

## 재령과 코어의 영향을 고려한 향상된 콘크리트 압축강도 추정기법의 경험적 제안

오홍섭<sup>1\*</sup>, 오광진<sup>2</sup>

# An Empirical Approach for Improving the Estimation of the Concrete Compressive Strength Considered the Effect of Age and Drilled Core Sample

Hongseob Oh<sup>1\*</sup>, Kwang-Chin Oh<sup>2</sup>

**Abstract:** To evaluate the compressive strength of concrete, rebound test and ultra pulse velocity methods as well as core test were widely used. The predicted strength effected by age, maturity and degradation of concrete, is a slight difference between in-situ concrete strength. The compressive strength of standard cylinder specimens and core samples by obtained from drilling will have a difference since the concrete is disturbed during the drilling by machinery. And the rebound number and ultra pulse velocity are also changed according to the age and maturity of concrete that effected to the surface hardness and microscpic minuteness. The authors performed the experimental work to reflect the age and core effect to the results from NDE test. The test results considering on the core and age of concrete were compared with the proposed equation to predict the compressive strength.

**Keywords:** Age, Compressive strength, Core effect, NDE, Rebound test, Ultrasonic pulse velocity

## 1. 서 론

시멘트와 골재 이외에도 다양한 재료가 결합되어 강도를 발현하는 콘크리트는 배합뿐만 아니라 재령, 시험편의 크기 등에 따라 강도가 민감하게 변화한다(ACI 214.4-03, 2013; Malhotra et al, 2004). 따라서 전통적인 비파괴시험방법인 반발경도법과 초음파법에 의한 콘크리트 강도 추정시 재령, 습도 등의 영향을 반영하기 위한 다양한 연구가 진행되고 있으며, 현장에서 채취된 코어와 비파괴 평가에 의한 강도와의 상관관계 등에 분석 등에 대한 연구들이 꾸준히 수행되고 있다(Tuncan et al., 2008; Shim, 2009; Uva et al., 2013).

Breysse(2012a, 2012b)는 기존 압축강도추정식들에 대한 비교분석을 통하여 새로운 강도예측 방법을 제시하였고, Park et al(2015)는 신뢰성 이론에 근거한 비파괴 압축강도 추정식을 제시하였다. Voigt et al.(2003), Kim et al.(2002), Lin et al.(2007)과 Cho(2008)는 초기재령에서 초음파속도의 변화와 압축강도 발현의 관계를 실험적으로 분석하였으며, Kim et al.(2005)는 혼화제 사용 콘크리트의 비파괴 강도 추정에 대한 연구를 수행하였다.

Kheder(1999)는 113개의 시험편에 대한 7일에서 90일사이의 콘크리트의 압축강도와 비파괴 실험결과를 1차적으로 비교분석한 후, 2차 실험에서 코어실험결과와 예측치를 비교하여 제안식의 신뢰성을 평가하였다. Di Leo et al.(1984)는 비파괴 시험시의 코어 크기에 대한 영향을 평가하였으며, Indelicatio(1993)는 골재크기 25 mm이상의 콘크리트에서 28 mm의 소형 코어의 강도 특성에 대하여 분석하였다. 최근에는 Khour et al.(2014), Uva et al.(2013)과 Tuncan et al.(2008) 등의 연구자들이 코어의 크기와 압축강도의 상관관계 등에 대하여 폭넓게 연구하고 있다.

반발경도법과 초음파속도법과 같이 간접적으로 콘크리트 강도를 평가하는 방법은 평가자의 숙련도, 구조물의 형태, 위치 및 재령 등에 따라 신뢰도의 차이가 발생하기 때문에 추가적으로 코어를 채취하여 압축강도를 평가한 후 비파괴검사결과와 상호 검증하는 단계를 거치게 된다. 이때 코어채취 위치는 비파괴 검사가 행해지는 주요부재보다는 채취후에도 문제가 발생하지 않는 2차부재 등을 대상으로 하는 것이 일반적이다. 또한 구조물의 손상을 최소화하기 위하여 코어의 크기를 최소화하여 강도를 평가하고자 하는 것이 효율적이거나 코어 크기에 대한 국내의 데이터가 충분히 축적되지 않아 아직까지는 표준공시체와 동일한 직경 100 mm의 코어를 현장채취하여 강도를 평가하고 있다.

콘크리트의 압축강도( $f_c$ ), 현장의 비파괴시험에 의한 추정

<sup>1</sup>정회원, 경남과학기술대학교 토목공학과 교수, 교신저자

<sup>2</sup>정회원, 시설안전기술공단 건설평가실

\*Corresponding author: opera69@chol.com

•본 논문에 대한 토의를 2015년 12월 1일까지 학회로 보내주시면 2016년 1월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

압축강도( $f_{NDE}$ )와 코어 압축강도( $f_{core}$ )는 식(1)과 같이 표현할 수 있으며, 비파괴 검사의 신뢰성을 향상시키기 위해서는 식(1)의 각 영향인자들에 대한 분석과 계수의 적용이 필수적이다.

$$f_c = \alpha_i f_{NDE} = \beta_i f_{core} \quad (1)$$

여기서,  $\alpha_i$ 는 콘크리트 재령, 습윤상태 또는 측정방향 등에 의한 계수,  $\beta_i$ 는 코어의 형상비, 직경, 습윤상태 등에 의한 계수

본 연구에서는 식(1)의 인자들 중에서 콘크리트 재령과 코어의 영향, 그리고 코어의 크기에 따른 압축강도의 변화 정도를 실험적으로 분석하여, 현장 비파괴 시험결과와 코어강도 결과를 통하여 콘크리트 강도 추정의 신뢰도를 향상시킬 수 있는 경험적 방법을 제안하고자 하였다.

## 2. 실험계획 및 제작

강도추정시 콘크리트 재령의 영향과 코어공시체와 표준공시체의 강도 차이를 실험적으로 분석하기 위하여 Table 1의 콘크리트 배합을 사용하여 원주형 공시체와 600×600×200 mm의 사각형의 시험체를 제작하였다. 콘크리트는 국내 현장에서 사용되는 콘크리트 특성을 반영할 수 있도록 부산지역의 OO레미콘을 사용하여 타설하였다. 사용된 보통포틀랜드 시멘트의 단위용적질량은 3,150 kg/m<sup>3</sup>이며, 골재는 단위용적질량이 각각 2,610 kg/m<sup>3</sup>과 2,690 kg/m<sup>3</sup>인 천연모래와 쇠석, 그리고 굵은골재 최대치수는 20 mm인 재료를 사용하였다. 또한 강도발현을 위해 단위용적질량 각각 2,220 kg/m<sup>3</sup>와 2,200 kg/m<sup>3</sup>인 플라이애쉬와 실리카흄을 사용하였다. 각 배합별 목표배합강도( $f_{cr}$ )는 40, 60 및 80 MPa로 설계하였으며,  $\phi$ 100×200 mm의 콘크리트 표준 공시체를 재령별로 5개 이상 제작하여 재령 1, 3, 5, 7, 14, 28, 150, 180, 240과 300일에 강도를 측정하였다. 채취된 코어강도와 비파괴 시험결과를 비교하기 위하여 위하여 Fig. 1과 같은 60×60×20 cm의 사각형 시

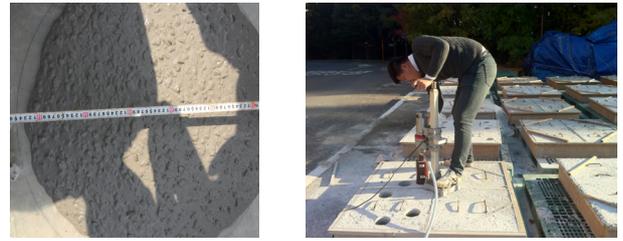


Fig. 1 Scene of flow test and concrete coring from rectangular specimen

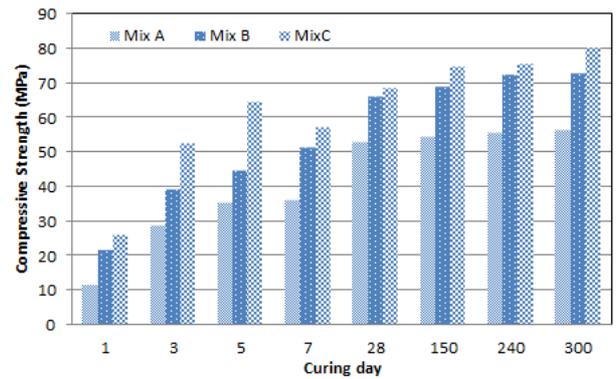


Fig. 2 Compressive strength development of concrete according to the curing day

험체를 제작하여 7일 이후에 코어를 채취하였다. 표준공시체는 실험직전까지 수중양생을 실시하였으며, 사각형 시험체는 대기중에서 기건양생하였다.

재령에 맞춰 양생된 콘크리트는 표준공시체에 대해서는 KS F 2730과 KS F 2732에 따라 반발경도시험과 초음파 펄스 시험을 실시한 후 KS F 2405에 따라 압축강도 시험을 실시하였다. 사각형 콘크리트 시험편의 경우에는 코어채취전 반발경도법을 실시하였으며, 직접법과 간접법으로 초음파 속도를 측정한 후 동일한 시험체에서 직경 100 mm, 50 mm와 30 mm의 공시체를 3개씩 채취하여 압축강도를 평가하였다. Fig. 2에는 재령에 따른 표준공시체의 평균 압축강도를 나타내었다. 목표 배합강도 40 MPa과 60 MPa인 Mix A와 B는 각각 52 MPa과 67 MPa의 28일 평균압축강도를 발현한 반면에 Mix C는 목표배합강도 80 MPa보다 낮은 69 MPa 정도를 나타내었다. Mix C의 경우에는 재령5일에 64 MPa 정도를 나타내었으나, 이후

Table 1 Mix proportion of concrete (unit : kg/m<sup>3</sup>)

Mix No.	$f_{cr}$ (MPa)	W/B (%)	S/a (%)	W	C	S		G	FA	SF	AE
						WS	CS				
Mix A	40	38.5	52	160	374	358	537	849	42	-	3.74
Mix B	60	31	51	165	479	328	492	809	53	-	4.52
Mix C	80	21	46.5	165	613	189	440	743	79	94	14.93

강도 증진이 이루어지지 않아 타설시 또는 5일 이후 이동중에 미세한 초기손상이 발생한 것으로 판단된다. Mix A와 B는 재령 300일까지 일반적인 강도발현 특징을 나타내었다.

### 3. 추정압축강도와 재령의 관계

#### 3.1 반발경도와 압축강도의 영향

Fig. 3에는 콘크리트 재령에 따른 반발경도와 압축강도의 변화를 도시하였다. Mix A, B와 C의 28일 평균 압축강도는 각

각 52 MPa, 62 MPa와 65 MPa로 측정되었으며, 재령에 따른 반발경도와 압축강도 변화에 대한 회귀분석 결과는 충분한 신뢰성을 갖는 것으로 분석되었다. 반발경도의 변화정도는 Mix A와 같은 50 MPa내외의 압축강도에서는 압축강도와 유사하게 변화하였으나, Mix B와 C 같은 60 MPa 이상의 콘크리트에서는 강도 증가에 비하여 반발경도 증가가 둔화되고, 28일 이후에 차이가 점차 커지는 것으로 나타났다. 또한 Mix C의 경우, 재령 7일 평균반발경도 35인 시험편에서 평균 55 MPa의 압축강도가 발현된 반면에, Mix A는 150일 이후에서 반발경도 40에서 평균압축강도 55 MPa가 발현되었다. 이는 배합에 따라 표면경도와 압축강도의 변화 속도에 차이가 발

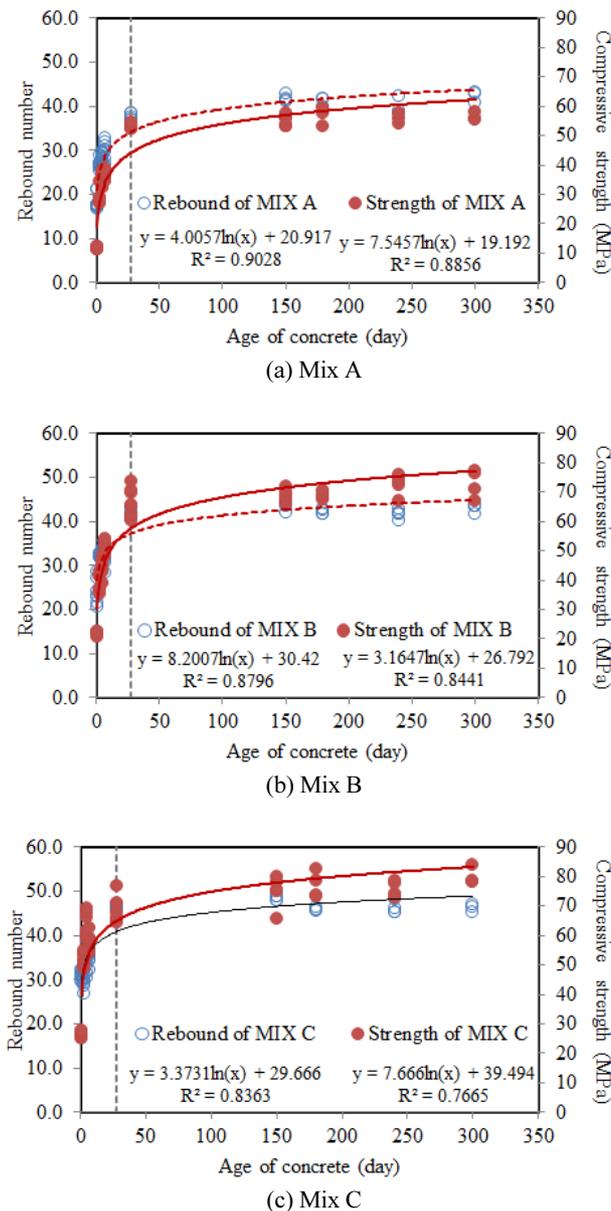


Fig. 3 Relationship of rebound value and compressive strength according to the curing time

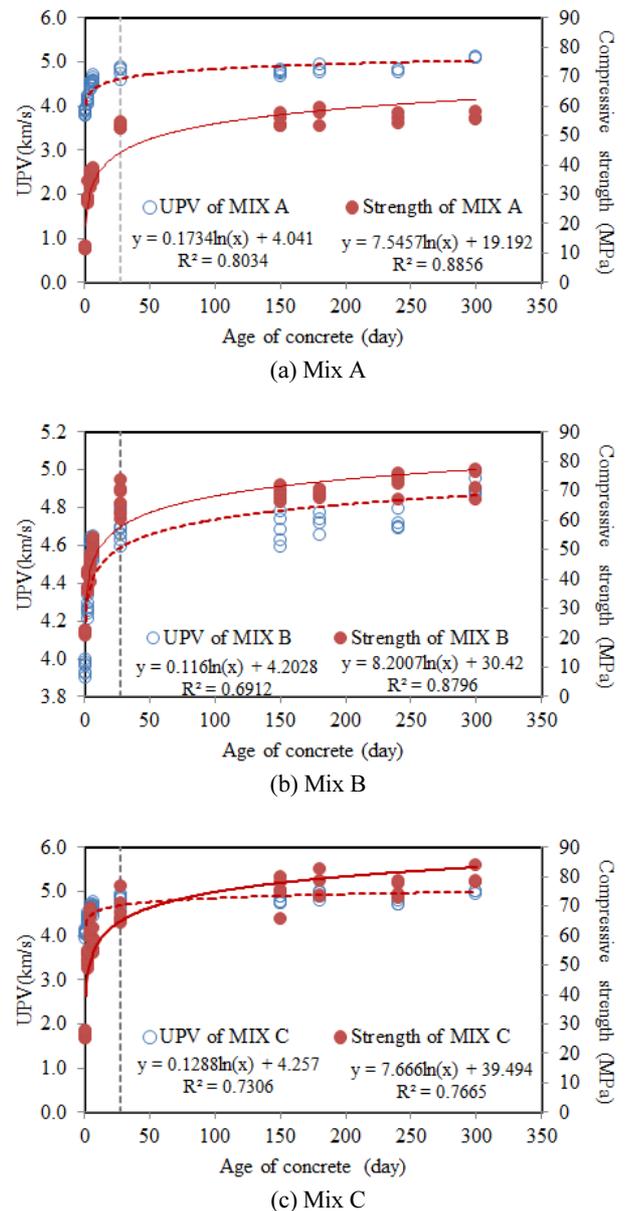


Fig. 4 Relationship of ultrasonic pulse velocity and compressive strength according to the curing time

생하는 것으로 나타내는 것이다.

### 3.2 초음파 속도와 재령의 관계

Fig. 4에는 초음파속도와 압축강도의 재령에 따른 변화관계를 나타내었으며, 재령초기에 초음파 속도가 급속히 증가하나 재령 28일 이후에는 강도 증가에 비하여 초음파 속도는 거의 증가하지 않는 것으로 나타났다. Chang et al.(2006)과 Bogas et al.(2013)의 연구에서도 보통중량 콘크리트의 경우 재령에 따른 초음파 속도의 증가보다 콘크리트 강도 증가 속도가 빠르게 증가하는 것으로 나타났다.

이는 수중양생된 콘크리트의 경우, 재령28일 이후에는 수화반응이 거의 끝나고 미세공극이 수화물에 의해 채워졌기 때문에 초음파 속도의 변화가 발생하지 않는 것으로 판단된다. 28일 이후 Mix A에서 초음파 속도 4.8 km/s내외에서 압축강도가 55 MPa 정도로 평가된 것에 비하여 Mix C는 압축강도 70~80 MPa 범위를 나타내어 초음파 속도범의 경우 밀실도가 확보된 일정강도 이상에서는 정확도가 낮아지는 것으로 판단된다. 초음파속도 변화에 대한 회귀분석 결과에서도 반발경도에 비하여 결정계수가 상대적으로 낮게 해석되어 신뢰도가 낮음을 알 수 있다.

### 3.3 재령에 따른 추정압축강도의 영향

Fig. 5에는 Table 1의 배합으로 제작된 콘크리트 공시체의

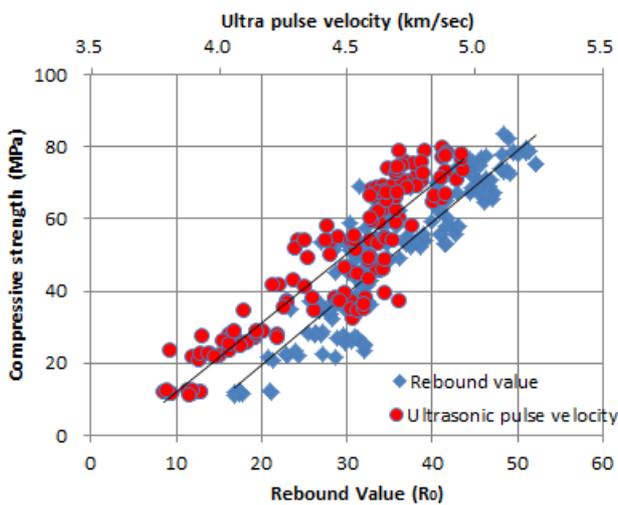


Fig. 5 Relationship between compressive strength and rebound value, ultrasonic pulse velocity

Table 2 Proposed equations for predicting of compressive strength

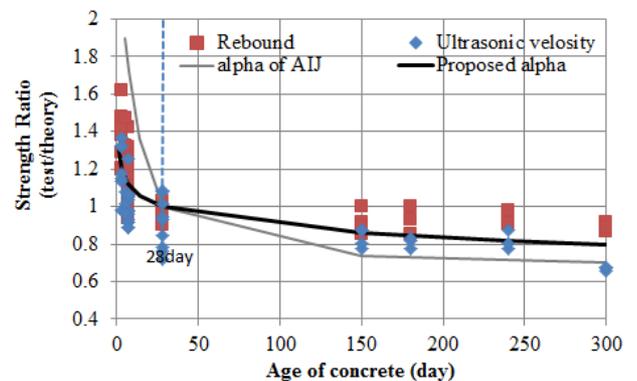
	Proposed Eq.	Ave	ST.Dev.	R <sup>2</sup>
Rebound	$F_c = 1.9797R_0 - 20.173$	1.046	0.213	0.823
Ultrasonic Pulse	$F_c = 56.974V_p - 206$	1.063	0.220	0.811

콘크리트 압축강도 결과와 반발경도 및 초음파 속도를 도시하였으며, 선형회귀분석을 통하여 도출된 강도예측식을 Table 2에 정리하였다(Oh et al. 2015).

실험결과 초음파 속도 4.6~4.7 km/s 사이에서 최저 37 MPa에서 최대 73 MPa까지 변화되는 것 예측되었으며, 속도 4.8 km/s 이상에서는 65 MPa 이상의 강도를 나타내었다. 이는 고강도 콘크리트의 강도발현 현상이 내부 미세 공극 유무 또는 분포보다는 천이영역(Interfacial Transition Zone)의 수화생성물 주위의 미수화시멘트입자 또는 실리카흄 등에 의해 밀실도가 높아지고 강도가 급격하게 높아지기 때문에 초음파 전달속도의 변화가 크지 않은 상태에서 강도가 변화하기 때문인 것으로 판단된다.

반발경도의 경우에는 반발경도 30~35 범위에서 압축강도가 최저 27 MPa에서 65 MPa까지 변화되는 것으로 나타났으며, 반발경도35이상에서는 강도편차가 감소하는 것으로 관찰되었다. 이와 같은 현상은 Fig. 3에 나타낸 것과 같이 고강도 영역에서는 재령 변화에 따라 수화생성물이 급격하게 변화하는데 비하여 표면 경도의 증가속도는 상대적으로 작기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 6에는 고강도 콘크리트의 실제 압축강도와 추정식에 의한 압축강도의 재령에 따른 변화를 평가하기 위하여 강도 범위 50 MPa~65 MPa 공시체에 대한 실험치/추정치의 강도비(Strength ratio)를 나타내었다. 초음파 속도 및 반발경도 모두 재령 28일 이전에는 추정식이 과소평가되는 것으로 분석되었으며, 재령이 증가함에 따라 점차 과대평가되는 것으로 나타났다. Fig. 6에 제시한 경험적 재령보정계수는 추정식과 실험치의 강도변화를 회귀분석을 통하여 재령 28일을 기준으



	1	3	5	7	14	28	150	240	300
Proposed $\alpha$	1.30	1.20	1.15	1.12	1.06	1.00	0.86	0.82	0.80
AIJ's $\alpha$			1.9	1.72	1.36	1	0.74	0.72	0.7

Fig. 6 Variation of strength ratio according to the age of concrete and empirical aging coefficient for strength prediction equation

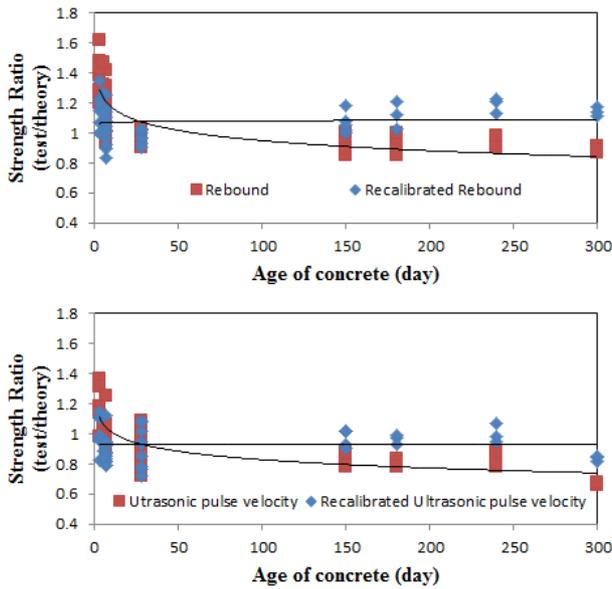


Fig. 7 Comparison of recalibrated predicted strength and test results

로 계수를 도출한 결과이며, 보정된 강도와 실험과의 비교는 Fig. 7에 정리하였다. 재령의 영향을 적절히 반영하는 것으로 나타났다. 재령보정계수는 콘크리트 탄산화 및 표면경화 등에 의하여 표면경도가 강도보다 높게 측정되는 것을 반영하기 위하여 보통강도 콘크리트에 대하여 일본건축학회(AIJ, 1983)에서 제시된 것이며, 강도범위에 따른 재령보정계수에 대한 충분한 데이터는 확보되어 있지 않은 상태이다. Fig. 6에 제안된 재령계수는 기존에 많이 사용되고 있는 보통강도 콘크리트에 대한 일본건축학회(AIJ, 1983)의 재령보정계수와 비교하여 재령 28일 이전에는 낮고, 재령이 증가할 경우에는 다소 커지는 것으로 산정되었다.

## 4. 코어공시체의 영향

### 4.1 표준공시체와 코어공시체의 관계

Fig. 8에는 일반콘크리트 공시체와 드릴링에 의해 채취한 콘크리트 공시체의 재령에 따른 압축강도비(코어강도/공시체강도)를 나타내었으며, 코어의 직경과 길이는 각각 100 mm와 200 mm로 고정하여 공시체의 형태와 동일하게 유지하였다. 실험결과 표준공시체와 비교하여 코어공시체의 강도가 낮게 나타났으며, 전체 실험편에서의 강도감소는 평균 17.5% 정도로 분석되었고, 재령 7일의 결과를 제외할 경우에는 약 11.3%의 강도 저하가 관찰되었다. 이는 드릴링시 발생할 수 있는 공시체 축의 미세한 변화와 골재와 시멘트 수화생성물 사이의 손상 또는 상면과 하면 하중 가력부위의 미세손상에

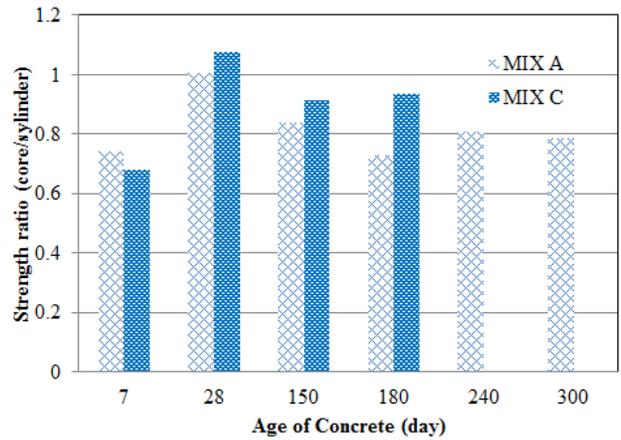


Fig. 8 Variation of compressive strength ratio of concrete core with molded cylinder strength according to the curing age

Table 3 Magnitude of strength correction factors for converting core strength into equivalent in-place strength [ACI 214.4R-03]

Factor	Condition	Mean value
Aspect ratio* : $F_{l/d}$	Standard treatment**	$1 - (0.130 - \alpha f_{core})(2 - l/d)^2$
	Soaked 48 h in water	$1 - (0.117 - \alpha f_{core})(2 - l/d)^2$
	Air dried	$1 - (0.144 - \alpha f_{core})(2 - l/d)^2$
Core diameter : $F_{dia}$	50 mm	1.06
	100 mm	1.00
	150 mm	0.98
Moisture condition : $F_{mc}$	Standard treatment	1.00
	Soaked 48 h in water	1.09
	Air dried	0.96
Damage due to drilling $F_D$		1.06

\* Constant  $\alpha$  equals  $4.3(10^{-4})$  1/MPa for  $f_{core}$  in MPa

\*\* Standard treatment specified in ASTM C 42/C 42M

기인한 것으로 판단된다.

코어 공시체의 미세손상을 고려하기 위하여 ACI 214.4R-03에서는 코어공시체의 압축강도 적용시 식(2)을 적용하도록 권장하고 있으며, 식(2)의 계수는 Table 3에 정리하였다. 여기에서 코어 채취시의 손상에 의한 강도 저하는 약 6% 정도로 제시하고 있다.

$$f_c = F_{l/d} \cdot F_{dia} \cdot F_{mc} \cdot F_D \cdot f_{core} \quad (2)$$

여기서,  $f_c$ : 등가 현장타설콘크리트 표준공시체의 압축강도,  $f_{core}$ : 콘크리트 코어 압축강도,  $F_{l/d}$ : 공시체 형상계수,  $F_{dia}$ : 공시체 직경에 의한 계수,  $F_{mc}$ : 코어의 습윤상태 계수,  $F_D$ : 드릴링과 표면처리시 발생할 수 있는 손상 계수

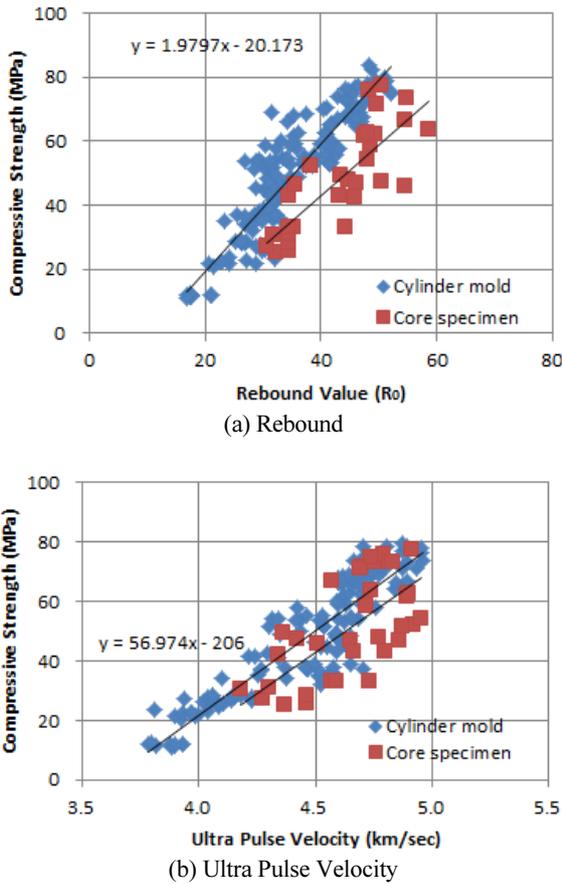


Fig. 9 Difference of compressive strength between molded concrete cylinder strength and concrete core according to the non destructive test methods

코어를 채취하기 위하여 콘크리트에 드릴링을 하여 시편을 채취하는 경우 골재의 종류, 내부 공극의 유무 등에 따라 영향을 받게 된다. Bohdan and Tomasz(2013)은 여러 연구자들의 실험결과를 분석하여 직경 12 cm 이하의 공시체와 직경 15 cm 이상에서는 압축강도가 낮아지는 이차함수형태의 직경과 강도의 관계를 제시하였다. Khoury et al.(2014)는 실험을 통하여 코어 시험체가 표준공시체와 비교하여 압축강도가 14~20%까지 낮아질 수 있음을 제시하였다. 또한 통계적 분석을 실시하여 코어 채취시의 손상계수를 식(3)과 같이 제안하였다. 이때  $\alpha$ 는 골재에 대한 상수로서 쇄석골재에 대해 0.06를 제시하였다.

$$F_D = 2.4 \times \frac{(l/d)^{0.006}}{[(d)^{0.1} \times (f_{core})^\alpha]} \quad (3)$$

본 연구의 실험결과에서도 동일한 배합의 콘크리트와 비교하여 압축강도에서 표준공시체와 코어공시체에서 ACI와 Khoury et al.(2014)의 결과와 유사한 경향을 나타냈다. 현장채

취 콘크리트의 코어강도와 추정압축강도를 상호비교하기 위해서는 코어의 손상영향을 고려하여야 한다. 본 연구에서는 표준공시체에 의한 비파괴 평가 결과와 코어공시체에 대한 비파괴 평가결과를 상호 비교하였으며, Fig. 9에 나타내었다. 반발경도법과 초음파법 모두 코어공시체에 대한 실험결과가 표준공시체와 비교하여  $R^2$ 는 낮아지고 분산은 커지는 것으로 분석되었다. 표준공시체에 의한 Table 2의 제안식과 코어 공시체에 의한 회귀분석 결과 반발경도와 초음파 속도법에 대한 기울기의 비는 각각 1.25과 1.03으로 나타났다.

표준공시체와 코어공시체의 회귀분석에 의한 반발경도와 초음파속도 예측식은 각각 25%와 3% 정도씩 코어공시체로부터 획득한 강도가 낮게 산정되었다. 따라서 현장에서 반발경도 또는 초음파 속도 이외에 코어공시체를 획득하여 강도를 평가하는 경우에는 코어공시체의 강도에 손상에 의한 영향을 고려하여 강도를 평가하는 것이 적합할 것으로 판단된다. 따라서 코어강도와 비파괴 결과를 상호 평가하기 위해서는 식 (4)에 의한 추정압축강도와 코어강도를 비교하는 것이 바람직하고, Table 2의 추정식을 적용할 경우에는 식 (2)에 Table 3의 수정계수 1.06 또는 식 (3)의 수정계수를 사용하여야 추정치의 신뢰도를 높일 수 있을 것이다.

#### 4.2 코어 크기 영향

비파괴 검사는 공용중인 구조체에 손상을 발생시키지 않고 재료의 강도를 평가하는 효과적인 방법이나, 구조물의 중요도 또는 검사의 신뢰도 확보를 위해 코어를 채취하여야 하는 경우가 있다. 관리 측면에서는 철근 간격 및 채취위치의 중요도 등에 따라 가급적 코어의 크기를 작게 하는 것이 바람직하나, 직경 100 mm의 표준공시체와의 강도 차이뿐만 아니라 시험결과의 신뢰성 등이 충분히 증명되지 않았기 때문에 현장에서의 활용도는 낮은 상태이다. 본 연구에서는 Fig. 10과 같이 콘크리트 배합(MIX A, B와 C)에 따라 코어 직경 30 mm, 50 mm 및 100 mm 공시체를 각각 9개씩 채취하여 압축강도 시험을 실시하였다. 코어공시체의 제원은 길이/직경의 비는 2.0으로 고정하고 편차를 최소화하기 위하여 하나의 시험체에서 30, 50 및 100 mm의 공시체를 같이 채취하였다.

각 직경별 평균압축강도 결과는 Fig. 11에 정리하였다. 기존의 연구결과(ACI, 2013; Khoury 2014; Tuncan, 2008)와 유사하게 직경 100 mm의 시험편의 압축강도가 가장 높고, 직경 30 mm인 시험편의 강도가 낮게 측정되었다. 직경 100 mm 코어의 평균 압축강도와 비교하여 직경 50 mm와 30 mm강도는 각각 9.8%와 17.6%정도 저하되는 것으로 관찰되었다.

채취된 코어의 크기가 작아짐에 따라 압축강도가 낮아지는 것은 일반 파괴역학적 크기효과와는 다른 결과이며, 다음의 두가지 원인에 따라 강도 감소가 발생하는 것으로 판단된다.



Fig. 10 Drilled core samples with different diameters and test setting for compressive strength

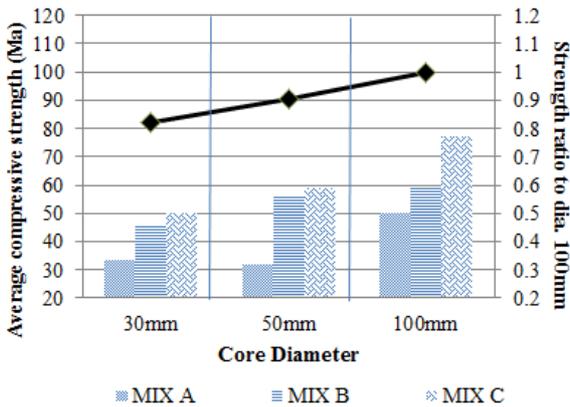


Fig. 11 Average compressive strength of drilled core sample according to the core diameter

첫 번째는 Fig. 12에 나타난 것과 같이 굵은 골재 최대치수 20 mm이상의 골재가 사용된 경우 직경 30 mm 또는 50 mm 코어에는 동일 평면에 1개 또는 2개의 골재가 존재하는 반면에 직경 100 mm 코어에는 최대 5개의 골재가 존재하게 된다. 따라서 미세구조에서 응력전달이 분산될 수 있는 직경100 mm의 코어 공시체의 강도가 상대적으로 크게 나타내게 된다. 두 번째는 코어 채취시의 드릴링에 의하여 코어의 측면은 시멘트 페이스트 뿐만 아니라 골재와 수화생성물의 계면도 여러 형태로 손상되게 되며, 직경이 작은 경우에는 강도에 미치는 영향이 커지게 된다.

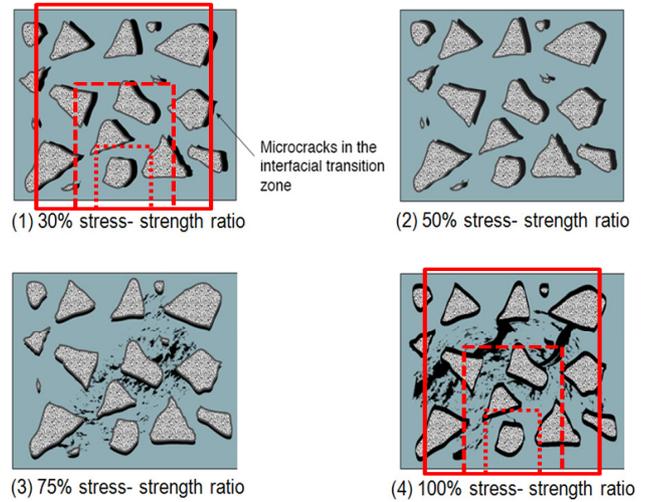


Fig. 12 Internal micro-cracking development of concrete under uniaxial compressive stress (Mehta, et al., 2006)

따라서 ACI 214.4R-03의 경우에는 Table 3에 나타난 것과 같이 직경 50 mm의 경우에는 1.06의 할증계수를 사용하도록 하고 있으며, Tuncan et al.(2008)의 연구에서는 Turkish Standard TS EN 12504-1에서 제안하고 있는 것과 유사하게 20 mm 골재가 사용된 콘크리트의 경우에는 50 mm 직경의 코어에서 약 7%의 강도저하를 나타내었다. Khoury et al.(2014)은 다양한 조건에 대한 실험을 통하여 직경에 대한 영향계수를 식 (4)와 같이 제시하였다.

$$F_{dia} = 1.507 - 0.11 \ln(d) \quad (4)$$

직경 50 mm와 30 mm의 계수는 각각 1.077과 1.133으로 산정되어 ACI 제안값보다는 크고, 본 연구의 실험결과보다는 작게 산정되었으나, 본 연구의 실험결과와 유사한 경향을 나타내어 국내에서도 직경에 대한 계수 적용시 사용할 수 있을 것으로 판단된다.

## 5. 결론

본 연구는 반발경도 및 초음파속도법에 의해 콘크리트 구조물의 압축강도 추정시 콘크리트의 재령과 코어압축강도에 의한 영향을 실험적으로 분석하여 추정압축강도의 신뢰성을 높이고자 하였다. 본 연구의 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 콘크리트의 재령이 증가함에 따라 압축강도가 발현되는 것과 같이 반발경도와 초음파속도 역시 증가하는 것으로 분석되었으나, 재료가 고강도화 될수록 반발경도와 초음

과 속도의 증가율은 둔화되는 것으로 나타났다.

- (2) 재령 300일까지의 실험결과와 순수한 재령의 영향은 50일 이후에는 거의 변화가 없는 것으로 나타났으며, 그 결과를 바탕으로 수정된 재령계수를 제안하였다. 보정된 추정압축강도의 경우 재령에 의한 변화가 크게 감소하는 것으로 나타났으나, 장기 영향인 탄산화 및 자외선 등에 의한 표면 경화의 영향 등에 대해서는 장기적인 연구가 필요한 것으로 판단된다.
- (3) 코어와 표준공시체의 압축강도를 비교하였으며, ACI에서 제시하고 있는 6% 보다는 다소 큰 11.3% 정도의 강도감소가 나타났으나, Khoury et al.(2014)의 연구 결과와 유사한 결과로서 현장 코어강도와 추정압축강도와의 분석시 ACI의 제안치 이상의 코어의 강도 저하를 고려하여야 할 것으로 판단된다.
- (4) 구조물의 손상을 최소화할 수 있는 방안으로서 코어의 크기에 따른 강도의 변화를 검토하였으며, 직경 50 mm 정도까지는 일정수준 정도의 신뢰성을 확보하면서 강도를 추정할 수 있는 것으로 분석되었다. 실험결과에서는 직경 100 mm 코어강도와 비교하여 직경 50 mm 코어 강도에서 최대 9.8%의 강도저하 현상이 발생하였고, 이는 기존의 연구결과들과 유사한 경향을 나타내는 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 2015년 경남과학기술대학교의 연구비 지원에 의해 수행되었으며, 저자들은 이에 감사드립니다.

## References

1. ACI Committee 214.4-03(2013) *Guide for obtaining cores and interpreting compressive strength results*, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 16pp
2. Architectural Institute of Japan (1983) *Manual of nondestructive test methods for the evaluation of concrete strength*, p.26 (in Japanese.)
3. Bogas, J. A., Gomes, M. G., & Gomes, A. (2013). Compressive strength evaluation of structural lightweight concrete by non-destructive ultrasonic pulse velocity method. *Ultrasonics*, 53(5), 962-972.
4. Bohdan, S. and Tomasz, K.(2013) Determination of the Influence of Cylindrical Samples Dimensions on the Evaluation of Concrete and Wall Mortar Strength Using Ultrasound Method, *Procedia Engineering*, 57,1078-1085
5. 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.

6. 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
7. Chang T. P., Lin, W. T., Chang, T. F. and Hsuao C. (2006) Engineering Properties of Lightweight Concrete assessed by stress wave propagation methods, *Cement and Concrete Composites*, 28(1), 57-68
8. Cho C. H. (2008) Calculation of Aging Effects of Ultrasonic Pulse Velocity in Concrete by Non-Destructive Test, *Journal of the Korea Institute of Safety Inspection, KSMI*, 12(6), 173-179
9. Di Leo, A., Pascale, G., and Viola, E. (1984). Core Sampling Size in Nondestructive Testing of Concrete Structures. ACI Special Publication, 82.
10. Indelicato, F (1993). A Statical Method for the Assessment of Concrete Strength through Microcores, *Materials and Structures*, 26, 261-267
11. Kheder, G. F. (1999). A two stage procedure for assessment of in situ concrete strength using combined non-destructive testing. *Materials and Structures*, 32(6), 410-417.
12. Khoury, S., Aliabdo, A. A. H., & Ghazy, A. (2014). Reliability of core test-Critical assessment and proposed new approach. *Alexandria Engineering Journal*, 53(1), 169-184.
13. Kim, J. S., Shin, Y. S., Kim, P. S. and Cho, C. H.(2005) A Study on the Estimation of Strength Nondestructive Test of the Admixture Concrete, *Journal of the Korea Institute of Safety Inspection, KSMI*, 9(4), 217-226
14. Kim, M. S., Yun, Y. H., Kim, J. K., Kwon, Y. W., and Lee, S. S. (2002). Estimation of aging effects on determination of compressive strength of concrete by non-destructive tests. *J Korea Concr Inst*, 14(5), 782-8.
15. Lin, Y., Kuo S.F., Hsiao C. and Lai C.P., (2007) Investigation of pulse velocity-strength relationship of hardened concrete, *ACI Material Journal*, 104-M38,344-350
16. Malhotra, V. Mohan, and Nicholas J. Carino, (eds) (2004) *Handbook on nondestructive testing of concrete* 2nd edition. CRC press, 384p
17. Mehta, P.K. and Monteiro P.J.M.(2006), *Concrete-Micro structure, Properties and Materials*, McGraw-Hill, Third edition
18. Oh, H., Kim, M. and Oh, K. C. (2015) Estimating the compressive strength of high-strength concrete using surface rebound value and ultra-pulse velocity, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection, KSMI*, (Submitted)
19. Park J. W., Choo J. H., Park G. R., Hwang I. B. and Shin Y. S. (2015) The Evaluation of Non-destructive formulas on Compressive Strength, using the Reliability Based on the Probability, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 19(4), 205-34
20. Shim, H. S. (2009), Inspection of Structural Elements Using NDE, *Journal of the Korea Institute of Safety Inspection, KSMI*, 11(3), 167-175
21. TS EN12504-1(2002) Testing concrete in structures-part 1: cored specimens-taking, examining and testing in compression, Turkish Standard Institute, Ankara, Turkey
22. Tuncan, M., Arioz, O., Ramyar, K., & Karasu, B. (2008). Assessing concrete strength by means of small diameter cores. *Construction and Building Materials*, 22(5), 981-988.

23. Uva, G., Porco, F., Fiore, A., & Mezzina, M. (2013). Proposal of a methodology for assessing the reliability of in situ concrete tests and improving the estimate of the compressive strength. *Construction and Building Materials*, 38, 72-83.
24. Voigt, T., Akkaya, Y., & Shah, S. P. (2003). Determination of early age mortar and concrete strength by ultrasonic wave reflections. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 15(3), 247-254.

Received : 09/07/2015

Revised : 10/08/2015

Accepted : 10/23/2015

---

**요 지** : 콘크리트의 강도를 평가하기 위하여 반발경도법과 초음파속도법이 폭넓게 사용되고 있다. 그러나 재료의 상태뿐만 아니라 콘크리트의 재령, 성숙도 및 손상도 등에 따라 예측강도와 현장의 실제강도가 차이가 발생하게 된다. 표준공시체와 현장에서 드릴링에 의하여 채취하는 코어공시체의 압축강도는 드릴링하는 동안 기계에 의한 교란이 발생하여 압축강도에 영향을 미치게 된다. 또한 반발경도 및 초음파속도의 경우에도 콘크리트의 재령 및 성숙도가 변화함에 따라 표면의 경도와 내부 미세조직의 변화에 의해서도 변화하게 된다. 저자들은 재령과 코어의 영향을 비파괴시험결과에 반영하기 위하여 실험을 실시하였으며, 코어 및 콘크리트 재령에 의한 영향을 압축강도 실험 및 예측결과와 비교 분석하였다.

**핵심용어** : 재령, 압축강도, 코어효과, 비파괴시험, 반발경도법, 초음파속도법

---