

화강암골재를 사용한 콘크리트의 강도추정식 개발

Development of Compressive Strength Estimation Equation for Concrete Mixed with Granite Aggregates

임 흥 철* 서 태 석** 우 상 균*** 송 영 철****
Rhim, Hong-Chul Seo, Tae-Seok Woo, Sang-Kyun Song, Young-Chul

Abstract

Prediction for the compressive strength of concrete by non-destructive tests(NDT) has a tendency to show different outcomes according to various aggregates. The purpose of this study is to develop estimation equation by rebound number, ultrasonic velocity and combined method at concrete structures which used granite as coarse aggregates. The test variable is water/cement ratio(41.1%, 48.6%, 67.6%), curing method(moisture condition, dry condition) and age(7, 14, 28, 56). According to the test variable, new equation was suggested, and compared with the existing equations.

keywords : Rebound number, Ultrasonic velocity method, Combined method, Granite

1. 서 론

비파괴 시험법에 의한 콘크리트의 강도 추정은 지역, 골재의 종류, 재령 및 양생방법 등에 따라 영향을 받는다.⁽¹²⁾ 따라서 사용재료와 환경조건이 바뀌게 되면 상관정도가 달라지므로 상관식은 그 정확성이 떨어지게 된다.⁽³⁾ 현재 국내 건설현장에서는 주로 일본에

서 제안된 추정식을 이용하여 강도를 추정하고있는 것으로 조사됐다.⁽¹⁾ 그러나 이 식들은 환경조건, 골재의 종류, 재령 등의 영향을 고려하지 않고 무분별하게 사용하고 있어 오차가 큰 것으로 나타나고 있다.⁽²⁾ 따라서 정확한 콘크리트의 강도를 추정하기 위해선 지역적 요인, 골재의 종류, 재령 등의 조건을 만족시키는 특 적용도에 적합한 추정식을 사용할 필요가 있다.

* 연세대학교 건축공학과 부교수

** 연세대학교 건축공학과 석사과정

*** 한전전력연구원 선임연구원

**** 한전전력연구원 책임연구원

E-mail : tsseo@hanmir.com 011-9995-3855

•본 논문에 대한 토의를 2002년 12월 31일까지 학회로 보내 주시면 2003년 4월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

특히 여러 영향인자 중에서 동일한 배합비와 환경조건에서도 골재의 종류에 따라 반발경도값이 상이할 수 있으므로 골재의 영향이 큰 것으로 알려져 있으며, 최근의 연구도 지역적 요인을 고려한 골재의 종류에 따른 강도 추정식을 제안하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다.^{(1),(4),(6),(7),(12)}

본 연구에서는 충청지역에 많이 분포하고 있는 화강암 골재를 이용하여 강도발현속도나 재료특성의 변화가 급격한 초기재령 콘크리트를 중심으로 양생방법별로 반발경도법, 초음파속도법 및 복합법에 의한 추정식을 제안하여 충청지역에서 화강암 골재를 이용한 구조물의 강도평가에 적합한 추정식을 제안하는데 주목적이 있다.

2. 연구계획 및 실험방법

2.1 연구계획

본 연구의 계획은 Fig. 1과 같으며 압축강도 실측값을 종속변수로, 비파괴측정값을 독립변수로 대응시켜 양생에 따른 비파괴 측정값의 영향인자를 분석하여 화강암 골재를 이용한 구조물의 강도평가에 적합한 추

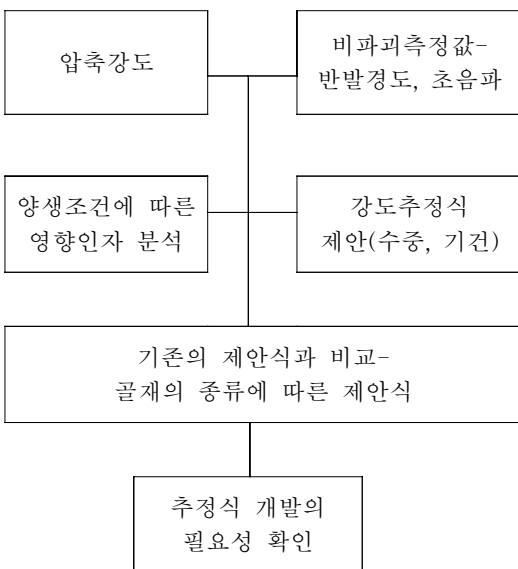


Fig. 1 연구 흐름도

정식을 제안하였다. 이번 실험을 통해 제안된 추정식과 기존의 제안식들 중에서 골재의 종류별로 제안된 추정식과 비교하여 골재의 종류에 따른 강도추정식 개발의 필요성을 확인해 보았다.

2.2 시편 제작

실험에 사용된 세가지 종류의 콘크리트 배합비는 아래 Table 1에 나타난 바와 같이 설계기준강도 210, 300, 400 kgf/cm²의 3 type(W/C: 67.6%, 48.6%, 41.1%)으로 했으며, 재료는 보통포틀랜드 1종 시멘트를 사용했고, 굵은골재는 충남 논산지역의 화강암 쇄석(굵은골재 최대치수:25mm)을 사용했으며, 잔골재는 충북 부광의 강모래를 사용하였다. 그리고, AE 제로는 단위수량 감소가 10~12%인 유기산계를 사용했다. 재령은 1주, 2주, 4주, 8주로 했고, 입방형 시편을 제작하여 반발경도법과 초음파속도법을 사용하여 실험했으며, 비파괴용 시편의 크기는 ASTM C 805-97, C 597-97 의 규준을 만족하는 범위 내에서 30×30×30 cm의 크기로 강도별로 3개씩 제작하였다. 압축강도 공시체의 크기는 ø10×20cm를 기준으로 했으며 강도별로 3개씩 제작하였다.

Table 1 콘크리트 배합

설계 강도 (kgf/cm ²)	슬럼프 (cm)	W/C (%)	S/a (%)	air (%)	단위중량(kg/m ³)				
					W	C	S	G	AE
210	13.0	67.6	45	4.0	185	284	832	983	0.426
300	12.5	48.6	44	4.0	185	381	791	985	0.572
400	12.0	41.1	40	4.0	191	465	667	973	0.698

Table 2 골재의 물리적 성질

구분	비중	조립률	흡수율 (%)	단위용적중량 (kg/m ³)
잔골재	2.58	2.73	1.10	1,626
굵은 골재	2.81	6.74	0.70	1,571



(a) 기건양생 시편



(압축강도 공시체)



(비파괴용 시편)
(b) 수중양생 시편

Photo 1 양생에 따른 시편

2.3 실험방법

압축강도 시험은 ASTM C 39-99 의 규준에 따라 200 ton 만능재료시험기(UTM)를 사용하여 최대하중을 측정후 압축강도를 산출하였다. 공시체 단면적은 공시체 높이의 서로 직교하는 두 방향의 지름을 측

	압축강도 공시체(Ø100×200mm)		반발도, 초음파속도	
	수중	기건	수중	기건
1부(7일)	3개	3개	2회	3회
2부(14일)	9	9	3회	3회
4부(28일)	9	9	4회	3회
8부(56일)	9	9		3회
총 개수	압축강도 공시체 : 72개 반발경도 및 초음파 속도 측정 시험 : 18개			

Fig. 2 시편의 크기와 개수

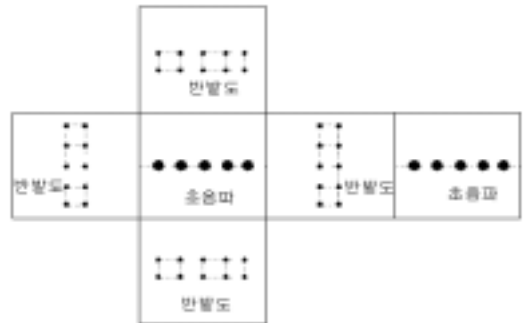


Fig. 3 시편의 전개도

정한 평균을 가지고 구했다. 본 실험에서는 3개의 공시체를 1개조로 하여 평균압축강도를 구하였다. 반발경도 실험은 ASTM C 805-97 규준에 따라 재령별로 타격면을 달리하여 10번씩 타격하며 타격점간의 거리는 최소 25 mm 이상으로 했으며 타격할 때 공극이 있거나 거친면은 피해서 측정을 했다. 타격할 때 방향은 수평 방향으로 타격 하였고 10개의 평균경도 값보다 6 이상 차이가 나는 경도 값은 버리고 나머지 측정값의 평균을 취했으며 6 이상 차이가 나는 값이 2개 이상이라면 전체의 측정값을 버리고 다시 측정했다. 한 시편당 10번씩, 배합당 30번(10×3)을 측정하여 평균을 구하였다. 초음파속도 측정법은 ASTM C 597-97 규준에 따라 실시하였으며 한 시편당 5회 측정하였고 한 배합당 총 15회(5×3)의 측정값의 평균값을 구하였고 50 kHz 단자를 사용하였다. 비파괴 시험은 수중양생시편의 경우에는 하루 전에 꺼내어 표면건조 시킨 후에 실시하였다.⁽³⁾

그리고, 이번 실험에서 사용된 장비는 PROCEQ

社의 디지털 슈미트헤머와 MS JAPAN社에서 제작한 TR-300을 사용하였다.

3. 실험결과 및 분석

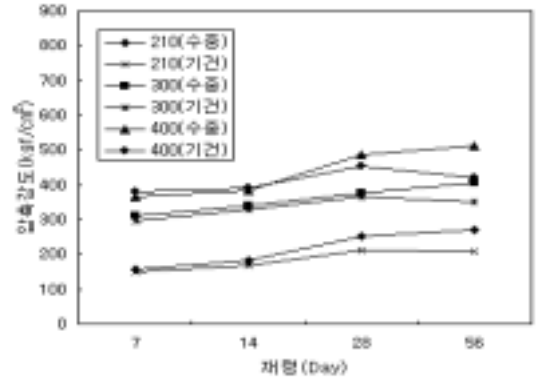
3.1 재령 및 배합에 따른 실험결과

배합별, 재령에 대한 압축강도, 초음파속도, 및 반발경도에 의한 실험결과가 Fig. 4와 같다. 압축강도 실험결과를 보면 수중, 기건 모두 재령 28일까지는 강도가 증가했지만 그 이후에 수중양생 공시체의 경우에는 4~6% 정도의 낮은 강도 증가율을 보였고 기건양생 공시체의 경우에는 강도가 약간 저하하는 것으로 나타났으며 이러한 현상이 나타난 것은 재령 초기에 급격한 수화반응으로 인하여 콘크리트 내부에 균열 및 공극의 발생으로 인하여 강도가 저하한 것으로 판단된다. 전체적으로 수중양생 시편의 압축강도가 기건양생 시편보다 6~10% 정도 높게 나타났다.

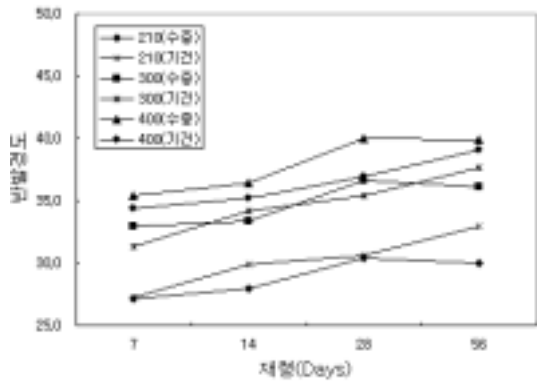
반발경도 실험결과를 수중양생시편의 경우는 재령 28일까지는 꾸준히 증가하다가 28일 이후에는 약간의 감소현상을 보였고 기건양생 시편의 경우는 28일 이후에도 증가하는 현상을 보였다. 이러한 현상이 나타난 이유는 본 실험결과를 볼 때 28일 이후에 반발경도와 압축강도가 서로 반대의 경향을 나타내고 있었기 때문에 재령 증가에 따른 압축강도의 영향 보다는 시편의 표면 상태에 따른 영향을 받은 것으로 판단된다. 따라서 수중양생 시편과는 달리 기건양생 시편의 경도값이 28일 이후에도 꾸준히 증가한 이유는 재령이 경과함에 따라 수분증발에 따른 표면경화로 인하여 경도값이 증가한 것으로 판단된다.

초음파속도는 재령 14일 까지 증가하다가 그 이후에는 0.7~0.8% 정도로 속도 증가율이 매우 낮은 것으로 나타났다. 이러한 현상이 나타난 이유는 초음파속도는 콘크리트 강도의 4제곱근에 비례하기 때문에 강도가 증가한다하더라도 음파속도의 증가는 매우 낮기 때문인 것으로 판단된다. 전체적으로 수중양생시편의 속도가 기건양생시편의 속도보다 3~5% 정도 높았다. 이는 수분의 영향을 많이 받는 것으로 판단되며 콘크리트내에 수분이 있을 경우 음파 속도가 5% 정도

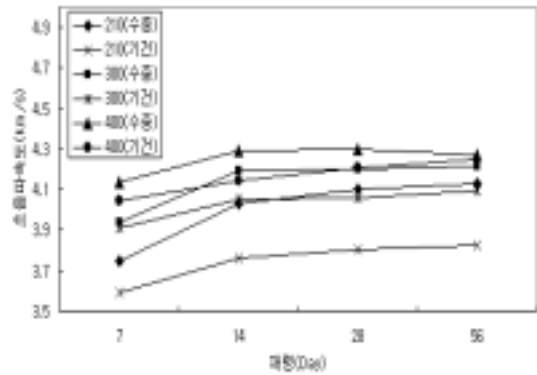
높게 나타난다는 기존 연구결과와도 일치하는 것으로 나타났다.⁽¹²⁾



(a) 콘크리트 압축강도



(b) 반발경도



(c) 초음파 속도

Fig. 4 실험 결과

3.2 추정식 제안

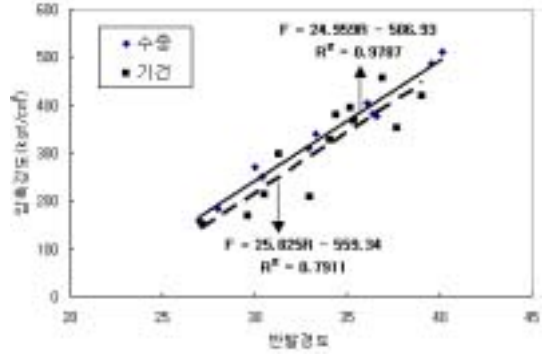
수중, 기건양생 별 실험결과를 가지고 산점도를 그려본 결과 Fig. 5(a)와 같이 양생에 따른 반발경도와 압축강도 사이에 큰 차이가 없는 것으로 나타났고 초음파 속도의 경우 Fig. 5(b)와 같이 반발경도와 압축강도와의 관계와는 달리 양생방법에 따라 차이가 큰 것으로 나타났는데 이는 수중양생 시편에서의 초음파 속도가 기건양생 시편에서보다 3~5% 정도 더 빨랐기 때문이었다. 따라서 반발경도 보다는 초음파속도가 수분의 영향을 많이 받는 것으로 판단된다. 전체적으로 반발경도에 의한 추정식의 기울기가 초음파속도에 의한 추정식의 기울기보다 완만하게 나왔는데 이는 초음파속도는 재령 14일 이후에 속도 증가율이 0.7~0.8%로 낮은 반면에 반발경도는 재령의 증가에 따라 강도의 증가를 잘 따라가고 있었기 때문이었다. 따라서 초음파속도법에 의한 강도추정은 미세한 변화에도 반응이 매우 민감하기 때문에 초음파속도법 단독으로 강도를 예측하는 것은 반발경도법 보다는 오차가 클 것으로 판단된다. 초음파속도에 의한 추세선의 기울기는 수중양생시편이 기건양생시편 보다 더 심하게 나타났으며 기건양생시편에서의 추정식이 수중양생에서의 추정식보다 강도의 변화 경향을 잘 나타내는 것으로 나타났다. 복합법에 의한 강도추정식을 제안해 보았다. 그 결과, 수중 기건양생에서 상관계수가 모두 양호하게 나왔고 단일법에 의한 강도추정은 양생방법에 따라 상관계수가 상이하게 나타났지만 복합법은 전체적으로 양호한 추정 상관성을 보이고 있는 것으로 나타났다.

본 실험에서 제안한 추정식은 Table 3과 같고 콘크리트의 물성변화가 급격한 초기재령에서 추정식을 제안했기 때문에 독립변수의 변화에 따라, 추정강도 값은 민감하게 반응을 보였다. 따라서 독립변수 값이 낮거나 높을 경우에 그 추정값은 부적절한 결과를 초래할 가능성이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 추정식을 개발할 때 사용된 실험값의 범위를 고려하여 추정 가능한 적용범위를 다음과 같이 정리하였고 현장양생조건이 기건양생에 가까운 점을 고려하여 기건양생 시편에 의해 제안된 추정식에 대해서 적용 범위를 두었다.

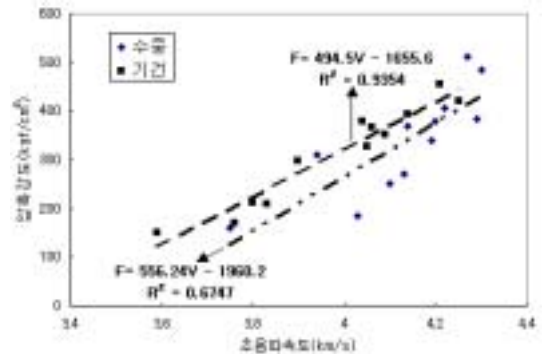
콘크리트 강도(F) : 140~450kgf/cm²

반발경도(R) : 27~40

초음파속도(V) : 3.6~4.3 km/s



(a) 반발경도



(b) 초음파 속도

Fig. 5 콘크리트 압축강도, 반발경도 및 초음파속도와와의 관계

Table 3 새롭게 제안된 추정식

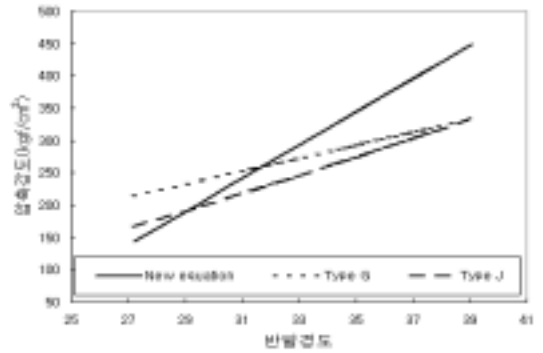
	추정식	상관 계수	결정 계수
수중양생	$F = 24.96R - 506.93$	0.989	0.978
	$F = 556.24V - 1960.2$	0.821	0.674
	$F = 23.63R + 44.23V - 644.6$	0.990	0.975
기건양생	$F = 25.825R - 559.34$	0.886	0.791
	$F = 494.5V - 1655.63$	0.967	0.935
	$F = -11.3R + 682.47V - 2022$	0.947	0.938

R: 반발경도, V: 초음파속도(km/s),

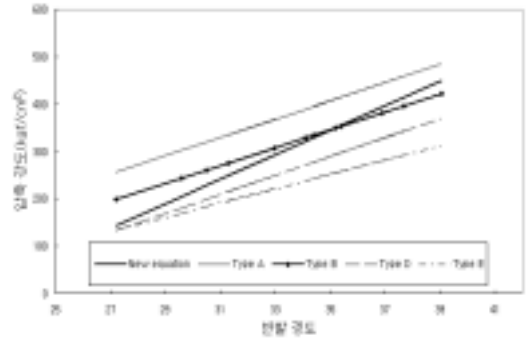
3.3 기존 제안식과의 비교 분석

반발경도법에 의한 강도추정식은 기존의 강도추정식의 타당성 및 골재의 종류에 따른 강도추정식 제안의 필요성을 확인하기 위하여 최근 국내연구자들이 제안한 추정식과 일본의 대표적인 추정식 및 미육군 시험소에서 제안한 추정식을 비교해 보았다. 특히 최근 국내연구자들이 제안한 추정식은 지역별 골재 종류에 따라 제안된 추정식들을 선별하였고 본 실험에서의 재령과 W/C의 조건을 맞추기 위하여 재령은 초기재령에서 제안된 식과 W/C는 본 실험에서 사용된 W/C가 포함되는 범위에서 선별하였다. 일본에서 제안된 추정식의 경우는 국내 현장에서 주로 일본에서 제안된 세가지 추정식(일본건축학회식, 재료학회식, 재료검사소식)에 의한 결과값을 평균하여 사용하는 것으로 조사된 것을 감안하여 평균값을 가지고 비교해 보았다.⁵⁾ 결과는 Fig. 6과 같다. 반발경도에 의한 비파괴 시험 강도추정식을 비교해본 결과 Type G(일본추정식 평균값 - 일본건축학회식, 재료학회식, 재료검사소식)의 경우 오차가 크게 나타나서 현재, 실무에서 주로 사용하고 있는 방법은 콘크리트의 강도를 예측하기에는 무리가 따른다고 생각되며, Type J(미육군 시험소식)도 오차가 큰 것으로 나타났다. 골재별로 제안된 추정식을 비교해본 결과 화강암골재를 사용한 Type B의 추정식에 의한 강도값이 이번에 제안된 추정식에 의한 강도값을 잘 설명하는 것으로 나타났고 그 밖에 Type A, Type D, Type E는 이번에 제안된 식과 추정양상에 큰 차이를 보이고 있었으며 전체적으로 골재의 종류에 따라서 제안된 식들이 서로 다른 추정양상을 보이고 있었다. 따라서 골재의 종류 이외의 조건이 흡사하다는 것을 고려할 때 골재의 종류가 추정강도에 미치는 영향이 큰 것으로 판단된다. 따라서 국내실정에 맞는 강도추정식의 개발이 필요하다고 생각되며 추정강도의 오차를 줄이기 위해선 지역에 따른 골재의 종류별로 추정식을 제안하는 것이 필요하다고 판단된다.

초음파 속도법에 의한 강도추정식은 Type K, Type L, Type M을 비교하였으며 결과는 Fig. 7과 같다. 일본 건축학회 식의 경우 새로 제안된 식에 비



(a) 외국식과의 비교



(b) 골재별로 제안된 식과의 비교

Fig. 6 반발경도법에 의한 추정식의 비교

해 경사도가 완만하며 오차가 크게 나타났다. 또한 Type K, Type L의 경우도 오차가 크게 나타났으며, Type D, E와 K, L이 골재의 종류를 제외하고 같은 조건에서 제안된 식임을 감안할 때 Type D, E 두 식간의 평균오차가 12%로 작은 반면에 Type K, L 두 식간의 평균 오차는 85%로 매우 크게 나타났다. 따라서 초음파속도법에 의한 강도추정은 반발경도에 의한 강도추정보다 골재의 영향을 더 많이 받는 것으로 사료되며 그 이외의 콘크리트 내부의 미세균열, 공극, 수분 등의 영향을 많이 받는 것으로 판단된다.

복합법에 대한 강도추정식은 김무한 식과 일본건축학회식을 가지고 비교하였고 그 결과는 Fig. 8과 같다. 김무한식의 경우 단일법(Type C)에서는 평균오차율이 35%로 나타났고 복합법(Type H)에서는 단일법에 비해서 평균오차율이 13%로 낮아졌으며, 일본건축학회식의 경우에도 비슷한 양상을 보여주었다.

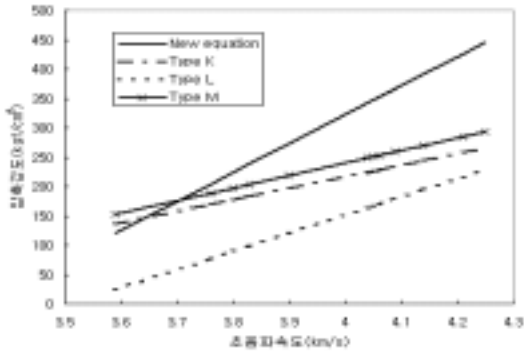


Fig. 7 초음파속도법에 의한 추정식의 비교

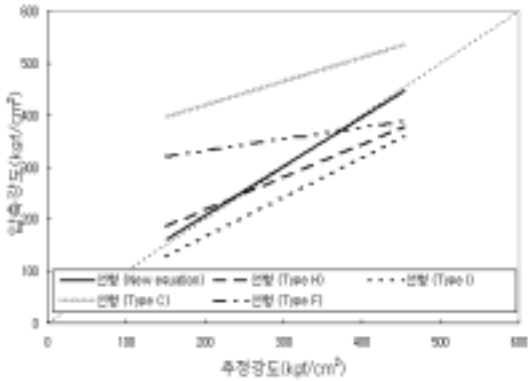


Fig. 8 복합법에 의한 추정식의 비교

따라서 단일법에 의한 강도추정보다는 복합법이 오차를 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 기존의 추정식과 비교해 본 결과 새로운 강도추정식의 개발이 필요한 것으로 나타 났으며, 추정강도의 오차를 줄이기 위해서는 는 지역에 따른 골재의 종류별로 강도추정 식을 제안할 필요가 있다고 판단된다.
- 2) 초음파속도법에 의한 강도추정은 반발경도에 의한 강도추정보다 골재 이외에도 콘크리트 내부의 미세균열, 공극, 수분 등의 영향을 많이 받는 것으로 판단된다.
- 3) 본 실험을 통하여 다음과 같은 추정식을 얻었으며 본 제안식은 초기재령에서 재 안된 식 이므로 시 공 중의 콘크리트 구조물의 강도평가에 효율적으로 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

$$F=25.825R-559.34$$

$$F=494.5V-1655.63$$

$$F=-11.3R+682.47V-2022$$

Table 4 기존의 제안식

Type	강도 추정식	재령	골재	W/C(%)
A	19.3R-269 (한천구 외 4인 2000)	3,7,14,28,91	현무암	30,40,50,60,70
B	18.8R-313 (한천구 외 4인 2000)	3,7,14,28,91	화강암	30,40,50,60,70
C	15R-34 (김무한 외 5인 1997)	-	-	-
D	20R-411 (오병환 외 2인 2001)	3,7,28,91	규암	40,50,60,70
E	15.1R-277 (정란 외 2인 2000)	3,7,28,91	안산암	40,50,60,70
F	7.3R+110 (일본 건축학회)	-	-	-
G	일본재료학회식, 일본건축학회식, 일본재료검사소식 평균(반발경도에 의한 추정식)			
H	8.1R+205.3V-802 (김무한 외 5인 1997)	-	-	-
I	8.2R+269V-1096 (일본 건축학회)	-	-	-
J	0.0932R²+8.0R-120.6(미국군 시험소)	-	-	-
K	195.5V-566(정란 외 2인 2000)	3,7,28,91	안산암	40,50,60,70
L	309.5V-1087(오병환 외 2인 2001)	3,7,28,91	규암	40,50,60,70
M	215V-620(일본 건축학회)	-	-	-
본 실험에서 제안된 식		7,14,28,56	화강암	41.1, 48.6, 67.6

감사의 글

본 연구는 서울대학교 지진공학연구센터(KEERC)와 한전전력연구원(KEPRI)의 연구비 및 실험장비 지원으로 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 한천구, 유호범, 김기철, 윤기원, 이승석, "구조물 안전진단에 있어 콘크리트 강도평가 식 적용에 대한 실태 조사 및 평가식 제안을 위한 연구," 한국구조물진단학회 학술발표 논문집, 제2권, 제2호, 1998, pp. 25-30.
2. 박선규, 조성현, 최세진, 김규용, 권영진, 김 무한, "콘크리트 압축강도 추정을 위한 비파 괴 시험식의 적용성 검토," 대한건축학회 학술발표논문집, 제17권, 제2호, 1997, pp. 1239-1244.
3. 이차돈, 최기봉, "반발도법에 의한 콘크리트 내력 평가," 한국구조물진단학회논문집, 제3권, 제1호, 1999, pp. 5-10.
4. 노윤기, 박현수, 정란, "슈미트 햄머에 의한 반발경도 강도 추정식 연구," 대한건축학회 학술발표 논문집, 제20권, 제2호, 2000, pp. 213-216.
5. 김상우, 이백수, 이승석, 류현기, 한천구, "슈미트 햄머법 비파괴 시험에 의한 현무암 골재를 사용한 콘크리트의 강도평가," 한국 구조물진단학회 학술발표논문집, 제4권, 제2호, 2000, pp. 57-60.
6. 오병환, 김동욱, 이승석, "규압골재를 사용한 콘크리트 구조물의 재령에 따른 비파괴강도 추정식," 한국구조물진단학회논문집, 제5권, 제2호, 2001, pp. 137-146.
7. 김민수, 윤영호, 이승석, 김진근, 권영웅, "비파괴시험에 의한 28일 콘크리트압축강도 의 추정식 제안," 한국구조물진단학회 학술 발표 논문집, 제5권, 제2호, 2001, pp. 77-82.
8. 권영웅, "콘크리트의 표면 경도시험법," 콘 크리트학회 논문집, 제10권, 제2호, 1998, pp.20-26.
9. ASTM C 39, "Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens," 1999.
10. ASTM C 805, "Standard Test Method for Rebound Number of Hardened Concrete," 1997.
11. ASTM C 579, "Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete," 1997.
12. ACI Committee 228, "In-Place Methods to Estimate Concrete Strength," 1997.

(접수일자 : 2002년 4월 22일)