

복합신소재와 성형공정

Advanced Composite and Their Manufacturing Processes



지효선(Hyo-Seon, Ji) 이사 | 대원대학 철도건설과 부교수 | 공학박사 | hsjj@mail.daewon.ac.kr
신욱범(Wook-Beom, Shin) 감사 | (주)일신하이텍 부사장 | 공학박사 | wbshin@hanafos.co.kr

1. 서론

과거 10여년 동안 건설기술자와 시설물관리담당자는 구조물의 노후화 특히, 강재 부식에 대한 해결책을 찾기 위해 고심해 왔다. 기간시설의 유지관리업무를 담당하고 있는 관리 주체는 강재 구조물이나 철근콘크리트 구조물의 노후화에 따라 날이 갈수록 누적되는 보수요구 물량을 도저히 감당할 수 없게 되었다. 뿐만 아니라 기간 시설의 건설이 증가함에 따라 유지관리에 대한 부담은 점점 가중되고 있다. 내구성을 증대시켜 수명이 긴 구조물을 건설해야 할 필요성과 기존 구조물의 수명 연장을 위한 필요성이 심각하게 대두됨에 따라, 근자에 해외 선진국에서는 신소재(ACM, Advanced Composite Materials)를 건설분야에 적용하는 방안을 매우 적극적으로 연구개발하고 있으며, 이 신소재는 복합재료(Composite Materials) 또는 FRP(Fiber Reinforced Polymers) 라고도 불린다. 이 신소재는 설계강도에 맞게 자유자재로 재료를 복합시켜 만들 수 있으며, 구조물의 중량을 줄일 수도 있는 혁신적인 건설재료이다. 지금

까지 신소재는 주로 항공기, 선박, 자동차 및 스포츠용품에서 널리 사용되어 왔으며, 복합소재에 사용되는 섬유는 유리섬유, 탄소섬유 및 아라미드 섬유가 주종을 이루고 이들을 결합시키는 기지(Matrix)로는 에폭시, 비닐에스터, 폴리에스터 등 여러 가지가 사용된다. 이 신소재는 경량이며 고강도, 내부식성, 내구성이 뛰어나서 기존의 건설재료인 강재나 콘크리트에 비해 우수한 장점을 지니고 있다. 복합신소재는 강재나 콘크리트에 비해 구조물의 수명이 길고, 내부식성으로 인해 유지관리비가 낮고 경량이라 공사비가 절감되며, 구조물의 전체 수명기간이 길어져서 수명비용(LCC)이 감소되어 다른 건설재료에 비해 경제적이라 할 수 있다. 이처럼 기존 건설분야의 각종 재료에 비해 여러 가지 우수한 장점을 가지고 있는 이 복합신소재는 수년 내에 건설재료로서 각광을 받을 수 있을 것으로 전망된다. 구미 선진국에서 이러한 신소재의 건설분야 이용기법이 확산되고 있는 추세와 시대적 흐름에 발맞추어 신소재의 모든 장점을 이용하여 기존의 노후화된 교량 바닥판을 대체할 수 있고 환경친화적인 신설교량을 위해 경량이면서, 내부식

성, 고강도의 특성을 지닌 복합신소재 교량바닥판 개발의 필요성이 대두되었다. 중량이 가벼워 비강성(Modulus/Density)과 비강도(Strength/Density)가 크다(약 강재의 1/4-복합재료중량 :1.82gf/cm³ 강재중량 :7.85gf/cm³). 그리고 원하는 방향으로 강성과 강도를 조절할 수 있다. 즉, 섬유방향으로 배치할 수 있다. 일반적으로 등방성 재료는 모든 방향으로 강성과 강도가 같지만 복합재료(비등방성)는 필요한 방향으로만 강성과 강도를 높여서 재료의 낭비를 막을 수 있다는 장점이 있다. 복합샌드위치로 할 경우 국부좌굴을 방지할 수 있어 보강재를 따로 설치할 필요가 없다. 스티프너 등과 같은 기하학적 보강없이 구조부재를 보강할 수 있다. 피로저항에 우수하여 피로파괴에 유리하다. 유지관리하기 쉽고 유지관리비가 적게 든다. 시공하기가 쉽고 단순해서 공정이 빠르며 시공성이 향상된다. 열팽창계수가 낮아 온도의 변화에 의하여 크기가 거의 변하지 않는다. 제조방법이 용이하여 정형가공이 가능하다. 구조적 요구 사항에 따라 최적 부재/구조를 생산할 수 있어 성형성이 좋다. 우수한 내구성과 방식, 방수효과가 뛰어나 열화손상이나 방수문제가 없다. 감쇠(Damping)효과가 커서 외부 요인에 의해 진동이 발생할 경우 쉽게 진동을 흡수할 수 있는 장점이 있다. 작업이 수월하고 미

관도 좋아진다.

2. 복합신소재의 특성

복합신소재는 두 가지 이상의 성질이 서로 다른 물질이 거시적으로 혼합되어 유용한 물질이 된 것을 가리킨다. 두 가지 이상의 소재가 결합되기 때문에 단일소재에는 없는 여러 가지 특성을 창출해 낼 수 있다. 복합재료는 모재인 매트릭스(Matrix) 또는 수지(Resin)와 보강재인 섬유(Fiber)로 구성되어 있다. 예를 들어 자른 지푸라기를 섞어서 만든 벽돌은 단일재료인 벽돌보다는 강성과 강도가 크고, 대나무는 섬유가 축방향으로 배열되어 있어서 다른 나무보다 가늘게 더 높이 자랄 수가 있다. 또한 철근콘크리트도 넓은 의미의 복합재료 개념이다. 보강재나 모재의 원료는 금속, 고분자, 세라믹 등 재료의 소재와 최첨단 소재까지 포함해서 모든 소재가 활용될 수 있으며, 역학적 성능 및 경제성 등을 고려하

표 2.1 Composite Materials의 조건
: Fiber(보강재) + Matrix(Resin)

Fiber (보강재)	Matrix (Resin)
High Strength High Modulus	Low Strength Low Modulus

표 2.2 강재와 복합신소재의 역학적 특성비교

특 성		Glass Fiber	Quartz Fiber	Aramid Fiber	Carbon Fiber	Graphite Fiber	강재
물리 적	비중	2.13	2.20	1.44	1.77	1.61	7.85
	밀도 gf/cm ³ (lb/in ³)	2.13 (0.090)	2.20 (0.079)	1.44 (0.052)	1.77 (0.064)	1.61 (0.079)	7.85 (0.283)
	필라멘트 지름 μm	5.3~9.9	8.9	12	7.01	8.0	-
역 학 적	인장강도 MPa (ksi)	4600 (665)	3450 (500)	3600	3650 (530)	2200 (320)	2400 (350)
	인장탄성계수 GPa (10 ⁶ psi)	85.5 (12.4)	69.0 (10.0)	125	230 (33.5)	340 (50)	200 (30)
	파괴시 신장률, %	5.7	5.0	2.5	1.4	0.58	27

여 최적의 제품을 만들 수 있게 선별, 설계되어야 한다. 표 2.1과 같이 보강재와 모재에 대하여 요약할 수 있다.

복합신소재는 강재보다 훨씬 인장강도가 크다. 그래서 높은 인장강도를 요구하는 구조물에 매우 효과적으로 사용될 수 있다. 일반적으로 파괴시까지 연성거동을 보이게 되며, 필요한 성능에 따라 섬유 방향을 배치하여 강성을 조절할 수 있다. 표 2.2에서는 섬유(Fiber)의 종류 및 강재와 복합신소재의 역학적 특성을 보여 주고 있다.

3. 복합신소재의 종류

섬유는 복합재료에 구조강성 및 강도를 전달하기 위해 사용된다. 섬유의 선택, 보강형태의 상세 및 복합재료에 행해지는 보강과정의 선택은 복합재료에서 필요로 하는 특성에 의해서 결정된다. 복합재료의 강도, 강성 그리고 응력-변형률 특성은 섬유함유량, 사용된 매트릭스 수지 그리고 외력에 관한 화이버 방향의 함수이다. 유리섬유의 강도 특성은 weaving에 의해서 감소될 수 있다. 보강재료는 유리섬유의 접착을 조절하고 표면 안정을 얻기 위해서 적절한 등급으로 만들어 질 수 있다. 설계코드에 따라 E-glass, C-glass, ECR-glass의 보강재가 사용된다. 표 3.1은 유리섬유의 전형적인 특성들을 나타내고 있다.

E-glass 섬유는 고강도, 전기저항 복합재료가 요구

되어질 때 선택된다. 복합재료에서 광범위하게 사용되는 섬유 형태이다. C-glass 섬유는 화학적 저항이 요구되어지고 화이버 특성이 설계에 적당할 경우에 선택될 수 있다. 대단히 좋은 화학적 저항이 있지만, E-glass에 비교해서 저강도이다. 보통 표면 tissue의 형태로 사용된다. ECR-glass 섬유는 E-glass 섬유의 대안으로 선택될 수 있다. 화학적 작용에 저항성이 상당히 크고 E-glass 섬유와 유사한 특성을 가진다. Rovings은 pultrusion과 filament winding과 같은 자동화 된 복합재료 제조과정에서 직접적이고 광범위하게 사용되는 연속strand이다. Rovings의 사용은 인장이 방향을 조절하도록 적용될 수 있는 과정에 제한된다. 섬유 강도 특성은 로빙에서 가장 크나, woven 보강으로서 사용될 때 감소할 수 있다. CSM(Chopped Strand Mat)은 유리섬유 strand가 짧게 잘려지고 고르게 분포되고 임의의 방향성을 갖는 non-woven 평면 재료이다. 섬유 함량의 약 25%를 초과하지 않는다. 구조적 보강효과를 결정하는 유효 섬유는 기껏해야 체적의 10%이고, 불연속 섬유의 사용은 하중 전달에 대한 수지에 따라 결정된다. CSM 보강으로 제조된 복합재료는 저응력, 저강도에 한해서 적용된다. 접합재의 특성은 물에 노출된 곳에서 재료의 완전함을 결정하고, 삼투성과 물집을 피하기 위해서 수지와의 적합성을 보증하도록 재료를 선택해야 한다. CFM은 CSM의 대안으로 사용할 수 있다. 특성과 가능한 적용은 CSM과 유사하다. CFM은 섬유가 임의

표 3.1 유리섬유의 종류별 재료적 성질

내 용	E-glass	C-glass	ECR-glass
Specific gravity	2.54	2.50	2.71
Tensile strength N/mm^2 (22°C)	3400	3000	3300
Tensile modulus kN/mm^2 (22°C)	72	69	72
Elongation %	4.8	4.8	4.8
Coefficient. of thermal expansion $10^{-6}/^{\circ}C$	5.0	7.2	4.8

의 소용돌이 모양이고 연속이라는 점을 제외하고는 CSM과 유사한 non-woven 재료이다. 사용자는 공급자와 같이 특수한 수지에 대한 접합재의 적합성을 검토해야 한다. WR은 꼬이지 않은 섬유로 만들어진 양방향 보강재이다. woven 재료는 큰 면적의 복합재료를 만드는 데 쉽다. woven 재료는 임의의 섬유 보강재보다 고강도, 고강성 복합재료를 만들지만, 고중량 보강재에서 주름이 있으면 섬유 함유량을 40%이하로 제한한다. 그래서 WR에서 유효 화이버 볼륨은 휘어진 방향과 직물방향 각각 20%이다. woven fabrics은 다양한 패턴으로 fabric 스타일을 형성하기 위해 얇힌 실과 weft yarns, fibers 또는 filaments로 만들어진다. woven fabrics는 보통 woven rovings보다 더 가볍고, 주름이 덜지고, 섬유함유량을 50%이상 할 수 있다. Prepregs(수지침투 가공재)는 완전히 양생이 되지는 않았지만, 이미 스며든 수지의 섬유 보강재이다. Prepregs로 부터 복합재료의 제조는 70°C~150°C범위의 온도가 요구된다. 섬유 함유량은 50%가 적당하다. Prepregs는 설계와 제조과정이고 화이버 볼륨, 저 공극 및 복합재료의 고성능이 요구되는 경우에 고려되어야 한다. 구조물의 복합재료로서의 polymer수지의 선택은 많은 인자에 의해서 결정되어지고, 재료공급자와 제조자의 전적인 자문이 없이는 이루어지지 말아야 한다. 요구되는 특성은 보통 강도, 강성, 인성 그리고 내구성에 의해 지배받는다. 사용온도와 환경, 제조방법, 양생조건과 특성수준을 고려해야 한다. 안정한 수지를 선택하기 위해서는 사용온도를 알아야 한다. 왜냐하면 사용온도가 resin second order glass transition temperature 근처에 있다면 강성이 감소되고 creep가 발생하기 때문이다. heat distortion temperature(HDT)와 관련돼 있다. 복합재료의 성능은 polymer 특성치와 제조된 재료 품질의 함수이다. 저점성 polymer는 저공극 복합재료를 얻기 위한 완전한 주입과 섬유 wetting을 보증하기위해 사용되어야 한다.

양생과정의 조절과 폴리머의 완전한 양생을 얻기 위해서는 최적의 역학적 특성을 얻고, 열 softening을 방지하고, creep을 제한하고, 습기 확산을 감소하고 소성효과를 최소화하는 것이 필수적이다. 완전한 양생은 복합재료를 형성하기에 앞서 구성요소를 철저히하고 정확하게 혼합함으로써 이루어져야 한다. 사용자는 각 단계에 적용할 수 있는 최대 두께와 laminate가 양생되는 최대시간을 재료공급자에 자문을 해야 한다. 이것은 laminate의 고접착을 보증한다. Orthophthalic 수지는 가장싼 폴리에스테르 수지이며, 가정 광범위하게 사용된다. orthophthalic산은 우수한 역학적 특성, 적당한 사용온도 저항능력과 화학적 저항의 특성을 가지고 있다. 관련 규격은 없다. Isophthalic acid(IPA) 물에 저항, 화학적 저항 또는 열에 저항이 요구될 때 고려되어야 한다. IPA는 phthalic acid anhydride를 대신할 수 있다. 큰 신장률과 더불어 우수한 역학적 특성이 있지만, orthophthalic 수지보다 비싸다. 비닐 에스터 수지는 폴리에스테르나 우레탄 수지의 성분으로 만들어 질 수 있다. epoxide 수지로 만들어진 수지는 특히 상업적으로 중요하다. epoxies로 만들어진 비닐에스테르 수지는 화학 저항 FRP 구조, filament winding 그리고 pultrusion에 적당하다. 파괴 신장률은 약 6%이다. Phenolic novolac epoxies로 만들어진 비닐 에스터 수지는 용해력 저항에 적당하고 높은 사용온도에서 사용하기에도 적당하지만 약 3%의 낮은 파괴 신장률을 가진다. 비닐 에스터 수지는 isophthalic polyesters 보다 고성능에 적합하다. 왜냐하면 물과 화학작용에 대한 우수한 저항능력이 있고, 강도와 강성이 좋으며, 인성이 크다. 파괴 변형률은 표준 orthophthalic와 isophthalic polyesters의 2배이다. 에폭시는 다른 폴리에스테르와 비교해 볼 때 역학적 성질과 물에 대한 저항성이 우수하고, 양생하는 동안 수축이 덜 되지만, 가격이 비싸다. 일반적으로 제조방법은 자동화된 방법, pultrusion,

filament winding, resin transfer moulding 그리고 compression moulding processes이다. 에폭시 수지는 내구성과 역학적 성질이 좋고, 전단강도가 큰 경우에 사용되어야 한다. 미립자 필러는 non-structural이고, 복합재료에 한해서 사용되어야 한다. 사용자는 재료공급자에 자문을 구해야 한다. 필러는 수축을 감소시키고, 양생동안 prak exotherm을 감소시키고, 점성을 증가시키고, 국부적인 인성을 증가시키고, 비용을 감소시키기 위해 수지에 부가될 수 있는 무기물 미립자이다. 또한 탄성계수와 압축강도를 증가시킬 수 있고, 특수한 특성을 향상시키기 위하여 표면코팅이 함유될 수 있다. 색소는 적당한 색깔을 얻기 위해서 기본적인 수지나 Gel coats의 부분으로서 사용될 수 있다. 사용자는 재료공급자의 도움을 요청해야 한다. 색소는 자외선을 방지하기 위해서 사용될 수 있다. 상기와 같은 구성재료를 갖고서 복합신소재를 FRP (Fiber Reinforced Plastic : 섬유강화 복합재료), Laminate (적층 복합재료), Sandwich (샌드위치 복합재료)로 그 종류를 분류할 수 있다. 따라서, FRP (Fiber Reinforced Plastic : 섬유강화 복합재료)는 그림 3.2, 3과 같이 구별할 수 있다. FRP (Fiber Reinforced Plastic : 섬유강화 복합재료), Laminate (적층 복합재료), Sandwich (샌드위치 복합재료)로 그 종류를 분류할 수 있다.

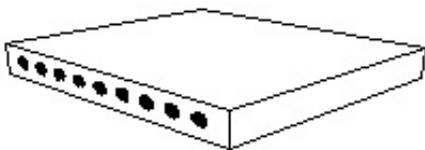


그림 3.2 Continuous FRP

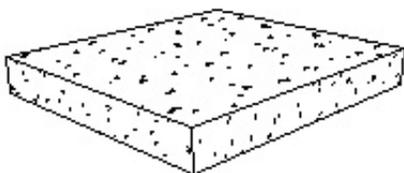


그림 3.3 Chopped FRP

그리고 Laminate (적층 복합재료)는 FRP가 층(Laminae)으로 이루어진 복합재료를 말하는데 그림 3.4와 같다.

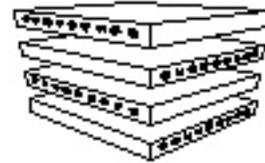


그림 3.4 Laminate(적층복합재료)

또한 Sandwich (샌드위치 복합재료)가 있다. 샌드위치구조는 복합적층의 특수한 경우이며 구조적, 환경적 요구조건에 맞도록 강성이 있는 면재와 저밀도인 심재로 구성되어 있으며 면재와 심재를 주로 접착제로 접착하여 사용된다. 면재는 축하중, 휨하중, 면내전단하중에 견디고 충분한 휨강성과 면내전단강성이 있어야 하며, 재질로는 알루미늄과 티타늄과 같은 금속재료나 유리섬유보강복합재(Glass Fiber Reinforced Plastic, GLFRP), 탄소섬유보강복합재(Graphite Fiber Reinforced Plastic, GRFRP)와 같은 복합재료가 사용된다. 심재는 면재를 안정적으로 지지하고 전단하중을 견디어야 하며, 벌집형태구조, Balsa와 같은 목재, 또는 Styrofoam 등의 발포재가 사용된다. 심재로 가장 많이 사용되는 벌집형태구조는 알루미늄, 섬유보강복합재 등의 박판재질을 접착시켜 벌집형태의 구조로 만든다. 심재의 물성치는 박판의 재질과 형상에 따라 다르며 일반적으로 직교이방성을 보인다. 이러한 샌드위치는 하중을 한쪽 면재에서 심재로, 그리고 다른 면재로 전달하여 복합체가 하나의 구조물로서 거동할 수 있도록 강한 접착제로 결합되어 있다. 벌집구조형태의 심재를 갖는 샌드

위치 구조의 큰 강성은 I형보에 비교하므로서 가장 쉽게 이해할 수 있다. 면재는 I형보의 플랜지에서 처럼 휨하중을 견디며, 심재는 I형보의 웨브처럼 전단하중을 지지하며 면재간의 거리를 유지하여 구조적 강성을 높여준다. 하지만 벌집구조형태의 심재는 I형보의 웨브와 달리 면재를 연속적으로 지지해 줄 뿐만아니라 비틀림강성도 크게 하여준다. 샌드위치 형태는 그림 3.5~7과 같다.



그림 3.5 하니컴 코어를 갖는 샌드위치형태

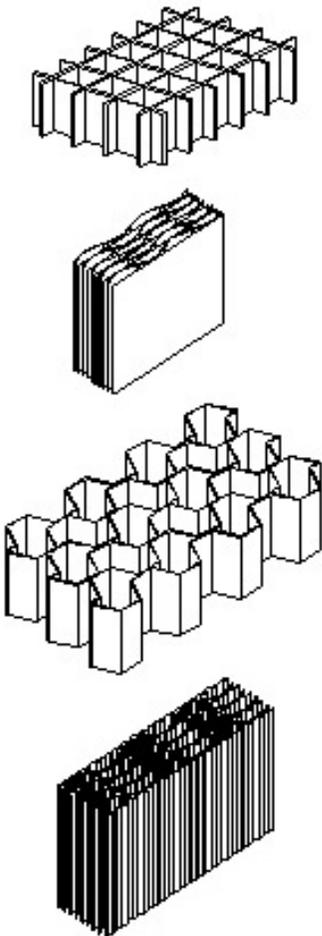


그림 3.6 다양한 형태의 코어를 갖는 샌드위치형태

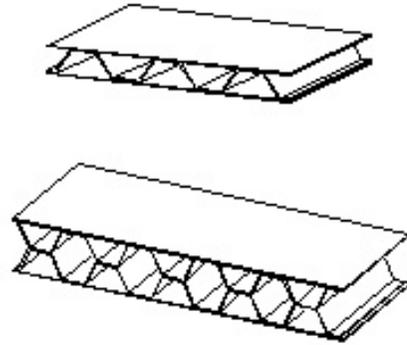


그림 3.7 Corrugate 코어를 갖는 샌드위치형태

4. 성형공정

복합재료를 성형하는 방법은 여러 가지가 있는데, 고분자 물질을 기지로 하는 복합재료의 성형방법으로는 진공백 성형(Vacuum Bag Molding), 압축성형(Compression Molding), 펄트루전(Pultrusion), 필라멘트 와인딩(Filament Winding), RTM(Resin Transfer Molding), ERM(Elastic Reservoir Molding), 포일 성형(Foil Metallurgy), 주조(Casting), 전착(Electrodeposition), 증착(Vapor Deposition) 및 금속용사(Metal Spray) 방법 등이 있다. 이 중에서 고분자 복합재료를 성형하는데 많이 사용되는 방법은 다음과 같다.

4.1 필라멘트 와인딩(Filament Winding)

그림4.1는 필라멘트 와인딩 공정을 보여 준다. 이 공정에서는 많은 수의 섬유가 실패로부터 풀려서, 액체의 수지, 촉매(Catalyst), 염료와 자외선 흡수제 등이 섞여 있는 수지통(Resin Bath) 속을 통과한다. 섬유의 장력은 실패와 수지통 사이의 섬유안내기(Fiber Guide)에 의하여 조절된다. 수지통에서 빠져나온 로빙(Roving)은 수지닦는 장치(Resin Wiping Device)로 여분의 수지를 닦아낸 후, 캐리지(Carriage)에서 넓게 펼쳐진 후 맨드릴(Mandrel)에 감기게 된다. 필라멘트 와인딩 제조방법

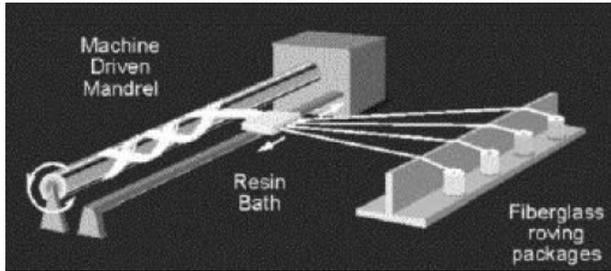


그림 4.1 필라멘트 와인딩 공정

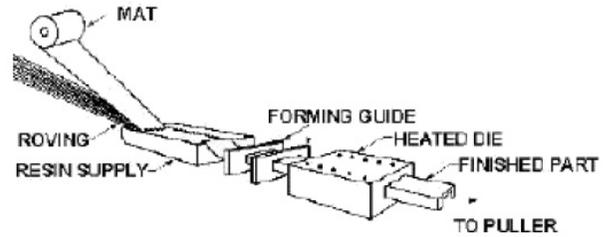


그림 4.2 펄트루전(Pultrusion) 공정

에서 수지의 함유량은 섬유의 장력과 수지를 닦는 장치에서 수지를 닦아내는 정도에 관련된다.

4.2 펄트루전(Pultrusion)

펄트루전은 길고 곧으며 단면적이 일정한 구조재를 제조하기 위하여 사용된다. 펄트루전으로 제조할 수 있는 모양은 원형의(속이 차거나 빈) 통, 평평한 판, 여러 가지 보(Beam), (앵글, Channel) 등이다. 최근에는 단면적이 변하거나, 곡선 모양의 제품을 펄트루전으로 제조하는 기술이 개발되었다. 그림 4.2는 펄트루전 공정 라인의 일반적인 모양을 보여준다. 이 공정에서는 연속적인 스트랜드 로빙(Strand Roving)과 매트(Mat)라인이 한쪽으로부터 당겨져서 수지를 담고 있는 통(Resin Bath)으로 통과하게 된다. 이 통속에는 경화제(Curing Agent), 염료, 자외선 차단제 및 화재 지연제와 같은 물질이 함께 들어 있다. 스트랜드 로빙과 매트 위에는 열가소성 폴리에스테르로 된 표면을 매끄럽게 하는 층을 덮게 된다. 이와 같이 혼합된 재료들은 예열이 된 여러 단계의 금형 내부를 통과하며, 이때 섬유가 균일하게 배열되면서 여분의 수지를 짜내게 된다. 마지막의 성형과정은 점차 좁혀지는 금형 내에서 이루어지며, 이렇게 제조된 복합재료를 적당한 길이로 자르게 된다. 금형의 입구는 수지가 너무 빨리 경화하는 것을 방지하기 위하여 수냉시키는 경우가 많으며, 금형의 나머지 부분은 전기나 기름 히터 등을 사용하여 가열하게 된다.

4.3 RTM(Resin Transfer Molding)

RTM에서는, 수지가 함침이 안된 상태의 스트랜드 매트나 짠 로빙(Woven Roving), 또는 천을 두 개로 된 금형의 아래 금형 위에 놓고 위의 금형을 덮은 후, 촉매가 들어 있는 액체 수지를 금형의 중앙에 위치한 스프루(Sprue)를 통하여 사출하여, 경화시키게 된다. RTM에서 사용하는 압력은 69-690 kPa(10~100psi)이며, 수지가 금형을 채우면서, 금형내부에 있는 공기가 통기구 구멍을 통하여 빠져 나가게 되고, 수지는 섬유에 함침되게 된다. 수지와 촉매의 선정에 따라서 경화는 상온에서 일어나거나 혹은 고온에서 일어나게 할 수도 있다. 금형에서 꺼낸 제품은 정확한 치수를 맞추기 위하여 다듬질을 필요로 한다. 평평한 섬유강화 플라이(Ply)를 사용하는 대신에 RTM에서는 원하는 형상의 모양과 거의 같은 프리폼(Preform)을 사용할 수가 있다. 이 프리폼은 미리 성형된 스트린위에 길이가 12.7~76.2mm인 장섬유를 뿌려서 만든다. 섬유와 같이 뿌려진 결합제(Binder)는 미리 성형된 모양을 유지하는 역할을 한다. 프리폼을 사용하는 이점은 깊은 구멍 같은 부분이 있는 복잡한 모양을 쉽게 성형할 수 있으며, RTM 공정에서 가장 많은 인력이 요구되는 다듬질을 필요로 하지 않는다는 것이다. 압축성형 공정에 비하여 RTM은 매우 낮은 공구비용(Tooling Cost)을 필요로 하며, 매우 간단한 금형 체결 장치(Mold Clamping Device)를 필요로 한

다. 일반적으로 금형을 체결하기 위하여 래칫(Ratchet)이나, 볼트, 너트 등을 사용하면 된다. RTM 공정의 또 한가지 이점은 금속 리브, 보강재와 기타 삽입물 등을 금형 내에 넣은 채로 제조를 할 수 있다는 것이다.

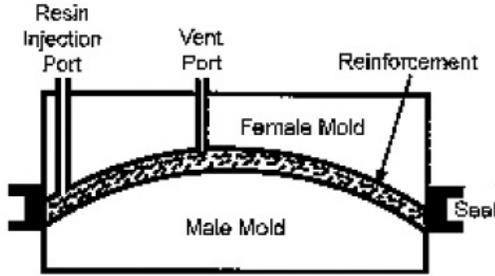


그림 4.3 RTM 공정

4.4 SMC(Sheet Molding Compound)

SMC는 섬유와 광물성 충전제(Filler)가 열경화성 수지에 함침되어 있는 연속적인 복합 판재로 이 재료는 금형에서 그대로 성형시킬 수가 있다. 수지는 경화가 되지 않은 상태에 있으나, 매우 점도가 높은 상태, 즉 증점된 상태에 있다. SMC는 압축성형공정에 의하여 경화 혹은 가교(Cross-linking)과정에 의하여 제품으로 완성된다. SMC는 복잡한 형상의 제품을 비교적 짧은 성형시간에 제조하기 위하여 사용된다.

4.5 압축성형공정(Compression Molding Process)

압축성형 공정은 자동차 등에 많이 사용되는 SMC를 매치드 몰드(Matched Mold)에서 성형하는 데 주로 사용된다. 압축성형 공정의 이점은 짧은 시간에 복잡한 형상의 제품을 만들 수 있으며, 여러 가지 구멍, 보스, 리브, 플랜지 등을 삽입하여 일체로 성형할 수 있다는 장점이 있다. 따라서 드릴링이나, 접합공정 같은 것이 단축되게 된다.

5. 복합신소재 접합방법

복합신소재는 기존의 등방성 재료에 비하여 비강성(E/ρ ; E 는 재료의 영율, ρ 는 재료의 밀도) 및 비강도(S/ρ ; S 는 재료의 강도)가 높을 뿐만 아니라 감쇠(Damping)특성과 충격특성이 우수하기 때문에 초기에는 우주 항공산업에 제한적으로 이용되어 왔다. 1970년대에 발생한 에너지 파동 이후 산업계 전반에 에너지 절약의 개념이 부각되면서 복합재료는 자동차, 로봇 팔 및 공작기계 등의 다양한 분야에 응용되기 시작하였고, 복합재료로 이루어진 구조물의 효율성은 약간의 예외적인 경우를 제외하고는 구조물 자체보다는 접합부에 의해서 결정되어지기 때문에 복합재료 접합부의 설계는 매우 중요한 연구분야로 대두되었다. 접합방법에는 기계적 접합(Mechanical Joining)과 접착제에 의한 접합(Adhesive Joining)으로 크게 분류할 수 있는데 각각의 장단점을 열거하면 다음과 같다.

5.1 기계적인 접합

피접합물을 파괴하지 않은 상태로 보수나 부속품을 대치하기 위하여 쉽고 빠르게 분해할 수가 있다. 표면처리가 거의 필요없다. 접합의 질(Joining Quality)을 검사하기가 쉽다. 피접합물에 구멍을 가공하여야 하므로 연속된 섬유를 끊거나 복합재료의 강도를 저하시킨다. 조인트 주위에 높은 응력집중(Stress Concentration) 현상을 발생시키며, 이것은 피접합물의 파괴를 가져올 수가 있다. 구조물의 무게를 증가시킨다. 부식(Corrosion) 문제를 야기시킬 수가 있다. 기계적인 접합은 피접합물에 구멍을 가공한 후, 볼트나 핀 혹은 리벳을 사용하여 체결을 한다. 또한 구멍을 가공하지 않은 상태에서 압력을 가하여 압력체결(Press Fit)을 사용하여 접합을 하기도 한다. 다음 그림은 몇 종류의 기계적 접합에 대한 예를 나타내었다. 기계적인 조인트의 강도는 그림

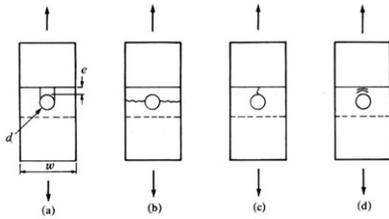


그림 5.1 볼트조인트의 파괴 형태

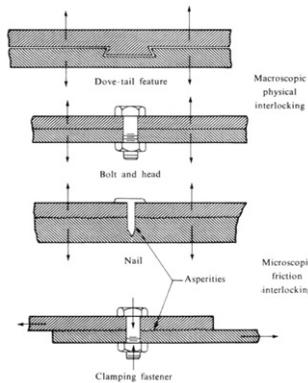


그림 5.2 기계적 접합의 예

5.1과 같이 피접합물의 가장자리까지의 거리와 볼트 구멍 직경의 비(e/d), 피접합물의 너비와 볼트구멍의 직경의 비(w/d) 및 피접합물의 두께와 볼트 구멍의 직경의 비(t/d)와 관련된다.

여러 개의 볼트로 체결한 조인트는 구멍 사이의 간격과 조인트의 위치가 중요하다. 기계적인 조인트의 파괴 형태는 그림 5.2에서 보는 바와 같이 전단파괴, 인장파괴, 분할파괴(Cleavage Failure) 및 베어링 파괴로 나눌 수가 있다. 조인트의 설계관점에서 보면 베어링 파괴가 다른 파괴보다 바람직하다. 그러나 (e/d) 와 (w/d) 의 값이 매우 크지 않으면 베어링 파괴를 기대하기가 어렵다. 일반적으로 피접합물이 모두 0° 섬유로 되어 있지 않은 경우에 $(e/d) > 3$ 이고 $(w/d) > 6$ 이면 전단 및 인장 파괴를 피할 수가 있다. 전단파괴를 방지하기 위하여 필요한 피접합물의 가장자리까지의 길이(e)는 피접합물의 가장자리의 두께를 증가시키거나 금속 심(Shim)을 박아서 감소시킬 수가 있다. 현재까지 이와 같은 기계적인 조인트의 설계변수는 대부분 실험적으로 규명되고 있다. 기계

적인 조인트의 강도는 조인트 주위의 응력집중을 감소시키는 방법으로 증가시킬 수가 있다. 다음은 조인트 주위의 응력집중을 감소시키는 방법이다. 탄소섬유와 같이 강성이 높은 재료로 된 피접합물의 조인트 주위를 유리섬유와 같이 강성이 낮은 재료로 대체함으로써 응력집중을 감소시킬 수가 있다. 조인트 주위의 피접합물 적층순서(Stacking Sequence)를 바꾸어서, 피접합물의 강성을 낮춘다. 예를 들면, $[0_2/\pm 45]_s$ 와 같은 적층판의 경우에 조인트 주위는 적층순서를 $[\pm 45]_s$ 로 하여 피접합물의 강성을 낮춘다. 기계적인 접합을 위한 피접합물의 구멍은 기계적인 가공에 의하거나 성형시에 미리 만들 수가 있으나 성형에 의하여 구멍을 만들면 방향이 틀린 섬유나 혹은 수지가 과도한 영역이 구멍주위를 둘러싸거나 봉합선(Knit Line) 등이 생길 염려가 있으므로 기계적인 가공에 의하여 구멍을 만드는 것이 바람직하다. 복합재료의 구멍을 가공하는 방법은 드릴을 사용하는 방법이 가장 쉬우나 적당한 가공속도 예리한 공구와 고정틀을 사용하지 않으면 복합재료의 손상을 가져올 수가 있다. 드릴 작업시 복합재료 밑에 얇은 알루미늄판을 받쳐서 함께 드릴링하면 복합재료 밑면의 층간분리를 방지할 수가 있다. 드릴링된 면의 표면조도와 손상정도는 기계적인 조인트의 피로수명에도 영향을 미친다.

5.2 접착제에 의한 접합(Adhesive Bonded Joints)

기계적인 접합법에 비하여 넓은 면적에 하중을 분포시킨다. 구멍가공이 필요 없다. 구조물의 무게를 거의 증가시키지 않는다. 얇은 피접합물을 접합시킬 수가 있다. 밀봉(Sealing)효과를 기대할 수 있으며, 열과 전기의 부도체 역할을 할 수 있다. 기계적 접합법에 비하여 뛰어난 피로저항을 가지고 있으며, 감쇠나 소음을 줄이는 효과도 우수하다. 피접합물을 부수거나 손상을 입히지 않고는 분해하기가 어렵다. 사용온도, 습도 및 다른 주위

환경에 의하여 영향을 받을 수가 있다. 접착제의 두께, 피접합물의 표면조도가 조인트의 정적강도 및 피로강도에 영향을 미친다. 접착제를 사용하는 접합의 목적에는 구조물의 접합과 비구조물의 접합 등 2가지 형태로 나눌 수 있다. 구조물의 접합일 경우에는 피접합물의 항복점 근처까지의 강도를 이용할 수 있을 정도로 충분한 강도를 갖는 접착제가 요구되지만 기밀(Sealing), 전기절연, 진동감쇠 등의 목적으로 사용되는 비구조물의 접합에서는 접착제의 강도는 별로 중요하지 않게 된다. 접착제에 의한 접합강도는 접착제의 종류, 접착제의 두께, 접합길이, 피접합물의 강성 및 표면조도에 의하여 영향을 받는다. 따라서 좋은 성능을 갖는 접착 조인트를 해석하고 설계 제작하는 일은 매우 어려운 문제이다. 접착제에 의한 조인트 중에서 가장 간단하면서도 많이 사용되는 조인트는 Single-lap 조인트이다. Single-lap 조인트는 제조가 간단하나, 비대칭으로 하중이 작용하기 때문에 휨 하중을 받게 되어, 접합부분의 끝단에 인장력인 Peel 응력을 받는다. 이 Peel 응력은 접착제와 피접합물의 경계면에서 파괴를 발생시키는 원인이 되기 때문에 접합강도를 저하시킨다. 이와 같은 단점을 보완하고자 Double-lap 조인트가 강도를 높이기 위하여 사용된다. 접착제의 끝 부분에서는 피접합물과 접착제와의 강성의 차이 때문에 응력집중 현상이 발생하며, 이를 줄이기 위하여 Stepped-lap 조인트와 Scarf 조인트 등이 사용된다. 그러나 피접합물이 복합재료인 경우에 Scarf를 가공하는 것이 쉽지 않으며, Scarf 끝 부분의 강도가 약하기 때문에 제일 먼저 파괴가 발생한다. 따라서 조인트의 전체강도가 떨어질 수 있으므로 이점을 주의하여야 한다. 접착제를 사용하여 조인트를 제작하기 위해서는 여러 가지 장비들이 필요하다. 이들 장비는 조인트 제작에 사용하는 접착제의 경화를 위해 필요한 온도와 시간을 유지시켜 줄 수 있어야 하며, 접착제가 경화하는 동안에 발생하는 화학적 반응으로 인하여 발생할 수 있

는 미소기포를 제거하여, 우수한 접착 특성을 얻기 위한 진공 백 시스템을 사용하거나, 조인트 전체에 균일한 고압을 가해줄 수 있는 기능을 갖추는 것이 필요하다. 가장 많이 사용하는 장비로는 Hot Press와 Autoclave를 들 수 있다. 복합신소재 바닥판넬과 차량바퀴와의 미끄럼 방지를 위하여 규사와 에폭시 수지를 이용한 접착공법과 에폭시 프라이머를 도포하는 방안이 있다. 이러한 이유는 에폭시 수지와 마찰특성이 우수한 고순도의 규사를 사용하여 강력한 접착력과 마찰력을 동시에 만족하는 기저층을 형성시켜 그 위에 차량통행에 안전성을 확보할 수 있다. 그리고 복합신소재 바닥판넬구조 표면에 대해서는 자외선(UV)과 화재에 대비해서 난염 처리를 한다.

6. 결론

상기에서 복합신소재와 성형공정에 대해서 기술하였다. 복합신소재는 원소재를 이용한 구조부재의 특성에 따라 성형공정이 각각 다르다고 할 수 있다. 건설구조물의 부재는 치수가 커서 어떤 복합신소재와 성형공정을 선택하느냐에 따라서 제조단가가 매우 차이가 있다. 건설산업에서 용납될 수 있는 가격 구조를 위하여 구조물 표준화, 최적 공정 및 자동화가 가장 큰 관심의 대상이다. 제조공정의 시간과 비용을 대폭 절감시킬 수 있는 충분한 연구검토가 필요하다. 앞으로 복합신소재가 비부식성, 경량화 등 소재의 장점과 뛰어난 성형성을 가지고 있기 때문에 건설분야에 복합신소재의 수요는 계속 늘어날 전망이어서 건설 구조물의 성형 공정의 개발에 집중적으로 연구되어야 할 것이다.

참고문헌

1. 이대길, 정광섭, 최진호(1998). 복합재료 역학 및 제조기술, 시그마프레스.
2. 지효선(2002). 고강도 복합신소재 교량현장적용 발표회, 대원대학 지역사회개발연구소 연구보고서.
3. 지효선, 천경식, 손병직, 장석윤(2004) “복합신소재 (ACM) 소형교량 상부구조의 특성 및 현장적용성”, 대한토목학회 논문집, 제 24권, 제 6A호, PP.1137~1144.
4. 지효선, 천경식, 손병직, 장석윤(2004) “복합신소재를 이용한 구조데크 시스템(ACDS)의 휨내력에 관한 실험적연구, 대한토목학회 학술발표회 논문집, 2004.
5. Douglas A, Eckel II, A Theoretical and Experimental Study on the Behaviour of Sandwich Bridge Decks Composed of Composite Materials, CCM Report 98-5, Univ. of Delaware.
6. Clarke, J.L.(Ed)(1996). Structural design of polymer composites-EUROCOMP design code and hand-book, E&FN Spon, London, England.
7. Kim, D.H.(1995). Composite Structures for Civil and Architectural Engineering”, E&FN Spon.
8. Allen, H.G.(1969). Analysis and Design of Structural Sandwich Panels, Pergamon Oxford.