

비파괴 시험에 의한 혼화재를 사용한 콘크리트의 강도 추정식 제안에 관한 연구

A Study on the proposal of Strength Presumption Equation of Concrete Using Admixture by Nondestructive Testing

김정섭*
Kim, Jeong-Sup

신용석**
Shin, Yong-Seok

김경옥**
Kim Koung-Ok

Abstract

This study aims to estimate strength approximate to actual concrete strength by presenting appropriate non-destructive strength estimation expression with admixtures such as fly ash, blast furnace slag and silica fume which are used as cement substitute and owing to theirs of cement owing to their equal conditions to blending characteristics of concrete used for domestic structures and their recyclable properties.

As a result of comparing error rate of existing expressions and this estimation expression, error rate of this estimation is reduced compared to existing expressions and has higher reliability.

When conventional concrete expression is applied to admixture concrete, error rate occurs and then this study suggests the following estimation expressions depending on types of admixture concrete.

키워드 : 혼화재, 비파괴 시험, 압축강도

Admixture, Nondestructive Testing, Compressive Strength

1. 서론

콘크리트의 강도에 대한 평가는 유지관리 및 구조적 안전성 측면에서 매우 중요한 의미를 갖는다.

콘크리트 구조물의 콘크리트 강도를 추정하는 방법은 파괴 시험과 비파괴 시험이 이용되고 있다. 그중 비파괴 시험은 반발경도법, 초음파속도법, 관입시험법, 인발시험법 등이 많이 이용되고 있다. 측정 방법 중에 파괴실험은 철근절단, 단면손실 등의 손상을 주어 치명적인 문제점을 초래할 수 있어, 기존 구조물에 손상을 주지 않고, 경제적이며, 손쉽게 할 수 있는 비파괴 실험이 바람직 할 것이다.

비파괴 시험에 의한 콘크리트 구조체의 강도를 추정하는 강도식은 많이 존재한다. 그러나 대부분 강도식들은 실존 구조체의 코어 공시체에 의한 것이 아니며 원주형 공시체에 의한 것이다. 또한 현재 사용이 일반화되고 있는 혼화재를 사용한 콘크리트에 보통콘크리트에 대한 강도식을 적용했을 경우 실제 압축강도와 강도식에 의한 추정강도는 변동성이 클 것으로 사료된다.

또한 혼화재를 사용한 콘크리트는 보통콘크리트 보다 초기의 압축강도가 낮은 경향을 보여, 초기 초음파속도 및 반발경도 또한 낮은 경향을 보일 것으로 보아 기존 제안식에 혼화재를 사용한 콘크리트에 사용시 적당하지 못할 것으로 사료된다.

* 정희원, 조선대학교 건축학부 교수, 공학박사

** 정희원, 조선대학교 대학원 박사과정

본 연구에서는 자원의 재활용으로 인해 시멘트 대체 사용이 증대되고 있는 혼화재인 플라이애시, 고로슬래그, 실리카흄을 대상으로 적용하도록 한다. 비파괴 시험시 콘크리트 재령에 따른 혼화재를 사용한 콘크리트에 적용 가능한 새로운 강도 추정식을 제안하고자 한다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험계획

보통 콘크리트를 기준으로 배합계획하였다. 혼화재의 치환 비율은 기존 연구에서 10%~50%의 치환의 상세 비율을 토대로 실험과 참고문헌에서 권고하는 수준의 비율로 실무에서 상용화된 혼화재별 각 배합비율을 선정한다. 배합비율을 결정 후, 공시체와 부재시험체를 제작하며, 코어공시체는 상부와 하부로 나누어 실험을 실시한다.

표 1. 실험계획

실험요인		수준	
배합사항	W/C	45%	
	혼화재	*플라이애시(FA)-20%, 고로슬래그(BF)-30%치환 실리카흄(SF)-20%치환	
	슬럼프(cm)	15±2	
부재	공기량(%)	4±1	
	공시체	공시체(M)	
	부재	벽체	상부(CH), 하부(CL)

본 연구에서 시험체는 크게 보통콘크리트와 혼화제를 사용한 콘크리트에 원주형 공시체와 코어공시체로 구분하며, 시험체명의 표기는 그림 1과 같다.

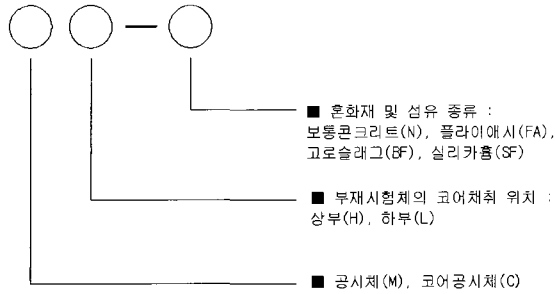


그림 1. 시험체의 표기

2.2 사용재료

본 실험에 사용한 시멘트는 S사의 1종 보통 포틀랜드시멘트를 사용토록 하며, 그 물리적 성질은 표 2와 같다.

표 2. 시멘트의 물성치 및 화학 조성

화 학 성 분 (%)							비 중
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Ig.loss	
21.9	6.59	2.81	60.12	3.32	2.11	2.58	3.15

잔골재와 굵은골재는 KS F 2502(골재의 채가름 실험 방법)의 규격에 적합한 골재를 사용하며, 잔골재는 강모래를 굵은골재는 깎자갈을 사용한다. 잔골재, 굵은골재의 물리적 성질은 표 3과 같다.

표 3. 골재의 물리적 성질

골재종류	최대치수 (mm)	비중	흡수율 (%)	조립율 (F.M)	단위용적중량 (kg/m ³)
잔골재	5	2.61	1.05	2.69	1,653
굵은골재	20	2.67	1.24	6.83	1,550

플라이애시는 충남 보령화력발전소에서, 고로슬래그 미분말은 광양제철소에서, 실리카흙은 삼립산업에서 수입한 Elken Microsilica를 사용하며, 혼화제의 화학적 성분은 표 4와 같다.

표 4. 혼화제의 물성치 및 화학 조성

구 분	화 학 성 분 (%)							비중	분말도 (cm ² /g)
	SiO ₂	Al ₂ O 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	3,639
고로슬래그	34.14	17.04	0.32	43.31	6.35	0.08	0.88	2.91	4,463
실리카	90.00	1.50	3.00	2.00	3.00	-	3.00	2.20	200,000

2.3 배합계획

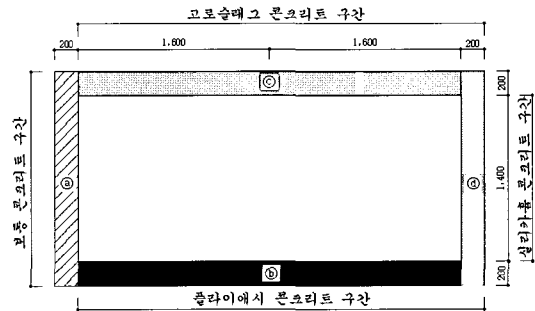
시험체에 사용된 콘크리트는 설계기준강도 24MPa, 콘크리트의 배합순서는 잔골재, 시멘트, 혼화제, 굵은골재와 같은 순서로 투입하며, 비빔을 한 후 KS F 2402(포틀랜드 시멘트 콘크리트의 슬럼프 시험 방법)의 규격에 의하여 슬럼프를 확인한 후 부어넣도록 한다. 콘크리트 배합표는 표 5와 같다.

표 5. 콘크리트 배합표

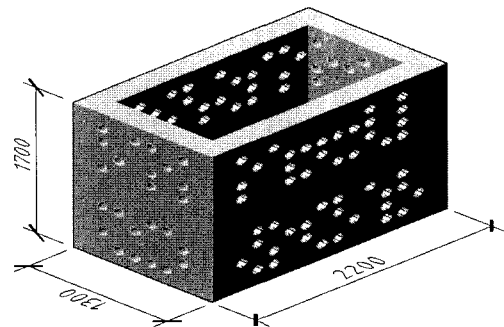
종류	재료	W/C (%)	치환율 (%)	질량 배합(kg/m ³)				혼화제
				W	C	S	G	
보통 콘크리트			0	158	350	889	907	0
고로슬래그 콘크리트		45	30	158	245	889	907	105
플라이애시 콘크리트		20	20	158	280	889	907	70
실리카흙 콘크리트		20	20	158	280	889	907	70

2.4 시험체의 제작 및 양생

본 실험에 사용되는 코어 채취용 시험체는 실제 구조물의 조건과 유사하도록 기중에 노출된 그림 2와 같은 벽체를 제작하였으며, 같은 조건으로 공시체를 제작하여 기중양생하였다. 코어의 채취는 벽체(Thk 20cm)에서 재령 7일, 14일, 28일, 60일, 90일, 180일에 상부와 하부에서 $\phi 10 \times 20$ cm로 천공하여 사용토록 한다.



(a) 평면도



(b) 입체도

그림 2. 부재 시험체 평면도, 입체도

3. 실험 방법 및 결과

3.1 실험방법

3.1.1 반발경도 측정

본 시험은 KS F 2730(콘크리트 압축강도 추정을 위한 반발경도시험)에 의하여 실시한다. 사용된 슈미트 햄머는 스위스 K사의 제품으로서 시험전 엔빌(test envil)로 보정하였으며, 코어 채취 후 20회를 타격하여 반발경도를 구하였고 시험값 중 평균의 $\pm 20\%$ 를 초과하는 시험값을 제거후 재 평균하여 반발경도(R)로 한다.

3.1.2 초음파속도 측정

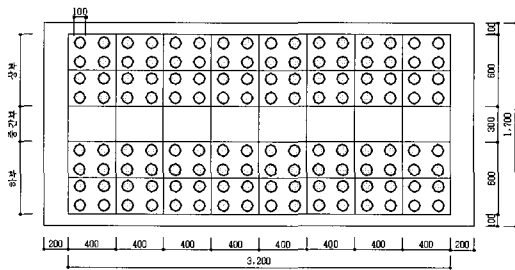
본 시험은 KS F 2731(콘크리트 압축강도 추정을 위한 초음파 펄스 속도 시험 방법)에 의하여 시험을 실시한다. 측정은 두 진자의 접착도를 높이기 위하여 그리스를 얇게 도포 하였으며, 수신자와 발진자를 서로 교대하여 일정한 힘으로 양면을 가압한 후 각 2회 측정하여 그 평균값을 초음파속도(VP)라 한다.

3.1.3 압축강도 실험

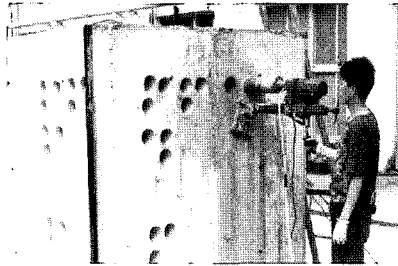
공시체와 코어공시체는 양생하여 표면 연마 후 최대하중 100tonf의 만능구조실험기(U.T.M)를 사용하여 KS F 2405(콘크리트 압축강도 시험 방법)에 따라 실험한다.

3.1.4 코어채취

코어채취는 부재 시험체에서 상부와 하부로 나누어 코어를 채취하였으며, 코어 채취시 구조물의 손상을 방지하기 위하여 재령 28일부터 채취하고, 코어채취시 발생하는 진동으로 인한 영향을 최소화하기 위해 저속으로 코어를 채취하였다.



(a) 코어 채취도



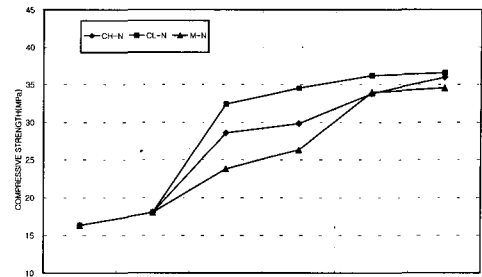
(b) 코어 채취 전경

그림 3. 코어채취 채취도 및 코어채취 전경

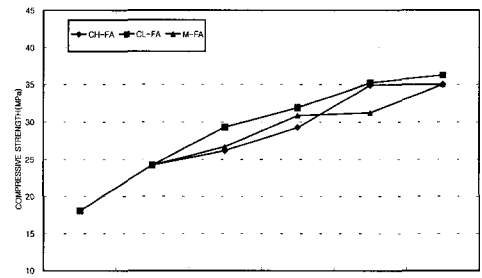
3.2 실험결과

3.2.1 파괴 압축강도

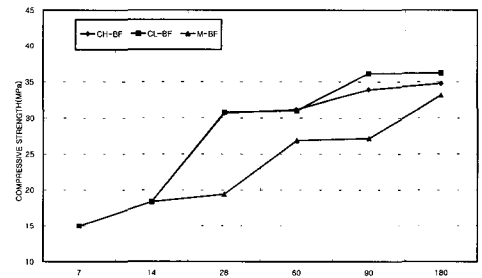
재료별로 재령에 따른 압축강도를 비교한 경우, 보통콘크리트가 혼화재를 사용한 콘크리트 보다 높은 압축강도를 보였으며, 코어공시체와 원주형 공시체 모두 설계기준강도 이상의 강도를 나타냈다. 또한 재령 14일부터 재령 28일 사이에 압축강도 발전에 따른 증가폭이 크게 나타났다. 플라이애시 콘크리트 경우는 코어공시체와 공시체 모두 재령 28일 강도가 설계기준강도 24MPa 이상 나타났으며, 재령에 따라 압축강도는 완만한 증가를 보였다. 고로슬래그 콘크리트의 경우는 코어 공시체는 설계기준강도 이상의 강도를 보였으나, 원주형 공시체의 경우 20MPa정도로 다소 낮은 강도를 나타냈다. 실리카흙의 콘크리트 경우는 하부에서 채취한 코어공시체를 제외한 원주형 공시



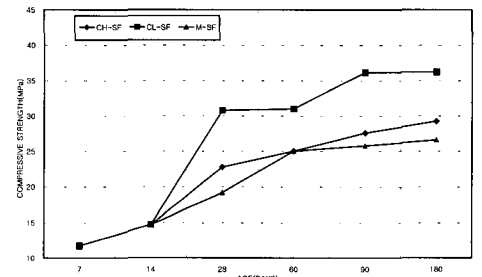
(a) 보통 콘크리트



(b) FA 치환 콘크리트



(c) BF 치환 콘크리트



(d) SF 치환 콘크리트

그림 3. 시험체별 재령에 따른 압축강도

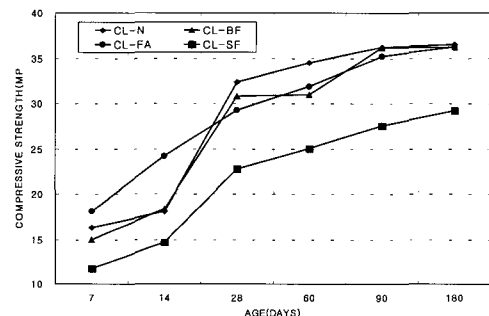


그림 4. 코어 공시체 하부 시험체별 재령에 따른 압축강도

체와 상부에서 채취한 코어공시체는 설계기준강도 보다 다소 낮은 압축강도를 나타냈으며, 다른 콘크리트에 비해 가장 낮은 압축강도 발현율을 보였다.

혼화재를 혼입한 콘크리트가 보통콘크리트보다 초기강도는 낮은 경향이 보였으나, 재령이 경과할수록 그 차이는 감소하였다.

코어 공시체의 상부와 하부를 비교하였을 때, 상부보다 하부의 압축강도가 높은 경향을 보였으며, 재령이 경과할수록 상부와 하부의 차이는 감소하였다. 이는 콘크리트 부어넣기 후 수분의 영향인 것으로 사료된다.

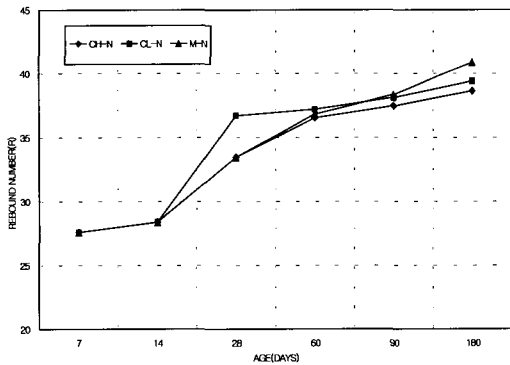
실리카흙 콘크리트가 다른 재료 콘크리트에 비해 상부와 하부의 압축강도 차이가 크게 나타났다.

3.2.2 반발경도

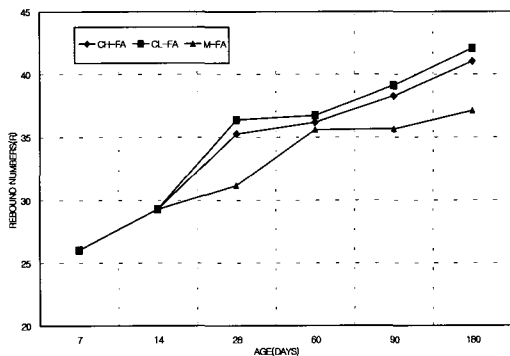
재료별로 재령에 따른 반발경도를 비교했을 경우, 모든 콘크리트가 재령이 경과할수록 반발경도는 증가하였으며 실리카흙 콘크리트가 다른 콘크리트보다 낮은 반발경도를 나타냈다. 또한 파괴 압축강도와 마찬가지로 재령 14일부터 재령 28일 사이의 반발경도 증가폭이 가장 크게 나타났다. 재령 60일 이후부터는 보통콘크리트의 반발경도 증가치는 완만한 직선을 보였으나, 혼화재를 사용한 콘크리트가 보통콘크리트 비해 강도 발현율이 증가하였다.

코어공시체와 원주형 공시체의 반발경도를 비교하였을 경우, 압축강도와 마찬가지로 코어공시체가 원주형 공시체 보다 반발경도가 높게 나타났다.

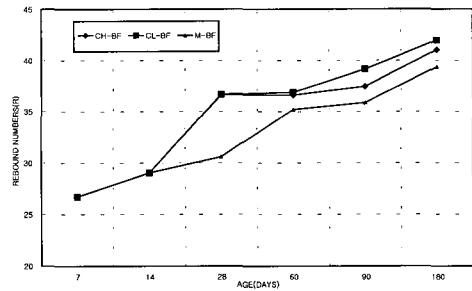
코어공시체의 상부와 하부의 반발경도를 비교하면, 상부보다 하부의 반발경도가 높게 나타났다.



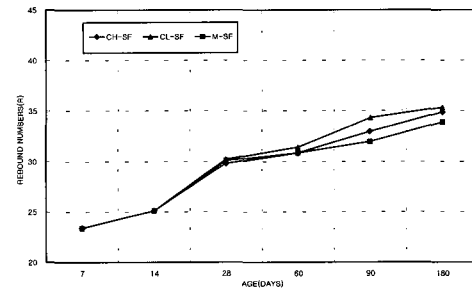
(a) 보통 콘크리트



(b) FA 치환 콘크리트



(c) BF 치환 콘크리트



(d) SF 치환 콘크리트

그림 5. 시험체별 재령에 따른 반발경도

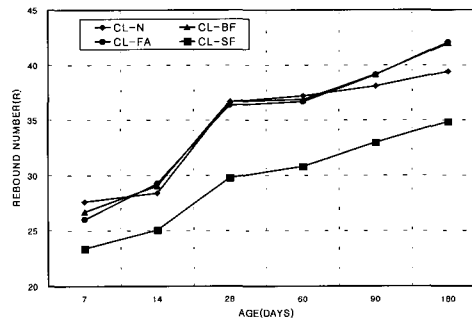
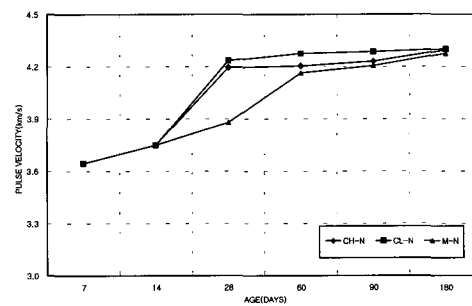


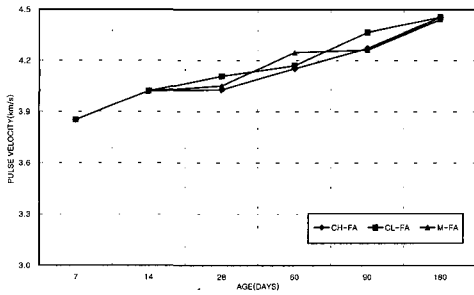
그림 6. 코어공시체 하부 시험체별 재령에 따른 반발경도

3.2.3 초음파속도

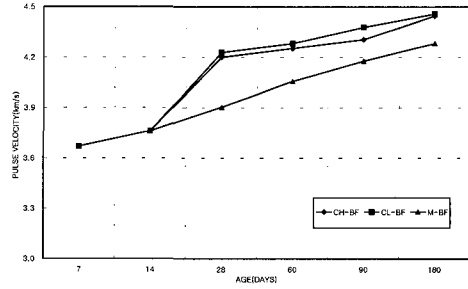
초음파속도 측정 결과는 파괴 압축강도와 반발경도와 마찬가지로 재령 14일부터 28일 증가폭이 가장 크게 나타났다. 코어공시체는 상부보다 하부의 초음파속도가 높게 나타났다. 재령 60일 이후에는 보통콘크리트 보다 혼화재를 사용한 콘크리트의 초음파속도가 높게 나타났다. 초음파속도는 특성상 재령 경과에 따른 반발경도와 파괴 압축강도의 증가치보다 초음파속도의 증가치는 매우 작은 경향을 보였다.



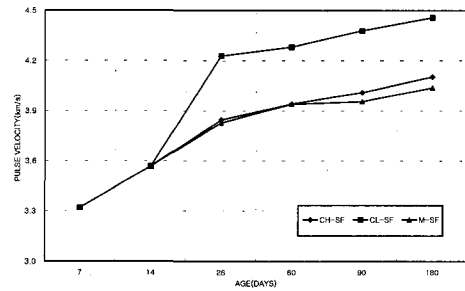
(a) 보통콘크리트



(b) FA 치환 콘크리트



(c) BF 치환 콘크리트



(d) SF 치환 콘크리트

그림 7. 시험체별 재령에 따른 초음파속도

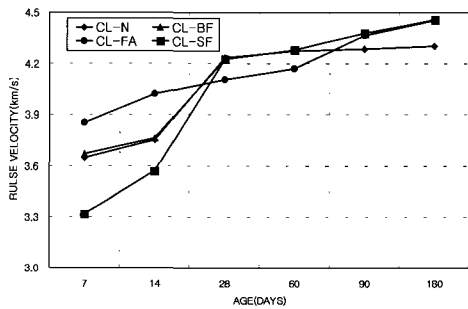
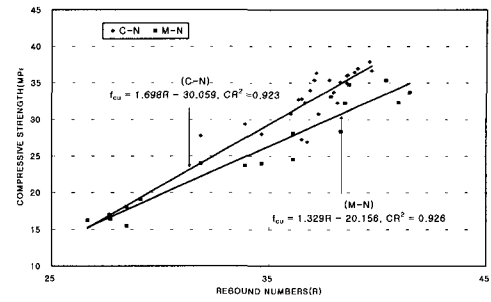


그림 8. 코어공시체 하부 시험체별 재령에 따른 초음파속도

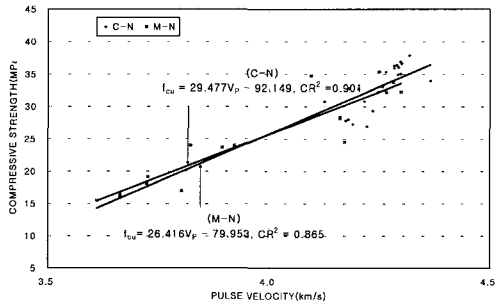
4. 회귀분석에 의한 추정식 제안

추정식은 SPSSWIN 10.0 통계 프로그램을 이용하였으며, 실험결과값을 기준으로 반발경도법과 초음파속도법의 상관관계에 따른 추정식은 그림 9.~그림 12.와 같다.

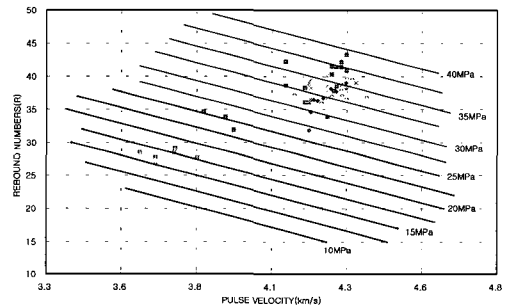
회귀분석에 따른 상관관계에 의한 추정식 제안 결과, 단일법의 경우 초음파속도법보다 반발경도법이, 반발경도법보다는 복합법의 회귀식의 적합도를 나타내는 결정계수(CR²)가 높게 나타났다.



(a) 반발경도법의 강도 회귀분석

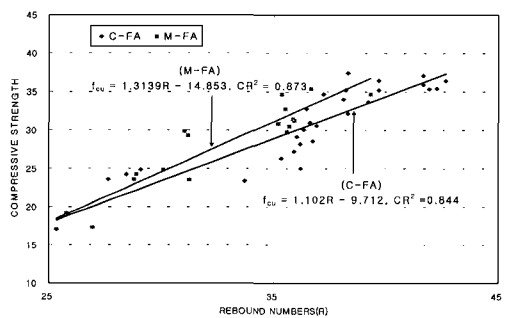


(b) 초음파속도법의 강도 회귀분석

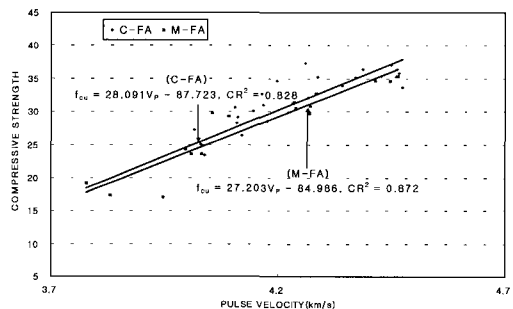


(c) 복합법에 의한 강도 회귀분석

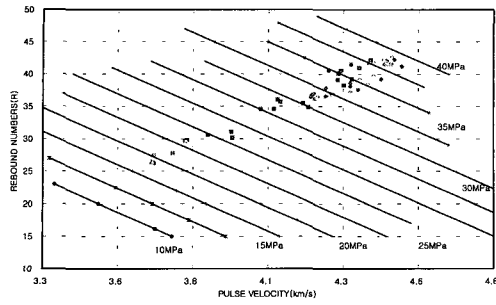
그림 9. 보통 콘크리트의 강도 회귀분석



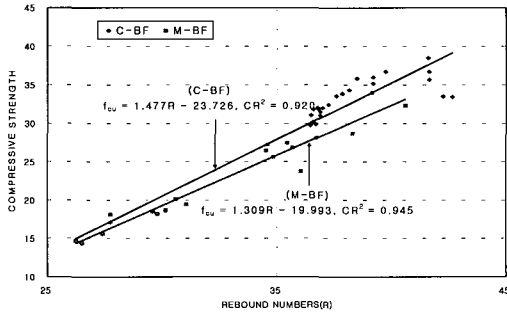
(a) 반발경도법의 강도 회귀분석



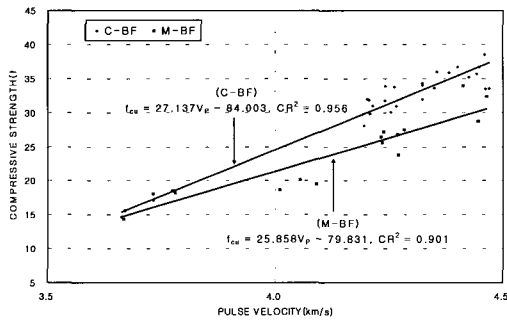
(b) 초음파속도법의 강도 회귀분석



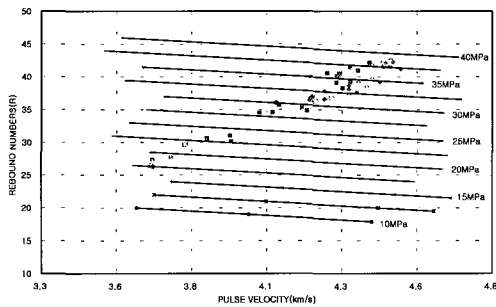
(c) 복합법에 의한 강도 회귀분석
그림 10. FA 치환 콘크리트의 강도 회귀분석



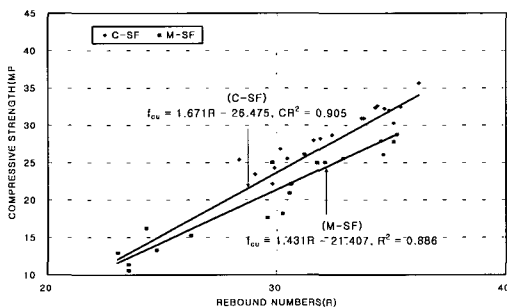
(a) 반발경도법의 강도 회귀분석



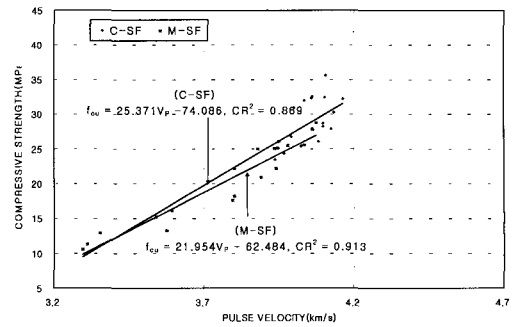
(b) 초음파속도법의 강도 회귀분석



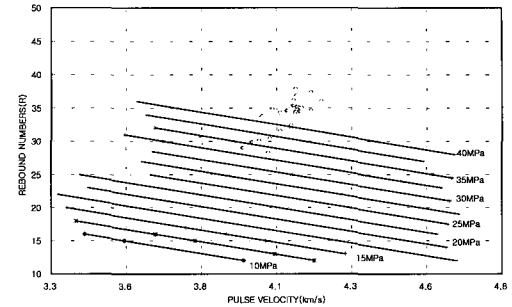
(c) 복합법에 의한 강도 회귀분석
그림 11. BF 치환 콘크리트의 강도 회귀분석



(a) 반발경도법의 강도 회귀분석



(b) 초음파속도법의 강도 회귀분석



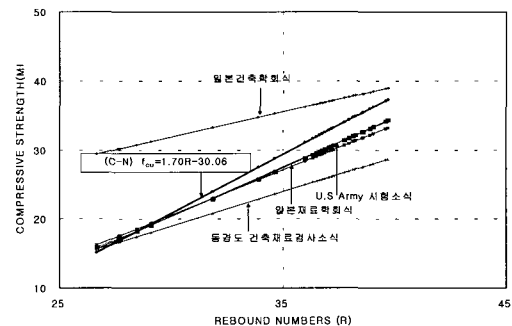
(c) 복합법에 의한 강도 회귀분석
그림 12. SF 치환 콘크리트의 강도 회귀분석

5. 기존 제안식과 본 연구의 추정식 비교

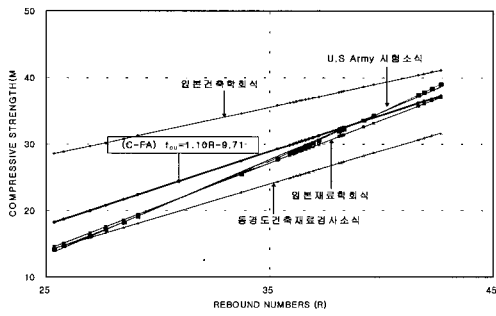
5.1 반발경도법의 기존 제안식과 추정식 비교

본 연구에 의한 시험체별 반발경도 결과를 적용했을 경우, 일본재료학회식은 2%~12%, 동경도 건축재료 검사소식은 13%~18%, U.S Army 시험소식은 1%~12% 정도 파괴압축강도보다 추정강도가 낮게 나타났으며, 일본건축학회식은 26%~40%정도 추정강도가 높게 나타났다.

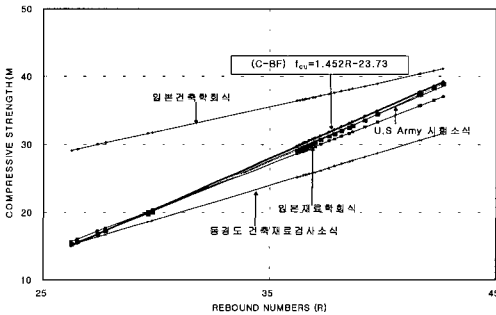
기존 제안식중 파괴 압축강도와 비슷한 경향을 보인 일본재료학회식, U.S Army 시험소식과 본 연구의 추정식과의 오차율을 비교해보면, 재령 초기와 재령 60일부터 90일까지의 기존 제안식의 오차율보다 본 연구의 추정식의 오차율이 큰 감소를 보였으며, 본 연구의 추정식의 신뢰도가 높은 것으로 판단된다.



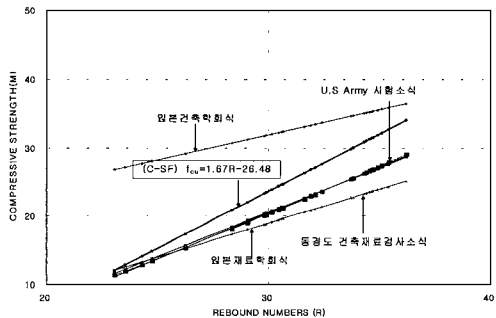
(a) 보통콘크리트



(b) FA 치환 콘크리트

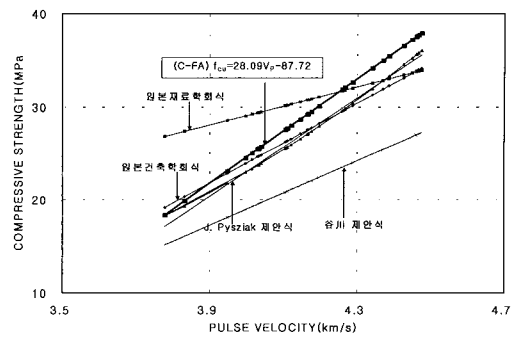


(c) BF 치환 콘크리트

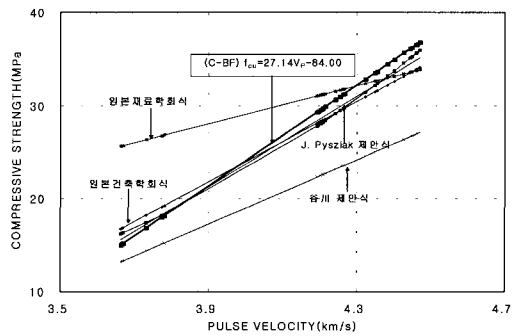


(d) SF 치환 콘크리트

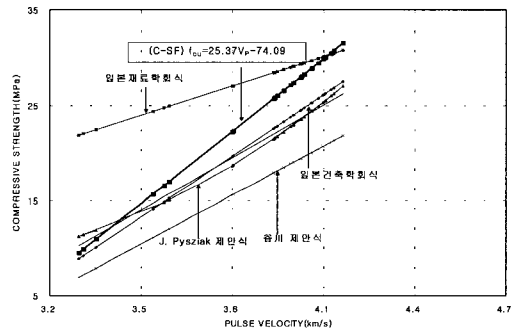
그림 13. 반발경도법의 기존 제안식과 추정식 비교



(b) FA 치환 콘크리트



(c) BF 치환 콘크리트

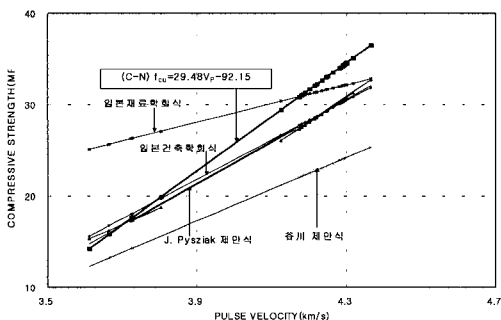


(d) SF 치환 콘크리트

그림 14. 초음파속도법에 의한 기존 제안식과 추정식 비교

5.2 초음파속도법의 기존 제안식과 추정식 비교

본 연구에 의한 시험체의 초음파속도를 기존 제안식에 적용했을 경우, 일본건축학회식은 4%~11%, J.Pysziak의 제안식은 3%~12%, 용川의 제안식은 24%~30%정도 파괴 압축강도 보다 추정강도가 낮게, 일본재료학회식은 7%~11%정도 추정강도가 높게 나타났다.



(a) 보통콘크리트

기존 제안식중 파괴 압축강도와 비슷한 경향을 보인 일본건축학회식, J.Pysziak의 제안식과 본 연구 추정식의 오차율을 비교한 결과, 전반적으로 기존 제안식 보다 본 연구 추정식의 오차율이 감소하여, 신뢰도가 높은 것으로 판단된다.

5.3 복합법의 기존 제안식과 추정식 비교

본 연구에 의한 혼화재의 반발경도와 초음파속도를 적체·용했을 경우, 일본건축학회식은 77%~108%, 용川 외 3인 제안식은 140%~145%정도 파괴강도와 일치치를 보였으며, 기존 제안식중 실리카흙 시험체를 제외한 나머지 시험체에서 1%~8%정도 차이를 보인 일본건축학회식이 파괴강도와 가장 비슷한 경향을 보인 제안식으로 나타났다.

기존 제안식중 파괴 압축강도와 비슷한 경향을 보인 일본건축학회식과 본 연구 추정식의 오차율을 비교한 결과, 전반적으로 기존 제안식보다 본 연구 추정식의 오차율이 감소하여, 신뢰도가 높은 것으로 판단된다.

6. 결 론

본 연구는 비파괴 시험을 통해 공시체와 부재 시험체의 코어 공시체를 채취 후, 파괴시험과 비파괴 시험을 통해 혼화재를 사용한 콘크리트의 강도 추정식을 제안한 것으로, 그 결과는 다음과 같다.

- 1) 혼화재를 사용한 콘크리트의 특성상 보통콘크리트 보다 초기의 압축강도 및 초음파속도, 반발경도가 혼화재를 사용한 콘크리트가 낮게 나오는 경향을 보였으나, 재령이 경과할수록 보통콘크리트보다 높게 나오는 결과를 토대로 기존 제안식을 적용할 경우 실제 압축강도와 추정강도는 많은 차이를 보일 것으로 사료되며 새로운 혼화재를 사용한 콘크리트에 맞는 새로운 추정식이 필요할 것으로 판단된다.
- 2) 비파괴 시험을 실시한 결과를 기존 제안식에 적용한 추정 강도와 파괴강도를 비교한 결과, 반발경도법의 경우 일본재료학회식과 U.S Army 시험소식이 1%~12% 정도, 초음파속도법의 경우 일본건축학회식과 J.Pysziak의 제안식이 3%~12%정도 파괴강도와 가장 작은 차이를 보였다.
- 3) 단일법과 반발경도와 초음파속도로 중회귀분석한 복합법을 비교했을 경우, 단일법의 경우 초음파속도법보다 반발경도법, 단일법보다 복합법의 결정계수가 높게 나타나 단일법보다 복합법의 적합도가 높은 것으로 판단된다.
- 4) 기존 제안식과 본 연구의 추정식을 비교했을 경우, 기존 제안식보다 본 연구의 추정식이 파괴강도와 비슷한 경향을 보였다.
- 5) 혼화재를 사용한 콘크리트에 대해 기존의 보통 콘크리트 제안식을 적용하면 파괴강도와 추정강도간의 오차율이 발생되므로, 본 연구에서는 혼화재 종류 및 단일법과 복합법에 따라 다음과 같은 추정식을 제안한다.

복합법에 의한 강도 추정식은 다음과 같다.

시험체명	추 정 식	결 정 계 수(CR ²)
C-FA	$f_{cu}=0.69R+14.00V_P-52.50$	0.904
C-BF	$f_{cu}=-0.30R+32.48V_P-95.51$	0.956
C-SF	$f_{cu}=1.41R+10.65V_P-48.85$	0.922

참 고 문 헌

1. 김정섭의 4인, “콘크리트 응력 추정에 따른 초음파속도와 반발경도의 상쇄효과에 관한 실험적 연구”, 대한건축학회 논문집 제 12 권 11호, 1996.11.
2. 김정섭의 4인, “현장 콘크리트 강도추정에 있어서 코어를 이용한 복합 비파괴 시험법에 관한 실험적연구”, 대한건축학회 논문집 제 13권 7호, 1997.07
3. 권영웅의 2인, “슈미트햄머 시험법에 의한 재령 180일 이후 콘크리트 압축강도식의 제안”, 한국구조물진단학회 학술발표논문집 제 7권 1호, 2003.05.
4. 노운기, “콘크리트 압축강도 추정을 위한 비파괴실험식에 관한 연구”, 단국대학교 석사학위논문, 2001.02.

반발경도법에 의한 강도 추정식은 다음과 같다.

시험체명	회 귀 식	결 정 계 수(CR ²)
C-FA	$f_{cu}=1.10R-9.71$	0.844
C-BF	$f_{cu}=1.48R-23.73$	0.920
C-SF	$f_{cu}=1.67R-26.48$	0.905

C-FA : 플라이애시 콘크리트

C-BF : 고로슬래그 콘크리트

C-SF : 실리카흙 콘크리트

초음파속도법에 의한 강도 추정식은 다음과 같다.

시험체명	회 귀 식	결 정 계 수(CR ²)
C-FA	$f_{cu}=28.90 V_P-87.72$	0.828
C-BF	$f_{cu}=27.14 V_P-84.00$	0.956
C-SF	$f_{cu}=25.37 V_P-74.09$	0.869