

고로슬래그 미분말을 혼입한 콜드조인트 콘크리트의 염화물 확산계수

오경석¹, 문진만², 권성준^{3*}

Chloride Diffusion Coefficients in Cold Joint Concrete with GGBFS

Kyeong-Seok Oh¹, Jin-Man Mun², Seung-Jun Kwon^{3*}

Abstract: Among the deteriorating agents, chloride ion is reported to be one of the most harmful ions due to its rapid diffusion and direct effect on steel corrosion. Cold joint which occurs in mass concrete placing is vulnerable to shear resistance and more severe deterioration. The paper presents a quantitative evaluation of chloride diffusion coefficient in OPC(Ordinary Portland Cement) and GGBFS(Ground Granulated Blast Furnace Slag) concrete containing cold joint. GGBFS concrete shows $6.6 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{sec}$ which is almost 30% level of OPC concrete results and the trend is repeated in the case of cold joint concrete. Compared with OPC concrete, GGBFS concrete is evaluated to have better resistance to chloride penetration, showing 0.30 times of chloride diffusion coefficient in concrete without cold joint 0.39 times with cold joint, respectively.

Keywords: Accelerated chloride diffusion coefficient, Cold joint, GGBFS, OPC

1. 서 론

콘크리트에 매립된 철근은 강알칼리성으로 보호되며 이는 철근에 부동태피막을 형성하여 부식을 방지하게 된다. 하지만 콘크리트가 열화환경에 장기간 노출될 경우 콘크리트 내부에 유해이온이 침투하게 되며, 부동태피막이 손실되어 철근의 부식이 발생하게 된다(Broomfield, 1997). 철근의 부식을 유발하는 유해이온 중 염화물이온은 해수나 비발대 지역에서 내부에 유입되는데, 확산속도가 빠르므로 철근 부식에 가장 큰 영향을 미치게 된다(Broomfield, 1997; RILEM, 1994). 일반 콘크리트에 대한 염화물 침투해석의 연구는 많이 수행되었으며, 최근들어 공극률 및 포화도와 같은 초기재령 콘크리트거동 모델링을 기초로 한 연구가 꾸준히 수행되고 있다(Maekawa et al., 2003a, b; Song and Kwon, 2009). 또한 균열부와 같은 취약부에 대해 내구성 관련 실험과 해석의 연구도 다양하게 수행되고 있다(Park et al., 2012; Song et al., 2006).

현대에 이르러 콘크리트 구조물의 시공 규모는 점점 증가되고 있으며, 댐과 교량 같은 대규모 구조물의 경우 취약부인

콜드조인트가 발생할 수 있다. 콜드조인트란 이어치기 지연으로 인해 불가피하게 발생하는 시공이음을 나타내며, 압축저항력에는 큰 영향이 없으나 전단력에 취약하고 이 면에 대해 국부적인 열화가 증가하는 것으로 알려져 있다(Park, 2001; JSCE, 2000; ACI, 2001). 콜드조인트는 면처리를 하지 않을 경우 이음부에 국부적으로 열화속도가 증가하게 된다. 콜드조인트를 가진 콘크리트는 탄산화 증가 및 투수 증가에 대해 상당부분 연구가 진행되어 있다(Kwon and Na, 2011; Yokozeki et al., 1998; Kwon et al., 2007; Hyun, 2008). 그러나 국내외시방서에서는 이러한 열화 가중치를 고려하고 있지 않으며 주로 실태조사 결과에 의존하는 내용을 다루고 있다.

콜드조인트가 발생하게 될 경우 콘크리트의 누수 및 박락뿐만 아니라 염화물의 침투가 가속화되어 철근의 부식을 야기한다. 콜드조인트를 방지하기 위해 국내 콘크리트표준시방서에는 이어치기 시간간격을 제한하고 있지만 면처리 불량, 타설시간 지연등으로 콜드조인트는 필연적으로 발생하게 된다. 다른 취약부의 염해 거동과 달리 혼화재의 영향과 콜드조인트를 고려하여 염화물 확산 특성을 평가한 연구는 매우 미약한 수준이다.

본 연구에서는 콜드조인트를 고려한 염화물 거동을 분석하였으며, OPC(Ordinary Portland Cement) 배합 뿐만 아니라 고로슬래그 미분말(GGBFS, Ground Granulated Blast Furnace Slag)을 치환한 배합을 함께 적용하였다. GGBFS는 많은 연구들을 통해 염화물 침투 저항성 개선에 대한 특성이 입증되었다(Leng et al., 2000; Ryu et al., 2012; Lee and Song, 2007;

¹정회원, 한남대학교 건설시스템 공학과 석사과정

²정회원, 한남대학교 건설시스템 공학과 석사

³정회원, 한대학교 건설시스템 공학과 부교수, 교신저자

*Corresponding author: jjuni98@hannam.ac.kr

Civil and Environmental Engineering, Hannam University, 70 Hannam-ro, Daedeok-gu, Daejeon 34430, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2016년 10월 1일까지 학회로 보내주시면 2016년 11월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

Song et al., 2009). GGBFS 특성과 콜드조인트에서 증가되는 염화물 확산특성이 기본적인 강도특성 변화와 함께 본 연구에서 정량적으로 분석될 것이다.

2. 실험계획 및 실험방법

2.1 실험재료 및 배합특성

본 연구에서는 전기영동법에 기초한 촉진염화물 확산실험 방법을 통해 비정상상태의 촉진염화물 확산계수를 평가하였다. 평가를 위해 국내 C사의 1종 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며, 국내 S사의 고로슬래그 미분말을 사용하였다. 조기 강도가 취약한 고로슬래그 미분말의 단점을 개선하기 위해 분말도 6,000 cm²/g 이상으로 사용하거나 알칼리 자극제를 사용하기도 하지만 이는 원가 상승의 원인으로 작용하여 실무에서 크게 적용하지 못하고 있는 실정이다(Ryu et al., 2012).

Table 1 Mix proportions

Case	G _{max} [mm]	Slump [mm]	s/a [%]	W/B [%]	Unit weight: kg/m ³				
					W	Binder		S	G
						C	GGBFS		
OPC	25	180	41.4	60	180	300	-	735	1040
GGBFS						180	120		1020

Table 2 Results of compressive strength

Case		Strength(MPa)			
		1	2	3	Average
28 day	OPC	30.0	29.9	30.2	30.0
	GGBFS	25.1	25.5	24.9	25.2
91 day	OPC	32.9	31.3	32.0	32.1
	GGBFS	33.2	32.9	33.3	33.1

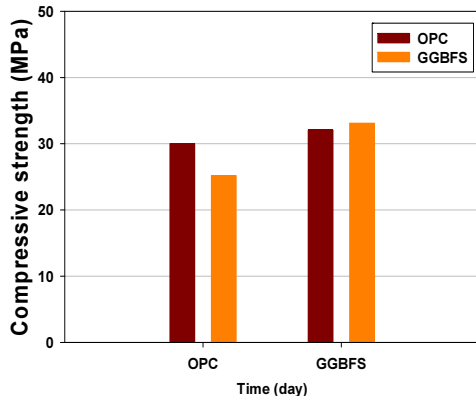


Fig. 1 Results of compressive strength

따라서 본 연구에서는 일반적으로 가장 많이 사용하는 분말도 4,000 cm²/g의 고로슬래그 미분말을 사용하여 연구를 진행하였다. Table 1에는 본 연구에 사용된 배합을 나타내었다.

압축강도 24 MPa, 슬럼프 180 mm, 공기량 4.5%를 기본으로 하는 배합을 적용하였다. GGBFS 혼입에 따른 염화물 거동 변화를 분석하기 위해 OPC를 40% 치환한 배합을 추가로 고려하였으며, 명확한 염화물 거동을 평가하기 위해서 W/B(물-결합재비)를 0.6으로 설정하였다.

Table 2에는 재령 28일, 91일 압축강도 평가 결과를 나타내었으며, Fig. 1에 재령에 따른 압축강도 평균을 도시하였다.

압축강도 평가결과 재령 28일에서는 OPC 콘크리트가 GGBFS 콘크리트에 비해 높은 강도가 평가되었으나 재령 91일에서는 GGBFS의 잠재수경성에 따른 장기강도발현에 의하여 높은 강도가 평가되었다. 이러한 GGBFS 콘크리트의 장기강도 발현특성은 많은 문헌에서 소개되었다(Leng et al., 2000; Lee and Song, 2007; Thomas and Bamforth, 1999).

2.2 콜드조인트를 가진 콘크리트 시편제작

일반 콘크리트와 콜드조인트 콘크리트의 촉진염화물 확산계수 평가를 위해 Ø100 × 200 mm 실린더 몰드를 제작하였다. 콜드조인트 콘크리트의 경우 몰드의 반을 먼저 타설한 뒤 별도의 마감이나 면처리를 하지 않은 상태로 1일간 기건 양생하여 나머지 반을 타설해 콜드조인트를 유도하였다. 완성된 실린더 몰드를 28일간 수중 양생 후 다이아몬드 컷팅기를 이



Fig. 2 Photos for concrete containing cold joint



(a) Sound concrete

(b) Cold joint concrete

Fig. 3 Photos for disk concrete

용해 $\varnothing 100 \times 50$ mm의 디스크콘크리트를 제작하였다. Fig. 2에서는 콜드조인트 콘크리트의 시편제작 사진을, Fig. 3에서는 완성된 디스크 형태의 콘크리트를 나타내었다. 초기재령에서는 염화물 확산시험기간동안 측정값이 수화에 따라 변할 수 있으므로 장기재령인 91일을 기준으로 염화물 특성을 평가하였다.

2.3 촉진염화물 확산실험 방법

본 연구에서는 단기간에 염화물 거동을 평가할 수 있는 촉진염화물 확산계수 평가 방법을 적용하였다. ASTM C 1202 방법을 이용하여 비정상 상태의 염화물 확산계수를 측정하였다. 양극(+)셀에는 0.3M NaOH 수용액, 음극(-)에는 0.5M NaCl 수용액을 적용하여 8시간 동안 전압을 인가하였다. Table 3에는 실험 조건을 나타내었으며, Fig. 4에는 확산셀 모식도를 나타내었다.

8시간 동안 전압 인가 후 시편을 UTM을 이용하여 쪼갬응력을 가하였으며, 단면에 0.1N의 AgNO₃ 수용액을 분무하여

염화물 침투 깊이를 평가하였다(Otsuki et al., 1992). 침투 깊이가 평가 범위는 시편의 양측 10 mm 부분을 제외하고 남은 영역을 5 mm 간격으로 측정하여 평균값을 사용하였다. 평가된 평균 침투 깊이를 바탕으로 식 (1)을 통해 촉진염화물 확산계수를 평가하였으며, Fig. 5에는 침투깊이 측정 범위를 나타내었다(Tang, 1996).

$$D_{rpt} = \frac{RTL}{zFU} \cdot \frac{x_d - \alpha \sqrt{x_d}}{t}$$

$$\alpha = 2 \sqrt{\frac{RTL}{zFU}} \cdot \operatorname{erf}^{-1} \left[1 - \frac{2C_d}{C_0} \right] \quad (1)$$

여기서, D_{rpt} 는 비정상상태에서 촉진염화물 확산계수(m²/sec), R 은 기체상수(8.314 J/mol.K), T 는 절대온도(K), L 은 시편의 두께(m), z 는 이온전자가(1.0), F 는 패러데이상수(96500 J/V.mol), U 는 전위차(V), x_d 는 비색법에 따른 침투깊이(m), t 는 전위차 적용시간(sec), C_d 는 비색법에 의한 반응농도(mol/l), C_0 는 확산셀에서의 염소이온 농도(mol/l)이다.

Table 3 Experimental conditions

Cathode	Anode	Applied Voltage	Thickness	Applied Time
0.5 M NaCl	0.3 M NaOH	30 V	50 mm	8 hr

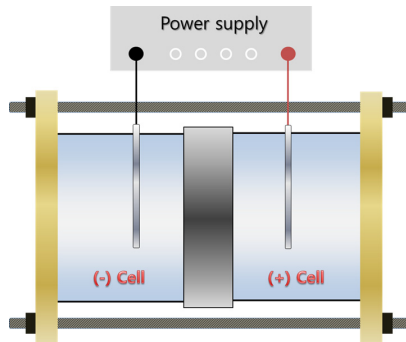


Fig. 4 Schematic of Equipment

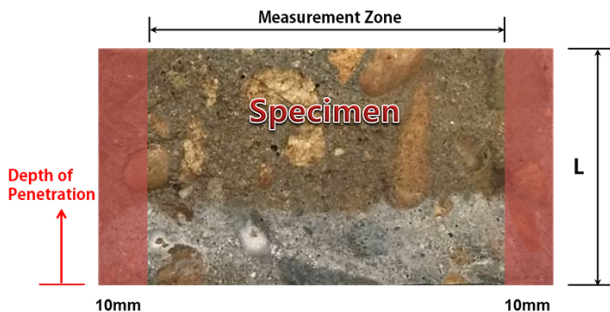


Fig. 5 Penetration depth evaluation area

3. 실험결과

3.1 압축강도 및 인장강도 평가

압축강도의 경우 실린더 시편을 사용하므로 압축강도 측정에 큰 문제가 없었으나 인장강도 측정의 경우 쪼갬인장시험을 적용하였다. 인장재하의 경우, 콜드조인트면의 박락으로 인해 강도 발현이 어려워 30°정도 기울여 평가를 진행하였다.

평가결과 압축재하 영역의 경우 콜드조인트 유·무에 따른 강도의 차이가 크게 발생하지 않았으나 인장재하 영역의 경우 콜드조인트 유·무에 따라 평균 약 67% 수준까지 강도가 감소하는 것으로 나타났다. 이는 콜드조인트면의 완벽하지 못한 일체성을 나타내고 있으며, 물질 이동에서도 열화증가를 간접적으로 나타내고 있다. Fig. 6에는 콜드조인트 콘크리트



Fig. 6 Photo for disk concrete(Tensile)

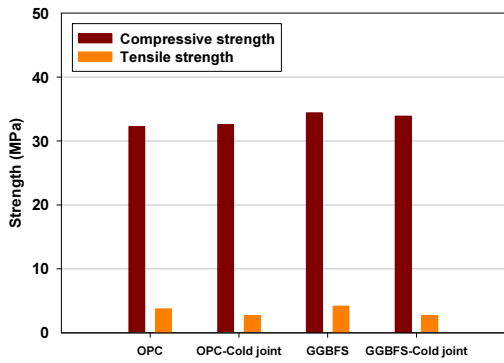


Fig. 7 Results of strength(91 days, disk sample)

의 박락상태를 나타내었으며, Fig. 7에는 강도 평가 결과를 도 시하였다.

3.2 콜드조인트 콘크리트의 염화물 확산특성 평가

본 연구에서는 GGBFS 혼입 및 콜드조인트를 고려하여 염 화물 확산계수를 평가하였다. 시편을 확산셀에 정지한 후 실 리콘을 이용해 밀봉한 후 전압을 인가 하였다. Fig. 8에는 실험 전경을 나타내었다.

실험 후 염화물 침투깊이 측정결과 GGBFS 콘크리트에서 OPC 콘크리트에 비해 침투깊이가 적게 발생한 것을 확인할 수 있었다. 이러한 특성은 잠재수경성에 따른 수밀성 증가와 염화물 흡착량의 증가를 원인으로 생각할 수 있다. 콜드조인트 콘크리트의 경우 역시 GGBFS로 치환한 슬래그 콘크리트 가 일반 콘크리트보다 낮은 침투 깊이를 나타내었으나 두 배 합 모두에서 콜드조인트면에서 염화물 침투가 뚜렷하게 나타 나는 것을 확인할 수 있다. Fig. 9에는 실험 후 건전부 콘크리트 와 콜드조인트 콘크리트의 염화물 침투 깊이를 나타내었다.

OPC 배합의 경우 콜드조인트면에서 상대적으로 깊은 염화 물 침투가 발생하긴 했지만 콜드조인트 주변부에서도 깊은 침 투가 발생하여 실험에 따른 침투방향과 수평방향(Horizontal direction) 침투가 함께 발생한 것으로 예상된다. 반면, 고로슬 래그 미분말을 치환한 배합의 경우 OPC 배합과 비교하여 수 평방향 침투보다는 실험에 따른 직선방향 침투가 뚜렷하게 나 타났다. 이는 고로슬래그 미분말을 치환함에 따라 염화물 침투 저항성능이 크게 개선된 주변부와는 다르게 취약부인 콜드조 인트면을 따라 깊은 염화물 침투가 발생했기 때문이다.

축진염화물 확산계수 평가결과 GGBFS 콘크리트($6.6 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{sec}$)에서 OPC 콘크리트($22.0 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{sec}$)에 비해 약 30% 수준의 낮은 확산계수가 평가 되었다. 이는 고로슬래그 미분 말의 잠재수경성으로 인해 물질이동 경로인 유효공극률의 감소와 수밀성 증가에 따른 원인이며, 재령이 증가함에 따라 이 러한 염화물 거동의 차이는 더욱 현저하게 나타날 것으로 예상

된다. 콜드조인트 콘크리트의 경우 GGBFS 콘크리트($8.6 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{sec}$)에서 OPC 콘크리트($23.7 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{sec}$)에 비해 36%수 준으로 매우 낮은 확산계수가 평가 되었다. 건전부 콘크리트 와 콜드조인트 콘크리트의 확산계수 비교 결과 OPC 배합의 경우 콜드조인트 콘크리트에서 건전부 콘크리트에 비해 약 1.07배 높은 확산계수가 평가 되었으며, GGBFS 콘크리트의 경우, 건전부 콘크리트에 비해 콜드조인트 콘크리트에서 1.30 배 높은 확산계수가 평가되었다. 단순히 콜드조인트와 건전 부의 비를 평가하면 GGBFS에서 큰 증가비가 평가되지만, 실험값을 비교하면 GGBFS 콘크리트가 콜드조인트를 가졌다 하더라도 건전부의 OPC 콘크리트보다 낮은 염화물 확산계수

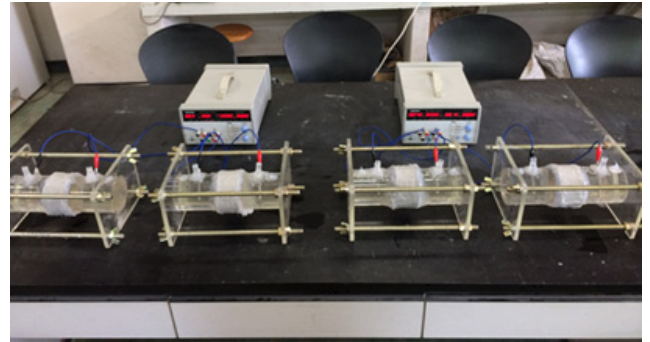


Fig. 8 Photo for experiment view

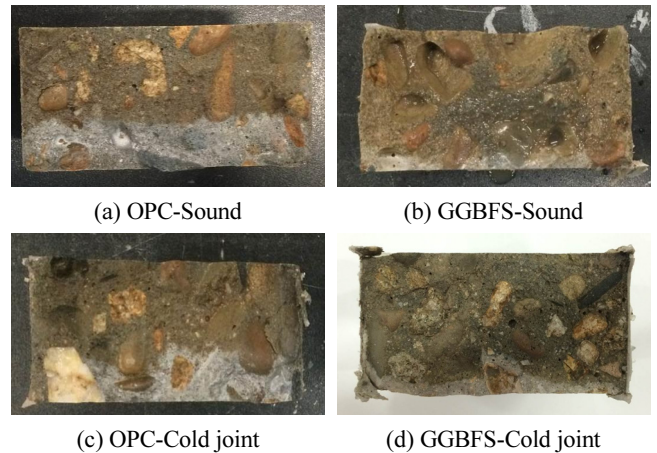


Fig. 9 Photos for depth of chloride penetration

Table 4 Results of chloride diffusion coefficients

	Chloride Diffusion Coefficient ($\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{sec}$)		
	1	2	Average
OPC	22.1	21.9	22.0
GGBFS	6.4	6.7	6.6
OPC-Cold joint	24.6	22.7	23.7
GGBFS-Cold joint	8.4	8.8	8.6

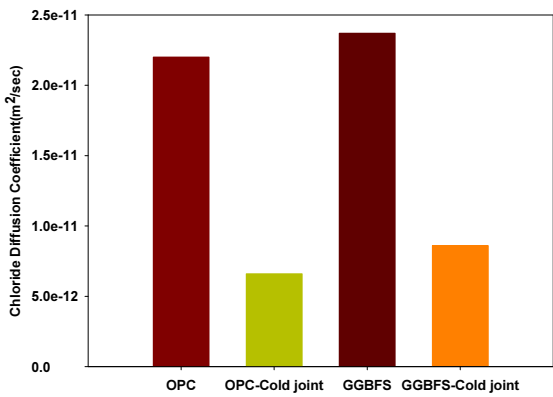


Fig. 10 Results of chloride diffusion coefficients

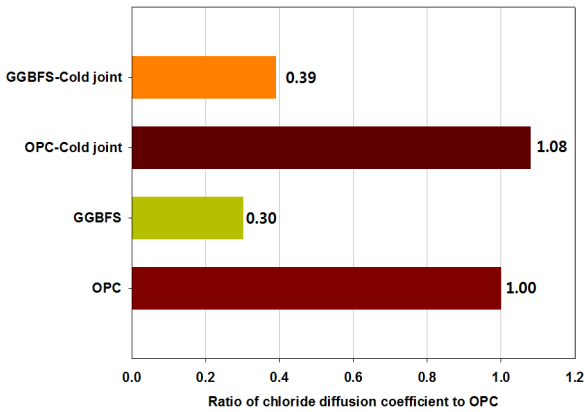


Fig. 11 Change in diffusion ratio to OPC concrete

값을 가진다.

Table 4에는 촉진염화물 확산계수 평가결과를 나타내었으며, Fig. 10에는 평가결과의 평균을 도시하였다. 또한 건전부 OPC 콘크리트를 기준으로 한 변화 비율을 Fig. 11에 나타내었다.

4. 결 론

본 연구에서는 GGBFS를 혼입한 콘크리트와 OPC 콘크리트에 콜드조인트를 유도한 뒤, 염화물 확산계수를 평가하였다. 본 연구에서 도출된 결론은 다음과 같다. 본 연구결과는 보통강도를 가진 콘크리트에 적용할 수 있으며, 고강도 콘크리트의 경우는 균열부 영향이 더욱 커질 수 있으므로 이에 대한 고려가 필요하다. 또한 콜드조인트 면처리 기법에 따라 염화물 거동이 달라지므로 이에 대한 고려가 필요하다.

- 1) 콜드조인트를 가진 콘크리트 시편의 쪼갬인장강도 시험에서 콜드조인트면의 박락에 따른 강도발현 저하가 크게

평가되었으며 콜드조인트를 가진 콘크리트의 열화증가를 간접적으로 평가할 수 있었다.

- 2) GGBFS 콘크리트에서는 $6.6 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{sec}$ 의 확산계수가 측정되었는데, 이는 OPC 콘크리트에 비하여 약 30% 수준의 낮은 확산계수값이다. OPC 콘크리트가 콜드조인트를 가질 때 확산계수는 7% 수준의 확산계수가 증가하여 $23.7 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{sec}$ 의 증가된 확산계수를 나타내었다. GGBFS 콘크리트의 경우 $8.6 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{sec}$ 으로 증가하였는데, 이는 건전부 GGBFS 확산계수에 비하여 1.3배 증가한 값이다. 그러나 이 결과도 OPC 건전부 결과의 0.39배 수준으로 매우 낮은 확산값을 보였으며, GGBFS 콘크리트의 뛰어난 내염해성을 확인할 수 있었다.
- 3) OPC 및 GGBFS 배합 모두 콜드조인트 콘크리트에서 확산계수가 크게 평가되었는데, 내구성 설계에서는 균열부에 대한 열화증가만이 고려되어 있다. 시공이음부와 같은 취약부 역시 내구성 설계에서 추가적으로 고려해야 할 사항이라고 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2015년 대한민국 교육부와 한국연구재단의 일반연구지원사업의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-286 2013R1A1A2060114).

References

ACI 224.3R-95 (2001), *Joints in Concrete Construction*, American Concrete Institute, USA, Reapproved.

ASTM C1202 (1993), *Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration*, Annual Book of American Society for Testing Materials Standards.

Broomfield, J. P. (1997), *Corrosion of Steel in Concrete: Understanding, Investigation and Repair*, E&FN, London.

Hyun, T.-Y., Kim, C.-Y., and Kim, J.-K. (2008), Permeability of Cracked Concrete as a Function of Hydraulic Pressure and Crack Width, *Journal of The Korea Concrete institute*, 20(3), 291-298.

JSCE (2000), *Concrete Cold Joint Problems and Countermeasures*, Concrete Library, 103.

Kwon, S.-J., and Na, U.-J. (2011), Prediction of Durability for RC Columns with Crack and Joint under Carbonation Based on Probabilistic Approach, *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 5(1), 11-18.

Kwon, S.-J., Park, S.-S., Nam, S. H., and Cho, H. J. (2007), Study on Survey of Carbonation for Sound, Cracked, and Joint Concrete in RC Column in Metropolitan City, *Journal of the Korea Structure Maintenance Institute*, 11(3), 116-122.

- Lee, S. S., and Song, H. Y. (2007), An Experimental Study on the Durability and Mechanical Properties of High Performance Concrete Using Blast-Furnace Slag Powder, *Architectural institute of Korea*, 23(11), 119-126.
- Leng, F., Feng, N., and Lu, X. (2000), An Experiment Study on the Properties of Resistance to Diffusion of Chloride Ions of Fly Ash and Blast Furnace Slag Concrete, *Cement and Concrete Research*, 30(6), 989-992.
- Maekawa, K., Ishida, T., and Kishi, T. (2003a), Multi-Scale Modeling of Concrete Performance, *Journal of Advanced Concrete Technology*, 1(2), 91-126.
- Maekawa, K., Ishida, T., and Kishi, T. (2003b), *Multi-Scale Modeling of Structural Concrete*, Tylor&Francis, London and Newyork, 1st Edition, 291-352.
- Otsuki, N., Nagtataki, S., and Nakashita, K. (1992), Evaluation of AgNO₃ Solution Spray Method for Measurement of Chloride Penetration into Hardened Cementitious Matrix Materials, *Construction and Building Materials*, 7(4), 195-201.
- Park, M. S. (2001), *Study on Control of Carbonation at Cold Joint of Reinforced Concrete Structures*, Master's Thesis, Yonsei University.
- Park, S. S., Kwon, S.-J., and Jung, S. H. (2012), Analysis Technique for Chloride Penetration in Cracked Concrete Using Equivalent Diffusion and Permeation, *Construction and Building Materials*, 29(2), 183-192.
- RILEM (1994), *Durability Design of Concrete Structures*, Report of RILEM Technical Committee 130-CSL, E&FN, 28-52.
- Ryu, D. W., Kim, W. J., Yang, W.H., Yu, J. H., and Ko, J. W. (2012), An Experimental Study on the Freezing-Thawing and Chloride Resistance of Concrete Using High Volumes of GGBS, *The Korea Institute of Building Construction*, 12(3), 315-322.
- Song, H. W., Lee, C. H., and Lee, K. C. (2009), A Study on Corrosion Potential of Cracked Concrete Beam According to Corrosion Resistance Assessment, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 13(1), 97-105 (in Korean).
- Song, H.-W., and Kwon, S.-J. (2009), Evaluation of Chloride Penetration in High Performance Concrete Using Neural Network Algorithm and Micro Pore Structure, *Cement and Concrete Research*, 39(9), 814-824.
- Song, H.-W., Pack, S. W., Lee, C. H., and Kwon, S.-J. (2006), Service Life Prediction of Concrete Structures under Marine Environment Considering Coupled Deterioration, *Journal of Restoration Buildings and Monuments*, 1(2), 265-284.
- Tang, L. (1996), Electrically Accelerated Methods for Determining Chloride Diffusivity in Concrete-Current Development, *Magazine of Concrete Research*, 48(176), 173-179.
- Thomas, M. D. A., and Bamforth, P. B. (1999), Modeling Chloride Diffusion in Concrete: Effect of Fly Ash and Slag, *Cement and Concrete Research*, 29(4), 487-495.
- Yokozeki, K., Okada, K., Tsutsumi, T., and Watanabe, K. (1998), Prediction of the Service Life of RC with Crack Exposed to Chloride Attack, *Journal of Symposium: Rehabilitation of Concrete Structure*, 10, 1-6.

Received : 04/07/2016

Revised : 05/09/2016

Accepted : 05/12/2016

요 지 : 철근 콘크리트 구조물의 철근에 대한 부식을 발생시키는 다양한 유해 열화인자 중 염화물 이온(Cl-)은 침투로 인한 확산속도가 빠르고, 철근에 직접적으로 관여하여 부식을 야기시켜 매우 중요한 열화원인이다. 대형 콘크리트 구조물의 타설에서 불가피하게 발생하는 콜드조인트는 전단력에 취약하여, 이는 내구적 열화에 대한 피해를 증가시키는 경향을 보인다. 본 연구에서는 콜드조인트를 가진 OPC(Ordinary Portland Cement) 콘크리트와 GGBFS(Ground Granulated Blast Furnace Slag) 염화물 촉진 실험으로 염화물 확산계수를 정량적으로 평가하였다. GGBFS 콘크리트에서는 $6.6 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{sec}$ 의 확산계수가 측정되었는데, 이는 OPC 콘크리트에 비하여 약 30% 수준의 낮은 확산계수값을 나타내었으며, 콜드조인트를 가진 콘크리트에서도 비슷한 경향이 관측되었다. OPC 건전부 콘크리트에 비하여 GGBFS 콘크리트의 염화물 확산계수는 건전부에서 0.30배, 콜드조인트부에서 0.39배 정도의 우수한 염해 저항성을 나타내었다.

핵심용어 : 촉진 염화물 확산계수, 콜드조인트, 고로슬래그 미분말, 보통 포틀랜드 시멘트
