

고강도 콘크리트의 내화성능 용도에 따른 FRP재활용 공정 개발

이승희¹ · 박종원² · 윤구영^{3,†}

¹홍익대학교 과학기술대학 바이오화학공학과

²홍익대학교 과학기술대학 건축공학과

³홍익대학교 과학기술대학 기계정보공학과

Development of FRP Recycling Process for Regenerating Applications of Fire Resistance Performance of High Strength Concrete

Seung Hee Lee¹, Jong Won Park² and Koo Young Yoon^{3,†}

¹Department Bio. & Chemical Engineering, Hong-Ik University, 2639, Sejong-ro, Jochiwon, Sejong 339-701, Korea

²Department Architectural Engineering, Hong-Ik University, 2639, Sejong-ro, Jochiwon, Sejong 339-701, Korea

³Department Mechano-Informatics Engineering, Hong-Ik University, 2639, Sejong-ro, Jochiwon, Sejong 339-701, Korea

요 약

환경문제를 야기시켰던 해상용 FRP재활용에 대해 지난 10여 년간 다양한 국가적 지원이 이루어져서 폐FRP로부터 콘크리트 강화용 섬유 제작이 진행되어 왔다. 이렇게 제작된 강화 콘크리트에 대해 구조적 능력까지 시험한 바 있다. 시험 테스트 결과 재활용 FRP 가루를 사용한 콘크리트는 고강도 콘크리트의 압축강도를 감소시키지 않았을 뿐 만 아니라, 고강도 콘크리트의 내폭 특성을 상당히 증대시켰다. 그러나 폐FRP로부터 매트층의 분리 방법이 안정화되지 않았기 때문에 폐FRP 섬유 가루의 특성에 대한 연구는 종결되지 않았다. 본 연구는 폐FRP로부터 매트층을 분리하는 효과적이며 친환경적인 새로운 방법에 관한 것이며, 이것은 내폭성이 강한 제품이나 구조물에 적합한 FRP섬유가루 생산 공정에 유용한 재활용 공정이라 생각한다.

Abstract – In the last decade, increasing national research fund for recycling the waste FRP (fiber reinforced plastics) ships which has caused environmental problems, improves the technology making concrete-reinforcing fibers out of the waste FRP. Furthermore, the concrete with recycled FRP fiber was tested for the structural performance. Experimental strength tests show that use of recycled FRP powder does not reduce the compressive strength of high strength concrete, and does increase the fire resistance performance of high strength concrete significantly. But, the study in investigating the properties of recycled fiber powder from waste FRP has not been completed because of the absence of the method of separation of mat layer from the waste FRP. This study is to propose a new extracting method of the mat layer from waste FRP, which is the efficient and environment friendly system. and thus it is considered to be the useful recycling method for fire resistance high concrete products or structures.

Keywords: Waste FRP Boat Regenerating(폐FRP 선박의 재자원화), FRP Powder(FRP 섬유가루), Eco-friendly Mechanical FRP Recycling(친환경적 FRP재활용), Mat Layer(매트층), Fire Resistance High Stress Concrete(내폭성 고강도 콘크리트)

1. 서 론

최근 들어 많은 국가적 지원(Kim *et al.*[2007], Paek *et al.*[2010])을 통하여, 친환경적이면서도 경제성을 확보한 많은 폐FRP재활용 공정들이 보고되었다. 로빙면포추출기를 통해 폐 FRP 선박으로부터

Fig. 1과 같은 로빙(유리섬유)층을 비교적 쉽게 분리해 내는 기술이 개발되었다(Yoon *et al.*[2007], Lee and Yoon[2013]). 제안된 로빙면포추출기에 의한 폐 FRP 재활용 기술은 분쇄방식에 비해 경제적인 것으로 나타났다. 또한 로빙면포추출기에 의해 폐 FRP 선박으로부터 분리해 낸 재활용 유리섬유의 혼입이 콘크리트 재료의 역학적 특성에 미치는 영향에 대한 연구를 통해 재활용 FRP가 콘크리트 재료의 휨강도와 인장강도를 개선할 수 있는 것으로 나타났다

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

다(Park et al.[2009, 2014]). 또한 재활용 유리섬유의 혼입이 철근 콘크리트 부재의 구조적 성능에 미치는 영향에 대한 실험연구를 통해 재활용 유리섬유(섬유가루)가 콘크리트 보 부재의 전단강도와 콘크리트 기둥 부재의 압축강도를 개선할 수 있으며(Park et al.[2010], Lee et al.[2014]), 콘크리트 보-기둥 접합부의 내진성능 개선에 기여할 수 있는 것으로 나타났다(Park et al.[2011], Lee et al.[2014]).

대부분의 FRP는 불포화 폴리에스테르수지와 유리섬유를 적층하여 만들어진 복합재이므로 로빙면포추출기를 통해 폐 FRP 선박으로부터 유리섬유층을 분리해 내는 과정에서 유리섬유보다는 폴리에스테르수지가 더 많은 가루(이하 재활용 수지가루)가 발생한다. 반면에 유리섬유층으로부터 콘크리트의 강도 보강을 위해 Fig. 1과 같은 유리섬유를 파쇄하는 과정에서는 폴리에스테르수지보다 유리섬유가 더 많은 가루(이하 재활용 유리가루)가 발생한다. 이러한 수지 및 유리가루는 소각처리 시 높은 비용이 발생할 수 있으며 매립할 경우 환경문제를 일으킬 수 있다(Sun et al.[1995], Kim et al.[2004]). 한편 초고층 구조물에 사용되는 고강도 콘크리트는 화재 시 콘크리트 내부에 수증기압이 발생하는데 고강도 콘크리트의 경우, 이 수증기압이 외부로 충분히 배출되지 못함으로써 내부 응력에 의한 폭렬(spalling) 현상이 발생할 수 있다(NISTIR[1996], Song[2004]). 이러한 폭렬 현상을 방지하기 위한 방법으로써 폴리프로필렌(PP) 섬유나 폴리론 파이버(PF) 섬유를 혼입시켜주는 방안에 대한 연구가 진행되어 왔다(Yoo et al.[2009], Han et al.[1999], Pierre[2001]). 그러나 이러한 섬유들이 고가라는 점이 섬유 강화 고강도 콘크리트의 내화성능 개선방안의 상용화에 가장 큰 걸림돌로 작용하고 있다.

따라서 폐FRP로부터 로빙면포층(유리섬유가 주성분)만 분리할 수 있다면 남은 재료들은 수지매트층(대부분 수지 성분)이 되게 되며(Fig. 1), 추출된 수지매트층을 활용하여 섬유가루를 생산할 수 있게 된다.

이에 본 연구는 사전 연구를 통해 폐 FRP로부터 콘크리트용 섬유강화제를 경제적으로 제조할 수 있는 장치를 개발하였으며 이 장치를 사용하여 만들어진 재활용 섬유강화제는 현재 수입 사용되는 고가의 섬유강화제와 유사한 수준의 우수한 기계적 및 화학적 물성을 갖는 것을 확인하였다. 따라서 본 연구는 개발된 폐 FRP를 활용한 섬유강화제 제조기술을 콘크리트 강도 강화용(고강도 콘크리트 내폭렬성) 재활용 FRP 섬유를 생산해 내는 공정에 응용하고자 한다.

폐 FRP 선박의 재활용 공정을 통하여 다량의 섬유가루(수지 및 유리가루)가 발생한다. Lee et al.[2014]의 연구에 따르면, 해당 섬

유가루의 혼입이 고강도 콘크리트의 압축강도 및 내화성능에 미치는 영향이 매우 우수하여 고가의 내폭렬 수입섬유강화제를 대체 할 수 있음을 보고 하였다. 따라서 본 연구는 고가의 섬유강화제에 대한 수입대체 효과를 통한 경제적 중요성 뿐 아니라 환경문제의 해결과 동시에 고부가가치 폐기물을 재자원화라는 산업적 중요성을 동시에 확보하는 기술이라 할 수 있다. 그러나 보고된 폐 FRP 섬유강화제를 적용함에 있어서 절대적 전제 조건이 확인 되었다. 즉 재활용 FRP 섬유가루의 혼입이 고강도 콘크리트의 압축강도를 감소시키지 않으면서도 수입산 내폭렬 PP섬유를 대체할 정도의 내화성능을 발휘할 수 있기 위해서는 섬유가루의 수지 성분이 60% 이상이어야 한다는 것이다. 따라서 건설재료로서 가장 대표적으로 사용되는 콘크리트, 특히 고강도콘크리트의 내진성능 및 내화성능을 개선하는데 본 재활용 섬유가루가 사용될 경우 환경문제의 큰 요인이 되고 있는 폐 FRP의 재활용이 획기적으로 이루어질 것이며 고강도 콘크리트의 성능향상을 통한 자원의 절약과 건설산업의 경쟁력 강화에도 크게 기여할 수 있을 것이다.

2. 본 론

2.1 고강도 콘크리트의 내화성능(내폭렬성) 용도에 따른 FRP 재활용 공정 실용화

2.1.1 기존 FRP 파쇄시스템

기존의 전처리기는 크기가 일정치 않은 1차 해체물을 2차 로빙면포 추출기에 투입할 수 있는 크기로 절삭하는 과정이다. 이 때 회전하는 칼날에 의해 발생하는 분진과 소음으로 인한 작업 환경이 열악해진다.

원형 칼날에 의한 기존의 횡 방향 절삭방식으로는 로빙면포층이 끊어져 작업성이 저하된다. 또한 칼날의 이송이나 절단시 모든 제어가 자동화 되지 않아 작업의 연속성이 떨어진다. 이러한 문제점들을 정리하면 다음과 같다.

1) 전처리기의 비효율성

전처리기의 절단 방식을 살펴보면 선체에 심하게 만곡된 부분에 대해 곡률 반경을 최소화하기 위해 샤프트에 걸린 칼날의 간격을 가변적으로 조절할 수 있게 하여야 한다. 또한 여러 개의 칼날이 동시에 작동 하여 작업성을 높여야 한다. 하지만, 칼날이 동시에 작동함에 따라 소음이 커지고 분진이 발생하여 작업자의 작업 효율을 저하시킬 수 있다. 따라서 전처리기 자체의 작업성과 작업자의 작업성을 동시의 높이기 위해서는 소음과 분진문제의 해결이 시급하다.

2) 로빙면포 추출기의 비효율성

기존의 로빙면포 추출기의 추출 방식을 살펴보면 원형 칼날에 의한 횡 방향 절삭방식을 채택하여 Glass fiber를 추출한다.

전 처리기에서 절삭된 폐FRP를 투입구에 투입한 후 에어실린더와 가이드에 의해 피파쇄물이 고정된다. 고정 후 후면부 에어 실린더에 의해 피파쇄물은 앞으로 전진하여 횡 이동 절삭하는 원형칼날에 의해 절삭되게 된다. 이때 칼날에 크기에 피파쇄물의 높이가 정해지게 된다. 칼날에 모터를 달아 벨트에 의한 구동이 가능하게 설계하였

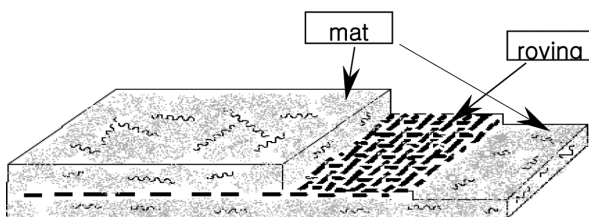


Fig. 1. The FRP structure (mat and the roving layers).

지만, 모터를 작동시키지 않아도 이송부의 횡 이동하는 힘으로서 피과쇄물은 절삭되게 된다. 하지만 이송 마력이 부족하면 칼날 회전은 가능하지만 칼날 회전시 로빙면포층이 끊어지기 때문에 칼날의 회전을 자제하도록 설계되었다. 이러한 방식에서 발생하는 문제점들을 살펴보면 크게 두 가지로 나눌 수 있다.

첫째, 장치의 제어를 수작업으로 실시하므로 이로 인한 작업성의 저하와 정확도가 감소되었다.

둘째, 로빙면포 추출기에 원형칼날 사용의 한계성이 드러났다. 원형칼날은 적층구조의 경계면(매트수지층과 로빙층의 경계)에 정확히 위치한 후, 칼날이 횡 이동하는 과정에서 칼날과 경계면의 접촉 부위가 넓어 횡 이동 중 경계면을 이탈하여 로빙면포가 끊어지는 현상이 발생 된다. 이는 최초 FRP 선박 건조자의 작업성에 따라 로빙면포층이 항상 수평하지 않아 발생하는 문제이므로 이러한 폐 FRP의 가변성을 모두 충족시킬 수 있는 칼날의 개발이 필요하다.

3) 자동화된 로빙면포층 및 매트층 추출시스템의 필요성

폐FRP를 처리하는 과정에서 발생하는 소음과 분진은 인체에 무해하지만, 작업장의 작업 환경을 해쳐 작업 능률의 저하를 초래하기 때문에 이러한 소음과 분진 문제 해결이 시급하다.

가장 이상적인 해결 방법은 폐FRP 로빙면포층 및 매트층 추출 시스템의 자동화를 통해 인력활용을 최소화하는 시설의 개발이다.

2.1.2 개선된 로빙면포층 추출 시스템의 개발

새로운 로빙면포 추출 방식의 기본 이론은 FRP의 직교 이방성에 기초를 둔다. FRP가 구조상의 특징인 직교 이방성 재료라 했을 때, 복합재료의 응력 및 파괴 에너지 해석이 이루어진다(Kim *et al.* [2010]). 따라서 횡단방향으로 cutting을 하였을 때 매우 적은 에너지(약 1/23)로서 파쇄 할 수 있다는 것을 보여준다. 또한 FRP는 복합적층 구조로서, 특히 20여년이 지난 폐FRP 선박의 경우는 강도 용이 아닌 형상구성용으로 사용된 매트층(chopped strand glass mat)은 수지를 많이 함유하고 있으므로 로빙층(roving cloth layer)에 비하여 상당 수준 재료의 변질(degrading)이 진행되어 강도 특성이 매우 취약한 상태이므로 적층분리와 횡단방향 절단을 응용한 파쇄 시스템을 구상하게 되었다.

1) 향상된 기능의 전처리기

선박을 해체하고 난 폐 FRP는 로빙면포 추출기에 투입되기 위해 하나의 공정을 더 거치게 된다. 크기가 일정치 않은 1차 해체물을 일정한 크기로 자르는 과정으로, 로빙면포 추출기에 투입할 수 있도록 정해진 규격(300 mm×120 mm)으로 절삭하게 된다. 이 때 이 규격은 선체에 심하게 만곡된 부분에 대해 곡률 반경을 최소화 할 수 있도록 정한 것이다. 이 때 곡률 반경을 줄이는 과정은 2차 추출 과정에서 로빙면포층의 휘어짐을 최소화 시키는 것에 있다.

선박으로부터 해체된 폐FRP를 이송부에 투입하여 전진시키고, 정해진 위치(300 mm)에 도달하면 유압실린더로 고정시킨다. 이 때 이송방향과 직각으로 설치된 칼날이 전진하면서 고정된 폐FRP를 절단한다. 그리고 절단된 폐FRP를 가지고 위와 동일한 방법으로 정해진 위치(120 mm)만을 변경하여 절단한다. 이 때 절단과정에서

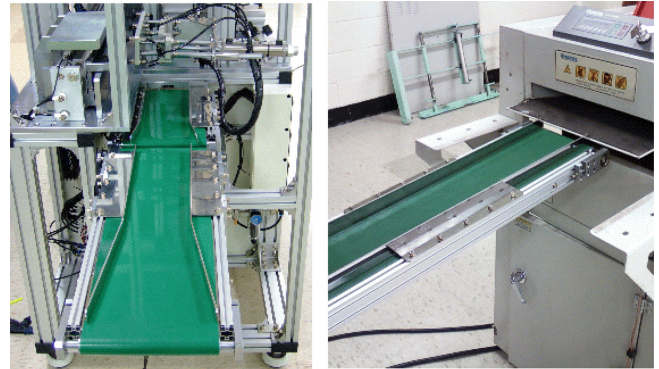


Fig. 2. The belt conveyor of the extracting system.

의 분진과 소음에 대한 문제는 칼날 회전부에 케이스를 덮고 집진 장비를 설치하여 해결하였다. 케이스에 의한 방음 효과와 집진 설비로 분진 방지에 따른 작업자의 능률 상승이 예상된다.

2) 로빙면포추출기 개선

개선된 로빙면포 추출기의 로빙면포 추출 방식은 다음과 같은 문제점들을 고려하여 설계 하였다.

첫째, 기존의 미흡했던 공정과정을 보완하여 이송방식에 대해 고찰함으로써 폐FRP 재처리시설의 자동화를 도모하고자 하였다. 이를 위해 컨베이어의 설치와 흡착기를 활용하여 자동공정을 이루었고, 로빙면포위치에 따른 종류별 프로그램을 개발하도록 구상하였다.

설치한 컨베이어의 선정조건으로는 ① 시설 ② 운반물 ③ 운반량 ④ 운반경로 ⑤ 운반방법 ⑥ 설치장소 ⑦ 설비효과 등이 필요하다. 따라서 위의 7가지 선정조건을 고려하여 최적의 자동화 공정을 이루기 위한 컨베이어를 선정하였다.

Fig. 2는 로빙면포추출기에 설치된 컨베이어를 나타낸 사진이다. 이 컨베이어는 벨트컨베이어방식으로 구성되어있다. 벨트컨베이어 방식은 운반 조적이 연속적이므로 동작이 원활 정속하고 능률적이다. 그리고 설비비에 비하여 운반량이 많다. 또한 운전 신뢰도가 높고, 보수 점검이 용이하며 유지비가 적게 든다. 따라서 모든 조건을 고려해 보았을 때 로빙면포추출기 자동화 공정에 필요한 컨베이어는 벨트컨베이어방식이 적합하다.

둘째, 폐FRP 재처리시설의 이송방식과 정렬방식을 고려하여, 흡착기를 설치함으로써 이송방식으로는 부족한 폐 FRP 재처리시설의 자동화를 완성하였다.

Fig. 3은 이송된 파쇄물을 절단부로 옮겨주는 흡착기와 이동 통로를 보여주고 있다.

새로운 로빙면포추출방식은 기존의 횡 방향 절삭과는 다르게 종 방향으로 절삭이 이루어지게 되므로 파쇄물이 세워진 상태로 절삭부에 이송되어야 한다. 하지만 전처리과정에서 나오는 파쇄물은 눕혀진 상태로 이송되어 오기 때문에 자동화 공정을 이루기 위해서는 파쇄물의 위치변경을 위한 새로운 정렬방식이 필요하게 된다. 이를 위해서 흡착기를 이송부분과 절삭부 사이에 설치하여 파쇄물의 위치변경을 가능하게 하였다.

이송부분인 벨트컨베이어를 통해 이송된 파쇄물이 흡착기가 설

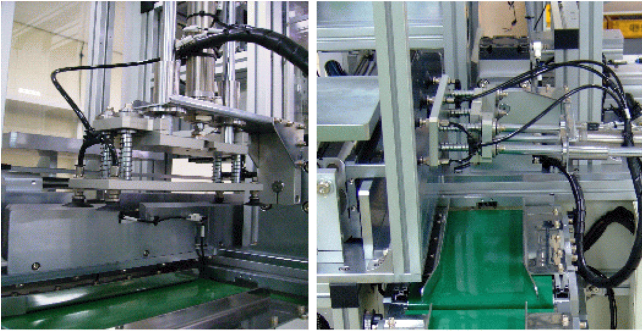


Fig. 3. The FRP block suction system.

치된 곳까지 옮겨지게 되면 흡착기 밑 4개의 모서리에 부착된 고무압판에 의해 파쇄물을 고정하게 된다. 흡착기 중간부분에 설치된 공압실린더에 의해 고정된 파쇄물은 흡착기에 완전히 부착되고 난 후 흡착기가 들어 올려지고, 90도 회전하여 파쇄물을 절삭부 앞까지 전달시켜준다. 절삭부 옆에는 ‘ㄱ’ 자 모양의 금속가이드가 설치되어 있는데 파쇄물이 절삭부에 놓이게 되면 이 금속가이드는 절삭부에 놓인 파쇄물을 절삭날 앞까지 밀어 전달하게 된다.

셋째, 자동화 공정에서 가장 중요한 파쇄물의 추출방식을 고려한 설계, 새롭게 고안된 로빙면포 추출기는 기존의 원형 칼날에 의한 횡 방향 절삭방식 대신에 췌기형 칼날을 채택하여 종 방향으로 로빙면포를 떼어낸다. 기존의 로빙면포 추출방식과 가장 큰 차이점은 칼날에 의해서 로빙면포를 절삭하는 방식이 아닌 로빙면포를 떼어내는 방식이라는 점이다.

기존의 원형칼날은 일관성이 부족한 단점이 있다. 파쇄물에서 로빙면포조각을 떼어낼 때 처음에는 잘 절삭되더라도 접촉력의 문제라던가 기타 여러 가지 이유로 인해 한번 어긋나기 시작하면 로빙면포 조각이 찢어지는 문제가 발생하게 되었다. 또한 굴곡이 있는 파쇄물일 경우 굴곡에 따른 절삭이 불가능하여 역시 로빙면포 조각이 찢어지는 문제가 발생하였다. 또한 이송마력이 부족하게 되면 원형칼날의 회전속도가 줄어들게 되고, 로빙면포층이 찢어지는 또 하나의 원인이 되기도 하였다. 칼날의 이러한 문제점들을 고려하여 기존의 횡 방향으로 절삭하던 원형칼날을 대신하여 종 방향으로 절삭하는 췌기형 칼날을 채택함으로써 기존의 원형칼날이 가지고 있던 여러 문제들을 해결하였다(Fig. 4).

새로운 절삭방식은 가이드를 통해 파쇄물이 절삭부로 이송되어 오면 췌기형 칼날과 양쪽의 칼날이 종 방향으로 절삭하게 된다. 절삭부로 옮겨진 파쇄물은 분류기와 절삭부 사이에 위치한 가이드로 고정되고 췌기형 칼날이 종 방향으로 내려와 앞뒤로 움직여 로빙면포를 떼어낸다(Fig. 4).

폐FRP는 일정한 로빙면포층을 가지고 있는 것이 아니고 다양한 층을 가지고 있기 때문에 로빙면포층의 개수, 위치에 따라 칼날의 위치가 달라져야 한다. 따라서 로빙면포층의 개수에 따라 프로그램 구성이 달라진다. 앞의 분류방식에서 폐FRP의 적층구성에 따른 프로그램 구성표를 보면 적층구성에 따라 서로 다른 10개의 프로그램 구성이 필요하다는 것을 알 수 있다. 파쇄물이 전처리과정을 거쳐

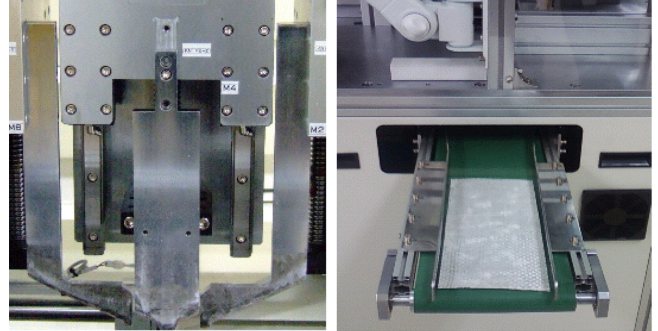


Fig. 4. The wedge type blade and a sample layer.

벨트컨베이어를 통해 이송되면 파쇄물의 적층구조를 살펴 정해진 프로그램을 입력한다. 파쇄물의 적층구성에 따라 프로그램된 방식에 의해 가운데에 있는 췌기형 칼날이 로빙면포와 매트수지층을 구분하여 종 방향으로 내려와 로빙면포를 절삭하기 시작한다. 이 과정에서 췌기형 칼날은 단순히 종 방향으로 움직이는 것뿐만 아니라 앞뒤로 움직여 로빙면포층을 매트수지층으로부터 분리한다.

어느 정도 절삭되면 췌기형 칼날은 더 이상 이동하지 않고 양 옆에 있는 보조칼날이 파쇄물의 절단된 단면에 들어와 양옆으로 서서히 이동하여 로빙면포층을 떼어내기 시작한다. 여기서 중요한 점은 양 옆의 칼날은 로빙면포와 매트수지층을 잘라내는 것이 아니라 떼어내기 위한 것이므로 가운데의 췌기형 칼날에 비해 날이 날카롭지 않다는 것이다. 세 개의 칼날을 사용하여 절삭하기 때문에 파쇄물에서 로빙면포조각을 떼어낼 때 로빙면포와 매트수지층 사이의 어긋남을 없애 로빙면포조각이 찢어지거나 로빙면포에 수지가 많이 묻어있는 문제를 해결할 수 있다. 또한 굴곡이 있는 로빙면포 조각을 절삭할 때에도 마찬가지로 절삭이 가능하게 된다.

3) 폐FRP 면포층분류 방식의 프로그램화

FRP 적층구성은 최초 작업자의 작업 방식과 목적에 따른 몇 가지의 규칙성이 있었다. 규칙성은 크게 두 가지로 분류(로빙면포층의 개수와 위치)가 가능하였다. 먼저 층의 개수로 나누어 보면, 최초 FRP 생산자의 목적에 따라 로빙면포 층을 1장 삽입한 FRP와 2장내지 3장까지 삽입한 FRP가 존재하였다. 로빙면포 층의 개수가 달라지면 절단 횟수 또한 달라지므로 층에 따른 변수를 고려하여 로빙면포 추출기를 프로그래밍 하여야 한다.

먼저, 로빙면포 층의 위치에 따른 분류를 살펴보면 다음과 같다. Fig. 5는 로빙면포 층을 1장 포함하고 있는 폐FRP의 단면이다. 그림에서 보듯이 로빙면포 층이 끝단이나 중앙에 위치하는 2가지 변

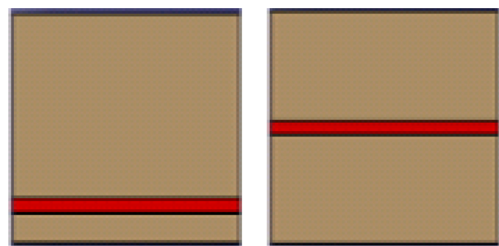


Fig. 5. A FRP Type with single roving layer.

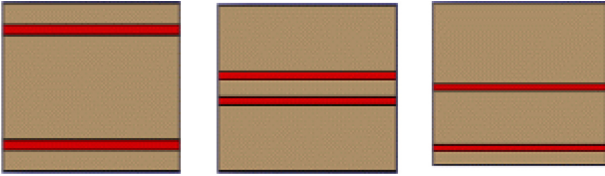


Fig. 6. FRP Types with two roving layers.

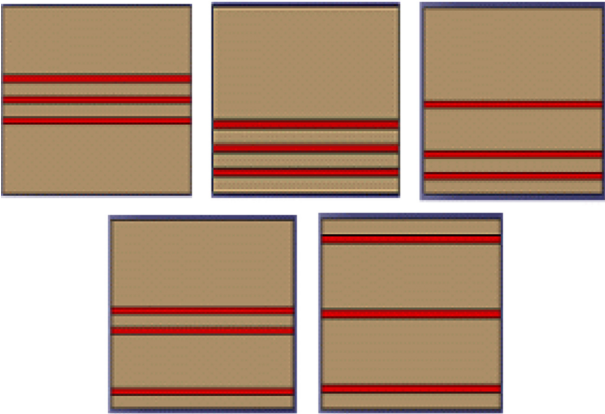


Fig. 7. FRP Types with three roving layers.

수가 있다.

Fig. 6은 로빙면포층을 2장 포함하고 있는 폐FRP의 단면이다. Fig 6은 로빙면포층의 위치가 양 끝단에 2장, 중앙에 2장, 끝단에 1장과 중앙에 1장 위치하는 3가지 변수가 존재한다.

Fig. 7은 로빙면포층을 3장 포함하고 있는 폐 FRP의 단면이다. 로빙면포층의 위치가 중앙에 3장, 양 끝단에 3장, 중앙에 1장과 끝단에 2장, 중앙에 2장과 끝단에 1장, 양 끝단에 1장씩과 중앙에 1장 위치하는 5가지 변수가 존재한다.

폐 FRP의 적층구성에 따른 로빙면포층의 총 장수와 위치를 고려한 절단시 변수를 정리하면 Table 1과 같다. Table 1에서 볼 수 있듯이 로빙면포층 적출시 총 10가지의 다른 프로그래밍이 필요하다.

4) 최종형태의 자동화공정 메커니즘

폐FRP 재처리 시설의 전체 단계를 다시 살펴보면, 전처리기, 로

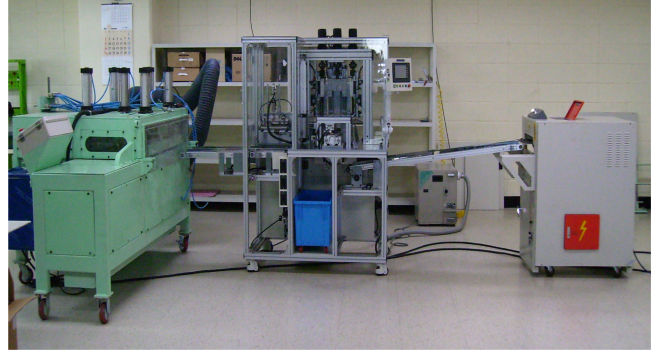


Fig. 8. Total FRP extracting system (pre-cutting part, main cutting part and FRP powder producing part).

빙층분리기 그리고 수지가루 분리기인 Fig. 8과 같다. 선반 해체를 제외한 나머지 단계들은 전처리 장치를 통과한 후 자동화된 하나의 작업 라인을 구축할 수 있다. 이처럼 여러 단계의 공정들을 하나의 일괄된 형태의 자동화된 작업 라인을 구축함으로써 작업의 효율성 및 연속성을 높일 수 있었다.

5) 염색장치(수지가루와 유리가루를 폐FRP 섬유강화제와 분리하는 장치) 개발

폐 선박으로부터 발생하는 섬유강화 플라스틱은 주로 유리섬유와 수지로 이루어져 있다. 이것은 복합재료로서 강도가 매우 커서 재활용하기 위해 분쇄하는 경우 많은 에너지를 소비해야 한다. 또한 분쇄 시 발생하는 분진은 환경오염을 야기할 수도 있다. 소각하여 열에너지로 얻는 경우는 수지가 소각되고 소각로에 잔존하게 되는 유리섬유 덩어리를 제거해야 하는 번거로움이 따른다. FRP로부터 유리성분을 얻어내는 방법에는 화학적인 방법으로 수지를 녹여 재활용하는 방법과 초임계 용매를 사용하여 수지를 녹이는 방법도 있다. 본 연구는 환경적인 문제나 에너지 소비적인 면과 재활용성을 고려하여 층간을 분리한 후 유리섬유가 70% 이상인 로빙층과 수지가 대부분인 매트층을 얻는 방법에 대해 것이며, 본 실험의 목적은 일련의 과정 중 공정의 단순화와 자동화를 꾀하는 과정에서 두 층을 쉽게 인식할 수 있도록 하기 위함이다.

보통의 소형과 중형의 폐선에서 사용한 FRP는 약 두 층의 로빙

Table 1. The Cutting Program Number for the FRP Type

Number of Roving Layer	Place of Roving Layer			Program #
	Upper Section	Lower Section	Middle Section	
1 Layer	Upper or Lower		None	NO.1
	None		1 Layer	NO.2
2 Layers	1 Layer	1 Layer	None	NO.3
	None		2 Layers	NO.4
	1 Layer in Upper or Lower		1 Layer	NO.5
	None		3 Layers	NO.6
	3 Layers in Upper or Lower		None	NO.7
3 Layers	2 Layers in Upper or Lower		1 Layer	NO.8
	1 Layer in Upper or Lower		2 Layers	NO.9
	1 Layer	1 Layer	1 Layer	NO.10

층을 가지며, 로빙층의 두께는 매트층의 약 1/7의 두께를 이룬다.

두 층을 기계적으로 칼날을 췌기처럼 이용하여 층 사이를 분리하는 실험을 수행하는 과정에서, 촘촘하게 유리섬유 가닥들이 짜여 있는 로빙층과 그렇지 않은 매트층은 물리적으로 쉽게 분리가 되었다. 그러나 칼날이 기계적으로 두 층의 약한 틈을 찾아 파고드는 것은 자동적으로 이루어지지 않았다. 또 다른 난점은 선박에 사용하는 FRP는 정해진 규격이 없어서 로빙층의 개수, 로빙층과 매트층의 두께가 조선소 마다 다르다는 것이다. 표준화되지 않은 시편을 자동화 시스템에 적용한다는 것은 인위적인 기준을 필요로 한다.

따라서 두 층의 물리적 또는 화학적 특성의 차이점을 이용하여 구별할 수 있도록 하여야 한다. 우선 유기고분자인 수지가 대부분인 매트층과, SiO₂로 대표할 수 있는 로빙층 중 어느 것을 없애거나 차별화하느냐에 따라 방법이 달라질 수 있다. 매트층의 수지를 녹이기 위해 고온의 진한 황산을 이용하여 왔으나, 그 방법이 너무 위험하여 실용성이 떨어진다. 본 그룹에서는 로빙층의 유리를 녹이기 위해 플루오르수소산(HF) 용액을 사용하였다.

HF 수용액으로 처리한 경우 눈으로 섬유의 밀도를 비교하여 로빙층을 판단할 수 있으나 광학적 센서를 이용하여 보다 정확하게 로빙층을 인식하고자 하였다. 수지의 경우는 소수성이고 섬유는 친수성이므로 친수성 염료를 사용하여 HF로 처리한 섬유를 착색하였다. 수용성 녹색 염료의 용액을 HF로 처리한 면에 붓으로 두 번 도포한 결과 Fig. 9에 보이는 결과를 얻었다. Fig. 9(a)는 HF 용액에 1시간 담근 후 염료를 칠한 FRP에 후광의 광원을 비친 후 촬영한 것으로 뚜렷하게 두 줄의 로빙층이 관찰된다. (b)의 사진은 광원을 옆에 두었을 때 로빙층의 유리섬유 다발들이 불룩하게 튀어나온 현상을 보이고 있다. 이것은 HF 용액만으로 처리하였을 때 눈으로 관찰된 것을 가시적으로 표현한 것이다. (c)는 (b)에서 불룩하게 튀어나온 섬유 단면들을 단단한 펜 끝으로 긁었을 때 쉽게 파이는 현상을 보인 것이다. 즉 HF 용액으로 처리한 경우 섬유가 녹아 약해져 있다는 것을 의미한다.

HF로 처리하지 않은 FRP에 대해 수용성 염료를 그대로 사용한 경우는 염료의 착색이 이루어지지 않고 HF로 처리한 이후에만 착색이 잘 되는 것으로 보아, HF가 FRP 단면의 섬유에 대한 친수성을 보장하는 것으로 결론지을 수 있다. 위의 결과로 염료의 농도를 기준으로 광학적 센서를 이용하면 매트층과 로빙층을 구별할 수 있을

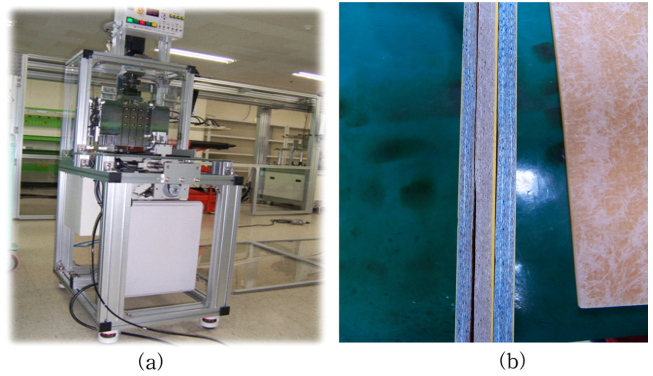


Fig. 10. (a) Photophysical differentiation System and (b) pre-treated samples of FRP waste.

것이다.

결론적으로 저탄소 실험을 추구하고 환경오염을 배제하고자 하는 본 연구에 유기용매의 사용은 적절하지 않으며, 예폭시 수지인 경우 그 용해도가 매우 떨어지므로 적절한 용매를 찾기도 어렵고 녹인 후의 수지 용액의 처리가 어렵다는 부작용도 가지고 있으므로 수지의 용해는 적절치 않다고 판단된다. 진한 황산을 사용하는 경우 위험하다는 점 외에 저급 황산의 경우 검게 변하는 성질로 인해 작업환경 및 외관상 추천할 만하지 않다. 로빙층의 유리섬유는 5분 이상의 시간 동안 HF 용액으로 처리하고 수용성 염료로 도포하면 매트층을 Fig. 10(b)처럼 구별할 수 있으며, 광학적 센서와 함께 자동화 공정에 이용할 수 있을 것으로 생각된다. 따라서 이 방법은 매우 간단한 공정이며서도 섬유가 주를 이루는 로빙층과 수지가 주를 이루는 매트층을 분리할 때 환경오염을 덜 발생시킬 것으로 예상된다.

6) 광학비전장치를 장착한 매트층 추출기

기존의 추출기에서 발생했던 소음과 분진발생 문제는 강화유리 설치와 흡진기를 통해 보완하였다. 강화유리는 흡착기 부분에 설치되어 소음 뿐 아니라 작업자의 안전을 도모하는 효과도 있다. 또한 절삭부에 흡진기를 설치하여 절삭시 발생하는 분진발산을 막아준다.

또한 전처리기와 세단기 사이를 벨트컨베이어로 연결하며, 자동 흡착기와 분류기를 설치함으로써 자동화 공정을 구현할 수 있게 되었다. 로빙면포층을 확인하고 파쇄물의 적층구조를 살펴 정해진 프로그램을 선택하고 입력하는 과정에서 비전시스템을 활용하여 작

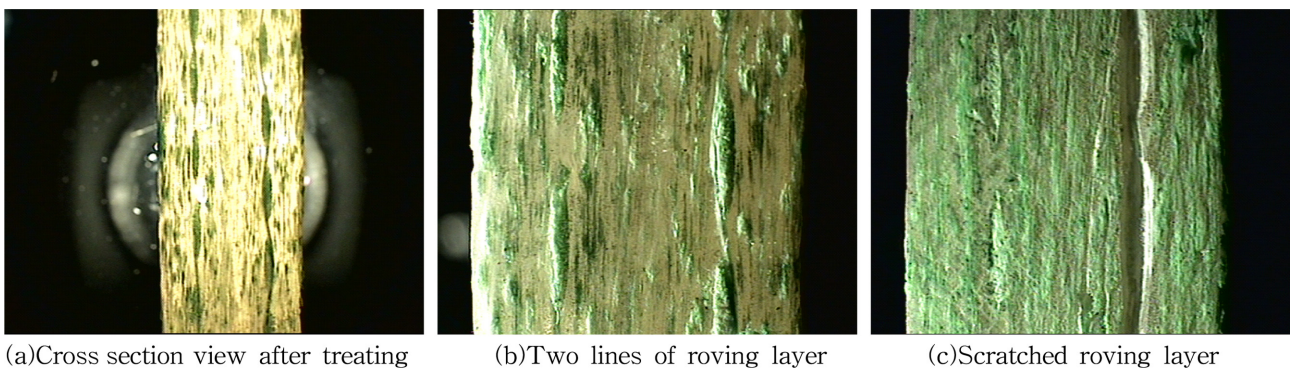


Fig. 9. Treatment of FRP roving layers with hydrofluoric acid and dye solution.

업자의 시각적 판단에만 의존하던 기존의 로빙면포 확인과정에서의 작업자가 담당해야 하는 부담을 많이 줄일 수 있게 되었다. 비록 투입되는 폐FRP의 조건(로빙면포층의 개수 및 구성 배열 등)에 따라 적절한 절삭프로그램을 수동 선택해야함으로 완전한 자동화를 이루었다고 보기는 어렵지만 기존의 면포추출기(단순 절단방식)에 비해 효율적이며 정확한 작업을 할 수가 있게 되었다.

기존 로빙면포 추출기는 로빙면포층을 추출하는 기계로 폐FRP를 재처리하는데 가장 핵심이 되는 기계이며, 기존의 로빙면포 추출과정은 크게 2단계로 나눌 수 있다.

1단계 : 전처리기에서 이송된 규격화된 폐 FRP 블럭을 정렬하는 단계로 공압을 이용하여 흡착기로 폐 FRP를 들어 올려 절삭위치를 정렬 한다.

2단계 : 정렬된 폐 FRP에서 로빙면포를 추출하는 단계로 왼쪽부터 1~3번 칼날이 있다(Fig. 6) 로빙면포가 절삭전 단계에 들어가면 위에 설치된 칼날 이송시스템을 조정하여 로빙면포층에 맞는 1-3번 칼날의 위치를 잡는다. 주축 칼날인 2번 칼날의 절단 후 2번 칼날의 위치에 따라 움직이는 1, 3번 칼날 절단작업으로 마무리 절삭을 한다.

기존의 추출공정에서는 주축(2번) 칼날의 위치 선정시 작업자의 시각적 판단에만 의지함으로써 절단 공정의 비효율성(정확성 및 공정효율 등)의 발생이 자주 일어나고 있어 로빙층의 염색과 비전장치를 통한 로빙면포추출장치(특히 등록)를 제작하였다(Fig. 11).

로빙면포제거를 통한 매트층 추출의 구조는 다음과 같다. 기존의 자동화 공정에서 가장 중요한 과정은 로빙층의 추출공정이다. 새롭게 고안된 매트면포 추출공정은 기존의 원형 칼날에 의한 횡 방향 절삭방식 대신에 췌기형 칼날을 채택하여 종 방향으로 로빙면포를 분리해낸다. 기존의 방식은 로빙면포만을 추출하기 위한 공정이라면, 본 공정은 칼날에 의해서 폐FRP로부터 로빙면포층만을 절삭하는 방식이 아닌 매트면포층을 동시에 분리하는(떼어내는) 방식이라는 점이다(Fig. 12).

기존의 원형칼날은 일관성이 부족한 단점이 있다. 파쇄물에서 로

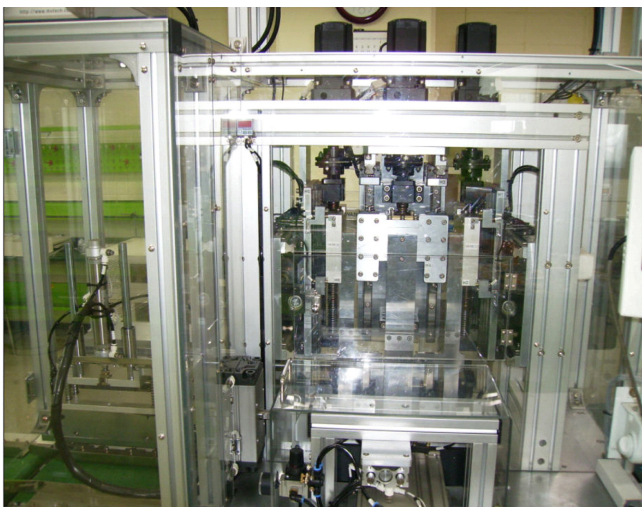


Fig. 11. Advanced distract system with vision system for layer differentiation.

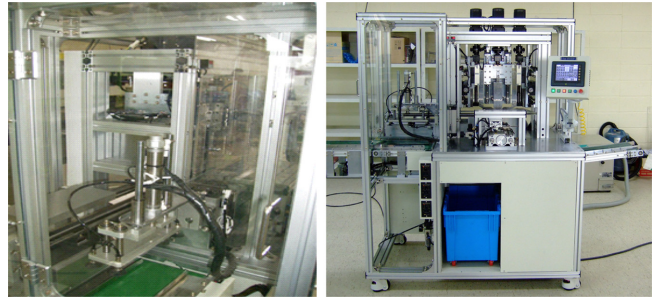


Fig. 12. Advanced vision system for layer differentiation.

빙면포조각을 떼어낼 때 처음에는 잘 절삭되더라도 접착력의 문제라던가 기타 여러 가지 이유로 인해 한번 정렬이 어긋나기 시작하면 로빙면포 조각이 찢어지는 문제가 빈번하게 발생하였다. 또한 굴곡이 있는 파쇄물일 경우 굴곡에 따른 절삭이 매우 어려우며, 일부 성공시에도 로빙면포조각이 찢어지는 문제가 발생하였다. 또한 이송마력이 부족한 경우에도 원형칼날의 회전속도가 줄어들게 되고 로빙면포층이 찢어지는 또 다른 원인이 되기도 하였다. 칼날의 이러한 문제점들을 고려하여 기존의 횡 방향으로 절삭하던 원형칼날을 대신하여 종 방향으로 절삭하는 췌기형 칼날을 채택함으로써 기존의 원형칼날이 가지고 있었던 여러 문제들을 해결하였다.

그러나 가장 핵심의 주된 개선은 비전시스템응용 절단시스템으로서 추출해야 될 로빙면포층의 위치를 염색을 통한 크게 개선된 광학이미지를 활용하여 컴퓨터가 지원하는 비전시스템의 로빙면포 위치 분석 자료를 연계(Lee and Yoon, 2013)된 것이다. 따라서 주축칼날 이송장치 지능화의 기술을 매트층 분리과정에 적용하여, 충분한 수지성분이 포함된 섬유가루(즉 매트층)만을 추출할 수 있게 되었다.

주축칼날의 이송시스템의 완전한 지능화는 로빙면포 추출시 로빙면포 조각이 찢어지는 문제 및 굴곡이 있는 로빙면포조각을 절삭할 때에도 마찬가지로 활용이 가능할 것이다. 이번 개선결과는 기존의 폐FRP에서 로빙면포층만을 효과적으로 추출함으로써 연계되는 대부분의 매트층(전체의 6/7)으로부터 수지 성분이 60% 이상인 섬유가루를 얻을 수 있다는 것이다. 따라서 건설재료로서 가장 대표적으로 사용되는 콘크리트, 특히 고강도콘크리트의 내진성능 및 내화성능을 개선하는 용도로 본 재활용 섬유가루의사용이 보장되는 것이다. 이는 재활용공정 전체의 경제성확보를 가능하게 할 것으로 예상된다. 따라서 앞으로도 본 추출시스템의 재활용 용도별 완전한 지능화를 위한 연구는 지속 되어야 할 것이다.

4. 결 론

고강도 콘크리트의 폭발현상을 방지하기 위해 사용되는 섬유는 우수한 내화성능에도 불구하고 섬유가 고가인 점이 산업현장에 있어 가장 큰 부담으로 작용하여왔다. 또한 기존 로빙층 로빙면포추출기를 사용하여 폐 FRP 선박의 재활용 시에 발생하는 잔유물인 섬유가루(유리가루와 수지가루 포함)는 환경문제를 일으킬 수 있다.

사전 보고된 연구결과에 따르면, 굳지 않은 콘크리트와 경화 콘크리트의 압축강도실험의 결과, 수지성분의 비율이 높은 섬유가루의 경우 섬유 미혼입 콘크리트에 비해 압축강도 감소가 없는 것으로 나타났으며, 또한 일정 수준 이상의 수지성분이 포함된 섬유가루의 경우는 내폭렬성도 갖는 것으로 보고되었다.

본 연구는 유의미한 수지성분이 포함된 폐FRP 섬유가루를 얻기 위한 매트층 추출공정을 다음과 같이 개발하였다.

1. 본 연구는 이러한 섬유가루의 매우 유용한 활용처로서 고강도 콘크리트의 압축강도 및 내화성능 향상에 주목하여 유용한 섬유가루 생산공정을 개발하는 것을 목표로 하였다. 기존의 RFRP(재활용섬유강화 FRP)에 사용되는 폐FRP 유리섬유(로빙층 분리 공정) 개발 공정을 개선하여, 수지성분이 주로 포함된 매트층을 효과적으로 추출하는 공정을 개발하였다.

2. 로빙층(유리섬유층)과 매트층(수지층)을 효율적으로 분리하기 위하여, 다양한 폐FRP 종류별 추출공정(10개의 추출프로그램)을 개발하였다. 또한 로빙층 염색과 광학적 인식기술을 활용한 로빙층과 매트층 추출 공정을 개발하였다. 따라서 추출된 매트층을 활용한 수지성분의 비율이 높은 섬유가루(고강도 콘크리트 내폭렬성 용도)의 대량생산이 가능해졌다.

3. 비록 실험실 규모의 공정개발 연구로 유용한 재활용 FRP 섬유가루의 생산 공정을 완성 하였다고 할 수는 없으나, 개발된 생산 공정을 보완하여 대량생산용 공정개발에 활용하는 것은 충분히 가능할 것으로 사료된다.

5. 기대성과

추가적인 연구를 통한 재활용 FRP 콘크리트 섬유가루 생산공정의 활용은 재활용공정의 성능의 개선은 물론 폐 FRP 선박의 처리비용(잔유물 활용도 개선)의 획기적인 감소에 따른 경제적 효과와 기존의 환경문제의 해결에도 도움이 될 수 있을 것으로 기대된다. 연구결과의 기대성과는 아래와 같다.

(1) 기술적 측면

최근 들어 국내에서도 비교적 큰 규모의 지진이 발생하면서 내진성능이 우수한 콘크리트 구조물에 대한 수요가 급증하고 있다. 한편 최근 들어 100층 규모의 초고층구조물이 계획되면서 초고강도 콘크리트의 개발이 절대적으로 요구되고 있다. 그러나 초고강도 콘크리트가 갖는 화재에 의한 폭렬현상은 초고강도 콘크리트 개발의 가장 큰 문제점으로 대두되었다. 본 연구에 의한 내폭렬성 초고강도 RFRP의 실용화에 크게 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

(2) 환경적 측면

최근 들어 엄청난 양의 폐FRP의 발생은 큰 환경문제를 야기하고 있다. 본 연구를 통한 폐FRP 섬유가루 재활용처의 개발은 재활용 섬유와 더불어 폐FRP의 재활용 총량을 통해 환경문제를 획기적으로 개선할 수 있을 것으로 기대된다.

(3) 경제적·산업적 측면

현재 국내에서 사용되는 고강도 콘크리트용 섬유강화체는 대부

분이 수입품을 사용하여 있어 재활용 섬유가루의 활용을 통하여 수입대체의 효과를 통한 자원절약의 이점과 함께 고부가 건설기술의 개발로 인한 국가 건설산업의 경쟁력 강화에도 기여할 것으로 기대된다.

후 기

이 논문은 홍익대학교 학술연구진흥비에 의해 지원되었음.

References

- [1] Kim, Y.S., Shim, S.M., Yoon, K.Y. and Kim, S.D., 2004, "Development of technology for environmentally friendly scrapped FRP ship treatment", Technology for Waste Material Recycling from KREST.
- [2] Kim, Y.S., Lee, S.H. and Yoon, K.Y., 2007, "A recycling technology for waste FRP by development of FRC and its products", Technology for Waste Material Recycling, Eco-Technopia 21 Project from KREST.
- [3] Baek, J.H., Kim, Y.S., Yoon, K.Y., Lee, S.H. and Park, J.W., 2010, "Seismic performance of reinforced concrete beam-to-column joints strengthened with recycled fibres from fiber-reinforced plastics", Korean, 2010, "A recycling technology high of strength concrete reinforced for with recycled fibres from fiber-reinforced plastics", Technology for Waste Material Recycling, Eco-Technopia 21 Project from KREST.
- [4] Park, J. and Baek, J., 2009, "Mechanical properties of high strength concrete reinforced with recycled fibres from fiber-reinforced plastics", Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction, Vol. 25, No. 8, pp. 127-134.
- [5] Park, J.W. and Paek J.H., 2010, "Structural performance of reinforced concrete members strengthened with recycled fibres from fiber-reinforced plastics", Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction, Vol. 26, No. 7, pp. 37-44.
- [6] Park, J.W. and Paek, J.H., 2011, "Seismic Performance of Reinforced Concrete Beam-to-Column Joints Strengthened with Recycled Fibres from Fiber-Reinforced Plastics", Korean Society of Disaster & Security, Vol. 11, No. 6, pp. 25-30.
- [7] Shun, D.W., Ghim, Y.S., Bae, D.H., Cho, S.H. and Son, J.E., 1995, "Bench - scale fluidized - bed plastic waste pyrolysis", Korea Society of Waste Management, Vol. 12, No. 1, pp 120.
- [8] Yoo, S.H., 2009, "Spalling reduction method of high strength reinforced concrete columns using fibers", Journal of Korean Institute of Fire Sci. & Eng., Vol. 23, No. 4, pp. 1-6.
- [9] Lee, S.H., Lee, J.K. and Kim, Y.J., 2012, "A study on the chemical pre-treatments suitable for the layer differentiation of FRP waste", Journal of the Korean Society for Marine Environment and Energy, Vol. 15, No. 1, pp. 47-53.
- [10] Han, C.G., Yang, S.H., Lee, B.Y. and Hwang, Y.S., 1999, "A study on the spalling properties of high-performance concrete with the kinds of aggregate and polypropylene fiber contents", Journal of

- the Korea Concrete Institute, Vol. 11, No. 5, pp. 69-78.
- [11] NISTIR 5934, 1996, "Fire performance of high-strength concrete : a report of the state-of-the-art", NIST, Dec.
- [12] Song, H., Hyung, W. K., Do, J.Y. and So, Y.S., 2004, "Explosive spalling dependent on compressive strength concrete including silica fume", Journal of Architectural Institute of Korea. Sep. Vol. 20, No. 9, pp. 111-117.
- [13] Pierre Kalifa, 2001, "High-temperature behaviour of HPC with polypropylene fibers from spalling to microstructures", Cement and Concrete Research, Jun. pp. 1487-1499.
- [14] Yoon, K.Y., Kim, Y.S. and Lee, S.H., 2007, "Recycle of the glass fiber obtained from the roving cloth of FRP I: study for the physical properties of fiber-reinforced mortar", Journal of the Korean Society for Marine Environment and Energy, Vol. 10, No. 2, pp. 102-106.
- [15] Lee, S.H. and Yoon, K.Y., 2013, "Developing advanced total recycling method of FRP boats", Journal of the Korean Society for Marine Environment and Energy, Vol. 16, No. 1, pp. 53-59.
- [16] Lee, S.H., Park, J.W. and Yoon, K.Y., 2014, "Compressive strength and fire resistance performance of high strength concrete with recycled fiber powder from fiber-reinforced plastics", Journal of the Korean Society for Marine Environment and Energy, Vol. 17, No. 1, pp. 46-51.
- [17] Yoon, K.Y., Kim, Y.S. and Paek, J.H., 2009, "The extracting system for waste FRP roving layer", Korea Patent No. 10-2009-0008129.

Received 7 July 2015

Revised 23 July 2015

Accepted 28 July 2015