

차세대 자동차 본넷용 친환경 경량화 자연섬유 복합재 구조 설계

박길수* · 공창덕* · 박현범**†

Structural Design of Light Weight Natural Fiber Composites for Next Generation Automobile Bonnet

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 차량용 본넷의 구조 설계 및 해석을 수행하였다. 구조 설계를 위해 아마/비닐 에스테르 복합재료가 적용되었다. 아마 섬유 복합재 본넷의 제조공법은 VARTML(Vacuum Assisted Resin Transfer Molding-Light) 제조공법이 적용하였다. VARTML 공법은 한쪽 면은 견고한 금형을 사용하고 다른 면은 진공과 함께 유연한 금형을 사용하여 압력차를 이용하여 내부에 적층된 섬유에 수지를 신속하게 함침시켜 성형하는 방법이다. 아마/비닐 에스테르 패널로 부터 시편을 가공하여 재료의 기계적 물성치를 획득하기 위한 시편 시험을 수행하였다. 이를 기반으로 자동차 본넷의 구조 설계를 수행하였다.

Key Words: 자연섬유(Natural fiber), 구조 설계(Structural design), 자동차 본넷(Automobile bonnet), 경량화(Light weight)

1. 서 론

자동차 경량화는 자동차업계의 영원한 과제이다. 자동차 경량화는 기본성능인 가속력과 제동력을 높이는 직접적인 요인이며, 가속력과 제동력을 높이기 위해서는 같은 출력 일 경우 경량화 할수록 유리하다. 자동차의 경량화는 엔진의 효율을 극대화 할 수 있으며, 상대적 출력이 적어도 출력 당 감당해야 할 중량비가 줄어들기 때문에 무거운 차량보다 가속성능과 운동성능을 우월하게 확보할 수 있다. 또한 최근 환경규제와 고유가 시대의 도래로 연비 개선은 필

수가 되었다. 오일 쇼크 때부터 활발히 도입되기 시작한 각국의 자동차 연비규제의 가장 근본적인 목표는 에너지 절약이라 할 수 있다. 최근 미국, 중국, 유럽을 비롯한 세계 각국은 자동차 연비 기준을 점차 강화하고 있고, 고연비 기술을 적용한 차량에 추가적인 인센티브를 제공하는 등 국가 차원에서도 연비 향상을 위해 꾸준한 노력을 기울여 그 성과를 거두고 있다. 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.

Received 21 January 2015, received in revised form 24 April 2015, accepted 29 April 2015

*Department of Aerospace Engineering, Chosum University

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

본 연구에서는 친환경 소재로 다양하게 연구되고 있는 아마/비닐에스테르(Flax/vinyl ester) 복합재료에 대한 물성치를 평가하여 소형 자동차 본넷의 구조 설계 및 해석을 수행하였다. 아마/비닐에스테르 적용 복합재료의 제조 방법은 경량화와 대량 생산에 적합한 제조공정인 RTM(Resin Transfer Molding)을 적용하였다. 시편을 제작하여 재료의 기계적 물성치를 분석하였으며, 분석된 기계적 물성치를 설계에 활용하였다. 구조 설계 결과는 구조 해석 및 구조 시험을 통해 구조 안전성을 검토하였다.

2. 자연섬유 분석 및 기계적 물성치 평가

복합재료로 적용되는 자연섬유는 셀룰로오스 함량이 높을수록 물성이 향상되어 기존의 인공 섬유를 대체하기에 유리하다. 현재 적용되고 있는 자연섬유는 아마(Flax), 대마(Hemp), 황마(Jute), 케나프(Kenaf), 모시(Ramie), 아바카(Abaca), 대나무(Bamboo), 코이어(Coir) 등이 있다[1-3]. 이 중에서 아마, 황마, 대마 등은 인장강도가 높은 편으로 산업용으로 적용하기에 적합한 형태이다. 섬유질의 함량을 비교했을 때 아마는 71%, 황마는 65%, 대마는 72%, 사이잘은 69%로 분석되었다. 따라서 본 연구에서는 2D-Fabric 형태로 직조된 아마 섬유를 차량용 후드 제작을 위한 재료로 선정하였다. Fig. 1은 아마섬유의 직조형상이며, Table 1은 아마 섬유의 기계적 물성치이다.

자연 섬유에 사용되는 수지는 크게 열가소성(Thermoplastic) 수지와 수지로 분리된다. 대표적인 열가소성 수지를 분석해 보면 폴리에틸렌(Polyethylene), 폴리프로필렌(Polypropylene), 폴리아미드(Polyamide)이다. 열경화성 수지는 에폭시(Epoxy), 비닐 에스테르(Vinyl ester), 페놀(Phenolic) 등이 사용된다. 최근에는 자연 수지도 개발되고 있는데 열대 나무의 열매 껍질에서 채취된 캐슈 너트 셸 수지(CNSL: Cashew nut shell oil resin)가 대표적인 자연 수지로 활용되고 있다. 복합재료 섬유에 적용되는 수지는 열경화성 수지가 많이 적용된다. 본 연구에서는 비교적 가격이 저렴한 비닐 에스테르를 아마 섬유에 적용할 수지로 선정하였다. 본 연구에서 사용한 수지의 점성은 25°C에서 350 mm²/s이다. 또한 침투계수는 25°C

Table 3. Mechanical properties of 2-D fabric flax/vinyl ester specimen (Fiber volume fraction; 34%)

Test Institute	Advanced Composite Materials R&D Center, Jiwootech Co., Ltd		
Test Type	Strength (MPa)	Modulus (GPa)	Poisson Ratio
Tension	76.74	9.14	0.24
Compression	72.80	6.78	
Flexure	108.72	6.75	
In Plane Shear	36.19	1.66	

에서 1.10¹⁵이다. Table 2는 비닐에스테르의 물성치를 나타내고 있다.

시편 제작 공법은 시제품 제작에 사용될 동일한 방법인 VARTML 제조 공법을 적용하여 제작되었다. 본 연구에서 각 시편 시험은 총 3개씩 수행하여 평균값을 산출하였다. 각 시편 시험 방법은 ASTM 규정에 의거하여 수행하였다. 인장, 압축, 굽힘, 전단 시험은 각각 ASTM D 3039, D 6641, D 790-3, D 5379에 의해 수행되었다. Table 3은 시편 시험 결과를 보여주고 있다. 섬유 체적비는 34%로서 참고문헌[4]의 연구에서 제시한 아마/비닐에스테르 시편의 섬유 체적비가 25% 인 것과 비교한 결과 본 연구에서 제시한 제작 공법이 보다 우수한 것으로 검토되었다.

3. 차체 본넷 구조 설계 및 해석

3.1 차체 본넷 구조 설계

본 연구에서는 아마섬유로 설계한 차량용 본넷의 구조적 거동을 비교하기 위해 기존 금속으로 제작된 국내 소형차의 본넷과 비교 분석하였다. 기계적 물성치는 앞서 분석된 아마 섬유 분석 결과를 적용하였다. 설계 하중은 자동차가 200 km/h의 속도로 운행했을 때 작용하는 공력하중을 분석하여 설계를 수행하였다. 또한 기존에 금속으로 설계된 구조물의 강성을 분석하여 복합재 구조의 강성이 유사

Table 1. Mechanical properties of 2-D fabric flax

Density [g/cm ³]	Orientation	Aerial Weight [gsm]	Tensile Strength [MPa]	Tensile Modulus
1.3	±45 biaxial	600	500	50

Table 2. Mechanical properties of KRF-1031

Non Volatile Monomer	Viscosity	Gel Time	Acid Value	Curing Temp.
54-58%	0.8-1.2 P	50-60 min	0-8 mg KOH/g	15-100%



Fig. 1. 2D-fabric flax fiber

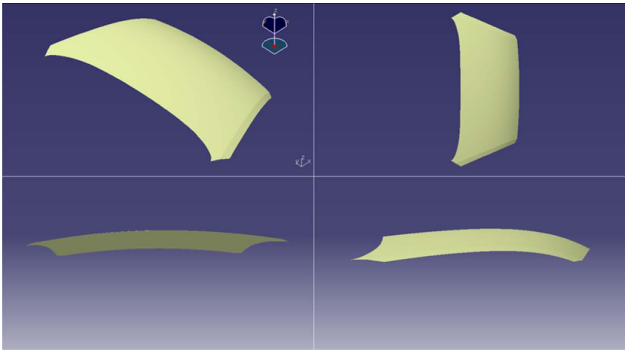


Fig. 2. Structural configuration of automobile bonnet

하도록 설계하였다[5].

구조 설계 결과 소형 차량용 본넷 구조는 2-D Fabric 아마섬유 6 plies 두께로 설계 되었으며, 적층 형태는 $[\pm 45]_6$ 이다. Fig. 2는 차량용 패넬의 구조 형상을 보여주고 있다. 대상 구조물 본넷의 3차원 형상을 모델링하여 구조 설계 결과의 검증을 위해 구조 해석을 수행하였다.

3.2 구조 해석

본 연구에서 최종 설계 결과의 구조 안전성 검토를 위해 상용 유한요소 해석 소프트웨어를 활용하여 구조 해석을 수행하였다. 구조물에 작용하는 하중은 자동차가 200 km/h의 속도로 운행하였을 때 작용하는 공력 하중을 분석하여 적용하였다. 패넬은 지면과 30°의 각도로 장착되어 있다고 가정하였고 자동차가 200 km/h의 속도로 운행 할 때 패넬에 작용하는 하중은 1932 N/m^2 이며 안전율 1.5배를 고려하였다. 구조 해석 종류는 응력 해석, 변형 해석, 좌굴 해석, 열응력 해석 총 4가지의 해석을 수행하였다. 경계 조건은 패넬이 장착되는 끝단 부위를 고정 경계 조건으로 적용하였다. 열해석을 위한 내외부 온도 조건은 엔진에서 전달되는 열을 분석하여 패넬 하부는 50°C로 적용하고 상부는 0°C로 적용하였다. Fig. 3은 유한요소 모델링 결과를 보여주고 있다.

차량용 본넷의 구조해석 결과 최대 압축 응력은 -0.90 MPa, 최대 인장 응력은 0.38 MPa로서 충분히 안전한 것으로 검토되었다. 변위 해석 결과는 본넷 중앙 부위에서 0.33 mm로 검토되어 차량과 결합되었을 때 변위도 충분히 안전한

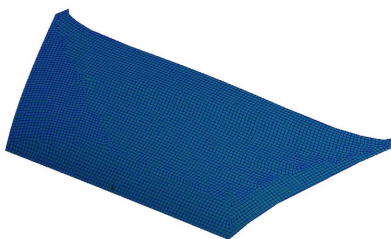


Fig. 3. Finite element modeling of automobile body panel

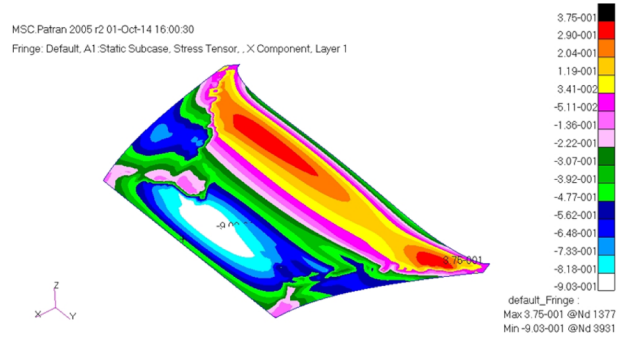


Fig. 4. Stress analysis result of flax/vinyl ester composite panel

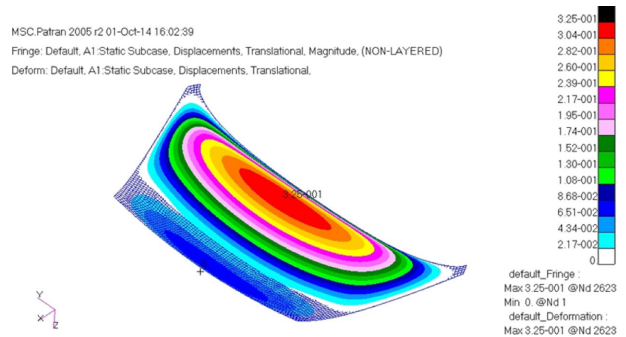


Fig. 5. Deformation of flax/vinyl ester composite panel

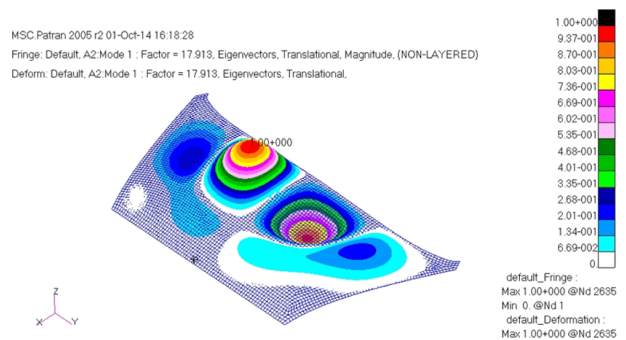


Fig. 6. Buckling analysis result of flax/vinyl ester composite panel

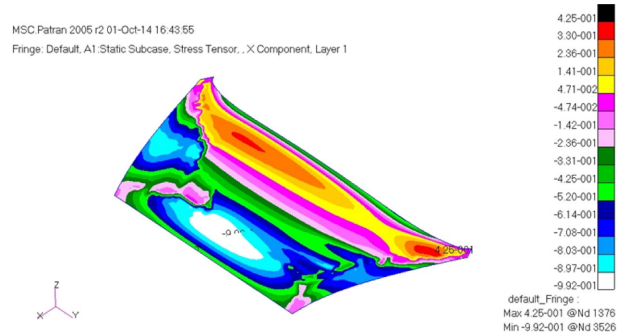


Fig. 7. Thermal stress analysis result

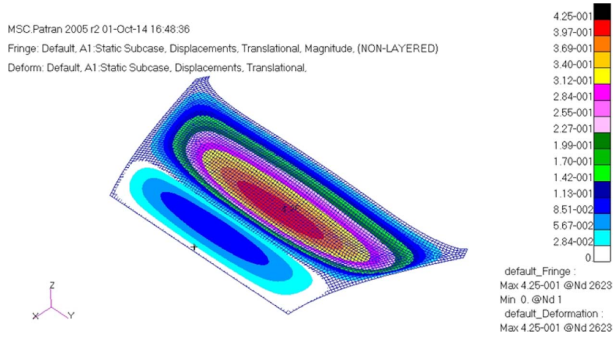


Fig. 8. Displacement analysis results due to thermal stress

것으로 확인되었다. 좌굴 해석 결과 하중배수는 18로서 충분히 좌굴에 안정한 구조물인 것으로 검토되었다. 또한 본넷은 엔진에 의한 열이 전달되므로 열응력 해석을 수행하였다. 온도 조건은 50°C의 온도를 적용하여 열응력을 검토한 결과 최대 압축 응력은 0.99 MPa로 확인되었으며, 최대 인장 응력은 0.43 MPa로 검토되었다. 변위는 0.43 mm로 검토되었다. Fig. 4-8은 구조 해석을 통한 응력, 변위, 좌굴, 열응력 해석 결과를 보여주고 있다.

4. 시제품 제작 및 구조 시험

4.1 차체 본넷 시제품 제작

본 연구에서는 VARTML(Vacuum Assisted Resin Transfer Molding-Light) 제조 공법으로 시제품을 제작하였다. 수지 주입구 개수는 1개이며, 수지 배출구는 4개로 장착하였다. 수지 주입 압력은 1 bar이며 수지 배출구 압력은 -1 bar로 적용하였다. 총 수지 주입 시간은 60분으로 확인되었다. 시제품 제작을 위한 경화 온도는 상온 경화이며, 경화 시간은 24시간 경화하였다. Fig. 9는 몰드에 아마 섬유 적층 및 수지 주입 후 성형 과정이다. Fig. 10은 시제품 제작 과정과 완성된 시제품을 보여주고 있다.

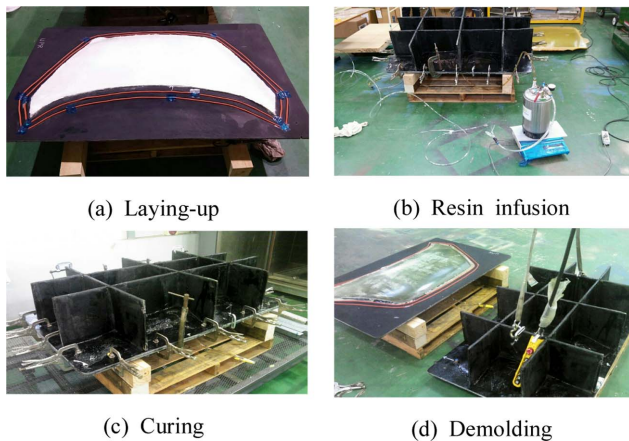


Fig. 9. Manufacturing process of prototype



Fig. 10. Manufactured prototype of automobile bonnet

4.2 차체 본넷 구조 시험

아마섬유 복합재 차량용 본넷의 구조 안전성 검토를 위한 구조 시험은 스트레인, 변위 시험을 수행하였다. 구조 시험 하중은 설계 하중인 공력 하중을 2 지점에 집중 하중으로 변환하여 적용하였다. 시제품을 고정하고 하중을 가한 후 변형률과 변위를 검토하여 해석 결과와 비교하였다. 시제품의 구속 위치는 뒷면 중앙 부위를 구속 하였으며, 하중 위치는 양 옆에서 각각 300 mm 지점에 하중을 적용하였다.

시제품의 끝단을 고정하고 상하면 4개 지점에 스트레인 게이지를 부착하여 스트레인을 검토하고 해석 결과와 비교하여 구조 설계 결과의 타당성을 검토하였다. Fig. 11은



Fig. 11. Bonnet mounting and attachment of strain gauge

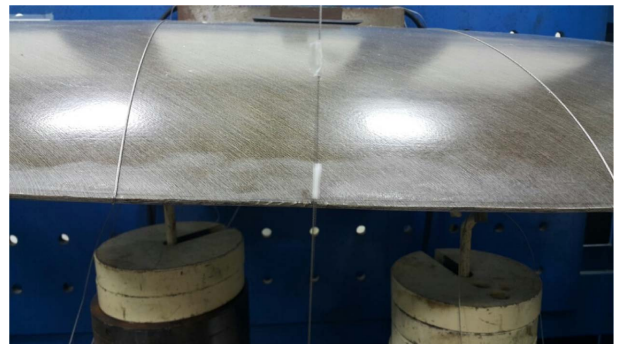


Fig. 12. Structural test of bonnet

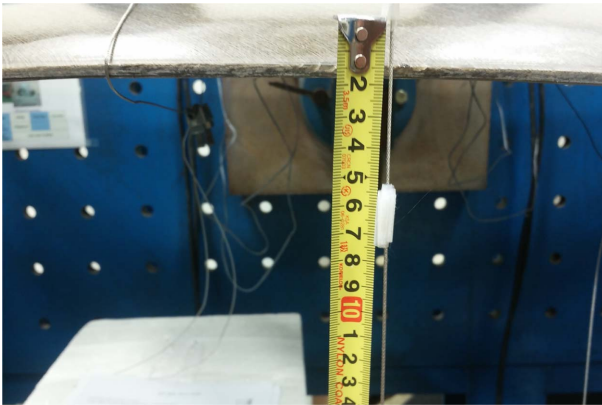


Fig. 13. Maximum displacement of the panel

스트레인 게이지를 부착한 사진이다.

공력 하중을 집중 하중으로 변환한 후 시제품의 상면 두 지점에 위치를 선정하여 무게 추를 이용해 집중하중을 모사하였다. 각 지점에 30 kg의 무게 추를 적용하여 총 60kg의 하중을 적용하였다. 스트레인 측정은 KYOWA 4 channel strain data acquisition system을 통하여 측정하였다. Fig. 12는 하중 적용 장면이다. 시제품 변위 측정은 패널 끝단에서 최대 변위를 측정하여 해석 결과와 비교하였다. Fig. 13에 변위 측정 장면을 명시하였다.

시제품의 구조 시험 결과를 분석하여 구조 해석 결과와 비교하였다. 시험 결과와 비교를 위한 구조 해석은 패널 끝단 지지점에 대한 경계 조건과 집중 하중을 반영하여 수행하였다. 본 연구에서 설계 단계에서는 분포 하중을 적용하여 설계 하였으나 구조 시험 방안이 집중 하중 형태가 용이하므로 분포 하중을 집중 하중으로 변환하여 구조 해석을 다시 수행하였다. 구조 하중은 두 지점에 각각 30 kg의 하중을 집중 하중으로 적용하여 해석한 후 비교하였다. 스트레인 게이지는 자동차 길이 방향으로 부착하였으며, 하중 해석 결과도 동일한 방향의 결과를 분석하여 비교하였다. Table 4는 해석 결과와 구조 시험 결과를 보여주고 있다. 구조 시험 결과와 유한 요소 해석 결과를 비교 검토한 결과 유사한 것으로 확인하였다. 따라서 아마 섬유를 적용한 차량용 본넷의 구조 설계는 충분히 안전한 구조인 것으로 검토되었다. Fig. 14-16은 상하면 스트레인 해석 결과 및 최대 변위 해석 결과를 보여주고 있다.

Table 4. Comparison of the analysis results and test results

	Analysis results	Test results
Displacement	51.4 mm	50 mm
Strain at No.1 point	3770 μ S	3450 μ S
Strain at No.2 point	3360 μ S	3112 μ S
Strain at No.3 point	5300 μ S	4843 μ S
Strain at No.4 point	4540 μ S	4065 μ S

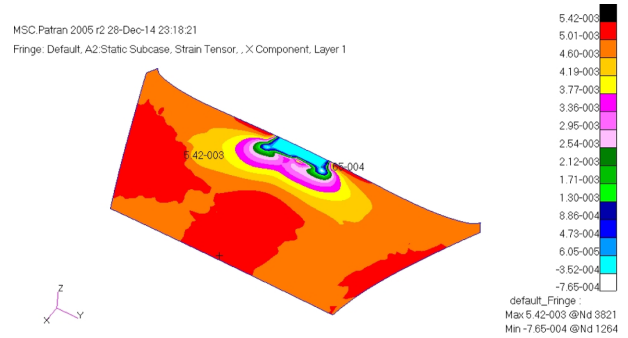


Fig. 14. The upper surface strain analysis

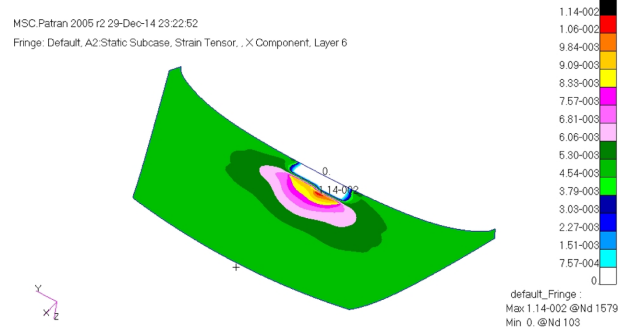


Fig. 15. The bottom surface strain analysis

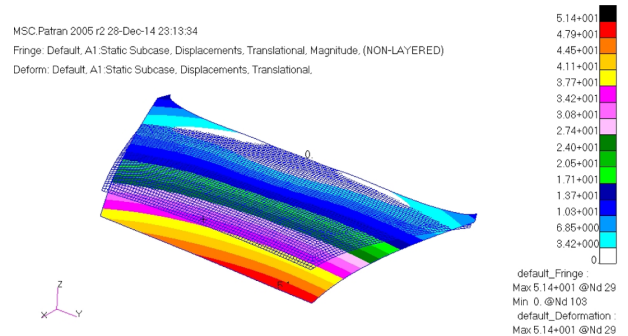


Fig. 16. Maximum displacement analysis

5. 결 론

본 연구에서는 차량용 본넷을 자연섬유인 아마 섬유와 비닐 에스테르를 적용하여 복합재 구조의 거동을 분석하고 구조 설계 및 해석을 수행하였으며, 시제품을 제작하여 구조 시험을 수행하였다. 구조 설계 후 구조 안전성을 평가하기 위하여 상용 유한 요소 해석 프로그램으로 구조 설계 결과를 검토하였다. 구조 해석 결과 아마/비닐 에스테르 복합재가 적용된 차량용 패널은 충분히 안전한 것으로 검토되었다. 시제품은 VARTML 공법으로 제작하였으며, 시제품 제작 후 구조 시험을 수행하여 구조물의 안정성을 검토하였다. 아마 섬유를 적용하여 제작한 차량용 본넷의 무게

는 5.2 kg으로 기존 금속으로 제작된 차량용 본넷과 비교했을 때 약 10%의 무게 절감 효과를 확인하였다. 본 연구에서 비교한 금속재 본넷은 상면 패널에 내부 스티프너가 보강된 구조이다. 본 연구에서 설계한 친환경 복합재 본넷은 일체형으로 제작의 용이성을 고려해 설계를 수행하였으나, 최적화는 고려가 되지 않았다. 향후 적층 패턴 최적화를 통해 추가 경량화가 가능할 것으로 보인다.

후 기

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

REFERENCES

1. Puglia, D., Iannoni, A., Kenny, J.M., Santulli, C., Sarasini, F., and Valente, T., "Thermal and Mechanical Behaviour of Phormium Tenax Reinforced Polypropylene Composite," *Proceeding of the 15th European Conference on Composite Materials*, 2012, pp. 1-7.
2. Adekunle, K.F., Cho, S.W., Patzelt, C., Blomfeldt, T., and Skrifvars, M., 2012, "Impact and Flexural Properties of Flax Fabrics and Lyocell Fibre Reinforced Bio-based Thermoset for Automotive and Structural Applications," *Proceeding of the 15th European Conference on Composite Materials*, 2012, pp. 1-6.
3. Park, H., Kong, C., Lee, J., Kim, I., and Lee, H., "Investigation on Mechanical Properties of Flax/Vinyl Ester Natural Fiber Composite," *Composites Research*, Vol. 27, No. 1, pp. 19-24.
4. Yan, L., "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.
5. Walter D. Pilkey, *Formulas for Stress, Strain and Structural Matrices*, A Wiley-Interscience Publication, Canada, 1994.
1. Puglia, D., Iannoni, A., Kenny, J.M., Santulli, C., Sarasini, F.,