

# 비파괴시험 자료를 적용한 콘크리트 기준강도의 통계적 추정

백인열<sup>†</sup>

가천대학교 토목환경공학과

(2014. 10. 27. 접수 / 2014. 11. 24. 수정 / 2015. 1. 6. 채택)

## Statistical Estimation of Specified Concrete Strength by Applying Non-Destructive Test Data

Inyeol Paik<sup>†</sup>

Department of Civil and Environmental Engineering, Gachon University

(Received October 27, 2014 / Revised November 24, 2014 / Accepted January 6, 2015)

**Abstract :** The aim of the paper is to introduce the statistical definition of the specified compressive strength of the concrete to be used for safety evaluation of the existing structure in domestic practice and to present the practical method to obtain the specified strength by utilizing the non-destructive test data as well as the limited number of core test data. The statistical definition of the specified compressive strength of concrete in the design codes is reviewed and the consistent formulations to statistically estimate the specified strength for assessment are described. In order to prevent estimating an unrealistically small value of the specified strength due to limited number of data, it is proposed that the information from the non-destructive test data is combined to that of the minimum core test data. The the sample mean, standard deviation and total number of concrete test are obtained from combined test data. The proposed procedures are applied to an example test data composed of the artificial numerical values and the actual evaluation data collected from the bridge assessment reports. The calculation results show that the proposed statistical estimation procedures yield reasonable values of the specified strength for assessment by applying the non-destructive test data in addition to the limited number of core test data.

**Key Words :** specified compressive strength, characteristic value, statistical estimation, core test data, non-destructive test data, safety assessment

### 1. 서론

공용중인 콘크리트 구조물에 대한 안전성 평가를 수행하는데 있어서 콘크리트 기준강도(specified strength)의 결정은 매우 중요한 부분을 차지한다. 공용중인 구조물이 현행 설계기준에서 요구하는 동일한 안전율을 확보하는지 여부를 판단하기 위해서는, 안전성 평가 계산에 사용할 구조물의 콘크리트 기준강도에 대하여 설계기준에서 통계에 기반하여 정의하는 설계기준압축강도(specified compressive strength)와 동일한 원칙에 따르는 정의가 필요하다. 현재 국내의 평가 과정에서는 기준강도 결정에 있어서 명확한 통계적 개념이 적용되지 않고 있는 실정이다.

신설 구조물에 대한 설계 과정에서 단면강도를 산정하기 위하여 사용하는 콘크리트의 설계기준강도

(specified strength for design,  $f_{ck}$ )는 콘크리트의 평균강도(mean strength,  $f_{cm}$ )와는 구분되며, 대개 평균강도보다 작은 값으로 정의되는 특성값(characteristic value)이다. 설계기준에서 이와 같이 정의된 설계기준강도를 강도감소계수  $\phi$ 와 함께 설계 식에 적용하면 목표로 하는 안전율을 확보할 수 있게 된다. 이와 동일한 관점에서, 공용중인 구조물에 대하여 안전성 평가를 수행하는 과정에서도 대상 구조물에 대한 재료시험을 통하여 구한 강도 예측자료로부터 콘크리트의 설계기준강도와 통계적 정의가 부합되도록 콘크리트의 평가기준강도(specified strength for assessment,  $f_{ca}$ )를 정의하고 이를 단면강도 산정 식에 적용한다면, 신설 구조물에 대한 설계와 공용중인 구조물에 대한 평가를 동일한 개념으로 수행할 수 있다.

콘크리트의 설계기준강도에 대한 통계적 정의를 제

<sup>†</sup> Corresponding Author : Inyeol Paik, Tel : +82-31-750-5340, E-mail : pinyeol@gachon.ac.kr

Department of Civil and Environmental Engineering, Gachon 1342, Seongnam-daero, Sujeong-gu, Seongnam-si, Gyeonggi-do 461-200, Korea

시하고 있는 대표적인 설계기준으로는 Eurocode<sup>1)</sup>와 FIB의 Model Code<sup>2)</sup>가 있다. 이들 기준에서는 구조물의 신뢰도를 결정하는 중요한 설계변수인 하중 및 재료강도에 대하여 통계적 개념인 특성값을 이용하고 있다. 콘크리트 압축강도의 특성값을 평균강도에서 표준편차의 특정 배수만큼을 뺀 값으로 정의하고 있다.

국내의 콘크리트구조설계기준<sup>3)</sup>과 콘크리트표준시방서<sup>4)</sup> 및 미국의 ACI 콘크리트구조기준<sup>5)</sup>에서도 콘크리트 설계기준강도를 나타내기 위하여 통계 개념을 도입하고 있다. 즉, 콘크리트의 품질을 확보하기 위한 목표배합강도의 설정에 있어서 압축강도의 표준편차 값을 이용하며, 또한 콘크리트 강도시험의 평균값이 설계기준강도에 대하여 만족해야 하는 규정을 정하고 있다.

한편, 공용중인 콘크리트구조물의 안전성 평가에 사용하기 위한 콘크리트의 평가기준강도를 통계적으로 정의하고 있는 대표적인 문헌으로는 미국의 ACI 지침<sup>6)</sup>을 들 수 있다. 이 지침은 구조물에서 채취한 코어의 압축강도에 대한 평균과 표준편차를 이용하여 통계적 추정(statistical estimation) 절차에 따라 설계기준강도의 정의와 부합하는 평가기준강도를 산출하는 과정을 제시하고 있다. 최근에 국내 콘크리트구조설계기준<sup>3)</sup>에서도 부록을 통하여 이 방법을 소개하고 있다. Bartlett과 MacGregor<sup>7)</sup>도 구조물로부터 채취한 제한된 수의 코어 압축강도로부터 구한 평균값을 이용하고 표준편차를 상수로 정의한 후 통계 기법을 적용하여 등가의 평가기준강도를 산정하는 과정을 제시하였다. 이 방법은 ACI 지침에서 대안방법으로 수록하고 있다. 미국 AASHTO의 교량평가편람<sup>8)</sup>에서도 통계 개념을 적용하여 콘크리트의 기준강도를 코어 강도 시험값의 평균에서 편차의 1.64배를 뺀 값으로 정하고 있다. 또한 이 편람에서는 구조물의 강도를 평가할 때 콘크리트의 평균강도 값을 사용하지 않도록 명시하고 있다.

그러나, 이와 같이 통계에 기반한 기준강도 산정 방법들을 적용하여 콘크리트 강도를 정확하게 구하기 위해서는 충분한 개수의 코어 시험값이 있어야 한다. 통계 특성을 나타내는 평균과 표준편차는 자료의 개수에 민감하게 영향을 받기 때문이다. 그러나 구조물로부터 코어를 채취하는 경우 구조물에 불리한 영향을 가할 가능성에 대한 부담과 경제적인 제약으로 인하여 코어의 개수가 제한될 수밖에 없다.

현재 국내에서 수행하고 있는 공용중인 구조물에 대한 정밀안전진단에서는 콘크리트의 압축강도를 구하기 위하여 코어 강도시험이나 반발경도시험 또는 초음파전달속도시험 등의 비파괴시험을 실시하고 있다. 그러나 이와 같이 구한 압축강도의 시험값으로부터 통계

적 개념에 따른 평가기준강도를 산정하는 과정이 없이, 대개 압축강도의 평균값을 설계기준강도와 비교하여 대략적인 판단에 따르고 있다.

이 논문에서는 국내외 콘크리트구조설계기준에서 규정하고 있는 콘크리트의 설계기준강도의 관련 규정을 통계적인 관점에서 설명하고, 이와 부합하는 평가기준강도의 통계적인 정의를 정리한다. 이와같이 규정된 평가기준강도를 현실적으로 구하기 위하여 최소한의 코어 시험값과 실무에서 수행하고 있는 비파괴시험 값을 추가하여 활용한다. 수치 예제 및 국내에서 수행한 교량에 대한 진단 자료에 적용하여 실무적인 적용 가능성을 검토한다.

## 2. 기준강도의 통계적 정의

### 2.1 설계 기준강도의 통계적 정의

구조설계의 일반원칙을 기술하고 있는 ISO 2394<sup>9)</sup>에서는 구조 재료의 기준강도를 특성값(characteristic value)으로 나타낸다. 이러한 특성값은 통계분포로부터 미리 규정한 백분위(percentile)에 해당하는 값으로 정하도록 하고 있다. 이를 콘크리트 압축강도 기호로 나타내면 다음과 같다.

$$f_{ck} = f_{\mu} - z_{\alpha} \sigma \quad (1)$$

여기서,  $f_{ck}$ 는 압축강도의 특성값인 설계기준압축강도,  $f_{\mu}$ 는 평균강도,  $\sigma$ 는 표준편차,  $z_{\alpha}$ 는 표준정규분포함수 값으로  $z_{\alpha} = -\Phi^{-1}(\alpha)$ ,  $\Phi$ 는 표준정규분포함수이다. 이 논문에서는  $z_{\alpha}$ 를 100 $\alpha$  % 백분위수라 한다.

Eurocode에서는 ISO의 개념을 채택하여 압축강도의 특성값을 5% 백분위수로 정하고 있으며,  $z_{0.05} = 1.64$ 를 대입하면 식 (2)와 같다.

$$f_{ck} = f_{\mu} - 1.64 \sigma \quad (2)$$

국내 콘크리트구조기준과 미국 ACI기준에서도 콘크리트 재료의 품질에 관한 요구조건에 통계 개념을 적용하고 있다. 이들 기준에서는 다음 두 요건이 충족되도록 한다. 첫째는 3번의 연속강도 시험의 결과 그 평균값이  $f_{ck}$  이상일 때이며, 둘째는 개개의 강도시험값이  $f_{ck} \leq 35 \text{ MPa}$ 인 경우  $(f_{ck} - 3.5) \text{ MPa}$  이상, 또는  $f_{ck} > 35 \text{ MPa}$ 인 경우  $0.9f_{ck}$  이상일 때이다. 이 규정에 대한 해설에서는, 이러한 규정을 만족하지 않을 확률을 1% 정도라고 하고 있다. 확률 및 통계의 기본 관계식을 적용하여<sup>10)</sup> 이상의 내용을 수식으로 정리하여 표

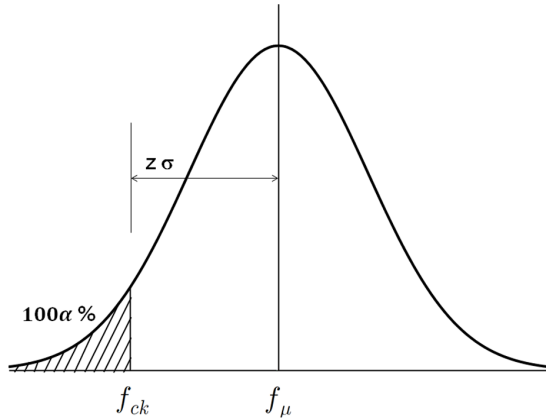


Fig. 1. Relationship between the characteristic value, mean value and standard deviation of concrete strength.

현하면<sup>11)</sup> 첫째 조건은 다음과 같다.

$$f_{ck} = \mu - 1.34\sigma \quad (3)$$

식 (1)에서  $z_\alpha = 1.34$  인 경우이므로, 표준정규분포로부터  $\alpha = 0.090$  이다. 따라서 식 (3)으로 구하는 설계기준강도는 9% 백분위에 해당하며, 일반적으로 10% 백분위로 보고 있다.

둘째 조건은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$f_{ck} = \mu + 3.5 - 2.33\sigma \quad (f_{ck} \leq 35 \text{ MPa}) \quad (4)$$

$$f_{ck} = (\mu - 2.33\sigma) / 0.9 \quad (f_{ck} > 35 \text{ MPa}) \quad (5)$$

## 2.2 평가 기준강도의 통계적 추정

특성값을 정의하는 식 (1)은 일반적으로 대상 시험값의 모든 집합인 모집단(population)에 대한 평균과 표준편차인 모평균  $\mu$ 와 모표준편차  $\sigma$ 로 표시한 값이다. 이와 구분하여, 공용중인 구조물에 대한 평가 과정에서 얻게 되는 강도의 시험값과 같이, 모집단에서 추출한 일부 측정값의 집합인 표본(sample)으로부터 구한 평균과 표준편차는 표본평균  $\bar{x}$ 와 표본표준편차  $s$ 로 표시한다. 제한된 개수의 표본을 추출하여 이를 토대로 모집단의 통계 특성을 추측하는 방법을 통계적 추정이라고 한다.

### 2.2.1 특성값의 추정

제한된 표본으로부터 특성값을 통계적으로 추정하는 방법(이후 CVEM, characteristic value estimation method)은 다음과 같다.<sup>12)</sup>

$$x_k = \bar{x} - k_{\alpha\gamma}(n) s \quad (6)$$

여기서  $k_{\alpha\gamma}$ 는 스튜던트 t-분포(student t-distribution)를 적용하여 구해지는 값으로 표본 개수  $n$ 에 대하여 Table 1과 같이 주어진다. 여기서  $\gamma$ 는 100(1- $\gamma$ )%의 신뢰구간(confidence level)을 나타내며, 주로 75%와 90%를 사용한다.  $\alpha$ 는 2.1절과 같이 백분위를 나타내며, Table 1은 설계기준과 동일한 수준인 10% 백분위에 대한 값을 나타낸다. 이 방법은 ACI 지침<sup>6)</sup>에서 채택하고 있다.

### 2.2.2 평균값의 추정을 통한 특성값 산정

먼저 모평균을 통계적으로 추정한 후에 특성값을 산정할 수도 있다.(이후 MVEM, mean value estimation method) 즉, 모평균의 하한값  $\mu_L$ 은 100(1- $\gamma$ )% 신뢰구간에 대하여 표본표준편차  $s$ 를 이용하면 다음과 같이 추정할 수 있다.<sup>7,10)</sup>

$$\mu_L = \bar{x} - T_\gamma(n) \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (7)$$

여기서,  $T_\gamma(n) = t(n-1, \gamma)$ 로 자유도(degree of freedom)가  $(n-1)$ 인 t-분포의 100(1- $\gamma$ )% 신뢰구간 값이며 Table 1과 같이 주어진다.

이 방법에서는 모표준편차가 알려져 있다고 가정하고 특성값을 다음과 같이 나타낸다.<sup>7)</sup>

$$x_k = \mu_L - z_\alpha \sigma \quad (8)$$

이 방법은 ACI 지침<sup>6)</sup>에서 대안방법으로 채택하고 있다.

## 3. 통계기반 평가 기준강도 산정 예

이상과 같이 통계에 기반하여 정의한 평가기준강도를 산정하는 계산 예를 보이기 위하여 두가지 강도 자

Table 1.  $k_{\alpha\gamma}(n)$  for the 10th percentile (100 $\alpha$ %) and  $T_\gamma(n)$  for 75% and 90% confidence level (100(1- $\gamma$ )%)<sup>13)</sup>

n	$k_{\alpha\gamma}(n)$		$T_\gamma(n)$	
	75%	90%	75%	90%
3	2.50	4.26	0.82	1.89
4	2.13	3.19	0.76	1.64
5	1.96	2.74	0.74	1.53
6	1.86	2.49	0.73	1.48
8	1.74	2.22	0.71	1.41
10	1.67	2.06	0.70	1.38
30	1.48	1.66	0.68	1.32

료를 이용한다. 첫 번째는 비파괴시험을 통한 강도의 시험값을 구하는 과정을 설명한 한국시설안전기술공단<sup>14)</sup>의 가상 예제이다. 두 번째는 한국도로공사와 한국시설안전기술공단에서 국내 교량에 대하여 수행한 정밀안전진단보고서들로부터 수집한 다수의 실측 자료이다.

ACI지침과 콘크리트구조기준 부록에서는 다음과 같은 통계적인 방법을 적용하여 평가기준강도를 나타내고 있다.

$$f_{ca} = \bar{f}_c - \sqrt{(Ks_c)^2 + (Zs_a)^2} \quad (9)$$

여기서  $\bar{f}_c$ 는 평균강도,  $K$ 와  $Z$ 는 시험회수와 신뢰수준에 따른 계수,  $s_c$ 는 시험결과의 표준편차,  $s_a$ 는 강도보정식의 표준편차이다. 편차의 두 번째 항인  $Z$  항은 시험값 보정을 포함하는 항으로 첫 번째 항인  $K$  항에 비하여 값이 작고, 보정을 통하여 강도 시험값이 구하여졌다고 가정하여, 논의의 간편성을 위하여 이 연구에서는 제외하고, 강도의 표준편차  $s$ 만을 이용하여 다음과 같이 나타낸다.

$$f_{ca} = \bar{f}_c - Ks \quad (10)$$

### 3.1 기준강도 추정 계산 예

첫 번째 예제는 Table 2와 같이 코어강도 3개와 코어를 채취한 위치에서의 반발경도 3개 및 추가로 5개의 반발경도 시험값으로 이루어진 가상의 데이터이다. 코어 위치의 반발경도 시험값을 토대로 실무에서 주로 사용하는 추정식들을 적용하여 코어강도와 가장 상관관계가 큰 식을 결정하고, 이로부터 나머지 5개의 반발경도 시험값에 대하여 추산한 강도를 Table 2에 나타내

Table 2. Numerical example of equivalent strength obtained from artificial values of core test and non-destructive test<sup>14)</sup>

No.	Core test (CO)	NDT	Equi. strength	Core & NDT (C+N)
1	24.2	41.0		24.2
2	29.5	49.0		29.5
3	34.1	54.0		34.1
4	-	46.8	28.5	28.5
5	-	44.4	27.4	27.4
6	-	40.5	25.6	25.6
7	-	44.7	27.5	27.5
8	-	53.5	31.7	31.7
mean	29.3			28.6
st. dev.	4.95			3.20
COV	0.169			0.112

었다. 이 표에서 COV는 변동계수(coefficient of variation)라고 하며 표준편차를 평균으로 나눈 값이다.

특성값 추정방법(CVEM)을 적용하면, 식 (6)과 Table 1로부터 평가기준강도  $f_{ca}$ 를 구할 수 있다. 먼저 코어강도 값만으로 된 시험값(이후 CO 시험) 3개를 이용하여 신뢰수준 75%에 대하여 구하면 다음과 같다.

$$f_{ca} = \bar{f}_c - k_{\alpha\gamma}(3)s = 29.3 - 2.50 \times 4.95 = 29.3 - 12.4 = 16.9(\text{MPa}) \quad (11)$$

다음으로 코어강도와 반발경도로부터 추산한 시험값을 합한 시험값(이후 C+N시험)인 총 8개 시험값을 이용하면 다음과 같다.

$$f_{ca} = \bar{f}_c - k_{\alpha\gamma}(8)s = 28.6 - 1.74 \times 3.20 = 28.6 - 5.57 = 23.0(\text{MPa}) \quad (12)$$

위 두 식의 계산과정을 비교하여 보면, 평균강도는 큰 차이가 없으나, 시험값이 3개인 CO시험은 12.4 MPa을 감해주게 되고, 시험값이 8개인 C+N시험은 5.6 MPa을 감하게 되어 최종 평가기준강도 값에 큰 차이가 생긴다. 일반적으로 이 방법을 따르면 시험값의 개수  $n$ 이 작은 경우에는, 표준편차가 작지 않으면 최종 평가기준강도가 매우 낮게 나올 수 있다. 이 예제의 경우에도 평균 강도에 비하여 산출된 평가기준강도의 비율이 신뢰수준 75%와 90%에 대하여 각각 58%, 28% 정도에 머문다. Table 3에 산출된 평가기준강도값을 나타내었으며, 평균값에 대한 비율은 괄호 안에 나타내었다.

다음 방법은 평균값추정(MVEM) 후에, 가정한 변동계수를 가지는 표준편차로 평가기준강도를 산정하는 방법으로 식 (7), (8) 및 Table 1을 이용한다. 식 (8)의 표준편차를 정하기 위하여 이 연구에서는 변동계수를 0.12로 가정한다. 이는 ACI지침에서 사용한 0.13과 유사한 수준이며, 신설 구조물의 콘크리트 통계 자료<sup>11)</sup> 0.06~0.07을 감안하여 가정하였다.

먼저 CO시험을 이용하여 10% 백분위인 평가기준강도를 산정한다.

$$\begin{aligned} \mu_L &= \bar{f}_c - T(3) \frac{s}{\sqrt{3}} = 29.3 - 0.816 \times \frac{4.95}{\sqrt{3}} \\ &= 29.3 - 2.33 = 27.0(\text{MPa}) \\ f_{ca} &= \mu_L - z_{\alpha} \sigma \\ &= 27.0 - 1.28 \times (27.0 \times 0.12) \\ &= 27.0 - 4.15 = 22.9(\text{MPa}) \end{aligned} \quad (13)$$

동일한 방법을 C+N시험에 적용하면,

$$\begin{aligned} \mu_L &= \bar{f}_c - T(8) \frac{s}{\sqrt{8}} = 28.6 - 0.706 \times \frac{3.20}{\sqrt{8}} \\ &= 28.6 - 0.799 = 27.8 \text{ (MPa)} \\ f_{ca} &= \mu_L - z_\alpha \sigma \\ &= 27.8 - 1.28 \times (27.8 \times 0.12) \\ &= 27.8 - 4.27 = 23.5 \text{ (MPa)} \end{aligned} \tag{14}$$

이 방법을 따른 계산과정 식 (13)을 앞의 계산과정 식 (11)과 비교하여 보면, 여기서는 평균값의 하한값을 추정하였으므로 27.0 MPa로 앞의 경우에서 평균값인 29.3 MPa 보다 작은 반면에, 식 (13)에서는 변동계수를 안다고 가정하므로 편차에 대한 불확실성이 줄었다. 무엇보다 COV를 0.12로 가정하여, 실제 0.169보다 작은 값이어서, 추정평균에서 4.15MPa만을 감해주게 되어 평가기준강도는 22.9MPa로 식 (11)의 16.9 MPa 보다 크게 된다. C+N시험의 COV는 0.112로 가정한 0.12와 비슷하여 CVEM 결과와 비슷함을 알 수 있다.

식 (13)과 식 (14)의 결과를 비교하면, 시험값의 개수가 증가한 경우에  $f_{ca}$ 가 22.9MPa에서 23.5MPa로 약간 증가할 뿐이어서 CVEM에 비하여  $n$ 이 증가한 효과가 크지 않다.

90% 신뢰수준에 대하여도 동일한 과정을 따라 평가 기준강도를 산출할 수 있으며, Table 3에 결과를 요약하여 나타내었다.

Table 3으로부터 CVEM은 시험값의 개수  $n$ 이 작은 경우에 평가기준강도 결과 값이 가장 작게 나오며,  $n$ 이 증가할수록 평가기준강도 값의 증가 효과가 크다. 반면에, MVEM은  $n$ 이 작은 경우에도 CVEM보다 큰 값을 주고,  $n$ 이 증가하면 평가기준강도 값은 소폭 증가함을 알 수 있다. 또한, 신뢰수준을 75%인 경우에서 90%인 경우로 증가시키면, 평가기준강도 값이 CVEM에서는 크게 감소하고 MVEM은 소폭 감소함을 알 수 있다.

**Table 3.** Estimation of specified strength for Table 2 (numbers in the parenthesis are the ratio of the estimated value to the mean value)

Sample type	Mean & St. Dev.[MPa]	Confi-dence level	Specified strength estimated, $f_{ca}$ [MPa]		
			CVEM	MVEM	Design Formula
CO N=3	29.3 & 4.95	75%	16.9 (0.58)	22.8 (0.78)	22.7 (0.77)
		90%	8.2 (0.28)	20.2 (0.69)	
C+N N=8	28.6 & 3.20	75%	23.0 (0.81)	23.5 (0.82)	24.3 (0.85)
		90%	21.5 (0.75)	22.8 (0.80)	

참고로 Table 3의 맨 우측에는 식 (3)과 같이 설계기준에서 정의한 수식에 표본평균과 표본표준편차를 대입한 값을 비교하였다. 그러나, 이론적으로는 시험값의 개수가 충분히 큰 경우에만 적용이 가능하며 제한된 개수의 시험값으로 구한 표본평균과 표본표준편차로는 식 (3)에 직접 적용할 수는 없다.

### 3.2 실제 진단 자료의 적용

두 번째 예제는 정밀안전진단 보고서에서 수집한 총 62세트의 실제 진단 자료로 구성한다. 하나의 세트는 하나의  $f_{ck}$ 에 대하여 Table 2와 같이 코어강도와 비파괴시험 값이 있으며, 코어 채취부에서 반발경도 시험을 수행한 보고서들만을 대상으로 자료를 수집하였다. 총 51개의 교량에 대한 정밀안전진단 보고서로부터, 기본적으로 각 교량 보고서에서 한 부재에 관하여 Table 2와 같은 데이터 세트를 하나씩 얻었다. 추가적으로 이들 보고서 중에서 교량의 상부구조와 하부구조 또는 PSC부재와 RC부재를 구분하여 부재들의  $f_{ck}$ 에 대한 시험자료들을 제시하고 있는 경우 11 세트를 추가하여 총 62세트를 대상으로 계산을 수행하였다. 즉, 3.1절을 1개의 예제로 볼 때, 3.2절에서는 서로 독립적인 62개의 예제에 대하여 기준강도를 각각 구하였다. 이 절에서는 75% 신뢰수준에 대한 추정결과만을 나타낸다.

Table 4에 총 62세트에 대한  $f_{ck}$  별로 코어 시험 개수 및 반발경도시험 개수의 구성을 나타내었다.  $f_{ck}$  는

**Table 4.** Number of core test and rebound test for specific compressive strength in field test data

Spec. strength $f_{ck}$ [MPa]	Number of core test	Number of rebound test
18	2	5, 13
	3	19
21	2	1, 4, 4, 8, 9, 9, 11, 11, 13, 18, 23, 25, 32
	3	6, 8, 11, 14, 23
	4	21
	2	4, 9, 12, 13, 14, 15, 15, 19
24	3	2, 2, 3, 7, 7, 7, 8, 9, 9, 9, 10, 12, 13, 20, 21, 22, 22, 24, 25
	4	3, 17, 49
27	5	18
	2	18, 26
28	2	2, 4
	3	6, 22
35	2	12
40	3	34, 47

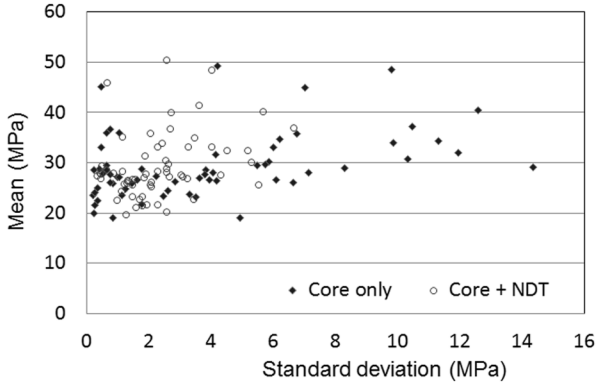


Fig. 2. Mean and standard deviation of 62 sets of compressive strength data obtained from CO data and C+N data.

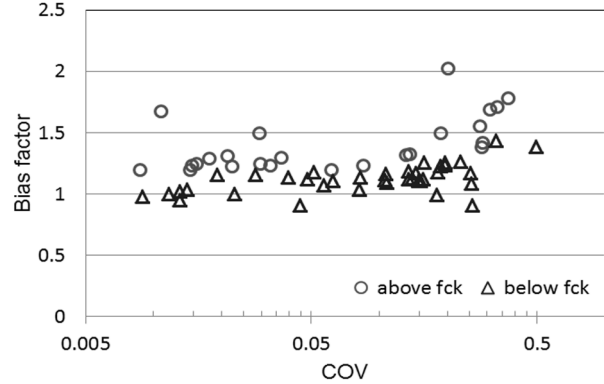


Fig. 4. Estimation of specified strength by MVEM using CO data for 75% confidence level.

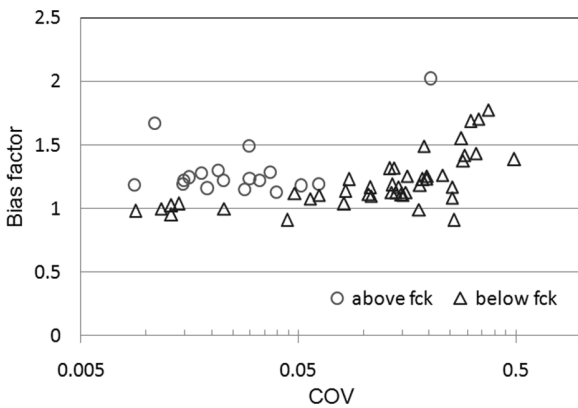


Fig. 3. Estimation of specified strength by CVEM using CO data for 75% confidence level.

21MPa과 24MPa인 경우가 다수이고, 코어는 대부분 2개 또는 3개를 채취하였음을 알 수 있다. 반발경도시험은 주로 25회 이내로 수행하고 있음을 알 수 있다. 여기서 반발경도 시험은 테스트 해머를 20회 정도 타격한 평균을 하나의 시험값으로 하고 있다.

Fig. 2에는 62세트 시험값의 평균과 표준편차를 표시하였다. 이 그림에는 코어강도만을 이용한 경우(CO 시험)와, 코어강도 및 반발경도를 합한 경우(C+N시험)에 대하여 함께 도시하였다. 이 그림으로부터 평균값의 분포 범위(그래프의 위아래 방향)는 두 경우에서 비슷하지만, 표준편차의 범위(그래프의 좌우 방향)는 CO 시험보다 C+N시험이 더 작음을 알 수 있다.

먼저 CO시험을 대상으로 CVEM을 적용하여 기준강도를 구한 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 이 그림은 시험값의 편심계수( $bias\ factor = \bar{f}_c / f_{ck}$ )를 세로축으로, 변동계수 ( $COV = s / \bar{f}_c$ )를 가로축으로 한다. 추정된 평가기준강도가  $f_{ck}$ 를 상회한 경우는 원형 표식으로,  $f_{ck}$ 보다 작게 나온 경우는 삼각형 표식으로 나타내었다. 변동

계수가 작은 구간에 몰려 있는 데이터를 구분하기 위하여 가로축은 로그눈금으로 하였으며, 보조눈금은 처음 구간은 0.005, 다음은 0.05 간격이다. 이 그림에서 변동계수가 0.06 이상으로 편차가 큰 경우에는, 편심계수가 2.02인 한 경우를 제외하고, 모두 평가기준강도가  $f_{ck}$ 보다 작게 추정되어, CVEM에서는 편차가 기준강도 추정에 큰 영향을 미침을 알 수 있다. 이 경우는 18세트만이  $f_{ck}$ 를 상회하는 결과를 얻었다.

Fig. 4는 CO시험만을 대상으로 MVEM을 적용한 결과이다. 이 방법에서는 COV를 0.12로 가정하므로, Fig. 3과 비교할 때 COV=0.12를 중심으로 우측 세트들 중에 편심계수가 1.2보다 큰 몇 개의 세트들에서  $f_{ck}$ 를 상회하는 결과가 나오며, 반대로 좌측 세트들 중에는 편심계수가 1.16 이하인 몇 개의 세트들은 오히려  $f_{ck}$ 보다 작은 값을 얻었다. Fig. 4에서는 20세트만이  $f_{ck}$ 를 상회하는 결과를 얻었다.

C+N시험을 대상으로 MVEM을 적용한 결과는 Fig. 5와 같으며 27세트에서  $f_{ck}$ 를 상회하였다. Table 3에서

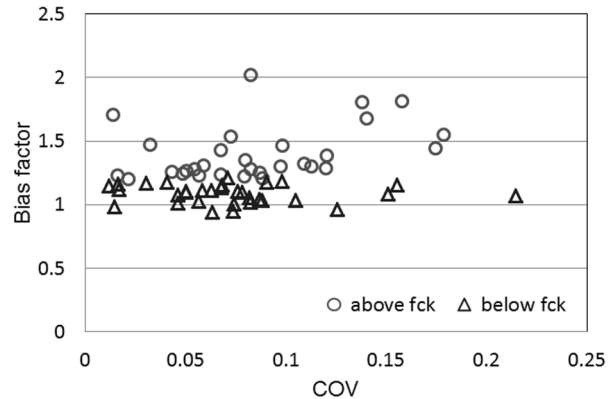


Fig. 5. Estimation of specified strength by MVEM using CO+N data for 75% confidence level.

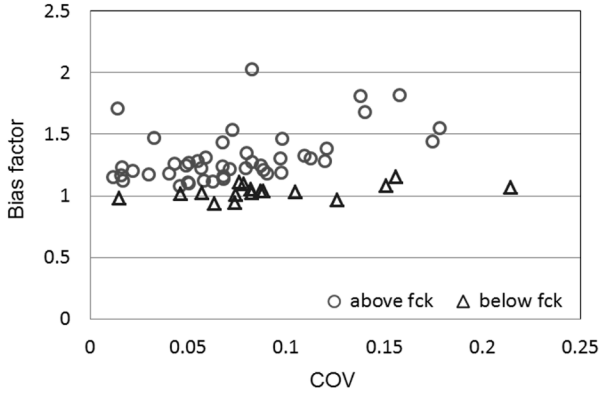


Fig. 6. Estimation of specified strength by CVEM using C+N data for 75% confidence level.

와 같이 MVEM은 C+N시험과 CO시험에서 큰 차이가 나타나지 않았다.

C+N시험에 대하여 CVEM을 적용한 결과는 Fig. 6과 같으며 45세트에서  $f_{ck}$ 를 상회하였다.  $f_{ck}$  미만인 17세트 중에 11세트는  $f_{ck}$ 값의 85%이상의 크기를 얻었으며, 단 2세트만 80% 미만의 결과를 얻었다.  $f_{ck}$ 를 상회하는 45세트 중에 42세트는 Table 4에 나타낸 바와 같이 정밀안전진단보고서에서 수행한 반발경도시험 회수를 그대로 적용한 경우이다. 나머지 3세트는 보고서의 반발경도시험 회수  $n$ 이 각각 1, 2, 6인 경우였으나 이를 4, 7, 14로 가정하면 Table 1의 계수들을 적용하여  $f_{ck}$ 를 상회하는 값을 얻을 수 있었다.  $f_{ck}$  미만인 모든 세트에도  $n$ 을 증가시켜 보았으나 추가로 상회하는 경우는 없었다. Fig. 6을 보면  $f_{ck}$  이하로 되는 경우들은 편심계수가 1에 가까운 경우, 즉, 시험값의 평균이 기준강도와 거의 같은 경우들이므로, 평균에서 편차 항을 빼면 기준강도 이하로 되는 경우들이다. 이와 같이 평균강도가 크지 않은 세트들은 시험 회수를 증가시켜도  $f_{ck}$ 를 상회하기가 힘들다.

#### 4. 결론

이 논문에서는 공용중인 콘크리트 구조물의 안전성 평가를 위하여 사용되는 콘크리트 기준강도에 대한 통계적 정의를 정리하고, 실무에서 적용할 수 있는 산정 절차를 검토하였다. 이를 통하여 공용중인 구조물의 평가를 위한 기준강도의 정의가 신설 구조물에 대한 설계기준의 기준강도와 부합할 수 있도록 도모하였다.

이 연구에서는 특성값을 통계적으로 추정하는 방법(CVEM)과 평균값을 추정한 후 변동계수를 상수로 가정하고 특성값을 구하는 방법(MVEM)을 적용하였다.

통계방법의 논리적인 관점에서는 CVEM은 통계적 추정과정에 충실하며, MVEM은 시험값의 표준편차를 나타내는 변동계수 값을 구조물별 강도시험과는 무관하게 상수로 가정한다는 단점이 있다.

CVEM을 현장 안전진단 자료에 적용한 결과를 보면, 코어시험 개수가 대부분 2 내지 3개에 불과하여 기준강도 값이 비현실적으로 작게 나왔다. Fig. 3을 보면 총 62세트의 시험 사례 중에 18세트인 29%만 설계기준강도 이상을 얻게 되므로 코어시험으로만 CVEM을 적용하기는 실무적으로 어렵다. 이 연구에서 제한한 코어 시험과 반발경도 시험을 합하여 시험 개수를 증가시키는 경우에는 Fig. 6과 같이 73%의 시험에서 설계기준강도 이상의 값을 얻을 수 있었다. 설계기준강도 이하의 값이 나오는 시험들은 코어 시험 평균값이 기준강도와 거의 같은 경우들이므로 향후 개선의 여지가 있다. 여기에서 코어시험과 반발경도 시험을 합하는 경우에는 반드시 코어 위치에서의 반발경도시험과 추가로 동일한 부재 내에서 수행한 반발경도 시험값을 사용하여야 한다.

MVEM은 표준편차를 나타내는 변동계수를 일정한 값으로 가정함에 따라, 3.1절의 예제와 같이 시험에서 얻은 변동계수보다 작은 값이 가정되는 경우에는 큰 값의 평가기준강도를 얻게 되어, 불안전측 결과를 초래할 수 있다. 따라서 변동계수 가정 값의 근거에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

이 연구에서는 일반 구조물에 주로 적용하는 신뢰수준 75%에 대하여 중점적으로 논의하였다. 중요 구조물에 적용하는 신뢰수준 90%로 기준강도를 추정하게 되면, 낮은 값이 나올 가능성이 있으므로 이에 대하여는 추후 보다 심도 있는 연구가 필요하다.

이 연구를 통하여, 코어 강도 시험값의 개수가 제한됨으로 발생하는 문제를 보완하기 위하여 현장에서 수행하고 있는 비파괴시험을 강도 추정 과정에 적용하는 가능성을 검토하여 합리적인 수준의 값을 얻을 수 있음을 확인하였다.

#### References

- 1) CEN, "Eurocode : Basis of structural design", European Committee for Standardization, pp. 31-35, 2002.
- 2) FIB, "Model Code 2010 Volume 1", the International Federation for Structural Concrete, pp.110, 2010.
- 3) KCI, "Concrete Design Code and Commentary", Korea Concrete Institute, pp. 46-53, 522-525, 2012.
- 4) MLTM, "Concrete Standard Specification", Korea

- Ministry of Land, Transportation and Maritime Affairs, pp. 33-35, 2009.
- 5) ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318M-08) and Commentary", American Concrete Institute, pp. 64-74, 2008.
  - 6) ACI, "Guide for Obtaining Cores and Interpreting Compressive Strength Results (ACI 214.4R-03)", American Concrete Institute, pp. 9-12, 16, 2003.
  - 7) F. M. Bartlett and J. G. MacGregor, "Equivalent Specified Concrete Strength from Core Test Data", Concrete International, pp. 52-58, 1995.
  - 8) AASHTO, "The Manual for Bridge Evaluation", 2nd ed., American Association of State Highway and Transportation Officials, pp. 6-33, 2011.
  - 9) ISO 2394, "General Principles on Reliability for Structures", International Organization for Standardization, Switzerland, pp. 12, 26-29, 1998.
  - 10) W. Kim, J. J. Kim and B. U. Park, "Modern Statistics", 4th ed. Youngji, pp. 128-179, 1998.
  - 11) I. Paik, C. S. Sim, Y. S. Jeong and H. J. Sang, "Statistical Properties of Material Strength of Concrete, Re-Bar and Strand Used in domestic Construction Site", Journal of Concrete Institute, Vol. 23, No. 4, pp. 421-430, 2011.
  - 12) J. O. Madsen, S. Krenk and N. C. Lind, "Methods of Structural Safety", Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, N.J., pp. 38-41, 1986.
  - 13) M. Natrella, "Experimental Statistics", Handbook No. 9, National Bureau of Standards, United States Government Printing Office, Washington, pp. T-5, T-14, 1963.
  - 14) KISC, "Non-Destructive Test Manual for Concrete and Steel", Korea Infrastructure Safety Corporation, pp. 27-29., 2006.