

복합신소재 설계자료(I)

Design Data of Advanced Composites (I)



지효선(Hyo-Seon Ji) 이사 | 대원대학 철도건설과 부교수 | 공학박사 | hsj@mail.daewon.ac.kr

1. 서론

복합신소재는 여러 가지 장점에도 불구하고 토목, 건축 등 일반 건설재료로서의 이용은 아직 초보 단계에 있다. 그 주된 원인은 등방성(Isotropy)인 일반 건설재료와 달리 비등방성(Anisotropy)인 복합신소재의 이론이 일반 설계기술자에게는 너무나 어렵다. 설계 사무소나 현장의 건설 기술자들은 대개 학부 수준의 콘크리트, 강구조의 이론적 배경을 갖고 있기 때문이다. 그리고 아직까지 건설기술자를 위한 설계지침서 등이 제정되지 않았다. 그러나 이미 부분적으로 건설분야에 복합신소재로 만든 구조물들이 적용되어지는 현실을 감안할 때 설계지침서와 같은 설계기준이 마련에 앞서 건설기술자들이 쉽게 복합신소재를 이용한 구조 설계자료의 제시가 요구되고 있다. 따라서, 본 기사에서는 이러한 요구에 부응하기 위하여 콘크리트, 강구조설계를 해왔던 건설기술자들이 쉽게 복합신소재 설계를 습득할 수 있도록 기초적인 재료설계부터 단계적으로 고급 부재 및 구조물 설계에 이르기 까지 연재형태로 복합신소재 설계

자료를 제시하고자한다.

2. 재료설계

복합신소재는 두 가지 이상의 성질이 서로 다른 물질이 물리적으로 혼합되어 유용한 물질이 된 것을 가리킨다. 두 가지 이상의 소재가 결합되기 때문에 단일소재에는 없는 여러 가지 특성을 창출해 낼 수 있다. 복합신소재는 모재인 매트릭스(Matrix) 또는 수지(Resin)와 보강재인 섬유(Fiber)로 구성되어 있다. 이렇게 구성된 것을 Lamina라 부른다. 섬유는 복합신소재에 구조강성 및 강도를 전달하기 위해 사용된다. 섬유의 선택은 복합신소재에서 필요로 하는 특성에 의해서 결정된다. 복합신소재의 강도, 강성 그리고 탄성계수의 특성은 섬유함량, 사용된 수지 그리고 섬유 배열 방향에 의해서 결정된다. 복합신소재의 가장 큰 장점중의 하나는 섬유배열을 통해 부재의 물성을 사용자의 요구대로 설계(tailoring design)할 수 있다는 것이다. 섬유는 복합신소재에 구조강성 및 강도를 전달하기 위해 사용된다. 섬

유의 선택, 보강형태의 상세 및 복합신소재에 행해지는 보강과정의 선택은 복합신소재에서 필요로 하는 특성에 의해서 결정된다. 또한 복합신소재의 강도, 강성 그리고 응력-변형률 특성은 섬유 함유량, 사용된 수지 그리고 외력에 대한 섬유 방향의 함수이다. 현재 국내에서 구조용 부재로 사용되어지는 섬유는 강도특성 및 가격 경쟁력이 우수한 유리섬유가 널리 사용되어지고 있다. 복합신소재 부재해석과 설계를 위해서 복합신소재의 구성재료인 섬유와 수지의 재료 특성을 파악한 후 그 재료들을 선택하여야 한다. 다음은 건설구조물에 많이 사용되는 유리섬유와 수지의 종류와 그 특성에 대해서 설명한다.

2.1 유리섬유

유리섬유 종류로는 E-glass, C-glass, ECR-glass가 있다. 표 1은 각 유리섬유의 특성을 나타낸다.

표 1 유리섬유의 특성

	E-glass	C-glass	ECR-glass
비중	2.54	2.50	2.71
인장강도 (N/mm ²)	3400	3000	3300
탄성계수 (kN/mm ²)	72	69	72
신장률(%)	4.8	4.8	4.8
열팽창계수 (10 ⁻⁶ /°C)	5.0	7.2	5.9

E-glass 섬유는 고강도, 전기저항 복합신소재가 요구되어질 때 선택된다. 복합신소재에서 광범위하게 사용되는 섬유 형태이다. C-glass 섬유는 화학적 저항이 요구되어지고 섬유 특성이 설계에 적당할 경우에 선택될 수 있다. 대단히 좋은 화학적 저항이 있지만, E-glass에 비교해서 저강도이다. ECR-glass 섬유는 E-glass 섬유의 대안으로 선택될 수 있다. 화학적 작용에 저항적이 상당히 크고 E-glass 섬유와 유사한 특성을 가진다.

2.1.1 로빙(Rovings)

로빙은 인발공법(pultrusion)과 필라멘트와인딩 공법(filament winding)과 같은 자동화 된 복합신소재 과정에서 직접적이고 광범위하게 사용되는 연속 스트랜드(strand)이다.

2.1.2 매트(Mats)

CSM(chopped strand mat)은 유리섬유 스트랜드가 짧게 잘려지고 고르게 분포되고 임의의 방향성을 갖는 재료이다. 섬유함유량의 약 25%를 초과하지 않는다. CSM 보강으로 제조된 복합신소재는 낮은 응력, 강성에 한해서 적용된다.

2.1.3 Woven rovings(WR)

WR은 꼬이지 않은 섬유로 만들어진 양방향 보강재이다. WR은 큰 부피를 갖는 복합신소재에 적합하다. WR은 임의의 섬유 보강재보다 높은 강도, 강성 복합신소재를 제조할 수 있지만, 부재의 중량이 커질 때 주름이 있을 수 있어 섬유함유량을 40%이하로 제한한다.

2.1.4 Fabrics

Fabrics은 다양한 패턴으로 fabric 스타일을 형성하기 위해 얇힌 실과 weft, yarns, fibers 및 filaments로 만들어진다. Fabrics는 보통 WR(woven rovings)보다 가볍고, 주름이 덜지며 섬유함유량을 50%이상 할 수 있다.

2.1.5 Prepregs(수지침투 가공재)

Prepregs는 완전히 양생이 되지는 않았지만, 이미 스며든 수지의 섬유 보강재이다. prepregs를 사용하여 복합신소재를 제조시 70°C~150°C 범위의 온도가 요구된다. 섬유함유량은 50%가 적당하다.

2.2 수지(Resins)

복합신소재에서 폴리머계열 수지의 선택은 많은 인자에 의해서 결정되어진다. 요구되는 특성은 보통 강도, 강성, 인성 그리고 내구성에 의해 지배받는다. 사용온도와 환경, 제조방법, 양생조건 등을 고려해야 한다.

2.2.1 Polyester resins

Orthophthalic 수지는 가장 저렴한 폴리에스테르 수지이며, 가장 광범위하게 사용된다. Orthophthalic 수지는 우수한 재료적 특성, 적당한 사용온도 저항능력과 화학적 저항의 특성을 가지고 있다.

Isophthalic acid 수지는 물에 저항, 화학적 저항 또는 열에 저항이 요구될 때 고려되어야 한다. Isophthalic acid 수지는 높은 신장률과 우수한 재료적 특성이 있지만, Orthophthalic 수지보다 값이 비싸다.

2.2.2 Vinyl ester resins

비닐에스테르 수지는 폴리에스테르나 우레탄 수지의 성분으로 만들어 질 수 있다. 비닐에스테르 수지는 화학 저항성을 요구하는 복합신소재 구조, 필라멘트와인딩, 인발공법(pultrusion)에 적합하다. 비닐에스테르 수지는 Isophthalic polyesters 보다 고성능에 적합하다. 왜냐하면 물과 화학작용에 대한 우수한 저항능력이 있고, 강도와 강성이 좋으며, 인성이 크다. 파괴 변형률은 Orthophthalic와 Isophthalic polyesters의 2배이다.

2.2.3 Phenolic resins

페놀수지는 열에 대한 성능이 강조되고, 독성의 저방출 그리고 불조건하에서 특성의 유지 등이 요구될 때 사용되어야 한다. 페놀수지로 만들어진 복합신소재의 두드러진 특성은 저인화성, 저인화속도 그리고 연기가 적다는 것이다. 비록 실내온도에서 양생이 가능하지만, 80° C 이상에서는 안정한 재료를 얻는 것이 필요하다.

고열 뒤틀림 온도와 불에 대한 저항은 우수하다. 또한 폴리에스테르와 비교해 불 때 저수축이 특징이다.

2.2.4 Epoxy resins (에폭시 수지)

에폭시는 다른 폴리에스테르와 비교해 불 때 기계적 성질과 물에 대한 저항성이 우수하고, 양생하는 동안 수축이 덜 되지만, 가격이 비싸다. 에폭시 수지는 내구성과 기계적 성질이 좋고, 전단강도가 큰 경우에 사용되어야 한다.

3. 적층설계

복합신소재는 레진과 섬유로 구성되어 있어 재료설계가 중요하다. 재료설계에 있어서 가장 중요한 요구사항 중 하나가 원하는 구조부재 두께를 계산하기 위해서 사용하는 레진과 섬유재료의 중량과 관계가 있다. 선택하는 각 재료의 중량에 대한 두께의 값으로부터 섬유가 레진에 함침된 Lamina의 두께를 계산할 수 있다.

표 1은 현재 국내에서 생산되어지는 유리섬유를 이용한 Lamina의 적층형태를 나타내고 있다. Lamina의 적층형태는 표 1에서 알 수 있듯이 섬유방향인 0°, 섬유직각방향 90° 그리고 섬유사선방향 ±45°로 일반적으로 나타낼 수 있다. 표 1의 Lamina를 사용하여 설계자는 복합신소재 구조부재의 두께에 맞추어 섬유방향의 다양한 형태의 적층설계를 설계할 수 있다. 복합신소재의 물성은 섬유의 분포나 배열에 따라 크게 좌우된다. 재료물성을 추정하는 방법에는 재료역학적인 방법인 혼합법(rules of mixture)과 변분의 원리를 이용한 방법 등이 있으나, 본 기사에서는 섬유와 수지의 함량에 따라 계산되는 혼합법을 이용하여 Lamina의 재료 물성을 유도하고자 한다. 복합신소재의 물성은 섬유의 분포나 배열에 따라 크게 좌우된다.

Layer Construction	
Uniaxial	L series  0° T series  90°
Biaxial & Double Bias	LT series  0° 90° DS series  +45° -45°
	DBL series  0° +45° -45° DBT series  +45° -45° +45°
Triaxial	
Quadriaxial	DBLT series  0° +45° 90° -45°

그림 1. Lamina의 적층형태

재료역학적인 방법인 혼합법은 다음 식 (1)과 같이 섬유와 수지의 부피비로 나타낼 수 있다.

$$V_f = \frac{\frac{w_f}{\rho_f}}{\left\{ \frac{w_f}{\rho_f} + \frac{w_m}{\rho_m} \right\}} \quad (1a)$$

$$V_m = 1 - V_f \quad (1b)$$

여기서, w_f , w_m 은 섬유와 수지의 무게비(weight fraction) 를 나타내며, ρ_f , ρ_m 은 비중을 나타낸다. 그리고 V_f , V_m 는 각각 섬유와 수지의 부피를 나타낸다.

혼합법을 이용하여 계산되는 Lamina의 재료물성은 다음식 (2)로 구할 수 있다.

$$E_1 = E_f V_f + E_m V_m \quad (2a)$$

$$E_2 = \frac{1}{\left\{ \frac{V_f}{E_f} + \frac{V_m}{E_m} \right\}} \quad (2b)$$

$$G_{12} = \frac{1}{\left\{ \frac{V_f}{G_f} + \frac{V_m}{G_m} \right\}} \quad (2c)$$

$$\nu_{12} = \nu_f V_f + \nu_m V_m \quad (2d)$$

상기 식(2)에서, E_f , E_m 는 각각 섬유와 레진 재료의 탄성계수를 말하며, E_1 , E_2 는 각각 Lamina의 적층형태인 섬유방향인 0° 및 섬유직각방향 90°의 탄성계수를 말하며, G_{12} , ν_{12} 는 lamina의 면내 전단탄성계수 및 프와송 비를 나타낸다.

상기 식 (2)을 통하여 계산된 한 Lamina의 물성값을 가지고서 설계자가 설계대상 복합신소재 구조부재의 소요두께에 도달되도록 적층설계를 하면 된다.

3.1 적층 강성(Laminate Stiffness)

Lamina에 대한 산출된 물성값을 토대로 적층설계를 수행한다. 소요두께를 갖는 구조부재에 대한 적층강성(laminat stiffness)을 실험 결과나 가공 데이터로부터 결정되어 진다. 실험 또는 가공데이터가 없을시, 재료특성은 일반적층이론(classical lamination theory, CLT)를 사용하여 계산한다. 다음은 적층강성을 구하는 과정을 단계별로 설명하고자 한다.

1) 1단계

사전에 알고 있는 각 lamina의 탄성특성 E_1 , E_2 , G_{12} 와 ν_{12} 과 함께, 다음 식 (3)으로부터 Q_{11} , Q_{22} , Q_{66} , 그리고 Q_{12} 를 결정한다.

$$Q_{11} = E_1 / (1 - \nu_{12} \nu_{21})$$

$$Q_{22} = E_2 / (1 - \nu_{12} \nu_{21})$$

$$Q_{66} = G_{12}$$

$$Q_{12} = \nu_{21} E_1 / (1 - \nu_{12} \nu_{21})$$

$$\nu_{21} = (E_2 / E_1) \nu_{12} \quad (3)$$

2) 2단계

각 lamina의 재료축(1, 2)에 대한 강성 Q_{ij} 얻어지면, 그림 2와 같이 섬유 배열각도 좌표 변환을 통해 구조축 (x, y)에 대한 재료강도 \bar{Q}_{ij} 을 계산한다.

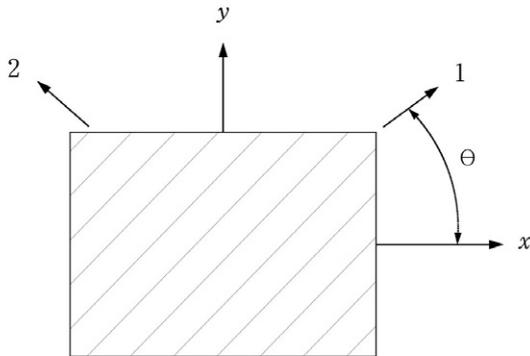


그림 2. 적층위치 표시

표 2 Lamina의 구조축과 재료축과의 관계

	Q_{11}	Q_{22}	Q_{12}	Q_{66}
\bar{Q}_{11}	n^4	n^4	$2m^2n^2$	$4m^2n^2$
\bar{Q}_{22}	n^4	m^4	$2m^2n^2$	$4m^2n^2$
\bar{Q}_{12}	m^2n^2	m^2n^2	$m^4 + n^4$	$-4m^2n^2$
\bar{Q}_{66}	m^2n^2	m^2n^2	$-2m^2n^2$	$(m^2 - n^2)^2$
\bar{Q}_{16}	$-m^3n$	mn^3	$-mn(m^2 - n^2)$	$-2mn(m^2 - n^2)$
\bar{Q}_{26}	$-mn^3$	m^3n	$mn(m^2 - n^2)$	$2mn(m^2 - n^2)$

여기서, $m = \cos\theta$ / $n = \sin\theta$

$\theta =$ 섬유의 주축에 상대적인 각도

3) 3단계

그림 3은 직교이방성인 층을 임의의 각도로 적층된 구조의 형상을 나타낸 것이고, 전체 적층구조에 대해서 합응력은 각 lamina 응력을 두께에 대하여 적분하여 구할 수 있다. 적층의 중간으로부터 k^{th} 의 아래 층까지 거리 h_{k-1} 와 위 층까지의 거리 h_k 을 각 적층 조건에 대해서 결정한다.

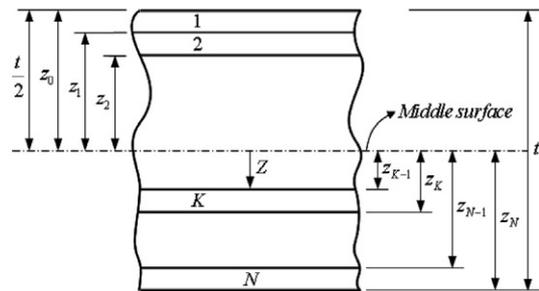


그림 3. 적층위치 표시

적층에 대한 A_{ij} , B_{ij} , 그리고 D_{ij} 을 구한다.

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^n (\bar{Q}_{ij})_k (h_k - h_{k-1})$$

$$B_{ij} = 1/2 \sum_{k=1}^n (\bar{Q}_{ij})_k (h_k^2 - h_{k-1}^2)$$

$$D_{ij} = 1/3 \sum_{k=1}^n (\bar{Q}_{ij})_k (h_k^3 - h_{k-1}^3)$$

$i, j = 1, 2, 6$

여기서,

A_{ij} = 적층에 관한 인장강성(extensional stiffness)

B_{ij} = 적층에 관한 합성 강성(coupling stiffness)

D_{ij} = 적층에 관한 휨 강성(bending stiffness)

n = 적층에서의 lamina의 수

4. 구조해석과 단면설계

3장, 4장에서 언급한 바와 같이 복합신소재구조 설계는 재료설계와 적층설계를 한 후 대상구조물 부재의 구조해석과 단면설계를 하여야 한다. 복합신소재구조의 설계는 처짐이 설계의 주요 제한사항이 되고 있다. 건설구조물용으로 많이 사용되는 복합신소재의 GFRP(Glass Fiber Reinforced Polymer)는 콘크리트나 강재와 달리 비등방성(anisotropic) 재료이면서 강성이 낮아 동일한

하중에 대하여 처짐이 크게 발생하고 있다.

복합신소재 구조물은 극한한계상태에 이르기 전에 충분한 파괴예고(warning of failure)가 있도록 설계되어야 한다. 일반적으로, 다른 건설재료 구조물과 달리 복합신소재 구조물은 재료의 응력-변형률 거동에서 항복점 후 어떠한 연성거동을 보인 후 파괴에 이르지 않는다. 따라서, 설계 시 이점을 충분히 설계자는 고려해야 한다.

일반 건설재료와 달리 복합신소재는 비등방성인 관계로 복합신소재구조 해석과 설계에 대한 프로그램에 대한 일반사항을 기술하고자 한다. 복합적층과 적층구조물요소의 해석과 설계를 위해 개발된 컴퓨터 해석프로그램을 사용해야 한다. 프로그램은 적층구조물의 복잡한 역학적 거동으로 인해 설계자가 적절한 목적에 따라 모델링을 하여서 사용해야 할 것이다.

5. 결론

설계 사무소나 현장의 건설 기술자들은 대개 학부 수준의 콘크리트, 강구조의 이론적 배경을 갖고 있기 때문에 본 기사에서는 복합신소재의 기본 설계이론을 제시하였다. 참고로 현재까지 복합신소재에 대한 설계기준 등과 같은 지침서가 제정되지 않았다. 그러나 국내외적으로 이미 부분적으로 건설분야에 복합신소재로 만든 구조물들이 적용되어지는 현실을 감안할 때 우리학회에서는 설계지침서와 같은 설계기준을 마련에 앞서 건설 기술자들이 쉽게 복합신소재를 이해하고 응용할 수 있는 복합신소재 구조 설계자료를 연재 형태로 제시하고자 한다. 본 기사에서는 복합신소재 설계의 기초이론을 제시하였다. 이러한 출발로 향후 복합신소재구조학회에서는 기초적인 재료설계부터 단계적으로 고급 부재 및 구조물 설계에 이르기까지 연재형태로 설계자료를 제시할 계획이다. 본 기사의 후속으로 다음 호에 계속해서 설계자가 직접설계하는데 참고하여 응용할 수 있도록 구조부재별로 직접 설계예를 제시하고자한다.

참고문헌

1. Demitz, J.R. (1999) *Limit States Design Methodology for Composite Material Bridge Structures*, CCM Report 99-3, University of Delaware Center for Composite Materials.
2. Douglas A. Eckel II (1998) *A Theoretical and Experimental Study on the Behaviour of Sandwich Bridge Decks Composed of Composite Materials*, CCM Report 98-5, Univ. of Delaware.
3. Clarke, J.L.(Ed) (1996) *Structural design of polymer composites - EUROCOMP design code and handbook*, E&FN Spon, London, England.
4. Kim, D.H. (1995) *Composite Structures for Civil and Architectural Engineering*, E&FN Spon
5. Matthews, F.L. and Rawlings, R.D. (1994) *Composite Materials : Engineering and Science*, Chapman & Hall