

FA 및 BFS를 다량 혼입한 콘크리트의 염분침투성

Chloride Penetration of Concrete Mixed with High Volume Fly Ash and Blast Furnace Slag

박 기 철¹⁾ 임 남 기^{2)*}
Ki-Cheul Park Nam-Gi Lim

Abstract

This study examined dynamic and characteristics and chloride penetration of concrete mixed with large amount of FA and BFS, which are considered for positive application to construction fields with purpose of long-term durability of concrete structures. As a result of strength test on FA and BFS, FA concrete showed higher increase of strength compared to OPC, when FA4000 and FA5000 were mixed 30%, respectively. For BFS concrete, those mixed with 30% and 50% of BFS8000, respectively, showed higher or equivalent strength compare to OPC. As a result of test of chloride penetration on FA and BFS, diffusion coefficients of concrete mixed with 30% FA4000 and FA5000, respectively, showed to restrain average 6.5% of diffusion coefficient compared to OPC. And in case of BFS concrete, those mixed with BFS6000 and BFS8000, restrained diffusion of chloride ions 253% and 336%, respectively, compared to OPC. Therefore, Mixing 50% of BFS was most efficient in order to maximize restraint of chloride penetration according to metathesis of large amount.

For relation between compression strength and diffusion coefficient of FA and BFS concrete, as strength increased, diffusion coefficient decreased. In this study, when mixing FA and BFS to concrete for long-run durability and restraint against chloride penetration, for FA, mixing it to concrete with less or equivalent 30% of replacement rate was most efficient. And for BFS, as fineness was higher and mixing it to concrete with less or equivalent 50% of replacement rate, there were results of higher strength compared to OPC and more efficient restraint of chloride ions.

Keywords : Chloride penetration, Diffusion coefficient, Fly ash, Blast furnace slag, NT BUILD 492

1. 서론

최근 콘크리트구조물이 대형화·거대화·초고층화 되면서 이들 구조물의 내구성 확보 및 향상을 통한 콘크리트구조물의 장수명화에 대한 사회적인 요구가 점점 증대되고 있다. 여기에 최근 급격한 환경기후변화에 의한 알카리 골재반응, 중성화, 탄산화, 황산염, 염해, 동결융해, 건조수축, 화학물질 등의 조기열화요인에 기인하는 콘크리트구조물의 내구성 저하가 커다란 사회문제로 부각되고 있다. 특히, 콘크리트구조물의 조기열화 현상에 기인하는 각종 요인들의 복잡성에 대응할 수 있는 내구성에 대한 해명과제는 기존의 연구에서부터 끊임없이 제기되고 있으나, 이에 대한 명확한 대책

이 현재까지 이어져 오고 있다.

이중에서도 가장 심각한 형태의 열화요인으로 최근 염화물이온(Chloride Ion)의 침투에 기인하는 철근콘크리트구조물의 내구성 저하가 커다란 해결 과제로 지목되고 있다. 더욱이, 최근 철근콘크리트구조물이 해안가를 중심으로 급격히 증가하면서 염화물이온의 침투에 대응할 수 있는 콘크리트구조물의 내구성의 향상 요구는 앞으로도 더욱더 높아질 것은 분명하다.

염화물이온은 해수, 해풍 및 사용재료를 통해 콘크리트에 유입되거나 또는 콘크리트구조물에 침투하게 된다. 특히, 콘크리트 중에 존재하는 염화물이온은 해양 환경 하에서 철근콘크리트구조물의 내구성 및 내구년수의 저하를 초래하는

1) 정회원, 동명대학교 건축공학과 박사과정수료
2) 정회원, 동명대학교 건축공학과 교수, 교신저자

* Corresponding author : ing@tu.ac.kr

• 본 논문에 대한 토의를 2015년 2월 28일까지 학회로 보내주시면 2015년 3월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

중요한 원인으로 인식되고 있다.

이에 대한 대책으로 최근 염화물이온의 침투 및 확산에 기인하는 콘크리트구조물의 내구성 향상 및 저하 대책으로 콘크리트구조물의 장기내구성을 목적으로 한 플라이애쉬 (Fly Ash : 이하, FA) 및 고로슬래그미분말 (Blast Furnace Slag : 이하, BFS), 섬유 (Fiber) 등을 혼입한 콘크리트의 적극적인 적용이 검토되면서 이들 재료를 혼입한 콘크리트의 역학적 특성 및 우수한 염분침투저항성이 주목 받고 있다.

이에 본 연구에서는 최근 시멘트원료 및 콘크리트용 골재, 지반개량제 등으로 건설 분야에의 적극적인 적용이 검토되고 있는 FA 및 BFS를 다량 혼입한 콘크리트의 염분침투성에 대해 검토하였다. 즉, 분말도가 각각 다른 FA 및 BFS를 시멘트 중량치환으로 30, 50, 70%까지 다량 혼입하는 방법으로 FA 및 BFS 혼입 콘크리트의 역학적 및 염분침투성을 실험적으로 검토하였다. 이를 통해 앞으로 콘크리트의 내구성 및 장수명화에 관한 연구의 일환으로 FA 및 BFS 혼입 콘크리트의 염분침투성을 단기간에 파악할 수 있는 기술개발과의 연계에 있어 그 토대가 될 수 있는 기초적인 자료를 제시하고자 한다.

2. 실험계획

2.1 실험재료

본 연구에서는 FA 및 BFS의 혼입이 콘크리트의 역학적 및 염분침투거동에 미치는 영향을 실험적으로 검토하기 위해 다음과 같은 재료를 이용하여 실험을 실시하였다.

시멘트는 보통포틀랜드시멘트 (분말도 3,300cm²/g, 밀도 3.16), FA는 KS L 5405에 규정된 분말도 : 4,780cm²/g (밀도 : 2.89), 분말도 : 3,370cm²/g (밀도 : 2.81)의 2종류를 사용하였고, BFS는 KS F 2563에 규정된 분말도 7,820 cm²/g (밀도 2.90), 6,120 cm²/g (밀도 2.89), 3,980 cm²/g (밀도 2.91)의 3종류를 사용하였다. FA 및 BFS의 물리적 성질은 각각 Table 1, 2와 같다. 또한, 잔골재는 경남 하동산 강모래 (밀도 : 2.67)로 KS F 2526의 규정에 적합한 천연골재를 사용하였고, 굵은골재는 경남 진해산 (밀도 : 2.69)으로 KS F 2526의 규정에 적합한 적당한 입도와 충분한 내구성을 가진 흡수율 3% 이하의 쇄석을 사용하였다. 사용골재의 물리적 성질은 Table 3과 같다.

한편, 본 실험에서는 FA 및 BFS 혼입 콘크리트의 유동성 및 장기강도 개선을 목적으로 KS F 2560 (2012)에 규정된

Table 1 Physical properties of FA

		FA 4000	FA 5000
Density (g/cm ³)	KS F 2563	1.95	1.95
	Test value	2.89	2.81
Specific surface area (cm ² /g)	KS F 2563	4,500	3,000
	Test value	4,780	3,370

Table 2 Physical properties of BFS

		BFS 4000	BFS 6000
Density (g/cm ³)	KS F 2563	2.80	2.80
	Test value	2.91	2.89
Specific surface area (cm ² /g)	KS F 2563	3000	5000
	Test value	3980	6120

Table 3 Physical properties of Aggregate

	Max Grain (mm)	Density (g/cm ³)	Absorbing ratio (%)	Weight of unit volume (kg/m ³)	F.M
Sand	5.0	2.67	1.10	1,554	2.71
Gravel	19.0	2.69	1.21	1,741	6.53

Table 4 Physical properties of AE and SP

	Water reducing ratio (%)	Bleeding ratio (%)	Freezing and thawing (%)	Compressive strength ratio (%)
AE	8.6	87	92	108
SP	10.9	52	89	127

* Compressive strength ratio (%) : 28 (Age) Strength test

공기연행제 AE (Air Entraining Agent)와 고강도 콘크리트용 폴리알킬아릴 설존산계염계의 고성능 감수제 SP (Super Plasticizer)제를 사용하였다. AE 및 SP제의 혼입량은 충분한 예비시험을 통해 확보된 목표 공기량과 슬럼프를 얻는데 필요한 량 (%.Vol)을 혼합수에 혼합한 후, 사용하였다. 본 실험에서 사용한 AE 및 SP제의 물리적 성질은 Table 4와 같다.

2.2 배합 및 공시체, 양생

본 연구에서는 FA 및 BFS의 콘크리트 다량 혼입에 따른 역학적 및 염분침투 거동을 고려하여 충분한 예비시험을 통해 FA 및 BFS의 콘크리트 혼입에 따른 확산계수의 편차를 가장 최소화할 수 있는 범위에서 FA 및 BFS를 다량 혼입하는 방법으로 실험을 실시하였다.

Table 5 Mix proportions and compressive and tensile Strength result of FA and BFS concrete

	Content [%vol.]	W/B (%)	Unit weight (kg/m ³)								Air (%)	Slump (mm)	Tensile Strength (N/mm ²)	Compressive Strength (N/mm ²)
			W	C	FA	BFS	S	G	AE	SP				
OPC	0	50	175	350		·	924	882	0.5	0.6	5.5	170	2.82	36.25
FA4000	30		175	245	105	·	904	863	0.6	0.7	5.8	175	2.36	32.86
	50		175	175	175	·	891	850	0.7	0.8	5.9	186	2.18	27.18
	70		175	105	245	·	878	834	0.8	0.8	6.1	208	1.97	22.48
FA5000	30		175	245	105	·	904	863	0.6	0.7	4.8	189	2.92	32.98
	50		175	175	175	·	891	850	0.7	0.8	5.9	197	2.57	28.05
	70		175	105	245	·	878	834	0.8	0.8	6.0	214	2.37	22.78
BFS4000	30		175	245	·	105	925	886	0.6	0.7	4.8	189	2.45	31.56
	50		175	175	·	175	923	883	0.7	0.8	5.0	203	2.51	30.18
	70		175	105	·	245	918	879	0.8	0.8	5.6	214	2.24	28.32
BFS6000	30		175	245	·	105	925	886	0.6	0.7	5.3	190	2.49	32.98
	50		175	175	·	175	923	883	0.7	0.8	5.7	213	2.52	32.09
	70		175	105	·	245	918	879	0.8	0.8	5.9	218	2.29	30.05
BFS8000	30		175	245	·	105	925	886	0.6	0.7	4.8	198	2.57	36.68
	50		175	175	·	175	923	883	0.7	0.8	5.0	218	2.60	37.18
	70		175	105	·	245	918	879	0.8	0.8	5.5	221	2.32	32.24

* Tensile & Compressive strength(N/mm²): 28(age) Strength test result

또한, 콘크리트의 배합은 FA 및 BFS의 분말도 및 혼입율의 차이가 콘크리트의 역학적 및 염분침투성에 미치는 영향을 검토하기 위해 물결합재비 (W/B=50%), 단위수량 (W=175kg/m³), 잔골재율 (s/a=52%)을 고정하였다. 또한, FA 및 BFS의 콘크리트 혼입에 따른 공기량 및 슬럼프 변화를 고려하여 AE 및 SP제를 첨가하는 방법으로 목표 공기량 (5.5±1.0%)과 슬럼프 (175±50mm)를 조절하였다. FA 및 BFS 혼입 콘크리트의 배합 및 강도시험 결과는 Table 5와 같다.

한편, 공시체는 압축강도시험용으로 Ø100×200mm의 원주형 공시체를 염분침투시험용으로는 NT BUILD 492의 규격에 의거 100×100×400mm의 각주공시체를 제작하여 실험을 실시하였다. 또한, 콘크리트의 양생은 28일간 수중양생 (20℃)을 실시하고 이후, 91일까지 기중양생을 실시하였다. 소정의 양생기간 후, 압축 강도시험용 원주 공시체를 이용하여 28일 압축강도시험을 실시하고, 각주공시체는 습식용 콘크리트 절단기를 이용하여 NT BUILD 492 시험 규격에 의거 염분침투시험용인 100×100×50mm 으로 제작하였다. 콘크리트의 강도시험방법은 Photo 1, 습식용 콘크리트 절단기는 Photo 2와 같다.

2.3 공시체의 표면 및 진공처리

본 연구에서는 침투면 이외로 부터의 염분침투를 방지하



Photo 1 Strength test method



Photo 2 Concrete cutter

기 위하여 공시체 측면에 해당되는 전 부분을 에폭시계 접착제를 이용하여 표면처리를 실시하였다. 이후, AASHTO T

227의 시험방법에 기준하여 공시체의 진공처리를 실시하였다.

본 시험과정은 공시체 중의 공기를 제거하고 또한, 콘크리트 중의 염분침투를 촉진시키기 위해 실시하는 것으로 데시케이터 (Desiccator)를 이용하여 3시간 진공처리를 실시한 후, 진공 펌프를 가동한 상태에서 Ca(OH)₂ 수용액을 데시케이터 내에 주입하는 방법이다. 이후, 데시케이터 내의 공시체가 충분히 침지될 수 있도록 Ca(OH)₂ 수용액을 주입한 후, 약 1시간 정도 더 진공펌프를 가동하여 공기를 제거한 상태에서 다시 대기압 상태로 돌아와 18±2시간 정도 수산화칼슘 수용액 중에 침지하는 방법으로 진공처리를 실시하였다.

2.4 염분침투시험

본 연구에서는 FA 및 BFS의 다량 혼입이 콘크리트의 염분침투성에 미치는 영향을 실험적으로 검토하기 위해 NT BUILD 492 전기영동시험방법에 의거하여 염분침투시험을 하였다. NT BUILD 492 전기영동시험의 개요도는 Photo 3과 같다.

NT BUILD 492에서는 시험기간 중의 공시체에 가압하는 가압전압 및 시간은 30V의 가압전압에 대응하는 초기전류에 의해 결정하는데 본 연구에서는 30V의 전압에 대응한 초기전류에 의해 가압전압 및 시간을 각각 15V 및 24시간으로 고정하여 염분침투시험을 실시하였다. 전기영동시험 후, 압축강도시험기를 이용하여 공시체의 정 중앙부를 할렬하였다. 본 연구에서의 인장강도는 이때의 쪼갬강도를 선택하였다. 이후, 할렬면에 AgNO₃ (0.1M)을 적당량 분사하여 백색으로

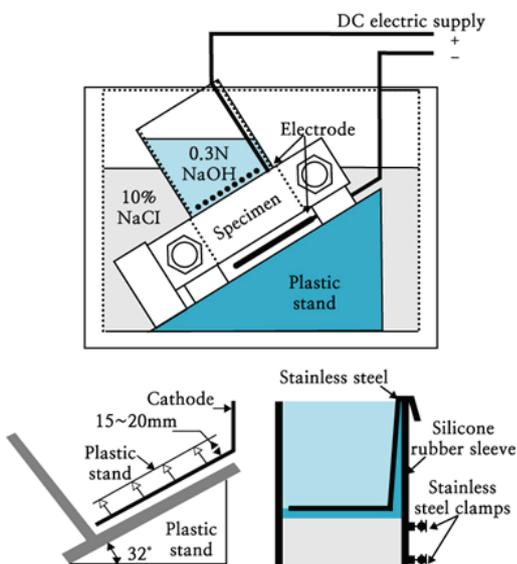


Photo 3 NT BUILD 492

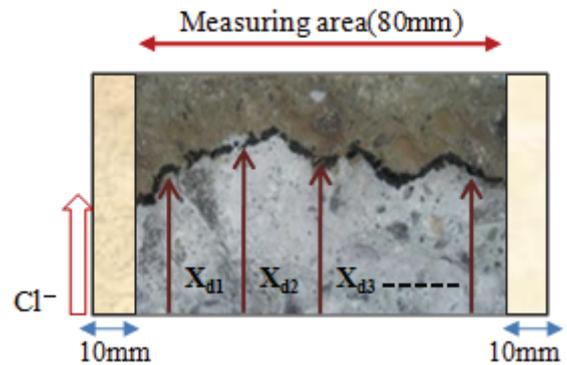


Photo 4 Chloride penetration measuring method

변환한 영역을 염분침투 깊이로 산정하였다.

한편, 염분침투깊이의 측정은 NT BUILD 492의 시험방법에 준하여 공시체의 양단으로부터 10mm를 제외하고 공시체의 중앙부에서 염화물이온이 침투한 15곳을 임의로 측정하여 그 평균값으로 하였다. 염분침투 깊이의 측정영역 및 방법은 Photo 4와 같다. 염분침투 깊이의 측정 후, 다음의 식과 같은 방법으로 확산계수 (D_{nssm})를 계산하였다. 본 연구에서의 확산계수는 염분침투 평가를 나타내는 지표로 NT BUILD 492의 시험 방법에 의해 얻어진 비정상 (非正常)상태에서의 확산계수이다.

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

여기에서 D_{nssm} : 확산계수 (비정상상태, m²/s), T: 용액의 평균온도 (°C), U: 전압 (V), L: 공시체두께 (mm), x_d : 염분침투 깊이의 평균치 (mm), t: 시험시간 (sec)을 나타낸다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 역학적 특성

3.1.1 FA 콘크리트의 역학적 특성

FA 혼입 콘크리트의 강도시험 결과는 Fig. 1과 같다. 그림으로부터 FA를 혼입한 콘크리트는 OPC 대비 전체적으로 낮은 강도를 나타내는 것을 알 수 있다. 이러한 경향은 FA의 치환율이 증가할수록 강도가 감소되는 것으로 파악되었는데 이는 치환율의 증가에 따른 시멘트의 중량 감소가 크게 영향을 미친 것으로 판단된다.

또한, FA의 분말도 및 치환율 차이에 따른 결과에서는

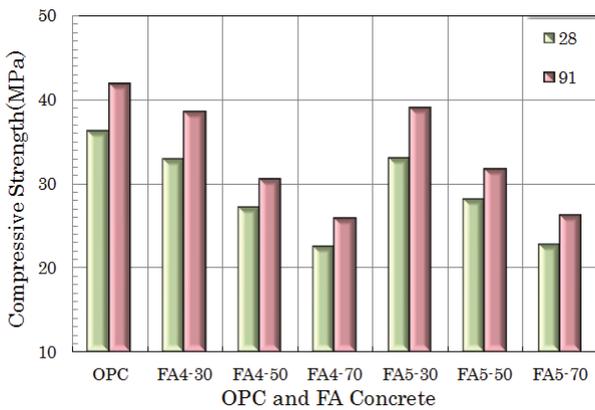


Fig. 1 Compressive strength test result of FA

FA4000 및 5000을 각각 30% 치환한 FA4-30 및 FA5-30의 경우는 OPC 대비 동등 이하의 강도를 나타내는 것으로 파악되었으나, 50% 이상 치환한 콘크리트는 OPC 대비 강도가 저하되는 것으로 나타났다. 이러한 결과로부터 FA 콘크리트의 경우 50% 이상의 혼입에서는 강도 저하에 대한 적절한 조치가 필요한 것으로 나타났다.

한편, 그림으로부터 28일에서 91일까지의 강도증가율은 OPC가 4.61MPa로 약 13% 정도의 증가율을 나타내는 것으로 파악되었다. 이와 비교하여 FA 콘크리트의 경우 FA4000 및 5000을 각각 30% 혼입한 FA4-30 및 FA5-30은 5.58 및 5.94MPa로 각각 약 17 및 18% 정도의 강도증가율을 나타내는 것으로 파악되어 FA의 혼입에 따른 장기강도 개선 효과가 확인되었다. 하지만, FA를 50% 이상 혼입한 콘크리트는 OPC 대비 동등 이하의 강도증가율을 나타내어 FA의 다량 혼입에 따른 장기강도의 개선 효과는 크게 없는 것으로 파악되었다.

3.1.2 BFS 콘크리트의 역학적 특성

BFS 혼입 콘크리트의 강도시험 결과는 Fig. 2와 같다. 그림으로부터 BFS 혼입 콘크리트에서도 OPC 콘크리트 대비 전체적으로 동등이하의 강도를 나타내는 것을 알 수 있다. 하지만, BFS 콘크리트의 경우에는 분말도 및 치환율의 차이가 강도에 크게 영향을 미치는 것으로 파악되었다. 먼저, BFS4000 (BS4) 및 6000 (BS6)의 경우는 OPC 대비 낮은 강도를 나타내는 것으로 파악되었으나, 분말도가 높은 BFS8000 (BS8)의 경우는 OPC 대비 동등이상의 강도를 나타내는 것으로 파악되었다. 이러한 경향은 고미분말의 BFS 혼입에 따른 마이크로 필라 효과 (Micro Filler Effect)가 강도 증가에 크게 영향을 미친 것으로 판단된다. 즉, 고미분말의 콘크리

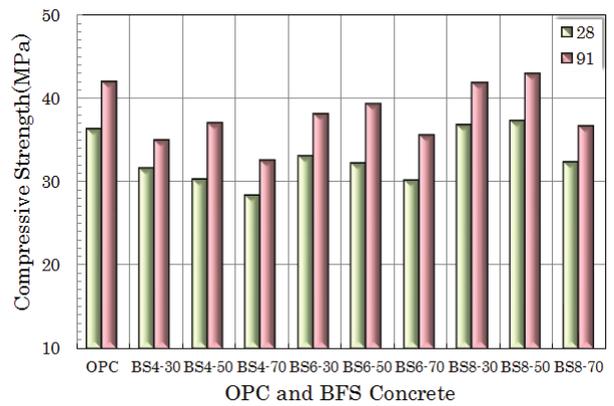


Fig. 2 Compressive strength test result of BFS

트 혼입에 따른 마이크로 입자 크기의 BFS 분말이 시멘트 입자 사이의 공극을 충전함으로써 콘크리트 내부조직이 아주 밀실한 형태로 구성되어 콘크리트의 강도 증가에 크게 영향을 미친 것으로 추측된다.

한편, OPC 및 BFS의 강도증가율에서는 OPC의 경우 28일에서 91일까지의 강도증가율은 4.61MPa로 약 13% 정도 증가하는 것으로 파악되었다. 이와 비교하여 BFS의 경우는 BS4000, 6000, 8000을 각각 30% 혼입한 것은 3.48, 5.15, 5.14MPa로 각각 11, 16, 14% 정도의 강도증가율을 나타내었다. 또한, BFS를 각각 50% 혼입한 것은 6.04, 7.06, 5.71MPa로 각각 20, 22, 16% 정도의 증가율을 나타내어 OPC 대비 평균 30% 이상의 강도증가율을 나타내어 BFS의 다량 혼입에 따른 장기강도의 개선 효과에 있어 가장 유효한 거동을 나타내는 것으로 확인되었다. 하지만, 70%의 혼입율에서는 OPC 대비 동등 이하의 강도증가율을 나타내어 다량 치환에 따른 장기강도의 개선에는 크게 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

이러한 결과로부터 본 연구의 결과에서는 BFS 콘크리트의 경우 분말도 차이에 상관없이 치환율을 50% 이하의 범위에서 콘크리트에 혼입하는 것이 장기강도의 개선에 있어 가장 유효한 것으로 확인되었다.

3.2 확산계수

3.2.1 FA 콘크리트의 확산계수

FA 혼입 콘크리트의 염분침투시험 결과는 Fig. 3과 같다. 본 연구에서는 FA의 혼입이 확산계수에 미치는 영향을 파악하기 위하여 종축에는 확산계수 ($\times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$)를 횡축에는 OPC 및 FA 콘크리트를 나타내었다.

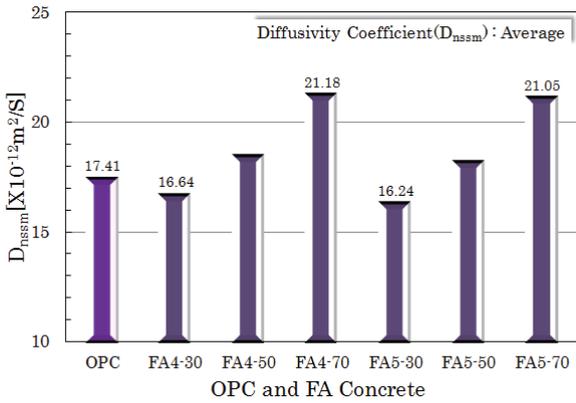


Fig. 3 Diffusivity coefficient of FA concrete

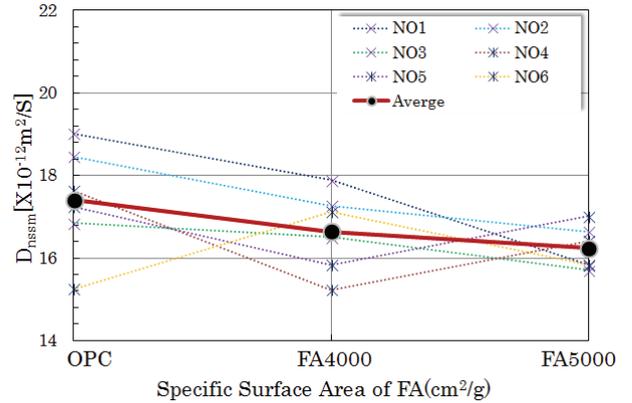


Fig. 4 Effect of FA specific surface area on diffusivity coefficient

그림으로부터 FA 혼입 콘크리트의 확산계수가 무혼입의 OPC 대비 전체적으로 높게 분포되어 있는 것을 알 수 있다. 특히, FA 4000 및 5000을 50% 이상 치환한 것은 OPC 대비 확산계수가 높게 나타나는 것으로 파악되어 FA의 다량 혼입에 따른 염분침투 억제 효과는 없는 것으로 확인되었다. 본 연구의 결과에서는 OPC의 평균 확산계수 (Average)인 17.41 ($\times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$) 대비 FA4000 및 5000을 각각 30% 혼입한 콘크리트의 확산계수가 16.64 및 16.24 ($\times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$)로 각각 4.8 및 7.3% 정도의 범위에서 확산계수를 억제할 수 있는 것으로 확인되었다. 한편, FA의 분말도 및 치환율의 차이가 확산계수의 거동에 미치는 영향은 각각 Fig. 4, 5와 같다.

Fig. 4로부터 FA의 분말도가 높아질수록 확산계수가 감소되는 경향을 나타내고 있다. 이러한 결과로부터 FA의 경우 분말도가 높은 고미분말의 혼입이 염화물이온의 억제에 있어 보다 효과가 있는 것을 알 수 있다. 하지만, FA4000 및 5000의 확산계수 차이는 0.40 ($\times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$) 정도로 거의 동등한 정도의 염분침투 억제 효과를 나타내는 것으로 확인되었다.

이러한 경향은 FA4000 및 5000의 분말도 차이가 영향을 미친 것으로서 약 1,000 (cm^2/g) 정도의 분말도 차이에서는 FA의 콘크리트 혼입에 따른 내부조직의 밀실화를 통한 염분 침투 억제 효과의 향상에는 크게 영향을 미치지 않은 것으로 추측된다. 이러한 결과로부터 향후 재료, 타설, 양생, 환경 등 여러 실험 인자를 고려한 FA혼입 콘크리트의 보다 폭넓은 연구가 진행되어 이에 대한 명확한 근거를 제시할 필요가 있을 것으로 판단된다.

한편, Fig. 5로부터 치환율 차이에 따른 확산계수의 결과에서는 FA4000 및 5000의 경우 치환율이 30% 이하의 범위에서는 OPC 대비 낮은 확산계수가 파악되어 치환율 증가에

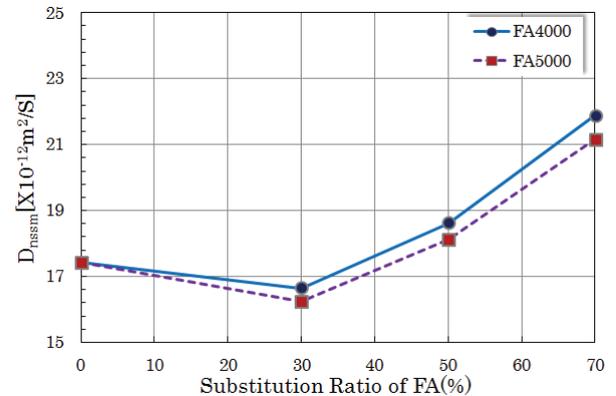


Fig. 5 Effect of FA substitution ratio on diffusivity coefficient

따른 염분침투 억제 효과가 확인되었다. 하지만, FA의 치환율이 30% 이상의 범위에서는 치환율이 증가할수록 확산계수도 동시에 증가하는 경향이 나타났다. 먼저, FA4000 및 5000을 각각 50% 혼입한 콘크리트의 확산계수는 18.41 및 18.13 ($\times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$)으로 OPC 대비 5.8 및 4.2% 정도 확산계수가 증가하는 것으로 나타났고, 70% 혼입한 것은 각각 21.18 및 21.05 ($\times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$) 정도로 OPC 대비 확산계수가 평균 21.3% 정도 급격히 증가하는 것으로 파악되었다.

이러한 경향은 FA의 혼입에 따른 강도 결과 (Fig. 1)가 크게 영향을 미친 것으로 판단된다. 즉, FA를 30% 치환한 콘크리트는 OPC 대비 강도의 차이가 크게 없이 거의 동등한 강도를 나타내어 FA 혼입에 의한 콘크리트 내부 치밀화가 외부로부터의 염화물이온의 침투를 억제한 것으로 추측된다. 하지만, FA를 50% 이상 치환한 콘크리트는 OPC 대비 강도 저하로 FA를 30% 치환한 콘크리트와 비교하여 그 내부구조가 보다 치밀화되지 못한 것이 외부로부터의 염화물이온의 침투를 보다 효과적으로 억제할 수 없었던 것으로 판단된다.

본 연구의 결과에서는 장기내구성 및 염화물 이온의 확산을 목적으로 FA를 콘크리트에 혼입한 결과 FA의 치환율을 30% 이하의 범위에서 혼입하는 것이 가장 유효한 것으로 확인되었다.

3.2.2 BFS 콘크리트의 확산계수

BFS 콘크리트의 염분침투시험 결과는 Fig. 6과 같다. 본 연구에서는 BFS의 혼입이 확산계수에 미치는 영향을 파악하기 위하여 종축에는 확산계수 ($\times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$)를 횡축에는 OPC 및 BFS 콘크리트를 나타내었다.

그림으로부터 BFS를 혼입한 콘크리트의 확산계수는 무혼입의 OPC 대비 전체적으로 낮은 것을 알 수 있다. 이러한 경향은 거의 모든 공시체에서 거의 같은 경향을 나타내는 것으로 파악되어 BFS의 혼입에 따른 염분침투억제 효과가 본 연구의 실험을 통해 확인되었다.

또한, BFS 콘크리트의 경우에는 분말도 및 치환율의 차이가 확산계수의 거동에 크게 영향을 미치는 것으로 파악되었다. 이러한 결과는 본 연구에서 염화물이온의 확산을 목적으로 BFS를 콘크리트에 혼입한 유효성을 시사하고 있는 것으로 특히, BFS의 경우 50% 이상 콘크리트에 다량 치환함으로써 우수한 염분침투 억제 효과를 기대할 수 있을 것으로 확인되었다. 한편, BFS의 분말도 및 치환율의 차이가 확산계수의 거동에 미치는 영향은 각각 Fig. 7, Fig. 8과 같다.

Fig. 7로부터 BFS의 분말도가 높아질수록 확산계수는 급격히 감소하는 것을 알 수 있다. 특히, BFS6000 및 8000을 혼입한 콘크리트의 경우는 무혼입의 OPC 콘크리트의 확산계수 17.41 ($\times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$)와 비교하여 7.50 및 5.00 ($\times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$) 이하로 각각 2.5 및 3.0배 이상 확산계수를 억제할 수 있는 것으로 파악되었다.

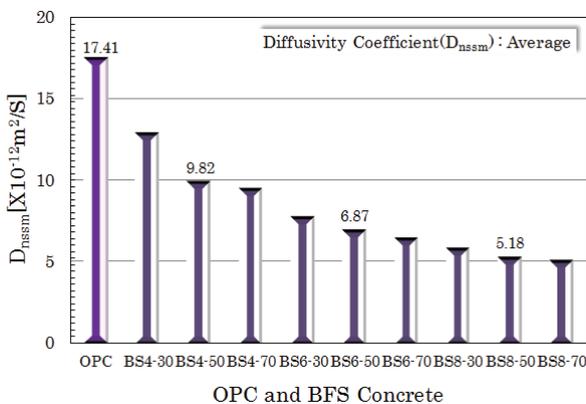


Fig. 6 Diffusivity coefficient of BFS concrete

이러한 경향은 고미분말의 BFS 혼입에 따른 마이크로 필라 효과 (Micro Filler Effect)에 의한 콘크리트 내부구조의 치밀화가 외부로부터의 염화물 이온의 침투를 억제시킨 것으로 판단된다. 이러한 결과로부터 같은 품질의 BFS라 할지라도 고미분말의 혼입이 콘크리트의 염분침투저항성을 보다 향상시킬 수 있을 것으로 확인되었다.

또한, Fig. 8로부터 BFS의 치환율 차이에 따른 결과에서는 치환율이 증가할수록 확산계수가 감소하는 것을 알 수 있다. 특히, 치환율 50% 까지는 확산계수가 거의 직선적으로 감소하는 것으로 파악되어 BFS의 다량 치환에 따른 염분침투억제 효과가 확인되었다. 하지만, 치환율이 50% 이상의 범위에서는 확산계수를 억제하는 비율이 크게 차이가 없는 것으로 나타나, BFS의 다량 혼입에 따른 염분 침투 억제 효과는 50% 정도의 범위에서 콘크리트에 혼입하는 것이 가장 적절한 것으로 확인되었다.

본 연구의 결과에서는 무혼입의 OPC 콘크리트의 확산계

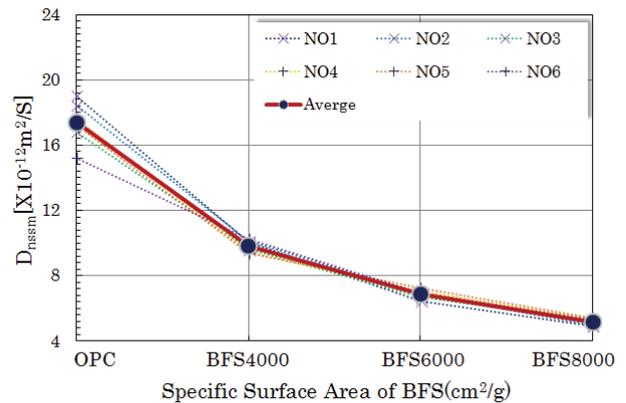


Fig. 7 Effect of BFS specific surface area on diffusivity coefficient

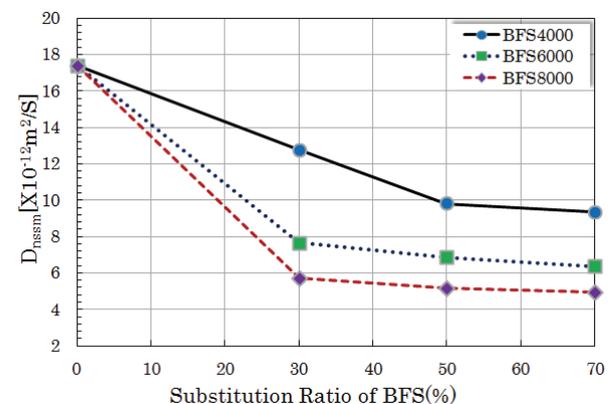


Fig. 8 Effect of BFS substitution ratio on diffusivity coefficient

수인 $17.41 (\times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s})$ 과 비교하여 BFS4000을 50% 콘크리트에 혼입하면 확산계수가 $9.82 (\times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s})$ 정도로 약 80% 정도의 범위에서 염화물이온의 확산을 억제할 수 있는 것으로 파악되었다.

또한, BFS6000을 50% 콘크리트에 혼입하면 확산계수가 $6.87 (\times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s})$ 정도로 OPC 대비 약 253% 정도의 범위에서 염화물이온의 확산을 억제할 수 있는 것으로 나타났다. 나아가 BFS8000의 경우에는 50% 콘크리트에 혼입할 경우 확산계수가 $5.18 (\times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s})$ 정도로 OPC 대비 약 336% 까지 염화물이온의 확산을 보다 효율적으로 억제할 수 있는 것으로 확인되었다.

이러한 결과로부터 본 연구에서 염화물이온의 확산을 목적으로 BFS를 콘크리트에 다량 혼입한 유효성이 검증된 것으로 판단된다. 특히, 본 실험의 결과에서는 거의 모든 공시체에서 커다란 불균형 없이 거의 동등한 시험 결과를 나타내는 것으로 파악되어 시험 결과에 대한 신뢰성은 충분히 있는 것으로 판단된다.

3.3 역학적 특성과 확산계수의 관계

본 연구에서는 FA 및 BFS 혼입 콘크리트의 역학적 및 염분침투성에 미치는 영향을 검토하기 위하여 강도 및 염분침투시험을 실시하였다. 즉, FA 및 BFS의 치환율 및 분말도의 차이가 콘크리트의 역학적 및 염분침투 거동에 미치는 영향을 검토하는 방법으로 FA 및 BFS의 역학적 특성과 염분침투성과의 상관성을 검토하였다. FA 및 BFS 콘크리트의 역학적 특성과 확산계수의 관계는 각각 Fig. 9, 10과 같다.

Fig. 9로부터 FA 혼입 콘크리트의 압축강도와 확산계수의 관계에서 압축강도가 증가할수록 확산계수는 감소하는 경향

을 알 수 있다. 예를 들어, FA4000 및 5000을 각각 30% 혼입한 콘크리트의 경우 OPC 콘크리트의 압축강도 (41.86MPa : 91day)와 비교하여 강도는 각각 38.44 및 38.92MPa 로 낮은 것을 알 수 있다. 하지만, 확산계수는 OPC의 $17.41 (\times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s})$ 과 비교하여 FA4000 및 5000을 각각 30% 혼입한 콘크리트의 확산계수는 16.64 및 $16.24 (\times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s})$ 로 확산계수의 억제에 있어서는 보다 유효한 거동을 나타내는 것으로 확인되었다.

한편, FA를 50% 이상 혼입한 콘크리트의 경우에서도 강도 증가와 함께 확산계수가 감소되는 경향이 파악되었으나, OPC 콘크리트와 비교하여 강도는 낮고 또한, 확산계수 역시도 높게 나타나는 것으로 확인되었다. 이러한 결과로부터 본 연구에서 FA의 혼입에 따른 장기내구성 확보 및 염분침투를 보다 효과적으로 억제하기 위해서는 FA의 치환율은 30% 이하로 설정하여 혼입하는 것이 가장 유효한 것으로 확인되었다.

Fig. 10으로부터 BFS 혼입 콘크리트의 압축강도와 확산계수의 관계에서도 강도가 증가할수록 확산계수는 감소하는 경향을 알 수 있다. 전술 (3.2.2)한 바와 같이, BFS의 경우 분말도 및 치환율의 차이가 이들의 역학적 특성 및 확산계수의 관계에 있어 크게 영향을 미치는 것으로 확인되었다.

예를 들어, BFS4000을 30, 50 혼입한 콘크리트의 경우 OPC 콘크리트의 압축강도 (41.86MPa)와 비교하여 강도는 각각 34.88 , 36.96MPa 로 OPC 대비 낮은 강도가 파악되었다. 하지만, 확산계수의 결과에서는 OPC의 $17.41 (\times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s})$ 과 비교하여 BFS4000을 각각 30, 50% 혼입한 것은 12.76 , $9.82 (\times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s})$ 정도로 확산계수의 억제 효과에 있어서는 OPC 대비 보다 유효한 거동을 나타내는 것으로 확인되었다.

또한, BFS6000을 30, 50% 혼입한 콘크리트의 경우 OPC 콘크리트의 압축강도와 비교하여 강도는 각각 38.08 , 39.24MPa

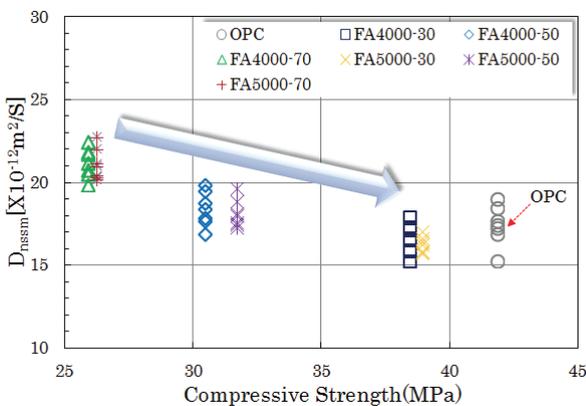


Fig. 9 Compressive strength & Diffusivity coefficient (FA)

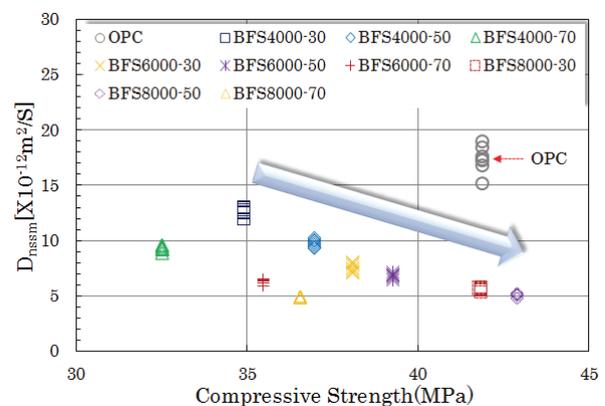


Fig. 10 Compressive strength & Diffusivity coefficient (BFS)

로 조금 낮은 것으로 파악되었다. 하지만, 확산계수의 결과에서는 BFS6000을 각각 30, 50% 혼입한 것은 7.65, 6.87 ($\times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$) 정도로 OPC 콘크리트 대비 확산계수의 증가율을 약 2.5배 이상 억제할 수 있는 것으로 파악되어 BFS의 혼입에 따른 염분침투저항성을 보다 효과적으로 향상 시킬 수 있을 것으로 확인되었다.

한편, BFS8000의 경우는 각각 30, 50% 혼입한 콘크리트의 압축강도가 각각 41.81, 42.89MPa로 OPC 대비 동등이상의 압축강도를 나타내었다. 여기에 확산계수의 결과에서도 OPC 콘크리트 대비 BFS8000을 각각 30, 50% 혼입한 것은 5.72, 5.18 ($\times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$) 정도로 OPC 콘크리트 대비 확산계수의 증가율을 3배 이상 억제할 수 있는 것으로 파악되어 BFS의 혼입에 따른 염분침투저항성을 가장 효과적으로 향상 시킬 수 있을 것으로 확인되었다.

이러한 결과는 본 연구에서 장기내구성 및 염화물이온의 확산을 목적으로 BFS를 콘크리트에 다량 혼입한 유효성을 시사하고 있는 것으로 BFS의 경우 콘크리트에의 다량 혼입에 있어서도 OPC 대비 동등이상의 강도는 물론 염분침투 억제 효과를 보다 향상시킬 수 있을 것으로 나타났다. 본 연구의 결과에서는 BFS의 분말도가 고미분말일수록 또한, 치환율의 경우에서는 50% 이하의 범위에서 콘크리트에 혼입할 경우 OPC 콘크리트 대비 동등 이상의 강도 확보는 물론 염화물이온의 확산을 보다 효과적으로 억제할 수 있을 것으로 확인되었다.

4. 결론

최근 실리카 폼의 대체 재료로써 국내외적으로 FA 및 BFS의 적극적인 적용이 검토되면서 이들 재료를 혼입한 고성능 계열의 콘크리트의 연구개발이 본격화되고 있다. 향후, 본 연구에서의 결과는 물론 나노고로슬래그 (Nano Blast Furnace Slag : NBFS)를 포함하는 광범위한 형태의 연구개발을 통해 FA 및 BFS를 혼입한 고성능콘크리트의 염분침투성을 단기간에 파악할 수 있는 기술 개발과의 연계가 필요할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 최근 콘크리트구조물의 장기내구성을 목적으로 건설 분야에 적극적인 적용이 검토되고 있는 FA 및 BFS를 다량 혼입한 콘크리트의 역학적 및 염분침투성에 대해 검토하였다. 즉, 분말도가 각각 다른 FA 및 BFS를 시멘트 중량치환으로 30, 50, 70%까지 다량 혼입하는 방법으로 FA 및 BFS 혼입 콘크리트의 역학적 및 염분침투성을 실험

적으로 검토하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) FA 콘크리트의 강도시험결과 OPC 대비 전체적으로 낮은 강도를 나타내었다. 본 연구의 결과에서는 FA4000 및 5000을 각각 30% 혼입한 것이 OPC 대비 높은 강도증가율을 나타내는 것으로 파악되어 FA의 혼입에 따른 장기강도개선 효과가 확인되었다.
- (2) BFS 콘크리트의 강도시험결과에서는 BFS8000을 30, 50% 혼입한 콘크리트가 OPC 대비 동등이상의 강도가 확인되었다. 또한, 강도증가율에서는 OPC 대비 BFS를 30% 혼입한 콘크리트는 평균 14% 또한, 50% 혼입한 것은 평균 30% 정도의 강도증가율을 나타내어 BFS의 다량 혼입에 따른 장기강도의 개선 효과가 확인되었다.
- (3) FA 콘크리트의 염분침투시험 결과에서는 무혼입의 OPC 대비 확산계수가 전체적으로 높게 나타나는 것으로 파악되었다. 본 연구의 결과에서는 FA4000 및 5000을 각각 30% 혼입한 콘크리트의 확산계수가 OPC 대비 평균 6.5% 정도의 범위에서 확산계수를 비교적 효율적으로 억제할 수 있는 것으로 확인되었다.
- (4) BFS 콘크리트의 염분침투시험 결과에서는 OPC 대비 확산계수가 전체적으로 낮은 것으로 나타났다. 또한, BFS의 경우 분말도 및 치환율의 차이가 콘크리트의 염분침투 거동에 크게 영향을 미치는 것으로 파악되었다. 특히, 고미분말의 BFS6000 및 8000을 혼입한 콘크리트의 경우 OPC 대비 각각 2.5 및 3.0배 이상 확산계수를 억제할 수 있는 것으로 파악되었다. 한편, 치환율 차이에 따른 결과에서는 먼저, BFS4000을 50% 콘크리트에 혼입한 것은 OPC 대비 약 80% 또한, BFS6000 및 8000을 각각 50% 혼입한 콘크리트는 OPC 대비 각각 253 및 336% 정도 염화물이온의 확산을 보다 효율적으로 억제할 수 있는 것으로 파악되었다. 이러한 결과로부터 BFS의 경우 다량 치환에 따른 염분침투저항성을 극대화시키기 위해서는 혼입율을 50% 정도의 범위에서 설정하는 것이 가장 유효한 것으로 확인되었다.
- (5) FA 및 BFS 콘크리트의 압축강도와 확산계수의 관계에서 강도가 증가할수록 확산계수는 감소하는 경향이 파악되었다. 이러한 경향은 FA 및 BFS 콘크리트의 강도시험결과가 크게 영향을 미친 것으로 나타났다. 본 연구의 결과에서는 FA 콘크리트의 경우 장기내구성

및 염분침투저항성을 향상시키기 위해서는 치환율을 30% 이하로 설정하는 것이 가장 유효한 것으로 파악되었다. 한편, BFS의 경우는 분말도가 높을수록 또한, 치환율은 50% 이하의 범위에서 설정하여 콘크리트에 혼입할 경우 OPC 대비 동등 이상의 강도 확보는 물론 염화물이온의 확산을 보다 효과적으로 억제 할 수 있을 것으로 확인되었다.

References

1. Arskog, Gjorv, Sengul, R. (2005), Chloride Penetration into Silica Fume Concrete after 10 Years of Exposure in Aursundet Bridge, NORDIC CONCRETE RESEARCH-PUBLICATIONS, 33.
2. Kawakita, S., Horiguchi, T. (2007), Influence of Compressive Stress on the Chloride Penetration into Concrete Mixed with Granulated Blast Furnace Slag or Fly Ash, Concrete Research and Technology, 18(3), 1-7.
3. Kee, J. S., An, G. H. (2012), Penetration Properties of Airborne Chlorides on Concrete Exposed in Marine Environment, Korea Concrete Institute, 24(5), 553-558.
4. Kim, B. S., Kim, D. H., Lee, Y. D., Lim, N. G. (2013), The Mechanical and Chloride Penetration Properties of Concrete Mixed with Various Fiber, *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction*, 29(11), 45-52.
5. Kim, D. H., Lim, N. G., 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.
6. Kim, D. H., Park, S. (2012), Chloride Penetration Resistance of Concrete using Polyvinyl Alcohol Fiber, *Journal of the Regional Association of Architectural Institute of Korea*, 14(3), 295-302.
7. Kim, D. H., Petia, S., Lim, N. G. (2011), Evaluation of Fiber and Blast Furnace Slag Concrete Chloride Penetration by Computer Simulation, *Journal of the Korea Institute of Building Construction*, 11, 379-386.
8. Kim, D. H., Shimura, K., Horiguchi, T. (2010), Effect of Tensile loading on the Chloride Penetration of Concrete Mixed with Granulated Blast Furnace Slag, *Journal of Advanced Concrete Technology*, 27-34.
9. Nordtest NTBUILD492 (1999), Chloride Migration Coefficient From Non-Steady State Migration Experiment, Finland.
10. Sugiyama, v., ritthichauy, w., and Tsuji, y. (2008), Experimental Investigation and Numerical Modeling of Chloride Penetration and Calcium Dissolution in Saturated Concrete, *Cement and Concrete research*, 38, 49-67.

Received : 09/22/2014

Revised : 10/30/2014

Accepted : 11/05/2014

요 지

본 연구에서는 최근 콘크리트구조물의 장기내구성을 목적으로 건설 분야에 적극적인 적용이 검토되고 있는 FA 및 BFS를 다량 혼입한 콘크리트의 역학적 및 염분침투성을 실험적으로 검토하여 다음과 같은 결론을 얻었다. FA 및 BFS의 강도시험결과 FA 콘크리트는 FA4000 및 5000을 각각 30% 혼입한 것이 OPC 대비 높은 강도증가율을 나타내는 것으로 파악되었다. 또한, BFS 콘크리트는 BFS8000을 30, 50% 혼입한 콘크리트가 OPC 대비 동등이상의 강도가 확인되었다. FA 및 BFS의 염분침투시험 결과에서는 FA4000 및 5000을 각각 30% 혼입한 콘크리트의 확산계수가 OPC 대비 평균 6.5% 정도 확산계수를 억제할 수 있는 것으로 파악되었다. 또한, BFS 콘크리트의 경우는 BFS6000 및 8000을 각각 50% 혼입한 것이 OPC 대비 각각 253 및 336% 정도 염화물이온의 확산을 효과적으로 억제할 수 있는 것으로 파악되어 BFS의 경우 다량 치환에 따른 염분침투저항성을 극대화시키기 위해서는 50% 정도 혼입하는 것이 가장 유효한 것으로 확인되었다. 한편, FA 및 BFS 콘크리트의 압축강도와 확산계수의 관계에서는 강도가 증가할수록 확산계수는 감소하는 경향이 파악되었다. 본 연구에서는 장기내구성 및 염분침투억제를 목적으로 FA 및 BFS를 콘크리트에 혼입한 결과, FA의 경우는 치환율을 30% 이하로 콘크리트에 혼입하는 것이 가장 유효한 것으로 파악되었다. 한편, BFS의 경우는 분말도가 높을수록 또한, 치환율은 50% 이하의 범위에서 콘크리트에 혼입할 경우 OPC 대비 동등 이상의 강도는 물론 염화물이온의 확산을 보다 효과적으로 억제 할 수 있을 것으로 확인되었다.

핵심 용어 : 염분침투성, 확산계수, 플라이애쉬, 고래슬래그미분말, 전기영동시험