

폐유리 및 폐자기를 활용한 무시멘트계 인조석재의 특성

Properties of Non-cement Artificial Stone Utilizing the Waste Porcelain and Waste Glass

김태현¹ · 이승호¹ · 이상수^{1*} · 송하영¹

Tae-Hyun Kim¹ · Seung-Ho Lee¹ · Sang-Soo Lee^{1*} · Ha-Young Song¹

(Received May 20, 2016 / Revised June 9, 2016 / Accepted June 10, 2016)

As the rapid industrialization and modernization progress of the world it is becoming a fast-paced environment pollution. And, dust or environment pollution to solve reckless diggings of natural aggregate cause a serious problem. This study was used a Blast Furnace Slag and Combined Heat and Power Plant of Fly Ash as a cement substitute to reduce CO₂ emissions during cement production, this study intend to suggest it's result as basic data 'Properties of Artificial Stone interior or exterior materials type utilizing industrial by-product and waste resource' utilizing Waste Porcelain and Waste Glass. As a result, it was high strength that matrix added the Combined Heat and Power Plant of Fly Ash of addition ratio 40%. Also, pre-experiment was conduct as mixing ratio of waste glass, waste porcelain on the basis of the preceding experiment, proper mixing ratio was judged that proper of waste glass, waste porcelain was mixing ratio 60, 70 (%) of appeared surface aggregate ratio more than 45%.

키워드 : 고로슬래그, 유동층 연소 플라이애시, 인조석재, 폐자기, 폐유리

Keywords : Blast furnace slag, Combined heat and power plant of fly ash, Artificial stone, Waste porcelain, Waste glass

1. 서론

전 세계적으로 급격한 산업화 및 현대화가 진행됨에 따라 환경 오염 또한 급격히 진행되어가고 있는 현재, 전 세계는 이러한 환경 문제를 해결하기 위해 탄소 배출을 줄이고자 '도쿄의정서'부터 최근에 개최된 '파리기후협약'까지 지구온난화 및 기타 환경문제 해결에 대한 관심이 급증되고 있다. 건설 분야 또한 환경문제 한 부분을 차지하고 있는데, 시멘트 생산 시 소성과정에서 대량의 CO₂가 배출되고 있다. 시멘트 1ton 생산 시 약 900kg의 CO₂가 배출되고 있으며 전 세계의 CO₂ 배출물 중 8%로 지구온난화를 악화시키고 있어 정부에서 시행한 '저탄소 녹색성장'에 의해 슬래그나 화력발전소에서 발생하는 산업부산물인 플라이애시를 시멘트에 일부분 대체하여 사용하고 있는 실정이다. 그러나 체계적인 배합설계가 이루어지지 않고 단순히 일부분을 대체하여 사용하고 있기 때문에 CO₂ 배출에 대한 문제가 해결 되지 않고 있는 실정이다. 또한 무시

멘트 연구를 위해 고로슬래그 사용이 증가함에 따라 자극제 사용량 또한 증가하게 되었는데, 이러한 자극제 사용량이 증가하면서 시공 단가가 증가되어 현장 적용 시 경제성이 떨어지며 강알칼리 성분으로 인한 위험 요소가 있다.

한편, 천연골재의 무분별한 채취로 환경오염 및 분진발생 등은 심각한 문제가 되고 있다. 또한, 기존 테라조 바닥의 경우 현장에서 시공 할 경우 상당량의 부유분진으로 인해 문제가 되고 있기 때문에 이를 대체하여 디럭스 타일을 사용하고는 있지만 내구성과 내수성이 취약하여 습기가 있는 곳에서는 시공이 곤란하다는 문제가 있다. 이처럼 기존의 테라조 및 인조석재의 문제와 시멘트의 사용으로 지구온난화 그리고 환경오염의 문제는 친환경적 차원에서 문제 해결을 위해 친환경적인 인조석재의 개발이 시급한 실정이지만 무시멘트계 친환경 인조석재의 연구는 아직 미비한 실정이다. 이에 따라, 본 연구에서는 기존 테라조 바닥 제조 시 사용되었던 시멘트를 대체하여 산업부산물인 고로슬래그를 사용하였고, 단가가 높

* Corresponding author E-mail: sslee111@hanbat.ac.kr

¹한밭대학교 건설환경조형대학 건축공학과 (Department of Architectural Engineering, Hanbat National University, Yuseong-Gu, Daejeon, 34158, Korea)

은 알칼리자극제를 대체하여 유동층 연소 플라이애시를 사용하였다. 그리고 천연골재를 사용하지 않고 인조석의 종석으로 폐유리와 폐자기를 활용한 무시멘트계 인조석재의 특성을 분석하고자 하였다.

2. 선행실험 계획 및 분석

2.1 선행실험 개요

인조석재 제작에 대한 본 실험에 앞서 고로슬래그의 경화 활성화를 위한 자극제대체재로서 pH가 12이상으로 강알칼리성 유동층 연소 플라이애시를 사용하였으며, 이에 적정 혼입율을 선정하기 위해 유동층 연소 플라이애시의 첨가율을 고로슬래그 질량에 대비한 0, 10, 20, 30, 40, 50(%)로 총 6가지 수준으로 설정하였다. 자극제를 사용한 시험체와 비교하기 위해 유동층 연소 플라이애시 첨가율 0%의 plain에 NaOH를 10% 첨가하였다. W/B는 유동층 연소 플라이애시의 높은 흡수율로 인해 50%로 고정하였다. 시험 항목은 table flow, 겉보기 밀도, 휨강도, 압축강도 등을 측정하였으며 실험 수준 및 요인은 다음 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Experimental factor and level

Experimental factor	Experimental level	
Binder conditions	BFS(Blast Furnace Slag), HFA(Combined Heat and Power Plant of Fly Ash)	2
Addition ratio of HFA	· 0, 10, 20, 30, 40, 50(wt.%)	6
Alkali activator	· NaOH	1
Addition ratio of Alkali activator	· 10%(only plain)	1
Curing conditions	· Relative humidity(80±5)%, Temperature(20±2)℃	1
W/B	· 50(wt.%)	1
Test items	· Air content, Table flow, Density, Water absorption, Compressive strength, Flexural strength	6

2.2 선행실험결과

2.2.1 공기량 및 유동성

Fig. 1은 유동층 연소 플라이애시의 첨가율에 따른 공기량 및 유동성에 측정결과를 나타낸 것으로, 유동층 연소 플라이 애시의 첨가율이 증가함에 따라 유동성 및 공기량은 감소하는 경향을 나타냈다. 이는 일반적으로 플라이애시를 사용할 경우 미연소탄소 성분이 공기를 흡착함에 따라 공기가 차지하는 부분을 미연소탄소

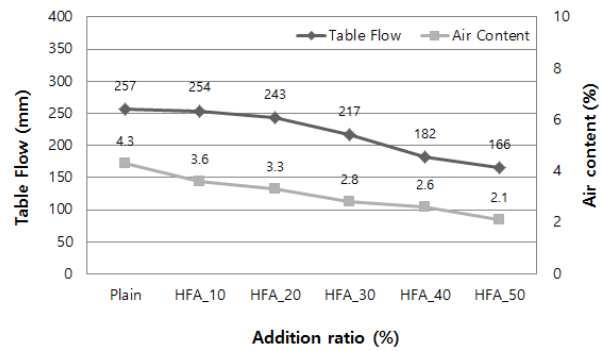


Fig. 1. Air content and table flow according to addition ratio of HFA

성분이 차지하게 되 공기량이 감소하는 경향으로 보이는데, 유동층 연소 플라이애시 또한 미연소 탄소 성분이 존재하기 때문에 이 또한 공기량이 감소하는 것으로 판단된다. 유동성의 경우 공기량이 감소함에 따라 유동성 또한 감소하는 것으로 보이며, 유동층 연소 플라이애시의 경우 화력발전소 플라이애시와 달리 입형이 구형이 아닌 과상형태로 되어있어 볼베어링 효과를 얻기 힘들어 유동성이 감소하는 것으로 사료된다.

2.2.2 밀도 및 흡수율

Fig. 2는 유동층 연소 플라이애시의 첨가율에 따른 밀도 및 흡수율에 대한 측정결과를 나타낸 것으로, 유동층 연소 플라이애시의 첨가율이 증가함에 따라 밀도는 감소하는 경향을 나타내며, 흡수율은 증가하는 경향을 보이고 있다. 이는 유동층 연소 플라이애시는 2.62g/cm³으로 낮은 밀도를 가지고 있어 첨가율이 증가함에 따라 밀도 감소의 효과를 보이는 것으로 사료되지만 큰 차이를 보이지는 않고 있다.

흡수율의 경우 유동층 연소 플라이애시의 첨가율이 증가함에

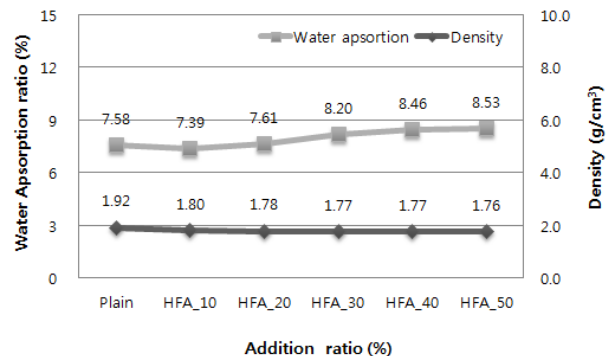


Fig. 2. Density and water absorption according to addition ratio of HFA

따라 흡수율이 증가하는 경향을 보이고 있는데, 이는 유동층 연소 플라이애시의 소성온도가 낮아 활성도가 높아 수분 흡수율이 좋기 때문에 흡수율이 증가하는 것으로 판단된다.

2.2.3 힘강도 및 압축강도

Fig. 3과 Fig. 4는 유동층 연소 플라이애시의 첨가율에 따른 힘강도 및 압축강도에 대한 분석결과를 나타낸 것으로, 유동층 연소 플라이애시의 첨가율 40%까지 강도가 증가하는 경향을 보이지만, 그 이후 첨가 시에는 강도가 감소하는 것으로 나타났고 첨가율 40%는 plain과 비슷한 강도를 보였다.

유동층 연소 플라이애시는 일반 화력발전소 플라이애시에 비해 알루미늄 및 실리카 성분이 많지 않지만 포졸란 반응 활성도가 높고, CaO성분이 10% 이상 많기 때문에 수분과 접촉 시 $Ca(OH)_2$

가 활발히 형성된다. 또한 유동층 연소 플라이애시는 수분과 접촉 시 pH 활성도 10 이상을 유지해 주어 결합재로 사용된 고로슬래그 피막을 깨주는 역할을 하게 되어 강도가 증진하는 것으로 사료된다. 하지만 유동층 연소 플라이애시를 40% 초과로 첨가할 경우 강도가 급격히 감소하는 결과를 보이는데 이는 실험 수준에 W/B를 고정한 상태에서 유동층 연소 플라이애시의 첨가율을 증가시키면서 W/B가 줄어 작업성이 감소하게 되어 강도가 감소하는 것으로 판단되며 또한, 유동층 연소 플라이애시의 양이 증가함에 따라 반응하지 못한 유동층 연소 플라이애시가 남아 있어 강도가 저하되는 것으로 판단된다.

3. 실험계획

3.1 사용재료

본 연구에서는 산업부산물을 활용한 인조석재를 제조하기 위해 산업부산물로 고로슬래그와 유동층 연소 플라이애시가 사용되었다. 고로슬래그는 SiO_2 , CaO, MgO, Al_2O_3 가 주요구성 성분이고, 밀도는 $2.91g/cm^3$, 분말도 $4,464cm^2/g$ 인 3종 고로슬래그를 사용하였다. 유동층 연소 플라이애시는 열병합 발전과정에서 배출된 유동층 연소 플라이애시를 A상에서 개량한 것으로 밀도 $2.62g/cm^3$, 분말도 $2,740cm^2/g$ 인 것을 사용하였다. 다음 Table 2는 결합재에 대한 화학적 성분을 나타낸 것이다.

또한, 본 실험에 사용된 폐유리는 국내 S사에서 생산하는 것을 사용하였으며 폐자기는 Y사에서 생산하는 것으로 SiO_2 와 CaO가 주성분이며, Na_2O , Al_2O_3 가 함유하고 있으며, 폐유리의 밀도는 $2.04g/cm^3$, 폐자기의 밀도는 $2.39g/cm^3$ 이다. 또한 갈색, 녹색, 투명한 유리병을 대상으로 사용하였으며 파쇄 후 입도조정 과정을 거쳤다.

3.2 실험계획

본 실험은 선행실험을 바탕으로 유동층 연소 플라이애시 첨가율 40%에서 높은 강도 값을 취하였기 때문에 Table 3과 같이 W/B를 50%로 고정 한 뒤, 유동층 연소 플라이애시를 40% 첨가한 고로

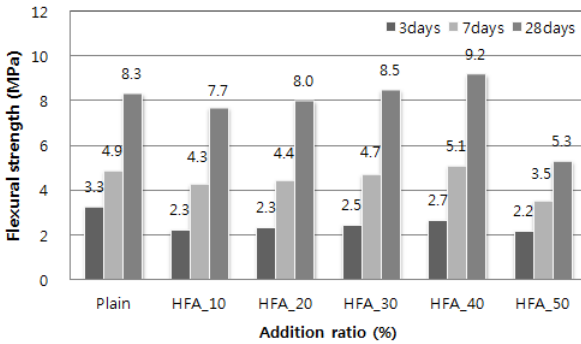


Fig. 3. Flexural strength according to addition ratio of HFA

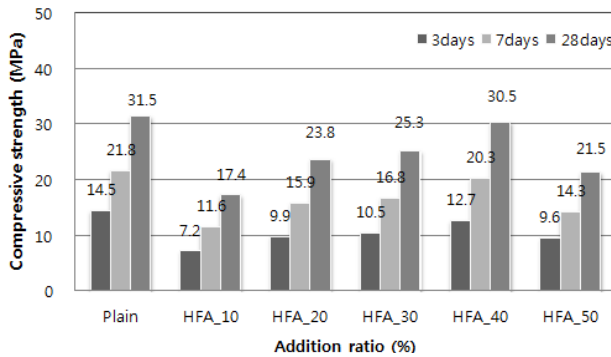


Fig. 4. Compressive strength according to addition ratio of HFA

Table 2. Chemical components of using materials

Using materials	Chemical component(%)										
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	Na_2O	K_2O	TiO_2	Blain(cm^2/g)	Density(g/cm^3)
Blast furnace slag	34.4	14.5	0.6	41.7	6.5	-	0.4	1.2	-	4,464	2.91
Combined heat and power plant of fly ash	26.6	14.9	5.3	38.4	4.4	6.9	1.3	1.1	0.6	2,740	2.62

Table 3. Experimental factor and level

Experimental factor	Experimental level	
Binder conditions	BFS(Blast Furnace Slag), HFA(Combined Heat and Power Plant of Fly Ash)	2
Addition ratio of WG ¹⁾ and WP ²⁾	· 50, 60, 70, 80(%)	4
Curing conditions	· Relative humidity(80±5)%, Temperature(20±2)°C	1
Addition ratio of HFA	· 40(wt.%)	1
W/B	· 50%(wt.%)	1
Test items	· Density, Water absorption, Flexural strength, Compressive strength, Surface aggregate	5

¹⁾WG: Waste glass, ²⁾WP: Waste porcelain

Table 4. Experimental fomulation

	W/B (%)	Unit weight(g)			
		BFS ¹⁾	HFA ²⁾	WP ³⁾	WG ⁴⁾
WP_50	50	9941.0	4970.5	4970.5	-
WP_60				5964.6	
WP_70				6958.7	
WP_80				7952.8	
WG_50				4970.5	
WG_60				5964.6	
WG_70				6958.7	
WG_80				7952.8	

¹⁾BFS: Blast furnace slag

²⁾HFA: Combined heat and power plant of fly ash

³⁾WP: Waste porcelain

⁴⁾WG: Waste glass

슬래그 기반에 폐유리 및 폐자기를 혼입율에 따른 인조석재의 특성을 보기 위해 폐유리 및 폐자기를 결합재의 용적비 50, 60, 70, 80(%)로 각 4가지 수준으로 나누어 실험을 진행하였다. 폐유리 및 폐자기의 최대치수는 15mm 이하의 것으로 사용하였다. 시험항목으로는 휨강도, 압축강도, 밀도, 흡수율, 출석률 로 총 5가지 시험을 시행하였다. 정확한 배합표는 다음 Table 4에 나타내었다.

3.3 실험방법

본 실험은 고로슬래그와 유동층 연소 플라이애시를 스파이럴 믹서에 투입한 후 35rpm으로 120초간 건비빔을 실시한 뒤 배합수를 넣고 45rpm으로 비빔하면서 폐유리 및 폐자기를 넣고 120초간 비빔한 후, 총 240초일 때 토출하였다. 시험체의 제작은 압축강도

를 측정하기 위해 『KS F 2519 석재의 압축 강도 시험 방법』에 의거하여 시험체를 제작하였고 재령 3, 7, 28일의 경화성상을 측정하였다. 비중 및 흡수율을 측정하기 위해서 4cm의 정육면체의 시험체를 각 3개 씩 제작하여 재령 7일일 때 『KS F 2518 석재의 흡수율 및 비중시험 방법』에 준용하여 시험을 실시하였다. 내마모성 시험은 『KS L 1001:2013』에 준용하여 마모감량을 측정하였다. 출석률은 『KS F 4035 기성 테라조』에 준용하여 인조석재 300×300×45(mm)의 표면에 2개의 대각선을 그어 그 직선이 폐유리 및 폐자기 위를 지나가는 부분의 치수를 계산하여 평균값을 나타내었다. 출석률의 계산은 식 (1)에 나타내었다.

$$\frac{a+b+c+d+e+\dots}{\text{대각선의 길이}} \times 100 \quad (1)$$

출석률 계산식에서 a, b, c, d, e, …… 은 시험체 위에 출석된 폐자기 및 폐유리의 위를 지나가는 선의 길이(mm)를 나타낸다.

4. 실험결과 및 분석

4.1 폐유리 혼입율에 따른 인조석재의 특성

4.1.1 밀도 및 흡수율

Fig. 5는 폐유리 및 폐자기의 혼입율에 따른 밀도 및 흡수율에 대해 측정한 결과로, 혼입율이 증가함에 따라 밀도는 증가하는 경향을 보이며, 흡수율은 감소하는 경향으로 보이고 있다. 선행 실험에 비해 밀도는 증가하였으며, 흡수율은 감소하는 경향을 보이고 있다. 이는 폐유리 및 폐자기의 혼입율이 증가함에 따라 중량의 증가로 인해 밀도가 증가하는 것으로 보이며, 흡수율은 자기질 및 유리 자체는 낮은 흡수율을 보이고 있으며, 이러한 인조석의 혼입율이 증가함에 따라 흡수율이 감소하는 것으로 사료된다.

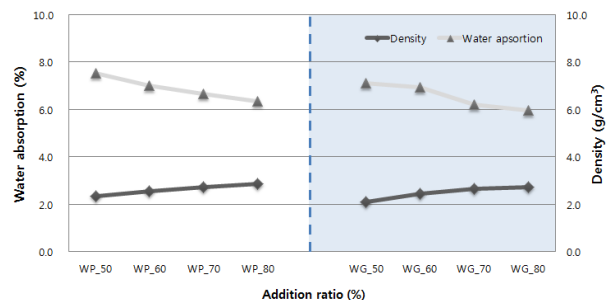


Fig. 5. Density and water absorption according to addition ratio of WG and WP

4.1.2 휨강도 및 압축강도

Fig. 6와 Fig. 7은 폐유리 및 폐자기 혼입율에 따른 인조석재의 휨강도 및 압축강도에 대한 측정결과를 나타낸 것으로, 혼입율이 증가함에 따라 휨강도 및 압축강도는 증가하는 경향으로 보이고 있지만 폐유리 및 폐자기 첨가율이 80%에서는 강도가 감소하는 것으로 보인다. 그리고 폐자기와 폐유리의 강도를 비교해 보면 폐자기가 폐유리에 비하여 강도 값이 약 1~2MPa 높은 강도를 보이고 있는데, 이는 폐자기가 폐유리에 비하여 결합재 페이스트와 부착성이 더 좋다는 것을 알 수 있다. 또한, 폐자기 및 폐유리의 첨가율 70% 까지 강도가 증가하는 경향인 것을 볼 수 있는데 이러한 이유는 고로슬래그와 유동층 연소 플라이애시 기반의 경화체와 비해 폐유리 및 폐자기의 자체강도가 높기 때문에 혼입율이 증가함에 따라 강도 증진이 있을 것으로 판단되며, 고로슬래그 기반의 페이스트의 부착력으로 인해 폐유리 및 폐자기 간격 간의 사이의 공극 충전으로 강도가 증진하는 것으로 판단된다.

하지만 폐유리 혼입율 80%에서는 강도 저하가 생기게 되었는데,

이 이는 폐유리 및 폐자기의 혼입 비율이 결합재의 양에 비해 초과해서 혼입되었기 때문에 강도 저하가 생긴 것으로 사료되며, 또한 과도한 혼입으로 인해 페이스트 양이 줄어들면서 폐유리 간 접촉성이 저하되면서 강도가 저하된 것으로 판단된다. 이를 보아 폐유리 및 폐자기의 혼입율은 용적 70%에서 높은 강도 값을 보이지만 폐유리 및 폐자기 혼입율 60%와 큰 차이를 보이지 않기 때문에 60~70(%)를 적정 혼입율로 볼 수 있을 것으로 보인다.

4.1.3 출석율

Fig. 8은 폐유리 및 폐자기 혼입율에 따른 인조석재의 출석율에 대한 측정결과를 나타낸 것으로, 폐자기 및 폐유리의 혼입율이 증가함에 따라 출석률을 증가하는 경향을 보이고 있다. 폐유리의 출석률에 대한 표면 변화 사진은 다음 Fig. 9 폐자기의 출석률에 대한 표면 변화 사진은 다음 Fig. 10과 같다. 그리고 폐유리를 혼입한 인조석재가 폐자기를 혼입한 인조석재보다 높은 출석률을 보이고 있는데 이는 폐자기의 단면은 경화체와 비슷한 색상을 띄고 있기

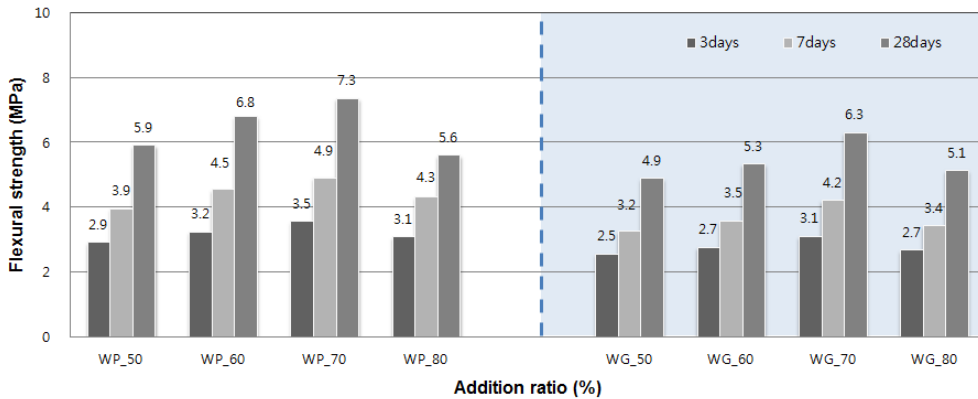


Fig. 6. Flexural strength according to addition ratio of WG and WP

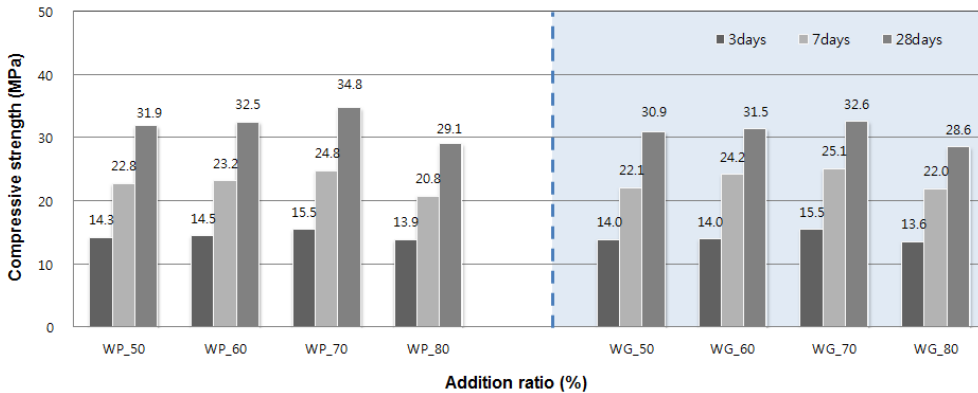


Fig. 7. Compressive according to addition ratio of WG and WP

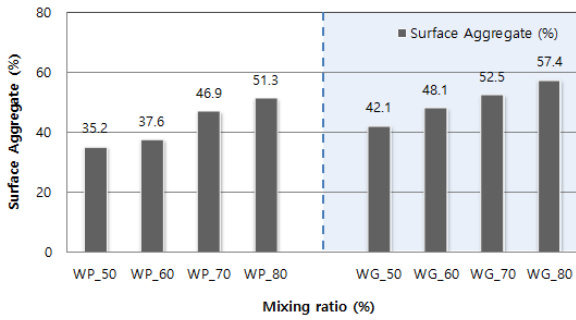


Fig. 8. Surface aggergate attendance to addition ratio of WG and WP

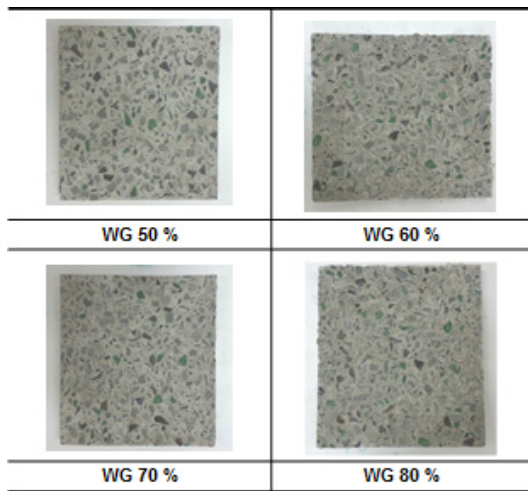


Fig. 9. Surface aggergate attendance to mixing ratio of WG

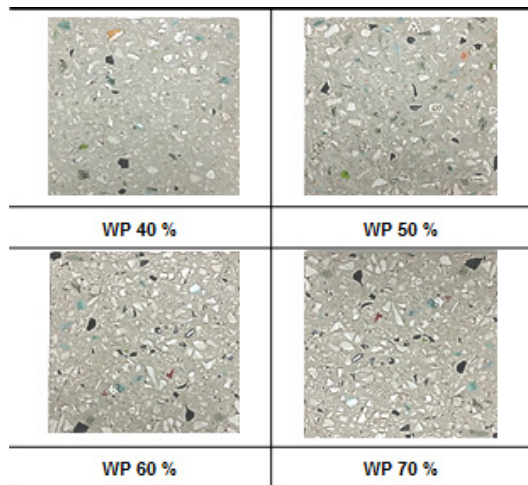


Fig. 10. Surface aggergate attendance to mixing ratio of WP

때문에 출석률에 감소의 영향으로 인해 폐유리에 비해 낮게 나온 것으로 판단된다. 폐유리 및 폐자기의 혼입율이 증가함에 따라 출

석율이 육안으로도 증가되는 것을 볼 수 있었으며, 골재가 연속적으로 적절한 분포를 한 것은 출석율 45% 이상을 보이는 인조석재가 가장 적절한 분포를 보였다.

5. 결론

산업부산물 및 폐자원을 활용한 내·외장재용 인조석재의 특성을 알아보고 이에 대한 사용가능성을 검토하기 위한 실험 결과는 다음과 같다.

1. 밀도 및 흡수율 시험결과 폐자기 및 폐유리 혼입율이 증가함에 따라 밀도는 증가하는 경향을 보이며, 흡수율은 감소하는 경향으로 보인다. 또한 폐유리는 폐자기에 비해 밀도가 낮고, 흡수율 또한 낮게 나타났다.
2. 휨강도 및 압축강도 시험결과 폐자기 및 폐유리의 혼입율이 증가함에 따라 증가하는 경향을 보이지만, 혼입율 70% 초과할 경우 감소하는 것으로 보였다. 또한, 폐자기를 혼입한 인조석재의 경우가 폐유리를 혼입한 인조석재에 비해 강도가 더 높게 발현되었다.
3. 출석률 시험결과 폐자기 및 폐유리 혼입율이 증가함에 따라 출석률은 증가하는 경향을 보였다. 하지만 폐유리가 폐자기에 비해 출석률이 더 높게 나타났다.

이후, 사업적 측면으로 이어진다면 기존의 천연골재로 제작된 테라조에 비하여 산업부산물과 폐자원을 활용하였기 때문에 본 연구의 결합재 적정 첨가율과 폐자원의 적정 첨가율을 첨가하여 제작할 시, 기존 테라조에 비하여 경제적으로 높은 평가를 받을 수 있을 것으로 판단된다.

References

Kim, T.H. (2016). Adhesion strength properties of matrix using magnesia according to potassium phosphate addition ratio, Korean Recycled Construction Resource Institute, **16(1)**, 34–35 [in Korean].

Nam, H.K. (2015). Engineering Properties of The Non-cement Mortar Using The Combined Heat Power Plant Fly-Ash and Recycled Fine Aggregate, Hanbat National University, Korea [in Korean].

Park, S.G. (2014). Lightweight properties of matrix using paper

- ash according to replacement ratios of fly ash and polysilicon sludge, Korean Recycled Construction Resource Institute, **2(2)**, 166–171 [in Korean].
- Shin, J.H. (2016), Properties of non cement matrix accrodng to the polysilicon and HFA replacement ratio of based on blast furnace slag, The Korea Institute of Building Construction, **16(1)**, 132–133 [in Korean].
- Yang, H. (2014), Mechanical properties of lightweight mortar in accordance with the particle size and replacement ratio of the wasted tire chip, International Organization for Standardization, Korean Recycled Construction Resource Institute, **3(4)** [in Korean].
- Yoo, Y.J. (2013), Characteristic of the mixing ratio Magnesia Phosphate Composite (MPC) exterior material artificial stone according to the waste porcelain mixing ratio, The Korea Institute of Building Construction, **13(2)**, 160–161 [in Korean].
- Yoo, Y.J. (2014), Mechanical properties of the artificial stone according to the ternary system inorganic composite and waste glass and fiber type, The Korea Institute of Building Construction, **13(2)**, 160–161 [in Korean].
- Yoo, Y.J. (2014), Physical characteristic of artificial stone using waste resources, The Korea Institute of Building Construction, **13(2)**, 160–161 [in Korean].

폐유리 및 폐자기를 활용한 무시멘트계 인조석재의 특성

전 세계적으로 급격한 산업화 및 현대화가 진행됨에 따라 환경오염 또한 급격히 진행되어가고 있다. 그리고 천연골재의 무분별한 채취로 환경오염 및 분진발생 등은 심각한 문제가 되고 있다. 이에 본 연구는 시멘트 생산 시 CO₂ 배출량을 줄이고자 시멘트 대체재로서 산업부산물인 고로슬래그와 유동층 연소 플라이애시를 사용하고자 하였으며, 천연골재의 무분별한 채취 문제를 해결하고자 골재로서 폐자기 및 폐유리를 활용하는 인조석재에 적용하는 산업부산물 및 폐자원을 활용한 내·외장재 인조석재의 특성에 대한 기초자료를 제시하고자 하였다. 그 결과, 고로슬래그를 주 결합재로 하여 유동층 연소 플라이애시를 40% 첨가하였을 때 가장 강도가 높았으며 또한, 선행실험을 토대로 폐자기 및 폐유리의 혼입율에 따른 실험을 진행 한 결과, 폐자기 및 폐유리의 적정 혼입율은 출석률이 45% 이상 보이는 혼입율 60, 70(%)의 혼입율이 가장 적정 혼입율이라고 판단된다.