

# 리브 형상 변경에 의한 알루미늄 범퍼 백빔의 경량화 설계

강성종\*

## Light Weighted Design of Aluminum Bumper Backbeam by Rib Shape Change

Sungjong Kang\*

**Key Words :** High speed front impact(고속 정면충돌), Bumper backbeam(범퍼 백빔), Side member(사이드 멤버), Strain energy(변형에너지), Backbeam section shape(백빔 단면 형상), RCAR front low speed test(RCAR 정면 저속 시험)

### ABSTRACT

Optimized section shape of aluminum bumper backbeam for enhancing the front high speed crashworthiness was investigated. Front body analysis model of a convertible vehicle was built up and parameter studies were carried out with changing the inner rib shape and the section thickness distribution. First an inner rib shape displaying most efficient structural performance was selected. Next, for the selected section the effect of section thickness combination was examined. Also, a light weighed backbeam section displaying crash performance over the current design was suggested. Finally RCAR front low speed impact analyses were carried out for the optimized models.

### 1. 서론

가장 기본적인 차량 충돌안전 성능인 고속 정면충돌 (high speed front impact) 안전성은 북미법규 FMVSS 208과 EU 법규 UN R94에서 규제하고 있으며 또한 법규 보다 가혹한 시험조건으로 수행되는 신차 안전도 평가인 NCAP 시험을 실시하여 안전성을 공개하고 있다. 북미 법규시험은 고정된 강체 벽에 48km/h의 속도로 풀 오버랩(full overlap) 충돌시켜 머리 손상 정도, 가슴 가속도와 변형량, 대퇴부 압축력 그리고 목 작용력으로 평가한다. 범퍼 백빔(bumper backbeam)과 그 후방에 위치해 충돌에너지 흡수를 담당하는 크래쉬 박스 그리고 엔진 변속기 등을 지지하며 차체로의 충격력 전달을 최소화하는 사이드 멤버(side member)가 구조적으로 중요한 역할을

담당하게 된다<sup>(1,2)</sup>.

사이드 멤버는 대부분의 충돌에너지를 흡수하여 후방으로의 전달력을 감소시키고 차실 변형량과 승객이 받는 가속력을 최소화시켜야 하므로 최대한의 압축붕괴를 통해 붕괴가능 거리에서 변형에너지(strain energy)를 극대화해야 한다. 압축붕괴 유도를 위해 굴곡부 보강재 추가와 함께 직선부에 비드와 노치를 추가하는 방법 등이 폭넓게 사용되고 있으나 사이드 멤버에 압축하중이 유도되지 않은 상태에서 압축붕괴를 무리하게 유도하기 위한 형상변화는 결국 평균하중 저하를 초래해 변형에너지 확보가 제한적일 수 밖에 없다<sup>(3-6)</sup>. 정면충돌시 범퍼 백빔 중앙부에 발생하는 굽힘변형을 최소화하지 않으면 사이드 멤버 선단부에 큰 휨력이 작용하고 사이드 멤버에 심한 굽힘 붕괴가 발생하여 충돌성능이 떨어지게 된다. 따라서 사이드 멤버와 크래쉬 박스 형상설계에 앞서 범퍼 백빔 형상을 고성능화 하는 것이 매우 중요하다. 전기자동차 및 고성능 차량에 활발히 적용되

\* 대구가톨릭대학교 기계자동차공학부  
E-mail : sjkang@cu.ac.kr

고 있는 알루미늄 범퍼 백빔은 압출 성형제작되므로 다양한 단면형상과 두께분포가 가능하여 롤 포밍 성형으로 제작되는 강재 범퍼 백빔에 비해서 설계 자유도가 상대적으로 풍부하다.

본 연구에서는 외국인 컨버터블 차량의 알루미늄 프론트 바디(front body) 충돌해석 모델을 구성하여 범퍼 백빔 단면형상(backbeam section shape)과 두께 변화에 대한 고속 정면 충돌성능 변화를 고찰하였다. 먼저 일정 두께의 내부 리브(inner rib)가 추가된 단면형상들에 대해 중량 변화와 변형에너지 변화를 비교하여 우수한 단면형상을 선정하였다. 또한 선정된 단면을 대상으로 현 사양과 동일한 중량을 유지하면서 외부(outer)와 리브의 두께 조합을 변경 해석하여 우수한 두께 조합을 도출하였다. 다음으로 현 사양 보다 큰 변형에너지를 나타내는 최소의 백빔 두께를 검토하여 경량화 가능성 정도를 확인하였다. 마지막으로 최종 우수 단면을 대상으로 RCAR(Research Council of Automotive Repairs) 정면 저속시험(front low speed test) 해석을 추가 실시하여 설계 타당성을 확인하였다. 해석에는 상용 비선형해석 소프트웨어 LS-Dyna를 사용하였다<sup>(7)</sup>.

## 2. 해석모델 구성 및 현 사양 고속 정면충돌 해석

### 2.1. 해석모델 구성 및 조건

Fig. 1은 해석 대상 차량의 프론트 바디 구조를 나타낸다. 사이드 멤버는 55×115mm, 두께 2.3mm의 사각단면으로 강관으로 제작되고 크래쉬 박스와 범퍼 백빔은 알루미늄으로 제작되었다. 크래쉬 박스는 56×76mm 그리고 백빔은 42×68mm의 사각단면으로 두께는 모두 2.0mm이다. 범퍼 백빔과 크래쉬 박스 그리고 크래쉬 박스와 사

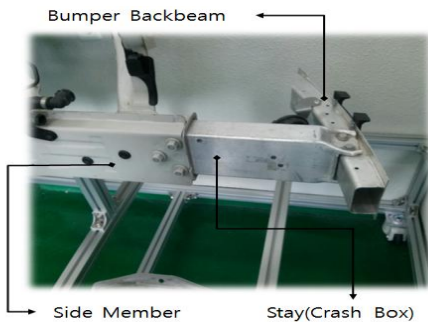


Fig. 1 Aluminum front body

이드 멤버는 볼트로 연결된다.

Fig. 2는 해석모델과 해석조건을 나타낸다. 완성차 풀 모델 구성에 대한 데이터 확보가 불가능하여 정면충돌 시 변형이 심하게 발생하는 사이드 멤버 직선부 약 200mm까지만 모델에 포함하였으며 총 215,000여개의 4절점 셀 요소로 구성하였다. 부품 간 볼트 연결부는 여러 개의 강재 빔을 이용하여 중앙 절점으로 연결한 후 체결 요소 간 중앙 절점들을 다시 강재 빔으로 연결 하였다. 소재는 사이드 멤버에는 SGARC440을 적용하였으며 크래쉬 박스와 백빔에는 AI7003-T7을 적용하였다(Fig. 3). 백빔 앞부분 범퍼 폼을 솔리드 요소들로 추가하였으며 사이드 멤버 끝단 부를 강재 관에 완전 고정하고 차량 대칭면 사이드 멤버 높이에 위치시킨 절점에 강재 빔으로 연결한 후 차량 공차중량과 더미중량을 합한 2015kg을 집중질량으로 정의하여 모델을 구성하였다. 모델 집중질량에 속도 48km/h를 주어 고정된 강재 벽에 충돌시켰다.

해석결과는 변형형상 그리고 범퍼 백빔과 크래쉬 박스의 주 붕괴 영역인 0~400mm에서의 변형에너지 E<sub>abs</sub>를 중량과 함께 비교하였다.

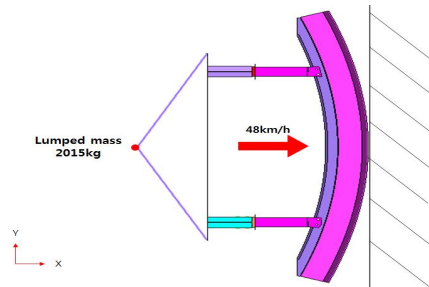


Fig. 2 Analysis front body model and conditions

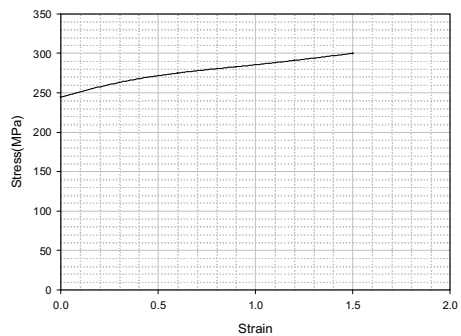


Fig. 3 Stress-plastic strain curve of AI7003-T7

2.2. 현 사양 해석 결과

Fig. 4는 현 사양인 기본모델(Base)의 백빔 단면 형상을 나타내며 백빔의 중량은 2.011kg이다. 해석결과 Fig. 5에서와 같이 백빔의 심한 굽힘변형으로 크래쉬 박스에 전단력이 발생하며 그에 따라 크래쉬 박스와 사이드 멤버에 굽힘변형이 심하게 발생함을 알 수 있다. Fig. 6의 하중-변위선도로부터 차량 변위 0~200mm는 범퍼 백빔 그리고 200~400mm에서는 크래쉬 박스의 붕괴거동이 지배적임을 알 수 있으며 0~400mm까지의 변형에너지는 44.740kJ로 나타났다.

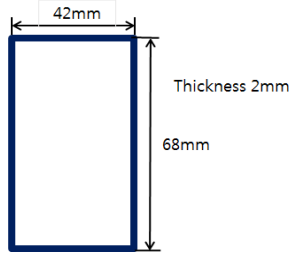


Fig. 4 Backbeam section of current design

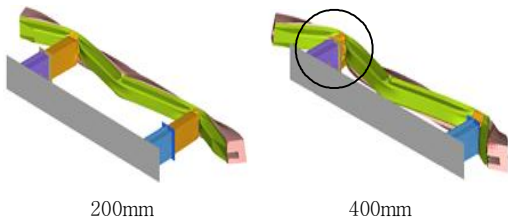


Fig. 5 Front body deformed shapes at vehicle displacement 200mm and 400mm: Base

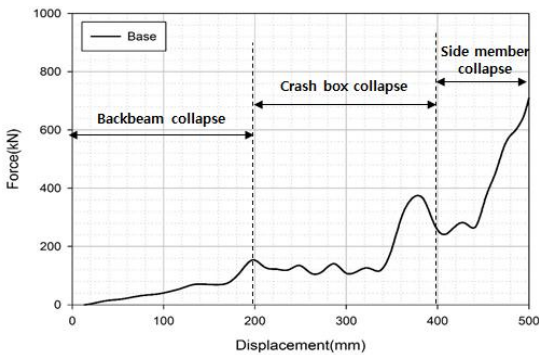


Fig. 6 Load carrying capability: Base

3. 단면형상 변화 및 두께 변화

3.1 단면형상 변화

기본모델 단면을 유지하면서 내부에 두께 2.0mm의 리브(rib)를 추가한 4개 백빔에 대해 해석하였다(Fig. 7). Rib(-)는 중앙부에 횡방향 리브 1개를 그리고 Rib(=)는 등간격으로 횡방향 리브 2개를 추가한 것이며 단면 Rib(+)는 횡방향과 종방향 리브를 1개씩 중앙부에 추가한 것이다.

Fig. 8은 하중-변위선도를 나타내며 Table 1과 Fig. 9에 변형에너지 변화를 분석하였다. Rib(-) 단면이 중량 증가 대비 변형에너지 증가  $\Delta E_{abs}/\Delta W$ 가 가장 크게 산출되어 가장 우수한 단면 형상이라 판단된다.

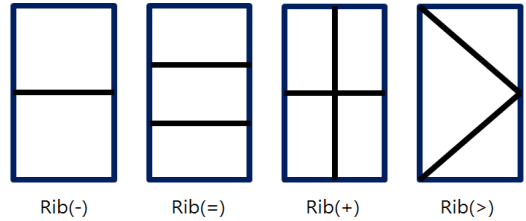


Fig. 7 Sections with inner ribs

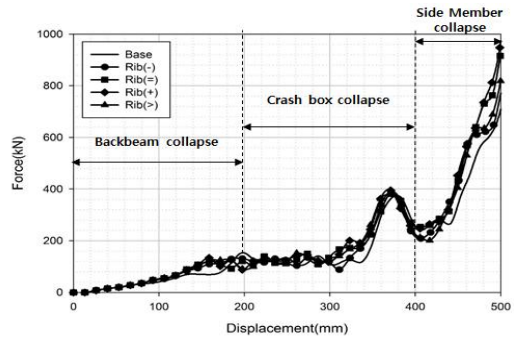


Fig. 8 Load carrying capability: inner rib addition to Base

Table 1 Structural performance: inner rib addition to Base

Model	W( $\Delta W$ )(kg)	E <sub>abs</sub> ( $\Delta E_{abs}$ )(kJ)
Base	2.011(+0)	44.740(+0)
Rib(-)	2.326(+0.315)	47.314(+2.574)
Rib(=)	2.641(+0.630)	49.191(+4.451)
Rib(+)	2.839(+0.828)	49.794(+5.054)
Rib(>)	2.755(+0.744)	49.978(+5.238)

## 리브 형상 변경에 의한 알루미늄 범퍼 백빔의 경량화 설계

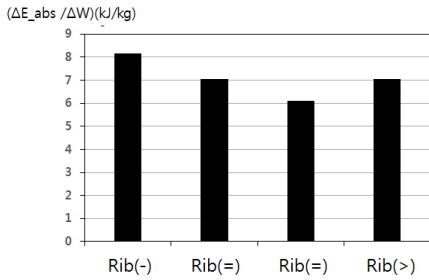


Fig. 9 Strain energy increase divided by weight increase: inner rib addition to Base

### 3.2. 두께 변화

내부 리브 형상이 우수한 것으로 검토된 Rib(-) 단면에 대해 외부 두께와 리브 두께의 조합에 따른 성능을 평가하였다.

먼저 기본모델 단면과 동일한 중량을 유지하면서 두께 조합을 변경하여 해석을 수행하였다. 외부 두께를 0.1mm 씩 감소시키고 동일 단면적이 유지되도록 리브의 두께를 조절하여 해석한 후 효과가 우수한 외부 두께 1.70~1.80mm 영역에 대해 세부 변화에 대한 해석을 추가 수행하였으며

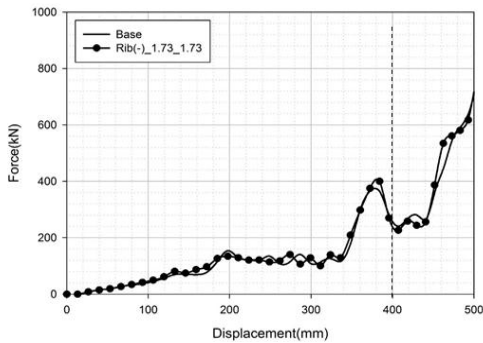


Fig. 10 Load carrying capability: Rib(-)\_1.73\_1.73

Table 2 Structural performance: Rib(-) models with varied thickness combination

Model	W(kg)	E_abs(kJ)
Base_2.0	2.011	44.740
Rib(-)_1.70_1.92	2.011	46.352
Rib(-)_1.73_1.73	2.011	46.823
Rib(-)_1.80_1.28	2.011	46.214
Rib(-)_1.90_0.64	2.011	45.913

모델명은 Rib(-)\_외부 두께\_리브 두께로 정의하였다.

Table 2 결과로부터 외부와 리브 두께가 모두 1.73mm 인 Rib(-)\_1.73\_1.73이 가장 변형에너지가 크게 산출되어 기본모델 대비 4.7% 향상되었다. Fig. 10과 Fig. 11은 Rib(-)\_1.73\_1.73의 하중-변위 선도와 변형 형상을 각각 나타낸다. Fig. 5의 기본모델 변형 형상과 비교하여 백빔의 굽힘변형이 뚜렷하게 감소함에 따라 크래쉬 박스에 압축변형이 증가하고 사이드 멤버 변형이 감소됨을 확인할 수 있다. 따라서 백빔 단면 전체 두께를 1.73mm 부근으로 제작하는 것이 효과적이다.

다음으로 단면 Rib(-)의 우수성을 추가로 확인하고자 기본모델의 두께를 2.0mm에서 2.6mm로 변경한 모델 Base\_2.6에 대해서 동일 중량을 유지하면서 두께 조합을 여러 가지로 변경하여 해석하였다. Table 3에서와 같이 외부 2.21mm, 내부 리브 2.49mm의 경우가 상대적으로 가장 변형에너지가 크게 산출되었으며 Base\_2.6 대비 6.0% 향상되었다.

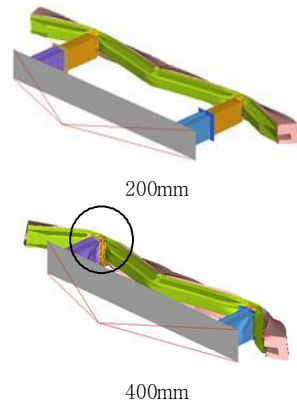


Fig. 11 Front body deformed shapes at vehicle displacement 200mm and 400mm: Rib(-)\_1.73\_1.73

Table 3 Structural performance of Rib(-) for varied thickness combination: Base\_2.6

Model	W(kg)	E_abs(kJ)
Base_2.6	2.614	47.898
Rib(-)_2.13_3.00	2.614	49.783
Rib(-)_2.17_2.74	2.614	49.555
Rib(-)_2.21_2.49	2.614	50.758
Rib(-)_2.25_2.25	2.614	48.828
Rib(-)_2.34_1.66	2.614	42.669
Rib(-)_2.47_0.83	2.614	47.690

Table 4 Structural performance: Rib(-) of uniform thickness

Model	W( $\Delta$ W)(kg)	E_abs(kJ)
Base_2.0	2.011(-0)	44.740
Rib(-)_1.60_1.60	1.861(-0.150)	46.528
Rib(-)_1.50_1.50	1.744(-0.267)	46.867
Rib(-)_1.40_1.40	1.628(-0.383)	46.516
Rib(-)_1.35_1.35	1.570(-0.441)	45.936
Rib(-)_1.30_1.30	1.512(-0.499)	43.409
Rib(-)_1.20_1.20	1.395(-0.616)	43.032
Rib(-)_1.10_1.10	1.279(-0.732)	42.835

4. 대등 충돌성능의 경량화 단면

Rib(-)\_1.73\_1.73의 두께를 0.05mm 씩 감소시켜 가면서 변형에너지가 기본모델 Base\_2.0의 변형에너지 44.740kJ 보다 크게 산출되는 최소의 백빔 두께를 파악하였다.

Table 4와 같이 두께 1.35mm일 때 변형에너지가 45.936 kJ로 나타나 최소 두께로 판단되었으며 이때 범퍼 백빔의 중량은 1.570kg으로 현 사양 2.011kg 대비 0.441kg 감소되어 중량 감소율은 21.9%에 달한다.

5. RCAR 정면 저속충돌 해석

Fig. 12와 같이 10° 경사진 고정 강체벽에 40%의 오프셋을 갖고 15km/h로 충돌시킨 후 산출된 수리비를 차량 보험료 책정에 반영하는 RCAR 정면 저속충돌 시험은 프론트 바디의 중요한 평가시험 중 하나이다(8,9). Fig. 13과 같이 해석모델을 구성하여 기본모델 그리고 고속 정면 충돌 해석에서 기본모델과 동일 중량이면서 성능이 우수

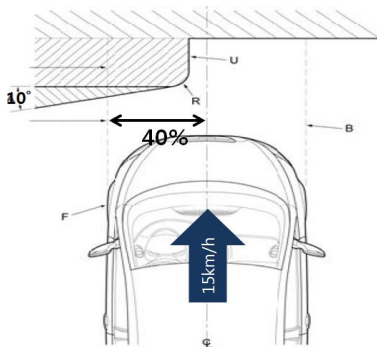


Fig. 12 RCAR front low speed test

하게 나타난 Rib(-)\_1.73\_1.73 또한 기본모델의 변형에너지를 초과하면서 21.9% 경량화된 Rib(-)\_1.35\_1.35에 대해 RCAR 정면 저속충돌 해석을 수행하였다. 충돌 성능은 백빔과 크래쉬 박스의 붕괴가 발생하는 변위 0~300mm까지의 변형에너지와 배리어 최대침입량 MID로 평가하였다(10).

Fig. 14와 Table 5는 RCAR 정면 저속충돌 해석 결과를 나타낸다 Rib(-)\_1.73\_1.73의 경우 범퍼 백빔의 강도 향상으로 변형에너지가 기본모델의 13.618kJ에서 14.794kJ로 8.6% 증가되며 그에 따라 고정 강체 배리어의 최대침

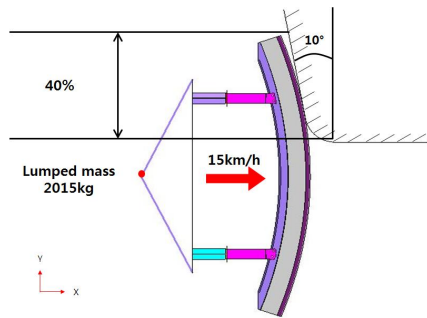


Fig. 13 Analysis model for RCAR front low speed test

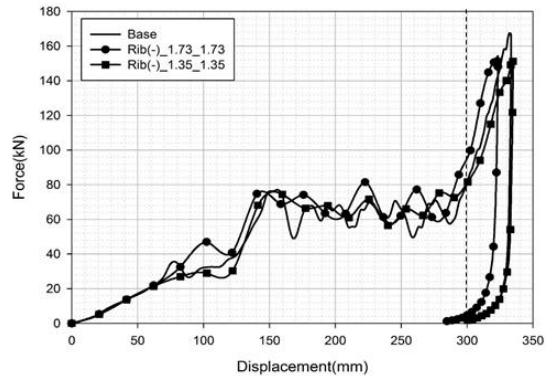


Fig. 14 Load carrying capability from RCAR front low speed impact analysis

Table 5 Structural performance from RCAR low speed impact analysis

Model	W (kg)	0~300mm Strain energy(kJ)	MID (mm)
Base_2.0	2.011	13.618	333.6
Rib(-)_1.73_1.73	2.011	14.794	323.4
Rib(-)_1.35_1.35	1.570	13.754	334.9

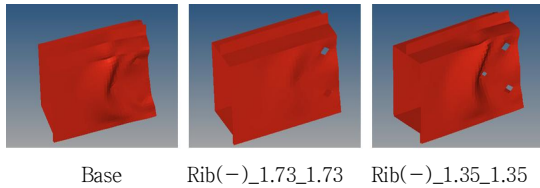


Fig. 15 Final deformation of crash box from RCAR low speed impact analysis

입량도 기본모델의 333.6mm에서 323.4mm로 10.2mm 감소되었다. 한편 경량화 모델 Rib(-)\_1.35\_1.35의 경우 변형에너지는 1.0%, 배리어 최대침입량은 1.3mm 각각 증가되어 나타나 기본모델 성능과 대등하게 산출되었다. Fig. 15의 크래쉬 박스 최종 변형형상으로 부터 Rib(-)\_1.73\_1.73의 경우 기본모델 대비하여 변형이 크게 감소되었다.

이로부터 현재의 범퍼 백빔 단면 내부 중앙에 가로방향으로 1개 리브를 추가하고 두께를 효과적으로 변경하면 중량 증가 없이 프론트 바디의 고속 정면충돌 성능과 RCAR 정면 저속충돌 성능 모두를 효과적으로 향상시킬 수 있음을 확인하였다. 또한 단면 두께를 1.35mm로 감소시켜도 현재 사양과 대등한 정면 충돌성능을 나타내며 이때 백빔은 0.441kg 경량화 된다.

## 6. 결 론

고속 정면충돌 해석을 통해 내부 리브 추가에 의한 알루미늄 범퍼 백빔의 단면 변경을 검토하였다.

현 사양과 동일한 두께 2.0mm의 여러 형상 리브를 내부에 추가하여 해석한 결과 중앙에 가로 방향으로 1개 리브를 추가한  $\square$  단면이 중량 증가 대비 변형에너지 증가가 가장 우수하게 나타났다.

현 사양 중량을 유지하면서  $\square$  단면에 대해 외부와 리브의 두께 조합을 변경한 결과 균일한 두께 1.73mm인 경우가 가장 우수하게 나타났으며 이때 변형에너지는 현 사양 대비 4.7% 증가한다.

$\square$  단면에 대해 변형에너지가 현 사양을 초과하면서 적용 가능한 백빔 최소 두께는 1.35mm이며 이때 경량화율은 21.9%(0.441kg)에 달한다.

균일 두께 1.73mm와 1.35mm의  $\square$  단면 모델에 대해 RCAR 정면 저속충돌 해석을 수행한 결과 두께 1.73mm 단면의 경우 현 사양 대비 크래쉬 박스와 범퍼 백빔의 변형에너지가 8.6% 증가하여 배리어 최대침입량이 10.2mm

감소하였으며 두께 1.35mm 단면의 경우는 현 사양과 유사하게 산출되었다.

이상에서 현재의 범퍼 백빔 사각단면 내부에 가로방향으로 리브를 추가하고 두께를 1.73mm로 균일하게 설계하면 중량증가 없이 고속 정면충돌과 RCAR 정면 저속충돌 성능 모두를 효과적으로 향상시킬 수 있다. 또한 단면 두께를 1.35mm로 감소시켜도 현 사양과 대등한 정면 충돌성능을 나타내며 이때 백빔은 0.441kg 경량화 된다.

## 후 기

이 결과물은 2017년도 대구가톨릭대학교 학술연구비 지원에 의한 것임.

## 참고문헌

- (1) Y. W. Kim and J. H. Kim, 2008, "Crash FE Analysis of Front Side Assembly of Passenger Cars for Management of Collapse Shape Via Variation of Thickness with Reverse Engineering", Transactions of KSAE, Vol. 16, No. 2, pp. 106~113.
- (2) J. H. Kim, B. J. Kim, S. J. Heo and M. S. Kim, 2004, "The Crash Energy Absorption Capacity Optimization for the Side-Member of an Aluminum Space Frame Vehicle", Transactions of KSAE, Vol. 12, No. 5, pp. 94~100.
- (3) S. H. Cho and H. K. Kim, 2011, "The Optimization Engineering of the Front Side Member for A-seg Vehicle", KSAE Spring Conference Proceedings, pp. 1512~1517.
- (4) J. H. Shin, Y. C. Kim and Kim, H. Y., 2011, "A Study on Vehicle Frontal Structure for Crash Compatibility", Journal of Auto-Vehicle Safety Association, Vol. 3, No. 2, pp. 11~16.
- (5) S. J. Kang, 2014, "Bumper Stay Design for Improving Frontal Crash Performance of Front Body", Journal of Auto-Vehicle Safety Association, Vol. 6, No. 2, pp. 5~11.
- (6) H. B. Lee and S. J. Kang, 2013, "Crash Performance of a Straight Member for Various Section Shapes and Local Reinforcement", Transactions of KSAE, Vol. 21, No. 5, pp. 97~103.

- (7) LS-DYNA User's Manual, 2006, "Nonlinear Dynamic Analysis of Structure", Version 971, LSTC.
- (8) H. H. Kim, I. H. Choi and J. H. Kim, 2010, "A Development of RCAR Performance with High Efficient C/BOX", KSAE Annual Conference Proceedings, pp. 2475~2482.
- (9) J. T. Kwon, J. S. Park and N. S. Kwon, 2011, "Stay of Front Bumper System Design for RCAR Low Speed Crash", KSAE Spring Conference Proceedings, pp. 1821~1825.
- (10) W. J. Im and S. J. Kang, 2017, "Crash Box Optimal Design by Component Analysis for RCAR Test", Transactions of KSAE, Vol. 25, No. 4, pp. 440~447.