

# 복합재료 성형기술



전 의 진

한국기계연구소 복합재료실

●1946년생  
●복합재료 관련 기술을 전공하고 있으며 특히 복합재료 Auto Clave, Filament Winding 및 RTM 등의 성형기술과 복합재료 특성규명에 관심을 가지고 있다.

## 1. 머리말

섬유강화 플라스틱을 시초로 복합재료가 상업적으로 생산, 판매되기 시작하지 어언 30여년이 되었다. 뛰어난 기계적·화학적 특성을 바탕으로 오늘날 복합재료는 신소재의 한 분야로 굳게 자리잡고 있다. 설계, 성형, 분석기술의 발전과 아울러 유리섬유 복합재료 이후에 특성이 뛰어난 복합재료 소재들이 개발되고 있어 복합재료의 응용범위를 더욱더 넓히고 있다. Boron, carbon, aramid섬유의 개발은 첨단 복합재료의 개발을 가능케 했으며 군용, 우주기기의 개발로 얻어진 결과들은 민간 항공기 또는 스포츠, 레저 분야에 많이 이용되고 있다. 민간 항공기의 많은 부분에 첨단 복합재료로 된 부품들이 사용되고 있으며 복합재료로 된 골프채, 낚시대, 테니스채 그리고 스키 등을 우리 주변에서 손쉽게 찾아볼 수 있다.

이 글에서는 고분자 기지 복합재료를 중심으로 그 성형법 및 응용에 대하여 논하고 기타 특수용도 복합재료에 대해서 약술하고자 한다.

## 2. 복합재료 성형

복합재료는 보강섬유와 기지재료로 구성되는데, 현재 사용되고 있는 보강섬유는 탄소섬유, 유리섬유를 비롯하여, 보론, aramid, 알루미늄

나 및 SiC 등이 있다. 기지재료로는 에폭시, 페놀, 폴리에스터, 비닐에스터 등의 열경화성 수지(thermoset resin) 및 PEEK, PES, PPS, PC 등의 열가소성수지(thermoplastic resin) 등의 고분자재료가 있고, 알루미늄, Mg, Ti 등의 금속재료 및 세라믹재료가 있다.

복합재료는 그 성형 방법에 있어 일반 재료와는 매우 다르다. 복합재료 성형방법은 주로 그 기지재료에 따라 달라지는데, 기지재료가 열경화성수지일 경우와 열가소성수지일 경우 또는 금속 및 세라믹일 경우, 각각 최적의 기계적, 물리적 성질과 경제성을 얻기 위해 전혀 다른 공정이 사용된다. 그리고 복합재료는 일단 성형이 되면 드릴링 및 커팅 정도의 간단한 후가공만으로 작업을 마치므로 제품의 형상에 따라 각기 다른 성형방법을 채택해야 한다.

### 2.1 오픈 몰드를 이용한 성형법

복합재료 성형법 중 가장 초보적이면서 광범위하게 사용되고 있는 성형법이 오픈 몰드(open mold) 성형법인데 핸드 레이 업(hand lay-up)과 스프레이 업(spray-up) 성형법이 이에 속한다. 핸드 레이 업은 원하는 제품의 형상에 따라 몰드를 제작하여 여기에 수지를 바르면서 보강재를 적층하여 굳힌 뒤 몰드에서 탈형하여 완성하는데, 저장용 탱크, 보트, 목욕통 등에 광범위하게 응용되고 있다.

핸드 레이 업에 사용되고 보강재는 glass

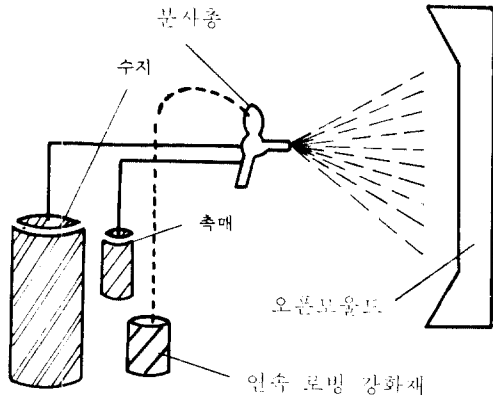


그림 1 스프레이 업 성형법

fiber chopped strand mat 및 woven roving이 있으며 기지재료는 폴리에스터 수지, 비닐에스터, 에폭시 등이 널리 사용된다. 핸드 레이 업은 작업자의 기술에 의해 품질이 좌우되며 유해가스가 발생하는 등의 단점이 있으나 아래와 같은 장점으로 널리 사용되고 있다.

- 장비의 가격이 저렴하다.
- 대형 구조물 성형이 가능하다.
- 설계 변경이 용이하다.
- 현장생산이 가능하다.
- 부분보강 및 부속품 삽입이 용이하다.

스프레이 업은 그림 1에서 보는 바와 같이 수지 및 보강섬유를 몰드에 분사 고착시켜 원하는 형태로 성형하는 방법으로서 사용되는 수지 및 보강섬유는 핸드 레이 업과 유사하다. 적층하는 과정이 어느 정도 자동화되어 있어 핸드 레이 업 보다 작업성이 좋으며 기타의 장단점은 핸드 레이 업과 유사하다.

## 2.2 시트 몰딩 컴파운드(SMC ; Sheet Molding Compound)

대량생산에 많이 사용되는 성형법으로 compression molding을 들 수 있는데 이는 복합재료 원재료를 가공하여 중간 형태의 재료인 프리프레그(prepreg)를 만든 뒤 이것을 matched die에 넣고 압력과 열을 가하여 성형하는 방법

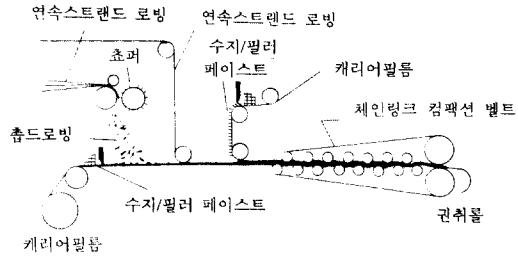


그림 2 SMC

으로 SMC(sheet molding compound) 또는 BMC(bulk moking compound)를 이용한 성형법이 있다. SMC는 그림 2에서 보는 바와 같이 보강섬유에 paste를 함침시켜 유연성이 있는 sheet 형태로 만든 것으로서 이를 몰드에 놓고 프레스로 약 4~18MPa로 가압하면서 몰드 120~180℃로 가열하여 제품을 생산한다.

SMC 성형에는 고압이 사용되므로 몰드 및 프레스의 가격이 비싸지만 성형 시간이 1~4분으로 비교적 짧은 편이므로 대량생산에 적합한 공법이다. SMC는 보강섬유 배열 상태에 따라 그림 3과 같이 분류한다.

BMC는 SMC와 유사하나 그 형태가 sheet 대신에 bulk 형태로 되어 있어 복잡한 3차원 형상의 성형에 적합하나 연속보강섬유의 사용이 불가하여 강도가 떨어진다는 단점이 있다.

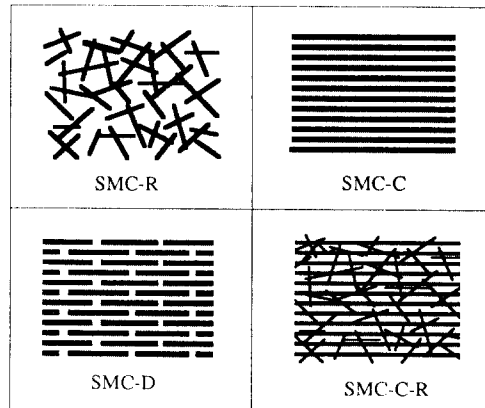


그림 3 SMC의 종류

### 2.3 레진 트란스퍼 몰딩(RTM ; Resin Transfer Molding)

최근 복합재료 대형 구조물 성형 및 생산성, 그리고 급속한 신제품개발 및 모델변경 문제로 새로운 제조방법의 요구가 절실해지고 있다. 고속대량 생산의 방법으로 SMC, BMC 등이 많이 응용되어 왔으나 장비 및 몰드의 가격이 비싸서 생산량이 많지 않거나 또는 설비가 자주 변경되는 경우에는 경제성 문제로 적용이 어려웠다. 이외에, 빠른 경화반응으로 인한 높은 생산성을 갖는 고분자기지 복합재료 제조방법으로 RIM(reaction injection molding), RRIM(reinforced reaction injection molding), RTM(Resin transfer molding) 등을 들 수 있다. RIM이나 RRIM 등은 단섬유 복합재료 성형에 주로 사용되는 반면, 단섬유뿐만 아니라 장섬유 보강 복합재료 성형에도 가능한 RTM은 원하는 형상의 몰드 안에 보강섬유 preform을 놓고 수지를 유입구를 통해 몰드 안에 주입한 후 몰드 안을 진공으로 유지하면서 열과 압력을 가해 성형하는 것이다. RTM 성형법은 다른 공정에 비해 상대적으로 낮은 가압력과 진공에 의해 성형되므로 양질의 제품 생산을 가능하게 할 수 있으며, 높은 보강섬유 함유율(60%wt 이상)과 빠른 제조시간(12분 이하)의 장점이 있다. 그림 4에 RTM 성형의 개략도가 나타나 있다. 현재 세계 선진 각국에서는 3차원 대형 구조물의 RTM 성형을 위해

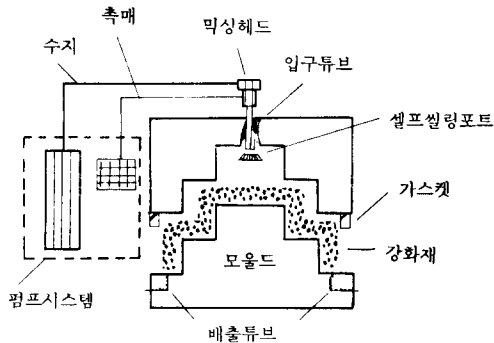


그림 4 RTM 성형의 개략도

본 기술의 핵심 기술인 수지유동해석, 수지함침 및 몰드 내부의 압력분포 제어 등의 기술에 관심을 가지고 연구 개발 중에 있다.

### 2.4 펄트루전(Pultrusion)

Pultrusion 성형은 그림 5과 같이 연속섬유에 수지를 함침시켜 단면이 일정한 형상을 지닌 가열된 금형을 통해 경화시키면서 연속적으로 제품을 성형하는 방법으로 긴 튜브, rod 및 채널(channel) 등과 같이 길이 방향으로 똑같은 단면을 가진 제품을 제조하는 데 사용된다. Pultrusion 성형은 그림 5에서 보여지는 바와 같이 보강섬유 스펀(spool), 수지함침통(resin bath), 가열 금형, 풀러(puller) 및 절단기 등으로 구성된다. 보강섬유 스펀로부터 공급되는 보강섬유가 수지함침통을 거치면서 보강섬유에 수지가 함침된다. 수지가 함침된 보강섬유는 가열된 금형을 통과하면서 복합재료는 경화가 되며, 금형을 빠져 나온 복합재료 제품은 풀러에 의해 연속적으로 당겨진다. 성형된 복합재료 제품은 절단기에 의해 원하는 길이만큼 절단되어 최종 완성된다.

Pultrusion의 성형에 있어서 가장 핵심적인 기술로는 수지선정기술, 섬유분포 제어기술 금형 온도제어기술 및 당기는 속도 제어기술 등이다.<sup>(1)</sup> 수지 선정은 제품의 기계적 특성, 성형온도 및 내식성 등과 관계 있을 뿐만 아니라 수지함침성 등과 매우 밀접하다. 성형된 제품의 섬유분포가 균일하여야 강도를 높일 수 있으므로 섬유분포 제어기술은 무엇보다 중요하며, 이를 위해 fiber guide system을 설계하여

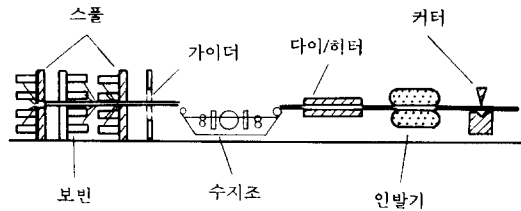


그림 5 펄트루전 성형

야 한다. Pultrusion 성형은 타 성형법에 비해 생산성이 높으며 당기는 속도조절이 중요하다. 금형의 온도제어는 생산성과 기계적 특성에 크게 영향을 미치므로 매우 중요한 기술이라 할 수 있다. 금형의 온도에 따라 금형 내에서의 경화도 변화가 달라지며, 최대 경화도에 도달하기까지의 시간이 변하게 된다. 최대경화도에 이르는 시간이 빠르면 금형의 입구쪽에서 경화가 모두 이루어지므로 당기는 힘이 상대적으로 줄고, 최대 경화도까지 도달하는 시간이 늦을수록 금형 출구쪽에서 경화가 완성되므로 당기는 힘은 상대적으로 증가된다. 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 무엇보다 중요하다고 할 수 있다.

최근 항공기 부품 등 고품위 구조물의 pultrusion 성형 적용이 활발해짐에 따라 튜브나 rod 등과 같이 단순한 제품의 형상에서 채널, I 형보, Box 형보 등의 복잡한 형상으로 다변화됨에 따라 금형의 설계 및 다단계 열제어기술 등의 개발에 열을 올리고 있으며, 특히 길이 방향의 섬유 배열밖에 성형할 수 없는 기존의 pultrusion 성형의 단점을 보완, 섬유 각도를 다양하게 성형할 수 있는 기술 개발에 관심을 모으고 있다. 그리고 점도가 상당히 높기 때문에 수지 함침이 용이하지 않는 열가소성 수지 복합재료의 pultrusion 성형을 위해 테이퍼(taper)진 금형을 이용하여 강압적인 압력을 가해 수지함침을 시키면서 성형하는 열가소성 수지 복합재료의 pultrusion 성형 기술 개발이 수행되고 있다.

### 2.5 필라멘트 와인딩 성형

필라멘트 와인딩(filament winding) 성형은 파이프, 압력용기, 로켓 모터 케이스 등의 축대칭 구조물을 성형하는 기술로서 일반 핸드레이업 법이나 tape wrapping 성형법에 비해 생산성은 뒤떨어지기는 하나 와인딩 각도를 마



그림 6 필라멘트 와인딩 성형

음대로 조절할 수 있는 설계 유연성 및 연속섬유의 성형으로 인한 고물성치를 기대할 수 있어 우주, 항공, 방산제품에 널리 응용된다. 그림 6은 필라멘트 와인딩 성형 장치로서 보강섬유스풀, 수지함침통, 케리지(carriage)와 스피들(spindle) 및 심축(mandrel) 등으로 구성된다. 보강섬유스풀에서 공급된 보강섬유는 수지함침통에서 수지가 함침되어 심축에 감기게 된다. 와인딩 각도는 성형장치의 케리지와 스피들의 RPM비에 따라 조절 가능하며, 케리지와 스피들의 구동은 DC 서보 모터나 기어에 의해 이루어진다. 와인딩이 끝난 제품은 심축과 함께 경화로에서 경화가 된 다음, 탈형기에서 심축과 복합재료는 이형이 되어 최종제품으로 완성된다.

필라멘트 와인딩 성형에 의해 제작된 제품은 오토클레이브(autoclave) 성형에 의해 성형된 제품에 비해 기공이 2~3배 이상 많고, 섬유체적률이 균일하지 못하므로, 물성치 저하의 요인이 된다. 결함 최소화를 위한 수지함침통 설계 기술과 섬유 체적률 균일화를 위한 섬유인장 제어 기술 및 돔(dome) 형상 설계 기술 등에 대한 연구가 세계의 많은 관련업체들에 의해 현재 수행 중에 있다. 수지함침통 설계에 있어서는 100% 수지함침과 주재, 경화재들의 확실한 혼합이 이루어져야 하며, 수지 내부의 존재하기 쉬운 기포를 제거하기 위해 진공처리가 필요하다. 섬유인장 제어에 의해 성형물의

두께 방향 섬유체적률을 일정하게 하여야만 기계적 특성을 향상시킬 수 있다. 또한 심축의 양끝에서 섬유가 미끄러지지 않도록 하기 위한 최단거리선(geodesic line)을 고려한 양끝단의 돔 형상 설계 및 케리지와 스피들에 의한 dwelling기술이 중요한 기술 중에 하나라 할 수 있다.

또한 필라멘트 와인딩 성형으로 최근 비선형 구조물은 물론 복합재료 I형 보이나 채널 등과 같이 비축대칭 구조물 성형 기술 개발을 위해 중점 연구 추진 중에 있으며, 특히 제품의 표면의 조도(roughness)에 있어서 정밀성을 요구하는 구조물인 경우를 위해 인터널 필라멘트 와인딩(internal filament winding) 성형기술에 대해 연구개발이 진행되고 있다. 그리고 최근 선진국에서 시도하고 있는 열가소성 수지 복합재료 필라멘트 와인딩 성형 기술도 빼놓을 수 없는 핵심 기술의 하나이다. 심축 위에 열가소성수지와 보강섬유가 함께 감길 때 레이저 등의 열원을 국부적으로 가하면서 롤러 등에 의한 압력을 가해서 성형해가는 기술이다. 이때 사용되는 원재료는 섬유형태로 된 수지와 보강섬유가 혼합되어 있는 섬유다발의 형태이거나, 보강섬유와 분말수지가 혼합되고 수지 필름으로 코팅된 형태 등을 사용한다.

### 2.6 오토클레이브 성형

오토클레이브(autoclave) 성형기술은 고품질 복합재료를 제조하는 성형기법 중 가장 많이 사용되고 있는 방법으로 평판이나 곡률을 가지고 있는 판넬의 제작, 하이컴 샌드위치 구조물의 접착, 금속 및 복합재료 항공기 부품 간의 접착(adhesive bonding) 등 복합재료 항공기 부품 제작에 많이 사용되고 있다. 오토클레이브 성형의 원리<sup>(2)</sup>는 그림 7에서와 같이 금형 위에 복합재료 적층판을 놓고 peel ply, bleeder 등을 lay-up하여 진공 bag으로 덮은 다음 sealant로 진공 bag과 금형 사이를 밀폐시킨 상태에서 진공 bag 내부에는 진공을, 외부에는 공압을 걸어주고 일정한 경화사이클로 적층

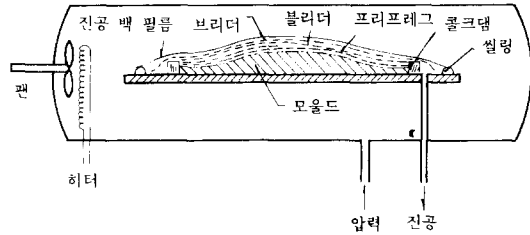


그림 7 오토클레이브 성형

구조물을 경화시키는 방법이다. 일반 hot press에 의한 matched die process보다 온도 및 압력의 분포가 균일하고 진공을 걸어 주었기 때문에 내부의 휘발물질이나 기포를 제거할 수 있는 장점이 있어 기계적 특성이 우수한 고급 복합재료 제품을 제작할 수 있는 특징을 가지고 있어 복합재료 항공기 부품의 제작에 필수적인 high-technology분야라 할 수 있다.

복합재료 항공산업 분야에의 응용을 살펴보면, 높은 하중을 받는 1차 구조물(primary structure)보다는 비교적 하중을 받으면서 형태를 유지시키는 역할을 하는 2차구조물(secondary structure)에 주로 많이 응용되었다. 그러나 80년대부터는 설계 및 성형기술의 발달로 2차구조물에서 더욱 확장되어 항공기 날개나 동체 보강재 등의 복합재료 구조물을 일체(一體) 성형하는 기술이 개발되어 응용단계에 있다.

오토클레이브 성형에 있어서의 핵심 기술은 압착거동 예측 및 두꺼운 복합재료 성형시의 섬유체적률과 경화도 균일화 등을 꼽을 수 있다. 오토클레이브 성형시 복합재료의 기계적 특성에 미치는 가장 큰 요인은 복합재료의 경화정도, 섬유체적률 및 기포 함유율 등을 꼽을 수 있는데 이러한 것들은 성형압력과 성형온도에 기인된다고 할 수 있다. 기계적 특성을 높이기 위해서는 성형압력과 성형온도를 나타내는 경화사이클을 최적화하는 기술이 선행되어야 하는데, 최적 경화사이클을 최적 선정하는 연구가 아직까지 완전히 이루어지지 않고 있다. 복합재료 제품 생산업체나 프리프레그 제

조회사에서는 오랜 경험이나 수 많은 오토클레이브 시험성형을 통해 경화 사이클을 찾아 사용해 왔다. 그러나 최근 Springer<sup>(3)</sup>나 Gutowsky<sup>(4)</sup> 등에 의해 경화 중의 수지유동 및 압착거동을 설명할 수 있는 이론적 모델을 제시하여 주목을 받았으나 실험의 결여로 입증될 수 없었다. 이 경화모델을 입증하기 위해 dielectricity법<sup>(5)</sup>나 acoustic emissio법<sup>(6)</sup> 등으로 실험해 오고 있으나, 여러 가지 실험오차로 정확한 결과를 얻어낼 수 없고, 이에 대한 연구가 계속 진행되고 있다. 한국기계연구소 복합재료실 연구팀은 이러한 이론적 모델의 실험적 입증에 의해 오토클레이브 성형시 복합재료 적층판의 압착거동을 연속적으로 모니터링할 수 있는 실험장치를 개발하였으며, 1989년 미국 특허를 획득한 바 있다. 앞으로 이러한 실험장치 및 기술이 항공관련 업체나 일반 방산 업체에서 직접 적용하여 생산에 도움이 되리라 사료된다. 오토클레이브 성형기술에 있어 또 하나의 과제는 두꺼운 복합재료의 성형인데, 복합재료의 두께나 두꺼울수록 적응된 내부의 수지 반응열로 인한 극심한 온도편차로 복합재료 전체에 걸친 온도 제어가 가장 큰 문제가 된다. 이를 위해 적층판 두께 방향으로 여러 개의 열전대를 심어 여기서 나오는 온도 신호를 컴퓨터에서 받아서 제어하는 smart processing 기술이 연구 중에 있다. 이 기술로는 적당한 수지유동을 유도하여 두께방향의 섬유체 적률도 균일히 할 수 있고, 기포도 최소화할 수 있으며, 경화도를 균일히 할 수 있으므로 항공기 1차 구조물의 복합재료 적용이 가능할 수 있으리라 기대된다.

## 2.7 열가소성 수지 복합재료 성형

열경화성 수지 복합재료가 높은 특성을 요구하는 고급 구조물에 주로 사용되어 온 반면, 열가소성 수지 복합재료는 그 사용 온도 범위가 낮기 때문에 항공기 1차 구조물 등의 고급 구조물에는 사용되지 못했다. 그러나 polysulfone(PS), polyethersulfone(PES) 등의 개발

로 사용 온도는 상승하였으나, 높은 온도에서의 화학 반응 저항성에 대한 문제가 해결되지 못했다. 일반적으로 열가소성 수지 복합재료는 높은 하중에 있어 크립(creep)이 쉽게 일어나는 경향은 있으나, 소성변형에 의한 내부 응력 감소 역할을 하는 이점이 있어 구조물에 사용하기 유리하다.<sup>(7)</sup> 이러한 연구 추세로 최근 영국 ICI사에서 개발한 poly-ether-ether-ketone(PEEK)이 소개되어 지금까지의 열가소성 수지 복합재료의 문제점을 상당 부분 해결하였으며, 고성능 복합재료 구조물에 열가소성 수지 복합재료의 응용 가능성을 확대시켜 놓았다.<sup>(8)</sup> 이에 따라 세계 선진각국에서는 열가소성 수지 개발에 상당한 노력을 기울이고 있으며 이에 대한 복합재료에의 응용도 함께 활발히 진행되고 있다. 열가소성 수지 복합재료는 열경화성 수지 복합재료에 비해 여러 가지 장점이 있으나, 그 중 제조상 이점으로는 다음과 같이 열거할 수 있다.<sup>(8)</sup>

- 재 가공성이 있다
- 금속재료 성형공정을 재현할 수 있다.
- 공정시간이 짧다.
- 저장시간이 무한대다.
- 상온저장이 가능하다.

그러나 열가소성 수지는 열경화성 수지에 비해 점도가 높아 (약 10<sup>4</sup>배 정도) 복합재료 제조시 수지함침성이 좋지 않아 섬유와 수지의 결합력이 약하고, 복합재료 내부에 결함이 존재할 가능성이 많다. 전세계적으로도 열가소성 수지 복합재료 제조공정에 대해 정착되어 있지 않은 상태이며, 성형공정 최적화에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

열가소성 수지 복합재료의 성형은 주로 compression molding법으로 사용되고 있으나, 성형할 구조물이 2차원적인 평판 구조물인 경우는 별 문제가 없으나, 곡면이거나 3차원 구조물인 경우는 성형시 보강섬유들의 미끄러짐 현상으로 섬유체적률이 불균일할 뿐만 아니라, 이로 인한 열변형으로 원하는 형상의 제품을 성형하기가 어렵게 된다. 최근 열가소성 수지

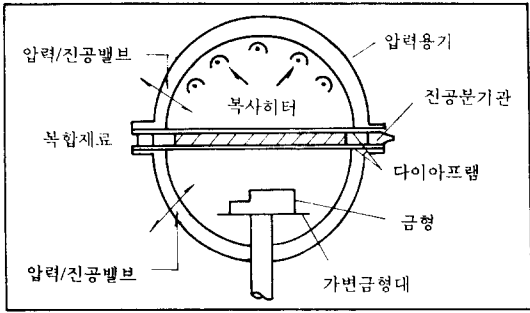


그림 8 Diaphragm Forming

복합재료 성형을 위해서 diaphragm forming 성형법이 개발되어 치수안정성 및 보강섬유들의 균일한 분포를 기대할 수 있게 되었다. diaphragm forming은 그림 8과 같이 열가소성 수지 복합재료 프리프레그적층판 상하에 diaphragm이라는 연신율이 뛰어난 필름을 두어 밀폐한 다음, 진공을 걸고 열을 가하여 수지를 녹인다. 수지가 충분히 녹은 후, 상부에 압력을 서서히 가하여 하부에 있는 금형에 닿도록 하여 금형의 형상대로 압착한다. 압력과 진공이 계속 걸린 상태에서 냉각을 시켜 최종 성형한다.

### 2.8 복합재료 금형

복합재료 금형(金型)은 복합재료 제품 성형시의 열변형 문제 때문에 성형하고자 하는 제품과 같은 재료를 사용하여 제작된 금형으로, 크게 gel coat, 보강섬유, 수지 및 기타 보강구조물 등으로 구성되어 있으며, 복합재료 금형은 금속재료 금형에 비해 다음과 같은 장점을 지니고 있다.

- 치수 안정성이 우수하다.
- 무게가 가볍다.
- 제조 단가가 저렴하다.
- 제작 시간이 짧다.
- 기계 가공 및 수가공이 불필요하는 등 제작공정이 간단하다.
- 수정 및 보수가 용이하다.
- 표면이 복잡할수록 효과가 크다.

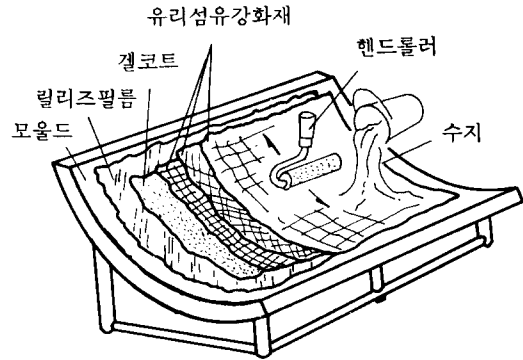


그림 9 핸드레이업법

그러나 금속재료 금형에 비해 표면강도 및 기계적 특성이 낮기 때문에 내구성면에서 불리하며, 사용온도의 한계가 낮은 단점이 있다. 복합재료 금형은 그 사용온도에 따라 상온용금형과 고온용금형으로 나눌 수 있으며, 이 중 상온용 복합재료 금형을 제작하는 방법에는 핸드레이업법과 스프레이업법 등이 있다. 그림 9는 가장 보편적인 방법의 하나인 핸드레이업법으로서, master에 이형처리를 한 다음, release film에 표면을 꾸밈없이 덮고 그 위에 gel coat를 1mm 내외로 바른다. 그 다음 수지가 함침된 보강섬유를 적층하여 상온 경화시킨다. gel coat나 복합재료를 너무 많이 보강할 경우 금형을 제조할 때 변형될 우려가 있으므로, 기계적 특성 및 내구성 등을 고려하여 될 수 있으며 얇게 보강하는 것이 좋다. 보강섬유는 단섬유나 fabric을 사용할 수도 있으며, 연속섬유를 이용한 프리프레그를 사용할 수도 있다. 고온용 복합재료 금형은 상온용 복합재료와 같은 적층순서를 따르되, 사용 수지를 고온용수지로 사용되어야 하며, 적층 후 bagging film으로 전체를 밀봉하여 진공을 걸어 준 다음, 경화로나 오토클레이브 등에서 경화시켜 완성한다.

### 3. 특수용도 복합재료 제조기술

특수용도 복합재료에는 금속복합재료(metal

matrix composite) 세라믹 복합재료(ceramic matrix composite), 탄소/탄소 복합재료(carbon/carbon composite) 등이 있다. 통상 특수용도 복합재료는 고분자 복합재료보다 훨씬 높은 온도 영역(350°C 이상)에서 그 용도에 따라 선택적으로 사용되어질 수 있다. 그러나 그 제조공법들은 이미 개발되어진 제조법들도 많이 있지만, 아직 완전히 확립되어 있지 않아서 생산성의 증대와 보다 건전한 특수용도 복합재료들의 제조를 위하여 많은 연구를 진행하고 있다. 본 절에서는 특수용도 복합재료의 제조 기술에 관하여 간단하게 소개하고자 한다.

### 3.1 금속복합재료

신뢰성 있는 금속복합재료의 제조방법은 적절한 보강섬유개발과 더불어 가장 현실적으로 중요한 요소 중의 하나인데 액상상태의 기지재료로 제조한 방법과 고상상태로 제조하는 방법 등이 있다. 액상제조 방법에는 squeeze casting, compocasting, vacuum infiltration, centrifugal casting이 있으며, 고상제조방법에도 분말야금법, 확산접합법(diffusion bonding), plasma spray 법 등이 있다.

액상제조 방법 중 가장 많이 사용되는 방법은 squeeze casting 법으로 주로 Al기지 복합재료 제조에 사용된다. 고상제조방법으로는 분말야금법인데 이 방법은 주로 Ti기지 및 금속간화합물 기지복합재료 제조에 PVD(plasma vapour deposition), 확산 접합법과 병행하여 사용되고 있다.<sup>(9)</sup> 간략하게 그 제조방법을 소개하면 다음과 같다.

Squeeze casting법은 주조와 단조를 동시에 병행할 수 있는 공정으로 고액공존상의 기지재료를 가압하여 보강섬유와의 젖음성(wettability)을 향상시켜 충분히 함침이 되도록하여 제조하는 액상제조 공법이다. Squeeze casting으로 제조한 금속복합재료 제품은 자동차 내연기관 부품, 로켓부품, 항공기 엔진 compressor 등에 응용이 가능하다.

분말야금법은 입자강화 및 whisker강화 금

속복합재료 제조시에 기지재료 분말과 보강재를 잘 혼합하여 압착을 하고 첨가제를 제거하여 소결하여 제조하는 방법이다. 분말야금법에 의해 금속복합재료를 제조시에 near-net-shape로 제조할 수 있는 장점이 있으나 제조단가가 높은 단점이 있으며, 최근에는 cold pressing으로 분말을 혼합한 후 CHIP(hot isostatic pressing) 성형법으로 성형을 완료하는 방법도 개발되었다.<sup>(10)</sup>

### 3.2 세라믹 복합재료

세라믹 복합재료를 제조하기 위한 방법을 통상 네 가지로 분류할 수 있다.<sup>(11)</sup>

첫째는 slurry infiltration 기술로 기지 slurry에 단섬유 또는 휘스커(whisker)를 혼합하여 소결, hot pressing, hot isostatic pressing 등을 거쳐 기지 재료가 토우속으로 스며들어 함침이 일어나는 방법이다. 이 제조방법은 일반적으로 점성유동을 나타내는 기지물질을 이용하여 복합재료를 만들 때 적합하지만 1차원 또는 2차원의 성형체에만 가능한 단점이 있다.

둘째는 sol-gel법이나 polymer precursor 공정같은 chemical synthesis routes이다. 이 방법은 비교적 저온에서 silicon carbide, silicon oxynitrides 등과 같은 비산화물계 세라믹기지로 하는 복합재료로 만들 수 있고 near-net-shape의 세라믹 복합재료를 제조할 수 있는 장점이 있다. 그러나 이 제조방법은 기지재료가 polymer로부터 세라믹으로 전환될 때 부피수축이 크게 발생하는 단점이 있다.

셋째로는 melt infiltration법이다. 이 제조방법은 squeeze casting과 유사한 방법으로 점성이 낮은 기지용액에 압력을 가함으로써 복합재료를 제조하는 방법이다. preform을 함침시키는 이 방법은 복잡한 형상의 복합재료를 제조하는데 유용한 방법이지만 효과적인 함침을 위해서는 온도를 올려 기지의 점성을 낮추어야 하므로 용융기지와 섬유 간의 화학반응으로 인하여 섬유의 손상을 가져올 수 있는 단점 등이



있다.

넷째는 CVI법(chemical vapor infiltration)으로 이미 잘 알려진 CVD 기술을 이용하여 등온에서 통상의 CVD 과정의 연장으로 preform에 반응 가스를 침투시키는 방법이다. CVI기술을 이용한 또다른 제조방법은 두꺼운 복합재료의 제조에 효과적인 미국의 Oak Ridge 국립연구소에서 개발된 Forced-CVI 방법이다. 이 방법은 압력과 온도구배를 주어 반응가스가 침투되는 시간을 줄여 효과적으로 복합재료를 제조하는 공정이다. 이 공정의 특성은 비교적 단순한 형태의 복합재료를 만드는데 이용된다는 것이다. CVI제조방법의 제한성은 아주 조밀한 복합재료를 제조할 수 없고 높은 CVI온도에서 장기간 노출되어야 하므로 섬유 손상을 가져올 수 있다는 것이다.

### 3.3 탄소/탄소 복합재료

내열성과 뛰어난 고온강도로 인해 우주, 항공 및 방위산업계에 많이 응용되고 있는 탄소/탄소 복합재료의 제조방법은 preform을 제조한 후 탄소 기지를 채우는 방법에 따라 액상함침법(liquid impregnation method)<sup>(12)</sup>과 화학증착법(chemical vapor deposition)<sup>(13)</sup> 및 두 방법의 장점을 이용한 mixed densification 방법 등이 있다.<sup>(4)</sup>

액상함침법은 탄소섬유 preform에 resin이나 pitch 등을 함침시켜 탄화과정(carbonization)을 통해 pyrolysis 탄소를 생성시키는 방법으로 두꺼운 시제품 제작에 적합하지만 고밀도화가 어려운 단점이 있다. 화학증착법은 탄화수소기체를 열분해시켜 열분해 탄소를 지지재료로써 증착시키는 방법으로 고밀도화에는 좋은 방법이나 두꺼운 시제품 제작시 두께 방향으로 균일한 밀도를 얻기 어려운 단점이 있다.

최근에는 Mixed Densification방법에 관한 많은 연구가 수행되고 있으며, 증착조건에 따른 증착층의 미세구조, 기계적 특성 및 물리적 열적 성질에 관한 보다 많은 체계적인 연구가 필요하다.

## 4. 맺음말

앞으로도 우주 항공 산업의 요구에 따라 새로운 첨단 복합재료가 우선 개발되고 그것이 일반 산업에 응용되는 형태로의 복합재료 발전이 계속될 것으로 사료된다. 새로운 섬유, 새로운 기기재료의 개발, 그리고 그 것들을 조합한 새로운 복합재료 성형방법 개발로 복합재료의 응용범위는 계속 확대될 것이다. 현재 복합재료 시장은 가장 큰 시장인 미국을 볼 때 고분자 복합재료가 연 10%씩 증가하고 있으며, 그 규모는 2000년대에 연차재료는 45억불, 제품으로는 90억불 정도로 될 것으로 예측된다. 국내 시장은 이에 비해 그 규모는 적으나, 매년신장률은 괄목할 정도이며 기술적 측면에서도 레저산업 관련 저급기술에서 우주항공용 복합재료 성형기술 같은 고급성형기술로 전환되어 가고 있다.

복합재료 기술은 기본재료기술, 구조설계기술, 성형기술 및 시험평가기술로 나눌 수 있는데 이러한 기술들을 일체성 있게 조화시켜 연구개발을 수행하여야 하며 당면한 연구개발 목표는 큰 변형에 견디고, 내구성이 높으며, 생산비가 저렴한 복합재료를 개발하는 것이라고 볼 수 있다. 복합재료 성형기술을 10년 주기로 살펴보면, 1970년대에는 금속재료의 복합재료 대체기술에 관심이 있었는데, 이 시기에 주로 사용되었던 성형기술로는 hand lay-up, hot press성형법 등이 있다. 1980년대는 복합재료의 고품질, 고정도를 위한 성형기술을 개발, 실용화한 시기였는데, 이 때는 autoclave, filament winding 성형법 등이 관심의 초점이 되어 항공산업 및 방위산업 분야에 많이 응용되어 왔다. 그러나 복합재료의 보다 많은 응용을 위해서는 낮은 생산성이 큰 문제점이 되어, 1990년대부터는 고생산성을 위한 성형기술의 개발에 주력하고 있는 실정이며, 따라서 RTM, Pultrusion, SMC 등의 성형기술을 보완 응용하여 응용범위를 보다 폭넓게 확대하고

자 하는 움직임이 있다. 국내 복합재료 성형기술의 발전을 위해서는 연구소, 업체, 대학 및 정부가 협력체제를 구축하고, 기술선진국과의 국제 공동연구를 활성화시키는 등 장기적 안목에서의 체계적인 연구수행계획을 확고히 해야 할 것이다.

참 고 문 헌

- (1) Engineered Materials Handbook, 1987, "Composites," ASM International.
- (2) 과학기술처 국가특정연구보고서, 1986. "섬유강화복합재료의 개발의 응용(Ⅲ)," UCN 638-697, C, p. 1.
- (3) Loos, A.C. and Springer, G.S., 1983, "Curing of Epoxy Matrix Composites," J. of Composite Materials, Vol. 17, pp. 135~169.
- (4) Gutowsky, T.G., 1985, "A Resin Flow Model/Fiber Deformation Model for Composites," SAMPE Quarterly, Vol. 16 pp. 58~60.
- (5) Ciriscioli P.R. and Springer G.S., 1989, "Dielectric Cure Monitoring-A Critical Review," SAMPE, Vol. 34, pp. 312~322.
- (6) Saliba, S.S., Saliba, T.E. and Lanzafame, J.F., 1989, "Acoustic Monitoring of Composite Materials during the Cure Cycle," SAMPE, Vol. 34, pp. 397~406.
- (7) Wendy Soll, Gutowski, T.G., 1988, "Forming Thermoplastic Composite Parts," SAMPE Journal, PP.15~19.
- (8) Krauss, H., Kempe, G., "Processing and Mechanical Properties of Fiber Reinforced Polyetheretherketone(PEEK)," DFVLR Stuttgart, IB-435-18/83.
- (9) 김 진, 이상관, 전의진, 1990, "금속복합재료," 대한금속학회회보 Vol.3, No.2, p. 130.
- (10) Abkowitz, S., Weihrauch, P., Advanced Materials and Processes 7.
- (11) James A Cornie, Joseph M., 1986, "Processing of Metal and Ceramic Matrix Composites, Ceramic Bulletin," Vol. 65, No. 2, p. 293.
- (12) Fitzer E., 1973, Carbon 10, p. 383.
- (13) Kotlensky W.V., 1973, "In Chem. Phys. of Carbon," Vol. 9, Marce Dekker Inc.
- (14) Don, J., Tlomak, P., He, J., and Shi, Y., "Material Technology Center 6th Annual Conference." 