

자동차용 섬유강화 복합재료

안 병 현

1. 서 론

자동차는 우리의 일상생활에 있어서 없어서는 안될 필수품으로 엄청나게 많은 종류와 양의 자동차가 생산, 소비되고 있다. 최근 자동차 산업의 발전 및 다양한 소비자의 요구에 따라 새로운 자동차용 소재들이 많이 개발되고 있는데, 그 중 하나가 플라스틱 및 섬유강화 복합재료이다. 자동차 소재로서 플라스틱 및 섬유강화 복합재료를 사용하면 무게가 감소하여 에너지 효율을 높일 수 있으며 배출가스의 감소에 의한 환경보호 측면에서도 그 영향이 매우 크다. 또한 여러 개의 부품들을 일체화하여 작업 및 조립 비용을 줄임으로써 자동차의 가격을 낮출 수 있을 뿐만 아니라 보다 안정성이 향상된 자동차를 생산할 수 있다[1].

국내의 자동차 업계는 주로 내장재 및 범퍼에 플라스틱 소재를 적용하고 있는 실정이나 미국의 경우에는 내장재 뿐만 아니라 *Figure 1*과 같이 hood, door, deck-lid, roof 등의 차체 외판으로부터 seat back, bumper beam, leaf spring, shaft 등 구조 부품에 이르기까지 섬유강화 복합재료를 적극적으로 활용하고 있다. 에너지 절약 및 환경보호라는 측면에서 국내 자동차 업계에도 섬유강화복합재료의 도입이 증가되리라 예상되므로 섬유강화 복합재료를 사용한 자동차 부품은 향후 성장 잠재력이 매우 큰 분야중 하나라고 하겠다. 본 장에서는 미국 자동차 업체를 중심으로 자동차용 섬유강화 복합재료의 종류, 물성 및 특성, 가공 방법, 적용 사례, 재활용 및 향후 전망 등에 대하여 살펴보고자 한다.

2. 자동차용 섬유강화 복합재료의 종류

자동차 제조회사는 제조 비용 및 자동차의 무게를 줄이기 위해 섬유강화 복합재료를 사용한 부품을 개발하고 있다[2]. 복합재료 차체의 개발은 자동차 산업에 있어서 전세계적인 추세이다. 고성능 복합재료는 전체적으로 강철에 비해 무게는 가벼우면서 강도 및 stiffness는 더 증가될 수 있다. 섬유강화 복합재료는 높은 댐핑 능력을 가지고 있으며, 통합된 형태로 성형이 가능하고, 부식이 되지 않으며, 필요한 도구 및 장비가 적고, class-A의 표면을 가지며, 보다 다양한 규격으로 생산이 가능하고 디자인도 유연하게 할 수 있다[1].

2.1. Sheet Molding Compound(SMC)

자동차 차체 외판은 우수한 표면, heat sag resistance, 낮은 열팽창계수, 설계의 유연성, 충격강도 및 충격 stiffness가 요구되는데 SMC는 이런 조건에 잘 부합된다[1]. SMC는 강철보다 더 우수한 class-A 표면을 가지며 E-coat bake 온도에서도 잘 견딘다. SMC를 사용하면 강철에 비해 무게를 20~30% 정도 줄일 수 있으며[3] 연결 조인트 없이 한 개의 제품으로 성형이 가능하다[4].

Audi, BMW, Mercedes, Peugeot, Volkswagen 과 같은 많은 유럽 자동차 메이커들이 SMC 범퍼를 사용하고 있다. 고성능 SMC는 차체 외판 뿐만 아니라 다른 구조 부품으로 용도의 확대가 예상된다. SMC 부품은 30% 정도의 유리섬유를 포함하는데 steel stamping 제품보다 가볍고 알루미늄이나 마그네슘 die casting 보다 가격이 저렴하고 소음을 잘 차단시키며 열가소성수지 제품

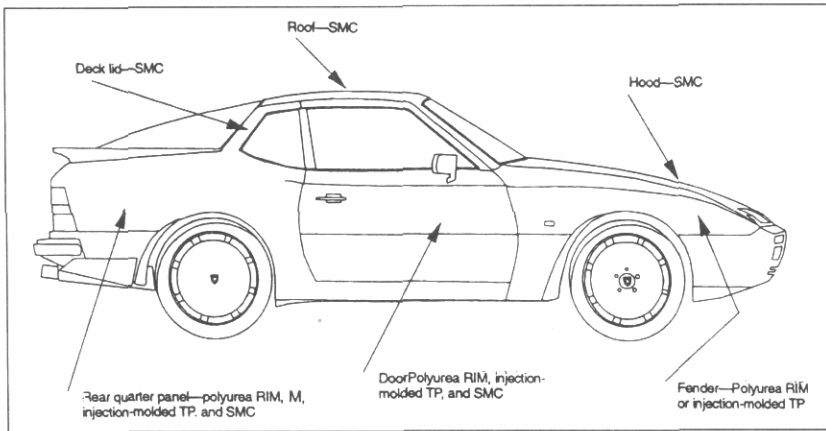


Figure 1. Major automobile exterior components that may be replaced by polymers or polymer matrix composite.

보다 내열성이 좋다. 알루미늄 엔진 밸브 커버도 SMC로 대체가 가능한데, 엔진 소음이 줄고, 부품을 통합하므로써 가공비가 줄고, 치수안정성이 우수하여 sealing이 향상된다[5]. 알루미늄 oil pan도 SMC로 대체되면 가격 및 중량이 30% 정도 절감되리라 예상된다[6].

2.2. 섬유강화 열가소성 수지(R-TP)

자동차 산업에서 다양한 R-TP가 현재 사용되고 있거나 앞으로의 사용이 예상된다. Freight liner는 중형 트럭의 후드에 유리섬유 강화 폴리에스테르를 사용하고 있다. 이 R-TP는 class-A 표면을 가지며, 이 일체형 후드는 비슷한 SMC 제품에 비해 약 15% 정도 무게가 가벼우며, 강도는 높고 성형 가격은 낮다[7].

섬유강화 나일론도 엔진과 관련된 여러 가지 부품으로 디자인되고 있는데 여기에는 timing chain tensioner, bearing cage, transmission 부품, 센서, 밸브 커버 등이 있다[6]. 유리섬유 강화 나일론으로 만든 소음 감쇄 밸브 커버는 알루미늄 제품에 비해 25% 정도 가격이 저렴하다[5]. Air-intake manifold도 유리섬유강화 나일론으로 제조되는데 50% 정도 무게가 감소하고, 마찰이 적어 성능이 향상되며 설비 비용이 절감되어 경제적이다[5]. 전면 및 후면 bumper backup bar는 40% 유리섬유강화 폴리프로필렌

으로 제조되어 Ford와 GM의 승용차에 도입되었다. 복합재료 범퍼는 보다 단순하고 디자인대로 작동되며 부착되는 부품들이 줄어든다[4,8].

2.3. 고성능 고분자 복합재료

고성능 고분자 복합재료(advanced polymer composite, APC)는 고성능이 요구되는 자동차 부품에 적용이 가능하리라 예상된다. 가능성이 있는 새로운 적용 분야로서는 transmission, universal joint 및 기타 엔진 부품 등이 있다[9]. 복합재료 drive shaft는 무게가 가볍고 다양하게 디자인할 수 있으며 가공하기가 비교적 쉽다. GM은 탄소섬유강화 복합재료를 사용하여 트럭의 강철 2-piece 축을 1-piece로 대체하였다[10]. Axle과 transmission housing도 APC로 대체할 수 있으리라 예상된다. 일곱 조각으로 구성된 강철 스프링(18.6 kg)도 일체형 복합재료 leaf spring(3.6 kg)으로 대체할 수 있는데 filament wound leaf spring은 대량 생산되는 자동차 및 밴에 사용되고 있다. 복합재료 브레이크 드럼은 기존의 드럼에 비해 30% 정도 성능이 향상되었으며 cracking 및 heat cracking에 대한 저항성도 증가되었다[11]. 유리섬유/에폭시 복합재료는 wheel 및 slat에의 사용이 고려중이고 트럭 및 스포츠카용 탄소/탄소 복합재료 브레이크가 개발 중에 있다.

3. 섬유강화 복합재료의 성형 공법

3.1. Liquid Composite Molding(LCM)

Liquid composite molding(LCM)은 다양한 자동차 부품의 성형에 널리 이용되고 있는데 snap-cure SRIM 수지 시스템, 저점도 RTM 시스템 및 관련된 기술의 개발에 의해 자동차 산업에서의 LCM의 경제성이 더욱 증가하고 있다. Resin transfer molding(RTM) 또는 structural reactive injection molding(SRIM)이 LCM에 속한다.

RTM은 Figure 2와 같이 보강 preform을 금형 속에 넣고 금형을 결합시킨 후 수지를 금형 내에 주입하고, 주입된 수지가 수분에서 수시간 정도에 걸쳐 경화됨으로써 제품이 성형이 되는 공법이다. SRIM은 RTM과 비슷한 공법이지만 원료의 화학 반응이 매우 빨라서 금형의 개봉과 보강재의 크기가 달라진다(Figure 3). SRIM에서는 수지가 금형 내에 주입되면 반응 및 경화가 수초 내에 완료된다. 수지가 preform속으로 침투함과 동시에 반응이 진행되므로 SRIM에서는 수지가 보강 섬유에 빨리 젖어야 하고 금형 내의 공기도 신속하게 배출되며 보강재가 수지에 완전히 함침된 후 경화가 일어나야 한다.

일반적인 RTM 수지는 2액형으로서 낮은 압력에서 약 100:1로 혼합된다. 큰 preform이 완전히 함침되기 위해서는 약 100~1000 cp 정도의

점도를 유지하도록 반응속도가 느려야 한다. SRIM 수지는 매우 반응성이 높기 때문에 주입 전에 완전히 혼합되도록 high pressure impingement mixing이 필요하다. RTM 수지의 경우 약 20초 정도로 경화시간이 단축되고 있으며, 반대로 SRIM 수지의 경우에는 큰 금형을 사용하고 보강재의 농도를 증가시킬 수 있도록 반응속도를 지연시킨 제품도 개발되고 있다. 이런 추세에 따라서 RTM과 SRIM이 통합된 성형 공법도 출현하리라 예상된다.

Pick-up truck box, bumper beam, auto instrument panel retainers, floor panel 등과 같은 자동차 구조 부품에 적용될 수 있는 복합재료를 생산하기 위한 LCM 공정은 근래에 많은 관심을 끌고 있다. LCM 공정은 낮은 온도, 낮은 압력에서 행하여지므로 장비 가격이 낮아지고, 따라서 소량생산에는 매우 경제적이다. 보강재를 필요한 곳에 정확하게 넣을 수 있으며 복잡한 부품들도 한번에 성형이 가능한 단일 부품으로 통합할 수 있기 때문에 노동력이 절감될수 있는 장점도 있다.

3.2. LCM용 Preform 제조 기술

LCM 공법이 더욱 많이 활용되기 위하여 해결

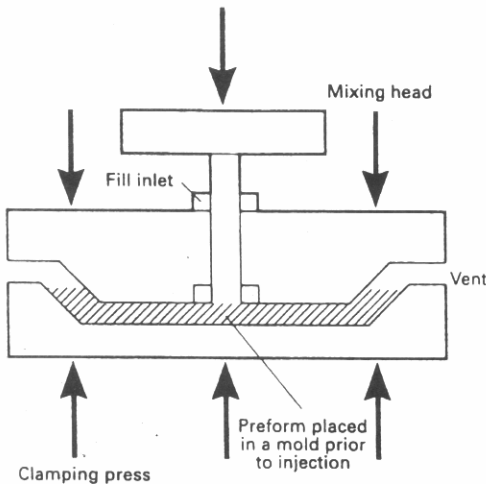


Figure 2. A RTM process.

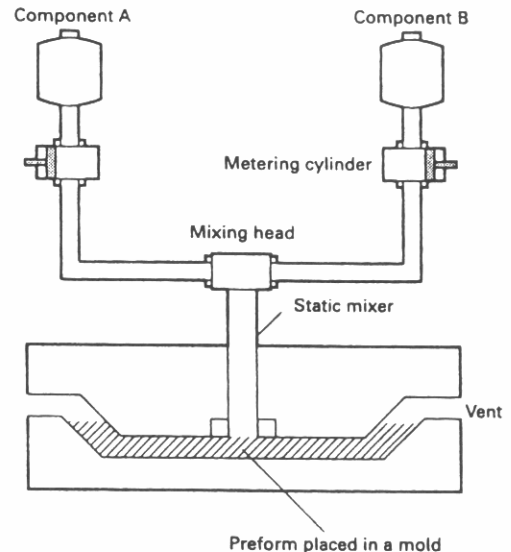


Figure 3. A SRIM process.

되어야 할 한가지 과제는 보강 preform을 경제적으로 생산하는 것이다. 견고한 3차원 preform을 만들기 위하여 thermoformable continuous strand mat 및 multi-end roving의 두 가지 형태의 유리섬유가 공급되고 있다[12]. 이와 같은 형태의 보강재는 preform의 가공 중에 하중을 많이 받는 특정 부분에 보강재를 추가할 수 있다. 이 두 가지의 보강재 기본 형태(mat, roving)는 directed fiber spray-up 공정 및 thermoformed mats의 stamping에 의해 LCM preform으로 가공된다. Directed fiber spray-up 공정은 성형하고자 부품과 동일한 형태의 preformed 금속 스크린에 유리섬유와 바인더를 분사하는 것이다. 절단된 유리섬유는 스크린을 통해 흡입되는 공기에 의하여 고정된다. 보강재가 원하는 두께에 이르면 binder의 경화에 의해 preform이 형성된다[12](Figure 4).

Thermoformed mat process는 mat를 가열하는 오븐, 매트고정용 틀 및 매트를 preform으로 성형하는 장치가 필요하다[13]. 일반적으로 여러장의 매트를 일정한 크기로 재단한 후 틀에 고정시켜서 성형한다. 재료가 포함된 frame을 오븐에 넣고 가열한 후 재빨리 성형 기기로 옮긴다. 성형 기기에서 mat가 preform으로 성형되면 틀

을 제거한 후 잘 다듬는다. 성형된 모양을 유지하기 위하여 열가소성 및 열경화성수지 바인더가 사용되기도 한다.

3.3. SMC와 BMC의 성형

SMC와 BMC(bulk molding compound)는 같은 형태의 압축성형 프레스를 사용한다. 하지만 부품 성형을 위하여 금형 속에 주입되는 원료의 형태는 다르다. 이 기술에서 많이 사용되는 원료는 유리섬유강화 수지(폴리에스테르, 비닐에스테르, 페놀수지, 에폭시) 및 clay, alumina 또는 calcium carbonate와 같은 충전제이다. 전형적인 SMC의 조성은 일반적으로 75 mm 이하의 길이를 갖는 섬유 30~50%, 수지 25% 및 적당량의 충전제, 점도조절제, low-profile agent이다. 자동차용 부품에는 폴리에스테르 및 비닐에스테르가 주로 사용되고, 에폭시 수지와 페놀수지는 underhood 응용에 보다 적합하다[14].

SMC의 제조는 먼저 유리섬유를 잘라서 수지-촉매-충전제의 혼합물에 섞고 양면에 폴리에틸렌 필름을 붙인다. 수지 혼합물과 절단된 유리섬유의 샌드위치는 압출 롤 사이를 통과하면서 완전히 혼합된다. 이 혼합물은 약간 경화된 후 롤로 말아진다(Figure 5). 최종 제품으로 성형될

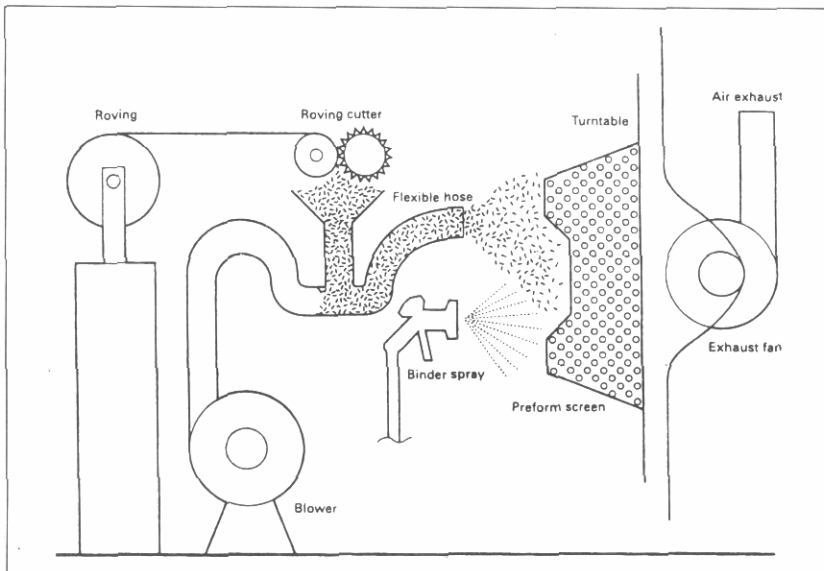


Figure 4. A directed-fiber spray-up process for preform fabrication.

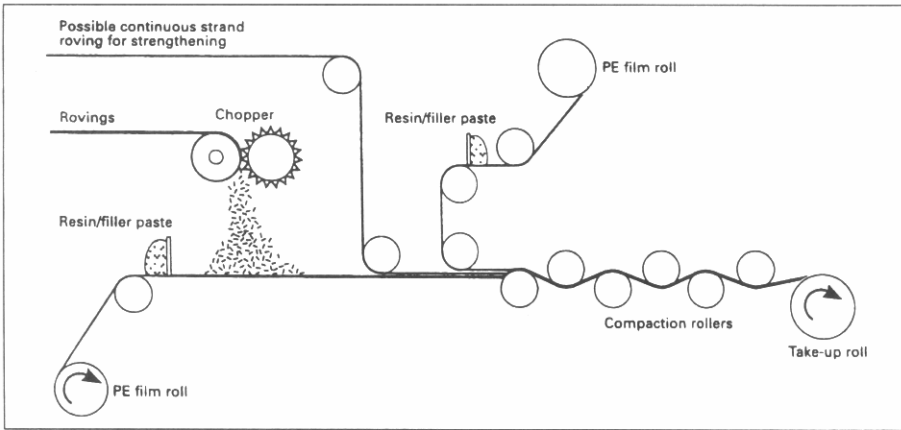


Figure 5. A SMC process.

때 SMC는 롤로부터 절단되고 폴리에틸렌 필름이 제거된 후 압축성형 프레스에서 성형된다. 성형 온도와 압력은 수지의 종류와 충전제의 양에 따라 약간씩 차이가 있는데 일반적으로 약 160°C와 35 MPa 정도이다.

BMC는 SMC와 비슷한 조성을 가지지만 유리 섬유 함량의 양이 약간 적고 섬유의 길이도 약간 짧다. BMC에는 주로 6~12 mm 길이를 갖는 유리 섬유 함량 15~20%와 폴리에스테르 수지가 사용된다. BMC는 절단된 섬유와 수지가 혼합기 속에서 잘 섞인 다음 연속적인 log 형태로 압출된다. 압출 log는 적당한 길이로 절단된 후 압축성형, 사출성형 및 transfer molding에 의하여 가공된다. BMC의 인장 강도, 탄성률 및 충격 에너지는 SMC에 비해 낮는데 이것은 사용되는 섬유 길이가 짧고 섬유 함량이 작기 때문이다(Table 1).

4. 성능 및 디자인

자동차와 같은 제품이 대량 생산되는 산업에서 복합재료와 금속 중 재료를 선택하여야 할 경우 복합재료의 생산속도가 중요한 관건이 된다. 생산량의 정도에 부합되는 성형 공법이 우선적으로 고려되어야 하고 구조 부품의 디자인은 선택된 성형 공법의 테두리 안에서 행하여져야 한다[15].

Table 1. Mechanical properties of typical SMC and BMC

Property	SMC -R25	SMC -R25	BMC with 10 to 25% E-glass
Specific gravity	1.83	1.82	1.8 to 2.0
Tensile strength, MPa	82.4	227	27 to 54
Tensile modulus, GPa	13.2	14.8	3.4 to 10.3
Poisson's ratio	0.25	0.26	-
Strain at failure, %	1.34	1.63	-
Flexural strength, MPa	220	403	69 to 172
Flexural modulus, GPa	-	14.9	5.5 to 8.3
Coefficient of thermal expansion, 10 ⁻⁶ /°C	-	-	14.4 to 27

4.1. SMC와 BMC의 구조 특성

SMC는 일반적으로 항복점이 없고 인장 파괴 변형은 매우 작다(<2%). 섬유 함량이 높아짐에 따라 인장 및 굴곡강도는 매우 증가한다. 반면 굴곡탄성률은 그다지 영향을 받지 않는다. 일반적으로 SMC의 굴곡강도는 인장강도보다 높다. 그러나 인장탄성률과 굴곡탄성률은 비슷하다. 인장 및 굴곡강도는 섬유의 길이가 증가함에 따라 증가한다. 상업용 SMC에서는 섬유 길이가 12 mm에서 50 mm 정도인데 이 범위 내에서 탄성률은 섬유 길이에 따라 변화하지 않는다. 섬유 길이가 길면 특히 복잡한 금형에서는 흐름 특성이 좋지 않다[16].

섬유의 종류는 강도나 탄성률과 같이 섬유 특성이 크게 작용하는 부분에 매우 큰 영향을 미친다. 수지의 종류도 인장 특성에 영향을 미치나

그 정도는 작다. 수지와 충전제의 종류 및 농도는 toughness에 크게 영향을 미친다. 이러한 인자들이 주의 깊게 설계되어야만 SMC 복합재료가 유리섬유강화 열가소성수지 및 SRIM 폴리우레탄과 경쟁력을 가질 수 있다.

일반적으로 tension-compression cyclic loading에서 SMC의 S-N diagram은 피로한계를 나타내지 않는다(Figure 6). 응력이 감소하면 파괴에 이르는 사이클의 회수는 증가한다. SMC의 피로강도는 섬유의 함량이 증가함에 따라 증가한다[17]. SMC의 피로 손상은 매트릭스 cracking과 섬유-매트릭스 interfacial debonding과 관련되어 있다. 매트릭스 cracking은 분산이 좋지 않은 충전제의 덩어리나 섬유의 끝 부분에서 잘 일어난다. 섬유가 하중 방향에 대해 각도를 가지면서 배열되면 피로 손상이 interfacial debonding의 형태로 일어난다. SMC에서 축적된 피로 손상은 잔류 인장강도의 저하를 야기시킨다[17].

4.2. 고성능 복합재료

탄소섬유강화 에폭시 복합재료는 강도와 피로에 대한 저항이 높아서 우주항공 및 방위산업에 널리 사용되고 있는데 탄소 섬유의 가격이 높아서 자동차 산업은 아직 많이 적용되지 못하고 있다. Ford는 탄소섬유를 사용하여 prototype LTD sedan을 제작한 후 강철로 제작된 승용차와 직접 비교하였다[18,19]. 이 연구에서 각 부분

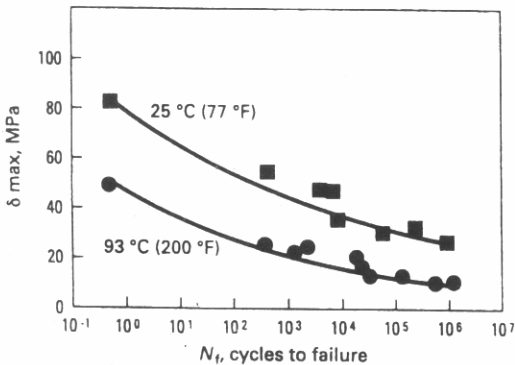


Figure 6. Typical S-N curve for a SMC automotive part.

별 무게 감소에 대한 결과는 Table 2와 같다. 이 연구 결과는 승차감과 자동차 역학 면에서 복합재료 자동차는 강철 자동차와 대등한 특성을 가졌음을 알 수 있었다.

자동차의 구조 부품 제조에 복합재료를 사용하는 방향은 두 가지로 나눌 수 있다[15]. 첫번째는 각 부품을 1:1 대체하는 것이고, 두번째는 몇 가지로 분리된 강철 부품들을 한 개의 복합재료 부품으로 통합하여 대체하는 것이다. Drive shaft, leaf spring 등이 1:1 대체의 경우에 포함된다. 그러나 대부분의 부품에서 있어서 금속을 복합재료로 1:1 대체하는 것은 경제적인 면에서 좋은 방법이 아니고 여러 부품을 집적화하여 조립 비용을 낮추는 것이 더 유리하다[15].

High speed resin transfer molding(HSRTM)을 이용하면 높은 생산속도를 얻을 수 있고 정확하게 수지를 제어할 수 있으며 부품을 고도로 집적화 할 수 있다. 차체 측면 조립에서 강철 부품의 경우 300개의 부품이 필요한 반면 SMC의 경우에는 10~20개, HSRTM의 경우에는 2~10개 정도로 부품의 수를 줄일 수 있다.

4.3. 외부 차체 패널

외부 차체 패널은 다음과 같은 특성을 가져야 한다[20-23].

- 부드러운 표면 및 우수한 도료 접착성
- 열 및 치수안정성
- 우수한 내충격성

Table 2. Major weight savings in carbon fiber-reinforced polymer (CFRP) vehicle compared with a steel vehicle

Component	Steel(kg)	CFRP(kg)	Reduction(kg)
Body-in-white	192.3	72.7	115
Front end	43.2	13.6	29.5
Frame	128.6	93.6	35
Wheels(5)	41.7	22.3	19.4
Hood	22.3	7.8	14.7
Decklid	19.5	6.5	13.1
Doors(4)	64.1	25.2	38.9
Bumpers(2)	55.9	20	35.9
Driveshaft	9.6	6.8	2.8
Total vehicle	1705	1138	566

• 기존 조립 공장에서의 적용성
 • 총비용 면에서의 기존의 강철과의 가격 경쟁력
 위와 같은 요구사항에 부합되기 위하여 Chrysler는 두가지 형태의 외부 차체 패널을 고려하고 있다. 첫번째 형태는 유리섬유강화 폴리에스테르 열가소성 수지이다. 폴리에스테르는 높은 용점을 가지므로 E-coating한 강철 차체 부품을 bake하는 온도인 205°C에서 견딜 수 있다. 수지는 강철의 5배 정도의 열팽창계수를 가지는데 유리섬유는 재료의 수축을 줄여주고 치수 및 열안정성을 향상시킨다. 부품들은 사출성형에 의하여 가공되는데 자동 공정이므로 비용 면에서 효율적이다. 사출성형에 의하여 가공되는 다른 섬유강화 플라스틱과 마찬가지로 이 제품의 표면 품질과 성능은 gate 디자인, 유리섬유의 함량 및 종류, 원료 조성 등의 영향을 받는다. 두번째 형태는 polyurea RIM elastomer system으로서 매우 빠른 사이클로 생산될 수 있다. 이 시스템에서는 촉매가 필요하지 않으며 넓은 가공 window를 가지고 물성이 우수하며 생산성이 좋다. Polyurea RIM은 toughness가 매우 우수하고[22] 외부 차체 패널로 사용시 내열성이 좋아서 E-coat bake 온도에도 잘 견딜 수 있다 [21].

미니밴의 fender로 사용되는 열가소성 폴리에스테르 및 polyurea RIM의 기계적, 물리적 성질은 Table 3과 같다. Bayflex 110~80은 상용 폴리에스테르 열가소성수지이며 다른 두 재료는 각각 다른 종류의 polyurea RIM이다. Polyurea RIM은 폴리에스테르보다 높은 인장강도 및 굴곡탄성률, 낮은 열팽창계수와 높은 충격강도를 나타낸다.

섬유강화 복합재료의 성능에 관한 데이터는 일반적인 디자인에 매우 중요하다. Metal Alternative Design(MAD)[23]라 불리는 새로운 디자인의 개념이 자동차 산업에 도입되었는데 이 개념은 단순히 낡은 디자인을 대체하는 것 이상으로 금속 부품을 효과적으로 대체하고자 하는 목적 때문에 개발되었다. 섬유강화 복합재료는 강철과는 그 특성이 매우 다르다. 이들의 차이점이 MAD에 의하여 인식되고 MAD는 금속 대체 과정을 원료 선정, 공정 디자인 및 부품 디자인을 포함하는 전체공정으로 취급한다.

4.4. Bumper Beam

일반적인 범퍼는 폴리우레탄 또는 폴리프로필렌의 soft fascia 및 충격흡수 foam, 그리고 강철로 만들어진 bumper beam으로 구성되어 있다. Bumper beam의 배열 때문에 bumper beam의 소재는 높은 인장강도, 압축강도, 굴곡탄성률 및 충격강도를 가져야 한다. 강철을 고분자로 대체할 때 주요 장점은 중량의 감소이다. Mazda 자동차에 부착된 bumper beam의 소재는 random glass-fiber reinforced hybrid resin composite이다. Hybrid 수지는 불포화폴리에스테르 폴리올과 polyisocyanate로 이루어져 있다. 이 새로운 폴리우레탄-에스테르 수지는 기존의 불포화폴리에스테르보다 더욱 강한 경화 시스템을 형성한다 [24]. 이와 같은 H-SMC(high-strength sheet molding compound)는 기존의 압축성형기로 가공되며 compounding중에 유리섬유에 함침된 불포화폴리에스테르 폴리올과 polyisocyanate사이에서 우레탄 형성반응이 일어난다. H-SMC는 취급하고 press하기에 적당한 점도를 가진다. H-

Table 3. Mechanical properties of a representative mini-van fender

Property	Guidelines	Bayflex 110-80	Dow Spectrum	du Pont Bixloy
Specific gravity	---	1.18	1.25	1.40
Flexural modulus, GPa	1.72	1.38	1.93	2.61
Elongation, %	20	20	35	15
Tensile strength, MPa	27.6	27.6	31.0	30.3
Heat sag, 1 h at 190°C, mm	---	complete	12.7	12.7
Notched Izod strength, J	0.45	0.22	0.32	0.28
Coefficient of thermal expansion $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$.	11.1	16.7	13.9	14.4

SMC를 가열 압축성형하면 라디칼 공중합에 의하여 경화되어 높은 강도와 toughness를 갖는다.

Table 4와 Table 5는 두 종류의 hybrid 수지를 사용한 H-SMC의 pendulum 충격강도시험의 결과이다. Table 6은 H-SMC 성형품의 물리적 특성을 보여준다. Bumper beam용 소재의 충격에 대한 반응 특성은 소재의 특성 뿐만 아니라 bumper의 종류에도 관계된다. 예를 들면 hybrid 수지 A는 type II bumper beam 속에서는 충격시험을 통과하지 못하였지만 type I 범퍼에서는 통과하였다. 이것은 디자인이 다르면 재료의 특성도 달라지기 때문이다. 이런 점에도 불구하고 hybrid 수지 A와 B는 모두 불포화폴리에스테르 및 비닐에스테르보다 우수하다.

H-SMC 수지중에서도 충격시 crack initiation energy(E_c)가 높은 hybrid 수지만이 bumper beam에 적합하다. Table 7은 몇 가지 경화시스템의 crack initiation energy를 비교한 결과이다.

Hybrid 수지 B는 A보다 두 배의 높은 crack initiation energy를 가진다. 수지 B가 A보다 굴곡 강도 및 탄성률이 낮아도 bumper beam에는 더욱 적합하다. 고분자 bumper beam을 지정할 때 crack initiation energy는 고려해야 할 중요한 인자중 하나이다. Bumper beam 구조 또한 crack initiation energy에 영향을 주는 인자이다.

4.5. 엔진 부품

엔진의 금속 부품을 고분자 복합재료로 대체하는 주요인은 비용의 절감이다. 복잡한 형태의 여러 가지 엔진 부품을 통합 내지 단순화하여 집적화된 복합재료 부품으로 성형하면 가공 및 조립 작업을 줄여 비용을 절감할 수 있다. Transmission torque converter, 브레이크 피스톤, commutator, pulley 등의 엔진 부품은 높은 온도 및 하중에서 강도, 치수안정성, 내화학적, 피로에 대한

Table 4. Pendulum impact response of type-I bumper beam

Property	Hybrid resin A	Hybrid resin B	Unsaturated polyester	Vinyl ester
Pendulum weight, kg	1066	1306	1066	1066
Caused load, kg	3336	4273	---	---
Dynamic deflection, mm	11.5	15.2	---	12.0
Appearance	pass	pass	cracked at first stroke	hair crack

Table 5. Pendulum impact response of type-II bumper beam

Impact velocity, mph	Hybrid resin A		Hybrid resin B		Unsaturated polyester		Vinyl ester	
	Load	Deflection	Load	Deflection	Load	Deflection	Load	Deflection
3.1	4.78	23	3.63	22	4.10	24	4.65	29
4.0	6.28	30	5.12	30	4.05(fail)	72(fail)	5.05	31
5.1	5.61(fail)	46(fail)	6.61	37	---	---	6.88	37
5.3	---	---	6.88	38	---	---	6.61(fail)	39(fail)
6.0	---	---	6.93(pass)	56(pass)	---	---	---	---

Table 6. Properties of H-SMC moldings

Property	Hybrid resin A	Hybrid resin B	Unsaturated polyester	Vinyl ester
Flexual strength, MPa	522	483	432	440
Flexual modulus, GPa	19.6	18.2	17.5	17.7
Tensile strength, MPa	309	288	256	279
Tensile modulus, GPa	20.1	20.5	18.2	18.4
Tensile elongation, %	2.0	2.2	1.8	2.1
Notched Izod strength (edgewise), J/m	1667	1550	1295	1069
Possion's ratio	0.32	0.43	0.37	0.35

Table 7. Impact response of cured resins

Property	Hybrid resin A	Hybrid resin B	Unsaturated polyester	Vinyl ester
Maximum stress, MPa	186	284	127	206
Impact modulus, GPa	2.91	3.03	3.07	2.97
Initiation energy, J	0.44	2.08	0.25	0.52
Propagation energy, J	0.03	0.10	0.02	0.04
Deflection at F_{max} , mm	1.1	2.7	0.8	1.2

Table 8. Static strength values for phenolic molding compounds

Property	RX-630	RX-660	RX-865	XB-22
Tensile strength, MPa	82.7	55.2	68.9	75.8
Flexural strength, MPa	193	137.9	186	151.7
Compressive strength, MPa	275.8	227.5	241.3	234.4
Shear strength, MPa	89.6	68.9	68.9	68.9
Tensile modulus, GPa	13.8	11.7	17.2	7.6
Tensile fracture strain %	0.6	0.5	0.4	1.0
Coefficient of thermal expansion $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	4.4	5.6	3.9	3.3

저항성 등을 갖는 소재를 요구한다. 섬유강화 페놀수지는 이와 같은 부분에서 실제 상용화되고 있다. 섬유강화 페놀수지의 일반적인 조성은 1/3 정도의 수지 및 2/3 정도의 섬유, 충전제, 기타 첨가제이다. 제품의 물성은 어떤 특정한 요구조건에 맞게 충전제 및 보강제를 변화시켜 조절이 가능한데 가공 조건에도 크게 좌우된다. 부품 디자인 및 gate의 위치, 성형 조건 등은 섬유의 배열에 영향을 주고 섬유의 배열은 stiffness, 강도 및 열팽창에 영향을 준다. 성형 및 후경화 조건에 의하여 가교도가 달라지고 가교도에 따라 제품의 최종 치수, creep resistance, stiffness 및 강도가 결정된다.

Table 8은 사출성형된 네가지 종류의 섬유강화 페놀수지의 상온에서의 전형적인 강도 값을 보여준다. 섬유강화 페놀의 특성은 섬유의 배열과 밀접한 관계가 있다. 금형의 표면부근에서는 shear stress에 의해 수지의 흐름 방향으로 섬유가 배열되고 내부에서는 수지의 흐름에 직각 방향으로 섬유가 배열되므로 제품의 표면과 내부의 물성이 다르게 된다. 엔진 및 transmission 부품은 충격 및 피로 하중을 포함하는 여러 가지 동적 응력에 견딜 수 있도록 설계되어야 한다. 고도로 가교화된 구조를 갖는 열경화성수지는 우수한 stiffness와 creep resistance를 가지지만 반면 제품을 brittle하게 만든다. 페놀수지의 전

형적인 notched Izod impact strength는 26.7에서 80 J/m이고 unnotched Izod impact는 80~133.4 J/m이다.

5. 재활용

전체 자동차 무게에 비하면 플라스틱 부품의 무게는 아직 작지만 그 수는 매우 많다. 현재 자동차에는 40종류에 7000 grade의 고분자 소재가 사용되고 있다[25]. 고분자는 일반적으로 서로 잘 섞이지 않으므로 각각 그 종류에 맞게 재활용을 하여야 한다.

SMC 및 BMC의 경우 제품을 분쇄하여 SMC/BMC compounding 또는 열가소성 수지의 충전제로 사용하는 방법이 시도되었고[26-28], SMC 분쇄물이 SMC의 물성에 미치는 영향에 대하여도 조사되었다[26,27]. 이 연구에서는 9.5 mm 체를 통과한 거친 입자와 4.8 mm 체를 통과한 고운 입자의 두 가지 종류의 SMC 분쇄물이 사용되었는데 그 결과는 Table 9와 같다. 거친 입자를 섞은 경우가 고운 입자를 섞은 경우 보다 인장 강도 및 모듈러스가 저하가 많이 발생하였다. 두 경우 다 충격강도의 감소는 많이 발생하였다. 재생 SMC를 PE 및 PP에 섞었을 때 SMC 분말은 충전제로는 작용하지만 보강재로는 작용하지 않았다[26,27]

6. 자동차용 섬유강화 복합재료의 전망

섬유강화 복합재료는 총 제조 비용 및 life-cycle 비용이 감소될 것으로 가정할 때 자동차 산업에서 더욱 널리 받아들여지리라 전망된다. 제조 비용의 감소에는 향상된 품질 및 신뢰성을 갖는 자동차 부품의 대량생산을 위한 성형 기술의 개발이 필요하다. 신뢰성 향상 및 원가 절감이라는 관점에서 볼 때 현재의 섬유강화 복합재료의 제조 기술은 다음과 같은 장점을 갖고 있다.

- 제조 공정 모델링, 모니터 및 제어
 - 품질관리
 - 혁신 가공 기술
 - 열경화성 및 열가소성 수지의 경제적인 재활용
- 섬유강화 복합재료의 품질을 향상시키고 보장하기 위해서는 공정 모니터 센서와 공정 모델의 개발이 필요하다. 실제 상황에서 재료의 화학적 특성, 보관, 복합재료 제조 변수가 잘 조화되도록 공정 조건을 조절하는 능력은 고가의 제품을 제조할 때는 필수적이다. 복합재료는 수리하기가 어려우므로 제조시 불량률 감소시켜 불합격 제품을 줄이는 것이 비용 절감에 효율적이다.

적절한 가공 기술을 선택하거나 개발하는 것도 총 제조비용의 감소에 영향을 미치는 중요한 사항이다. 복합재료 제조공정의 비용 효율은 주요 장비 투자 비용, cycle time 그리고 제품의 신뢰성 및 일관성에 의하여 지배된다. 고도로 자동화된 사출성형은 단섬유강화 복합재료에만 적용될 수 있다. 장섬유강화 열가소성수지는 pultrusion과 pelletizing 성형법을 결합시켜 가공하여야 한다. 열경화성수지를 사출성형할 경우 섬유배열을 조절하기가 힘들고 섬유의 함량이 높으면 성형하기가 힘들다. SMC는 다양한 응용범위를 가지지만 압축성형시 높은 압력이 요구되므로 장비의 가격이 증가하고 제품의 크기가 한정된다. SMC는 또한 최적 기계적 강도 및 표면 상태를 얻기 위하여 수지의 유동성이 크게 요구되므로 섬유의 배열 및 함량을 조절하기 어렵다.

RTM과 SRIM의 경우 높은 함량의 섬유배열을 정확하게 조절할 수 있다. LCM 공법은 크고 복

잡한 제품을 빠른 사이클로 생산할 수 있어서 자동차용 부품을 생산하기에는 이상적인 성형법이다. 그러나 cycle time, 섬유 젖음, 기계적 성질 및 표면 상태를 최적화하기 위하여는 preform 제작 기술의 개선이 필요하다. 특히 탄소섬유 및 탄소섬유/유리섬유 복합 시스템에서의 preform 기술 개발에 더 많은 노력이 필요하다. 높은 반응성을 갖는 시스템의 SRIM에서는 신속한 충전, preform의 완전한 침투, 우수한 젖음성, 기공의 감소 및 보강 섬유 유동의 최소화, 균일한 수지 분산 등에 관한 연구가 필요하다.

참고문헌

1. "Materials for Lightweight Vehicles", Office of Transportation Materials, U. S. Department of Energy, Washington, D.C., 1992.
2. H. Baker, *Adv. Mater. Proc.*, 39(1991).
3. M. O'Malley, *J. Metals*, 17(1990).
4. S. A. Wood, *Modern Plast.*, 46(1991).
5. L. Dodyk, *Adv. Compos.*, 21(1991).
6. D. Stover, *Adv. Compos.*, 29(1990).
7. D. E. Baxter, Jr., *Adv. Mater. Proc.*, 26(1991).
8. T. P. Schroeter and R. K. Leavitt, "1990 Corvette Rear Underbody-The Case for Preform", pp.275-281.
9. "Modern Plastics Encyclopedia" (R. Juran, Ed.), pp.19-154, McGraw-Hill Inc., New York, 1991.
10. R. L. Frutiger, S. Baskar, K. H. Lo, and R. Fanis, *Adv. Compos.*, 3343(1991).
11. D. A. Kleymeer and J. R. Stimpson, "Production of an Automotive Bumper Using LCM", pp.283-290.
12. A. B. Strong, "Fundamentals of Composites Manufacturing", SME, Dearborn, MI, 1989.
13. D. Weyrauch and W. Michaeli, "A New Preforming Technology for RTM and SRIM," AN-TEC SPE, pp.761-766, 1992.
14. R. W. Meyer, "Handbook of Polyester Molding Compounds and Molding Technology", Chapman and Hall, New York, 1987.
15. P. Beardmore, "Engineering Materials" (J. Weeton Ed.), pp.24-31, ASM International, Materials Park, OH, 1987.
16. R. Bums, "Polyester Molding Compounds", pp. 181-228, Marcel Dekker, Inc., New York, 1982.
17. P. K. Mallick, "Composite Materials Tech-

- nology" (P. K. Mallick and S. Newman Ed.), pp.25-65, Hanser Publishing, Munich, 1990.
18. P. Beardmore, J. J. Harwood, and E. J. Horton, "Proc. Intl. Conf. Compos. Materials", pp.47-60, Elsevier, Paris, 1980.
 19. H. T. Kulltami and P. Beardmore, "Composites", pp.225-235, Vol. 12, 1980.
 20. V. Wigotsky, *Plast. Eng.*, 34(1993).
 21. D. Vesey and S. Abouzadbr, "Automotive Exterior Body Panels", pp.1-6, Society of Automotive Engineers, Detroit, 1988.
 22. D. J. Primeaux, II *et al.* "Automotive Exterior Body Panels", pp.1-14, Society of Automotive Engineers, Detroit, 1988.
 23. J. Arimond and B. B. Fitts, "International Congr. Expos.", pp.79-83, Society of Automotive Engineers, Detroit, Feb 29-March 4, 1988.
 24. J. W. Berg *et al.*, H-SMC Bumper Beam Endured 5 mph Impact, *Plastics in Automobiles: Bumper Systems. Interior Trim, Instrument Panels, and Exterior Panels.* pp.47-63, Society of Automotive Engineers, Detroit, 1989.
 25. S. L. D. Day, *ANTEC*, SPE, pp.1542-1544, (1992).
 26. W. D. Graham and R. B. Jutte, "SPI Composites Institute: Press Molders Conf.", 1990.
 27. R. B. Jutte and W. D. Graham, "SPI Composites Institute: 46th Ann. Conf.", 1991.
 28. K. Butler, "SPI Composites Institute: 46th Ann. Conf.", 1991.