

## 폐 FRP 선박의 로빙층에서 분리한 유리섬유의 재활용 I: 섬유강화 모르타르의 물성에 관한 연구

윤구영<sup>1</sup> · 김용섭<sup>2</sup> · 이승희<sup>3,†</sup>

<sup>1</sup>홍익대학교 과학기술대학 기계정보공학과

<sup>2</sup>홍익대학교 과학기술대학 조선해양공학과

<sup>3</sup>홍익대학교 과학기술대학 화학시스템공학과

## Recycle of the Glass Fiber Obtained from the Roving Cloth of FRP I: Study for the Physical Properties of Fiber-reinforced Mortar

Koo Young Yoon<sup>1</sup>, Yong Seop Kim<sup>2</sup>, Seung Hee Lee<sup>3,†</sup>

<sup>1</sup>Department of Mechano-Informatics and Design Engineering, Hongik University, Jochiwon, Chung-Nam 339-701, Korea

<sup>2</sup>Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Hongik University, Jochiwon, Chung-Nam 339-701, Korea

<sup>3</sup>Department of Chemical System Engineering, Hongik University, Jochiwon, Chung-Nam 339-701, Korea

### 요 약

선박 제조에 사용되고 있는 FRP(Fiber-reinforced plastic)를 재활용하기 위한 노력이 지속되고 있는 가운데 보다 친환경적이며 가치를 재창출할 수 있는 방법들이 연구되고 있다. 본 연구진들은 선박용 FRP에 쓰이는 유리섬유의 구조가 그 짜임새의 형태에 따라 로빙층과 매트층으로 구분된다는 사실에 착안하여 FRP를 분쇄하지 않고 층을 분리할 수 있었다. 그 중 로빙층을 적절한 크기로 잘라 장섬유(약 50 mm, 이후 'F섬유')를 만들었다. F섬유의 인장강도 증가와 화학적 내식성 증가는 잔재하는 수지(전체 섬유의 무게비 25% 정도)의 영향인 것으로 보인다. 본 연구에서는 F섬유의 재활용의 한 방법으로 섬유강화 모르타르를 제조한 결과 2%(v/v)의 F섬유를 포함한 모르타르는 28일 양생 후 휨강도가 34.6% 증가함을 보였다. 수입 합성섬유 P-54를 사용한 모르타르와 유사한 정도의 휨강도를 얻을 수 있었다. 이는 F섬유가 골재로 사용이 가능하며 수입품을 대체할 수 있음을 의미한다.

**Abstract** – While the effort has been made in recycling the FRP (Fiber Reinforced Plastic) used for the medium-to-small size ships, researchers try to find out the methods more favorable for the environments and more value-added. In respect to the fact that the FRP consists of two types of layers, roving and mat, differentiated by the 2-dimensional structure, our group was able to separate the layers of FRP instead of grinding it. The roving cloth was cut to the long glass fibers (about 50 mm long; calling it 'F-fiber' afterwards). F-fiber showed increasing tensile strength and chemical-resistance possibly due to the remained resin (about 25% by weight). In this experiment fiber-reinforced mortars are made of the F-fiber as a recycling method of FRP. The mortar containing 2% (v/v) F-fiber results in 34.6% increment of bending strength from the standard after 28 day curing. The resulting strength is similar to that of the mortar with imported polyvinyl fiber P-54. These results imply that F-fiber can be applied to the 'fiber reinforced mortar' and furthermore may be a substitute for the imported fibers.

**Keywords:** 폐FRP(폐섬유강화플라스틱), FRP-Recycling(폐FRP재활용), Glassfiber(유리섬유), FRM(섬유강화모르타르)

### 1. 서 론

유리섬유나 탄소섬유, 합성섬유를 불포화 폴리에스테르나 에폭시 수지 등의 열경화성 수지로 결합시킨 것이 섬유강화 플라스틱

(Fiber reinforced plastic, FRP)이다. 이들 중 0.1 mm 이하의 두께를 가진 유리섬유를 보강재로 사용한 것을 유리 섬유강화 플라스틱이라 하는데 간단히 GFRP(glass fiber reinforced plastic) 또는 상용적으로 FRP 라고 한다.

유리 섬유강화 플라스틱은 가볍고, 내구성·내충격·내마모성 등

Corresponding author: kyyoon@hongik.ac.kr

이 우수하고, 녹슬지 않으며, 열에 대한 변형이 적으며, 가공하기 쉽다는 장점이 있다. 따라서 건축자재, 배의 몸체, 스키용품, 가정용 욕조, 헬멧, 테니스 라켓, 의자, 항공기 부품 등 여러 분야에 활용되고 있다. 현재 어선 등 소형선박의 경우 91000 여척(2005년) 중 약 70%의 배가 FRP로 건조되고 있으며 16000여척이 16년 이상 노후된 것으로 이미 폐기처분해야 할 선박의 양은 그 한계에 달해있는 실정이다(김용섭[2003]). 또한 폐기처리 비용이 44만원/톤으로 5톤 어선의 처리비용이 220만원에 달한다(권영배[1992], 김용섭[2000, 2001]). 또한 그 처리 방법이 조각이나 매립에 의한 것으로 장기간의 환경오염문제가 일어날 수 있다. 이러한 이유로 외국에서는 FRP를 이용한 선박의 건조가 금지되고 있는 실정이다 (윤구영[2006]).

여러 재활용방법 중 열이나 화학적 처리에 의한 방법은 현실성 등의 이유로 매우 제한적이며, 기계적 처리방법이 가장 보편적으로 사용되고 있다(윤구영[2006]). 그러나 FRP의 탁월한 내구성으로 인해 분쇄에 드는 에너지 등의 비용, 분쇄하는 과정에서 분진 재처리문제, 분쇄하여 얻은 물질 중 수지(소수성)와 유리섬유(친수성)의 물리적 성질의 차이점과 혼합물의 구성 분포의 불균일, 분쇄된 유리섬유의 길이가 매우 짧은 점 등 기존의 기계적 처리방식의 한계로 인하여 실용적 측면에서 적용범위가 매우 한정적이었다(Nakagawa[1996], 현부성[1998], 황의환[2002], 윤구영[2006]).

FRP의 구조는 두 가지 유리섬유층을 갖는데 매트(mat)층과 로빙(roving)층이 그것이다. 전자는 짧은 유리섬유(2 cm 내외)가 다발이 아닌 날개의 형태로 방향성 없이 퍼져있는 층이며 주로 FRP의 충진재 역할을 한다, 후자는 장유리섬유(30 cm 이상)의 다발이 바구니 짜는 형태의 촘촘한 조직을 갖는 층이다. 두 층이 번갈아 놓이게 되고 수지가 층간에 접착제로 사용됨으로써 강한 수직과 괴력에 견딜 수 있는 구조이다. 반면 층 사이의 결합은 보다 약하여 쉽게 분리될 수 있었다(김용섭[2006]). 이렇게 분리된 층들은 본래의 FRP와 수지의 양 및 물리적 형태가 다르므로써 여러 용도로의 변환이 가능할 것으로 사료된다.

이렇게 확보한 폐 FRP 부분(주로 로빙층)을 FRC(fiber reinforced concrete)의 섬유 보강재 대체물로 사용해 보고자 하였다. 현재 상용화된 FRC에는 철사, 합성섬유, 펄프 등 다양한 종류의 섬유보강재가 사용되고 있다. 잘게 분쇄한 폐유리나 폐 FRP를 기존 콘크리트의 잔골재 대용으로 실험한 결과가 보고된 적은 있으나(배기선[2005], 배수호[2001], 황택상[2000], Corinaldesi[2005], Kojima [1995]) FRC에는 적용되지 못하였다. 본 연구에서는 폐 FRP로부터 얻은 장섬유(이하 'F섬유')를 시멘트 모르타르에 넣어 모르타르의 내식성 및 휨강도를 측정함으로써 고부가가치(단순잔골재로 활용시 대비 1000배 이상)를 갖는 섬유 보강재로의 가능성을 연구해 보고자 하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1 사용 재료

시멘트는 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며, 잔골재는 주 문진 표준사를 사용하였다. 앞서 발표한 보고서(김용섭[2006], 윤

구영[2006])에서와 같이 폐선박의 FRP를 적당한 크기로 절단한 후 층상으로 적층되어있는 로빙과 매트층을 분리하고 로빙층을 약 50 mm의 길이로 절단하여 로빙층의 짜임에서 분리한 유리섬유에 대해 밀도, 인장강도(섬유보강재에 있어서 인장강도는 일반 콘크리트의 최대 단점인 휨강도를 보강시키는 핵심특성이다.), 화학적 내구성을 비교하였으며, 이러한 유리섬유를 포함한 시멘트 모르타르를 제조하여 휨강도, 알칼리 실리카 반응(ASR) 등을 수행하였다. 비교 대상으로는 수입산 polypropylene 혼성중합체인 합성섬유(이하 P-54)를 이용하였다.

### 2.2 실험 방법

#### 2.2.1 유리섬유의 물성 측정

밀도는 Alfa Mirage Co.의 SD-200L 비중계를 이용하여 측정하였으며, F섬유에 포함된 수지의 양은 F섬유를 연소시켜 수지를 제거한 후 수지의 함유량을 계산하였다. F섬유의 단면은 섬유를 고정시킨 후 금으로 표면 처리를 한 후 단면을 촬영하였다(Nikon EPIPHOT300).

F섬유가 원료 유리섬유와 다르게 수지를 포함하고 있을 것이나 그 공정 과정에서 많은 양의 수지가 이탈되므로 그 인장강도 및 화학적 내식성의 비교가 필요하고, 기존의 섬유 보강재와의 비교로 대체 가능성을 판단하기 위한 기초 물성 측정을 하였다.

인장강도 실험은 만능재료 시험기(SGA-C-LPC)를 이용하였다. 각 섬유를 아크릴 판에 고정시킨 후 인장강도를 측정하였다. 화학적 내구성은 원료 유리섬유와 F섬유에 대해 증류수, 0.1 M NaOH 용액, 0.1 M NaCl 용액에 7일간 담근 후 인장강도를 측정하였다.

#### 2.2.2 모르타르의 물성 측정

모르타르의 제조는 ASTM c 305와 c 109 c 109M-05에 준하여 시행하였다.

ASTM에는 믹싱 보울에 물을 시멘트의 1/4배 정도의 양으로 넣은 후 시멘트와 모래를 1:2.75의 비율로 순서대로 30초 간격으로 넣으면서 저속으로 저어주고 다시 30초간 중속으로 저어주도록 되어있다. 그러나 본 실험에서는 50 mm의 섬유재가 섞임으로 인한 뭉침 현상으로 인해 믹서의 회전이 수월치 않았다. 따라서 시멘트와 모래 및 F 섬유를 마른 상태에서 미리 섞어 놓고 예정량의 2/3 정도의 물이 담긴 보울에 혼합물을 1/4 씩 넣어가며 물을 첨가하였다(4분 이내에 혼합 완료). 흐름도를 측정해가며 물을 첨가하였고, 혼합이 완료된 후 15초간 덮어두었다.

흐름도는 ASTM 규격에 따라 제작한 몰드에 채운 후 템퍼로 20회 다진 후 스며 나온 물기를 제거하고 1분 후 몰드를 떼어내고 테스트기를 15초간 25회 돌린다. 캘리퍼를 이용하여 4곳의 지름 평균값이 110 mm ± 5% 이내로 들어가면 허용하였다.

모르타르의 몰드는 40×40×160 mm를 사용하였고, 몰드에 윤활유를 바른 후 앞에 혼합한 모르타르를 혼합한지 2분 30초 이내에 몰당하였다. 몰드에 25 mm 만큼 채운 후 10초 간 한 방향으로 8번 다지고 방향을 바꿔가며 4회 다진다. 규정에 따르면 다지는 사람에 따라 강도가 달라질 수 있으므로 같은 사람이 다져야 테

이터의 오차를 줄일 수 있다. 몰드를 끝까지 채운 후 다시 같은 방법으로 다지고 표면은 매끈하게 처리하여 휨강도 실험 시 힘의 분산을 고르게 할 수 있도록 하였다.

온도와 습도를 고르게 유지시키기 위해 양생실을 따로 제작하였으며, 25 °C와 60% 습도를 유지하도록 조절하였다.

양생실에서 24 시간 양생시킨 후 6개의 시편은 1일째의 휨강도 실험을 위해 몰드에서 꺼내고 나머지는 21 °C의 포화된 라임 용액에 담가 수중양생 시켰으며, 3일, 7일, 28일째 되는 날에 꺼내어 바로 휨강도를 측정하였다.

F섬유를 전체 부피에 대해 0%, 1.5%, 2%의 비율로 첨가하여 모르타르를 제작하였으며 수입 PVA 섬유 P-54는 2%(v/v)를 포함하도록 모르타르를 제작하여 휨강도를 비교하였다. 각 데이터는 6개의 시편을 제작하여 그 중 적어도 3개 이상의 신뢰성 있는 데이터(평균값에서 10%이내)를 평균한 값으로 취했다. 휨강도는 만능재료 시험기(SGA-C-LPC)로 측정하였다.

본 실험에서 사용한 재료들의 비중은 각각 시멘트 3.2 g/cm<sup>3</sup>, 모래 2.45 g/cm<sup>3</sup>, FRP 1.45 g/cm<sup>3</sup>을 이용하였다. 비중계는 Alfa Mirage Co.의 SD-200L을 사용하였다.

알칼리 실리카 반응(ASR) 시험은 ASTM c 160-05에 준하여 실험하였다. F섬유를 넣지 않은 것과 1.5% 넣은 시편 3 개씩을 1 M NaOH 용액에 21일간 80 °C를 유지한 상태에서 매일 같은 시간에 길이 변화를 다이얼 게이지로 측정하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 F섬유의 물성 특성

##### 3.1.1 F섬유의 길보기 형태

폐 FRP로부터 얻은 로빙은 매트릭스 형태로, 가로와 세로로 유리섬유들이 꼬여져 있으며(Fig. 1(a)), 이로부터 얻은 F섬유(Fig. 1(b))는 그 단면도가 Fig. 2에 보이듯이 직사각형을 유지한 상태로 존재한다.

로빙으로부터 얻은 F섬유는 길이가 50 mm 정도이며, 그 단면은 가로 3.182 mm 세로 0.239 mm로 단면적은 0.760 mm<sup>2</sup>였다(현미경: Nikon EPIPHOT300, Analyzer: Video test T4.0 IMT). 잔재하는 수지로 인해 원료 유리섬유(직사각형 다발)와는 달리 수

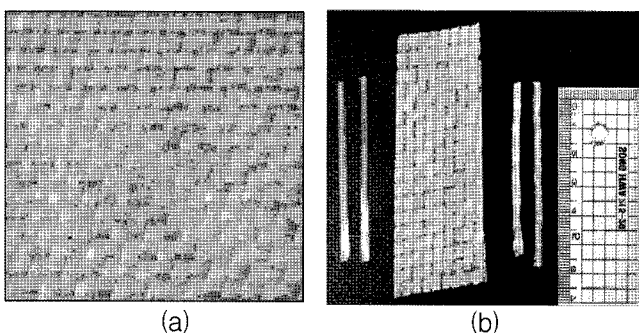


Fig. 1. Roving Cloth obtained from FRP

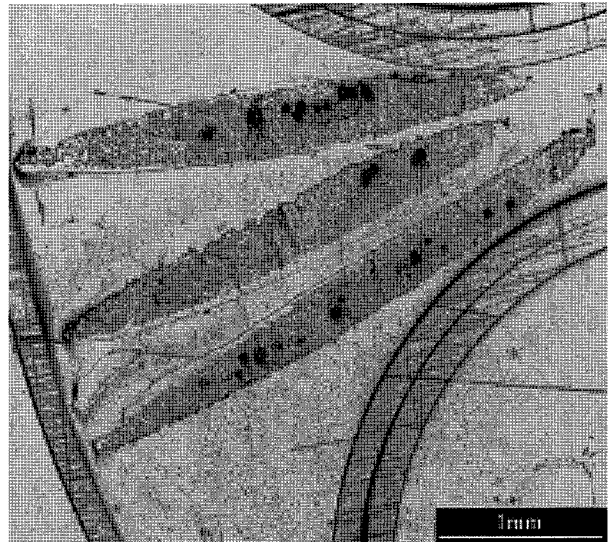


Fig. 2. Cross section of F-fiber (by SEM).

Table 1. Comparison of aspect ratios (length/diameter) of F-fiber and P-54

Fibers	Cross section (mm <sup>2</sup> )	Aspect ratio	ref.
F-fiber	0.760	51	this experiment
P-54	0.008	782	manufacturer report

백 개의 가닥이 뭉쳐져 타원형 형태를 유지하였다.

위의 단면 사진과 광학분석기로부터 얻은 데이터를 이용하여 형상비(Asspect ratio)를 계산하였으며(Table 1), 수입 합성섬유 P-54의 것과 비교하였다.

F섬유의 단면도가 직사각형이므로 원형으로 가정하여 환산한 후 직경을 얻었다. 0.984 mm의 직경과 50 mm의 길이를 갖는다고 볼 수 있으며, 이로부터 50.8의 형상비를 얻는다.

형상비가 클수록 모르타르와 섬유 간 결합이 강해지는 것으로 알려져 있다.

##### 3.1.2 F섬유의 물성

FRP 제작 시에는 수지의 양이 전체 질량의 약 70%를 차지할 정도로 많은 양을 포함하나 F섬유를 얻는 물리적 분리 과정에서 많은 양의 수지가 로빙층이 아닌 매트층과 함께 떨어지는 현상을 관찰하였다. F섬유를 열분해하여 잔존하는 수지의 양을 계산한 결과 24.6%(w/w) 만을 포함하는 것으로 나타났으며, 이 수치는 폐 FRP의 샘플이나 분쇄된 방법에 따라 다른 값을 가질 것으로 예상된다.

섬유에 대한 인장강도는 원료 유리섬유와 F섬유, P-54에 대해 측정하였으며, 그 결과를 Table 2에 보이고 있다.

Table 2. Tensile strength of the fibers tested

Fiber	bundle of raw glass fibers	F-fiber	P-54
Tensile strength (MPa)	414	794	758

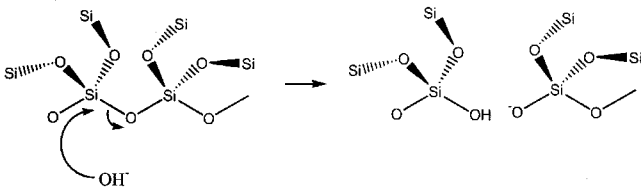


Fig. 3. Diagram of the SiO<sub>2</sub> network in the glass which can be broken by hydroxide ion in basic solution.

F섬유의 인장강도는 원료 유리섬유보다 1.9배 강하고, P-54와 유사한 결과를 보였다.

이러한 결과와는 별개로 화학적 내구성을 평가하기 위해 섬유를 증류수와 알칼리 용액, 염용액에 7일간 담근 후 인장강도의 변화를 관찰하였다. 유리섬유의 구조는 Si 주변에 4 개의 산소가 결합하는 그물 구조를 기본으로 한다(Fig. 3). 일반적으로 사용되는 유리는 산 뿐만 아니라 염기성 용액에도 약한데 그것은 Fig. 3에서 보여주듯이 수산기(OH<sup>-</sup>)의 공격으로 인해 Si-O 간 결합이 부분적으로 끊어짐으로 설명될 수 있다.

FRP에 사용되는 유리는 E-glass인 borosilicate로서 다른 유리에 비해 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, MgO, 알칼리 금속의 양이온을 많이 포함하고 있다(각 성분 함유량 표시?). 이들은 순수한 규소산화물(SiO<sub>2</sub>)의 유리에서 4족의 Si 대신 3족의 Al이나 B이 치환되고 1족의 알칼리금속이나 2족의 알칼리토금속의 양이온이 전기적 중성을 유지시키는 구조를 갖거나 또는 Si-O-Si 간의 결합이 끊어지고 Si-O와 O-Si로 이온화되면서 다른 금속의 양이온이 전기적 중성을 유지하기 위해 작은 공간에 존재하는 형태를 이룬다(Fig. 4).

원료 유리섬유와 F섬유를 증류수, 알칼리 용액, 염 용액에 1 주일간 담가둔 후 측정된 인장강도의 결과를 Table 3에 보이고 있다.

건조한 상태에 비해 증류수에서 조차 인장강도가 감소한 것은

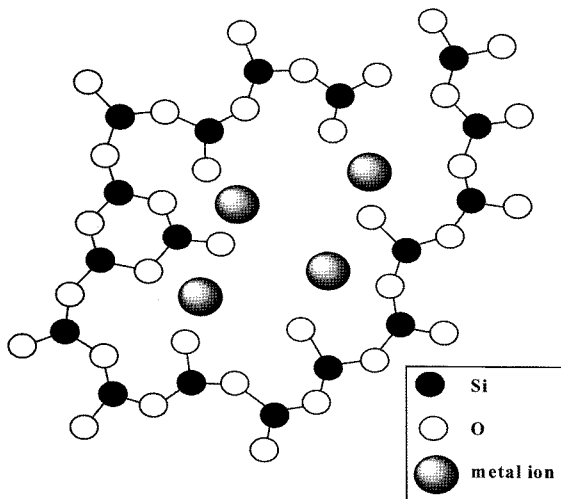


Fig. 4. Diagram of the SiO<sub>2</sub> network of glasses with some alkali and alkaline metal ions.

Table 3. Tensile strength (MPa) of raw glass fiber and F-fiber simmered in each solution for one week

Fiber	Solution	dry	distilled water	0.1 M NaOH	0.1 M NaCl
	Bundle of raw glass fiber		414	117	65
F-fiber		794	394	200	305

수용액의 수소 이온에 의한 알칼리금속이나 알칼리토금속 이온의 치환에 의한 것이고, 염의 용액에 넣어두었던 것의 강도 변화가 다른 용액에 비해 작은 것은 이러한 치환 효과가 적기 때문으로 생각된다.

증류수에서의 인장강도 감소는 원료 유리섬유의 경우 72%, F섬유는 50% 이었으며, NaOH 용액에서의 감소도 원료 유리섬유의 경우는 84% F섬유는 75%이었다. 시멘트의 화학적 성질에 의해 모르타르가 염기성을 띠므로 F섬유가 장시간 염기성 상태에서 하에서 섬유 보강재로서의 역할을 수행할 수 있음을 판단하기 위한 실험이었으며, F섬유는 원료 유리섬유보다 그 변화가 적어 대체 섬유 보강재로서의 가능성을 보였다.

### 3.2 F섬유를 포함한 모르타르의 물성

F섬유를 첨가하지 않은 모르타르의 경우에 비해 같은 흐름도를 갖는 모르타르 제조에 적은 양의 물이 소비되었다. 이는 발수성의 수지를 포함하는 F섬유로 인한 것으로 보인다.

#### 3.2.1 알칼리 실리카 반응(ASR)

알의 화학적 내식성 실험결과에서 보듯이 알칼리성을 띤 시멘트 존재 하에서 유리는 그 결합이 붕괴됨으로 인해 팽창하는 결과를 보인다. 이러한 경우 모르타르에 사용될 수 없으므로 ASR 실험은 반드시 수행되어야 한다(박승범[2001, 2002], Park[2004]).

F섬유를 넣은 모르타르와 넣지 않은 것에 대해 팽창된 길이를 측정된 결과를 거의 오차 범위 내에서 변화한 것을 관찰하였다.

#### 3.2.2 휨강도

F섬유를 0%, 1.5%, 2% 포함한 모르타르와 P-54를 2.0% 포함한 모르타르에 대해 1일, 3일, 7일, 28일에 걸쳐 휨강도를 측정된 결과를 Fig. 5에 보이고 있다.

1일과 3일의 양생 시편은 0%에 비해 크게 증가하지 않았다. 그

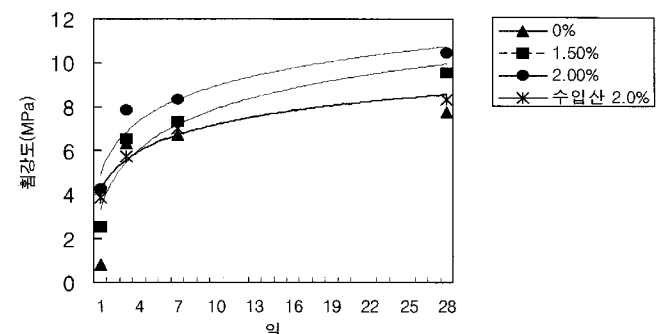


Fig. 5. Bending strength of the mortars containing various amounts of F-fiber (0%, 1.5%, 2%) and P-54 (2%) depending on the curing dates.

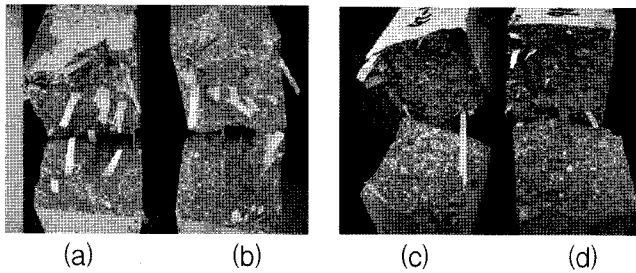


Fig. 6. Photos of bisected mortars containing 2% F-fiber after curing for (a) 1 day, (b) 3 days, (c) 7 days, and (d) 28 days.

리나 7일째 이후 1.5% F섬유를 포함한 모르타르는 8.4%, 2% 포함한 것은 23.1% 만큼 증가한 휨강도를 보였으나, 28일째는 1.5% 짜리가 23.2%, 2% 짜리가 34.6% 증가한 것으로 나타났다. 또한 수입 섬유와는 거의 유사한 휨강도를 보임으로써 모르타르의 휨강도 보강용 섬유재료로서의 가능성을 보여주고 있다.

양생된 모르타르의 단면은 1일과 3일째에는 섬유가 모르타르에서 분리되는 현상을 보이나, 7일 이후의 시편에서는 섬유가 단절되는 현상을 보이고 있다(Fig. 6). 따라서 재령이 커질수록 포졸란 효과가 좋을 것으로 예상되며, 이에 대한 실험은 진행 중에 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 기존의 기계적 폐 FRP 처리 방법과는 달리 50 mm 정도의 장섬유를 얻기 위해 로빙층을 이용하였으며, 로빙층으로부터 얻은 F섬유는 수지성분을 약 25% 정도 포함하는 것으로 나타났다. F섬유는 원료 유리섬유보다 인장강도도 매우 우수하고, 화학적 내구성도 있으며, 이것을 포함한 모르타르는 휨강도가 뛰어난 고부가가치의 섬유강화재료로서 실용 가능성을 보였다. F섬유의 형상비가 수입 합성섬유 P-54 보다 작음에도 불구하고 그 휨강도가 유사한 것으로 나타났으므로 F섬유의 길이를 달리하여 휨강도를 측정함으로써 폐 FRP의 재활용률을 증가시키는 실험이 이루어져야 할 것이다.

#### 후 기

본 연구는 환경부 과제인 “차세대 핵심환경기술개발사업(2005)” 과 “2006학년도 홍익대학교 학술연구진흥비” 지원을 받아 수행되었음을 밝힙니다.

#### 참고문헌

[1] 권영배 외 10인, 1992, 고분자 폐기물 연속 건류 소각과 폐 열회수 및 건식 가스처리 기술개발, 동력자원부 연구보고서.

- [2] 김용섭, 2003, 물성조사와 폴리머 시멘트 몰타르 제조를 통한 FRP 폐기물의 재활용 기술개발, 대한조선학회논문집, Vol.40, No.1, 55-62.
- [3] 김용섭, 김도영, 황기연, 2000, 10, 26, 가연성 해양폐기물 열분해 장치 개발에 대한 연구, 한국해양공학회 추계학술대회, 96-100.
- [4] 김용섭, 윤구영, 이승희, 2006, 1, 31, 섬유강화콘크리트 및 제품 개발에 의한 폐FRP자원화 기술 환경부 연차보고서.
- [5] 윤구영, 김용섭, 이승희, 2006, 11, 24, FRP선박의 재활용처리에 관한 실용적 연구개발 동향, 한국해양환경공학회 추계학술대회논문집.
- [6] 김용섭, 정충훈, 김백현, 2001, 열가소성 물질의 효과적인 연소제어 기술 개발, 한국해양연구원연구보고서.
- [7] 박승범, 이봉춘, 2002, 폐유리와 산업부산물을 사용한 모르타르 팽창특성, Journal of the Korea Concrete Institute, Vol.14, No.3, 440-448.
- [8] 박승범, 조정휘, 김정환, 2001, 잔골재로 폐유리를 혼입한 콘크리트의 물리·역학적 특성에 관한 실험적 연구, Journal of the Korea Concrete Institute, Vol.13, No.2, 184-191.
- [9] 배기선, 박상훈, 이상욱, 2005, 섬유복합재봉(FRP ROD)과 고강도 모르타르 이용한 철근 콘크리트 구조물의 휨 보강공법(MFRI)공법, 한국복합재료학회지, 59-65.
- [10] 배수호, 정영수, 2001, 폐유리 분말을 혼입한 유리 콘크리트의 역학적 특성에 관한 실험적 연구, Journal of the Korea Concrete Institute, Vol.13, No.1, 54-61.
- [11] 현부성, 1999, “폐유리 분말을 원료로 한 전자재 개발”, 세라미스트, 제2권, 제1호, 23-26.
- [12] 황의환, 한천구, 최재진, 이병기, 2002, “폐 FRP 미분말을 사용한 폴리머 시멘트 모르타르의 물성”, Journal of the Korea Concrete Institute, Vol.14, No.2, 190-198.
- [13] Corinaldesi, V., Gnappi, G., Moriconi, G., and Montenero, A., 2005, Reuse of ground waste glass as aggregate for mortar, Vol.25, No.2, 197-201.
- [14] Kojima, A., and Furukawa, S., 1995, Preparation and properties of lightweight high-strength mortars containing FRP fine powder as aggregate, Disposal and recycling of organic and polymer construction materials, 1995, 137-150.
- [15] Nakagawa Muneo 외 1996, “폐 FRP 미분말을 사용한 콘크리트의 기초 물성 연구”, 대한건축학회 학술논문집.
- [16] Park, S.-B. and Lee, B.-C., 2004, Studies on expansion properties in mortar containing waste glass and fibers, Cement Concrete Research, Vol.34, No.7, 1145-1152.

2006년 6월 21일 원고접수

2007년 5월 2일 수정본 채택