

特輯

“건설분야에서의 복합재료 응용기술”(총 7편) 중 - 제 6편

건축토목용 복합재료의 국내·외 설계기준 분석

한복규*, 홍건호**, 김기수****

Technical Review on the Design Methods and Guidelines for Fiber Reinforced Composites

Bog-Kyu Han*, Geon-Ho Hong*, Ki-Soo Kim****

ABSTRACT

A decade ago, the technology of strengthening structures using FRP composites was primitive, with very few publications. Nowadays, the potential growth of research is achieved to the wide recognition of the importance of this new technology. In fact, significant practical applications have been preceded and the development of design methods have been achieved. However, the specific design methods for each applications are still lack of design skills in spite of the wide applications of FRP composites in the construction industry.

The purpose of this paper is to report the development of design methods for FRP-strengthened structures by technical review design methods and guidelines of fiber reinforced composites.

Key Words : FRP, FRP composites, FRP design method

1. 서론

현재 건축토목 구조물과 관련하여 복합재료(FRP)의 적용성이 연구되고 있는 분야는 트러스, 프레임, 벽체·건물·교량에 사용되는 판, 콘크리트 내부의 보강재 또는 긴장재, 부재 외부 긴장재로서의 플레이트나 셸, 콘크리트 부재 외부 보강재 또는 거푸집 등이 있다. 현재까지, 위와 같은 모든 분야에서 복합재료의 적용 가능성은 매우 높은 것으로 알려져 있으며, 이러한 분야에 적용 가능한 복합재료의 제작을 위하여 다양한 제조공정 및 기술에 관한 연구도 수행되고 있다. 하지만, 이와 같은 복합재료(FRP)의 다양한 적용성에 비해 이와 관련된 설계기준 및 시방서의 부족은 복합재료 적용성을 크게 저하시키고 있는 실정이다. 한 예로, 전 세계적으로 시공된 약 80여개의 복합재료 교량의 경우에서 정립화된 복합재료 전용 시방규정 및 지침에 의하여 설계 및 시공된 사례는

없는 것으로 조사되고 있다. 복합재료(FRP)와 관련된 설계기준 및 시방서의 발전과정을 살펴보면, FRP 사용 초기에는 기존 건축물의 보강 차원에서 활용되다가 점차 신설 건축물의 철근 또는 긴장재를 대체하는 내부 보강재로 영역이 넓혀가고 있으며, 최근에는 교량(바닥판, 교각)과 건축물(기둥, 슬래브)의 주 구조부재에 FRP를 활용하는 단계로까지 진행되고 있다. 따라서 현재 체계적으로 설계기준 및 시방서의 틀이 구축되어 있는 것은 주로 보강재로 사용되는 복합재료에 대한 것이 주류를 이루고 있다는 것과 각 제조사별로 독자적인 노하우(know-how)와 기술을 보유하고 있어 일반화된 설계기준을 작성하기 어려운 실정이다. 하지만, 이러한 상황에서 여러 건설 선진국에서는 복합재료를 활용한 구조물에 시방규정 및 지침을 제정하기 위하여 관련학회의 위원회를 구성하는 등 활발한 노력을 경주하고 있다.

본고에서는 국내·외 복합재료와 관련된 설계기준, 시방

* (주)한국소본도건설 과장

** 호서대학교 건축공학과 교수

****+ 홍익대학교 재료공학과 교수, 교신저자(E-mail:kisoo@hongik.ac.kr)

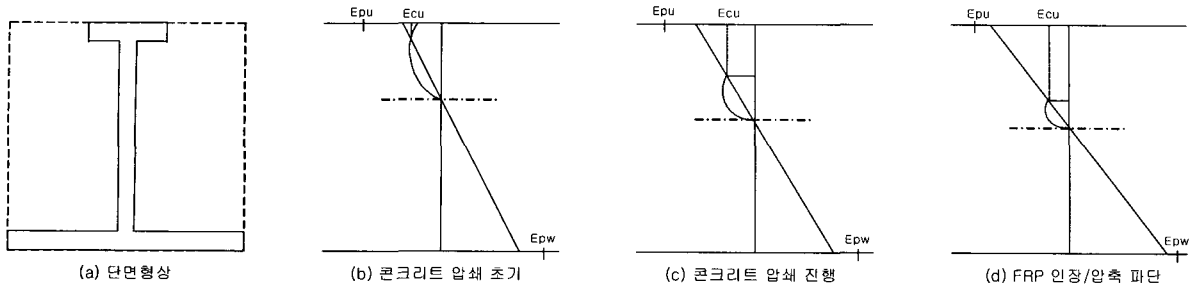


Fig. 1 파괴 진행에 따른 단면 내 응력 분포.

서 및 지침서를 분석함으로써 설계기본원리를 재정립하고, 향후 활용가능성을 제시하고자 한다.

2. 복합재료(FRP)의 국·내외 설계기준분석

건설 분야 적용을 목표로 하는 복합재료를 사용한 부재의 거동에 대한 연구는 국내에서는 아직 미미한 실정이나 미국, 일본, 유럽 등의 기술 선진국이나 대만, 중국 등의 여러 나라에서는 매우 활발히 수행되고 있으며, 미국의 경우에는 ASCE(American society of Civil Engineers)에서 1,200쪽의 FRP 구조물 설계지침서를 1984년에 제정하였다. 최근 ASCE에서는 하중-저항계수 설계법(LRFD)에 근거한 새로운 시방서 준비를 위해 관련전문가로 위원회를 구성하여 설계규정 개정작업을 진행 중이다. LRFD 시방서는 인발 복합재 보, 판, 봉형 단면형상을 갖는 건설분야에 주로 적용되는 구조물에 대한 설계, 제작 및 시공 표준화에 관한 시방규정을 포함하고, 설계기준, 공학적 물성치 등을 망라하여 설계일반, 사용재료, 환경내구성, 크리프와 피로하중 등에 의한 시간 영향, 단면 및 부재, 전체 및 국부좌굴, Joint 부분 등의 장으로 구성되도록 관련 데이터 베이스를 조사, 분석하였다. 유럽에서는 1996년에 복합재 구조물 설계, 제작, 시공법에 관한 표준지침서의 형태로 Euro Code를 제정하였다. Euro Code는 270쪽의 규정, 360쪽 분량의 핸드북 및 각종 실험 관련자료로 구성되어 있고, 다양한 재료의 복합재에 대한 설계방법을 규정하고 있으며, 한계상태 설계법을 채택하고 있다. 일본에서는 1993년 FRP보강 콘크리트 건축물에 대한 한계상태 설계법에 근거한 설계지침서가 제정되었다. 이러한 국외에서의 노력에도 불구하고 초창기 연구를 주도했던 항공산업분야에서는 복합재를 주로 판형 구조(plate type structure)로 적용하였기 때문에 강재에 비해 복합재 보에 대해서는 아직도 세계적으로 충분한 데이터 베이스가 확보되어 있지 않은 실정이다. 향후, 차세대 구조재료로 FRP 부재에 대한 구조적 거동에 관한 이해와 효율적인 설계기술 개발을 위한 체계적인 연구가 요구된다고 할 수 있다.

3. 복합재료(FRP)의 설계개념

3.1 FRP 부재의 구조적 거동

콘크리트부재에 대한 보강재로서 FRP 재료를 사용하기 위해서는 취성적인 파괴로부터 충분한 안전율을 확보할 수 있는 설계절차의 확보가 필요하다. 이를 위해서는 FRP 부재의 구조적 거동에 대한 이해가 반드시 필요하다 할 수 있다. 기본적으로 철근콘크리트 부재는 압축 측 콘크리트의 파괴와 인장 측 파괴가 동시에 일어나는 균형철근비보다 철근을 작게 배근하여 철근이 먼저 항복한 후 콘크리트가 파괴되도록 설계하여 연성파괴를 유도하도록 설계되어 있으며, 그 결과 보강철근이 많은 양의 에너지를 흡수할 수 있는 능력이 존재하게 된다.

하지만, 일반적으로 알려진 바와 같이 FRP 재료의 전단이나 휨 압축, 휨 인장에 의한 파괴는 취성적 파괴로 알려져 있으며 FRP 보강재 파괴시의 응력-변형률관계를 살펴보면 일정한 선형적 변화이다. 따라서 연성파괴를 유도하는 설계보다는 많은 안전율을 확보하고 FRP보다는 압축 측 콘크리트 먼저 파괴되도록 설계하는 것이 일반적이다.

Fig 1은 FRP 합성바닥판에서 최상단 콘크리트의 압쇄파괴가 일어난 후에 FRP-콘크리트 부재에서 일어나는 콘크리트와 FRP의 응력 변화과정을 도식화한 그림이며, Fig 2는 이에 대한 모멘트-곡률 관계이다. Fig 1-a는 비대칭 단면을 갖는 FRP 합성바닥판의 단면 형상으로서 FRP의 상부 플랜지 위에 콘크리트 덮개 부분이 없다는 측면에서 기존의 단면과 구분된다. Fig 1-b는 최상부 콘크리트의 변형률이 콘크리트의 극한 변형률(ϵ_{cu})에 도달한 시점에서 FRP와 콘크리트의 단면 내 응력 분포로서 FRP는 아직 파괴에 도달하지 않은 상태이다. Fig 1-c는 지속적인 하중에 의하여 상부 콘크리트 부분이 차례대로 압쇄되면서 콘크리트의 압축응력을 FRP 부재가 받는 상태이다. 이 때, Fig 1-a의 단면과 달리 상부에 콘크리트 덮개 부분이 있는 단면인 경우에는 모멘트 저항 능력이 감소하게 되는데 이는 콘크리트 압쇄에 의한 응력이 감소되고 모멘트 팔길이의 감소로 인한 모멘트 저항 능력의 감소가 FRP

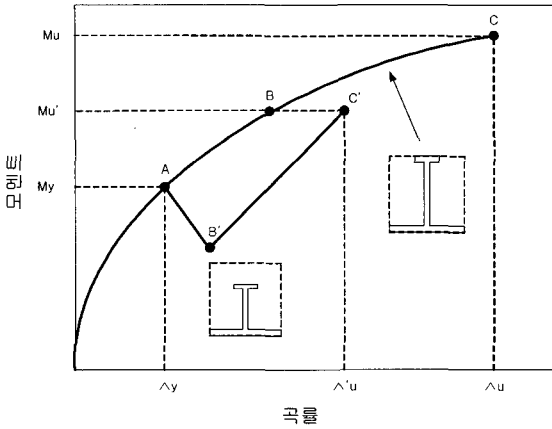


Fig. 2 파괴 진행에 따른 단면의 모멘트-곡률 관계.

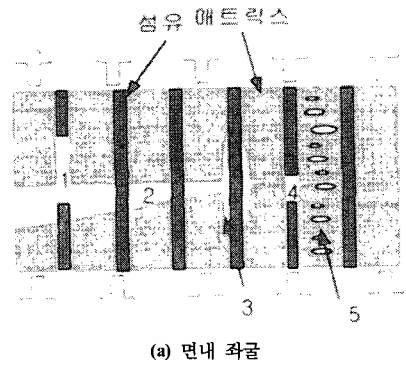
응력 증가에 의한 모멘트 증가 효과보다 크기 때문이다. Fig 1-d는 파괴 진행의 마지막 단계로서 FRP가 인장 또는 압축 파괴에 도달하여 더 이상 부재가 하중을 받을 수 없는 상태이다. 이와 같이 FRP 합성바닥판 부재는 콘크리트가 압축파괴 되더라도 계속적으로 연성능력을 확보할 수 있다.

3.2 FRP 부재의 파괴모드

FRP 재료는 탄성적으로 거동하며 강도가 높은 재료이나, 항복하지 않고 취성파괴하는 특성이 있다. 따라서 FRP 구조를 해석 및 설계하기 위해서는 FRP의 파괴모드를 파악하는 것이 중요하며, FRP의 파괴모드는 다음과 같이 정의할 수 있다.

FRP 구조에 하중이 작용하면 변형이 발생하게 되고, 작용 하중이 FRP 구성재료가 저항할 수 있는 응력을 초과하게 되면, 모재, 섬유, 또는 모재와 섬유 사이에서 미세한 균열 발생하기 시작한다. FRP 구조의 파괴는 이러한 균열이 진전되면서 발생하게 되며, FRP의 균열거동은 균질한 재료인 강재에 발생한 균열에 비하여 매우 복잡한 거동 특성을 보이게 된다. Fig 3에서는 FRP 구조의 파괴가 진행되는 동안에 발생할 수 있는 여러 가지 가능한 국부적인 파괴형태를 나타내었다.

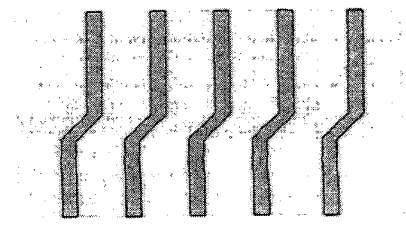
Fig 3-a는 인장하중에 의하여 발생할 수 있는 균열의 형태를 나타낸 것이며, 인장하중에 의하여 섬유의 인출 (pull-out), 섬유 사이의 모재 균열, 섬유와 모재 사이의 부착면 탈락, 섬유 파단, 그리고 모재 균열이 발생할 수 있다. Fig 3-b는 면외 응력에 의하여 발생한 계면박리 (delamination)를 나타내고 있으며, 이는 섬유 자체가 섬유방향과 직각방향으로 충분한 강도를 나타내지 못하는 것이 원인이 되어 발생하게 된다. 압축하중에 의하여 발생할 수 있는 섬유의 미세 좌굴 형태를 Fig 3-c에 나타내었다. 이는 섬유에 비하여 모재 자체의 강도가 낮은 것에 의하여 발생 할



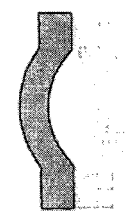
(a) 면내 좌굴



(b) 계면 박리



(c) 미세 균열



(d) 계면박리 및 좌굴

Fig. 3 FRP 구조의 발생 균열 종류.

수 있는 것으로, 이때 섬유는 불안정한 현상을 유지하게 된다. Fig 3-d에는 압축하중으로 인하여 발생하는 거시적인 계면박리 및 좌굴 형태를 나타내었다. 이러한 현상은 사전에 계면박리가 발생한 영역을 포함하고 있는 FRP에서 발생하는 것이다. 위 그림에서 제시한 파괴형태가 발생하면 에너지가 흡수되고, 이는 결과적으로 FRP 강도에 영향을 미치게 된다.

3.3 복합재료(FRP)의 재료시험

복합재료(FRP)를 구조물에 적용하기 위해서는 복합재료 시험방법에 대해 숙지할 필요가 있으며, 다음과 같다. 현재 국내·외적으로 적용되고 있는 복합재료의 재료특성 조사 및 분석을 위한 인장시험, 전단시험, 압축시험 등의 표준시험방법은 최초로 항공공학용 복합재료에 적합하도록 개발된 시험법이므로 건설 분야 적용에 적합한 제조공법, 재료특성, 사용 부재 크기 등을 고려한 시험방법을 개발하고, 이를 이용하여 재료 특성 조사 및 분석이 수행되어야 하지만, 이에 대한 연구는 미약한 실정이다. Table 1에 복합재료 특성 분석을 위하여 각 국에서 적용하고 있는 시험 종류별 표준방법을 나타내었다.

Table 1 국가별 복합재료(FRP) 재료시험방법

구 분	인장시험	전단시험	압축시험	휨시험	충전단시험
국제규격-ISO	527-5	14129	14126	14125	14130
미국-ASTM	D3039	D5379, D3518	D3410	D790	D2344
영국-BS	EN 2782	EN 14129	EN ISO 14126	EN 2562	EN 2377
일본-JIS	K 7054	K 7079	K 7018	K 7017	K 7078
한국-KS	F 2241	F 2248	F 2243	F 2242	F 2246

4. 복합재료(FRP)의 설계이론 분석

건물, 교량 등의 거터에 적용되는 보 부재로 활용되는 FRP 부재는 가장 기본적인 형태로서 휨 강성을 극대화 할 수 있는 I-형, channel, T-형의 개구단면 및 상자형 폐 단면과 같은 형상을 이용하고 있다. 일반적으로 보는 상재하중에 의한 휨, 축방향력, 비틀림 모멘트에 저항하는 기능을 수행하는 구조부재로서 박판 복합재 보는 Euler형 좌굴이나 국부좌굴에 의해 시작된 변형에 의해 파괴에 도달할 수도 있으며 적층 방법이나 기하학적인 형상, 하중의 종류에 따라서는 보 강섬유의 단절(fiber breakage), 과도한 변형도, 복합응력 등과 같은 재료의 한계강도에 의해 파괴에 도달하게 된다. 이와 같은 기본구조를 바탕으로 복합재료 설계이론의 발전과정을 살펴보면, 기존 강재와 같은 등방성 개단면 또는 폐 단면 보가 휨, 축 방향력, 비틀림 모멘트를 받는 경우에 대한 해석이론은 Vlasov와 Gjelsvik에 의해 정립되었으며, 이들의 이론을 복합재 보로 확장한 복합재 보 해석이론은 Bauld와

Tzeng에 의해 제안되었다. 본 제안은 재료의 강도를 검토하기 위해서 보강섬유 등의 재료에 발생하는 응력이나 변형도를 산정해야 하였으며, 이들 응답을 이용하여 구조물의 하중 지지력을 결정하게 되었다. 본 해석이론은 6개의 연계된 평형 미분방정식에 대한 해를 구해야 되기 때문에 설계 시에는 사용하기가 곤란한 요소가 있다.

좌굴된 보의 경우에는 선형영역에서의 전단력과 비틀림은 좌굴시 보의 과도한 면의 변형에 의한 추가적인 합력이 발생하고 이는 합력과 변위의 곱의 형태로 표현된다. Bauld와 Tzeng은 보의 안정성에 관한 Vlasov와 Gjelsvik의 고전이론을 대칭 적층된 개구단면 적층 복합재 박벽보로 확장하였다. 이들이 제안한 이론은 고전 박벽보 이론이 적용하는 가정에 Kirchhoff-Love의 가설에 근거한 고적적층이론의 상관관계식을 적용하였다. 이들은 복합적층 보가 휨에 의한 Euler형 좌굴을 일으키는 경우는 단면을 구성하는 모든 박벽요소가 특별직교이방성으로 적층된 경우에 한정된다고 보고하였다.

뿐만 아니라 Euler형 좌굴에 대한 기존연구는 기둥에 대한 Euler 좌굴공식에 나타나는 휨 강성의 평가에 집중되어 있다. 거시역학(macro-mechanics) 및 미시역학(micro-mechanics)적 접근방법에 의한 해석적 방법을 적용하여 복합재 보 단면의 휨 강성을 예측하거나 시편실험을 통하여 휨 강성을 산정하기 위한 방법이 문헌에 보고되어 있다.

Barbero와 Sonti 등의 연구에서는 미시역학을 적용한 인발 보의 휨 강성은 보강섬유와 폴리머간 부피 구성비율인 혼합법칙을 적용하여 단면재료의 탄성계수를 구하고, 단면 2차 모멘트를 곱하여 사정한다. 그러나, Maji 등의 연구에 의하면 혼합법칙을 적용하여 계산된 인발 보의 휨 강성은 실험을 통하여 구한 휨 강성보다 매우 비 안전측(15~50%)으로 예측할 수 있는 것으로 보고하고 있다. 이것은 인발 보의 제작시 보강섬유가 축방향으로 완벽하게 평행을 이루지 못하기 때문인 것으로 이들은 분석하였다.

유럽의 복합재 구조물 설계시방서에는 인발, 핸드레이업, RTM(Resin Transfer Molding)등의 방법으로 제작되고 몇 가지 대표적인 보강섬유비, 기지(resin), 보강방법별로 E-glass의 종방향 탄성계수 E를 비롯한 열기계적 물성치를 8개의 표에 제시하고 설계 시 사용하도록 권장하고 있다. Euro Code 시방서에 의한 Euler형 기둥좌굴 해석 시에는 이와 같은 표에 제시된 탄성계수 E에 단면형상에 대한 단면 2차모멘트 I를 곱하여 휨 강성을 산정하고 Euler 좌굴공식을 이용하여 좌굴하중을 계산하도록 규정하고 있다. 1984년 ASCE의 구조용 복합재 설계지침에는 좌굴하중을 단면형상계수, 세장비 및 축 방향 탄성계수의 함수로 계산하도록 규정하고 있다.

감사의 글

본 연구는 교육인적자원부 지방연구중심대학육성사업(바

이오하우징연구사업단)의 지원과 과학재단 우수연구센터인 스마트 사회기반시설 연구센터의 지원에 의해 이루어진 것입니다. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- 1) 장수명, “합리화 바닥판 개발(Ⅱ)”, 한국건설기술연구원, 2002.
- 2) 조근희, 김병석, 이영호 “파괴거동을 고려한 복합재료 (FRP)-콘크리트 합성 바닥판의 단면설계에 관한 연구,” 한국콘크리트 학회 2002년도 가을 학술발표회 논문집, pp. 614-646.
- 3) 明嵐政司 外, “纖維強化プラスチックの土木構造材料への適用に関する共同研究報告書(I),” 建設省土木研究所, 1998.
- 4) Eric Johansen, et al., “Design and Construction of Two Pedestrian bridges an Haleakala National Park, Maui, Hawaii,” Proceedings, Fiberglass-Composite Bridges Seminar, 13th Annual Bridge Conference and Exhibition, Pittsburgh, PA. 1996.