

폐유리와 산업부산물을 사용한 모르터의 팽창특성

박승범^{1)*} · 이봉춘¹⁾

¹⁾충남대학교 토목공학과

(2002년 2월 1일 원고접수, 2002년 5월 31일 심사완료)

Expansion Properties of Mortar Using Waste Glass and Industrial By-Products

Seung-Bum Park^{1)*} and Bong-Chun Lee¹⁾

¹⁾ Dept. of Civil Engineering, Chungnam National University, Daejeon, 305-764, Korea

(Received February 1, 2002, Accepted May 31, 2002)

ABSTRACT

Waste glass has been increased with the development of industry. The utilization of waste glass for concrete can cause the concrete to be cracked and to be weakened due to an expansion by alkali-silica reaction(ASR). In this study, ASR expansion and properties of strength were analyzed in terms of waste glass color(amber, emerald-green), industrial by-products(ground granulated blast-furnace slag, fly ash), and the content of industrial by-products for reducing ASR expansion caused by the waste glass. The possibility of using glass ground as pozzolanic properties was also analyzed. From the result of this study, the pessimum size of waste glass was 2.5~1.2 mm regardless of waste glass color. And the smaller than 2.5~1.2 mm waste glass is, the more decreasing expansion of ASR is. Also, the combination of waste glass with industrial by-products have an effect on reducing the expansion and strength loss caused by ASR between the alkali in the cement paste and the silica in the waste glass, and the glass ground of less than 0.075 mm is applicable as a pozzolanic material.

Keywords: waste glass, glass ground, alkali-silica reaction, ground granulated blast-furnace slag, fly ash, pessimum size

1. 서 론

유리제품의 활용이 증대됨에 따라 폐유리의 발생량도 점차 증대되고 있다. 폐유리병은 유리병의 원료로 재활용하는 방법도 있으나 다른 재활용 방법의 하나는 콘크리트용 재료로서 적용하는 것이다. 콘크리트에 폐유리를 재활용할 경우 잔골재의 대체재료와 콘크리트의 혼화제로서의 사용을 고려할 수 있다^{1~3)}.

자원의 고갈로 콘크리트용 양질의 골재를 획득하기가 어렵고, 시멘트 제조시 발생하는 CO₂에 의한 환경문제가 대두되는 현실에서 발생량이 점차 증대되고 있는 폐유리병을 콘크리트용 재료로서 이용하는 것은 환경문제 및 경제성의 측면에서도 유효할 것으로 사료된다.

그러나 폐유리를 콘크리트용 재료로서 이용^{4~6)}할 경우, 알칼리 실리카반응(Alkali-Silica Reaction : ASR)에 의한 팽창으로 콘크리트의 성능저하가 지적되고 있다.

따라서 본 연구에서는 폐유리병을 분쇄한 유리분말의 입도가 ASR에 의한 팽창에 미치는 영향과 강도특성을 비교·평가하고 폐유리의 혼입에 의한 ASR의 팽창을 억제하기 위한 방안으로 산업부산물(플라이애시, 고로슬래그)을 혼입하여 ASR에 따른 팽창과 강도특성을 구명하고자 한다.

2. 사용재료 및 시험방법

2.1 사용재료

본 연구의 시멘트는 보통 포틀랜드시멘트(Type I)가 사용되었고, 잔골재는 주문진 표준사를 사용하였으며 시멘트의 물리·화학적 특성은 Table 1과 같다.

폐유리(Waste Glass : WG)는 유리병과 유리제품으로 광범위하게 사용되고 있는 갈색(amber)과 녹색(emerald-green)의 폐유리를 5~2.5 mm, 2.5~1.2 mm, 1.2~0.6 mm, 0.6~0.3 mm, 0.3~0.15 mm, 0.15~0.075 mm, 0.075 mm미만의 입도로 구분하여 사용하였으며, 사용된 폐유리의 화학적 조성은 Table 2와 같다.

* Corresponding author

Tel : 042-821-5674 Fax : 042-822-6265

E-mail : park_sb@hanbat.chungnam.ac.kr

포졸란 재료로서 폐유리의 성능을 분석하기 위해 사용된 석회(hydrated lime)는 국내 B사 제품의 200 mesh 크기의 소석회(Ca(OH)₂)를 사용하였다.

플라이애시(fly ash : FA)는 보령 화력발전소에서 부산된 유연탄 플라이애시를 사용하였고, 그 화학적 조성 및 물리적 특성은 Table 3과 같다.

고로슬래그 미분말(ground granulated blast-furnace slag : BS)은 국내 C사에서 생산되는 미분말을 사용하였고, 그 화학적 조성 및 물리적 특성은 Table 4와 같다.

실리카 흙(silica fume : SF)은 남아프리카 Anglo Alpha Co. 제품의 초미분말을 사용하였으며, 화학적 조성 및 물리적 특성은 Table 5와 같다.

2.2 시험방법

유색 폐유리의 입도에 따른 ASR팽창과 2.5~1.2 mm의 입도를 갖는 유색 폐유리 분말 20%와 산업부산물의 혼입에 따른 ASR팽창과 강도특성을 평가하기 위해서 다음과 같은 실험변수를 선정하였다.

- ① 폐유리의 색깔 (갈색, 녹색)
- ② 폐유리의 입도 (5~2.5 mm, 2.5~1.2 mm, 1.2~0.6 mm, 0.6~0.3 mm, 0.3~0.15 mm, 0.15~0.075 mm, 0.075 mm 미만)

- ③ 산업부산물의 종류(고로슬래그 미분말, 플라이애시)
- ④ 산업부산물의 혼입율 (10%, 20%, 30%, 50%)

또한, 포졸란 재료로서 폐유리 분말의 적용 가능성을 분석하기 위해서 일반적인 포졸란 재료(실리카흙, 고로슬래그 미분말, 플라이애시)와 알칼리-실리카 반응성 시험과 석회-유리 시험을 수행하여 폐유리 분말의 성능을 비교 분석하였다.

2.2.1 알칼리-실리카 반응 시험

콘크리트용 골재로서 폐유리를 재활용하기 위한 시험으로 폐유리의 ASR에 대한 영향평가는 ASTM C 1260⁷⁾에 준하여 실시하였다.

이를 위해 물-시멘트비(W/C) 0.47, 골재/시멘트비

Table 2 Chemical composition of waste glass

Type Composition	Emerald-green glass(%)	Amber glass(%)
SiO ₂	71.3	72.1
Al ₂ O ₃	2.18	1.74
Na ₂ O+K ₂ O	13.07	14.11
CaO+MgO	12.18	11.52
SO ₃	0.053	0.13
Fe ₂ O ₃	0.596	0.31
Cr ₂ O ₃	0.44	0.01

Table 1 Physical properties and chemical composition of cement

Chemical composition (%)										Physical properties					
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	Ig.loss	Total	Specific gravity	Blaine (cm ² /g)	Stability (%)	Compressive strength(kgf/cm ²)		
									3days				7days	28days	
21.24	5.97	3.34	62.72	2.36	0.13	0.81	1.97	1.46	100				3.14	3200	0.02

Table 3 Chemical composition and physical properties of fly ash

Chemical composition (%)								Physical properties		
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	SO ₃	Ig. loss	Specific Gravity	Blaine (cm ² /g)	Particle size(mm)
65.3	25.50	4.25	1.20	0.98	0.21	1.03	3.63	2.1	3,124	4.2×10 ⁻²

Table 4 Chemical composition and physical properties of ground granulated blast-furnace slag

Chemical composition (%)								Physical properties		
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	SO ₃	Ig. loss	Specific gravity	Blaine (cm ² /g)	Particle size (mm)
35.20	15.90	0.46	42.21	5.85	0.12	0.11	0.05	2.83	3,000 ~ 4,000	1.0~1.6

Table 5 Chemical composition and physical properties of silica fume

Chemical composition (%)					Physical properties		
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	Ig. loss	Specific gravity	Blaine (cm ² /g)	Particle size(μm)
92.5	1.68	2.51	0.56	0.31	2.21	263,000	1.36

(S/C) 2.25로 하여 2.5×2.5×31 cm의 모르터 바 시편을 각 배합당 3개씩 제작하였다. 24시간 표준양생과 24시간 80℃의 물에 저장한 후 시료들은 80℃의 밀폐된 1 N NaOH 수용액 안에 저장하였다. 길이변화 측정은 저장된 용기에서 시편을 꺼내어 바로 측정기를 이용하여 측정하였다. 모르터 바의 길이는 0.002 mm내의 정확도를 갖는 길이비교측정기(컴퍼레이터)를 사용하여 14일동안 측정하였다.

2.2.2 석회-유리 시험

포졸란 재료로서 폐유리의 적용 가능성을 분석하기 위해 ASTM C 593⁽⁶⁾에 준하여 시험을 실시하였다. 즉 수산화석회, 광물혼화재(glass, silica fume, fly ash, slag), 표준사는 각각 180 g, 260 g, 1340 g을 혼합하여 물의 양은 플로우 시험을 통해 흐름값이 65~75%에서 유지되도록 정하여 5×5×5 cm의 각주 공시체를 제작하였다. 제작된 공시체는 밀폐된 용기안에 저장하여 54±2℃에서 7일간 양생 후, 23℃에서 21일 동안 양생하였다. 압축강도는 재령 7일과 28일에서 측정하였다.

2.2.3 모르터 압축강도 시험

폐유리 및 산업부산물을 사용한 시멘트 모르터의 압축강도시험은 KS L 5105 『시멘트 모르터의 압축강도 시험 방법』에 준하여 5×5×5 cm 공시체를 제작하여 ASTM C 1260의 시험조건과 같은 80℃ 1N NaOH 수용액에 14일간 침지한 후 모르터의 압축강도를 측정하였다.

2.2.4 SEM에 의한 관찰

폐유리의 입도에 따른 모르터 바와 산업부산물을 사용한 경우의 모르터 바를 절단하여 표면을 일련의 샌드페이퍼(sand paper)로 연마하여 금(gold) 코팅한 후 주사전자현미경(SEM : scanning electron microscopy)으로 시멘트 경화체의 폐유리 주변에 존재하는 알칼리 실리카 반응생성물과 모르터 바의 표면을 관찰하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 폐유리 골재의 입도별 팽창특성

알칼리-실리카 반응은 반응성 골재인 고체와 알칼리 용액의 액체를 포함하는 고체-액체의 화학반응이므로 골재의 크기와 관련된 반응성 골재의 표면적은 알칼리-실리카 반응에 의한 팽창과 밀접한 관계를 갖는 주요한 요인이다.

폐유리 골재의 입도가 알칼리-실리카 반응에 의한 팽창에 미치는 영향을 분석하기 위해서 폐유리를 표준사의 중량 대체비로 20% 치환하여 입도별(5~2.5 mm, 2.5~1.2 mm, 1.2~0.6 mm, 0.6~0.3 mm, 0.3~0.15 mm, 0.15~0.075 mm, 0.075 mm 미만) 팽창율을 측정하였다. 유색 폐유리의 입도별 팽창이력곡선을 Fig. 1과 Fig. 2에 나타내었으며 유색 폐유리의 입도에 따른 재령별 팽창율은 Fig. 3과 Fig. 4와 같다.

폐유리의 색깔에 따른 팽창특성은 녹색의 경우가 갈색의 폐유리 보다 전반적으로 낮은 팽창량을 나타내었으며 재령 14일에서 폐유리의 입도에 따른 팽창률은 2.5~1.2 mm의 폐유리 입도에서 폐유리의 색깔에 관계없이 가장 큰 퍼시엄 입도(pessium size)를 나타내었다. 이와 같이 폐유

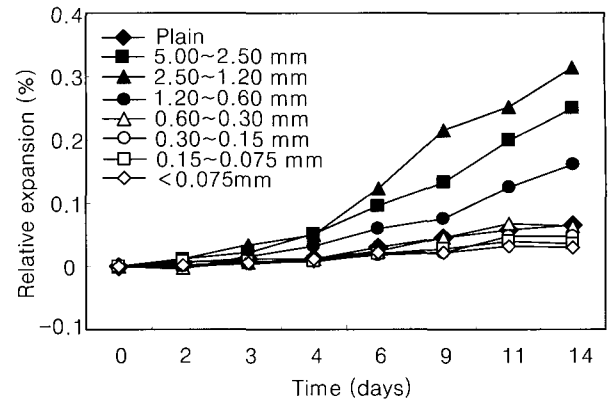


Fig. 1 Expansion time histories for mortar bars (amber glass)

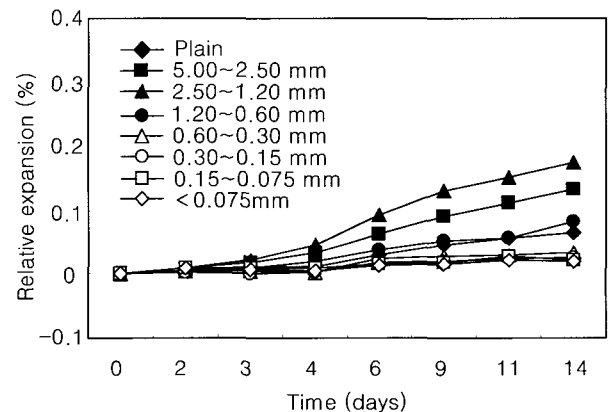


Fig. 2 Expansion time histories for mortar bars (emerald-green glass)

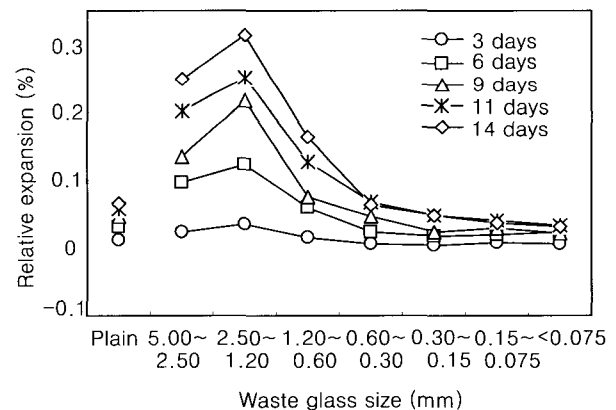


Fig. 3 Expansion of mortar bars (amber glass)

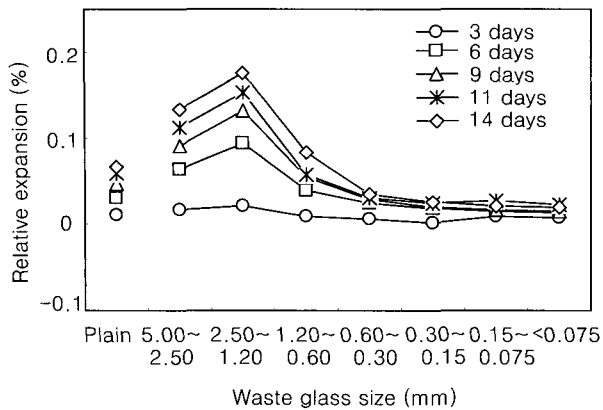


Fig. 4 Expansion of mortar bars (emerald-green glass)

리 혼입에 따른 ASR 팽창이 녹색의 폐유리를 혼입한 경우가 갈색의 폐유리를 혼입한 경우에 비해 적게 발생하고 있는 것은 녹색 유리의 제조시 녹색의 색깔을 위해 첨가되는 Cr_2O_3 의 산화물 첨가가 팽창을 억제시키는 것으로 사료되며 이러한 결과는 Cr_2O_3 의 증가에 의해 팽창이 감소된다는 Weihua Jin¹⁸⁾의 연구결과와 유사한 경향을 나타내고 있다. Cr_2O_3 가 ASR을 억제시키는 메카니즘은 전기적 이중층 반발작용(electrical double-layer repulsion)으로부터 초래된 팽창압은 이온의 이온가에 역비례하다는 Prezzi et al.¹⁹⁾의 가설에 의해서 설명되어질 수 있기 때문에 Cr^{3+} 를 포함하는 겔은 보다 적은 팽창을 나타낸 것으로 사료된다. 또한, 폐유리의 입도가 1.5~1.2mm보다 작을수록 팽창율은 점차 감소하는 경향을 보이고 있으며 갈색 폐유리의 경우 0.15~0.075mm와 0.075mm미만의 팽창율은 0.037%와 0.03%로 1.5~1.2mm의 갈색 폐유리 보다 약 85~88%의 팽창저감효과를 나타내었으며 Plain보다는 낮은 팽창율을 나타내었다. 각각의 폐유리 입도범위를 갖는 모르타의 팽창은 재령이 증가할수록 점차 증가하는 경향을 나타내었다.

일반적으로 알칼리-실리카 반응에 의한 팽창은 반응성 골재의 입자크기에 크게 의존하는데 Diamond et al.⁸⁾는 반응성 골재로서 오팔을 사용한 모르타 바의 시험을 통해서 골재입자의 크기가 50 μm 에서 20 μm 까지 감소할수록 팽창율은 증가하지만 20 μm 이하에서는 팽창이 일어나지 않는다고 보고하였으며 이와같이 퍼시멈입도가 존재하는 이유는 알칼리-실리카 반응에 의해 생성된 겔량은 반응성골재의 표면적의 증가와 함께 증대하지만, 반대로 이러한 반응에 공급된 알칼리와 물의 양은 반응성골재의 표면적이 증가하면 감소하기 때문이라고 Hobbs와 French^{9,10)}은 밝히고 있다. 그러나 ASTM C 1260에 준하여 수행한 실험에서는 알칼리 양이 지속적으로 추가됨에도 불구하고 폐유리의 입도가 2.5~1.2mm를 초과하는 경우 팽창율은 점차 감소하는 경향을 보이고 있는데 이러한 경향은 폐유리의 입도가 작을수록 알칼리-실리카 반응과 더불어 부분

적으로 폐유리에 의한 포졸란 반응이 발생한 것으로 사료된다. Photo 1은 2.5~1.2 mm 폐유리 입도를 혼합한 모르타의 페이스트와 폐유리의 계면을 SEM 촬영한 것으로 폐유리 주변에 ASR로 인한 반응성 겔의 형성과 ASR의 팽창으로 인해 발생된 균열을 확인할 수 있다.

Photo 2는 0.075 mm미만의 폐유리 입도를 갖는 모르타 바 표면의 영상으로 2.5~1.2 mm 폐유리 입도에서 관찰되었던 반응성 겔과 균열의 모습은 확인할 수 없었으며 입도가 미세한 폐유리를 콘크리트에 적용할 경우 ASR로 인한 성능저하를 방지할 수 있고 콘크리트 혼화재료로서의 용도전개가 가능할 것으로 사료된다.

3.2 산업부산물의 혼입에 따른 팽창특성

3.2.1 산업부산물을 혼입한 모르타의 팽창특성

폐유리를 콘크리트용의 잔골재로 30%이상 사용할 경우 콘크리트의 강도가 저하된다고 보고¹¹⁾되고 있으며 2.5~1.2 mm의 유색 폐유리 20%를 잔골재로 대체할 경우에 발생하는 유해한 팽창을 억제하기 위한 방안으로 산업부산물을 혼입하여 혼입율별 팽창특성을 분석하였다.

Fig. 5와 Fig. 6은 알칼리-실리카 반응성 시험에서 Pessimum 입도를 나타낸 2.5~1.2mm의 유색 폐유리를 20% 혼입한 모르타 공시체에 대하여 고로슬래그 미분말과 플라이애시의 혼입을 변화(10~50%)에 따른 팽창량을 측정된 결과이다.

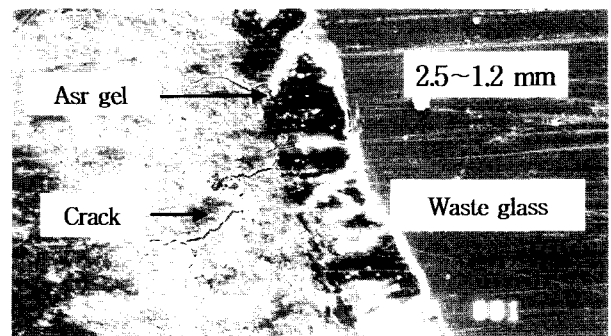


Photo 1 SEM image of mortar bar

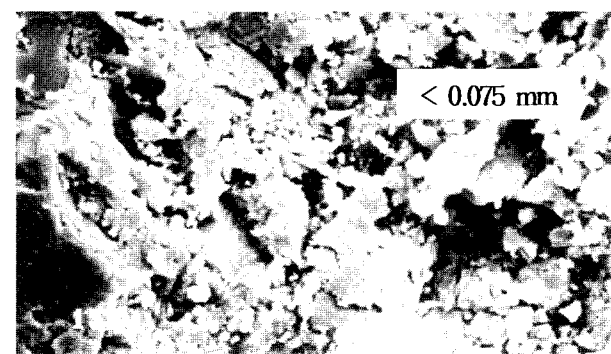


Photo 2 SEM image of mortar bar

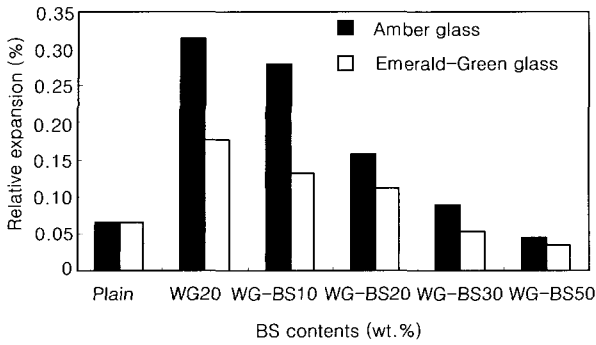


Fig. 5 Expansion of mortar bars containing WG and BS

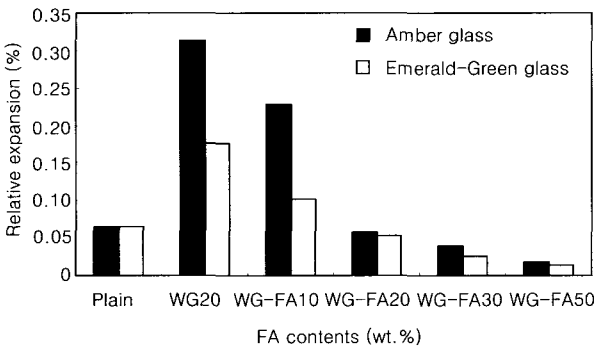


Fig. 6 Expansion of mortar bars containing WG and FA

Fig. 5를 살펴보면 폐유리의 색깔에 따라서는 갈색의 경우가 전반적으로 녹색의 경우보다 높은 팽창률을 나타내었다. 고로슬래그 미분말의 혼입율이 증가함에 따라 팽창폭은 점차 감소되는 경향을 나타내었고 고로슬래그 미분말을 30%이상 사용한 경우는 ASTM C 1260에서 무해한 것으로 규정하고 있는 기준치인 0.1%팽창율을 밑도는 것으로 나타났다. 또한, 고로슬래그 미분말의 혼입에 의한 팽창은 2.5~1.2 mm의 갈색 폐유리를 혼입한 경우에 비해 약 11~86%의 팽창억제 효과가 있는 것으로 나타났으며 ASR에 대해서 무해한 폐유리 콘크리트를 제조하기 위해서는 고로슬래그 미분말 혼입율을 30%이상 혼입하는 것이 바람직한 것으로 나타났다.

한편, 플라이애시를 혼입한 경우는 고로슬래그 미분말을 혼입한 경우와 마찬가지로 폐유리의 색깔에 관계없이 혼입율이 증가할수록 팽창은 점차 감소하는 경향을 나타내고 있으며 갈색 폐유리 2.5~1.2 mm를 혼입한 경우의 팽창에 비해 약 27~94%의 팽창억제 효과를 나타내었다. 플라이애시를 유색의 폐유리 혼입량 20%에 적용할 경우 20%이상의 플라이애시 혼입율이 적절할 것으로 사료된다.

동일한 산업부산물의 혼입률에서는 플라이애시를 혼입한 경우가 고로슬래그 미분말을 혼입한 경우보다 양호한 팽창억제효과를 나타내었으며 폐유리의 혼입으로 인한 ASR의 팽창억제에 산업부산물의 사용은 효과적인 것으로

나타났다.

산업부산물의 혼입에 의해 팽창이 억제되는 원인으로서는 높은 비표면적으로 인해 콘크리트 중의 알칼리를 희석시킨다고 Davies 등¹²⁾은 보고하고 있으며, Qian 등¹³⁾은 슬래그는 비교적 강산성을 갖기 때문에 슬래그를 첨가한 매트릭스(슬래그·시멘트 수화 생성물)은 OH, Na⁺ 및 K⁺를 가까이 당기며, 결과적으로 이것의 이온이 반응성 골재로의 이동을 지연시켜, 그 지연 효과는 산업부산물의 치환률이 높을 경우 크게 나타난다고 하였다.

이와 같이 산업부산물의 혼입에 의한 알칼리의 희석, 알칼리 성분의 이동지연효과 및 조직의 치밀화로 인해 산업부산물의 치환률이 증가할수록 ASR에 의한 팽창의 억제 효과는 증대될 것으로 사료된다.

3.2.2 산업부산물을 혼입한 모르터의 강도특성

갈색과 녹색 폐유리를 혼입한 모르터의 강도에 산업부산물(고로슬래그 미분말, 플라이애시)의 혼입율이 미치는 영향에 대해서 분석하였다.

2.5~1.2 mm의 폐유리 혼입율 20%에 대해서 산업부산물의 혼입율을 변화시킨 후 80 °C의 NaOH용액에 14일간 침지 후의 압축강도 시험결과는 Fig. 7과 Fig. 8과 같다.

폐유리 만을 혼입한 경우와 고로슬래그 미분말 10%를 혼입한 경우는 Plain에 비해 폐유리의 색깔에 관계없이 낮은 강도를 발현하고 있으나 고로슬래그 미분말의 혼입율이 증가함에 따라 강도는 증가하여 고로슬래그 미분말

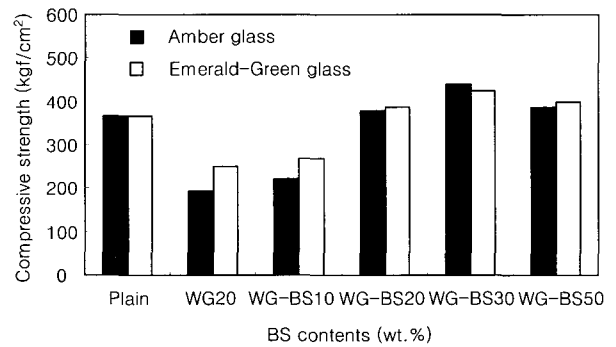


Fig. 7 Compressive strength according to BS contents

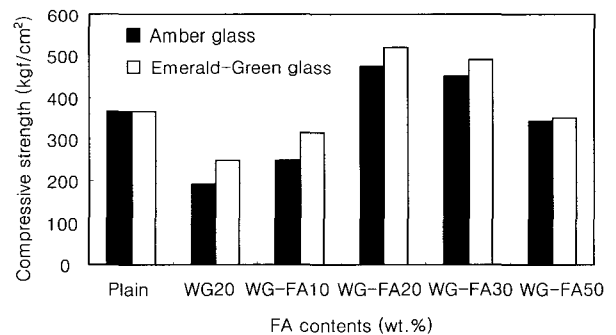


Fig. 8 Compressive strength according to FA contents

30%에서 가장 큰 강도를 발현하는 것으로 나타났으며 폐유리 색깔에 따른 영향은 고로 슬래그 20%이상의 혼입물에서는 크지 않은 것으로 나타났다. 또한, 플라이애시의 혼입물에 따른 강도특성은 고로슬래그 미분말을 혼입한 경우와 유사한 경향을 보이고 있으며 플라이애시 혼입물 20%에서 가장 큰 강도를 나타내었다. 산업부산물의 동일 혼입물에서는 플라이애시의 경우가 고로슬래그 미분말보다 양호한 강도발현을 나타내었다.

폐유리를 혼입함으로써 발생된 ASR 팽창은 산업부산물의 혼입에 의해 ASR에 의한 팽창이 감소하여 균열의 발생량이 감소하기 때문에 강도가 증진된 것으로 사료된다.

80 °C NaOH에 침지한 폐유리 20% 혼입에 대해서 산업부산물의 혼입을 증가에 따른 팽창비와 80 °C NaOH에 침지한 모르타의 압축강도비와의 관계를 나타낸 것이 Fig. 9와 Fig. 10이다.

산업부산물의 혼입율이 증가할수록 2.5~1.2 mm의 폐유리 만을 혼입한 경우에 비해 팽창비는 감소하는 것에 반해 강도비는 고로슬래그 미분말은 30%, 플라이애시는 20%까지 혼입율을 증가할수록 증가한 후 그 이상의 혼입물에서는 강도가 감소하는 것으로 나타나 많은 량의 산업부산물 혼입은 ASR의 팽창에는 효과적이나 강도의 발현에는 부정적인 것으로 나타났다.

Photo 3과 Photo 4는 2.5~1.2 mm의 폐유리와 산업부산물을 혼입한 모르타의 표면을 SEM 촬영한 것이다. 산업부산물을 혼입한 모르타 시편에서는 반응성 겔을 확인할 수 없었으며 대체적으로 양호한 상태를 확인할 수 있었고 플라이애시를 20% 혼입한 Photo 4의 SEM촬영에서는 폐유리 주변에 플라이애시의 입자를 확인할 수 있었으며 2.5~1.2 mm의 폐유리만을 혼입한 Photo 1의 SEM사진에서 볼 수 있었던 반응성 겔은 확인할 수 없었다.

3.3 폐유리 분말의 혼화재료로서의 가능성 분석

폐유리의 입도가 작을수록 알칼리-실리카 반응으로 인해 발생하는 팽창이 현저히 저하되며 강도의 손실도 작아지게 되는 것을 확인하였다. 본 절에서는 갈색 폐유리 분말이 포졸란 재료로서의 사용 가능성을 분석하기 위해서 ASTM C 539에 준하여 시험을 수행하였다. 또한, 폐유리 분말을 콘크리트 혼화제로 사용한 팽창시험과 강도시험을 통하여 실리카 흙, 고로슬래그 미분말, 플라이애시와 같은 일반적인 포졸란 재료와의 성능을 비교·분석하였다.

3.3.1 폐유리 분말의 Lime-Glass시험

Fig. 11은 폐유리 분말의 포졸란 재료로서 사용 가능성을 평가하기 위하여 ASTM C 539에 준하여 시험한 결과이다. ASTM C 539에 따르면 54 °C의 오븐에서 7일 후의 압축강도와 추가로 20 °C의 물에 21일 동안 수증양생한

경우의 압축강도는 41.88kgf/cm²을 초과하는 재료가 포졸란 재료로서 사용할 수 있다고 규정하고 있는데 시험결과 실리카 흙, 고로슬래그 미분말 및 플라이애시는 모두 규정

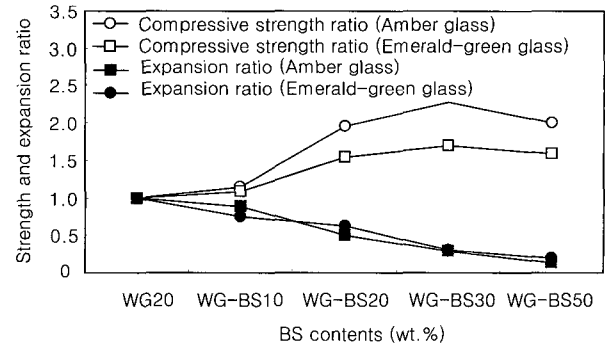


Fig. 9 Compressive strength ratio and expansion ratio

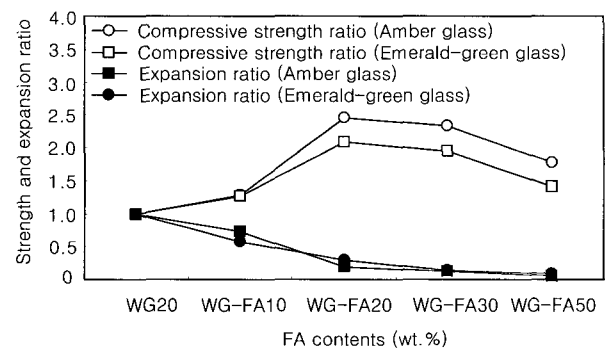


Fig. 10 Compressive strength ratio and expansion ratio

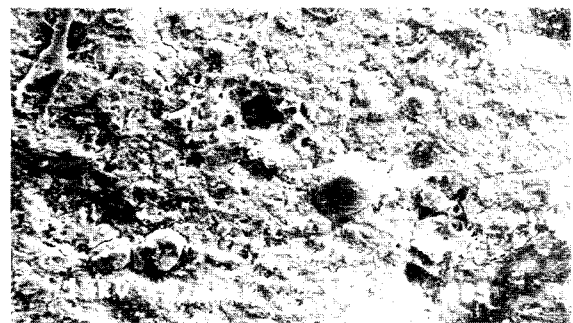


Photo 3 SEM image of mortar bar (BS 20 %)

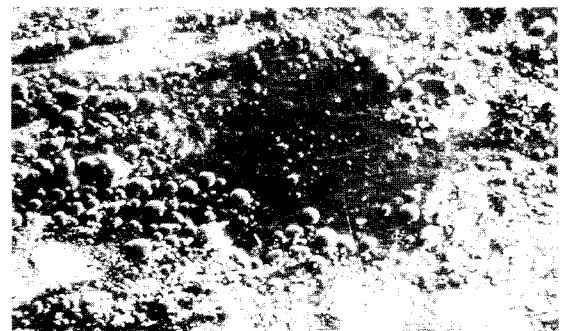


Photo 4 SEM image of mortar bar (FA 20 %)

값을 만족하는 것으로 나타났다. 폐유리를 사용한 경우 0.6~0.3 mm 입도를 갖는 폐유리 분말은 모르터 시편의 제조시 성형이 불량한 상태를 나타내었으며 7일과 29일에서의 요구강도를 발현하지 못하는 것으로 나타났다.

또한, 0.3~0.15 mm와 0.15~0.075 mm의 폐유리는 0.6~0.3 mm에 비해 양호한 강도발현을 나타내었으나 ASTM C 539의 기준값에는 미치지 못하는 것으로 나타났다. 0.075 mm미만의 입도를 갖는 폐유리 분말은 기준값을 초과하는 것으로 나타나 폐유리의 입도가 0.075 mm 미만의 미세한 폐유리가 포졸란 재료로서의 성능을 갖는 것으로 판단되며, 0.075 mm미만의 폐유리 분말은 기존의 포졸란 재료보다는 낮은 강도발현을 나타내었다.

Yixin et al.¹⁴⁾은 형광 유리를 사용하여 38 μm의 형광유리 분말에서 포졸란 재료로서의 가능성이 있다고 보고하였으며 포졸란 재료보다 폐유리의 분말을 사용할 경우 포졸란 반응성이 작게 나타나는 원인을 폐유리 분말이 갖고 있는 구성성분(SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃)의 총량이 비교적 작기 때문이라고 보고하고 있다.

폐유리를 보다 양호한 포졸란 재료로서 사용하기 위해서는 폐유리 구성성분(SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃)의 변화는 유리 제조시의 특성으로 인해 변화하기 어렵기 때문에 폐유리의 입도를 더욱 미세하게 분쇄하면 포졸란재료로서 더욱 더 유용할 것으로 사료된다.

3.3.2 폐유리 분말의 팽창 및 강도특성

폐유리 분말, 포졸란 재료(플라이애시, 고로슬래그 미분말, 실리카 흙)를 시멘트 중량비로 20% 치환하여 재령별 팽창량을 나타낸 팽창이력곡선은 Fig. 12와 같다.

Plain을 포함한 모든 시편에서의 팽창량은 ASTM C 1260에서 무해로 규정하고 있는 0.1% 팽창률 이내로 나타났으며, 20%의 고로슬래그 미분말을 혼입한 경우는 다른 포졸란 재료에 비해 상대적으로 팽창저감효과가 낮은 것으로 나타났다. 폐유리 분말을 혼입한 경우는 보통의 모르터보다 61~65%의 양호한 팽창저감효과를 나타내었고 0.075 mm미만의 폐유리 분말을 혼입한 경우는 플라이애시와 거의 동등한 팽창억제효과를 나타내었으며 이러한 폐유리 분말의 팽창억제효과는 Meyer, Baxter, Yixin등^{14~16)}의 연구에서와 같은 경향을 나타내고 있다.

Fig. 13과 Fig. 14는 포졸란 재료와 폐유리 분말을 시멘트 중량비로 20% 치환하여 80 °C NaOH용액에 14일 간 침지한 후의 모르터 압축 및 휨강도 시험결과이다. 실리카 흙을 혼입한 경우의 강도는 다른 혼화제를 첨가한 경우에 비해 월등히 큰 강도발현을 나타내었으며 플라이애시와 슬래그를 혼입한 경우는 혼화제를 첨가하지 않은 Plain의 압축 및 휨강도 보다 낮은 강도발현을 나타내었다. 그러나 0.075 mm미만의 폐유리 분말을 혼입한 경우는 Plain보다 약 10%의 강도증진 효과를 나타내었다. 폐유리

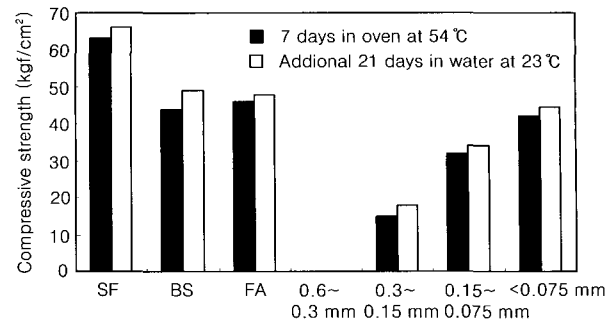


Fig. 11 Compressive strength of lime-mineral additive mixtures

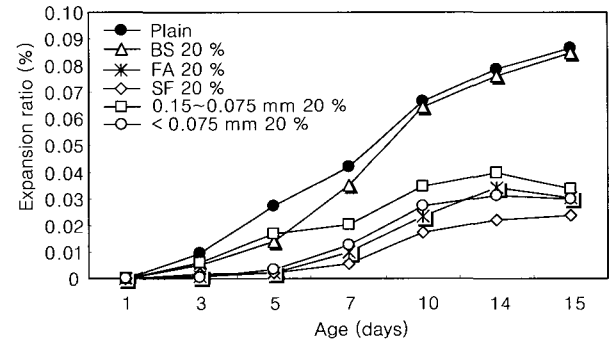


Fig. 12 Expansion time histories for mortar bar

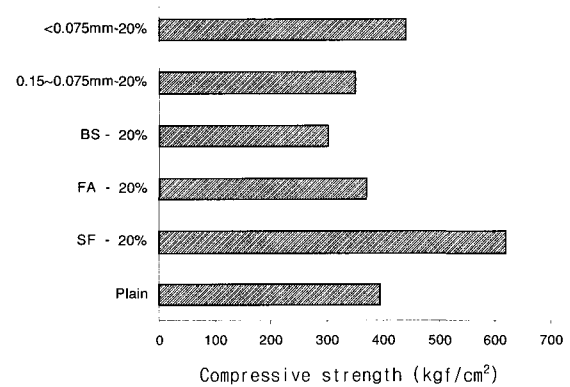


Fig. 13 Compressive strength of mortar containing 20% mineral additives

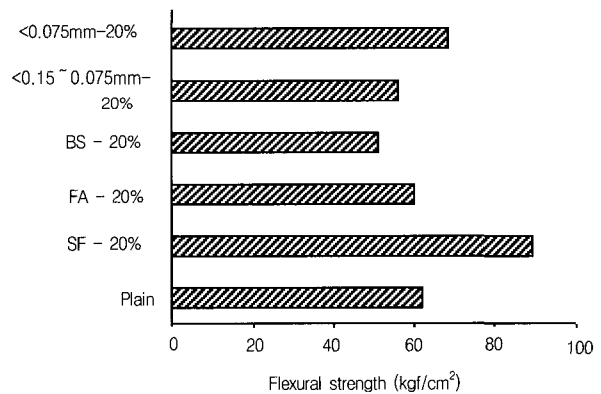


Fig. 14 Flexural strength of mortar containing 20% mineral additives

분말을 시멘트 대체비로 혼입하였을 경우 발생한 양호한 강도발현은 폐유리 안의 Na_2O 의 높은 함유량과 높은 온도에서의 포졸란 반응이 강도증진에 기여된 것으로 사료되며, 일반적으로 콘크리트 안의 알칼리가 초기의 칼슘실리케이트수화물(C-H-S : calcium silicate hydrate)의 형성에 있어서 촉매역활을 하기 때문에 초기강도가 증진된다는 Jawed와 Skalny¹⁷⁾의 연구내용이 이를 설명해주고 있다.

이와같이 폐유리 분말을 시멘트 혼화재로서의 적용 가능성을 분석한 결과 폐유리 분말의 크기는 포졸란 반응시험(lime-glass test), 팽창량 및 강도의 특성에 영향을 미치는 주요한 요인이며 0.075 mm미만의 폐유리 분말의 경우 일반적으로 사용되는 포졸란 재료(플라이애시, 고로슬래그 미분말)과 비교해 볼 때 양호한 성능을 갖는 것으로 나타났다. 이러한 폐유리를 콘크리트 혼화재로서 사용할 경우 폐유리의 매립지의 축소와 시멘트 사용량의 절약에 따른 CO_2 의 발생량을 감소시켜 환경오염의 방지에 도움을 줄 수 있을 것으로 사료된다.

4. 결 론

폐유리의 색깔, 폐유리 입도, 산업부산물의 혼입량 등에 따른 팽창 및 강도특성과 포졸란 재료로서 폐유리 분말의 사용 가능성을 분석한 결과는 다음과 같다.

1) ASTM C 1260에 준하여 시험한 폐유리의 입도에 따른 ASR 팽창특성은 폐유리의 색깔에 관계없이 2.5~1.2 mm의 폐유리 입도에서 퍼시멈 입도(pessimum size)를 나타내었다.

2) 폐유리의 입도가 2.5~1.2 mm보다 작을수록 ASR 팽창율은 점차 감소하는 경향을 보이고 있으며 갈색 폐유리의 경우 0.15~0.075 mm와 0.075 mm미만에서의 팽창률은 각각 0.037 %, 0.03 %로 2.5~1.2 mm의 갈색 폐유리 보다 85 %~88 %의 팽창저감효과를 나타내었으며 Plain보다 낮은 팽창율을 나타내었다.

3) 2.5~1.2 mm와 0.075 mm미만의 폐유리를 SEM촬영한 결과 0.075 mm미만의 폐유리에서는 2.5~1.2 mm의 폐유리에서 발견된 알칼리-실리카 반응성 겔은 확인 할 수 없었다.

4) 2.5~1.2 mm 갈색 폐유리를 혼입한 모르터에 산업부산물을 혼입할 경우 팽창량은 고로슬래그 미분말과 플라이애시의 혼입량의 증가에 따라 각각 11~86 %, 27~94 %의 팽창저감효과를 나타내었으며 강도특성을 고려해 볼 때 고로슬래그 미분말은 30 %, 플라이애시는 20 %의 혼입율이 적절한 것으로 나타났다.

5) 포졸란 재료로서 폐유리 분말의 적용 가능성을 ASTM C 593에 준하여 시험한 결과 0.075 mm미만의 입

도를 갖는 폐유리 분말만이 규준값을 초과하는 것으로 나타났다.

6) 0.075 mm미만의 폐유리 분말을 혼화재로 사용할 경우 Plain 보다 65 %의 양호한 팽창저감효과를 나타내었으며 강도는 Plain보다 약 10 %의 증진 효과를 나타내어 0.075 mm미만의 미세한 폐유리가 포졸란 재료로서 적용이 가능한 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R01-2000-00372) 지원으로 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

1. 社團法人 クリーン・ジャパンセンター “再資源化技術の開発状況調査報告書,” 1997. p.185.
2. 出雲亭一, 影山後文, “ガラス微粉末がセメントモルタルの壓縮強度發現に及ぼす影響について,” 關東學院大學工學部研究報告集, Vol. 40-1, 1996, pp.13~17.
3. 박승범, “건설폐기물의 재활용 및 처리기술개발,” 건설교통부, 2000.
4. Johnson, C. D., “Waste Glass as Coarse Aggregate for Concrete,” *Journal of Testing and Evaluation*, Vol. 2, No. 5, 1974.
5. 박승범 외 2인, “폐유리 골재를 혼입한 모르터의 알칼리 실리카 반응에 관한 연구,” 한국콘크리트학회 논문집, Vol. 13, No. 3, 2001.
6. ASTM C 593-95 “Standard Specification for Fly Ash and Other Pozzolans for Use with Lime,” American Society for Testing and Materials, 1995.
7. ASTM C 1260-94 “Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates,” American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA, 1994.
8. Diamond, S. et. al. “A Study of Expansion due to Alkali-Silica Reactions as Conditioned by the Grain Size of the Reaction Aggregate,” *Cement and Concrete Research*, Vol. 4, 1974, pp.591~607.
9. Hobbs, D. W., “Expansion due to Alkali-Silica Reaction and the Influence of Pulverized Fuel Ash,” *Proc. 5th Int. Conf. on Alkali-Aggregate Reaction*, Cape Town, 1981, pp.1~30.
10. French, W. J., “Reaction between Aggregate and Cement Paste-An Interpretation on the Pessimum,” *Q.J. Eng. Geol.*, Vol. 13, 1980, pp. 231~247.

11. 박승범 외 2인, "잔골재로 폐유리를 혼입한 콘크리트의 물리·역학적 특성에 관한 실험적 연구," 한국콘크리트학회 논문집, Vol. 13, No. 2, 2001.
12. Davies, G., et al "Use of the NBRI Accelerated Test to Evaluate the Effectiveness of Mineral Admixtures in Preventing the Alkali-Silica Reaction," *Cement and Concrete Research*, Vol. 17, 1987, pp.97~107.
13. Qian, C. X., et. al. "Mechanism of Mineral Admixture Suppressing Alkali-Silica Reaction," *Cement and Concrete Research*. Vol. 24, 1994, pp.1327~1334.
14. Shao, Y. X., et. al., "Studies on Concrete Containing Ground Waste Glass," *Cement and Concrete Research*, Vol. 30, 2000, pp.91~100.
15. Meyer, C. and Baxter, S., "Alkali-Silica Reaction in concrete with waste glass as aggregate," *Materials for a New Millennium, Proceedings of ASCE Materials Engineering Conference*, Washington, D.C., 1996, pp.1388~1394.
16. Meyer, C. and Baxter, S. "Potential of Waste Glass for Concrete Masonry Blocks," *Materials for a New Millennium, Proceedings of ASCE Materials Engineering Conference*, Washington, D.C., 1996, pp.666~673.
17. Jawed, I. and Skalny, J., "Alkalies in Cement - A review," *Cement and Concrete Research*, Vol.8, 1978, pp.37~51.
18. Jin, W. H., "Alkali-Silica Reaction in Concrete with Glass Aggregate," Thesis for Degree of Doctor of Science, Columbia University, 1998.
19. Prezzi, M, Monteiro, P. J. M., and Sposito, G., "The Alkali-Silica Reaction, Part I: Use of Double-Layer Theory to Explain Behavior of Reaction-Product Gels," *ACI Materials Journal*, Vol. 94, No. 1, 1997, pp.10~17.

요 약

산업의 발달과 더불어 폐유리의 발생량은 점차 증가되고 있다. 콘크리트에 폐유리를 사용할 경우 알칼리 실리카 반응(ASR)에 의한 팽창으로 콘크리트에 균열이 발생하여 성능저하를 일으킬 수 있다. 본 연구에서는 폐유리의 색깔(갈색, 녹색), 입도 및 폐유리로 인해 발생하는 ASR팽창을 저감시키기 위해 산업부산물의 종류(플라이애시, 고로슬래그 미분말)와 혼입율에 따른 ASR팽창과 강도특성을 분석하였다. 또한, 포졸란 재료로서 폐유리 분말의 사용가능성을 분석하였다. 연구결과, 폐유리의 색깔에 관계없이 폐유리의 퍼시범 입도는 2.5~1.2 mm로 나타났으며, 폐유리의 입도가 2.5~1.2 mm보다 작을수록 팽창은 점차 감소하는 것으로 나타났다. 또한, 폐유리에 산업부산물의 혼입은 ASR로 인한 팽창과 강도저하를 억제시키는데 효과적이며, 0.075 mm미만의 폐유리 분말이 포졸란 재료로서 적용이 가능한 것으로 나타났다.

핵심용어 : 폐유리, 유리 분말, 알칼리 실리카 반응, 플라이애시, 고로슬래그 미분말, 퍼시범 입도