

열가소성 폴리올레핀으로 구성된 범퍼 후방 보 개발에 관한 연구

Investigation of Development of Bumper Back-Beam Using a Thermoplastic Polyolefin

안동규^{1,✉}, 김세훈², 박근성³

Dong-Gyu Ahn^{1,✉}, Se-Hun Kim², and Gun-Sung Park³

1 조선대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Chosun Univ.)

2 현대중합금속 고창공장 (Gochang Plant, Hyundai Welding Ltd.)

3 ㈜캠스 (CAMS Ltd.)

✉ Corresponding author: smart@chosun.ac.kr, Tel: 062-230-7043

Manuscript received: 2012.4.26 / Accepted: 2012.6.2

Recently, the application of the plastic material to automotive components and structures has steadily increased to satisfy demands on the saving of overall weight and the improvement of energy efficiency. The objective of this paper is to investigate the development of a bumper back-beam using a thermoplastic olefin (TPO). The bumper back-beam was designed to be manufactured from the injection molding process. In order to obtain a proper design of the bumper back-beam, three-dimensional finite element analyses were performed for various design alternatives. Stress-strain curves for different strain rates were measured by high speed tensile tests of the TPO to consider strain rate effects in the FEA. The influence of the sectional shape and the rib formation on the contact force-intrusion curves, the deflection and the energy absorption rate of the bumper back-beam was examined. From the results of the examination, a proper design of the bumper back-beam was acquired. The bumper back-beam consisting of TPO was fabricated from the injection moulding process and the vibration welding. Pendulum crash tests were carried out using the fabricated bumper back-beam. The results of the tests showed that the designed bumper back-beam can satisfy requirements of the federal motor vehicle safety standard (FMVSS). Through the comparison of the previously designed bumper back-beam with the newly designed bumper back beam, it was noted that the weight of the designed bumper back-beam is lighter than that of the previously designed bumper back beam by nearly 16 %. In addition, it was considered that the newly designed bumper back beam can improve recycling of the bumper back-beam.

Key Words: Bumper Back-Beam (범퍼 후방 보), Thermoplastic Polyolefin (열가소성 폴리올레핀), Finite Element Analysis (유한요소해석), Pendulum Crash Experiments (진자 충돌 실험), Weight Reduction (무게 감소), Recycling (재활용)

기호설명

χ = applied impact energy

m = mass of impactor

V = velocity of impactor

η = absorbed energy

F = contact force

δ = displacement of impactor

μ = energy absorption rate
 δ_i = intrusion of bumper back-beam
 δ_d = deflection of bumper back-beam
 F_{\max} = maximum contact force
 k_i = stiffness for intrusion
 k_d = stiffness for deflection
 t_i = impact time
 $\sigma_{e,\max}$ = maximum effective stress

1. 서론

최근 지구 온난화 현상과 화석연료 감소에 의하여 CO₂ 가스 배출 최소화와 에너지 효율 향상에 대한 관심이 전세계적으로 높아지고 있다.^{1,2} 자동차 산업에서는 이러한 시대적 요구에 대한 해결 방향으로 샤시/구조 및 부품에 대한 경량화 연구를 지속적으로 추진하고 있다.^{3,4} 자동차 샤시/구조 및 부품의 경량화를 위하여 알루미늄, 마그네슘, 복합재료, 경량 샌드위치 판재 및 플라스틱 재료 등이 활용되고 있다.⁵⁻¹⁰

여러가지 자동차 구조/부품 중에서 범퍼 후방 보 (Bumper Back-beam) 는 차량 충돌시 굽힘 변형으로 충격 에너지를 흡수하는 주요 구조 부품이다.⁹ 자동차 범퍼의 경량화를 위하여 폴리프로필렌 (Polypropylene) 이나 폴리카보네이트 (Polycarbonate) 등의 공업용 플라스틱 및 SMC (Sheet Moulding Compression), RTM (Resin Transfer Moulding), RIM (Reaction Injection Moulding) 공정으로 제작된 보강된 플라스틱 등이 범퍼 후방 보 제작에 적용되고 있다.^{11,12} GMT (Glass Mat Thermoplastic) 소재의 경우 최근 범퍼 후방 보의 경량화를 위하여 많이 사용되고 있다.^{13,14}

자동차 범퍼시스템 개발시 각 국가별로 정해진 법규에 따른 충돌 안전성에 대한 요구사항을 만족시켜야 한다.¹³⁻¹⁵ 그래서 자동차 범퍼 시스템 개발시 각 설계조건/사용재료등에 대하여 유한요소해석, 최적화 및 굽힘/충돌시험을 반복 수행하여, 범퍼시스템의 법규 만족성을 고찰하고 최적화 설계를 도출하고 있다.^{14,15} Cheon 등은 유리섬유 (Glass Fiber) 와 탄소섬유 (Carbon Fiber) 를 사용한 복합재 범퍼 보를 설계/제작 하였다. 이 연구에서 유한요소해석으로 복합재료 범퍼 보의 최적 설계를 도출하였고, 굽힘 시험을 통하여 제작된 복합재 범퍼 보의 특성을 고찰하였다.¹¹ Davoodi 등은 고분자 복합재료를 자동차 범퍼 에너지 흡수체 (Energy

Absorber) 에 적용하기 위하여 3 차원 유한요소 충격해석과 연계한 해석적 연구를 수행한 바 있다.¹⁶ Hosseinzadeh 등은 금속/GMT/SMC 범퍼들에 대하여 E.C.E United Nations Agreement, Regulation No. 42 에 따른 진자 충돌 (Pendulum crash) 조건에 대한 3 차원 충격 해석을 수행하여, 응력/처짐/운동에너지 전달특성/충격하중 변화를 고찰하였다.¹³ 또한 SMC 범퍼를 위한 보강 설계 방법을 제안하였다.¹³ Marzbanrad 등은 3 차원 충격해석으로 알루미늄 및 고강도 강판을 이용한 범퍼 설계시 범퍼 두께와 수직/수평 방향 리브 (Rib) 설계에 대한 연구를 수행하였다.⁹ 이들은 추가적인 3 차원 충격해석을 수행하여 GMT 와 SMC 재료로 구성된 범퍼의 두께 설계와 리브 배치에 따른 범퍼 응력분포 및 처짐 변화를 고찰하였다.⁹ Park 등은 벽 충돌 조건과 보행자 충돌조건에 대한 3 차원 충돌해석 결과를 이용하여 범퍼 보 단면 최적화 기법에 대한 연구를 수행하였다.¹⁵ 2011년에는 Davoodi 등이 진자 충돌 조건에 대한 3 차원 충돌해석 결과를 이용하여 하이브리드 바이오 복합재료로 구성된 범퍼 보의 단면 선정 방법에 대한 연구가 수행되었다.¹⁴

최근 자원 고갈과 친환경적 폐자재 처리에 대한 전세계적인 요구에 따라 재활용 (Recycling) 에 대한 법규가 북미/유럽에서 제정되기 시작하여 각국으로 확대되고 있다.^{14,17} 세계적인 완성차 업체에서는 시범적으로 범퍼 후방 보에 대한 재활용을 시도하고 있다.¹⁸ 그러나 플라스틱 복합재 범퍼 보에 많이 사용되고 있는 GMT 재료로 플라스틱 범퍼를 성형한 경우, 재가공이 어렵고 컴파운딩 기술이 확립되지 못하여 폐 GMT 범퍼의 재활용이 용이하지 못하다.¹⁹ 1990 년대 초부터 재활용이 가능하고 GMT 재료보다 가벼운 열가소성 폴리올레핀 (Thermoplastic polyolefin: TPO) 재료를 범퍼 시스템과 같은 자동차 외장품에 적용하는 것에 대한 연구가 시작되고 있다.^{19,20}

본 논문에서는 열가소성 폴리올레핀으로 구성된 범퍼 후방 보 개발에 관한 연구를 수행하였다. 3 차원 비선형 충격해석을 이용하여 적합한 범퍼 후방 보의 형상과 리브 설계를 도출하였다. 선정된 설계안을 적용하여 사출성형공정으로 열가소성 폴리올레핀으로 구성된 범퍼 후방 보 시제품을 제작하였다. 제작된 범퍼 후방 보에 대한 진자 충돌 시험을 수행하여, 열가소성 폴리올레핀으로 구성된 범퍼 후방 보의 충격 특성을 고찰하였다.

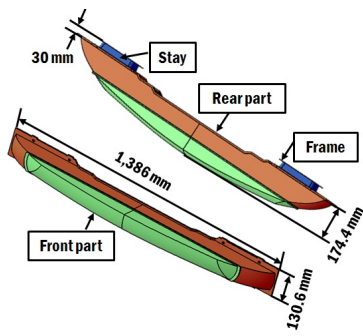


Fig. 1 Design of the bumper back-beam

2. 범퍼 후방 보 설계

본 연구의 대상인 범퍼 후방 보의 기본 외형 설계는 Fig. 1 과 같다. 범퍼 후방 보의 크기는 1,380.0 mm × 174.4 mm × 130.6 mm 이다. 범퍼 후방 보는 열가소성 폴리올레핀 재료를 사출성형하여 전/후방부 (Front and rear parts)를 제작한 후, 진동 용착 공정으로 전/후방부를 접합하도록 설계하였다. 범퍼 후방 보의 외곽 두께와 내부에 배치된 리브들의 두께는 각각 5.5 mm 와 3.0 mm 로 설계하였다. 범퍼 후방 보와 대차는 후방부 뒷부분에 결합되는 스테이 (Stay) 와 프레임 (Frame) 에 의하여 연결된다.

범퍼 후방 보의 설계에서는 단면 형상, 리브 방향 및 리브 배열에 따른 범퍼 후방 보 설계안들에 대하여 3 차원 유한요소해석을 수행하고, 이 결과를 이용하여 충격 특성 분석과 범규 만족을 고찰하였다. 그 결과 충격 특성이 가장 우수하고, 범규를 만족하는 설계안을 최종 범퍼 후방 보 설계로 선정하였다. Fig. 2, 3 및 4 는 각각 단면 형상, 리브 방향 및 리브 배열에 따른 범퍼 후방 보 설계안들을 나타낸다.

Fig. 2 는 범퍼 후방보의 전방부 단면을 개방형과 밀폐형으로 하였을 때의 설계안들이다. Fig. 3 은 후방보의 리브 방향이 수평과 수직일때의 설계안들을 나타낸다. Fig. 4 의 Design 1 은 전방부에 리브를 배치하지 않았고, Design 2 는 후방부에 수평방향 리브만 배치하였다. Design 3 은 전후방부에 수평방향 리브에 등간격 수직방향 리브를 추가하였다. Design 4 에서는 후방보의 중앙부에 수직방향 리브를 조밀하게 배치하였다. Design 5 에서는 Design 4 를 기준하여 스테이 결합부에 수직방향 리브를 추가 배치하였다.

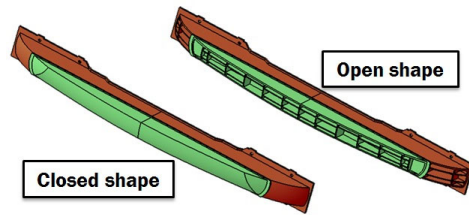


Fig. 2 Design alternatives of bumper back-beam according to sectional shape

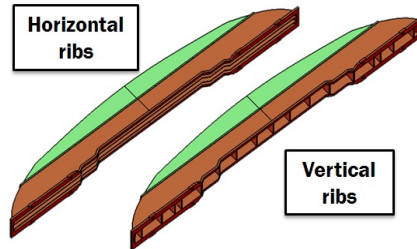


Fig. 3 Design alternatives of bumper back-beam according to the rib direction

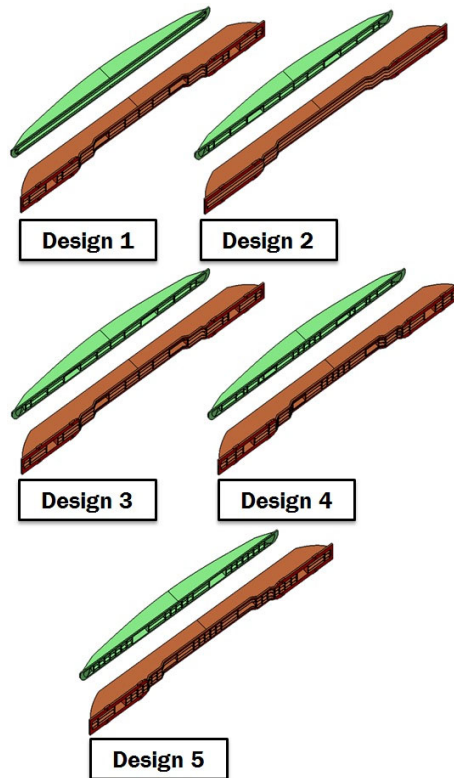


Fig. 4 Design alternatives of bumper back-beam according to the rib formation

본 연구에서 적용된 범퍼는 미연방 자동차 안전기준 (Federal Motor Vehicle Safety Standard: FMVSS)²¹ 이다. 미연방 자동차 안전기준 581 항 49CFR²²의 침투량(Intrusion: δ_i)과 처짐량(Deflection: δ_d) 규정은 각각 101 mm 와 47 mm 이다.

3. 열가소성 폴리올레핀 재료의 특성 및 물성

범퍼 후방 보의 개발에 적용된 열가소성 폴리올레핀 재료는 폴리프로필렌 수지에 충격 보강제로 이중합성 고무성분인 EPDM (Ethylene Propylene Diene M-class) 을 가교시켜 제작된 것이다. 이 재료에는 유리섬유가 보강제로 추가되지 않아 재활용이 가능하다. 열가소성 폴리올레핀 재료의 밀도는 $1.003 \times 10^{-3} \text{ g/mm}^3$ 으로써, 기존 범퍼 후방 보에 적용되고 있는 밀도가 $1.306 \times 10^{-3} \text{ g/mm}^3$ 인 GMT 재료 보다 약 30.2 % 정도 가벼운 재료이다.

열가소성 폴리올레핀 재료의 기계적 물성과 변형을 속도가 고려된 응력-변형을 선도는 각각 정적 인장 시험과 고속 인장 시험으로부터 취득하였다. 고속 인장 시험 결과를 3 차원 유한요소해석에 적용하기 위하여 구간별 선형 모델 (Piecewise linear model) 을 도입하였다. 정적 인장 실험 결과 열가소성 폴리올레핀 재료의 종탄성 계수 (Young's modulus) 와 포아송 비 (Poisson's ratio) 는 각각 3.20 MPa 와 0.40 이었다. Fig. 5 는 열가소성 폴리올레핀 재료의 구간별 선형 모델로 표현된 변형을 속도별 진응력 (True stress) - 소성 변형을 (Plastic strain) 선도이다.

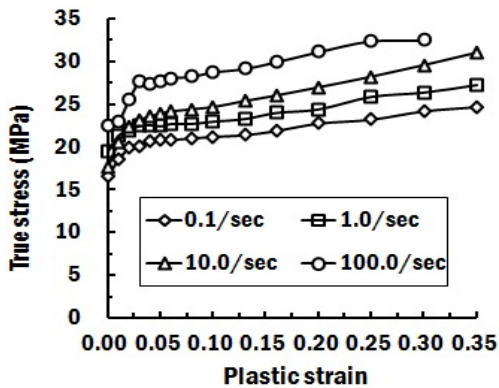


Fig. 5 True stress-plastic strain relationships with strain rate effects for TPO

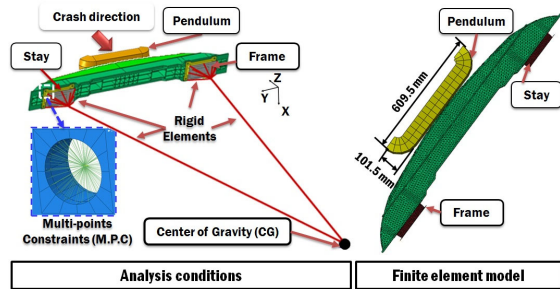


Fig. 6 Conditions and modeling of finite element analysis

4.3 차원 유한요소해석

범퍼 후방 보의 3 차원 유한요소해석 조건은 Fig. 6 와 같은 미연방 자동차 안전 기준 49CFR²²의 진자 충돌 시험(Pendulum crash test) 조건과 동일하게 설정하였다.

진자의 형상과 범퍼 후방 보/스테이/프레임에 대한 유한요소해석 모델링은 Fig. 6 와 같다. 범퍼 후방 보와 프레임은 4 절점 사면체 솔리드 (Tetrahedral solid) 요소로 나타내었다. 범퍼 후방 보 는 설계안들에 따라 약 46,000-75,000 개 정도의 솔리드 요소로 모델링 하였다. 프레임의 솔리드 요소 및 절점수는 각각 13,920 개와 4,998 개였다. 충격 진자는 강체로 가정하였다. 충격 진자와 범퍼 스테이는 각각 242 개와 1,990 개의 4 절점 사각형 쉘 요소로 모델링 하였다.

범퍼 후방 보와 충격 진자가 Fig. 6 과 같이 Z 축으로 동일 평면에서 충돌하도록 하였다. 실제 적용 차량의 무게 중심점 (Center of gravity: CG)과 프레임/스테이를 연결하는 총 8 개의 체결부를 강체요소로 연결 하였다.²³ 무게 중심점은 고정시켰다. 체결부 중심과 범퍼는 다중점 제한조건 (Multi-points constraint: MPC) 조건으로 연결하였다.²³ 또한, 실제 범퍼 후방 보 제작시 전/후방부 사이에 들어가게 되는 폴리우레탄 폼은 관련 선행연구들과 같이 3 차원 유한요소해석에서 고려하지 않았다.²³ 유한요소해석에서는 충격 진자의 무게 (m) 는 미 연방 자동차 안전기준의 진자 충격 실험 규격인 실차 최대 무게 1,710 kg 의 80 % 에 해당하는 1,368 kg 보다 무거운 실차 공차 중량 1,600 kg 을 적용하였다. 이것은 충격해석을 이용한 범퍼 후방 보 설계시 안전율을 15 % 이상 부여하기 위함이다. 충격 속도 (V) 는 미 연방 자동차 안전 기준인 2.5 mph 를 적용하였다. 3 차원 유한요소해석

은 ABAQUS V6.5 Explicit 을 이용하였다. 초기 시간증분과 감쇄계수는 각각 1.09×10^{-6} sec 와 1.05×10^{-6} kg/sec 를 적용하였다.

입력에너지 (χ), 범퍼 후방 보에 의해 흡수된 에너지 (η) 및 범퍼 후방 보의 에너지 흡수율 (μ) 은 각각 식 (1), (2) 및 (3) 과 같이 산출 하였다. 침투량에 대한 범퍼 후방 보의 강성 계수 (k_i) 와 처짐량에 대한 범퍼 후방 보의 강성 계수 (k_d) 는 각각 식 (4) 및 (5) 와 같이 계산하였다.

$$\chi = \frac{1}{2} mV^2 \tag{1}$$

$$\eta = \int_0^{\delta} Fd\delta \tag{2}$$

$$\mu = \frac{\eta}{\chi} \times 100 \tag{3}$$

$$k_i = \frac{F_{max}}{\delta_i} \tag{4}$$

$$k_d = \frac{F_{max}}{\delta_d} \tag{5}$$

5.3 차원 유한요소해석 결과 및 고찰

5.1 충돌부 단면 형상에 따른 충격 특성 변화

Fig. 7 과 8 은 범퍼 후방 보의 충돌부 단면 형상에 따른 범퍼 후방 보의 충격 특성 변화이다.

Fig. 7 에서 밀폐 형상 (Closed shape) 의 단면을

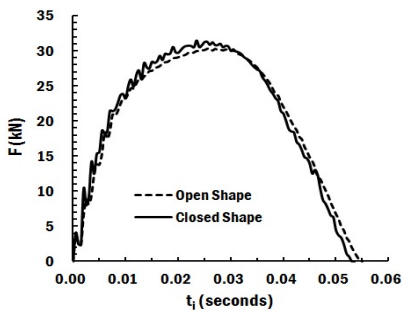


Fig. 7 Influence of sectional shapes on the contact force-impact time curves

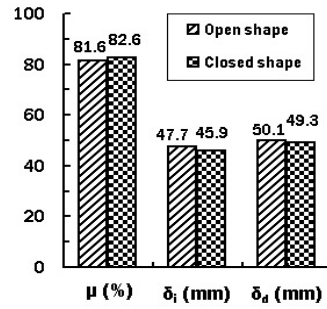


Fig. 8 Effects of sectional shapes on energy absorption rate, intrusion and deflection

가진 범퍼 후방 보의 최대 접촉하중이 개방 형상 (Open shape) 을 가진 범퍼 후방보의 최대 접촉하중보다 약 1.2 kN 높게 나타남을 알 수 있다. 또한 충격시간의 경우 밀폐 형상의 단면을 가진 범퍼 후방 보가 개방 형상을 가진 범퍼 후방 보 보다 0.0015 초 정도 짧게 나타났다. Fig. 8 에서 밀폐형상의 단면을 가진 범퍼 후방 보의 침투량과 처짐량이 개방 형상의 단면을 가진 범퍼 후방 보의 침투량과 처짐량보다 각각 약 2.2 mm 와 약 0.8 mm 정도 작게 나타남을 알 수 있었다. 이 결과들로부터 밀폐 형상을 가진 범퍼 후방 보를 적용할 경우, 개방 형상을 가진 범퍼 후방 보보다 강성이 개선 되고 충격 시간이 감소함을 알 수 있었다.

Fig. 8 에서 밀폐 형상을 가진 범퍼 후방 보가 개방 형상을 가진 범퍼 후방 보 보다 에너지 흡수율 측면에서 약 1.0 % 정도 우수함을 알 수 있었다. 이 현상은 충격 진자와 범퍼 후방 보의 충돌이 진행되는 동안 충격 진자와 범퍼 후방 보 충돌면에서 반복되는 국부적인 접촉/비접촉 현상에 의하여 Fig. 7 과 같이 접촉 하중의 요동 (Fluctuation) 이 발생하고, 이로 인하여 충격에너지의 추가적인 흡수가 일어나기 때문으로 사료된다.

위 결과들로부터 범퍼 후방 보 충돌부에 적용될 단면 형상을 밀폐 형상으로 결정하였다.

5.2 리브 방향에 따른 충격 특성 변화

Fig. 9 는 범퍼 후방 보의 리브 방향에 따른 범퍼 후방 보의 에너지 흡수율, 최대 접촉하중, 침투량 및 처짐량의 변화를 나타낸다.

Fig. 9 에서 수평 방향의 리브들이 배치된 범퍼 후방 보의 접촉 하중이 수직 방향의 리브들이 배치된 범퍼 후방 보의 접촉 하중 보다 약 5.1 kN 정도 크게 나타나는 것을 알 수 있었다. 그러나, 침

투량과 처짐량의 경우 수평 방향의 리브들이 배치된 범퍼 후방보가 수직 방향의 리브들이 배치된 범퍼 후방 보보다 각각 약 7.9 mm 와 7.3 mm 정도 작게 나타났다. Table 1 과 침투량과 처짐량에 대한 강성을 산출한 결과, 수평 방향의 리브들이 배치된 범퍼 후방 보가 수직 방향의 리브들이 배치된 범퍼 후방 보보다 침투량과 처짐량에 대한 강성이 각각 약 1.37 배 와 약 1.35 배 정도 높게 나타나는 것을 알 수 있었다.

Fig. 9 의 에너지 흡수율을 비교한 결과, 수평 방향의 리브들이 배치된 범퍼 후방 보와 수직 방향의 리브들이 배치된 범퍼 후방 보의 에너지 흡수율은 거의 비슷함을 알 수 있었다. 또한 Table 1 의 충격 시간의 경우, 수평 방향의 리브들이 배치된 범퍼 후방 보의 충격 시간이 수직 방향의 리브들이 배치된 범퍼 후방 보의 충격 시간보다 약 0.0065 초 정도 짧음을 알 수 있었다.

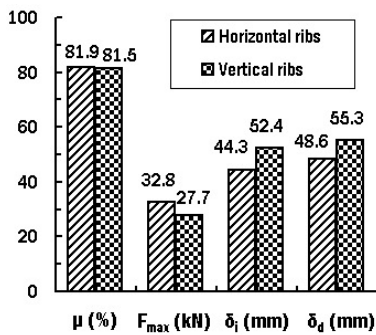


Fig. 9 Influence of rib direction on energy absorption rate, maximum contact force, intrusion, and deflection

Table 1 Variation of stiffness and impact time according to rib directions

Rib direction	k _i (kN/m)	k _d (kN/m)	t _i (seconds)
Horizontal	723.1	674.9	0.0515
Vertical	528.6	500.9	0.0580

위 결과들로부터 범퍼 후방보의 충격 특성 향상을 위해서는 수평 방향 리브를 우선적으로 설계하여 배치를 결정 한 후, 부가적인 충격 특성 개선을 위하여 수직 방향 리브의 배치를 변경하는 방식으로 리브 설계 기법을 결정하였다. 그리고 이 설계 기법에 따라 Fig. 5 의 5 가지 설계안을 도출하였다.

5.3 리브 설계안들에 따른 충격 특성 변화

Fig. 10 과 11 및 Table 2 는 범퍼 후방 보의 리브 설계안들에 대한 유한요소해석 결과이다.

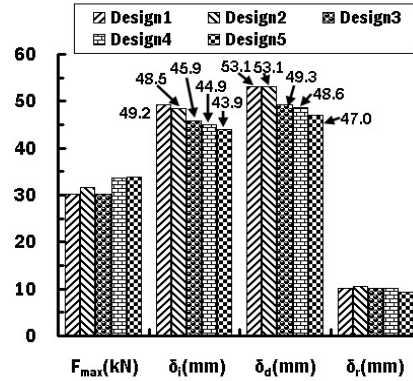


Fig. 10 Variation of maximum contact force, intrusion, deflection, and restitution according to design alternatives

Table 2 Variation of stiffness, energy absorption rate and maximum effective stress according to design alternatives

	k _i (kN/m)	k _d (kN/m)	μ (%)	σ _{e,max} (MPa)
Design1	621.8	567.7	81.7	28.1
Design2	650.1	593.9	82.1	26.0
Design3	660.0	614.1	81.7	27.3
Design4	747.5	690.7	79.7	26.1
Design5	771.7	720.7	81.9	26.1

Fig. 10 의 결과로부터 5 가지 설계안들 모두가 침투량이 43.9-49.2 mm 범위내에 있으며, Design 5 의 설계안에서 가장 작은 침투량이 발생하는 것을 알 수 있었다. 또한, 5 가지 후방 보 설계안 모두가 미 연방 자동차 안전 규격의 최대 침투량 제한조건인 101.0 mm 보다 작은 것을 알 수 있었다. 그러나 처짐량의 경우 Design 5 의 설계만이 미 연방 자동차 안전 규격의 최대 처짐량 제한조건인 47.0 mm 와 거의 동일하게 나타났다. 이 결과들로부터 미 연방 자동차 안전 규격의 최대 침투량과 최대 처짐량 조건을 만족하는 설계안은 Design 5 임을 알 수 있었다.

설계안 5 가지에 대한 최대 접촉하중과 최대 처짐 후 탄성 회복량을 Fig. 10 과 비교하였다. 최대 접촉 하중의 경우 Design 4 와 5 에서 각각 33.6

kN 과 33.9 kN 으로 다른 설계안들보다 2.1-3.7 kN 정도 높게 나타났다. 탄성 회복량은 5 가지 설계안 모두 10.0 mm 내외로 나타났다.

Table 2 는 5 가지 설계안들에 대한 침투량에 대한 강성, 처짐량에 대한 강성, 에너지 흡수율 및 최대 유효응력이다. Table 2 에서 Design 4 와 5 의 침투량과 처짐량에 대한 강성이 각각 747.5 kN/m 와 690.7 kN/m 이상으로 현저히 증가한다. 최대 유효응력은 Design 4 와 5 에서 26.1 MPa 정도로 가장 작게 나타내었다. Fig. 11 의 주변형을 분포에서도 Design 4 와 5 에서 낮은 주 변형율 분포를 나타낼 수 있었다. 그러나, Table 2 의 에너지 흡수율을 고찰하면 Design 4 의 경우 약 79.7 % 정도의 충격 에너지를 범퍼 후방 보의 변형으로 흡수 할 수 있어, 약 82 % 내외의 충격 에너지를 흡수하는 4 가지 설계안들보다 충격 에너지 흡수율이 약간 적게 나타나는 것을 알 수 있었다.

이 결과들로부터 Design 5 의 설계안을 본 연구의 최적 범퍼 후방 보 설계안으로 도출하였다. 또한, Fig. 11 로부터 범퍼 후방 보의 처짐을 감소시키기 위해서는 주 변형율이 높게 나타나는 스테이 연결부 주위의 지지 방법에 대한 연구가 필요함을 알 수 있었다.

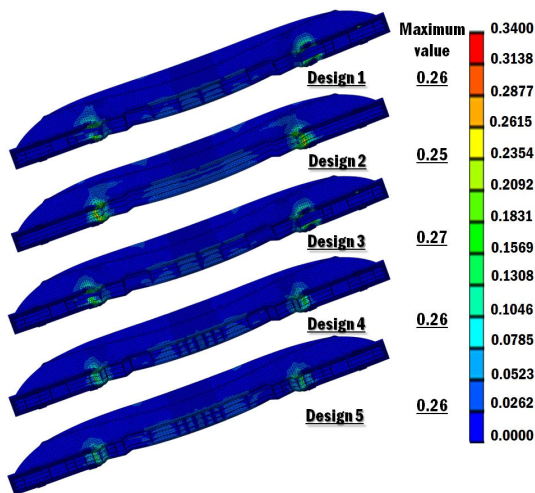


Fig. 11 Distributions of principal strain for different design alternatives

6. 시제품 제작 및 충돌 시험

6.1 사출성형 금형 및 시제품 제작

최종 설계안으로 도출된 Design 5 범퍼 후방 보

설계에 대하여 Fig. 12 와 같은 사출성형 금형을 제작하였다. 범퍼 후방 보 전/후방부가 한 개의 금형에서 사출성형 될 수 있도록 금형을 제작하였다. 스프루 (Sprue), 런너 (Runner) 및 게이트 (Gate) 설계는 사출성형해석을 수행하여 결정하였다. 스프루는 직경 20 mm 의 원통형 스프루를 사용하였다. 게이트는 20.0 mm × 5.0 mm 의 초기 단면과 29.7 mm × 1.0 mm 의 최종 단면을 가지는 팬 게이트를 사용하였다. 금형 재료는 SM45C 로 선택하였다.

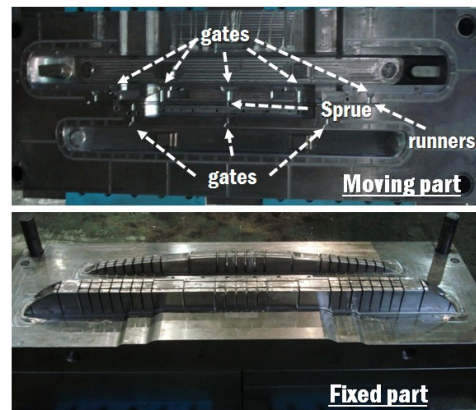


Fig. 12 Injection mould for the bumper back-beam consisting of TPO

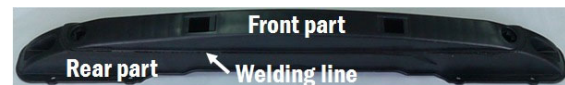


Fig. 13 Prototype of the designed bumper back-beam

범퍼 후방 보의 전/후방부는 850 tons 급 사출성형기에서 성형되었다. 최대 사출 압력, 사출 시간 및 보압 시간은 각각 11.9 MPa, 10.6 초 및 6 초를 적용하였다. 사출 성형으로 제작된 전/후방부를 진동융착하여 Fig. 13 과 같은 최종 시제품을 제작하였다. 스테이는 강판을 성형 후 용접하여 제작하였다. 스테이의 크기는 범퍼 후방 보의 단면이 감소하는 지점까지 연장하여, 주변형율이 높게 형성되는 부분의 굽힘 변형을 감소시키도록 하였다.

6.2 진자 충돌 시험

진자 충돌 시험은 미연방 자동차 안전 규격인 49CFR²² 의 절차와 시험조건에 따라 수행되었다.

진자의 무게는 차량 최대 중량의 80 % 인 1,368 kg 을 적용하였고, 진자 충돌 속도는 2.5 mph 였다. 스테이와 프레임을 Fig. 14 와 같이 시험용

대차에 볼트로 체결하여 범퍼 후방 보를 대차에 고정하였다. 침투량과 처짐량은 Fig. 14 와 같이 대차 중앙부에 센서를 장착하여 측정하였다. 침투량과 처짐량을 유한요소해석과 동일하게 범퍼 후방 보 전방부의 중앙 충돌부와 범퍼 후방보 후방부 중앙 리브의 변위로 측정하였다.

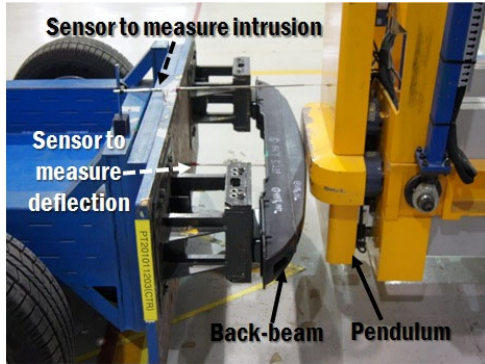


Fig. 14 Experimental set-up for pendulum crash tests

7. 진자 충돌 시험 결과 고찰

Fig. 15 는 제작된 범퍼 후방 보의 진자 충돌 시험 결과이다.

진자 충돌 시험 결과 Fig. 15 와 같이 본 연구에서 설계/제작된 범퍼 후방 보의 침투량과 처짐량이 각각 30.0 mm 와 25.0 mm 로 나타났다. 이 결과로부터 열가소성 폴리올레핀 재료로 사출성형된 범퍼 후방 보가 침투량과 처짐량 측면에서 미 연방 자동차 안전규격을 만족하는 것을 알 수 있었다. 유한요소해석 결과와 충돌 시험 결과를 비교한 결과 Fig. 15 와 같이 침투량과 처짐량 측면에서 각각 31.7 % 와 46.8 % 정도 해석 결과가 크게 나타났다. 이 현상은 3 차원 충돌 해석 수행시 안전율을 고려하여 충돌 진자 무게를 약 17.0 % 정도 크게 가정하였으며, 진자와 범퍼 후방보의 충돌시 충돌면의 마찰/열 발생과 대차의 국부 변형에 의한 에너지 손실 및 후방 보의 전/후방부 사이에 들어가는 폴리우레탄 폼의 영향등이 유한요소해석에 고려되지 않았기 때문으로 사료된다. 특히 침투량보다 처짐량의 해석결과와 시험결과 차이가 큰 이유는 전/후방부 사이에 들어가는 폴리우레탄 폼에 의한 충격에너지 흡수가 해석에서 고려되지 못하여, 시험시보다 많은 충격에너지가 후방부로 전달되었기 때문으로 사료된다.

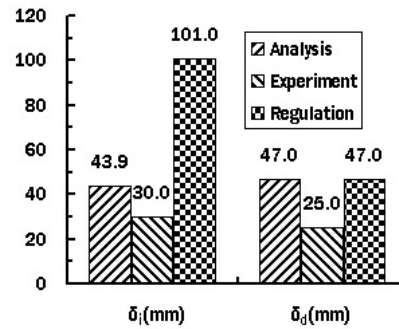


Fig. 15 Results of pendulum crash tests

Table 3 Comparison of weight of GMT back-beam and that of TPO back-beam

Weight of GMT back-beam (kg)	Weight of TPO back-beam (kg)	Rate of weight reduction (%)
6.38	5.36	16.0

Table 3 은 기존의 GMT 재료로 제작된 범퍼 후방 보와 본 연구에서 제작된 열가소성 폴리올레핀 재료로 사출성형된 범퍼 후방 보의 무게를 비교한 결과이다. Table 3 에서 열가소성 폴리올레핀 재료로 사출성형된 범퍼 후방 보를 사용할 경우, 약 16.0 % 정도의 무게 감소가 가능할 것으로 사료된다. 또한 열가소성 폴리올레핀 재료는 재활용이 용이하고, GMT 재료보다 재활용을 위한 공정이 현저히 적게 소요된다. 이 결과들로부터 열가소성 폴리올레핀 재료로 사출성형된 범퍼 후방 보를 사용할 경우 무게 감소와 폐 후방 보 재활용을 통한 환경 영향성 개선이 가능할 것으로 사료된다.

8. 결론

본 논문에서는 열가소성 폴리올레핀으로 구성된 범퍼 후방 보 개발에 대한 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

첫째, 미 연방 자동차 안전규격에 기준한 3 차원 유한요소 충돌해석을 수행하여 충돌부 단면 형상과 리브 방향이 열가소성 폴리올레핀으로 구성된 범퍼 후방 보의 충격 특성에 미치는 영향을 고찰 할 수 있었다. 이 고찰 결과로부터 범퍼 후방 보의 충돌부 단면 형상이 밀폐 형상일때 개방 형상인 경우 보다 후방 보의 충격 특성이 향상됨을 알 수 있었다.

둘째, 열가소성 폴리올레핀으로 구성된 범퍼

후방 보에 적합한 5 가지 설계안을 도출하고 3 차원 유한요소 충돌해석을 수행하여, 설계안에 따른 범퍼 후방 보의 충격 특성 변화를 고찰하였다. Design 5 의 설계안이 침투량, 처짐량, 에너지 흡수율, 침투량에 대한 강성 및 처짐량에 대한 강성이 가장 우수하였다. 그리고, Design 5 가 가장 작은 유효/주응력과 주변형을 분포를 나타내었다. 이 결과들로부터 Design 5 를 범퍼 후방보의 최적 설계로 선정 하였다.

셋째, 사출성형 금형을 설계/제작하고 사출성형과 진동융착으로 열가소성 폴리올레핀으로 구성된 범퍼 후방 보 시제품을 제작하였다. 이 범퍼 후방 보를 이용하여 미 연방 자동차 안전 규격 49CFR 에 따른 진자 충돌 시험을 수행하였다. 그 결과 본 연구에서 설계/제작된 범퍼 후방 보가 침투량과 처짐량 측면에서 미 연방 자동차 안전 규격을 만족함을 알 수 있었다.

넷째, 기존 GMT 재료로 제작된 범퍼 후방 보와 본 연구에서 제작된 범퍼 후방 보를 무게와 재활용 측면에서 비교/분석하였다. 그 결과 열가소성 폴리올레핀으로 구성된 범퍼 후방 보를 사용할 경우, 약 16 % 정도 무게 감소와 재활용성 향상 및 이를 통한 연비 감소와 환경 영향성 개선이 가능한 것을 알 수 있었다.

추후 개선된 범퍼 후방 보 설계용 3 차원 유한요소 충돌 해석 모델 개발을 위하여 전/후방부 사이에 들어가는 폴리우레탄 폼 재료 모델링 기법 개발과 이 모델을 이용한 3 차원 유한 요소 충돌해석 기법에 대한 연구를 계속적으로 수행할 예정이다. 또한 국외지역 상용화에 필요한 북미고속도로안전보험협회 (Insurance institute for highway safety: IIHS) 규격의 만족성에 대한 연구도 추진할 예정이다. 또한, GMT 로 제작된 범퍼 후방보에 대한 충돌시험을 추가적으로 수행하여 현재 개발된 범퍼의 충격 특성과 비교할 예정이다.

참고문헌

1. Hoel, M. and Kverndokk, S., "Depletion of Fossil Fuels and the Impacts of Global Warming," *Resource and Energy Economics*, Vol. 18, No. 2, pp. 43-54, 1996.
2. Park, C. W., Kwon, K. S., Kim, W. B., Min, B. K., Park, S. J., Sung, I. H., Yoon, Y. S., Lee, K. S., Lee, J. H., and Seok, J. W., "Energy Consumption Reduction Technology in Manufacturing - A Selective Review of Policies, Standards, and Research," *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, Vol. 10, No. 5, pp. 151-173, 2009.
3. Asnafi, N., Langstedt, G., Andersson, C. H., Östergren, N., and Håkansson, T., "A New Lightweight Metal-Composite-Metal Panel for Application in the Automotive and Other Industries," *Thin-Walled Structures*, Vol. 36, No. 4, pp. 289-310, 2000.
4. Park, S. H., Ko, J. B., Choi, W. D., and Choi, M. Y., "A Study on the Effect of Metal Plate Position Design on Mechanical Strength during Lap Joint Dissimilar Friction Stir Welding Process of Aluminum Alloys," *Journal of the KSPE*, Vol. 27, No. 3, pp. 66-72, 2010.
5. Friedrich, H. and Schumann, S., "Research for a "New Age of Magnesium" in the Automotive Industry," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 117, No. 3, pp. 276-281, 2001.
6. Lee, S., Park, J., Koo, D., and Jung, B., "The Development of Material Technology Applied to Bumper Beam," *Transactions of the Korean Society of Automotive Engineers*, Vol. 10, No. 4, pp. 206-215, 2002.
7. Li, Y., Lin, Z., Jiang, A., and Chen, G., "Use of High Strength Steel Sheet for Lightweight and Crashworthy Car Body," *Materials & Design*, Vol. 24, No. 3, pp. 117-182, 2003.
8. Ning, H., Janowski, G. M., Vaidya, U. K., and Husman, G., "Thermoplastic Sandwich Structures Design and Manufacturing for the Body Panel of Mass Transit Vehicle," *Composite Structures*, Vol. 80, No. 1, pp. 82-91, 2007.
9. Marzbanrad, J., Alijanpour, M., and Kiasat, M. S., "Design and Analysis of an Automotive Bumper Back Beam in Low-speed Frontal Crashes," *Thin-Walled Structures*, Vol. 47, No. 8-9, pp. 902-911, 2009.
10. Puri, P., Compston, P., and Pantano, V., "Life Cycle Assessment of Australian Automotive Door Skins," *International Journal of Life Cycle Assessment*, Vol. 14, No. 5, pp. 420-428, 2009.
11. Cheon, S. K., Choi, J. H., and Lee, D. G., "Development of the Composite Bumper Beam for Passengers Cars," *Composite Structures*, Vol. 32, No. 1-4, pp. 491-499, 1995.

12. Sapuan, S. M., Maleque, M. A., Hameedullah, M., Suddin, M. N., and Ismail, N., "A Note on the Conceptual Design of Polymeric Composite Automotive Bumper System," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 159, No. 2, pp. 145-151, 2005.
13. Hosseinzadeh, R., Shokrieh, M. M., and Lessard, L. B., "Parametric Study of Automotive Composite Bumper Beams Subjected to Low-velocity Impacts," *Composite Structures*, Vol. 68, No. 4, pp. 419-427, 2005.
14. Davoodi, M. M., Sapuan, S. M., Ahmad, D., Ali, A., Khalina, A., and Jonoobi, M., "Mechanical Properties of Hybrid Kenaf/Glass Reinforced Epoxy Composite for Passenger Car Bumper Beam," *Materials & Design*, Vol. 31, No. 10, pp. 4927-4932, 2010.
15. Park, D. K., Jang, C. D., Lee, S. B., Heo, S. J., Yim, H. J., and Kim, M. S., "Optimizing the Shape of a Bumper Beam Section Considering Pedestrian Protection," *International Journal of Automotive Technology*, Vol. 11, No. 4, pp. 489-494, 2010.
16. Davoodi, M. M., Sapuan, S. M., and Yunus, R., "Conceptual Design of a Polymer Composite Automotive Bumper Energy Absorber," *Materials & Design*, Vol. 29, No. 7, pp. 1447-1452, 2008.
17. Gerrard, J. and Kandlikar, M., "Is European End-of Life Vehicle Legislation Living up to Expectations? Assessing the Impact of the ELV Directive on 'Green' Innovation and Vehicle Recovery," *Journal of Cleaner Production*, Vol. 15, No. 7, pp. 17-27, 2007.
18. Yoo, T. and Hong, J., "The Development of Eco-Friendly Recompound Material for Automotive Engine Under Cover with Recycling Used GMT Bumper Backbeam," *Proceedings of Autumn Annual Meeting of Korean Society of Automotive Engineers*, pp. 1488-1492, 2004.
19. Lee, Y. K., Lee, H. S., and Nam, B. U., "Functional Polyolefin for Automotive," *Polymer Science and Technology*, Vol. 9, No. 1, pp. 4-11, 1998.
20. Froelich, D., Maris, E., Haoues, N., Chemineau, L., Renard, H., Abraham, F., and Lassartesses, R., "State of the Art of Plastic Sorting and Recycling: Feedback to Vehicle Design," *Minerals Engineering*, Vol. 20, No. 9, pp. 902-912, 2007.
21. <http://www.nhtsa.gov/cars/rules/import/fmvss/index.html#P581>
22. <http://www.nhtsa.gov/cars/rules/adaptive/Inoper/Index.html>
23. Kim, H. Y., Choi, J. G., Kim, S. B., Ha, D. Y., Lee, K. W., and Yeo, T. J., "Numerical Analysis of Bumper Back Beam Deformation Behavior in Test Conditions of Successive Impact," *Proceedings of Spring Annual Meeting of Korean Society of Automotive Engineers*, pp. 1308-1313, 2006.