

저심도 철도시스템 구축을 위한 저탄소 친환경 PC 박스용 콘크리트의 성능 평가

고태훈^{*}, 하민국¹, 정호진²

¹한국철도기술연구원 신교통연구본부, ²한국에스지에스 건설재료연구소

A Performance Evaluation of Concrete for Low-carbon Eco-friendly PC Box for Near-surface Transit System

Tae-Hoon Koh^{*}, Min-Kook Ha¹, Ho-Jin Jung²

¹New Transportation Systems Research Center, Korea Railroad Research Institute

²Construction Materials Testing Center, SGS Korea Co., Ltd

요약 본 연구에서는 저비용의 저심도 도시철도시스템을 구축하기 위하여 산업부산물인 고로슬래그 미분말, 플라이애시 및 급냉 진기로 산화슬래그를 사용하여 개발된 저탄소 친환경 PC 박스용 콘크리트의 역학적 성능 및 내구성을 평가 하였다. 역학적 특성을 평가한 결과, 재령 1일 압축강도는 모든 조건에서 설계기준강도(f_{ck}) 35 MPa의 90% 이상 강도 발현 하는 것으로 나타나 공기단축 가능으로 건설비용을 절감할 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 소요의 물성 및 설계기준강도(f_{ck}) 35 MPa를 만족하는 범위에서 시멘트 단독 사용 조건보다 염소이온침투성 및 확산계수가 낮게 나타나 내염성능이 우수한 것으로 나타났으며, 동결융해 저항성 및 화학저항성의 경우에도 내구성능이 우수한 것으로 나타났다. 따라서 저탄소 친환경 PC 박스용 콘크리트를 사용할 경우, 시멘트 제조 시 발생하는 이산화탄소 및 환경부하를 저감할 수 있을 것으로 기대된다.

Abstract Low-carbon eco-friendly precast concrete (PC) box structure has been recently developed as a low-cost infrastructure of near-surface transit system. The concrete of PC box was manufactured by industrial byproducts such as ground granulated blast furnace (GGBF) slag, flyash and rapid-cooling electric arc furnace (EAF) oxidizing slag, its mechanical property and durability were estimated in this study. Based on the mechanical and durability tests, it is found that low-carbon eco-friendly concrete shows high initial compressive strength, more than 90% of design strength (35MPa), and high resistance to salt-attack, chemical-attack and freeze-thaw. Therefore, low-carbon eco-friendly PC box concrete technology is expected to contribute to the railway with low environmental impact.

Key Words : CO₂ emission, Durability evaluation, Ground granulated blast furnace slag, Precast Concrete, Rapid-cooling electric arc furnace oxidizing slag

1. 서론

기존의 지하철은 심도가 깊어짐에 따라 많은 건설비용이 소요되고, 시민들의 접근성 및 다른 교통시스템과

의 환승 시 불편함 등의 문제가 대두되고 있다. 따라서 여러 지하체에서는 기존 지하철에 대비하여 낮은 건설비용과 접근성이 우수한 경전철시스템이 활발히 도입되고 있는 추세이다. 그러나 지상 고가방식의 경전철시스템은

본 논문은 국토교통부 철도기술연구사업의 “저비용 저심도 인프라 핵심기술 개발(14RTRP-B068762-02)” 연구비 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

*Corresponding Author : Tae-Hoon Koh(Korea Railroad Research Institute)

Tel: +82-31-460-5661 email: thkoh@krii.re.kr

Received March 16, 2015

Revised (1st April 27, 2015, 2nd May 6, 2015)

Accepted May 7, 2015

Published May 31, 2015

도시미관을 저해하고, 소음·진동 발생, 교통 혼잡 초래 등의 문제들로 인해 민원이 발생하여 경전철 사업의 추진에 어려움을 겪고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 도시교통 연계성과 접근성이 우수하며, 고가방식의 건설비 수준 이하의 저비용으로 건설되는 저심도 도시철도시스템 기술개발이 추진 중에 있다.

저비용의 저심도 도시철도시스템을 구축하기 위해서는 급속시공을 전제로 한 건설비용의 절감이 요구되어 지는데, 이를 위한 방법으로 프리캐스트 콘크리트 구조물의 적용이 제안되고 있다. 프리캐스트 콘크리트 기술은 고품질의 콘크리트를 현장에 공급하여 급속시공을 유도할 수 있는 경제적인 기술로써 저심도 철도시스템 구축에 요구되는 생력화, 고품질, 급속시공 요건을 모두 충족시킬 수 있는 매우 합리적인 기술이라 할 수 있다.

또한 최근 국내외에서는 건설분야의 CO₂ 배출량을 저감시키는 방안으로 시멘트 사용량 감소 및 산업부산물의 재활용에 대한 연구와 관심이 증가하고 있다. 대표적으로 철강슬래그와 플라이애시 등을 결합재(시멘트)의 대체 재료로 재활용하는 방안이 가장 크게 주목을 받고 있다. 이는 처리 곤란한 산업부산물을 활용하여 환경오염을 저감하면서 건설분야에서 CO₂ 배출의 가장 큰 원인이 되고 있는 시멘트 사용량을 감소시킬 수 있어 친환경적인 해결방안으로 제시되고 있다.

본 연구에서는 산업부산물인 고로슬래그 미분말과 플라이 애시로 시멘트의 일부를 대체하고, 분체량 저감을 위해 대체 재료의 수화반응을 활성화 시킬 목적으로 Na₂SO₄를 사용하였다. 또한 급냉 전기로 산화슬래그를 천연 잔골재의 대체 재료로 사용하여 개발된 저탄소 친환경 PC 박스용 콘크리트의 역학적 성능 및 내구성 평가를 수행하였다.

2. 실험 개요

2.1 사용재료

2.1.1 시멘트 및 혼화재

시멘트는 밀도 3.15 g/cm³의 1종 보통포틀랜드시멘트(이하 OPC로 약함)를 사용하였으며, 이산화탄소 배출 저감을 목적으로 시멘트 대체 재료로써 플라이애시(이하 FA로 약함) 및 고로슬래그 미분말(이하 BS로 약함)을 사용하였다. 시멘트 및 혼화재의 물리적 성질은 Table 1

과 같다.

2.1.2 골재

잔골재는 밀도 3.55 g/cm³, 조립률 3.07의 산업부산물인 급냉 전기로 산화슬래그(Rapid-Cooling Electric Arc Furnace Oxidizing Slag, 이하 EAF_S로 약함)를 사용하였으며, 입도분포곡선은 Fig. 1과 같다. 천연 잔골재 대체 재료로 EAF_S를 사용함으로써 골재 채취 및 산업부산물 처리에 따른 환경 파괴를 감소시킬 수 있으며, 천연잔골재의 자원고갈이라는 문제점을 해결할 수 있다. 굵은골재는 최대치수가 20 mm 인 부순골재(이하 G로 약함)를 사용하였다. 급냉 전기로 산화슬래그 및 굵은골재의 물리적 성질은 Table 2와 같다.

Table 1. Physical properties of OPC and admixtures

Items	Density (g/cm ³)	Surface area (cm ² /g)	ig. loss (%)
OPC	3.15	3,705	2.1
FA	2.24	3,524	3.4
BS	2.88	4,224	1.0

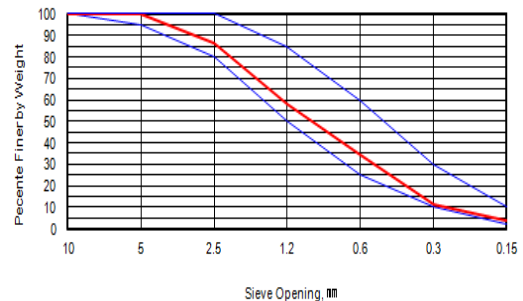


Fig. 1. Gradation curve of EAF_S

Table 2. Physical properties of aggregates

Items	Density (g/cm ³)	Absorption (%)	F.M.
EAF_S	3.55	0.10	3.07
G	2.70	0.67	6.44

Table 3. Mix proportions

Types	W/B (%)	S/a (%)	Binders(B, weight ratio, %)			Aggregates		Activator (Na ₂ SO ₄)
			OPC	FA	BS	S	G	
No.1	35.9	43.0	100	-	-	EAF_Slag 100%	G _{max} 20mm	-
No.2	29.6	40.9	50	15	35			-
No.3	31.8	41.3	50	15	35			B×2%
No.4	26.2	41.9	35	25	40			-
No.5	28.3	42.3	35	25	40			B×2%

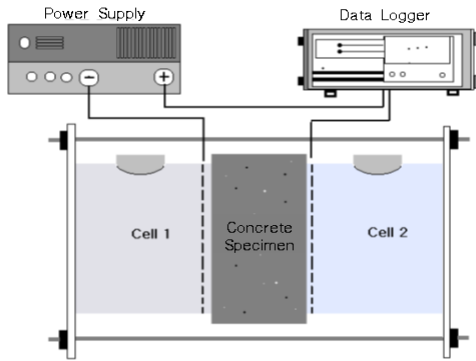
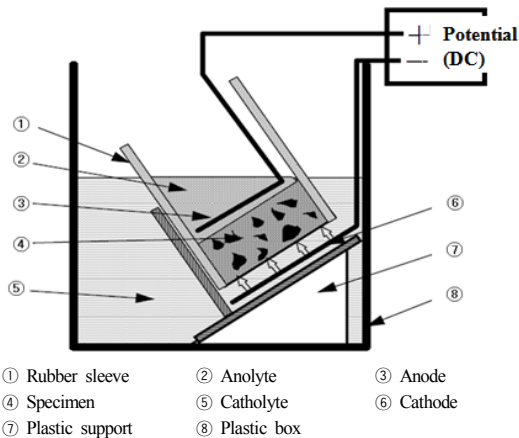


Fig. 2. Electrical block diagram

Table 4. Chloride ion penetrability based on charge passed

Total passed charge (coulombs)	Chloride ion penetrability
> 4000	High
2000 ~ 4000	Moderate
1000 ~ 2000	Low
100 ~ 1000	Very low
< 100	Negligible



- ① Rubber sleeve ② Anolyte ③ Anode
- ④ Specimen ⑤ Catholyte ⑥ Cathode
- ⑦ Plastic support ⑧ Plastic box

Fig. 3. One arrangement of the migration set-up

2.1.3 혼화제

콘크리트의 유동성 확보 및 공기량 조절을 위하여 화학혼화제는 K사의 폴리카르본산계 고성능 AE 감수제 (이하 AD로 약함)를 사용하였다.

2.2 콘크리트 배합

본 연구에서는 저심도 철도시스템 구축을 위한 저탄소 친환경 PC 박스용 콘크리트를 제작하기 위해 사전 예비배합을 통하여 설계기준강도(f_{ck}) 35 MPa, 목표 슬

럼프 150 ± 25 mm 및 공기량 4.5 ± 1.5 %로 선정하였다. 또한 분체량 저감을 위해 대체 재료의 수화반응을 활성화 시킬 목적으로 Na_2SO_4 를 사용하였으며, 배합설계 조건은 Table 3과 같다.

또한 프리캐스트 콘크리트 기술을 적용시키기 위하여 양생은 증기양생을 실시하였다. 증기양생 조건은 몰드에 콘크리트를 다져 넣은 후 다짐이 완료된 콘크리트 몰드를 2시간 동안 상온방치 하였으며, 이 후 2시간에 걸쳐 55°C 까지 승온(20°C 이하/hr)시켰다. 승온 완료 후, 6시간 동안 $52 \sim 58^\circ\text{C}$ 가 되도록 온도를 유지시킨 후 20°C 까지 하강(10°C 이하/hour) 시켰다.

2.3 실험방법

2.3.1 굳지 않은 콘크리트 시험

굳지 않은 콘크리트의 슬럼프는 KS F 2402에 준하여 실시하였으며, 공기량 측정은 KS F 2421에 준하여 평가하였다.

2.3.2 압축강도 시험

압축강도 시험용 공시체는 $\text{O}100 \times 200$ mm 원주형 몰드에 다짐을 실시하여 3개를 제작하였으며, 증기 양생 후 몰드를 탈형하여 소정의 재령까지 $20 \pm 3^\circ\text{C}$ 의 양생 수조에 침지하여 수중 양생(이하 표준양생으로 칭함)하였다. 압축강도 시험은 재령 1일, 7일 및 28일에서 KS F 2405에 준하여 실시하였다.

2.3.3 염소이온 침투저항성 시험

염소이온 침투저항성 시험은 KS F 2711에 준하여 실시하였으며, 시험용 공시체는 2.3.2와 같이 제작하여 표준양생을 실시하였다. 시험 직전에 공시체를 양생수조에서 꺼내어 중앙부에서 두께가 50 mm가 되도록 절단한 다음 확산셀에 결합하기 전까지 진공포화 시켰다. 시험편은 Fig. 2와 같이 확산셀에 고정시키고 회로를 구성하였으며, (-)전극셀에 3.0%의 NaCl 수용액을 채우고 (+)전극셀에는 0.3 N의 NaOH 수용액을 채운 후, 60V의 전압을 6시간 동안 가하였다. 데이터로거를 통하여 30분 간격으로 전압값을 측정하였으며, 식 (1)을 이용하여 회로를 통과한 총 전하량을 계산하였다. 또한 계산된 통과 전하량으로 Table 4와 같이 염소이온 침투성을 판정하였다.

$$Q = 900 \times (I_0 + 2I_{30} + 2I_{60} + \dots + 2I_{330} + I_{360}) \quad (1)$$

여기서, Q는 회로를 통과한 전하량(coulombs)이며, I_0 는 전압을 가한 직후의 전류(amperes)이며, I_t 는 전압을 가하고 나서 t분 경과 후의 전류이다.

2.3.4 염소이온 확산계수 시험

염소이온 확산계수 시험은 NT Build 492T에 준하여 실시하였으며, 시험용 공시체는 2.3.2와 같이 제작하여 표준양생을 실시하였다. 시험 직전에 공시체를 양생수조에서 꺼내어 중앙부에서 두께가 50 mm 가 되도록 절단한 다음 확산셀에 결합하기 전까지 진공포화 시켰다. 시험편을 Fig. 3과 같이 확산셀에 고정시키고 회로를 구성하였으며, 시험편의 양쪽 단면부에 대하여 한쪽면은 음극용액(10.0 % NaCl)에 노출시키고, 반대면은 양극용액(0.3 N NaOH)에 노출시켰다. 이 후 최초로 30V의 전압을 가하여 통과하는 전류량(mA)에 따라 시험 전압 및 시간을 설정하여 시험을 진행 하였다. 시험 종료 후, 시험편을 축방향으로 할렬하여 파단면에 질산(0.1 M)용액을 분무하고, 백색으로 변색된 부분을 측정하여 염소이온의 침투깊이를 측정하였으며, 식 (2)를 이용하여 염소이온 확산계수를 계산하였다[1].

$$D_{nssm} = \frac{0.0239(273 + T)L}{(U - 2)t} \left(x_d - 0.0238 \sqrt{\frac{(273 + T)Lx_d}{U - 2}} \right) \quad (2)$$

여기서, D_{nssm} 은 비정상 상태의 염소이온 확산계수 ($\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{sec}$)이며, U는 전압(V)이며, T는 양극용액의 시험 초기 및 종료 온도의 평균값($^{\circ}\text{C}$)이며, L은 공시체 두께(mm)이며, x_d 는 평균 염소이온 침투깊이(mm)이며, t는 시험시간(hr)이다.

2.3.5 촉진탄산화 시험

시험용 공시체는 2.3.2와 같이 제작하여 표준양생을 실시하였다. 촉진탄산화 시험은 KS F 2584에 준하여 실시하였으며, 온도 $20 \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 상대습도 $60 \pm 5 \%$, CO_2 (농도 5%) 가스 환경으로 고정된 촉진탄산화 시험기 안에서 30일 동안 노출시켰다. 촉진 완료 후 시험편을 축방향으로 할렬하여 파단면에 1% 페놀프탈레인 용액을 분무하였으며, 표면으로부터 붉은색으로 변색되지 않은 부분을 측정하여 탄산화 깊이를 결정하였다.

2.3.6 동결융해저항성 시험

동결융해저항성 시험용 공시체는 $100 \times 100 \times 400 \text{ mm}$ 각주형 몰드에 다짐을 실시하여 제작하였으며, 증기 양생 후 몰드를 탈형하여 플라이애시 및 고로슬래그의 포졸란반응 및 잠재수경성반응을 고려하여 재령 28일까지 표준양생하였다. 동결융해저항성 시험은 KS F 2456의 A법에 준하여 실시하였다. 시험편을 동결융해 시험용 용기에 넣고 물을 채운 후, $-18 \sim +4 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 를 1 Cycle(4시간)로 하여 동결융해 작용을 반복하였고, 300 Cycle에서 시험을 종료하였다. 또한, 30 Cycle 주기로 동탄성계수를 측정하였으며, 초기 동탄성계수 값에 대한 Cycle별 동탄성계수 값인 상대동탄성계수로 정리하였다.

2.3.7 화학저항성 시험

화학저항성 시험은 ASTM C 267에 준하여 실시하였으며, 시험용 공시체는 2.3.2와 같이 제작하여 표준양생을 실시하였다. 시험편을 담수, 황산나트륨용액(10% Na_2SO_4) 및 염산용액(5% HCl)에 3개월 동안 침지한 후 침지 전·후의 중량 및 압축강도를 측정하였다. 압축강도 변화율 및 중량 변화율은 식 (3) 및 식 (4)를 이용하여 계산하였다[2].

$$\text{변화율}(\%) = \frac{\text{침지전 압축강도} - \text{침지 후 압축강도}}{\text{침지 전 압축강도}} \times 100 \quad (3)$$

여기서, 침지 전 압축강도는 재령 28일의 압축강도 이다.

$$\text{중량변화율}(\%) = \frac{\text{침지 전 중량} - \text{침지 후 중량}}{\text{침지 전 중량}} \times 100 \quad (4)$$

여기서, 침지 전 중량은 시험 대상 시험편의 침지 전 측정된 중량 이다.

2.3.8 재료분리 저항성 시험

EAF_S의 밀도가 타 배합재료에 비해 고밀도의 재료이기 때문에 발생할 수 있는 재료간의 분리현상에 대한 평가를 위해 재료분리 저항성 시험을 ASTM C 1610을 참고 및 수정하여 실시하였다[3]. 재료분리저항성 시험용 공시체는 $\text{Ø}150 \times 300 \text{ mm}$ 원주형 몰드에 다짐을 실시하여 제작하였으며, 증기 양생 후 몰드를 탈형하였다. 탈형 후 커터기를 사용하여 축방향으로 커팅하고, 커팅된 면을 디지털촬영장비를 사용하여 촬영하였다. ASTM C

457을 참고하여 경화된 콘크리트의 단면을 Fig. 4와 같이 상단부, 중앙부 및 하단부로 구분하고 화상분석프로그램(IMAGE-PRO PLUS)을 사용하여 촬영된 콘크리트 면적에 대하여 EAF_S가 차지하고 있는 면적을 계산하였다. EAF_S의 재료분리 저항성은 식 (5)를 이용하여 계산하였다[4].

$$S = 2 \left(\frac{(FA_B - FA_T)}{(FA_B + FA_T)} \right) \times 100, \text{ if } FA_B > FA_T \quad (5)$$

$$S = 0, \text{ if } FA_B \leq FA_T$$

여기서, S는 재료분리저항성(%)이며, FA_T는 상단부 면적에 대한 EAF_S가 차지하는 비율(%)이며, FA_B는 하단부 면적에 대한 EAF_S가 차지하는 비율(%)이다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 굳지 않은 콘크리트 평가

Table 5는 굳지 않은 콘크리트의 슬럼프 및 공기량을 정리한 것이다. Table 5의 결과 모든 조건에서 목표 슬럼프 150 ± 25 mm 및 공기량 4.5 ± 1.5 %를 만족하는 것으로 나타났다.

3.2 압축강도 평가

Fig. 5는 각 배합설계 조건별 콘크리트의 재령 1일, 7일 및 28일 압축강도 시험결과를 나타낸 것이다. Fig. 5의 결과에서 재령 28일 압축강도는 OPC(No.1) 사용조건, 분체 사용조건 및 자극제 사용조건 모두 설계기준강도(f_{ck}) 35 MPa의 약 110 ~ 128 % 수준으로 나타나 설계조건을 충분히 만족시키는 것으로 확인되었다.

3.3 염소이온 침투저항성 평가

Fig. 6은 각 배합설계 조건별 콘크리트의 재령 28일 염소이온 침투저항성 시험결과를 나타낸 것이다. Fig. 6의 결과, 염소이온 침투성은 OPC(No.1) 조건만 보통 수준으로 판정 되었으며, 분체 치환조건 및 자극제 사용 조건은 모두 매우 낮음으로 판정되었다.

고로슬래그 미분말 및 플라이애시의 사용량이 많은 분체 65 % 치환 조건이 분체 50 % 치환 조건 보다 우수한 염소이온 침투저항성을 나타냈다.

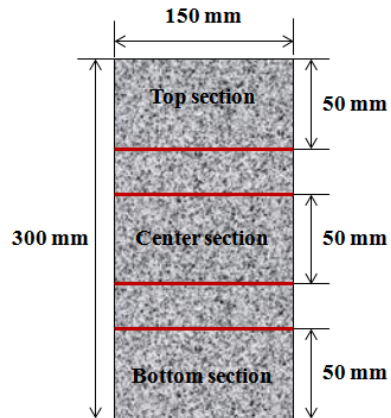


Fig. 4. Side of splitted of cocrete

Table 5. Fresh concrete

Types	Slump (mm)	Air content (%)
No.1	160	4.1
No.2	155	3.8
No.3	170	4.3
No.4	150	4.0
No.5	160	4.4

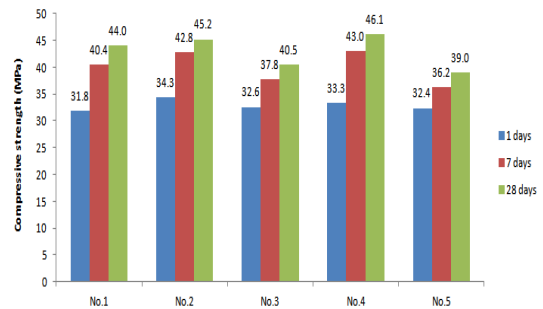


Fig. 5. Compressive strength

또한, 자극제 사용조건이 미사용 조건에 비해 염소이온 침투저항성이 우수한 것으로 나타났으며, 이러한 결과는 자극제가 증기양생 중 콘크리트 내부에서 수화반응을 촉진시키면서 경화 조직이 치밀해진 것으로 판단된다.

3.4 염소이온 확산계수 평가

Fig. 7은 각 배합설계 조건별 콘크리트의 재령 28일 염소이온 확산계수 시험결과를 나타낸 것이다. Fig. 7의 결과 염소이온 확산계수는 OPC(No.1) 조건이 $9.94 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{sec}$, 분체 치환조건 및 자극제 사용조건은 $(2.7\sim 4.8) \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{sec}$ 로 나타났다.

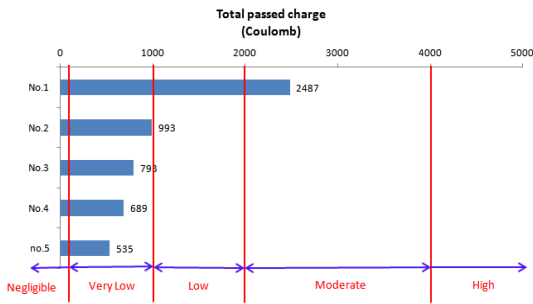


Fig. 6. Chloride ion penetration resistance

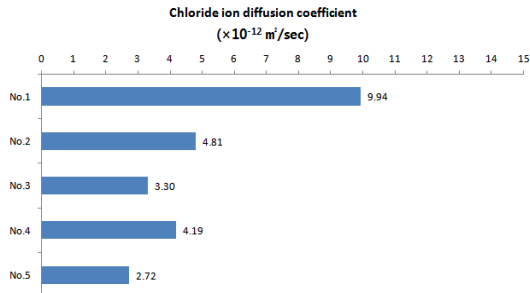


Fig. 7. Chloride ion diffusion coefficient

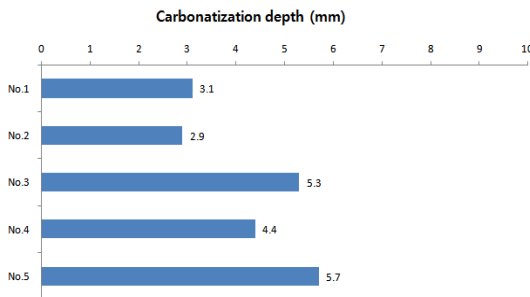


Fig. 8. Carbonation depth

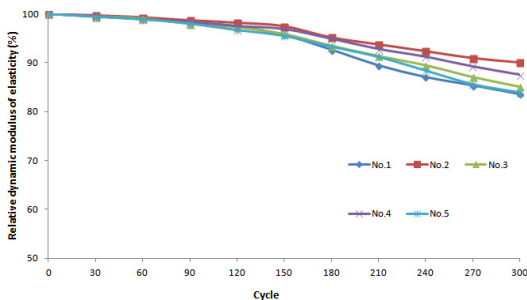


Fig. 9. Resistance of freezing and thawing

설계기준강도(f_{ck}) 35 MPa를 만족하는 범위에서 분체 치환조건 및 자극제 사용조건이 OPC(No.1)보다 약 2배

이상 염소이온 확산계수가 낮게 나타나 내염성능이 우수한 것으로 판단된다. 이러한 결과는 내염성능에 우수한 플라이애시 및 고로슬래그의 사용에 따른 포졸란 반응 및 잠재수경성 반응으로 조직구조가 치밀해진 것으로 판단되며, 염소이온 침투 저항성 시험결과와 일치한다.

3.5 축진탄산화 평가

Fig. 8은 각 배합설계 조건별 콘크리트의 재령 28일에서의 축진 탄산화 깊이를 나타낸 것이다. Fig. 8의 결과 분체 50% 치환조건(No.2)이 OPC(No.1) 조건보다 탄산화 저항성이 비교적 우수한 것으로 나타났으며, 분체 65% 치환조건(No.4)은 혼화재료(고로슬래그 미분말 및 플라이애시)의 치환율이 높아 OPC(No.1) 조건보다 탄산화 저항성은 불리한 것으로 나타났다.

또한, 분체 치환 조건별 자극제 사용조건의 경우 미사용 조건에 비해 탄산화 저항성이 낮은 것으로 나타났다. 이러한 결과는 탄산화저항성에 불리한 고로슬래그의 치환율이 높고 OPC의 사용량이 상대적으로 적기 때문이며, 자극제의 사용은 초기에 수화반응을 활성화시켜 무침가 조건과 비교하여 상대적으로 조직구조가 치밀하지 못한 것으로 판단된다.

3.6 동결융해 저항성 평가

Fig. 9는 각 배합설계 조건별 콘크리트의 재령 28일에서의 동결융해 저항성 시험결과를 나타낸 것이다. Fig. 9의 결과 분체 치환조건 및 자극제 사용조건이 OPC(No.1) 조건 보다 동결융해 저항성이 우수한 것으로 나타났다.

설계기준강도(f_{ck}) 35 MPa를 만족하는 범위에서 분체 50% 치환 조건이 분체 65% 치환 조건보다 동결융해 저항성이 우수한 것으로 나타났으며, 이러한 결과는 강도 및 내구성 발현에 기여하는 시멘트량이 상대적으로 많기 때문인 것으로 판단된다.

3.7 화학저항성 평가

Table 6 및 Table 7은 각 배합설계 조건별 콘크리트의 재령 28일에서의 침지재령 3개월 화학저항성 시험결과를 나타낸 것이다. Table 6의 결과, 5% HCl 용액 침지조건인 경우 분체 50% 치환조건이 압축강도 및 중량의 유지성능이 가장 우수한 것으로 나타났다. Table 7의 결과, 10% Na₂SO₄ 용액 침지조건인 경우에는 분체 65

% 치환조건이 압축강도 및 중량의 유지성능이 가장 우수한 것으로 나타났으며, 이러한 결과는 혼화재료(고로슬래그 미분말 및 플라이애시)의 사용량이 많기 때문인 것으로 판단된다.

Table 6. Chemical resistance (5% HCl)

Types	Compressive strength (MPa)		Rate of change (%)	
	28 days of age	After immersion	Compressive strength	Weight
No.1	44.0	33.6	-23.6	-3.40
No.2	45.2	38.1	-15.7	-2.94
No.3	40.5	34.4	-15.1	-2.93
No.4	46.1	35.7	-22.6	-3.00
No.5	39.0	30.5	-21.7	-3.24

Table 7. Chemical resistance (10% Na2SO4)

Types	Compressive strength (MPa)		Rate of change (%)	
	28 days of age	After immersion	Compressive strength	Weight
No.1	44.0	40.5	-8.0	+0.20
No.2	45.2	43.5	-3.8	+0.20
No.3	40.5	38.8	-4.2	+0.16
No.4	46.1	44.9	-2.5	+0.17
No.5	39.0	38.1	-2.3	+0.14

Table 8. Segregation resistance

Types	Ratio of area (%)		
	FA_T	Center	FA_B
No.1	25	28	25
No.2	24	24	23
No.3	28	26	27
No.4	28	27	22
No.5	22	27	21

Center = (EAF_S area / Total area)×100

3.8 재료분리 저항성

Fig. 10은 각 배합설계 조건별 콘크리트의 재령 1일에서의 촬영된 단면을 화상분석프로그램(IMAGE - PRO PLUS)을 사용하여 분석한 것을 나타낸 것이다. Table 8은 각 배합설계 조건별 촬영된 단면에 대하여 EAF_S가 차지하는 비율을 정리한 것이다. Table 8의 결과 OPC(No.1) 단독사용 조건, 분체 치환조건 및 자극제 사용조건인 경우 모두 $FA_T > FA_B$ 이므로, 재료분리가 없는 것으로 나타났다. 또한, 중앙단면에서도 EAF_S가 차지하는 비율이 상단부 및 하단부와 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 분체량이 많고 고로슬래그 미분말 및 플라이애시 사용으로 점성이 높아졌기 때문인 것으로 판단된다.

3.9 이산화탄소 배출량 저감효과

배합케이스별 이산화탄소 배출저감량을 비교하면, 1종 시멘트만을 결합재로 사용한 No.1 대비 No.2~4는 약 $159\text{kg/m}^3 \sim 230\text{kg/m}^3$ (포틀랜드 시멘트 탄소 배출계수: $0.944\text{kg CO}_2/\text{kg}$)⁵⁾의 획기적인 이산화탄소배출 저감을 기대할 수 있다[5].

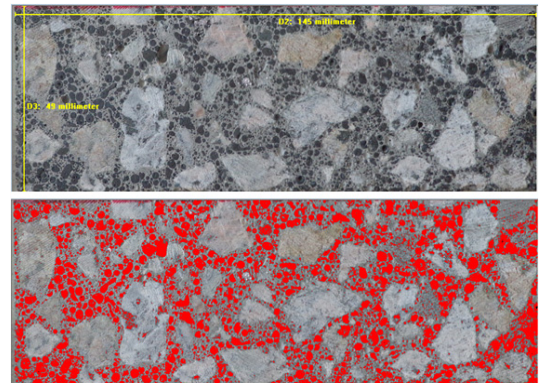
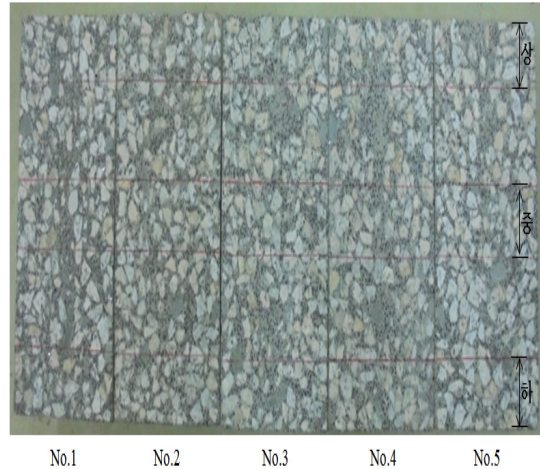


Fig. 10. Segregation resistance

4. 결론

본 연구는 이산화탄소 배출저감을 목적으로 산업부산물인 고로슬래그 미분말과 플라이애시를 시멘트의 대체 재료로 사용하고, 급냉 전기로 산화슬래그를 천연 잔골재의 대체 재료로 사용하여 개발된 저탄소 친환경 PC 박스용 콘크리트의 역학적 성능 및 내구성을 평가한 것으로, 결론은 다음과 같다.

- 1) 사전 예비배합을 통하여 선정된 목표 슬럼프 150±25 mm 및 공기량 4.5±1.5 %를 만족하는 배합시험 결과, 설계기준강도 35MPa 확보를 위한 전체 결합재 사용량이 시멘트 단독사용 조건대비 분체 50 % 치환 사용조건은 14 % 증가, 분체 65 % 치환 사용조건은 17 % 증가하는 것으로 나타났다.
- 2) 분체량 저감을 위해 시멘트 및 혼화재(고로슬래그 미분말 및 플라이애시)의 수화반응을 활성화 시키는 자극제를 사용한 결과, 전체 결합재 사용량은 시멘트 단독사용 조건 대비 자극제 첨가 조건이 6 ~ 8 % 증가하는 것으로 나타났으며, 자극제 무첨가 조건 대비 결합재가 크게 감소하는 효과를 나타냈다.
- 3) 급속시공을 위한 프리캐스트 콘크리트 기술을 적용하기 위해 증기양생을 실시한 저탄소 친환경 PC 박스용 콘크리트의 재령 1일 압축강도는 모든 조건에서 설계기준강도 35MPa 의 90 % 이상 강도 발현하는 것으로 나타났으며, 재령 7일 및 28일 압축강도는 모든 조건에서 설계기준강도 35MPa 을 만족하는 것으로 나타났다.
- 4) 소요의 물성 및 설계기준강도 35MPa 을 만족하는 범위에서 분체 50 % 치환조건 및 분체 65 % 치환조건의 경우 시멘트 단독사용 조건보다 염소이온 침투성 및 확산계수가 낮게 나타 내구성능이 더 우수한 것으로 나타났으며, 이러한 결과는 W/B 저감과 플라이애시 및 고로슬래그 미분말 사용에 의한 포졸란 반응과 잠재수경성 반응효과에 따른 것으로 판단된다.
- 5) 분체 50 % 치환 조건의 경우, 시멘트 단독사용 조건과 유사하게 나타났으며, 분체 65 % 치환조건 및 자극제 사용조건의 경우 시멘트 단독사용 조건에 비해 탄산화저항성은 다소 불리한 것으로 판단된다. 이러한 결과는 탄산화저항성에 불리한 고로슬래그의 치환율이 높고 OPC의 사용량이 상대적으로 적기 때문인 것으로 판단된다.
- 6) 분체 치환조건 및 자극제 사용조건이 시멘트 단독사용 조건보다 동결융해 저항성 및 화학저항성이 우수한 것으로 나타났으며, 이러한 결과는 고로슬래그 미분말 및 플라이애시의 사용으로 시멘트 단독사용 조건보다 콘크리트 내부가 수밀성이 우수

하고 치밀한 경화구조를 가지고 있는 것으로 판단된다.

- 7) 밀도가 높은 급냉 전기로산화슬래그를 사용함에도 불구하고 많은 분체량 및 혼화재료(고로슬래그 미분말 및 플라이애시)의 사용으로 점성이 증가하여 모든 배합조건에서 재료분리 현상은 발생하지 않았다.

이상의 결과를 통하여 산업부산물을 시멘트 및 잔골재 대체 재료로 사용하여 저탄소 친환경 PC 박스용 콘크리트를 개발할 경우, 공기단축 가능으로 건설비용을 절감시키고 시멘트 제조시 배출되는 이산화탄소 및 환경부하를 저감할 수 있을 것으로 기대된다.

References

- [1] NT BUILD 492. Concrete, Mortar and Cement Based Repair Materials : Chloride Migratio Coefficient from Non-Steday-staed Migration Experiments, Nordtest, 1999.
- [2] ASTM C 267. Standard Test Method for Resistance of Mortars, Graouts, and Monolithic Surfacing and Polymer Concrete, ASTM, West Conshohocken, 2001.
- [3] ASTM C 1610. Standard Test Method for Static Segregation of Self-Consolidating Concrete Using Column Technique, ASTM, West Conshohocken, 2006.
- [4] ASTM C 457. Standard Test Method for Microscopical Determination of Parameters of the Air-Void System in Hardened Concrete, ASTM, West Conshohocken, 2012.
- [5] <http://www.edp.or.kr/lci/co2.asp>

고 태 훈(Tae-Hoon Koh)

[정회원]



- 1998년 2월 : 한양대학교 대학원 토목공학과 (공학석사)
- 2008년 8월 : 미국 Purdue Univ. School of Civil Eng. (공학박사)
- 1998년 4월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 책임연구원

<관심분야>
재료공학, 콘크리트양생

하 민 국(Min-Kook Ha)

[정회원]



- 2013년 8월 : 국민대학교 대학원
건설시스템공학과 (공학석사)
- 2014년 11월 ~ 현재 : 한국철도기
술연구원 연구원

<관심분야>

재료공학, 콘크리트양생

정 호 진(Ho-Jin Jung)

[정회원]



- 2000년 8월 : 인하대학교 공학대학
원 건축공학과 (공학석사)
- 2000년 11월~ 현재 : 한국에스지
에스 건설시험연구원 콘크리트연구
팀 재직중
- 2013년 3월 ~ 현재 : 공주대학교
일반대학원 건설환경공학과 박사재
학중

<관심분야>

배합설계, 내구성, 보수보강