

고성능 섬유강화 복합재료의 제조 기법과 문제점



이 우 일

서울대학교 기계공학과 교수

● 1954년 7월 3일 생
● 생산공정에서의 열공
학 문제에 관심을 가지
고 있으며, 특히 복합재
료 및 고분자 재료의 성
형공정연구에 많은 관심
을 가지고 있다.

1. 머리말

복합재료는 두 가지 이상의 재료를 섞어 만든 어떤 원하는 성질을 가진 재료를 일컬으며, 주로 높은 강도를 최소한의 무게로서 얻기 위함인데, 자연적 복합재료로서 목재등이 있고, 또 짚을 섞은 흙벽돌등 예전부터 사용되어 왔다. 복합재료는 2차 대전 이후 우주 항공산업의 급격한 발전으로 재료의 경량화 문제가 대두되면서 그 물성에서 빠른 발전을 거듭해왔는데, 이는 재료과학의 발달로 말미암아 새로운 섬유와 중합체(polymer)를 위시한 소재의 개발에 기인한다. 최근 부품 소재로서 각광받고 있는 섬유강화 복합재료는 그림 1에서와 같이 보강섬유(reinforcing fiber)와 이들을 서로 접착시키고 형태를 갖추게 하기 위한 기지재료(matrix)로 이루어지며, 보통 보강섬유는 기계적으로 아주 강하고 기지재료는 비교적 약하나 파괴 특성이 우수해 서로 보완적인 관계에 있다. 복합재료에 대한 소개, 물성, 제조법, 응용 및 전망등은 참고문헌 (1)~(5)에 개괄적으로 설명되어 있다.

보강 섬유로는 유리섬유를 비롯하여, 탄소섬유(graphite fiber, 혹은 carbon fiber, kevlar 섬유, boron 섬유 및 세라믹 계 섬유(silicon carbide 섬유, unsaturated polyester, vinyl ester 등과 에폭시, 나이론, 또 고온용의 phenolic, polyimide 수지들의 중합체들이 주종

을 이루는데, 이외에 알루미늄을 비롯한 금속과 세라믹 들도 사용된다. 보강섬유는 연속적인 형태로 사용되는 경우도 있고(continuous fiber), 짧게 찢은 형태로 쓰이는 경우도 있는데(short fiber) 보통 기계적 성질 면에서는 continuous fiber 쪽이, 가격 및 제작 면에서는 short fiber 쪽이 우수하다. 이외에 섬유형태는 아니나, whisker 등이 보강재료로 쓰이기도 한다. 복합재료는 그 성능 및 가격을 기준으로 범용 복합재료와 고성능복합재료(advanced composite material, ACM)등으로 나눌 수 있는데 ACM에는 주로 연속 섬유가 사용된다.

섬유강화 복합재료는 사용되는 기지재료에 따라 polymer 기지 복합재료(polymer matrix composite, 혹은 fiber reinforced plastic; FRP라고도 함), 금속 기지 복합재료(metal matrix composite, 혹은 fiber reinforced metal, FRM), 세라믹 기지 복합재료(ceramic matrix composite, 혹은 fiber reinforced ceramic, FRC)등으로 나눌 수 있다. 현재까지는 중합체 기지 복합재료가 주로 쓰이고 있으나, 고온용 등 특수용도로 금속기지 및 세라믹 기지 복합재료들에 대한 연구가 최근 활발히 진행되

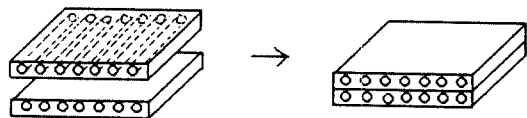


그림 1 복합재료의 구조

고 있다.

보강섬유 중 그 사용량에 있어서는 범용 FRP 때문에 유리섬유가 으뜸이나, 고성능복합재료와 관계되어 가장 많이 쓰이는 것은 탄소섬유이다. 탄소섬유는 현재까지는 가격 때문에 주로 우주 항공용 부품 및 고급 스포츠 용품 등에 국한, 사용되어왔으나 새로운 섬유 제조기법의 개발로 그 가격이 현저히 떨어질 것으로 기대되어, 자동차산업등 대 수요 시장으로의 응용이 보다 본격화될 전망이다.

기지재료로 주로 쓰이는 중합체 재료는 크게 열경화성 수지(thermosetting resin)과 열가소성 수지(thermoplastic resin)의 두 가지로 나눌 수 있다. 열경화성 수지는 반응이 일어나기 전에는 액체 상태이다가, 열을 가해 화학반응이 일어나면 굳어지게 되는데, unsaturated polyester, vinyl ester, epoxy, phenolic, polyimide 등이 여기에 속하며, 상온에서 액체 상태이므로 보강섬유와 쉽게 섞을 수 있고, 화학 반응 후에는 기계적, 열적, 화학적 성질등이 우수한 장점이 있는 반면, 일단 경화가 되면 다시 돌이킬 수 없다는 단점도 가지고 있다. 특히 epoxy 수지는 우수한 기계적 성질등으로 인하여 ACM의 기지재료로 가장 많이 사용되며 polyimide는 내열성 때문에(350°C 정도까지 사용가능) 고온용 부품에 많이 쓰인다.

한편 열가소성 수지는 이미 화학반응(polymerization)이 완결된 상태이며 상온에서 고체로 존재하다가 열을 가해 온도가 올라가면 녹거나 부드러워지는 특징을 지니고 있다. 열가소성 수지는 그림에서와 같이 결정구조가 존재하는 결정성(crystalline) 수지와 결정구조가 없는 무정성(amorphous) 수지로 나눌 수 있다. ACM의 기지재료로 사용되는 열가소성 수지 가운데서 나이론, poly phenylene sulfide (PPS), poly ether ether ketone(PEEK) 등의 수지가 결정성 수지에 속하며, poly sulphone (PS) 등은 무정성 수지이다. 이들 열가소성 수지는 파괴인성(fracture toughness)이 열경화성 수지에 비해 아주 높아 강도 및 강성도의

저하 없이 파괴인성이 높은 복합재료를 얻을 수 있으며 열을 가하면 부드러워져 여러 단계에 걸친 성형이 가능하고, 화학반응이 완결된 상태이므로 냉동 보관해야하는 열경화성 수지 복합재료와는 달리 저장이 용이하다는 등의 장점이 있어 새로운 기지재료로서 많은 연구의 대상이 되고 있다. 그러나 열경화성 수지는 화학반응이 일어나기 전에는 분자 길이가 짧아 점도가 낮으므로 보강섬유와의 혼합이 용이한 장점이 있는데 반해 열가소성 수지는 점도가 아주 높아 효율적인 제조공정의 개발이 문제점으로 남아 있다. 보통 보강섬유는 화학적, 물리적으로 안정되어 있어 공정 중에 전혀 변화가 없는 경우가 대부분이므로 공정 중 변화가 생기는 이들 수지의 특성은 복합재료의 제조공정의 선택 및 최적화에도 직접 연관이 되어 제조공정 중의 문제 해결 및 복합재료의 물성향상을 위하여는 이들 수지의 열화학적 특성 및 유변학적 특성이 기계적 성질과 더불어 충분히 파악되어야 한다.

고성능 복합재료와 범용 복합재료의 제조공정 상의 가장 두드러진 차이점은 수지의 유동에 있다. 즉 ACM의 경우 경량화 효율의 극대화를 위하여 보강섬유는 미리 설계자가 지시한 방향으로 배열되어 있어야 하므로 제조 공정중 보강섬유는 제자리에 있고 수지만 유동하게 되거나, 혹은 수지의 유동이 전혀 없게 된다. 범용 복합재료의 경우에는 공정 시간의 감축 및 제조원가 절감 등의 이유로 수지와 보강섬유의 혼합물이 같이 유동하게 되므로 수지/보강섬유 혼합물의 유변학적 특성 및 유동으로 유발되는 섬유 배열 방향의 예측 및 조절 등이 중요한 문제로 대두되게 된다.

2. 섬유강화 복합재료의 특징과 제조 방법

섬유강화 복합재료의 가장 큰 특징은 그 우수한 기계적 성질에 있다. 그림 2에서 볼 수 있는 바와 같이, 보강섬유의 높은 무게비 강도 및 강성도(specific strength and modulus) 때

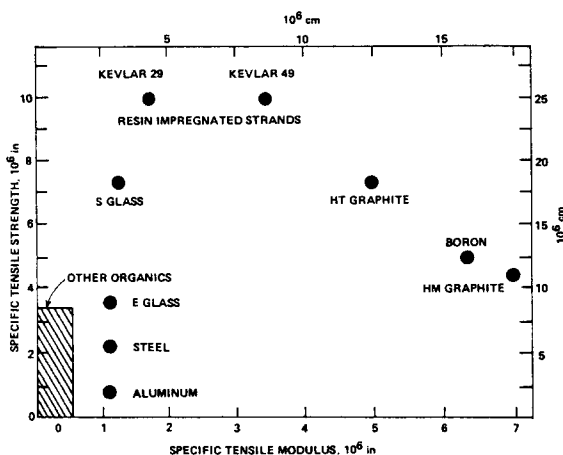


그림 2 복합재료 보강섬유와 금속재료의 단위 무게당 기계적 성질

문에 복합재료도 기본 금속재료에 비해 높은 무게비 강도 및 강성도를 가지고 있다. 표 1에 대표적인 섬유강화 복합재료의 물성치들이 소개되어 있다. 또한 복합재료의 기계적 성질은 섬유의 배열 방향에 따라 달라져 탄소섬유강화 epoxy의 경우 섬유방향과 그 직각 방향과는 강성도가 약 20배 정도 달라지게 되어 상당한

이방성(anisotropy)이 존재하게 되므로 그 설계가 금속재료와는 많이 달라지게 되며, 적절한 섬유 방향을 선택하면 더욱 더 경량화 효율을 높일 수 있다. 복합재료는 부품의 무게 감소 효과외에 긴 피로 수명, 우수한 진동 감쇠 특성 등 여러 가지 다른 우수한 기계적 성질들을 가지고 있다. 그외에 내식성이 높으며, 전기절연성이 우수한 점등 여러 면에서 장점을 지니고 있다. 이러한 소재의 장점들로 인하여, 복합재료로 만들어진 구조물이나 부품들은 경량, 고강도, 내식성등의 특징을 지닌다.

복합재료 구조물은 그 제조공정이 금속재료 부품에 비해 비교적 간단하며 복잡한 형상을 쉽게 만들 수 있으므로 부품의 수효가 많이 줄어들게 되어(parts consolidation) 부가적인 조립 공정이 많이 생략되게 되고 sheet metal 성형의 경우보다 금형 값이 월등히 적어 생산원가를 낮출 수 있다는 장점도 지니고 있다.

복합재료의 제조방법은 제품의 형상에 따라 각기 달라 아주 많고 또 계속 새로운 공정이 계속 개발되고 있으나 현재 많이 사용되고 있는 주요한 제조방법들을 열거해 보면 다음과

표 1 대표적인 복합재료들의 물성치

Material	Specific gravity	Modulus, GPa (Msi)	Tensile strength, MPa (ksi)	Yield strength, MPa (ksi)	Ratio of modulus to weight, 10 ⁶ m	Ratio of tensile strength to weight, 10 ⁶ m
High-strength carbon fiber-epoxy (unidirectional)	1.55	137.8 (20)	1550 (225)	—	9.06	101.9
High-modulus carbon fiber-epoxy (unidirectional)	1.63	215 (31.2)	1240 (180)	—	13.44	77.5
E-glass fiber-epoxy (unidirectional)	1.85	39.3 (5.7)	965 (140)	—	2.16	53.2
Kevlar 49 fiber-epoxy (unidirectional)	1.38	75.8 (11)	1378 (200)	—	5.60	101.8
Boron fiber-6061 Al alloy (annealed)	2.35	220 (32)	1109 (161)	—	9.54	48.1
Carbon fiber-epoxy (quasi-isotropic)	1.55	45.5 (6.6)	579 (84)	—	2.99	38

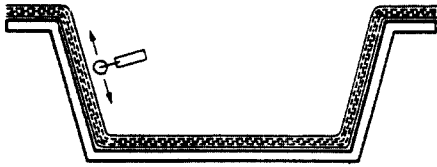


그림 3 Hand lay-up 공정

같다.

Hand Lay-up 및 Spray-up : hand lay-up은 그림 3에서와 같이 open mold 위에 적절한 이형처리를 한 후 그위에 보강섬유(보통 직물 형태로 되어 있음)와 수지를 잘 섞어 roller등으로 밀며 원하는 두께까지 한층씩 수작업에 의해 쌓아나가는 방법을 말하며 spray-up은 이 방법을 약간 자동화하여 chopped fiber와 수지의 혼합물을 spray gun 등으로 뿌려 나가는 방법이다. 이 둘 방법은 대형 구조물을 손쉽게 만들 수 있다는 장점은 있으나 생산성이 낮고 제품의 기계적 성질이 균일하지가 않아 prototype 제작용 등 및 대형 구조물의 제작에 많이 사용되며, ACM의 제조에는 거의 사용되지 않는다.

Bag Molding : 이 방법에는 vacuum bag molding, pressure bag molding, autoclave molding 등이 있는데 보강섬유와 수지의 혼합물을 밀폐된 bag으로 싸 다음 bag 안에 진공

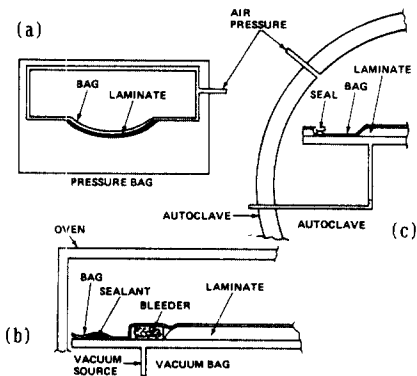


그림 4 Bag molding 공정 (a) Pressure bag molding (b) Vacuum bag molding (c) Autoclave molding

을 걸거나(vacuum bag molding), bag 바깥쪽에 압력을 가하거나 (pressure bag molding), bag 안에는 진공을 걸고 bag 바깥에는 압력을 가하는 autoclave molding) 방법들이 있다(그림 4 참조). 이 방법은 die를 비교적 쉽게 제작할 수 있고 진공을 걸 경우 수지에 함유된 휘발성 물질을 제거할 수 있다는 장점은 있으나, 대량생산에는 적합하지 못한 단점도 가지고 있다. 이중 autoclave molding은 우주 항공용 등 고성능 복합재료(ACM) 부품 제조용으로 가장 많이 쓰이는 방법이다.

Matched Die Molding(Compression Molding) : Sheet metal의 성형에서와 비슷하게, 표면이 잘 가공된 압, 수의 금형 사이에 보강섬유와 수지의 혼합물을 넣고 금형의 온도를 올리고 press를 이용, 압력을 가해 성형하는 방법이다(그림 5). 이 때 보강섬유와 수지의 혼합물은 그 형태에 따라 bulk molding compound(BMC)와 sheet molding compound(SMC) 등으로 나눈다. BMC는 보강섬유와 수지를 적당한 비율로 섞은 딱 같은 형상의 혼합물이다. SMC는 보강섬유와 기지재료의 혼합물이 얇게 퍼진 sheet 모양으로 된 것으로 보강섬유의 수지에 대한 비율을 높일 수 있어 BMC에 비해 제품의 기계적 성질이 우수하며, 다루기가 쉽고 대량 생산에 적합해 panel이나 bumper 등 자동차 부품 생산용으로 많이 사용되고 있는데 이 때에는 미리 판상의 보강섬유/수지의 혼합물을 가열하여 부드럽게 만든 후 금형 사이에서 압력을 가하여 냉각시켜 원하는 모양을 만들어 내게 된다(thermoforming).

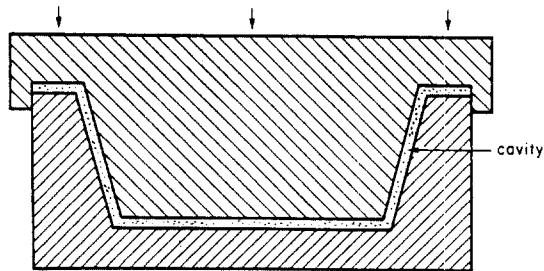


그림 5 Matched die molding 공정

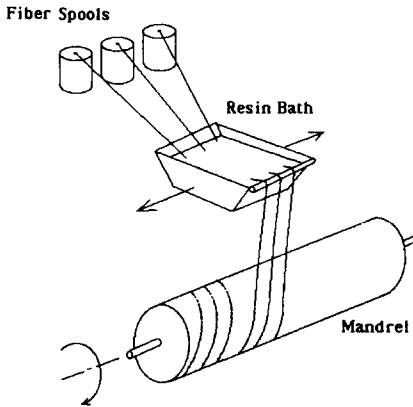


그림 6 Filament winding

Filament Winding : Filament winding은 축대칭인 형상의 부품을 만드는데 사용되며, 그림 6에서와 같이 미리 연속 보강섬유에 수지를 묻혀 mandrel 위에 감는 방법이다. Rocket motor case, 압력용기등이 이 방법으로 만들어진다.

Pultrusion : 그림 7에서와 같이 섬유에 수지를 묻혀 die를 통해 뽑아내는 방법인데, angle, tube등의 구조재를 연속적으로 만들어 낼 수 있다.

이상에 설명한 방법들외에 보강섬유/수지의 혼합물을 플라스틱의 경우처럼 injection molding, transfer molding등을 하여 여러 제품을 만들 수 있는데, 복합재료의 제조 방법은 기지재료의 성질을 비롯해 만들어질 제품의 형

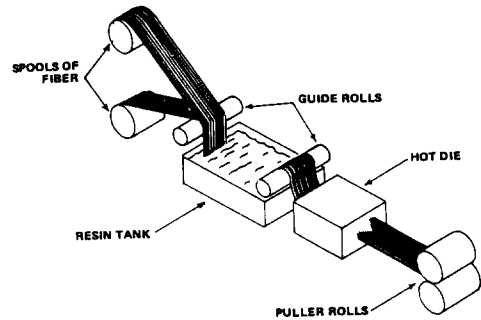


그림 7 Pultrusion

상, 수량, 요구되는 기계적 성질등에 따라 각각 다르게 선택되어야 한다.

보통 고성능 복합재료의 제조에는 열경화성 수지 복합재료의 경우 판재나 shell형상의 부품에는 autoclave molding이, 축대칭 형상의 부품에는 filament winding등이 많이 사용되며, 열가소성수지 복합재료의 경우 compression molding이 주로 사용된다. 다음에, 고성능 복합재료 제조 방법을 열경화성 수지 복합재료와 열가소성 수지 복합재료의 경우로 나누어 가장 대표적인 autoclave molding(열경화성 수지)과 compression molding(열가소성 수지 복합재료)을 중심으로 공정 및 문제점등을 보다 자세히 설명하기로 한다.

3. 열경화성수지 복합재료의 제조

앞서 언급한 바와 같이 열경화성 수지 복합

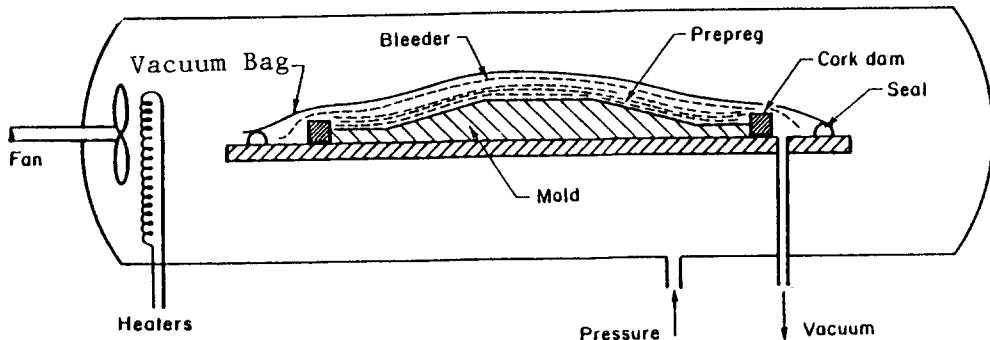


그림 8 Autoclave의 구조

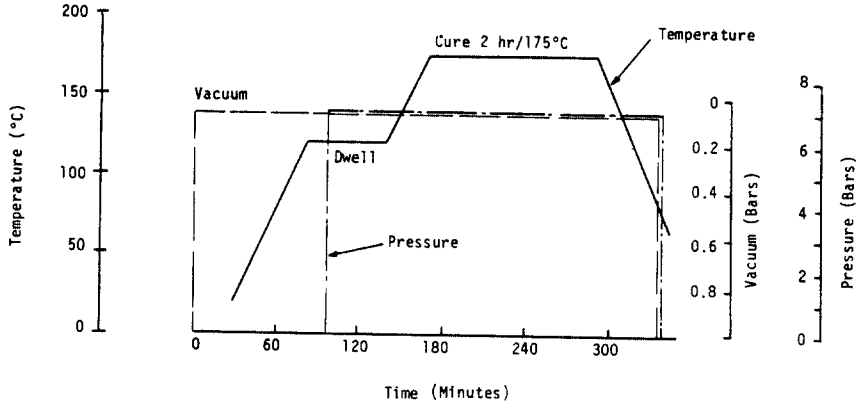


그림 9 대표적인 graphite epoxy 복합재료의 cure cycle

재료는 주로 autoclave molding을 통해 만들어지며 다른 방법들도 그 원리에 있어서는 autoclave molding과 유사하다고 생각할 수 있다. autoclave는 그 구조가 그림 8과 같은 가압 오븐이며, 성형 부품에 대한 가열은 송풍기를 이용한 강제 대류에 의하여 이루어진다. 이 경우 공정 변수로는 온도와 압력을 들 수 있는데, 성형 온도와 압력을 각각 시간에 대한 함수로 준 것을 cure cycle이라고 한다. cure cycle은 수지의 열화학적 및 유동 특성에 따라 다르게 주어져야 하는데 대표적인 고온용탄소 섬유강화 에폭시(graphite/epoxy) 복합재료의 cure cycle이 그림 9에 나와 있다. Autoclave molding 공정은 크게 세 단계로 나눌 수 있다. 즉 prepreg의 제조, layup, autoclave curing이 그 것이다. Prepreg은 pre-impregnate를 줄인 말로 섬유에 수지를 미리 함침시켜 놓은 얇은 테이프 형태의 반제품을 의미하며 이 때 섬유는 일정한 방향으로 배열되어 있거나(unidirectional prepreg), 직물 형태로 되어 있다. 또 수지는 점도를 약간 높혀 다루기 쉽게 한 B-stage를 사용한다. 이 prepreg은 여러가지의 보강섬유 및 수지의 조합에 따라 여러 종류의 제품이 있으며, autoclave molding시 원자재 처럼 취급되는 성형의 기본 반제품이다. 이 prepreg tape는 탄소섬유/에폭

시의 경우 그 두께가 약 1/8mm(5/1000in)로 여러 겹을 쌓아 원하는 두께를 얻을 수 있다. 이 때 각 층(ply라 부름)의 섬유 배열 방향은 설계자가 최대의 구조 효율을 얻기 위하여 지정한대로 해야 하는데, 이 적층 작업을 layup이라고 한다. layup은 주로 수작업에 의하여 많이 이루어지고 있으며, 최근 자동화가 일부 되고 있으나, 형상이 비교적 간단한 경우에 국한되고 있다. 이렇게 적층된 복합재료 적층판은 그림 10에서와 같이 기타 성형에 필요한 여러 부자재들과 함께 autoclave에 들어가 성형하게 되는데, 이렇게 복합재료 적층판과 성형 부자재들을 적절히 쌓은 것을 curing assembly라 한다. 그림에서 bleeder는 적층판의 잉

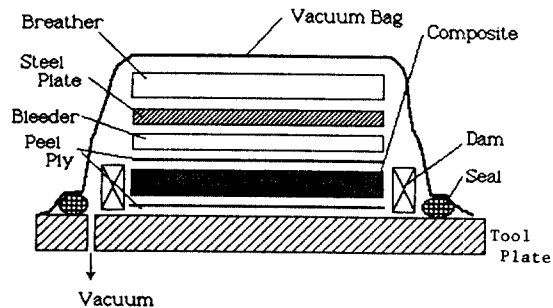


그림 10 Autoclave molding에서의 curing assembly

여의 수지를 흡수하기 위한 습 혹은 종이 같은 다공질의 재료이며, vacuum bag은 전체를 덮어 씌워 진공을 걸기 위한 내열성(film 혹은 blanket)이다. 진공을 걸어 주는 이유는 수지에 포함된 휘발성 물질을 뽑아내기 위함이다.

성형시 온도를 올려주면 화학반응이 일어나 수지가 경화되게 되는데 이 때 경화된 정도가 복합재료 내부에서 균일하여야 하므로 복합재료 내부의 온도 분포는 균일할 것이 요구된다. 압력을 가하는 것은 복합재료 적층판내의 잉어의 수지를 짜 내어 각 층간의 접합을 확실하게 함과 동시에 보이드의 크기를 최대한 억제하려는데 있다. 수지가 밖으로 흘러 나오는 수지의 유동은 점도의 크기에 따라 달라지게 되는데 수지의 점도는 온도에 따라 달라 지게 되므로 그림 11에서와 같이 공정변수 간에 비교적 복잡한 상호 관계가 존재하게 된다.

이러한 공정 변수들의 목적으로 볼 때 적절한 cure cycle은 결국 다음과 같은 여러 조건을 만족시켜야 할 것이다.

- (1) 가장 빠른 시간 내에 공정이 끝날 것
- (2) 경화도가 부품내에서 균일할 것
- (3) 여분의 수지가 모두 짜졌을 것

이러한 조건들을 만족시키는 최적 cure cycle은 실험이나 공정의 적절한 modeling에 의하여 가능할 것인데, 전적으로 실험에 의존하게 되면 보통 cure cycle이 4~5시간이 소요되므로 시간 및 경비의 지출이 상당하게 된다. 이러한 어려움을 피하기 위하여 공정에 대한 모델링이 많이 연구되어 왔으며^(6,7), computer를 이용해 비교적 신속히 온도분포, 수지의 경화도 분포, 수지의 유동등을 계산해 낼 수 있

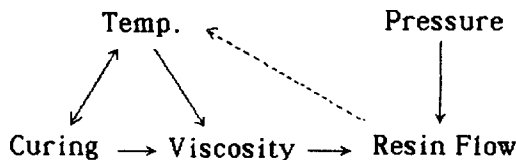


그림 11 열경화성 복합재료 제조공정에서 공정 변수간의 상호 관계

어 위에 열거한 적절한 cure cycle을 찾아내는데 상당한 도움을 줄 수 있다. 모델은 다음과 같은 여러 공정 변수를 산출할 수 있어야 하며 그 방법이 다음에 설명되어 있다.

온도 : 성형 중 복합재료 부품 내의 온도 분포는 비정상(transient) 열전도 방정식을 풀어서 비교적 쉽게 얻을 수 있다. 1차원으로 가정해 두께 방향만 고려할 경우

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial T}{\partial x} \right) + H_R \quad (1)$$

이며 H_R 은 수지의 화학반응에 따른 열발생에 기인한다.

수지의 경화도 : 수지의 경화도(degree of cure)는 경화 반응의 진행 정도를 나타 내는데 많은 잘 맞는 모델들이 제시되어 있으며^(8,9) 일반적으로 다음과 같은 형태로 표시된다.

$$d\alpha/dt = f(\alpha, T) \quad (2)$$

여기서 α 는 경화도를 나타내며, $d\alpha/dt$ 는 경화도의 시간에 대한 변화율을 각각 나타낸다.

수지의 점도 : 일반 유체와는 달리 수지의 점도는 경화 반응이 진행됨에 따라 증가하게 되므로

$$\mu = g(\alpha, T) = (4)$$

의 형태로 나타내 진다^(8,9).

수지의 유동 : Prepreg에는 보통 성형이 완료된 복합재료에서 보다 많은 양의 수지가 존재하며 여분의 수지는 압력이 가해짐에 따라 prepreg 밖으로 흘러나오게 된다. 수지의 유동은 두께 방향으로 일어나며 몇 개의 모델이 제시된 바 있다. 즉 Springer⁽¹⁰⁾는 압력을 가하였을 때 복합재료 밑 부분(tool plate쪽 부분, 그림 10 참조)의 수지의 압력이 가해진 압력과 같다고 가정하여 비교적 간단한 모델을 제시하였다. 또 Gutowsky⁽¹¹⁾는 섬유들 간의 접촉으로 인한 하중의 전달 때문에 압력의 차이가 두께 방향으로 생긴다고 가정하여 모델을 제시하였는데 섬유함유율이 아주 높은 경우에

는 압력의 차이가 상당하나 섬유함유율이 60% 정도 이하에서는 압력의 차이가 거의 없음을 실험적으로 입증하였다.

이러한 모델들을 근거로 복합재료의 cure cycle 중의 변화를 컴퓨터로 수치 모사할 수 있는 프로그램을 만들어 cure cycle의 선정에 이용할 수 있다.

4. 열가소성수지 복합재료의 제조

최근 PEEK를 비롯한 우수한 성질의 semi-crystalline thermoplastic resin들이 소개됨에 따라 이들 수지를 이용한 복합재료의 최적 성형공정에 대한 연구가 많은 관심을 끌고 있다. 열가소성 수지 복합재료는 앞서 열경화성 수지 복합재료에서와 같이 주로 prepreg을 적당히 재단하여 적층한 후 matched die mold에 집어 넣어 compression molding에 의해 만들어지는데(그림 12), 그 제조 공정은 우선 온도를 수지의 용점 이상으로 올리고 압력을 가한 상태에서 일정시간 지속시킨 후 적당한 냉각물로 냉각시키는 등의 여러 단계로 이루어진다. 또 수지가 이미 함침되어 있는 prepreg을 사용하지 않고 그 자리에서 함침이 이루어지게 할 수도 있는데 이 때는 수지의 함침도 공정의 한 단계로서 고려되어야 한다. 따라서 열가소성 수지 복합재료의 제조 공정은 아래와 같이 3단계로 크게 나눌 수 있다.

- (1) Fiber bundle에로의 수지의 함침
- (2) 가압 상태에서의 prepreg ply들 간의 접합

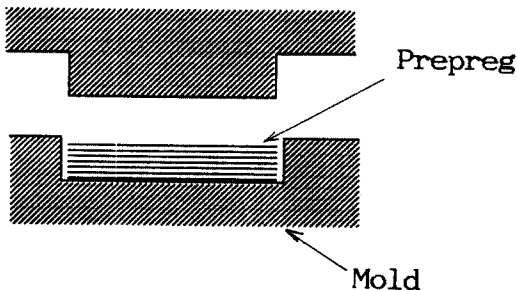


그림 12 열가소성 수지 복합재료의 제조

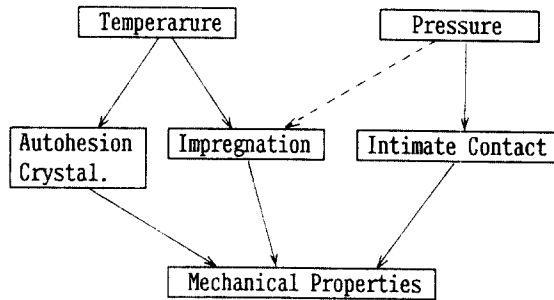


그림 13 열가소성 수지 복합재료 제조 공정에서 공정 변수간의 상호관계

(3) 냉각에 따른 수지의 결정화

열가소성 제조 공정에서 문제가 되는 각 공정 변수간의 상호 관계가 그림 13에 나와 있다. 그림에서 보는 바와 같이 열가소성 수지 복합재료의 경우에는 공정 변수 간의 상호작용이 열경화성수지 복합재료에서 보다 적어 상기 각 단계를 완전 분리시켜 생각할 수 있다.

온도 분포 및 수지의 결정도: 성형 중 복합재료 부품 내의 온도 분포는 비정상(transient) 열전도 방정식을 풀어서 비교적 쉽게 얻을 수 있다. 1차원으로 가정해 두께 방향만 고려할 경우

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (K \frac{\partial T}{\partial x}) + H_c \quad (4)$$

이며 H_c 는 수지의 결정화에 따른 열발생에 기인한다. 위의 식은 유한요소법 혹은 유한차분법으로 수치 해를 얻을 수 있다. 식(4)을 풀기 위해서는 온도 변화에 따른 수지의 결정도(crystallinity)의 변화에 대한 관계가 반드시 주어져야 한다.

결정성 열가소성 수지의 경우 결정질 구조의 구성비를 표시하는 결정도는 특히 기계적 성질에 있어 중요한 영향을 끼친다. 결정도는 냉각률에 따라 크게 달라지며 일반적으로

$$c = h(T, dT/dt) \quad (5)$$

의 형태로 표시되는데 일반적인 결정화 과정에

서의 식(5)의 함수 형태가 몇 가지 제시된 바 있다^(12~14). 식(4)과 (5)로서 주어진 냉각 조건에서의 시간에 따른 온도 분포의 변화 및 그에 따른 수지의 *crystallinity*의 변화를 계산해 낼 수 있다. 계산된 결정도는 기계적 성질을 추정하는데 사용될 수 있으며 결정도와 기계적 성질의 상관관계는 탄소섬유/PEEK 복합재료에 대해 주어져 있다⁽¹⁵⁾.

수지의 함침 : 수지의 함침은 prepreg 제조 시 혹은 막바로 수지와 보강섬유를 적당히 섞어 온도와 압력을 가해 성형을 할 경우 문제가 된다. 열가소성 수지는 용점(혹은 *glass transition temperature*) 이상에서도 그 점도가 열경화성 수지보다 아주 높으므로 함침이 어려워 이에 대한 이해가 필요하다. 압력을 가하지 않은 상태에서 수지의 섬유 다발 내로의 함침은 모세관 현상에 의한 섬유방향으로의 “*channel flow*”와 섬유와 직각 방향으로의 유동으로 나누어 생각할 수 있는데 각각 *Poiseuille flow*와 다공성 물질을 통과하는 유동(Darcy's law 적용)로서 생각할 수 있다. 또 함침을 촉진시키기 위하여 압력을 가하였을 경우 수지의 유동은 다공성 물질을 지나는 유체의 유동으로 생각할 수 있는데 이때에는 *permeability*가 가압으로 인한 섬유 다발의 압착 때문에 압력의 함수로 달라지게 된다.

Prepreg Ply간의 접합 : Prepreg의 표면에는 상당한 요철이 존재하며, 수지의 점도가 높기 때문에 열경화성 수지 복합재료에서와 같은 수지의 유동에 의한 뒤섞임은 기대할 수가 없다. 따라서 prepreg 층간의 접합이 일어나기 위하여는 prepreg 표면끼리 접촉이 일어난 후 (*intimate contact*), polymer 분자들의 확산에 의해 완전한 접합이 이루어 지게 된다(*autohesion*). *Intimate contact*는 prepreg 표면의 형상을 간단한 사각원주의 집합으로 modeling하여 해석 할 수 있으며, *autohesion*의 정도는 시간의 4승근에 비례하는 것으로 알려져 있다^(16,17)

5. 맺음말

이상에서 설명한 바와 같이 고성능 복합재료는 그 제조 공정이 다양하고 공정의 개념이 기존 금속 재료와는 크게 다르며, 많은 열 공학 및 유체공학적인 문제를 수반하고 있다. 특히 최적 공정의 선택이 가장 큰 관심의 대상이므로 공정의 modeling에 대한 연구가 많이 이루어지고 있으며, 이러한 modeling을 통하여 고성능 복합재료 제조 공정에서의 문제점을 보다 잘 이해할 수 있고 제조 공정의 최적화에 이용할 경우 비용이 많이 들고 시간이 오래 걸리는 실험적인 방법을 많은 부분 대체할 수 있어 새로운 기지재료가 소개되었을 경우의 그 제조 공정의 결정에 있어 시간과 비용을 대폭 절감시킬 수 있다. 앞으로 소재의 기능화, 경량화 추세에 힘입어 복합재료의 수요는 계속 늘어날 전망이어서 새로운 공업용 소재로서의 복합재료에 대한 공학적인 이해가 필요하며, 특히 기존의 재료 제조 공정과는 비교적 색다른 복합재료 제조 공정에 대한 보다 넓은 이해가 필요할 것이다.

참고 문헌

- (1) Lubin, G., 1982, “Handbook of Composites”, Van Nostrand Reinhold Co.
- (2) Schwartz, M.M., 1984, “Composite Materials Handbook”, McGraw-Hill Book Co.
- (3) ASM, 1987, “Engineered Materials Handbook”, Vol. 1. Composites, ASM International.
- (4) Noton, B., 1974, “Engineering Application of Composites”, Academic Press.
- (5) Watt, A.A., 1980, “Commercial Opportunities for Advanced Composites”, STP 704, ASTM.
- (6) Loos, A. C. and Springer, G. S., 1983,

- “Curing of Epoxy Matrix Composites”, Journal of Composite Materials, Vol. 17, pp. 135~169.
- (7) Calius, E. P. and Springer, G. S., 1985, “Modeling of Filament Winding of Composites”, Proceedings of the Fifth International Conference on Composite Materials, The Metallurgical Society, pp. 1071~1088.
- (8) Lee, W.I., Loos, A.C., and Springer, G.S., 1982, “Heat of Reaction, Degree of Cure, and Viscosity of Hercules 3501-6 Resin”, Journal of Composite Materials, Vol. 16, pp.510~520.
- (9) Dusi, M.R., Lee, W.I., Ciriscioli, P.R. and Springer, G.S., 1987, “Cure Kinetics and Viscosity of Fiberite 976 Resin”, Journal of Composite Materials, Vol. 21, pp.243~261.
- (10) Springer, G. S., 1982, “Resin Flow During the Cure of Fiber Reinforced Composites”, Journal of Composite Materials, Vol. 16, pp. 400~410.
- (11) Gutowsky, T.G., 1985, “A Resin Flow/Fiber Deformation Model for Composites”, SAMPE Quarterly, Vol. 16, pp. 58~64.
- (12) Ozawa, T., 1971, “Kinetics of Non-Isothermal Crystallization”, Polymer, Vol. 12, pp.150~158.
- (13) Kamal, M.R. and Chu, E., 1983, “Isothermal and Nonisothermal Crystallization of Polyethylene”, Polymer Engineering and Science, Vol. 23, pp.27~31.
- (14) Velisaris, C.N. and Seferis, J.C., 1986, “Crystallization Kinetics of Polyetheretherketone(PEEK) Matrices”, Polymer Engineering and Science, Vol. 26, pp.1574~1581.
- (15) Talbott, M.F., Springer, G. S. and Berglund, L. A., “The Effect of Crystallinity on the Mechanical Properties of PEEK Polymer and Graphite Fiber Reinforced PEEK”, to appear in the Journal of Composite Materials.
- (16) Wool, R.P. and O'Connor, K.M., 1981, “A Theory of Carck Healing in Polymers,” Journal of applied Physics, Vol. 52, pp.5953~5963.
- (17) Dara, P.H. and Loos, A.C., 1985, “Thermoplastic Matrix Composite Processing Model”, Center for Composite Materials and Structures, Report CCMS-85-10, VPI-E-85-21, Virginia Ploytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia.

