

## 섬유강화 복합재료와 자동차

### Composite Applications to Automobiles

이 상 관, 김 병 선  
S. K. Lee, B. S. Kim



이 상 관  
· 1962년 6월생  
· 한국기계연구원 복합재료  
그룹 선임연구원  
· 복합재료



김 병 선  
· 1953년 10월생  
· 한국기계연구원 복합재료  
그룹 책임연구원  
· 복합재료

#### 1. 서 론

최근 자동차는 전자화, 고급화, 안전화 등에 대한 수요자들의 요구 다양화에 따라 부대장비가 늘어나 자동차 중량이 계속 증가하는 추세이며, 세계적으로 환경오염 문제가 대두되면서 기업별 평균연비 및 자동차 배기가스규제 강화에 대비한 연비개선이 절실히 요구되고 있다. 자동차의 연비개선 대책은 엔진, 구동 계의 효율향상, 주행저항저감, 경량화 등이 있으나, 엔진효율 향상 및 구동계의 전달효율 향상은 기술적으로 거의 한계에

도달하여 대폭적인 효율향상은 기대하기 어려운 실정이며 구조변경, 경량재료 변경, 부품합리화 등에 의한 경량화가 연비개선에 가장 기여도가 높으며, 경량재료 변경에 의한 효과가 특히 기대된다. 경량화 기술중 대체재료화와 일체 성형화는 기본적 방법이고, 대체 재료중 복합재료는 알루미늄과 함께 가장 바람직한 대체 재료이다. 특히 복합재료는 경량, 강성, 내식성 등의 우수한 재료특성을 바탕으로 차량 경량화, 내부식성 및 충격, 진동 등의 성능 향상, 금형 가격의 절감 등을 위하여 차체 외판, 외장 부품, leaf spring같은 기구부품 및 엔진부품 등에 적용하기 시작하여, 현재 그 사용이 증가하고 있는 추세이다. 복합재료에 사용되는 보강섬유는 유리섬유가 사용되고 있으며, 최근에는 미국, 일본의 자동차 업계에서 경량화 효과를 증대시키기 위하여 탄소섬유를 사용한 복합재료부품의 사용을 추진 중에 있다. 예를 들면, 미국의 Ford사에서는 100% 탄소섬유 강화 복합재료(Carbon Fiber Reinforced Plastics, CFRP) 시작차를 제조하여 SAEC(The Annual Society of Automoitve Engineers

Convention)에 전시하였다. 이차는 기존 철제 차량의 무게와 비교했을 때 약 51.5% 정도 경량화되어 연비가 기존차량의 약 35% 정도 개선되었다<sup>1)</sup>. 엔진부품에 주로 사용되는 금속복합재료의 경우, 탄화규소(SiC) 섬유, 알루미나(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 섬유 등이 주로 사용되고 있다. 사용되는 보강재의 기하학적 형상은 입자(Particle)형태, 휘스커(Whisker)형태, 단섬유(Short Fiber)형태, 연속섬유(Continuous Fiber)형태로 분류할 수 있다. 기지재료는 주로 불포화 폴리에스터(Unsaturated Polyester), 비닐에스터(Vinylester) 등의 열경화성 수지(Thermoset Resin)와 나일론(Nylon), 폴리프로필렌(Polypropylene, PP), 폴리에틸렌(Polyethylene, PE)등의 열가소성 수지가 있다. 금속복합재료의 경우, 주로 알루미늄합금(Al Alloy)이 주종을 이루고 있으나, 최근에는 마그네슘 합금(Mg Alloy)의 사용도 검토되고 있다.

대체 재료로서 복합재료를 자동차에 적용하기 위해서는 성능, 생산속도 및 생산비 등을 포함하는 여러 요인을 서로 균형 있게 조절해야 한다. 예를 들면, 항공·우주 분야에서는 성능 향상이 중요한 요구 조건이지만, 자동차 분야에서는 향상된 성능만이 반드시 가장 필요한 것은 아니다. 그 대신 더 필요한 문제는 부품의 생산속도가 빠르고 생산비가 낮아서 가격면에서 유리해야 한다는 것이다. 자동차용 복합재료 부품은 각 단계에서 1분 이하의 소요시간으로 5분 이내의 전체공정을 현재의 목표로 삼고 있다. 이와 같이 가격 면에서 유리한 복합재료를 개발하여 적용하기 위해서는 원재료의 선택도 중요하지만 복합재료 생산비의 70%는 제조과정에 있으므로 생산성이 높으면서 신뢰성도 높은 제조공정의 개발이 필요하다<sup>2), 3)</sup>. 예를 들면 미국에서 개최한 여러 워크샵에 참여한 복합재료 종사자들에 대한 설문조사 결과에 의하면<sup>4)</sup>, 향후

5~15년의 기간 내에 가장 중요한 문제는 가장 유리한 제조방법의 확인과 그 방법을 사용하는데 있어서의 과학적이고 기술적인 문제점의 확인이라는 것이다. 현재 자동차용 복합재료를 생산하는 데 유리한 제조방법으로는 압축성형(Compression Molding), 액상성형(Liquid Molding), 인발성형(Pultrusion), 필라멘트 와인딩성형(Filament Winding)등이 있다. 압축성형은 현재 자동차 외장부품 성형에 널리 알려져 있는 SMC(Sheet Molding Compound)성형, 최근에 많은 연구가 되고 있는 LMPC(Low Pressure Molding Compound)성형, GMT(Glass Mat Reinforced Thermoplastics)성형 등이 있다. 액상성형은 RTM(Resin Transfer Molding)과 VARI(Vacuum Assisted Injection Molding), SRIM(Structural Reaction Injection Molding) 등이 있으며, 자동차 산업뿐만 아니라 일반 산업에서도 최근 많은 각광을 받고 있다.

그러므로 본 소고에서는 자동차용 복합재료의 제조에 널리 사용되는 성형공정에 대하여 간단히 살펴보고, 자동차 부품에 있어서의 복합재료 응용 현황과 최근 환경문제가 대두되면서 관심의 초점이 되고 있는 자동차용 복합재료 재활용 기술에 대하여 고찰하고자 한다.

## 2. 제조기술

자동차용 복합재료 성형기술중 SMC, RTM, Filament Winding, Pultrusion에 관해서는 이전의 자동차공학회지<sup>5)</sup>에 상세하게 설명이 되어 있으므로 본 소고에서는 간략하게 소개하기로 하겠다.

### 2.1 압축성형(Compression Molding)

압축성형은 표면이 잘 가공된 암, 수의 금

형 사이에 보강섬유와 수지의 혼합물을 넣고 금형의 온도를 올리고 프레스를 이용하여 압력을 가해 성형하는 방법으로 자동차 부품 생산분야에 많이 적용되고 있다. 대표적인 압축성형공정으로는 현재 자동차 외장부품 제조에 널리 사용되고 있는 SMC(Sheet Molding Compound), 최근에 많은 연구가 되고 있는 LPMC(Low Pressure Molding Compound), GMT(Glass Mat Reinforced Thermoplastics) 등이 있다. 본 절에서는 이들 성형공정에 대하여 간략하게 소개하고자 한다.

### 2.1.1 SMC(Sheet Molding Compounds)<sup>5), 6)</sup>

SMC는 보강재, 수지, 충전재(Filler), 증점제(Thickener), 첨가제(Additives), 이형제 등이 혼합되어 반고체의 얇은 판 형태로 제작되는 것으로 상하 금형 사이에 넣어 압력과 열을 가하여 성형하는 데 쓰이는 재료를 뜻하는 데, 일반적으로 이 재료를 사용하여 압축성형하는 성형 공법을 뜻하기도 한다. Fig.1은 SMC를 제작하는 과정의 개요도인데 이렇게 제작된 판재형태의 반고체가 압축성형에 사용된다. SMC에 사용되는 재료를 살펴보면, 보강섬유는 주로 유리섬유가 사용되고 있으며, 수지로는 불포화 폴리에스터, 비닐에스터가 주로 사용된다. 최근에는 페놀 수지도 SMC의 수지로 사용되고 있다. 페놀 수지로 이루어진 SMC는 기존의 불포화 폴

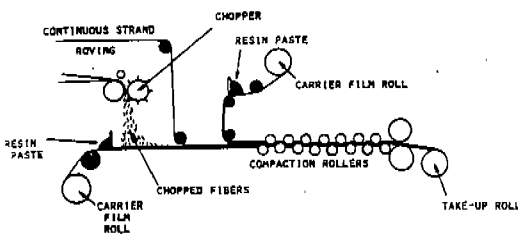


Fig.1 SMC 제조과정의 개요도

리에스터 수지로 이루어진 SMC보다 가연성(Flammability)이 낮고 연기의 생성도 적으며 높은 열적 안정성을 보유하고 있다. 충전재로는 탄산칼슘( $\text{CaCO}_3$ )이 가장 많이 사용되며,  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 도 충전재로 사용된다. 충전재가 하는 역할은 수지의 부피 수축을 줄이며, 유동을 향상시켜서 성형성을 향상시키며, 성형된 제품의 표면정도를 향상시키는 역할을 한다. 증점제는 SMC의 취급성이 용이하도록 수지의 점도를 높이는 역할을 한다. 불포화 폴리에스터와 비닐에스터 SMC에 사용하는 증점제는  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$  등과 같은 IIA족의 금속산화물이다. 이러한 증점제를 수지에 넣으면 수지의 점도는 6,000,000~75,000,000cP 정도로서 이동 보관하고 차후에 성형하기에 적당하도록 되어 있다. 첨가제는 주로 저수축첨가제(Low Profile Additives)로서 SMC의 수축을 제어하기 위하여 불포화 폴리에스터와 비닐에스터에 혼합하는 열가소성 분말을 말한다. 이와 같은 열가소성 분말에는 Polyvinyl Acetate, Polymethyl Acetate, Polystyrene 등이 있다. 이외에 첨가제는 난연제(Flame Retardant), 자외선 흡수제(Ultraviolet Absorber)와 내충격 강화제(Impact Modifier) 등이 있다. 이형제는 제품을 금형으로부터 이형시키기 용이하도록 하기 위하여 주로 수지 paste에 섞는다. 주로 사용되는 이형제는 Zinc Stearate, Calcium Stearate 등이 있다.

SMC는 보강재의 형태에 따라 크게 4가지로 분류되는 데 Fig.2에 SMC의 보강 형태에 따른 분류를 나타낸 것이다. SMC-R은 Random 섬유를 사용하며 섬유의 길이는 4~8mm 정도이다. 형상이 복잡하고, Rib, Boss 등이 많은 구조물에 사용하는 데 최종 제품은 각 방향에 대하여 강도가 대체적으로 균등한 것이 보통이다. SMC-C는 일 방향으로 정렬된 보강섬유가 들어 있는 것으로 한

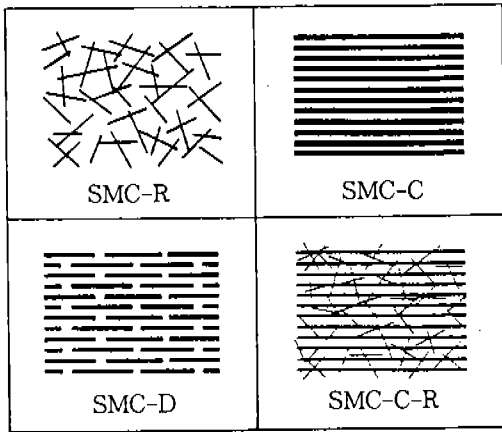


Fig.2 SMC의 보강재의 형태에 따른 분류

쪽방향의 강도가 크게 요구될 때 사용된다. SMC-CR은 연속섬유와 Random섬유를 복합하여 사용하는 것이며, SMC-D는 단섬유를 방향성이 있도록 배열시킨 것인데 각각의 특성에 맞게 응용하여야 한다.

SMC는 상하의 금형 사이에 넣어 압력과 열로 성형하는 데, 온도는 약 120~180℃ 정도이며, 압력은 5.5~17MPa(800~2,500 psi) 정도이다. 성형시간은 제품의 두께, 금형 온도, 촉진제 배합량에 따라 달라지며 일반적으로 1~4분 정도이다. 경화 완료된 제품은 후가공을 통하여 완성된다. 이 공정은 생산성이 높고, 복잡한 부품을 일체로 단번에 성형할 수 있다는 장점도 있다. 그러나 요구 압력이 높은 관계로 대형 프레스가 필요하고 금형의 제작비가 높으므로 대량생산의 경우에 적용된다.

### 2.1.2 LMPC(Low Pressure Molding Compound)

LMPC는 기본적으로 통상적인 SMC와 비교해서 무엇보다도 성형 압력이 1.03MPa(150psi) 정도로 낮고 수지 유동 특성이 아주 우수한 장점이 있다. 즉 SMC같이 대형

프레스가 필요없고, 금형 제작비도 대폭 절감할 수 있는 큰 장점이 있으므로 대량 생산뿐만 아니라 소량 다품종 생산에도 경쟁력이 없다. 따라서 이 공정은 자동차 부품뿐만 아니라 일반 산업부품의 생산에도 응용 가능성이 매우 높다.

LMPC의 핵심 성분은 Scott Bader에 의해 제조된 결정성(crystalline) 불포화 폴리에스터이다<sup>7)</sup>. 이 수지는 용융점이 약 55℃로 상온에서 고체 상태이다. LMPC는 통상적인 SMC와 비슷한 formulation으로 배합되기는 하지만 55℃ 이상의 고온에서 배합된다. 이 온도에서는 결정성 폴리에스터는 액체 상태로 LMPC 전체에 고루 퍼지게 된다. 그 다음에 복아제를 함침시킨 후 상온으로 냉각시키면 이 수지는 고체 상태로 되돌아가게 된다. 이것이 기본적인 LMPC의 증점 공정(Thickening Process)이다. LMPC는 산화물계 증점제(Oxide Thickener)를 포함하지 않으므로 화학적으로 증점되지는 않고, 단지 그 재료가 상온에 도달했을 때 숙성(maturation)이 완료된다. 따라서 수지의 점도는 몇 년이 지나더라도 그대로 유지된다.

LMPC는 전형적인 원재료를 사용한 통상의 SMC와 거의 유사하다. 그러나 SMC와 비교해서 두 가지의 큰 차이점이 있다. 첫째는 산화물계 증점제를 사용하지 않는다는 점이고, 둘째는 결정성 폴리에스터를 사용한다는 것이다. 결정성 폴리에스터는 formulation에 첨가되는 것이 아니라 기존의 불포화 폴리에스터의 사용량만큼 대체한다는 것이다. 결정성 폴리에스터의 양은 응용 제품에 따라 달라지고, 요구되는 증점도에 따라 달라진다.

LMPC의 주요 장점은 앞서서도 언급하였듯이 결정성 폴리에스터에 의해 저압에서도 성형할 수 있다는 것이다. 가열된 금형 위에

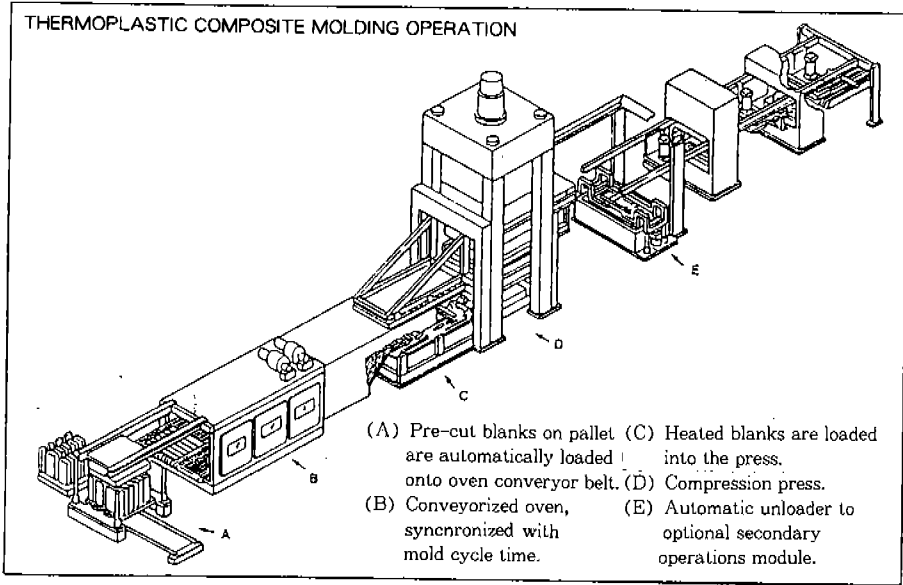


Fig.3 GMT의 압축 성형공장

LMPC가 놓으면 결정성 폴리에스터는 녹아서 점도가 낮아지게 된다. 이 현상이 저압에서도 금형 내부에서 뛰어난 재료 유동을 가능하게 한다. 산화물계 증점제를 사용하는 통상의 SMC에서는 비슷한 온도 영역에서 LPMC만큼 수지 점도가 낮아지지 않는다. 이는 SMC의 유동은 폴리에스터와 증점제의 상호반응에 의해 분자량이 증가하여 억제되기 때문이다.

2.1.3 GMT(Glass Mat Reinforced Thermoplastics)

GMT는 여러 종류의 열가소성 수지(Thermoplastic Resins)를 기지로 하고 서로 다른 길이와 방향을 가진 유리섬유로 보강한 복합 재료를 의미한다. 이 재료는 주로 보강재의 종류와 부품의 사용 용도에 따라 서로 다른 조건하에서 압축성형에 사용된다. Fig.3은 GMT 압축성형 공정의 개요도를 나타낸 것이다<sup>8)</sup>. GMT는 비용 효율이 높고 대량 생산에 적합하며, 복잡한 형상이나 대형 부품 생

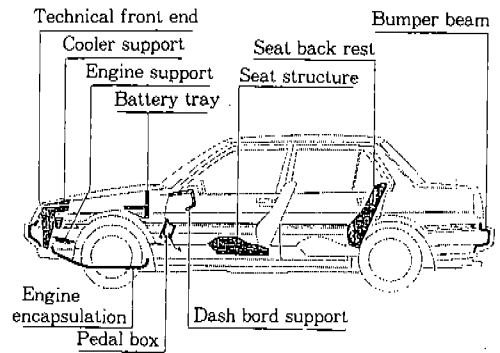


Fig.4 GMT의 자동차 부품 적용 예

산에 주로 사용된다. 특히 기지재료로 비교적 가격이 저렴한 폴리프로필렌(Polypropylene)을 사용하면 자동차 부품의 대량생산의 응용 가능성은 높아진다. Fig.4는 GMT를 자동차 부품에 적용한 예를 나타내었다<sup>8)</sup>.

자동차 분야를 고려해보면, GMT는 미적 인 고려 없이 구조용 부품을 제조하기 위하여 주로 시트(sheet) 형태로 사용된다. 그러므로 강철, 알루미늄 등의 시트 금속, BMC

공정은 수초에 불과하다<sup>12)</sup>. SRIM 공정에서는 충전시간이 짧기 때문에 보강재 사이로 수지가 함침될 때 섬유 매트(Mat)가 움직이지 않도록 주의하여야 한다. 이것은 주로 유압 프레스로 섬유 매트를 압축하고 수지 유동이 원활히 일어나도록 고정시킨다.

SRIM 공정은 대형 부품을 수초 내에 성형할 수 있기 때문에 상업적 잠재력은 매우 높다. 그러나 성형동안 발생하는 극심한 변화 때문에 공정 변수의 조절이 매우 어렵다. 따라서 SRIM 공정을 복합재료 자동차부품 제조에 응용하기 위해서는 공정의 최적화가 반드시 필요하다.

### 2.3 인발성형(Pultrusion)

일반성형은 Fig.6과 같이 연속섬유 혹은 매트에 수지를 함침시켜 단면이 일정한 형상을 지닌 가열된 금형을 통하여 경화시키면서 연속적으로 제품을 성형하는 공법으로, 긴 튜브, Rod 및 채널 등과 같이 길이방향으로 똑같은 단면을 지닌 제품을 제조하는 데 사용된다. 인발성형기는 Fig.6에 나타낸 바와 같이 보강섬유 스푼(Spool), 수지함침장치(Resin bath), 형상제어장치(Forming guide), 가열 금형, 당김 장치(Puller) 및 절단기 등으로 구성된다. 보강섬유 스푼로부터 공급되는 보강섬유가 수지함침장치를 거치면서 보강섬유에 수지가 함침된다. 수지가 함침된 보강섬유는 가열된 금형을 통과하면서 복합재료가

경화되며, 금형을 빠져 나온 복합재료 제품은 당김 장치에 의해 연속적으로 당겨진다. 성형된 복합재료 제품은 절단기에 의해 원하는 길이만큼 절단되어 최종 완성된다.

인발성형에 있어서 가장 핵심성형 기술로는 수지 선정 기술, 섬유분포 제어기술, 금형 온도 제어 기술 및 당기는 속도 제어 기술 등이 있다<sup>12)</sup>. 수지선정은 제품의 기계적 특성, 성형온도 및 내식성 등과 관계 있을 뿐만 아니라 수지함침성과도 매우 밀접한 관계가 있다. 성형된 제품의 섬유분포가 균일하고 섬유함유율이 높을수록 강도를 높일 수 있으므로 섬유분포 제어기술은 무엇보다 중요하다. 금형온도 제어기술은 생산성과 기계적 특성에 크게 영향을 미치므로 매우 중요한 기술이라 할 수 있는데 금형의 온도에 따라 금형 내에서의 경화 반응도가 달라지며, 최대 경화반응도에 도달하기까지의 시간이 달라지게 된다. 최대 경화반응도에 이르는 시간이 빠르면 금형의 입구 쪽에서 경화가 모두 이루어지므로 당기는 속도가 상대적으로 줄고 최대 경화반응도까지 도달하는 시간이 늦을수록 금형 출구 쪽에서 경화가 완성되므로 당기는 힘은 상대적으로 증가한다. 당기는 속도는 결국 금형의 온도와 당기는 힘 등을 고려하여 결정되며, 생산성 향상을 위해서 당기는 속도가 최대가 될 수 있도록 금형의 온도 및 당기는 힘을 조절하는 기술이 중요하다 할 수 있다.

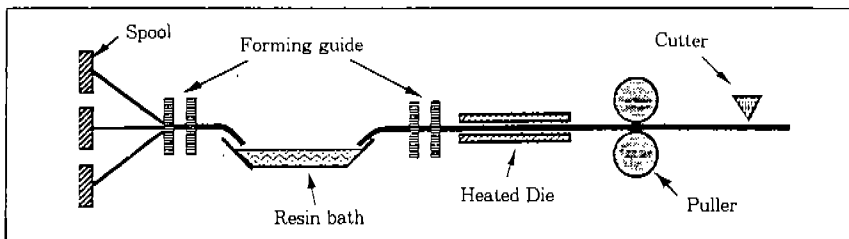


Fig.6 일반성형의 개요도

인발성형으로 성형가능한 자동차 부품은 충격 흡수보(Impact Beam), 드라이브 샤프트(Drive Shaft)등이 있다.

### 2.4 필라멘트 와인딩(Filament Winding)

필라멘트 와인딩은 축대칭 등 다양한 형상의 부품을 만드는데 사용되는(Fig.7), 성형 중 섬유 경로(Fiber Path)를 변경시키기 어렵고 맨드릴(Mandrel)처리를 고려해야 하며 제품의 표면이 매끄럽지 못하고 두께 방향으로의 섬유체적율이 일정하지 않은 단점이 있다. 필라멘트 와인딩에는 함침이 연속 보강 섬유를 직접 수지용기 속으로 통과시켜 맨드릴위에 감는 Wet Winding법과 얇은 프리프레그(Prepreg) 테이프를 감는 Dry Winding법이 있다. 드라이브 샤프트, 천연가스 차량용 연료 탱크 등이 이 방법으로 만들어지는데, 이 경우는 섬유의 올바른 배치, 섬유에 가해질 장력 및 경화동안의 온도분포 및 그에 따른 잔류응력등이 중요한 고려대상이다<sup>13)</sup>. 열가소성 복합재료의 경우에 테이프 적층 공정<sup>10)</sup>을 축대칭 제품에 적용한 것으로 로봇을 이용한 다축 제어를 통하여 접착 경로를 따라서 접합하게 된다<sup>14)</sup>.

### 3. 응용 현황

본 절에서는 자료를 통하여 조사한 복합재료의 최근 응용 현황을 분야별로 설명하고자 한다.

#### 3.1 차체·외판

1996년대 북미에서 SMC가 자동차차 쓰인 양은 1995년 90,920톤에서 908,900톤으로 20% 증가하였다. 이는 SMC의 다양한 유용성 때문에 첨단 자동차 재료로 선도적 위치를 차지하고 있다고 SMC Automobile Alliance(SMCAA)는 말한다<sup>15)</sup>. 최근에는 27개의 제조회사로부터 승용차, 트럭의 380개 부품들이 SMC로 제조되고 있다. 이것은 1995년에 비해 300%의 신장율을 보이며 80여개가 1996년에 새롭게 제조된 것이다.

Ford사는 SMC를 이용하여 가격을 14% 감소시켰고, 22%의 무게를 Taurus Mercury Sable의 라디에타의 아래, 뒷부분의 지지대를 제작함으로써 감소시켰다. 22조각의 강철 구조로된 이전의 모델대신에 SMC를 이용하여 일체로 제작함으로써 복잡한 제조

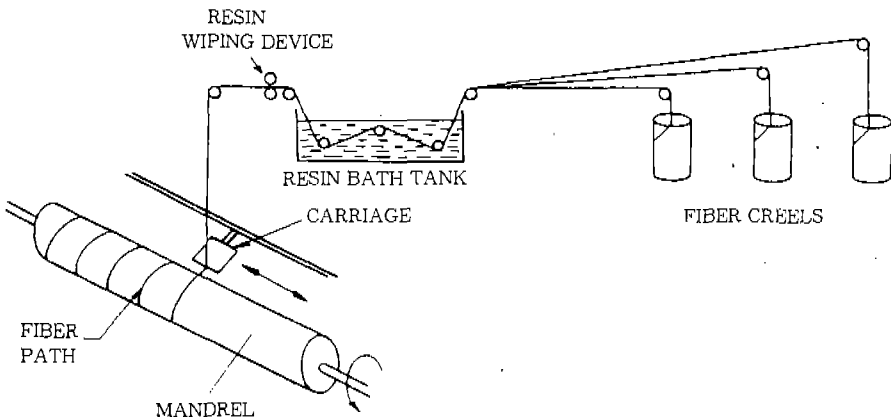


Fig.7 필라멘트 와인딩 공정의 개요도

공정은 수초에 불과하다<sup>12)</sup>. SRIM 공정에서는 충전시간이 짧기 때문에 보강재 사이로 수지가 함침될 때 섬유 매트(Mat)가 움직이지 않도록 주의하여야 한다. 이것은 주로 유압 프레스로 섬유 매트를 압축하고 수지 유동이 원활히 일어나도록 고정시킨다.

SRIM 공정은 대형 부품을 수초 내에 성형할 수 있기 때문에 상업적 잠재력은 매우 높다. 그러나 성형동안 발생하는 극심한 변화 때문에 공정 변수의 조절이 매우 어렵다. 따라서 SRIM 공정을 복합재료 자동차부품 제조에 응용하기 위해서는 공정의 최적화가 반드시 필요하다.

### 2.3 인발성형(Pultrusion)

일반성형은 Fig.6과 같이 연속섬유 혹은 매트에 수지를 함침시켜 단면이 일정한 형상을 지닌 가열된 금형을 통하여 경화시키면서 연속적으로 제품을 성형하는 공법으로, 긴 튜브, Rod 및 채널 등과 같이 길이방향으로 똑같은 단면을 지닌 제품을 제조하는 데 사용된다. 인발성형기는 Fig.6에 나타난 바와 같이 보강섬유 스펴(Spool), 수지함침장치(Resin bath), 형상제어장치(Forming guide), 가열 금형, 당김 장치(Puller) 및 절단기 등으로 구성된다. 보강섬유 스펴로부터 공급되는 보강섬유가 수지함침장치를 거치면서 보강섬유에 수지가 함침된다. 수지가 함침된 보강섬유는 가열된 금형을 통과하면서 복합재료가

경화되며, 금형을 빠져 나온 복합재료 제품은 당김 장치에 의해 연속적으로 당겨진다. 성형된 복합재료 제품은 절단기에 의해 원하는 길이만큼 절단되어 최종 완성된다.

인발성형에 있어서 가장 핵심성형 기술로는 수지 선정 기술, 섬유분포 제어기술, 금형 온도 제어 기술 및 당기는 속도 제어 기술 등이 있다<sup>12)</sup>. 수지선정은 제품의 기계적 특성, 성형온도 및 내식성 등과 관계 있을 뿐만 아니라 수지함침성도 매우 밀접한 관계가 있다. 성형된 제품의 섬유분포가 균일하고 섬유함유율이 높을수록 강도를 높일 수 있으므로 섬유분포 제어기술은 무엇보다 중요하다. 금형온도 제어기술은 생산성과 기계적 특성에 크게 영향을 미치므로 매우 중요한 기술이라 할 수 있는데 금형의 온도에 따라 금형 내에서의 경화 반응도가 달라지며, 최대 경화반응도에 도달하기까지의 시간이 달라지게 된다. 최대 경화반응도에 이르는 시간이 빠르면 금형의 입구 쪽에서 경화가 모두 이루어지므로 당기는 속도가 상대적으로 줄고 최대 경화반응도까지 도달하는 시간이 늦을수록 금형 출구 쪽에서 경화가 완성되므로 당기는 힘은 상대적으로 증가한다. 당기는 속도는 결국 금형의 온도와 당기는 힘 등을 고려하여 결정되며, 생산성 향상을 위해서 당기는 속도가 최대가 될 수 있도록 금형의 온도 및 당기는 힘을 조절하는 기술이 중요하다고 할 수 있다.

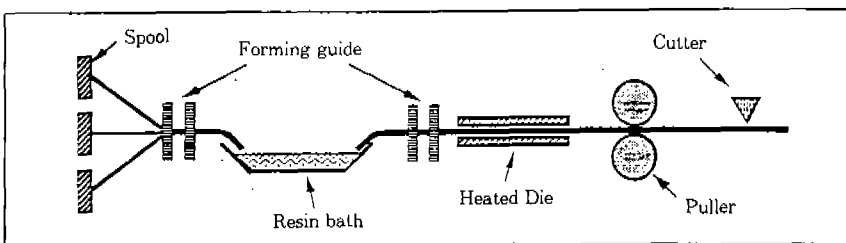


Fig.6 일반성형의 개요도



인발성형으로 성형가능한 자동차 부품은 충격 흡수보(Impact Beam), 드라이브 샤프트(Drive Shaft)등이 있다.

#### 2.4 필라멘트 와인딩(Filament Winding)

필라멘트 와인딩은 축대칭 등 다양한 형상의 부품을 만드는데 사용되는데(Fig.7), 성형 중 섬유 경로(Fiber Path)를 변경시키기 어렵고 맨드릴(Mandrel)처리를 고려해야 하며 제품의 표면이 매끄럽지 못하고 두께 방향으로의 섬유체적율이 일정하지 않은 단점이 있다. 필라멘트 와인딩에는 함침이 연속 보강 섬유를 직접 수지용기 속으로 통과시켜 맨드릴위에 감는 Wet Winding법과 얇은 프리프레그(Prepreg) 테이프를 감는 Dry Winding법이 있다. 드라이브 샤프트, 천연가스 차량용 연료 탱크 등이 이 방법으로 만들어지는데, 이 경우는 섬유의 올바른 배치, 섬유에 가해질 장력 및 경화동안의 온도분포 및 그에 따른 잔류응력등이 중요한 고려대상이다<sup>13)</sup>. 열가소성 복합재료의 경우에 테이프 적층 공정<sup>10)</sup>을 축대칭 제품에 적용한 것으로 로봇을 이용한 다축 제어를 통하여 접착 경로를 따라서 접합하게 된다<sup>14)</sup>.

### 3. 응용 현황

본 절에서는 자료를 통하여 조사한 복합재료의 최근 응용 현황을 분야별로 설명하고자 한다.

#### 3.1 차체·외관

1996년대 북미에서 SMC가 자동차 쓰인 양은 1995년 90,920톤에서 908,900톤으로 20%증가하였다. 이는 SMC의 다양한 유용성 때문에 첨단 자동차 재료로 선도적 위치를 차지하고 있다고 SMC Automobile Alliance(SMCAA)는 말한다<sup>15)</sup>. 최근에는 27개의 제조회사로부터 승용차, 트럭의 380개 부품들이 SMC로 제조되고 있다. 이것은 1995년에 비해 300%의 신장율을 보이며 80여개가 1996년에 새롭게 제조된 것이다.

Ford사는 SMC를 이용하여 가격을 14% 감소시켰고, 22%의 무게를 Taurus Mercury Sable의 라디에타의 아래, 뒷부분의 지지대를 제작함으로써 감소시켰다. 22조각의 강철 구조로된 이전의 모델대신에 SMC를 이용하여 일체로 제작함으로써 복잡한 제조

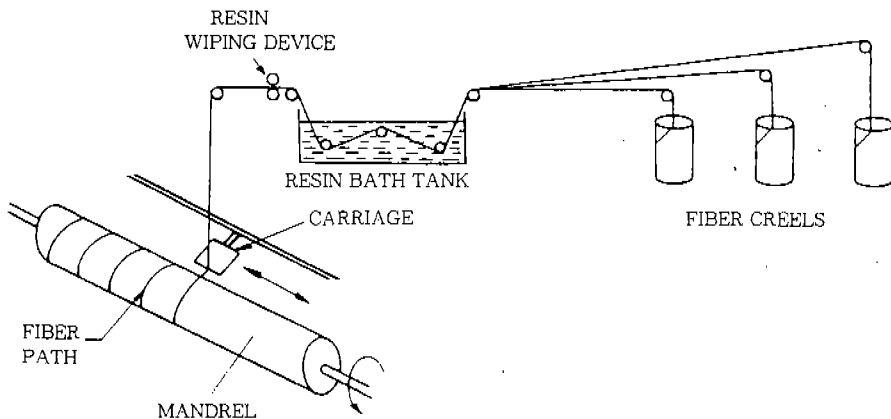


Fig.7 필라멘트 와인딩 공정의 개요도

공정을 단순화 시켰다. 또한 glove box door와 steering column knee bolster를 SMC로 제작하여 24%의 무게를 줄였으며 sunroof shade와 연료 탱크도 SMC로 제작하였다.

Crysler사는 Sebring JX Convertible의 본넷에 SMC를 적용하였다. 이것은 Crysler가 승용차에 이 부분에 SMC를 적용한 첫 예이다. SMC를 이용하여 무게와 경비를 줄이고 강철로는 얻을 수 없는 매끄러운 디자인을 하였다.

SOTIRA는 유럽으로 수출되는 Ford의 Fiesta에 들어가는 rear spoiler를 하루 100개 이상 찍어내고 있다. Sotira가 ICS(Injection Compression System)이라 이름한 이 제조 공법을 RTM에 기초를 두고 있다. 처음에는 폴리우레탄 폼 코어(foam core)를 성형하고, 유리 섬유 예비성형체로 spoiler를 감싼다. 세 부분은 그리고 나서 세 개의 강철 금형에 각각 놓고서 불포화 폴리에스터 수지를 차례대로 주입한다. 경화가 된 후에 이들은 금형으로부터 탈형하여 후가공을 한다. 다음에 이들은 13가지 색깔로 도장한다. 이렇게 제조된 spoiler는 비교적 가격이 저렴하면서도 치수 안정성 및 기계적 특성이 우수하다.

작은 스포츠카나 고급 승용차의 외장재에

쓰이는 복합재의 우수성은 Alfa Romeo와 Ferrari의 모델들에서 잘 볼 수 있다. 새로운 Alfa Romeo Spider roadster나 GTV coupe의 본넷은 SMC를 이용하여 헤드램프와 그릴부분(Grille Aperture)등을 일체화하여 성형한 것이다(Fig.8). 이것은 유럽의 자동차 공업에서 최초의 새로운 class "A" SMC부품이며 기능이 통합된 복합재의 가능성과 자동차 디자인의 자유로움을 나타내는 전형적인 예이다. 표면처리는 이전의 유럽의 어떠한 SMC부품보다 뛰어나다. Alfa 본넷은 Milan의 Tecnogroup Schiraretti가 SMC와 GMT의 전문 회사인 Ranger Italiana에서 들어온 금속 금형에 의해 제작되었다. 최근 많은 복합재료 제조업체들이 Ferreri F355를 위한 부품들을 생산하고 있다는 데, Ranger Italiana 역시 Ferrari F355를 위한 앞, 뒤 범퍼(Bumper)를 제조하고 있다. Floor pan은 GMT로 제조되었으나 더 이상은 알려지지 않고 있다. Brandolph 또한 Ferrari의 공급자인데 이 회사는 예비성형체 제조기술(Preforming Technology)를 이용하여 SRIM으로 앞, 뒤 범퍼 빔을 Unifilo Mat와 Dow Spectrim 수지를 이용하여 제작하고 있다<sup>16)</sup>.

소형 밴은 스포츠카보다는 수요가 작지만

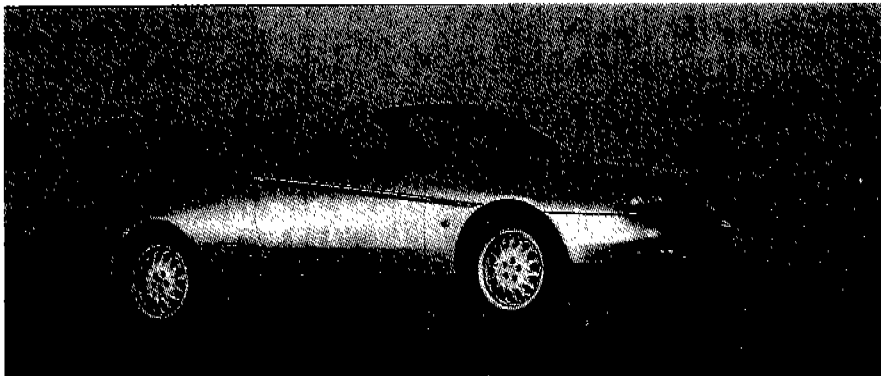


Fig.8 Class "A" AMC 본넷으로 장착된 Alfa Romeo Spider

그들의 작은 부피 때문에 복합 재료가 많이 사용되고 있다. 새로 나온 VW. Sharan/Ford Galaxy 모델은 structural front end, water box, 그리고 소음 차폐(noise shield)를 포함한 여러 가지 SMC부품을 가지고 있다. 그 제작된 Front end는 다기능이며 좋은 치수 안정성과 높은 강도를 가지고 있다고 한다. Front end는 1,000톤의 Dieffenbacher press에 의해 제작되는데, 두 개의 금형에 의해 하루 830개가 생산된다. Men zolit-Fibron사는 VW사로부터 GMT front end (Fig.9)를 주문 받고 있는데 이것은 B5 Model Passat에 쓰이는 것으로 최종적으로 LFT(Long Fiber Reinforced Thermoplastic)로 바꾸게 될 것이다.

General Motors는 GMC와 Chevrolet밴의 라디에타 지지대를 1996년까지 복합재료를 이용한 구조로 재구성하려 하고 있다. 이러한 상황은 자동차 부품에서 라디에타 지지대가 차지하는 비율이 상당히 크기 때문인데 매년 Taurus/Sable의 경우 0.5백만 unit

/year, GM밴은 150,000 unit/year를 생산하기 때문이다. 라디에타 지지대는 대형 부품과 결합하여 복합재료산업의 연중 생산 비율을 상승시키고 있다. Taurus/Sable 라디에타 지지대의 무게는 8kg정도이다. 만일 GM밴의 라디에타 지지대의 무게가 이와 유사하다면 1996년 복합재료의 새로운 응용 분야 영역이 합계가 5,000톤 이상될 것으로 보고 있다. SMC 라디에타 지지대의 경제적인 면은 눈여겨보지 않을 수 없다. 왜냐하면 SMC의 치수 안정성이 여러 형태의 엔진 덮개 내부 요건에서도 안정성이 확인되었기 때문에 조립 공정에서 완전한 형태의 제품을 자동차 내부에 빨리 장착시킬 수 있기 때문이다<sup>17)</sup>.

그리고 이 회사는 보다 내용적이 큰 탄소 섬유 강화 연료 탱크의 설계와 함께 천연가스 차량 시장에 복귀하였다. GM은 1997년에는 GMC와 Chevrolet 픽업 트럭에 압축 천연가스 부분을 도입하기로 계획하고 있고 2000년에는 NGV(Natural Gas Vehicle)를 출하할 것으로 예상하고 있다. 그 예로

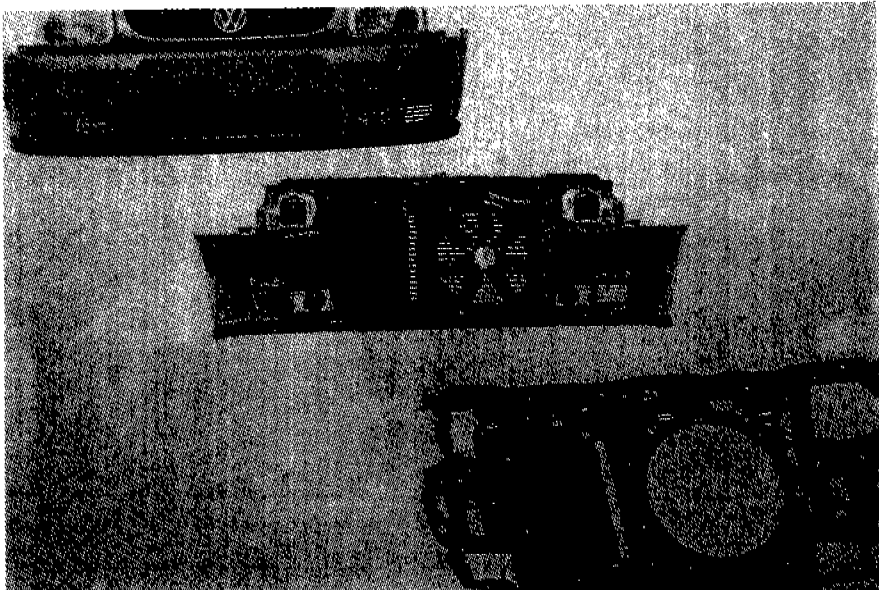


Fig.9 VW Polo의 GMT front end

Chevrolet Corsica는 이러한 변화의 선두 주자 역할을 하고 있다. GM은 1994년 시에라 픽업의 두 개의 천연가스 통이 압력에 의해 연료 주입 도중 폭발한 이후 NGV사업에서 물러났지만 GM은 금속 라이너에 탄소 섬유/에폭시 수지를 와인딩한 연료탱크 시장에 재 진입한다고 한다<sup>18)</sup>.

Chrysler사는 신형 Chrysler미니밴의 앞유리 와이퍼 전반부의 plenum을 유리 섬유 강화 비닐 에스테르 SMC제품으로 생산하여 자동차 조립 비용을 감소시켰다. 신형 미니밴의 Uchannel부품은 겨우 3.4kg의 무게, 19.5cm의 길이 16cm의 두께와 147cm의 폭을 가지고 있다. Bailey사는 압축성형에 의해서 유리 섬유 강화 비닐 에스테르 SMC제품의 32%를 전반부 plenum으로 생산하고 있다. 비닐 에스테르 SMC 제품이 열가소성 복합재료보다 많은 부분에서 선택되어지는 것은 열적 안정성이 뛰어나기 때문이다. plenum은 120℃의 연속 사용 온도와 150℃의 단시간 사용에서도 강성, 강도, 내구성이 요구되어지기 때문이다. 성형공정은 완전 자동화되었으며, deflashing, 드릴링, 탐침검사, studs삽입과 탈착공정을 거쳐 제품화되었다<sup>19)</sup>.

Dodge사에서는 viper범퍼를 새로운 형태로 개발하였다. 기존의 viper범퍼는 에너지 흡수재료로 폴리프로필렌 폼을 성형한 후 2차 공정에 의해 단단한 SRIM 범퍼 빔에 부착시키는 방식을 써왔다. 그러나, 새로운 공정에서는 에너지 흡수재료를 쓰지 않고 고 신축성 우레탄을 사용하여 범퍼 빔과 함께 일체화를 시켰다. 예비성형체와 수지는 강도의 손실없이 보다 복잡한 형태의 모델을 만들기 위해 적절히 변형시켜 사용하였다. 1993년 3월 시장 경제보고서에 따르면 Chrysler사는 viper범퍼를 위해 금속체에서 SRIM 우레탄으로 교체한 것으로 나타났다. 현재 사용되어지는 범퍼는 fiber glass 리폼이 채

워져 있는 금형에 두 가지 요소의 우레탄을 사출하여 만든다. 이와 같은 SRIM빔은 금속재 빔에 비해 절반의 무게에도 못미치는 3.4kg정도의 무게를 가지고 있다. 이외 조명용 범퍼와 그 외 구성 요소들을 감안한다면 차체 중량의 9kg정도까지 감량시킬 수 있을 것으로 보고 있다<sup>20)</sup>.

Volvo사에서는 Low pressure moulding compound(LPMC)공정으로 가격면에서 효과적인 폴리프로필렌을 사용해 트럭의 side skirt 부품을 제작하였다<sup>21)</sup>. 이 부품은 Sonoform AB라는 회사에서 Volvo사에 납품하고 있다. 앞·뒷바퀴 사이에 있는 side skirt cover 부품은 전반부, 중반부, 후반부, 상반부의 네 부분으로 나뉜다. LPMC공정을 이용한 제품의 경우 매우 우수한 표면과 sink마크를 거의 찾아 볼 수 없다. SMC와 비교할 때 SMC는 성형시 8MPa의 압력을 요하지만 LPMC의 경우는 단지 1.5MPa의 압력으로 성형할 수 있다. 그 결과 프레스와 금형에 투자되는 비용이 줄어들게 되었다. LPMC의 원재료는 roll 혹은 plate형태로 주어진다. 원재료를 금형에 맞게 절단한 후 금형내에서 140~150℃온도로 가열한 후 바로 성형할 수 있다. Sonoform사에서는 500톤 용량의 프레스를 사용하여 side skirts를 생산하고 있다.

최근 북미에는 기존의 SMC를 대체하는 저압 및 저밀도 SMC공법에 많은 연구를 하고 있다. 가장 큰 관심사는 SMC의 성형 압력을 줄여 나감으로써 생산성 향상과 비용절감이라 할 수 있다. Union Carbon 및 Ashland Chemical등 여러 기업에서 이 기술에 관심을 보이고 있다. 특히, Union Carbide사에서 개발한 XTM-1 Thickening Modifier와 XTA-1 Thickening Agent는 일반적으로 상용화된 불포화 폴리에스터 수지에 첨가하여 제조한 LPMC를 이용해 만든 제품은 수

축과 표면조도, 기계적물성등이 기존의 SMC의 4.8~8.2MPa에 비해 1.4MPa의 상당히 낮은 압력으로 150℃의 온도에서 성형할 수가 있도록 하였다. 최근 Ashland 사에서는 대형트럭의 본넷 내부 강화재를 1.75MPa의 압력으로 성형하였다고 발표하였으며, Alpha/Owens-Coring사에서도 LPMC를 위한 연구를 통해 LPMC전용 Ultryl수지를 개발하여 2.1MPa의 성형 압력으로 class "A" 제품을 제조하였다. Gen사이에서는 여러 종류의 대형 트럭 부품을 저압성형에 의해 성공적으로 제조하였다. 예를 들면, Kenworth T603 덮개는 2.1MPa의 성형 압력으로 성형한 결과, 제품 중량은 43kg으로 나타났다. 또한 Volvo WG RH 본넷은 20kg, Volvo 2200 roof는 61kg을 나타내었다.

### 3.2 부하부품

자동차의 부하 부품에도 복합재료가 사용되고 있는데, 그 예로는 드라이브 샤프트, leaf spring 그리고 프레임 들 수 있다. 드라이브 샤프트는 Filament Winding 성형 기법을 통하여 제작되는데, 강도 및 비틀림 강성도가 뛰어나고 무게가 기존 금속재의 30~40%이며 내피로 성이 우수하여, Hercules, CIBA-GEIGY, Celanese 등에서 이미 연구 개발을 완성하여 일부 실용화하고 있다. Leaf spring은 Tape Winding, 압축성형 및 Pulforming 성형기법으로 제작 회사에서 개발사용하고 있는데, GM계열의 Corvette이 복합재료 leaf spring을 사용하고 있는 실예이다. 초기의 복합재료 leaf spring은 철제로 설계된 형태 그대로에 재료만을 대체하는 방식이 사용되었으나 요즘은 복합재료 상용을 전제로한 새로운 설계기법이 사용되고 있다. 내충격성, 내식성 및 치수 안정성을 바탕으로 차체 프레임의 복합재료화 또한 시도되고 있는데 미국의 Ford사에서는 충돌시 앞

부분부터 점차로 파괴되는 복합재료 frame을 개발하고 있다<sup>22)</sup>.

Dana Corp에서는 기존의 금속재 보다 유리한 점이 많은 자동차용 복합재료 드라이브 샤프트를 개발하였는데 그 내부 구조는 와인딩 성형법으로 제조된 유리섬유 복합재료를 적용하여 샤프트의 성능 특성을 현저하게 향상시켰다고 한다.

유리섬유를 튜브의 내부에 배열함으로써, 주어진 직경에 대한 비틀림 상수를 변화시킬 수 있는데 이 특성은 기존의 금속재에서는 불가능하다. 또한, 섬유 배열 방향이 변화함에 따라 스프링 상수 및 차량의 하중전달 성능이 바뀌므로 조종성능을 향상시킬 수 있다. 따라서 유리섬유/카본 드라이브 샤프트는 차량의 하중전달 범위를 넓힐 수 있을 뿐만 아니라 소음을 줄이고 경량화에 의해 연비를 향상시킬 수 있다. 금속재료 샤프트는 재료의 특성상 회전속도가 제한되어 있으나 복합재료의 경우에는 그러하지 않다. 복합재료 샤프트 외부에 배열되는 카본섬유는 금속재료 보다 더 큰 굽힘 하중을 받을 수 있으므로 샤프트의 굽힘 강성도가 향상되고 무게가 감소된다. 드라이브 샤프트의 강성도가 높을수록 임계 회전속도는 증가하는데, 이와 같이 다른 종류의 섬유를 적용함으로써 샤프트의 굽힘 강성도는 비틀림 강성도와 독립적으로 변화시킬 수 있다. 즉, 유리섬유/카본 드라이브 샤프트는 임계 회전속도와 비틀림 강성도 특성을 동시에 증가시킬 수 있는데, 예를 들어, 임계 회전속도 6000rpm에 설계된 강철 샤프트를 카본 및 알루미늄으로 대체하더라도 7000rpm으로 증가시킬 수 있다. 차량위 조종특성은 스프링의 끝단에 부착된 강철 볼을 상상하면 쉽게 이해할 수 있는데 스프링 특성의 변화는 볼의 운동에 직접적으로 영향을 주기 때문에 이 변화를 줄 수 있다는 것은 차량의 조종특성 향상에 매우 효

과적이다. 스프링 역할을 하는 것이 차량의 드라이브 샤프트인데 그 특성을 보강섬유의 종류, 방향 및 양에 따라 마음대로 변화시킬 수 있다는 것은 차량의 조종 성능을 향상시킬 수 있다는 뜻이다<sup>23)</sup>.

General Motor는 1피스(pice)의 탄소섬유 보강 Al기지 금속복합재료(C/Al)를 드라이브 샤프트로 개발하여 기존의 2피스의 드라이브 샤프트를 40% 경량화시켰다. Ford Motor Co.는 Duralcan 재료를 압출하여 제조한 튜브형태의 드라이브 샤프트를 시험중에 있다. 이 샤프트는 기존의 샤프트보다 최대 rpm을 17.5%로 증가시켰으며, 길이도 수인치 늘렸으며, 샤프트 지름도 14% 감소시켰다.

### 3.3 엔진부품

자동차 엔진의 경량화 품목 중에서 기존 흡기/배기용 다기관(intake/exhaust manifold)의 복합재료화는 외국에서 상당한 진전을 보이고 있다. 사용되는 재료들로는 열가소성 나이론계 수지에 유리섬유가 함유된 것으로 Dupont이나 BASF에서 상품화하여, Zytel 혹은 Ultramid 등의 상품명으로 판매되고 있으며, 열경화성 수지 BMC재료(Palapreg)도 사용된다. 흡기/배기 다기관은 복잡한 형상을 가지는 제품이므로 사출성형 혹은 압축성형과 더불어 Bi-Sn합금을 녹여 내어관을 형성시키는 lost core기술이 함께 이용되어야 한다. 실제적인 사용 예로서는 포드사의 Mondeo엔진, 캐딜락의 Northstar엔진에 적용되고 있다. 이 부품은 경량화와 함께 내구성, 내열 및 내부식성 등의 장점을 가지고 있으며, 자동차용 엔진 주변 부품의 복합재료화의 시발점이 되는 부품으로 평가되고 있다<sup>24)</sup>.

자동차의 경우, 금속복합재료<sup>22)</sup>는 특히 엔진부품이나 동력전달부에 가장 많이 응용되

고 있다. 여기서 주철과 강철같은 기존 재료의 대체는 무게감소, 비강도 및 비강성 향상, 진동감쇠 특성 향상, 마모특성 향상, 우수한 열적, 윤활적 특성을 제공한다. 특히 엔진부품의 무게 감소는 엔진진동의 감소, 엔진효율 향상뿐만 아니라 가속성능도 향상시킨다. 가솔린 엔진 피스톤 보다 더 높은 응력이 걸리는 디젤엔진 피스톤은 금속복합재료로 응용하기 위한 가장 우선적인 목표이다. 용탕단조(squeeze casting)로 일체 성형한 탄화규소 휘스커 보강 Al기지 금속복합재료(SiC<sub>w</sub>/Al)나 탄화규소 휘스커 보강 Al기지 금속복합재료(SiC<sub>w</sub>/Al)가 기존의 high-silicon Al이나 Ni-resist cast-iron inserts로 제조된 기존의 피스톤을 대체할 수 있다. 이와 같은 엔진부품의 대체를 위하여 많은 회사들이 노력을 하여 왔으며, 1983년에 Toyota에서 처음으로 디젤 피스톤의 ring영역에 SiC<sub>w</sub>/Al로 부분 강화한 것이 금속복합재료로 상용 피스톤을 제조한 대표적인 예이다(Fig.10). 그리고 세계적인 피스톤 제조회사인 Kolbenschmidt AG에서도 피스톤 크라운(piston crown), 링 영역, 보스, 스커트(skirt)에 탄화규소를 선택적으로 보강하여 용탕단조를 이용하여 제조한 피스톤은 상업화가 가능하다고 주장하고 있다. 커벡팅 로드 역시 피스톤과 마찬가지로 금속복합재료로 응용 가능한 부품이다. Handa Motors는 상용 1.1-liter city engine용으로 스테인레스 스틸(stainless steel)을 보강하여 Al기지 금속복합재료(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al) 로드를 제조하였다. Chrysler같은 다른 회사들도 Duralcan의 탄화규소 보강 Al기지 금속복합재료(SiC/Al)를 이용하여 단조(forging) 혹은 주조하여 금속복합재료 로드를 제조하였다. 현재 많은 전문업체들이 금속복합재료의 사용화를 위하여 많은 연구개발을 진행중에 있다. 예를 들면 Honda Motor Co.는 금속복합재료 실린더 라이너를

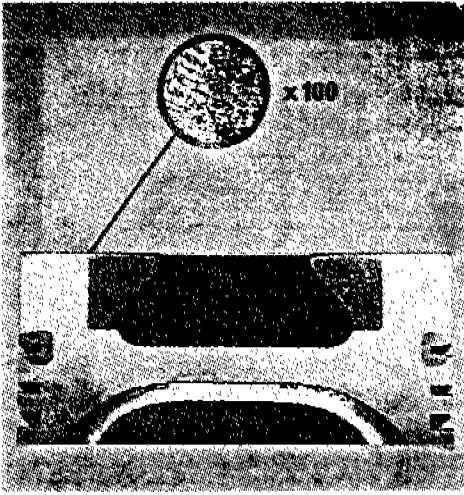


Fig.10 SiC<sub>w</sub>/Al로 부분 강화한 금속복합재료 피스톤

가진 주조 알루미늄 실린더 블록을 완전 자동공정을 이용하여 제조하였다. Honda는 예비성형체로 알루미늄과 탄소의 하이브리드 형태로 제조하여 실린더 블록 속에 넣어 기존의 주철 라이너를 제거함으로써 약 2.5kg의 경량화를 시켰다. 이 회사는 스포티 Prelude Si 모델용으로 매달 수천 개의 블록들을 생산하고 있다. 엔진부품외의 금속복합재료가 응용 가능한 다른 부품은 드라이브 샤프트와 프레임 파트(part)이다.

#### 4. 기술적인 문제점

복합재료가 자동차에 응용되는 데 과학적, 기술적으로 가장 큰 장애 요인으로서는

- 1) 성형중에 발생하는 물리/화학적 변화
  - 2) 계면효과
  - 3) 재활용
  - 4) 데이터 베이스 및 실험 방법
- 등이다. 첫째, 성형중 발생하는 물리/화학적 변화에서 가장 중요시되는 문제는 process-

ing monitoring 및 control이며 센서의 output이 어떻게 process control에 관련이 되며, 또한 어떻게 부품의 최종성능과 연관이 있는지에 대한 이해이다. 또 하나 중요한 과제는 processing monitoring modeling과 거기에 사용될 데이터 베이스이다. 그 이유는 simulation을 통하여 금형 설계를 개선할 수 있으며 최적 성형 인자를 선택할 수 있기 때문이다. 둘째, 계면효과에서 가장 중요한 과제는 계면 구조와 성질을 복합재료의 성능과 계면형성에 영향을 미치는 성형인자와 연관시키는 일이다. 관심의 대상이 되고 있는 성형인자로서는 섬유 표면처리, sizing, 그리고 성형중 섬유표면과 수지와의 유동성 및 젖음성등이다. 또한 중요한 과제는 섬유와 기지간의 계면성능시험에서의 결과와 실제 복합재료의 계면 성능간의 관계이다. 마지막으로, 계면에 영향을 미치는 환경적 요인에 대한 연구이다. 셋째, 재활용은 생산량이 적은 항공 우주산업 보다는 생산량이 많은 자동차 및 전자산업에서 더 중요시되며, 최근에 환경 보호와 자원절약 차원에서 재활용 문제가 급격히 대두되고 있는 실정이다. 이 재활용과 관련해서는 다음 장에서 상세하게 알아보기로 하겠다. 넷째, 데이터 베이스와 시험방법에서는 성형 특성과 품질평가를 위해서 규격화된 양식이 요구된다. 데이터 상호간의 내삽(interpolate) 할 수 있고 직접 측정한 범위 밖에서도 외삽(extrapolate) 할 수 있는 전문시스템(expert system)이 필요하다.

#### 5. 복합재료 폐기를 처리기술

자동차 부품의 복합재료화에 있어서 항상 대두되는 문제가 복합재료의 재활용 부분에서 별도의 장으로 복합재료 폐기물, 처리 및 재활용에 대해서 살펴보도록 하겠다. 복합재료의 재활용에 이용되는 공정 및 응용,

선진국의 동향, 재료별 및 공정별 세부 사항을 조사하였다. 자동차부품으로 사용되는 복합재료는 주로 SMC/BMC이어서, 이 재료에 관하여 중점적으로 언급하였다<sup>25)</sup>.

### 5.1 재활용 공정

각국의 특성상, 복합재료의 종류 및 수거 체계 등이 다르지만 분쇄를 거쳐 물리적 혹은 화학적 처리의 근본적인 방법은 다음 몇 가지의 범주에 속하므로 선진국에서 응용하고 있는 복합재료 폐기물 처리 방법 몇 가지를 처리가 어려운 열경화성 수지 복합재료를 중점적으로 검토 및 정리하였다.

#### 5.1.1 화학적 분리법—수지와 섬유의 회수(Recovery)

열경화성 수지 복합재료의 경우 제품의 생산 공정 중에서 필수적으로 발생하는 원재료 상의 스크랩이나 경화 이전의 불량제품의 재활용 문제도 고려해볼 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. Sizing처리도 계속 남아 있어 재사용 되는 유리섬유를 새로운 섬유와 혼용하여 복합재료 제품을 제조했을 때 좋은 결과를 얻고 있다<sup>26)</sup>. 연속 섬유가 재활용될 때는 적절한 크기로 잘라서 2차 구조물의 성형에 사용이 가능하다. 이 재활용 방법은 인발 상황, RTM 및 Hand lay-up 등의 공정에서 사용이 가능하다. 이방법도 스크랩의 양이 지속적이며 대량으로 발생되어야 실사가 가능한 방법이며 소량이며 단속적으로 발생될 시에는 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. 한예로 disulfide bonds를 가지는 경화제로 경화된 에폭시 수지가 환원되어 완전히 녹고 다시 산화 반응에 의하여 재경화될 수 있는 연구가 좋은 결과를 보였다. 또한 같은 메커니즘이 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<sup>27), 28)</sup>. 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 줄어들 수 있다. 이와 같은 방법은 실험실적으로 가능성을 제시하고 있지만 현재 실용화되지는 않고 있다.

#### 5.1.2 연소 혹은 소각 공정—Combustion (Incineration) process

Combustion 혹은 Incineration 방법<sup>29), 30)</sup>은 생산 현장에서 가장 많이 사용된다. 복합재료는 20~50% 정도의 유기화합물로 구성되어 있기 때문에 산소 존재 하에서 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% 정도 되는데 이들은 저급 제품 제조시 충전 재로서 사용하게 된다.

첨부제가 첨부된 복합재료는 소각시 분해되며 공해를 유발하는데, 황화합물이나 질소



화합물과 같은 산성비의 상당한 투자가 요구된다. 첨부제가 없는 복합재료는 공해가 거의 없이 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 온도보다 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 알코올화(Alcoholysis) 공정은 제외)은 복합재료를 충전재 혹은 연료로 재생 시켰다. 연소 방법은 폴리머의 에너지 가치를 부활시키는 또 다른 기술이며 더 쉬운 방법이다.

### 5.1.3 분쇄공정(Regrinding of composites)

폐기된 열경화성수지 복합재료는 재성형(remolding)이 불가능하기 때문에 폐기물을 가루(milled)를 내거나 작은 조각(granulated)으로 분쇄하여 새로운 복합재료의 부품제작에 섞어서 응용한다<sup>31), 32)33)</sup>. 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 복합재료로 부터 잘라진 스크랩(최고 3mm의 길이)은 충전재로서 사용될 수 있으며 그 예로 GM사의 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 (60micron)는 SMC, BMC 및 열가소성 수지 제품의 충전재로서 사용될 수 있다. 스크랩 형성과정에서 모여진 0.5~0.7mm 정도의 유리섬유는 충전재(active filler)로써 사용될 수 있으며 SMC의 일부 보강재로도 사용될 수 있다. 스크랩이나 짧은 유리섬유가 새로운 SMC나 BMC부품 제작에 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. 한예로, 독일 Fraunhofer Institute for Applied Materials Research의 최근 연구결과<sup>34)</sup>에 의하면 uncured carbon prepreg을 -30℃에서 saw mill로 절단시킨 후 autoclave 혹은 press로 성형함이 가장 손쉬운 방법이다. 이렇게 성형된 평판은 density가 0.8이며 섬유의 형태는 습과 흡사하지만 tensile strength는 65~70MPa이며 3point bending strength는 120MPa이어서 타구조물 제작에 응용하기엔 물성상의 문제가 없음을 지적하였다.

### 5.1.4 고온 압축 성형법(Hot pressing)

열경화성 수지 복합재료의 재활용을 위한 공정은 Polyurethane이나 Epoxy의 스크랩을 Hot press에서 200℃온도와 50~100bar의 압력으로 재성형(remolding)될 수 있다는 것이 Baumann<sup>35)</sup>에 의해 검토되었다. 이러한 방법으로 재활용된 재료는 물성치가 매우 낮아 자동차용 바퀴 흠받이(mud-flaps)와 같은 하중을 거의 받지 않는(non-load bearing) 응용 제품에서나 사용된다. 이 재료에 binder 역할을 하는 열가소성 수지를 포함시키면 강도를 증기시킬 수 있다. 이 기술

은 모든 열경화성 수지 복합재료에는 해당되지 않으며 제품의 물성이 떨어지므로 저급 제품(low grade material)의 시장이 필요하다.

### 5.1.5 열분해 공정(Pyrolysis)

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

일반 Pyrolysis 공정<sup>36)</sup>에는 공기가 없는 상태에서 가열을 하는 방법이 포함되어 있다. 대부분의 복합재료에는 무기물이 많아 많은 양의 고체 잔여물(solid residue)이 형성될 수 있다. 더욱이 열분해 공정 과정에서 형성되는 char는 mineral filler와 혼합되어 고체 잔여물의 보강재 역할을 해준다. 이 공정에서 발생한 오일과 가스는 특성이 뛰어나지 않기 때문에 주로 연료로서 사용된다<sup>37)</sup>. 예를 들면 약 760°C 정도로 SMC를 열분해시키면 72%의 고형성분, 14%의 Oil, 14%의 가스가 생성된다. 고형 성분은 CaCO<sub>3</sub>, 유리섬유, 카본 등으로 이루어진다. 유리섬유의 기계적 물성이 저하되지만 주로 새로운 SMC 제품이나 콘크리트의 충전재로서 사용된다. 이중에서 CaCO<sub>3</sub>는 충전재(active filler)로서 사용 가능하며 아스팔트 포장 재료에도 사용될 수 있다. 일반적으로 열분해공정의 온도가 낮을수록 분해되는 재료의 분자량이 높아지므로 더 나은 특성의 재료가 남

는다. 열분해공정은 신 공정이 아니지만 복합재료의 재활용에 응용을 시도한 것은 최근의 일이다. 미국에서는 1988년과 1991년 사이에 Conrad Industries(Chehais, Washington)와 J. H. Beers(Wind Gap, Pennsylvania) 회사들에 의하여 시도되어 활용화되고 있다. 이공정과 흡사한 알코올화 공정(Alcoholysis)과 가스와 공정(Gasification)등도 있다.

## 5.2 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 않는 상태이다. 하지만 미국, 일본, 캐나다 및 독일 등이 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.

미국은 복합재료의 최대 생산 및 사용국으로서 대량의 레크레이션 보트 및 자동차, 각종 tank류, 건축자재등의 생산 중 혹은 사용 후 폐기물이 대량 발생하는데 이에 대한 체계적인 혹은 전국적인 재활용 시스템을 구축하고 있지는 않는 것으로 판단된다. 전국적으로 걸쳐 여러 분야(sector)에서 추진되고 있기 때문에 총괄적인 집계는 어렵지만 이와 관련하여 발표되는 자료의 양을 기준으로 보면 가장 활발하게 진행된다고 판단된다. 그 한 예로 강력한 환경보호 정책의 영향으로 폐기된 자동차의 부품의 재활용 문제와 결부

되어 자동차용 복합재료의 재활용에 보다 관심을 지난 80년대부터 갖게되었다. 구체적인 노력의 결과가 자동차 회사들이 주축이된 Vehicle Recycling Partnership(VRP)과 SMC Automotive Alliance(SMCAA)이다. 이 단체들과 General Motors사가 SMC와 BMC 재료의 재활용 문제를 주도하고 있다<sup>38), 39)</sup>.

일본은 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 열분해 장치(Trailer loading pyrolysis furnace or Trailer loading incineration rotary kiln)를 제작후 운영하고 있다<sup>40), 41)</sup>.

유럽에서는 독일이 가장 적극적인 노력을 기울이고 있으며, 많은 SMC 관련회사들이 주축이 되어 ERCOM Composite Recycling 단체를 1990년에 결성하였다. 실험적으로 해오던 재활용연구를 1991년에 SMC/BMC 스크랩과 부품을 재처리 하기 위한 생산시설(production scale facility)을 지었다. ERCOM은 이동식 분쇄트럭과 짐중식 분류 혹은 분쇄 설비를 갖추고 처리된 재활용 재료를 SMC/BMC회사에 다시 매매할 수 있도록 일원화된 시스템을 개발하였다<sup>42), 43)</sup>.

캐나다는 최근까지 다른 나라들과 마찬가지로 열가소성 수지 제품들의 재활용에만 국한하여 왔으나, 90년 초까지 복합재료의 재활용에 대한 Pilot Plant 등의 가동을 거친후

수개의 회사가 상업용 재활용 재료를 만들어내고 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-up 등의 폐기물 및 폐기된 electronic circuit board등이다<sup>44)</sup>.

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

### 5.3 재료 상태별 재활용 고찰

대형 구조물에 사용되는 복합재료는 대개 Polyester계 수지를 모재로 하므로 양적인 면에서 볼 때 Glass/polyster-vinylester계가 가장 많고, Glass/Epoxy, Glass/Phenolic, Carbon/Epoxy 등의 순이다. 선진국에서 복합재료의 재활용과 관련된 연구활동을 살펴보면 자동차용 복합재료의 재활용의 예가 많이 발견된다. 그 중에서도 SMC(Sheet Molding Compound)의 재활용이 대표적인 예로서 많이 언급되고 있다. 그 이유는 자동차용 SMC가 1) 재활용을 연구할 수 있는 투자능력이 있는 대기업이 관련된 업종이며, 2) 재활용회사 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. Fig.11은 신형 Scania L-class 트럭의 그릴에 재활용된 SMC를 적용한 예를 나타낸 것이다.

#### 5.3.1 열가소성 수지 복합재료(Thermoplastic Composites)

저밀도 polyethylene 혹은 polypropylene<sup>45)</sup>과 같은 열가소성 수지의 경우 가열에 의하여 용융시켜서 재사용이 가능하다. 하지만

Table 1. 재활용된 복합재료 부품

미 국	일 본	독 일	캐 나 다
- Rear upper inner panel(Corvette, General Motors)	- Roof inner rack(Toyota Sprinter Carib)	- Spare wheel well(Audi 100)	- Construction pannels(Plastiglas Co)
- Agrilculture Flooring(Azdel Co.)	- Head lamp Housing(Keito Mfg Co.)	- Sunroof frame(BMW 3계열)	- Park benches(Plastiglas Co)
- Econoline van interior engine cover(Ford motors)	- Aggregate for motor Cement(Asaoka Corp)	- 방음벽(Polo)	- Restaurant tables(Plastiglas Co)
- Manhole Cover(nylon/GI fiber, SRIM)		- Bumper(Mercedes 트럭)	- Livestock flooring(Faroex Co)
- Thermoplastic bumpers(GE plastics)		- Sink, Mountain step	- Residential door skin(Faroex Co)
		- Front end panel	- 자동차 bumper beam(Faroex Co)
		- Tractor roof, SBB 의자	- Knee bolster panel(Faroex Co)
		- Air intake cover	- Load floor and seat back(Faroex Co)
		- 전화 booth	
		- 자물쇄 나무대용	
		- 전기 distribution cabinet	
		- Cable distribution base	
		- Garden pool & chair	
		- Front end(VW Passat)	



Fig.11 신형 Scania L-class 트럭의 그릴에 재활용된 SMC

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 바꿀 수는 없다. 따라서 기계적인 분쇄, 가열 및 가압을 통해 저급 제품의 주재료로서 활용이 가능하다. Graphite/PEEK 적층판의 경우 잘게 부순 후 압축성형에 의하여 다른 제품을 성형할 수 있는 주재료로서

사용이 가능하다. 아직 연구단계에 있지만 열가소성수지를 분해해서 수지와 섬유를 분리 해내는 방법이 연구되고 있다. 이 방법은 유기 고분자 물질을 원래의 모노머로 분해시키는 과정을 말한다. purification과 polymerization기술을 이용하여 원래의 고분자물질로 변화시키게 된다. 분리된 유리 섬유는 처리 없이 보강섬유로 사용 가능하며, coupling agent로서 재처리하기도 한다<sup>46)</sup>.

5.3.2 열경화성 수지 복합재료

열경화성 복합재료의 재활용은 열가소성 수지 복합재료의 경우 보다 어렵다. 열가소성 수지와 같이 열경화성 수지는 재용융이 되지 않기 때문에 재활용 공정에서 비용이 보다 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(Filler) 등으로 사용이 가능하다. 하지만 충전재 자체의 가격이 매우 저렴하기 때문에 대체 충전재로서의 재사용에 제한적일 수밖에 없다. 열경화성 수지 복합재료(Thermoset Composites)도 폴리머 뿐만 아니라 보강재 역할을 하는 여러 종류의 섬유와 bulkiness, stiffness, fire retardation 등의 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 방법이 있다.

- 1) Mechanical recycling : 즉 스크랩을 이용하여 새로운 복합재료를 제작함
- 2) Chemical recycling(pyrolysis) : 폴리머를 organic compound로 회복시켜

chemical raw material로 사용함

- 3) Energy recovery : 소각시 폴리머에 저장되어 있는 에너지를 최대한 활용함

Fig.12에서는 재활용 분야에서 대표적인 열경화 복합재료인 SMC를 재활용하는 법을 인용해 보았다<sup>29)</sup>. 구체적인 방법은 다음절에서 설명될 것이다.

5.3.3 폐기된 복합재료(Post-consumer composites)의 재활용

열가소성 및 열경화성 복합재료의 구분은 떠나서 소비자에 의해서 사용후 폐기된 복합재료 부품 혹은 제품의 재활용 문제는 보다 어려운 기술적 및 경제적인 면을 갖고 있다. 수집 및 분류 등의 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 방법 등이 해결되어야 한다. 따라서 제품제조시 재료를 구분할 수 있는 코드(Code)를 포함시키는 방법도 고려할 수 있다<sup>47)</sup>.

5.3.4 보강 섬유의 재활용

폐기물 중에서 주요 대상은 유리섬유이다.

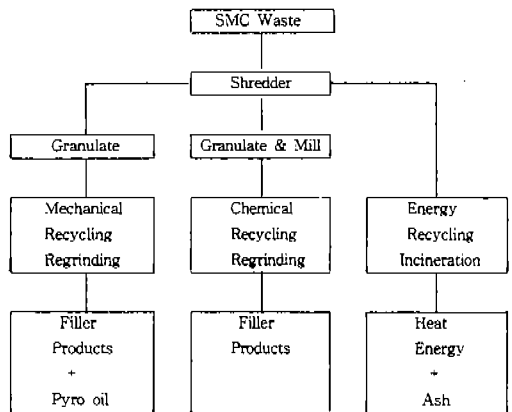


Fig.12 SMC/BMC재료의 재활용 순서도

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 원섬유를 더하여 사용한다. 약 1500℃ 이상에서 유리섬유는 재용융되어 새로운 섬유로 만들 수 있다. 재용융시 유리는 최초의 무정형 구조로 돌아가서 연신 과정을 거쳐 다른 형태의 재사용 처를 찾을 수 있다. 폐 유리섬유의 단순 매립은 심각한 토양오염과 수질오염으로 인체에 해가 될 수 있으므로 다른 형태의 폐기 방법을 연구해야 한다. Advanced composites에 사용되는 케블라, 탄소섬유 및 보론 섬유 등은 유리섬유에 비해 비싸므로 재사용이 보다 매력적이다. SMC내의 유리섬유의 분리와 비슷한 화학적 접근 방법이 가능하지만 구체적인 연구 결과는 발표되지 않고 있는 상황이다. 하지만 유리 섬유와는 달리 산소 존재 하에서 연소 가능하므로 이에 상응하는 폐기물 처리방법을 이용 할 수 있다.

## 6. 결 론

세계적으로 자동차 산업의 경쟁이 매우 치열하게 진행되고 있기 때문에 복합재료가 자동차 부품에 보다 많이 적용되기 위해서는 성능, 생산속도 및 생산비 등을 포함하는 여러 요인을 서로 균형 있게 조절해야 한다. 자동차 분야에서는 향상된 성능만이 반드시 가장 필요한 것은 아니다. 그 대신 더 필요한 문제는 부품의 생산속도가 빠르고 생산비가 낮아서 가격면에서 유리해야 한다는 것이다. 자동차용 복합재료 부품은 각 단계에서 1분 이하의 소요시간으로 5분 이내의 전체공정을

현재의 목표로 삼고 있다. 이와 같이 가격 면에서 유리한 복합재료를 개발하여 적용하기 위해서는 원재료의 선택도 중요하지만 복합재료 생산비의 70%는 제조과정에 있으므로 생산성이 높으면서 신뢰성도 높은 제조 공정의 개발이 필요하다. 그리고 향후보다 생산성이 높고 고성능·고기능을 가진 신재료, 신공법의 개발이 필요하다.

지구 환경의 관점에서 자동차의 경량화에 의한 연비 개선도 필요하지만 복합재료 폐기물처리 즉 복합재료 재활용기술의 개발도 매우 중요하다. 향후 자동차 산업 뿐만 아니라 모든 산업에서도 복합재료 개발에 반드시 필요한 기술이다.

이외에 복합재료의 특성을 잘 활용할 수 있는 설계, 장기적인 신뢰성 데이터의 축적, 수명예측법의 확립등이 필요하다.

## 참 고 문 헌

1. 전의진, 조치룡, "복합재료와 자동차", 자동차공학회지, Vol. 13, No. 3, 1991, 1~5.
2. "Fabrication 70% of Cost for Advanced Composites", Advanced Composites, July/Aug., 1988, 12.
3. "Study sees High-Volume Composites Use in 1990's", Advanced Composites, Sept/Oct., 1988, 12.
4. "Next Decade Defence : Less is more", Advanced Composites Jan/Feb, 1993, 18.
5. 이대길, 오박균, "복합재료 자동차 부품의 설계 및 제조 방법", 자동차공학회지, Vol. 16, No. 2, 1994, 45~53.
6. 조치룡, 김태욱, "섬유강화 복합재료의 생산성 향상기술", 기계와 재료, Vol. 14, No. 3, 1992, 22~30.

7. J. A. Neate, W. Robins, etc., "Low Cost Molding with Low Pressure Molding Compound(LPMC)", 49th Annual Conference, Composite Institute, SPI, Feb. 7~9, 1994, session 13-B.
8. 조봉규, "열가소성 수지 복합재료 중간 소재", '96 복합재료 Worksop, 한국복합재료학회, Oct, 10, 1996, 45~74.
9. G. Molina, S. Lepore, etc., "Compression Molding of GMT : Effects Due to Ribs and Parameters Settings on Final Performafnce", 46th Annual Conference, Composite Institute, SPI, Feb. 18~21, 1991, sessuib 21-B.
10. 엄분광, 김병선, "섬유강화 복합재료의 현황과 전망", 기계와 재료, Vol. 7, No. 2, 1995, 25~42.
11. Ciriscioli P. R., Springer, G. S. and Lee, W. I., "An Expert System for Autoclave Curing of Composites", submitted to the Journal of Composite Materials.
12. 변준형, 김태욱, 이상관, "항공기 구조물의 고분자 복합재료의 성형기술", 기계와 재료, Vol. 6, No. 2, 1994, 84~96.
13. Calius, E. P., Springer, G. S., "Modeling of Filament Winding of Composite Materials", Pro. of the 5th International Conference on Composite Materials, The Metallurgical Society, 1985, 1071~1088.
14. Agarwal, V., G eri, etc, "Thermal Characterization of the Laser-Assisted Consolidation Process", Journal of Thermoplastic Composite Materials, Vol. 5, 1992, 115~135.
15. "New SMC Automotive Parts are up 300%", Reinforced Plastics, Feb., 1996, 4.
16. "Composites in the Front of Car Design", Reinforced Plastics, Feb., 1996, 16~23.
17. Reinforced Plastics Newsletter, June 26, 1995, Vol. XIX, No. 13.
18. Reinforced Plastics Newsletter, June 10, 1996, Vol. XX, No. 12.
19. Reinforced Plastics Newsletter, January 8, 1996, Vol. XX, No. 1.
20. Reinforced Plastics Newsletter, Mary 30, 1995, Vol. XIX, No. 11.
21. "Volvo switches from PP to LPMC for Side Skirts", Reinforced Plastics, Jul., 1996, 5.
22. 전의진, 조치룡, 이상관, "자동차용 복합재료", 대한금속학회회보, Vol. 14, No. 3, 1991, 240.
23. 복합재료 소식지, 한국기계연구원, 1996, 1/2월, 통권 제30호.
24. 복합재료 소식지, 한국기계연구원, 1995, 11/12월, 통권 제29호.
25. 김병선/황병선, "복합재료의 재활용", 한국복합재료 학회지, 8권, 1호, 1995. 3.
26. J. C. Bradley, W. D. Graham, R. Forster, "Solvent Separation : A Method for Recycling Uncured SMC", 49th Annual conf, Composites Inst, The Society of the Plastics Industry, Inc. Feb 7~9, '94.
27. 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.

28. R. B. Jutte, W. D. Graham, "Recycling SMC", 46th Annual Conference, Composite Institute, The Society of the Plastics Industry Inc. February 18~21, 1991.
29. "RECYCLING OF SMC-THE ENERGY/ENVIRONMENT PICTURE", SMC Automotive Alliance, 49th Annual Conf. Inst., The society of the Plastics Industry, Inc. Feb. 7~9, '94.
30. D. H. Kelley, "FRP Equipment of Treating Waste Incineration Gases", Material Performance, Vol. 33, No. 1, pp. 72~75, 1994.
31. K. Rusch, "Recycling of Automotive SMC-The Current Picture", 48th Annual Conf, Composite Inst, The Society of the Plastics Industry Inc. Feb. 8~11, 1993.
32. K. Butler, "Recycling of Molded SMC and BMC Materials", 46th Annual Conf, Composite Inst, The Society of the Plastics Industry Inc. Feb. 18~21, 1991.
33. J. Pettersson, P. Nilsson, "Recycling of SMC", 48th Annual Conference, Composite Institute, The Society of the Plastics Industry Inc. February 8~11, 1993.
34. K. Pannkoek, M. Oethe, J. Busse, "Efficient Prepreg-Recycling at Low Temperature", ICMC, Nonmetallic Materials and Composites at Low Temperatures VIII, Geneva, Switzerland, Sept. 23~25, 1996.
35. G. F. Baumann, "A Pragmatic Review of RIM Recycling Option", ASM/ESD Advanced Composites Conference, Detroit, 8~11, October 1990, p. 271~275.
36. B. Darrah, "Recycling Composites in Canada:Technologies, Markets and Applications", 48th Annual Conference, Composite Institute, The Society of the Plastics Industry Inc. February 8~11, 1993.
37. C. N. Curcuras, et al, "Recycling of Thermoset Automotive Components", SAE Int'l Congress and Exposition, Detroit, Mi, 25 Feb. 1, Mar '91, Paper 910387, p. 1~16.
38. A. Owens and J. Henshaw, "RECYCLING, COMPOSITES ADD DESIGN", University of Tulsa, 1991.
39. "Composites Recycling Revs Up", TECH UPDATE, MANUFACTURING ENGINEERING, Vol. 110, No. 5, p. 24~30, May, 1993.
40. Tasundo Kitamura, "Market Development for Recycling Thermoset in Japan", 49th Annual Conf., Composites Inst., The Society of the Plastics, Inc. Feb. 7~9, '94.
41. Hiroyuki Hamada, Susumu Yamaguchi, Gabriel O. Shonaik, Teruo Kimura and Zenichiro Maekawa, "Recyclability of Long Glass Mat Reinforced Thermoplastic Composite", 49th Annual Conf. Inst., The society of the Plastics Industry, Inc. Feb. 7~9, '94.
42. A. Weber, "Plastics in Automotive engineering and aspects of plastics waste from abandoned vehicles", Plastics, Rubber and Composites Processing and Applications, 16('91), 143~156.
43. P. Schaefer, A. G. Plowman, "SMC



- Recycling : An Update ERCOM's Experience in Production and Application", 47th Annual Conf., Composites Institute The Society of the Plastics Industry, Inc. Feb. 7~9, '94.
44. B. Darrah, "Recycling Composites in Canada : An Update", 49th Annual conf, Composites Inst, The Society of the Plastics Industry, Inc. Feb. 7~9, 1994.
45. D. L. Reinhard, "Glass Reinforced Polypropylene Composite-A Recycling Case study", Azdel, Inc., One Plastics Ave, Pittsfield, MA 01201, 1993.
46. J. Janoschek, K. M 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.
47. S. J. Pickering, "NEW RECYCLING TECHNOLOGY FOR PROCESSING-SCRAP COMPOSITES", M3.1-M3.14, Proceedings Verbundwerk, 1992.