

폐유리를 혼입한 섬유보강 콘크리트의 알카리-실리카 반응에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on Alkali-Silicate Reaction of Fiber Reinforced Concrete Containing Waste Glass

이봉춘* 이택우* 권혁준* 이준* 박승범**
Lee, Bong-Chun Lee, Taek Woo Kwon, Hyuk-Joon Lee, Jun Park, Seung-Bum

ABSTRACT

Using waste glass in concrete can cause crack and strength loss by the expansion of alkali-silica reaction(ASR). In this study, ASR expansion and properties of strength were analyzed in terms of brown waste glass content, and fibers(steel fiber, polypropylene fiber) and fiber content for reduction ASR expansion due to waste glass.

In this accelerated ASTM C 1260 test of waste glass, pessimum content can not be found. Also, when used the fibers with waste glass, there is an effect on reduction of expansion and strength loss due to ASR between the alkali in the cement paste and the silica in the waste glass. Specially, adding 1.5 vol.% of steel fiber to 20% of waste glass, the expansion ratio was reduced by 40% and flexural strength was developed by up to 110% comparing with only waste glass(80°C H₂O curing).

1. 서 론

유리제품의 활용이 증대됨에 따라 폐유리의 발생량도 점차 증대하고 있다. 무색의 폐유리는 대부분 재활용되고 있으나 유색의 폐유리는 재활용률이 높지 않아 매립되고 있으며 매립지의 부족 등으로 단순 매립은 점차 어려운 실정에 있다. 또한, 폐유리는 미생물로 분해되지 않기 때문에 환경친화적인 측면에서 매립은 적합하지 않아 유색 폐유리의 재활용에 대한 관심이 증대되고 있다.^(1,2,3)

최근 선진국가에서는 폐유리 재활용을 위한 과제로서 ASR의 억제와 폐유리 활용방안을 위한 많은 연구^(4,5)들이 수행되고 있으나 국내에서는 아직 이에 대한 기초적 연구조차 이루어지고 있지 않은 실정에 있다. 따라서, 본 연구에서는 먼저 국내에서 발생하는 갈색폐유리의 혼입률에 따른 ASR의 팽창 특성을 비교·평가하였고 폐유리의 혼입에 의한 ASR의 팽창을 억제하기 위한 방안으로 보강용 섬유(강섬유 : Steel fiber, PP섬유 : Polypropylene fiber)⁽⁶⁾를 혼입하여 ASR에 따른 팽창과 강도특성을 구명하였으며 폐유리의 유효활용을 위한 기초적 자료를 제시하였다.

* 정회원, 충남대학교 토목공학과 대학원

** 정회원, 충남대학교 토목공학과 교수

2. 사용재료 및 실험방법

2.1 사용재료

(1) 시멘트 및 잔골재

본 실험에 사용된 시멘트는 국내 D사 제품의 보통 포틀랜드시멘트를 사용하였으며, 화학적 조성 및 물리적 성질은 표 1과 같다. 또한, 잔골재는 주문진 표준사를 사용하였다.

표 1 포틀랜드 시멘트의 화학적 성분 및 물리적 성질

화학적 성분(%)									
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	Ig.loss	Total
21.24	5.97	3.34	62.72	2.36	0.13	0.81	1.97	1.46	100

물리적 성질								
비중	비표면적 (cm ² /g)	44 μm on Residue (%)	안정도	응결시간(분)		압축강도(kgf/cm ²)		
				초결	종결	3일	7일	28일
3.14	3200	12.5	0.02	240	370	221	298	389

(2) 페유리

본 실험에 사용된 페유리는 유리병과 유리제품으로 광범위하게 사용되고 있는 유색의 soda-lime 유리를 반응성 골재로서 사용하였으며, 국내에서 생산되는 갈색 페유리를 파쇄하여 ASTM C 1260의 시험방법에서 요구하는 골재의 입도로 구분하여 사용하였다. 사용된 갈색 페유리의 화학적 조성은 다음 Table 2와 같다.

표2 페유리의 화학적 조성

종류	성분 (%)						
	SiO ₂	Al ₂ SO ₃	Na ₂ O+K ₂ O	CaO+MgO	SO ₃	Fe ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃
갈색유리 (%)	72.1	1.74	14.11	11.52	0.13	0.31	0.01

(3) 보강용 섬유

페유리의 사용에 의해 발생하는 ASR의 팽창을 억제하기 위해 사용된 보강용 섬유는 국내 C사에서 제조된 양단후크형 강섬유와 국내 S사에서 제조된 망사형 PP섬유를 사용하였으며 보강용 섬유의 물리적 특성은 표 3과 같다.

표 3 섬유의 물리적 특성

섬유 종류	길이(mm)	지름(mm)	비중(kgf/cm ³)	인장강도(kgf/cm ²)	탄성계수(kgf/cm ²)
강섬유	36	0.6	7.85	4,500	200×10 ⁴
PP섬유	25	100×10 ⁻³	0.9	2,600	3.6×10 ⁴

2.2 섬유보강 모르타의 배합

갈색 페유리를 사용한 모르타의 ASR 팽창 및 강도특성과 보강용 섬유의 사용에 따른 ASR 팽창 및 강도특성을 평가하기 위해서 갈색 페유리 혼입률(10, 20, 30, 50, 100%), 보강용 섬유의 종류(강섬

유, PP섬유), 섬유 혼입률(강섬유:0.5~1.5vol.%, PP섬유:0.1~0.5vol.%)을 실험변수로 하여 표 4와 같은 배합을 선정하였다.

표 4 모르터의 배합

Mix No.	W/C (%)	S/C (%)	Fiber Contents (vol.%)	C(g)	W(g)	S(g)	WG(g)	SF(g)	PP(g)
Plain	0.47	225	-	440	206.8	990.0	0	-	-
WG10			-			891.0	99.0	-	-
WG20			-			792.0	198.0	-	-
WG30			-			693.0	297.0	-	-
WG50			-			495.0	495.0	-	-
WG100			-			0	990.0	-	-
WG20-SF0.5	0.47	225	0.5	440	206.8	785.5	196.4	8.1	-
WG20-SF1.0			1.0			779.0	194.7	16.3	-
WG20-SF1.5			1.5			772.5	193.1	24.4	-
WG20-PP0.1			0.1			791.8	198.0	-	0.2
WG20-PP0.2			0.2			791.7	197.9	-	0.4
WG20-PP0.5			0.5			791.2	197.8	-	1.0

2.3 실험방법

(1) 알칼리 실리카 반응성 시험

알칼리 실리카 반응성 시험은 ASTM C 1260⁽⁷⁾에 준하여 모르터 바는 W/C 0.47과 S/C는 2.25로 각 배합당 3개씩의 시편을 제작하였다. 24시간 표준양생 후 80℃의 물에 24시간 동안 저장한 후 시료들은 80℃의 밀폐된 1 N NaOH수용액 안에 14일동안 저장하면서 길이변화를 측정하였다.

(2) 모르터 압축강도 시험

폐유리 및 보강용 섬유를 혼입한 시멘트 모르터의 압축강도시험은 KS L 5105 『시멘트 모르터의 압축강도 시험방법』에 준하여 5×5×5cm 몰드를 제작하여 ASTM C 1260의 시험조건과 같은 80℃ 1N NaOH 수용액과 80℃ H₂O에 14일간 침지한 후 모르터의 압축강도를 측정하였다.

(3) 모르터 휨강도 시험

폐유리 및 보강용 섬유를 혼입한 시멘트 모르터의 휨강도 시험은 4×4×16cm의 몰드를 제작하여 압축강도 시험을 위한 조건과 동일하게 80℃ 1N NaOH 수용액과 80℃ H₂O에 14일간 침지한 후 폐유리 혼입률 및 섬유혼입에 따른 모르터의 휨강도를 측정하였다.

3. 실험결과

3.1 폐유리 혼입에 의한 팽창분석

ASTM C 1260에 준하여 측정한 갈색 폐유리의 혼입률(0~100%)에 따른 팽창이력곡선은 그림 1과 같다. 폐유리를 혼입하지 않은 Plain과 비교해 볼 때 폐유리를 혼입한 모르터 바의 팽창은 상대적으로 큰 팽창을 나타내었고 갈색 폐유리의 모든 혼입률에서 ASTM C 1260에서 규정하고 있는 0.2%의 팽창률을 초과하고 있는 것으로 나타났다. 갈색 폐유리의 혼입률에 따른 팽창비는 Plain에 비해 약 2.5~10.3배 증가하였으며, ASTM C 1260시험에 있어서는 폐유리 혼입률이 증가함에 따라 팽창이 계속적으로 증가하기 때문에 퍼시엄량은 발생되지 않았다. 이러한 원인은 ASTM C 1260의 시험방법이 1N NaOH수용액 안으로부터 알칼리 공급이 무한하기 때문에 퍼시엄량이 존재하지 않는 것으로 판단된다.

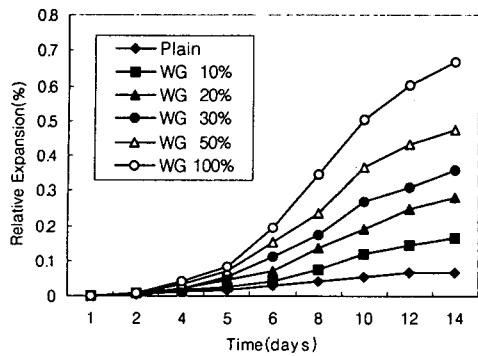


그림 1 갈색 폐유리의 팽창이력곡선

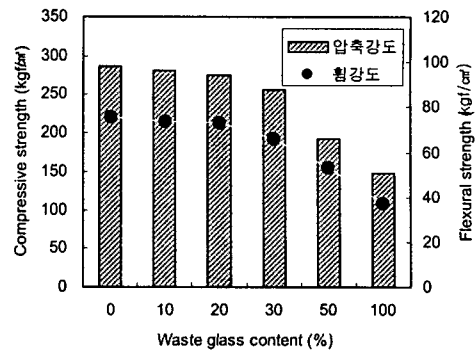


그림 2 갈색 폐유리 혼입률에 따른 압축 및 휨강도

3.2 폐유리를 혼입한 모르터의 강도특성 분석

그림 2는 ASTM C 1260에 의한 시험조건과 같은 80°C 1N NaOH수용액에 14일 침지한 모르터의 압축강도와 휨강도를 갈색 폐유리의 혼입률에 따라 나타낸 것이다. 갈색 폐유리의 혼입률이 증가함에 따라 압축 및 휨강도는 점차 감소하는 경향을 나타내었고 혼입률의 증가에 따라 압축강도는 약 2~49%, 휨강도는 3~51%의 강도 저감을 나타내고 있으며 갈색 폐유리 혼입률 20%이상의 혼입률에서 강도저하율이 증대되는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 폐유리를 혼입할 경우 폐유리에 포함되어 있는 실리카 성분에 의해 ASR이 발생하고 이로 인해 발생한 팽창압으로 모르터에 균열이 발생하여 모르터의 강도가 저하한 것으로 판단된다.

3.3 보강용 섬유를 혼입한 모르터의 ASR특성

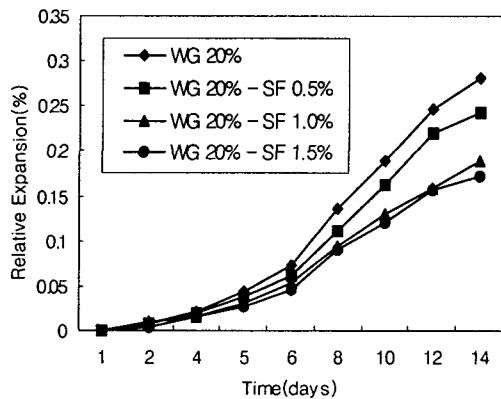


그림 3 강섬유 혼입률에 따른 팽창이력곡선

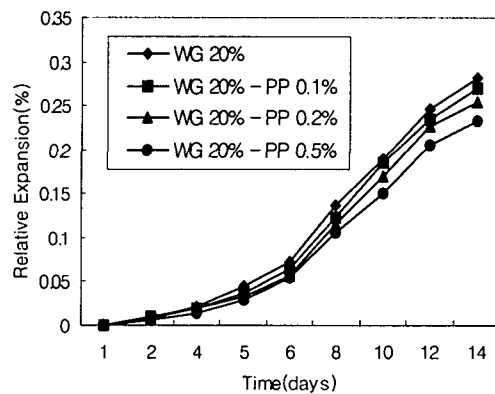


그림 4 PP섬유 혼입률에 따른 팽창이력곡선

그림 3~4는 갈색 폐유리에 강섬유 혼입률(0.5~1.5vol.%)과 PP섬유 혼입률(0.1~0.5vol.%)에 따른 모르터의 팽창이력곡선이다. 이를 살펴보면 강섬유와 PP섬유 모두 혼입량이 증가함에 따라 팽창이 감

소하는 경향을 나타내었다. 강섬유 혼입률이 1.0vol.%이상의 경우에는 ASTM C 1260에서 규정하고 있는 팽창률이 0.2%이하로 저감되는 효과를 나타내었으나 PP섬유의 경우는 팽창저감 효과는 있으나 0.2%를 상회하고 있어 더 많은 PP섬유의 첨가나 고로슬래그 및 플라이애쉬와 같은 혼화재료의 활용을 통한 ASR 억제 방안이 요구된다.

3.4 보강용 섬유를 사용한 모르터의 강도 특성

그림 5~6은 갈색 폐유리 혼입률 20%에 대해서 강섬유 혼입률을 변화시킨 후 80°C의 1N NaOH의 수용액과 80°C의 H₂O용액에 14일간 침적한 후 압축강도와 휨강도를 나타내었다. 폐유리 20%에 대한 강섬유 및 PP섬유 혼입에 따른 압축강도의 변화는 NaOH와 H₂O에 침적한 경우, 섬유 혼입률에 따라서는 현저한 강도차이를 나타내지 않았고, NaOH에 침적한 경우가 ASR반응으로 발생된 팽창으로 H₂O에 침적한 경우보다 낮은 강도발현을 나타내었다. 휨강도의 경우는 NaOH에 침적한 경우가 H₂O에 침적한 경우보다 다소 낮은 값을 나타내고 있으나 섬유의 혼입률이 증가함에 따라 휨강도는 점차 증가하는 경향을 나타내었고 NaOH와 H₂O용액에 침적한 후의 강도 폭이 점차 감소하는 경향을 나타내었다.

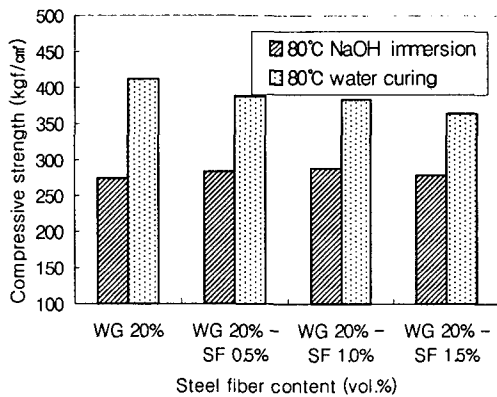


그림 5 강섬유 혼입에 따른 압축강도

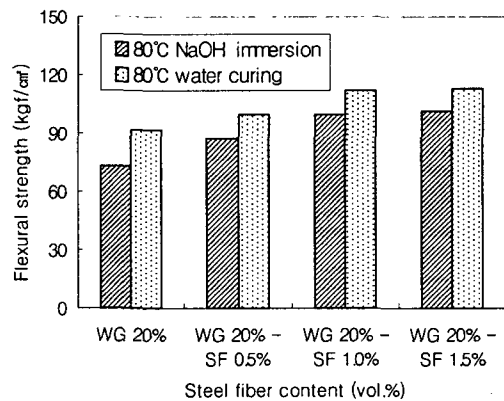


그림 6 강섬유 혼입에 따른 휨강도

80°C 1N NaOH에 침적한 갈색 폐유리 20% 혼입에 대해서 섬유 혼입률의 증가에 따른 팽창비와 80°C H₂O에 양생한 후 측정된 폐유리 20%의 휨강도를 기준으로 하여 80°C 1N NaOH에 침적한 모르터의 휨강도비와의 관계를 나타낸 것이 그림 7~8이다.

이를 살펴보면 섬유 혼입률의 증가에 따라 팽창비는 감소하는 경향을 나타내었으나 휨강도비는 증가하는 경향을 나타내었다. 강섬유를 1.5vol.% 혼입한 경우 폐유리만을 혼입한 경우에 비해 40%의 팽창저감효과를 나타내었고, 폐유리만을 혼입하여 1N NaOH에 침적시킨 경우의 휨강도는 H₂O에 양생한 경우보다 약 20%의 강도저감을 나타내었으나 강섬유를 1.5vol.% 혼입하였을 경우는 약 10%의 강도증진효과를 나타내었다. 또한, PP섬유를 혼입한 경우에도 팽창비와 휨강도 모두 강섬유를 혼입한 경우와 같은 양상을 나타내었고, PP섬유 혼입률이 0.1~0.5vol.% 증가함에 따라 약 5~18%의 팽창저감효과를 나타내었으며 휨강도는 기준 휨강도에 비해 약 8~18% 강도가 적게 나타났다.

폐유리를 사용할 경우 발생하는 ASR 팽창과 강도저하는 섬유의 혼입을 통한 시멘트 페이스트와의 양호한 부착력과 매트릭스의 구속효과로 팽창 및 강도저하를 억제하는데 효과적인 것으로 나타났다.

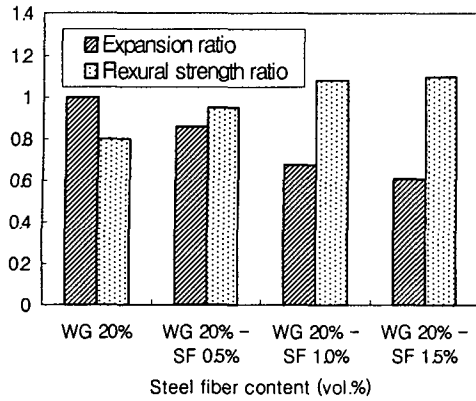


그림 7 강섬유 혼입률에 따른 팽창비와 강도비

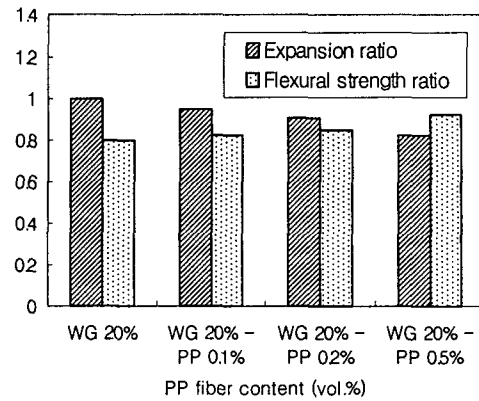


그림 8 PP섬유 혼입률에 따른 팽창비와 강도비

4. 결 론

폐유리를 혼입한 섬유보강 콘크리트의 알카리-실리카 반응에 의한 팽창특성과 모르터의 강도특성을 분석한 결과는 다음과 같다.

- (1) ASTM C1260에 준하여 수행한 ASR에 따른 팽창은 갈색 폐유리 혼입률이 증가할수록 팽창률은 증가하는 경향을 나타내었으며, 폐유리 혼입에 따른 퍼시머량은 발견되지 않았다.
- (2) 갈색 폐유리를 혼입한 모르터의 압축 및 휨강도는 갈색 폐유리의 혼입률이 증가함에 따라 점차 감소하였고, 20%이상의 갈색 폐유리 혼입물에서는 현저한 강도저하 현상을 나타내었다.
- (3) 갈색 폐유리 혼입률 20%에 강섬유를 0.5~1.5vol.% 혼입한 경우는 약 13~40%의 팽창 저감 현상을 나타내었고, PP섬유를 0.1~0.5vol.% 혼입한 경우는 약 5~18%의 팽창 저감효과를 나타내었다.
- (4) 폐유리 20%만을 혼입하여 80℃ NaOH에 침적시킨 경우의 휨강도는 기준 휨강도(80℃ H₂O 양생)에 비해 20%의 강도저감을 나타내었으나 강섬유를 1.5vol.% 혼입하였을 경우의 휨강도는 기준 휨강도에 비해 약 10%의 강도증진효과를 나타내었고, PP섬유를 0.5vol.% 혼입하였을 경우의 휨강도는 기준 휨강도에 비해 약 8%의 강도저감을 나타내었다.

참 고 문 헌

1. Johnson, C. D. "Waste Glass as Coarse Aggregate for Concrete", Journal of Testing and Evaluation, Vol. 2, No. 5, 1974.
2. 大門正機 外 2人, "ガラス粉末の水和硬化性狀-廢ガラスの建設素材としての基礎物性に關する研究", 旭硝子財團研究成果報告, 1995
3. 박승범 외, "건설폐기물의 재활용 및 처리기술개발", 건설교통부, 2000
4. 四川直宏 外 2人, "ガラス粉末を用いたモルタルの強度特性, 第49回 セメント技術大會講演集", 1995
5. 出雲淳一, 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代40-1卷, 1996
6. 박승범 외, "에너지절약형 고품능 섬유보강 콘크리트의 개발 및 설계·시공 지침안 작성에 관한 연구", 건설교통부, 1998
7. ASTM C 1260-94 "Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates". American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA, 1994.