

## 탈황석고와 페로니켈슬래그 미분말을 혼합한 진동전압방식 모르타르의 강도 및 내구성에 관한 연구

# A Study on Strength and Durability of Vibrated and Rolled Method Mortar Mixed with Desulfurized Gypsum and Ferronickel Slag Fine Powder

유정환<sup>1</sup> · 박상순<sup>2\*</sup>

Jeong-Hwan Yoo<sup>1</sup> · Sang-Soon Park<sup>2\*</sup>

(Received October 28, 2021 / Revised December 6, 2021 / Accepted December 9, 2021)

In this study, strength and durability evaluations are performed on vibrated-rolled method mortar mixtures containing desulfurized gypsum and ferronickel slag powder. Desulfurized gypsum and ferronickel slag fine powders were substituted for 25% limestone fine powders used in the manufacture of VR tubes, and mortar specimens were prepared using vibrated-rolled method. Accordingly, flexural and compressive strengths were performed to evaluate the strength, and chlorine ion penetration resistance and sulfuric acid resistance tests were performed to evaluate durability. Flexural and compressive strength were improved in the range 20 to 60% of desulfurized gypsum among admixtures, and the amount of passing charge decreased in the chloride ion penetration resistance test in the range of 20 to 80% of desulfurized gypsum. As for the resistance to sulfuric acid, when the proportion of desulfurized in the admixture was 40%, the strength and weight change rate according to the immersion period was reduced. Appropriate use of desulfurized gypsum and ferronickel slag powder is expected to improve performance in terms of strength and durability.

**키워드** : 탈황석고, 페로니켈슬래그미분말, 진동전압방식, 내구성

**Keywords** : Desulfurized gypsum, Ferronickel slag powder, Vibrated and rolled method, Durability

## 1. 서론

환경부 조사에 따르면 2008년 기준 폐석고 및 폐석회의 일일 발생량은 5,059톤이었으며, 연 평균 약 195만톤의 탈황석고가 발생되고 있다. 탈황석고는 화력발전소의 전력 생산 및 원유 정제처리 과정 중에 발생하는 배기가스로부터 SO<sub>x</sub> 성분을 제거하기 위한 과정 중 발생한다. 순도 및 품질이 상당히 균질함에도 불구하고 석고보드용 이외에는 현재까지 적극적인 재활용이 이루어지지 않고 있어 다양한 활용방법의 모색이 요구된다(Ministry of Environment 2010).

페로니켈은 스테인리스강 및 특수강의 주원료이며, 순니켈

20%를 포함하고 있으며 철(Fe)과 니켈(Ni)의 혼합물 형태로, 제련 과정 중 연간 200만 톤 규모의 슬래그가 발생되고 있다. 페로니켈 슬래그는 국내에서 2000년 중반부터 잔골재로 활용되기 시작하였으며 2009년 한국 산업규격인 “KS F 2790 콘크리트용 페로니켈슬래그 잔골재”의 제정을 시작으로 활용을 확대하기 위해 페로니켈슬래그 골재를 활용한 콘크리트 및 성능에 관한 연구가 진행되었다(Lim 2017; Sun et al. 2019; Saha and Sarker 2017). 그러나 페로니켈슬래그 분쇄 시 발생하는 약 10%의 미분은 뚜렷한 활용처가 없어 최근까지도 매립되거나 대부분 폐기되었다(Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs 2011). 이는 비철금속인 페로니켈슬래그 미분말이 물과 접할 경우 표면에 불투수층이 생성

\* Corresponding author E-mail: parkss87@smu.ac.kr

<sup>1</sup>상명대학교 건설시스템공학과 석사 (Department of Civil Engineering, Sangmyung University, Chungnam, 31066, Korea)

<sup>2</sup>상명대학교 건설시스템공학과 교수 (Department of Civil Engineering, Sangmyung University, Chungnam, 31066, Korea)

되어 물과 반응하지 못하기 때문에 콘크리트용 혼화재료로서의 활용에 한계가 있기 때문이다. 하지만 최근 분쇄밀의 기계적 연마 작용을 통하여 분말도를 높여, 페로니켈슬래그 미분말 표면의 자극을 통해 물과의 반응성이 활성화되는 메카노케미컬(mechano-chemical) 반응에 관한 연구가 진행되면서 페로니켈슬래그 미분말의 시멘트 혼화재료로서의 사용 가능성이 보고된 바 있다(Park et al. 2013; Sreenen 2013). 그러나 아직까지 연구초기단계로서 시멘트 혼화재료로서의 전면적인 활용에는 한계가 있으므로 이를 해결하기 위한 다양한 방법에 관한 연구가 요구되고 있다(Kim et al. 2019).

본 연구진은 선행연구를 통해 페로니슬래그 미분말과 다양한 혼화재료의 복합사용에 따른 강도발현 향상효과를 검토하였고 그 중 석고가 효과적이었음을 확인하였다(Nam et al. 2018). 또한 페로니켈슬래그 미분말을 건식배합 기반의 대표적인 프리캐스트 콘크리트 제품인 진동전압 방식의 철근 콘크리트관(Vibrated and rolled reinforced concrete pipe, VR관)의 제조시 혼합하는 경우의 성능향상효과를 확인하였다(Park 2017).

따라서 본 연구에서는 진동전압 방식으로 시편을 제작할 수 있는 진동전압 성형기를 활용해서 VR관의 성능향상을 위해서 페로니켈슬래그 미분말과 탈황석고의 혼합치환에 따른 모르타르의 강도 및 내구성 향상효과를 정량적으로 평가하는 것을 연구의 목표로 한다.

## 2. 실험

### 2.1 실험재료

본 연구에서는 시편을 제작하기 위해 국내에서 제조한 1종 보통 포틀랜드 시멘트(Ordinary Portland Cement : OPC)로는 H사 제품을 사용하였고, 사용한 시멘트의 물리적 특성 및 화학적 조성은 Table 1과 같다. 페로니켈슬래그 미분말(Ferronickel Slag Powder : FSP)은 페로니켈슬래그를 1차 분쇄한 것으로 P사에서 야적된 페로니켈슬래그를 H 시멘트사의 분쇄밀로 분쇄한 재료로서 화학 조성 및 특징은 Table 1과 같으며, 아래에 나타나 있는 Fig. 1(a)는 FSP를 촬영한 것이다. 본 연구에 사용된 탈황석고는 황산화물을 저감하기 위한 건식탈황의 진행 과정에서 발생한 산업부산물로서 국내 H사의 탈황석고(Flue Desulfurized Gypsum :DSG)이며, Fig. 1(b)는 DSG를 촬영한 것이다. 그 외 본 연구에 사용된 혼화재는 시멘트 제조과정 중 발생한 석회석미분말(Limestone Powder : LS)이며, 현재 VR관 생산시 실제 적용되고 있는 혼화재의 일종이

며 Plain 배합에만 적용하였다. 잔골재는 충남 공주 강모래 및 A사의 부순 모래를 사용했고, 최대 입자 크기가 8mm 정도인 석분을 추가하였다.

Table 1. Chemical compositions for OPC, FSP and DSG

Types	SiO <sub>2</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO <sub>3</sub> (%)	blaine (cm <sup>2</sup> /g)
OPC	21.96	5.27	63.41	3.01	0.40	3510
FSP	54.42	6.74	3.36	31.14	0.01	3560
DSG	1.80	0.90	32.07	0.61	42.55	3550

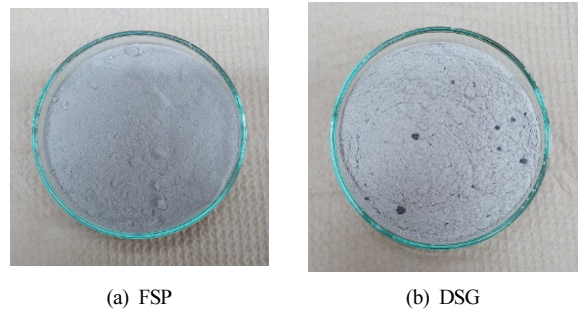


Fig. 1. Experiment material

### 2.2 실험배합 및 제작

본 연구에서는 FSP 및 DSG 두 가지 산업부산물을 혼합한 모르타르 시편의 강도 및 내구성을 평가하기 위해 힘 및 압축 강도, 염소이온침투저항성 및 내황산저항성 시험을 진행하였다. 현재 현장에서 VR관 제작시 적용되는 LS 25% 치환배합을 비교를 위한 기준배합(Plain)으로 하였다. 시험 변수는 FGD 및 FSP의 복합 치환율로 혼화재 전체의 치환율을 OPC 대비 25%로 고정하였으며, 혼화재 중 DSG의 비율을 0, 20, 40, 60, 80, 100%로 계획하였으며 모르타르 제작 배합표는 Tabel 2와 같다. 본 연구에서는 VR관 제작 방식과 동일하게 진동전압 성형기를 이용하여 건식배합으로 모르타르 시편을 제작하였다. 모르타르 시편의 제작방법은 Step 1. 혼합 모르타르 믹서기에 준비한 시료를 넣은 후, 물 없이 건비빔을 2분간 진행하며, 2분 후 물을 투입하여 1분 30초간 혼합한다. Step 2. 진동전압 성형기에 혼합된 시료를 투입하고, 1분 30초간 전압 후 진동전압을 실시한다. Step 3. 마지막으로 전압을 제거하고 모르타르 시편을 탈형한다. 탈형한 시편은 KS F 2476 “폴리머 시멘트 모르타르의 시험 방법”에 기초하여 아래 Fig. 2(a)와 같은 항온항습기 안에 즉시 넣고, 2시간 동안 25°C에서 65°C로 온도를 상승시키며, 6시간 동안 65°C로 유지시킨 후 2시간 동안 25°C로

온도를 감소시키는 것으로 KS F 4402 기준에 따라 증기양생 기준 시간에 맞춰 시편의 증기양생을 실시하였다.

Table 2. Mix proportions of mortars

Case	Unit weight(kg/m <sup>3</sup> )							
	W	C	FSP	DSG	LS	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>
Plain	148	292	-	-	97	288	849	867
F25			97	-	-			
F20G5			77.6	19.4	-			
F15G10			58.2	38.8	-			
F10G15			38.8	58.2	-			
F5G20			19.4	77.6	-			
G25			-	97	-			

### 2.3 실험방법

재령 3일, 7일, 14일, 28일의 휨강도를 측정하기 위하여 40mm×40mm×160mm 모르타르 시편을 사용하였다. 휨강도는 KS F 2476 “폴리머 시멘트 모르타르의 시험 방법”과 KS F 4042 “콘크리트 구조물 보수용 폴리머 시멘트 모르타르”를 기준으로 시험을 수행하였으며, 각각의 배합에 대해 3회 시험을 실시하여 평균값으로 나타냈다.

압축강도 시험은 재령 3일, 7일, 14일, 28일에 휨강도 시험수행 후 쪼개진 시편을 사용하였다. 압축강도 또한 휨강도와 마찬가지로 KS F 2476 “폴리머 시멘트 모르타르의 시험 방법”과 KS F 4042 “콘크리트 구조물 보수용 폴리머 시멘트 모르타르”를 기준으로 시험을 수행하였다. 각각 배합별 6회 시험을 실시하여 평균값으로 나타냈다.

염소이온 침투 저항성 시험은 KS F 2711 “전기 전도도에 의한 콘크리트의 염소이온 침투 저항성 시험 방법”에 기초하여 재령 14일, 28일 및 56일에 염소이온을 이용하여 통과 전하량 측정 시험을 실시하였다. 화학적 저항성능 평가는 ASTM C 267-97 “Chemical Resistance of Mortars, Grouts, and Monolithic Surfacing and Polymer Concretes”의 방법 B에 기초하여 수행하였다. Fig. 2(c)와 같이 50mm×50mm×50mm 입방형 시편을 제작하여 28일간 수중 양생시킨 후 5.0% 황산 용액에 시편을 침지시킨 후 28일까지 매일 질량을 측정하고, 침지 1일, 7일, 14일, 28일에 압축강도 시험을 실시하여 변화과정을 분석하였다. 또한 ASTM C 1365 “Determination of the Proportion of Phases in Portland Cement and Portland-Cement Clinker using X-Ray Powder Diffraction Analysis”를 참조하여 XRD(X-ray diffraction) 분석을 진행하였다.

시료의 광물학적 단계에 관한 정보를 얻기 위하여 성능개선 효과가 뚜렷한 대표배합의 시편과 Plain 시편의 재령 28일 및 침지 28일의 압축강도 시험 수행 후 쪼개진 시편 조각을 한국세라믹기술원으로 보내 분석을 의뢰하였다. SEM(Scanning Electron Microscope) 분석은 ASTM C 1723 “Examination of Hardened Concrete Using Scanning Electron Microscopy”를 기초하여 시료를 분석하였다. 재령 28일, 침지 1일, 7일, 14일, 28일 압축강도 시험 수행 후 쪼개진 시편 조각을 전처리 후 Fig. 2(d) 국내 S사의 SEM 기기를 통하여 시료의 미세구조를 2,000 배율로 관찰 및 분석하였다.

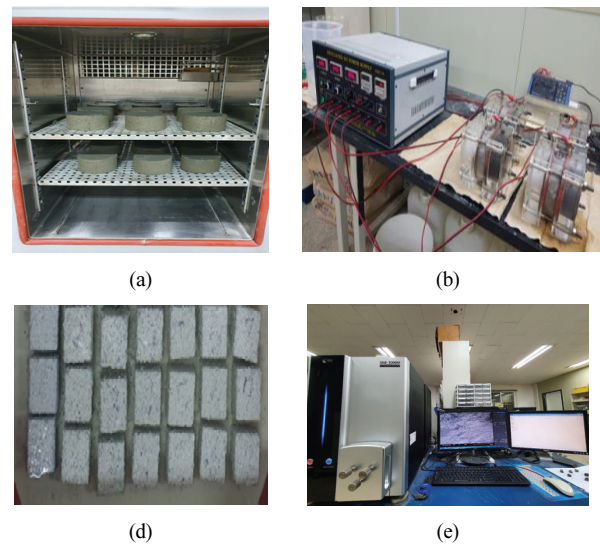


Fig. 2. Photos for a test process : (a) specimens for RCPT (b) test equipment for RCPT (c) specimen for chemical resistance test (d) test equipment for SEM

## 3. 실험결과 및 분석

### 3.1 휨강도

휨강도 평가는 KS F 2476 및 KS F 4042에 기초하여 재령 3, 7, 14, 28일에 각각 3개 시편을 이용하여 실시하였으며, 휨강도 시험결과는 측정값의 평균으로 Fig. 3에 나타내었다.

FSP만을 치환한 F25은 재령 7일에서 Plain 휨강도의 48.8% 수준이었으며, 재령 14일에는 88.1%로 증가하고 28일에는 102.6%로 Plain의 휨강도를 초과하였다. 혼화재 중 DSG를 20% 혼합한 F20G5는 재령 7일에서 Plain 휨강도의 117.5% 이었고 혼화재 중 DSG를 40% 혼합한 F15G10는 133.1%로서 Plain 강도와 F25 강도를 상회하는 강도발현 특성을 나타내었다. 반면 혼화재중 DSG 비

율이 60%인 F10G15의 경우는 재령 7일에서는 Plain과 F25에 비해 휨강도가 크지 않았으나 재령 14일부터 Plain 휨강도를 상회하였다. 혼화재 중 DSG의 혼합비율이 80%인 F5G20은 모든 재령에서 Plain의 휨강도 이하의 강도를 나타내었지만 3,7,14일에는 F25 이상의 휨강도를 나타내었다. DSG만을 혼합한 G25는 모든 재령에서 Plain 및 F25이상의 강도를 나타내지 못하여 강도발현이 우수하지 않은 것으로 나타났다.

### 3.2 압축강도

압축강도 평가는 KS F 2476 및 KS F 4042에 기초하여 재령 3, 7, 14, 28일에 휨강도를 진행하고 난 후 쪼개진 6개의 시편을 이용하여 수행하였으며, 압축강도 시험 결과는 측정값의 평균으로 Fig. 4에 나타내었다.

FSP만을 치환한 F25는 재령 7일에서 Plain 압축강도의 94,2%였으나 14일 이후는 100% 이상으로 강도가 향상되었다. DSG를 복합치환한 F20G5의 경우 재령 3일에서 이미 Plain의 압축강도를 상회하였으며 재령 7일에서는 F20G5, F15G5, F10G15배합에서 Plain과 F25 이상의 압축강도를 나타내었다. 이러한 경향은 재령 28일까지 이어져서 재령 28일에는 F20G5는 Plain의 101,5%, F25

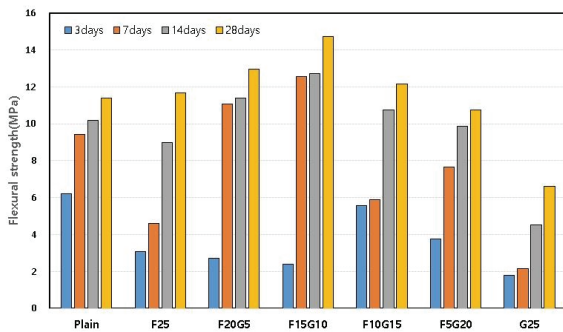


Fig. 3. Results of flexural strength test

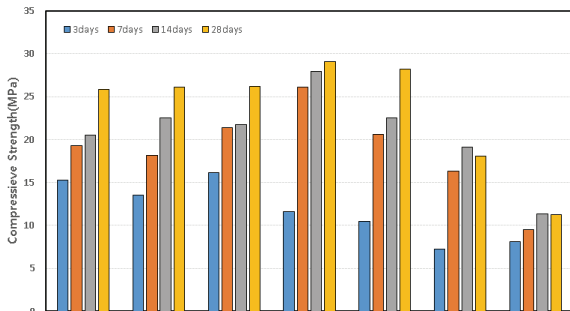


Fig. 4. Results of compressive strength test

의 100,3%이고 F15G10은 Plain의 112,5%, F25의 111,1%로 가장 큰 압축강도 향상효과를 나타내었다. F10G15의 경우도 Plain의 109,4%, F25의 108,1%로 강도향상 효과가 있었다. 그러나 F5G20과 DSG만을 혼합한 G25의 경우는 휨강도와 마찬가지로 강도향상 효과는 없었다. DSG의 혼합은 추가적인  $SO_4^{2-}$ 의 사용으로 초기 에트링가이트의 생성과 파괴를 반복시켜  $C_3A$ 의 매우 빠른 수화반응속도를 늦추게 되고 FPS가 포졸란 반응을 일으킬 수 있는 시간을 확보하게 된다. 또한 분리된  $Ca^{2+}$ 가 FPS에 부족한 CaO 성분으로 대체되어 OPC 및 FPS만을 혼합한 배합보다 우수한 강도발현 특성을 보인다(Nam et al, 2018).

### 3.3 염소이온침투저항성

염소이온침투저항성 시험은 재령 14일, 28일, 56일에 ASTM C 1202 및 KS F 2711에 기초하여 총 6시간 동안 데이터로거를 통하여 통과 전하량 값을 측정하였으며, 측정결과 및 평가는 Fig. 5 및 Table 3에 나타내었다. Plain은 재령 14일 기준에서는 7,650 coulomb 값을 재령 28일 및 56일에서는 5,288 및 7,259 coulomb로 ‘ASTM C 1202’의 나타난 등급 기준 표에 따르면 염소 이온 투과성이 높은 것으로 나타났다. FSP만의 배합인 F25는 재령 14일, 28일, 56일에서 각각 4,937, 5,054, 5,657coulomb으로 Plain에 비해서 통과전하량이 감소하였다. DSG를 복합치환한 F20G5는 재령 14일에서는 3,317coulomb으로 염소이온 투과성이 보통으로 나왔으며, 재령 28일에서는 1,049coulomb으로 염소이온 투과성이 낮음으로 나왔고 재령 56일에서는 779coulomb으로 매우 낮음으로 나왔다. F15G10은 재령 14일 및 재령 28일에서 797, 941coulomb으로 염소 이온 투과성이 매우 낮음으로 나왔으나, 재령 56일에서는 3,506coulomb으로 증가하였다. F10G15는 재령 14일에서는 783coulomb으로 매우 낮음으로 나왔으며, 재령 28일에서는 2,555coulomb으로 보통, 재령 56일에서는 3,415coulomb으로 등급은 같은 보통이지만 염소 이온 투과성은 증가하는 것을 확인할 수 있었다. F5G20은 재령 14일에서는 8,577coulomb으로 높았으나 재령 28일에서는 1,058 coulomb, 재령 56일에서는 779coulomb로 매우 낮음 등급이었다. G25는 재령 14일 5,022coulomb이었고 재령 28일 및 56일에서 4,050, 5,589coulomb으로 높음 등급이었다. 다소의 변동성은 있으나 혼화재 중 DSG의 비율이 20%인 F20G5에서 80% 범위인 F5G20까지 Plain과 F25에 비하면 전반적으로 염소이온 침투저항성이 개선되는 것으로 나타났다. 재령 14일과 28일에서는 혼화재 중 DSG의 혼합비율이 40%인 F15G10의 개선효과가 크고 재령 56일에서는



혼화재 중 DSG의 비율이 80%인 F5G20이 상대적으로 큰 것으로 나타났다.

Table 3. Results of penetrability evaluation

Case	Chloride ion penetrability		
	14 days	28 days	56 days
Plain	High	High	High
F25	High	High	High
F20G5	Moderate	Low	Very low
F15G10	Very low	Very low	Moderate
F10G15	Very low	Moderate	Moderate
F5G20	High	Low	Very low
G25	High	High	High

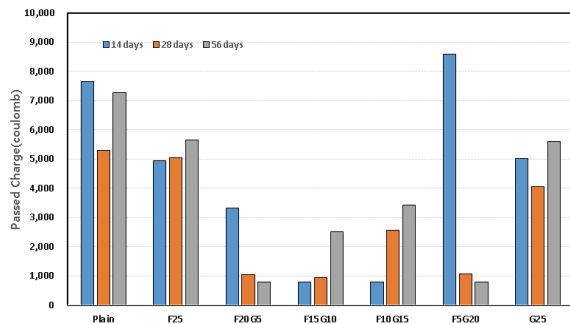


Fig. 5. Results of passed charge

### 3.4 내황산저항성

내황산저항성 시험은 ASTM C 267의 방법 B에 기초하여 5.0% 황산용액에 시편을 28일 동안 침지 시켜 질량 및 압축강도의 변화를 측정하였으며, Fig. 6에 침지시간에 따른 표면 열화를 사진으로 나타내었다. 질량변화는 5.0% 황산용액에 시편을 침지 시킨 후 배합별 각 3개의 시편의 평균 질량으로 측정하였고 질량변화율은 Fig. 7에 나타내었다. 침지 1일에는 모든 시편이 3~9% 질량이 증가하는 모습을 보였으며, 황산 용액의 흡수로 인해 시편의 질량이 증가된 것으로 판단된다. 침지 7일에서 Plain, F15G10 및 G25는 침지 전과 비교하였을 때 질량이 1~3% 증가되었으며, 나머지 시편들은 질량이 1~5% 감소하는 모습을 보였다. 재령 14일에서는 G25는 침지 전 질량과 비교하였을 때 차이가 없었으며, F25, F20G5 및 F5G20은 8~9% 감소하였다. 침지 21일에서는 G25는 3% 질량 감소를 보였으며, Plain, F15G10 및 F10G15는 평균 7% 질량 감소를 보였다. F25, F20G5 및 F5G20은 침지 전 대비 10~13% 질량 감소를 보였다. 침지 28일에서는 G25가 6%로 가장 질량

변화가 작게 나타났고 Plain, F15G10 및 F10G15는 평균 10% 질량 감소를 보였으며, F25 및 F20G5는 16~17% 질량 감소를 나타내었다. 침지 1, 7, 14 및 28일에 시편 3개의 압축강도 측정을 실시하였다. 침지시간에 따른 압축강도의 변화는 Fig. 8에 나타내었다. Plain 시편은 침지 전과 비교하여 침지 28일에 침지전 압축강도의 38% 수준으로 감소하였고, FSP만을 치환한 F25는 45% 수준으로 감소하였다. DSG를 복합치환한 F20G5와 F15G10에서는 각각 침



Fig. 6. Sulfuric acid resistance test

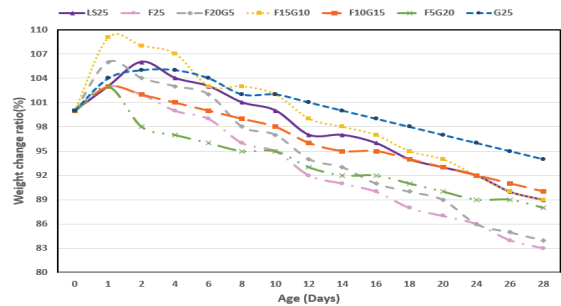


Fig. 7. Results of weight change in chemical resistance test

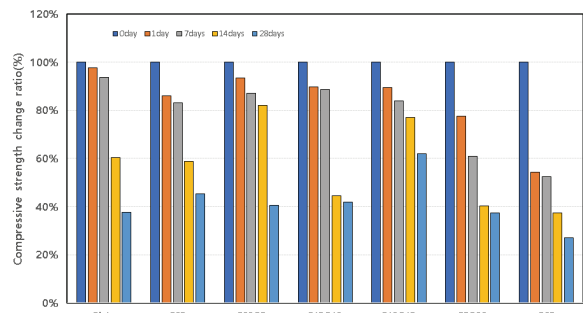


Fig. 8. Results of compressive strength change in chemical resistance test

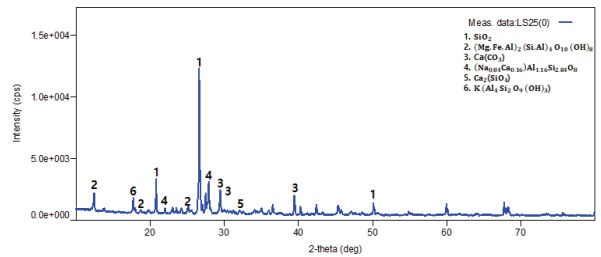
지전 압축강도의 41, 42% 수준으로 감소하였지만 F10G15의 경우에는 침지 1일 89%, 7일 84%, 14일 77%, 28일 62%로 상대적으로 가장 적은 감소폭을 나타내었다. 반면 F5G20에서는 침지 14일에 40%로 감소하였고 침지 28일에는 37%로 감소하였고 DSG만을 치환한 G25의 경우 침지 7일에 53%로 감소한 후 28일에는 27% 수준으로 감소하였다.

### 3.5 XRD

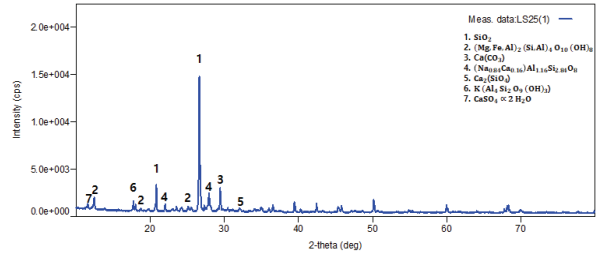
XRD 평가는 내황산저항성 시험에서 질량변화와 강도변화에서 상대적으로 우수한 특성을 보인 혼화제 중 DSG의 비율이 60%인 F10G15 시편의 침지전과 28일 침지 후 시편을 이용하였으며 비교를 위해 Plain 시편을 함께 분석하였고 분석결과는 Fig. 9 및 Fig. 10과 같다. XRD 분석 결과 Plain 침지 전과 후에 Quartz( $\text{SiO}_2$ )가 가장 높은 비중을 차지하였으며, Clinocllore( $(\text{Mg,Fe,Al})_6(\text{Si,Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$ )가 두 번째로 많은 비중을 차지하였다. 침지 전과 후의 큰 차이는 Quartz( $\text{SiO}_2$ ) 비중이 줄어 들면서, Clinocllore( $(\text{Mg,Fe,Al})_6(\text{Si,Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$ )의 비중이 높아졌다는 점이다. 또한 Calcite( $\text{CaCO}_3$ ) 및 Albite-calcian( $\text{Na}_{0.84}\text{Ca}_{0.16}\text{Al}_{1.16}\text{Si}_{2.84}\text{O}_8$ )가 침지 후 다소 줄어들었으며, Gypsum( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )이 새롭게 생성되는 것을 확인할 수 있었다. F10G15에서의 수화생성물은 Plain과 유사하게 Quartz( $\text{SiO}_2$ )가 가장 많은 비중을 차지하였고 Albite-calcian( $\text{Na}_{0.84}\text{Ca}_{0.16}\text{Al}_{1.16}\text{Si}_{2.84}\text{O}_8$ ) Muscovite( $\text{K}_{0.77}\text{Al}_{1.93}(\text{Al}_{0.5}\text{Si}_{3.5}\text{O}_{10})(\text{OH})_2$ )의 순이었다. Plain과의 차이는 상대적으로 Clinocllore( $(\text{Mg,Fe,Al})_6(\text{Si,Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$ )가 적은 비중을 차지한다는 점이다. 침지 후 Quartz( $\text{SiO}_2$ )의 비중이 다소 감소하면서 Clinocllore( $(\text{Mg,Fe,Al})_6(\text{Si,Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$ )의 비율이 5배가량 상승하는 모습을 보였으며, Calcite( $\text{CaCO}_3$ )가 다소 감소하는 모습을 보였다. Plain 시편의 결과와 비교하면 Quartz( $\text{SiO}_2$ )에 포함된 이산화규소 성분과 녹니석의 일종인 Clinocllore( $(\text{Mg,Fe,Al})_6(\text{Si,Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$ )가 추가적으로 생성되면서 화학적 침식 성능이 향상된 것으로 평가된다.

### 3.6 SEM 분석저항성

내황산저항성과 관련하여 SEM(Scanning Electron Microscope)을 이용하여 2000배 배율로 미세구조를 분석하였으며, 침지 전 및 침지 7일, 14일, 28일의 시편으로 진행하였다. SEM 분석 결과는 Fig. 11에 나타내었다. Plain에서는 에트링가이트와 모노설페이트를 확인할 수 있었으며 내황산저항성이 상대적으로 우수했던 F10G15도 침지 전 에트링가이트와 모노설페이트를

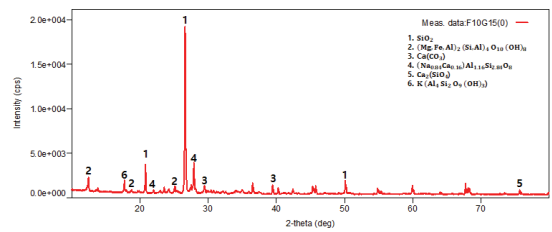


(a) Plain before immersion

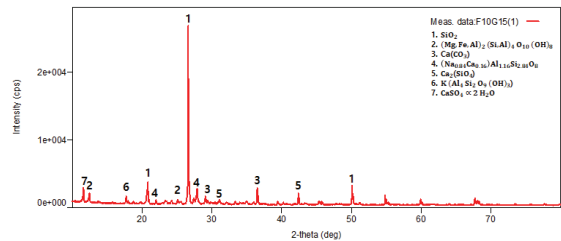


(b) Plain after 28days immersion

Fig. 9. XRD spectrum results(plain)



(c) F10G15 before immersion



(d) F10G15 after 28days immersion

Fig. 10. XRD spectrum results(F10G15)

확인할 수 있었으며 침지기간이 증가한 후 Plain과 비교해서 공극이 적은 조밀한 미세구조 형태를 이루고 있는 것을 확인할 수 있었다.

## 4. 결론

본 연구에서는 FSP 및 DSG를 복합치환한 진동전압방식의 모

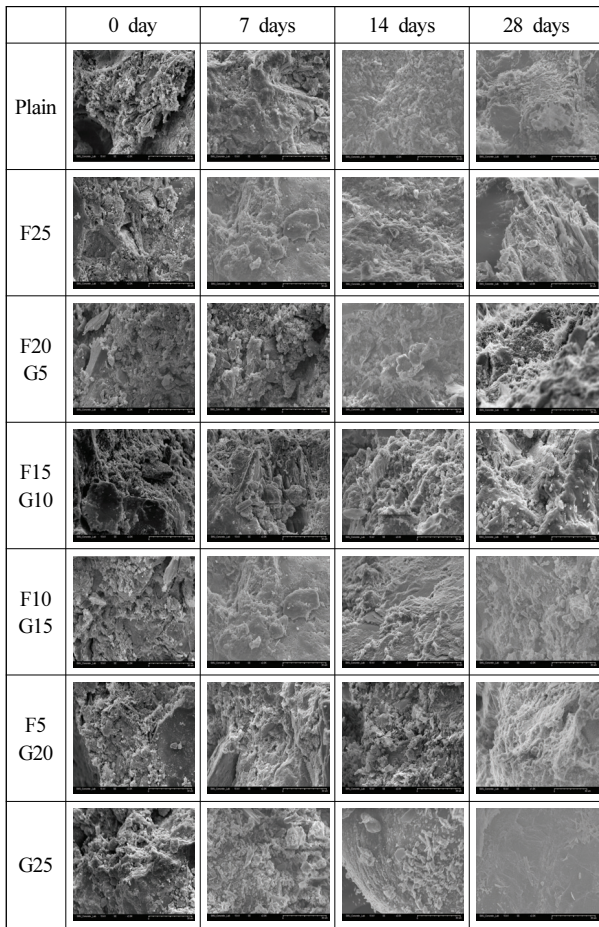


Fig. 11. Results of SEM

르타르 시편을 제작하였다. 모르타르의 힘 및 압축강도를 통한 강도 발현특성과 염소이온침투저항성 및 황산 5%용액을 이용하는 내황산저항성 시험을 통하여 FSP 및 DSG 혼합 모르타르에 대한 강도 및 내구성 평가를 실시하였다. 실험결과 분석을 통해 도출된 결론은 아래와 같다.

1. 힘 및 압축강도 분석결과 FSP를 혼합한 F25는 초기 강도는 Plain 보다 낮았지만 재령 28일에서는 Plain의 강도와 유사한 강도특성을 나타냈다. FSP와 DSG를 복합치환한 배합의 경우 혼화재 중 DSG의 비율이 20%~60%인 경우 FSP만을 혼합한 경우보다 최대 44.1% 강도가 증가하였으며 가장 강도증가효과가 큰 배합은 혼화재 중 DSG 비율이 40%인 F15G10이었다. 혼화재 중 DSG의 혼합비율이 80% 이상인 경우에는 강도가 저하되었다.
2. 염소이온 통과저항시험에서 FSP를 혼합한 경우 Plain에 비해 염소이온 통과전하량이 감소되었으며 FSP와 DSG를 복합치환한 경우 Plain과 F25에 비해 전반적으로 염소이온 통과저항성

능이 향상되는 효과가 있었다. 재령 28일에서는 혼화재 중 DSG 혼합비율이 40%인 F15G10이 가장 개선효과가 크고 재령 56일에서는 DSG의 혼합비율이 80%인 F5G20의 개선효과가 가장 큰 것으로 나타났다.

3. 내황산저항성 시험은 황산 5.0% 용액에 모르타르 시험편을 침지시킨 후 질량변화 및 압축강도변화를 측정하였다. 실험 결과 질량변화 부분에서는 초기에는 황산 용액을 흡수하여 질량이 오히려 증가하는 모습을 보였으며, 침지 시간이 증가할수록 감소가 진행되었으며 침지 28일에서는 혼화재 중 DSG의 혼합비율이 60% 이상인 경우에 F25과 Plain에 비해 질량감소비율이 저감되었다. 침지일에 따른 압축강도 변화는 FSP를 혼합한 경우 Plain에 비해 감소하였으며 DSG를 복합치환한 F10G15의 경우 강도감소 폭이 가장 작아서 개선효과를 확인할 수 있었다.
4. XRD 분석 결과, FSP와 DSG를 혼합한 경우 이산화규소 성분이 포함된 Quartz( $\text{SiO}_2$ )의 비중이 제일 컸으며, 녹니석의 일종인 Clinocllore( $(\text{Mg,Fe,Al})_6(\text{Si,Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$ )이 그 다음으로 비중이 컸으며 Plain과 비교하면 Calcium silicate가 추가 생성되었으며 Albite-calcian( $\text{Na}_{0.84}\text{Ca}_{0.16}\text{Al}_{1.16}\text{Si}_{2.84}\text{O}_8$ )의 비중이 컸다. 5% 황산용액 침지 후에는 Quartz( $\text{SiO}_2$ )가 다소 감소하였으며, 특히 Clinocllore( $(\text{Mg,Fe,Al})_6(\text{Si,Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$ )는 증가하는 모습을 보였다. Plain 결과를 비교하면 Quartz( $\text{SiO}_2$ )에 포함된 이산화규소 성분과 녹니석의 일종인 Clinocllore( $(\text{Mg,Fe,Al})_6(\text{Si,Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$ )이 추가적으로 생성되면서 화학적 침식 성능이 향상된 것으로 평가된다.
5. SEM 분석 결과 시험 결과를 통하여 Plain에서는 에트린가이트와 모노설페이트를 확인할 수 있었으며 DSG를 복합치환한 경우 침지 전 에트린가이트와 모노설페이트를 확인할 수 있었으며 침지기간이 증가한 후 Plain과 비교해서 공극이 적은 조밀한 미세구조 형태를 이루고 있는 것을 확인할 수 있다.

### Conflicts of interest

None.

### 감사의 글

본 연구는 상명대학교의 교내연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

## References

- Kim, H., Lee, C.H., Ann, K.Y. (2019). Feasibility of ferronickel slag powder for cementitious binder in concrete mix, *Construction and Building Materials*, **207**, 693–705.
- Lim, B.G. (2017). A study on the mechanical properties and durability for the mortar using modified ferronickel slag fines, Master's Thesis, SangMyung University [In Korean].
- Ministry of Environment (2010). A study on establishment of quality certification criteria for recycled waste plaster [In Korean].
- Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs (2011). Technical development and products for agricultural utilization from ferronickel slag, Technical Report of MIAFF, 3–6.
- Nam, S.K., Chung, T.J., Jo, S.A., Yoo, J.H., Park, S.S. (2018). Analysis of the influence of combined use of ferronickel slag fine powder and admixture on VR sewage pipe strength development, *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*, **6(3)**, 214–221 [In Korean].
- Park, S.H., Chu, Y.S., Song, H., Lee, J.K., Seo, S.K. (2013). Fabrication of  $Mg(OH)_2$  from ferro–nickel slag, *Journal of the Korean Institute of Resources Recycling*, **22(1)**, 42–47 [In Korean].
- Park, S.S. (2017). Strength and resistance to chloride penetration in mortar containing ferronickel slag powder by vibrated and rolled manufacturing method, *Journal of the Korea Concrete Institute*, **29(6)**, 633–640 [In Korean].
- Saha, A.K., Sarker, P.K. (2017). Compressive strength of mortar containing ferronickel slag as replacement of natural sand, *The 3rd International Conference on Sustainable Civil Engineering Structures and Construction Materials–Sustainable Structures for Future Generations*, **171**, 689–694.
- Sereenen, O. (2013). A study on the utilization of mechanically activated ferro–nickel slag, Ph.D Thesis, Suncheon National University.
- Sun, J., Feng, J., Chen, Z. (2019) Effect of ferronickel slag as fine aggregate on properties of concrete, *Construction and Building Materials*, **207**, 201–209.

### 탈황석고와 페로니켈슬래그 미분말을 혼합한 진동전압방식 모르타르의 강도 및 내구성에 관한 연구

본 연구에서는 산업부산물인 탈황석고 및 페로니켈슬래그 미분말을 혼합한 진동전압방식 모르타르의 강도 및 내구성의 평가를 실시한다. VR관 제작시 사용되는 석회석미분말 25% 치환을 기준으로 탈황석고 및 페로니켈슬래그 미분말을 복합치환하고, 진동전압방식을 사용하여 시편을 제작하였다. 강도발현 특성을 평가하기 위해 힘 및 압축강도를 실시하였으며, 내구성을 평가하기 위해 염소이온침투저항성 및 내황산저항성 시험을 실시하였다. 힘 및 압축강도에서 혼화재 중 탈황석고의 비율이 20~60% 범위에서 강도가 향상되었으며, 탈황석고의 비율이 20~80% 범위에서 염소이온침투저항성 시험에서 통과 전하량이 감소하는 경향을 보였다. 내황산저항성은 탈황석고의 비율이 40%인 경우 침지시간에 따른 강도 및 질량 감소율이 줄어들었다. 강도 및 내구성 실험결과를 기초로 탈황석고 및 페로니켈슬래그 미분말을 적절하게 혼합해서 사용한다면 강도 및 내구성에서 성능 개선 효과를 기대할 수 있다고 판단된다.