하는데 목적이 있다.

비파괴 압축강도 제안식은 파괴실험에 의해 측정된 압축강도 값과 비파괴실험을 통한 압축강도 추정값 사이의 상관관계를 나타내는 식이다. 따라서 동일한 콘크리 트를 대상으로 파괴실험 및 비파괴실험을 실시하고, 그 상관관계의 결과값을 통계 처리하여 강도추정식을 작성할 수 있다.

본 연구에서는 보통 콘크리트와 혼화재를 사용한 플라이애시(FA), 고로슬래그(BF), 실리카흄(SF) 등의 혼화재를 사용한 콘크리트 원주형(圓柱形) 공시체와 같은 조건의 벽체구조체를 제작하여, 코어를 채취한 코어공시체에 대하여 재령 4년(1460일)에 대 한 반발경도와 초음파속도를 측정하고, 실제 파괴 압축강도(*f*_c)와의 상관관계를 구하여 혼화재 사용 콘크리트의 장기재령 강도를 비파괴 방법으로 평가하기 위한 추정식을 제안하고자 한다.

1.3 기존 연구의 동향

1.3.1 기존 연구

콘크리트의 반발경도법 및 초음파속도법에 의한 강도특성에 대한 연구는 선진국 을 중심으로 활발하게 이루어지고 있으며, 국내에서도 연구가 활발하게 연구되어지 고 있다.

각 방법을 별도로 사용하는 경우는 신뢰성이 매우 저하되어 현재에는 반발경도 법과 초음파속도법을 동시에 사용하는 복합법이 주로 사용되고 있다.

이외에도 최근에는 충격탄성파, 적외선, X선, 전자파 등을 이용한 다양한 검사 방법 이 개발되어 사용되고 있으나, 이러한 최신방법도 현재에는 신뢰성에 문제점이 있다.

이러한 방법은, 주로 외국에서 개발된 것으로 국내 조건의 콘크리트 강도평가에 는 맞지 않는 것으로 나타나고 있다.

콘크리트 강도를 반발경도법으로 추정하고자 하는 국내의 연구는 최근 들어 대 한주택공사 부설 주택연구소와 과학기술처 한국표준연구소를 중심으로 콘크리트 강도, 재령, 타격방향, 온도, 습도 등을 변수로 연구가 진행되었다. 그러나 이 연구

에서는 비파괴 실험 강도에 큰 영향을 미치는 응력의 크기, 골재의 입도(粒度), 콘 크리트 두께, 사용기기의 종류, 콘크리트 표면의 탄산화 정도, 골재 배합비 및 슬럼 프(slump) 등에 대한 변수가 반영되지 않아 콘크리트의 강도를 판정하는 일반적인 추정식을 제안하기에는 아직까지 충분하지 않은 것으로 판단된다.

또한, 초음파속도법을 이용하여 콘크리트 강도를 추정하는 연구로는 충남대학교 를 중심으로 물-시멘트비(W/C)와 재령을 변수로 둔 연구, 고강도 콘크리트 압축강 도추정식을 위한 연구를 발표한 적이 있으며, 최근에 단국대학교에서 콘크리트의 압축강도 추정을 위한 비파괴 실험식에 대한 연구를 발표한바 있다.

혼화 콘크리트에 대한 비파괴 연구는 조선대학교를 중심으로 혼화콘크리트의 강 도 발현 특성에 기인하여 재령 2년까지 비파괴 실험을 통해 충정식을 제안 한바 있다.

1.3.2 외국의 연구동향

콘크리트의 반발경도법에 대한 국외 연구는 일본건축학회 지침서 및 ASTM C 805-85에서 이미 제안하여 광범위하게 사용되고 있다.

이 지침서에서는 조사대상 콘크리트를 두께 10cm이상, 압축강도 10~60MPa 등 으로 제한하고 있고, 측정부위, 사용 기기의 종류, 타격방향, 타격횟수, 재령 등에 따라 측정값을 조정하도록 하고 있다.

그러나 이 지침서에서도 조사대상 콘크리트에 작용하고 있는 응력의 크기, 골재 의 종류, 콘크리트 표면의 탄산화 정도, 골재의 배합비 등이 포함되어 있지 않아 추가적인 연구가 필요한 실정이다.

또한 외국에서의 콘크리트 구조물에 대한 비파괴검사와 평가방법에 대한 개발은 최근 10여년 사이에 활발히 시도되고 있다. 미국에서는 MIT, Cornell University, University of California at Berkeley 및 미공병대 연방운송국(Federal Highway Administration)과 각 주의 운송국에서 연구를 진행하고 있다.

그리고 초음파를 이용한 검사방법으로 약 10여개의 회사가 미국 내에서 특정목 적을 위한 상업용 기기를 개발하여 판매하고 있다.

2종류 이상의 비파괴 실험법의 복합에 의해서 콘크리트 강도를 추정하는 방법 은 오래전에 Kesler, Higuchi, Facaoaru, Wiebenga 등에 의해 시작되었으며, 1968 년 Jones와 Facaoaru는 초음파속도법과 반발경도법의 조합을 가장 유망한 조합으 로 제안하기에 이르렀다.

1.3.3 국내 연구동향

국내에서는 1970년대 이후에 반발경도 실험이나 초음파속도 실험처럼 한가지 방 법에 의한 강도추정식 제안이 주종을 이뤘으나 2000년대에 들어서면서 복합법에 대한 연구가 증대되고 있다.

1990년대 말부터 반발경도법 및 초음파속도법, 복합법에 대한 국내 실정에 맞는 표준화 연구가 단국대학교 정란 교수, 청주대학교 한천구 교수 등에 의해 진행 중 이다.

2000년대에 이르러 혼화콘크리트에 대한 반발경도법, 초음파속도법, 복합법에 대 한 비파괴 연구가 조선대학교 김정섭교수에 의해 진행중이다.

국내에서 주로 이용되는 강도 추정식은 일본건축학회식과 일본재료학회식 등의 추정식을 사용하며, 추정식의 제안자에 따라 각각 다른 결과를 나타내어 강도추정 에 있어 동일하게 적용하기 어려운 점이 있다.

따라서 강도 추정결과에 대한 신뢰도에 문제가 되므로 콘크리트 건축물의 공사 관리의 오류나 잘못된 안전성 평가로 인하여 심한 경우 건축물의 손상 및 붕괴 등 심각한 문제를 야기할 소지가 있다.

본 논문에서는 현장상황과 동일한 기중조건에서 보통콘크리트 및 혼화재를 사용 한 콘크리트의 부재실험체를 제작하여 재령4년(1460일)에 대한 코어 실험체를 채취 한 후, 비파괴 실험과 파괴 실험에 대한 비교값을 통해 혼화콘크리트 및 보통 콘크 리트 강도 추정식을 제안하고자 한다.

1.4 연구 진행 흐름도

본 연구를 수행하기 위하여 진행된 연구 흐름도는 다음과 같다.



[그림 1.1] 연구 진행 흐름도

Ⅱ. 이론적 연구

2.1 콘크리트 압축강도에 미치는 영향인자

2.1.1 온도가 콘크리트 강도에 미치는 영향

시멘트가 물과 반응하면 발열 화학 반응에 의한 120kal/kg 정도의 열이 발생하고, 콘크리트의 열전도율은 상대적으로 적기 때문에 매스(mass) 콘크리트에서의 수화열 은 내부 온도를 상승시키게 된다.

양생온도가 어느 정도 증가되면 수화반응이 촉진되어 장기강도에 나쁜 영향을 주지 않으면서 콘크리트의 조기강도를 얻을 수 있으나, 콘크리트를 타설하고 응결하는 동 안에 높은 온도를 공급하면 조기강도는 증가하지만 오히려 7일 이후의 강도에 나쁜 영향을 주게 된다. 초기 수화반응이 급격하게 진행되면 좋지 않은 영향을 주게 된다.

초기 수화 반응이 급격하게 진행되면 좋지 않은 무리구조를 생성하여 보다 다공 (多空)성이 되고, 많은 공극이 채워지지 않은 상태로 남게 되기 때문에, 시멘트 겔 (gel) 이론에 따르면 느린 수화 반응에 의하여 공극이 적게 생긴 콘크리트에 비하여 강도가 낮아진다고 할 수 있다.

또한 높은 온도하에서 초기 수화작용을 촉진시키면 계속 진행햐여야 할 수화작용 에 저해가 되고, 수화생성물의 분포가 불균질하게 된다.

즉, 시멘트 입자로부터 수화생성물이 확산되고, 공간에 균등하게 침강(沈降)하는데 필요한 시간이 충분치 못하게 되어, 수화를 일으키고 있는 입자 주위에 수화생성물 이 집중되고, 이 때문에 계속되어야 하는 수화작용을 지연시키고 장기강도에 나쁜 영향을 미치게 된다.

이러한 수화생성물의 불균질 분포는 시멘트 겔 비가 낮아져 강도에 나쁜 영향을 미치게 된다.

2.1.2 양생의 영향

콘크리트는 재령이 경과함에 따라 시멘트의 수화 반응에 의하여 조직이 치밀해져 강도가 증가한다. 양생의 목적은 경화과정에 있어서 콘크리트를 적절한 온도와 습도 하에서 강도발현을 유지하게 하는 것이다.

콘크리트를 부어넣기 한 후 습윤상태로 유지시키면 콘크리트 강도는 장기에 걸쳐 서 증가하나, 콘크리트를 대기 중에 방치하여 건조시키면 수분을 공급할 수 없어 시 멘트 수화반응이 완만하게 진행되지 못하여 강도발현이 잘되지 못한다.

건조시킨 콘크리트를 다시 습윤한 상태로 하면 수화반응이 다시 진행하여 재령이 경과함에 따라 강도는 증가하게 된다.

건조의 영향은 초기재령에서 크게 발생한다. 이와 같은 것은 콘크리트 중에서 수분 이 급격히 증발하고, 시멘트 수화반응이 방해를 받고 강도가 발현되지 않는 사이에 건조 수축이 시작되어 시멘트 페이스트(paste)와 골재와의 부착성이 떨어지게 된다.

시멘트의 수화반응은 온도가 높은 만큼 빨리 진행되어 초기재령에서의 콘크리트 강도발현이 커지게 된다. 그러나 장기재령에서의 강도는 양생 온도가 높은 만큼 작 아진다.

콘크리트 타설 온도나 기온이 낮으면 콘크리트 중의 수분이 동결하여 시멘트 페 이스트의 조직이 파괴되기 때문에 동결 후의 재령에 따른 강도 발형은 아주 큰 손 상을 입게된다. 초기 동해를 방지하기 위해서는 콘크리트의 강도가 어느 정도에 도 달할 때까지 보온 양상을 하는 것이 중요하다.

2.2 코어(core) 채취에 의한 압축강도 측정방법

2.2.1 코어 채취법의 개요

코어 채취법은 기존 콘크리트 구조물에서 코어를 채취하여 강도, 중성화 등의 물 성을 확인하는 것으로서 강도나 기타 물성을 설계상 소요강도가 만족되고 있는가 를 조사하는 관리상의 요구 외에 건축물의 노화 상태를 조사하는 것이다. 중요한 것은 실험의 목적에 따라 대표적인 코어 공시체를 채취할 장소, 개소 그리고 수량 을 충분히 검토한 후 선정하는 것이다.

코어 채취는 콘크리트 코어 드릴링(drilling) 및 커터(cutter)를 이용하여 구조물 및 공시체가 손상되지 않도록 하여야 한다.

그러나 코어 실험의 경우에는 구조체 콘크리트의 코어를 채취하고 이것을 이용 하여 구조체 콘크리트의 강도를 추정하므로 추정값의 정밀도는 높으나 코어 채취 시에 있어서 기둥, 보 등의 중요한 구조부재에 대하여 채취가 어렵고, 채취 후에도 코어 채취위치의 보수 등에 어려움이 있어 현재 구조체 내력을 손상시키지 않으면 서 강도추정의 정밀성을 높일 수 있는 실험방법을 연구 중에 있다.

콘크리트 코어 공시체의 채취 방법 및 유의사항으로는 먼저 코어 공시체의 채 취는 모르타르와 굵은 골재가 충분히 부착되도록 경화된 후 하여야 하고, KS F 2422(콘크리트에서 절취한 코어 및 보의 강도 시험 방법(2007.11.05))에서 정한 재령 14일 이후에 채취하는 것이 바람직하며, 표면에 직각으로 채취해야 한다.

또한 코어 공시체의 채취 위치는 조사목적에 따라 적절한 평가가 이루어지도록 하 여야 한다. 즉, 가능한 구조내력에 영향을 주지 않는 곳을 택하도록 함과 더불어 외 관상 문제가 되는 곳은 가능한 피하는 것이 바람직하다. 특히, 세장(細長)한 부재에 서는 코어 채취 후 문제가 야기 될 수 있으므로 위험하지 않은 부위에서 행하여야 한다.

콘크리트 중의 철근은 원칙적으로 절단되지 않도록 하여야 하며, 작업이 용이한 곳에서 채취하여야 한다. 즉 콘크리트 코어 채취 전에 철근탐사기를 이용하여 피 복콘크리트를 제거하여 매입(埋入)된 철근의 유무 및 위치를 정확히 측정하여 철근 이 절단되지 않도록 한다.

부득이하게 철근이 절단된 경우에는 철근의 재질, 직경 및 양을 고려한 용접 보 수(補修)·보강(補强) 등 배근상태에 따른 보정을 해야 한다. 단, 가압축(加壓軸)에 평행한 방향이거나 경사방향으로 철근이 들어 있는 코어 공시체는 강도실험을 하 지 않는다.

코어의 외관, 구조물의 환경, 채취위치의 방향, 건습의 조건 등에 대해서도 기록 하여 보관할 필요가 있으며, 채취된 코어는 헝겊 또는 물로 깨끗이 세척하여 채취 위치, 번호 등의 필요한 사항을 기입한 후 비닐봉지에 넣어 봉인하고 직사광선이 닿 지 않토록 보관한다.

또한, 채취한 부위에는 팽창재를 혼입한 모르타르 등을 이용하여 즉시 보수하며 코어는 가능한 전문기관에 의뢰하여 다이아몬드 또는 초경합금을 부착한 코어드릴 을 사용하여 채취하도록 하며, 구조물 및 실험체가 손상되지 않도록 하여야 하고, 파손되거나 굵은 골재가 흔들리는 코어 공시체는 강도실험에서 제외시킨다.

그리고 코어공시체의 강도는 채취한 코어의 상태에 따라 그 강도에 큰 편차를 나타내므로 보링기술은 극히 중요하게 된다. 아무리 성능이 좋은 비트(bit)나 코어 채취기를 사용해도 채취시 설치가 미흡하거나, 냉각수의 공급부족이던가, 작업능률 을 올리기 위하여 불필요한 하중 등으로 절단 작업을 행하면 코어 공시체는 극도 로 손상을 받아 코어 공시체의 강도가 저하된다.

즉, 코어 채취시 비트에 반력이 발생하므로 코어 채취기를 앵커볼트 등으로 충분 히 고정하여야 한다. 코어 실험체는 가압면(加壓面)이 수평이 되도록 커터로 절단하 거나 연마(研磨)한 후, 20±3℃의 수중에서 40~48시간 습윤 상태로 두어야 한다.

2.2.2 코어 공시체의 압축강도 실험

채취된 코어의 양 단면은 KS F 2403(콘크리트의 강도 실험용 공시체 제작 방 법)에 따라 캡핑(capping)하거나, 소정의 평활도를 갖도록 마무리한 다음, KS F 2405(콘크리트의 압축강도 실험방법)에 따라 코어의 압축강도 실험을 행한다. 한편, 실험준비와 연관하여 압축강도 실험전에 코어시료는 규정에 따라 마무리하는데, 특 히 양단면은 코어축선에 대하여 직각이 되게 하고, 캡핑할 때에는 가압면의 마감에 주의해야 한다.

코어 공시체의 압축강도는 실험체의 평균 직경으로 전체 단면적을 산정하여 계 산하고, 필요한 경우는 <표 2.1>에 의거하여 실험체의 높이/지름(H/D)에 따른 보 정계수를 계산된 압축강도에 곱함으로써 환산 압축강도를 구한다.

2.2.3 코어실험 강도 추정에 미치는 영향인자

(1) 코어지름

코어 실험체의 바깥지름은 실험체의 상하면에 서로 직교하는 두 방향의 지름을 0.25mm까지 측정하여 그 평균값을 실험체의 지름으로 한다. 콘크리트 코어의 채취 시 코어 절단면의 요철((凹凸), 골재와 페이스트(paste)의 부착저하, 굵은 골재의 강 도저하 등으로 인하여 절단면이 결손에 의한 코어 강도의 편차가 증대되거나 강도 가 저하될 수 있으며, 이와 같은 현상은 코어지름이 적을수록 커진다.

따라서, 코어의 최소지름은 스위스에서 50mm를 사용하고 있으나 적은 실험체로 부터 발생될 수 있는 변수를 줄이기 위하여 일반적으로 100mm 이상, 굵은 골재 최대치수의 3배 이상으로 하고 있다.

(2) 코어 높이와 지름과의 비

지름방향의 두 지점에서 0.25mm까지 측정하여 그 평균값을 실험체의 높이로 한다. 코어 압축강도는 높이/지름의 비가 작을수록 증가하는 현상을 나타내므로 실험체 의 높이는 될 수 있는 한 지름의 1~2배로 한다. 따라서, 2배보다 작은 경우의 압 축강도는 KS G 2422 (콘크리트에서 절취한 코어 및 보의 강도 실험 방법)에 정한 <표 2.1>의 보정계수를 곱하여 지름의 2배의 높이를 갖는 실험체의 강도로 환산하 도록 하며, 이에 관련된 외국의 보정계수도 <표 2.1>에 나타내었다.

높이(H)/	보 정 계 수			ਥੀ ਹ	
지름(D)	KS F 2422	ASTM C 42-87	BS 1881	JIS A 1107	
2.00	1.00	1.00	1.00	1.00	H/D가 표시
1.75	0.98	0.98	0.97	0.98	된 값의 사이
1.50	0.96	0.96	0.95	0.96	에 있는 경우
1.25	0.93	0.93	0.92	0.93	에는 보정계수
1.10	-	_	0.90	-	로 기거나기비
1.00	0.89	0.87	0.87	0.89) 글 직신보간법 () 글 그치리
					으도 주안다.

<표 2.1> 코어 높이와 지름비 변화에 따른 보정계수

(3) 코어 절단면의 요철

코어 절단면의 요철에 의한 코어 강도 저하는 1mm일 때 4% 정도, 2mm 이상 일때 7% 이상으로서 가능한 요철이 발생하지 않도록 주의한다. 따라서, 코어 실험 체의 단면의 5mm 이상의 요철이 있는 경우나 단면과 코어 축이 이루는 각이 85° 이하인 경우에는 단면을 콘크리트 커터(cutter) 등으로 90°가 되도록 마무리한다.

(4) 코어의 채취방향 및 위치

코어의 채취방향은 통상 타설방향에 대하여 수평 또는 수직이며, 타설방향으로 채취된 코어의 강도는 기둥이나 벽체에서와 같이 타설 직각방향으로 채취된 경우 보다 5%~8% 정도 크게 나타났다. 일반적으로 코어는 구조물의 최상단에서 가장 낮은 강도를 갖고 하부로 깊이 내려 갈수록 코어강도는 증가하게 된다. 이는 상부 표면에서 코어를 채취하면 블리딩(bleeding)과 굵은 골재의 침하 등에 의하여 하부 에서 채취한 코어에 비하여 강도가 저하하기 때문이다. 따라서, 타설방향 및 채취 위치가 코어 실험체의 강도에 미치는 영향에 대한 고려가 필요하다.

(5) 코어 채취시기(콘크리트의 재령)

초기재령에서 채취한 콘크리트 코어의 강도는 절단면의 굵은 골재와 모르터의 부착력 감소 또는 코어 실험체의 절단면 결손으로 실제 값보다 낮게 평가될 수 있 다. 따라서, 코어채취 시기는 재령 14일 이후로 하는 것이 바람직하다. 또한, 실제 구조물에서는 표준 공시체의 양생조건과 동일한 양생조건 및 방법을 기대할 수 없 기 때문에 콘크리트 구조물이 재령이 경과함에 따라 강도가 증가한다 할지라도 표 준양생한 공시체의 28일 압축강도보다 항상 크지는 않다. 따라서, 현장에서 양생된 구조물의 코어 강도는 표준공시체의 28일 압축강도와 동일하게 보는 것이 일반적 이며 코어강도에 대해서는 재령에 대한 보정은 하지 않는 것이 바람직하다.

(6) 코어 채취기 회전속도 및 채취속도

코어 채취기 회전속도는 코어 보령중의 절삭, 마모(다이아몬드의 집중도, 특성 및 비트의 구속과 채취속도, 피절단물의 성질에 따라 다름)와 코어 채취기의 진동 파괴 등에 의해서 생기는 비틀림 전단력이 원동기의 구축에 걸리는 전단저항으로 드릴링 시 토크(Torque)가 크면 클수록 코어강도는 저하되며 드릴링 속도가 빠르 면 코어강도는 적어지게 된다. 또한, 드릴링 작업에 의해서 코어 시료가 어느 정도 교란(攪亂)되기 때문에 코어 공시체의 압축강도는 동일 조건의 표준공시체 압축강 도 보다 항상 작은 값을 나타내게 된다. 따라서, 콘크리트 코어의 강도는 채취기토 크에 반비례하여 감소되며, 코어 절단면의 요철 발생에 의한 강도저하를 방지하기 위하여 채취시 토크 및 채취도를 조절하는 것이 바람직하고, 드릴링 작업을 조심스 럽게 행하여 그 영향을 줄여야 한다.

(7) 매입된 철근

철근콘크리트 구조물에서 철근을 절단하지 않고 코어 채취하는 것이 현장 여건 상 불가능한 경우가 있으나, 이러한 매입 철근의 영향에 관한 연구가 비교적 적고, 그 결과도 상당히 다르다. 철근을 절단하는 경우에 있어서 재하축과 수직인 방향으 로 철근이 있는 경우에는 묻혀진 철근의 직경이 클수록 강도의 저하는 현저해진다. 철근의 직경이 D19 이상의 경우 강도 저하율은 약 10%에 달하기 때문에 이러한 코어는 제외하는 것이 좋지만 부득이 강도실험을 하는 경우에는 겉보기 강도가 저 하하는 것에 유의할 필요가 있다. 따라서, 콘크리트 중의 철근은 원칙적으로 절단 되지 않도록 하는 것이 바람직하다.

2.3 구조체 콘크리트의 비파괴 강도 추정방법

2.3.1 반발경도법

(a) NR형 슈미트햄머

반발경도법은 슈미트햄머(Schumidt Hammer)를 이용하여 측정하는 방법으로 간 편하고 건축물에 손상을 주지 않으면서 구조물의 강도를 추정할 수 있는 방법으로 이미 세계적으로 널리 사용되고 있으며 이에 대한 관련규정도 마련되어 있다.

반발경도법은 슈미트햄머로 콘크리트 면을 타격시 햄머의 타격에너지에 따라 반 사되는 반동량을 반발경도로 표시하고, 이때의 반발경도와 콘크리트 파괴 압축강도 와의 상관관계식을 실험적으로 구하여 콘크리트 구조물의 강도를 측정한다.

슈미트햄머는 콘크리트의 구성성분 및 시공상태에 따라 여러 가지 유형의 기종이 있으나, 일반적으로 건축물에서는 <사진 2.1>과 같은 N형과 NR형이 가장 많이 사 용되고 있다. 슈미트햄머의 사용목적에 따른 유형 및 기종은 다음 <표 2.2>와 같다.



(c) P형 슈미트햄머

<사진 2.1> 슈미트 햄머의 종류

(b) N형 슈미트햄머

<표 2.2> 슈미트햄머의 종류 및 특성

기 종	적용 콘크리트	충격에너지 (kgf·cm)	강도 측정범위 (MPa)	반발경도 기록
N형	보통콘크리트	0.225	15~60	반발경도 R을 직접 읽음
NR형	보통콘크리트	0.225	15~60	반발경도 R을 자동 기록
NP형	보통콘크리트	0.025	10~60	반발경도 R을 자동 기록
L(R)형	경량콘크리트	0.075	10~60	반발경도 R을 자동 기록
P형	저강 콘크리트	0.090	5~15	진자식 초기강도 추정
M형	매스콘크리트	3.000	60 ~ 100	반발경도 R을 직접 읽음

(1) 반발경도법의 원리

반발경도법의 원리는 슈미트햄머로 경화콘크리트면을 타격할 경우 반발경도(R) 와 콘크리트 압축강도(f_c)와의 사이에 특정 상관관계가 있다는 실험적 경험을 기초 로 한다.

타격시 햄머내의 중추 반동량을 반발경도로 표시하며, 이 반발경도의 크기에 따 라 콘크리트의 압축강도를 추정한다. 그리고 물리적 특성에 따라 다르다.

특히 반발경도법은 콘크리트와 같은 불균질한 재료표면에서 국부적인 반발경도 를 구하는 것이기 때문에 측정면에 있어서 골재의 유무, 콘크리트의 습윤상태, 콘 크리트의 재령 등에 따라 반발경도에 많은 영향을 미친다.

따라서 강도 추정의 유일한 방법으로 사용할 수 없으나 간편하고 짧은 시간에 강도 추정이 가능한 우수한 사용성과 콘크리트 구조물 전체에 대해 강도 측정이 가능하다는 점에서 유효한 시험법이라 할 수 있다.

(2) 반발경도에 미치는 영향인자

슈미트햄머 추정식 반발경도에 대해 여러 가지 영향을 미치므로 이에 대한 내용 을 정리하면 <표 2.3>과 같다.

खे ।	향 요 인	현 상	
	시멘트	많아질수록 반발경도는 저하	
콘크리트 재료	보통골재	큰 영향 없음	
	인공골재	보통골재보다 반발경도 약간 저하	
콘크리트 양생	습윤양생	건조양생의 경우보다 반발경도 저하	
ㅋㄱ기ㅌ 티거머	거친경우	연마한 경우보다 반발경도 저하	
근그디드 다석인	목재거푸집사용	철재거푸집 사용한 경우보다 반발경도 저하	
대상 두께	10cm이하	급격하게 반발경도 저하	
티거이키	모서리 부분	강성의 증가로 인하여 반발경도 증가	
다석파시	기둥	위치에 따라 반발경도가 다를수 있음	
콘크리트 노후화	중성화	반발경도 증가	
온도	콘크리트 표면의 동결	반발경도 증가	
타겨 회스	5 ~ 20 हो	만족할 만한 강도 추정값을 얻기 위해서는 2	
99 XT	0 2034	약 20회의 타격회수가 필요	

<표 2.3> 반발경도에 영향을 미치는 인자

1) 시험체의 치수 형상 및 강성

콘크리트 보와 벽체에 있어서 단면이나 시험체가 작거나 얇으면 충격시에 변위가 발 생하여 반발경도의 감소를 가져오며, 이러한 강성 저하는 약 15% 정도의 반발경도 가 감소된다.

2) 타격방향에 따른 보정치

<표 2.4>는 타격방향에 따른 보정치를 나타낸 것인데, N형과 NR형 슈미트 햄머는 타격방향에 따라서 반발경도가 달라져 타격 각도에 따른 보정계수를 적용하도록 하 고 있다.

바바겨ㄷ(D)	수평과 이루는 각도				ਸੀ ਤ
킨 1 2 78 ㅗ(II)	+ 90°	+45°	-45°	-90°	
10	_	_	+ 2.5	+ 3.4	
20	-5.4	-3.5	+ 2.4	+ 3.2	
30	-4.7	-3.1	+ 2.3	+ 3.1	+부호는 上向,
40	-3.9	-2.0	+ 2.0	+ 2.7	-는 下向
50	-3.1	-2.7	+ 1.6	+ 2.2	
60	-2.3	-1.6	+ 1.3	+ 1.7	

<표 2.4> 타격방향 보정값

4) 압정력에 따른 경도보정치

20×20×20cm의 정육면체면 공시체에 의한 반발경도 측정시, 약 100kN의 압정(壓 精)상태에서 타격시험을 실시한다. 실험결과에 의하면 압정(壓精)력이 작을수록 R값 이 작아지는 것을 알 수 있다.

5) 재령에 따른 보정

콘크리트의 경도는 일반적으로 재령 7일까지는 급격하게 증가되고 그 이후는 거 의 변화가 미비하다. 그러나 7일 이후에도 강도가 크게 증가되고 있고, 특히 동일 강도하에서는 재령 7일 콘크리트의 경도가 재령 28일 콘크리트 경도 보다 높게 나 타나는 것으로 밝혀졌다.

그렇기 때문에 재령이 경과된 콘크리트를 시험하고자 할 때에는 구조체로부터 반발경도와 코어 강도를 구하여 그들의 직접 상환 관계식을 구할 필요가 있다.

(3) 반발경도 측정시 기기보정

슈미트 햄머를 사용하는 경우 Test Anvil에 의한 보정을 하여야 한다. 보정은 Test Anvil의 반발경도(R) 80을 기준으로 하고, 80±2의 범위를 정상으로 하나 될 수 있는 한 81±1의 범위 내에 들도록 조정을 한다. 이 범위의 값을 벗어날 경우 슈미트햄머의 조정나사를 조작하여 보정하여야 한다.

(4) 측정부위 상태 및 위치 선정

- 1) 측정면은 평활한 면을 선정하고 요철, 마감재 또는 도장면은 제거한다.
- 2) 콘크리트 두께는 최소 10cm 이상 되는 면을 선정한다.
- 3) 보, 기둥 등의 모서리에서는 최소 3~6cm 이격된 개소에서 측정한다.
- 4) 콘크리트 표면함수율 : 습윤상태가 건조한 상태보다 반발도가 약 5% 낮다.
- 5) 타격면의 평활도 : 거친면을 타격하면 반발도는 10~15%로 낮다.
- 6) 벽, 기둥의 측정 : 상부, 중앙부, 하부 등에서 측정한다.
- 7) 보 측정 : 단부와 중앙부에서 측정한다.
- 8) 구조물 전체의 콘크리트 강도를 판단할 수 있도록 측정위치를 정한다.

(5) 반발경도법에 의한 기존 제안식

반발경도에 의한 콘크리트 강도 추정식은 다음 <표 2.5>과 같이 외국의 여러 학 자들이 많은 실험을 통해 얻은 자료를 바탕으로 강도추정식을 제안하고 있는데 연 구자에 따라 많은 차이를 보이고 있어 무조건적으로 사용한다면 추정 오차는 크게 발생될 수 있다. 따라서 반발경도를 이용한 콘크리트 강도추정식은 코어시료의 파 괴강도와 반발경도와의 상관관계를 고려하는 것이 바람직한 방법이다.

구 분	제 안 식
일본 건축학회式	$f_{cu} = 7.3R + 100$
일본 재료학회式	$f_{cu} = 13R - 184$
동경 건축재료검사소式	$f_{cu} = 10R - 110$
U.SArmy 실험소式	$f_{cu} = -120.6 + 8.0R + 0.0932R^2$

<표 2.5> 반발경도법에 의한 기존 제안식

2.3.2 초음파속도법

초음파속도법은 콘크리트 압축강도, 탄성계수, 균열 깊이, 내부결함 등의 콘크리 트 품질을 평가하는 수단으로 이용될 수 있다.

를 이용한 콘크리트 압축강도 추정은 초음파속도와 압축강도와의 상관관계를 이 용하여 강도를 추정하는 것이다.

초음파속도에 큰 영향을 미치는 것은 골재·시멘트 용적비, 골재의 종류, 굵은골 재의 최대치수 및 함수율에 의해 영향을 받는다.

강도 추정시 이와같은 인자를 고려하여 압축강도를 추정하고 통계적인 신뢰성과 강도범위를 정하기 위해서는 많은 실험을 통해 상관관계를 설정하여야 한다.

초음파속도와 압축강도간에는 상관계수가 상당히 낮아 반발경도법보다 신뢰성이 떨어지므로, 초음파속도를 이용하여 콘크리트의 강도를 추정할 때에는 이 방법을 단독으로 사용하기 보다는 2가지 실험법을 병행하여 추정하는 복합법을 이용하는 것이 신뢰성이 높다는 보고가 있다.

초음파속도와 압축강도의 상관관계를 설정할 때 압축강도에 영향을 미치는 여러 가지 영향인자를 고려함으로써 압축강도 추정의 신뢰성을 높일 수 있으나, 실제 조 사대상 구조물에서 이러한 인자들을 알 수 없는 경우가 많아 초음파속도만으로 강 도추정을 행할 경우에는 신뢰성에 문제가 있을 수 있다.

외국의 경우는 초음파속도법을 균열 및 공극 등을 검출하고 콘크리트의 균질성 을 조사하는 품질관리 목적으로 이용하고 콘크리트 강도추정은 보조수단으로 사용 하고 있는 실정이다.

(1) 측정방법

초음파속도 측정을 이용하는 방법으로 콘크리트 매질에서의 음속측정은 발신자로 부터 발신한 초음파가 수신자에 도달할 때까지의 전파시간을 측정해 전파거리를 전파시간으로 나눔으로써 콘크리트 매질의 전파속도를 측정한다.

(2) 초음파속도에 의한 콘크리트 강도추정식

음속에서 압축강도를 추정하는 것은 측정기 개발과 동시에 이루어졌으며 많은 추 정식이 제안되어져 있다. <표 2.6>은 기존 연구에서 제안한 초음파속도법에 의한 콘크리트 강도추정식이다.

구 분	제 안 식		
일본 건축학회식	$f_{cu} = 215V_p - 620$		
일본 재료학회식	$f_{cu} = 102V_p - 117$		
J.Pyszniak 식	$f_{cu} = 92.5V_p - 508Vp + 782$		
谷川 식	$f_{cu} = 172.5 V_p - 499.6$		

<표 2.6> 초음파속도법에 의한 기존 제안식

(3) 초음파속도에 영향을 미치는 인자

1) 콘크리트 함수율

일반적으로 콘크리트중의 함유수분은 음속에 큰 영향을 미치며 습윤상태 일수록 파속은 커지게 된다. 따라서 초음파속도는 콘크리트 함수율에 따라 보정하여야 하 며 함수율이 1% 증가하면 음속은 약 50~100m/sec 증대된다.

2) 콘크리트 배합비

압축강도와 음속과의 관계는 배합비에 따라서 현저하게 차이가 난다. 즉, W/C가 작고, 굵은골재량이 많은 배합 등에서는 초음파속도가 빠르게 된다.

3) 내부철근

강재를 통과하는 음속(약 5m/sec)은 콘크리트를 통과하는 음속보다 빠르기 때 문에 내부에 철근 등이 존재할 경우에는 기존의 연구결과에 따라 측정된 음속 값을 보정해야 한다.

4) 콘크리트 온도

10°C~30°C까지는 콘크리트의 온도변화가 초음파속도에 큰 영향을 미치지 않는 다. 그러나 이 범위 이상에서는 <표 2.7>과 같이 초음파속도를 수정해야 한다.

5) 철근의 영향

철근을 통해 전달되는 초음파속도가 콘크리트를 통해 전달되는 속도보다 2배 정 도 빠르기 때문에 초음파속도 측정 시 미리 철근의 위치를 탐지하여 철근의 영향 을 받지 않는 곳에서 초음파속도를 측정할 필요가 있다.

6) 습도환경의 영향

초음파는 0°C~40°C 범위에서는 습기의 차가 거의 없는 환경 등이 고려되어야 한다.

(4) 초음파속도에 의한 품질판정

초음파속도에 의한 품질의 판정은 <표 2.8>과 같다.

<표 2.7> 콘크리트 온도에 따른 초음파속도 수정계수

° ⊑(°C)	초음파속도	ਸੀ ਹ	
~ 또(()	기건 콘크리트	습윤 콘크리트	
60	+ 5	+ 4	
40	+ 2	+ 1.7	
20	0	0	그러나 귀서 까기가
0	-0.5	-1	금하는 것이 바람식암
-4	-1.5	-7.5	

<표 2.8> 초음파속도에 의한 품질판정

전파속도(km/sec)	품 질 기 준	비고
4.6이상	우수함	
3.7~4.6	양호함	미구 쾨니리
3.1~6.7	보통	
2.1~3.1	불량	(ASIM)
2.1이하	사용불가	

2.3.2 복합법

복합법은 비파괴 실험 방법 중 2가지 이상의 결과를 이용, 상호 보완하여 콘크리 트의 강도를 추정하는 방법으로서, 콘크리트의 압축강도와 일정한 상관관계를 갖는 비파괴 실험 값을 추정식에 순차 변수로서 추가하면 강도 추정의 정도가 향상될 것 이라는 전제에 기초하고 있다. 가장 일반적인 방법으로는 반발경도법과 초음파속도 법을 이용한 조합법이 있다.

실험방법은 콘크리트 공시체나 현장 콘크리트 구조물에서 반발경도와 초음파속도를 측정하여 이 두 개의 변수를 독립변수로 하는 중회귀식을 구하는 방법으로, 단일법과 비교할 때 상관계수(相關係數, coefficient of correlation) 및 결정계수(決定係數, coefficient of determination)가 높은 강도추정시 높은 신뢰성의 확보가 가능한다.

반발경도법과 초음파속도법은 강도 추정 외에 콘크리트의 균질성 판정이나 초기
재령 콘크리트의 품질 관리 등에도 적용할 수 있지만, 본 방법은 콘크리트의 압축강 도에만 적용된다.

본연구에서 복합법에 의한 강도 추정은 코어 공시체에 대한 압축강도와 반발경 도, 초음파 속도의 회귀분석을 통해 추정식을 제안하고자 한다.

복합법에 의한 기존 제안식은 <표 2.9>와 같으며 일본건축학회식은 보통콘크리 트와 경량콘크리트에 대해서 강도를 추정하였으며, 谷川식은 26주 이내의 재령보정 계수를 두어 콘크리트 강도를 추정하였다.

<표 2.9> 복합법에 의한 기존 제안식

구 분	제 안 식	비 고
일본 건축학회식	$ \begin{aligned} & \mathbf{f}_{cu} = (8.2 \mathrm{R_o} + 269 V_p - 1094) / 10 \\ & \mathbf{f}_{cu} = (4.1 \mathrm{R_o} + 334 V_p - 1022) / 10 \end{aligned} $	보통 콘크리트 경량 콘크리트
(谷川)식	$f_{cu} = (10.2(K \cdot R_o) + 223 V_p - 960)/10$	

주: f_{cu}: 압축강도(MPa), V_n: 초음파속도(km/sec), Ro : 반발도

K: 재령에 의한 보정계수

- •재령 13주 이내, K=1.0
- ·재령 13주~26주 이내, K=1.0~0.9사이 직선보간
- ·재령 26주 이상, K=0.9

Ⅲ. 실험계획

3.1 실험의 개요

본 연구에서는 보통콘크리트와 시멘트의 대체 자원으로서 사용이 일반화되고 있 는 플라이애시(FA), 고로(高爐)슬래그(BF), 실리카흄(SF) 등의 혼화재를 사용한 콘 크리트를 대상으로 실험한다.

보통콘크리트와 혼화재 사용 콘크리트를 재령 7일에서 재령 1,460일 경과에 따른 반발경도와 초음파속도에 의한 단일법과 반발경도와 초음파속도 등의 2개의 변수 를 적용한 복합법을 이용한 콘크리트 압축강도의 추정에 관한 연구로, 실제 현장여 건과 유사한 조건을 적용하여 신뢰도를 높이기 위하여 벽식 구조체를 제작하여 기 중양생 후 코어 채취를 한다.

보통콘크리트를 설계기준강도 24MPa로, 대상콘크리트는 문헌조사를 통해 강도발 현이 우수하고 최근 현장에서 사용되고 있는 배합비를 적용하여 예비실험을 실시 후 배합비를 결정한다.

실험에 사용된 실험체는 원주형(圓柱形) 공시체와 코어 채취를 위한 콘크리트 벽 두께 200mm의 구조체를 제작하여 파괴 압축강도 실험과 비파괴 실험을 실시한다.

콘크리트는 현재 시공현장에서 가장 많이 사용하는 굵은 골재 최대치수 20mm, 콘크리트 배합강도는 24MPa, 슬럼프는 15±2cm를 기준으로, 재령은 7일, 28일, 60 일, 90일, 180일, 365일, 730일, 1,460일로 결정한다.

양생 후 파괴 압축강도 실험과 비파괴 실험을 실시하여 혼화재 사용한 콘크리트 별, 비파괴 실험 측정 위치에 따른 추정식을 제안하고, 기존 제안식과 비교와 재령 에 따른 추정식의 변화와 신뢰성을 검토한다.



[그림 3.1] 추정식 작성 흐름도

3.2 사용 재료

3.2.1 시멘트

본 실험에 사용할 시멘트는 KS L 5201(포틀랜드 시멘트)에 규정된 S사 제품을 사용하고, 시멘트의 화학적 성분 및 물리적 성질은 <표 3.1>과 같다.

<표 3.1> 시멘트의 화학적 성분 및 물리적 성질

구 분		화 학 성 분 (%)						
	SiO2	Al_2O_3	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO_3	Ig. loss ⁴⁾	
보통 포틀랜드 시멘트	21.9	6.59	2.81	60.12	3.32	2.11	2.58	3.15

3.2.2 골재

잔골재는 KS F 2502(골재의 체가름 실험 방법)의 규격에 적합한 섬진강사 강모 래를 사용하며, 굵은골재는 KS 규격에 적합한 깬 자갈을 사용한다. 잔 골재와 굵 은 골재의 물리적 성질은 <표 3.2>와 같다.

<표 3.2> 골재의 물리적 성질

골재 종류	최대치수 (<i>mm</i>)	단위용적질량 (<i>kg/m[*]</i>)	비중	흡수율 (%)	조립율 (<i>F. M</i>) ⁵⁾
잔골재	5	1,653	2.61	1.05	2.69
굵은골재	20	1,550	2.67	1.24	6.83

3.2.3 혼화재

혼화재로서 플라이애시는 충남보령발전소에서, 고로슬래그 미분말은 광양제철소 에서, 실리카흄은 삼림산업에서 수입한 Elkern Micosilica를 사용한다.

- 4) *Ig. loss* (강열감량, 强熱減量, Loss of ignition) : 시멘트나 석회 등을 고온에서 가열할 때에 잃는 수분, 결정수, 탄산가스, 휘발성 물질 등의 무게.
- 5) 조립율(fineness modulus : F.M) : 골재의 입도를 표시하는 계수로서 10개의 표준체를 이용해서 체가
 름 한후에 각 체에 남은 양을 전시료의 중량백분율로 계산한 후에 이들 합계를 100으로 나눈값.

콘크리트에 사용된 혼화재의 화학적 조성은 <표 3.3>과 같다.

구 분		화 학 성 분 (%)							
	SiO2	Al_2O_3	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO_3	Ig.loss		
플라이애시	52.09	25.36	12.90	2.58	1.37	0.07	3.70	2.15	
고로슬래그	34.14	17.04	0.32	43.31	6.35	0.08	0.88	2.90	
실리카흄	90.00	1.50	3.00	2.00	3.00	_	3.00	2.51	

<표 3.3> 혼화재의 화학적 조성

3.2.4 콘크리트 배합

실험체에 사용된 콘크리트의 설계기준강도(*f_{ck}*)는 24MPa이며, 콘크리트의 배합 순서는 잔골재, 시멘트, 혼화재, 굵은골재 순서로 투입하며 비빔을 한 후 KS F 2402(포틀랜드 시멘트 콘크리트의 슬럼프 실험 방법)의 규격에 의하여 슬럼프를 확 인한 후 부어넣기 한다.

동시에 KS F 2405(콘크리트의 압축강도 실험 방법)의 규격에 따라 원주형 공시 체를 제작하여 재령별 압축강도를 측정하며 콘크리트 배합표는 <표 3.4>와 같다.

재료	W/C	치환율	중 량 배 합 (<i>kg/m</i>)						
종류	(%)	(%)	W	С	S	G	혼화재		
보 통 콘크리트		0	158	350	889	907	0		
FA 치환 콘크리트	50	30	158	245	889	907	105		
BF 치환 콘크리트		20	158	280	889	907	70		
SF 치환 콘크리트		20	158	280	889	907	70		

<표 3.4> 콘크리트 배합표

3.3 실험체 제작

본 연구에서는 비파괴 강도를 추정하기 위하여 실험변수에 따라 원주형 공시체 와 코어 채취용 구조체를 제작한다.

공시체는 Ø100mm×200mm로, 코어 공시체 채취를 의한 부재 실험체는 [그림 3.2]~[그림 3.3]과 같이 3,600mm(L)×1,800mm(W)×1,700mm(H)×200mm(t)로 실제 구조물과 같이 철근을 배근하여 콘크리트 벽체를 제작한다.



[그림 3.3] 구조체의 코어 채취도 및 코어 채취 전경

본 연구에서 실험체는 크게 보통콘크리트와 혼화재를 사용한 콘크리트의 코어공 시체 구분하며, 실험체명에 따른 실험 변수별 구분은 다음<표 3.5>와 같다.

코어 공시체에 따른 실험 변수별 구분은 다음과 같다.



<표 3.5> 실험 변수

실	험 요 인	수	군			
배	W/C		50%			
합	호 칭, 게	플라이애시(FA, 20%치	시환), 고로슬래그(BF, 30%치환)			
2]	는 와 세	실리카흄(SF, 20%치환)				
~F	슬 럼 프	15±2cm				
항	공 기 량		$4 \pm 1\%$			
부	공 시 체		공시체(M)			
,	그ス케	벼 퀜	상 부(CH)			
재	- [소:세	막 제	하 부(CL)			
	재 령	7, 14, 28, 60, 180, 365,730, 1,460일				

3.4 실험 방법

3.4.1 파괴 압축강도 실험

원주형 공시체와 코어공시체는 실험일까지 각 조건에 맞추어 폭로(暴露)시켜 두 며 표면을 연마한 후 0.05mm 정밀도를 갖는 버어니어캘리퍼스(Vernier Calipers)로 지름과 길이를 2회씩 측정한 후 평균값으로 단면적을 구한다.

실험은 최대하중 1,000kN, 최대유효높이 3m, 테이블 길이 4.2m의 만능구조실험기 에 가압판과 구좌(球座, Sperical Block)를 사용하여 KS F 2405(콘크리트의 압축강 도 실험 방법)에 따라 실험한다.



[사진 3.1] 압축강도 실험 전경

3.4.2 반발경도 측정

반발경도의 측정은 KS F 2730(콘크리트 압축 강도 추정을 위한 반발 경도 실험 방법)에 의하여 실시한다. 본 실험에 사용된 측정기는 스위스 NR형을 사용하며, 측 정에 앞서 테스트 앤벌(Test Anvil)을 이용하여 반발경도값을 81±1로 교정하여 실 시한다.

실험할 콘크리트 부재의 실험면은 다공질의 조악한 면을 피하고 평활한 면을 선

택해야 한다. 사용된 거푸집의 재질과 다르거나 미장 및 도장이 되어 있는 면은 평 활한 콘크리트의 반발경도와 크게 차이가 있으므로 마감면을 완전히 제거한 후 실 험한다.

실험값의 20개의 평균으로부터 오차가 20% 이상이 되는 경우의 실험값은 버리고 나머지 실험값의 평균을 구한다. 이때 범위를 벗어나는 실험값이 4개 이상인 경우 에는 전체 실험값군을 버리고 다시 실험체에 슈미트햄머를 타격하여 반발경도를 구하여야 한다.



[사진 3.2] 반발경도 측정 전경

3.4.3 초음파속도 측정

초음파속도는 KS F 2731(콘크리트 압축강도 추정을 위한 초음파펄스속도 실험 방법)에 의하여 실시한다.

실험은 콘크리트 구조물의 일정거리를 통과하는 발진자와 수신자의 사이의 펄스 (pulse) 통과 시간으로부터 초음파 속도를 측정함으로써 콘크리트의 압축강도를 추 정하기 위한 것이다.

실험을 실시전에 레퍼런스(reference) 바(bar)를 이용하여 영점보정을 하여 측정 기기의 정확도를 높인다. 실험체와 표면과 발신자와 수신자가 밀착을 위해서 발신 자와 수신자 양쪽에 그리스(grease)를 바르고 측정하며 수신자와 발신자의 방향을



바꾸어서 2번 실시한다.



[사진 3.3] 초음파속도 측정 전경

3.5 실험 기기

본 실험에 사용될 비파괴 측정기구는 초음파속도 측정기(PUNDIT), 반발경도 측 정기(Schumidt Hammer)이며 만능구조실험기(U.T.M) 등이 사용된다.

가. 압축강도 측정기

- (1) 기 기 명 : 만능구조실험기(Universal Testing Machine)
- (2) 제 조 사 : 한국 흥진정밀
- (3) 용 량 : 1,000kN
- (4) 작 동 : 유압식
- (5) 용 도 : 압축, 인장, 휨, 전단실험

나. 초음파속도 측정기

(1) 기 기 명 : PUNDIT (Portable Ultrasonic Non-destructive

Digital Indicating Tester)
(2) 발 명 자 : R. H. Elvery (England)
(3) 제 조 사 : 영국 C. N. S Instrument Ltd.
(4) 측정 정도 : ±0.1µsec
(5) 시간 측정 범위 : 0.1µsec[~]1,000µsec (표준 type)
(6) 전달 능력 : 0[~]15m (양쪽 표면에서 측정, 횡파 측정인 경우 0[~]1.5m)
(7) 입력 감도 : 54kHz로써 Signal 100µVolt, Impedence는 2MΩ
(8) 측정 온도 범위 : 0℃[~]40℃
다. 반발경도 측정기

(1) 기 기 명 : Schumidt Hammer NR type

- (2) 발 명 자 : Schumidt(Swizerland)
- (3) 제 조 사 : 스위스 Proceq
- (4) 타격 에너지 : 0.225 m·kgf

Ⅳ. 실험결과

4.1 실험결과

보통 콘크리트와 혼화재를 사용한 원주형 공시체와 구조체의 코어 공시체를 대 기중에서 양생시켜 재령에 따라 만능구조실험기를 이용한 파괴 압축강도실험을 실 시하였다.

각 실험체별로 파괴 압축강도실험과 비파괴 실험 결과는 <표 4.1>과 같다.

~ 종 류	재 령(일)	실 험 체 명	f _c (MPa)	V _p (km/sec)	R
	7	C-N-7	16.1	3.646	27.6
	14	C-N-14	18.1	3.751	28.4
	00	CH-N-28	28.4	4.195	33.5
	20	CL-N-28	32.4	4.235	36.7
	60	CH-N-60	29.0	4.204	36.5
		CL-N-60	34.5	4.276	37.2
	90	CH-N-90	33.5	4.230	37.5
보 통		CL-N-90	36.2	4.286	38.1
콘크리트	190	CH-N-180	35.7	4.295	38.6
	100	CL-N-180	36.6	4.302	39.4
	265	CH-N-365	35.3	4.294	39.4
	300	CL-N-365	36.8	4.393	40.7
	720	CH-N-730	37.0	4.313	38.7
	730	CL-N-730	36.3	4.423	41.4
	1460	CH-N-1,460	37.5	4.400	41.2
	1460	CL-N-1,460	39.9	4.543	42.8

<표 4.1> 코어 공시체 실험 결과

C : 코어 공시체, H : 구조체의 상부, L : 구조체의 하부, R : 실험체의 반발경도

종 류	재 령(일)	실 험 체 명	f _c (MPa)	Vp(km/sec)	R
	7	C-FA-7	17.9	3.852	26.0
	14	C-FA-14	24.2	4.021	28.4
	00	CH-FA-28	25.2	4.195	35.3
	28	CL-FA-28	29.3	4.107	36.4
	60	CH-FA-60	29.2	4.204	36.2
	00	CL-FA-60	31.9	4.170	36.7
FA	00	CH-FA-90	34.9	4.230	38.3
치화	90	CL-FA-90	35.2	4.366	39.1
712	190	CH-FA-180	35.0	4.295	41.0
콘크리트	100	CL-FA-180	36.3	4.455	42.1
	265	CH-FA-365	35.1	4.294	41.1
	305	CL-FA-365	35.6	4.474	42.5
	730	CH-FA-730	33.4	4.313	41.3
	730	CL-FA-730	38.6	4.434	41.4
	1460	CH-FA-1,460	33.4	4.553	46.4
	1400	CL-FA-1,460	38.4	4.453	47.1
	7	C-BF-7	14.9	3.667	26.7
	14	C-BF-14	18.0	3.762	29.1
	00	CH-BF-28	30.7	4.201	36.8
	20	CL-BF-28	30.8	4.228	36.7
	60	CH-BF-60	31.2	4.252	36.6
	00	CL-BF-60	31.2	4.281	36.6
BF	00	CH-BF-90	33.9	4.305	37.9
치하	90	CL-BF-90	36.2	4.379	39.2
712	190	CH-BF-180	34.8	4.446	41.0
콘크리트	100	CL-BF-180	36.2	4.457	42.0
	365	CH-BF-365	36.7	4.420	41.5
		CL-BF-365	37.2	4.448	41.6
	730	CH-BF-730	37.1	4.447	41.7
	100	CL-BF-730	39.0	4.407	41.9
	1460	CH-BF-1,460	34.7	4.372	39.3
	1460	CL-BF-1,460	38.4	4.390	49.0

종 류	재 령(일)	실 험 체 명	$f_c(MPa)$	V _p (km/sec)	R
	7	C-SF-7	11.7	3.319	23.4
	14	C-SF-14	14.7	3.569	25.1
	20	CH-SF-28	22.8	3.846	29.8
	20	CL-SF-28	26.9	4.049	30.3
	60	CH-SF-60	25.1	3.941	30.8
SE	00	CL-SF-60	27.8	4.050	31.4
51	90	CH-SF-90	27.6	4.010	32.7
치하		CL-SF-90	31.8	4.032	34.3
712		CH-SF-180	29.3	4.103	34.9
코그리티	100	CL-SF-180	33.9	4.134	35.3
229-	265	CH-SF-365	30.5	4.115	35.4
	305	CL-SF-365	31.6	4.141	35.6
	720	CH-SF-730	30.9	4.142	35.7
	730	CL-SF-730	33.7	4.159	37.2
	1460	CH-SF-1,460	30.6	4.049	35.2
	1400	CL-SF-1,460	33.0	4.072	38.8

4.1.1 파괴 압축강도 실험결과

재령에 따른 보통콘크리트의 압축강도는 [그림 4.1]과 같다.

[그림 4.1] 보통 콘크리트의 재령에 따른 압축강도

보통콘크리트 경우는 재령 28일 강도가 코어공시체의 상부는 28.4MPa, 코어공시 체의 하부는 31.9MPa로 설계기준강도 24MPa 이상의 압축강도를 나타내며, 코어공 시체의 상부보다는 코어 공시체 하부에서 높은 압축강도를 나타내었다.

재령 14일부터 28일사이에서 압축강도 발현율이 가장 크게 증가하였으며, 재령 60일 부터는 34MPa~40MPa 정도의 일정한 압축강도를 보였다.

FA 치환 콘크리트의 재령에 따른 압축강도는 [그림 4.2]와 같다.

재령 28일 강도가 코어공시체의 상부는 25.2MPa, 코어공시체의 하부는 29.3MPa 로 상부보다는 하부에서 압축강도가 더 크게 나타났으며, 코어공시체 상부, 하부 모두 설계기준강도 이상의 압축강도를 나타냈다

[그림 4.2] FA 치환 콘크리트의 재령에 따른 압축강도

재령 28일 보통콘크리트의 압축강도와 비교했을 경우, 코어공시체의 상부는 11.2%, 코어공시체의 하부는 9.6% 정도 보통콘크리트의 압축강도가 낮게 나타났다. 재령 90일까지 압축강도는 완만한 증가를 보였으며, 재령 90일부터는 보통콘크리 트의 압축강도와 유사한 압축강도를 나타냈다.

BF 치환 콘크리트의 재령에 따른 압축강도는 [그림 4.3]과 같다.

[그림 4.3] BF 치환 콘크리트의 재령에 따른 압축강도

재령 28일 강도가 코어공시체의 상부는 30.9MPa, 코어공시체의 하부는 30.8MPa로 설계기준강도 이상의 압축강도를 나타냈다. 코어공시체의 상부보다는 코어 공시체 하부의 압축강도가 높게 나타났다.

재령 28일 보통콘크리트의 압축강도와 비교했을 경우, 코어공시체의 상부는 8.1% 정도 압축강도가 높게 나타났으며, 코어공시체의 하부는 5.0% 정도 압축강도 가 낮게 나타났다.

재령 14일부터 28일까지 압축강도 발현율이 가장 크게 증가하는 양상을 보였으 며, FA 치환 콘크리트와 마찬가지로 재령 90일부터는 보통 콘크리트의 압축강도와 유사한 압축강도를 보였다. 재령일 730일부터 1,460일에서 약간의 강도저하양상을 나타냈으며 이는 구조체의 상부에서 코어를 채취하여 강도가 저하된 것으로 사료 된다.

SF 치환 콘크리트의 재령에 따른 압축강도는 [그림 4.4]와 같다.

[그림 4.4] SF 치환 콘크리트의 재령에 따른 압축강도

SF 치환한 콘크리트 경우는 재령 28일 강도가 코어공시체의 상부는 22.8MPa, 코어공시체의 하부는 26.9MPa로 코어공시체의 상부는 설계기준강도 이하의 압축 강도를 나타냈으며, 재령 60일 이후부터 설계기준강도 이상의 압축강도를 보였다.

SF 치환 콘크리트는 다른 혼화재를 치환한 콘크리트에 비해 가장 낮은 압축강도 발현율을 보였다.

재령 28일 보통콘크리트의 압축강도와 비교했을 경우, 코어공시체의 상부는 19.7%, 코어 공시체의 하부는 17.0% 정도 보통콘크리트의 압축강도보다 낮게 나타 내었다.

재령에 14일부터 180일까지 압축강도 발현율이 완만한 상승하는 것으로 나타났 으며, 다른 혼화재를 치환한 콘크리트에 비해 실리카흄 치환 콘크리트는 재령이 경 과할수록 보통콘크리트보다 다소 낮은 압축강도를 보였다.

다른 재령에 비해 재령 365 이후 강도저하 된 것은 코어채취 높이 때문인 것으로 사료된다.

4.1.2 반발경도 실험결과

재료별로 재령에 따른 반발경도를 비교했을 경우, 모든 콘크리트가 재령이 경과할수 록 반발경도는 증가하였으며, SF 치환 콘크리트가 다른 혼화재 치환 콘크리트보다 낮 은 반발경도를 나타냈다.

보통 콘크리트의 재령에 따른 반발경도는 [그림 4.5]와 같다.

재령별 코어공시체 상부와 하부의 반발경도를 비교했을 경우, 코어공시체 하부 가 상부보다 1.5~9.7% 정도 높게 나타났다.

재령별 반발경도의 발현은 재령 7일부터 28일 사이에서 가장 큰 반발경도 증가 를 보였으며 재령이 경과할수록 재령 28일 기준 상부는 9.1~26.0% 정도, 하부는 1.4~16.6% 정도 반발경도가 증가하였다.

[그림 4.5] 보통 콘크리트의 재령에 따른 반발경도

FA 치환 콘크리트의 재령에 따른 반발경도는 [그림 4.6]과 같다. 재령별 코어공 시체 상부와 하부의 반발경도를 비교했을 경우, 코어공시체 하부가 상부보다 0.2~ 3.4% 정도 높게 나타났다.

재령별 반발경도의 발현은 재령 7일부터 28일 사이에서 가장 큰 반발경도 증가 를 보였으며 재령이 경과할수록 재령 28일 기준 상부는 2.5~31.4% 정도, 하부는



0.8~29.4% 정도 반발경도가 증가하였다.

[그림 4.6] FA 치환 콘크리트의 재령에 따른 반발경도

BF 치환 콘크리트의 재령에 따른 반발경도 변화는 [그림 4.7]과 같다.

[그림 4.7] BF 치환 콘크리트의 재령에 따른 반발경도

재령별 코어공시체 상부와 하부의 반발경도를 비교했을 경우, 코어공시체 하부

가 상부보다 0.2~24.6% 정도 높게 나타났다.

재령별 반발경도의 발현은 재령 7일부터 28일 사이에서 가장 큰 반발경도 증가 를 보였으며 재령이 경과할수록 재령 28일 기준 상부는 2.8~13.3% 정도, 하부는 0.5~33.5% 정도 반발경도가 증가하였다.

SF 치환 콘크리트의 재령에 따른 반발경도 변화는 [그림 4.8]과 같다. 재령별 코 어공시체 상부와 하부의 반발경도를 비교했을 경우, 코어공시체 하부가 상부보다 1.3~10.1% 정도 높게 나타났다.

재령별 반발경도의 발현은 재령 7일부터 28일 사이에서 가장 큰 반발경도 증가 를 보였으며 재령이 경과할수록 재령 28일 기준 코어공시체 상부는 3.4~18.1% 정 도, 코어공시체 하부는 3.8~28.3% 정도 반발경도가 증가하였다.

[그림 4.8] SF 치환 콘크리트의 재령에 따른 반발경도

4.1.3 초음파속도 실험결과

보통 콘크리트의 재령에 따른 초음파속도는 [그림 4.9]와 같다.

재령별 코어공시체 상부와 하부의 초음파속도를 비교했을 경우, 코어공시체 하 부가 상부보다 1.0~3.3% 정도 높게 나타났다.

재령별 반발경도의 발현은 재령 7일부터 28일 사이에서 가장 큰 초음파속도 증 가를 보였으며 재령이 경과할수록 재령 28일 기준 코어공시체 상부는 0.2~4.9% 정도, 코어공시체 하부는 1.0~7.3% 정도 초음파속도가 증가하였다.

[그림 4.9] 보통 콘크리트의 재령에 따른 초음파속도

FA 치환 콘크리트의 재령에 따른 초음파속도는 [그림 4.10]과 같으며, 재령별 코 어공시체 상부와 하부의 초음파속도를 비교했을 경우, 코어공시체 하부가 상부보다 0.4~2.2% 정도 높게 나타났다.

재령별 반발경도의 발현은 재령 7일부터 28일 사이에서 가장 큰 초음파속도 증 가를 보였으며 재령이 경과할수록 재령 28일 기준 코어공시체 상부는 3.1~130% 정도, 코어공시체 하부는 1.5~8.3% 정도 초음파속도가 증가하였다.



[그림 4.10] FA 치환 콘크리트의 재령에 따른 초음파속도

BF 치환 콘크리트의 재령에 따른 초음파속도 변화는 [그림 4.11]과 같다.

[그림 4.11] BF 치환 콘크리트의 재령에 따른 초음파속도

재령별 코어공시체 상부와 하부의 초음파속도를 비교했을 경우, 코어공시체 하부 가 상부보다 0.2~0.7% 정도 높게 나타났다.

재령별 반발경도의 발현은 재령 7일부터 28일 사이에서 가장 큰 초음파속도 증 가를 보였으며 재령이 경과할수록 재령 28일 기준 코어공시체 상부는 1.2~5.9% 정 도, 코어공시체 하부는 1.3~5.4% 정도 초음파속도가 증가하였다.

[그림 4.12] SF 치환 콘크리트의 재령에 따른 초음파속도

SF 치환 콘크리트의 재령에 따른 초음파속도 변화는 [그림 4.12]와 같다.

재령별 코어공시체 상부와 하부의 초음파속도를 비교했을 경우, 코어공시체 하부 가 상부보다 0.4~5.3% 정도 높게 나타났다.

재령별 반발경도의 발현은 재령 7일부터 28일 사이에서 가장 큰 초음파속도 증 가를 보였으며 재령이 경과할수록 재령 28일 기준 코어공시체 상부는 2.5~7.7% 정 도, 코어공시체 하부는 0.6~2.7% 정도 초음파속도가 증가하였다.

4.2 기존 제안식 적용 결과

4.2.1 반발경도법에 의한 기존 제안식 적용 결과

1) 보통 콘크리트

보통콘크리트의 반발경도법에 의한 기존 제안식의 추정강도와 파괴강도 비교한 것은 <표 4.2>과 [그림 4.13]과 같다.

보통콘크리트의 경우, 기존 제안식의 추정강도와 파괴강도간에 일본건축학회식은 6%~88% 정도, 일본재료학회식은 2%~18% 정도, 동경도 건축재료검사소식은 1%~23% 정도, U.S Army 실험소식은 1%~28% 정도, 권영웅 식은 17%~61% 정도 차이를 보였으며, 일본재료학회식과 U.S Army 실험소식은 파괴강도와 가장 비슷한 경향을 보였으며 일본건축학회식은 최대 88%로 가장 큰 차이를 나타냈다.

スミ	재 령	시처케며	f_c	р		추정	강도 <i>(</i>)	(Pa)	
ਠ ਜਾ	(일)	결핍제경	(<i>MPa</i>)	л	1	2	3	4	5
	7	C-N-7	16.1	27.6	30.1	17.5	16.6	17.1	21.3
ч	14	C-N-14	18.1	28.4	30.7	18.5	17.4	18.1	22.9
- -	90	CH-N-28	28.4	33.5	34.4	25.1	22.5	25.1	32.5
	20	CL-N-28	32.4	36.7	36.8	29.3	25.7	29.8	38.7
통	60	CH-N-60	29.0	36.5	36.7	29.1	25.5	29.5	38.3
	00	CL-N-60	34.5	37.2	37.2	30.0	26.2	30.5	39.6
콘	90	CH-N-90	33.5	37.5	37.4	30.3	26.5	30.9	40.1
		CL-N-90	36.2	38.1	37.8	31.1	27.1	31.8	41.3
	190	CH-N-180	35.7	38.6	38.2	31.8	27.6	32.6	42.3
크	100	CL-N-180	36.6	39.4	38.8	32.8	28.4	33.8	43.8
	265	CH-N-365	35.3	39.4	38.7	32.8	28.4	33.8	43.7
리	300	CL-N-365	36.8	40.7	39.7	34.5	29.7	35.8	46.3
-1	720	CH-N-730	37.0	38.7	38.2	31.8	27.7	32.6	42.3
Е	730	CL-N-730	36.3	41.4	40.2	35.4	30.4	36.9	47.6
-	1460	CH-N-1,460	39.9	48.8	45.6	45.0	37.8	48.9	61.5
	1400	CL-N-1,460	37.5	49.7	46.2	46.1	38.7	50.4	63.2

<표 4.2> 반발경도법에 의한 기존 제안식의 추정강도와 파괴강도 비교(1)

1. 일본건축학회식, 2. 일본재료학회식,. 3.동경도 건축재료검사소식, 4. U.S Army 실험소식, 5. 권영웅 식

일본건축학회식과 권영웅 식은 모든 재령에서 파괴강도보다 높게 추정되었으며 나머지 제안식은 재령 14일까지는 파괴강도보다 추정강도가 높게 나타났다. 재령 28일후부터 재령 730일까지에서 파괴강도보다 추정강도가 낮은 경향을 보였으며, 재령 1,460일에서 추정강도보다 높게 추정되었다.

[그림 4.13 반발경도법에 의한 기존 제안식의 추정강도와 파괴강도 비교(1)

2) FA 치환 콘크리트

FA 치환 콘크리트의 반발경도법에 의한 기존 제안식의 추정강도와 파괴강도 비 교한 것은 <표 4.3>과 [그림 4.14]와 같다.

	재령	시처케며	f_c	л		추정	강도 <i>(</i>)	(Pa)	
σ π	(일)	결범제경	(<i>MPa</i>)	л	1	2	3	4	5
	7	C-FA-7	17.9	26.0	30.1	17.5	16.6	17.1	21.3
	14	C-FA-14	24.2	28.4	30.7	18.5	17.4	18.1	22.9
Ē٨	90	CH-FA-28	25.2	35.3	34.4	25.1	22.5	25.1	32.5
гА	20	CL-FA-28	29.3	36.4	36.8	29.3	25.7	29.8	38.7
え	60	CH-FA-60	29.2	36.2	36.7	29.1	25.5	29.5	38.3
	00	CL-FA-60	31.9	36.7	37.2	30.0	26.2	30.5	39.6
환	00	CH-FA-90	34.9	38.3	37.4	30.3	26.5	30.9	40.1
	90	CL-FA-90	35.2	39.1	37.8	31.1	27.1	31.8	41.3
코	190	CH-FA-180	35.0	41.0	38.2	31.8	27.6	32.6	42.3
L	100	CL-FA-180	36.3	42.1	38.8	32.8	28.4	33.8	43.8
ヨ	265	CH-FA-365	35.1	41.1	38.7	32.8	28.4	33.8	43.7
1	300	CL-FA-365	35.6	42.5	39.7	34.5	29.7	35.8	46.3
티	720	CH-FA-730	33.4	41.3	38.2	31.8	27.7	32.6	42.3
E	730	CL-FA-730	38.6	41.4	40.2	35.4	30.4	36.9	47.6
	1460	CH-FA-1,460	33.4	46.4	45.6	45.0	37.8	48.9	61.5
	1400	CL-FA-1,460	38.4	47.1	46.2	46.1	38.7	50.4	63.2

<표 4.3> 반발경도법에 의한 기존 제안식의 추정강도와 파괴강도 비교(2)

1. 일본건축학회식, 2. 일본재료학회식, 3.동경도 건축재료검사소식, 4. U.S Army 실험소식, 5. 권영웅 식

FA 치환 콘크리트의 경우, 기존 제안식의 추정강도와 파괴강도간에 일본건축학

회식은 9%~62%정도, 일본재료학회식은 1%~24% 정도, 동경도 건축재료검사소식 은 9%~28% 정도, U.S Army 실험소식은 3%~27% 정도, 권영웅 식은 6%~61% 정도 차이를 보였다.

일본재료학회식이 파괴강도와 가장 비슷한 경향을 나타냈으며 일본건축학회식과 U.S Army 실험소식은 파괴강도와 큰 차이를 보였다.

일본건축학회식과 권영웅 식은 추정강도는 파괴강도보다 높게 나타났으며 일본 재료학회식과 동경도 건축재료검사소식, U.S Army 실험소식의 추정강도는 파괴강 도보다 낮은 경향을 보였다.

권영웅 식은 재령 14일까지는 파괴강도보다 낮게 추정되었으며, 재령 28일부터는 파괴강도보다 높게 추정되었다.

[그림 4.14] 반발경도법에 의한 기존 제안식의 추정강도와 파괴강도 비교(2)

3) BF 치환 콘크리트

BF 치환 콘2크리트의 반발경도법에 의한 기존 제안식의 추정강도와 파괴강도 비 교한 것은 <표 4.4>과 [그림 4.15]와 같다.

기존 제안식의 추정강도와 파괴강도간에 일본건축학회식은 6%~98% 정도, 일본재

료학회식은 4%~10% 정도, 동경도 건축재료검사소식은 6%~22% 정도, U.S Army 실험소식은 1%~13% 정도, 권영웅 식은 20%~44% 정도 차이를 보였다.

조르	재령	시처궤며	f_c	D		추정 강도 <i>(MPa)</i>				
ŏπ	(일)	'큰 김 세 경	(<i>MPa</i>)	Л	1	2	3	4	5	
	7	C-BF-7	14.9	26.7	29.5	16.3	15.7	15.9	19.7	
DE	14	C-BF-14	18.0	29.1	31.2	19.4	18.1	19.0	24.1	
БΓ	റം	CH-BF-28	30.7	36.8	36.9	29.5	25.8	29.9	38.9	
	20	CL-BF-28	30.8	36.7	36.8	29.3	25.7	29.7	38.6	
-7]	60	CH-BF-60	31.2	36.6	36.7	29.2	25.6	29.6	38.5	
ヘ	00	CL-BF-60	31.2	36.6	36.9	29.6	25.9	30.0	39.0	
환	00	CH-BF-90	33.9	37.9	37.6	30.8	26.9	31.5	40.8	
	90	CL-BF-90	36.2	39.2	38.6	32.5	28.2	33.4	43.3	
	100	CH-BF-180	34.8	41.0	40.0	34.9	30.0	36.3	46.9	
콘	100	CL-BF-180	36.2	42.0	40.6	36.2	31.0	37.8	48.6	
Э	265	CH-BF-365	36.7	41.5	40.3	35.5	30.5	37.0	47.7	
크	300	CL-BF-365	37.2	41.6	40.3	35.6	30.6	37.1	47.9	
리	720	CH-BF-730	37.1	41.7	40.5	35.9	30.7	37.4	48.2	
F	730	CL-BF-730	39.0	41.9	40.6	36.0	30.9	37.6	48.5	
=	1460	CH-BF-1,460	34.7	39.3	38.7	32.7	28.3	33.7	43.6	
	1400	CL-BF-1,460	38.4	49.0	45.8	45.3	38.0	49.3	62.0	

<표 4.4> 반발경도법에 의한 기존 제안식의 추정강도와 파괴강도 비교(3)

1. 일본건축학회식, 2. 일본재료학회식, 3.동경도 건축재료검사소식, 4. U.S Army 실험소식, 5. 권영웅 식

[그림 4.15] 반발경도법에 의한 기존 제안식의 추정강도와 파괴강도 비교(3)

일본재료학회식이 파괴강도와 가장 비슷한 경향을 보였으며 일본건축학회식과 U.S Army 실험소식은 파괴강도와 큰 차이를 나타냈다. 동경도 건축재료검사소식은 파괴강도보다 다소 낮게 추정되었다.

일본건축학회식과 권영웅 식은 추정강도는 파괴강도보다 높게 나타났으며, 나머 지 기존 제안식은 재령 14일까지는 파괴강도보다 높게 추정되었으며 재령이 경과 할수록 파괴강도 보다 낮게 추정 되었고, 재령 730일이후 재령 1460일 사이에서 추정강도가 높게 나타났다.

BF 치환한 콘크리트를 반발경도법에 의해서 일본건축학회식와 권영웅 식으로 추정했을 경우는 추정강도가 파괴강도보다 과대 평가 될 것이며, 일본재료학학식과 동경도 건축재료검사소식은 추정강도는 파괴강도보다 과소 평가 될 것으로 사료된 다.

4) SF 치환 콘크리트

SF 치환 콘크리트의 반발경도법에 의한 기존 제안식의 추정강도와 파괴강도 비 교한 것은 <표 4.5>과 [그림 4.16]와 같다.

조르	재 령	실험체명	f _c p	D	추정 강도 <i>(MPa)</i>				
0 11	(일)		(MPa)	л	1	2	3	4	5
SF	7	C-SF-7	11.7	23.4	27.1	12.0	12.4	11.7	13.3
	14	C-SF-14	14.7	25.1	28.3	14.2	14.1	13.8	16.6
	7 0	CH-SF-28	22.8	29.8	31.8	20.4	18.8	20.0	25.6
⇒Ì	20	CL-SF-28	26.9	30.3	32.1	20.9	19.2	20.6	26.3
~	60	CH-SF-60	25.1	30.8	32.5	21.7	19.8	21.4	27.5
히.	00	CL-SF-60	27.8	31.4	32.9	22.4	20.4	22.2	28.5
컨	90	CH-SF-90	27.6	32.7	33.8	24.1	21.7	24.0	31.0
		CL-SF-90	31.8	34.3	35.1	26.2	23.3	26.3	34.1
퀷	180	CH-SF-180	29.3	34.9	35.5	26.9	23.9	27.1	35.1
ť		CL-SF-180	33.9	35.3	35.8	27.5	24.3	27.7	36.0
Э	365	CH-SF-365	30.5	35.4	35.8	27.6	24.4	27.8	36.1
-1		CL-SF-365	31.6	35.6	36.0	27.9	24.6	28.2	36.6
וב	720	CH-SF-730	30.9	35.7	36.1	28.1	24.7	28.3	36.8
티	730	CL-SF-730	33.7	37.2	37.1	29.9	26.2	30.4	39.5
Е	1460	CH-SF-1,460	30.6	35.2	35.7	27.4	24.2	27.6	35.8
	1400	CL-SF-1,460	33.0	38.8	38.3	32.0	27.8	32.9	42.6

<표 4.5> 반발경도법에 의한 기존 제안식의 추정강도와 파괴강도 비교(4)

1. 일본건축학회식, 2. 일본재료학회식, 3.동경도 건축재료검사소식, 4. U.S Army 실험소식, 5. 권영웅 식

SF 치환 콘크리트의 경우, 기존 제안식의 추정강도와 파과강도간에 일본건축학 회식은 13%~131%정도, 일본재료학회식은 3%~17% 정도, 동경도 건축재료검사소 식은 4%~23% 정도, U.S Army 실험소식은 5%~18% 정도, 권영웅 식은 5%~ 23% 정도 차이를 보였으며, 일본재료학회식과 U.S Army 실험소식이 파괴강도와 비슷한 경향을 보였으며 일본건축학회식과 권영웅식은 파괴강도와 큰 차이를 나타 냈다.

모든 제안식이 재령 초기에는 추정강도가 파괴강도보다 높은 경향을 보이다가 재령이 경과할수록 일본건축학회식과 권영웅 식은 추정강도는 파괴강도보다 높게 나타났으며 일본재료학학식, 동경도 건축재료검사소식, U.S Army 실험소식의 추 정강도는 파괴강도보다 낮은 경향을 보였다.

FA, BF 치환한 콘크리트와 마찬가지로 SF 치환한 콘크리트를 일본건축학회식 과 권영웅 식으로 추정했을 경우는 추정강도가 파괴강도보다 과대 평가 될 것으로 사료된다.

[그림 4.16] 반발경도법에 의한 기존 제안식의 추정강도와 파괴강도 비교(4)

4.2.2 초음파속도법에 의한 기존 제안식 적용 결과

(1) 보통콘크리트

보통콘크리트의 초음파속도법에 의한 기존 제안식의 추정강도와 파괴강도 비교 한 것은 <표 4.6>과 [그림 4.17]과 같다.

スピ	재 령	시처케며	f_c	V_{ρ}	추정 강도 <i>(MPa)</i>				
ਰ π	(일)	'큰 띰 세 경	(MPa)	(km/sec)	1	2	3	4	5
	7	C-N-7	16.1	3.646	16.4	25.5	16.0	12.9	12.9
	14	C-N-14	18.1	3.751	18.7	26.6	17.8	14.8	16.5
보	റം	CH-N-28	28.4	4.195	28.2	31.1	27.9	22.4	31.6
	20	CL-N-28	32.4	4.235	29.1	31.5	29.1	23.1	32.9
통	60	CH-N-60	29.0	4.204	28.4	31.2	28.1	22.6	31.9
	60	CL-N-60	34.5	4.276	29.9	31.9	30.1	23.8	34.3
7	90	CH-N-90	33.5	4.23	29.0	31.4	28.8	23.0	32.8
τ		CL-N-90	36.2	4.286	30.2	32.0	30.4	24.0	34.6
ョ	180	CH-N-180	35.7	4.295	30.3	32.1	30.6	24.1	34.9
		CL-N-180	36.6	4.302	30.5	32.2	30.9	24.2	35.2
	365	CH-N-365	35.3	4.294	30.3	32.1	30.6	24.1	34.9
리		CL-N-365	36.8	4.393	32.4	33.1	33.5	25.8	38.3
트	730	CH-N-730	37.0	4.313	30.7	32.3	31.2	24.4	35.6
		CL-N-730	36.3	4.423	33.1	33.4	34.5	26.3	39.3
	1,460	CH-N-1,460	39.9	4.434	33.3	33.5	34.8	26.5	39.6
		CL-N-1,460	37.5	4.356	31.7	32.7	32.4	25.2	37.0

<표 4.6> 초음파속도법에 의한 기존 제안식의 추정강도와 파괴강도 비교(1)

(1) 일본건축학회 (2) 일본재료학회식 (3) J. Pysziak의 제안식 (4) 谷川의 제안식 (5) 한전기술연구원

보통콘크리트의 초음파속도를 측정하여 그 결과를 기존 제안식에 적용하여 강도 를 추정해본 결과, 일본건축학회식은 2%~16%, 일본재료학회식은 1%~59%, J. Pysziak식은 1%~15%, 谷川식은 18%~33%, 한전기술연구원식은 1%~19% 정도 파괴강도와 차이를 보였다.

일본건축학회식과 J. Pysziak식의 제안식의 추정강도가 파괴강도와 비슷한 경향 을 보였으며, 谷川식은 추정강도가 파괴강도보다 최대 33%로 낮게 추정되었다.

일본재료학회식의 제안식은 재령 14일까지 추정강도가 파괴강도보다 높게 나타 났으며 재령이 경과할수록 추정강도가 파괴강도보다 낮은 경향을 보였다. 일본건축 학회식 및 J. Pysziak식, 谷川식은 모든 재령에서 파괴강도보다 낮게 추정되었다.

[그림 4.17] 초음파속도법에 의한 기존 제안식의 추정강도와 파괴강도 비교(1)

(2) FA 치환 콘크리트

FA 치환 콘크리트의 초음파속도법에 의한 기존 제안식의 추정강도와 파괴강도 비교한 것은 <표 4.7>과 [그림 4.18]과 같다.

조르	재 령	시처케며	f_c	V_{ρ}		(Pa)			
ሪ ተ	(일)	'큰 띰 세 경	(MPa)	(km/sec)	1	2	3	4	5
	7	C-FA-7	17.9	3.852	20.8	27.6	19.8	16.5	19.9
E A	14	C-FA-14	24.2	4.021	24.4	29.3	23.5	19.4	25.6
ГА	20	CH-FA-28	25.2	4.195	24.6	29.4	23.7	19.5	25.9
치	20	CL-FA-28	29.3	4.107	26.3	30.2	25.6	20.9	28.6
	60	CH-FA-60	29.2	4.204	27.3	30.7	26.8	21.7	30.1
환	00	CL-FA-60	31.9	4.170	27.6	30.8	27.2	22.0	30.7
-	00	CH-FA-90	34.9	4.230	29.8	31.9	30.0	23.7	34.1
	90	CL-FA-90	35.2	4.366	31.9	32.8	32.7	25.3	37.3
콘	180	CH-FA-180	35.0	4.295	33.8	33.7	35.5	26.9	40.4
		CL-FA-180	36.3	4.455	33.8	33.8	35.5	26.9	40.4
크	365 0	CH-FA-365	35.1	4.294	34.2	33.9	36.1	27.2	41.0
_1		CL-FA-365	35.6	4.474	34.2	33.9	36.1	27.2	41.0
디	730	CH-FA-730	33.4	4.313	33.8	33.7	35.5	26.9	40.4
Е		CL-FA-730	38.6	4.434	33.3	33.5	34.8	26.5	39.7
	1 / 60	CH-FA-1,460	33.4	4.553	35.9	34.7	38.7	28.6	43.7
	1,400	CL-FA-1,460	38.4 4.453 33	33.7	33.7	35.4	26.8	40.3	

<표 4.7> 초음파속도법에 의한 기존 제안식의 추정강도와 파괴강도 비교(2)

(1) 일본건축학회 (2) 일본재료학회식 (3) J. Pysziak의 제안식 (4) 谷川의 제안식 (5) 한전기술연구원

FA 치환 콘크리트의 초음파속도를 측정하여 그 결과를 기존 제안식에 적용하여 강도를 추정해본 결과, 일본건축학회식은 88%~117%, 일본재료학회식은 92%~ 155%, J. Pysziak식은 88%~111%, 谷川식은 70%~92%, 한전기술연구원식은 100%~118% 정도 파괴강도와 일치를 보였다.

일본건축학회식과 J. Pysziak식의 제안식이 추정강도가 파괴강도와 비슷한 경향 을 보였으며, 일본재료학회식은 재령 14일까지는 파괴강도와 큰차이를 보였으며 재 령이 경과할수록 파괴강도와 비슷한 경향을 나타냈으며, 谷川식은 전체적으로 8%~30% 정도 낮게 추정되었다.

일본건축학회식과 일본재료학회식의 제안식은 재령 14일까지 추정강도가 파괴강 도보다 높게 나타났으며 재령이 경과할수록 일본건축학회식은 1%~17%, 일본재료 학회식은 1%~55%, J. Pysziak식은 2%~11%, 한전기술연구원식은 1%~18% 정도 파괴강도보다 높게 추정되었다. J. Pysziak식은 2%~12%, 谷川식은 8%~30% 정도 재령에서 파괴강도보다 낮게 추정되었다.

[그림 4.18] 초음파속도법에 의한 기존 제안식의 추정강도와 파괴강도 비교(2)

(3) BF 치환 콘크리트

BF 치환 콘크리트의 초음파속도법에 의한 기존 제안식의 추정강도와 파괴강도 비교한 것은 <표 4.8>과 [그림 4.19]와 같다.

재령 추정 강도(MPa) f_c V_p 종 류 실험체명 (일) (MPa) (km/sec) 2 3 5 1 4 7 C-BF-7 14.9 3.667 16.8 25.716.3 13.3 13.6 C-BF-14 18.0 3.762 18.9 26.7 18.0 14.9 16.9 14 BF CH-BF-28 30.7 4.201 28.3 31.2 28.0 22.531.8 28 CL-BF-28 30.8 4.228 28.9 31.4 28.8 23.0 32.7 치 31.7 29.5 CH-BF-60 31.2 4.252 29.4 23.433.5 60 CL-BF-60 31.2 4.281 30.0 32.0 30.3 23.9 34.5 환 CH-BF-90 33.9 4.305 29.1 31.5 29.1 23.133.0 90 CL-BF-90 36.2 4.379 32.2 33.0 33.1 25.6 37.8 콘 CH-BF-180 34.8 4.44633.6 33.7 35.2 26.740.1 180 CL-BF-180 36.2 4.457 33.8 33.8 35.5 26.940.4 ヨ CH-BF-365 33.0 26.3 39.2 36.7 4.420 33.4 34.4365 CL-BF-365 37.2 4.448 33.6 33.7 35.2 26.8 40.1 리 CH-BF-730 37.1 4.447 33.6 33.7 35.2 26.8 40.1 730 CL-BF-730 39.0 4.407 32.8 33.3 34.0 26.138.7 E CH-BF-1,460 34.7 32.0 32.9 37.6 4.37232.9 25.51,460 CL-BF-1,460 38.4 4.390 32.4 33.1 33.5 25.8 38.2

<표 4.8> 초음파속도법에 의한 기존 제안식의 추정강도와 파괴강도 비교(3)

(1) 일본건축학회 (2) 일본재료학회식 (3) J. Pysziak의 제안식 (4) 谷川의 제안식 (5) 한전기술연구원

BF 치환 콘크리트의 초음파속도를 측정하여 그 결과를 기존 제안식에 적용하여 강도를 추정해본 결과, 일본건축학회식은 87%~113%, 일본재료학회식은 88%~ 173%, J. Pysziak식은 89%~109%, 谷川식은 69%~89%, 한전기술연구원식은 9 2%~113% 정도 압축강도와 차이를 보였다.

일본건축학회식과 J. Pysziak식의 제안식이 추정강도가 파괴강도와 비슷한 경향 을 보였으며, 일본재료학회식은 재령 14일까지는 파괴강도와 큰 차이를 보였으나 재령이 경과할수록 파괴강도와 비슷한 경향을 보였다. 谷川식은 전체적으로 11%~ 31% 정도 낮게 추정되었다.

일본건축학회식과 일본재료학회식의 제안식은 재령 14일까지 추정강도가 파괴강도 보다 높게 나타났으며 재령이 경과할수록 일본건축학회식은 5%~12% 정도, 일본재 료학회식은 5%~12% 정도, J. Pysziak식은 6%~11% 정도 파괴강도보다 낮게 추정 되었다.

한전기술연구원식은 재령 14일까지는 6%~8% 정도 파괴강도보다 낮게 추정되었 으나 재령이 경과할수록 1%~13% 정도 파괴강도보다 높게 추정되었다.

[그림 4.19] 초음파속도법에 의한 기존 제안식의 추정강도와 파괴강도 비교(3)

(4) SF 치환 콘크리트

SF 치환 콘크리트의 초음파속도법에 의한 기존 제안식의 추정강도와 파괴강도 비교한 것은 <표 4.9>과 [그림 4.20]과 같다.

SF 치환 콘크리트의 초음파속도를 측정하여 그 결과를 기존 제안식에 적용하여 강도를 추정해본 결과, 일본건축학회식은 80%~100%, 일본재료학회식은 94%~ 189%, J. Pysziak식은 77%~100%, 谷川식은 62%~79%, 한전기술연구원식은 1 6%~94% 정도 압축강도와 차이를 보였다.

일본건축학회식의 제안식이 추정강도가 파괴강도와 비슷한 경향을 보였으며, 일본 재료학회식은 재령 28일까지는 파괴강도와 큰 차이를 보였으나 재령이 경과할수록 파 괴강도와 비슷한 경향을 나타냈으며, 谷川식은 최대 38%로 가장 큰 차이를 보였다.

일본재료학회식의 제안식은 재령 60일까지 추정강도가 파괴강도보다 높게 나타 났으며 재령이 경과할수록 1%[~]6% 정도 파괴강도보다 낮게 추정되었다. 일본건축 학회식은 8%[~]20%, J. Pysziak식은 12%[~]23%, 谷川식은 21%[~]38%, 한전기술연 구원식은 6%[~]84% 정도로 모든 재령에서 파괴강도보다 낮게 추정되었다. 전체적 으로 재령 14일까지 추정강도가 큰 변화를 보인후 재령 28일이후 비슷한 경향의

강도변화를 나타냈다.

조르	재령	재령 시허체며		V_p	추정 강도 <i>(MPa)</i>				
0 11	(일)	'큰 띰 세 경	(<i>MPa</i>)	(km/sec)	1	2	3	4	5
	7	C-SF-7	11.7	3.319	9.4	22.2	11.5	7.3	1.8
CD	14	C-SF-14	14.7	3.569	14.7	24.7	14.7	11.6	10.3
эг	20	CH-SF-28	22.8	3.846	20.7	27.5	19.7	16.4	19.7
え	20	CL-SF-28	26.9	4.049	25.1	29.6	24.2	19.9	26.6
- 1	60	CH-SF-60	25.1	3.941	22.7	28.5	21.7	18.0	22.9
환	00	CL-SF-60	27.8	4.050	25.1	29.6	24.2	19.9	26.6
콘	00	CH-SF-90	27.6	4.010	24.2	29.2	23.2	19.2	25.3
	30	CL-SF-90	31.8	4.032	24.7	29.4	23.8	19.6	26.0
	180	CH-SF-180	29.3	4.103	26.2	30.2	25.5	20.8	28.4
		CL-SF-180	33.9	4.134	26.9	30.5	26.3	21.4	29.5
크	265	CH-SF-365	30.5	4.115	26.5	30.3	25.8	21.0	28.8
-1	305	CL-SF-365	31.6	4.141	27.0	30.5	26.5	21.5	29.7
디	720	CH-SF-730	30.9	4.142	27.0	30.5	26.5	21.5	29.7
Ē	130	CL-SF-730	33.7	4.159	27.4	30.7	26.9	21.8	30.3
	1 460	CH-SF-1,460	30.6	4.049	25.1	29.6	24.2	19.9	26.6
	1,400	CL-SF-1,460	33.0	4.072	25.5	29.8	24.7	20.3	27.4
(1) 일본	신축학회	(2) 일본재료학회식	4 (3) J. Pys	ziak의 제안	식 (4) 김	別의 제영	· 식 (5)	한전기술	연구원

<표 4.9> 초음파속도법에 의한 기존 제안식의 추정강도와 파괴강도 비교(4)

[그림 4.20] 초음파속도법에 의한 기존 제안식의 추정강도와 파괴강도 비교(4)

4.2.3 복합법에 의한 기존 제안식 적용 결과

(1) 보통 콘크리트

보통콘크리트의 복합법에 의한 기존 제안식의 추정강도와 파괴강도 비교한 것은 <표 4.10>과 [그림 4.21]과 같다.

~ 르	재령	시처레며	fc	f _c _D		추정 강	강도 <i>(MPa)</i>	
0 11	(일)	'큰 띰 세 경	(MPa)	л	(km/sec)	1	2	
	7	C-N-7	16.05	27.60	3.646	11.3	28.9	
	14	C-N-14	18.07	28.40	3.751	14.8	30.5	
	 00	CH-N-28	28.39	33.47	4.195	30.9	39.1	
	20	CL-N-28	31.87	36.71	4.235	34.6	42.6	
보 통	60	CH-N-60	29.01	36.53	4.204	33.6	42.2	
		CL-N-60	33.80	37.22	4.276	36.1	43.4	
	90	CH-N-90	33.50	37.47	4.23	35.1	43.3	
		CL-N-90	36.15	38.10	4.286	37.1	44.4	
ਦ -	180	CH-N-180	35.67	38.62	4.295	37.8	44.9	
च		CL-N-180	37.01	39.40	4.302	38.6	45.8	
리	365	CH-N-365	35.34	39.38	4.294	38.4	45.7	
Ē		CL-N-365	36.81	40.72	4.393	42.2	47.8	
	730	CH-N-730	36.95	38.65	4.313	38.3	45.1	
		CL-N-730	36.32	41.42	4.423	43.5	48.7	
	1 460	CH-N-1,460	39.89	48.75	4.434	49.8	56.1	
	1,400	CL-N-1,460	37.51	49.65	4.356	48.5	56.4	

<표 4.10> 복합법에 의한 기존 제안식의 추정강도와 파괴강도 비교(1)

(1) 일본건축학회식, (2) 谷川 외 3인 제안식

보통 콘크리트의 파괴강도와 반발경도 및 초음파속도를 측정하여 기존 제안식에 적용하여 강도를 추정해본 결과, 일본건축학회식은 71%~127%, 谷川식은 125%~ 180% 정도 파괴강도와 일치를 보였다. 일본건축학회식의 제안식이 추정강도가 파 괴강도와 비슷한 경향을 보였으며, 谷川식은 가장 큰 차이를 보였다.

일본건축학회식과 일본재료학회식의 제안식은 재령 14일까지 18%~29% 정도 추 정강도가 파괴강도보다 낮게 나타났으며 재령이 경과할수록 4%~27%정도 파괴강 도보다 높게 추정되었다. 谷川식은 재령 14일까지 69%~80% 정도 추정강도가 파 괴강도 보다 높은 경향을 보이다가 재령이 경과할수록 25%~45%정도 파괴강도보 다 높게 추정되었다.
[그림 4.21] 복합법에 의한 기존 제안식의 추정강도와 파괴강도 비교(1)

(2) FA 치환 콘크리트

FA 치환 콘크리트의 복합법에 의한 기존 제안식의 추정강도와 파괴강도 비교한 것은 <표 4.11>과 [그림 4.22]와 같다.

FA 치환 콘크리트의 파괴강도와 반발경도 및 초음파속도를 측정하여 기존 제안 식에 적용하여 강도를 추정해본 결과, 일본건축학회식은 87%~140%, 谷川식은 129%~162% 정도 파괴강도와 일치를 보였다.

일본건축학회식의 제안식이 추정강도가 파괴강도와 비슷한 경향을 보였으며, 谷 川식은 가장 큰 차이를 보였다.

일본건축학회식과 일본재료학회식의 제안식은 재령 14일까지 9%~13% 정도 추 정강도가 파괴강도보다 낮게 나타났으며 재령이 경과할수록 4%~40%정도 파괴강 도보다 높게 추정되었다.

谷川식은 재령 7일에 62% 정도 추정강도가 파괴강도 보다 높은 경향을 보이다가 재령이 경과할수록 29%[~]53%정도 파괴강도보다 높게 추정되었다.

조르	재령	시허케며	f_c	D	Vp	추정 강	도 <i>(MPa)</i>
σπ	(일)	'큰 띰 세 경	(<i>MPa</i>)	л	(km/sec)	1	2
	7	C-FA-7	17.9	26.0	3.852	15.6	29.0
	14	C-FA-14	24.2	28.4	4.021	22.0	32.7
FA	20	CH-FA-28	25.2	35.3	4.195	27.9	39.5
-7]	20	CL-FA-28	29.3	36.4	4.107	30.9	41.3
ヘ	60	CH-FA-60	29.2	36.2	4.204	32.0	41.4
화	00	CL-FA-60	31.9	36.7	4.17	32.9	42.1
Ľ.	<u>u</u> 00	CH-FA-90	34.9	38.3	4.23	36.9	44.4
	90	CL-FA-90	35.2	39.1	4.366	40.1	46.0
콘	100	CH-FA-180	35.0	41.0	4.295	44.1	48.6
-	100	CL-FA-180	36.3	42.1	4.455	45.0	49.6
크	265	CH-FA-365	35.1	41.1	4.294	44.7	48.8
귀	300	CL-FA-365	35.6	42.5	4.474	45.8	50.2
ч	720	CH-FA-730	33.4	41.3	4.313	44.3	48.9
트 /30	730	CL-FA-730	38.6	41.4	4.434	43.8	48.8
	1 460	CH-FA-1,460	33.4	46.4	4.553	51.1	54.7
	1,400	CL-FA-1,460	38.4	47.1	4.453	49.0	54.6

<표 4.22> 복합법에 의한 기존 제안식의 추정강도와 파괴강도 비교(2)

(1) 일본건축학회식 f_{cu}= 8.2R+269 V_P-1094/10 (2) 谷川 외 3인 제안식 f_{cu}= 9.9R+79.2 V_P-273/10

[그림 4.32] 복합법에 의한 기존 제안식의 추정강도와 파괴강도 비교(2)

(3) BF 치환 콘크리트

BF 치환 콘크리트의 복합법에 의한 기존 제안식의 추정강도와 파괴강도 비교한 것은 <표 4.12>과 [그림 4.23]과 같다.

<표 4.12> 복합법에 의한 기존 제안식의 추정강도와 파괴강도 비교(3)

조리	재 령	시처케며	f _c p		Vp	추정 강	도 <i>(MPa)</i>
σπ	(일)	' 글 띰 세 경	(<i>MPa</i>)	Л	(km/sec)	1	2
	7	C-BF-7	14.9	26.7	3.667	11.1	28.2
DE	14	C-BF-14	18.0	29.1	3.762	15.6	31.3
БΓ	റം	CH-BF-28	30.7	36.9	4.201	33.8	42.5
치	20	CL-BF-28	30.8	36.7	4.228	34.4	42.5
1	60	CH-BF-60	31.2	36.6	4.252	35.0	42.6
화	00	CL-BF-60	31.2	36.6	4.281	36.0	43.1
-	00	CH-BF-90	33.9	37.9	4.305	35.6	43.8
	90	CL-BF-90	36.2	39.2	4.379	40.5	46.1
콘	190	CH-BF-180	34.8	41.0	4.446	43.9	48.5
	100	CL-BF-180	36.2	42.0	4.457	44.9	49.5
크	265	CH-BF-365	36.7	41.5	4.420	43.5	48.8
1	305	CL-BF-365	37.2	41.6	4.448	44.3	49.1
리 -	720	CH-BF-730	37.2	41.7	4.447	44.5	49.2
	730	CL-BF-730	39.0	41.9	4.407	43.5	49.1
	1 460	CH-BF-1,460	39.0	41.9	4.407	40.5	46.3
	1,400	CL-BF-1,460	39.0	41.9	4.407	48.9	56.0

(1) 일본건축학회식, (2) 谷川 외 3인 제안식

[그림 4.23] 복합법에 의한 기존 제안식의 추정강도와 파괴강도 비교(3)

BF 치환 콘크리트의 파괴강도와 반발경도 및 초음파속도를 측정하여 기존 제안 식에 적용하여 강도를 추정해본 결과, 일본건축학회식은 75%~125%, 谷川식은 129%~189% 정도 압축강도와 차이를 보였다. 일본건축학회식의 제안식이 추정강 도가 파괴강도와 비슷한 경향을 보였으며, 谷川식은 가장 큰 차이를 보였다.

일본건축학회식과 일본재료학회식의 제안식은 재령 14일까지 13%~25% 정도 추 정강도가 파괴강도보다 낮게 나타났으며 재령이 경과할수록 9%~25%정도 파괴강 도보다 높게 추정되었다.

谷川식은 재령 14일까지 74%~89% 정도 추정강도가 파괴강도보다 높은 경향을 보이다가 재령이 경과할수록 29%~36%정도 파괴강도보다 높게 추정되었다. 재령 28일 이후 부터 일본건축학회식과 谷川식 모두에서 파괴강도보다 높은 추정강도를 나타내었다.

(4) SF 치환 콘크리트

BF 치환 콘크리트의 복합법에 의한 기존 제안식의 추정강도와 파괴강도 비교한 것은 <표 4.13>과 [그림 4.24]와 같다.

조르	재 령	시허체며	f_c	D	V_p	추정 강	도 <i>(MPa)</i>
ŏπ	(일)	'큰 김 세 '8	(<i>MPa</i>)	Λ	(km/sec)	1	2
	7	C-SF-7	11.7	23.4	3.319	-0.9	22.1
SF	14	C-SF-14	14.7	25.1	3.569	7.2	25.8
U1	00	CH-SF-28	22.8	29.8	3.846	18.5	32.7
치	20	CL-SF-28	26.9	30.3	4.049	24.3	34.7
•	60	CH-SF-60	25.1	30.8	3.941	21.9	34.4
환	60	CL-SF-60	27.8	31.4	4.050	25.3	35.8
	00	CH-SF-90	27.6	32.7	4.010	25.2	36.8
	90	CL-SF-90	31.8	34.3	4.032	27.2	38.6
콘	190	CH-SF-180	29.3	34.9	4.103	29.6	39.7
	100	CL-SF-180	33.9	35.3	4.134	30.8	40.4
크	265	CH-SF-365	30.5	35.4	4.115	30.3	40.3
	300	CL-SF-365	31.6	35.6	4.141	31.2	40.8
리	720	CH-SF-730	30.9	35.7	4.142	31.3	40.9
	730	CL-SF-730	33.7	37.2	4.159	32.9	42.4
트	1 460	CH-SF-1,460	33.7	37.2	4.159	28.4	39.7
	1,400	CL-SF-1,460	33.7	37.2	4.159	32.0	43.4
(1) 이보기초하치지 (0) 公田 이 2이 케이지							

<표 4.13> 복합법에 의한 기존 제안식의 추정강도와 파괴강도 비교(4)

(1) 일본건축학회식, (2) 谷川 외 3인 제안식

SF 치환 콘크리트의 파괴강도와 반발경도 및 초음파속도를 측정하여 기존 제안 식에 적용하여 강도를 추정해본 결과, 일본건축학회식은 재령 49%~99%, 谷川식은 127%~189% 정도 파괴강도와 일치를 보였다. 일본건축학회식의 제안식이 추정강 도가 파괴강도와 비슷한 경향을 보였으며, 谷川식은 가장 큰 차이를 보였다.

일본건축학회식의 제안식은 재령 7일에서 추정강도값이 마이너스 값이 추정되었 으며 재령이 경과할수록 1%~51% 정도 추정강도가 파괴강도보다 낮게 나타났다. 谷川식은 재령 14일에 76%~89% 정도 추정강도가 파괴강도 보다 높은 경향을

보이다가 재령이 경과할수록 27%~36%정도 파괴강도보다 높게 추정되었다.

[그림 4.24] 복합법에 의한 기존 제안식의 추정강도와 파괴강도 비교(4)

V. 회귀분석에 의한 강도 추정식 제안

콘크리트 강도 추정에 있어서 파괴실험에 의한 압축강도와 비파괴 실험에 의한 반발경도, 초음파속도간의 함수관계를 규명하는 것은 보다 정확한 강도 추정을 위 해 무엇보다 중요하다.

이러한 변수들 중 다른 변수들에 의해 영향을 받는 변수를 종속변수(dependent variable) 또는 반응 변수(response variable)라 하고, 이러한 종속변수에 영향을 주 는 변수를 독립변수(independent variable)라 하며, 이러한 변수간의 함수관계를 통 계적으로 추가하는 방법을 회귀분석이라 한다. 일반적으로 회귀분석은 한 개뿐만이 아닌 여러 독립변수와 한 개의 종속변수 사이를 규명하는데 주로 사용된다.

주로 종속변수는 독립변수의 변화에 의하여 변하게 되므로 이를 회귀분석 할 때 에는 신뢰성 있는 독립변수들을 이용하여야 신뢰성을 확보할 수 있다.

한 개의 독립변수와 종속변수의 관계분석을 단순회귀분석(simple regression analysis)이라 하며, 두 개 이상의 독립변수가 사용되는 선형회귀분석을 중선형회귀 분석(multiple linear regression analysis)이라 부르며, 간단히 중회귀분석(multiple regression analysis)이라 한다.

본 연구에서는 보통콘크리트와 혼화재 사용 콘크리트의 강도 추정식의 신뢰성을 확보하고 보다 정확한 추정식을 결정하기 위하여, 각 실험체의 측정치를 재령별, 실험체별로 SPSS(Statistical Package for the Social Science)win(Windows) 10.0 통계분석 프로그램을 이용하여 단순회귀분석을 및 중회귀 분석하여 상관계수(CR, coefficient of coreation) 및 결정계수(CR², coefficient of determination) 등을 구하 였다.

5.1 단순회귀분석결과

보통콘크리트 및 혼화재 사용한 실험체의 파괴실험, 반발경도실험, 초음파속도실험 결과를 통계프로램 (SPSS 10.0)을 이용하여 단순 회귀분석결과는 <표 5.1>~<표 5.2> 및 [그림 5.1]~[그림 5.2]와 같다.

구 분	실험체명	추 정 식	결정계수 (CR ²)(%)
	CL-N	f _{cu} =1.5R-25.1	92.8
보통 콘크리트	CH-N	f _{cu} =1.5R-25.2	90.5
	C-N	f _{cu} =1.5R-22.8	88.0
	CL-FA	f _{cu} =1.0R-4.9	84.9
FA 치환 콘크리트	CH-FA	f _{cu} =0.8R-1.4	75.1
	C-BF	f _{cu} =0.9R-2.2	72.5
	CL-BF	f _{cu} =1.2R-14.9	85.0
BF 치환 콘크리트	CH-BF	f _{cu} =1.5R-24.0	93.6
	C-BF	f _{cu} =1.2R-14.2	82.4
	CL-SF	f _{cu} =1.5R-20.8	89.6
SF 치환 콘크리트	CH-SF	f _{cu} =1.6R-23.9	91.4
	C-SF	f _{cu} =1.5R-20.4	86.5
			1 - 1 - 1 - 1 - 1 - 1 - 1 - 1 - 1 - 1 -

<표 5.1> 반발경도법에 의한 회귀분석 결과

·C-〇: 코어 공시체(상, 하부 통합), ·CL-〇: 코어 공시체 하부, ·CH-〇: 코어 공시체 상부,

<표 5.2> 초음파속도법에 의한 회귀분석 결과

구 분	실험체명	추 정 식	결정계수 (CR ²)(%)
	CL-N	f_{cu} =27.7 V_{P} -84.9	94.3
보통콘크리트	CH-N	f_{cu} =29.9 V_{P} -93.8	91.2
	C-N	f_{cu} =28.6 V_{P} -88.5	89.3
다 기취	CL-FA	f_{cu} =29.1 V_{P} -92.0	86.3
FA 지완 코그리트	CH-FA	f_{cu} =22.4 V_{P} -65.5	77.8
2-4-	C-BF	f_{cu} =23.8V _P -70.2	74.0
हि नग	CL-BF	f_{cu} =27.1 V_{P} -83.7	93.2
BF 시완 코그리티	CH-BF	f_{cu} =29.4 V_PP -92.6	94.7
2-24-	C-BF	f_{cu} =28.0V _P -87.0	90.0
이미 귀 최	CL-SF	f_{cu} =26.6 V_P -77.9	87.9
SF 지완 코그리티	CH-SF	f_{cu} =25.2V _P -73.3	87.4
2-4-	C-SF	$f_{cu}=26.3V_{P}=77.3$	82.0

보통콘크리트 및 혼화재 사용 콘크리트의 반발경도법에 의한 추정식은 코어 공시체 의 상부와 하부를 통합한 추정식 보다는 상부와 하부로 구분한 추정식의 결정계수가 3.2~17.1% 정도 높게 나타났다.

초음파속도법의 경우, 앞의 반발경도법과 마찬가지로 코어공시체의 상부와 하부를 통합한 추정식 보다는 상부와 하부로 구분한 추정식의 결정계수가 2.1~16.6% 정도 높게 나타났다.

이와 같이 코어공시체의 상부와 하부를 통합한 추정식 보다 상부와 하부를 구분한 실험체의 결정계수가 높게 나온 것은 상부와 하부의 상관성이 높아 상부와 하부를 구 분한 실험체의 회귀식의 적합도를 나타내는 결정계수가 높게 나온 것으로 사료된다.

반발경도법과 초음파속도법의 결정계수로 비교했을 경우, SF 치환 콘크리트 추정식 을 제외한 나머지 추정식이 초음파속도법이 반발경도법 보다 0.8~9.2% 정도 결정계 수가 높은 경향을 보였으며 SF 치환 콘크리트의 추정식은 반발경도법의 추정식이 초 음파속도법의 추정식 보다 1.9~5.2% 정도 높게 나타났다.

(a) 보통 콘크리트



(b) FA 치환 콘크리트

(c) BF 치환 콘크리트



(d) SF 치환 콘크리트 [그림 5.1] 반발경도법에 의한 강도 회귀분석



(b) FA 치환 콘크리트

(c) BF 치환 콘크리트



(d) SF 치환 콘크리트 [그림 5.2] 초음파속도법에 의한 강도 회귀분석

5.2 중회귀분석결과

보통콘크리트 및 혼화재 사용한 실험체의 파괴압축강도실험, 반발경도실험, 초음파 속도실험결과를 통계프로램 (SPSS 10.0)을 이용하여 중회귀분석결과는 <표 5.3> 및 [그림 5.3]과 같다.

구 분	실험체명	추 정 식	결정계수 (CR ²)(%)
	CL-N	f_{cu} =18.1V _P +0.6R-64.7	94.7
보통콘크리트	CH-N	f_{cu} =22.9V _P +0.4R-77.5	93.4
	C-N	f_{cu} =16.3V _P +0.7R-64.1	93.2
D ^ 귀 최	CL-FA	f_{cu} =16.6V _P +0.5R-55.8	88.3
FA 시완 코그리트	CH-FA	f_{cu} =14.2V _P +0.3R-43.0	78.7
<u> </u>	C-FA	f_{cu} =13.7 V_{P} +0.4 R -43.0	76.2
्र न्व	CL-BF	$f_{cu}=22.3V_{P}+0.3R-75.9$	95.9
BF 시완 코그리티	CH-BF	f_{cu} =12.2V _P +0.8R-51.4	94.1
2-2-9	C-BF	f_{cu} =19.7 V_{P} P+0.4R-68.0	92.0
이고 귀취	CL-SF	f_{cu} =13.2V _P +0.8R-52.4	94.7
SF 지완 코그리트	CH-SF	f_{cu} =7.7V _P +1.1R-40.0	91.9
	C-SF	f_{cu} =11.6V _P +0.9R-48.5	90.2

<표 5.3> 복합법에 의한 회귀분석 결과

·C-〇:코어 공시체(상, 하부 통합), ·CL-〇:코어 공시체 하부, ·CH-〇:코어 공시체 상부,

보통콘크리트 및 혼화재 사용 콘크리트의 복합법에 의한 추정식은 코어 공시체의 상부와 하부를 통합한 추정식 보다는 상부와 하부로 구분한 추정식의 결정계수가 0. 2~15.9% 정도 높게 나타났다.

앞의 단일법인 반발경도법과 초음파속도법과 비교했을 경우, 복합법의 추정식의 결 정계수가 반발경도법에 의한 추정식 보다는 0.5~12.8% 정도, 초음파속도법 추정식 보 다는 0.4~10.0% 정도 복합법이 결정계수가 높게 나타났다.

따라서 현장에서 단일법인 반발경도법과 초음파속도법 보다는 복합법을 이용 강도 를 추정하는 것이 좋을 것으로 사료된다.



(a) 보통 콘크리트

(b) FA 치환 콘크리트

[그림 5.3] 복합법에 의한 강도 회귀분석

(d) SF 치환 콘크리트

(c) BF 치환 콘크리트

VI. 기존 제안식과 추정식 비교

6.1 반발경도법에 의한 기존 제안식과 추정식 비교

보통 콘크리트의 반발경도법에 의한 기존 제안식과 추정식의 오차율은 <표 6.1> 및 [그림 6.1]과 같다

			오 차 율(%)	
구 분	재 령	보 여그 추저시	이보게근하히시	U.S Army
		E ET T84	일근세포익외격	시험소식
	7	10.9	7.8	5.5
보	14	6.3	2.4	0.2
통	28	-3.6	-11.1	-10.4
코	60	1.5	-6.3	-4.6
-	90	-4.9	-13.4	-11.2
ユ	180	-3.8	-12.5	-9.5
리	365	1.3	-7.2	-3.8
트	730	-0.7	-9.3	-5.9
	1,460	3.7	-5.1	-0.3
FA	7	14.3	-16.1	-19.3
치하	14	-5.6	-31.0	-34.0
시원	28	7.8	3.3	4.3
	60	-1.5	-5.4	-4.0
콘	90	-9.3	-10.0	-7.2
크	180	-2.9	-0.1	3.9
귀	365	-1.5	-7.2	-3.8
4	730	-4.5	-9.3	-5.9
트	1,460	8.4	15.1	20.9

<표 6.1> 반발경도법에 의한 기존 제안식과 추정식의 오차율 비교(1)

보통 콘크리트의 재령에 따른 기존제안식과 본 연구의 추정식의 오차율 비교했 을 경우, 본 연구의 추정식은 0.7~10.9%, 일본재료학회식은 2.4.~13.4% 정도, U.S Army 실험소식은 0.2~11.16%로 본 연구의 추정식이 기존 제안식보다 재령별 로 낮은 오차율을 보였다.



[그림 6.1] 반발경도법에 의한 기존 제안식과 추정식의 오차율 비교(1)

FA 치환 콘크리트의 반발경도법에 의한 기존 제안식과 추정식의 오차율은 <표 6.1> 및 [그림 6.2]와 같다

재령에 따른 기존제안식과 본 연구의 추정식의 오차율 비교했을 경우, 본 연구의 추정식은 1.5~14.3% 정도, 일본재료학회식은 0.1~31.0% 정도, U.S Army 실험소 식은 3.8~34.0%로 본 연구의 추정식이 기존 제안식보다 재령별로 낮은 오차율을 보였다.

[그림 6.2] 반발경도법에 의한 기존 제안식과 추정식의 오차율 비교(2)

		오 차 율(%)			
구 분	재 령	비 서그 초기시	이보게ㅋ하.허시	U.S Army	
		ዊ ଅተ ተ%ዋ	철근새묘익외식	시험소식	
BF	7	18.2	8.8	6.3	
키히	14	14.5	7.0	5.1	
시컨	28	-1.1	-4.5	-3.0	
	60	-2.6	-6.1	-4.6	
콘	90	-7.8	-10.7	-8.1	
ヨ	180	1.5	-0.1	3.9	
ב	365	-2.2	-7.2	-3.8	
4	730	-4.4	-9.3	-5.9	
<u> </u>	1,460	5.8	4.6	9.6	
SF	7	15.1	3.1	0.5	
~ -) 히.	14	7.5	-5.3	-8.3	
시원	28	-5.0	-19.0	-21.0	
	60	-4.1	-17.9	-19.4	
콘	90	-7.2	-21.3	-21.5	
ヨ	180	0.2	-12.8	-12.1	
귀	365	1.1	-7.2	-3.8	
4	730	1.3	-9.3	-5.9	
<u> </u>	1,460	4.9	-7.3	-5.7	

<표 6.2> 반발경도법에 의한 기존 제안식과 추정식의 오차율 비교(2)

BF 치환 콘크리트의 반발경도법에 의한 기존 제안식과 추정식의 오차율은 <표 6.2> 및 [그림 6.3]과 같다

본 연구의 추정식은 재령 7일과 14일에서는 14.5~18.2% 정도 오차율을 보였으나 재령이 경과할수록 오차율은 낮게 나타났다.

재령에 따른 기존제안식과 본 연구의 추정식의 오차율 비교했을 경우, 본 연구의 추정식은 1.1~18.2% 정도, 일본재료학회식은 0.1~10.7% 정도, U.S Army 실험소 식은 3.0~9.6% 정도로 본 연구의 추정식이 기존 제안식보다 재령별로 낮은 오차율 을 보였다.

SF 치환 콘크리트의 반발경도법에 의한 기존 제안식과 추정식의 오차율은 <표 6.2> 및 [그림 6.4]와 같다

본 연구의 추정식은 재령 7일과 14일에서는 7.1~15.1% 정도의 높은 오차율을 보 였으나 재령이 경과할수록 오차율은 낮게 나타났다.

이는 구조체의 손상을 최소화하기 위해 재령 28일부터 코어를 채취하여 재령 7 일과 14일의 실험결과가 원주형 공시체의 실험결과로 대체 되므로 해서 원주형 공



시체와 코어공시체의 반발경도 차이로 인하여 재령 7일과 14일에 본 연구의 추정 식의 오차율이 높은 경향을 보이는 것으로 사료된다.

[그림 6.3] 반발경도법에 의한 기존 제안식과 추정식의 오차율 비교(3)

[그림 6.4] 반발경도법에 의한 기존 제안식과 추정식의 오차율 비교(4)

재령에 따른 기존제안식과 본 연구의 추정식의 오차율 비교했을 경우, 본 연구의 추정식은 0.2~15.1% 정도, 일본재료학회식은 3.1~19.0% 정도, U.S Army 실험소 식은 0.5~21.5% 정도로 본 연구의 추정식이 기존 제안식보다 재령별로 낮은 오차 율을 보였다.

6.2 초음파속도법에 의한 기존 제안식과 추정식 비교

보통 콘크리트의 초음파속도법에 의한 기존 제안식과 추정식의 오차율은 <표 6.3> 및 [그림 6.5]와 같다.

7.1	- 기 - 크		오 차 율(%)			
ተ ቲ	^11 5	본 연구 추정식	일본건축학회식	J.Pysziak 제안식		
보	7	-1.9	2.1	-0.6		
	14	3.2	2.8	-1.8		
0	28	5.8	-5.3	-6.0		
	60	4.2	-7.6	-7.8		
콘	90	-4.7	-17.8	-17.5		
7	180	-5.6	-19.5	-18.2		
	365	-1.2	-15.0	-12.6		
되	730	-0.8	-14.9	-11.8		
트	1,460	1.6	-13.4	-7.5		
FA	7	16.4	13.5	9.2		
	14	5.1	0.8	-3.3		
시원	28	-2.1	-7.0	-10.6		
	60	-5.6	-11.2	-13.1		
콘	90	-7.6	-13.9	-12.1		
ヨ	180	0.8	-5.4	-0.4		
	365	2.9	-15.0	-12.6		
되	730	-1.0	-14.9	-11.8		
Ē	1,460	2.7	-3.5	2.5		

<표 6.3> 초음파속도법에 의한 기존 제안식과 추정식의 오차율 비교(1)

[그림 6.5] 초음파속도법에 의한 기존 제안식과 추정식의 오차율 비교(1)

재령에 따른 기존제안식과 본 연구의 추정식의 오차율 비교했을 경우, 본 연구의 추정식은 0.8~5.6% 정도, 일본건축학회식은 2.1~19.5% 정도, J.Pysziak의 제안식 은 0.6~18.2% 정도로 본 연구의 추정식이 기존 제안식보다 재령별로 낮은 오차율 을 보였다.

FA 치환 콘크리트의 초음파속도법에 의한 기존 제안식과 추정식의 오차율은 <표 6.3> 및 [그림 6.6]과 같다.

본 연구의 추정식은 재령 7일에서 16.4% 정도의 높은 오차율을 보였으나 재령이 경과할수록 오차율은 낮게 나타났다.

재령에 따른 기존제안식과 본 연구의 추정식의 오차율 비교했을 경우, 본 연구의 추정식은 1.0~16.4% 정도, 일본건축학회식은 0.8~15.0% 정도, J.Pysziak의 제안식 은 0.4~13.1% 정도로 본 연구의 추정식이 기존 제안식보다 재령별로 낮은 오차율 을 보였다.

[그림 6.6] 초음파속도법에 의한 기존 제안식과 추정식의 오차율 비교(2)

BF 치환 콘크리트의 초음파속도법에 의한 기존 제안식과 추정식의 오차율은 <표 6.4> 및 [그림 6.7]과 같다.

재령에 따른 기존제안식과 본 연구의 추정식의 오차율 비교했을 경우, 본 연구의 추정식은 0.3~5.2% 정도, 일본건축학회식은 4.9~15.0% 정도, J.Pysziak의 제안식 은 0.2~13.2% 정도로 본 연구의 추정식이 기존 제안식보다 재령별로 낮은 오차율

을 나타냈다.

			오 차 율(%)		
수 문	재정	본 연구 추정식	일본건축학회식	J.Pysziak 제안식	
BF	7	4.1	11.5	8.6	
키히	14	1.2	4.8	0.2	
시컨	28	0.3	-7.5	-8.2	
	60	3.4	-4.9	-4.5	
콘	90	-5.1	-14.7	-13.2	
ヨ	180	5.2	-5.4	-0.5	
	365	-0.1	-15.0	-12.6	
ч -	730	-3.6	-14.9	-11.8	
Ē	1,460	-3.1	-13.7	-10.3	
SF	7	-15.5	-23.8	-0.8	
~- નો તો.	14	10.3	-1.2	-1.2	
시컨	28	7.5	-7.3	-12.1	
	60	6.8	-8.5	-13.1	
콘	90	-6.9	-24.6	-29.7	
ヨ	180	1.0	-15.9	-18.8	
 기	365	0.8	-15.0	-12.6	
4	730	-1.2	-14.9	-11.8	
Ē	1,460	-7.8	-25.9	-30.3	

<표 6.4> 초음파속도법에 의한 기존 제안식과 추정식의 오차율 비교(2)

[그림 6.7] 초음파속도법에 의한 기존 제안식과 추정식의 오차율 비교(3)

SF 치환 콘크리트의 초음파속도법에 의한 기존 제안식과 추정식의 오차율은 <표 6.4> 및 [그림 6.8]와 같다.

본 연구의 추정식은 재령 7일과 14일에서는 10.3~15.5% 정도의 높은 오차율을 보였으나 재령이 경과할수록 오차율은 낮게 나타났다.

이는 앞의 반발경도법에 의한 추정식과 마찬가지로 구조체의 손상을 최소화하기 위해 재령 28일부터 코어를 채취하여 재령 7일과 14일의 초음파속도 실험결과가 원주형 공시체의 실험결과로 대체 되므로 해서 원주형 공시체와 코어공시체의 초 음파속도 차이로 인하여 재령 7일과 14일에 본 연구의 추정식의 오차율이 높은 경 향을 보이는 것으로 사료된다.

재령에 따른 기존제안식과 본 연구의 추정식의 오차율 비교했을 경우, 본 연구의 추정식은 0.8~15.5% 정도, 일본건축학회식은 1.2~23.8% 정도, J.Pysziak의 제안식 은 0.8~29.7% 정도로 본 연구의 추정식이 기존 제안식보다 재령별로 낮은 오차율 을 나타냈다.

[그림 6.8] 초음파속도법에 의한 기존 제안식과 추정식의 오차율 비교(4)

6.3 복합법에 의한 기존 제안식과 추정식 비교

보통 콘크리트의 복합법에 의한 기존 제안식과 추정식의 오차율은 <표 6.5> 및 [그림 6.9]와 같다.

그빌	- শা না	러 오 차 율(%)		
イモ	새성	본 연구 추정식	일본건축학회식	谷川 제안식
보	7	1.8	-41.9	44.4
 토	14	2.8	-22.5	40.8
0	28	2.0	7.9	26.2
	60	2.9	10.1	26.7
콘	90	-4.8	3.6	20.6
E	180	-4.7	4.9	19.9
зÌ	365	0.1	10.3	22.8
ч	730	-0.5	10.1	21.8
Ē	1,460	3.0	15.3	22.9
FA	7	13.6	-16.8	38.3
	14	-0.8	-10.0	25.8
시컨	28	2.0	7.4	32.6
	60	-4.1	5.8	26.8
콘	90	-8.2	8.7	22.4
ヨ	180	-0.3	20.0	27.5
]	365	1.5	21.9	28.6
덕	730	-2.1	18.3	26.3
Ē	1,460	6.1	28.0	34.2

<표 6.5> 복합법에 의한 기존 제안식과 추정식의 오차율 비교(1)

[그림 6.9] 복합법에 의한 기존 제안식과 추정식의 오차율 비교(1)

앞의 반발경도법 및 초음파속도법의 추정식 오차율 보다 복합법의 추정식이 7. 7~273.3% 정도 오차율이 낮게 나타났다.

재령에 따른 기존제안식과 본 연구의 추정식의 오차율 비교했을 경우, 본 연구의 추정식은 1.8~2.8% 정도, 일본건축학회식은 3.6~41.9% 정도, 谷川 제안식은 19. 9~44.4% 정도로 본 연구의 추정식이 기존 제안식보다 재령별로 낮은 오차율을 나 타냈다.

FA 치환 콘크리트의 복합법에 의한 기존 제안식과 추정식의 오차율은 <표 6.5> 및 [그림 6.10]과 같다.

[그림 6.10] 복합법에 의한 기존 제안식과 추정식의 오차율(2)

복합법에 의한 추정식이 반발경도법 및 초음파속도법의 추정식 오차율 보다 10. 3~273.3% 정도 오차율이 낮게 나타났다.

재령에 따른 기존제안식과 본 연구의 추정식의 오차율 비교했을 경우, 본 연구의 추정식은 0.8~13.6% 정도, 일본건축학회식은 5.8~28.0% 정도, 谷川 제안식은 22. 4~38.3% 정도로 본 연구의 추정식이 기존 제안식보다 재령별로 낮은 오차율을 나 타냈다.

BF 치환 콘크리트의 복합법에 의한 기존 제안식과 추정식의 오차율은 <표 6.6> 및 [그림 6.11]과 같다.

복합법에 의한 추정식이 반발경도법 및 초음파속도법의 추정식 오차율 보다 11. 5~266.7% 정도 오차율이 낮게 나타났다.

		오 차 율(%)		
수 문	재령	본 연구 추정식	일본건축학회식	J.Pysziak 제안식
BF	7	4.2	-33.8	47.2
	14	2.3	-15.6	42.5
시컨	28	-0.5	9.9	27.6
	60	1.3	12.1	27.3
콘	90	-5.9	7.6	22.0
ヨ	180	4.6	19.9	27.5
— בו	365	-0.2	15.8	24.5
Ч	730	-3.3	13.3	22.5
<u> </u>	1,460	1.1	17.8	28.2
SF	7	-3.7	50.5	47.6
~- 키히.	14	4.6	-106.9	42.3
시컨	28	0.2	-15.6	27.4
	60	0.4	-10.4	26.2
콘	90	-6.7	-16.2	19.3
ヨ	180	1.3	-1.8	23.3
	365	1.9	-0.9	23.5
더	730	1.4	-0.5	22.5
<u> </u>	1,460	1.2	-5.6	23.3

<표 6.6> 복합법에 의한 기존 제안식과 추정식의 오차율 비교(2)

재령에 따른 기존제안식과 본 연구의 추정식의 오차율 비교했을 경우, 본 연구의 추정식은 0.4~6.7% 정도, 일본건축학회식은 7.6~33.8% 정도, 谷川 제안식은 22. 0~47.2% 정도로 본 연구의 추정식이 기존 제안식보다 재령별로 낮은 오차율을 나 타냈다.

SF 치환 콘크리트의 복합법에 의한 기존 제안식과 추정식의 오차율은 <표 6.6> 및 [그림 6.11]과 같다.

복합법에 의한 추정식이 반발경도법 및 초음파속도법의 추정식 오차율 보다 2.9 5~124.5% 정도 오차율이 낮게 나타났다.

재령에 따른 기존제안식과 본 연구의 추정식의 오차율 비교했을 경우, 본 연구의 추정식은 0.2~6.7% 정도, 일본건축학회식은 0.5~106.9% 정도, 谷川 제안식은 19. 3~47.6% 정도로 본 연구의 추정식이 기존 제안식보다 재령별로 낮은 오차율을 나 타냈다.



[그림 6.11] 복합법에 의한 기존 제안식과 추정식의 오차율(3)

[그림 6.11] 복합법에 의한 기존 제안식과 추정식의 오차율(4)

Ⅷ. 결 론

본 연구는 혼화재 사용한 콘크리트에 대하여 원주형 공시체와 코어채취용 구조 체를 제작하여 비파괴 실험과 파괴 실험을 통해 장기 재령(4년)에 대한 강도 추정 식을 제안한 것으로, 그 결론은 다음과 같다.

- 반발경도 및 초음파속도를 측정하여 기존 제안식에 적용한 강도를 추정한 결과, 반발경도법의 경우 일본재료학회식이 76~118% 정도, U.S Army 실험소식이 75~134% 정도, 초음파속도법에서는 일본건축학회식이 77~117% 정도, J.Pysziak 의 제안식이 85~116% 정도 파괴압축강도와 가장 비슷한 경향을 보였다. 복합법의 경우 기존 제안식 모두가 파괴 압축강도와 큰 차이를 나타냈다.
- 2) 반발경도법의 경우 일본건축학회식은 3~131% 정도 파괴강도보다 높게, 나머지 제안식은 2~29% 정도 파괴강도보다 낮게 추정되는 경향을 보였다.
 초음파속도법의 경우 모든 제안식이 2~38% 정도 파괴강도보다 낮게 추정되었다.
 복합법의 경우는 모든 제안식이 3~89% 정도 파괴강도보다 높게 추정되었다.
- 3) 단일법과 반발경도와 초음파속도로 중회귀분석한 복합법을 비교했을 경우, 추정식별로 차이는 있지만 복합법이 초음파속도법보다 0.4%~10.0% 정도, 반발경도법 보다는 0.5%~12.8% 정도 결정계수가 높게 나타나 단일법보다는 복합법을 이용하는 것이 정확한 강도를 추정할 수 있을 것으로 사료된다.
- 4) 상부와 하부를 통합한 추정식과 상부와 하부를 구분한 추정식의 결정계수를 비교 했을 경우, 상부와 하부로 구분한 추정식이 상부와 하부를 통합한 추정식 보다 결정계수가 2.6%~12.4% 정도 높게 나타났다.
 따라서 비파괴 실험 측정위치에 따라 추정식을 적용하는 것이 보다 정확한 강도를 추정할 수 있을 것으로 사료된다.

- 5) 기존 제안식과 본 연구 추정식의 오차율을 비교한 결과, 재령 7일과 14일에서는 다소 큰 오차율을 보였으나 재령이 경과할수록 기존제안식보다 오차율이 감소 하는 경향을 보여 본연구의 추정식이 신뢰도가 높은 것으로 판단된다.
- 6) 혼화재 사용 콘크리트에 대해 기존의 보통콘크리트 제안식을 적용하면 오차율이 발생되므로, 본 연구에서는 혼화재 사용콘크리트에 대한 혼화재 종류, 비파괴 실험 위치, 비파괴 실험 방법별에 따라 다음과 같은 추정식을 제안한다.
 또한 본 연구의 추정식이 다른 재령에 비해 재령 7~14일에 오차율이 높게 나타 나 재령 초기에 오차율을 줄일 수 있는 방안이 필요할 것으로 사료된다.

구 분	실험체명	추 정 식	결정계수 (CR ²)(%)
반발경도법	CL-FA	f _{cu} =1.0R-4.9	84.9
	CH-FA	$f_{cu}=0.8R-1.4$	75.1
	C-FA	f _{cu} =0.9R-2.2	72.5
초음파속도법	CL-FA	f_{cu} =29.1 V_P -92.0	86.3
	CH-FA	$f_{cu}=22.4V_{P}-65.5$	77.8
	C-FA	f_{cu} =23.8V _P -70.2	74.0
복합법	CL-FA	f_{cu} =16.6V _P +0.5R-55.8	88.3
	CH-FA	f_{cu} =14.2V _P +0.3R-43.0	78.7
	C-FA	f_{cu} =13.7V _P +0.4R-43.0	76.2

BF 치환 콘크리트의 강도 추정식은 다음과 같다.

BF 치환 콘크리트의 강도 추정식은 다음과 같다.

구 분	실험체명	추 정 식	결정계수 (CR ²)(%)
반발경도법	CL-BF	f _{cu} =1.2R-14.9	85.0
	CH-BF	$f_{cu}=1.5R-24.0$	93.6
	C-BF	f _{cu} =1.2R-14.2	82.4
초음파속도법	CL-BF	$f_{cu}=27.1V_{P}-83.7$	93.2
	CH-BF	f_{cu} =29.4 V_PP -92.6	94.7
	C-BF	$f_{cu}=28.0V_{P}-87.0$	90.0
복합법	CL-BF	$f_{cu}=22.3V_{P}+0.3R-75.9$	95.9
	CH-BF	f_{cu} =12.2V _P +0.8R-51.4	94.1
	C-BF	f_{cu} =19.7 V_P P+0.4R-68.0	92.0

SF 치환 콘크리트의 강도 추정식은 다음과 같다.

구 분	실험체명	추 정 식	결정계수 (CR ²)(%)
반발경도법	CL-SF	$f_{cu}=1.5R-20.8$	89.6
	CH-SF	f_{cu} =1.6R-23.9	91.4
	C-SF	f_{cu} =1.5R-20.4	86.5
초음파속도법	CL-SF	$f_{cu}=26.6V_{P}-77.9$	87.9
	CH-SF	$f_{cu}=25.2V_{P}-73.3$	87.4
	C-SF	$f_{cu}=26.3V_P-77.3$	82.0
복합법	CL-SF	f_{cu} =13.2V _P +0.8R-52.4	94.7
	CH-SF	$f_{cu}=7.7V_{P}+1.1R-40.0$	91.9
	C-SF	f_{cu} =11.6V _P +0.9R-48.5	90.2

【참고 문헌】

- 1. 김정섭외 2인, "비파괴 실험에 의한 혼화재를 사용한 콘크리트의 강도 추정식 제안에 관한 연구", 한국건축시공학회지, 제6권 3호, pp. 59~66, 2006.09
- 김정섭외 3인, "혼화재를 사용한 콘크리트의 비파괴 실험에 의한 강도 추정에 관한 연구", 대한건축학회논문집 제22권 4호, pp. 111~118, 2006.4.
- 3. 김정섭외 3인, "혼화콘크리트 비파괴 강도 추정에 관한 연구", 구조물진단학회논 문집 제 9권 4호, pp. 217~226, 2005. 10.
- 김판선외 4인, "혼화재를 사용한 콘크리트의 복합법 비파괴실험에 의한 강도 추 정에 관한 연구"대한건축학회 학술발표논문집, 제 25권 1호, pp. 129~132, 2005. 10.
- 신용석외 4인, "반발경도에 의한 혼화재를 혼입한 콘크리트의 압축강도 추정에 관한 연구"대한건축학회 학술발표논문집, 제 24권 1호, pp 379~382, 2004.10.
- 6. 김정섭외 4인, "콘크리트 응력 추정에 따른 초음파속도와 반발경도의 상쇄효과에 관한 실험적 연구", 대한건축학회논문집 제12권 11호, pp. 201~210, 1996.11.
 7. 김정섭외 4인, "현장 콘크리트 강도추정에 있어서 코어를 이용한 복합 비파괴 실험 법에 관한 실험적 연구", 대한건축학회논문집 제13권 7호, pp. 209~221, 1997.07.
 8. 김정섭외 3인, "혼화재를 활용한 콘크리트의 내구성 연구", 대한건축학회 학술발 표논문집, 제19권 2호, pp. 637~642, 1999.10.

9. 노운기, "콘크리트의 압축강도 추정을 위한 비파괴실험식에 관한 연구", 단국대

학교 석사학위논문, 2001.01.

- 10. 김판선, "혼화재 및 섬유 사용 콘크리트의 비파괴 실험에 의한 강도 추정에 관
 한 연구", 조선대학교 박사학위논문, 2006.08
- 11. 이승엽, "複合非破壞試驗法을 利用한 現場콘크리트의 壓縮强度 推定에 관한 實驗的 研究(材齡 730日을 中心으로)", 조선대학교 석사학위논문, 1998.08
- 12. 임창훈, "現場콘크리트 材齡에 따른 複合非破壞試驗法의 相殺效果에 관한 實驗的 研究", 조선대학교 석사학위논문, 1997.12.
- 13. 오승석, "현장콘크리트 강도추정을 위한 복합비파괴실험법의 실험적 연구", 조 선대학교 석사학위논문, 1996.12.
- 14. 권영웅외 2인, "슈미트 햄머 실험법에 의한 재령 180일이하 콘크리트의 압축강

도식의 제안", 한국구조물진단학회 학술발표논문집, pp. 61~65, 2003.05.

15. 권영웅외 3인, "슈미트햄머 실험체에 의한 실존 콘크리트 구조체의 압축강도

추정식에 관한 연구", 한국구조물진단학회 학술발표논문집, 2002.11.

16. 권영웅외 2인, "슈미트햄머에 의한 콘크리트 구조체의 압축강도 추정식", 한국

구조물진단학회 학술발표논문집, pp. 65~70, 2003.10.

17. 한천구외 4인, "코어공시체 강도에 미치는 시멘트 종류 및 혼화재료의 영향",

대한건축학회 학술발표논문집 제 22권 2호, pp 335~338, 2002.10.

18. 한천구외 4인, "슈미트 햄머의 반발경도 및 초음파속도에 미치는 결합재의 영

향", 대한건축학회 학술발표논문집 제 23권 1호, pp. 299~302, 2003.04.

19. 한천구외 4인, "코어공시체에 의한 콘크리트구조물의 압축강도 평가에 관한 문

헌적 검토", 한국구조물진단학회 학술발표논문집, pp. 65~68, 2004.05.

18. 임서형외 1인, "초음파속도법에 의한 고강도 콘크리트의 압축강도 추정에 관한 연구", 한국구조물진단학회논문집, pp. 123~130, 2001.07.

20. 한준회, "고로슬래그 콘크리트의 구조체 강도발현 성상에 관한연구", 한양대학

교 석사학위논문, 2001.06.

- 21. 한국콘크리트학회, "콘크리트 구조물의 비파괴검사 및 안전진단", 기문당, 2001.04.
- 22. 한국콘크리트학회, "콘크리트 표준시방서 해설", 기문당, 2003.05.
- 23. 한국표준과학연구원, "콘크리트 구조물 비파괴검사의 신뢰도 향상을 위한 관리 체계 구축방안", 표준과학연구원, 1998.11.
- 24. 대한주택공사 부설 주택연구소, "비파괴 검사 활용기술 연구(I)", 대한주택공 사, 1998.07.
- 25. 한혁상, "복합비파괴검사법에 의한 콘크리트 강도평가와 그 응용", 한국비파괴 검사학회 학술발표대회논문집, pp. 35~39, 1992.05
- 26. 시설안전기술공단, "콘크리트구조물의 비파괴검사에 의한 진단실험기준연구",

시설안전기술공단, 1997.12.

27. 과학기술처 한국표준연구소, "콘크리트 구조물에 대한 초음파 탐상법 개발", 과

학기술처, 1986.06

28. 이승석외 1인, "비파괴검사기술의 최신 연구동향", 비파괴검사학회지, 2004.02

- R. Jones "Non-destructive testing of Concrete", Cambridge university press, 1962
- 30. I. Facaoaru "Non-destructive testing of Concrete in Romania", Architecture and city planning/Building research Institute, 1968
- R. J Wheen, "Non-destructive testing of Concrete", Building Science, Vol. 9, No.4, 1974
- 32. I. Facaoaru "Non-destructive testing of Concrete in Romania, Symposium on NDT of Concrete and timber", Inst. of Civil engineer, Londin, 1970
- ACI 318-1989 ; Building Code Requirement for Reinforced Concrete and Commentary, American Concrete Institute, Detroit, MI, 1989.
- 34. KS F 2404, "현장에서 콘크리트의 압축 및 강도 실험체용 공시체를 제작하고 양생하는 방법", 1995.
- 35. KS F 2405, "콘크리트 압축강도 실험방법", 2001.

36. KS F 2730, "콘크리트 압축강도 추정을 위한 반발 경도 실험 방법", 2003
37. KS F 2731, "콘크리트 압축강도 추정을 위한 초음파 펄스 속도 실험 방법", 2003

【부 록】

사진 1. 부재 실험체 벽체철근 배근 전경



사진 2. 부재 실험체 벽체철근 배근 전경



사진 3. 슬럼프 테스트 전경



사진 4. 부재 실험체 콘크리트 부어넣기 후 전경


사진 5. 코어채취 전경



사진 6. 재령 60일 반발경도 측정 전경



사진 7. 재령 180일 반발경도 측정 전경



사진 8. 재령 1,460일 반발경도 측정 전경



사진 9. 재령 1,460일 파괴압축강도 측정 전경



사진 10. 재령 1,460일 초음파속도 측정 전경

저작물 이용 허락서					
학 과	건축공학과 학 번	20087072		과 정	석사, 박사
성 명	한글:유명환 한문:劉明煥 영문:Yoo, Myung-hwan				
주 소	광주시 서구 치평동 쌍용 금호아파트 204동 1602호				
연락처	017-391-1800 E-MAIL kkc2631@chol.com				
논문제목	한글 : 혼화재 사용 콘크리트 구조체의 비파괴실험에 의한 강도 추정				
	영어 : The Estimation of Compressive Strength by the Nondestructive Test of Concrete Structures used Mineral Admixture				
본인이 저작한 위의 저작물에 대하여 다음과 같은 조건아래 조선대학교가 저작물을					
이용할 수 있도록 허락하고 동의합니다.					
 다 음 - 1. 저작물의 DB구축 및 인터넷을 포함한 정보통신망에의 공개를 위한 저작물의 복제, 기억장치에의 저장, 전송 등을 허락함 2. 위의 목적을 위하여 필요한 범위 내에서의 편집 · 형식상의 변경을 허락함. 다만, 저작물의 내용변경은 금지함. 3. 배포 · 전송된 저작물의 영리적 목적을 위한 복제, 저장, 전송 등은 금지함. 4. 저작물에 대한 이용기간은 5년으로 하고, 기간종료 3개월 이내에 별도의 의사 표시가 없을 경우에는 저작물의 이용기간을 계속 연장함. 5. 해당 저작물의 저작권을 타인에게 양도하거나 또는 출판을 허락을 하였을 경우에는 1개월 이내에 대학에 이를 통보함. 6. 조선대학교는 저작물의 이용허락 이후 해당 저작물로 인하여 발생하는 타인에 의한 권리 침해에 대하여 일체의 법적 책임을 지지 않음 7. 소속대학의 협정기관에 저작물의 제공 및 인터넷 등 정보통신망을 이용한 저작물의 건송 · 출력을 허락함. 					
동의여부 : 동의(〇) 반대()					
2009년 05월 일					
저작자: 유명환 (서명또는인)					