

## 강원지역 레미콘의 계절별 평균압축강도의 통계특성 분석

### Analysis of Measured Mean Compressive Strength of Ready-Mixed Concrete by Season in Gangwon Area

윤 경 구\*      박 인 정\*\*      홍 영 호\*\*\*  
Yun, Kyong-Ku      Park, In-Jung      Hong, Young-Ho

#### Abstract

In this study the compressive strength data were collected from ready-mix concrete plants, and the analysis result showed that when using A-D test the concrete of 24MPa is suitable than that of 21MPa for normal distribution. The prediction formula for average compressive strength were proposed to  $f_{cu} = f_{ck} + 4(MPa)$ . When comparing the proposed equations and existing relationship, the estimation variations of elastic modulus and creep modulus were not significant. The proposed equation confirmed that there was no effect to the influence function for modulus of elasticity and creep. Therefore, it was concluded that the proposed equation could replace the exiting interaction formula.

키워드 : 압축강도, 통계특성, 정규분포

Keywords : compressive strength, statistical property, normal distribution

#### 1. 서론

콘크리트는 온도에 따른 품질변동이 큰 재료로서 타설 후 소요의 품질을 확보하기 위해 계절특성 파악 및 콘크리트 주위의 온·습도를 적절한 범위로 유지시켜 유해한 작용을 받지 않도록 주의해야 한다. 특히, 강원도 지역과 같이 계절변화로 인해 온도차이가 극심하게 발생하는 경우 각종 균열의 발생, 콘크리트의 품질불량, 강도저하 등 다양한 문제를 일으키므로 콘크리트표준시방서에서는 하루 평균기온 4℃이하인 동절기와 25℃이상인 하절기 콘크리트 타설시에는 특별한 조치를 취하도록

규정하고 있다.

강원도 지역의 하절기의 경우 높은 대기온도의 영향으로 콘크리트의 수화열이 증가하여 운반 중의 슬럼프 Loss발생, 연행공기량 감소, 건조수축균열, 온도균열 등으로 인하여 콘크리트의 압축강도 저하가 발생할 수 있고, 동절기의 경우 차가운 대기온도로 인한 수화반응 지연현상이 압축강도 저하의 주된 원인이 된다. 또한, 영동과 영서간의 동일계절별 기온차가 심하여 같은 배합비를 사용하여도 압축강도의 편차가 발생하여 지역 간의 불균형이 일어나게 된다.

콘크리트의 압축강도는 콘크리트의 품질을 평가하는 데 가장 널리 쓰이는 기본적인 요소로 골재의 크기와 모양, 공기량, 양생조건, 하중재하시간 등 여러 조건에 따라 영향을 받는다. 이 조건들은 많은 불확실성을 내포하고 있으므로 콘크리트의 압축강도는 변동성을 갖고 있는 확률변수로 고려되어야 한다. 콘크리트 설계기준은 저항을 결정하

\* 강원대학교 토목공학과 교수

\*\* 강원대학교 토목공학과 산업대학원 석사과정

\*\*\* 강원대학교 대학원 토목공학과 석사과정, 교신저자

는 콘크리트 등 재료의 통계적 특성, 구조물의 기하학적 특성등과 하중의 변동성을 고려하여야 하며, 각 국가 및 지역의 특성을 반영하여야 한다 [11]. 그러나 국내 설계기준의 경우 설계기준강도 ( $f_{ck}$ ), 평균압축강도( $f_{cu}$ )의 관계식은 미국 및 유럽의 설계기준과 유사한 형태를 따르며, 국내 설계기준이 정립될 당시에는 콘크리트의 실제 강도를 측정할 수 없었으므로 그 추정값을 이용하여 설계기준강도에 8MPa을 더한 값을 취하도록 설계하였다. 그러나 과거 설계기준식의 제안을 위해 사용한 재료에 비해 현재 콘크리트 타설 환경이 많이 바뀌었고, 외국과 국내의 환경적 요인의 차이가 있을 것으로 판단된다. 국외의 설계기준식의 경우 국내 생산된 콘크리트의 실험 자료가 반영되지 않은 것이므로 우리나라 실정에 맞지 않는다고 할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 강원도 지역 레미콘의 평균압축강도 자료를 이용하여 지역적, 계절적 인자들이 평균압축강도에 미치는 영향을 설계기준강도와 평균 압축강도와의 관계를 통계적 특성에 따라 분석하고, 압축강도의 지역별, 계절별 통계 분석 및 선행연구에서 검증된 통계적 특성을 검증하였으며, 이를 바탕으로 국내 제조환경을 고려한 콘크리트의 설계기준강도-평균압축강도의 적합한 관계식을 도출하고자 하였다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 확률분포모델

연속형 확률변수는 확률밀도함수로 그 특성을 설명하고 식 (1)과 같이 표현되고, 누적분포함수는 식 (2)와 같다.

$$P(a < X \leq b) = \int_a^b f_x(x) dx \quad (1)$$

$$F_X(x) = P(X \leq x) = \int_{-\infty}^x f(\tau) d\tau \quad (2)$$

본 논문에서 사용된 대표적인 연속형 확률분포 모델로는 정규분포를 주로 이용했다.

### 2.2 정규분포

평균  $\mu$ 와 분산  $\sigma^2$ 을 가지는 정규확률변수  $X$ 의 확률분포의 확률밀도함수는 식 (3)을 통해 표현된다.

$$f_X(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right\} \quad (3)$$

$,-\infty < x < \infty$

평균이 0이고 표준편차가 1인 정규확률분포를 표준정규확률분포(standard normal distribution)이라고 하며, 식 (4)는 이때의 확률밀도함수를 나타

낸다.

$$f_X(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\left(\frac{1}{2}\right)x^2\right\} \quad (4)$$

$,-\infty < x < \infty$

모든 정규변수는 식 (5)에 보인 변수 변환을 통해 표준정규변수로 변환할 수 있다.

$$s = \frac{x-\mu}{\sigma} \text{ and } dx = \sigma ds \quad (5)$$

평균은 같고 표준편차가 다른 정규분포에 대한 확률밀도함수곡선이 그림 1에 나타나 있다. 정규분포의 확률밀도함수곡선은 곡선의 아랫부분의 면적의 합이 1이 되어야 하므로 자료들의 편차가 클수록 곡선의 높이가 낮고 넓어진다는 것을 알 수 있다. 또한 평균이 다르면 중심위치가 변화한다.

대부분의 확률변수들은  $\mu$ 와  $\sigma^2$ 이 알려지면 확률분포가 정확하게 알려지지 않은 확률변수에 대하여 정규분포로 적절하게 가정하게 된다. 그림 2는 정규분포의 누적분포함수의 경향성을 나타내주는 그래프이다. 대부분의 확률변수들은  $\mu$ 와  $\sigma^2$ 이 알려지면 정규분포로 적절하게 가정하게 된다.

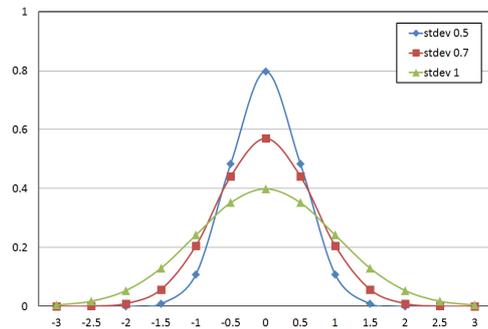


그림 1 정규분포의 확률밀도함수

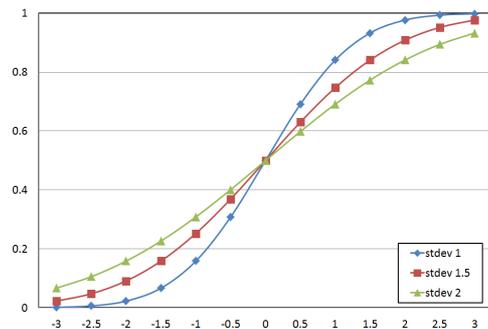


그림 2 정규분포의 누적분포함수

## 2.2 모멘트법

확률분포모델은 확률분포모델의 형태, 확률밀도 함수 또는 누적분포함수뿐 아니라 그 모델을 구성하는 매개변수의 영향을 받으므로, 매개변수를 결정하는 방법과 적절한 확률분포모델의 형태를 결정하는 것이 실제적인 중요성을 갖는다[9]. 확률분포모델은 실제 관측 자료 또는 실험 자료에 기초하여야하는데, 매개변수는 통계적 추정(statistical estimation)에 의하여 결정하여야하며, 적합한 분포의 형태에 대한 추론(inference)이 이루어져야한다. 본 연구에서 사용한 매개변수의 결정 방법은 점추정법이다.

크기가  $n$ 인 표본 집단의 표본평균과 표본분산은 식 (6)과 식 (7)을 이용하여 구할 수 있다.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (6)$$

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (7)$$

$\bar{x}$ ,와  $s^2$ 는 각각 모집단의 평균( $\mu$ )와 분산( $\sigma^2$ )에 대한 점추정값이다. 식 (7)의 제곱항을 전개하면 식 (8)와 같다.

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \left( \sum_{i=1}^n x_i^2 - n\bar{x}^2 \right) \quad (8)$$

## 2.3 Anderson-Darling(A-D) test

확률분포모델을 가정하고 검증하는 방법은 크게 2가지로 나뉜다. 하나는 확률지를 이용하여 육안으로 확인하는 방법과 적합도 검정(goodness-of-fit test)을 이용하는 방법이 있는데, 전자에 비해 후자가 더욱 정확한 확률분포모델의 가설을 검증하는 방법이다.

본 연구에서 검증법으로 사용한 방법인 A-D test는 경험적 누적 분포함수를 기초로 한 검정 방법으로 분포의 높은 값과 작은 값들의 확률분포 검증에 효과적이다. A-D test의 방법은 식 (9)을 사용하여  $F_X(x_i)$ 를 구하고 이를 이용하여 A-D 통계량( $A^2$ , 식 (10))을 계산하여 이에 상응하는 p-값을 ( $\alpha(1-\alpha)$ : 유의수준)와 비교한다.(김우철, 1993; Ang, 2007).

$$F_X(x_i) = \Phi\left(\frac{x_i - \bar{x}}{s}\right) \quad (9)$$

$$A^2 = -\sum_{i=1}^n \left[ \frac{(2i-1) \{ \ln F_X(x_i) + \ln [1 - F_X(x_{n+1-i})] \}}{n} \right] \quad (10)$$

여기서  $\bar{x}$ 는 평균이고  $s$ 는 표준편차이다.

p-값은 가설 검정에서 귀무가설의 기각 적합성을 확인하는데, 검정 통계의 p-값이  $\alpha$ 보다 작을

경우 귀무가설을 기각한다. 즉, p-값이 선택한 유의수준  $\alpha$ 보다 작으면, 자료가 특정 분포를 따르지 않는다는 결론을 내린다. p-값은 측정된 검정통계량의 값이 유의하게 되는 최저수준이다.

## 3. 자료의 수집 및 통계특성 분석

### 3.1 자료의 수집

콘크리트의 자료는 콘크리트의 압축강도의 확률분포모델을 작성하고, 콘크리트의 압축강도와 탄성계수 간의 관계식을 도출하기 위하여 2009-2011년에 걸쳐 강원도내 18개 시·군에 레디믹스트콘크리트제조업체의 설계기준강도 21MPa 및 24MPa의 콘크리트 압축강도의 자료를 수집하였다. 레미콘 시험실로부터 수집한 자료는 지역별 평균압축강도 통계특성과 동일하게 설계기준강도( $f_{ck}$ ) 21MPa과 24MPa에 대하여 각각 1,228개와 1,202개로 총 2,430개의 자료를 수집하였다. 수집한 자료의 평균압축강도의 평균과 표준편차는 표 1과 표 2를 통해 설계기준강도별로 정리하였다.

표 1 지역별 평균과 표준편차( $f_{ck}$  21MPa)

Region	$f_{ck}$ 21MPa		
	Number of data	Mean (MPa)	Standard deviation
강릉	177	25.23	1.480
동해	118	24.75	0.871
삼척	177	25.07	1.261
양구	22	24.98	0.521
양양	33	25.09	1.034
영월	86	24.57	1.132
인제	65	24.76	1.118
정선	59	26.81	0.854
철원	127	25.25	0.963
춘천	124	25.60	0.861
태백	30	25.11	0.667
평창	27	24.02	0.678
홍천	68	25.58	1.128
화천	62	24.38	0.621
횡성	67	25.02	1.332

표 2 지역별 평균과 표준편차( $f_{ck}$  24MPa)

Region	$f_{ck}$ 24MPa		
	Number of data	Mean (MPa)	Standard deviation
강릉	169	28.35	1.961
동해	118	28.34	0.871
삼척	169	29.06	1.650
양구	25	29.01	1.230
양양	27	28.17	1.539
영월	88	28.35	1.206
인제	65	27.69	1.409
정선	61	27.99	0.873
철원	119	29.62	2.106
춘천	126	29.02	0.966
태백	29	28.29	3.937
평창	27	27.42	0.686
홍천	68	29.24	1.031
화천	59	27.73	0.752
횡성	69	27.56	1.227

### 3.2 자료의 통계적 특성 분석

계절별 평균압축강도는 자료의 계절적 상관성을 알아보기 위해 12월부터 2월은 winter로, 3월부터 5월은 spring으로, 6월부터 8월은 summer로, 9월부터 11월은 fall로 설정하였다. 설계기준강도 21MPa 및 24MPa를 모두 만족하고, 계절별 평균압축강도는 큰 폭의 차이를 보이지 않고 있지만, 공통적으로 설계기준강도 21MPa 및 24MPa 모두에서 겨울기간에서 평균압축강도의 최저수치를 나타낸다. 이는 강원도지역의 계절적 특성상 하루 평균온도가 4°C 이하로 떨어지는 시기가 25°C 이상으로 올라가는 시기보다 길기 때문에 이러한 형태의 그래프가 나타난 것이라 판단된다. 따라서 우리나라의 남부지역을 대상으로 계절적 평균압축강도를 구하여 자료를 보정할 필요성이 있다. 각 지역별 압축강도는 설계기준강도 21MPa와 24MPa를 모두 만족하지만 지역에 따른 큰 상관성은 나타나지 않았다.

### 3.3 변동계수 및 편중계수

국내 연구의 경우에는 주로 외국의 자료를 이용하였다[2][7].

대개 변동계수(coefficient of variation, c.o.v.)는

5.0~19.0%, 편중계수(bias factor)는 1.08~1.20의 범위를 보였다. ACI Committee 214에서 품질관리 수준을 같은 배치에서 변동계수가 4~5%에 포함되면 Good control, 5~6%에 포함되면 Average control, 6%를 초과하면 Poor control로 규정하고 있다(ACI, 2002). 표 3은 국내외 연구의 변동계수의 결과치를 나타낸 것이다.

표 3 변동계수에 대한 국내·외 문헌결과

Region	Reference	COV
국내	시상광, 2000	0.18
	신경호, 2010	0.02-0.14
	백민희, 2011	0.073 - 0.0065
국외	Mirza, S.A., 1979	0.20
	Israel, M., 1987	0.18
	Nowak, A.S., 2003	0.04 - 0.12

본 연구에서 콘크리트 압축강도의 편중계수 및 변동계수는 표 4에 명시하고 있다. 변동계수의 경우 설계기준강도가 21MPa의 경우에 0.046, 24MPa의 경우에 0.059로 품질관리 기준에 Good control로 판단된다. 편중계수는 21MPa와 24MPa에서 각각 1.19, 1.36로 나타났다. 기존의 자료의 경우 설계기준강도에 따른 강도가 증가할수록 편중계수가 감소하는 것을 보인다. 그러나 본 연구의 강도가 증가할수록 편중계수가 증가하는 반대의 결과를 보인다. 이는 기존의 자료에 비해 강도의 편차가 커져 변동계수 수치의 차이가 보이는 것으로 판단된다.

표 4 변동계수 및 편중계수 결과

설계기준강도(MPa)	Bias factor	c.o.v.
21	1.19	0.046
24	1.36	0.059

### 3.4 정규분포곡선 분석 및 적합성 검증

그림 3과 그림 4는 레미콘 회사의 자료를 설계기준강도별 히스토그램과 정규분포모델의 확률밀도함수를 도시한 것이다. 수집된 자료의 히스토그램과 설계기준강도의 영향을 배제하기 위해 사용한 설계기준강도와 실제 압축강도의 비( $f_{cu}/f_{ck}$ )를 이용하였다. 히스토그램과 정규분포 확률밀도함수 곡선은 그래프상에서 알 수 있듯이 비슷한 추세로 도시된다. 그림 3과 그림 4의 히스토그램은 정규분포로 가정한 확률밀도함수곡선과 비슷한 추세를 보이는 것으로 분석된다. 그러나 확률밀도함수 곡선의 추세는 비슷하나 그래프 횡축의 수치적 차이

가 있는 것을 볼 수 있다. 이는 그림 4 24MPa자료의 분산정도가 그림 3의 21MPa자료의 분산정도보다 큰 것을 볼 수 있다. 즉 설계기준강도 21MPa인 경우 자료값들의 차이가 적다고 해석할 수 있다.

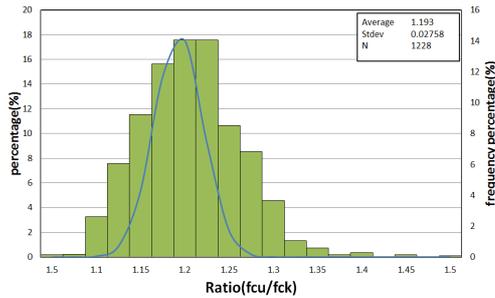


그림 3 히스토그램 및 정규분포곡선(21MPa)

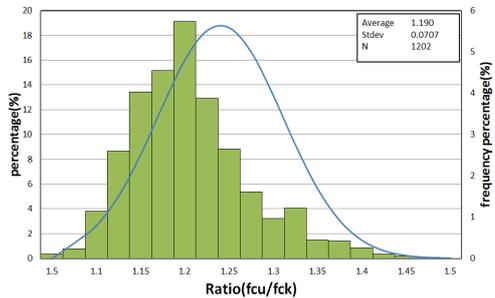


그림 4 히스토그램 및 정규분포곡선(24MPa)

본 연구에서는 수집된 자료의 정규분포 적합성 판정을 위해 A-D Test를 실시 하였다. 표 5는 국내에서 정규분포의 적합성을 위해 실시한 결과이다[6].

표 5 정규분포의 적합성 검증에 대한 국내 결과

$f_{ck}$ (MPa)		A-D Test p-value
Field	21	0.005 미만
	24	
	27	
	30	
	35	
	40	
Laboratory	45	0.008
	60	0.119
	24	0.218
	30	0.047
	40	0.215
	50	0.834
	60	0.909

표 6은 본 연구의 자료를 설계기준강도에 따른 A-D Test의 결과값을 제시한 것이다. A-D Test 값은 설계기준강도 21MPa에 비해 24MPa이 매우 큰 값을 보인다. 이는 정규확률지의 선형성에 관련이 있는 것으로 보인다. 정규확률지가 선형을 따를수록 A-D Test 값이 작은 것을 볼 수 있다.

표 6 설계기준강도별 A-D Test의 p-value값

$f_{ck}$		A-D Test p-value
Ready-Mixed	21MPa	0.005 미만
	24MPa	

그림 5와 그림 6은 설계기준강도 21MPa와 24MPa를 확률지에 도시하고 확률밀도함수의 95% 신뢰구간을 표시한 것이다. 두 확률지를 보면 99%이상의 신뢰구간의 경우 21MPa는 비슷한 선형이 나타나지만 24MPa는 신뢰구간에 벗어나는 것으로 나타난다. 그러나 전체적으로 선형성을 보이고 정규분포 또한 부합하는 것으로 보인다. 이는 95% 신뢰구간으로 정확히 판단 할 수 있다.

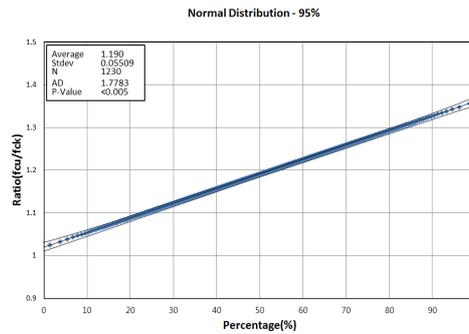


그림 5 정규 확률지(21MPa)

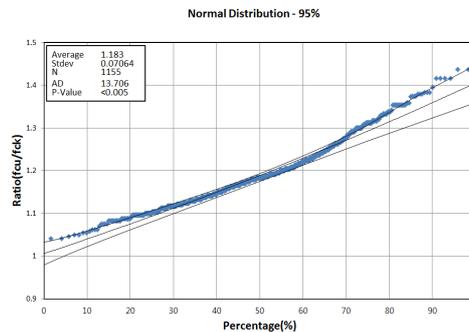


그림 6 정규 확률지(24MPa)

### 3.5 평균압축강도식 제안 및 적합성 검증

EC2에서 규정하고 있는 재령 28일에서의 평균 압축강도는 식 (11)로써 Rüschi(1969)에서 얻은 수식이다. 이는 KCI에서 사용하는 수식과도 동일하며 이는 크리프 변형 및 처짐 등을 예측하는 경우보다 실제 값에 가까운 값을 구하기 위해 이용한다.

$$f_{cm} = f_{ck} + 8[MPa] \quad (11)$$

Shenck(2005)는 설계기준강도 50MPa이하에서 보통강도콘크리트 표준편차의 95% 분위값을 상수로 하는 관계식을 식 (12)와 같이 제안하였다.

$$f_{cm} = f_{ck} + 6[MPa] \quad (12)$$

본 논문에서는 설계기준강도 21MPa과 24MPa에 대한 설계기준의 규정에 따른  $f_{cu}$  을 도출하였으며 KCI와 Shenck 이외의 제안식을 이용해 결과를 비교하였다. 제안식은 식 (13)과 같다. 이는 표 7에 제시하고 있다. 표 8은 표 7에서의  $f_{cu}$  와 실제 콘크리트 압축실험값  $f_{cu}'$  의 오차를 분석하고 있다.

$$f_{cm} = f_{ck} + 4[MPa] \quad (13)$$

표 7 설계기준식과 제안식에 따른  $f_{cu}$  값

$f_{ck}$	$f_{cu}'$	KCI/EC2	Shenck	Proposed
		$f_{ck} + 8$	$f_{ck} + 6$	$f_{ck} + 4$
21	25.05	29	27	25
24	28.57	32	30	28

표 8  $f_{cu}$  값과  $f_{cu}'$  의 오차 비교

$f_{ck}$	$f_{cu}'$	KCI/EC2	Shenck	Proposed
		$f_{ck} + 8$	$f_{ck} + 6$	$f_{ck} + 4$
21	25.05	3.946	1.946	-0.054
24	28.57	3.435	1.435	-0.565

식 (12)는 가중평균을 구하는 식으로써  $x_i$  는 각 강도별 오차,  $n_i$  는 각 강도별 자료의 수, N은 전체 자료의 수이다.

$$M = \left( \frac{\sum (x_i^2 \times n_i)}{N} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (14)$$

식 (14)를 이용하여 구한 가중평균값은 표 9에

정리하였다.

표 9  $f_{cu}$  값과  $f_{cu}'$  의 오차의 가중평균 비교

KCI/EC2	Shenck	Proposed
$f_{ck} + 8$	$f_{ck} + 6$	$f_{ck} + 4$
3.70	1.71	0.40

### 3.6 탄성계수 및 크리프에 미치는 영향

콘크리트의 탄성계수는 구조요소의 변형 특성에 관여하는 중요한자이다. 일반적으로 압축강도의 함수로 표시하며, 각 국가별 함수의 형태 및 변수에 있어 약간 차이를 보인다. 탄성계수의 식은 식 (15)의 형태를 보이며, 표 10은 탄성 계수의 변수를 각 국가의 규정별로 정리한 것이다. 식 (15)에서 a는 상수 값이며, 압축강도의 지수 b의 값은 각 국가의 기준별로 구별되며, 국내 콘크리트구조 설계기준과 유럽 콘크리트설계기준인 CEB-FIP에서는 1/3을 EC2에서는 0.3을 ACI에서는 1/2을 제안하고 있다.

$$E_c = a \cdot f_{cu}^b \quad (15)$$

표 10 각 기준의 탄성계수

Code	a	b	
KCI	8,500	1/3	
ACI318	$f_{cu}' < 21MPa$	4,700	1/2
	$f_{cu}' \geq 21MPa$	$E_c = 3,320 \sqrt{f_{cu}'} + 6.9$	
CEB-FIP	8,482.5	1/3	
EC2	11,026	0.3	

본 논문에서는 기준압축강도의 지수로 1/2과 1/3을 제시해 비교하였다. 관계식으로 나타낸 것이 식 (16)와 식 (17)인데, 지수를 1/2로 택하는 경우 실제로 콘크리트의 압축강도가 증가할수록 같은 정도로 탄성 계수가 증가하지는 않았다. 이는 ACI에서 21MPa 이상의 콘크리트에 대하여 별도의 관계식을 제안하고 있는 것과 같은 경향을 보이며, Noguch등의 연구에서도 콘크리트의 압축강도 수준과 무관하게 일반적으로 사용할 수 있는 관계식에서 지수를 0.3~0.4의 범위로 제한한 것보다 유사하다[10].

또한, 실험 자료의 상관계수 값을 비교하여도

지수를 1/3으로 택한 것이 더 큰 값을 보이고 있다. 따라서, 콘크리트의 압축강도와 탄성계수의 관계식으로서 압축강도의 크기와 무관하게 식 (17)을 사용할 수 있을 것으로 판단된다.

$$E_c = 8,680 \sqrt[3]{f_{cu}} \quad (16)$$

$$E_c = 4,630 \sqrt[3]{f_{cu}} \quad (17)$$

그림 7은 평균압축강도와 활선탄성계수를 회귀분석한 그래프이다. 일반적으로 구조해석에 사용되는 탄성계수 값은 활선탄성계수이므로 그 값을 각 설계기준에 따라 비교하는 것이 일반적이다. 본 연구의 평균압축강도 자료의 활선탄성계수와 비교하면 EC2의 식은 상대적으로 큰 탄성계수 값을 보이며, ACICode는 상대적으로 작은 값을 보인다.

우리나라설계기준인 KCI는 유럽콘크리트 구조물 설계기준인 CEB-FIPCode의 식과 비슷한 추세를 보인다.

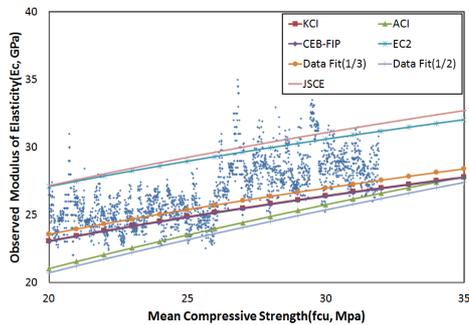


그림 7 평균압축강도와 활선탄성계수의 회귀분석 및 비교

평균압축강도는 크리프 변형률 계산에도 영향을 미친다. 일반적으로 크리프 변형률은 다음의 식 (18)과 식 (19)을 이용해 구한다.

$$\varepsilon_{cr}(t, t') = f_c(t') \left[ \frac{1}{E_{ci}(t')} + \frac{\phi(t, t')}{E_{ci}} \right] \quad (18)$$

$\varepsilon_{cr}(t, t')$  : 시간 t일에서의 전체변형률  
 $\phi(t, t')$  : 재령 t일에서의 크리프 계수  
 $E_{ci}$  : 재령 28일에서의 콘크리트 초기접산탄성계수

$$\phi(t, t') = \phi_{RH} \beta(f_{cu}) \beta(t') \beta(t-t') \quad (19)$$

$\phi_{RH}$  : 위기의 상대습도와 부재두께가 미치는 영향계수  
 $\beta(f_{cu})$  : 콘크리트 강도가 크리프에 미치는 영향함수  
 $\beta(t')$  : 시간 t'가 크리프에 미치는 영향함수  
 $\beta(t-t')$  : 재하기간에 따라 크리프에 미치는 영향함수

이때, 강도가 크리프에 미치는 영향함수  $\beta(f_{cu})$

는 평균압축강도로 구하고 식 (20)과 같다.

$$\beta(f_{cu}) = \frac{16.8}{\sqrt{f_{cu}}} \quad (20)$$

식 (20)을 이용하여 영향함수  $\beta(f_{cu})$ 를 구한 결과는 다음의 표 11과 그림 8에 정리하였다. 그 결과 본 논문에서 제안한 평균압축강도 식을 이용하여 구한 값과 KCI, Shenck와 제안식의 평균압축강도를 이용해 구한 값을 그래프를 이용해 비교했을 때, 선형의 비슷한 경향으로 그려지는 것을 확인할 수 있었다. 크리프에 미치는 영향함수는 KCI가 가장 작고 제안식을 이용한 값이 가장 크게 나타났다. 따라서 기존 평균압축강도 설계기준식을 제안식으로 대체하여 사용하여도 크리프를 구하는 식에는 영향을 미치지 않을 것으로 판단된다.

표 11 크리프에 미치는 영향함수  $\beta(f_{cu})$

$f_{ck}$	KCI	Shenck	Proposed
21	3.12	3.23	3.36
24	2.97	3.07	3.17
27	2.84	2.92	3.02
30	2.73	2.80	2.88
35	2.56	2.62	2.69
40	2.42	2.48	2.48
45	2.31	2.35	2.35
50	2.21	2.24	2.24

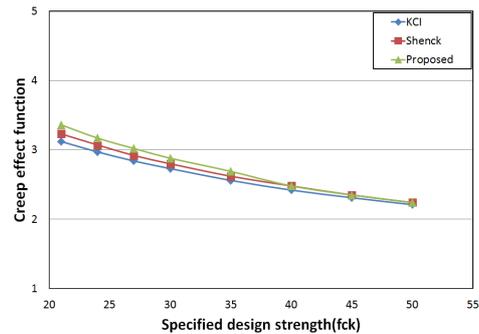


그림 8 영향함수 비교그래프

#### 4. 결론

강원도내 지역별 레미콘 평균압축강도를 설계기준강도별로 비교 분석한 결과 설계기준강도별 비슷한 경향을 보이지만 지역적 큰 차이를 찾을 수 없었다. 이는 강원도라는 한정된 지역의 자료를 분석하였고, 지역별 자료의 수와도 관련이 있을 것이

라 판단된다. 따라서 지역 및 장기간에 걸쳐 자료를 수집하고 분석이 필요하다. 계절별로 분석한 결과는 겨울에 강도의 발현이 다른 계절에 비해 떨어짐을 확인 할 수 있었다. 이는 설계기준강도별 공통적인 경향으로 보이고 있었으며 겨울이외의 계절의 평균압축강도의 차이는 미미했다. 따라서 강원도내 겨울지역의 레디믹스트 콘크리트의 품질 관리가 필요하다고 판단된다.

수집한 강원도내 레디믹스트 콘크리트의 평균압축강도의 확률분포는 정규분포에 적합하다고 판단되고, 변동계수의 경우 설계기준강도별로 Good control이라 판단되고, 편중계수는 강도가 증가할수록 편중계수가 증가하는 경향을 보인다.

정규분포의 적합성 검증의 경우 확률지에 도시한 경우 95% 신뢰구간에 대체적으로 만족하였고, A-D Test값의 p값은 기존의 자료와 동일한 결과를 얻을 수 있었고, A-D Test값은 24MPa이 21MPa보다 크게 나타나 설계기준강도 24MPa이 21MPa보다 정규분포에 가깝다고 판단할 수 있다.

평균압축강도 제안식의 경우 강원도내 평균압축강도 제안식 오차의 가중평균 계산 결과 기존의 관계식보다 작은 오차값을 보여 강원도 지역적 특성에 더욱 적합한 식이라 판단된다. 영향 함수를 이용한 크리프계수에 대한 평가도 기존의 관계식에 큰 차이를 보이지 않아 강원도 지역 설계기준강도는 대체하여 사용해도 무관하다.

탄성계수의 제안식의 경우, 회귀 분석을 통한 제안식 검증에서 강원도 평균압축강도의 자료와 가장 유사한 선형성을 보인다.

따라서 기존에 사용되고 있는 설계기준강도의 식은 국내의 지역적, 기후적 특성에 맞게 보정하여 설정에 맞는 설계기준강도법 및 탄성계수 최적화된 제안식을 수정 할 필요성이 있다.

### 참 고 문 헌

[1] 김상효, 배규웅, 박홍석, “철근콘크리트 부재 강도의 확률적 특성 분석”, *한국콘크리트학회 논문집*, 제3권, 제4호, pp.117-123, 1991.

[2] 김상효, 조형근, 배규웅, 박홍석, “구조물의 신뢰성에 관한연구: 고정하중, 적재하중 및 풍하중하에서의 R.C. 건물”, 한국건설기술연구원 중간보고서, 한국건설기술연구원, 1998.

[3] 김지상, 신정호, 최연왕, 문재흠, “콘크리트 역학적 성질의 통계적 특성”, *한국콘크리트학회 2008년 가을학술대회 논문집*, Vol.20, No.2, pp.657-660, 2008.

[4] 김지상, 신정호, 문재흠, 김주형, “철근콘크리트용 봉강의 역학적 성질의 통계적 특성”, *한국콘크리트학회 2009년 봄학술대회 논문집*, Vol.21, No.1, pp.429-430, 2009.

[5] 대한토목학회 · 교량설계핵심기술연구단, *도로교설계기준해설*, 기문당, 2008.

[6] 백민희, “콘크리트의 설계기준강도와 평균압축강도의 관계에 관한 연구”, 석사학위논문, 서경대학교 대학원, 2011.

[7] 시상광, 박문호, 김상진, “철근 콘크리트 슬래브교의 설계규정 평가”, *대한토목학회 논문집*, Vol.20, No.2-A, pp.321-332, 2000.

[8] ACI Committee 214, Evaluation of Strength Test Results of Concrete(ACI 214R-02), American Concrete Institute, 2002.

[9] Ang, Alfredo H-S and Tang Wilson H., *Probability Concepts in Engineering*, John Wiley & Sons, NJ, 2007.

[10] Takafumi Noguchi, Fuminori Tomosawa, Kamran M. Nemati, Bernardino M. Chiaia, and Alessandro P. Fantilli, 2009.

[11] Nowak, A. S. and Szerszen, M. M., “Calibration of Design Code for Buildings (ACI 318): Part 1-Statistical Models for Resistance”, *ACI Structural Journal*, Vol.100, No.3, pp.377-382, 2003.