

2년 양생 실험결과를 이용한 고로슬래그 미분말 콘크리트의 염화물 확산 예측식

윤용식¹, 조성준², 권성준^{3*}

Prediction Equation for Chloride Diffusion in Concrete Containing GGBFS Based on 2-Year Cured Results

Yong-Sik Yoon¹, Sung-Jun Cho², Seung-Jun Kwon^{3*}

Abstract: GGBFS(Ground Granulated Blast Furnace Slag), one of the representative concrete mineral admixtures, improves the long-term durability and engineering performance of concrete by latent hydraulic activity. In this study, considering 3 levels of W/B(0.37, 0.42, 0.47) and GGBFS replacement ratio(0 %, 30 %, 50 %), durability performances for chloride attack are evaluated, and equations which predict behavior of accelerated chloride diffusion are proposed. Also, the relationship between accelerated chloride diffusion coefficient and passed charge is evaluated. In target curing day, accelerated chloride diffusion tests(Tang's method, ASTM C 1202) and compressive strength(KS F 2405) are performed. In the 730 day's results of accelerated chloride diffusion coefficient, GGBFS concrete has up to 28 % of decreasing ratio compared to OPC concrete, and in those of passed charge, GGBFS concrete has up to 29 % of decreasing ratio compared to OPC concrete. Also, it is deemed that the impact of variation of W/B is less in GGBFS concrete than in OPC concrete. The equations which predict accelerated chloride diffusion coefficient and passed charge are drawn, based on the characteristics of mixture and test results. The equation which predicts passed charge shows slightly higher coefficient of determination than that which predicts accelerated chloride diffusion coefficient.

Keywords: GGBFS, Accelerated diffusion coefficient, Passed charge, Compressive strength, Regression analysis

1. 서 론

콘크리트는 뛰어난 화학 저항성을 갖고 있고 경제적인 건설재료이다. 또한 재료의 생산 및 운송 시스템이 구축되어 있으므로 전 세계적으로 매해 약 55억 톤이 사용되는 것으로 추정된다(Metha and Monteiro, 2009). 콘크리트는 인장력에 취약한 공학적 특성을 갖고 있기 때문에 내부에 철근 보강재를 매립한 철근 콘크리트(RC: Reinforced Concrete) 구조 또는 프리스트레스트 콘크리트(PSC: Pre-Stressed Concrete) 구조로 다양한 건축 토목 구조물(보, 말뚝, 기초, 외벽 등)에 활용되고 있으며 고강도, 고성능, 고유동 콘크리트 등 요구하는 성능을 확보하면서 꾸준히 발전하고 있다(Metha and Monteiro, 2009; Song et al., 2006).

콘크리트 구조물은 가혹한 외부 환경에 노출되거나 사용기

간이 증가함에 따라 열화 현상이 발생한다. 국내의 경우, 양질의 천연골재 수급 문제, 콘크리트 구조물이 특수 환경(가혹 환경)에 노출되는 문제 등으로 내구성에 대한 우려가 증가하고 있는 실정이다. 특히, 염분제거가 완전하게 되지 않은 해사의 사용은 내부의 철근의 부식 개시시기를 앞당겨 구조물의 내구성을 크게 저하시키게 된다. 매립된 철근이 부식되어 인장력을 견뎌내지 못할 경우 대규모 사고가 발생되거나 구조물의 이용이 제한되어 높은 사회적 비용이 발생하게 된다(KCI, 1996; RILEM, 1994; Song et al., 2005). 염해에 대한 문제를 해결하는 방법 중에 재료적인 접근방법으로는 콘크리트에 혼화재를 혼입하는 방법이 가장 널리 알려져 있다(Lee and Kwon, 2012; Oh et al., 2016; Yoon and Kwon, 2018).

대표적인 혼화재료로는 고로슬래그 미분말(GGBFS: Ground Granulated Blast Furnace Slag), 플라이애시(FA: Fly Ash), 실리카퓌름(SF: Silica Fume) 등이 있으며 그 중 고로슬래그 미분말은 공학적 안정성이 확보된 산업 부산물로 알려져 있다(Park et al., 2018). 특히 급냉 슬래그 미분말의 경우 시멘트의 수화 반응에서 생성된 수산화칼슘(Ca(OH)₂)과 추가 반응을 이루는 잠재 수경성을 나타내기 때문에 콘크리트의 장기 내구성 및 공학적 성능을 향상시킨다(Thomas and Bamforth, 1999; KCI, 2011). 또한 고로슬래그 미분말은 자유염화물 함

¹정회원, 한남대학교 건설시스템공학과 박사과정

²정회원, 한남대학교 건설시스템공학과 석사과정

³정회원, 한남대학교 건설시스템공학과 부교수

*Corresponding author: jjuni98@hannam.ac.kr

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

•본 논문에 대한 토의를 2019년 3월 1일까지 학회로 보내주시면 2019년 5월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

착량이 OPC(Ordinary Portland Cement)보다 높아 철근부식에 직접적으로 관여하는 자유염화물 제어에 효과적이며, 밀실해진 공극구조가 염화물 이온의 확산을 제어할 수 있다 (Maekawa et al., 2003; Al-Amoudi et al., 2009).

많은 연구에서 고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트의 염화물 저항성을 평가하였지만, 다양한 배합을 동일한 조건으로 2년 이상 양생하여 장기적인 확산성을 평가한 연구는 매우 제한적이다. 본 연구에서는 3 가지 수준의 물-결합재 비 (0.37, 0.42, 0.47) 및 고로슬래그 미분말 혼입률(0%, 30%, 50%)을 고려한 콘크리트 시편을 대상으로 기존의 재령 49일, 180일, 365일에서 분석된 동일 연구(Park et al., 2018)에 재령 730일 실험 결과를 추가하여 분석하였다.

촉진 염화물 확산 실험(Tang's method, ASTM C 1202)과 압축강도 실험(KS F 2405)결과를 주로 다루었으며, 재령이 증가함에 따라 개선되는 콘크리트의 성질을 물-결합재 비 및 고로슬래그 미분말의 혼입률을 고려하여 비교 분석하였다. 또한 배합 특성과 본 연구의 실험 결과를 바탕으로 다중회귀분석을 실시하여 촉진 염화물 확산계수 및 통과 전하량을 예측하는 식을 제안하였으며 촉진 염화물 확산계수와 통과 전하량 간의 상관관계를 비선형 회귀분석을 통해 평가하였다.

2. 평가 방법

2.1 콘크리트의 배합 및 시편 준비 방법

본 연구에서는 고로슬래그 미분말의 치환률 및 물-결합재 비에 따른 고성능 콘크리트의 내구성능 거동을 평가하고자 Table 1과 같이 물-결합재 비 3 수준(0.37, 0.42, 0.47), 고로슬래그 미분말 치환률 3 수준(0%, 30%, 50%)을 고려하였다. 또한, Table 2와 Table 3에 본 연구에서 사용한 골재 및 폴리카본산계 감수제의 특성을 나타내었다. 폴리카본산계 감수제는 나프탈렌계 감수제보다 슬럼프 유지성능이 2~3 배 우수하고 조기강도 발현에 유리한 특성을 갖고 있는 것으로 알려져 있다(Lee et al., 2004).

각 배합에 대하여 $\varnothing 100 \times 200$ mm의 원주형 공시체를 제작하였으며 목표 재령일에 도달할 때까지 20°C 항온 수중양생을 실시하였다. 촉진 염화물 확산 실험(Tang's method, RCPT)을 수행하고자 원주형 공시체를 $\varnothing 100 \times 50$ mm의 디스크 시편으로 절단하였고 염화물 이온의 일 방향 침투를 유도하고자 시편의 옆면에 에폭시를 도포하였다.

2.2 촉진 염화물 확산 실험 방법

2.2.1 Tang's method

각 물-결합재 비 및 GGBFS 치환률 조건의 배합에 대하여 촉진 염화물 확산계수를 평가하고자 Tang's method에 준하여

촉진 염화물 확산 실험을 수행하였다. 이 시험방법은 전기적 이동과 확산을 동시에 고려하여 이론상 가장 합리적이고 비정상상태의 확산계수를 구할 수 있다는 장점이 있다. Fig. 1에 Tang's method 모식도 및 실험 조건을 나타내었다. 에폭시가 도포된 디스크 시편을 대상으로 Cell I(음극)에는 0.5 M의 염화나트륨(NaCl) 수용액을, Cell II(양극)에는 포화 수산화칼슘(Ca(OH)₂) 수용액을 적용하여 8 시간동안 30 V의 전압을 인가하였다. 전압을 인가한 후 시편을 할렬하여 쪼개진 부분에 0.1 N의 질산은(AgNO₃) 수용액을 분무하여 비색법으로 염화물 이온의 침투 깊이를 측정하였다. 또한 NT BUILD 492에 준하여 염화물 이온의 침투 깊이 측정 영역 및 간격을 설정하였다(Tang and Nilson, 1992; NT BUILD 492, 1999). 본 논문에서 인용한 연구(Park et al., 2018)에서는 초 장기재령 콘크리트의 내구성능 평가를 위해 각 배합별로 다량의 시편을 제작하였다. 그로인해 초기재령에서 시편의 양생 및 운반에 대한 문제가 발생하여 재령 28일에 촉진 염화물 확산계수 및 통과 전하량 평가를 실시하지 못하였다. 재령 28일의 촉진 염화물 확산계수 결과는 과거에 수행된 동일 배합 연구의 결과를 인용하여 사용하였다(SERI, 2003)

Table 1 Mix proportions for high performance concrete containing GGBFS

	W/B	Unit weight(kg/m ³)					S.P (%)
		W	C	GGB FS	Fine Agg.	Coarse Agg.	
OPC	0.37	168	454	0	767	952	1.10
	0.42	168	400	0	787	976	1.00
	0.47	168	357	0	838	960	0.95
GGBFS 30	0.37	168	318	136	762	946	1.30
	0.42	168	280	120	783	972	1.10
	0.47	168	250	107	835	956	1.00
GGBFS 50	0.37	168	227	227	760	943	1.40
	0.42	168	200	200	780	969	1.20
	0.47	168	178	179	832	853	1.10

W/B : Water to Binder ratio, W : Water, C : Cement, S.P : Super Plasticizer

Table 2 Properties of fine and coarse aggregates

Types	Items	Gmax (mm)	Specific gravity (g/cm ³)	Absorption (%)	F.M.
Fine aggregate		-	2.58	1.01	2.90
Coarse aggregate		25	2.64	0.82	6.87

F.M. : Fineness Modulus

Table 3 Properties of super-plasticizer

Types	Items	Type	pH	Main component	Solid	Density
2000R		Liquid	6.7	Polycarbonic Acid	25 %	1.08

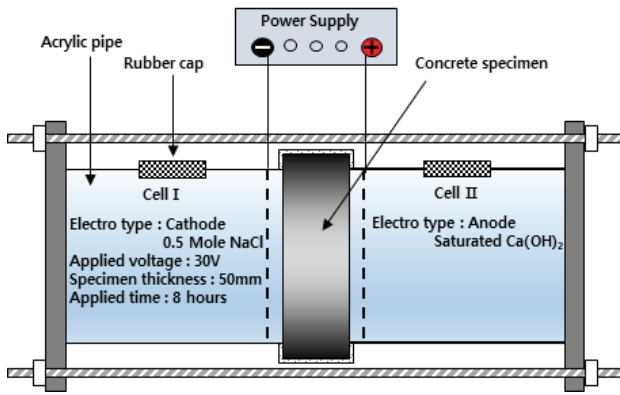


Fig. 1 Test diagram and conditions for Tang's method

각 배합에 대하여 측정된 염화물 이온의 침투 깊이를 식 (1) 및 식 (2)에 적용하여 각 배합의 촉진 염화물 확산계수를 도출하였다.

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

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

여기서, D_{rcpt} 는 비정상상태에서의 촉진 염화물 확산계수 (m^2/sec), R 은 기체상수($8.314 J/mol \cdot K$), T 는 절대온도(K), L 은 시편두께(m), z 는 이온전자가(1.0), F 는 패러데이상수 ($96,500 J/V \cdot mol$), U 는 전위차(V), x_d 는 비색법에 의한 침투 깊이(m), t 는 전위차의 적용시간(sec), C_d 는 비색법에 의한 반응농도 (mol/l), C_0 는 음극 Cell의 염소이온농도(mol/l)를 나타낸다.

2.2.2 RCPT (Rapid Chloride Penetration Test)

ASTM C 1202에 준하여 각 배합을 대상으로 통과 전하량을 측정하였다. 이 실험은 결과 값인 통과 전하량을 통해 촉진 염화물 확산계수를 경험식으로 도출할 수는 있지만, 본질적으로는 단순히 침투저항성만을 정성적으로 평가하는 실험이다. 실험의 모식도는 2.2.1절의 Tang's method(Fig. 1)와 동일하나 실험 조건은 다르다. 에폭시가 도포된 디스크 시편을 대상으로 Cell I (음극)에는 3%의 염화나트륨($NaCl$) 수용액을, Cell II (양극)에는 0.3 M 수산화나트륨($NaOH$) 수용액을 적용하여 6 시간동안 60 V의 전압을 인가하였다. RCPT 실험 조건을 Table 4에 정리하여 나타냈다. 전압을 인가하는 동안 30분 간격으로 통과 전류 값을 측정하여 아래의 식 (3)을 통해 통과 전하량을 산출하였다. ASTM C 1202에서는 Table 5와같이 통과 전하량으로 콘크리트의 염화물 확산 저항성을 평가한다 (ASTM C 1202, 2005). 재령 28일의 통과 전하량 결과는 식 (4)와 같이 기존의 연구에서 제안된 상관식에 재령 28일 촉진 염

화물 확산계수를 대입하여 도출하였다(Berke and Hicks, 1994).

$$Q = 900(I_0 + 2I_{30} + 2I_{60} + \dots + 2I_{330} + I_{360}) \quad (3)$$

여기서 Q 는 통과 전하량(Coulomb)을 나타내고 있으며, I_x 는 x 분에서의 전류 값(A)을 나타낸다.

$$Q = \quad (4)$$

여기서, Q 은 통과 전하량 (Coulomb), D 는 촉진 염화물 확산계수(m^2/sec)를 나타낸다.

Table 4 Test conditions for RCPT

Condition		Levels
Electrolyte	Cathode	3% NaCl
	Anode	0.3 M NaOH
Applied voltage(V)		60
Applied time(Hour)		6
Thickness(mm)		50

Table 5 Evaluation standard of RCPT(ASTM C 1202, 2005)

Total passed charge (Coulomb)	Chloride ions permeability
> 4,000	High
2,000 ~ 4,000	Moderate
1,000 ~ 2,000	Low
100 ~ 1,000	Very low
< 100	Negligible

2.3 압축강도 평가 방법

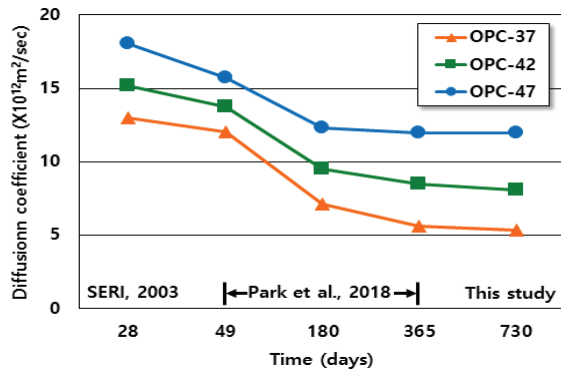
모든 배합에 대하여 목표 재령일에서 KS F 2405에 준하여 압축강도를 평가하였다(KS F 2405, 2015).

3. 평가 결과

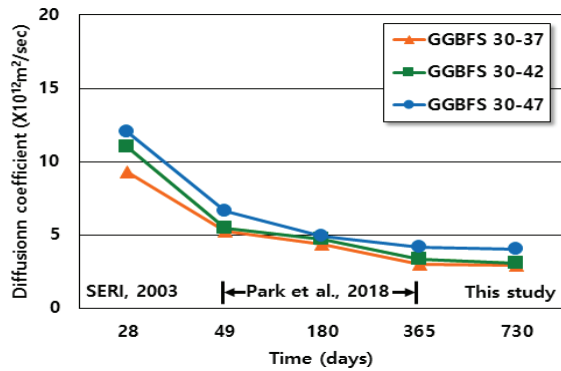
3.1 촉진 염화물 확산 실험 평가 결과

3.1.1 Tang's method 평가 결과

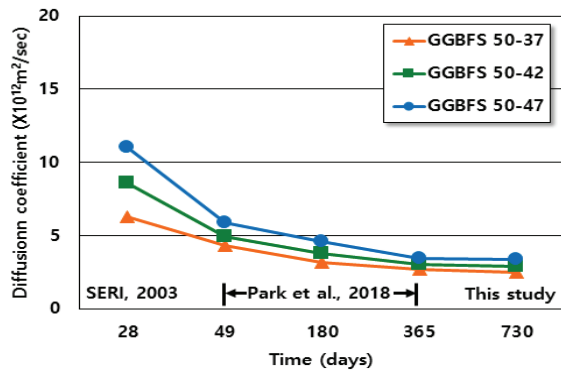
재령 28일 실험결과(SERI, 2003) 및 재령 49일, 180일, 365일 실험 결과(Park et al., 2018)는 기존의 연구에서 인용하였으며, 재령 730일 결과를 추가하여 물-결합재 비 및 GGBFS 치환 혼입률을 고려하여 촉진 염화물 확산계수 변화 거동을 평가한 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 아래의 실험결과 그래프에서 배합 뒤 숫자는 물-결합재 비를 나타낸다. 예를 들어 GGBFS 50-37은 물-결합재 비 0.37의 고로슬래그 미분말 50% 치환 혼입 배합을 나타낸다.



(a) OPC



(b) GGBFS 30



(c) GGBFS 50

Fig. 2 Result of diffusion coefficient

모든 배합에서 재령일이 증가할수록 촉진 염화물 확산계수가 감소하였으며, 물-결합재 비가 낮을수록, 고로슬래그 미분말 혼입률이 높을수록 더 낮은 확산계수가 나타났다. 특히, 초기재령일인 28일에서부터 고로슬래그 미분말 혼입 배합이 OPC 배합보다 낮은 값을 나타내었는데 OPC 배합 대비 GGBFS 30 배합에서는 66%~72%, GGBFS 50 배합에서는 48%~61%의 확산계수를 나타내었다. 재령일이 28일에서 730일로 증가함에 따라 OPC 배합은 41%~66%의 감소율을, GGBFS 30 배합의 경우 28%~33%의 감소율을, GGBFS 50 배합의 경우 30%~40%의 감소율을 나타내었다. 고로슬래그 미분말의 잠재수정성에 의한 추가적인 수화물의 생성으

로 확산계수 감소율이 고로슬래그 미분말 혼입 콘크리트에서 OPC 콘크리트 보다 높게 나타난 것으로 보인다. 또한, 물-결합재 비의 증감으로 인한 확산계수 변화 폭이 GGBFS 혼입 콘크리트보다 OPC 콘크리트에서 더 크게 나타났다. 물-결합재 비 0.42를 기준으로 각 재령일에서의 변동 폭을 평균적으로 하여 평가하면 OPC 배합의 경우 -24%~30%의 변동 폭을, GGBFS 30 배합의 경우 -8%~18%의 변동 폭을, GGBFS 50 배합의 경우 -16%~20%의 변동 폭을 나타내었다. 물-결합재 비의 증감으로 인한 확산계수의 변동을 Fig. 3에 나타내었다. 기존의 연구에서 알려진 바와 같이 OPC 콘크리트는 물-결합재 비가 염해저항성능에 지배적인 영향을 미치는 것으로 보인다(Yoon and Kwon, 2018). 또한 고로슬래그 미분말을 치환 혼입한 콘크리트는 OPC 콘크리트보다 물-결합재 비의 영향을 적게 받는 것으로 판단된다.

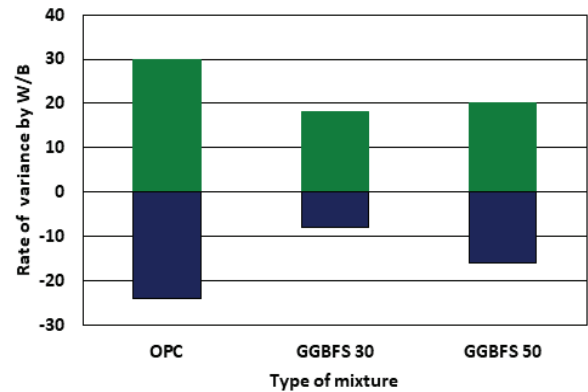


Fig. 3 Result of variance of accelerated diffusion coefficient by varying W/B

3.1.2 RCPT (Rapid Chloride Penetration Test)

목표재령일에서 측정된 각 배합의 통과 전하량을 Fig. 4에 나타내었다. 재령 28일의 통과 전하량은 식 (4)와 같이 기존의 연구에서 제안된 상관식을 참고하여 도출하였으며, 재령 49일, 180일, 365일의 결과는 기존의 연구의 결과를 인용하였다 (Park et al., 2018).

3.1.1절의 촉진 염화물 확산계수 평가 결과 동향과 같이 물-결합재 비가 낮을수록, 고로슬래그 미분말 혼입률이 높을수록 낮은 통과 전하량이 나타났는데 이는 두 실험 모두 본질적으로 전기장 내의 염화물 이온의 이동속도에 지배적인 실험이기 때문이다. Table 5에 나타난 평가기준에 따르면 재령 28일에서 OPC 배합은 모두 High 등급에 포함되었으며, GGBFS 30 배합은 물-결합재 비 0.37 배합만 Moderate 등급에 포함되고 나머지 배합은 High 등급에 포함되었다. GGBFS 50 배합의 경우 물-결합재 비 0.47 배합에서만 High 등급에 포함되었으며 나머지 배합들에서는 Moderate 등급으로 평가되었다. 최종 재령일인 730일에서는 OPC 배합의 경우 물-결합재 비

0.37에서만 Low 등급에 포함되지만 모든 고로슬래그 미분말 혼입 배합에서는 Low 등급 및 Very low 등급에 해당되어 염해 저항성이 뛰어난 것으로 판단된다. 재령일이 28일에서 730일로 증가함에 따라 OPC 배합의 경우 34%~42%, GGBFS 30 배합의 경우 26%~29%, GGBFS 50 배합 22%~31%의 감소율을 나타내었다. 물-결합재 비의 증가로 인한 모든 재령일의 평균 변동 폭은 OPC 배합에서는 -26%~24%, GGBFS 30 배합에서는 -8%~13%, GGBFS 50 배합에서는 -17%~25%의 변동 폭을 나타내었다. 물-결합재 비의 증가로 인한 통과 전하량의 변동을 Fig. 5에 나타내었다.

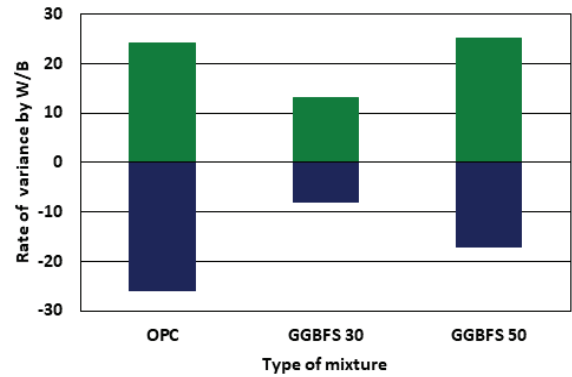


Fig. 5 Result of variance of passed charge by varying W/B

3.2 압축강도 평가 결과

재령 28일, 49일, 180일, 365일 압축강도 결과는 기존의 연구에서 인용하였으며(Park et al., 2018), 재령 730일 결과 값을 추가하여 각 배합의 압축강도를 평가한 결과를 Fig. 6에 나타내었다.

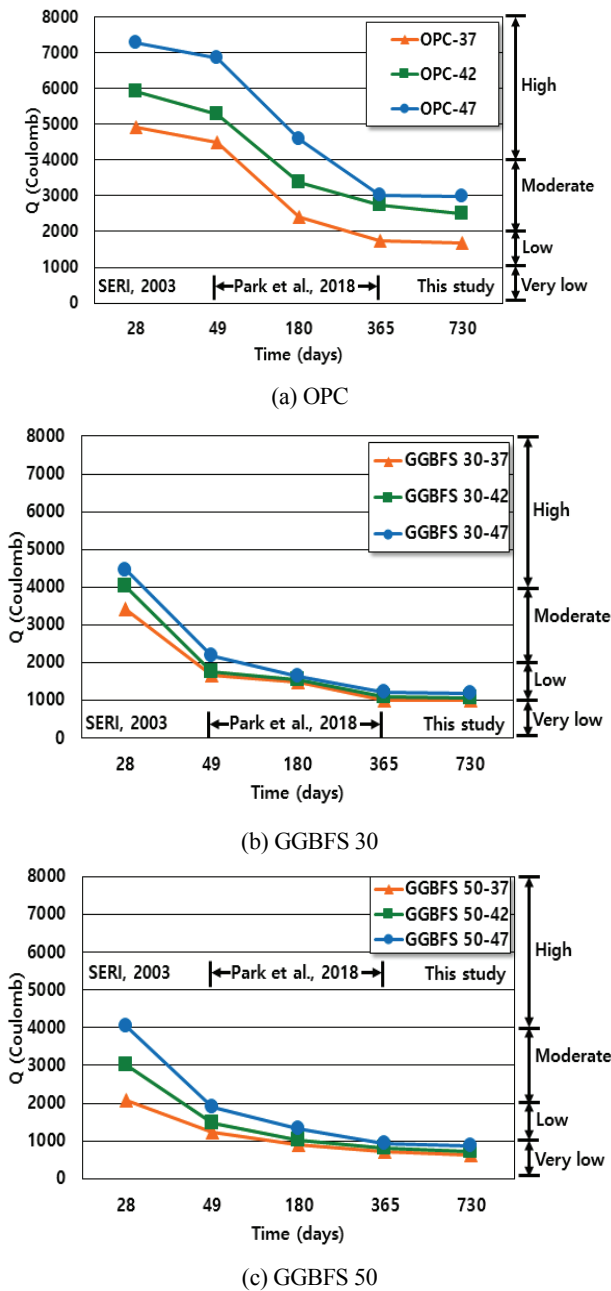


Fig. 4 Result of passed charge

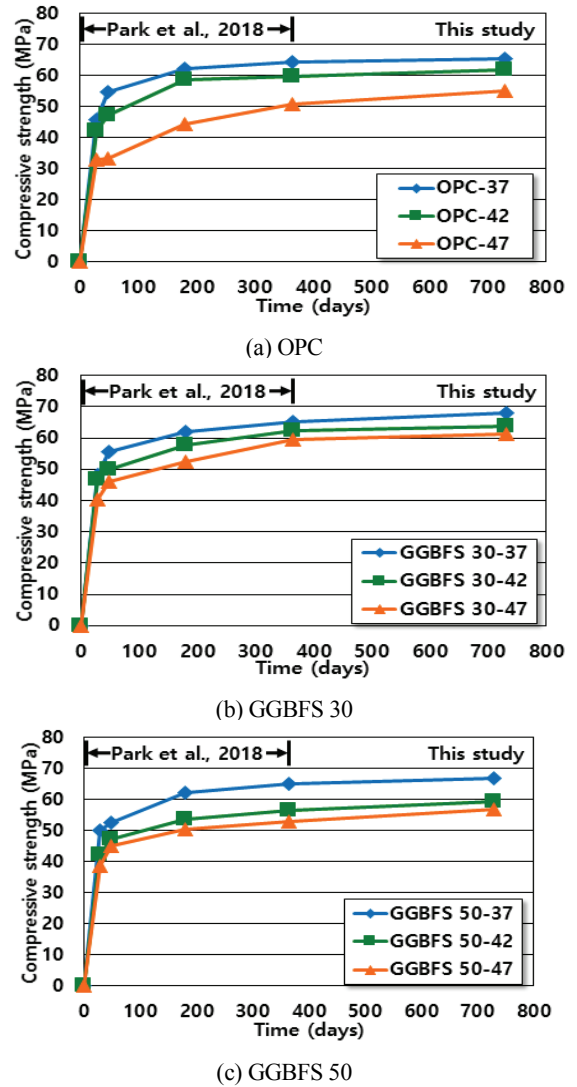


Fig. 6 Result of compressive strength

3.1 절의 촉진 염화물 확산 실험 거동과는 다르게 GGBFS 50 배합에서 GGBFS 30 배합보다 다소 낮은 강도 값이 발견되었다. 염해 저항 성능의 경우 OPC보다 고로슬래그 미분말의 분말도가 높기 때문에 Packing effect에 의해 염화물 이온의 침투가 저하되지만 압축 강도 거동은 Packing effect에 의한 영향을 받지 않아 혼입률 30%와 50% 사이에 큰 차이가 발생하지 않았다. 또한 초기재령인 28일에서 OPC 배합과 고로슬래그 미분말 혼입 배합 간에 강도차이가 크지 않았다. 시멘트를 고로슬래그 미분말로 치환하면 시멘트 량이 줄어들어 강도가 낮아져야하지만 시멘트 량이 감소하면서 시멘트와 반응하는 자유수의 양이 늘어나고 이로 인해 C₃S와 C₄AF의 반응이 촉진되어 강도가 회복된다. 이러한 효과를 Dilution effect라 하며 기존의 연구에서도 증명되었다(Jeong et al., 2015). 재령 28일 대비 730일에서의 강도 증가율은 OPC 배합에서 143% ~ 167%, GGBFS 30 배합에서 137% ~ 152%, GGBFS 50 배합에서 134% ~ 147%를 나타내었다. 각 배합의 강도 증가율을 Fig. 7에 나타내었다.

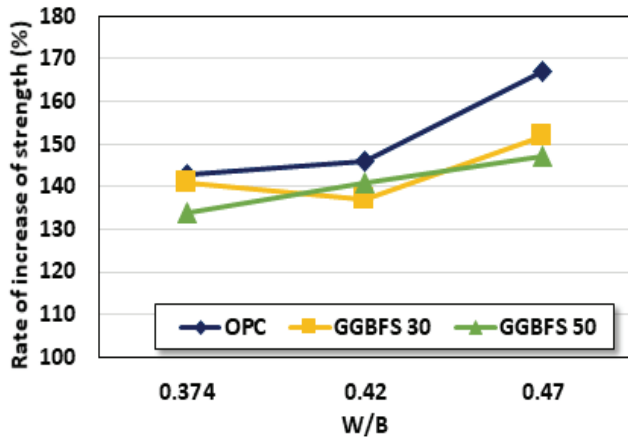


Fig. 7 Ratio of increase in compressive strength

4. GGBFS 치환 혼입 고성능 콘크리트의 촉진 염화물 확산 예측식 제안

4.1 촉진 염화물 확산 거동과 압축강도 및 배합특성간의 상관관계 분석

본 연구에서 사용한 배합특성(물-결합재 비, 고로슬래그 미분말의 혼입률) 그리고 3.1.1절의 촉진 염화물 확산계수, 3.2절의 압축강도 평가 결과를 바탕으로 다중회귀분석을 실시하여 배합정보 및 압축강도로 촉진 염화물 확산계수를 예측하는 식을 제안하였다. 다중회귀분석 결과를 Fig. 8 및 식 (5)에 나타내었다.

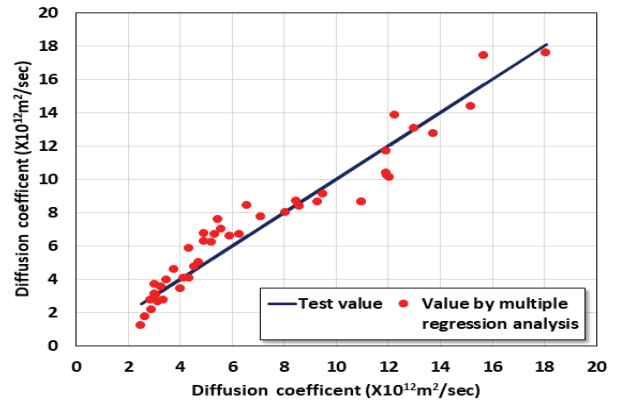


Fig. 8 Result of multiple regression analysis between diffusion coefficient and strength with properties of mixture

$$D = 10^{-12} \times (26.88 - 0.0073 \times GGBFS + 3.02 \times W/B - 0.3259 \times CS + 0.001127 \times GGBFS^2 - 0.406 \times GGBFS \times W/B) \quad (5)$$

$(R^2 = 0.929)$

여기서, D 는 촉진 염화물 확산계수(m²/sec), $GGBFS$ 는 고로슬래그 미분말 혼입률(%), W/B 는 물-결합재 비, CS 는 압축강도(MPa)를 나타낸다.

Fig. 8과 같이 X 및 Y 축 모두 실험값(촉진 염화물 확산계수)을 축으로 하여 기울기 1인 선을 도시할 경우, 이 선에 회귀 분석 값이 집중되어야 정도(precision)가 높은 회귀식이라 볼 수 있다. 다중회귀분석 결과 결정계수가 0.929로 높게 나타나 회귀식이 신뢰할만한 수준인 것으로 보인다. 또한 같은 조건으로 촉진 염화물 확산계수 대신 3.1.2절의 통과 전하량 평가 결과를 이용하여 다중회귀분석한 결과를 Fig. 9 및 식 (6)에 나타내었다.

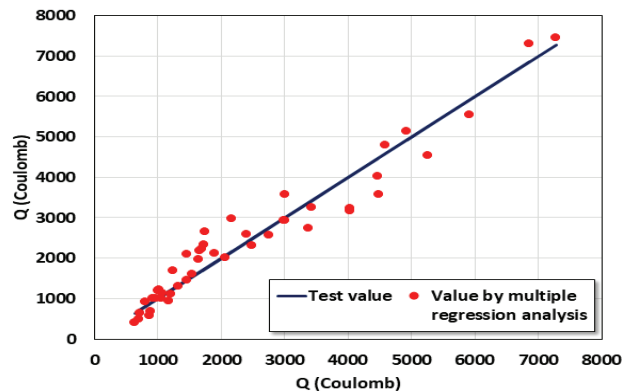


Fig. 9 Result of multiple regression analysis between passed charge and strength with properties of mixture

$$Q = 21366 - 86.9 \times GGBFS - 6197 \times W/B - 412.6 \times CS + 2.369 \times CS^2 + 0.792 \times GGBFS \times CS \quad (6)$$

$(R^2 = 0.940)$

여기서, Q 는 통과 전하량(Coulomb), $GGBFS$ 은 고로슬래그 미분말 혼입률(%), W/B 는 물-결합재 비, CS 는 압축강도(MPa)를 나타낸다.

Fig. 8과 마찬가지로 Fig. 9에도 X 및 Y 축 모두 실험 값(통과 전하량)을 축으로 하여 기울기가 1인 선을 도시한 후 회귀 분석 값과 비교하였다. 다중회귀분석 결과 결정계수가 0.940으로 나타났으며 이는 위의 축진 염화물 확산계수 결과를 이용하였을 때보다 다소 높은 값이다. 따라서 본 연구에서 얻은 축진 염화물 확산계수 예측식 중에서는 통과 전하량 예측식이 축진 염화물 확산계수 예측식 보다 다소 높은 신뢰도를 갖고 있는 것으로 보인다. 또한 본 연구와 같은 배합 및 실험 조건으로 추가 실험이 예정되어있으므로 장기재령 실험 데이터가 쌓인다면 신뢰도가 보다 높은 제안식을 얻을 수 있을 것으로 보인다.

4.2 축진염화물확산계수와 통과 전하량 간의 상관관계 분석

본 절에서는 축진염화물 확산계수와 통과 전하량 간의 관계식을 비선형 회귀분석을 통해 분석하고 기존의 연구(Berke and Hicks, 1994)에서 제안된 식과의 비교를 수행하였다. 본 연구의 축진 염화물 확산계수와 통과 전하량 간의 비선형 회귀분석 결과를 Fig. 10 및 식 (7)에, 기존의 연구결과와의 비교 결과를 Fig. 11에 나타내었다.

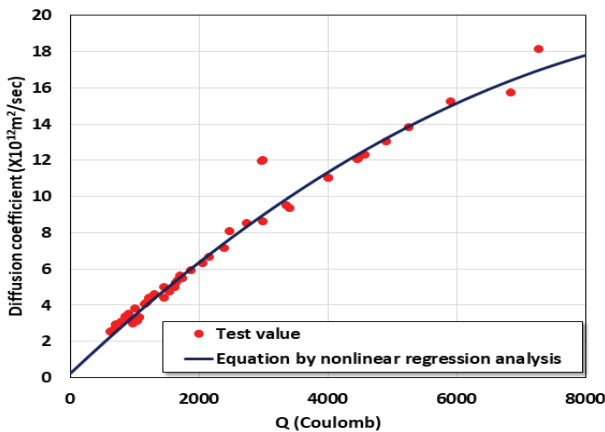


Fig. 10 Result of nonlinear regression analysis between diffusion coefficient and passed charge

$$D = 10^{-12} \times (0.2268 + 0.003363 \times Q - 1.456 \times 10^{-7} \times Q^2) \quad (7)$$

$(R^2 = 0.970)$

여기서, D 는 축진 염화물 확산계수(m^2/sec), Q 는 통과 전하량(Coulomb)을 나타낸다.

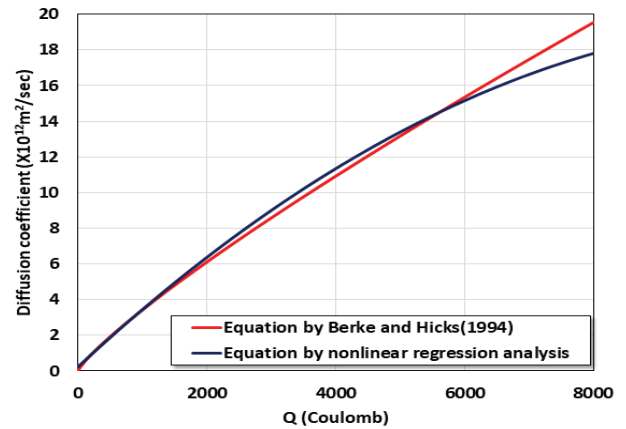


Fig. 11 Result of comparison between the equation of this study and the equation of previous study

축진 염화물 확산계수와 통과 전하량 간의 비선형회귀분석 결과 0.970이라는 높은 결정계수가 나타났으며 이는 두 실험 방법 모두 전기장 내 염소이온 속도에 지배적인 축진 염화물 확산 실험의 부류에 속하기 때문으로 보인다. 또한 기존의 연구(Berke and Hicks, 1994)에서 제안된 식과 본 연구에서 도출한 식을 비교 평가한 결과 통과 전하량이 0 coulomb ~ 5,600 coulomb인 범위에서는 본 연구의 제안식과 기존의 제안식 간에 큰 차이가 발생하지 않았다. 그러나 통과 전하량이 5,600 coulomb 이상으로 증가하게 되면 두 식 간의 차이가 점점 증가하게 되는데, 이는 기존의 식에서는 콘크리트의 품질이 불량해짐에 따라 비선형적으로 증가하는 식의 입력 값인 통과 전하량의 경향을 충분히 고려하는데 제한성이 있기 때문으로 보인다.

5. 결론

본 연구에서는 3 가지 수준의 물-결합재 비 및 고로슬래그 미분말 혼입률을 고려하여 목표 재령일에서 축진 염화물 확산계수, 통과 전하량 압축강도를 평가하였다. 또한 다중회귀분석을 통해 배합특성과 압축강도 결과로 축진 염화물 확산계수 및 통과 전하량을 예측할 수 있는 식을 제안하였으며 축진 염화물 확산계수와 통과 전하량 간의 상관식을 도출하였다. 본 연구의 결론은 다음과 같다.

- 1) 재령일이 28일에서 730일로 증가함에 따라 축진 염화물 확산계수가 크게 감소하였다. 재령 28일 대비 730일에서의 확산계수 감소율을 평가하면 OPC 배합의 경우 41% ~ 66%, GGBFS 30 배합의 경우 28% ~ 33%, GGBFS 50 배합의 경우 30% ~ 40%의 감소율을 나타내었다. 고로

슬래그 미분말의 잠재수경성에 기인하여 모든 고로슬래그 미분말 혼입 배합에서 OPC 배합보다 낮은 확산계수를 나타내었다. 또한, 초기재령일인 재령 28일에서부터 OPC 배합보다 고로슬래그 미분말 혼입 배합이 48 % ~ 72 % 낮은 확산계수를 나타내었다.

- 2) ASTM C 1202에 준하여 통과 전하량을 평가한 결과 재령 28일에서는 모든 OPC 배합이 High 등급에 포함되며 모든 GGBFS 배합에서는 물-결합재 비가 낮은 배합은 Moderate 등급을, 높은 배합은 High 등급을 나타내어 OPC 배합과 GGBFS 배합 간 등급차이가 1단계 이하로 나타났다. 하지만 최종 재령일인 730일에서는 최대 2단계까지 차이가 발생하였다. 재령일이 확보된 GGBFS 혼입 콘크리트는 OPC 콘크리트 대비 뛰어난 염해 내구성능을 나타낸다는 것을 알 수 있다.
- 3) 압축강도 평가 결과 물-결합재 비가 낮을수록 높은 강도가 발현되었으며 잠재수경성에 의해 GGBFS 배합에서 OPC 배합보다 높은 강도가 나타났다. 재령일이 28일에서 730일로 증가함에 따라 OPC 배합의 경우 143 % ~ 167 %, GGBFS 30 배합의 경우 137 % ~ 152 %, GGBFS 50 배합의 경우 134 % ~ 147 %의 증가율을 나타내었다.
- 4) 촉진 염화물 확산계수와 통과 전하량간의 상관관계를 비선형회귀분석으로 평가하여 기존의 연구와 비교하였다. 본 연구의 제안식은 높은 결정계수(0.970)를 갖고 있으나, 통과 전하량이 5,600 coulomb 이상인 경우 기존의 제안식과의 차이가 증가하게 되는데 이는 기존의 식에서는 비선형적으로 증가하는 식의 입력 값인 통과 전하량의 경향을 충분히 고려하지 못하고 있기 때문으로 사료된다.

감사의 글

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

References

1. ASTM C 1202. (2005), Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration, American Society for Testing and Materials.
2. Al-Amoudi, O. S. B., Al-Kutti, W. A., Ahmad, S., and Maslehuddin, M. (2009), Correlation between Compressive Strength and Certain Durability Indices of Plain and Blended

- Cement Concretes, *Cement and Concrete Composites*, 31(9), 672-676.
3. Berke N. S., and Hicks, M. C. (1994), Predicting Chloride Profiles in Concrete, *CORROSION*, 50(3), 234-239.
4. Jeong, J. Y., Jang, S. Y., Choi, Y. C., Jung, S. H., and Kim, S. I. (2015), Effects of Replacement Ratio and Fineness of GGBFS on the Hydration and Pozzolanic Reaction of High-Strength High-Volume GGBFS Blended Cement Pastes, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 27(2), 115-125.
5. KCI(Korea Concrete Institute). (1996), Latest Concrete Engineering, Kimoondang, Seoul, 453-459.
6. KCI(Korea Concrete Institute). (2011), Concrete and Environment, Kimoondang, Seoul, 28-36.
7. KS F 2405. (2015), Standard Test Method for Compressive Strength of Concrete, KSSN.
8. Lee, J. W., Kim, K. M., Bae, Y. K., and Lee, J. S. (2004), Study on the field application according to the early strength of the concrete admixed with polycarboxylate superplasticizer, *In Korea Concrete Institute academic conference*, Korea Concrete Institute, Pyeongchang, 200-203.
9. 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.
10. Metha, P. K., and Monteiro, P. M. (2009), Concrete-Structure, properties, and materials, 2nd edition, prentice Hall, New-Jersey, 1-7.
11. Maekawa, K., Ishida, T., and Kishi, T. (2003), Multi-Scale Modeling of Concrete Performance, *Journal of Advanced Concrete Technology*, 1(2), 91-126.
12. NT BUILD 492, (1999), Concrete, Mortar and Cement-Based Repair Materials: Chloride Migration Coefficient from Non-Steady-State Migration Experiments, NORDTEST.
13. Oh, K. S., Moon, J. M., Park, K. T., and Kwon, S. J. (2016), Evaluation of Load Capacity Reduction in RC Beam with Corroded FRP Hybrid Bar and Steel, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 20(2), 10-17.
14. Park, J. S., Yoon, Y. S., and Kwon, S. J. (2018), Relations Analysis between Strength and Time-parameter in High Performance Concrete Containing GGBFS Cured for 1 year, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 30(4), (accepted).
15. RILEM. (1994), Durability Design of Concrete Structures, Report of RILEM Technical Committee 130-CSL, E&FN, London, 28-52.
16. SERI. (2003), Evaluation of chloride ion diffusion characteristics of high durability concrete, Samsung Engineering Research Institute.
17. Song, H. W., Kwon, S. J., Byun, K. J., and Park, C. K. (2005), A Study on Analytical Technique of Chloride Diffusion Considering Characteristics of Mixture Design for High Performance Concrete using Mineral Admixture, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, 25(1A), 213-223.
18. 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 of Building and Monument*, 12(4), 265-284.

19. 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.
20. Thomas, M. D. A., and Bamforth, P. B. (1999), Modelling chloride diffusion in concrete: Effect of fly ash and slag, *Cement and concrete research*, 29(4), 487-495.
21. Yoon, Y. S., and Kwon, S. J. (2018), Evaluation of Time-

Dependent Chloride Resistance in HPC containing Fly Ash Cured for 1 year, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, (accepted).

Received : 09/07/2018

Revised : 10/29/2018

Accepted : 11/12/2018

요 지 : 대표적인 콘크리트 혼화재료 중 하나인 고로슬래그 미분말을 혼입한 콘크리트는 잠재수경성에 의해 콘크리트의 장기 내구성능 및 역학적 성능이 향상된다. 본 연구에서는 3 가지 수준의 물-결합재 비(0.37, 0.42, 0.47) 및 고로슬래그 미분말 혼입률(0 %, 30 %, 50 %)을 고려하여 염해에 대한 내구성능 평가를 수행하였으며, 염화물 확산 거동(축진 염화물 확산계수, 통과 전하량)을 예측하는 식을 도출하고 축진 염화물 확산계수와 통과 전하량간의 상관관계를 평가하였다. 2년 양생조건 시 고로슬래그 미분말 혼입 콘크리트에서 OPC 콘크리트 대비 축진 염화물 확산계수 평가 결과에서는 최대 28 %의 감소율을 통과 전하량 평가에서는 최대 29 %의 감소율을 나타냈다. 또한 물-결합재 비의 증감에 의한 영향을 OPC 콘크리트 보다 GGBFS 미분말 혼입 콘크리트에서 더 적게 받는 것으로 판단된다. 배합 특성 및 실험 결과를 바탕으로 축진 염화물 확산계수 및 통과 전하량을 예측하는 식을 다중회귀분석을 통해 도출한 결과, 통과 전하량 예측식이 확산계수 예측식보다 높은 결정계수를 나타냈다.

핵심용어 : 고로슬래그 미분말, 축진 염화물 확산계수, 통과 전하량, 압축강도, 회귀분석
