

폐 FRP 선박의 로빙층에서 분리한 유리섬유의 재활용 II: 섬유강화 콘크리트의 물성에 관한 연구

김용섭¹ · 이승희² · 윤구영^{3,†}

¹홍익대학교 과학기술대학 조선해양공학과

²홍익대학교 과학기술대학 화학시스템공학과

³홍익대학교 과학기술대학 기계정보공학과

Recycle of the Glass Fiber Obtained from the Roving Cloth of FRP II: Study for the Physical Properties of Fiber-reinforced Concrete

Yong Seop Kim¹, Seung Hee Lee² and Koo Young Yoon^{3,†}

¹Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Hongik University, Jochiwon, Chungnam 339-701, Korea

²Department of Chemical System Engineering, Hongik University, Jochiwon, Chungnam 339-701, Korea

³Department of Mechano-Informatics and Design Engineering, Hongik University, Jochiwon, Chungnam 339-701, Korea

요약

폐FRP의 로빙층을 매트층과 수지로부터 분리하여 섬유 형태의 ‘F섬유’를 얻었으며, 이것의 용도로 콘크리트 제품 또는 구조물을 고려하였다. 골재는 시멘트의 2.45 배(무게비)로 하고 F섬유(밀도 1.45)는 시멘트와 골재의 부피비로 계산하여 만든 공시체에 대한 휨강도를 실험 하였다. 1%의 F섬유를 갖는 것이 양생한 지 28일째 되었을 때 넣지 않은 것에 비해 23%의 강도 증가를 보였다. 그러나 0.5%를 포함한 공시체의 경우는 강도의 변화를 보이지 않음으로써 강도 보강용으로 쓰일 수 있는 최소 혼입량이 0.5% 보다는 크다는 것을 알았다. 철근 콘크리트 시제품인 벤치 플룸의 경우 1% F섬유를 포함할 때 포함하지 않은 것에 비해 휨강도가 21% 증가하였다.

Abstract – Recycling glass fiber, ‘F-fiber,’ was obtained by the separation of the roving layer from waste FRP and the concrete products or structures were considered for its application. Experiment was carried out for the bending strength of aggregate (2.45 of cement) by weight and F-fiber (density of 1.45, volume ratio to all of the aggregate and the cement). Whereas the specimen containing 1% F-fiber showed the bending strength 23% higher than that without F-fiber after curing for 28 days, the one with 0.5% F-fiber did not give any change. It could be found, therefore, that the minimum mixing amount should be larger than 0.5% for the strength reinforcement. One of the reinforcing concrete product, bench flume, containing 1% F-fiber showed 21% increment of bending strength in contrast to that without F-fiber.

Keywords: Waste FRP(폐섬유강화 플라스틱; Fiber Reinforced Plastic), FRP-Recycling(FRP재활용), Glassfiber(유리섬유), F-fiber(F섬유), FRC(섬유강화콘크리트; Fiber Reinforced Concrete)

1. 서 론

폐FRP의 재활용 연구는 지난 30여 년간 일본을 선두로 소위 선진국에서 많은 연구(Shoji[2003], Bartholomew[2004])가 진행되어 왔으며, 크게 두 가지 분야로 나눌 수 있다. 첫째는 폐기물의

효율적(경제적)처리를 통한 에너지 전환이고 두 번째는 폐기물의 고부가가치를 통한 물질의 변화이다. 우리나라에서도 관련법의 보완과 함께 연구의 중요성이 강조되어 왔다(이은재 등[2007]). 첫 번째 에너지 전환으로는 소각하여 열에너지를 이용하거나 열분해하여 건류가스 등의 자원화를 꾀하는 것이다. 두 번째로 거론되는 방법은 기계적 파쇄와 분쇄를 거쳐 화학적 처리를 거친 후 재활용 또는 재사용하거나, 부가가치를 갖는 2차 물질을 개발하는 방

*Corresponding author: kyyoon@hongik.ac.kr

법이다. 이 외에도 앞의 방법을 공정단계별로 융합하는 방법이 있다(Bartholomew[2004], 윤구영 등[2006]). 더욱이 최근에 와서는 폐FRP의 재처리에 있어서 친환경적 측면 즉 폐기물 재처리 공정상의 친환경성(처리공정 상의 분진과 소음 그리고 2차적 환경 유해물질 배출 등의 절감)과 또한 폐기물의 재자원화 사업의 사회적 요구(Defosse[2003], Shibata and Zairyo[2006])가 크게 대두 되었다.

소각의 경우 FRP 제조 시 사용한 수지가 환경오염을 일으킬 수 있으며, 열분해하는 경우 유리섬유가 완전히 연소하지 못하는 이유로 로에 잔재한다는 단점과 경제성이 떨어지는 단점이 있다. 또한 폐FRP를 분쇄하는 등의 단순재처리는 FRP의 강도로 인해 투입되는 에너지가 과다하여 경제성이 없다. 따라서 폐FRP의 재자원화(고부가가치화)는 투입되는 에너지를 감소시켜 경제성을 부여하고, FRP의 매우 다른 두 가지 성분, 무기물(유리섬유)과 유기물(수지)을 효과적으로 분리하는 공정이 선결과제라 하겠다. FRP의 두 가지 구성 중 유리섬유는 성분의 특징상 구조물의 강도 보강용으로 쓰일 수 있으며, 수지성분은 보다 높은 고부가가치 분야로의 활용이 가능하다(김용섭과 윤구영[2002]). 예를 들면 수지성분의 가스화 또는 고형 연료화를 통한 고부가가치 재생에너지로 활용될 수 있다.

폐FRP에서 유리성분만을 추출하는 공정은 매우 어려우면서도 고비용의 공정을 포함하고 있다. 또한 추출공정의 특성에 따라서 최종 추출물(유리섬유)의 재활용처 및 부가가치의 차이가 매우 큰 것으로 보고 되어 왔다. 본 연구진은 폐FRP 내의 유리섬유 중 로빙층(roving cloth)을 활용하는 연구를 실행하고 있다. FRP 내의 유리섬유는 수지를 흡수하여 형상을 구성하는 매트층(fiber glass mat)과 강성을 담당하는 로빙층으로 이루어져 있으며 이 두 층이 번갈아 포개져 있는 위에 표면 매트층(surface mat)이 덮여 있다(Fig. 1). 로빙층은 접직된 형상의 유리섬유 다팔을 격자구조로 직조한 것이며 FRP의 제작과정 중 적절한 양의 수지가 도포되어 있어서 로빙층을 길이로 잘라 얻은 유리섬유(이하 'F섬유(F-fiber)')는 내구성을 지닌 섬유형 구조물 보강재로 활용될 수 있는 것이다(윤구영 등[2007]).

FRP의 40%가 유리섬유이며, 60%가 수지이고(길상인 등[2005]) 로빙층에는 75% 정도가 유리섬유이며, 25%가 수지(윤구영 등[2007])인 것으로 보고하였다. 결과적으로 폐FRP의 재자원화에 있어서 로빙층의 중요성은 대부분의 유리섬유를 추출한다는 것이고, 부수적으로는 FRP의 성분의 70-80%의 수지 성분을 분리할 수 있

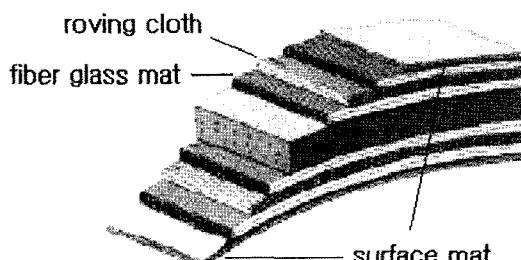


Fig. 1. Layers of FRP.

다는 것이다. 이러한 결과는 폐FRP의 재생에너지 공정의 효율성을 크게 높일 수 있는 방법이 되는 것이다. 그러므로 로빙층의 추출과 재활용 혹은 재자원화 연구는 폐유리섬유의 단순 재활용 단계가 아닌 폐FRP 재자원화 연구의 중요분야로 대두되고 있다.

면포형태의 유리섬유(laminated glass-fiber)에서 개별 유리섬유(접직된 유리섬유 다팔에 수지성분이 도포된)를 분리하여 섬유보강재(fiber-reinforced material)로 활용하는 연구는 아직 초기 단계이다(윤구영[2007], 윤구영 등[2007]). 그러나 지난 수년간의 연구를 통하여 콘크리트 구조물의 단순 골재 차원뿐만 아니라 강도 보강용 골재로 사용 할 수 있음이 보고 되었다(Litherland *et al.*[1980], Majumdar[1975], Shoji[2003]). 그러나 시멘트의 환경은 강한 염기성으로 pH 12를 넘는다. 보통의 유리섬유는 이러한 염기성 상태에서 매우 약하며 인장강도를 측정하지 못할 만큼 약해진다. FRP에 쓰이는 유리섬유(E-Glass)도 내화학적 성질의 부족으로 그 동안 사용되지 못하였으나, FRP 제작과정에서 유리섬유에 수지코팅이 이루어짐으로써 염기성 용액(50 °C)에서 30일이 지나야 50% 정도의 인장강도 감소가 일어남을 알았다(이승희 등[2008]). 따라서 이 유리섬유를 콘크리트 제품의 강도 보강용으로 재활용 하는 연구가 실행되었다. 우선 자갈이나 혼화재를 사용하지 않은 단순한 모르타르(시멘트+모래+물+F섬유)를 제조하여 흡강도를 측정한 결과 강도 보강재로서의 가능성을 확인 하였다(윤구영 등[2007]). 이제 본 논문에서는 F섬유(윤구영 등[2007], 이승희 등[2008])를 콘크리트에 활용하여 자갈 등의 굵은 골재를 사용하였을 때에도 혁신적인 강도 변화를 보이는지 실용화의 가능성 있는지를 연구하였다.

2. 실험 재료 및 방법

섬유강화 콘크리트(FRC, Fiber Reinforced Concrete)를 제조할 때 F섬유를 사용하고, 공시체를 제작하여 양생한 후 압축강도와 흡강도를 측정하였다. 별개로 철근 골격을 갖는 벤치 플룸을 제작하여 시판되고 있는 시제품과의 강도 비교도 수행하였다.

2.1 실험 재료

시멘트(3.5 g/cm^3)는 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며, 모래는 주문진 표준사를, 기타 잔골재는 23 mm이하의 것을 사용하였다. 폐선박의 FRP를 적당한 크기로 절단한 후 층상으로 적층되어있는 로빙층으로부터 분리한 유리섬유(F섬유, 1.45 g/cm^3)를 5 cm로 절단하여 사용하였다. 폐FRP로부터 로빙층을 분리하는 과정에서 많은 양의 매트층과 수지가루가 발생한다. 매트층은 얇은 유리섬유들이 방향성 없이 층상으로 펼쳐져 있는 층으로 분리과정에서 유리가루의 형태로 얻어지게 된다. 본 실험에서는 부가적으로 얻어지는 유리가루와 수지가루를 F섬유와 같은 복합재료의 용도로의 가능성을 보고자 같은 공시체를 제작하였다. 발생한 매트층과 수지의 분쇄 가루도 강도 비교 실험을 위해 분리하였다. 혼화제로는 고성능 감수제(m-300, 멜라민계)를 사용하였다. 골재는 시

멘트의 2.45 배(무게비)로 하였으며 F섬유(밀도 1.45)는 시멘트와 골재의 부피비로 계산하였다.

2.2 실험 방법

F섬유를 부피비로 0.5%와 1%를 포함하는 시편을 제작하였다. 압축 강도 측정을 위해서 직경 100 mm 높이 200 mm인 원통형의 공시체를 제작하고, 휨강도 측정을 위해선 100×100×250 mm의 공시체를 제작하였다. 시제품의 강도를 비교하기 위해 철근 콘크리트 제품으로 열린 수로관 벤치 플룸(3종, 300C, 340×300×2000 mm, 철근 4 mm)을 KS F 4010에 따라 습식양생 하였다(아산 T사). 시제품을 만들기 위한 같은 콘크리트 혼합물을 압축강도와 휨강도 실험을 위해 벤치 플룸과 같은 혼합물로 공시체를 제작하였다. 공시체는 습식양생 후 20 °C의 수중에서 35일 저장하였고, 대기 중에 있던 시제품과 함께 강도 시험을 수행하였다. 강도 측정기기는 만능시험기(제일 정밀 제작)이었으며, 벤치 플룸의 휨강도 시험은 KS F 4010에 따랐다.

3. 결과 및 고찰

F섬유를 넣지 않은 것을 기준으로 1% F섬유를 포함하는 공시체에 대해 휨강도 측정을 하여 Fig. 2와 같은 결과를 얻었다. 이 때 실용화되고 있는 합성수지 폴리프로필렌(PP; polypropylene) 섬유를 1% 포함한 공시체도 함께 비교하였다.

보강재를 포함한 콘크리트 시편은 0%에 비해 모두 증가하였다. 특히 28일째 되는 날의 1% F섬유를 포함하는 공시체는 약 23%의 휨강도 증가를 보였다. 이것은 같은 양의 폴리프로필렌을 포함한 것보다 우수한 강도이다. 앞서 발표한 모르타르에 대한 실험 결과도 1.5%의 F섬유를 포함한 것이 23%의 증가(윤구영 등[2007])를 보였다. 이러한 유사한 결과는 F섬유가 시멘트 구조물에서 자갈과 같은 골재가 존재할 때에도 공시체의 강도를 증가시키는 정도는 감소하지 않음을 보인 것이다.

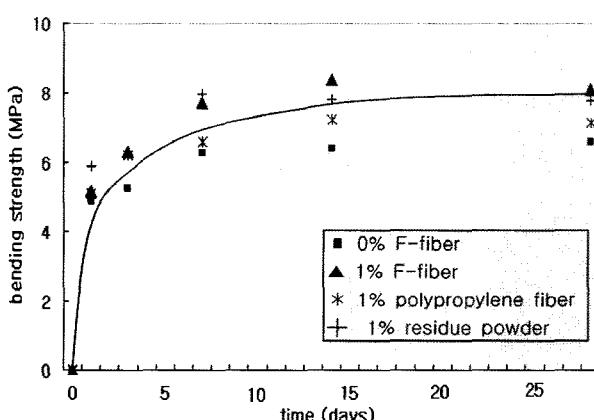


Fig. 2. Bending strength of the concrete block (100×100×250 mm) containing F-fiber after curing in the water (20 °C) for 1, 3, 7, 14, and 28 days.

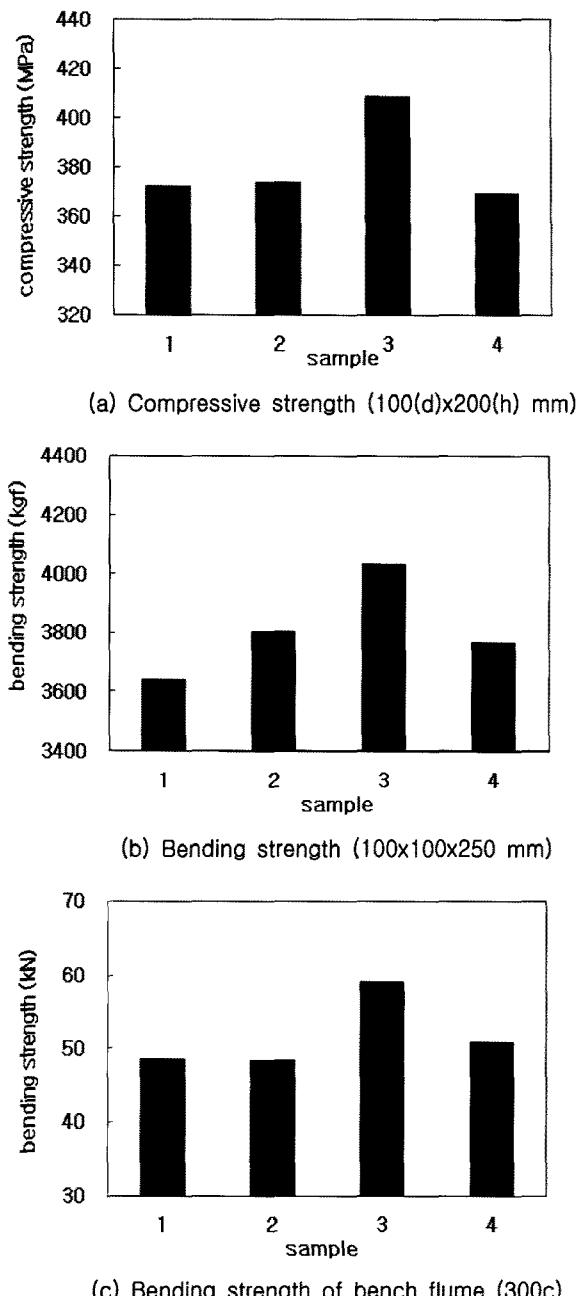


Fig. 3. (a) Compressive strength, (b) bending strength, and (c) bending strength of bench flume after 35 days: containing 1. 0%, 2. 0.5%, 3. 1.0% F-fiber, and 4. 0.5% residue powder.

Fig. 3은 철강 콘크리트 제품인 벤치 플룸(300c)을 만들기 위한 혼합물로 압축강도와 휨강도를 측정한 것이다. 압축강도(Fig. 3(a))는 0.5%의 F섬유 샘플에서는 그 효과가 미약하나 1%에서는 10%의 증가를 보였다. 휨강도(Fig. 3(b))도 1%를 포함한 것이 11%의 강도 증가를 보였으며, 벤치 플룸의 휨강도(Fig. 3(c))는 1%의 경우 21%가 넘는 증가를 보였다. 0.5% F섬유를 포함하는 것은 강도의 변화가 거의 없는 것으로 나타났으나 2배의 섬유를 첨가한 경우 강도 변화가 크게 나타난 것으로 보아 최소 혼입량을 0.5% 이상으로 보아야 하며 1% 이상에서 첨가량과 강도간의 비례관계를 조사해 볼 필요가 있다. 다른 실험에서 2% 이상의 F섬유를 첨

가한 경우 시멘트와 골재의 혼합에 문제점이 있었으며 이에 대한 보완 실험이 진행 중이다.

매트총의 유리가루와 수지가루를 1% 포함한 공시체는 F섬유만큼은 아니지만 18%의 강도 증가를 보였다(Fig. 2). 그러나 가루분을 0.5%를 포함한 시제품은 강도 증가가 나타나지 않았다(Fig. 3(c)).

4. 결 론

폐FRP의 재활용을 위해 본 연구진은 FRP의 구조를 이용하여 층상으로 분리하는 기술을 보고한 바 있다. 층상으로 존재하는 로빙총을 매트총과 수지로부터 분리하여 섬유 형태의 F섬유를 얻었으며, 이것의 용도로 콘크리트 제품 또는 구조물을 고려하였다. 이미 발표한 바 있는 모르타르 실험으로 그 가능성을 살펴보았으며, 본 연구에서는 콘크리트 공시체 및 콘크리트 시제품에 대한 강도를 실험하였다. 골재는 시멘트의 2.45 배(무게비)로 하고 F섬유(밀도 1.45)는 시멘트와 골재의 부피비로 계산하여 만든 공시체에 대한 휨강도 실험 결과 1%의 F섬유를 갖는 것이 양생한 지 28일째 되었을 때 넣지 않은 것에 비해 23%의 강도 증가를 보였다. 그러나 0.5%를 포함한 공시체의 경우는 강도의 변화를 보이지 않음으로써 강도보강용으로 쓰일 수 있는 최소 혼입량이 0.5% 보다는 커야 함을 확인하였다.

시제품의 강도를 확인하고자 철강 콘크리트 제품인 벤치 플룸을 제작하였으며 1% F섬유를 포함할 때 포함하지 않은 것에 비해 휨강도가 21% 증가하였다. 이로써 F섬유의 콘크리트 보강재에 대한 가능성은 입증되었다. 앞으로 F섬유의 크기 또는 배합율에 따른 강도 변화를 조사함으로써 폐FRP 선박에서 발생하는 유리섬유를 이용한 콘크리트 제품의 실용화의 문을 열 수 있을 것으로 본다.

후 기

본 연구는 환경부 과제인 “차세대 핵심 환경 기술 개발 사업(2007)”로 수행되었다.

참고문헌

- [1] 길상인, 윤진한, 성홍근, 진태병, 정노택, 김선동, 강창구, 2005, “폐 FRP 선박 용융안정화 처리기술 개발”, 한국해양환경공학회 추계학술대회 논문집, 194-200.

- [2] 김용섭, 윤구영, 2002, 환경친화적 FRP폐선 처리 기술 개발, 한국해양수산개발원 연구보고서.
- [3] 윤구영, 김용섭, 이승희, 2006, “FRP선박의 재활용 처리에 관한 실용적 연구 개발 동향”, 한국해양환경공학회 추계학술대회 논문집, 330-334.
- [4] 윤구영, 2007, “FRP 선박의 재처리시스템과 활용성 연구”, 한국해양환경공학회지, Vol. 10, No. 3, 181-186.
- [5] 윤구영, 김용섭, 이승희, 2007, “폐FRP 선박의 로빙총에서 분리한 유리섬유의 재활용 I: 섬유강화 모르타르의 물성에 관한 연구”, 한국해양환경공학회지, Vol. 10, No. 2, 102-106.
- [6] 이승희, 김용섭, 윤구영, 2008, “폐FRP 선박에서 얻은 F섬유의 염기성 용액에서의 강도저하”, 한국해양환경공학회지 게재 승인.
- [7] 이은재, 정노택, 김선동, 전태병, 2007, “폐 FRP 선박처리 현황 및 관련 법제도 고찰”, 한국해양과학기술협의회 공동학술대회, 2711-2719.
- [8] Bartholomew, K., 2004, Fiberglass Reinforced Plastics Recycling, Dec. Report, MnTAP.
- [9] Defosse, M., 2003, “Composites: European industry hunts for recycling solutions under new EOL-V laws”, Modern Plastics, Vol. 80, No. 6, 73-79.
- [10] Litherland, K. L., Oakley, D. R. and Proctor, B. A., 1980, “The use of accelerated aging procedure to predict the long term strength of GRC composites”, Advances in Cement-Matrix Composites, edited by Roy, D. M., Majumdar, A. J., Shah, S. P., and Manson, J. A., Materials Research Society, 61-74.
- [11] Majumdar, A. J., 1975, “Properties of fiber cement composites”, Proceedings of the RILEM Symposium on the Fiber Reinforced Cement and Concrete, edited by Neville, A., The Construction Press, England, 279-314.
- [12] Shibata, K. and Zairyo, K., 2006, “Desired environmental response from FRP/FRT-P-FRP recycle technology using atmospheric pressure dissolution method”, Engineering Materials, Vol. 54, No. 4, 58-61.
- [13] Shoji, Y., 2003, “Recycling waste FRP- From pure research to practical use”, J of the Japan Society for Composite materials, Vol. 29, No. 6, 210-216.

2007년 12월 17일 원고접수

2008년 2월 15일 수정본 채택