

# 양생조건에 따른 레드머드 혼입 알칼리활성화 슬래그 시멘트 모르타르의 강도 및 백화특성

## Strength and Efflorescence Characteristics of Alkali-Activated Slag Cement Mortar with Red Mud according to Curing Conditions

강 석 표<sup>1</sup>

황 병 일<sup>2\*</sup>

Kang, Suk-Pyo<sup>1</sup> Hwang, Byoung-II<sup>2\*</sup>

*Department of Architecture, Woosuk University, Jincheon-Eup, Jincheon-Gun, 27841, Korea<sup>1</sup>*

*Department of Construction Engineering, Woosuk University, Jincheon-Eup, Jincheon-Gun, 27841, Korea<sup>2</sup>*

### Abstract

This study is to investigate the effect of various temperature and humidity conditions on the strength and efflorescence of alkali activated slag cement(AAS) using the red mud. As a result of examining the strength and efflorescence characteristics of AAS mixed with red mud according to the curing conditions, The compressive strength and flexural strength were the highest at 28 days, but the absorption rate, efflorescence area and soluble Na<sup>+</sup> elution were lowest in standard wet curing compared to the air curing, high temperature curing and low temperature curing.

Keywords : curing condition, alkali-activated slag cement, red mud, strength, efflorescence

### 1. 서 론

최근 건설 산업에서는 주요 온실가스 발생 원인인 포틀랜드시멘트의 사용량을 줄이기 위하여 화력발전소에서 발생하는 플라이애시나 철강 산업의 부산물인 고로슬래그 등과 같은 산업폐기물을 이용하는 순환자원 재활용 연구가 활발히 진행되고 있다[1]. 이러한 연구의 일환으로 시멘트를 전혀 사용하지 않고 플라이애시 또는 고로슬래그 미분말을 이용한 알칼리 활성화 시멘트 연구도 국내외에서 활발하게 이루어지고 있다[1,2].

알칼리 활성화 시멘트는 초기 강도 발현과 화학 저항성이 높은 것으로 알려져 콘크리트 및 시멘트 관련 연구자들에게

많은 관심을 받고 있으나 국내의 경우 주로 고가의 자극제를 사용하여 경화 메커니즘 규명 및 강도발현 특성에 중점을 두고 연구들이 수행되고 있다. 이는 알칼리 활성화 시멘트가 건설산업 현장에 실제로 활용되는데 가장 큰 장애요소로 고가의 자극제에 의한 경제적인 단점을 해결하기 위하여 자극제로써 활용 가능한 산업부산물에 관심이 모아지고 있다[3,4].

레드머드(Red mud)는 보오크사이트 원광석으로부터 수산화알루미늄(Al(OH)<sub>3</sub>) 및 산화알루미늄(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)을 제조하는 공정에서 발생하는 산업부산물이다[3,4]. 국내의 경우 레드머드는 Bayer Process를 통하여 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 1톤을 생산하면 함수율 40~60%의 슬러지상태로 대략 2톤이 발생되며, 발생량은 국내 발생량의 대부분을 차지하고 있는 K사에서만 연간 약 30만 톤이 슬러지 상태로 발생되고 있다[3,4].

알칼리 활성화 슬래그-레드머드 시멘트는 알칼리 활성화 시멘트 연구의 일환으로 시멘트 조성에서 알칼리 자극제, 고로슬래그와 레드머드로 구성되어, 포틀랜드시멘트를 사용하지 않는 클링커 프리 시멘트(Clinker Free Cement)를

Received : April 2, 2018

Revision received : April 25, 2018

Accepted : May 14, 2018

\* Corresponding author : Hwang, Byoung-II

[Tel: 82-42-531-2903, E-mail: hbi0819@naver.com]

©2018 The Korea Institute of Building Construction, All rights reserved.

의미한다. 유사한 시멘트계 재료로서 알칼리 활성화 슬래그 시멘트, 알칼리 활성화 슬래그-플라이애시 시멘트, 알칼리 활성화 슬래그-포졸란 시멘트 등이 있다[1,3]. 알칼리 활성화 슬래그-레드머드 시멘트는 레드머드를 액상 규산나트륨 또는 수산화나트륨과 같이 고로슬래그미분말의 자극제로 활용하는 것으로 2000년 초반 해외에서 처음으로 발표되었다.

한편 시멘트 및 콘크리트 연구자들에게 백화는 구조적으로 문제가 되지 않는다는 근거로 상대적으로 적은 관심과 연구가 이루어지고 있다[4]. 그러나 알칼리활성화 시멘트의 경우 백화에 매우 취약하고 심한 경우에는 구조적으로 문제가 될 수도 있는 유해한 백화가 발생되기도 한다[4]. 특히 나트륨 계열의 자극제를 사용하는 알칼리활성화 결합재는 백화에 더욱 취약한 것으로 알려져 있다[4]. 이것은 미반응 상태로 존재하는  $\text{Na}_2\text{O}$ 가 증가할수록  $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 가 증가하고 알칼리활성화 결합재의 생성물인 알루미늄실리케이트 구조에서 나트륨 이온이 상대적으로 쉽게 이동할 수 있어 포틀랜드 시멘트와 비교하여 백화발생에 매우 취약한 것으로 알려져 있다[6,7].

이와 같은 백화 발생 가능성이 높은 클링커 프리 시멘트의 백화 억제방법으로서 다양한 방안들이 검토되어지고 있다. 그 중에서도 65°C 이상의 고온증기양생을 실시하게 되면 강도가 증가되고 조직이 치밀해져 알칼리 용출량이 감소함으로써 백화가 감소되는 것으로 보고된 바가 있다[7]. 특히 알칼리활성화 슬래그 레드머드 시멘트의 경우 수화반응시 보통 포틀랜드 시멘트와 비교하여 다량의 수분이 필요한 것으로 알려져 있지만 다양한 양생조건에 대한 연구가 진행된 사례가 없다[3].

따라서 본 논문은 알칼리활성화 슬래그 레드머드 시멘트의 백화저감을 위한 기초연구로서 양생조건에서 수분이 충분하지 않은 고온 및 저온에서의 레드머드 혼입 알칼리활성

화 슬래그 시멘트 모르타르의 강도 및 백화에 미치는 영향을 수증양생 및 기건양생과 비교하여 검토하였다.

## 2. 실험계획 및 방법

### 2.1 실험계획

양생조건에 따른 알칼리활성화 슬래그-레드머드 모르타르의 강도 및 백화를 검토하고자 하는 실험계획을 Table 1에 나타내었다. 레드머드는 보통 포틀랜드 시멘트와 알칼리활성화 슬래그 시멘트의 중량비로 0%, 10%, 20% 대체하였다. 제작된 알칼리활성화 슬래그-레드머드 모르타르는 온도 20°C RH 50%의 기건양생, 온도 20°C의 수증양생, 온도 70°C의 고온양생, 온도 7°C RH 30%의 저온양생으로 설정하여 양생하였으며 W/C는 75%, B:S는 1:3으로 설정하였다. 실험 항목으로는 압축강도, 휨강도, 흡수율, 백화발생면적, 이온크로마토그래피 분석을 실시하였다.

### 2.2 사용재료

#### 2.2.1 결합재

본 논문에서 사용한 보통 포틀랜드 시멘트와 알칼리활성화 슬래그 시멘트의 물리 화학적 성질을 Table 2에 나타내었다. 본 논문에서 사용한 결합재 중 보통 포틀랜드 시멘트는 국내 S사의 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였다. 알칼리활성화 슬래그 시멘트는 국내 C사에서 시제품으로 제조되어진 고로슬래그미분말의 주요 자극제로서 탈황석고를 사용하는 산업부산물만으로 제조된 클링커프리 시멘트를 사용하였다.

#### 2.2.2 골재

본 논문에서 사용한 잔골재는 KS L 679에서 품질규정하

Table 1. Experimental plan and mix design

Type of binder		Binder(%)		W/C(%)	B:S	Curing conditions	Test items
		Cement	Red mud				
Ordinary portland cement (OPC)	OPC 0	100	0	75	1:3	Water curing (20°C)	- Compressive strength
	OPC 10	90	10			Atmospheric curing (20°C RH50%)	- Flexural strength
	OPC 20	80	20			- Water absorption	
Alkali-activated slag cement (AAS)	AAS 0	100	0	75	1:3	High temperature curing (70°C)	- Efflorescence
	AAS 10	90	10			Low temperature curing (7°C RH30%)	- Ion chromatography
	AAS 20	80	20				

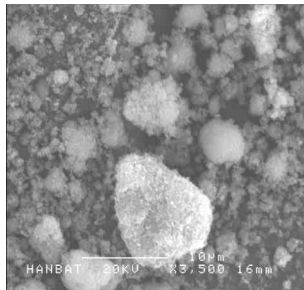
Table 2. Physical properties and chemical composition of binder

Type of binder	Specific surface area(cm <sup>2</sup> /g)	Density (g/cm <sup>3</sup> )	lg. loss	Chemical composition (%)					
				SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>
OPC <sup>1)</sup>	3,144	3.15	1.32	21.7	5.7	3.2	63.1	2.8	2.2
AAS <sup>2)</sup>	4,058	2.83	2.23	22.1	8.9	1.4	54.9	3.3	5.2

1) OPC : Ordinary portland cement 2) AAS : Alkali-activated slag cement

Table 3. Properties of red mud

Type	Specific surface area (cm <sup>2</sup> /g)	Average particle diameter (μm)	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Moisture content ratio(%)	Chemical composition (%)							
					SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O
Dried	2.353	2.75	3.50	10.2	38.8	16.1	22.8	3.4	0.2	0.0	10.0	0.4



(a) Dried red mud

(b) SEM image(×3,500)

Figure 1. Red mud

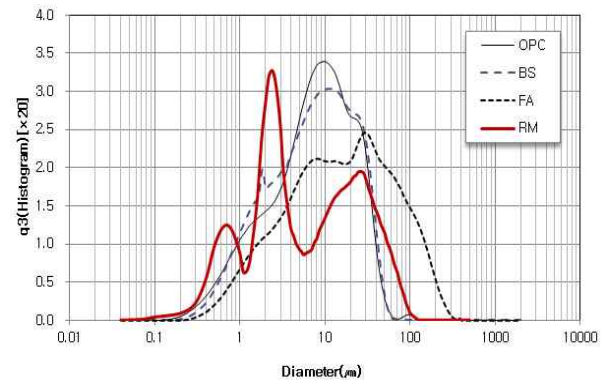


Figure 2. Particle size distribution of dried red mud

고 있는 ISO 표준사를 사용하였다.

### 2.2.3 레드머드

본 논문에서 사용한 건조 레드머드의 물리·화학적 특성을 Table 3에 나타내었다. 건조 레드머드의 함수율은 10.2%, 밀도는 3.50g/cm<sup>3</sup>, 비표면적은 2,353cm<sup>2</sup>/g이다. 본 논문에서 사용한 레드머드는 함수율 40~60%의 상태로 배출되고 있는 슬러지를 함수율 10% 내외로 건조 및 분쇄시켜 Figure 1과 같은 건조 레드머드를 사용하였다[4].

건조 레드머드의 평균입경은 2.75μm로서 레드머드의 입도 분포를 나타낸 Figure 2에서 알 수 있는 바와 같이 시멘트, 플라이애시, 고로슬래그미분말 등의 평균 입경 20~30 μm와 비교하여 약 1/10에 해당 되며 마이크로시멘트 평균 입경 4~6μm 보다도 작은 것으로 나타났다[1].

## 2.3 실험방법

### 2.3.1 모르타르 배합

모르타르 배합은 보통 포틀랜드 시멘트와 알칼리활성화 슬래그 시멘트를 결합재로 사용하여 W/C 75%, B:S 1:3, 결합재 : 레드머드를 100:0, 90:10, 80:20 의 비율로 혼합하여 모르타르를 제작 하였다.

### 2.3.2 양생조건

본 논문에서 실시한 양생조건은 시험체 제작 후 온도 20°C, 상대습도 50%의 항온항습실에서 1일간 양생한 후 탈형하였다. 탈형한 시험체는 실험계획에서 제시한 양생조건인 표준수중양생, 기건양생, 고온양생, 저온양생에서 각각 존치하였다. 각각의 양생조건은 Figure 3에 나타낸 바와

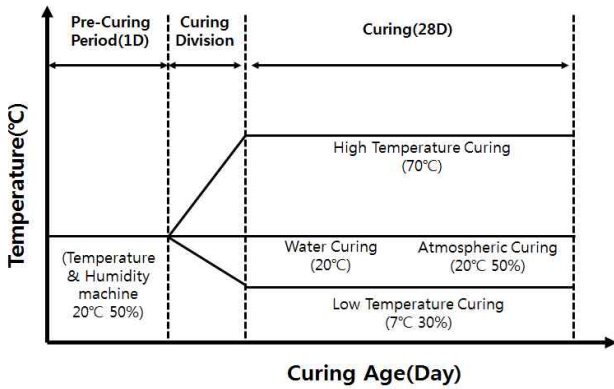


Figure 3. Curing conditions

Table 4. Degree of efflorescence

Degree	Efflorescence area
I	none
II	less than 10%
III	above 10%, less than 30%
IV	above 30%, less than 50%
V	above 50%



(a) Efflorescence

(b) Image processing result

Figure 4. Specimen of efflorescence

같이 표준수중양생(OPC0-W, OPC10-W, OPC20-W, AAS0-W, AAS10-W, AAS20-W)의 경우 온도 20°C 양생수조, 기건양생(OPC0-A, OPC10-A, OPC20-A, AAS0-A, AAS10-A, AAS20-A)의 경우 온도 20°C 상대습도 50%의 항온항습기, 고온양생(OPC0-H, OPC10-H, OPC20-H, AAS0-H, AAS10-H, AAS20-H)의 경우 온도 70°C의 건조기, 저온양생(OPC0-L, OPC10-L, OPC20-L, AAS0-L, AAS10-L, AAS20-L)의 경우 온도 7°C, 상대습도 30%의 항온항습기에서 양생하였다.

### 2.3.3 시험방법

#### 1) 압축강도 및 휨강도

본 논문에서 압축강도 및 휨강도 시험은 실험계획에 제시된 모르타르 배합을 KS L ISO 679 「시멘트의 강도시험방법」에 준하여 시험체 제작 후 각 양생조건에서 재령 28일에 측정하였다[1].

#### 2) 흡수율

흡수율 시험은 각 양생조건별로 28일 양생된 5×5×5cm 시험체를 KS F 2609 「건축 재료의 물 흡수계수 측정방법」에 따라 온도 20±2°C, 상대 습도 65±5%의 표준 상태에서 항량이 될 때까지 건조하였다. 건조된 시험체의 측면은 에폭시로 실링 처리하고, 약 20°C의 물에 2~10mm 정도의 깊이로 담근 후 10분, 30분, 1시간, 6시간, 24시간에 시험체의 물 흡수량을 측정하였으며 물 흡수량을 시험체 질량으로 나누어 흡수율을 산정하였다[3].

#### 3) 백화시험

본 논문에서의 백화 시험은 일본 건재시험센터에서 개발한 「시멘트계 재료의 백화시험 방법(日本, JTCCM)」에 준하여 실시하였다[5].

백화 시험체는 5×5×5cm 시험체를 제작하여 각 양생조건에서 28일간 양생하였다. 백화 시험은 시험체의 측면을 에폭시로 실링처리하고 온도 7°C, 상대습도 50% 조건의 항온항습기에서 14일 동안 시험체 하부 2~10mm를 증류수에 침지하여 백화발생을 살펴보았다[5].

백화발생면적은 백화 촉진 항온항습기에서 14일 후 백화 발생 정도를 사진 촬영하고 ‘페인트넷’ 프로그램으로 백화발생면적을 산출하여 정량화하였다. 백화 등급은 정량화된 백화발생면적을 Table 4에 나타난 바와 같이 백화 발생 면적에 따라 5등급으로 구분하였다[4].

백화 촉진 항온항습기에서 14일 후 시험체에서 발생한 백화 사진(a)과 이를 ‘페인트넷’으로 화상처리한 백화 사진(b)을 Figure 4에 나타내었다.

#### 4) 이온크로마토그래피

백화시험 전 시험체를 파쇄하여 1.25~1.50mm의 분말을 각 양생별로 선별하였다. 선별된 분말 샘플과 증류수를 중량비 1:50으로 혼합하여 촉진 백화시험 조건과 동일한

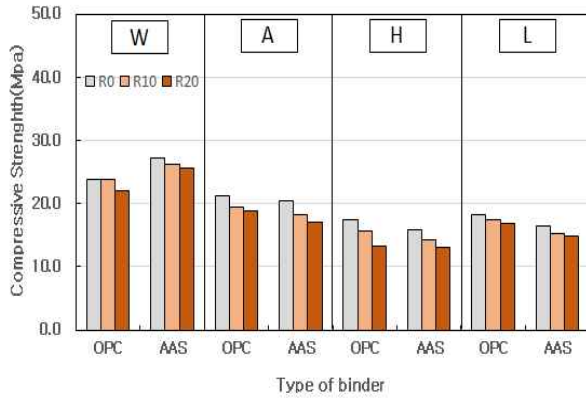


Figure 5. Compressive strength with curing conditions

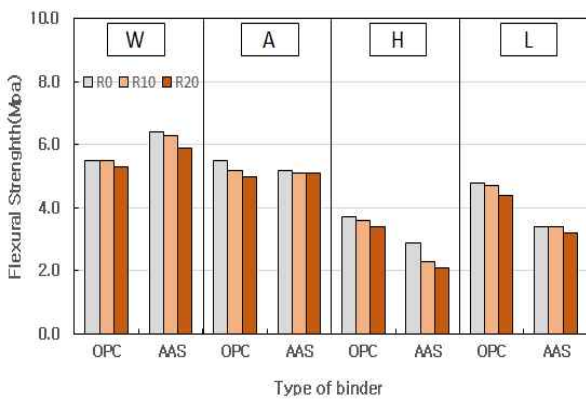


Figure 6. Flexural strength with curing conditions

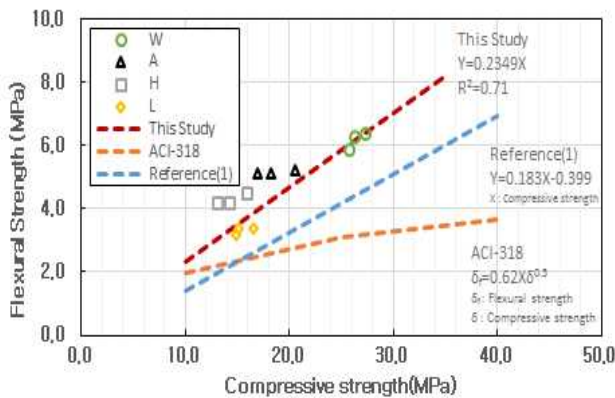


Figure 7. Compressive strength and flexural strength

온도 7°C, 상대습도 50% 조건의 항온 항습기에 48시간 유지한 후 분말 샘플이 침전되어 맑아진 상층부에서 채취한 20mL를 거름종이로 걸러냈다[4]. 가용성 Na<sup>+</sup> 용출량은 Metrohm 930 compact IC Flex 분석 장비를 이용하여 정량 측정하였다.

### 3. 실험결과 및 분석

#### 3.1 압축강도

양생조건에 따른 시험체의 28일 압축강도는 Figure 6에 나타난 바와 같이 표준수중양생을 실시한 시험체가 가장 높게 나타났고, 기건, 고온, 저온양생은 상대적으로 낮게 나타났다.

28일 압축강도는 표준수중양생과 비교하여 기건양생에서 77.4%, 고온양생에서 60.0%, 저온양생에서 66.5% 인 것으로 나타났다. 일반적으로 충분한 수분이 공급되어지는 양생 조건에서의 압축강도는 상온과 비교하여 고온에서 높고 저온에서 낮은 경향을 나타낸다[8]. 하지만 수분이 충분하지 않은 고온에서는 저온에서와 마찬가지로 상온과 비교하여 저온과 유사한 낮은 강도를 발현하고 있다. 이는 기존 문헌에서 제시된 바와 같이 양생조건에 따른 습도가 콘크리트 내부 조건보다 낮을 경우 대기중으로 수분의 이동이 발생되고 이로 인하여 수화반응에 필요한 수분이 부족하였기 때문으로 사료된다[8,9,10]. 특히 고온양생의 경우 저온양생보다도 적은 압축강도를 보이고 있었다. 따라서 콘크리트 타설시 표면의 수분증발을 방지하기 위한 조치로서 밀봉양생과 같은 조치가 필요할 것으로 사료된다.

알칼리활성화 슬래그 시멘트 시험체의 압축강도는 보통 포틀랜드 시멘트 시험체와 비교하여 수중양생에서 113%, 기건양생에서 93.4%, 고온양생에서 93.5%, 저온양생은 88.7%인 것으로 나타났다. 알칼리활성화 슬래그 시멘트는 보통 포틀랜드 시멘트와 비교하여 양생시 수분공급이 원활한 조건에서 강도발현이 우수한 것으로 나타났다. 이는 기존 연구결과에서 보고한 바와같이 알칼리활성화 슬래그 시멘트가 보통 포틀랜드 시멘트와 비교하여 시멘트와 반응하는 자유수의 양이 많고, alite(C<sub>3</sub>S)와 ferrite(C<sub>4</sub>AF)의 반응이 촉진됨에 따라 수화도가 높아지기 때문인 것으로 판단된다 [11].

레드머드 대체율에 따른 알칼리활성화 슬래그-시멘트 시험체의 평균 28일 압축강도는 대체율 0%에서 20.1MPa, 대체율 10%에서 18.7MPa, 대체율 20%에서 17.7MPa 으로 나타나 레드머드 대체율이 증가 할수록 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 레드머드가 고로슬래그 자극제로서 초기 재령에서는 영향을 미치는 것으로 알려져 있으나 장기재령으로 갈수록 자극제로서 반응 할 수 있는 결합재량이 부족해 강도가 저하되는 것으로 판단된다[1].

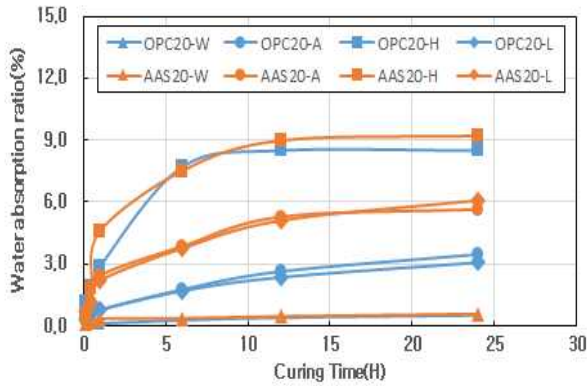


Figure 8. Water absorption ratio with curing conditions

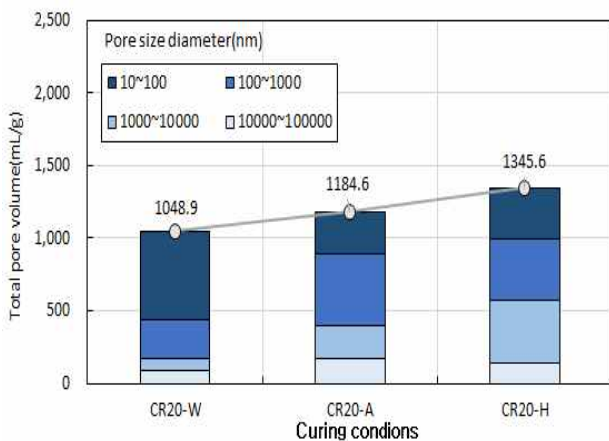


Figure 9. Total pore size

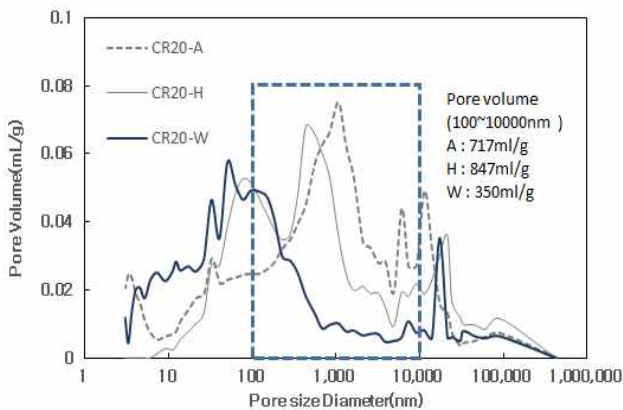


Figure 10. Pore size distribution

### 3.2 휨강도

양생조건에 따른 시험체의 28일 휨강도는 Figure 6에 나타낸 바와 같이 표준수중양생을 실시한 시험체가 가장 높게 나타났고, 기건, 고온, 저온양생은 상대적으로 낮게

나타났다.

평균 28일 휨강도는 보통 포틀랜드 시멘트의 경우 표준수중양생과 비교하여 기건양생에서 96.3%, 고온양생에서 65.64%, 저온양생에서 85.2%이었고, 알칼리활성화 슬래그 시멘트의 경우 표준수중양생과 비교하여 기건양생에서 82.8%, 고온양생에서 39.2%, 저온양생에서 53.7%으로 나타났다. 압축강도와 마찬가지로 휨강도는 양생시 수분공급이 원활한 조건에서 알칼리활성화 슬래그 시멘트가 보통 포틀랜드 시멘트와 비교하여 상대적으로 양호하게 나타났다.

본 논문에서 도출된 시험체의 압축강도와 휨강도의 관계는 기존연구결과에서 제안한 식과 비교하여 Figure 7에 나타내었다[9,10]. 본 논문에서의 압축강도와 휨강도의 상관관계는 아래 식(1)과 같다.

$$y = 0.2349x \text{ ----- (1)}$$











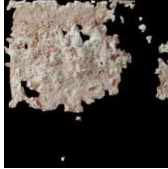








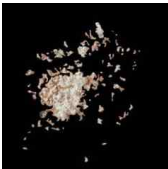
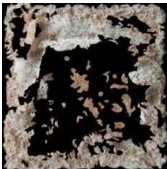



여기서, y는 휨강도(MPa)이고 x는 압축강도(MPa)이다. 양생조건에 따른 알칼리활성화 슬래그 레드머드 시멘트의 28일 휨강도는 기존 연구결과에서 제안한 식과 비교하여 동일한 압축강도에서 높은 경향을 나타내고 있다[12,13].

### 3.3 흡수율

콘크리트의 백화중 2차 백화는 경화체가 경화 후 외부로부터 유입, 침투되는 수분에 의하여 모세관기공이 표면까지 물로 채워진 경우 수분침투 수에 용해된 알칼리 성분이 표면까지 용출, 이동하여 석출 또는 대기중의 CO<sub>2</sub> 가스와 반응을 일으켜 발생된다[4]. 따라서 수밀성을 평가하는 지표인 흡수율이 클수록 콘크리트의 백화 발생 가능성은 높아지게 된다 [14].

양생조건에 따른 시험체의 흡수율은 Figure 8에 나타낸 바와 같이 표준수중양생을 실시한 시험체가 가장 높게 나타났고, 기건, 고온, 저온양생은 상대적으로 낮게 나타났다. 평균 흡수율은 표준수중양생에서 0.55%, 기건양생에서 4.56%, 고온양생에서 8.86%, 저온양생에서 4.58%로 나타났다. 이는 양생과정 중 시험체 내부 수분이 외부로 증발하면서 경화체 내부에 많은 공극이 생성되었기 때문이다. 이러한 결과는 양생조건에 따른 시험체의 총 세공량을 나타낸 Figure 9와 세공분포를 나타낸 Figure 10에서 명확하게 알 수 있다. 총 세공량은 표준수중양생에서 1,048ml/g, 기건양생에서 1,184ml/g, 고온양생에서 1,345ml/g로서 표

Table. 5. Efflorescence characteristics

Curing condition	Ordinary Portland Cement			Alkali-Activated Slag Cement		
	Red mud content(%)			Red mud content(%)		
	0	10	20	0	10	20
Water curing						
	0.17 <sup>1)</sup> II <sup>2)</sup>	0.02 II	0.03 II	0.03 II	0.02 II	1.56 II
Atmospheric Curing						
	0.02 II	87.58 V	91.65 V	0.01 II	23.47 III	72.51 V
High temperature curing						
	2.28 II	61.05 V	96.16 V	0.03 II	91.35 V	93.31 V
Low temperature curing						
	0.01 II	10.86 III	53.7 V	0.01 II	71.86 V	74.16 V

1) Efflorescence area(%), 2) Efflorescence degree

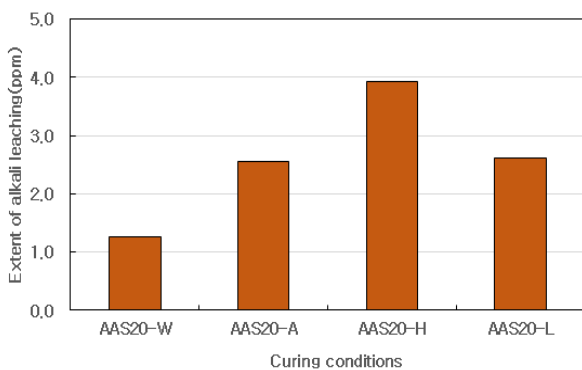


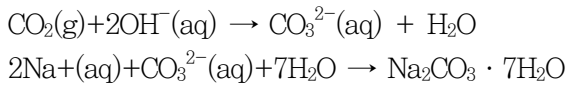
Figure 11. Na<sup>+</sup> leaching test

준수중양생이 가장 적은 것으로 나타났다. 특히 표준수중양생의 경우 세공직경 100~10,000nm의 세공량이 고온양생과 비교하여 현저히 감소하였고 이는 표준수중양생 시험체의 흡수율이 감소로 영향을 미친 것으로 판단된다.

### 3.4 백화특성

보통 포틀랜드 시멘트에 레드머드를 대체한 시험체 백화는 레드머드에서 공급되는 Na와 대기중의 CO<sub>2</sub> 가스가 반응하여 생성되는 일반적인 알칼리탄산염 백화인 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> · H<sub>2</sub>O이다[4]. 이는 NaOH 및 물유리와 같은 나트륨계 자극제로부터 Na가 충분히 공급되어 발생하는 지오폴

리며 백화물질의 생성메커니즘과 유사한 것으로 보고하고 있다[4, 7].



결합재로서 알칼리활성화 시멘트에 레드머드를 사용한 시험체에서 발생한 백화는 레드머드에서 공급되는  $\text{Na}^+$ 와 칼리활성화 시멘트의 자극제로서 사용된 탈황석고에서 공급되는  $\text{SO}_3$ 가 반응 하여 생성되는  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ 가 주로 생성된다[4].

양생조건에 따른 결합재 종류별 백화실험 결과를 Table 5에 나타내었다. 평균 백화발생면적 측정결과 표준수중양생에서 0.3%, 기건양생에서 45.8%, 고온양생에서 57.3%, 저온양생에서 35.1%으로 나타났다.

표준수중양생 시험체는 백화가 거의 발생하지 않은 반면 기건양생, 고온양생, 저온양생 시험체는 레드머드 대체율이 증가할수록 백화발생이 증대되고 있다. 동일한 레드머드 대체율에서는 양생조건에 따라 백화발생면적의 차이가 나타났으며 특히 표준수중양생의 경우 기건, 고온, 저온 양생과 비교하여 백화발생면적이 상대적으로 낮게 나타났다. 이러한 원인을 확인하기 위해 이온크로마토그래피에 의한  $\text{Na}^+$  용출량을 분석하였다.

양생조건에 따른  $\text{Na}^+$  용출량 분석결과를 Figure 11에 나타내었다. 알칼리활성화 슬래그 시멘트의 레드머드 대체율 20% 시험체에서의 양생조건에 따른  $\text{Na}^+$  용출량은 표준수중양생에서 1.25ppm, 기건양생에서 2.54ppm, 고온양생에서 3.93ppm, 저온양생에서 2.61ppm로서 표준수중양생 시험체에서 낮은 값을 나타내고 있다. 이는 표준수중양생의 경우 시험체 표면의 백화 발생의 원인이 되는  $\text{Na}^+$  성분이 양생수에 용출되어 시험체 내부에 상대적으로 알칼리 성분이 적고 이는 백화시험에서 낮은 백화발생면적으로 나타난 것으로 판단된다[4].

#### 4. 결 론

양생조건에 따른 레드머드 혼입 알칼리활성화 슬래그 시멘트 모르타르의 강도 및 백화 특성을 보통 포틀랜드 시멘트 모르타르와 비교 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 압축강도 및 휨강도는 표준수중양생과 비교하여 기건양생, 고온양생, 저온양생에서 60~77.4% 수준으로

서 강도에 영향을 미치는 정도는 온도보다는 습도가 큰 것으로 나타났다.

- 2) 본 논문에서 도출된 압축강도와 휨강도의 관계는 기존 연구결과에서 제안한 식과 비교하여 동일 압축강도에서 좀 더 높은 휨강도를 나타내고 있다.
- 3) 상대습도가 상대적으로 낮은 기건, 고온, 저온양생의 경우 표준수중양생과 비교하여 흡수율이 상대적으로 높게 나타났다.
- 4) 표준수중양생의 경우 세공직경 100~10,000nm의 세공량은 다른 양생조건과 비교하여 현저히 감소하였다.
- 5) 레드머드 혼입 모르타르를 표준수중양생 시킨 시험체에서는 백화가 거의 발생하지 않은 반면 기건양생, 고온양생, 저온양생 시킨 시험체에서는 레드머드 대체율이 증가할수록 백화발생이 증대되고 있다.
- 6)  $\text{Na}^+$  용출량은 표준수중양생에서 가장 작게 나타났고 이는 기건, 고온, 저온양생과 달리 양생중에 시험체 표면에서 백화 발생의 원인이 되는  $\text{Na}^+$  성분이 양생수에 용출되었기 때문으로 사료된다.

#### 요 약

본 논문은 알칼리활성화 슬래그 레드머드 시멘트의 백화 저감을 위한 기초연구로서 다양한 온도 및 습도 조건이 레드머드 혼입 알칼리활성화 슬래그 시멘트의 강도 및 백화에 미치는 영향을 보통 포틀랜드 시멘트와 비교하여 검토하였다. 양생조건에 따른 레드머드 혼입 알칼리활성화 슬래그 시멘트의 강도 및 백화특성 검토결과 표준수중양생을 실시한 모르타르는 기건양생, 고온양생, 저온양생과 비교하여 28일 압축강도, 휨강도가 가장 높게 나타났으며 흡수율 및 백화발생면적,  $\text{Na}^+$ 용출량은 가장 낮게 나타났다. 따라서 향후 레드머드의 대량 활용을 위한 방안으로서 적절한 양생조건은 수중양생으로 사료된다.

**키워드** : 양생조건, 알칼리활성화 슬래그 시멘트, 레드머드, 강도, 백화

#### Acknowledgement

This research was supported by a grant (16



---

CTAP-C115206-01#), (18CTAP-C142091-01) from Infrastructure and transportation technology promotion research Program funded by Ministry of Land, Infrastructure and Transport of Korean government.

### References

1. Kang SP, Kwon SJ. Effects of red mud and alkali-activated slag cement on efflorescence in cement mortar. *Construction and Building Materials*. 2017 Feb;133:459-67.
2. Moon KJ. Properties of non-sintered cement and concrete recycled with industrial waste. [doctor's thesis]. [Chongbuk (Korea)]: Chongbuk National University; 2003. 61-172 p.
3. Kang SP, Kwon SJ. Strength and pore characteristics of alkali-activated slag-red mud cement mortar used polymer according to red mud content. *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*. 2016 Mar;20(2): 26-33.
4. Kang SP, Kang HJ. Pore and efflorescence characteristics of alkali activated slag-red mud cement mortar depending on red mud. *Journal of Korea Institute of Building Construction*. 2017 Jan;17(3):261-8.
5. Moon GD, Choi YJ. Comparative study of the test methods for efflorescence of building materials. *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction*. 2012 Apr.;32(1): 217-8.
6. Pan Z, Cheng L, Lu Y, Yang N. Hydration products of alkali-activated slag-red mud cementitious material. *Cement and Concrete Research*. 2002 Sep;32(3):357-62.
7. Pan Z, Li D, Yu J, Yang N. Properties and microstructure of the hardened alkali-activated red mud-slag cementitious material. *Cement and Concrete Research*. 2003 2;33(9):1437-41.
8. Allahverdi A, Najafi Kani E, Hossain KM, Lachemi M. *Handbook of alkali-activated cements, mortars and concretes*. Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering. 2014. Chapter 17. Method to control efflorescence in alkali-activated cement-based materials; p. 463-83.
9. Hyung WG, Kim JH, Park SJ. Properties of non-sintered cement mortar using alkali and sulfate mixed stimulants according to curing method. *Journal of Korea Institute of Building Construction*. 2015 Jun;27(3):236-43.
10. Hyung WG, Kim JH, Park SJ. Properties of alkali-activated cement mortar by curing method. *Journal of Korea Institute of Building Construction*. 2014 Apr;26(2):117-24.
11. Jang SY, Jeong JY, Choi YC, Kim SI, Jeong SH. 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*. 2015 Apr:115-25.
12. Rabbat BG. *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-95) and Commentary (ACI 318R-95)*. Washington, D.C: Farnington hills; 1995. 373p.
13. Oh YH, Kim YC, Kim EG, Kim GS. The study of correlation between compressive strength and flexural bending strength of concrete pavement. *Journal of the Korea Concrete Institute*. 2007 Nov;19(2):1025-8.
14. Lee MS. Concrete's water tightness evaluation based on water absorption coefficient theory. *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction*. 2001 Feb;17(2): 75-83.