

증기양생한 고로슬래그 다량치환 시멘트 콘크리트의 압축강도 특성

Compressive Strength Properties of Steam-cured High Volume GGBFS Cement Concrete

홍성현¹ · 김형석¹ · 최슬우^{1*} · 이광명¹ · 최세진²

Seong-Hyun Hong¹ · Hyung-Suk Kim¹ · Seul-Woo Choi^{1*} · Kwang-Myong Lee¹ · Se-Jin Choi²

(Received February 11, 2015 / Revised March 11, 2015 / Accepted March 11, 2015)

Recently, lots of researches on concrete with high volume mineral admixture such as ground granulated blast furnace slag (GGBFS) have been carried out to reduce CO₂. It is known that the precast concrete has an advantage of high strength at early age due to steam curing, even if concrete has high replacement level of mineral admixture. However it demands the investigation of compressive strength properties according to steam curing regimens. In this study, concretes with water-binder ratio of 32, 35% and water content of 135, 150, 165kg/m³ were produced to investigate compressive strength properties of high volume (60% by mass) GGBFS cement concrete according to steam curing regimens. Then steam curing was implemented with the maximum temperature of 50, 60°C and steaming time of 5, 6, 7 hours. From the test results, it was found that steam curing was effective to raise early strength of high volume GGBFS cement concrete, but 28 day compressive strengths of steam cured specimens were lower than those of water cured specimens. Thus, a further study would be needed for the optimum steam curing regimens to satisfy target demolded strength and specified strength for the application of high volume GGBFS cement concrete to precast concrete members.

키워드 : 고로슬래그 미분말, 프리캐스트 콘크리트, 증기양생, 압축강도

Keywords : Ground granulated blast furnace slag, Precast concrete, Steam curing, Compressive strength

1. 서론

지구온난화에 따른 기후 변화 문제가 대두되면서 산업 전반에 서 탄소배출 감축 노력이 이루어지고 있다. 특히 시멘트 제조 시 발생하는 CO₂량이 우리나라 전체 CO₂ 배출량의 약 6.5%를 차지하는 상황에서 탄소배출권 거래제의 시행은 건설 산업에 탄소배출 감축이라는 선결 과제를 부여했다. 또한 시멘트의 주원료인 석회석의 채굴이 한계에 다다르고 화석연료의 비용 상승 등으로 인해 시멘트 제조비용이 증가할 것으로 예측되면서 새로운 건설재료에 대한 요구가 증대되고 있다. 이러한 이유로 시멘트 사용량을 줄이기 위해 혼화재의 치환율을 높이고, 무시멘트 콘크리트에 관한 연구를 수행하고 있지만 초기강도 확보 및 활성화제 사용에 따른 유

동성능 저하, 높은 pH, 자기수축 증가 등 현장적용에 어려움이 있는 것으로 알려져 있다(Yazici et al, 2010; Kim et al, 2014; Oh et al, 2014).

한편 최근 공기단축 효과, 품질 확보, 공사비 절감 등을 위해 프리캐스트 콘크리트의 시공이 증가하고 있다. 프리캐스트 콘크리트는 대부분 증기양생을 실시하기 때문에 혼화재료의 사용량을 증가시켜도 초기 강도 확보가 가능하다. 하지만 현재 이러한 프리캐스트용 콘크리트에 다량의 혼화재를 사용한 자료는 부족한 실정이다. 특히 양생온도에 따라 시멘트 및 슬래그 시멘트의 강도 발현 특성이 상이하게 나타나며(Barnett et al, 2006), 증기양생을 실시한 경우 압축강도가 양생 이력에 큰 영향을 받기 때문에(Razak et al, 2011) 다양한 양생 이력에 대한 압축강도 분석이 요구된다.

* Corresponding author E-mail: sinope16@skku.edu

¹성균관대학교 건설환경시스템공학과 (Department of Civil, Architectural and Environmental System Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon, 440-746, Korea)

²원광대학교 건축공학과 (Department of Architectural Engineering, Wonkwang University, Iksan, 570-749, Korea)

따라서 본 연구에서는 고로슬래그 미분말 치환율이 60%인 고로슬래그 다량 치환 시멘트를 이용하여 물-결합재 비(32, 35%)와 단위수량(135, 150, 165kg/m³)을 배합 변수로 고로슬래그 다량치환 시멘트 콘크리트를 제조하였으며, 최고온도(50, 60) 및 최고 온도 유지시간(5, 6, 7시간)을 변화시켜 다양한 증기양생 이력에 따른 압축강도 특성을 확인하였다.

2. 사용 재료 및 실험 방법

2.1 사용재료

결합재는 고로슬래그 미분말 치환율이 60%인 고로슬래그 다량 치환 시멘트(밀도 2,93g/cm³, 분말도 3,810cm²/g)를 사용하였으며, 그 화학적 조성을 Table 1에 나타내었다. 사용한 잔골재는 밀도 2,56g/cm³인 강사이며, 굵은 골재는 최대치수 25mm, 밀도 2,63g/cm³인 쇄석을 사용하였다.

2.2 실험 방법

2.2.1 슬럼프 및 공기량

콘크리트 배합 직후 KS F 2402 ‘콘크리트의 슬럼프 시험 방법’ 및 KS F 2421 ‘압력법에 의한 굳지 않은 콘크리트의 공기량 시험 방법’에 따라 슬럼프와 공기량을 측정하였다.

2.2.2 공시체 제작 및 양생

콘크리트 공시체는 100×200mm의 원주형 몰드를 이용하여 제작하였으며, 양생은 수증양생과 증기양생으로 나누어 실시하였다. 수증양생용 공시체는 타설 후 24시간 이내에 탈형하여 20±3 로 유지되는 항온수조를 이용하여 양생하였으며, 증기양생용 공시체는 각각의 조건에 따라 증기양생 직후 탈형하여, 압축강도 측정 시까지 수증양생과 동일한 환경에서 양생하였다.

2.2.3 압축강도

압축강도는 KS F 2405 ‘콘크리트의 압축 강도 시험 방법’에 준하여 재령 1, 3, 7, 28일에서 각각 측정하였다. 또한 증기양생을

Table 1. Chemical composition of HVBFS* cement

Mass (%)						
SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Fe ₂ O ₈	L.O.I.
29.7	10.8	52.5	3.0	1.2	1.3	0.34

*HVBFS: High Volume Ground Granulated Blast Furnace Slag

실시한 공시체의 경우, 증기양생 직후 탈형강도를 추가적으로 측정하였다.

3. 예비 실험 연구(Series 1)

3.1 배합비

일반적으로 프리캐스트 콘크리트 부재 제작에는 설계기준강도 40MPa급의 콘크리트를 사용하므로 연구에 사용한 콘크리트 배합의 목표강도를 45MPa 로 결정하였다. Series 1에서는 단위수량에 따른 고로슬래그 다량치환 시멘트 콘크리트의 강도 특성을 확인하기 위해 W/B를 32%로 고정하고 단위수량을 각각 135, 150, 165kg/m³으로 변화시켰으며, 연구에 사용한 배합비는 Table 2에 정리되어 있다. 또한 목표 슬럼프 및 공기량을 각각 60±10mm, 3.5±0.5%로 결정하였다.

3.2 증기양생

프리캐스트 콘크리트는 증기양생 후 탈형강도가 중요하기 때문에 목표 탈형강도를 18MPa로 하였으며, 탈형강도 확보를 위한 증기양생 이력을 Table 3과 같이 선정하였다. 콘크리트 배출 후 공시체 제작에 필요한 전치 구간 3시간, 20 /hr 이하의 속도로 온도가 상승되는 구간 2시간, 최고온도 60 가 유지되는 구간 6시간, 20 /hr 이하의 속도로 온도가 하강되는 구간 2시간으로 총 13시간의 증기양생을 실시하였다.

3.3 결과 및 분석

3.3.1 슬럼프 및 공기량

Series 1에서는 작업성 확보를 위해 고성능 AE감수제를 사용하였으며, 각 배합의 고성능 AE감수제 사용량과 슬럼프 및 공기량

Table 2. Mix proportions of concrete (Series 1)

Type	W/B (%)	S/a (%)	Unit Weight (kg/m ³)			
			Water	HVBFS Cement	Fine Agg.	Coarse Agg.
32-135	32	45	135	422	790	992
32-150			150	469	755	947
32-165			165	516	719	903

Table 3. Steam curing regimens (Series 1)

Pre-steaming Period (hr)	Controlled Heating (hr)	Steaming Time (hr)	Maximum temperature (°C)	Controlled Cooling (hr)
3	2	6	60	2

측정 결과가 Table 4에 정리되어 있다. 결과를 보면, 32-135 배합에서 많은 혼화제를 사용하였음에도 슬럼프가 작게 나타났다. 이는 32-135 배합은 단위수량이 낮아 상대적으로 콘크리트 내 골재의 비율이 높고, 페이스트가 적은 빈배합이기 때문에 혼화제 첨가에 따른 유동성 개선 효과가 미미하기 때문으로 판단된다. 반면 단위수량이 150kg/m³ 이상인 배합에서는 0.5% 이하의 고성능 AE 감수제 사용으로 목표 슬럼프를 확보할 수 있었다. 또한 공기량의 경우 모든 배합에서 목표 공기량을 만족시키는 결과를 얻었다.

3.3.2 압축강도 발현특성

Series 1의 압축강도 측정 결과를 나타내는 Fig. 1을 보면, 모든 배합에서 탈형강도 25MPa 이상을 확보할 수 있었다. 특히 단위수량이 큰 32-165의 경우 29.5MPa의 높은 탈형강도를 보였다. 일반적으로 단위수량이 클수록 콘크리트 내 시멘트 페이스트의 비율이 높아 큰 압축강도를 보이는데, 실험결과 증기양생으로 인한 수화

Table 4. Slump and air content of concrete (Series 1)

Type	AE HRWR (%)	Slump (mm)	Air content (%)
32-135	1.18	70	3.7
32-150	0.50	60	3.9
32-165	0.42	55	3.0

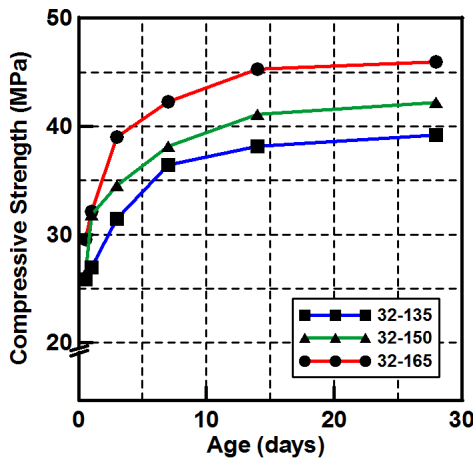


Fig. 1. Compressive strength (Series 1)

Table 5. Compressive strength ratio to that of 28 days (%)

Type	Demolded Time	Time (days)				
		1	3	7	14	28
32-135	65.9	68.8	80.2	93.0	97.3	100.0
32-150	62.6	75.5	81.8	90.5	97.5	100.0
32-165	64.3	70.0	85.0	92.0	98.6	100.0

촉진효과로 단위수량에 따른 압축강도의 차이가 커진 것으로 판단된다.

28일 압축강도의 경우, 32-165에서 45MPa 이상의 압축강도를 얻을 수 있었다. 재령 28일 압축강도를 기준으로 재령별 압축강도의 비율을 Table 5에 나타내었다. 모든 배합의 탈형강도가 60% 이상의 압축강도를 보인 반면 28일까지의 재령증가에 따른 압축강도 발현은 38.2~34.1% 포인트 증가에 그친 것을 알 수 있다. 이는 초기 증기양생으로 높은 탈형강도를 얻었기 때문에 재령 증가에 따른 강도 발현율이 낮아진 것으로 사료된다.

4. 본 실험 연구(Series 2)

4.1 배합비

Series 2에 사용한 콘크리트 배합이 Table 6에 정리되어 있다. Series 1의 결과를 바탕으로 작업성과 경제성을 고려하여 단위수량을 150kg/m³으로 고정하였으며, 전체적으로 높은 탈형강도를 확보할 수 있었기 때문에 W/B=35%를 변수로 추가하였다. 또한 실제 작업성을 고려하여 목표 슬럼프를 150±15mm로 증가시키고, 목표 공기량은 동일하게 3.5±0.5% 수준을 유지하였다.

4.2 증기양생

Series 1에서 높은 탈형강도를 얻을 수 있었던 반면 장기재령에

Table 6. Mix proportions of concrete (Series 2)

Type	W/B (%)	S/a (%)	Unit Weight (kg/m ³)			
			Water	HVBFS Cement	Fine Agg.	Coarse Agg.
32-150	32	45	150	469	755	947
35-150	35		150	429	770	967

Table 7. Steam curing regimens (Series 2)

Mark*	Pre-steaming Period (hr)	Controlled Heating (hr)	Steaming Time (hr)	Maximum Temp. (°C)	Controlled Cooling (hr)
SC 5-50	2	2	5	50	3
SC 5-60				60	
SC 6-50			6	50	
SC 6-60				60	
SC 7-50			7	50	
SC 7-60				60	

*Steaming Time-Maximum temperature

서의 강도 증가율이 낮았기 때문에, 압축강도에 영향을 미치는 최고온도와 최고온도 유지시간을 변화시켜 실험을 수행하였다 (Razak et al, 2011; Ramezani-pour et al, 2013). Table 7과 같이 Series 2 에서는 최고온도 50, 60 , 최고온도 유지시간을 5, 6, 7시간으로 총 6 종류의 증기양생을 실시하였다.

4.3 결과 및 분석

4.3.1 슬럼프 및 공기량

Series 2에서는 목표 슬럼프와 공기량 확보를 위해 유동화제와 AE제를 각각 사용하였으며, 그 사용량을 Table 8에 정리하였다. 측정 결과, 모든 배합에서 목표 슬럼프와 공기량을 확보할 수 있었으며, 단위수량을 150kg/m³ 수준으로 유지함으로써 1% 미만의 유동화제를 사용하여 효율적으로 소요 슬럼프를 얻을 수 있었다.

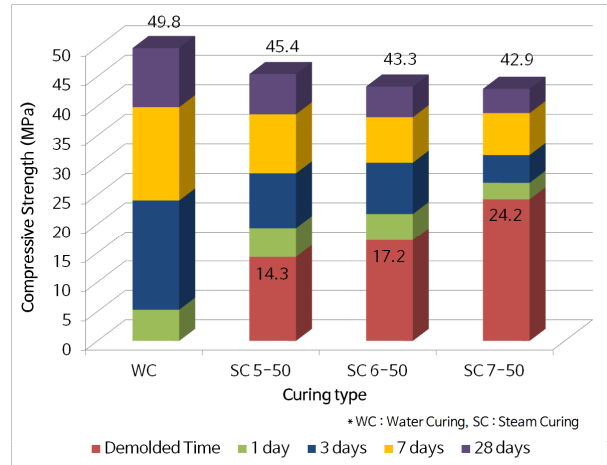
4.3.2 W/B=32% 콘크리트 압축강도 발현특성

Fig. 2에 W/B=32%인 콘크리트의 양생조건에 따른 압축강도를 정리하여 나타냈다. 최고온도가 50 인 경우(Fig. 2(a)), 최고온도 유지시간이 5시간에서 7시간으로 증가하면 탈형강도는 14.3MPa에서 24.2MPa로 약 69%의 압축강도가 증가하였다. 반면 최고온도 유지 시간이 긴 경우, 탈형강도가 높은 반면 재령 증가에 따른 압축강도 발현율이 감소하여 7일 압축강도는 모든 배합에서 비슷한 수준을 나타냈다. 특히 수중양생한 공시체의 7일 압축강도가 증기양생을 실시한 공시체의 압축강도와 유사하였다. 이후 재령 28일에서는 수중양생 공시체가 가장 높은 압축강도를 나타냈으며, 가장 높은 탈형강도를 보였던 SC 7-50 공시체에서 가장 낮은 압축강도를 얻었다.

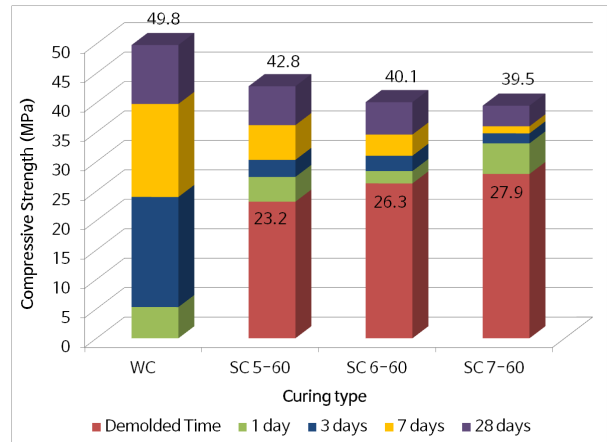
최고온도가 60 인 경우(Fig.2(b)), 모든 공시체에서 23MPa 이상의 탈형강도를 얻을 수 있었다. 이는 고온에서 수화반응이 촉진되었기 때문에 50 에서 양생한 콘크리트 공시체와 비교하여 높은 탈형강도를 보인 것으로 판단된다. 반면 28일에서 SC 7-60 공시체의 압축강도가 수중양생한 공시체 압축강도의 약 79.3% 수준으로 낮았으며, 이는 SC 7-50 공시체와 비교하여 약 6.8% 포인트나 낮은 결과이다. 따라서, 증기양생의 최고온도 및 최고온도 유지시간이 길수록 결합재의 수화반응이 촉진되어 높은 탈형강도

Table 8. Slump and air content of concrete

Type	Superplasticizer (%)	Air entraining agent (%)	Slump (mm)	Air (%)
32-150	0.80	0.005	150	3.3
35-150	0.73	0.005	165	3.7



(a) Max. curing temp. 50°C



(b) Max. curing temp. 60°C

Fig. 2. Compressive strength of W/B=32% concrete

를 얻을 수 있으나, 장기적인 강도 발현율이 낮아지기 때문에 28일 압축강도가 낮아지는 것으로 사료된다. 일반적으로 고온에서 양생한 콘크리트의 압축강도는 상온에서 양생한 콘크리트의 압축강도보다 초기재령에서는 크지만 장기재령에서 작게 나타나며(Metha et al, 2006), 이는 고온에서 초기 빠른 수화속도로 인해 수화 생성물의 불규칙한 확산으로 공극 및 미세균열이 증가하여 장기 강도 발현에 유해한 영향을 미치기 때문으로 알려져 있다(Kim et al, 1998; Kwon et al, 2008).

4.3.3 W/B=35% 콘크리트 압축강도 발현특성

양생조건에 따른 W/B=35% 콘크리트의 압축강도를 나타낸 Fig. 3를 보면, 모든 증기양생 조건에서 12.6MPa 이상의 탈형강도를 얻을 수 있었다. 하지만 동일한 증기양생을 실시한 W/B=32% 콘크리트의 탈형강도와 비교하여 1.7~6.2MPa 정도의 낮은 값으

로, 수증양생한 W/B=35% 콘크리트의 1일 압축강도가 W/B=32% 콘크리트보다 1.2MPa 낮은 것과 비교하여 증기양생한 경우 W/B 증가에 따른 강도 감소폭이 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 이는 증기양생에 따른 초기 수화촉진효과로 W/B에 의한 강도 차이가 상대적으로 크게 확대되어 나타난 것으로 판단된다.

최고온도 및 최고온도 유지시간에 따른 압축강도의 영향을 살펴보면, W/B=32% 콘크리트와 유사하게 최고온도가 높고 최고온도 유지시간이 길어질수록, 높은 탈형강도를 나타냈으며 재령이 증가에 따른 강도 발현율이 낮았다. 또한 증기양생을 실시한 모든 공시체의 7일 압축강도가 수증양생을 실시한 공시체(36MPa)보다 낮게 나타났으며, 재령 28일에서 수증양생 공시체와 증기양생 공시체의 압축강도 차이는 더 큰 폭으로 증가하였다.

증기양생을 실시한 W/B=35% 콘크리트의 압축강도를 수증양생을 실시한 공시체의 28일 압축강도에 대한 비율로 계산하여

Table 9. Compressive strength ratio (%)

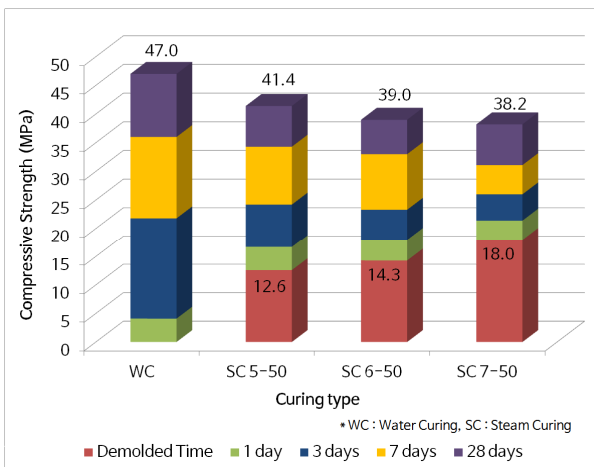
Type	Demolded Time	Age (days)			
		1	3	7	28
Water curing	-	8.7	46.4	76.6	100.0
SC 5-50	26.8	35.5	51.5	73.0	88.1
SC 6-50	30.4	38.3	49.6	70.2	83.0
SC 7-50	38.3	45.5	55.3	66.2	81.3
SC 5-60	39.1	46.6	53.4	65.1	78.7
SC 6-60	44.0	50.2	55.5	64.9	75.7
SC 7-60	52.3	53.8	60.9	68.1	74.3

Table 9에 나타내었다. 그 비율을 보면, SC 5-50의 경우 최고온도 유지시간을 증가시켜 SC 6-50으로 양생하면 탈형강도는 3.6% 포인트 증가하지만, 최고온도를 증가시켜 SC 5-60으로 양생할 경우 탈형강도가 12.3% 포인트 증가하였다. 따라서 최고온도 유지시간을 증가시키는 것보다 최고온도를 증가시키는 것이 탈형강도를 증가시키는데 효과적임을 알 수 있다. 반면 28일 압축강도에 낮은 영향을 미치는 범위에서 탈형강도를 높이는 방법을 선택해야 하는 경우에는 최고온도 유지시간을 증가시키는 것이 효과적이었다.

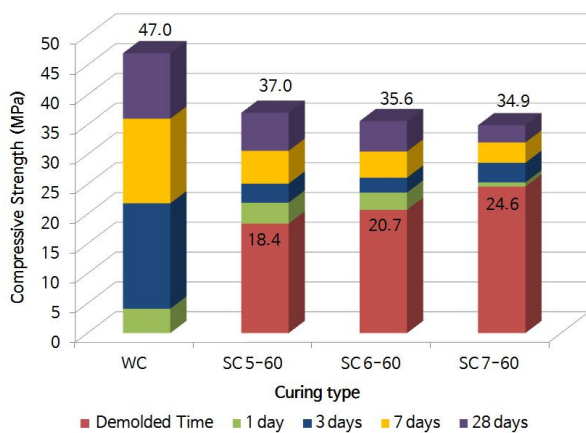
5. 결론

본 연구에서는 고로슬래그 다량치환 시멘트 콘크리트의 프리캐스트 적용을 위해, W/B, 단위수량, 증기양생 이력 등에 따른 압축강도 발현특성 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 단위수량을 변수로 고로슬래그 다량치환 시멘트 콘크리트 배합을 수행한 결과, 단위수량 150kg/m³을 적용하는 것이 작업성 및 경제성 확보에 용이한 것으로 나타났다.
2. 물-결합재 비에 따른 압축강도를 분석한 결과, W/B=32%와 비교하여 W/B=35%에서는 상대적으로 적은 결합재량으로 인해 초기강도 확보가 불리하였다. 특히 증기양생을 실시한 경우 W/B 증가에 따른 초기강도 감소폭이 수증양생한 경우보다 크게 나타났다.
3. 증기양생 최고온도 및 유지시간을 변화시켜 압축강도 발현 특성을 살펴보면, 탈형강도가 높을수록 장기재령에서 강도 발현율이 감소하는 현상을 확인할 수 있었다. 또한 소요 탈형강도가 만족되는 범위에서 최고온도를 증가시키는 것보다 최고온도 유지시간을 증가시키는 것이 장기강도 확보에 유리하였다.
4. 증기양생을 통해 고로슬래그 다량치환 시멘트 콘크리트의 초기강도 확보가 가능하였으나, 본 연구에서 목표로 한 탈형강도



(a) Max. curing temp. 50°C



(b) Max. curing temp. 60°C

Fig. 3. Compressive strength of W/B=35% concrete

및 목표강도를 달성하기에는 미흡하였다. 따라서 고로슬래그 다량치환 시멘트 콘크리트의 프리캐스트 적용을 위하여 탈형 강도 및 압축강도를 만족시키는 최적의 증기양생 이력에 대한 추가적인 연구가 필요하다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 포스코 건축건자재 연구그룹의 “고로슬래그 미분말 활용기술 개발”의 지원으로 수행되었습니다.

References

Barnett, S.J., Soutsos, M.N., Millard, S.G., and Bungey, J.H. (2006). “Strength development of mortars containing ground granulated blast-furnace slag: Effect of curing temperature and determination of apparent activation energies.” *Cement and Concrete Research*, **36**, 434–440.

Kim, R.H., Kim, G.Y., Kim, J.H., Lee, B.K., and Cho, B.S. (2014). “Effect of Types and Replacement Ratio of Alkali Activator on Compressive Strength of Ground Granulated Blast Furnace Slag Mortar.” *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*, **2(4)**, 360–366.

Kim, J.K., Moon, Y.H., Eo, S.H. and Choi, E.K. (1998). “The effect of different curing time and temperature on compressive

strength of concrete.” *Journal of Korea Concrete Institute*, **10(3)**, 43–152.

Kwon, H.S., Kim, S.J., Gong, M.H., Paik, M.S., and Jung, S.J. (2008). “An Experimental Study on the Strength Development of High Strength Mortar by Steam Curing.” *Journal of Architectural Institute of Korea*, **24(7)**, 85–92.

Metha, P.K., Monteiro, P.J. (2006). *Concrete: Structure, Properties, and Materials*, McGraw-Hill, USA.

Oh, S.H., Hong S.H., and Lee, K.M. (2014). “Autogenous Shrinkage Properties of High Strength Alkali Activated Slag Mortar.” *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*, **2(1)**, 60–65.

Ramezaniapour, A.A., Khazali, M.H., and Vosoughi, P. (2013). “Effect of steam curing cycles on strength and durability of SCC : A cast study in precast concrete.” *Construction and Building Materials*, **49**, 807–813.

Razak, H.A., and Sajedi, F. (2011). “The effect of heat treatment on the compressive strength of cement-slag mortars.” *Materials and design*, **32**, 4618–4628.

Yazici, H., Yardimci, M.Y., Yigiter, H., Aydin, S., and Turkel, S. (2010). “Mechanical properties of reactive powder concrete containing high volumes of ground granulated blast furnace slag.” *Cement & Concrete Composites*, **32**, 639–648.

증기양생한 고로슬래그 다량치환 시멘트 콘크리트의 압축강도 특성

최근 CO₂ 감축을 위해 고로슬래그 미분말과 같은 혼화재의 치환율을 높이기 위한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 프리캐스트 콘크리트의 경우 증기양생을 실시하기 때문에 혼화재의 치환율을 높여도 초기 강도 확보에 유리한 것으로 알려져 있다. 하지만 다양한 증기양생이력에 따른 압축강도 특성에 대한 연구가 요구된다. 따라서 본 연구에서는 고로슬래그 다량치환(질량비 60%) 시멘트 콘크리트의 증기양생 이력에 따른 콘크리트 압축강도 특성을 규명하기 위해 물-결합재비(W/B) 32, 35%, 단위수량 135, 150, 165kg/m³ 수준으로 콘크리트를 제조하였다. 그리고 공시체의 최고온도(50, 60) 및 최고온도유지시간(5, 6, 7hr)을 변수로 증기양생을 실시하였다. 실험결과, 증기양생을 통해 높은 초기강도를 얻을 수 있었지만 28일 압축강도에서 강도가 저하되는 현상을 확인할 수 있었다. 따라서 고로슬래그 다량치환 시멘트 콘크리트의 프리캐스트 콘크리트 부재에의 적용을 위해서는 탈형강도 및 요구강도를 확보할 수 있는 증기양생 이력에 대한 추가적인 연구가 필요하다.