



단품 해석을 통한 RCAR 시험 대응 크래쉬 박스 최적화 설계

임 우 직¹⁾ · 강 성 종^{*2)}

대구가톨릭대학교 대학원 자동차공학과¹⁾ · 대구가톨릭대학교 기계자동차공학부²⁾

Crash Box Optimal Design by Component Analysis for RCAR Test

Woojig Im¹⁾ · Sungjong Kang^{*2)}

¹⁾Graduate School of Automotive Engineering, Catholic University of Daegu, Gyeongbuk 38430, Korea

²⁾Department of Mechanical & Automotive Engineering, Catholic University of Daegu, Gyeongbuk 38430, Korea

(Received 30 August 2016 / Revised 14 March 2017 / Accepted 20 April 2017)

Abstract : The structural performance of the RCAR front low speed test was discussed by using the front body FE model of a medium-sized passenger car. First, to improve the impact load transfer mechanism to the side member and the energy absorbing capability, the shape and the length of the crash box were modified. Next, a reliable component analysis condition for the crash box was derived from the results of the front body analysis, and several component analyses were carried out to optimize the number of the forming and the center forming distance. The front body model that was equipped with the designed crash box showed a distinctive, improved performance without an increase in weight. The maximum barrier intrusion decreased by about 16 mm, and no serious deformation was detected in the side member.

Key words : RCAR(자동차수리연구회), Crash box(크래쉬 박스), Front body model(프런트 바디 모델), Impact load transfer mechanism(충돌하중 전달특성), Component analysis(단품 해석), Forming(포밍)

1. 서 론

저속충돌시의 차량 손상 정도와 수리비 산출 규정을 정한 국제 조직인 RCAR(Research Council for Automotive Repair)는 차량 손상 평가 후 수리비용을 산출하여 등급에 따라 보험료를 차등 적용하고 있다. RCAR에서 규정한 저속 전방 충돌시험 조건은 Fig. 1과 같으며 10° 기울어진 강체 충돌벽에 차량이 40% 오프셋 되도록 하여 15 km/h로 충돌시킨다.¹⁾ 저속 전방 충돌에 대한 차량 손상을 최소화하기 위해 최대 배리어 침입거리 및 사이드 멤버(S/MBR, Side member) 변형을 최소화해야 하며 범퍼 백빔과 사이드 멤버 사이에 위치하여 차량으로 전달되는 충돌 에너지를 흡수하고 차체와 부품의 손상을 최소화하

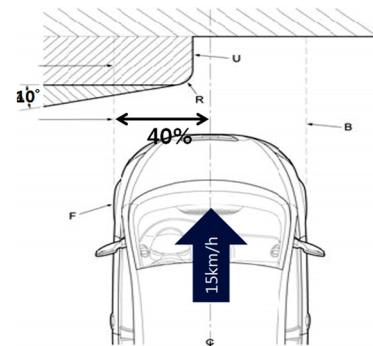


Fig. 1 RCAR front low speed impact test

는 크래쉬 박스(C/Box, crash box)의 형상 설계가 중요하다.^{2,3)}

본 연구에서는 먼저 사이드 멤버, 크래쉬박스, 범퍼 백빔과 폼 등으로 구성된 프런트 바디 기본모델

*Corresponding author, E-mail: sjkang@cu.ac.kr

(Front body base model)을 구성하고 이 모델에 대해 RCAR 전방 저속충돌 해석을 수행하여 충격하중 전달특성(Impact load transfer mechanism)개선의 필요성을 확인하고 외형 변경을 실시하였다. 다음으로 프론트 바디 해석결과를 재현하는 크래쉬 박스 단품해석(Component analysis)을 수행하여 크래쉬 박스 포밍(Forming)을 최적화하였다. 최종적으로 최적화된 크래쉬 박스 형상을 프론트 바디에 적용하여 기본 모델 대비 최종모델의 RCAR 시험 대응 성능향상을 확인하였다.

2. 기본 모델 구성 및 해석

2.1 기본 모델 구성

양산 준중형 승용차의 프론트 바디 모델을 구성하였다. 저속 충돌임을 고려하고 해석시간 단축을 위해 범퍼 커버는 생략하였으며 사이드 멤버 전방 직선부 208 mm만을 모델에 포함하였다.⁴⁾

이중 폐단면 구조의 범퍼 백빔과 사다리꼴 형상의 크래쉬 박스는 CO₂ 용접되며 크래쉬 박스 플랜지 부분에 CO₂ 용접된 백플레이트는 프론트 엔드 모듈(FEM) 마운팅 브라켓과 볼트 결합되어 백빔과 사이드 멤버를 연결시킨다(Fig. 2).

적용된 백빔의 소재 및 두께는 SPFC 780, 1.5 mm 이고 크래쉬 박스는 SPFH 590, 1.5 mm이다. 또한,

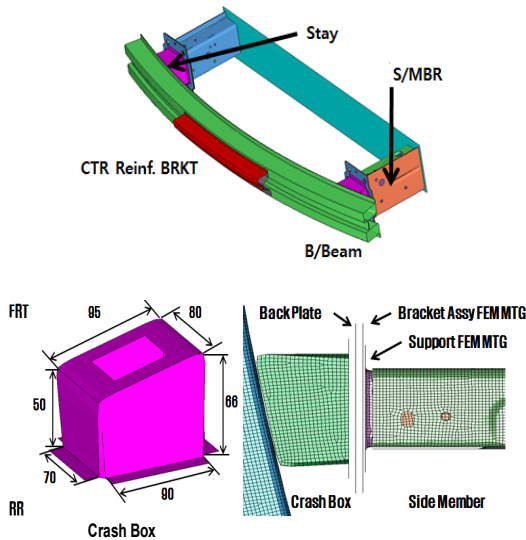


Fig. 2 Front body structure and modeling

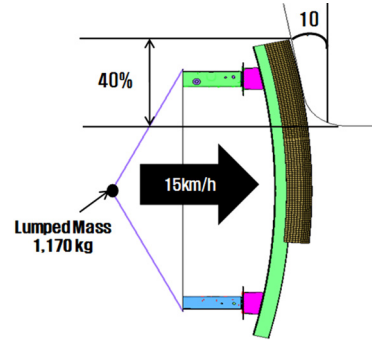


Fig. 3 Front body model and analysis conditions

사이드 멤버 인너의 소재 및 두께는 SGARC 440, 2.0 mm이며 아우터는 SG AFC 590 DP, 1.6 mm이다. Fig. 3은 해석 모델과 해석 조건을 나타낸다. 부품 간 CO₂ 용접부는 절점 사이를 강체빔으로 연결시켰으며 사이드 멤버 양끝을 강체 판과 강체 빔으로 연결하고 차량 중량에서 모델 중량 23.0 kg을 뺀 1170 kg를 집중질량으로 부여하였다. RCAR 시험 조건과 동일하게 10° 경사진 고정 배리어에 15 km/h의 속도로 충돌시켰으며. 최대 배리어 침입량 MID(Maximum intrusion displacement), 변형에너지 E_{abs}(Energy absorption), 사이드 멤버 변형을 분석하였으며 해석에는 LS-DYNA를 사용하였다.⁵⁾

2.2 기본 모델 해석

기본 모델(Base)에 대한 하중-변위 선도는 Fig. 4와 같다. 최대 배리어 침입거리가 161.9 mm로 나타났다. 1 영역은 범퍼 폼, 2 영역은 크래쉬 박스, 백플레이트와 사이드 멤버 아우터, 3 영역은 백빔 그리고 4 영역은 사이드 멤버의 붕괴 영역으로 각각 구분된다.

Fig. 5와 같이 크래쉬 박스와 사이드 멤버 결합부 단면 불일치로 인해 사이드 멤버 아우터에 굽힘 모멘트가 작용하여 크래쉬 박스와 사이드 멤버 아우터가 동시에 붕괴되고 97.8 kN의 1차 피크 하중이 나타났다. 1차 피크 이후 사이드 멤버 아우터 붕괴가 지속되면서 일정 구간 80 kN 이하의 낮은 하중이 산출되었다. 123.6 kN의 2차 피크에서 백빔 붕괴가 발생하였으며 이후 Fig. 6과 같이 사이드 멤버 전체 붕괴가 확대되었다.⁴⁾

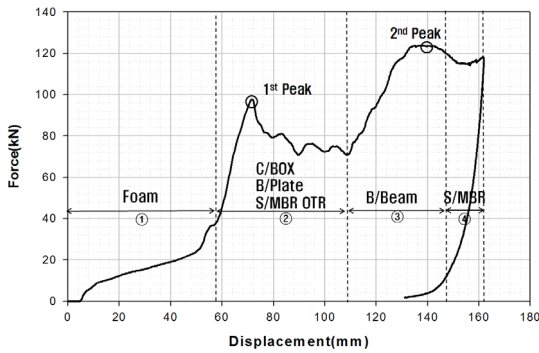


Fig. 4 Load carrying capability: Base

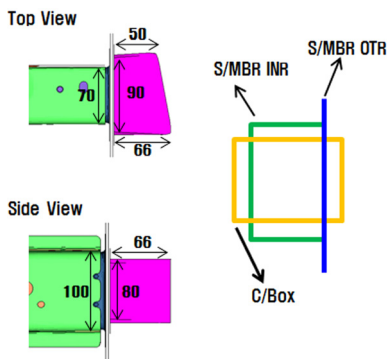


Fig. 5 Cross section of crash box and side member at joint

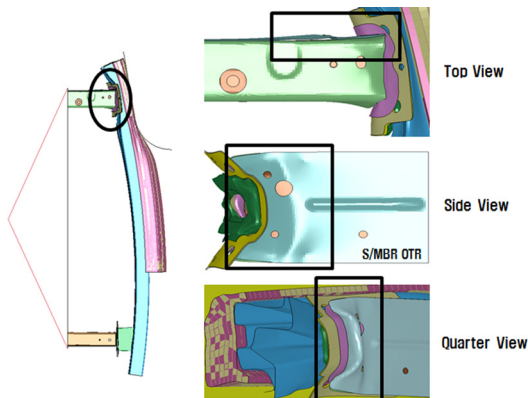


Fig. 6 Final deformation: Base

3. 크래쉬 박스 외형 변경

기본 모델에서 사이드 멤버 아우터의 국부 변형이 조기에 발생됨을 없애 충돌하중 전달특성을 향상시키고자 사이드 멤버 단면 사이즈에 맞게 크래쉬 박스의 상하 길이를 20 mm 확장하고 좌우 길이를 20 mm 축소하여 크래쉬 박스와 사이드 멤버 결

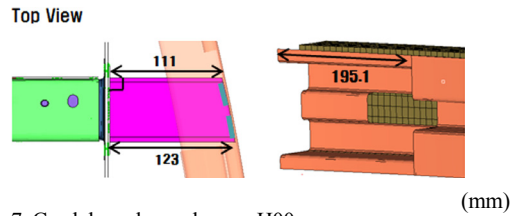


Fig. 7 Crash box shape change: H00

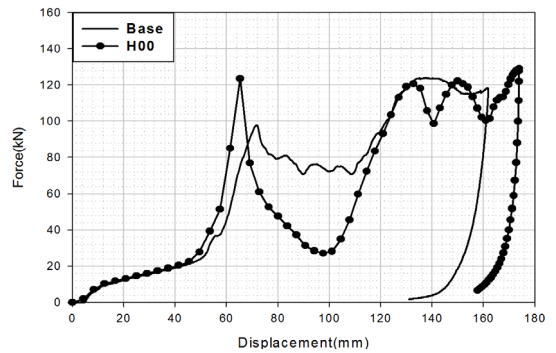


Fig. 8 Load carrying capability: crash box shape change

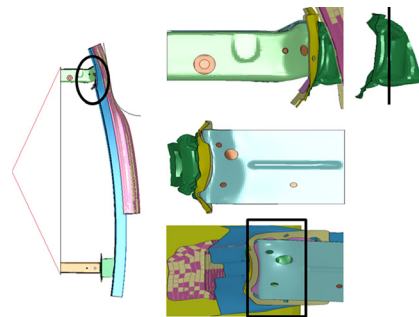


Fig. 9 Final deformation: H00

Table 1 Analysis results: crash box shape change

Model	MID (mm)	1st Peak (kN)	C/Box E abs (J)
Base	161.9	97.8	2762.6
H00	173.9	125.2	4747.1

합부의 단면을 일치시켰다(Fig. 7). 또한, 압축 붕괴를 유도하고자 크래쉬 박스 아우터 기울기를 없애 직선화하였고 충돌에너지 흡수성능 향상을 위해 범퍼 백빔 아우터까지 전방부 길이를 66 mm에서 123 mm로 확장하였으며 백빔 인너 끝 195.1 mm를 제거하고 백빔 아우터에 CO₂ 용접됨을 가정하여 모델 H00를 구성하였다.⁶⁾

Fig. 8, Fig. 9 그리고 Table 1의 해석결과로부터

Table 2 Analysis results: side member thickness increase

Model	MID (mm)	S/MBR Collapse load (kN)
Base	161.9	123.5
H00	173.9	131.7
H00_OTR2.2	169.8	146.1

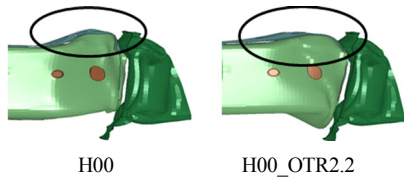


Fig. 10 Final deformation: side member thickness increase

조기에 발생하던 사이드 멤버 아우터 국부 변형이 억제됨에 따라 하중전달 특성이 개선되어 기본 모델에 비해 피크 하중이 크게 증가하고 크래쉬 박스의 압축붕괴가 뚜렷하게 나타나며 사이드 멤버에 아우터에 발생했던 심한 국부변형이 발생하지 않음을 알 수 있다. 그러나 길이 증가에 따른 불안정한 박스 붕괴로 헤드 변위 70 mm ~ 120 mm에서 하중 저하가 발생하여 기본모델 대비 최대 배리어 침입 거리가 12 mm 증가하였다. 따라서 크래쉬 박스에 포밍을 추가하여 충분한 압축붕괴를 유도할 필요가 있다.

크래쉬 박스 외형 변경에도 불구하고 사이드 멤버 아우터 변형이 여전히 크게 발생함으로 사이드 멤버 아우터 두께를 1.6 mm에서 2.2 mm로 변경한 모델 H00_OTR2.2에 대해 해석하였다. Table 2의 결과로부터 H00 대비 사이드 멤버 붕괴하중이 14.4 kN 증가하고 Fig. 10과 같이 사이드 멤버 굽힘붕괴가 감소하여 배리어 최대 침입거리가 4.1 mm 감소하였다. 사이드 멤버의 변형을 감소시키기 위해서는 사이드 멤버 아우터 두께를 2.2 mm로 증가시키는 것이 기본적으로 필요하다고 판단하여 이후 해석에서는 사이드 멤버 아우터 두께를 2.2 mm로 하여 해석을 진행하였다.

4. 크래쉬 박스 단품 성능평가 조건 도출

프론트 바디 장착 상태에서의 부품 성능을 예측할 수 있는 단품 해석조건을 도출하였다. Fig. 11의

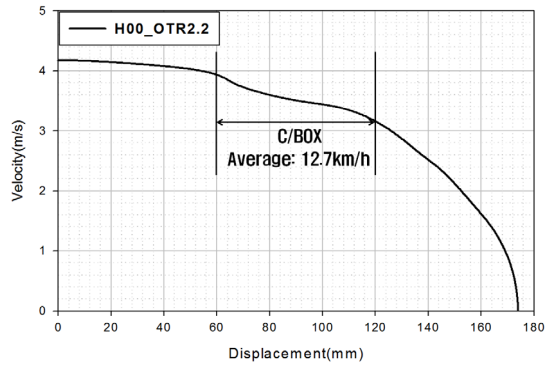


Fig. 11 Velocity-displacement curve: H00_OTR2.2

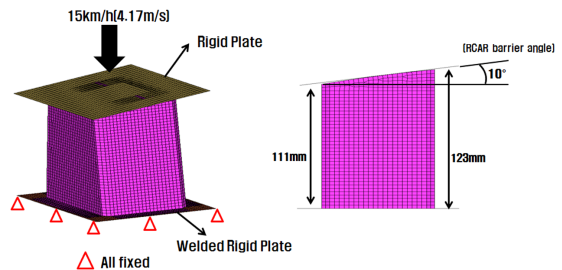


Fig. 12 Crash box component analysis model

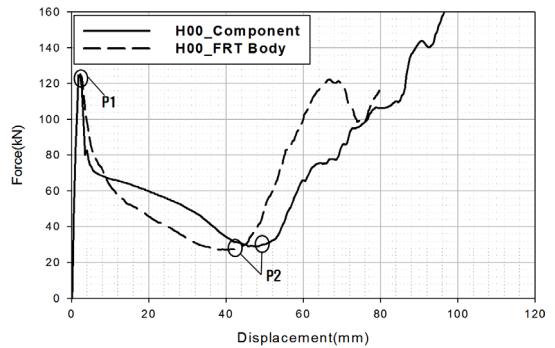


Fig. 13 Load carrying capability: crash box component vs. front body

프론트 바디 변위-속도 해석결과로부터 크래쉬 박스 붕괴영역에서 평균속도는 12.7 km/h로 나타났다. 속도 영향에 대한 분석을 거쳐 H00_OTR2.2 크래쉬 박스에 대해 사이드 멤버 연결부는 강체판을 용접하여 완전 고정된 후 반대편에 위치한 10° 경사진 강체판을 15 km/h의 등속도로 이동시키는 단품 해석 모델 H00_Component를 구성하였다(Fig. 12).⁷⁾

Fig. 13에서와 같이 단품 모델과 프론트 바디 모델 H00_FRT Body(H00_OTR2.2)의 P1 점과 P2 점

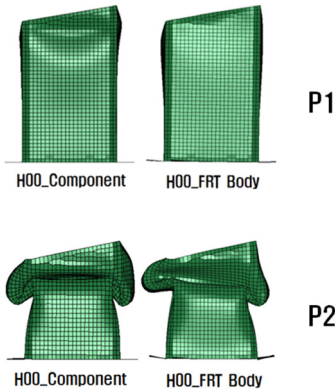


Fig. 14 Deformations at point P1 and P2 of Fig.13: crash box component vs. front body

하중이 유사하게 산출되며 붕괴 형상도 Fig. 14와 같이 거의 동일함을 확인할 수 있었다.

5. 크래쉬 박스 포밍 변화 해석

5.1 포밍 개수 변화

Fig. 15와 같이 H00_Component에 등 간격으로 포밍을 추가하여 해석하였다. 포밍 깊이와 폭은 각각 5 mm, 6 mm이고 포밍의 개수는 1열, 2열, 3열로 변화시켰으며 포밍 추가에 따른 강도 저하를 고려하여 두께는 기존 1.2 mm에서 1.8 mm로 증가시켰다.^{8,9)}

Fig. 16은 하중-변위 선도를 Fig. 17은 변형 구간별 변형에너지를 각각 나타낸다. 1열 포밍 H00_FM1의 경우 포밍의 폭 6 mm 변형 후 포밍 상부 붕괴가 발생하는 98.1 kN까지 하중이 상승하지만 이후 아무 저항 없이 붕괴가 발생한다. 2열 포밍 H00_FM2는 포밍 사이 중앙부 지지효과로 인해 40 mm 변형 이후 152.2 kN ~ 168.7 kN의 하중을 유지하면서 붕괴가

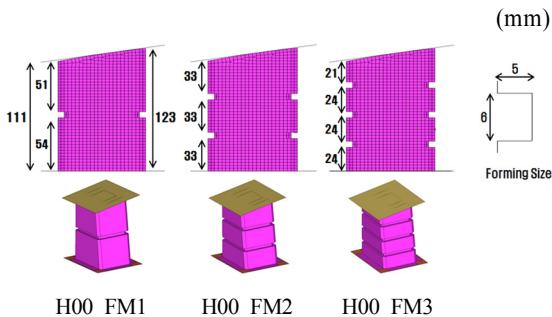


Fig. 15 Analysis models: number of formings

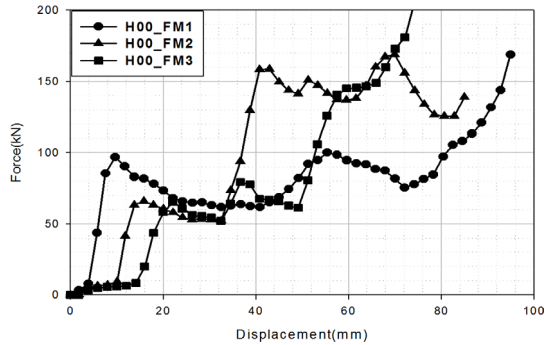


Fig. 16 Load carrying capability: number of formings

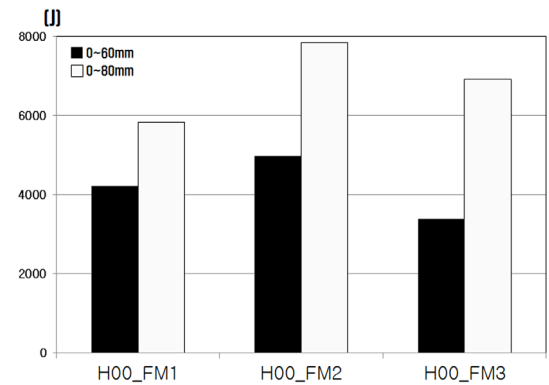


Fig. 17 Strain energy: number of formings

발생하고 변형에너지가 변위 0 mm ~ 60 mm사이 4975.1 J, 변위 0 mm ~ 80 mm사이 7859.6 J로 각각 나타났다. 3열 포밍 H00_FM3 모델은 포밍 폭 18 mm 변형 후 포밍 간 접촉 저항으로 인해 계단 형태의 하중-변위 곡선이 나타나며 변형거리 68 mm 이후 하중이 상승한다. 1열과 3열 모델 대비 변위 0 mm ~ 60 mm 와 0 mm ~ 80 mm에서 변형에너지가 모두 높게 산출되는 H00_FM2가 가장 우수한 모델로 판단된다.

5.2 포밍 중앙부 간격 변화

Fig. 18과 같이 H00_FM2에 대해 포밍 중앙 간격을 기존 33 mm에서 24 mm, 21 mm, 18 mm로 각각 변경하여 해석하였다.

Fig. 19는 변형 형상을 나타내며 Fig. 20은 하중-변위 선도를 나타낸다. 크래쉬 박스 포밍 중앙부 간격을 줄일수록 포밍부 붕괴시간이 짧아지면서 상부의 붕괴 시점이 앞당겨져 초기 변형에너지가 상승하고 중앙부에서의 지지효과로 인해 포밍 접촉 이후 안

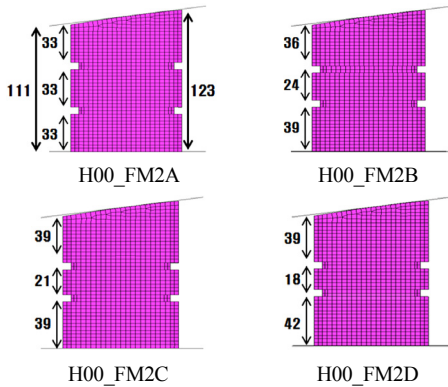


Fig. 18 Analysis models: center forming distance

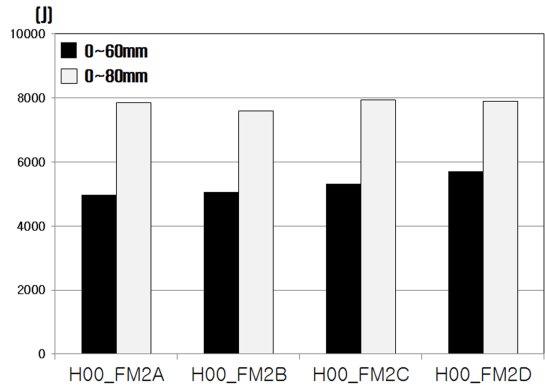


Fig. 21 Strain energy: center forming distance

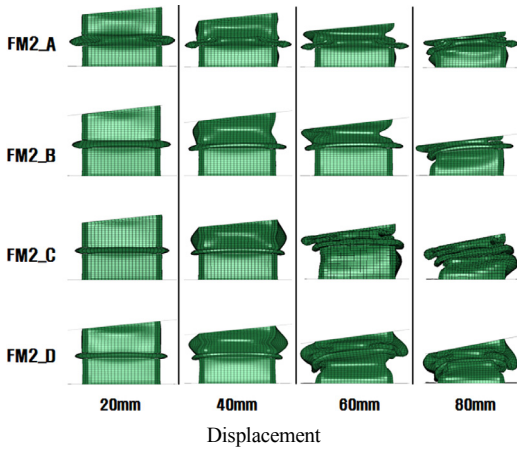


Fig. 19 Deformation: center forming distance

6. 최적화 크래쉬 박스 적용 프론트 바디 해석

크래쉬 박스 H00_FM2D를 장착한 프론트 바디 모델 H00_FM2D_FRT Body에 대해 해석한 결과 하부가 완전 고정된 단품해석에 비해 피크 하중이 3.6 kN 작게 산출된 반면 크래쉬 박스가 5.8 mm 더 압축되어 결과적으로 변형에너지가 813.7 J 크게 나타났다(Fig. 22, Table 3).

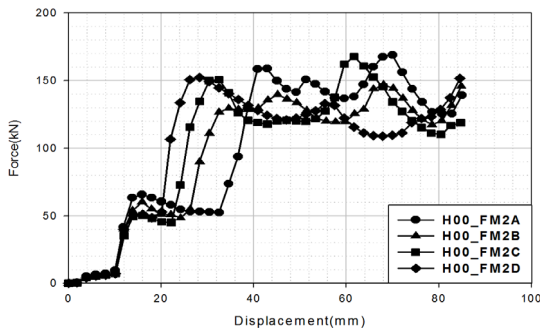


Fig. 20 Load carrying capability: center forming distance

정적인 압축붕괴 형태가 나타난다. 그로 인해 Fig. 21에서와 같이 포밍 중앙부 간격이 짧을수록 변위 0 mm ~ 60 mm의 변형에너지가 증가하였으며 H00_FM2D가 우수한 것으로 판단된다. 반면 변위 0 mm ~ 60 mm의 변형에너지는 큰 차이가 없게 나타났다.

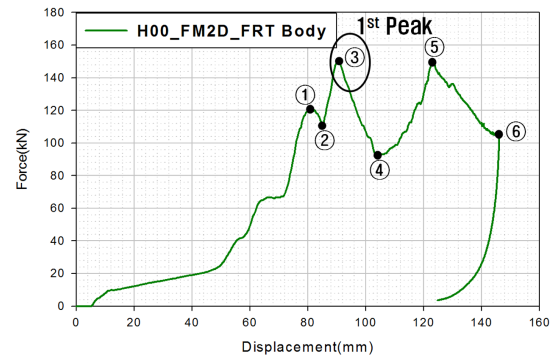
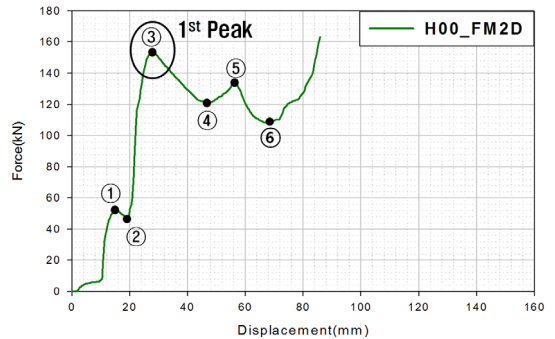


Fig. 22 Load carrying capability: H00_FM2D vs. H00_FM2D_FRT Body

Table 3 Analysis results: H00_FM2D vs. H00_FM2D_FRT Body

Model	1st Peak (kN)	C/Box E_abs (J)
H00_FM2D	153.2	6547.3
H00_FM2D_FRT Body	149.6	7361.0

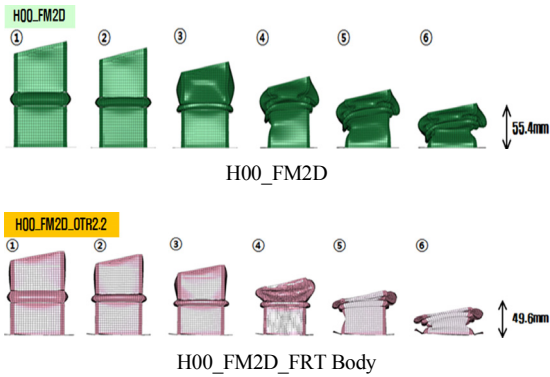


Fig. 23 Deforming shapes: H00_FM2D vs. H00_FM2D_FRT Body

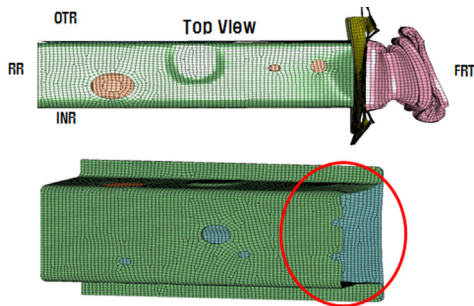


Fig. 24 Final deformation: H00_FM2D_FRT Body

또한 Fig. 23의 변형 형상 비교로부터 ①~⑥까지 단뿔 해석과 론트 바디 해석의 변상이 동일하게 나타나고 있으며 Fig. 24에서와 같이 FEM 마운팅 브라켓이 용접되는 선단부를 제외하고 사이드 멤버 변형이 발생하지 않는다.

Fig. 25, Table 4에 기본 모델과 H00_FM2D_FRT Body 해석결과를 비교하였다. 기본 모델 대비 배리어 최대 침입거리가 15.7 mm 감소하고 크래쉬 박스 붕괴 안정성 증대로 1차 피크 하중이 51.8 kN 증가하였다. 또한 크래쉬 박스 변형에너지가 166.5 % 향상되어 Fig. 26에서와 같이 기본모델에서 발생하는 사이드 멤버의 국부 변형이 최종 모델에서 거의 발생하지 않음을 확인하였다. 기본 모델 대비 중량 변

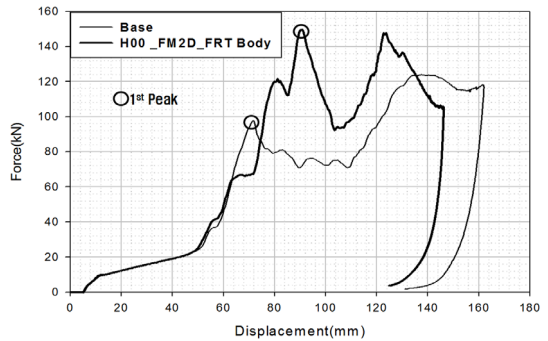


Fig. 25 Load carrying capacity: Base vs. H00_FM2D_FRT Body

Table 4 Analysis results: Base vs. H00_FM2D_FRT Body

Model	MID (mm)	1st Peak (kN)	C/Box E_abs (J)	W(kg)
Base	161.9	97.8	2762.6	21.85
H00_FM2D_FRT Body	146.2	149.6	7361.0	21.84

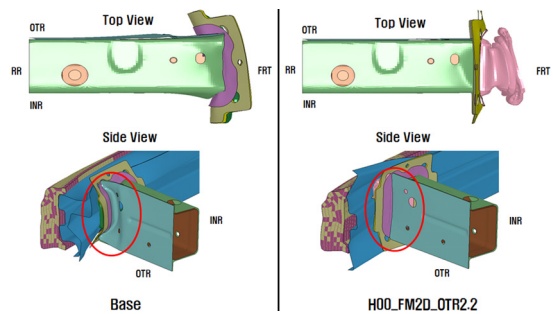


Fig. 26 Final deformation: Base vs. H00_FM2D_FRT Body

화는 거의 없으나 타 충돌시험 성능 확보를 위해 삭 제된 백빔 인너부 끝단부 보강이 추가 되는 경우 중 량이 미소하게 증가할 수 있다.¹⁰⁾

7. 결 론

단뿔 해석을 통한 RCAR 저속충돌 대응 크래쉬 박스 설계기술을 연구하였다.

후방으로의 하중 전달 성능 개선을 위해 크래쉬 박스와 사이드 멤버 연결부 단면을 일치시키고 크 래쉬 박스 길이를 범퍼 백빔 아우터까지 확장한 결 과 기본 모델 대비 변형에너지가 크게 증가되었으 나 길이 증가로 인한 불안정으로 굽힘 붕괴가 심하 게 발생하였다.

크래쉬 박스의 RCAR 저속충돌 성능을 단품 해석을 통해 모사하기 위해서는 하부를 고정시키고 10° 경사를 가진 강체 판을 상부에 15 km/h의 등속도로 미치는 것이 하나의 적합한 조건이다.

단품 해석을 통해 크래쉬 박스 포밍 최적화를 실시한 결과 2열 포밍이 우수하게 평가되었으며 중앙부 간격이 줄어들수록 포밍 상부의 붕괴시점이 짧아져 초기 변형에너지가 증가하고 중앙부 지지효과로 안정적인 붕괴 형태가 나타났다

단품 해석으로부터 도출된 최적화 크래쉬 박스 모델을 프론트 바디 모델에 적용한 결과 중량 증가 없이 크래쉬 박스 변형에너지가 기본 모델 대비 166.5 % 증가하여 최대 배리어 침입거리가 15.7 mm 감소하였으며 사이드 멤버 변형이 거의 발생하지 않았다.

References

- 1) Research Council for Automotive Repairs, Rcar Low Speed Structural Crash Test, Issue 2.2, 2008.
- 2) J. T. Kwon, J. S. Park and N. S. Kwon, "Stay of Front Bumper System Design for RCAR Low Speed Crash," KSAE Spring Conference Proceedings, pp.1821-1825, 2011.
- 3) Y. B. Chun and C. W. Lee, "Casestudy on Bumper Stay for Damageability & Repairability Improvement," Transactions of KSAE, Vol.13, No.2, pp.157-161, 2005.
- 4) S. J. Kang, "Bumper Stay Design for RCAR Front Low Speed Impact Test," Transactions of KSAE, Vol.24, No.2, pp.191-197, 2016.
- 5) LS-DYNA User's Manual, Nonlinear Dynamic Analysis of Structures, Version 971, LSTC, 2006.
- 6) H. S. Kim, I. H. Choi and J. H. Kim, "A Development of RCAR Performance with High Efficient C/BOX," KSAE Annual Conference Proceedings, pp.2475-2482, 2010.
- 7) H. J. Im, "Study of Optimized Crash Box for Low Speed Crash Performance," KSAE Annual Conference Proceedings, pp.1709-1712, 2008.
- 8) S. H. Kim, J. S. Yoo and H. J. Yim, "Design of the Crash Box to Improve Damageability from Low Speed Rear Impact," KSAE Annual Conference Proceedings, pp.1972-1977, 2012.
- 9) C. W. Lee and Y. K. Kim, "RCAR Performance Improvement of a Super-mini Size Vehicle," KSAE Spring Conference Proceedings, pp.18-25, 2010.
- 10) D. H. Lee, H. G. Lee, S. S. Kim, D. J. Kim and Y. J. Bae, "A Perspective Study of Bumper Structure to Meet New IIHS Low Speed Bumper Test," KSAE Spring Conference Proceedings, pp.1176-1182, 2008.