

국내 교량의 현장 코어강도를 활용한 개선된 비파괴강도 추정식 제안

김훈겸^{1*}

Estimation of Nondestructive Strength Equations Based on the Results of In-situ Concrete Strength for Existing Bridges

Hun-Kyom Kim^{1*}

Abstract: Nondestructive strength Equations are commonly used to determine the strength of concrete. However, the application of the existing equations may include many errors because this method is proposed on the basis of limited experimental parameters while actual bridges have various parameters such as conditions of concrete mixtures, properties of concrete strength, etc. Also, the error among the existing equations causes the confusion when engineers select the proper estimation equation for the concerned bridge. In this study, a series of the field inspection and the test have been performed on 297 existing bridges, in order to evaluate the bridges, based on the test results of the in-depth inspection, and the estimated strengths by means of the nondestructive strength equations are analyzed and compared with results of the core specimen strengths. According to results of analyses, the nondestructive strength equation proposed by CNDT Committee of Architectural Institute of Japan had high relationship with core strength. However, the strengths predicted by this equation, are underestimated when concrete's strengths are over 30 MPa, otherwise, they are overestimated. Also in this paper, based on the relationship between the estimated nondestructive concrete strengths and the core specimen strengths the modified strength equation through simple correlation analysis is proposed.

Keywords: Non-destructive testing, Concrete compressive strength, Rebound, Ultrasonic pulse velocity

1. 서 론

교량의 콘크리트 압축강도는 콘크리트 품질과 특성을 판단하는 중요한 성질이며, 공용 중 교량의 내력 및 장기 내구성을 판단하기 위하여 교량의 정밀안전진단시 내구성 시험의 한 종류로 콘크리트 압축강도 시험을 시행하고 있다.

콘크리트 압축강도를 평가할 수 있는 여러 가지 방법이 제안되고 왔으며, 그중 구조물에 손상을 주지 않고 콘크리트의 품질을 평가할 수 있는 비파괴 시험법을 통한 콘크리트 압축강도를 추정하는 방법이 제안되어 왔다.

그 중 대표적인 비파괴 강도평가 방법은 반발경도법, 초음파속도법, 조합법등이 주로 사용되고 있는데, 현재 국내에서 사용하고 있는 비파괴 강도 추정식들은 대부분 제한된 실험 변수를 토대로 제안되어 배합조건 및 강도특성, 환경조건 등이 다양한 실 교량의 압축강도 추정시 많은 오차를 포함하게

된다(Kim, 2007; Lim, 2007). 또한 제안된 추정식들 간에 오차도 커서 실무자들이 실구조물의 압축강도 추정식을 선택할 때 혼란을 유발하게 된다.

이러한 문제점을 해결하기 위해 RILEM(1994)에서는 콘크리트 부재에 대한 압축강도를 추정하기 위한 방법으로, 다수의 기존 강도 추정식에 의한 강도와 실제코어강도를 비교하여 오차가 가장 적은 추정식을 산정하도록 제안하고 있다. 이때 선정된 추정식에 보정계수를 산출한 후, 보정계수를 추정식에 곱하여 대상 현장의 압축강도를 평가하도록 되어 있으며, 국내의 안전점검 및 정밀안전진단 세부지침(KISTEC, 2011)에서도 위의 RILEM에서와 같은 방법을 제시하고 있다.

그러나 이런 방법은 다수의 강도 추정식들 중 정밀도가 가장 높은 추정식을 선정해야 하기 때문에 계산이 매우 번거로우며, 특히 고강도콘크리트 현장에서 테스트해머에 의한 강도 평가가 저 평가 되는 것으로 보고되고 있어, 최근의 고강도 콘크리트로 건설되는 현장이 증가하는 추세로 볼 때 그 신뢰성이 떨어진다고(Kwon et al., 2006; Kim et al., 2016).

또한 국내 공용 중 교량의 실제 현장상태를 고려한 비파괴 강도 추정식 개발은 아직까지도 미흡한 실정이며, 현장 상태를 반영하기 위해서는 많은 공용 교량들에서 획득된 시험데

¹정회원, 서울특별시청 도로시설과 전문관, 공학박사, 교신저자

*Corresponding author: 201104030@seoul.go.kr

15 Deoksung-gil, Jung-gu, Seoul, 04515, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2018년 4월 1일까지 학회로 보내주시면 2018년 5월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

이터의 축적이 절대적으로 필요하다.

따라서 본 연구에서는 한국시설안전공단에서 12년 동안 실시한 297개 교량의 정밀안전진단 결과 중 압축강도 비파괴시험 및 546개의 현장 코어압축강도 시험결과를 Data Base화 하고, 그 결과를 토대로 사용빈도수가 높은 비파괴 압축강도 추정식의 평가결과를 현장코어강도와 비교하여 상관관계를 분석하였으며, 교량의 정밀안전진단시 보통강도와 고강도에서 모두 간편하고 유용하게 이용될 수 있는 높은 신뢰도를 가진, 코어강도를 고려한 개선된 압축강도 추정식을 제시하였다.

2. 대상 교량 현황

본 논문에서는 비파괴강도 추정식에 대한 비교 및 검토를 위하여 한국시설안전공단에서 정밀안전진단을 실시한 총 297개 교량에서 획득한 546개의 코어압축강도 시험결과와, 비파괴시험결과를 분석하였다. 비파괴시험이 수행된 콘크리트 부재는 바닥판, 거더, 교각, 교대 등으로 콘크리트의 압축강도는 11~56 MPa 범위를 가지는 것으로 검토되었다.

Fig. 1은 분석에 이용된 대상교량을 나타내고 있으며, 원효대교, 부산대교, 팔당대교, 진도대교, 고수대교, 남한강교 등 전국 각지의 교량 시험 데이터를 활용하였다.

대상교량 중 공용년수가 20~35년 된 교량이 전체교량의 70% 이상으로 가장 많았으며, 1960년대 이전에 준공된 교량도 20개소가 포함되어 있었다.

3. 일반적인 비파괴 압축강도 평가절차

3.1 비파괴 압축강도 추정 방법

비파괴시험에 의한 대표적인 콘크리트의 압축강도 평가방법은 반발경도법, 초음파속도법, 조합법 등이 주로 사용되고 있다. 반발경도법은 경화 콘크리트면을 장비로 타격하여 콘

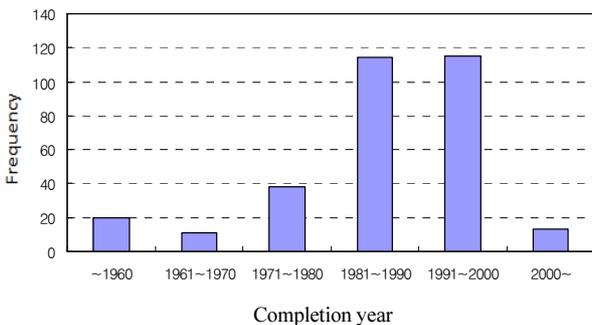


Fig. 1 Completion year of structure

크리트면의 반발경도를 측정하고, 반발경도와 콘크리트 압축강도와의 상관관계를 이용하여 압축강도를 추정하는 비파괴 시험이다(Fig. 2).

초음파속도법은 초음파를 이용하여 물체 내부의 정보를 얻는 방법으로서, 콘크리트에 접촉시킨 발진자에서 발진한 초음파 에너지가 콘크리트 중을 이동하여 수신자에 도달한 시간을 구하여 전파거리를 나누어 전파속도를 구한 후 초음파 전파속도로 콘크리트 강도와의 상관관계를 도출하여 압축강도를 추정할 수 있다(Fig. 3).

조합법은 경화된 콘크리트의 압축강도에 영향을 미치는 요인들을 2가지 이상 선정하여 측정값과 압축강도의 상관성을 높이는 방법이다. 주로 사용되는 방법은 표면을 스프링 힘으로 타격한 후 반발되는 반발도와 경화 콘크리트면을 따라 전달되는 속도의 두 인자를 콘크리트 압축강도와의 상관관계를 도출하여 콘크리트 강도를 추정하는 방법이다.

3.2 코어강도 보정을 통한 비파괴강도 추정

국내의 안전점검 및 정밀안전진단 세부지침에서는 Fig. 4와 같이 현장에서 직접 채취한 코어강도를 이용하여 식 (1)과



Fig. 2 Rebound hardness test



Fig. 3 Ultrasonic pulse velocity test

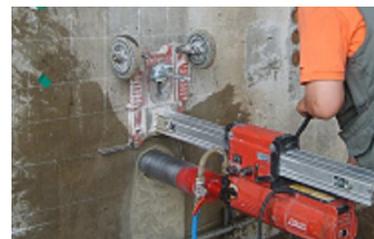


Fig. 4 Concrete core test

같은 현장 코어강도를 이용한 보정계수를 사용하는 방법을 제시하고 있다(KISTEC, 2011; RILEM, 1994).

$$C_t = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \left(\frac{R_{pr}}{R_{st}} \right) \quad (1)$$

여기서, C_t 는 보정계수, R_{pr} 은 코어 압축강도(MPa), R_{st} 은 비파괴강도(MPa)이다.

3.3 각 추정식에 의한 강도비교

콘크리트의 압축강도를 추정하는 방법은 수집된 정밀안전진단보고서마다 다소의 차이가 있으나, 대부분 교량에 있어서 동일한 방법으로 압축강도를 추정했기 때문에 본 연구에서는 가장 많이 사용된 식과 검사 방법을 기준으로 하여 자료를 분석하였다.

수집된 정밀안전진단보고서에서 비파괴시험법에 의한 압축강도를 구하는 식이 사용되었는데, 대부분의 교량에서 사용된 추정식으로 일본재료학회(보통콘크리트) 추정식, 일본건축학회 CNDT 소위원회 강도계산식, 일본건축학회CNDT 소위원회 공동제안식, 릴렘식을 들 수 있다.

본 연구에서는 Table 1과 같이 식 (2)~(5)의 상기 4가지 식(KISTEC, 2011; RILEM, 1980)을 토대로 추정된 콘크리트의 압축강도를 코어압축강도와 비교·분석하였다.

여기서, F_c 은 압축강도(MPa), R_o 은 보정반발경도, V_p 은 초음파전달속도(km/sec)이다.

한편, 보정반발경도 R_o 는 다음과 같이 측정경도 R 에 보정값 ΔR_1 , ΔR_2 , ΔR_3 을 더한 값으로 한다.

$$R_o = R + \Delta R_1 + \Delta R_2 + \Delta R_3 \quad (6)$$

여기서, ΔR_1 은 타격방향에 따른 보정값, ΔR_2 은 압축 부재

의 사하중 응력에 따른 보정값, ΔR_3 는 콘크리트의 습윤상태에 따른 보정값이다.

한편 일반적으로 콘크리트의 탄산화는 압축강도에 영향을 주며(Kim et al., 2010; Oh et al., 2016), 탄산화를 고려하기 위하여 반발경도법의 경우 일반적으로 슈미트 햄머사에서 제시하고 있는 재령보정계수를 곱하여 압축강도를 산정하고 있다.

수년이 경과한 콘크리트 구조물은 표면경도가 높기 때문에 식 (7)과 같이 압축강도로 수정하여 콘크리트의 압축강도를 추정한다.

$$F'_c = \alpha \cdot F_c \quad (7)$$

여기서, α 는 재령보정계수이며, Table 2는 콘크리트 재령에 따른 보정계수를 나타내고 있다.

4. 현장 코어시험의 압축강도 분포

본 논문에서는 비파괴 압축강도 추정식의 비교분석에 앞서, 546개의 현장 코어압축강도 시험결과의 분산정도와 신뢰성 확인을 위하여 콘크리트 설계기준강도별(F_{ck}) 코어압축강도(F_{co}) 분포를 분석하였다.

콘크리트 설계기준강도는 18, 21, 24, 27, 35, 40 Mpa을 기준으로 분석하였으며, Table 3은 분석에 사용된 각 설계기준강도별 코어압축강도 시험체의 개소수, 압축강도 평균값과 표준편차를 나타내고 있으며, Fig. 5~10은 설계기준강도별 코어강도 시험체의 빈도수 및 정규분포곡선($F(x)$)을 나타내고 있다.

분석에 사용된 코어강도결과의 개소수는 설계기준강도가 21~27 MPa의 경우가 전체 코어강도 개소수의 79%를 차지하였으며, 설계기준강도가 35 Mpa 이상인 경우는 65개소로 전

Table 1 Nondestructive strength equations

Method	Researcher	Equation[MPa]
Rebound method	Materials Research Society of Japan	$F_c = 1.3R_o - 18.4$ (2)
	Architectural Institute of Japan	$F_c = 0.73R_o + 10.0$ (3)
Ultrasonic Pulse velocity method	Architectural Institute of Japan	$F'_c = 21.5V_p - 62.0$ (4)
Combined Method	RILEM	$\log_{10}F_c = 0.3794V_p + 0.1149R_o + 0.4332$ (5)
		$F'_c = 0.085F_c$

Table 2 Age coefficient

Age of concrete(day)	10	20	28	50	100	150	200	300	500	1000	3000
α	1.55	1.12	1.00	0.87	0.78	0.74	0.72	0.70	0.67	0.65	0.63

Table 3 Mean and standard deviation for core strength

F_{ck} (MPa)	Test point	Mean(MPa)	SD(MPa)
18	47	24.36	5.41
21	161	27.02	6.88
24	152	29.53	5.83
27	121	32.64	6.10
35	22	37.38	7.24
40	43	40.50	4.47

체코어강도 개소수의 12%를 차지하였다.

설계기준강도가 클수록 코어압축강도 평균값과 설계기준강도와의 차이가 줄어드는 경향을 보였다. 설계기준강도가

40 MPa인 경우 평균값은 40.50 MPa, 표준편차는 4.47로 편차가 가장 작게 나타났으며, 설계기준강도가 35 MPa인 경우는 코어강도 개소수가 22개소로 다른 대상에 비하여 상대적으로 분석 대상수가 적어 편차가 7.24 MPa로 다소 크게 나타난 것으로 판단된다.

그러나, 전체적으로 볼 때 설계기준강도별 코어압축강도의 표준편차는 4.47~7.24 MPa의 범위로 설계기준강도에 따른 표준편차의 변화는 크지 않는 것으로 나타나, 본 연구의 비파괴 압축강도 추정식 비교분석을 위하여 사용된 대상 코어강도 결과는 보통강도 콘크리트는 물론 고강도 콘크리트 추정강도 분석에 활용시 신뢰성이 확보되는 것으로 나타났다.

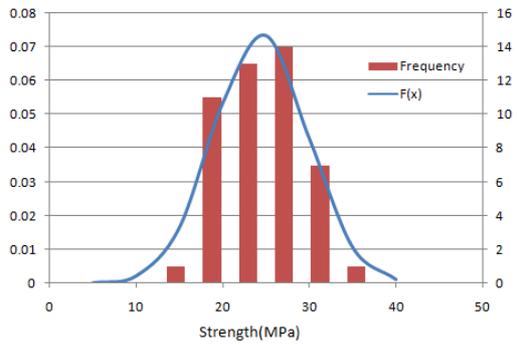


Fig. 5 concrete core test(F_{ck} =18 MPa)

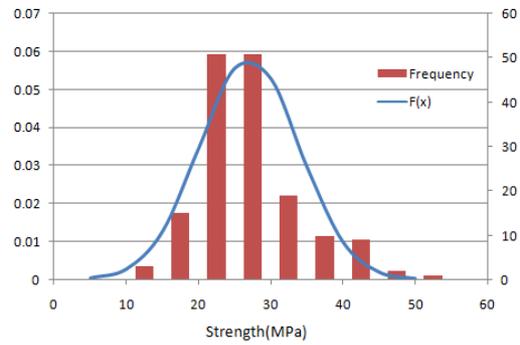


Fig. 6 concrete core test(F_{ck} =21 MPa)

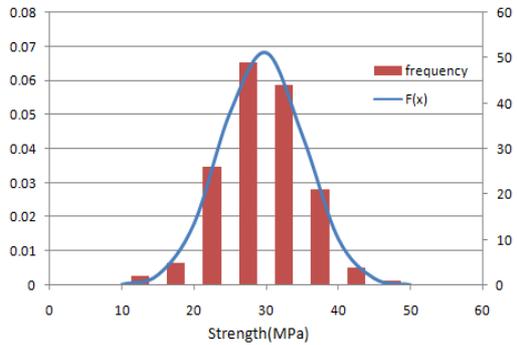


Fig. 7 concrete core test(F_{ck} =24 MPa)

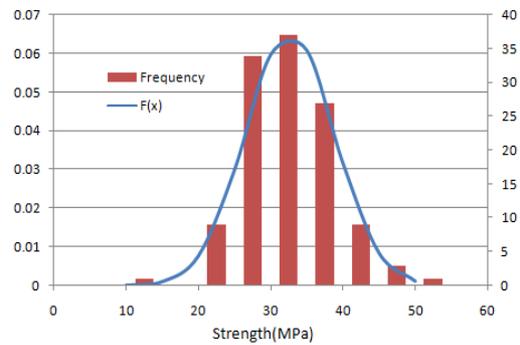


Fig. 8 concrete core test(F_{ck} =27 MPa)

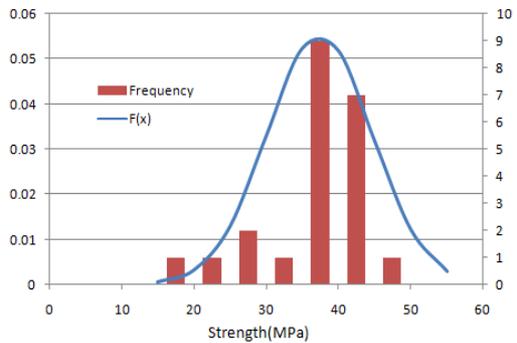


Fig. 9 concrete core test(F_{ck} =35 MPa)

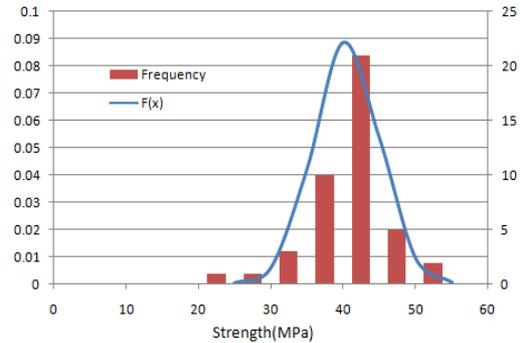


Fig. 10 concrete core test(F_{ck} =40 MPa)

5. 비파괴 압축강도 추정식의 비교분석

식 (2)~(5)에 의해 추정된 강도와 실제파괴강도(코어압축강도)와의 상관성을 확인하기 위하여, 수집된 정밀안전진단 보고서를 활용하여 Figs. 11~14의 그래프와 같이 각 추정식별로 코어압축강도와 상관관계를 분석하였다. 여기서, X축은 코어압축강도를 나타내고 있으며, Y축은 코어압축강도에 대한 각 식으로 구한 추정강도의 비로써 그 값이 1이면 코어압축강도와 추정강도가 동일함을 나타내고 있다. Fig. 11~14에서 추정강도는 반발경도법인 식 (2), (3)의 경우 구해진 값을 식 (7)을 이용하여 콘크리트 재령계수(Table 2)로 보정한 값이며, 초음파속도법인 식 (4)와 조합법인 식 (5)의 경우 제시된 식의 계산 값을 적용하였다. 코어압축강도는 현장에서 교량 구조물의 코어를 채취한 후 콘크리트의 각종 물리적·역학적

시험을 실시하여 코어의 직경, 길이, 매입철근, 채취방향에 대하여 보정한 값을 의미한다.

콘크리트 압축강도 분석결과 4가지 식 모두 실제파괴강도(코어압축강도)가 저강도에서 고강도로 갈수록 코어압축강도에 대한 추정강도의 비는 약1.5에서 0.5로 이동하였다. 일본 재료학회식과 일본건축학회 CNDT 소위원회 강도계산식에 의한 추정강도는 실제파괴강도가 30 MPa 부근일 때 가장 잘 일치하는 것으로 분석되었으며, 일본건축학회 CNDT 소위원회 공동제안식으로 구한 추정강도는 코어압축강도가 25 MPa 인 부근에서 가장 잘 일치하였다. 또한 4가지 식 모두 코어압축강도가 30 MPa 이상일 때 추정강도는 과소평가되는 것으로 나타났으며 50 MPa 부근에서는 약 50% 이상 과소평가하는 것으로 분석되었다.

그 이유는 기존식이 보통강도 콘크리트의 강도추정식이기

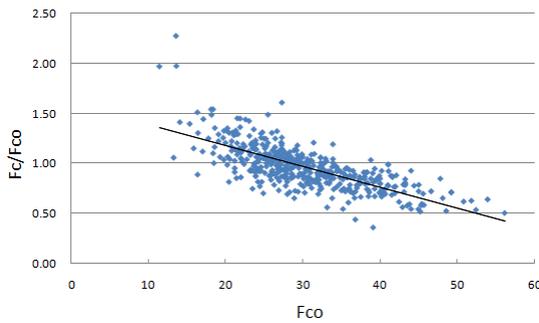


Fig. 11 Relationship between core strength and predicted strength (Materials Research Society of Japan)

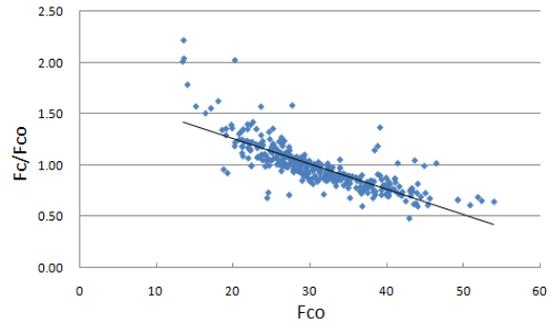


Fig. 12 Relationship between core strength and predicted strength (Architectural Institute of Japan; rebound method)

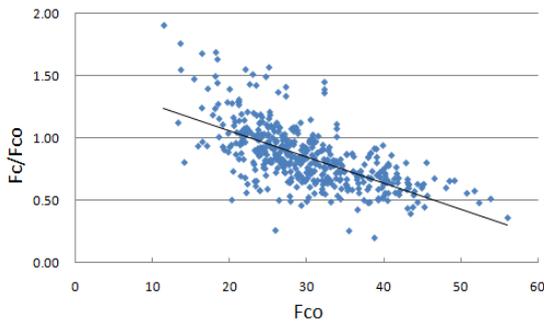


Fig. 13 Relationship between core strength and predicted strength (Architectural Institute of Japan; ultrasonic pulse velocity method)

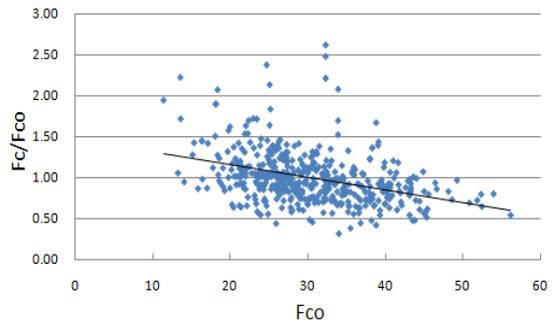


Fig. 14 Relationship between core strength and predicted strength (RILEM)

Table 4 Relationship between core strength and predicted strength

Method	Researcher	Equation	R^2
Rebound method	Materials Research Society of Japan	$F_c/F_{co} = -0.021F_{co} + 1.5925$	0.52
	Architectural Institute of Japan	$F_c/F_{co} = -0.025F_{co} + 1.7566$	0.63
Ultrasonic velocity method	Architectural Institute of Japan	$F_c/F_{co} = -0.021F_{co} + 1.48$	0.41
Combined Method	RILEM	$F_c/F_{co} = -0.016F_{co} + 1.4749$	0.15

때문에 고강도 콘크리트에는 오차율이 큰 것으로 판단된다. 실제파괴강도가 25~30 MPa 인 경우에 일본건축학회 CNDT 소위원회 강도계산식에 의한 추정강도가 다른 식에 의한 강도보다 실제파괴강도와의 오차가 가장 적은 것으로 나타났다. 릴렉식에 의한 추정강도의 경우는 다소 분산형 형태의 그래프 양상을 보였다.

추정강도와 코어강도와의 관계를 알아보기 위하여 단순상관분석(simple correlation analysis)을 실시한 결과, Table 4와 같은 관계식을 유도하였다. 여기서 F_{co} 는 코어압축강도를 나타내고 있으며, F_c 는 각 식에 대한 추정강도식을 의미한다. 일본건축학회 CNDT 소위원회 강도계산식에 의한 추정강도 분석개소는 Table 4와 같이 단순상관분석결과 결정계수는 0.63으로 나타나 다른 추정식에 비하여 가장 큰 신뢰도를 보였다.

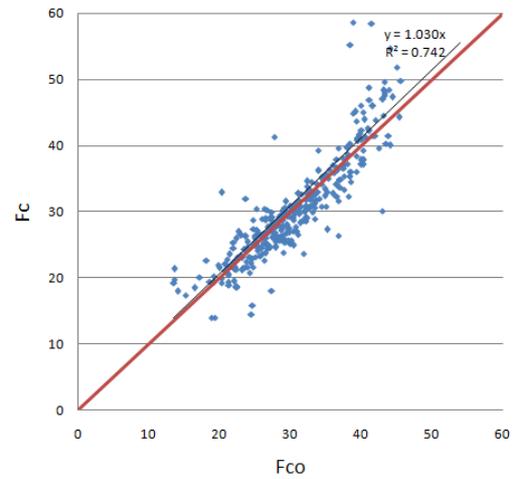


Fig. 15 Relationship between core strength and proposed equation

6. 비파괴 압축강도 추정식 제안

앞의 각 추정식에 대한 상관분석결과를 비교한 결과 실제 파괴강도와의 오차가 가장 적고 상관분석의 신뢰도가 가장 높게 평가된 식은 일본건축학회 CNDT 소위원회 강도계산식으로 나타났다. 그러나 일본건축학회 CNDT 소위원회 강도계산식도 보통 강도의 콘크리트에서만 비교적 정확도가 있을 뿐, 저강도 및 고강도 콘크리트에서는 오차가 크게 분석되었다. 그러므로 본 연구에서는 Table 4의 일본건축학회 CNDT 소위원회 강도계산식과 코어압축강도와의 상관 관계식을 이용하여 일본건축학회 CNDT 소위원회 강도계산식을 보정한 식 (8)을 제안하였으며, α 는 재령보정계수로서 Table 2의 값을 사용한다.

$$F_{cn} = \frac{\alpha(7.3R_o + 100) \times 0.098}{-0.025F_{co}' + 1.7566} \quad (\text{MPa}) \quad (8)$$

여기서, F_{cn} 은 콘크리트 추정 압축강도, R_o 은 보정반발경도, F_{co}' 은 코어압축강도, α : 재령보정계수이다.

Fig. 15는 본 연구에서 제안한 식에 의해서 구해진 추정압축강도와 코어압축강도를 비교한 그래프로서, 상관분석결과 $y = 1.0307x$ 로 기울기가 거의 1에 가까운 값을 나타내어 제안식에 의해 구해진 추정강도가 실제파괴강도와 잘 일치함을 알 수 있다. 앞에서 언급한 RILEM에서 제안한 방법(식 (1))과 비교해 볼 때, 다수의 추정강도식들 중 정밀도가 가장 높은 산정식을 찾아낼 필요없이, 최소한의 코어압축강도와 보정반발경도가 파악되면 보다 신뢰성이 확보되는 압축강도를 추정할 수 있기 때문에 매우 편리하고 35 MPa 강도 이상의 콘크리트에서도 추정압축강도가 잘 일치함을 알 수 있다.

7. 결론

본 연구에서는 한국시설안전공단에서 12년 동안 실시한 297개 교량의 정밀안전진단 결과를 토대로 콘크리트 압축강도를 구하는데 가장 많이 사용된 기존 추정식들을 선정하여 각각을 실제파괴강도(코어압축강도)와 비교·분석을 실시하였다. 분석이 이루어진 기존 추정식들 중 일본건축학회 CNDT 소위원회 강도계산식이 다른 추정식들에 비하여 실제파괴강도와의 오차가 가장 적고 상관분석의 신뢰도도 가장 높으므로 검토되었다.

또한, 선형 회귀분석을 토대로 각 식의 추정강도와 실제파괴강도의 상관관계를 도출하였으며, 기존식을 수정한 새로운 식 (8)을 제안하고 제안된 식에 의해 구해진 추정강도값과 실제파괴강도를 비교한 결과 결정계수(R^2)가 0.74로서 비교적 잘 일치함을 보였다

따라서 본 연구의 결과에서 제안한 추정식이 국내 공용 중 교량구조물에 대한 정밀안전진단시 강도 추정식으로 유용하게 이용될 수 있으며, 보통강도 콘크리트구조물뿐만 아니라 고강도 콘크리트 구조물의 압축강도를 추정하는 간편식으로 이용될 수 있을 것으로 사료된다.

References

- Kim, G. H. (2007), The Reliability for the Estimated Strength by the Ultrasonic Pulse Velocity, Hanyang University, Seoul, 31-43.
- 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. W., Oh, H. S., 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.

KISTEC (2011), Guideline of Precise Inspection for Safety and Diagnosis, Common, 12-56.

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.

Lim, S. Y. (2007), A Study on the Estimation of Compressive Strength of Concrete by Non-Destructive Test, Daegu University, Daegu, 1-2.

Oh, H. S., and Oh, K. C. (2016), An Empirical Estimation Procedure of Concrete Compressive Strength Based on the In-Situ Nondestructive Tests Result of the Existing Bridges, *Journal of KSMI*, 20(4), 111-119.

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

RILEM (1994), RILEM Technical Recommendations for the Testing and Use of Construction Materials, E & FN SPON.

Received : 11/14/2017

Revised : 02/21/2018

Accepted : 02/28/2018

요 지 : 콘크리트 비파괴강도 추정식은 일반적으로 콘크리트 강도를 결정하는데 사용된다. 그러나 기존의 추정식들은 대부분 제한된 실험 변수를 토대로 제안되어 배합조건, 강도특성 등이 다양한 실제 공용중 교량의 콘크리트 압축강도 추정시 많은 오류를 포함한다. 본 연구에서는 297개 공용 교량의 정밀안전진단 결과 중 콘크리트 비파괴시험 및 현장 코어강도 시험결과를 토대로 콘크리트 부재의 코어강도와 비파괴 추정 강도 평가결과를 비교분석하였다. 분석결과 분석이 이루어진 기존 추정식들 중 일본건축학회 CNDT 소위원회 강도계산식이 다른 추정식에 비하여 실제 파괴강도와 오차가 가장적고 상관분석의 신뢰도도 가장높은 것으로 검토되었다. 그러나 이 추정식은 코어강도가 30 MPa 이상일 때 추정강도는 과소평가되는 것으로 나타났다. 이에 본 논문에서는 추정식에 의한 강도와 현장 코어강도사이의 관계를 활용하여 회귀분석을 통한 개선된 비파괴강도 추정식을 제안하였다.

핵심용어 : 비파괴강도 시험, 콘크리트 압축강도, 반발경도, 초음파속도
