

고강도 콘크리트의 실용성 향상을 위한 실험적 연구

An Experimental Study for Improving the Applicability of High-Strength Concrete

유 영 찬* 민 병 렬* 이 장 화** 김 공 환***
You, Young Chan Min, Byung Yeol Lee, Jang Hwa Kim, Keung Hwan

요 약

본 연구의 목적은 현장에서 구입 가능한 저품질의 재료를 사용한 일련의 실험을 통하여 28일 압축강도와 물·시멘트비와의 관계를 유출함으로써 고강도 콘크리트의 배합설계식을 얻기 위한 것이다. 목표슬럼프는 고층건물체의 시공성을 고려하여 $15\pm 2\text{cm}$ 로 하였으며 혼화제로는 고성능감수제를 사용하였다. 실험결과로부터 고강도콘크리트의 응력-변형도 특성을 비롯하여 탄성계수, 포아송비, 단위중량 등 고강도콘크리트의 일반적인 재료성질을 얻었으며 본 연구에서 제안한 고강도콘크리트의 배합설계식은 국내 현장조건을 고려한 실용식으로 고강도콘크리트의 설계 및 시공을 위한 기초자료로 사용 가능하다고 판단된다.

Abstract

Tests were conducted to get a general mix-proportioning relationship of high strength concrete using low quality materials easily purchased in situ. The superplasticizer was used as a chemical admixture to compensate low slump of base concrete keeping its slump up about $15\pm 2\text{cm}$. General material properties such as modulus of elasticity, poisson's ratio, unit weight and stress-strain characteristic of high strength concrete were obtained. Test results show that mix proportioning of high strength concrete proposed in this paper have reasonable validity and it can be used as basic data in design and construction of high strength concrete.

Keywords : High strength, concrete, stress-strain, elasticity, mix-proportioning unit-weight

1. 서 론

고강도콘크리트는 고층건물의 콘크리트 시공 및 상경간 콘크리트 교량의 건설 등 종래에 불가능했던 일들을 가능하게 하고 있으며 부재의 단면감소로 인한 자중의 감소로

인하여 구조물의 내진성능 향상에도 많은 기여를 하고 있다. 또한 고강도콘크리트를 이용한 구조물이 철골 구조물의 경우보다 경제성이 훨씬 높아 건설비의 절감을 가져올 수 있다. 따라서 선진 외국에서는 고강도콘크리트의 건축물체에 적용을 위하여 재료자체의 개발은 물론 고강도콘크리트를 이용한 부재들의 역학적 성질 및 내진성능 향상에 관한 연구도 활발히 진행되고 있다.

이와 같이 고강도콘크리트에 관한 연구가 미국, 일본등

* 한국 건설기술연구원 구조연구실 연구원

** 한국 건설기술연구원 구조연구실 선임연구원

*** 한국 건설기술연구원 구조연구실장, 공박

선진국에서는 700~1300kg/cm² 수준에 도달되어 있고 다각적인 실용화 방안이 제시되었으며 실제 시공상에도 많이 적용되고 있음에도 불구하고 국내에 이를 도입·적용할 수 없는 가장 큰 이유중의 하나는 현장기술자들의 기술수준, 현장사정 등의 외적인 요인 이외에도 콘크리트를 구성하는 재료의 지역적 차이에 의해 외국에서 제시된 표준배합표를 직접 국내 현실에 적용할 경우 많은 무리가 따르기 때문이다. 또한 국내에서는 최근의 시대적 요구에 따라 일부대학 및 연구소, 또는 기업자체의 연구를 통하여 고강도콘크리트의 개발 및 건축물への 적용을 위한 부재실험을 비롯하여 현장 시공성 실험을 수행하고 있으나^(1,2) 고강도콘크리트 배합설계시 가장 문제가 되는 시공성확보를 위한 소요슬럼프 유지 및 직접 현장에 적용할 수 있는 현장조건에 의한 실험 등의 분야는 계속적인 연구가 필요하다고 사료된다. 따라서 본 연구에서는 고강도콘크리트의 목표강도를 상향 확보하는 관점보다는 일정수준(400kg/cm²~500kg/cm²)의 고강도콘크리트를 50층 규모의 RC 구조물 건설시에 실용화시키는 것을 목적으로 하여 시공성확보를 위한 소요슬럼프 유지를 우선으로 하고 재료선정 및 실험조건을 국내의 현실적인 현장조건에 근접하는 가능한 불리한 조건을 설정하여 국내현장로의 직접 적용에 도움이 되도록 실험을 실시하였다.

2. 재료 선정

2.1 시멘트

국내의 일반현장에서 사용되고 있는 시멘트는 국내 내수용으로 제작회사에 관계없이 무작위로 선택되고 있으며 또한 어느 정도 풍화가 진행된 상태라 예상되기 때문에 본 실험에서는 이에 준하는 제품을 선택하였다. 다만 시험의 일관성을 유지하기 위하여 시중에 유통되고 있는 단일회사(S사)의 제품을 사용하였으며 선택된 시멘트는 비중시험결과 비중이 3.10으로 나타났다.

2.2 골재

잔골재는 한강상류지역의 3종류를 선정하여 체가름 시험을 실시한 후 각체의 표준입도를 모두 만족시키고 고강도콘크리트에 유리하다고 제안되어진^(3,4) 조립을 2.7~3.2의 하한치를 나타내고 있는 미사리골재를 선택하였

다. 굵은 골재는 굵은골재 최대치수가 25mm인 안양산 쇄석골재를 선택하였으며 현장조건을 고려하여 물세척을 하지 않고 사용하였다. 또한 골재의 강도차에 의한 영향을 배제하기 위하여 로스엔젤레스 마모시험에 의한 마모율이 40%로서 규준이 정하는 최대치 값을 나타내고 있는 골재를 사용하였다. 선택된 골재의 물리적 성질을 도표로 나타내면 표1과 같다.

Table. 1 Physical properties of aggregates

	Maximum size of aggregate (mm)	Specific gravity	Absorption ratio (%)	Finesness moduli
Fine aggregate	-	2.63	1.52	2.74
Coarse aggregate	25	2.60	0.75	7.16

2.3 혼화제

고강도콘크리트는 물·시멘트비가 낮고 단위수량이 적기때문에 감수제 계통의 혼화제를 사용하지 않을 경우 적절한 작업성(Workability)을 확보하기 어렵다. 본 실험에서는 콘크리트의 제성질에 해로운 영향을 끼치지 않으면서 종래의 감수제에 비해 감수효과가 탁월한 ASTM C494 Type F로 규정된 나프탈린계의 고성능감수제(DAREX SUPER 20)와 ASTM C260에 규정된 공기연행제(DAREX AEA)를 사용하였다. 사용된 혼화제의 주요 성분 및 성상은 표2와 같다.

Table. 2 Chemical admixture

	Class	Type	Main Constituent	Specific gravity	Standard dosage rate
High-range water reducer	ASTM C494	Liquid	Naphtalene polymers	1.21	0.36~3.0%
Air-entraining admixture	ASTM C260	Liquid	Sulfonated hydrocarbon	1.03	0.04~0.07%

3. 배합 설계

3.1 배합설계 변수

본 연구에서 고려된 실험변수는 아래와 같으며 이를 도표로 나타내면 그림1과 같다.

(1) 물·시멘트비

고려된 물·시멘트비는 초고층 구조물에 실제로 적용할 것을 목표로 하고 있기 때문에 도입 초기단계임을 고려하

실험 수	물 시멘트 비	고성능감수제 투입 전 콘크리트의 슬럼프	고성능 감수제 투입 시기	양생 조건
내 용	33 %	제로 슬럼프 (슬럼프만큼 없는 슬럼프)	비빔후 즉시	표준
	35 %			
	38 %			
	40 %	1 ~ 2 cm 의 슬럼프	비빔후 소요량의 1/2 의 타설시 소요량의 1/2	대기
	43 %			
	45 %			

Fig. 1 Variable of mix-proportioning

여 33%~45%로 하였다.

(2) 고성능감수제 투입 전 콘크리트의 슬럼프

사용되는 고성능감수제량은 고성능감수제를 첨가하지 않은 콘크리트의 슬럼프를 제로 슬럼프로 한 후 고성능감수제로 소요슬럼프를 보정할 경우의 단위 시멘트량과 콘크리트의 슬럼프를 1~2cm 정도 확보한 후 고성능감수제로 소요슬럼프를 보정할 경우의 단위시멘트량에 따라 달라진다.

(3) 고성능감수제 투입시기 및 투입량

레미콘을 생산하여 현장까지 운반하는 시간은 건설부 제정 콘크리트 표준시방서⁽⁶⁾에서 온난건조시 운반 타설까지의 시간을 60분으로 제한하고 있다. 따라서 이와같은 시간의 간격을 고려하기 위하여 고성능감수제의 투입량을 비빔직 후 소요량의 1/2, 60분의 운반시간 후 나머지 1/2을 투입하였다.

(4) 양생조건(표준, 대기)

대기양생조건은 실험실 내에서 타설 후 3일까지 하루 1회 표면이 쉴 정도 물을 뿌리고 비닐로 덮어 수분의 증발을 억제하였으며 이후 야외에 방치하는 것으로 하였다.

3.2 배합설계 결과 및 분석

이상의 배합조건 및 설계변수로 부터 각각의 물·시멘트비에 대하여 시멘트량과 잔골재율을 변화시키면서 목표 슬럼프 15±2cm를 얻기 위한 시험배합을 실시하였다. 시험배합은 10ℓ 정도 양에 대하여 실험실 내의 그늘진 곳에서 손비빔으로 하였다.

Table. 3 Standard mix-proportioning table

	Maximum size of aggregate (mm)	Target slump (cm)	Water-Cement ratio (%)	Fine aggregate ratio (%)	Unit weight (kg/m ³)				
					Water	Cement	Fine Aggregate	Coarse Aggregate	S.P (%)
Case 1	25	17	33	35	165.0	500.0	606.3	1113.2	1.0
	25	17	35	35	157.5	450.0	628.1	1153.1	1.7
	25	18	38	35	163.4	430.0	628.6	1154.1	1.0
	25	17	40	37	164.0	410.0	670.2	1128.1	1.3
	25	17	43	37	167.7	390.0	672.9	1132.6	1.0
	25	17	45	37	166.5	370.0	680.3	1145.1	1.3
Case 2	25	16	33	35	231.0	700.0	486.2	892.6	0.3
	25	17	35	35	210.0	600.0	535.2	982.7	0.3
	25	14	38	35	190.0	500.0	583.2	1071.0	0.5
	25	17	40	37	180.0	450.0	642.8	1080.8	0.5
	25	15	43	37	184.9	430.0	643.6	1083.3	0.5
	25	16	45	37	180.0	400.0	657.8	1107.2	0.3
Case 3	25	13	35	35	157.5	450.0	628.1	1153.1	2.0
	25	17	40	37	164.0	410.0	670.2	1128.1	1.5
	25	15	45	37	166.5	370.0	680.3	1145.1	1.6
Case 4	25	15	35	35	210.0	600.0	535.2	982.7	0.9
	25	15	40	37	180.0	450.0	642.8	1080.8	1.2
	25	15	45	37	180.0	400.0	657.8	1107.2	0.6

-Case 1: Mix-proportioning for concrete whose slump at base concrete condition is below zero.

-Case 2: Mix-proportioning for concrete whose slump at base concrete condition is about 1~2cm.

-Case 3, Case 4: Mix-proportioning for concrete to which half of required S.P. is added when mixed and the other is added after 1 hour.

Case 1 and Case 2 correspond to Case 3, Case 4 respectively.

4. 실험결과와 비교·분석

표3에 의한 배합설계에 대하여 각각 공시체를 제작한 후 재령에 따른 압축강도 시험을 실시하였다. 시험체 크기는 Φ10×20cm이며 Φ15×30cm의 표준 공시체에 대하여 0.95의 강도보정을 실시하였다. 하중재하는 용량 100t의 유압식 시험기를 사용하여 매초 1.5~3.5kg/cm²의 일정한 속도로 하중을 가하였고 가해진 하중은 50t 용량의 로드셀을 통하여 측정하였다. 캘핑 재료로는 시멘트 모르타를 사용하였으며 시험에 의해 얻은 각 배합설계별 압축강도는 표4와 같다.

4.1 압축강도

배합설계에 의해 얻은 콘크리트 압축강도를 물·시멘트비에 대하여 1차 회귀 분석함으로써 고강도 콘크리트 배합설계를 위한 초기 단계에서 필요한 물·시멘트비와 28일 압축강도와의 관계식을 얻을 수 있다(그림2). 도표안에 나타난 식은 물·시멘트비에 대한 강도의 함수를 1차 회귀분석한 값이고 r은 상관계수(Correlation Coefficient) 값이며 직선은 표준양생, 점선은 대기양생을 나타내

Table. 4 Compressive strength

	w/c	3-day strength (kg/cm ²)		7-day strength (kg/cm ²)		28-day strength (kg/cm ²)	
		Water curing	Dry curing	Water curing	Dry curing	Water curing	Dry curing
		Case 1	33	410.0	354.3	445.0	421.0
	35	367.6	340.0	420.0	411.7	480.0	453.0
	38	315.5	312.3	370.3	352.1	462.2	445.6
	40	308.8	294.1	354.3	334.2	448.2	412.9
	43	241.5	214.2	346.7	288.8	427.1	400.1
	45	240.7	211.3	309.4	273.9	400.0	393.3
Case 2	33	361.0	314.2	397.5	362.7	502.6	455.5
	35	304.7	267.7	374.3	331.2	491.8	459.5
	38	300.0	257.0	349.0	334.2	450.0	436.0
	40	268.7	249.0	343.6	330.0	440.5	403.3
	43	211.3	188.0	309.5	291.1	424.4	375.1
	45	191.6	182.7	280.7	243.3	375.8	332.4
Case 3	35	374.3	369.8	443.0	436.0	493.0	518.0
	40	378.8	342.2	401.0	427.8	433.9	454.3
	45	322.6	291.5	327.4	381.0	388.8	298.6
Case 4	35	361.0	372.0	407.8	391.7	488.0	502.9
	40	378.8	370.0	394.4	397.5	446.1	460.5
	45	232.6	227.3	294.1	273.6	374.3	348.8

고 있다. 그림2(a), (b)에서 보는 바와 같이 제안된 배합설계식은 미국 개척국(Bureau of Reclamation) 콘크리트편람에서 제시한 공기연행제를 사용하지 않은 콘크리트에 대한 배합식과 유사한 경향을 나타냄으로써 본 제안식의 타당성을 간접적으로 입증하고 있다. 즉 기 제안된 배합설계식들은 강도가 고강도화됨에 따라 배합식의 기울기는 작아지며 y 절편값은 커지는 경향을 나타내고 있다. 따라서 기술한 기 제안식들의 이러한 경향 및 Case 1식의 적용범위가 400~500kg/cm²인 것을 감안하면 본 제안식은 실용식으로 사용 가능하다고 판단된다.

(미 개척국(Bureau of Reclamation) 콘크리트 편람의 콘크리트 배합설계식)

$\sigma_{28}=160\sim 230\text{kg/cm}^2$ 인 경우 :

$$\sigma_{28}=230(W/C)-139 \quad (1)$$

$\sigma_{28}=231\sim 330\text{kg/cm}^2$ 인 경우 :

$$\sigma_{28}=190(W/C)-76 \quad (2)$$

$\sigma_{28}=331\sim 385\text{kg/cm}^2$ 인 경우 :

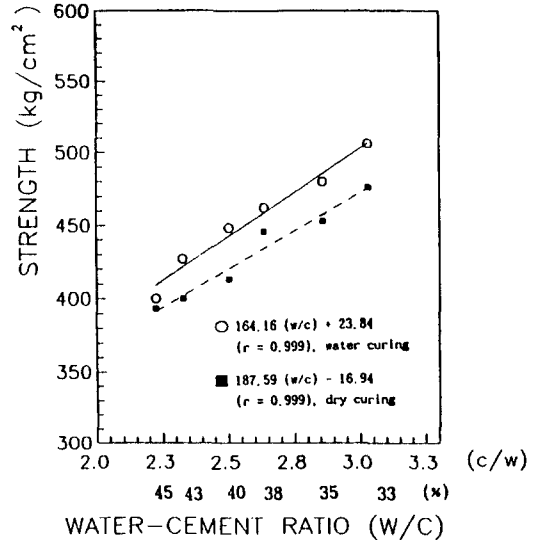
$$\sigma_{28}=144(W/C)+22 \quad (3)$$

한편 Case 3과 Case 4는 각각 Case 1과 Case 2와 동일 배합 조건하에서 콘크리트의 운반거리를 고려하여 약 1시간동안 강제식 믹서로 비빔을 계속한 경우로 비빔시의 온도 및 비빔을 실시한 날의 습도(우천시, 호린날, 맑은날)등에 상당한 영향을 받아 물·시멘트비에 대한 강도

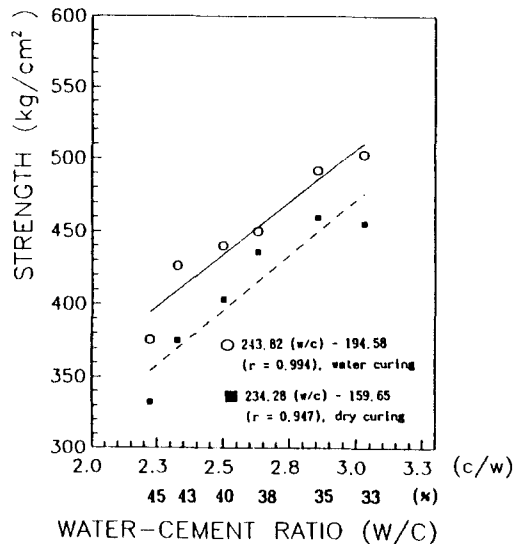
특성의 변화가 커진 것으로 판단된다. 따라서 본 조건하에 대해서는 더 많은 실험을 통하여 합리적인 배합설계식의 유용도가 필요하다고 사료된다.

4.2 28일 강도 추정식

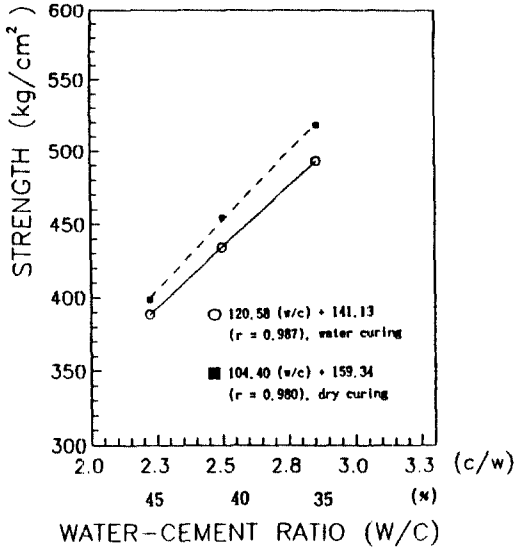
고강도콘크리트는 일반콘크리트에 비해 강도가 조기 발현되므로 일반콘크리트로의 적용을 목적으로 제안된



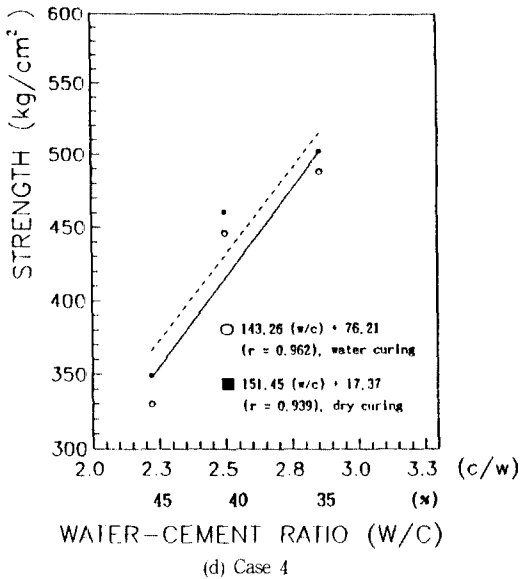
(a) Case 1



(b) Case 2



(c) Case 3



(d) Case 4

Fig. 2 28-day compressive strength versus w/c

28일 강도 추정식은 고강도콘크리트의 경우 28일 강도를 과대 평가하게 된다. 따라서 각 배합설계별로 얻은 7일 강도에 대하여 기 제안식들을 적용시키고 28일 강도와 비교하여 제안식들의 적용성을 검증하였다(표5).

표에서 보는 바와 같이 표준양생의 경우를 기준으로 했을 때 기존에 제안된 제안식들 모두 28일 강도에 대하여 7일강도가 400kg/cm² 이상인 경우 약 20%, 300~

Table. 5 Comparison of proposed 28-day compressive strength presumption formulars based on 7-day compressive strength

	Test Result (kg/cm ²)	28-day compressive strength presumption formular							
		Slater		JASS 5		CEB- FIP			
		7-day w/c strength	28-day strength	28-day strength	Proposed Tested	28-day strength	Proposed Tested	28-day strength	Proposed Tested
Case 1	33	445.0	506.3	613.8	1.21	630.8	1.25	684.6	1.35
	35	420.0	480.0	584.0	1.22	597.0	1.24	646.2	1.35
	38	370.3	462.2	524.2	1.13	529.9	1.15	569.7	1.23
	40	354.3	448.2	504.9	1.13	508.3	1.13	545.1	1.22
	43	346.7	427.1	495.7	1.16	498.0	1.17	533.4	1.25
45	309.4	400.0	450.1	1.13	447.7	1.12	476.0	1.19	
Case 2	33	397.5	502.6	557.0	1.11	566.6	1.13	611.5	1.22
	35	374.3	491.8	529.1	1.08	535.3	1.09	575.8	1.17
	38	349.0	450.0	498.5	1.11	501.1	1.11	536.9	1.19
	40	343.6	440.5	491.9	1.12	493.9	1.12	528.6	1.20
	43	309.5	424.4	450.2	1.06	447.8	1.06	476.2	1.12
45	280.7	375.8	414.7	1.10	408.9	1.09	431.8	1.15	
Case 3	35	443.0	493.0	611.4	1.24	628.0	1.27	681.5	1.38
	40	401.1	433.9	561.3	1.29	571.5	1.32	617.1	1.42
	45	372.4	388.8	526.8	1.35	532.7	1.37	572.9	1.47
Case 4	35	407.8	488.3	569.4	1.17	580.5	1.19	627.4	1.28
	40	394.4	446.1	553.3	1.24	562.4	1.26	606.8	1.36
	45	344.8	374.3	494.3	1.32	495.5	1.32	530.5	1.42

400kg/cm²인 경우 약 10% 정도 실험값보다 높은 값을 나타내고 있다. 따라서 기존의 제안식들은 7일 강도가 300kg/cm² 이상인 고강도콘크리트에는 적용하기 어려울 것이라 판단되며 JASS 5의 제안식에 근간한 새로운 추정식을 제안하기 위하여 Case별로 7일강도와 28일 강도를 도표로 나타내었다(그림3).

제안된 28일 강도 추정식은 고강도콘크리트의 강도발현 특성을 어느 정도 반영한 실험식이라 판단되나 더 많은 실험을 통하여 보안되어야 한다고 사료된다.

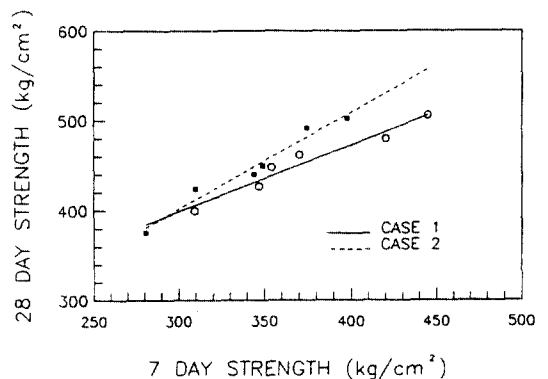
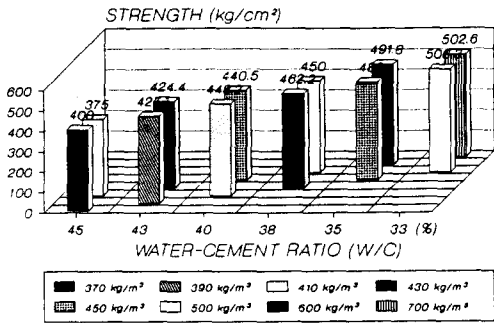


Fig. 3 28-day compressive strength versus 7-day compressive strength Case 1: $F_{28}=0.75 F_7+150$ (4)

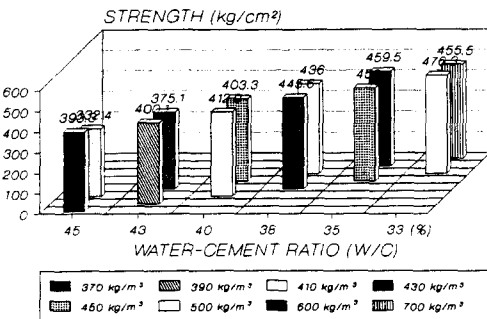
Case 2: $F_{28}=1.07 F_7+80$ (5)

4.3 시멘트량에 따른 강도변화

일반적으로 콘크리트 강도는 단위시멘트량에 비례하는 것으로 알려져 있다. 그러나 물·시멘트비가 작아 시공성 확보를 위한 슬럼프 유지를 위해 단위시멘트량이 증대되어야 할 경우 어느 단계를 넘으면 단위시멘트 증가에 따른 콘크리트 강도 증가 비율은 둔화되며 경우에 따라서는 오히려 강도가 감소되는 경우도 발생한다⁽³⁾. 한편 같은 경우에 고성능감수제를 사용하면 소요 슬럼프 확보를 위한 단위시멘트량을 줄일 수 있지만 단위시멘트량의 감소에 비례하여 단위수량이 감소하므로 고성능감수제의 성능을 기대할 수 없는 경우도 발생한다. 따라서 고성능감수제의 성능을 기대할 수 있는 최소의 단위시멘트량이 가장 경제적이다 판단되나 이 경우 단위수량, 잔골재 및 굵은골재의 함수율, 외기온도 및 습도 등의 제조조건에 의해 콘크리트의 슬럼프, 블리딩 등이 민감하게 변화하므로 현장에서의 품질관리가 중요한 문제로 등장하게 된다.



(a) Water curing



(b) Dry curing

Fig. 4 Effects of cement contents on concrete compressive strength

동일 물·시멘트비에 대하여 시멘트량을 달리 했을 때의 실험결과를 도표로 나타내면 그림4와 같다. 그림 3.(a)에서 보는 바와 같이 표준양생시 물·시멘트비가 일정할 경우 시멘트량에 따른 강도의 차이는 약 5% 이내로 거의 강도변화가 없음을 알 수 있다. 특히 물·시멘트비가 33%, 35%인 경우는 Case 2 경우의 단위 시멘트량이 각각 700kg/m³, 600kg/m³으로 Case 1에 비하여 시멘트량의 용적비율이 과대해 짐에 따라 오히려 강도가 저하되는 현상을 나타내고 있다. 따라서 Case 1의 경우가 고성능감수제의 성능을 기대할 수 있는 단위수량에 해당하는 경제적인 단위시멘트량이라 판단된다. 한편 대기양생의 경우는 강도비가 5~18%로 표준양생에 비해 더 큼을 알 수 있다. 이는 대기 양생의 경우 외기의 변화에 따라 수분의 증발이 발생하여 강도발현에 영향을 미친 것으로 사료된다.

4.4 응력-변형도 곡선

콘크리트의 응력-변형도 곡선으로 보편적으로 많이 사용되는 제안식은 최대하중까지 관계를 식(6)과 같이 2차 포물선으로 가정한 Hognestad의 제안식이다⁽⁷⁾.

$$f_c = f'_c \left[\frac{2\epsilon_c}{\epsilon_0} - \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_0} \right)^2 \right] \quad (6)$$

f_c : 콘크리트의 응력

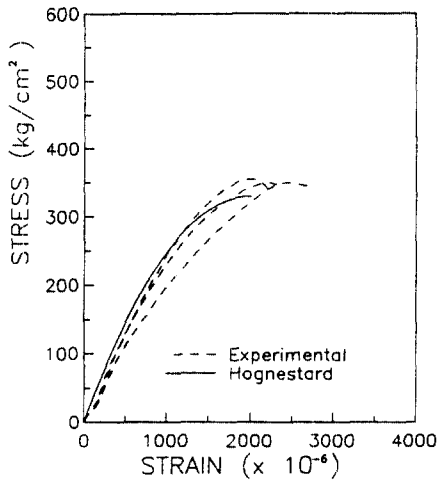
f'_c : 콘크리트의 최대응력

ϵ_c : 콘크리트의 변형도

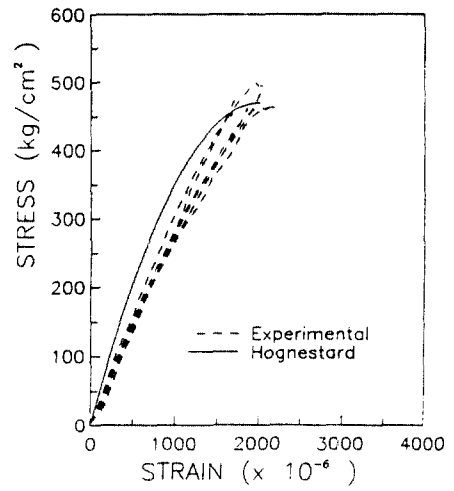
ϵ_0 : 콘크리트 최대응력시의 변형도

이들 제안식들은 모두가 보통 200~400kg/cm² 정도의 보통 콘크리트에 적용 가능한 제안식으로 응력-변형도 곡선의 초기 기울기가 커지면서 거의 직선에 가까운 특성을 나타내는 500kg/cm² 이상의 고강도콘크리트의 경우에는 이들 제안식의 적용에 무리가 따른다. 고강도콘크리트에 대한 식 (6)의 적용 가능성을 검토하기 위하여 실험에 의해 얻은 응력-변형도 곡선을 강도별로 분류하여 이론식 값과 비교하면 그림5와 같다.

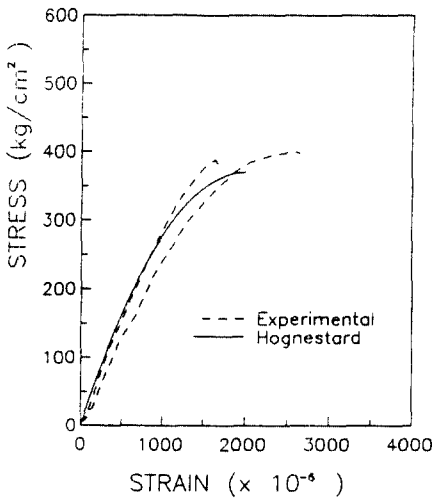
그림에서 보는 바와 같이 강도가 400kg/cm²이하의 콘크리트의 경우는 제안식과 실험치가 잘 일치하고 있으나 강도가 500kg/cm²이상일 경우 실험치는 최대강도까지 거의 선형을 나타냄으로써 이론치와 상당한 차이를 나타내고 있음을 알 수 있다. 따라서 500kg/cm²이상의



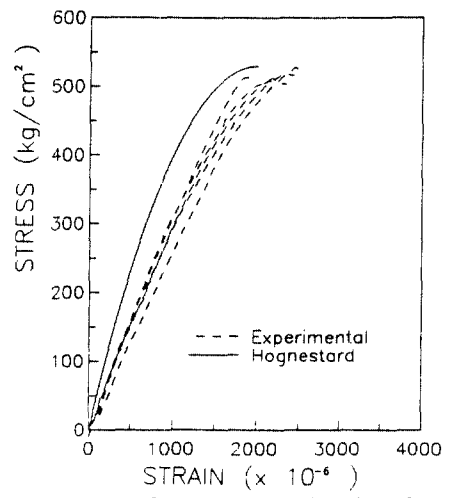
(a) Compressive strength 350kg/cm²



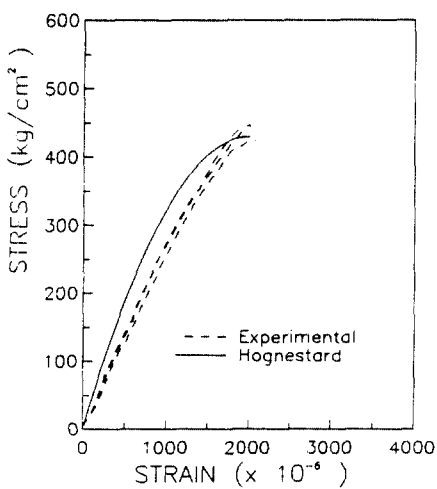
(d) Compressive strength 500kg/cm²



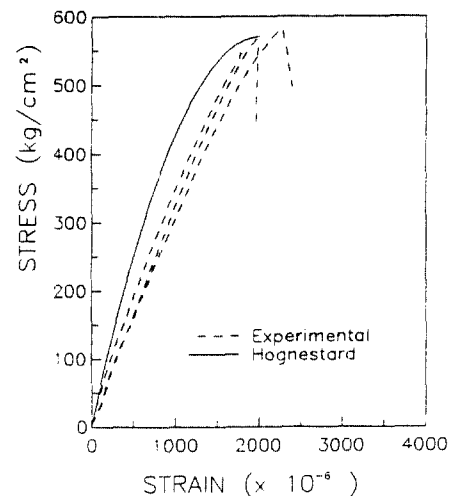
(b) Compressive strength 400kg/cm²



(e) Compressive strength 550kg/cm²



(c) Compressive strength 450kg/cm²



(f) Compressive strength 600kg/cm²

Fig. 5 Stress-strain curve for concrete

고강도콘크리트의 경우는 최대강도까지 선형 응력-변형도 관계를 가정하고 최대강도시 변형도를 0.002로 가정한 Roy와 Sozen의 제안식을 사용하는 것이 보다 타당하다고 판단된다.⁽⁷⁾ 또한 최대 응력시의 변형율은 콘크리트 강도에 관계없이 0.002~0.0025의 범위에 있는 것으로 나타났으며 콘크리트의 급격한 파괴 및 데이터의 디지털 방식에 의한 측정으로 인하여 최대강도시의 변형도를 정확히 측정할 수 없었음을 고려하면 휨 압축을 받을 경우 콘크리트의 최대 압축변형은 0.003 이상일 것이라 판단되므로 $\epsilon_u=0.003$ 의 값을 사용하여도 큰 무리가 없을 것으로 사료되나 이에 관한 추가적인 정밀시험 및 연구가 필요하다고 판단된다.

4.5 탄성 계수

현재 ACI⁽⁸⁾에서 채택하고 있는 일반 콘크리트의 탄성계수는 일반적으로 식(8)을 사용하고 있으며 420kg/cm² 이상의 고강도콘크리트의 경우는 1982년 Martinez, S. 등에 의해 제안된 수정식을 사용하고 있다(식9).⁽⁴⁾

$$E_c=4300 \times \omega^{1.6} \cdot \sqrt{f_c'} \quad (7)$$

$$E_c=15000 \sqrt{f_c'} \quad (8)$$

$$E_c=10530 \sqrt{f_c'} + 70,000 \quad (9)$$

한편 정확한 이론적 근거 및 원인 파악은 아직 불분명하지만 기존의 국내 실험 결과에 의하면 고강도콘크리트의 경우 동일 강도에 대한 탄성계수 값이 외국의 경우보다 비교적 작은 값을 나타내고 있다⁽³⁾. 따라서 국내실정에 맞는 탄성계수에 대한 새로운 제안식의 개발이 필요하다고 판단된다. 본 연구에서 얻은 실험결과에 대하여 식(8)과 식(9)를 비교하여 나타내면 그림6과 같다. 그림에서 직선은 실험치를 최소 자승법에 의해 회귀분석한 것으로 식(10)과 같다.

$$E_c=12000 \sqrt{f_c'} + 23400 \quad (10)$$

그림에서 보는 바와 같이 식(8)에 의한 값은 실험치에 비해 15% 정도 큰 값을 나타내고 있으며 식(9)에 의한 값도 실험치에 비해 약 5% 정도 큰 값을 나타내고 있다. 따라서 고강도콘크리트의 경우는 수정 제안된 식(9)가 보다 타당하다고 사료되며 국내 실험치가 외국의 제안식 보다 작은 값을 나타내고 있음을 고려하면 식

(10)도 콘크리트 탄성계수에 대한 제안식으로 사용 가능할 것이라 판단된다.

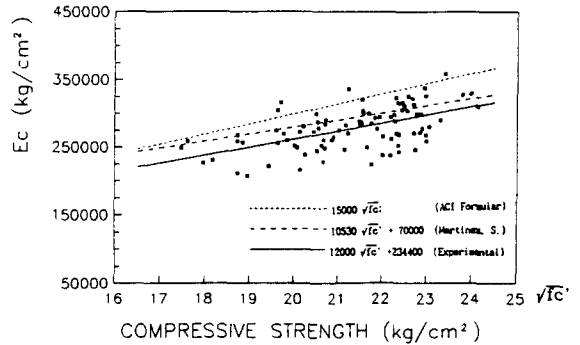


Fig. 6 Modulus of elasticity versus concrete strength

4.6 포아송 비(Poisson Ratio)

일반 콘크리트의 포아송비 값은 0.15~0.2 정도이며 560~800kg/cm²의 고강도콘크리트는 대략 0.2~0.28 정도의 값을 나타내고 있다.⁽⁴⁾ 본 실험에 의해 얻은 포아송비 값은 어떤 특정 배합변수의 영향을 받지 않는 것으로 생각되나 그 분포 범위가 0.17~0.2 사이에 존재하는 것으로 보아 0.185 정도의 값을 사용하는 것이 타당하다고 사료된다.

4.7 수화열(단열 온도 상승)시험

Case 1과 Case 2의 대표적인 물·시멘트비인 35%, 40%, 45%에 대하여 콘크리트 단열온도 상승시험을 실시하였다. 공시체 크기는 30×50×40cm의 직육면체이며 각 배합별로 콘크리트 타설 후 공시체 중앙부에서의 최고온도시까지의 시간 및 온도를 도표로 나타내면 그림7과 같다.

그림에서 보는 바와 같이 최고온도는 시멘트량에 다소 차이는 있으나 타설후 24시간을 전후로 약 55~68℃에 이르는 것으로 나타났다. 따라서 시험체의 단열상태가 불완전한 것을 감안하면 최고온도가 더 상승될 것으로 예상된다. 특히 실제 시공사례에 의한 검토결과를 보면 ⁽¹⁾ 외기온도가 20~30℃일 때 압축강도 500kg/cm²의 고강도콘크리트를 사용한 기둥(40×60cm), 전단벽(두께: 40cm)에서의 내부온도가 86℃정도까지 상승되는 것으로 나타났다. 따라서 타설 후 최소한 3일까지는 물을 뿌려주

는 등 양생에 특별한 주의가 필요할 것이라 판단된다. 동일 물·시멘트비에 대하여 시멘트량을 달리하였을 때의 온도변화를 살펴보면 Case 2의 경우가 Case 1에 비해 높은온도로 상승되었고 최고온도에 이르는 시간도 더 빠름을 알 수 있었으며 최고온도에서의 온도 차이는 물·시멘트비에 관계없이 단위 시멘트량의 차이에 선형적으로 비례하는 것으로 나타났다. 따라서 단위 시멘트량은 수화열량을 결정하는 주요인이라 판단되며 물·시멘트비에 의한 영향은 그다지 크지 않은 것으로 사료된다.

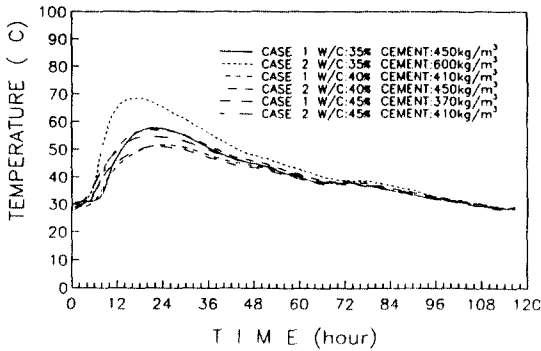


Fig. 7 Temperature variation according to time sequence

4.8 단위 중량

고강도콘크리트의 단위중량은 같은 재료를 사용하는 일반콘크리트에 비하여 단위수량이 감소함에 따라 약간 크게 되므로 구조설계용 중량을 검토할 필요가 있다(표 6). 표에서 보는 바와 같이 물·시멘트비에 관계없이 표준양생의 경우 2.40~2.43t/m³, 대기양생의 경우 2.39~2.41t/m³의 값을 나타내고 있다. 따라서 고강도콘크리트의 경우 설계용 단위중량은 2.4t/m³의 값으로 하는 것이 더 타당하다고 판단된다.

Table. 6 Unit weight of high strength concrete

(w/c)	Unit weight (t/m ³)	
	Water curing	Dry curing
33	2.40	2.39
35	2.42	2.40
38	2.42	2.40
40	2.43	2.41
43	2.42	2.39
45	2.42	2.40
Average	2.42	2.40

5. 결 론

- (1) 제안된 배합설계식은 미 개척국 콘크리트 편람의 배합식과 유사한 경향을 나타냄으로써 본 제안식의 타당성을 입증하고 있으며 국내 고강도콘크리트의 배합설계식으로 사용가능하다고 판단된다.
- (2) Hognestad의 콘크리트 응력-변형도 제안식은 고강도화 될수록 적용이 어려울 것으로 판단되며 고강도콘크리트의 경우에는 최대응력까지 선형 응력-변형도 관계를 가정한 Roy & Sozen의 제안식을 사용하는 것이 보다 타당하다고 판단된다.
- (3) 고강도콘크리트의 탄성계수식은 수정제한된 Martinez, S.의 제안식이 보다 타당하다고 판단되며 국내 실험치가 외국의 제안식보다 적은 값을 나타내는 경향을 고려하여 본 연구의 제안식과 같은 실용식을 사용하여야 할 것으로 판단된다.
- (4) 본 연구에서 제안한 28일 강도 추정식은 고강도콘크리트의 강도발현 특성을 어느 정도 반영한 실험식이라 판단되나 계속적인 실험을 통하여 보완되어져야 한다고 사료된다.
- (5) Case 1의 단위시멘트량은 고성능감수제의 성능을 기대할 수 있는 경제적인 단위 시멘트량이라 판단되며 이 경우 콘크리트의 물성변화에 미치는 제조건에 대한 계속적인 연구 및 현장에서의 엄격한 품질관리가 필요하다고 사료된다.
- (6) 콘크리트의 수화열로 인한 온도상승은 타설후 24시간을 전후로 약 55~68°C에 이르는 것으로 나타났다. 따라서 타설 후 3일까지는 주기적으로 물을 뿌려주는 등 양생에 특별한 주의가 필요할 것으로 판단된다.
- (7) 고강도콘크리트의 구조설계용 단위중량은 2.4t/m³으로 하는 것이 보다 타당한 것으로 판단된다.
- (8) 실험에 의해 얻은 포아송비 값은 그 분포범위가 0.17~2.0인 것으로 보아 0.185값을 사용하는 것이 보다 타당하다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술처에서 시행한 “신주택 기술개발 연구사업”의 일환으로 수행되었으며 관계제위께 깊은 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. 신성우, "분당 삼성 초고층 APT에 500kg/cm² 이상의 고강도콘크리트 시공 및 구조적 연구," 콘크리트 학회지, 제2권, 제4호, 1990년 12월, pp.8-21.
2. 박철림, 조철근, 양은익, 장승규, 권영호, "현장타설 고강도콘크리트의 시공성 및 강도특성에 관한 실험적 연구," 콘크리트 학회지, 제3권, 제2호, 1991년 6월, pp.97-104.
3. "고강도콘크리트의 경제적 배합비 결정 및 실용화에 관한 연구," 대우엔지니어링 기술연구소, DWERI-CE-10, 1984.
4. "State-of-the-art report on high-strength concrete," ACI Committee 363, ACI Manual of Concrete Practice, Part 1, 1988.
5. 콘크리트 표준시방서, 건설부, 1988.
6. 오병환, 이성로, 고강도콘크리트의 통계적 특성을 이용한 품질관리, 콘크리트 학회지, 제3권, 제1호, 1991년 3월, pp.33-41.
7. R. Part, T. Paulay, "Reinforced Concrete Structure," Wiley, New-York, 1975, pp.3.
8. ACI Committee 318, "Building code requirements for reinforced concrete(ACI 318-89)," American Concrete Institute, Detroit, 1989, pp.318/318R-83.
9. 건축공사 표준시방서, 건설부, 1989.
10. Neville, "Properties of concrete," Pitman, 1981.
11. Burge, T.A., "14000psi in 24 hours," Concrete International : Design & Construction, Vol.6, No.9, Sept. 1983, pp.36-41.
12. Carrasquillo R.L., Nilson A.H., "Properties of high strength concrete subject to short-term loads," ACI Journal, Vol.78, No.3, May-June, 1981, pp.171-178.
13. Wang P.T., SHAH S.P., Naaman A.E., "Stress-strain curve of normal and lightweight concrete in compression," ACI Journal Vol.75, No.11, Nov., 1978, pp.603-611.
14. Park, R., Kent, D.C., and Sampson, R.A., "Reinforced concrete members with cyclic loadings," ASCE, Vol.98, ST7, Proc. Paper 9011, July, 1972, pp.1341-1360.
15. 박철림, 고강도콘크리트의 실용화에 관한 국내의 연구 동향, 콘크리트 학회지, 제2권, 제3호, 1990년 9월, pp.27-36.
16. 김화중, 고성능감수제 및 AE 감수제의 특성과 이용, 콘크리트 학회지, 제3권, 제3호, 1991년 9월, pp.31-42.
17. 정현수, 일반 혼화제의 특성과 이용, 콘크리트 학회지, 제3권, 제3호, 1991년 9월, pp.43-49.

(접수일자 : 1992. 1. 28)