creative commons

COMMONS DEED

저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.

변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

[UCI]I804:24011-200000265133
조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

2015년 8월
석사학위논문

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

조선대학교 대학원

항 공 우 주 공 학 과

박 길 수

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

충돌 하중을 고려한 친환경 자연섬유 복합재 적용 자동차 차체 패널의 구조설계 연구

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

2015 년 5 월

조 선 대 학 교 대 학 원

항 공 우 주 공 학 과

박 길 수

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

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

지도교수 공 창 덕

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함.

2015 년 4 월

조 선 대 학 교 대 학 원

항 공 우 주 공 학 과

박 길 수

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

박길수의 석사학위 논문을 인준함

위원장 호원대학교 교수 박 현 범 인

위원 (주)유니슨 수석연구원 방 조 혁 인

위원 조선대학교 교수 공 창 덕 인

2015 년 5 월 25 일

조 선 대 학 교 대 학 원

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

목 차

LIST OF FIGURES ..... Ⅳ

LIST OF TABLES vii

NOMENCLATURE viii

ABSTRACT ix

제 1 장 서 론 1

제 2 장 자연섬유 복합재 4

제1절 자연섬유 4

1.자연섬유 개요 4

2.자연섬유 선정 6

제2절 수지선정 7

제3절 VARTM 제작 공법 8

제4절 VARTM 공법 적용 시편제작 및 시편 기계적 물성치 평가 9

제 3 장 차량용 패널 구조 설계 및 구조해석 12

제1절 평판의 휨강도 이론 12

제2절 패널 구조설계 14

제3절 패널 구조해석 16

제 4 장 성인머리 충돌해석 19

제1절 성인머리모형 19

제2절 패널 충돌해석 20

제3절 패널 충돌해석 결과 23

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 5 장 시편 충돌 해석 및 실험 25
제1절 Flax/vinyl ester 시편 제작 25
제2절 시편 충격시험 27
제3절 시편 충격 해석 및 실험 결과 28
제4절 손상 후 압축강도 실험 36

제 6 장 시제품 제작 39
제1절 수지 유동해석 39
제2절 몰드 제작 41
제3절 시제품 제작 44

제 7 장 시제품 구조해석 및 실험 48
제1절 시제품 변형률 및 변위 측정 48
제2절 패널에 작용하는 하중 해석 50
제3절 해석 결과 비교 53
제4절 시제품 낙하충격 실험 53

제 8 장 결론 55
참 고 문 헌 57

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

LIST OF FIGURES

Fig. 1 UD and 2-D Fabric Flax ····· 5
Fig. 2 Natural fiber classification ····· 5
Fig. 3 Natural fiber composite applications and technologies ····· 6
Fig. 4 Competitive analysis : Natural fiber composites and glass fiber composites ····· 7
Fig. 5 VARTM process conceptual ····· 9
Fig. 6 Specimen production process ····· 10
Fig. 7 C-scan of the produced specimen ····· 10
Fig. 8 Structural configuration of automobile bonnet ····· 15
Fig. 9 Finite element modeling of automobile body panel ····· 16
Fig. 10 Stress analysis result of flax/vinyl ester composite panel ····· 17
Fig. 11 Deformation of flax/vinyl ester composite panel ····· 17
Fig. 12 Buckling analysis result of flax/vinyl ester composite panel ····· 17
Fig. 13 Thermal stress analysis result ····· 18
Fig. 14 Displacement analysis results due to thermal stress ····· 18
Fig. 15 Adult headform dimensions ····· 19
Fig. 16 Model of headform impactor ····· 20
Fig. 17 Impact test condition of headform ····· 20
Fig. 18 Impact deformation of Flax/vinyl ester composite panel ····· 21
Fig. 19 Impact stress analysis result of Flax/vinyl ester composite panel ····· 21
Fig. 20 Impact deformation of steel panel ····· 22
Fig. 21 Impact stress analysis result of steel panel ····· 23
Fig. 22 Specimen manufacturing process ····· 25
Fig. 23 Dimension of specimen for impact test ····· 26
Fig. 24 View of Flax/vinyl ester specimen ····· 26
Fig. 25 Drop-weight type impact test machine ····· 27
Fig. 26 Impact analysis result of Flax/vinyl ester specimen : Deformation(8J) ····· 29

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Fig. 27 Impact analysis result of Flax/vinyl ester specimen : Deformation(9J) ····· 29
Fig. 28 Impact analysis result of Flax/vinyl ester specimen : Deformation(10J) ··· 30
Fig. 29 Impact analysis result of Flax/vinyl ester specimen : Stress(8J) ····· 30
Fig. 30 Impact analysis result of Flax/vinyl ester specimen : Stress(9J) ····· 30
Fig. 31 Impact analysis result of Flax/vinyl ester specimen : Stress(10J) ····· 31
Fig. 32 Damage configuration of specimen after impact test(8J) ····· 31
Fig. 33 Damage configuration of specimen after impact test(9J) ····· 32
Fig. 34 Damage configuration of specimen after impact test(10J) ····· 32
Fig. 35 Result of Impact test(8J) ····· 32
Fig. 36 Result of Impact test(9J) ····· 33
Fig. 37 Result of Impact test(10J) ····· 34
Fig. 38 Flax/vinyl ester specimen observed using microscope ····· 35
Fig. 39 Flax/vinyl ester specimen observed using microscope of impact test(8J) ··· 35
Fig. 40 Flax/vinyl ester specimen observed using microscope of impact test(10J) ··· 36
Fig. 41 Configuration before compression test of impact damaged specimen ····· 37
Fig. 42 Configuration after compression test of impact damaged specimen ····· 37
Fig. 43 Load-displacement curve of compression specimen ····· 38
Fig. 44 Process of resin flow analysis ····· 40
Fig. 45 Flow analysis result of flax/vinyl ester panel ····· 41
Fig. 46 Structural configuration of automobile panel mould ····· 42
Fig. 47 Stiffener attached to the back of the mould ····· 42
Fig. 48 Sheet wax and vacuum lines installed in the mould ····· 43
Fig. 49 Mould curing ····· 43
Fig. 50 Automotive panel mould ····· 44
Fig. 51 Flax laying-up ····· 45
Fig. 52 Resin infusion ····· 45
Fig. 53 Curing ····· 46
Fig. 54 Demolding ····· 46
Fig. 55 Automotive panel prototypes ····· 47

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Fig. 56 Panel fixed and attach strain gauge ····· 48
Fig. 57 Structural test of bonnet ····· 49
Fig. 58 Maximum displacement of the panel ····· 49
Fig. 59 Boundary condition apply ····· 50
Fig. 60 Load application ····· 51
Fig. 61 The upper surface strain analysis ····· 51
Fig. 62 The bottom surface strain analysis ····· 52
Fig. 63 Maximum displacement analysis ····· 52
Fig. 64 Impact test of panel ····· 54
Fig. 65 Damage configuration of panel after impact test ····· 54

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

LIST OF TABLES

Table 1 Properties of Natural fibers ····· 4

Table 2 Properties of resins ····· 8

Table 3 Mechanical properties of UD Flax/vinyl ester specimen ····· 10

Table 4 Mechanical properties of 2-D fabric Flax/vinyl ester specimen ····· 11

Table 5 Specification of automotive steel panel ····· 14

Table 6 Mechanical properties of steel ····· 22

Table 7 Comparison of panel performances ····· 24

Table 8 Specification of impact test machine ····· 28

Table 9 Result of specimen impact analysis ····· 29

Table 10 Result of specimen impact test(8J) ····· 33

Table 11 Result of specimen impact test(9J) ····· 33

Table 12 Result of specimen impact test(10J) ····· 34

Table 13 Result of compressive strength after impact ····· 38

Table 14 Condition of injection port of flax/vinyl ester panel ····· 41

Table 15 Comparison of the analysis results and test results ····· 53

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

NOMENCLATURE

	Deflection
	Elastic modulus
ν	Poisson‘s ratio
h	Thickness of plate
D	Composite plate rigidity
P	Uniform distributed loading
α	L_y/L
β	L/L_y
σ_x	Normal stresses in x direction
σ_y	Normal stresses in y direction
τ_{xy}	Shear stress
E_x	Elastic modulus in x direction for isotropic material
E_y	Elastic modulus in y direction for isotropic material
ν_x, ν_y	Poission‘s ratio in x and y directions
α_x	Thermal expansion coefficient in x directions
α_y	Thermal expansion coefficient in y directions
P	In plane forces
G	Shear modulus
M_x, M_y	Bending moments per unit length on surface normal to x and y axes
M_{xy}	Twisting moment per unit length
Q_x	Shear forces per unit length on surface normal to x
Q_y	Shear forces per unit length on surface normal to y
V_x	Equivalent shear force per unit length acting on planes normal to x
V_y	Equivalent shear force per unit length acting on planes normal to y

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

ABSTRACT

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

by Park, Kil-Su

Advisor : Prof. Kong, Chang-Duk, Ph. D.

Department of Aerospace Engineering,

Graduate School of Chosun University

Lightweight materials and design have always been an important topic in automotive industry. The reason why such a factor must be considered first of all is that it would lead to the improvement of such basic functions of cars as the acceleration force and the breaking power, the need to improve fuel efficiency based on the emergence of the various environmental regulations and the era of high oil prices, and the constant necessity for the weight reduction of EVs (electrical vehicles), the next-generation type of vehicle.

For the lightweight of structural components, a lot of composite materials are used instead of metallic materials. The composite materials are used for various structural components throughout the world. Instead of the metallic materials which were used before, the newly-introduced composite materials with light weight can be used in such high-performance fields as the aviation field and the automobile field with the same effect.

Generally, there are a lot of synthetic chemical substances and poisonous substances created following the lifespan of the products used in the field of composite materials, making it almost impossible to recycle them. As a result, they are discarded. Recently, the level of interest for natural fibers in the process of designing and manufacturing composite materials has increased. Compared to the ones made following the chemical composition

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

process, the natural fibers can be recycled with relatively low costs and the capacity of providing fibers continuously. [1-2] Among the previous researches, the one which was carried out by P.J Herrera-Franco focused on the investigation and research of the mechanical characteristics of the Henequen natural fibers. In the research, the mechanical operation of HDPE (high density polyethylene) reinforced with the Henequen fibers was continuously studied. [3] M. Zampaloni studied the kenaf natural-fiber reinforced polypropylene composite materials. The study about the kenaf natural-fiber reinforced polypropylene which can be thermoformed in various fields focuses on the manufacturing process. With the characteristics equal to those of the previous synthetic composite materials, it can be used in various ways. [4] Vincent Placet studied the mechanical characteristics of Hemp. The study focused on the thermal-mechanical analysis and the dynamic-mechanical analysis of Hemp. [5] A number of researches have been recently carried out to investigate the characteristics of the natural fibers.

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. In modeling the adult head model to assess the safety by the collision analysis on the panel. To produce a test specimen after the collision by comparing the C-Scan analysis up to a site of injury an damage in the experiment verified the validity of the analysis. Results of the structural design, examined the structural safety through structural analysis and structural testing.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 1 장 서 론

자동차 경량화는 자동차업계의 영원한 과제이다. 경량화가 자동차 업계에서 최우선으로 고려되어야 할 이유는 자동차의 기본성능인 가속력과 제동력의 향상, 환경규제 및 고유가 시대의 도래에 따른 연비 개선 필요성, 차세대 자동차인 EV(Electrical Vehicle)에서의 경량화 필요성 지속 등이다.

먼저, 자동차의 기본성능인 가속력과 제동력을 높이기 위해서는 같은 출력에서는 경량화 할수록 유리하다. 자동차의 경량화는 엔진효율을 극대화 할 수 있고, 타이어, 브레이크, 서스펜션에 가해지는 부담 및 운전자의 피로도를 완화시키는 등 모든 면에서 유리하게 작용한다. 또한 상대적으로 출력이 적어도 마력당 감당해야 할 중량비가 줄어들기 때문에 무거운 차량보다 가속성능과 운동성을 우월하게 확보할 수 있다.

두 번째로, 환경규제 및 고유가 시대의 도래로 연비가 중요시 되며 자동차회사에게 경량화는 선택이 아닌 필수가 되었다. 오일쇼크 때부터 활발히 도입되기 시작한 각국의 자동차 연비규제의 가장 근본적인 목표는 에너지 절약이라 할 수 있다. 환경측면에서 각종 대기오염 물질을 유발하는 자동차 연료 사용을 줄이는 것이 온실가스 배출을 줄여 지구온난화를 방지하는 첫 관문이기 때문이다. 또한 자동차 연비규제는 고갈되어 가는 화석연료 사용을 줄임으로써 꾸준히 상승하고 있는 유가에 대한 애안으로도 중요한 역할을 한다. 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 보고 있다. 1975년부터 미국에서 시행중인 CAFE제도(기업평균연비 : Corporate Average Fuel Economy)각 대표적으로 연방 전부 차원에서 구체적인 연비 기준 방안을 발표해 적극적인 연비 규제에 나서고 있다. 각국의 연비규제 강화에 발맞추어 세계 자동차 생산업체들은 고연비 달성을 위한 다양한 기술 개발에 전력을 다하고 있다. 연비를 강화하기 위해서는 파워트레인의 개선, 공기역학적 디자인, 경량화 등의 방법을 고려할 수 있는데 그 중 효과가 가장 확실하고 다른 방법에 앞서 기본적으로 고려되어야 할 방안이 경량화라고 판단된다. 효율 상으로도 10% 무게 감소 시 5~7% 연비 감소가 가능한 것으로 알려져 있고, 가시성이 가장 높으므로 글로벌 자동차업계는 지속적으로 경량화를 위해 노력하고 있으며 관련 부품업체들도 완성차 업체와 협력하여 소재를 개발하고 있다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

마지막으로, EV(Eletrical Vehicle)등 유류를 소비하지 않는 친환경 자동차를 개발하고 있지만 경량화에 대한 필요성은 지속될 것으로 예상된다. EV가 양산되어 의미있는 시장점유율을 확보하기까지는 많은 기술적 어려움과 비용 문제가 있어 과도기적으로 HEV(Hybrid Electrical Vehicle), PHEV(Plug in Hybrid Electrical Vehicle)등이 개발되고 있는 상황으로 Combustion Engine을 사용하는 자동차의 비중이 급격히 줄어들 가능성이 낮다. 또한 HEV 및 EV 역시 배터리 용량 때문에 한분 충전 후 이동 가능한 거리가 제한적이므로 이를 극복하기 위해 배터리 용량 개선과 경량화에 대한 필요가 절실하다. 또한 경량화 된 자동차 소재는 전기차 및 연료전지 차에도 쓰일 수 있는 기본 프레임으로 활용 가능하다. 따라서 경량화는 자동차업계가 풀어가야 할 영원한 숙제라고 볼 수 있다.

구조물의 경량화를 위해서는 금속재료 대신 복합재료가 많이 사용되고 있다. 복합재료는 세계적으로 부품 등 구조적으로 다양한 용도로 사용되고 있다. 기존에 사용되어진 금속을 대체하여 경량화를 통해 항공기 및 자동차 분야와 같은 고성능 분야에도 동일한 효과로 사용 가능하게 되었다.

일반적으로 이러한 복합재료 분야에 사용되는 제품의 수명이후에 합성화학성분과 유독성분이 많이 생겨나 재활용이 거의 불가능하여 폐기하게 된다. 이에 최근에는 복합재료 설계 및 제조에서 자연섬유에 대한 관심이 증가하고 있는 추세이다. 자연섬유는 화학적인 합성으로 만들어진 섬유에 비해 상대적으로 낮은 비용과 지속적으로 섬유 제공을 가능토록하며 재활용 할 수 있다.[1-2] 이전 선행 연구들 중 P.J Herrera-Franco 등은 헤네켄(Henequen) 자연섬유의 기계적 특성에 대해 조사 및 연구 되었다. 이 연구에서는 헤네켄 섬유로 강화된 HDPE(High Density Polyethylene) 기계적 거동에 관해 지속적으로 연구되었다.[3] M. Zampaloni 등은 케나프 자연섬유의 강화폴리프로필렌 복합재료에 대한 연구를 하였다. 다양한 분야에 열 성형 될 수 있는 케나프 섬유 강화 폴리프로필렌은 제조에 중점이 된 연구로 기존의 합성 복합재료에 대등한 특성으로 다양하게 적용 될 수 있다.[4] Vincent Placet 은 대마(Hemp)의 기계적 특성에 대해 연구 했다. 이 연구에서는 대마의 열적기계분석 거동과 동적기계분석 방법에 대해 연구 되었다.[5] 최근 몇 년 동안의 많은 실험 연구들은 자연섬유의 특성을 조사하기 위해 수행되어졌다.

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

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

대량 생산에 적합한 제조공정인 VARTM(RTM-Light)을 적용하였다. 특히 성인 머리 모형을 모델링하여 패널에 충돌해석을 하여 안전성을 평가하였다. 시편을 제작하여 충돌 실험 후 C-Scan 촬영하여 해석한 손상 부위와 실험 손상 부위를 비교하여 해석의 타당성을 검증하였다. 구조 설계 결과는 구조 해석 및 구조 시험을 통해 구조 안전성을 검토하였다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 2 장 자연섬유 복합재

제 1 절 자연섬유

1. 자연섬유 개요

복합재료로 적용되는 자연 섬유는 크게 유기물과 무기물로 구분이 된다. 유기물은 식물의 섬유가 대표적은 복합재료이고 무기물은 광물 섬유 등으로 분류된다. 본 연구에서 다루어지는 자연 섬유는 식물 섬유인 유기물로서 그 종류를 보면 아마(Flax), 대마(Hemp), 황마(Jute), 용설란 종류인 사이잘(Sisal), 헤네켄(Henequen), 야자열매 껍질인 코이어(Coir)등이 대표적인 자연 섬유로 사용되고 있다[1-4]. 본 연구에서 향후 친환경 구조물 설계를 위해 다양한 자연 섬유의 특성을 비교하였다. 먼저 섬유질의 함량을 비교했을 때 아마는 71%, 황마는, 65%, 대마는 72%, 사이잘은 69%로 분석되었다. Table 1에 대표적인 자연 섬유의 물성치를 제시하였다. Fig. 1은 아마섬유의 직조된 형상이며, Fig.2는 목재섬유에 따른 자연섬유 분류표이다[6].

Table 1 Properties of Natural fibers

Fiber type	Density[g/cm^3]	Stiffness[GPa]	Strength[MPa]
Hemp	1.5-1.6	30-60	300-800
Flax	1.5-1.6	50-70	500-900
Jute	1.3-1.5	20-55	200-500
Sisal	1.2-1.4	9-22	100-800
Cotton	1.5-1.6	6-10	300-600
Soft wood	1.2-1.4	10-50	100-170

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

UD Flax

2-D Fabric Flax

Fig. 1 UD and 2-D Fabric Flax

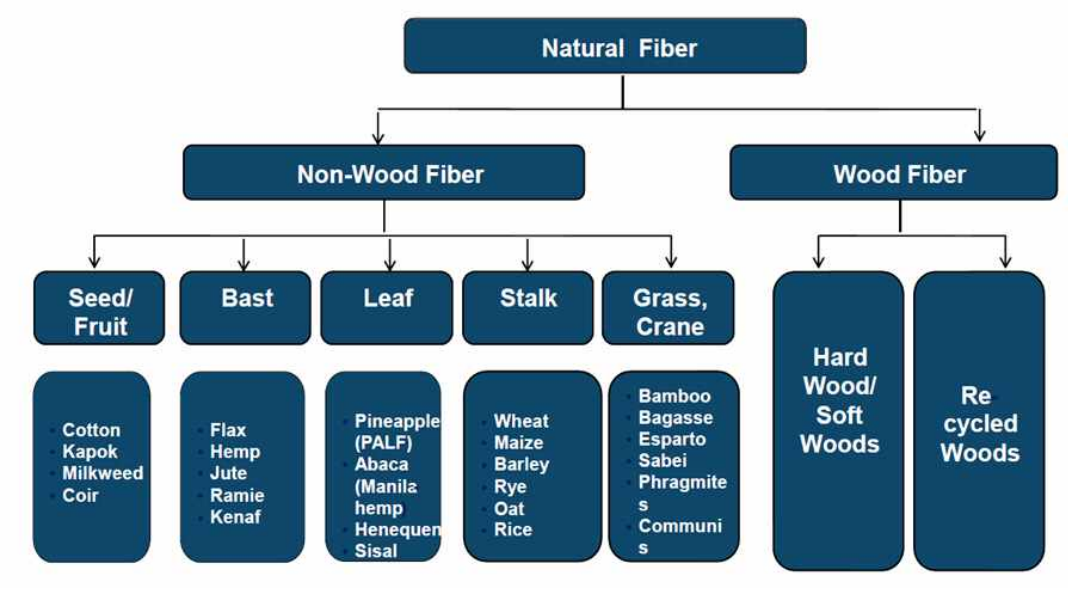

Fig. 2 Natural fiber classification : Vegetable fibers are used as reinforced material, divided into tow segments wood and non wood fibers[6]

현재 자연섬유 복합재는 여러 분야에서 사용되고 있다. 자동차 산업에서는 도어패널, 좌석 등받이, 헤드라이너, 계기판, 트렁크 라이너 등에 사용되고 있고 전자제품에는 모방일 제품 및 노트북의 케이스에 사용되고 있다. 스포츠 분야에서는 자전거 프레임, 테니스 라켓, 스노보드 등에 사용되며, 건축분야에서는 창문 틀, 갑판, 난간 등에서 사용되고 있다. 이처럼 자연섬유 복합재는 무게는 줄이면서 강도는 높여 기존의 철제 구조물을 대신하여 많이 사용되고 있는 추세이다. Fig. 3는 산업 분야에서 사용되고 있는 자연섬유

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

복합재 활용 제품과 제조 공법에 대해 나타내고 있다[6].

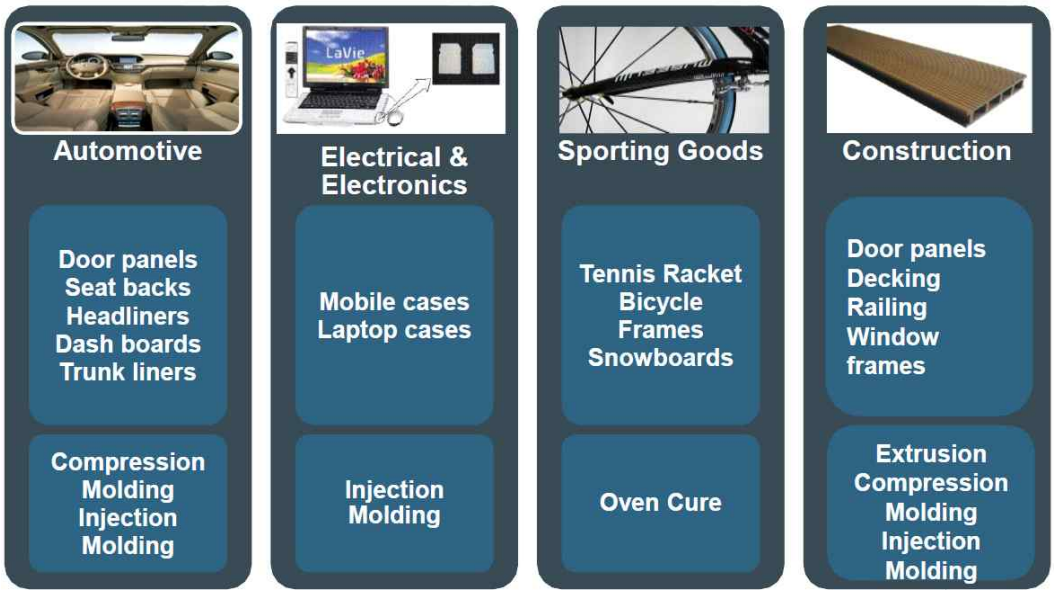

Fig. 3 Natural fiber composite applications and technologies[6]

2. 자연섬유 선정

자동차 구조물에 사용하는 재료는 굽힘, 비틀림등 전체적으로 높은 강성을 가지고 있어야 한다. 또한 충격이 가해졌을 때 잘 찌그러지지 않는 국부손상 강성과 강도, 차량의 진동을 잘 흡수 할 수 있는 진동 저감, 정면충돌 시 운전자의 충격을 완화할 수 있는 에너지 흡수력, 차량의 무게를 줄일 수 있는 낮은 비중, 제작비용을 줄여야 하는 낮은 가격 등 여러 가지 조건을 갖추어야 자동차 구조물에 사용 가능하다. 이러한 특성을 가진 섬유 복합재로는 탄소 섬유와 유리섬유 등이 현재 많이 사용되고 있다. 하지만 탄소섬유와 유리섬유는 상대적으로 가격이 비싸서 상용화에 많은 어려움이 있다. 또한 운용 수명 이후에 합성화학 성분과 유독성분이 많이 생겨 재활용이 거의 불가능하여 폐기하게 된다. 이에 최근에는 자연섬유에 대한 관심이 증가하고 있다. 자연섬유는 화학적인 합성으로 만들어진 섬유에 비해 상대적으로 낮은 비용과 지속적으로 섬유 제공을 가능토록 하며 재활용이 가능하다. 자연섬유와 유리섬유의 특성을 비교하면 강도를 제외하고는 가격

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

이나 무게 절감, 재활용성 등 다른 분야에서는 자연섬유가 뛰어나다.

자연섬유 중에서도 아마섬유는 대마(Hemp), 황마(Jute), 사이잘(Sisal), 마닐라삼섬유(Abaca)에 비해 강도가 가장 높다. 또한 밀도를 제외하고는 다른 모든 특성이 뛰어나 복합재료에 적용하기에 가장 적합하다. 이에 본 연구에서는 자동차 차체 패널에 자연섬유를 적용하여 연구를 수행하였다. Fig. 4는 자연섬유와 유리섬유와의 특성 비교 및 자연 섬유의 특성을 비교한 그림이다[6].

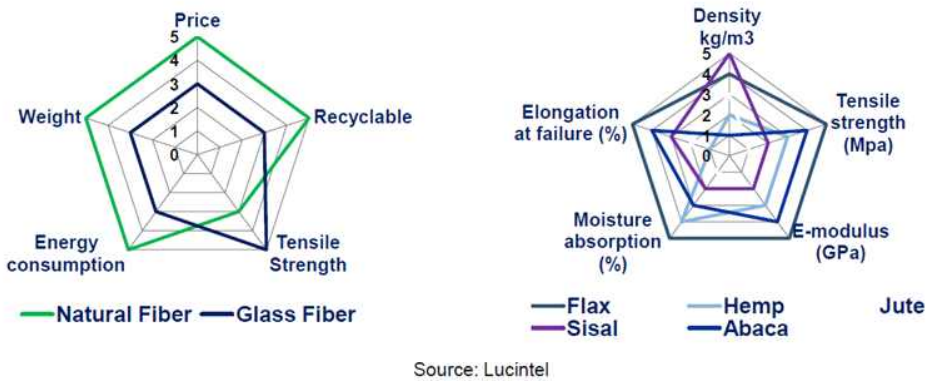

Fig. 4 Competitive analysis : Natural fiber composites and glass fiber composites[6]

제 2 절 수지선정

자연섬유에 사용되는 수지는 크게 열가소성(Thermoplastic) 수지와 열경화성(Thermoset) 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 열매 나무의 열매 껍질에서 채취된 캐슈 넛 쉘 수지(CNSL : Cashew nut shell oil resin)가 대표적인 자연 수지로 활용되고 있다. 복합재료 섬유에 적용되는 수지는 열경화성 수지가 많이 적용된다. 본 연구에서 폴리에스테르, 비닐 에스테르, 에폭시, 페놀 수지에 대한 기계적 특성을 분석하여 Table 2에 제시하였다. 페놀 수지는 화염 저항성이 뛰어나지만 제작 공정이 어려운 단점을 지니고 있다. 에폭시

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

는 기존의 탄소, 유리섬유 복합재에 많이 사용되고 있고, 자연 섬유 복합재에도 연구를 위하여 다양하게 사용되고 있는데 단점은 상대적으로 가격이 비싸서 상용화에는 좋지 않은 것으로 분석되었다. 본 연구에서는 비록 제반물성치가 에폭시에 비해 다소 떨어지지만 가격이 저렴한 비닐 에스테르를 선정하였다.

Table 2 Properties of Resins

Property	Poly esters	Vinyl esters	Epoxies	Phenolics
Tensile strength (MPa)	34-105	73-81	55-130	50-60
Tensile modulus (GPa)	2.1-3.5	3-3.5	2.7-4.1	4-7
Flexural strength (MPa)	70-110	130-140	110-150	80-135
Flexural modulus (GPa)	2-4	3	3-4	2-4
Specific gravity	1.1-1.4	1.1-1.3	1.2-1.3	1.2-1.3
Cure shrinkage (%)	5-12	5-10	1-5	2-4

제 3 절 VARTM 제작 공법

본 연구에서는 아마(Flax) 섬유와 비닐에스테르(Vinyl ester) 수지를 선정하여 VARTM(Vacuum Assisted RTM) 공법을 적용하여 시편을 제작하였다. RTM 제조 공정 기술은 향후 오토클레이브를 대체할 중요 제작 공법이다. 오트클레이브 성형법은 제품의 품질이 좋지만 제품을 생산하기 위한 장비 구축이 매우 고가로서 막대한 비용이 투입되어야 한다. 그러나 RTM 공정은 오토클레이브 적용 제품과 거의 유사하게 제품의 질을 향상시킬 뿐만 아니라 제작 공정 구축을 위한 시설비용이 감소하므로 기존의 제작 공정보다 비용이 절감되는 경쟁 요소를 지니고 있다. 또한 최근에는 환경오염이 심각해지면서 국외에서 RTM 제조 과정에 친환경 섬유를 적용하는 방안으로 연구가 수행되고 있다. 본 연구에 적용한 VARTM(Vacuum Assisted RTM)은 양쪽면이 모두 금형으로

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

되어있는 RTM과 달리 한쪽 면의 금형과 진공백으로 금형을 이루고 몰드 내부와 대기압과의 압력차를 이용하여 금형 내부에 적층된 섬유에 수지를 신속하게 함침시켜 복합재료 구조물을 성형하는 방법이다. VARTM 공정은 진공의 힘을 이용하여 수지가 주입되면서 금형 내부의 기포를 배출시키며 대기압만큼의 힘으로 진공백 면을 통하여 수직의 압력이 가해져 제품의 내부 기공을 줄여주고 섬유 체적률을 높여준다. Figure 5는 VARTM 공법의 개념도이다.

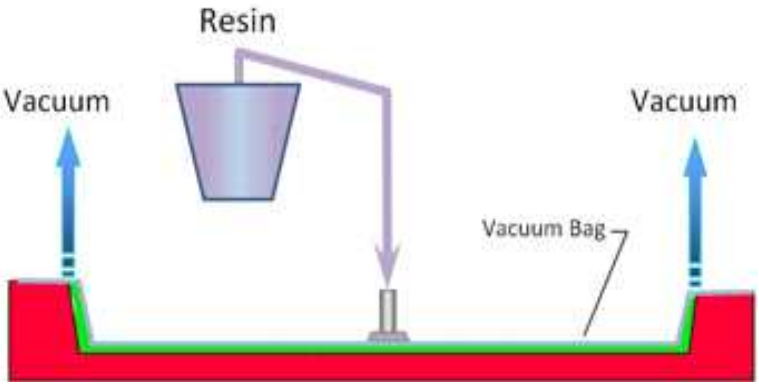

Fig. 5 VARTM process conceptual

제 4 절 VARTM 공법 적용 시편 제작 및 시편 기계적 물성치 평가

본 연구에서 적용한 VARTM 공법을 적용하여 Flax/Vinyl ester 복합재 시편을 제작하고 기계적 특성을 평가하였다. 시편 제작에 적용된 아마 섬유는 영국의 Composite Evolution에서 구매한 섬유이며, 일방향(UD) 및 ±45°로 직조된 2-D Fabric 두 가지 형태의 섬유를 제작하여 물성치를 평가하였다. 수지로는 CCP Composite 사의 KRF-1031 비닐 에스테르를 선정하였다. 시편 제작은 ASTM의 물성치 평가 규정에 의거하여 제작하였다.

적층된 아마 섬유에 수지를 주입하고 진공상태를 유지하면서 시편을 성형하였다. 시편 성형 온도는 80℃ 온도에서 2시간 후 120℃ 온도로 1시간 유지하여 성형하였다. 시편의 제작 과정을 그림 2에 명시하였다. 제작 후에 시편의 결함 유무를 확인하기 위해서 C-Scan 검사법이 적용되었다. 그림 3은 2-D Fabric 아마 복합재 시편의 C-Scan 시험

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

결과이다. 기공도를 검토한 결과 5% 이하인 것으로 검토되었다. Figure 6은 시편 제작 과정이며 Figure 7은 제작된 시편 C-Scan 사진이다.

Fig. 6 Specimen production process

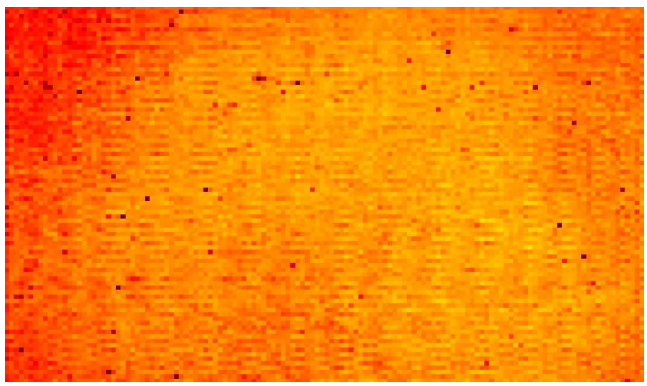

Fig. 7 C-Scan of the produced specimen

본 연구에서 재료의 기계적 특성을 분석하기 위하여 앞서 제시한 공법을 이용해 Flax/Vinyl ester의 UD 시편과 Fabric[45/-45] 시편의 기계적 물성치를 평가하였다. Table 3과 Table 4에 시편의 기계적 물성치를 제시하였다.

Table 3 Mechanical Properties of UD Flax/vinyl ester specimen

Test type	Strength (MPa)	Modulus (GPa)
Tension	227.2	22.3
Flexure	252.1	14.3
In Plane Shear	27.6	-

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table 4 Mechanical Properties of 2-D fabric Flax/vinyl ester specimen

Test type	Strength (MPa)	Modulus (GPa)
Tension	109.83	10.07
Flexure	163.04	10.12
In Plane Shear	20.95	

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 3 장 차량용 본네트 구조 설계 및 구조해석

제 1 절 평판의 휨강도 이론

등방성 또는 직교 이방성을 갖는 평판의 응력은 식 (1), (2)와 같다[15].

$$=-\frac{x}{h}+\frac{M_x \cdot z}{h^3/12} \qquad \sigma_y=-\frac{P_y}{h}+\frac{M_y \cdot z}{h^3/12} \tag{1}$$

$$Z_{xy}=\frac{P_{xy}}{h}-\frac{M_{xy} \cdot z}{h^3/12} \qquad Z_{xz}=\frac{3Q_x}{2h}\left[1-\frac{z}{h/2}\right)^2\right] \qquad Z_{yz}=\frac{3Q_y}{2h}\left[1-\left(\frac{z}{h/2}\right)^2\right] \tag{2}$$

이 경우 분포하중은 $P_x=P_y=P_{xy}=0$, $M_{xy}=0$ 와 같다.
열 하중에 의한 응력은 식 (3), (4)와 같다.

$$\sigma_x=\frac{M_x \cdot z}{h^3/12}-\frac{E_x(\alpha_x+\nu_y\alpha_y)}{1-\nu_x\nu_y}T \tag{3}$$

$$\sigma_y=\frac{M_y \cdot z}{h^3/12}-\frac{E_y(\alpha_y+\nu_x\alpha_x)}{1-\nu_x\nu_y}T \tag{4}$$

여기서, $\alpha=L_y/L$, $\beta=L/L_y$이다. 분포하중을 받는 평판의 처짐은 식 (5)와 같이 나타난다.

$$w=\frac{16P_1L^4}{\pi^6D}\sum_{m=1}^{\infty}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{\sin(n\pi x/L)\sin(m\pi y/L_y)}{mn(n^2/L^2+m^2/L_y^2)^2} \tag{5}$$

여기에서 m = 1, 3, 5, $\cdots\infty$, n = 1, 3, 5, $\cdots\infty$이며, 모멘트는 식 (6), (7)을 이용하여 구할 수 있다[15].

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

$$\frac{16P_1L^2}{\pi^4}\sum_{m=1}^{\infty}\sum_{n=1}^{\infty}\gamma_1\frac{\sin(n\pi x/L)\sin(m\pi y/L_y)}{mn(n^2+m^2/\alpha^2)^2} \tag{6}$$

$$M_y=\frac{16P_1L^2}{\pi^4}\sum_{m=1}^{\infty}\sum_{n=1}^{\infty}\gamma_2\frac{\sin(n\pi x/L)\sin(m\pi y/L_y)}{mn(n^2+m^2/\alpha^2)^2} \tag{7}$$

여기서 $\gamma_1=(n^2+\nu m^2/\alpha^2)$, $\gamma_2=(m^2/\alpha^2+\nu n^2)$이다. 최대 처짐 및 최대 모멘트, 최대 전단력은 식 (8)~(16)으로 나타난다[15].

$$w_{\max}=w_{center}=c_1\frac{P_1L^4}{Eh^3} \tag{8}$$

$$(M_x)_{\max}=c_2P_1L^2 \quad \text{(center)} \tag{9}$$

$$(M_y)_{\max}=c_3P_1L_y^2 \quad \text{(center)} \tag{10}$$

$$(Q_x)_{\max}=c_4P_1L \quad (x=0,\ \text{L edges}) \tag{11}$$

$$(Q_y)_{\max}=c_5P_1L_y \quad (y=o,\ L_y\ \text{edges}) \tag{12}$$

$$(V_x)_{\max}=c_6P_1L \quad \text{(lateral edge forces)} \tag{13}$$

$$(V_y)_{\max}=c_7P_1L_y \quad \text{(lateral edge forces)} \tag{14}$$

$$R_0=c_8P_1LL_y \quad \text{(center forces)} \tag{15}$$

여기에서 c_1~c_8은 식 (16)과 같이 구할 수 있다[15].

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

$$
\begin{aligned}
&= 0.1421 + 0.08204\beta - 0.3985\beta^2 + 0.219\beta^3 \\
c_2 &= 0.1247 + 0.05524\beta - 0.2762\beta^2 + 0.1441\beta^3 \\
c_3 &= 0.03726 - 0.01504\beta + 0.1028\beta^2 - 0.07756\beta^3 \\
c_4 &= 0.4967 + 0.1686\beta - 0.6849\beta^2 + 0.3976\beta^3 \\
c_5 &= -0.0007805 + 0.3679\beta + 0.04574\beta^2 - 0.07488\beta^3 \\
c_6 &= 0.4583 + 0.02879\beta + 0.004425\beta^2 - 0.1137\beta^3 \\
c_7 &= -0.003591 + 0.5091\beta + 0.05874\beta^2 - 0.1445\beta^3 \\
c_8 &= -0.003545 + 0.1179\beta - 0.02755\beta^2 - 0.02202\beta^3
\end{aligned}
\tag{16}
$$

제 2절 패널 구조설계

본 연구에서 대상 구조물은 국내 소형 자동차 본네트로 선정하여 설계를 수행하였으며, 기존의 스틸로 설계된 구조물과 비교하였다. 기계적 물성치는 앞서 분석된 아마 섬유 분석 결과를 적용하였다. 설계하중은 자동차가 200km/h의 속도로 운행했을 때 작용하는 공력 하중을 분석하여 설계를 수행하였다. 스틸로 설계된 본네트의 사양은 Table 5에 나타내었다.

Table 5 Specification of automotive steel panel

L_x	1.02m
L_y	0.52m
h	2mm
E	200GPa
ν	0.3
	200km/h(=55.6m/s)

본네트에 작용하는 공력하중은 본네트가 지면과 30도의 각도로 고정되어 있다고 가정하였다. 그때의 하중 P_1 및 본네트의 강도 D는 식 (17), (18)과 같다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

$$\frac{1}{2}\rho_{air}\,V^2 = \frac{1}{2}\times 1.25\times 55.6^2\times \sin 30 = 966.05N/m^2 = 966.05Pa \tag{17}$$

$$D = \frac{200\times 10^9\times(2\times 10^{-3})^3}{12\times(1-0.3^2)} = \frac{200\times 2^3\times 1}{12\times(1-0.09)} = 146.52\,NM \tag{18}$$

패널은 평판 구조물로 하중을 받을 때 중앙 부분에서 휘는 정도를 분석하여 설계하기 위해 휨강도를 기준으로 구조설계를 수행하였다. 먼저 스틸 패널의 휨강도를 계산한 후에 스틸 패널의 휨 강도에 준하는 Flax/Vinyl ester 패널의 두께를 정하여 휨 강도를 계산하였다. 이때 Flax/Vinyl ester의 $E_1 = E_2 = 10.07GPa = E_{eq}$이다.

$$D_{composite} = \frac{E_{eq}h_p^3}{12(1-0.18^2)} = \frac{10.07\times 10^9\times(1\times 10^{-3})^3}{12\times(1-0.18^2)} = 0.86Nm \tag{19}$$

스틸 구조물의 휨강도에 준하게 설계하기 위해 아마섬유 6plies 두께로 설계 하였으며, 적층 형태는 $[\pm 45°]_6$ 이다. 이때 다시 계산한 강도는 $D_{composite} = 187.33Nm$ 이다. 설계된 패널의 형상은 Figure 8에 나타내었다.

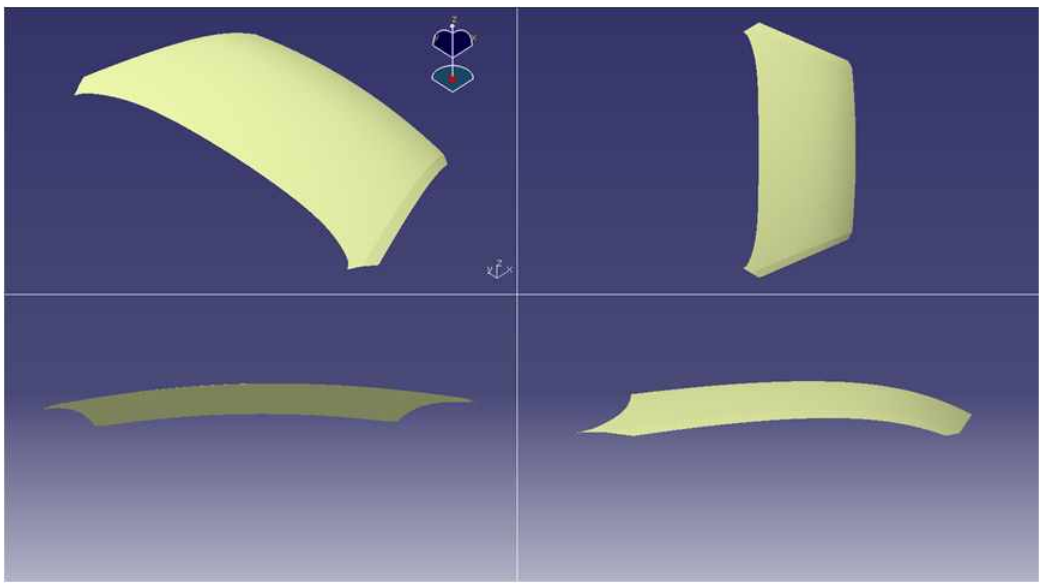

Fig. 8 Structural configuration of automobile bonnet

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 3 절 패널 구조해석

본 연구에서 설계 결과의 안전성 검토를 위해 상요 유한요소 해석소프트웨어인 MSC. NASTRAN을 활용하여 구조해석을 수행하였다. 구조물에 작용하는 하중은 자동차가 200km/h의 속도로 운행하였을 때 작용하는 공력하중을 분석하여 적용하였다. 패널은 지면과 30°의 각도로 장착되어 있다고 가정하였고, 자동차가 200km/h의 속도로 운행할 때 패널에 작용하는 하중은 안전율 1.5배를 고려하여 1932N/m^2를 적용하였다. 구조 해석은 응력해석, 변형해석, 좌굴해석, 고유진동수 해석, 열응력해석 총 5가지의 해석을 수행하였다. Figure 9에 유한요소 모델링 결과를 나타내었다.

Fig. 9 Finite element modeling of automobile body panel

자동차 전방 덮개 패널의 구조해석 결과 최대 압축 응력은 -0.90MPa, 최대 인장 응력은 0.38MPa로서 충분히 안전한 것으로 검토되었다. 변위 해석 결과는 패널 중앙 부위에서 0.33mm로 검토되어 차량과 결합되었을 때 변위도 충분히 안전한 것으로 확인되었다. 좌굴 해석 결과 좌굴 하중 배수는 18로서 충분히 좌굴에 안정한 구조물인 것으로 검토되었다. 여기서 하중 배수(load factor)란 현재 작용 하중에 이 값을 곱하면 해당 모드의 좌굴이 발생함을 의미하는 것으로서 주어진 하중에 대해 구조물의 좌굴에 대한 안전성을 나타내는 일종의 안전계수이다. 또한 자동차 전방 덮개 패널은 엔진에 의한 열이 전달되므로 열응력 해석을 수행하였다. 온도 조건은 50℃의 온도를 적용하여 열응력을 검토한 결과 최대 압축 응력은 0.99MPa로 확인되었으며, 최대 인장 응력은 0.43MPa로 검토되었다. 변위는 0.43mm로 검토되었다. 따라서 열응력 해석 결과도 충분히 안전한 것으로 검토되었다. Fig. 10~14는 구조 해석을 통한 응력, 변위, 좌굴,

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

열응력 해석 결과를 보여주고 있다.

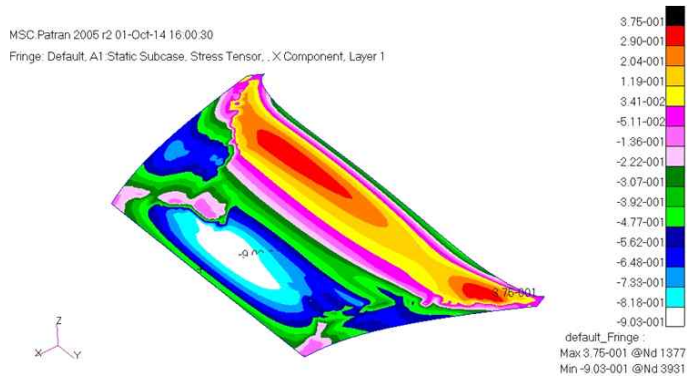

Fig. 10 Stress analysis result of flax/vinyl ester composite panel

e

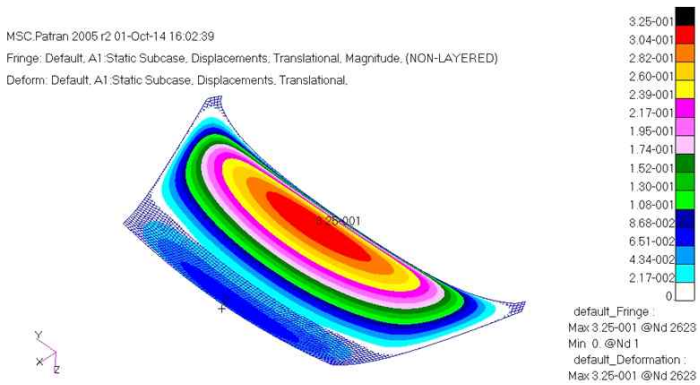

Fig. 11 Deformation of flax/vinyl ester composite panel

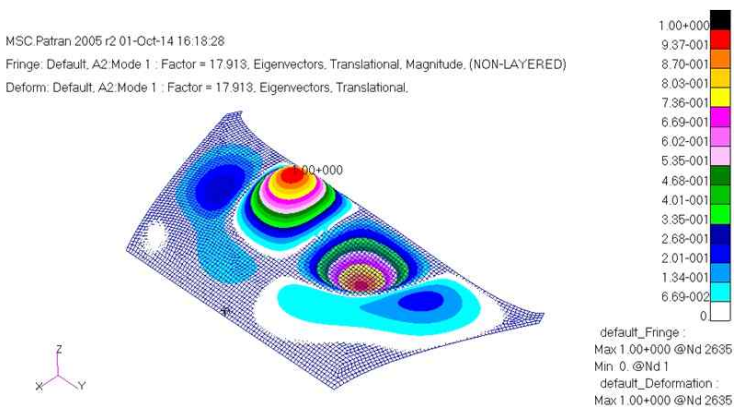

Fig. 12 Buckling analysis result of flax/vinyl ester composite panel

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

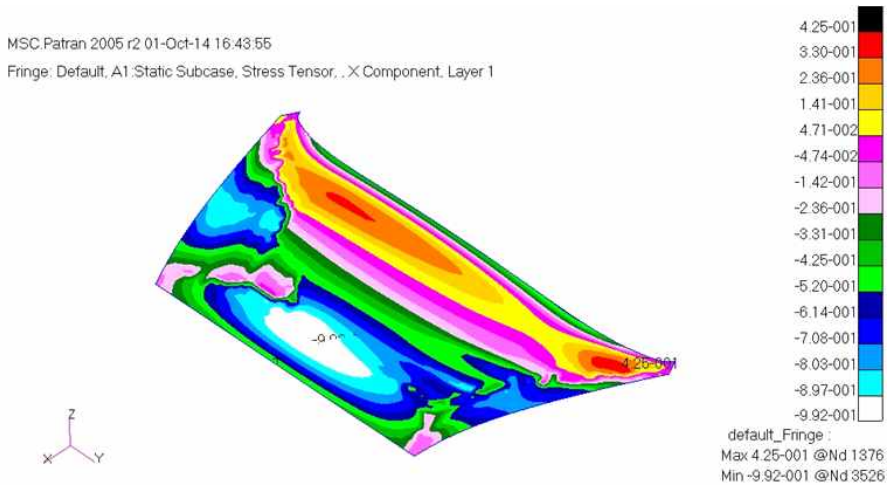

Fig. 13 Thermal stress analysis result

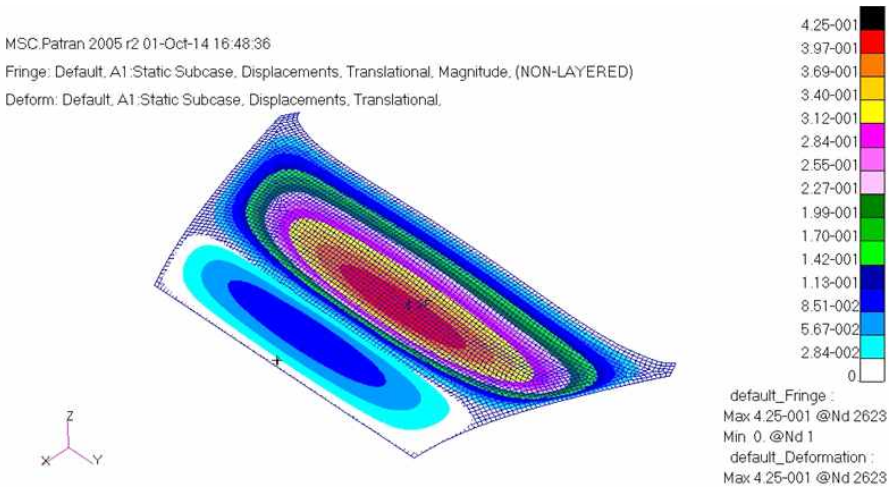

Fig. 14 Displacement analysis results due to thermal stress

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 4 장 성인 머리 충돌 해석

제 1 절 성인 머리 모형

본 논문에서는 유럽 보행자 보호 법규를 기준으로 성인 및 유아 보행자 머리 모형 모델을 생성하였다. 머리 모형은 강체의 구로 본체는 알루미늄으로 형성되어야 하며 점탄성을 가지는 피부로 둘러싸여야 한다[7]. 성인 머리 모형의 지름은 165mm로 fig. 15와 같이 구성되어 있다. 충돌 법규 준수를 위하여 성인 머리 모형의 질량은 4.8±0.1kg이 되어야 하며, 피부는 13.9mm의 두께로 최소한 구의 절반 이상 둘러싸여야 한다. Fig. 16은 모델링한 성인 머리 모형을 나타내고 있다. 성인 머리모형의 본체는 알루미늄으로 무게는 4.24kg이며, 피부는 점탄성을 가져야 하므로 고무 재질로 설계하였으며 무게는 0.70kg이다.

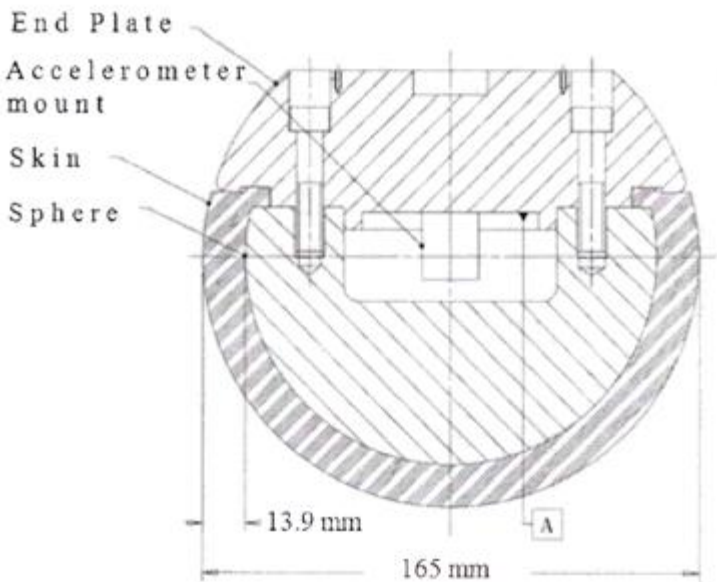

Fig. 15 Adult headform dimensions[7]

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

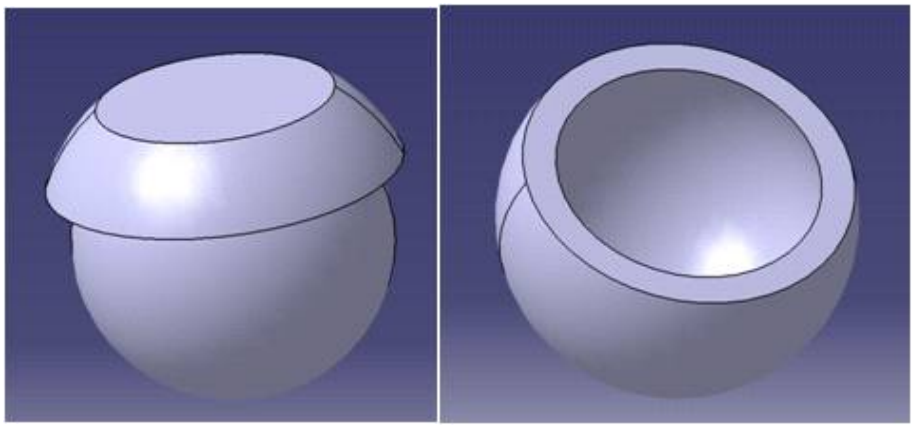

Fig. 16 Model of headform impactor

제 2 절 패널 충돌 해석

충돌 해석은 유럽 보행자 보호 관련 기준에 따라 40km/h의 속도로 Fig. 17와 같이 구조적으로 가장 취약한 부분인 패널 중앙부위에 충돌하였다. 또한 기존의 스틸 패널의 충돌해석을 수행하여 자연 섬유를 적용한 패널과 무게 절감율 및 충돌 변위 등을 비교 분석하였다.

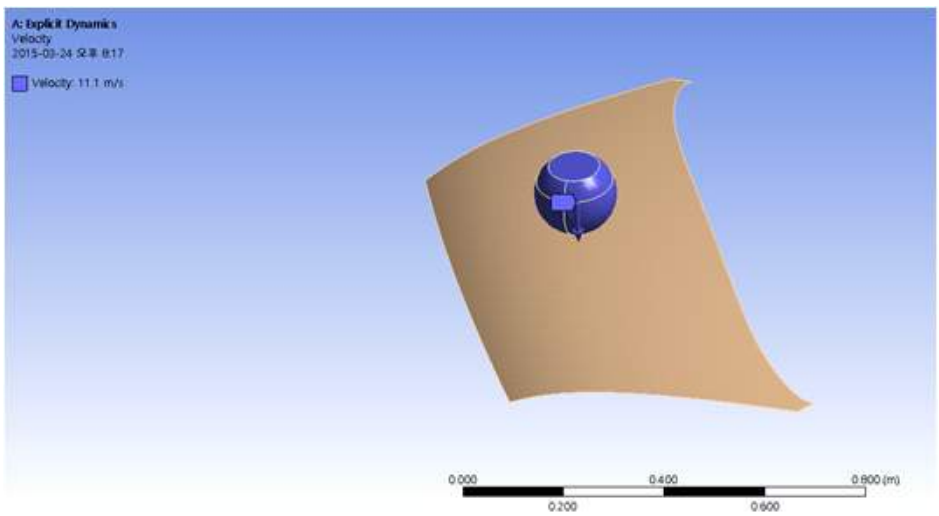

Fig. 17 Impact test condition of headform

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

먼저 Flax/Vinyl ester를 적용한 패널의 충돌해석 결과 패널 중앙 부위에서 변위는 54.603mm로 확인되었다. 수직 방향 변형이 120mm를 초과하는 경우는 머리 모형 충돌 시 엔진과 직접적으로 간섭되어 머리 상해치 및 엔진손상이 극대화 될 수 있다는 것을 의미한다[8]. 결과적으로 패널의 수직방향 변형이 120mm를 초과하지 않았으므로 안전한 것으로 확인되었다. 응력은 151.09MPa로 확인 하였다. Flax/Vinyl ester 패널의 충돌 변위 해석과 응력 해석은 Fig. 18, 19에 나타내었다.

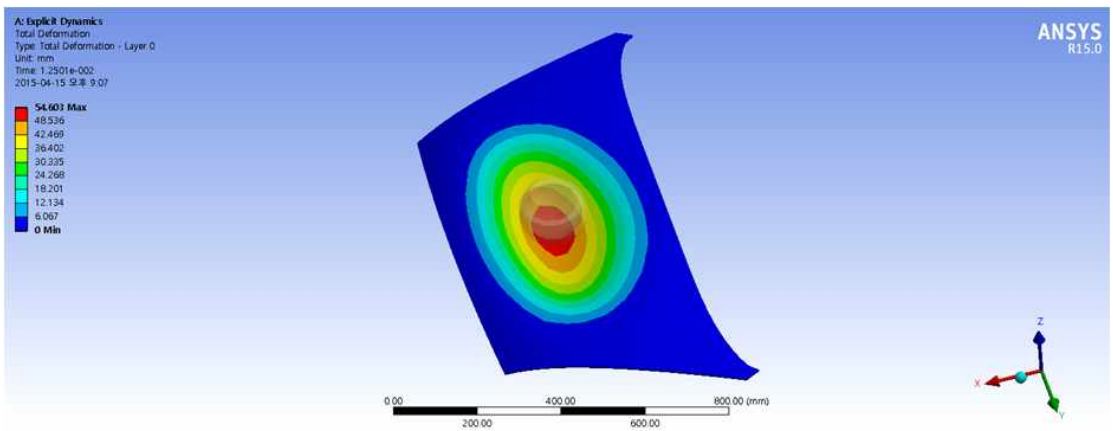

Fig. 18 Impact deformation of Flax/vinyl ester composite panel

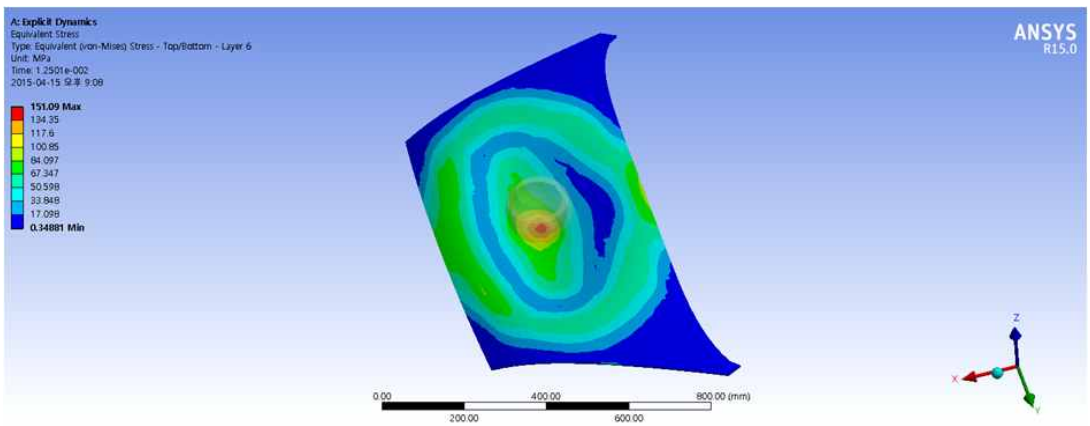

Fig. 19 Impact stress analysis result of Flax/vinyl ester composite panel

Flax/vinyl ester로 설계한 패널의 구조적 거동을 비교하기 위해 기존 스틸 패널의

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

충돌 해석을 수행하였다. 충돌 해석은 Flax/vinyl ester를 적용한 패널과 마찬가지로 성인 머리 모형을 40km/h의 속도로 패널 중앙 부분에 수직방향으로 충돌하였다. 스틸 패널은 2mm로 설계하였으며 스틸의 물성치는 Table 6에 나타내었다.

Table 6 Mechanical properties of steel

Material	Young's Modulus[GPa]	Bulk Modulus [GPa]	Shear Modulus [GPa]	Poisson's Ratio	Density [kg/m^3]
Steel	200GPa	166.6GPa	76.9Gpa	0.3	7850

스틸 패널 충동해석 결과 변위는 패널 중앙 부위에서 최대변위 53.995mm이며 응력은 260.15MPa으로 확인하였다. Fig. 20은 스틸 패널의 충돌 변위 해석 결과이며 Fig. 21은 스틸 패널의 충돌 응력 해석 결과를 나타내고 있다.

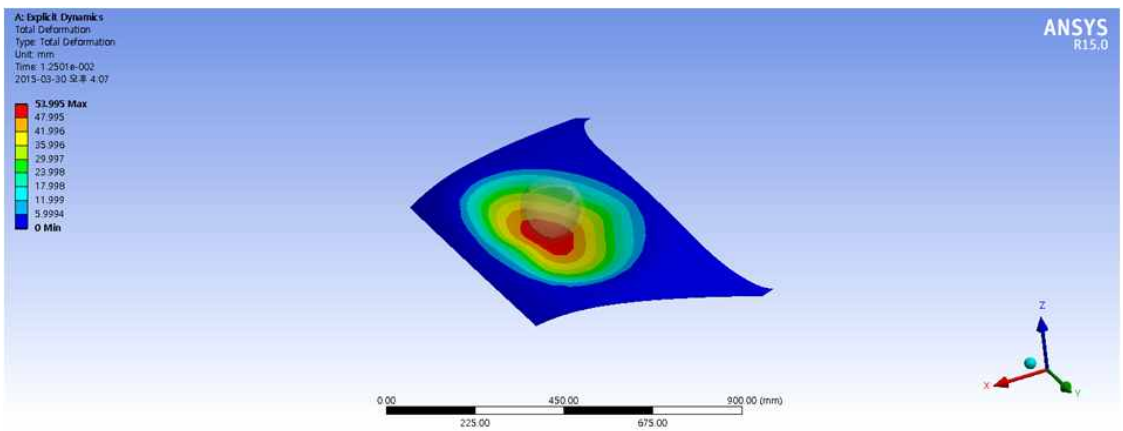

Fig. 20 Impact deformation of steel panel

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

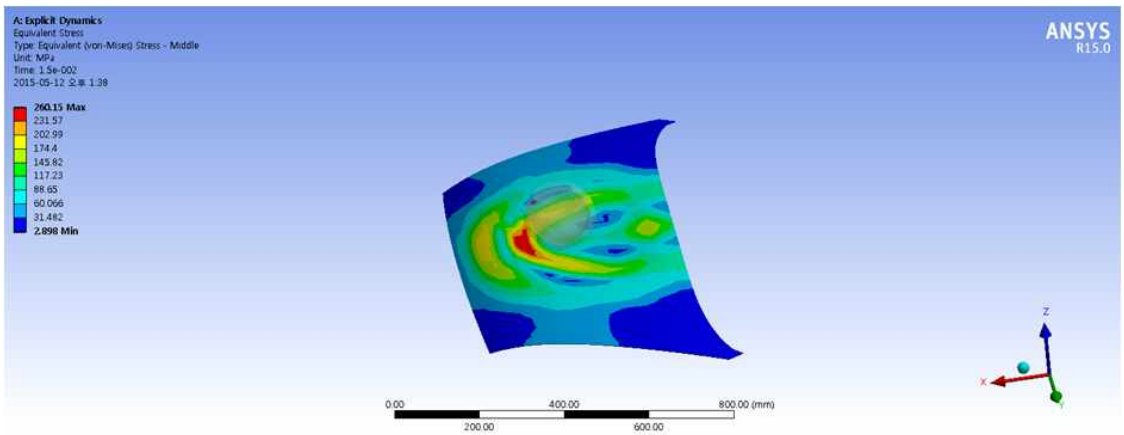

Fig. 21 Impact stress analysis result of steel panel

제 3 절 패널 충돌 해석 결과

Flax/vinyl ester 적용 패널의 안전성을 분석하기 위해 유럽 보행자 보호 법규를 기준으로 성인 머리 모형을 모델링하여 충돌 해석을 수행하였다. 성인 머리 모형은 지름 165mm이며 무게는 4.9kg으로 설계하였다. 충돌 속도는 40km/h이며 패널 중앙 부위에 수직으로 충돌하였다. 충돌 해석 결과 스틸 패널의 변위는 패널 중앙 부위에서 최대변위 53.995mm이며 Flax/vinyl ester 적용 패널은 54.603mm로 스틸 패널이 1.13% 적게 변위가 일어났다. 응력은 스틸 패널이 260.15MPa이며, Flax/vinyl ester 적용 패널은 151.09MPa로 스틸 패널과 비교하여 자연섬유를 적용한 패널이 41.92% 더 낮은 것을 확인하였다. 이는 자연섬유 복합재 적용 패널을 설계할 때 스틸 구조물 보다 휨 강성도를 높게 설계하였기 때문에 자연섬유 복합재료를 적용한 패널의 응력이 더 낮은 것으로 분석된다. Flax/vinyl ester를 적용한 패널의 두께는 6mm로 2mm인 스틸 패널보다 3배 두껍지만 두패널의 무게를 비교하면 스틸 패널은 6.48kg이고, Flax/vinyl ester 적용 패널은 4.43kg으로 스틸패널보다 31.7% 더 가벼워 구조물의 경량화를 위해 스틸 패널을 대체하여 Flax/vinyle ester 패널을 적용 가능한 것으로 확인하였다. Table 7은 스틸 패널과 Flax/vinyl ester 패널의 해석 결과를 비교한 내용을 나타내고 있다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table 7 Comparison of panel performances

	Steel panel	Flax/vinyl ester panel	Comparison[%]
Panel mass	6.48kg	4.4267kg	-31.7
Thickness	2mm	6mm	200
Deformation	53.995mm	54.603mm	1.13
Stress	260.15MPa	151.09MPa	-41.92

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 5 장 시편 충돌 해석 및 실험

제 1 절 Flax/vinyl ester 시편 제작

아마섬유를 적용한 차량용 패널의 해석 결과를 검증하기 위해 패널 충돌실험을 해야 하지만 실험 장비 고가의 장비이다 보니 충돌 실험을 구현하기 힘들어 시편을 제작해 시편 충격실험을 통해 실험 결과와 해석 결과를 비교하여 해석의 타당성을 검증하였다. 에너지는 체적에 비례하므로 성인 머리모형이 패널에 충돌 했을 때의 에너지에 비례하는 에너지를 계산하여 시편 충격 실험을 수행하여 시편의 파손 여부를 분석하였다. 또한 충격 실험 이후에 압축강도 실험을 수행하여 손상 이후의 구조물의 안전성을 분석하였다.

시편의 적층 수 결정 및 충격 시험 방안은 ASTM D7136[9]에 의거하여 충격 시험을 수행하였다. 시편 규격은 가로×세로가 100mm×150mm로서 시편의 중앙에 충격 시험기를 활용하여 충격 손상을 가한 후 손상 거동을 해석 결과와 비교하였다. 시편은 Evolution Composite에서 구매한 섬유이며 ±45°로 직조된 2-D Fabric 형태의 섬유를 0°로 5장 적층하여 제작하였다. 수지는 CCP composite 사의 KRF-1031 Vinyl ester를 사용하였다. 시편 제작은 본 연구에서 제작 공법으로 채택된 VARTM 공법을 활용하여 제작하였다. Fig. 22는 시편 제작 과정을 나타내고 있다. Fig. 23은 충격 시험 시편 형상의 개념도이고 정중앙에 충격을 가하여 거동을 분석하였다. Fig. 24는 시편 성형 후 충격 시험용 시편으로 다이아몬드 절단기를 이용하여 가공된 형상을 명시하였다.

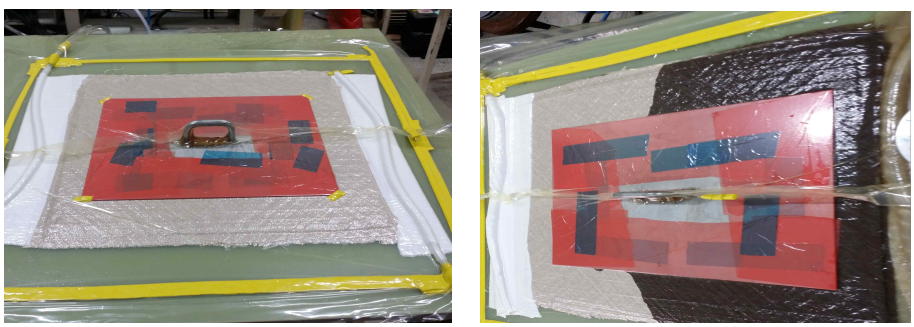

Fig. 22 Specimen manufacturing process

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

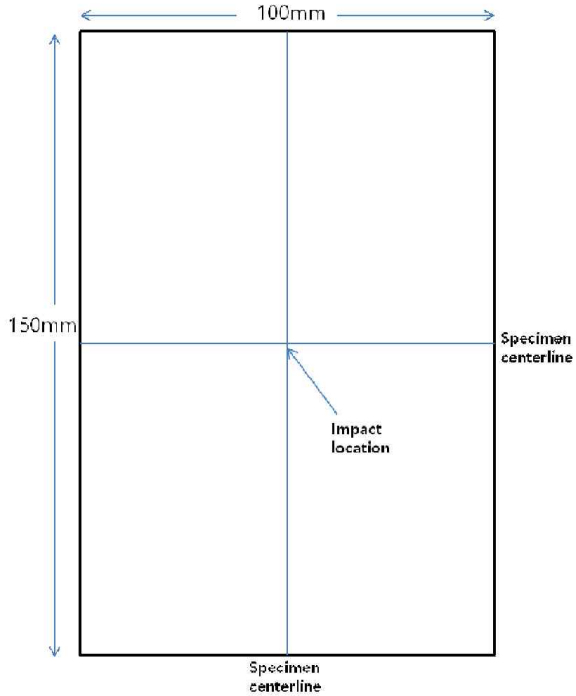

Fig. 23 Dimension of specimen for impact test

Fig. 24 View of Flax/vinyl ester specimen

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 2 절 시편 충격시험

본 연구에서 적용한 충격 시험기는 중량 낙하식 충격 방식으로 충격 에너지를 위치 에너지로 환산하여 충격체(Impactor)를 계산된 에너지에 해당하는 위치로 이동시켜 하단부 지지대에 클램프(Clamp)를 이용하고 시편을 고정하고 낙하시켜서 충격을 가하는 방식이다. 충격체 질량은 5.0kg이고, 반구충격체(Hemispherical Striker Tip)의 직경은 12.7mm로서 ASTM D7136[9] 기준에 의해 적용되었다. Table 8은 충격시험기의 제원이며, Fig. 25는 중량 낙하식 충격 시험기를 나타낸 사진이다. 시편에 가하는 충격 에너지를 정하기 위해 패널에 성인 머리가 40km/h의 속도로 충돌했을 때의 에너지를 계산하였다.

$$\frac{1}{2}mv \tag{20}$$

Fig. 25 Drop-weight type impact test machine

조선대학교 CHOSUN UNIVERSITY

Table 8 Specification of impact test machine

장비명	국문	충격시험기
	모델명	9250HV
제원	1182ft-lbs(1603J)까지의 충격에너지	
	65.6ft/sec(20m/s)까지 스프링 가속 충격속도	
	Maximum drop heigh of 66.9ft(20.4m)	

식 (20)으로 계산한 결과 성인 머리가 패널에 충돌했을 때의 에너지는 301.9J이다. 에너지는 체적에 비례하므로 패널에 가해지는 에너지를 시편에 적용하기 위해 식 (21)을 이용하여 시편에 적용할 에너지를 계산하였다. 이때 패널의 부피는 2579.6cm^3 이고 시편의 부피는 75cm^3 이다.

$$u \times V \tag{21}$$

시편의 부피를 V, 패널의 부피를 V_2라고 하면 시편과 패널의 부피 비율은 $V_1/V_2 = 0.029$ 이다. 에너지는 체적에 비례하므로 식 (21)을 이용하여 시편에 적용할 에너지를 구하면 8.8J이 계산된다. 성인 머리 모형이 패널에 충격할 때의 에너지에 비례하는 충돌하는 실험하기 위해 시편 충격 시험에는 8J / 9J / 10J의 충격 에너지로 충격 손상을 적용하였다. 충격 시험 장치는 충격 손상이 시작되는 시점부터 종료 때까지 로드셀을 통해 접촉력과 충격 이력이 자료 수집 장치에 기록되도록 구성되어 있다.

제 3 절 시편 충격 해석 및 실험 결과

충격실험을 하기 앞서 충격실험을 모사하여 해석을 수행하였다. 해석은 Ansys의 Explicit Dynamics를 이용하여 충경시의 시편의 응력 및 변위를 분석하였다. 충격체의 질량은 5.2kg이며, 충돌 접촉면의 지름은 12.7mm로 설계하였다. 시편 충돌 속도는 8J/ 9J/ 10J의 충격 에너지를 가하기 위해 1.76m/s, 1.86m/s, 1.96m/s의 속도로 설정하였다. 충격시의 변위와 응력은 Table 9에 나타내었고 Fig. 26, 27, 28은 8J, 9J, 10J의 변위

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

해석 결과이고, Fig. 29, 30, 31은 응력해석 결과이다.

Table 9 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

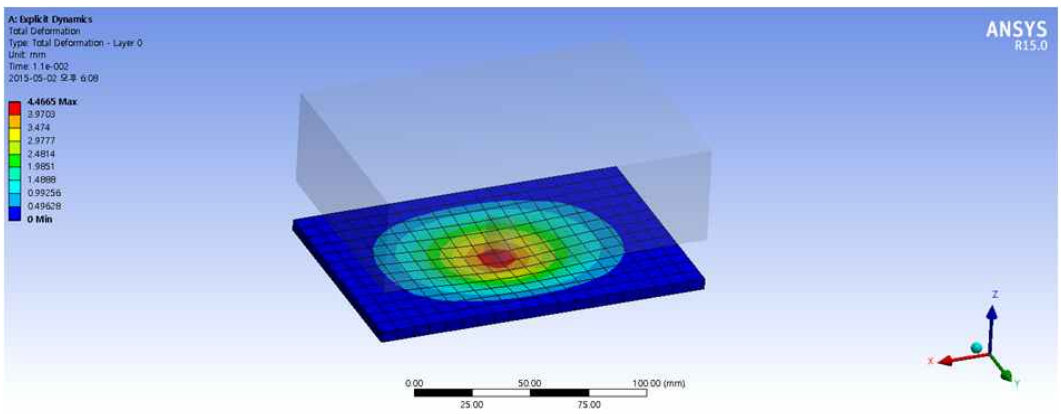

Fig. 26 Impact analysis result of Flax/vinyl ester specimen : Total deformation(8J)

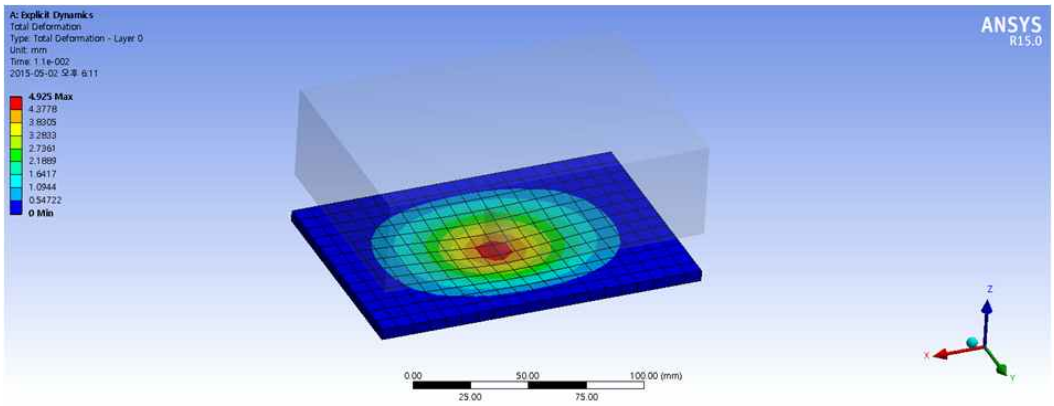

Fig. 27 Impact analysis result of Flax/vinyl ester specimen : Total deformation(9J)

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

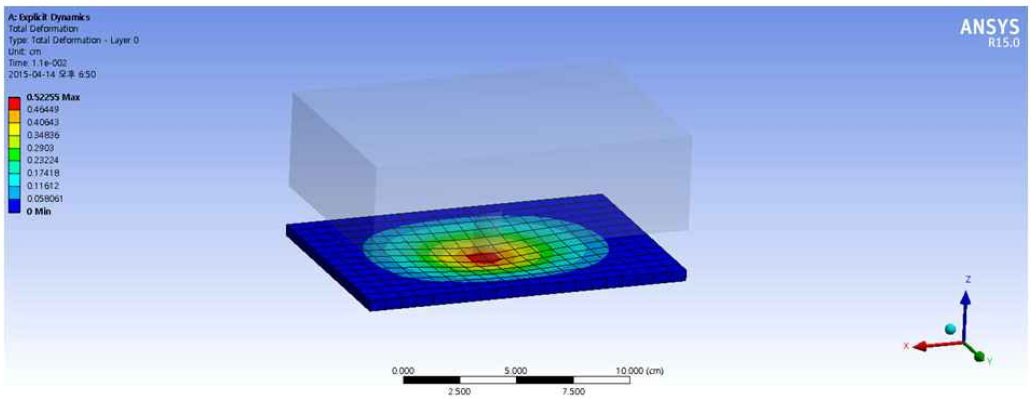

Fig. 28 Impact analysis result of Flax/vinyl ester specimen : Total deformation(10J)

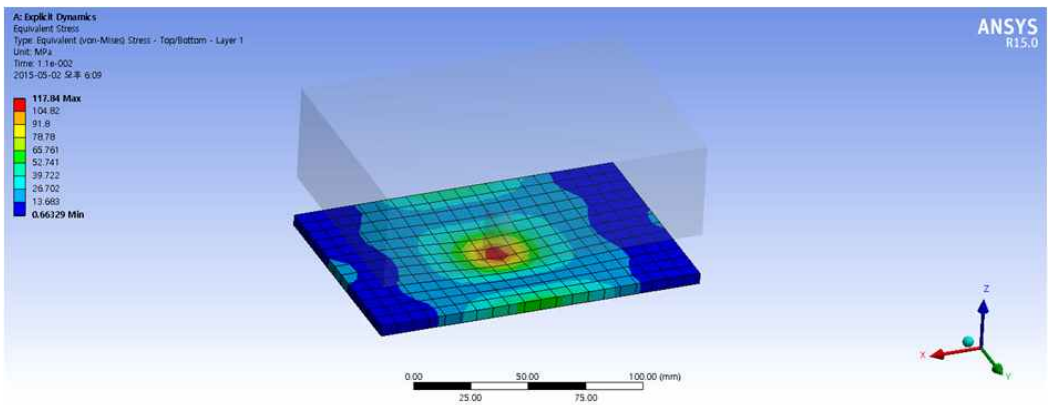

Fig. 29 Impact analysis result of Flax/vinyl ester specimen : Stress(8J)

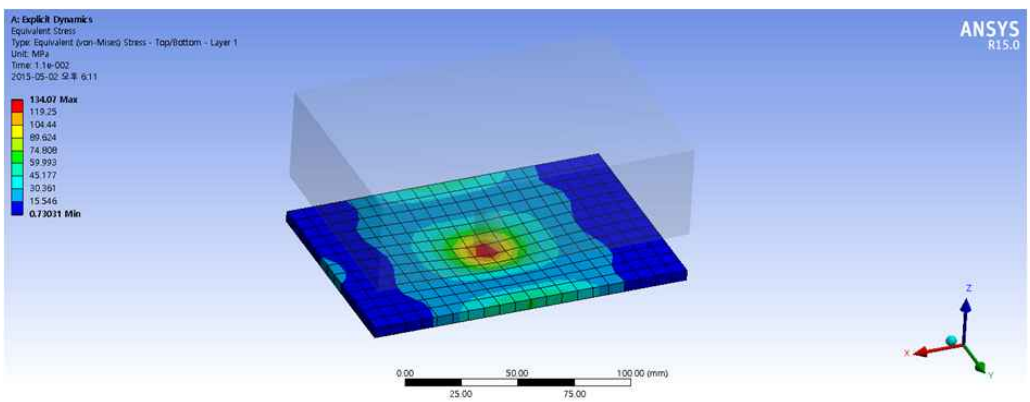

Fig. 30 Impact analysis result of Flax/vinyl ester specimen : Stress(9J)

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

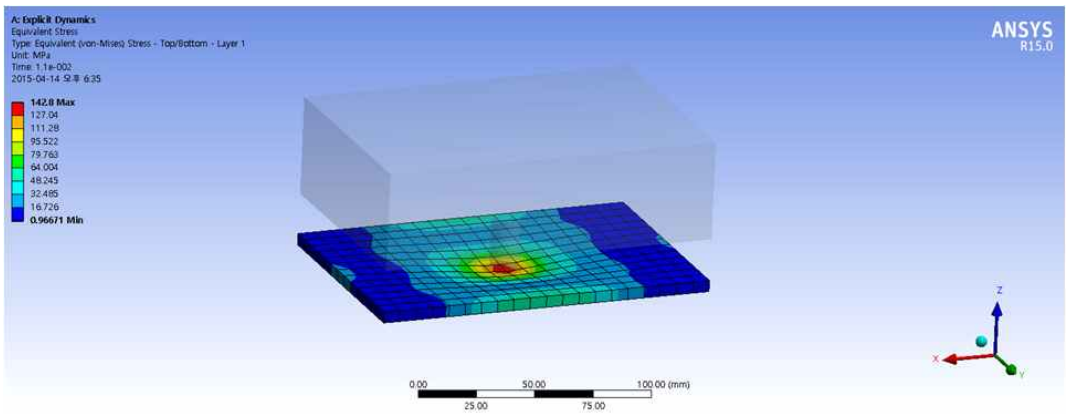

Fig. 31 Impact analysis result of Flax/vinyl ester specimen : Stress(10J)

충격 실험은 충격 시험기를 활용하여 Flax/vinyl ester 시편에 8J / 9J / 10J의 충격을 가하였다. 충격체의 무게는 5.0kg이며 낙하 위치는 8J / 9J / 10J 각각 0.16m / 0.18m 0.20m의 높이에서 낙하하였다. 충격시의 속도는 각각 1.76m/s, 1.87m/s, 1.98m/s 이었다. 충격 후 시편을 분석한 결과 뒷면까지 손상된 것을 확인하였다. 8J/9J/10J의 충격 후 시편의 앞면과 뒷면을 Fig. 32, 33, 34에 나타내었다. 충격 손상이 시작되는 시점부터 종료 때까지의 접촉력과 충격 이력을 각각 Fig. 35, 36, 37과 Table 10, 11, 12에 나타내었다.

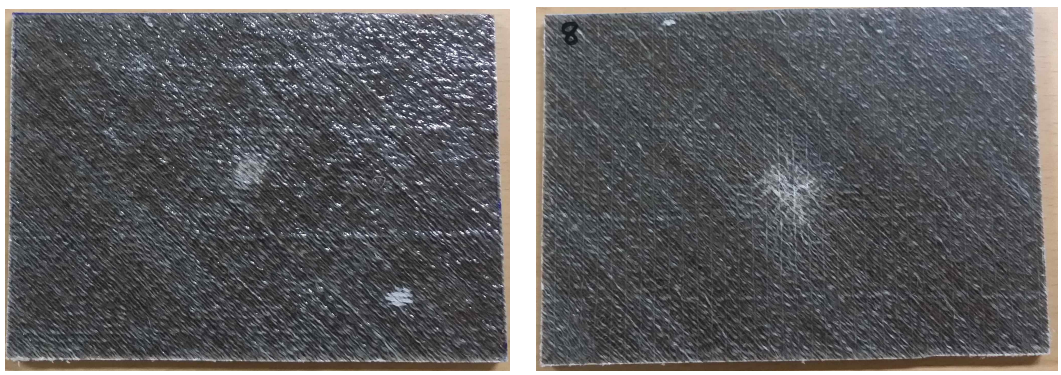

Fig. 32 Damage configuration of specimen after impact test(8J)

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

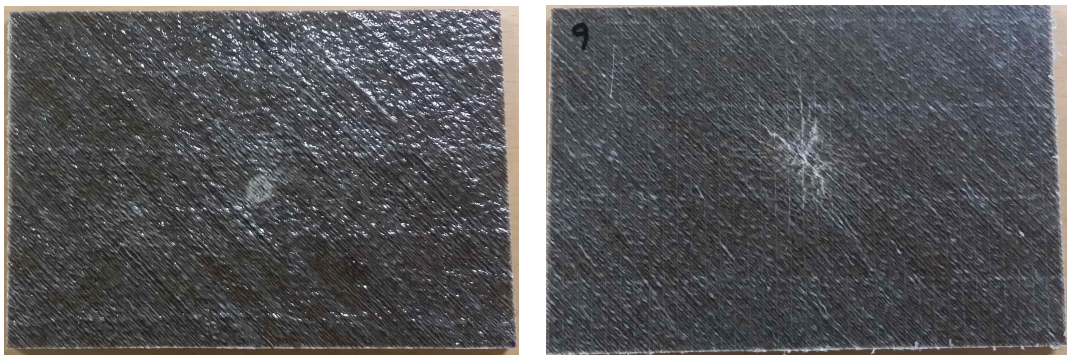

Fig. 33 Damage configuration of specimen after impact test(9J)

Fig. 34 Damage configuration of specimen after impact test(10J)

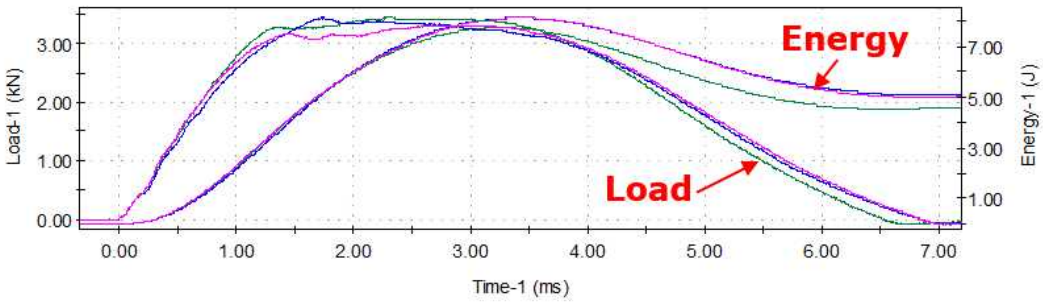

Fig. 35 Result of Impact test(8J)

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table 10 Result of specimen impact test(8J)

No.		Maximum load[kN]	Velocity slow down [%]	Impact velocity [m/s]	Total energy [J]	Impact energy [J]	Energy to max load [J]	Drop Weight [kg]
1		3.4423	61.6189	1.7335	4.5331	7.5824	6.6134	5.0466
2		3.4423	38.2251	1.7756	5.0988	7.9556	5.0500	5.0466
3		3.3135	72.4200	1.7756	4.9869	7.9557	7.5172	5.0466
Average		3.3994	57.4213	1.7616	4.8729	7.8312	6.3935	5.0466
Median		3.4423	61.6189	1.7756	4.9869	7.9556	6.6134	5.0466
Minimum		3.3135	38.2251	1.7335	4.5331	7.5824	5.0500	5.0466
Maximum		3.4423	72.4200	1.7756	5.0988	7.9557	7.5172	5.0466
Coef. of Var.		2.1865	30.4410	1.3815	6.1482	2.7517	19.5233	0.0000
Std. Dev.		0.0743	17.4796	0.0243	0.2996	0.2155	1.2482	0.0000

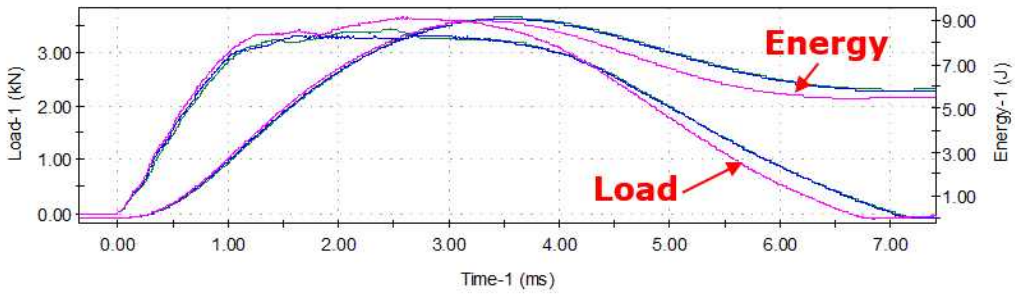

Fig. 36 Result of Impact test(9J)

Table 11 Result of specimen impact test(9J)

No.		Maximum load[kN]	Velocity slow down [%]	Impact velocity [m/s]	Total energy [J]	Impact energy [J]	Energy to max load [J]	Drop Weight [kg]
1		3.4255	64.1120	1.8837	5.8446	8.9532	7.9729	5.0466
2		3.2983	78.9142	1.8779	5.8033	8.8984	8.6849	5.0466
3		3.6399	71.7484	1.8685	5.4760	8.8093	8.2758	5.0466
Average		3.4546	71.5915	1.8767	5.7080	8.8870	8.3112	5.0466
Median		3.4255	71.7484	1.8779	5.8033	8.8984	8.2758	5.0466
Minimum		3.2983	64.1120	1.8685	5.4760	8.8093	7.9729	5.0466
Maximum		3.6399	78.9142	1.8837	5.8446	8.9532	8.6849	5.0466
Coef. of Var.		4.9976	10.3397	0.4087	3.5382	0.8171	4.2996	0.0000
Std. Dev.		0.1726	7.4024	0.0077	0.2020	0.0726	0.3573	0.0000

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

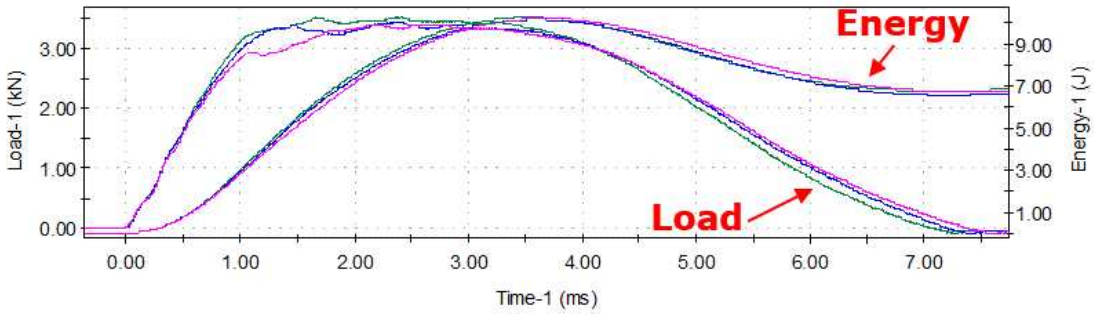

Fig. 37 Result of Impact test(10J)

Table 12 Result of impact test(10J)

No.		Maximum load[kN]	Velocity slow down [%]	Impact velocity [m/s]	Total energy [J]	Impact energy [J]	Energy to max load [J]	Drop Weight [kg]
1		3.5206	61.2597	1.9949	6.7659	10.0418	8.7124	5.0466
2		3.4383	59.6124	1.9855	6.5412	9.9469	8.5024	5.0466
3		3.3919	49.6133	1.9890	6.7208	9.9828	7.6189	5.0466
Average		3.4503	56.8285	1.9898	6.6760	9.9905	8.2779	5.0466
Median		3.4383	59.6124	1.9890	6.7208	9.9828	8.5024	5.0466
Minimum		3.3919	49.6133	1.9855	6.5412	9.9469	7.6189	5.0466
Maximum		3.5206	61.2597	1.9949	6.7659	10.0418	8.7124	5.0466
Coef. of Var.		1.8895	11.0905	0.2397	1.7807	0.4796	7.0104	0.0000
Std. Dev.		0.0652	6.3026	0.0048	0.1189	0.0479	0.5803	0.0000

시편 충격실험 후 시편의 손상 정도를 분석하기 위해 손상부위를 100배 확대하여 현미경 촬영을 하였다. Fig. 38은 충격을 가하지 않은 시편의 100배 확대 사진이며 Fig. 39, 40은 각각 8J, 10J의 충격을 가한 후의 시편의 100배 확대 현미경 촬영한 사진이다. 충격을 가하기 전의 시편과 비교했을 때 충격을 가한 시편은 섬유가 끊어져 손상이 간 것을 확인할 수 있다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Fig. 38 Flax/vinyl ester specimen observed using microscope

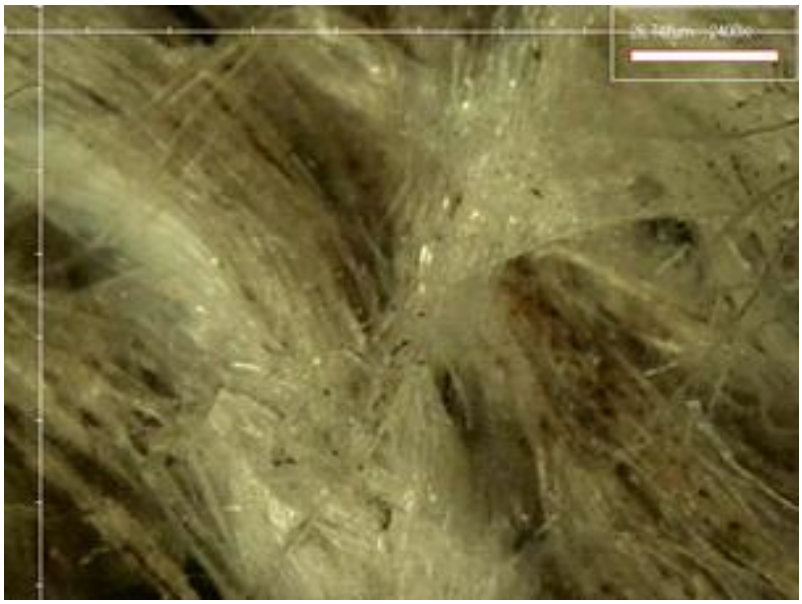

Fig. 39 Flax/vinyl ester specimen observed using microscope of impact test(8J)

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

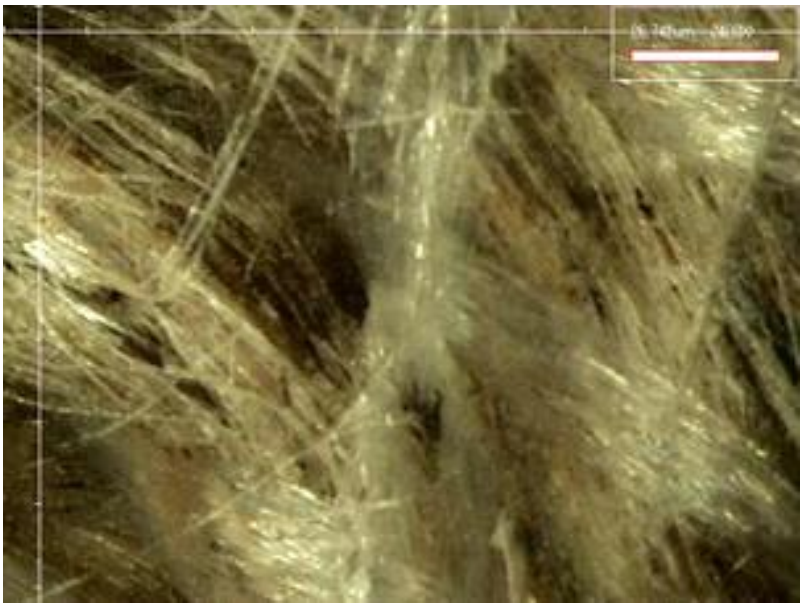

Fig. 40 Flax/vinyl ester specimen observed using microscope of impact test(10J)

제 4 절 손상 후 압축강도 실험

본 연구에서는 충격손상 후 구조물의 강도 저하 정도를 분석하기 위해 시편 충격 실험 이후에 압축강도 측정 실험을 실시하였다. 압축강도 실험은 Flax/vinyl ester 시편에 8J/9J/10J의 충격을 가한 시편과 손상이 없는 시편의 압축강도를 측정하였다. 충격 후 압축강도 시험은 ASTM D7137[12]에 의하여 수행되었다. 복합재료의 특성상 좌굴에 약한 시험 환경을 보완하기 위한 특수 치구는 ASTM 시험규정에 따라 좌굴 방지 시스템을 고안하여 적용하였다.[11] Fig. 41는 압축 시험 전 시편이 지그에 장착된 형상이며, Fig. 42은 압축 시험 후 파손된 시편의 형상이다.

시편 시험 결과 Flax/vinyl ester 시편의 8J / 9J / 10J의 충격 에너지 적용 후 압축강도는 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 10J 이상의 충격 시에는 유지 보수가 필요한 것으로 분석하였다. Table 13은 8J/9J/10J의 충격 후 압축 강도 비교 결과이며, Fig. 43은 8J/9J/10J의 충격 에너지가 적용된 후의 시편 압축 강도 시험 후 하중-변위

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

선도를 나타내었다.

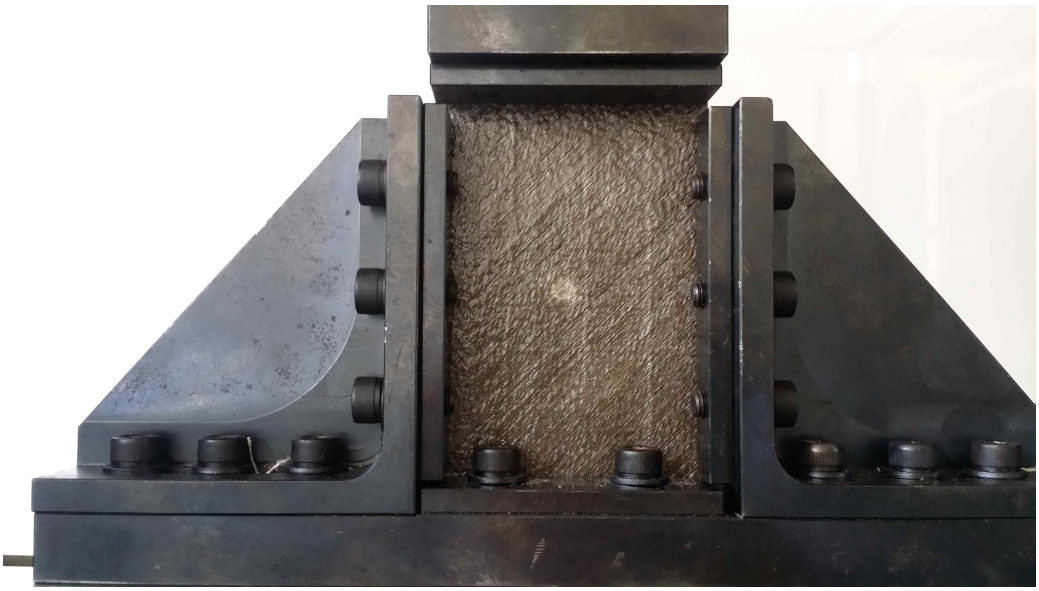

Fig. 41 Configuration before compression test of impact damaged specimen

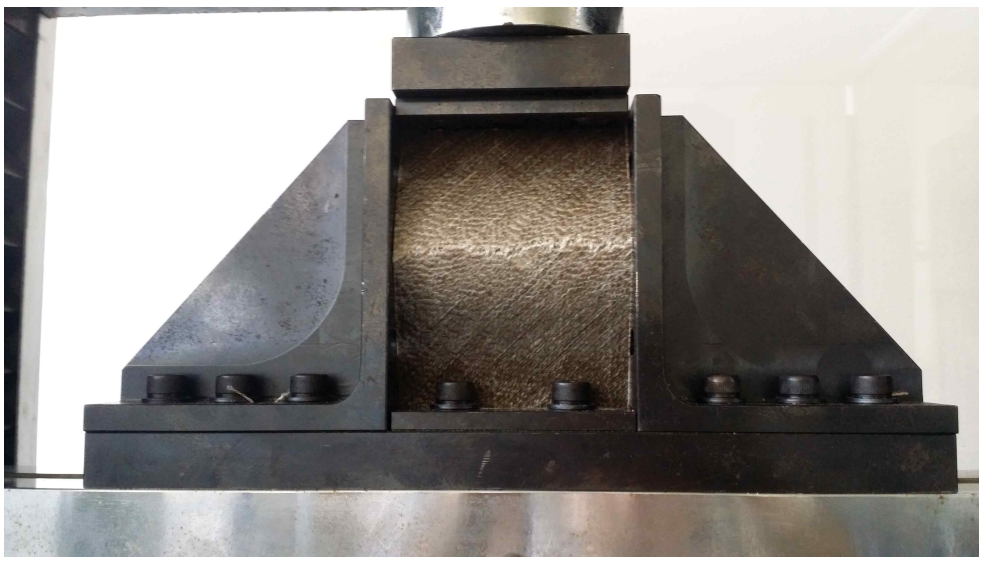

Fig. 42 Configuration after compression test of impact damaged specimen

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table 13 Result of compressive strength after impact

	No damage	8J	9J	10J
Compressive Strength[MPa]	89.87	81.287	74.519	63.5698
Strength reduction[%]	0	-9.55	-17.08	-29.26

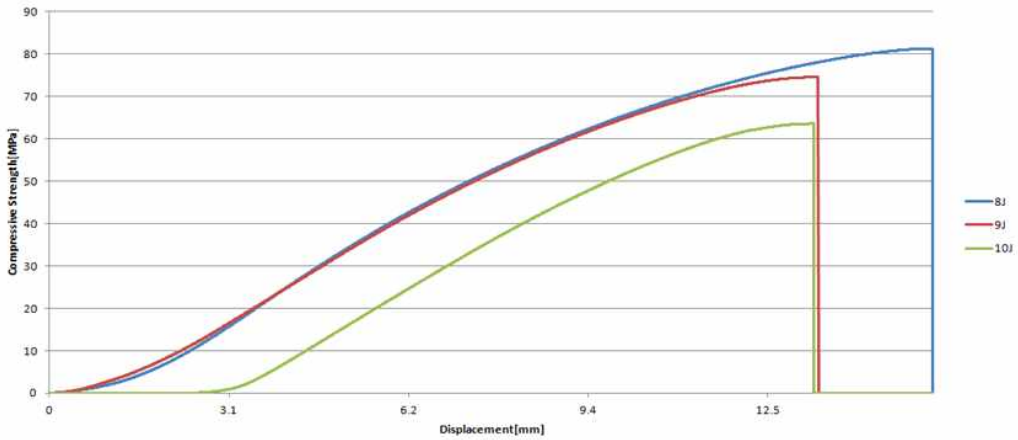

Fig. 43 Load-displacement curve of compression specimen

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 6 장 시제품 제작

시속 200km/h의 속도로 운행할 때 패널이 받는 하중을 고려하여 구조 설계를 수행하고 해석을 통해 패널의 구조 거동을 분석하였다. 본 연구에서는 구조 시험을 통해 해석했던 결과를 검증하기 위해 시제품을 제작하였다. 시제품은 VARTML(Vacuum Assisted Resin Transfer Molding-Light) 제조 공법으로 제작하였다.

제 1 절 수지 유동해석

RTM 공정에서 수지 주입 시 고려되어야 할 사항은 수지의 점도(resin Viscosity), 수지 유동속도(resin flow velocity), 주입 압력(injection pressure)등이 있다. 특히 수지의 교반은 장시간 진행될 경우 초기 경화 현상이나 기포가 발생할 우려가 높으므로 최적의 조건을 맞추어야 한다.

RTM의 해석에서 가장 중요한 일은 유동 선단의 이동을 예측하는 것이다. 즉, 유동 선단의 위치가 성형공정에 직접적인 영향을 끼치는 중요한 공정 변수로 작용하므로, 선단 위치를 정확하게 파악하는 것이 무엇보다 중요하다. 제품 형상이 대부분 불규칙하고 복잡하므로, RTM 공법을 이용한 복합재료 구조물 제작 시 금형 설계에 고려될 주입구(Injection port)/배출구(vent port) 선정 및 최적의 성형조건의 결정을 위하여 수지 유동 해석(resin flow analysis)은 필수적이다. 수지 유동을 해석하는 데는 수치해석적인 방법이 일반적으로 사용 되고 있는데, 본 연구에서는 RTM 제품 성형 공정에서의 수지 유동을 예측할 수 있는 상용프로그램 RTM-Worx를 통해 자동차 본넷 구조물의 RTM 성형공정을 모사 하였다.

수지 유동 해석(resin flow analysis)의 절차는 크게 섬유 및 수지의 물성 측정에 의한 유동특성 결정, 해석 모델의 형상에 대한 정확한 모델링 및 격자 생성, 수치해석 프로그램 구동을 통한 수치적 계산 결과의 시각적 모사로 나눌 수 있다. Fig. 44 은 수지 유동 해석 과정을 보여주고 있다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

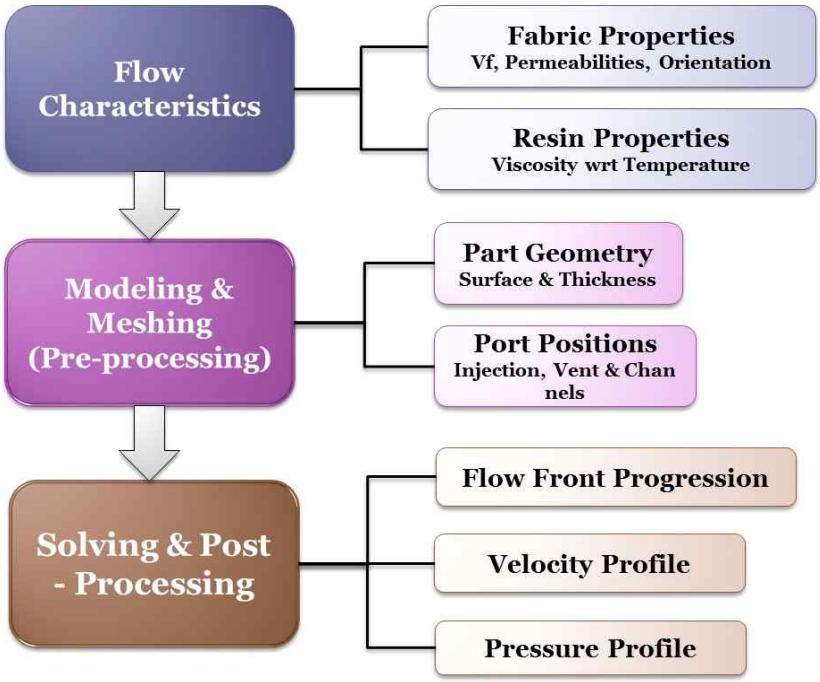

Fig.44 Process of resin flow analysis

선행 연구를 통해 RTM 공법의 신뢰성을 확보 하였고 블레이드의 섬유 체적비는 RTM으로 제작된 시편을 통해 34% 로 측정되었다. 이때 자연 섬유의 함침성 계수는 선행연구에서 획득한 결과인 4.6e-11m^2 이며 RIM 수지유동해석은 동일한 조건으로 수행 하였다[14].

수지 유동 해석을 통하여 유동 선단의 위치 및 수지 주입에 의한 금형 내부의 압력분포, 수지충전시간을 예측하고 이를 바탕으로 수지주입 압력과 수지주입구(Injection port)와 배출구(vent port)의 위치 및 개수를 결정하였다. 수지유동 해석 결과 dry patch는 발견되지 않았으며 수지가 완전 주입 되는데 걸린 시간은 2330초로 확인하였다. Resin gel time 때의 3000초보다 빠르게 주입되었기 때문에 수지 경화가 일어나기 전 주입이 완료됨을 확인 할 수 있었으며, 수지 유동 해석을 위해 입력한 조건은 Table 14에 나타내었으며, 수지유동 해석 결과는 Fig. 45에 나타내었다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table 14 Condition of injection port of flax/vinyl ester panel

Injection pressure	2bar	Fiber permeability	4e-10m^2
Vacuum pressure	1bar	Resin viscosity	100cP
Thickness	8mm	Resin gel time	3000s
Channel area	15mm^2	Volume fraction	35%

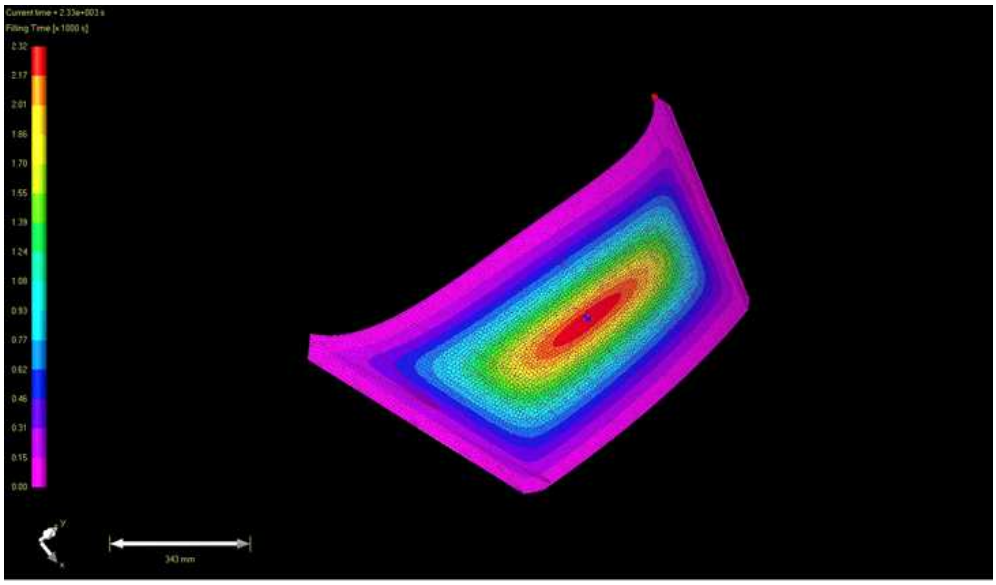

Fig.45 Flow analysis result of flax/vinyl ester panel

제 2 절 몰드제작

몰드는 마스터 모델을 이용하여 유리섬유로 몰드를 제작하고 몰드 뒷면에는 변형을 방지하기 위한 스티프너를 적용하였다. 시트웍스를 설치하고 포맥스를 이용해 진공라인을 생성하였다. 첫 포맥스(1)의 위치는 성형 라인에서 20mm의 거리를 두고 이후 포맥스(2)는 상면 몰드의 자중 및 진공 등을 고려하여 부착하였다. Fig. 46-48는 모델링한 몰드의 구조 형상을 보여주고 있다. Fig. 49는 경화중인 몰드 사진이며 Fig. 50은 완성된 몰드이다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

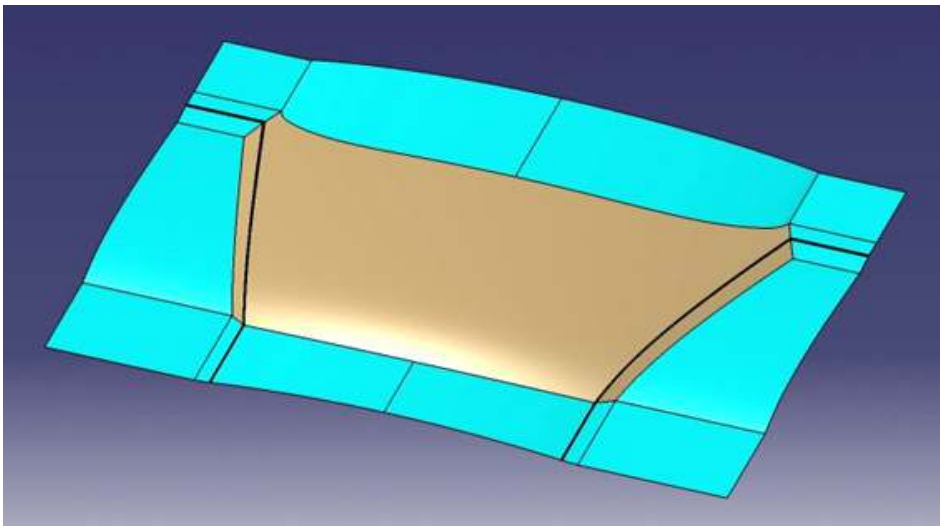

Fig. 46 Structural configuration of automobile panel mould

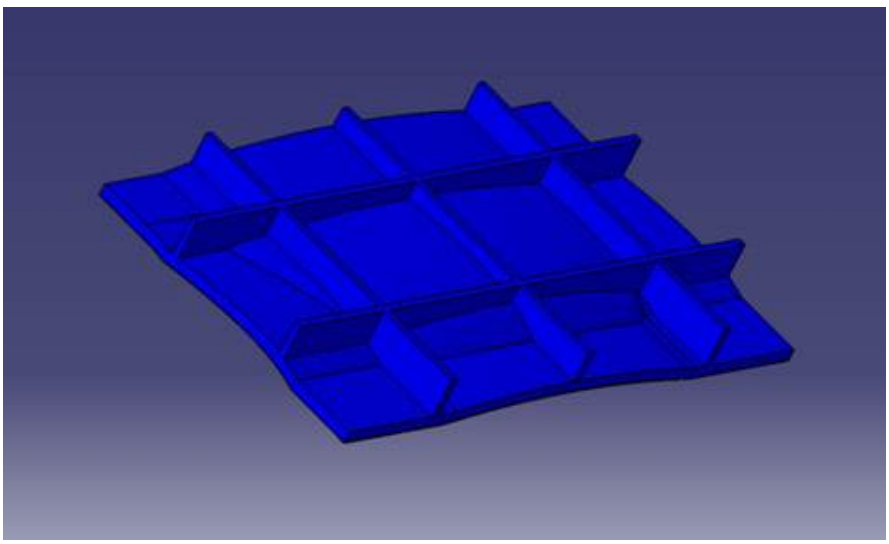

Fig. 47 Stiffener attached to the back of the mould

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

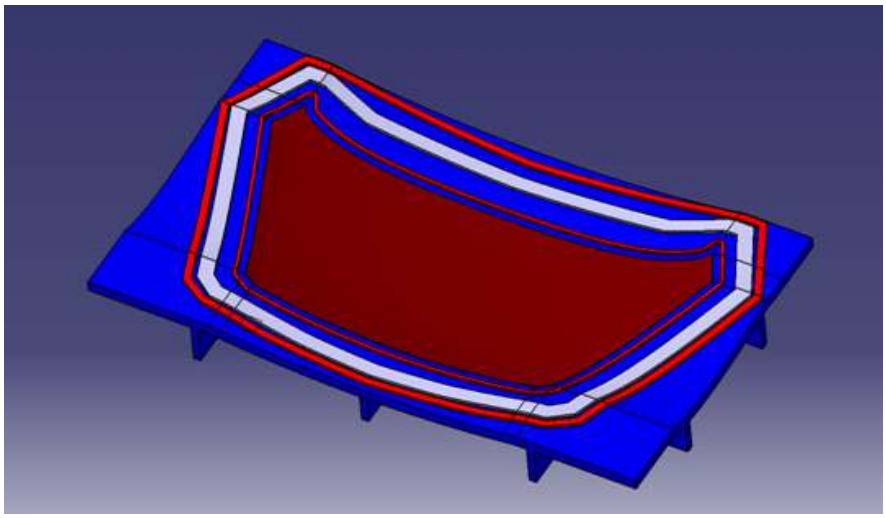

Fig. 48 Sheet wax and vacuum lines installed in the mould

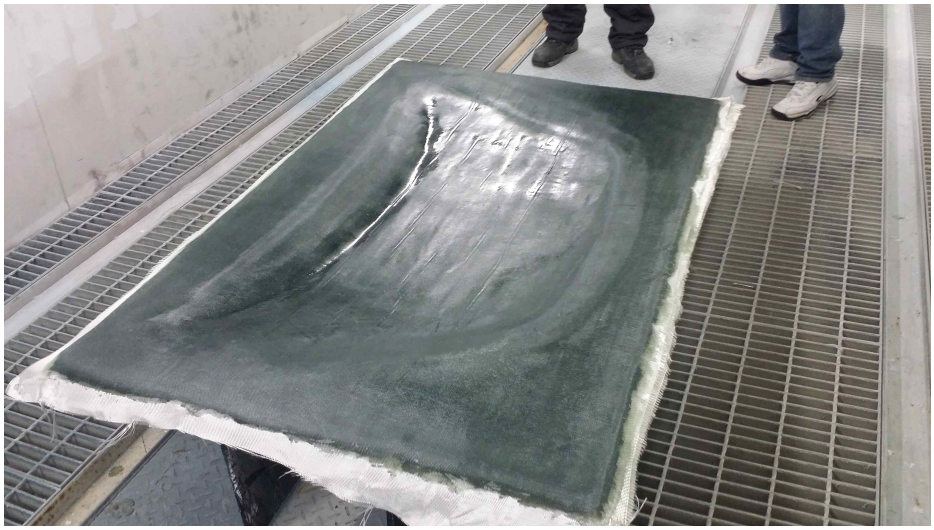

Fig. 49 Mould curing

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Fig. 50 Automotive panel mould

제 3 절 시제품 제작

복합재료 제작을 위하여 기존에 잘 알려져 있는 오토클레이브 성형 법은 제품의 품질이 좋지만 제품을 생산하기 위한 장비 구축이 매우 고가로서 막대한 비용이 투입되어야 한다. 따라서 제품의 기본 생산 단가가 상승하게 된다. 또한 종래 널리 알려져 있는 수적층(Hand lay-up) 방식은 작업자 숙련 의존도가 높고 작업 환경이 열악한 반면 제작 단가는 매우 저렴하다.

이에 본 연구에서는 RTM(Resin Transfer Molding) 공법을 기반으로 한 RIM 성형법을 채택하게 되었다. RIM 공법은 양쪽 면이 모두 견고한 금형으로 되어 있는 RTM과는 달리 한쪽 면은 견고한 금형을 사용하고 다른 면은 진공과 함께 유연한 금형을 사용하여 압력 차를 이용하여 금형 내부에 적층된 프리폼에 수지를 신속하게 함침시켜 성형하는 방법이다.[10,13]

본 공법은 진공의 흡입력과 진공 면에 가해지는 수직 압력을 이용하여 금형 내부의 기포를 줄여 섬유 체적율을 높이면서 수지 충전시간을 짧게 할 수 있다는 장점이 있다. 또한 RIM 공법은 RTM 보다는 섬유 체적율 이나 함침 시간 면 등 에서는 조금 떨어지지나 본 연구의 블레이드와 같이 대형구조가 아닐 경우 제작 장비나 작업 준비 면에서 시간, 공간, 금액의 효율성을 확보할 수 있다.

섬유는 Composites evolution사의 Biotex Falx 600g/m^2±45 Biaxial을 사용하였고 수지는 CCP Composites사의 KRF-1031을 사용하였다. 섬유 적층 형태는 $[\pm45]_6$ 이다. 시제품 제작은 수지 주입구를 1개, 수지 배출구는 4개로 장착하였다. 수지 주입 압력은 1bar 이며 수지 배출구 압력은 -1bar로 적용하였다. 수지와 경화제의 비율은 100:3으로

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

적용하였다. 총 수지 주입 시간은 60분으로 확인되었다. Fig. 51-54은 시제품 제작 과정을 나타내고 있다. Fig. 55는 완성된 시제품 형상이다.

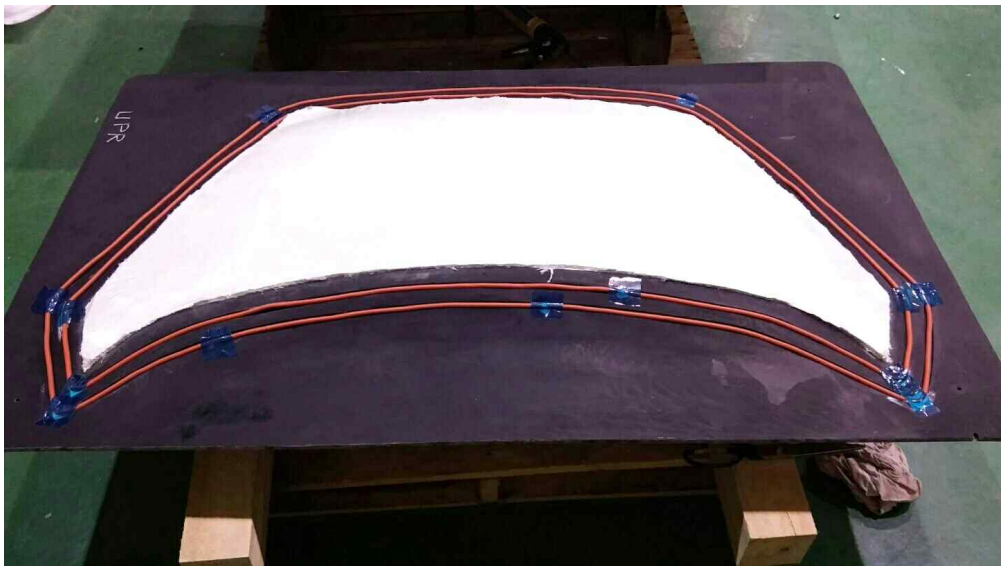

Fig. 51 Flax laying-up

Fig. 52 Resin infusion

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

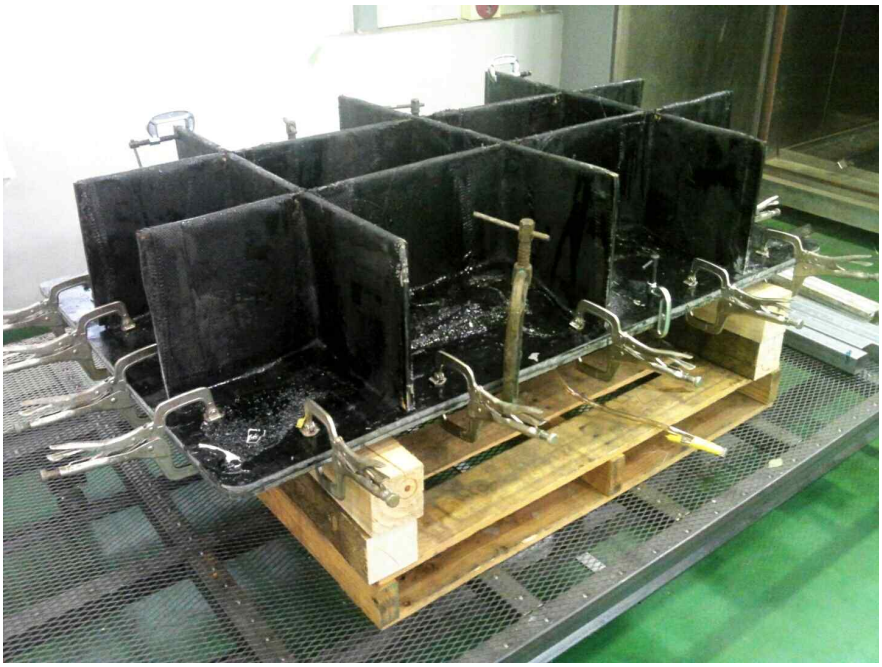

Fig. 53 Curing

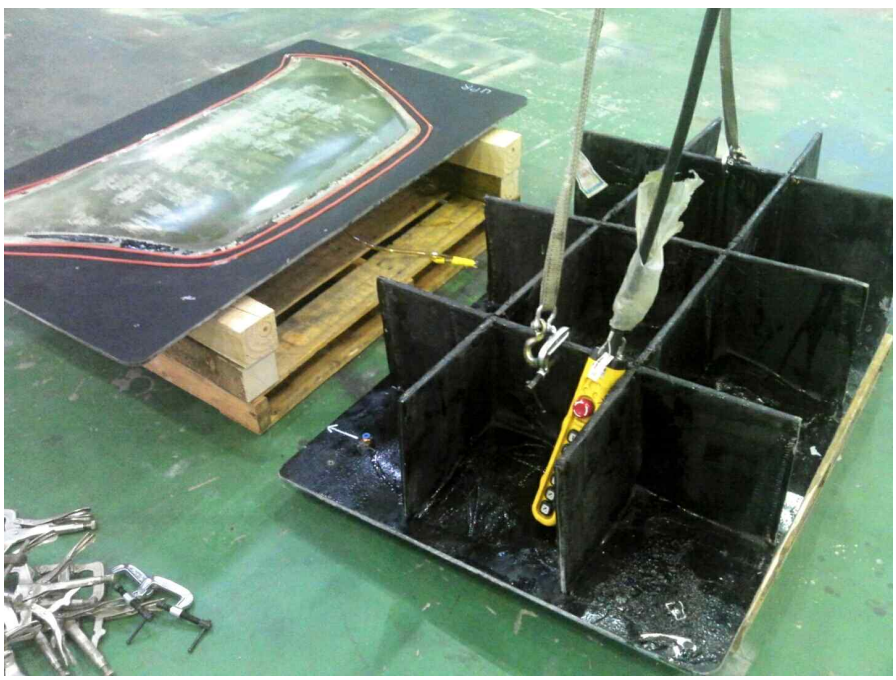

Fig. 54 Demolding of flax/vinyl ester panel

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Fig. 55 Automotive panel prototypes

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 7 장 시제품 구조해석 및 실험

아마섬유 복합재 자동차 패널의 안전성 검토를 위한 구조 시험은 변형률, 변위 시험을 수행하였다. 구조 시험 하중은 설계 하중인 공력 하중을 집중 하중으로 변경하여 적용하였다. 시제품을 고정한 후에 하중을 가한 후 변형률과 변위를 검토하여 해석 결과와 비교하였다.

제 1 절 시제품 변형률 및 변위 측정

시제품의 응력-변위 검토를 위하여 외력에 의한 물질의 변형 정도인 스트레인(strain)을 측정하여 응력을 계산한다. 따라서 시제품 표면에 스트레인 게이지를 부착하는 작업이 선행되어야 한다. 본 시험을 위해서 패널의 4개 지점에 스트레인 게이지를 부착하여 스트레인을 검토하고 해석 결과와 비교하여 구조 설계 결과의 타당성을 검토하였다. Fig. 56은 시제품을 고정하고 스트레인 게이지를 부착한 사진이다.

Fig. 56 Panel fixed and attach strain gauge

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

공력 하중을 집중 하중으로 변경한 후 시제품의 상면 두 지점에 위치를 선정하여 무게추를 이용해 집중하중을 모사하였다. 각 지점에 30kg의 무게 추를 적용하여 총 60kg의 하중이 적용되었다. 스트레인 측정은 KYOWA 4 channel strain data acquisition system 을 통하여 측정하였다. Fig. 57은 하중 적용 장면이다. 시제품 변위 측정은 본넷 끝단에서 최대 변위를 측정하여 해석 결과와 비교하였다. Fig. 58에 변위 측정 장면을 명시하였다.

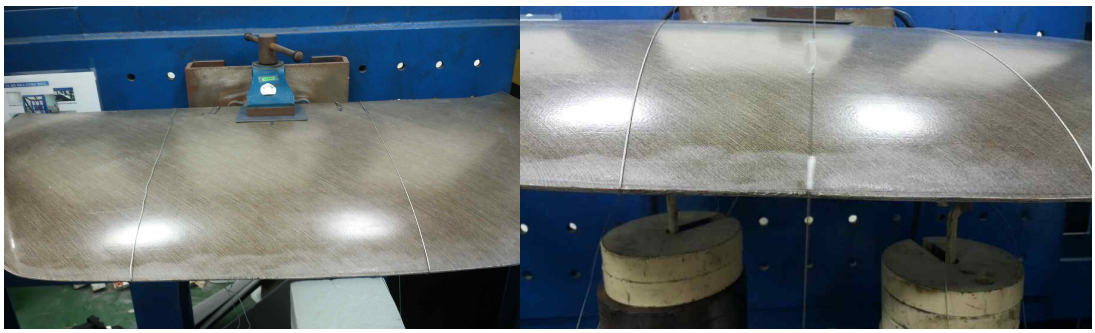

Fig. 57 Structural test of bonnet

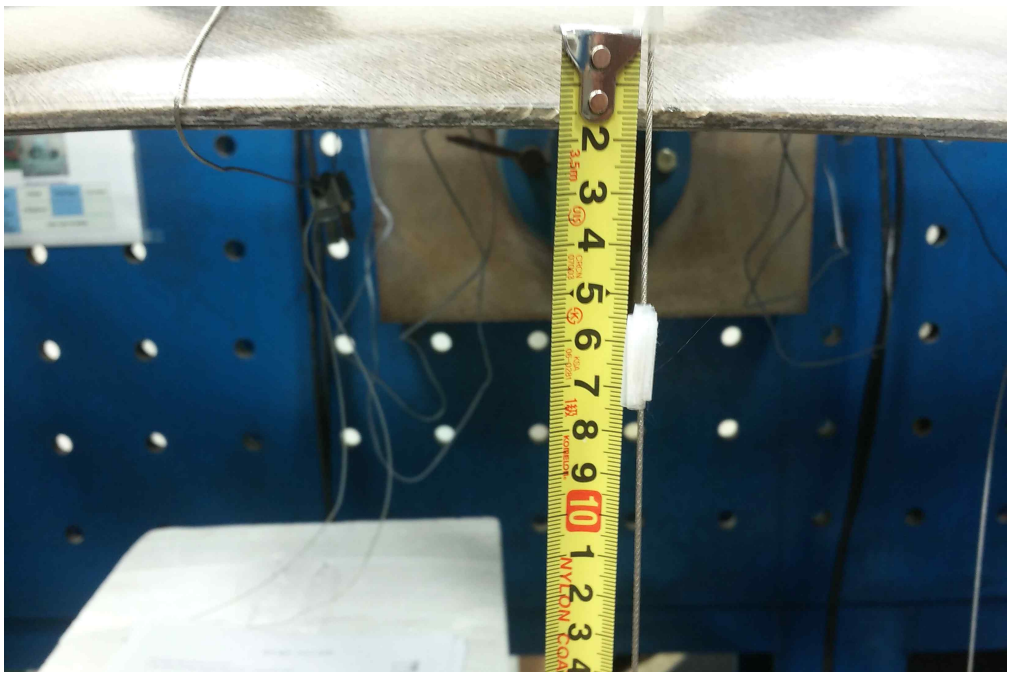

Fig. 58 Maximum displacement of the panel

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 2 절 패널에 작용하는 하중 해석

구조 해석은 패널 끝단 지지점에 대한 경계 조건을 반영하여 수행하였다. 구조 하중은 두 지점에 가각 30kg의 하중을 집중 하중으로 적용하여 해석한 후 비교하였다. Fig. 54-55는 해석을 위한 경계 조건 및 하중 적용 모델이다. 해석 결과 최대 변위는 패널 끝단에서 51.4mm로 확인되었다. 1번 지점에서의 스트레인은 3770μS, 2번 지점에서의 스트레인은 3360μS, 3번 지점에서는 5300μS, 4번 지점에서의 스트레인은 4540μS으로 확인 되었다. Fig. 59-63은 상하면 스트레인 해석 결과 및 최대 변위 해석 결과이다.

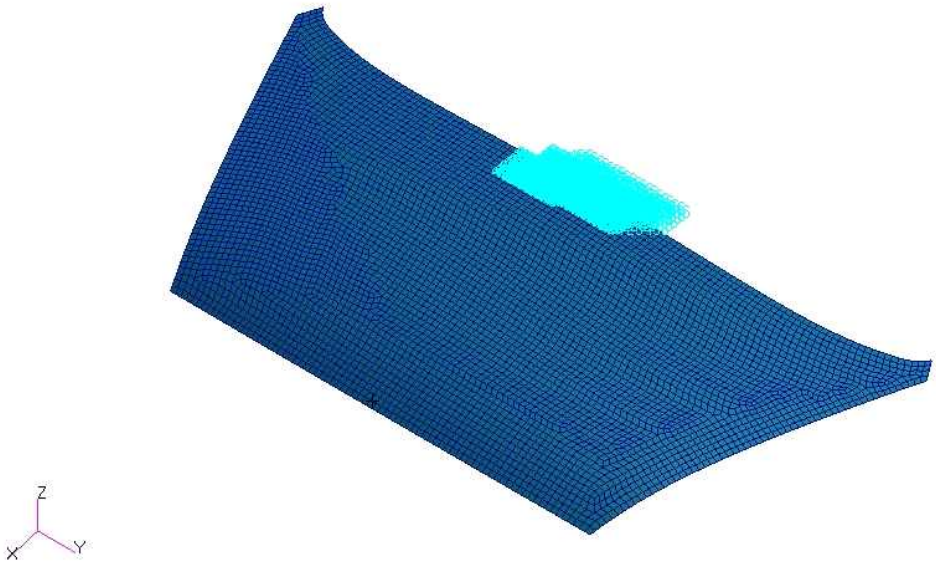

Fig. 59 Boundary condition apply

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

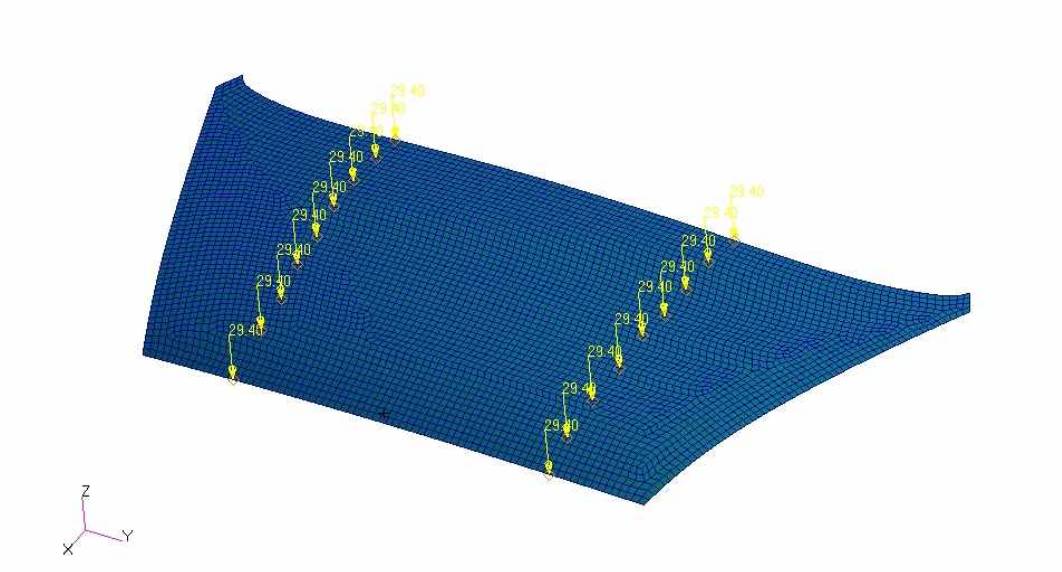

Fig. 60 Load application

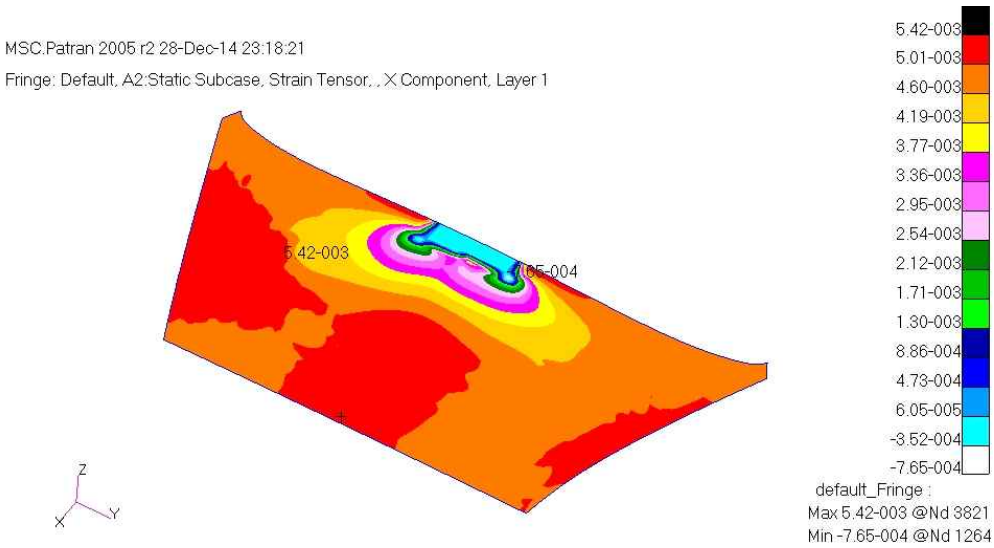

Fig. 61 The upper surface strain analysis

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

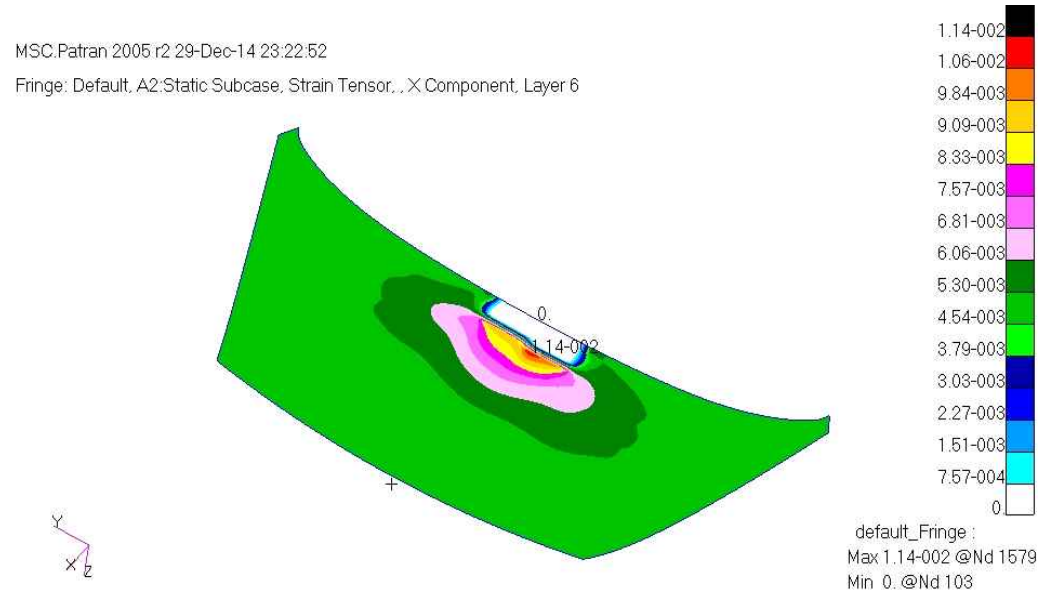

Fig. 62 The bottom surface strain analysis

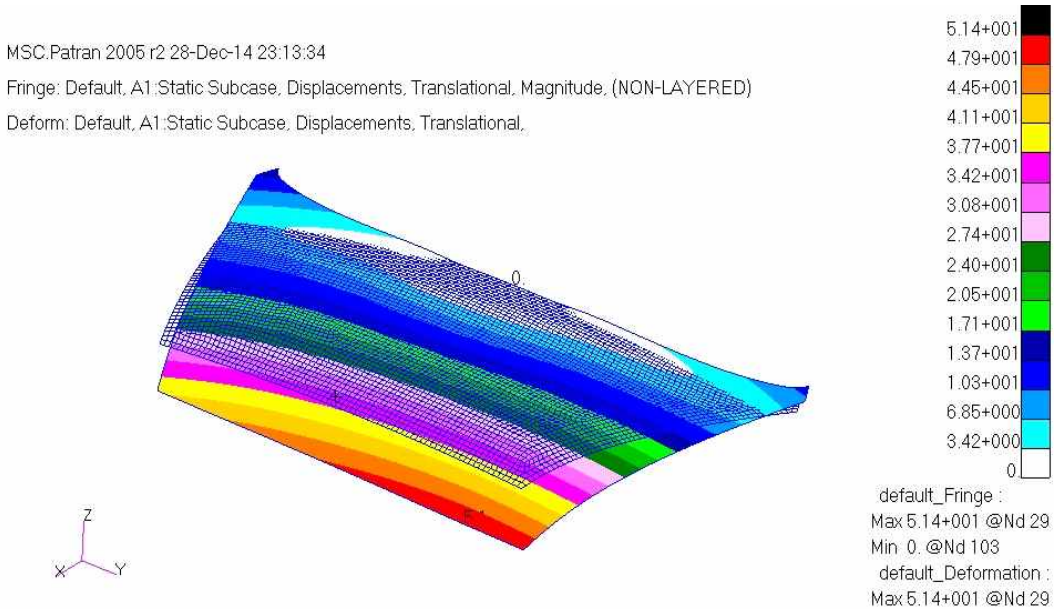

Fig. 63 Maximum displacement analysis

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 3 절 해석 결과 비교

본 연구에서는 시제품의 구조 시험결과와 유한요소 해석 결과와 비교하여 해석 결과를 검증하였다. 구조 시험 결과와 유한 요소 해석 결과를 비교 검토한 결과 유사한 것으로 확인하였다. 따라서 아마섬유 적용 자동차 패널의 구조 설계 결과는 충분히 안전한 구조인 것으로 검토되었다. Table 15는 시제품 패널의 구조 시험 결과와 유한요소 해석 결과를 비교한 표이다.

Table 15 Comparison of the analysis results and test results

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

제 4 절 시제품 낙하 충격 실험

본 연구에서는 패널에 충격을 가했을 때 손상의 정도를 분석하기 위해 제작한 시제품에 낙하 충격 실험을 수행하여 충격 후 패널의 손상 거동을 분석하였다. 충격 실험은 4.9kg의 성인 머리 모형을 제작하여 40km/h의 속도로 충격실험을 해야 하지만 실험장비가 고가이다 보니 시편 충격실험으로 대체하였다. 또한 추가로 시제품을 제작하여 유럽 보행자 기준에 못 미치지만 본 연구실에서 수행할 수 있는 범위 내에서 낙하 실험을 수행하였다. 낙하 실험은 2m의 높이에서 8kg의 추를 매달아 낙하하였고 그때의 충격 에너지는 156.8J이다. 충격 후 패널을 분석한 결과 육안으로 보이는 손상은 없었으며 아마 섬유로 제작한 패널이 낙하 충격에 충분히 안전한 것으로 확인하였다. Fig. 64는 낙하 실험 사진이며 Fig.65은 낙하 충격 후 패널을 나타내었다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Fig. 64 Impact test of panel

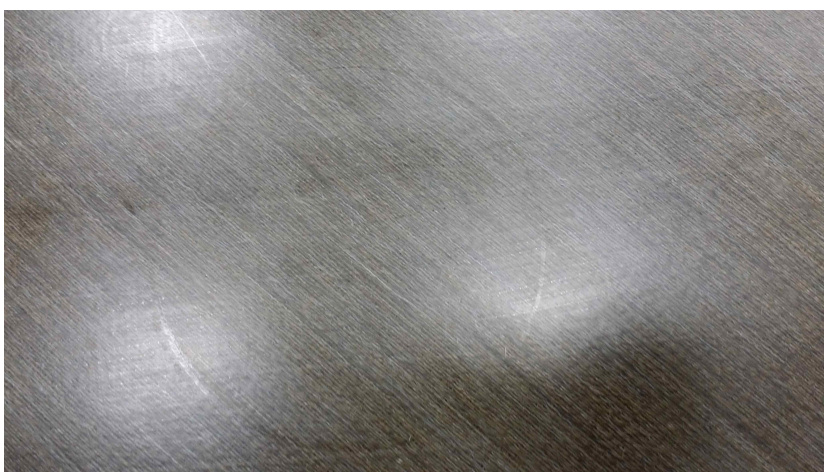

Fig. 65 Damage configuration of panel after impact test

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 8 장 결 론

본 연구를 통해서 자연섬유인 아마를 이용한 Flax fabric/Vinyl ester 복합재료가 차량용 차체 패널에 적합한가에 대해 알아보고자 설계 및 해석, 제작, 실험을 통해 결과 값을 비교하고 확인 하였으며, 결과를 요약 하면 다음과 같다.

1) 기존의 금속재료로 제작된 차체 패널을 자연섬유 복합재를 적용하여 재설계하였으며, 패널에 작용하는 하중은 차량이 시속 200km/h의 속도로 운행할 때의 공력하중을 적용하여 패널의 휨강성도를 고려하여 설계하였다.
2) 기존의 금속재료를 적용한 패널의 휨 강성도에 준하는 구조물 설계를 위해 아마섬유를 적용한 패널의 두께는 6mm로 설계하였다.
3) 구조 안전성 검토를 위해 상용 유한요소 해석 프로그램인 MSC. NASTRAN을 활용하여 구조해석을 수행하였다. 구조해석은 응력, 변형, 좌굴, 열응력 해석 총 4가지의 해석을 수행하였다.
4) 구조해석 결과 최대 압축 응력은 -0.90MPa, 최대 인장응력은 0.38MPa, 최대 변위는 패널 중앙 부위에서 0.33mm, 하중배수는 18, 열에 의한 압축응력은 0.99MPa, 열에 의한 인장응력은 0.43MPa, 열에 의한 변위는 0.43mm로 자연섬유 복합재를 적용한 패널이 충분히 안전한 것으로 확인 되었다.
5) 또한 충돌 하중에 의한 구조 안전성에 대하여 해석을 수행하였다. 충돌은 유럽 보행자 보호 관련 기준에 따라 4.9kg의 성인 머리 모형을 모델링하여 40km/s의 속도로 패널 중앙 부위에 수직으로 충돌해석 하였다. 해석은 유리섬유를 적용한 패널(5mm)과 자연섬유를 적용한 패널을 비교하였다.
6) 유리섬유를 적용한 패널은 5mm로 설계하였고 아마섬유를 적용한 패널은 6mm로 설계하였는데 무게는 4.4kg으로 동일하였다. 하지만 변위 해석 결과 유리섬유를 적용한 패널은 60.01mm, 자연섬유를 적용한 패널은 54.603mm로 9.01% 적게 변위가 일어났으며, 응력은 유리섬유를 적용한 패널이 177.72MPa, 아마섬유를 적용한 패널은 151.09MPa로 14.98% 응력이 낮아 같은 무게에서 아마섬유를 적용한 패널이 유리섬유를 적용한 패널 보다 구조적으로 더 뛰어난 것을 확인하였다.
7) 충돌해석 결과를 검증하기 위해 Flax/Vinyl ester 시편을 제작해 충격실험 데이터와 충돌해석 결과를 비교하였다. 충격실험은 ASTM D7136기준에 의거하여 수행

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

하였다.

8) 또한 충격을 가한 시편의 압축강도 실험을 통해 충격 후 압축강도가 얼마나 저하되는지에 대한 연구를 진행하였다. 충격 손상 후 강도를 측정한 결과 8J/9J/10J의 충격을 가한 시편은 충격을 가하지 않은 시편에 비해 각각 9.55%, 17.08%, 29.26% 압축강도가 저하된 것을 확인하였다.

9) 구조 시험을 통해 해석했던 결과를 검증하기 위해 시제품을 제작하였다. 시제품은 VARTML(Vacuum Assisted Resin Transfer Molding-Light) 제조 공법으로 제작하였고 제작 후 구조시험 및 낙하 충격 시험을 통해 해석 결과 검증 및 구조물은 안전성을 분석하였다.

10) 아마섬유 복합재 차량용 패널의 구조 안전성 검토를 위해 스트레인, 변위 시험을 수행하였다. 구조시험은 설계 하중인 공력 하중을 집중 하중으로 변환하여 적용하였다. 해석 결과와 실험 결과를 비교한 결과 유사한 것으로 확인하여 구조적 안전성을 검증하였다.

11) 마지막으로 제작한 시제품에 낙하 실험을 수행하였다. 낙하실험은 8kg의 추를 2m의 높이에서 낙하하였고 그때의 에너지는 156.8J이다. 충격 실험 후 패널을 분석한 결과 육안으로 보이는 손상은 없었으며 낙하 충격에 충분히 안전한 것으로 확인하였다.

12) 아마섬유 복합재를 적용하여 차량용 패널을 설계하여 정적하중 해석, 충돌해석, 하중 실험, 충돌 시험을 통해 아마섬유 복합재를 적용한 패널이 충분이 안전한 것으로 확인하였다. 또한 기존의 금속 패널과 비교하였을 때 금속 패널의 무게는 6.48kg이고 아마섬유를 적용한 패널의 무게는 4.4kg으로 31.7% 무게를 절감효과를 확인하였다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

참 고 문 헌

1. Ignaas Verpoest. “A general introduction to composites, highlighting the advantages of flax and hemp composites,” Jec composites, pp.15-37, 2012.
2. Moussa Gomina. “Flax and hemp composites applications,” Jec composites, pp.141-162, 2012.
3. P. J Herrera-Franco, A. Valadez-González, “Mechanical properties of continuous natural fibre-reinforced polymer,” Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, vol. 35, pp. 339-345, 2004.
4. M. Zampaloni, F. Pourboghrat, S.A. Yankovich, B.N. Rodgers, J. Moore, L.T. Drzal, A.K. Mohanty, M. Misra. “Kenaf natural fiber reinforced polypropylene composites: A discussion on manufacturing problems and solutions,” Composites: Part A, vol. 38, pp.1569-1580, 2007.
5. Vincent Placet. “Characterization of the thermo-mechanical behavior of Hemp fibres intended for the manufacturing of high performance composites,” Composites: Part A, vol. 40, pp. 1111-1118, 2009.
6. Lucintel Brief, “Opportunities in Natural Fiber Composite”, Lucintel, 2011
7. Regulation(EC) No.78/2009 of the European Parliament and of the Council of 14 January, 2009
8. 박홍익 “보행자 머리 상해 저감을 위한 차체 후드 최적설계에 관한 연구”, 국민대학교 석사학위논문, 2012
9. 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
10. 박현범 외, “아마/비닐 에스테르 자연 섬유 복합재료의 기계적 특성 분석 연구”, Composites Research, Vol. 27, No. 1, 19-24, 2014
11. 박현범 “항공기 복합재 구조의 저속 충격 손상 평가 및 유지 보수 기법 연구”, 조선대학교 박사학위논문, 2011
12. ASTM D 7137, “Standard test method for compressive residual strength properties of damaged polymer matrix composite plates”, 2005

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

13. 이하승 외, “자연섬유를 적용한 구조물의 VARTM 수지 흐름 해석연구”, 항공우주시스템공학회, 2014
14. Chang, F. K. et al., ‘Strength of Mechanically Fastened Composite Joint’, J. of Composite Materials, 1982.
15. Walter D. Pilkey, ‘Formulas for stress, strain and structural matrices’, John Wiley & Sons, INC., 1994.