

사용 재료별 고강도콘크리트의 탄성계수 특성에 관한 실험적 연구

A Experimental Study on the Elastic Modulus Property of High Strength Concrete Using the Various Materials

김동석 * 하재담 ** 김기수 *** 최 롱 ****
Kim, Dong-Seuk Ha, Jae-Dam Kim, Ki-Soo Choi, Long

ABSTRACT

The Elastic modulus depends on the elastic property of composition materials, the gravity of aggregate, the bond strength of binder, the usage and quantity of admixture, curing and measuring method, etc. Accordingly, the aim of this study, by manufacturing concrete of practical high strength range(600~1000kg/cm²) with the specific cement and mineral admixtures, is to compare elastic modulus with the existing equations and also to estimate elastic property of use materials.

As a result, it could be confirmed that the existing equations which were proposed by the ACI 363, CEB-FIP Code, and New-RC have a tendency to the overestimation in general. However, it could be confirmed that the KCI-96 and Norwegian NS 3473 equations are closed to measuring results, and that the elastic modulus property have a different tendency due to types of cements.

1. 서론

최근 들어 건설 구조물의 대형화 및 특수화 추세에 따라 국내에서도 점차 고강도콘크리트를 이용한 설계반영 및 일부 사용실적이 증가하고 있으나 국내의 경우 고강도콘크리트의 실용적 제법 및 재료특성에 대한 연구가 아직 미미한 실정이다. 또한 현재 콘크리트 구조물의 시방규준의 대부분이 외국의 규준 및 저강도 영역(400kg/cm²이하)의 콘크리트에 대한 실험 결과치를 근거로 하고 있어 국내 재료를 사용한 고강도콘크리트의 구조적 거동 및 현상을 예측하는데 많은 제약이 따르고 있다.

따라서 본 연구에서는 시멘트 결합재 측면에서 고강도콘크리트 제조에 실용화가 가능한 고기능성 시멘트 및 Silica fume, Fly ash, 고로Slag미분말 등의 광물질 혼합재를 이용하여 실용 고강도영역(600~1000kg/cm²)에서 콘크리트 구조물의 설계나 해석에 있어서 중요한 재료특성인 탄성계수를 실측하여 국내의 시방규준(KCI-96) 및 ACI 363식, CEB-FIP CODE식과 일본의 New-RC 규준식과 비교 분석과 함께 시멘트 종류에 따른 고강도콘크리트의 탄성계수 특성을 규명하여 향후 국내 고강도콘크리트의 설계 규준 정립 및 실용화에 기초적 자료를 제공하고자 한다.

- * 정희원, 쌍용양회(주) 중앙연구소 콘크리트연구실 주임연구원
- ** 정희원, 쌍용양회(주) 중앙연구소 콘크리트연구실 선임연구원(공학박사)
- *** 정희원, 쌍용양회(주) 중앙연구소 콘크리트연구실장(공학박사)
- **** 정희원, 쌍용양회(주) 중앙연구소장(공학박사)

2. 실험개요

2.1 실험계획

고강도콘크리트의 재료적 특성 평가를 위한 시멘트 종류로 T는 고유동, 고강도, 저발열 특성을 가지는 Belite시멘트(이하, Belite 표기)와 조기 고강도발현을 목적으로 제조한 고강도시멘트를 사용하였고, 혼합재로는 1종시멘트를 Base로 하여 일반적으로 특수콘크리트 제조에 널리 활용되고 있는 Silica fume, Fly ash, Slag 미분말 등의 광물질 재료를 사용하였다. 실험 인자 및 수준은 사용 시멘트별 실용 고강도콘크리트(600~1000kg/cm²) 제조에 적합한 수준의 콘크리트 배합인자를 고려하여 선정하였으며, 각 시멘트 종류별 실험인자 및 수준은 표1에 나타내었다.

표1. 시멘트 종류별 실험계획

시멘트 종류	실험인자 및 수준				비 고 (실험 Data)
	W/C비 (%)	단위수량(kg/m ³)	잔골재율(%)	치환율(%)	
Belite시멘트	28, 32, 36	155, 165, 175	35, 40, 45	-	15
고강도시멘트	24, 28, 32	155, 165, 175	35, 40, 45	-	11
1종 + Silica fume	24, 28, 32	155, 165, 175	40	5, 10, 15	15
1종 + Fly ash	24, 28, 32	155, 165, 175	40	5, 15, 25	7
1종 + Slag 분말	24, 28, 32	155, 165, 175	40	20, 30, 40	7

2.2 사용재료

2.2.1 화학 혼화제

화학 혼화제의 선정은 감수성능 및 경시변화 특성을 고려하여 고강도콘크리트 제조에 가장 효과적인 인 폴리카본산계의 고성능 AE감수제를 사용하였다.

2.2.2 결합재

고강도콘크리트 배합실험에 사용된 결합재는 시멘트 Type의 경우 고강도 발현에 유리한 Belite시멘트(이하, Belite 표기) 및 고강도시멘트(이하, HSC 표기)를 이용하였고, 또한 혼합계 Type으로써는 1종시멘트(이하, OPC 표기)를 Base로 하여 노르웨이산 Elkem 940의 Silica fume(이하, S/F 표기)과 삼천포산 분급 Fly ash(이하, F/A 표기) 및 분말도 6,000cm²/g의 고로Slag 미분말(이하, S/G 표기)을 사용하였으며, 각 대상재료별 화학성분 및 물리특성은 표3, 표4와 같다.

표3. 시멘트의 광물조성 및 물리적특성

시멘트 종 류	비중	Blaine (cm ² /g)	용결(h:m)		압축강도(kg/cm ²)				광물조성(%)			
			초결	종결	3일	7일	28일	56일	C3S	C2S	C3A	C4AF
Belite	3.20	4,180	5:20	8:30	191	292	452	551	28.39	50.54	2.38	11.01
HSC	3.18	4,100	3:35	5:45	259	350	455	520	36.96	34.61	5.91	12.00
OPC	3.15	3,250	4:30	6:50	228	323	413	458	47.24	23.30	10.07	9.91

표4. 혼합재의 화학성분

종 류	화학조성 (%)								
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	lg-loss
S/F	94.3	1.5	0.4	0.2	0.4	0.24	0.89	-	1.90
F/A	62.4	23.6	6.1	3.9	1.0	0.49	0.96	0.40	3.90
S/G	32.9	13.1	1.1	43.1	6.0	0.23	0.45	1.63	0.02

2.1.3 골재

사용골재는 잔골재의 경우 비중 2.58, 조립율 2.73인 대전 인근의 부강산 하천사와 굵은골재는 비중이 2.72인 단양산 19mm 쇄석을 사용하였으며, 그 물리적 특성은 표5에 나타내었다.

표5. 골재의 물리적특성

골재종류 \ 항목	비중	흡수율 (%)	단위용적중량 (kg/m ³)	실적율 (%)	조립율	비고 (산지)
잔골재	2.58	1.1	1,626	-	2.73	부강산
굵은골재(19mm)	2.72	0.7	1,571	57.0	6.74	단양산

3. 실험방법

3.1 콘크리트 배합

고강도콘크리트의 배합실험은 각 재료별 실용 고강도(600~1000kg/cm²) 확보에 적절한 배합인자 선정을 통해 KS F 2402(Slump) 및 KS F 2421(공기량)에 따른 Fresh콘크리트의 특성평가와 함께 KS F 2405에 준한 재령별(7, 28, 56일) 강도측정용 시편(∅10×20cm)을 제작하였으며, 배합조건 및 혼합방법은 표1 및 그림1과 같다.

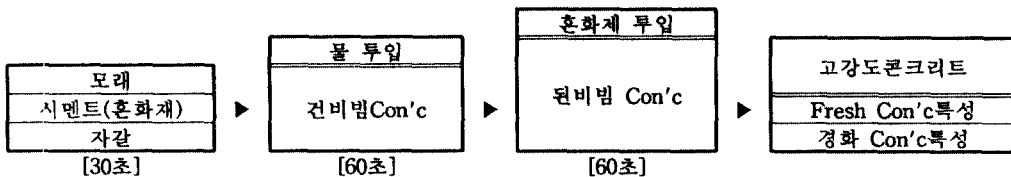


그림1. 혼합방법

3.2 탄성계수 측정

제작된 시편의 탄성계수 측정은 Compresso 및 Extensio Meter를 사용하여 ASTM C 469에 준한 최대 응력의 40% 수준에서의 할선 탄성계수(Secant Modulus)를 측정하였으며, 측정값은 28일 재령 기준 2개 공시체의 평균치로 하였으며, 또한 실측결과와 고강도콘크리트의 탄성계수 추정 표준식들과의 비교를 위해 콘크리트 배합실험시 사용재료의 단위용적중량 산정 및 공시체 강도시험 전에 콘크리트의 단위용적중량을 측정하여 표준식에 의한 탄성계수를 계산하였다.

4. 각국의 탄성계수 표준식

콘크리트의 탄성계수는 구조물의 설계나 해석에 있어 중요한 재료적 물성치로써 각 구성재료의 탄성특성과 체적비, 굵은골재의 비중, 골재와 시멘트의 부강장도, 혼화재료의 사용량, 양생방법 및 측정방법 등의 많은 변수들에 의해 영향을 받으므로 명확하게 규명하는 것은 어려우나 일반적으로 콘크리트의 탄성계수 평가는 압축강도와 단위용적중량의 함수로 예측하고 있다. 하지만 콘크리트가 고강도화 됨에 따라 탄성계수 특성은 크게 달라지기 때문에 이에 대한 합리적인 평가를 위해 96년에 개정된 국내 콘크리트 사양서(KCI-96)의 경우 ACI 363식을 간략화하여 압축강도 300kg/cm²이상에 대한 별도의 표준식을 제시하고 있고, 국외의 경우도 각국의 실정에 알맞은 고강도콘크리트의 탄성계수 추정에 대한 여러 표준식들을 사용하고 있으며, 그 자세한 내용은 표6과 같다.

표6. 각국의 탄성계수 표준식⁷⁾

(단위: kg/cm²)

구 분	탄성계수식	비 고
KCI-96 표준식(국내)	$E_c = (10,500 \cdot \sqrt{\sigma_{ck}} + 70,000$	• $300\text{kg/cm}^2 \leq \sigma_{ck}$
ACI 363식	$E_c = (10,500 \cdot \sqrt{f'_c} + 70,000 \cdot \left(\frac{\gamma_c}{2.346}\right)^{1.5}$	• $326\text{kg/cm}^2 \leq f'_c \leq 786\text{kg/cm}^2$ • $2.32\text{t/m}^3 \leq \gamma_c \leq 2.42\text{t/m}^3$
New-RC 제안식(일본)	$E_c = k_1 \cdot k_2 \cdot 40,250 \cdot \sqrt[3]{f'_c} \cdot \left(\frac{\gamma_c}{2.4}\right)^2$	• $204\text{kg/cm}^2 \leq f'_c \leq 1,632\text{kg/cm}^2$ • $1.5\text{t/m}^3 \leq \gamma_c \leq 2.5\text{t/m}^3$ • k_1 (골재종류), k_2 (혼화제 종류) _k
CEB-FIP Code식	$E_c = \alpha \cdot 47,000 \cdot \sqrt[3]{f_{ck} + 8}$	• $f_{ck} \leq 816\text{kg/cm}^2$ • α (골재종류 보정)
Norwegian Code NS 3473식	$E_c = 48,300 \cdot f_{cc}^{0.3} \cdot \left(\frac{\gamma_c}{2.4}\right)^{1.5}$	• $255\text{kg/cm}^2 \leq f_{cc} \leq 867\text{kg/cm}^2$ ($10 \times 10 \times 10\text{cm}$)

5. 실험결과 및 고찰

5.1 표준식과의 고찰

그림2은 사용재료를 달리한 고강도콘크리트($600 \sim 1000\text{kg/cm}^2$)의 탄성계수 실측치와 각국의 표준식과의 비교결과를 나타낸 것이다. 일반적으로 고강도콘크리트의 탄성계수에 대한 다수의 국내 실험결과에 의하면 외국의 경우에 비해 다소 낮은 값을 가진다고 보고되고 있으며, 본 실험 Data의 경우도 전반적으로 외국의 표준식보다는 다소 낮은 경향을 가짐을 알 수 있다.

본 실험에서 탄성계수 측정에 사용된 콘크리트의 평균 단위용적중량 측정치는 2.421kg/m^3 수준이었으며, 이를 고려한 각국에서 제시된 표준식과의 비교결과 국내 콘크리트 시방규준의 KCI-96식과 Norwegian Code NS 3473식은 고강도영역($600 \sim 1000\text{kg/cm}^2$)에서 실험 결과치에 가장 근접한 결과를 보이나 KCI-96식은 콘크리트가 고강도화됨에 따라 다소 과대평가되는 경향을 가진다.

또한 CEB-FIP Code식은 실측치보다 사용재료별 평균 12~18% 과대평가하는 것을 알 수 있으며, ACI 363식은 국내 시방규준식과 유사하나 콘크리트의 단위용적을 고려함에 따라 약 3~7% 수준, 일본의 New-RC 제안식의 경우도 약 5% 정도 실측치보다 과대평가되는 경향을 가진다는 것을 알 수 있다.

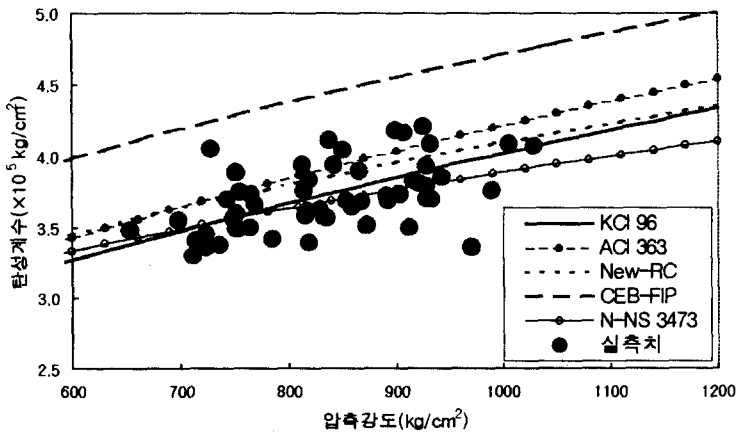


그림 2. 탄성계수 실측치와 각국 표준식과의 비교

5.2 사용재료별 고찰

그림 3은 사용재료의 종류에 따른 탄성계수비(실측치/계산치)의 각국 기준식과 비교결과를 나타낸 것이다. 콘크리트가 고강도화됨에 따라 사용 재료별 다른 경향을 가진다는 것을 알 수 있다. Belite의 경우 고강도콘크리트에 대한 각 기준식과의 비가 약 0.81~0.98 수준이나 강도가 증가함에 따라 비교적 일정한 경향을 보였으며, HSC의 경우는 실측치와 계산치의 비가 약 0.88~1.04 수준의 결과를 보였으나 강도가 증가함에 따라 각 기준식은 과대평가되는 경향을 보였다.

혼합재 종류에 따라서는 OPC+S/F의 경우 기준식과의 비가 각 0.82~1.00 수준으로 강도에 따른 탄성계수 특성은 Belite와 매우 유사한 경향을 보였으며, 반면에 OPC+F/A의 경우는 0.88~1.07 수준으로 CEB-FIP Code식을 제외하면 전체적으로 각 기준식을 상회하는 결과를 보이거나 강도가 증가하면서 기준식에 비해 과소평가되는 경향이 뚜렷한 특성을 보였다. 또한 OPC+S/G의 경우도 전반적으로 기준식보다는 낮은 결과를 보이거나 강도에 따라 다소 과대평가되는 경향을 가진다는 것을 알 수 있다. 따라서 고강도콘크리트의 탄성계수 특성은 각 기준식이 강도와 단위용적중량의 함수로써 제시됨에 따라 시멘트 재료측면에서의 수화 및 강도발현 특성의 영향도 크게 작용하는 것으로 판단된다.

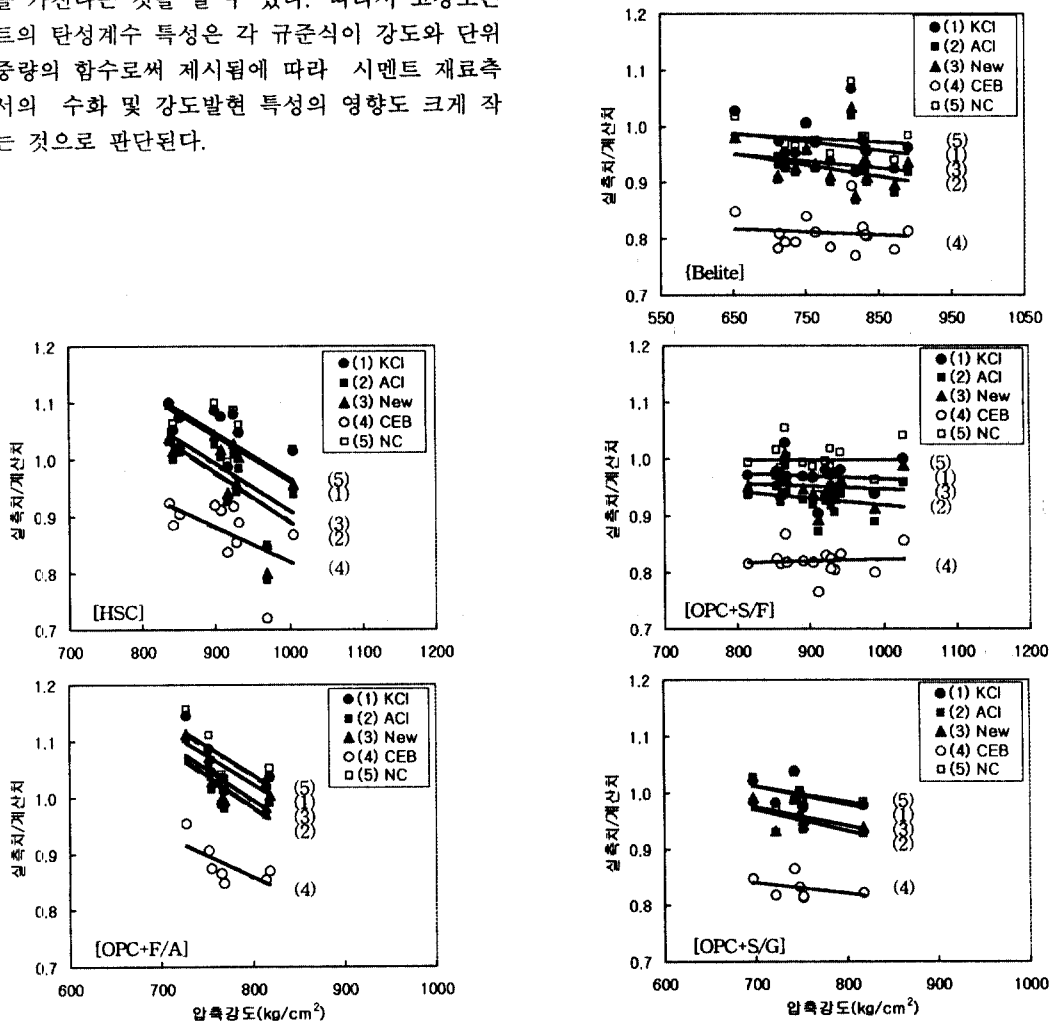


그림 3. 시멘트 종류별 각국의 기준식과 탄성계수비(실측치/계산치) 비교

6. 결론

고강도콘크리트 제조에 실용화가 가능한 재료들을 이용한 실용 고강도영역($600\sim 1000\text{kg/cm}^2$)에서의 탄성계수 실험결과에 대해 각국의 규준식 및 사용 재료에 따른 비교결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 전반적으로 외국의 규준식보다는 다소 낮은 경향을 가지며, CEB-FIP Code식은 실측치보다 12~18% 과대평가하는 반면, 국내 콘크리트 시방규준의 KCI-96식과 Norwegian Code NS 3473식은 고강도영역($600\sim 1000\text{kg/cm}^2$)에서 실험 결과치에 가장 근접한 결과를 보이거나 KCI-96식은 콘크리트가 고강도화됨에 따라 다소 과대평가되는 경향을 보였다.

2) 또한 사용 재료측면에서 Belite 시멘트 및 OPC+S/F의 경우 탄성계수 실측치가 각 규준식보다 다소 낮은 결과를 가지며 고강도화됨에 따라 일정한 경향을 보였으나, HSC와 OPC+F/A의 경우는 규준식을 다소 상회하지만 강도가 증가함에 따라 규준식에 비해 과소평가되는 특성을 보였다.

따라서 고강도콘크리트의 탄성계수 특성은 각 규준식이 강도와 단위용적중량의 함수로써 제시됨에 따라 시멘트 재료측면에서의 수화 및 강도발현 특성의 영향도 크게 작용하는 것으로 판단된다.

7. 참고문헌

- 1) KS F 2438 : 콘크리트 원주 공시체의 정탄성계수 및 포아슨비 시험방법.
- 2) ASTM, Designation C 469 : Method of Test for Static Young's Modulus of Elasticity and Poison's Ratio in Compression of Cylindrical concrete Specimens.
- 3) 건설교통부, 콘크리트표준시방서, 1996.
- 4) ACI Committee 363, "State-of-Art Reprt on High Strength Concrete(ACI 363R-84)", ACI, Detroit, 1989.
- 5) CEB-FIP, Bulletin D'Information No. 197, High-strength Concrete State-of-Art Report, Aug. 1990.
- 6) 이장화 외 3인, "고강도콘크리트의 실용화를 위한 연구", 한국콘크리트학회 학술발표회 논문집, 제 3권 2호, 1991, 11.
- 7) 박훈규 외 3인, "고강도 콘크리트에 대한 탄성계수식 비교연구", 한국콘크리트학회 학술발표회 논문집, 제 8권 2호, 1996, 11.