

섬유강화 복합재료의 가공

김 병 선 · 황 병 선

1. 서 론

첨단복합재료의 역사는 세계 제 2차 대전 중 미국, 영국, 일본을 비롯한 선진 각국에서 재료 과학의 발달로 시작되었다. 그후 1960년대 우주경쟁, 상업용 항공산업의 성장, 다른 분야에서의 활용 증가 등에 따라 고성능 첨단복합재료 제품의 필요성이 대두되어, 첨단복합재료에 대한 연구개발이 선진국을 중심으로 활발히 이루어져 왔으며 뛰어난 기계적, 화학적 특성을 바탕으로 오늘날 복합재료는 신소재의 한 분야로 굳게 자리잡고 있다. 복합재료 부품/구조물의 설계, 성형, 시험평가기술 등의 발전과 아울러 복합재료를 구성해 주는 다양한 원소재들이 특성 향상 및 개발되고 있어 그 응용 범위를 더욱 더 넓혀주고 있다.

이러한 복합재료의 개발은 성능, 생산속도 및 생산비 등을 포함하는 여러 요인, 상황 등을 서로 균형있게 조절해야 한다. 고성능 재료에서는 성능 향상이 중요한 요구 조건이지만, 여러 응용 분야를 검토해보면 향상된 성능이 바람직하지만 반드시 필요한 것은 아닌 경우가 많이 있음을 알 수 있다. 따라서 복합재료를 효율적인 대체 재료로서 더욱 활용하려면 향상된 생산 속도와 더 저렴한 생산비의 성형 공정 개발이 요구된다. 예로, 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 높

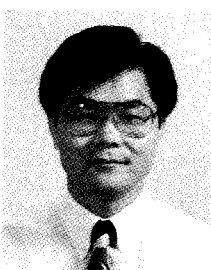
으면서 신뢰성도 높은 제조 공정의 개발이 중요하며^{1,2} 또한 선진국의 전문가들은, 향후 5~15년의 기간 내에 가장 중요한 문제는 가장 유리한 제조방법의 확인과 그 방법을 사용하는데 있어서의 과학적이고 기술적인 문제점의 확인으로 전망하고 있다.¹

본 논문에서는 섬유강화 복합재료 제조에 널리 사용되는 성형공정에 대하여 살펴보고, 일부 복합재료 응용 분야, 기술적인 문제점 및 최근 환경문제가 대두되면서 관심의 초점이 되고 있는 복합재료 recycling 사례조사도 병행하고자 한다.



김병선

1972~ 1976 미국 Grinnel College, 물리학 (B.S)
1976~ 1978 미국 Washington University, 기계공학(B.S)
1978~ 1980 미국 Washington University, 기계공학(M.S)
1986~ 1990 미국 Washington of Missouri-Rolla, 기계공학(Ph.D)
1991~ 현재 한국기계연구원, 책임연구원



황병선

1974~ 1978 부산대학교 재료공학(B.S)
1986~ 1988 미국 University of Dayton, 재료공학(M.S)
1988~ 1994 미국 University of Dayton, 기계공학(Ph.D)
1978~ 1986 국방과학연구소, 연구원
1994~ 현재 한국기계연구원, 책임연구원

Processing of Fiber Reinforced Composite Materials

한국기계연구원 (Byung-Sun Kim and Byung-Sun Hwang, Korea Institute of Machinery and Materials, Composite Materials Laboratory, 66 Sangnam-dong, Changwon, Kyungnam, Korea)

2. 첨단복합재료의 성형공정

첨단복합재료의 성형공정은 국가 보안상의 문제로 일부 통제되어 있으며, 일부는 최첨단 생산기술을 보호하기 위해 통제되고 있기 때문에 각 성형공법의 핵심기술은 공개되지 않고 있는 실정이다.

2.1 압축성형(Compression Molding)

압축성형은 표면이 잘 가공된 압, 수의 금형 사이에 보강섬유와 수지의 혼합물을 넣고 금형의 온도를 올리고 프레스를 이용하여 압력을 가해 성형하는 방법으로 자동차 부품 생산분야에 많이 적용되고 있다. 대표적인 압축성형공정으로는 현재 수송수단 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 이 성형공정들에 대하여 간략하게 소개하고자 한다.

2.1.1 SMC(Sheet Molding Compound)^{4,5}

SMC는 보강재, 수지, 충전제(filler), 증점제(thickener), 첨가제(additives), 이형제 등이 혼합되어 반고체의 얇은 판 형태로 제작되는 것으로 상하 금형 사이에 넣어 압력과 열을 가하여 성형하는데 쓰이는 재료를 뜻하는 데, 일반적으로 이 재료를 사용하여 압축성형하는 성형공법을 뜻하기도 한다. **그림 1**은 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 페놀수지도 SMC의 수지로 사용되고 있다. 페놀수지로 이루어진 SMC는 기존의 불포화 폴리에스터 수지로 이루어진 SMC보다 가연성(flammability)이 낮고 연기의 생성도 적으며 높은 열적 안정성을

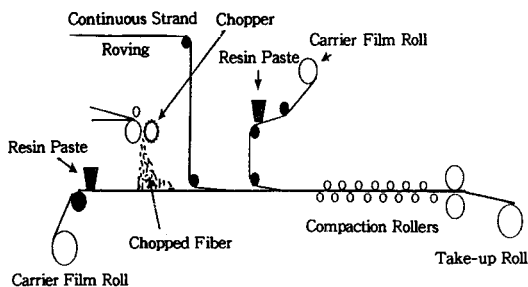


그림 1. SMC 제조과정의 개요도.

보유하고 있다. 충전제로는 탄산칼슘(CaCO_3)이 가장 많이 사용되며, $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 도 충전제로 사용된다. 충전제가 하는 역할은 수지의 부피 수축을 줄이며, 유동을 향상시켜서 성형성을 향상시키며, 성형된 제품의 표면정도를 향상시키는 역할을 한다. 증점제는 SMC의 취급성이 용이하도록 수지의 점도를 높이는 역할을 하며 불포화 폴리에스터와 비닐에스터 SMC에 사용하는 증점제는 MgO , CaO 등과 같은 IIA족의 금속산화물이다. 이러한 증점제를 수지에 넣으면 수지의 점도는 6,000,000~75,000,000 cP 정도로서 이동 보관하고 차후에 성형하기에 적당하도록 되어 있다. 첨가제는 주로 저수축 첨가제(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 분류되는데 **그림 2**에 SMC의 보강 형태에 따른 분류를 나타낸 것이다. SMC-R은 random 섬유를 사용하며 섬유의 길이는 4~8 mm 정도이다. 형상이 복잡하고, Rib, Boss 등이 많은 구조물에 사용하는데 최종 제품은 각 방향에 대하여 강도가 대체적으로 균등한 것이 보통이다. SMC-C는 일 방향으로 정렬된 보강섬유가 들어 있는 것으로 한쪽 방향의 강도가

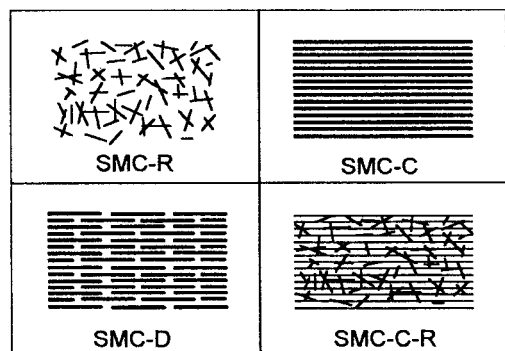


그림 2. SMC의 보강재 형태에 따른 분류.

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

SMC는 상하의 금형 사이에 넣어 압력과 열로 성형하는데, 온도는 약 120~180 °C 정도이며, 압력은 5.5~17 MPa(800~2,500 psi) 정도이다. 성형시간은 제품의 두께, 금형 온도, 촉진제 배합 량에 따라 달라지며 일반적으로 1~4분 정도이다. 경화 완료된 제품은 후가공을 통하여 완성된다. 이 공정은 생산성이 높고, 복잡한 부품을 일체로 성형할 수 있으며 철판 가공에 비하여 비교적 깊은 드로우잉(draw-ing)이 요구되는 부품도 단번에 성형할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 요구 압력이 높은 관계로 대형 프레스가 필요하고 금형의 제작비가 높으므로 대량 생산의 경우에 적용된다.

2.1.2 LPMC(Low Pressure Molding Compound)

LPMC는 기본적으로 통상적인 SMC와 비교해서 무엇보다도 성형 압력이 1.03 MPa(150 psi) 정도로 낮고 수지 유동 특성이 아주 우수한 장점이 있다. 즉 SMC같이 대형 프레스가 필요 없고, 금형 제작비도 대폭 절감할 수 있는 큰 장점이 있으므로 대량 생산뿐만 아니라 소량 다품종 생산에도 경쟁력이 있다. 따라서 이 공정은 자동차 부품뿐만 아니라 일반 산업부품의 생산에도 응용 가능성이 매우 높다.

LPMC의 핵심 성분은 Scott Bader에 의해 제조된 결정성(crystalline) 불포화 폴리에스터이다.⁶ 이 수지는 용융점이 약 55 °C로 상온에서 고체 상태이다. LPMC는 통상적인 SMC와 비슷한 formulation으로 배합되기는 하지만 55 °C 이상의 고온에서 배합된다. 이 온도에서는 결정성 폴리에스터는 액체 상태로 LPMC 전체에 고루 퍼지게 된다. 그 다음에 보강재를 함침시킨 후 상온으로 냉각시키면 이 수지는 고체 상태로 되돌아가게 된다. 이것이 기본적인 LPMC의 증점 공정(thickening process)이다. LPMC는 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 계속 유지된다.

LPMC는 전형적인 원재료를 사용한 통상의 SMC와 거의 유사하다. 그러나 SMC와 비교해서 두 가지의 큰 차이점이 있다. 첫째는 산화물계 증점제를 사

Thermoplastic composite molding operation

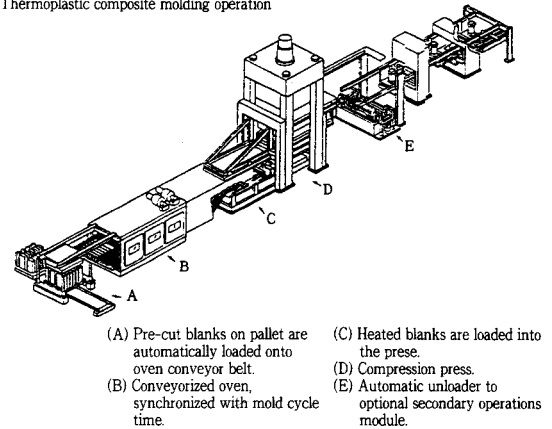


그림 3. GMT 압축 성형공정.

용하지 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.

LPMC의 주요 장점은 앞서서도 언급하였듯이 결정성 폴리에스터에 의해 저압에서도 성형할 수 있다는 것이다. 가열된 금형 위에 LPMC가 놓이면 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 증점제와의 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 복합재료를 의미한다. 이 재료는 주로 보강재의 종류와 부품의 사용 용도에 따라 서로 다른 조건하에서 압축성형에 사용된다.

그림 3은 GMT 압축성형 공정의 개요도를 나타낸 것이다.⁷ GMT는 비용 효율이 높고 대량 생산에 적합하며, 복잡한 형상이나 대형 부품 생산에 주로 사용된다. 특히 기지재료로 비교적 가격이 저렴한 폴리프로필렌을 사용하면 자동차 부품의 대량생산의 응용 가능성은 높아진다. 그림 4는 GMT를 자동차

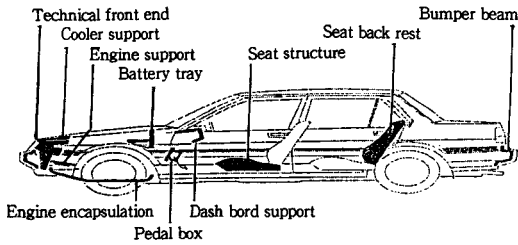


그림 4. GMT의 자동차 부품 적용 예.

부품에 적용한 예를 나타내었다.

자동차 분야를 고려해보면, GMT는 미적인 고려 없이 구조용 부품을 제조하기 위하여 주로 시트(sheet)형태로 사용된다. 그러므로 강철, 알루미늄 등의 시트 금속, BMC(bulk molding compound), SMC와 직접적인 경쟁이 가능하다. 일반적으로 GMT는 기존 재료들과 비교해서 다음과 같은 장점을 가지고 있다.⁸

- 1) 열경화성 수지($1.6 \sim 1.9 \text{ g/cm}^3$)와 비교해서 밀도가 $1.0 \sim 1.4 \text{ g/cm}^3$ 로 낮다.
- 2) 인장, 굽힘 등의 기계적 특성이 우수하며, 특히 저온에서도 우수한 내충격 특성을 가지고 있다.
- 3) 치수 안정성이 우수하다.
- 4) 내식성과 내약품성이 우수하다.
- 5) 성형공정이 단순하다. 심지어 복잡한 형상의 부품도 한 성형공정에 의해 제조가 가능하다.
- 6) 성형시간이 짧아 대량생산이 가능하다.
- 7) 기지재료가 열가소성 수지이므로 부품의 재활용이 가능하다.

그러나 이러한 많은 장점에도 불구하고 다음과 같은 이유로 인해 GMT의 급속적인 확산이 지연되고

있다.

- 1) 중간재의 가격이 열경화성 수지와 강철보다 비싸다.
- 2) Class "A" 표면을 얻기가 어렵다.
- 3) 냉각, 수축, 변형 특성 등과 같은 재료의 기계적 특성에 관한 지식이 완전하지 못하다.

기지재료를 고려하면, GMT의 약 98%는 폴리프로필렌이다. 이외 가능한 수지로는 PET, PBT, PC, PA 등이 있다.

2.2 액상성형(Liquid Molding)

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.

2.2.1 RTM(Resin Transfer Molding)

RTM은 금형 내에 보강재를 미리 위치시켜 놓고 외부에서 압력을 가해 수지를 함침시킨 후 경화시켜 제품을 생산하는 방법이다. 그림 5에 RTM 공정의 개요도를 나타내었다. 이 방법은 생산성이 높고 기계적 성질이 우수한 제품을 얻을 수 있다. 다른 복합재료 성형법에 비해 장치 및 설비비가 저렴하고, 복잡한 형상의 대형 부품을 쉽게 성형할 수 있으며 보강재의 양과 방향성을 조절하여 제품의 기계적인 성질을 향상시킬 수 있는 등의 장점을 가지고 있어 최근 크게 각광받는 성형 방법이다. 자동차 부품의 제조에 사용되는 수지로는 점도가 비교적 낮은 열경화성 수지($100 \sim 1000 \text{ cP}$)인 불포화 폴리에스터 수지가 주로 사용되며, 보강재로는 주로 continuous strand mat나 random chopped mat의 형태인 유

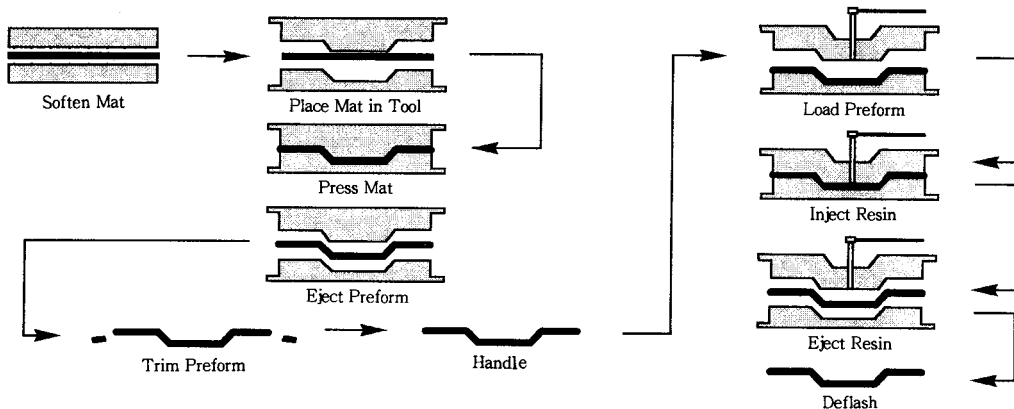


그림 5. RTM 공정의 개요도.

리섬유를 많이 쓰는데 이 경우 금형 형상에 적합하도록 직조하거나 binder를 사용하여 예비성형체(preform)를 제조하여야 하며, 금형 내의 수지유통 예측을 위하여 예비성형체의 투과성계수도 실험으로 측정하여야 한다. 이 공정은 자동차의 내·외장부품이나 의료기구, 저장탱크, 배관용 부품 등 여러 분야에 적용되고 있다.

RTM 공정의 생산성을 좌우하는 중요한 과정은 수지의 주입과 경화과정인데 수지의 주입에서는 압력, 온도, 점도, 유동속도 등이 고려되어야 하며, 기포형성, 불완전한 함침, 예비성형체의 변형 등을 방지할 수 있도록 주입조건을 결정하여야 한다. 경화 과정에 있어서는 경화진행에 따른 점도의 변화와 유동의 영향을 고려하여야 하며, 압력과 온도를 조절하여 빠른 경화와 유동을 동시에 얻을 수 있도록 최적화 하여야 한다. RTM에 있어서는 금형 충전 과정이 주된 관심사인데 일반적으로 수지 주입에 소요되는 시간이 짧으므로 경화 반응을 무시하고 온도와 점도가 일정하다고 가정하여 문제를 해석하기도 한다.⁹ 이상에 설명한 방법들 외에 제품의 형상 및 보강재/수지의 성질에 따라 여러 가지 다른 방법들을 사용할 수 있다. 최근에는 복합재료를 항공기나 잠수함 등의 1차 구조물(primary structure)로 사용하려는 시도들이 활발하며, 이에 따라 복합재료 구조물의 두께가 점점 두꺼워지고 있다. 열경화성 수지 복합재료는 화학반응에 따른 발열로 인하여 성형 중 내부의 온도가 지나치게 올라가는데 이를 피하기 위하여 경화 사이클을 미리 정해주시 않고 성형과정 중의 부품온도 등을 입력받아 컴퓨터를 이용, 미리 정해진 적절한 규칙에 의해 온도를 제어하려는 시도들도 있다.¹⁰

2.2.2 VARI(Vacuum Assisted Resin Injection)¹¹

VARI 공정은 일반적인 RTM 공정에 보강재를 포함하고 있는 금형에 수지주입 전후에 진공을 걸어 금형 내를 진공상태로 만들어 성형하는 공정으로 vacuum assisted RTM 공정으로 알려져 있다. RTM 성형시 진공을 사용하면 동일 성형조건에서 진공이 없는 일반적인 RTM성형 공정과 비교해서 훨씬 우수한 기계적 특성과 보다 적은 기공(porosity)을 가진 부품의 제조가 가능하므로 VARI 성형 부품의 품질은 우수하다. 그 이유는 수지 저장시 혹은 부품 제조시 존재하는 보강재의 수분과 불순물이 제거되어 보강섬유와 수지사이의 접착력이 좋아지

고, 금형과 수지사이의 압력구배가 증가되기 때문이다. 그러나 VARI는 성형 단가의 측면과 성형 부품이 대형일 경우에 그 적용이 어려운 단점이 있으므로 부품의 용도와 크기에 따라서 그 사용 유무를 결정하여야 할 것이다.

2.2.3 SRIM(Structural Reaction Injection Molding)

SRIM 공정은 RTM 공정과 매우 유사한 공정으로 금형 내에 보강재를 미리 넣고 열적으로 활성화된 반응성 수지를 주입하여 성형하는 공정으로 생산성이 매우 좋다. SRIM 공정과 RTM 공정과의 큰 차이는 반응 활성화(reaction activation)와 충전시간(filling time)에 있다. 일반적인 RTM 공정에서 충전 시간은 대략 15분 정도이나 반면 SRIM 공정은 수초에 불과하다.¹¹ 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 유통이 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)

인발성형은 그림 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 제조하는데 사용된다. 인발성형기는 그림 6에 나타난 바와 같이 보강섬유 스펀(spools), 수지함침장치(resin bath), 형상제어장치(forming guide), 가열 금형, 당김 장치(puller) 및 절단기 등으로 구성된다. 보강섬유 스펀로부터 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.¹¹ 수지선정은 제품의 기계적 특성, 성형온도 및 내식성 등과 관계가 있을 뿐만 아니라 수지함침성까지도 매우 밀접한 관계가 있다. 성형된 제품의 섬유분포가 균일하고 섬유 함유율이 높을수록 강도를 높일 수 있으므로 섬유분포 제어기술은 무엇보다 중요하다. 금형 온도 제어기술은 생산성과 기계적 특성에 크게 영향을 미치므로 매우 중요한 기술이라 할 수 있는데 금형의 온도에 따라 금형 내에서의 경화반응도가 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.

인발 성형기술은 생산성이 기존의 성형공정에 비해 수십배에서 수백배 높고, 노동집약적인 기존의 복합재료 산업을 상당부분 자동화할 수 있는 이점이

있으나, 성형상 불가피하다고 할 수 있는 보강섬유에 대한 설계 유연성에 극히 제한을 받고 있다. 그러나 최근 인발 성형법을 보완하여 보강섬유의 방향성을 자유로이 조절할 수 있는 pull-winding 성형기술, braided pultrusion 성형기술 및 pull press 성형기술 등이 개발되어 항공기 고부가가치 구조물에 응용되어가고 있다.

Pull-winding 성형공법은 인발 성형공법에 tape winding 혹은 filament winding 성형기술이 접목된 성형기술로, 수지가 함침된 축방향 연속섬유에다 tape 형태의 보강섬유나 보강섬유다발(bundle)을 축방향과 일정한 각도를 유지하면서 winding하여 축방향으로만 보강될 수밖에 없는 단점을 보완한 새로운 공법이다(그림 7). Pull-winding 성형공법은 성형제품의 형상이 파이프류와 같은 축대칭 구조물만을 성형할 수 있는데 비해, braided 성형공법은 일단 단면형상의 구조물을 보강섬유의 방향성에 제한을 두지 않고 여러 가지 형상으로 성형할 수 있는 최신 성형기술이다.

Braided pultrusion 성형공법은 pultrusion 성형기술에 braiding 기술을 접목시킨 성형기술로, 보강섬유를 braiding하여 원하는 형상의 preform을 제

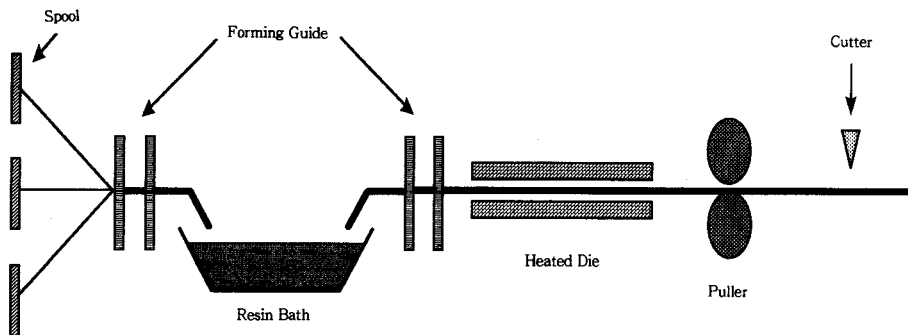


그림 6. 인발성형의 개요도.

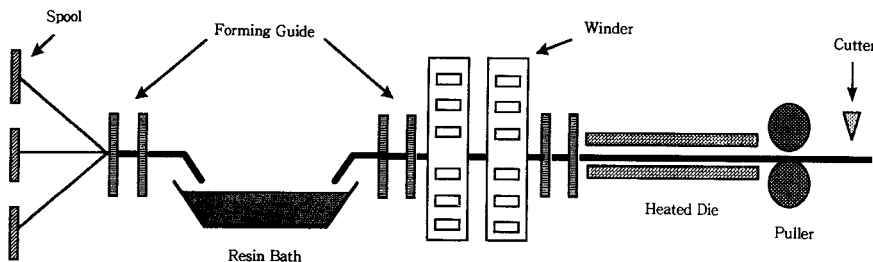


그림 7. Pull-winding 성형 공정.

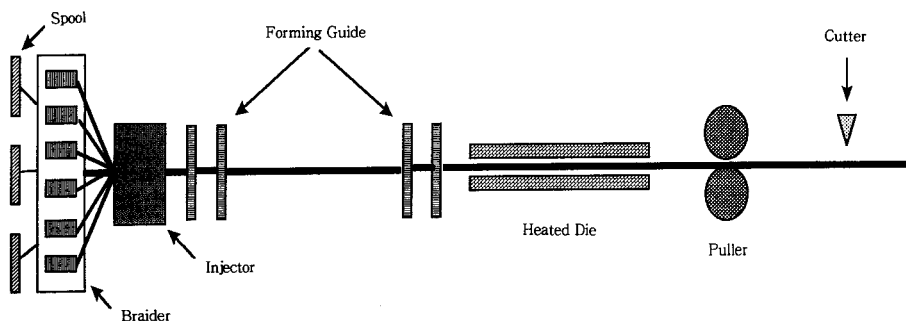


그림 8. Braided pultrusion 성형 공정.

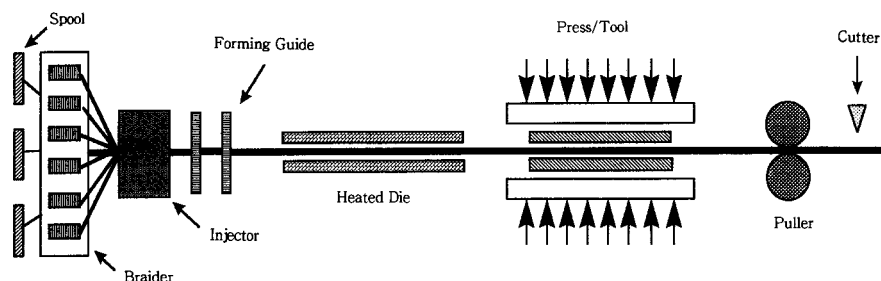


그림 9. Pull-press 성형 공정.

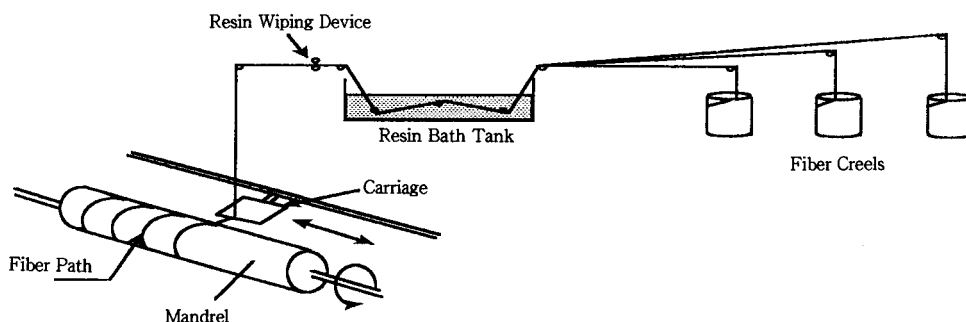


그림 10. 필라멘트 와인딩 공정의 개요도.

조한 다음, preform에 수지를 주입하여 forming guide를 거쳐 연속적으로 가열 금형에서 경화시켜 제품을 성형하는 공법이다(그림 8). 이 성형공법으로는 autoclave 성형이나 filament winding 성형기술로만 가능했던 복합재료 부품을 성능 면에서 전혀 손색이 없으면서 생산성을 향상시킬 수 있다.

Pull press 성형기술도 역시 인발 성형공법에 hot pressing 기술을 접목한 것으로 인발 성형에서와는 달리 가열 금형에서 복합재료를 완전하게 경화를 시키지 않고 30-40% 정도로 경화시킨 다음 press 안의 금형 위에 올려놓고 열과 압력을 가하여 완전하

게 경화시키는 방법이다(그림 9).

2.4 필라멘트 와인딩(Filament Winding)

필라멘트 와인딩은 축대칭 등 다양한 형상의 부품을 만드는데 사용되는데(그림 10), 성형중 섬유 경로(fiber path)를 변경시키기 어렵고 맨드릴(mandrel) 처리를 고려해야 하며 제품의 표면이 매끄럽지 못하고 두께 방향으로의 섬유 체적율이 일정하지 않은 단점이 있다. 이 섬유 체적율은 감겨지는 섬유 strand의 tension을 잘 조절하면 약 55% 수준으로 어느 정도 일정하게 유지할 수 있지만 부품에 따라 매번 실험적인 방법으로 적절한 tension을 구해야하는 문제점이

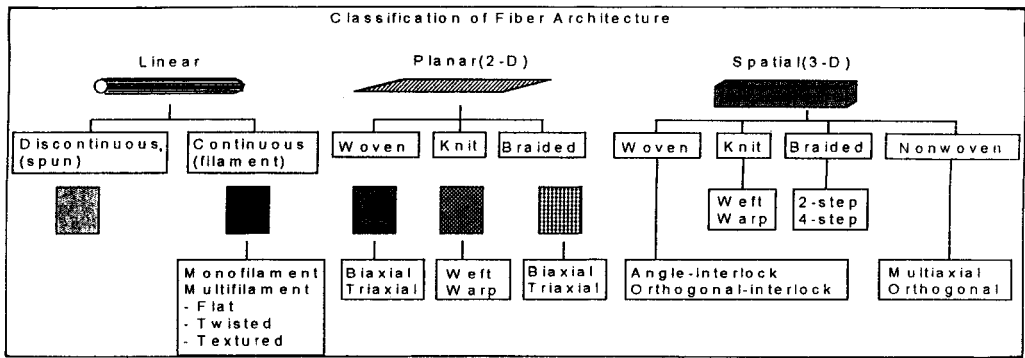


그림 11. 2차원 및 3차원 직물구조.

있다. 더 높은 섬유체적율(60~65%)의 부품을 제작하려면 winding이 종료된 후 shrinking tape 혹은 캐블러 섬유로 한번 더 감은 후 경화를 거친 다음 shrinking tape 혹은 캐블러 섬유를 제거하면 된다. 필라멘트 와인딩에는 함침이 연속 보강섬유를 직접 수지용기 속으로 통과시켜 맨드릴 위에 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 잔류응력 등이 중요한 고려대상이다.¹² 열가소성 복합재료의 경우에는 테이프 적층 공정⁹ 축대칭 제품에 적용한 것으로 로봇을 이용한 다축 제어를 통하여 접합 경로를 따라서 접합하게 된다.¹³ 이 공정으로는 고성능 제품 제작에 아주 적합하지만 생산 시간이 긴 단점이 있어 더 좋은 filament winding machine 개발, 공정개선연구, 단시간 성형용 수지개발을 필요로 한다.

2.5 Textile(직물) 복합재료 제조 기술^{14,15}

복합재료 성형 방법과 밀접한 관계를 가지는 성형체(preform) 제조 기술은 성형 기술을 향상시키기 위해 매우 필요하다. 직물 복합재료는 그림 11에서 보는 바와 같이 크게 2차원과 3차원 구조물로 구분되는데 여기서는 보다 잠재력이 뛰어난 3차원 구조물의 성형 공법에 대해 간략하게 기술하고자 한다.

두께 방향의 섬유로 보강된 3차원 직물 구조의 복합재료는 적층 복합재료에 비하여 손상 허용치가 현저하게 증가된다. 이러한 직물 복합재료는 자동화된 preform제조 기법을 통하여 생산비 감소를 가져올 수 있기 때문에 항공 우주 산업 분야에서 관심의 대상이 되고 있다. 복합재료의 사용이 큰 구조물

응용으로 늘어감에 따라 이러한 3차원 직물 구조는 구조물의 일체성뿐만 아니라 near-net-shape 제조가 가능하기 때문에 잠재력이 매우 높다.

2.5.1 Woven Textile

3차원 woven textile은 주로 multiple warp weaving 기법으로 제조된다. 한 set의 warp과 weft yarn이 하나의 평면 층을 이루고 다른 일련의 warp yarn들이 이 층들을 서로 연결하여 3차원 구조물을 구성한다. 이 방법에 의하면 다양한 구조형을 만들 수 있으나 bias방향으로 섬유들을 배열하기가 어렵고 shedding 및 beat-up운동으로 인해 고탄성 섬유의 경우 손상이 가기 쉽다는 단점이 있다.

2.5.2 Knitted Textile

3차원 knitted textile은 weft knitting이나 warp knitting 방법으로 만들 수 있으나 구조적으로 multiaxial warp knit가 더 응용 가능성이 있다. 이 textile에서는 warp(0°), weft(90°) 그리고 bias(θ)섬유가 직물의 두께 방향으로 knit되어 서로 일체화된다. 섬유의 각도를 다양하고도 정확하게 줄 수 있는 것이 이 기법의 장점이나 stitching 과정에서 섬유가 손상을 입을 염려가 있다.

2.5.3 Braided Textile

3차원 braided textile은 둘 이상의 yarn이 공간적으로 서로 꼬여져서 일체화된 구조물을 가진다. 일반적으로 알려진 형태로는 track과 column이 상하 좌우로 움직여서 4단계에 걸쳐 섬유가 서로 꼬여지는 4-step braiding과, 고정된 중축 섬유 사이로 braiding섬유가 서로 대각선 방향으로 움직여 2단계에 걸쳐서 섬유가 꼬여지는 2-step braiding이 있다. 4-step braiding에는 machine bed가 원형인 형태와 직각형이 있는데 원형 braider는 튜브형이나 판형의 구조물을 만드는데 유리하고 직각형 braider

는 solid 형태의 구조물 제작에 이용된다.

2-step braiding은 4-step braiding에 비해 제작 속도가 빠르고 길이 방향으로 섬유 포함량이 많기 때문에 그 방향으로 강성이 높지만 conformability는 뒤떨어진다. 다른 형태의 직물에 비해 3차원 braided textile은 우리가 원하는 복합재료 부품의 최종 형상에 가까운 형태로 직조된다. 그래서 기계적인 체결이나 2차 가공을 할 필요가 없으므로 생산비가 크게 절감된다는 이점을 가진다.

3. 기술적 장애 요인

고분자 복합재료의 생산성 향상에 과학적, 기술적인 큰 장애 요인으로서는

1. 성형 중에 발생하는 물리적/화학적 변화
2. 계면 효과
3. 재활용(recycling)
4. 데이터 베이스 및 실험 방법

등이다. 특히 recycling은 생산량이 적은 항공 우주 산업보다는 생산량이 많은 자동차 및 전자 산업에서 더 중요시되고 있다. 첫째, 성형중 발생하는 물리적/화학적 변화에서 가장 중요시되는 문제는 process monitoring 및 control이며 센서의 output이 어떻게 process control에 관련이 되며, 또한 어떻게 부품의 최종 성능과 연관이 있는지에 대한 이해이다. 또 하나 중요한 과제는 process simulation modeling과 거기에 사용될 data base이다. 그 이유는 simulation을 통하여 금형 설계를 개선할 수 있으며 최적 성형 인자를 선택할 수 있기 때문이다. 둘째, 계면 효과에서 가장 중요한 과제는 계면 구조와 성질을 복합재료의 성능과 계면 형성에 영향을 미치는 성형 인자와 연관시키는 일이다. 관심의 대상이 되고 있는 성형 인자로서는 섬유표면처리, sizing, 그리고 성형중 섬유 표면과 수지와와의 유동성 및 젖음성 등이다. 또한 중요한 과제는 섬유와 기지간의 계면 성능 시험에서의 결과와 실제 복합재료의 계면 성능간의 관계이다. 마지막으로, 계면에 영향을 미치는 환경적 요인에 대한 연구이다.

셋째, 재활용 면에서 현재까지 연구된 바로는 열가소성 고분자가 이점이 있다고 하는데, 앞으로 복합재료의 응용에 있어서 이 문제는 재료의 선택에 큰 영향을 줄 것이다. 서로 다른 재료로 만들어진 조립된 부품의 경우 나중에 따로 분리해야 하므로

재활용을 고려한 기술은 재료 선택뿐만 아니라 부품 설계에도 직접적인 영향을 줄 것이다. 넷째, 데이터 베이스와 시험 방법에서는 성형 특성과 품질 평가를 위한 시험 방법의 확립이 모든 산업에서 필요하며, 더욱이 데이터 상호간의 교환과 비교를 쉽게 하기 위해서 규격화된 양식이 요구된다. 데이터 point간에 내삽(interpolate)할 수 있고 직접 측정된 범위 밖에서도 외삽(extrapolate)할 수 있는 expert system이 필요하다.

4. 복합재료 폐기물 처리기술

수송수단 부품의 복합재료화에 있어서 항상 대두되는 문제가 복합재료의 재활용 부분이어서 별도의 장으로 복합재료 폐기물, 처리 및 재활용에 대해서 살펴보도록 하겠다. 복합재료의 재활용에 이용되는 공정 및 응용, 선진국의 동향, 재료별 및 공정별 세부 사항을 조사하였다. 수송수단부품으로 사용되는 복합재료는 주로 SMC/BMC이어서, 이 재료에 관하여 중점적으로 언급하였다.²⁵

4.1 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 열경화성수지 복합재료를 중점적으로 검토 및 정리하였다.

4.1.1 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, 충전제를 분리한다. 대표적인 SMC의 구성 재료를 보면 수지 26%, 유리섬유 28%, 충전제 46% 이므로 상당량의 재사용 가능한 유리섬유를 얻을 수 있다. Sizing처리도 계속 남아 있어 재사용되는 유리섬유를 새로운 섬유와 혼용하여 복합재료 제품을 제조했을 때 좋은 결과를 얻고 있다.¹⁶ 연속섬유가 재활용될 때는 적절한 크기로 잘라서 2차 구조물의 성형에 사용이 가능하다. 이 재활용 방법은 인발 성형, RTM 및 hand lay-up 등의 공정에서 사

용이 가능하다. 이방법도 스크랩의 양이 지속적이며 대량으로 발생되어야 실시가 가능한 방법이며 소량이며 단속적으로 발생될 시에는 경화시킨 후 완제품의 재활용 방법을 이용해야 한다.

경화된 열경화성 수지의 회수는 사실상 불가능한 것으로 여겨져 왔지만 80년대에 미국에서는 에폭시, 폴리이미드 및 폴리에스터 수지의 회수를 위한 연구가 계속되어 왔다. 한 예로 disulfide bonds를 가지는 경화제로 경화된 에폭시 수지가 환원되어 완전히 녹고 다시 산화 반응에 의하여 재 경화될 수 있는 연구가 좋은 결과를 보였다. 또한 같은 메카니즘이 폴리이미드 수지에도 응용되어 그 가능성을 보여주었다. 폴리에스터 수지의 경우는 좀 다른 조건하에서 에스터 결합을 끊는 반응법(hydrolytic scission of ester bonds)을 이용하여 단량체를 얻는다.^{17,18} 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.

4.1.2 연소 혹은 소각 공정-Combustion(Incineration) Process

Combustion 혹은 incineration 방법은^{19,20} 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 재료로서 사용하게 된다.

첨부제가 첨부된 복합재료는 소각시 분해되며 공해를 유발하는데, 황화합물이나 질소화합물과 같은 산성비의 주범이 되는 것을 방지토록 집진 시설을 해야 하나 이러한 고성능 연소 시설 설치에 상당한 투자가 요구된다. 첨부제가 없는 복합재료는 공해가 거의 없이 소각된다. 폴리에스터나 에폭시는 소각후 거의 같은 양의 재(ash)를 남기며 매우 낮은 기계적 특성을 가지고 있다. 재의 형상은 첨부제의 성분, 보

강재 및 소각 온도 등에 좌우된다. 복합재료 내에 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 충전제가 포함된)를 얻을 수 있지만 이 부분에 대한 연구는 아직도 부족하다. 보강재 및 충전제는 콘크리트 제작에 사용되는 mineral material과 흡사하기 때문에 소각후 잔여 보강재 및 충전제는 콘크리트 생산에 사용될 수 있다.

지금까지 검토된 공정(polyurethane의 알코올화(alcoholysis) 공정은 제외)은 복합재료를 충전제 혹은 연료로 재생시켰다. 연소 방법은 폴리머의 에너지 가치를 부활시키는 또 다른 기술이며 더 쉬운 방법이다.

4.1.3 분쇄공정(Regrinding of Composites)

폐기된 열경화성 수지 복합재료는 재생형(remolding)이 불가능하기 때문에 폐기물을 가루(milled)를 내거나 작은 조각(granulated)으로 분쇄하여 새로운 복합재료의 부품제작에 섞어서 응용한다.²¹⁻²³ 약 20×20 mm 크기의 조각은 chip board, light weight cement board, agricultural mulch 및 insulation 등의 제조에 사용될 수 있다. 즉, SMC나 BMC로 만들어진 열경화성 수지 복합재료로부터 잘라진 스크랩(최고 3 mm의 길이)은 충전제로서 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(60 micron)는 SMC, BMC 및 열가소성 수지 제품의 충전제로서 사용될 수 있다. 스크랩 형성과정에서 모여진 0.5-0.7 mm 정도의 유리섬유는 충전제(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. 충전제로서 재사용될 때 활용도의 여부는 입자 크기 및 분포, 새로운 수지와와의 친화성, 경제성에 달려 있다. 한 예로, 독일 Fraunhofer Institute for Applied Materials Research의 최근 연구결과에²⁴ 의하면 uncured carbon prepreg을 -30 ℃에서 saw mill로 절단시킨 후 autoclave 혹은 press로 성형함

이 가장 손쉬운 방법이다. 이렇게 성형된 평판은 밀도가 0.8이며 섬유의 형태는 솜과 흡사하지만 tensile strength는 65~70 MPa이며 굴곡강도는 120 MPa이어서 타구조물 제작에 응용하기엔 물성상의 문제가 없음을 지적하였다.

4.1.4 고온 압축 성형법(Hot Pressing)

열경화성 수지 복합재료의 재활용을 위한 공정은 폴리우레탄이나 에폭시의 스크랩을 hot press에서 200 °C 온도와 50-100 bar의 압력으로 재성형될 수 있다는 것이 Baumann에²⁵ 의해 검토되었다. 이러한 방법으로 재활용된 재료는 물성치가 매우 낮아 자동차용 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 저급 제품(low grade material)의 시장이 필요하다.

4.1.5 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 문제 등이다.

일반 열분해 공정에는²⁶ 공기가 없는 상태에서 가열을 하는 방법이 포함되어 있다. 대부분의 복합재료에는 무기물이 많아 많은 양의 고체 잔여물이 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.²⁷ 예를 들면 약 760 °C 정도로 SMC를 열분해시키면 72%의 고형성분, 14%의 Oil, 14%의 가스가 생성된다. 고형 성분은 CaCO₃, 유리섬유, 카본 등으로 이루어진다. 유리섬유의 기계적 물성이 저하되지만 주로 새로운 SMC 제품이나 콘크리트의 충전제로서 사용된다. 이중에서 CaCO₃는 충전제(active filler)로서 사용 가능하며 아스팔트 포장

재료에도 사용될 수 있다. 일반적으로 열분해 공정의 온도가 낮을수록 분해되는 재료의 분자량이 높아 지므로 더 나은 특성의 재료가 남는다. 열분해 공정은 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 실용화되고 있다. 이 공정과 흡사한 알코올화 공정(alcoholysis)과 가스화 공정(gasification) 등도 있다.

4.2 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 사용 국으로서 대량의 레크레이션 보트 및 자동차, 각종 tank류, 건축자재 등의 생산 중 혹은 사용후 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 환경 보호 정책의 영향으로 폐기된 자동차의 부품의 재활용 문제와 결부되어 자동차용 복합재료의 재활용에 보다 관심을 지닌 80년대부터 갖게 되었다. 구체적인 노력의 결과가 자동차 회사들이 주축이된 VRP(vehicle recycling partnership)과 SMCAA(SMC automotive alliance)이다. 이 단체들과 General Motors사가 SMC와 BMC 재료의 재활용 문제를 주도하고 있다.^{28,29}

일본은 1970년초부터 복합재료 폐기물(reinforced plastic waste)에 관심을 갖기 시작했으며, 1985년 이후 국립연구소에서 구체적인 처리 방법을 연구하기 시작했다. 이에 따라서 RP Waste Recy-

표 1. 재활용된 복합재료 부품

미 국	일 본	독 일	캐 나 다
- rear upper inner panel (Corvette, GM) - agriculture flooring (azdel Co.) - econoline van interior - engine cover (Ford) - manhole Cover (nylon/Gl fiber, SRIM) - thermoplastic bumpers (GE plastics)	- roof inner rack(Toyota) - head lamp housing (Keito Mfg Co.) - aggregate for motor Cement(Asaoka Corp)	- spare wheel well (Audi 100) - sunroof frame(BMW) - 방음벽(Polo) - bumper(Mercedes 트럭) - sink, mountain step - front end panel - tractor roof, SBB 의자 - air intake cover - 전화 booth - 전기 distribution cabinet - cable distribution base - garden pool & chair - front end(VW Passat)	- construction panels (Plastiglas Co) - park benches (Plastiglas Co) - restaurant tables(Plastiglas Co) - livestock flooring(Faroex Co) - residential door skin(Faroex Co) - 자동차 bumper beam(Faroex Co) - knee bolster panel(Faroex Co) - load floor and seat back (Faroex Co)

cling & Treatment Council이 조직되었으며 연구 사업은 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.^{30,31}

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 재처리하기 위한 생산시설(production scale facility)을 지었다. ERCOM은 이동식 분쇄트럭과 집중식 분류 혹은 분해 설비를 갖추고 처리된 재활용 재료를 SMC/BMC회사에 다시 매매할 수 있도록 일원화된 시스템을 개발하였다.^{32,33}

캐나다는 최근까지 다른 나라들과 마찬가지로 열가소성 수지 제품들의 재활용에만 국한하여 왔으나, 90년 초까지 복합재료의 재활용에 대한 pilot plant 등의 가동을 거친 후 수개의 회사가 상업용 재활용 재료를 만들어 내고 있다. 주로 충전제, resin extender 및 장/단 유리섬유가 생산되고 있다. 이들 회사들이 사용하는 원재료, 즉 폐기 복합재료의 출처는 SMC, filament winding, pultrusion, hand lay-up 등의 폐기물 및 폐기된 electronic circuit board 등이다.³⁴

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

4.3 재료 상태별 재활용 고찰

대형 구조물에 사용되는 복합재료는 대개 폴리에스터계 수지를 모재로 하므로 양적인 면에서 볼 때 glass/polyester-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 SMC의 재활용 이 대표적인 예로서 많이 언급되고 있다. 그 이유는 자동차용 SMC가 1) 재활용을 연구할 수 있는 투자가에 있는 대기업이 관련된 업종이며, 2) 재활용회력사 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.

4.3.1 열가소성 수지 복합재료(Thermoplastic Composites)

저밀도 폴리에틸렌 혹은 폴리프로필렌과³⁵ 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 고분자 첨가물(polymer additive)나 유리섬유를 첨부시키는 방법이 있다. 이와는 달리, 구조용으로 사용되는 배열된 보강섬유가 포함된 열가소성 복합재료를 물리적인 방법에 의해서 동일한 품

질을 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 압축 성형에 의하여 다른 제품을 성형할 수 있는 주재료로서 사용이 가능하다. 아직 연구단계에 있지만 열가소성 수지를 분해해서 수지와 섬유를 분리해 내는 방법이 연구되고 있다. 이 방법은 유기 고분자 물질을 원래의 모노머로 분해시키는 과정을 말한다. Purification과 polymerization기술을 이용하여 원래의 고분자물질로 변화시키게 된다. 분리된 유리섬유는 처리 없이 보강섬유로 사용 가능하며, coupling agent로서 재처리하기도 한다.³⁶

4.3.2 열경화성 수지 복합재료

열경화성 복합재료의 재활용은 열가소성 수지 복합재료의 경우보다 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 방법 등에 의하여 얻어지는 것을 충전제 등으로 사용이 가능하다. 하지만 충전제 자체의 가격이 매우 저렴하기 때문에 대체 충전제로서의 재사용에 제한적일 수 밖에 없다. 열경화성 수지 복합재료도 폴리머뿐만 아니라 보강재 역할을 하는 여러 종류의 섬유와 bulkiness, stiffness, fire retardation 등의 특성을 향상시키는 첨가제 등으로 구성되어 있어서 스크랩 복합재료를 처리할 수 있는 공정은 이러한 혼합물을 처리할 수 있는 공정이어야 한다. 열경화성 수지 복합재료를 재활용하는 방법에는 크게 세 가지 방법이 있다;

- 1) Mechanical recycling : 즉 스크랩을 이용하여 새로운 복합재료를 제작함.
- 2) Chemical recycling(Pyrolysis) : 폴리머를 organic compound로 회색시켜 chemical raw material로 사용함.
- 3) Energy recovery : 소각시 폴리머 저장되어 있는 에너지를 최대한 활용함.

그림 12에서는 재활용 분야에서 대표적인 열경화성 복합재료인 SMC를 재활용하는 법을 인용해 보았다.¹⁹ 구체적인 방법은 다음절에서 설명될 것이다.

4.3.3 폐기된 복합재료(Post-consumer Composites)의 재활용

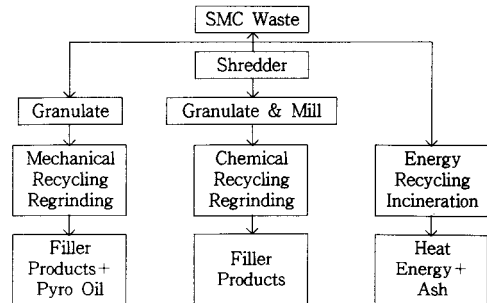


그림 12. SMC/BMC 재료의 재활용 순서도.

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 분류 등의 문제가 해결된다 하더라도 기름, 페인트, 금속 삽입물 등의 이물질이 적절히 제거되어야 고품질의 재활용을 위한 처리 방법을 적용할 수 있는 즉, 금속 부착물의 분류를 위한 방법의 개발, 오염된 복합재료의 처리 방법 등이 해결되어야 한다. 따라서 제품 제조시 재료를 구분할 수 있는 코드(code)를 포함시키는 방법도 고려할 수 있다.³⁷

4.3.4 보강 섬유의 재활용

폐기물 중 주요 대상은 수요가 가장 많은 유리섬유이다. 장섬유와 단섬유가 적절한 공정을 통하여 회수된다. 수지와 섬유가 화학적인 방법에 의하여 분리될 때 최초의 용도대로 재사용까지 가능하다. 처리 과정에서 섬유 표면이 손상을 입게 되면 물성이 저하되므로 표면처리를 다시 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. 폐 유리섬유의 단순 매립은 심각한 토양오염과 수질오염으로 인체에 해가 될 수 있으므로 다른 형태의 폐기 방법을 필요로 한다. 고성능 복합재료에 사용되는 케블라, 탄소섬유 및 보론섬유 등은 유리섬유에 비해 비싸므로 재사용에 보다 매력이 있다. SMC 내의 유리섬유의 분리와 비슷한 화학적 접근 방법이 가능하지만 구체적인 연구결과는 발표되지 않고 있는 상황이다. 하지만 유리섬유와는 달리 산소 존재 하에서 연소 가능하므로 이에 상응하는 폐기물 처리방법을 이용

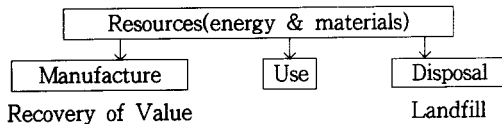


그림 13. 복합재료 부품의 life cycle 분석도.

할 수 있다.

주로 SMC 위주로 정리했지만 다른 열가소성 및 열경화성 수지와 다른 섬유 복합재료의 재활용도 위에서 검토된 기술을 활용할 수 있다. 각각의 재활용 기술은 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. 열분해기술은 폐기물로부터 고가재료를 회수하는데 적합하지만 연료(fuel)만 회수한다면 소각시키는 것이 더욱 적절한 방법이다. 공해문제만 해결한다면 소각은 오염된 폐기물처리에 가장 효율적인 방법이다.

그러나 재활용의 목적은 환경보호에 있으므로 가장 적합한 재활용 기술을 검토하는 방법은 life cycle 환경분석 하는데 있다. Life cycle 분석은 각 부품의 생산, 사용 및 폐기물 처리등에 사용된 resources를 검토하는데 있다. 이러한 검토는 부품이 여러 재료로 생산되었을 때 resources의 소비 비용을 해주어 부품의 수명후 응용될 수 있는 가장 효율적인 방법을 알 수 있게 해준다. 그림 13은 life cycle 분석도를 보여준다.

Life cycle 분석은 어려운 분석이며 자세한 분석 방법들은 아직도 연구개발 중에 있다. 지금까지 복합재료 부품과 관련하여 life cycle 분석이 충분히 검토된 바 없으나 자동차에서의 경우 일부 금속부품을 복합재료로 대체시키는 것이 환경적인 면에서 유리하게 증명된 상태이다. 복합재료 및 금속자동차 부품의 life cycle 에너지 소비를 비교한 결과를 검토해 보면 복합재료 부품응용에 의한 경량으로 life cycle 동안의 연료절감으로 인해 상당한 에너지 절약이 있었다는 것을 알 수 있다. 간단한 부품의 복합재료화가 life cycle 기간동안에 절약하는 에너지는 30-50% 정도 절약되는 것으로 연구되었다.³⁸ 여기서 폐기물 재활용으로부터 얻어지는 에너지를 추가시킨다면 최고 60% 정도까지의 에너지를 절약시킬 수 있다.

5. 결 론

현재 진행 중이거나 계획되고 있는 군사용/민간 항공기, 인공위성, 선박, 스포츠레저 등 일반산업에서 복합재료를 사용하는 부품 및 비율이 크게 증가되고 있으며, 앞으로 고성능의 항공기 개발 추세에 따라 고성능의 첨단복합재료 사용이 더욱 늘어날 것으로 본다. 그와 함께 점점 대두되는 문제는 생산속도가 빠르고 생산비가 낮아서 가격 면에서 유리한 복합재료의 개발이다. 본 논문에서는 이러한 생산성의 중요성을 확인하고, 성능 향상 및 생산성 향상을 위한 가장 유리한 복합재료 성형 방법, 기술적 장애요인, 폐기물 처리방안 등에 대해서 알아보았다.

세계적으로 교통수단 산업의 경쟁이 매우 치열하게 진행되고 있기 때문에 복합재료가 자동차 부품에 보다 많이 적용되기 위해서는 성능, 생산속도 및 생산비 등을 포함하는 여러 요인을 서로 균형있게 조절해야 한다. 자동차 분야에서는 향상된 성능만이 반드시 가장 필요한 것은 아니다. 더 필요한 문제는 부품의 생산속도 개선 및 저가의 생산비로 단가 면에서 유리해야 한다는 것이다. 일반적으로 가격 면에서 유리한 복합재료를 개발하여 적용하기 위해서는 원재료의 선택도 중요하지만 복합재료 생산비의 70%는 제조 과정에 있으므로 생산성이 높으면서 신뢰성도 높은 제조 공정의 개발이 필요하다 그리고 향후 보다 생산성이 높고 고성능·고기능을 가진 신재료, 신공법의 개발이 필요하다.

지구 환경의 관점에서 수송수단 등의 경량화에 의한 연비 개선도 필요하지만 복합재료 폐기물 처리 즉 복합재료 재활용기술의 개발도 매우 중요하다. 향후 자동차 산업뿐만 아니라 모든 산업에서도 복합재료 개발에 반드시 필요한 기술이다.

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

참 고 문 헌

1. "Fabrication 70% of Cost for Advanced Composites", *Advanced Composites*, 7/8, 12 (1988)
2. "Study sees High-Volume Composites Use in '90's", *Advanced Composites*, 9/10, 12 (1988).
3. "Next Decade Defence: Less is more", *Advanced Composites*, 1/2, 18 (1993).

4. 이대길, 오박관, *자동차공학지*, **16**(2), 45 (1994).
5. 조치룡/김태욱, *기계와 재료*, **4**(3), 22 (1992).
6. J. A. Neate and W. Robins, etc., *49th Ann Conf.*, Composite Institute, SPI, Feb. 7-9 (1994).
7. 조봉규, '96 복합 재료 *Workshop*, 한국복합재료학회, 45-74, Oct. 10 (1996).
8. G. Molina and S. Lepore, etc., *46th Ann Conf Composite Institute*, SPI, Feb. 18-21, session 21-B (1991).
9. 엄분광, 김병선, *기계와 재료*, **7**(2), 25 (1995).
10. P. R. Ciriscioli, G. S. Springer, and W. I. Lee, submitted to *the Journal of Composite Mat'ls*.
11. 변준형/김태욱/이상관, *기계와 재료*, **6**(2), 84 (1994).
12. E. P. Calius and G. S. Springer, *Pro. of the 5th Int'l Conf. on Composite Materials*, The Metallurgical Society, 85, 1071-1088.
13. V. Agarwal, et al., *J. of Thermoplastic Composite Mat'ls*, **5**, 115 (1992).
14. T-W. Chou and F. K. Ko, Ch.5, Elsevier Science Pub., 1988.
15. J-H. Byun, Ph.D. Thesis, University of Delaware, 1991.
16. J. C. Bradley, W. D. Graham, and R. Forster, *49th Annual Conf.*, Composites Inst., SPI, Feb. 7-9 (1994).
17. W. D. Graham, R. B. Jutte, and D. L. Shipp, *49th Ann. Conf.*, Composites Inst., The Society of the Plastics Industry, Inc., Feb. 7-9 (1994).
18. R. B. Jutte and W. D. Graham, *46th Ann. Conf.*, Composite Institute, The Society of the Plastics Industry Inc., Feb. 18-21 (1991).
19. Graham and R. Clayton, SMC Automotive Alliance, *49th Ann. Conf.*, Composite Inst., SPI, Feb. 7-9 (1994).
20. D. H. Kelley, *Material Performance*, **33**(1), 72 (1994).
21. K. Rusch, *48th Ann. Conf.*, Composite Inst., The Society of the Plastics Industry Inc., Feb. 8-11 (1993).
22. K. Butler, *46th Annual Conf.*, Composite Inst., The Society of the Plastics Industry Inc., Feb. 18-21 (1991).
23. J. Pettersson and P. Nilsson, *48th Annual Conference*, Composite Institute, The Society of the Plastics Industry Inc., Feb. 8-11 (1993).
24. K. Pannkoek, et al., *ICMC, Nonmetallic Mat'ls and Composites at Low Temperatures VIII*, Geneva, Switzerland, Sept. 23-25 (1996).
25. G. F. Baumann, *ASM/ESD Advanced Composites Conference*, 271, Detroit, October 8-11 (1990).
26. B. Darrah, *48th Ann. Conf.*, Composite Inst., SPI, Feb. 8-11 (1993).
27. C. N. Curcuras, et al., *SAE Int'l Congress and Expo*, Detroit, Mi, Paper 910387, P1-16, Feb-Mar '91, Feb-Mar. (1991).
28. A. Owens and J. Henshaw, U. of Tulsa (1991).
29. R. Thompson, TECH UPDATE, Manufacturing Engineering, Vol. 110, No. 5, p. 24~30, May (1993).
30. T. Kitamura, *49th Ann Conf.*, Composites Inst., The Society of the Plastics, Inc., Feb. 7-9 (1994).
31. H. Hamada, et al., *49th Ann. Conf.*, Composite Inst., SPI, Feb. 7-9 (1994).
32. A. Weber, *Plastics, Rubber and Composites Processing and Applications*, **16** 143 (1991).
33. P. Schaefer and A. G. Plowglan, *47th Ann. Conf.*, SPI, Feb. 7-9 (1994).
34. B. Darrah, *49th Annual Conf.*, Composites Inst., The Society of the Plastics Industry, Inc. Feb. 7-9 (1994).
35. D. L. Reinhard, Azdel, Inc., One Plastics Ave, Pittsfield, MA 01201 (1993).
36. J. Janoschek, et al., *Polym. Master Sci., Eng.*, **68**, 294 (1993).
37. S. J. Pickering, M3.1-M3.14, Proceedings Verbundwerk, 1992.
38. B. Krummenacher, Dow Europe, Horgen, Switzerland.