



콘크리트 품질관련 표준 및 관련 비파괴 시험법 기술동향 -콘크리트 탄성계수-

An Introduction to Korea Standards and Relevant Nondestructive Testing for Concrete - modulus of elasticity -

이병재 Byung-Jae Lee
(주)제이엔티아이엔씨 선임연구원

오태근 Tae-Keon Oh
인천대학교 안전공학과 교수

1. 머리말

건설재료로서 콘크리트는 강도뿐만 아니라 변형성능도 또한 중요한 요소이다. 재료의 변형성능을 평가하는 물리량의 하나로서 탄성계수가 있다. 콘크리트의 탄성계수는 콘크리트의 강도에 가장 크게 영향을 받으며, 그 이외에 콘크리트의 재령, 골재와 시멘트 성질, 재하속도, 시험체의 형상 및 크기에 따라 달라진다.

콘크리트의 탄성계수를 결정하는 기존의 방법은 KS F 2438 “콘크리트 원주 공시체의 정탄성계수 및 포아송비 시험방법”에 준하여 LVDT 및 변형률계이지를 사용하는 전통적인 방법을 적용하여 왔다. 이러한 정탄성계수 측정방법은 실험자의 숙련도나 콘크리트의 불균질성 등으로 시험체간의 오차가 비교적 큰 단점을 내포하고 있다. 또한 파괴에 따른 탄성계수 측정방법은 고가의 시험장비, 숙련된 시험기술자, 과다한 시험시간 및 비용이 소요되는 문제점을 가지고 있다.

이러한 문제를 해결하기 위해 콘크리트 구조물의 유지관리와 평가방법으로서 다양한 비파괴 시험기법이 사용되고 있다.

따라서 본 고에서는 콘크리트 탄성계수 측정과 관련한 파괴 및 비파괴 시험방법에 대한 KS 표준의 현황, 주요 시험방법 및 주의사항에 대하여 소개하고자 한다.

2. 콘크리트 탄성계수 관련 표준의 현황

콘크리트의 품질관리를 위한 표준은 한국산업표준을 비롯한 국내외 표준에서 지정하고 있으며, 그 중, 콘크리트의 탄성계수를 평가하기 위한 표준은 다음 <표 1>에 나타낸 바와 같다.

표 1. 콘크리트 탄성계수 측정 관련 한국산업규격(KS)

인증번호	내용	개정일	비고
KS F 2437	공명 진동에 의한 콘크리트의 동탄성계수 및 동포아송비의 시험방법	2013.12.9	
KS F 2438	콘크리트 원주공시체의 정탄성계수 및 포아송비 시험방법	2002.10.31	
KS F 2731	콘크리트 압축강도 추정을 위한 초음파 펄스속도 시험방법	2008.12.30	

3. 콘크리트 탄성계수 시험방법 및 주의 사항

3.1 콘크리트 원주공시체의 정탄성계수 및 포아송비 시험방법 [KS F 2438]

3.1.1 시험의 목적

콘크리트의 탄성적 성질 중에서 제일 중요한 탄성계수 및 푸아송비를 구하기 위하여 성형한 원기둥공시체 및 다이아몬드로 뚫은 콘크리트 코어가 섬유방향 압축응력을 받았을 때 시험을 행한다.

3.1.2 시험방법

① 공시체 준비

- 성형한 공시체 또는 코어 공시체를 압축강도시험을 행할 때와 같은 방법으로 준비한다.
- 공시체의 지름은 길이의 중앙에서 지름을 서로 직각의 두 방향에서 0.25 mm까지 측정하여 평균을 구한다. 공시체의 단면적은 이 평균지름을 사용하여 계산한다. 성형된 공시체는 캐핑된 부분을 포함하여 길이를 2.54 mm까지 측정한다.
- 압축강도를 구하기 위한 동반 공시체가 없을 경우, 또는 공시체의 조사 단위질량이 명확하지 않을 때는 공시체를 시험 직전에 공기 중 질량을 50 g의 정밀도로 측정하여 구한 치수로 계산한 용적으로 나누어 계산한다. 그 결과를 g/cm^3 으로 나타낸다.

② 와이어 스트레이인 게이지의 사용하는 경우

- 일반적으로 공시체 표면의 상대방향의 위치에 2매씩 4매의 게이지를 접착제를 사용하여 접착시킨다. 게이지의 접착위치는 몰드의 이음매 등에 의한 요철이 없고, 기포가 작은 위치를 선정한다.

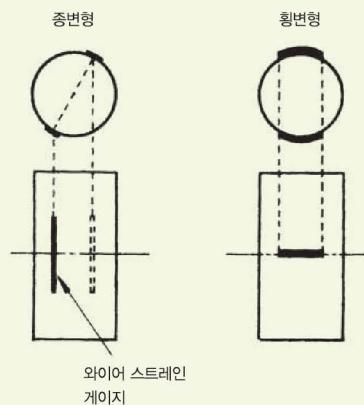


그림 1. 와이어 스트레이인 게이지의 접착의 예

– 접착제가 경화하여 게이지가 콘크리트 표면에 완전히 접착된 후 게이지 단자를 리드선으로 정변형 측정장치에 연결시켜 브릿지를 형성한다.

– 사용하는 게이지의 게이지 팩터에 따라 정변형 측정 장치를 조정하고 재하시 정확하게 게이지를 읽을 수 있도록 준비한다. 시험 중에는 주위의 온도와 습도를 일정하게 유지함이 요망된다. 이것은 와이어 스트레이인 게이지 및 측정장치의 온도변화에 따르는 측정오차를 줄이는 데 매우 중요하다.

③ 컴프레소 미터와 엑스텐소 미터를 사용하는 경우

- 컴프레소 미터는 공시체의 세로방향 변형의 측정에 사용되고 실제의 변형을 자렛대의 원리로 2배로 확대하여 다이얼 게이지로 읽는다. 통상 이들 2개의 계기를 조합하여 세로 및 가로방향의 변형을 동시에 측정한다.

④ 재하 및 변형 측정시험

- 만일 동반 공시체를 이용할 수 없을 때에는 탄성계수의 시험에 앞서 압축강도 시험을 행하여 파괴하중의 40%의 하중을 계산한다.
- 여분의 공시체가 없어서 최대하중을 구하지 못했을 경우에는 앞에서 구한 단위질량과 표 2로부터 최대변형값을 구한다.
- 공시체는 변형 측정장치를 붙여 시험기의 하관 또는 지지블록 위에 놓고 공시체의 축과 구좌 상부 지지블록의 압력 중심과 일치시킨다.
- 영(零)하중인 때의 변형 측정장치의 읽음을 기록하든가 영점조정이 가능하면 이것을 영(零)으로 조정한다.
- 구좌블록을 조용히 공시체 위에 내려 블록의 가동부분을 손으로 회전시켜 균등한 가압이 되도록 한다.
- 공시체는 적어도 2회 이상, 가급적이면 3회 반복하여 하중을 가한다. 그 최대하중은 파괴하중의 40%,



그림 2. 컴프레소미터와 엑스텐소미터 사용의 예

또는 <표 2>에서 구한 최대실측예정 변형에 도달할 때까지 재하속도를 $0.25 \pm 0.035 \text{ MPa}$ 로 한다.

- 제 1회의 재하는 변형을 기록하지 않고, 계산은 제2회의 재하로부터 변형과 하중을 기록하여 평균으로 한다. 제 1회의 하중은 주로 게이지를 정착시키기 위해 가해지고, 그 사이의 게이지의 동작을 관찰하여 제2회 하중 전에 비정상적인 동작을 수정한다.
- 하중은 계속하여 가해 그 하중의 크기와 세로변형을 다음과 같을 때 기록한다.

i) 세로변형이 25.4 mm 에 대해 $0.127 \mu\text{m}$ 일 때 (0.00005 일 때)

ii) 가해준 하중이 극한하중의 40% 와 같을 때(세로변형은 총세로변형을 유효게이지 길이로 나눈 것이라고 정의된다), 푸아송비를 구하기 위해 같은 점에서 세로변형을 기록한다. 만일 응력-변형률 곡선을 구하기 위해서는 하중을 계속 가해 2점 이상의 읽음을 읽든가, 연속기록을 할 수 있는 장치를 사용한다. 최대하중에 달함과 동시에 극한하중의 경우를 제외하고 하중을 적용할 때 와 동일속도로 0으로 되돌린다. 만일 읽음을 못 하였으면 하중사이클을 완성하고 다시 반복하다.

이 여분의 사이클을 기록해 둔다.

- 극한하중이 불명확한 경우에는 세로변형이 <표 2>의 값에 도달하였을 때의 각 하중 사이에 제 2조의 읽음을 읽는다. 보통의 콘크리트에서는 이 변형은 하중이 극한하중의 50% 의 범위에 도달하였을 때 생긴다.

3.1.3 탄성계수 계산

- ① 탄성계수를 350 MPa 까지 다음 식으로 계산한다.

$$E = \frac{S_2 - S_1}{\epsilon_l - 0.00005}$$

여기서, E : 탄성계수(MPa)

S_2 : 가해진 최대하중에 대한 응력(MPa)

표 2. 최대변형값

시험시의 단위질량 [kg/m ³]	다음 재령에서의 최대변형		[단위 : μm/25.4 mm]
	7일 이상	7일 미만	
3,280 이상	7.62	5.08	
2,640 ~ 3,264	9.53	6.35	
2,160 ~ 2,624	11.4	7.62	
1,840 ~ 2,144	13.3	8.89	
1,680 ~ 1,824	15.2	10.2	
1,520 ~ 1,664	17.1	11.4	
1,360 ~ 1,504	19.1	12.7	
1,200 ~ 1,344	20.9	13.9	

S_1 : 세로변형 0.00005 cm 에 대한 응력(MPa)

ϵ_l : 응력 S_2 로 생긴 세로변형

4. 비파괴 시험법을 통한 탄성계수 측정

콘크리트의 정탄성계수 측정방법은 위에서 소개한 파괴 시험방법에 의해 측정될 수 있다. 하지만, 실험자의 숙련도나 콘크리트 재료의 불균질성으로 시험체간 오차가 비교적 큰 단점이 있다. 콘크리트의 탄성계수 측정을 위해 초음파법, 탄성파법 등의 비파괴시험법에 대한 연구가 많이 이루어져왔으나, KS에서는 공명진동에 의한 동탄성계수 측정법을 규정하고 있으며, 최근 아스팔트나 지반재료에서 이용되어지는 충격공진시험(IR : Impact resonance test) 방법이 개발되어 콘크리트에 적용되고 있다. 따라서 본 절에서는 두 가지 측정방법을 간단히 소개하고자 한다.

4.1 공명진동에 의한 콘크리트의 동탄성계수 및 동푸아송비 시험방법 [KS F 2437]

4.1.1 시험의 목적

① 공명진동수(共鳴振動數) 측정장치에 의하여 원기둥형 및 각기둥형 등의 콘크리트 공시체의 세로진동, 가로진동, 비틀진동의 1차 진동수를 구하여 동탄성계수, 동전단 탄성계수 및 동푸아송비를 구하는 방법이다.

② 세로진동법 또는 가로진동법에 의해 구한 동탄성계수는 동결용해 저항성을 나타내는 내구성 지수의 계산 및 산, 알칼리 등의 화학약품에 대한 저항성, 화재에 의한 콘크리트의 열화(劣化) 상황 등의 판정에 사용된다. 또한 동탄성계수로부터 압축강도를 간접적으로 추정한다.

4.1.2 시험방법

① 공시체의 질량 및 치수의 측정

- 공시체의 질량과 길이는 $\pm 0.5\%$ 이내의 정밀도를 측정하여야 한다. 단면치수의 값은 $\pm 0.5\%$ 이내의 정밀도로 구해야 한다. 길이와 단면치수는 몇 개소에서 측정한 것의 평균을 취한다.

② 치수비의 제한

- 가로진동의 경우 공시체의 길이와 진동방향의 두께와 비는 2 이상의 범위에 있는 것을 표준으로 한다.
- 공시체의 길이와 진동방향의 질량과의 비가 몹시 커

지거나 작아지면 1차 진동수를 구하기 어려울 때가 많다. 이 비가 2 미만이 되면 5에서는 계산식의 신뢰도가 적어진다.

③ 진동수의 결정

- 공시체의 양 끝이 자유롭게 세로(가로)진동을 할 때에 너무 구속되지 않고 진동할 수 있도록 지지대 위에 두어야 한다. 픽업은 공시체의 진동방향에 동작하도록 콘크리트의 다른 단면에 접촉시켜야 한다.
- 발전기의 진동수를 바꾸어 이에 따라 공시체가 진동하도록 구동력을 가하면서 증폭된 픽업의 출력전압을 관측한다. 지시기에 명확한 최대의 진동이 생기고, 진동의 마디를 측정한 결과 1차 공명 세로진동인 것을 확인하였을 때의 진동수를 세로진동의 1차 진동수로 한다.

④ 시험결과 계산

– 세로진동의 경우

$$E_D = C_1 w n_1^2$$

$$\text{단, } C_1 = 400 \times 10^{-5} \times \frac{L}{A} [\text{s}^2/\text{mm}^2]$$

여기서, E_D : 동탄성계수(N/mm^2)

w : 공시체의 질량(kg)

n_1 : 세로진동의 1차 진동수(Hz)

L : 공시체의 길이(mm)

A : 공시체의 단면적(mm^2)

– 가로진동의 경우

$$E_D = C_2 w n_2^2$$

$$\text{단, } C_2 = 164 \times 10^{-5} \times \frac{L^3 T}{d^4} [\text{s}^2/\text{mm}^2] \quad (\text{원기둥공시체})$$

$$C_2 = 947 \times 10^{-6} \times \frac{L^3 T}{b t^3} [\text{s}^3/\text{mm}^2] \quad (\text{각기둥공시체})$$

여기서, E_D : 동탄성계수(N/mm^2)

w : 공시체의 질량(kg)

n_2 : 가로진동의 1차 진동수(Hz)

L : 공시체의 길이(mm)

d : 원기둥공시체의 지름(mm)

$b t$: b 는 각기둥공시체의 단면과 각 변(mm), t 는 진동방향의 변

T : 회전반지름 R (원기둥공시체에 대해서는 $d/4$, 각기둥공시체에 대해서는 $t/3.464$)과 길이 L 및 동푸아송비 μ_D

에 따라 정해지는 수정계수

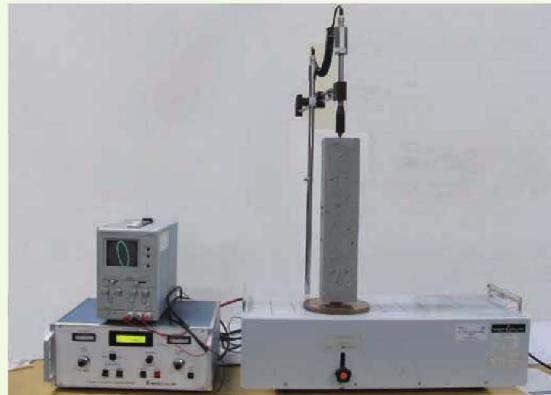


그림 3. 공명진동 측정전경

4.2 충격공진시험방법 [ASTM C 215]

충격공진시험은 1980년대 개발되어 콘크리트 슬래브의 두께측정, 공동 탐사, 박리검사, 텐더 등의 보강재의 상태진단, 다짐불량으로 인한 벌집구조 검출 등과 같은 콘크리트 구조물에 대한 안전도 진단의 수단으로 널리 활용되는 비파괴시험방법의 일종이다.

충격공진시험은 시편에 충격하중을 가하여 시간영역 응답을 측정하고 이를 다시 주파수 영역으로 신호를 변환하여 해석하는 기법이다. 이 시험기법의 원리는 충격 반향기법과 매우 유사하나, 경계조건이 명확한 공시체에 대하여 수행함으로써 미소변형률 영역에서의 탄성계수와 감쇠비를 효과적이고 신뢰성 있게 획득할 수 있는 장점이 있다. 또한, 충격공진시험은 미소변형률 영역에서 동적하중 재하조건에서의 재료적 감쇠비를 매우 신속하고 신뢰성 있게 결정할 수 있는 장점이 있다. 그리고 충격공진 실험기법은 시험장치 구성이 매우 간단하고, 시험수행에 숙련된 기술을 요하지 않을 뿐 아니라 시험수행과 결과해석의 전 과정이 불과 몇 분 내에 완료되는 매우 간편한 비파괴시험 방법이다. 충격공진시험방법에 대

표 3. 수정계수 T^* 의 값

R/L	T^*	R/L	T^*
0.00	1.00	0.09	1.60
0.01	1.01	0.10	1.73
0.02	1.03	0.12	2.03
0.03	1.07	0.14	2.36
0.04	1.13	0.16	2.73
0.05	1.20	0.18	3.14
0.06	1.28	0.20	3.58
0.07	1.38	0.25	4.78
0.08	1.48	0.30	6.07

*동푸아송비를 $1/6$ 로 계산한 값이다. 동푸아송비가 μ_D 일 경우, 다음의 수정계수로 곱한 것으로 한다.

$$G_D = \frac{1 + (0.26\mu_D + 3.22\mu_D^2)k/L}{1 + 0.1328k/L}$$

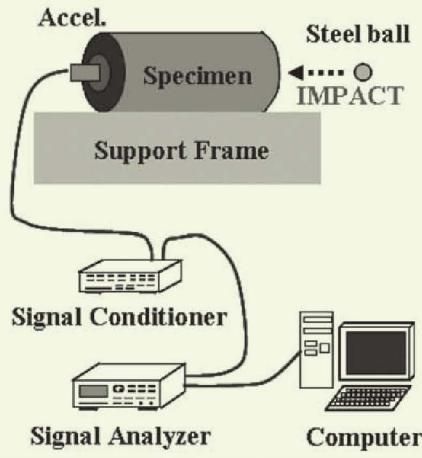


그림 4. 충격공진시험 개요도

한 연구가 국내에서 일부 진행되었지만, 기준은 아직 정립되지 않은 실정이다. 하지만 미국 ASTM C215는 국내 KS F 2437에서 규정하는 공명진동에 의한 동탄성계수 측정방법과 동일한 시험방법에서 추가로 시험체에 충격을 가하는 방법을 규정하고 있으며, <그림 4>에서는 충격공진시험의 개요도를 나타내었고 타격 시험전경은 <그림 5>와 같다.

일반적으로 동적실험에서는 크기가 작은 순간하중을 이용하여 이에 대한 변형률이 매우 작아 초기접선 탄성계수에 가까우며 정탄성계수보다 20~30% 정도 더 높게 나타나는 것으로 보고되고 있다. 따라서 비파괴 시험에서의 동탄성계수는 적절한 환산을 통하여 정탄성계수로의 변환이 요구된다.

5. 맷음말

콘크리트의 탄성계수 측정은 표준 공시체의 파괴시험을 통해 실시하는 것이 일반적이다. 그러나 기존 구조물에 대한 측정은 코어채취 등을 필요로 하고 시험자의 숙



그림 5. 충격공진시험 전경

련도에 따라 값이 달라질 수 있다. 이에 비해 비파괴시험 방법의 경우, 기존 구조물에 손상을 가하지 않고 표준 장비에 의해 비교적 높은 정확성을 가지고 측정이 가능하며 현장 적용성도 높은 장점을 가진다. 아직까지 비파괴 시험방법에 대한 인지도가 떨어지고 국내 표준시험기준이 정립되지 못한 점도 있지만, 관련 기술자들의 노력으로 신뢰성 높은 기준 및 시험법 통해 정확한 탄성계수의 측정이 이루어지길 바란다. □

담당 편집위원 : 이준(한국건설생활환경시험연구원) lj4923@nate.com
이병재((주)제이엔티아이엔씨) lbae80@hanmail.net
오태근(인천대학교) tkoh@incheon.ac.kr

참고문헌

- 1) 한국표준협회, “한국표준정보망 디지털라이브러리”, <http://www.ks.or.kr>.
- 2) 박승범, “최신건설재료실험 제2판”, 문운당, 2010.
- 3) 한국콘크리트학회, “최신콘크리트공학”, 기문당, 2011.
- 4) Sidney Mindess 외, “제2판 콘크리트”, 동화기술, 2008.



이병재 선임연구원은 충남대학교 토목공학과에서 복합슬래그를 활용한 연안해역복원용 친환경콘크리트의 특성에 관한 연구로 2011년 박사학위와 토목품질시험기술사를 취득하였다. 현재 (주)제이엔티아이엔씨 기술연구소에 재직하고 있으며, 관심분야는 건설재료에 있어서 산업부산물의 활용기술, 친환경 콘크리트 및 포장 기술 분야이다.
lbae80@hanmail.net



오태근 교수는 University of Illinois at Urbana-Champaign 토목공학과에서 콘크리트 구조물에 대해서 초음파를 활용한 균열탐지 및 손상파악에 대한 연구로 2012년 박사학위를 취득하였다. 현재 인천대학교 안전공학과에 재직하고 있으며, 관심분야는 토목 및 건축 구조물에 있어서 다양한 비파괴 방법을 이용 한 구조물 건전성 모니터링이다.
tkoh@inu.ac.kr