

Research Paper

증해추출 왕겨분말을 혼입한 지오폐리머의 황산마그네슘 저항성에 관한 연구

Magnesium Sulfate Resistance of Geopolymer Incorporating Evaporated Rice Husk Powder

조승비¹ · 김영수^{2*}

Cho, Seung-Bi¹ · Kim, Young-Su^{2*}

¹Master's Course, Department of Architectural Engineering The Graduate School Pusan National University, 2, Busandaehak-ro 63beon-gil, Geumjeong-gu, Busan, 46241, Korea

²Professor, Department of Architectural Engineering The Graduate School Pusan National University, 2, Busandaehak-ro 63beon-gil, Geumjeong-gu, Busan, 46241, Korea

*Corresponding author

Kim, Young-Su
Tel : 82-51-510-2443
E-mail : kys@pusan.ac.kr

ABSTRACT

The purpose of this study is to evaluate the magnesium sulfate resistance of a geopolymer mixed with rice husk powder. General concrete, silica fume mixed concrete, and binary blended geopolymer were selected as comparison targets to confirm the magnesium sulfate resistance, and sulfate deterioration was calculated using the compressive strengths with ages. In addition, the weight change rate and the relative dynamic coefficient of the geopolymer were comparatively analyzed, and the degree of ettringite formation was confirmed using X-ray diffraction analysis. In the experiment, the geopolymer mixed with 10% rice husk powder showed 10.8% higher compressive strength than concrete with silica fume when submerged for 56 days. Also, the geopolymer mixed with rice husk powder showed a small weight change rate of 0.9 to 1.45%. After immersion in magnesium sulfate through X-ray diffraction analysis, it was observed that a small amount of ettringite was dispersed in the geopolymer containing rice husk powder. Thus, there is a high correlation with the corrosion resistance of magnesium sulfate

Keywords : magnesium, sulfate attack, rice husk powder, geopolymer

Received : September 5, 2022

Revised : October 21, 2022

Accepted : December 1, 2022

1. 서론

최근 지구온난화가 급속도로 진행되면서 각 산업에서 지구온난화의 원인으로 지목받고 있는 이산화탄소 배출량 저감에 대해 중요하게 인식하고 있다. 시멘트 생산과정에서 발생하는 이산화탄소 배출량은 연간 전 세계 배출량의 8%를 차지하고 있다[1,2]. 이에 따라 시멘트 제조 시 발생하는 이산화탄소를 줄이기 위한 연구가 활발히 수행되고 있다. 이산화탄소 감축을 위한 노력 중 효과적인 방법으로는 무기 결합재를 시멘트의 일부로 대체하여 시멘트의 사용량을 줄이는 방법과 시멘트를 전혀 사용하지 않고 무기 결합재와 알칼리 활성화제로 구성되는 지오폐리머(Geopolymer)를 사용하는 방법이 있다. 시멘트를 전혀 사용하지 않는 지오폐리머의 경우 이산화탄소 및 온실가스 배출을 크게 줄이는데 도움이 되어 건설산업에서 널리 사용하고 있다[3].

보통 콘크리트는 수화반응 시 규산칼슘수화물(C-S-H) 및 수산화칼슘(Ca(OH)₂)이 생성되는데, 외부 황산염 이온에 의해 큰 팽창을 발생시켜 균열을 유도하는 황산염 침식 현상이 종종 발생된다. 그러나 지오폐리머는 기본적으로 수산화칼슘이



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.

없으므로 황산염 침식에 안전할 가능성이 높지만 최근 연구들에 따르면 양생조건 및 온도의 변화에 민감하여 품질의 안정화가 어려우며, 지오폐리머의 배합에 따라 보통 콘크리트와 유사한 수준의 팽창 피해가 발생하는 것으로 보고되고 있어, 적절한 대책이 필요한 실정이다[4].

왕겨에 화학 약품을 첨가하여 150~180°C의 고온·고압 공정을 통한 증해추출 왕겨분말(이하 왕겨분말)의 경우, 기존의 소성온도에 따라 실리카의 품질이 크게 달라지는 공정에 비해 안정적으로 고순도의 실리카를 얻을 수 있는 특징이 있다[5]. 이러한 특성을 가진 왕겨분말을 혼입 시 지오폐리머 내의 중합반응의 촉진에 따라 포졸란 반응으로 인한 내부구조 치밀화로 인한 미세 구조 및 강도 향상, 황산염 침식 저항성에 도움을 줄 수 있을 것으로 보인다[6,7].

이러한 관점에서, 본 연구에서는 왕겨분말을 혼입한 2성분계 지오폐리머를 제작하여, 황산마그네슘 침식을 받는 지오폐리머의 압축강도, 열화지수, 중량변화율, 정량분석 등을 보통 콘크리트, 실리카 흙 혼입 콘크리트, 플라이애시와 고로슬래그를 혼입한 2성분계 지오폐리머와 비교·분석하여 왕겨분말 혼입 지오폐리머의 황산마그네슘 저항성을 평가하고자 한다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험재료

본 실험에 사용한 골재는 굵은 골재는 고강도 콘크리트 제조에 있어서 최대 허용 굵은 골재 치수인 19mm 이하의 쇄석을 사용하였고, 잔골재는 5mm 이하의 자연 모래를 사용하여 입도를 표준 입도 범위 안에 들도록 조정하여 사용하였다. 시멘트는 국내 S사에서 생산된 것으로 시멘트 비중은 3.15이며, 비표면적은 3,510cm²/g으로 KS의 규격을 충족한 1종 보통포틀랜드시멘트를 사용하였다. 왕겨분말의 경우 왕겨 증해액을 150°C 건조기에 투입 후 입자 크기가 300mesh 이하의 분말 상태로 제작하였다. 고로슬래그는 국내에서 생산된 것으로 품질규격은 KS F 2563의 3종에 만족한 것을 사용하였으며, 플라이애시는 국내에서 생산된 것으로, KS L 5405의 2종 규정에 만족한 것을 사용하였다. 실험에 사용된 알칼리 활성화제는 KS 3종 액상 규산나트륨 수용액과 순도 98% 이상의 수산화나트륨을 혼합하여 구성되었고, 비빔 시간 24시간 전에 제조하여 균일하게 섞이도록 혼합하였다. 본 배합에 사용된 혼화재의 물리적 특성은 Table 1와 같다.

Table 1. Physical and chemical properties of admixtures

	Specific gravity	Fineness(cm ² /g)	Chemical composition(%)							
			SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	SO ₃
Rice husk powder	2.30	7,830	42.41	6.40	5.92	1.82	3.67	-	36.02	-
Slica fume	2.20	200,000	94.8	0.66	-	1.06	0.19	0.61	-	2.12
Fly ash	2.22	3,580	50.72	20.76	-	6.37	3.61	1.08	-	0.54
Blast furnace slag	2.90	4,342	28.14	15.87	-	1.06	45.95	4.98	-	2.12

2.2 시편계획

본 연구에서는 왕겨분말 혼입 지오폐리머의 황산염 저항성에 미치는 영향을 알아보하고자 하며, 왕겨분말 혼입률은 기존의 연구를 참고하여 가장 높은 압축강도 및 휨강도를 나타낸 10%, 20%, 30% 으로 구성하였다[8]. 양생온도는 20±1°C로 정하였고 양생 28일 후 황산마그네슘 용액에 침지시켜 연구를 진행하였다. 왕겨분말의 황산마그네슘 침식 저항성의 비교를 위해 포틀랜드 시멘트를 혼입한 콘크리트, 콘크리트 내의 치밀한 내부구조를 형성하는 것으로 알려진 실리카 흙을 혼입한 콘크리트, 플라이애시와 고로슬래그를 혼입한 2성분계 지오폐리머를 비교대상(이하 Series I)으로 선정하여 실험하였다. 또

한 왕겨분말을 혼입한 지오폴리머의 반응을 위한 무기 결합재료는 고로슬래그와 플라이애시를 선정하여(이하 Series II) 실험하였다. 상세한 실험인자 및 평가항목은 Table 2와 같다.

Table 2. Experiment factors and evaluation items

Experiment factor	Alkali activator(NaOH : Na ₂ SiO ₃)		1 : 1
	Molarity of alkali activator (M)		10
	Binder ratio(%)	Rice husk powder	10, 20, 30
		Slica fume	10
		Fly ash	30, 70, 80, 90
	Blast furnace slag	30, 70, 80, 90	
Evaluation item	Compressive strength(days)		3, 7, 14, 28, 56
	Weight change(days)		3, 7, 14, 28, 56
	Relative Dynamic Modulus of Elasticity(days)		3, 7, 14, 28, 56
	X-ray diffraction		After 56 days of curing

2.3 시편의 제작 및 양생방법

콘크리트의 비빔은 굵은 골재와 잔골재를 투입하여 30초간 건비빔하고 난 후 시멘트와 혼화재, 물 (물 + 공기연행제 + 고성능 감수제)의 순으로 투입하였으며, 3분비빔(1분비빔→1분휴지→2분비빔)방식으로 혼합하였다. 공시체는 $\phi 100 \times 200$ mm 인 원주형 공시체를 제작하였다. 시편은 각 재령별 3개씩, 총 150개 시편을 제작하였다. 모든 시편은 타설 이후 24시간 양생한 뒤 탈형하여 $20 \pm 1^\circ\text{C}$ 로 유지되는 수조에 침적하여 28일 재령까지 양생한 이후 황산마그네슘 용액과 수증으로 분리하여 소정의 재령까지 침지하였다. 상세한 시편계획은 Table 3에 나타낸다.

Table 3. Mix design

Name	A/B (%)	S/a (%)	Unit weight(kgf/m ³)							Alkali activator solution		
			Cement	Slica fume	Rice husk powder	Fly ash	Blast furnace slag	Fine aggregate	Coarse aggregate	Water	NaOH	Na ₂ SiO ₃
Series I	O100		360		-	-	-	824.5	910.5	180	-	-
	S10 O90	50	324	36	-	-	-	762.9	842.4		90	90
	F30 G70				-	108	252	797.9	880.4	-	90	90
	F70 G30					-	252	108	777.4	858.9		
Series II	R10 F90				36	324	-	761.6	841.6			
	R20 F80				72	288	-	761.4	841.3			
	R30 F70				108	252	-	797.9	880.4			
	R10 G90				36	-	324	806.7	891.1	-	90	90
	R20 G80				72	-	288	801.4	885.8			
	R30 G70				108	-	252	797.9	880.4			

2.4 실험방법

2.4.1 압축강도

경화 콘크리트의 역학적 특성을 알기 위한 콘크리트 압축강도 시험은 KS F 2405 “콘크리트의 압축강도 시험방법 규정”에 준하여 측정하였다. 소정의 양생기간을 거친 공시체를 각각 수조에서 꺼내어 그라인딩식 캐핑머신으로 2mm 내외의 표면을마를 작업을 행한 후, 최대 용량 200tf의 만능재료 시험기를 이용하여 측정하였다. 압축강도는 식 (1)을 이용하여 3개의 실린더 몰드에 대한 평균값을 구하였다.

$$\sigma_c = \frac{P}{A} \tag{1}$$

여기서, σ_c 는 압축강도(MPa), A는 공시체의 단면적(mm²), P는 최대하중(N)이다. 측정된 압축강도를 이용하여 황산염 침식에 의한 열화의 정도를 파악하기 위해, Rasheeduzzafar등이 제시한 황산염 열화지수를 식 (2)을 이용하여 구하였다[9].

$$\text{황산염 열화지수 (\%)} = \frac{(SW - SS)}{SW} \times 100 \tag{2}$$

여기서, SS는 재령 t일에서의 황산마그네슘 용액에 침지한 공시체의 압축강도이며, SW는 재령 t일에서 수중양생 공시체의 압축강도이다.

2.4.2 중량변화율

중량변화 측정은 ASTM C 267의 실험방법에 준하여 각 재령 3, 7, 14, 28, 56일에서 각각 실시하였다. 표면 침전물을 제거하기 위하여 화학섬유로 된 솔을 이용하여 세척 후에 면직 타월로 표면 수분을 제거하였다. 20±3°C의 건조기에서 30분 동안 건조한 다음, 사용범위가 0.01~10,200g인 전자저울을 사용하여 중량을 측정하였다. 중량변화율은 식 (3)을 이용하여 3개의 공시체에 대한 평균값을 구하였으며 반올림하여 0.01%까지 계산하였다.

$$\text{중량변화율 (\%)} = \frac{W - C}{C} \times 100 \tag{3}$$

여기서 C는 침지 전 공시체의 중량(g)이며, W는 재령에 따른 침지 후의 공시체의 중량을 나타낸 것이다.

2.4.3 상대동탄성계수

화학적 침식을 받은 콘크리트의 열화를 판단함에 있어 강도를 기준으로 할 경우 측정횟수를 늘리거나 측정 간격을 좁힘으로써 신뢰성을 획득할 수 있는데, 반해 상대동탄성계수의 경우 전 시험기간에 대해 동일한 시험체로 품질변화를 측정할 수 있으므로 콘크리트의 열화정도를 판단하는데 강도측정과 더불어 좋은 지표로 활용할 수 있다.

$$\text{상대동탄성 계수 (\%)} = \frac{\text{침지 후 동탄성 계수}}{\text{침지 전 동탄성 계수}} \times 100 \tag{4}$$

상대동탄성계수를 구하기 위하여 동탄성계수를 KS F 2437 “공명 진동에 의한 콘크리트의 동탄성계수 및 동 푸아송비의

시험방법”에 준하여 공명 진동식 동탄성계수 측정기를 이용하여 측정하였으며 식 (4)와 같이 침지 전의 동탄성계수에 대한 침지 후의 동탄성계수의 비를 백분율로 나타내어 상대동탄성계수를 구하였다.

2.4.4 정량분석

본 실험에서 결합재의 종류와 구성비율에 따른 황산마그네슘 침식 저항성에 관한 특정 수화물의 상대적인 생성 정도를 확인하기 위해 $\phi 100 \times 200 \text{mm}$ 인 원주형 공시체를 제작하였다. 모든 시편은 타설 이후 24시간 양생한 뒤 탈형하여 $20 \pm 1^\circ \text{C}$ 로 유지되는 수조에 침적하여 28일 재령까지 양생하였다. 이후 황산마그네슘 1급 시약을 10% 농도로 물과 혼합한 황산마그네슘 용액에 56일간 침지 후 X선 회절 분석법에 의한 분석을 수행하였다. X선 회절 분석법은 X선을 결정에 부딪히게 하면 그 중 일부는 회절을 일으키고 그 회절각과 강도는 물질 구조상 고유한 것으로서 이 회절 X선을 이용하여 시료에 함유된 결정성 물질의 종류와 양에 관계되는 정보를 알 수 있다. 시료를 보통 분말상태로 하여 분석하며, 시멘트 수화물의 종류 및 정량을 알 수 있다.

2.4.5 황산마그네슘 용액 침지방법

본 연구의 황산마그네슘 저항성 평가를 위한 황산염 침지 방법은 ASTM C 267, ASTM C 579에 의거하여 시행하였으며, 침지용액은 황산마그네슘 1급 시약을 10% 농도로 물과 혼합하여 제조하였다. 탈형 후 황산마그네슘 용액 내에 침지를 하였으며, 온도는 $20 \pm 1^\circ \text{C}$ 로 일정하게 유지하였다. 용액의 농도를 매 6시간마다 측정하여 pH가 7을 초과할 때 용액의 전량을 교체하였으며, 3시간마다 교반을 하여 침지조 내의 용액농도를 일정하게 분포하도록 하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 압축강도

지오폐리머에서 왕겨분말의 혼입률에 따른 압축강도를 알아보기 위해서 10%, 20%, 30%로 나누어 혼입하였으며, 결합재 구성비율에 따른 지오폐리머의 압축강도 시험을 실시하였다. 그 결과는 Figure 1와 같다. 재령에 따른 압축강도를 살펴보면 재령 7일까지는 혼화재를 투입한 압축강도가 보통 콘크리트에 비해 다소 낮게 나타나며, 재령 14일 이후부터는 보통 콘크리트보다 높은 강도발현을 나타내는 것을 확인할 수 있다.

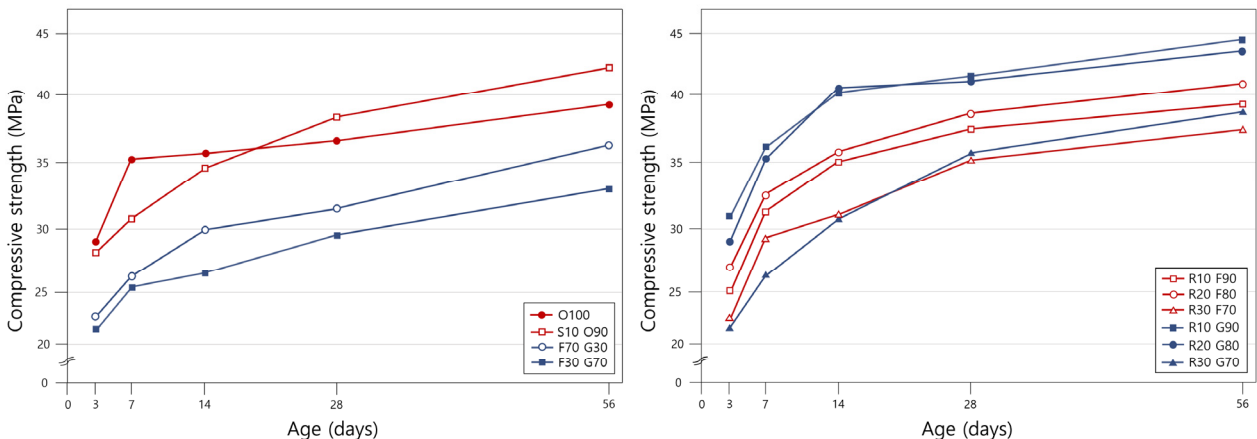


Figure 1. Compressive strength

왕겨분말에 따른 압축강도 특성을 살펴보면 혼입률 10%일 경우, 재령 7일부터 보통 콘크리트보다 높은 강도 발현을 나타내며 일반적으로 널리 사용되고 있는 포졸란재인 플라이애시나 고로슬래그 미분말보다 높은 강도 발현수준을 나타냈다. 또한, 재령 28일 기준으로 왕겨분말 10% 혼입 시 강도가 증가하지만, 그 이후로는 감소하는 것을 확인할 수 있는데 이는 10~20% 정도의 혼입률이 가장 큰 강도 발현을 하는 기존의 연구와 일치하는 내용이었다. 또한, 물리적 변화를 관찰하기 위하여 수중양생 28일 이후 수중과 황산마그네슘 용액에 나누어 침지한 중량변화율을 측정하여 Table 4에 나타낸다.

Table 4. Compressive strength

Name		Compressive strength(MPa)									
		3 day		7 day		14 day		28 day		56 day	
		Water	MgSO ₄	Water	MgSO ₄	Water	MgSO ₄	Water	MgSO ₄	Water	MgSO ₄
Series I	O100	28.78	26.59	36.82	35.45	37.54	36.51	38.54	37.45	39.91	38.85
	S10 O90	27.68	30.84	31.81	30.74	34.95	34.54	38.42	36.81	42.40	40.24
	F30 G70	23.85	21.42	25.95	24.81	29.24	28.64	31.49	30.79	36.43	33.41
	F70 G30	22.43	20.64	25.41	23.18	26.86	24.19	29.73	27.91	33.13	31.78
Series II	R10 F90	27.68	25.48	33.49	31.84	36.81	34.92	38.61	36.57	41.72	40.64
	R20 F80	25.74	24.26	31.54	30.21	35.42	33.24	37.86	35.87	39.87	37.41
	R30 F70	22.85	21.87	29.84	28.23	31.94	30.66	35.64	33.43	37.49	35.84
	R10 G90	31.56	30.54	36.54	34.86	40.76	39.73	44.73	42.81	46.44	44.59
	R20 G80	29.85	28.42	35.84	33.29	41.83	40.41	42.16	40.51	44.56	42.18
	R30 G70	22.48	20.85	27.41	25.46	32.84	30.54	36.82	34.94	38.78	35.54

O : Ordinary portland cement S : Silica fume R :Rice husk powder F : Fly ash G : Ground granulated blast furnace slag

3.2 황산염 열화지수

황산염 열화지수는 황산마그네슘 침식에 대한 열화의 지표로 사용되는 분석인자이며, 큰 값일수록 열화의 진척정도를 의미하고, 낮은 값일수록 열화에 대한 저항성의 증가를 의미한다. Table 5은 침지재령 28일과 56일에서의 황산염 열화지수를 나타낸 것이다. 침지재령 28일에서는 4.48% 로 다소 높게 나타난 보통 콘크리트를 제외하고 전체적으로 0.75~1.83%의 열화도를 보였다. 침지재령 56일에서는 보통 콘크리트가 6.75%, 플라이애시 30%, 고로슬래그 70%을 혼입한 지오폴리머가

Table 5. Sulfate deterioration factor

Name		Sulfate deterioration factor(%)	
		28 day	56 day
Series I	O100	4.48	6.75
	S10 O90	1.54	2.48
	F30 G70	1.83	2.67
	F70 G30	1.64	2.51
Series II	R10 F90	0.75	1.43
	R20 F80	0.92	1.51
	R30 F70	1.24	1.79
	R10 G90	0.64	1.28
	R20 G80	0.81	1.46
	R30 G70	1.16	1.87

2.67%, 고로슬래그 30%, 플라이애시 70%을 혼입한 지오폐리머가 2.51%로 비교적 높게 나타났다. 앞서 살펴본 압축강도 변화에서 황산마그네슘 용액에 침지한 경우라도 강도가 지속적으로 증가하였지만, 상대적인 침식은 시편에 따라 차이가 크게 나타남을 확인할 수 있었다. 또한, 왕겨분말을 혼입한 경우 30% 미만인 경우, 기존의 혼화재 중 황산마그네슘 침식 저항성이 뛰어나다고 알려져 있는 실리카 흙을 혼입한 콘크리트에 비해 높은 저항성을 나타내고 있어 왕겨분말을 혼입하는 방법이 안정적인 성능을 발휘하는데 효과적일 것으로 기대할 수 있다.

3.3 중량변화율

황산마그네슘 침지재령에 따른 중량변화를 고찰 시 왕겨분말 혼입 지오폐리머의 경우 중량감소가 나타나지 않아 황산마그네슘 저항성을 가지는 것을 Figure 2에서 확인할 수 있었다. 압축강도 결과와 마찬가지로 왕겨분말 혼입률이 10%인 지오폐리머의 경우 높은 황산마그네슘 침식 저항성을 보여주며, 혼입률이 30% 이상일 때 오히려 강도저하 및 낮은 황산마그네슘 저항성에 의한 중량변화가 나타났음을 알 수 있었다. 또한, 재령 56일에서의 중량변화율을 살펴보면 보통 콘크리트의 중량변화율이 3.78%로써 황산마그네슘에 의한 열화가 가장 심각한 수준임을 알 수 있었다. 왕겨분말을 10%일 때 가장 적은 중량변화율을 보였으며, 혼입률이 증가함에 따라 열화 정도가 심해짐을 알 수 있었다.

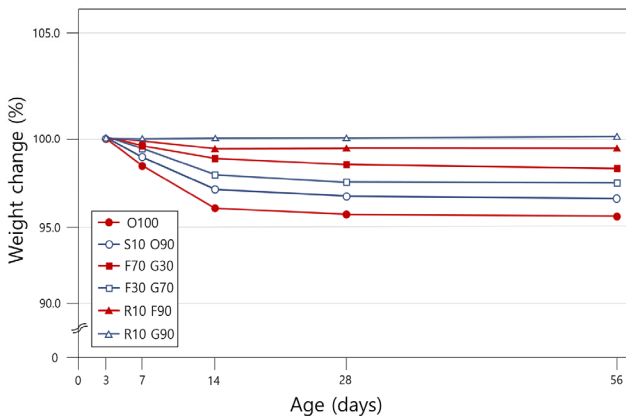


Figure 2. Weight change

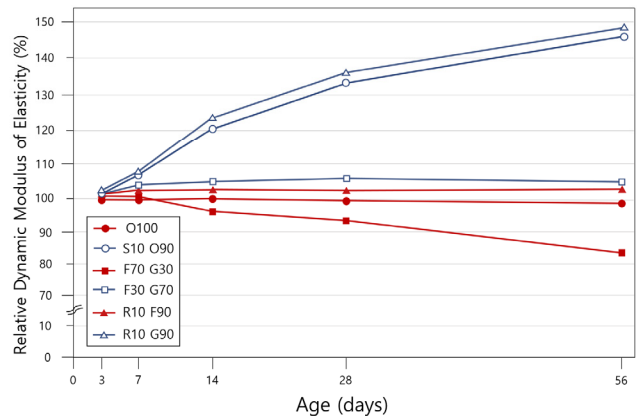


Figure 3. Relative Dynamic Modulus of Elasticity

3.4 상대동탄성계수

상대동탄성계수는 콘크리트의 내부 미세균열의 지표로 사용된다. 따라서 황산마그네슘 침식에 의한 콘크리트의 내부 열화의 정도를 평가하기 위해 상대동탄성계수를 측정하여 분석하였다.

Figure 3은 황산마그네슘 용액의 침지재령에 따른 상대동탄성계수를 나타낸 것이다. 침지재령 56일에서 왕겨분말 10% 혼입 콘크리트와 실리카 흙 혼입 콘크리트의 상대동탄성계수가 143.98%와 142.45%로 가장 크게 나타났다. 이러한 수치는 황산마그네슘 침식에 관계없이 포졸란 반응에 의한 콘크리트 내부구조의 균질화가 이루어지고 있음을 알 수 있다. 한편, 플라이애시 치환율 70%에서 상대동탄성계수의 값이 작아지는 것은 다량의 미반응 플라이애시가 오히려 콘크리트 내부의 전체적인 균질성을 낮추는 것으로 사료된다[10].

3.5 정량분석

황산마그네슘 용액에 56일간 침지한 시편 내의 에트린자이트의 생성 정도를 확인하기 위해 X선 회절 분석법을 통해 관찰하였다. X선 감지기가 측정하는 X선의 강도는 cps(Counts per second)로 단위시간 당 지나가는 광자의 수를 의미한다. Figure 4에서 볼 수 있듯이 왕겨분말, 고로슬래그 혼입 지오폐리머의 경우 고로슬래그의 Ca성분이 알칼리 활성화제의 수분과 반응한 규산칼슘수화물(이하 S)은 25~26°에서 16,724cps로 가장 높은 것을 볼 수 있으며, 수산화칼슘(이하 C)은 27~28°에서 8,985cps로 높은 것을 알 수 있었다. 황산마그네슘 침식에 의해 생성되는 에트린자이트(이하 E)는 약 26~27°에서 3,894cps로 낮게 나타났다. 왕겨분말, 플라이애시 혼입 지오폐리머의 경우 고로슬래그 혼입 시와 비슷한 형상을 보이지만 규산칼슘수화물은 14,276cps, 수산화칼슘은 6,751cps, 에트린자이트는 4,748cps로 나타났다. 플라이애시, 고로슬래그를 혼입한 지오폐리머의 경우 에트린자이트가 9,725cps로 높게 나타났으며, 수산화칼슘은 각각 6,728cps로 나타났으며, 규산칼슘수화물은 7,981cps로 나타났다. 보통 콘크리트로 에트린자이트가 9,834cps로 높게 나타났으며, 수산화칼슘은 5,746cps, 규산칼슘수화물은 5,485cps로 낮게 나타났다.

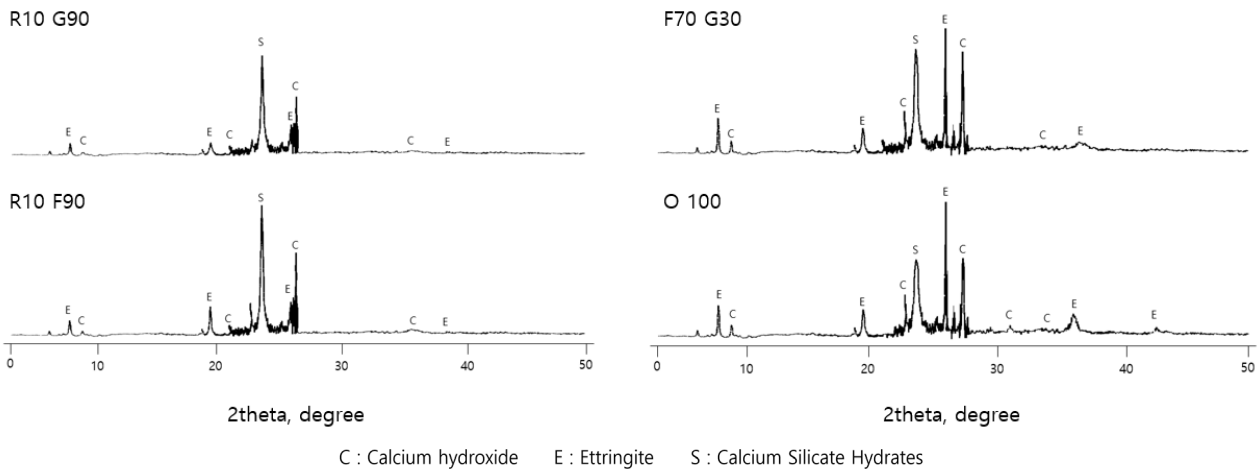


Figure 4. X-ray diffraction

4. 결론

왕겨분말 혼입 지오폐리머의 황산마그네슘 저항성을 평가하기 위해, 비교대상으로 보통 콘크리트, 실리카 흙 혼입 콘크리트, 플라이애시와 고로슬래그를 혼입한 2성분계 지오폐리머를 선정하여 황산마그네슘 용액침지 시험을 실시한 결과 다음과 같은 사실을 알 수 있었다.

- 1) 수중침지 재령 56일 기준으로 보았을 때 왕겨분말 10% 혼입 지오폐리머의 경우 실리카 흙 혼입 콘크리트 대비 10.8% 높은 압축강도를 나타냈으며, 왕겨분말을 30% 혼입 시 압축강도는 10~20% 혼입한 지오폐리머에 비해 낮게 나타났다. 플라이애시와 고로슬래그를 혼입한 2성분계 지오폐리머의 경우 가장 낮은 압축강도를 보였다.
- 2) 황산염 열화지수는 황산마그네슘 용액 침지재령 56일에서 보통 콘크리트의 경우 6.75%이었으나, 왕겨분말 혼입 지오폐리머의 경우 모든 시편에서 1.28~1.87%의 낮은 수준을 보였다. 이는 실리카 흙 혼입 콘크리트의 2.48%보다 낮게 나타나 왕겨분말이 황산마그네슘 침식 저항성에 큰 도움이 되는 것으로 판단된다.
- 3) 황산마그네슘 용액 침지재령 28일 이후부터 모든 시험체에서 중량이 크게 변화하였으며, 침지재령 56일에서 보통 콘

크리트는 3.78%로써 황산마그네슘에 의한 열화가 가장 심각한 수준임을 알 수 있었다. 그러나, 왕겨분말 혼입 지오폴리머의 경우 0.9~1.45%의 작은 증량변화율을 보였다.

- 4) X선 회절 분석법을 통해 황산마그네슘 침식 후의 구성성분에 따른 정량분석을 실시한 결과, 보통 콘크리트와 플라이 애시, 고로슬래그를 혼입한 2성분계 지오폴리머에서는 콘크리트의 강도를 낮추는 에트린자이트가 다량으로 산재해 있음을 볼 수 있었다. 반면에, 왕겨분말 혼입 지오폴리머에서는 에트린자이트가 소량 발생한 것을 확인할 수 있었으며, 알칼리 활성화제의 수분과 반응한 규산칼슘수화물 등 수화생성물이 다량 생성되어 구조체의 경화를 촉진하는 것을 확인할 수 있었다. 따라서, 황산마그네슘 침식 저항성에 높은 상관성이 있음을 알 수 있었다.

향후 연구과제로는 왕겨분말을 혼입한 지오폴리머의 황산마그네슘 침식의 열화 메커니즘에 대한 명확한 규명을 위하여 DSC-TG 분석, EDS 분석 등을 이용한 지오폴리머의 화학적 특성 변화에 대한 연구가 필요하다고 판단된다.

요약

왕겨분말 혼입 지오폴리머의 황산마그네슘 저항성을 평가하기 위해, 비교대상으로 보통 콘크리트, 실리카 흙 혼입 콘크리트, 플라이애시와 고로슬래그를 혼입한 2성분계 지오폴리머를 비교대상으로 선정하여 황산마그네슘 용액침지시험을 실시하였다. 재령별 압축강도를 이용하여 산출한 황산염 열화지수는 황산마그네슘 용액 침지재령 56일에서 보통 콘크리트의 경우 6.75%이었으나, 왕겨분말 혼입 지오폴리머의 경우 모든 시편에서 1.28~1.87%의 낮은 수준을 보였다. 이는 실리카 흙 혼입 콘크리트의 2.48%보다 낮게 나타나 왕겨분말이 황산마그네슘 침식 저항성에 큰 도움이 되는 것으로 판단된다. 또한, 콘크리트 내부 미세균열과 외부열화에 대한 평가를 위해 시험체의 증량변화율의 경우 황산마그네슘 용액 침지재령 28일 이후부터 모든 시험체에서 증량이 크게 변화하였으며, 침지재령 56일에서 보통 콘크리트는 3.78%로써 황산마그네슘에 의한 열화가 가장 심각한 수준임을 알 수 있었다. 그러나, 왕겨분말 혼입 지오폴리머의 경우 0.9~1.45%의 작은 증량변화율을 보였다. 지오폴리머 내의 에트린자이트 생성 정도를 X선 회절 분석법을 통하여 확인하였으며, 왕겨분말 혼입 지오폴리머에서는 소량으로 생성되어 있는 것을 확인할 수 있어, 황산마그네슘 침식 저항성에 높은 상관성이 있음을 알 수 있었다.

키워드 : 황산마그네슘, 황산염침식, 증해추출 왕겨분말, 지오폴리머


Funding


Not applicable

Acknowledgement

This research was supported by the National Research Foundation of Korea(NRF) in 2022. (NRF-2020R111A3052917)

ORCID

Seung-Bi Cho,  <https://orcid.org/0000-0002-1851-8735>

Young-Su Kim,  <https://orcid.org/0000-0003-1580-9550>

References

1. The Government of the Republic of Korea. 2050 Carbon Neutral Strategy of the Republic of Korea Towards a Sustainable and Green Society. Seoul (Korea): The Government of the Republic of Korea. 2020. 131 p.
2. Jeong YS, Cho SH, Moon SH, Ji CY. Scenario to reduce greenhouse gas emissions in building sector towards the goal of carbon neutrality by 2050. *Journal of the Architectural Institute of Korea*. 2021 Oct;37(10):189-97. <https://doi.org/10.5659/JAIK.2021.37.10.189>
3. Perkins SE, Argueso D, White CJ. Relationships between climate variability, soil moisture, and Australian heatwaves. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2015 Jun;120(16):8144-64. <https://doi.org/10.1002/2015JD023592>
4. Bakharev B, Sanjayan JG, Cheng YB. Sulfate attack on alkali-activated slag concrete, cement and concrete research. 2002 Feb;(4):211-6. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00659-7](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00659-7)
5. Hossain SS, Roy PK, Bae CJ. Utilization of waste rice husk ash for sustainable geopolymer: A review. *Construction and Building Materials*. 2021 Dec;(310):125218. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125218>
6. Das SK, Mishra J, Singh SK, Mustakim SM, Patel A, Das SK, Behera U. Characterization and utilization of rice husk ash (RHA) in fly ash – Blast furnace slag based geopolymer concrete for sustainable future. *Materials Today: Proceedings*. 2020 Mar;(29):5162-7. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.870>
7. Nuaklong P, Janprasit K, Jongvivatsakul P. Enhancement of strengths of high-calcium fly ash geopolymer containing borax with rice husk ash. *Journal of Building Engineering*. 2021 Aug;(40):102762. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102762>
8. Parthiban D, Vijayan DS, Sanjay Kumar R, Santhu AP, Cherian GA, Ashiq M. Performance evaluation of fly ash based GPC with partial replacement of RHA as a cementitious material. *Materials Today: Proceedings*. 2020 Jun;33:550-8. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.244>
9. Rasheeduzzafar, Al-Amoudi OSB, Sahel N, Abduljawwad, Maslehuddin M. Magnesium-sodium sulfate attack in plain and blended cements. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 1994 May;6(2):201-22 [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0899-1561\(1994\)6:2\(201\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0899-1561(1994)6:2(201))
10. Amran M, Fediuk R, Murali G, Avudaiappan S, Ozbakkaloglu T, Vatin N, Karelina M, Klyuev S, Gholampour A. Fly ash-based eco-efficient concretes: a comprehensive review of the short-term properties. *Materials*. 2021 Jul;14(15):4264. <https://doi.org/10.3390/ma14154264>