

비파괴 검사에 의한 콘크리트 구조물의 강도평가

EVALUATION & ASSESSMENT OF NDT RESULTS IN EXISTING CONCRETE CONSTRUCTION

權 英 雄
(仁川大 教授 工學博士)

1. 서 언

콘크리트 구조물의 강도평가를 하는 목적은 시방서(specification : 구조계산서)상의 강도를 충족시키고있는나 하는 판단기준과 콘크리트의 균질성(uiformity)를 알아보고자 하는데 있다.

실제로 시공중이거나 사용되고 있는 구조물에 있어서 구조체의 사용성이나 안정성에 대하여 우려가 생기게 될 경우에도 해석적 방법이나 재하시험을 통하여 구조적인 강도 평가를 내리기에 앞서 구조체의 콘크리트 강도를 구하는 것은 선행작업으로 널리 행해지고 있다.

지금까지 많은 콘크리트 학자들은 실존 콘크리트 구조물로 부터 그 강도를 구하려는 노력을 끊임없이 하여 왔으며 이는 콘크리트 공학의 발전과 더불어 계측기술이나 자료처리방법의 개발로 거의 사실에 가까운 구조체의 강도를 추정하기에 이르렀다.

특히 본 연구에서는 실존하는 콘크리트 구조물로 부터 강도를 추정하기 위해 여러 비파괴 시험법이 널리 행해지고는 있으나, 현실적으로 이들의 결과를 처리하는 방법이 없거나 미숙하기 때문에 전체구조물의 강도 평가가 거의 불

가능한 실정이어서 매우 중요한 문제점으로 대두되고 있다. 더우기 국내적으로는 신도시의 부실시공 사건을 비롯하여, 행주대교의 붕괴, 청주 우암아파트 화재 사건 등, 크고 작은 건물과 교량등이 사용성의 차원을 넘어 붕괴라는 안정성문제가 끊임없이 대두되고 있어 사전에 비파괴 시험법에 의한 실존 콘크리트 구조물의 강도를 추정할 필요성은 그 어느때 보다도 절실히 요구된다 하겠다.

그래서 지금까지 개발된 비파괴기법을 철근 콘크리트 구조물에 응용시키는 것을 정리하면 <표 1>과 같다.

2. 비파괴 검사의 강도특성

2. 1 일반사항

우리가 비파괴 시험을 통하여 얻으려고 하는 목적은 콘크리트의 품질을 확보/조절/평가하기 위함이다. 품질이 보증되는 콘크리트란, 첫째, 구조물에 걸리는 하중을 지탱할 수 있어야 하고, 둘째, 성능저하가 없어야 하며 마지막으로 구조물에 사용되었을 때 목적하는 바의 기하학적 형상을 안정되게 유지할 수 있어야 한다. 현실적으로 콘크리트 구조물의 강도를 측

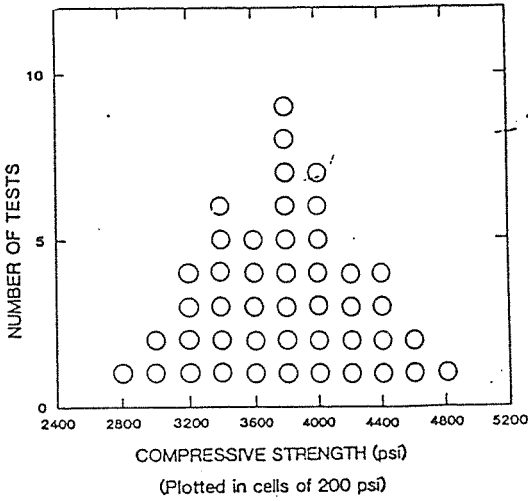
<표 1> 철근 콘크리트 구조물의 비파괴 기법의 적용

콘크리트의 성질	우선 적용시험법	적용 가능 시험법
강도	1. 관입시험법 2. 슈미트햄머 시험법 3. 인방시험법 4. 초음파 속도 시험법	
품질관리	2. 관입시험법 2. 슈미트햄머 시험법 3. 초음파 속도 시험법 4. 감마선 시험법	1. 초음파 잔향 시험법
피복두께		1. 레이더 추적 시험법 2. 감마선 시험법 3. 초음파 잔향 시험법
강성	1. 초음파 속도 시험법	1. 재하시험
밀도	1. 감마선시험법 2. 초음파 속도 시험법	1. 뉴트론 밀도 계측 시험법
철근 굵기 철근 위치	1. 피복 측정기 2. 감마선 시험법	1. X-선 시험법 2. 초음파 잔향 시험법 3. 레이더 추적법 4. 온도 기록법
철근의 부식	1. 전기 전위법 2. 전기 저항법	
공극조사	1. 음향 충격법 2. 감마선 시험법 3. 초음파 속도 시험법	1. 온도 탐사법 2. X-선 시험법 3. 초음파 잔향 시험법 4. 레이더 추적법
구조물의 일체성	1. 재하 시험법	1. 음향 재하 시험법

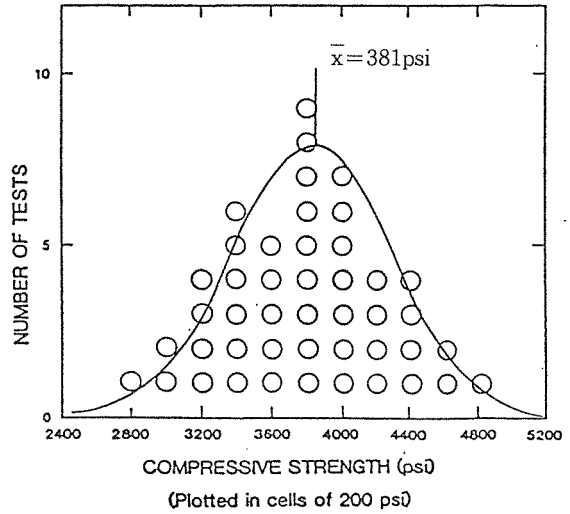
정하는 비파괴 시험법이 상당수 존재하고 있기 때문에 이들의 결과로부터 콘크리트 구조물의 내구성이나 마모성, 형태성 등의 콘크리트 품질평가가 가능하다. 그러나 이러한 성질들은 콘크리트의 다상성(multi-phase)과 구조물이 존재하는 주위 환경, 위치 또는 제조과정에서 설계강도와 상당히 다르게 나타날 수 있기 때문에 실존 콘크리트 구조물의 강도를 정량화하여 추정/판단하는 것은 매우 어려운 과제중의 하나이다.

2. 2 비파괴 시험값의 변동성

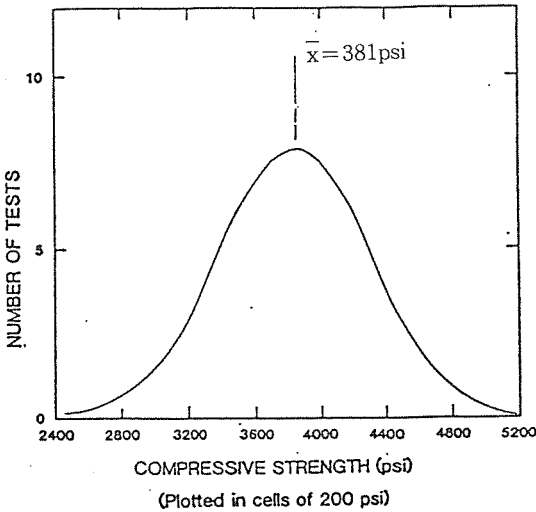
콘크리트의 강도는 서로 다른 배취(batch to batch)에서는 물론, 동일 배취 내의 시험(within test)에서도 여러가지 원인들로 인하여 강도가 다르게 나타난다. 그렇기 때문에 실존 콘크리트 구조물에서의 강도 분포가 분산성이 매우 높을 것이라고 하는 것은 쉽게 알 수 있는 일이다. 그렇기 때문에 실존 콘크리트 구조물의 강도를 추정하는 어려움은 바로 이 분산성(scattering)내지 변동성(variability)에 있다 하겠다. 콘크리트 구조물의 강도는 동일



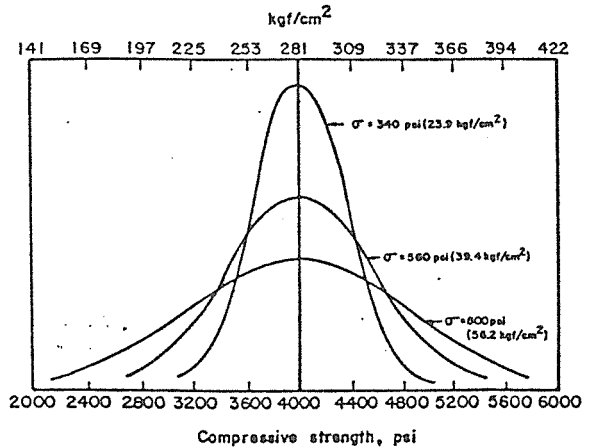
<그림 1> 시험값 45개의 분포



<그림 2> 시험값의 정규분포 곡선화



<그림 3> 정규분포 곡선



<그림 4> 표준편찬에 따른 정규분포 곡선의 성향

구조체이면서도 국부적으로는 서로다른 강도를 갖는다. 이는 구조체를 이루고 있는 재료의 샘플링 과정에서 부터 타설 제조과정, 양생과정 나아가 시험과정등의 환경수준에 따라 그 강도가 다르게 나타나기 때문이다. 그렇기 때문에 이러한 불확정한 가운데서 정량적인 데이터들을 수정하여 평가하는데에는 필연적으로 신뢰성이론에 근거한 통계적 기법을 도입하지 아니

할 수 없다. 본문에서는 비파괴 시험 데이터등이 통계적으로 나타나는 특성을 중심으로 설명하려 한다.

2. 3 비파괴 시험값의 분포

많은 비파괴 시험 데이터들을 정리하여 통계적으로 나타내면 정규분포 곡선을 이루며 이의 유도 과정은 <그림 1>, <그림 2>, <그림

3>의 단계로 표현된다. 일반적으로 대부분의 시험값들은 평균값 근처에서 가장 많이 분포되며 대칭성의 모양을 띠게 된다. 이들 그래프들의 강도적 성질을 좀더 구체적으로 나타내기 위해 <그림 4>의 경우로 부터 알아보자.

비파괴 시험값들의 정규분포 곡선은 그 변동성에 따라 크게 세가지 유형으로 나타나는데, 이는 표준편차나 변동계수의 크기에 따라 각각 달리 나타난다. 품질관리가 잘된 양질의 콘크리트 일수록 표준편차가 적게 나타나며 대부분의 시험값들은 평균값 근처로 모이게 된다. 다시 말해서 가파른 곡선(steep curve : $\sigma = 340\text{psi}$ 인 경우)은 일련의 강도가 평균값 근처에서 거의 같게 나타나는 반면, 가장 완만한 곡선(flat curve : $\sigma = 800\text{psi}$ 인 경우)은 강도값이 불규칙한 변동성이 높은 성질로 나타난다. 정규분포 곡선의 형태가 어떠한 간에, 이는 시험값의 변동성을 나타내는 주요 파라메타임에는 틀림없으며, 곡선의 최상 꼭지점(극대점)에 대응되는 시험값이 변량의 평균에 해당된다.

2. 4 시험값의 통계처리

일반적으로 통계적 처리기법은 비파괴 데이터 값이 많다는 전제하에서 설명되는데 그 신뢰도는 데이터 수가 많을수록 높게 나타난다. 이때의 통계지표로는 평균값(\bar{X})과 표준편차(σ) 및 변동계수(COV)를 들 수 있는데 이를 구하는 방법 및 성질을 나타내면 각각 다음과 같다.

2. 4. 1 평균(\bar{X})

평균값은 시험값들의 최대값과 최소값의 중간에 위치하는 대표 값으로서 산술적으로 다음과 같이 계산된다.

$$\bar{X} = \frac{X_1 + X_2 + X_3 + \dots + X_n}{N} = \frac{\sum X_i}{N}$$

이때 \bar{X} 는 평균강도이고, $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$ 은 국부적인 시험강도, N 은 시험데이터

의 수이다.

2. 4. 2 표준편차(σ)

표준편차는 비파괴 시험데이터들의 변동성을 나타내는 파라메타로서, 평균값으로 부터 개개의 값을 뺀 편차의 제곱합의 제곱근으로 나타내며 다음 식으로 나타낼 수 있는데 구조체의 강도 평가를 내리는 가장 주요한 파라메타의 역할을 하고 있다.

$$\begin{aligned} \sigma &= \sqrt{\frac{(X_1 - \bar{X})^2 + (X_2 - \bar{X})^2 + (X_3 - \bar{X})^2 \dots (X_n - \bar{X})^2}{N-1}} \\ &= \sqrt{\frac{\sum (X_i - \bar{X})^2}{N-1}} \\ \sigma &= \sqrt{\frac{\sum X_i^2 - \left(\frac{(\sum X_i)^2}{N}\right)}{N-1}} \end{aligned}$$

표준편차가 크면 클수록 변동성(흩어짐)은 커지며, 또한 정규분포 곡선은 상대적으로 납작(flat)해진다. 다시말해서 콘크리트의 품질관리 수준이 낮아짐을 나타낸다.

2. 4. 3 변동계수(V : COV)

변동계수는 평균강도에 대한 표준편차의 백분율을 나타내는 상대적 파라메타로서 실존 구조체의 강도평가를 내리는데 있어서 주요 파라메타가 되는데 다음식으로 구한다.

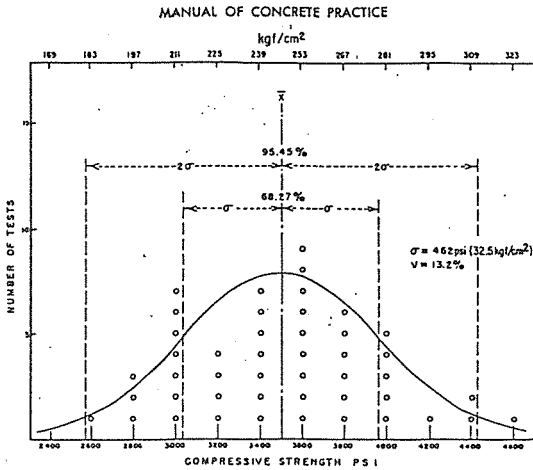
$$V = \sigma / \bar{x} * 100(\%)$$

2. 5 통계지표의 성질

2. 5. 1 정규분포 곡선(normal frequency distribution curve)

대부분의 시험값들이 정규분포 곡선을 띠고 있다는 사실은 앞에서 설명하였다. 이 정규분포 곡선은 통계지표인 표준편차의 개념으로부터 <그림 5>와 같이 여러가지 정보를 제공 가능케 해준다. 예를들면, 정규분포 곡선의 면적(시험값의 백분율)의 약 68%가 평균값을 중심으로 $\pm 1\sigma$ 내에 들며, 95%가 $\pm 2\sigma$ 안에

든다. 이를 좀더 구체적인 적분수치로 나타내면 <표 2>와 같다. 한편, 이 정규분포 곡선과 표는 표준편차의 배수(multiple)에 따라 어떤 시험값이 특정값 이하로 떨어질 확률을 예측가능하게 한다.



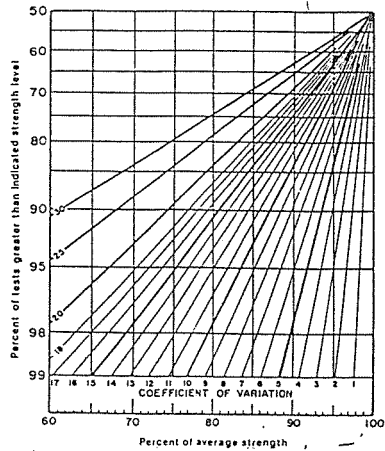
<그림 5> 강도값의 분포에 따른 정규분포 곡선

<표 2> 시험값이 f_c' 이하로 떨어질 확률(단, $X \geq f_c'$)

평균강도 \bar{X}	저강도일 확률(%)	평균강도 \bar{X}	저강도일 확률(%)
$f_c' + 0.10\sigma$	46.0	$f_c' + 1.6\sigma$	5.5
$f_c' + 0.20\sigma$	42.1	$f_c' + 1.7\sigma$	4.5
$f_c' + 0.30\sigma$	38.2	$f_c' + 1.8\sigma$	3.6
$f_c' + 0.40\sigma$	34.5	$f_c' + 1.9\sigma$	2.9
$f_c' + 0.50\sigma$	30.9	$f_c' + 2.0\sigma$	2.3
$f_c' + 0.60\sigma$	27.4	$f_c' + 2.1\sigma$	1.8
$f_c' + 0.70\sigma$	24.2	$f_c' + 2.2\sigma$	1.4
$f_c' + 0.80\sigma$	21.2	$f_c' + 2.3\sigma$	1.1
$f_c' + 0.90\sigma$	18.4	$f_c' + 2.4\sigma$	0.8
$f_c' + \sigma$	15.9	$f_c' + 2.5\sigma$	0.6
$f_c' + 1.10\sigma$	13.6	$f_c' + 2.6\sigma$	0.45
$f_c' + 1.20\sigma$	11.5	$f_c' + 2.7\sigma$	0.35
$f_c' + 1.30\sigma$	9.7	$f_c' + 2.8\sigma$	0.25
$f_c' + 1.40\sigma$	8.1	$f_c' + 2.9\sigma$	0.19
$f_c' + 1.50\sigma$	6.7	$f_c' + 3.0\sigma$	0.13

2. 5. 2 누적 분포곡선(cumulative distribution curve)

누적 분포곡선은 평균강도에 대한 특정강도의 백분율 이하로 떨어지는 시험횟수(빈도)를 합계하여 만든 곡선이다. 이는 가로축(X-axis)에서 가리키는 강도를 초과할 것으로 예상되는 강도 발생율을 세로축(Y-axis)에 나타낸 것으로 변동계수와 표준편차에 따라 <그림 6>, <그림 7>과 같이 나타내며, 이는 콘크리트 강도를 관리하는 주요한 도표로 이용된다.



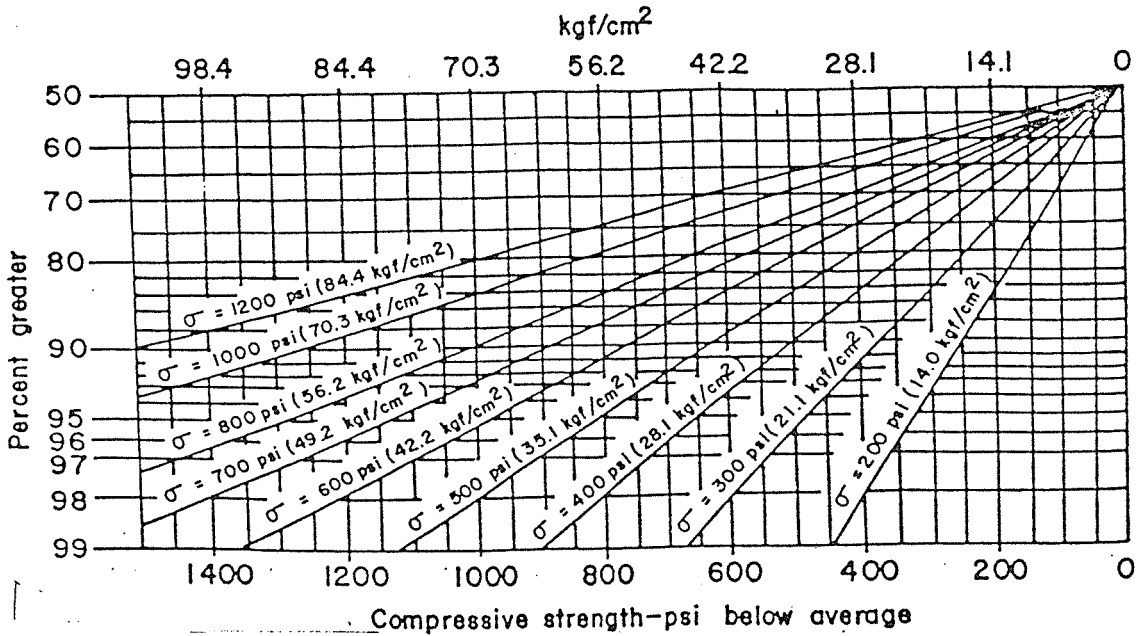
<그림 6> 변동계수에 따른 누적분포 곡선

3. 시험값의 판별기준(criteria)

3. 1 일반사항

콘크리트 실린더의 강도는 시공되고 있거나 사용되고 있는 콘크리트 구조물의 품질을 판정하는 가장 구체적인 판단지표가 된다. 실린더의 강도를 가지고 어떤 구조물의 재하강도(능력)를 바로 평가하는 것은 합리적이지 못한데 그 이유는 부적절한 데이터를 근거로 신뢰성을 부여하는 것이 옳지 않기 때문이다.

콘크리트의 내력평가에 있어서는 평균강도(X)의 개념보다는 어느 요구되는 강도 특히, 설계강도(f_c') 이하로 떨어지는 데이터의 수



<그림 7> 표준편차에 따른 누적분포 곡선

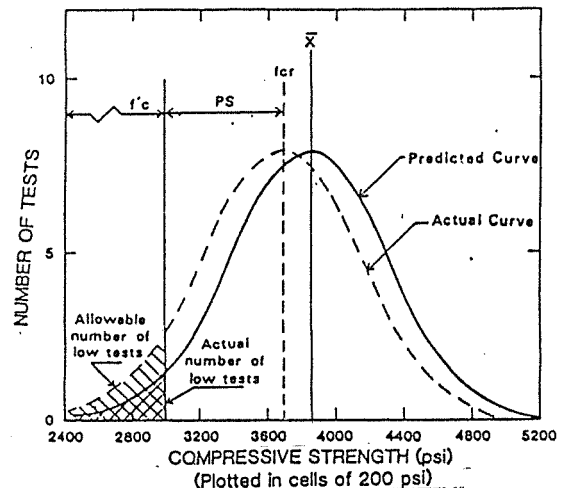
(시험횟수)가 얼마나 되느냐가 중요한 판정기준이 된다. 그러나 낮은 강도가 나타날 확률은 품질관리가 잘 되었다 하더라도 언제든지 나타날 수 있기 때문에 최소강도(minimum strength)의 개념으로 판정하는 것은 실용적이지 못하다. 모든 구조물은 국부적으로 콘크리트의 강도가 낮게 나타날 확률이 있는데, 이는 구조부재의 국부적 결함이라든가, 시공여건, 재료적 성능을 고려치 않는 설계강도의 막연한 신뢰나, 조기강도의 감소에서, 또는 거푸집 제거시의 초기재하 과정등에 기인한다. 다시 말해서 콘크리트의 연속타설 과정이나 경제적 이유등으로 해서 부실결과가 일어날 소지가 다분히 있다는 점이다.

그러나, 최종 판단기준은 어떤 구조물이 내구연한(life cycle)동안 격계 될 여러가지 한계상태에 놓일 경우를 생각하여, f'_c 보다 강도가 낮게 나타날 시험확률을 결정하는 것이 중요한데 이는 설계자의 고유권한에 해당된다.

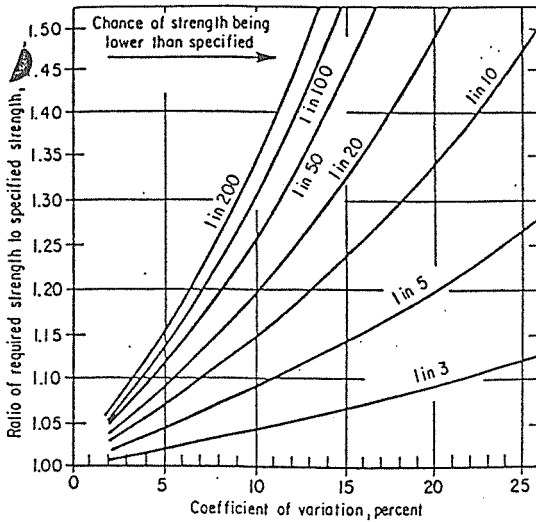
ACI318/71이래 여타 규준 및 시방서등은 이러한 관점에서 그 지침(수준)을 설정하고 있다. 이들의 강도 성향 분포는 평균강도 \bar{X}

<그림 8>가 설계기준강도 f'_c 를 초과하는 것이 가장 이상적이다. 이때 강도 잉여량은 변동계수와 표준편차등의 예상 변동성이나 낮은 강도가 일어날 확률에 따라 달리 나타난다.

표준편차나 변동계수를 얻는데 필요한 시험 데이터수는 어떤 시험군거로부터 최소 30회의 연속시험이 선행되어야 하는데 이는 공사현장 수준을 고려하는 데에서 비롯되어야 한다. 여



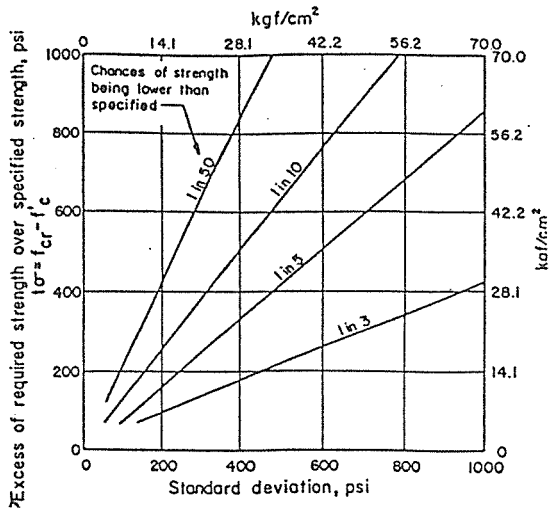
<그림 8> 전형적인 요구강도와 평균강도



<그림 9> 저강도가 일어날 확률에 대한 변동 계수와 상대 강도비의 성향

기에서 요구하는 연속 30회의 시험개념은 동일 종류의 콘크리트에 있어서 30회에 걸친 연속배치의 개념을 말하거나, 또는 30회 이상의 임의 배치그룹을 통계적 평균으로 처리해서 나옴을 의미한다. 여기에서 동일 조건(similar condition)으로 정의하는 것은 매우 어려운 일 이므로 보통 30회 이상의 시험결과들을 수집 하는 것으로 정의할 수 있다. 특히 여기에서 주의할 점은 일반적으로 사용재료나 제작과정 상의 차이점(change)에서 나타나는 강도효과 가 소위 통계적으로 말하는 표준편차나 변동계 수의 영향보다 평균강도에 큰 영향을 미친다는 점이다. 이때, 차이점이라 함은 시멘트나 혼화 제의 종류, 상표, 골재원, 배합비, 시험배치, 배합, 운반, 시험법 등 일련의 콘크리트 재료 의 생산과정에 있어서의 차이점을 말한다.

이러한 시험값(데이터)들은 사용 콘크리트 로 하여금 설계시방 강도를 발휘할 수 있는 대 표성을 가지고 있어야 하는데 이는 표준편차가 콘크리트의 평균 강도가 다를 때마다 달리 나 타나고 있기 때문이다.



<그림 10> 저강도가 일어날 확률에 대한 표준편차와 상대 강도비의 성향

3. 2 콘크리트의 요구강도

콘크리트의 평균요구강도(f_{cr} : average re quired strength)는 설계방법에 관계없이 식 (1)이나 식(2), <표 2> 또는 <그림 9>, <그림 10>에 따른다.

$$f_{cr} = \frac{f'_c}{(1-tV)} \dots\dots\dots(1)$$

$$f_{cr} = f'_c + t\sigma \dots\dots\dots(2)$$

여기에서 :

f_{cr} = 평균요구 강도

f'_c = 설계시방 강도

$t=f'_c$ 이하로 떨어질지도 모를 시험상수(<표 2> 참조)

V = 추정 변동계수

σ = 추정 표준편차

특히, 시방서 상으로 시험횟수 N 이 있을 때 에는 식(1)을 개량한 개량식 (3), (4)를 사용 한다.

$$f_{cr} = \frac{f'_c}{1 - \frac{tV}{\sqrt{N}}} \dots\dots\dots(3)$$

$$f_{cr} = f_c' + \frac{t\sigma}{\sqrt{N}} \dots\dots\dots(4)$$

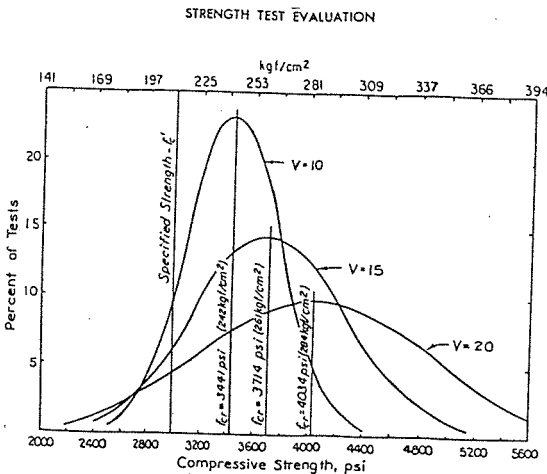
한국(일본)의 건축공사 표준시방서 및 동해설(KASS 5T 601 : 공사현장 건물의 콘크리트 배합의 강도관리 시험방법)에 의하면, 보통 콘크리트의 경우 합격 판정계수 k값으로 콘크리트의 강도(배합)수준을 판정하고 있는데, 소개하면 다음과 같다.

$$k = \frac{1 - 1.282 \frac{V}{100\sqrt{N}}}{1 - 1.64 \frac{V}{100}} \quad (\text{특수 콘크리트})$$

$$k = \frac{1 - 1.282 \frac{V}{100\sqrt{N}}}{1 - \frac{V}{100}} \quad (\text{보통 콘크리트})$$

3. 3 요구강도의 특성

<그림 11>는 변동계수가 각각 10, 20, 30%일 때의 정규분포 곡선을 나타낸다. 그림에 따르면 콘크리트 강도는 변동성이 크면 클수록 그 요구강도는 증가되게 나타나는데 좋은 품질관리는 변동성을 작게하여 요구강도를 높일 필요가 없기 때문에 그만큼 경제적 이점을 안겨준다.



<그림 11> 변동계수에 따른 정규분포 곡선의 성향

3. 4 요구강도의 도달수준

평균요구강도(f_{cr})는 시방서에서 요구하는 강도 f_c' 보다 커야함은 이미 앞에서 언급하였다. 다만 그 정도가 얼마여야 한다는 기준은 현장의 특수성을 고려한 시방서에 따라 좌우되는데 표준편차와 변동계수에 따라 다음과 같이 4가지 도달수준으로 생각할 수 있다.

3. 4. 1 도달수준 #1(Criterion #1) :

ACI214, ACI318

이 도달수준은 몇 %의 개개 강도가 설계강도 f_c' 이하로 떨어지느냐하는 비율에 따라 판정하는 것으로 콘크리트의 강도가 위험(critical)하지 않을 수준을 말한다. 이러한 수법은 ASTM C 94-74에서 권장되는데 강도설계법(U.S.D)으로 설계된 경우 통상 10%의 강도 시험이 설계강도 f_c' 이하로 떨어지는 것이 허용된다.

○ 표준 편차법

표준편차 σ 가 450psi이고 품질관리가 매우 잘 되었을 때 :

$$f_{cr} = f_c' + t\sigma$$

$$= 4000 + 1.28(450) \dots(\text{<표 3> 참조})$$

$$= 4580\text{psi}(322\text{kg}/\text{cm}^2)$$

(cf. $V = 450/4580 * 100 = 9.8\%$)

<표 3> t상수

$\bar{X} \pm t\sigma$ 안에 들 확률	저강도 일 시험을	t
40	3/10	0.52
50	2.5/10	0.67
60	2/10	0.84
68.27	1/6.39	1.00
70	1.5/10	1.04
80	1/10	1.28
90	1/20	1.65
95	1/40	1.96
95.45	1/44	2.00
98	1/100	2.33
99	1/200	2.58
99.73	1/741	3.00

○ 변동 계수법
 변동계수가 10%이고 품질관리가 잘 되었을 때 :
 $f_{cr} = f_c' / (1 - tV)$
 $= f_c' / (1 - 1.28(0.1))$ (t: <표 3> 참조)
 $= 1.15f_c'$ (<그림 9> 참조)
 $= 4600\text{psi}(324\text{kg}/\text{cm}^2)$

3. 4. 2 도달수준 #2(criterion #2): ACI318

N개의 연속 평균강도가 설계강도 f_c' 보다 작게 되는 도달수준으로 콘크리트의 강도가 어떤 구조물의 중요도에 있어서 위험(critical)할 때의 도달수준을 말한다. ACI318-71에 의하면 시험데이터 N이 충분할 때 3개의 연속평균 강도가 설계강도 f_c' 보다 작게 일어날 확률을 1/100로 잡고 있다.

○ 표준 편차법
 표준편차가 750psi일 때 :
 $f_{cr} = f_c' + t\sigma / \sqrt{N}$
 $= 4000 + 2.33(750) / \sqrt{3}$
 (식 4, <표 3> 참조)
 $= 5000\text{psi}$

○ 변동 계수법
 변동계수가 15%일 때 :
 $f_{cr} = f_c' / (1 - tV / \sqrt{N})$
 $= 4000 / (1 - 2.33(0.15) / \sqrt{3})$
 $= 5000\text{psi}$

3. 4. 3 도달수준 #3(criterion #3): ACI318

이 도달수준은 임의의 개개 강도가 설계강도 f_c' 보다도 더 작은 일정값 이상으로 되어야 하는 도달수준이다. 다시말해서 콘크리트 강도가 f_c' 가 아닌 $(f_c' - 500)$ 이하가 될때서야 비로소 구조물의 주용도에 있어서 위험하다고 하는 완화 성격을 띠고 있다. 그러나 이 도달수준은 표준편차가 500psi이상일 때 적용이 가능하다.

○ 표준 편차법
 표준편차가 750psi이고 $(f_c' - 500)$ 이하의 확률이 1/100일 때 :
 $f_{cr} = f_c' - 500 + t\sigma$

$= 4000 - 500 + 2.33(750)$
 (식 4, <표 3> 참조)
 $= 5245\text{psi}$

○ 변동 계수법
 변동계수가 15%일 때 :
 $f_{cr} = f_c' - 500 / (1 - tV)$
 $= (f_c' - 500) / (1 - 2.33(0.15))$
 (t: <표 3> 참조)
 $= 5390\text{psi}$

3. 4. 4 도달수준 #4(criterion #4)

이 도달수준은 설계강도 f_c' 의 일정 비율, 즉 $0.85f_c'$ 이하의 강도가 일어나서는 아니되는 도달수준이다.

○ 표준편차법
 표준편차 σ 가 750psi이고, $0.85f_c'$ 이하의 확률이 1/100일 때 :
 $f_{cr} = 0.85f_c' + t\sigma$
 $= 0.85(4000) + 1.28(750)$
 (t: <표 3> 참조)
 $= 5145\text{psi}(361\text{kg}/\text{cm}^2)$

○ 변동 계수법
 변동계수가 15%이고, $0.85f_c'$ 이하의 확률이 1/100일 때 :
 $f_{cr} = 0.85f_c' / (1 - tV)$
 $= 0.85f_c' / (1 - 2.33(0.1))$
 (t: <표 3> 참조)
 $= 5230\text{psi}(368\text{kg}/\text{cm}^2)$

4. 모강도(base)로서의 코아강도의 특성

콘크리트 시험체의 강도를 측정하는 주요 목적은 실제 구조물에 쓰일 때의 콘크리트 강도를 예측하는데 있다. 중요한 것은 '예측한다'는데 있으며 특히 콘크리트의 충전이나 양생에 따라 달라지긴 하지만 구조물에서 콘크리트 강도에 대한 지침을 얻는 것은 매우 중요하다. 이미 알려진 바처럼 시험체의 강도는 그 형태, 비례, 크기에 따라 달라지므로 시험 결과를 통

해 콘크리트의 본질적인 강도 값을 얻을 수는 없다.

응결중에 방해물을 받는 시험체이거나, 충분히 굳기전에 심한 추위에 노출되었거나, 부적당하게 양생되었거나, 단순한 파괴시험 결과 등에 오류가 있을 수 있다. 이런 논란은 의심스러운 부재에서 콘크리트 샘플을 채취하여 시험해보면 알 수 있다. 이것은 사용된 콘크리트 배합의 '잠재적인' 강도를 결정하는 시험이므로 실제상태에 대한 보정이 필요하다. 구조물에 사용된 콘크리트의 '실제적인' 강도를 측정하기 위해 코아를 채취한다. 일반적으로 코아는 다이아몬드 절삭날을 가진 회전기구로 채취한다.

이렇게 하여 실린더형 시험체를 얻을 수 있는데 때때로 철근 부분이 절단될 수 있으며, 평평하지 않은 표면을 가질 수도 있다.

코아는 침수하였다가, 켈핑후, 영국 기준 BS 1881 : Part 4 : 1970 또는 ASTM S C42-77에 따라 습윤상태에서 압축시험한다. 그러나 ACI에서는 실용상태에 따라 건조 혹은 습윤상태에서 시험할 것을 권장한다. 일본에서는 건조상태에서 시험하면 습윤상태에서 시험한 것보다 약 10% 가량 높은 강도를 보인다고 주장하고 있다. 코아는 길이/지름(L/D) 비의 영향을 받는데, 코아의 강도가 표준 실린더의 강도(L/D비가 2)와 관련지어 볼 때 코아의 L/D비도 2에 근사해야 한다. 표준 시험체가 큐브이면 L/D비가 1인 코아를 사용하는 것이 유리하다. 왜냐하면 이런 실린더는 큐브와 거의 같은 강도를 갖기 때문이다. 그 비가 1과 2사이에 있으면 보정해야 할 필요가 있는데, 최근 연구에서는 건조상태에서나 습윤상태 모두에 대해서 같은 보정치를 사용한다. 그러나 그 계수는 ASTM C42-77보다 낮다.

1보다 적은 L/D비를 갖는 코아는 신뢰할 수 없는데 BS 1881 : Part 4 : 1970에서는 그 최소값을 0.95로 규정하고 있다. 이 제한은 지켜져야 하지만 실제적으로 코아의 길이는 콘크리트의 두께에 의해 좌우된다. 아주 짧은 코아

는 접착시켜도 된다. 보통 기준에서는 150mm나 100mm를 사용하도록 지정하고 있다. 그러나 50mm 크기의 코아도 스위스에서 성공적으로 사용되었으며 이는 스위스나 독일기준에서 찾아볼 수 있다. 같은 L/D비를 갖는 50mm 코아는 200mm 큐브보다 10% 높은 강도를 갖는다. 아주 작은 코아는 큰 것보다 더 많은 변수를 갖게 되며 가급적 피하는 것이 좋지만 불가피한 경우에는 작은 코아는 100mm나 150mm 코아 갯수에 비해 3배수의 코아를 시험함이 적절하다고 판단된다. 이렇듯 코아 지름이 골재 최대치수의 3배 이하이면 더 많은 갯수의 코아를 시험해야 한다. Bungy는 매우 작은 크기의 코아를 시험했으며 Jaegermann과 Bentur는 골재 최대 치수가 20mm일 때, 50mm 크기의 코아는 100mm 크기의 코아보다 10% 낮은 강도를 나타낸다고 하였다. 어떤 경우에는 코아를 도로나 활주로에서 다이아몬드나 카보런덤(carborundum) 절삭날을 이용하여 절삭해 내기도 한다. 코아의 강도는 일반적으로 표준실린더보다 낮은 강도를 나타내는데 드릴링 작업의 영향이나 현장 양생때문으로, 표준 시험체에서 실시하는 양생보다 불리한 상태에 있기 때문에 이런 현상이 나타난다. 그러나 드릴작업을 조심스럽게 행하면 그 피해는 줄일 수 있다. 강도가 큰 콘크리트일수록 그 영향은 커지며 Malhotra는 400kg/cm² 강도의 콘크리트에서 15%까지 강도가 감소된다고 주장하였다.

콘크리트협회(The Concrete Society)는 5~7% 감소를 적절한 것으로 보고 있다. 코아에 가로지르는 철근이 존재하게 되면 강도에 영향이 있으리라 예측되지만 이 사실에 대해서는 반론이 일고 있다. Malhotra의 논문에 있어서는 아무런 영향도 없다는 두개의 결과와 철근이 없는 코아에 비해 8~13%의 강도감소를 보인다는 한개의 연구결과를 보고하고 있다. 콘크리트협회는 콘크리트의 강도감소는 철근의 위치와도 관계있는 것으로 발표하였다. 즉 철근의 위치가 코아의 단부에서 멀어질수록 영

향은 커진다. 이런 이유 때문에 가로지른 철근은 5~10%의 적당한 강도감소를 가져오는 것으로 가정하는 것이 합리적이다. 구조물의 정확한 양생 이력을 알아내기란 매우 어렵기 때문에 코아의 강도에 대해 양생이 미치는 영향은 불확실하다. 권장 기준에 따라 양생한 구조물에 대하여 Petersons는 코아 강도와 실린더 강도의 비(같은 재령에서)는 언제나 1이하이며 실린더 강도가 증가할수록 그 정도는 심화된다고 주장하였다. 이 비율의 대략적인 값은 실린더 강도가 200kg/cm²일 때 1이하, 600kg/cm²일 때 0.7을 쓴다. 수개월 된 콘크리트에서 채취한 코어는 28일 재령에서 보다 높은 강도를 갖는다고 주장하는 이도 있으나, 실제로는 그렇지 않으며 현장 콘크리트는 28일후 강도 증가가 거의 없다는 증거도 있다. 그렇기 때문에 영국의 콘크리트협회에서는 코아의 강도를 해석하는 데 있어서 재령을 따로 고려하지 않는다. 한편 Petersons는 일반적인 조건에서 28일 강도에 대한 증가 정도가 3개월에서 10%, 6개월 재령에서 15%가 증가된다고 주장하고 있다. 따라서 재령의 영향을 무시할 것이 아니라고 하지만 절대적인 습윤양생이 있을 수 없으므로 강도의 증가는 없는 것으로 한다.

코아 강도에 대한 또다른 영향인자는 구조물에서 채취 위치가 될 수 있는데 코아는 일반적으로 구조물의 최상단에서 가장 낮은 강도를 갖는데, 이는 기둥, 벽, 보, 슬라브까지 확대시킬 수 있다. 최상단에서 밑으로 깊이가 커질수록 코아의 강도는 증가하지만 300mm이상의 두께에서는 더 이상의 증가가 없다. 그 차이는 10% 심지어 20%까지 될 수 있다. 슬라브의 경우 양생상태가 나쁘면 이 차이는 더욱 커진다. 인장강도와 압축강도에 모두 같은 정도로 영향을 준다. 드릴링 방향 또한 코아의 강도에 영향을 주는데, 수평으로 채취하면 전형적으로 8% 가량 강도가 감소한다. 앞서 언급한 바처럼 공칭 28일 강도와 관련하여 코아의 강도를 해석하는 일은 쉬운 일이 아니다. 타설과 양생

이 양호한 상태에서조차도 코아의 강도는 표준 시험체 강도의 70~85%를 넘지 못한다. 이런 사실은 ACI에서 확인되는데, 코아의 평균 강도가 공칭 강도의 85% 이상이고, 75% 이하인 강도가 한개도 없을 경우에 그 콘크리트는 적합한 것으로 본다. ACI에 따라 코아를 건조 상태에서 시험하면, ASTM이나 BS에 따라 시험한 경우보다 높은 강도를 나타내므로 결국 위의 필요 조건들에 구애받지 않는다. 또 다른 나라에서는 코아강도는, 표준 시험체 강도의 일정 퍼센트를 넘지 않는다고 예측한다. 즉 독일에서는 85%, 덴마크에서는 90%, 노르웨이에서는 70%로 규정하고 있다. 이런 모든 이유 때문에 코아 강도를 소위 실린더나 큐브강도로 무조건 환산해서는 안된다. 왜냐하면 코아 결과는 그 자체가 이미 합리적인 평가 기준이기 때문이다.

5. 비파괴 강도와 모강도와의 상관 분석

5. 1 강도 추정식

실험식으로 결과를 표시하면 양의 관계를 간결하게 표현할 수 있고, 수학적인 해석방법을 적용할 수 있으므로 편리하다.

실험식은 2~3종류의 방법으로 얻을 수 있으나 여기서는 도표를 이용하는 방법을 설명코자 한다. 먼저 균등눈금도표에서 양의 관계가 직선관계인가 곡선관계인가를 파악하여 적당한 실험식의 형을 정하여야 한다. 본문에서는 단순회귀분석의 개념을 간단히 소개하고자 한다.

5. 1. 1 회귀 분석 1/직선 관계

이 관계를 $Y=AX+B$ 로 표시하여 정수 A, B의 값을 구한다. 예를 들면 n개의 점에서 <그림 2>와 같은 직선을 얻으면 다음의 n개의 등식이 성립된다.

$$Y_1=AX_1+B$$

$$Y_2=AX_2+B$$

$$Y_3=AX_3+B$$

$$Y_n = AX_n + B$$

정수 A, B를 결정하기 위하여 등식의 집합이 대개 같은 개수의 조로 나누어 각 조에서 이런 등식의 좌변과 우변을 가산하여 두 식에서 A, B를 구한다.

$$Y_1 + Y_2 + \dots + Y_k = A(X_1 + X_2 + \dots + X_k) + kB$$

$$Y_{k+1} + Y_{k+2} + \dots + Y_n = A(X_{k+1} + X_{k+2} + \dots + X_n) + (n-k)B$$

여기서 k는 제1조의 등식의 계수이고, n/2임.

5. 1. 2 회귀분석 2/곡선관계

균등눈금도표로 얻은 실험그래프가 곡선인 경우 이 그래프를 여러 종류의 비균등그래프와 비교하여 보고, 이것과 가장 유사한 그래프를 선정하며 이 선정한 그래프가 갖고 있는 방정식을 알아야 한다.

다음 이 방정식에 따른 변수로서 직선관계가 되도록 변수를 대치한다. 다른 변수의 수치계산을 하지 않고 작성한 그래프가 직선화되었는가를 조사한다. 만약 완전히 직선화되지 않는 경우, 이 그래프를 버리고 다른 방정식을 사용하여 재검토한다.

이와같이 하여 최적의 방정식이 되면 다른 변수에 의한 실험식의 정수를 결정하고, 또한 변수가 바뀐 역산으로 부터 원래의 변수에 의한 실험식(곡선)의 정수를 결정하여 최종적인 실험식을 도입한다. 예를 들면 선정한 방정식이 $Y = A \exp(Bx)$ 이라면 이것에 $\log Y = Z$, $\log A = A$ 로 바꾸면 $Z = A + Bx$ 라는 직선식이 된다.

5. 2 콘크리트 구조체의 강도 추정(배경)

5. 2. 1 강도 추정식을 위한 기본 가정

콘크리트 구조체의 강도를 추정함에 있어서 시험의 신뢰성이나 경제성, 시험속도, 난이도 및 구조물에 미치는 손상 정도 등의 이유로 해서 여러가지 시험법의 선택이 있을 수 있다.

예를 들면, 1991년도의 신도시 시공 영향평가 조사에서의 연구 과제는 대상지역이나 조사

물량이 천문학적으로 방대하면서도 높은 신뢰성을 필요로 했기 때문에, 여러가지 변동 요인을 감안하여(문헌조사 등) 다음과 같은 잠정적인 실험 수준(level)을 전제로 하여 150개의 콘크리트 코아와 슈미트 햄머의 반발도로부터 추정 강도식을 제안한 바 있다.

1) 콘크리트 강도는 코아 강도를 모강도(base)로 하며,

2) 코아의 압축 강도는 재령 요인을 고려하지 않는다.

3) 코아의 압축강도 계산에 있어서 길이/직경(L/D)비는 고려한다.

4) 강도식은 편의상 직선식으로 한다.

5) 콘크리트의 재령 요인은 재령 계수 α_n 을 사용한다.

6) 코아의 강도는 실린더 강도의 85%로 한다.

5. 2. 2 강도 추정식을 만들기 위한 기초 자료

코아 시험의 결과로부터 강도 추정식을 만들기 위해서는 코아의 모강도(base)를 위의 기본 가정으로부터 변환시킬 필요성이 있게 된다. 다시말하면 코아 강도를 실린더 강도와 재령 계수를 고려한 회귀 분석 자료를 만들어야 한다.

5. 2. 3 강도식의 추정을 위한 회귀분석

비파괴 분석법에 영향을 주는 여러 요인(효과)들을 고려하여 비파괴 시험 값과 코아강도 값을 단순회귀분석(Simple Regression Analysis)하여 강도추정식(회귀식)을 구할 수 있다.

6. 구조체의 비파괴 강도평가 및 처리

6. 1 비파괴 검사의 샘플링 규모(수량)

어떤 콘크리트 구조체의 비파괴 강도를 추정하여 평가하기 위해서는 조사하고자 하는 구조체에 대해 표본을 설정하여 비파괴 검사 규모를 결정하여야 한다.

일반적으로 콘크리트 배합의 품질검사에 따르는 콘크리트의 체적과 표면적(슬라브, 벽체

<표 4> 매개변수(σ, V)에 따른 도달수준(ACI)

매개변수		강도평가	A	B	C	D	F
		강도수준					
표준편차(kg/cm ²) (현장)	현장강도		28.1이하	28.1~35.2	35.2~42.2	42.2~49.2	49.2이상
	실험강도		14.1이하	14.1~17.6	17.6~21.1	21.1~24.6	24.6이상
변동계수(%) (시험실)	현장강도		3.0이하	3.0~ 4.0	4.0~ 5.0	5.0~ 6.0	6.0이상
	실험강도		2.0이하	2.0~ 3.0	3.0~ 4.0	4.0~ 5.0	5.0이상

A : excellent/B : very good/C : good/D : fair/F : poor

등)에 따라서 측정 수량을 결정함이 바람직한데 보통 각 수직층에 대하여 콘크리트 체적 120m³나 표면적 500m²이내 마다 측정 부위를 설정하는 것이 좋다.

6. 2 비파괴 강도조사

비파괴 측정 대상이 확정되면 비파괴 기기를 검사(calibration)하고 대상부위를 측정한다. 이때 측정된 파라메타(예를들면 반발도)를 회귀분석의 결과에서 나온 강도추정식에 대입하여 비파괴 강도를 구한다. 물론 이때 강도 추정식에 영향을 미치는 여러 실험변수들을 구조물의 노출환경을 고려하여 적용시켜야 한다.

6. 3 통계지표의 계산

측정된 비파괴 시험 데이터들을 대상으로 구조체의 평균강도, 표준편차, 변동계수, 신뢰도 및 상관도 등을 구한다.

일반적으로 현장이나 시험실에서 나타나는 콘크리트 강도의 표준편차나 변동계수의 도달수준(ACI)을 나타내면 <표 4>와 같다.

6. 4 구조체의 강도판정

콘크리트 구조물의 강도를 판정하기 위해서는 시방서에서 제시하고 있는 강도판정 기준에 입각하여 강도평가를 내린다. 위에서 언급한 KASS 5T 601이나 ACI규준을 예를들어 판별하면 각각 다음과 같다.

○ KASS 5T 601의 경우

$$f_m \geq kf_c' \quad (f_m : \text{구조체의 평균 측정강도})$$

○ ACI의 경우

$$f_m \geq f_{cr}$$

6. 5 저항도의 처리

만일 콘크리트 구조체가 저항도 콘크리트로 판정되고, 계산에서 하중 저항능력이 현저하게 감소된다고 판단될 때는 문제가 야기되는 부위에서 코어를 채취하여 코어강도를 구할 필요가 있다. ACI 318의 경우로 예를들면 측정강도가 설계강도 f_c' 보다 500psi(35kg/cm²)보다 더 낮은지를 알기 위하여 각각 3개의 코어를 채취한다. 만일 3개의 코어강도가 평균으로 설계강도 f_c' 의 85%에 달하고, 그중 어느 코어도 75%이하가 되지 않으면 구조적으로 적합하다고 판정을 내릴 수 있다. 만일 여기에서도 구조적 적합성이 의심스러울 때는 책임기술자(감독관청)는 구조물의 재하시험을 실시하거나 기타 적절한 조치를 취해야 할 것이다.

7. 비파괴 검사의 신뢰성

7. 1 콘크리트 시험법의 직·간접성

콘크리트의 강도가 전체 구조물이나 특정 부재의 강도를 대신할 수 있는나하는 문제는 논란의 여지가 많다.

<표 5>에서 보면, 실린더나 큐브강도에 따른 모듈드에 의한 강도시험은 표준강도로서 콘크리트 재료의 평가에 있어서 기저(base)가 되나, 이가 바로 전체 구조물의 성격을 대변하는 데에는 한계가 있음을 알 수 있다.

그러나 이러한 간접성에도 불구하고 모듈드 시험 결과는 여러가지 공학적 판단(변환)에

<표 5> 콘크리트 시험법의 상대적 신뢰 특성

강도 수준		시험법				
		콘크리트			구조체(부재)	
		모울드시험	비파괴시험	코아시험	재하시험	극한 재하시험
콘크리트	표준강도	A	D	B	D	D
	현장강도	C	C	B	C	C
구조체(부재)	사용강도	D	D	C	A	A
	극한강도	D	D	C	C	A

<표 6> 콘크리트 시험법의 상대적 특성

시험법	비용	시험속도	피해정도	대표성	신뢰성
극한 재하시험	D	C	F	A	A
재하시험	D	C	D	A	A
코아 시험	D	C	C	B	B
관입 시험	C	A	D	C	B
인발 시험	C	A	B	C	B
초음파 시험	B	A	A	A	B
슈미트햄머 시험	A	A	A	C	C

의하여 적어도 현장 강도로서 추정이 가능하리라고 본다.

비파괴 시험법은 적어도 현장에서의 실존 건물의 강도를 추정하는 한 방법으로 사용될 수 있으며, 코아에 의한 강도시험은 대체적으로 콘크리트 강도나 구조체의 강도를 평가하는 바로미터(barometer)로서 대체될 수 있음이 시사되고 있다. 그러나, 이때 코아 강도 값에 영향을 주는 많은 변수들은 고려되지 않으면 안된다.

한편, 구조체에 대한 재하시험은 구조체의 사용 강도나 극한강도를 평가하는데 있어서 가장 직접적 신뢰성을 가져다 준다. 또한 이 방법을 통해서 현장 콘크리트의 강도를 역으로 추정할 수도 있다.

7. 2 시험법의 상대적 특성

콘크리트 강도시험을 행함에 있어서 아무리 신뢰성이 높은 시험법일지라도 시험속도나 시험법의 편이도 및 경제성이 뒤따르지 못하면 그 시험법을 채택하는 데에는 한계가 있게 마련이다. 더우기 시험법의 직접성을 높이기 위하여

보면, 실존 구조체가 상대적으로 손상을 입음도 고려해야 한다. <표 6>은 여러 시험법에 대해 신뢰도, 시험속도, 난이도, 경제성 및 구조물의 손상 등을 상대적으로 평가한 것이다.

예를들면, 코아 강도시험은 신뢰성이 높을 때 비하여 시험속도나 편의성, 경제성, 구조물의 손상 등, 실리적 측면에서 불리하며, 반면에 표면강도 시험은 신뢰성은 떨어지나 시험속도나 난이도, 경제성 및 구조물에 대한 손상 등의 측면에서는 상대적으로 매우 유리하다.

8. 결 언

콘크리트의 강도평가는 시방강도와 요구강도 등의 부등식에 대한 판정이 아니라 정규분포 곡선상에서 나타나는 통계나 회귀분석 차원에서 평가가 이루어져야 한다. 또한 콘크리트 구조물의 재료적 성능을 조사 계량화하는 데에는 구하고자 하는 목적에 맞는 적절한 비파괴 시험법이 적용되어야 할 줄 안다.

〈參考文獻〉

1. 권영웅, 실존콘크리트 구조물의 강도 추정
에 관하여(Ⅰ), 대한건축학회지, 36권 1호,
1992. 1
2. 권영웅, 콘크리트 소재 구조물의 강도 측
정 시험법에 관한 연구, 콘크리트 학회지, 3
권 4호, 1991. 12
3. 권영웅, 실존콘크리트 구조물의 강도 추정
에 관한 연구(Ⅰ) 레미콘, 한국레미콘공업
협회, 1992. 6
4. 권영웅, 비파괴 시험법에 의한 경화 콘크
리트의 임계강도(반발도) 제안에 관한 연
구, 공업개발연구 6권 1호, 인천대학교 공업
개발연구소, 1991.
5. KSF 2403-80, 시험실에서 콘크리트의
압축강도 및 휨강도 시험용 공시체를 제작하
고 양생하는 방법
6. KSF 2404-76, 현장에서 콘크리트의 압
축강도 및 휨강도 시험용 공시체를 제작하고
양생하는 방법
7. KSF 2405-79, 콘크리트의 압축강도 시
험방법
8. KSF 2412-80, 도려낸 콘크리트 코아의
길이 측정 방법
9. KSF 2418-73, 콘크리트 중의 펄스 속도
시험방법
10. KSF 2422-81, 콘크리트에서 절취한 코
아 및 보의 강도 시험방법
11. 건설부, 건축공사 표준시방서(KASS 5T-
601, 602, 1985)
12. ACI 214-77, RECOMMENDED PRAC-
TICE FOR EVALUATION OF STRE-
NGTH TEST RESULTS OF CONCRETE
13. ACI 228.1R-89, IN-PLACE METHODS
FOR DETERMINATION OF STRENGTH
OF CONCRETE
14. ACI 318-89, BUILDING CODE RE-
QUIREMENTS FOR REINFORCED CON-
CRETE
15. BS 6089 : 1981, GUIDE TO ASSESS-
MENT OF CONCRETE STRENGTH IN
EXISTING STRUCTURES
16. BS 4408 PART 4, 1971. RECOMMEN-
DATIONS FOR NON-DESTRUCTIVE
METHODS OF TEST FOR CONCRETE,
SURFACE HARDNESS METHODS
17. DIN 1048, PART 2. TEST METHODS
FOR CONCRETE
18. ASTM 42-77, OBTAINING AND
TESTING DRILLED CORES AND
SAWED BEAMS OF CONCRETE
19. RILEM, RECOMMENDATION FOR
TESTING CONCRETE BY HARDNESS
METHODS
20. A. M. NEVILLE, PROPERTIES OF
CONCRETE 3RD ED., PITMAN, 1981.
21. 龜倉 精機 株式會社, 콘크리트 햄머 α -
650x, α -750x 취급설명서, 일본
22. 일본재료시험협회, 슈미트 햄머에 대한 실
시 콘크리트의 압축강도 판정방법 지침
(안), 재료시험 7권 59호, 소화 33년, 8월.
23. 일본 건축학회, 콘크리트 강도 추정을 위한
비파괴 시험방법 매뉴얼, 소화 58년, 1월.
24. 대한건축학회, 신도시 아파트 시공평가 조
사연구, 1991년 12월.
25. V.M. MALHOTRA, N.J.CARINO, CRC
HANDBOOK ON NONDESTRUCTIVE
TESTING OF CONCRETE, 1991.
26. ACI, NONDESTRUCTIVE TESTING,
ACI SP-112, 1988
27. 한국레미콘협회, 레미콘기술관리 WORK-
SHOP, 1992
28. 한국콘크리트학회, 고강도 콘크리트 및 폼
질관리, 제11회 기술강좌 1992. 1
29. 건설기술교육원, 관리, 기사과정 기본교재,
1991.
30. 한국콘크리트학회, 콘크리트 구조물의 비
파괴 검사 및 안전진단, 1993. 2