

解説

복합재료의 재활용

김병선* · 황병선*

Recycling of Composites:-A Review

B.S. Kim* and B.S. Hwang*

ABSTRACT

The recycling process and applications are investigated and reviewed on composites. The research trends and production of recycled items in a few countries, U.S., Japan, Germany, and Canada are considered. The details of recycled materials and processes are also reported. SMC/BMC(Sheet Molding Compound/Bulk Molding Compound) appears to be recycled in defined manner rather than any other composites. Thus, the recycling of these materials is mostly described in detail. The selection of recycling method is also described shortly.

초 록

복합재료의 재활용에 이용되는 공정 및 응용 예를 조사 검토하였다. 선진국의 현재까지의 동향을 검토하였으며, 재료별 및 공정별 세부 사항을 조사하였다. 체계적으로 재활용되고 있는 재료는 SMC/BMC이며, 주로 이 재료에 관하여 언급하였다. 재활용 기술의 선택에 관하여 또한 간략하게 서술하였다.

1. 서 론

오늘날 급속히 성장하고 있는 각종 고분자 복합재료(FRP 혹은 강화 플라스틱, Advanced Composites, 이하 복합재료라 함) 산업으로부터 발생하는 복합재료 폐기물의 종류는 자동차 부품, 육조, 물탱크, 건축조형물, 선박, 산업용 부품, 스포츠/레저용품, PCB(Printed Circuit Board), 항공/우주용 제품 등이 있다. 복합재료는 내부식성과 재활용(Recycling)을 위한 경제성 문제와 관련 깊은 구성재료 및 크기의 상이, 금속부품과의 혼용, 사용후 오염정도등의 때문에 주요 처리 방법을 매립에 의존하게 된다. 국내의 유리섬유 생산량이 60,000톤/년, 카본섬유가 600톤/년, 그리고 수지가 75,000

톤/년 이상되며 국내의 생산량은 세계의 약 1/15 정도이어서 이 많은 양이 폐기될때 적절한 방법으로 처리할 수 없으면 심각한 환경 문제가 됨을 쉽게 상상할 수 있다. 현재에는 비록 매립에 의한 처리 방법이 저렴할 수 있으나 미래에 환경 규제와 매립지의 부족으로 인한 폐기물 처리 비용은 점차로 증가하여 제품의 생산원가에 영향을 받을 것이 분명하므로 이에 대비하는 것이 중요하다.

최종 매립과 관련된 폐기문제는 다른 각도에서 고찰되어야 하며 계속적으로 생산량이 늘어나는 상황에서 복합재료의 재활용 문제는 최종적으로 폐기되는 복합재료의 양을 줄이는 개념에서 출발한다. 기지 재료가 고분자 제품이므로 기존 플라스틱계열 제품의 재활용기술을 응용할 수 있지만

* 한국기계연구원, 복합재료그룹

섬유강화 복합재료 부품은 여러 다른 특성의 재료로 구성되어 있기 때문에 재활용이 보다 어렵다. 따라서 재활용에 관련된 문제에는 크게 두가지 문제점이 있다. 한가지는 복합재료의 특성을 살려 재활용할 수 있는 이 기술적인 문제점을 해결하는 것이고, 다른 하나는 모든 재활용 문제에 공통적으로 적용되는 폐기물을 효과적이며 저비용으로 수거 하는데 있다. 즉, 두번째 문제는 복합재료에만 국한된 문제는 아니고 환경보존과 관련된 대부분의 자원의 재활용적인 면에서 공통적으로 해결해야 하는 문제이다.

본문에서는 선진국에서 연구된 내용을 중심으로 복합재료 폐기물을 처리할 수 있는 방법들을 논하고 재활용된 예를 제시하므로써 국내의 복합재료 폐기물 처리를 위한 적극적인 대책을 마련하는데 도움이 될 수 있는 계기를 제공하고자 한다.

2. 외국의 기술 동향

선진국의 경우에도 복합재료 제품의 재활용문제에 구체적인 사업을 전개하기 시작한 것은 오래되지 않았다. 따라서 사용된 복합재료 제품의 재활용을 위한 필수적인 수거 및 분류를 체계적으로 할 수 있는 Infrastructure가 제대로 갖추어져 있지 않은 상태이다. 하지만 미국, 일본, 캐나다 및 독일등이 가장 적극적으로 연구하고 있으므로 이들의 재활용에 관한 동향을 분석 및 정리해 본다. 복합재료 폐기물을 이용한 2차 제품 재활용(Secondary Recycling)은 다른 플라스틱 재료와의 가격 경쟁에서 경쟁력이 떨어지므로 연구방향은 1차 제품(Primary Recycling)에 중점을 두고 있다.

▷ 미 국 ◁

복합재료의 최대 생산 및 사용국으로서 대량의 레크레이션 보트 및 자동차, 각종 tank류, 건축자재등의 생산 중 혹은 사용후 폐기물이 대량 발생하는데 이에 대한 체계적인 혹은 전국적인 재활용 시스템을 구축하고 있지는 않는 것으로 판단된다.

전국적으로 걸쳐 여러분야(sector)에서 추진되고 있기 때문에 총괄적인 집계는 어렵지만 이와 관련

하여 발표되는 자료의 양을 기준으로 보면 가장 활발하게 진행된다고 판단된다. 그 한 예로 강력한 환경보호 정책의 영향으로 폐기된 자동차의 부품의 재활용 문제와 결부되어 자동차용 복합재료의 재활용에 보다 관심을 지난 80년대 부터 갖게 되었다. 구체적인 노력의 결과가 자동차 회사들이 주축이 된 Vehicle Recycling Partnership(VRP)과 SMC Automotive Alliance(SMCAA)이다. 이 단체들과 General Motors 社가 SMC와 BMC 재료의 재활용 문제를 주도하고 있다[1~3].

▷ 일 본 ◁

1970년초 부터 복합재료 폐기물(Reinforced Plastic Waste)에 관심을 갖기 시작했으며, 1985년 이후 국립연구소에서 구체적인 처리 방법을 연구하기 시작했다. 이에 따라서 RP Waste Recycling & Treatment Council이 조직되었으며 연구사업은 복합재료 선박(RP Ship) 같은 대형 구조물의 재활용부터 시작되어 Pilot plant가 설치되어 수년간 실험을 거쳤다. 최근 경제적으로 수거/재활용을 하기 위하여 현장 절단(On-site Cutting) 후 처리할 수 있는 절단기계를 설계/제작하고, 이동식 열분해장치(Trailer loading pyrolysis furnace or Trailer loading incineration rotary kiln)를 제작 후 운영하고 있다[4~6].

열가소성 자동차용 부품의 경우 조각내기(shredding) 방법을 이용해서 타 재료의 부재료로서 사용이 가능하나 일반 플라스틱제품의 수거와 같은 infrastructure를 구축해야 하므로 폐기된 자동차에서 쉽게 구분할 수 있도록 자동차 제조사의 적극적인 협조가 필요한데, Nissan & Fuji Heavy Industry에서 범퍼(bumper)의 재활용이 쉽도록 자동차 대리점을 통해 수거하는 작업에 협조하기로 하는 등의 구체적인 움직임이 있다.

▷ 독 일 ◁

유럽에서는 독일이 가장 적극적인 노력을 기울이고 있으며, 많은 SMC 관련회사들이 주축이 되어 ERCOM Composite Recycling 단체를 1990년에 결성하였다. 실험적으로 해오던 재활용 연구를 1991

Table 1. The recycled composite items of a few countries.

United States	Japan	Germany	Canada
Rear upper inner panel (Corvette, General Motors) Agriculture flooring (Azdel, Inc.) Econoline van interior engine cover(Ford Motors) Manhole cover(Nylon/glassfiber SRIM Product) Thermoplastic bumpers (GE Plastics)	Roof inner rack(Toyota Sprinter Carib model) Head lamp housing (Keito Mfg. Co.) Aggregate for mortar cement(Asaoka Corp)	Spare wheel well(Audi 100) Sunroof frame (BMW 3 series) Front end(VW Passat) Noise barrier shield(Polo) Bumper(Mercedes Truck) Mounting step Front end panel Air intake cover Tractor roof Sinks SBB seats Telephone booth Electrical distribution cabinet Cable distribution base Garden pools and chairs Wood replacement in locks	Consturction panels (Plastiglas Co.) Park benches (Plastiglas Co.) Conference furniture (Plastiglas Co.) Restaurant tables (Plastiglas Co.) Livestock flooring (Farorex Co.) Residential door skin (Farorex Co.) Automotive bumper beam (Farorex Co.) Knee bolster panels (Farorex Co.) Load floor and seat back (Farorex Co.) Recycled SMC (Pheonix Fiberglass Co.)

년에 SMC/BMC 스크랩과 부품을 재처리 하기 위한 생산시설(production scale facility)을 지었다. ERCOM은 이동식 분쇄트럭과 집중식 분류 혹은 분쇄 설비를 갖추고 처리된 재활용 재료를 SMC/BMC 회사에 다시 매매할 수 있도록 일원화된 시스템을 개발하였다[7~10].

▷ 캐 나 다 ◁

최근까지 다른 나라들과 마찬가지로 열가소성 수지 제품들의 재활용에만 국한하여 왔으나, 90년 초까지 복합재료의 재활용에 대한 Pilot Plant등의 가동을 거친 후 수개의 회사가 상업용 재활용 재료를 만들어 내고 있다. 주로 충전재(filler), resin extender 및 장/단 유리 섬유가 생산되고 있다. 이들 회사들이 사용하는 원재료, 즉 폐기 복합재료의 출처는 SMC, filament winding, pultrusion, hand lay-up등의 폐기물 및 폐기된 electronic circuit board등이다[11~12].

다음에는 지금까지 조사된 재활용된 재료를 사용한 부품들은 Table 1에 요약하여 보았다.

3. 재료 상태별 재활용 고찰

대형 구조물에 사용되는 복합재료는 대개 Polyester계 수지를 모재로하므로 양적인 면에서 볼 때 Glass/polyester-vinylester계가 가장 많고, Glass/Epoxy, Glass/Phenolic, Carbon/Epoxy 등의 순이다. 선진국에서 복합재료의 재활용과 관련된 연구 활동을 살펴보면 자동차용 복합재료의 예가 많이 발견된다. 그중에서도 SMC(Sheet Molding Compound)의 재활용이 이 대표적인 예로서 많이 언급되고 있다. 그 이유는 자동차용 SMC가 (1)재활용을 연구할 수 있는 투자능력이 있는 대기업이 관련된 업종이며, (2)재활용과 관련된 회사 이미지 재고, (3)대량생산이 이루어지는 품목이므로 경제성이 있을 수 있다는 점이다. 따라서 이 SMC와 관련되어 고찰되는 내용이 타 종류의 복합재료의 재활용에도 그대로 혹은 변화시켜 응용할 수 있을 것이다.

3-1. 열가소성 수지 복합재료

저밀도 polyethylene 혹은 polypropylene[13]과

같은 열가소성 수지의 경우 가열에 의하여 용융시켜서 재사용이 가능하다. 하지만 열가소성 수지의 물성의 열화 및 강화섬유의 길이가 감소되므로서 물성 저하가 발생한다. 1차 제품 재활용(Primary recycling)을 위해서 polymer additive나 유리섬유를 첨부시키는 방법이 있다.

이와는 달리, 구조용으로 사용되는 배열된 보강섬유가 포함된 열가소성 복합재료를 물리적인 방법에 의해서 동일한 품질을 가진 원재료로 전환하거나 ply의 배열을 바꿀수는 없다. 따라서 기계적인 분쇄, 가열 및 가압을 통하여 저급 제품의 주재료로서 활용이 가능하다. Graphite/PEEK 적층판의 경우 잘게 분수후 압축성형에 의하여 다른 제품을 성형할 수 주재료로서 사용이 가능하다.

아직 연구단계에 있지만 열가소성 수지를 분해해서 수지와 섬유를 분리 해내는 방법이 연구되고 있다. 이 방법은 유기 고분자 물질을 원래의 모노머로 분해시키는 과정을 말한다. purification과 polymerization 기술을 이용하여 원래의 고분자 물질로 변화시키게 된다. 분리된 유리 섬유는 처리 없이 보강섬유로 사용 가능하며, coupling agent로서 재처리 하기도 한다[2, 14].

3-2. 열경화성 수지 복합재료

열경화성 복합재료의 재활용은 열가소성 수지 복합재료의 경우 보다 어렵다. 열가소성 수지와 같이 열경화성 수지는 재용융이 되지 않기 때문에 재활용 공정에서 비용이 더 많이 든다. 또한 처리된 재료의 응용에서의 차이점은 열경화성 수지 복합재료는 재활용된 재료가 같은 기능을 가진 복합재료 제품의 주재료로서는 사용되지 않는다는 점이다. 다음절에서 언급될 예정이지만 분쇄 혹은 열분해 방법등에 의하여 얻어지는 것을 충전재 등으로 사용이 가능하다. 하지만 충전재 자체의 가격이 매우 저렴하기 때문에 대체 충전재로서의 재사용에 제한적일 수 밖에 없다. 열경화성 수지 복합재료도 폴리머 뿐만 아니라 보강재 역할을 하는 여러종류의 섬유와 bulkiness, stiffness, fire retardation등의 특성을 향상시키는 첨부제등으로 구성되어 있어서

스크랩 복합재료를 처리할 수 있는 공정은 이러한 혼합물을 처리할 수 있는 공정이어야 한다. 열경화성 수지 복합재료를 재활용하는 방법에는 크게 세가지 방법[3]이 있다;

- 가. Mechanical recycling ; 즉 스크랩을 이용하여 새로운 복합재료를 제작함.
- 나. Chemical recycling(pyrolysis) ; 폴리머를 organic compound로 회복시켜 chemical raw material로 사용함.
- 다. Energy recovery ; 소각시 폴리머에 저장되어 있는 에너지를 최대한 활용함.

Fig.1에서는 재활용 분야에서 대표적인 열경화 복합재료인 SMC를 재활용하는 법을 인용해 보았다[3, 15]. 구체적인 방법은 다음절에서 설명될 것이다.

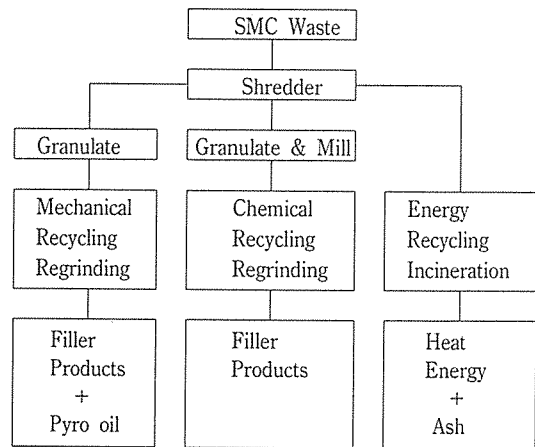


Fig. 1 Schematic of Recycling of SMC/BMC Materials[3]

3-3. 폐기된 복합재료(Post-consumer composites)의 재활용

열가소성 및 열경화성 복합재료의 구분을 떠나서 소비자에 의해서 사용후 폐기된 복합재료 부품 혹은 제품의 재활용 문제는 보다 어려운 기술적 및 경제적인 면을 갖고 있다. 수집 및 분류등의 문제가 해결된다 하더라도 기름, 페인트, 금속 삽입물 등의

이물질이 적절히 제거되어야 고품질의 재활용을 위한 처리 방법을 적용할 수 있을 것이다. 즉, 금속 부착물의 분류를 위한 방법의 개발, 오염된 복합재료의 처리 방법등이 해결되어야 한다. 따라서 제품 제조시 재료를 구분할 수 있는 코드(Code)를 포함시키는 방법도 고려할 수 있다[4, 16~17].

3-4. 보강 섬유의 재활용

폐기물 중에서 주요 대상은 유리섬유이다. 장섬유와 단섬유가 적절한 공정을 통하여 회수된다. 수지와 섬유가 화학적인 방법에 의하여 분리될 때 최초의 용도대로 재사용까지 가능하다. 처리 과정에서 섬유 표면이 손상을 입게되면 물성이 저하되므로 재표면처리를 할 수 있다. 단섬유의 경우 반복된 재사용으로 섬유길이의 감소 등으로 인한 물성을 보강하기 위하여 원 섬유를 더하여 사용한다. 약 1500°C 이상에서 유리섬유는 재용융되어 새로운 섬유로 만들 수 있다. 재용융시 유리는 최초의 무정형 구조로 돌아가서 연신 과정을 거쳐 다른 형태의 재사용처를 찾을 수 있다. 폐유리섬유의 단순 매립은 심각한 토양오염과 수질오염으로 인체에 해가 될 수 있으므로 다른 형태의 폐기 방법을 연구해야 한다. Advanced composites에 사용되는 케블라, 탄소섬유 및 보론 섬유등은 유리섬유에 비해 비싸므로 재사용이 보다 매력적이다. SMC 내의 유리섬유의 분리와 비슷한 화학적 접근 방법이 가능하지만 구체적인 연구결과는 발표되지 않고 있는 상황이다. 하지만 유리 섬유와는 달리 산소 존재하에서 연소 가능하므로 이에 상응하는 폐기물 처리 방법을 이용할 수 있다.

4. 복합재료 재활용 처리공정

각국의 특성상 복합재료의 종류 및 수거 체계 등이 다르지만 분쇄를 거쳐 물리적 혹은 화학적 처리의 근본적인 방법은 다음 몇가지의 범주에 속하므로 선진국에서 응용하고 있는 복합재료 폐기물 처리 방법 몇가지를 검토 및 정리하였다.

4-1. 화학적 분리법-수지와 섬유의 회수(Recovery)

열가소성 수지 복합재료에서 수지와 섬유의 분리에 대하여 위에서 간단히 언급하였다. 열경화성 수지 복합재료의 경우 제품의 생산 공정중에서 필수적으로 발생하는 원재료상의 스크랩이나 경화 이전의 불량제품의 재활용 문제도 고려해 볼 수 있겠다. 경화되지 않은 상태(B-stage)의 스크랩을 용매 탱크에 넣고 기계적인 교반을 거쳐 수지, 보강섬유, 충전재를 분리한다. 대표적인 SMC의 구성 재료를 보면 수지 26%, 유리섬유 28%, 충전재 46%이므로 상당량의 재사용 가능한 유리섬유를 얻을 수 있다. 보다 비싼 탄소섬유일 경우에는 경제성이 더 있을 수 있겠다. size 처리도 계속 남아 있어 재사용되는 유리섬유를 새로운 섬유와 혼용하여 복합재료 제품을 제조했을 때 좋은 결과를 얻고 있다[18]. 연속 섬유가 재활용될 때는 적절한 크기로 잘라서 2차 구조물의 성형에 사용이 가능하다. 이 재활용 방법은 인발 성형, RTM 및 Hand lay-up 등의 공정에서 사용이 가능하다. 이 방법도 스크랩의 양이 지속적이며 대량으로 발생되어야 실시가 가능한 방법이며 소량이며 단속적으로 발생될 때에는 경화시킨 후 완제품의 재활용 방법을 이용해야 한다. 경화된 열경화성 수지의 회수(Recovery)는 사실상 불가능한 것으로 여겨져 왔지만 80년대에 미국에서는 에폭시, polyimide 및 polyester 수지의 회수를 위한 연구가 계속되어 왔다. 한 예로 disulfide bonds를 가지는 경화제로 경화된 에폭시 수지가 환원되어 완전히 녹고 다시 산화 반응에 의하여 재경화될 수 있는 연구가 좋은 결과를 보였다. 또한 같은 메카니즘이 polyimide 수지에도 응용되어 그 가능성을 보여주었다. Polyester 수지의 경우는 좀 다른 조건하에서 에스테르 결합을 끊는 반응법(hydrolytic scission of ester bonds)을 이용하여 단량체를 얻는다[16, 22]. 열경화성 수지 중에서 가장 많은 소비량을 가지는 폴리에스터의 양을 고려할 때 회수되는 화학물질인 styrene monomer 혹은 oligomer의 재활용은 무시할 수 없는 경제적인 면을 가지고 있다. 수지가 적절한

방법으로 회수되면 섬유의 회수 또한 가능하다. 열분해와 같은 고온처리가 되지 않기 때문에 섬유의 물성저하도 줄어 들 수 있다. 이와 같은 방법은 실험실적으로 가능성을 제시하고 있지만 현재 실용화 되지는 않고 있다. 따라서 다음 절에서는 실제 실용화되고 있는 재활용 공정을 고찰해 보자.

4-2. 연소 혹은 소각 공정-Combustion (Incineration) process

Combustion 혹은 Incineration 방법[3, 20]은 생산 현장에서 가장 많이 사용하고 있는 방법이다. 복합재료는 20~50% 정도의 유기화합물로 구성되어 있기 때문에 산소 존재하에서 연소시켜 에너지원으로서 재활용하는 방법이다. 생산제품의 불량제품이나 스크랩이 연속적으로 많은 양이 생산되지 않을 경우 대부분의 생산 현장에서 채택하는 방법이다. 하지만 연소 후 발생하는 무기물(Solid Waste)이 약 50~80% 정도되는데 이들은 낮은 등급의 제품 제조시 충전재로서 사용하게 된다.

첨부제가 첨부된 복합재료는 소각시 분해되며 공해를 유발하는데, 황화합물이나 질소화합물과 같은 산성비의 주범이 되는 것이 대기로 나가지 않도록 집진 시설을 해야한다. 하지만 이러한 고성능 연소 시설을 설치하는 데는 상당한 투자가 요구된다. 첨부제가 없는 복합재료는 최소의 공해를 유발시키며 깨끗이 소각된다. Polyester나 epoxy는 소각후 거의 같은 양의 재(ash)를 남기며 매우 낮은 기계적 특성을 가지고 있다. 재의 형상은 첨부제의 성분, 보강재 및 소각 온도 등에 좌우된다. 복합재료내에 있는 유리섬유는 800℃ 이상의 온도에서 녹으며 충전재가 있으면 800℃의 온도 보다 몇백도 더 높은 소각 온도를 요한다. 가장 적합한 온도로 소각할 때 가장 적절히 사용할 수 있는 재(보강재 및 충전재가 포함된)를 얻을 수 있지만 이 부분에 대한 연구는 아직도 부족하다. 보강재 및 충전재는 콘크리트 제작에 사용되는 mineral material과 흡사하기 때문에 소각후 잔여 보강재 및 충전재는 콘크리트 생산에 사용될 수 있다.

지금까지 검토된 공정(polyurethane의 알콜화

(Alcoholysis) 공정을 제외한)은 복합재료를 충전재 혹은 연료로 재생시켰다. 연소 방법은 폴리머의 에너지 가치를 부활시키는 또다른 기술이며 더 쉬운 방법이다.

4-3. 분쇄공정(Regrinding of composites)

폐기된 열경화성수지 복합재료는 재생형(remolding)이 불가능하기 때문에 폐기물을 가루(milled)를 내거나 작은 조각(granulated)으로 분쇄하여 새로운 복합재료의 부품제작에 섞어서 응용한다[3, 15~16, 21~23]. 약 20×20mm 크기의 조각은 Chip board, light weight cement board, agricultural mulch 및 Insulation 등의 제조에 사용될 수 있다. 즉, SMC나 BMC로 만들어진 열경화성수지 복합재료로부터 잘라진 스크랩(최고 3mm의 길이)은 충전재로서 사용될 수 있으며 그 예로 GM社의 Corvette panel에 SMC 재활용된 자재가 20% 나 포함되어 있다. 또한 roofing asphalt, BMC, polymer concrete, concrete aggregate 및 road paving materials 등에도 이용될 수 있다. 미세한 가루로 분쇄된 SMC(60 micron)는 SMC, BMC 및 열가소성 수지 제품의 충전재로서 사용될 수 있다. 스크랩 형성과정에서 모여진 0.5mm~0.7mm 정도의 유리섬유는 충전재(active filler)로써 사용될 수 있으며 SMC의 일부 보강재로도 사용될 수 있다. 스크랩이나 짧은 유리섬유가 새로운 SMC나 BMC 부품제작에 섞여지는 함량은 일반적으로 약 25% 정도이다. 이러한 방법으로 일부 유리섬유를 회수할 수 있고 재활용된다. 충전재로서 재사용될 때 활용도의 여부는 입자 크기 및 분포, 새로운 수지와와의 친화성, 경제성에 달려 있다.

4-4. 고온 압축 성형법(Hot pressing)

열경화성 수지 복합재료의 재활용을 위한 공정 중에서 특이한 방법으로서 Polyurethane이나 Epoxy 의 스크랩은 Hot press에서 200℃ 온도와 50~100 bar의 압력으로 재생형(remolding) 시킬 수 있다는 것이 Baumann[24]에 의해 검토되었다. 이러한 방

법으로 재활용된 재료는 물성치가 매우 낮아 자동 차용 바퀴 흙받이(mud-flaps)와 같은 하중을 거의 받지 않는(non-load bearing) 응용 제품에서나 사용된다. 이 재료에 binder 역할을 하는 열가소성 수지를 포함시키면 강도를 증가시킬 수 있다. 이 기술은 모든 열경화성 수지 복합재료에는 해당되지 않으며 제품의 물성이 떨어지므로 저급제품(low grade material)의 시장이 필요하다.

4-5. 열분해 공정(Pyrolysis)

열분해 공정은 공기가 없는 상태에서 가열을 하여 재료를 분해시키는 방법이며 이 방법에는 여러가지 있다. 열분해 과정의 온도가 낮을수록 분해되는 재료의 분자량이 커지며 원재료의 특성이 더 많이 남는다. 이 방법의 장점은 오염된 폐기물을 처리 하는데 연소 방법과 함께 가장 적합한 방법이란 점이다. 하지만 이 방법을 실용화하는 과정에서 생기는 문제점은 기술적으로 두가지 정도가 지적되고 있다. 공정에 알맞은 크기로 분쇄하는 과정과 열분해 장치로 분쇄된 조각을 효과적으로 이송시키는 문제등이다.

4-5-1. 일반 열분해

일반 Pyrolysis 공정[3, 12]에는 공기가 없는 상태에서 가열을 하는 방법이 포함되어 있다. 대부분의 복합재료에는 무기물(inorganic material)이 많아 많은양의 고체 잔여물(solid residue)이 형성될 수 있다. 더우기 열분해 공정 과정에서 형성되는 char는 mineral filler와 혼합되어 고체 잔여물의 보강제 역할을 해준다. 이 고체로부터 발생한 오일과 가스는 특성이 뛰어나지 않기 때문에 주로 연료로서 사용된다[25]. 예를 들면 약 760°C 정도로 SMC를 열분해 시키면 72%의 고형성분, 14%의 Oil, 14%의 가스가 생성된다. 고형 성분은 CaCO_3 , 유리섬유, carbon 등으로 이루어진다. 유리섬유의 기계적 물성이 저하 되지만 주로 새로운 SMC 제품이나 콘크리트의 충전재로서 사용된다. 이 중에서 CaCO_3 는 충전제(active filler)로서 사용가능하다. 또한 아스팔트 포장 재료에도 사용될 수 있다. 일

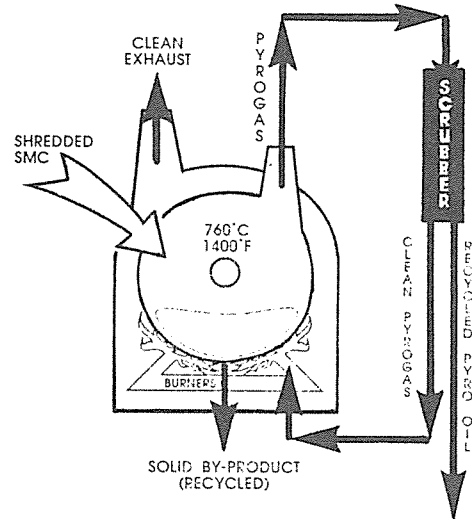


Fig. 2. Schematics of Typical Pyrolysis Process[2]

반적으로 열분해공정의 온도가 낮을수록 분해되는 재료의 분자량이 높아지므로 더 나은 특성의 재료가 남는다. 열분해공정 자체는 새로운 방법이 아니지만 복합재료의 재활용 분야에 이용하려고 시도한 것은 최근의 일이다. 미국에서는 1988년과 1991년 사이에 Conrand Industries(Chehais, Washington)와 J.H. Beers(Wind Gap, Pennsylvania) 회사들에 의하여 시도되어 실용화 되고 있다.

4-5-2. 알코올화 공정(Alcoholysis)

열분해 공정에 시약(reagent)을 첨부시켜 특성의 제품을 생산토록 유도하는 방법도 있다. 즉 열분해 공정에 알코올을 첨부시킨 공정이 알코올화 공정(Alcoholysis) 공정[23]이다. 예로 Polyurethane이 모재인 재료는 알코올과 반응하여 고품질의 단량체(monomer)를 형성한다. RTM 스크랩과 polyurethane foam은 현재 이 방법으로 재활용되어 단량체를 생산한다. 그러나 이 방법은 일반적인 열경화성 수지(unsaturated polyesters 및 epoxies)에는 적용되지 않으며 보강된 혹은 충전제가 첨부된 재료에는 적용할 수 있는 기술은 아직 개발되지 않았다.

4-5-3. 가스화 공정(Gasification)

Viest-Alphine社와 Dow Europe社[24]가 공동

개발한 고온가스화 공정(gasification)은 열경화/열가소성 수지 복합재료를 포함해서 여러 종류의 플라스틱 혼합물을 처리할 수 있는 공정이다. 이 공정은 1600°C의 온도에서 폴리머를 가스화 하여 수소와 일산화 탄소(carbon monoxide)가 혼합된 가스를 형성시킨다. 복합재료 mineral 성분이 액체 상태로 된 것을 식히면서 건축물로 사용되는 재료를 변환된다[24]. 이 공정은 또한 오염된 복합재료들을 처리하는데 매우 효율적인 방법이다.

5. 재활용 기술의 선택

주로 SMC 위주로 정리했지만 다른 열가소성 및 열경화성 수지와 다른 섬유 복합재료의 재활용도 위에서 검토된 기술을 활용할 수 있다. 각각의 재활용기술은 특정 폐기물에 따라 장단점이 있다. 분쇄하는 방법은 폐기물이 오염되지 않았을 경우 적합하며 폴리머가 첨가제로서 재활용될 수 있지만 이 고가의 폴리머를 첨가제로서 사용하는 것은 때로는 별로 경제성이나 효율적이 아닐 수도 있다. 열분해 기술은 폐기물로부터 고가 재료를 회수하는데 적합하지만 연료(fuel)만 회수한다면 소각시키는 것이 이 더욱 적절한 방법이다. 공해문제만 해결한다면 소각은 오염된 폐기물처리에 가장 효율적인 방법이다.

그러나 재활용의 목적은 환경보호에 있으므로 가장 적합한 재활용 기술을 검토하는 방법은 라이프 사이클(life cycle) 환경분석 하는데 있다. 라이프 사이클(Life cycle) 분석은 각 부품의 생산, 사용 및 폐기물처리 등에 사용된 resources를 검토하는데 있다. 이러한 검토는 부품이 여러 재료로 생산되었을 때 resources의 소비 비교를 해주어 부품의 수명후 응용될 수 있는 가장 효율적인 재활용 방법을

알 수 있게 해준다. Fig. 3은 life cycle 분석도[27]를 보여준다.

Life cycle 분석은 어려운 분석이며 자세한 분석 방법들은 아직도 연구개발 중에 있다. 지금까지 복합재료 부품과 관련하여 life cycle 분석이 충분히 검토된 바는 없으나 자동차에서의 경우 일부 금속 부품을 복합재료 부품으로 대체 시키는 것이 환경적인 면에서 유리하게 증명된 상태이다. 복합재료 및 금속 자동차 부품의 life cycle 에너지 소비를 비교한 결과를 검토해 보면 복합재료 부품 응용에 의한 경량으로 life cycle 동안의 연료절감으로 인해 상당한 에너지 절약이 있다는 것을 알 수 있다. 간단한 자동차 부품의 복합재료화가 life cycle 기간 동안에 절약하는 에너지는 30~50% 정도 절약되는 것으로 연구되었다[27]. 여기에 폐기물 재활용으로부터 얻어지는 에너지를 추가 시킨다면 최고 60% 정도까지의 에너지를 절약시킬 수 있다[28].

6. 요 약

1. 복합재료의 재활용 문제는 선진국에서도 최근에 적극적으로 연구하며, 재활용 전담회사가 가동되고 있다. 재활용되는 자원이 산재되어 있기 때문에 사회적인 뒷받침을 필요로 하여 공공기관의 주도적 사업으로 시작하고 있다. 따라서 국내에서도 재활용 기술개발과 함께 폐기물 복합재료의 수거 및 분류 작업이 용이한 체계가 구축되어야 하며 경제성 문제가 제기되므로 초기 연구에는 공공기관의 투자가 요망된다.

2. 일반적으로 알려져 있는 열경화성 수지 복합재료는 재활용될 수 없다는 인식이 수정되어야 할 것이다. 열가소성 수지 제품 혹은 열가소성 복합재료의 재활용 공정과는 다르지만 실용화된 대표적인 것이 SMC/BMC의 재활용이다. 현재 실용화된 재활용 공정중 가장 활발하게 응용되는 것은 기계적 분쇄후 충전재로서 사용하는 공정이며, 열분해, 연소공정등은 보다 많은 투자를 필요로 하기 때문에 응용이 덜 활발하며 수지와 섬유의 화학적 분해 공정은 실험실 규모의 연구가 이루어지고 있다.

3. 재활용 공정의 선택은 재료의 종류, 양, 최종

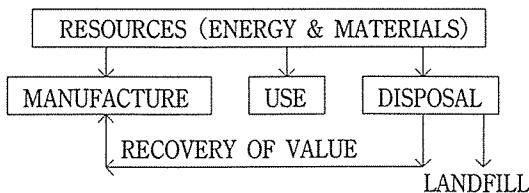


Fig. 3. Analysis of Life Cycle for Composite Parts

응용분야등 많은 요인을 고려하여 이루어져야 한다. 폐기물 처리전략은 폐기물로부터 최대한의 가치를 찾을 수 있는데 목표를 두어야 하는데 그 한 예로서 Life cycle 분석은 가장 환경적으로 안전한 폐기방법을 알려준다. 또한 복합재료의 재활용 기술을 개발하는데 있어 각 국가별 여건이 상이하므로 일본이나 독일의 경우 이동식 분쇄 및 연소용로를 설계 운영하는 것과 같이 우리나라에 적절한 모델이 설정되어야 한다.

참 고 문 헌

1. A. Owens and J. Henshaw, "RECYCLING, COMPOSITES ADD DESIGN", University of Tulsa, 1991.
2. "Composites Recycling Revs Up", TECH UPDATE, MANUFACTURING ENGINEERING, Vol. 110, No. 5, p24-30, May, 1993.
3. "RECYCLING OF SMC-THE ENERGY/ENVIRONMENT PICTURE", SMC Automotive Alliance, 49th Annual Conference Institute, The society of the Plastics Industry, Inc. February 7-9, 1994.
4. Tatsundo Kitamura, "Market Development for Recycling Thermoset in Japan", 49th Annual Conference, Composites Institute, The Society of the Plastics, Inc. February 7-9, 1994.
5. Hiroyuki Hamada, Susumu Yamaguchi, Gabriel O. Shonaike, Teruo Kimura and Zenichiro Maekawa, "Recyclability of Long Glass Mat Reinforced Thermoplastic Composite", 49th Annual Conference Institute, The society of the Plastics Industry, Inc. February 7-9, 1994.
6. T. Kitamura, "Recycling Thermosets in Japan Update-Tertiary Report," 48th Annual Conference, Composites Institute, The Society of the Plastics Industry Inc. February 8-11, 1993.
7. A. Weber, "Plastics in Automotive Engineering and Aspects of Plastics Waste from Abandoned Vehicles", Plastics, Rubber and Composites Processing and Applications, 16(1991) 143-156.
8. P. Schaefer, A.G. Plowglan, "SMC Recycling : An Updata ERCOM's Experience in Production and Application", 47th Annual Conference, Composites Institute, The Society of the Plastics Industry, Inc. February 7-9, 1994.
9. G. Menges, "The Recycling of Fiber Composite Plastics," Institut für Kunststoffverarbeitung an der RWTH Aachen, D-52056 Aachen, Pontstr. 49.
10. Schaefer, A.G. Plowgian, "Germany-Auto Part Recycling ; For SMC A Reality," 48th Annual Conference, Composites Institute, The Society of the Plastics Industry Inc. February 8-11, 1993.
11. B. Darrah, "Recycling Composites in Canada : An Update", 49th Annual conference, Composites Institute, The Society of the Plastics Industry, Inc. February 7-9, 1994.
12. B. Darrah, "Recycling Composites in Canada : Technologies, Markets and Applications," 48th Annual Conference, Composites Institute, The Society of the Plastics Industry Inc. February 8-11, 1993.
13. D.L. Reinhard, "Glass Reinforced Polypropylene Composite-A Recycling Case study", Azdel, Inc., One Plastics Ave, Pittsfield, MA 01201, 1993.
14. J. Janoschek, K. Kaiserger, S. Knappe and J. Opfermann, "The Influence of Recycled Material on Crystallization Kinetics of Semi-crystalline Thermoplastic Polymers", Polym. Master Sci Eng. Vol. 68, pp. 294-296, 1993.
15. K. Rusch, "Recycling of Automotive SMC-The Current Picture," 48th Annual Conference, Composites Institute, The Society of the Plastics Industry Inc. February 8-11, 1993.
16. W.D. Graham, R.B. Jutte, D.L. Shipp, "Recycling Post-Consumer Glass Reinforced Composites-The Role of Glass Fibers", 49th Annual Conference, Composites Institute The Society of the Plastics Industry, Inc. February

7-9, 1994.

17. S.J.Pickering, "NEW RECYCLING TECHNOLOGY FOR PROCESSING SCRAP COMPOSITE", M3.1~M3.14, Proceedings Verbundwerk, 1992.

18. J.C.Bradley, W.D. Graham, R. Forster, "Solvent Separation : A Method for Recycling Uncured SMC", 49th Annual conference, Composites Institute, The Society of the Plastics Industry, Inc. February 7-9, 1994.

19. G.Tesoro, H.Chum, A.Powers, "New Concepts for Recovery of Thermosets", 47th Annual Conference, Composites Institute, The Society of the Plastics Industry, Feb.3-6, 1992.

20. D.H.Kelley, "FRP Equipment for Treating Waste Incineration Gases", Material Performance, Vol.33, No.1, pp.72-75, 1994.

21. K.Butler, "Recycling of Molded SMC and BMC Materials," 46th Annual Conference, Composites Institute, The Society of the Plastics Industry Inc. February 18SMC/BMC21, 1991.

22. R.B.Jutte, W.D.Graham, "Recycling SMC," 46th Annual Conference, Composites Institute, The Society of the Plastics Industry Inc. February 18-21, 1991.

23. J.Pettersson, P.Nilsson, "Recycling of SMC," 48th Annual Conference, Composites Institute, The Society of the Plastics Industry Inc. February 8-11, 1993.

24. G.F.Baumann, "A Pragmatic Review of RIM Recycling Option", ASM/ESD Advanced Composites Conference, Detroit, 8-11, October 1990, P271-275.

25. C.N.Curcuras, et al, "Recycling of Thermoset Automotive Components", SAE International Congress and Exposition, Detroit, Michigan, 25 Feb-1 Mar 1991, Paper 910387, P1-16.

26. W.D.Graham, R.B.Jutte, D.L.Shipp, "Recyclibility of Glass Fiber Reinforcements in Thermoset and Thermoplastic Applications," 48th Annual Conference, Composites Institute. The Society of the Plastics Industry Inc, February 8-11, 1993.

27. B.Krummenacher, "Polymers in Car-Energy Consumption and Recycling", Dow Europe, Horgen, Switzerland.

28. A.Weaver, "Recycling in Action", Reinforced Plastics, Feb 1992, P32-33.