

# 알칼리 활성화 3성분계 혼합시멘트의 염해 저항성에 관한 실험적 연구

## An Experimental Study on the Chloride Attack Resistibility of Alkali-Activated Ternary Blended Cement Concrete

양 완 희<sup>1\*</sup>

황 지 순<sup>1</sup>

전 찬 수<sup>2</sup>

이 세 현<sup>2</sup>

Yang, Wan-Hee<sup>1\*</sup>

Hwang, Ji-Soon<sup>2</sup>

Jeon, Chan-Soo<sup>2</sup>

Lee, Sea-Hyun<sup>2</sup>

*R&D CENTER, Intchem Co., Ltd., Suwon-si, Gyeonggi-do, 443-370, Korea<sup>1</sup>*

*Advanced Building Research Division, Korea Institute of Construction Technology, Goyang-si, Gyeonggi-Do, 411-712, Korea<sup>2</sup>*

### Abstract

The use of ternary blended cement consisting of Portland cement, granulated blast-furnace slag (GGBFS) and fly ash has been on the rise to improve marine concrete structure's resistance to chloride attack. Therefore, this study attempted to investigate changes in chloride attack resistibility of concrete through NT Build 492-based chloride migration experiments and test of concrete's ability to resist chloride ion penetration under ASTM C 1202(KS F 2271) when 1.5-2.0% of alkali-sulfate activator (modified alkali sulfate type) was added to the ternary blended cement mixtures (40% ordinary Portland cement + 40% GGBFS + 20% fly ash). Then, the results found the followings: Even though the slump for the plain concrete slightly declined depending on the use of the alkali-sulfate activator, compressive strength from day 2 to day 7 improved by 17-42%. In addition, the coefficient from non-steady-state migration experiments for the plain concrete measured at day 28 decreased by 36-56% depending on the use of alkali-sulfate. Furthermore, total charge passed according to the test for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration decreased by 33-62% at day 7 and by 31-48% at day 28. As confirmed in previous studies, reactivity in the GGBFS and fly ash improved because of alkali activation. As a result, concrete strength increased due to reduced total porosity.

Keywords : ground granulated blast-furnace slag(GGBS), fly ash, blended cement, alkali activated cement, chloride attack resistibility, ability to resist chloride ion penetration, chloride migration coefficient

## 1. 서 론

### 1.1 연구의 목적

우리나라는 국토의 지리적 특성상 해안 구조물의 건설이 활발하다. 이러한 해안 구조물에 사용하는 콘크리트는 여러 가지 환경 조건에 의해 성능 저하가 일어나게 되는데, 그 중 가장 심각한 내구성 저하 요인은 염소이온의 침투에 의한 철근의 부식이다[1,2].

이에 따라 국내 건설현장에서는 해양 콘크리트 구조물의 염해 내구성 확보 및 수화열 저감 등을 위한 재료적 대책으로 혼합시멘트의 사용이 증가하고 있다[3,4,5].

콘크리트에 고로슬래그 미분말이나 플라이애시 등의 혼화재를 사용할 경우 소요의 슬럼프를 얻기 위한 단위수량을 저감할 수 있으며, 수화발열량 감소, 수밀성 증대, 장기강도 향상, 알칼리골재반응 억제, 염해 저항성 및 내화학적 등이 개선되나, 재령 초기의 강도는 다소 저하하는 것으로 알려져 있다[6,7,8,9]. 특히 이러한 광물질 혼화재는 콘크리트 내부의 공극 용적을 감소시켜 염소 이온 침투 저항성의 개선에 기여한다고 보고되고 있다[4,10,11].

한편 포틀랜드 시멘트의 사용을 억제하고 알칼리 활성화에 의해 고로슬래그 미분말, 플라이애시 등을 적극 활용하

Received : June 1, 2016

Revision received : June 13, 2016

Accepted : July 5, 2016

\* Corresponding author : Yang, Wan-Hee

[Tel: 82-31-273-0663, E-mail: dangchan74@empas.com]

©2016 The Korea Institute of Building Construction, All rights reserved.

는 것은 지속가능한 건설 재료의 활용이라는 측면에서 최근 많은 주목을 받고 있으며[12,13], 고로슬래그 미분말을 대량 활용하는 경우에 알칼리 활성화제를 통해 조기 강도를 보완하는 방안이 보고된 사례도 있다[6,14,15,16]. 따라서 내구성 증가의 목적으로 3성분계 시멘트를 활용할 때 알칼리 설페이트계 활성화제의 사용은 조기강도의 개선 목적으로 유효한 방안이 될 수 있으나, 이러한 경우에 염해저항성과 같은 내구성의 변화를 고찰한 사례는 부족한 실정이다.

일반적으로 콘크리트에서 염해저항성을 확인하는 방법으로 NT Build 492[17]에 의한 염화물 확산시험과 ASTM C 1202[18]와 KS F 2271[19]에 의한 염소이온 침투 저항성 시험이 주로 활용[4,10,11,20,21,22,23,24,25]되고 있다.

이에 따라 본 연구에서는 보통포틀랜드 시멘트, 고로슬래그 미분말, 플라이애시를 4:4:2로 혼합한 3성분계 시멘트에 알칼리 설페이트계 활성화제(Modified Alkali Sulfate type)를 1.5~2.0% 사용할 때, NT Build 492에 의한 염화물 확산시험과 ASTM C 1202와 KS F 2271에 의한 염소이온 침투 저항성 시험을 이용하여 콘크리트의 염해저항성의 변화를 관찰하고자 하였다.

## 2. 실험계획 및 방법

### 2.1 실험계획 및 콘크리트 배합

실험에 사용한 콘크리트의 결합재 구성은 보통포틀랜드 시멘트와 고로슬래그 미분말, 플라이애시를 4:4:2로 혼합한 결합재에 압축강도 성능과 경제성을 고려하여 알칼리 설페이트계 활성화제를 0, 1.5, 2.0% 사용하였다. 이 때 단위결합재량은 360kg/m<sup>3</sup>와 400kg/m<sup>3</sup> 두가지 경우를 대상으로 하였으며 자세한 콘크리트 배합은 Table 1과 같다.

콘크리트 배합 후 공기량 및 슬럼프를 측정하였으며, 압축강도 시험체 제작 후 재령에 따라 압축강도 및 염화물 확산계수 산정 시험, 염소이온 침투저항성 시험을 실시하고 알칼리 설페이트계 조강제의 사용에 따른 염해 저항성 변화를 비교하였다.

### 2.2 사용재료

본 연구에서 사용한 재료의 특성은 Table 2 및 Table 3에 나타낸 바와 같이 시멘트는 1종 포틀랜드 시멘트(밀도

3.14g/cm<sup>3</sup>, 분말도 3,350cm<sup>2</sup>/g), 고로슬래그는 3종 고로슬래그 미분말(밀도 2.89g/cm<sup>3</sup>, 분말도 4,100cm<sup>2</sup>/g), 플라이애시는 2종 플라이애시(밀도 2.24g/cm<sup>3</sup>, 분말도 3,430cm<sup>2</sup>/g)를 사용하였으며, 굵은 골재와 잔골재는 최대치수 25mm인 부순 자갈과 세척사를 사용하였다. 알칼리 활성화제는 Table 4와 같이 알칼리 설페이트계 재료를 사용하였으며, 화학 혼화제로는 고흡분함량 16%의 폴리카르본산계 고성능 감수제(Polycarboxylate-based superplasticizer)를 사용하였다.

Table 1. Mix Proportions of experiment

Specimen	W/B	S/a	Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )										
			W	Total Binder	OPC	BS	FA	AS	S	G	Ad.(%)		
360-Plain					144.0	144.0	72.0	-					
360-AS1.5	50.0	49.0	170	360	142.2	142.2	70.2	5.4	831	878		1.0	
360-AS2.0					141.6	141.6	69.6	7.2					
400-Plain					160.0	160.0	80.0	-					
400-AS1.5	43.4	44.6	165	400	158.0	158.0	78.0	6.0	769	917		1.0	
400-AS2.0					157.3	157.3	77.3	8.0					

OPC : Ordinary portland cement

BS : Blast furnace Slag Powder

FA : Fly Ash

AS : Alkali Activator(Modified Alkali Sulfate type)

Table 2. Physical properties of cementitious materials

	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	Compressive Strength (MPa)			Activity Index (%)	
			3d	7d	28d	28d	56d
OPC	3.14	3,350	34.8	44.1	55.6	-	-
BS	2.89	4,100	-	-	-	93	107
FA	2.24	3,430	-	-	-	94	98

Table 3. Physical properties of aggregate

	Density(g/cm <sup>3</sup> )	Fineness Modulus	Absorption (%)
Coarse aggregate	2.62	6.84	1.17
Fine aggregate	2.54	2.64	1.03

Table 4. Properties of alkali activator

Type	Appearance	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Chemical composition(%)	
Modified Alkali Sulfate type	Light gray inorganic Powder	2.75±0.05	CaO	27~34
			SiO <sub>2</sub>	2~6
			Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	< 5
			Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	< 5
			Na <sub>2</sub> O	10~14
			K <sub>2</sub> O	< 4
			SO <sub>3</sub>	45~55

### 2.3 시험체 제작 및 시험방법

콘크리트의 슬럼프 및 공기량의 측정은 KS F 2402 「콘크리트의 슬럼프 시험방법」 [26]과 KS F 2421 「압력법에 의한 굳지 않은 콘크리트의 공기량 시험방법」 [27]에 의해 시험을 실시하였으며, 압축강도 시험은 KS F 2405 「콘크리트의 압축강도 시험방법」 [28]에 의해  $\text{Ø}100 \times 200\text{mm}$ 의 원주 공시체를 제작하여 계획된 재령까지 수중양생 ( $20 \pm 1^\circ\text{C}$ )을 실시한 후 재령 2, 3, 7, 28, 56일에 각각 시험체 3개를 측정하여 평균값을 얻었다.

염화물 확산계수 산정을 위한 염화물 확산시험은 NT BUILD 492 「Chloride Migration Coefficient from Non-Steady-State Migration Experiments」 [17]의 규정에 의해 시험하였다.

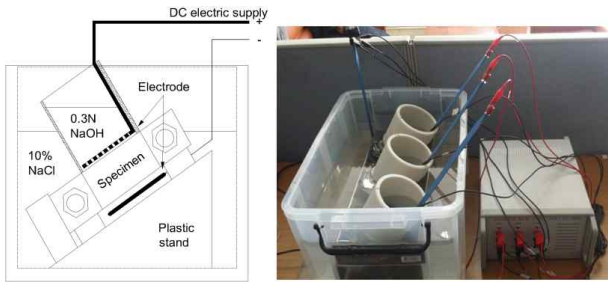


Figure 1. Arrangement for the migration set-up

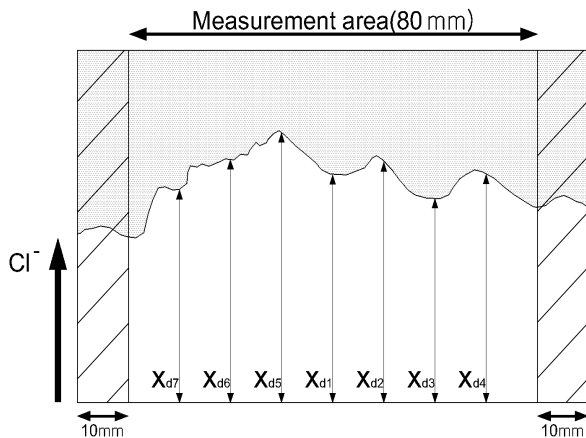


Figure 2. Illustration of measurement for chloride penetration depths

시험체는 28일간 양생된 원주형 공시체를 50mm 두께로 절단하여 염분침투를 촉진하기 위한 3시간의 진공처리를 실시하였다. 진공상태가 유지된 상태에서 포화  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  수용액을 주입한 후 대기압 상태에서  $18 \pm 2$  시간

동안 침지하는 전처리 과정을 거쳤다. Figure 1에 나타난 바와 같이 0.3N의 NaOH 수용액을 양극(Anode)으로, 10%의 NaCl 수용액을 음극(Cathode)으로 하여 초기 30V 전압을 가했을 때의 초기 전류값을 기초로 하여 가압 전압 및 시험시간이 결정되며 본 연구에서는 24시간으로 실시하였다.

염화물 침투깊이는 시험이 종료된 후 시험편을 할렬하여 절단면에 0.1M의 질산은( $\text{AgNO}_3$ ) 용액을 분무하였을 때 은회색으로 변색된 부위를 측정하였다. 측정은 Figure 2와 같이 시험체 양단의 10mm를 제외하고 중심에서 외측방향으로 10mm 간격씩 7곳을 측정하여 그 평균 깊이를 염화물의 침투 깊이로 하였다.

비정상상태(Non-Steady-State)에서의 염화물 확산계수 산정은 아래의 식(1)에 의해 산출하였다.

$$D_{nssm} = \frac{0.0239(273 + T)L}{(U - 2)t} \left( x_d - 0.0238 \sqrt{\frac{(273 + T)Lx_d}{U - 2}} \right) \quad (1)$$

여기서,

$D_{nssm}$  : 비정상 상태의 염화물 확산계수 ( $\times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ )

$U$  : 적용 전압의 절대 값(V)

$T$  : 측정 전후의 양극(Anode)용액의 평균 온도( $^\circ\text{C}$ )

$L$  : 시험체 두께(mm)

$x_d$  : 염화물이온 침투 깊이(mm)

$t$  : 시험 지속시간(h)

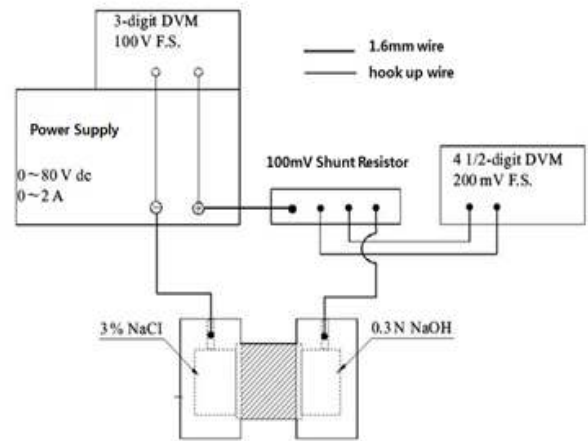


Figure 3. Electrical block diagram for test to resist chloride ion penetration

염소이온 침투 저항성 시험은 ASTM C 「Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration」 [18] 및 KS F 2711 「전기전도도에 의한 콘크리트 염소이온 침투 저항성 시험방법」 [19]에 의거하여 수행하였다. 시험에 사용된 시험체는  $\varnothing 100 \times 200\text{mm}$  공시체를 28일간 양생한 후  $\varnothing 100 \times 50 \pm 3\text{mm}$ 가 되도록 시험체를 절단하였다. 이후 측면을 실리콘으로 얇게 바르고 경화시켰으며, 3시간 동안 진공상태를 유지한 후, 18시간 동안 증류수에 침지하여 완전히 포화가 되도록 하였다.

시험셀(Applied Voltage Cell)의 (-)전극에 3.0 %의 NaCl 용액을 채우고 (+)전극쪽에는 0.3N의 NaOH 용액을 채운 후 Figure 3, Figure 4와 같이 시험체를 시험셀에 고정시키고 회로를 구성하였다.

회로를 통과한 충전하량의 측정은 시험시작 후 30분마다 6시간 동안 0.2Ω에 걸리는 전압을 데이터 로거로 측정하여 기록하고, 측정된 전압을 전류로 환산하여 식(2)를 이용하여 총통과전하량을 산정하였다.



Figure 4. Arrangement for test to resist chloride ion penetration

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

- 여기서,  $Q$  : 총통과전하량
- $I_0$  : 전압을 가한 시험시작 직후의 전류
- $I_t$  : 전압을 가한 후 t분 경과 후의 전류

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 유동성 및 압축강도

Table 5에 콘크리트의 공기량 시험결과와 슬럼프 시험 결과를 나타내었다.

Table 5. Properties of fresh concrete

Specimen	Air(%)	Slump(mm)
360-Plain	5.5	205
360-AS1.5	5.8	195
360-AS2.0	6.0	195
400-Plain	5.0	195
400-AS1.5	5.4	190
400-AS2.0	5.7	185

공기량은 5.5~6.0% 범위를 나타내었으며 360-series, 400-series 모두 알칼리 설페이트계 활성화제의 혼입에 따른 의미있는 변화는 관찰되지 않았다. 슬럼프의 경우 360-series가 195~205mm, 400-series가 185~195mm를 나타내었는데, 알칼리 설페이트계 자극제의 혼입에 따라 5~10mm 수준으로 다소 감소하는 경향을 나타내었다.

압축강도 결과는 Table 6 및 Figure 5와 Figure 6에 나타내었다.

Table 6. Result of compressive strength(MPa)

Specimen	2d	3d	7d	28d	56d
360-Plain	5.1	8.5	16.3	31.1	39.2
360-AS1.5	6.7	11.1	21.7	32.3	39.1
360-AS2.0	6.1	10.2	20.2	31.0	37.9
400-Plain	8.0	10.8	20.4	34.9	45.2
400-AS1.5	9.7	14.9	27.3	37.2	42.5
400-AS2.0	9.4	15.2	29.0	35.3	41.8

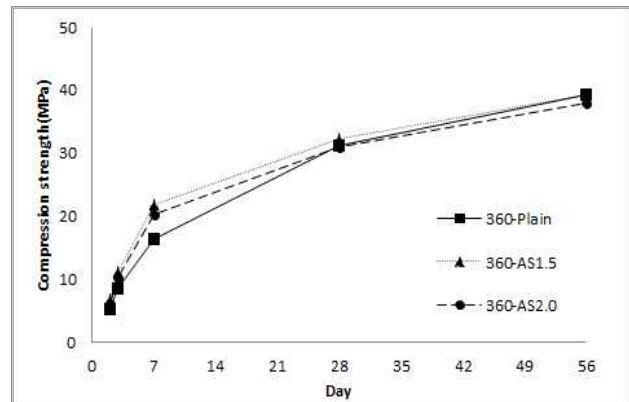


Figure 5. Compressive strength(unit binder : 360kg/m<sup>3</sup>)

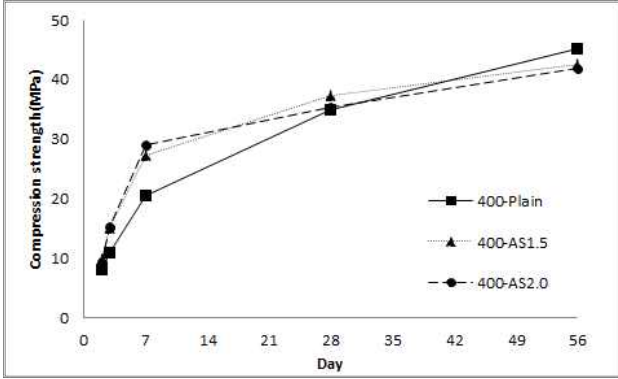


Figure 6. Compressive strength(unit binder : 400kg/m<sup>3</sup>)

360-series의 경우 재령 2일부터 재령 7일까지 알칼리 설페이트계 활성화제의 활용에 따라 20~33% 향상되었으며, 28일에서는 유사한 수준을 나타내다가 56일에서는 다소 감소하는 경향을 나타내었다.

400-series에서도 재령 2일부터 재령 7일까지 알칼리 설페이트계 활성화제의 활용에 따라 17~42% 향상되었으며, 28일에서는 유사한 수준을 나타내다가 56일에서는 다소 감소하는 비슷한 경향을 나타내었다.

알칼리 설페이트계 자극제를 1.5% 사용한 경우 재령 28일까지 Plain보다 우수한 압축강도 특성을 나타내었으나, 2.0%를 사용한 경우에는 재령 56일에 Plain 대비 강도 감소 현상이 좀 더 두드러지게 나타났다.

알칼리 설페이트계 자극제를 사용한 경우 재령 초기의 강도 향상은 기존의 연구[6,14]와 같이 알칼리 설페이트계 활성화제에 의해 고로슬래그나 플라이애시가 좀 더 빠르게 반응이 이루어진 결과로 판단된다.

또한 재령 28일 이후의 경우에는 알칼리 설페이트와 보통 포틀랜드 시멘트의 C<sub>3</sub>A가 재령 초기에 에트링자이트(Ettringite, 3CaOAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub> · 3CaSO<sub>4</sub> · 32H<sub>2</sub>O)를 생성하는 반응이 촉진되었고, 이러한 반응에 의해 C<sub>3</sub>A의 소모가 많았던 것이 압축강도가 다소 감소한 원인인 것으로 추정된다. 참고적으로 포틀랜드 시멘트의 반응과 관련된 기존의 문헌[29]에서는 알칼리 설페이트가 존재할 때 재령 초기의 포틀랜드 시멘트의 C<sub>3</sub>S는 반응이 증가하나 최종강도는 재령초기 C<sub>3</sub>A의 소모량과 반비례하여 감소하는 경향이 있다고 기술하고 있다.

이와 같이 보통 콘크리트에 고로슬래그나 플라이애시와 같은 혼화재료를 다량 사용할 경우 조기강도의 저하가 크게 나타나는데[6,14], 알칼리 설페이트계 활성화제가 이러한

현상을 일부 완화 시키는 것을 확인할 수 있었다.

### 3.2 염화물 확산성

재령 28일에 측정한 염화물 확산시험 결과는 Table 7 및 Figure 7과 같다. 360-Plain과 400-Plain은 각각  $11.672 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ 와  $8.649 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ 로 동일한 결합재의 조건에서 단위분체량이 다소 많고, 압축강도가 우수한 400-Plain이 더 낮은 확산계수를 나타내었다.

Table 7. Result of chloride diffusion coefficient(at 28days)

Specimen	Chloride penetration depths(mm)							Diffusion Coefficient ( $\times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ )	
	1	2	3	4	5	6	7		Ave
360-Plain	35.8	36.6	33.1	31.8	34.8	30.2	38.7	<b>34.5</b>	<b>11.672</b>
	31.7	29.6	35.1	33.3	32.1	37.2	28.6	<b>32.5</b>	
360-AS1.5	21.9	17.9	13.9	15.0	22.8	23.4	15.6	<b>18.7</b>	<b>6.010</b>
	22.3	18.4	14.6	14.8	14.8	13.1	20.8	<b>17.0</b>	
360-AS2.0	10.5	21.7	16.0	16.8	14.9	14.0	11.1	<b>15.0</b>	<b>5.115</b>
	14.9	14.3	14.0	17.0	17.5	19.1	12.2	<b>15.6</b>	
400-Plain	29.8	31.9	33.8	30.1	27.7	28.1	30.5	<b>30.3</b>	<b>8.649</b>
	36.5	30.6	31.1	27.5	30.0	33.7	33.9	<b>31.9</b>	
400-AS1.5	9.62	14.3	11.2	15.8	12.9	10.7	13.6	<b>12.6</b>	<b>4.010</b>
	13.2	11.3	9.17	12.3	17.2	10.0	9.20	<b>11.7</b>	
400-AS2.0	20.8	13.6	8.76	14.0	16.6	23.7	23.7	<b>17.3</b>	<b>5.516</b>
	17.3	22.9	22.0	14.3	7.12	9.7	15.1	<b>15.5</b>	

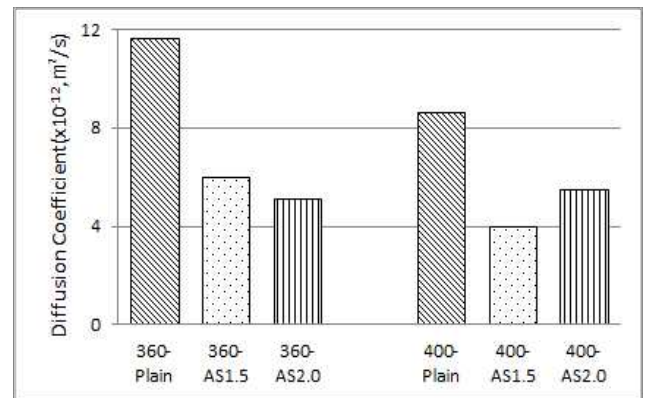


Figure 7. Chloride diffusion coefficient(at 28days)

알칼리 설페이트를 1.5%, 2.0% 활용에 따라 360-series는 Plain 대비 각각 48.5%, 56.2%, 400-series의 경우 plain 대비 각각 53.6%, 36.2% 염화물 확산계수가 감소하는 것으로 나타났다.

360-series의 경우 알칼리 설페이트계 자극제를 1.5% 사용하는 경우보다 2.0% 사용하는 경우가 다소 낮은 확산

계수를 나타낸 반면 400-series의 경우 알칼리 설페이트 자극제를 1.5% 사용한 경우보다 2.0% 사용한 경우가 오히려 확산계수가 높게 나타났다.

보통 콘크리트에 고로슬래그 미분말을 활용하는 경우 미세 공극이 치밀해지는 효과에 의해 염화물의 확산이 저감되는데[4,10,11], 알칼리 설페이트의 혼입에 따라 고로슬래그 및 플라이애시의 반응성이 향상되어 Plain 대비 공극이 더욱 치밀해진 효과[16,30]에 의해 염화물 확산 계수가 감소한 것으로 판단된다.

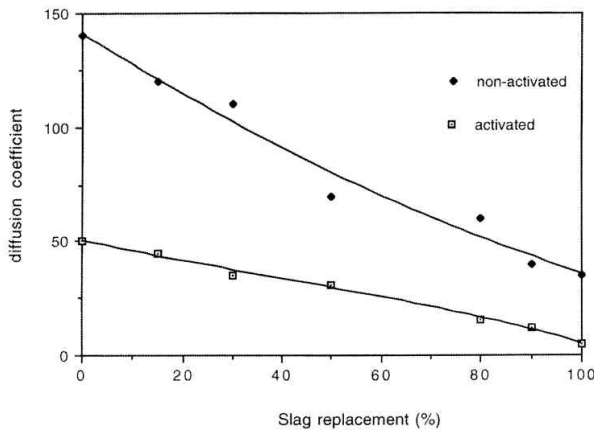


Figure 8. The effective diffusion coefficient (10–15 m2/s) of paste plotted as a function of the content of slag additive to OPC[30]

특히 본 연구와 비슷한 Della M. Roy의 기존의 연구[30]에서 포틀랜드 시멘트와 고로슬래그 미분말을 35:65로 사용하고 4M의 NaOH로 활성화 할 때, 물결합재비 35%의 페이스트의 총공극률은 활성화에 따라 18.3%에서 14.6%로 개선되었으며, 공극의 중간크기가 8.5nm에서 6.2nm로 작아졌다고 하였고, 동일한 연구에서 Figure 8과 같이 정상 상태의 염화물 확산 시험(Steady-State chloride diffusion) 결과, 포틀랜드 시멘트대비 고로슬래그 미분말을 대체할수록, 또한 동일한 대체율에서도 알칼리 활성화가 이루어진 시험체의 확산계수가 낮은 것이 보고되었다. 본 연구에서도 이러한 결과와 유사하게 알칼리 설페이트계 활성화제의 활용에 따른 결합재의 활성화 효과에 의해 염소 이온의 확산 성능이 감소한 것으로 추정된다.

### 3.3 염소이온 침투 저항성

재령 7일과 28일에 측정한 염소이온 침투 저항성 시험

결과는 Table 8 및 Figure 9와 같다.

360-Plain의 경우 총통과 전하량이 재령 7일 4,124 Coulombs에서 재령 28일 1,529 Coulombs로 감소하였으며, 400-plain은 재령 7일 2,587 Coulombs에서 재령 28일 1,284 Coulombs로 감소하였다. 염소이온 침투 저항성 역시 동일한 결합재의 조건에서 단위분체량이 다소 많고, 압축강도가 우수한 400-Plain이 360-Plain 보다 향상되는 것으로 나타났다.

360-series의 경우 알칼리 설페이트계 활성화제의 활용에 따라 총통과 전하량이 재령 7일은 58~62%, 재령 28일은 46~48% 감소하는 결과를 나타내었으며, 400-series 역시 알칼리 설페이트계 활성화제의 활용에 따라 재령 7일은 33~50%, 재령 28일은 31~48% 감소하였다. 알칼리 설페이트계 활성화제의 활용에 따라 특히 재령 7일에서 총통과전하량의 감소가 컸는데, 이는 알칼리 활성화제의 활용에 의해 7일 압축강도의 상승이 높았던 것과 깊은 관련이 있는 것으로 추정된다.

Table 8. Result of ability to resist chloride ion penetration

Specimen	Charge Passed (Coulombs)	
	7d	28d
360-Plain	4,124	1,529
360-AS1.5	1,720	795
360-AS2.0	1,550	825
400-Plain	2,587	1,284
400-AS1.5	1,728	878
400-AS2.0	1,287	662

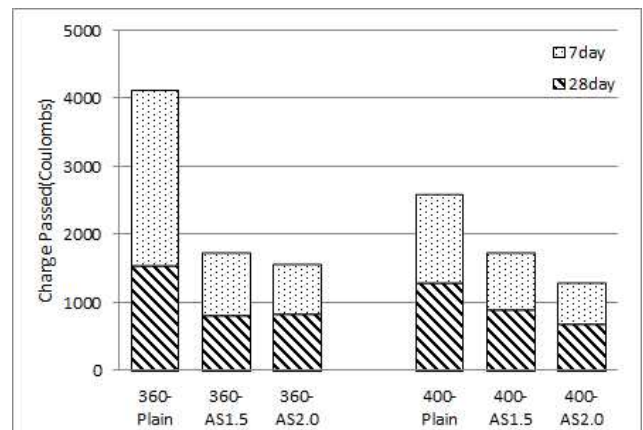


Figure 9. Ability to resist chloride ion penetration(at 7, 28days)

기존의 유사한 연구[4]에서 단위분체량 350kg/m<sup>3</sup>, 단위수량 140kg/m<sup>3</sup>(W/B=40%) 일 때 결합재 구성을 보통 포트랜드 시멘트, 고로슬래그 미분말, 플라이애시를 5:3:2 인 경우와 5:4:1인 경우가 총통과 전하량이 각각 1,114Coulombs, 1,852Coulombs로 나타났는데, 본 연구에서는 단위수량이 170kg/m<sup>3</sup>로 기존의 연구보다 더 많았음에도 불구하고 알칼리 활성화제의 활용에 따라 총통과 전하량이 800Coulombs 내외로 상대적으로 더 낮게 측정되었다.

한편 Table 9와 같이 ASTM C 1202[17]와 KS F 2711 [18]에서는 통과 전하량에 따른 염소이온의 침투성을 구분하여 제시하고 있는데, 알칼리 설페이트계 활성화제를 사용할 경우 염소이온 침투성이 낮은 수준(Low)에서 매우 낮은 수준(Very Low)으로 저감되는 것으로 나타났다.

Table 9. Chloride ion penetrability based on charge passed[17,18]

Charge Passed(Coulombs)	Chloride Ion Penetrability
4,000 <	High
2,000 ~ 4,000	Moderate
1,000 ~ 2,000	Low
100 ~ 1,000	Very Low
< 100	Negligible

아직까지 명확하고 충분한 원인의 규명은 부족하지만 기존의 연구[20,30,31,32]에서도 고로 슬래그, 플라이애시, 메타카올린 등을 활성화한 재료들이 일반적인 포트랜드 시멘트보다 염소이온 침투성이 더 낮은 것으로 보고하고 있는데, 이러한 연구결과와 유사하게 본 연구에서도 알칼리 설페이트계 활성화제의 활용이 염소 이온 침투 저항성의 향상에 긍정적인 역할을 한 것으로 판단된다.

### 3.4 염화물 확산 계수와 염소이온 침투저항성의 비교

Figure 10은 염화물 확산 시험에 의한 염화물 확산 계수와 염소이온 침투 저항성 시험에 의한 총통과전하량 사이의 상관 관계를 나타낸 것이다.

본 연구의 결과만으로 염화물 확산 계수와 염소이온의 침투 저항성 간의 일정한 관계를 단정 짓기는 어렵지만 기존의 연구[25]에서도 두 시험결과 간에 일정한 상관관계가 있는 결과를 나타냈으며, Figure 10에서 보는 바와 같이 알칼리 설페이트계 활성화제의 활용에 따라 염화물 확산 계수와 염소이온 침투성이 모두 일정한 수준으로 저하하는 결과를 확인할 수 있었다. 하지만 알칼리 설페이트계 활성화제를 1.5% 사용하는 경우와 2.0% 사용하는 경우를 대상으로 비교하면 단위분체량에 따라 일관된 경향을 나타내지는 않았다.

본 연구에서는 재령 28일의 시험체를 대상으로 염해 저항성을 평가하고 분석하였으나 향후 장기 재령의 시험체를 대상으로 한 실험과 분석이 지속적으로 이루어져야 할 것으로 판단된다.

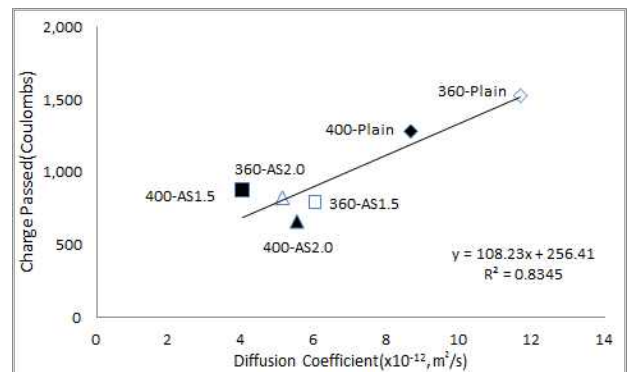


Figure 10. Comparison between diffusion coefficient and chloride ion penetrability

## 4. 결 론

보통포트랜드 시멘트, 고로슬래그 미분말, 플라이애시를 4:4:2로 혼합한 3성분계 시멘트에 알칼리 설페이트계 활성화제(Modified Alkali Sulfate type)를 1.5~2.0% 사용할 때, 콘크리트의 염해저항성의 변화를 관찰한 결과는 다음과 같다.

- 1) 알칼리 설페이트계 활성화제의 활용에 따라 Plain 대비 슬럼프는 다소 감소하는 경향을 나타냈으나 재령 2일부터 재령 7일까지의 압축강도는 17~42% 향상되었고 재령 28일에서는 유사한 수준을 나타냈다.
- 2) 재령 28일에 측정된 염화물 확산 계수는 알칼리 설페이트의 활용에 따라 Plain 대비 36~56% 감소한 결과

를 나타냈으며, 알칼리 설페이트의 혼입에 따라 고로슬래그 및 플라이애시의 반응성이 향상되어 Plain 대비 공극이 더욱 치밀해진 효과에 의해 염화물 확산 계수가 감소한 것으로 판단된다.

- 3) 염소이온 침투 저항성 시험에 따른 총통과 전하량은 알칼리 설페이트계 활성화제의 활용에 따라 Plain 대비 재령 7일은 33~62%, 재령 28일은 31~48% 감소하는 결과를 나타냈고, 기존의 연구 결과와 마찬가지로 알칼리 활성화가 염소 이온 침투 저항성의 향상에 긍정적인 역할을 하는 것으로 판단된다.
- 4) 염화물 확산 계수와 염소이온의 침투 저항성 시험결과는 일정한 상관관계가 있는 것으로 판단되며, 알칼리 활성화가 염화물 확산 계수와 염소이온 침투성에 모두 일정한 수준의 저감 효과가 있는 것으로 나타났다.

이상과 같이 고로슬래그 미분말 및 플라이애시를 사용한 3성분계 혼합시멘트에서 알칼리 설페이트계 활성화제의 사용으로 초기강도가 개선되며, 재령 28일의 시험체를 대상으로 염해저항성을 확인한 결과 Plain 시험체 대비 염해저항성이 향상되는 것을 확인할 수 있었다. 향후 이와 관련하여 장기 재령의 시험체를 대상으로 한 실험과 분석이 지속적으로 이루어져야 할 것으로 판단된다.

## 요 약

포틀랜드 시멘트, 고로슬래그 미분말, 플라이애시를 활용한 3성분계 혼합시멘트는 해양 콘크리트 구조물의 염해 내구성 확보 등의 이유로 사용이 증가하고 있다. 이에 따라 본 연구에서는 보통포틀랜드 시멘트, 고로슬래그 미분말, 플라이애시를 4:4:2로 혼합한 3성분계 시멘트에 알칼리 설페이트계 활성화제(Modified Alkali Sulfate type)를 1.5~2.0% 사용할 때, NT Build 492에 의한 염화물 확산 시험과 ASTM C 1202( KS F 2271)에 의한 염소이온 침투 저항성 시험을 이용하여 콘크리트의 염해저항성의 변화를 관찰하고자 하였다. 그 결과 알칼리 설페이트계 활성화제의 활용에 따라 Plain 대비 슬럼프는 다소 감소하는 경향을 나타냈으나 재령 2일부터 재령 7일까지의 압축강도는 17~42% 향상되었다. 또한 재령 28일에 측정된 염화물 확산 계수는 알칼리 설페이트의 활용에 따라 Plain 대비 36~56% 감소하였으며, 염소이온 침투 저항성 시험에 따

른 총통과전하량은 재령 7일은 33~62%, 재령 28일은 31~48% 감소하는 결과를 나타내었다. 이는 기존의 연구 결과와 마찬가지로 알칼리 활성화에 의해 고로슬래그 미분말 및 플라이애시의 반응성이 향상되어 공극이 더욱 치밀해진 효과에 의한 것으로 판단된다. 향후 이와 관련하여 장기 재령의 시험체를 대상으로 한 실험과 분석이 지속적으로 이루어져야 할 것으로 판단된다.

**키워드** : 고로슬래그 미분말, 플라이애시, 혼합시멘트, 알칼리 활성화 시멘트, 염해저항성, 염소이온 침투저항성, 염화물 확산 계수

## Acknowledgement

This research was supported by Embodied Impacts of Building and Low Carbon Construction Materials of grant funded by the Ministry of Land, Infrastructure, and Transport.

## References

1. Mehta PK, Monteiro PJM, Concrete, Microstructure, Properties, and Materials. New York (USA):McGraw Hill; 2006, Chapter 5,16, Corrosion of Embedded Steel in Concrete; p. 176-83.
2. Neville AM, Properties of Concrete. Essex (England):Prentice Hall; 1995, Chapter 10, Durability of concrete; p. 482-536.
3. Bae JY, Cho SH, Shin KJ, Kim YY. A Comparative Study on Strength Development, Chloride Diffusivity and Adiabatic Temperature Rise of Marine Concrete Depending on Binder Type. Journal of the Korea Concrete institute, 2013 Aug;25(3):441-18.
4. Song HW, Lee CH, Lee KC, Kim JH, Ann, KY. Chloride Penetration Resistance of Ternary Blended Concrete and Discussion for Durability. Journal of the Korea Concrete Institute. 2008 Aug;20(4):439-49.
5. Bae JY, Jang YI, Park SB, Kim YY. An Experimental Study on the Compressive Strength and Chloride Diffusivity of Mortar Produced with Multiple Mixed Cement by the Experiments Design. Journal of Material Cycles and Waste Management, 2011 Feb;28(2):165-74.
6. Yang WH, Ryu DW, Kim WJ, Park DC, Seo CH. An Experimental Study on Early Strength and Drying Shrinkage of High Strength Concrete Using High Volumes of Ground Granulated Blast-furnace Slag(GGBS). Journal of the Korea Institute of Building



- 
- Construction, 2013 Aug;13(4):391–99.
7. ACI Committee 226. Ground granulated blast–furnace slag as cementations constituent in concrete. *ACI Materials Journal*, 1987 Jul;84(34):327–42.
  8. Hester D, McNally C, Richardson MG. Study of influence of slag alkali level on the alkali–silica reactivity of slag concrete. *Construction and Building Materials*, 2005 Feb;19(9):661–5.
  9. Leng F, Feng N, Lu X. 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*, 2000 Jun;30:989–92.
  10. Bae SH, Park JI, Lee KM, Choi S. Influence of Mineral Admixtures on the Diffusion Coefficient for Chloride Ion Concrete. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, 2009 Jul;29(4):347–53.
  11. Suryavanshi AK, Swamy RN, Cardew GE. Estimation of Diffusion Coefficients for Chloride Ion Penetration into Structural Concrete. *ACI Materials Journal*, 2002 Sep;99(5):441–49.
  12. Shi C, Krivenko PV, Roy D. *Alkali–Activated Cement and Concretes*. New York (USA):Taylor & Francis; 2006. Chapter 1, Introduction; p. 1–4.
  13. Roy D. Alkali–activated cements opportunities and challenges. *Cement and Concrete Research*, 1999 Feb;29(2):249–54.
  14. Ryu DW, Kim WJ, Yang WH, You JH, Ko JW. An Experimental Study on the Freezing–Thawing and Chloride Resistance of Concrete Using High Volumes of GGBS. *Journal of the Korea Institute of Building Construction*, 2012 Jun;12(3):315–23.
  15. Ryu DW, Kim WJ, Yang WH, Park DC. Experimental Study on the Carbonation and Drying Shrinkage of Concrete Using High Volumes of Ground Granulated Blast–furnace Slag. *Journal of the Korea Institute of Building Construction*, 2012 Aug;12(4):393–400.
  16. Yang WH, Ryu DW, Park DC, Kim WJ, Seo CH. A study of the effect of light–burnt dolomite on the hydration of alkali–activated Portland blast–furnace slag cement. *Construction and Building Materials*, 2014 Jun;57:24–9.
  17. Nordtest Method, Concrete, Mortar and Cement–Based Repair Materials [NT–BUILD 492]. Nordtest (Finland): Chloride Migration Coefficient from Non–Steady–State Migration Experiments; 1999.
  18. Annual Book of ASTM Standard, Electrical Indication of Concrete’s Ability to Resist Chloride Ion Penetration [C1202]. West Conshohocken, PA(USA) : ASTM International; 2012.
  19. Korean Standards Association. Testing method for electrical indication of concrete’ s ability to resist chloride ion penetration [KS F 2711]. Seoul (Korea): Korean Standards Association; 2012.
  20. Ismail I, Bernal SA, Provis JL, Nicolas RS, Brice DG, Kilcullen AR, Hamdan S, van Deventer JSJ. Influence of fly ash on the water and chloride permeability of alkali–activated slag mortars and concretes. *Construction and Building Materials*, 2013 Nov;13:1187–201.
  21. Elfmarkova V, Spiesz P, Brouwers HJH. Determination of chloride coefficient in blended cement mortars. *Cement and concrete Research*, 2015 Dec;78:190–99.
  22. Ravikumar D, Neithalath N. Electrically induced chloride ion transport in alkali activated slag concretes and the influence of microstructure. *Cement and Concrete Research*, 2013 May;47:31–42.
  23. Choi DS, Choi JJ. Relationship between Chloride Diffusivity and the Fundamental Properties of Concrete. *Korean Society of Hazard Mitigation*, 2009 Jan;9(1):15–20.
  24. Korea Concrete Institute. *Curing Concrete*. Seoul (Korea). Kimoonang; 2010. Chapter 6, standard method; p. 101–2.
  25. Lee CY, Kim HS, Kim JC, Cheong HM, Ahn TS. Comparison of Test Methods for Evaluation of Chloride Diffusion Coefficient in Concrete. 2008 Spring Conference of the Korea Concrete Institute, 2008 Apr;20(1):581–4.
  26. Korean Standards Association. Method of Test For Slump of Concrete [KS F 2402]. Seoul (Korea): Korean Standards Association; 2012.
  27. Korean Standards Association. Standard Test Method for Air Content of Fresh Concrete by the Pressure Method:Air Receiver Method [KS F 2421]. Seoul (Korea): Korean Standards Association; 2011.
  28. Korean Standards Association. Standard Test Method for Compressive Strength or Concrete [KS F 2405]. Seoul (Korea): Korean Standards Association; 2010.
  29. Taylor HFW. *Cement chemistry*. UK: Thomas Telford Publishing Company Ltd; 1990. Chapter 7.6, Actions of calcium sulphate and of alkalis; p. 236–7.
  30. Roy DM, Jiang W, Silsbee MR. Chloride diffusion in ordinary, blended, and alkali–activated cement pastes and its relation to other properties. *Cement and Concrete Research*, 2000 Dec;30(12):1879–84.
  31. Saraswathy V, Muralidharan S, Thangavel K, Srinivasan S. Influence of activated fly ash on corrosion–resistance and strength of concrete. *Cement and Concrete Composites*, 2003 Oct;25(7):673–80.
  32. Miranda JM, Fernandez–Jimenez A, Gonzalez JA, Palomo A. Corrosion resistance in activated fly ash mortars. *Cement and Concrete Research*, 2005 Jun;35(6):1210–7.