

## 재령에 따른 고성능 콘크리트의 수화 특성치와 염화물 확산성 변화

고태호<sup>1</sup>, 권성준<sup>2\*</sup>

### Changes in Cement Hydrate Characteristics and Chloride Diffusivity in High Performance Concrete with Ages

Tae-Ho Koh<sup>1</sup>, Seung-Jun Kwon<sup>2\*</sup>

**Abstract:** Cement hydrates and the related characteristics change with ages, and the behaviors are much related with chloride diffusion. In this work, 30% replacement ratio with FA(Fly Ash) and GGBFS(Ground Granulated Blast Furnace Slag) are considered for concrete with three levels of W/B (Water to Binder ratio) and 2 years of curing period. Chloride diffusion coefficients from accelerated condition are obtained at 5 measurement period (28days, 56days, 180days, 365days, and 730days), and the results are compared with porosity, binding capacity, and permeability from program-DUCOM. The similar changing pattern between chloride diffusion and permeability is observed since permeability is proportional to the square of porosity. Curing period is grouped into 4 periods and the changing ratios are investigated. Cement hydrate characteristics such as porosity, permeability, and diffusion coefficient are dominantly changed at the early ages (28~56 days), and diffusion coefficient in OPC concrete with low W/B continuously changes to 180days.

**Keywords:** Hydrates, Chloride diffusion coefficient, Permeability, Porosity

## 1. 서 론

콘크리트는 다공성 재료이며 내부의 공극 구조 및 수화물 량은 구조적, 내구적 성능에 큰 영향을 미친다. 최근 들어 염화물 이온의 침투에 따른 철근부식이 심각하게 제기됨에 따라 많은 연구가 염해에 집중되고 있는데, 매립된 철근의 부식은 많은 공학적, 사회적인 문제를 야기한다(Park and Kim, 2013; Kwak et al., 2015). 철근 콘크리트(RC: Reinforced Concrete)는 압축부는 콘크리트가, 인장부는 주로 보강재가 외부 하중에 저항하는 구조인데 염해 환경에 노출된 콘크리트의 경우, 철근 부식과 이로 인한 균열 발생과 같은 문제가 발생한다. 초기에는 미관의 저하가 발생하는 수준이지만, 시간의 경과와 함께 균열 발생, 피복두께의 박락이 발생하고 최종적으로는 구조물의 안전성에 큰 영향을 준다(RILEM, 1994; Thomas and Bamforth, 1999). 또한 이에 따른 보수비 역시 초기 부식이 발생하여 균열이 진전된 후 크게 증가하게 되므로 염해에 대한 부식 제어는 공학적, 사회적으로 큰 의미를 갖는다(Asiedu and Gu, 1998; KDI,

2009). 최근 들어 국내 시방서 및 구조기준에서도 환경의 등급화를 통하여 사용재료의 규제와 설계에서 부식 제어를 더욱 엄격하게 제안하고 있으며, 이는 국외에서도 같은 경향을 보인다(JSCE, 2007; ACI 201R-08, 2008; CEN, 2004).

염화물 침투기구는 해사 또는 염화물계 혼화제 등에 기인하는 경우도 있으나 대부분 외부의 유입에 따른 부식이 지배적이며, 부식 발생 기구는 침지대보다 조석대 및 비말대 등 산소의 유입이 원활한 곳에서 더욱 활발하게 발생한다. 이러한 염화물 침투는 주로 공극을 통해 이루어지며, 내부에서 시멘트 수화물이나 골재에 흡착되거나 내부의 자유수를 통하여 이동하게 된다. 콘크리트 내부로 침투된 염화물 이온은 수화물에 고정되는 고정염화물(Bound chloride ion)과 내부의 자유수에 해리되어 철근 부식에 직접 영향을 미치는 자유염화물(Free chloride ion)로 분류되며, 두 이온간의 평형은 다양한 관계로 구현된다(Maekawa et al., 2003; Yuan et al., 2009).

염화물 이동을 해석 또는 평가하는데 사용되는 염화물 확산계수 역시 공극률의 함수로 구현되며, 흡착과 이동 역시 다양한 수화물의 특성치로 모델링된다. 많은 연구에서 수화물 생성량에 따른 염화물 이온의 흡착, 공극 구조에 따른 염화물 확산계수의 변화 등이 모델링 되고 있으며, 이러한 염화물 거동은 시간의 변화에 따라, 엄밀하게 말하면 시간에 따른 수화 반응의 변화에 따라 변화하게 된다(Maekawa et al., 2003; Song and Kwon, 2009; Park et al., 2012).

<sup>1</sup> 정회원, 연세대학교 박사과정, (주)태헌 대표이사

<sup>2</sup> 정회원, 한남대학교 건설시스템공학과, 부교수, 교신저자

\*Corresponding author: jjuni98@hannam.ac.kr

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

•본 논문에 대한 토의를 2019년 12월 1일까지 학회로 보내주시면 2020년 1월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

겉보기 확산계수의 경우 시간의 변화에 따른 모델링으로 제안되고 있으나(Lee and Kwon, 2012; Thomas and Bamforth, 1999), 이는 내부 수화물의 팽창에 따른 공극 구조 개선, 수화물 증가에 따른 흡착량의 증가, 염화물 이온의 구배 감소에 따른 확산의 저감 등 다양한 수화 특성치와의 변화에 기인한 것이다. 최근 들어 일반 OPC(Ordinary Portland Cement)의 단점을 개선하기 위해 혼화 재료가 대단위로 혼입되는데, 고로슬래그미분말(GGBFS: Ground Granulated Blast Furnace Slag)과 플라이애시(FA: Fly Ash)를 대표적으로 들 수 있다. GGBFS의 경우는 잠재 수경성 반응을 통하여 공극 구조가 개선되고 내화학적 및 염화물 침투에 매우 효과적인 재료로 알려져 있으며, 수화열 저감 등에도 효과적으로 알려져 있다(Song and Saraswathy, 2006). FA의 경우 포졸란 반응에 의해 추가적인 수화물을 생성하게 되는데 작업성 증가, 수화열 저감, 건조수축의 감소 등 많은 공학적인 장점들을 가지고 있다(Nath and Sarker, 2011). 또한 강제 및 화력 발전 산업부산물로서 CO2 저감에도 실질적인 대안으로 제시되고 있다(Kim et al., 2014).

본 연구에서는 OPC(Ordinary Portland Cement) 콘크리트와 GGBFS와 FA를 치환한 고성능 콘크리트에 대하여 염화물 촉진실험을 수행하였으며, 양생 기간에 따른 염화물 확산특성을 분석하였다. GGBFS 및 FA는 가장 대표적인 혼화재료로서 콘크리트는 모두 장기 재령 시 공극률 감소와 수화물의 증가를 유도한다. 0.37~0.47의 물-결합재 비는 보통 고성능 콘크리트의 물-결합재 비 수준이며, 치환률을 30% 고정환 이 유는 치환률이 높으면서 품질관리가 부족할 경우 뚜렷한 내구적 저항성을 확보하지 못하기 때문이다. 특히 FA의 경우 국내에서 주로 수화열 제어로 사용되는데, 30% 이상 다량 치환하는 경우는 희박하다. 그러므로 두 혼화 재료의 치환률은 30%를 고려하였으며, 물-결합재 비를 0.37, 0.42, 0.47의 3수준으로 설정하였다.

2년까지 양생된 OPC, FA, GGBFS 콘크리트의 염화물 확산계수 변화를 분석하였으며 다상복합수화발열모델(MCHHM: Multi-Component Hydration Heat Model)과 공극구조형성모델(MPSFM: Micro Pore Structure Formation Model)을 사용하고 있는 DUCOM 프로그램을 통하여 수화특성치를 분석하였다(Maekawa et al., 2003; Song and Kwon, 2009; Ishida and Mekawa, 2003; Ishida et al., 1997). 본 연구에서는 공극률, 자유 염화물 구속능, 투수계수 등의 수화 특성치와 염화물 확산성의 변화를 양생 기간을 고려하여 분석하였으며, 이러한 관계는 시간에 따른 염해 저항성 변화에 간접적인 자료로 활용될 수 있다고 판단된다.

## 2. 염화물 확산계수 실험방법 및 사용재료

### 2.1 사용재료 및 배합표

치환률 30%의 FA 및 GGBFS를 가진 콘크리트를 제조하기 위하여 Table 1과 같이 배합표를 구성하였다. 공기량  $4.0 \pm 1.5\%$ 와 슬럼프 150 mm를 목표로 하였으며, 골재의 물리적 성능은 Table 2에, 사용된 고성능 감수제의 특성은 Table 3에 나타내었다.

Table 1 Mix proportions for this study

	W/B (%)	Unit weight(kg/m <sup>3</sup> )					S.P (%)	
		W	C	FA	GGBFS	S		G
OPC concrete	37	168	454	0	0	767	952	1.1
	42	168	400	0	0	787	976	1
	47	168	357	0	0	838	960	0.95
FA concrete	37	168	318	136	0	745	952	1.4
	42	168	280	120	0	768	953	1.2
	47	168	250	107	0	820	939	1.0
GGBFS concrete	37	168	318	0	136	762	946	1.3
	42	168	280	0	120	783	972	1.1
	47	168	250	0	107	835	956	1.0

W : Water, C : Cement, S : Sand, G : Gravel  
S.P : Super-Plasticizer

Table 2 Physical properties of the sand and gravel used

Types	Items	G <sub>max</sub> (mm)	F.M.	Absorption (%)	Specific gravity (g/cm <sup>3</sup> )
Sand		-	2.90	1.01	2.58
Gravel		25	6.87	0.82	2.64

Table 3 Properties of the super-plasticizer used

Types	Items	Main component	pH	Density	Type
2000R		Polycarbonic Acid	6.7	1.08	Liquid

### 2.2 염화물 확산성 평가

측정 기간은 최대 2년으로 총 56일, 180일, 365일, 730일에 염화물 확산특성을 측정하였다. 다량의 시편제조로 인해 28일 결과는 실험하지 못하여 동일 배합의 측정값을 인용하였다(SERI, 2003). 촉진 염화물 확산계수를 평가하기 위해 비정상 상태 촉진측정방법인 Tang's method를 이용하여 확산계수를 도출하였다. 음극에는 0.5 M의 염화나트륨(NaCl) 수용액을, 양극에는 포화 수산화칼슘(Ca(OH)<sub>2</sub>) 수용액을 적용하여,

8 시간 동안 30 V의 전압을 인가한 후 시편을 할렬하여, 쪼갠 부분에 0.1 N의 AgNO<sub>3</sub> 용액을 분무한 후, 은색으로 변하는 부분을 염소이온 침투 깊이로 측정하였다. 측정된 침투 깊이를 아래의 식(1)에 적용하여 촉진 염화물 확산계수를 도출하였다. Table 4에서는 Tang's method 시험 조건을, Fig. 1에서는 실험 전경을 나타내고 있다.

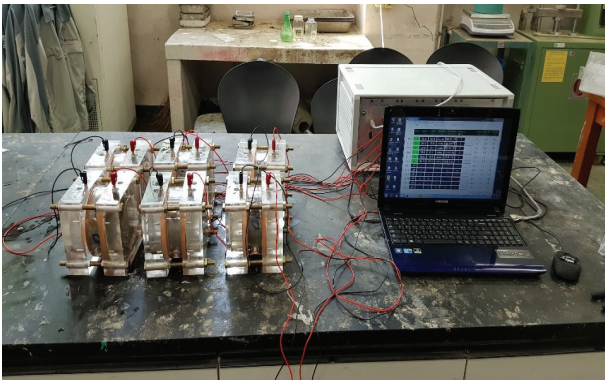
$$D_{rcpt} = \frac{RTL}{zFU} \frac{x_d - \alpha \sqrt{x_d}}{t} \quad (1)$$

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

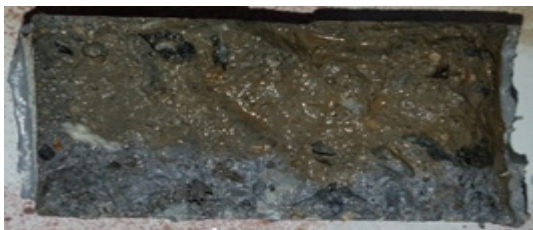
식(1)에서  $D_{rcpt}$ 는 비정상상태에서 구한 전위차 촉진 염화물 확산계수(m<sup>2</sup>/sec),  $R$ 은 기체상수(8.314 J/mol · K),  $T$ 는 절대온도(K),  $L$ 은 시편두께(m),  $z$ 는 이온전자가(1.0),  $F$ 는 패러데이상수 (96,500 J/V · mol),  $U$ 는 전위차(V),  $x_d$ 는 비색법에 의한 침투깊이(m),  $t$ 는 전위차의 적용시간(s)을 나타낸다. 또한 식(2)에서  $\operatorname{erf}^{-1}$ 은 오차함수(error function)의 역함수를,  $C_0$ 와  $C_d$ 는 음극 Cell의 염소이온농도(mol/l)와 비색법에 의

**Table 4** Conditions for rapid chloride penetration

Cathode	Anode	Applied voltage	Thickness of specimen	Applied time
0.5 M NaCl	Saturated Ca(OH) <sub>2</sub>	30 V	50 mm	8 hours



(a) Diffusion cell referred to ASTM C 1202



(b) Colorimetric measurement for chloride penetration depth

**Fig. 1** Photos for chloride diffusion coefficient measurement

**Table 5** Results of chloride diffusion coefficient in RCPT

	W/B (%)	Accelerated chloride diffusion coefficient ( $\times 10^{-12}$ m <sup>2</sup> /s)				
		28 days	56 days	180 days	365 days	730 days
OPC concrete	37	13.01	12.05	7.14	5.58	5.34
	42	15.20	13.77	9.48	8.49	8.06
	47	18.08	15.70	12.28	11.95	11.94
FA concrete	37	13.04	6.14	5.18	4.65	3.80
	42	16.05	6.77	5.68	5.32	4.70
	47	20.50	7.53	6.71	5.90	5.01
GGBFS concrete	37	9.30	5.22	4.37	3.02	2.93
	42	11.00	5.45	4.72	3.30	3.08
	47	12.00	6.60	4.94	4.14	4.01

한 반응농도 (mol/l)를 나타낸다.

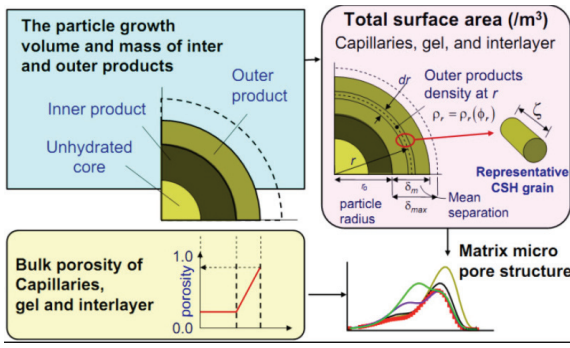
전기영동실험을 통한 염화물 이온 확산계수는 실제 구조물의 염화물의 이동을 나타내는 걸보기 확산계수와 차이가 발생한다. 전기영동실험에 의한 확산계수는 전기장 내의 자유 염화물 이동속도를 나타내지만 전기영동시험 방법은 비교적 짧은 시간에 콘크리트의 염화물 거동을 평가할 수 있으며, 많은 연구에서 걸보기 확산계수와 연관성이 연구되어 있다 (Lee and Kwon, 2012, Yoon et al., 2012, Polder et al., 2006). 각 재령일에서의 배합별 촉진 염화물 확산계수 평가 결과를 Table 5에 수록하였다.

### 3. 수화생성물과 염화물 확산계수의 비교

#### 3.1 해석프로그램 개요

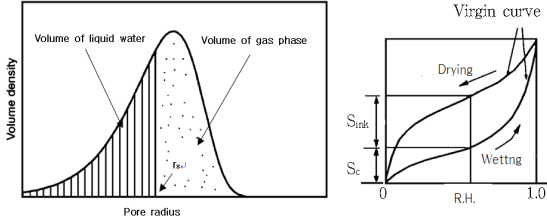
물리적으로 공극률을 평가하기 위해서는 MIP(Mercury Intrusion Porosimetry)나 질소흡착법 등이 사용되고, 수화물 성상을 평가하기 위해서는 XRD 같은 장비가 사용된다(Kumar and Bhattacharjee, 2003). 실제로 공극률 측정값을 이용하여 평가하는 것이 가장 바람직하지만, 콘크리트내의 시멘트 페이스트 부분을 채취하여 실험하므로 변동성을 무시할 수 없다. 본 연구에서는 다양한 배합과 재령에 대한 결과값이 필요하므로 DUCOM에서 사용하고 있는 다상수화 복합발열모델과 공극구조 형성모델을 사용하여 공극률, 염화물 구속능, 투수성을 도출하였다.

각 수화 특성치(공극률, 구속능, 투수성)는 확산계수와 마찬가지로 시간에 따라 비선형적으로 변화하며 최종적인 실험 결과인 2년까지의 결과를 최종 값으로 하여 변화비율을 분석하도록 한다. Fig. 2에서는 DUCOM 프로그램의 개요를 나타내고 있다(Ishida and Maekawa, 2003; Ishida et al., 1997).



(a) MCHHM and cluster expansion

$$S = \int_0^{r_s} dV = 1 - \exp(-Br_s)$$



(b) Moisture volume density and saturation curve

Fig. 2 Outline of MCHHM and MPSFM in DUCOM

## 3.2 해석에 사용된 모델

### 3.2.1 수화발열모델 (MCHHM)

시멘트 복합재료의 단위량당 평균수화발열특성은 각 성분의 발열특성  $\bar{H}_i$  와 각 광물조성의 중량률  $p_i$  를 고려하여 식(3)과 같이 구할 수 있고, 전체열발생률은 식(4)와 같이 구성된다.

$$\bar{H}_c = \sum p_i \bar{H}_i \quad (3)$$

$$= p_{C_3S} \bar{H}_{C_3S} + p_{C_2S} \bar{H}_{C_2S} + p_{SG} \bar{H}_{SG} + p_{FA} \bar{H}_{FA} + p_{C_3A} (\bar{H}_{C_3AET} + \bar{H}_{C_3A}) + p_{C_4AF} (\bar{H}_{C_4AFET} + \bar{H}_{C_4AF})$$

$$\bar{Q}_c = C \times \bar{H}_c \quad (4)$$

위의 식에서는 초기에 석고(gypsum)가 C<sub>3</sub>A 및 C<sub>4</sub>AF와 반응하여 에트링가이트(ettringite)를 생성하는 반응에 각각 C<sub>3</sub>AET, C<sub>4</sub>AFET에 의한 발열특성을 고려하고 있다. 에트링가이트 생성반응에 의하여 첨가된 석고가 고갈되면 에트링가이트가 황산으로 전환되면서 C<sub>3</sub>A와 C<sub>4</sub>AF의 수화반응이 시작된다.

### 3.2.2 공극구조 형성 모델 (MPSFM)

해석모델에서는 내부생성물 및 외부생성물을 동시에 다룬 전체적인 체계에서 공극구조를 식(5)과 공극분포 밀도함수로 나타낸다.

$$\phi(r) = \phi_{cp} V_{cp}(r) + \phi_{gl} V_{gl}(r) + \phi_{lr} \quad (5)$$

여기서,  $V_{cp}(r)$  및  $V_{gl}(r)$ (m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>)은 시멘트 경화체중의 모세관 공극( $\phi_{cp}$ ) 및 겔공극( $\phi_{gl}$ )에 대한 공극경분포를 규정한 함수이고 각각의 공극  $i$ 에 대해서 식(6)과 같은 형태로 정의할 수 있다.

$$V_i = 1 - \exp(-B_i r), \quad (0 \leq V_i(r) \leq 1) \quad (6)$$

$$dV_i = B_i r \exp(-B_i r) dr$$

여기서,  $B_i$ 는 함수형상을 결정하는 변수인데 모세관공극 또는 겔공극을 원통형으로 가정할 때 표면적의 값  $S_i$ 로부터 식(7)에 따라서 도출한다.

$$S_i = 2\phi_i \int r^{-1} dV = 2\phi_i \int_{r_{min}}^{\infty} B_i \exp(-B_i r) dr \quad (7)$$

여기서,  $r_{min}$ 은 고려할 최소공극반경이다. 식(7)은 수학적으로 풀기가 어렵기 때문에 많은 수치해석결과에 의해 구한  $B$ 를  $S/\phi$ 의 함수로서 다른 관계를 실제의 수치계산에 이용한다.

### 3.2.2 수분이동 모델(MTM: Moisture Transport Model)

수분이동 모델에서는 액상수와 수증기의 열역학적 평형관계를 기반으로 하고 있다. 공극 내 국소적인 평형에 관해서, 기상 및 액상 계면이 평면인 경우 기상중의 수증기 분압은 포화수증기압과 같지만, 시멘트 페이스트의 모세관공극이나 겔공극과 같이 벽간거리가 작은 공간에서 기액계면은 곡면이 되며 곡률에 의해서 평형수증기압이 변화하게 된다.

계면이 구상의 일부인 모관인 경우 이러한 관계는 Kelvin의 식(8)에 의해서 다음과 같이 구현된다.

$$\ln \frac{P_v}{P_{v_0}} = -\frac{2\gamma M_w}{RT\rho_l r} \quad (8)$$

여기서,  $P_v$ 는 수증기의 분압(Pa)이고,  $P_{v_0}$ 는 포화수증기압(Pa)이며,  $\gamma$ 는 액체의 표면장력(N/m)이다. 수증기의 분압  $P_v$ 과 상대습도를  $P_v/P_{v_0}$ 라고 하면 액상수가 존재하는 최대 공극반경  $r_s$ 가 그에 따라 결정되고, 반경  $r_s$ 보다 작은 공극은 응축수로 가득 차게 된다. 이 때 공극의 포화도  $S$ 는 반경  $r_s$ 이하의 공극체적의 총합이 되며 식(9)와 같이 구성된다.

$$S = \int_0^{r_s} dV = 1 - \exp(-Br_s) \quad (9)$$

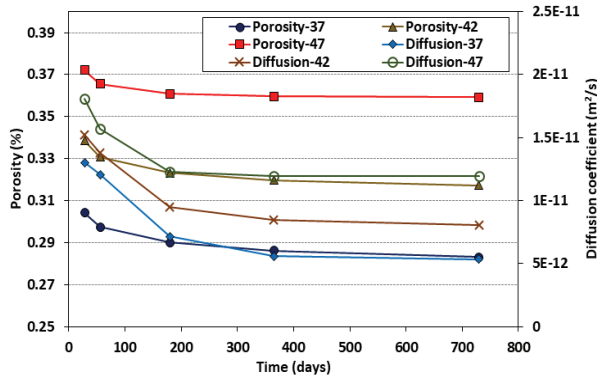
각 모델에 대한 상세한 설명은 기존의 문헌에 소개되어 있으므로 이를 참고하는 것이 바람직하다.(Ishida and Maekawa,



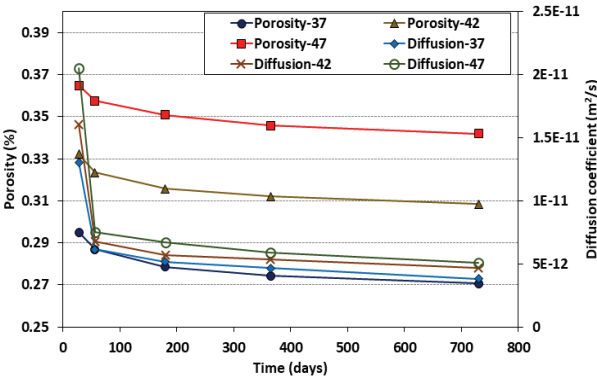
### 3.3 공극률과 염화물 확산계수

본 절에서는 사용되는 공극률( $\phi_t$ )은 전 공극률로서 모델링에서의 겔공극( $\phi_{gl}$ : gel pore), 층간공극( $\phi_{lr}$ : layer pore), 모세관 공극( $\phi_{cp}$ : capillary)을 모두 합친 공극률을 의미한다. 실제로는 주된 이온의 이동기구는 모세관 공극을 통해서 이루어지는 것으로 알려져 있다. Fig. 3에서는 각 배합에 따른 재령별 공극률의 변화와 확산계수의 변화를 나타내고 있다.

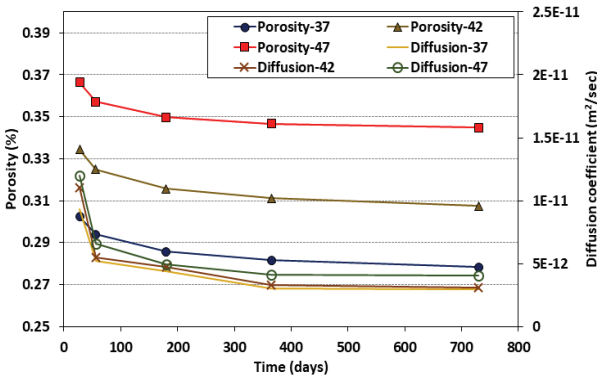
공극률의 변화비율은 28일~56일에서 가장 크게 나타났으나, 확산계수의 변화는 56일~180일에서 가장 크게 평가되었



(a) OPC concrete case



(b) FA concrete case



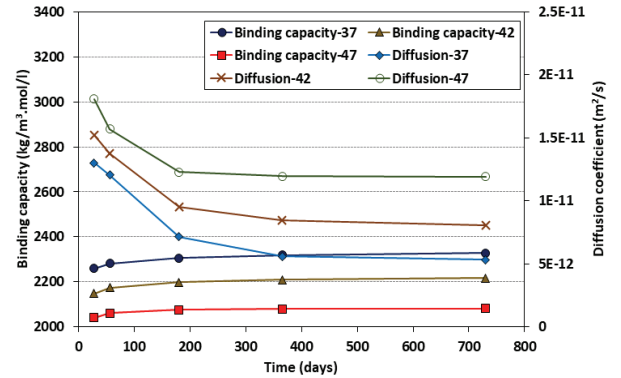
(c) GGBFS concrete case

Fig. 3 Changes in diffusion coefficient and porosity with ages

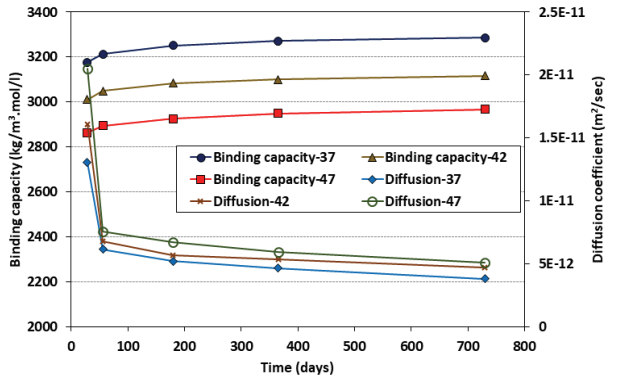
다. 공극률과 확산계수 모두 재령 180일 이내에서 급격하게 감소하고 있음을 알 수 있다. 특히 낮은 물-결합재 비를 가진 OPC 콘크리트의 경우 재령 180일 이후에도 크게 감소함을 알 수 있다.

### 3.4 고정화 비율과 염화물 확산계수

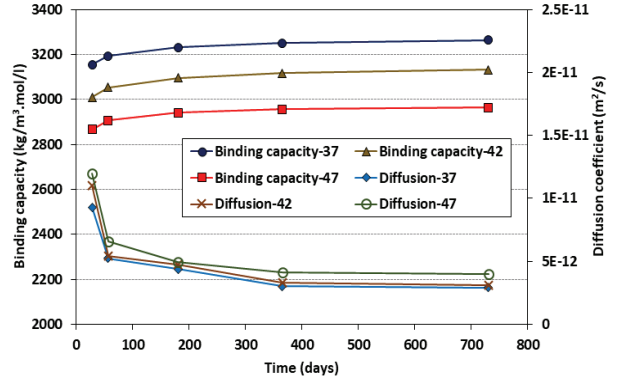
콘크리트 내의 고정 염화물은 다양한 식으로 표현할 수 있는데, Freundlich isotherm이 가장 합리적으로 차용되고 있다 (Maekawa et al., 2003; Tang, 1996). 염화물 이온  $C_d$ (mol/m³)과  $C_{bound}$ (kg/m³)의 상관성을 위해서는 콘크리트 단위중량당 CSH 겔의 중량비로 정의할 수 있는  $\beta_{csh}$  값이 필요한데 콘크



(a) OPC concrete case



(b) FA concrete case



(c) GGBFS concrete case

Fig. 4 Changes in diffusion coefficient and binding capacity with ages

리트 및 CSH 겔의 밀도는  $2.30 \text{ g/cm}^3$  및  $2.34 \text{ g/cm}^3$ 로 거의 근사하므로 식(10)과 같이 나타낼 수 있다(Song and Kwon, 2009; Park et al., 2012).

$$\beta_{csh} = \frac{V_{csh}\rho_{csh}}{V_t\rho_{conc}} \approx \frac{V_{csh}}{V_t} = 1 - \phi_t \quad (10)$$

여기서  $V_{csh}$ 와  $V_t$ 는 CSH와 전체 콘크리트의 체적,  $\rho_{csh}$ 와  $\rho_{conc}$ 는 CSH와 콘크리트의 밀도를,  $\phi_t$ 는 전체 공극률을 나타낸다. 또한 구속되는 염화물량은 자유염화물 농도( $C_d$ )에 따라 변화하는데, 식(11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_{bound} = A(1 - \phi_t) W_{CONC} C_d^B \quad (11)$$

여기서  $A$ 는 사용계수로, OPC 콘크리트에서는  $3.57 \times 10^{-3}$ 을, 30% 치환된 GGBFS 및 FA 콘크리트에 대해서는  $3.82 \times 10^{-3}$ 와  $3.78 \times 10^{-3}$ 을 사용하였다(Song and Kwon, 2009; Tang, 1996).  $W_{CONC}$ 는 단위부피당 콘크리트 중량( $\text{kg/m}^3$ )을 나타낸다.  $B$ 는 구속능에 따른 지수를 나타내는데, OPC 콘크리트에서는 0.38을, 30%를 치환한 GGBFS 및 FA 콘크리트에 대해서는 0.37 및 0.29를 사용하였다(Song and Kwon, 2009; Tang, 1996).

Fig. 4에서는 자유염화물량 농도가  $0.51 \text{ mol/l}$ 일 경우의 구속능을 각 배합조건에 따라 비교하였다.

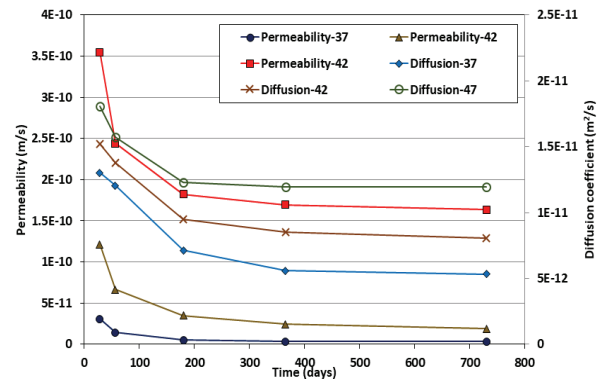
고정화 비율은 비선형적인 지수함수를 가지고 있어 초기에 크므로 재령 28일에서 180일 사이에 60.0% 이상의 변화를 가지고 있다. OPC 콘크리트에서 물-결합재 비가 47%인 경우는 초기의 수화물량이 매우 작게 평가되어 상대적으로 초기의 염화물 구속량의 증가가 크게 평가되었다.

### 3.5 투수계수와 염화물 확산계수

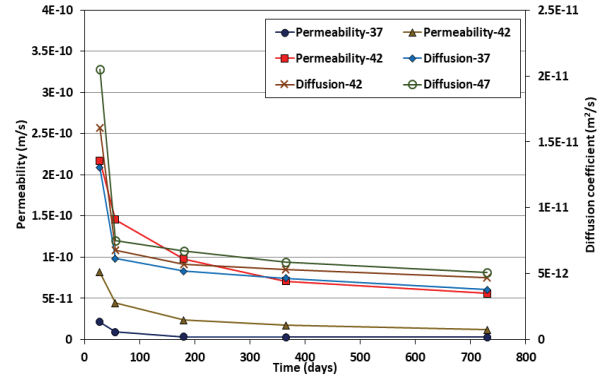
기존의 연구에 의하면 Darcy' Law에 기반한 투수계수는 식(12)와 같이 적용할 수 있다(Song and Kwon, 2007; Hilsdorf and Kropp, 1995).

$$K = C \frac{\phi_t^2}{8n^2 B_{cp}^2} \frac{\rho g}{\eta} \quad (12)$$

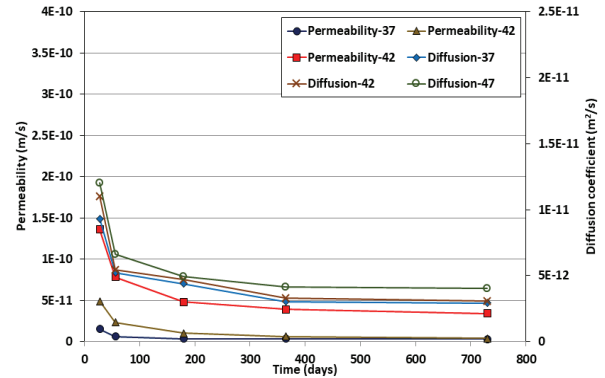
여기서,  $\rho$ 는 유체의 밀도 ( $999.3 \text{ kg/m}^3$ ),  $g$ 는 중력가속도 ( $\text{m}^2/\text{s}$ ),  $\eta$ 는 유체의 점성으로  $1.974 \times 10^{-6} \text{ Pa.s}$ 를 나타낸다.  $\phi$  및  $B_{cp}$ 는 전체 공극률과 다상수화발열모델에서 도출된 전체 공극률과 수화물 변수를,  $C$ 는 실험상수(= 0.2),  $n$ 은 조도계수(=  $0.25\pi^2$ )를 나타낸다. Fig. 5에서는 DUCOM 해석을 통하여 도출된 투수계수와 확산계수의 변화를 나타내었다.



(a) OPC concrete case



(b) FA concrete case



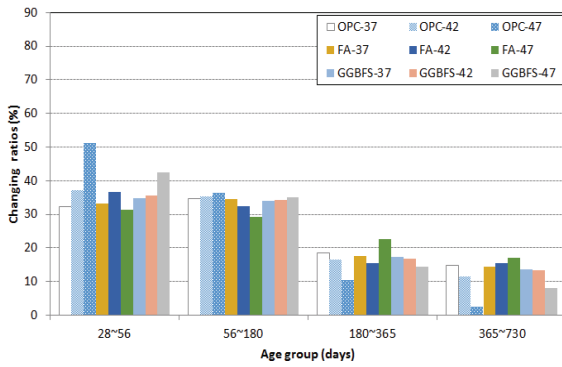
(c) GGBFS concrete case

Fig. 5 Changes in diffusion coefficient and water permeability with ages

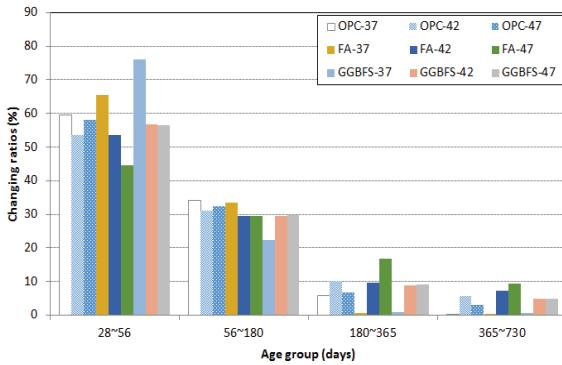
투수계수는 공극률의 제곱에 비례하는 함수이므로 형태적으로 가장 확산계수와 비슷한 패턴을 보인다. 이러한 경향은 장기 재령에서도 유사성을 가지는데, 실제로 이온의 확산과 투수성은 식(13)과 같이 간단하게 제안되기도 한다(Hilsdorf and Kropp, 1995).

$$K = a \times D_{ion}^b \quad (13)$$

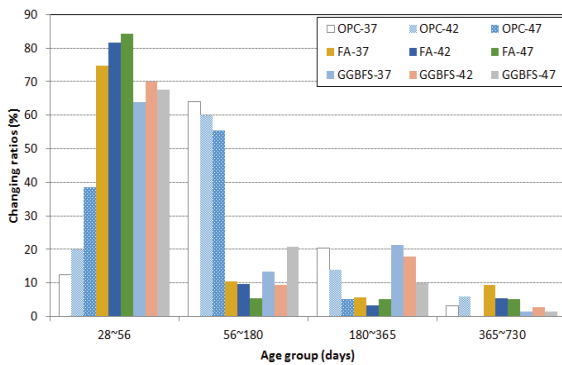
여기서  $a, b$ 는 실험상수를 의미한다.



(a) Changing distribution in porosity



(b) Changing distribution in permeability



(c) Changing distribution in diffusion coefficient

Fig. 6 Changing ratios of hydrates characteristics and diffusion coefficient

### 3.6 재령에 따른 수화물 생성변화와 확산계수 변화비율 분석

각 수화물 특성치는 재령에 따라 변화하고 확산계수와 발생기구가 다르므로 직접적인 비교는 불가능하다. 2년의 장기 재령이므로 2년 결과를 거의 수화가 완료된 최종 값으로 하고 변화비율의 분포를 재령 28일~56일, 56일~180일, 180일~365일, 365일~730일, 총 4그룹으로 분류하여 각각의 변화비율을 비교 평가하였다. 재령에 따른 각 특성치의 변화비율은 Fig. 6에 도시하였다.

재령에 따른 공극률 분포 변화는 재령 28일~56일 사이에서 31.3%~51.2%의 수준을 보였으며, 물-결합재비가 낮을수록 높은 변화율을, 즉 초기재령에서 높은 감소율을 나타내었다.

재령 56일~180일 사이에서는 29.1%~36.2% 수준으로 전 배합에 걸쳐서 균등한 수준을 나타내었으며, 이후 재령에 대한 감소는 크지 않았다. 다만 물-결합재 비가 47%인 OPC 콘크리트의 경우는 재령 28일~56일 사이에 확산계수 변화량이 크게 발생하였는데, 이는 높은 물-결합재의 OPC 콘크리트에서는 재령 초기의 공극률이 상대적으로 크기 때문이다. 수화물의 생성에 따른 염화물 구속 효과는 공극률의 변화에 비례하므로 공극률과 같은 경향을 나타내었다.

투수성에 대한 변화비율은 초기재령 (재령 28일~56일) 사이에서 매우 큰 변화분포가 발생하였으며, FA 및 GGBFS를 혼입한 경우에 더욱 크게 변화하였다. OPC 콘크리트의 경우 55%~59%의 변화율, FA 콘크리트의 경우 44.5%~65.6%를, GGBFS 콘크리트의 경우 56.4%~76.1%의 변화율 분포가 발생하였다. 혼화재를 사용한 경우 물-결합재 비가 클수록 초기 재령에서 활발한 투수성의 감소를 확인할 수 있다.

염화물 확산계수의 경우, 재령 28일~56일에서 FA 콘크리트의 경우 74.7%~84.2%의 분포를, GGBFS 콘크리트의 경우 64.0%~70.1%의 높은 변화율 분포를 가지고 있었으나, OPC의 경우 재령 56일~180일 사이에서 큰 변화 비율 분포를 가지고 있었다. 55.6%~64.1%의 변화비율이 재령 56일~180일 사이에서 발생하였는데, 이는 혼화재료를 치환한 수준(30%)에 비하면 매우 높은 수준이다. 즉 OPC 콘크리트의 경우 비교적 완만하게 확산성이 증가하므로 재령 56일~180일 사이에도 지속적인 감소가 발생한다. 또한 초기 재령에서는 물-결합재 비가 높을수록 크게 변화하였으나, 56일 이후로는 물-결합재 비가 낮을수록 확산성이 지속적으로 감소하였다.

이는 단위 결합재량이 낮은 배합에서는 초기의 확산성 감소가, 단위 결합재량이 높은 배합에서는 재령 56일 이후의 확산성 감소가 지속적으로 발생하게 되는데, 상대적으로 수화 반응에 따른 효과가 지속적으로 유지되기 때문이다.

## 4. 결론

본 연구에서는 재령 28일, 56일, 91일, 365일, 730일의 초장기 조건에 대하여 OPC 콘크리트와 혼화재(FA, GGBFS)를 30% 치환한 콘크리트의 확산계수를 분석하였다. 또한 해석을 통하여 공극률, 염화물 구속능, 투수계수를 도출하였으며, 양생기간에 따른 변화를 분석하였다. 본 연구를 통하여 도출된 결론은 다음과 같다.

- 1) 공극률, 투수성, 확산성의 변화를 재령에 따라 분석한 결과, 공극률의 제곱에 비례하는 투수계수의 변화 패턴이 확산계수의 변화 패턴과 가장 비슷하게 평가되었으며,

혼화제를 치환한 배합에서는 초기 재령에서의 확산성 및 투수성의 감소가 매우 크게 발생하였다.

- 2) 최대 2년 까지의 재령 기간을 4개의 그룹(28일~56일, 56일~180일, 180일~365일, 365일~730일)으로 분류한 뒤 전체 변화량에 따른 각 재령 그룹의 변화를 분석하였다. 재령에 따른 공극률 분포 변화는 물-결합재 비가 낮을수록 높은 변화율, 즉 초기재령에서 높은 감소율을 나타내었다. 재령 56일~180일 사이에서는 29.1%~36.2% 수준으로 전 배합에 걸쳐서 균등한 수준을 나타내었으며, 이후 재령에 대한 감소비율은 높지 않았다.
- 3) 투수성에 대한 변화비율은 초기 재령(28일~56일) 사이에서 매우 큰 변화분포가 발생하였는데, OPC 콘크리트의 경우 55%~59%의 변화를, FA 콘크리트의 경우 44.5%~65.6%를, GGBFS 콘크리트의 경우 56.4%~76.1%의 변화분포가 발생하였다. 염화물 확산계수의 경우, 초기재령에서 FA와 GGBFS를 혼입한 경우, 매우 높은 변화분포를 가지고 있었으나, OPC 콘크리트의 경우 재령 56일~180일 사이에서도 상대적으로 큰 변화 비율 분포를 가지고 있었다. 또한, 혼화제(FA, GGBFS)를 혼입한 경우보다 비교적 꾸준하게 확산계수 감소가 발생하였으며, 낮은 물-결합재 비를 가진 경우 이러한 현상은 뚜렷하게 나타났다.

## 감사의 글

이 논문은 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2015 R1A5A1037548).

## References

1. Arya, C., Buenfeld, N. R., and Newman, J. B. (1990), Factors Influencing Chloride Binding in Concrete, *Cement Concrete Research*, 20(2), 291-300.
2. Asiedu, Y., and Gu, P. (1998), Product life cycle cost analysis: State of the art review, *International Journal of Production Research*, 36(4), 883-908.
3. ACI 201R-08 (2008), Guide to Durable Concrete, *American Concrete Institute*, MI, USA.
4. CEN (2004), Eurocode 2: Design of Concrete Structure EN-1992-1-1, *European Committee for Standardization (Comité Européen de Normalisation, CEN)*: Brussels, Belgium.
5. Hilsdorf, H., and Kropp, J. (1995), Performance criteria for concrete durability, *CRC Press*.
6. Ishida, T., Chaube, R. P., Kishi, T., and Maekawa, K. (1997), Modeling of pore content in concrete under generic drying wetting conditions,

*Concrete library of JSCE*, 564(35), 275-287.

7. Ishida, T., and Maekawa, K. (2003), Modeling of durability performance of cementitious materials and structures based on thermohygro physics, *Rilem Proceedings PRO*, 29, 39-49.
8. Japan Society of Civil Engineering (2007), Standard Specification for Concrete Structures-Materials and Construction, *JSCE-Guidelines for Concrete 16*, Japan.
9. Kumar, R., and Bhattacharjee, B. (2003), Study on some factors affecting the results in the use of MIP method in concrete research, *Cement and Concrete Research*, 33(3), 417-424.
10. Korea Development Institute (2009), A Study on Estimation of Pavement Maintenance for Preliminary Feasibility Plan—Technical Report of Policy Research, *Kibodang Press: Seoul*, Korea.
11. Kim, S. J., Mun, J. M., Lee, H. S., and Kwon, S. J. (2014), CO2 emission and storage evaluation of RC underground structure under carbonation considering service life and mix conditions with fly ash, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 14(12), 999-1009.
12. Kwak, K. S., Ma, S. J., Choi, S. M., and Oh, S. K. (2015), Property Analysis of Waterproofing and Corrosion-Resistant Performance in Concrete Water Supply Facilities, *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*, 3(2), 122-131.
13. Lee, S. H., and Kwon, S. J. (2012), Experimental study on the relationship between time-dependent chloride diffusion coefficient and compressive strength, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 24(6), 715-726.
14. Maekawa, K., Ishida, T., and Kishi, T. (2003), Multi-Scale Modeling of Concrete Performance, *Journal of Advanced Concrete Technology*, 1(2), 91-126.
15. Nath, P., and Sarker, P. (2011), Effect of Fly Ash on the Durability Properties of High Strength Concrete, *Procedia Engineering*, 14, 1149-1156.
16. 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, 183-192.
17. Park, S. S., and Kim, M. W. (2013), Evaluate the Concrete mix by Type Accelerated Corrosion Test and Chloride Penetration Analysis with Artificial Seawater Cyclic Wet and Dry Condition, *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*, 1(3), 211-218.
18. Polder, R. B., Wegen, G., and Boutz, M. (2007), Performance Based Guideline for Service Life Design of Concrete for Civil Engineering Structures-A Proposal Discussed in the Netherlands, *International RILEM Workshop on Performance Based Evaluation and Indicators for Concrete Durability*, RILEM, Madrid, Spain, 31-39.
19. RILEM. (1994), Durability Design of Concrete Structures, *Report of RILEM Technical Committee 130-CSL, E&FN*, 28-52.
20. SERI (2003), Evaluation of Chloride Ion Diffusion Characteristics of High Durability Concrete, *Samsung Engineering Research Institute*, Final report.
21. Song, H. W., and Saraswathy, V. (2006), Studies on the corrosion resistance of reinforced steel in concrete with ground granulated blast-furnace slag-an overview, *Journal of Hazardous Materials*, 138(2), 226-233.
22. Song, H. W., and Kwon, S. J. (2007), Permeability characteristics of carbonated concrete considering capillary pore structure, *Cement and Concrete Research*, 37, 909-915.



23. 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, 814-824.
24. Tang, L. (1996), Chloride transport in concrete-measurement and prediction, Ph.D dissertation, Göteborg, Chalmers University of Technology.
25. 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.
26. Yoon, C. S., Kim, K. H., Yang, W. Y., and Cha, S. W. (2012), Chloride Diffusion Coefficient at Reference Time for High Performance Concrete for Bridge Pylons in Marine Environment, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 24(4), 435-444.
27. Yuan, Q., Shi, C. Schutter, G. D., Audenaert, K., and Deng, D. (2009), Chloride binding of cement-based materials subjected to external chloride environment - A review, *Construction and Building Materials*, 23(1), 1-13.

Received : 04/08/2019

Revised : 07/29/2019

Accepted : 08/20/2019

---

**요 지** : 콘크리트의 수화물 및 이와 관련된 특성치들은 재령에 따라 변화하며 이는 염화물 확산성과 큰 관련이 있다. 본 연구에서는 세 가지 수준의 물-결합재 비와 플라이 애시 및 고로슬래그 미분말을 30% 혼입한 콘크리트 대하여 2년간 장기 양생을 수행하였다. 5번의 측정 시점(28일, 56일, 180일, 365일, 730일)에 대하여 촉진실험을 통하여 촉진 염화물 확산계수를 평가하였으며, DUCOM을 통하여 도출된 공극률, 염화물 구속능, 투수계수의 변화와 비교하였다. 염화물 확산성과 투수성의 변화 패턴이 가장 유사하였는데, 이는 투수성이 공극률의 제공에 비례하기 때문이다. 또한, 각 재령 기간 동안 변화하는 비율을 분석하였는데, 초기 재령(재령 28일~56일)에서 공극률, 투수성 및 염화물 확산성의 변화가 지배적이었고, 낮은 물-결합재 비를 가진 OPC 콘크리트에서는 180일까지 확산성의 변화가 지속적으로 크게 평가되었다.

**핵심용어** : 수화물, 염화물 확산계수, 투수성, 공극률

---