

촉진양생법에 의한 고로슬래그 미분말 혼합 콘크리트의 압축강도 예측

Compressive strength prediction of concrete using ground granulated blast furnace slag by accelerated testing

(2009년 10월 15일 원고접수, 2009년 12월 15일 심사완료/ Received October 15, Accepted December 15, 2009)

김용직^{1)*}, 김영진¹⁾, 최연왕²⁾
(주)대우건설 기술연구원, 토목연구팀¹⁾
세명대학교 토목공학과²⁾

Kim Yong Jic¹⁾ · Kim Young Jin¹⁾ · Choi Yun Wang²⁾
Daewoo E&C, Civil Engineering Research Team, Gyeonggi, 440-800, Korea¹⁾
Semyung University, Department of civil Engineering, Chungbuk, 390-711, Korea²⁾

Abstract

Recently, production cost of ready mixed concrete 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 ready mixed concrete companies, however, has been decreased owing to their excessive competition in sale. Consequently, ready mixed concrete companies began to manufacture the concrete by mixing ground granulated blast furnace slag(GGBF) and fly-ash in order to lower the production cost. Therefore, the objective of this study was to predict 28 days strength of GGBF slag concrete by early strength(warm and hot water curing method) for the sake of managing with ease the quality of ready mixed concrete. In experimental results, the prediction equation for 28 days compressive strength of GGBF slag concrete could be produced through the linear regression analysis of early strength and 28 days 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 days strength of GGBF slag concrete by 1 day compressive strength(accelerated testing) according to warm and hot water curing method won the good reliability.

키워드 : 고로슬래그 미분말, 온수양생법, 열수양생법, 1일 압축강도, 예측식

Keywords : Ground granulated blast furnace slag, Warm water curing method, Hot water curing method, 1 day strength, prediction equation of concrete

1. 연구의 목적

콘크리트는 우수한 압축강도 및 품질 특성을 가진 재료로서, 값이 싸고 우수한 성형성 등으로 인하여 세계적으로 각광받는 구조재료로 이용되고 있다. 그러나 최근 콘크리트 제조시 필요한 원료, 인건비 및 유가 등이 상승하고 있어 레디믹스트 콘크리트 및 콘크리트 공장제품의 제조원가 및 수송비가 상승하고 있지만 콘크리트의 납품단가는 이를 반영하지 못하는 실정이다. 이를 극복하기 위한 일환으로 레미콘 제조업체들은 레미콘의 제조원가를 최소한으

로 줄이고자 고로슬래그 미분말 및 플라이애시를 혼화제로 사용하는 업체가 증가하고 있다. 일반적으로 고로슬래그 미분말 및 플라이 애시는 그 자체에는 수경성이 없고 시멘트의 수화생성물인 수산화칼슘과 같은 알칼리 물질의 자극에 의해서 서서히 반응하는 잠재수경성 및 포졸란 반응의 영향으로 고로슬래그 미분말 및 플라이애시를 혼화제로 사용한 콘크리트는 재령 7일 이전의 압축강도는 보통콘크리트와 비교해서 작으나 재령 28일 이후의 장기강도에서는 증가된다는 연구결과가 보고되고 있다^{1,2)}. 레미콘의 품질관리를 위해서는 기존의 포틀랜드 시멘트계를 사용한 콘크리트뿐만 아니라 광물질 혼화제를 혼합한 콘크리트 압축강도의 조기강도 추정에 의한 품질관리가 필요

* Corresponding author
E-mail: ykim08@dwconst.co.kr

하지만 국내에서는 이에 관한 연구를 찾아보기 어려운 실정이다^{3,4)}.

본 연구에서는 레미콘 제조업체의 원가절감 및 신뢰성 높은 품질관리를 통한 현장 콘크리트의 구조물의 안전성을 확보하기 위하여 예비실험 결과를 토대로 물-결합재비 45, 49 및 53%와 고로슬래그 미분말 0, 15, 30 및 45%를 혼합한 콘크리트를 제조하여, 촉진생법에 의한 1일 압축강도로서 28일 압축강도를 예측하는 추정식을 제안하였다^{5,6)}. 또한, 실험의 신뢰성을 높이기 위하여 배합순서는 랜덤추출법을 사용하였으며 동일 배합을 3회 반복 실시하여, 각각의 고로슬래그 미분말 혼합률에 대해 90%의 신뢰구간으로 검토하였다⁷⁾.

2. 실험개요

2.1 사용재료

2.1.1 시멘트 및 고로슬래그 미분말

보통포틀랜드 시멘트(OPC) 및 고로슬래그 미분말(GGBF)은 각각 밀도 3.15g/cm^3 및 2.90g/cm^3 것을 사용하였다. OPC 및 GGBF의 화학성분 및 물리적 성질은 Table 1과 같다. 본 연구에서 사용한 GGBF는 1종으로서 활성도 지수가 재령 7일 및 28일에서 각각 57 및 105%이며, KS F 2563의 품질 규정을 만족하였다.

Table 1 Chemical components and physical properties of OPC and GGBF

Items	OPC*	GGBF**
SiO ₂	21.60	33.33
Al ₂ O ₃	6.00	15.34
Fe ₂ O ₃	3.10	0.44
CaO	61.41	42.12
MgO	3.40	5.70
SO ₃	2.50	2.08
Density(g/cm ³)	3.15	2.90
Blaine Fineness(cm ² /g)	3,539	3,480

* OPC : Ordinary portland cement

**GGBF: Ground granulated blast furnace slag

2.1.2 골재

잔골재는 밀도 2.55g/cm^3 인 강모래를 사용하였으며, 굵은 골재는 최대치수(G_{max})가 20mm 및 밀도 2.72g/cm^3 부순

골재를 사용하였다. Table 2는 사용골재의 물리적 성질을 나타낸 것이다.

Table 2 Physical properties of aggregate

Items	Fine aggregate	Coarse aggregate
G_{max}	-	20
Density(g/cm ³)	2.55	2.72
Absorption(%)	2.43	0.80
F.M.	2.81	6.72
Unit weight(kg/m ³)	1,677	1,695
Percentage of solids(%)	64.5	62.3

2.1.3 화학혼화제

유동성 향상을 위하여 화학혼화제는 AE감수제(Water reducing AE agent : 이하 WRAE로 약함) 표준형으로서 상온에서 밀도 $1.2\pm 0.02\text{g/cm}^3$, pH 7.0 ± 1.0 인 액상을 사용하였다.

2.2 실험방법

2.2.1 콘크리트 배합

물-결합재비 3단계(45, 49 및 53%), 고로슬래그 미분말 혼합률 4단계(0, 30, 50 및 70%)로 변화시켜 콘크리트를 제조하여 예비실험을 실시하였다. 이 예비실험 결과를 기초로 하여 고로슬래그 미분말의 적정 혼합률을 4단계(0, 15, 30 및 45%)로 결정하였다. 목표 슬럼프 및 공기량은 각각 $150\pm 20\text{cm}$ 및 $4.5\pm 1.5\%$ 이며, Table 3은 본 실험에서의 콘크리트 배합표를 정리한 것이다. 본 연구에서는 실험결과와 신뢰성 및 재현성 확보를 위하여 동일배합을 3회 실시하였으며 실험순서는 랜덤 추출법에 의해 배합순서를 결정하였다.

2.2.2 촉진양생방법

촉진양생 수조는 $600\times 600\times 450\text{mm}$ 크기의 수조를 사용하였으며, Fig. 1과 같이 촉진 양생법의 순서 및 시간에 따라 실험을 실시하였다. 촉진양생은 온수법인 양생온도 55°C 및 열수법인 양생온도 70°C 의 온도 조건을 이용하였다. 촉진양생이 끝난 후에는 $20\pm 3^\circ\text{C}$ 의 표준양생용 수조에 30분 정도 담근 후 촉진 압축강도를 측정하였다. 공시체 제작 후 촉진압축강도 측정까지 소요되는 시간은 총 24시간이다.

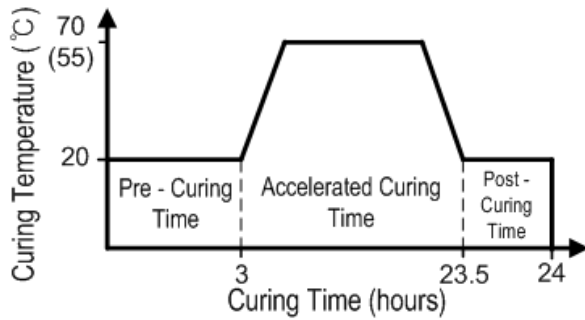


Fig. 1 Cycle of accelerated testing

2.2.3 압축강도

동일 배합으로 제조한 공시체 3개는 촉진양생법에 의하여 촉진 양생을 실시하고, 나머지 공시체는 표준 양생을 실시하여 각 재령별로 KS F 2405에 의하여 압축강도를 측정하였다.

Table 3 Mix design of concrete

W/B (%)	Replacement ratio of GGBF (%)	Unit mass(kg/m ³)					
		W	OPC	GGBF	S*	G**	WRAE
53	0	185	346	0	691	1,065	1.038
	15	185	294	52	687	1,065	1.038
	30	185	242	104	684	1,065	1.038
	45	185	190	156	681	1,065	1.038
49	0	186	382	0	658	1,065	1.146
	15	186	325	57	655	1,065	1.146
	30	186	267	115	651	1,065	1.146
	45	186	210	172	646	1,065	1.146
45	0	187	414	0	630	1,065	1.242
	15	187	352	62	625	1,065	1.242
	30	187	290	124	621	1,065	1.242
	45	187	228	186	616	1,065	1.242

* S : Fine aggregate

** G : Coarse aggregate

3. 실험결과 및 고찰

3.1 고로슬래그 미분말 혼합 콘크리트의 압축강도 특성

Fig. 2, 3 및 4는 GGBF의 적합한 혼합률을 알아보기 위한 예비실험 결과를 나타낸 것이며, W/B비와 GGBF의 혼합률을 변화시켜 재령 별로 압축강도를 측정하여 정리하였다. 그 결과 W/B비와 관계없이 재령 7일에서는 GGBF의

혼합률이 증가함에 따라서 압축강도가 감소하였다. 그러나 재령 28일에서는 GGBF의 혼합률이 70%를 제외하고는 GGBF를 혼합하지 않은 콘크리트와 거의 유사한 압축강도를 나타내고 있었으며, 장기재령인 56일에서는 오히려 GGBF를 혼합하지 않은 콘크리트보다 압축강도가 크게 발현 되었다.

이러한 실험결과는 기존의 GGBF를 혼합한 연구결과와 매우 유사한 경향을 나타내고 있었다^{2,8,9)}.

따라서 본 연구에서는 GGBF의 혼합률 70%까지 혼합하여 실시한 예비 실험의 결과를 토대로 혼합률을 50% 이하인 25, 30 및 45%로 결정하였다.

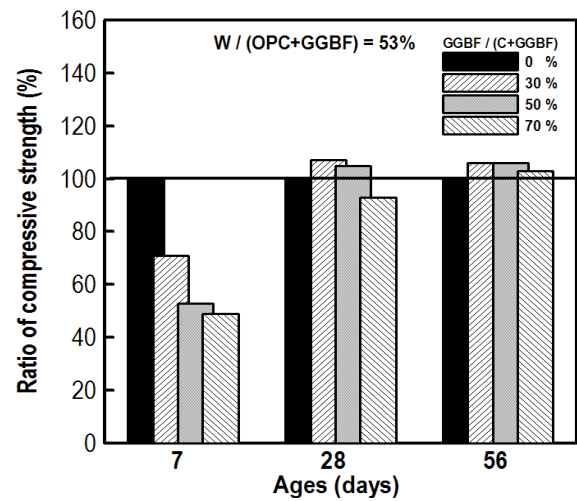


Fig. 2 Relationship of ages and ratio of compressive strength according to GGBF (W/B = 53%)

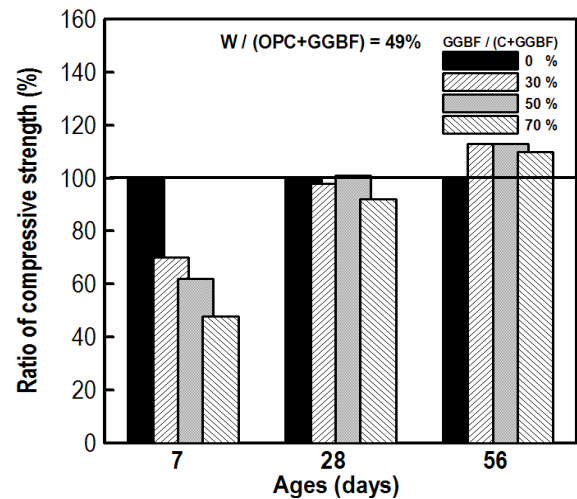


Fig. 3 Relationship of ages and ratio of compressive strength according to GGBF (W/B = 49%)

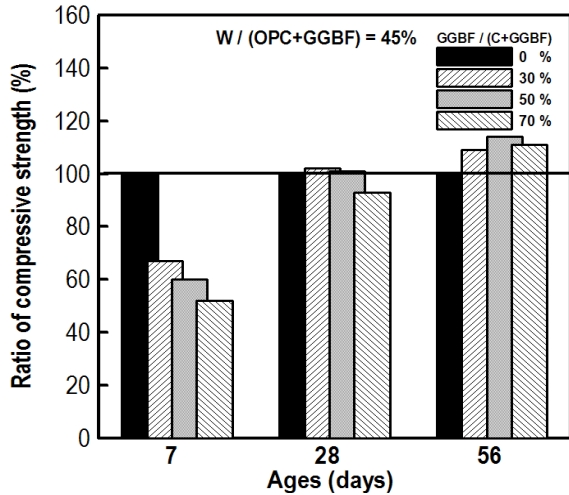


Fig. 4 Relationship of ages and ratio of compressive strength according to GGBF (W/B = 45%)

Table 4는 GGBF의 혼합률(0, 15, 30 및 45) 변화가 압축강도에 미치는 영향을 알아보기 위하여 재령 7일 및 28일을 선정하여 일원분산분석을 실시하여 검증한 결과를 정리한 것이다. 이 표에서 GGBF의 혼합률의 변화가 콘크리트의 압축강도에 미치는 영향을 살펴보면 재령 7일에서는 유의수준이 0으로서 GGBF의 혼합률이 재령 7일의 압축강도에 크게 영향을 미치는 것으로 나타났다. 그러나 재령 28일에서는 유의수준이 0.119로서 유의수준이 0.05 이상으로 나타나 GGBF의 혼합률과 압축강도는 상관성이 없는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 GGBF를 혼합한 콘크리트는 잠재수경성의 영향으로 장기재령에서 압축강도를 회복한다는 기존의 연구결과와 유사하였다¹⁰⁾.

3.2 고로슬래그 미분말 혼합 콘크리트의 촉진압축강도 추정

3.2.1 온수양생법에 의한 압축강도 추정

Fig. 5~8은 GGBF의 혼합률 4단계(0, 15, 30 및 45%)에서 온수법에 의한 촉진압축강도와 재령 28일의 압축강도의 관계를 선형회귀식을 이용하여 정리한 것이다. 이 그림에서의 상·하한선은 90%의 신뢰구간을 예측한 선이다. 신뢰구간 예측식은 식 1 및 2를 이용하였다¹¹⁾.

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

Table 4 Result of one-way ANOVA (compressive strength)

Age (days)	Source	Sum of squares	df*	Mean square	F	Sig. of F**
7	Between groups	309.832	3	103.277	13.006	0.000
	Within groups	254.098	32	7.941	-	-
	Total	563.930	35	-	-	-
28	Between groups	68.957	3	22.986	2.104	0.119
	Within groups	349.653	32	10.927	-	-
	Total	418.610	35	-	-	-

* df : Degree of freedom

** Sig. of F : Significant probability

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

여기서,

Y_i : 재령 28일 실측 압축강도(MPa)

\hat{Y}_i : $Y = AX + B$ (직선회귀식)에서 구한 재령 28일 콘크리트의 추정 압축강도(MPa)

X_i : 촉진 실측 압축강도(양생온도 55 또는 70°C, MPa)

X : 촉진 실측 압축강도의 평균(MPa)

\hat{X} : $Y = AX + B$ (직선회귀식)에 대입할 초기 압축강도(MPa)

n : 실측 데이터의 수

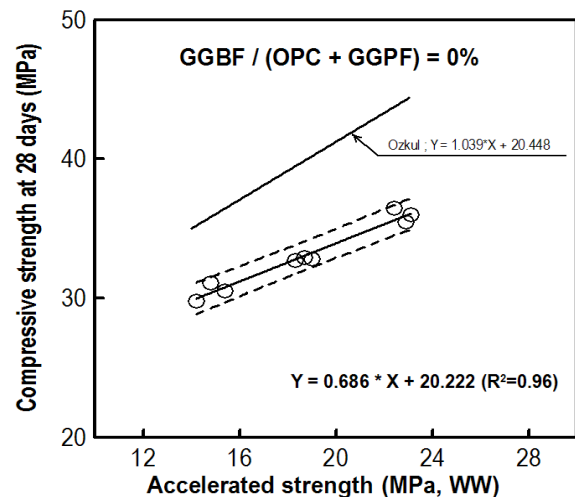


Fig. 5 Relationship of 1 day and 28 days compressive strength (GGBF = 0%)

Fig. 5~8의 결과 온수법에 의한 촉진압축강도와 재령 28일의 압축강도는 결정계수가 최소 0.82 이상으로 나타났다.

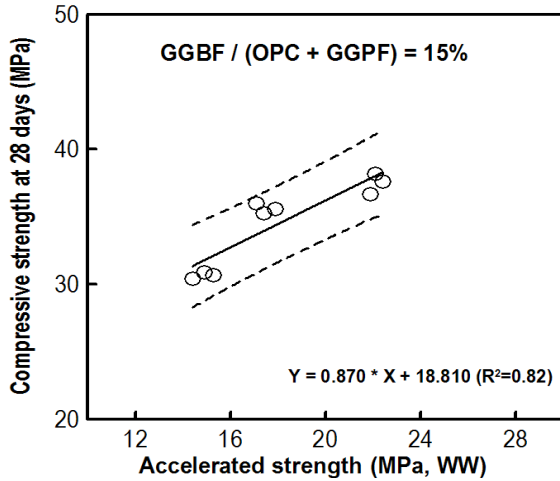


Fig. 6 Relationship of 1 day and 28 days compressive strength (GGBF = 15%)

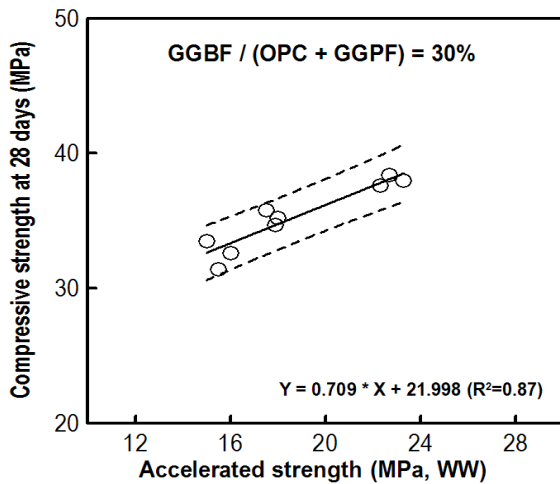


Fig. 7 Relationship of 1 day and 28 days compressive strength (GGBF = 30%)

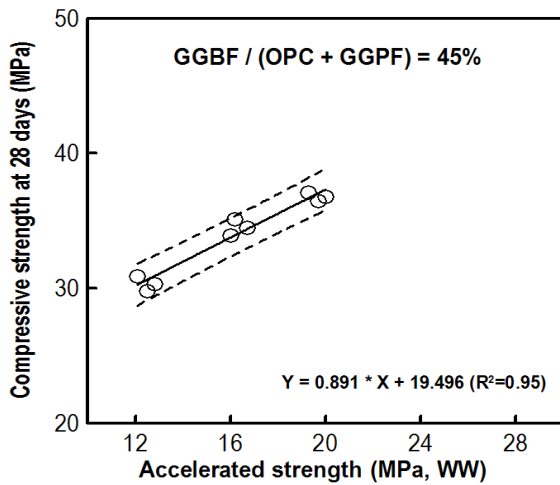


Fig. 8 Relationship of 1 day and 28 days compressive strength (GGBF = 45%)

Fig. 5는 GGBF를 혼합하지 않은 보통콘크리트에 대한 기존 연구결과의 추정식과 비교한 결과이다³⁾. 기존의 연구 결과에서 제시한 추정식이 본 연구에서 제시한 추정식보다 촉진압축강도가 증가함에 따라서 점진적으로 증가하는 경향을 보이고 있었다. 이러한 원인은 서로 상이한 설계기준강도와 촉진양생법에서 사용한 양생온도의 영향 때문으로 판단된다.

3.2.2 열수양생법에 의한 압축강도 추정

Fig. 9~12는 GGBF의 혼합률 4단계(0, 15, 30 및 45%)에서 열수법에 의한 촉진압축강도와 재령 28일의 압축강도의 관계를 선형회귀식을 이용하여 정리한 것이다. 이 그림에서 표시한 상·하한선은 90%의 신뢰구간을 예측한 선으로서, 식 1 및 2를 이용하여 예측 하였다¹¹⁾.

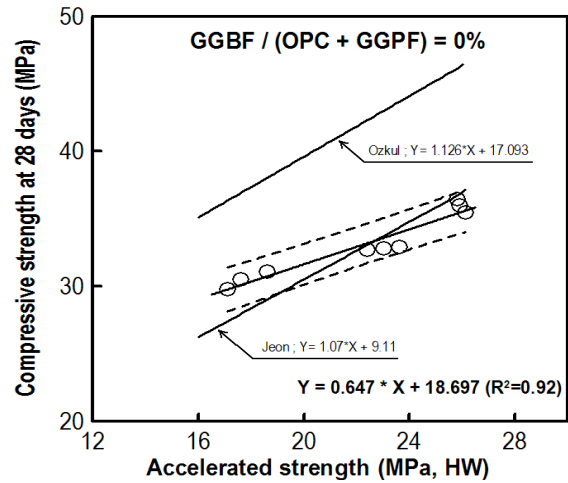


Fig. 9 Relationship of 1 day and 28 days compressive strength (GGBF = 0%)

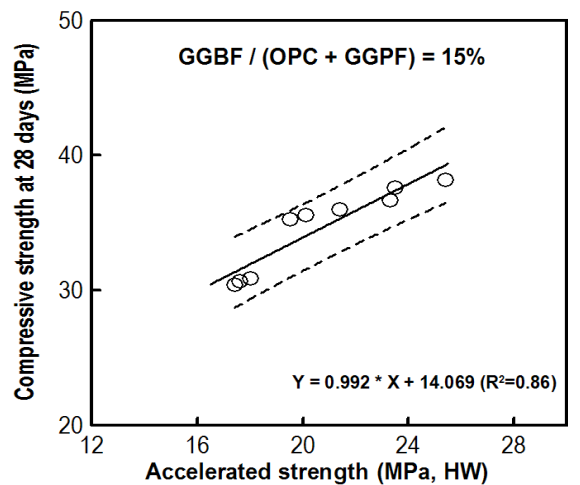


Fig. 10 Relationship of 1 day and 28 days compressive strength (GGBF = 15%)

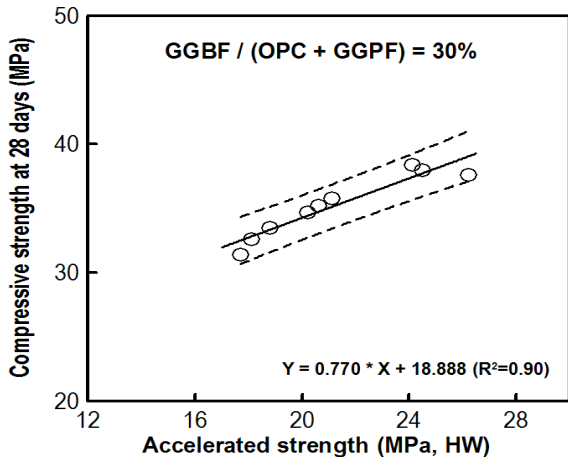


Fig. 11 Relationship of 1 day and 28 days compressive strength (GGBF = 30%)

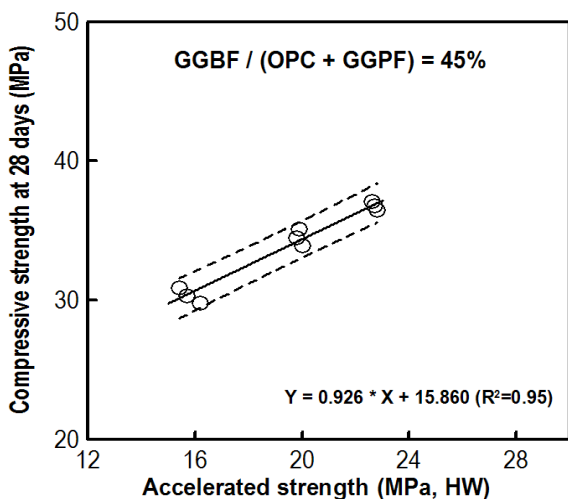


Fig. 12 Relationship of 1 day and 28 days compressive strength (GGBF = 45%)

Fig. 9는 본 연구에서 제시한 추정식과 국외의 Boiling water method(100°C의 끓는 물에 의한 양생) 및 국내의 기존 연구자의 열수양생법에 의한 추정식 결과를 비교하여 정리한 것이다.^{3,12)} GGBF 혼합물 0%인 보통콘크리트에서 제시한 추정식을 비교한 결과 Boiling water method에 의한 압축강도 추정식은 본 연구에서 제시한 추정식보다 평균 20% 정도 큰 경향을 보이고 있다. 이는 서로 다른 양생방법에 의한 결과로 판단된다. 그러나 기존의 국내에서 제시한 열수양생법에 의한 추정식은 본 연구에서 제시한 추정식 90% 신뢰구간의 상·하한선 범위와 근접함을 알 수 있었다. 그리고 Fig. 9~12 결과 열수법에 의한 촉진압축강도와 재령 28일의 압축강도는 결정계수가 최소 0.86 이상으로 나타났다.

3.3 고로슬래그 미분말 혼합 콘크리트의 추정식의 검정

Table 5는 촉진양생법에 의한 압축강도와 표준양생법에 의한 재령 28일 압축강도의 관계를 선형회귀분석법을 이용하여 정리한 식이다. Table 5의 결과 촉진압축강도와 재령 28일 압축강도의 상관성은 결정계수가 최소 0.82로서 좋은 상관성을 보여주고 있다. Fig. 13 및 14는 재령 28일의 실측 압축강도와 촉진 양생법에 의한 추정 28일 압축강도 값을 선형회귀분석을 통하여 정리한 것이며, 선형회귀식의 기울기가 1에 가까울수록 추정식의 신뢰성이 높은 것이다. 이 그림의 결과 온수양생법에 의한 실측 및 추정 압축강도의 관계는 기울기가 최소 0.82, 최대 0.96으로 나타났다. 또한 열수양생법에 의한 실측 및 추정 압축강도의 관계는 기울기가 최소 0.86, 최대 0.95로 나타났다.

Table 5 Regression equation and coefficient of determination

Curing method	GGBF/(OPC+GGBF)	Regression equation	Coefficient of determination(R ²)
WW*	0%	$f_{28}=0.686 \times f_{ww}+20.222$	0.96
	15%	$f_{28}=0.870 \times f_{ww}+18.810$	0.82
	30%	$f_{28}=0.709 \times f_{ww}+21.998$	0.87
	45%	$f_{28}=0.891 \times f_{ww}+19.496$	0.95
HW**	0%	$f_{28}=0.647 \times f_{hw}+18.697$	0.92
	15%	$f_{28}=0.992 \times f_{hw}+14.069$	0.86
	30%	$f_{28}=0.770 \times f_{hw}+18.888$	0.90
	45%	$f_{28}=0.926 \times f_{hw}+15.860$	0.95

* WW : Warm water curing method (55°C)
** HW : Hot water curing method (70°C)

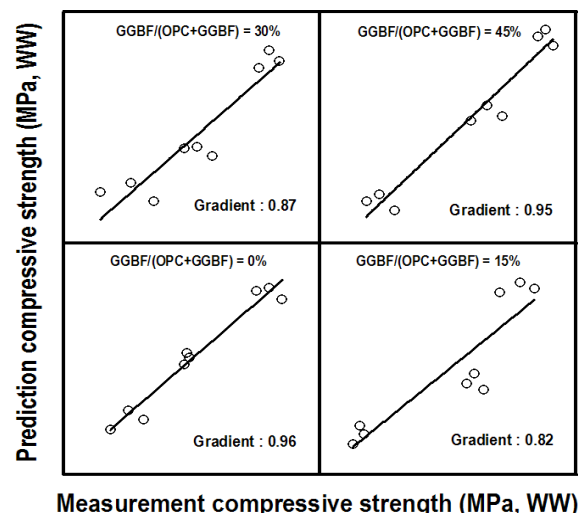


Fig. 13 Comparison of measurement and prediction compressive strength (Warm water curing method)

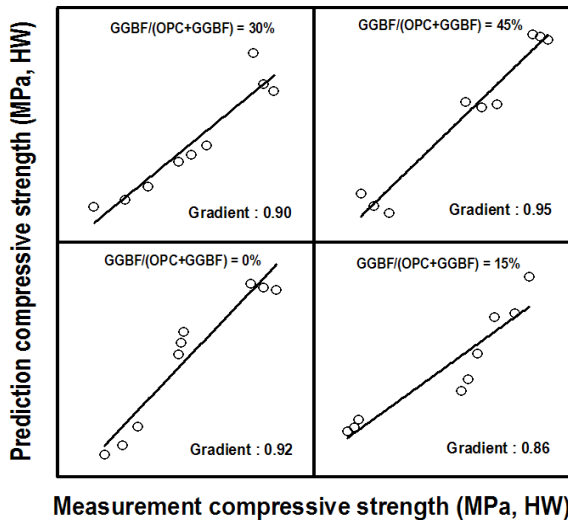


Fig. 14 Comparison of measurement and prediction compressive strength (Hot water curing method)

4. 결론

본 연구의 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 고로슬래그 미분말의 혼합률 4단계(0, 15, 30 및 45%) 및 물-결합재비 3단계(15, 49 및 53%)의 경우, 고로슬래그 미분말의 혼합률이 콘크리트의 압축강도에 미치는 영향은 재령 7일에서는 유의수준 0으로서 영향을 미치는 것으로 나타났으나, 재령 28일에서는 유의수준 0.119로서 상관성이 없는 것으로 나타났다.
- 2) 본 연구의 시험 범위에서는 온수양생법에 의한 촉진 압축강도와 재령 28일의 압축강도는 선형회귀분석 결과 결정계수가 최소 0.82 이상으로 좋은 상관성을 보였고, 또한 열수양생법에 의한 촉진압축강도와 재령 28일의 압축강도는 결정계수가 최소 0.86 이상으로 나타났다.
- 3) 온수양생법에 의한 실측 및 추정 압축강도의 선형회귀분석 결과 기울기가 최소 0.82, 최대 0.96으로 나타났다으며, 열수양생법에 의한 실측 및 추정 압축강도는 선형회귀분석 결과 기울기가 최소 0.86, 최대 0.95로 나타났다.

감사의 글

본 논문은 초장대교량 사업단의 “고기능성 콘크리트/포장재료 및 이용기술 개발(08기술혁신E01)”의 일환으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 1) 문한영, 서정우, 최재진, 김기형, 콘크리트 혼화재료, 기문당, 1997
- 2) 최연왕, 고로슬래그 미분말을 활용한 고성능 콘크리트의 실용화에 관한 연구, 한양대학교 대학원, 1996
- 3) Ozakul M.H., Efficiency of accelerated curing in concrete, Cement and concrete research 31, pp. 1351-1357, 2001
- 4) Öztekin E., Accelerated strength testing of portland-pozzolan cement concretes by warm water method, ACI Materials journal, No. 84, M7, pp. 51-54, 1987
- 5) Lamond JF., Accelerated strength testing by the warm water method, ACI journal, No. 76-23, pp. 499-512, 1979
- 6) Tokyay M., Strength prediction of fly ash concretes by accelerated testing, Cement and concrete research 29, pp. 1737-1741, 1999
- 7) ASTM, Standard test method for making, accelerated curing, and testing concrete compression test specimens, C 684-99, 2003
- 8) Hogan FJ., Meusel JW., Evaluation for durability and strength development of a ground granulated blast furnace slag, Cement Concrete and Aggregate, Vol. 3, No. 3, pp. 40-52, 1981
- 9) ACI, Ground granulated blast-furnace slag as a cementitious constituent in concrete, ACI Committee 233, 2000
- 10) 문한영, 최연왕, 김용직, 고로슬래그 미분말 혼합 콘크리트의 온수양생법에 의한 강도 추정, 대한토목학회논문집, 제 21권, 제 6-A호, pp. 967-976, 2001
- 11) ACI, Accelerated strength testing, Detroit, 1978
- 12) 전찬기, 콘크리트 품질의 조기판정에 관한 연구, 성균관대학교 대학원, 1987

축진양생법에 의한 고로슬래그 미분말 혼합 콘크리트의 압축강도 예측

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

핵심용어 : 고로슬래그 미분말, 축진양생법, 축진강도, 랜덤추출, 추정식