

3차원 프리폼 T-빔 구조물의 개발을 위한 적층복합재료 섬유비율의 최적화

이동우* · 김창욱* · 변준형** · 송정일*†

Optimization of Fiber Ratio in Laminated Composites for Development of Three-dimensional Preform T-beam Structure

Dong-Woo Lee*, Chang-Uk Kim*, Joon-Hyung Byun**, Jung-Il Song*†

ABSTRACT: Finite element analysis of T-beam laminate structure under bending-torsional loading was conducted to prevent the delamination which is the major failure behavior on laminated composites. Three-dimensional preform, which is that fabric is braided through thickness direction, is suggested from the laminate analysis. The analysis aimed to optimize the fiber ratio in laminated composites. After it is suggested that guideline for design of T-beam structure using commercial software ANSYS Composites PrePost. The results show that strength of T-beam structure is increased 21.6% when the fiber density along with beam length direction is two times bigger than transverse direction. It is expected that development of high strength T-beam structure using designed three-dimensional preform.

초 록: 본 연구에서는 적층복합재료에 발생하는 주요 손상인 박리를 방지하기 위하여, 굽힘-비틀림 하중이 작용하는 T-빔의 유한요소해석을 수행하였다. 복합재료 T-빔의 제작에 사용할 수 있는 3차원 직조 프리폼을 설계하고자 하였으며, 이는 2차원 구조의 직조섬유가 두께방향으로도 직조가 되어 있는 형태로서, 층간 분리에 의한 박리를 방지할 수 있는 구조이다. 적층복합재료의 해석 및 평가를 위하여 개발된 유한요소해석 소프트웨어인 ANSYS Composites PrePost를 이용하여 구조해석을 수행함으로써 적층복합재료의 섬유비율을 최적화하고, 이를 토대로 3차원 프리폼 T-빔의 제작을 위한 가이드라인을 제시하였다. 해석결과, T-빔의 길이방향 섬유의 비율이 수직방향 섬유의 2배일 때 가장 높은 강도를 보였으며, 하중조건의 변화에도 최적화된 빔 구조의 강도가 유지되는 것을 확인할 수 있었다. 도출된 섬유비율을 이용하여 3차원 프리폼을 개발할 경우, 박리가 일어나지 않는 고강도의 T-빔 구조물을 제작할 수 있을 것으로 기대된다.

Key Words: 프리폼(preform), 빔 구조물(Beam structure), 최적화(Optimization), 적층복합재료(Laminated composites)

1. 서 론

섬유강화 복합재료(Fiber Reinforced Plastic, FRP)는 섬유를 보강재(Reinforcement)로 하고, 수지를 기지재(Resin)로

하는 복합재료로서, 비강도(Specific strength) 및 비강성(Specific stiffness)을 요구하는 다양한 분야에서 사용되고 있다. 섬유강화 복합재료 중에서도 2차원 평면 형태의 직조 섬유를 두께방향으로 여러 장 적층 후, 수지를 주입하여 제

Received 12 August 2017, received in revised form 31 October 2017, accepted 31 October 2017

*Department of Mechanical Engineering, Changwon National University, Changwon 51140, Korea

*†Department of Mechanical Engineering, Changwon National University, Changwon 51140, Korea, Corresponding author
(E-mail: jisong@changwon.ac.kr)

**Composites Research Center, Korea Institute of Materials Science, 51508, Korea

조하는 적층복합재료는 우수한 강도 및 설계의 편리성으로 인하여 널리 사용되고 있다[1-4].

적층복합재료는 고강도의 설계가 가능하지만 지하중에서 장시간 사용시 피로하중에 의한 파손이 발생할 수 있으며, 주요 파손 메커니즘은 층간 분리에 의한 박리(Delamination)이다[5,6]. 이러한 피로하중에 의한 손상 및 파손은 자동차, 항공, 항만 하역설비 등 다양한 산업에서 적층복합재료의 응용을 제한한다.

적층복합재료에 사용되는 섬유를 두께방향으로 한번 더 직조할 경우 3차원 구조의 단일 섬유 보강재가 되며, 이 경우 박리가 발생하지 않으며, 이러한 구조를 적용한 차량용 엔진, 날개, 케이스 등 다양한 복합재료 제품들의 개발이 시도되고 있다[7,8].

그러나 3D 구조의 복합재료는 두께방향으로 직조된 섬유의 영향으로 적층복합재료에 비하여 물성이 떨어진다는 단점이 있으며, 물성저하를 최소화하기 위하여 제품의 형태에 맞게 직조 구조의 최적화가 필요하다[9,10].

본 연구에서는 3D 직조 복합재료 빔(beam) 구조물 시제품을 제조하기에 앞서, 널리 사용되고 있는 2D 구조해석 기법을 이용하여 3D 프리폼(preform)의 섬유비율을 빔 구조물에 적합하게 최적화하고자 하였다.

시편단위에서 2D 복합재료와 3D 직조 복합재료를 비교한 결과에 따르면, 두 종류의 복합재료는 인장시험시, 하중방향으로 배열된 섬유다발의 수와 극한강도가 동일한 추세를 보인다. 또한 압축시험에서도 인장시험과 유사한 거동을 보였으며, 3D 복합재료에서는 박리가 발생하지 않았고, 두께 방향의 강도가 향상됨을 확인할 수 있었다[11,12]. 따라서 2D와 3D 구조가 서로 다른 물성을 가지며 그 차이가 크지만, 2D 구조해석을 통하여 섬유비율을 조절할 경우 그 경향은 유지되며, 해석결과를 3D 구조물의 제조에 적용할 수 있을 것으로 기대된다. 그러나 해석을 통하여 얻은 결과의 경향만 일치하기 때문에 정량적인 결과값을 3D 구조물의 설계에 사용할 수는 없으며, 향후 해석결과를 기반으로 하여 제작한 시험편을 이용한 보완 연구가 필요하다.

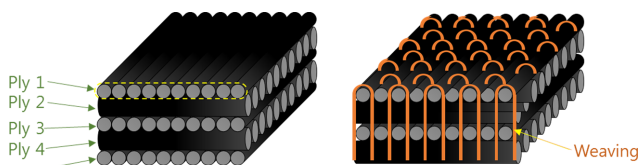


Fig. 1. Comparison of (a) Laminate and (b) braided structure

2. 해석 방법

2.1 사용재료

3D 직조 복합재료 빔 구조물은 탄소섬유를 보강재로 사용하며, 접합부를 포함한다. 해석을 위해서는 복합재료와

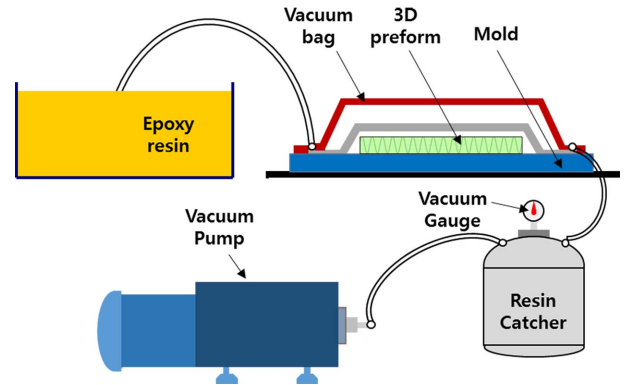


Fig. 2. Vacuum Assisted Resin Infusion Process

Table 1. Manufactured composites for hole machining study

	Carbon/Vinylester	Adhesive film
E_1 (GPa)	123.3	3.6
E_2 (GPa)	7.8	3.6
G_{12} (GPa)	5.0	3
G_{23} (GPa)	3.1	3
V_{12} (mm/mm)	0.31	0.30

접착제의 물성이 모두 필요하며, 해당 물성들은 Table 1에 나타내었다. 탄소섬유가 일방향 배열된 매트(CFW 73, 한국카본, 한국)를 시험규격에 따라 적층한 뒤 진공 인퓨전 성형공정을 이용하여 수지를 주입 후 경화시켜 복합재료를 제조하였으며, 제조 설비의 구성은 Fig. 2와 같다. 최종 제품은 프리폼에 수지를 주입하는 방식을 사용하여 제조하기 때문에 인퓨전 성형공정이 사용될 가능성이 높으며, 시편도 동일한 방식으로 제조하고자 하였다. 그 후, 기계적 특성평가를 수행하여 탄소섬유/비닐에스터 복합재료의 기계적 물성을 구하였다. 기계적 시험은 인장, 압축 및 면간전단시험(interlaminar shear test)을 수행하였으며, 사용규격은 각각 ASTM D3039, D3410 및 D5379이다. 접착필름(LF-501, 무한카본, 한국)의 물성은 업체에서 제공하는 카달로그를 참조하였다.

2.2 해석 모델

구조해석에 사용된 모델은 T-빔(Beam)으로, Fig. 3와 같다. 전통적인 방식으로 제조되는 T-빔은 별도의 접합부가 없지만 본 연구에서 사용한 모델은 두 파트(part)를 만든 뒤 다시 접착하는 방식을 사용하기 때문에 접합부를 포함하고 있다. 이러한 차이는 개발하고자 하는 제품이 프리폼을 사용하기 때문이다. 해석에서는 두 개의 파트를 각각 Pi plate, Vertical plate라고 명명하였으며, Pi plate에는 Pi support가 결합되어 있다. Pi support는 직교하게 연결된 두 판이 수직을 이루도록 보조하는 역할을 하며, 접합부의 응력집중을

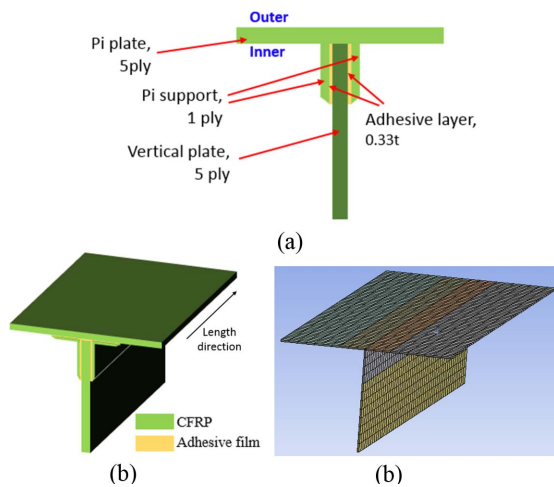


Fig. 3. T-beam modeling for FEA (a) Cross section, (b) Three-dimensional structure and (c) Meshed structure

완화하는 역할도 한다. Vertical plate는 Pi support에 삽입되어 최종 제품인 T-빔이 만들어지게 된다. T-빔 내부 섬유 배열의 경우, 3D 프리폼의 직조 시에는 그 특성상 섬유를 다양한 방향으로 배열하는데 한계가 있으며, 0° 와 90° 방향으로만 섬유가 배열되어 있는 것으로 가정하고 구조해석을 수행하였다. 적층순서는 복합재료의 경화과정에서 비틀림이 발생하지 않도록 대칭 적층구조를 사용하였으며, [0/90/0/90/0]의 순서로 섬유를 적층하고, 두께는 3mm가 되도록 모델링을 수행한 뒤, 해당 모델을 이용하여 구조해석을 수행하였다. 접합부의 경우, 성형시의 접착제 두께를 측정하여 실제 모델에도 동일한 치수를 반영하였으며, 소프트웨어 상에서 접착제와 복합재료간의 접착조건은 bonded로 가정하였다.

구조해석의 절차는 Fig. 4와 같다. 먼저 섬유의 밀도가 균일한 적층복합재료 T-빔의 모델링을 수행 후, 구조해석을 통하여 굽힘-비틀림 하중 하에서의 파손기준(failure criteria)을 평가한다. 셀(shell) 요소를 사용하였으며, 생성된 절점(node)과 요소(element) 수는 각각 2912 및 1893 개이다. 셀 모델은 사각형 플레이트 두 개가 결합된 형상이기 때문에 구조가 매우 단순하기 때문에 요소망도 일정한 크기와 모양으로 생성이 되었다(Fig. 3(c)). 파손기준은 최대 주응력(Maximum stress), 최대 변형률(Maximum strain), Tsai-Wu, Tsai-Hill 및 Puck 이론이 사용되었다. 파손기준은 적층복합

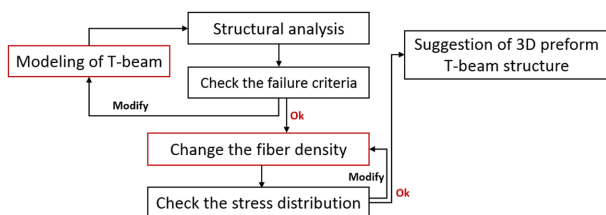


Fig. 4. Flow diagram for optimization of fiber density

재료를 구성하는 각각의 플라이(ply)에 적용되며, 상대적으로 높은 하중이 작용할 때 파손이 발생하지 않거나 가장 적은 파손을 보이는 모델을 선정하는 방식으로 활용할 수 있다. 본 연구에서는 몇 가지 모델을 이용한 반복해석을 통하여 파손이 가장 적게 발생하는 모델을 선정하고, 두번째 단계인 섬유비율의 최적화 연구를 수행하였다. 이 단계에서는 빔의 길이방향과 빔 길이와 직교한 방향의 섬유 비율을 각각 다르게 하여 구조해석을 수행하였으며, 굽힘-비틀림 하중 작용 시, 응력이 가장 낮게 나타나는 섬유 비율을 선정하였다.

2.3 경계 조건

Fig. 5는 빔 해석시의 경계조건을 나타낸 것이다. 빔은 항공기 날개의 CFRP 평판에 부착하여 사용되는 것으로 가정하였으며, 항공기의 날개는 비행중에 복합하중을 받기 때문에, CFRP 평판에 굽힘과 비틀림이 발생하도록 경계조건을 설정하였다. 복합하중을 가하기 위하여 CFRP 평판의 한쪽 끝단을 고정하고 반대쪽 끝단에는 강제 변위를 주어 굽힘 하중과 비틀림 하중이 발생하도록 하였다. 이 경우 평판의 굽힘과 비틀림에 의한 응력이 빔에도 전달되며, 빔 내부에서의 섬유 배열에 따라 빔의 각 플라이(ply)에서 발생하는 주응력을 비교함으로써 최적의 섬유배열 및 적층구조를 선정하고자 하였다.

T-빔은 5장의 일방향 탄소섬유를 [0/90/0/90/0]의 순서로 적층 후, 수지를 주입하여 경화시키는 방식으로 만들어지며, 이때 각각의 플라이(ply)를 어느정도 두께를 지는 섬유를 사용하는지에 따라서 층 별 섬유의 비율이 달라지게 된다. 이 과정에서 각 층의 섬유 비율을 제조하고자 하는 제품에 맞게 최적화 함으로써 고강도의 제품을 제작하는 것이 가능하다. 그러나 3D 프리폼은 별도의 적층과정 없이 기계를 이용하여 한번에 생산되며, 생산된 제품에 수지만 주입 후 경화시키면 바로 제품이 완성되기 때문에 제조시간은 크게 단축되지만 초기 프리폼의 설계가 중요하다. 본 해석에서는 Table 2와 같이 각 플라이의 섬유 비율에 따라 5가지 경우로 나누어 해석을 수행하고 그 결과를 비교하였다. 섬유 비율이 과도한 차이를 보일 경우 특정 하중에 대하여 취약할 것으로 예상되어, 최대 4:1로 정하였으며, 향후 파라메트릭 연구를 통하여 더욱 정교한 비율을 선정하는 것이 필요하다. 빔 구조물에서는 하중의 전달방향이 빔의 길이방향 이므로, 길이방향의 물성을 보강하는 것이 빔 자체의 강도를 향상시키는데 효과적일 것으로 예상되었다.

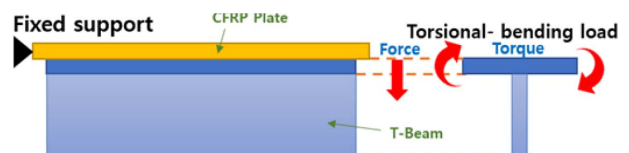


Fig. 5. Boundary conditions for FEA

Table 2. Fiber density of each plies

Fiber ratio	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5
0	1:1	1.5:1	2:1	3:1	4:1
90	0.60	0.69	0.75	0.82	0.86
0	0.60	0.69	0.75	0.82	0.86
90	0.60	0.46	0.38	0.27	0.21
90	0.60	0.69	0.75	0.82	0.86
Total	3	3	3	3	3

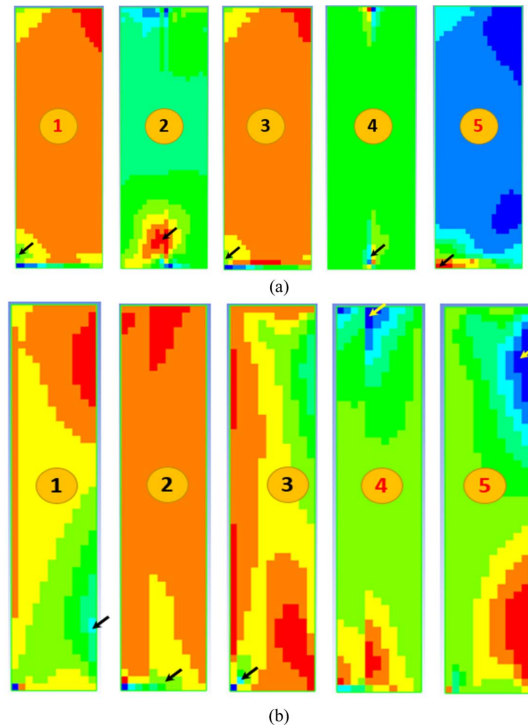
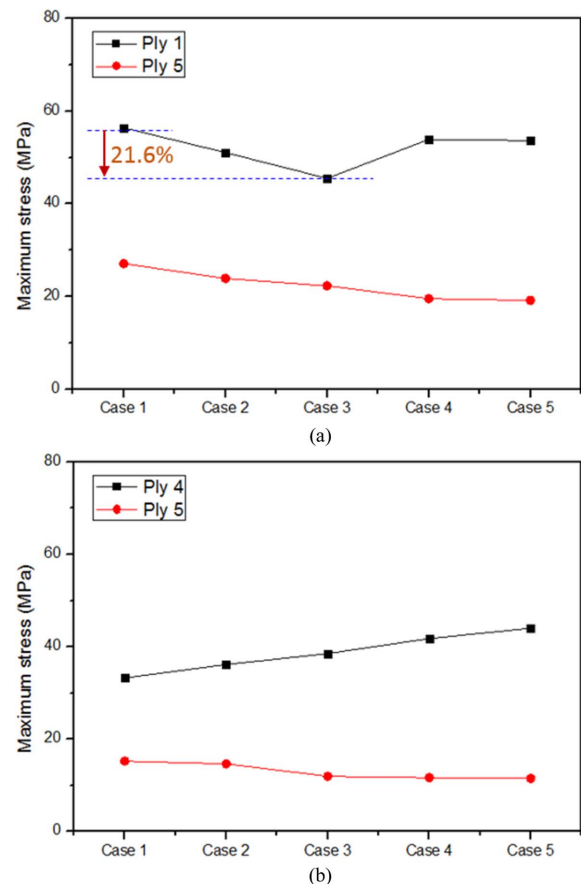
따라서 Case 1은 빔의 길이방향인 0도와 빔 길이에 직교한 수직방향 90도에서 동일한 섬유비율을 가지지만, Case 2부터 Case 5까지는 0도 방향의 섬유비율이 점차 증가하도록 모델링을 수행하였으며, 전체 두께는 3 mm로 일정하게 유지하였다.

3. 해석 결과

3.1 섬유 비율에 따른 응력거동

Fig. 6은 Case 1의 조건으로 모델링한 T-빔의 Pi plate와 Vertical plate에서, 각 플라이에서의 섬유 길이방향 주응력 (principal stress) S1의 분포를 나타낸 것이며, 빔의 길이방향은 그림에서 세로로 향하도록 배열되어 있다. 상단은 하중이 작용하는 위치, 하단은 고정단(fixed support)이다. 각 플라이에서 최대응력이 발생한 지점은 화살표로 나타내었다. 또한 그림에 표시된 숫자는 플라이의 적층 순서대로 나타낸 것이다. 해석결과, 대부분의 응력이 고정단 부근에서 크게 나타남을 확인할 수 있으며, 특히 Pi plate에서는 1, 5번 플라이, Pi support에서는 4, 5번 플라이에서 높은 응력이 나타났다. 이는 T-빔의 구조에 따라서 각각의 플라이에 작용하는 하중이 다르며, 하중을 적절하게 분산시킬 경우 T-빔의 강도를 향상시킬 수 있음을 의미한다.

Fig. 7은 Table 2의 조건에 따라 섬유의 비율을 달리하여 T-빔의 모델링 및 구조해석을 수행한 후, 응력이 크게 나타나는 플라이에서의 최대응력을 비교한 것이다. 응력이 상대적으로 낮게 발생하는 ply는 분석에서 제외하여 데이터를 쉽게 확인할 수 있도록 하였다. 각 플라이에서 발생한 응력이 낮을수록 다른 플라이로 응력이 잘 분산되었음을 의미하며, 각 플라이 중에서 최대응력이 걸리는 플라이가 가장 파손될 가능성이 높기 때문에, 최대응력이 줄어들 경우 강도가 향상되었다고 할 수 있다. 우선 Pi plate와 Vertical plate를 비교해 보면, Vertical plate에서 발생하는 가장 높은 응력(Case 5의 ply 4)이 Pi plate의 가장 낮은 응력(Case 3의 Ply 1)보다 응력이 낮으므로, Vertical plate는 항상 Pi plate보다 늦게 파손된다고 할 수 있으며, 이는 Pi plate의 해석결과를 토대로 최적의 섬유비율을 선택할 수 있음을 의미한다. Pi plate의 Ply 1과 Ply 5중 Ply 1에 걸리는 응력이 높으므로

**Fig. 6.** Stress distribution on (a) Pi plate and (b) Vertical plate with case 1 condition**Fig. 7.** Maximum stress on (a) Pi plate and (b) Vertical plate

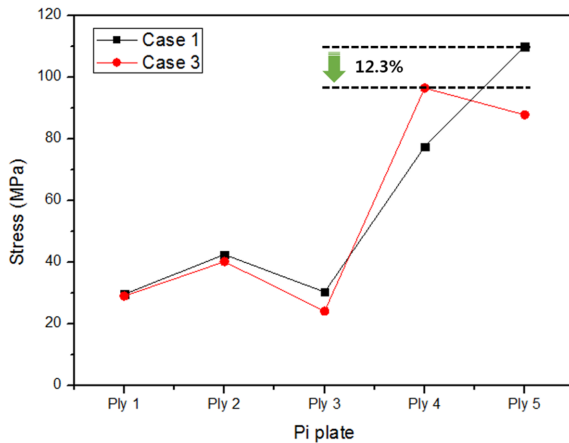


Fig. 8. Maximum stress on Pi plate with increased loading

, Ply 1에서 가장 낮은 응력이 발생하는 조건인 Case 3를 최적 조건으로 선정하였다. Case 3는 빔의 길이방향 섬유 밀도가 수직방향에 비하여 2배 높은 구조로써, 이 구조를 사용할 경우, 균일한 밀도 조건을 사용하는 경우에 비하여 최대 하중이 21.6% 감소한다.

섬유비율의 최적화 후, 하중조건 변화에 따라서 최적화 전후의 상대적 차이가 유지되는지 확인하기 위하여, 최적화 해석에 사용된 하중조건의 두 배의 하중조건으로 추가해석을 수행하여, 균일한 섬유비율을 지닌 Case 1과 최적의 섬유비율을 지닌 Case 3에서의 최대응력을 비교하였다. Vertical plate에 비하여 Pi plate에서 전반적으로 높은 응력이 나타났기 때문에 Pi plate만 비교에 사용되었다. Fig. 8은 Pi plate의 각 플라이에 나타나는 최대응력을 나타낸 것이다. Case 1은 섬유가 균일하게 분포하는 경우, Case 3는 최적화된 섬유비율로 해석한 결과이며, 5번 플라이에 걸리던 높은 응력이 다른 플라이로 분산되면서 최대 응력이 약 12.3% 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 1, 2, 3번 플라이의 경우 4, 5번 플라이에 비하여 낮은 응력을 보였는데, 이는 복합하중에 의해 발생한 굽힘하중에 의한 것으로 생각된다.

3.2 3D 프리폼 T-빔의 구조

적층구조해석을 통하여 도출한 3D 프리폼 T-빔의 설계 방안은 Fig. 9와 같다. 제조공정을 단순화하기 위하여 Pi plate

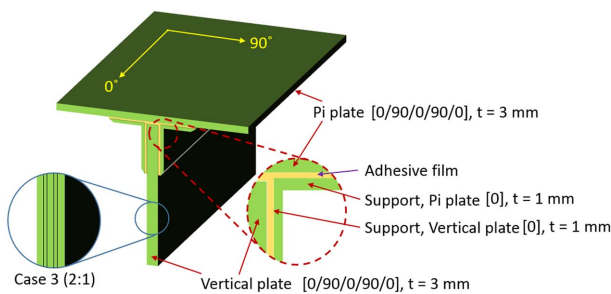


Fig. 9. Optimized design for 3D preform T-beam

와 Vertical plate는 동일한 적층구조인 [0/90/0/90/0]로 제작되며, 각각의 plate는 Case 3(섬유비율 = 2:1) 조건을 사용하여 제작된다. Pi plate와 Vertical plate가 만나는 조인트 부는 1 mm 두께의 탄소섬유를 0° 방향으로 적층하여 보강한다. 향후 3D 프리폼의 제작 시, Pi plate와 Support가 결합된 일체형 프리폼을 제작하고, 일체형 프리폼의 Support부에 Vertical plate를 삽입하고 진공 인퓨전 성형공법을 이용하여 수지를 주입하는 고속의 제조공정을 사용하고자 한다.

4. 결 론

3차원 프리폼은 일반 섬유와 달리 두께방향으로도 직조가 되어있어, 복합재료의 주요 파손거동인 박리를 방지할 수 있는 구조이다. 본 연구에서는 3차원 프리폼을 이용하여 복합재료 T-빔을 제조하기에 앞서, 프리폼의 강도를 향상시키기 위한 섬유비율의 최적화연구를 수행하였다. 최적화해석을 위하여 기존에 널리 사용되고 검증된 적층구조 해석 기법을 사용하였으며, 이 경우 3차원 구조를 그대로 모델링 하지 않고 해석이 가능하며 프리폼의 구조를 개선하기 위한 방향성을 제시하는데 도움이 된다. 해석을 통하여, 빔의 길이방향 섬유의 밀도가 수직방향에 비하여 두 배 높을 때 강도가 가장 크게 향상됨을 확인할 수 있었으며, 하중조건을 변화시켜도 선정한 섬유의 비율이 다른 조건들에 비하여 우수한 강도를 유지하는 것을 확인할 수 있었다. 향후 3D 프리폼을 이용한 고강도의 T-빔 구조물이 개발된다면 고속성형이 가능하며 장시간 사용에 의한 박리가 발생하지 않는다는 장점으로 인하여 기존의 CFRP T-빔을 대체하고, 자동차, 항공, 방산 등 다양한 산업에서 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 2017년도 산업통상자원부 및 한국산업기술평가관리원(KEIT)의 연구비 지원에 의한 연구임(No. 10074270) 일부 저자는 교육부와 한국연구재단의 지역혁신인력양성 사업으로 지원받아 연구를 수행하였음(No. 2014H1C1A1067175).

REFERENCES

1. S. Chen, M. Zang, D. wang, S. Yoshimura, T. Yamada, "Numerical Analysis of Impact Failure of Automotive Laminated Glass: A Review," *Composites Part B: Engineering*, Vol. 122, 2017, pp. 47-60.
2. G.S. Pavan, K.S. Nanjunda Rao, "Bending Analysis of Laminated Composite Plates Using Isogeometric Collocation Method," *Composite Structures*, Vol. 176, 2017, pp. 715-728.
3. A. ozutok, E. Madenci, "Static Analysis of Laminated Composite Beams Based on Higher-order Shear Deformation Theory

- by Using Mixed-type Finite Element Method,” *Inter. J. of Mech. Sci.*, Vol. 130, 2017, pp. 234-243.
4. B. Ostre, C. Bouvet, C. Minot, J. Aboisslere, “Experimental Analysis of CFRP Laminates Subjected to Compression after Edge Impact,” *Composite Structures*, Vol. 152, 2016, pp. 767-779.
 5. W. Hu, R. Jones, A.J. Kinloch, “Discussion of the Stress Ratio Effect on the Fatigue Delamination Growth Characterization in FRP Composite Structures,” *Procedia Structural Integrity*, Vol. 2, 2016, pp. 66-71.
 6. N.S. Mohan, S.M. Kulkarni, A. Ramachandra, “Delamination Analysis in Drilling Process of Glass Fiber Reinforced Plastic (GFRP) Composite Materials,” *J. of Mat. Processing Tech.*, Vol. 186, 2007, pp. 265-271.
 7. M. Amirul Islam, “3D Woven Preforms for E-textiles and Composites Reinforcements,” *Advances in 3D Textiles*, 2015, pp. 207-263.
 8. D. Li, Q. Yao, N. Jiang, L. Jiang, “Bend Properties and Failure Mechanism of a Carbon/carbon Composite with a 3D Needle-punched Preform at Room and High Temperatures,” *New Carbon Materials*, Vol. 31, 2016, pp. 437-444.
 9. G. Tang, Y. Yan, *et al.*, “Dynamic Damage and Fracture Mechanism of Three-dimensional Braided Carbon Fiber/epoxy Resin Composites,” *Materials & Design*, Vol. 22, 2001, pp. 21-25.
 10. Z. Asaee, S. Shadlou, F. Taheri, “Low-velocity Impact Response of Fiberglass/magnesium FMLs with a New 3D Fiberglass Fabric,” *Composite Structure*, Vol. 122, 2015, pp. 155-165.
 11. J. Brandt, K. Drechsler, and F.J. Arendts, “Mechanical Performance of Composites Based on Various Threedimensional Woven-fibre Preforms,” *Composites Science and Technology*, Vol. 56(3), 1996, pp. 381-386.
 12. B.P. Dash, B.K. Behera, “A Study on Structure Property Relationship of 3D Woven Composites,” *Materials Today*, Vol. 2, 2015, pp. 2991-3007.