

박벽 복합재료의 해석 및 설계기술 현황

Analysis and Design of Thin-walled Composite :
State-of-the-art review



이 재 흥*



김 영 빙**

*세종대학교 건축공학부 부교수

**세종대학교 건축공학부 박사과정

1. 서 론

첨단 산업 시대에 도래하면서 재료와 화학 공학의 눈부신 발전에 힘입어 각종 구조용 신소재인 복합재료가 등장하게 되었고, 많은 공학 분야에 활발히 적용되었다. 최근 들어 건설 산업에 복합재료의 일종인 FRP(Fiber Reinforced Plastics)재료를 철골 부재와 같은 얇은 판, 개단면의 형태인 박벽 복합재료를 사용하려는 노력들이 진행되어 왔다. 따라서 건설 분야의 기술자들은 박벽 복합재료의 해석 및 설계 기술력과 산업화 활용에 대해 관심을 갖게 되었다.

첨단 신소재인 복합재료는 두 가지 이상의 재료를 일체화 시켜 서로 다른 재료의 이점만을 살려 단일 재료에서는 얻을 수 없는 고도의 기능이나 특성을 실현한 재료로 정의할 수 있다(그림 1). 이러한 장점으로 인해 우주 항공 산업의 첨단 신소재인 복합재료가 건설 분야에서 미래 산업으로 부각되었으나, 복합재료의 큰 잠재력에도 불구하고 건설 재료로의 응용은 복합재료 구조해석의 난해성 등의 이유로 아직 초보단계에 있다. 그러나 최근 들어 건설 산업에서는 인발 제조 공정(Pultruded Composite)¹⁾과 같은 제조 공법의 급속한 발달로 인해 박벽 개단면과 같은 복합재료 구조체가 개발되었다(그림 2).

복합재료는 인위적 재료로서 임의의 방향으로 화이버 경사각을 이루어 기존의 재료와 다른 비균질 비동방성(nonhomogeneous anisotropic)을 보이게 된다(그림 3).

이러한 성질로 인해 복합재료 구조체는 매우 복잡하고 상호 연계된 구조적 거동으로 인해 구조해석 및 설계가 재료식 재료에 비해 훨씬 난해한 편이다. 특히 건설용 구조부재 형태로 각광받는 인발 성형 복합재료(pultruded composite materials)는 그 단면 형태가 기존의 강재와 같은 H, C, T 등의 박벽 요소(thin-walled members)로 구성할 수 있다.

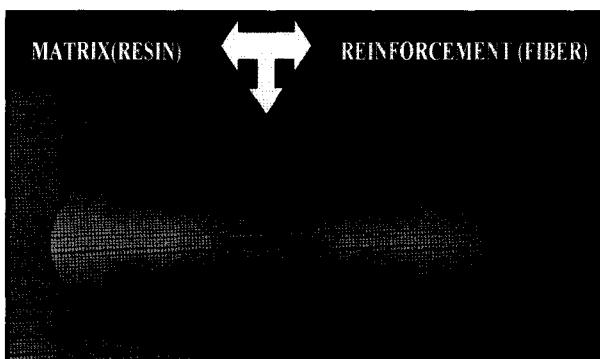


그림 1 복합재료의 단면

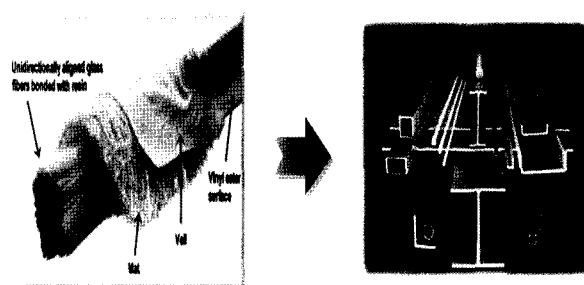


그림 2 인발성형 복합재료 형상

이러한 복합재 구조는 기존의 고전적 균질 등방성재료(homogeneous isotropic)의 박벽 구조 이론에 근거해서는 해석 및 설계가 될 수 없으며, 이러한 구조를 해석하기 위해서는 박벽 단면 형태의 복합재료 구조재를 해석할 수 있는 신 개념의 구조해석 및 설계기술이 반드시 필요하게 된다.

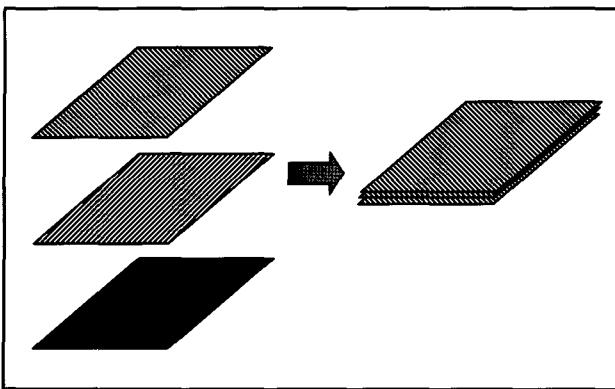


그림 3 임의의 적층각에 의한 복합재료

따라서 인발 성형된 박벽 복합재료로 이루어진 구조용 보 및 기둥을 사용할 수 있도록 선형 구조해석은 물론 좌굴해석과 비선형 구조해석 기술개발 및 복합재 구조 부재의 최적설계 기술 개발에 대한 연구가 수행되어야 할 것이다. 이 기술이 성공적으로 완료되면 복합재 건설용 부재의 제조, 구조해석 및 설계기술을 확보하여 교량, 항만구조, 플랜트, 저장탱크 등에 꼭 넓게 응용될 수 있을 것이다.

2. 복합재료 기술의 연구동향

첨단 복합재료를 이용한 건설용 구조부재인 FRP 기술개발은 지난 100여년간 사용되어온 콘크리트와 강재 등의 재래식 구조재료보다 진일보된 차세대 신소재로 구성된 구조물을 해석하고 설계하는 한 차원 높은 핵심 설계기술이다. 복합재료의 연구는 과거에 구조 보강재로 사용되던 복합재료가 점차 1990년대 들어 최신 제조 기술 중 하나인 인발 기술에 의해 H형, C형 등의 구조부재 생산이 가능함에 따



그림 4 복합재료 시험체 및 구조부재 실험

라 인발 성형된 복합재료를 구조물의 보, 기둥 등의 골조에 사용하려는 연구가 매우 활발히 진행되고 있다. 그러나 구조재 보강재로서의 FRP 관련 연구 및 시공은 활발하지만, 주 구조부재로서의 연구 및 시공은 이론적, 해석적 접근들이 미비하며 초기 단계에 있다. 국내에서 행해진 이제까지의 연구는 복합재료 보 또는 기둥에 대한 실험연구(그림 4)가 대부분이었으며, 일부 이론 연구는 모델을 매우 단순화 시켜 실제의 거동과는 많은 차이를 보이고 있는 실정이다.

2.1 박벽 복합재료 구조부재

신소재인 복합재료가 구조물에 사용되면서 최근 들어 건설 산업에 FRP 재료를 철골 부재와 같은 얇은 판, 개단면의 형태로 적용하여 사용하려는 노력들이 진행됨에 따라 많은 연구들이 진행되어 왔다.

Kirchhoff(1850)와 Love(1934)는 “횡전단에 의한 변형은 무시하고 중립면에 수직인 직선은 변형 후에도 중립면에 수직이며, 직선이다(Kirchhoff & Love assumption)”라는 가정하에 이론을 전개하였다. 그리고 박벽 개단면의 등방성 보에 대하여 상재하중에 의한 휨, 축력, 비틀림 모멘트와 같은 하중을 받는 경우의 해석 이론은 Vlasov²⁾와 Gjelsvik³⁾에 의해 정립되었다. Vlasov는 이 연구에서 “(1) 보 단면의 외형은 자신의 면에 대해 변형하지 않는다. (2) 박벽 부재의 중립면에서 전단 변형은 0이다.(Vlasov's assumption) (3) 부재의 외형 방향에서의 수직 응력은 축방향 응력과 비교해 무시할 만큼 작다. 즉, 박벽 부재에 대해 위에 서술한 Kirchhoff & Love assumption이 유효하다”등과 같은 정의로 가정하였다. Vlasov와 Gjelsvik의 고전 박벽보 이론은 판형 박벽 요소의 2차원 문제를 보의 1차원 문제로 단순화 시켰으며, 이 이론의 변위장은 기하학적 조건으로 보의 변위장으로, 박벽 요소의 응력은 가상일 원리로 보의 합력으로 변환하였다. 이처럼 대다수의 연구들은 등방성재료의 얇은 판 개단면 부재에 대한 연구로 진행되었다.

이러한 Vlasov의 얇은 판 보 이론을 바탕으로 Bauld & Tzeng⁴⁾는 등방성 재료에 대해 대칭으로 적층된 개단면 복합재료 보에 Vlasov이론을 확장 적용하여 얇은 판 복합재료 보의 휨과 비틀림, 좌굴 해석을 하였다. 이 연구에서 하중과 경계 조건에 따른 해석을 통해 응력과 처짐은 선형 이론을, 좌굴은 비선형 이론을 적용하여 방정식을 유도하였다. 그 외 다수의 연구자들이 얇은 판 복합재 보의 거동을 연구했으나 대부분은 대칭 적층된 이축 대칭 단면을 지난 보에 국한되어 왔다. 그러나 Omidvar & Ghorbanpoor⁵⁾는 채널 단면의 대칭 적층된 박벽 개단면 구조 부재 해석

에 있어 보강된 라그란지안(Lagrange) 보간 함수를 개발하여 비선형 유한요소 모델(finite element model)을 제시하고 휨, 비틀림, 좌굴에 대해 유한요소 해석한 결과와 실험을 비교 분석하였다.

특히, 박벽 부재의 휨-비틀림 좌굴을 설계할 때는 부재의 세장성에 인한 구조 안정성을 고려하여야 하는데, 이 때 등방성 재료 개단면 부재의 휨-비틀림 좌굴 해석에서 필요한 미분 방정식을 Chajes & Winters⁶⁾ 그리고 Yu⁷⁾, Chen & Atsuta⁸⁾가 유도하였다. Barsoum & Gallagher⁹⁾는 박벽 등방성 재료의 비틀림에 대해서 유한요소 모델(finite element model)을 개발하였고, 일반적으로 등방성 재료 박벽 복합재 보에 있어 H형과 같은 2축 대칭의 형태는 축하중 작용시 휨과 비틀림 좌굴이 연계(coupled)되지 않고 각각 발생하는 것으로 알려져 있다.¹⁰⁾ 그러나 적층된 복합재료에서는 2축 대칭 단면인 경우에도 재료의 비등방성으로 인해 휨-비틀림 좌굴이 연계되어 있으므로 구조 해석시 고려되어야 한다.

박벽 구조의 횡 좌굴 문제는 Bleich¹¹⁾에 의해 연구되었으며, Clark & Hill¹²⁾은 다양한 하중 조건에 따른 일축 대칭 단면의 횡 좌굴에 관한 해를 제시하였다. Rehfield & Atilgan¹³⁾는 개단면 복합 부재의 단축 하중에서의 좌굴 방정식을 제시하였고, Barbero & Tomblin¹⁴⁾는 인발 복합 기둥의 오일러 좌굴 실험에 의해 FRP 복합 H형 보의 휨-비틀림과 횡-비틀림 좌굴에 대한 실험 연구를 수행하였다. Kabir & Sherbourne는 Rayleigh-Ritz 방법을 기반으로 H형 단면 복합재 보의 횡-비틀림 좌굴에 대해 연구¹⁵⁾하였을 뿐만 아니라, 복합재 C형 단면 보의 횡 좌굴의 이론해를 제안¹⁶⁾했다. 또한, Lin¹⁷⁾ 등은 유한 요소법에 의한 박벽 복합 구조체의 좌굴 문제를 연구하였으며, Davalos & Qiao¹⁸⁾는 플랜지가 넓은 복합재료 보의 휨-비틀림과 횡-비틀림 좌굴에 대해 분석적이고 경험적인 방법을 제시하였다. 또한, Kabir & Sherbourne는 전단 효과를 포함한 박벽 복합보의 횡 좌굴의 안정성¹⁹⁾과 채널 단면의 국부 좌굴 효과¹⁶⁾를 연구하였다. 최근 들어서는 Lee & Kim²⁰⁾이 H형 복합재 보의 휨-비틀림 좌굴에 대한 해석 모델을 제안하였고, 동적 거동에까지 확대하였다. 이 모델은 임의의 적층 상태의 구성 즉, 대칭뿐만 아니라 비대칭의 적층 상태, 그리고 다양한 경계조건에 따른 휨과 비틀림 형상의 연계를 설명하였다.

2.2 박벽 복합재료 구조부재의 최적화

복합재료는 두 가지 이상의 재료가 결합할 수 있으므로

설계자가 플라이(Ply)의 두께와 층수, 화이버(Fiber) 즉, 보강섬유의 방향각 및 혼입률, 적층의 배열 등을 구조적 성능에 맞게 구조 단면의 형상과 재료, 그리고 화이버 적층각을 선택하여 최적설계를 할 수 있다.

박벽 복합재료의 최적화에 대한 연구는 대부분 연구들이 복합 적층 평판에 대해 한정적이며, 구조부재에 대해서는 최근 들어 연구들이 수행 중에 있다. 과거에는 복합재료의 적층각에 대한 최적화 연구로서 Jacoby²¹⁾와 Gürdal & Haftka²²⁾에 의한 경사도(Gradient) 방법을 사용하여 연구 되어왔으나, 최근 몇 년간은 기준의 최적화 기법들이 사용하는 경사도 벡터값을 사용하지 않고 해를 이진화 원리를 통하여 목적 함수의 값만을 이용해 최적해를 탐색하는 방법인 생물학적 원리를 이용한 유전 알고리즘(Genetic Algorithm)을 사용함으로서 구조체의 최적화 문제 해결에 많이 이용되고 있다. 유전 알고리즘을 이용한 최적화 연구에서 Lee²³⁾는 확률론적 탐색 알고리즘의 일종인 유전 알고리즘을 사용하여 복합 적층 캔틸레버 보의 최소 중량 설계와 비대칭 복합 적층 평판의 최소 두께 설계에 대한 최적화 연구를 하였고, Soremekun²⁴⁾는 복합 적층 평판의 최대 좌굴 하중과 비틀림 각도를 최적화하는 연구가 수행한 바 있으며, Park²⁵⁾은 다양한 하중 종류와 경계 조건으로 복합 적층 평판의 최대 강성을 Tsai-Hill 이론을 적용하여 연구하였다. 또한 다수의 연구자들은^{26~28)} 복합재료에 대한 최적화 연구를 여러 방면에 대해 수행하여 왔다.

최근 들어 복합 적층 평판이 아닌 박벽 H-형 복합재료 보의 최적화 연구들이 제안되고 있다. Vesna Savic²⁹⁾는 확률론적 알고리즘인 Hit-and-Run 방법을 이용하여 박벽 H-형 복합재료 보의 적층각을 이용하여 최적화 연구를 하였다. 또한 본 연구자는 박벽 H-형 복합재료 보의 적층각을 이용한 최적화 연구를 Krishnakumar³⁰⁾이 제안한 마이크로 유전알고리즘(μ -GA)을 이용하여 박벽 H-형 복합재료 보의 구조적 성능, 즉 휨 강성, 축 강성, 횡좌굴 모멘트를 최대화하는 적층각을 선택하는 연구³¹⁾를 수행한 바 있다.

2.3 복합재료 관련 각종 설계 규준

유럽에서는 복합재료 구조물의 설계기법을 1996년 시방서에 채택하여 사용하고 있으며, 미국의 경우에도 1997년 미국토목학회(ASCE)에서 미국표준국(NIST), 미국재료시험학회(ASTM), 미국도로교통협회(AASHTO) 등과 협력하여 인발성형 복합재료 구조물의 설계시방서가 제정되었고, Strongwell, Creative Pultrusion사 등은 자체 설계

메뉴얼(Design Manual)을 갖추고 있다. 또한 미국콘크리트학회(ACI)에서는 콘크리트 보강을 위한 복합재료에 대한 연구가 계속 진행 중이며 일본에서는 1993년 복합재료 콘크리트 구조물의 설계지침을 지정한 바 있다.

이렇듯 선진국에서는 복합재 건설용 구조부재의 해석 및 설계기술을 재래식 구조재료를 대체할 수 있는 차세대 기술로 집중 육성하고 있는 바 국내에서도 머지않아 새로운 구조부재 설계기술로 정착되어 적극 활용될 것이다.

3. 복합재료 구조부재의 해석모델 개발

3.1 변위장 및 변형률

본 연구의 이론전개에서는 그림 5에서 보는 바와 같이 3종류의 좌표계가 사용되고 있으며, 이 좌표들은 서로 상호 연관되어 있다. 첫째는 보의 단면이 x 축과 y 축으로 이루어져 있으며 z 축이 보의 길이방향인 직교 카테시안 좌표계(orthogonal Cartesian coordinate system), 즉 (x, y, z)이다. 둘째 좌표계는 평판의 국부좌표(local plate coordinate)로서, (n, s, z)로 구성되어 있는 외형좌표계(contour coordinates)이며 그림 5과 같다. 여기서 n 축은 평판요소로부터 직각방향이며, s 축은 단면의 등고선상을 따라 형성되는 좌표이다. 셋째 좌표계는 원점 O로부터 일정거리 떨어진 임의의 점에서의 접선방향 좌표이다. 또한 P 점은 비틀림 중심을 나타내며 일반적으로 전단중심점이 된다. 그림 5에서와 같이 P점으로부터 임의의 거리만큼 떨어진 등고선 상의 점까지의 거리는 q와 r로서 나타낼 수 있다.

본 연구에서는 아래와 같은 기본가정이 사용되었다.

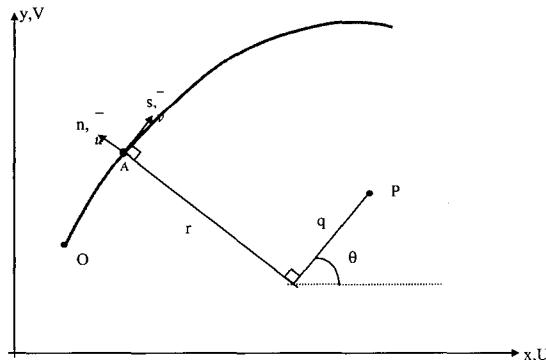


그림 5 보와 박벽요소의 좌표계

1. 박벽의 외형은 자신의 면에 대해 변형하지 않는다.

2. 중립면에 발생하는 전단변형률 γ_{sz} 은 모든 요소에 있어 0이다.

3. 고전판이론의 Kirchhoff-Love 가정은 전단면에 유효하다.

기본가정과 변위성분의 식들에서 유도되어진 박벽 개단면에 필요한 최종적인 변형률은 다음과 같이 주어진다.

$$\epsilon_z = \epsilon_z^* + (x + ns\sin\theta)x_y + (y - nc\cos\theta)x_x + (w - nq)x_w \quad (1a)$$

$$\gamma_{sz} = nx_{sz} \quad (1b)$$

3.2 변형률 에너지

구조체의 전체 포텐셜 에너지(total potential energy)는 식(2)와 같이 변형률 에너지(strain energy) U^* 와 외부 힘에 의한 일 V^* 의 합으로 나타낼 수 있다.

$$\Pi = U^* + V^* \quad (2)$$

복합 재료 변형률 에너지 U^* 에서 변형에너지 변분값은 다음과 같이 나타낼 수 있으며,

$$\delta U^* = \int_0^l \{N_z \delta \epsilon_z^* + M_y \delta x_y + M_x \delta x_x + M_w \delta x_w + M_t \delta x_{sz}\} dz \quad (3)$$

N_z, M_x, M_y, M_w, M_t 는 각각 축력, x, y 방향의 휨모멘트, 뒤틀림모멘트, 비틀림모멘트를 나타내며 아래와 같이 정의 된다.³²⁾

$$N_z = \int_A \sigma_z ds dn \quad (4a)$$

$$M_y = \int_A \sigma_z (x + ns\sin\theta) ds dn \quad (4b)$$

$$M_x = \int_A \sigma_z (y - nc\cos\theta) ds dn \quad (4c)$$

$$M_w = \int_A \sigma_z (w - nq) ds dn \quad (4d)$$

$$M_t = \int_A \sigma_{zs} n ds dn \quad (4e)$$

① 박벽 복합재료 보의 휨 해석

식(2)에 변형에너지의 변분값과 외부 힘에 의한 일의 변분값을 대입하여 전체 포텐셜에너지의 변분의 값이 0인 원리를 적용하면 아래와 같이 최종적인 식을 얻는다.

$$0 = \delta \Pi = \int_0^l \{N_z \delta W' - M_y \delta U'' - M_x \delta V'' - M_w \delta \Phi'' + 2M_t \delta \Phi' + q \delta V\} dz \quad (5)$$

② 박벽 복합재료 보의 횡-비틀림 좌굴 해석
식(2)에서의 V^* 는 단면의 전단 중심 위로 거리 \bar{a} 인 점에 작용하는 횡하중의 포텐셜이며 전단 중심에서 횡하중의 변분값¹¹⁾을 대입하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$0 = \int_0^l \{ N_z \delta W' - M_y \delta U'' - M_x \delta V'' - M_w \delta \Phi'' + 2M_t \delta \Phi' - M_b (\Phi \delta U'' + U'' \delta \Phi) - \bar{a} p \Phi \delta \Phi \} dz \quad (6)$$

3.3 구성 방정식

판 요소에 대한 구성방정식은 식(4)에 각 충의 구성 방정식과 식(1)를 대입하여 일반화된 변형률에 대해 나타낼 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} N_z \\ M_y \\ M_x \\ M_w \\ M_t \end{Bmatrix} = \begin{matrix} E_{11} & E_{12} & E_{13} & E_{14} & E_{15} \\ E_{22} & E_{23} & E_{24} & E_{25} \\ E_{33} & E_{34} & E_{35} \\ E_{44} & E_{45} \\ E_{55} \end{matrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_z \\ x_y \\ x_x \\ x_w \\ x_{sz} \end{Bmatrix} \quad (7)$$

여기서 E_{ij} 는 박벽 복합재료 보의 강성을 나타내는 것으로 E_{ij} 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.³²⁾

$$\begin{aligned} E_{11} &= (EA)_{com}, \quad E_{22} = (EI_y)_{com} \\ E_{33} &= (EI_x)_{com}, \quad E_{44} = (EI_w)_{com} \\ 4E_{55} &= (GJ)_{com} \end{aligned}$$

위 식에서 $(EA)_{com}$ 은 복합재료 보의 축강성이며, $(EI_x)_{com}$ 과 $(EI_y)_{com}$ 은 x와 y 방향에 대한 휨강성, 그리고 $(EI_w)_{com}$ 과 $(GJ)_{com}$ 은 뒤틀림 강성과 비틀림 강성을 나타낸다.

3.4 지배방정식

① 박벽 복합재료 보의 휨 해석

H형 복합재료 보의 휨 해석은 단순 자지된 보에 분포하중 q 를 재하하고 여러 가지 적층 형태를 고려하여 해석한다. 판 요소에 대한 구성 방정식에서 강성행렬은 적층 형태에 따라 다르게 나타난다. 각각의 적층형태에 따른 구성 방정식을 지배방정식에 대입함으로 휨 방정식 형태를 유도해낼 수 있고, 휨 방정식의 지배방정식은 다음과 같다.

$$N_z' = 0 \quad (8a)$$

$$M_y'' = 0 \quad (8b)$$

$$M_x'' + q = 0 \quad (8c)$$

$$M_w'' + 2M_t' = 0 \quad (8d)$$

경계조건은 식(9)과 같다.

$$\delta w : N_x \quad (9a)$$

$$\delta u : M_y' \quad (9b)$$

$$\delta u' : M_y \quad (9c)$$

$$\delta v : M_x' \quad (9d)$$

$$\delta v' : M_x \quad (9e)$$

$$\delta \phi : M_w' + 2M_t \quad (9f)$$

$$\delta \phi' : M_w \quad (9g)$$

② 박벽 복합재료 보의 횡좌굴 해석

횡 좌굴 방정식은 식(6)을 부분적분한 후 정리하면 아래와 같이 얻을 수 있다.

$$N_z' = 0 \quad (10a)$$

$$M_y'' + (M_b \Phi)'' = 0 \quad (10b)$$

$$M_x'' = 0 \quad (10c)$$

$$M_w'' + 2M_t' + M_b U'' + \bar{a} p \Phi = 0 \quad (10d)$$

경계조건도 부분적분으로 아래와 같이 구해진다.

$$\delta W : N_z \quad (11a)$$

$$\delta U : M_y' + (M_b \Phi)' \quad (11b)$$

$$\delta U' : M_y + M_b \Phi \quad (11c)$$

$$\delta V : M_x' \quad (11d)$$

$$\delta V' : M_x \quad (11e)$$

$$\delta \Phi : M_w' + 2M_t \quad (11f)$$

$$\delta \Phi' : M_w \quad (11g)$$

4. 박벽 복합재료 구조부재의 수치해석결과

4.1 박벽 복합재료 보의 휨 해석에 대한 예제

본 예제에서는 역대칭 크로스 플라이에 대한 수치적 예제로서 등분포 하중을 받을 때 수직 처짐값을 구해보고, 유한요소 해석법인 ABAQUS와 비교 분석하였다.

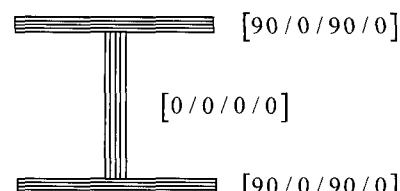


그림 6 역대칭 크로스플라이 적층형태

역대칭이면서 크로스 플라이로 적층할 때, 그림 6과 같으면 두 개의 연계강성 E_{13} 과 E_{24} 이 작용하여 아래와 같

은 휨 방정식을 얻게 된다.

$$E_{11}W'' - E_{13}V'' = 0 \quad (12a)$$

$$-E_{22}U^{iv} - E_{24}\Phi^{iv} = 0 \quad (12b)$$

$$E_{13}W'' - E_{33}V'' + q = 0 \quad (12c)$$

$$-E_{24}U^{iv} - E_{44}\Phi^{iv} + 4E_{55}\Phi'' = 0 \quad (12d)$$

웨브 또한 역대칭 크로스 플라이로 적층할 경우는 균형 대칭식이 된다.

예제를 살펴보면 판요소를 여러 가지 크로스 플라이 형태로 적층시켜 중앙점에서의 최대 처짐 값을 계산하고 ABAQUS와 비교해 보았다. 부재의 양단은 단순지지로 하였으며 부재 전반에 걸쳐 등분포하중 $q = 1\text{ kN/m}$ 를 하였다. 길이는 8 m 이고, 2축 대칭인 H형 복합재 보의 단면에 사용된 형상은 플랜지 폭(b)이 10 cm 이고 웨브의 높이(h)는 20 cm 로 가정하였고, 플랜지와 웨브는 4개의 층으로 적층하여 총 두께를 0.5 cm 로 하였다. 단면의 형태는 그림 7과 같으며, 재료의 물성치는 다음과 같다.

$$E_1 = 25\text{ GPa}, \quad E_2 = E_3 = 1\text{ GPa}$$

$$G_1 = 0.5\text{ GPa}, \quad G_2 = G_3 = 0.6\text{ GPa}$$

$$\nu_{23} = \nu_{13} = \nu_{12} = 0.25$$

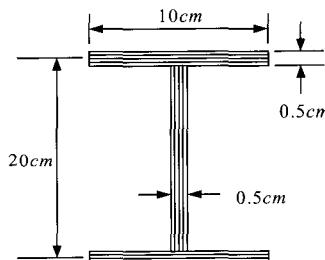


그림 7 박벽 H형 보의 단면 형상

ABAQUS 해석에 있어서 플랜지와 웨브를 S9R5의 판요소로 3차원 모델링하였으며 그 형상은 그림 8과 같으며, 해석결과는 그림 9와 같다.

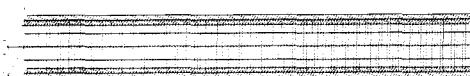


그림 8 ABAQUS 해석 모델

해석한 결과 표 1은 역대칭인 경우 크로스 플라이 형태, 즉 90° 와 0° 의 여러 가지 조합형태를 보여준다. 우선 웨브는 일방향으로 두고 플랜지의 적층 상태만 변화 시켰을 때는 모두 같은 처짐값을 보여준다. 또한 웨브와 플랜지를 동일하게 적층시킨 네가지 경우 모두 같은 처짐 값을 갖는

다. 하지만 웨브를 일방향으로 두고 플랜지만 크로스 플라이로 적층한 경우보다 플랜지와 웨브의 적층각을 동시에 변화 시킨 경우가 최대 처짐값이 더 높게 나왔다.

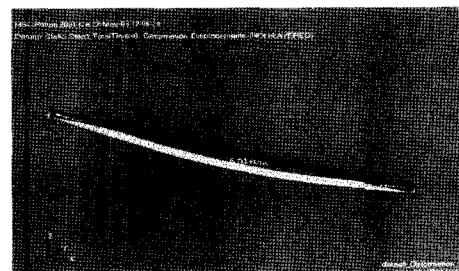


그림 9 복합재료 보의 유한요소해석 결과

표 1 역대칭 크로스 플라이의 여러 가지 적층형태에 대한 수직변위

Bottom flange	Web	Top flange	참고문헌 ³³⁾	ABAQUS	Error(%)
[0 ₂ /90 ₂]	[0] ₄	[0 ₂ /90 ₂]	0.24930	0.26533	6.043
[0/90] ₂	[0] ₄	[0/90] ₂	0.24930	0.26519	5.993
[90 ₂ /0 ₂]	[0] ₄	[90 ₂ /0 ₂]	0.24930	0.26561	6.142
[90/0] ₂	[0] ₄	[90/0] ₂	0.24930	0.26528	6.022
[0 ₂ /90 ₂]	[0 ₂ /90 ₂]	[0 ₂ /90 ₂]	0.30690	0.33513	8.424
[0/90] ₂	[0/90] ₂	[0/90] ₂	0.30690	0.32614	5.900
[90 ₂ /0 ₂]	[90 ₂ /0 ₂]	[90 ₂ /0 ₂]	0.30690	0.33554	8.537
[90/0] ₂	[90/0] ₂	[90/0] ₂	0.30690	0.32624	5.929

4.2 박벽 복합재료 보의 횡-비틀림 좌굴 해석에 대한 예제

본 예제는 길이 $l = 8\text{ m}$ 의 H형 단면을 지닌 박벽 복합재 보의 예제로서 화이버 방향에 따른 효과와 횡-비틀림 좌굴에서의 스펜-높이의 비를 알기 위해 고려된 예제이다. 단면의 형상은 그림 10과 같고, 재료의 물성치는 아래와 같이 사용하였다.

$$E_1/E_2 = 25, \quad G_{12}/E_2 = 0.6, \quad \nu_{12} = 0.25$$

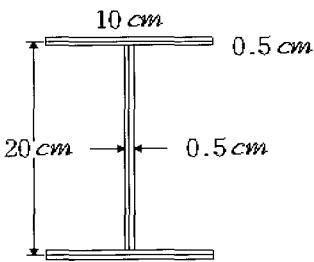


그림10 H형 단면의 박벽 복합 보

여기서 지수 1과 2는 각각 화이어 방향과 화이어 방향의 직각 방향을 나타낸다. 편의상, 무차원 좌굴 모멘트와

하중을 다음과 같이 사용한다.

$$\bar{M}_{cr} = \frac{M_{cr}l}{E_2 t_3 b_3^3} \quad (13)$$

$$\bar{P}_{cr} = \frac{P_{cr}l^2}{E_2 t_3 b_3^3} \quad (14)$$

$$\bar{q}_{cr} = \frac{q_{cr}l^3}{E_2 t_3 b_3^3} \quad (15)$$

웨브의 적층은 앵글-플라이[θ/-θ]로, 상·하부 플랜저는 한 방향으로만 적층되어 있는 것으로 가정하였다. 그리고 H형 단면의 연계 강성 $E_{12}, E_{13}, E_{24}, E_{25}, E_{34}, E_{35}$ 는 0으로 나타난다. 그러나, H형 단면의 E_{15} 은 웨브의 비대칭적인 적층 형태로 인해 사라지지는 않는다. 유한 요소 해석과 정해에 의해 순수 휨에서 단순 지지된 보의 임계 모멘트에서 H형 단면의 E_{15} 의 연계 효과는 무시된다. 보의 임계 모멘트는 그림 11과 같이 나타난다. 화이버 방향이 각도를 갖게 될 때 유한 요소 해석과 정해 사이의 불일치는 고려되어야 하며, 예제에서 $\theta = 30^\circ$ 에서 두 결과 사이의 오차는 10% 이상 존재한다. 즉, 화이버 방향이 각도를 갖게 되면 정해에서는 연계 강성에 의해 더 이상 유효하지 않다는 것을 알 수 있다.

좌굴 하중에서 스팬 길이와 높이 비의 효과를 알아보기 위해 순수 휨이 작용하는 단순 지지된 보에서 길이를 $l = 2, 4, 8, 16m$ 로 변화 시켜 보았다(그림 12). H형 단면의 박벽 복합재 보에서는 모든 스팬의 경우 최대 좌굴 하중은 거의 45° 에서 발생하였다. 따라서 횡-비틀림 좌굴 강성은 비틀림 강성(GJ_{com})에 의존함을 할 수 있다.

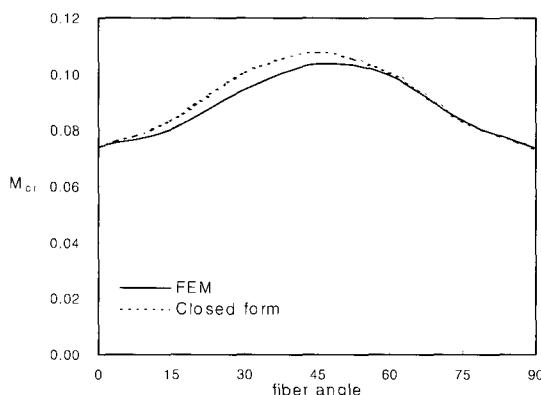


그림 11 순수 휨을 받을 때 H형 단면 복합재 보의 적층각에 따른 횡-비틀림 좌굴 모멘트

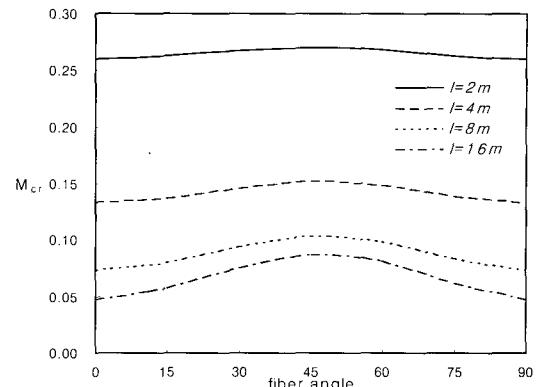


그림 12 보 길이에 따른 순수 휨을 받을 때 H형 복합재 보의 적층각에 따른 횡-비틀림 좌굴 모멘트

서 많이 증가함³⁴⁾을 알 수 있는데, 미국의 경우 건설 분야의 복합재료 시장 규모는 자동차, 항공 산업에 이어 3번째이며, 특히 지난 10년간의 건설 분야 신장률은 매년 평균 43%에 이르고 있다. FRP의 형태 구성은 케이블(Cable), 보(Girder) 그리고 판 요소로 사용되고 있다.

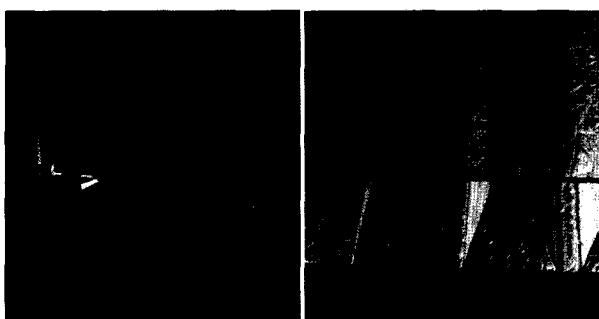
FRP Cable의 개발은 주로 일본과 유럽에서 진행되었으며, post-tensioning cable이나, 현수교량 케이블을 이용한 하이브리드(hybrid) 교량들이 건설 되었다. 그리고 FRP Girder는 하이브리드 또는 완전 복합재료(all-composite)를 사용한 교량 및 건물에 적용 되었는데 특히, 1998년 스위스 건물 박람회에서 전시용으로 건설된 5층 건물인 Eyecatcher 빌딩은 목재 테크와 복합재료의 골조를 사용한 하이브리드 건물로 처음 시공되었다. 이 건물은 박람회 이후 철거 되었다가 스위스 Basel에서 다시 시공되어 현재까지 사무실 용도로 사용되고 있다(그림 13). 하이브리드 건물의 최초 구조물인 이 건물의 골조는 그림 14에서 볼 수 있듯이 3개의 사다리 형태의 FPR 골조로 이루어져 있으며, 외관 측면에는 사다리꼴 형태의 단면을 지닌 불투명한 GFRP(Glass-fibre-reinforced polyester) 샌드위치판을 사용하였다.



그림 13 Eyecatcher building

5. 박벽 복합재료 산업화의 실제 응용사례

최근 들어 FRP의 응용은 건설 분야인 건축물과 교량에



골조 형태 외관 측면 판 요소
그림 14 Eyeatcher building

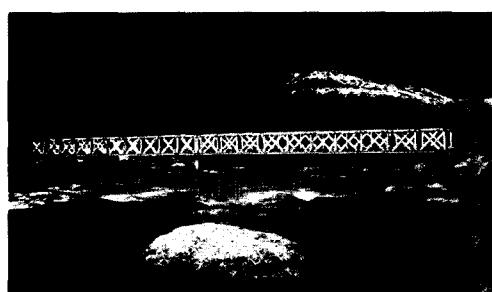


그림 15 All-composite Pontresina bridge

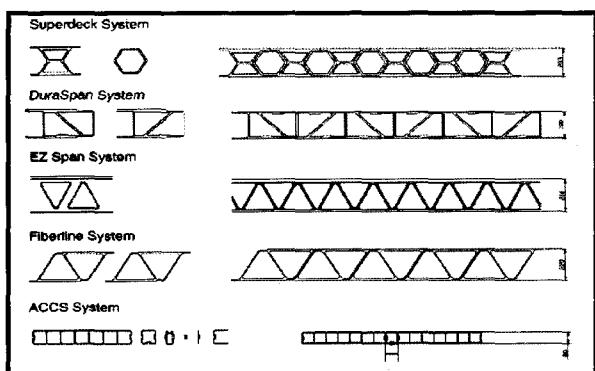


그림 16 인발 성형된 교량 상판의 데크 단면

교량 건설에의 복합재료 응용은 가장 활발히 진행되고 있는 분야로서 1986년 독일의 뒤셀도르프시에 건설된 복합재 봉을 이용한 콘크리트 교량이 시발점이 되어 현재에는 U.C. San Diego의 highway bridge를 비롯한 전 세계적으로 수십 건의 교량이 부분적 또는 완전 복합재료로 제작 시공되고 있다. 완전 복합재료를 이용한 구조물로는 길이 12.5m의 두개 스판으로 이루어진 Pontresina 보행 다리를 들 수 있으며, 주요 골조는 트러스로 이루어져 있다 (그림 15). 이 뿐만이 아니라 교량 상판으로도 FRP DECK 가 활용되고 있으며 DECK 슬래브의 형태는 Hardcore, Kansas, Duraspan, Superdeck, EZ-span, Strongwell의 형태가 사용되고 있다(그림 16).

그 외에도 미국에서는 1993년 기준으로 지하 저장탱크 시장의 90%, 송유관 시장의 50%를 복합재료가 차지하고 있다. 또한, 육상 및 해상의 콘크리트 및 강재 파일을 대체 할 수 있는 복합재료 파일이 개발되어 수건이 실제 시공되었다. 미 해군에서는 복합재 트러스 계단타워를 건축구조물로 시공하였으며, 복합재료의 우수한 전파 투광성을 이용하여 인발성형 복합재로 통신시설용 건물을 시공하였다. 또한, 복합재료는 콘크리트 구조물의 보, 기둥 및 슬래브와 같은 부재의 구조 보강용으로 널리 사용되고 있다.

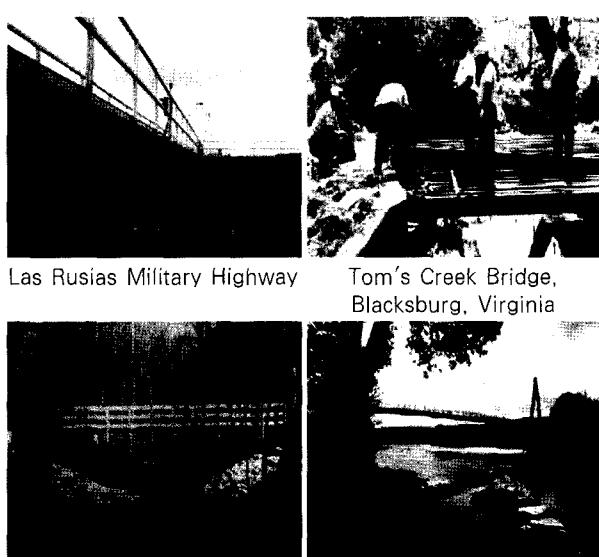
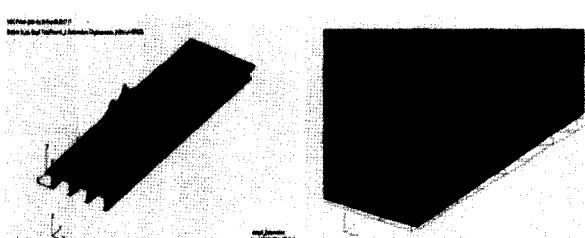


그림 17 본학재를 이용한 교량



FRP 바닥판 유한요소해석 결과

바닥판의 변형된 형상

그림 18 FRP 바닥판의 범용 유한요소 해석 결과



FRP Bridge Deck Test Bed, Troutville, Virginia

그림 19 복합재료 이용한 교량 상판 Test

6. 맷음말

본 기사에서는 박벽 복합재료의 해석 및 설계 기술과 산업화에서의 응용사례들에 대하여 소개하였다. 첨단 신소재인 복합재료의 구조적 해석 및 기술력은 대부분이 우주항공, 군수산업 분야에서 이루어졌으나, 복합재료가 건설 구조용 구조부재로 점차 보급되면서 건설 분야의 차세대 기술로 자리매김하게 될 것이다. 따라서 국내 박벽 복합재료 구조 부재의 설계 기술의 자립화를 위해 많은 실험과 이론적, 해석적 방법을 제시한다면 건설 분야에서 건축, 토목구조체로서 장스팬 구조나 고층구조의 골조와 같이 초경량이며 고강도, 고강성이 요구되는 곳에 활용될 것이다. 또한 궁극적으로 현재의 철골조를 대체할 수 있는 복합 구조시스템을 제시할 수 있는 계기를 마련할 수 있을 것이다.

참 고 문 현

1. Carl T. Herakovich, "Mechanics of Fibrous Composites", John Wiley-Sons, Inc., 1998
2. Vlasov VZ., Thin-walled elastic beams 2nd edition, Israel Program for Scientific Translation, Jerusalem, Israel, 1961
3. Gjelsvik A., The theory of thin-walled bars, John Wiley and Sons Inc, New York, 1981
4. Bauld, N. R. Tzeng, L. S., "A Vlasov theory for fiber-reinforced beams with thin-walled open cross section", *International Journal of Solids and Structures*, Vol.20, No.3, 1984, pp.277~297
5. Omidvar, B, Ghorbanpoor, A, "Nonlinear FE solution for thin-walled open-section composite beams", *Journal of Structural Engineering*, 1996, Nov., pp.1369~1378
6. Chajes W, Winters G., Torsional-flexural buckling of thin-walled member, *J Struct Engng ASCE*. Vol.91, No.4, 1965, pp.103~24
7. Yu W., Cold-formed steel design, McGraw-hill, NewYork, 1973
8. Chen W, Atsuta T. Theory of beam-columns, McGraw-Hill, New York, vol.2: Space behavior and design, 1977
9. Barsoum R., Gallagher R. Finite element analysis of torsional and torsional-flexural stability problems, *Int J Numer Meth Engng*. Vol.2, No.2, 1970, pp.33 5~52
10. Brush DO., Almroth BO., Buckling of bars plates and shells, McGraw-Hill, New York, 1975
11. Bleich F., "Buckling strength of metal structures." New York : McGraw-Hill., 1952
12. Clark JW, Hill HN., "Lateral buckling of beam." *J Struct Eng, ASCE*, 1960;86(7), pp.175~96
13. Rehfield LW, Atilgan AR., On the buckling of thin-walled laminated composite open-section beams, Proceedings of 30th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structure, Structural Dynamics and Material Conference, AIAA, Washington D.C., 1989
14. Barbero EJ, Tomblin J., buckling of thin-walled composite columns, *Thin-walled Struct.*, 1993, pp.237~258
15. Kabir MZ, Sherbourne AN., "Lateral-torsional buckling of postlocal buckled fibrous composite beam.", *J Eng Mech, ASCE*, 1998(July), pp.754~64
16. Kabir, M. Z., Sherbourne, A. N., "Optimal fiber orientation in lateral stability of laminated channel section beams", *Composites Part B*, 29B, 1998, pp.81~87
17. Lin ZM, Polyzois D, Shah A., "Stability of thin-walled pultruded structural members by the finite element method.", *Thin-walled Struct*, 1996;24, pp. 1~18
18. Davalos JF, Qiao P. "Analytical and experimental study of lateral and distorsional buckling of FRP wide-flange beam.", *J composite Construct ASCE* 1997, 1(4), pp.150~159
19. Sherbourne AN, Kabir MZ., Shear strain effects in lateral stability of thin-walled fibrous composite beams, *J Engn Mech ASCE*, 640-7, 1995
20. Lee J, Kim S., "Flexural-torsional buckling of thin-walled I-section composites.", *Computers and Structures.*, 2001;79(10), pp.987~95
21. Jacoby SLS, Kowalik JS, Pizzo JT, "terative methods for nonlinear optimization problems.", Prentice Hall., 1972
22. Gürdal Z, Hafka RT, "Optimization of composite laminates.", Presented at the NATO Advanced Study Institute on Optimization of Large Structural

- Systems, Berchtesgaden, Germany, 1991 September 23-October 4.
23. 이상근, 한상훈, 구봉근, “단순 GA를 이용한 복합 적층 구조의 효율적인 최적설계”, 대한토목건축학회논문집, Vol. 20, No.2-A, 2000, pp.255~264.
24. G.Soremekun, Z.Gürdal, R.T.Haftka, L.T. Watson , “Composite laminate design optimization by genetic algorithm with generalized elitist selection”, *Computers & Structures*, Vol.79, 2000, pp.131~143
25. J.H.Park, J.H.Hwang, C.S.Lee, W.Hwang, “Stacking sequence design of composite laminates for maximum strength using genetic algorithms”, *Composite structures*, Vol.52, 2001, pp.217~231.
26. Callahan,J.K., Weeks,G.E., “Optimum Design of Composite Laminates Using Genetic Algorithms.”, *Composites Engineering*, Vol.2, 1992, pp.149~160.
27. Le Riche,R., Haftka,R.T., “Improved Genetic Algorithm for Minimum Thickness Composite Laminate Design.”, *Composites Engineering*, Vol.5, 1995, pp.143~161.
28. Marcellin, J. L., Trompette, P., Dornberger, R., “Optimization Composite Beam Structures using a genetic Algorithm.”, *Structural Optimization*, Vol.9, 1995, pp.236~244.
29. Vesna Savic, Mark E. Tuttle, Zelda B. Zabinsky, “Optimization of composite I-sections using fiber angles as design variables”, *Composite structures*, Vol.53, 1995, pp.265~277.
30. K. Krishnakumar, “Micro-genetic Algorithms for Stationary and Non-stationary Function Optimization”, SPIE, *Intelligent Control and Adaptive Systems*, Vol.1196, 1989, pp.282~296.
31. 김영빈, 이재홍, “마이크로 유전알고리즘을 이용한 I형 복합재료 보의 최적설계”, 대한건축학회 논문집, vol.19, no.6, 2003, pp.69~76
32. 이재홍, “얇은 판 개단면 복합재료 보의 도심 및 전단 중심”, 대한건축학회논문집, Vol. 17, No.2, 2001, pp.53~57
33. 이승혜, 김영빈, 이재홍, “등분포 하중을 받는 H-형 복합재료 보의 휨 해석”, 대한건축학회 논문집, vol.18, no.8, 2002, pp.3~11
34. Thomas Keller, “Recent all-composite and hybrid fibre-reinforced polymer bridges and buildings”, *Prog. Struct. Engng Mater*, Vol.3, 2001, pp.132~140. 