

표면반발경도와 초음파 속도를 활용한 고강도 콘크리트 압축강도 추정

김민욱¹, 오홍섭^{2*}, 오광진³

Estimating the Compressive Strength of High-Strength Concrete Using Surface Rebound Value and Ultrasonic Velocity

Min Wook Kim¹, Hongseob Oh^{2*}, Kwang Chin Oh³

Abstract: The authors performed the experimental work to propose the strength prediction equation for high strength concrete based on the non-destructive test methods. The concrete specimens that the range of design compressive strength was 40~80 MPa was produced in laboratory, and then tested rebound test and ultrasonic velocity methods and also compressive test according to the Korea Standard. The test results was compared with previously equations suggested by other researcher. From the test, these traditional nondestructive methods are simple, quick, has proven to be reliable and useful method for predicting the concrete strength. The test results were compared with the previous equations and then newly proposed own equations based on the test results. The proposed equations have the suitable precision and accuracy for applying the high strength concrete structures

Keywords: Rebound test, Ultrasonic pulse velocity, High strength concrete, Compressive strength

1. 서 론

콘크리트 강도 추정을 위한 다양한 비파괴 시험방법 중에서 반발경도법과 초음파 속도법은 실험방법의 단순함과 효율성으로 인하여 1960년대 이후 지속적으로 사용되고 있으며 (AIJ, 1983; Malhotra 2004; RILEM, 1980; Willetts, 1958), 새로운 강도추정식들에 대한 연구도 꾸준히 진행되고 있다 (Atici, 2011; Breyse, 2012a; 2012b; Trtnik et al., 2009). 국내의 경우는 1980년대 후반 비파괴시험방법이 국내에 소개된 이후 일본의 추정식(AIJ, 1983; Tanigawa, 1980)을 적용하던 것에서 점차 벗어나 국내의 건설환경과 재료에 적합한 비파괴 강도 추정식을 개발하기 위한 연구들이 많이 진행되었다 (Han and Kim, 1999; Im, 2007; Kim et al, 2002; KRISS, 1999; Kwon, 2006; Kwon, 2010).

그러나 비파괴점사의 부정확성 및 한계 등으로 인하여 ASTM 기준에서는 비파괴 시험에 의한 강도 추정방법은 콘크리트 강도를 결정하는 수단이 아니라 콘크리트 품질의 균질

성을 판정하는 수단 또는 부재간의 품질비교 수단으로 규정하고 있으며, 원칙적으로 콘크리트 강도추정은 할 수 없는 것으로 규정하고 있다. 따라서 강도추정을 위해서는 대상구조물의 콘크리트 코어강도와 반발도와의 상관관계를 규명한 후 구조물의 강도를 추정하도록 규정하고 있다. 이와 유사하게 일본건축학회(1983)나 RILEM(1980)의 기준에서도 콘크리트 강도추정의 보조수단으로 규정하고 있다. 그러나 영국 BS 및 독일 DIN 기준에서는 콘크리트 강도추정 수단으로 사용할 수 있도록 하고 있다.

최근 초고층건물 및 장대 교량 등에 사용되는 고강도 콘크리트의 활용이 급격히 증가하고 있기 때문에 고강도 콘크리트 구조물의 신뢰성, 안정성, 유지관리 및 고강도 콘크리트 구조물의 품질관리 및 내구성에 대한 종합적인 품질평가의 중요성이 제기되고 있다. 실제로 시공 중이거나 사용 중인 구조물에 있어서 안정성 및 신뢰성 평가를 위한 객관적인 지표로서 구조물의 콘크리트 압축강도 평가는 콘크리트의 품질과 특성 및 구조적인 판단을 위한 기본 파라미터이다. 이를 위하여 Khan(2012), Kim et al.(2002), Kwon(2006)은 고강도 콘크리트의 압축강도 추정을 위해 반발경도법과 초음파속도법에 의한 추정식을 제안하고자 하였으며, Mohammed et al.(2011)은 rubbercrete의 강도추정식을 제시하였다.

최근 고강도 콘크리트의 사용량이 증가함에 따라 콘크리트의 품질상태 및 간접적인 강도 추정을 위한 보조 기법의 필요

¹정회원, 지진방재연구센터 연구원

²정회원, 경남과학기술대학교 토목공학과 교수, 교신저자

³정회원, 한국시설안전공단 건설평가실

*Corresponding author: opera69@chol.com

•본 논문에 대한 토의를 2016년 4월 1일까지 학회로 보내주시면 2016년 5월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

성이 대두되고 있으나, 국내 조건을 고려한 추정식 개발은 아직 부족한 상태이다. 본 연구에서는 고강도 콘크리트 영역의 강도를 추정하기 위하여 기존에 제안된 반발경도법과 초음파 속도법에 의한 추정식의 신뢰성을 실험을 통하여 분석하고자 하였다.

2. 기존 강도추정식의 분석

콘크리트 표면의 경화도로부터 강도를 추정하는 반발경도법과 콘크리트 매트릭스 내부의 초음파 전달속도를 사용하는 초음파 속도법은 시멘트와 골재의 크기 및 종류, 혼화재의 사용유무, 공극의 상태 등과 같은 콘크리트 매트릭스의 구성요소와 함께 재령 및 콘크리트의 습윤상태 등에 의한 영향을 받게 된다(Breysse, 2012a; Kim, 2002). 또한 콘크리트의 강도가 높아짐에 따라 콘크리트의 조직이 치밀해지고 반발경도와 전달속도의 민감도가 높아지게 된다. 따라서 지금까지 제시된 많은 연구들이 회귀분석에 의한 추정식을 제안하고 있으며, 대표적인 강도 추정식의 형태는 Table 1과 같다. 일반적으로 실험실에서의 비파괴 시험과 압축강도 결과에 대한 회귀분석을 통하여 1차함수형 또는 지수함수형의 추정식을 제시하고 있다. 국내에서는 고강도 콘크리트에 대한 압축강도 추정 연구가 미미한 상황이나, 고강도 콘크리트 사용이 증가함에 따라 필요성은 계속 증가하고 있는 실정이다.

KRISS(1999)에서는 공시체뿐만 아니라 실제 구조물에 가깝도록 벽식 시험체를 제작하여 실린더 공시체와 비파괴 시험 결과를 비교하고, 코어공시체의 압축강도와 실린더 압축강도를 비교하는 방법으로 연구를 수행하였다. 이때 실험 변수는 양생조건과 W/C로 기본조건에 대해서만 고려하였다. Han and Kim(1999)은 콘크리트 비파괴강도 추정을 위해 반발경도법과 초음파속도법을 인발시험법 결과와 비교, 검증하였다. Im(2007)은 반발경도법, 코어 채취법, 초음파 속도법, 복합법 등의 비파괴 검사법을 통하여 일반강도(24 MPa)와 고

강도(40 MPa) 추정식을 달리 제안하였다. 그러나 강도영역에 대한 추정식이 아닌, 단순 하나의 설계강도를 대상으로 하여 연구를 수행하였으므로 그 신뢰도는 떨어질 것으로 판단되며, 최근 사용량이 많아지고 있는 50 MPa이상의 콘크리트에 대해서는 고려되지 않았다. 아직까지 많은 연구들이 강도의 범위가 상대적으로 작기 때문에 고강도 영역에서의 비파괴 시험결과와의 신뢰성을 높이는 데에는 한계를 보이고 있는 실정이다.

국외에서는 Atici(2011)가 보통포틀랜드 시멘트를 혼합한 콘크리트를 기준으로 플라이애쉬 혼합 콘크리트, 고로슬래그 혼합 콘크리트 등을 변수로 연구를 진행하여 구성 재료에 따른 영향을 분석하고자 하였으며, 여러 혼합재료에 대한 일반화된 강도추정식을 제안하였다. Del Rio(2004)는 재령에 따른 콘크리트 경화정도가 초음파 속도에 미치는 영향에 대해서 연구를 수행하였다. Qasrawi(2000)는 물-시멘트비를 변수로 중동지역의 재료를 사용하여 반발경도, 초음파법 및 조합법에 관한 연구를 진행하였다. Trtnik(2009)의 경우에는 인경신경망 이론에 의해 신뢰도가 낮은 측정치를 제거하는 방법을 적용하여 기존의 강도 추정식보다 높은 신뢰도를 확보할 수 있었음을 제시하였다.

Table 2에는 국내에서 콘크리트 압축강도 추정을 위해 많이 사용되는 일본 재료학회식(1958), 건축학회식(1983) 외에 국내외 연구자들에 의해 제안된 강도 추정식을 정리하였다. Table 2에 나타난 것과 같이 대부분 선형 회귀분석에 의한 강도 추정식이 가장 많은 형태로 나타났으며, 부분적으로 지수함수나 다항식의 형태를 나타내는 경우도 있으며, 복합법의 경우에는 중회귀분석에 의한 추정식을 제시하고 있음을 알 수 있다.

3. 콘크리트 공시체 제작 및 강도 평가

3.1 사용재료 및 실험체 제작

고강도 콘크리트영역에서의 비파괴강도 추정식을 분석하고 제안하기 위하여 강도 40 MPa~80 MPa 이상의 콘크리트를 Table 3에 나타난 배합으로 실험편을 제작하였다. $\Phi 100 \times 200$ mm의 콘크리트 공시체를 재령 1, 3, 5, 7, 14, 28, 150, 180, 240 과 300일별로 최소 5개씩 제작하였으며, 재령에 따라 압축강도 실험을 실시하였다.

콘크리트는 국내 현장에서 사용되는 콘크리트 특성을 반영할 수 있도록 부산지역의 OO레미콘을 사용하여 타설하였으며, 사용재료는 단위중량 $3.15 t/m^3$ 의 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였고 골재는 부산광역시에서 입수된 단위중량이 각

Table 1 Information about R and UVP vs strength relationship model from literatures

Type of model	Expression	Reference
Linear	$k_1 R_0 + k_2$	[3] [6] [10]
Polynomial	$k_1 R_0^2 + k_2 R_0 + k_3$	[28]
Power	$k_1 R_0^{k_2}$	[5] [20]
Exponential	$k_1 \exp(k_2 R_0)$	[2] [18]

where, k_1 , k_2 and k_3 are experimental coefficients from regression analysis

R_0 is either rebound value or UVP velocity

Table 2 Existing equations for predicting of concrete compressive strength

		Reference	Equation(MPa)
Rebound method		Materials Research Society of Japan [1,32]	$F_c = 1.3R_0 - 18.4$
		Architectural Institute of Japan [2]	$F_c = 0.73R_0 + 10.0$
		Atici[3]	$F_c = 3.34 e^{0.0598R_0}$
		Han and Kim [8]	$F_c = 1.618R_0 - 28.13$
		Im [9]	$F_c = 1.869R_0 - 34.925$
		Kim et al [11]	$F_c = 1.267R_0 + 9.7868$
		KRISS [12]	$F_c = 0.7679R_0 - 2.979$
		Kwon et al [17]	$F_c = 2.59R_0 - 51.5$
		Mohammed et al[20]	$F_c = 9.5879 e^{0.0384R_0}$
		Qasrawi [22]	$F_c = 1.353R_0 - 17.393$
	Willetts [30]	$F_c = 0.00932R^2 + 0.8R - 12.06$	
Ultrasonic Pulse Velocity Method		Materials Research Society of Japan [1]	$F_c = 10.2 V_p - 11.7$
		Architectural Institute of Japan [2]	$F_c = 21.5 V_p - 62.0$
		Atici[3]	$F_c = 0.0316 e^{1.3 V_p}$
		Del Rio[7]	$F_c = \exp[(-5.4 \pm 0.8) + (1.85 \pm 0.18) V_p]$
		Han and Kim [8]	$F_c = 60.977 V_p - 234.2$
		Im [9]	$F_c = 18.7 V_p - 61.3551$
		Khan [10]	$F_c = (0.5208 V_p)^5$
		Kim et al [11]	$F_c = 50.163 V_p - 178.2$
		KRISS [12]	$F_c = 32.565 V_p - 113.5$
		Mohammed et al[20]	$F_c = 0.7586 e^{0.8 V_p}$
Combined Method		Qasrawi [22]	$F_c = 36.72 V_p - 129.077$
		Trtnik et al [29]	$F_c = 0.0854 e^{1.2882 V_p}$
		Architectural Institute of Japan [2]	$F_c = 0.82R_0 + 26.9 V_p - 109.4$
		Im [9]	$F_c = -0.0777R_0 + 28.67 V_p - 92.4157$
	RILEM [23]	$F_c = 10^{0.3794 V_p + 0.01149R_0 - 0.5668}$	

Table 3 Mix proportion of concrete(unit : kgf)

Mix No.	W/C (%)	S/a (%)	W	C	FA	SF	S		G	AE
							WS	CS		
Mix 1	38.5	52	160	374	42	-	358	537	849	3.74
Mix 2	31	51	165	479	53	-	328	492	809	4.52
Mix 3	23	48	165	574	72	72	273	409	758	12.92
Mix 4	21	46.5	165	613	79	94	189	440	743	14.93

각 $2.61 t/m^3$ 과 $2.69 t/m^3$ 인 천연모래와 쇠석을 이용하였으며 굵은골재 최대치수는 20 mm이다. 또한 강도발현을 위해 단위중량이 각각 $2.22 t/m^3$ 와 $2.2 t/m^3$ 인 플라이애쉬와 실리카흄을 사용하였다.

Breysse(2012)의 연구에 의하면 콘크리트 재료에서 반발경

도와 초음파 속도에 가장 중요하게 영향을 미치는 요인은 재령, 골재의 형태, 골재량, 물-바인더비 및 공극의 유무이며, 혼화제의 종류 및 양 또는 골재의 크기 등은 크게 영향을 미치지 않는 것으로 분석되었다. 따라서 본 연구에서는 골재량과 물-바인더비만을 변화시켰으며, 시멘트와 혼화제의 종류 등에

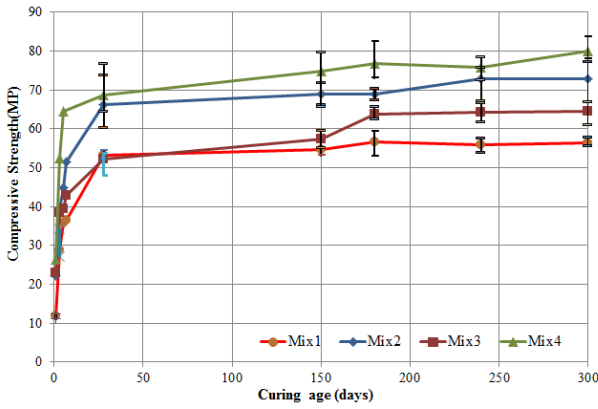


Fig. 1 Compressive strength variation of each concrete mix according to the curing time

대해서는 고려하지 않았다.

3.2 압축강도 실험 및 비파괴 시험

압축강도 시험은 KS F 2405(2010)에 따라 1일 이후에 실시하였으며, Fig. 1에는 각 재령별 압축강도 측정결과를 정리하였다. 28일 이후의 실험결과에서는 배합(Mix)별로 압축강도 최대치와 최소치의 범위를 표시하였으며, 전체적으로 재령28일과 180일 측정값을 제외하고 편차는 크지 않은 것으로 나타났다. Mix3의 경우에는 설계배합강도보다 낮게 관찰되어 실리카흙의 배합량 또는 수화반응이 충분히 이루어지지 않은 것으로 판단된다.

압축공시체에 대하여 반발경도법(KS F 2730, 2008)과 초음파속도법(KS F 2731, 2008)을 적용하여 비파괴시험을 실시하였다. 압축공시체에 대한 반발경도 측정은 압축시험기에 공시체를 거치시킨후 압축강도의 10% 내외의 하중을 가력한 후 측면에서 반발경도를 20회 측정하여 평균치를 사용하였으며, 초음파 속도는 공시체 길이방향에 대하여 직접법으로 3회 측정후 평균값을 사용하였다.

4. 비파괴 실험 결과 분석

4.1 기존 예측식과의 비교

Fig. 2와 Fig. 3에는 각각 표준공시체의 반발경도와 초음파속도별 압축강도 분포를 나타내었다. 반발경도(R)의 도수분포는 반발경도 10간격으로 분석하였으며, 불확실도가 높았던 초기재령을 제외하고, 30 MPa 이상의 경우에 강도별 표준편차는 9.7~11.3 MPa내외로 강도수준에 관계없이 거의 유사하게 분석되었다.

초음파 속도는 0.25 km/s의 간격으로 분포도를 예측하였으

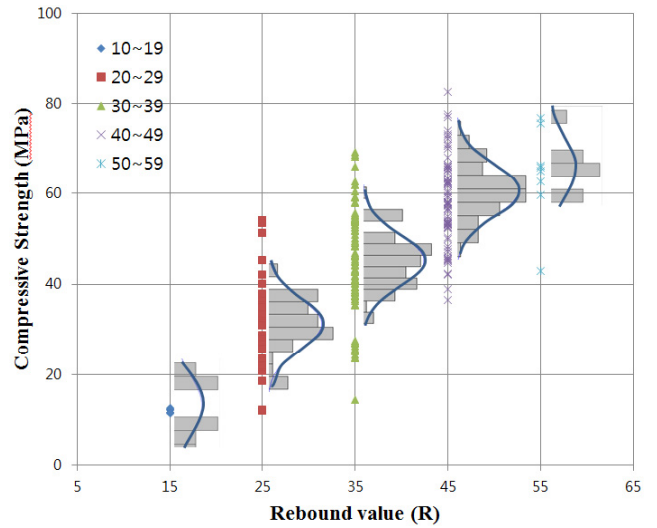


Fig. 2 Frequency distribution of rebound value according to the compressive strength

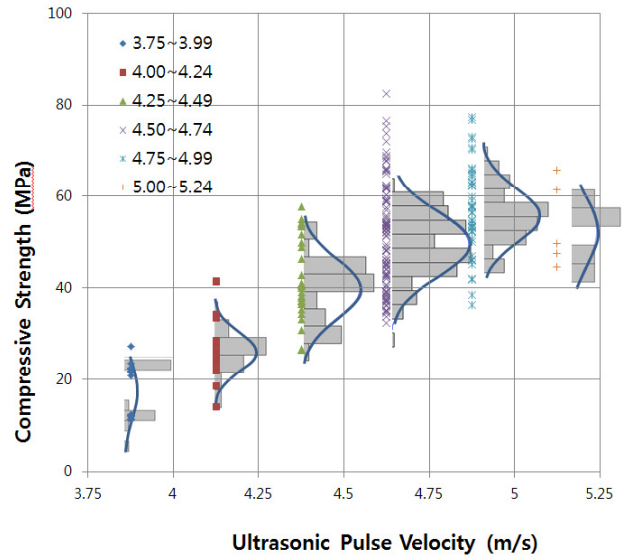


Fig. 3 Frequency distribution of ultrasonic pulse velocity according to the compressive strength

며, 초음파 속도 4.24 km/s이하(평균강도 30 MPa) 이하에서는 5.5 MPa 정도의 표준편차가 발생하였으나, 초음파 속도 4.50~4.74 km/s(평균강도 51 MPa)구간에서 표준편차가 11.4 MPa 정도로 상당히 크게 분석되었으나, 다른 구간의 경우에는 9 MPa 내외로 분석되어 강도에 따른 분산의 변화는 거의 없는 것으로 나타났다.

Fig. 4와 5에는 기존 압축강도 제안식과 실험결과에 의한 예측치와 실제 압축강도와와의 평균강도비와 RMSE(root mean square error)를 나타내었으며, 제안식과 실험치의 상세비교는 Fig. 6에 도시하였다. Fig. 4에 나타낸 것과 같이 Kim et al.(2002)의 제안식을 제외하고 반발경도법의 경우에는 전반

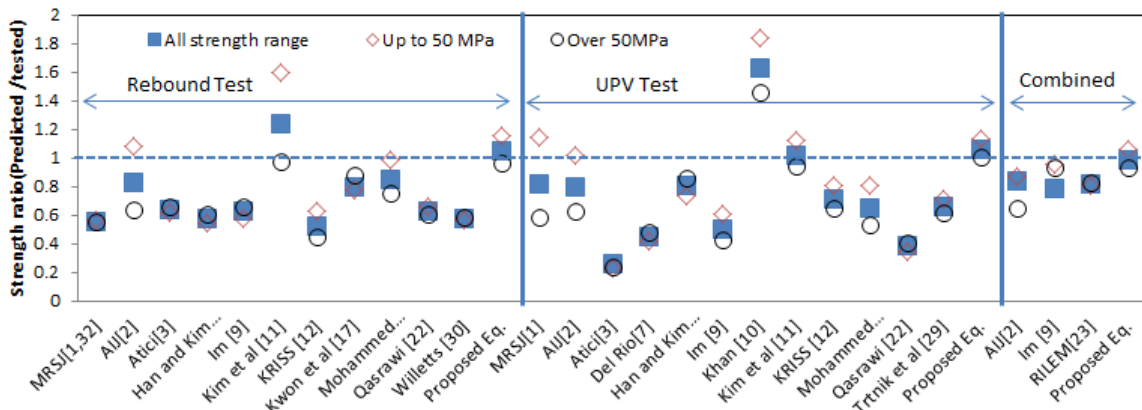


Fig. 4 Average strength ratio from predicted and tested compressive strength

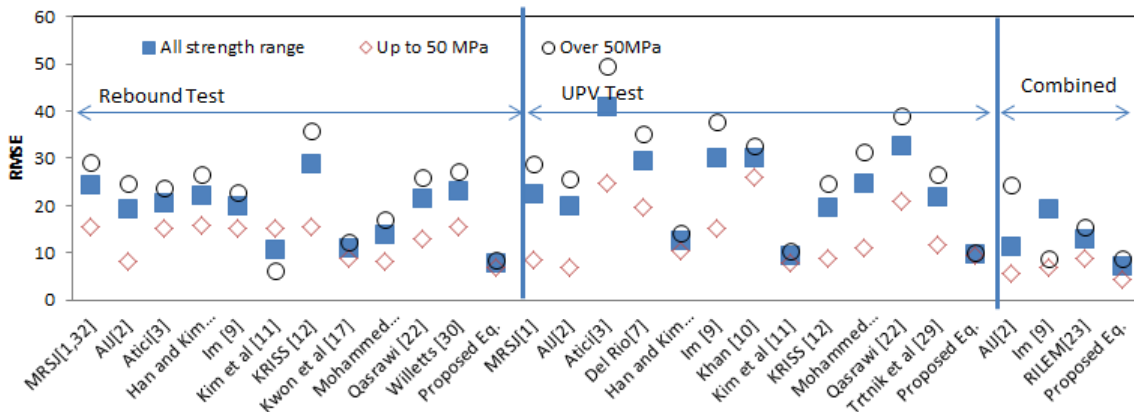


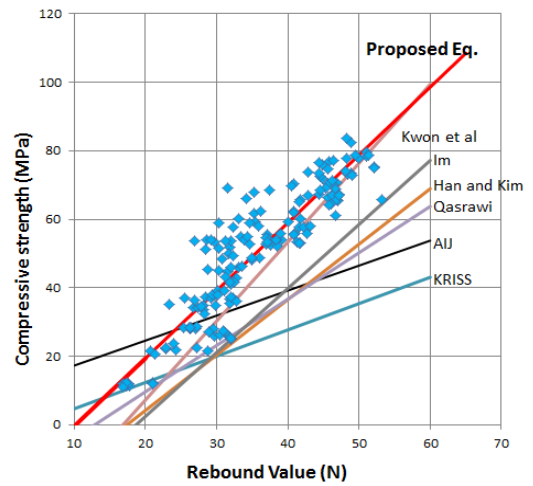
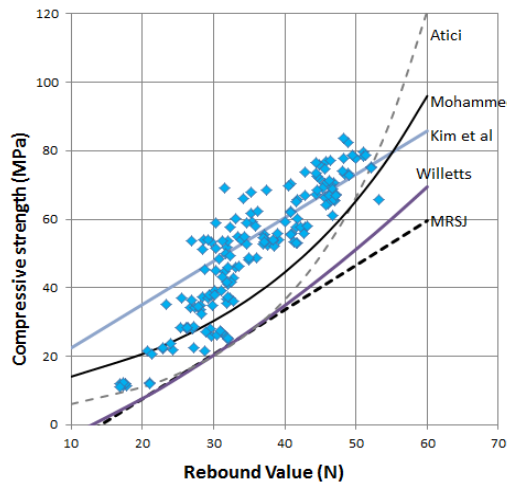
Fig. 5 Root-mean-square error between predicted values and test values

적으로 과소예측되는 것으로 나타났으며, 일본건축학회(AIJ, 1983)와 Kim et al.(2002)의 식의 경우에는 50 MPa 이하의 보통강도 콘크리트와 50 MPa 이상의 고강도 콘크리트의 예측 결과의 차이가 큰 것으로 분석되었다. 초음파속도의 경우에는 Khan(2012)의 경우 과대평가되는 것으로 분석되었으며, 다른 예측식의 경우에는 전반적으로 과소평가되는 것으로 나타났다. 또한 MRSJ(1958), AIJ(1983)과 Khan(2012)의 경우에는 강도에 따른 예측 결과의 차이가 다소 큰 것으로 분석되었다.

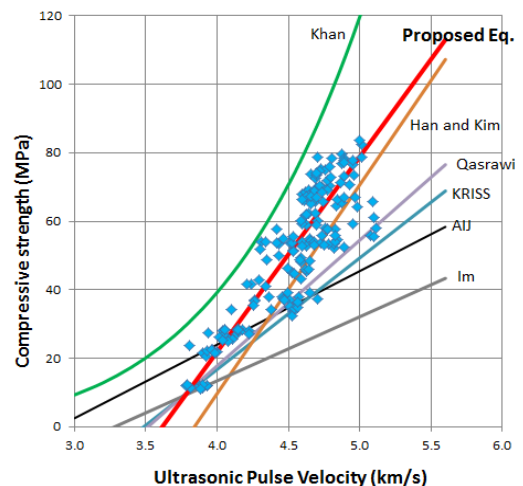
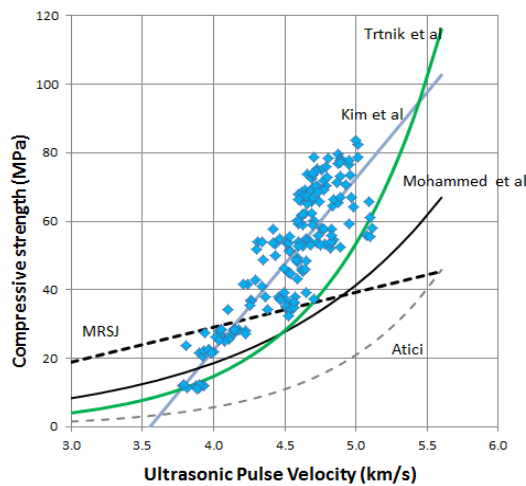
각 예측식들에 대한 실험 결과의 최소제곱근오차(RMSE)는 Fig. 5에 나타내었다. 반발경도법과 초음파속도법 모두 50 MPa 이상의 고강도 영역에서 오차가 증가함을 알 수 있으며, 반발경도법의 경우에는 KRISS(1999), 초음파속도의 경우에는 Atici(2011)의 식의 오차가 상대적으로 크게 분석되었다. 국내에서 많이 사용되고 있는 일본건축학회식(AIJ, 1983)과 재료시험소식(MRSJ)의 경우에는 전체적인 경향이 맞지 않는 것으로 나타났으며, Kwon et al.(2006)의 제안식이 상대적으로 실험 결과와 적합도가 높은 것으로 분석되었다. 지수함수 형태로 제안된 Atici(2011)와 Mohammed et al.(2011)의 경우

에는 반발경도 40~50내외에서의 압축강도를 크게 저평가하는 것으로 분석되었다. KRISS(1999)의 제안식의 경우에도 본 연구의 실험결과와 비교하면 강도가 증가할수록 저평가되는 것으로 나타났다. 반발경도 30~35내외에서 강도가 최저 20 MPa에서 최대 70 MPa까지 변화하는 것으로 나타났으며, 이는 보통강도콘크리트와 고강도 콘크리트영역에서 표면 수화 생성물의 경도차이에서 기인한 것으로 판단된다.

Fig. 6(b)는 직접법에 의한 초음파속도 예측식과 압축강도 결과를 나타내었다. 초음파 속도는 압축공시체에 대하여 직접법으로 측정하였으며, 직접법의 경우 콘크리트 내부 공극 상태의 영향을 받기 때문에 간접법에 비하여 5%정도 속도가 높게 나타난다. 일차 회귀분석식의 경우 Kim et al.(2002)의 식이 다른 식들과 비교하여 상대적으로 정확하게 나타났으며, 지수함수형태의 경우에는 Khan et al.(2012)의 제안식이 과대평가되는 경향은 있으나 속도 증가에 따른 강도 변화 정도는 잘 반영하는 것으로 나타났다. 고강도 영역인 초음파 속도 4.5 m/s 이상의 속도에서는 기존의 일본재료학회(MRSJ, 1958)와 일본건축학회(AIJ, 1983) 식의 경우에는 Atici(2011)와 Im(2007)을 제외한 다른 제안식들보다 정확도가 떨어지는



(a) relationship of rebound value and compressive strength



(b) relationship of ultrasonic pulse velocity and compressive strength

Fig. 6 Comparison of test results and various prediction equations by previous researches

것으로 분석되었다. 전체적으로 고강도영역에서 예측강도가 실제강도보다 낮게 나타나는 것으로 분석되었으며, 이는 기존 예측식들이 표면강성 및 내부 공극율과 압축강도의 변화가 비례하는 압축강도 50 MPa 이하의 콘크리트를 대상으로 하였기 때문인 것으로 판단된다. 그러나 고강도 콘크리트 영역에서의 강도변화는 미세 수화생성물의 조직 치밀성 및 골재의 강도 등에 영향을 받고, 강성증대 또는 내부공극의 감소에 따라 강도가 증가하는 것은 아니기 때문에 기존의 식으로는 정확도가 떨어지는 것으로 판단된다. 이와 같은 경향은 Fig. 7의 Tomosawa and Noguchi(1993)의 연구결과에서 나타난 압축강도와 탄성계수의 관계에서도 간접적으로 유추할 수 있으며, Yilmaz and Sendir(2002)는 다양한 연구자들의 암석의 탄성계수와 반발경도와의 관계를 제시하였다. 기존의 연구에 의하면 50 MPa 이상의 고강도 콘크리트 영역에서 재료의 강성을 나타내는 탄성계수의 증가정도가 감소하는 것으로

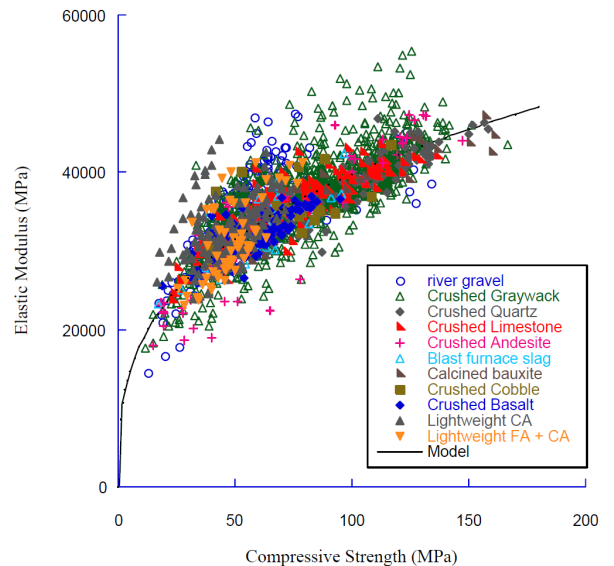


Fig. 7 Relationship of elastic modulus and high strength concrete

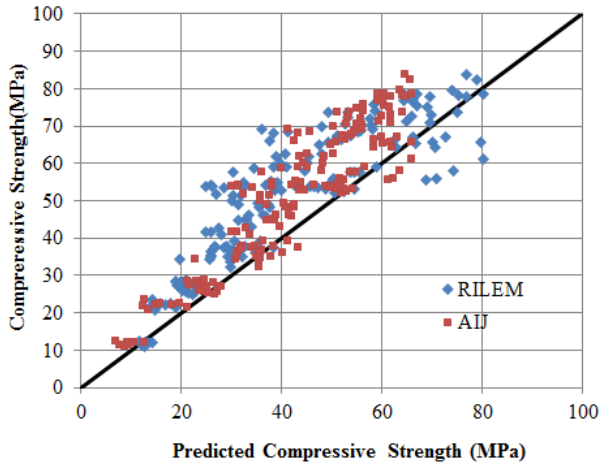


Fig. 8 Comparison of test results and combined prediction equations by RILEM and AIJ

나타났으며, 이는 반발 경도의 변화추이와 비슷한 것이다. Fig. 8에는 RILEM과 AIJ에서 제안한 복합법에 의한 예측결과와 본 연구의 실험결과를 나타내었다. 전체적으로 반발경도법과 초음파법만을 적용한 경우에 비해서는 적합도가 높아지는 것으로 나타났으나, 예측강도가 과소평가되는 것으로 분석되어 이에 대한 보정이 필요한 것으로 분석되었다.

4.2 선형회귀분석에 의한 고강도 예측식의 제안

Table 4에는 본 연구에서 실험된 압축강도 결과와 반발경도 및 초음파 속도를 사용하여 선형회귀분석한 식과 제안된 식에 의한 평균, 표준편차 및 결정계수를 정리하였으며, 실험 결과와의 비교는 Fig. 4와 5에 실제 압축강도와 예측치의 평균 및 최소자승오차를 정리하였으며, Fig. 6에는 실험에 의한 압축강도와 예측값의 관계를 도시하였다.

반발경도법, 초음파법 등에 대한 제안식의 경우, 예측치가 실제압축보다 미소하게 크게 평가되는 것으로 분석되었으며, 표준편차는 기존식들과 큰 차이를 나타내지 않으면서 적합도 정도를 반영하는 결정계수(R^2)는 각각 0.823과 0.811로 상당히 높게 분석되었다. 반발경도법은 Kwon et al.(2006)의 결과와 고강도 영역에서는 거의 유사하였으나, 40~60 MPa 영역에서 Kwon et al.의 제안식이 강도를 저평가하는 것으로 나타났

Table 4 Proposed equations for predicting of compressive strength

	Proposed Eq.	Ave	ST. Dev.	R^2
Rebound	$F_c = 1.9797R_0 - 20.173$	1.046	0.213	0.823
Ultrasonic Pulse	$F_c = 56.974V_p - 206$	1.063	0.220	0.811
Combined Method	$F_c = 23.37V_p + 1.13R_0 - 97.83$	0.988	0.147	0.831

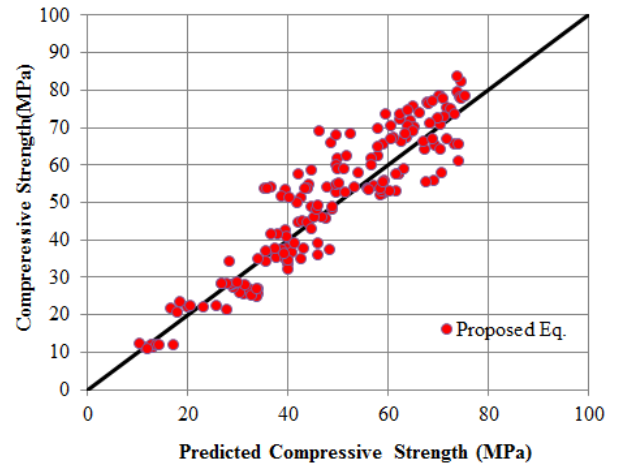


Fig. 9 Relationship between test result and proposed combined prediction equation

고, 초음파속도법 제안식의 경우는 Han and Kim(1999)의 제안식과 기울기가 유사한 것을 분석되었다. 반발경도와 초음파속도에 대한 중회귀분석 결과는 Fig. 9에 나타내었으며, 복합법 제안식 역시 결정계수가 0.831로 높게 나타나 기존식과 비교하여 높은 신뢰성을 갖는 것으로 나타났다. 그러나 보통강도콘크리트와 고강도 콘크리트의 미세구조가 변화하는 압축강도 50~60 MPa 사이에서는 상대적으로 분포도가 넓어지는 것으로 나타났으며, 이는 보통강도콘크리트와 같이 표면강성과 미세공극의 변화에 의해 강도가 지배되는 것이 아니라 수화 생성물 조직과 골재 강도에 더 영향을 받기 때문인 것으로 판단된다.

5. 결론

고강도 콘크리트에 적합한 비파괴강도 예측식을 제안하기 위하여 반발경도법 및 초음파 속도법을 실시하여 기존의 제안식들과 비교 분석하였다.

반발경도 및 초음파 속도 측정결과 강도등급별 측정결과와 분포도에 따른 변화는 거의 없는 것으로 분석되었다. 기존의 강도예측식들의 경우 고강도 영역에서의 신뢰도가 크게 떨어지는 것으로 나타났으며, 현재 많이 사용되고 있는 일본건축학회 및 재료학회식은 기존에 국내에서 제안된 식들에 비해서도 신뢰도가 현저히 낮은 것으로 분석되었다.

압축강도 50~70 MPa의 범위의 콘크리트에서 반발경도 $R=35\sim45$ 정도의 반발경도가 관측되었으나, 이 범위의 콘크리트에서 강도 증가에 비하여 강성변화 정도가 둔화되기 때문에 계측치의 분산이 높고 신뢰도가 낮아지는 것으로 나타났다.

또한 초음파 속도의 경우에도 보통강도 콘크리트 영역에서는 내부 공극의 유무 및 조직의 치밀도에 의하여 강도와 초음파 속도가 비례관계를 갖는데 비하여 고강도 영역에서는 골재의 강도 및 골재와 시멘트 페이스트 계면의 조직성상에 의하여 강도가 영향을 받기 때문에 초음파 속도의 증가가 완만해 지는 것으로 판단된다.

제안된 예측식은 전체 강도영역에서 다른 예측식들에 비하여 정확도가 높게 나타났으며, 신뢰도가 충분히 있는 것으로 판단된다. 그러나 제안식의 경우에는 압축공시체에 대한 실험 결과로서 제시된 것으로 실제 콘크리트 코아공시체와의 비교 및 재령에 대한 분석이 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2015년 에너지기술평가원(0000000015513)과 한국연구재단(NRF-2015R1A2A2A01005286)의 연구비 지원에 의해 수행되었으며, 저자들은 이에 감사드립니다.

References

1. Akashi, T. (1988) Studies on nondestructive testings of concrete, *Journal of JSCE* 390, 1-22.
2. Architectural Institute of Japan (1983) *Manual of nondestructive test methods for the evaluation of concrete strength*, p.26 [in Japanese].
3. Atici, U. (2011) Prediction of the strength of mineral admixture concrete using multivariable regression analysis and an artificial neural network, *Expert Systems with applications*, 38(8), 9609-9618.
4. Breyse, D. (2012a) Nondestructive evaluation of concrete strength: an historical review and a new perspective by combining NDT methods, *Construction and Building Materials*, 33, 139-163.
5. Breyse, D. (ed) (2012b) *Non-Destructive Assessment of Concrete Structures: Reliability and Limits of Single and Combined Techniques*, State-of-the-Art Report of the RILEM Technical Committee 207-INR, 1-16.
6. Chefdeville, J. (1953) Application of the method toward estimating the quality of concrete. RILEM Bull 15(special issue - vibration testing of concrete part 2), Paris.
7. Del Rio, L. M., et al. (2004) Characterization and hardening of concrete with ultrasonic testing, *Ultrasonics*, 42(1), 527-530.
8. Han, M. Y., and Kim, D. W. (1999) A Study on the Pull-out test for Non-Destructive Evaluation of Concrete Strength, *Proceeding of the Korea Concrete Institute*, 11(2), 639-642 [in Korean].
9. Im, S. Y. (2007) *A Study on the Estimation of Compressive Strength of Concrete by Non-Destructive Test*, M.S. Thesis, Daegu University [in Korean].

10. Japan Society for Testing and Materials (1958) Guideline for evaluation of compressive strength of concrete by Schmidt Hammer (draft), materials testing, 7-59. 426-430 (in Japanese).
11. Khan, M. I. (2012) Evaluation of non-destructive testing of high strength concrete incorporating supplementary cementitious composites, *Resources, Conservation and Recycling*, 61, 125-129.
12. Kim, M.-H., Choi, S.-J., Kang, S.-P., Kim, J.-H., and Jang, J.-H. (2002) A Study on the Application of Non-Destructive Testing Equation for the Estimation of Compressive Strength of High Strength Concrete, *Journal of the Korea Institute of Building Construction*, 2(3), 123-130 [in Korean].
13. Korea Research Institute of Standards and Science (1999) *Standardization for Concrete Compressive Strength Estimation Equation by Experiment for Specimen and Wall Type Structure*, Research Report [in Korean].
14. KS F 2405 (2010) *Standard test method for compressive strength of concrete*, Korea Agency for Technology and Standards.
15. KS F 2730 (2008) *Testing method for rebound number to conclude compressive strength of concrete*, Korea Agency for Technology and Standards.
16. KS F 2731 (2008) *Testing method for velocity of ultrasonic pulses to conclude compressive strength of concrete*, Korea Agency for Technology and Standards.
17. KS F 2422 (2007) *Method of obtaining and testing drilled cores and sawed beams of concrete*, Korea Agency for Technology and Standards.
18. Kwon, Y.-W., Park S.-C., and Kim M.-S. (2006) Strength Prediction Equations for High Strength Concrete by Schmidt Hammer Test, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 18(3), 389-395.
19. Kwon, H. R. (2010) *A Study on Compressive Strength Estimation of Concrete of Existing Structures by Rebound Method*, M.S. Thesis, Seoul National University for Technology [in Korean].
20. Malhotra, V. M., and Nicholas J. C., (eds) (2004) *Handbook on nondestructive testing of concrete* 2nd edition. CRC press, 384.
21. Mohammed, B. S., Najwa J. A., and M. A. (2011) Evaluation of rubbercrete based on ultrasonic pulse velocity and rebound hammer tests. *Construction and Building Materials*, 25(3), 1388-1397.
22. Pessiki, S. P., and Carino, N. J. (1988) Setting time and strength of concrete using the impactecho method. *ACI Mater J*, 85(5), 389-399.
23. Qasrawi, H. Y. (2000), Concrete strength by combined non-destructive methods Simply and reliably predicted, *Cement and Concrete Research*, 30, 739-746.
24. RILEM CNDT-Committee (1980), RILEM Tentative Recommendations for In-situ Concrete Strength Determination by Non-Destructive Combined Methods(First draft), May, 1980.
25. Sbartai, Z. M., et al.(2012) Concrete properties evaluation by statistical fusion of NDT techniques, *Construction and Building Materials*, 37, 943-950.
26. Shariati, M., et al. (2011) Assessing the strength of reinforced concrete structures through Ultrasonic Pulse Velocity and Schmidt Rebound Hammer tests, *Sci. Res. Essays*, 6(1), 213-220.
27. Stergiopoulou, C., Aggour, M., and McCuen, R. (2008) Non-destructive testing and evaluation of concrete parking garages, *Journal of Infrastructure Systems*, 14(4), 319-326.

28. Tanigawa, Y., and Kosaka, Y. (1980) Non-destructive Testing Methods of Concrete, *Concrete Journal of Japan Concrete Institute*, 18(1), 38-50 [in Japanese].
29. Tomosawa, F., and Noguchi T. (1993) Relationship between compressive strength and modulus of elasticity of high-strength concrete. *Proceedings of the Third International Symposium on Utilization of High-Strength Concrete*, 2, 1247-1254.
30. Trtnik, G., Franci K., and Goran T. (2009) Prediction of concrete strength using ultrasonic pulse velocity and artificial neural networks. *Ultrasonics*, 49(1), 53-60.
31. Willetts, C. H. (1958) *Investigation of the Schmidt Concrete Test Hammer*, No. WES-MP-6-267, ARMY Engineer Waterways Experiment Station Vicksburg MS.
32. Yilmaz, I., and Sendir, H. (2002) Correlation of Schmidt hardness with unconfined compressive strength and Young' modulus in gypsum from Sivas (Turkey) *Engineering Geology*, 66, 211-219.

Received : 05/25/2015

Revised : 07/21/2015

Accepted : 12/10/2015

요 지 : 저자들은 비파괴시험에 의한 고강도콘크리트의 강도 예측식을 제안하기 위하여 실험적 연구를 수행하였다. 본 연구에서 사용된 콘크리트의 설계압축강도는 40~80 MPa 범위이며, 압축공시체를 제작하여 반발경도법과 초음파 속도법으로 실험한후 KS기준에 따라 압축강도 실험을 실시하였다. 실험결과는 기존의 연구자들에 의하여 제안된 다양한 실험예측식들과 비교분석하였다. 실험결과 고강도 콘크리트에서도 반발경도법과 초음파속도법의 경우 간편성과 신뢰성에 있어 콘크리트 강도를 측정하기에 충분한 유용성을 확보한 것을 확인할 수 있었다. 기존식들과의 비교를 통하여 고강도 콘크리트에 적합한 강도예측식을 제안하였으며, 실험결과에 대한 충분한 신뢰성을 확보한 것으로 판단되어, 향후 고강도 콘크리트 구조물에 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

핵심용어 : 반발경도법, 초음파속도법, 고강도콘크리트, 압축강도
