

고강도 콘크리트의 탄성계수에 미치는 배합재료의 영향평가

장일영¹⁾ · 박훈규^{1)*} · 이승훈²⁾ · 김규동²⁾

¹⁾금오공과대학교 토목공학과 ²⁾삼성물산(주)건설부문 기술연구소

(2001년 7월 23일 원고접수, 2001년 11월 30일 심사완료)

Effect of Mix Ingredients on Modulus of Elasticity of High-Strength Concrete

Il-Young Jang¹⁾, Hoon-Gyu Park^{1)*}, Seung-Hoon Lee²⁾, and Gyu-Dong Kim²⁾

¹⁾ Dept. of Civil Engineering, Kumoh National University of Tech., Gumi, 730-701, Korea

²⁾ Institute of Tech., Samsung Engineering & Construction Co., Ltd., Yongin, 449-900, Korea

(Received on July 23, 2001, Accepted on November 30, 2001)

ABSTRACT

For the design of concrete structures in the serviceability limit state, the uniaxial static modulus of elasticity may be a most important parameter. In particular, this may be so just for a deflection control of the structure.

Even in new concrete codes, however, the elastic modulus is normally presented on the form of general empirical relationships with the compressive strength and density of concrete. Normally, there is a large uncertainty associated with the general equations obtained by regression. Thus, in a typical plot of static modulus of elasticity vs. compressive strength, a large scatter can be observed at same strength.

The aim of this study is to present the method for obtain the maximum modulus of elasticity at same compressive strength. In the present paper report the effects of mix ingredients on the modulus of elasticity of high-strength concrete. The test of 284 cylinder specimens are conducted for type I with 11 % replacement of fly-ash cement concretes. Different water-binder ratio, amounts of water and coarse aggregate as variables were investigated. And also analyzed it statistically by using SAS.

Keywords : modulus of elasticity, mix ingredients, high-strength concrete, compressive strength

1. 서 론

콘크리트 구조물의 설계 및 해석에 있어서나 구조물 처짐 제어에 있어서 가장 중요한 재료적 변수는 탄성계수이다. 일반적으로 탄성계수는 실용적 측면에서 측정이 용이한 단위중량과 압축강도만의 함수로써 간략하게 정의되고 있다. 그러나 이러한 회귀식들은 대부분 실험자료에 대한 평균적인 의미이므로 매우 많은 불확실성이 포함되어 있어 지금까지 제시된 많은 규준식 및 실험식들이 다소의 차이가 있다. Fig. 1에서와 같이 이러한 식들은 압축강도와 탄성계수사이의 큰 상관성이 있음을 잘 표현하고 있으나, 동일한 압축강도에서 탄성계수는 크게 분산된 값으로 측정됨을 알 수 있다. 이것은 콘크리트 탄성계수가 각 구성재료의 탄성특성과 체적비, 굵은골재와 시멘트 페이스트 사이의부착강도, 혼화재료의 사용량, 양생방법 및 습윤상태, 재하속도, 시험방법, 공시체 가압면의 처리방법

등의 수많은 변수들에 의해 영향을 받으며, 이러한 변수들을 고려한 실험을 통하여 콘크리트의 탄성적 특성을 명확하게 규명하여 정량화하는 것은 매우 어렵다는 것을 의미한다¹⁾.

보통강도 콘크리트에서 굵은골재량과 최대치수의 증가는 역학적, 기하학적 비균질성을 증대 시켜 응력-변형률 곡선의 비선형성을 증가시킨다. 따라서 골재의 체적비가 증가할수록 탄성계수는 증가한다는 것이 일반적인 견해이다²⁾.

그러나 보통강도 콘크리트와 파괴양상이나 시멘트풀 또는 모르타 강성이 다른 고강도 콘크리트의 경우에는 탄성계수에 미치는 골재 등의 배합재료에 따른 영향이 다를 것이 예상된다.

이러한 관점에서 본 연구에서는 고강도 콘크리트 영역에서 탄성계수에 미치는 배합변수들의 영향을 통계적 기법을 이용하여 분석하고, 이를 통하여 동일한 압축강도에서 최대의 탄성계수를 얻기 위한 방안을 모색해 보고자 한다.

2. 실 험

* Corresponding author

Tel : 054-467-4068 Fax : 054-467-4240

E-mail : hgpark@knut.kumoh.ac.kr

2.1 실험변수 및 실험재료

콘크리트는 페이스트 매트릭스(paste matrix)와 골재의 합성재료로 볼 수 있으므로 본 연구에서는 일정한 골재량(굵은골재 용적률, V_G)에서의 물-결합재비와 단위수량을 변수로 하여 모르타에 의한 영향을 분석하였으며, 동일한 단위수량에 따른 굵은골재량과 최대치수를 변수로 하여 골재의 영향을 분석하였다.

실험변수는 Table 1에 나타난 것과 같다. 실험에 사용된 시멘트, 잔골재, 굵은골재의 물리적 특성은 Table 2에 나타내었다. 혼화재료는 충남 보령산 유연탄계 플라이애쉬(F.A)를 사용하였다.

2.2 배합 및 실험방법

콘크리트 배합은 Table 3 및 4와 같다.

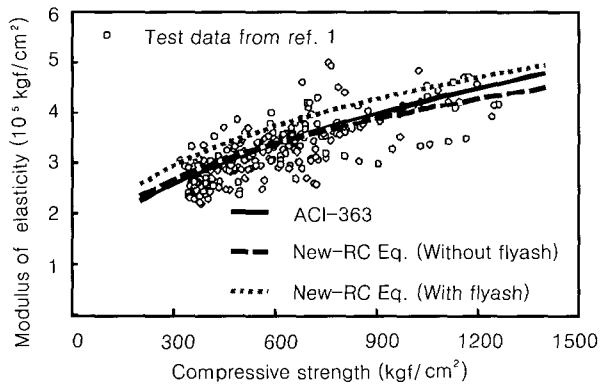


Fig. 1 Elastic modulus vs. compressive strength

Table 1 Test variables

Variables		
Water-Binder ratio(%)	[W/(C+F)]	24, 26, 30, 34, 38
Water content(kg/m³)	[W]	161, 171, 181
Volume fraction of coarse aggregate	[V _G]	0.31, 0.34, 0.37
Max. size of coarse aggregate(mm)	[D _G]	13, 19, 25
Curing age(day)		28, 56

Table 2 Material properties

Item	Cement	Fly ash	Fine agg.	Coarse agg.
Type	Type I	-	River sand	Crushed stone
Specific surface(cm²/g)	3315	4300	-	-
Specific gravity	3.15	2.1	2.62	2.64
Fineness modulus	-	-	2.74	6.82
Compressive strength(kgf/cm²)	400	-	-	1172
Elastic modulus(kgf/cm²)	-	-	-	649848

Table 3은 동일 단위수량($W=171 \text{ kg/m}^3$)에서 물-결합재비($W/(C+F)=0.24\sim 0.38$)와 굵은골재량($V_G=0.31, 0.37$) 변화를 변수로 한 것이며, Table 4는 굵은골재량($V_G=0.34$)이 일정한 경우에 대해 물-결합재비와 단위수량($W=161, 171, 181 \text{ kg/m}^3$)에 따른 탄성계수 변화양상을 분석하기 위한 것이다.

굵은골재 최대치수(D_G)는 13, 19, 25 mm를 사용하여 그 영향을 평가하였다.

압축강도와 탄성계수 시험은 $\phi 10 \times 20 \text{ cm}$ 공시체 양면을 연마하여 각각 재령 28일과 56일에서 KS F 2405, KS F 2438에 따라 실시하였으며, 압축강도는 측정된 값의 0.96 배를 취하여 $\phi 15 \times 30 \text{ cm}$ 공시체에 대한 강도로 환산하여 분석하였다.

2.3 실험결과

모든 탄성계수 측정 실험결과를 ACI 및 New-RC 표준과 비교하여 Fig. 2에 나타내었다.

Fig. 2에서 알 수 있듯이 본 연구의 실험결과는 고강도 콘크리트를 대상으로 하는 ACI-363식에 비해 약 10% 정도 높은 측정값을 나타낸 반면에, 플라이 애쉬를 혼입한 콘크리트에 대한 New-RC식에 비해서는 2~4% 정도 낮은 값으로 측정되었다.

3. 통계적 분석

본 연구에서는 고강도 콘크리트 탄성계수에 영향을 미치는 배합재료의 영향을 분석하기 위하여 상관분석과 주 성분분석을 수행하였다. 재령 28일, 56일에서의 전체자료

Table 3 Mix proportions

W/(C+F)	W-V _G -D _G	S/a	Content(kg/m ³)				
			W	C	F.A	G	S
0.24	171-0.31-13,19,25	46.5	171	642	71	794	685
	171-0.37-13,19,25	36.2	171	642	71	947	533
0.26	171-0.31-13,19,25	48.2	171	592	66	794	733
	171-0.37-13,19,25	38.2	171	592	66	947	581
0.30	171-0.31-13,19,25	50.7	171	513	57	793	810
	171-0.37-13,19,25	41.1	171	513	57	948	656
0.34	171-0.31-13,19,25	52.4	171	453	50	793	868
	171-0.37-13,19,25	43.2	171	453	50	948	715
0.38	171-0.31-13,19,25	53.7	171	405	45	794	914
	171-0.37-13,19,25	44.7	171	405	45	948	761

Table 4 Mix proportions

W/(C+F)	W-V _G -D _G	S/a	Content(kg/m ³)				
			W	C	F.A	G	S
0.24	161-0.34-13,19,25	42.8	161	604	67	871	646
	171-0.34-13,19,25	41.3	171	642	71	871	608
	181-0.34-13,19,25	38.8	181	679	75	871	547
0.26	161-0.34-13,19,25	45.3	161	557	62	871	716
	171-0.34-13,19,25	43.2	171	592	66	871	598
	181-0.34-13,19,25	40.9	181	626	70	871	598
0.30	161-0.34-13,19,25	47.7	161	483	54	871	788
	171-0.34-13,19,25	45.9	171	513	57	871	733
	181-0.34-13,19,25	44.0	181	543	60	871	679
0.34	161-0.34-13,19,25	49.4	161	427	47	871	843
	171-0.34-13,19,25	47.8	171	453	50	871	791
	181-0.34-13,19,25	46.1	181	479	53	871	740
0.38	161-0.34-13,19,25	50.6	161	382	42	871	886
	171-0.34-13,19,25	45.9	171	405	45	871	837
	181-0.34-13,19,25	47.7	181	428	48	871	788

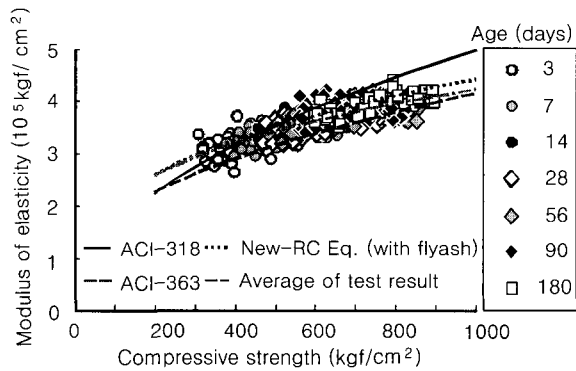


Fig. 2 Comparison of test result and code equations for modulus of elasticity of high-strength concrete

에 대한 분석을 통하여 전체적인 변수들의 영향정도를 파악하고, 각 재령에서 동일 압축강도의 자료에 대한 분석을 수행하여 동일 압축강도에서 탄성계수에 미치는 배합변수들의 영향정도를 평가하였다.

3.1 상관분석

상관분석은 하나의 변수와 다른 변수의 관련성을 판단하기 위한 분석방법으로서, 본 연구에서는 일반적 상관분석방법인 Pearson방법을 이용하였다³⁾.

3.1.1 재령 28일 및 56일 전체자료 분석

Table 5와 6은 재령 28, 56일에 측정된 전체 실험결과에 대한 통계적 특성 및 상관분석 결과이다.

Table 6에서 탄성계수(E_c)와 각 변수간의 유의성을 검증해 보면, E_c 와 W 와의 상관계수는 -0.18 로 비교적 낮은 편이나, 그 때 상관계수보다 클 확률값이 $0.03(97\%)$ 이다. 따라서 검정실시 전 설정해둔(SAS 프로그램 기본 값) $0.05(95\%)$ 보다 작으므로 어느 정도의 역상관이 있다고 판단된다.

분석을 통하여 E_c 와 유의성이 있는 변수는 W , $W/(C+F)$, C , Flyash(F.A), S 의 배합변수와 단위중량(γ_c), 압축강도(f_{ck})임을 알 수 있다. 여기서 E_c 는 γ_c , f_{ck} 와 가장 큰 상관성을 보임을 알 수 있다. 따라서 기존의 실험적으로 제시된 다양한 탄성계수식들이 단위중량, 압축강도

Table 5 Simple statistics for all test results

Age	Variable	N	Mean	Std. D.	Min.	Max.
28	f_{ck}	150	641.7	90.5	470.0	781.0
	E_c	150	369743.0	21099.0	309743.0	416343.0
56	f_{ck}	134	701.2	105.9	537.0	856.0
	E_c	134	383978.0	19375.0	331708.0	425934.0

Table 6 Correlations for all data

Age	28			56		
	γ_c	f_{ck}	E_c	γ_c	f_{ck}	E_c
W	-0.13	-0.06	-0.18	-0.11	-0.04	-0.19
	0.11	0.48	0.03	0.19	0.61	0.03
W/(C+F)	-0.41	-0.91	-0.38	-0.33	-0.90	-0.39
	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
C	0.38	0.88	0.34	0.31	0.89	0.35
	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
F.A	0.38	0.88	0.34	0.31	0.89	0.35
	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
S/a	-0.48	-0.61	-0.14	-0.39	-0.56	-0.08
	0.00	0.00	0.09	0.00	0.00	0.35
S	-0.44	-0.77	-0.22	-0.37	-0.75	-0.22
	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01
G	0.32	0.01	-0.18	0.29	-0.03	-0.17
	0.00	0.93	0.06	0.00	0.72	0.05
D_G	0.28	-0.05	0.15	0.33	-0.05	0.00
	0.00	0.53	0.06	0.00	0.59	1.00
V_G	0.34	0.06	0.15	0.31	0.00	-0.14
	0.00	0.53	0.06	0.00	0.99	0.11
γ_c	1	0.54	0.56	1	0.45	0.41
	0	0.00	0.00	0	0.00	0.00
f_{ck}		1	0.54		1	0.46
		0	0.00		0	0.00

*Note :
 Correlation coefficient
 Confidence limit
 F.A=Fly ash
 γ_c =Unit weight of hardened concrete

의 함수로써 표현되는 것이다.

Table 6의 분석결과에서 주목할 점은 E_c 와 유의성이 있는 변수들 중 W/(C+F), C, F.A, S는 f_{ck} 와 더 큰 상관성이 있으므로 탄성계수에 대한 독립변수라 하기 어려운 반면, W는 γ_c 나 f_{ck} 에 비해 E_c 에 더욱 독립적인 역의 상관성이 있음을 알 수 있다. 즉 단위수량 증가는 탄성계수 감소 효과가 있음을 의미한다.

최근 장일영 등³⁾의 연구에 의하면, Fig. 3과 같이 New-RC 연구에서 제시한 단위수량의 표준적인 범위에 비해 국내 실험자료를 토대로 한 물-결합재비에 따른 단위수량의 범위가 높은 값을 가짐을 알 수 있다. 이러한 배합특성으로 인하여 Fig. 1과 Fig. 2에서 볼 수 있듯이 평균적으로 New-RC 탄성계수식의 추정값에 비해 국내

실험값이 더 낮게 측정된다는 것을 알 수 있다.

3.1.2 단위수량의 영향분석

단위수량의 영향을 명확히 분석하기 위하여 Table 4에 나타난 것과 같이 일정한 골재량($V_G=0.34$)에 대해 단위수량을 161, 171, 181 kg/m³로 변화시킨 실험자료에 대한 분석을 수행하였으며, 결과를 Table 7에 나타내었다.

분석결과에서 볼 수 있듯이 탄성계수와 가장 큰 상관성을 보이는 γ_c 와 f_{ck} 를 종속변수로 하는 배합변수를 제외할 경우, W가 0.02(98%)의 유의도로서 E_c 를 종속변수로 하는 변수임을 알 수 있다. 이러한 양상을 Fig. 4에 나타내었다.

Table 7의 상관분석 결과와 Fig. 4의 비교에서 단위수량 증가에 따른 탄성계수 감소 효과를 명확히 알 수 있다.

3.1.3 굵은골재의 영향분석

고강도 콘크리트의 탄성계수에 미치는 굵은골재의 영향

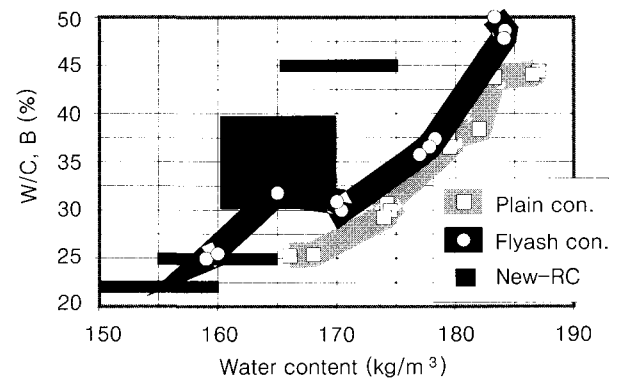


Fig. 3 Relation of W/C ratio and water content

Table 7 Correlations between each variables in case of $V_G=0.34$

Age	28			56		
	γ_c	f_{ck}	E_c	γ_c	f_{ck}	E_c
W	-0.18	-0.05	-0.26	-0.18	-0.09	-0.28
	0.11	0.67	0.02	0.15	0.43	0.02
W/(C+F)	-0.54	-0.92	-0.54	-0.47	-0.79	-0.56
	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
C	0.49	0.88	0.45	0.42	0.76	0.45
	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
F.A	0.49	0.88	0.45	0.42	0.76	0.45
	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
S	-0.42	-0.80	-0.37	-0.35	-0.69	-0.36
	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
D_G	0.26	-0.03	0.09	0.2	-0.05	-0.09
	0.02	0.77	0.42	0.09	0.70	0.47
γ_c	1	0.70	0.72	1	0.61	0.61
	0	0.00	0.00	0	0.00	0.00
f_{ck}		1	0.70		1	0.60
		0	0.00		0	0.00

을 분석하기 위하여 Table 3에 나타난 것과 같이 일정한 단위수량($W=171 \text{ kg/m}^3$)에 대해 굵은골재 용적률(V_G)을 0.31, 0.34, 0.37로 변화시킨 실험자료에 대한 상관분석을 수행하였으며, 그 결과를 Table 8에 나타내었다.

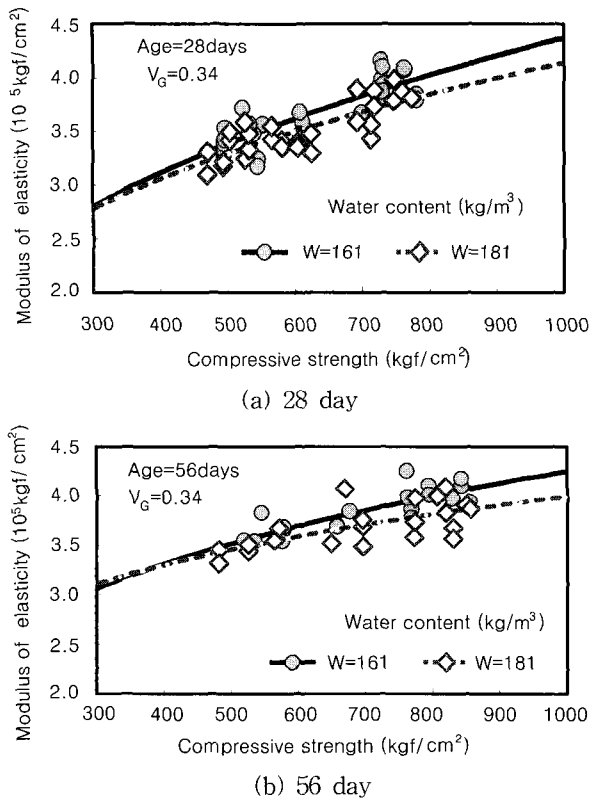


Fig. 4 Influence of water content on modulus of elasticity

Table 8 Correlation between each variables in case of $W=171 \text{ kg/m}^3$

Age	28			56		
	γ_c	f_{ck}	E_c	γ_c	f_{ck}	E_c
W/(C+F)	-0.20	-0.95	-0.27	-0.13	-0.91	-0.21
	0.09	0.00	0.03	0.25	0.00	0.01
C	0.17	0.92	0.21	0.11	0.88	0.24
	0.17	0.00	0.08	0.36	0.00	0.05
F.A	0.17	0.92	0.22	0.11	0.88	0.25
	0.17	0.00	0.06	0.38	0.00	0.04
S	-0.46	-0.77	-0.02	-0.39	-0.69	-0.09
	0.00	0.00	0.83	0.00	0.00	0.47
G	0.56	0.08	-0.24	0.50	-0.01	-0.16
	0.00	0.47	0.04	0.00	0.91	0.16
D_G	0.47	-0.01	0.31	0.55	-0.02	0.15
	0.00	0.93	0.01	0.00	0.85	0.21
V_G	0.56	0.09	-0.24	0.50	-0.01	-0.17
	0.00	0.45	0.04	0.00	0.93	0.16
γ_c	1	0.23	0.07	1	0.13	0.17
	0	0.05	0.53	0	0.26	0.14
f_{ck}		1	0.27		1	0.30
		0	0.02		0	0.01

Table 8의 재령 28일 실험결과에서 f_{ck} 를 종속변수로 하는 배합변수를 제외하면, G , D_G , V_G 와 E_c 의 유의도가 각각 0.04, 0.01, 0.04로 어느 정도 상관성이 있는 것으로 나타났으며, 이러한 관계를 Fig.5에서 비교하였다.

Fig. 5의 비교에서와 같이 동일한 단위수량과 굵은골재량인 경우 굵은골재 최대치수에 따른 뚜렷한 차이는 보이지 않으나 골재치수 13 mm에 비해 19 mm나 25 mm를 사용한 경우의 탄성계수가 평균적으로 5%정도 높게 나타남을 알 수 있다. 그러나 전반적으로 보통강도 콘크리트에서와 같이 굵은골재량 증가에 따른 탄성계수 증가는 기대하기 어려운 것으로 보이며, 오히려 Fig. 5(a)와 (b)에서와 같이 콘크리트가 고강도화 될수록 굵은골재량이 증가하면 탄성계수 값이 낮게 나타났으며, 최대 5%정도 차이를 보이고 있다. 이러한 차이는 굵은골재치수 19 mm나 25 mm에 비해 13 mm인 경우 좀 더 큰 차이를 보인다. 이것은 콘크리트가 고강도화 될수록 골재 강성에 비해 모르타르 강성의 영향이 증가하기 때문인 것으로 보인다. 따라서 골재치수가 25 mm인 경우에는 굵은골재량의 영향이 없는 것으로 보이나, 19 mm이하인 경우에는 굵은골재량을 적게 사용하는 것이 탄성계수 향상에 좀 더 효과적일 것이다.

재령 56일의 실험결과에 대한 분석에서는 탄성계수와 굵은골재의 상관성이 파악되지 않았다. 이러한 결과에서 모르타르(단위수량 및 시멘트)량은 재령에 관계없이 탄성계수와 상관성을 가지지만, 재령 28일 이후에는 골재량에 따른 탄성계수의 변화는 기대할 수 없는 것으로 분석할 수 있다.

3.1.4 동일 압축강도자료 분석

본 연구의 주요목적이 배합재료의 영향을 분석하여 동일한 압축강도에서 가장 높은 탄성계수를 얻을 수 있는 방법을 모색하고자 하는 것이므로, 목표강도 500, 600, 700, 800 kgf/cm^2 을 기준으로 적절한 편차범위내의 압축강도를 동일 압축강도로 취하여 분석하였다.

Table 9와 10은 재령 28일, 56일에서 측정된 실험결과 중 목표강도 500, 600, 700, 800 kgf/cm^2 자료에 대한 통계적 특성과 상관분석결과를 나타낸 것이다. 각 목표강도별 압축강도 표준편차는 ACI-363의 35~49 kgf/cm^2 권장 범위와 JASS-5 제시값인 35 kgf/cm^2 보다 작다³⁾. 변동계수(=표준편차/평균) 또한 Walker²⁾의 품질관리 등급에 따라 판단하여 우수한(<5%) 품질의 콘크리트라 할 수 있으며, 동일한 압축강도로 취급할 수 있다.

Table 10의 상관분석결과를 살펴보면, 공통적으로 W 의 감소와 E_c 증가 사이에 유의성이 있는 것이 확인된다. E_c 와 D_G 나 V_G 와의 상관은 없는 것으로 나타났으며, C 와는 역상관을 보이고 있다. 또한 S 나 S/a 의 증가도 어느 정도 E_c 향상에 기여하는 것으로 분석된다.

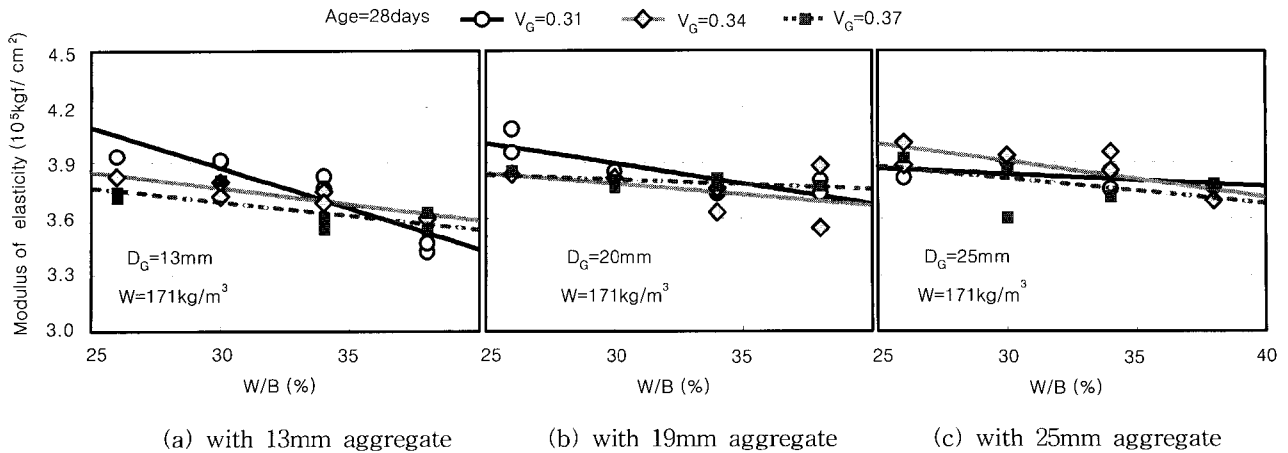


Fig.5 Influence of coarse aggregate volume fraction on modulus of elasticity

Table 9 Simple statistics for each target strength

Age (day)	Variable	N	Mean	S. Dev.	Min.	Max.	
			kgf/cm ²				
28	F500	f_{ck}	38	519.6	22.1	470.0	545.0
		E_c	38	351794.0	20600.0	309743.0	388327.0
	F600	f_{ck}	40	609.2	29.2	553.0	649.0
		E_c	40	365511.0	16986.0	329769.0	395716.0
	F700	f_{ck}	52	710.4	25.8	657.0	748.0
		E_c	52	383568.0	14324.0	342985.0	416343.0
56	F600	f_{ck}	23	576.9	22.0	557.0	649.0
		E_c	23	366956.0	11038.0	345265.0	392797.0
	F700	f_{ck}	51	700.0	30.3	651.0	745.0
		E_c	51	391543.0	18210.0	348743.0	425934.0
	F800	f_{ck}	51	797.4	33.8	751.0	856.0
		E_c	51	388962.0	14528.0	353338.0	425483.0

이러한 분석결과를 Fig. 6과 7에 나타내었다.

Fig. 6에서 각 목표강도별, 시멘트량에 따른 탄성계수값 차이를 볼 수 있다. Fig. 6(a) 재령 28일의 측정결과를 보면, 전체자료 분석결과에서 나타난 것과 같이 전체적으로는 시멘트량 100 kg/m³증가에 따라 압축강도 증가와 더불어 탄성계수가 약 2.7%정도 증가하는 양상을 확인할 수 있다.

그러나 각 목표강도 별로 검토해 보면, 동일 압축강도에서는 시멘트량이 물-결합재비나 압축강도에 종속되지 않고 탄성계수를 종속변수로 할 경우, 시멘트량이 감소할수록 탄성계수 향상에 기여하는 것으로 나타났다.

Fig. 7은 각 목표강도별 잔골재량과 탄성계수의 관계를 나타낸 것이다.

Fig. 7(a)의 재령 28일 측정결과에서, 전체 적으로 볼 때 잔골재량 100 kg/m³증가에 따라 약 1.2%의 탄성계수

감소가 있는 것으로 나타났으나, 각 목표강도별 양상과 전체적인 양상은 차이가 있다. 압축강도 700 kgf/cm²의 경우에는 큰 차이가 없으나 500 kgf/cm²의 경우에는 잔골재량 100 kg/m³증가에 따라 탄성계수가 4.3%정도 증가하는 것으로 나타났다.

따라서 동일 압축강도를 목표로 배합을 할 경우 가능한 범위내에서 단위수량과 단위시멘트량을 줄이고, 잔골재량을 늘임으로서 탄성계수 향상을 기대 할 수 있을 것이다.

재령 56일 실험자료에 대한 상관분석 결과는 자료수가 통계적분석을 수행하기에는 적은량인 관계로 28일에 대한 분석결과와 같이 각 목표강도별로 일치된 분석결과를 보이지 않는다. Fig. 6(b)와 Fig. 7(b)에서 볼 수 있듯이 재령 28일의 실험자료에 대한 분석결과와 유사한 양상을 보이고 있으나, 시멘트량이나 잔골재량에 따른 탄성계수 변화가 재령 28일에 비해 매우 작다. 이러한 경향으로 볼 때 재령이 증가함에 따라 탄성계수는 배합변수의 영향에 비해 압축강도나 단위중량과 같은 경화 후 특성의 영향이 큰 것으로 보인다.

3.2 주성분 분석

주성분 분석은 많은 변동인자에 대해 공통변량으로 요약하여 설명하는 기법이며, 주성분 분석을 통하여 공통변량으로 형성된 변수에 대해 회귀분석을 수행할 경우 배합변수와 탄성계수와의 관계를 적절히 모델화할 수 있다.

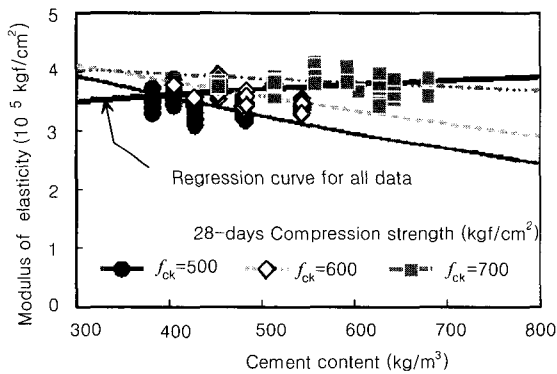
3.2.1 재령 28일 및 56일 전체자료 분석

각 주성분과 콘크리트를 구성하는 재료변수 사이의 상관관계를 설명하는 인자부하량(factor loadings)은 고유치와 고유벡터로 구하며, 인자부하량을 이용하여 구한 재령 28일 및 56일 전체 자료는 제 1~3주성분으로 요약되었다. 인자부하량을 구한 결과는 Table 11과 같다.

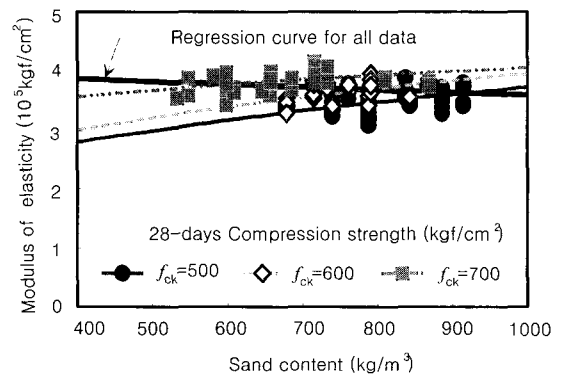
인자부하량이 0.4이상이면 매우 높은 적재량이라 할 수 있으므로, 배합변수들의 인자부하량을 살펴보면 제1주성분

Table 10 Correlation between each variables for target strength data

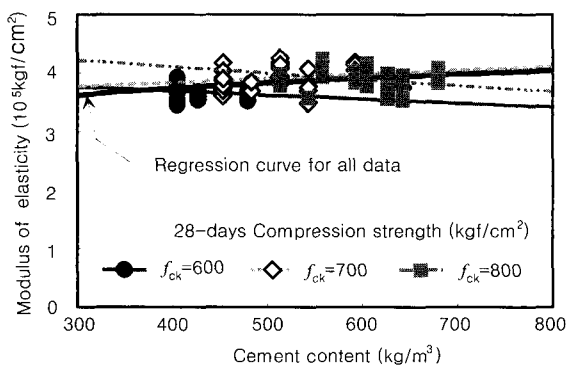
Age	28 days									56 days								
	F500			F600			F700			F600			F700			F800		
Variable	γ_c	f_{ck}	E_c	γ_c	f_{ck}	E_c	γ_c	f_{ck}	E_c	γ_c	f_{ck}	E_c	γ_c	f_{ck}	E_c	γ_c	f_{ck}	E_c
W	-0.26	-0.28	-0.15	-0.29	-0.02	-0.34	-0.24	-0.06	-0.39	-0.09	-0.14	-0.01	-0.11	0.08	-0.01	-0.20	0.09	-0.36
	0.12	0.09	0.38	0.07	0.91	0.03	0.09	0.69	0.00	0.68	0.51	0.95	0.43	0.56	0.96	0.16	0.54	0.01
W/(C+F)	0.48	-0.23	0.40	0.28	-0.23	0.46	0.18	-0.68	0.12	0.42	-0.46	0.33	-0.07	-0.67	-0.29	0.08	-0.65	0.31
	0.00	0.16	0.01	0.08	0.15	0.00	0.21	0.00	0.39	0.04	0.03	0.12	0.61	0.00	0.04	0.59	0.00	0.03
C	-0.53	-0.04	-0.54	-0.38	0.17	-0.54	-0.26	0.59	-0.27	-0.44	0.44	-0.33	0.04	0.66	0.27	-0.15	0.64	-0.48
	0.00	0.82	0.00	0.02	0.29	0.00	0.06	0.00	0.05	0.03	0.04	0.12	0.80	0.00	0.05	0.29	0.00	0.00
S/a	-0.56	-0.33	0.26	-0.02	-0.03	0.36	-0.30	-0.31	0.38	-0.82	-0.16	-0.53	-0.19	-0.28	-0.07	-0.06	0.26	0.39
	0.00	0.04	0.11	0.92	0.83	0.02	0.03	0.03	0.01	0.00	0.46	0.01	0.19	0.05	0.63	0.65	0.07	0.00
S	0.06	-0.02	0.30	0.12	-0.08	0.46	-0.13	-0.42	0.40	-0.36	-0.29	-0.22	-0.13	-0.31	-0.01	0.02	-0.38	0.46
	0.71	0.88	0.07	0.46	0.62	0.00	0.35	0.00	0.00	0.10	0.18	0.32	0.35	0.03	0.95	0.91	0.01	0.00
G	0.40	0.06	-0.06	0.28	-0.04	-0.05	0.58	0.04	-0.21	0.68	0.41	0.39	0.37	-0.07	-0.18	0.25	0.03	-0.17
	0.01	0.74	0.74	0.08	0.83	0.75	0.00	0.77	0.13	0.00	0.05	0.07	0.01	0.61	0.20	0.07	0.85	0.24
D _G	0.41	-0.01	0.26	0.03	-0.71	0.12	0.52	0.13	-0.19	0.30	0.68	0.50	0.57	-0.14	-0.17	0.01	-0.30	-0.02
	0.01	0.97	0.12	0.87	0.00	0.46	0.00	0.37	0.18	0.17	0.00	0.02	0.00	0.34	0.22	0.95	0.03	0.90
V _G	0.40	0.06	-0.06	0.28	-0.04	-0.05	0.58	0.04	-0.21	0.68	0.41	0.39	0.33	0.01	-0.18	0.23	-0.05	-0.18
	0.01	0.74	0.74	0.08	0.83	0.76	0.00	0.79	0.13	0.00	0.05	0.07	0.02	0.96	0.19	0.10	0.75	0.22
γ_c	1	0.30	0.47	1	0.05	0.77	1	0.04	-0.00	1	0.33	0.67	1	0.24	0.25	1	0.14	0.11
	0	0.07	0.00	0	0.77	0.00	0	0.78	0.98	0	0.13	0.00	0	0.09	0.08	0	0.33	0.43
f_{ck}		1	0.26		1	0.12		1	0.09		1	0.35		1	0.43		1	-0.24
		0	0.12		0	0.45		0	0.54		0	0.10		0	0.00		0	0.09



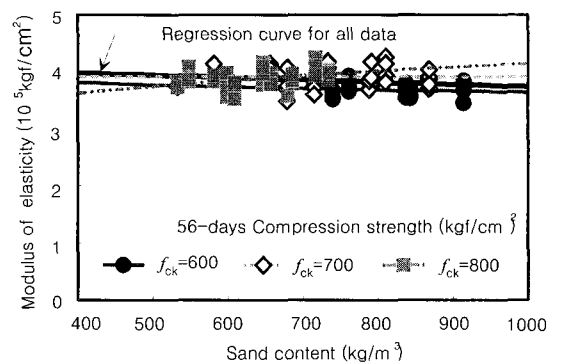
(a) 28 days test age



(a) 28 days test age



(a) 56 days test age



(a) 56 days test age

Fig. 6 Influence of cement content on modulus of elasticity

Fig. 7 Influence of sand content on modulus of elasticity

Table 11 Factor loadings for all data

Age	28 days			56 days		
	Factor pattern					
Variable	PC-1	PC-2	PC-3	PC-1	PC-2	PC-3
W	0.131	0.097	-0.664	0.084	0.107	-0.641
W/(C+F)	-0.914	0.315	0.058	-0.906	0.357	0.027
C	0.929	-0.286	-0.202	0.921	-0.313	-0.184
S/a	-0.867	-0.437	0.130	-0.848	-0.489	0.163
S	-0.959	-0.156	0.223	-0.958	-0.178	0.204
G	0.348	0.924	0.106	0.340	0.911	0.073
D _G	0.090	0.019	0.406	0.068	0.081	0.405
V _G	0.344	0.927	0.100	0.348	0.912	0.073
γ_c	0.572	0.141	0.644	0.484	0.221	0.672
f_{ck}	0.892	-0.311	0.109	0.809	-0.350	0.142
E _c	0.433	-0.375	0.625	0.400	-0.378	0.561

Table 12 Factor loadings for each target strength data

Age	28 days								
	F500			F600			F700		
Variable	Factor loading								
	PC-1	PC-2	PC-3	PC-1	PC-2	PC-3	PC-1	PC-2	PC-3
W	0.355	0.094	-0.498	-0.612	-0.093	-0.145	0.358	-0.191	-0.749
W/(C+F)	-0.826	-0.044	-0.219	0.704	0.420	-0.388	-0.770	0.504	-0.325
C	0.984	0.096	-0.023	-0.883	-0.389	0.252	0.826	-0.548	0.019
F.A	0.974	0.101	-0.045	-0.889	-0.398	0.263	0.830	-0.543	0.028
S/a	-0.210	-0.872	-0.154	0.774	-0.622	-0.041	-0.913	-0.344	0.110
S	-0.623	-0.712	0.169	0.910	-0.364	-0.085	-0.982	-0.074	0.117
G	-0.035	0.985	-0.016	-0.297	0.933	-0.045	0.540	0.796	-0.001
D _G	-0.228	0.000	0.158	0.398	-0.155	0.399	0.506	0.296	0.218
V _G	-0.035	0.985	-0.016	-0.295	0.934	-0.046	0.538	0.798	-0.002
γ_c	-0.600	0.456	0.403	0.386	0.521	0.606	0.150	0.767	0.340
f_c	0.186	0.052	0.870	-0.188	-0.037	-0.186	0.538	-0.344	0.546
E _c	-0.503	-0.050	0.609	0.660	0.253	0.444	-0.408	-0.078	0.625

(PC-1)의 경우에는 압축강도에 영향을 주는 인자들로서 W/(C+F), C, F.A, S/a, S의 배합재료와 γ_c , f_{ck} , E_c로 공통변량을 형성하고 있음을 알 수 있다.

한편 제3주성분(PC-3)에서 W와 D_G, γ_c , E_c가 공통변량으로 형성되어 있으며, 상관분석 결과에서와 같이 탄성계수 증가와 단위수량 감소가 상관성이 있음을 확인 할 수 있다. 또한 제3주성분에서 굵은골재 최대치수와 탄성계수가 공통변량으로 형성됨을 알 수 있음을 알 수 있는데, 3.1.3절 굵은골재의 영향에 대한 상관분석에서와 같이 굵은골재 최대치수 증가와 탄성계수 증가가 상관이 있음을 확인할 수 있다.

주성분 분석에서도 굵은골재량과 탄성계수는 공통변량으로 형성되지 않는 것으로 나타났다.

3.2.1 동일 압축강도자료 분석

Table 12의 재령 28일 압축강도 500, 600 및 700 kgf/cm²에 대한 분석결과를 살펴보면, 제1주성분에서 압축강도가 거의 일정한 변수이므로 공통변량에서 제외됨을 알 수 있으며, W/(C+F), C, F.A, S의 배합변수와 γ_c , E_c가 공통변량으로 형성됨을 알 수 있다.

주성분 분석에도 상관분석과 일치하는 양상을 확인할 수 있는데, Table 11의 재령 28일 전체자료에 대한 주성분 분석결과를 보면, 제1주성분에서 시멘트량 증가(0.929)와 잔골재량 감소(-0.959)가 압축강도 증가(0.892)와 상관성이 있으며, 압축강도 증가를 독립변수로 하여 탄성계수(0.433)가 증가하는 일반적인 양상을 보인 반면에, Table 12에서와 같이 압축강도가 공통변량에서 제외될 경우 제1주성분에서 시멘트량 증가(0.984)와 잔골재량 감소(-0.623)는 오히려 탄성계수 감소(-0.503) 효과가 있음을 알 수 있다.

재령 28일 동일 압축강도 자료에 대한 주성분 분석에서

Table 13 Factor loadings for each target strength data

Age	56 days								
	F600			F700			F800		
	Factor loading								
Variable	PC-1	PC-2	PC-3	PC-1	PC-2	PC-3	PC-1	PC-2	PC-3
W	0.292	-0.362	-0.601	-0.102	-0.440	0.508	0.523	-0.579	0.394
W/(C+F)	-0.334	0.751	0.347	0.469	-0.062	-0.051	-0.631	-0.413	0.147
C	0.461	-0.879	0.029	-0.452	-0.047	0.149	0.843	0.056	0.061
F.A	0.462	-0.873	0.064	-0.463	-0.036	0.139	0.843	0.048	0.086
S/a	-0.834	-0.268	0.049	-0.354	0.150	0.072	-0.805	0.010	-0.039
S	0.860	0.376	-0.299	-0.137	0.159	-0.001	-0.939	0.036	-0.073
G	0.860	0.376	-0.297	0.720	-0.119	-0.239	0.333	0.031	-0.040
D _G	0.424	-0.014	0.236	0.449	0.559	0.637	-0.016	0.395	0.853
V _G	0.860	0.376	-0.297	0.719	-0.118	-0.239	0.334	0.030	-0.039
γ_c	0.496	0.736	0.100	0.367	0.775	0.052	0.124	0.641	0.147
f_c	0.626	-0.221	0.299	-0.540	0.215	-0.101	0.600	0.239	-0.559
E_c	0.401	0.614	0.426	-0.476	0.468	-0.455	-0.536	0.456	-0.030

굵은골재량이나 최대치수와 탄성계수는 공통변량으로 형성되지 않는 것으로 나타났으며, Table 12와 13에서 공통적으로는 제 2 또는 제 3주성분에서 단위수량과 탄성계수가 공통변량을 형성하고 있음을 알 수 있다.

이러한 동일 압축강도 자료에 대한 주성분 분석 결과를 종합해 볼 때, 동일한 압축강도의 배합인 경우 상관분석에서와 같이 단위수량, 시멘트량, 잔골재량 또는 잔골재율의 배합변수를 독립변수로 하여 회귀분석을 수행할 경우 탄성계수를 추정할 수 있는 적절한 모델식을 도출할 수 있을 것이다.

최대치수가 작을수록 굵은골재량을 적게 하는 것이 고강도 콘크리트의 탄성계수 향상에 효과적이다.

3) 동일 압축강도를 목표로 배합을 할 경우, 가능한 범위내에서 단위수량과 단위시멘트량을 줄이고, 굵은골재량에 비해 잔골재량을 늘임으로써 탄성계수 향상을 기대할 수 있다.

4) 단위수량, 시멘트량, 잔골재량 또는 잔골재율의 배합변수를 독립변수로 하여 회귀분석을 수행할 경우 배합재료로부터 탄성계수를 추정할 수 있는 적절한 모델식을 도출할 수 있을 것이다.

4. 결 론

본 연구에서는 고강도 콘크리트영역에서, 동일한 압축강도에서 최대의 탄성계수를 얻기 위한 방안을 모색하기 위한 실험 및 상관분석, 주성분 분석의 통계적 연구를 수행하여 탄성계수에 미치는 배합변수들의 영향을 분석하였으며, 연구결과는 다음과 같다.

- 1) 단위수량 감소는 탄성계수 증가 효과가 있다.
- 2) 굵은골재 최대치수가 19 mm이하인 경우, 굵은골재

참고문헌

1. 장일영, 윤영수, 박훈규, “국내의 실험자료를 이용한 고강도 및 초고강도 콘크리트의 탄성계수식,” 콘크리트학회지, 제8권 6호, 1996.
2. Neville, N. E., “*Properties of Concrete*,” 4th ed., Pitman Books, London, 1995.
3. 장일영, 박훈규, 장광기, “고강도 콘크리트의 배합설계 시스템 개발에 관한 연구,” 대한토목학회논문집, 제19권 I-5호, 1999.

요 약

콘크리트 구조물의 설계 및 해석에 있어서나 구조물 치질 제어에 있어서 가장 중요한 재료적 변수는 탄성계수이다. 일반적으로 탄성계수는 실용적 측면에서 측정이 용이한 단위중량과 압축강도만의 함수로써 간략하게 정의되고 있다. 그러나 이러한 회귀식들은 대부분 실험자료에 대한 평균적인 의미이므로 매우 많은 불확실성이 포함되어 있어 지금까지 제시된 많은 표준식 및 실험식들이 다소의 차이가 있다. Fig. 1에서와 같이 이러한 식들은 압축강도와 탄성계수사이의 큰 상관성이 있음을 잘 나타내고 있으나, 동일한 압축강도에서 탄성계수는 크게 분산된 값으로 측정됨을 알 수 있다.

본 연구에서는 고강도 콘크리트 영역에서 탄성계수에 미치는 배합변수들의 영향을 통계적 기법을 이용하여 분석하고, 이를 통하여 동일한 압축강도에서 최대의 탄성계수를 얻기 위한 방안을 구명하였다.

핵심용어 : 탄성계수, 배합재료, 고강도 콘크리트, 압축강도