

Research Paper

# 황산으로 중화시킨 액상 레드머드를 혼입한 시멘트 페이스트의 수화특성

## Hydration Characteristics of Liquid Red Mud Mixed Cement Paste Neutralized with Sulfuric Acid

강석표<sup>1</sup> · 홍성욱<sup>1</sup> · 김상진<sup>2\*</sup> · 인병은<sup>2</sup>

Kang, Suk-Pyo<sup>1</sup> · Hong, Seong-Uk<sup>1</sup> · Kim, Sang-Jin<sup>2\*</sup> · In, Byung-Eun<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Professor, Department of Construction Engineering, Woosuk University, Jincheon-Eup, Jincheon-Gun, 27841, Korea

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

\*Corresponding author

Kim, Sang-Jin

Tel : 82-43-531-2903

E-mail : sjkim9701@naver.com

Received : July 13, 2022

Revised : September 14, 2022

Accepted : September 21, 2022

ABSTRACT

In this study, Neutralized red mud(LRM+S) at a pH of 6-8 was prepared by adding sulfuric acid to liquefied red mud(LRM) at a pH of 10~12. After adding LRM and LRM+S to the cement paste, the hydration heat, compressive strength, and hydration products were examined. The observed accumulated hydration heat revealed that the calorific value of the cement paste with LRM was low and its peak was delayed when compared with that of plain cement paste(referred to as Plain), whereas the calorific value of the cement paste with LRM+S was similar to that of Plain. At the age of 28 days, the compressive strength of the cement paste with 20% LRM was 55% of the strength of Plain. Using X-ray diffraction, it was determined that the cement paste with 20% LRM exhibited a Ca(OH)<sub>2</sub> peak after 3 days, whereas the cement paste with 20% LRM+S and Plain exhibited a Ca(OH)<sub>2</sub> peak after an hour. Thus, the strength degradation of cementitious materials was improved by adding neutralized red mud prepared by adjusting the pH of highly alkaline LRM with sulfuric acid.

**Keywords** : red mud, liquefied red mud, sulfuric acid red mud, cement paste, hydration heat, compressive strength, X-ray diffraction, recycling

## 1. 서론

건설산업 분야에서의 폐기물을 이용한 재활용은 대량으로 소비할 수 있는 장점이 있어 다양한 종류의 폐기물들이 국내·외에서 연구되고 있다[1]. 그 중에서도 대표적인 산업부산물로서 고로슬래그 미분말과 플라이애시가 있으며 이들은 실질적으로 산업현장에서 광범위하게 재활용되고 있다[2]. 그러나 대부분의 산업부산물들은 다양한 분야에서 다양한 용도로 재활용하고자 하였으나 실용화 되지 못하고 연구 단계에서 국한되어지고 있다. 실질적으로 재활용 되지 못하는 산업부산물 중 레드머드는 최근 들어 국내·외 적으로 다양한 연구자들에 의해 논의 되고 있는 연구 주제이다[3]. 레드머드는 수산화알루미늄(Al(OH)<sub>3</sub>) 제조 공정인 베이어프로세스를 통하여 발생하는 무기질 부산물로서 전 세계적으로 연간 약 1억 2천만톤이 발생되고 있다[4,5]. 이러한 베이어프로세스는 원료인 보크사이트를 가성소다로 고온, 고압 조건하에서 가열시켜 알루미늄산화 용액을 제조하고 이를 종자법으로 수산화알루미늄을 석출시켜 생산하는 방식으로서 전 세계 수산화알루미늄 제조공정의 95%를 차지하고 있다[6,7]. 이러한 레드머드는 pH가 11~12의 강알칼리성이기 때문에 매립하여 폐기하는 경우 토양, 물, 대기오염으로 이어질 수 있어 산업계에 큰 문제가 되고 있다[8].

해외의 경우 대부분 매립지를 조성하여 복토하는 방식을 채택하고 있다. 그러나 저장, 복구 및 모니터링 비용이 상승하고



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

매립할 수 있는 육지 공간이 부족하여 한계에 봉착함에 따라 보크사이트 잔사물(레드머드) 재활용에 많은 투자와 노력을 기울이고 있다[9]. 현재 우리나라에서 레드머드는 폐기물관리법 시행규칙(보크사이트 잔재물)로서 사업장 일반 폐기물로 지정되어 있으며 시멘트 혼화재료, 안료 또는 착색제 등에 재활용 가능한 것으로 규정되어있다. 그러나 재활용 되는 레드머드는 건조분쇄공정을 거쳐 건조된 분말 형태로서 경제성이 낮아 재활용율은 발생량의 10% 미만으로 매우 낮은 실정이다[10]. 이와 같은 경제성 문제를 개선하여 레드머드를 대량으로 재활용하기 위해 건조 분쇄공정 없이 직접 슬러지 상태로 재활용하는 방안이 제안되었다. 본 논문의 선행연구에서는 레드머드 슬러지를 건조분쇄하지 않고 물에 분산한 액상 레드머드 슬러리를 시멘트 콘크리트 재료로서 재활용하는 연구를 수행하였다. 그 결과 레드머드의 높은 알칼리 함량으로 인하여 시멘트 수화반응에 좋지 않은 영향을 주는 것으로 나타났다[11].

따라서 본 연구에서는 강알칼리성인 액상 레드머드를 첨가한 시멘트 페이스트의 강도저하를 개선하기 위해서 pH 10~12 인 액상 레드머드를 황산으로 중화하여 pH 6~8인 액상 레드머드를 시멘트 페이스트에 첨가하여 활용가능성을 확인하고 레드머드의 재활용 확대에 기여하고자 한다.

## 2. 실험계획 및 방법

### 2.1 실험계획

본 논문에서는 레드머드 슬러지로부터 액상 레드머드를 제조하기 위하여 물과 분산제, 소포제를 혼합하여 제조하였으며, 상기와 같이 제조된 액상 레드머드에 황산을 첨가하여 pH 6~8의 중화 액상 레드머드를 제조하였다. 중화에 따른 액상 레드머드의 화학적 특성을 비교하기 위하여 XRD 및 XRF 분석을 진행하였다.

상기에서와 같이 제조되었던 액상 레드머드를 사용한 시멘트 페이스트의 수화특성을 비교·검토 하기 위하여(Liquefied Red Mud, LRM) 및 황산 중화 액상 레드머드(Liquefied Red Mud + Sulfuric acid, LRM+S)를 첨가한 시멘트 페이스트의 배합을 Table 1에 나타내었다. Plain 배합의 경우 시멘트를 단독으로 사용하였으며, 물시멘트비는 0.3으로 하였다. 또한 PS-LRM 및 PS-LRM+S 배합은 Plain에 LRM 및 LRM+S를 시멘트 중량에 대해 각각 20wt%씩 외할 첨가하였다. 시멘트 페이스트의 압축강도는 재령 3일, 7일, 28일에 측정하였으며, 수화특성은 수화열 및 XRD 분석으로 관찰하였다.

Table 1. Mix design

Mix ID	Cement(g)	Water(g)	Extra discount Red Mud(g)	
			LRM	LRM+S
Plain			-	-
*PS-LRM	100	30	20	-
**PS-LRM+S			-	20

\* PS-LRM : Paste Sample-Liquefied Red Mud

\*\* PS-LRM+S : Paste Sample- Liquefied Red Mud + Sulfuric acid

### 2.2 사용재료

본 논문에서 사용한 시멘트는 KS L 5201의 규정에 적합한 국내 S사의 1종 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며, 물리·화학적 특성을 Table 2에 나타내었다. 본 논문에서 페이스트 첨가용으로 사용한 LRM 및 LRM+S를 제조하기 위한 레드머드 슬러지는 K사에서 공급받아 사용하였고, 물리·화학적 특성을 Table 3에 나타내었다. 레드머드 슬러지의 화학적 조성의 주

성분은  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 로 약 80wt%로 구성되어져 있다. 본 논문에서 LRM을 중화하여 LRM+S를 제조하기 위해 시약급 황산 95%, 을 사용하였다.

**Table 2.** Physical properties and chemical composition of OPC

Type	Blaine ( $\text{cm}^2/\text{g}$ )	Setting time		Density ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	Chemical composition(%)						
		Initial (min)	Final (hour)		$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	CaO	MgO	$\text{SO}_3$	lg. loss
OPC*	3,300	200	5.5	3.15	21.7	5.7	3.2	63.1	2.8	2.2	2.44

\* OPC : Ordinary Portland Cement

**Table 3.** Properties of Redmud sludge

Type	Chemical composition(wt.%)								Moisture content ratio(%)
	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	CaO	MgO	$\text{SO}_3$	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{K}_2\text{O}$	
Redmud sludge	38.8	16.1	22.8	3.4	0.2	0.0	10.0	0.4	36

## 2.3 실험방법

### 2.3.1 LRM 및 LRM+S 제조

본 논문에서는 함수율 약 36wt%의 산업부산물 레드머드 슬러지 질량을 기준으로 레드머드 슬러지, 물, 분산제, 소포제를 1:0.2:0.0036:0.0014의 비율로 혼합하여 LRM을 제조하였으며, 제조과정을 Figure 1에 나타내었다. 먼저 1단계에서는 회전자의 고속회전으로 인해 약 20~30m/s의 높은 전단력이 발생되고 주위의 진공에 의해 레드머드 슬러지가 아래에서 회전자 사이로 빨려 들어가며 입자가 분산되어 입경이 작아지게 만드는 호모믹서를 사용하여 레드머드 슬러지를 물과 함께 약 3분간 혼합하였고, 2단계에서는 저장안정성을 향상시키기 위하여 분산제와 소포제를 상기 비율로 첨가하여 2분간 다시 혼합하여 제조하였다[12]. 제조된 LRM에 대해서 물리·화학적 특성을 분석하였다. LRM+S는 pH가 11.5인 LRM에 황산을 첨가하여 1일 이후에 pH를 6~8로 유지되도록 제조한 후 물리·화학적 특성을 분석하였으며, 상기와 같이 제조된 LRM 및 LRM+S는 시멘트 페이스트 혼합수에 균일하게 혼합하여 사용하였다.

### 2.3.2 강도특성

Plain 및 PS-LRM, PS-LRM+S의 압축강도는 배합별로 3개의 샘플에 동일한 조건을 적용하여 3일, 7일 및 28일에 측정하였으며 평균 압축강도 값으로 하였다. 압축강도는 KS L ISO 679 시멘트 강도 시험방법에 준하여 시험하였다. 시험체 제작은 40×40×160mm 몰드에 시멘트 페이스트를 타설하여 24시간 동안 온도 20±2°C, 상대습도 50%의 항온항습실에서 경화시키고, 1일 후 탈형하여 지정된 재령까지 온도 20±1°C의 수조에서 양생하였다.

### 2.3.3 수화특성

시멘트 페이스트 및 PS-LRM, PS-LRM+S의 수화시간에 따른 수화열을 측정하기 위하여 Multichannel microcalorimeter(TAM AIR, C80, SETARAM Company, France)를 사용하였다. 수화열 측정시간은 시멘트에 물을 혼합한 직후부터 72시간까지 하였다.

수화생성물 확인을 위한 샘플은 3, 7, 28일의 재령별 시험체의 파편을 무수 에탄올에 침지시켜 수화를 정지시켰다. 이어

서 샘플을 45°C 오븐에서 72 시간 동안 건조시킨 후 분쇄하여 200mesh 체를 통과시킨 후 XRD(X-Ray Diffraction Miniflex) 분석하였다[13].



Figure 1. Manufacturing process of liquefied red mud

### 3. 실험결과 및 분석

#### 3.1 액상 레드머드의 물리·화학적 특성

레드머드 슬러지로부터 제조된 LRM 및 LRM+S의 물리적 특성을 Table 4에 나타내었다. LRM의 물리적 특성은 함수율 49.5%, pH 11.5, 밀도 1.50g/cm<sup>3</sup>, 비표면적 2353cm<sup>2</sup>/g, 평균입자지름 2.75μm, 점도 42,550cP이며, LRM+S의 경우 함수율 49.2%, pH 6.7, 밀도 1.54g/cm<sup>3</sup>, 비표면적 2353cm<sup>2</sup>/g, 평균입자지름 2.75μm, 점도 45,550cP이다. 특히 LRM+S는 pH 11.5의 LRM을 황산으로 중화시켜 pH 6.7의 약산성으로 나타냈다.

XRF(X-ray fluorescence)에서 검출된 화학 성분과 이러한 물질의 XRD(X-ray diffraction) 패턴에서 검출된 화학 특성을 각각 Table 5 및 Figure 2에 나타내었다. Table 5에서 LRM+S의 SO<sub>3</sub>함량은 황산의 첨가로 LRM보다 약 4.19% 높게 나타났다. Figure 2에서 볼 수 있듯이 LRM의 주요 화합물은 Quartz, Calcite, Bohemite, Hematite 등으로 확인되었다. 이러한 화합물은 LRM+S에서도 동일하게 나타났으며 LRM+S에서는 황산의 첨가로 2θ = 25.5, 51.1에서 특성피크가 확인되었으며 이는 Gypsum과 Sodium Sulfate로 확인되었다.

**Table 4.** Physical properties of Red Mud

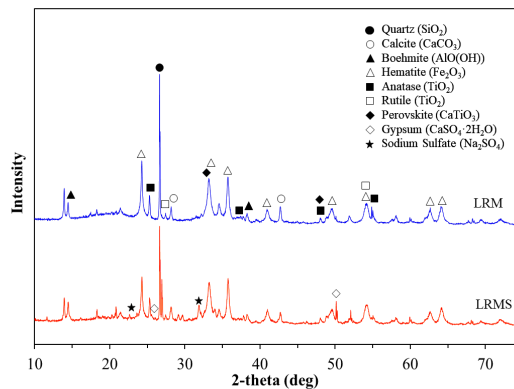
Type of red mud	Moisture content(%)	pH	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Specific surface area (cm <sup>2</sup> /g)	Average particle diameter (μm)	Viscosity (cP)
LRM*	49.5	11.5	1.50	2,353	2.75	42,550
LRM+S**	49.2	6.7	1.54	2,353	2.75	45,250

\* LRM : Liquefied Red Mud

\*\* LRM+S : Liquefied Red Mud + Sulfuric acid

**Table 5.** Chemical composition of Red Mud

Type of red mud	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Na <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>
LRM	17.6	25.6	30.4	0.21	13.2	1.83	6.27	0.29
LRM+S	17	25.4	29.2	0.21	10.7	1.84	5.99	4.48


**Figure 2.** XRD patterns of LRM and LRM+S

### 3.2 압축강도

Table 1의 배합비로 제조한 시편의 재령별 압축강도 측정결과를 Figure 3에 나타내었다. LRM 및 LRM+S를 첨가한 시멘트 페이스트의 압축강도의 경우 Plain과 비교하여 감소하였다. Plain의 압축강도는 3일 46.53MPa, 7일 52MPa, 28일 61MPa, LRM-20의 경우 3일 9.08MPa, 7일 32.51MPa, 28일 34.10MPa, LRM+S는 3일 31.80MPa, 7일 42.30MPa, 28일 53.20MPa로 나타났다. PS-LRM의 경우 Plain과 중화한 PS-LRM+S에 비해 초기강도가 현저히 낮게 나타났고, 7일 강도의 경우 강도 발현이 진행되었지만, 28일강도의 경우 7일 강도와 비교하여 미미한 강도 발현을 나타내었다. 액상 레드머드첨가 시멘트페이스트의 압축강도는 무첨가 시멘트 페이스트(Plain)와 비교하여 감소하였으며, 중화한 액상 레드머드(PS-LRM+S) 첨가 시멘트 페이스트의 경우 중화하지 않는 액상 레드머드(PS-LRM)와 비교하여 높게 나타났다.

중화하지 않는 액상 레드머드 첨가 시멘트 페이스트에 대한 압축강도비를 Figure 4에 나타내었다. PS-LRM의 압축강도와 비교하여 Plain의 경우 3일 512%, 7일 159% 28일 178%로 나타났고, 중화한 PS-LRM+S은 3일 350%, 7일 130% 28일 156% 증가한 것으로 나타났다. 7일 이전에는 재령이 짧을수록 PS-LRM의 강도비 차이가 커지고 있다.

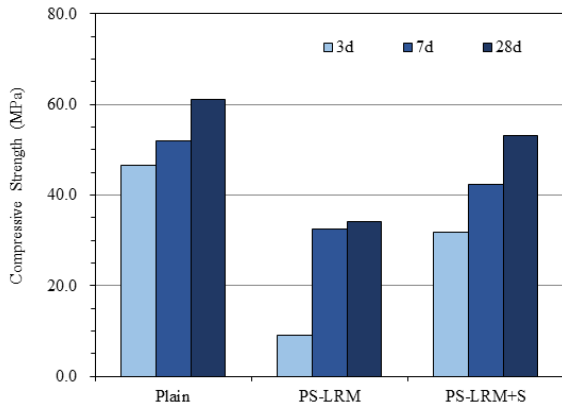


Figure 3. Effects of LRM and LRM+S on the compressive strength of the cement paste

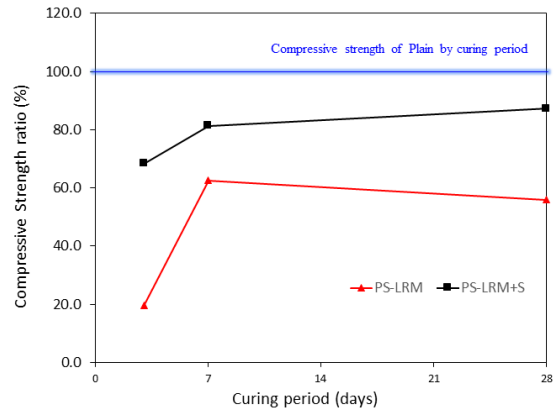


Figure 4. Effects of LRM and LRM+S on the compressive strength ratio of the cement paste

### 3.3 수화특성

#### 3.3.1 수화열

Figure 5에 수화열 피크를 나타내었다. Plain의 피크는 약 15시간, LRM을 첨가한 페이스트의 피크는 54시간으로 나타났다. 따라서 Plain과 비교하여 1.6~3.6배 지연됨을 알 수 있다. 반면에 LRM+S를 첨가한 페이스트의 피크는 Plain과 유사하게 나타났다. 따라서 액상 레드머드를 황산으로 중화하여 시멘트 페이스트에 첨가하는 경우 Plain과 유사하게 C<sub>3</sub>S 및 C<sub>2</sub>S의 수화 및 C-S-H 및 Portlandite(Ca(OH)<sub>2</sub>) 형성하고 있는 것으로 사료된다.

시간에 따른 누적수화열량을 Figure 6에 나타내었다. Plain의 72시간 동안의 누적수화열량은 294.3J/g, PS-LRM의 경우 238.2J/g, PS-LRM+S는 283.4J/g으로 나타났다. 따라서 액상 레드머드를 황산으로 중화하여 시멘트 페이스트에 첨가하는 경우 액상 레드머드보다 높은 초기강도를 발현하고 첨가량에 따른 영향은 크지 않을 것으로 사료된다. 특히 PS-LRM의 3일 재령에서 강도저하가 두드러지게 나타났으며 이는 PS-LRM의 누적수화열량이 상대적으로 낮은 결과와 일치한다. LRM의 첨가로 인한 초기수화의 부정적인 영향은 28일 압축강도에도 영향을 미친 것으로 판단된다.

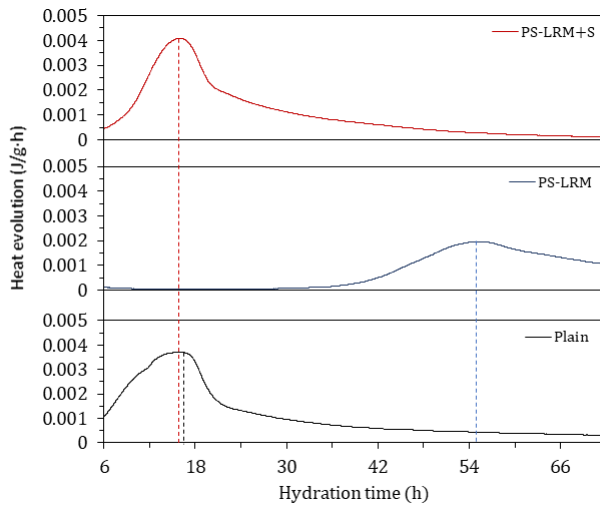


Figure 5. Heat evolution rates of the various cement paste samples

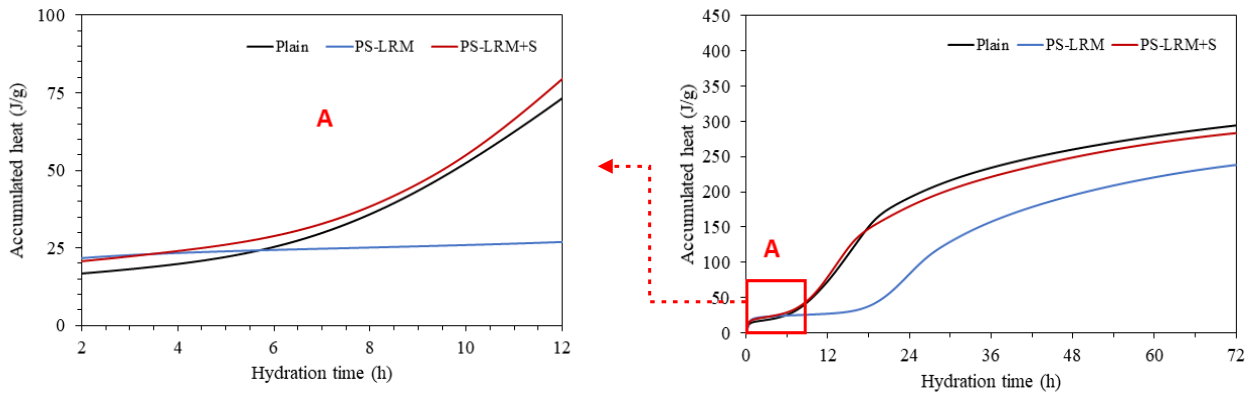


Figure 6. Accumulation of heat for the various cement paste samples

### 3.3.2 XRD

재령에 따른 XRD 결과를 Figure 7에 나타내었다. PS-LRM의 3일 및 7일 재령에서  $2\theta = 18^\circ$ 에서  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  피크가 확인되었다. 이는 압축강도 결과에서 3일부터 PS-LRM의 강도가 급격하게 증가하는 것과, 수화열 결과에서 2차 피크가 나타나며  $\text{C}_3\text{S}$  및  $\text{C}_2\text{S}$ 의 수화 및 C-S-H 및 Portlandite( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) 생성되는 결과와 일치한다. 28일 수화 후 Plain 및 PS-LRM, PS-LRM+S에서 강도를 발현하는 Portlandite( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), Calcium Silicate Hydrate(C-S-H)가 모두 나타나고 있다. 따라서 시멘트 페이스트에 레드머드를 첨가하여 xrd 분석한 결과 새로운 상이 나타나지 않아 시멘트 수화생성물의 형성에 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다.

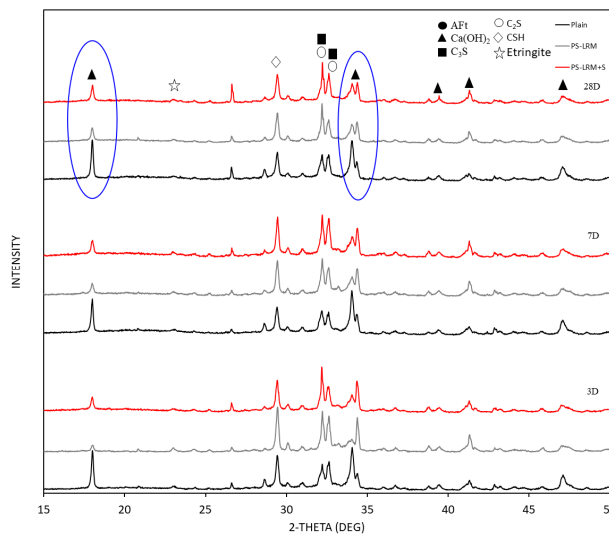


Figure 7. XRD spectrum results of the mixtures with red mud at varying ages

## 4. 결론

본 연구에서는 슬러지로 발생되는 레드머드를 건조분쇄하지 않고 물에 분산한 함수율 약 49.5wt%인 액상 레드머드를 황산으로 중화하여 제조된 레드머드를 사용하여 시멘트 페이스트에 첨가한 후 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 수화열 측정결과 Plain과 비교하여 LRM을 첨가한 시멘트 페이스트는 수화열 최대피크의 발열량이 낮고 0.14시간 지연되었다. 반면 LRM+S를 첨가한 시멘트 페이스트의 경우 Plain 수화열 피크와 유사하게 나타났다.
- 2) 28일 압축강도 측정결과 PS-LRM과 비교하여 Plain의 경우 159%, PS-LRM+S은 156%의 강도비를 나타내었으며, 중한 액상 레드머드를 첨가한 PS-LRM+S의 경우 Plain과 비교하여 유사한 강도비를 나타내고 있다.
- 3) XRD분석결과 PS-LRM의 경우 3일부터  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  피크가 확인되었으며 PS-LRM+S은 Plain과 마찬가지로 1시간부터  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  피크가 나타나 초기 압축강도를 발현한 것으로 판단된다. 또한 레드머드의 첨가로 인한 새로운 생성물은 관찰되지 않았다.
- 4) PS-LRM+S의 28일 압축강도는 Plain과 유사한 수준까지 도달하고 있어 레드머드를 중화함으로써 기존에 제한하고 있는 레드머드의 사용량보다 증가시킬 수 있을 것으로 판단된다.

## 요약


본 연구에서는 액상 레드머드를 첨가한 시멘트계 재료의 강도저하를 개선하기 위해서, pH가 10~12인 액상 레드머드(LRM)에 황산을 첨가하여 pH를 6~8로 조절한 중화레드머드(LRM+S)를 제조하였다. LRM과 LRM+S를 각각 시멘트 페이스트에 첨가하여 수화열, 압축강도, 수화생성물을 확인하였다. 수화열 측정결과 LRM을 첨가한 시멘트 페이스트는 Plain과 비교하여 발열량이 낮고 수화속도가 지연되었지만, LRM+S를 첨가한 시멘트 페이스트는 Plain의 수화열 피크와 유사하게 나타났다. 압축강도 측정결과 PS-LRM의 압축강도는 모든 재령에서 Plain의 압축강도보다 저하되었고 28일 재령에서 55% 수준을 나타내었다. 반면에 PS-LRM+S의 압축강도는 Plain의 압축강도와 비교하여 28일 재령에서 유사한 수준을 나타내었다. XRD 분석 결과 PS-LRM는 3일부터  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  피크가 확인되었지만, PS-LRM+S의 경우 Plain과 유사하게 1시간부터  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  피크가 나타났다. 따라서 강알칼리성의 액상 레드머드에 황산을 첨가하여 중화레드머드를 제조하여 시멘트계 재료에 첨가하면 강도저하를 개선할 수 있을 것으로 판단된다.


키워드 : 레드머드, 액상 레드머드, 황산중화 레드머드, 시멘트 페이스트, 수화열, 압축강도, 엑스선 회절 분석기, 재활용


## Funding


This work is supported by the Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement(KAIA) grant funded by the Ministry of Land, Infrastructure and Transport(Grant 22TBIP-C160747-02).

## ORCID

Suk-Pyo Kang,  <http://orcid.org/0000-0001-5948-4925>

Seong-Uk Hong,  <https://orcid.org/0000-0003-4808-5034>

Sang-Jin Kim,  <http://orcid.org/0000-0002-6381-1252>

Byung-Eun In,  <https://orcid.org/0000-0003-3824-6607>

## References

1. Ribeiro DV, Labrincha JA, Morelli MR. Potential use of natural red mud as pozzolan for portland cement. Materials research.



- 2011 Mar;14(1):60-6. <https://doi.org/10.1590/S1516-14392011005000001>
2. Kim C, Kim N. Durability Evaluation of Precast Concrete Using Blast Furnace Slag and Fly Ash . *Journal of the Korea Concrete Institute*. 2021 Dec;33(6):629-35. <https://doi.org/10.4334/JKCI.2021.33.6.629>
  3. Song Y, Dong M, Wang Z Qian X, Yan D, Shen S, Ruan S. Effects of red mud on workability and mechanical properties of autoclaved aerated concrete (AAC). *Journal of Building Engineering*. 2022 Dec;61:105238. <http://doi.org.libproxy.woosuk.ac.kr/10.1016/j.job.2022.105238>
  4. Li J, Xu L, Sun P, Zhai P, Chen X, Zhang H, Zhu W. Novel application of red mud: Facile hydrothermal-thermal conversion synthesis of hierarchical porous AlOOH and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> microspheres as adsorbents for dye removal. *Chemical Engineering Journal*. 2017 Aug; 321:622-34. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.03.135>
  5. Yang J, Xiao B. Development of unsintered construction materials from red mud wastes produced in the sintering alumina process. *Construction and Building Materials*. 2008 Dec;22(12):2299-307. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.10.005>
  6. Doodoo AD, Nuamah RA, Agyei TB, Obada DO, Yaya A. Awaso bauxite red mud-cement based composites: Characterisation for pavement applications. *Case Studies in Construction Materials*. 2017 Dec;7:45-55. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2017.05.003>
  7. Amritphale SS, Anshul A, Chandra N, Ramakrishnan N. A novel process for making radiopaque materials using bauxite—Red mud. *Journal of the European Ceramic Society*. 2007 Aug;27(4):1945-51. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2006.05.106>
  8. Harjeet N, Abanti S. A study on the characterization of red mud. *International Journal on Applied Bioengineering*. 2014 Jan;8(1):1-4. <https://doi.org/10.18000/ijabeg.10118>
  9. He J, Jie Y, Zhang J, Yu Y, Zhang G. Synthesis and characterization of red mud and rice husk ash-based geopolymer composites. *Cement and Concrete Composites*. 2013 Mar;37:108-18. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.11.010>
  10. Liu X, Zhang N, Sun H, Zhang J, Li L. Structural investigation relating to the cementitious activity of bauxite residue—Red mud. *Cement and Concrete Research*. 2011 Aug;41(8):847-53. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.04.004>
  11. Choe G, Kang S, Kang H. Mechanical properties of concrete containing liquefied red mud subjected to uniaxial compression loads. *Materials*. 2020 Feb;13(4):854. <https://doi.org/10.3390/ma13040854>
  12. Choe G, Kang S, Kang H. Characterization of slag cement mortar containing nonthermally treated dried red mud. *Applied Sciences*. 2019 Jun;9(12):2510. <https://doi.org/10.3390/app9122510>
  13. Wang Y, He F, Wang J, Hu Q. Comparison of effects of sodium bicarbonate and sodium carbonate on the hydration and properties of Portland cement paste. *Materials*. 2019 Mar;12(7):1033. <https://doi.org/10.3390/ma12071033>