



저탄소 그린콘크리트의 내구 특성

Durability Properties of Low Carbon Green Concrete

조일호* · 성찬용**†

Cho, Il Ho · Sung, Chan Yong

ABSTRACT

This study was performed to evaluate the chlorine ion penetration resistance, chemical resistance and freezing and thawing resistance 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 performance 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 offshore structures. Accordingly, the fly ash, limestone powder and blast furnace slag powder can be used for offshore structure materials.

Keywords: chloride ion penetration resistance; chemical resistance; freezing and thawing resistance

1. 서 론

최근 국내에는 영종도 신공항, 고속철도, 서해대교, 광안대교, 인천대교, 이순신 대교, 부산신항 등의 해양구조물 시공이 활발히 이루어지고 있다. 이들 구조물들은 많은 부분이 해중에 있거나 해양에 인접해 있는 철근콘크리트 구조물의 형태로 설계·시공되고 있으며, 중요한 사회간접시설들이 이러한 해양·항만구조물, 도로 및 교량 등의 공사와 유지관리는 중요한 관심사로 대두되어 왔다. 이러한 관점에서 산업부산물인 플라이 애시, 고로슬래그 미분말, 석회석 미분말 등을 다량으로 혼합한 콘크리트에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 그 사용량 또한 급증하고 있는 추세이다. 일반적으로 플라이 애시 등의 산업부산물을 사용한 콘크리트는 소오의 슬럼프 및 공기량을 얻기 위한 단위수량을 저감할 수 있으며, 유동성이나 재료분리저항성이 개선되기 때문에 고유동 콘크리트에도 적용되는 등 다수의 실적이 보고되고 있다. 시멘트의 일부를 고로슬래그 미분말로 대체한 콘크리트의 활용은 기술적, 경제적, 환경적인 이점을 가져온다. 내마모성, 염화이온침투 등에 대한 물리·역학적 성능 향상은

기존 연구를 통해 검증되었다 (Cho and Sung, 2006; Sharfuddin et al; 2008).

국내외의 동향을 살펴보면, 이러한 복합적인 이유로 플라이 애시나 고로슬래그 미분말을 단일 함유한 콘크리트에 대하여 분말도 및 치환율에 따른 실험과 연구가 진행되어 왔으며, 그 결과 수화 발열량 감소, 수밀성 증대, 장기강도 향상, 알칼리골재반응 억제, 염해 및 동결융해저항성, 화학부식 저항성 등이 향상되는 것으로 알려져 있다.

실리카흙-플라이 애시, 실리카흙-고로슬래그 미분말, 실리카흙-플라이 애시-고로슬래그 미분말 등을 시멘트의 일부로 대체하여 콘크리트의 성능을 향상시킨 SCM (Supplementary Cementitious Materials)에 대한 연구는 활발히 진행되고 있다 (M.N. Haque, 1996). 하지만 플라이 애시와 고로슬래그 미분말, 석회석 미분말을 복합 혼합한 4성분계 시멘트를 사용한 저탄소 그린콘크리트에 대한 연구는 매우 미비한 실정이다. 특히 플라이 애시, 석회석 미분말 및 고로슬래그 미분말을 복합 사용한 콘크리트는 보통콘크리트에 비해 단위시멘트량이 적은 것에 기인하여 Ca(OH)₂의 생성량이 적고 양생조건이나 배합조건에 따라 중성화에 대한 저항성이 떨어지는 것으로 보고되고 있다 (Chidiac and Panesar, 2008). 그러나 염화물 침투 저항성, 동결융해 저항성, 중성화 저항성, 건조수축 변화 등은 장기적인 내구성을 확보하는데 있어 매우 중요한 지표가 되기 때문에 플라이 애시, 석회석 미분말 및 고로슬래그 미분말을 복합 사용한 혼화재가 내구성에 미치는 영향에 관한 검토가 필요하다.

* 융합기술생산연구원

** 충남대학교 지역환경토목학과

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

Fax: +82-42-821-8877

E-mail: cysung@cnu.ac.kr

2013년 7월 22일 투고

2013년 9월 12일 심사완료

2013년 9월 16일 게재확정

따라서 본 연구에서는 해양구조물에 주로 사용되고 있는 플라이 애시, 고로슬래그 미분말 및 석회석 미분말을 함께 사용한 저탄소 그린콘크리트의 내구 특성에 대한 기초자료를 제공하는데 그 목적이 있다

II. 재료 및 방법

1. 사용재료

가. 시멘트

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

나. 골재

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

Table 1 Physical properties of ordinary portland cement

Specific gravity	Blaine (cm ² /g)	Setting time (h : min)		Compressive strength (MPa)		
		Initial	Final	3 days	7 days	28 days
3.14	3,323	3 : 50	5 : 12	26	34	40

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
21.12	4.87	62.34	4.21	2.47	3.45	1.54

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	Crushed coarse aggregate	2.61	6.86	1.27	1,530	59.7
	Crushed sand	2.61	3.19	1.28	1,530	58.4
	River sand	2.55	2.31	1.91	1,500	59.7

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
2.32	3,307	62.37	9.12	21.05	4.87	0.17	2.42

다. 플라이 애시

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

라. 석회석 미분말

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

마. 고로슬래그 미분말

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

바. 고성능 AE 감수제

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

2. 콘크리트 배합

기준 시험체는 보통 포틀랜드 시멘트만을 사용하여 제작하였으며, 다른 배합은 시멘트의 일부를 석회석 미분말, 플라이 애시 및 고로슬래그 미분말을 함께 혼입하여 제작하였다. 각 배합의 잔골재는 중량비로 부순잔골재 3 : 강모래 7, 물-결합재비 47 %,

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)
1.04	96.26	0.61	2.09	2.72	3,652

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)
5.37	47.32	0.57	30.04	16.70	2.91	4,733

Table 7 General properties of superplasticizer

Type	Item	Main ingredient	Specific gravity (20 °C)	Solid content (%)	pH	Appearance
Superplasticizer		Polycarboxirate	1.18	16.40	5.05	Light yellow liquid

Table 8 Mix design of low carbon green concrete

Type	Item	W/B (%)	S/a (%)	Unit material content (kg/m ³)							
				W	C	S	G	FA	SP	LP	PC
OPC					410	906	918	0	0	0	4.18
C67					274	893	905	103	0	33	2.89
C55	39.3	49.7	161		225	891	903	103	49	33	2.42
C45					184	889	901	103	90	33	2.03
C35					143	888	900	103	131	33	1.64

※ 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.

석회석 미분말 혼입률 8 %와 플라이 애시 혼입률 25 %로 고정하고, 고로슬래그 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, 배합설계는 Table 8와 같다.

3. 시험방법

가. 염소이온투과저항성

콘크리트의 염소이온 침투에 대한 저항성을 짧은 시간내에 측정하기 위한 목적으로 KS F 2711 (전기전도도에 의한 콘크리트의 염소이온 침투저항성 시험방법)에 준하여 실시하였다. Ø 100×200 mm 실린더 공시체를 제작하고, 재령 7일, 28일, 90일 습윤양생 후 콘크리트 시료절단기로 절단하였다. 시편의 두께는 50±2 mm로 하였으며, 시편의 테두리에 콘크리트 보호용 도막제를 코팅 후 확산셀을 구성하여 실험을 실시하였다.

나. 화학저항성

화학저항성 시험은 ASTM C 267 규정에 따라 φ 100×200 mm의 원형공시체를 제작하여 28일 동안 기건양생 (20 °C, 50 % RH) 시킨 후 황산 5 %와 염산 5 %, 염화나트륨 10 %, 염화칼슘 10 % 용액에 각각 56일 동안 침전 시킨 후, 7일마다 시험액에서 공시체를 꺼내어 침식되고 약화된 부분을 수돗물로 세척하여 제거한 후, 천으로 닦은 후에 중량변화율을 구하였다. 또한, 화학약품 침식에 따른 콘크리트의 압축강도 변화를 알아보기 위해 침식 재령 28일과 62일, 즉 총재령 56일과 90일에 압축강도 시험을 수행하였다.

다. 동결융해저항성

동결융해에 대한 저항성시험은 KS F 2456 (급속 동결융해에 대한 콘크리트의 저항 시험방법)의 기준 B type인 공기중 동결, 수증용해의 방법으로 실시하였다. 재령 14일 동안 수증양생한 100×100×400 mm 공시체 중심에서의 온도를 2시간 동안 4 °C에서 -18 °C로, -18 °C에서 1시간 정제, 1시간 동안에 -18 °C에서 4 °C로 상승, 4 °C에서 1시간 정제시키는 것을 1 cycle로 반복 수행하여, 동결융해 1 cycle 소요시간을 5시간으로 하였다. 동결융해 종료 cycle은 300 cycle로 하였으며, 동결융해저항성을 측정하기 위하여 매 30 cycle 마다 각 시험체를 고유진동수에 의한 측정방법을 이용하여 동탄성계수를 측정하여 내구성지수를 구하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 염소이온투과저항성

Fig. 1에서 보는 바와 같이, 재령 7일의 기준시편 OPC의 총통과전하량은 6,554 coulombs의 높은 (high) 값을 보였으며, C67 배합의 경우도 5,660 coulombs으로 높은 (high) 값을 나타내었다. C55와 C45 배합의 경우도 모든 시편이 물-결합재비와 관계없이 통과전하량은 2,062~2,076 coulombs의 보통 (moderate) 값을 나타내었으나, C35 배합에서는 1,995 coulombs의 낮은 (low) 값을 나타내어 C67 배합의 플라이 애시 사용에 비하여 C35 배합의 복합사용 혼화재 사용으로 인한 염소이온투과저항성이 뚜렷한 감소를 나타내었다. 이처럼 C35의 배합은 OPC, C67, C55 및 C45 배합에 비해 염소이온투과저항성이 우수한 것으로 나타났다. 이는 시멘트와의 반응메카니즘이 다른 2종류의 광물

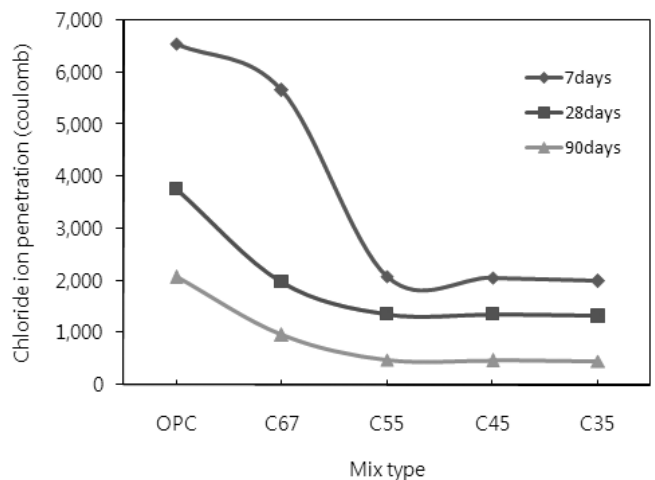


Fig. 1 Relationship between mix type and chloride ion penetration

질 혼화재 치환효과가 초기에 시멘트의 반응촉진제로 사용되는 혼화제 사용효과에 의해 콘크리트의 수화조직이 치밀하게 충전되었기 때문에 초기재령 7일에서도 염소이온투과저항성이 상대적으로 낮은 특징적인 차이점을 보였다고 할 수 있다 (Sung and Kim, 2011; Hassan et al., 2001).

그러나 재령 28일과 90일에서는 OPC를 제외한 모든 배합에서 보통 이하의 염소이온 투과저항성을 보였다. OPC에 비해서 플라이 애시 25 %를 혼입한 C67의 재령 28일에서는 투과저항성이 47 %와 90일에서는 54 % 감소하였고, 플라이 애시를 25 % 혼입한 C67과 플라이 애시 25 %와 고로슬래그 미분말 32 %를 혼입한 C35를 비교하면 각각 33 % 및 52 %로 나타났고, 장기재령일수록 투과성이 급격히 감소하는 것으로 나타났다. 이와 같이 복합사용 혼화재의 혼입량이 증가할수록 염소이온투과저항성이 크게 나타난 것으로 판단된다 (Bouzoubaa et al., 2005). 따라서 플라이 애시를 혼입한 경우 장기재령으로 갈수록 투과저항성이 향상되었으며, 여기에 고로슬래그 미분말을 다량 혼입한 경우, OPC에 비해 약 50 % 이상 투과저항성이 향상되어 매우 뛰어난 투과저항성을 나타내었는데, 이는 고로슬래그 혼입에 따른 잠재수경성 때문이라 판단된다 (Kenji and Kaketo, 1993).

2. 화학저항성

Fig. 2는 황산용액 침전에 따른 중량변화율을 나타낸 것으로, OPC에서는 침전 재령 4주째에 중량 손실률이 약 3.4 %로 나타났으나, C67은 오히려 중량이 약 0.9 % 증가하였다. 이는 플라이 애시 혼입에 따라 황산에 대한 저항성이 커진 상태에서 오히려 수분이 흡수되어 중량손실이 없고 증가한 것으로 나타났고, 플라이 애시 혼입량 25 %와 고로슬래그 미분말 혼입량 12 %인

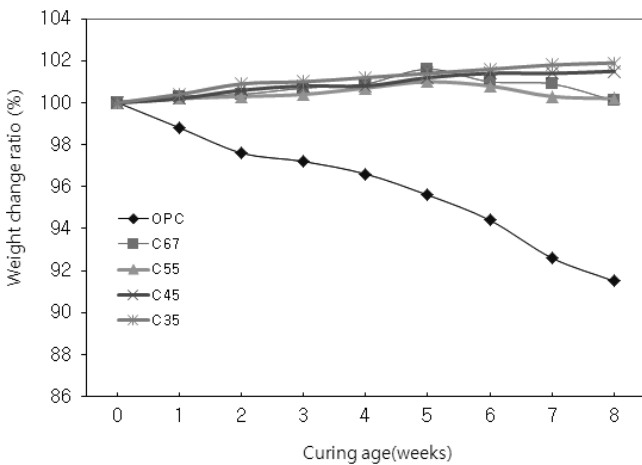


Fig. 2 Relationship between curing age and weight change ratio (H₂SO₄)

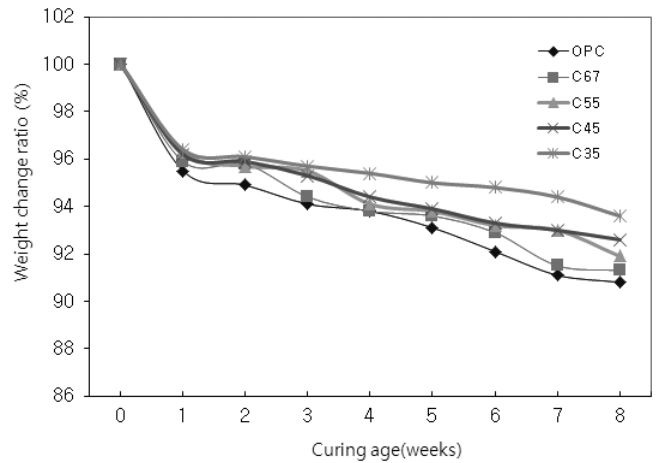


Fig. 3 Relationship between curing age and weight change ratio (HCl)

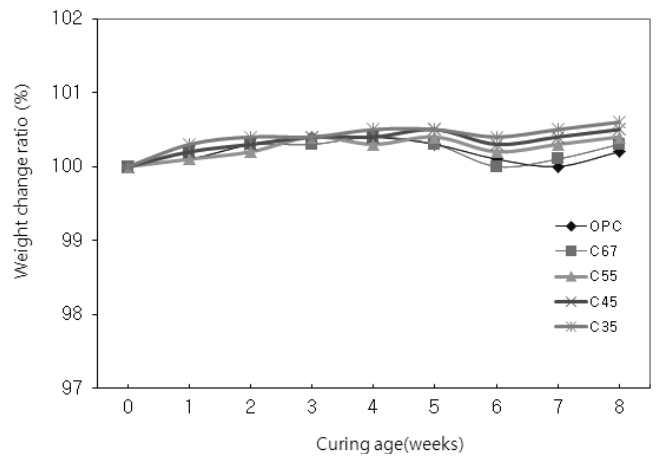


Fig. 4 Relationship between curing age and weight change ratio (NaCl)

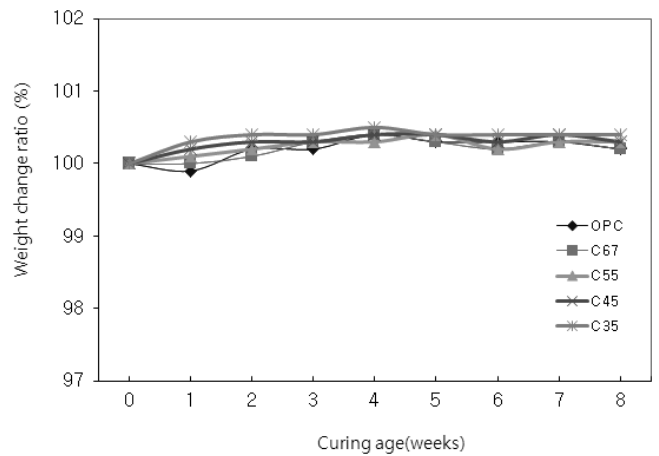


Fig. 5 Relationship between curing age and weight change ratio (CaCl₂)

C55의 재령 4주째의 경우 중량증가율이 0.7 % 나타났으며, 고로슬래그 미분말이 32 %인 C35의 경우 1.2 % 증가하였는데, 이는 고로슬래그 미분말의 혼입량이 증가함에 따라 황산에 대한 침식저항성이 증진되는 것으로 판단된다 (Cho and Sung., 2006; Sung et al., 2009).

재령 8주째의 경우는 고로슬래그 미분말의 혼입량이 12 %인 C55는 중량증가율이 0.2 %, 32 %인 C35는 1.9 %로 나타났으며, 침전기간이 증가함에 따라 수분의 흡수보다 중량손실률이 점점 더 커질 것으로 판단된다 (Sung and Noh, 2004; Temkhajomkit and Nawa, 2004).

Fig. 3은 염산 침전에 따른 중량변화를 나타낸 것으로, 재령 4주째의 경우 OPC와 C67은 6.2 % 정도 중량손실을 나타내었고, C55는 5.9 %, C45는 5.6 %, C35는 4.6 %의 중량손실이 나타내었으며, 재령 8주째의 OPC는 9.2 %, C67은 8.7 %, C55

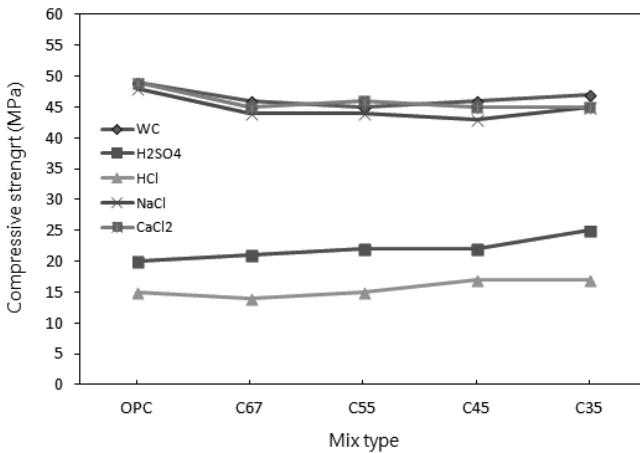


Fig. 6 Relationship between mix type and compressive strength (curing age 56 days)

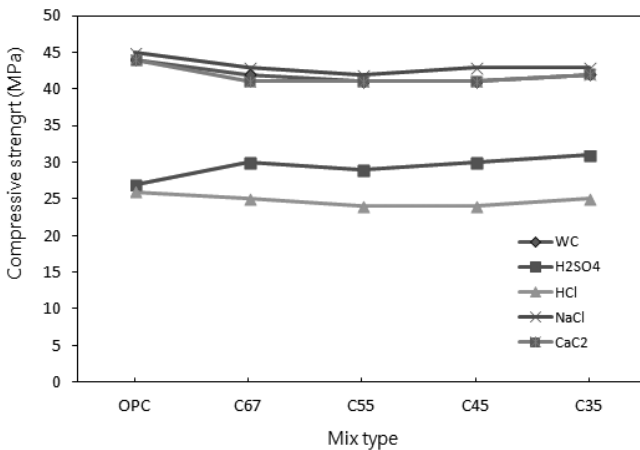


Fig. 7 Relationship between mix type and compressive strength (curing age 90 days)

는 8.1 %, C45는 7.4 %, C35는 6.4 %의 중량 손실이 나타났다.

Fig. 4, 5에서 보는 바와 같이 염화나트륨과 염화칼슘 침전에 따른 중량변화는 거의 나타나지 않았는데, 이는 염화나트륨이나 염화칼슘이 황산이나 염산처럼 콘크리트에 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다 (Bouzoubaa et al., 2005).

따라서, 플라이 애시의 혼입이나 고로슬래그 미분말의 혼입에 따라 중량손실이 거의 나타나지 않았으며, 염산의 경우만 줄어든 것으로 보아 염산에 대한 저항성이 적은 것으로 판단된다 (Han et al., 2012; Lim et al; 2011).

각 배합에 따른 재령 28일 양생 후 28일 침전시킨 56일 강도와, 28일 양생 후 62일을 침전시킨 재령 90일 압축강도를 나타내면 Fig. 6, 7과 같다.

Fig. 6에서 수증양생한 콘크리트(WC)에 대한 재령 56일 압축강도비를 살펴보면, 황산의 경우 C67이 71.4 %, C55가 70.7 %, C45는 73.2 %, C35는 73.8 %로 나타났고, 염산의 경우 C67이 59.5 %, C55와 C45는 58.5 %, C35는 59.5 %로 나타났으며, 염화나트륨의 경우 C67과 C55가 102 %, C45는 104.8 %, C35는 102.4 %로 나타났으며, 염화칼슘의 경우 C67만 96.7 %로 나타났고, C55, C45 및 C35가 100 %로 동일하게 나타났다. 황산과 염산의 경우 강도가 수증양생시킨 콘크리트에 비해 약 26 ~ 43 % 감소하였고, 염화나트륨과 염화칼슘의 경우에는 오히려 강도가 약 2.3 ~ 4.8 % 증가하였다.

Fig. 7에서 62일 침전된 재령 90일 압축강도는 황산의 경우 C67 ~ C35에서 41 ~ 53 %로 C35가 53 %로 가장 크게 나타났고, 염산의 경우 C45가 36.9 %로 가장 크게 나타났으며, 염화나트륨의 경우는 C55가 97.8 %, 염화칼슘의 경우 C45가 97.8 %로 가장 크게 나타났다.

3. 동결융해저항성

Fig. 8에서 보는 바와 같이, OPC 및 복합사용 혼합재의 혼입량에 상관없이 내구성지수가 90 이상으로 우수한 결과를 나타내었다. 이는 배합 시 콘크리트의 공기량을 4.5 ± 1.5 %로 하여 동결융해저항성에 요구되는 소요의 목표공기량 범위로 하였기 때문이라 판단된다 (Kim et al., 2012).

또한, 동결융해사이클이 진행됨에 따라 수분의 침투로 인한 콘크리트 경화체 조직의 이완으로 표면이 열화되면서 상대동탄성계수가 감소하는 경향을 나타내고 있다. 동일 물-결합재비에서 복합사용 혼합재와 1종 보통 포틀랜드 시멘트로 제조한 콘크리트의 상대동탄성계수가 약간 차이를 보이고 있는데, 이는 혼합재의 포졸란 및 잠재수경성 반응에 의한 수화조직의 치밀화로 열화가 적게 진행된 것으로 판단된다.

동결융해사이클에 따른 내구성지수를 보면 플라이 애시 25 %

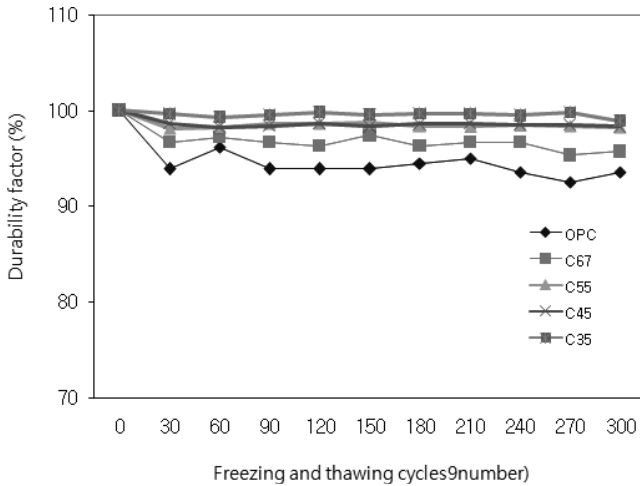


Fig. 8 Relationship between freezing and thawing cycles and durability factor

에 고로슬래그 미분말 12 %, 22 %, 32 %를 혼입한 C55, C45, C35의 내구성지수가 각각 98.2, 98.3, 98.9로 고로슬래그 미분말의 혼입량이 증가함에 따라 내구성지수는 증가하였다. 이는 콘크리트의 공기량이 약 5 %로 동결융해저항성에 요구되는 소요공기량이 연행되었기 때문이라 판단된다 (Song et al., 1998).

한편 플라이 애시만 혼입한 C67의 내구성지수가 95.7로 플라이 애시와 고로슬래그 미분말을 함께 혼입한 C35, C45, C55의 콘크리트가 상대적으로 동결융해저항성이 우수한 결과를 보였다.

IV. 결 론

본 연구는 시멘트 사용량을 줄이고 대체재로 가격이 저렴한 석회석 미분말과 산업부산물인 고로슬래그 미분말 및 플라이 애시를 대량 사용한 저탄소 그린콘크리트에 대한 염소이온투과저항성, 화학저항성, 동결융해저항성을 구명하였으며, 본 연구를 통해 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 염소이온투과저항성은 재령 28일과 90일에서 OPC를 제외한 모든 배합에서 2,000 coulombs 이하로 약 50 % 이상 높은 투과저항성을 보였고, 장기재령일수록 염소이온투과저항성이 급격히 감소하는 것으로 나타났으며, 복합사용 혼화재의 혼입량이 증가할수록 염소이온투과저항성이 크게 나타났다.

2. 화학저항성은 플라이 애시 및 고로슬래그 미분말의 혼입량이 증가함에 따라 황산과 염산에 대한 저항성이 향상되었으며, 염화나트륨과 염화칼슘은 중량변화가 거의 없는 것으로 나타나, 콘크리트 침식에 영향을 주지 못한 것으로 판단된다.

3. 동결융해저항성은 플라이 애시 25 %, 고로슬래그 미분말 12~32 %를 혼입한 C55, C45, C35에서 내구성지수가 98 이

상 유지되는 것으로 나타나, 우수한 동결융해저항성을 보였으며, 복합사용 혼화재의 혼입량이 증가할수록 동결융해저항성이 우수하게 나타났다.

따라서 플라이 애시, 석회석 미분말 및 고로슬래그 미분말은 저탄소 그린콘크리트의 내구성을 위한 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 limestone 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. Han, D. Y., S. C. Bae, S. J. Yoon, K. J. Mun, and W. G. Hyung, 2012. A study on the chemical resistance of non-sintered cement mortar with industrial waste used. *Journal of the Korean Society of Concrete Institute* 24(1): 443-444 (in Korean).
5. 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.
6. Kim, H. J., K. S. Lee, and H. G. Park, 2012. Experimental study on freezing-thawing and rapid assessment of resistance to chloride ion penetration for concrete of waste glass sludge. *Journal of the Korean Society of Concrete Institute* 24(2): 689-960 (in Korean).
7. Lim, C. K., Y. G. Cho, J. H. Ha, T. Y. Hyun, and J. H. Kim, 2011. An experimental study on the resistance to chloride ion penetration in high durability ternary blended concrete. *Journal of the Korean Society of Concrete Institute* 23(2): 193-194 (in Korean).
8. Neville, A. M., 1997. *Properties of concrete*, John Wiley & Sons, Inc., New York: 482-487.
9. Song, Y. S., J. H. Noh, and S. H. Kang, 1998. A

- study on the resistance to sea water and high flowing properties of concrete using blended low heat cement. *Journal of the Korean Society of Concrete Institute* 10(6): 281-289 (in Korean).
10. 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).
 11. 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).
 12. 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).
 13. 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).
 14. Taylor, H. F. W., 1990. Cement chemistry, *Academic Press*. London: 543-500.
 15. 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.
 16. Chidiac S. E, and Panesar D. K, 2008, Evolution of mechanical properties of concrete containing ground granulated blast furnace slag and effects on the scaling resistance test at 28 days. *Cement and Concrete Research* 30 (2): 63-71.
 17. Sharfuddin Ahmed M, Kayali O, and Anderson W, 2008, Chloride penetration in binary and ternary blended cement concretes as measured by two different rapid method. *Cement and Concrete Research* 30 (7): 576-582.
 18. Haque1, M. N., 1996. Strength development and drying shrinkage of high strength concretes, *Cement and Concrete Research* 18 (5): 333-342.