

자동차 도어 경량화를 위한 판재형 사이드 임팩트 빔 개발 프로세스

이인철¹ · 이태규² · 장동환[#]

Development Process of Side Impact Beam for Automotive Light-Weighting Door using Sheet Type

I. C. Lee, T. K. Lee, D. H. Jang

(Received January 5, 2015 / Revised March 5, 2015 / Accepted March 10, 2015)

Abstract

This paper presents the development process of automotive side door impact beam for passenger cars. Weight reduction while maintaining functional requirements is one of the major goals in the automotive industry. In this study, thin-walled side door beam using quenchable boron steel was designed to reduce the weight of conventional side door tubular one. In order to estimate design for the proposed side door beams, the static side impact protection tests(FMVSS 214) were conducted using the finite element method. Based on the simulation results, geometry modification of the side door beam has been performed via creating new reinforcing ribs. Furthermore, the manufactured frontal impact beam was mounted on the real side door of a passenger car, and then static impact protection test carried out. It is concluded that the presented test results can provide significant contribution to the stiffness of side door impact beams and light-weighting door research.

Key Words : Side Door Impact Beam, Finite Element Method, Sheet Type, Reinforcing Rib, Impact Protection

1. 개요

자동차 도어는 방한, 방수, 방음 등과 같이 외부에서 발생하는 환경변화를 자동차 실내에 유입되는 것을 방지함과 동시에 측면충돌로부터 충격을 흡수하여 탑승자를 보호하는 역할을 한다. 이러한 자동차 도어는 전체 구조물이 일체형으로 구성되어 있는 모노코크(monocoque) 차체에서 대표적인 가동부품(moving part)으로서 별도의 단일 모듈로 제작이 가능하다[1]. 따라서 소재의 다양성, 디자인 변경의 용이성, 신공법의 적용 등이 가능하기 때문에 안전성 향상기술, 경량화 기술 등이 우선적으로 적용되는 대표적인 자동차 차체의 핵심모듈이다. 도어모듈

을 구성하는 여러 가지 부품 중에서 사이드 임팩트 빔은 승용차량의 도어에 장착되어 측면충돌 사고에서 탑승객의 안전을 보장하는 역할을 하기 때문에 고강성과 높은 충격 에너지를 흡수할 수 있는 능력을 요구하는 안전부품이다. 이러한 사이드 임팩트 빔에 대한 기계적 성질을 만족하기 위하여 전통적으로 다양한 열처리를 수반한 철강소재를 적용하였으나 차체의 중량을 증가시키고 낮은 연성 한계온도에 대한 문제점이 있다[2].

최근에 자동차에 대한 경량화는 연비효율과 배기가스에 대한 환경규제로 인하여 국제적으로 큰 관심을 일으키고 있다. 이와 같은 경량화에 대한 목적으로 알루미늄, 마그네슘 같은 비철금속의 적용이

1. 인하대학교 대학원

2. ㈜엠에스오토텍

Corresponding Author : Dept. of Mechanical Design, Inha Technical College, E-mail: dhjang@inhac.ac.kr

확대되고 있으며 최근에는 상대적으로 높은 비강도를 갖고 있는 섬유강화 복합소재에 대한 적용도 활발하게 연구되고 있다[2, 3]. 그러나 아직까지는 철강소재와 비교하여 적용소재에 대한 높은 원가와 생산공정의 난이도 문제로 인하여 자동차 완성차 메이커에서 광범위하게 상용화되고 있지는 못하고 있는 실정이다.

박육형 구조물(thin-walled structure)은 충격과 충돌 상황에서 안전성을 높이고 에너지를 흡수할 수 있는 효율성의 목적으로 자동차 산업뿐만 아니라 다양한 산업분야에서 활용되고 있다. 최근에는 자동차 범퍼, 차체 프레임뿐만 아니라 지지대(pillar) 등에 압축에 의한 튜브형 구조물(tubular structure)이 많이 적용되고 있다. 이러한 이유로 현재까지 자동차 도어 사이드 임팩트 빔에 대해 주로 튜브형 빔(tubular beam)이 보편적으로 적용되어 왔다[4]. 따라서 이러한 튜브형 빔에 대해 다양한 단면형상과 두께에 대한 하중특성, 비선형 굽힘거동 특성, 이론적 또는 실험적인 에너지 흡수 특성들에 대한 많은 연구가 진행되어 왔다[5~7]. 그러나 현재까지 프레스 박판성형이 가능한 판재형(sheet type) 사이드 임팩트 빔을 이용하여 측면충돌 성능을 향상시키기 위한 구조적 보강기술에 관한 연구는 거의 없는 실정이다.

본 논문에서는 자동차 도어에 대한 경량화를 위하여 굽힘저항이 향상된 판재형 사이드 빔을 제안하였다. 제품개발을 위하여 도어의 디자인 자유도를 향상시키기 위한 사이드 빔에 대한 개념설계를 수행하였다. 설계에 대한 적합성을 검증하기 위하여 유한요소해석에 의한 굽힘 저항특성을 검토하였으며 해석결과를 이용하여 상세설계에 반영하였다. 전면 도어의 사이드 임팩트 빔에 대한 시제품을 제작하여 도어모듈에 조립하고 요구되는 성능에 대한 평가를 위하여 옆문 강도시험을 수행하였다.

2. 사이드 임팩트 빔 초기설계

2.1 사이드 임팩트 빔 개요

자동차의 범퍼나 지지대 등을 보강하는 일반적인 방법은 리브(rib)를 이용하는 것으로서 구조물에 대한 강성을 증대시키고 변형을 억제하는 역할을 한다. 따라서 사이드 임팩트 빔에 대해서도 다양한 형상의 리브를 적용하여 두께와 적용하는 소재에 변화에 따른 변형특성을 연구가 진행되어 왔다[8].

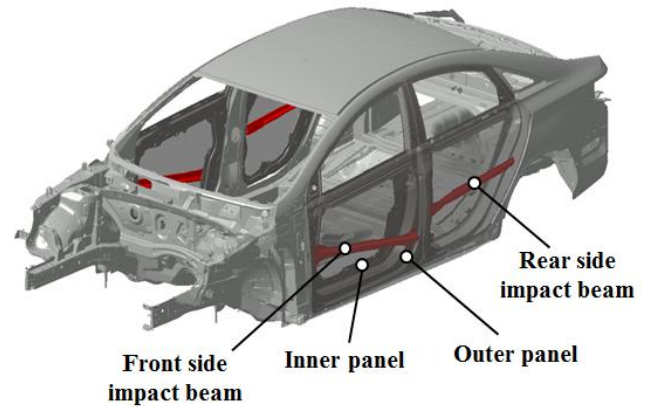


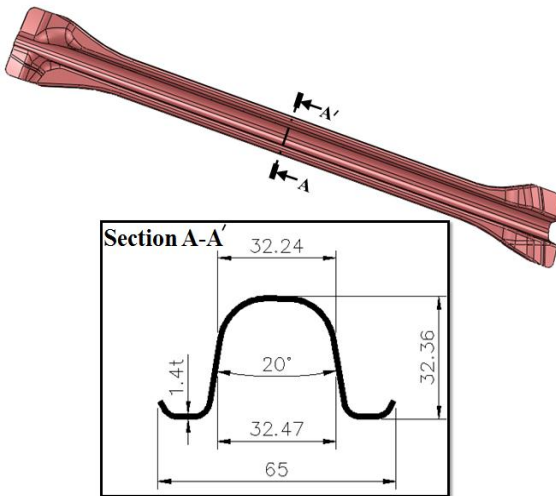
Fig. 1 Shape and mounting configuration of the side door impact beams

Fig. 1은 자동차 차체에 조립된 사이드 임팩트 빔에 대한 형상을 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 외판(outer panel)과 내판(inner panel)으로 구성되어 있는 도어의 구조물에 대해 사이드 임팩트 빔은 내판의 경계면 사이에서 횡방향으로 조립된다. 이러한 사이드 임팩트 빔은 일반적으로 전면 도어(front door)나 후면 도어(rear door)가 유사한 형상으로 되어 있으며 용접이나 볼트체결을 이용하여 적용된다. 따라서 사이드 임팩트 빔은 외부에 노출되지 않기 때문에 외관 표면품질에 대한 제약이 작고 상대적으로 설계 자유도가 높은 특징이 있다. 최근에 측면충돌에 대한 충격으로부터 탑승객을 보호하기 위하여 측면 에어백 등의 기능이 추가되고 있으나 일차적인 보호장치는 사이드 임팩트 빔이다.

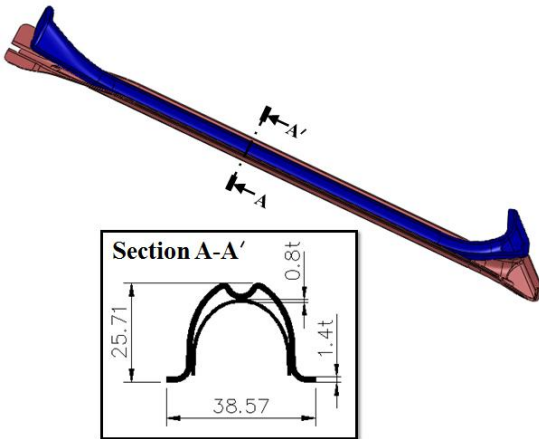
2.2 개념설계

자동차 사고에서 측면충돌은 탑승객에 대한 치명적인 상해와 사망률 증가의 주요한 요인중의 하나로 알려져 있다. 이러한 측면충돌은 일반적으로 두 가지 형태로 구분할 수 있는데 하나는 기둥(pole)에 의한 것과 다른 하나는 차대차(side to side car)에 의한 것으로 원형의 기둥과 대차(barrier)를 이용하여 정적 또는 동적 안전성을 평가한다. 현재 세계의 주요 자동차 완성 메이커 회사에서는 이러한 측면충돌에 대한 탑승객의 안전성을 평가하기 위하여 유럽 NCAP(New Car Assessment Program)이나 북미의 FMVSS(Federal Motor Vehicle Safety Standards)에서 제정된 법규에 따라 시험을 수행한다[8].

일반적으로 자동차 차체의 측면 구조물은 다수의



(a) Front side impact beam and section view



(b) Rear side impact beam and section view

Fig. 2 The 1st proposed side impact beam

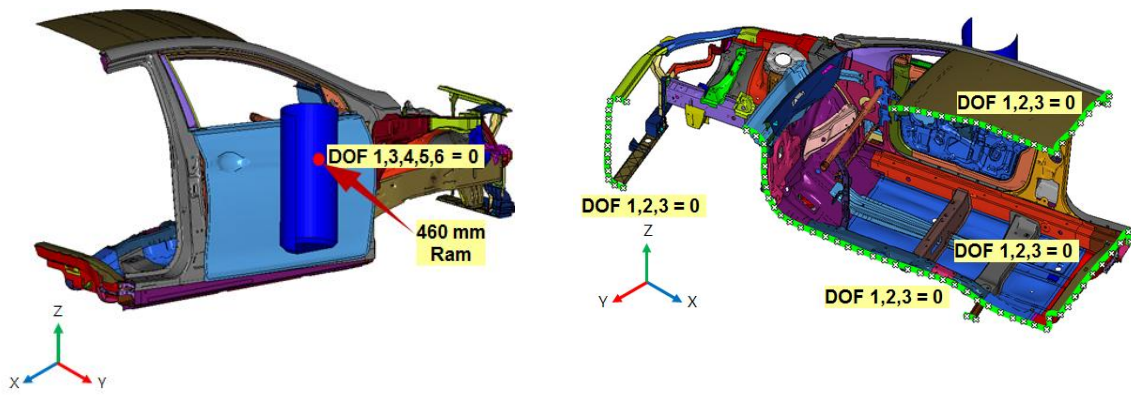
판재와 부재로 구성되어 있기 때문에 강성측면에서 전면에 있는 범퍼보다 상대적으로 취약하다. 이러한 원인은 구조적으로 보강할 수 있는 디자인 공간이 부족하고 특히 도어의 강성을 보강할 수 있는 보강 구조물이 부족하기 때문이다[8]. 이와 같은 구조물에 대해 차체의 변형에 대한 안전도를 향상 시키기 위하여 핫 스탬핑(hot stamping) 공법이 많이 적용되고 있다. 핫 스탬핑 기술은 고온의 보론강을 이용하여 성형하는 기술로서 연신율이 대폭 증가하여 성형성이 뛰어나고 소재에 대한 고강도화를 달성할 수 있다는 장점이 있다[9].

본 논문에서는 자동차 도어에 대한 경량화를 위

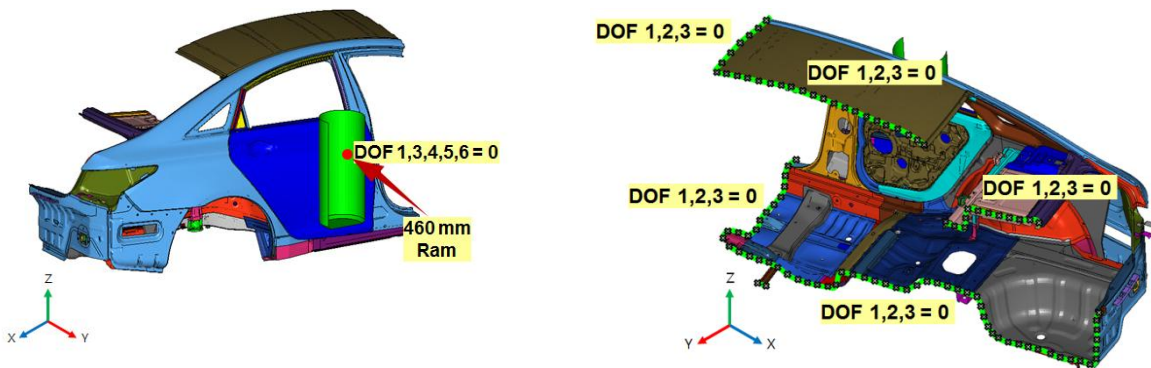
하여 기존에 냉연강판인 STDE980 소재를 적용한 중량 1.983kgf와 1.490kgf의 전/후면 튜브형 사이드 임팩트 빔에 대해 단면설계를 통하여 Fig. 2와 같이 프레스 성형이 가능한 판재형으로 각각 변경하였다. Fig. 2(a)에서와 같이 1차 설계 단계에서 전면 도어의 사이드 임팩트 빔은 두께 1.4mm의 굴곡형상의 개방형 형상을 적용하였다. 후면 도어에서는 전면 도어 대비 상대적으로 단축된 도어의 형상을 고려하여 Fig. 2(b)와 같이 두께가 각각 1.4mm와 0.8mm로 되어 있는 두 개의 개방형 판재가 겹치는 구조로 구성하였다. 제조원가의 급격한 상승을 방지하고 강성을 확보하기 위해서 기존에 적용된 철강소재를 유지하면서 핫 스탬핑 공법으로 성형이 가능한 보론강 SABC1470 소재를 이용하였다. 적용되는 대상차종은 국내 완성차 메이커의 중형급 양산모델이며 전면과 후면 도어에 동일하게 적용하였다. 설계된 사이드 임팩트 빔에 대한 안전도에 대한 적합성을 검증하기 위해서 북미의 FMVSS 214 정적 시험법규를 이용하여 굽힘 저항력에 대한 평가기준을 적용하였다 [10]. Table 1은 각각 전면과 후면도어에 대해 옆문 강도시험에서 FMVSS 214 법규에 규정된 굽힘 저항력을 나타낸 것이다. 표에서와 같이 승용차량에서는 시트가 장착되어 있지 않을 경우 초기, 중기, 최대 변위에 대해 제시된 굽힘 저항력의 100%를 만족하면 법규를 통과하는 것으로 되어 있다. 그러나 국내 완성차 메이커에서는 시험오차와 탑승객의 안전도를 고려하여 법규에서 제시된 초기와 중기변위에 대한 굽힘 저항력보다 1.2배(120%)의 높은 값으로 시험기준을 제시하고 있다. 그리고 최대변위에 대한 굽힘 저항력은 법규에 제시된 100% 값을 만족하는 것으로 적용하고 있다. 따라서 본 논문에서는 정적 옆문 강도시험에서 초기와 중기변위에서는 120%, 최대변위에서는 100%의 굽힘 저항력에 해당하는 값을 이용하여 사이드 임팩트 빔에 대한 적합성을 검증하였다.

Table 1 Static test for side impact protection[10]

Displacement (mm)	100% bending resistance load(kgf)	120% bending resistance load(kgf)
Initial(155)	1,020	1,224
Intermediate(310)	1,580	1,896
Peak(460)	3,160	-



(a) Boundary conditions of front side impact beam



(b) Boundary conditions of rear side impact beam

Fig. 3 FE analysis for the static-side impact protection(FMVSS 214)

3. 유한요소 해석기반 설계변경

3.1 해석조건

현재까지 튜브형 구조물에 대해 순수 굽힘 응력 상태에서 직경과 두께의 변화에 따른 모멘트 특성을 이론적으로 예측하는 많은 연구가 진행되어왔다. 또한 유한요소법을 이용한 모의실험을 통해 이러한 구조물에 대한 변형특성을 분석하고 이를 통해 박육형 구조물에 대해서도 수치해석적 방법을 적용하여 하중특성을 효율적으로 예측할 수 있는 것으로 알려졌다[4].

본 논문에서는 설계된 사이드 빔에 대한 적합성을 평가하고 설계변경에 반영하기 위하여 유한요소법에 의한 옆문 강도해석을 수행하였다. 이러한 옆문 강도해석은 도어의 측면변형에 대한 기본적인 강도특성을 평가하는 필수적인 범규항목이다. Fig. 3은 옆문 강도해석에서 전면과 후면도어에 적용된

경계조건을 각각 나타낸 것이다. Fig. 3(a)에서와 같이 전면 도어에 대한 옆문 강도해석에서는 도어를 차체 구조물(body-in-white)에 장착한 후에 해석의 효율성을 위해서 차체 구조물의 대칭방향으로 절단하고 모든 방향에 대한 병진운동(translate motion)을 구속하였다. 하중조건은 FMVSS 214 시험방법에 따라 사이드 임팩트 빔이 조립된 도어에 대해 강체(rigid body)로 설정된 램(ram)을 차체의 횡방향으로 460mm 까지 가압하였다. 이때 램에 발생하는 반력(reaction force)을 준정적 문제(quasi-static problem)로 가정하여 사이드 임팩트 빔에 대한 굽힘 저항력으로 계산하였다. 후면도어에 대한 해석조건은 Fig. 3(b)와 같으며 경계조건과 가압조건은 전면 도어의 경우와 동일하게 설정하였다. 해석에 사용된 차체 구조물에서 각각의 부재들과 판재들의 용접조건들에 대한 영향은 무시했으며 모든 차체 구조물의 구성요소들을 강체요소(RBE2)로 결합하는 일반적인 방법을 사용

Table 2 Material properties for SABC1470[11]

Properties	Value
Tensile strength(MPa)	1,470
Yield strength(MPa)	996
Elongation(%)	6

Table 3 Simulation results for the 1st front side impact beam design

Displacement (mm)	Bending resistance load(kgf)	Result
Initial(155)	865.5(84.8%)	Fail
Intermediate(310)	2,107.4(133.4%)	Pass
Peak(460)	3,122.3(98.8%)	Fail
Weight	1.347kgf(32.1% weight reduction)	

하였다. 유한요소모델링에서 쉘 격자망(shell mesh)을 사용하였으며 전/후처리와 해석을 위해서 상용프로그램인 HyperMesh와 Nastran을 각각 사용하였다. 해석에 사용된 SABC1470에 대한 물성조건은 Table 2와 같다[11].

3.2 전면 도어 해석결과 및 설계변경

Table 3은 1차 설계단계에서 적용된 전면 도어의 사이드 임팩트 빔에 대한 옆문 강도해석 결과와 모델에 대한 기존 양산모델 대비 경량화율을 나타낸 것이다. 표에서 알 수 있듯이 옆문 강도에 대한 굽힘 저항력이 중기변위를 제외하고 초기와 최대변위에 대한 굽힘 저항력에서 모두 범규 기준을 만족하지 못하여 단면에 대한 설계변경이 필요하게 되었다. 변형된 형상에 대한 분석결과 Fig. 4와 같이 개방형 구조로 인하여 가해진 하중으로 중심에서 양방향으로 인장되어 벌어지는 현상이 발생하였다. 따라서 Fig. 5와 같이 단면에 대한 개방형 구조를 폐쇄형 구조로 변경하였으며 판재의 두께를 1.6mm로 증가시키고 사이드 임팩트 빔의 중앙 굴절부에 두께 1.4mm의 보강재를 추가하였다. 이러한 설계변경에 따라 옆문 강도해석을 수행한 결과 Table 4와 같이 모든 경우에 대해 범규 기준을 만족하였다. 그러나 1차 설계모델과 비교했을때 중량이 42.2% 증가하고 기존 양산모델과 비교하여도 경량화율이 미비하여

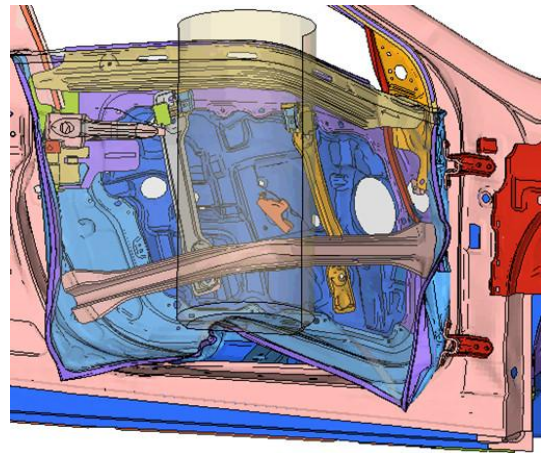


Fig. 4 Deformation pattern for the front side impact beam

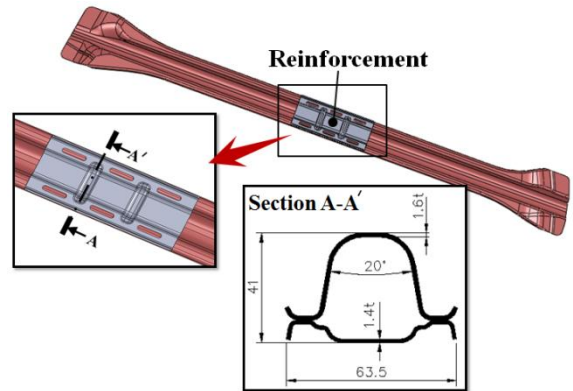


Fig. 5 The 2nd proposed front side impact beam and section view

Table 4 Simulation results for the 2nd front side impact beam design

Displacement (mm)	Bending resistance load(kgf)	Result
Initial(155)	1,227.8(120.4%)	Pass
Intermediate(310)	2,581.7(163.4%)	Pass
Peak(460)	3,500.2(110.8%)	Pass
Weight	1.915kgf(3.4% weight reduction)	

개선목적이 부합하지 않아서 추가적인 설계변경이 필요하게 되었다. Fig. 6은 최종적으로 설계변경된 전면 도어의 사이드 임팩트 빔과 단면에 대한 형상을 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 2차 설계와 비교하

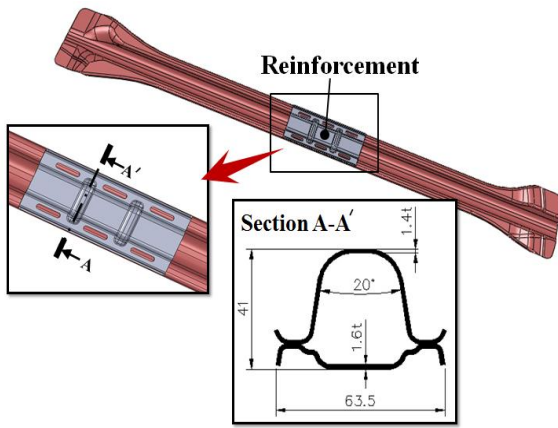


Fig. 6 The final proposed front side impact beam and section view

Table 5 Simulation results for final front side impact beam design

Displacement (mm)	Bending resistance load(kgf)	Result
Initial(155)	1,400.4(137.3%)	Pass
Intermediate(310)	2,998.1(189.8%)	Pass
Peak(460)	3,740.0(118.4%)	Pass
Weight	1.537kgf(22.5% weight reduction)	

여 기본적인 판재의 두께는 1.4mm로 감소시키고 구조적으로 굽힘 저항력에 영향을 많이 주는 것으로 판단된 중앙 굴절부의 보강재는 1.6mm로 두께를 증가시켰다. 이와 같은 최종적인 전면도어에 대한 사이드 임팩트 빔의 옆면 강도해석결과 Table 5와 같이 모든 경우에 대해 만족하면서 2차 설계모델과 비교하여 전반적으로 굽힘 저항특성도 향상되었다. 또한 기존에 양산모델과 비교하여 중량이 22.5% 감소하여 경량화의 효과를 얻을 수 있었다.

3.3 후면 도어 해석결과 및 설계변경

Table 6은 1차 설계단계에서 적용된 후면 도어의 사이드 임팩트 빔의 모델에 대한 옆면 강도해석결과와 기존 양산모델 대비 경량화율을 나타낸 것이다. 표에서 알 수 있듯이 중기와 최대변위에서는 굽힘 저항력에 대한 법규기준을 만족하였으나 초기 변위에서는 목표값을 달성하지 못하였다. 변형된 형상에 대한 분석결과 특히 초기 굽힘저항에서 취약

Table 6 Simulation results for the 1st rear side impact beam design

Displacement (mm)	Bending resistance load(kgf)	Result
Initial (155)	1,067.9(104.7%)	Fail
Intermediate (310)	2,507.5(158.7%)	Pass
Peak(460)	3,199.5(101.3%)	Pass
Weight	1.046kgf(29.8% weight reduction)	

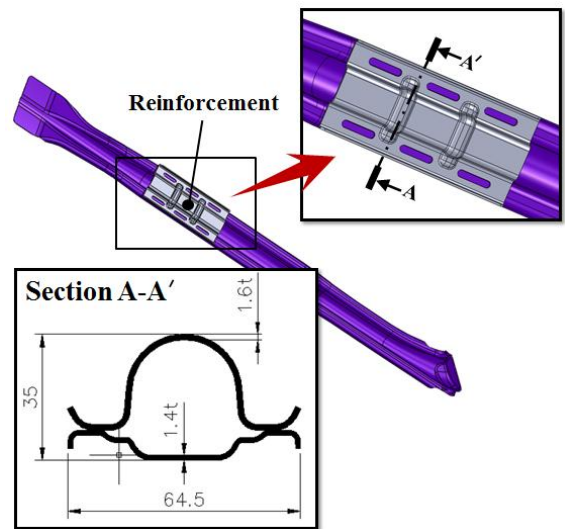


Fig. 7 The final proposed rear side impact beam and section view

Table 7 Simulation results for the final rear side impact beam design

Displacement (mm)	Bending resistance load (kgf)	Result
Initial (155)	1,374.6 (134.8%)	Pass
Intermediate (310)	2,822.8 (178.7%)	Pass
Peak (460)	3,636.6 (115.1%)	Pass
Weight	1.110kgf (25.5% weight reduction)	

한 것으로 판단되어 Fig. 7과 같이 전면 도어와 동일하게 폐쇄형 단면의 형상으로 변경하고 가장 변형이 극심한 부분에 보강재 구조물을 추가하였다. 이러한 설계변경에 따라 옆면 강도해석을 수행한 결과 Table 7과 같이 모든 경우에 대해 법규 기준을 만

족하였다. 또한 기존 양산에서 사용하고 있는 튜브형 사이드 임팩트 빔과 비교하여 25.5%의 경량화를 달성하였다. 이상과 같은 결과를 통해 도어의 사이드 임팩트 빔은 전면이나 후면이나 동일하게 개방형 구조로는 가압 하중에 의한 에너지를 용이하게 흡수할 수 없는 구조로 판단되었다. 또한 사이드 임팩트 빔의 구조물에서는 보강재의 역할이 지배적인 영향을 주는 것으로 보여진다.

4. 시제품 제작 및 평가

제안된 자동차 도어에 대한 판재형 사이드 임팩트 빔의 성형성과 조립성을 검토하기 위하여 판재와 보강재에 대한 시작금형을 각각 가공하였다. 보론강 SABC1470 블랭크는 고주파 가열로를 이용하여 5분간 733℃로 가열하였으며 이송시간은 8초이다. 성형을 위하여 300ton 유압프레스를 사용하였으며 슬라이드의 하강속도는 120mm/sec이고 성형에 소요된 시간은 20초이다. Fig. 8은 최종적으로 성형이 완료된 전면과 후면 도어에 대한 사이드 임팩트 빔에 대한 사진으로서 판재와 중앙 굴절부의 보강재는 레이저 용접을 이용하여 체결하였다. 완성된 시제품에 대해 육안으로 확인한 결과 표면손상, 국부 터짐, 주름 등과 같은 성형불량은 나타나지 않았다.

본 논문에서는 완성된 시제품의 성능에 대한 타당성을 검토하기 위하여 Fig. 9와 같이 상대적으로 설계변경의 난이도가 높았던 전면 도어에 대한 옆문 강도시험을 수행하였다. 그림에서와 같이 시험조건은 옆문 강도해석 조건과 동일하며 기존에 양산되고 있는 도어에 제작된 사이드 임팩트 빔을 조립하였다. 시험을 위하여 도어를 고정하기 위한 차체 구조물과 동일한 지그를 별도로 제작하고 미국 MTS사의 5ton 선형 유압 액츄에이터를 이용하여 1 mm/sec의 속도로 가압하여 시험을 수행하였다. Table 8은 전면 도어의 옆문 강도시험에 의한 굽힘 저항력을 나타낸 것으로서 모든 조건에 대해 범규기준을 만족하였으며 초기변위에서는 해석결과보다 상대적으로 성능이 우수한 것으로 나타났다.

5. 결론

본 논문은 기존 자동차 도어에 범용적으로 적용되고 있는 튜브형 사이드 임팩트 빔에 대해 경량화를



(a) Front side impact beam



(b) Rear side impact beam

Fig. 8 Photograph of prototype

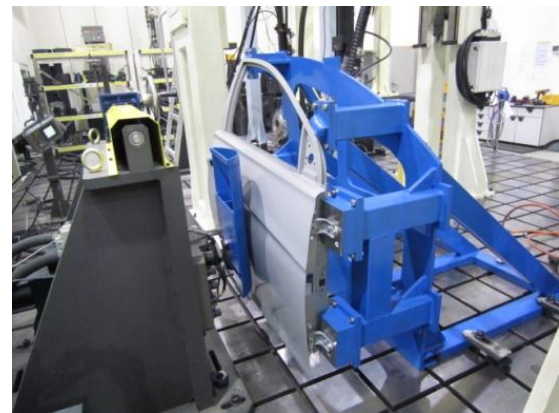


Fig. 9 Experimental set-up for static side impact protection test(FMVSS 214)

Table 8 Static test results for the front door assembly

Displacement (mm)	Bending resistance load (kgf)	Result
Initial (155)	1,952.7 (191.4%)	Pass
Intermediate (310)	2,708.0 (171.4%)	Pass
Peak (460)	3,642.8 (115.3%)	Pass

위하여 판재형으로 개선한 개발 프로세스에 관한 것이다. 이를 위하여 핫 스탬핑 공법으로 프레스 성형이 가능한 형상을 제안하였으며 수치해석결과를 이용하여 설계변경을 수행하고 시제품을 제작하여 성능을 시험하였다. 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 자동차 전면과 후면도어에 대한 판재형 사이드 임팩트 빔을 설계하고 안전성 평가를 위해 북미 FMVSS 214 정적 시험법규를 적용하여 수치해석을 수행하여 설계변경에 반영하였다.

(2) 판재형 사이드 임팩트 빔에 대해 개방형 구조는 굽힘 저항이 취약하며 폐쇄형 구조가 상대적으로 가압하중에 의한 에너지를 흡수하는 구조로 적합하다.

(3) 굽힘 저항력을 향상시키기 위하여 판재형 사이드 임팩트 빔의 구조물에서는 변형이 극심한 굴절 중앙부에 보강재의 추가가 효율적이며 전체적인 구조물의 강성에 많은 영향을 준다.

(4) 기존 튜브형 사이드 임팩트 빔과 비교하여 범규기준을 모두 만족하면서 판재형 전면 도어 사이드 임팩트 빔은 22.5%, 후면 도어의 경우는 25.5%의 경량화 효과가 각각 있었다.

(5) 핫 스탬핑 공법으로 제작된 전면 도어의 사이드 임팩트 빔에 대한 옆면 강도시험을 평가한 결과 요구되는 범규조건을 만족하였다.

(6) 향후에 저연비 차량개발을 위해 모노코크 차체의 기타 다른 구조물에 대해서도 판재형 구조물을 이용한 적용 가능성이 높을 것으로 판단된다.

후 기

본 논문은 산업통산자원부 우수제조기술센터사업에 의해 수행된 결과임.

REFERENCES

- [1] D. H. Jang, 2011, Process Development for Automotive Hybrid Hood using Magnesium Alloy AZ31B Sheet, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 20, No. 2, pp. 160~166.
- [2] T. S. Lim, D. G. Lee, 2002, Mechanically Fastened Composite Side-door Impact Beams for Passenger Cars Designed for Shear-out Failure Modes, *Compos. Struct.*, Vol. 56, No. 2, pp. 210~221.
- [3] J. Zhou, B. Wang, J. Lin, L. Fu, 2013, Optimization of an Aluminum Alloy Anti-collision Side Beam Hot Stamping Process using a Multi-objective Genetic Algorithm, *Arch. Civ. Mech. Eng.*, Vol. 13, No. 3, pp. 401~411.
- [4] A. O. Ayhan, K. Genel, S. Eksi, 2012, Simulation for Nonlinear Bending Behavior and Geometric Sensitivities for Tubular Beams with Fixed Supports, *Thin Walled Struct.*, Vol. 51, pp. 1~9.
- [5] Y. Liu, M. L. Day, 2008, Bending Collapse of Thin-walled Circular Tubes and Computational Application, *Thin Walled Struct.*, Vol. 46, pp. 442~450.
- [6] F. Guarracino, 2003, On the Analysis of Cylindrical Tubes under Flexure: Theoretical Formulations, Experimental Data and Numerically by using Finite Element Method, *Thin Walled Struct.*, Vol. 41, pp. 127~147.
- [7] A. G. Mamalis, D. E. Manolacos, M. B. Ioannidis, P. K. Kostazos, 2006, Cylindrical Steel Tubes: Numerical Modeling, *Int. J. Crashworthiness*, Vol. 11, No. 1, pp. 37~47.
- [8] A. Ghadianlou, S. B. Abdullah, 2013, Crashworthiness Design of Vehicle Side Door Beams under Low-speed Pole Side Impacts, *Thin Walled Struct.*, Vol. 67, pp. 25~33.
- [9] D. H. Lee, T. J. Kim, J. D. Lim, H. J. Lim, 2009, Development of High Strength Steel Body by Hot Stamping, *Trans. Mater. Process*, Vol. 18, No. 4, pp. 304~309.
- [10] U.S Department of Transportation, 1992, National Highway Traffic Safety Administration Laboratory Test Procedure for FMVSS 214S (Static) Side Impact Protection, U.S Department of Transportation, Washington DC, pp. 1~36.
- [11] K. W. Nam, S. H. Park, J. S. Yoo, S. M. Lee, 2012, Analysis of Impact Characteristics of Bonded Dissimilar Materials for Center Pillar, *Trans. Kor. Soc. Mech. Eng.*, Vol. 36, No. 8, pp. 929~934.