

폐글라스울이 콘크리트의 역학적 특성에 미치는 영향

Effect of Waste Glass Wool on Mechanical Properties of Concrete

김 정 태¹

최 우 혁²

정 철 우²

이 재 용^{2*}

Kim, Jeong-Tae¹

Choi, Woo-Hyuk²

Chung, Chul-Woo²

Lee, Jae-Yong^{2*}

Korea Radioactive Waste Agency, Buksung-ro 89, Gyeongju, 38140, Korea¹

Department of Architectural Engineering, Pukyong University, Yongso-ro 45, Busan, 48513, Korea²

Abstract

Glass wool is a material that has been used as a heat insulator in various fields including construction industry. Since it is a nonflammable material, it does not generate toxic gases on fire, and thus public agencies recommend using glass wool as a heat insulator instead of other organic materials. However, repeated drying and wetting cycles can deteriorate thermal property of glass wool due to the shrinkage and reduction in pore size. For this reason, it needs to be replaced periodically, and waste materials are generated. This research aims to utilize waste glass wool as additives for increasing mechanical properties of concrete. According to the experimental results, it was found that glass wool has weak pozzolanic activity, and beneficial effect on both compressive and flexural strength. The optimum amount found in this experimental work was 0.5% volumetric addition to the concrete.

Keywords : waste glass wool, pozzolanic activity, compressive strength, flexural strength

1. 서 론

글라스울은 건축물의 내벽, 외벽, 배관, 덕트, 샌드위치 패널, 자동차, 선박, 가전 등 다양한 분야에서 단열, 불연, 흡음의 용도로 광범위하게 사용되고 있는 재료이다. 글라스울(Glass wool)은 소다 성분이 많은 저 융점의 유리를 섬유상으로 뽑아내어 만든 것이며, 글라스울의 섬유 직경은 2~10 μ m 정도로 매우 작고, 이러한 섬유 다발이 겹쳐져서 충분한 두께를 형성하여 각종 용도로 사용되게 된다. 그러나 글라스 울의 경우, 반복적인 습윤 건조의 사이클을 겪게 되면, 특유의 다공질 구조의 특성 상 수분의 이동으로 인한 형태의 변형 및 수축이 필연적으로 발생하게 되므로 단열용으로 사용되는 경우 단열 효과가 시간이 지날수록

점점 감소하게 된다. 따라서 배관용 단열재로서 글라스울이 사용되는 경우에는 3~4년 주기로 교체를 하는 것을 원칙으로 한다. 이러한 경우에 발생하게 되는 글라스울 폐기물의 대부분은 글라스울의 생산회사로 보내어져 새로운 글라스울을 생산하는 재료로서 재활용되는 경우가 대부분으로 보고되어져 있다.

글라스울의 경우 이산화규소(SiO₂)성분이 매우 풍부하기 때문에, 만약 이러한 이산화규소 성분이 비결정질의 상태로 존재한다면, 콘크리트에 혼입되는 경우 콘크리트에 존재하는 수산화칼슘과 반응하여 강도발현물질인 C-S-H를 생성할 가능성이 충분히 존재한다. 또한 글라스울이 콘크리트 내부에 잘 분산되어 진다면, 짧은 단섬유의 보강으로 강도증진 효과도 기대할 수 있다. 따라서 폐기되는 글라스울이 콘크리트용 보강재료로서 사용될 수 있는지 실험적으로 증명할 수 있다면, 폐글라스울의 유용한 재활용 방안을 제시할 수 있을 것으로 사료된다. 또한 현재까지는 폐유리, 유리섬유 등 유리 관련 제품들의 콘크리트 혼입에 따른 영향에 대한 연구는 상당 부분 진행이 되어져 왔으나

Received : January 20, 2016

Revision received : February 3, 2016

Accepted : February 11, 2016

* Corresponding author : Lee, Jae-Yong

[Tel: 82-51-629-6092, E-mail: jylee@pknu.ac.kr]

©2016 The Korea Institute of Building Construction, All rights reserved.

[1,2], 글라스울을 이용하여 콘크리트의 물성을 분석한 연구 사례는 부족한 것으로 조사되어, 이에 대한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 글라스울 자체의 물성을 확인하고, 포졸란 반응성을 평가하여, 콘크리트에 혼입하였을 시 콘크리트의 역학적 성능에 미치는 영향을 파악하고자 한다. 이를 통해 플랜트 등의 배관시설에서 교체되는 보온재인 글라스울을 콘크리트용 보강재료로서 사용될 수 있는지 여부를 판단하고, 자원 재활용의 새로운 예시를 제시하고자 한다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험 계획

본 연구에서는 우선적으로 글라스울이 가지는 화학적 미세구조적 특성을 XRF 및 XRD를 이용하여 확인하고, 28일 재령에서 압축강도 및 휨 인성 실험을 진행하여 폐글라스울이 콘크리트의 역학적 성질에 미치는 영향을 파악하고자 하였다. 또한, 폐글라스울 미분말의 포졸란 반응성을 측정하여, 시멘트를 대체하는 재료로서의 활용 가능성도 평가하고자 하였다. 이를 통해 폐글라스울이 콘크리트에 미치는 영향을 종합적으로 평가하여 재활용 가능성을 제시하고자 한다.

2.2 실험 방법

2.2.1 사용 재료

시험체 제작에 사용된 시멘트는 H사의 1종 보통포틀랜드 시멘트로 물리적 성질은 Table 1과 같다. 폐글라스울은 폐기되기 직전의 재료를 수급하여 일부분을 절취한 후 사용하였다. 잔골재로는 KS L ISO 679(Methods of testing cements -Determination of strength) 기준에 준하는 주문진 표준사(비중 2.6g/cm³)를 사용하였으며 굵은 골재로는 KS F 2526(Concrete aggregate) 기준에 준하는 콘크리트용 골재(비중 2.6g/cm³)을 사용하였다. 배합수는 불순물이 혼입되지 않은 부산광역시의 상수도를 사용하였다.

Table 1. Physical properties of cement

Cement	Specific gravity (g/cm ³)	Blaine (cm ² /g)	Setting time(hr:min)		Autoclave expansion	Compressive strength (MPa)
			Initial	Final		
C	3.15	3,440	3:40	4:30	0.18	58.6

2.2.2 XRF 및 XRD 분석

폐글라스울의 화학적 성분은 XRF 장치(XRF 1700, X-ray Fluorescence spectrometer, Shimadzu, Japan)를 사용하여 확인하였으며, 폐글라스울의 광물학적 특성을 확인하기 위하여 XRD 장치(Ultima IV X-ray diffractometer, Rigaku, Japan)를 활용하였다.

2.2.3 배합

본 실험에 사용된 콘크리트 배합의 상세는 Table 2에 나타나 있다. 본 실험에 사용된 물시멘트비(w/c)는 각각 0.3 및 0.5로, 이는 고강도 콘크리트(w/c 0.3) 및 일반강도 콘크리트(w/c 0.5)의 영역에서 폐글라스울의 혼입이 콘크리트의 물성에 미치는 영향을 파악하기 위함이다. 콘크리트의 배합은 시멘트, 굵은 골재, 잔골재를 섞은 후 절취된 폐글라스울 시편의 일부를 각각 1cm 크기로 잘게 쪼개어 투입하였다. 준비된 재료는 배합용 믹서를 통해 재료를 30초간 건비빔 한 후, 물을 투입하고 1분 30초간 배합하였다. 각 배합에서 폐글라스울의 혼입률은 전체 콘크리트의 체적의 0.5% 및 1%로 하여, 폐글라스울의 혼입률에 따른 효과를 확인하고자 하였다.

배합 후, KS F 2403 콘크리트의 강도시험용 공시체 제작 방법에 따라 공시체를 제작하였다. 압축강도 공시체의 경우 직경 10cm 길이 20cm의 원주형 공시체를 사용하였으며 휨 인성 시험 공시체의 경우 150mm×150mm×550mm 크기의 각주형 몰드에 타설하였다. 콘크리트의 배합 후 각 몰드 부피의 1/3만큼 넣고 25회 다짐을 하였으며 이를 3번 반복하여 콘크리트 공시체를 타설하였다. 타설이 끝난 직후 콘크리트 몰드의 상부 표면을 불투수성의 필름으로 덮어 콘크리트 표면의 수분 증발을 막았으며, 1일이 지난 후 필름을 제거하고 몰드를 탈형한 후, 이를 포화 수산화칼슘 용액에 27일간 상온 (23±2℃)에서 수중양생 하였다.

Table 2. Mix proportions of concrete

Unit (kg/m ³)	W/C	Water	Cement	Coarse aggregate	Fine aggregate	Water reducing agent
High strength	0.3	209.8	667	954.7	548	1.34
Low strength	0.5	211.2	400	1097	629.7	0.8

*An input of water reducing agent : 0.2% of cement weight

2.2.4 압축강도

압축강도 측정은 KS L 5105 규정에 따라 실시하였으며, 재령 28일 강도를 측정하였다. 압축강도를 측정하기 위한 실험장비는 Shimadzu사(Japan)의 Universal Testing Machine (UTM, UH-F100A)을 사용하였으며, 하중재하 속도는 1mm/min 으로 하였다.

2.2.5 휨인성 측정

콘크리트의 휨강도 및 휨인성 측정은 KS F 2566 “섬유 보강 콘크리트의 휨성능 시험방법”을 이용하여 측정하였다. 휨인성 측정법을 사용한 이유는 하중 재하속도를 늦추고 변위제어 방식을 통해 배합시 단섬유 형태로 혼입된 폐글라스울이 휨인성에 미치는 영향을 확인하기 위함이었다. 휨인성 시험에 대한 시험장치의 개요도 및 실제 시험체의 모습을 Figure 1에 나타내었다. 휨인성 시험은 4점 재하(Four point bending) 방식을 활용하였으며, 각 지점간의 거리는 150mm로 두었다.

시험의 정확성을 기하기 위하여 각주형 공시체의 중립축을 정확하게 표기한 후, 중립축에 Guide bar가 위치하도록 고정하였으며, Guide bar에 설치된 LVDT를 통하여 하중 재하시 중립축에서의 처짐을 측정하였다. 하중 재하 속도는 0.05mm/min으로 동일하게 고정하여 하중 변위 곡선 데이터를 측정하였으며, 이의 최대하중을 이용하여 휨강도를 계산하였다.

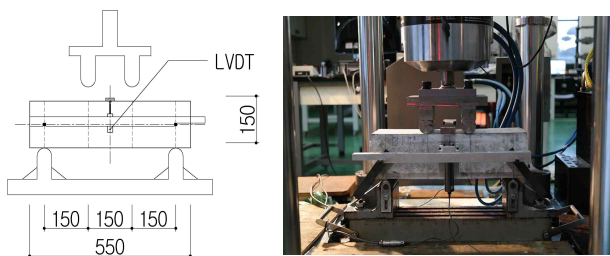


Figure 1. Text configuration for flexural strength and toughness measurement

2.2.6 포졸란 반응성

글라스울 미분말의 포졸란 반응성을 측정하기 위해, Luxan et al.[3]이 제안한 “Rapid evaluation of pozzolanic activity of natural products by conductivity measurement”방법을 활용하였다. 본 실험에서는 수산화

칼슘과 초순수를 이용하여 수산화칼슘 포화용액을 만든 후, 용기에 300mL의 수산화칼슘 포화용액과 16g 폐글라스울 분말 시료를 넣고 40℃에서 교반한 후, 초기용해도 값이 낮은 포졸란재에 의한 데이터 편차를 줄이기 위해 4시간 동안 40℃상태에서 시간에 따른 전기전도도의 변화를 관찰하였다. 또한, 4시간 동안의 측정 이후, 상온에 노출시켜 온도가 25℃에 도달하였을 때, 최종적인 전기전도도를 측정하였다. Table 3에 나타난 바와 같이 전기전도도의 초기값과 최종값의 차이를 이용하여 폐글라스울의 포졸란 반응성을 평가하였다.

2.2.7 미세구조

폐글라스울을 혼입한 콘크리트의 미세구조와 계면결합 형태를 확인하기 위하여 압축강도 측정 후, 파괴된 단면에서 시료를 추출하여 SEM(Scanning electron microscope, Tescan, Czech, VEGA II LSU)촬영을 하였다. 배율은 500배 및 1,000배로 상황에 따라 조절하여 관찰하였다.

Table 3. Evaluation of pozzolanic activity using electrical conductivity measurements[4]

pozzolanic activity	Variation on conductivity (mS/cm)
Non pozzolanic	< 0.4
Variable pozzolanocity	0.4~1.2
Good pozzolanocoty	> 1.2

3. 실험결과

3.1 폐글라스울의 물리적 화학적 성질

Figure 2는 폐글라스울의 XRD 패턴을 나타낸 것이다. Figure 2에 따르면 폐글라스울은 약간의 quartz 결정상을 제외하고는 피크의 대부분이 넓은 밴드 형태로 나타나 전형적인 비결정질 실리카의 패턴을 보였다. 폐글라스울의 형상 및 이미지는 Figure 3에 나타나 있다.

Figure 3의 SEM 이미지에 따르면, 폐글라스울은 약 10μm에서 30μm의 범위에 분포하는 다양한 직경을 가지는 섬유다발로 구성되어 있는 것을 확인할 수 있다. 통상 비결정질의 실리카는 그 크기에 따라 시멘트의 입경정도로 작아지게 되면 포졸란 반응을 하게 되고, 잔골재의

입경에 분포하게 되면 알칼리 골재반응을 할 가능성이 존재하는데[4,5], XRD 분석결과 및 SEM에서 관찰한 바에 따르면, 폐글라스울은 포졸란 반응을 할 가능성이 더욱 높다고 판단된다.

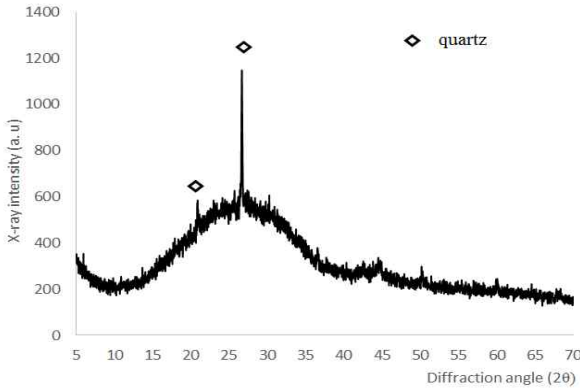


Figure 2. XRD pattern of waste glass wool

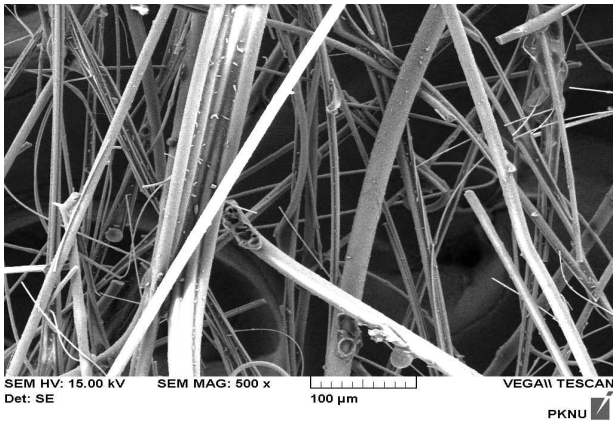


Figure 3. SEM image of waste glass wool

3.2 압축강도

Figure 4는 폐글라스울의 혼입률에 따른 압축강도의 변화를 나타낸 그래프이다. Figure 4에 따르면, 물시멘트비에 관계없이 폐글라스울 0.5%가 혼입되었을 때 최대 압축강도를 발현하는 것으로 나타났다. 물시멘트비 0.3일 경우 폐글라스울 혼입률 0.5% 시험체는 67.32MPa의 압축강도를 보였으며, 이는 플레인 콘크리트의 60.02MPa에 비해 약 10%이상의 강도가 증가한 효과를 보였다. 이는 물시멘트비가 0.5인 시험체에서도 마찬가지로, 폐글라스울 혼입률 0.5%일 때 압축강도 37.44MPa로 플레인 콘크리트의 33.50%에 비해 약 10%의 강도 상승효과를 보였다. 그러나 폐글라스울 혼입률이 1%로 증가하였을 때, 압

축강도가 감소하는 것 또한 확인할 수 있다. 이는 일반강도인 물시멘트비 0.5인 시험체에서는 두드러지게 나타나지 않았지만, 고강도용 시험체인 물시멘트비 0.3인 시험체에서는 명확하게 드러난 것을 확인할 수 있다.

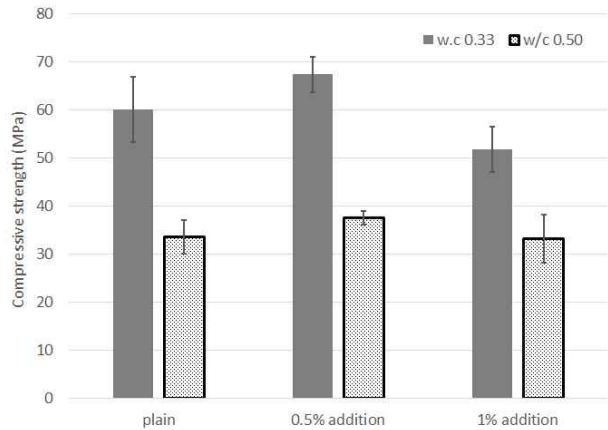


Figure 4. 28 day compressive strength of concrete incorporating waste glass wool

3.3 휨강도 및 휨인성

Figure 5는 폐글라스울의 혼입률에 따른 휨강도의 변화를 나타낸 그래프이다. 물시멘트비 0.3인 콘크리트에서는 폐글라스울 0.5%가 혼입된 경우 휨강도가 가장 높게 나타났다. 그러나 혼입률이 1%로 증가하는 경우, 압축강도와 마찬가지로 휨강도 또한 감소하는 것으로 나타났다. 그러나 물시멘트비 0.5인 경우에는 폐글라스울의 혼입으로 인한 휨강도의 증가를 확인할 수 없었다.

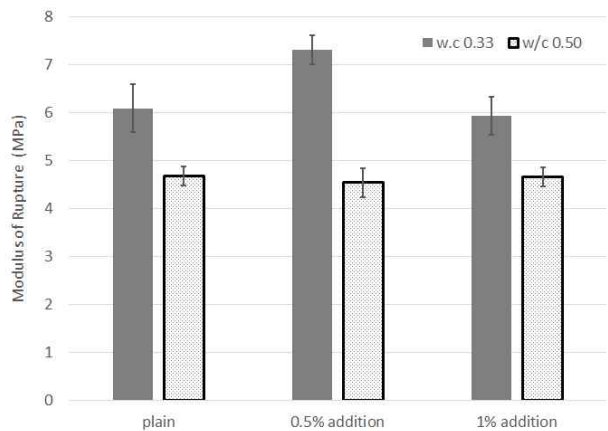


Figure 5. 28 day flexural strength of concrete incorporating waste glass wool

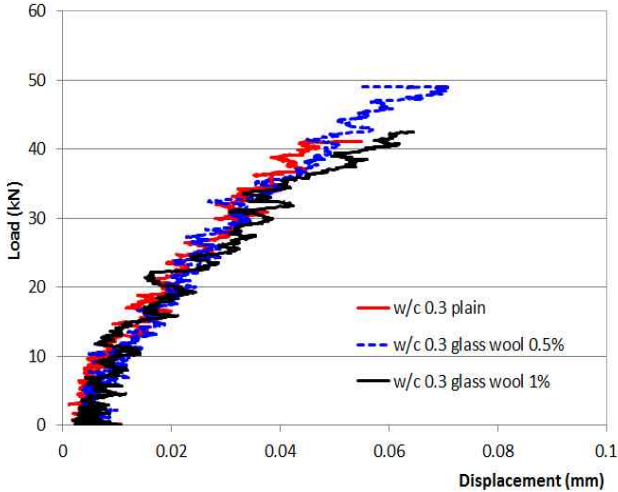


Figure 6. Load vs. displacement curve of concrete incorporating waste glass wool(w/c 0.3)

Figure 6은 폐글라스울을 혼입한 콘크리트(w/c 0.3)의 하중-변위 곡선을 나타낸 그래프이다. 폐글라스울 혼입 콘크리트는 변위 0.08mm 지점에 도달하였을 때 콘크리트의 파괴가 일어났으며, 이는 KS 기준 및 JCI-SF4에서 언급하고 있는 최대 측정 변위인 $L/150$ 인 3mm의 약 $1/50$ 수준으로(ASTM C의 경우 $L/200 = 2\text{mm}$), 일반 콘크리트와 같은 취성적인 거동을 보임을 알 수 있다. 본 실험 결과에 따르면, 폐글라스울의 혼입은 역학적 측면에서 강도상승의 효과는 기대할 수 있으나, 휨인성 측면에서의 기여도는 크지 않음을 확인할 수 있었다.

3.4 포졸란 반응성

Figure 4 및 5에 따르면 폐글라스울 0.5%를 혼입하는 경우 대체적으로 폐글라스울의 압축강도 및 휨강도가 상승하는 것을 확인하였다. 폐글라스울의 경우 앞서 언급된 바 대로 비결정질 실리카이므로 포졸란 반응성을 가질 수 있는데, 이의 포졸란 반응성 분석을 통해, 실제 폐글라스울과 시멘트 페이스트의 계면에 화학적 결합이 일어날 수 있는지의 여부를 확인하고자 포졸란 반응성 실험을 진행하였으며, 이를 위해 폐글라스울 분말을 40°C의 포화수산화칼슘 수용액에 침지시켜 4시간 동안의 전기전도도 변화를 측정하여 Figure 7에 나타내었다.

Figure 7에 따르면, 폐글라스울 분말의 경우 초기 전기전도도 값은 7.28mS/cm로 나타났으며, 시간이 지날수록 전기전도도 값이 서서히 떨어지는 것을 확인할 수 있었다.

이는 폐글라스울의 실리카 성분이 수산화칼슘과 반응하여, 불용성의 고체(C-S-H)를 생성시키게 되면, 내부 수용액 상에서 칼슘 및 수산화이온의 농도를 줄이게 되어, 전기전도도를 떨어뜨리기 때문이다. 최종적으로 얻어진 전기전도도의 값은 6.45mS/cm로 나타났다.

포졸란 반응성을 평가하기 위한 초기 전기전도도와 최종 전기전도도 값의 차이는 0.83mS/cm로 나타났다. Table 3에 따르면, 포졸란 반응성을 가지기 위해서는 0.4mS/cm 이상의 수치를 가져야 하며, 완전한 포졸란 반응성을 가지는 값으로는 1.2mS/cm로 나타나 있다. 본 실험에 사용된 폐글라스울의 경우, 중간 범위에 위치하여, 포졸란 반응성을 가지지만, 그 정도는 크지 않음을 확인할 수 있었다. 이는 폐글라스울이 일정량의 결정상 quartz를 일정량 함유하고 있기 때문으로 사료된다.

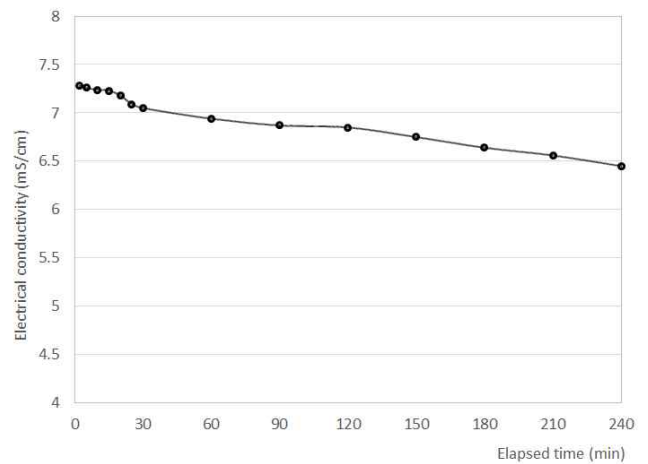


Figure 7. Changes in electrical conductivity of suspension containing saturated lime solution

3.5 계면결합 형태

폐글라스울 0.5% 및 1%가 혼입된 콘크리트의 파괴 단면 미세구조 형상은 각각 Figures 8 및 9에 나타나 있다.

폐글라스울의 경우, Figure 8과 같이 시멘트 페이스트의 계면에 잘 접촉되어져서 존재하는 경우도 있었지만, Figure 9와 같이 잘 접촉되지 못하여 따로 존재하는 경우도 다수 발생하였다. 특히 Figure 8에 나타난 형상으로 볼 때, 균열의 진행방향에 폐글라스울이 배치되게 되면 이로 인해 균열의 진행을 다소 억제할 수 있을 것으로 판단된다.

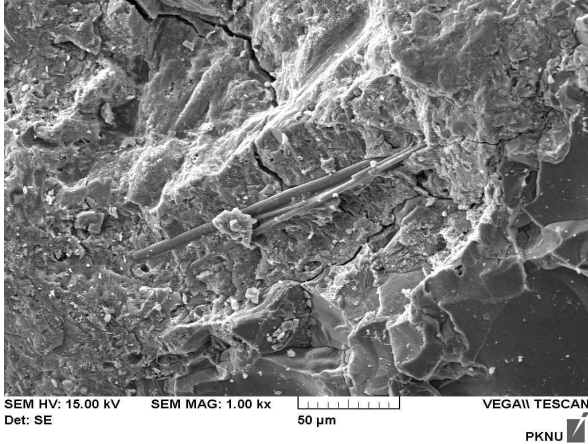


Figure 8. Microstructural image of concrete incorporating 0.5% waste glass wool

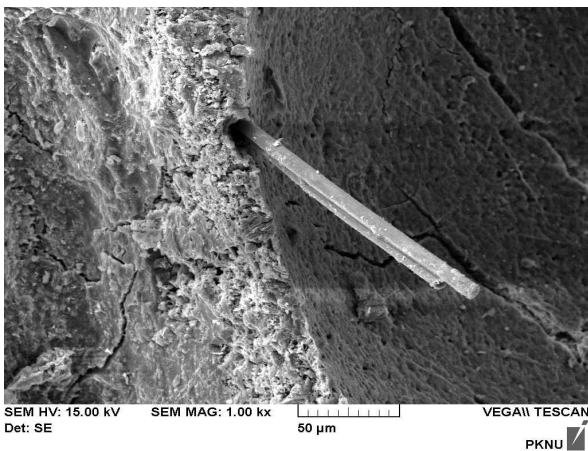


Figure 9. Microstructural image of concrete incorporating 1% waste glass wool.

4. 고 찰

본 연구에 나타난 Figure 6의 휨인성 실험을 위한 하중-처짐 곡선은 최대 하중까지만 실험을 지속한 상태에서 얻은 데이터이다. 본 실험에서는 최대하중 이후의 post peak 거동을 확인하기 위하여 변위제어 방식을 사용하였음에도 불구하고, 제어가 정밀하지 못하여 휨인성 측면에서 의미 있는 결론을 도출하기는 어려웠다. 글라스울이 micro-fiber이고 섬유질의 성질 자체가 취성적임을 감안하면, post-peak 곡선을 확보하여 휨인성 평가를 하더라도 일반 plain 콘크리트와 큰 차이가 없을 것으로 판단은 되나, Figure 6에 주어진 데이터만으로는 이를 단정할 수는 없기 때문에, 추후 보다 정밀하고 최적화된 실험제어를 통

해 이에 대한 물성을 평가할 필요성이 존재한다.

폐글라스울의 경우 재료의 특성상 내부에 상당한 공극을 가지고 있는데, 이를 콘크리트에 혼입하는 경우, 비록 잘게 부수어서 혼입시켰다고 하더라도, 상당량의 기포 공극이 콘크리트 내부에 혼입될 수밖에 없다. 따라서 이를 충분히 제거해 주지 못한다면 내부 공극의 증가로 인해 폐글라스울을 혼입하여도 보강 효과를 충분히 얻지 못한다. 본 실험에서는 콘크리트 부피의 1%에 해당되는 폐글라스울을 혼입한 경우, 이러한 현상이 관찰되었으며, 물시멘트비가 낮아 페이스트의 유동성이 떨어지는 경우에 더욱 크게 나타나는 것으로 관찰되었다. 폐글라스울을 투입하였을 때 발생할 수 있는 이러한 현상을 개선시키기 위해서는 배합 시간을 좀 더 길게 하여 시멘트 페이스트가 폐글라스울의 미세공극 사이로 충분히 침투할 수 있도록 유도하여 내부의 공기를 제거시킬 필요가 있다. 또한 소포제와 같은 첨가제가 이러한 현상을 개선하는데 충분한 도움을 줄 수 있다고 판단된다. 폐글라스울 투입량 증가에 따른 물성의 변화는 현장에 적용하게 될 때 더욱 큰 문제점을 야기할 수 있기 때문에, 향후 추가적인 연구를 통해 반드시 이를 정량적으로 확인할 필요성이 있다고 판단된다.

본 실험에서 폐글라스울의 보강 효과는 물시멘트비가 낮고 폐글라스울의 혼입률이 0.5%인 경우에 더욱 효과적이었다. 이는 폐글라스울의 혼입에 있어서 공극 용액 및 시멘트 매트릭스와의 충분한 접촉이 필수적 요소임을 의미한다. 이러한 상태를 효과적으로 유지할 수 있다면, 포졸란 반응성 결과 및 XRD 분석 결과를 고려해 볼 때, 폐글라스울은 콘크리트 공극 용액과의 반응으로 C-S-H를 폐글라스울의 표면에 생성할 수 있게 되며, 이를 통해 주변의 시멘트 매트릭스와 화학적 결합을 이루되므로 충분한 강도증진 효과를 가질 수 있을 것으로 사료된다.

5. 결 론

본 실험에서 나타난 연구 결과는 다음과 같다.

- 1) 폐글라스울은 비결정질의 실리카로 구성되며, 약한 포졸란 반응성을 가진다.
- 2) 콘크리트 체적의 0.5%에 해당되는 폐글라스울을 혼입하면 압축강도 및 휨강도의 증가가 관찰되었으나, 콘크리트 체적의 1%에 해당되는 폐글라스울을 혼입

하게 되면 압축강도 및 휨강도의 증가는 관찰할 수 없었다.

- 3) 실험적 한계로 인해 폐글라스울이 콘크리트의 휨인성에 미치는 영향은 확인할 수 없었다.
- 4) 폐글라스울에서 보강 효과는 폐글라스울과 시멘트 계면과의 접착이 충분해야만 발생하는 것으로 나타났다.

요 약

글라스울(Glass Wool)은 건설 현장 및 여러 다양한 분야에서 단열재로 사용되고 있다. 글라스울의 경우 불연재료이며 화재시 유해한 가스를 발생시키지 않으므로, 단열재로서의 사용이 더욱 권고되고 있는 상황이다. 그러나 글라스울이 반복적인 습윤 건조의 사이클에 노출되면, 공극의 감소 및 수축이 발생하여 단열성능을 잃게 되므로, 주기적인 교체가 필요하다. 본 연구에서는 이러한 폐글라스울을 콘크리트용 첨가재료로 활용하여 역학적 성능을 개선하고자 하는 시도를 하였다. 실험 결과에 따르면 폐글라스울은 약한 포졸란 반응성을 가지며, 압축강도 및 휨강도의 증가 효과를 가짐을 알 수 있었으며, 이를 위한 최적의 폐글라스울 혼입량은 콘크리트 체적의 0.5%에 해당되는 것으로 나타났다.

키워드 : 폐글라스울, 포졸란 반응, 압축강도, 휨강도

Acknowledgement

This work was supported by a Research Grant of Pukyong National University(2015Year).(C-D-2015-0589).

References

1. Park SB, Lee BC. Mechanical Properties of Steel Fiber Reinforced Concrete Using Waste Glass. *Journal of the Korea Concrete Institute*. 2002 Dec;14(6):1032-39.
2. Park SH. Characteristics and Use of Glass Fiber Reinforced Concrete. *Journal of the Korea Concrete Institute*. 1990;2(2):26-33.

3. Luxán MP, Madruga F, Saavedra J. Rapid evaluation of pozzolanic activity of natural products by conductivity measurement. *Cement and Concrete Research*. 1989 Jan;19(1):63-8.
4. Shi C, Wu Y, Riefler C, Wang H. Characteristics and pozzolanic reactivity of glass powders. *Cement and Concrete Research*. 2005 May;35(5):987-93.
5. Polley C, Cramer SM, Cruz RVDL. Potential for using waste glass in portland cement concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 1998 Nov;10(4):210-9.