

충돌 하중을 고려한 친환경 자연섬유 복합재 적용 자동차 차체 패널의 구조 설계 연구

박길수* · 공창덕* · 박현범**†

A Study on Structural Design of Natural Fiber Composites Automobile Body Panel Considering Impact Load

Kilsu Park*, Changduk Kong*, Hyunbum Park**†

ABSTRACT: In this study, structural design and analysis of the automobile bonnet is performed. The flax/vinly ester composite material is applied for structural design. The Vacuum Assisted Resin Transfer Molding-Light (VARTML) manufacturing method is adopted for manufacturing the flax fiber composite bonnet. The VARTML is a manufacturing process that the resin is injected into the fly layered-up fibers enclosed by a rigid mold tool under vacuum. A series of flax/vinyl ester composite panels are manufactured, and several kinds of specimens cut out from the panels are tested to obtain mechanical performance data. Based on this, structural design of the automobile bonnet is performed.

초 록: 본 연구에서는 자동차 구조물의 경량화를 위해 자연섬유 복합재료를 적용하여 차량용 패널의 구조 설계 및 해석을 수행하였다. 구조 설계를 위해 Flax/vinyl ester 복합재료를 적용하였다. 섬유 복합재 패널의 제조공법은 VARTML(Vacuum Assisted Resin Transfer Molding-Light) 제조공법이 적용되었다. 구조 설계 후 충돌에 의한 구조물의 안전성을 분석하기 위해 충돌 실험을 수행하였다. 충돌 실험은 유럽 보행자 보호 기준에 맞게 수행하였으며 해석 결과를 검증하기 위하여 시편을 제작해 충격 실험을 수행하였다. 또한 충격 손상 후 구조물의 잔류강도를 측정하기 위해 손상을 가한 시편의 압축강도 실험을 수행하였다.

Key Words: 자연 섬유(Natural fiber), 구조 설계(Structural design), 자동차 패널(Automobile panel), 경량화(Light weight)

1. 서 론

자동차 경량화는 구조 설계 분야에서 중요한 분야이다. 자동차 경량화는 기본성능인 가속력과 제동력을 높이는 직접적인 요인이며, 가속력과 제동력을 높이기 위해서는 같은 출력일 경우 경량화 할수록 유리하다. 자동차의 경량화는 엔진의 효율을 극대화 할 수 있으며, 상대적 출력이 작아도 출력 당 감당해야 할 중량비가 줄어들기 때문에 무거

운 차량보다 가속성능과 운동성능을 우월하게 확보할 수 있다. 또한 최근 환경규제와 고유가 시대의 도래로 연비 개선은 필수가 되었다. 10%의 무게 감소 시 5~7%의 연비가 좋아지는 것으로 알려져 있어 자동차 제조회사에서는 경량화를 위해 노력하고 있으며 관련 부품업체들도 완성차업체와 협력하여 경량소재를 개발하고 있다.

본 연구에서는 친환경 소재로 다양하게 연구되고 있는 아마/비닐에스테르(Flax/vinyl ester) 복합재료에 대한 물성

Received 30 June 2015, received in revised form 27 October 2015, accepted 27 October 2015

*Department of Aerospace Engineering, Chosun University

**Department of Defense & Science Technology-Aeronautics, Howon University, Corresponding author (E-mail: swordship@daum.net)

치를 평가하여 소형 자동차 패널의 구조 설계 및 해석을 수행하였다. 아마/비닐에스테르 적용 복합재료의 제조 방법은 경량화와 대량 생산에 적합한 제조공정인 VARTML (Vacuum Assisted Resin Transfer Molding-Light)을 적용하였다. 시편을 제작하여 재료의 기계적 물성치를 분석하였으며, 충돌에 의한 구조물의 안전성을 분석하기 위해 시편 충격 실험을 수행하였다. 또한 충돌 후 구조물의 잔류강도를 측정하기 위해 충격을 가한 시편의 압축강도 실험을 수행하여 손상 후 구조물의 구조적 거동을 분석하였다.

2. 자연섬유 분석 및 기계적 물성치 평가

자연섬유 복합재는 최근 여러 산업 분야에서 사용되고 있다. 특히 자동차 산업에서는 도어패널, 좌석 등받이, 헤드라이너, 계기판, 트렁크 라이너 등 기존 금속재료를 대체하여 구조물의 경량화를 위해 자연섬유 복합재료를 적용한 구조물로 대체하고 있는 추세이다. 자연 섬유는 유리섬유와 비교했을 때 강도는 다소 낮지만 가격, 비중, 에너지 흡수 능력을 비교했을 때 자연섬유가 유리섬유보다 유리하다. 특히 자연섬유 중에서도 아마섬유가 인장강도와 탄성계수가 가장 뛰어나다. 따라서 본 연구에서는 아마섬유를 적용하여 구조설계를 수행하였다. Fig. 1은 자연섬유와 유리섬유의 특성을 비교한 그래프이며 Fig. 2는 자연섬유

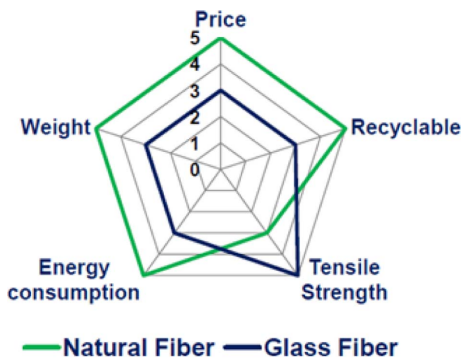


Fig. 1. Comparison of natural fiber and glass fiber[1]

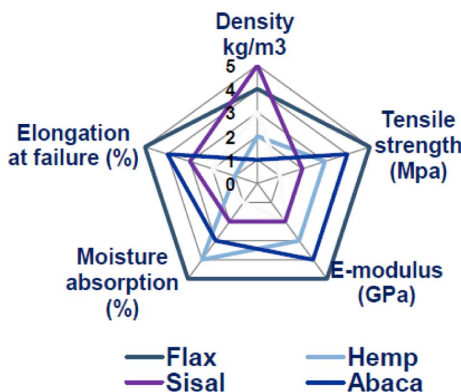


Fig. 2. Competitive analysis of natural fiber[1]

Table 1. Mechanical properties of 2-D fabric flax/vinyl ester specimen (Fiber volume fraction; 34%)

Test type	Strength (MPa)	Modulus (GPa)	Poisson ratio
Tension	109.83	10.07	0.18
Compression	89.87	9.70	
Flexure	163.04	10.12	
In Plane Shear	20.05		

의 특성을 비교한 그래프이다[1].

자연 섬유에 사용되는 수지는 크게 열가소성 수지와 열경화성 수지로 분리된다. 복합재료 섬유에 적용되는 수지는 열경화성 수지가 많이 적용된다. 열경화성 수지는 에폭시(Epoxy), 비닐 에스테르(Vinyl ester), 페놀(Phenolic) 등이 사용된다. 본 연구에서는 비교적 가격이 저렴한 비닐 에스테르를 아마 섬유에 적용할 수지로 선정하였다.

선정된 시편은 VARTML 제작 공법을 적용하여 시편을 제작하였다. 시편은 인장, 압축, 굽힘, 전단 시험을 수행하여 물성치를 평가하였다. Table 1은 시편 시험 결과를 보여주고 있다. 섬유 체적비는 34%로서 참고문헌[2]의 연구에서 제시한 아마/비닐에스테르 시편의 섬유 체적비가 25% 인 것과 비교한 결과 본 연구에서 제시한 제작 공법이 보다 우수한 것으로 검토되었다.

3. 차체 패널 구조 설계 및 해석

3.1 차체 패널 구조 설계

본 연구에서는 아마섬유로 설계한 차량용 패널의 구조적 거동을 비교하기 위해 기존 금속으로 제작된 국내 소형 차의 패널과 비교 분석하였다. 기계적 물성치는 앞서 분석된 아마 섬유 분석 결과를 적용하였다. 패널은 판 구조물로 패널의 중앙에 하중이 가해졌을 때 휘어지는 특성이 생기므로 기존에 금속으로 설계된 구조물의 휨강도를 분석하여 자연섬유 복합재를 적용한 구조의 휨강도가 유사하도록 설계하였다. 판 구조물의 휨강도는 식 (1)에 의하여 계산된다[3].

$$D_{composite} = \frac{E_{eq} h_p^3}{12(1-\nu^2)} \tag{1}$$

기존에 설계된 소형 차량의 금속 패널의 두께는 2 mm이며 이때 휨강도 D는 146.52 N·m이다. Flax/vinyl ester를 1 ply 적용한 구조물의 휨강도 D는 0.86 NM이다. 기존의 금속 패널에 준하는 휨강도를 얻기 위해 Flax/vinyl ester를 적용한 패널 구조는 2-D Fabric 아마 섬유 6plies 두께로 설계 되었으며, 적층 형태는 $[\pm 45]_6$ 이다. Fig. 3은 차량용 패널의 구조 형상을 보여주고 있다. 대상 구조물 패널의 3차원 형상을 모델링하여 구조 설계 결과의 검증을 위해 구조 해석을 수

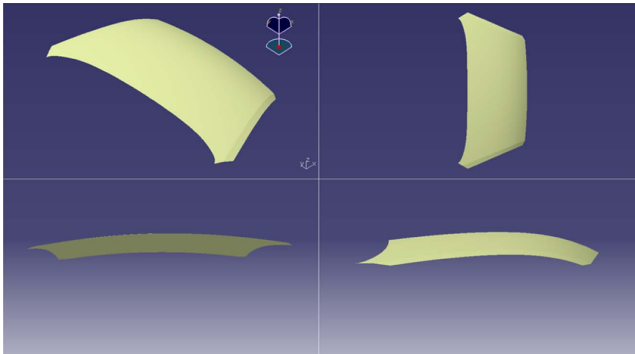


Fig. 3. Structural configuration of automobile bonnet

행하였다.

3.2 성인머리모형 충돌 해석

설계된 패널의 충돌에 의한 안전성을 분석하기 위해 성인 머리모형을 모델링하여 충돌 해석을 수행하였다. 충돌 해석은 성인 남성 머리가 40 km/h의 속도로 패널 중앙 부위에 충돌하였을 때 패널의 변위와 응력을 분석하였다. 성인 머리 모형은 유럽 보행자 보호 법규를 기준에 따라 구모형으로 본체는 알루미늄으로 형성하고 점탄성을 가지는 피부로 둘러싸여야 한다. 머리 모형의 지름은 165 mm, 무게는 4.9 kg으로 Fig. 4와 같이 구성되어 있다. 성인머리 모형의 충격체 형상과 피부는 Fig. 5와 같이 모델링하였다[4].

충돌 해석은 유럽 보행자 보호 관련 기준에 따라 40 km/h

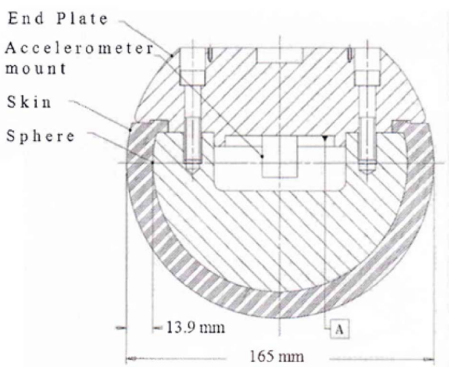


Fig. 4. Adult headform dimension[5]

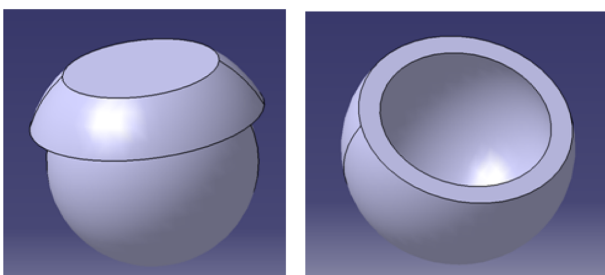


Fig. 5. Model of headform impactor

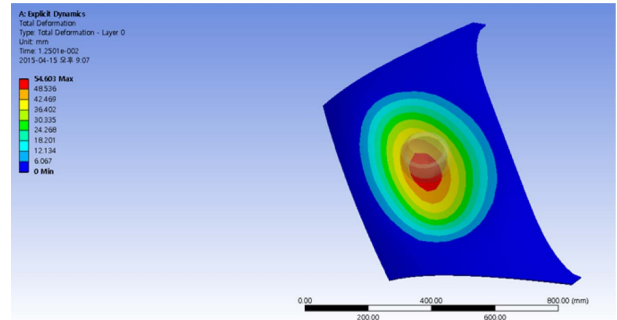


Fig. 6. Impact deformation of flax/vinyl ester composite panel

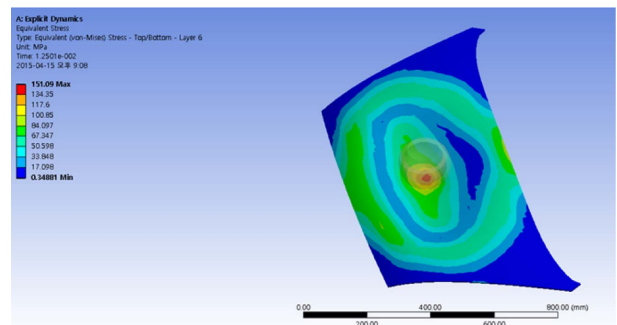


Fig. 7. Impact stress analysis result of flax/vinyl ester composite panel

h의 속도로 구조적으로 가장 취약한 부분인 중앙부위에 충돌하였다.

충돌해석 결과 패널 중앙 부위에서 변위는 54.603 mm로 확인되었다. 수직 방향 변형이 120 mm를 초과하는 경우는 머리 모형 충돌 시 엔진과 직접적으로 간섭되어 머리 상해 치 및 엔진손상이 극대화 될 수 있다는 것을 의미한다. 결과적으로 패널의 수직방향 변형이 120 mm를 초과하지 않았으므로 안전한 것으로 확인되었다. 응력해석 결과는 151.09 MPa로 확인하였다. 충돌 변위 해석과 응력 해석은 Fig. 6, 7에 나타내었다.

Flax/vinyl ester을 적용한 패널의 구조적 거동을 비교하기 위해 기존 스틸 패널의 충돌해석을 수행하였다. 충돌해석은 Flax/vinyl ester 패널과 동일하게 40 km/h의 속도로 패널 중앙 부위에 수직 방향으로 충돌하였다. 스틸 패널의 두께는 2 mm로 설계하였고 스틸의 물성치는 Table 2에 나타내었다.

스틸 패널의 충돌 해석 결과 변위는 패널 중앙부위에서

Table 2. Mechanical properties of steel

Young's Modulus [GPa]	Bulk Modulus [GPa]	Shear Modulus [GPa]	ν	ρ [kg/m ³]
200	166.6	76.9	0.3	7850

Table 3. Comparison of panel performance

	Steel panel	Flax/vinyl ester panel	Comparison
Mass	6.48 kg	4.4 kg	-31.7%
Thickness	2 mm	6 mm	200%
Deformation	53.9 mm	54.6	1.13%
Stress	260 MPa	151 MPa	-41.92%

53.995 mm이며 응력은 260.15 MPa으로 확인하였다. 자연 섬유를 적용한 패널과 비교하였을 때 변위는 자연섬유 패널이 1.13% 더 높았고, 응력은 41.92% 더 작은 것을 확인하였다. 패널의 무게를 비교하였을 때 자연섬유 패널이 31.7% 더 가벼워 구조물의 경량화를 위해 스틸 패널을 대체하여 Flax/vinyle ester 패널을 적용 가능한 것으로 확인하였다. Table 3은 스틸 패널과 아마섬유 패널의 충돌 해석결과를 비교한 표이다.

4. 시편 충격시험

4.1 Flax/vinyl ester 시편 충격 시험

아마섬유를 적용한 차량용 패널의 해석 결과를 검증하기 위해 성인 머리 모형의 충격체를 제작하고 시제품에 충격 시험을 수행해야한다. 하지만 특수 장비가 필요하므로 본 연구에서는 시제품 제작 전에 경향을 분석하기 위한 연구를 수행하였다. 축소형 시편을 제작한 후 시편 충격 시험을 통해 실험 결과와 해석 결과를 비교하고 해석의 타당성을 검증하였다. 에너지는 체적에 비례하므로 성인 머리모형이 패널에 충돌 했을 때의 에너지에 비례하는 에너지를 계산하여 시편 충격 시험을 수행하여 시편의 파손 여부를 분석하였다. 또한 충격 시험 이후에 압축강도 시험을 수행하여 손상 이후의 구조물의 안전성을 분석하였다.

본 연구에서 적용한 충격 시험기는 중량 낙하시 충격 방식으로 충격 에너지를 위치에너지로 환산하여 충격체 (Impactor)를 계산된 에너지에 해당하는 위치로 이동시켜 하단부 지지대에 클램프(Clamp)를 이용하고 시편을 고정하고 낙하시켜서 충격을 가하는 방식이다. 충격체 질량은 5.0 kg이고, 반구충격체(Hemispherical Striker Tip)의 직경은 12.7 mm로서 ASTM D7136[6] 기준에 의해 적용되었다. 시편에 가하는 충격 에너지를 정하기 위해 패널에 성인 머리가 40 km/h의 속도로 충돌했을 때의 에너지를 계산하였다.

$$U = \frac{1}{2}mv^2 \tag{2}$$

본 연구에서 제작한 시편은 VARTML 공법을 적용하였다. 시편의 크기는 100 mm × 150 mm ±45°로 직조된 2-D Fabric 형태의 섬유를 0° 방향으로 적층하여 제작하였다. 에너지는 체적에 비례하므로 성인 머리모형이 패널에 충돌할 때

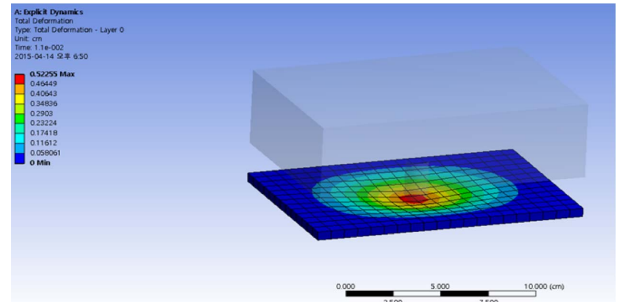


Fig. 8. Impact analysis result of flax/vinyl ester specimen : deformation (10 J)

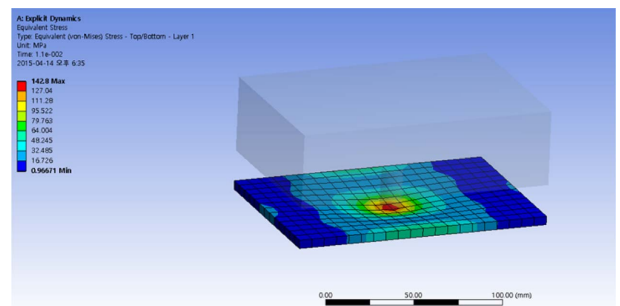


Fig. 9. Impact analysis result of flax/vinyl ester specimen : stress (10 J)

의 에너지를 계산한 후 시편에 가할 에너지를 결정하였다. 성인 머리모형이 패널에 충돌할 때의 에너지는 301 J이며 시편에 가할 충돌 에너지는 8.8 J로 계산된다. 따라서 본 연구에서는 8 J/9 J/10 J 3가지 경우의 충격 시험을 수행하였다.

충격 시험을 수행하기 전에 충격 시험을 모사하여 해석을 수행하였다. 해석은 Ansys의 Explicit Dynamics를 이용하여 충격시의 시편의 응력 및 변위를 분석하였다. 충격체의 질량은 5.2 kg이며, 충돌 접촉면의 지름은 12.7 mm로 설계하였다. 시편 충돌 속도는 8 J/9 J/10 J의 충격 에너지를 가하기 위해 충돌 속도는 1.76 m/s, 1.86 m/s, 1.96 m/s로 적용하였다. 해석 결과는 Table 4에 나타내었으며 Fig. 6, 7은 10 J의 충격을 가한 시편의 변위와 응력 해석 결과이다.

충격 시험은 충격 시험기를 활용하여 Flax/vinyl ester 시편에 8 J/9 J/10 J의 충격을 가하였다. 충격체의 무게는 5.2 kg이며 낙하 위치는 8 J/9 J/10 J 각각 0.16 m, 0.18 m, 0.20 m의 높이에서 낙하하였다. 충격체의 속도는 각각 1.76 m/s, 1.87 m/s, 1.98 m/s이었다. 충격 후 시편을 분석한 결과 뒷면까지 손

Table 4. Result of specimen impact analysis

V [m/s]	1.76	1.86	1.96
E [J]	8	9	10
Deformation [mm]	4.4665	4.925	5.2255
Stress [MPa]	117.84	134.07	142.8



Fig. 10. Damage configuration of specimen after impact test (10 J)

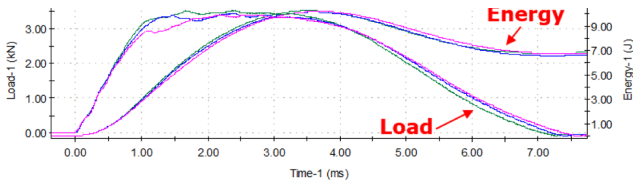


Fig. 11. Result of specimen impact test (10 J)

Table 5. Result of specimen impact test

	Max. load [kN]	Impact velocity [m/s]	Energy to max load [J]
8 J	3.3994	1.7616	6.3935
9 J	3.4546	1.8767	8.3112
10 J	3.4503	1.9898	8.27795

상된 것을 확인하였다. 10 J의 충격 후 시편의 앞면과 뒷면을 Fig. 10에 나타내었다. 충격 손상이 시작되는 시점부터 종료 때까지의 접촉력과 충격 이력을 각각 Fig. 11과 Table 5에 나타내었다.

4.2 시편 손상 후 압축강도 시험

본 연구에서는 충격손상 후 구조물의 강도 저하 정도를 분석하기 위해 시편 충격 시험 이후에 압축강도 측정 시험을 실시하였다. 압축강도 시험은 Flax/vinyl ester 시편에 8 J/9 J/10 J의 충격을 가한 시편과 손상이 없는 시편의 압축강도를 측정하였다. 충격 후 압축강도 시험은 ASTM D7137[5]에 의하여 수행되었다. 복합재료의 특성상 좌굴에 의한 시험 환경을 보완하기 위한 압축 시험 지그는 ASTM 시험규정에 따라 좌굴 방지 시스템을 고안하여 적용하였다. Fig. 12는 압축 시험 전 시편이 지그에 장착된 형상이며, Fig. 13은 압축 시험 후 파손된 시편의 형상이다.

시편 시험 결과 Flax/vinyl ester 시편의 8 J/9 J/10 J의 충격 에너지 적용 후 압축 강도는 손상이 없는 시편 강도와 비교하여 각각 9.55%/17.08%/29.26% 저하되었다. 패널 구조설계 시 1.5의 안전율을 적용하였으므로 손상에 의해 강도가 33% 감소되는 영역은 유지 보수가 반드시 필요한 영역으로 10 J 이상의 충격 시에는 유지 보수가 필요한 것으로 분석하였다. Table 6은 8 J/9 J/10 J의 충격 후 압축 강도 비교 결과이

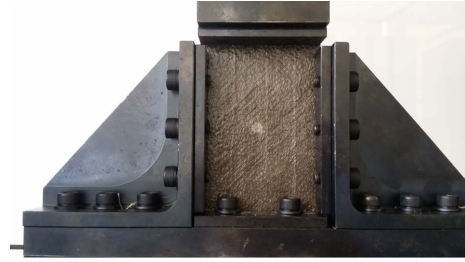


Fig. 12. Configuration before compression test of impact damage specimen

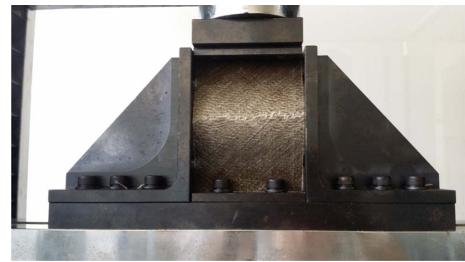


Fig. 13. Configuration after compression test of impact damage specimen

Table 6. Result of compressive strength after impact

	No damage	8J	9J	10J
Compressive Strength [MPa]	89.87	81.28	74.51	63.56
Strength reduction [%]	0	-9.55	-17.0	-29.26

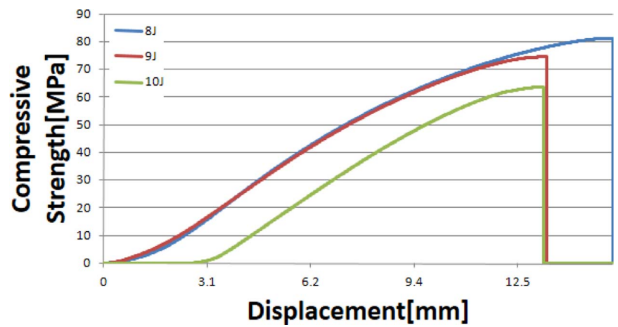


Fig. 14. Load-displacement curve of compression specimen

며, Fig. 14는 8 J/9 J/10 J의 충격 에너지가 적용된 후의 시편 압축 강도 시험 후 하중-변위 선도를 나타내었다.

5. 결 론

본 연구에서는 자연섬유인 아마섬유를 이용하여 Flax/vinyl ester 복합재료를 차량용 차체 패널에 적용하여 구조설계 및 해석, 충격시험을 수행하였다. 패널의 구조설계는 휨강

도를 기준으로 구조설계를 수행하였다. 스틸 패널의 휨강도에 준하게 설계하기 위해 Flax/vinyl ester 패널의 두께는 6 mm로 설계하였으며, 적층 형태는 $[\pm 45]_6$ 이다. 구조 설계 후 유럽 보행자 보호 법규를 기준으로 성인 머리모형을 모델링하여 패널 중앙 부위에 40 km/h의 속도로 충돌 해석을 수행하였다. 마지막으로 충격 손상 후 구조물의 잔류 강도를 측정하기 위해 시편을 제작하여 충격시험 후 손상된 시편의 압축강도 시험을 수행하였다. 시편 충격 에너지는 체적에 비례하는 에너지를 계산해 시험을 수행하였으며, 10 J 이상의 충격 시에는 유지 보수가 필요한 것으로 확인하였다. 본 연구에서 설계한 Flax/vinyl ester 패널은 기존 스틸 패널과 비교하여 31.7%의 무게 절감률을 확인하였으며 기존 스틸 패널을 대체하여 적용이 가능한 것으로 확인하였다.

후 기

본 연구는 조선대학교 산학협력 선도대학(LINC) 육성사업에서 지원하는 연구과제로 수행된 것이며, 지원에 대해 감사드립니다. 본 연구는 호원대학교 교내학술비 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

1. Lucintel Brief, "Opportunities in Natural Fiber Composite", Lucintel, 2011.
2. Libo Yan, "Effect of Alkali Treatment on Vibration Characteristics and Mechanical Properties of Natural Fabric Reinforced Composites," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 31, No. 13, 2012, pp. 887-896.
3. Walter D. Pilkey, *Formulas for Stress, Strain and Structural Matrices*, A Wiley-Interscience Publication, Canada, 1994.
4. Regulation(EC) No. 78/2009 of the European Parliament and of the Council of 14 January, 2009.
5. ASTM D 7137, "Standard Test Method for Compressive Residual Strength Properties of Damaged Polymer Matrix Composite Plates", 2005.
6. ASTM D 7136, "Standard Test Method for Measuring the Damage Resistance of a Fiber-reinforced Polymer Matrix Composite to a Drop-weight Impact Event", 2005.