

3점 굽힘 하중 해석을 통한 금속 판재형 도어 임팩트 단면형상 최적설계

김선용
울산과학기술대학교 기계공학부

Optimal Section Design for Metal Press Door Impact Beam Development by 3-Point Bending Analysis

Sun-Yong Kim
Department of Mechanical Engineering, Ulsan College

요약 금속 일체형 판재 도어 임팩트 빔 개발을 위해 단면 형상의 최적설계를 진행하였다. 기존의 도어 임팩트는 충격을 흡수하는 강관과 양쪽에 브라켓을 용접하여 자동차에 설치하는 구조로 이루어졌다. 하지만, 브라켓을 설치하기 위한 용접작업은 생산성을 떨어뜨리고 생산단가를 증가시키는 과정이다. 이러한 단점을 극복하기 위해 일체형 판재 도어 임팩트 빔의 개발은 반드시 필요한 공정이다. 본 논문에서는 일체형 판재 도어 임팩트의 단면 형상을 수치해석의 방법으로 제안하는 연구를 진행하였다. 외부 충격에 대한 반력 하중 및 생산성을 고려하여 엔지니어의 직관적인 설계 형상 6가지에 대하여 수치해석을 진행하였다. 객관적인 비교를 위해 3점 굽힘 하중 실험을 모사하는 유한요소해석을 진행하였다. 형상과 치수가 상이한 6가지의 단면 형상 중 최적의 형상을 선정하고, 상세 설계를 위해 단면형상의 높이와 폭의 치수를 변화시키며 해석을 진행하였다. 이를 통해, 일체형 판재 도어 임팩트의 최적의 단면 형상을 제안하였다.

Abstract A case study was performed in order to develop well-designed of thin plate door impact beam. The conventional impact beam was consisted of steel-pipe welded two brackets on the both side, which causes low productivity and high cost. In order to overcome those disadvantage, it is necessary to develop a new type of door impact; thin plate impact beam. The thin plate impact beam was not needed a welding procedure, which can lead low cost and high productivity. In order to maximally resist from an external force, the cross-section design should be well designed. 6 different cross-section design were proposed based on engineer's experience. Three point bending test was simulated those 6 different impact beam and compared the reaction forces. Among them, one case was chosen and redesigned for detail design.

Keywords : Side Impact, Press Door Impact, Three Point Bending Simulation, Contact Analysis, Johnson-Cook Model

1. 서론

자동차용 도어 임팩트 빔(door impact beam)은 주행 중 측면의 충격으로부터 승객을 안전하게 보호하고,

차량피해를 최소화하기 위한 목적으로 인사이드 패널과 아웃사이드 패널 사이에 가로방향으로 설치되는 보강재 품이다(Fig. 1). 이러한 임팩트 빔은 승객의 안전과 직결되어 있으므로 관련법규가 있으며 대표적으로 북미

본 논문은 한국산업단지공단을 통하여 지원된 산업통상자원부 생산기술사업화 지원사업 현장맞춤형 기술개발(RUS18008)부분 사업비에 의하여 수행되었음.

*Corresponding Author : Sun-Yong Kim(Ulsan College)

email: sykim2@uc.ac.kr

Received April 23, 2019

Accepted July 5, 2019

Revised June 7, 2019

Published July 31, 2019

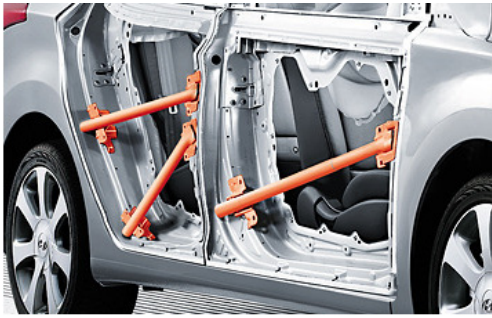


Fig. 1. The location of impact beam for an automobile [2]



(a) 2-bracket welded type



(b) 3-bracket welded type

Fig. 2. The current-production of impact door beam

NHTSA와 유럽의 ECE가 있다. 또 다른 북미의 대표적인 측면충돌(side impact) 법규로 FMVSS 214D가 있다. 이러한 법규를 만족시키기 위해서는 도어 임팩트는 충분한 굽힘 강도(bending strength) 확보가 요구되어진다.

현재 널리 사용되는 도어 임팩트 빔의 제작방법으로 Fig. 2. (a)와 같이 충격흡수 역할을 하는 스틸(Steel) 강관과 양쪽 끝에 브라켓을 용접하여 설치하는 것이 보통이다. 하지만, 충돌 법규 규제에 대한 대응책의 중요성이 커짐에 따라 Fig. 2. (b)와 같이 3개의 브라켓을 장착하여 도어 임팩트 빔이 개발 및 생산되고 있다. 충돌 법규의 대응 및 설치를 위해 브라켓 수를 증가시키는 것은 생산성이 떨어지게 되며, 생산 비용을 증가시키게 된다.

이러한 단점을 극복하기 위해 임팩트 빔과 브라켓을 일체형으로 제작할 수 있는 프레스 도어 임팩트 빔 (press door impact beam) 방식이 제안되었다[1, 3].

하지만, 굽힘 강도 및 중량의 증가 문제로 아직까지 양산 적용에는 극히 제한적이다[3, 4].

이러한 단점을 극복하기 위해, 일체형 도어 임팩트 빔의 최적형상 및 경량화를 위한 설계 치수 최적화를 위해 많은 연구가 진행되었다. 참고문헌 [1]에서 단면의 포밍 개수, 단면 사이즈 및 두께 변환에 따른 분석을 하였다. 단면의 높이는 높을수록 굽힘 강도는 증가하는 경향이였으나, 폭의 변화는 일정한 값 이상에서는 오히려 굽힘 강도가 낮아짐을 알 수 있었다. 또한, 자동차의 중량저감을 위해 알루미늄 도어 임팩트빔의 측면충돌 성능을 향상시키기 위해 단면 형상과 설계 치수를 최적화하였다. 참고문헌 [4]에서는 중공형 임팩트 빔의 내부의 형상을 최적화 하여 유한요소해석을 통해 예측하고, 실차적용을 통해 검증을 하였다.

본 연구에서는 일체형 프레스 임팩트 도어 빔 개발을 위한 단면 형상을 굽힘 강도의 설계자 및 생산성을 고려한 제작 관점에서의 융합적으로 고려하여 6가지의 일체형 프레스 도어 임팩트 빔의 형상을 제안하였다. 기존의 양산품으로 적용되고 있는 외경 34.0mm, 두께 2.0mm 강관 임팩트 빔의 굽힘 강도를 기준으로 일체형 프레스 도어 임팩트 빔의 강도를 비교 분석하였다. 이를 위해 유한요소해석(FEA)를 통해 성능을 비교 분석하였다. 제안한 단면 형상에 대한 검증은 3점 굽힘 해석을 통해 각 단면에 따른 하중을 비교하였으며, 최적의 단면 형상을 도출하였다. 유한요소해석을 위한 전처리(Preprocessor)를 수행하기 위해 Hypermesh를 사용하였으며 솔버(Solver)를 위해 RADIOSS[5]를 사용하였다.

2. 일체형 임팩트 빔 설계

2.1 유한요소해석 조건

강관형 구조물에 대한 굽힘 응력에 대한 유한요소해석을 이용한 해석적 검증에 관한 많은 연구가 진행되었다. 본 논문에서는 최적의 단면 형상을 제안하기 위해 3점 굽힘 해석[1, 3]을 진행하였다. Fig. 3.은 3점 굽힘 해석 모델을 나타낸다. 본 모델의 구성은 추후 3점 굽힘 실험을 고려한 모델임을 밝혀둔다. 지름 60mm인 강재 롤 2개를 400mm 간격으로 고정시켜두었으며, 동일한 지름을 가진 헤드(Head)을 8.3mm/s의 속도로 수직 이동시켰으며, 경계조건으로 헤드에 부과된 변위(imposed displacement)를 시간의 함수로 선정하였다. 참고로 강

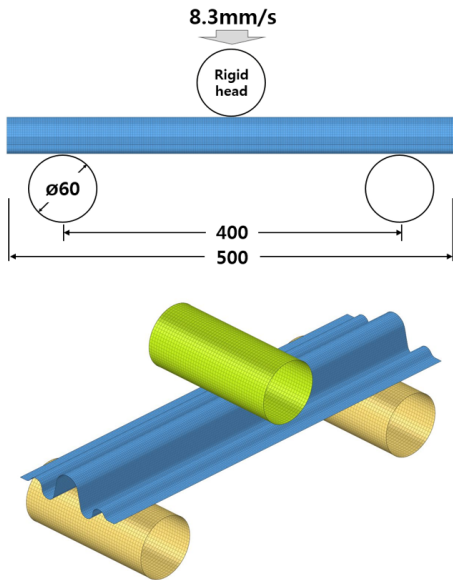


Fig. 3. Three point bending analysis model

체 임팩트의 속도는 0.16 mm/s ~ 120 mm/s [1,6] 수준으로 참고문헌 마다 다양하게 적용되었다. 헤드의 변위는 수직방향의 이동(translation)을 자유(free)로 두고, 나머지 자유도는 구속조건으로 고려하였다. 헤드와 강관 또는 일체형 도어 임팩트 빔 사이에는 접촉(contact)조건을 고려하였으며, 도어빔의 단면형상과 지지부 또한 접촉으로 선정하였다. 접촉의 조건을 정의하기 위해 접촉해석을 위해 가장 널리 적용되는 RADIOSS[5]에서 접촉 TYPE 7 CONTACT 조건을 선택하였으며, 마찰계수는 0.15으로 정의하였다.

해석에 적용된 재료에 대한 물성 모델은 RADIOSS에서 제공하는 물성모델인 존슨-쿡(Johnson-Cook) 모델을 사용하였으며 임팩트 도어 빔에 적용하였다. 일반적으로 존슨-쿡 모델은 금속재료의 판재의 변형률을 효과를 고려할 수 있는 모델로, 재료연화에 영향을 주는 큰 범위의 변형률에 의한 요소손실(Failure of element)등의 모사가 가능하며, 존슨-쿡 모델은 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$\sigma = a + b\epsilon^n \quad (1)$$

여기서, σ 는 유효 응력(Effective stress), ϵ 는 유효 소성변형률(Effective plastic strain), a 는 항복응력

Table 1. Material properties of impact door beam

E(GPa)		210
ν		0.3
$\rho(\text{kg/m}^3)$		7850
Strain hardening	a(MPa)	400
	b	450
	n	0.3
Failure Johnson	D_1	0.2
	D_2	0.3
	D_3	-2.0

(Plastic yield stress), b 는 변형률 경화상수(Plastic hardening parameter), 그리고 n 은 변형률 경화지수(Plastic hardening exponent)이다. 존슨-쿡 모델에서 요소손실은 누적 손상법칙에 따라 발생하며 식 (2)로 표현 할 수 있다.

$$D = \sum \frac{\Delta\epsilon}{\epsilon_f} \quad (2)$$

여기서, $\epsilon_f = [D_1 + D_2 \exp(D_3\sigma^*)]$ 로 나타낼 수 있고, σ^* 는 유효응력에 의한 일반화된 평균응력, D_1, D_2, D_3 는 파괴상수이다. 존슨-쿡 모델에서 온도연화관련 상수는 존재하나, 본 연구에서는 온도에 대한 영향은 무시하였다. 본 연구에서 적용한 재료의 물성값과 존슨-쿡 모델의 파라미터들은 Table 1에 표현하였다. 재료의 물성에 대한 독립성을 보장하기 위해 재료는 모든 조건에서 동일하게 적용되었다.

2.2 임팩트 도어 빔 단면 형상

기존 강관형태는 원형 단면으로 외경 34.0mm에 두께는 2.0mm로 양쪽에 브라켓이 용접되어 있다. 양쪽에 조립되는 브라켓의 폭은 115mm에 최대 높이는 강관형 도어 빔 반지름에 해당하는 17mm로 설계되어 있다. 기존의 도어 빔과 브라켓으로부터 일체형 임팩트 도어빔의 설계영역(design domain)을 설정할 수 있다. 최대 폭은 브라켓의 최대 폭과 동일한 115mm으로 고려하였으며, 높이는 강관의 외경인 34mm로 고려하였다. 주어진 설계영역에서 엔지니어의 직관과 경험에 의하여 5가지 모델과 참고문헌[1, 2]을 기반으로 1가지 모델, 총 6가지 모델에 3점 굽힘 해석을 진행하였다. 제안하는 6가지 모델에 대해서는 Fig. 4.에 나타내었다.

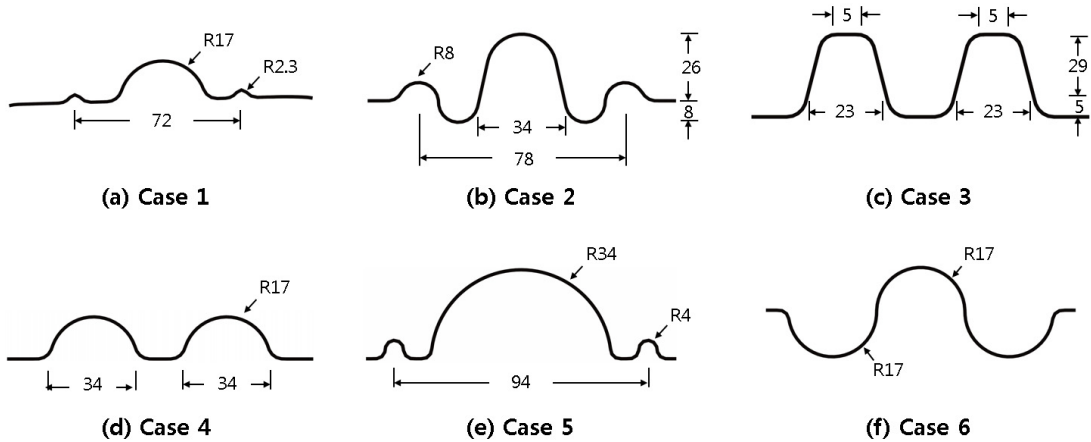


Fig. 4. The cross-section shape of the proposed impact beam

본 연구에서는 기본적인 단면형상은 수직방향 힘을 효과적으로 분산시키는 아치형(arch) 형상을 기반으로 하였다. Fig. 4. (a)는 첫 번째 단면 형상(Case 1)으로, 기존의 강관 형상에 굽힘에 잘 견딜 수 있게 날개 부분에 약간의 피크 형상을 주어 단면을 선정하였다. 두 번째 단면 형상(Case 2)으로 강관의 최대 직경의 설계 영역을 최대한 살려 높이 34mm의 아치 형상으로 설계 하였으며, 굽힘 강도를 극대화하기 위해 양쪽에 반지름 8mm의 반원 형상을 기준라인 위/아래 위치시켰다. 세 번째 단면 형상(Case 3)으로 참고문헌[1, 3]을 기반으로 설계 하였다. 사다리꼴 형상으로 포밍의 개수 변화에 대해서는 포밍수 1~3중 2개의 굽힘 강도가 가장 우수한 것으로 알려져 있다[1]. 이와 같이, 본 연구에서 포밍수 2개를 기반으로 치수를 선정하였다. 네 번째는 아치 형상의 개수를 2개로 하여 단면 형상(Case 4)을 정의해 보았다. 다섯 번째는 첫 번째의 형상의 기반에서 아치형상의 지름을 가능한 최대한 크게 하였으며, 양쪽의 날개 부분의 반지름을 4mm로 단면 형상(Case 5)을 고려하였다. 마지막으로 기준라인에서 반지름 17mm 위/아래로 엇갈리게 하여 단면 형상(Case 6)을 고려하였다.

유한요소해석은 헤드의 수직거리(-z방향) 기준으로 750mm 움직였을 때 까지 진행하였다. 접촉조건으로 헤드에 부과되는 반력(Reaction force)을 계산하여 비교하였다. 여기서 기존 강관형 도어빔의 두께는 2.0mm이고, 제안한 일체형 도어빔의 두께는 1.2mm으로 선정하였다.

3. 임팩트 빔 수치해석

3.1 다양한 단면 형상 수치해석

앞 절에서 제안한 6가지 단면 형상에 대한 반력 계산 결과를 Fig. 5.에 나타내었다. 기존 강관형 임팩트 도어 빔 최대하중의 크기는 $9.88E+03[N]$ 으로 계산되었으며, 일정시간 이후부터는 급격히 하중의 크기가 낮아짐을 알 수 있었다. 하중이 가해지는 초기부터 반력의 기울기는 급격히 증가하여 헤드의 변위가 약 20mm 수직 하강하였을 때, 최대 반력의 크기 나타남을 알 수 있었다. 다양한 단면 형상을 기반으로 3점 굽힘 하중 해석결과에서 두 가지 관점에서 주위 깊은 고찰이 필요하다.

첫 번째, 초기에 헤드 변위와 반력의 기울기점에서 보면, 상대적으로 Case 1, 4 & 5의 기울기가 완만한 것으로 보이며, Case 2 & 3의 기울기가 급격한 것으로 나타나 있다. 이는 헤드가 수직 하강하면서 버팀목 역할을 하는 부분의 기울기와 관련이 있어 보인다. 즉, Case 1, 4 & 5와 같은 경우는 완만하게 원주 곡선으로 단면 형상이 이루어져 있으나, Case 2 & 3의 단면 형상은 수직하중에 버팀목 역할을 할 수 있는 구조로 설계되어 있음을 알 수 있다. 3점 굽힘 하중 해석에서 단면 형상에 수직 방향의 주요 하중임으로 이에 잘 견딜 수 있는 설계가 중요함을 알 수 있었다.

두 번째, 기존 강관 임팩트 빔과 Case 3의 경우 최대 반력의 크기는 상대적으로 높은 편이지만, 최대 하중이후 헤드의 변위에 따라 급격하게 반력의 크기가 낮아짐을 알 수 있다. 반면, Case 1, 2 & 5의 경우 최대하중 이후

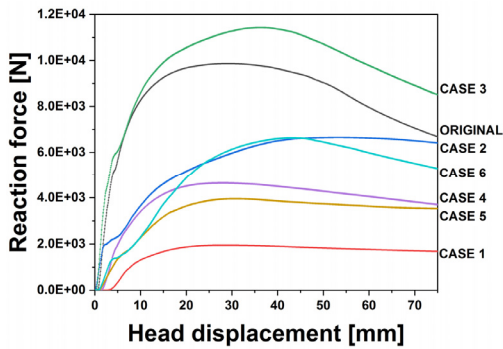


Fig. 5. Reaction forces of the various type of profiles and the original case

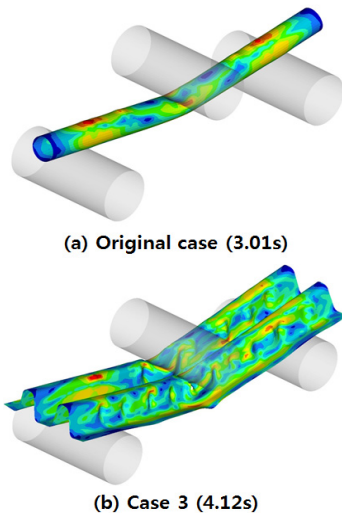


Fig. 6. Von Mises Stress contour at the maximum reaction force

헤드의 변위가 변함에도 불구하고 최대하중을 지속적으로 유지함을 알 수 있었다. 이는 아치형상의 특징으로 수직하중을 수평추력으로 단면 형상 전체에 골고루 잘 분산시키는 것으로 판단이 된다.

다양한 형상별 해석결과를 바탕으로 기존 강관형 도어 빔 대비 포밍수 2개의 사다리꼴 단면 형상의 일체형 도어빔의 반력이 약15.6% 가량 우수한 것으로 유한요소해석 결과 알 수 있었다. 이는 기존의 참고문헌[1]과 상이한 결과이다. 참고문헌 [1]에서는 기존의 강관과 일체형 도어 임팩트 빔의 무게를 비교하였다. 하지만, 본 연구에서는 강관 및 양쪽 브라켓의 무게를 고려한 전체 어셈블리 상태에서의 무게를 기준으로 하였기에, 일체형 도어 임팩

트 빔의 폭과 포밍 개수를 충분히 여유를 가지고 설계를 할 수 있기 때문에 참고문헌 [1]과 상이한 결과가 도출되었음을 알 수 있었다.

Fig. 6. (a)는 기존 도어 임팩트 응력 분포를 헤드가 8.3m/2의 속도로 3.01초 수직 하강 하였을 때의 응력 분포도를 나타낸 것이다. 즉, 최대 반력 하중을 유지할 때의 응력 분포도 이다. 최대 응력은 헤드 및 받침대 부분에서 높게 나타남을 알 수 있었다. 또한, Fig. 6. (b)는 6가지의 단면 형상 중 반력하중이 가장 높게 나온 Case 3의 최대 반력 하중을 유지할 때의 응력분포도 이다. 기존의 강관 형태와 비슷하게 헤드 및 받침대 부분에서 비교적 높은 응력 분포도를 보이지만, 전체적으로 응력이 골고루 분포됨을 알 수 있어, 하중을 골고루 받고 있음을 알 수 있다.

3.2 단면 형상 파라메트릭별 수치해석

비록 Case 3의 단면 형상을 적용하여 기존 강관보다 우수한 성능을 보임을 알 수 있지만, 폭과 높이의 치수를 변환하면서 파라메트릭 해석을 통해 최적의 설계(안)을 제안하고자 한다. 치수변환에 관한 자세한 정보는 Fig. 6에 나타내었으며, 그 결과를 Fig. 7에 표현하였다.

기존 Case 3의 폭은 23mm이며, 높이는 29mm로 폭은 고정시키고, 높이를 각각 23mm(Type A)와 18mm(Type B)로 변경시켜 반력을 계산하여 보았다. Fig. 7.은 반력 결과를 나타낸 그래프이다. Case 3, Type A 와 Type B의 결과를 비교한 결과는 폭이 고정일 경우 높이가 높을수록 반력 하중이 크게 나타난 것을 알 수 있었다.

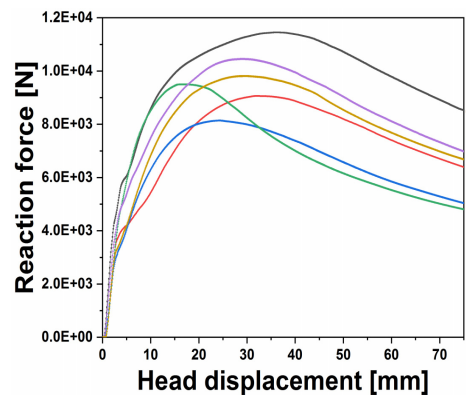


Fig. 7. Reaction forces for various width and height of Case 3

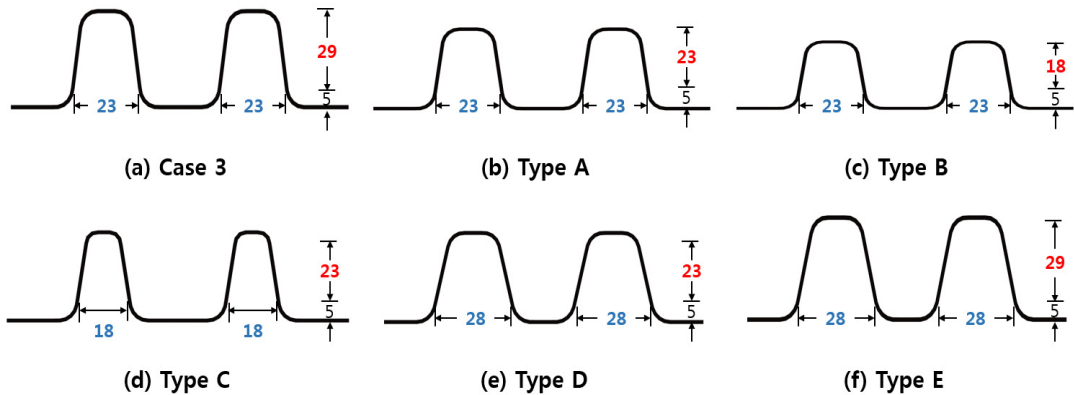


Fig. 8. A variety of different dimensions of Case 3: the changes of width and height of forming shape

이번의 경우는 높이가 일정할 때, 폭의 변화에 대해서 결과를 비교하여 보았다. Fig. 6.에서 Type A, Type C & Type D의 치수를 보면, 높이는 28mm로 일정하게 고정하고 폭의 치수를 각각 23mm, 18mm 그리고 28mm로 변화를 주었다. 그 결과 Fig. 7.과 같이 폭이 가장 넓은 Type D의 반력 하중이 가장 높게 나타남을 알 수 있었다. 하지만, 본 결과에서는 폭이 일정할 때 높이가 높을수록 반력하중이 높아지는 결과와는 상이하게 나타남을 알 수 있었다. Type A(폭:23mm)와 Type C(폭:18mm)의 결과에서 비록 Type A가 폭이 넓지만 최대 반력하중의 결과는 Type C보다 낮음을 알 수 있었다. 높이가 고정일 때 폭이 넓어짐에 따라 항상 반력하중이 높아지는 것은 아님을 알 수 있었다. 또한, 폭의 넓이에 따라 최대하중 이후의 반력하중의 낮아지는 기울기와 관계가 있음을 알 수 있었다. Fig. 6.에 나타낸 폭의 변화는 18mm, 23mm, 그리고 28mm로 3가지이다. 폭이 가장 좁은 18mm인 Type C의 경우 반력하중의 변화가 최대 반력하중 이후 급격하게 낮아지지만, 23mm 와 28mm의 경우 그 기울기 정도가 완만한 것을 알 수 있었다. 이는 특정 길이의 폭은 충격 에너지를 잘 분산시키는 것으로 판단된다.

폭의 변화를 통해 폭이 가장 넓은 28mm일 때의 반력하중이 높게 나타남으로 높이를 Type별 가장 높은 29mm로 선정하고, 폭도 가장 넓은 28mm로 고려하여 수치해석을 수행하였다. Type E에 대한 결과는 Fig. 7.에 나타내었으며, Type별 수치해석에서는 가장 높은 결과를 얻을 수 있었지만 Case 3보다는 92.1%수준의 최대 반력하중의 결과를 얻었다.

4. 해석결과 및 고찰

본 연구에서는 일체형 도어 임팩트 빔의 설계를 위해 다양한 단면 형상을 제안하고 수치해석을 통해 최적의 형상 안을 제안하였다. 기존 도어 임팩트 빔의 브라켓의 치수를 기준으로 단면 형상을 제안하였다. 그 이유는 일체형 도어 임팩트의 조립성을 고려하여야 하기 때문에 브라켓 치수 이상의 설계 영역은 조립성의 문제를 야기할 수 있기 때문이다. 단면 형상의 설계를 위해 엔지니어의 직관과 참고문헌들을 참고하여 6가지의 단면 형상을 제안하였으며, 수치해석을 통해 반력하중의 결과를 비교하였다. 다른 단면 형상에 비해 돔 형상의 단면 형상의 특징으로 최대 반력 하중 이후 반력 하중의 변화가 거의 없음을 알 수 있었다. 하지만, 2개의 포밍 단면 형상의 수치해석 결과가 가장 우수한 것으로 나타났으며, 기존의 강관 대비 약 15.6%가량 우수한 것으로 해석결과를 통해 알 수 있었다.

또한, 포밍 수 2개의 단면 형상에 대한 폭과 높이에 대한 반력 하중의 결과를 비교한 결과 높이는 높을수록 반력 하중이 비례하여 커짐을 알 수 있었다. 하지만, 폭 치수의 증가에 따라서는 반력 하중이 비례하여 커지는 것은 아님을 알 수 있었으며, 본 수치해석에서는 최적의 폭 치수를 선정하였다. 덧붙여, 좁은 폭의 경우는 최대 반력 하중 이후 반력하중의 크기가 급격히 낮아짐을 알 수 있었다. 승객의 안전을 위해서 최대 반력하중 뿐만 아니라, 최대 반력하중 이후의 반력하중 또한 충분히 고려되어야 한다.

5. 결론

기존의 도어 임팩트 빔은 강관의 형태로 양쪽에 브라켓을 용접하는 형태이다. 생산성 및 효율성을 위해 일체형 도어 임팩트 빔의 요구가 증대됨에 따라 새로운 도어 임팩트 빔의 설계는 반드시 필요하다. 기존의 도어 임팩트 빔의 굽힘 하중의 성능을 만족시키기 위해 최적의 단면 형상의 설계가 필요하며, 본 논문에서는 3점 굽힘 실험을 모사하는 수치해석을 수행하여 굽힘 하중의 성능을 비교하였다.

기존의 강관 형태에서 일체형 도어 임팩트 빔의 설계를 위해 포밍 수와 단면 형상의 최적설계가 이루어져야 한다. 다양한 포밍 수와 단면 형상을 제안하여 3점 굽힘 해석을 진행하였으며, 포밍 수 2개인 경우 기존의 강관 형태보다 약 15.6%가량 하중이 높음을 알 수 있었다. 또한, 포밍 수 2개의 형상에 높이와 폭을 변경하면서 결과를 비교하면서 최적의 형상조건을 제안하였다.

References

- [1] K. R. Jo and S. J. Kang, "The Section Design of Press Door Impact Beam for Improving Bending Strength", Transactions of KSAE, Vol. 25, No. 1, pp. 74-81, 2017. DOI: <https://doi.org/10.7467/KSME.2017.25.1.074>
- [2] <http://www.hani.co.kr/arti/economy/car/463456.html>
- [3] K. R. Jo and S. J. Kang, "The Effect of Mounting Location in Door and Body Stiffness on Press Door Impact Beam Bending Strength", Transactions of KSAE, Vol. 26, No. 2, pp. 272-278, 2018. DOI: <https://doi.org/10.7467/KSAE.2018.26.2.272>
- [4] J. Y. Kim and S. H. Choi, "Study on the Optimization Design and Impact Experiment of Side Door for Impact Beam in the Vehicle Side Door", Journal of The Korean Society of Tribologists and Lubrication Engineers, Vol. 31, No. 1, pp. 13-20, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.9725/kstle.2015.31.1.13>
- [5] Altair Radioss Reference Guide, Altair HyperWorks 2018.0
- [6] I. C. Lee, T. K. Lee and D. H. Jang, "Development Process of Side Impact Beam for Automotive Light-Welding Door Using Sheet Type", Transactions of Materials Processing, Vol. 24, No. 2, pp. 130-137, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.5228/KSTP.2015.24.2.130>

김 선 용(Sun-Yong Kim)

[정회원]



- 2011년 11월 : Queen's Univ., Materials and Mechanical Engineering, PhD
- 2011년 9월 ~ 2013년 11월 : Samsung Electronics., Senior Engineer

•2013년 12월 ~ 2016년 2월 : Hanwha Corp., Senior Engineer

•2016년 3월 ~ 현재 : 울산과학기술대학교 기계공학부 교수

〈관심분야〉

Design optimization, Finite Element Analysis, Vibration control