

하중조건과 콜드조인트를 고려한 1년 양생된 OPC 콘크리트의 염화물 확산계수 평가

오경석¹, 권성준^{2*}

Chloride Diffusion Coefficient Evaluation in 1 Year-Cured OPC Concrete under Loading Conditions and Cold Joint

Kyeong-Seok Oh¹, Seung-Jun Kwon^{2*}

Abstract: Cold joint caused by construction delay is vulnerable to shear stress and it allows more rapid chloride penetration and diffusion. In the paper, investigation of chloride diffusion coefficient is performed for 1-year cured concrete considering compressive and tensile loading level and cold joint. The results are compared with the previous results in 91-day cured concrete. In the 1-year cured concrete without loading, 10.7% and 10.5% of diffusion reduction are evaluated for those in 91-day cured concrete, respectively. The reduction ratios are almost similar however the result in cold joint concrete shows much higher values. The results in 1-year cured concrete under 30% and 60% of compressive loading show reduction of chloride diffusion by 10.9% and 5.8% compared with 91-day cured results, which is caused by steady hydration of cement particles, so called, time effect. In the case of tensile loading, the differences in results are not significant regardless of time effect and cold joint since micro cracks which is weak point of concrete is much dominant despite of long term curing.

Keywords: Durability, Chloride diffusion coefficient, Tensile stress, Compressive stress, Cold joint, Aging effect

1. 서 론

콘크리트는 내구성과 뛰어난 공학적 성능으로 물 다음으로 많이 쓰이는 건설 재료이다. 그러나 염해 환경에 노출된 RC (Reinforced Concrete) 구조물은 염해 이온의 침투 및 확산에 의해 매립된 철근의 부동태 피막(Passive layer)이 파괴되고 철근의 부식이 발생한다(Broomfield, 1997). 부식이 시작된 철근은 3~5배의 체적 팽창이 발생하고 콘크리트 내부의 인장응력이 발생하여 균열이 발생하게 된다. 이러한 균열은 사용성의 저하뿐 아니라, 더 많은 염화물 유입을 야기하고 구조적인 성능저하로 진전된다(Mangat and Gurusamy, 1987).

1990년대 초부터 콘크리트내의 염화물 거동을 평가하기 위해 겔보기 확산계수 및 신타조사를 기반으로 한 많은 연구가 진행되었다(RILEM, 1994; Thomas and Bentz, 2002). 겔보기 확산계수를 통한 염화물 거동 연구는 장기간 침지에 따라 시간이 많이 소요되어 장기 연구 기간이 확보되어야 한다. 최

근 들어 비정상상태에서의 전기영동법을 기반으로 한 촉진염화물 확산 실험을 통해 염화물 거동을 평가하려는 연구들이 진행되어 왔으며(Tang and Nilsson, 1992b; Moon et al., 2001; Song et al., 2005), 이를 고려하여 시간의존성 확산계수를 이용한 염화물 침투해석기법을 제안하는 연구도 활발하게 진행되었다(Kwon et al., 2013). 이러한 연구는 주로 초기재령 거동 모델링과 같이 연계되어 공극률, 수화도, 포화도 등과 같은 공학적 성능을 고려한 연성해석으로 발전하였다.

콘크리트는 건전부 이외에도 균열부, 타설이음부와 같이 취약부가 발생하게 되고 항상 내부 및 외부의 응력에 노출되어 있다. 콜드조인트는 대규모 구조물 시공 시 기술의 제한적 문제와 현장 여건 및 환경에 따라 불가피하게 발생하는 시공 이음을 의미한다. 콜드조인트 면은 압축응력에 대해서는 비교적 안전하게 저항할 수 있지만, 전단력에 매우 취약하며, 불연속면에 열화인자들의 침투하기 용이하여 내구성 저하를 일으키는 것으로 알려져 있다(JSCE, 2000; ACI, 2001). 시공이음부의 일체화를 위하여 콘크리트 표준시방서에 이어치기 시간의 간격을 제한하도록 제시되어 있지만, 면처리 불량과 타설시간 지연 등에 따라 콜드 조인트는 쉽게 발생한다.

콘크리트의 균열부의 염화물 거동에 대해서는 많은 연구가 진행되어 왔으나(Gowripalan et al., 2000; Kwon et al., 2007; Kwon et al., 2009, Park et al., 2012), 콜드조인트를 가진 콘크리트의 염

¹정희원, 한남대학교 건설시스템 공학과, 공학 석사

²정희원, 한남대학교 건설시스템 공학과, 부교수, 교신저자

*Corresponding author: jjuni98@hannam.ac.kr

Department of Civil and Environmental Engineering, Hannam University, Daejeon, 34430, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2017년 10월 1일까지 학회로 보내주시면 2017년 11월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

해 증가에 대한 영향은 주로 실태조사 결과에 의존하고 있다. 또한 다양한 응력에 노출되어 있는 콜드조인트 콘크리트의 염화물 거동에 대한 연구는 매우 제한적이며, 콘크리트에 하중과 콜드조인트의 여부에 따른 염화물 거동에 대한 연구는 거의 없는 실정이다. 또한 시간 의존성을 가지는 콘크리트의 경우, 하중 영향 및 콜드조인트 영향이 재령의 증가에 따라 염화물 확산계수에 어떠한 영향을 미치는 지에 대한 연구 역시 사례를 찾기 어렵다.

본 연구에서는 인장 및 압축 하중을 콜드조인트 콘크리트 시편에 인가하였으며, 장기침지로 1년 양생된 콘크리트 시편을 대상으로 시간에 따른 확산계수의 감소를 분석하였다. 이를 위해 물-시멘트비 0.6을 가진 OPC(Ordinary Portland Cement) 콘크리트 배합을 사용하였으며, 직육면체 시편과 원주형 시편 대상으로 파괴 압축 및 인장응력에 대해 30%와 60% 수준을 각각 유도하였다. 또한 동일 배합으로 선행 연구된 91일 재령 실험결과와 비교하여 염화물 확산계수의 변화를 정량적으로 분석하였다.

2. 실험방법

2.1 콘크리트 배합특성

연구에 사용된 콘크리트의 배합은 압축강도 24 MPa, 물-시멘트비(w/c: Water to Cement) 60%와 슬럼프 180 mm를 적용하였다. 시멘트는 국내 C사의 제품을 이용하였으며, Table 1에서는 본 실험에 사용된 배합표를 나타내고 있다. 또한, Tables 2와 3에서는 사용된 시멘트의 물리/화학적 특성과 골재의 특성을 나타내고 있다.

Table 1 Mix proportions for OPC

W/C (%)	S/a (%)	Gmax (mm)	Slump (mm)	Unit weight(kg/m ³)			
				W	C	S	G
60.0	41.4	25	180	180	300	735	1040

Table 2 Chemical and physical compositions of OPC

SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO(%)	MgO(%)
21.0	4.29	3.35	62.10	2.27
Physical properties				
SO ₃ (%)	Ig. loss(%)	Specific gravity		Blaine(cm ² /g)
2.35	2.73	3.16		3,214

Table 3 Physical properties of sand and coarse aggregate

Items Types	G _{max} (mm)	Specific gravity	Absorption (%)	F. M.
Sand	-	2.60	1.00	2.70
Aggregate	25	2.62	0.78	6.78

2.2 시편제작

쪼갠인장시험에 의한 인장응력을 유도하기 위해서 Ø 100×200 mm 실린더 몰드를 제조하였으며, 압축응력을 인가하기 위해 100×100×650 mm 빔 몰드를 제작하였다. 각각의 몰드의 반을 먼저 타설한 뒤, 24시간 기건 양생 후 남은 반을 타설하여 콜드조인트 면을 유도하였다. 염화물 촉진실험을 위해 재령 28일 이후 50mm의 두께로 시편을 절단하였으며, 이후 재령 1년까지 수중양생을 실시하였다.

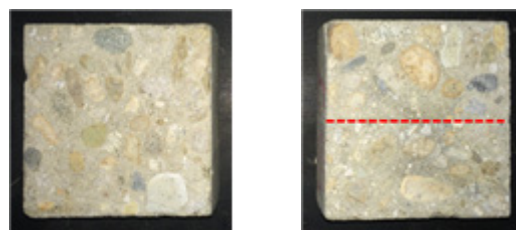
1년 수중양생의 이유는 장기 양생된 OPC 콘크리트의 경우 측정시간 동안 수화반응 및 공극률 감소수준이 매우 낮으며, 완전히 경화된 상태를 가정하기 위하여 매우 긴 양생기간을 고려하였다. 또한 이 결과는 선행 연구된 91일 양생한 뒤의 시험결과와 비교하였다. Figs. 1과 2는 압축 및 인장응력 재하용 콘크리트 시편을 나타낸다.

2.3 하중재하 방법

하중재하 조건에서의 콘크리트 염화물 확산계수를 평가하기 위해 하중을 재하할 수 있는 별도의 강제 프레임을 제작하였고, UTM 장비를 이용하여 하중을 인가하였다. 파괴하중 대비 도입하중에 대한 비율은 식 (1)과 같다.

$$R = \frac{P_i}{P_c} \times 100 \quad (1)$$

여기서, R은 압축 및 인장력에 대한 하중비(%), P_i는 재하된 하중(kN), P_c는 압축 및 인장력에 대한 파괴하중(kN)을 나



(a) Normal concrete (b) Cold joint concrete

Fig. 1 Concrete sample for compressive stress



(a) Normal concrete (b) Cold joint concrete

Fig. 2 Concrete sample for tensile stress

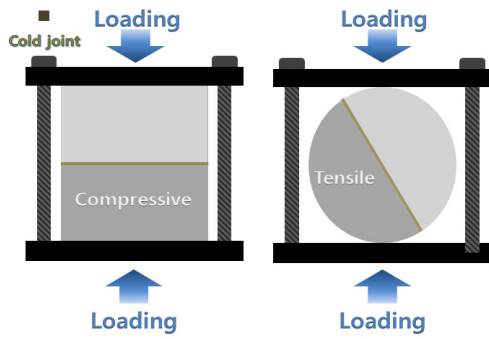
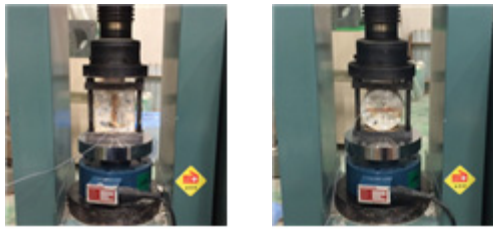


Fig. 3 Schematic diagram for loading frame(compressive and tensile stress)



(a) Compressive loading (b) Tensile loading

Fig. 4 Photos of inducing loads

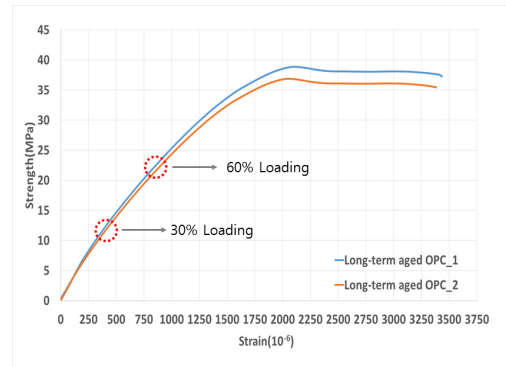
타낸다. 또한, 인장응력 유도시 콜드조인트의 취약한 박락으로 인하여 정확한 강도의 평가가 어려워 시편을 약 30° 정도 기울여 하중을 재하하였다. Figs. 3과 4에는 강제 프레임 모식도와 하중재하 전경을 나타내었다.

하중재하 여건상 파괴하중의 30%, 60%의 조건을 정확히 인가하고 시험 기간 동안 유지하는 것은 어려운 일이다. 기준이 되는 시편을 사용하여 각 조건 별 응력-변형률 그래프를 작성한 뒤 목표하중에서 $\pm 5\%$ 오차수준으로 하중을 재하 하였다. 소요의 하중을 재하한 뒤, 프레임을 결착시킨 후 하중을 제하(Unloading)하게 되면 탄성회복이 발생한다. 또한 추가적인 강제 프레임의 릴렉세이션에 의한 하중 손실이 발생할 수 있다. 따라서 프레임의 축에 게이지를 부착하여 탄성회복과 릴렉세이션에 의한 변형률 손실을 6시간 동안 관측하였다. Fig. 5(a)에는 하중을 받는 콘크리트의 응력-변형률도를 나타내며, Fig. 5(b)는 하중 제하후의 변형률 변화를 나타내고 있다.

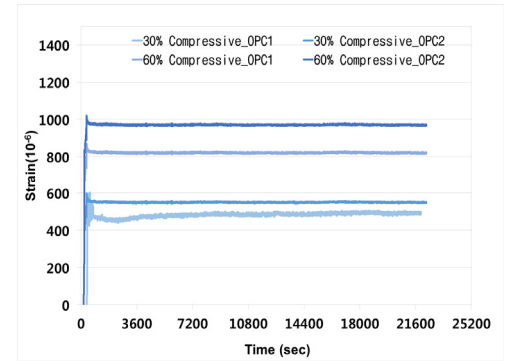
Fig. 5(a)에서 알 수 있듯이 일반 콘크리트의 압축력 30% 하중 인가수준은 500~600 μ 변형률 수준을, 60% 하중 인가수준은 800~900 μ 변형률 수준을 나타내었다. 또한 Fig. 5(b)에서 알 수 있듯이 염화물 확산계수 실험시간인 6시간 동안 응력 손실은 거의 없는 것으로 평가되었다.

2.4 염화물 확산계수 평가

하중조건을 고려한 배합별 염화물 확산계수를 평가하기 위



(a) Stress and strain curve for reference sample



(b) Strain variation during inducing loading

Fig. 5 Stress and strain variations in the test

Table 4 Accelerated chloride test condition

Cathode	Anode	Applied voltage	Thickness	Applied time
0.5 M NaCl	0.3 M NaOH	30 V	50 mm	6 hours

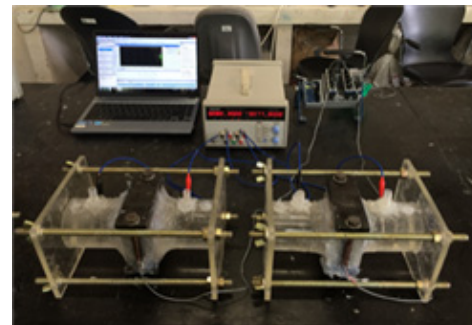


Fig. 6 Photos for RCPT(rapid chloride penetration test)

해 ASTM C 1202를 참고한 확산셀을 제작하여 촉진염화물 확산실험을 수행하였다(ASTM C 1202; Tang and Nilsson, 1992). Table 4에는 촉진염화물 확산실험에 대한 조건을 나타내었으며, Fig. 6에서는 실험사진을 나타내고 있다.

Tang이 제안한 비정상상태의 촉진염화물 확산실험은 일반

적으로 8시간을 인가하지만(Tang and Nilsson, 1992). 본 연구에서는 하중조건을 고려할 경우 발생될 수 있는 미세균열과 콜드조인트면의 지나친 염화물 침투 방지를 위해 동일 조건에서 6시간의 전압을 인가하여 염화물 확산계수를 평가하였다. 촉진염화물 실험 완료 후 시편을 할렬하여, 할렬된 콘크리트면에 0.1 N AgNO₃ 수용액을 분무하여 염화물 침투 깊이를 측정하였다. Tang's method는 전기적 이동에 따른 자유 염화물 이온의 확산을 고려할 수 있으므로 비정상상태의 확산계수로 많이 사용되고 있다. 확산계수 평가는 식 (2)와 (3)을 사용하였다(Tang and Nilsson, 1992).

$$D_{r_{cpt}} = \frac{RTL}{zFU} \cdot \frac{x_d - \alpha \sqrt{x_d}}{t} \quad (2)$$

$$\alpha = 2 \sqrt{\frac{RTL}{zFU}} \cdot \operatorname{erf}^{-1} \left[1 - \frac{2C_d}{C_0} \right] \quad (3)$$

여기서, $D_{r_{cpt}}$ 는 비정상상태에서 구한 전위차 촉진 염화물 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(96,500 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)를 나타낸다.

3. 염화물 확산계수 분석

3.1 압축 및 인장강도 평가

압축강도와 인장강도는 KS F 2404 및 KS F 2423에 준하여

Table 5 Result of Compressive and tensile strength

Case	Strength(MPa)			
	1	2	Average	
Compressive strength	91_O*	32.6	31.9	32.3
	91_OJ*	32.3	32.9	32.6
	365_O	36.9	37.9	37.4
	365_OJ	35.8	36.6	36.2
Tensile strength	91_O*	3.7	4.0	3.9
	91_OJ*	2.6	2.8	2.7
	365_O	3.8	4.2	4.0
	365_OJ	2.7	2.8	2.8

O: OPC, OJ: Cold joint concrete

*: Previous result(Mun, 2016)

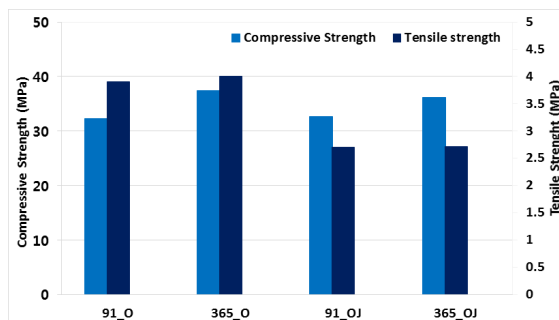


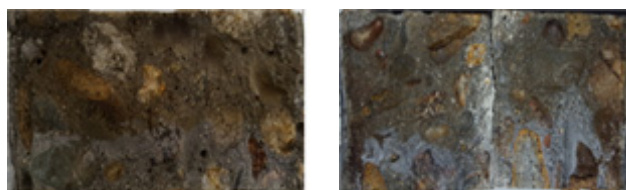
Fig. 7 Compressive and tensile strength(91 days and 365 days)

평가하였다. 압축강도 및 인장강도 평가는 선행연구인 91일 재령(Mun, 2016)과 365일 재령을 같이 Table 5와 Fig. 7에 나타내었다. 본 논문에서 쓰이는 O, OJ는 각각 OPC와 OPC Cold joint를 나타내며 숫자는 양생 일수를 나타낸다.

압축 및 인장강도를 평가한 결과 365일 수중 양생된 콘크리트의 지속적인 수화반응으로 인해 강도가 증가하였는데, 91일 대비 일반콘크리트에서는 15.8%의 증가와 콜드조인트 조건에서는 11.0%의 증가를 보였다. 또한 인장강도는 일반콘크리트에서는 2.6%를 콜드조인트 조건에서는 3.7%의 증가를 나타내었다. 재령의 증가에 따른 강도 증가는 초기재령에 비하여 매우 낮은 수준이지만, 수화물의 지속적인 생성과 공극률 감소로 인해 완만한 강도증가를 나타내고 있다(Choi et al., 2015).

3.2 하중을 고려하지 않은 경우의 염화물 확산계수 평가

하중조건을 고려하지 않은 조건의 염화물 침투 사진은 Fig. 8



(a) OPC

(b) OPC Cold joint

Fig. 8 Photos for depth of penetration(control)

Table 6 Results of chloride diffusion coefficients(normal condition)

Case	Chloride diffusion coefficient($\times 10^{-12}$ m ² /sec)		
	1	2	Average
91_O*	22.1	21.9	22.0
365_O	19.7	19.6	19.6
91_OJ*	24.6	22.7	23.7
365_OJ	21.4	21.0	21.2

O: OPC, OJ: Cold joint concrete

*: Previous result (Mun, 2016)

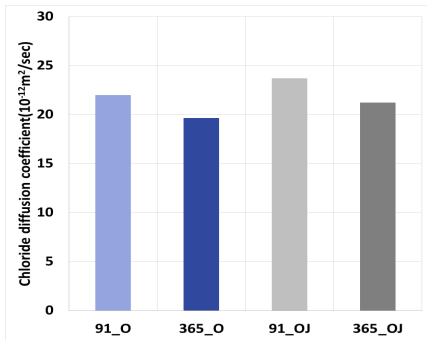


Fig. 9 Comparison of diffusion coefficient with age effect

에 도시하였다. 선행연구인 91일 재령과 본 연구 결과인 365일 재령 염화물 확산계수는 Table 6과 Fig. 9에 나타내었다 (Mun, 2016).

선행연구인 91일 재령과 염화물 확산계수 비교결과 365일 재령 일반 콘크리트는 $19.7 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{sec}$ 로 평가되었으며, 이는 91일 재령보다 10.7% 낮게 평가되었다. 또한, 365일 재령 콜드조인트 콘크리트에서는 $21.2 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{sec}$ 로 평가되었으며, 이는 91일 재령보다 10.5% 낮은 염화물 확산계수이다. 91일과 365일 재령 모두 콜드조인트 콘크리트가 일반 콘크리트보다 염화물 확산계수가 높아 침투에 더욱 취약함을 나타내었고, 91일 재령과 비교한 경우는 건전부와 비슷한 수준을 나타내었다. 이는 장기재령을 거친 콘크리트라 하더라도 콜드조인트 콘크리트는 지속적으로 염화물 침투에 취약함을 나타낸다.

3.3 하중을 고려한 경우의 염화물 확산계수 평가

3.3.1 압축응력 조건에서의 염화물 확산계수 평가

압축재하영역을 고려한 콜드조인트 유·무에 따른 염화물 침투 깊이의 차이를 비교하기 위해 축진염화물확산실험을 실

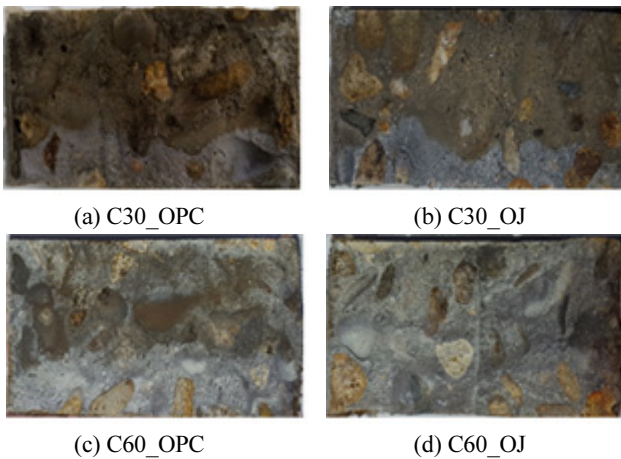


Fig. 10 Photos for depth of penetration(Compressive 30%, 60%)

Table 7 Results of chloride diffusion coefficients(Compressive)

Load	Case	Chloride Diffusion Coefficient ($\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{sec}$)		
		1	2	Average
Compressive 30%	91_O*	20.0	21.5	20.8
	365_O	17.8	19.6	18.7
	91_OJ*	38.3	37.4	37.9
	365_OJ	30.7	27.1	28.9
Compressive 60%	91_O*	29.2	29.8	29.5
	365_O	21.8	24.4	23.1
	91_OJ*	43.0	41.4	42.2
	365_OJ	34.3	34.1	34.2

O: OPC, OJ: Cold joint concrete

*: Previous result(Mun, 2016)

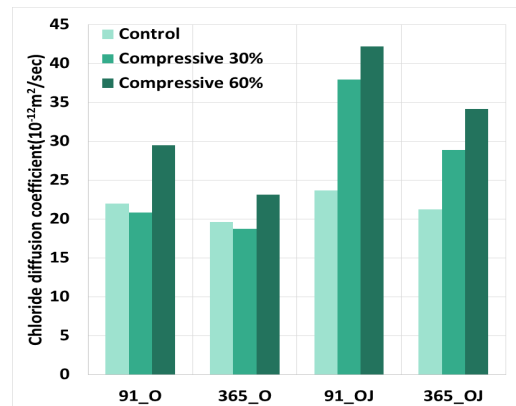


Fig. 11 Chloride diffusion coefficient considering compressive stress level(91days and 365days)

행하였으며, 365일 재령 염화물 침투 사진은 Fig. 10에 도시하였다. 또한, 재령에 따른 염화물 확산계수의 차이를 비교하기 위해 재령 91일과 365일 확산계수를 Table 7과 Fig. 11에 나타내었다(Mun, 2016).

압축재하영역에 대한 염화물 확산계수 평가결과 지속적인 양생의 영향으로 재령 91일 보다 365일 염화물 확산계수에서 모두 낮은 수치로 평가되었다. 또한 건전부 압축력 30%의 경우 91일 재령과 마찬가지로 염화물 확산계수는 기준 콘크리트보다 낮게 평가되었다. 이는 하중 재하에 따른 공극압밀의 영향으로 투기성 및 투수성 시험 결과와 비슷한 경향을 나타낸다(Kermani, 1991; Choi et al., 2015; Kim et al., 2009).

Table 6에 제시된 각 재령의 하중이 없는 결과를 기준으로 한 응력변화에 대한 확산계수의 변화비는 Table 8과 같다.

압축력을 재하할수록 60% 압축영역에서 확산계수의 증가비는 크게 평가되었다. 건전부보다 콜드조인트 콘크리트에서 증가율이 비교적 크게 증가함을 보였다. 특히 압축영역 30%

Table 8 Result of increase ratio according to age and compressive level

Case	Chloride diffusion coefficient increase ratio(%)	
	Compressive 30%	Compressive 60%
91_O*	-5.45	34.09
365_O	-5.08	17.26
91_OJ*	59.92	78.06
365_OJ	36.32	61.32

O: OPC, OJ: Cold joint concrete
*: Previous result (Mun, 2016)

수준에서 재령의 증가에 상관없이 공극의 압밀에 따라 확산계수는 모두 감소하였다. 91일 조건에서 30% 압축하중에서는 -5.45%~34.09%의 확산계수 증가를 60% 압축하중에서는 59.92%~78.06%의 확산계수 증가를 나타내었다. 그러나 이러한 증가율은 재령이 365일로 증가함에 따라 30% 영역에서는 -5.08%~17.26%로, 60% 영역에서는 36.32%~61.31% 수준으로 모두 감소하였다.

확산계수의 변화형태는 동일하지만, 전체적으로 값들이 감소하였는데, 이는 장기간 수중양생에 따른 공극률이 감소 및 수화물 생성이 주 원인이다.

3.3.2 인장응력 조건에서의 염화물 확산계수 평가

인장재하영역을 고려한 콜드조인트 유·무에 따른 염화물 침투 깊이의 차이를 비교하기 위해 축진염화물확산실험을 실행하였으며, 365일 재령 염화물 침투 사진은 Fig. 12에 도시하였다. 또한, 재령에 따른 염화물 확산계수의 차이를 비교하기 위해 재령 91일과 365일 확산계수를 Table 9과 Fig. 13에 나타내었다.

인장재하에 대한 염화물 확산계수 평가결과 재령 365일 염화물 확산계수는 91일 재령 확산계수와 비슷한 수준으로 평

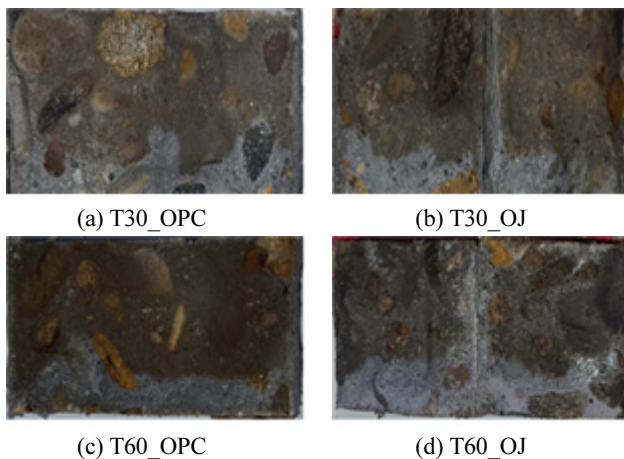


Fig. 12 Photos for depth of penetration(Tensile 30%, 60%)

가되었다. 또한, 압축부와는 다르게 전전부 인장력 30%에서도 염화물 확산계수가 빠르게 증가함을 보였다. 이는 콘크리트의 인장력에 취약한 재료적 특성 때문으로 30% 수준의 인장하중에서 발생한 미세균열이 주된 원인이라고 할 수 있다. 인장재하영역에서는 콜드조인트의 유·무에 관계 없이 장기간 수중양생에도 불구하고 비슷한 염화물 확산계수를 보였다.

Table 9 Results of chloride diffusion coefficients(tensile)

Load	Case	Chloride diffusion coefficient ($\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{sec}$)		
		1	2	Average
Tensile 30%	91_O*	28.7	28.6	28.7
	365_O	25.9	25.3	25.6
	91_OJ*	29.1	29.9	29.5
	365_OJ	27.1	25.9	26.5
Tensile 60%	91_O*	30.8	32.1	31.5
	365_O	31.9	30.7	31.3
	91_OJ*	32.5	32.2	32.4
	365_OJ	33.2	31.1	32.2

O: OPC, OJ: Cold joint concrete
*: Previous result (Mun, 2016)

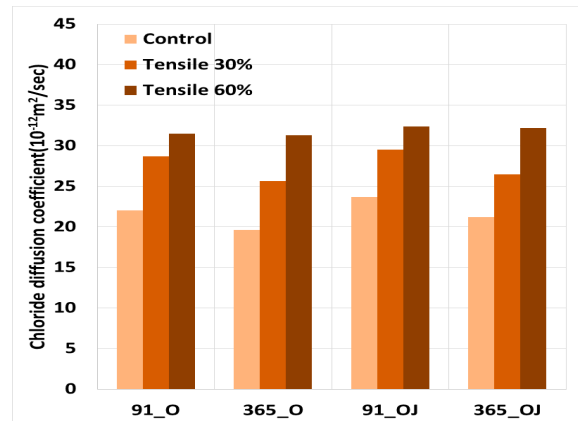
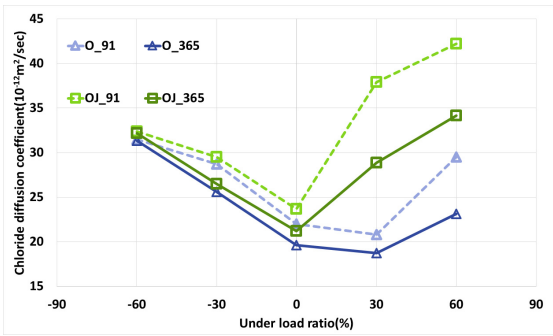


Fig. 13 Chloride diffusion coefficient considering tensile stress level (91 days and 365 days)

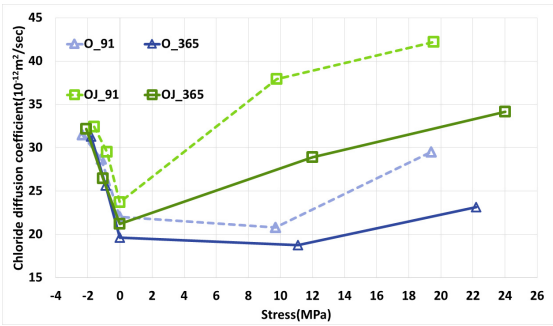
Table 10 Result of increase ratio according to age and tensile level

Case	Chloride diffusion coefficient increase ratio(%)	
	Tensile 30%	Tensile 60%
91_O*	30.45	43.18
365_O	30.05	58.98
91_OJ*	24.47	36.71
365_OJ	24.91	51.75

O: OPC, OJ: Cold joint concrete
*: Previous result (Mun, 2016)



(a) Changes in diffusion coefficient with loading ratio



(b) Changes in diffusion coefficient with induced stress

Fig. 14 Results of chloride diffusion coefficient considering load condition and cold joint

Table 10에는 하중을 재하하지 않은 각 조건(Table 6)을 기준으로 한 염화물 확산계수 증가율을 나타내었다.

압축부에서는 재령이 증가함에 따라 비교적 낮은 수준의 염화물 확산계수를 보였지만, 인장력 60%를 재하한 경우 비교적 큰 확산계수의 증가를 나타내었다. 이는 인장영역에서 발생한 비교적 큰 균열이 수화반응으로 인한 염화물 확산 저감성보다 지배적이기 때문이다. 인장영역 60%에서 콜드조인트의 확산계수 변화비는 91재령시 36.71%였으며, 365재령시 51.75%로 평가되었다. 실제 60% 인장하중하에서의 확산계수는 91일에 $31.3 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{sec}$, 365일에 $31.2 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{sec}$ 로 큰 차이를 갖지 않았으나, 하중이 없는 조건에서는 365일 재령의 확산계수가 작기 때문에 비율상 크게 평가되었다. Fig. 14에는 선행연구인 재령 91일(Mun, 2016)과 본 연구를 통한 재령 365일 염화물 확산계수의 결과를 통합하여 하중비 및 하중으로 분류하여 도시하였다.

91일 재령과의 비교 결과 장기재령에 의한 지속적인 수화반응으로 인하여 전체적으로 확산계수가 감소하고 있음을 알 수 있다. 그리고 건전부에 압축력 30%를 적용한 경우에는 기준 콘크리트보다 낮은 염화물 확산계수가 평가되는 경향이 같았다. 또한, 91일 재령과 같이 압축 및 인장력 60%를 재하할 경우 하중을 재하하지 않았을 경우 대비 높은 증가율을 나타내었다. 이는 파괴하중의 약 70% 수준 이후부터는 콘크리트

내부 공극의 균열이 천이영역에서 발생한 균열과 연결되어 콘크리트 전체 균열로 확산된다고 알려져 있기 때문이다 (Metha and Monteiro, 2013). 또한 압축영역에서는 장기수화로 인하여 염화물 확산계수의 감소를 뚜렷하게 확인할 수 있지만, 인장영역에서는 수화의 영향보다 균열의 영향으로 인한 추가적인 확산이 지배적이므로 확산계수의 시간의존성 저감효과가 매우 낮음을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 하중조건과 콜드조인트 영향을 고려하여 1년 동안 장기 양생된 콘크리트의 염화물 확산계수를 도출하였다. 또한 선행연구인 동일 조건에서 실험한 재령 91일의 실험 자료를 분석하여 비교하였다. 하중조건과 콜드조인트 유무에 따른 재령 365일 콘크리트의 확산계수 평가를 통해 도출된 결론은 다음과 같다.

- 1) 하중을 재하하지 않은 기준 확산계수의 경우, 재령 365일 염화물 확산계수는 건전부에서 $19.7 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{sec}$, 콜드조인트 콘크리트에서는 $21.2 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{sec}$ 로 평가되었다. 동일조건의 91일 재령 염화물 확산계수보다 건전부에서는 10.7%, 콜드조인트에서는 10.5% 낮게 평가되었다. 이는 재령에 따른 건전부와 콜드조인트의 감소율 차이가 비슷하지만 염화물 확산계수는 콜드조인트 콘크리트에서 크게 평가되었다.
- 2) 압축력 30% 재하의 경우 91일 재령과 365일 재령 모두 하중재하에 따른 공극압밀 영향에 의해 염화물 확산계수가 기준 콘크리트보다 모두 감소하는 경향을 보였다. 이를 제외한 경우에는 기준 콘크리트보다 모두 확산계수가 증가하였다. 특히, 압축력 60%를 재하한 경우 365일 재령 건전부에서는 14.7%, 콜드조인트에서는 38.0%로 91일 재령보다 낮은 확산계수를 나타내었다. 이는 장기간 수중양생에 따른 수화반응에 의해 확산계수가 낮게 평가되었기 때문이다.
- 3) 인장재하영역에서는 압축부와는 다르게 30% 하중 영역에서부터 확산계수가 선형적으로 증가함을 보였으며, 재령에 따른 콜드조인트 유무의 확산계수성 변화가 크지 않았다. 이는 장기간 수중양생에 따른 수화반응보에 의한 확산계수 감소보다 다균열에 의한 염화물 확산이 지배적이기 때문이다.

감사의 글

본 연구는 기본 연구지원사업(후속연구지원)에 의해 수행

되었으며, 저자는 이에 감사 드립니다(NRF-2016R1D1A1A09919224).

References

- ACI 224.3R-95 (2001), Joints in Concrete Construction, American Concrete Institute, USA, Reapproved.
- Broomfield, J. P. (1997), Corrosion of Steel in Concrete: Understanding, Investigation and Repair, E&FN, 1-15.
- Choi, S. -J., Kang, S. -P., Kim, S. -C., and Kwon, S. -J. (2015), Analysis Technique on Water Permeability in Concrete with Cold Joint considering Micro Pore Structure and Mineral Admixture, *Advances in Materials Science and Engineering*, Article ID 610428, 1-10.
- Goripalan, N., Sirivivatnanon, V., and Lim, C. C. (2000), Chloride diffusivity of concrete cracked in flexure, *Cement and Concrete Research*, Pergamon, 442-452.
- JSCCE (2000), Concrete Cold Joint Problems and Countermeasures, Concrete Library, 103.
- Kermani, A. (1991), Permeability of stressed concrete, *Building Research and Information*, 19(6), 360-366.
- Kim, D. -H., Lim, N. -G., and Horiguchi, T. (2009), Effect of Compressive Loading on the Chloride Penetration of Concrete Mixed with Granulated Blast Furnace Slag, *Journal of the Korea Institute of Building Construction*, 9(6), 71-78.
- Kim, T. -S., Jung, S. -H., Choi, Y. -C., and Song, H. -W. (2009), An Experimental Study on Relation between Chloride Diffusivity and Micro structural Characteristics for GGBS Concrete, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 21(5), 639-647.
- Kobayashi, K., and Takemoto, Y. (2001), Effect of Ground Granulated Blast Furnace Slag on Corrosion protection, *Pro. of the Japan Concrete Institute*, 23(2), 553-558.
- Kwon, S. -J., Na, U. -J., Park, S. -S., and Jung, S. -H. (2009), Service Life Prediction of Concrete Wharves with Early Aged Crack: Probabilistic Approach for Chloride Diffusion, *Structural Safety*, 31(1), 75-83.
- Kwon, S. -J., and Park, S. -G. (2007), A Study on Estimation for Chloride Diffusivity in Cracked Concrete in Harbor Structures through Field Survey, *Journal of The Korean Society of Civil Engineers*, 27(5A), 745-752.
- Kwon, S. -J., and Park, S. -G. (2013), Analysis Technique for Chloride Penetration in High Performance Concrete Behavior Considering Time-Dependent Accelerated Chloride Diffusivity, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 25(2), 145-153.
- Lee, S. -T. (2014), Effect of Fineness Levels of GGBFS on the Strength and Durability of concrete, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, 34(4), 1095-1104.
- Leng, F., Feng, and N., 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.
- Lim, M. -K., Park, M. -Y., and Jung, S. -J. (2007), A Study of the Strength and Durability Properties on Recycled Fine Aggregate Mortar and Blain of Blast Furnace Slag, *Journal of the architectural institute of Korea*, 23(10), 91-98.
- Mangat, P. S., and Gurusamy, K. (1987), Chloride Diffusion in Steel Fiber Reinforced Marine Concrete, *Cement and Concrete Research*, 17(2), 385-396.
- Mehta, P. K., and Monteiro, P. J. (2013), *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*, McGraw-Hill Education.
- Moon, H. -Y., Kim, H. -S., and Moon, J. -H. (2001), Accelerated Test Methods for Diffusion Coefficient of Chloride Ions into Concrete Using Potential Difference, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 21(3-A), 403-412.
- Mun, J. -M. (2016), Chloride Diffusion Coefficients in Cold Joint Concrete Considering Loading Conditions and Slag, Hannam University.
- Oner, M., Erdogdu, K. Gunlu, A. (2003), Effect of Components Fineness on Strength of Blast Furnace Slag Cement, *Cement and Concrete Research*, 33(4), 463-469.
- 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.
- Song, H. -W., Park, 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 of Build Monuments*, 12(4), 265-284.
- Tang, L., and Nilsson, L. O. (1992), Rapid Determination of the Chloride Diffusivity in Concrete by Applying an Electrical Field, *ACI Materials Journal*, 89(1), 49-53.
- Thomas, M. D. A., and Bentz, E. C. (2002), Computer Program for Predicting the Service Life and Life-Cycle Costs of Reinforced Concrete Exposed to Chlorides, *Life365 Manual*, SFA, 12-56.

Received : 02/15/2017

Revised : 04/18/2017

Accepted : 04/26/2017

요 지 : 시공지연 등으로 발생한 콜드조인트는 전단력에 취약하며 염화물 침투 및 확산을 촉진시킨다. 본 연구는 압축 및 인장하중과 콜드조인트 조건을 고려한 1년 양생된 콘크리트의 염화물 확산계수를 분석하였으며 선행연구인 91일 재령의 결과와 비교하였다. 91일 재령결과와 비교할 때, 하중을 재하하지 않은 일반적인 경우에는 건전부에서는 10.7%, 콜드조인트에서는 10.5%로 낮게 평가 되었다. 건전부와 콜드조인트의 감소율의 차이는 비슷하지만 염화물 확산계수는 콜드조인트에서 크게 발생하였다. 압축력 30%의 경우 건전부는 하중재하시 발생된 공극압밀로 인하여 확산계수가 감소하였다. 콜드조인트 콘크리트의 경우 365일 재령은 91일 재령보다 압축력 30%일 경우 10.9%, 압축력 60%일 경우 5.8% 확산계수가 낮게 평가되었는데, 이는 장기간 수중양생에 따른 지속적인 수화반응에 의해 확산계수가 낮게 평가되었기 때문이다. 인장력의 경우 압축부와는 다르게 동일 수준의 인장하중과 재령, 콜드조인트 유·무에 따른 확산계수의 차이가 비교적 크지 않았다. 이는 콘크리트가 1년 재령임에도 불구하고 인장력에 취약한 재료적 특성인 미세균열이 지배적인 영향으로 작용하였기 때문이다.

핵심용어 : 내구성, 염화물 확산계수, 인장응력, 압축응력, 콜드조인트, 재령효과
