

확률론적 방법을 적용한 도로교량의 비파괴 압축강도식 평가

Comparison Study on Nondestructive Strength Equation Based on Probability for Bridges

김 훈 검 Kim, Hun-Kyom | 정회원 · 서울특별시청 도로시설과 전문관 · 공학박사 · 교신저자 (E-mail : 201104030@seoul.go.kr)

ABSTRACT

PURPOSES : This study is to estimate nondestructive strength equation based on probability for bridges using field test data.

METHODS : 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.

RESULTS : According to results of analyses, In case of standard design compressive strength of concrete is 18MPa, 21MPa, similar reliability of RILEM equation were 0.89~0.90, but in case of standard design compressive strength of concrete is 35MPa, 40MPa were 0.4~0.56. According to standard design compressive strength of concrete is 40MPa, similar reliability of ultrasonic pulse velocity method equation were 0.56.

CONCLUSIONS : RILEM equation had high similar reliability than other equation in case of standard design compressive strength of concrete is 18MPa, 21MPa, but had low similar reliability than other equation in case of standard design compressive strength of concrete is 35MPa, 40MPa. and ultrasonic pulse velocity method equation had low similar reliability than other equation in case of standard design compressive strength of concrete is 40MPa.

Keywords

nondestructive strength equation, similar reliability, probability, compressive strength of concrete

Corresponding Author : Kim, Hun-Kyom, Officer
Road Facility division, Seoul Metropolitan Government,
15 Deoksugung-gil, Jung-gu, Seoul, 04515, Korea
Tel : +82.2.2133.1672 Fax : +82.2.2133.1078
E-mail : 201104030@seoul.go.kr

International Journal of Highway Engineering

<http://www.ksre.or.kr/>

ISSN 1738-7159 (Print)

ISSN 2287-3678 (Online)

Received Mar. 23, 2018 Revised Mar. 26, 2018 Accepted Jun. 04, 2018

1. 서론

교량구조물의 콘크리트 품질은 구조물의 안전성 및 내구성에 밀접한 관계가 있기 때문에 콘크리트에 대한 정확한 품질평가는 매우 중요하다. 품질평가에 대한 영향을 주는 여러 가지 요인 중 콘크리트 압축강도는 주요 요인 중 하나이며, 건설 또는 공용 중 교량의 안전성과 내

구성에 의문이 발생할 경우 비파괴 시험을 통하여 콘크리트의 압축강도를 추정하거나, 구조물의 일부에 직접 코어를 채취하여 강도를 확인하기도 한다. 그러나 현장에서 사용되고 있는 비파괴 강도 추정식들은 대부분 제한된 실험 변수를 토대로 제안되어 현장의 배합조건 및 강도특성, 외기 환경조건, 탄산화 등 수많은 변수들을 고

려할 수 없기 때문에 많은 오차 및 강도의 편차를 동반하게 된다. 또한 제안된 추정식들간에 오차도 커서 실무자들이 실구조물의 압축강도 추정식을 선택할 때 혼란을 유발하게 된다(Kwon et al., 2006; Kim 2007; Lim 2007; Kim et al., 2016).

최근 들어 이런 문제점을 고려하여 신뢰성 개념에 근거한 평가방법에 대한 관심이 높아지고 있으나, 비파괴 현장데이터 축적의 부족 등으로 어려움을 겪고 있다(Kim, 2010).

박 등(Park et al., 2015)은 비파괴 강도 추정식 평가에 대하여 신뢰성 개념을 이용하여 확률기반의 유사신뢰도를 제안하고 신뢰도 분석을 수행하였다. 그러나 박 등의 연구는 대상시설이 지중구조물(지하철 및 철도)에 국한되어 있으며, 구조물별로 상대적 평가만 이루어진 차원이기 때문에 폭넓은 데이터를 활용하여 도로교량에 적합한 비파괴 강도의 신뢰성 분석과 정량적 데이터의 제공이 절실히 필요한 실정이다.

이에 본 논문에서는 한국시설안전공단에서 12년 동안 실시한 297개 교량의 정밀안전진단 결과 중 압축강도 비파괴 시험 및 546개의 현장 코어압축강도 시험결과를 토대로, 설계기준강도별로 현장에서 많이 사용되는 압축강도 추정식에 대하여 확률론적 방법에 의하여 신뢰도 평가를 수행하였다.

2. 확률론적 방법에 의한 압축강도 평가방법

2.1. 구조물 신뢰성 이론

오늘날 확률적으로 안전도는 소위 신뢰성지수(reliability index) 또는 안전성 지수(safety index)라고 일컫는 β 에 의해 안전여유 $Z=R-L \leq 0$ 이 되는 확률과 관련하여 정의된다. 그러므로 신뢰성지수/안전성지수 β 는 확률적 안전에 대한 합리적 척도로 널리 사용되고 있다. 따라서 신뢰성지수 β 는 Fig. 1 및 2와 같이 요구성능 L 과 보유성능 R 의 분포가 중첩되는 부분의 면적에 해당하는 성능상실 확률의 함수로 다음과 같이 구해진다(Jo, 2008; Park et al., 2015).

예컨대, R 과 L 이 정규분포인 경우, 안전여유 $Z=R-L$ 도 정규분포이므로 안전여유는 평균 Eq. (1)과 표준편차 Eq. (2)를 갖는 정규분포로 나타낼 수 있다.

$$\mu_Z = \mu_R - \mu_L \quad (1)$$

$$\sigma_Z = \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_L^2} \quad (2)$$

이때 성능상실 확률은 다음과 같이 표현된다

$$P_F = P(Z \leq 0) \quad (3)$$

Z 을 표준 정규분포로 변환하면 Eq. (4)와 같으며,

$$\mu = \frac{Z - \mu_Z}{\sigma_Z} \quad (4)$$

성능상실 확률은 Eq. (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$P_F = \Phi\left(-\frac{\mu_Z}{\sigma_Z}\right) \quad (5)$$

즉, 평균 μ_Z 에 해당하는 표준공간 내에서 원점으로부터 μ_Z/σ_Z 의 위치에 성능상실점이 존재한다. 이 거리를 안정성 지수 β 라고 정의하며, 다음과 같이 나타낸다.

$$\beta = \frac{\mu_Z}{\sigma_Z} = \frac{\mu_R - \mu_L}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_L^2}} \quad (6)$$

여기서, β 는 신뢰도, μ_Z, μ_R, μ_L 은 각각 설계기준, 저항요소, 하중요소의 확률분포 평균, $\sigma_Z, \sigma_R, \sigma_L$ 은 각각 설계기준, 저항요소, 하중요소의 표준편차를 나타낸다.

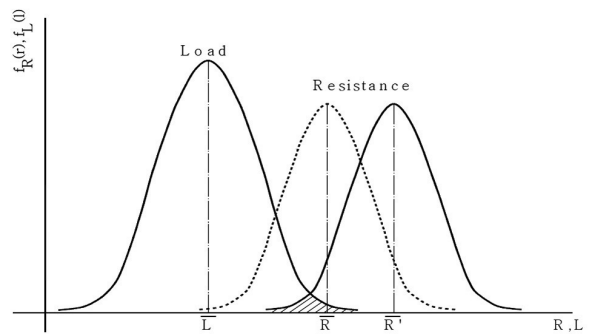


Fig. 1 Probability of Failure (Change of Mean)

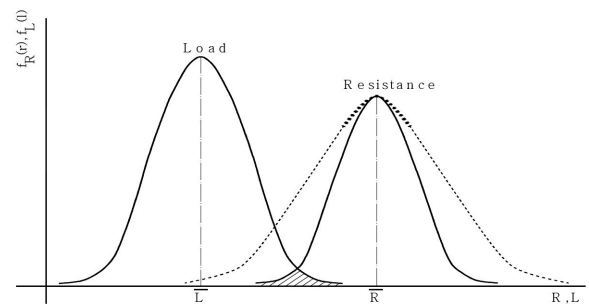


Fig. 2 Probability of Failure (Change of Variance)

2.2. 압축강도 신뢰성 평가

압축강도의 신뢰성 공학은 실제 구조물이 가지고 있

는 압축강도와 비파괴 추정치에 따른 압축강도의 유사성 평가에 적용된다.

콘크리트 구조물의 실제 압축강도는 실내시험을 통해 얻어지는 코어압축강도로 대변되며 안정성 측면을 고려한 구조물 신뢰성 이론과 달리 유사성을 근간으로 콘크리트의 실제 압축강도(코어압축강도, Core compressive strength) C 와 비파괴 시험에 의해 추정되는 압축강도(Non-Destructive compressive strength) N 으로 표시하며, 평균과 표준편차를 재구성하여 Eq. (7)과 같이 유사 신뢰도(Similar reliability, ρ)를 나타낼 수 있다 (Park, et al., 2015)

$$\rho = \frac{\mu_0}{\sigma_0} = \left(\frac{\mu_C - |\mu_C - \mu_N|}{\sqrt{\sigma_C^2 + |\sigma_C^2 - \sigma_N^2|}} \right) \left(\frac{\mu_C}{\sqrt{\sigma_C^2}} \right) \quad (7)$$

여기서, σ_C 는 코어압축강도의 표준편차, σ_N 은 추정 압축강도의 표준편차, μ_C 는 코어압축강도의 평균, μ_N 은 추정압축강도의 평균이다.

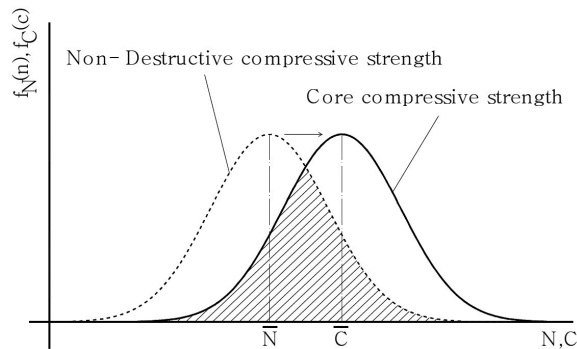


Fig. 3 Probability of Failure(Change of Mean) - Compressive Strength

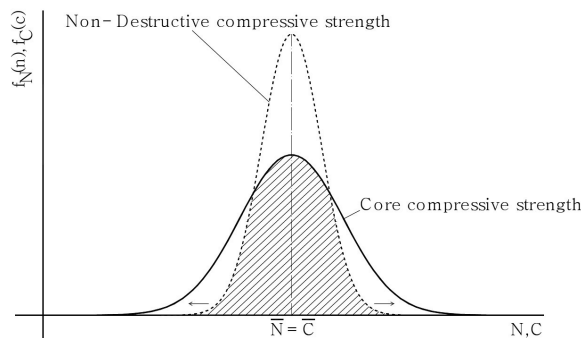


Fig. 4 Probability of Failure(Change of Variance) - Compressive Strength

3. 현장 시험결과를 이용한 신뢰성 평가

3.1. 대상교량 현황

비파괴강도 추정식에 대한 평가를 위하여 한국시설안전공단에서 정밀안전진단을 실시한 총 297개 교량에서 획득한 546개의 코어압축강도 시험결과와 비파괴시험 결과를 분석하였으며, 각각의 동일 부재에서 실시한 코어압축강도와 비파괴시험값들을 사용하였다. 비파괴시험이 수행된 콘크리트 부재는 바닥판, 거더, 교각, 교대 등으로 콘크리트의 압축강도는 11MPa~56MPa 범위를 가지는 것으로 검토되었다. Fig. 5는 분석에 이용된 대상교량을 나타내고 있으며, 원효대교, 부산대교, 팔당대교, 진도대교, 고수대교, 남한강교 등 전국 각지의 교량 시험 데이터를 활용하였다.

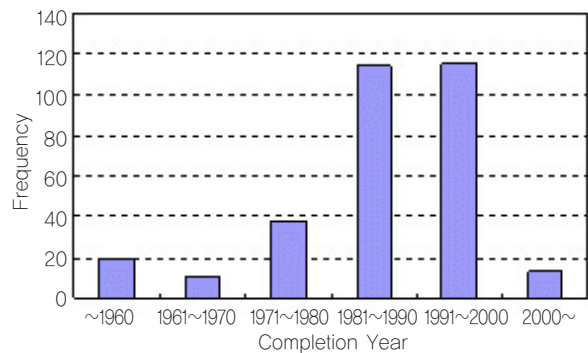


Fig. 5 Completion Year of Structure

대상교량 중 공용년수가 20~35년 된 교량이 전체교량의 70% 이상으로 가장 많았으며, 1960년대 이전에 준공된 교량도 20개소가 포함되어 있었고, 2000년 이후 준공된 교량은 준공 후 최초 정밀안전진단 주기 등을 고려할 때 데이터 확보가 어려워 17개소의 교량이 포함되었다

3.2. 비파괴강도 추정식

3.2.1. 비파괴 압축강도 추정방법

비파괴시험에 의한 대표적인 콘크리트의 압축강도 평가 방법은 반발경도법, 초음파속도법, 조합법 등이 주로 사용되고 있다. 반발경도법은 경화 콘크리트면을 장비로 타격하여 콘크리트면의 반발경도를 측정하고, 반발경도와 콘크리트 압축강도와의 상관관계를 이용하여 압축강도를 추정하는 비파괴시험이다. 초음파속도법은 초음파를 이용하여 물체 내부의 정보를 얻는 방법으로서, 콘크리트에 접촉시킨 발신자에서 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. 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.

3.2.2. 비파괴 압축강도 추정식 선정

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

Table 1. Nondestructive Strength Equations

Researcher/Method	Equation [MPa]
Materials Research Society of Japan (Rebound method)	$F_c = 1.3R_o - 18.4$ (8)
Architectural Institute of Japan (Rebound method)	$F_c = 0.73R_o + 10.0$ (9)
Architectural Institute of Japan (Ultrasonic Pulse velocity method)	$F'_c = 21.5V_p - 62.0$ (10)
RILEM (Combined Method)	$\log_{10}F_c = 0.3794V_p + 0.1149R_o + 0.4332$ $F'_c = 0.085F_c$ (11)

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

Table 1과 같이 Eqs. (8)~(11)의 상기 4가지 식 (KISTEC 2011; RILEM 1980)을 토대로 추정된 콘크리트의 압축강도를 코어압축강도와 확률론적 방법에 의하여 비교·분석 하였다.

여기서, F_c 은 압축강도, R_o 은 보정반발경도, V_p 은 초음파전달속도이다.

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

$$R_o = R + \Delta R_1 + \Delta R_2 + \Delta R_3 \quad (12)$$

여기서, ΔR_1 은 타격방향에 따른 보정값, ΔR_2 은 압축 부재의 사하중 응력에 따른 보정값, ΔR_3 은 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 Eq. (13)과 같이 압축강도로 수정하여 콘크리트의 압축강도를 추정한다.

$$F'_c = \alpha \cdot F_c \quad (13)$$

여기서, α 는 재령보정계수이다.

3.3. 현장코어강도 시험의 압축강도 분포

비파괴 압축강도 추정식의 확률론적 평가에 앞서, 546개의 현장 코어압축강도 시험결과와 분산정도와 신뢰성 확인을 위하여 콘크리트 설계기준강도별(F_{ck}) 코어압축강도(F_{co}) 분포를 분석하였다.

콘크리트 설계기준강도는 18, 21, 24, 27, 35, 40MPa를 기준으로 분석하였으며, Table 2는 분석에 사용된 각 설계기준강도별 코어압축강도 시험체의 개소수, 압축강도 평균값과 표준편차를 나타내고 있으며, Fig. 6~11은 설계기준강도별 코어강도 시험체의 빈도수 및 정규분포곡선($F(x)$)을 나타내고 있다.

분석에 사용된 코어강도결과의 개소수는 설계기준강도가 21~27MPa의 경우가 전체 코어강도 개소수의 79%를 차지하였으며, 설계기준강도가 35MPa 이상인 경우는 65개소로 전체코어강도 개소수의 12%를 차지하였다.

설계기준강도가 클수록 코어압축강도 평균값과 설계기준강도와의 차이가 줄어드는 경향을 보였다. 설계기준강도가 18, 35, 40MPa인 경우 다른 설계기준강도에 비해 현장 시험 개소수가 상대적으로 적으나, 해당 시험 값들은 일정한 값을 기준으로 정규분포곡선 형태를 보이며, 전체적으로 볼 때도 설계기준강도별 코어압축강도의 표준편차는 4.47MPa~7.24MPa의 범위로 설계기준강도에 따른 표준편차의 변화는 크지 않는 것으로 나타나 본 연구의 비파괴 압축강도 추정식 평가를 위하여 사용된 대상 코어강도 결과는 보통강도 콘크리트는 물론 고강도 콘크리트 추정강도 분석에 활용 시 신뢰성이 확보되는 것으로 분석되었다.

Table 2. Mean and Standard Deviation for Core Strength

Fck (Mpa)	Bridges	Test point	Mean[MPa]	SD[MPa]
18	29	47	24.36	5.41
21	98	161	27.02	6.88
24	77	152	29.53	5.83
27	58	121	32.64	6.10
35	12	22	37.38	7.24
40	23	43	40.50	4.47

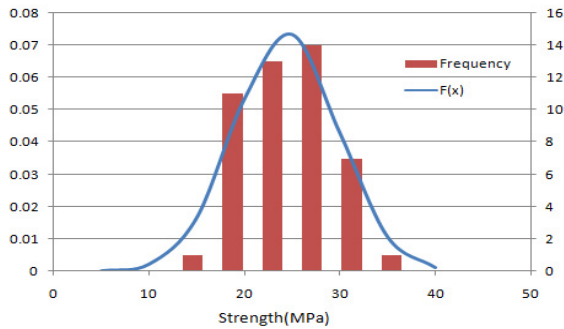


Fig. 6 Concrete Core Test (Fck = 18MPa)

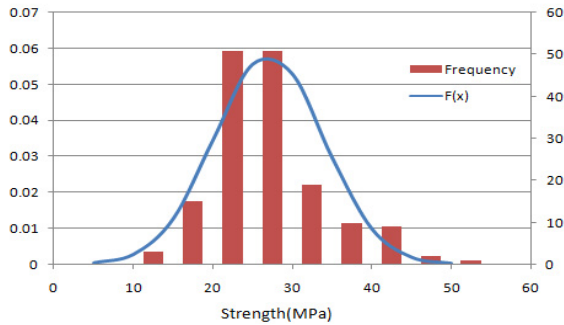


Fig. 7 Concrete Core Test (Fck = 21MPa)

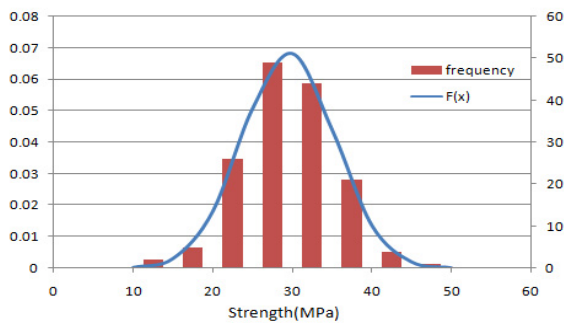


Fig. 8 Concrete Core Test (Fck = 24MPa)

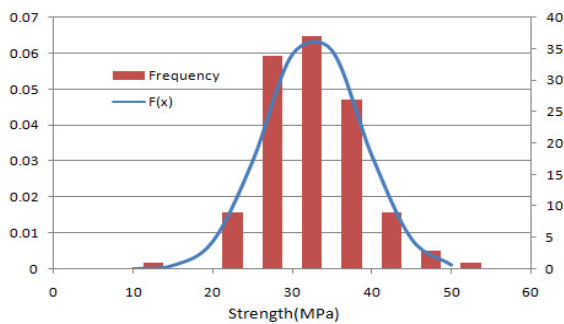


Fig. 9 Concrete Core Test (Fck = 27MPa)

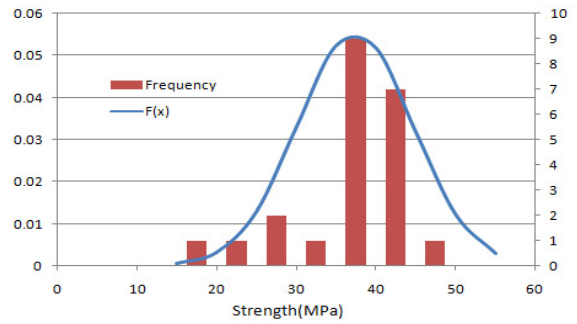


Fig. 10 Concrete Core Test (Fck = 35MPa)

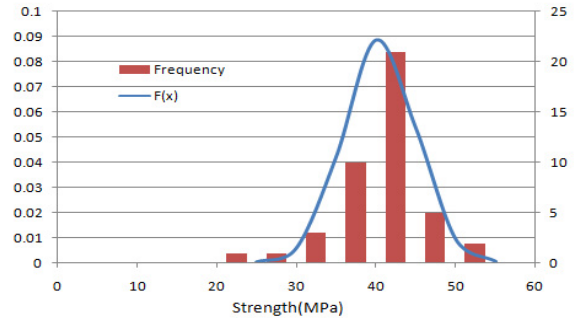


Fig. 11 Concrete Core Test (Fck = 40MPa)

3.4. 설계기준강도별 신뢰성 분석

Table 1에 제시된 콘크리트 압축강도 추정식에 대하여 확률론적 신뢰도 평가를 위해, 실제교량의 콘크리트 설계기준강도별로 각 압축강도 추정식에 의한 강도값의 평균값 및 표준편차, 유사신뢰도를 Table 3~8과 같이 계산하였으며, Fig. 12~17과 같이 각 추정식들의 설계기준강도별 정규분포곡선과 코어강도의 정규분포곡선을 도시하였다.

Fig. 12~17에서 CS는 현장 콘크리트 코어강도의 정규분포곡선이며, A는 일본재료학회 추정식, B는 일본건축학회 CNDT 소위원회 강도계산식, C는 일본건축학회 CNDT 소위원회 공동제안식, D는 릴렉식을 나타낸다.

여기서, 압축강도 추정식에 의한 강도값은 현장사항을 고려하여 각종 보정을 한 값이며, 실제 각 교량의 정밀안전진단 시 최종 결정된 값이다.

우선, 각 추정강도 평균값을 살펴보면, 코어강도의 평균값과 비교 시 가장 큰 차이를 보인 추정식은 초음파법인 일본건축학회 CNDT 소위원회 공동제안식이며, 설계기준 강도가 40MPa인 경우 코어강도의 평균값은 40.5MPa인데 반해 초음파법에 의한 추정 강도 평균값은 29.65MPa로 10.85MPa의 차이를 보였다. 이는 Fig. 17에 잘 나타나 있으며, 코어강도 정규분포곡선의 평균값과 초음파법 정규분포곡선의 평균값 거리가 다른 식들에 비하여 멀리 떨어져 있음을 확인할 수 있다.

표준편차는 일본재료학회식이 4.09~4.72, 일본건축학회 CNDT 소위원회 강도계산식은 2.5~3.46, 일본건축학회 CNDT 소위원회 공동제안식은 4.06~5.84, 릴렘식은 6.02~13.53으로 모든 설계기준강도 ($F_{ck}=18\sim40\text{MPa}$)에서 일본건축학회 CNDT 소위원회 강도계산식이 표준편차가 가장 적고, 릴렘식이 표준편차가 가장 크게 나타났다. 이는 Fig. 12~17에서 나타난 것처럼 릴렘식에 의한 정규분포곡선은 다른 추정식에 비하여 완만한 곡선 형태를 보이며, 일본건축학회 CNDT 소위원회 강도계산식은 그 반대의 경향을 보임을 알 수 있다.

한편, 각 추정식별 유사신뢰도 분석결과를 살펴보면 교량의 설계기준강도가 18MPa인 경우 일본건축학회 CNDT 소위원회 강도계산식이 0.63으로 가장 작은 유사신뢰도를 나타냈으며, 릴렘식은 0.89로 다른 식에 비하여 높은 유사신뢰도를 나타냈다.

교량의 설계기준강도가 21MPa인 경우에는 일본재료학회식, 일본건축학회 CNDT 소위원회 강도계산식, 일본건축학회 CNDT 소위원회 공동제안식들은 유사신뢰도가 0.74~0.70수준으로 나타났으며, 릴렘식의 경우에는 0.90으로 매우 높은 유사신뢰도를 나타냈으며, Fig. 12~13과 같이 코어강도의 정규분포곡선과 매우 잘 일치함을 알 수 있다.

설계기준강도가 35MPa인 경우는 일본재료학회식, 일본건축학회 CNDT 소위원회 강도계산식, 일본건축학회 CNDT 소위원회 공동제안식들은 유사신뢰도가 0.67수준으로 거의 동일한 수준으로 나타났고, 릴렘식은 0.47로 다른 식에 비하여 작은 값을 나타내었다.

설계기준강도가 40MPa인 경우 릴렘식이나 초음파법에 의한 유사신뢰도는 0.4~0.56으로 다른 식에 비하여 상대적으로 작은 신뢰도를 나타냈다.

결국 릴렘식의 경우는 설계기준강도가 18, 21MPa인 경우 유사신뢰도가 0.89~0.90으로 다른 추정식에 비하여 높은 신뢰도값을 나타냈으나, 설계기준강도가 35, 40MPa인 경우 0.40~0.47로 다른 추정식에 비하여 매우 낮은 신뢰도값을 나타내었다. 여기서, 설계기준강도가 18, 21MPa인 경우 릴렘식에 의한 추정강도 값의 표준편차가 다른 식에 비하여 가장 크게 계산되었지만 유사신뢰도가 가장 높게 나타난 이유는 Eq. (7)에 나타나 있듯이, 유사신뢰도는 코어강도의 표준편차 및 평균, 비파괴 추정강도의 표준편차 및 평균값들에 의하여 결정되기 때문이다. Fig. 3 및 4에서 코어강도의 정규분포곡선과 비파괴 추정강도의 정규분포곡선이 겹치는 면적이 유

사확률이며 유사확률이 클수록 유사신뢰도는 커지게 된다. 만약 비파괴추정강도의 표준편차가 작아도 코어강도 정규분포곡선과의 겹치는 면적이 작을 경우 유사확률은 작아지게 된다. 릴렘식은 설계기준강도가 고강도로 갈수록 유사신뢰도가 낮아지는 경향성을 보였으며 본 연구에 적용된 대상교량 중 설계기준강도가 35~40MPa인 교량은 대부분 PSC교량(PSC박스거더교, PSCI)임을 감안할 때 현재 공용중인 PSC교량의 강도 추정 시 릴렘식을 적용하는 것은 릴렘식으로 구한 추정값이 실제 콘크리트 압축강도와 유사할 확률이 적다는 것을 의미한다.

한편 초음파속도법의 경우 설계기준강도가 21~35MPa인 경우 일본재료학회 및 일본건축학회 CNDT 소위원회 강도계산식으로 계산된 유사신뢰도값과 많은 차이를 보이지는 않았지만, 설계기준강도가 40MPa인 경우는 0.56으로 일본재료학회 및 일본건축학회 CNDT 소위원회 강도계산식에 비하여 매우 작게 계산되었다.

현재 실무에서는 교량의 콘크리트 압축강도를 추정할 때, 연구자들이 제안한 여러 추정식들을 이용하여 강도를 추정하고 있으나, 비파괴 추정식들은 대부분 실험실에서 제안된 회귀분석식으로 실제 현장에서 발생하는 많은 오차와 콘크리트 압축강도의 편차는 고려할 수가 없다. 이에 본 논문에서와 같이 확률론적 방법에 의한 평가를 통하여 공학적 의사결정을 하는 것이 필요하며, 실무에서는 유사신뢰도 확인을 통하여 해당 구조물에 적합한 압축강도 추정식(유사신뢰도가 높은 식)을 선택하여 사용해야 하며, 현재 실무에서와 같이 강도 추정식으로 구한 강도값을 표현할 때 단순히 강도값만을 표현하는 것이 아니라 유사신뢰도 값을 같이 표현하도록 하여 추정강도값의 신뢰도 수준을 인지시키는 것이 필요하다.(예시: 일본재료학회식으로 계산한 추정강도 26MPa-유사신뢰도 0.74수준).

단, 실무에서 유사신뢰도의 적정 한계값을 어디까지 볼 것인가에 대해서는 향후 추가적으로 더 많은 데이터(최근 시공교량 등의 시험데이터)의 축적과 장기적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

Table 3. Similar Reliability ($F_{ck} = 18\text{MPa}$)

Equation	Mean[MPa]		StDev[MPa]		ρ
	μ_C	μ_N	σ_C	σ_N	
A	24.36	26.45	5.41	4.5	0.799
B	24.36	28.17	5.41	2.5	0.631
C	24.36	22.4	5.41	4.06	0.767
D	24.36	24.3	5.41	6.02	0.896

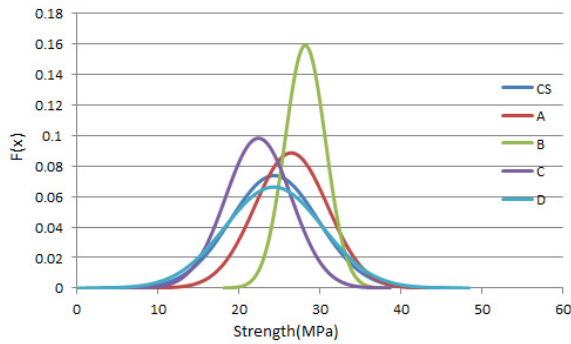


Fig. 12 Normal Distribution Curve (Fck = 18MPa)

Table 4. Similar Reliability (Fck = 21MPa)

Equation	Mean[MPa]		StDev[MPa]		ρ
	μ_C	μ_N	σ_C	σ_N	
A	27.02	25.76	6.88	4.25	0.749
B	27.02	27.97	6.88	3.29	0.724
C	27.02	23.01	6.88	5.09	0.706
D	27.02	26.06	6.88	7.36	0.901

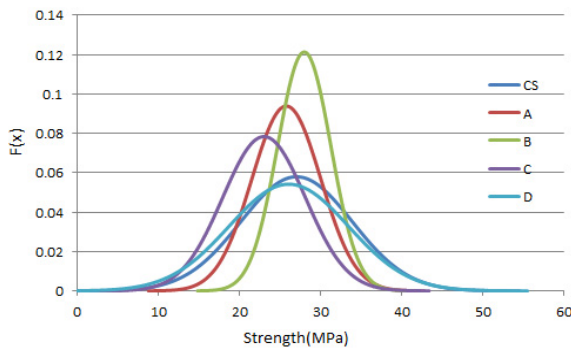


Fig. 13 Normal Distribution Curve (Fck = 21MPa)

Table 5. Similar Reliability (Fck = 24MPa)

Equation	Mean[MPa]		StDev[MPa]		ρ
	μ_C	μ_N	σ_C	σ_N	
A	29.53	26.4	5.83	4.25	0.737
B	29.53	28.3	5.83	3.3	0.739
C	29.53	23.23	5.83	5.14	0.711
D	29.53	27.27	5.83	8.74	0.615

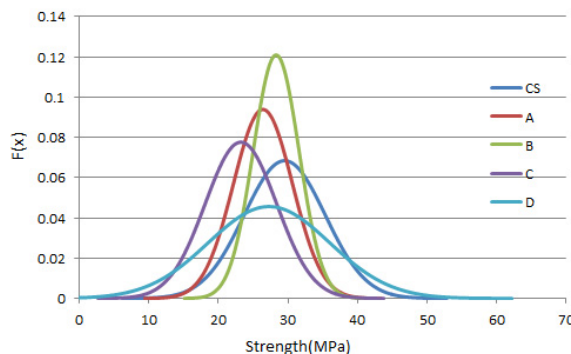


Fig. 14 Normal Distribution Curve (Fck = 24MPa)

Table 6. Similar Reliability (Fck = 27MPa)

Equation	Mean[MPa]		StDev[MPa]		ρ
	μ_C	μ_N	σ_C	σ_N	
A	32.64	27.22	6.1	4.42	0.686
B	32.64	28.91	6.1	2.5	0.654
C	32.64	24.3	6.1	4.56	0.620
D	32.64	26.09	6.1	7.53	0.647

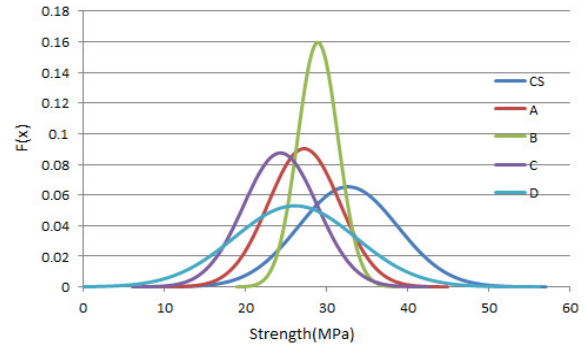


Fig. 15 Normal Distribution Curve (Fck = 27MPa)

Table 7. Similar Reliability (Fck = 35MPa)

Equation	Mean[MPa]		StDev[MPa]		ρ
	μ_C	μ_N	σ_C	σ_N	
A	37.38	32.63	7.24	4.09	0.673
B	37.38	33.51	7.24	3.22	0.667
C	37.38	29.38	7.24	5.81	0.674
D	37.38	41.61	7.24	13.53	0.474

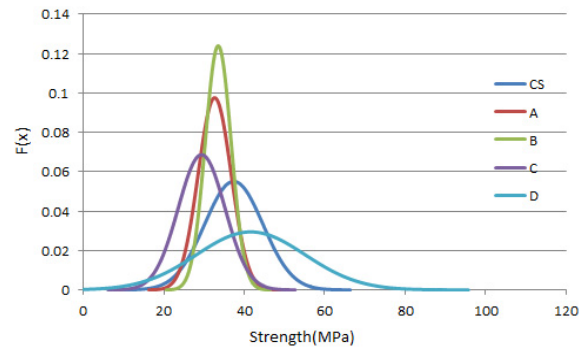


Fig. 16 Normal Distribution Curve (Fck = 35MPa)

Table 8. Similar Reliability (Fck = 40MPa)

Equation	Mean[MPa]		StDev[MPa]		ρ
	μ_C	μ_N	σ_C	σ_N	
A	40.5	34.93	4.47	4.72	0.816
B	40.5	34.5	4.47	3.46	0.719
C	40.5	29.65	4.47	5.84	0.560
D	40.5	40.91	4.47	10.8	0.409

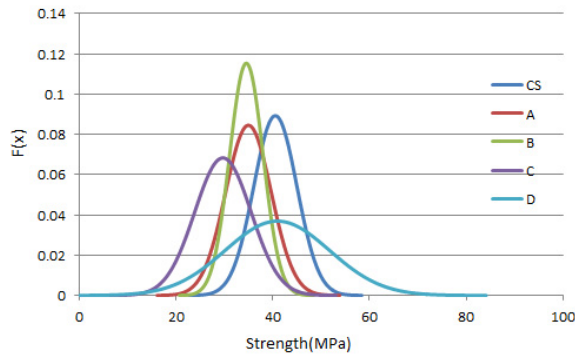


Fig. 17 Normal Distribution Curve (Fck = 40MPa)

4. 결론

한국시설안전공단에서 12년 동안 실시한 297개 교량의 정밀안전진단 결과를 토대로 콘크리트 압축강도를 구하는데 가장 많이 사용된 기준 추정식들을 선정하여 확률론적 방법에 의한 신뢰도 평가를 수행하였다.

우선, 비파괴압축강도 추정식의 확률론적 평가에 앞서, 546개의 현장 코어압축강도 시험결과의 분산정도와 신뢰성 확인을 위하여 교량의 콘크리트 설계기준강도별 코어압축강도 분포를 분석하였다. 분석결과 설계기준강도가 클수록 코어압축강도 평균값과 설계기준강도와의 차이가 줄어드는 경향성을 보였으며, 전체적으로 볼 때 설계기준강도별 코어압축강도의 표준편차는 4.47~7.24MPa의 범위로 설계기준강도에 따른 표준편차의 변화는 크지 않은 것으로 나타났다. 한편, 설계기준강도별 압축강도 추정식들의 신뢰성 분석결과 릴렘식의 경우는 설계기준강도가 18, 21MPa인 경우 유사신뢰도가 0.89~0.90으로 다른 추정식에 비하여 높은 신뢰도값을 나타냈으나, 설계기준강도가 35, 40MPa인 경우 0.40~0.47로 다른 추정식에 비하여 매우 낮은 신뢰도값을 나타내었다. 릴렘식은 설계기준강도가 고강도로 갈수록 유사신뢰도가 낮아지는 경향성을 보였으며, 초음파속도법의 경우 설계기준강도가 21~35MPa인 경우 일본재료학회 및 일본건축학회 CNDT 소위원회 강도계산식으로 계산된 유사신뢰도값과 많은 차이를 보이는

않았지만, 설계기준강도가 40MPa인 경우는 0.56으로 일본재료학회 및 일본건축학회 CNDT 소위원회 강도계산식에 비하여 매우 작게 계산되었다.

본 연구의 평가 결과는 콘크리트 압축강도 추정식 선정의 공학적 의사결정을 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

REFERENCES

- Jo, H. N. (2008). *Structure reliability of engineering*, goomi book (in korea).
- Kim, G. H. (2007). "The reliability for the estimated strength by the ultrasonic pulse velocity", Hanyang University, Seoul, pp.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), pp.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), pp.1-9.
- KISTEC (2011). *Guideline of Precise Inspection for Safety and Diagnosis*, Common, pp.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), pp.389-395.
- Lim, S. Y. (2007). "A Study on the Estimation of Compressive Strength of Concrete by Non-Destructive Test", Daegu University, Daegu, pp.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), pp.111-119.
- Park, J. w., Choo, J. H., Park, G. R., Hwang, I. B., Shin, Y. S. (2015) "The Evaluation of Non-Destructive Formulas on Compressive Strength Using the Reliability Based on Probability", *Journal of KSMI*, 19(4), pp.25-34
- RILEM CNDT-Committee (1980). *RILEM Tentative Recommendations for In-situ Concrete Strength Determination by Non-Destructive Combined Methods (First draft)*.