

폐FRP 선박의 재자원화를 위한 유리면포 추출장치 개발

윤구영^{1,†}

¹홍익대학교 과학기술대학 기계정보공학과

Developing An Extracting Method of Laminated Glass-Fiber for Waste FRP Boats Regenerating

Koo Young Yoon^{1,†}

¹Department of Mechanical and Design Engineering, Hongik University, Jochiwon, Chungnam 339-701, Korea

요 약

지난 30여 년 동안 세계 각국에서는 FRP(fiber reinforced plastics)선박의 폐처리 또는 재활용(재자원화)을 위하여 실용성과 안정성을 지니는 많은 기계적 방법에 대한 연구 개발을 진행하여 왔다. 기술적, 사회경제적 관점에서 가장 선호되는 방법인 소위 '기계적 방법'에는 크게 파쇄와 분쇄를 거친 후 결과물을 재활용하는 방법과 단순 파쇄과정 대신 유리면포(roving cloth)의 박리파쇄와 분류과정을 통한 수지와 유리섬유의 개별적 재활용 방법이 있다. 그러나 추출되는 유리면포의 크기가 제한적이어서 결과물의 활용도는 크지 않았다. 기계적 재활용방법의 편리성에도 불구하고 또 다른 재활용방법연구는 열분해(가스화)와 소각연료화(고형에너지) 방안이다. 이는 재생에너지화를 목표로 하는 연구다. 많은 열분해연구가 진행되어 왔음에도 폐FRP의 재생에너지화의 가장 큰 걸림돌은 폐FRP내의 유리섬유분리의 어려움에 있다. 따라서 기계적 처리 방법으로 유리섬유를 효과적으로 추출 할 수 있다면 폐FRP 친환경적 재자원화와 재생에너지화 연구는 크게 활성화 될 것이다. 본 논문에서는 기계적 방법에 있어 유리섬유의 효과적 분리 추출과 열분해 방법에서 필요한 전처리 문제(수지함유량 증대)에 대한 적극적 해결 방안으로서 FRP의 복합재료특성을 응용한 친환경적 유리면포(로빙층) 분류 처리 방안을 개발하였다. 또한 본 유리면포에서 세단된 유리섬유는 기존 콘크리트의 물성강화용으로 직접 사용할 수 있을 것으로 사료된다.

Abstract – There are several basic classes of recycling methods for FRP boats. The main one is “Mechanical recycling” which involves shredding and grinding of the scrap FRP in a new product. That is one of the simpler and more technically proven methods. It recently has been reported that FRP can be recycled by separating into layers instead of crushing into powder. Many researchers should be more interested in these mechanical recycling for the eligibility. Nevertheless, because resins is very useful renewable energy, most of waste FRP regenerating methods depend on incineration (reclamation) or thermal recycling (pyrolysis). FRP is made up of laminated glass-fiber (roving cloth layer) which is also very unlikely to break into each layer. If there is an extracting method which is efficient and environment friendly removing glass fiber from waste FRP, it should also solve the another urgent problem. Laminated glass-fiber which is very limited renewable, is a serious barrier to wast FRP boat regenerating. This study is to propose a new extracting method which is efficient and environment friendly waste FRP regenerating system. And it should be applied to renewable energy applications with the waste resins of FRP. Also recycling glass fiber obtained by the separation of the roving layer from waste FRP will be consider to be useful for concrete products or structures.

Keywords: FRP Laminated Glass-fiber(FRP 유리면포), FRP Boats(FRP선박), Waste FRP Boat Regenerating(폐FRP 선박의 재자원화), Eco-friendly Mechanical FRP Recycling(친환경적 FRP재활용), Roving Cloth(로빙층)

[†]Corresponding author: kyyoon@hongik.ac.kr

1. 서 론

폐FRP의 기계적 방법을 통한 재활용 연구는 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 첫째는 지난 30여 년간 선진 모든 국가에서 많은 연구가 진행되어왔던 폐기물의 효율적(경제적)처리 공정 개발 연구이다(김용섭 등[2002]), Shoji[2003], Bartholomew[2004], 이은재 등[2007]). 그러나 폐FRP의 주된 구성요소인 유리섬유와 수지 성분을 분리처리 하지는 못하였으며 이로 인하여 재처리 사업의 운영비 증대를 초래하게 되었다. 결과적으로 폐FRP 전체를 효과적으로 처리 할 수는 있게 되었으나 재활용 사업으로의 확대는 이루어지지 않고 있다.

따라서 최근에 외서는 두 번째 방법으로서 폐FRP의 재처리에 있어서 친환경적 측면 즉 폐기물 처리 공정상의 친환경성(방진과 저소음 그리고 2차적 환경유해 물질배출 제한 등)과 더불어 폐기물의 단순 재처리가 아닌 재자원화 가능성의 증대가 사회적으로 크게 요구되었다(Defosse[2003], Shibata *et al.*[2006], 윤구영 [2007]). 또한 최근의 기계적 방법 연구는 폐FRP의 재처리결과물의 부가가치를 높이는 연구로서 폐FRP의 효과적 파쇄뿐만 아니라 결과물의 효용가치를 확보 할 수 있는 방안으로 재처리하는 연구가 진행되어 왔다(Bartholomew[2004], 윤구영 등[2006]).

FRP의 두 가지 성분인 유리섬유와 수지를 각각 고부가가치의 재자원화(재생에너지화)하기 위한 선결과제는 효과적으로 두 성분을 분리하는 것이며, 두 성분 중 유리섬유는 물리적 특징 상 구조물의 강도 보강용으로 쓰일 수 있으며, 수지성분은 가스화 또는 고형 연료화(RDF)를 통한 고부가가치 재생에너지로 활용될 수 있다(Majumdar *et al.*[1980], 윤구영[2007]). 그러나 폐FRP에서 유리성분만을 추출하는 공정은 매우 복잡하면서도 고비용의 공정을 포함하고 있다. 또한 추출공정의 특성에 따른 최종 추출물(유리섬유)의 재활용처 및 부가가치의 차이도 매우 큰 것으로 보고되어 왔다(길상인 등[2005]), 윤구영 등[2007]).

본 연구는 폐FRP내의 유리섬유 중 로빙층(Roving cloth)을 효과적으로 추출하는 방법을 개발하고 있다. FRP 내의 유리섬유는 수지를 흡수하여 기본형상을 구성하는 매트층(Fiber glass mat)과 강성을 담당하는 로빙층으로 이루어져 있으며, 로빙층은 집적된 형상의 유리섬유 다발이 격자구조로 직조되어있다(윤구영 등 [2007]). 따라서 로빙층을 폐FRP로부터 분리하기 위해서는 단순 파쇄 후 분리 공정 보다는 FRP의 복합적층 구조에서 박리를 통한 로빙층 분리가 가장 간단한 방법이다. 또한 발표된 연구(윤구영 등[2002])에 의하면 20여 년 이상 열화(degrading)된 로빙층

과 매트층 사이의 결합력은 취약하여 층간 박리가 용이하게 이루어지는 것으로 조사되었다. 본 논문은 다양한 박리방식을 이용하여 폐FRP로부터 유리면포(로빙층) 추출장치를 개발하였으며 본 장치 및 전용칼날은 특허출원 중이다.

2. 본 론

2.1 유리면포 추출의 중요성과 방법

FRP는 Fig. 1과 같이 크게 2종류(표면면포는 표면 보호용으로만 쓰임)의 유리 섬유(로빙층과 매트층)를 적층하여 성형한다. 따라서 그 두께는 적층의 수에 비례한다. 또한 유리섬유 사이에는 결합을 위해 수지를 도포하여 성형하게 된다.

폐FRP의 재자원화에 있어서 로빙층 유리섬유의 중요성은 Table 1에서 보듯이 전체 FRP의 유리성분 함유량(중량기준)의 약 60%가 로빙층에 포함되어 있기 때문이다. 그러므로 유리섬유를 추출하고자 하는 연구 뿐만 아니라 최대한 많은 양의 유리섬유가 분리된 FRP잔유물이 필요한 연구에서도 로빙층 추출은 매우 중요한 선결과제이다.

선박용 FRP에는 대략 중량기준으로 유리섬유, 40%, 수지, 60%의 구성비를 갖고 있다. 그러므로 로빙층이 분리된 폐FRP 잔유물(매트층)에는 80% 정도의 수지가 함유되어 있다(길상인 등[2005]), 윤구영 등[2007]). 이러한 결과는 유리면포(로빙층)의 효과적 추출이 폐FRP의 재생에너지 공정에 있어서도 효율성을 크게 높일 수 있는 전처리방법이 되는 것이다. 그러므로 로빙층의 성공적 추출은 로빙층의 자체의 재활용과 재자원화 뿐만 아니라 남은 폐FRP 잔유물의 재자원화(재생에너지화)에 있어서도 크게 기여하게 될 것이다.

면포형태의 유리섬유(laminated glass-fiber)에서 개별 유리섬유(집적된 유리섬유 다발에 수지성분이 도포된)를 분리(세단파쇄)하여 섬유보강재(fiber reinforced material)로 활용하는 연구는 아직 초기 단계이다. 그러나 지난 수년간의 연구를 통하여 콘크리트 구

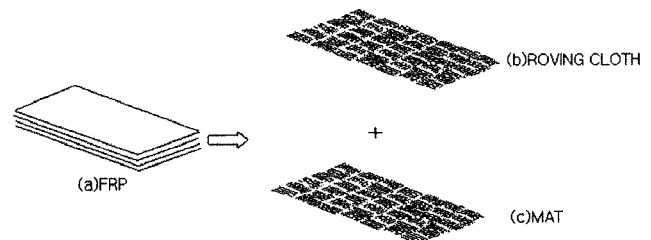


Fig. 1. Extracting mechanism of laminated glass-fiber.

Table 1. Glass Fiber of FRP

	Kind of glass fiber	Number, # (specific gravity*0.03)(g/m ²)	Thickness of 1ply	Reference
1	SURFACE MAT	#30	0.3 mm	for surface protection
2	ROVING CLOTH	#570	0.8 ~ 0.9 mm	for strength
3	FIBER GLASS MAT	#450	0.8 ~ 1.03	for shaping
		#380	0.7 ~ 0.91	
		#300	0.5 ~ 0.73	

조물의 단순한 골재대용으로 쓰이던 용도를 넘어서 고부가가치를 가지는 강도 보강용 재료로 사용 할 수 있다는 연구가 보고되었다(윤구영[2007], 윤구영 등[2007], Yoon[2007]). 폐FRP의 기계적 처리 방법에 있어서 가장 효과적인 방법은 복합재료특성을 응용한 친환경적 분류 처리 방안인 박리 파쇄 방법이다(윤구영[2007]). 그러나 이 방법으로는 로빙층을 원래 형태인 면포형태가 아닌 단편(최대 16*16 mm)크기로만 분리할 수 있었다. 또한 박리 공정 중 수지성분 또한 다량 포함되어 파쇄 되는 단점이 있었다.

따라서 본 연구는 Fig. 1에서 보이듯이 복합적층 구조인 FRP에서 매트층과 로빙층을 층간 분리를 통하여 로빙층을 유리면포 형태로 추출할 수 있는 방법을 개발하였다. 즉 수지를 함유하고 있는 매트층과 로빙층 사이에 적절한 날(edged tool)을 삽입하여 상하층을 분리시키는 방안이다.

2.2 FRP선박의 성형방법에 따른 유리면포 추출장치 설계

FRP 선박의 성형방법에는 Hand lay up 법과 같은 수작업을 통한 방법이 널리 쓰이고 있다. 이는 금형에 이형제를 도포한 후에 롤러를 사용하여 시행한다. 먼저 surface mat을 적층 한 후 mat, roving cloth등을 필요한 두께, 필요한 강도까지 적층한다. 이는 복잡한 형상 또는 소형에서 대형까지 광범위하게 응용되고 있는 일반적인 성형방법이다. 또한 선박의 적층 공정 중 부분적으로 유리 섬유 조성비를 바꾸거나 다른 강화재 등을 넣을 수 있다. 따라서 FRP선박에 있어서 매트층과 로빙층의 조성비는 매우 다양한 형상을 하고 있다. 즉 매트층과 로빙층이 일정한 배열로 구성되어 있는 경우로부터 FRP내에 조성비가 임의적인 혹은 다양한 배열 구성이 혼재되어 있는 경우까지 매우 다양한 스펙트럼을 보인다.

따라서 본 연구는 조성비가 일정한 경우에는 다중 면포 동시 추출 방식을 제안하였으며 구성이 임의 적인 경우에는 단일 면포 추출 방식으로 설계하였다. 또한 단일 추출 방식에서는 고정된 박리 날에 폐FRP 모재를 이송하는 방식과 모재가 고정된 상태에서 박리 날을 이송하는 두 가지 방식을 개발하였다.

2.2.1 다중면포 동시 추출 방식

새로운 면포추출 시스템에서 박리 기능은 이 시스템의 핵심적 요소이며 폐FRP를 1점의 층상(로빙층과 매트층을 분리 절단하여)으로 잘라내는 특허 출원 중인 박리절단기이다. 그 형상은 Fig. 2-4와 같으며 압축 실린더의 압력과 행정을 적절히 제어하여 폐FRP로부터 로빙층을 1층씩 분리하게 된다. 박리절단기는 실린더, 스프링, 5개의 칼날로 구성되어 진다. 먼저 받침대에 전처리 과정에서 투입규격에 맞게 잘라진 폐 FRP 판을 놓으면 실린더에 의하여 FRP판을 칼날 쪽으로 밀어주면서 동시에 아래 방향으로 작용하는 스프링의 압력과 압축공기에 의하여 작동하는 실린더의 쌍방향 압력을 이용하여 FRP가 움직이지 않도록 고정시켜 준다. 전진 실린더의 압력으로 폐FRP는 높이가 다른 5개의 칼날에 도달하게 되며 그 때 유리 섬유 면포층 사이로 칼날이 통과하면서 한 겹씩 잘라지게 된다. Fig. 2는 박리 절단기 칼날의 솔리드 모델로서 Fig.

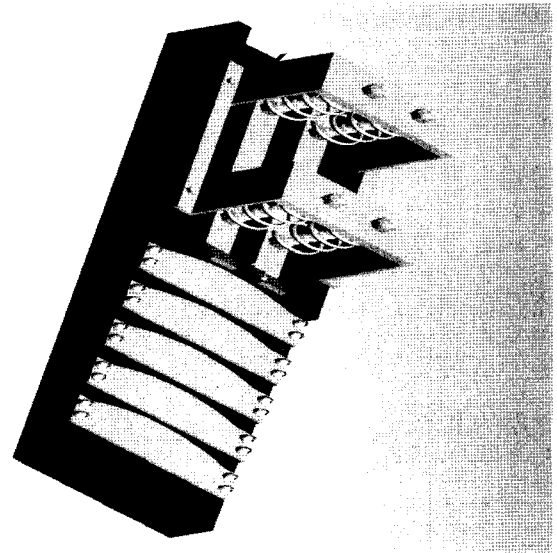


Fig. 2. Multi-extracting system of laminated glass-fiber as solid modeling.

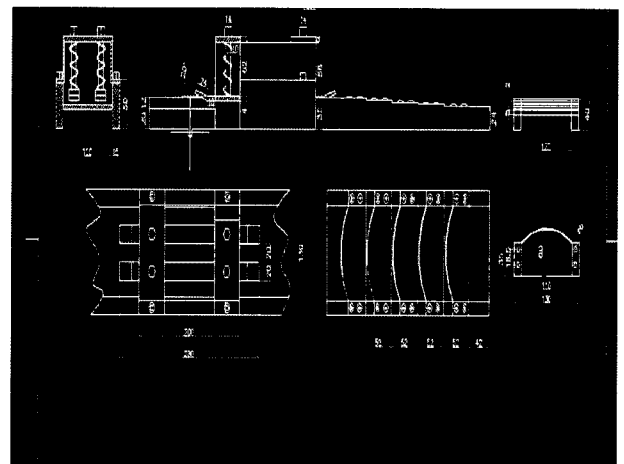


Fig. 3. Multi-extracting system of laminated glass-fiber as 2D modeling.

3의 2D 도면을 이용하여 작성하였다. 이것을 살펴보면 서로 다른 높이로 5개의 칼날이 직렬로 배치되어 있음을 알 수 있다. 이것은 FRP폐기물이 이 위를 통과할 때 한꺼번에 여러 겹이 절단되는 효과와 두께가 다른 폐FRP가 공급되더라도 작업을 원활하게 할 수 있게 하기위한위함이다.

박리절단기는 공기압에 의하여 작동되는 실린더에 의하여 구동되며 이 실린더는 피절단물인 FRP 폐기물을 칼날과 밀착된 상태를 유지하면서 절단이 종료될 때까지 폐기물판을 밀어주는 역할을 한다. 본 박리장치에 있어서는 운전조절요소(파쇄물 이송 및 위치 고정 압력인자, 박리 칼날의 간격 및 입사각도인자 등)가 매우 중요한 시스템운영변수이며 또한 폐기물의 형상과 다양한 칼날의 특성(날의 형상)도 박리추출의 효율성에 매우 큰 영향을 주는 것으로 조사되었다. 따라서 해당 인자들을 고려하여 최적화된운영매뉴얼이 작성되었다.

Fig. 4는 실제 개발된 다중면포 추출장치의 실물이다. Fig. 5는

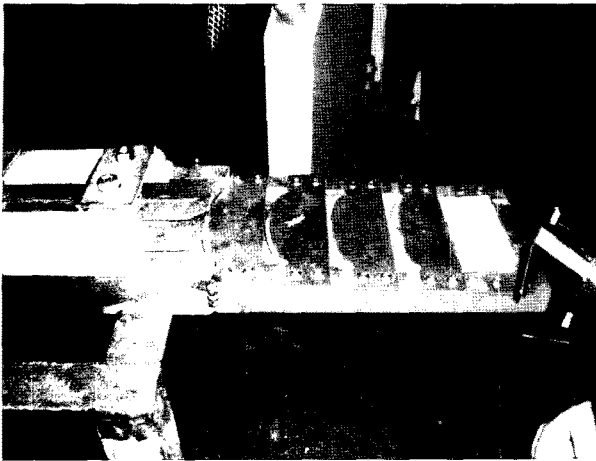


Fig. 4. Multi-extracting system of laminated glass-fiber.

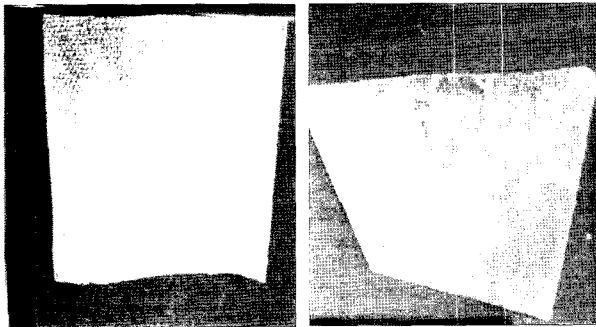


Fig. 5. Sample of laminated roving cloth and mat.

박리 절단기를 이용하여 FRP 폐기물을 자른 것이다. 왼쪽 로빙층의 두께는 약 1 mm 안팎이고, 오른쪽의 매트층은 3-7 mm 정도로 다양했으며, 그 이유는 폐FRP의 두께와 두 유리섬유의 조성비 그리고 도포된 수지량이 균일하지 않기 때문에 발생한 것으로 사료된다. 기존의 단편 파쇄시스템(윤구영 [2007])과 비교하면, 기계효율성과 안정성 그리고 분진 및 소음 절감 측면에서 획기적 개선이 있었으며 가장 큰 장점은 유리면포 전체를 추출가능하다는 것이다. 또 추출된 유리면포로부터 섬유강화콘크리트(FRC)용 섬유강화재로 사용할 있는 다양한 종류(길이 및 폭)의 유리섬유를 생산할 수 있게 되었다(윤구영 등[2007]).

폐FRP로부터 로빙층을 추출할 수 있다면 기존 고가의 수입산 FRC(fiber reinforced concrete) 용 합성섬유를 대체 할 수 있다. 기존의 단편파쇄시스템의 폐FRP 파쇄물(유리섬유)은 장섬유의 길이가 최대 16 mm 정도로서 기존의 FRC섬유의 길이인 50 mm와 비교하여 길이가 크게 부족하여 섬유강화재로서 특성이 한정적인 것이 현실이었다. 본 연구는 국내 최초로 개발된 폐FRP 면포추출 시스템을 이용하여 50 mm 이상의 장유리섬유를 폐FRP로부터 얻을 수 있게 되었다.

2.2.2 단일 유리면포 추출 방식

다중면포 추출장치의 장점은 생산 효율성이 높은 반면, FRP선박의 성형 및 조성비 구성의 다양성을 모두 해결 하지는 못하는

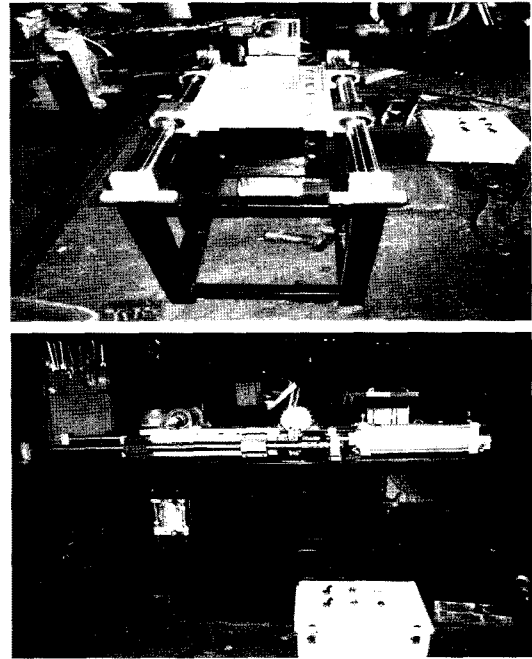


Fig. 6. Extracting system of laminated glass-fiber.

단점이 있다. 조선소의 특성에 따른 매트층과 로빙층의 다양한 조합 모두에 맞는 다중추출 시스템의 개발은 비효율적이기 때문이다. 따라서 이를 보완하기 위하여 단일 면포 추출장치를 개발하였다.

Fig. 6에서 보인 장치는 상면에 형성된 레일과 레일의 길이방향으로 천공된 장공을 구비한 베드와 베드를 받치고 있는 받침대로 구성되는 프레임에 보여주고 있다. 레일에 안내되어 베드 상부에서 실린더에 의하여 폐FRP는 수평 운동을 하게 된다. 더불어 FRP 폐기물을 절단시키는 원형의 칼날과 칼날을 고정시키는 프레임으로 구성 된다. 측면에는 폐기물 장착함과 FRP폐기물의 위치를 정확히 제어하는 에어실린더를 구비하는 공급부가 추가로 구성되어 있다. 또한 본 연구에서는 상기 프레임에 제어부가 추가로 구성되며 상기 제어부는 스텝모터, 구동모터와 에어실린더가 연결되어 FRP 본체의 이송속도와 에어실린더의 공기압을 제어한다. 이송 속도와 압력 그리고 실린더 공급압력 등이 절단 효율에 미치는 영향이 매우 크므로 많은 반복 작업을 통하여 최적의 운전 매뉴얼을 설정할 수 있었다.

부가적으로 스텝모터 등의 적절한 구동을 통하여 FRP를 단계적으로 이송함으로써 유리면포의 길이와 폭 등의 조절 기능을 첨가할 수 있다. 또한 절단 시 분진과 소음 그리고 재료별 분류의 편의성을 확보하는 현장 운영 체계(격리된 박리공정 및 유리면포 분리장치 등)도 개발되었다. 앞서 Fig. 6에서 보인 로빙층은 다시 유리섬유로 가공되어 여러 형태의 섬유보강재로 사용될 것이며, 고농도의 수지가 함유된 매트층은 폐자원 재생에너지 분야에서 크게 각광받는 재료로 쓰이게 될 것이다.

유리 면포 추출장치의 효율성을 개선하기 위하여 대량의 유리면포를 폐FRP에서 층상으로 신속하게 분리 할 수 있어야 할 것이다. 즉 박리 메커니즘이 FRP에 직접 작동하여 유리면포를 분리하는

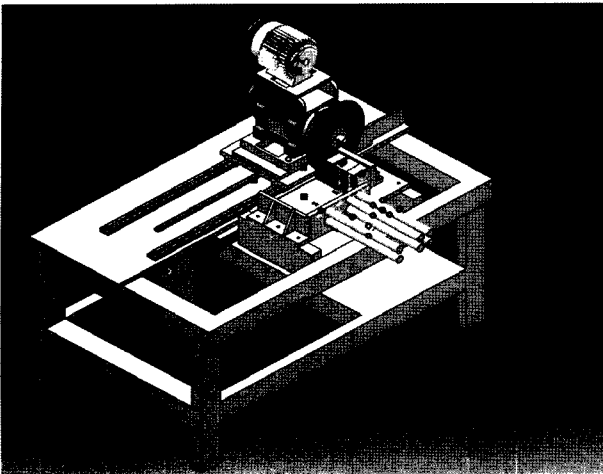


Fig. 7. Active extracting system of laminated glass-fiber.

시스템의 개발이 필요하다. Fig. 7은 대용량 또는 다양한 평면의 FRP를 효과적으로 박리할 수 있는 직접 구동형 면포추출 시스템이다.

특히 출원 중인 본 장치는 커터 어셈블리(Cutter assembly), FRP 폐기물 공급계통, 구동장치 그리고 프레임으로 구성되며, 프레임은 위에 커터 어셈블리와 폐기물 공급계통 등의 장치를 설치하기 위한 베드부분과 이것을 받치고 있는 받침대로 되어 있으며 베드 아래에는 커터 어셈블리를 이송하기 위한 구동 모터와 이송장치가 있다. 베드 위에는 좌우로 길게 2열로 커터 어셈블리가 작동되기 위한 레일이 있고, 그 위에 커터 어셈블리와 구동용 모터가 있다. 레일과 직교방향으로 폐기물 공급계통이 설치되어 있으며 이 공급계통은 폐기물이 절단되는 동안 일정한 힘으로 폐기물을 잡아서 밀어주는 실린더와 이 실린더에 공기를 공급하는 장치 그리고 폐기물 장착과 간격조절용 나사 등으로 구성된다. 이 외에 커터 어셈블리 이송속도 및 커터 회전속도 그리고 실린더 공기압 등을 조절하기 위한 제어판이 있다.

3. 결 론

본 연구에서는 폐FRP 재활용공정에서 필수요소인 효과적 유리면포 추출장치를 개발하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 유리면포 추출 장치개발

폐FRP의 구성특성에 따른 다중면포 동시 추출 시스템과 단일면포 추출장치를 개발하였다. 이로써 FRP선박의 모든 성형 특성(유리섬유 조성비 등)에 맞게 면포추출시스템을 적용 할 수 있으며 시스템 운영에 있어서도 적절한 운영체계를 구축하게 되었다.

(2) 유리면포의 활용성 개발

편의성이 증대된 운영 체계 하에서 다양한 크기의 유리섬유를 생산할 수 있는 유리면포를 추출 하게 되었다.

(3) 폐FRP 선박의 재자원화 지원기술 개발

본 추출장치를 전처리장치로 활용하여 폐FRP의 유리면포의 재자원화(고부가가치화) 뿐만 아니라 남은 파쇄잔유물인 매트층의 재생에너지 연구(가스화와 고형에너지화 등)를 지원하게 되었다.

따라서 개발된 폐FRP 유리면포 추출기는 폐FRP 선박의 단순 재활용을 넘어서, 현재의 에너지 고갈에 따른 신재생에너지 연구에 있어서 새로운 기회를 줄 수 있을 것으로 사료된다. 앞으로도 유리면포 추출시스템의 산업화 및 양산화 기술 등에 있어서 많은 연구와 지원이 있을 것으로 기대한다.

후 기

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

참고문헌

- [1] 길상인, 윤진한, 성흥근, 진태병, 정노택, 김선동, 강창구, 2005, “폐 FRP 선박 용융인정화 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 로빙층에서 분리한 유리섬유의 재활용 I: 섬유강화 모르타르의 물성에 관한 연구”, 한국해양환경공학회지, Vol. 10, No. 2, 102-106.
- [6] 이은재, 정노택, 김선동, 진태병, 2007, “폐 FRP 선박처리 현황 및 관련 법제도 고찰”, 한국해양과학기술협의회 공동학술대회, 2711-2719.
- [7] Bartholomew, K. 2004, Fiberglass Reinforced Plastics Recycling, Dec. Report, MnTAP.
- [8] Defosse, M. 2003, “Composites: European industry hunts for recycling solutions under new EOL-V laws”, Modern Plastics, Vol.80, No.6 73-82.
- [9] Majumdar, A. J., Singh, B., Langly, A. A. and Ali, M. A. 1980, “The durability of glass fiber cement-the effect of fiber length and content”, J. Mater. Sci. Vol. 15, No. 5, 1085-1096.
- [10] Shibata, K. and Zairyo, K. 2006, “Desired environmental response from FRP/FRTP-FRP recycle technology using atmospheric pressure dissolution method”, Engineering Materials, Vol.54, No. 4, 58-61.
- [11] 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.
- [12] Yoon, K. 2007, “Developing Practical Recycling methods of FRP Boats”, Proceedings of the 3rd East Asian Workshop for Marine Environment.

2007년 12월 17일 원고접수

2008년 2월 15일 수정본 채택