

현장타설 콘크리트 압축강도의 확률적 분석

Statistical Study on Compressive Strength of Field-Cast Concrete

김 상 효* 배 규 응**
Kim, Sang Hyo Bae, Kyu Woong

요 약

철근콘크리트부재의 강도는 여러가지 요인으로 인하여 변이를 보이고 있다. 주요 요인들은 콘크리트나 철근의 강도 및 역학적 특성의 변이, 시공오차등이다. 이들중 콘크리트의 강도는 상대적으로 높은 불확실성을 가지며, 다양한 요인(배합, 운반, 타설, 양생등)에 의해 변화정도가 영향을 받는다.

본 연구에서는 국내 철근콘크리트 구조물이 가지는 신뢰도의 수준을 분석하기 위한 기초자료 조사를 위하여, 현장에서 타설되는 콘크리트를 설계강도별로 직접채취하여 습윤양생과 현장조건양생을 통하여 콘크리트의 28일 압축강도의 확률적 특성을 분석하였다. 분석된 결과를 이용하여 현장타설 부재내에서의 콘크리트의 압축강도를 추정하였다.

ABSTRACT

It is widely recognized that the strength of reinforced concrete members has characteristics of random variations due to the variability of the mechanical properties of concrete and steel, the dimensional error as well as incorrect placement of reinforcing bars. In those sources of randomness, variations in concrete strength may be the one affecting the strength of R. C. members most.

The concrete strength is usually assumed to have large uncertainty due to the variations in many factors, such as material properties, proportions of the concrete mix, methods of mixing, transporting, placing and curing, etc.

In this study, the random characteristics inherent in the strength of field-cast concrete have been examined based on the data collected by testing standard cylinders made of field-cast concrete and cured under in-situ condition.

1. 서 론

철근콘크리트 구조물의 강도(또는 저항력)는 여러가지 요인에 의해 변이를 보이고 있다. 주요 요인들은 콘크리트와 철근의 강도 및 역학적 특성의 변이, 부재단면의 오차, 배근위치

의 오차등이다. 이들중 콘크리트의 강도는 상대적으로 매우 높은 불확실성을 가지며, 다양한 요인에 의해 변화정도가 영향을 받는다. 불확실성의 요인이 되는 사항들을 살펴보면,

- 골재, 시멘트등의 기본재료의 품질 변화
- 배합비의 변화

* 정회원, 한국건설기술연구원 구조연구실 수석연구원,

** 정회원, 한국건설기술연구원 구조연구실 연구원

● 1989. 9. 2 접수. 본 논문에 대한 토론을 1990. 6. 30까지 본학회에 보내주시면 1990. 9월호에 그 결과를 게재해 드립니다.

- 배합, 운반 및 타설방법
- 양생과정

등이다. 이외에도 실제 구조물내에서의 콘크리트 강도는 실험공시체의 결과와는 타설 및 양생의 차이, 부재 크기의 영향등에 의해 현실적으로 차이를 가지고 있다.

이들 요인을 살펴보면 콘크리트 강도는 품질관리수준에 많은 영향을 받는다는 것을 알 수 있다. 실제로 Bloem(1)의 연구결과에 의하면 동일품질의 콘크리트도 우수한 수준의 양생을 거친 부재에 대해 아주 일반적인 양생을 거친 부재에서의 강도는 75-85% 수준이다. 기본재료의 품질변화에 의한 강도변이는 동일한 배치내에서 나타나는 변이로 부터도 알 수 있다. 즉 동일배치에서 제작한 공시체 압축강도는 일반적으로 0.5-8.1%의 변이계수(coefficient of variation)를 가지며(2), 3.6%의 평균치를 가지는 것으로 나타났다. 물론 이 변이의 요인에는 실험방법(실험기기, 재하속도등) 및 효율적인 혼합여부에 따른 영향도 포함한다.

현장타설 콘크리트강도의 변이는 전체적으로 볼 때, 품질관리의 수준에 따라 10-20%정도이다. 캐나다에서 조사한 결과로는 공장타설(precast)인 경우 12%, 공장배합 현장타설(ready-mix in-situ concrete)인 경우 15%, 현장배합 현장타설(site-mix in-situ concrete)인 경우 18%의 변이계수를 보여주고 있다(2). Tso(3)의 조사에서도 8-13%의 변이를 보이고 있다. 또한 앞에서 설명하였듯이 평균강도도 변화하는데 MacGregor(4)는 Mirza(2)의 조사결과에 기초하여 공칭 압축강도 3000psi, 4000psi, 5000psi에 대하여 실제 구조물내에서의 압축강도 평균을 각각 92%, 85%, 81%로 취하고 있다.

2. 계획배합강도

콘크리트 강도의 불확실성은 두가지로 분리

하여 생각할 수 있다. 즉 재료의 특성상 제거가 불가능한 변이(inherent variability)와 세밀한 품질관리를 통해 어느정도 제거할 수 있는 변이로 구분할 수 있다. 따라서 콘크리트 구조물의 해석에서는 어느정도의 강도변이는 예상하여야 하며, 이러한 특성 때문에 시방서에서도 배합설계시에 공칭 설계강도로 부터 적절한 수준의 안전치를 주고 있다.

건축공사 표준시방서에서는 보통 품질의 콘크리트에 대하여 계획배합강도를 다음과 같이 결정하도록 하고 있다.

$$f_d \geq f_c + T + \sigma \quad (\text{kg/cm}^2) \quad (1)$$

$$\text{또는, } f_d \geq 0.7(f_c + T) + 3\sigma \quad (\text{kg/cm}^2) \quad (2)$$

여기에서

f_d = 콘크리트의 설계배합강도

f_c = 콘크리트의 설계기준강도

σ = 레디믹스트 콘크리트에 있어 동일한 콘크리트에 대한 공장에서의 표준편차

T = 콘크리트 타설후 28일 동안의 예상평균기온에 의한 보정값

이며, 계획배합강도는 위의 두 식에서 큰 값으로 결정된다. 참고로 미국 ACI318-83에 제시되어 있는 계획 배합강도 결정방법을 살펴보면,

$$f_d > f_c + 1.34\sigma \quad (\text{psi}) \quad (3)$$

$$\text{또는, } f_d > f_c + 2.33\sigma - 500 \quad (\text{psi}) \quad (4)$$

의 두식에서 큰 값을 취하며, 표준편차의 값이 결정되어 있지 않은 경우에는

$$f_d = f_c + 1000 \quad \text{for } f_c < 3000\text{psi}$$

$$f_d = f_c + 1200 \quad \text{for } 3000\text{to}5000\text{psi}$$

$$f_d = f_c + 1400 \quad \text{for over } 5000 \text{ psi}$$

(5)

에 의해 배합강도를 결정한다.

대한 건축학회에서 1988년에 제정한 극한강도설계법에 의한 철근콘크리트 구조계산 규준에서도(3)-(5)식에 준하는 기준을 채택하고

있다.

3. 조사 및 실험방법

현장타설 콘크리트 수집은 서울 및 경인지역의 11개 건축공사 현장에서 1989년 6월부터 9월까지 실시하였다. 채취한 콘크리트는 설계강도 180, 210, 240kg/cm² 등으로 210kg/cm² 강도가 널리 사용되고 있는 관계로 가장 많다. 채취횟수는 한 현장당 타설층수별로 2-3회로 전체 25회이며, 제작공시체는 5개 기본단위로 100조(500개)이다. 이들중 현장조건양생이 64조, 습윤양생이 36조인데 습윤양생조는 현장조건양생조와 항상 같은 레미콘에서 제작하여 그 결과를 비교할 수 있도록 하였다. 한 레미콘차량에서는 각 1조만 제작하였다. 채취한 콘크리트의 생산레미콘회사는 모두 8개사이었다.

공시체 제작용 콘크리트는 현장에서 발생할 수 있는 요인을 가능한 모두 고려하기 위하여, 콘크리트 펌프차동에 의해 타설부위까지 운반된 콘크리트를 채취, 사용하였다. 채취된 위치는 지상1층에서부터 지상14층까지 고투 분포되어 있다. 공시체는 현장작업인 관계로 규격 $\phi 10 \times 20$ cm를 1회용 플라스틱 몰드를 이용하여 한국공업규격(KS F 2404)에 준하여 제작하였다. 제작된 공시체는 외부 환경에 영향을 비교적 안받는 장소(현장창고 등)로 옮겨 24시간 양생한 뒤, 실험실로 운반하여 습윤양생 및 현장 조건양생을 실시하였다. 습윤양생은 한국공업규격(KS F 2404)에 준하여 실시하였다. 현장조건양생은 공시체 제작후 습윤양생조와는 달리 콘크리트 표면을 공기에 그대로 노출시켰으며, 실험실에 운반한 후에도 실험실내에서 습기가 닿지 않도록 하였다.

압축강도 실험은 28일 강도를 대상으로 한국공업규격(KS F 2405)에 준하여 실시하였는데, 재하속도 매초 2.5kg/cm²를 유지하도록 하였다.

4. 실험결과 및 비교 분석

〈표 1〉에는 현장조건으로 양생된 공시체의 압축강도 실험결과가 정리되어 있다. 이 결과는 1조 5개의 공시체중에서 각 조별 평균값 근처의 3개 결과만을 정리한 것이며, 5개 모두를 이용한 결과는 팔호속에 정리되었다. 표에서 보다시피 그 차이는 매우 작아 무시할 정도이다.

본 연구에서 선정한 현장조건양생 방법의 양생수준을 검토하기 위해 습윤양생 공시체와 현장조건양생공시체의 실험결과를 비교한 것이 〈표 2〉에 정리되어 있다. 현장 對 습윤의 비는 공칭강도에 따라 약간의 차이를 가지나 전체적으로 습윤양생 대비 92%의 수준이다. 이는 Bloem(1)의 실험에서 양호한 현장조건양생(job cylinder)결과 91%와 매우 잘 일치된다. 따라서 본 연구의 현장조건양생은 매우 좋은 양생조건으로 분류될 수 있다.

〈표 1〉에서 현장조건양생 콘크리트의 공칭강도 대비는 공칭강도가 증가함에 따라 96,86, 83%로 줄어드는 것을 알 수 있는데, 이는 다른 연구결과(4)와 같은 경향이다. 전체적으로는 공칭강도 대비 89%이며, 현재 건축구조물 공사에서 가장 많이 사용되는 공칭강도 210kg/cm²에 있어서는 86%수준으로 외국의 조사결과와 비교해 낮은 수준이다. 〈표 2〉의 습윤양생 공시체의 압축강도도 공칭강도 대비 95%수준이다. 이는 건축공사 표준시방서나 미국 ACI 318-83등에 제시되어 있는 계획 배합강도와 비교할 때 매우 낮은 수준이다. 이러한 결과의 정확한 원인은 보다 철저한 분석이 필요하겠지만 가장 큰 원인은 현장작업자가 콘크리트 타설의 편이를 위해 다량의 가수를 한 것과 펌프타설관을 통과하면서 발생하는 강도저하 요인의 영향인 것 같다. 이러한 영향을 분석하기 위하여 한 현장에서 레미콘이 도착한 후 바로 채취한 시료로 공시체를 제작하여 본 연구에서 실시한 결과와 비교하였다. 설계

표 1 현장조건 양생 공시체 실험결과

단위 : kg/cm²

공칭강도 f_n		180	210	240	전 체
평 균	f_c/f_n	96.1	85.8	82.9	88.8
	(%)	(96.1)	(85.8)	(83.1)	(88.9)
	f_c	173	180	199	—
변 이		0.21	0.10	0.16	0.17
계 수		(0.21)	(0.10)	(0.16)	(0.17)
표 본 수(조)		22	29	13	64

표 2 양생조건에 따른 압축강도 비교

단위 : %

공 칭 강 도		f_c / f_n		현 장	표 본 수 (조)
		습 윤	현 장	습 윤	
180		89.5	85.3	95	8
210		97.4	87.8	90	21
240		95.2	88.7	93	7
전 체	평 균	95.2	87.4	92	36
	변이계수	0.12	0.11		

표 3 제작위치에 따른 강도변이(현장양생)

채취위치 공칭강도	B-5 층	6-10 층	11-15 층	전체
180	—	97 (14)	95 (8)	96 (22)
210	86 (18)	84 (5)	85 (6)	86 (29)
240	93 (7)	68 (3)	79 (3)	83 (13)
전체	88 (25)	90 (22)	89 (17)	89 (64)

* 공칭강도대비(%) * (): 제작량(조)

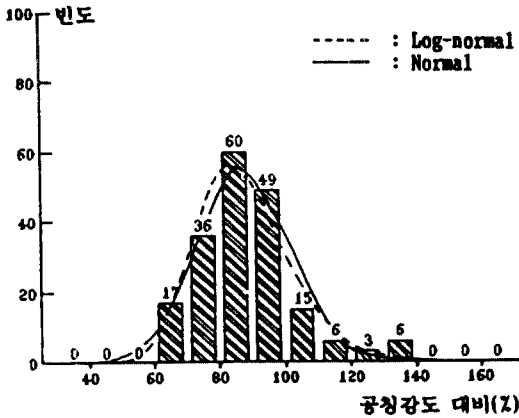


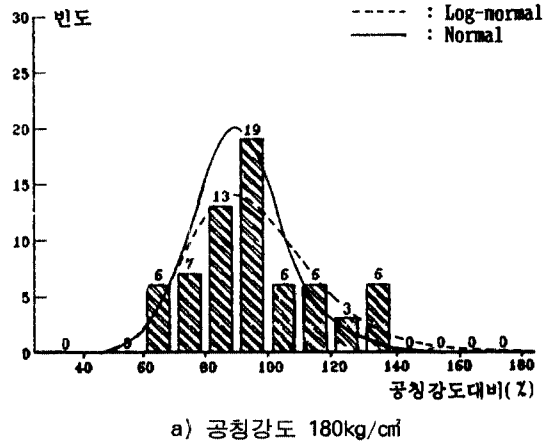
그림 1 현장조건양생 공시체의 28일 압축강도 분포도(전체)

강도 210kg/cm²에 대하여 레미콘에서 채취, 습윤양생한 공시체는 238kg/cm²(3개 공시체 평균), 일상적인 가수후 타설부위에서 채취, 습윤양생한 경우 193kg/cm², 현장조건 양생의 경우 158kg/cm²이 나왔으며, 다른 1조의 경우 각각 231kg/cm², 168kg/cm² 및 159kg/cm²가 나왔다.

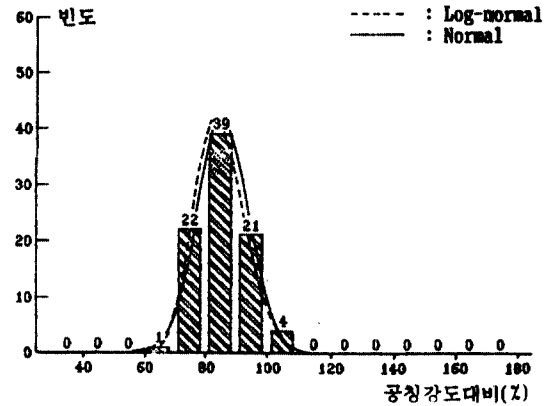
〈표 3〉에는 펌프타설관을 통과하면서 발생하는 강도저하를 분석하기 위하여 현장양생 공시체의 압축강도를 채취위치(층수)에 따라 분류하였다. 240kg/cm²강도를 제외하고는 별다른 영향을 보이지 않고 있다. 그러나 240kg/cm²강도의 경우, 매우 현저한 강도저하가 나타나고 있으므로 특별한 주의를 요한다. 물론 제작 공시체의 양이 매우 작아 정확한 결론을 내리기에는 무리가 있다.

변이계수는 〈표 1〉에 정리되어 있듯이 현장 조건 양생공시체 전체에 있어 17%로 이는 Mirza(2)의 조사결과에 의하면 공칭강도 4000psi(약 280kg/cm²)이하에서 보통의 품질관리 수준에 해당한다. 그러나 특이한 것은 공칭강도 210kg/cm²에 있어 변이계수가 0.10으로 상대적으로 매우 작다. 참고문헌(5)에서도 이와 비슷한 결과가 조사되어 있다.

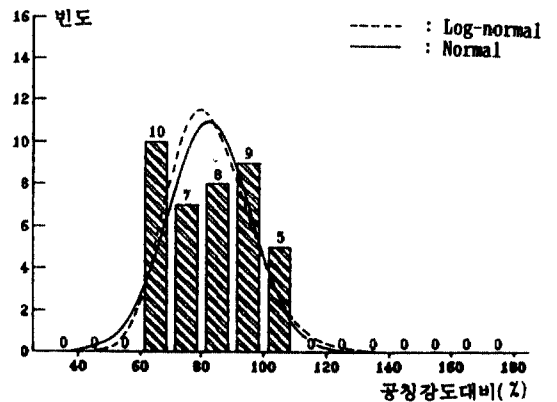
습윤양생을 실시한 36조 전체에서의 변이계



a) 공칭강도 180kg/cm²



b) 공칭강도 210kg/cm²



c) 공칭강도 240kg/cm²

그림 2 현장조건양생 공시체의 28일 압축강도 분포도(공칭강도별)

수(표2)는 0.12로 현장조건양생전체(64조)에 대한 변이계수 0.17보다 작으나, 습윤양생에 대응하는 현장조건양생 36조의 변이계수(0.11)와는 매우 비슷한 수준이다.

〈그림 1〉은 현장조건양생 공시체의 압축강도 분포도(각조당 3개, 전체)이며, 정규분포(normal distr.)와 대수정규분포(lognormal distr.)의 이론치와 비교되어 있다. 외국의 연구(2)에서는 정규분포로 모형화한데 반하여 본 조사결과에서는 전반적으로 대수정규분포가 적합한 것으로 나타났다. 확률분포의 종류에 따른 철근콘크리트 부재강도의 영향은 참고문헌 8에 분석되어 있다.〈그림 2〉는 콘크리트 공칭강도별 분포도이다.

분포도를 살펴보면 전체 조사대상(그림 1)에서 공칭강도를 초과하는 경우가 전체 192개 공시체중에서 30개(16%)에 불과하다. 이들도 대부분 공칭강도 180kg/cm²의 공시체에서 나타났으며, 공칭강도 210kg/cm²의 경우에는 채취공시체 87개 중 4개(5%)만이 공칭강도를 초과하고 있으며, 공칭강도 240kg/cm²에서도 39개중 5개(13%)만이 공칭강도보다 큰 값을 가지고 있다. 물론 이 결과는 습윤양생이 아닌 현장조건 양생공시체의 실험결과이지만, 앞에서 분석한 바와 같이 현장조건양생 강도 대 습윤양생 강도가 전반적으로 92% 정도인 것과 앞에서 언급한 계획배합강도가 공칭강도의 120% 이상의 수준이어야 한다는 점을 감안할 때 이는 매우 우려되는 결과이다. 즉 현장조건 양생공시체의 강도가 공칭강도 대비 110%의 수준은 되어야 함에도 불구하고, 공칭강도 210과 240kg/cm²의 공시체에서는 전부 이에 미달하고 있으며, 공칭강도 180kg/cm²에서만 15개(23%)가 110%를 초과하는 것으로 나타났다. 그러나 여기에서 공칭강도 180kg/cm²에서는 변이계수가 크기 때문에 요구되는 계획배합강도도 높아져야 한다는 것을 고려하여야 한다.

〈표 1〉에 정리되어 있는 결과로부터 실제 현장타설 콘크리트 구조물에서의 콘크리트 강

도를 추정해 볼 수 있다. Bloem(1)의 실험결과를 분석하면, 잘 양생된 부재에서의 강도는 양호한 현장조건양생 공시체의 압축강도의 93% 수준이며, 일반적인 현장의 조건(비교적 불량)에서 양생된 부재의 경우는 76% 정도이며, 평균적으로 85% 수준이다. 참고로 Petersons은 보통수준의 현장양생에 대하여 90%를 추정하였다(참고문헌(2) 참조). 이를 이용하여 정리한 결과가 〈표 4〉이다.

전반적으로 65% - 80%의 수준으로 MacGregor(4)가 공칭강도 3000psi에 대해 추정한 92%와 비교할 때 매우 낮은 수준이며, 강도 210kg/cm²에서 평균수준의 현장양생을 가정하여도 공칭강도 대비 72.8%로 MacGregor의 92%보다 약 20%가량 작다. 그러나 Bloem(1)은 일반적인 현장양생조건이 〈표 4〉의 불량에 가까운 것으로 분석하고 있으므로 이 경우에는 더욱 낮은 강도를 가지게 된다. 본 결과를 ACI 318에서 최대 압축강도로 허용하는 0.85f_c와 비교하여도 10% 이상 강도가 떨어지는 것을 알 수 있다.

MacGregor(4)도 공칭강도가 증가함에 따라 평균압축강도가 작아지는 것으로 분석하였다. 즉 4000psi(280kg/cm²)에 대하여 85%, 5000psi(350kg/cm²)에 대해서는 81%를 취하였다.

현장타설부재의 콘크리트 압축강도의 변이계수도 공시체 압축강도의 변이계수보다는 약간 커지는 것으로 분석되고 있다. Mirza(2)에 의하면 현장타설부재에서의 변이계수는 표준양생된 공시체 압축강도의 변이계수와 다음과 같은 관계식을 가진다.

$$\delta^2 = \delta_{cm}^2 + 0.0084 \quad (6)$$

본 조사에서는 주로 현장조건양생을 실시하였다. 그러나 〈표 2〉에 정리되어 있듯이 같은 레미콘에서 채취하여 서로 다른 조건(습윤 및 현장)으로 양생한 36개조의 결과는 서로 비슷한 변이계수(0.12와 0.11)를 보이고 있다. 따라

표 4 양생수준에 따른 현장타설 구조물의 콘크리트 압축강도

단위 : kg/cm²

공 칭 강 도	현장조건양생 공시체의강도	현장의 양생수준		
		불 량	평 균	양 호
180	173 (96.1)	131 (73.0)	147 (81.7)	161 (89.4)
210	180 (85.8)	137 (65.1)	153 (72.8)	167 (79.7)
240	199 (82.9)	151 (63.0)	169 (70.5)	185 (77.1)
전 체	— (88.8)	— (67.5)	— (75.5)	— (82.6)

() : 공칭강도 대비(%)

서 (식 6)에 <표 1>의 조사대상 전체에 대한 변이계수 0.17을 적용하면 $\delta = 0.19$ 로 MacGregor(4)가 3000psi(210kg/cm²)에 대해 분석한 0.18과 매우 비슷하다. 강도별로 분석하면 공칭강도 180, 210, 240kg/cm²에 대하여 각각 0.23, 0.14, 0.18이다. 참고로 MacGregor(4)도 5000psi(350kg/cm²)강도에 대하여는 변이계수 0.15를 취하였다.

이상에서 분석한 결과는 공시체 $\phi 10 \times 20$ cm의 실험결과로서 표준공시체($\phi 15 \times 30$ cm)에 대한 보정치(0.97)를 고려하지 않았다. 따라서 이를 고려할 경우 약 3%의 강도저하가 있게 된다.

5. 결 론

본 현장타설 콘크리트 압축강도 실험의 분석결과는 다음과 같이 정리할 수 있다.

- 1) 현장조건양생 공시체의 28일 강도는 설계강도 대비 83-96%의 수준으로 설계강도가 높아질수록 비율이 떨어진다. 전체적으로는 설계강도대비 89%의 수준이다.
- 2) 이에 기초하여 현장타설 구조물내에서의 콘크리트 강도를 추정해 보면 설계강도

대비 65-80%의 수준이며, 일반적인 경우 70%수준이다. 이는 다른 연구(4)에서 추정하는 92%와 비교하여 매우 낮은 수준이며, ACI에서 제한하는 최대 압축강도 $0.85f_c$ 와 비교하여도 매우 낮은 수준이다.

- 3) 습윤양생 공시체의 28일 강도도 설계강도대비 95%의 수준으로 건축공사 표준시방서에서 제시하는 계획배합강도에 비해 매우 낮은 수준이다.
- 4) 압축강도 변이계수는 공시체 압축강도에서는 0.17이며, 현장타설부재에서는 0.19로 다른 조사결과와 유사하다.
- 5) 확률분포는 대수정규분포가 적합한 것으로 분석된다.
- 6) 콘크리트가 현장에 운반된 뒤의 품질관리가 압축강도에 많은 영향을 미치므로 세심한 주의를 요한다.

참고문헌

1. Bloem, D. L., "Concrete Strength in Structures", ACI Journal, March, 1968, pp. 176-187.
2. Mirza, S. A., and MacGregor, J. G.,

- “Statistical Descriptions of Strength of Concrete”, ASCE, Vol. 105, No. ST6, June, 1979, pp. 1021–1037.
3. Tso, W. K. , and Zelman, I. M. , “Concrete Strength Variation in Actual Structures”, ACI Journal, Dec. 1970, pp. 981–988.
 4. MacGregor, J. G. , Mirza, S. A. , and Ellingwood, B. , “Statistical Analysis of Resistance of Reinforced and Prestressed Concrete Members”, ACI Journal, May–June, 1983, pp. 167–176.
 5. 한국건설기술연구원, “구조물의 신뢰성에 관한 연구”, 중간보고서, 1988.
 6. Campbell, R. H. and Tobin, R. E. , “Core and Cylinder Strengths of Natural and Lightweight Concrete”, ACI Journal, April, 1967, pp. 190–195.
 7. Ellingwood, B. , et al. , “Development of a Probability Based Load Criterion for American National Standard A58”, NBS SP 577, U. S. Department of Commerce, June, 1980.
 8. 한국건설기술연구원, “구조물의 신뢰성에 관한 연구”, 최종보고서, 1989.