

옆문강도 및 측면충돌 성능을 고려한 알루미늄 도어 임팩트빔 최적화 연구

양지혁^{1*}

¹현대·기아 연구개발총괄본부 차량해석팀

Optimization of the Aluminum Door Impact Beam Considering the Side Door Strength and the Side Impact Capability

JiHyuck Yang^{1*}

¹Vehicle CAE Team, Hyundai & Kia Corporate Research & Development Division

요 약 최근에 많은 완성차 업계에서 차량 중량을 줄이기 위해 알루미늄 재질의 도어 임팩트빔을 사용하고 있으나, 이는 옆문강도 및 측면충돌 성능을 저하시킬 수 있다. 따라서 이 논문에서는 옆문강도 법규를 만족시키고 스틸 도어 빔 수준의 측면충돌 성능을 유지할 수 있는 알루미늄 빔의 최적화된 단면 형상과 설계수치를 제시하고자 한다.

Abstract Recently, several vehicle manufacturers have used the aluminum side door impact beam in order to reduce the vehicle weight and costs. But, the aluminum impact beam may cause the reduction of the side door strength and the side impact capability. Therefore, this paper optimized the section dimension and section shape of the side door impact beam to satisfy the legislation of the side door strength and maintain the side impact capability as well as steel impact beam

Key Words : Aluminum Door Impact Beam, Optimization, Side Door Strength, Side Impact

1. 서론

자동차의 도어 임팩트빔(Door Impact Beam)은 여러 형상 단면의 빔과 이를 도어 인너판넬(Inner Panel)에 장착토록 하는 프론트/리어 브라켓(braket)으로 구성되어 있으며 측면충돌 및 옆문강도 성능을 효과적으로 확보해줌으로 최근 대부분의 승용차에 적용되고 있다

한편, 자동차 경량화는 재료비 감소와 연비 향상, 선진 기술력 제시의 측면에서 매우 중요하여 많은 연구가 이루어지고 있다. 김범진 등은 구조용 발포재의 굽힘붕괴시험과 차체의 충격하중 배분설계를 통해 알루미늄(aluminum) 차체의 충돌안전성 향상을 위한 설계개념을 제시하였고[1], 김현영 등은 스틸(steel) 차체 대비 동등 이상의 구조강성과 충돌특성 및 30% 경량화를 위해 알루미늄 압출재 압괴/굽힘특성을 분석하고 구조해석을 통해 압출부재의 단면 형상을 선정 후 충돌해석을 수행하여 알루미늄 차체 설계 기준을 제시하였다[2].

또한 국부적 경량화로 도어 임팩트빔의 재질을 기존의 스틸에서 알루미늄 등의 각종 경량재로 변경하는 방안 [3,4]이 추진되고 있고 이미 AUDI, NISSAN 등에서 A4, A6 및 Maxima 등의 차종에 적용 중으로 이를 통해 대당 2kg 이상의 경량화가 가능했던 것으로 추정된다. 이성혁 등은 4점굽힘시험법을 이용하여 알루미늄[5] 및 보강 알루미늄[6] 사각단면보의 굽힘붕괴시 국부적 좌굴거동에 대해 실험/해석적으로 검토한 바 있고, 송세일 등은 옆문강도 성능에 대한 타원형 스틸 임팩트빔 단면의 최적화 연구를 수행하였다[7].

국내 완성차 업계에서는 측면충돌 및 옆문강도 성능 저하로 인해 알루미늄 도어 임팩트빔의 양산화를 미루고 있으나 경쟁력 강화 및 신기술 확보를 위해 이에 대한 선행 검토가 필요하다. 본 연구에서는 알루미늄 도어 임팩트빔 단면최적화 및 위상최적화[8]를 통해 기존 스틸 대비 동등 이상의 측면충돌 및 옆문강도 성능을 만족하며 경량화가 가능한 설계안을 도출하고 상용화의 가능성을

*교신저자 : 양지혁(sunnyingod@naver.com)

접수일 11년 03월 20일

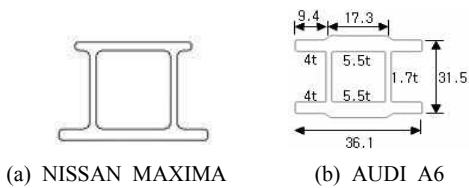
수정일 (1차 11년 04월 11일, 2차 11년 04월 15일)

게재확정일 11년 05월 12일

제시하고자 하였다. 여기서는 최적화 해석 비용 단축을 위해 옆문강도 성능에 대해 최적화를 수행한 후 측면충돌 성능에 대해 확인하는 과정으로 연구를 진행하였다.

2. 알루미늄 도어 임팩트빔 검토

AUDI A4, A6 및 NISSAN MAXIMA 등의 차량에 적용 중인 알루미늄 도어 임팩트빔에 대한 조사 결과 공통적으로 단면이 일반적인 중공형 ‘o’자가 아닌, ‘u’자 단면으로 나타났다(그림 1). 이는 체결 용이성을 위한 것으로 AUDI는 임팩트빔과 브라켓을 볼팅으로 체결한 후 도어에 장착하고, NISSAN은 임팩트빔과 도어이너널을 직접 볼팅 체결한다.

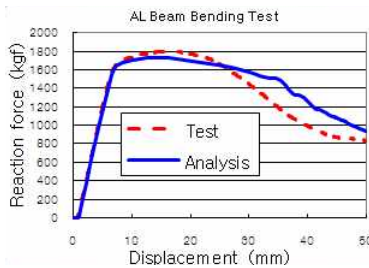


[그림 1] 타사 차량 도어 임팩트빔 단면 구조

알루미늄 물성 및 해석 신뢰성 검증을 위해 AUDI A6 알루미늄 도어빔 단면에 대해 3점굽힘 강도시험 및 CAE 해석을 수행하여 변위당 반력을 비교해 본 결과 그림 2와 같이 확인 해석이 시험을 잘 묘사하고 있음을 알 수 있다. 해석은 범용 CAE Tool인 ABAQUS를 사용하였다[9]. 도어빔 길이는 500mm, 단면치수는 그림 1(b)와 같고 하중축과 지지대 사이 거리는 200mm, 하중속도는 10mm/min이다.



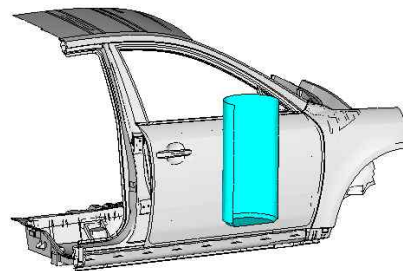
(a) 시험/해석 방법



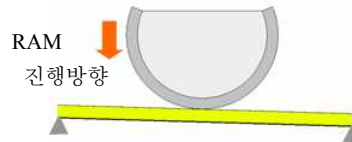
(b) 시험/해석 결과 비교

[그림 2] A6 도어빔 단순 굽힘 강도 시험/해석

옆문강도는 북미 FMVSS 214 법규로 그림3과 같이 직경 304mm 원통형 강체인 RAM으로 차량 도어를 규정 변위까지 가압하고 RAM의 진행 변위별 차량의 반력을 측정한다. 초기 6inch(152.4mm)까지의 변위별 평균반력이 1021.5kgf, 12inch(304.8mm)까지의 평균반력이 1589kgf 이상이 법규 만족치다[10,11]. 옆문강도 성능과 관련된 타사 차량 알루미늄 도어빔의 강도 파악을 위한 시험 묘사 해석을 수행하였다. 당사 선행 연구를 통해 알루미늄 도어빔 적용 시 앞문(Front Door) 초기(6inch) 성능이 취약해지는 것으로 나타났기에 이의 개선에 중점을 두었다. 초기 옆문강도 성능은 도어빔이 대부분의 영향을 차지하는바 그림 4와 같이 단순화한 해석을 통해 도어빔 강도 평가를 수행하였다.

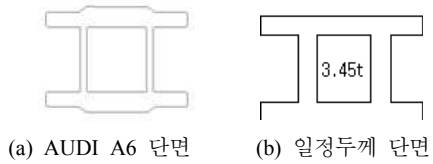


[그림 3] 옆문강도 시험 (앞문)

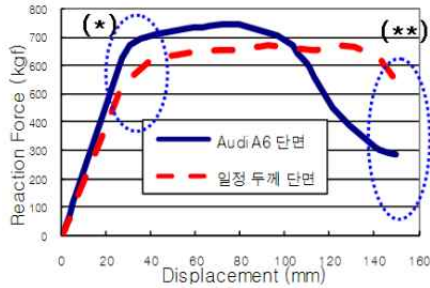


[그림 4] 옆문강도 성능관련 도어빔 강도해석

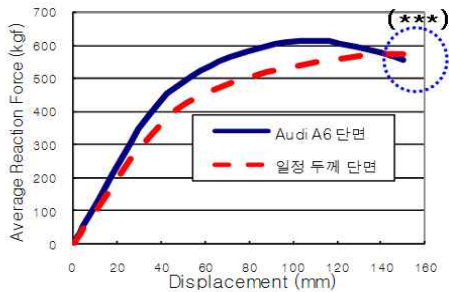
AUDI A6 알루미늄 도어빔의 단면 적정성 파악을 위해, 현재 사양과 같이 각 단면 두께가 다른 경우(그림 5a)와 동일 중량으로 각 단면 두께가 일정한 경우(그림 5b)에 대해 도어빔 강도해석을 수행하였다. 그림 5(c)의 도어빔의 변위별 반력 선도에서 변위 30mm까지는 A6 단면에서의 반력이 높아서 유리하나(*) 100mm 이후에는 급격히 감소하여 일정 두께 단면보다 낮아지는 것을 알 수 있다(**). 그림 5(c)의 변위-반력 선도의 아래 면적을 변위로 나누면 각 변위까지의 평균반력이 얻어지며 이를 그림 5(d)에 나타냈다. 최종적으로 옆문강도의 평가인자 중 하나인 6inch까지의 평균반력에서는 일정두께 단면이 다소 유리한바(***), A6 도어빔은 옆문강도 성능면에서 최적단면이 아님을 알 수 있다.



(a) AUDI A6 단면 (b) 일정두께 단면



(c) 해석결과 - 반력



(d) 해석결과 - 평균반력

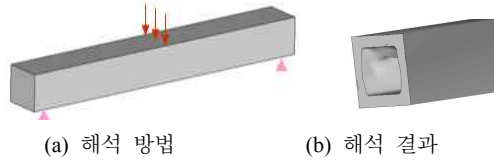
[그림 5] 알루미늄 도어빔 강도해석

3. 알루미늄 도어빔 최적화

본장에서는 도어빔의 기본단면 도출 및 최적화된 단면 치수를 구하고자 한다.

3.1 위상최적화

2장에서 AUDI A6 도어빔이 최적 단면이 아닌 것으로 나타난바 최소한의 기본단면 도출을 위해 그림 6과 같은 양단 단순지지 중실형 사각단면 빔에 대하여 최적화 상용 CAE Tool인 OptiStruct[12]를 이용하여 굽힘 시험 상태에서의 위상최적화 (Topology Optimization)를 수행하였다. 그 결과 그림 6(b)와 같이 중공형 ‘口’자 단면(사각 단면)이 빔의 굽힘강도에서 가장 기본적인 단면 구조임을 알 수 있다.



(a) 해석 방법 (b) 해석 결과

[그림 6] 도어빔 위상최적화

3.2 단면최적화

AUDI A6 알루미늄 도어빔의 단면치수가 최적이지 아닌 바 먼저 ‘口’자 단면 치수에 대한 굽힘강도 최적화 해석을 수행하여 최적 단면을 얻은 후 옆문강도 성능 만족여부를 파악코자 하였다. 최적화 TOOL인 iSIGHT를 이용하여 굽힘강도 성능에 대한 ‘口’ 단면의 각 치수를 다음의 전략으로 최적화하였다.

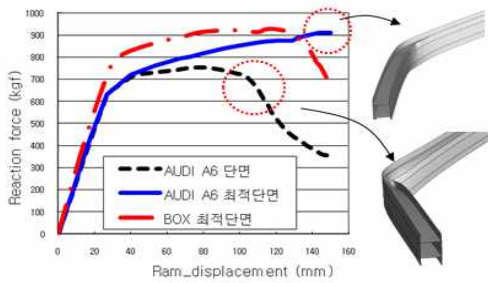
Find $T_i(i=1-6)$
 Maximize R_f
 Subject to $M_f \leq M_0 \times 1.1$

여기서 T_i 는 각 단면의 두께, R_f 는 변위-반력선도의 면적인 총반력(변위×반력), M_f 는 최종중량, M_0 는 초기 중량이다. 6inch, 12inch까지의 평균반력은 결국 총반력을 최대화함으로써 최적화할 수 있다.

‘口’자 단면 최적화 수행 결과 표 1과 같이 10% 중량 증대 대비 총반력 27% 증가되는 최적단면을 얻었다.

[표 1] ‘口’자 및 ‘口’자 단면 최적화 결과

각 단면 두께(mm)	A6단면	‘口’자 최적 단면		‘口’자 최적 단면	
			증감		증감
T1	5.5	3.6	-35%	5.4	-2%
T2	1.7	2.8	+65%	2.0	+18%
T3	1.7	1.6	-6%	1.3	-24%
T4	5.5	5.9	+7%	6.6	+20%
T5	4.0	3.7	-7%	-	-
T6	4.0	6.5	+63%	-	-
중량(kg)	1.23	1.35	+10%	1.35	+10%
총반력 (kgf·mm)	88,780	112,500	+27%	123,500	+39%



[그림 7] ‘교’ 및 ‘자’ 최적단면 반력그래프

그림 7을 보면 A6 단면은 RAM이 진행되면서 빔의 단면이 무너지면서 100mm 시점부터 반력이 급격히 감소하나, 앞에서 도출한 ‘교’자 최적단면에서는 단면을 유지하면서 반력이 꾸준히 증가하여 A6 단면보다 우세하다. ‘자’자(box) 최적단면은 130mm 시점 이후 반력이 급격히 저하되나 평균적으로 A6 단면보다는 우세하다.

다음으로 3.1절의 위상최적화로 얻은 ‘자’자 단면에 대하여 같은 방법으로 굽힘강도 성능의 최적화 해석을 수행하였다. 그 결과 표 1에서와 같이 10% 중량 증대 대비 총반력이 39% 증가되는 최적단면을 얻었다.

4. 최적단면 도어빔의 옆문강도 성능

3장에서 도출한 최적단면의 알루미늄 도어빔을 적용할 경우 차량 상태의 옆문강도 및 측면충돌 성능의 변화를 알아보고자 했다. 우선 옆문강도 성능 파악을 위하여 차량에 스틸 도어빔과 알루미늄 도어빔 장착 시의 옆문강도 성능변화를 알아보았다.

그림 3의 옆문강도 시험을 묘사하여 ABAQUS로 해석을 실시하였으며, 전체 요소수는 75만개이다. 스틸빔을 장착한 차량의 해석/시험 결과는 표 2와 같다. 6inch와 12inch에서의 평균 반력을 법규치 대비 %로 기록하였으며 개발목표는 마진을 고려하여 법규치 대비 120%이상으로 설정하였다. 스틸빔 적용시 앞문/뒷문의 6inch, 12inch 평균반력 시험치가 120%이상으로 모두 목표 만족수준이다.

[표 2] 스틸빔 장착 옆문강도 해석/시험 결과

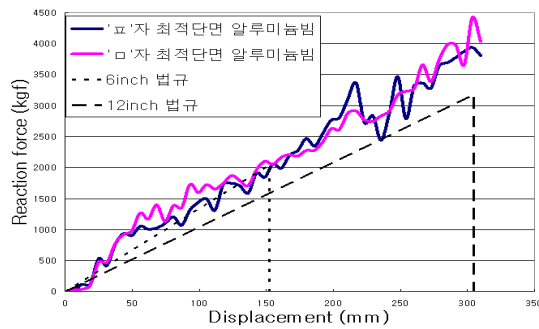
법규대비 평균반력	앞문(%)			뒷문(%)		
	시험	해석	오차	시험	해석	오차
개발목표	120			120		
6inch	136	119	-12%	149	152	+2%
12inch	153	140	-8%	169	172	+2%
비고	오차=(해석-시험)/시험					

동일차에 스틸빔 대신 A6 알루미늄 도어빔을 장착하고 옆문강도 해석을 수행한 결과 표 3에서 보듯이 시험 예측치가 법규는 만족하나 앞문 6inch 성능이 118%로 개발 목표에 미치지 못하는 것으로 나타났다. 스틸빔 적용시와 비교하면 앞문 6inch 성능이 136%에서 118%로 상당히 감소하였고 그 영향으로 12inch 성능도 감소하였다. 뒷문도 6inch까지 149%에서 140%로, 12inch까지 169%에서 155%로 반력 저하가 있었으나 여유치가 많았기 때문에 개발목표는 충분히 만족하는 것으로 나타났다. 앞문의 경우는 RAM 50mm 전진 후 알루미늄 도어빔 저항강도가 기존 스틸빔보다 떨어져서 충분한 반력을 가지지 못하기 때문에 6inch부터 성능 저하가 나타났으나 뒷문은 도어빔이 앞문 대비 약 200mm 정도 짧아서 초기 저항 감소가 상대적으로 적은 것으로 판단된다. 결론적으로 AUDI 타입 알루미늄 도어빔의 즉시 적용은 불가한 수준이다.

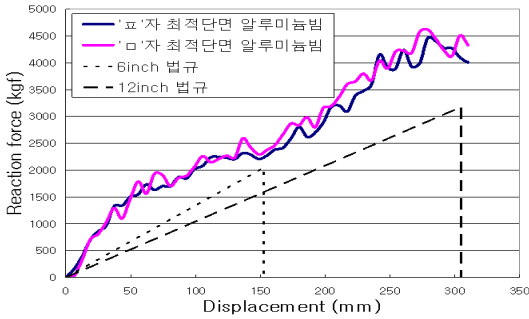
[표 3] 알루미늄빔 장착 옆문강도해석

법규대비 평균반력	앞문(%)	뒷문(%)	Total
6inch	118	140	-
12inch	149	155	-
중량변화	1,512g ↓/대	1,282g ↓/대	2,794g ↓/대
비고	시험/해석 오차 고려한 시험예측치임		

3.2절에서 얻은 ‘교’자 및 ‘자’자 최적단면 알루미늄 도어빔을 각각 적용할 경우 옆문강도 성능의 변화를 그림 8에 나타냈다. 여기서 6inch 법규와 12inch 법규 선도가 이루는 삼각형의 면적이 평균반력 법규치이며 시험 시 변위-반력 선도의 면적이 이 삼각형 면적을 넘어야 법규 만족이 된다.



(a) 앞문



(b) 뒷문

[그림 8] ‘표’자 및 ‘□’자 최적단면 알루미늄빔 적용 옆문 강도 반력그래프

앞문/뒷문의 6inch/12inch 성능을 표 4에 비교해 본 결과 두 단면의 앞문/뒷문 결과가 모두 120%를 넘어서 개발 목표를 만족하였다. 특히 ‘□’자 최적단면에서는 스틸빔과 거의 동등한 수준의 옆문강도 성능을 보였다. 따라서 단면최적화를 통해 ‘표’자는 대당 2.4kg, ‘□’자는 대당 2.3kg의 중량저감과 함께 옆문강도 성능을 만족하는 알루미늄 도어빔의 적용이 가능함을 알 수 있다.

[표 4] 옆문강도 해석결과(‘표’자 및 ‘□’자 최적단면 적용시)

6inch/12inch(%)	‘표’최적단면	‘□’최적단면
앞문	126/145	132/144
뒷문	153/165	152/161
중량변화	2,406g ↓/대	2,294g ↓/대
비고	시험/해석오차 고려한 시험예측치임	

5. 최적단면 도어빔의 측면충돌 성능

3장에서 도출한 ‘표’자 및 ‘□’자 단면 알루미늄 도어빔의 최적단면을 적용할 경우 충돌성능 만족 여부를 파악하기 위해 기존 스틸 도어빔을 알루미늄 최적단면 도어빔으로 대체하여 측면충돌해석을 수행하였고, 차체변형 결과를 표 5에, 승객상해 결과를 표 6에 보였다. 측면충돌의 여러 법규와 상품성 항목 중에서 가혹한 조건인 SINCAP(Side Impact New Car Assessment Program)과 IIHS(Insurance Institute for Highway Safety)로 평가했다. 인체 유사 시험장치인 더미(Dummy)를 좌석에 착석시킨 차량에 충돌 이동벽을 SINCAP은 경사지게 38.5mph로, IIHS는 수직으로 50kph로 충돌시켜 더미의 상해치를 평가하며 차체변형은 참고치로 활용한다. 여기서 충돌성능

의 절대적 수치에 의미를 두기보다는 상해 차이를 참고하여 스틸과 알루미늄 도어빔 간의 상대적 비교만을 고려하였다.

표 5를 보면 두 최적단면 모두 차체변형은 스틸빔과 동등수준으로 평가된다. 표 6의 SINCAP 상해치는 상/하부 갈비뼈(RIB), 척추하부(SPN)의 가속도로부터 계산된 TTI 값으로 등급을 산출하고, 골반(Pel) 가속도는 130g 이상일 때 만 별도로 표기한다.

$$TTI = \frac{MAX(URIB, LRIB) + T12}{2}$$

‘표’자 및 ‘□’자 최적단면에서의 등급은 3★/4★로 동등이나 TTI가 앞문 75g, 73g로 스틸빔 77g 대비 다소 우세하며, 뒷문 70g, 68g로 스틸빔 71g 대비 역시 동등 이상으로 나타났다. 골반가속도는 빔의 강도저하로 다소 불리하나 130g 대비 여유치가 크다. 따라서 ‘표’자 및 ‘□’자 단면 최적안은 옆문강도 및 측면충돌 성능에서 적용 가능한 것으로 판단된다.

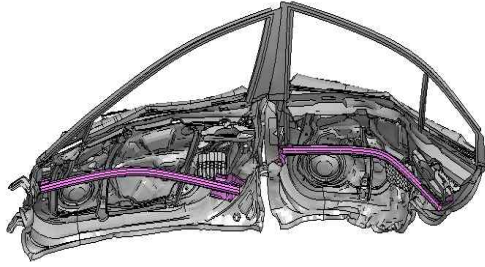
[표 5] 측면충돌 해석결과-차체변형 (‘표’자 및 ‘□’자 최적단면 적용시)

차체변형 (B PLR INR부)	스틸빔	알루미늄빔	
		‘표’자 최적단면	‘□’자 최적단면
IIHS SIDE (충돌후 생존공간)	380mm	379mm	376mm
SINCAP (충돌시 최대변형)	309mm	315mm	311mm

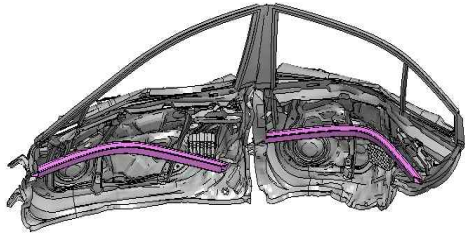
[표 6] 측면충돌 해석결과 - 승객상해 SINCAP (최적단면 알루미늄빔 적용시)

SINCAP (가속도, g)	스틸빔	알루미늄빔	
		‘표’자 최적단면	‘□’자 최적단면
FRT	U/RIB	66	57
	L/RIB	80	75
	SPN	74	71
	TTI	77	73
	PEL	73	84
RR	U/RIB	64	55
	L/RIB	68	63
	SPN	73	73
	TTI	71	68
	PEL	97	96
RATE	3★/4★	3★/4★	3★/4★
3★:72<TTI≤91g, 4★: 57<TTI≤72g			

그림 9에 측면충돌 시 스틸빔과 알루미늄빔 장착 상태 도어의 변형 양상을 나타냈다. 알루미늄빔에서 다소 변형이 커지나 지대한 차이는 아닌 것으로 평가된다.



(a) 스틸빔



(b) 알루미늄빔

[그림 9] SINCAP 측면충돌 시 도어빔 변형 형상

6. 결론

본 연구에서는 차체 경량화 및 신소재 적용을 위한 알루미늄 도어 임팩트빔의 양산 적용을 위한 선행연구로써 알루미늄 도어빔 최적화 설계안을 마련하여 강도/충돌 성능을 확보하고자 하였고 연구 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 옆문강도를 묘사한 알루미늄 도어빔 굽힘강도 단면최적화를 통해 타사 차량보다 중량 대비 강도가 우수한 '교'자 및 'ㄱ'자 최적단면을 도출하였다.
- (2) 타사 차량에 적용된 '교'자 단면 알루미늄 도어빔을 그대로 적용하면 약 2.8kg 경량화가 가능하나 옆문강도 성능 감소가 우려된다.
- (3) 단면최적화를 통해 얻은 '교'자 최적단면 및 위상 최적화/단면최적화를 통해 얻은 'ㄱ'자 최적단면 알루미늄 도어빔을 적용하면 각각 2.4kg, 2.3kg 경량화가 가능하고 옆문강도/측면충돌 성능은 스틸빔 대비 동등 또는 개발목표 만족수준으로 판단된다.
- (4) 결론적으로 단면최적화 과정을 통한 알루미늄 도어빔 적용을 통해 강도/충돌 성능의 손실 없이 대당 2kg 이상의 경량화 효과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다. 다만, 재료비 증가, 볼팅 공정 추가 및 신규 투자비 등을 고려하면 비용은 다소 상승할 것으로 예측되어 경량화 효과는 반감될 것으로 판단된다.

참고문헌

- [1] 김법진, 허승진, "알루미늄 경량 차체의 충돌에너지 흡수 성능 향상을 위한 설계 개선 연구", 자동차공학회논문집, 제11권 제3호, pp.155-160, 2003.
- [2] 김현영, 김진국, 허승진, 강혁, "알루미늄 초경량 차체의 충격 흡수부재 설계 및 충돌 안전도 평가", 자동차공학회논문집, 제10권 제1호, pp.216-233, 2002.
- [3] 한길영, 이동기, "자동차 사이드 도어용 인트루전 비임 개발을 위한 케블라섬유강화 복합재료의 기계적 특성에 관한 연구", 한국해양공학회지 제14권 제2호, pp.89-98, 2000.
- [4] Tae Seong Lim, Dai Gil Lee, "Mechanically fastened composite side-door impact beams for passenger cars designed for shear-out failure modes", Composite Structures, Vol 56, pp.211-221, 2002.
- [5] 이성혁, 최낙삼, "굽힘하중을 받는 알루미늄 사각관 보의 국부적 좌굴붕괴 거동에 관한 연구", 대한기계학회논문집 A권, 제27권 제12호, pp.2011-2018, 2003.
- [6] 이성혁, 최낙삼, "보강 알루미늄 사각관 보의 굽힘 성능평가", 한국자동차공학회논문집, 제13권 제5호, pp.171-180, 2005.
- [7] 송세일, 차익래, 이권희, 박경진, "정적충돌성능을 고려한 자동차 옆문 충격빔의 최적설계", 자동차공학회논문집 제10권 제3호, pp.176-184, 2002.
- [8] J. S. Arora, Introduction to Optimization Design, McGraw-Hill Book Company, New York, 1989.
- [9] ABAQUS Keywords Manual, HABBITT, KARLSSON & SORENSEN, INC., Ver.6.6, 2006.
- [10] FMVSS Standard No.214 Side Impact Protection, National Highway Traffic Safety Administration.
- [11] 자동차안전기준시행세칙, 개정 1.28 건설교통부고시 제1997-17호, 1997.
- [12] Altair OptiStruct 8.0 User's Guide, Altair Engineering, Inc., 2007.

양 지 혁(Ji-Hyuck Yang)

[정회원]



- 1998년 2월 : 연세대학교 공과대학원 기계공학과 (기계공학석사)
- 2003년 2월 : 연세대학교 공과대학원 기계공학과 (기계공학박사)
- 2003년 2월 ~ 현재 : 현대기아 연구개발총괄본부 책임연구원

<관심분야>

자동차공학, 내구강도, 충돌성능