

고로슬래그 미분말 치환율에 따른 콘크리트의 단열온도상승 평가

Evaluation of Adiabatic Temperature Rise for Concrete with Blast-Furnace Slag replacement

(Received February 12, 2013/ Revised March 8, 2013 / Accepted March 11, 2013)

김주형^{1)*}, 이도현²⁾, 정상화¹⁾

한국건설생활환경시험연구원 첨단건설재료센터¹⁾, 토지주택연구원 선임연구실장²⁾

Joo Hyung Kim¹⁾, Do Heun Lee²⁾, Sang Hwa Jung¹⁾

Korea Conformity Laboratories, Seoul, 153-803, Korea¹⁾

Land & Housing Institute, Daejeon, 305-731, Korea¹⁾

Abstract

Recently, the interest is increasing about the eco-friendly concrete. Accordingly, the blast furnace slag(BFS), a by-product of industry is known for improving the durability through compaction in concrete and is expanding the use. The research about BFS in concrete be accomplished frequently. In this study, we should know the hydration characteristic of BFS concrete the through the adiabatic temperature rise test due to the replacement of a variety of BFS. In addition, we produced the regression analysis factors through the test result and analyzed the effect for the replacement of BFS. According to test results, the compressive strength showed a slight degradation or equal and the the adiabatic temperature rise figure and rising factors are went down for rising replacment of BFS. In the future, the study about the adiabatic temperature rise equation for the various replacement of BFS and binder is considered necessary.

키워드 : 콘크리트, 고로슬래그 미분말, 단열온도상승시험

Keywords : Concrete, Blast-Furnace Slag, Adiabatic Temperature Rise test

1. 서론

산업부산물에 대한 관심이 높아지고 있는 시점에서 고로슬래그 미분말은 이미 오래전부터 시멘트 대체 혼화재료로서 사용되고 있으며, 일반적인 시멘트보다 분말도가 높아 페이스트의 내부 조직을 치밀화함으로써 내구성 향상에 도움이 되는 것으로 알려져 있다.¹⁾ 또한 현재 건설 산업에서 고로슬래그 미분말 사용은 광범위하게 사용되고 있으며, 고로슬래그 치환 콘크리트에 대한 연구는 공학적 특성 및 초기 자기수축 등 다양한 분야에서 활발히 이루어지고 있다.²⁻⁶⁾ 고로슬래그 미분말의 적용이 확대됨에 따라 대형

구조물이나 매스콘크리트에 수화열에 어떠한 영향을 미치는지는 연구진행이 미진한 상태이다. 콘크리트 타설 후 내·외부 온도차에 따른 온도응력에 의한 균열은 수화열 해석에 중요한 요인으로 볼 수 있다. 특히 콘크리트 단열 온도 상승량은 수화열 해석 결과에 큰 영향을 미친다. 현재 한국콘크리트학회 표준시방서 18장 매스콘크리트편에 시멘트 종류에 따른 콘크리트 배합의 단열온도 상승특성을 추정하는 식을 제시하고 있다.⁷⁾ 그러나, 이는 시멘트 종류에 따른 추정식이며, 다양한 혼화제 사용에 따른 결합재에 적용하기 어려우며, 실제 단열온도 상승시험을 통해 특성을 파악해야 하므로 적용하기에는 어려운 실정이다.

본 연구에서는 다양한 강도수준별로 고로슬래그 미분말 치환율 특성을 알아보기 위해 물-결합재비를 변화시켜 배

* Corresponding author
E-mail: kjhmole@kcl.re.kr

합 및 실험을 실시하였다. 물리적 특성을 파악하기 위해 28일 압축강도를 측정하였으며, 단열상태에서의 콘크리트 수화발열특성을 파악하기 위해 단열온도 상승시험을 실시하였다. 또한, 콘크리트 시방서에서 제시하고 있는 단열온도 상승 추정식에 사용되는 계수를 산정하였다. 이를 통해 결합재의 고로슬래그 미분말 치환에 따른 발열 특성에 대한 기초자료를 제공하고자 한다.

2. 실험 연구

2.1 사용 재료

본 연구에서는 KS L 5201(포틀랜드 시멘트)을 만족하는 국내 A사의 1종 시멘트와 국내 H사의 고로슬래그 미분말을 결합재로 사용하였다. 사용된 시멘트와 결합재의 물리적 특성 및 화학조성은 Table 1에 정리하였다. 또한 입도 분포는 Fig 1에 나타내었다. 현재 사용되고 있는 고로슬래그 미분말은 일반적으로 시멘트에 비해 분말도가 높으며, 입도는 작은 입자가 상대적으로 고르게 분포가 있음을 보여주고 있다.

잔골재는 밀도가 2.57 g/cm³인 해사와 2.54 g/cm³인 부순모래를 50:50으로 섞어서 사용하였으며, 굵은골재는 최대골재 크기가 25mm이며, 밀도가 2.71 g/cm³인 골재를 사용하였다.

사용된 골재를 규격을 만족하고 있으며, 품질 특성은 Table 2에 나타내었다. 이와 더불어 슬럼프와 공기량을 확보하기 위해 국내 E사의 고성능 AE 감수제를 첨가하였다.

Table 1 Physical characteristic & Chemical composition of binders

		OPC	BFS
Density(g/cm ³)		3.15	2.89
Blaine Fineness(cm ² /g)		3,435	4,417
MgO	[%w/w]	2.55	4.62
Al ₂ O ₃		3.52	11.0
SiO ₂		16.3	28.3
SO ₃		2.79	2.53
K ₂ O		1.25	0.5
CaO		69.1	51.0
Fe ₂ O ₃		4.25	0.51
Loss Ignition		0.24	1.54

Table 2 Physical characteristic of aggregate

	sea sand	crushed sand	coarse aggregate
Density(SSD*)	2.57	2.54	2.71
Absorption(%)	0.8	1.17	0.9
Fineness modulus	2.96	3.02	6.93

*SSD : Saturated Surface-Dried

Table 3 Mixing Proportions of Concrete

Series	Mix No.	w/b	s/a	Replacement (%)	Unit materials content(kg/m ³)					Admixture (Binder×%)	Air-entraining (Ad×%)	
					Water	Binder		Sea sand	Crushed sand			Gravel
						Cement	BFS					
35	35PL	0.35	0.47	0	165	471	0	393	393	896	1.2	0.2
	3515			15	165	401	70.7	392	392	894	1.0	0.3
	3530			30	165	330	141	391	391	891	0.9	0.3
	3545			45	165	259	212	389	389	888	0.7	0.4
45	45PL	0.45	0.48	0	170	378	0	417	417	913	0.8	1.5
	4515			15	170	321	56.7	416	416	911	0.8	1.5
	4530			30	170	264	113	415	415	909	0.7	1.6
	4545			45	170	208	170	414	414	907	0.7	1.6
55	55PL	0.55	0.49	0	175	318	0	434	434	914	0.6	2.1
	5515			15	175	270	47.7	433	433	912	0.6	2.3
	5530			30	175	223	95.5	432	432	911	0.5	2.4
	5545			45	175	175	143	432	432	909	0.4	2.5

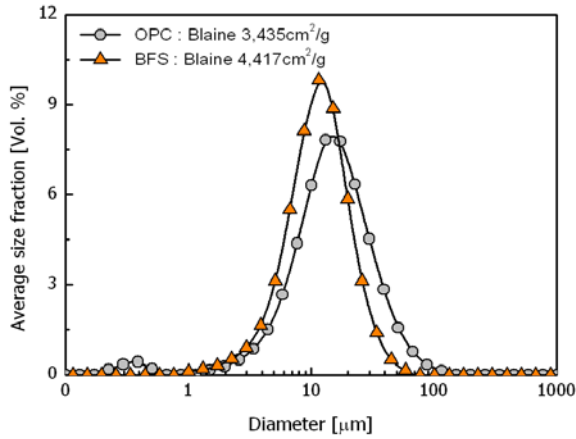


Fig. 1 Size distribution of cement and BFS

2.2 배합비

고로슬래그 미분말 치환율에 따른 영향을 파악하기 위해 물-결합재비를 각각 28일 강도 기준으로 수준별 30, 40, 50MPa 수준의 배합을 위해 0.35, 0.45 0.55 3종류로 하였으며, 치환율은 국토해양부 고시에 「레미콘, 아스콘 품질관리 지침」에 고로슬래그 미분말 치환율을 50%이하로 제한하고 있으며, 이에 따른 다양한 치환율에 대한 영향 검토를 위해 0, 15, 30, 45%로 하여 배합을 진행하였다. 실험에 사용한 배합표는 Table 3에 정리하였다. 배합 후 굳지 않은 상태에서의 슬럼프와 공기량은 Fig. 2에 정리하였다. 슬럼프는 185~200mm와 공기량은 4.6~5.8%로 측정되었다. 현장 적용 및 실내 실험시 작업성에 문제가 없도록 배합을 실시하였다.

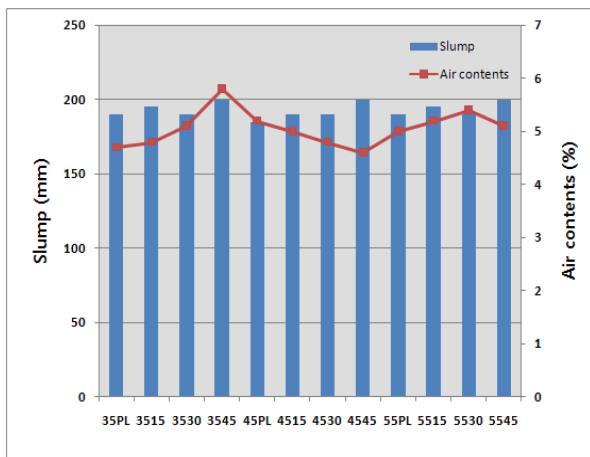


Fig. 2 Slump and air contents of mixing

2.3 실험 방법

2.3.1 압축강도

압축강도용 원주형 공시체($\phi 100 \times 200\text{mm}$)는 KS F 24038(콘크리트의 강도 시험용 공시체 제작 방법)에 준하여 제작하였으며, 일정한 배합온도를 유지하기 위해 배합 전 충분한 배합재료에 대한 전치를 한 후에 실시하였다. 또한, 28일 동안 수중양생을 한 후에 KS F 24059(콘크리트의 압축강도 시험 방법)에 의거하여 실험을 실시하였다.

2.3.2 단열온도 상승시험

고로슬래그 미분말 치환율에 따른 수화특성을 알아보기 위해 단열온도 상승시험을 실시하였다. 일본 Tokyo Rico 사 ATR-120HA 장비를 사용하였으며 1회 시험시 50L 용량을 배합하여 실험 용기에 넣은 후 1분 간격으로 온도를 측정하였다. 배합 후 단열온도상승값이 일정한 수렴구간이 나타날 때 지속한 후에 시험을 종료하였다. Fig 3은 시험 장비 및 전경을 나타내었다.



Fig. 3 Adiabatic Temperature rise tester

단열온도 상승시험 결과는 콘크리트 시방서에 제시한 식(1)과 같으며, 각 배합별 Q_{∞} 과 γ 를 각각 구하였다.

$$Q(t) = Q_{\infty}(1 - e^{-rt}) \quad (1)$$

여기서, Q_{∞} 는 최종단열온도 상승량으로서 시험에 의해 정해지는 계수, r 은 온도상승 속도로서 시험에 의해 정해지는 계수, t 는 재령(일), $Q(t)$ 는 재령 t 일에서 단열 온도 상승량이다.

3. 실험 결과 및 분석

3.1 압축강도

Fig 4는 고로슬래그 미분말 치환율에 따른 콘크리트의 28일 압축강도 결과를 나타내었다. 모든 배합에서 목표강도 수준의 강도결과를 보이고 있다. 시리즈 35와 45의 경우, 치환율이 0~45%로 높아질수록 강도는 5~11%로 감소하는 경향을 나타냈으며, 시리즈 55인 경우, 치환율이 높아져도 거의 차이가 없는 것으로 나타났다. 이는 물-결합재비가 낮을수록 절대적인 시멘트 양이 강도발현특성에 영향을 주는 것으로 판단되며, 물-결합재비가 높아지면 충분한 수분공급이 이루어져 치환율이 높아져도 강도영향이 없는 것으로 나타났다.

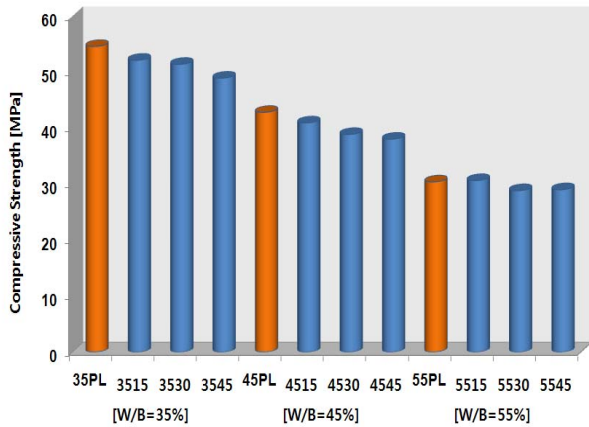


Fig. 4 Compressive strength of concrete

3.2 치환율에 따른 단열온도상승시험

Fig 5는 고로슬래그 미분말 치환율에 따른 물-결합재별 콘크리트의 단열온도 상승시험 결과를 나타내었다. 또한, Fig 5는 각 배합별 최종온도상승량을 그래프로 나타내었다. 시리즈 35에서는 고로슬래그 미분말 치환율에 따라 3~14%, 시리즈 45에서는 2~13%, 시리즈55에서는 2~8%로 최종온도상승량이 감소되었다. 초기수화특성에서는 고로슬래그 미분말이 수화시연효과로 나타나 상승곡선 기울기가 떨어지는 것으로 나타났다. 따라서, 이를 종합해보면 물-결합재비 및 고로슬래그 미분말 치환율이 높아질수록 단열온도 상승 곡선의 기울기 낮아지며, 최종온도상승량도 감소하였다.

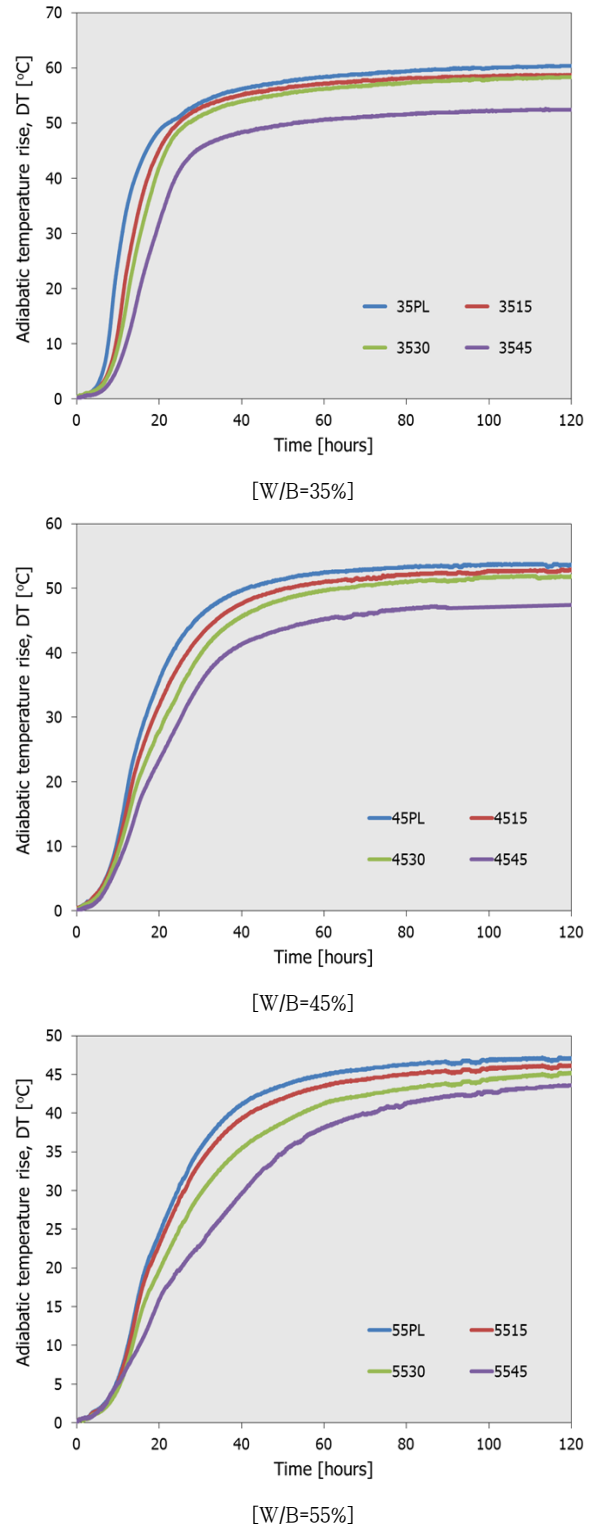


Fig. 5 Results of adiabatic temperature rise test

3.3 회귀분석에 따른 수치 분석

콘크리트 표준시방서(2009)에서는 고로슬래그 시멘트에 대한 Q_{∞} 및 r 를 제시하고 있는데, 이는 결합재 질량을 기준으로 고로슬래그 미분말을 40% 치환한 경우에 대해 고려한 결과이다.

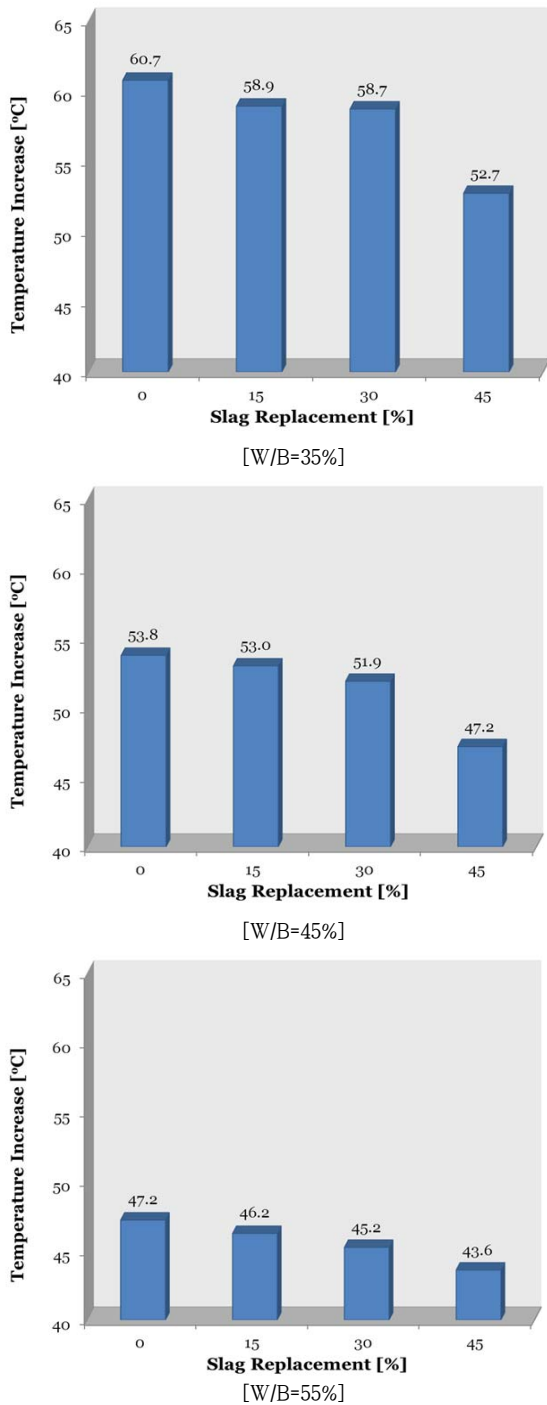


Fig. 6 Results of last adiabatic temperature rise amount

본 연구에서는 실험결과를 토대로 고로슬래그 미분말 치환율에 따라 콘크리트 표준시방서에서 제시한 식(2)에서의 회귀곡선의 Q_{∞} 및 r 를 산정하기 위해 치환율별 계수 값을 제시하였다. 그 결과는 Table 4와 같다. Fig 7은 시리즈별 고로슬래그 미분말 치환율에 따른 Q_{∞} 및 r 결과를 나타내었다.

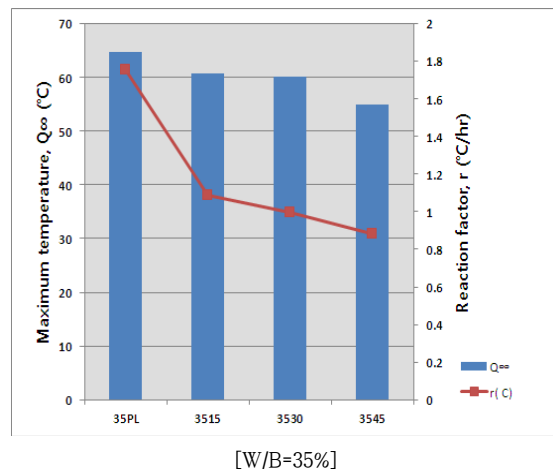
고로슬래그 미분말 치환율에 따라 Q_{∞} 의 값은 낮아지는 것으로 나타났다. 시리즈 35에서는 치환율에 따라 7~10%, 시리즈 45에서는 5~14%, 시리즈 55에서는 5~12% 낮아지는 것을 확인할 수 있었다. 이는 결합재에 고로슬래그 미분말을 치환하는 경우 단열온도 상승폭이 작아지는 것을 정량적으로 보여주는 결과이다.

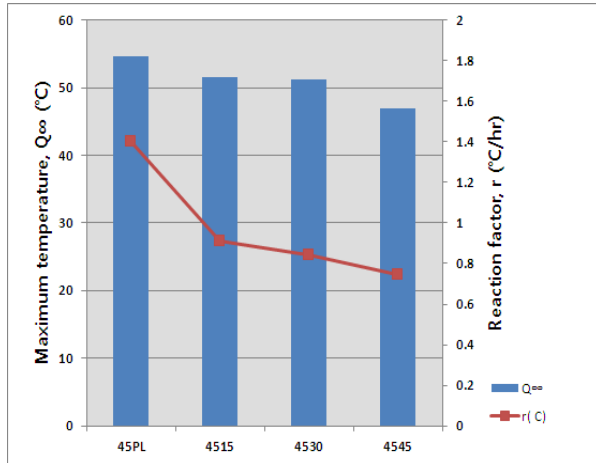
r 의 경우에도 모든 시리즈에서 고로슬래그 미분말 치환율이 높아질수록 낮아지는 경향을 나타내었다. 콘크리트 단열온도 상승 반응계수는 수화반응속도와 관련이 있는데, 이는 시멘트와 고로슬래그미분말의 수화반응속도에 기인한다고 판단된다. 추후 초기강도와 구조물의 거꾸집 탈형 시기 등에 영향을 미칠 수 있으므로 콘크리트 결합재 선정에 있어 사전에 충분한 검토를 실시해야 할 것으로 판단된다.

Table 4 Coefficients for estimating adiabatic temperature

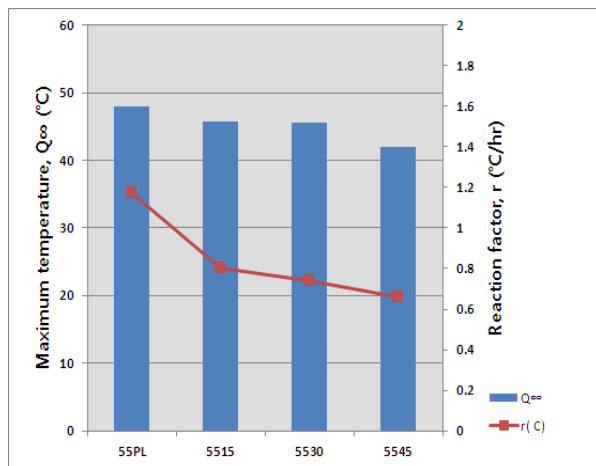
BFS Replacement ratio	$Q(t) = Q_{\infty} (1 - e^{-\gamma t})$			
	$Q_{\infty}(C) = aC^* + b$		$r(C) = gC^* + h$	
	a	b	g	h
15	0.114	15	0.0022	0.207
30	0.137	15	0.0024	0.207
45	0.154	15	0.0026	0.207

C^* is binder content per unit volume of concrete, kg/m^3





[W/B=45%]



[W/B=55%]

Fig. 7 Results of Q_{∞} and $r(C)$ from adiabatic temperature rise test

4. 결론

본 연구에서 물-결합재별 고로슬래그 미분말 치환율에 따른 단열온도 상승 시험을 통한 수화특성 결과는 다음과 같다.

1) 28일 압축강도 시험결과, 고로슬래그 미분말 치환율에 따라 약간의 저하와 동등의 결과를 나타내었다. 시리즈 35와 45의 경우, 치환율이 0~45%로 높아질수록 강도는 5~11%로 감소하는 경향을 나타냈으며, 시리즈 55인 경우, 치환율이 높아져도 거의 차이가 없는 것으로 나타났다. 이는 물-결합재비의 영향에 따른 결과로 판단되며 추후 물-결합재비에 따라 치환율 선정에 있어 충분한 사전 검토가 필요할 것으로 판단된다.

2) 단열온도 상승시험 결과, 시리즈 35에서는 고로슬래그 미분말 치환율에 따라 3~14%, 시리즈 45에서는 2~13%, 시리즈55에서는 2~8%로 최종온도상승량이 감소되었다. 이는 고로슬래그 미분말 치환율이 높아질수록 최종단열온도 상승값은 저하되며, 상승곡선에도 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었다.

3) 콘크리트 시방서에 제시하고 있는 회귀분석식을 통해 최종단열온도 상승값과 상승반응계수를 산정하기 위한 계수값을 제시하였으며, 그 값을 산정하였다. Q_{∞} 과 r 은 고로슬래그 미분말 치환이 증가할수록 높아지는 것으로 나타났다.

4) 실험결과를 토대로 고로슬래그 미분말 치환은 강도 저감 없이 단열온도저감에 효과가 있으며, 반응계수를 낮출 수 있는 결합재임을 확인하였다.

5) 추후 다양한 고로슬래그 미분말 치환율 및 결합재에 따른 실험을 통해 적용할 수 있는 단열온도상승식을 제시해야 할 것으로 판단된다. 또한 고로슬래그 미분말의 분말도가 높아질수록 콘크리트 수화반응에 있어 시멘트보다 영향을 줄 수 있으므로 이에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

- 1) 김진근, 노재호, 박연동, 한정호, 김훈, 시멘트 및 콘크리트의 수화발열특성에 관한 연구, 콘크리트학회 논문집, Vol.7 No.3, pp.211~219, 1995
- 2) 김상철, 강석화, 김진근, 매스콘크리트 구조물에서의 시멘트 종류별 수화발열 특성 평가, 콘크리트학회 논문집, Vol.11 No. 6, pp. 3~12, 1999
- 3) 이상수, 원철, 김동석, 박상준, 고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트의 공학적 특성에 관한 연구, 콘크리트학회 논문집, Vol.12 No.4, pp 49~58, 2000
- 4) 배준영, 조성현, 신경준, 김윤용, 콘크리트 단열온도 상승량에 미치는 시험체 용적의 영향, 콘크리트학회 논문집, Vol.24 No.6, pp. 659~666, 2012
- 5) G. De Schutter, L. Taerwe, General hydration model for portland cement and blast furnace slag cement, Cement and Concrete Research, Volume 25, Issue 3, pp 593~604, 1995
- 6) D.P Bentz, V Waller, F de Larrard, Prediction of Adiabatic Temperature Rise in Conventional and High-Performance Concretes Using a 3-D Microstructural

Model, Cement and Concrete Research, Volume 28,
Issue 2, pp 285~297, 1998

- 7) 콘크리트 표준시방서, 2009년, 한국콘크리트학회
- 8) ‘콘크리트의 강도 시험용 공시체 제작 방법’ 한국산업규격 KS F 2403 : 2010, 기술표준원
- 9) ‘콘크리트 압축 강도 시험방법’ 한국산업규격 KS F 2405 : 2010, 기술표준원

고로슬래그 미분말 치환율에 따른 콘크리트의 단열온도상승 평가

최근 친환경 콘크리트에 대한 관심이 높아지고 있다. 이에 따라 산업부산물인 고로슬래그 사용이 확대되고 있으며, 이에 대한 연구도 활발히 이루어지고 있다. 고로슬래그는 콘크리트 내부의 치밀화를 통해 내구성 향상에 도움이 되는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 물-결합재비별 다양한 고로슬래그 치환에 따른 단열온도상승시험을 통해 고로슬래그 사용 콘크리트의 발열 및 수화 특성을 알아보려 한다. 콘크리트 배합은 물-결합재비를 각각 0.35, 0.45, 0.55 3종류로 하였으며, 치환율은 변수별로 0, 15, 30, 45%를 하여 영향 특성을 파악하기 위한 배합을 선정하였으며, 압축강도 및 단열온도 상승시험을 진행을 실시하였다. 또한, 실험결과를 통해 콘크리트 표준시방서에 있는 단열온도상승식의 회귀분석 계수를 제시하였으며, 고로슬래그 치환율에 영향을 분석하였다. 실험결과에 따르면 압축강도는 고로슬래그 치환율이 높아질수록 약간의 저하 혹은 동등의 결과를 나타내었으며, 단열온도상승시험은 고로슬래그 치환율이 높아질수록 최종온도상승값은 저하하였으며, 회귀분석을 통해 상승계수값도 저하함을 확인할 수 있었다. 추후 좀 더 다양한 고로슬래그 치환율 및 결합재에 따른 단열온도상승식을 제시하는 연구가 필요할 것으로 판단된다.