



저작자표시 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

- 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](#) 

2011년 2월
석사학위논문

기능성 플라스틱을 이용한 초경량 범퍼
백빔 설계에 관한 연구

조 선 대 학 교 대 학 원

기계공학과

김 세 훈

기능성 플라스틱을 이용한 초경량 범퍼 백빔 설계에 관한 연구

A study on the design of the lightweight bumper
backbeam consisting of functional plastics

2011 년 02 월 25 일

조 선 대 학 교 대 학 원

기계공학과

김 세 훈

기능성 플라스틱을 이용한
초경량 범퍼 백빔 설계에
관한 연구

지도교수 안 동 규

이 논문을 공학석사학위신청 논문으로 제출함.

2010 년 10 월

조 선 대 학 교 대 학 원

기계공학과

김 세 훈

김세훈의 석사학위 논문을 인준함.

위원장 조선대학교 교수 김 종 관



위 원 조선대학교 교수 한 길 영



위 원 조선대학교 교수 안 동 규



2010 년 11월

조 선 대 학 교 대 학 원

목 차

LIST OF TABLE	I
LIST OF FIGURES	II
NOMENCLATURES	IV
ABSTRACT	
제 1 장 서 론	1
제 1 절 연구배경 및 관련연구	1
제 2 절 연구목적 및 방법	4
제 2 장 기능성 플라스틱 판재의 충격 특성 평가	6
제 1 절 내충격 시험/평가 기술 개발	6
1. 실험 Set-up	6
2. 스트레칭형 경계조건에서 내충격 시험방법	7
3. 기능성 플라스틱 판재의 내충격 흡수에너지 측정 방법 ..	11
제 2 절 스트레칭형 경계조건에서의 충격시험	13
1. 기능성 플라스틱 판재의 파단 특성 분석	13
2. 기능성 플라스틱 판재의 실험 결과 및 고찰	16
제 3 장 초경량 범퍼 백빔에 대한 3차원 유한요소해 석	21
제 1 절 기능성 플라스틱을 이용한 범퍼 백빔의 3차원 유한	

요소 해석 방법	21
1. 유한요소 해석 방법 및 모델링	21
2. 경계조건	24
3. 재료 물성 특성 분석	25
4. 충돌해석 관련 법규 및 규정	28
제 2 절 초경량 범퍼 백빔의 설계에 따른 3차원 유한요소 해석 결과 및 고찰	29
1. 소재별 적용 위치 및 구성에 따른 충격 흡수 특성 검증	29
2. 개방형 및 밀폐형 설계에 따른 범퍼 백빔의 충돌 해석 결과 및 고찰	35
3. 백빔 내 리브 방향에 따른 충돌 해석 결과 및 비교/분석	40
4. 리브 설계안에 따른 범퍼 백빔 충돌 해석 결과 및 고찰	45
제 4 장 미연방 자동차 안전 기준 (FMVSS) 에 따른 범퍼 백빔의 지속 충돌 시험	50
제 1 절 5 mile 범퍼 백빔의 지속 충돌 시험	50
1. 범퍼 백빔 충돌 시험 시편 제작	50
2. Pendulum 충돌 시험 방법	53
3. Pendulum 충돌 시험 결과 및 비교/분석	55
제 5 장 결론 및 향후 과제	57
REFERENCES	59

감사의 글

LIST OF TABLES

Table 1 Design of specimen for stretching type of impact test	10
Table 2 Failure mode of specimen for stretching type of impact test	14
Table 3 Results of impact test of functional plastic panel and that of GMT panel for the case of stretching boundary conditions (D=40mm)	16
Table 4 Number of nodes and elements of three-dimensional finite element analysis	23
Table 5 Material properties of TPO and PP(α)	25
Table 6 Impact regulations conditions	28
Table 7 Result of FE analysis according to material combinations	30
Table 8 Number of nodes and elements of three-dimensional finite element analysis	36
Table 9 Result of FE analysis according to material replacement and combinations	36
Table 10 Number of nodes and elements of three-dimensional finite element analysis	41
Table 11 Results of FE analysis according to ribs direction	41
Table 12 Results of FE analysis according to ribs formation	46
Table 13 Results of low-speed frontal collision test	55

LIST OF FIGURES

Fig. 1 TPO (Thermoplastic Poly Olefin)	1
Fig. 2 Components of Bumper system	2
Fig. 3 Research for flowchart	5
Fig. 4 Experimental set-up of drop impact test	6
Fig. 5 Data acquisition system of impact tests	7
Fig. 6 High speed camera system to measure the collision between the impact head and specimen	8
Fig. 7 Schematics and experimental devices for stretching type of impact test	9
Fig. 8 Cumulative absorption energy	11
Fig. 9 Specimens of functional plastics	13
Fig. 10 Deformed shape of functional plastic panels for the case of stretching boundary conditions	14
Fig. 11 SEM image of PP(α) (Polypropylene + Glassfiber 20%)	15
Fig. 12 Results of impact test for functional plastic panel and those for GMT panel for the case of stretching boundary conditions (P- δ curve)	17
Fig. 13 Comparison of the absorbed impact energy and energy absorption rate for GMT panel and those for functional plastics	18
Fig. 14 Force-time curves for the GMT panel and functional plastic panels	19
Fig. 15 Variation of specific force according to impact energy	20
Fig. 16 Modeling of pendulum	21
Fig. 17 FE model of the impact analysis for bumper backbeam	22
Fig. 18 FE model of the impact analysis for pendulum	23
Fig. 19 Boundary conditions of pendulum impact test	24
Fig. 20 Results of high speed tensile tests for TPO	26
Fig. 21 Results of high speed tensile tests for PP(α)	26
Fig. 22 Design of bumper backbeam according to material combinations	29
Fig. 23 Comparison of the force-intrusion and the energy-intrusion curves according to	

material combinations	31
Fig. 24 Variation of effective stress distributions for different material combinations	33
Fig. 25 Variation of principal strain distributions for different material combinations	33
Fig. 26 Design of bumper backbeam according to sectional shapes	35
Fig. 27 Influence of sectional shapes on the force-intrusion curves and force-time curves of bumper backbeam	37
Fig. 28 Contact area between the pendulum and bumper backbeam	38
Fig. 29 Energy absorption characteristics	38
Fig. 30 Variation of effective stress distributions for different section shapes	39
Fig. 31 Variation of principle strain distributions for different section shapes	39
Fig. 32 Design of bumper backbeam according to ribs direction	40
Fig. 33 Influence of ribs direction on the force-intrusion curves and force-time curves of bumper backbeam	42
Fig. 34 A absorbed energy according to ribs direction	43
Fig. 35 Variation of effective stress distributions for ribs direction	43
Fig. 36 Variation of principal strain distributions for ribs direction	44
Fig. 37 Design of the rib formation	45
Fig. 38 Influence of the rib formation on the force-intrusion curves and force-time curves of bumper backbeam	46
Fig. 39 Absorbed energy according to the rib formation	47
Fig. 40 Variation of effective stress distributions for the rib formation	48
Fig. 41 Variation of principal strain distributions for the rib formation	48
Fig. 42 Final design for bumper backbeam	50
Fig. 43 Manufacturing process of injection mould	51
Fig. 44 Fabricated mould set	51
Fig. 45 Injection molding apparatus	52
Fig. 46 Vibration welding and final product	52
Fig. 47 Experimental devices for low-speed frontal collision test	53
Fig. 48 Experimental set-up of low-speed frontal collision test	54
Fig. 49 Comparison of results of experiment and those of FE analysis	55

NOMENCLATURES

C_d : 재료의 응력 전파속도

E : 탄성계수

E_{ab} : 시편이 흡수한 충격에너지

$E_{ab,max}$: 시편이 흡수한 총 누적 충격 흡수 에너지

E_i : i 구간의 충격 흡수에너지

E_{in} : 충격 입력에너지

$\sum e_i$: 1 부터 i 구간까지의 총 흡수 에너지

$\sum e_j$: i 부터 k 구간까지의 총 복원 에너지

g : 중력가속도

L_c : 임계요소길이

m : 질량

P : 하중

P_i : i 구간의 힘

P_{i-1} : $i-1$ 구간의 힘

P_{max} : 최대하중

time : 충격 실험에 따른 시간

Δt_s : 안정적 시간증분

V : 충격속도

δ : 변위

δ_D : 처짐량

δ_I : 침투량

δ_i : i 구간의 변위

δ_{i-1} : $i-1$ 구간의 변위

δ_{max} : 최대변위

η : 에너지 효율

χ : 충격 에너지 흡수율

ABSTRACT

A study on the design of the lightweight bumper backbeam consisting of functional plastics

Kim Se Hun

Advisor : Prof. Ahn Dong-Gyu, Ph. D

Dept. of Mechanical Engineering,

Graduate School of Chosun University

Recently, the demand of eco-friendly products with high energy efficiency and low environmental impact has increased to cope with the energy depletion and environmental regulation. Transport vehicle industries begins to make an effort to develop a lightweight component, which satisfies the consisting of requirements of rigidity, strength and crashworthiness, for the reduction of overall weight and the improvement of the energy consumption rate. Due to these trends, the direction of the development of the automotive bumper is changed from the metal bumper to the plastic bumper. The objective of this thesis is to obtain a proper design of the lightweight bumper backbeam consisting of functional plastics for the automotive. Thermoplastic poly olefin (TPO), poly propylene with 20 % of glassfiber (PP(α)) and glassfiber reinforced mat thermoplastic (GMT) were chosen as alternative materials of the bumper backbeam. In order to obtain mechanical properties and strain-stress relationships with strain rate effects, tensile and high-speed tensile tests were performed. Preliminary impact characteristics, including force-deflection curves, deformation behaviours, energy absorption rates, failures, and fractures, of the alternative materials were investigated through the drop impact tests for the specimen. The results of the drop impact tests showed that the TPO material has a comparable impact property to the GMT material. In order to obtain a proper design of the bumper backbeam, three-dimensional finite element analysis was performed using a commercial code of ABAQUS V6.5 explicit. Collision test conditions of US Federal Motor Vehicle Safety

Standard (FMVSS, pendulum collision type) were applied to the FE model. The results of the FE analysis for the FMVSS condition showed that the impact characteristics of the backbeam can be improved as front and rear parts of the backbeam are consisted of TPO and TPO plastic materials, respectively. In addition, it was noted that influence of the ribs in the longitudinal direction on the impact performance is higher than that of the ribs in the width direction. Using these results, alternative designs of the ribs formation (five types) for the backbeam were estimated. The repeated FE analyses for the alternative designs of the ribs formation were carried out. From the results of the FE analysis, the impact characteristics of the backbeam for alternative designs of the ribs formation were compared from the viewpoints of the energy absorption characteristics, strain-stress distributions, intrusion, and deflections. Using this comparison results, a proper rib design of the backbeam was estimated. The collision tests for the FMVSS were carried out to verify the estimated design of the bumper backbeam. The specimen was manufactured from the injection molding of front and rear parts and the vibration welding of the two parts. The results of the collision tests showed that the designed bumper backbeam satisfies the regulation of FMVSS. From this results, it was shown that the proposed design of the bumper backbeam can be applied to the development of the lightweight bumper backbeam. In the future, additional researches, including the FE analyses and the collision tests for the regulation of Insurance Institute for Highway Safety (IIHS, barrier collision type), should be carried out to commercialize the proposed design of the bumper backbeam.

제 1 장 서 론

제 1 절 연구배경 및 관련 연구

산업혁명 이후 인류의 무분별한 화석에너지 사용으로 인하여 전 세계는 환경오염 뿐만 아니라 화석 에너지 수급 불균형과 높은 가격 구조의 지속 등 심각한 에너지 문제를 겪고 있다. 이에 환경오염 예방과 에너지 소비 효율에 대한 규제 강화에 따른 대응책으로 제품 경량화를 통한 에너지 효율을 높이는데 주력하고 있으며, 이로 인해 불거질 수 있는 안전성 문제를 보완하기 위해 자동차/선박/항공기 등과 같은 수송기기 관련 산업군서는 제품 경량화를 통해 에너지 소비 효율을 향상시키고 고강성, 고강도, 고내충격성 재료 개발을 통해 승객의 안정성 강화를 위한 소재 개발에 주력하고 있다.¹⁻³⁾ 이에 에너지 효율 증대를 통한 환경오염 요인 감소와 함께 강도/강성/내충격성을 현저히 증가시키기 위한 기능성 플라스틱 (Functional plastics) 에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이러한 기능성 플라스틱 중 본 연구에 사용된 TPO (Thermo plastic polyolefin) 는 Fig. 1 과 같이 범용 수지인 PP (Polypropylene) 에 충격 보강재로 EPDM (Ethylene propylene diene M-class) 이라는 이중합성고무를 첨가하여 경도로 가교시킨 재료이다.⁴⁻⁵⁾ 기능성 플라스틱의 경우 첨가 재료에 따라 기계적 물성과 충격 특성이 결정될 수 있다. 본 소재의 경우 Polypropylene 에 유리 섬유 (Glass fiber) 를 20 % 정도 첨가함으로써 기계적 강도, 고충격 흡수능을 향상시켜 고강성, 고강도가 요구되는 자동차 외장 부품에 적용할 수 있도록 하였다.⁶⁻⁷⁾

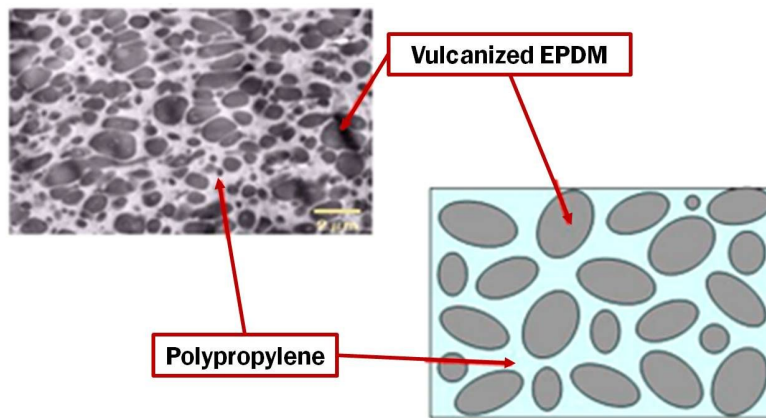


Fig.1 TPO (Thermoplastic poly olefin)

본 소재가 적용된 범퍼 백빔은 범퍼 시스템을 구성하고 있는 부품 중 하나로서 범퍼 시스템은 자동차의 가장 앞부분과 뒷부분에서 차체에 장착되어 경미한 충돌 시 충돌에너지를 최대한 흡수하여 차체의 변형을 막아주고, 과도한 충돌 시에도 최대한의 강도와 에너지 흡수 능력을 발휘하여 차체의 변형을 최소화 시켜줌과 동시에 승객의 안전을 도모하는 중요한 자동차 외장 부품이다. Fig.2 와 같이 범퍼시스템은 범퍼 백빔 (bumper backbeam), 범퍼 스테이 (bumper stay), 범퍼 페이스 (bumper fascia) 로 구성되며, 이 중 범퍼 백빔은 스테이를 통하여 볼트로 차체 사이드 멤버 (side member) 에 장착되어 충돌 시 흡수재가 충돌에너지를 충분히 흡수할 수 있도록 지지함과 동시에 차체 및 엔진 등 타 부품의 손상을 방지할 수 있도록 여분의 충돌 에너지를 감소시켜주는 역할을 한다.⁸⁻¹¹⁾

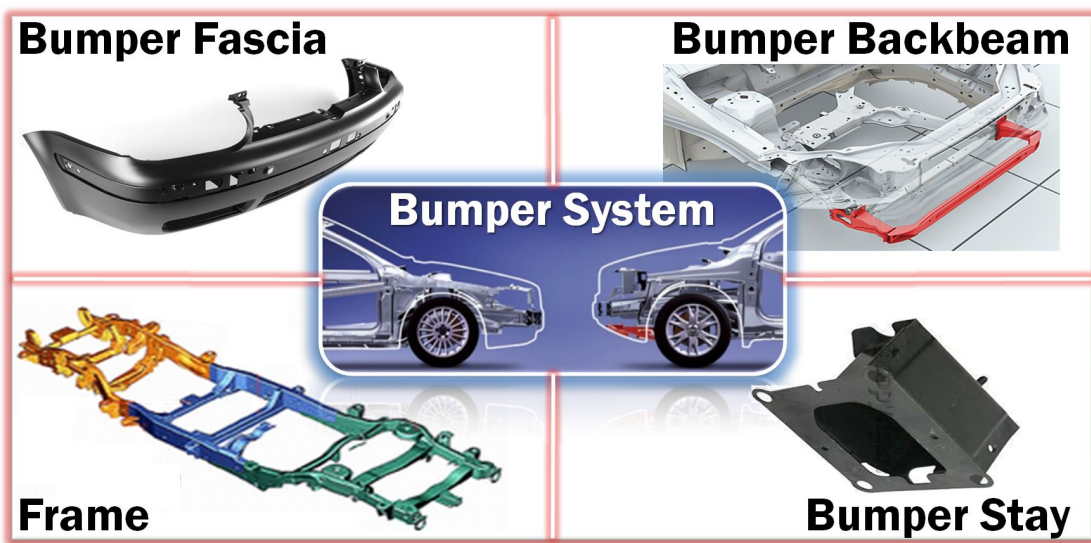


Fig. 2 Components of Bumper system

범퍼 백빔의 충돌 성능은 자동차의 각종 충돌로부터 승객을 보호하기 위하여 제정된 각국의 법규를 만족하여야 한다. 자동차 충돌에 관한 대표적인 안전 법규로는 한국 국내 안전 기준 (KMVSS), 미국 북미 자동차 안전 기준 (FMVSS), 그리고 유럽 자동차 안전기준 (ECE/EEC) 가 있다.¹²⁻¹³⁾ 안전 법규 이외에 상품성 시험으로써 Insurance Institute for Highway Safety (미국 고속도로 안전 보험 협회, 이하 IIHS)

는 도로에서 발생하는 충돌로 인한 인명 및 재산 피해를 줄이는 것을 목적으로 하는 비영리 연구, 교육조직으로 IIHS 에서 시행하는 저속 범퍼 충돌 테스트는 북미 보험료 산정 기준이 되고, 그 결과가 소비자에게 발표되는 상품성 시험으로, 차량 범퍼 개발에 대한 준 법규로써 그 목표 성능을 만족할 수 있어야 한다.¹⁴⁻¹⁵⁾

현재 많은 자동차 회사들에서는 위와 같은 법규를 만족시키기 위해 신규개발중인 차량에 승객 안전을 보장하면서 연비가 우수한 자동차를 개발하기 위하여, 대체 소재의 개발과 새로운 범퍼 시스템의 제작 기술 및 조립기술을 통하여 가볍고 튼튼하며 충격흡수능이 우수한 범퍼 백빔을 개발/장착하기 위해 많은 연구를 수행하고 있다. 특히, 각종 자동차용 부품의 구조성능 평가를 위해 유한요소해석 (CAE) 을 설계에 이용하고 있으며, 그 연구 영역은 점차 넓어지고 있는 추세이다.¹⁶⁻¹⁹⁾

Marzbanrad 등은 유한요소해석을 이용하여 유럽 안전 규정에 따라 복합재료의 일종인 GMT 와 SMC 범퍼 백빔을 제작하여 범퍼 백빔의 두께와 리브형 구조체의 분포에 따라 충돌 해석을 통하여 범퍼 백빔의 충돌 특성을 분석하였다.²⁰⁾ Tanaka 등은 방향족 폴리에스터 액정 고분자 섬유를 이용한 범퍼 셸드를 제작하여 금속 범퍼 셸드와 고속에서의 각각 충돌 실험을 수행하여 충격 에너지 분포 및 과단 경향에 대하여 비교/분석 하였다.²¹⁾ Hosseinzadeh 등은 금속계 범퍼 빔과 복합재료 범퍼 빔을 제작하여 저속 충돌 조건에서 펜듈럼 충돌 실험을 수행하여 충격 응력 분포와 침투량 및 처짐량의 비교를 통해 충돌 시 소재 및 단면 구조에 따른 충격 흡수율과의 상관관계에 대하여 연구하였다.²²⁾ Davoodi 등은 폴리머 복합재료를 이용하여 에너지 업소버를 제작하여 범퍼 페시아와 범퍼 백빔 사이에 결합 및 구조변형을 통해 저속 충돌에서의 충돌에너지 흡수능에 대하여 연구를 수행하였다.²³⁾ Sohn 등은 하이드로 포밍 기술을 이용해 범퍼 스테이를 제작하여 캐나다 자동차 안전 규정에 따라 압축 및 충격 실험을 실시하여 에너지 흡수능과 내충격성에 대한 연구를 수행하였다.²⁴⁾ Cheon 등은 복합재료로 구성된 범퍼 백빔을 설계하여 좌굴해석과 굽힘 실험을 수행하여 범퍼 백빔 끝단의 테이퍼 각도에 따른 에너지 흡수특성을 비교/분석하였다.²⁵⁾

본 연구에서는 국내외 관련 회사 및 학계의 선행연구를 바탕으로 범퍼 페시아를 제외한 범퍼 시스템의 충돌 시 충돌 에너지 흡수, 손상성 및 수리성에 중요한 영향을 미치는 범퍼 백빔의 소재적용, 단면 형상, 범퍼 백빔 내 리브 분포를 통해 범퍼 백빔의 최적 설계안을 도출하고자 연구를 수행하였다.

제 2 절 연구목적 및 방법

본 연구의 최종 목표는 기능성 플라스틱을 이용한 초경량 범퍼 백빔 설계이며, 초경량 범퍼 백빔의 소재 배치 및 구성, 단면 형상 그리고 범퍼 백빔 내 리브 분포에 따라 범퍼 백빔의 충격 특성에 미치는 영향에 대하여 분석/고찰하고자 한다. 이러한 연구를 통하여 초경량 범퍼 백빔 설계 시 각 변수의 조합에 의해 좌우되는 범퍼 백빔의 충격 특성을 정략적으로 평가하고, 최적의 설계조건을 도출하고자 한다.

본 연구의 최종 목적의 달성을 위하여 고정형 경계조건에서 낙하 하중 방식의 충격 시스템을 이용하여 범퍼 백빔에 적용을 위한 기능성 플라스틱의 충격 특성에 대해 분석/고찰하였다. 이 연구 결과를 얻기 위하여 현재 양산 중인 범퍼 백빔 소재의 판재와 동일 조건에서의 충격 실험을 통해 열가소성 플라스틱에 유리섬유와 같은 가소제에 따른 하중-변위 특성, 변형 특성, 충격 에너지 흡수 특성 및 파손 특성 등을 비교/분석 하였다.

다음으로 유한요소해석 프로그램을 이용하여 미연방 자동차 안전기준 (FMVSS) 규정 조건에 따라 3차원 유한요소 해석을 수행하였다. 먼저 3차원 유한요소 해석을 수행하기 위해 정적 인장 실험 및 고속 인장 실험을 통해 기계적 물성을 도출하였으며, ABAQUS V6.5 상용 프로그램을 이용하여 기능성 플라스틱 소재 배치 및 구성에 대한 해석 모델을 개발 및 검증 하였다. TPO 와 PP(a) 를 각각 4 가지 TYPE 으로 배치 및 구성하여 충격 특성이 가장 우수한 배치 및 구성안을 도출하였다. 도출된 결과로부터 펜듈럼과의 충돌부의 밀폐형과 개방형 형상에 대해 3차원 유한요소 해석을 수행하여 변형량, 유효 응력 분포, 주변형률 분포, 충격 에너지 흡수에 대하여 정략적으로 비교/분석하였다. 검증된 유한요소 해석 모델을 바탕으로 범퍼 백빔 내부의 리브형 구조체의 배치 및 분포에 따른 3차원 유한요소 해석을 수행하여 범퍼 백빔 내부의 변형 특성과 응력 및 변형률 분포 에너지 흡수 특성 등을 분석/고찰하였다. 도출된 최적 설계안을 바탕으로 미연방 자동차 안전기준 (FMVSS) 규정 조건에 따른 저속 충돌 실험을 통하여 충돌 시 파손 경향에 대하여 분석하였으며, 3 차원 유한요소 해석을 통하여 육안으로 확인이 불가능했던 충돌 시 범퍼 백빔의 변형 거동과 충격 특성 분포에 대해 확인할 수 있었다.

본 연구를 위한 수행계획은 Fig. 3 과 같다.

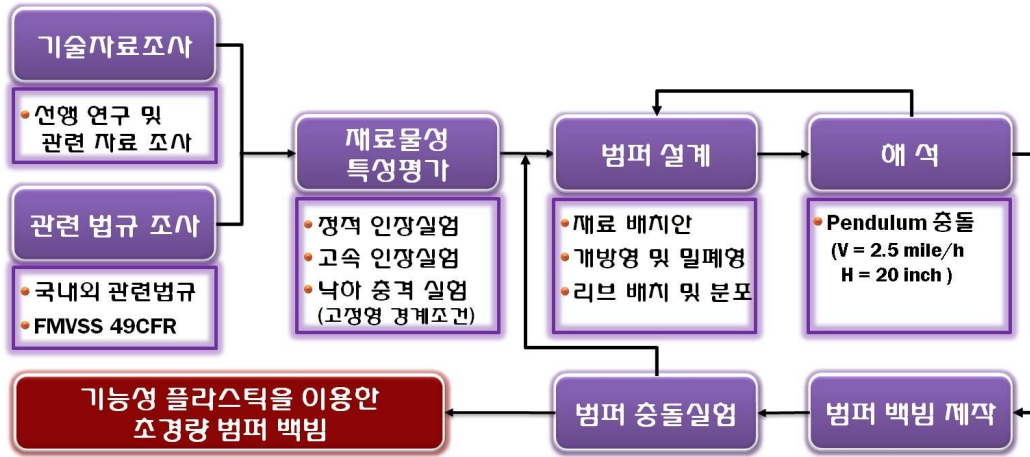


Fig. 3 Research for flowchart

제 2 장 기능성 플라스틱 판재의 충격 특성 평가

제 1 절 내충격 시험/평가 기술 개발

1. 실험 Set-up

기능성 플라스틱 판재에 대한 충격 특성 평가는 금속 판재 및 기타 복합재료 판재의 충격 시험에 가장 많이 사용되는 낙하 하중 (Drop weight) 방식의 충격 시험기기를 통하여 실험을 수행하였다. 본 연구에서 수행한 충격 실험 기기는 Fig. 4 와 같은 시스템으로 구성되어 있다.

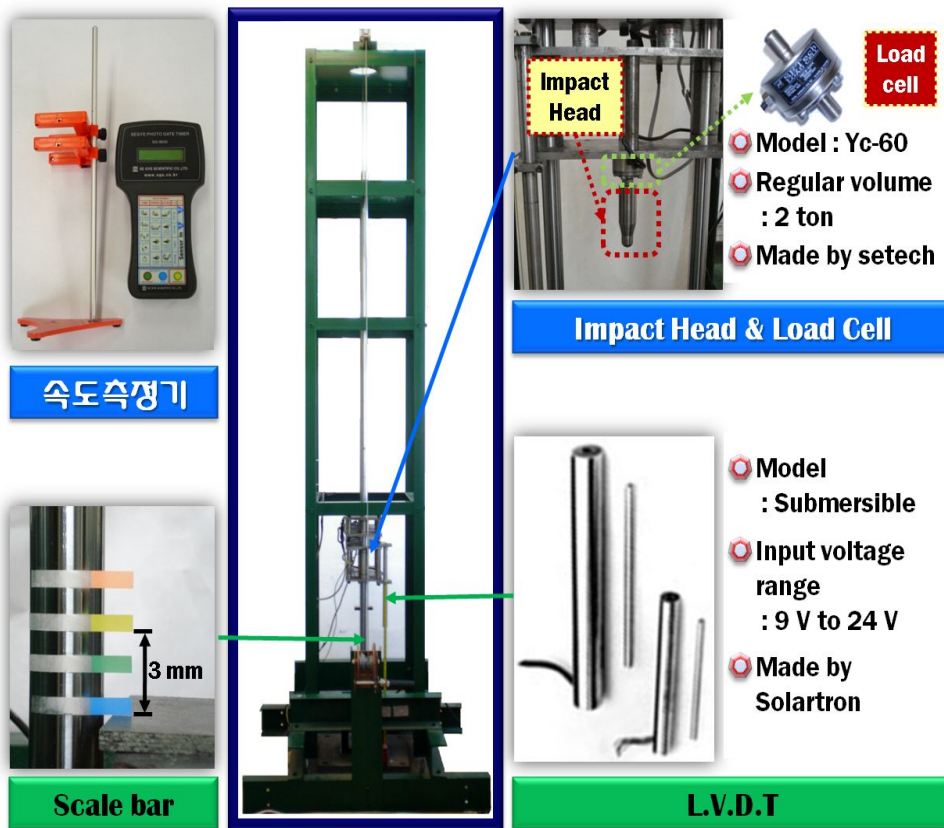


Fig. 4 Experimental set-up of drop impact test

충격 시 충격 하중을 측정하기 위해 충격 헤드의 상부에 로드 셀 (Load Cell) 을 장착하였으며, 충격 시험기 좌측 하단에 LVDT (Linear Variable Differential Transformer) 를 장착하여 충격 하중 부과에 따른 시편의 변위를 측정하도록 하였다. 또한, 충격 헤드의 충격 시편 타격 직전의 낙하속도를 측정하기 위해 속도 측정기를 설치하였으며, 충격 시험기 좌측에 부착한 척도를 통하여 충격 후 충격 헤드가 되튀어 오르는 양을 측정하였다.

충격 시험 시 로드셀과 LVDT 로부터 받아들여진 충격 하중과 시편의 변위에 대한 데이터는 Fig. 5 와 같은 시스템을 통하여 실시간으로 취득할 수 있고, 충격 시험 시 충격 헤드와 시편의 충돌 시간은 0.01 초 이내의 아주 짧은 시간에 이루어지므로 Fig. 5 와 같은 시스템은 이에 적합하게 제작되어있다.

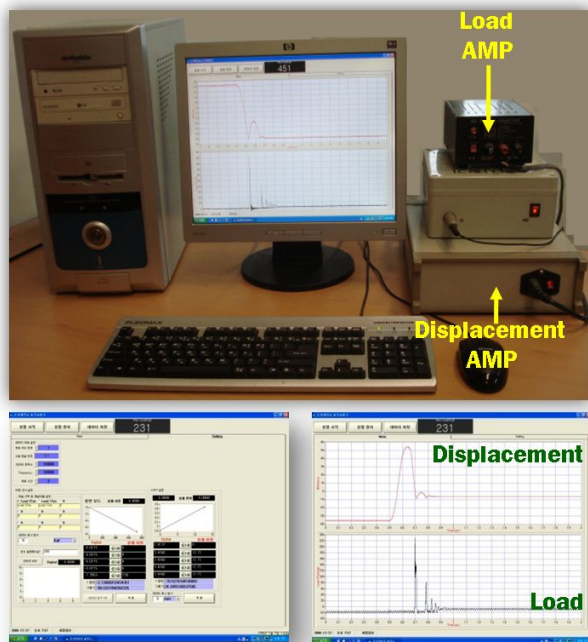


Fig. 5 Data acquirement system of impact tests

짧은 시간에 이루어지는 충격 시점 및 시편의 전후 변화를 포착하기 위해 Fig. 6 과 같이 초당 10,000 컷 촬영이 가능한 고속 카메라와 함께 매 충격 시험 시 동일한 밝기의 환경에서 촬영하기 위해 조명기기를 사용하였다.

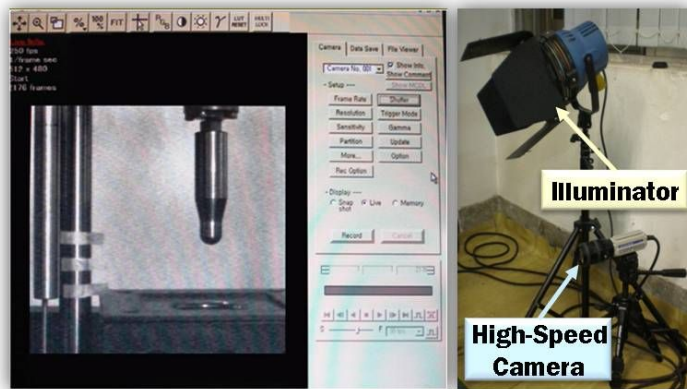


Fig. 6 High speed camera system to measure the collision between the impact head and specimen

2. 스트레칭 경계조건에서 내충격 시험방법

기능성 플라스틱 판재에 대한 스트레칭 (Stretching) 경계조건에서 내충격 시험 방법은 Table 1 과 같이 제작된 기능성 플라스틱 판재에 Fig. 4 의 충격 시험기기를 이용하여 기능성 플라스틱 판재에 충격 헤드를 자유낙하 시켜 충격 헤드가 접촉되는 시편의 중앙 부분에 충격하중을 전달시키는 방식으로 실험을 수행하였다.

또한, 충격시험에 사용된 치구는 고무가 첨가된 상판과 하판을 고정구로 고정시키고, 치구의 중앙 원형부를 제외한 잔여부분은 볼트 체결에 의해 고무에 부가되는 압력으로 완전 고정시켜 충격 시 충격 헤드의 접촉에 의한 중앙부 변형만을 유도하는 스트레칭 방식으로 실험을 수행하였다.



Fig. 7 Schematics and experimental devices for stretching type of impact test

기능성 플라스틱 판재의 내충격 특성을 분석을 위한 스트레칭 경계조건의 자유 낙하 충격 시험 기기의 실험 개념도 및 치구, 충격 헤드는 Fig. 7 과 같으며, 충격 시험에 사용된 충격 헤드의 경우 무게 11.1 kg 에 직경 20 mm, 40 mm 2 가지 타입의 충격헤드를 사용하였다.

스트레칭 경계조건인 충격 시험에 사용된 기능성 플라스틱 판재 시편의 경우 사출 성형을 통하여 제작하게 되는데 동일 금형에서 제작한 TPO 와 TPO + α 의 두께 및 무게에서 차이가 나는 이유는 두 소재 사이의 수축률 차이 때문이라 사료된다.

Table 1 Design of specimen for stretching type of impact test

Specimen	Width (mm)	Length (mm)	Thickness (mm)	Weight (g)
TPO	120	120	6.05	86.7
PP(α)	120	120	5.60	83.8
GMT	120	120	6.08	114.4

3. 기능성 플라스틱 판재의 내충격 흡수에너지 측정 방법

스트레칭 경계조건에서 기능성 플라스틱 판재의 내충격 특성 평가 방법은 하중-변위 선도를 이용한 직접식 적분 방법으로써 로드셀 (Load Cell) 과 LVDT 로부터 받아들인 하중과 변위 데이터를 조합하여 하중-변위 곡선을 생성한다. 그 후 Fig. 8 과 같이 하중 발생 시작점부터 최대 변위 발생 지점까지의 구간을 수치 적분하는 방법이다. 이를 바탕으로 아래 식 (1) 을 통하여 충격 시 총 누적 충격 에너지 흡수량을 산출할 수 있다.

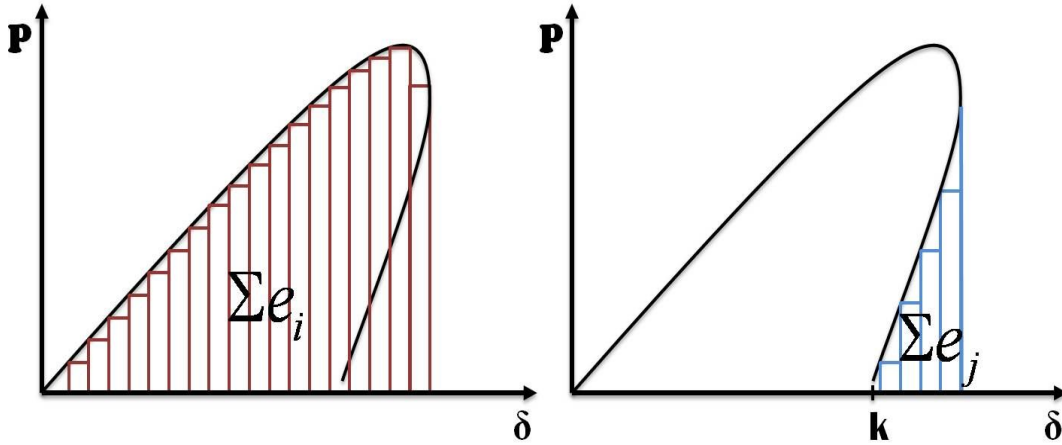


Fig. 8 Cumulative absorption energy

$$\sum e_i = P_{i-1} \times (\delta_i - \delta_{i-1}) + \frac{1}{2} \times (P_i - P_{i-1}) \times (\delta_i - \delta_{i-1}) \quad (1)$$

$$\sum e_j = P_{j-1} \times (\delta_j - \delta_{j-1}) + \frac{1}{2} \times (P_j - P_{j-1}) \times (\delta_j - \delta_{j-1}) \quad (2)$$

※ (j = i + k)

$$E_{ab} = \sum e_i - \sum e_j \quad (3)$$

산출된 총 누적 충격 에너지 흡수량에서 식 (2) 를 통해 산출된 범퍼 백빔의 복원 에너지를 감하여 범퍼 백빔의 흡수 에너지량을 산출하여 범퍼 백빔의 내충격성 특성을 평가 하였다. 충격 입력에너지는 펜듈럼의 가격 속도를 운동에너지로 환산한

것으로 식 (4) 와 같으며, 충격 시 발생하는 소리 등 여타 손실되는 에너지는 무시하였다. 충격에너지 흡수율은 식 5) 와 같이 범퍼 백빔이 흡수한 충격에너지 흡수량을 범퍼 백빔에 가해지는 총 충격 입력에너지로 나누어 산출하였다.

$$E_{in} = mgh \quad (4)$$

$$\chi = \frac{E_{ab}}{E_{in}} \times 100 \quad (5)$$

제 2 절 스트레칭 경계조건에서의 충격 시험

1. 기능성 플라스틱 판재의 파단 특성 분석

본 연구에서는 기능성 플라스틱인 TPO, PP(α) 와 복합재료 GMT 판재에 대하여 스트레칭 경계조건에서 충격시험을 수행하였다. 본 연구에 적용된 기능성 플라스틱은 대표적인 열가소성 플라스틱 중 폴리프로필렌에 가소제로 이중합성고무 (EPDM) 및 유리섬유 (Glassfiber) 를 첨가한 소재로써 사출공정을 통해 제작하였다. 충격 시험을 통해 GMT 판재와의 파단 특성을 비교/분석하기 위해 Fig. 9 와 같이 GMT 판재와 동일 크기로 제작하여 실험을 수행하였다.

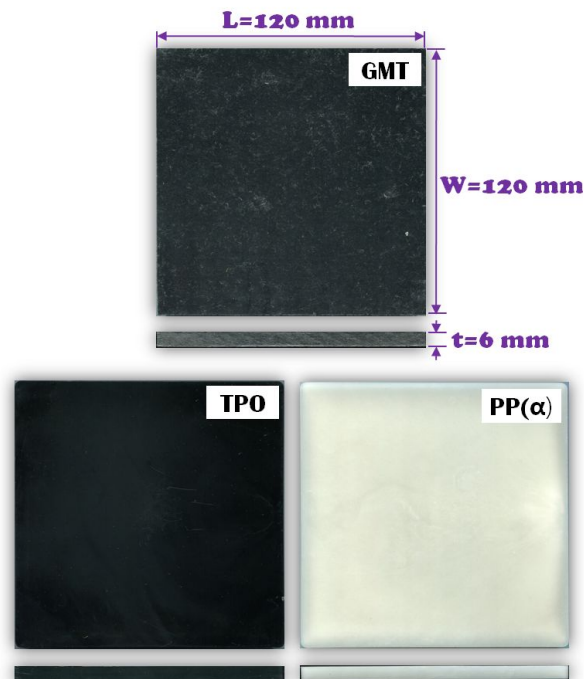


Fig. 9 Specimens of functional plastics

또한, 시편에 충격 시험은 직경 20 mm 와 40 mm 인 충격 헤드를 사용하여 시편이 시편의 파단 특성에 영향을 미치는 최소 입력에너지 및 파단 경향을 확인하기

위해 외관 상 failure 현상이 발생될 때까지 실험을 수행하였다. 스트레칭 경계조건에서 failure 현상이 발생하는 최소 입력에너지 및 형상은 Table 2, Fig. 10 과 같다.

Table 2 Failure mode of specimen for stretching type of impact test

Specimen	GMT		TPO		PP(α)	
	Energy (J)	Failure Mode	Energy (J)	Failure Mode	Energy (J)	Failure Mode
D = 20 mm	9.79 J	crack	5.44 J	whitening	1.09 J	whitening
D = 40 mm	10.88 J	crack	27.20 J	whitening	1.09 J	whitening

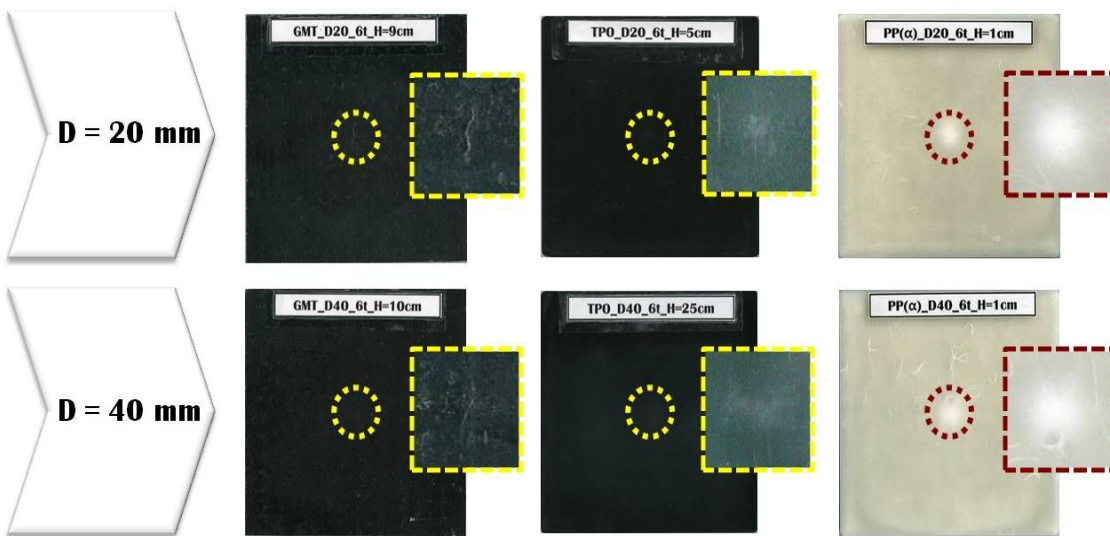


Fig. 10 Deformed shape of functional plastic panels for the case of stretching boundary conditions

스트레칭 경계조건에서의 충격 실험 결과 GMT 의 경우 충격 부 반대 면에서 약 12 mm 정도의 크랙이 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 기능성 플라스틱 판재의 경우 TPO의 경우 직경 6 mm 의 화이트닝 현상이 발생하는 것을 알 수 있었다. 특히, PP(α) 의 경우 충격 헤드의 직경에 관계없이 충격부의 반대면에서 직경 15 mm 이상의 화이트닝 현상이 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 기능성 플라스틱에서 받

생하는 화이트닝 현상은 플라스틱과 같이 고분자 재료를 내포하고 있는 재료에서 발생하게 되는데, 고분자의 소성변형의 일종인 Crazing 현상이 주원인이다. Crazing 현상은 충격 시 인장 응력 방향에 수직인 면에 미세 공동 (micro void) 발생과 합체로 인해 발생하게 되는데, 이러한 crazing 현상은 가소제로 유리섬유가 포함되어 있는 소재에서 특히 뚜렷이 발생된다. crazing 현상으로 인해 유리섬유의 미세 절단이 발생되고 이는 크랙으로 이어진다. PP(α) 또한 마찬가지로 Fig. 11 과 같이 유리섬유의 불규칙적 분포와 폴리프로필렌과의 불완전 결합으로 인해 crazing 현상이 더 가중된다고 사료된다.

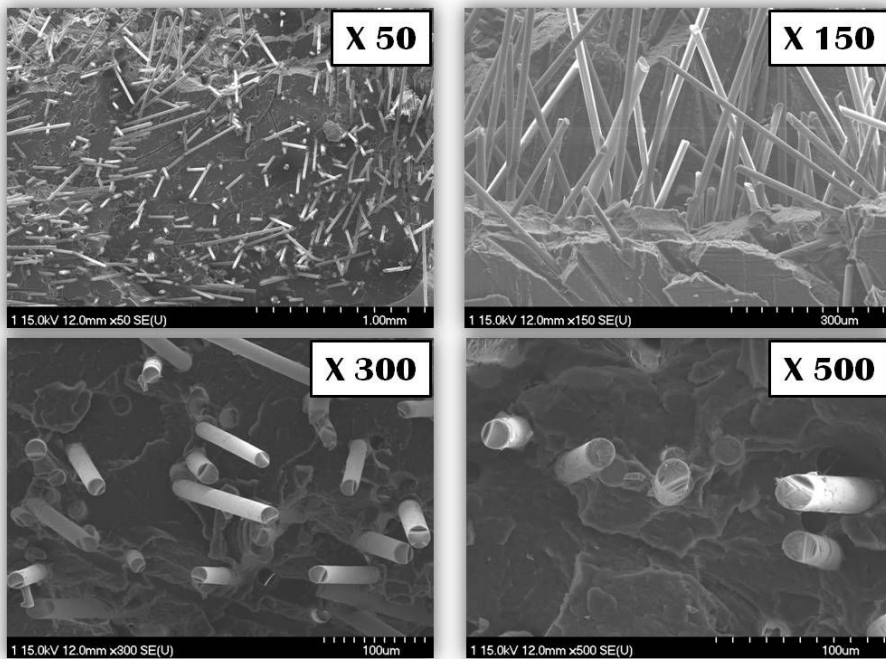


Fig. 11 SEM image of PP(α) (Polypropylene + Glassfiber 20%)

2. 기능성 플라스틱 판재의 실험 결과 및 고찰

기능성 플라스틱 판재와 복합재료인 GMT 판재의 충격 특성을 비교/분석하기 위해 충격헤드와 접촉면의 국부적 변형을 유도하는 스트레칭형 경계조건에서 충돌시험을 수행하였다. 충격 헤드는 직경 40 mm 를 사용하였으며, 그 결과 Table 3 과 Fig. 12 와 같은 결과를 얻을 수 있었다.

Table 3 Results of impact test of functional plastic panel and that of GMT panel for the case of stretching boundary conditions (D=40mm)

Specimen	H (cm)	E _{in} (J)	E _{ab,max} (J)	χ (%)	P _{max} (N)	δ _{max} (mm)	E _r (J)
GMT	13	14.2	7.30	51.6	4,508.0	5.35	10.5
	65	70.8	53.63	75.8	10,054.8	11.07	22.8
	150	163.3	134.12	82.1	12,642.0	15.73	29.2
TPO	13	14.2	4.79	33.9	2,254.0	7.79	8.8
	65	70.8	52.45	74.1	4,939.2	17.47	13.8
	150	163.3	140.90	86.3	7,222.6	26.80	17.5
PP(α)	13	14.2	10.49	74.1	2,812.6	6.04	5.8
	65	70.8	43.27	-	4,468.8	-	-

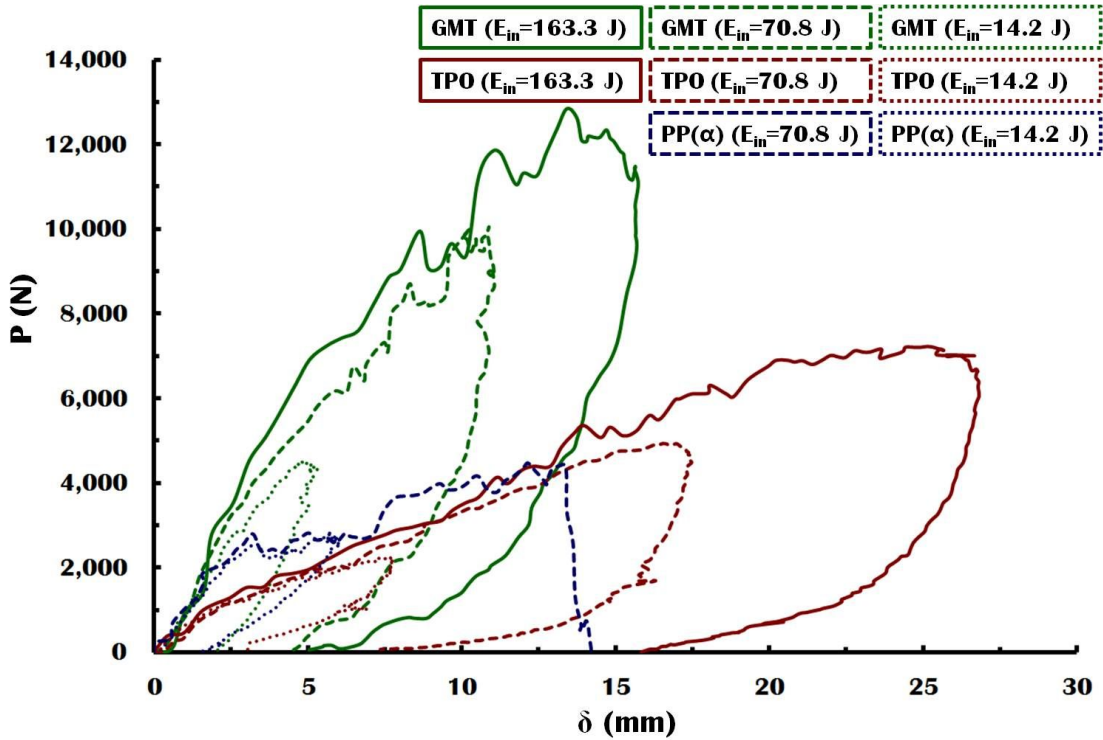


Fig. 12 Results of impact test of functional plastic panel and that of GMT panel for the case of stretching boundary conditions (P- δ curve)

기능성 플라스틱과 GMT 의 최대 하중, 최대 처짐량, 에너지 흡수 특성 등 비교한 결과, 최대 하중의 경우 기능성 플라스틱 판재에 비해 동일 입력에너지에서 2 배 정도 높은 것을 확인할 수 있었다. 기능성 플라스틱 판재 중 PP(α) 의 경우 충격 입력에너지 70.8 J에서 충격 하중에 의한 파단이 발생하는 것을 알 수 있었다. 이는 유리섬유가 교차 적층된 GMT 와 달리 유리섬유의 불규칙적인 분포와 폴리프로필렌과의 불완전 결합으로 인해 발생한 화이트닝 현상으로 인해 다른 두 소재에 비해 낮은 입력에너지에서 파단이 발생됐다고 사료된다. TPO 의 경우 GMT 에 비해 40 % 이상 변형이 증가 되고, 45 % 이상 변형량이 복원되는 것을 확인할 수 있었다.

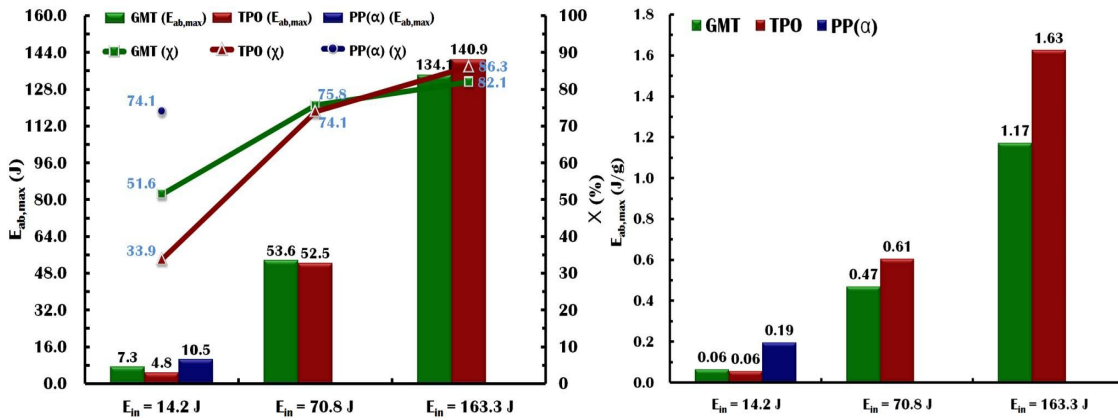


Fig. 13 Comparison of the absorbed impact energy and energy absorption rate for GMT panel and that for functional plastics

기능성 플라스틱 판재와 GMT 판재의 에너지 흡수 특성 비교 결과 가장 낮은 입력에너지 14.2 J 에서는 PP(α) 판재의 충격 에너지 흡수능이 가장 우수한 반면, 입력에너지가 증가할수록 PP(α) 판재의 경우 높은 취성으로 인해 파단이 발생하는 것을 확인할 수 있었다.

기능성 플라스틱 판재인 TPO 판재와 GMT 판재의 충격 흡수능 비교 결과 최대 4 % 이내로 유사함을 확인할 수 있었다. 누적 충격 에너지 흡수량에 대해 단위 무게로 환산해보면 TPO 판재의 경우 입력에너지가 높아질수록 GMT 판재에 비해 충격 에너지 흡수능 또한 급격히 증가하는 것을 확인할 수 있는데, 이는 TPO 에 가소제로써 첨가되어있는 비결정성 고분자 재료인 이중합성고무가 충격 시 플라스틱 재료의 특징 중의 하나인 화이트닝 현상에 이은 파단 현상을 완화시켜주면서, 충격 헤드 접촉부의 국부적 변형을 통하여 충격 에너지 흡수능 또한 향상된다고 사료된다.

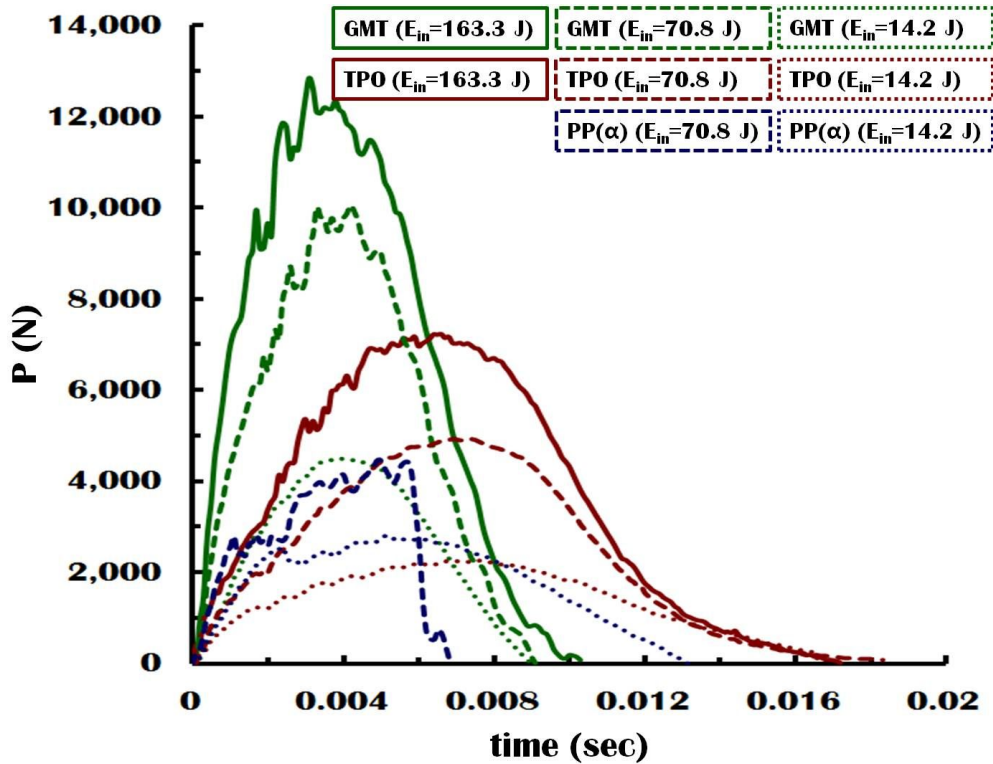


Fig. 14 Force-time curves for the GMT panel and functional plastic panels

Fig. 14 는 충격 입력에너지에 따른 기능성 플라스틱 판재와 GMT 판재의 충격 하중 특성을 나타낸 그림이다. GMT 판재의 경우 TPO 판재에 비해 입력에너지가 증가할수록 동일 입력에너지에서 높은 하중이 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 또한 P-t curve 에서 TPO 판재에 비해 GMT 판재와 PP(α) 판재의 하중 증·감 현상이 더 빈번히 발생하는 것을 확인할 수 있는데, 이러한 현상은 섬유층이 교차 적층된 GMT 판재와 유리섬유가 불규칙적으로 분포된 PP(α)의 유리섬유가 충격에 의한 파단이 발생하면서 이에 따라 충격 헤드와 시편 간 접촉하중의 증감 현상 또한 빈번히 발생된다고 사료된다.

Fig. 15 는 충격 입력에너지에 따른 기능성 플라스틱 판재와 GMT 판재의 단위 무게 당 최대 하중을 나타낸 그림이다. 입력에너지가 증가할수록 TPO 판재에 비해 GMT 판재의 경우 충격 에너지 흡수가 낮아 전달 하중량이 점차 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

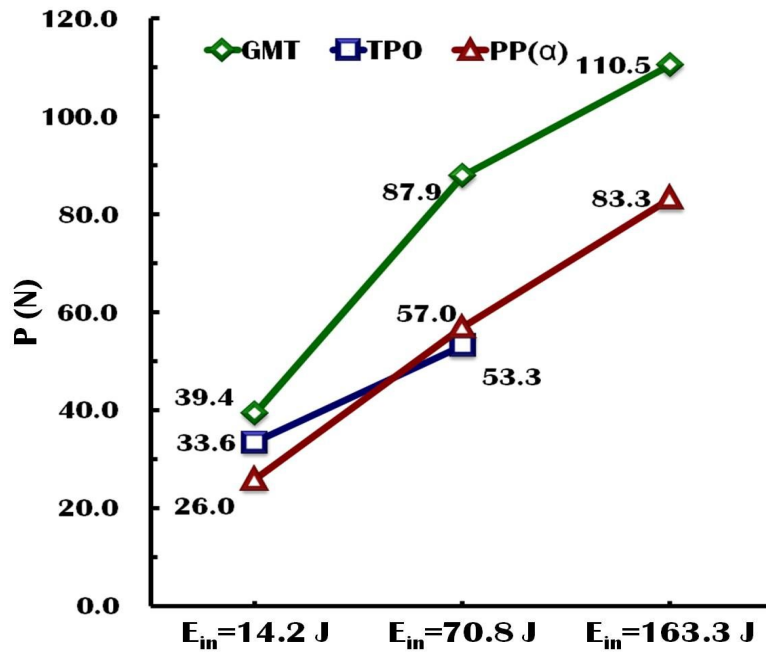


Fig. 15 Variation of specific force according to impact energy

제 3 장 초경량 범퍼 백빔에 대한 대한 3차원 유한요소 해석

제 1 절 기능성 플라스틱을 이용한 범퍼 백빔의 3차원 유한요소 해석 방법

1. 유한요소해석방법 및 모델링

본 연구에서는 충돌 시 범퍼 백빔의 내충격 특성을 분석하기 위하여 실제 자동차 충돌 테스트 중 한 가지 방법인 펜듈럼 (Pendulum) 충돌조건에서 내충격 해석을 수행하였다. 본 연구에서는 모델의 기하학적 형상과 적용 소재가 비선형일 뿐만 아니라 접촉 현상 또한 비선형이기 때문에 충격 시 순간적인 동적 반응을 해석하기에 효율적인 외연적 시간적분 유한요소법 (Explicit time integration finite element method) 을 사용하였다.

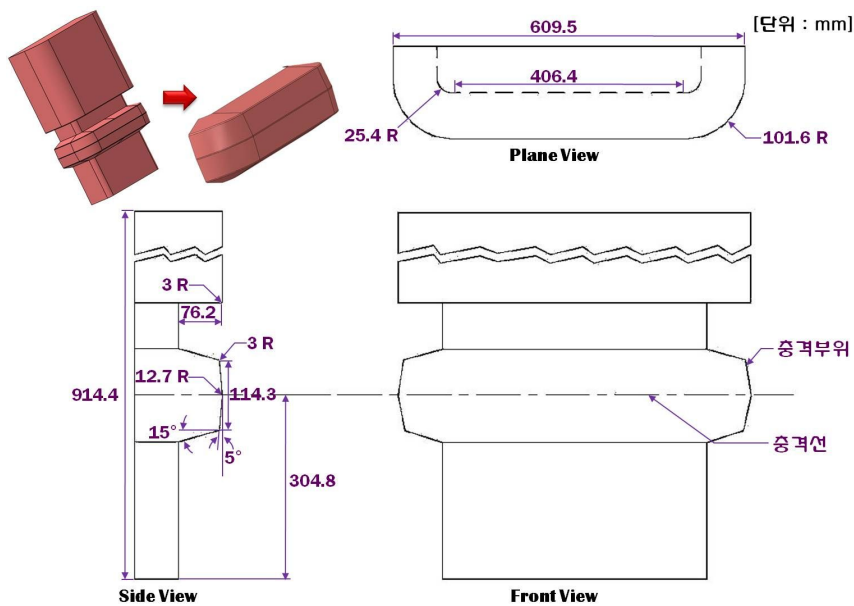


Fig. 16 Modeling of pendulum

설계 초기에는 모든 범퍼 부품의 형상 및 적용 소재의 물성치에 대한 데이터가 없고, 가용할 수 있는 시간이 짧아 모든 범퍼시스템의 구성 부품을 포함하는 범퍼시스템 전체 모델에 대한 해석이 현실적으로 어렵다. 또한, 법규 내용 등 모든 설계 검토 항목을 고려하는 일련의 해석도 곤란하므로, 고찰과 가정 설정을 통해 충돌 시 가장 중요한 역할을 수행하는 범퍼 백빔과 범퍼 스테이를 대상으로 하여 충돌 해석을 수행하고자 하였다.

유한요소 해석을 위한 펜듈럼의 경우 CATIA V5 를 이용하여 Fig. 16 과 같이 실제 충격 시험에 사용되는 펜듈럼 크기와 동일하게 모델링을 수행하고, 실제 해석상에는 충격부위만 모델링을 수정하여 해석에 적용하였다. 범퍼 백빔과 범퍼 스테이의 경우 CATIA V5 를 이용해 구현된 2 개의 파트로 구성된 범퍼 백빔 모델링 데이터에는 충돌해석용 모델로써 불필요한 부분과 그로 인해 발생한 미스매치 부분이 많이 포함되어 있어서, 해석 수행 전 CATIA V5 를 이용하여 불필요한 부분을 제거하는 전처리 과정 (Preprocessing) 을 수행하였다. 이와 같이 전처리 과정을 거친 모델링 데이터는 Fig. 17 과 같이 유한요소 해석 모델링을 수행하였으며, 유한요소 모델링 및 해석은 ABAQUS V6.5 상용프로그램을 이용하여 수행하였다.

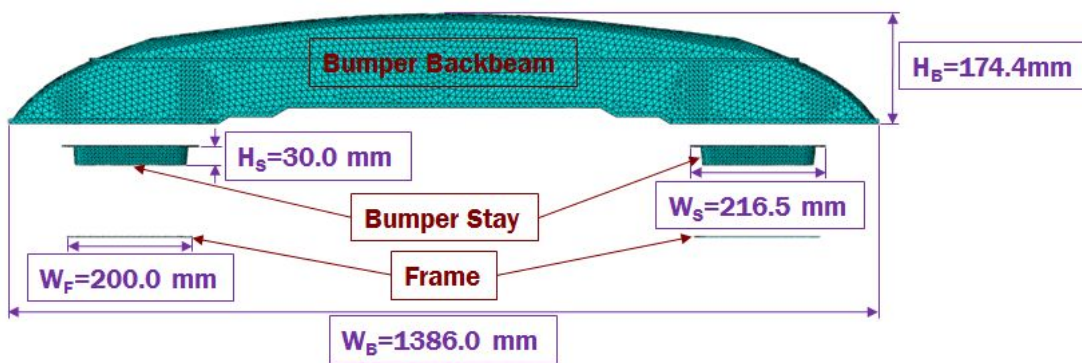


Fig. 17 FE model of the impact analysis for bumper backbeam

범퍼 백빔과 범퍼 스테이의 경우 4 절점 사면체 요소 (4-node linear element) 로 격자를 생성하였고, 펜듈럼과 배리어, 프레임의 경우 Fig. 18 과 같이 해석시간 절약을 위해 4 절점 사각형 쉘 (shell) 요소 (4-node linear element) 로 격자를 생성하였다.

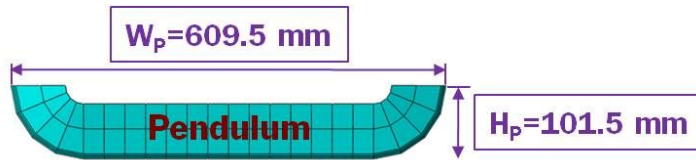


Fig. 18 FE model of the impact analysis for pendulum

범퍼 시스템 충격 시험 시 범퍼 시스템을 구성하는 모든 부품을 대차에 마운팅하여 테스트하지만, 본 해석 모델에서는 해석 시간 감소 및 사용 메모리를 최소화하기 위하여 대차 혹은 범퍼 스테이에 연결되는 프레임을 직접 모델링하지 않고, 그 대신 이들을 대표하는 평판 형상의 강체 구조물을 추가하였다.

내충격 유한요소 해석에 사용되었던 유한요소 격자수는 Table 4 와 같다.

Table 4 Number of nodes and elements of three-dimensional finite element analysis

	Bumper Backbeam (EA)	Bumper Stay (EA)	Bumper Frame (EA)	Pendulum (EA)
Node	22,444	4,998	1,986	276
Element	70,006	13,920	1,990	242

총 8만 5천여개의 요소로 구성된 3차원 충돌 해석 모델은 CPU 3.16 GHz 인텔 코어 2 듀오 (Intel Core2 Duo CPU of 3.16GHz) 와 RAM 3.25 GB 의 고 사양을 가진 컴퓨터를 통해 해석을 수행하였으며, 해석 시간은 평균 55시간 40분 정도 소요되었다.

2. 경계조건

펜듈럼 충돌해석을 위한 경계조건은 Fig. 19 와 같이 적용하였다. 펜듈럼 충돌해석의 경우 내충격 유한요소해석에 적용한 경계조건은 범퍼 백빔 및 범퍼 스테이의 경우 자유단 상태로 가정하였고, 펜듈럼과 범퍼 프레임의 경우 실제 펜듈럼 충돌 실험과 동일하게 충돌 방향인 Z 방향으로만 움직일 수 있도록 하였다. 차량의 무게 중심점과 펜듈럼에는 차체 공차 중량 1.6 ton 을 부여하였으며, 무게 중심점과 프레임 사이에는 실험 시 강체로 가정하는 프레임을 표현하기 위해 강체 요소를 생성하여 연결하였다.

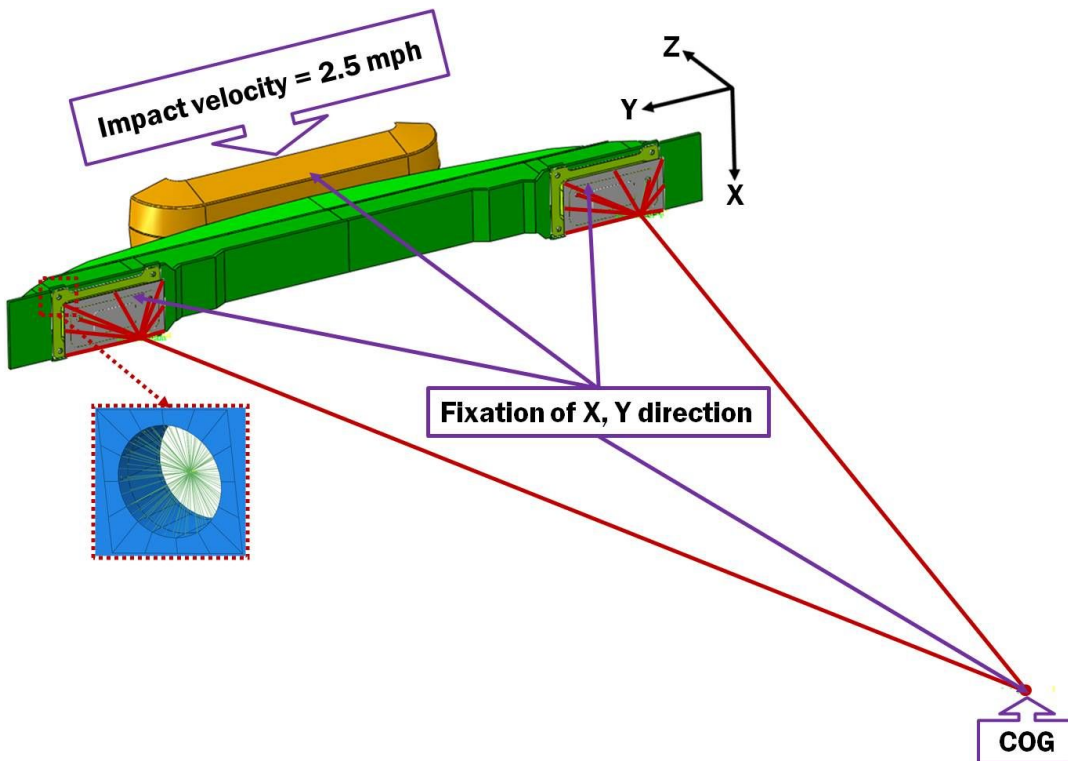


Fig. 19 Boundary conditions of pendulum impact test

또한 볼트를 통해 접합이 이루어지는 범퍼 백빔과 범퍼 스테이, 범퍼 스테이와 범퍼 프레임 사이의 결합 부분은 다중구속요소 (Multi Point Constraint) 를 이용하여 구속 조건을 부여하였으며, 펜듈럼은 범퍼 백빔과 맞게 위치시켜 충돌해석을 수행하였다.

3. 재료물성 특성 분석

충격 시 충격 특성을 분석하기 위해서 범퍼 백빔과 범퍼 스테이는 탄소성 재료로 가정하였다. 범퍼 백빔의 재료는 TPO (Thermoplastic Poly Olefin) 와 폴리프로필렌 소재에 20 % 유리섬유가 첨가된 소재 (PP(α)) 이며, 해석에 적용된 두 소재의 밀도는 각각 $1,040 \text{ kg/mm}^3$, $1,050 \text{ kg/mm}^3$ 이다.

해석에 적용할 소재의 기계적 물성을 구하기 위하여 만능재료시험기를 이용한 정적 인장시험을 수행하여 Table 5 와 같이 탄성계수, 포와송비, 인장강도 등을 도출하였다.

Table 5 Material properties of TPO and PP(α)

	TPO	PP(α)
E (GPa)	3.2	3.5
ν	0.404	0.465
σ_t (MPa)	25.54	82.21
ϵ_t	0.3379	0.0685

또한, 충격 해석 시 발생하는 소성 변화의 정확한 결과 값을 얻기 위해서 재료의 변형률 속도 효과가 고려된 재료의 물성 값이 필요하여 본 연구에 사용된 재료인 TPO 와 PP(α) 에 대하여 고속인장 시험을 수행하여 변형률 속도 효과에 의존적인 소성영역의 물성을 확보하여 해석에 적용하였다.

기존의 선행 연구 및 Steel 계열의 범퍼 백빔 연구에서는 소재의 물성 적용 시 Johnson-Cook 모델을 적용하여 고속변형에서의 변형률 및 온도, 가속도의 영향을 반영하였지만, 본 연구에서는 실제 고속인장시험을 통해 확보한 데이터를 Fig. 20 과 Fig. 21 과 같이 일정 변형률 속도 구간 별로 커브 피팅을 하여 각 변형률 속도에 따른 보다 정확한 데이터를 ABAQUS 에 소성 물성으로 적용하였다.

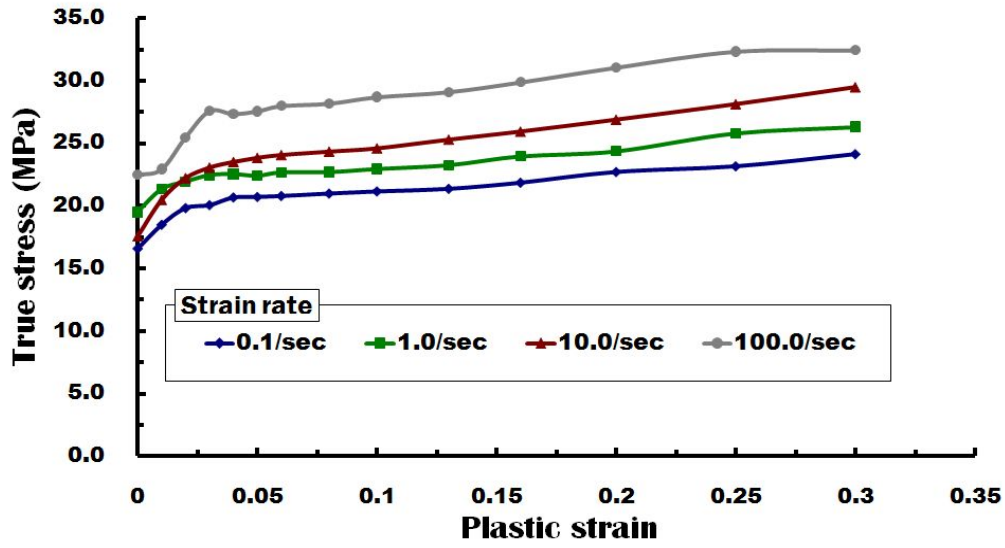


Fig. 20 Results of high speed tensile tests for TPO

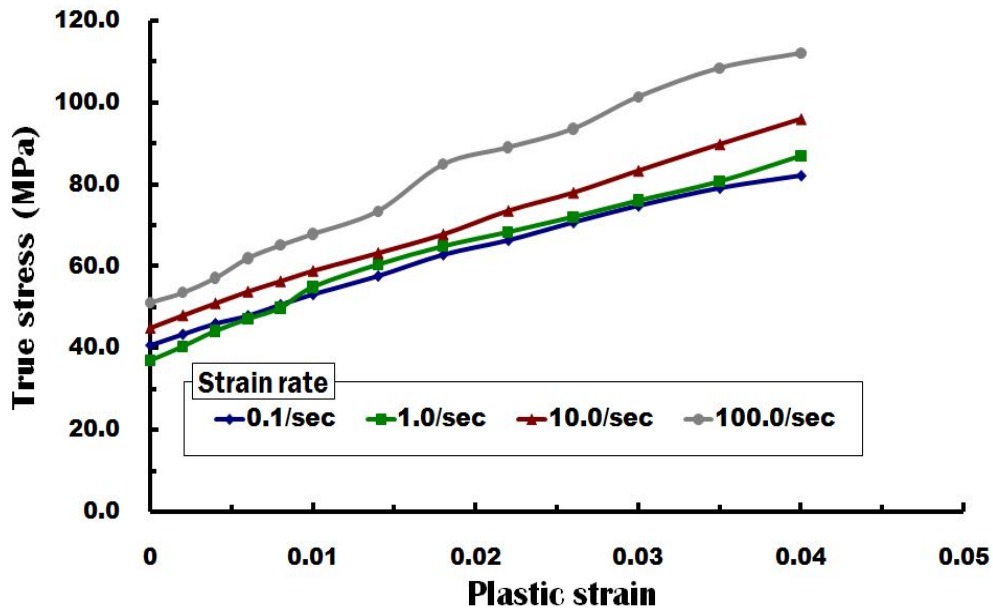


Fig. 21 Results of high speed tensile tests for PP(a)

또한, 범퍼 백빔의 재료 물성에는 외연적 시간 적분 시 해석의 정확도를 높이기 위해 감쇄계수를 적용하였다. 감쇄계수의 값은 초기의 댐핑이 적용되지 않은 초기의 안정적 시간 증분의 크기 보다 약간 작은 값을 입력하였다. 안정적 시간증분 (Δt_s) 과 재료의 응력 전파 속도 (C_d) 는 식 (6) 과 같이 계산하였다. 충격해석에 사용된 임계요소의 길이는 2 mm 이며, 재료 물성치와 임계 요소길이를 식 (6) 에 대입하여 계산한 결과 안정적 시간 증분은 1.09×10^{-6} 초로 계산되었으며 감쇄 계수값은 보다 적은 값인 1.05×10^{-6} kg/sec 로 결정하였다.

$$\Delta t_s = \frac{L_c}{C_d} = \frac{L_c}{\sqrt{\frac{E}{\rho}}} \quad (6)$$

4. 충돌해석 관련 법규 및 규정

범퍼 백빔의 설계는 차량의 개발 초기에서부터 점차 증대되는 안전성의 요구와 함께 연비향상을 이루어야 하는 제약이 있다. 이에 충돌 성능을 평가하기 위한 법규로는 국내의 경우 자동차 안전기준시행세칙에 명시되어 있으며, 수출 차량의 경우에는 그 지역에 따라 대표적으로 미국의 경우 고속도로 안전국 (NHTSA)에서 규정하고 있는 미연방 자동차 안전기준 (FMVSS 49CFR) Part 581 과 캐나다의 CMVSS 215, 유럽의 EC R42 에서 시행하는 충돌시험조건을 만족해야 한다.

이 중 본 연구에 펜듈럼 충돌해석에 적용된 법규인 미연방 자동차 안전기준 (FMVSS 49CFR) 은 54개의 시험항목이 있다. 이러한 시험항목들은 차량의 안전관련 인증제도를 뒷받침해주는 자료로써 판매 후 안전 문제의 발생으로 인해 사후확인에 불합격하면 해당 차종을 모두 리콜해야 하므로 사전에 FMVSS 규정 및 품질에 대한 안전설계나 확인시험을 거쳐야 한다.

위의 법규 및 규정을 바탕으로 최종적으로 상품성 시험에 대한 성능을 만족하기 위해 Table. 6 과 같은 조건으로 충돌해석 및 충돌시험을 수행하였다.

Table 6 Impact regulations conditions

	FMVSS 49 CFR
Impactor	Pendulum
Impact Velocity	2.5 mile/h (= 4.02 km/h)
Impact Height	18 inch (= 457.2 mm)

제 2 절 초경량 범퍼 백빔의 설계에 따른 3차원 유한요소 해석 결과 및 고찰

1. 소재별 적용 위치에 따른 충격 흡수 특성 검증

범퍼 백빔의 구조적 최적 설계안을 도출하기 전 낙하 충격 실험의 기초 연구를 통해 충격 특성이 우수한 소재에 대하여 검증하였으며, 이를 위해 소재 적용 위치와 구성에 따른 해석결과에 대해 비교/분석하였다.

범퍼 백빔의 충돌 해석 시 가장 먼저 고려해야 할 결과로써 규정상 **Intrusion** 양과 **Deflection** 양의 만족을 고려해야 한다. **Intrusion** 은 범퍼 백빔의 가장 끝단이 충격에 의해 안쪽으로 밀려들어간 길이로써 흔히 침투량으로 표현하고, **Deflection** 은 범퍼 백빔의 하단 부 절점부터 범퍼 스테이와 프레임이 결합되는 부분까지의 길이로써 처짐량으로 표현된다. 본 연구에 적용된 모델의 기준은 침투량과 처짐량이 각각 101 / 47 mm 로써 차량 충돌 시 주어진 설계 기준을 벗어나게 되면 차체에 손상을 일으킬 염려가 있다. 그래서 소재 적용 위치에 따라 규정을 만족함과 동시에 설계 기준에 가장 적합한 소재 적용안을 찾고자 하였다. 본 연구에서는 TPO와 유리섬유 20%가 첨가된 PP(α)의 소재 적용 위치 및 구성에 따른 충격 특성을 비교하기 위하여 미국 연방 자동차 안전기준인 FMVSS 법규 중 PART 571 규정에 따라 펜듈럼 충돌 해석을 수행하였다.

2 개 PART의 조합체로 이루어진 범퍼 백빔에 TPO와 PP(α) 두 소재의 적용 부분 및 구성에 따라 Fig. 22와 같이 4 가지 조건의 설계안을 도출하였다.

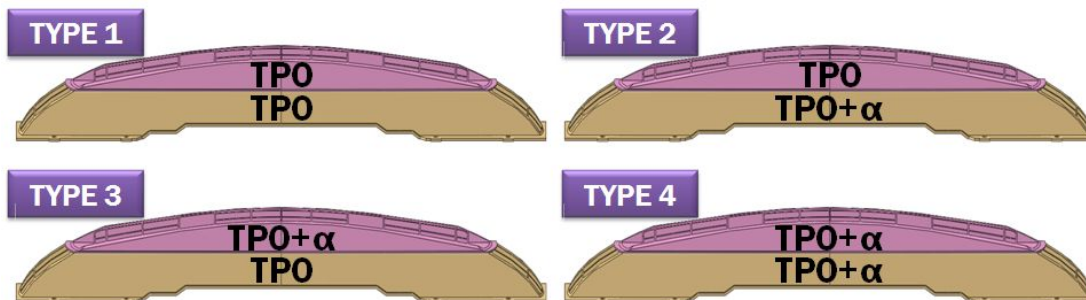
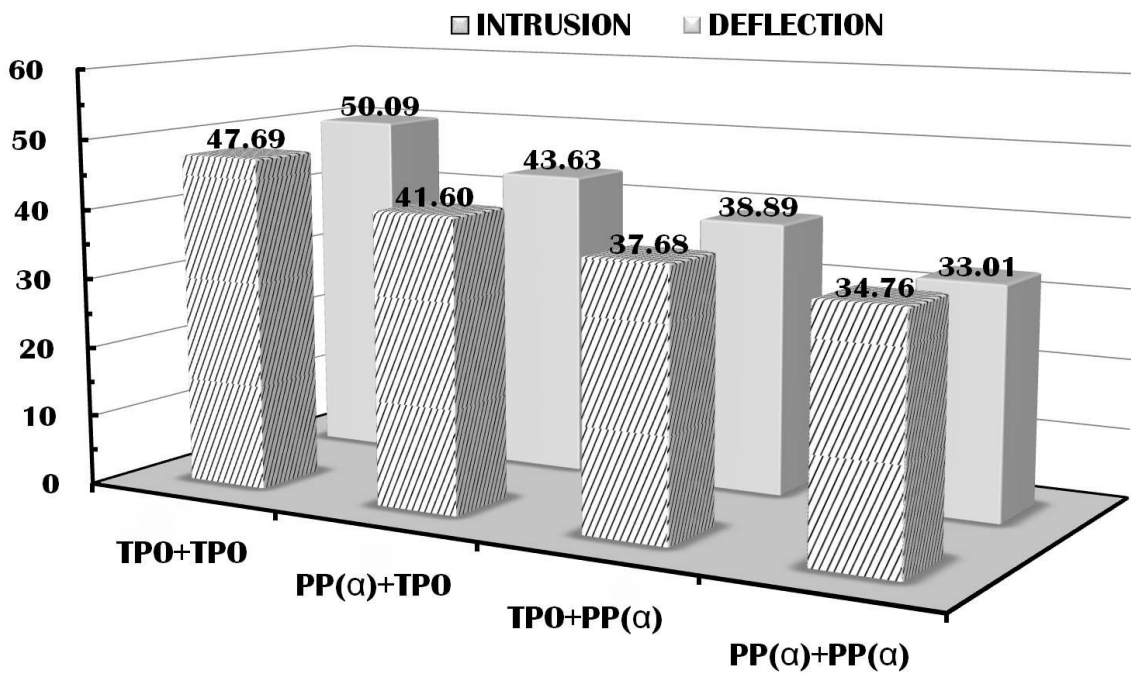


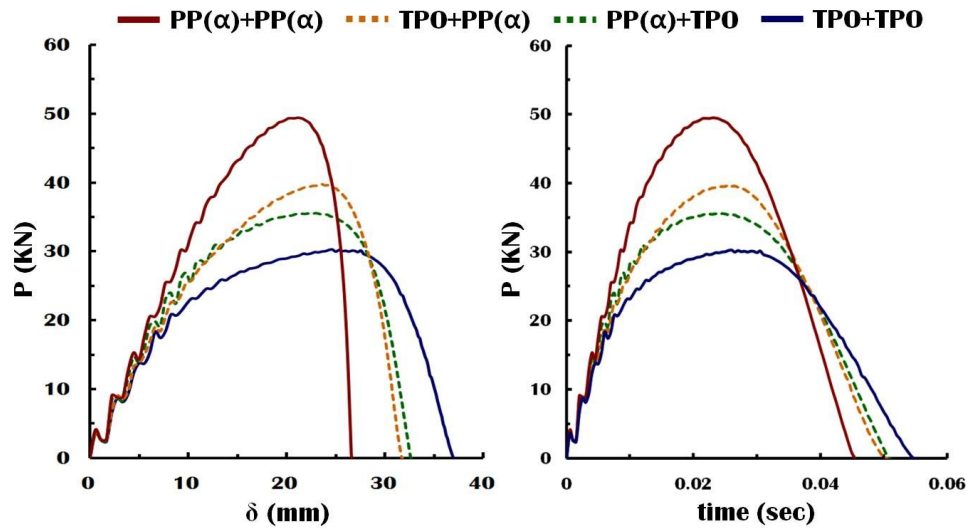
Fig. 22 Design of bumper backbeam according to material combinations

Table 7 Result of FE analysis according to material combinations

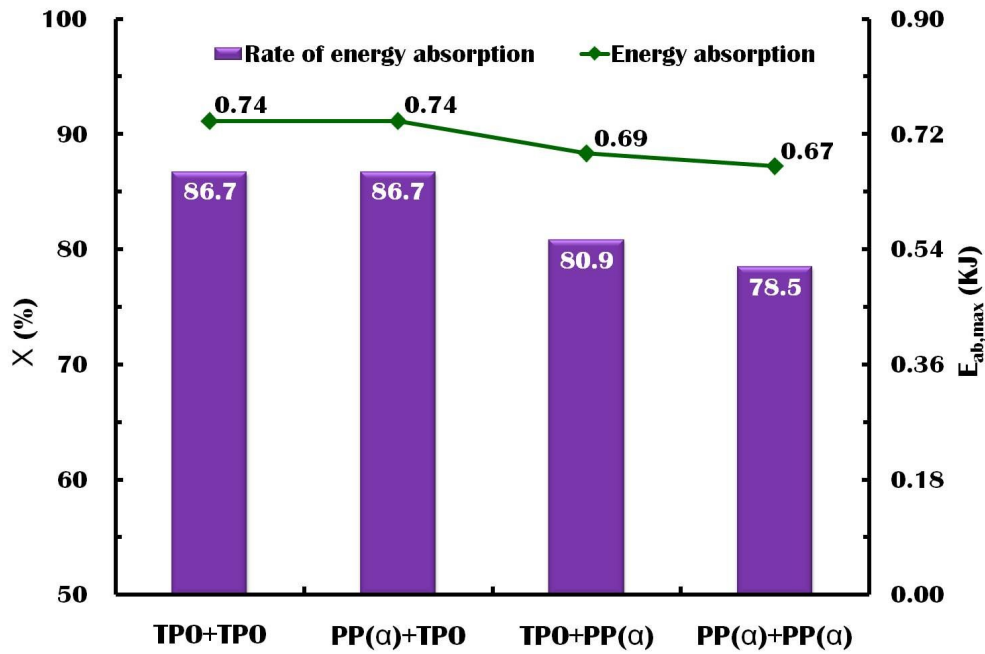
	E_{in} (KJ)	$E_{ab,max}$ (KJ)	χ (%)	P_{max} (KN)	δ_I (mm)	δ_D (mm)
TPO+TPO	0.85	0.74	86.7	30.30	47.69	50.09
PP(α)+TPO	0.85	0.74	86.7	35.56	41.60	43.63
TPO+PP(α)	0.85	0.69	80.9	39.73	37.68	38.89
PP(α)+PP(α)	0.85	0.67	78.5	49.45	34.76	33.01



(a) Deformation according to material combinations



(b) P- δ_i curve & P-t curve



(c) Energy absorption characteristics

Fig. 23 Comparison of the force-intrusion and the energy-intrusion curves according to material combinations

소재의 적용 위치 및 구성에 대해 FMVSS 법규 중 PART 571 규정에 따른 펜듈럼 충돌 해석은 Table 7 과 Fig. 23 과 같은 결과를 얻을 수 있었다. Table 7 은 충격 입력에너지, 누적 충격 흡수에너지, 충격 에너지 흡수율, 최대하중, 침투량 및 처짐량 순서로 나타내었다. 입력에너지 (E_{in}) 는 식 (7) 을 통해 도출하였다.

$$E_{in} = mgh \quad (7)$$

Table 7 과 Fig. 23 (a) 와 같이 변형량의 경우 PP(α)를 범퍼 백빔의 하단부에 배치한 경우 다른 모델에 비해 최대 33.5 % 이상 변형량을 줄이는 것을 확인 할 수 있었다. 하지만 그에 반해 최대 하중은 증가하고, 충격 에너지흡수량은 감소하는 경향을 보였다. 이와 같은 결과는 TPO 에 비해 상대적으로 강성이 높은 PP(α) 의 범퍼 백빔에 대한 적용 비율이 높아질수록 충돌 시 범퍼 백빔의 강성 증가와 함께 충격에 의한 전체적인 변형또한 감소된다고 사료된다.

Fig. 23 (b) 에서 PP(α) 만 적용된 범퍼 백빔의 경우 충격 하중이 49.45 KN 으로 4가지 모델 중 가장 높은 것을 확인할 수 있었다. TPO 만 적용된 범퍼 백빔의 경우 충격 하중은 30.30 KN 으로 가장 낮은 반면 충격 하중에 의한 변형량은 가장 큰 것을 확인할 수 있었다.

충격 에너지 흡수 특성 결과를 나타낸 Fig. 23 (C) 의 경우 2 개의 부품으로 구성된 범퍼 백빔에 대한 TPO 적용 밀도가 높은 모델의 경우 PP(α) 적용 밀도가 높은 모델에 비해 침투량 및 처짐량의 변형량이 높은 만큼 상대적으로 충격 흡수능이 우수함을 확인할 수 있었다. 또한, 범퍼 백빔의 상단부에 비해 하단부의 적용되는 재료가 충격 시 범퍼 백빔의 충격 흡수능에 영향도가 크다는 것을 알 수 있었다.

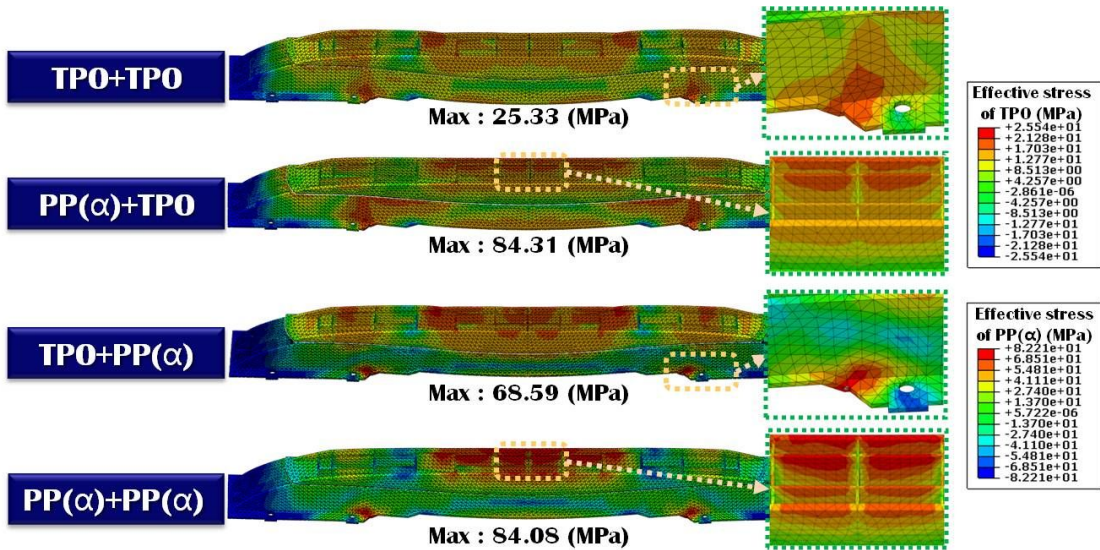


Fig. 24 Variation of effective stress distributions for material combinations

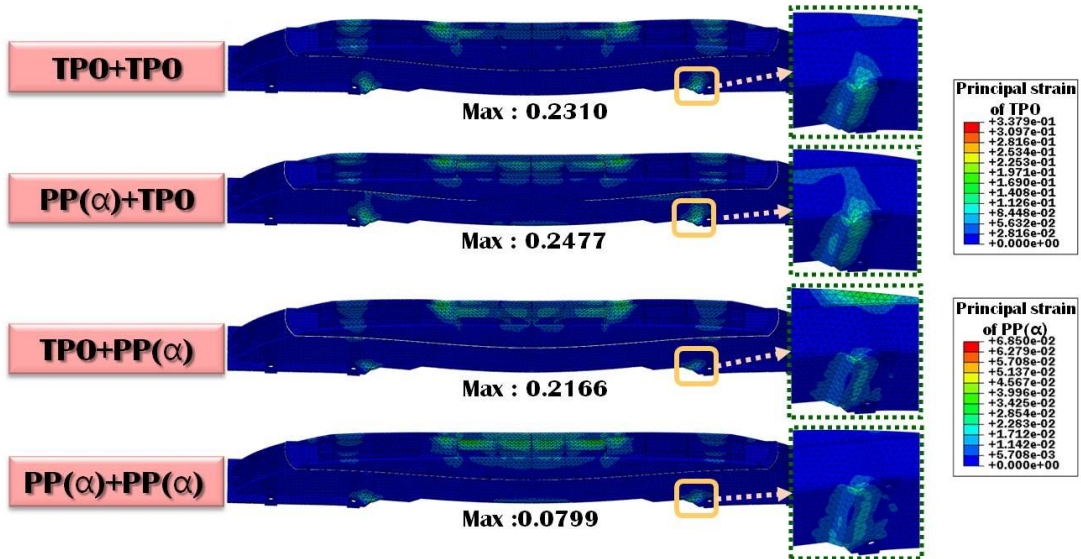


Fig. 25 Variation of principal strain distributions for different material combinations

Fig. 24 와 Fig. 25 는 TPO 와 PP(α) 의 적용 위치 및 구성에 따른 응력 분포와 주변형률 분포를 나타낸 그림이다. 범퍼 백빔의 상단부는 펜듈럼과 접촉이 처음 발생하는 중앙부와 펜듈럼의 굴곡진 부분과 접촉이 일어나는 중앙부로부터 240 mm 부근에서 응력 분포가 집중적으로 발생하는 것을 알 수 있었다. 범퍼 백빔의

하단부의 경우 펜듈럼의 중앙부 충돌 시 충격 하중이 범퍼 백빔의 양 끝단으로 분산되면서 스테이와의 볼트체결이 이루어지는 부분에서 응력 분포가 집중적으로 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 현상은 충격 시 발생된 충격 하중이 중앙으로부터 범퍼 백빔의 양 끝단으로 전달되면서 범퍼 백빔의 전체적인 굽힘 변형을 유도하게 되는데, 전체적인 변형이 발생하다가 상대적으로 강성이 큰 범퍼 스테이와 프레임까지 변형을 일으키지 못하기 때문에 볼트 체결 부분에서 응력집중이 발생하여 국부변형이 발생된 것으로 사료된다.

응력 분포의 경우 PP(a)를 범퍼 백빔의 하단부에 적용시킨 결과 범퍼 스테이와의 볼트 체결부분에서 응력 집중 분포 영역과 주변형률 분포 영역이 감소하고 이로 인해 범퍼 백빔의 전체적인 변형량 또한 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 하지만, PP(a)를 범퍼 백빔의 하단부에 적용함으로써 충격 시 범퍼 백빔의 하단 중앙부에서 최대응력이 급격히 증가되어 인장 파단이 우려되는 부분을 확인할 수 있었다. 이러한 현상으로 인해 PP(a)를 범퍼 백빔의 소재로 적용할 경우 펜듈럼과의 접촉 하중에 의한 파단과 범퍼 백빔의 인장 변형에 의한 미세 파단이 예상된다.

위와 같은 결과를 바탕으로 TPO를 범퍼 백빔의 상·하단부에 배치함으로써 충격 에너지 흡수 및 파단 특성이 우수함을 확인할 수 있었다.

2. 개방형 및 밀폐형 설계에 따른 범퍼 백빔 충돌 해석 결과 및 고찰

검증된 소재 적용 위치 및 구성안을 바탕으로 범퍼 백빔의 상단부 및 하단부에 TPO 를 적용시켰다. 위의 설계안에 대하여 범퍼 백빔 내 리브 설계를 수행하기 전 펜듈럼과의 충돌 시 범퍼 백빔의 단면 형상에 따른 충격 특성을 분석/검증하기 위해 Fig. 26 과 같은 개방형 형상과 밀폐형 형상에 따른 충격 해석을 수행 하였으며, 유한요소 해석에 사용된 격자 수는 Table 8 과 같다.

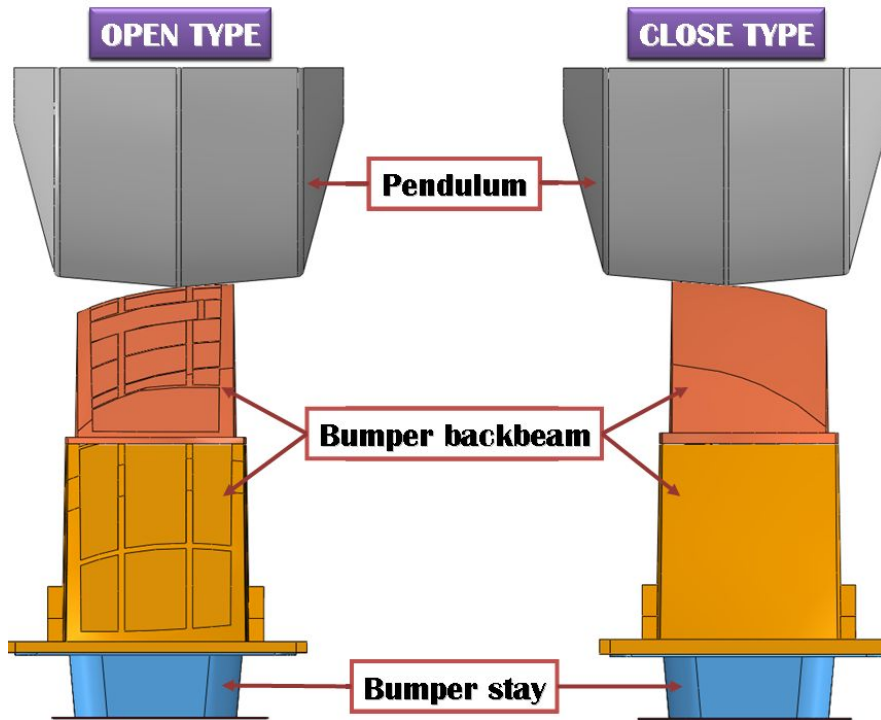


Fig. 26 Design of bumper backbeam according to section shapes

개방형 및 밀폐형 범퍼 백빔의 충격 특성 및 검증을 위한 유한요소해석 모델링 및 해석은 소재별 적용 위치 및 구성안에 따른 충격 특성 분석을 위한 모델링과 마찬가지로 ABAQUS V6.5 상용 프로그램을 이용하였고, 범퍼 백빔을 제외한 펜듈럼, 범퍼 스테이 및 프레임은 동일한 모델을 사용하였으며, 충돌 해석에 요구되는 경계 조건 및 해석 조건 또한 동일한 조건을 부여하였다.

Table 8 Number of nodes and elements of three-dimensional finite element analysis

		Bumper Backbeam (EA)	Bumper Stay (EA)	Bumper Frame (EA)	Pendulum (EA)
OPEN TYPE	Node	22,444	4,998	1,986	276
	Element	70,006	13,920	1,990	242
CLOSE TYPE	Node	21,509	4,998	1,986	276
	Element	66,865	13,920	1,990	242

3차원 유한요소해석 결과 충격 입력에너지, 충격 흡수에너지, 충격 에너지 흡수율, 최대하중, 침투량 및 처짐량에 대해서 Table 9 와 같은 결과를 알 수 있었다.

Table 9 Result of FE analysis according to section shapes

	E_{in} (KJ)	$E_{ab,max}$ (KJ)	χ (%)	P_{max} (KN)	δ_I (mm)	δ_D (mm)
OPEN TYPE	0.85	0.74	86.7	30.30	47.69	50.09
CLOSE TYPE	0.85	0.74	86.7	31.50	45.89	49.32

Table 9 에서와 같이 개방형 모델과 밀폐형 모델의 변형량을 비교해보면 개방형 모델에 비해 밀폐형 모델의 변형 특성이 우수함을 확인할 수 있었다. 특히, 처짐량의 차이에 비해 침투량에서 변형량의 차이가 뚜렷이 나타나는데 이는 펜듈럼의 충돌 시 밀폐형 모델의 경우 범퍼 백빔의 전체적인 변형을 유도하는 반면, 개방형 모델의 경우 Fig. 28 과 같이 직접 접촉이 이루어지는 리브가 펜듈럼의 접촉 하중에 의해 국부적 변형이 발생하면서 위와 같은 처짐량 차이가 발생된다고 판단되어진다.

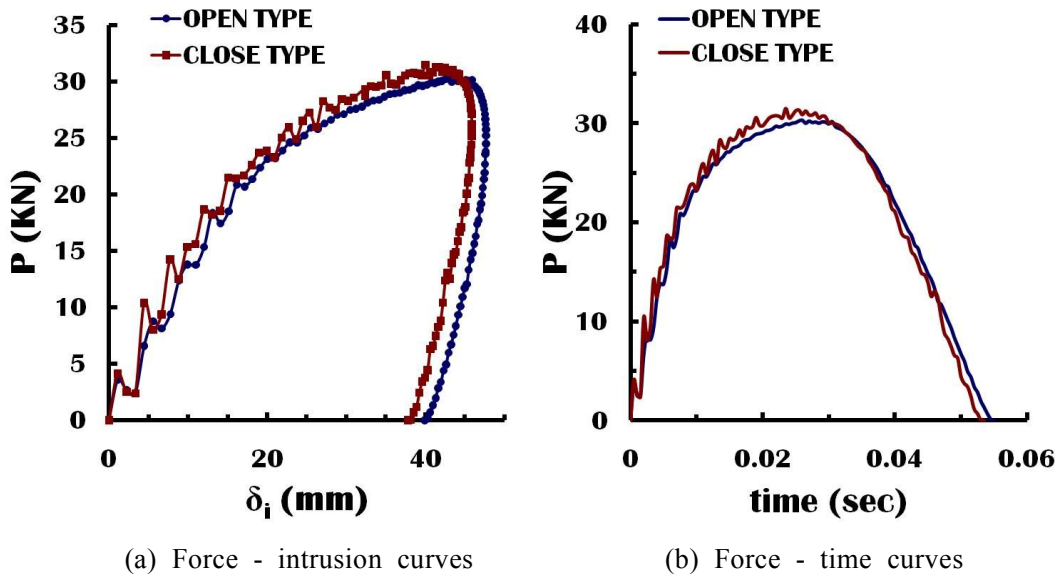


Fig. 27 Influence of sectional shapes on the force-intrusion curves and force-time curves of bumper backbeam

Table 9 및 Fig. 27 에서와 같이 밀폐형 모델과 개방형 모델의 해석결과를 비교한 결과 하중의 경우 최대 하중 값이 2.4 KN 의 차이를 보임을 알 수 있었다. 최대 침투량과 처짐량은 1.1 mm / 2.4 mm 로 밀폐형 모델 이 범퍼 백빔의 변형면에서 우수한 특성을 보임을 확인할 수 있었다. Fig 28 (a) 와 (b) 를 보면 하중 선도의 초기부분에 밀폐형 모델에 비하여 개방형 모델이 좀 더 완만한 곡선의 형태를 보이고 있는데, 이는 밀폐형 모델 의 경우 범퍼 백빔의 표면과 펜듈럼의 충격선이 충돌 시 접촉과 비접촉 현상이 반복되면서 충돌 초기 하중이 급격히 증가했다가 감소하는 현상이 발생하는 것이라고 판단되고, 이와 달리 개방형 모델의 경우 Fig. 28 과 같이 충돌 초기 펜듈럼의 충격선이 범퍼 백빔의 리브와 리브 사이에 침투해 들어가면서 리브의 붕괴로 인해 상대적인 진동 현상이 완화된 것으로 판단된다.

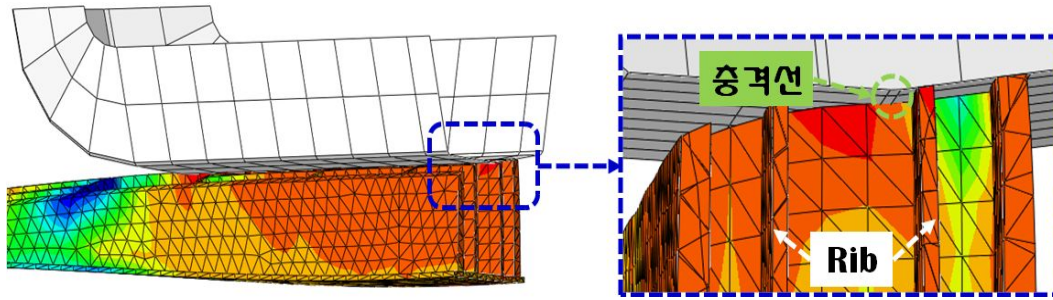


Fig. 28 Contact area between the pendulum and bumper backbeam

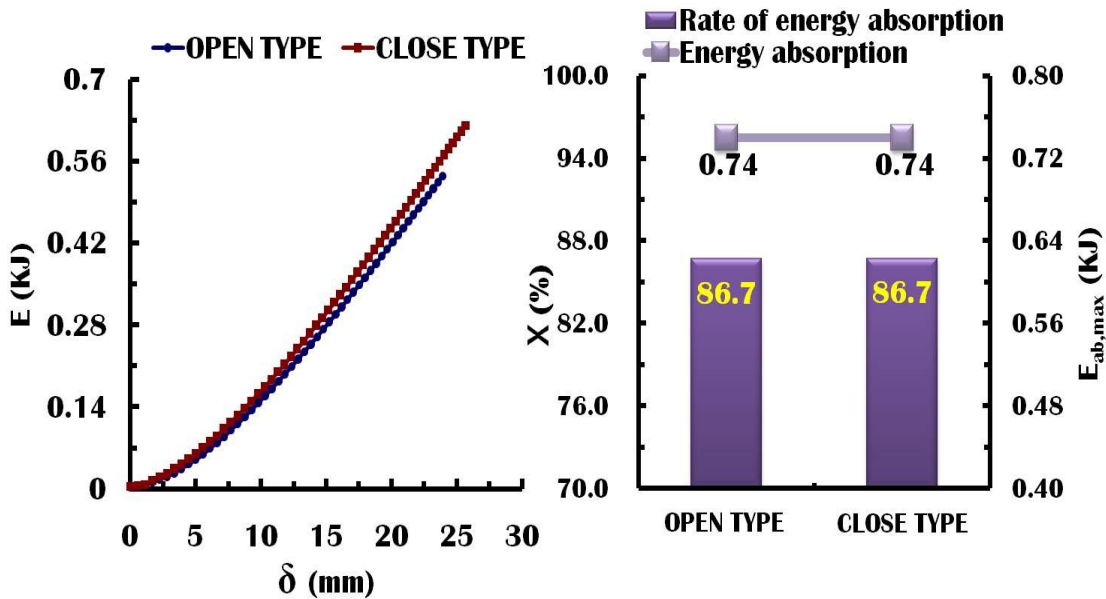


Fig. 29 Energy absorption characteristics

Table 9 및 Fig. 29 는 밀폐형 모델과 개방형 모델의 충격 에너지 흡수에 대해 비교한 결과이다. 최대 하중이 발생할 때 까지의 에너지 흡수 특성의 경우 개방형 모델에 비해 밀폐형 모델이 우수함을 알 수 있었다. 이는 범퍼 백빔 내 리브의 국부적 변형에 따른 충격 흡수보다 범퍼 백빔의 전체적인 변형에 의한 충격 흡수능이 더 우수하기 때문이라 사료된다.

총 누적 흡수 에너지의 경우 밀폐형 모델과 개방형 모델이 0.74 KJ 의 누적 흡수 에너지량을 보이고 있으며, 범퍼 백빔의 충격에너지 흡수율과 충격 에너지 흡수량 차이 또한 두 모델 사이에서 거의 미비하다는 것을 확인할 수 있었다.

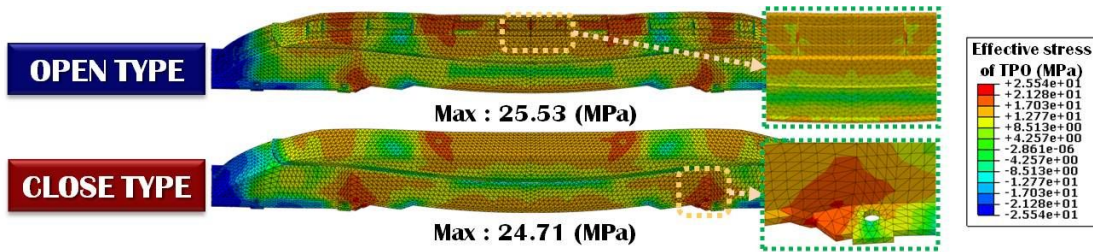


Fig. 30 Variation of effective stress distributions for different section shapes

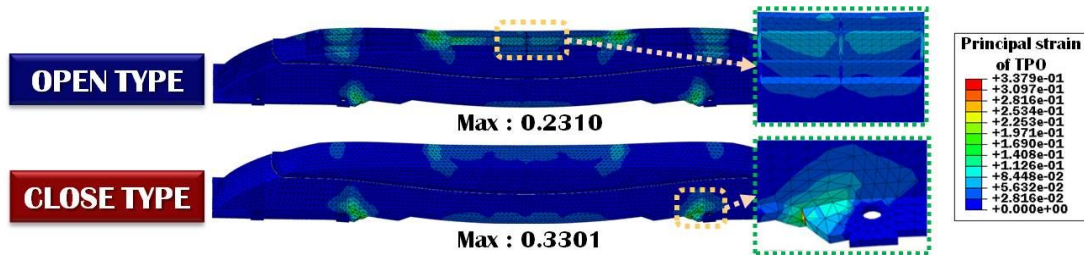


Fig. 31 Variation of principle strain distributions for different section shapes

Fig. 30 과 Fig. 31 은 밀폐형 모델 과 개방형 모델 에 따른 응력 분포와 주변형 율 분포에 대해 나타낸 결과이다. 밀폐형 모델의 경우 범퍼 백빔의 상단부에서 펜 들럼 충돌 시 충격 하중이 범퍼 백빔의 전체적인 변형을 유도하면서 범퍼 백빔과 범퍼 스테이의 결합부에 최대 응력과 주변형 율이 집중되는 것을 확인할 수 있었 다. 개방형 모델 의 경우 충격 시 범퍼 백빔 상단부의 리브가 붕괴되면서 1차적으 로 충격 흡수가 이루어지기 때문에 범퍼 백빔과 범퍼 스테이 결합부에서의 응력 및 주변형 율을 분포 영역이 상대적으로 감소하지만, 펜들럼의 접촉하중에 의한 리 브의 파단발생이 우려됨을 알 수 있었다.

이와 같은 결과로 밀폐형 모델과 개방형 모델의 충격 에너지 흡수능은 비슷한 특성을 보이지만, 변형 및 파단 특성에서 밀폐형 모델이 우수함을 확인할 수 있었 다.

3. 범퍼 내 리브 방향에 따른 충돌 해석 결과 및 비교/분석

범퍼 백빔 내 리브의 배치 및 분포에 대한 설계를 수행하기 이전에 수평형 리브와 수직형 리브가 충격 시 범퍼 백빔의 충격 특성에 영향도를 고려하기 위하여 범퍼 백빔의 길이 방향으로 2개의 리브를 배열한 수평형 리브와 범퍼 백빔의 폭 방향으로 17 개의 리브를 배열한 수직형 리브의 분포에 따른 범퍼 백빔의 충격 특성에 대하여 분석하였다. 두 가지 형상의 범퍼 백빔의 충격 해석을 수행하기 위하여 Fig. 32 와 같은 모델링을 수행하였다.

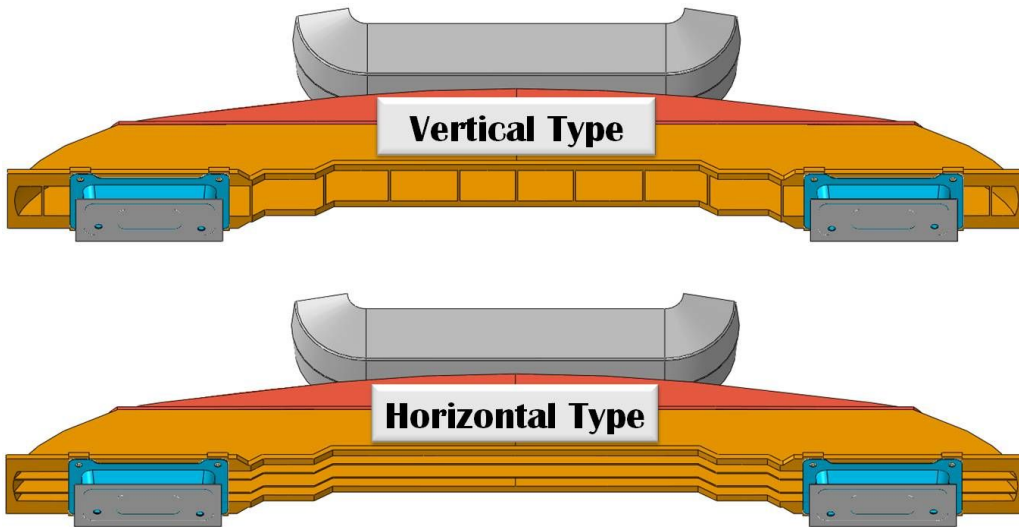


Fig. 32 Design of bumper backbeam according to ribs direction

해석 조건 및 경계 조건을 앞서 수행한 FMVSS 범규 중 PART 571 규정에 따른 펜듈럼 충돌 해석과 동일 하며, 해석에 사용된 유한요소 격자수는 Table 10 과 같다.

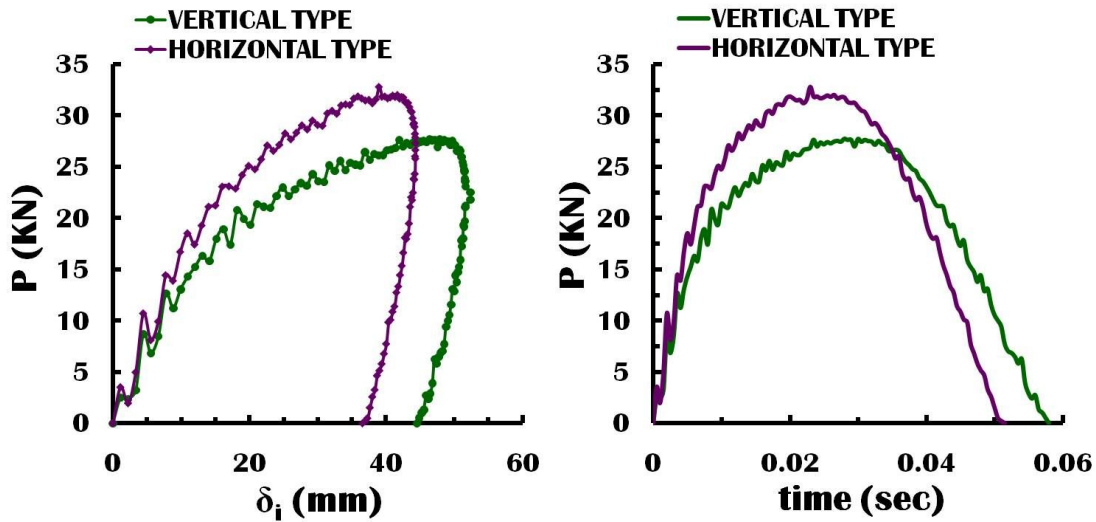
Table 10 Number of nodes and elements of three-dimensional finite element analysis

		Backbeam (EA)	Stay (EA)	Frame (EA)	Pendulum (EA)
VERTICAL TYPE	Node	15,322	4,998	1,986	276
	Element	46,076	13,920	1,990	242
HORIZONTAL TYPE	Node	20,081	4,998	1,986	276
	Element	59,631	13,920	1,990	242

Table 11 Results of FE analysis according to ribs direction

	E_{in} (KJ)	$E_{ab,max}$ (KJ)	χ (%)	P_{max} (KN)	δ_I (mm)	δ_D (mm)
VERTICAL TYPE	0.85	0.74	86.86	27.70	52.39	55.33
HORIZONTAL TYPE	0.85	0.74	86.07	32.79	44.34	38.58

3차원 충격 유한요소 해석 결과 Table 11 과 같이 충격 입력에너지, 충격 흡수 에너지, 충격 에너지 흡수율, 최대하중, 침투량 및 처짐량에 대한 결과를 알 수 있었다. 동일 입력에너지에서 종방향 리브 분포와 횡방향 리브 분포 모델의 충격 해석 결과 최대 누적 충격 흡수 에너지의 경우 0.74 KJ 로 거의 유사하고, 침투량 및 처짐량은 횡방향 리브 분포의 경우 약 8 mm 정도 감소되는 것을 확인할 수 있었다. 이와 같은 결과는 펜듈럼과의 충돌 시 종방향 리브에 비해 횡방향 리브가 범퍼 백빔의 대변형에 큰 영향을 미친다고 판단되어진다. 하지만, 대변형 감소로 인해 전달하중은 증가되는 것을 확인할 수 있었다.



(a) Force - intrusion curves

(b) Force - time curves

Fig. 33 Influence of ribs direction on the force-intrusion curves and force-time curves of bumper backbeam

Table 11 과 Fig. 33 은 종방향으로만 배치되어 있는 리브와 횡방향으로만 배치되어 있는 범퍼 백빔의 유한요소 해석 결과를 나타내었다. Fig. 33 (a) 에서는 하중과 침투량을 나타낸 선도로 종방향 배치에 비해 횡방향 배치안이 침투량은 10% 정도 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 하지만 최대 하중의 경우 14 % 정도 높음을 알 수 있었다. Fig. 33 (b) 는 하중과 시간으로 나타낸 선도로 횡방향 리브 배치에 비해 종방향 리브 배치에서 하중 값이 많이 튀는 이유는 범퍼 백빔의 변형 시 횡방향 리브 배치는 범퍼 백빔의 전체적인 변형을 유도하지만, 종방향 리브 배치에서는 리브 사이사이에서 국부적 변형이 발생함으로 인해 하중의 증·감 현상이 빈번히 발생된다고 사료된다.

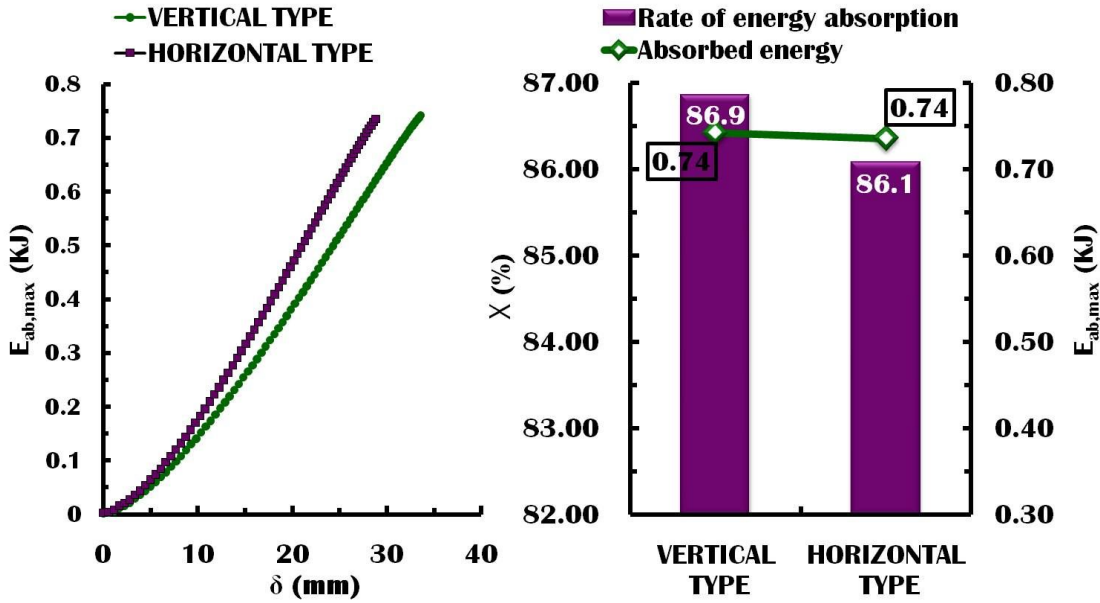


Fig. 34 A absorbed energy according to ribs direction

Table 9 및 Fig. 34 는 리브 배치에 따른 충격 에너지 흡수에 대해 비교한 결과이다. 총 누적 흡수 에너지의 경우 횡방향 리브 배치와 종방향 리브 배치에서 0.02 KJ 로써 근소한 차이를 보이고 있으며 충격범퍼 백빔의 충격 에너지 흡수량 및 흡수율 또한 0.5 % 이내로 미세한 차이를 보이는 것을 확인할 수 있었다. 위 결과로부터 종방향 리브 배치에 비해 횡방향 리브 배치가 충격 특성 향상에 기여도가 크다는 것을 확인할 수 있었다.

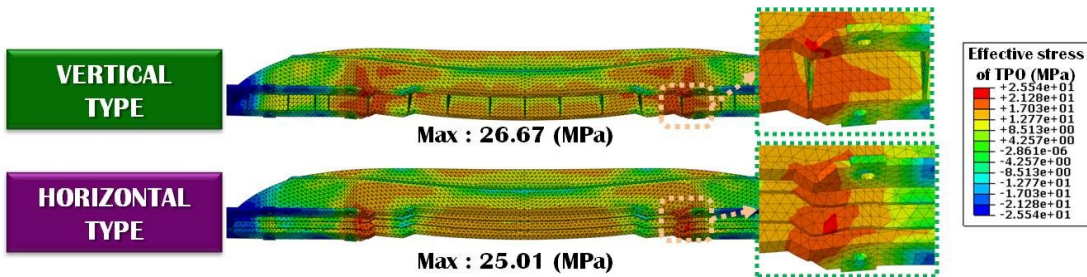


Fig. 35 Variation of effective stress distributions for ribs direction



Fig. 36 Variation of principal strain distributions for ribs direction

Fig. 35 와 Fig. 36 은 리브 방향에 따른 유효 응력 분포와 주변형률 분포를 나타낸 그림이다. 종방향 리브 배치의 경우 횡방향 리브 모델에 비해 많은 변형이 발생되면서 리브 배치 때문에 볼트 체결부 뿐만 아니라 리브 사이에 최대응력 분포 및 변형율 분포 영역이 집중되는 것을 확인할 수 있었다. 이에 반해 횡방향 리브의 경우 펜듈럼과의 충돌 시 범퍼 백빔의 길이 방향으로 전달하중을 분산시킴으로써 볼트 체결부에서의 최대 응력 및 변형율 분포 영역 또한 감소되는 것을 확인할 수 있었다.

4. 리브 설계안에 따른 범퍼 백빔 충돌 해석 결과 및 고찰

미국 연방 자동차 안전 기증의 펜듈럼 충돌 해석을 통하여 범퍼 백빔의 소재 및 수정, 단면형상, 리브 방향에 따른 충격 해석 모델의 검증을 수행하였다.

소재 배치 및 구성에 따른 해석 결과 TPO 를 범퍼 백빔의 적합한 소재로써 적용시키고, 단면 형상에 따른 유한요소 해석 결과 밀폐형 형상을 적용시켰으며, 횡방향 리브 배치를 필수로 적용시키고 응력 및 변형을 집중영역에 따른 종방향 리브의 배치 및 분포를 통해 Fig 37 과 같은 5 가지 설계안을 도출하였다..

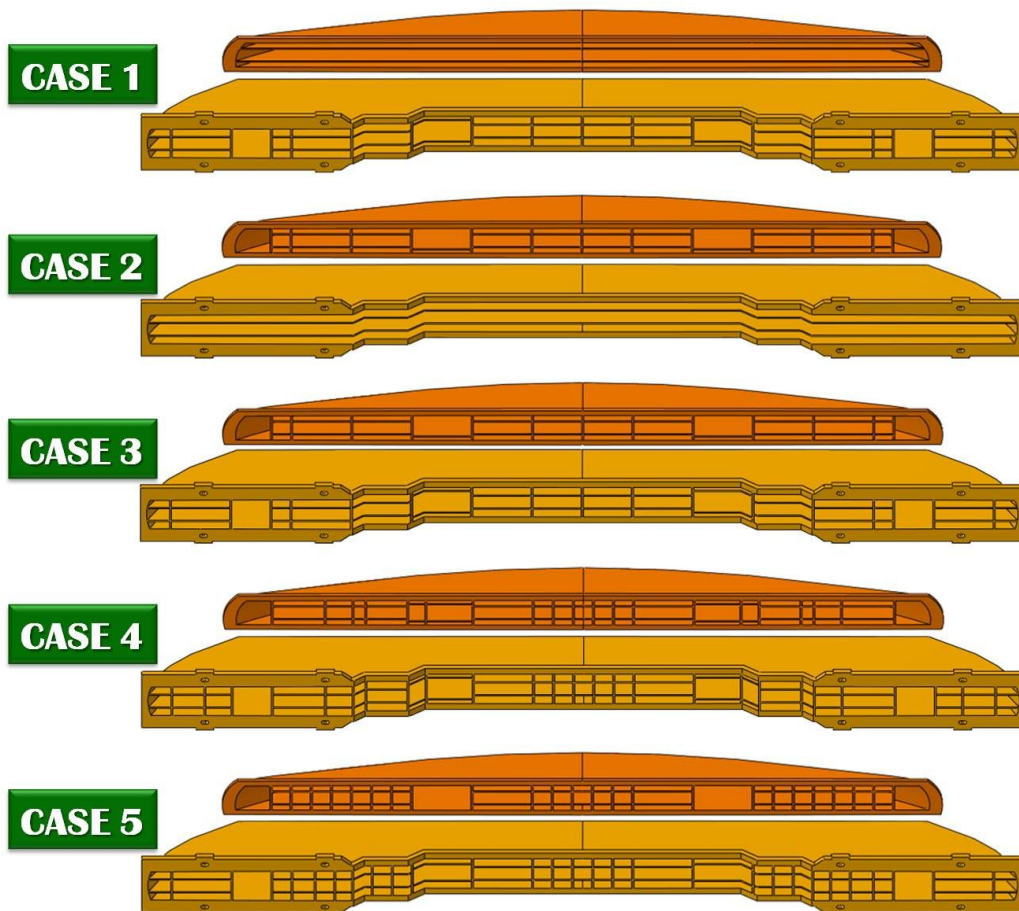
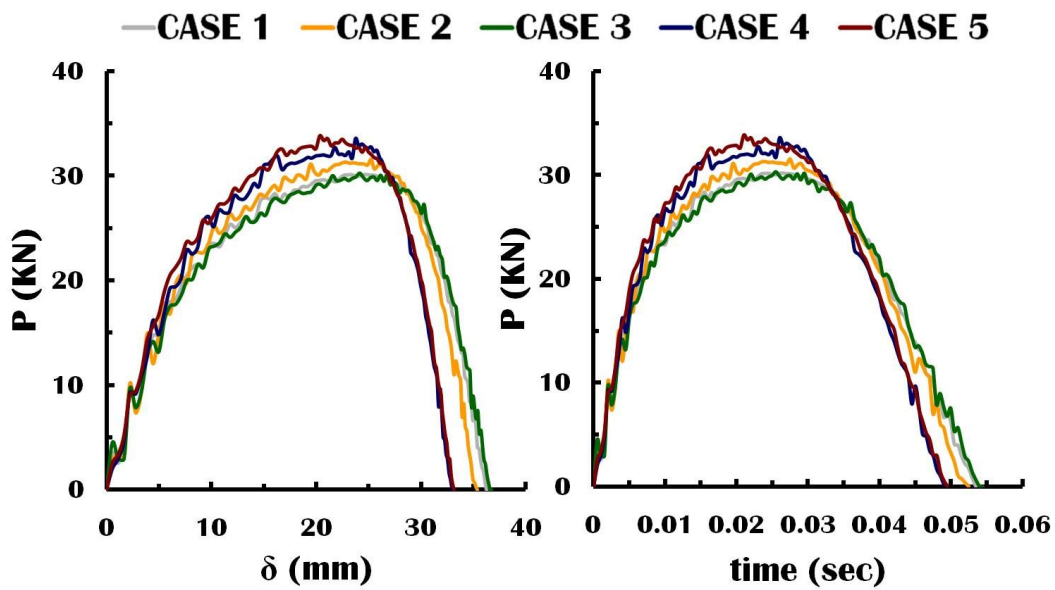


Fig. 37 Design of the rib formation

Fig.38 은 리브의 배치 및 분포에 따른 변형량을 나타낸 그림이다. CASE 1 과 같이 중·횡 방향의 리브를 일정한 간격으로 배치한 모델이 충격부에 종방향 리브를 배치한 CASE 2 보다 3 % 정도 변형 특성이 우수함을 확인할 수 있었다.

Table 12 Results of FE analysis according to ribs formation

	E_{in} (KJ)	$E_{ab,max}$ (KJ)	χ (%)	P_{max} (KN)	δ_I (mm)	δ_D (mm)
CASE 1	0.85	0.67	78.34	30.16	49.22	53.13
CASE 2	0.85	0.66	77.34	31.55	48.53	53.12
CASE 3	0.85	0.67	78.63	30.29	45.89	49.32
CASE 4	0.85	0.65	76.41	33.56	44.90	48.59
CASE 5	0.85	0.66	77.69	33.87	43.89	47.38



(a) Force - intrusion curves

(b) Force - time curves

Fig. 38 Influence of rib formation on the force-intrusion curves and force-time curves of bumper backbeam

Table 12와 Fig. 38 을 통해 범퍼 백빔 내 리브의 배치 및 분포에 따라 비교해보면 동일 입력에너지에서 침투량 및 처짐량 등 변형량이 증가할수록 최대 하중은 감소되는 것을 확인할 수 있었다. 누적 충격 흡수 에너지 및 에너지 흡수율의 경우 리브 배치 및 분포에 관계없이 거의 유사한 데이터가 도출 되는 것을 확인할 수 있었다. 리브 배치 및 분포에 따른 3차원 충격 유한요소 해석 결과 Fig. 38 과 같이 범퍼 백빔 내 종방향 리브가 증가 되면서 최대 하중 또한 증가되는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 범퍼 백빔의 최대 응력 및 변형율 분포 영역에 종방향 리브를 추가함으로써 최대 하중의 증·감 폭도 현저히 완화되는 것을 확인할 수 있었다.

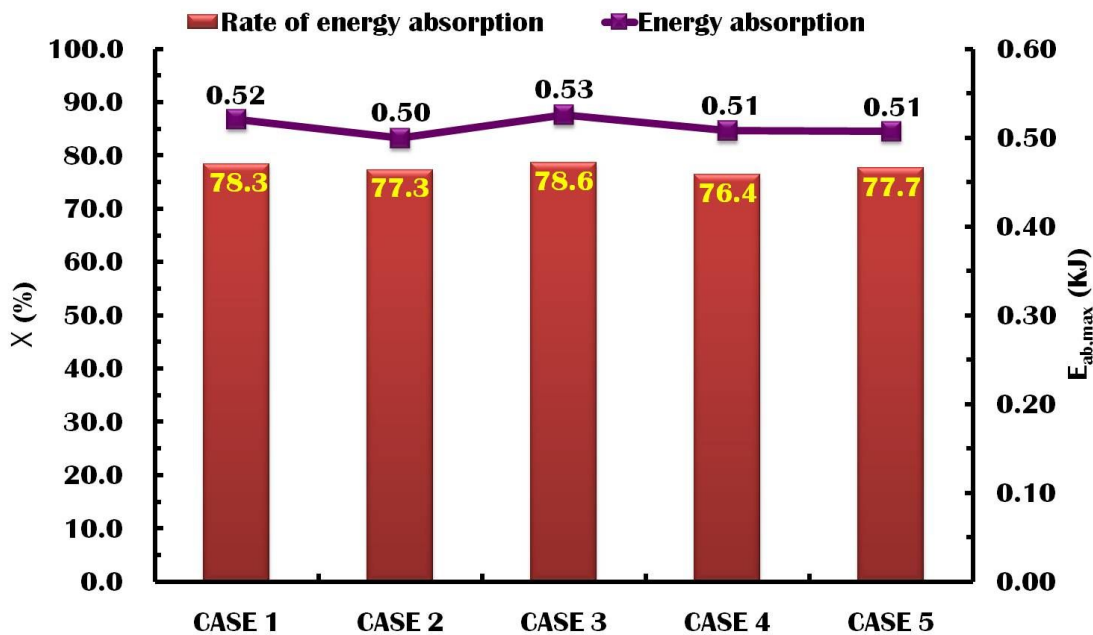


Fig. 39 Absorbed energy according to rib formation

Fig. 39 를 통해 펜듈럼 충돌 시 리브 배치 및 분포에 따른 충격 에너지 흡수능에 대하여 비교 평가 할 수 있었다. CASE 1 에 비해 최대 응력 및 변형율이 발생하는 영역에 리브를 집중 배치한 CASE 5 와의 비교 결과 최대 누적 충격 흡수 에너지량이 0.01 KJ 이내로 매우 미미한 차이를 나타냄을 알 수 있었다. 이와 같은 결과로 범퍼 백빔 내 종방향 리브 배치는 충격 흡수능에 끼치는 영향이 미비하다고 사료된다.

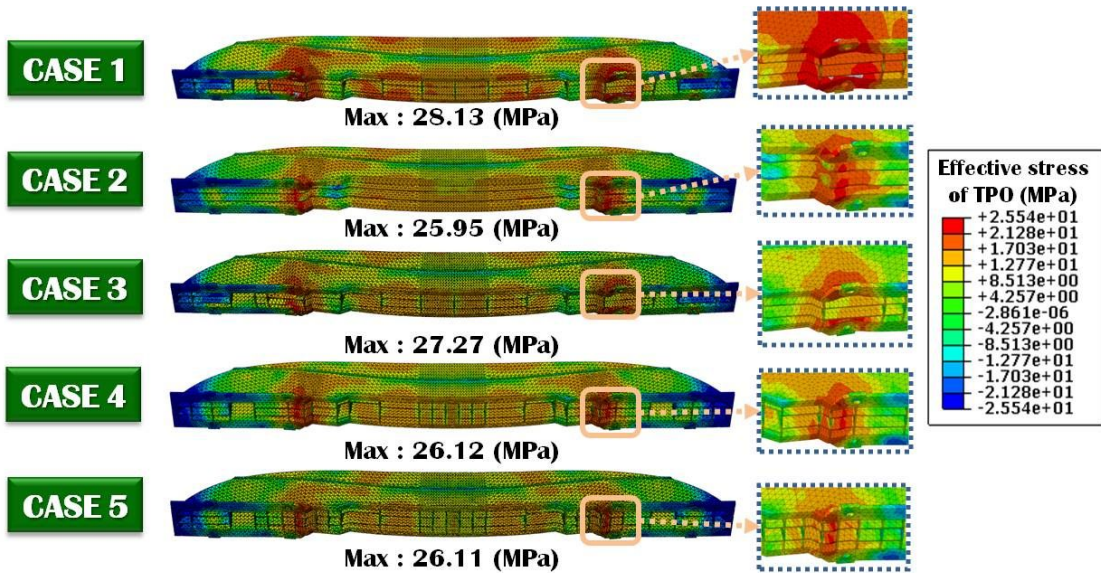


Fig. 40 Variation of effective stress distributions for rib formation

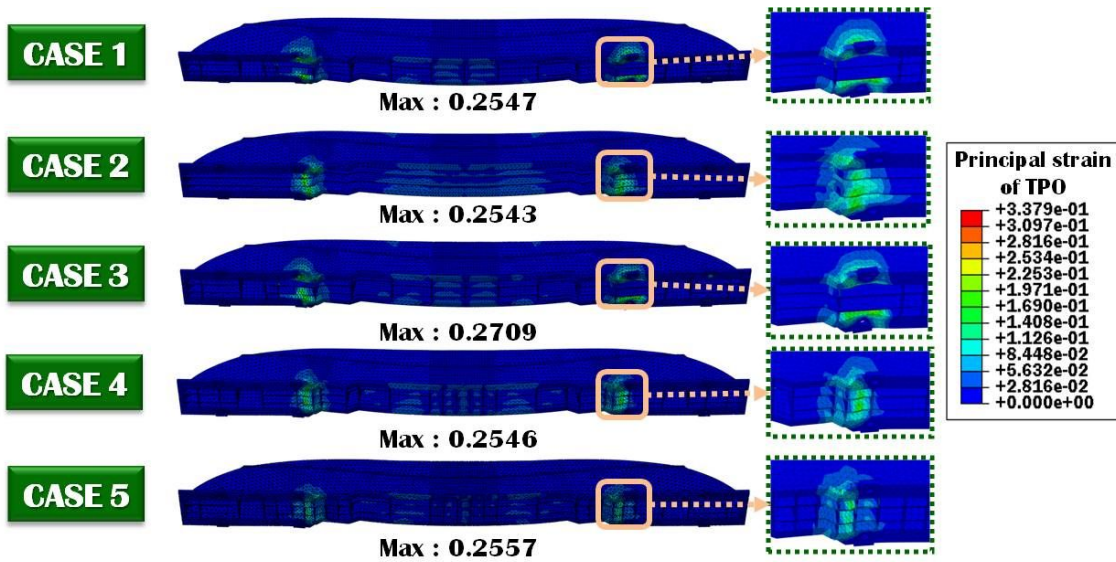


Fig. 41 Variation of principal strain distributions for rib formation

Fig. 40 과 Fig. 41 은 펜들럼 충돌 시 범퍼 백빔의 최대 유효응력 분포 및 최대 주변형률 분포 에 대해 나타낸 결과이다. CASE 1 과 CASE 2 에 비해 CASE 3 의 경우 범퍼 백빔 내 리브의 횡방향과 종방향 조합을 통해서 최대 응력 및 주변형률

분포 영역이 현저히 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 현상은 최대 응력 및 변형율이 집중되는 볼트 체결부에 종방향 리브를 집중 배치함으로써 범퍼 백빔의 대변형으로 인해 볼트체결부에 집중되는 응력을 분산시키기 때문이라 사료된다. 또한, 집중 배치된 종방향 리브는 인장 변형에 의해 볼트 체결부에 발생하는 최대 변형율 분포 완화에 영향을 미치지 않음을 확인할 수 있었다.

제 4 장 미연방 자동차 안전기준 (FMVSS) 에 따른 범퍼 백빔의 저속 충돌 시험

제 1 절 범퍼 백빔의 저속 충돌 시험

1. 충돌 시험용 범퍼 백빔 제작

본 연구를 통해 수행된 3차원 유한요소 해석을 바탕으로 Fig. 42 와 같은 최적 모델을 도출하였다. 유한 요소 해석 모델링 중 전처리 과정을 통해 제거됐던 부분에 대해서 모델링 수정 후 실험을 위한 범퍼 백빔 제작을 수행하였다.

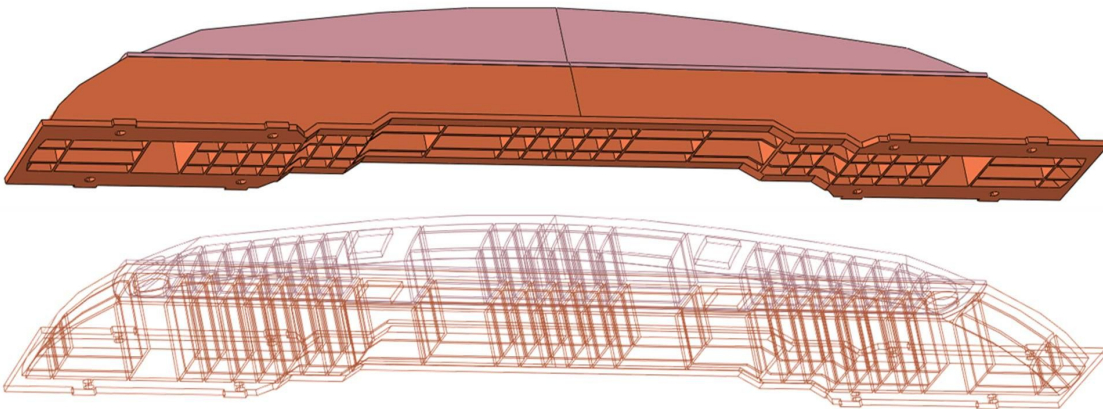


Fig. 42 Final design for bumper backbeam

범퍼 백빔 시제품 사출 성형을 위한 대상 금형을 제작하기 위하여 전체적인 외형 형상 가공을 수행하였다. 금형 제작 재료는 SM45C 를 사용하였으며, 금형 제작 공정은 Fig. 43 의 (a) NC 형상 가공, (b) 방전가공, (c) 와이어 컷팅가공, (d) 사상 가공 공정 순으로 진행하였다. Fig. 43 은 완성된 금형의 최종 조립 과정을 거친 완성된 범퍼 백빔 금형의 형상을 보여준다.

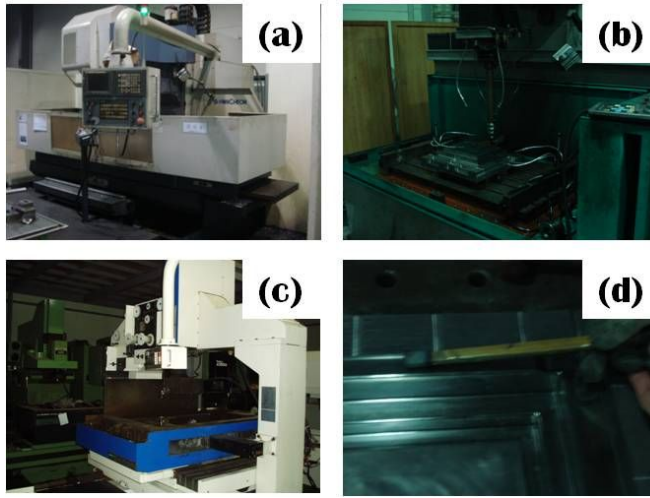


Fig. 43 Manufacturing process of injection mould

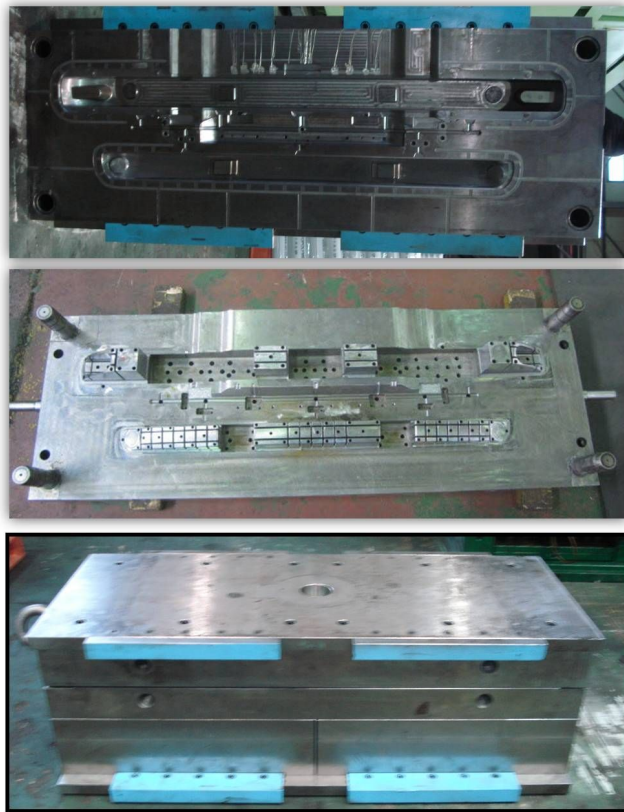


Fig. 44 Fabricated mould set

완성된 금형과 Fig. 45 와 같은 850 ton 급 사출기를 사용하여 시사출을 실시하였다. 성형시간은 사출시간 6 초, 보압시간 5초, 그리고 자연냉각 상태로 냉각시간을 250 초를 부여하여 시제품을 제작하였다. 사출 성형 공정에 의해 제작된 범퍼 백빔의 상·하단부 부품은 Fig. 46 과 같이 진동 용착기를 통해 접합시켜 실험을 위한 최종 제품을 완성하였다.



Fig. 45 Injecton molding apparatus



Fig. 46 Vibration welding and final product

2. Pendulum 충돌 시험 방법

사출 성형 공정에 의해 제작된 범퍼 백빔에 대하여 미연방 자동차 안전기준 (FMVSS 49CFR) 에 따라 충돌 시험을 수행하였다. 충돌 시험에 앞서 차량 장착 시와 동일한 조건을 부여하기 위해 Fig. 47 과 같이 스테이와 결합된 범퍼 백빔에 대하여 지그에 스테이를 통해 범퍼 백빔을 부착시켜 볼트채결을 통해 대차에 결합하였다.

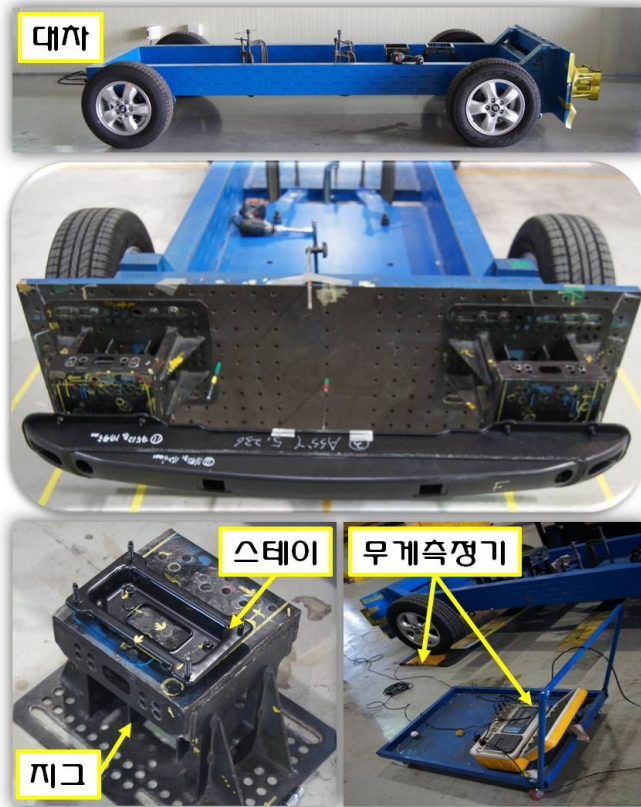


Fig. 47 Experimental devices for low-speed frontal collision test

대차에 공차 중량 1,368 kg 을 부여하기 위해 차량용 무게 측정기에 범퍼 백빔을 결합한 대차를 설치하여 실험 규정에 요구되는 차량무게를 설정하였다.

범퍼 백빔이 장착된 대차는 펜듈럼 정면부에 위치시키고 충격 높이는 Fig. 48과 같이 법규에 따라 지면으로부터 높이 457 mm 부분을 가격하도록 조건을 부여하였다. 대차의 정면부에 장착되어있는 스틱형태의 센서는 충돌 시 펜듈럼의 침투량과 충돌에 의한 범퍼 백빔의 처짐량을 측정하기 위한 센서이다.



Fig. 48 Experimental set-up of low-speed frontal collision test

펜듈럼의 후면부에는 대차와 마찬가지로 실험용 추를 장착하여 공차중량 1,368 kg 을 부여하고, 충격 속도 2.5 mile/h 를 부여하였다.

3. Pendulum 충돌 시험 결과 및 비교/분석

3 차원 충격 유한요소 해석을 통해 도출된 최적 설계안으로 사출 성형 공정에 의해 제작된 범퍼 백빔에 대하여 미연방 자동차 안전기준 (FMVSS 49CFR) 에 따라 저속 충돌 시험을 수행하였다. 시험 결과 Table 13 과 Fig. 49 와 같은 결과를 얻을 수 있었다.

Table 13 Results of low-speed frontal collision test

	V (km/h)	m _R (kg)	δ _I (mm)	δ _D (mm)
Experiment	10.1	1,368	30.0	25.0
Analysis	10.0	1,600	46.4	50.3

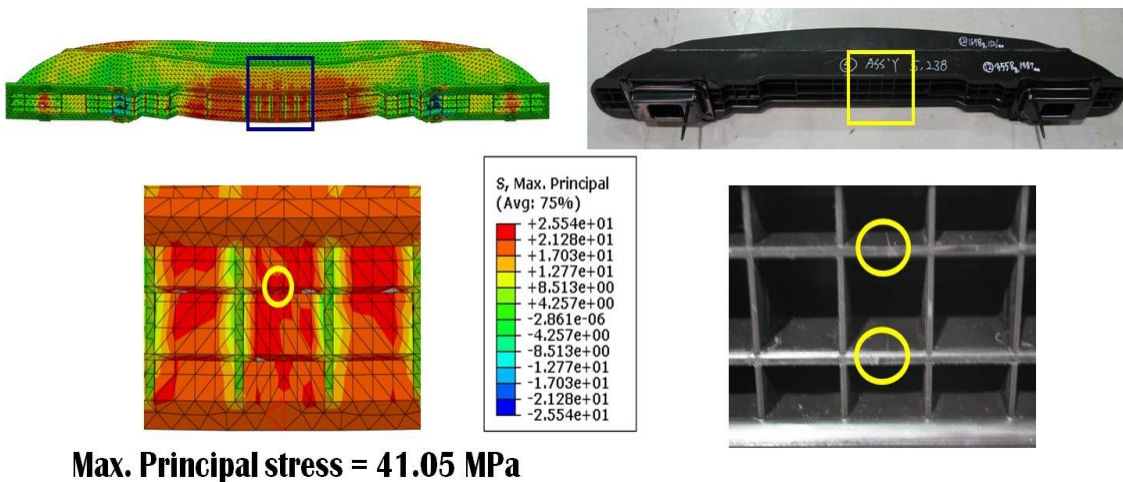


Fig. 49 Comparison of experiment and those of FE analysis

해석 결과와 비교해 볼 때 침투량에서 35 % 정도 오차율을 보였으며, 처짐량의 경우 50 % 가까운 오차율을 보이는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 오차는 실제 차량 무게인 1,710 kg 에 대하여 실험 시에는 규정에 따라 실차 무게의 80 % 의

무게인 1,368 kg 을 적용하였으나 해석의 경우 공차 중량인 1,600 kg 을 실험 조건으로 부여했기 때문이라 사료되며, 또한 범퍼 백빔이 장착된 대차의 충격 시 발생하는 지면과의 마찰에너지 등 실험 시 발생하는 소산에너지 등을 정확히 고려하지 않아 실험결과와 다소 차이가 발생된다고 사료된다.

하지만, 주응력 분포 영역의 측정 결과 범퍼 백빔의 굽힘 변형에 의해 범퍼 백빔의 하단 중앙부 리브에 크랙발생을 예측할 수 있었으며 실험결과 또한 유사한 영역에서 인장파단에 의한 크랙이 발생함을 확인할 수 있었다.

제 5 장 결론 및 향후 과제

본 연구에서는 기능성 플라스틱을 이용한 범퍼 백빔의 충격 특성에 대하여 분석/고찰하였다. 기능성 플라스틱의 충격 특성을 분석하기 위해 낙하하중 방식의 충격 시험기를 이용하여 충격 시험을 수행하였으며, 기능성 플라스틱을 이용한 범퍼 백빔에 대하여 3차원 충격 유한요소 해석을 수행하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 기능성 플라스틱 판재인 TPO, PP(α) 판재와 현재 양산 제품의 적용 소재인 GMT 판재에 대하여 스트레칭 경계조건에서 낙하 충격 실험을 수행하여 변형 및 파단 특성과 충격 에너지 흡수 특성 데이터를 비교 분석하였다.

(2) 기능성 플라스틱을 이용한 범퍼 백빔에 대하여 미국 연방 자동차 안전기준 (FMVSS) 의 펜듈럼 충돌 조건에 따라 내충격 특성을 조사할 수 있는 3 차원 내충격 유한요소해석 모델을 개발하여 충격 해석을 수행하였다. TPO 와 PP(α) 의 소재 배치 및 구성, 단면형상, 범퍼 백빔 내 리브 배치에 따른 충격 해석을 수행하여 기능성 플라스틱을 이용한 범퍼 백빔의 최적 설계안을 도출할 수 있었다.

(3) 미국 연방 자동차 안전 기준 (FMVSS) 규정에 따라 Pendulum 충돌 테스트 및 유한요소 해석을 수행하여 비교/분석하였다. 실험 결과 침투량 및 처짐량의 규정 통과 기준인 101mm/47mm 를 만족하였고, 충격 해석을 통해 실험에서는 알 수 없었던 응력 분포 및 주변형률 분포특성과 충격 에너지 흡수능에 관하여 알 수 있었다. 펜듈럼과 충격 부위와 변형 시 응력과 변형율이 집중되는 범퍼 백빔과 스테이의 결합부에 리브를 추가함으로써 집중되는 응력과 변형율을 분산시키는 효과를 얻을 수 있었다.

결론적으로 기능성 플라스틱을 이용한 초경량 범퍼 백빔에 대하여 3차원 유한요소 해석 및 실험을 수행한 결과 자동차 외장 부품인 범퍼 백빔의 충돌 시 나타나는 실제 현상과 유사한 결과를 묘사할 수 있음을 알 수 있었다. 기능성 플라스틱인 TPO 를 범퍼 백빔의 전체 모델에 적용함으로써 충격 시 범퍼 백빔의 대변형을 유도하여 충격 흡수능 향상에 기여함과 동시에 경량화 및 강성을 요구하는 수송기기 관련 분야에 매우 효율적이고 경제적인 소재라 판단할 수 있었다.

추후, 기능성 플라스틱 판재가 자동차/항공기/선박 등 수송기기 관련 산업군에서

보다 다양하게 사용될 수 있도록 다음과 같은 추가적인 연구가 수행되어야 할 것이다.

(1) 강성 및 충격 특성 향상을 위한 화학적 성분비에 따른 충격 특성에 대한 연구가 이루어져야 할 것이다.

(2) 범퍼 백빔의 추가적인 해석을 수행하여 실제 충돌 실험 조건을 고려한 초경량 범퍼 백빔에 대한 유한요소 해석 모델을 개발해야 할 것이다.

(3) 범퍼 백빔의 상품성 연구를 위한 처짐량 보완과 파단 특성 향상을 위한 리브 분포 및 단면계수 향상을 위한 추가 분석이 이루어져야 할 것이다.

REFERENCES

1. Hui-Ping Wang., Chung-Tang Wu., Yong. Guo., Mark. E. Botkin., Acoupled meshfree/finite element method for automotive crashworthiness simulations, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 36, pp. 1210 ~ 1222, 2009
2. Leslaw. Kwasniewski., Cezary. Bojanowski., Jeff. Siervogel., Jerry. W. Wekezer., Krzysztof. Cichocki., Crash and safety assessment program for paratransit buses, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 36, pp. 235 ~ 242, 2009
3. A. Abvabi., A. Nasr., A. Noorpoor., M. Saeed Kiasat., Investigation on the effect of impact location height on pedestrian safety using a legform impactor dynamic model, *Safety Science*, Vol. 48, pp. 660 ~ 671, 2010
4. 김동규, 유정수, 박상연, 이규현, 김광희, 이문용, 샌드위치 판재를 적용한 자동차 범퍼빔 개발, *한국소성가공학회 2009년도 춘계학술대회 논문집*, pp. 199~202, 2009
5. 이상제, 박진수, 구도희, 정병훈, 자동차 범퍼빔 적용 차세대 재료기술의 개발, *한국자동차공학회논문집 제 10권*, 제 4호, pp. 206 ~ 215, 2002
6. 강성중, 충돌성능을 고려한 승용차 범퍼빔 단면의 최적화, *한국자동차공학회논문집 제 6권*, 제 6호, pp. 276 ~ 284, 1998
7. M.M. Davoodi., S.M. Sapuan., D. Ahmad., Aidy Ali., A. Khalina., Mehdi Jonoobi., Mechanical properties of hybrid kenaf/glass reinforced epoxy composite for passenger car bumper beam, *Materials and Design*, Vol. 31, pp. 4927 ~ 4932, 2010
8. 신춘환., 민병권., Thermoplastic Olefin, *고무학회지*, 제 24권, 제 2호, pp. 133 ~ 142, 1989
9. R.A. Ryntz., The effects of thermoplastic poly(olefin) subsequent paintability and thermal (TPO) morphology on shock performance, *Progress in Organic Coatings*, Vol. 27, pp. 241 ~ 254, 1996
10. 윤두현, 조선형, 김이곤, 섬유강화 플라스틱 복합재의 압축성형에 있어서 이방성과 금형-재료계면의 미끄럼을 고려한 3차원 유한요소해석, *대한기계학회논문집 A권*, 제 23권, 제 7호, pp. 1075 ~ 1084, 1999
11. 김지원, 이창식, 승용차 재활용 범퍼의 충격흡수 성능에 관한 연구, *한국자원리사이클링*

- 학회논문집, 제 18권, 제 1호, pp. 44 ~ 51, 2009
12. J. SUH., J.-H. LEE., H.-S. KANG., K.-T. PARK., J.-S. KIM., M.-Y. LEE. and B.-H. JUNG.,
OPTIMAL PROCESSING AND SYSTEM MANUFACTURING OF A
LASER WELDED TUBE FOR AN AUTOMOBILE BUMPER BEAM, *International Journal of
Automotive Technology*, Vol. 70, pp. 209 ~ 216, 2006
 13. Marek. Mazurkiewicz., Yei. Lung. Tien., Crash simulation of bumpers, *Computers & Structures*,
Vol. 26, pp. 741 ~ 747, 1987
 14. 이권희, 주원식, 실험계획법을 이용한 승용차 앞 범퍼의 최적설계, *한국자동차공학회
2002년도 춘계학술대회논문집*, pp. 542 ~ 547, 2002
 15. 이일섭, 박준, 김민수, 임홍재, 이규령, 박동규, 중간매개 반응표면 모델을 이용한 5mph 차
량 범퍼 단면, *한국자동차공학회 2004년도 춘계학술대회논문집*, pp. 1110 ~ 1115, 2004
 16. 조휘창, 박인송, 정면 오프셋 충돌시 가스튜브를 이용한 차량용 범퍼의 손상성, 수리성에
대한 연구, *한국자동차공학회 논문집*, 제 11권, 제 5호, pp. 134 ~ 139, 2003
 17. 서정, 한유희, 김태일, 이문용, 이광현, 레이저 용접 블랭크 응용 자동차 범퍼 개발, *한국레
이저가공학회지 제 2권, 제 1호*, pp. 51 ~ 60, 1999
 18. K.P. Lam., K. Behdinan., W.L. Cleghorn., A material and gauge thickness sensitivity analysis on
the NVH and crashworthiness of automotive instrument panel support, *Thin-Walled Structures*,
Vol. 41, pp. 1005 ~ 1018, 2003
 19. 이승훈, 박상근, 조영호, 알루미늄 범퍼시스템 개발, *한국자동차공학회 2000년도 추계 학
술대회 논문집*, pp. 919 ~ 924, 2000
 20. 김동학, 김광순, 나성준, 엄인섭, 핫스탬핑 공법을 이용한 Front Bumper Beam 최적화, *한국
소성가공학회 2008년도 추계 학술대회 논문집*, pp. 241 ~ 244, 2008
 21. Laurie. A. Hellinga., Anne. T. McCartt ., Emily. R. Haire., Choice of teenagers' vehicles and
views on vehicle safety: Survey of parents of novice teenage drivers, *Journal of Safety Research*,
Vol. 38, pp. 707~713, 2007
 22. 이동현, 이호길, 김수상, 김동준, 배유종, 신 IIHS 대응 범퍼 구조에 대한 고찰, 2008 *한국자
동차공학회 창립 30주년 기념 학술대회 논문집*, pp. 1176 ~ 1182, 2008
 23. 이상제, 정윤석, 구도희, 이문용, 차대차 충돌시 차량형상에 따른 범퍼 손상성 평가에 대한

- 연구, *한국자동차공학회논문집*, 제 14권, 제 5호, pp. 79 ~ 83, 2006
24. S.M. Sapuana., M.A. Malequea., M. Hameedullaha, M.N. Suddin., N. Ismail., A note on the conceptual design of polymeric composite automotive bumper system, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 159, pp. 145 ~ 151, 2005
25. Zonghua. Zhang., Shutian. Liu ., Zhiliang. Tang ., Design optimization of cross-sectional configuration of rib-reinforced thin-walled beam , *Thin-Walled Structures*, Vol. 47, pp. 868 ~ 878, 2009
26. Paolo. Feraboli., Francesco. Deleo., Bonnie. Wade., Mostafa. Rassaian., Mark. Higgins., Alan Byar., Maurizio. Reggiani., Andrea. Bonfatti., Luciano. DeOto., Attilio. Masini., Predictive modeling of an energy-absorbing sandwich structural concept using the building block approach, *Composites: Part A*, Vol. 41, pp. 774 ~ 786, 2010
27. 강형선, 충격성능 및 보행자 보호규제를 만족하는 범퍼 단면결정 설계기술개발 (CAD/CAM 활용을 위한), *한국산학기술학회논문지*, 제 8권, 제 5호, pp. 968 ~ 972, 2007
28. 이상제, 박진수, 구도희, 차량경량화를 위한 재료기술의 개발과 적용사례, *한국자동차공학회2002년도 춘계학술대회논문집*, pp. 1145 ~ 1151, 2002
29. 홍창섭, 오재운, 김학덕, 이대창, 송주현, 트럭의 충돌 특성 해석을 위한 유한요소 모델의 개발, *한국자동차공학회 1999년도 추계학술대회논문집*, pp. 630 ~ 635, 1999
30. 원시태, 김기주, 차체 범퍼 임팩트빔의 설계에 미치는 구조변수의 영향, *한국정밀공학회 2007년도 춘계학술대회논문집*, pp. 517 ~ 518, 2007
31. Javad. Marzbanrad., Masoud. Alijanpour., Mahdi. Saeid. Kiasat., Design and analysis of an automotive bumper beam in low-speed frontal crashes , *Thin-Walled Structures*, Vol. 47, pp. 902 ~ 911, 2009
32. M. Tanaka., Y. Moritaka., Single bumper shields based on Vectran fibers, *Advances in Space Research*, Vol. 34, pp. 1076 ~ 1079, 2004
33. Ramin. Hosseinzadeh., Mahmood. M. Shokrieh., Larry. B. Lessard., Parametric study of automotive composite bumper beams subjected to low-velocity impacts, *Composite Structures*, Vol. 68, pp. 419 ~ 427, 2005

34. M.M. Davoodi., S.M. Sapuan., R. Yunus., Conceptual design of a polymer composite automotive bumper energy absorber, *Materials and Design*, Vol. 29, pp. 1447 ~ 1452, 2008
35. S.M. Sohna., B.J. Kimb., K.S. Park., Y.H. Moon., Evaluation of the crash energy absorption of hydroformed bumper stays, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 187-188, pp. 283 ~ 286, 2007
36. Seong. Sik. Cheon., Jin. Ho. Choi., Dai. Gil. Lee., Development of the composite bumper beam for passenger cars, *Composites Structures*, Vol. 32, pp. 491 ~ 499, 2009
37. 곽창수, 이재형, 윤성기, 단섬유 강화 사출성형 복합재료로 만든 차량용 범퍼빔의 충돌해석, *대한기계학회논문집 A권, 제 22권, 제 9호*, pp. 1699 ~ 1712, 1998
38. 박인송, 복합재료 타원형 스프링을 이용한 저속 충돌용 자동차 범퍼에 대한 연구, *자동차 공학회, 제 16권, 제 5호*, pp. 30 ~ 40, 1994
39. www.iihs.org/ratings/protocols/pdf/iihs_rcar_barrier.pdf
40. www.fmvss-testing.com