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

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

[UCI]I804:24011-200000265777

2016년 8월

박사학위 논문

자연 섬유 복합재를 적용한 자동차 후드구조 최적화 설계 연구

조선대학교 대학원

항공우주공학과

이 하 승

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

자연 섬유 복합재를 적용한 자동차 후드구조 최적화 설계 연구

Study on Structural Optimization of an Automobile Hood using Natural Fiber Composite

2016년 8월 25일

조선대학교 대학원

항공우주공학과

이 하 승

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

자연 섬유 복합재를 적용한 자동차 후드구조 최적화 설계 연구

지도교수 공 창 덕

이 논문을 공학박사학위 신청 논문으로 제출함

2016년 8월

조선대학교 대학원

항공우주공학과

이 하 승

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

이하승의 박사학위 논문을 인준함

위원장	호원대학교	교수	박 현 범 (인)
위 원	해군사관학교	교수	오 경 원 (인)
위 원	조선대학교	교수	오 현 웅 (인)
위 원	조선대학교	교수	김 태 규 (인)
위 원	조선대학교	교수	공 창 덕 (인)

2016년 6월

조선대학교 대학원

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

목 차

Ⅰ. 서론 ····· 1

Ⅱ. 친환경 복합재 ····· 10

1 자연섬유 및 수지 선정 ····· 10

1-1 섬유선정 ····· 10

1-2 수지선정 ····· 12

2 제조공법 ····· 13

3 RIM공법 적용 시편 제작 기계적 물성치 평가 ····· 15

Ⅲ. 구조설계 ····· 18

1 대상 구조물 모델링 ····· 19

2 구조 하중 조건 ····· 18

3 구조 최적화 이론 ····· 22

3-1 위상최적화 ····· 23

1). 위상 최적화 문제의 정의 ····· 24

2). 목적함수 정의 ····· 25

3). 밀도 함수 ····· 23

4 위상 최적화 적용 ····· 33

5 사이즈 최적화 ····· 36

6 구조해석 ····· 38

7 모달해석 ····· 48

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

8 구조설계결과 ····· 52

Ⅳ. 충돌해석 ····· 55

Ⅴ. 수지 유동해석 ····· 60

1. 함침성 실험 ····· 62
2. 적층 전략 수립 ····· 66
3. 해석결과 ····· 70

Ⅵ. 시제품 제작 ····· 75

Ⅶ. 구조 시험 ····· 83

Ⅷ. 결론 ····· 87

【참고문헌】 ····· 90

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

LIST OF FIGURES

Fig. 1 Natural fiber composite applications and technologies..... 2
Fig. 2 RTM (or RIM) process [5]..... 5
Fig. 3 Competitive analysis : Natural fiber composites and glass fiber composites[6] 12
Fig. 4 Conceptual view of RIM process 14
Fig. 5 Specimen production process 16
Fig. 6 C-scan of the manufactured speciment 16
Fig. 7 Structural configuration of automobile hood..... 19
Fig. 8 Various load cases 22
Fig. 9 Flow of optimization design..... 33
Fig. 10 Mesh generation of hood for topology optimization 34
Fig. 11 Results of hood topology optimization..... 34
Fig. 12 Remained region(black) and removed region(white)..... 35
Fig. 13 Updated topology optimization model 36
Fig. 14 Searching conditions for size optimization..... 37
Fig. 15 Results of size optimization 38
Fig. 16 Deformation distribution at bending stiffness condition 39
Fig. 17 Loading point deformation at bending stiffness condition 40
Fig. 18 Stress distribution at bending stiffness condition..... 40
Fig. 19 Safety factor distribution at bending stiffness condition 40
Fig. 20 Loading point deformation at torsional stiffness condition 41
Fig. 21 Deformation distribution at torsional stiffness condition..... 42
Fig. 22 Safety factor distribution at torsional stiffness condition 42
Fig. 23 Stress distribution at different skin stiffness conditions..... 43
Fig. 24 Low load normal displacement distribution at skin stiffness

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

condition (a)..... 43
Fig. 25 Low load normal displacement distribution at skin stiffness condition (b)..... 44
Fig. 26 Low load normal displacement distribution at skin stiffness condition (c)..... 44
Fig. 27 Low load normal displacement distribution at skin stiffness condition (d)..... 45
Fig. 28 High load normal displacement distribution at skin stiffness condition (a)..... 45
Fig. 29 High load normal displacement distribution at skin stiffness condition (b)..... 46
Fig. 30 High load normal displacement distribution at skin stiffness condition (c)..... 46
Fig. 31 High load normal displacement distribution at skin stiffness condition (d)..... 47
Fig. 32 High load normal displacement distribution at skin stiffness condition (c) 47
Fig. 33 Safety factor distribution at skin stiffness condition (c)..... 48
Fig. 34 1st Mode shape 49
Fig. 35 2nd Mode shape 50
Fig. 36 3rd Mode shape..... 50
Fig. 37 4th Mode shape 51
Fig. 38 5th Mode shape..... 51
Fig. 39 6th Mode shape 52
Fig. 40 Final design configuration of hood skin and stiffener 54
Fig. 41 Model of adult head configuration 56
Fig. 42 Impact analysis model..... 57

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Fig. 43 Deformation distribution of hood at head impact on hood 58
Fig. 44 Stress distribution of head model at head impact on hood 59
Fig. 45 Procedure of resin flow analysis 61
Fig. 46 Drawing of permeability test zig..... 63
Fig. 47 Permeability tool showing measurement target and HD webcam..... 64
Fig. 48 Resin flow compare between Permeability test and Resin flow analysis..... 66
Fig. 49 Fundamental resin infusion strategies using vacuum pressure 69
Fig. 50 Hood modeling for resin flow analysis and location of resin injection/vent port (1st condition) 70
Fig. 51 Resin flow analysis results at the first resin infusion condition 71
Fig. 52 Resin flow analysis results using the runner (2nd resin infusion condition) 74
Fig. 53 Preforming of flax fabric on the inner hard mold..... 76
Fig. 54 Peel ply settings..... 76
Fig. 55 Setting the runner with injection port on upper side..... 77
Fig. 56 Vacuum operation 77
Fig. 57 setting the runner position 78
Fig. 58 Resin injection 79
Fig. 59 completion of resin injection 79
Fig. 60 Curing at room temperature after resin injection 80
Fig. 61 Finally manufactured protype hood 81
Fig. 62 Comparison of resin infusion pattern between resin flow analysis result and manufacturing process at 20% filling (150 seconds)..... 82

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Fig. 63 Fixed points(A, C, strain gage) and loading point(C) for structural test..... 83
Fig. 64 Structural test rig, strain measuring system and hydraulic loading system..... 84
Fig. 65 Structural test of the prototype hood..... 84
Fig. 66 Location of strain gages..... 85
Fig. 67 Strain analysis results on upper and lower surface 86

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

LIST OF TABLES

Table 1. Properties of natural fibers 11
Table 2. Properties of various resins..... 13
Table 3. Mechanical properties of UD Flax/vinyl ester specimen..... 17
Table 4. Mechanical properties of 2-D fabric flax/vinyl ester specimen..... 17
Table 5. Load case compare between ref. 37 and ref. 38..... 18
Table 6. Natural frequency of flax hood..... 49
Table 7. Design results of hood..... 53
Table 8. EuroNCAP test condition of HIC 56
Table 9 Permeability test results of the 40% fiber volume fraction.....65
Table 10 Resin flow analysis parameter at the first resin infusion condition 71
Table 11 Resin flow analysis parameter at 2nd resin infusion condition..... 72
Table 12 Comparison between analysis results and measured results of the manufactured hood 75
Table 13 Comparison of deformations between the stress analysis results and the structural test results 86

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

NOMENCLATURE

$\hat{A}$	Interval ratio of reinforcement
E_{ijkl}^{0}	Modulus of elasticity of the given materials
e	Element
F	The force vector
f	body force
H_f	Rotation operator
K	stiffness matrix
k_e	Element of stiffness matrix
k	Permeability of the reinforcement
l	Flow Length
m	positive move-limit
P^r	Pressure difference
p	penalty
$r_{\min}$	The radius of the filter
$r_{\min}$	The radius of the filter
U	The displacement vector
t	surface force
u	The actual displacement
u_i	Component of the displacement vector
u_e	Displacement vector elements
x	The design variable vector
αR	Acceleration head model
δu	Virtual displacement
$\epsilon_{ij}(u)$	The actual Strain

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

$\epsilon_{k1}(\delta u)$	Virtual strain
η	damping coefficient
$\rho(x)$	Density design function
λ	Lagrange multiplier
μ	The viscosity of the resin
Ω^{mat}	Space materials
HIC	Head Injury Criterion Requirement

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

ABSTRACT

Study on Structural Optimization of an Automobile Hood using Natural Fiber Composite

Lee, Ha-Seaung
Advisor : Prof. Kong, Changduk, Ph. D.
Department of Aerospace Engineering,
Graduate School of Chosun University

Recently due to increasing interest in eco-friendly materials, studies on fiber obtained from nature have been actively performed to the area of composite. Although the natural flax fiber has less strength than the high strength fiber such as the carbon fiber, it has similar strength to glass fiber. Accordingly, it can be applied as very advantageous composite when an appropriate resin has been selected. In this study, the design of eco-friendly structure using flax fiber was performed after investigation on mechanical properties of natural composite. The selected target structure is a hood of a small compact automobile.

The optimization of structural design using the FEM can be divided largely into size optimization, shape optimization, topology optimization. The size optimization was performed to obtain design parameters including thickness through performing repeatedly the finite element analysis in a given shape. Therefore it has a disadvantage of the degree of freedom falling. The topology optimization was applied to find an optimal model within given constraints by changing the topology.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

In order to evaluate the structural design results of the hood, the structural analysis was performed by the finite element method. The element used for the analysis was the composite shell element PCOMP. Through this analysis, stress, deformation, safety factor, etc. at various load cases with constraints were investigated, and the structural safety was confirmed.

The impact analysis was carried out by modeling the adult head to confirm the head impact safety. In the impact analysis of the hood, stress, displacement and safety were found when an adult male head hits on the hood central region at car velocity of 40km/h.

For manufacturing of the hood using flax fabric/vinyl-ester composites, the RIM(Resin Injection Method) was adopted. In order to finding the proper RIM conditions of the food, the resin flow analysis was performed. The flow analysis is to predict of resin flow filling time and to confirm no dry-patch. The resin flow analysis was performed using the Polyworx FEM flow simulation solver. The permeability coefficient that is an important factor for resin flow analysis was obtained by experimental test. Through performing repeatedly the analysis by changing the location of resin inlet and outlet and vacuum pressure and by adding the runner, the proper resin filling time and pattern were found within the vinyl-ester resin gelling time of 3000 seconds.

The prototype hood was manufactured by applying the RIM based on the resin flow analysis results, it was confirmed that the measured resin infusion time agreed well with the analyzed resin infusion time.

The manufactured prototype was tested in accordance with the structural loading condition, it was confirmed that the structural test results meet similarly with the analysis results.

Through this study, it shows that the automobile hood using the flax fabric/ vinyl ester composite can be used as an alternative structure instead of the currently used metal hood.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Ⅰ. 서론

현재 복합재 구조는 자동차, 항공기, 건축 구조물 등에 금속재를 대처하여 경량화를 통해 비용 절감 효과가 있기 때문에 적용 용도가 급격히 증가하고 있는 추세이다. 그러나 기존의 복합재 구조는 금속재 구조보다 가볍고 내구성이 좋은 장점을 지니고 있지만 운용 수명 이후에 재활용이 거의 불가능하고 100% 분해가 되지 않는 소재가 대부분으로 친환경적이지 않다.

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 연구되었다. 이 연구에서는 헤네켄 섬유로 강화된 HDPE(High Density Polyethylene) 기계적 거동에 관해 지속적으로 연구되었다.[3] M. Zampaloni 등은 케나프 자연섬유의 강화 폴리프로필렌 복합재료에 대한 연구를 하였다. 다양한 분야에 열 성형 될 수 있는 케나프 섬유 강화 폴리프로필렌은 제조에 중점이 된 연구로 기존의 합성 복합 재료에 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.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

현재 자연섬유 복합재는 여러 분야에서 사용되고 있다. 자동차 산업에서는 도어패널, 좌석 등받이, 헤드라이너, 계기판, 트렁크 라이너 등에 사용되고 있고 전자제품에는 모방 일 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. 1는 산업 분야에서 사용되고 있는 자연섬유 복합재 활용 제품과 제조 공법에 대해 나타내고 있다[6].

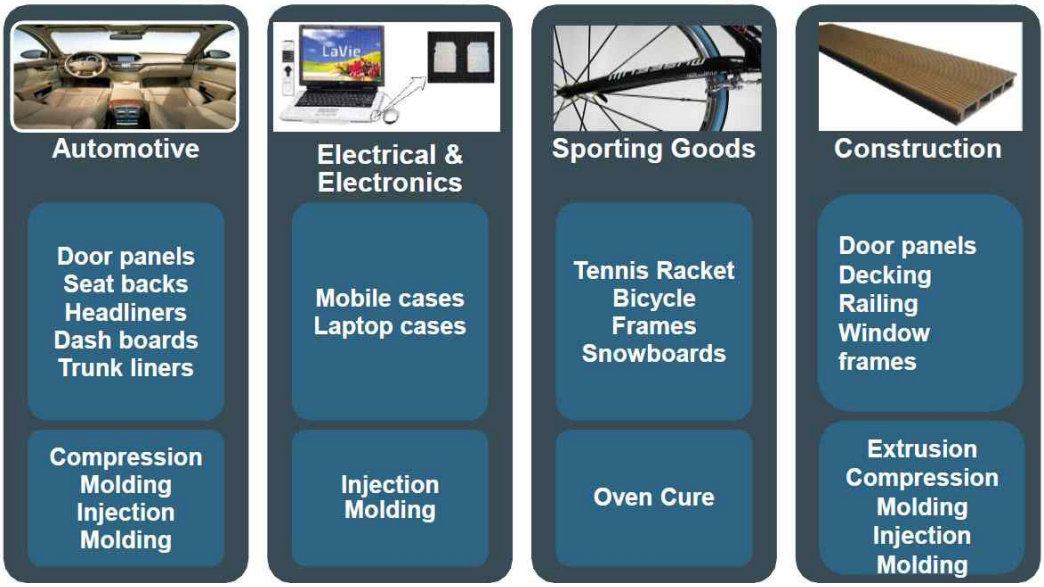


Fig. 1 Natural fiber composite applications and technologies[5]

최근 들어 복합재료 대형 구조물 성형 및 생산성 등의 향상을 고려하여 RTM(Resin Transfer Molding) 공법이 부각되고 있다.

1970년대 중반 미국과 캐나다를 중심으로 RTM 성형기술이 제시되어

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

10년 동안 저렴한 Mold 비용과 인력지향적인 Open Mold작업에서 단순히 상부 mold와 클램프등을 적용한 Closed Mold로의 작업으로 FRP 산업에 일대 혁신을 가져왔다. 그러나 생산성과 경제성에 의해 소량생산의 몇몇 업체를 제외하고는 RTM은 외면되고 다시 Open Mold로의 생산방식이 다시 1980년대까지 이어지게 되었다.

그러나 1990년대 들어와 대량생산의 기초를 마련한 몰드기술과 소재의 발전 등으로 RTM 공정에 새로운 기술이 소개되면서 지금 미국을 비롯 유럽에서 복합재료성형 산업에서는 가장 큰 기술의 주류를 이루고 있다.

따라서 RTM은 Hand Lay-Up, Spray-Up에서 문제화되었던 제품의 불량률, 노동력 집중 그리고 Autoclave, Filament Winding, SMC, BMC 등의 많은 설비투자의 비용, 제작을 위한 규제등의 문제점들을 해결할 수 있는 최신성형공법 주목 받았다. 저가의 설비와 장치로도 선박등과 같은 고품질의 복잡한 형상의 대형제품의 성형이 용이하며 다품종 소량생산에도 적합한 복합재료 성형기술이다.

RTM성형기술은 이러한 장점을 바탕으로 패널, 욕조, 세면대 뿐만 아니라 자동차, 항공기, 선박등 일반 산업에도 응용중이며, 미국과 유럽을 바탕으로 확대되고 있는 추세이다.

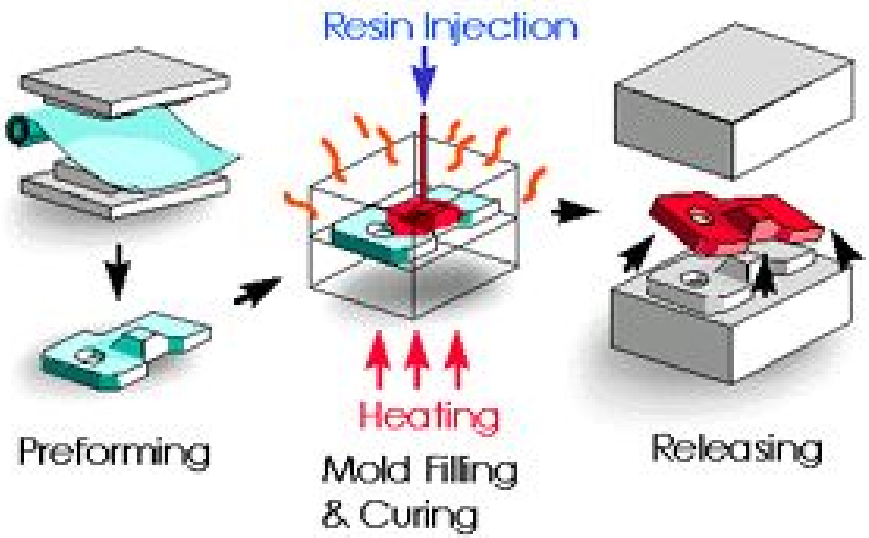
특히 자동차, 항공기 등의 산업 전반에서 경량화에 따른 에너지 절감이 큰 이슈로 대두됨에 따라 선진국에서는 복합재의 사용을 적극 추진하고 있으며, 기존의 성형방법인 핸드 레이업과 오토클레이브 공정에 대한 경제성 및 성능 개선의 필요성이 제기됨에 따라 점차적으로 탈 오토클레이브 (OOA, Out of Autoclave) 공정을 사용하는 추세이다. 보편화된 OOA 공정중 하나인 RTM 또는 RIM 공정은 일본, 유럽, 미국 등의 선진국 복합재 자동차 부품 제조회사에서는 활발히 본 공정을 사용하여 구조물을 제작하고 있는 실정이다.

친환경 소재 적용 RTM 또는 RIM 제작 공법의 현재 개발수준은 국내

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

에서는 최초이며 세계적으로 기술개발이 현재 수행되고 있는 연구 분야이다. 최근 환경오염의 관심 증대로 인해 친환경 소재의 개발이 중요하게 대두되고 있다. 현재 친환경 적용 방안은 유럽을 중심으로 복합재료 선진국에서 개발 중인 핵심 기술로서 본 산학공동기술개발을 통해 국내 기업이 동등한 위치로 도약할 수 있는 기회이다. 본 공정을 적용하여 상품화된 제품은 기존의 오토클레이브 공법으로 제작한 복합재 구조와 유사한 제품의 질을 유지하면서 제작비용이 절감되고 친환경적인 구조물이 제작될 것이므로 상품화 했을 때 동일한 제품에 비해 사업화 경쟁력이 매우 높다.



Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

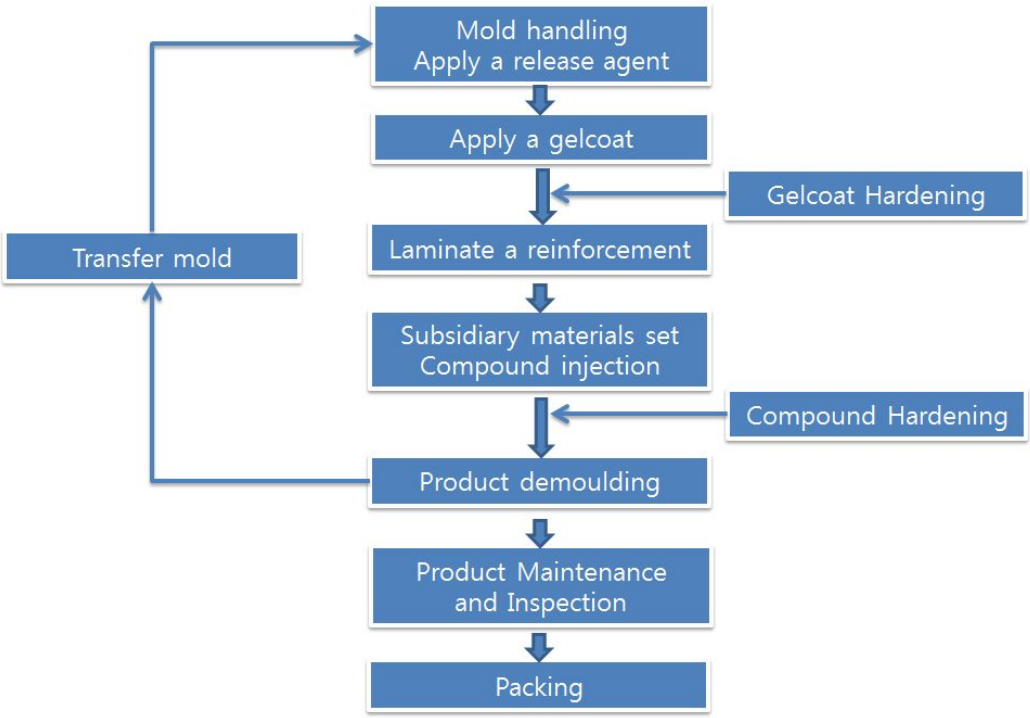


Fig. 2 RTM (or RIM) process [5]

구조최적화에 관한 연구는 주로 구조물의 치수와 단순한 형상을 설계변수로 하는 치수최적화와 형상최적화에 집중되어 왔으며, 많은 구조물의설계에 응용되어 왔다.[6] 그러나 구조물의 치수나 형상만을 설계변수로 하여서는 구조물의 위상변화를 고려할 수 없으므로, 최적화를 통하여 얻어 진해는 초기 설계에 제한된 국부최적해일 가능성이 높다. 이러한 치수 및 형상최적화 기법의 단점을 극복하기 위하여 최적화 과정 중, 구조물의 위상의 변화를 고려할 수 있는 위상최적화 기법의 개발이 요구되어왔다.

구조물의 최적위상에 관한 연구는 주로 해석적인 방법을 통하여 단순한 구조물의 최적위상에 관한 연구가 수행되어 왔다.[7] 해석적인 방법

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

을 통한구조물의 위상최적화는 다양한 목적함수를 가지는 공학문제의 경우에는 그 적용이 불가능하다. 수치해석기법의 발전에 따라, 수치해석기법을 적용하여 이 같은 단점을 해결하고자 하는 연구가 진행되었다. 최적화 과정 중 위상의 변화를 고려하기 위하여 효과적인 수학적인 함수로 구조물의 위상을 표현할 수 있어야 한다. 구조물의 위상 변화를 설계영역 내에서의 재료와 공극으로 이분화하고, 수치해석을 적용한 최초의 실용적인 위상최적화 기법이 Bends와 Kikuchi[8]에 의하여 제안되었다. Bends와 Kikuchi는 위상최적화를 위하여 설계영역을 공극을 갖는 수많은 미세구조로 이루어졌다고 가정하는 균질화법(Homogenization method)을 제안하였다. 각 미세구조내의 공극의 크기와 방향을 설계변수로 하며 재료의 물성은 설계변수의함수로 표현된다. 이 가정을 바탕으로 질량 제한조건 하에서의 컴플라이언스 최소화 문제를 최적조건법(Optimality criteria method)을 이용하여 수행하였다. Hassani와 Hinton은 균질화법을 이용한 위상 최적화 기법을 정리하였다.[9-11] Díaz와 Bendsøe[12]는 단일하중 조건이 아닌 복합하중 조건에서의 위상최적화를 균일화법을 적용하여 수행 하였다. 컴플라이언스 최소화 문제뿐만 아니라, 진동문제에서의 고유진동수를 목적함수로 하는 위상최적화 또한 수행되었다[13]. 균질화법의 경우에는 최적위상의 경계가 분명하지 않은 단점이 있다. 따라서, 최적위상으로부터 구조물을 실제로 제작하는데 어려움이 있다. 균질화법을 기초로 하여 재료 물성치를 밀도의 함수로 가정하고, 위상최적화 문제를 최적의 밀도분배 문제로 치환한 SIMP법(Solid Isotropic Material with Penalization model method)이 Bendsøe 와 Sigmund에 의하여 제안되었다.[14-15] SIMP법은 설계영역내의 각 요소의 가상 상대밀도를 설계변수로 한다. 상대밀도의 함수로 강성행렬을 가정하여 목적함수를 최소화하는 최적의 상대밀도 분포를 얻게 된다. SIMP법은 균질화법에 비하여 수식화가 간단하며 적은 계산시간을 소요되는 장점 때문에 많은 공학문제에 적용되어 왔다.[16-22]

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Yang과 Chuang[16]은 SIMP법과 순차 선형계획법을 2차원 및 3차원 구조물의 위상최적화를 수행 하였다. Sigmund[17]는 MEMS와 같은 compliant mechanism의 위상최적화를 수행하였다. 응력제한조건이 부과된 구조물의 질량 최소화 문제 또한 구조물의 설계관점에서 매우 중요하다. SIMP법과 MMA(Method of Moving Asymptotes)를 사용하여 위상최적화를 Duysinx 등[18]이 수행하였다. Pedersen[19]은 평판 구조물의고유진동수를 최대화하는 위상최적화를 수행하였으며, Sigmund[20]는 multiphysics actuator의 위상최적화를 수행하였다. SIMP법이 위상최적화에 아주 효율적인 도구이기는 하나, 본질적인 문제점들 또한 존재한다. 체크보드패턴, 최적해의요소 의존성(Mesh-dependency), 국부 최적해(Local minima)등이 가장대표적인 예이다.[21-22] 이러한 문제점들을 해결하기 위하여 크게 2가지 종류의 제약법이 위상최적화에 적용되어 왔다.[23-29] 민감도 필터링[28]이나 밀도 필터링[24-26]과 같은 필터링 기법과 페리미터조절[27-29] 및 기울기제한과 같은 제한조건법이 있다. 이외에도 Yoon과 Park[30]은 밀도 재분배법을 제안한 바 있다. 위 방법들은 적용을 위한 변수들이 많고 그 변수에 따라서 최적위상이 달라지는 단점이있다. 이러한 문제를 본질적으로 극복하기 위하여 SIMP 법과 다른 위상최적화 기법들이 새로 제안되었다. Xie와 Steven[31]은 진화적 구조최적화(Evolutionary Structural Optimization, ESO)법을 제안하였다. ESO 법은 설계영역 내에서 특정 요소의 응력이 상대적으로 작다면, 재료가 비효율적으로 사용된 것으로 간주하고, 낮은 응력의 요소들을 제거하여 최적해를 얻는 방법을 사용한다. Zhao[32]은 요소를 제거하는 기준으로 응력대신에 변형에너지를 이용하여 최적화를 수행하였다. ESO 법의 경우, 제거된 요소가 최적화 과정 중 다시 설계영역에 추가될 수 없다는 단점이있었다. 따라서 얻어진 최적해가 전역 최적해가 아닐 수도 있다. Querin등[33]은 요소의 제거와 추가가 가능한 양방향 진화적 구조최적화(Bi-directional Evolutionary Structural Optimization, BESO)기

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

법을 안하였다. 하지만, ESO법이나 BESO법은 민감도해석을 수행할 필요가 없으므로 적용이 쉬운 반면에, 최적 설계과정에서 결정해야 하는 변수나 요소의 제거 기준에 따라서 최적해가 변화하는 단점이 있다. 레벨셋(Level set)함수를 바탕으로 하는 레벨셋 위상최적화(Level set topology optimization)기법이 제안되었다.[34-36] 레벨셋 위상최적화기법에서는 설계변수로 재료의 경계를 모사하는 레벨셋 함수를 선택하고, 이 경계선의 이동을 형상민감도에 따라 조절하여 최적해를 얻을 수 있다. 따라서, SIMP법이 가지는 체크보드패턴 문제나 최적해의 모호한 경계에 따른 문제로 부터 자유로운 최적해를 얻을 수 있는 장점이 있다. 하지만, 일반적으로 SIMP법에 비하여 더 많은 계산시간이 필요하다는 단점이 있다. 초기 레벨셋 위상최적화에서는 설계영역에서 초기에 존재하는 내부경계의 위치와 개수에 따라서 최적해가 달라지는 단점이 존재하였다. 이를 극복하기 위하여 Park과 Youn은 변형에너지 분포에 따른 내부경계생성(Inner-front creation) 기법을 제안하여 초기 레벨셋 함수와 무관한 최적해를 얻을 수 있는 방법을 제안한 바있다. 위상최적화기법의 경우, 초기 설계영역의 크기와 형상에 따라서 얻어지는 최적해가 제한되는 단점이 존재한다. 만약, 최적화 과정 중 위상변화에 따라 설계공간을 적응적으로 변화시킬 수 있다면, 최적해를 얻기 위한해석시간을 크게 감소시킬 수 있을 뿐만 아니라, 고정된 설계영역에 의한 최적해의 제한 도 해결할 수 있다. Kim과 Kwak[37]은 설계공간 또한 설계변수로 고려하여 수치적 연속화 기법(Numerical continuation scheme)을 적용하여 위상 최적설계를 수행한 바 있다. 또한, Chang과 Youn[38]은 구조물의 위상을 재료조각(Material cloud)으로 표현을 하고 재료조각의 크기와 위치를 최적화의 설계변수로 하여 최적화를 수행하였다. ESO법, 레벨셋 위상최적화, 수치적 연속화 기법 및 재료조각법등은 많은 장점이 있지만, SIMP법에 비하여 그 적용이 쉽지 않거나 효율성이 떨어지므로 SIMP법이 실제 공학문제에 널리 적용되고 있다.[39]

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

자동차와 보행자의 출돌에 의한 머리상해에 대한 연구는 Courville가 임상시험을 통해 2.5-50 μs 시간에서 전두엽에서의 합성가속도(Resultant acceleration)를 WSTC(Wayne State Tolerance Curve)를 이용하여 근사치로 제시하였으며 [40], 임계값은 1000이하로 한정지었다. 하지만 실제 결과와의 차이 때문에, 미국연방교통안전청(National Highway Transportation Safety Authority:NHTSA)에 의해 머리 상해치(Head Injury Criterion:HIC)라는 수정된 기준으로 대체되었다.[41]

보행자 머리상해를 감소시키기 위해 선행된 연구는 크게 차대 보행자 사고 발생 이전에 작동하는 능동적 안전시스템(Activesystem)과 사고 발생 이후에 작동하는 수동적 안전시스템(Passive system)으로 구분할 수 있다.

수동적 안전시스템은 차량 정면에 충돌에너지를 흡수할 수 있는 재질이 나 형태, 기구 등을 차량에 적용하는 방식이다. 재질에 대한 연구는 3가지 타입(steel,aluminum,carbonfiberpolycarbonate(CF/PC))의 후드를 이용 한 충돌 실험 연구와[42-45] foam composite material의 두께 변화(5mm, 10mm)에 따른 머리 상해치 비교 연구가 있다[46]. 형태에 대한 연구는 후드와 엔진룸 사이의 간격과 yield strength를 분석한 연구와[47] 차량 전면형태 변화(SUV,Pickup truck,Sedan)에 따른 머리 상해치를 비교한 연구가 있다.

본 연구에서는 친환경 소재로 다양하게 연구되고 있는 아마/비닐에스테르(Flax/vinyl ester) 복합재료에 대한 물성치를 평가하여 소형 자동차 본넷의 최적화 구조 설계 및 해석을 수행하였다. 아마/비닐에스테르 적용 복합재료의 제조 방법은 경량화와 대량 생산에 적합한 제조공정인 RIM을 적용하였다. 특히 성인 머리 모형을 모델링하여 패널에 충돌해석을 하여 안전성을 평가하였다. 구조 설계 결과를 적용하여, 수지 유동해석을 수행 하였으며, 이를 기반으로 시제품 제작 및 구조 시험을 통해 구조안전성을 검토하였다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Ⅱ. 친환경 복합재 및 제조공법의 선정과 기계적 물성치 평가

1. 자연섬유(Flax) 및 수지(Vinyl ester) 선정

1-1. 섬유 선정

복합재료로 적용되는 자연 섬유는 크게 유기물과 무기물로 구분이 된다. 유기물은 식물의 섬유가 대표적인 복합재료이고 무기물은 광물 섬유 등으로 분류된다. 본 연구에서 다루어지는 자연 섬유는 식물 섬유인 유기물로서 그 종류를 살펴보면 아마(Flax), 대마(Hemp), 황마(Jute), 용설란 종류인 사이잘(Sisal), 헤네켄(Henequen), 야자열매 겉껍질인 코이어(Coir) 등이 대표적인 자연 섬유로 사용되고 있다[1-5]. 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. 또한 기계적 강도 및 강성을 비교한 결과 아마 섬유가 우수한 것으로 검토되었다. 표 1에 대표적인 자연 섬유의 물성치를 제시하였다[48-50]. 따라서 본 연구에서는 아마 섬유를 자연 섬유 구조물에 적용할 재료로 선정하였다. 아마 섬유는 진동 흡수 능력도 뛰어나며 가격이 다른 섬유와 비교해 저렴하고 구매가 용이하다. 현재 유럽에서 아마 섬유는 많이 생산되고 있으며, 프랑스가 공급량의 80%를 점유하고 있다.

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 무게

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

를 줄일 수 있는 낮은 비중, 제작비용을 줄여야 하는 낮은 가격 등 여러 가지 조건을 갖추어야 자동차 구조물에 사용 가능하다.[48]

Table 1. Properties of natural fibers

Fiber type	Density[g/cm3]	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

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 수명이후에 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 가격이나 무게절감, 재활용성 등 다른 분야에서는 자연섬유가 뛰어나다.[49]

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. 3는 자연섬유와 유리섬유와의 특성 비교 및 자연 섬유의 특성을 비교한 그림이다[6].

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

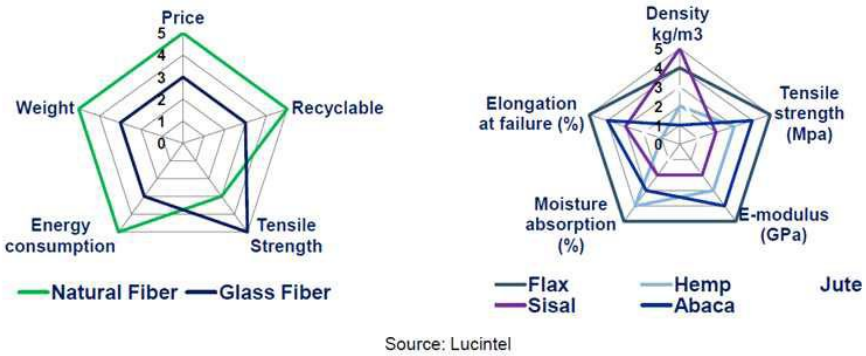


Fig. 3 Competitive analysis : Natural fiber composites and glass fiber composites[6]

1-2 수지 선정

자연 섬유에 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 열대 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 수지는 기존의 탄소, 유리 섬유 복합재에 많이 사용되고 있고, 자연 섬유 복합재에도 연구를 위하여 다양하게 사용되고 있는데 단점은 상대적으로 가격

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

이 비싸서 상용화에는 좋지 않은 것으로 분석되었다. 본 연구에서는 비록 제반물성치가 에폭시에 비해 다소 떨어지지만 가격이 저렴한 비닐 에스테르를 선정하였다.

Table 2. Properties of various resins

Property	Poly-ester	Vinyl-ester	Epoxy	Phenolic
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

2. 제조공법의 선정

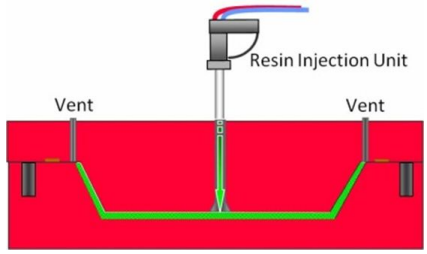
RTM은 성형품 구조 중에서 섬유로 구성되는 부분인 프리폼(Preform)을 미리 제작 해두고, 그것을 금형에 장착해서 수지를 주입하는 것으로 복합재료를 성형하는 방법이다. 점도가 낮은 고분자상의 수지를 사용하면, 저압 0.7MPa 정도로 수지 주입이 가능하기 때문에 성형장치와 금형이 간단하게 되고 사출 성형이나 압축 성형에 비교해서 성형 비용을 절감할 수 있다[6].

본 연구에서는 제작 공법으로 VARTM(RTM-Light) 공법을 개선한 RIM 성형법을 채택하였다. RIM 공법은 양쪽 면이 모두 견고한 금형으로 되어 있는 RTM이 수지 수입에서 가압하는 방식과는 달리 수지주입에 가압압력 대신 진공압력만 사용하므로 한쪽 면은 견고한 금형을 사용하고 다른 면은 진공과 함께 유연한 금형을 사용하여 압력 차를 이용하여 금형 내부에 적층된 프리폼에 수지를 신속하게 함침시켜 성형하는 방법

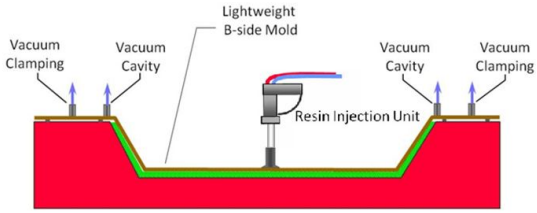
Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

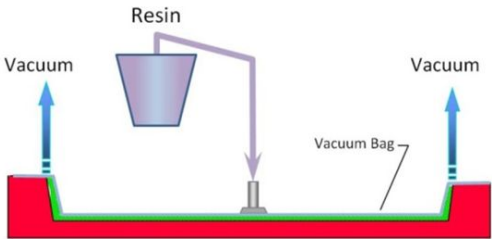
이다. 본 공법은 진공의 흡입력과 진공 면에 가해지는 수직 압력을 이용하여 금형 내부의 기포를 줄여 섬유 체적율을 높이면서 수지 충전시간을 짧게 할 수 있어 대형 구조물 제작에 손쉽게 적용이 가능한 장점이 있다. 본 공법은 기존 RTM 성형과 오토클레이브 공법에 비해 성형비용이 적게 들면서 수적층 공정보다 매우 좋은 품질의 제품 성형이 가능한 기술로 최근 각광을 받고 있는 성형법이다. 대표적인 수지 주입방법 개념도를 Fig. 4에 명시하였다.



Resin transfer moulding



RTM- Light



Resin infusion Moulding (RIM)

Fig. 4 Conceptual view of RIM process

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

3. RIM 공법 적용 시편 제작 및 시편 기계적 물성치 평가

본 연구에서 제작 공법으로 채택된 RIM공법을 활용하여 아마/비닐에스테르 복합재 시편을 제작하고 기계적 특성을 평가 하였다. 시편 제작에 적용된 아마 섬유는 영국의 Composite Evolution 에서 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.

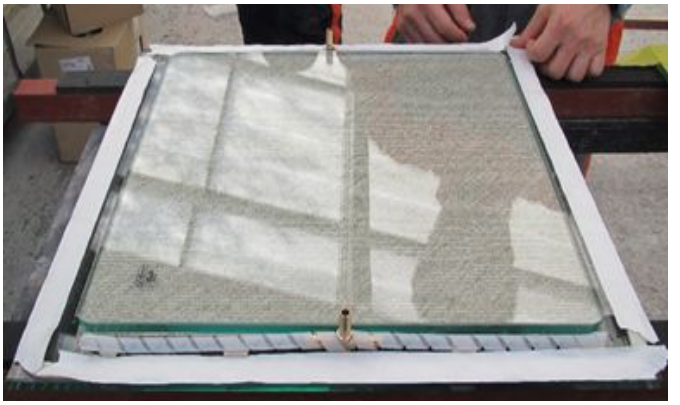
적층된 아마 섬유에 수지를 주입하고 진공상태를 유지하면서 시편을 성형하였다. 시편 성형 온도는 80℃ 온도에서 2시간 후 120℃ 온도로 1시간 유지하여 성형하였다.

재단된 섬유를 적층후 수지유로 확보를 위한 필프라이(Peel Fly) 역시 적층 하였다. 수지 주입구와 배출구에는 균일한 수지 흐름 선단을 위해 스파이럴 튜브(Spiral tube)를 적용였으며, 진공상태 유지후 수지주입 실시하였다. 시편의 제작 과정을 Fig. 5에 명시하였다.

제작 후에 시편의 결함 유무를 확인하기 위해서 C-Scan 검사법이 적용되었다. Fig. 6은 2-D Fabric 아마 복합재 시편의 C-Scan 시험 결과이다. 어두운 부분이 결함 부분인데 섬유의 내부에서 결함이 없는 것으로 확인 되었으며, 기공도를 검토한 결과 5% 이하인 것으로 검토되었다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



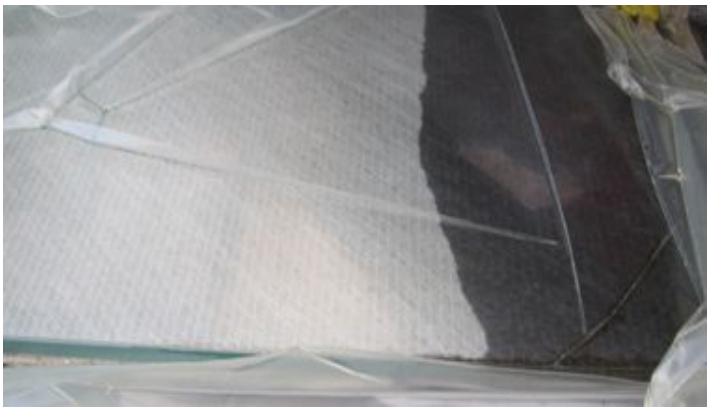


Fig. 5 Specimen production process

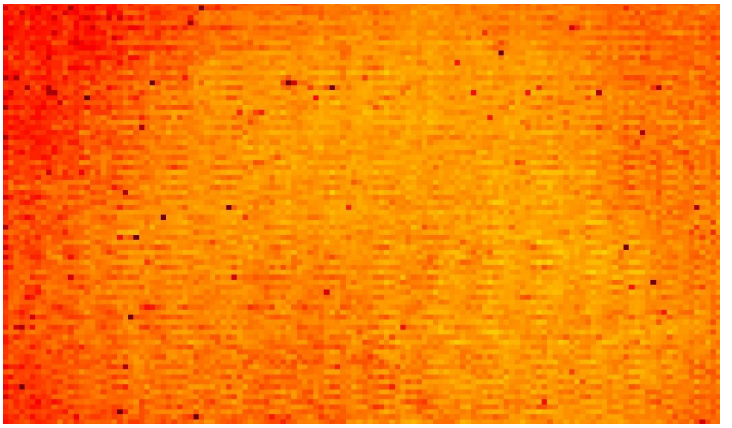


Fig. 6 C-Scan of the manufactured specimen

dCollection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

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

Table 3. Mechanical properties of UD flax/vinyl ester specimen

Test type	Strength (MPa)	Modulus (GPa)	v
Tension	227.2	22.3	0.42
Flexure	252.1	14.3	
In Plane Shear	27.6	-	

Table 4. Mechanical properties of 2-D fabric flax/vinyl ester specimen

Test type	Strength (MPa)	Modulus (GPa)	v
Tension	76.74	9.14	0.18
Flexure	108.72	6.75	
In Plane Shear	36.19	1.66	

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Ⅲ.최적화 구조설계

본 기술개발에서 대상 구조물은 자동차 구조물의 후드(또는 본넷)로 K사의 소형 모델을 선정하여 최적화 설계를 수행하였으며, 기존의 금속재 구조물과 비교하였다. 기계적 물성치는 앞서 분석된 아마 섬유 분석 결과를 적용하였다.

선행 연구에서는 설계 하중은 자동차가 200km/h의 속도로 운행 했을 때 작용하는 공력하중을 분석하여 설계를 수행하였으나, 이번 연구에서는 실제 자동차 메이커인 H사와 G사의 후드 구조 하중 조건을 적용하였으며, 두 메이커의 구조 하중조건 비교를 Table 5에 나타내었다. [51 - 53]

참고문헌들을 참조하여 굽힘강성, 비틀림강성, 저하중외판강, 고하중외판강성 총 4가지의 하중 조건을 선정하였으며 굽힘강성 및 비틀림강성의 하중조건에 부합하는 위상 최적화 구조 설계를 통해 내부 지지구조물의 형상을 결정하고, 사이즈 최적화를 통해 4가지의 하중조건을 부합하는 보강구조물(stiffener)와 스킨의 두께를 확정하였다. 이후 구조 해석을 통해 안정성을 검증하였다.

Table 5. Load case compare between ref. 37 and ref. 38

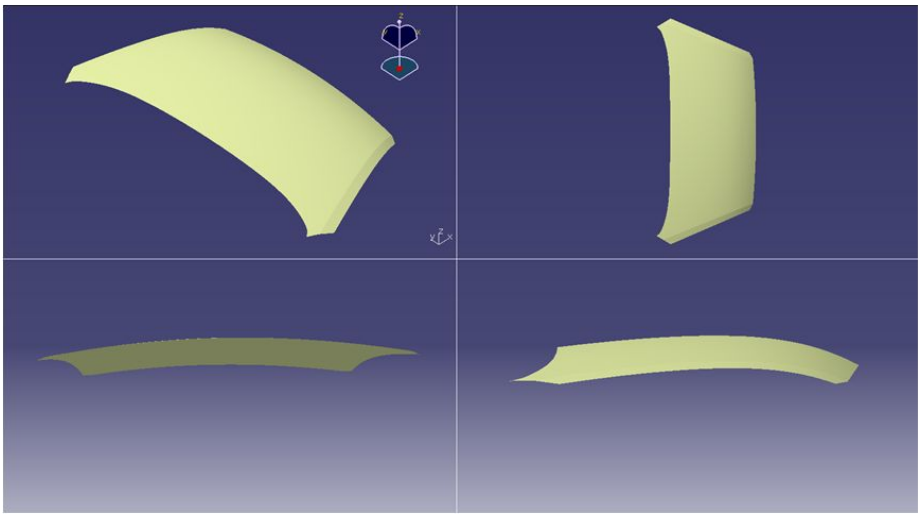
Carmaker	Bending stiffness	Torsional stiffness
H	3mm or less	15mm or less
G	Compared with other cars	150 Nm/deg

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

1. 대상 구조물 모델링

대상 구조물 본넷 설계 형상은 CATIA를 활용하여 모델링 하였으며, 이를 기반으로 구조 해석 모델링으로 변환하였다.



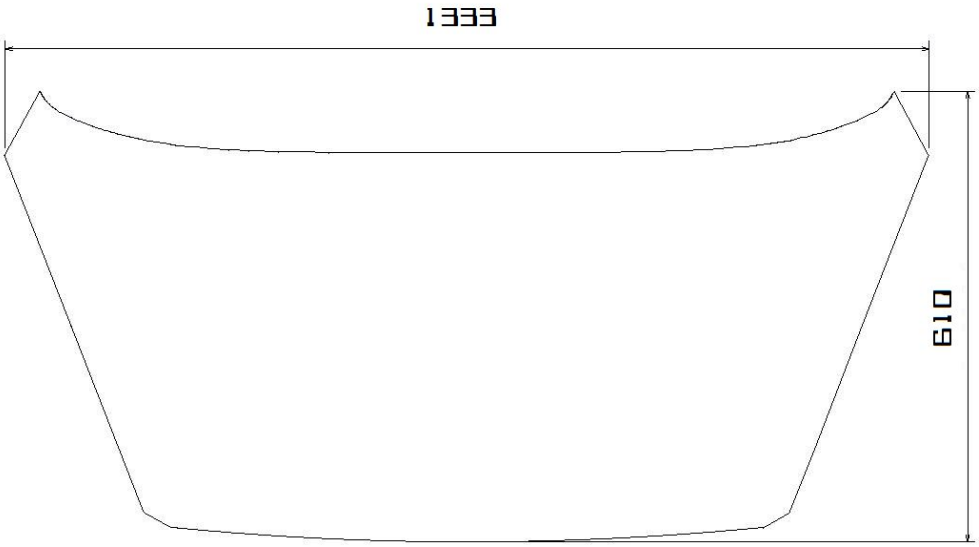


Fig. 7 Structural conFiguration of automobile hood

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

2. 구조 하중 조건

1-1. 굽힘 강성 조건

Fig 8(a)에서와 같이 Hinge 부분 고정 후 latch부분에 100N의 하중을 가한 후 하중점의 수직 변위가 3mm 이하임을 확인한다.

1-2. 비틀림 강성 조건

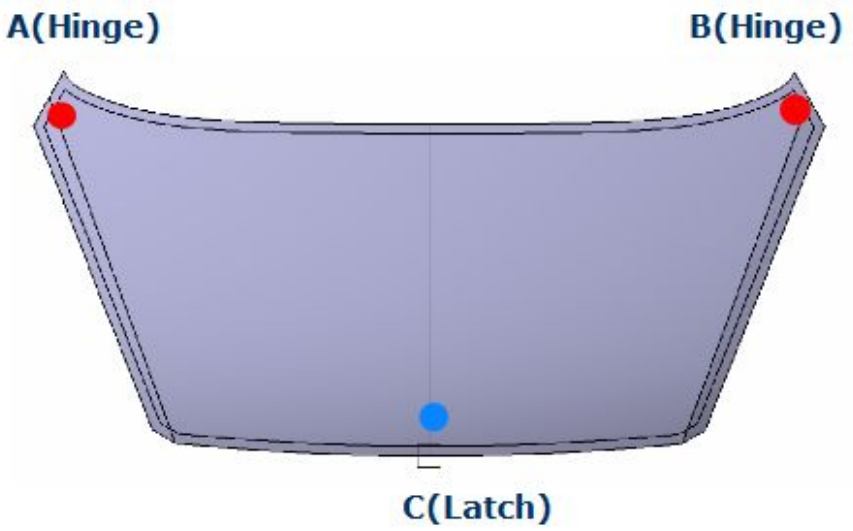
Fig 8(b)에서와 같이 Hinge와 latch부분에 고정후 왼측 앞 부분의 아랫방향 변위 고정후 우측 앞 부분에 100N의 하중을 가하여 Hood Torsional rigidity가 150Nm/deg 이상임을 확인한다.

1-3. 외판 강성 조건 (2종)

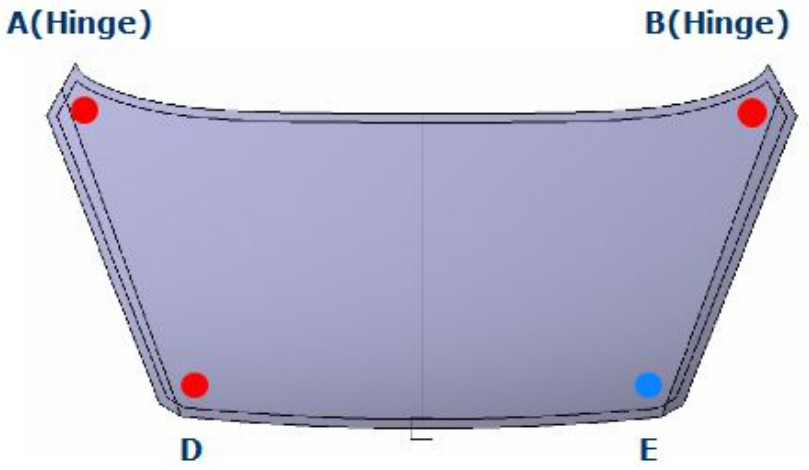
Fig 8(c)에서와 같이 Hinge와 latch부분에 고정후 약할 것이라 판단되는 부분에 수직으로 50N이하의 하중에서는 강성도가 0.05mm/N, 200N에서는 수직 변위가 15mm 이하가 되며 파손유무를 확인 한다.

dCollection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



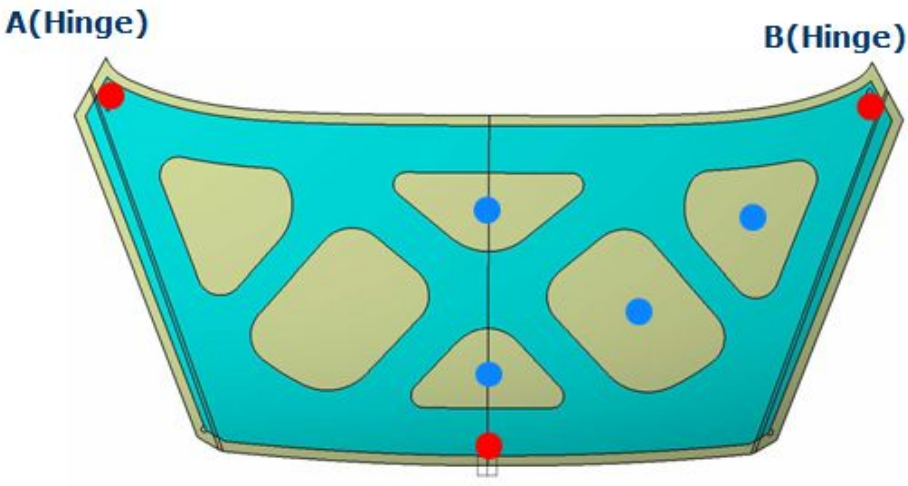
(a)Bending stiffness condition



(b)Torsional stiffness condition

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



(c) Skin stiffness condition

Fig. 8 Various load cases

3. 구조 최적화 이론

최적화 문제는 크게 치수최적화, 형상 최적화, 위상최적화로 나누어 볼 수 있다. 이런 최적화 기법은 1980년 후반부터 MSC/NASTRAN ANSYS등 FEM 소프트웨어를 통해 이용되어 왔다. 또한 GENISIS와 같은 전문화된 구조 최적화 소프트웨어는 보다 진보된 기술과 효율을 보이며 지난 10년간 산업에서의 최적화 기술 응용에 지속적으로 주도하고 있다. 특히 최근에는 자동차 산업등에서는 사전 설계단계시 효율적인 설계를 위해 위상 최적화 어플리케이션의 빠른 성장중이다.

치수 최적화는 고정된 기하학적 형상에 대하여 보의 단면적, 판의 두께, 관성모멘트등을 설계 변수로 여 이들 치수를 변화 시키면서 유한요소해석을 반복적으로 수행하여 최적의 치수를 얻을 수 있다. 이는 간단한 최적화에 속하지만 형상을 변화시키지 못하며, 주어진 형상 내에서만

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

최적화를 수행하므로 구조물이 변화할 수 있는 자유도가 많이 떨어지는 단점을 가지고 있다.

형상 최적화는 구조물의 연속적인 경계면 형상을 설계변수로 하는 최적화 기법으로, 기하모델을 유한요소 모델로 생성하여 최적화 과정동안 유한요소 절점의 자유도를 변화시키면서 최적화 형상을 만들게 된다. 다만, 유한요소 모델이 많이 변화될 경우 요소변형에 따른 오차가 발생되므로 해석시 주기적으로 요소 재생성이 꼭 필요하다. 치수 및 형상 최적화는 초기 위상이 결정되고 난 후 최적화 수행이 가능하며, 최적화 과정동안 구조물의 위상은 고정된 것으로 가정한다. 이는 최적화로 구한 치수 및 형상이 설계자의 경험이나 직관력으로 결정한 초기위상에 많은 제한을 받게 됨을 뜻한다. 따라서 설계자의 최기 추축이 잘못되었을 경우 올바르지 못한 최적화 과정을 진행하게 될 수 있으며 처음부터 재설계해야 하는 경우가 발생할 수 있다.

위상 최적화는 제품으로 가공 할려는 모재의 형상을 다공성 구조의 모델로 생성한 수 빈 공간을 채워 밀도를 증가시키는 원리로 구조물의 형상과 크기를 동시에 변화시키는 기법이다. 이는 재료가 있는 부분은 1, 재료가 없는 부분은 0으로 표현하는 방식으로 구조물의 형상을 직접적으로 표한하여 궁극적으로는 구조물에 사용된 재료를 재분배하여 구조물의 새로운 위상을 찾아내는 기법이다. 특히 초기형상이 결정되지 않는 구조물의 시제품을 개념설계 할 수 있다는 점에서 매우 유용하게 사용될 수 있다. [54][55]

1-1.위상최적화 (Topology Optimization)

위상학(Topology)은 공간의 일 대 일, 연속 그리고 그 역도 연속인 함수에 대하여도 불변인 성질을 연구하며, 사물의 본질적인 형태를 다루는

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

학문이다. 일반적으로 공간을 추상적으로 정의하기 위해서 나온 것이 위상(位相)이란 개념이며, 집합에 의해 정의된다. 위상최적화란 구조물의 위상학적 기하형상을 주어진 조건에 가장 적합한(Optimal)형태로 만드는 일련의 과정을 의미한다. 이 문제에서 최적이라는 개념은 경우에 따라 다르게 사용되며, 일반적으로는 목적함수(Objective function)의 값을 극대화하거나 극소화하는 상태를 의미한다. 따라서 목적함수를 극대화하는 위상학적 기하형상을 설계하는 일련의 과정을 위상최적화라 정의할 수 있다.위상최적화는 구조물의 위상에 의존하는 형상최적화의 제한적인 문제를 가지고 있지 않으며, 최적화 과정 동안에 어떠한 형상과 위상의 정보도 관여하지 않기 때문에 형상최적화와 구별된다. 즉 위상최적화는 최적화 수행 시 초기 위상의 정의가 필요 없고, 일반적으로 연속적인 설계영역을 이산화하여 각 요소안의 설계변수들이 밀도의 형태로서 재료적인 내용을 포함하도록 가정한다.

1) 위상 최적화 문제의 정의

일반적인 구조물의 최적화 기법은 그 구조물의 형상을 표현하는 독립변수 n개를 설정하고 목적함수의 값을 극대화하는 n개의 변수 값을 결정하는 방법이다. 따라서 복잡한 구조물일수록 그 모양을 표현하기 위한 변수의수가 늘어나게 된다. 그러나 이러한 방법은 미리 구조물 형상에 대한 자유도를 n개로 설정한 것으로, 그 이외의 더욱 효율적인 구조를 고려하는 것이 불가능하다는 단점이 있다. 이와는 다르게 위상학적 기하형상을 최적화하기 위해서 본 연구에서는 'Material Distribution Problem(MDP)'를 이용한다. MDP는 임의의 설계영역을 정하고, 그 영역을 유한요소로 분할한 뒤, 각 요소의 밀도를 위상으로 표현하는 문제이며, 정의된 영역에서 목적함수를 최대화 또는 최소화 시키는 밀도분포

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

함수를 결정하는 문제이다. 즉 설계영역의 전체적인 밀도분포가 물체의 형상을 표현해 주는 것이다. 이상적인 최적화는 그 결과로 설계 영역의 밀도 함수 값이 0또는 1이 되는 설계이다. 밀도 함수의 값이 1이 되는 곳에는 질량이 존재하고 밀도 함수의 값이 0이 되는 곳은 질량이 존재하지 않는 빈 공간으로 설계한다. 본 연구에서 위상최적화의 목표는 주어진 하중을 만족하는 강성에서 최소 질량을 갖는 구조물의 위상을 찾는 것이다. 강성이 높을수록 구조물의 변형이 작게 생기고 에너지를 적게 흡수하므로 컴플라이언스(compliance)의 값이 작게 된다. 따라서, 목적함수는 최소 변형률에너지 또는 최대 강성에너지이며, 수렴조건은 재료의 질량, 즉 사용되는 재료의 한계이며 설계변수로는 밀도를 사용하였다.

2) 목적함수 정의

여러 가지 표면력(surfaceforce)과 체력(bodyforce)등의 외력(external force)이 작용하는 기본 공간을 생각한다. 이 공간의 일부를 채우는 동시에 주어진 조건을 만족하면서 외력에 최대로 저항하는 구조물을 설계하는 문제는 적절한 $E_{ijkl}(x)$를 찾는 것으로 정의할 수 있다. 위 문제는 일반구조물의 정역학적 평형 조건에 대한 등가 에너지 원리인 가상변위의 원리로 설명할 수 있다.가상변위의 원리는 정역학적으로 평형상태에 있는 경우에, 외력에 의한 외적가상일과 내력에 의한 내적가상일이 같다는 것이다. 위 기본 공간에서 내적가상일은 다음 식 (1)과 같이 정의 된다.

$$a(u,v) = \int_{\Omega} E_{ikkl}(x)\epsilon_{ij}(u)\epsilon_{ij}(\delta u)d\Omega \qquad (1)$$

여기서, E_{ijkl} : Modulus of elasticity of the given materials

u : Actual displacement

δu : Virtual displacement

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

$$\epsilon_{ij}(u) = \frac{1}{2}(\frac{u_i}{x_j} + \frac{u_j}{x_1})$$: Actual Strain

$\epsilon_{k1}(\delta u)$: Virtual strain

외적가상일은 다음 식 (2)와 같다.

$$c(u) = \int_{\Omega} f_i \delta u_i d\Omega + \int_{\Gamma_T} t_i \delta u_i ds \tag{2}$$

여기서, f : Body force

t : Surface force

u_i : Component of the displacement vector

내적가상일과 외적가상일이 같으므로 다음 식 (3)과 같이 표현된다.

$$\int_{\Omega} E_{ijkl}(x)\epsilon_{ij}(u)\epsilon_{kl}(\delta u)d\Omega = \int_{\Omega} f_i \delta u_i d\Omega + \int_{\Gamma_T} t_i \delta u_i ds \tag{3}$$

적절한 탄성계수 함수를 찾는 문제이므로
$E_{ijkl}(x)$는 다음과 같이 찾을 수 있다.

$$\min_{u \in U, E} c(u) = \int_{\Omega} f_i u_i d\Omega + \int_{\Gamma_T} t_i u^i ds \tag{4}$$

식 (4)는 본 문제에서의 목적함수로, 함수 c(u)는 주어진 하중(외력)으

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

로 발생한 변형에너지이며, 이를 최소화 하는 것이 목적이다. 즉, 구조물 이주어진 조건에서 최대 강성(최소 변형)을 가지도록 하는 것을 의미한다. 위 문제를 유한요소법의 이산화(discretization)를 이용한 벡터식으로 표시하면 식(5)와 같다

.

$$\min_u (f^T u) \quad s.t. \quad Ku = f$$

여기서, K : 전체 강성행렬 (K = $(K = \sum_{e=1}^{N} K_e(E_e))$

(5)

f : External force

u : Displacement

위상최적화 방법(MDP)은 밀도 분포의 경계를 이루는 최적 형상과 각 요소 안에 할당된 밀도 값에 의한 최적 위상으로 표현된다. 하지만, 그 해는 요소형태에 기초한 회색 패턴의 온(on)-오프(off)로 구성되기 때문에 재료와 재료가 없는 부분이 선명하게 드러나 재료 분포의 불연속성을 가지게된다. 먼저, 주어진 영역을 유한개의 요소로 나누고, 다음의 식으로 각 요소를 material과 no material로 구분한다. material은 1로 표시되고, no material은 0으로 표시된다.

$$E_{ijkl} = 1_{\Omega^{mat}} E^{0_{ijkl,}} 1_{\Omega^{mat}} = \begin{cases} 1 \text{ if } x \in \Omega^{mat} \\ 0 \text{ if } x \in \Omega \setminus \Omega^{mat}, \end{cases} \tag{6}$$

$$\int_{\Omega} 1_{\Omega mat} d\Omega = Vol(\Omega^{mat}) \leq V$$

여기서, Ω^{mat} : Space materials

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

실제로 0또는 1을 정하는 문제에는 연속함수를 적용하기 어렵고, 불연속 함수는 미분 값이 존재하지 않기 때문에 목적함수의 극대 값을 결정하는 것이 어렵다. 따라서 연속함수를 사용하면서 0과 1에 가까운 결과를 내는 방법이 필요하다. 실제로 최적화를 수행하기 위해서 많이 사용하는 방법은 penalized, proportional stiffness model이다. 설계영역에서 하나의 고유한 탄성계수가 균일하게 분포되는 것이 아니라 요소들의 탄성계수 집단으로 표현된다. 요소들의 탄성계수는 설계변수인 밀도에 의존하여 요소 강성에 영향을 미친다. 이러한 점은 최적화 단계에서 구조해석 시에 유한요소해석과 같은 요소단위의 해석을 위해 적합하다. 즉, 식 (6)대신에 다음의 식(7)과 식(8)을 사용 하며, 탄성계수와 밀도와의 관계는 식 (7)과 같다

$$E_{ijkl}(x) = \rho(x)^p E^0_{ijkl}, p > 1 \tag{7}$$

$$\int_{\Omega} \rho(x) d\Omega \leq V; 0 \leq \rho_{\min} \leq \rho(x) \leq 1 \tag{8}$$

여기서, $\rho(x)$: Density design function

E^0_{ijkl} : Modulus of elasticity of the given materials

p : Penalty intervening variable

여기서 연속함수인 x 를 결정하여 바닥판의 최적 위상을 찾는다. 즉, 단일 재료를 사용한 단면의 경우 본 문제에서의 탄성계수 결정이 밀도함수 x 의 결정으로 모두 정해지는 모델을 이용한다(식 (7)).

즉, $E_{ijkl}(\rho = 0) = 0, E_{ijkl}(\rho = 1) = E^{0_{ijkl}}$ 이다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

벌칙매개변수 p 는 1보다 큰 정수로 밀도함수의 값이 0과 1근처로 움직이도록 하는 역할을 한다. 벌칙매개변수 p는 다음의 식(9)로 구하며 보통 3 을 사용한다.($\nu = 0.3$일 때)

$$p \geq \max \frac{2}{1-\upsilon^0}, \frac{4}{1+\upsilon^0} \quad (\in 2-D) \tag{9}$$

식 (3),(4)를 다음과 같이 식(10) 로 나타낼 수 있다:

$$a(u,v) = \int_{\Omega} E_{ijkl}(x)\epsilon_{ij}(u)\epsilon(v)d\Omega \tag{10}$$

min l(u) such that a(u,v) = C(v), for all admissible v.

이제 이 문제의 해를 구하기 위하여 Lagrange Multiplier $\Lambda, \lambda^+, \lambda^-$를 도입한 범함수는 다음 식 (11)과 같다:(Bendsoe,2004)

$$L = c(u) - a(u,\overline{u}) - c(\overline{u}) + \Lambda(\int_{\Omega} \rho(x)d\Omega - V)$$
$$+ \int_{\Omega} \lambda^+(x)(\rho(x)-1)d\Omega + \int_{\Omega} \lambda^-(x)(\rho_{\min} - \rho(x))d\Omega \tag{11}$$

위 식을 변위에 대하여 편미분하면 $U = \overline{U}$ 를 얻으며, 밀도함수에 대한조건은 식 (12)으로 표시되며,

$$\frac{E_{ijkl}}{\rho}\epsilon_{ij}(u)\epsilon_{kl}(u) = \Lambda + \lambda^+ - \lambda^- \tag{12}$$

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

이 조건을 다시 쓰면 식 (13)과 같다.

$$p\rho(x)^{p-1}E^{0_{ijkl}}\epsilon_{ij}(u)\epsilon_{kl}(u) = \Lambda \tag{13}$$

이 관계식은 최적의 $\rho(X)$ 함수분포를 위한 조건으로 이용한다.

3) 밀도함수

업데이트밀도함수의 업데이트는 목적함수를 최소화하는 과정에서 이루어지며 목적함수 c(X)는 변형으로 인한 에너지의 총합으로 정의할 수 있다:

$$\min : c(x) = U^T KU = \sum_{e=1}^{N}(p_e)^p u_e^T k_0 u_e \tag{14}$$

$$\begin{aligned} \text{subject to} : : & \frac{V(X)}{V_0} = f \\ & : KU = F \\ & : 0 < \rho_{\min} \le \rho \le 1 \end{aligned} \tag{15}$$

여기서,U :The displacement vector, F :The force vector

K :stiffness matrix, u_e :Displacement vector elements

k_e :Element of stiffness matrix, x :The design variable vector

밀도함수를 업데이트하기 위하여 OC(Optimality Criteria) method를 사용한다. OC 방법에 사용되는 식은 (16)과 같다.(Bendsoe,1995)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

$$\rho_e^{\neq w} = \begin{cases} \max(\rho_{\min}, \rho_e - m) \\ \quad \text{if } \rho_e B_e^{\eta} \le \max(\rho_{\min}, \rho_e - m), \\ \rho_e B_e^{\eta} \\ \quad \text{if } \max(\rho_{\min}, \rho_e - m) < \rho_e B_e^{\eta} < \min(1, \rho_e + m), \\ \min(1, \rho_e + m) \\ \quad \text{if } \min(1, \rho_e + m) \le \rho_e B_e^{\eta}, \end{cases} \tag{16}$$

여기서, m(move) : positive move-limit

η : damping coefficient

B_e 의 값은 (17)식을 통해 얻는다.

$$B_e = \frac{-\dfrac{\partial c}{\partial \rho_e}}{\lambda \dfrac{\partial V}{\partial \rho_e}} \tag{17}$$

여기서, λ는 라그랑지 곱수이고, 수식의 분자(mesh-independency filter)의 민감도는 목적함수를 설계변수로 편미분한 것이며, 요소의 민감도(sensitivity)를 수정함으로서 얻을 수 있다.(Bendsoe,1995)

$$\frac{\partial c}{\partial \rho_e} = \frac{1}{\rho_e \sum_{f=1}^{N} H_f} \sum_{f=1}^{N} H_f \rho_f \frac{\partial c}{\partial \rho_f} \tag{18}$$

H_f는 회선연산자(무게요소)이고 다음 식 (19)와 같이 구한다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

$$H_f = r_{\min} - dist(e,f), \quad (19)$$
$$f \in N \mid dist(e,f) \le r_{\min}, e = 1,....,N,$$

여기서, dist(e,f) : Center distance of the elements e and f

$r_{\min}$: The radius of the filter

최적화 계산 순서

(1) Pre-processing of geometry and loading

① 기준이 되는 영역(구조)을 정한다.

② 구조물이 반드시 있는 곳 또는 구조물이 없어야 하는 영역이 있으면 미리 정해준다.

③ 기준영역에 대한 유한요소 망을 만든다.기하학적 모양을 묘사하기에 충분한 해상도가 나오도록 한다.

④ 설계변수에 대한 유한요소공간을 만든다.

본 연구에 대상 구조물은 본넷의 경량화를 위하여 본넷 구조물을 내부 구조물인 스파와 외부 구조물은 스킨으로 나누어 설계 하였다. 상용프로그램을 통해 내부 구조물의 형상을 위상 최적화를 통하여 위상값을 구하며, 형상이 결정된 스파와 스킨의 두께를 변수로 하여 사이즈 최적화 기법을 수행 였으며, 설계 흐름은 Fig 9와 같다.[56]

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

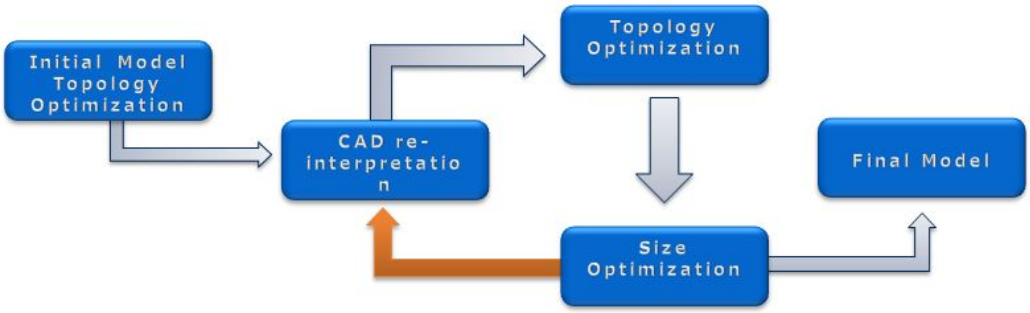


Fig. 9 Flow of optimization design

4. 위상최적화 적용

앞서 거론하였지만 위상 최적화는 다공성 모델로 가정하고 각 부위의 밀도를 향상시켜 형상을 만드는 과정이기 때문에, 격자의 크기는 가능하면 조밀한 것이 좋다. 하중 조건은 굽힘 강성과 비틀림 강성의 힘이 동시 작용하는 것으로 설정 하였으며, 물성치는 설계의 편의를 위해 구조강으로 가정하였다. 또한 본넷 형상의 경계에서 15mm 오프셋 영역은 엔진룸 실링을 위해 스파가 존재 하지 않으므로 오프셋 영역을 제외한 영역에 최적화 설계를 수행하였다. 경계조건 중 질량 감소 목표는 40%로 부여하였으며, 해석 완료 후 보존할 영역과 제거해도 되는 영역을 구분하여 출력하였다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

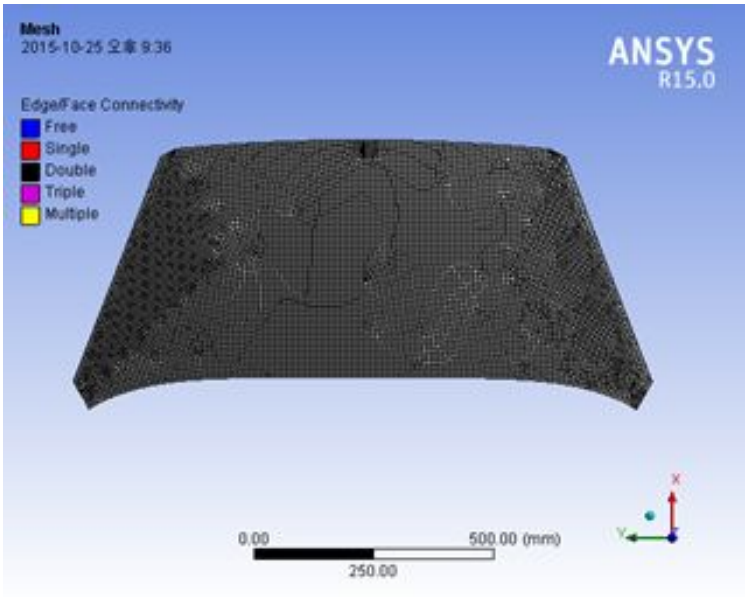


Fig. 10 Mesh generation of hood for topology optimization

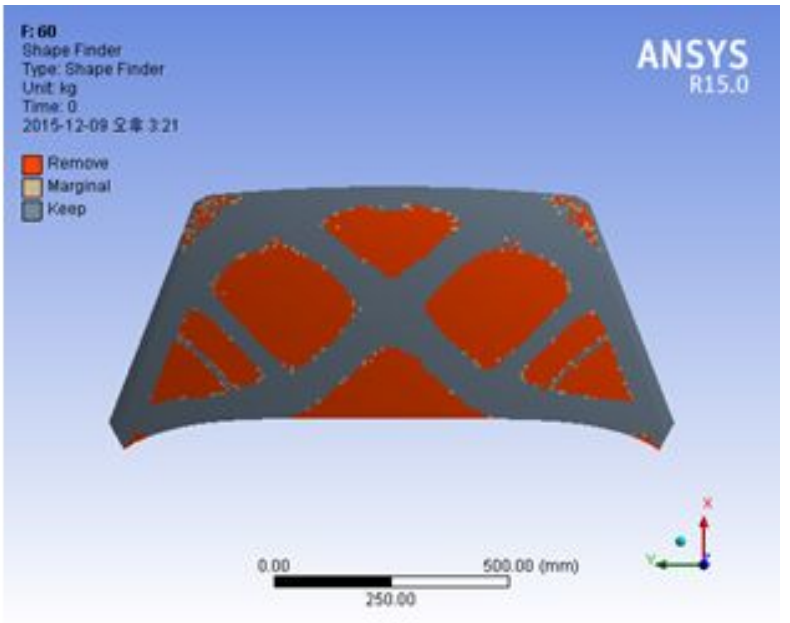


Fig. 11 Results of hood topology optimization

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

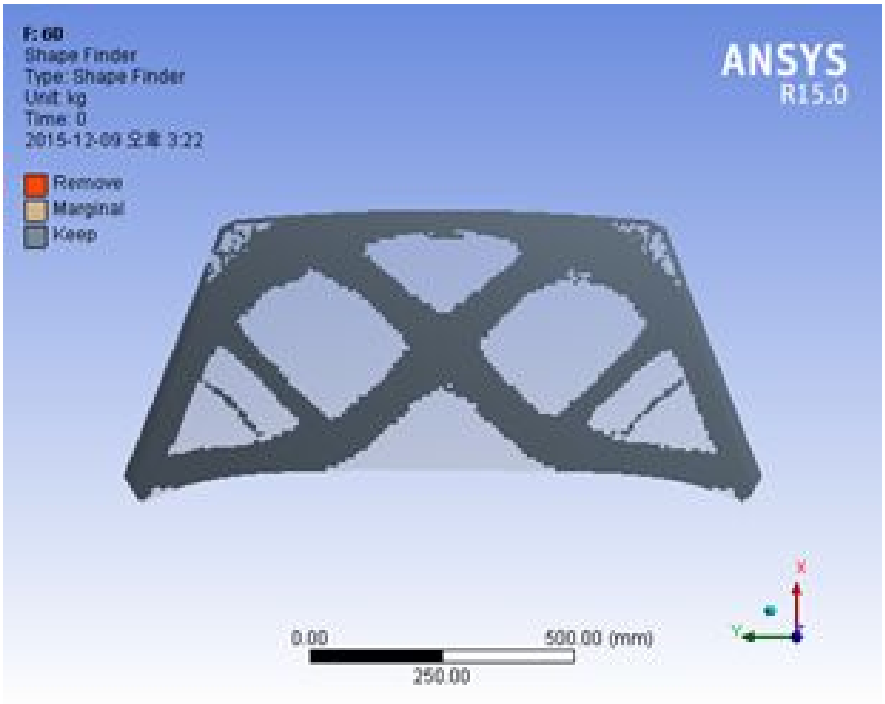
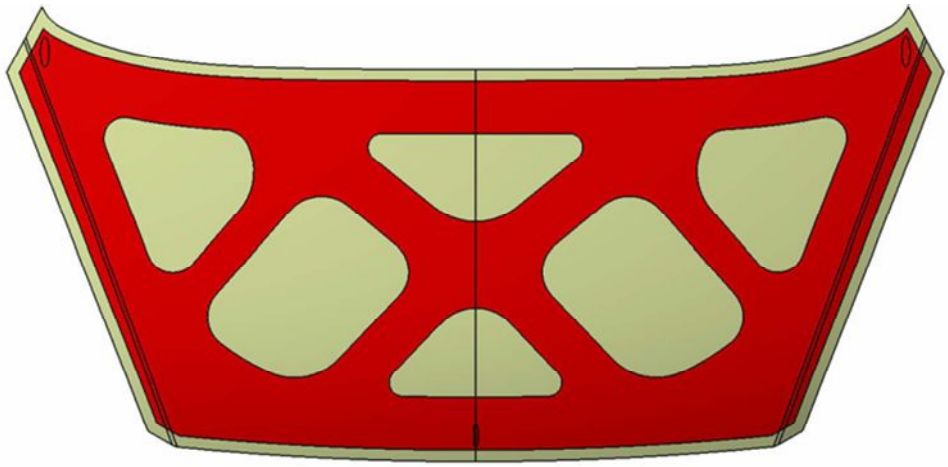


Fig. 12 Remained region(black) and removed region(white)

위상 최적화 결과에서 주요 노드값을 획득하여 CAD툴에서 리버스 모델링을 수행하여 보강구조의 형상을 확정하였다. 위상 최적화 흐름은 Fig 10~12과 같으며, 최종 모델링된 보강제의 형상은 Fig. 13과 같다.

dCollection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



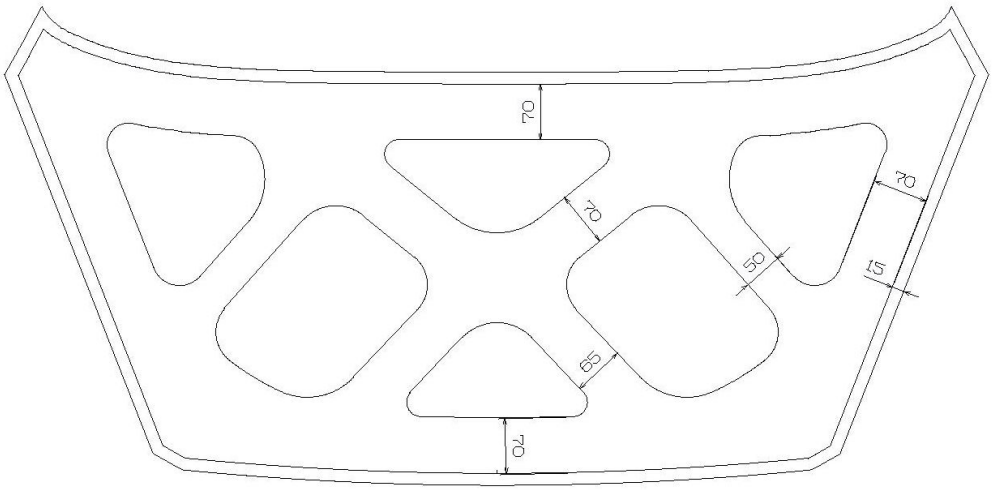


Fig. 13 Updated topology optimization model

5. 사이즈 최적화

위상 최적화를 통해 확보된 보강구조 형상과 고정된 스킨의 가각 두께를 변수로 사이즈 최적화를 수행 하였다. 사이즈 최적화는 아마섬유 복

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

합재의 물성치를 적용 했으며, 질량 최소화를 목적함수로써 아마섬유 복합재의 1ply 의 두께인 1mm씩 변화를 줘서 각 조건에 대한 해석을 수행 하였다. 해석 조건으로는 모든 하중 조건을 적용 하였으며, 하중조건을 만족하는 후보군을 선정 후 다음 하중조건으로 사이즈 최적화를 수행하였다. Fig. 14와 같이 사이즈 최적화에 보강구조와 스킨에 두께를 설계 변수로 하는 설계점으로 설정하고 4가지 하중조건에 대해 각각 계산하여 하중조건 만족 및 질량을 가장 적은 설계점을 찾았다.

사이즈 최적화 수행 결과 보강구조는 Fig. 15와 같으며 16ply 스킨은 3ply이며 이때 아마 섬유를 적용한 후드의 무게는 10kg으로 실제 금속 구조물 본넷의 무게인 15.3kg 보다 35%의 경량화를 하였다.

Table of Design Points

	A	B	C	D	E	F	G
1	Name	P5 - skin Thickness	P6 - spar Thickness	P7 - Geometry Mass	P8 - Directional Deformation Minimum	Exported	Note
2	Units	mm	mm	kg	mm		
21	DP 18	4	21	11.836	-0.50231		
22	DP 19	4	22	12.262	-0.4654		
23	DP 20	4	23	12.687	-0.43272		
24	DP 21	4	24	13.113	-0.40362		
25	DP 22	5	17	10.856	-0.62808		
26	DP 23	5	18	11.281	-0.57341		
27	DP 24	5	19	11.707	-0.52606		
28	DP 25	5	20	12.133	-0.48475		
29	DP 26	5	21	12.559	-0.44847		
30	DP 27	5	22	12.985	-0.41641		
31	DP 28	5	23	13.411	-0.38791		
32	DP 29	6	16	11.153	-0.61391		
33	DP 30	6	17	11.579	-0.55979		
34	DP 31	6	18	12.005	-0.51293		
35	DP 32	6	19	12.431	-0.47206		
36	DP 33	6	20	12.856	-0.4362		
37	DP 34	6	21	13.282	-0.40455		
38	DP 35	6	22	13.708	-0.37645		
39	DP 36	6	23	14.134	-0.35136		
40	DP 37	7	15	11.45	-0.60241		
41	DP 38	7	16	11.876	-0.54892		
42	DP 39	7	17	12.302	-0.50255		
43	DP 40	7	18	12.728	-0.4621		
44	DP 41	7	19	13.154	-0.4266		
*							

Chart: No data

Fig. 14 Searching conditions for size optimization

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Definition	
Source	C:₩Users₩Administrator₩Desk
Type	DesignModeler
Length Unit	Meters
Element Control	Program Controlled
Display Style	Body Color
Bounding Box	
Properties	
Volume	7.6641e+006 mm³
Mass	9.9633 kg
Surface Area(approx.)	8.8393e+005 mm²
Scale Factor Value	1.
Statistics	
Basic Geometry Options	
Advanced Geometry Options	

Fig. 15 Results of size optimization

6. 구조해석

설계의 안정성을 확인하기 위해 하중조건에 대해 구조 해석을 수행 하였다.

1) 굽힘강성의 경우 Fig 16~19 와 같이 해석결과 하중점의 수직 변위가 2.87mm의 변위가 발생했으며, 이는 기준인 3mm 이하이므로 충분 만족함을 확인 하였으며, 하중이 가장 크게 힌지 부근이며 이때의 구조 안전율은 11.4이다.

2) 비틀림강성해석 결과 경우 Fig. 20~22 비틀림 강성은 897.597 nm/deg로 설계 요구조건인 150Nm/deg이상을 만족하며, 이때의 안전율은 15이상임을 확인 하였다.

3) 외판 강성 안정성의 경우 Fig.23과 같이 취약해 보이는 임이의 지점을 A,B,C,D를 선정하여 해석을 수행 하였으며,이 경우 fig. 24~27과

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

같이 저하중 중일 때 외판 강성변위는 0.7mm로 이는 요구 조건인 0.05mm/N을 만족한다. 또한 Fig. 28~33과 같이 고하중 외판 강성의 경우 C 지점에서 수직 변위가 1.22mm로 수직 변위 15mm 이하를 만족하며 이때의 안전율은 2.758 로 안전함을 검토되었다.

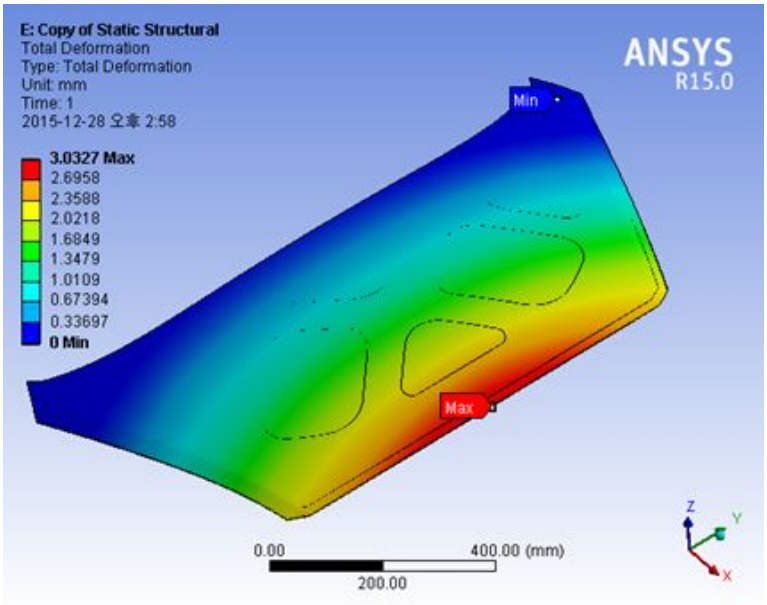


Fig. 16 Deformation distribution at bending stiffness condition

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

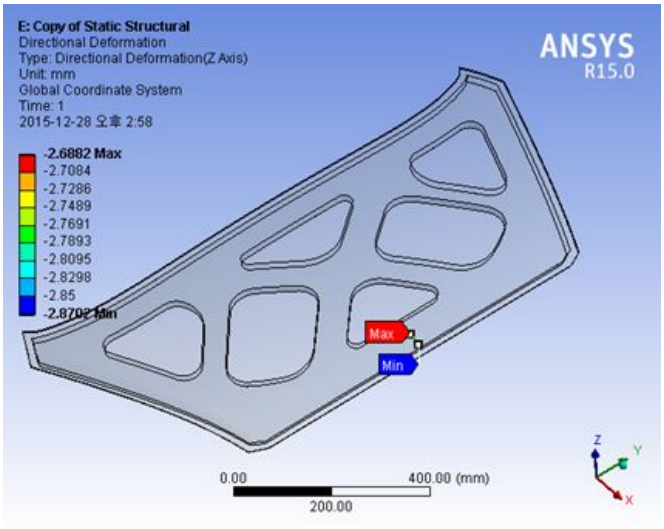


Fig. 17 Loading point deformation at bending stiffness condition

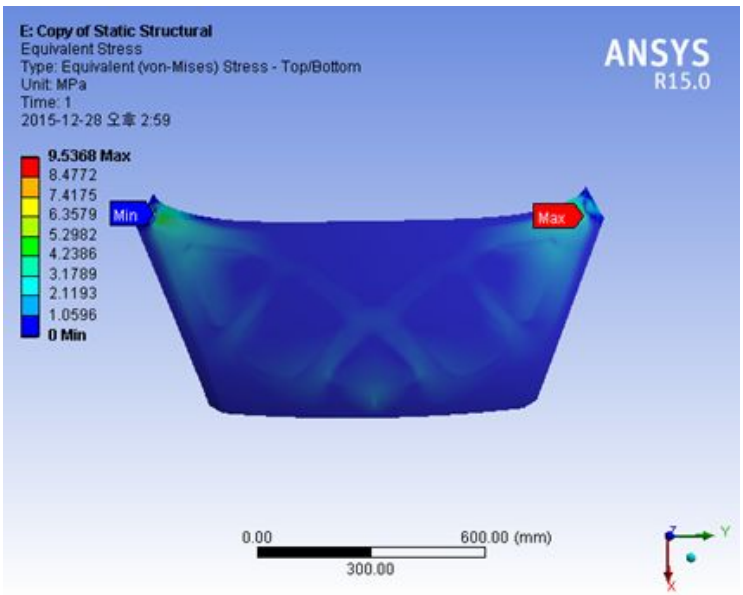


Fig. 18 Stress distribution at bending stiffness condition

dCollection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

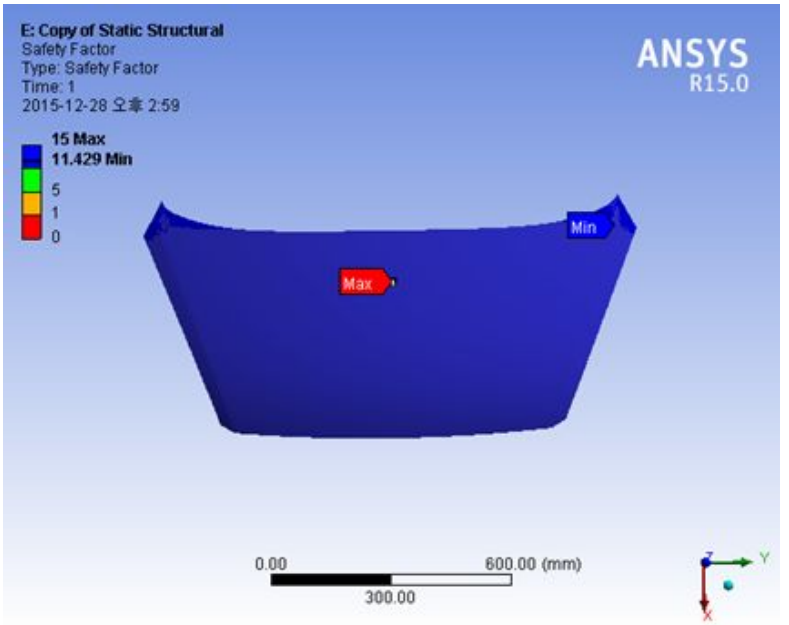


Fig. 19 Safety factor distribution at bending stiffness condition

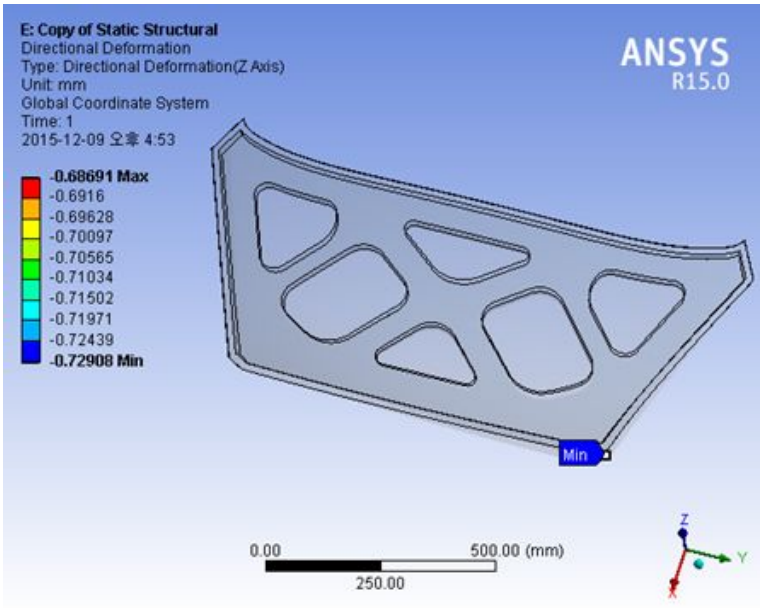


Fig. 20 Loading point deformation at torsional stiffness condition

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

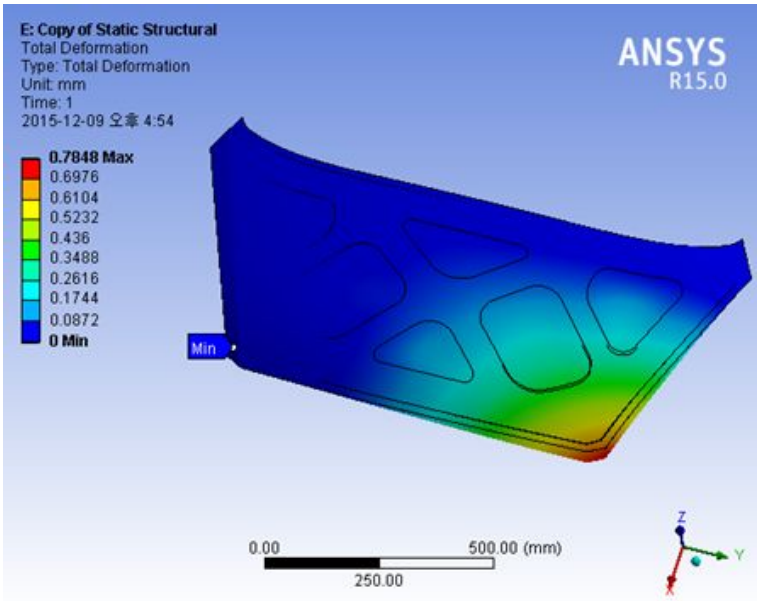


Fig. 21 Deformation distribution at torsional stiffness condition

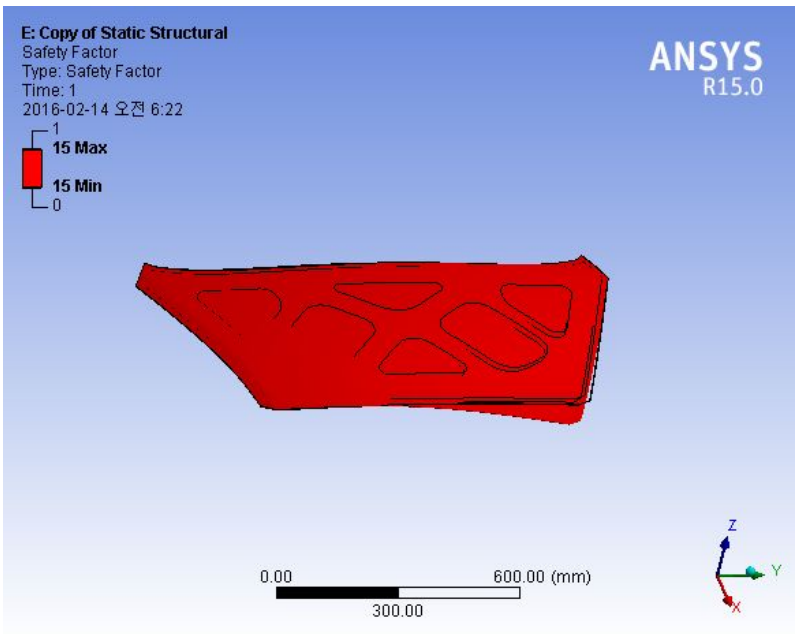


Fig. 22 Safety factor distribution at torsional stiffness condition

dCollection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

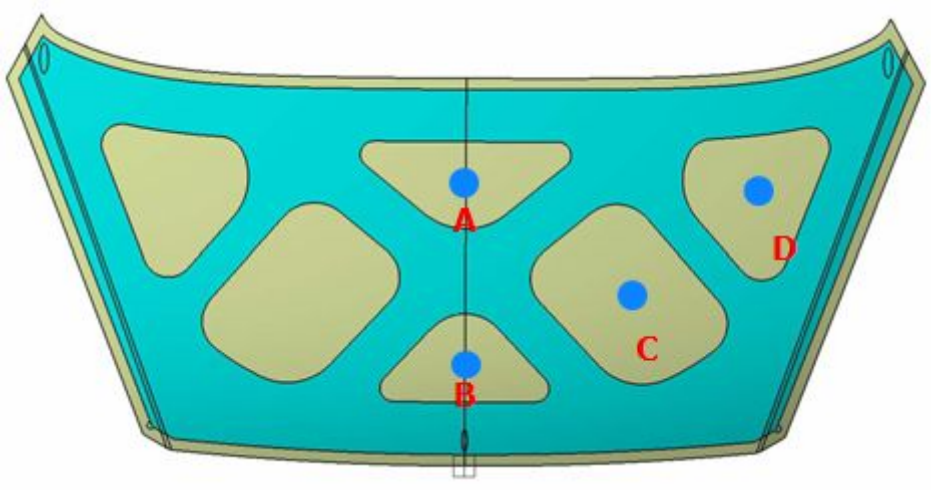


Fig. 23 Stress distribution at different skin stiffness conditions

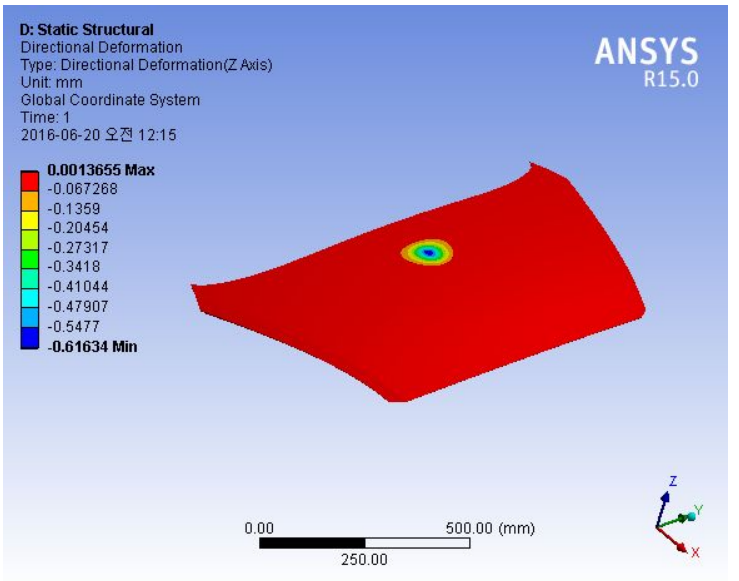


Fig. 24 Low load normal displacement distribution at skin stiffness condition (a)

dCollection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

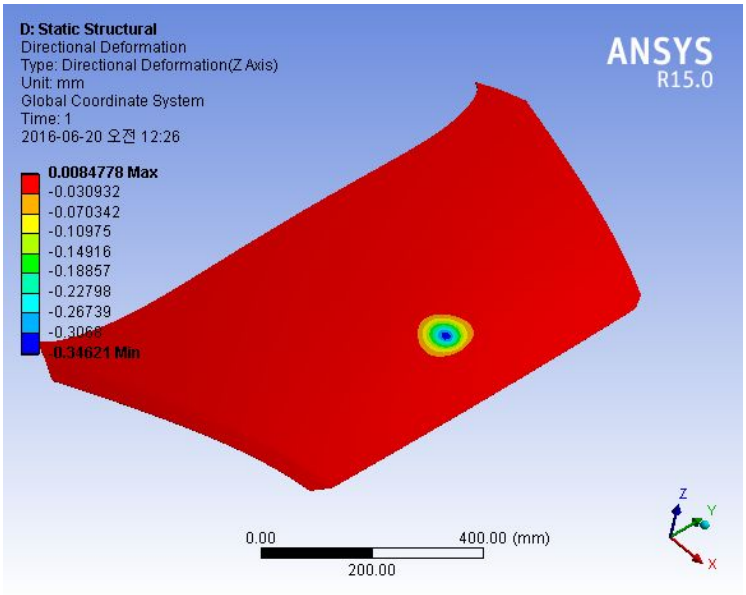


Fig. 25 Low load normal displacement distribution at skin stiffness condition (b)

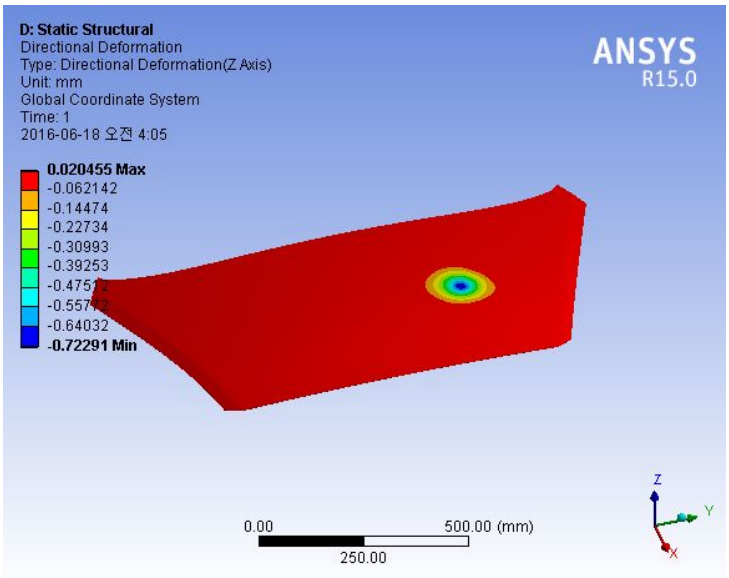


Fig. 26 Low load normal displacement distribution at skin stiffness condition (c)

dCollection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

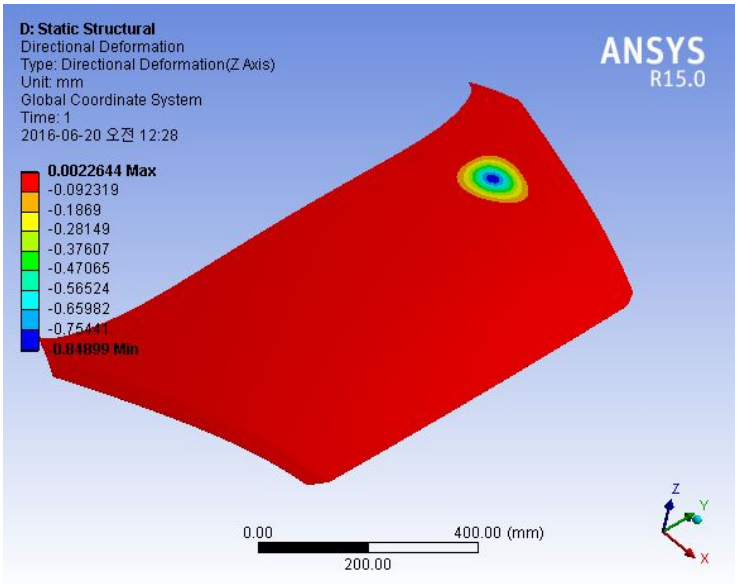


Fig. 27 Low load normal displacement distribution at skin stiffness condition (d)

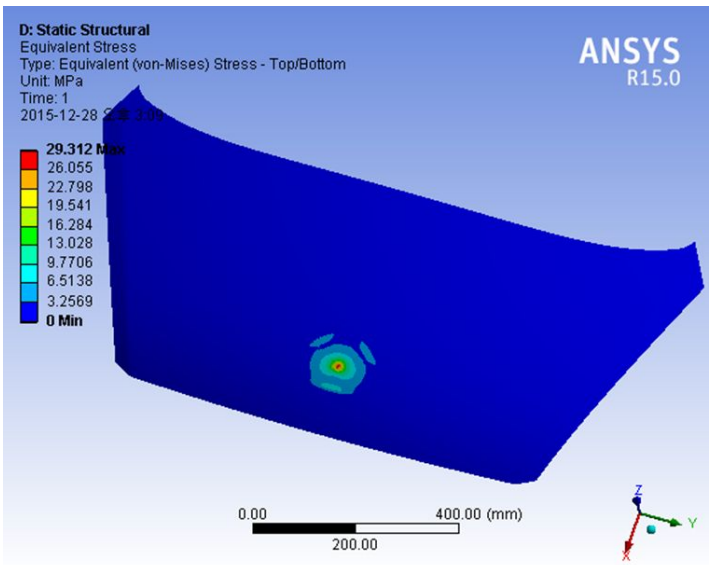


Fig. 28 High load normal displacement distribution at skin stiffness condition (a)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

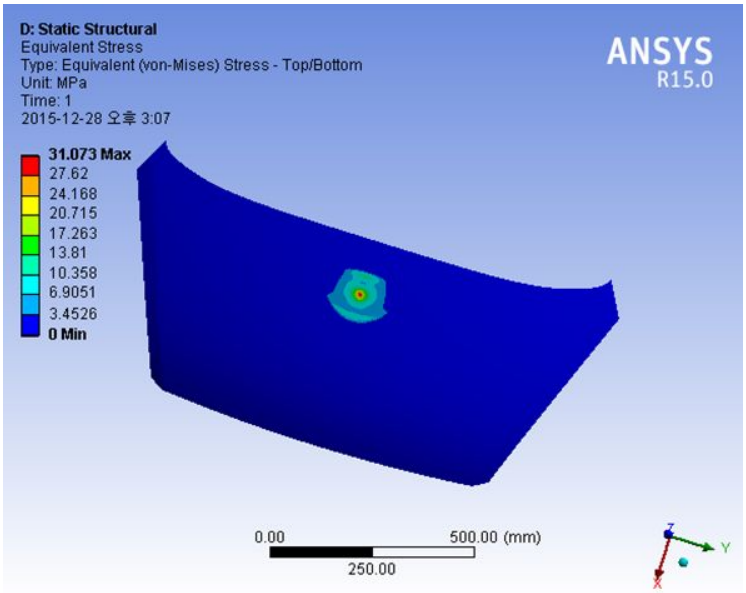


Fig. 29 High load normal displacement distribution at skin stiffness condition (b)

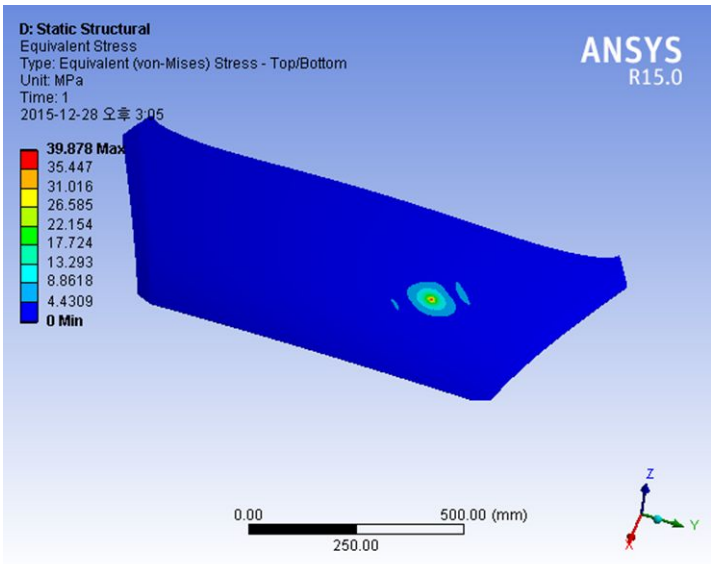


Fig. 30 High load normal displacement distribution at skin stiffness condition (c)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

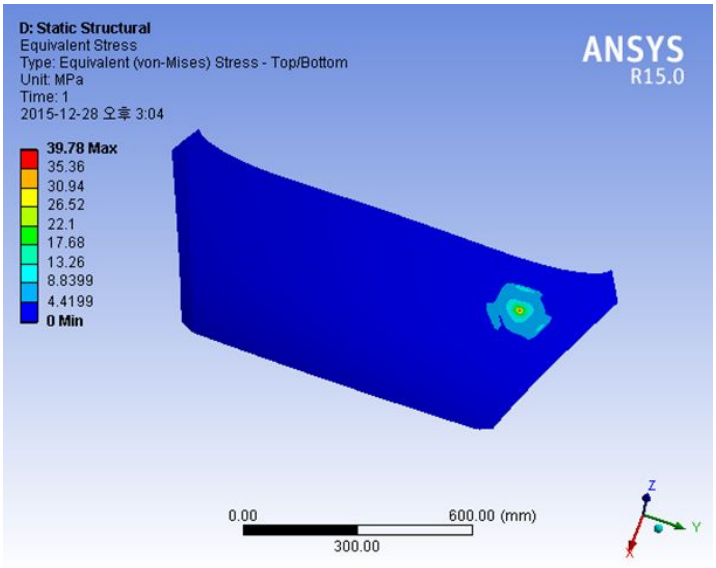


Fig. 31 High load normal displacement distribution at skin stiffness condition (d)

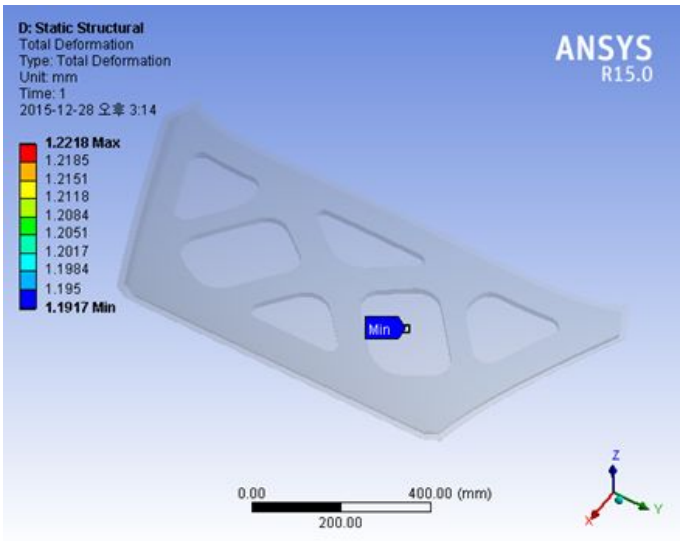


Fig. 32 High load normal displacement distribution at skin stiffness condition (c)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

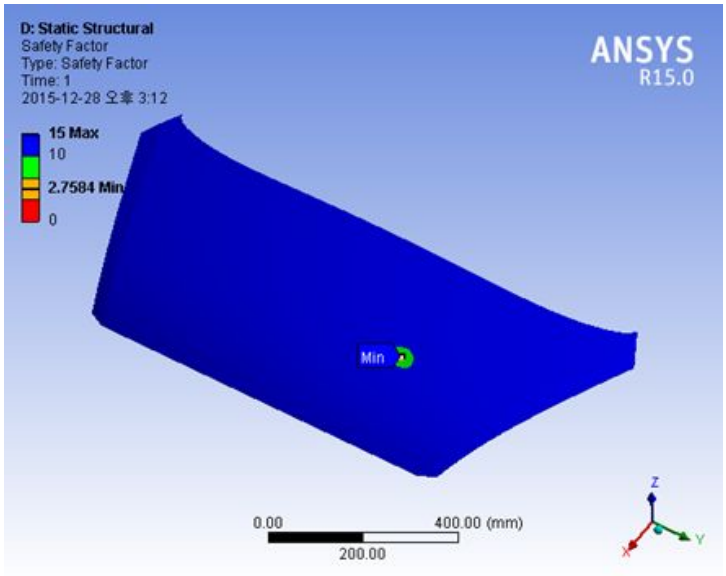


Fig. 33 Safety factor distribution at skin stiffness condition (c)

7. 모달 해석

자동차 후드는 엔진실의 각종 기기를 보호하는 얇은 판재로 넓은 면적을 가진 셸 구조물이다. 넓고 얇은 판재의 형상은 고유진동수가 낮아 차량의 진동에 대한 영향을 많이 받게 되므로 동적 특성을 고려하여 설계되어야 한다. 즉 후드는 주행 시 노면의 요철 바람 등의 외력을 받고 엔진 회전체등의 소음원 및 진동원에 대한 영향을 받으며 다른 진동요소들과 넓은 주파수 대역에 걸쳐 공진 현상이 일어나기 때문에 자동차 후드의 강성과 진동효과는 차량의 승차감과 소음에 밀접한 관계를 갖는다. 아마섬유 특성상 소음 진동 흡수에 강한 장점이 있으며, 아마섬유가 적용후 흰지와 라텟을 구속한 조건으로 모달 해석을 수행하여 고유진동수를 파악 하였다. 첫 고유진동수는 162.47Hz로써 이는 다른 후드의 고유진동수와 비교했을 때 고유진동수가 높음을 확인하였으며 Table 6. 및 Fig. 34~39에 진동수별 Mode형상을 나타내었다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table 6. Natural Frequency of flax hood

Mode	Frequency[Hz]
1	162.47
2	194.52
3	226.07
4	275.44
5	411.76
6	414.96

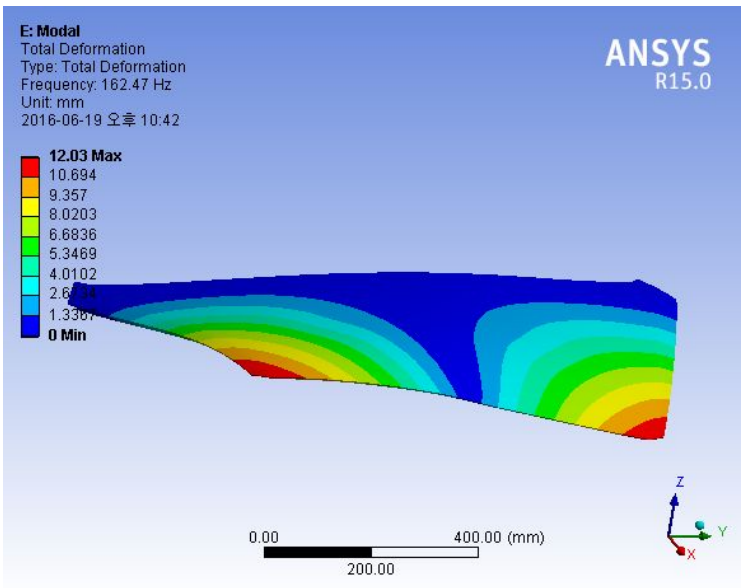


Fig. 34 1st Mode shape

dCollection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

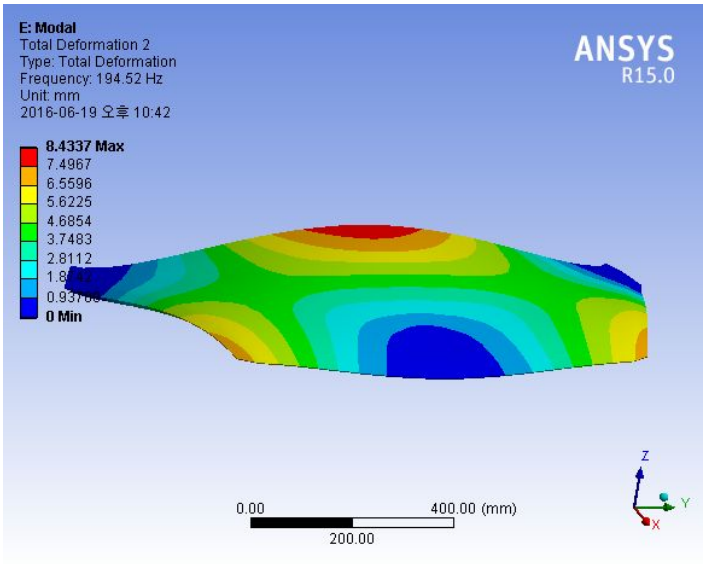


Fig. 35 2nd Mode shape

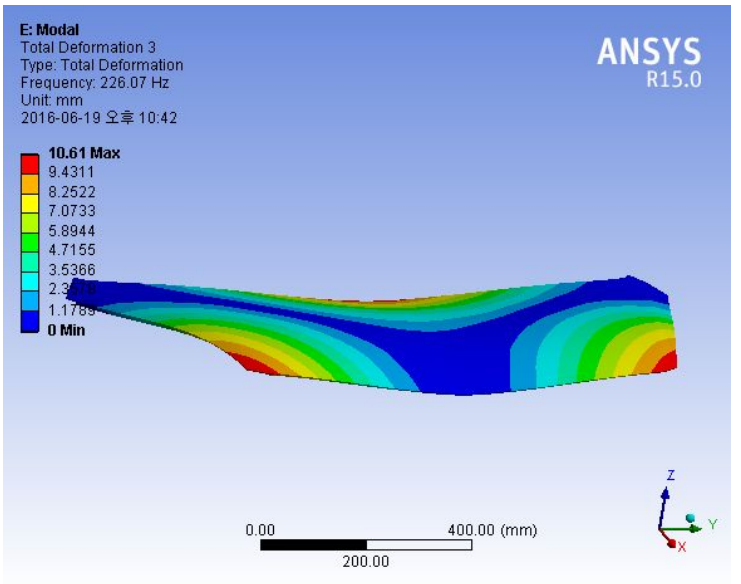


Fig. 36 3rd Mode shape

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

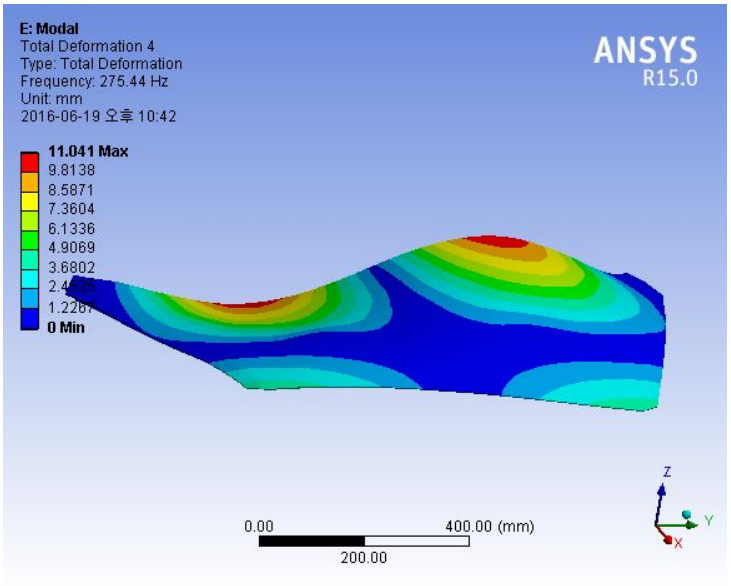


Fig. 37 4th Mode shape

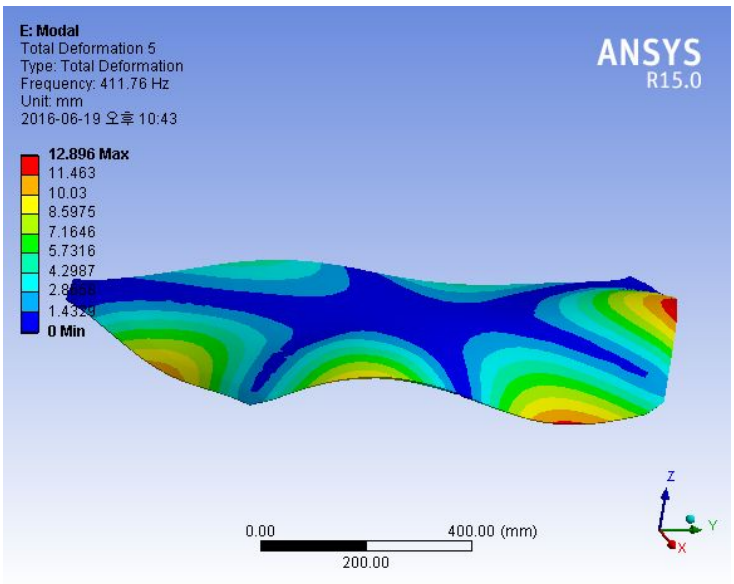


Fig. 38 5th Mode shape

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

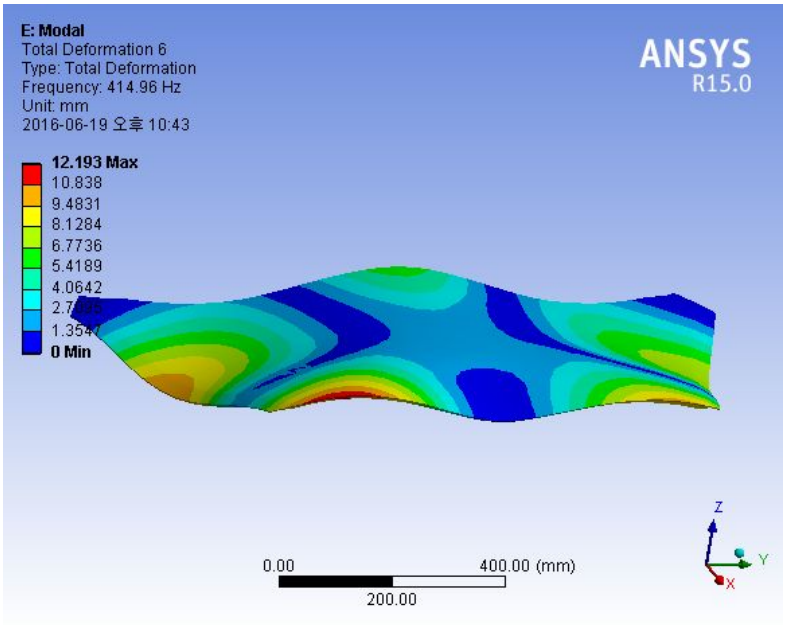


Fig. 39 6th Mode shape

8. 구조설계결과

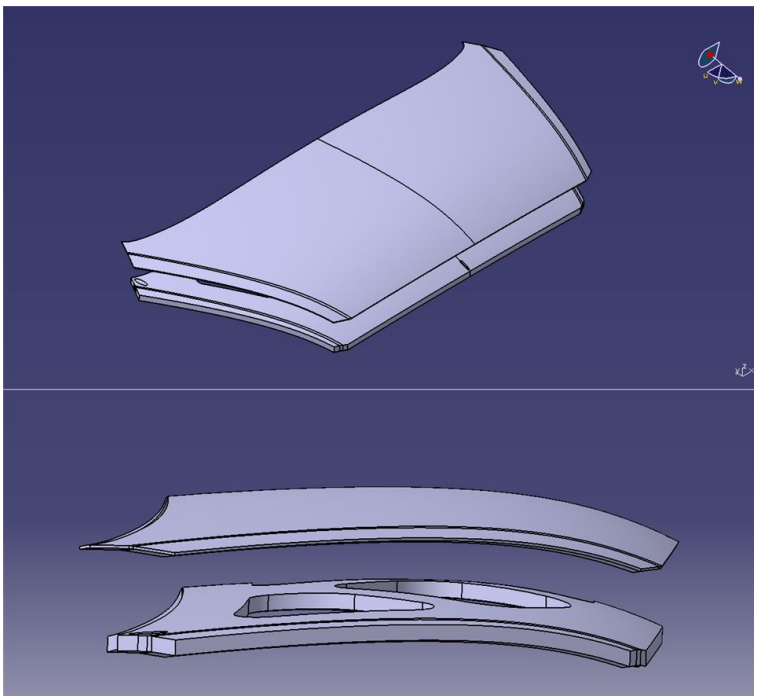
하중조건 1~4를 만족하는 구조 설계 결과는 Table 7와 같다. 섬유와 수지는 앞서 선정한대로 600 gsm biaxial fabric 아마섬유와 비닐 에스테르가 적용 되었으며, 시편 테스트를 통한 물성치를 적용하여 위상 최적화 및 치수 최적화 결과 스킨은 3ply, 보강재는 16ply이다. 이때의 스킨 두께는 3mm, 보강재의 두께는 16mm이며 스킨 및 보강재의 형상은 Fig. 40과 같다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table 7. Design results of hood

	Skin	Stiffener
Fiber	600 gsm Flax biaxial fabric	
Matrix	Vinylester resin	
No. of Plies	3	16
Thickness (mm)	3	16



Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

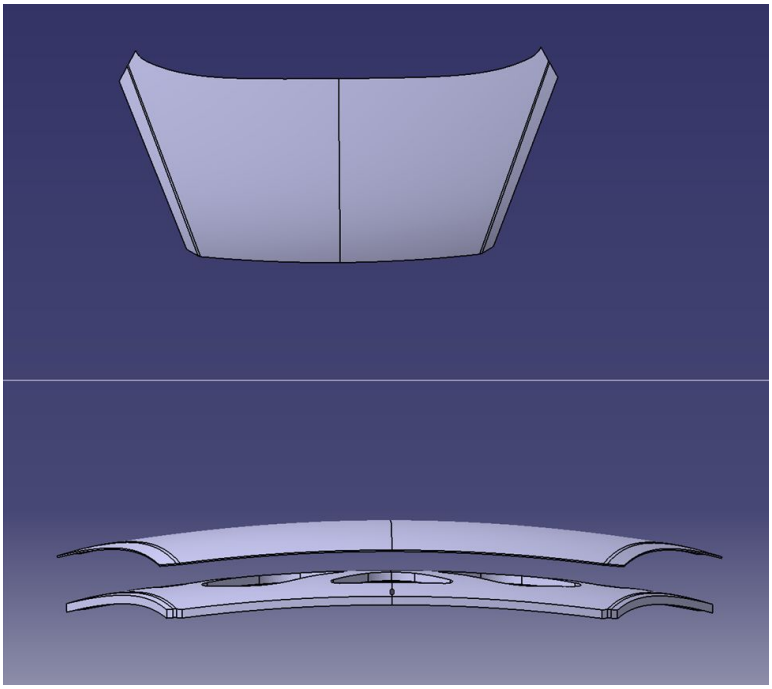


Fig. 40 Final design configuration of hood skin and stiffener

dCollection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

IV. 충돌해석

유럽 신차평가제도(European New Car Assessment Program: EuroNCAP)는 유럽 5개국(영국,프랑스,독일,네덜란드,스웨덴)정부와 자동차 협회들에 의해 설립되었으며 1996년도부터 차량의 충돌 시험을 시작하였다. 어린이와 성인 보행자의 충돌을 묘사하기 위해 유럽 자동차 안전성 강화 위원회(European Enhanced Vehicle-safety Committee: EEVC)의 지침을 토대로 진행하고 있다.[57]

충돌 시험에서 탑승자에 대한 묘사는 full dummy를 사용하고 있지만, 보행자 충돌에 대한 묘사는 신체 일부를 표현한 머리와 다리 모형을 사용 한다. Full dummy를 사용하지 않은 이유는 보행자의 다리와 범퍼에 대한충돌 지점은 제어할 수 있지만, 머리와 차량 상부에 대한 충돌 지점은 제어가 용이하지 않기 때문이다. 실제 보행자의 안정성은 보행자 머리 상해치(Head Injury Criterion : HIC)를 통해 판단하며, Euro NPCAP 테스트 조건은 Table 8 과 같다.

보행자 머리 상해치(Head Injury Criterion: HIC)는 머리 중심에서의 3축 합성가속도(Resultantaccelerationg)를 의미하며 t_1, t_2는 $0 < t_1 < t_2$가 되는 시각에서 HIC값이 최대가 되는 시간이고, 작용 시간 $(t_2 - t_1)$은 $15\mu s$ 이하로 정해져 있다. 이때의 HIC는 아래의 식으로 구할 수 있다.

$$HIC = \max\left[\left(\frac{\int_{t_1}^{t_2} \alpha R^{dt}}{t_2 - t_1}\right)^{2.5} (t_2 - t_1)\right] \tag{20}$$

αR : Acceleration head model

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table 8. EuroNCAP Test Condition of HIC

Test Condition	
Test Speed	40(km/h)
Adult Headform Mass	4.8(kg)
HIC [Head Injury Criterion] Requirement	HIC ≤1000 [Good]
	1000 < HIC ≤ 1350 [Adequate]
	HIC > 1350 [Marginal]

설계된 패널의 충돌에 의한 안전성을 분석하기 위해 성인머리모형을 모델링하여 충돌 해석을 수행 하였다. 해석을 통해 획득한 보행자 머리의 3축 합성가속도를 적용하여 HIC 분석과 구조물의 수직 변위를 구하는 것이 목적이다. 충돌 해석은 성인 남성 머리가 40km/h의 속도로 패널 중앙 부위에 충돌하였을 때 패널의 변위와 응력을 분석하였다. 성인 머리 모형은 유럽 자동차 안전성 강화 위원회 규정에 따라 구 모형으로 본체는 알루미늄으로 형성하고 점탄성을 가지는 피부로 둘러싸여야 한다. 머리 모형의 지름은 165mm, 무게는 4.8Kg으로 Fig. 41와 같이 구성되어 있다. 성인머리 모형의 충격체 형상과 피부는 Fig. 42과 같이 모델링 하였다.[57]

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

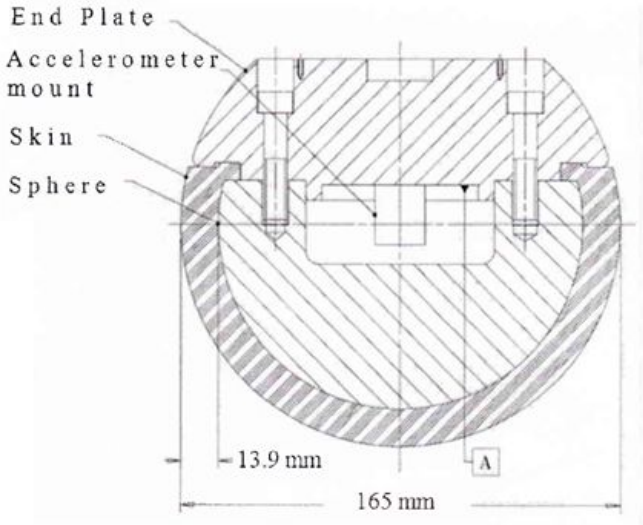


Fig. 41 Model of adult head configuration

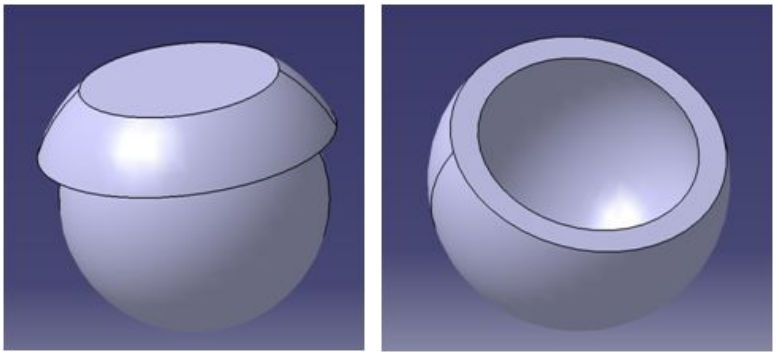


Fig. 42 Impact analysis model

앞서 언급한 봐야 같이 충돌 해석은 유럽 보행자 보호 관련 기준에 따라 40km/h의 속도로 구조적으로 가장 두꺼운 부분인 중앙부위에 충돌하였다. 충돌 결과 HIC는 1247로 보통 보행자 보호 정도를 만족함을 확인하였다

충돌해석 결과 패널 중앙 부위에서 변위는 108.5mm로 확인되었다. 수직 방향 변형이 120mm를 초과하는 경우는 머리 모형 충돌 시 엔진과

dCollection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

직접적으로 간섭되어 머리 상해치 및 엔진손상이 일어날 수 있다는 것을 의미한다. 결과적으로 패널의 수직방향 변형이 120mm를 초과하지 않았으므로 안전한 것으로 확인되었다. 이때 보행자의 머리에 작용하는 응력해석 결과는 135.22MPa으로 확인하였다. 충돌 변위 해석과 응력 해석은 Fig 43, 44에 나타내었다.

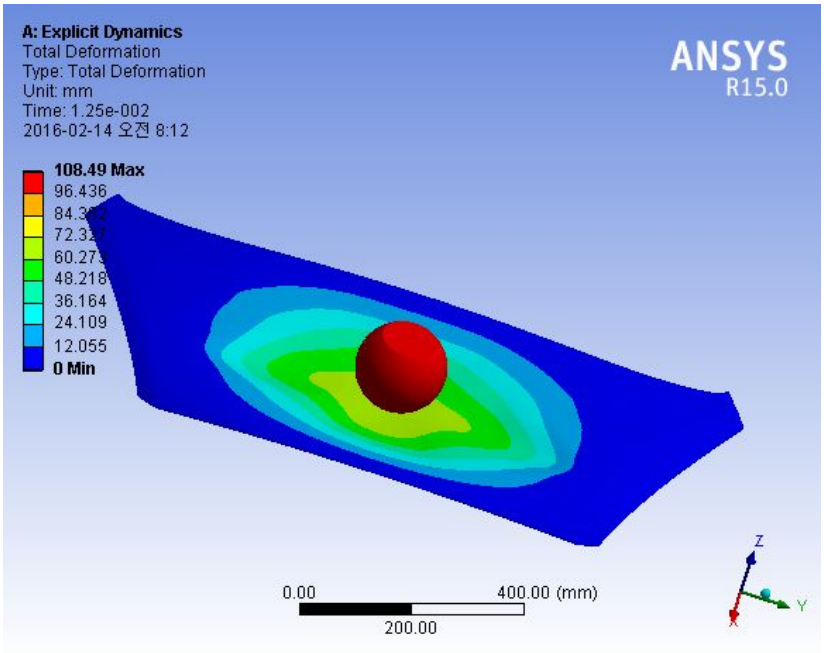


Fig. 43 Deformation distribution of hood at head impact on hood

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

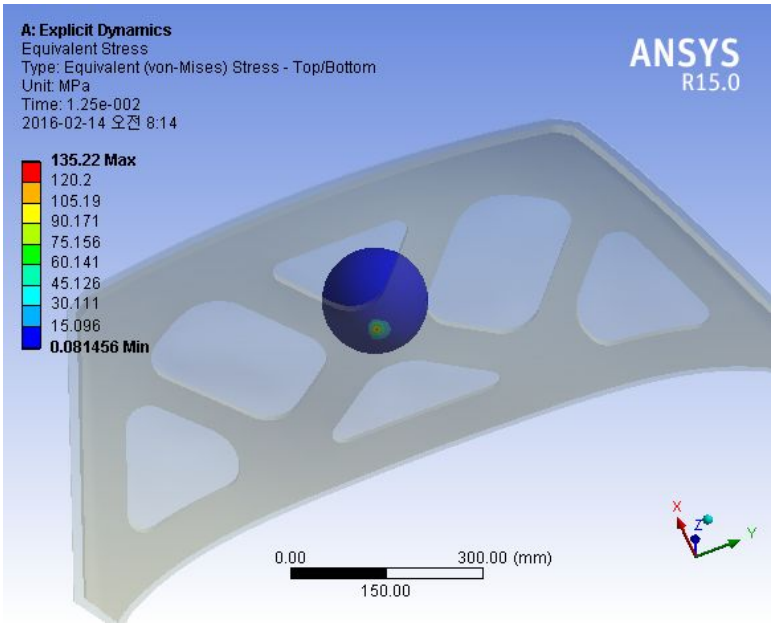


Fig. 44 Stress distribution of head model at head impact on hood

dCollection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

V 수지 유동 해석

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

RIM의 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, RIM 공법을 이용한 복합재료 구조물 제작 시 금형 설계에 고려될 주입구(Injection port) 및 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 RIM 제품 성형 공정에서의 수지 유동을 예측할 수 있는 상용프로그램 Poly-Worx를 통해 자동차 후드 구조물의 RIM 성형공정을 모사 하였다.

Poly-Worx는 진공적층공법의 기본법칙인 Darcy의 법칙(Darcy's Law)를 근간으로 한다. Darcy의 법칙은 강화재 사이에 흐르는 점성유체의 특성을 정의한 법칙으로 다음식과 같이 표현된다. [58]

$$t = \frac{\hat{A}\mu l^2}{2k^{p_r}} \tag{21}$$

$\hat{A}$: Interval ratio of reinforcement

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

k : Permeability of the reinforcement

μ : The viscosity of the resin

l : Flow length

P^r : Pressure difference

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 45는 수지 유동 해석 과정을 보여주고 있다.

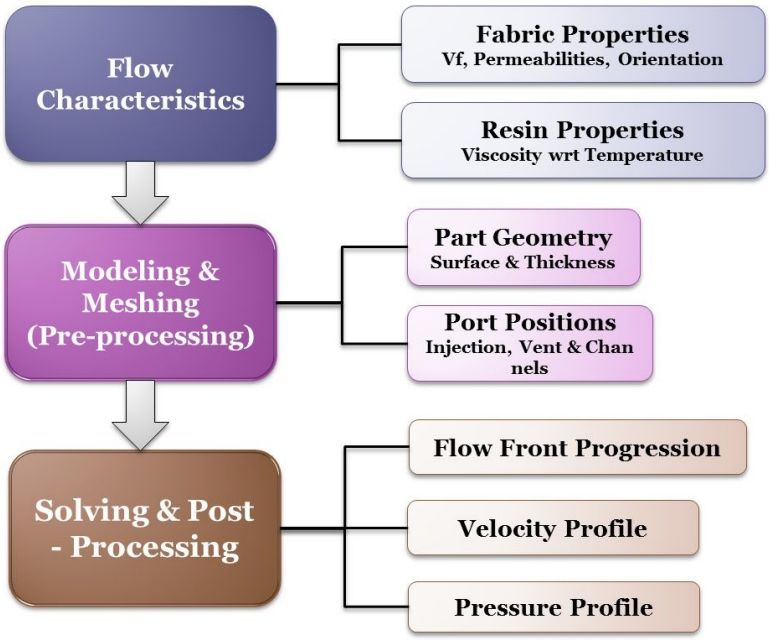


Fig. 45 Procedure of resin flow analysis

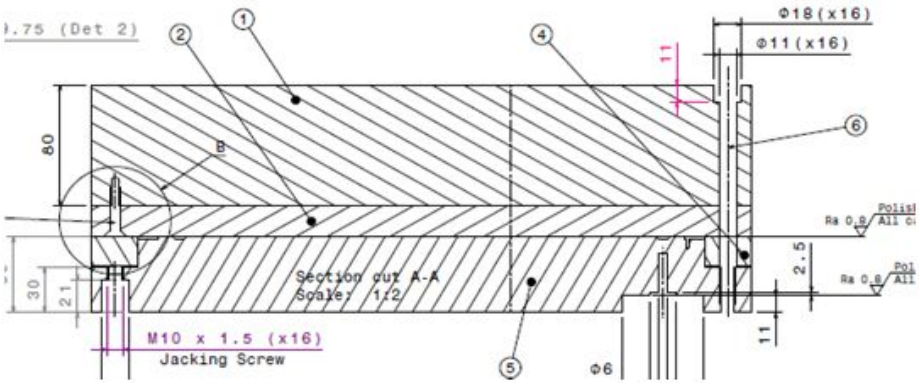
dCollection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

1. 함침성 실험

수지 유동해석에서 기본이 되는 변수는 섬유 체적비, 수지 점성도, 그리고 함침성 계수가 가장 중요한 기본 데이터이며 특히 함침성 계수는 직접 실험을 통해서 측정되어야 하며 이를 위해서 직접 실험 장비를 설계 제작하여 함침성 계수를 측정하였다.

함침성 시험용 몰드는 아래 중앙의 홀에서 수지를 주입하고 주위 4 개의 구멍을 통해 출력되는 구조이다. 몰드 내부에 원형태의 측정도구와 상단에 카메라를 통해수지의 침투 속도를 측정하게 된다. 주입구 압력과 수지의 점성 및 침투 속도를 통해 재료의 함침성을 특정하게 된다. Fig. 46는 함침성 실험 장비 설계도를 보여주며, Fig 47은 실험을 위해 셋업된 형상이다.



Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

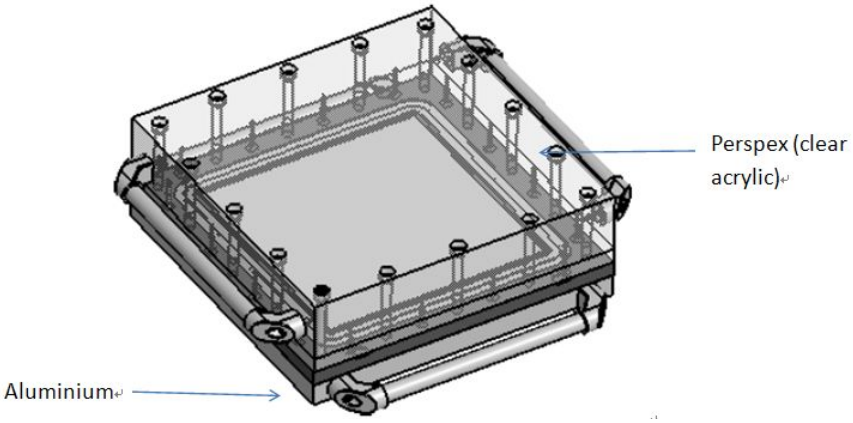
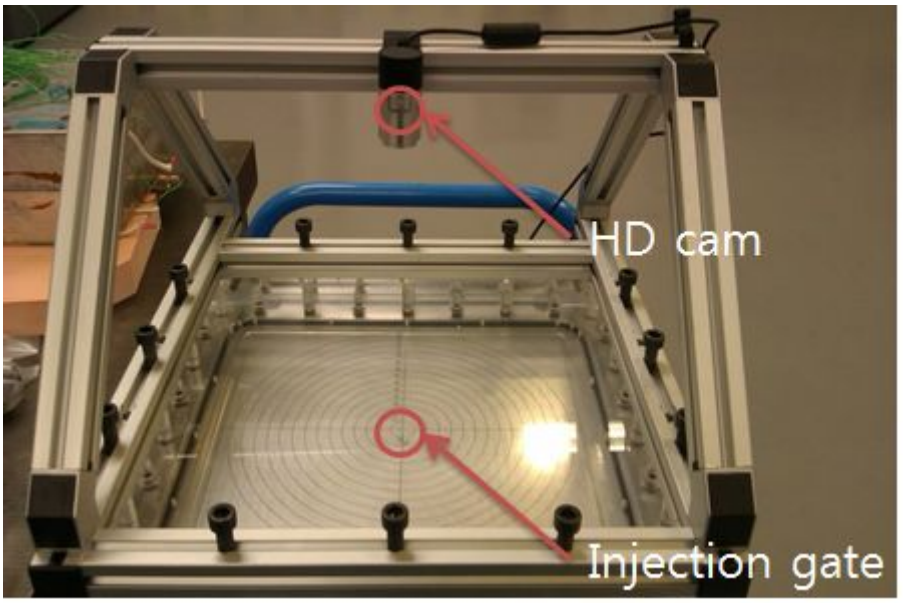


Fig. 46 Drawing of permeability test zig



Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

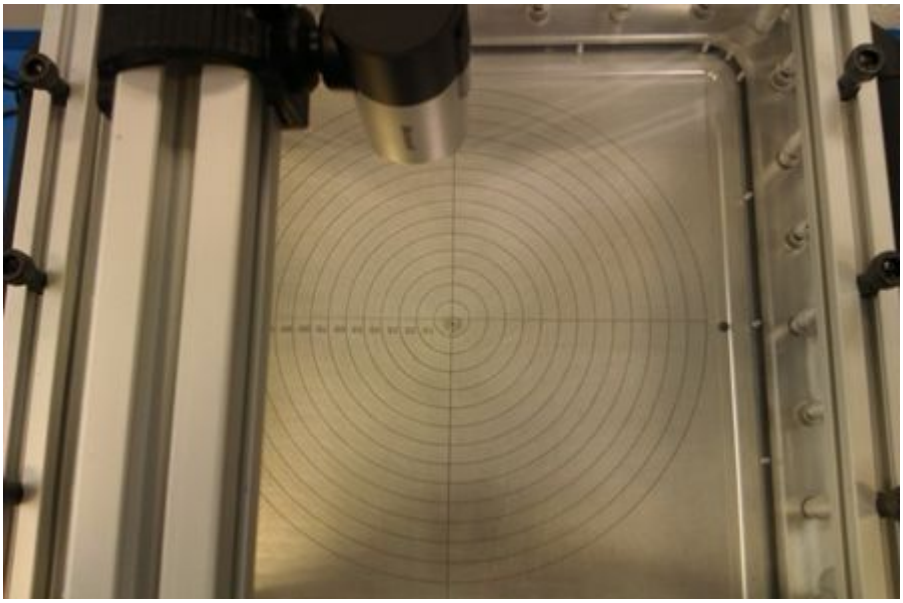


Fig. 47 Permeability test showing measurement target and HD webcam

시험은 총 3번에 걸쳐 수행하였으며, 시험 결과 섬유의 롤 방향의k1와 롤 수직 방향인 k2의 함침률 값은 조금 상이하게 나타났다. 이는 실제 섬유 제품 제작시 롤을 감을 때 생기는 힘에 의한 것으로 예측된다. K1 방향의 함침률 평균은 5.077E-11, k2방향의 함침률은 4.147E-11이고 이 둘의 평균 함침률은 4.6E-11 이다. 섬유체적비가 40%일 때 함침성 시험 결과는 Table 9에 나타내었다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table 9 Permeability test results of the 40% fiber volume fraction

Test No.	P inlet	P cav	k1	k2	Ref angle
40%	bar	Bar	m2	m2	degree
1	1.672	-0.03	4.440E-11	4.040E-11	45
2	1.682	-0.03	7.770E-11	5.680E-11	
3	1.672	-0.03	3.020E-11	2.720E-11	45
		AVRG	5.077E-11	4.147E-11	

상용 프로그램 poly worx의 해석 신뢰성을 분석 하기 위해 함침률 테스트 조건을 적용하여 수지 유동을 모사하였다. 이때 섬유의 함침률은 k1 과 k2의 평균인 4.6E-11를 적용하였다. 수지 함침률 테스트는 웹캠을 통해 시간당 수지흐름 선단이 파악 되었으며, 수지가 중앙의 섬유 주입구로부터 직경 50mm까지 도달시간기준으로 함침률 테스트와 해석 시간을 비교 하였다. 이때 함침률 시험 결과는 480초 였으며, 수지 유동 해석 결과는 445 초로 유사함을 확인 하였으며, Fig. 48는 이때의 형상을 나타낸다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

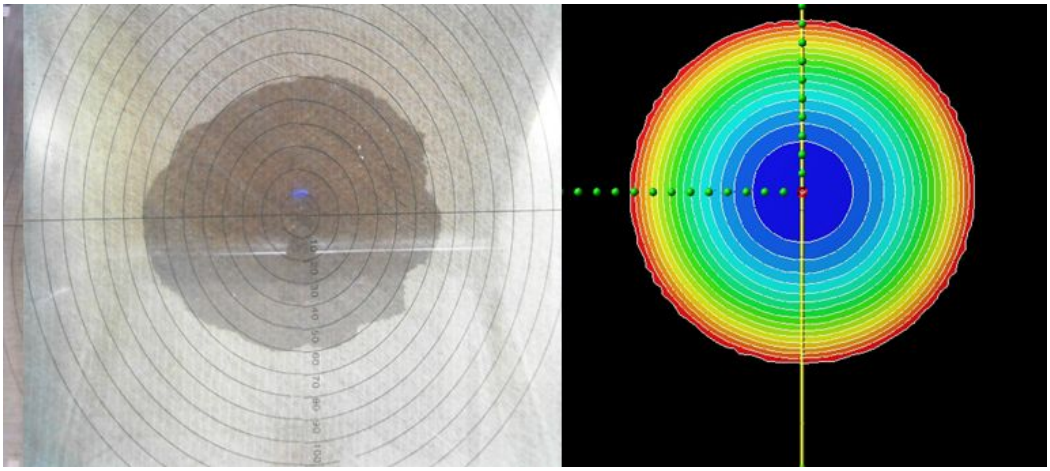


Fig. 48 Resin flow comparison between permeability test and resin flow analysis

2. 적층전략 수립

RIM에 있어 적층전략(Laminating strategy)의 수립은 핵심 요소로써 성형적층의 성공여부를 좌우한다. 적층전략은 제품 크기, 사용 재료의 특성과 구성 등의 정보를 바탕으로 주입 채널과 배출 채널의 치수 선정과 적절한 배치를 의미한다. 적층전략 수립에 있어 필요한 파라미터를 세부적으로 살펴보면 다음과 같다. [58]

(1) 제품의 크기

제품의 크기는 함침(수지의 흐름) 길이와 직결되며 주입 채널과 배출 채널의 수와 배치 형태에 직접적인 영향을 미친다. 또한 제품의 크기는 진공펌프의 용량선정을 위한 척도로도 작용한다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

(2) 수지의 점도

RIM은 수지를 함침시키지 않은 강화재(reinforcement material)를 몰드에 배치했다가 진공압에 의해 수지를 흐르게 하여 강화재에 침투시키는 방식이다. 수지의 종류에는 상관없지만 수지의 점도는 성형적층 작업에 민감한 부분이다. 보통 진공적층공법에 있어 수지의 점도는 100-500 mPas로 한정되며 되도록 낮은 점도의 수지를 사용하는 것이 유리하다.

(3) 강화재의 간격률, 함침성, 배치

수지와 마찬가지로 강화재(reinforcement material)의 물성도 중요한데, 강화재의 여러 물성 중 간격률과 함침성이 필요한 요소이다. 간격률은 섬유의 직조간격 또는 섬유가닥 사이 간격을 강화재 굵기에 대한 비율을 말하며 보통 0.5~0.85 정도이다. 함침성은 섬유자체의 유체흐름 정도를 말하며 제품마다 값이 다르다.

(4) 제품의 형상

몰드면이 평면이나 완만한 곡면일 경우는 수지의 흐름이 원활하게 가지만 복잡한 기하형상일 경우는 전혀 다른 전략수립이 필요하다.

2-1. 기본 적층전략

RIM 은 제품의 크기, 형상에 따라 다양한 적층전략을 수립할 수 있다. 이러한 적층전략들은 기본적인 적층전략을 제품에 맞게 수정하여 사용하게 된다. 기본적인 적층전략을 살펴보면 다음과 같다.

(1) 평판에서의 적층전략

평판에서의 적층은 Fig 49과 같이 3가지 방법이 있다. 작은 크기의 평

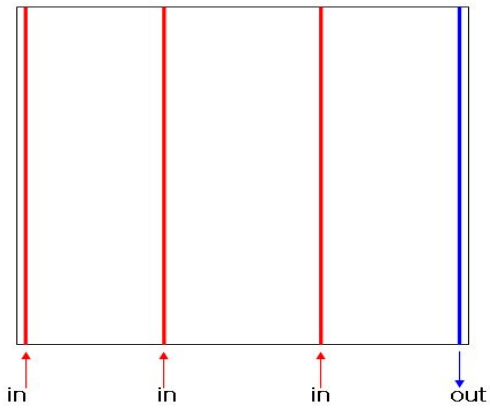
Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

판은 모든 가장자리에 배출채널을 배치하고 가운데 주입채널을 배치하거나((b) 참조) 그 반대의 배치((c)참조)를 하는 것이 보편적이고, 큰 평판의 경우 (a)와 같이 한쪽 가장자리에 배출채널을 두고 주입채널을 등간격으로 배치하는 것이다. 제품 크기에 따라 전략이 다른 이유는 흐름길이의 한계 때문이며, (b), (c)는 속도나 함침율에서 별다른 차이가 없다.

자동차 후드등 입체적인 구조물은 평판의 적층전략과 거의 유사하고, Fig 49의 (b), (c)와 같은 개념의 방법을 사용한다. 단, 높이라는 인자로 인해 (b), (c)의 차이는 달라진다.

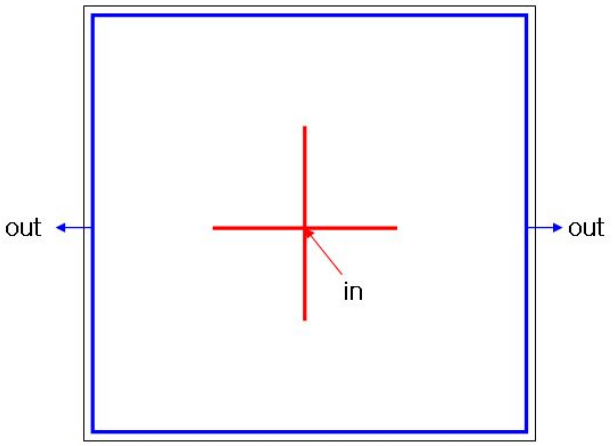
(b)의 경우는 함침시간이 길어지지만 공동발생이 적어 성공률이 높다. (c)의 경우는 수지의 흐름속도가 높이 고저차에 의해 빨라져서 함침시간이 짧은 장점이 있지만 공동발생이 쉽게 나타나고, 주입채널 부근에 수지가 많이 모여 불룩해지는 경우도 있다. 이러한 차이로 인해 암몰드를 이용해서 제품을 성형할 경우는 (b) 개념의 방법을, 수몰드를 이용할 때는 (c) 개념의 방법을 사용하는 것이 유리하다.



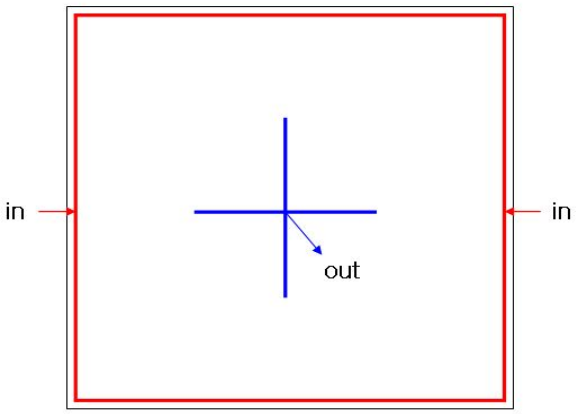
(a)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



(b)



(c)

Fig. 49 Fundamental resin infusion strategies using vacuum pressure

dCollection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

3. 해석 결과

본넷 구조물은 Thin RIM 으로 모델링을 수행하였고(Fig 50), Poly-Worx에서 불러들여 주입/배출구 및 경로를 배치하여 시뮬레이션을 수행하였다.

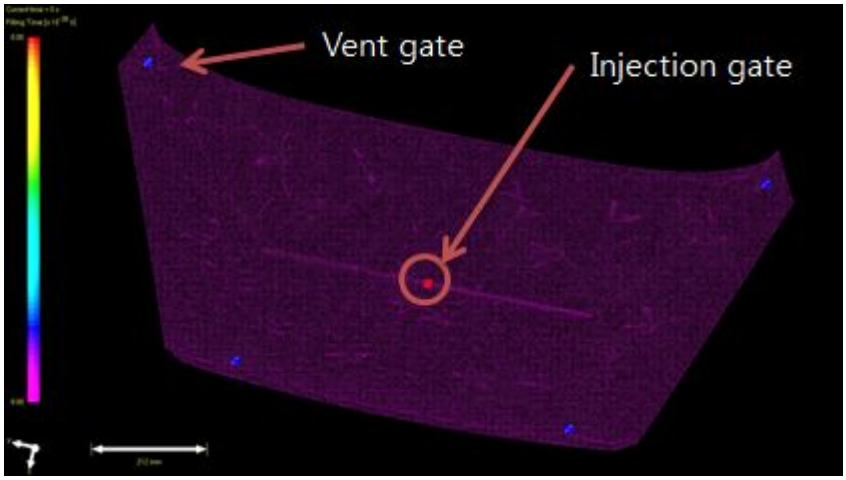


Fig. 50 Hood modeling for resin flow analysis and location of resin injection/vent port (1st condition)

첫 번째로 주입구를 1개(주입경로도 1개임)로 배치하였고, 배출구와 배출경로는 가장자리를 둘러싸는 형상으로 배치하고, 배출구는 4개를 배치하였다. 주입/배출경로의 직경은 12mm로 설정하였다. 제품의 둘레에는 면적 15mm인 채널을 설정하였으며, 적용된 섬유의 체적비는 40% 이때의 함침률은 4.6E-11 이다. 수지는 앞서 선정한 비닐 에스테르를 적용하였으며, 수지의 점성은 150cP이며 섬유 경화 시간은 3000초이며 이는 Table. 10에 정리 하였다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table 10 Resin flow analysis parameter at the first resin infusion condition

Injection Pressure	0BAR	Fiber Permeability	4.6e-11m^2
Vacuum Pressure	1bar	Resin viscosity	150cP
Runner Diameter	0mm	Resin gel time	3000초
Channel Diameter	15mm^2	Volume Fraction	40%

시뮬레이션 결과는 Fig 51과 같이 총 함침시간은 17200초였으며, 수지의 경화시간을 감안하면 2%정도 함침되었을 때 경화되어 끝났을 것으로 예상되었다.

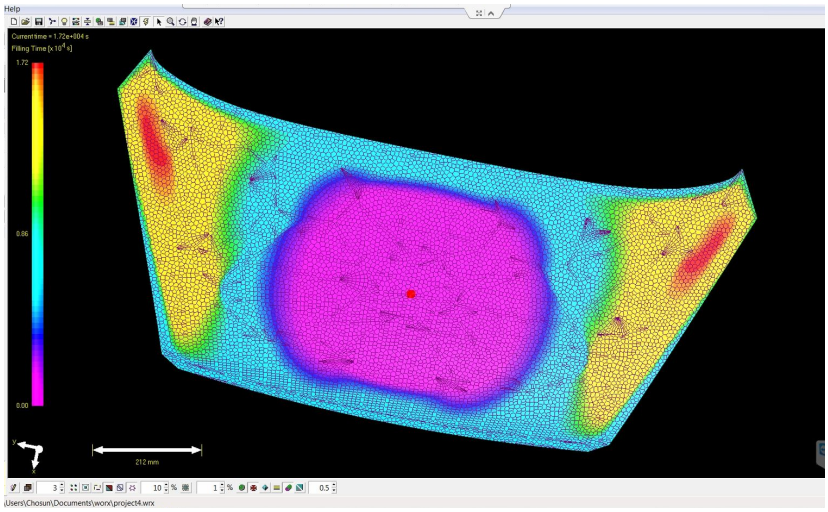


Fig. 51 Resin flow analysis results at the first resin infusion condition

dCollection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

이러한 경우 수지 주입중 수지의 경화가 이루어지므로 수지 주입을 완료 할 수가 없다. 이로 인해 수지 주입 시간을 줄일 수 있는 방안이 필요하며, RIM에서 수지 주입 시간을 줄 일수 있는 방안으로는 런너의 설정, 수지주입구 개수, 수지 배출구 개수 등이 있으나 제작의 편의를 고려하여 수지 주입구 근처에 런너를 설정 하였다.

첫 번째로 주입구를 1개(주입경로도 1개임)로 배치하였고, 수지주입구 근처에 15mm의 런너를 추가 하였다. 나머지 설계 변수는 첫 번째 조건과 같으며 이는 Table 11에 나타내었다.

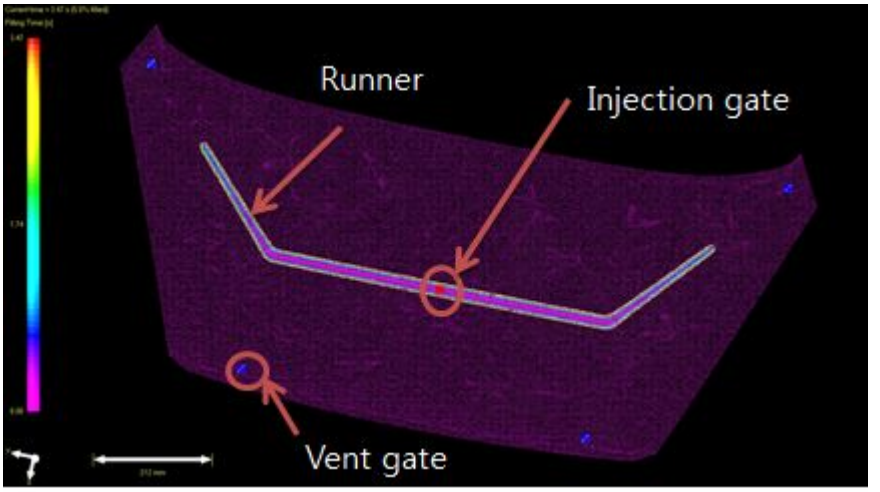
Table 11 Resin flow analysis parameter at 2nd resin infusion condition

Injection Pressure	0BAR	Fiber Permeability	4.6e-11m^2
Vacuum Pressure	1bar	Resin viscosity	150cP
Runner Diameter	15mm	Resin gel time	3000초
Channel Diameter	15mm^2	Volume Fraction	40%

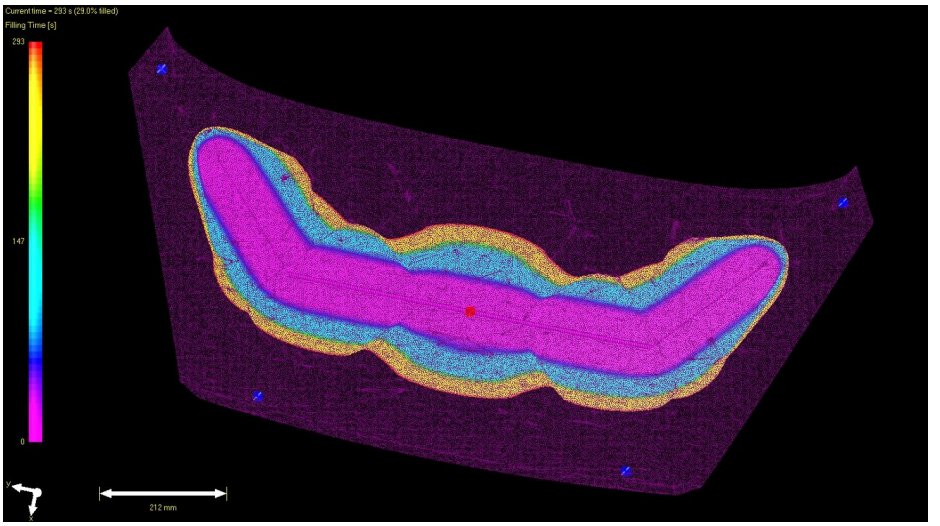
시뮬레이션 결과는 Fig. 52 과 같이 총 함침시간은 2460초였으며, 이는 수지 겔 타임 안에 성형이 완료됨 확인 할 수 있다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



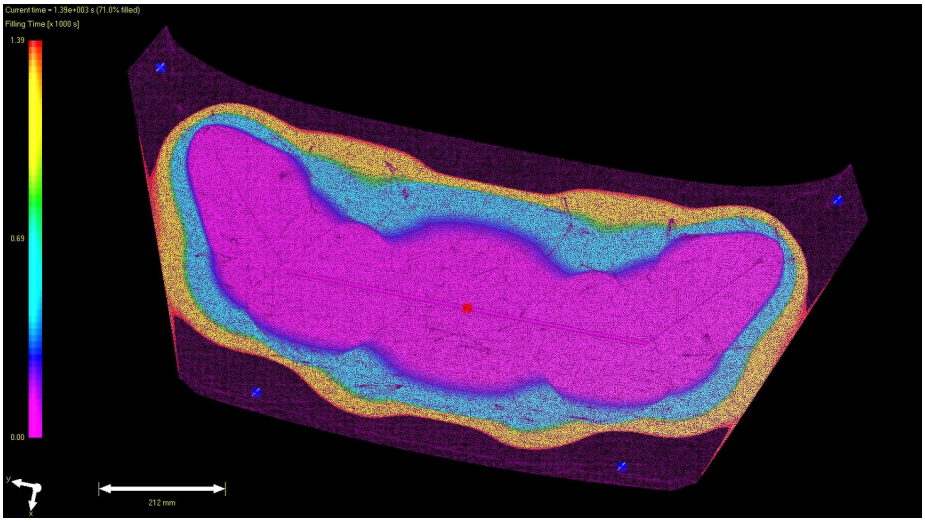
(a) Resin flow progress at 3 seconds



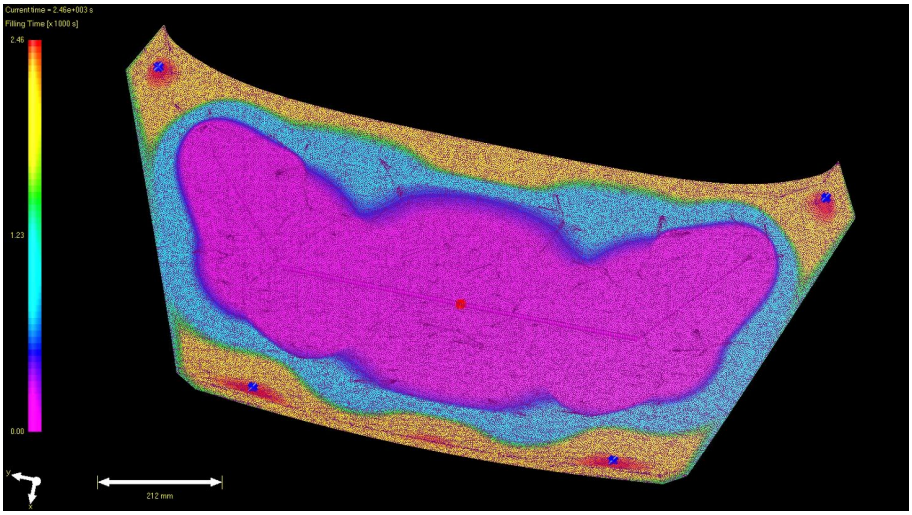
(b) Resin flow progress at 290 seconds

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



(c) Resin flow progress at 1390 seconds



(d) Resin flow progress at 2460 seconds

Fig. 52 Resin flow analysis results using the runner (2nd resin infusion condition)

이와 같이 수지 유동흐름 해석을 통해 제품 성형의 성공 여부를 판단할 수 있었으며, 최적화된 제작 공법을 확립 할 수 있었다.

dCollection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

VI 시제품 제작

1. 시제품 제작 과정

Fig.53~61과 같이 시제품을 제작 하였다. RIM용으로 수정된 몰드는 수지 주입구 개수는 1개이며, 수지 배출구는 4개로 장착하였다. RIM이기 때문에 수지 주입 압력은 0 bar이며 수지 배출구 압력은 -1bar로 적용하였다. 수지와 경화제의 비율은 100:3으로 적용하였다. 총 수지 주입 시간은 2700초로 확인 되었다. 이는 수지 유동 해석 결과인 2460초와 비교했을 때 10%이하의 오차를 확인하였다.

Fig. 62 는 수지 주입 해석결과와 실제 수지 주입 과정의 주입시작 후 150초에서의 비교결과로 해석결과와 실제 주입 수지 침투형상이 매우 유사함을 보여준다.

최종 제작된 시제품의 무게는 10.4kg으로 측정되었으며, 기존 유사 형상의 금속재 후드의 무게가 15kg이다. 따라서 친환경 아마 복합재료를 적용한 경우 30%의 무게 절감 효과가 있는 것으로 분석되었다. 시제품과 수지유동해석, 구조 설계 예측 무게에 관해서 Table 12에 비교 하였다.

Table 12 Comparison between analysis results and measured results of the manufactured hood

	Analysis	Prototype	Error
Infusion time(s)	2460	2700	10
Weight(kg)	10	10.4	4

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Fig. 53 Preforming of flax fabric on the inner hard mold

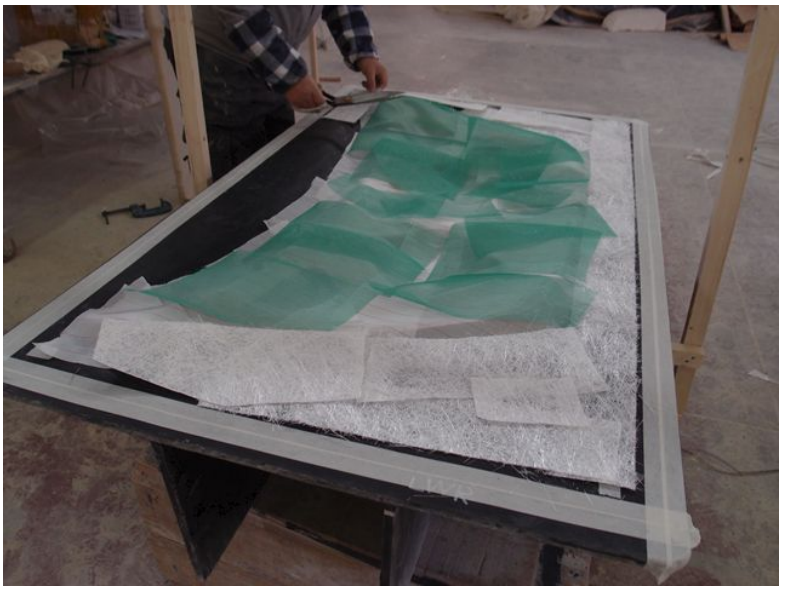


Fig. 54 Peel ply settings

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

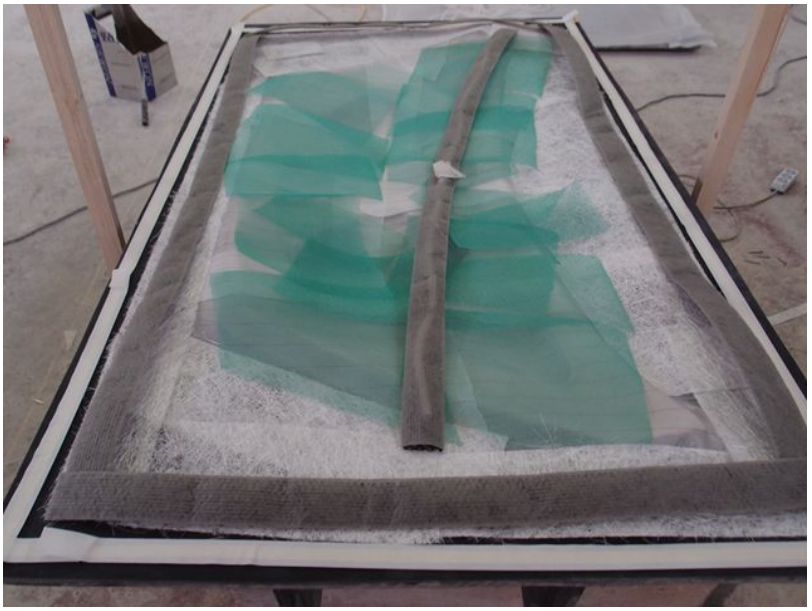


Fig. 55 Setting the runner with injection port on upper side

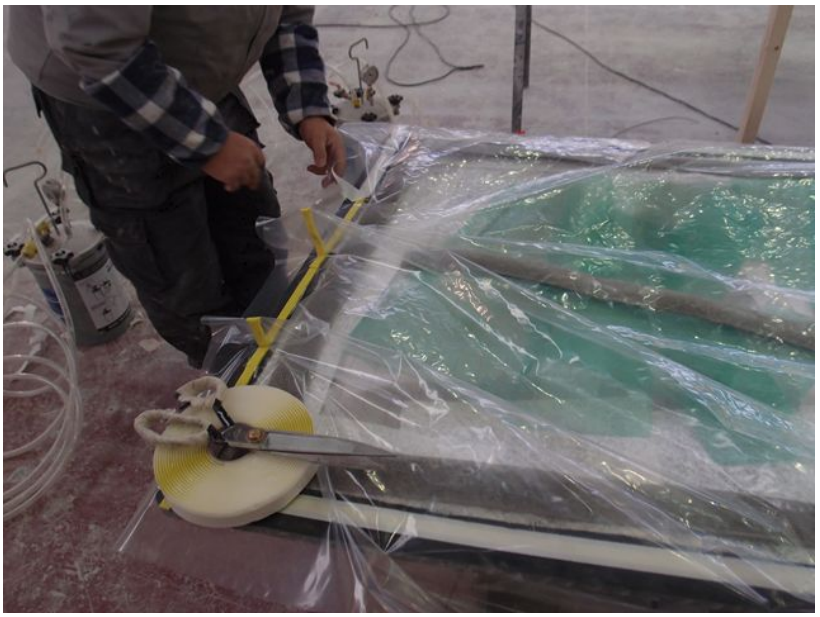


Fig. 56 Vacuum operation

dCollection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

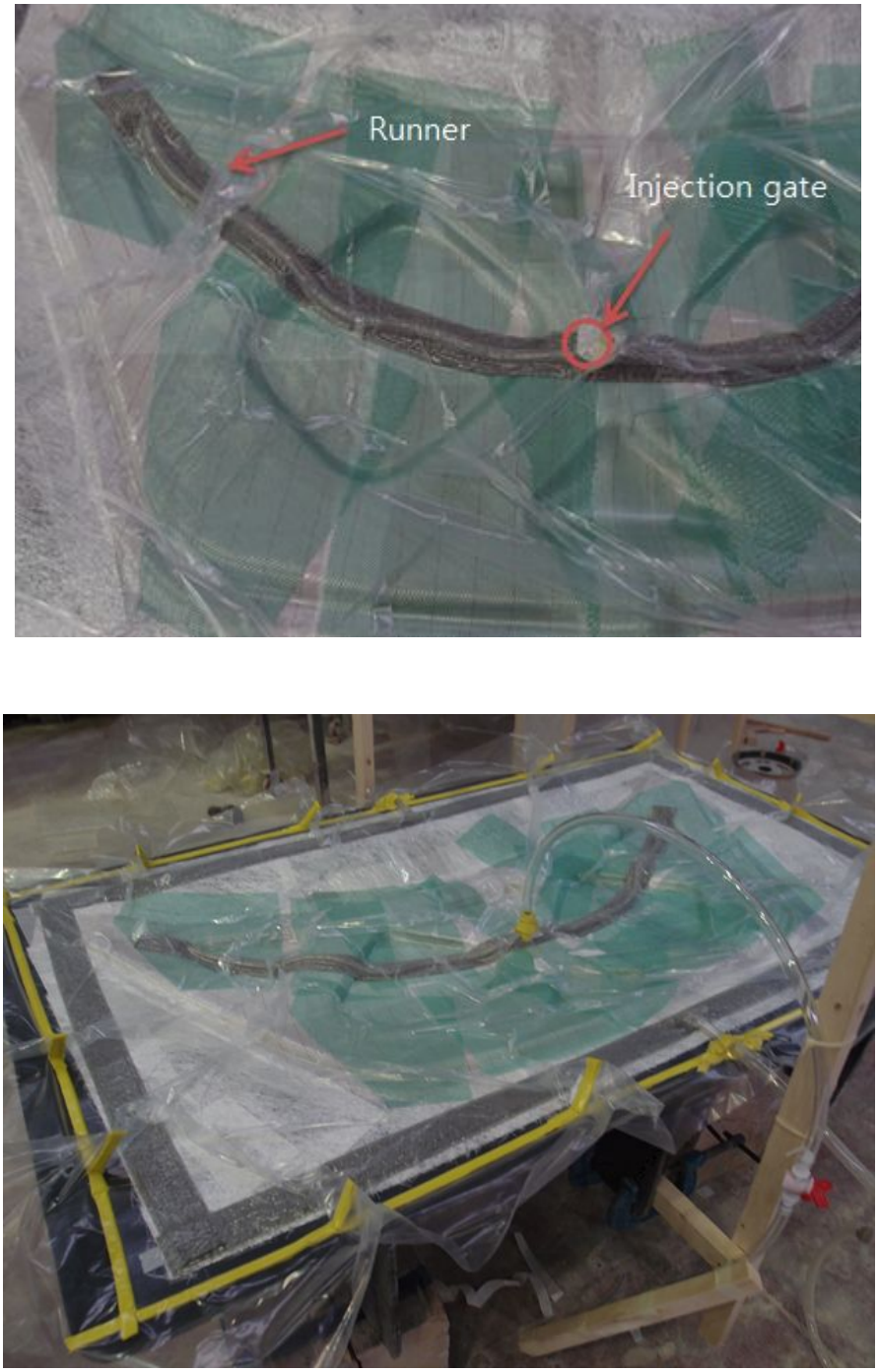


Fig. 57 Setting the runner position

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

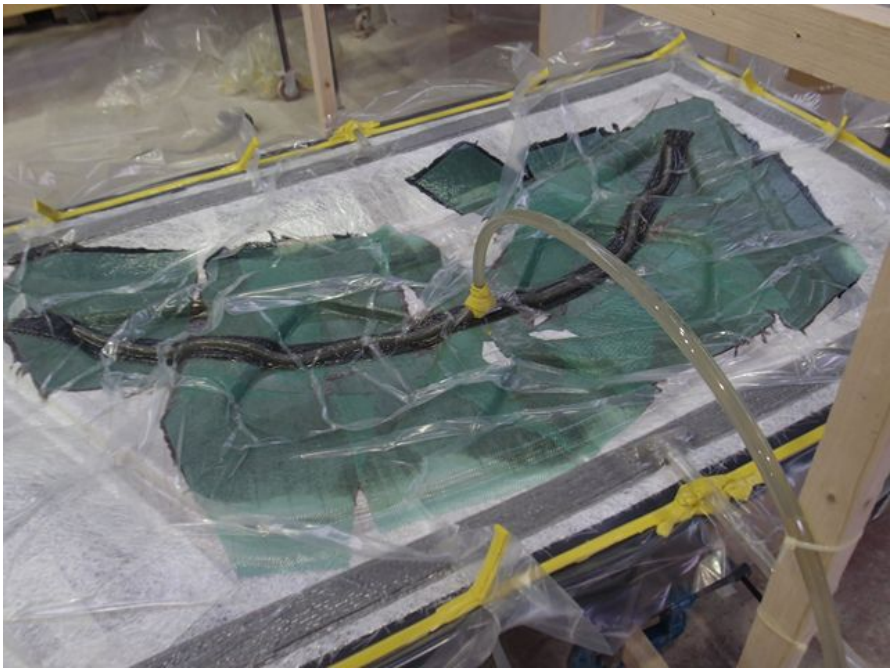


Fig. 58 Resin injection

Fig. 59 completion of resin injection

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Fig. 60 Curing at room temperature after resin injection

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

(a) Inner face (stiffener side)

(b) outer skin face

Fig. 61 Finally manufactured protype hood

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

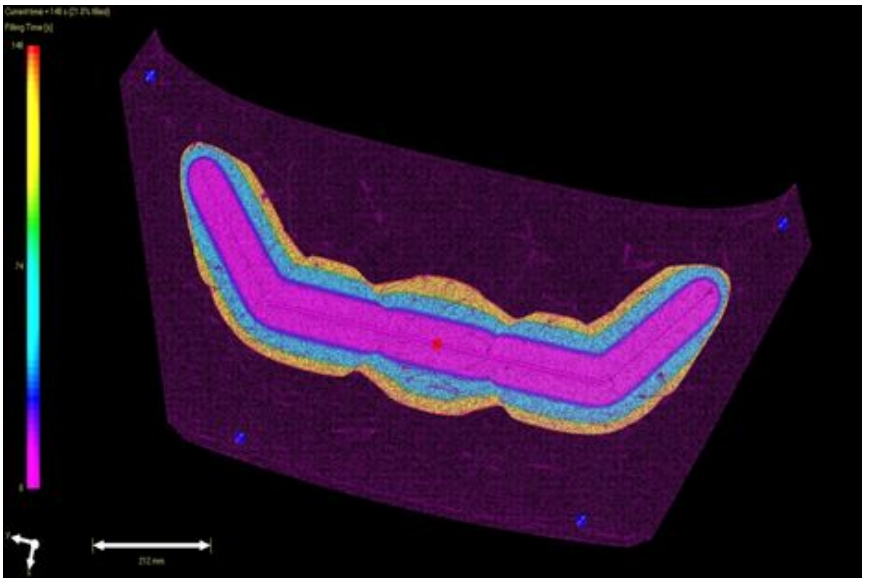


Fig. 62 Comparison of resin infusion pattern between resin flow analysis result and manufacturing process at 20% filling (150 seconds)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

VII. 구 조 시 험

구조시험은 설계된 구조물의 실제 거동이 이론적인 해석결과와 잘 일치하는지를 확인하여 이론해석에서 제시한 안전계수 등의 제반 사항을 입증하기 위해 수행되었다. 일반적으로 구조시험은 정하중 시험을 수행하며 구조물이 파괴에 이를 때까지 하중을 증가하여 파괴강도를 얻는 형태를 취하지만 본 연구에서는 설계하중을 작용시켜 이때의 응력 및 변위를 측정하여 해석 결과와 비교하는 방법을 취하였다.

정 하중 시험을 위해 설계하중은 Fig. 63와 같이 하중조건 1번을 유압식 구조 시험 장비를 이용하여 정하중 시험을 수행 하였다. 또한 흰지 구속에서 15mm 부근에 아래위로 스킨부분과 지지구조물에 스트레인게이지를 부착하여 스트레인값을 측정 하였다. Fig. 64는 유압식 구조 실험 장비 및 시스템의 모습이며, Fig. 65는 구조시험 중인 후드의 사진이며, Table 13는 구조해석결과와 구조시험 결과의 변형 및 스트레인을 비교한 것으로서 9% 이내에서 서로 잘 일치함을 확인하였다.

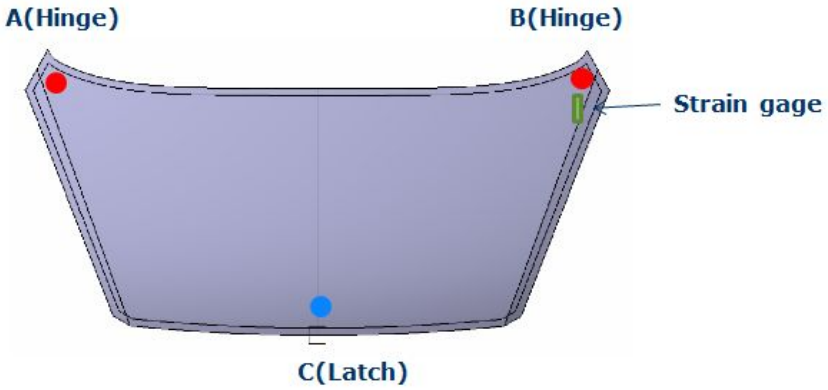


Fig. 63 Fixed points(A, C, strain gage) and loading point(C) for structural test

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

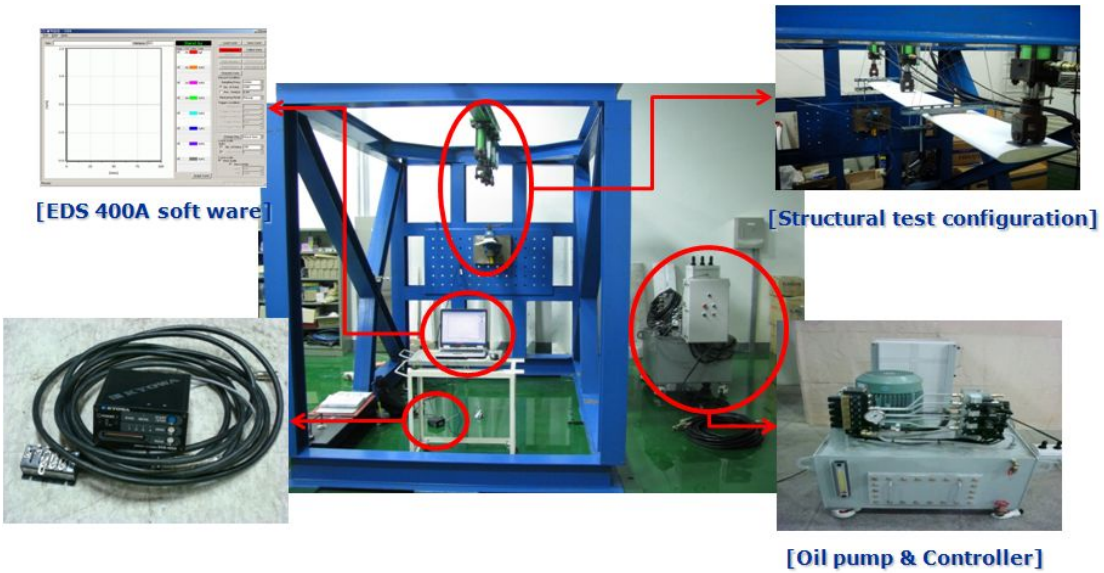


Fig. 64 Structural test rig, strain measuring system and hydraulic loading system

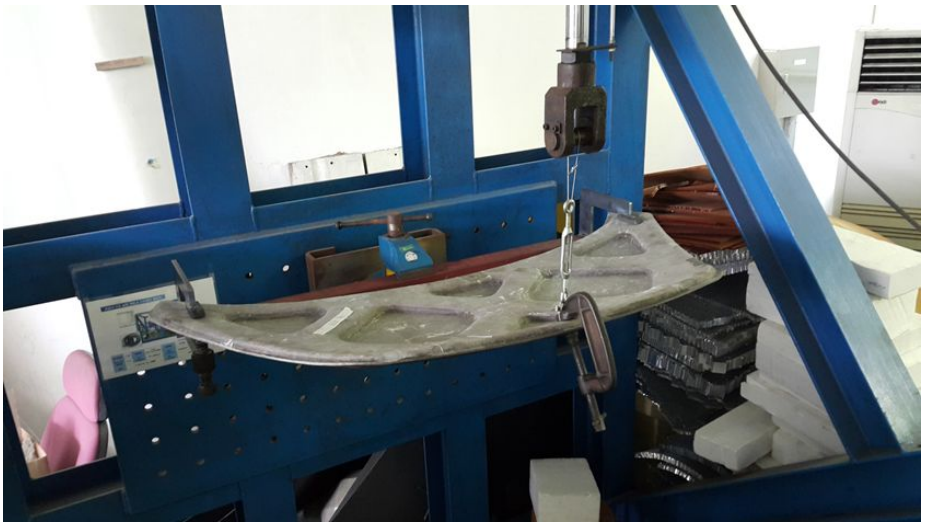


Fig. 65 Structural test of the prototype hood

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

(a)

(b)

Fig. 66 Location of strain gages

a) Strain gage attached on lower surface,

b) Strain gage attached on upper surface

dCollection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

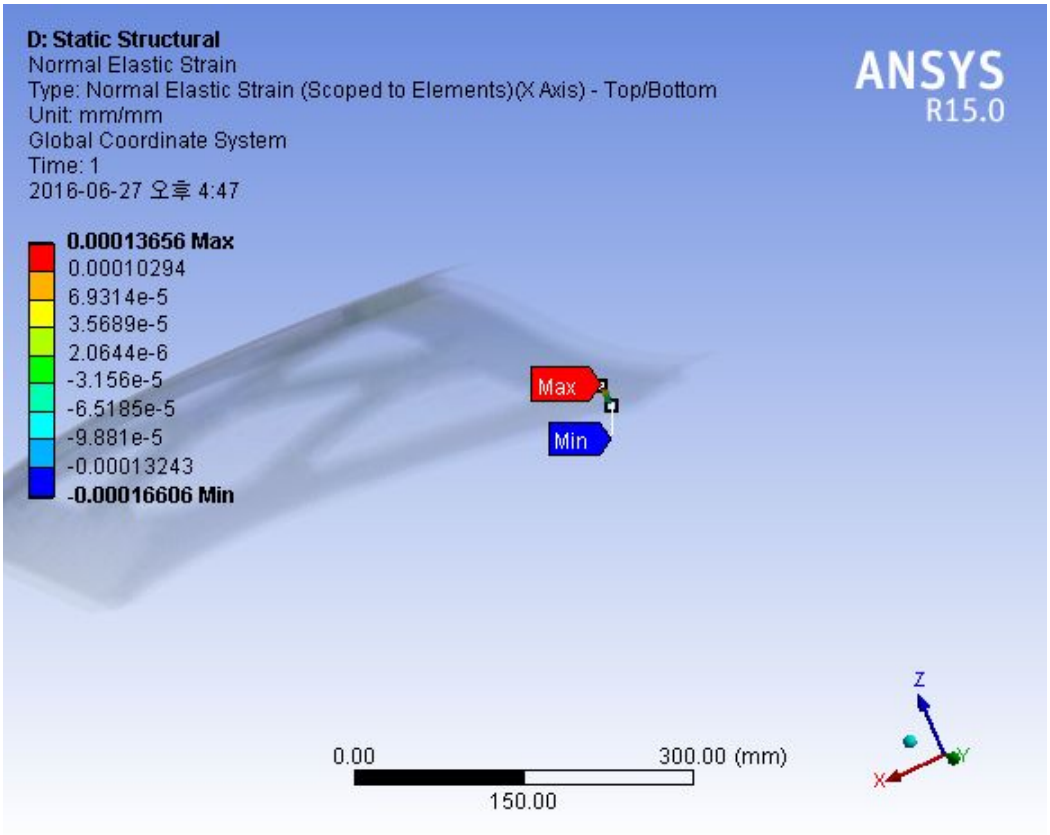


Fig. 67 Strain analysis results on upper and lower surface

Table 13 Comparison of deformations between the stress analysis results and the structural test results

	Analysis	Test	error
Displacement at load point	2.87mm	2.65mm	9%
Upper surface strain (με)	134	131	2%
Lower surface strain (με)	-166	-156	9%

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Ⅶ 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 요약하면 다음과 같다.

첫째. 기존의 금속재료로 제작된 차체 패널을 자연섬유 복합재를 적용하여 재설계하였으며, 후드에 적용된 하중 조건은 실제 상용 자동에 적용되는 하중을 고려하였다.

둘째. 후드 구조물은 내부구조물과 외피로 나누어 경량화를 위한 최적화 설계를 수행하였다. 내부 구조물의 경우 하중 조건에 적용하여 위상 최적화를 통한 형상을 구하였으며, 획득된 내부 구조물의 형상과 외피의 두께를 변수로 하여 자연섬유 적용한 사이즈 최적화 설계를 수행하였다.

셋째. 구조 안전성 검토를 위해 상용 유한요소 해석 프로그램인 MSC. NASTRAN을 활용하여 구조해석을 수행하였다. 구조해석은 하중조건인 굽힘 강성, 비틀림 가성, 외판 강성에 관해서 해석을 수행하였으며, 구조해석 결과 모든 하중조건을 만족함을 확인하였으며, 굽힘강성은 안전율 11.4, 비틀림강성은 안전율 15이상 외판강성은 안전율 2.758로 구조적으로 안전함을 확인 하였으며, 최종 완료된 구조 설계 결과는 스킨은 3ply, 보강재는 16ply이다

넷째. 충돌 하중에 의한 구조 안전성에 대하여 해석을 수행하였다. 충돌은 유럽 보행자 보호 관련 기준에 따라 4.8kg의 성인 머리 모형을 모델링하여 40km/s의 속도로 패널 중앙 부위에 수직으로 충

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

돌해석 하였다. 해석 결과 HIC는 1247로 EuroNCAP규정에서 보통단계를 만족 하였으며, 구조물을 변위 역시 자동차 내부 구조물과의 간섭이 없는 것을 확인 하였다.

다섯. 구조 설계 및 해석 결과 검증하기 위해 시제품을 제작하였다. 시제품 제작 전 상용 프로그램을 통해 RIM 공법시 수지 유동 흐름을 해석하였으며, 수지 겔 타임 3000내인 2460초에 수지 주입이 완료되는 수지 주입구 및 런너 설정등 을 찾았다. 시제품 제작시 수지 유동 해석과의 비교를 통해 수지 주입 흐름이 해석과 유사함을 확인 하였다.

여섯. 완료된 시제품을 통해 구조 시험을 수행하였다. 구조시험은 설계하중 중 굽힘강성에 대하여 하중점 수직 변위 및 특정지역의 스트레인을 측정하여, 해석 결과와 실험 결과를 비교하였다. 수직변위의 경우 해석 2.87mm 시험 2.65mm, 스트레인의 경우 상부 해석 134με, 시험 131με, 하부 해석 -166με, 시험 -156με로 유사함을 확인하였다. 최종 완료된 제품은 기존 금속 제품에 비해 약 30% 경량화를 확인 하였다.

추후 연구 과제로

첫째. 자연섬유 복합재에서 강화섬유로는 기계적 강도가 가장 높은 flax에 한정되었고 수지로는 가격이 저렴하고 경화시간이 상대적으로 긴 vinyl-ester에 한정하였으니 추후 국내에서도 용이하게 생산하여 획득할 수 있는 hemp의 일종인 삼배나 모시등의 소재와 자연수지인 Greenpoxy, CNSL oil등을 이용하는 다양화를 연구할 예정이다.

또한 제조공법에서 금형제작비 절감을 위해 RIM공법을 이용하였으나 내외면이 정밀한 치수를 요구하는 경우를 대비한 금형설계 및

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

RTM공법을 적용에 대한 추가 연구가 필요하다.

둘째. 진동 흡수 특성이 좋은 아마 섬유 복합재 특성을 고려하여, 실제 자동차 구조물과의 공진 특성 비교 및 Head impact 관련 실험이 필요하다.

dCollection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

【참고문헌】

1. Flax and Hemp Fibres: A Natural Solution for the Composite Industry, Frederic Reux, Ignaas Verpoest, European Confederation of Flax and Hemp. European Scientific Committee, JEC Composites, 2012 ISBN2952627614, 9782952627610
2. Natural Fibre Composites, 1st Edition, Hodzic & Shanks , Wood head Publishing, ISBN 9780857099228
3. P. J Herrera-Franco, A. Valadez-Gonzalez, "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. Lee Jong sup, Topology Optimization of Plastic Structures using Finite Element Limit Analysis, School of mechanical, Aerospace and Systems Engineering, Division of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, 119p, 2010,

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

8. R. T. Haftka and R. V. Grandhi, "Structural shape optimization -a survey", Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 57, pp. 91-106, 1986.
9. M. P. Bendsøe and N. Kikuchi, "Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method", Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 71, pp. 197-224, 1988.
10. B. Hassani and E. Hinton, "A review of homogenization and topology optimization I-homogenization theory for media with periodic structure", Computers and Structures, Vol. 69, pp. 707-717, 1998.
11. B. Hassani and E. Hinton, "A review of homogenization and topology optimization II-analytical and numerical solution of homogenization equation", Computers and Structures, Vol. 69, pp. 719-738, 1998.
12. B. Hassani and E. Hinton, "A review of homogenization and topology optimization III-topology optimization using optimality criteria", Computers and Structures, Vol. 69, pp. 739-756, 1998.
13. A. R. Díz and M. P. Bendsøe, "Shape optimization of structures for multiple loading conditions using a homogenization method", Structural Optimization, Vol. 4, pp. 17- 22, 1992.
14. A. R. Díz and N. Kikuchi, "Solutions to shape and topology eigenvalue optimization problems using a homogenization method", International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 35, pp. 1487-1502, 1992.
15. M. P. Bendsøe, "Optimal shape design as a material distribution problem", Structural Optimization, Vol. 1, pp. 193-202, 1998
16. M. P. Bendsøe and O. Sigmund, "Material interpolation schemes in topology optimization", Archive of Applied Mechanics, Vol. 69, pp. 635-654, 1999.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

17. R. J. Yang, and C. H. Chuang, "Optimal topology design using linear programming", Computers and Structures, Vol. 52, No.2, pp. 265-275, 1994.
18. O. Sigmund, "On the design of compliant mechanisms using topology optimization", Mechanics of structures and machines, Vol. 25, No. 4, pp. 493-24., 1997.
19. P. Duysinx, and M. P. Bendsøe, "Topology optimization of continuum structures with local stress constraints", International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 43, pp. 1453-478, 1998.
20. N. L. Pedersen, "On topology optimization of plates with prestress", International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 51, pp. 225-239, 2001.
21. O. Sigmund, "Design of multi physics actuators using topology optimization. Part II: two-material structures", Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 190, pp. 6605-6627, 2001.
22. A. Díaz, and O. Sigmund, "Checkerboard patterns in layout optimization", Structural Optimization, Vol. 10, pp. 40-45, 1995.
23. O. Sigmund, and J. Peterson, "Numerical instabilities in topology optimization: a survey on procedure dealing with checkerboards, mesh - dependencies and local minima", Structural Optimization, Vol. 16, pp. 68-75, 1998.
24. T. E. Bruns, and D. A. Tortorelli, "Topology optimization of non - linear elastic structures and compliant mechanisms", Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 190, pp. 3443-3459, 2001.
25. B. Bourdin, "Filters in topology optimization", International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 50, pp. 2143-2158, 2007.
26. O. Sigmund, 2007, "Morphology-based black and white filters for topology optimization", Structural Multidisciplinary Optimization, Vol. 33, pp. 401-424, 2007

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

27. R. B. Harber, C. S. Jog, and M. P. Bendsøe, 1996, "A new approach to variable-topology shape design using a constraint on perimeter", Structural Optimization, Vol. 11, pp. 1-12, 1996.
28. J. Petersson, 1999, "Some convergence results in perimeter - controlled topology optimization", Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 171, pp. 123-140, 1999.
29. C. S. Jog, 2002, "Topology design of structures using a dual algorithm and a constraint on the perimeter", International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 54, pp. 1007-1019, 2002.
30. S. K. Youn, and S. H. Park, 1997, "A study on the shape extraction process in the structural topology optimization using homogenization material", Computers and Structures, Vol. 62, pp. 527-538, 1997.
31. Y. M. Xie, and G. P. Steven, 1993, "A simple evolutionary procedure for structural optimization", Computers and Structures, vol. 49, No. 5, pp. 885-896, 1993.
32. C. Zhao, P. Hornby, G. P. Steven, and Y. M. Xie, 1998, "A generalized evolutionary method for numerical topology optimization of structures under static loading conditions", Structural Optimization, Vol. 15, pp. 251-260, 1998.
33. O. M. Querin, V. Young, G. P. Steven, and Y. M. Xie,"Computational efficiency and validation of bi-directional evolutionary structural optimization", Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 189, pp. 559-573, 2000.
34. J. A. Sethian and A. Wiegmann, "Structural boundary design via level set and immersed interface methods", Journal of computational physics, Vol. 163, pp. 489- 528, 2000.
35. G. Allaire, and F. Jouve, and AM. Toader, “A level set method for shape optimization", Comptes Rendus Mathematique, Vol. 334, pp. 1125-1130, 2002.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

36. M. Y. Wang, X. Wang, and D. Guo, "A level set method for structural topology optimization", Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 192, pp. 227-246, 2003.
37. I. Y. Kim, and B. M. Kwak, "Design space optimization using a numerical design continuation method", International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 53, pp. 1979-2002, 2002
38. S. Y. Chang, and S. K. Youn, "Material cloud method for topology optimization", International Journal for Numerical Methods in
39. Engineering, Vol. 65, pp. 1585-1607, 2006.
40. Courville, C. B., "Coup-contrecoup mechanism of craniocerebra injuries: some observations",Archives of Surgery, pp.19-43,1942
41. "Occupant crash protection head Injury Criterion. Report No.FMVSS 208",NHTSA, 1972.
42. S Shahbeyk,A Kamalan,M Osanlou,"A comparative study on vehicle aluminum and steel hood assemblies",International Journal of Crash worthiness, Vol8,pp.367-374, 2003.
43. A.Masoumia, Mohammad Hassan Shojaeefardb, "Comparison of Steel and Aluminium Hood with Same Design in View of Pedestrian Head Impact", Safety Science, Vol49,pp.1371-1380, 2011.
44. Koki Ikeda, Hideki Ishitobi, "Development of Aluminum Hood StructureforPedestrianProtection", SAEPaper No:2003-01-2793
45. Masoumi A, Shojaeefard MH, Najibi A, "Comparison of steel, aluminum and composite bonnet in terms of pedestrian head impact", Safety Science, pp.1371-1380, 2011.
46. JingtaoHan,ZhengyiJiang,SihaiJiao,"Study on the Head Impacting Properties of Foam Composite Material Engine Hood", Advanced Materials Research, Vol156,pp.303-306, 2011.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

47. LinliXu,Wenya Tian,Elwin Mao,"Study on High Risky Spots of Engine Hood for Pedestrian Head Crash",Applied Mechanics and Materials,Vol80,pp.1165-1169
48. 박길수, 충돌 하중을 고려한 친환경 자연섬유 복합재 적용 자동차 차체 패널의 구조 설계 연구, 학위논문(석사), 조선대학교 대학원 : 항공우주공학과 2015.
49. 공창덕, 친환경 섬유 복합재를 사용한 RTM 제조 공정 기술 개발 , 조선대학교, 2014.
50. Hyunbum Park, Changduk Kong, Jeonghwan Lee, Ingwon Kim, Hoyeon Lee, Investigation on Mechanical Properties of Flax/Vinyl Ester Natural Fiber Composite, Composites Research v.27 n.1, pp.19-24, 2014.
51. 신현우, 유형조, 여동훈, 신경열, 고윤석, 최상운, 이성원, Design and Analysis of Vehicle Hood using Magnesium Alloy Sheets, 2005년도 한국소성가공학회 추계학술대회 논문집, 220-226 (7 pages), 2005.
52. Process Development for Automotive Hybrid Hood using Magnesium Alloy AZ31B Sheet, D. H. Jang, Transactions of Materials Processing, Vol.20, No.2, 2011.
53. Woojin Co, 2008, The Development of Automotive Hybrid Hood(Steel-Mg) Assembly using Magnesium Alloys in Warm Forming, Innovative Cluster Project of Ulsan Industrial Complex, Ulsan.
54. 이승윤, 위상최적화 기법을 활용한 자동차 체결 기구 및 섬유강화 복합재료 도어의 최적설계, 학위논문(석사)-- 경북대학교 대학원 : 기계공학과 2016.
55. 이은형, 위상과 형상 최적화 기법을 사용한 FRP 교량바닥판의 설계, 학위논문(석사)-- 단국대학교 대학원 : 토목환경공학과 구조공학전공 2009.
56. ANSYS Mechanical Users Guide, Release 12.0 - © 2009 SAS IP, Inc. All rights reserved. - Contains proprietary and confidential information of ANSYS, Inc. and its subsidiaries and affiliates.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

57. "European New CarAssessmentProgramme,EuroNCAP,Pedestrian testing protocol",Version5.1,2010.
58. Jin-Wook Jeong, Byung-Sung Lee, Byung-Yoon Kang, Gab-Su Han and Sung-Bu Su, Study of Laminating Strategy for FRP Hull Using Resin Infusion Simulation, 한국해양공학회지 제23권 제2호, pp 98-103, 2009.
59. Ignaas Verpoest. "A general introduction to composites, highlighting the advantages of flax and hemp composites," Jec composites, pp.15-37, 2012.
60. Moussa Gomina. "Flax and hemp composites applications," Jec composites, pp.141-162, 2012.
61. Fowler PA, Hughes JM, Elias RM J Sci Food Agric 86(12):1781, 2006.
62. Hill CAS, Hughes M J Biobased Mater Bioenergy 4(2):148
63. Summerscales J, Dissanayake NPJ, Virk AS, Hall W Composites Part A 41:1336, 2010.
64. Eichhorn SJ, Baillie CA, Zafeiropoulos N, Mwaikambo LY, Ansell MP, Dufresne A, Entwistle M, Herrera-Franco PJ,
65. Escamilla GC, Groom L, Hughes M, Hill C, Rials TG, Wild PM J Mater Sci 36:2107. doi:10.1023/A:1017512029696, 2001.
66. Arash Mahdavi,Raghavan Balaji,Mary Frecker,EricM.Mockensturm, "Parallel Optimality Criteria-based Topology Optimization for Minimum Compliance Design",6th World Congresses of Structural andMultidisciplinaryOptimization, 2005.
67. Bank, "Compositesforconstruction:StructuralDesign with FRP Materials",Wiley , 2006.
68. H. Kang and W. M. Kyoung, "Structural Design Optimization of the aluminum Space Frame Vehicle", journal of KSAE, Vol. 16, No. 1, pp. 175-180, 2008.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

69. J. H. Kim, K. H. Im, S. B. Pyeon, I. Y. Yang and J. H. Kim, “The Bending Charateristics of Al-CFRP square Hybrid Member for Automobile Structural Members”, journal of KSAE, volume. Ⅲ, pp. 1512-1516, 2007.
70. H. C. Kim, J. S. Yun and S. H. Chang, “Productive Method of Monocoque Structure Automobile with High Stiffness and Lightweight Composites”, journal of KSAE, volume. Ⅲ, pp. 1695-1700. 2005.
71. Y. C .Ji, N. I. Jeon, W. J. Seo, M. S. Doo, I. S, Chung, “The Structural Analysis on the Damper Spring Module of Mcpherson Suspension”, journal of KSAE, volume Ⅱ, pp. 691-696, 2004
72. C. Choi, K. I. Bae, “The Stress Analysis of Chassis Components in the Early Stage of Vehicle development”, journal of KSME, Vol. 36, No.9, pp. 876-885. 1996.
73. R. T. Haftka and R. V. Grandhi, "Structural shape optimization - a survey", Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 57, pp. 91-106. 1986.
74. M. P. Bendsøe and N. Kikuchi, "Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method", Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 71, pp. 197-224. 1988,
75. B. Hassani and E. Hinton, "A review of homogenization and topology optimization I-homogenization theory for media with periodic structure", Computers and Structures, Vol. 69, pp. 707-717. 1998.
76. B. Hassani and E. Hinton, "A review of homogenization and topology optimization II-analytical and numerical solution of homogenization equation", Computers and Structures, Vol. 69, pp.719-738, 1998.
77. B. Hassani and E. Hinton, "A review of homogenization and topology optimization III-topology optimization using optimality criteria", Computers and Structures, Vol. 69, pp. 739-756 1998.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

78. A. R. Díz and M. P. Bendsøe, "Shape optimization of structures for multiple loading conditions using a homogenization method", Structural Optimization, Vol. 4, pp. 17- 22, 1992.
79. A. R. Díz and N. Kikuchi, "Solutions to shape and topology eigenvalue optimization problems using a homogenization method", International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 35, pp. 1487-1502, 1992.
80. M. P. Bendsøe, "Optimal shape design as a material distribution problem", Structural Optimization, Vol. 1, pp. 193-202, 1989.
81. M. P. Bendsøe and O. Sigmund, "Material interpolation schemes in topology optimization", Archive of Applied Mechanics, Vol. 69, pp. 635-654, 1999.
82. R. J. Yang, and C. H. Chuang, "Optimal topology design using linear programming", Computers and Structures, Vol. 52, No.2, pp.265-275, 1994.
83. O. Sigmund, "On the design of compliant mechanisms using topology optimization", Mechanics of structures and machines, Vol. 25, No. 4, pp. 493-24, 1997.
84. P. Duysinx, and M. P. Bendsøe, "Topology optimization of continuum structures with local stress constraints", International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 43, pp. 1453-478, 1998.
85. N. L. Pedersen, "On topology optimization of plates with prestress", International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 51, pp. 225-239, 2001.
86. "보행자친화적첨단안전차량개발연구보고서,국토해양부. 2008.
87. Pritz H. B., Hassler C. R., Herridge J. T., Weis E. B. Jr, "Experimental study of pedestri an injury minimization through vehicle design",Stapp Car Crash Conference, Vol19,pp.725-751, 1975

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

88. T.-L.TENG,V.-L.NGO, "Analyzingpedestrianheadinjurytodesign pedestrian-friendly hoods", International Journal of Automotive Technology, Vol12,pp.213-224,2011
89. YamadaY., OkudaK., ShiraishiN., D.Hughes, "Pedestrian protection
90. and rear-end collision injury reduction technologies on ASV-2",7th IntelligentTransportSystemsWorldCongress,2000
91. Hogi Jung, "Pedestrian protection system: review and problems", KSAE 2010 Annual Conference, pp.1820-1826,2010
92. Tarak Gandhi, Mohan Manubhai Trivedi, "Pedestrian Protection Systems: Issues, Survey, and Challenges", IEEE Transaction on IntelligentTransportationSystems,Vol8,pp.413-430,2007
93. R.Fröming, V.Schindler, M.Kühn,"Requirement engineering for active safety pedestrian protection systems based on accident research",Advanced Microsystems for Automotive Applications, pp. 79-106,2006
94. PeterJ. Schuster,"Current Trends in Bumper Design for Pedestrian Impact",SAEPaper No:2006-01-0464
95. Rikard Fredriksson,Yngve Håland, Jikuang Yang,"Evaluation ofa new pedestrian head injury protection system with a sensor in the bumper and lifting of the bonnet's rear part",Autoliv Research, Sweden,pp.131-141,2002
96. Lee JW,Yoon KH,Kang YS,Park GJ,"Vehicle hood and bumper structure design to mitigate casualties of pedestrian accidents",The 17th InternationalTechnicalConference on the Enhanced Safety of Vehicles(ESV),2001
97. Quanjie Gao,"Improvement of Hood Hinge Based on Protection of Pedestrian Head", Advanced Materials Research, Vol228,pp.119-124, 2011

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

98. 25. C.Kerkeling,J.Schafer,G.-M. Thompson,"Structural hood and hinge concepts for pedestrian protection",17th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles Conference, 2001
99. "각국의 자동차안전도평가제도 시행현황",국토해양부 정책자료,2010
100. "신차안전도평가 방법(보행자)",자동차 결함신고센터,2011
101. "Japan New Car Assessment Program: Pedestrian head protection performance tests",pp.36-37,2011
102. "Notesontheassessmentprotocol,ANCAP",Version4.8,2007
103. "http://www.nhtsa.gov/Laws+&+Regulations/Vehicles",NHTSA
104. "CNCAP management regulation, CNCAP",2009edition,2009
105. "Latin american & carribean New Car Assessment Programme, LatinNCAP,Assessmentprotocoland bio mechanical limits",Version 1.1,2010
106. Thomas Frank, Daimler Chrysler AG,"Development andv alidation of numerical pedestrian impactor models", 4th European LS-DYNA Users Conference, pp3-11,2007

Collection @ chosun