

시뮬레이션을 이용한 하이브리드 범퍼 빔 개발

이종길*, 강동관¹

Development of a Hybrid Bumper Beam Using Simulation

J.K. Lee, D. K. Kang

Abstract

Bumper back beam is one of the essential structural components of front-end module. It should be designed to withstand a minor bump in low-speed collision, 2.5 mph crash test for example. And weight reduction is always important problem in the design of almost all the parts in car for energy saving. So, the key issues in shape design of a bumper are weight reduction and the performance in 2.5mph crash test. In this study, a light weight and high performance bumper back beam model was developed using analytical approach based on mechanics and FE simulation together.

Key Words : FEM(유한요소법), Bumper(범퍼), Crush box(크러쉬 박스), Hybrid bumper beam(하이브리드 범퍼 빔), Shape optimization(형상 최적화)

1. 서 론

최근 자동차 부품 산업은 고성능화, 경량화, 단순화의 방향으로 발전하고 있으며, 치열한 경쟁 구도 가운데 조립공정 단순화, 물류관리, 경량화, 품질향상, 원가 절감들의 요구가 거세지고 있다. 이에 따라 완성차 업체는 시스템별 부품 모듈화 개발에 박차를 가하고 있으며, 자동차 부품의 공급체제도 이에 따라 변화하고 있다.

자동차 프론트 엔드 모듈은 이러한 배경에서 개발되고 있으며, 프론트 엔드 모듈에 장착되는 범퍼도 경량, 고성능화의 만족은 물론 프론트 엔드 모듈 구조 성능에 대한 상호 보완적 기능을 하는 방향으로 개발되고 있다.

이러한 상황에서 선진업체들은 범퍼 구조의 이중화, 단면 형상의 변화, 크러쉬 박스(crush box)와 같은 추가적 에너지 흡수 부재의 활용을 통해 범퍼의 구조 성

능 극대화 하려는 연구를 꾸준히 진행하고 있는 실정이다.

범퍼 빔 형상 설계를 위하여 FMVSS 581 규정에 따른 충돌 해석을 수행하여 범퍼의 성능을 비교 평가하고, 최적의 범퍼 빔 형상 및 소재 구성 방안을 제시를 목표로 하여 본 연구가 수행되었다.

본 연구에서는 기존에 장착된 차량 범퍼의 외관 형상 및 내부 공간 제약을 고려하여 범퍼 빔의 형상을 설정하고 성능 향상과 경량화를 동시에 만족시키기 위하여 다양한 형태의 범퍼 빔 구성에 대한 해석을 수행하고, 최적화를 시도하였다.

범퍼 빔의 기본 개념은 고분자 소재와 철강재의 복합적 사용을 통해 제작된 하이브리드 빔의 형태로 하였으며, 충돌 해석은 상용 프로그램인 LS-Dyna[1], 유한요소 모델링에는 HyperMesh[2]를 사용하였다.

1. 한국산업기술대학교 기계공학과

교신저자: 한국산업기술대학교 기계공학과

E-mail:ljkk@kpu.ac.kr

2. 범퍼 빔 형상 설계 개념

2.1 성능 기준의 설정

범퍼의 성능 기준의 설정을 위하여 수행한 기존의 철강 단일재 빔에 대한 진자(pendulum) 충돌 해석 결과 최대 변위 발생 위치에서 범퍼와 차체 기준점 사이의 간격이 약 63mm 로 나타났으며, 응력 값이 인장강도를 초과하는 부분은 없는 것으로 나타났다.

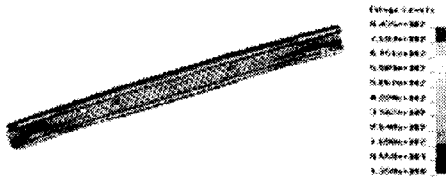


Fig.1 Predicted stress distribution (MPa, Original model)

이에 따라 본 연구에서는 다음과 같은 세 가지 기준을 해석 결과를 판정하는 기준으로 하였다.

- 1) 범퍼 빔의 최대 변형 지점에서의 차체 기준점과의 간격을 60mm 이상일 것.
- 2) 최대 응력값이 소재의 인장강도를 넘지 않을 것.
- 3) 중량이 기존 범퍼보다 가벼울 것.

2.2 범퍼 형상 설계를 위한 역학적 개념

본 연구에서 개발되는 범퍼는 기존 차량에 탑재 되는 것으로 목표로 하고 있다. 따라서 형상에 대한 대폭적인 수정이 어렵기 때문에 기존의 외곽 형상을 유지하면서, 기존 차량 범퍼의 단면 형상을 기준으로 하여 구조적 기여도가 낮은 부분을 제거하는 방식으로 형상 변경을 하였다.

범퍼의 진자 충돌 시험 모드는 양단이 고정된 보의 중앙에 집중하중이 가해지는 형태로 단순화 될 수 있다.

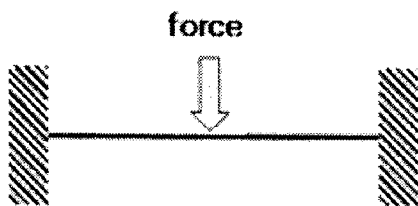


Fig. 2 Simplified beam model for analytical analysis

이 경우, 보에 작용하는 모멘트는 대략 다음과 같은 형태가 된다.

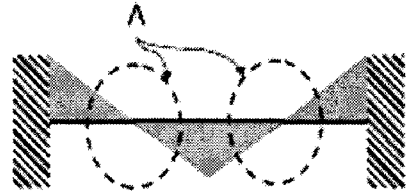


Fig. 3 Bending moment distribution of a beam with built-in support

따라서 Fig. 3 의 A 부분은 구조적 기여도가 낮고, 따라서 이 부분을 중심으로 소재를 제거하여 경량화를 달성하는 것을 기본 개념으로 하였다.

3 해석을 통한 범퍼 빔 형상 결정

3.1 1차 해석 결과

1 차 해석에서는 경량화를 위한 다양한 형태의 아이디어들을 적용하고, 그 성능을 검증하는 작업을 수행하였으며, 이 운데 Fig.4 에 나타낸 바와 같은 플라스틱의 두께 5.0mm, 철재 보강재의 두께 1.2mm 로 구성된 범퍼 빔이 양호한 성능을 가지는 것으로 판단하였다. 경량화는 기존 차량 대비 약 3.4%정도 가능하고, 변형량으로 판단한 충돌 성능은 기존의 범퍼와 동등수준인 것으로 나타났다. 이것은 성형 후, 플라스틱의 밀도가 0.94E-9 ton/mm³ 에서 증가하지 않는다는 가정과 플라스틱의 탄성계수가 10GPa 이상 확보된다는 가정에 얻은 결과이다.

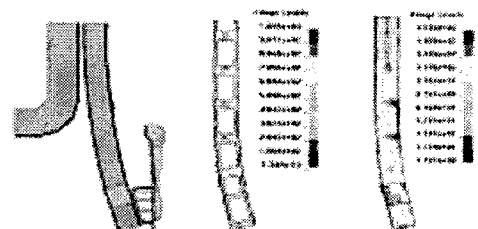


Fig. 4 Predicted deformation and stress distribution of 1st year's model

그러나 플라스틱이 성형되면서 압축되어 소재 밀도가 증가하는 문제와 실용적으로 사용 가능한 플라스틱 소재의 탄성계수는 수 GPa 정도라는 현실적 문제를 고려하여 추가적인 형상 최적화 작업을 수행하였다.

3.2 시뮬레이션을 이용한 개선 모델 개발

플라스틱의 비중을 최악의 경우로 산정하여 $1.1 \sim 1.4E-9 \text{ ton/mm}^3$ 으로 하고, 탄성계수는 $3.4\sim 6.5\text{GPa}$ 정도로 산정하여 경량화 및 성능 개선을 위한 모델 변경 및 해석을 통한 검증은 수행하였다. 이 경우 플라스틱의 기여도를 낮추면서 대응하는 것이 유리한 것으로 판단되어 1차 모델에서 플라스틱 두께를 3mm, 철재 보강재 두께를 1.4mm로 조정하였다. 철강재 보강부의 소재도 1차년도 소재보다 강도가 높은 핫스탬핑 소재(항복강도 1100 MPa, 인장강도 1541MPa, 연신율 9%)를 사용하였다. 그런데 해석 결과 소재의 연신율이 낮아 범퍼 빔에 파손이 일어나는 것으로 예측되었다.

이 문제의 해결을 위해 범퍼 빔의 고정 구조에 크러쉬 박스(crush box)를 삽입하여 에너지를 추가로 흡수하도록 구조를 설정하였다. 이러한 구조는 현재 선진 자동차 업체들이 이미 연구를 수행하고 일부 적용하고 있는 구조로 향후 범퍼 빔의 강도를 높이면서 충돌 성능과 경량화를 이룰 수 있는 매우 유력한 대안으로 인정받고 있다.

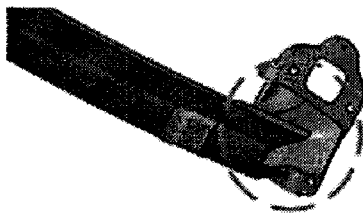


Fig. 5 Beam support structure made by crush box

상기와 같은 모델에 대하여 크러쉬 박스의 두께와 물성에 따른 충돌 성능을 충돌 후 빔과 차체의 거리로 평가하였다.

Table 1 Predicted performances of crush boxes

Case	#1	#2	#3	#4
Yield Stress(MPa)	210	210	465	465
Thickness(mm)	1.2	1.2	1.2	1.6
Distance(mm)	45.2	50.3	54.9	50.6

평가 결과 크러쉬 박스의 강성이 어느 한계까지는 에너지 흡수 능력이 증대되어 성능 향상에 기여하지만, 과도하게 강성이 클 경우에는 오히려 전체 성능을 저하시키는 것으로 드러났다. 본 연구에서는 성형 문제와 성능을 함께 고려하여 case 3에 해당하는 크러쉬 박스 소재를 선정하였다.

이렇게 선정된 크러쉬 박스에 지지 구조를 이용하여 다양한 범퍼 빔 구조에 대하여 해석을 수행하면서 경량화 및 성능 향상을 시도하였다.

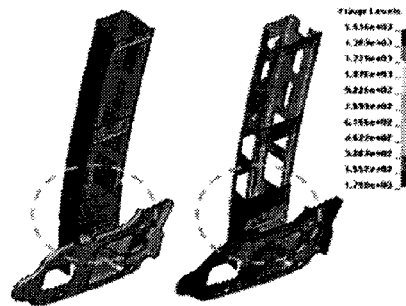


Fig. 6 Predicted stress distribution of a bumper beam model #1 (Young's modulus of polymer = 3.4GPa, Density of polymer = $1.1E-9\text{ton/mm}^3$)

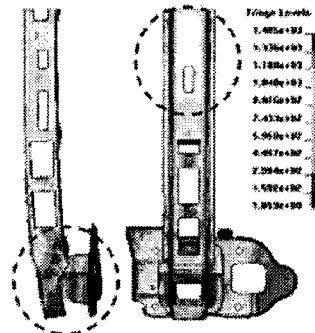


Fig. 7 Predicted stress distribution of bumper beam model #2 (Young's modulus of polymer = 3.4GPa, Density of polymer = $1.1E-9\text{ton/mm}^3$)

크러쉬 박스 지지 구조를 이용하는 Fig. 5의 모델을 기초로 하여 소재 제거 부위만을 일부 수정할 경우, 지지부와 연결되는 범퍼 끝단이 벌어지면서 하중 지지용량이 급격히 감소하는 양상을 보였다. 이 문제의 해결을 위해 Fig.6에서와 같이 횡부재를 추가하면서, 경량화를 위해 소재 제거 부위를 변경하였다. 그러나 빔의 중앙 부분에서 응력의 최고치가 인장강도 값을 다소 상회하는 것으로 나타났다.

이는 소재를 추가적으로 더 제거해야 함을 의미하며, Fig.8 에서와 같은 방법으로 소재 제거 부위를 변경하여 대응하였다. 이를 통해 기존 철재 범퍼 대비 동등 수준의 성능을 확보할 수 있는 것으로 판정되었다.

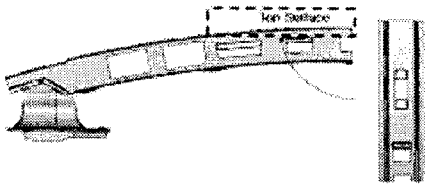


Fig. 8 Removed area for weight reduction

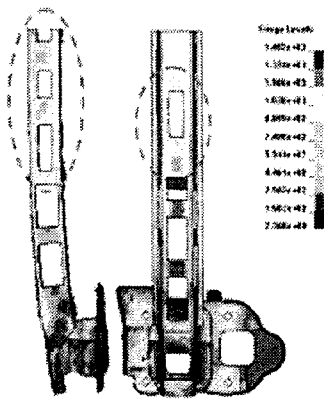


Fig. 9 Predicted stress distribution of a bumper beam model #3 (Young's modulus of polymer = 6.5GPa, Density of polymer = 1.4E-9ton/mm³)

추가적인 경량화를 위하여 소재 제거 부위를 확대하였다. 추가적인 소재 제거를 위한 개념을 Fig.8 에 나타내었으며, 해석 결과는 Fig.9 에 나타내었다. 이 경우 약 3%정도의 경량화 효과가 있는 것으로 나타났다.

이것은 1 차모델에 비하여 플라스틱소재의 탄성계수가 상당히 약화되고, 밀도가 약 27%증가된 상태에서도 1 차년도와 비슷한 성능을 형상 변경을 통해 얻을 수 있다는 것으로 보여주는 결과이다.

한편, 플라스틱 소재의 개발에서 성능의 추가적 향상을 위해 보강사가 소재에 추가될 경우 밀도가 1.7E-9ton/mm³까지 증가할 가능성이 있었다. 따라서 추가적인 형상 변경을 통해 경량화를 이루면서 성능을 유지하도록 하였다. 플라스틱 소재의 탄성계수를 6.5GPa 로 하고, 밀도를 1.7E-9ton/mm³로 하여 해석을 수행하면서 추가적으로 소재 제거 위치를 변경한 모델들 가운데 최상의 모델에 대한 해석 결과를 Fig.10 에 나타내었다.

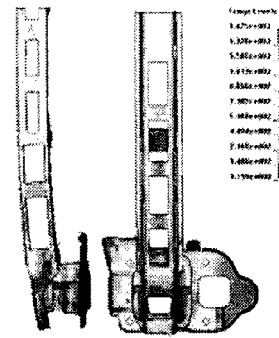


Fig. 10 Predicted stress distribution of a bumper beam model #4 (Young's modulus of polymer = 6.5GPa, Density of polymer = 1.7E-9ton/mm³)

이 경우 경량화는 약 1%로 아주 미미했으며, 충돌 후 차체 기준부와의 거리로 평가된 충돌성능은 앞에서 설정한 기준 대비 약 96%정도 수준에 머물렀다. 이 결과에서 볼 때, 플라스틱 소재의 밀도가 1.7E-9ton/mm³ 이상이 되면 경량화에 대한 대응이 매우 어렵다고 생각된다.

3 결론

본 연구에서는 역학적 접근과 유한요소 해석을 이용하여 플라스틱과 철재 보강재로 제작된 하이브리드 범퍼 빔의 경량화 및 성능 최적화를 수행하였으며, 결론은 다음과 같다.

1) 핫 스탬핑용 철재와 플라스틱의 복합적 사용을 통하여 하이브리드 범퍼 빔을 제작할 경우, 철재의 신율 부족으로 인한 문제가 발생할 수 있으며, 이것은 크러쉬 박스를 추가하여 해결 가능하다.

2) 범퍼 빔의 성능 향상과 경량화를 위하여 핫스탬핑과 크러쉬 박스를 적절히 사용하는 방법이 매우 효과적인 방법임을 확인할 수 있었다.

3) 크러쉬 박스의 형상 및 소재의 적절한 선정을 통하여 범퍼 빔의 성능을 극대화 할 수 있으며, 이것은 범퍼 빔과 크러쉬 박스의 특성을 동시에 고려한 설계를 통하여 가능하다.

4) 빔의 경량화를 위한 역학적 접근으로 굽힘 모멘트 선도를 이용한 범퍼 빔의 길이 방향 하중 상태 파악을 통해 소재를 제거할 부위를 결정하는 방법이 사용될 수 있다.

5) 탄성계수 10GPa 이상의 플라스틱 소재와 철재 보강구조

를 적절히 사용하면 철재 단일 소재를 사용하는 것보다 더 효과적인 범퍼 빔의 제작이 가능하다.

6) 향후 플라스틱과 철재 보강재의 접합성을 향상시키기 위한 연구와 핫스탬핑 철재의 연신율을 높이기 위한 연구가 행한다면, 하이브리드 범퍼 빔의 성능을 획기적으로 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 산업자원부 중기거점기술개발 사업의 일환으로 이루어졌으며, 이에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- [1] LSTC, LS-DYNA Keyword user's manual
- [2] Altair Eng, HyperMesh training manual