

고분자 복합재료의 제조공법

김 영 록

1. 서 론

고분자 복합재료의 물성은 제조 및 성형시 사용되는 섬유 보강재, 수지의 종류, 섬유 보강재의 방향성(fiber orientation)에 따라 크게 변화한다. 복합재료 제조시 물성 및 성능을 요구 조건에 만족시키기 위해서는 제품 설계 및 사용 재료의 선정뿐만 아니라 성형공법 선정 또한 중요한 부분이다. 그림 1¹에서 나타낸 제품 원가에 성형공정이 차지하는 비율은 50% 이상이므로 복합재료 제품이 가격 경쟁력을 가지기 위해서는 제품의 특성에 따른 성형공법 선정이 매우 중요하다. 성형공법의 선정은 연간 제품 생산량, 제품의 크기, 사용 재료의 종류 및 형태, 제품의 사용 하중, 사용 환경 등을 종합적으로 고려하여 선정해야만 복합재료 부품의 적용이 가능하다. 그림 2²는 성형공법 및 생산량에 따른 복합재료 부품 제조 가격을 나타내었다. 이 결과는 넓이가 4 ft²인 24 ply graphite/epoxy 부품을 연간 2,000개 생산할 때 소요되는 부품의 생산 단가이다. 이 그림은 단순한 형상의 제품 제작시 비교한 그림이므로 형상의 크기와 모양이 변화하면서 이러한 생산 가격은 달라질 수 있다.

이 외에도 prepreg cutting 자동화, 자동 로봇을 이용한 layup 과정, 물류 이동 자동화, 자동 trimming, cutting/drilling 등을 통하여 품질 안정화 및 가격 경쟁력을 개선해 나가기도 하며 새로운 성형법 개발을 통한 제품 개발도 꾸준히 진행되고 있다. 그러나 근본적으로 제품의 가격을 낮추기 위해서는 최적의 성형공법 선정이 우선되어야 한다.

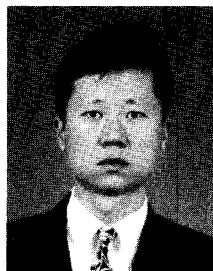
일반적으로 고분자 복합재료 성형품은 성형시에 다음과 같은 조건들을 만족하여야 한다.

- 완전한 consolidation이 되어야 한다.

- 균일한 두께로 성형되어야 한다.
- 수지의 불균일한 유동으로 섬유의 분포도 차이가 없어야 한다.
- 제품내 기포를 함유하지 않아야 한다.
- 열응력(thermal stress)에 의한 제품의 휨 및 치수 변형이 없어야 한다.

이러한 조건들을 만족시키기 위해서 성형시 조절이 가능한 인자들을 성형 공법에 따라 적절히 조절해야 한다. Autoclave 성형시에는 열과 압력 조절이 성형품 물성에 영향을 주는 중요한 성형 인자이며 filament winding 공법시에는 mandrel에 섬유를 감을 때의 섬유가 받는 인장력과 섬유를 감는 속도 등이 성형품의 물성에 영향을 미치는 성형 인자이다.

본고에서는 고분자 복합재료의 성형시 고려해야 할 기본 이론을 소개하고자 한다. 고분자 복합재료 성형시 주요 인자인 강화 섬유의 compressibility와 수지의 permeability 등에 대하여 기술하였으며, 복합재료 제조시 널리 쓰이는 성형법에 대한 소개와 특성에 대해 언급하였으며 고분자 복합재료 제조시 성형 공법 선정 방법에 대해 기술하였다.



김영록

1983 상균관대 섬유 공학과(학사)
1984~ University of Massachusetts-Lowell 플라스틱 공학과(박사)
1989~ American composite Technology사(연구원)
1991~ 삼성중공업 중앙연구소 (선임연구원)
1995~ 삼성화학중앙연구소 현재 (수석연구원)

Review of Composite Manufacturing Processes

삼성화학중앙연구소(Young Roak Kim, Samsung Central Research Institute of Chemical Technology, 103-12, Moonji-Dong, Yusung-ku, Taejon, Korea)

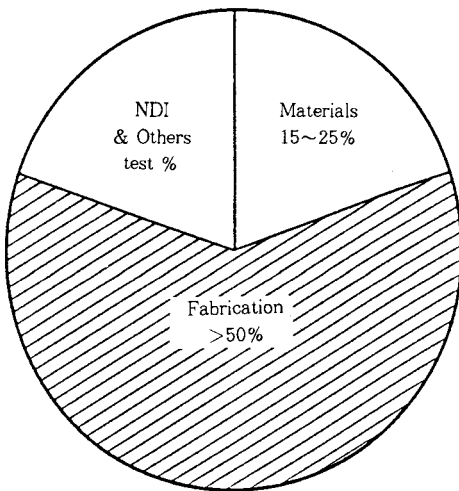


그림 1. 복합재료 제품 제조비용 내역.

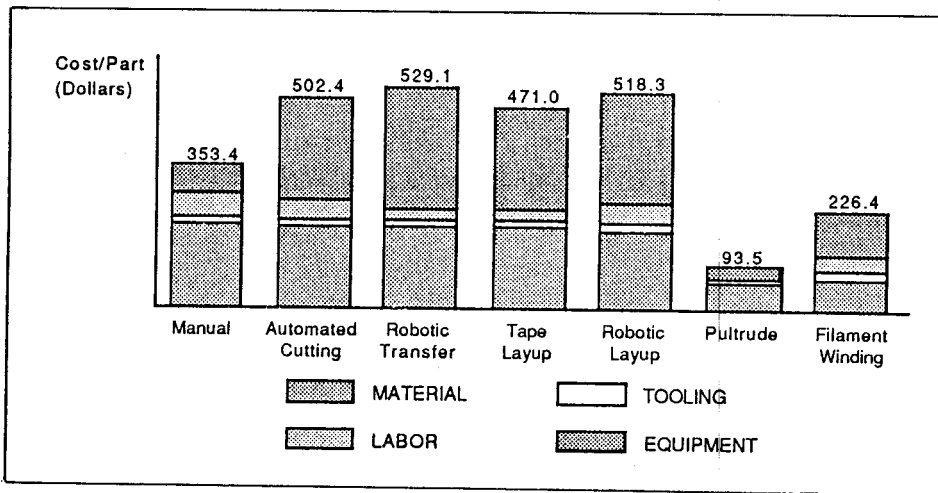


그림 2. 성형공법에 따른 성형품 제조 가격.

2. 복합재료 성형의 일반 이론

2.1 섬유강화제의 Consolidation

고분자 복합재료 성형은 섬유 보강재/수지 비율을 일정하게 하기 위한 consolidation 과정을 거친다. 이때 섬유 부피 함유율은 성형품의 물성에 직접적인 영향을 줄 뿐만 아니라 성형시 요구되는 성형 압력과 수지 함침에도 큰 영향을 준다. 그러므로 물성이 우수한 제품 생산을 위해서는 섬유강화제의 consolidation 이론을 이해하는 것이 매우 중요하다. 실험에 의해 밝혀진 consolidation은 섬유의 종류 및 형태, 적층방법 및 섬유의 후처리 방법 등에 따라 많은 영향을 받는다.³ 이러한 섬유의 consolidation 과정은 성형시 수지를 섬유강화제에 함침 시킬 때

여분의 수지와 섬유 내부에 포함된 기공들을 제거하고 제품의 치수가 균일하도록 해주는 과정이다. 그림 3은 섬유의 형태에 따른 성형 압력과 섬유 부피 함유율과의 관계를 나타내었다. 그림에서 보듯이 같은 압력을 가하더라도 섬유의 형태에 따라 consolidation 되는 정도가 다르기 때문에 사용되는 섬유의 종류 및 방향성에 따라 섬유 부피 함유율이 다른 제품이 생산된다. 그러므로, 일정한 섬유/수지 비율을 얻기 위해서 필요한 최적의 성형 압력을 결정하는 것이 매우 중요하다. 이 데이터는 성형시 필요한 자료일 뿐만 아니라 제품의 설계, 금형 제작에도 중요한 자료로 활용될 수 있다.

2.2 수지의 흐름성

(Resin Flow Through Fiber Reinforcements)

섬유강화제의 수지 함침시, 수지의 흐름 현상은 거시적으로 볼 때 Darcy의 법칙⁴에 따르며 식 (1)로 나타낸다.

$$\frac{Q}{A} = u = -\frac{K}{\mu} \frac{dP}{dx} \quad (1)$$

여기서 Q 는 섬유내 수지 흐름량(cm^3/sec), A =흐름 단면적(cm^2), u =수지 흐름 속도(cm/sec) μ =수지 점도 (centipoise), P =압력, x =수지 흐름 길이 이다. 이때 수지의 흐름 정도를 나타내어 주는 수치를 permeability (K)라 하고 단위는 Darcy($1 \text{ Darcy} = 9.87 \times 10^{-9} \text{ cm}^2$)로 표시한다. 여기서 K 는 섬유의 방향성, 직조 형태, 섬유의 지름 및 bundle 크기 등에 영향을 받는다.^{5,6} 그림 4는 수지 형태에 따른 수지의 흐름성을 나타낸 그림이다. 이러한 섬유내의 수지 흐름 현상은 미시적으로 관찰해 보면 섬유가 3차원 입체 조직으로 구성되어 있으므로 수지의 흐름은 섬유강화제의 섬유 방향성, stacking 방

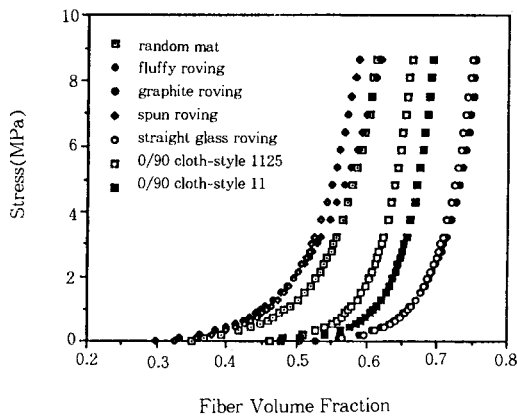


그림 3. 섬유 형태에 따른 compressibility.

법, 섬유의 표면 거칠기, 섬유 지름 등에 따라 수지의 흐름성이 달라짐을 예상할 수 있다. 이러한 수지의 흐름성은 resin transfer molding(RTM)이나 structural reaction injection molding(SRIM)시 수지의 섬유내 함침(impregnation) 현상을 해석하는 수단으로 주로 사용된다. 성형공정시 금형 내 섬유 부피 함유율이 낮을 경우에는 적층 조건에 따라 내부의 기공 생성량 및 기공 크기가 다르게 생성되는데 이러한 현상은 섬유가 성형시 금형 내에서 받는 압축 압력과 밀접한 관계가 있다.⁷ 이외에 기공 생성에 영향을 주는 인자들로써 수지 주입 압력, 수지의 표면장력, 수지와 강화 섬유의 접촉각 및 수지의 점도 등이 있다.

2.3 수지의 Reaction

수지의 반응성은 제품의 생산 속도와 가장 밀접한 연관성을 주는 성형 인자로써 특히 열경화성 수지의 경화도는 성형시 고려해야 할 중요한 성형 인자이다. 수지의 반응성은 수지 자체의 경화 특성과 경화제의 종류 및 농도, 성형 온도 등에 따라 변화한다. 최근 수지의 경화 반응과정을 FEM(finite element method)을 통하여⁸ 예측함으로써 제품의 성형 과정을 이해하는 연구가 활발하다. 이러한 수치 해석 기법을 통한 경화 kinetics와 수지의 점도 변화를 예측하여 금형내에서의 수지 반응을 예측할 수 있다. 일반적으로 열경화성 수지 복합재료 성형시 단량체의 가교 반응으로 인하여 망상 구조의 고분자가 되는데 수지의 경화는 단량체간의 가교 결합과 비례 관계가 있다고 가정하며 gel을 형성한 후에도 화학적인 반응은 계속 진행된다. 수지의 경화도 예측을 통한 점도 변화 모델, 금형내 수지 유동 해석, 경화 반응에 의해 발생하는 금형내 열전달 해석등을 종합하여 열경화성 수지 복합재료의 성형 과정을 예측한다.^{9, 10}

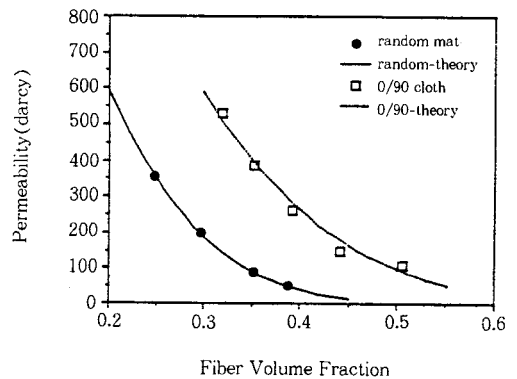


그림 4. 섬유 형태에 따른 permeability.

3. 복합재료 성형 공법의 종류 및 특성

복합재료의 성형에는 다양한 종류의 재료들이 여러 형태로 사용되고 있다. 사용 재료의 종류 및 형태에 따라 성형 공법 및 성형 조건이 달라지며 성형품의 물성에도 큰 차이가 있다. 복합재료 성형시 주로 쓰이는 재료들을 표 1에 정리하였다. 이러한 형태의 섬유 보강재들은 roving, yarn 상태 또는 수지가 함침된 prepreg로 제공된다. 최근에는 열가소성 수지를 이용한 복합재료 개발이 활발하여 thermoforming이 가능한 열가소성 prepreg, commingled thermoplastic and glass/graphite fibers, thermoplastic powder impregnated reinforcement 등이 개발되었다. 신규 열가소성 복합재료 개발은 성형 공법에 많은 진보를 가져왔다. 열가소성 수지 복합재료의 장점은 초기의 성형법이 행하여진 후 다시 다른 형태로 2차 가공을 할 수 있는 점이다.

초기의 복합재료 성형법은 주로 수공법인 hand-lay-up 공법을 주로 사용하였다. 현재까지도 부품의 크기가 큰 경우에는 hand-lay-up 공법을 이용하고 있다. 그 후부터 꾸준히 자동화 공법이 가능한 설비들이 개발되었다. 이들은 filament winding, pultrusion, pulforming, tape placement 등이 있다. 표 2는 생산 공장에서 자주 쓰이는 공법들을 정리하였다. 복합재료의 생산량이 증가함에 따라 수공법 사용은 점차 줄어들고 CAD(computer aided design), CAE(computer aided engineering) 기법들이 자주 사용되고 있다. 최근에는 filament winding, compression press 등의 자동화 설비에 자동 운반 장치, 초고속 절단 장치(Water Jet 또는 Lazer Jet), 로봇을 이용한 물류 이송 장치 등의 추가 장치를 사용하여 생산성을 향상시킨다. 다음은 주로 사용되는 복합재료 성형 공법들의 개요와 특성 성형 제품들에 대하여 언급하겠다.

3.1 Hand Lay-Up/Spray-Up 공법

Hand lay-up 공법은 성형 공법 중에서 가장 오래된

표 1. 고분자 복합재료 구성 재료

재료 종류	이용 가능한 형태
Reinforcements	
Glass Fiber	Roving, yarn, tapes, woven, fabrics, milled fiber, chopped mat, continuous strand mat, preform, filler
Boron	Whiskers, tow, yarns, tape, woven and non-woven broadgoods(dry or Prepreg), preforms, filler
Graphite	Same as for boron, plus chopped fiber
Aramids	Kevlar-roving, yarn, tape and fabric, including Prepreg
충진재	Hollow glass or plastic microspheres, solid glass microspheres, syntactic foams, sandwich structures, calcium carbonate, clay, mica
Resin matrices	
Thermoset	Epoxy, unsaturated polyester, vinyl ester, polybutadiene, high-temperature polyimides
Thermoplastics	Nylon, polycarbonate, polypropylene, polyetheretherketone, polyphenylene sulfide, polysulfone
Molding compounds	Bulk molding compound, sheet molding compound, glass mat thermoplastics

표 2. 주로 사용되는 복합재료 성형공법들

분 류	성 형 공 법
Open Mold	Spray-Up, Hand-Lay-Up or Contact Molding, Vacuum Bag Molding, Autoclave Molding, Centrifugal Casting
Closed Mold	Matched Die Molding, Compression Molding, Resin Transfer Molding
Automated Systems	Filament Winding, Pultrusion, Pulforming, Tape Placement

공법으로 매우 간단하나 인건비 비중이 높은 공법이다. 이 공법은 개방식 금형을 사용하여 성형한다. 금형은 주로 나무나 유리 섬유 강화 복합재료를 주로 사용하지만 제품의 치수 안정성을 요구할 경우에는 알루미늄이나 steel을 사용한 금형을 쓰기도 한다. 생산 속도를 향상시키기 위해서 금형내에 가열 장치를 설치하여 경화 시간을 줄일 수 있다. 성형 과정은 제품 표면을 매끄럽게 하기 위해 gel coat를 바르거나 아주 얇은 mat를 수지량이 많이 포함되도록 적층을 시킨다. 표면층 위에 mat 또는 fabric을 금형에 1 ply씩 놓은 후 roller나 brush를 사용하여 불포화 폴리에스터같은 수지를 함침시킨다. 이때 여분의 수지와 기포를 충분히 제거해야 물성을 향상시킬 수 있다. 이 공법은 주로 상온에서 경화를 진행시키므로 주로 8-10시간 정도의 경화 시간이 소요되며 epoxy 수지를 사용할 경우에는 3-7일 정도의 경화 시간이 요구된다. Hand lay-up 공법은 생산성이 낮으므로 다품종 소량에 적합한 공정이다. 이 공법으로 생산된 제품은 생산

지의 기술에 따라 품질에 큰 차이를 나타내므로 품질관리와 금형 관리가 매우 중요하다.

Spray-up 공법은 섬유 roving을 절단기를 이용하여 원하는 길이로 절단함과 동시에 air spray gun을 이용하여 수지와 함께 금형내에 붙여 주는 공법이다(그림 5). 단섬유는 gun nozzle를 통과하면서 수지가 도포된다. 수지 함침된 단섬유는 roller로 압착하여 섬유 내 기포를 제거한다. Hand lay-up 공법처럼 금형 표면에는 gel coat층을 형성한 후 spray 과정을 진행한다. Spray-up 공정은 주로 hand lay-up 공법으로 제조되는 제품보다 크기가 큰 제품에 이용되며 성형시 섬유를 spray할 때 섬유를 균일하게 분포시키는 것이 중요하다.

3.2 Autoclave/Vacuum Bag 공정

Autoclave/vacuum bag 공정은 고성능 열경화성 복합재료 성형 가공법 중에서 가장 보편화되어 있는 성형법이다. 이 공법은 주로 항공/우주용 복합재료 성형품을 성형시 주로 쓰이는 공법으로 다른 성형공법보다는 성형공정 원가가 매우 높은 반면 제품의 물성이 뛰어나다. 본 공법은 탄소/epoxy 또는 유리 섬유/epoxy prepreg 성형에 주로 적용되며 원하는 형상으로 적층 후 autoclave 속에서 열과 압력을 가하여 성형한다. Prepreg란 preimpregnated의 약어로서 일반적으로 섬유 보강재에 수지를 무게로 42 wt% 수준 포함한 것을 말한다. 이러한 prepreg를 경화시키면 복합재료는 섬유를 부피로 60% 정도 포함하게 된다. 그림 6은 vacuum bag forming의 예를 나타낸다. 금형의 표면은 구멍이 없는 테프론 필름으로 덮어서 prepreg에서 나오는 수지가 금형에 붙는 것을 방지한다. 테프론 필름 표면 위에 수지 흡수제(resin bleeder)가 놓여지고 그 위에 구멍이 있는 테프론을 놓는다. 그 위에 복합재료 prepreg layer들을 원하는 방향에 따라 놓는다. Prepreg 위층에는 아래면과같이 테프론, 수지 흡수제, 구멍이 없는 테프론을 덮는다. 그 위에 온도 분포를 균일하게 하기 위하여 알루미늄 caul plate를 놓고, 위에 구멍이 없는 테프론을 덮는다. 그 위에 진공 펌프로 공기를 뽑아 낼 때 공기의 통로가 되는 air breather를 놓은 후 나일론으로 제조된 진공백을 이용하여 덮은 후 vacuum sealant를 이용하여 진공 포장한다. 이렇게 진공백에 쌓여진 prepreg는 autoclave 밖에서 진공이 잘되었는지 확인한 후 autoclave내에 투입하여 진공관을 연결시킨다. 예열이 된 autoclave 내에서 열이 가해지면서 prepreg의 여분의 열경화성 수지가 빠져나오며 각 layer에 압력을 가하면서 제품내에 기공을 줄여 제품을 만든다. 이 공법은 열과 압력을 가하는 정도에 따라 제품 물성에 큰 영향을 준다. 그러므로 성형 압력과 가압 시간, 가압온도 등의 조건을 신중하게 결정하여야 한다. 그림 7은 전형적인 탄소섬유/epoxy 수지 복합재료 성형시의 경화 사이클을 나타낸 그림이다. Autoclave 공법을

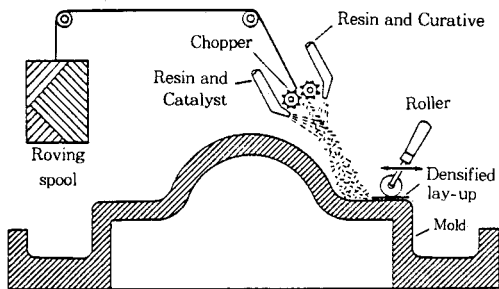


그림 5. Spray-up 공정.

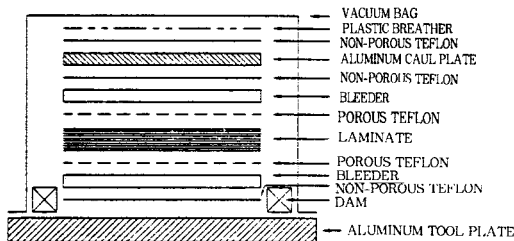


그림 6. Vacuum bag 공정.

이용한 제품 성형시 물성이 우수한 제품을 성형하기 위해 요구되는 사항을 아래에 정리하였다.

- 재료내 온도가 경화 도중 항상 preset 온도를 넘지 않도록 조절한다.
- 경화시 제품내 수지량이 균일하도록 조절해야 한다.
- 재료는 균일하게 완전하게 경화되어야 한다.
- 경화된 제품내 기공이 가능한 적은 양이 포함되도록 성형하여야 한다.
- 경화 과정은 가능한 짧은 시간 내에 이루어지도록 성형하여야 한다.

3.3 RTM(Resin Transfer Molding)

RTM 성형은 섬유 보강재를 제품 형상과 비슷하게 재단을 하여 금형 속에 넣고 금형을 결합시킨 후, 수지를 금형내에 주입하여 복합재료를 성형하는 공법이다(그림 8). RTM 성형시 요구되는 기술로는 1) 요구 성능을 만족시키는 preform을 설계하여 preform 제조시 섬유 절단 최소화 기술, 2) 수지 함침 과정에서 성형 인자(성형 온도, 주입 압력, 수지의 점도, 섬유 부피 함유율, mold 형상, 경화 반응도)의 상관관계를 이해하여 제품의 내부에 수지가 부족하거나, 기공 등이 발생하지 않도록 성형 조건을 예측하는 기술, 3) 부품의 형상에 따라 수지 주입구의 위치, 크기 및 수, vent의 위치, 크기 및 수 등의 많은 설계 변수 등을 고려한 금형 설계 기술 등이 있다. 제품을 금형에서 탈형 후에 경우에 따라 후가공이 필요하며, gel coat를 금형 표면에 도포 후 성형을 하는 방법도 사용한다. 이러한 방법은 표면의 품질을 향상시키고, 최

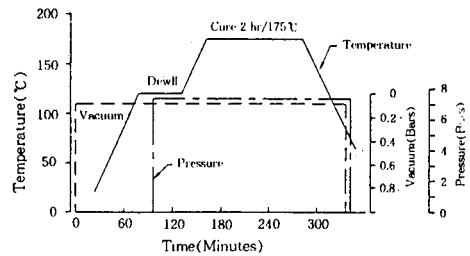


그림 7. 탄소섬유/epoxy 복합재료의 autoclave내 성형 cycle.

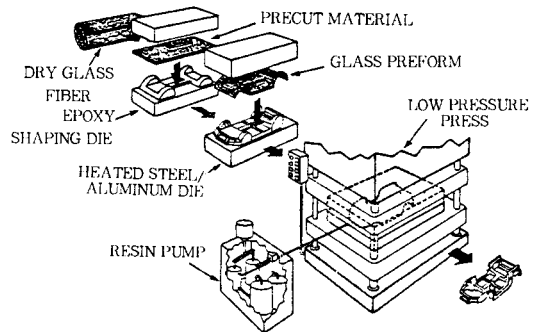


그림 8. RTM 공정.

종 제품의 이형을 용이하도록 도와준다. 이러한 공법을 이용한 제품으로는 상용차의 외장부품, 스포츠카의 외장품, 항공기용 구조물, 날개, 의자, 욕조, 미사일 발사관 등의 광범위한 분야에서 응용되고 있다. RTM과 매우 유사한 공정으로 SRIM(structural reaction injection molding) 공법이 있다(그림 9).

3.4 압축성형(Compression Molding)

압축성형을 통하여 제품을 생산하는 방법은 기존의 수작업이나 다른 공법에 비해 물성 및 생산성 향상과 더불어 치수 안정성과 품질 안정화를 가능하게 하였다. 또한 압축 공정은 복잡한 구멍, boss, rib, flange 등을 삽입한 형태의 제품을 일체로 성형할 수 있다는 장점이 있다. 그림 10은 압축성형 공정을 나타내었다. 최근에는 열가소성 수지를 이용한 GMT(glass mat reinforced thermoplastic)를 개발하여 압축성형을 통하여 자동차 및 항공 분야에 적용을 하고 있다.

압축성형 공정은 자동차 및 건축 분야에 많이 사용되는 성형품들을 주로 SMC(sheet molding compound)와 BMC(bulk molding compound)와 같은 재료를 금형에서 성형하는데 주로 사용되어 왔다. SMC란 열경화성 수지(주로 불포화 폴리에스터 수지), 유리섬유, 탄산칼슘의 혼합물로 두께 1-5 mm의 sheet 상태로 공급되며 완제품을 성형하기 위한 중간 단계의 재료이다. SMC내의 수지는 경화가 되지 않은 상태이나 매우 점도가 높으며 (10,000-40,000 cps) 첨가제로는 CaCO_3 , 경화제, 증점

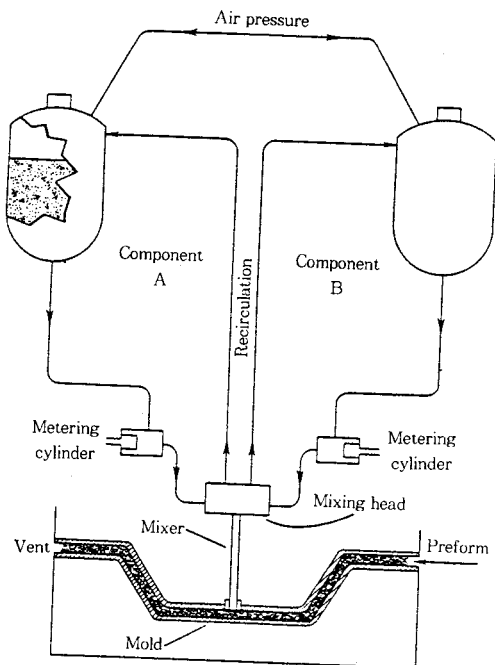


그림 9. SRIM 공정.

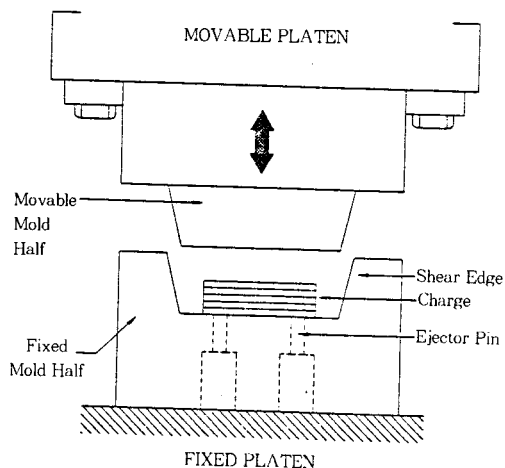


그림 10. 압축 성형 공정.

제, 수축방지제 등이 수지 내에 포함되어 있다. SMC sheet는 압축성형 공정을 통하여 수지 경화 반응이 진행되어 금형내에서 제품으로 성형된다. SMC 제조 공정은 수지 혼합, 유리섬유 배합, 압축함침 및 수지 점도를 올려주기 위한 숙성 과정으로 이루어진다. 그림 11은 SMC sheet가 생산되는 과정을 그린 개략도이다.

SMC를 이용한 제품 적용은 주로 국내에서는 욕조나 세면대 등의 건축 자재에 주로 사용해 왔으나 미국의 경우에는 SMC 생산량의 2/3 정도가 자동차 부품 특히 외

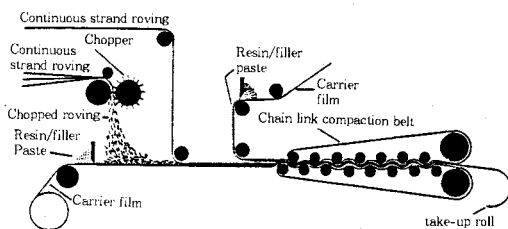


그림 11. SMC 제조 공정.

관에 쓰이고 있다. 자동차 외관의 경우에는 수축을 방지하고 표면의 광택도를 높이기 위한 성형 및 재료 formulation 기술이 필요하다. 이러한 표면 관련 문제점들을 해결하기 위해서 최근에는 금형내 gel coat를 바른 후에 성형 과정을 수행하거나, 성형 도중에 금형내의 제품 표면에 직접 수지 주입을 실시하는 in-mold coating 기술이 사용되고 있다. 이러한 방법은 표면 기복, 다공성 및 sink mark와 같은 결함을 없애 주는 방법으로 많이 이용된다. 이외에도 점합 기술 및 페인트 처리 기술 등이 수반되어야만 자동차 외관 적용이 가능하다. SMC를 이용한 압축 성형시 개발해야 할 기술적 과제들로는 아래와 같다.

- 1) 유리섬유의 분포가 균일하도록 sheet의 charge 형태 확립
- 2) 표면 품질 확보를 위한 금형 설계 및 저수축 수지 formulation 기술
- 3) 가격 경쟁력을 위한 생산성 향상 기술(속경화 formulation, 고속 성형 기술, 후가공 자동화)
- 4) 휨, sink mark 등의 발생 방지를 위한 최적 성형 조건 확립
- 5) 적용 분야의 확대를 위한 재료의 고성능화 및 소재의 저비중화 기술 개발

3.5 인발공법(Pultrusion)

Pultrusion 공법은 단면적이 일정한 고강도 복합재료 구조물을 연속적으로 성형하는 공법이다. 이 공정은 연속 섬유 roving과 mat를 creel과 수지 bath를 통과시켜 수지를 함침시키며 수지 함침된 섬유들이 forming guide에 의해 제품 모양으로 모여져서 heating된 금형으로 들어간다. 금형을 통과하는 동안 수지의 열경화 반응이 진행되어 액체 상태의 수지가 점차 굳어져 금형으로부터 나오면 clamping puller에 의해 당겨져 연속적으로 단면적이 일정한 제품이 생산된다. 당겨진 제품은 cutter에 의해 원하는 길이로 잘려진다. 그림 12는 전형적인 인발성형 공법의 개요도이다. 인발성형 공법은 생산성이 높고 제품의 섬유 부피 함유율이 높은 제품 생산이 가능하다. 또한, 제품 길이가 무제한인 제품을 생산할 수 있는 장점이 있다.

인발성형의 핵심 기술은 수지 선정 및 혼합, 강화 섬유

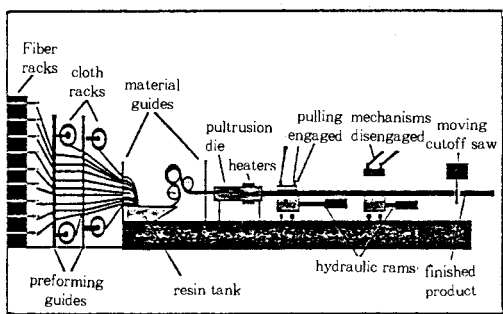


그림 12. 인발성형 공법.

의 preforming guide 설계, 금형의 온도 조절로 분류된다. Preforming guide는 사용되는 섬유들이 금형내로 과열되지 않고 형태를 유지하면서 들어가도록 해준다. 그러므로, 제품 형상이 복잡한 경우, 중공 형태일 경우, mat나 fabric을 사용할 경우 등에는 preforming guide 설계 기술이 매우 중요하다. 성형시 금형 온도 조절과 수지의 혼합 기술은 생산 속도와 제품의 품질에 큰 영향을 준다. 특히, 두께가 두꺼운 제품을 성형시에는 제품 내·외부의 경화 속도 차이에 의한 crack 발생을 방지하기 위해서 수지와 유리섬유가 금형 내부에 들어가기 전에 heater를 통과시켜 부분적으로 경화시킨 후 성형하기도 한다. 최근에는 열가소성 수지를 이용한 인발공법도 적용이 되고 있다. 열가소성 인발성형 공법은 extruder와 인발기를 함께 이용한 직접 생산 방식과 prepreg를 재료를 사용한 간접 생산 방식이 있다. 열가소성 인발성형 금형의 출구에는 제품의 형상을 유지해 주기 위한 냉각장치가 설치되어 있는 것이 특징이다. 인발성형시에 최적 조건을 얻기 위해 고려해야 될 성형 인자들은 인발속도, 금형의 형상, 성형 제품의 섬유 부피 함유율과 사용 섬유 형태, 수지반응성, 금형 길이 등이 있다. 최근에는 pultrusion/winding, pultrusion/braiding, pultrusion/extrusion, pultrusion/compression 공법 등이 개발 중이다. 이러한 공법들의 최적 성형 조건을 위해서는 고려해야 할 성형 인자들이 더욱더 많아지게 되었다.

인발성형을 통한 제품들은 성형품의 특성상 단면적이 일정하므로 건축 분야, 수송기 및 항공/우주 분야의 구조물 적용 등에 많이 쓰이고 있다. 이 공법은 타 공법에 비하여 생산성이 우수한 장점을 가짐에 따라 가격 경쟁력이 높으며 시장 수요가 점차 증가되는 추세이다. 적용 제품으로는 냉동 트럭 container 구조물, 창문틀, 전기 절연체, 냉각탑 구조물, 자전거 frame, 다리 건설용 beam 구조물, 버스 내·외장재, 고압선 cover, 석유 시추용 rod, 해양 platform, 다리 건설용 tension rope, 콘크리트 구조물 내에 사용되는 rebar 등 적용 분야가 다양하다.

3.6 Filament Winding 공법

Filament winding 공정은 섬유 roving을 수지 bath

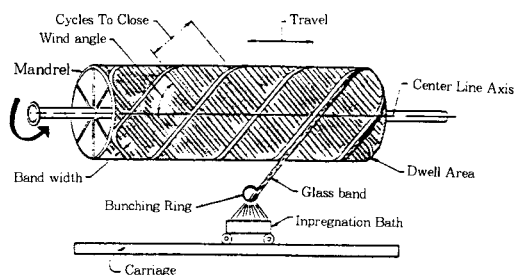


그림 13. Filament winding 공법.

속을 통과시킨 후 mandrel 위에 감아서 제품을 제조하는 방식이다(그림 13). 이때 섬유의 장력과 섬유 roving이 감기는 방향 등이 정확히 조절되도록 설비들이 자동화되어 있다. 주로 mandrel이 회전되면서 섬유 roving이 감겨지며 carriage의 이송 속도와 mandrel 회전속도로 섬유 roving의 winding 각도를 조절한다. 원형 mandrel의 경우, 와인딩 각 θ 도는

$$\theta = \frac{2\pi Nr}{V} \quad (2)$$

로 표시되며, 여기서 N 은 회전속도, V 는 캐리지의 이송 속도이고, r 은 섬유가 mandrel에 감길 때의 반경이다. r 은 winding 과정에서 증가하므로, 일정한 θ 를 얻기 위하여서는 V 와 N 을 조화시켜야 한다. F/W 공법은 저렴한 생산 가격과 높은 생산성으로 원형 형태의 제품 제조에 주로 적용되었다. 최근 computer control 기술과 다양한 설비들의 개발로 최근에는 비대칭 모양의 제품 생산에도 적용되기도 한다. F/W 공법의 사용 분야는 다양하여 군수 용품으로는 헬리콥터의 rotor blades, tail rotor booms, rocket motor cases, external fuel tanks, pressure bottles 등에 적용되며, tennis racket, ski poles, baseball bats, drive shaft 등 스포츠 및 일반 산업용으로 널리 쓰이고 있다.

3.7 열가소성 수지 복합재료 성형

열가소성 복합재료를 이용한 성형은 열경화성 성형공법과 큰 차이는 없으나 열가소성 수지는 수지의 중합 반응이 완료된 후이므로 성형중 장시간 고온에서 반응이 진행되는 과정은 일어나지 않으므로 열경화성 성형공법에 비해 성형시간을 단축시킬 수 있다. 열가소성 복합재료 성형은 수지의 특성 때문에 이미 성형된 제품을 2차 성형을 통하여 다른 모양으로 변형시킬 수 있으며 열을 가하여 접합시킬 수도 있다. 표 3은 열가소성 수지 복합재료 성형시 일어나는 성형 과정을 도표화 한 것이다. 공정을 이루는 각 과정이 따로 분리되어 별도로 진행되지만 경우에 따라 경제성을 고려하여 여러 스텝의 성형 절차를 한 공정으로 생산하기도 한다.

열가소성 복합재료의 기계적 특성은 섬유 표면 처리제

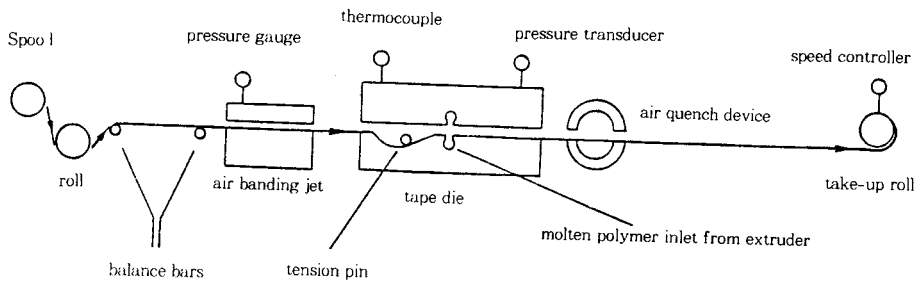


그림 14. 열가소성 prepreg 제조를 위한 hot melt 공정.

표 3. 열가소성 수지 복합재료 성형공정 과정

1. Fiber Formation
2. Fiber Treatment
3. Combining
4. Ply Formation
5. Layup
6. Melting
7. Devolatilization
8. Consolidation
9. Forming
10. Solidification
11. Assembly

표 4. 열가소성 Impregnation 공정들

- | |
|------------------------|
| Hot Melt Process |
| Solution |
| Slurry |
| Dry Powder |
| Commingled Fiber |
| Film |
| Surface Polymerization |

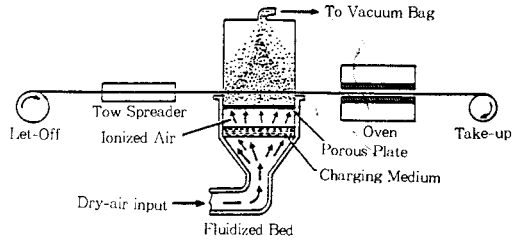


그림 15. Fluidized bed를 사용한 열가소성 prepreg 제조 공정.

생물이 높으므로, 성형 압력, 성형 온도 및 시간 조절을 적절히 조절해야 한다. 그림 16¹³은 열가소성 복합재료 consolidation 과정시 시간-온도-압력 분포도를 나타내었다. 그림에서 보면 수지가 녹기 시작하면서 압력이 가해지기 시작한다. 성형 압력은 ply간의 접착과 기포들이 없어질 때까지 계속된다. 냉각 과정에도 delamination을 방지하기 위해 성형 압력이 계속된다. 온도가 열가소성 수지의 T_g 보다 낮아지면 성형 압력을 제거한다. 성형 과정 중 온도 분포 예측은 가능하나 완전한 consolidation을 위한 시간, 온도 및 압력을 종합적으로 해석하는 방법은 현재 개발 중이다. 생산성을 높이기 위하여 최고 온도 및 압력에 도달하는 시간을 가능한 줄여야 하며 설정 조건이 성형공정비 및 생산성에 큰 영향을 미친다. Consolidation 과정 동안에 복합재료의 두께가 점차적으로 줄어들며 그림 17에 나타내었다. Bulk consolidation 동안에는 layer간의 간격이 줄어들면서 수지가 녹는 즉시 layer간의 접착이 시작되며 이때 가해지는 성형 압력으로 열가소성 수지는 viscoelastic 반응을 나타낸다. Commingled fiber를 사용할 경우에는 이때 섬유 bundle내 수지 함침이 일어난다. 수지가 고르게 분포되고 여분의 수지가 빠져나오면 그 후에 성형 압력 급격히 증가된다. 그림 17에서 보듯이 100% adhesion 과정이 지나면 consolidation 과정이 끝난다. Solidification 과정중 수지의 수축에 의해 제품내 기공 발생을 방지하기 위해서는 성형 압력이 계속 유지되어야 한다.

최근에는 GMT(glass mat thermoplastic)를 이용하여 자동차의 범퍼, battery tray, seat structure, dash board 등에 널리 쓰이고 있다. 또한 pultrusion 공정을 이용한 long fiber reinforced resin 개발로 충격성이 뛰

의 종류에 따라 크게 변화한다. 표면 처리제는 사용되는 섬유와 수지의 종류에 따라 적절히 사용되어야 하며, 성형시 증발이 되지 않아야 하며 사용 수지와 접착성이 좋아야 한다. 표면 처리제는 섬유 표면과 반응을 하는 저분자 co-polymers가 주로 사용된다. 이러한 섬유 표면 처리는 fiber formation 또는 prepreg formation시 solution coating 방식으로 주로 적용된다. 섬유에 수지를 함침시켜 적정 섬유 부피 함유율의 prepreg를 만든다. 표 4에 열가소성 수지 함침 공정을 나타내었다. Hot melt process는 GMT로 알려진 복합재료 제조 공정에 적용되어 상업적으로 가장 널리 쓰이는 공정이다. 이 과정은 solvent가 필요 없는 장점이 있으나 함침을 위해서는 높은 온도 및 압력이 필요하다. 그림 14¹¹는 압출기를 사용한 hot melt 공정을 나타내었다. 이 외에도 fluidized bed를 이용한 powder coating 공정으로 tow prepreg를 생산하며 (그림 15)¹² commingled fiber를 이용하여 직조함으로써 fabric prepreg를 만드는 공정은 개발 중이다.

열가소성 복합재료의 consolidation 과정은 수지 점도가 열경화성 수지 점도보다 높기 때문에 제품내 기공 발

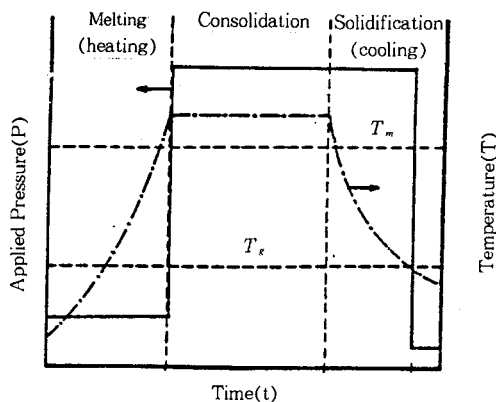


그림 16. 열가소성 복합재료 성형시 온도-시간-압력 분포도.

어난 제품을 injection molding 공법을 이용하여 제품을 성형하기도 한다.

4. 성형공법 선정

설계 초기에 잘못된 성형공법 선정은 개발비 상승과 개발 기간 연장 등의 결과를 초래할 수가 있다. 그러므로 성형공법 선정은 제품설계시 아주 중요한 부분이다. 또한 성형공정 변수를 잘못 설정할 경우 불완전한 consolidation이 발생하여 제품내 기포 생성, 함침 불량, 섬유 분포도 불균일 등이 생길 수가 있다. 이러한 제품 불량은 기계적 물성을 저하시키며 내화학성도 감소된다.

제품의 형태에 따라 성형공법을 적절히 선정하여야 하며 rib가 포함된 제품은 성형시 섬유가 포함된 수지 재료의 유동을 고려하여 성형법을 선정하여야 한다. Hollow 형태의 제품을 성형시에는 F/W 공법이 적절하며 성형시 사용하는 core의 제거 방법을 고려하여야 한다. 제품이 길고 대칭성을 가지며 단면적이 일정한 형태의 제품은 extrusion이나 pultrusion 공법을 이용하여 제품을 생산하는 것이 가격이나 생산성에 유리하다.

제품의 크기에 따라서도 성형 압력과 설비의 용량에 제한을 받기 때문에 성형공법 선정이 제한된다. 성형 압력이 적으면 적을수록 같은 용량의 설비를 사용할 경우, 생산 가능한 제품의 크기가 커진다. 그리고, 제품의 기능 및 요구물성, 수지의 유동성, 재료 반응시간 등에 따라 성형공법 선정이 제한된다. 또한, 제품의 특성상 요구되는 표면 품질(매끄러운 면, 특정한 색상, textured 표면)의 특성을 고려하여 성형공법을 선정한다. 이때, 금형내에 in-mold coating이나 후가공 처리와의 호환성 등도 고려하여야 한다.

성형공정의 생산성은 성형공법 선정시 고려해야 할 가장 중요한 인자이다. 생산량이 적고 제품의 크기가 큰 경

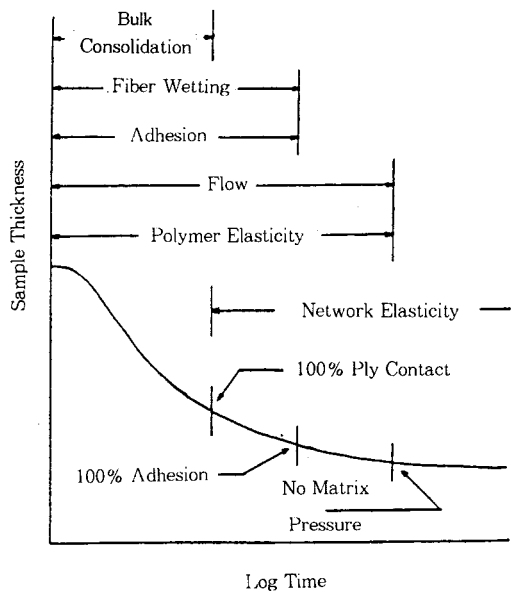


그림 17. 열가소성 복합재료 성형시 시간과 두께의 관계.

우에는 금형비가 적게 들고 설계 변경이 쉬운 hand lay-up이나 spray-up공정이 경제적인 면에서 가장 적합한 공정이다. 반면 생산량이 많을 경우에는 자동화 공법인 injection molding이나 compression molding 공법이 인건비 비율을 줄일 수 있기 때문에 선호되는 공법이다. 그림 18¹⁴은 열경화성 제품 성형시 성형공법 선정에 대한 guide를 나타내었다. 그림에 나타내었듯이 제품 크기 및 형태, 제품 물성, 사용 재료, 생산량 및 제품 생산 가격 등이 성형공법시 고려해야 할 사항임을 알 수 있다.

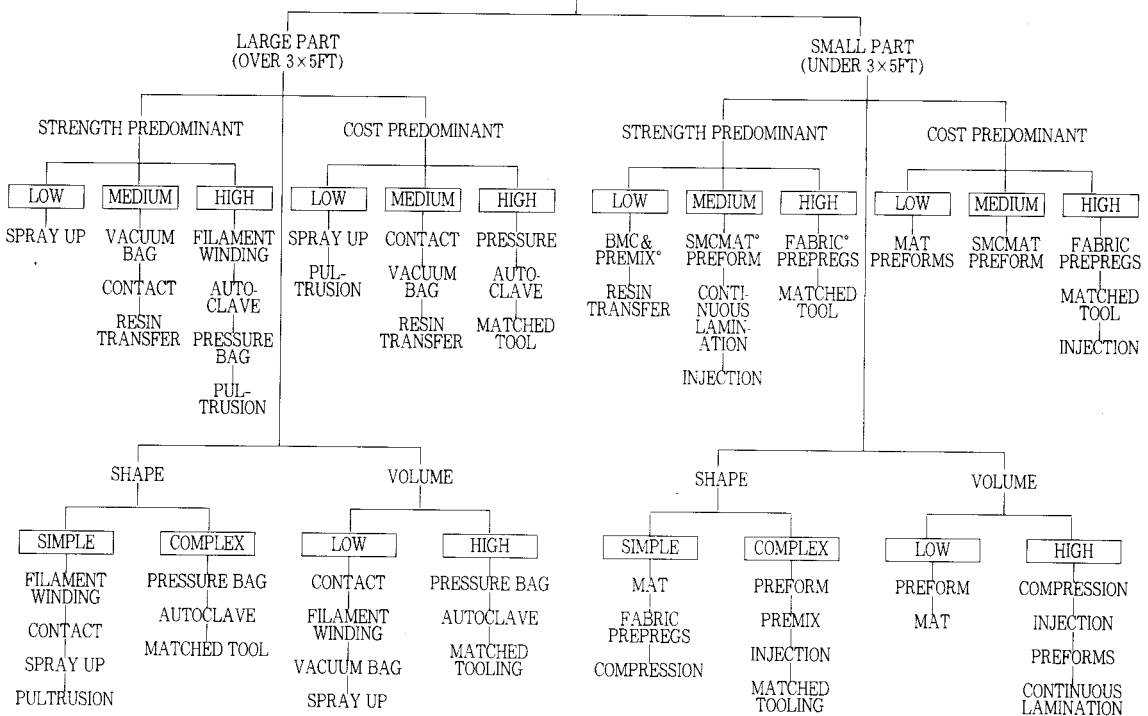
이 외에 경제성 분석시 고려해야 할 사항으로는 성형후 완제품을 생산하기 위해 필요한 후가공 공정 비용이 있다. 후가공 공정으로는 trimming, finishing, joining attaching hardware 등이 있다. 그러므로, 제품설계시 일반적으로 아래 사항 등을 고려하면 성형공법 선정에 관계없이 가격 절감과 성형성 향상을 이룰 수 있다.

- 1) 가능한 간단한 형태로 설계한다.
- 2) Stiffness를 향상시킬 수 있는 형태로 설계하고 rib 수는 가능한 줄인다.
- 3) 조립 시간과 joining을 줄이기 위해 가능한 부품 수를 줄이는 방향으로 제품을 설계한다.
- 4) 두께가 가능한 균일하게 설계를 한다.
- 5) 설계 허용공차를 가능한 크게 잡는다. 일단 생산이 결정되면 허용공차 관리를 철저히 한다.

5. 맺음말

이상과 같이 복합재료 성형시 고려해야 할 기본 물성

REINFORCED PLASTICS PART TO BE PROCESSED(THERMOSET)



*BMC, PREMIX PREFORMS AND PREPREGS ALL MATCHED TOOL COMPRESSION MOLDING

그림 18. 열경화성 복합재료의 성형공법 선정과정.

이론, 성형공법의 종류 및 특성에 관하여 논하였다. 또한 성형공법 선정시 고려해야 할 인자들에 대해서도 언급하였다. 특히, 최근 복합재료 적용은 항공, 우주 산업보다는 자동차, 전자 및 건축 분야의 적용이 더욱더 활발하기 때문에 생산성 향상과 가격 절감이 보다 큰 문제로 부상되고 있다. 이를 볼 때 복합재료의 사용이 더욱더 활발히 진행되기 위해서는 생산성 향상과 품질 안정화를 동시에 이룰 수 있는 자동화 성형공법 연구가 매우 중요한 과제라고 생각하며, 이를 위해서는 생산성 향상을 위한 원재료 개발과 기존에 사용되는 여러 부품을 일체화하여 단일 부품으로 생산하는 제품 설계 기술 등에 대한 연구가 함께 진행되어야 한다. 고분자 복합재료의 새로운 분야 적용 확대를 위해서는 경사 복합재료의 생산이 가능한 신 공정 개발과 smart structure 복합재료 생산에 용이한 신 공법 개발 연구 등도 함께 수행되어야 될 과제라 생각한다.

참 고 문 헌

1. 차세대 복합재료 핸드북, 편집 목광 일본 규격 협회 출판, 152 (1990)
2. S. Krolewski and T. G. Gutowski, "Effects of the

Advanced Composite Fabrication Process on Part Cost", 18th International SAMPE Technical Conference Proceeding, 83-97 (1986).

3. Y. R. Kim, S. McCarthy, J. P. Fanucci, and S. C. Nolet, "Compressibility, and Relaxation of Fiber Reinforcements During Composite Processing", SPE ANTEC Proceedings, 36, 1252 (1990).
4. F. A. L. Dullien, *Porous Media: Fluid Transport and Pore Structure*, Academic Press, New York, 1979.
5. P. C. Carman, *Flow of Gas Through Porous Media*, Academic Press, New York, 1956.
6. Y. R. Kim, S. McCarthy, J. P. Fanucci, and S. C. Nolet, "Resin Flow Through Fiber Reinforcements During Composite Processing", 2nd. International SAMPE Technical Conference, 709 (1990).
7. 한국 복합재료 학회지, 제 7권 2호, 24 (1994).
8. C. D. Han, D. S. Lee, and N. B. Chin, "Development of a Mathematical Model for the Pultrusion Process," 40th, Ann. Tech. Conf., RP/CI, Soc. Plast. Ind. (1985).
9. J. M. Tang, W. I. Lee, and G. S. Springer, *J of Composite Materials*, 21, 421 (1987).
10. G. L. Batch and C. W. Macosko, "A Computer Analysis of Temperature and Pressure Distributions in a Pultrusion Die," 42nd, Ann. Tech. Conf., RP/CI, Soc. Plas. Ind. (1987).
11. T. Chung, "Liquid Crystal Polyester-Carbon Fiber Com-

- posites," NASA Contractor Report 172323, NASA Langley (1986).
12. J. D. Muzzy, Research in Progress, Georgia Institute of Technology (1987).
 13. Manufacturing International '88 Proceedings Vol 4, Editor T. G. Gutowski 32 (1988).
 14. D. V. Rosato, *Designing with Plastics and Composites: Handbook*, Van Nostrand Reinhold 698 (1991).