Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection
Vol. 20, No. 4, July 2016, pp.111-119
http://dx.doi.org/10.11112/jksmi.2016.20.4.111
pISSN 2234-6937
eISSN 2287-6979

공용중 교량 비파괴시험 결과에 기반한 경험적 콘크리트 압축강도 추정방법의 제안

오홍섭[1*], 오광진[2]

An Empirical Estimation Procedure of Concrete Compressive Strength Based on the In-Situ Nondestructive Tests Result of the Existing Bridges

Hong-Seob Oh[1*], Kwang-Chin Oh[2]

Abstract: Rebound hammer test, SonReb method and concrete core test are most useful testing methods for estimate the concrete compressive strength of deteriorated concrete structures. But the accuracy of the NDE results on the existing structures could be reduced by the effects of the uncertainty of nondestructive test methods, material effects by aging and carbonation, and mechanical damage by drilling of core. In this study, empirical procedure for verifying the in-situ compressive strength of concrete is suggested through the probabilistic analysis on the 268 data of rebound and ultra-pulse velocity and core strengths obtained from 106 bridges. To enhance the accuracy of predicted concrete strength, the coefficients of core strength, and surface hardness caused by ageing or carbonation was adopted. From the results, the proposed equation by KISTEC and the estimation procedures proposed by authors is reliable than previously suggested equation and correction coefficient.

Keywords: Age, Carbonation, Correction coefficient, Rebound hammer method, SonReb method

1. 서 론

2012년 기준으로 시설물의 안전관리에 관한 특별법(이하 시특법)의 관리대상 구조물인 1,2종 시설물은 총 60,106개로서, 1995년 법 제정당시 11,444개 였던 시설물에서 5.2배 이상 증가하였다. 또한 사용연한이 20년 이상 경과한 시설물의 경우에도 Fig. 1에 나타낸 것과 같이 교량은 1,402개, 터널은 306개소, 항만과 댐은 482개소이며, 건축물은 2,024개소로 조사되고 있다(KISTEC, 2012). 중요시설물 중 건축물의 경우 대다수가 콘크리트 부재로 구성되어 있으며, 교량의 경우에도 상당수가 콘크리트로 시공되어 있다. 이와 같은 시설물들은 균열 등에 대한 외관조사와 함께 비파괴검사를 포함한 정기적인 점검과 진단을 수행하고, 사용성능을 평가하고 있다. 콘크리트 압축강도는 시설물의 안전도뿐만 아니라 처짐 및 진동 등의 사용성에도 영향을 미치기 때문에 점검시마다 정확하게 평가하는 것이 중요하다. 콘크리트 압축강도는 사용기간, 즉 일정재령 이후에도 점진적으로 변화하며, 사용환경에 따라서도 영향을 받게 된다.

그러나 현장 콘크리트 압축강도 평가는 반발경도법 또는 초음파법 등의 비파괴검사방법을 주로 사용하고 있으며, 일부 부재에 대하여 코어강도 평가 등과 같은 부분파괴검사를 같이 수행하고 있다. 콘크리트 시설물의 코어강도는 현장 강도를 평가할 수 있기 때문에 신뢰도는 높으나 구조물에 손상을 줄 위험이 있기 때문에 주요부재에 대해서는 평가하기 어려운 경우가 많다. 이에 반하여 스프링에 의한 타격에너지를 이용하여 콘크리트 표면 경도로부터 강도를 추정하는 반발경

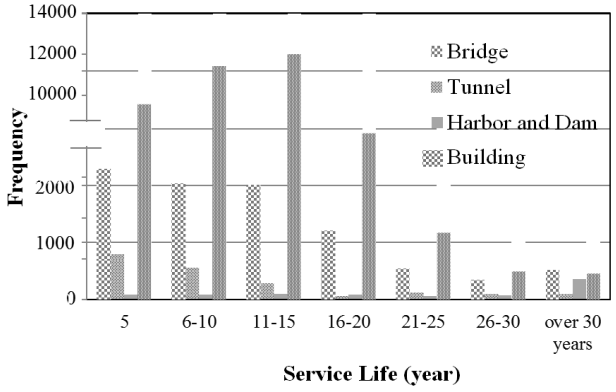


Fig. 1 Managed infrastructures status by special act on the safety management of infrastructures of South Korea(2012)

[1]정회원, 경남과학기술대학교 토목공학과 교수, 교신저자
[2]정회원, 한국시설안전공단 건설안전본부 건설평가실 처장
***Corresponding author:** opera69@chol.com
Dept. of Civil Engineering, Gyeongnam National University of Science and Technology, Jinju 660-758, Korea
•본 논문에 대한 토의를 2016년 8월 1일까지 학회로 보내주시면 2016년 9월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

Copyright Ⓒ 2016 by The Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0)which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

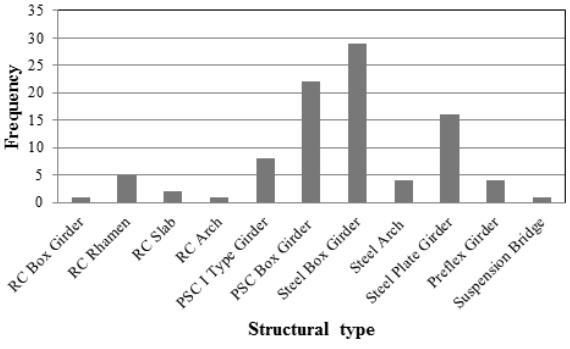
도법은 시험법이 단순하고 적용성이 높으나, 재령, 탄산화, 습윤상태 등의 현장과 재료 상태에 영향을 많이 받는다(Breccolotti et al., 2013; Fiore, 2013; Kheder, 1999; Kim et al., 2010).

초음파속도법은 매질의 균질성과 치밀성에 따라 전달속도가 변화하기 때문에 강도를 추정할 수 있으나, 비균질재료인 콘크리트 특성상 정확도가 낮을 수 있다(Del Rio, 2004). 기존의 많은 연구들이 현장 비파괴시험결과를 활용하여 콘크리트 강도를 추정하고자 하였으나, 재령, 탄산화, 시험방법 차이 등으로 인하여 추정결과의 신뢰도가 낮아 활용도가 작았다. 본 연구에서는 교량에 대하여 수행된 현장 비파괴검사결과를 사용하여 기존에 제안된 재령 또는 탄산화의 영향을 반영하고 코어 강도 특성을 적용하여 비파괴 검사에 의한 현장 콘크리트 강도 추정시 신뢰도를 높일 수 있는 경험적 기법을 제안하고자 한다.

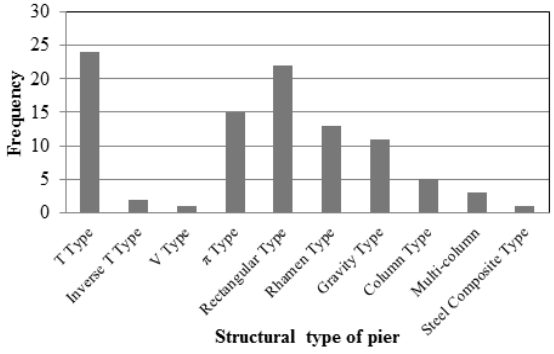
2. 상태평가 대상 교량 현황

본 연구에서는 국내에서 수행된 106개 교량 안전진단 결과로부터 114개 상부구조와 154개 하부구조의 반발경도, 초음파속도와 코어강도 측정결과를 분석하고자 하였다. 대상교량 위치는 강상 78개, 육상 25개 및 해상 3개였으며, 대상 교량 상부구조와 하부구조형식은 Fig. 2에 나타내었다.

도로교 등급은 1등급 76개, 2등급 17개 및 3등급 4개로 구성되어 있다. 기타교량으로 육교 4개소와 철도교 5개소에 대한 결과가 포함되어 있다. 대상교량에서 가장 오래된 교량은 1900년 완공된 한강철도교이며, 도로교의 경우에는 1937년 준공된 한강대교였다. Fig. 3에는 점검당시 대상교량의 공용연한을 나타내었다. 30년 미만의 교량이 가장 많은 것으로 나타났으며, 70년 이상 교량도 4개소가 포함되어 있다. 콘크리트 설계기준강도는 Fig. 4에 제시한 것과 같이 하부구조의 경우 대부분 21 MPa 이하로 조사되었으나, 최근 시공된 교량의 상부구조들은 27 MPa 이상으로 분석되었다.



(a) Types of superstructure



(b) Types of substructure

Fig. 2 Structural types reported in safety inspection reports considered in this research

3. 현장콘크리트 압축강도 영향인자

3.1 코어의 영향

현장에서 콘크리트 코어 채취시 드릴의 속도, 코어의 크기 및 강도 등에 의하여 코어에 미세 손상이 발생할 수 있으며, 재취된 코어의 직경, 길이/직경 등의 형상비에 따라 압축강도가

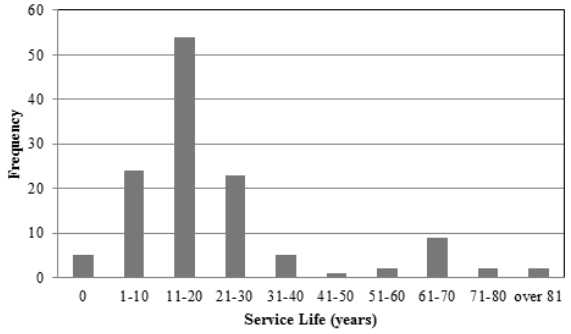


Fig. 3 Relative frequence on the service life distribution on the investigated bridges

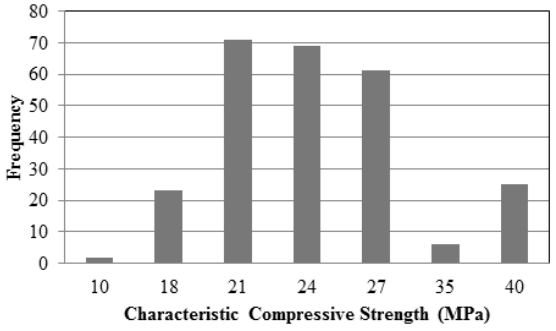


Fig. 4 Relative frequence on the specified compressive strength on the investigated bridges

변화하게 된다. ACI 214.4R-13에서는 채취된 코어의 손상 정도를 반영하기 위하여 식(1)과 같은 손상계수를 적용하도록 제안하고 있으며, 손상원인별 계수를 Table 1과 제시하고 있다.

$$f_c = F_{l/d} \cdot F_{dia} \cdot F_{mc} \cdot F_D \cdot f_{core} \quad (1)$$

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

ACI 214.4R-13에서는 압축강도의 영향은 고려하지 않았으나, Kuoury et al.(2013)는 콘크리트 압축강도의 영향을 고려한 손상계수를 식(2)와 같이 제안하였다. 이때 α는 골재에 대한 상수로서 쇄석골재에 대하여 0.06을 제시하였다.

Table 1 Magnitude of strength correction factors for converting core strength into equivalent in-place strength(ACI 214.4R-13)

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 α equals 4.3(10-4) 1/MPa for f_{core} in MPa

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

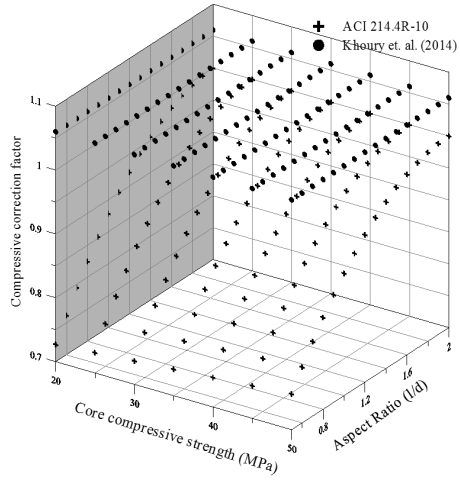


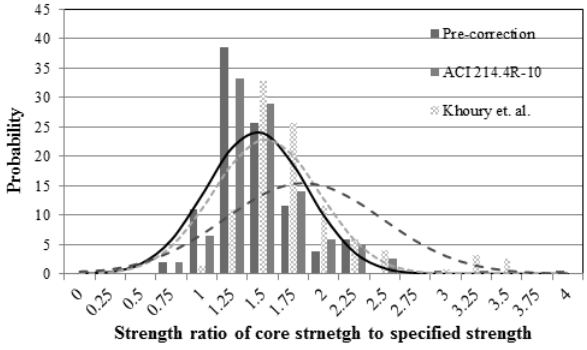
Fig. 5 Strength correction factors for converting core strength according to the aspect ratio and compressive strength

$$F_D = 2.4 \times \frac{(l/d)^{0.006}}{[(d)^{0.1} \times (f_{core})^{\alpha}]} \quad (2)$$

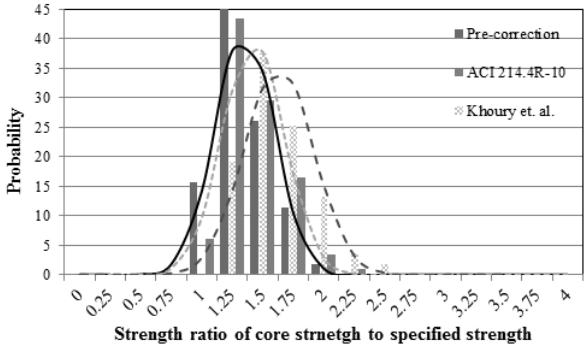
Fig. 5에는 코어의 형상과 강도에 따른 강도수정계수를 도시하였다. ACI 214.4R-10의 수정계수는 형상비(l/d)가 1.0일 경우 최저 0.93에서 형상비 2.0에서 1.06의 수정계수가 적용되는데 반하여 Kuoury et al.(2014)의 경우에는 동일한 형상비 1.0의 경우에도 압축강도 20 MPa의 경우에는 1.265, 강도 50 MPa에서는 1.197을 사용하도록 하고 있어 콘크리트의 현장 강도 특성을 보다 잘 반영할 수 있는 것으로 판단된다.

Fig. 6은 현장 획득된 코어압축강도 결과 중 하부구조 155개와 상부구조 115개소의 코어강도와 설계기준강도(f_{ck}) 및 수정계수를 적용한 수정압축강도의 비에 대한 히스토그램과 정규분포로 유추된 확률분포 곡선을 나타내었다. 수정전 코어강도/설계압축강도의 평균과 표준편차는 하부구조가 각각 1.325, 0.407인 반면, 시공오차가 작은 것으로 유추되는 상부구조는 각각 1.226, 0.228로 분석되었다. 수정후의 압축강도비는 압축강도의 영향이 고려된 Kuoury et al.(2014)의 경우가 높게 나타났으며, 저강도 콘크리트에서 설계강도보다 높게 측정되는 것이 많은 것으로 분석되었다.

Fig. 7에는 가정된 정규분포를 적용하여 설계기준강도에



(a) Substructure



(b) Superstructure

Fig. 6 Strength ratio of core strength to specified compressive strength

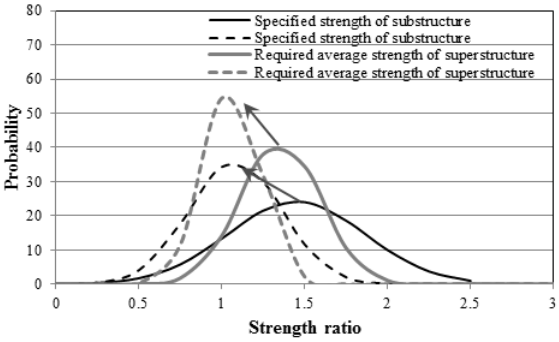


Fig. 7 Comparison of strength ratio distribution according to the specified compressive strength and required average compressive strength

Table 2 Strength reduction coefficient according to the age of concrete proposed by AIJ(1983)

day	28	50	70	100	200	500	1000	3000
AIJ's α	1	0.87	0.84	0.78	0.72	0.67	0.65	0.63

대한 코어강도의 비와 KCI 콘크리트구조기준(2012) 표 2.3.2와 ACI 318-05의 배합강도 또는 요구평균압축강도(f_{cr})에 대한 코어 강도의 비를 도시하였다. 수정전 강도의 경우 설계기준강도와 비교하였을 때 하부구조와 상부구조의 코어압축강도의 평균이 각각 1.5와 1.35인데 반하여 요구평균압축강도와 비교할 경우에는 각각 1.05와 1.0정도로 변화되었으며, 표준편차 또한 줄어드는 것으로 나타났다. 따라서 현장코어의 강도 상태를 평가하기 위해서는 코어강도에 수정계수를 적용한 후 설계기준강도(f_{ck})가 아닌 설계요구강도(f_{cr})와 비교하는 것이 실제 구조물의 시공상태를 평가하는 목적에 부합하는 것으로 판단된다.

3.2 재령과 탄산화의 영향

공용중 구조물의 강도 평가는 현장 코어 채취에 의해 검증하는 것이 가장 신뢰성 있는 방법이나, 부재의 중요도 및 현장여건에 따라 불가능한 경우가 더 많기 때문에 비파괴시험에 의해 강도를 추정하게 된다. 그러나 오랜기간의 경험을 통하여 노후화된 콘크리트 구조물의 경우, 비파괴검사에 의한 추정압축강도와 실제 압축강도와 차이가 있음을 알게 되었으며, 차이를 보정하기 위한 경험적 방법들이 제안되었다(AIJ, 1983; Tanigawa, 1984; Szilágyi et al., 2014) 그중 많이 알려진 것이 Table 2에 정리한 AIJ(1983)의 콘크리트 재령보정계수이며, 식(3)과 같이 적용하고 있다.

$$f_c = \alpha_i f_{NDE} = F_i \cdot f_{core} \tag{3}$$

여기서, α_i는 콘크리트 재령, 습윤상태 또는 측정방향 등에 의한 계수, F_i는 코어 형상비, 직경, 습윤상태 등에 의한 계수

Kim et al.(2009)은 재령에 따른 반발경도의 변화가 콘크리트 표면의 탄산화에 기인한 것으로 분석하였으며, 반발경도와 재령에 따른 관계로부터 식(4)와 같은 강도계수를 제시하였다. Kim et al.(2009)의 연구에 의하면 콘크리트 강도가 낮을수록 반발경도에 비하여 강도가 낮아지는 것으로 분석하였다.

$$\alpha(R,t) = 1 - \frac{0.3064}{(R/34.7)^{4.2}}\left(\frac{t-28}{t+94}\right) \tag{4}$$

여기서, α는 강도계수, R은 반발경도, t는 시간

Szilágyi et al.(2014)은 여러 연구자들의 실험결과들을 활용하여 식(5)와 같은 phenomenological constitutive model을 제안하고 탄산화깊이에 따른 반발경도 변화를 예측하였다.

$$R(t)/R_{28} = \frac{1}{1 + a_{11} \cdot \chi_c^{\alpha_{12}}} \tag{5}$$

여기서, $R(t)$는 임의시간(t)에서의 반발경도, R_{28}은 28일에서의 반발경도, $\alpha_{11} < 0$과 $\alpha_{12} > 0$는 강도에 따른 상수, χ_c는 탄산화 깊이

콘크리트 탄산화는 내부의 미세공극속에 존재하는 이산화탄소와 물이 반응하여 탄산기(Carbonic acid)가 생성되고, 이것이 주로 수산화칼슘($Ca(OH)_2$)과 CSH으로 이루어진 콘크리트 내부의 칼슘층(Calcium phase)과 반응하여 탄산칼슘($CaCO_3$)으로 변화하게 된다. 이 반응과 연쇄적으로 수화된 CSH($CaO \cdot SiO_2 \cdot H_2O$)는 자유 CaO와 반응하여 추가적으로 탄산화된다(Breccolotti et al., 2013).

$$CO_2 + H_2O \Rightarrow H_2CO_3 \tag{6}$$

$$H_2CO_3 + Ca(OH)_2 \Rightarrow CaCO_3 + 2H_2O \tag{7}$$

$$H_2CO_3 + CaO \Rightarrow CaCO_3 + H_2O \tag{8}$$

이 화학반응에 의하여 내부의 미세공극은 감소하고 콘크리트 단위중량, 탄성계수 및 강도가 증가하게 된다(Jerga, 2004). Jerga(2004)는 28일 압축강도가 24.4 MPa, 36.08 MPa 및 46.1 MPa인 콘크리트입방체($150^3 mm^3$)에 대하여 각각 359일, 393일과 545일 동안 대기중 및 15% 이산화탄소 농도에서 촉진탄산화 실험을 수행하였다. 이산화탄소 노출시간을 고려할 경우 Kim et al.(2009)의 연구와 유사하게 콘크리트 강도가 증가

함에 따라 탄산화에 의한 강도 증가율은 감소하는 것을 발견하였다.

콘크리트의 표면 경도와 압축강도에 영향을 미치는 콘크리트의 탄산화 깊이는 Tuutti(1982)의 연구결과로부터 Fick의 제1법칙에 의하여 식(9)와 같이 표현될 수 있으며, Monteiro (2012)는 LNEC E-465(2005)의 연구결과를 활용하여 일반습도환경의 외기환경(XC3등급)에 대하여 식(10)과 같은 압축강도와 탄산화계수의 관계를 제시하였다.

$$\chi = k \cdot \sqrt{t} \tag{9}$$

$$k = 847 f_{cm}^{-1.435} \tag{10}$$

여기서, χ는 탄산화 깊이(mm), k는 탄산화계수($mm/yr^{1/2}$), t는 노출시간($year$), f_m은 콘크리트 평균압축강도(MPa)

국내에서는 Lee et al.(2000)와 Lee et al.(2003)과 Im et al.(2004)이 도심, 해안교량 및 강상 교량 등에 대한 현장 자료를 사용하여 경험적 탄산화 계수를 4.10(도심), 4.64(해상), 2.31(강상)로 제안하였다. Fig. 8에는 2장에서 정리한 대상교량 자료를 활용하여 식(9)와 국내에서 제안된 지역별 탄산화 계수를 적용하여 탄산화 깊이 예측결과를 도시하였다. 탄산화 깊이 예측시 사용된 콘크리트 압축강도는 식(2)의 의해 수정된 코어강도를 사용하였다.

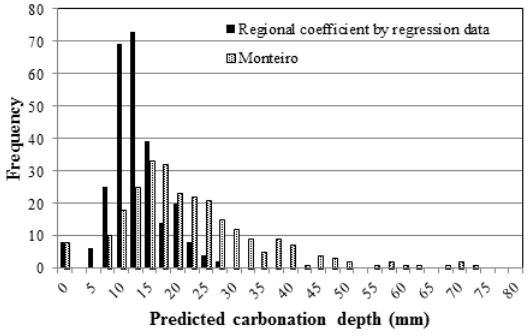


Fig. 8 Predicted carbonation depth of proposed carbonation coefficients

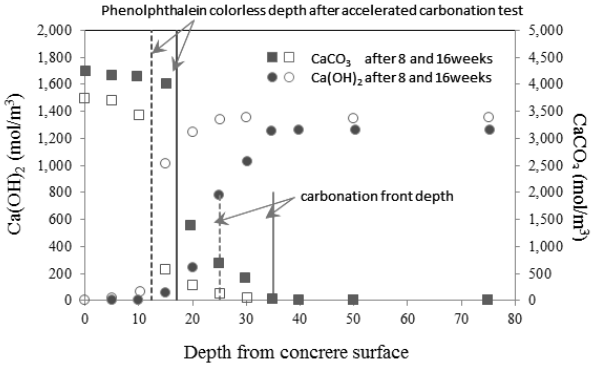


Fig. 9 Relationship between carbonated depth of concrete and $CaCO_3 - Ca(OH)_2$ distribution after accelerated carbonation test with 8 and 16 weeks(Chang and Chen, 2006)

국내 제안 계수의 경우 지역적 특성만을 반영하고 있기 때문에 동일한 공용연수를 갖는 경우에는 동일한 탄산화 깊이를 갖는 것으로 예측되었으며 전체적으로 탄산화 깊이가 작게 예측되었다. 이에 반하여 강도의 영향이 반영된 식(9)는 동일한 공용연한 20년의 교량에 대해서도 현장 압축강도가 18~48 MPa로 변화함에 따라 탄산화 깊이를 61.4~14.3 mm로 예측하여 실제 현장 조건을 반영할 수 있을 것으로 판단된다.

위에 언급된 노후콘크리트의 코어 손상과 탄산화깊이 등의 영향을 콘크리트 압축강도 추정에 반영할 수 있다면 추정강도의 신뢰성을 높일 수 있을 것으로 판단된다. 일반적으로 탄산화가 진행되면 콘크리트 표면경화 속도가 강도발현속도에 비하여 빨라지게 됨에 따라 탄산화 깊이가 깊어질수록 반발경도보다 압축강도 증가정도가 낮아지게 된다. Fig. 9에는 Chang과 Chen(2006)의 결과에 의한 페놀프탈레인용액의 색변화 깊이와 완전탄산화 깊이의 차이를 나타내었고, 대체적으로 색변화 깊이의 2배정도의 깊이에서 완전탄산화가 발생한 것으로 나타났다.

Breccolotti et al.(2013)은 조합법(SonReb Method)에 의한 압축강도 추정시 탄산화 깊이의 영향을 수치해석방법으로 분석하여 탄산화 깊이 15 mm 이상에서 반발경도가 변화하지 않는다는 것을 판정하고 식(11)의 수정계수를 제안하였다.

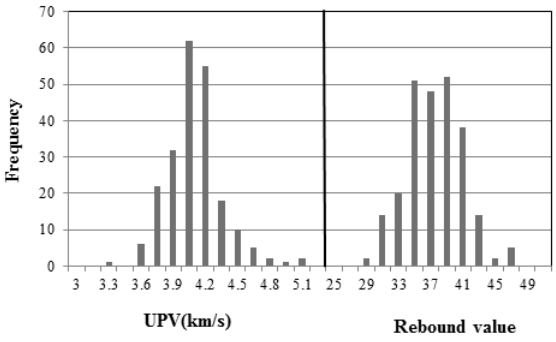
$$\alpha_c = (0.7 + e^{-1.2e^{\chi_c/7.5}}) \cdot e^{\sqrt[3]{\chi_c}\,0.08(1-(24/f_{ck})} \tag{11}$$

본 연구에서는 Table 2의 재령계수와 Kim et al.(2009)이 제안한 식(4)의 계수와 함께 식(11)의 계수를 적용하여 현장 측정된 반발경도 수정계수의 정확도를 평가하고자 하였다. 이때 탄산화에 의한 반발경도의 영향은 Breccolotti et al.(2013)의 연구결과와 같이 탄산화 깊이 15 mm까지 탄산화 영향이 발생하는 것으로 가정하였다.

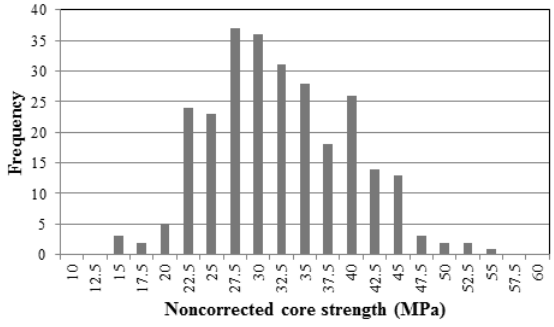
4. 현장평가된 비파괴검사 결과

4.1 보정전 비파괴검사결과와 수정압축강도의 관계

현장평가된 268개의 수정전 초음파 속도(km/s), 반발경도 및 수정전 코어압축강도 분포를 Fig. 10에 나타내었다. 반발경도와 초음파 속도의 산술평균(표준편차)는 각각 36.42 MPa



(a) UPV and Rebound index



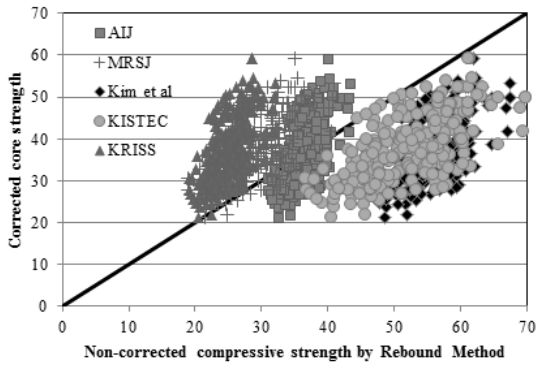
(b) core compressive strength

Fig. 10 Relative frequency of the measured rebound index, ultra pulse velocity and core compressive strength

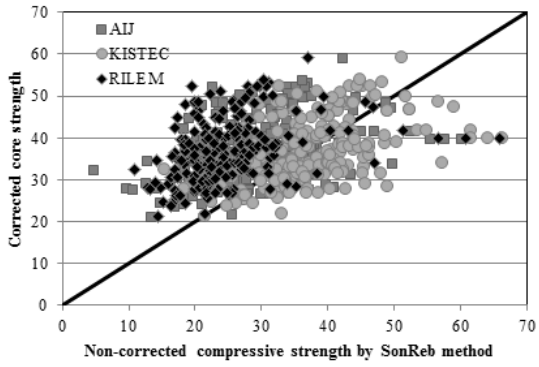
Table 3 Existing equations and proposed equation for predicting of concrete compressive strength

	Reference	Equation(MPa)
Rebound method	AIJ	$F_c = 0.73R_0 + 10.0$
	MRSJ	$F_c = 1.3R_0 - 18.4$
	Kim et al	$F_c = 1.27R_0 + 9.79$
	Kim et al. and KISTEC	$F_c = 1.98R_0 - 20.17$
	KRISS	$F_c = 0.77R_0 - 2.98$
SonReb Method	AIJ	$F_c = 0.82R_0 + 26.9V_p - 109.4$
	Kim et al. and KISTEC	$F_c = 23.37V_p + 1.13R_0 - 97.83$
	RILEM	$F_c = 10^{0.3794V_p + 0.01149R_0 - 0.5668}$

(3.55 MPa)와 4.03 km/s(0.27 km/s)인 반면, 코어압축강도는 31.23 MPa(7.50 MPa)로 비파괴검사결과와 비교하여 분산정도가 높게 나타났기 때문에 강도추정시 오차정도가 클 것으로 판단된다. Table 3에는 현재 국내에서 많이 적용되고 있는 강도 추정식을 정리하였으며, 현장 결과와 분석하여 Fig. 11에 정리하였다. KISTEC(2014)과 Kim et al.(2016)의 추정식은 최근의 실험 결과를 바탕으로 제안된 추정식으로 고강도 콘크리트영역까지 추정할 수 있도록 제안되었다.



(a) Rebound Method



(b) SonReb Method

Fig. 11 Relationship between core compressive strength corrected by Eq. (2) and predicted strength by various equations in Table 3

탄산화 또는 재령에 의한 수정계수를 적용하지 않은 반발경도법과 복합법(SonReb)에 의한 추정압축강도와 코어강도와의 관계를 도시하였다. 국내에서 많이 사용되고 있는 MRSJ (1958), AIJ(1983)와 KRISS(1999)의 추정강도는 KISTEC(2014)과 Kim et al(2002)의 식과 비교하여 분산은 작으나 전반적인 경향이 맞지 않는 것으로 나타났으며, SonReb법의 경우에도 전체적으로 AIJ(1983)와 RILEM(1980)의 제안식의 분석과 신뢰도가 상대적으로 낮은 것으로 분석되었다.

4.2 보정후 비파괴검사결과와 압축강도의 관계

노후화된 교량의 압축강도는 탄산화 및 재령 등에 의하여 표면반발경도에 영향을 미치게 된다. 따라서 현장시험에 의한 콘크리트의 강도 평가는 Fig. 12와 같은 절차에 따라 판정하는 것이 바람직한 것으로 판단된다. 코어 압축강도는 드릴링에 의한 손상도가 반영될 수 있도록 식(2)의 수정계수를 적용하고, 표면경화 및 탄산화 등에 의한 반발경도 등의 변화정도는 식(11)의 강도수정계수를 적용하는 것이 적절한 것으로 판단된다. 또한 추정압축강도는 설계기준강도(f_{ck})가 아닌 설계요구강도(f_{cr})와 비교하는 것이 시설물의 안전도 평가측면

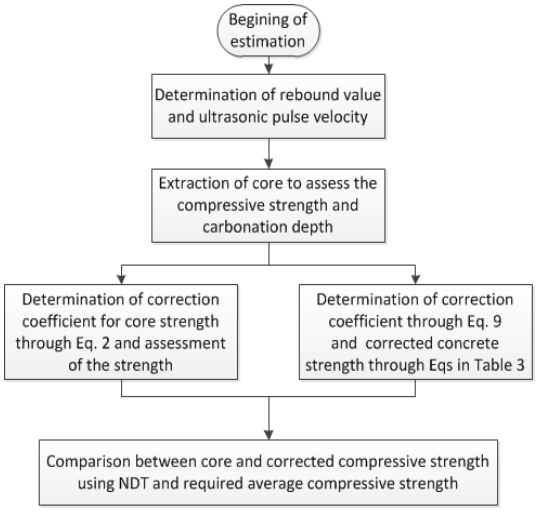


Fig. 12 In-situ estimation procedure of concrete compressive strength by rebound hammer and SonReb Methods

에서 적합한 것으로 판단된다.

Table 4에는 기존에 압축강도 추정식들에 AIJ(1983)의 재령계수와 Kim et al.(2009)과 Breccolotti et al.(2013)의 수정계수를 적용한 코어압축강도와 추정강도 비($\frac{f_{core}}{f_{NDT}}$)와 결정계수(R^2)를 나타내었으며, Fig. 13에는 다른 추정식과 비교하여 정확성이 상대적으로 높은 Kim et al.(2016)과 KISTEC(2014)의 반발경도와 복합법 추정식에 Breccolotti et al.(2013)의 수정계수를 적용한 결과를 도시하였다. 전체적으로 AIJ(1983)와 Kim et al.(2009)의 재령계수보다는 Breccolotti et al.(2013)의 재령계수를 적용할 경우의 결정계수가 높아지는 것으로 분석되었으며, 추정식의 경우에는 KRISS(1999)와 KISTEC(2014)의 경우가 정확도가 다른 식에 비하여 높은 것으로 분석되었다. 강도비의 평균과 표준편차를 고려할 경우에도 KISTEC(2014)의 반발경도법 및 복합법의 제안추정식의 정확도가 다른 추정식과 비교하여 상대적으로 높게 분석되었다.

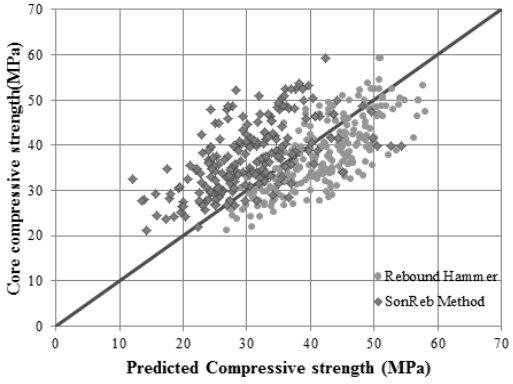


Fig. 13 Relationship between corrected core strength and predicted strength by rebound hammer and SonReb Methods

5. 결 론

본 연구는 현장시험결과를 바탕으로 탄산화 및 코어손상도 반영을 위한 수정계수와 현장압축강도 추정절차를 제시하였다.

1) 106개의 대상교량은 공용연한과 위치가 다양하게 분포되어 있어 압축강도 추정시 충분한 다양성을 확보할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 콘크리트 압축강도가 10~40 MPa로 분포되어 있어 코어 채취시의 손상 및 표면반발도 변화 정도가 적절히 반영될 수 있을 것으로 판단된다.
2) 현장 코어 강도 분석결과 압축강도에 따라 수정계수를 달리 적용하는 것이 합리적인 것으로 판단되며, 낮게 설정되어 있는 설계기준강도보다는 요구압축강도 또는 배합강도와 비교하는 것이 시설물의 상태를 보다 정확하게 평가할 수 있는 것으로 분석되었다.
3) 압축강도 추정식의 경우에는 Kim et al.(2002)의 식과 제안식이 기존 식들과 비교하여 정확한 것으로 분석되었으나, Kim et al.(2009)의 경우에는 KISTEC의 제안식보다 과다

Table 4 Comparison results of compressive strength ratio($\frac{f_{core}}{f_{NDT}}$) according to the various correction coefficients

		Coefficient of AIJ			Coefficient of Kim et al.			Coefficient of Breccolotti		
		Average	St.Dev.	R^2	Average	St.Dev.	R^2	Average	St.Dev.	R^2
Rebound method	MRSJ	2.053	0.323	0.401	1.861	0.563	0.407	1.628	0.222	0.550
	AIJ	1.617	0.272	0.318	1.440	0.316	0.221	1.279	0.168	0.572
	Kim et al.	1.057	0.174	0.344	0.944	0.214	0.192	0.837	0.108	0.586
	KRISS	2.367	0.374	0.396	2.124	0.533	0.09	1.875	0.236	0.603
	KISTEC	1.141	0.178	0.4123	1.029	0.284	0.407	0.904	0.117	0.587
SonReb Method	AIJ	2.486	1.685	0.136	2.068	1.225	0.241	1.738	0.703	0.276
	RILEM	2.228	0.554	0.114	2.028	0.553	0.191	1.962	0.470	0.225
	KISTEC	1.911	1.969	0.183	1.703	1.597	0.301	1.276	0.269	0.362

평가되는 것으로 분석되었고, 수정계수의 영향을 크게 받는 것으로 나타났다.

4) 재령 또는 탄산화 등에 의한 콘크리트 표면 경화도의 영향을 고려한 수정계수의 경우, 기존의 제안식들에서 AIJ의 계수는 적합하지 않은 것으로 분석되었으며, 강도에 따라 탄산화 깊이를 고려한 Breccolotti et al.(2013)의 수정계수가 보다 정확하게 추정할 수 있는 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 경남과학기술대학교 2016년 대학회계 연구비지원에 의해 수행되었으며, 저자들은 이에 감사드립니다.

References

ACI Committee 214.4-03 (2013), Guide for Obtaining Cores and Interpreting Compressive Strength Results, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 16pp.

ACI Committee 318 (2005), Building Code Requirements for Structural Concrete(ACI 318-05) and commentary. American Concrete Institute.

AIJ (1983), Manual of Nondestructive Tests Methods for the Evaluation of Concrete Strength, Architectural Institute of Japan.

Breccolotti, M., Bonfigli, M. F., and Materazzi, A. L. (2013), Influence of Carbonation Depth on Concrete Strength Evaluation Carried Out using the SonReb Method. NDT & E International, 59, 96-104.

Chang, C. F., and Chen, J. W. (2006), The Experimental Investigation of Concrete Carbonation Depth, *Cement and Concrete Research*, 36(9), 1760-1767.

Del Rıo, L. M., Jimenez, A., Lopez, F., Rosa, F. J., Rufo, M. M., and Paniagua, J. M. (2004), Characterization and Hardening of Concrete with Ultrasonic Testing, Ultrasonics, 42(1), 527-530.

Fiore, A., Porco, F., Uva, G., and Mezzina, M. (2013), On the Dispersion of Data Collected by in Situ Diagnostic of the Existing Concrete, Construction and Building Materials, 47, 208-217.

Japan Society for Testing and Materials (1958), Guideline for Evaluation of Compressive Strength of Concrete by Schmidt Hammer(draft), Material Testing, 7-59, 426-430(in Japan).

Jerga, J. (2004), Physico-mechanical Properties of Carbonated Concrete, Construction and Building Materials, 18(9), 645-652.

KCI (2012), Concrete Structural Design Code, Korea Concrete Institute.

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.

Khoury, S., Aliabdo, A. A. H., and Ghazy, A. (2014), Reliability of Core Test–Critical Assessment and Proposed New Approach, Alexandria Engineering Journal, 53(1), 169-184.

Kim, J.-K., Kim, C.-Y., Yi, S.-T., and Lee, Y. (2009), Effect of Carbonation on the Rebound Number and Compressive Strength of Concrete, Cement and Concrete Composite, 31, 139-44.

Kim, M. W., Oh, H., and Oh, K. C. (2016), Estimating the Compressive Strength of High-Strength Concrete Using Surface Rebound Value and Ultrasonic Velocity, *Journal of KSMI*, 20(2), 1-9.

Kim, H. K., and Kim, S. B. (2010), Service Life Prediction and Carbonation of Bridge Structures According to the Environmental Conditions, *Journal of KSMI*, 14(4), 126-32.

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.

KISTEC (2012), 3rd Master Plan for Safety and Maintenance of Infrastructures, KISTEC.

KISTEC (2014), A Development of Strength Estimation Technique for the High Strength Concrete.

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).

Lee, C. S., Seol, J. S., and Yoon, I. S. (2000), Current Status on Durability of 140 RC Bridges in Seoul Metropolitan Area, *Journal of KSMI*, 4(3),161-168.

Lee, Y. J., Kim, Y. H., and Lee, Y. Y. (2003), Current Status on the Chloride and Carbonation of Train Structures in the East, *Journal of KSMI*, 7(1), 259-266.

Lim, H. B., Park, C. H., and Shin, J. I. (2004), Current Status on the Carbonation of Highway Bridges, *Conference proceeding of KSCE*, 3677-3682.

LNEC E-465 (2005), Concrete Prescriptive Methodology to Estimate Concrete Properties to Achieve the Design Service Life Under Environment Conditions XC or XS., *National Laboratory of Civiel Engineering*, Lisbone, Portugal.

Monteiro, I., Branco, F. A., De Brito, J., and Neves, R. (2012), Statistical Analysis of the Carbonation Coefficient in Open Air Concrete Structures, Construction and Building Materials, 29, 263-269.

RILEM CNDT-Committee (1980), RILEM Tentative Recommendations for In-situ Concrete Strength Determination by Non-Destructive Combined Methods(First draft), May, 1980.

Szilágyi, K., Borosnyói, A., and Zsigovics, I. (2014), Extensive Statistical Analysis of the Variability of Concrete Rebound Hardness Based on a Large Database of 60years Experience, Construction and Building Materials, 53, 333-347.

Tanigawa, Y., Baba, K., and Mori, H., (1984), Estimation of Concrete Strength by Combined Nondestructive Testing Method, *ACI Journal*, 82, 57-76.

Tuutti, K. (1982), Corrosion of Steel in Concrete : CBI Research 4, Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm, p82.

Received : 03/23/2016
Revised : 04/15/2016
Accepted : 04/20/2016

요 지 : 반발경도법과 복합법에 의한 현장비파괴 시험과 코어강도의 평가는 노후화된 구조물의 상태평가를 위하여 가장 효과적인 방법이다. 그러나 비파괴 시험방법의 불확실성과 함께 재료의 재령, 탄산화와 코어채취시의 물리적 손상 등에 의하여 현장강도 추정시의 정밀도를 낮추는 요인으로 작용하게 된다. 본 연구에서는 106개 교량에서 수집된 268개의 비파괴시험결과와 코어압축강도 결과를 사용하여 현장 압축강도 추정방법을 제시하고자 하였다. 코어강도의 신뢰도를 높이기 위하여 수정계수를 적용하고자 하였으며, 노후콘크리트의 반발경도에 영향을 미치는 탄산화 또는 재령에 의한 수정계수를 적용하여 현장 강도 추정결과의 신뢰도를 높이고자 하였다. KISTEC의 제안 추정식과 수정계수를 적용한 경우 기존의 추정방법과 비교하여 신뢰도가 높아지는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 재령, 탄산화, 수정계수, 반발경도법, 복합