



저탄소 그린콘크리트의 물리·역학적 특성

Physical and Mechanical Properties of Low Carbon Green Concrete

조일호* · 성찬용**†

Cho, Il Ho · Sung, Chan Yong

ABSTRACT

This study was performed to evaluate the slump flow, air content, setting time, compressive strength, adiabatic temperature rise and diffusion coefficient of chloride used ordinary portland cement, crushed coarse aggregate, crushed sand, river sand, fly ash, limestone powder, blast furnace slag powder and superplasticizer to find optimum mix design of low carbon green concrete for structures. The performances of low carbon green concrete used fly ash, limestone powder and blast furnace slag powder were remarkably improved. This fact is expected to have economical effects in the manufacture of low carbon green concrete for structures. Accordingly, the fly ash, limestone powder and blast furnace slag powder can be used for low carbon green concrete material.

Keywords: slump flow, air content, setting time, compressive strength, adiabatic temperature rise, diffusion coefficient of chloride

I. 서 론

최근 콘크리트의 고성능화 및 자원의 유효활용, 환경부하저감, 지구온난화의 요인인 CO₂ 배출량 저감 등의 관점에서 산업부산물인 플라이 애시, 고로슬래그 미분말, 석회 석 미분말 등을 다량으로 혼입한 콘크리트에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며 그 사용량 또한 급증하고 있는 추세이다 (Sung and Kim, 2011; Hassan et al., 2001).

산업부산물의 유효활용과 CO₂ 저감이라는 두가지의 목표를 동시에 해결할 수 있는 매우 유용한 플라이 애시, 고로슬래그 미분말 및 석회석 미분말을 혼입한 콘크리트가 환경부하 저감 대책임에는 틀림이 없으나, 그 특성에 대한 충분한 검토없이 사용한다면 오히려 콘크리트의 품질저하를 초래할 수 있어 사용에 신중한 접근이 요구된다. 일반적으로 플라이 애시 등의 산업부산물을 사용한 콘크리트는 소요의 슬럼프와 공기량을 얻기 위해 단위수량을 저감할 수 있으며 유동성이나 재료분리저항성이 개선되기 때문에 고유동 콘크리트에도 적용되는 등 다수의 실적이

보고 되고 있다 (Cho and Sung, 2006).

또한 플라이 애시 등을 혼입한 콘크리트의 분말도와 치환율에 따른 많은 연구가 진행되어 왔으며, 그 결과 수화발열량 감소, 수밀성 증대, 장기강도 향상, 알칼리골재반응 억제와 염해 및 동결융해저항성, 화학부식저항성 등이 향상되는 것으로 알려져 있다 (Sung et al., 2000). 이에 반해 조기강도 발현 저하, 자기수축 및 초기진조수축 증대, 중성화 촉진 등이 문제점으로 지적되고 있다 (Sung and Noh, 2004; Temkhajomkit and Nawa, 2004).

따라서 본 연구에서는 현재 레미콘 업계에서 가장 일반적으로 사용되고 있는 플라이 애시, 고로 슬래그 미분말 및 석회석 미분말을 함께 사용한 저탄소 그린콘크리트를 개발하여 물리·역학적 특성을 규명하고, 최적배합의 그린콘크리트를 개발하여 복합혼화재를 구조물 재료로 활용할 수 있는 기초자료를 제공하는데 그 목적이 있다.

II. 재료 및 방법

1. 사용재료

가. 시멘트

시멘트는 KS F 5201에 규정된 국내 D사 제품의 1종 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며, 그 물리적 성질 및 화학성분은 Table 1, 2와 같다.

* 대덕사이언스센터

** 충남대학교 지역환경토목학과

† Corresponding author Tel.: +82-42-821-5798

Fax: +82-42-821-8877

E-mail: cysung@cnu.ac.kr

2013년 4월 19일 투고

2013년 5월 3일 심사완료

2013년 5월 14일 게재확정

Table 1 Physical properties of ordinary portland cement

Specific gravity	Blaine (cm ² /g)	Setting time (h : min)		Compressive strength (MPa)		
		Initial	Final	3days	7days	28days
3.15	3,303	4 : 10	5 : 22	25	31	39

Table 2 Chemical composition of ordinary portland cement (Unit: wt. %)

SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Fe ₂ O ₃	Others
20.87	5.01	61.90	3.50	2.21	3.18	3.33

나. 골재

부순굵은골재와 부순잔골재 및 강모래는 KS F 2527에 규정된 상태로 현장조건을 반영하여 사용하였으며, 그 물리적 성질은 Table 3과 같다.

Table 3 Physical properties of aggregate

Kind	Item	Specific gravity (oven dry)	Fineness modulus	Absorption ratio (%)	Unit weight (kg/m ³)	Percentage of solids (%)
Crushed coarse aggregate		2.63	6.82	1.21	1,500	59.4
		2.62	3.02	1.28	1,570	56.2
River sand		2.59	2.32	1.97	1,510	58.3

다. 플라이 애시

화력발전소에서 채취한 유연탄 플라이 애시 (KS L 5405)로서 그 물리적 성질과 화학성분은 Table 4와 같다.

Table 4 Physical properties and chemical composition of fly ash

Physical properties		Chemical composition (%)					
Specific gravity (20 °C)	Blaine (cm ² /g)	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Moisture content (%)	Ig.loss
2.46	3,507	61.40	7.58	20.70	5.41	0.18	4.73

라. 석회석 미분말

콘크리트와 강재에 해로운 영향을 주지 않는 석회석 미분말을 사용하였으며, 그 화학성분과 물리적 성질은 Table 5와 같다.

Table 5 Chemical composition and physical properties of limestone powder

Chemical composition (%)				Physical properties	
MgO	CaCO ₃	Al ₂ O ₃	Others	Specific gravity (20 °C)	Specific surface (cm ² /g)
0.92	96.56	0.43	2.09	2.71	3,573

마. 고로 슬래그 미분말

고로 슬래그 미분말은 KS F 2563에 따라 D사 제품의 3종을 사용하였고, 그 화학성분과 물리적 성질은 Table 6과 같다.

Table 6 Chemical composition and physical properties of blast furnace slag powder

Chemical composition (%)					Physical properties	
MgO	CaO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Others	Specific gravity (20 °C)	Specific surface (cm ² /g)
5.34	45.96	0.35	28.14	20.21	2.90	4,550

바. 고성능 AE 감수제

콘크리트의 내구성 향상 및 경제성 제고를 목적으로 물-시멘트비를 감소시켜 조기강도 발현을 향상시키고 작업성을 확보하기 위하여 KS F 2560의 고성능 AE 감수제를 사용하였으며, 그 일반적 성질은 Table 7과 같다.

Table 7 General properties of superplasticizer

Type	Item	Main ingredient	Specific gravity (20 °C)	Solid content (%)	pH	Appearance
Superplasticizer		Polycarboxirate	1.13	19.4	5.1	Light yellow liquid

2. 콘크리트 배합

기준 시험체는 보통 포틀랜드 시멘트만을 사용하여 제작하였으며, 다른 배합은 시멘트의 일부를 석회석 미분말, 플라이 애시 및 고로 슬래그 미분말을 함께 혼입하여 제작하였다. 각 배합의 잔골재는 중량비로 부순잔골재 3 : 강모래 7, 물-결합재비 47 %, 석회석 미분말 혼입률 8 %와 플라이 애시 혼입률 25 %로 고정하고, 고로 슬래그 미분말을 각각 12 %, 22 % 및 32 %로 하였다. 또한 실험변수에 따른 변화를 분석하기 위하여 목표 초기 슬럼프 플로우값 500±50 mm, 공기량 4.5±1.5 %을 얻기 위하여 고성능 AE 감수제를 0.78~1.0 % 사용하였으며, 각 배합의 배합인자 및 수준은 Table 8과 같고, 배합설계는 Table 9와 같다.

Table 8 Experimental factors and levels

Experimental factors	W/B (%)	Binder (kg/m ³)	Hardened concrete (MPa)	Air content (%)	Target slump flow (cm)
Experimental levels	5 (39~49)	5 (330~494)	Compressive strength (21~35)	1 (4.5±1.5)	1 (50±5)

Table 9 Mix design of low carbon green concrete

Item Type	W/B (%)	S/a (%)	Unit material content (kg/m ³)							
			W	C	S	G	FA	SP	LP	PC
OPC	47	50	163	390	886	898	0	0	0	3.90
C67				261	873	885	98	0	31	2.61
C55				214	871	883	98	47	31	2.14
C45				175	869	881	98	86	31	1.75
C35				136	868	880	98	125	31	1.36

※ OPC: ordinary portland cement 100 %
 C67: cement 67 % + limestone powder 8 % + fly ash 25 %
 C55: cement 55 % + limestone powder 8 % + fly ash 25 % + slag powder 12 %
 C45: cement 45 % + limestone powder 8 % + fly ash 25 % + slag powder 22 %
 C35: cement 35 % + limestone powder 8 % + fly ash 25 % + slag powder 32 %
 W: water, B: binder, S/a: sand percentage, C: cement, S: crushed sand 3 + river sand 7, G: crushed coarse aggregate, FA: fly ash, SP: blast furanace slag powder, LP: limestone powder, PC: superplasticizer

3. 시험방법

가. 슬럼프 플로우 및 공기량

슬럼프 플로우는 KS F 2402 (콘크리트의 슬럼프 시험방법)에 준하여 실시하였으며, 공기량은 KS F 2421 (굳지않은 콘크리트의 압력법에 의한 공기 함유량 시험방법)에 준하여 측정하였다.

나. 응결시간

관입저항침에 의한 콘크리트 응결시험은 KS F 2436 (관입저항침에 의한 콘크리트 응결시간 시험방법)에 준하여 실시하였으며, 관입저항치가 3.5 MPa일 때 초결, 28 MPa일 때 종결로 하였다.

다. 압축강도

압축강도는 $\varnothing 100 \times 200$ mm의 공시체를 KS F 2405 (콘크리트의 압축강도 시험방법)에 준하여 재령 1.5일, 3일, 7일, 14일, 28일, 90일에 측정하였다.

라. 단열온도상승량

단열온도상승량은 시험기 내부를 공기 순환식으로 단열상태를 유지하고 단열온도 측정 범위는 +10 °C ~ +80 °C, 정확도 ± 0.1 °C, 시편용기는 $\Phi 400 \times H 400$ mm의 철재로 제작하여 7일간 측정하였다.

마. 염화물 확산계수

북유럽 기준 NT Build 492 (비정상 상태에서의 염화물 이온 확산계수 측정법)의 기준에 따라 시험을 실시하였으며, 공시체는 KS F 2403에 따라 $\varnothing 100 \times 200$ mm의 크기로 각 인자별로 3개씩 제작하여 20 °C에서 28일 동안 수중양생을 실시한 후, 두께

50 \pm 2 mm의 크기로 절단하여 진공박스에서 3시간 진공처리 후 수산화칼슘 수용액으로 18 \pm 2시간 동안 침지하여 측정하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 슬럼프 플로우 및 공기량

Table 10에서 보는 바와 같이, 복합사용 혼화재의 혼입량이 증가할수록 OPC에 비해 슬럼프 플로우는 5~15 mm 정도 증가되었고, 공기량은 0.8~1.3 % 정도 감소하였다. 이와 같은 경향은 플라이 애시에 포함된 미연소 탄소의 AE제 흡착작용으로 공기포가 소멸하는 현상과 석회석 미분말 및 고로 슬래그 미분말의 분말도에 기인한다는 기존의 연구와 유사한 결과를 나타내었다 (Kenji and Kaketo, 1993).

Table 10 Test results of slump flow and air content

Item Type	Target slump flow (mm)	Target air content (%)	Slump flow (mm)	Air content (%)
OPC	500 \pm 50	4.5 \pm 1.5	495	5.7
C67			500	4.7
C55			510	4.9
C45			505	4.4
C35			500	4.7

2. 응결시간

Fig. 1에서 보는 바와 같이, 석회석 미분말, 고로 슬래그 미분말 및 플라이 애시를 복합으로 치환했을 때의 초결시간은 C35 > C45 > C55 > OPC > C67 순으로 빠르게 나타났고, 종결시간은 C35 > OPC > C67 > C55 = C45 순으로 빠르게 나타났다. 또한 초결시간이 시멘트량 35 %인 C35에서 시멘트량 100 %인 OPC의 경우 보다 약 55분, 종결시간은 약 35분 정도 응결시간이 빠르게 나타났다. 이는 석회석 미분말이 알라이트의 수화를 촉진시키는 필러 (filler) 효과가 커 응결시간이 앞당겨진 것으로 보여지며, 진동밀로 분쇄한 플라이 애시의 표면변화에 따른 결정구조의 파괴가 초기 수화발열 촉진으로 응결시간이 감소한 것으로 판단된다. 또한, 조강형 혼화재의 분산효과에 의한 것으로 콘크리트 공사 시 후속 공정 신속화에 기여할 수 있다는 기존의 연구와 유사한 경향을 나타내었다 (Hassan et al, 2001).

한편 종결시간은 OPC보다 시멘트량 67 %에서는 약 35분, 시멘트량 55 %와 45 %에서는 약 55분 정도 느리게 나타났는데, 이는 OPC 콘크리트에 비해 단위시멘트량이 적고, 고로 슬래그 미분말은 물과 접촉 시 Si-Al층을 형성하고, 시멘트의 수화반응

시 발생하는 수산화칼슘 $[Ca(OH)_2]$ 등의 알칼리 영향으로 인해 고로 슬래그 표면의 Si-Al층이 자극을 받아 수화가 진행되기 시작하므로 수화반응이 다소 지연된 것으로 판단된다.

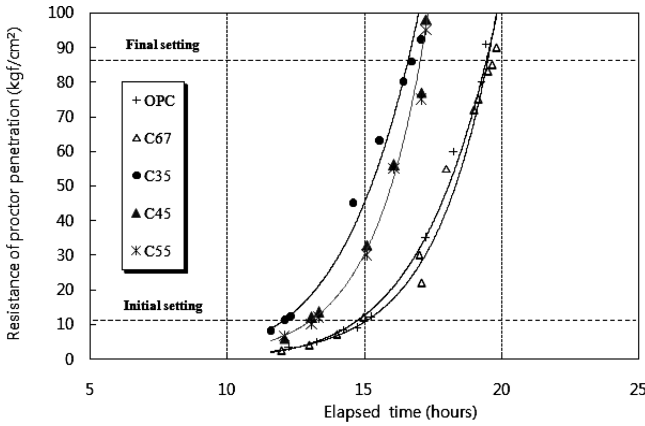


Fig. 1 Relationship between elapsed time and resistance of proctor penetration

3. 압축강도

Fig. 2는 복합사용 혼화재로 시멘트와 석회석 미분말, 플라이 애시 및 고로 슬래그 미분말을 함께 혼합한 콘크리트의 압축강도를 나타낸 것으로, OPC의 경우 재령 3일 압축강도가 20.8 MPa 인데 비하여, C67은 23.8 MPa, C55는 26.1 MPa, C45는 26.4 MPa, C35는 29.6 MPa로서 초기강도는 OPC의 압축강도보다 14.42~42.30% 증가하였다. 이는 시멘트와 플라이 애시 혼합 시 진동밀로 분쇄를 했을 경우 기계적 에너지에 의해 구조가 깨지거나 뒤틀림으로써 유리질의 양이 증가하게 되며, 동시에 포졸란 반응이 촉진되는 현상이 나타난 것으로 기존의 연구와 유사한 결과를 나타내었다 (Bouzoubaa et al., 2005).

또한 석회석 미분말과 고로 슬래그 미분말의 복합사용은 초기 강도 발현에 유용한 것으로 나타났는데, 이는 석회석 미분말에 의한 알라이트 (C_3S)의 수화촉진에 의해 생성된 $Ca(OH)_2$ 가 고로 슬래그 미분말의 수화반응을 촉진시킨 것으로, 재령 3일에서는 특히 석회석에 의한 알라이트의 수화촉진이 재료설계에서 중요한 인자라고 판단되며, 이는 기존의 연구와 유사한 결과를 나타내었다 (Neville, 1995; Taylor, 1990).

재령 28일에서는 석회석 미분말에 의해 알라이트의 수화반응에 의해 생성된 $Ca(OH)_2$ 가 고로 슬래그 미분말과 수화반응이 진행되어 경화체를 치밀하게 하였기 때문이라는 기존의 연구와 유사한 경향을 나타내었다 (Sung et al., 2009; Zhuguo et al., 2002).

재령 90일 압축강도는 OPC의 경우 41.5 MPa인데 비하여, C67

은 43.7 MPa, C55는 45.6 MPa, C45는 46.4 MPa, C35는 47.2 MPa로서 5.30~13.73%의 압축강도 증가율을 보였는데, 이는 적정 비율의 석회석 미분말과 고로 슬래그 미분말의 복합사용이 강도 발현에 유익하고, 고로 슬래그 미분말의 양이 석회석 미분말보다 약간 많은 것이 강도증진에 효과가 있는 것으로 판단된다.

이러한 결과로 고로 슬래그 미분말과 석회석 미분말 및 플라이 애시를 사용한 콘크리트는 OPC만 사용한 콘크리트보다 초기 및 장기강도가 증가한다는 것을 알 수 있다.

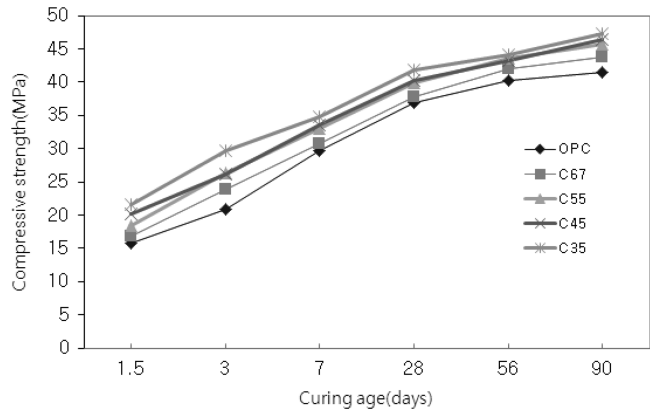


Fig. 2 Relationship between curing age and compressive strength

4. 단열온도상승량

콘크리트 재령에 따른 단열온도상승 변화는 Fig. 3과 같다. 콘크리트 타설온도 21 ± 3 °C에서 단열온도상승량 (K)과 반응속도 계수 (α)의 값은 C67에서 54.9 °C와 1.26 °C/H, C55에서 52.6 °C와 1.39 °C/H, C45에서 51.4 °C와 1.42 °C/H 그리고 C35에서는 49.1 °C와 0.92 °C/H로 나타났다. 이들은 OPC 경우의 K값 58.3 °C와 α 값 1.14 °C/H와 비교하면 복합사용 혼화재의 사용량에 따라 단열온도상승량은 각각 6.31%, 9.73%, 11.83% 및 15.78% 감소하였다. 한편 반응속도계수 α 값은 C67, C55, C45에서 10.52%, 21.92%, 24.56% 증가하였으나, C35의 경우에만 19.29% 감소한 것으로 나타났으며, 복합사용 혼화재량이 증가할수록 OPC에 비해 단열온도상승량은 감소하였고, 반응속도 계수는 높아지는 경향을 나타내었다.

이는 복합 혼화재 사용량은 증가하고 단위시멘트량이 감소함에 따라 콘크리트 구조체내의 온도응력 및 온도균열지수에 직접적으로 영향을 미치기 때문에 콘크리트 구조물 시공 시에는 소량의 품질을 확보할 수 있는 범위내에서 이에 대한 적극적인 검토가 필요하며, 콘크리트 타설 계획 수립 시 단위시멘트량을 조절하는 것은 균열제어면에서 매우 효과가 있을 것으로 판단된다 (Taylor, 1990).

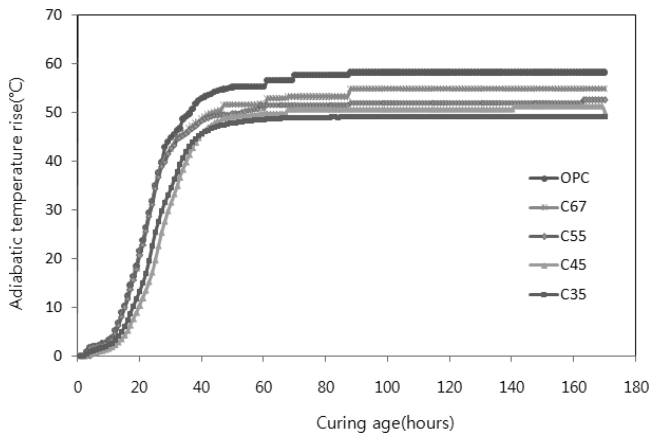


Fig. 3 Relationship between curing age and adiabatic temperature rise

5. 염화물 확산계수

Fig. 4에서 보는 바와 같이, 재령 28일에서 평균 염화물 확산계수는 C67에서 $4.54 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$, C55~C35는 $2.08 \times 10^{-6} \sim 3.26 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$ 범위로 나타났다. 이들 기준 시편인 OPC의 평균 염화물 확산계수 $12.30 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$ 와 비교하면, C67은 63.09%, C55~C35는 73.49~83.08% 감소하였으며, 재령 28일과 90일 다같이 혼화재의 혼입량이 증가할수록 염화물 확산계수는 감소하였다.

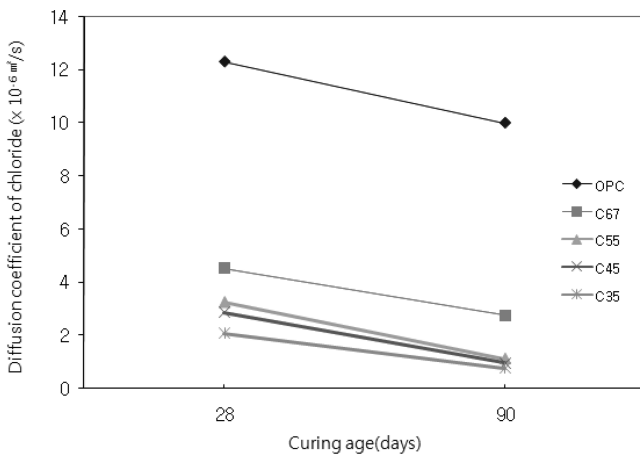


Fig. 4 Relationship between curing age and diffusion coefficient of chloride

이처럼 C35의 염화물 확산계수가 OPC 및 C67 배합에 비해 상대적으로 낮게 나타났으며, 재령 90일에서 확산계수는 59~72% 감소하였고, 확산계수 감소폭도 큰 것으로 나타났다. 이는 콘크리트의 재령이 증가함에 따라 수화물이 결정화되면서 매우 치밀한 수화물을 생성하여 콘크리트의 강도증진이 이루어지며,

이러한 내부조직의 구조변화는 염소이온 확산계수의 감소를 가져오는 것으로 판단된다 (Neville, 1995).

또한 이는 염소이온 침투저항성과 동일한 결과로써 복합사용 혼화재는 시멘트와 반응 메카니즘이 다른 3종류의 광물질 혼화재 치환효과와 초기 시멘트의 반응촉진재로 사용되는 혼화제 사용효과에 의해 콘크리트 수화조직이 치밀하게 충전되었기 때문에 상대적으로 염화물 확산계수가 낮게 나타났다고 판단되며, 염소이온 투과저항성 및 확산계수는 콘크리트 구조물에서 염화물 이온의 침투 및 확산에 대한 내염 특성의 주요 척도로 사용되고 있다.

6. 탄소배출저감량

Table 11은 일반 레미콘 및 저탄소 그린콘크리트의 배합설계와 레미콘의 1 m³ 생산 시 발생하는 이산화탄소 발생량을 산정한 것으로 저탄소 그린콘크리트는 보통 포틀랜드 시멘트를 사용한 일반 레미콘에 비하여 약 37.1%의 탄소배출 저감효과가 있는 것으로 추정된다. 즉 저탄소 그린콘크리트의 경우 기존의 일반적인 콘크리트에 비해 약 96 kg-CO₂/m³의 탄소 배출 저감이 가능한 것을 알 수 있으며, 이는 소나무 한 그루가 연간 5.6 kg의 CO₂를 흡수한다고 할 때 (Mehta, 2001), 소나무 17 그루가 흡수하는 양과 맞먹는 수치이다.

Table 11 Mix design and carbon emissions of green concrete

Item	Unit material content (kg/m ³)								CO ₂ (kg-CO ₂ /m ³)
	W	C	S	G	FA	SP	LP	PC	
OPC	163	390	886	898	0	0	0	3.90	356.9
LGC	163	136	868	880	98	125	31	1.36	260.3

* OPC: ordinary portland cement, LGC: low carbon green concrete

IV. 결 론

본 연구는 시멘트 사용량을 줄이고 대체재로 가격이 저렴한 석회석 미분말과 산업부산물인 고로 슬래그 미분말 및 플라이 애시를 대량 사용한 저탄소 그린콘크리트에 대한 슬럼프 플로우, 공기량, 압축강도, 응결시간, 단열온도상승량, 염화물 확산계수 특성을 구명하였으며, 본 연구를 통해 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 슬럼프 플로우와 공기량은 복합사용 혼화재의 혼입량이 증가할수록 OPC에 비해 슬럼프 플로우는 5~15 mm 증가하였으며, 공기량은 0.8~1.3% 정도 감소되었다.
2. 초결시간은 C35 > C45 > C55 > OPC > C67 순으로 응결시간이 약간 빠르게 나타났는데, 이는 복합사용 혼화재가 알라이

트의 수화를 촉진시키는 충전효과 때문인 것으로 판단된다.

3. 압축강도는 C35 > C45 > C55 > C67 > OPC 순으로 크게 나타났으며, OPC보다 재령 3일에서는 14.42~42.30 % 증가하였고, 재령 90일에서는 5.30~13.73 % 증가하였다.

4. 단열온도상승량은 49.1~54.9 °C로 OPC의 온도상승량 58.3 °C보다 6.31~15.78 % 감소하였으며, 반응속도계수 α 값은 0.92~1.42 °C/h로서 OPC의 α 값 1.14 °C/h에 비하여 모든 배합에서 증가하였으나 C35의 경우에만 19.29 % 감소하였다.

5. 염화물 확산계수는 재령 28일에서 C67~C35는 2.08×10^{-6} ~ 4.54×10^{-6} cm²/s 범위로 나타났으며, OPC의 염화물 확산계수 12.30×10^{-6} cm²/s와 비교하면, 63.09~83.08 % 감소하였다.

따라서 플라이 애시, 석회석 미분말 및 고로 슬래그 미분말은 저탄소 그린콘크리트의 재료로 유용하게 사용할 수 있을 것이다.

REFERENCES

1. Bouzoubaa, N., M. Zhang, V. M. Malhotra, and M. D. Golden, 2005. Blended fly ash cements review. *ACI Material Journal* 96(6): 641-650.
2. Cho, I. H., and C. Y. Sung, 2006. Flowability of high flowable concrete with fly ash and lime powder. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 48(4): 23-29 (in Korean).
3. Hassan, K. E., J. G. Cabrera, and R. S. Maliehe, 2001. The effect of mineral admixture on the rheology of cement paste and concrete. *Cement and Concrete Research* 31: 245-255.
4. Kenji, O., and U. Kaketo, 1993. Effect of blending ratio of OPC, BFS and fly ash properties of cement paste, *Proceedings of the Japan Concrete Institute* 15(1): 23-24.
5. Neville, A. M., 1995. Properties of concrete, 4th edition.
6. Sung, C. Y., S. H. Rhee, and C. S. Song, 2000. Experimental study on physical and mechanical properties of concrete with fly ash. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 42(3): 107-113 (in Korean).
7. Sung, C. Y., and K. H. Noh, 2004. Flow properties of polypropylene fiber reinforced high flow concrete. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 46(4): 79-87 (in Korean).
8. Sung, C. Y., J. N. Youn, and Y. I. Kim, 2009. Physical and mechanical properties of porous concrete using waste activated carbon. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 51(4): 21-27 (in Korean).
9. Sung, C. Y., and T. H. Kim, 2011. Engineering properties of permeable polymer concrete for pavement using powdered waste glass as filler. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 38(1): 145-151 (in Korean).
10. Taylor, H. F. W., 1990. Cement chemistry, *Academic Press*. London: 543-500.
11. Temkhajomkit, P., and T. Nawa, 2004. The fluidity of fly ash cement paste containing naphthalene sulfonate superplasticizer, *Cement and Concrete Research* 23: 1,017-1,024.
12. Zhuguo, L. I., Y. Tanigawa, and H. Mori, 2002. Theoretical analysis on time-dependence of fluidity and thixotropy of high fluidity concrete, *Journal of the Structure Constructure Engineers* 558: 15-22.
13. Mehta, P, K, 2001. Reducing the Environmental Impact of Concrete. *Concrete International* 23(10): 61-66.