

열수양생법에 의한 고로슬래그미분말 혼합 콘크리트의 강도 추정

문한영¹⁾ · 최연왕^{2)*} · 김용직¹⁾

¹⁾ 한양대학교 토목공학과 ²⁾ 세명대학교 토목공학과

(2003년 10월 10일 원고접수, 2004년 1월 15일 심사완료)

Early Prediction of Concrete Strength Using Ground Granulated Blast Furnace Slag by Hot-Water Curing Method

Han-Young Moon¹⁾, Yun-Wang Choi^{2)*}, and Yong-Gic Kim¹⁾

¹⁾ Dept. of Civil Engineering, Hanyang University, Seoul, 133-791, Korea

²⁾ Dept. of Civil Engineering, Semyung University, Chungbuk, 390-711, Korea

(Received October 10, 2003, Accepted January 15, 2004)

ABSTRACT

Recently, production cost of ready mixed concrete(remicon) has been increased due to the rising cost of raw materials such as cement and aggregate etc. cause by the upturn of oil price and increase of shipping charge. The delivery cost of remicon companies, however, has been decreased owing to their excessive competition in sale. Consequently, remicon companies began to manufacture the concrete by mixing ground granulated blast furnace slag(GGBF) in order to lower the production cost. Therefore, the objective of this study was to predict 28-day strength of GGBF slag concrete by early strength(1 day-strength, 7 day-strength) for the sake of managing with ease the quality of remicon. In experimental results, the prediction equation for 28 day-strength of GGBF slag concrete could be produced through the linear regression analysis of early strength and 28 day-strength. In order to acquire the reliability, all mixture were repeated as 3 times and each mixture order was carried out by random sampling. The prediction equation for 28 day-strength of GGBF slag concrete by 1-day strength(hot-water method) won the good reliability.

Keywords : GGBF slag, hot-water method, 1 day-accelerated strength, random sampling, prediction equation of concrete

1. 서 론

콘크리트의 주요 재료인 시멘트는 우수한 압축강도 및 품질특성을 가진 재료로서, 값이 싸고 구하기 쉽다는 장점으로 전 세계적으로 각광받는 구조재료로 이용되고 있다. 그러나 최근 들어서 발생하는 콘크리트 구조물의 대형 붕괴사고 및 건설 중인 구조물의 크고 작은 시공 결함 등은 구조재료로서 콘크리트의 장점을 의심스럽게 하고 있다. 이는, 레디믹스트 콘크리트(이하 레미콘으로 약함)의 제조 및 생산은 원칙적으로 KS 표시허가공장에서 제한된 규정에 의해서 품질관리 하도록 되어 있으나, 레미콘의 운반시간 제한으로 인하여 레미콘 제조업체의 대부분이 지역화 및 소형화되어 있어 품질관리 및 품질향상을 위한 연구인원 및 연구장비의 확보가 크게 부족한 편이기 때문이다.

따라서, 레미콘 원자재인 시멘트, 골재, 혼화재료 등의 변동에 대하여 체계적으로 품질관리에 반영하지 못하고 있는 실정이다. 특히, 레미콘은 제조 후 현장에 굳지 않은 상태로 반입되어 워커빌리티의 측정을 위한 슬럼프 시험 및 콘크리트 구조물의 내구성 평가방법 중의 하나인 공기량 시험은 타설 전에 조기에 측정하여 품질관리를 신속하게 할 수 있다. 그러나 구조재료로서 구조물의 안전성을 좌우하는 콘크리트의 압축강도는 레미콘을 타설한지 28일이 경과된 시점에서 강도 확보 여부를 평가받게 되어 있어 압축강도를 측정하는 시험기간이 한 달이나 소요되기 때문에 현장에서 레미콘의 강도를 인정하고 다음 공정으로 이어지는데 시간적 손실이 발생된다.

그러므로 제조업체가 신속하게 이상 유무에 따라 품질관리를 할 수 없는 실정이다¹⁾. 또한, 이미 구조체에 타설된 콘크리트가 경화된 다음 압축강도를 검사한 결과가 시공계약과 다른 강도부족 결과가 발생하게 되면 경화된 콘크리트의 보수보강이 매우 곤란하여 사후 조치 문제로 큰

* Corresponding author

Tel : 043-649-1331 Fax : 043-649-1778

E-mail : crete77@semyung.ac.kr

경제적 손실이 발생하는 경우가 생긴다. 더욱이, 최근 시멘트 및 골재 등 원재료 값의 상승 및 세계적인 유가 급등으로 인한 운송비의 증가로 레미콘 제조원가는 상승하고 있다. 그러나 레미콘 제조업체들 간의 과당경쟁으로 인해 레미콘의 납품 단가는 오히려 낮아지고 있는 실정이다.

이를 극복하기 위한 일환으로 레미콘 제조업체들은 레미콘의 제조원가를 최소한으로 줄이고자 고로슬래그미분말 및 플라이애쉬를 혼화제로 사용하는 업체가 증가하고 있다²⁾. 일반적으로 고로슬래그미분말 및 플라이애쉬는 그 자체에는 수경성이 없고 시멘트의 수화생성물인 수산화칼슘과 같은 알칼리 물질의 자극에 의해서 서서히 반응하는 포졸란반응의 영향으로 고로슬래그미분말 및 플라이애쉬를 혼화제로 사용한 콘크리트는 재령 7일 이전의 압축강도는 보통콘크리트와 비교해서 작으나 재령 28일 이후의 장기강도에서는 증가된다는 연구결과가 보고되고 있다^{3,4)}. 레미콘의 품질관리를 위해서는 기존의 포틀랜드시멘트계를 사용한 콘크리트뿐만 아니라 광물질 혼화제를 사용한 콘크리트 압축강도의 조기 추정에 의한 품질관리가 필요하지만 국내에서는 이에 대한 연구를 찾아보기 어려운 실정이다⁵⁻⁸⁾. 본 연구에서는 레미콘 제조업체의 원가절감 및 신뢰성 높은 품질관리를 통한 현장콘크리트의 구조물의 안전성을 확보하기 위하여 기존의 연구실험 결과⁹⁾를 토대로 물-결합재비 45, 49 및 53%와 고로슬래그미분말 0, 15, 30 및 45%를 혼합한 콘크리트를 제조하여, 열수양생법에 의한 1일 압축강도로서 28일 압축강도를 예측하는 추정식을 제안하였고, 7일 압축강도로서 28일 압축강도를 예측하는 추정식과 비교 검토하였다. 또한, 실험의 신뢰성을 높이기 위하여 배합순서는 랜덤추출법을 사용하였으며 동일 배합을 3회 반복 실시하여, 각각의 고로슬래그미분말 혼합률에 대해 90%의 신뢰구간으로 검토하였다.

2. 실험개요

2.1 사용재료

2.1.1 시멘트 및 고로슬래그미분말

시멘트 및 혼화제로 사용한 고로슬래그미분말은 각각 비중 3.15인 보통포틀랜드시멘트(이하, OPC로 약함)와 비중 2.90인 고로슬래그미분말(이하, SG로 약함)을 사용하였다. OPC 및 SG의 화학성분 및 물리적 성질은 Table 1과 같다. SG는 1종으로 활성도지수가 재령 7일 및 28일에서 각각 57 및 105%로 KS F 2563의 품질 규정을 만족하였다.

2.1.2 골재

잔골재는 예천산 강모래, 굵은 골재는 최대치수가 20 mm인 부순골재를 사용하였으며, 골재의 물리적 성질은 Table 2와 같다.

2.1.3 화학혼화제

유동성 향상을 위하여 화학혼화제는 AE감수제(Water Reducing AE Agent: 이하 WRAE로 약함) 표준형으로서 상온에서 비중 1.2 ± 0.02 , pH 7.0 ± 1.0 인 액상을 사용하였다.

2.2 실험방법

2.2.1 콘크리트 제조방법

콘크리트 믹서는 용량 50ℓ, 회전속도 100 rpm 까지 조절이 가능한 강제식 믹서를 사용하였으며, 한 배치량 30ℓ, 회전속도 50 rpm으로 2분간 믹싱하였다. 재료투입 순서는 잔골재, OPC 및 SG, 굵은 골재, 화학혼화제를 혼합한 배합수 순서로 하였다. 압축강도 측정을 위하여 $\Phi 10 \times 20$ cm 원주형 공시체를 KS F 2403에 의하여 제조하였다.

2.2.2 슬럼프 및 공기량

KS F 2402 및 KS F 2421에 의하여 균지 않은 콘크리트의 슬럼프 및 공기량을 측정하였다. 목표 슬럼프 및 공기량은 15 ± 2 cm, 4.5 ± 1.5 %로 하였고 화학혼화제의 투입량으로서 조절하였다.

2.2.3 열수양생법

양생 수조는 $60 \times 60 \times 45$ cm 크기의 수조이며, Fig. 1과 같은 열수양생법의 순서 및 시간에 따라 실시하였다. 즉, 공시체 제작 3시간 후에 물의 온도 70 ± 2 °C인 열수양생을 20.5시간 실시하였으며 열수양생이 끝난 후 20 ± 3 °C의 표준양생 수조에 30분 정도 담근 후 압축강도를 측정하였다. 여기서, 공시체 제작 후 압축강도 측정까지 걸리는 총 시간은 24시간 내·외가 소요된다.

2.2.4 압축강도

동일 배합으로 제조한 공시체 3개는 열수양생법에 의하여 축진양생을 실시하고, 나머지 공시체는 표준양생을 실시하여 각 재령별로 KS F 2405에 의하여 압축강도를 측정하였다.

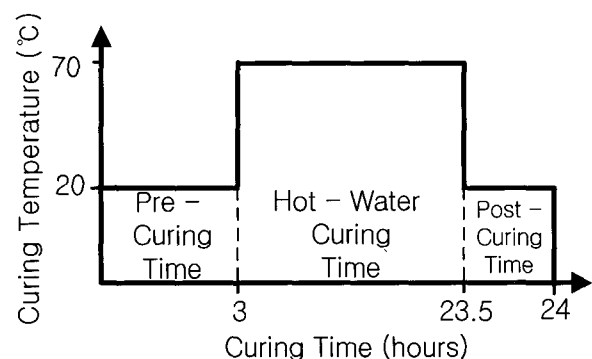


Fig. 1 Cycle of hot-water method

Table 1 Chemical components and physical properties of OPC and SG

Types	Items	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)	Specific gravity	Specific surface (cm ² /g)
OPC		21.60	6.00	3.10	61.41	3.40	2.50	3.15	3,539
SG		33.33	15.34	0.44	42.12	5.70	2.08	2.90	3,480

Table 2 Physical properties of aggregates

Types	Items	G _{max} (mm)	Specific gravity	Absorption (%)	F.M.	Unit weight (kg/m ³)	Percentage of solids (%)
Fine aggregate		-	2.55	2.43	2.81	1,677	64.5
Coarse aggregate		20	2.72	0.80	6.72	1,695	62.3

2.3 콘크리트의 배합

기존의 연구실험 결과⁵⁾를 기초로 하여 SG의 적정 혼합률을 4수준(0, 15, 30 및 45%)으로 결정하였다. 이때 목표 슬럼프값 및 공기량은 각각 15±2cm 및 4.5±1.5%로 결정하였으며, 단위시멘트량은 물-결합재비 53, 49 및 45%에서 각각 346, 382 및 414 kg/m³으로 선정하였고 본 연구의 배합표는 Table 3과 같다. 실험결과의 신뢰성 및 재현성의 확보를 위하여 동일배합을 3회 실시하였으며 실험순서는 랜덤 추출법에 의해 배합순서(총 36배합)를 결정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 고로슬래그미분말 혼합 콘크리트의 압축강도 특성

기존의 연구실험 결과⁵⁾에 의하면 물-결합재비 45, 49 및 53%이고 SG의 혼합률 0, 30, 50 및 70%로 증가함에 따라서 재령 7일의 압축강도는 보통콘크리트에 비해 저하

되는 현상이 나타났다.

그러나 재령 28일의 경우에는 SG를 30 및 50% 혼합한 콘크리트의 압축강도는 보통콘크리트와 유사한 반면 SG 혼합률 70%인 경우 보통콘크리트와 비교하면 압축강도는 감소하는 경향을 나타내었다. 이상의 결과는 기존의 다른 연구자들의 실험 결과와 유사한 경향을 나타내었으며, 재령 28일 이후 SG를 40~65% 범위로 혼합한 콘크리트의 압축강도가 증가한다는 Hogan 및 Meusel의 연구결과와도 잘 일치함을 알 수 있다^{3,4)}.

SG를 레미콘 공장에서 혼합하여 사용하고자 할 경우, 콘크리트 공사현장의 품질관리, 원가절감, 거푸집 해체시기 및 공사기간의 단축 등을 고려하여 적정 혼합률의 범위를 결정하는 것은 매우 중요하다⁹⁾.

그러나 SG의 혼합률이 낮을 경우 원가절감에 도움이 되지 않으며, 증가시킬 경우 초기강도가 지나치게 낮아지는 탓으로 거푸집 해체시기 및 공사기간이 크게 지연되는 문제점이 지적되고 있다. 따라서 본 연구에서는 SG 혼합률을 4수준인 0, 30, 50 및 70%로 선정하여 실시한 기존의 연구 실험결과⁵⁾를 토대로 SG 혼합률을 50% 이하 4

Table 3 Mixture proportions of concrete

W/(OPC+SG) (%)	S/a (%)	SG/(OPC+SG) (%)	Unit weight (kg/m ³)					WRAE
			W	OPC	SG	S	G	
53	40	0	185	346	0	691	1065	1.038
		15	185	294	52	687	1065	1.038
		30	185	242	104	684	1065	1.038
		45	185	190	156	681	1065	1.038
49	39	0	186	382	0	658	1065	1.146
		15	186	325	57	655	1065	1.146
		30	186	267	115	651	1065	1.146
		45	186	210	172	646	1065	1.146
45	38	0	187	414	0	630	1065	1.242
		15	187	352	62	625	1065	1.242
		30	187	290	124	621	1065	1.242
		45	187	228	186	616	1065	1.242

수준 0, 15, 30 및 45%로 선정하였다.

기존의 연구실험 결과를 통해 결정한 물-결합재비 3수준 및 SG 혼합률 4수준으로 제조한 콘크리트 12배합(총 36배합)의 재령 7 및 28일의 압축강도를 측정하여 물-결합재비별로 정리한 것이 Fig. 2 ~ 4이다.

Fig 2 ~ 4는 기존의 연구실험 경향과 유사한 결과를 나타내었다. 즉, 재령 7일 압축강도는 SG 혼합률이 증가할수록 보통콘크리트에 비해 압축강도가 감소하는 반면 재

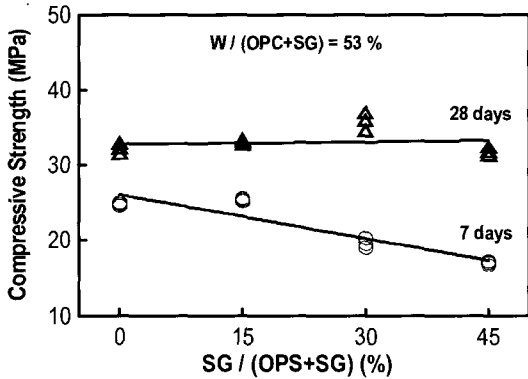


Fig. 2 Relationship of replacement ratio and compressive strength

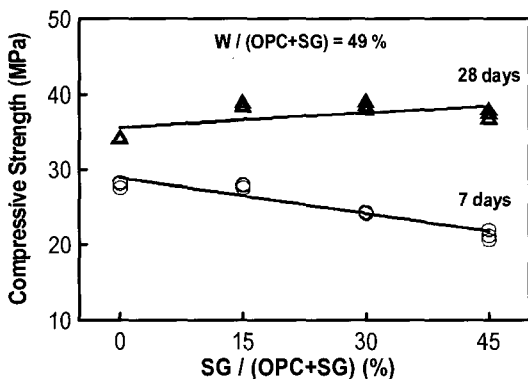


Fig. 3 Relationship of replacement ratio and compressive strength

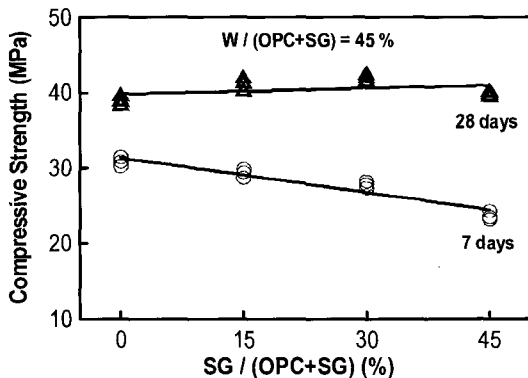


Fig. 4 Relationship of replacement ratio and compressive strength

령 28일에서는 비슷해지거나 오히려 약간 증가하는 결과를 나타내었다. 그래서 물-결합재비 및 혼합률에 따른 재령 7일의 압축강도의 변화를 선형 회귀분석한 결과를 참고하여 SG 혼합률이 0, 15, 30 및 45%로 15%씩 증가하는데 따라 SG를 사용하지 않은 보통콘크리트와 비교한 결과, 물-결합재비와 관계없이 평균 약 9, 18 및 27%의 압축강도 저하현상을 나타내었다. 그러나 재령 28일의 압축강도는 SG 혼합률의 변화에 상관없이 유사한 압축강도 값을 나타냄으로서 SG의 잠재수경성의 작용으로 압축강도가 증진되었다는 여러 연구자들의 결과와 동일하였다^{10,11)}.

이러한 결과를 통계적으로 확인하기 위하여 콘크리트의 재령 7일 및 28일을 선정하여 SG의 혼합률에 따른 콘크리트의 압축강도를 1원 분산분석을 실시하였다.

1원 분산분석 결과 SG 혼합률의 변화가 콘크리트의 압축강도에 미치는 영향은 재령 7일에서는 유의수준 0.05 이하로 유의하였으나, 재령 28일에서는 0.118로 유의수준 0.05 이상으로 나타났다. 이상의 실험결과를 고찰해 보면, 물-결합재비 45, 49 및 53%와 SG 혼합률 0, 15, 30 및 45%에서의 콘크리트 압축강도는 재령 7일에서 SG 혼합률의 변화에 따라 크게 영향을 받으나, 재령 28일에서는 SG 혼합률의 변화에 따라 영향을 받지 않음을 확인하였다.

3.2 고로슬래그미분말 혼합 콘크리트의 조기 압축강도 추정

3.2.1 재령 7일 압축강도로서 재령 28일 압축강도 추정
SG 혼합 콘크리트의 표준양생 재령 7일 압축강도로서 28일 압축강도를 예측하기 위하여 SG 혼합률별로 정리한 것이 Fig. 5 ~ 8이다.

Fig. 5 ~ 8은 SG 혼합률 0, 15, 30 및 45%별로 선형회귀식을 구하여 정리한 것이며, 상·하한선은 90%의 신뢰구간을 예측한 선이다. 신뢰구간 예측식은 다음식을 이용하였다¹²⁾.

$$Se = \sqrt{\frac{\sum(Y_i - \hat{Y})^2}{n-2}} \quad (1)$$

$$Y = AX+B \pm t(n-2; \alpha/2) \times Se \sqrt{1 + \frac{1}{n} + \frac{(X - \bar{X})^2}{\sum(X_i - \bar{X})^2}} \quad (2)$$

- 여기서, Y_i : 재령 28일 측정 압축강도 (MPa)
 \hat{Y} : $Y=AX+B$ (직선회귀식)에서 구한 재령 28일 콘크리트의 추정 압축강도 (MPa)
 X_i : 조기 측정 압축강도 (열수양생법, 재령 7일)(MPa)
 \bar{X} : 조기 압축강도 값들의 평균 (MPa)
 X : $Y=AX+B$ (직선회귀식)에 대입할 초기 압축강도 (MPa)
 n : 측정 데이터의 수

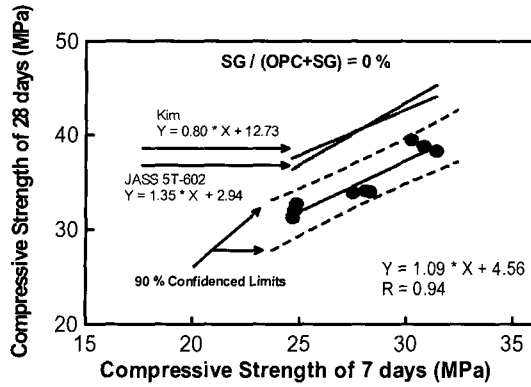


Fig. 5 Relationship of 7 days and 28 days compressive strength

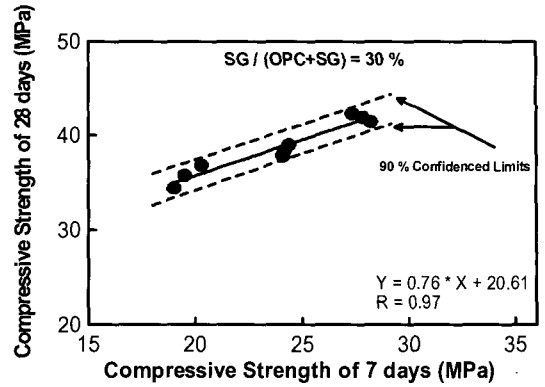


Fig. 7 Relationship of 7 days and 28 days compressive strength

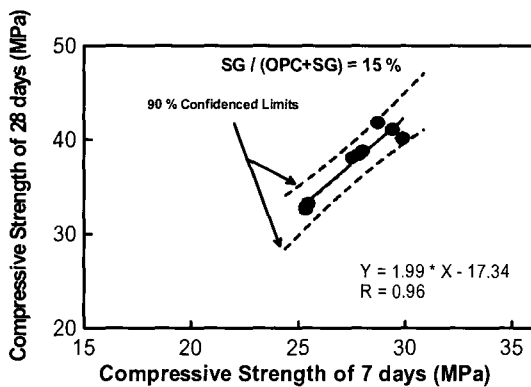


Fig. 6 Relationship of 7 days and 28 days compressive strength

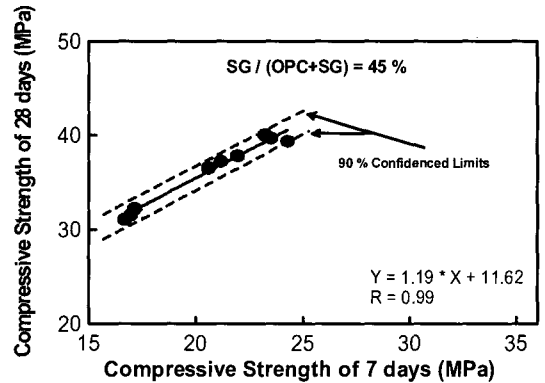


Fig. 8 Relationship of 7 days and 28 days compressive strength

SG를 혼합하지 않은 보통콘크리트에 대한 Fig. 5는 JASS 5T-602 및 국내 기존 연구 결과의 추정식과 비교한 결과이다^{13,14}. JASS 5T-602 및 국내 기존 연구 결과에서 제시한 추정식이 본 연구에서 제시한 추정식보다 평균 약 16%정도 큰 값을 나타내고 있었다. 이는 기존 연구결과와 본 연구에서의 설계기준강도 값이 서로 다르기 때문으로 판단된다.

Table 4는 표준양생 재령 7일에서 재령 28일의 압축강도 추정식을 앞의 Fig. 5 ~ 8에서 정리한 것이며, SG 혼합률 0, 15, 30 및 45%에 상관없이 최소 94%에서 최대 99%까지 모두 상관성이 90% 이상인 좋은 선형 상관성을 보여주고 있다.

Table 4 Regression equation and correlation coefficient

SG/(C+SG)	Regression equation	Correlation coefficient (R)
0 %	$f_{28} = 1.09 \times f_7 + 4.56$	0.94
15 %	$f_{28} = 1.99 \times f_7 - 17.34$	0.96
30 %	$f_{28} = 0.76 \times f_7 + 20.61$	0.97
45 %	$f_{28} = 1.19 \times f_7 + 11.62$	0.99

3.2.2 열수양생법에 의한 촉진 압축강도로서 재령 28일 압축강도 추정

열수양생법을 이용하여 24시간 양생시킨 콘크리트의 촉진 강도와 재령 28일 압축강도와의 관계를 SG 혼합을 변화에 따라 정리한 것이 Fig. 9 ~ 12이다.

Fig. 9 ~ 12 또한 선형 회귀분석을 실시하여 추정식을 구하였고, 앞의 식 1 및 2를 이용하여 상·하한선 90%의 신뢰구간을 예측하였다. Fig. 9는 본 연구에서 제시한 추정식과 국외의 Boiling Water Method (100 °C의 끓는 물에 의한 양생) 및 국내의 기존 열수양생법에 의한 추정식 결과를 비교한 것이다^{15,16}. SG 혼합률이 0%인 보통콘크리트에서 제시한 추정식을 비교한 결과, Boiling Water Method에 의한 압축강도 추정식은 본 연구에서 제시한 압축강도 추정식보다 평균 18%정도 작은 경향을 나타내었다. 이는 서로 다른 양생방법에 의한 결과라고 판단된다. 그러나 국내의 기존 열수양생법에 의한 연구결과에서 제시한 추정식을 보면 본 연구에서 제시한 압축강도 추정식보다 약 6% 정도 적은 값을 나타내었으나 Fig. 9에서 나타나듯이 90% 신뢰구간의 상·하한선 안에 근접함을 알 수 있다.

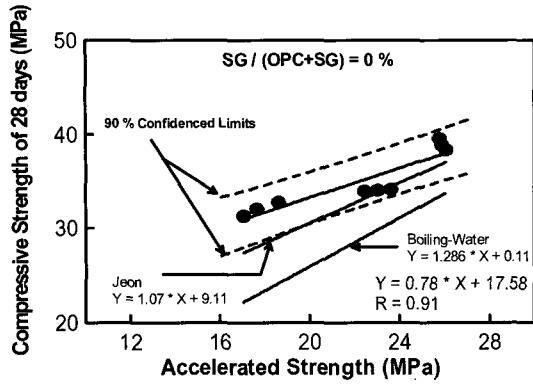


Fig. 9 Relationship of 1 day and 28 days compressive strength

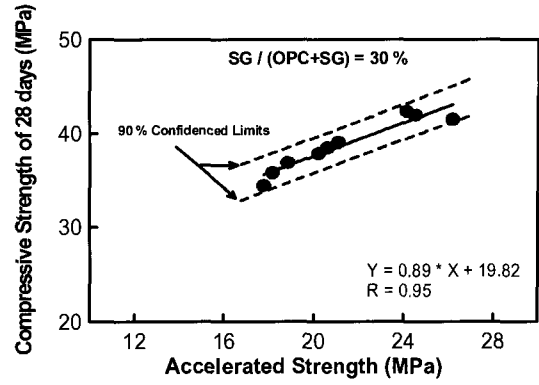


Fig. 11 Relationship of 1 day and 28 days compressive strength

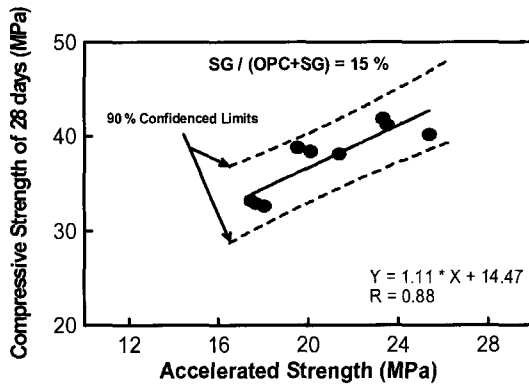


Fig. 10 Relationship of 1 day and 28 days compressive strength

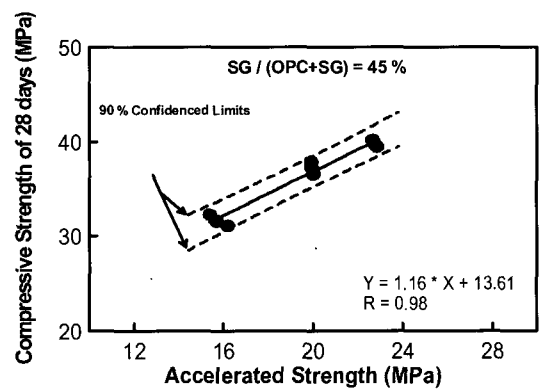


Fig. 12 Relationship of 1 day and 28 days compressive strength

Table 5는 열수양생법에 의한 재령 1일에서 재령 28일의 압축강도 추정식을 앞의 Fig. 9 ~ 12에서 정리한 것이다. SG 혼합물 15%의 콘크리트를 제외하고 0, 30 및 45%에서는 상관성이 90% 이상인 좋은 선형 상관성을 보여주고 있다.

3.3 고로슬래그미분말 혼합 콘크리트의 재령 28일 추정 압축강도의 검증

원가절감을 목표로 콘크리트 제품 및 레미콘 공장에서 사용되고 있는 SG 또는 Fly-Ash 등과 같은 광물질 혼화재들은 지나치게 많은 양을 사용할 수 없고 너무 적게 사용하면 원가 절감에 도움이 되지 않는다. 따라서 소요의 요구조건을 충족하는 적정 혼합률을 결정하는 것이 중요하다. 따라서 본 연구에서는 기존의 연구실험 결과⁵⁾를 기초로 하여 물-결합재비는 45, 49 및 53%로 SG의 혼합률은 0, 15, 30 및 45%로 선정하였다.

이 배합을 이용하여 열수양생법에 의한 촉진강도와 표준양생에 의한 재령 7일 및 28일 압축강도를 측정하여 회귀분석을 실시하여 Table 4 및 5와 같은 추정식을 제시하였다. Table 4와 5의 추정식 검증을 위해 실제 실험에서

측정한 재령 28일의 압축강도와 비교한 것이 Table 6이다. 또한, Table 6에서는 표준양생 재령 7일 압축강도로서 재령 28일의 압축강도를 예측(Table 4에서 제시한 식)한 것과 열수양생법에 의한 촉진강도로서 재령 28일 압축강도를 예측(Table 5에서 제시한 식)한 것을 실측한 재령 28일의 압축강도에 대한 강도비로 정리하였다. 그리고 SG 혼합물에 따라 실측 압축강도에 대한 추정 압축강도의 비를 정리한 것이 Fig. 13이다. 이 그림에서 알 수 있듯이 Table 4와 5의 추정식에 의한 재령 28일 압축강도 값과 실제 측정한 재령 28일의 압축강도 값의 결과를 비율로서 정리하면 표준편차가 각각 0.02와 0.03으로서 미소한 차이로 재령 7일 압축강도로서 재령 28일의 압축강도를 추정

Table 5 Regression equation and correlation coefficient

SG/(C+SG)	Regression equation	Correlation coefficient (R)
0%	$f_{28} = 0.78 \times f_{1d} + 17.58$	0.91
15%	$f_{28} = 1.11 \times f_{1d} + 14.47$	0.88
30%	$f_{28} = 0.89 \times f_{1d} + 19.82$	0.95
45%	$f_{28} = 1.16 \times f_{1d} + 13.61$	0.99

Table 6 Comparison of measurement strength and prediction strength of concrete

SG/ (OPC+SG)	W/ (OPC+SG)	Measurement strength (MPa)			Prediction strength (MPa)		Prediction/measurement strength	
		f_{1w}	f_7	f_{28}	A	B	A/ f_{28}	B/ f_{28}
0%	53%	17.1	24.7	31.3	31.5	30.9	1.01	0.99
		18.6	24.9	32.7	31.7	32.1	0.97	0.98
		17.6	24.8	32.0	31.6	31.4	0.99	0.98
	49%	22.4	27.5	33.9	34.6	35.1	1.02	1.04
		23.6	27.2	34.1	35.2	36.0	1.03	1.06
		23.0	28.3	34.0	35.5	35.6	1.04	1.05
	45%	25.8	30.3	39.5	37.5	37.7	0.95	0.95
		26.1	31.5	38.3	38.8	37.9	1.01	0.99
		25.9	30.9	38.8	38.2	37.7	0.98	0.97
15%	53%	17.4	25.5	33.2	33.3	33.8	1.00	1.02
		18.0	25.4	32.6	33.1	34.5	1.02	1.06
		17.6	25.4	32.9	33.1	34.0	1.01	1.04
	49%	21.4	27.5	38.1	37.4	38.2	0.98	1.00
		19.5	28.0	38.8	38.4	36.2	0.99	0.93
		20.1	27.8	38.4	38.0	36.8	0.99	0.96
	45%	23.3	28.7	41.8	39.8	40.4	0.95	0.97
		25.4	29.9	40.2	42.1	42.6	1.05	1.06
		23.5	29.4	41.2	41.2	40.6	1.00	0.99
30%	53%	18.8	20.3	36.8	36.1	36.6	0.98	0.99
		17.7	19.0	34.4	35.1	35.6	1.02	1.03
		18.1	19.5	35.8	35.5	36.0	0.99	1.01
	49%	21.1	24.4	39.0	38.9	38.6	1.00	0.99
		20.2	24.1	37.8	39.0	37.8	1.03	1.00
		20.6	24.2	38.4	39.8	38.1	1.04	0.99
	45%	26.2	28.2	41.5	42.0	43.1	1.01	1.04
		24.1	27.3	42.3	41.4	41.3	0.98	0.98
		24.5	27.8	41.9	41.7	41.7	1.00	1.00
45%	53%	15.4	17.2	32.2	32.0	31.5	0.99	0.98
		16.2	16.7	31.1	31.5	32.3	1.01	1.04
		15.7	17.0	31.6	31.8	31.8	1.01	1.01
	49%	20.0	20.6	36.6	36.1	36.8	0.99	1.01
		19.9	22.0	37.8	37.7	36.7	1.00	0.97
		19.8	21.2	37.2	36.8	36.7	0.99	0.99
	45%	22.6	23.2	40.1	39.3	39.9	0.98	1.00
		22.8	24.3	39.4	40.6	40.1	1.03	1.02
		22.7	23.5	39.7	39.6	40.1	1.00	1.01

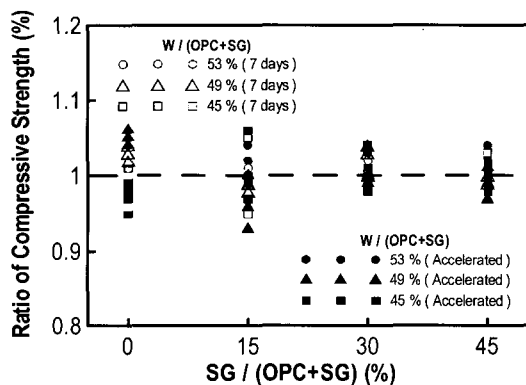


Fig. 13 Comparison of measurement strength and prediction strength

하는 것이 열수양생법에 의한 촉진강도로서 재령 28일 압축강도를 추정하는 것보다 다소 산포값이 적은 경향을 나

타내고 있다. 이는 Fig. 14 및 15에서 나타나듯이 물-결합 재비 및 SG 혼합율별로 열수양생법에 의한 촉진 강도가 재령 28일 압축강도에 최대 71% 및 최소 50% 도달하였고 재령 7일 압축강도는 최대 82% 및 최소 54% 도달하여 재령 28일 압축강도에 보다 근접한 압축강도 값으로 예측하였기 때문에 판단된다. 그러나 전체 양생시간이 7일 정도이면 비교적 높은 강도를 나타낼 수 있고 변동계수도 작아져서 신뢰할만한 결과를 얻을 수 있으나 양생기간이 너무 길어 조기 판정방법이라기 보다는 조기 재령강도의 의미가 강하기 때문에 신속한 실험결과를 획득함에 있어서는 부적합하다. 다시 말해서 열수양생법에 의한 1일 촉진강도로서 재령 28일 압축강도를 추정하는 식 Table (5)가 표준양생 재령 7일 압축강도로서 재령 28일 압축강도를 추정하는 식 Table (4)보다 신뢰성면에서도 차이가 적고 실용적으로 적용이 가능함을 확인하였다.

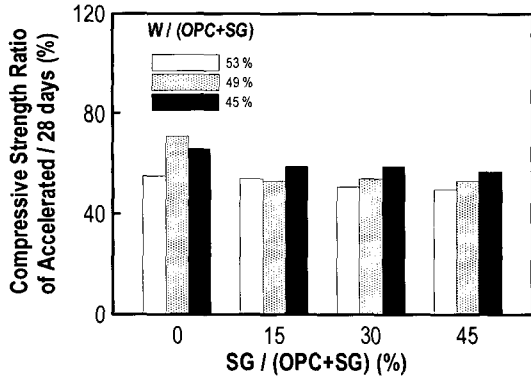


Fig. 14 Ratio of 28 days and 1 day compressive strength

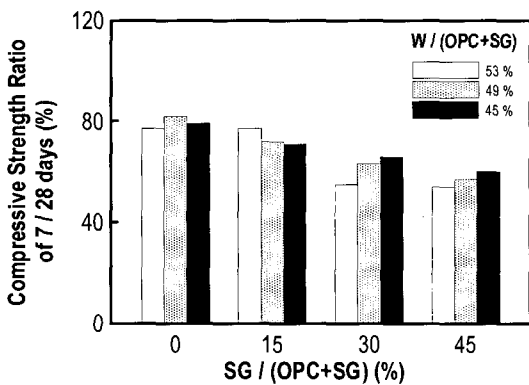


Fig. 15 Ratio of 28 days and 7 days compressive strength

4. 결 론

본 연구의 결과를 정리하면 다음과 같다

- 1) 물-결합재비 3수준(45, 49 및 53%)과 고로슬래그미분말 혼합물 4수준(0, 15, 30 및 45%)이 재령 7일 및 28일의 콘크리트의 압축강도에 미치는 영향을 분석한 결과 고로슬래그미분말 혼합물은 재령 7일의 경우에만 영향을 미치고 있었으며 재령 28일에서는 영향을 거의 미치지 않는 것으로 나타났다.
- 2) 물-결합재비 3수준(45, 49 및 53%)과 고로슬래그미분말 혼합물 4수준(0, 15, 30 및 45%)의 범위에서 표준양생 재령 7일 압축강도에서 28일 압축강도를 추정하기 위해 회귀분석을 실시하여 90%의 신뢰구간을 확인하였고 추정식에 대한 상관계수는 90% 이상으로 좋은 선형 상관성을 보였다.
- 3) 물-결합재비 3수준(45, 49 및 53%)과 고로슬래그미분말 혼합물 4수준(0, 15, 30 및 45%)의 범위에서 열수양생에 의한 촉진강도로서 28일 압축강도를 추정하기 위해 회귀분석을 실시하여 90%의 신뢰구간을 확인하였고 추정식에 대한 상관계수는 고로슬래그미분말 혼

합률 15%의 경우만 제외하고는 90% 이상 좋은 선형 상관성을 보였다.

- 4) 본 연구에서 제시한 추정식들의 검정 결과 90%의 신뢰구간을 확인하였으며, 열수양생법에 의한 촉진 강도로서 재령 28일 압축강도를 추정하는 식이 표준양생 재령 7일 압축강도로서 28일 압축강도를 예측하는 추정식보다 신뢰성 면에서 차이가 거의 없고 적용성 면에서도 상당히 우수하다는 것을 확인하였다.

참고문헌

1. 김용직, “고로슬래그미분말을 사용한 콘크리트 품질의 조기판정에 관한 연구”, 석사학위논문집, 세명대학교 대학원, 2001, pp.1~3.
2. Rahhal, V.F. and Bantic, O.R., “Mineral Admixtures Contribution to the Development of Heat of Hydration and Strength,” *Cement, Concrete and Aggregates*, CCAGPD, Vol.16, No.2, 1994, pp.150~158.
3. Hogan, F. J. and Meusel, J. W., “Evaluation for Durability and Strength Development of a Ground Granulated Blast Furnace Slag,” *Cement, Concrete and Aggregates*, Vol.3, No.3, 1981, pp.40~52.
4. 최연왕, “고로슬래그미분말을 활용한 고성능 콘크리트의 실용화에 관한 연구”, 박사학위논문집, 한양대학교 대학원, 1996, pp.7~12.
5. 문한영, 최연왕, 김용직, “고로슬래그미분말 혼합 콘크리트의 온수양생법에 의한 강도 추정”, 대한토목학회 논문집, 제21권 제6-A호, 2001, pp.967~976.
6. 한국산업규격, “콘크리트 생산 공정 관리용 시험 방법-콘크리트 압축 강도의 조기판정 시험 방법(온수양생법)”, KS F 2827, 한국표준협회, 1996, pp.1~2.
7. M. Tokyay, “Strength Prediction of fly ash Concretes by Accelerated Testing,” *Cement and Concrete Research*, Vol.29, No.11, 1999, pp.1737~1741.
8. Corina-Maria Aldea, “Effects of Curing Conditions on Properties of Concrete Using Slag Replacement,” *Cement and Concrete Research*, Vol.30, No.3, 2000, pp.465~472.
9. 대한토목학회, “고로슬래그 시멘트 및 고로슬래그미분말을 사용한 콘크리트의 설계 시공지침(안)”, 대한토목학회, 1995, pp.10~15.
10. 문한영, 서정우, 최재진, 김기형, “콘크리트 혼화재료”, 한국콘크리트학회, 1997, pp.159~184.
11. Thomas Anwar, “Metallurgical and Slag Cements, the Indispensable Energy Savers,” *General Practices, IEEE Cement Industry 21 Technical Conference*, 1979, pp.108~126.
12. ACI, “Accelerated Strength Testing,” Publication SP-56, ACI, Detroit, USA, 1978.

13. 김선영, 권태수, 이수근, “콘크리트의 7일 강도를 이용한 28일 강도의 추정”, 콘크리트학회지, 제10권, 1호, 1998, pp.119~124.
14. Neville, A. M., “*Properties of Concrete*,” Fourth Edition, John Wiley & Sons, New York, 1995, pp.359~365.
15. 전찬기, “콘크리트 품질의 조기판정에 관한 연구”, 박사학위논문집, 성균관대학교 대학원, 1987, pp.117~118.
16. Sandor Popovics, “*Strength and Related Properties of Concrete*,” John Wiley & Sons, New York, 1998, pp.21~24.

요 약

최근 시멘트 및 골재 등 원재료 값의 상승 및 세계적인 유가 급등으로 인한 운송비의 증가로 레미콘 제조원가는 상승하고 있다. 그러나 레미콘 제조업체들 간의 과당경쟁으로 인해 레미콘의 납품 단가는 오히려 낮아지고 있는 실정이다. 이를 극복하기 위한 일환으로 레미콘 제조업체들은 레미콘의 제조원가를 최소한으로 줄이고자 하는 노력 중 하나로 고로슬래그미분말 및 플라이애쉬를 혼화재로 사용하는 업체가 증가하고 있다. 그러나 이러한 광물질 혼화재를 사용한 콘크리트의 품질관리에 대한 연구는 미흡한 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 고로슬래그미분말 혼합 콘크리트의 28일 압축강도를 조기에 예측하기 위해 열수양생법 및 표준양생에 의한 7일 압축강도를 이용하였다. 고로슬래그미분말 혼합물 별로 선형회귀분석을 실시하여 추정식을 제시하였고 90%의 신뢰구간을 나타내었다. 또한 실험의 신뢰성을 높이기 위해 모든 배합은 3회 반복하였고, 배합순서는 랜덤추출법을 사용하였다. 이러한 실험결과 열수양생법에 의한 1일 축진강도로서 고로슬래그미분말 혼합 콘크리트의 재령 28일 압축강도를 예측할 수 있는 추정식의 신뢰성을 확인하는 성과를 얻었다.

핵심용어 : 고로슬래그미분말, 열수양생법, 축진강도, 랜덤추출, 추정식