

승용차 프론트 사이드 조립체의 역설계적 유한요소 충돌해석

김 용 우¹⁾ · 김 정 호²⁾ · 정 경 신³⁾

순천대학교 기계자동차공학부^{1,2)} · 순천대학교 대학원 기계공학과³⁾

Crash FE Analysis of Front Side Assembly for Reverse Engineering

Yong-Woo Kim¹⁾ · Jeong-Ho Kim²⁾ · Kyung-Shin Jeong³⁾

^{1,2)}Department of Mechanical Engineering, Suncheon National University, Jeonnam 540-742, Korea

³⁾Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Suncheon National University, Jeonnam 540-742, Korea

(Received 18 April 2006 / Accepted 3 August 2006)

Abstract : Crashworthiness design is of special interest in automotive industry and in the transportation safety field to ensure the vehicle structural integrity and more importantly the occupant safety in the event of the crash. Front side assembly is one of the most important energy absorbing components in relating to the crashworthiness design of vehicle. The structure and shape of the front side assemblies are different depending on automakers. Thus, it is not easy to grab an insight on designer's intention when you glance at a new front side member without experiences. In this paper, we have performed the explicit nonlinear dynamic finite element analysis on the front side assembly of a passenger car to identify the mechanical roles of each part of the assembly and to enhance the absorbing energy from the viewpoint of reverse engineering.

Key words : Crash(충돌), Front side assembly(프론트 사이드 조립체), Finite element analysis(유한요소해석), Reverse engineering(역설계), Shell element(셸 요소), Integrity of occupant compartment(객실의 보전)

1. 서론

충돌에 관한 연구는 자동차 산업계 및 교통안전 분야에서 관심을 쏟고 있는 분야로서 차량의 구조적 안전성과 충돌시 객실의 보전에 초점을 두고 이에 대비한 설계 및 평가를 위하여 연구되고 있다. 차량 충돌시 탑승자의 부상 정도는 충돌 세기와 밀접한 관련이 있으며, 탑승자가 있는 객실 공간을 충분히 유지하면서 구조물이 충돌 에너지를 흡수하는 능력과 직접적인 연관이 있다. 객실의 보전은 다양한 형태의 충돌 모드에서 객실 보호의 가장 근간이 되는 요소이다. 따라서 '충돌시 어떻게 탑승자를 보호할 수 있는가'하는 것이 충돌문제 연구의 중요한

주제 중의 하나가 된다. 충돌시 탑승자의 안전을 확보하기 위해 다음과 같은 분야의 연구가 이루어지고 있다.¹⁻⁶⁾

충돌방지시스템(crash avoidance systems)분야에서는 운전자의 실수(human error), 즉 인간의 감지 및 판단 등의 실수로 인한 충돌을 방지하기 위하여 운전자에게 충돌의 가능성에 대해 미리 정보를 제공하거나 경고를 주는 시스템과 자동차 운전 제어를 맡아 하는 시스템 등이 연구되고 있다.

구속장비(restraint systems)분야에서는 에어백, 안전벨트 등과 같이 차량 사고시 운전자와 탑승자를 구속하여 상해의 요인을 감소시키거나 제거하여 안전을 도모하는 장비 등이 개발되고 있다.

구조물 충돌분야는 정면충돌, 측면충돌, 후방충

*Corresponding author, E-mail: kimstime@sunchon.ac.kr

돌, 전복, 적합조건(compatibility) 등으로 대별할 수 있다. 다른 차량 또는 물체와 충돌시 ‘탑승자 보호를 어느 정도 달성할 수 있는가’하는 문제는 차량 구조물의 충돌 에너지의 제어 및 처리 능력에 의해 결정된다.

차량구조물의 충돌에서 구조물의 재료 선택은 매우 중요하다. 전통적으로 차체의 재료는 제조의 용이성, 에너지 흡수능력, 모양내기(styling), 경제성 등을 고려하여 현재까지 강(steel)을 주로 사용하고 있다. 또한, 충돌에 대한 각종 안전 법규에 대처하기 위한 설계뿐만 아니라, 차량의 무게, 제조상의 제한점, 소음 및 진동과 차량의 내구성 등의 측면도 고려되어야 한다. 최근에는 연비를 향상시키기 위해 차량의 무게를 감소시키기 위한 경량화 노력의 일환으로 강을 대체하는 다른 재료에 대한 연구도 이루어지고 있다.

본 연구에서는 차량의 정면 충돌시 충돌에너지를 가장 많이 흡수하는 부품중의 하나인 프론트 사이드(front side) 조립체를 대상으로 유한요소해석을 실시하고자 한다. 이 조립체의 형태와 부품은 다양하여 차량 제조사 또는 차종마다 달라서, 정면 충돌시 이 조립체의 각 부품이 담당하는 역학적 역할을 파악하기 쉽지 않다.

외국산 완성차의 프론트 사이드 조립체를 역설계 기법으로 모델링하고 PAM-Crash 2G를 사용한 유한요소 충돌해석을 실시하여, 에너지 흡수능력, 충돌하중, 변형속도, 응력분포 및 변형형상을 검토함으로써 프론트 사이드 조립체 및 주요 부품의 역학적 역할을 파악하고, 이를 바탕으로 주요 부품의 강도의 비를 적절히 선택함으로써 에너지흡수 능력을 향상시킬 수 있음을 보이고자 한다.

2. 해석대상

프론트 사이드(front side) 조립체의 형태 및 부품은 차종마다 약간씩 다르거나 매우 다를 수 있다. 그러나 이들이 담당하는 역할과 목적은 대동소이하다. 본 연구에서는 외국산 승용차의 프론트 사이드 조립체의 부품들을 3차원 스캐닝하여 CAD 도면을 얻고 이를 이용하여 유한요소해석 모델을 작성하였다. Fig. 1의 backward assembly, 실제 차체와 용접된

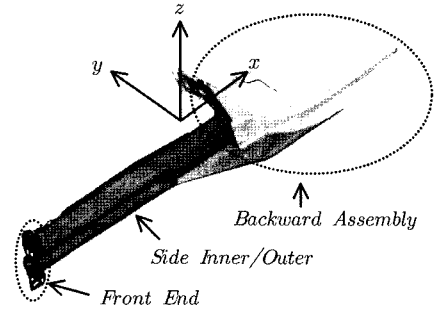


Fig. 1 Front side assembly

부위 그리고 장착된 각 부품들이 연결되어 있는 부분들을 고려하여 용접된 부위를 모두 고정시키고 해석을 실시하였다.

해체한 각 부품 중에서 인장시편을 채취할 수 있는 상태의 주요 부품에 대하여 인장시험을 실시하여 응력-변형률 곡선을 얻었으며, 나머지 부품에 대하여는 경도검사 및 조직검사를 실시하고 이와 유사한 강판의 응력-변형률 곡선으로 추정하였다.

3. 셀 요소의 선택

3.1 셀 요소의 종류

본 연구에서는 충돌해석 전용 프로그램의 하나인 PAM-Crash 2G를 사용하였는데, PAM-Crash 2G는 Table 1과 같은 4종류의 4절점 셀 요소를 제공하고 있다.⁷⁾

3.2 셀 요소의 검토 및 선택

Table 1의 4가지 셀 요소 중 어느 셀 요소를 선택하여 모델링에 이용할 것인지를 검토하기 위해, 프론트 사이드의 부분 조립체(Table 2의 Model-1)를 대상으로, 4가지 셀 요소를 사용하여 각각 충돌해석을 실시하였다.

충돌체의 질량과 속도는 160kg과 50km/h로 각각 설정하여, 사용한 셀 요소에 따른 에너지 보존, 흡수 에너지, 충격하중, 변형형상, 응력분포, 변형속도분포 등을 검토하였다.

Fig. 2에서 보인 바와 같이 에너지의 보존은 셀 요소의 종류에 상관없이 잘 지켜지고 있으나 요소에 따라서 운동에너지 및 내부에너지가 전체에너지에 기여하는 크기가 다를 수 있다. 즉, BT 및 BWC

Table 1 Types of 4-noded shell elements in PAM-Crash 2G

Types	Characteristics
BT (Belytschko-Tsay)	<ul style="list-style-type: none"> Uniform under-integration (1×1) Controlled zero energy modes
HT (Hughes-Tezduyar)	<ul style="list-style-type: none"> Full or selective reduced integration : 4 in-plane integration points No zero energy modes
BWC (Belytschko-Wong-Chiang)	<ul style="list-style-type: none"> Uniform under-integration (1×1) Controlled zero energy modes Anti-warping term
FBWC (Belytschko-Wong-Chiang)	<ul style="list-style-type: none"> Full integration (2×2) No zero energy modes Assumed shear and membrane fields Anti-warping term

*The anti-warping term in BWC and FBWC results in better behavior for warped elements.

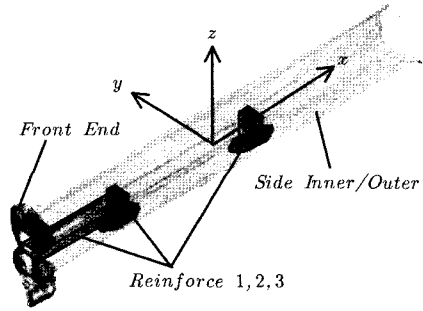


Fig. 3 Major parts in Fig. 1

Table 2 Test models

Model	Constructions of model
Model-1	□ + Side inner/outer
Model-2	□ + Side inner/outer + Front end
Model-3	□ + Side inner/outer + Reinforce 1,2,3
Model-4	□ + Side inner/outer + Front end + Reinforce 1,2,3

where □ denotes 'Backward assembly' in Fig. 1

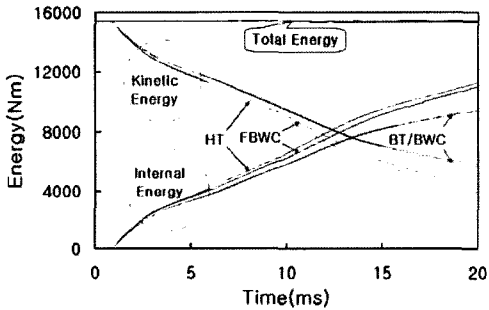


Fig. 2 Energy balance of Model-1 in terms of element types

셀 요소(감차적분을 사용하는 요소)경우, HT 및 FBWC 셀 요소에 비해 내부에너지가 작게 계산되는 반면 운동에너지는 더 크게 계산된다. 이는 BT 및 BWC 셀 요소가 감차적분을 채용함으로써 강성이 실제보다 작게 계산되어 변위 및 변형속도가 크게 계산되나 변형에너지는 작게 계산되는 것으로 판단된다. 이러한 사실은 수치실험의 결과에서도 확인할 수 있었다.^{5,8-10)} 따라서 본 연구에서는 FBWC 셀 요소를 사용하여 수치해석을 실시한다.

4. 역설계 유한요소 충돌해석

Fig. 3과 같은 프론트 사이드 조립체의 주요 부품 (Side inner/outer, Front end, Inner reinforce 1,2,3)의 역학적 역할을 파악하기 위하여, FBWC 셀 요소를 사용하여 Table 2와 같은 4가지 모델을 선정하여 각각에 대해 수치해석을 실시하였다. 충돌하는 충돌체의 질량과 속도는 3.2결과 동일하게 설정하여, 사

용한 셀 요소에 따른 각각의 흡수에너지, 충격하중, 변형형상, 응력분포, 변형속도분포 등을 검토하였다.

4.1 흡수에너지

Front end가 없는 경우(Model-1과 Model-3), 충격력을 받음과 동시에 변형이 발생하여 충돌에너지가 흡수되기 시작한다. 이에 비해 Front end가 있는 경우(Model-2와 Model-4), 약 1ms 후부터 변형이 시작된다. 그리고 Model-1과 Model-2를 비교해보면, 본 연구 모델의 경우에는 Front end의 부착 여부가 에너지 흡수능력에 미치는 영향은 거의 없음을 알 수 있다. Front end를 부착하면 변형이 약간 지연되나 에너지 흡수능력에는 큰 영향을 미치지 않았다.

Model-1과 Model-3을 비교하면, Inner reinforce가 있음으로써 에너지 흡수능력이 현저히 증가됨을 알 수 있다. Fig. 4는 동일한 시간 내(20ms)에 일어나는 흡수에너지를 도시한 것으로 Model-3은 방향(길이 방향)의 변형속도가 다른 모델에 비해 느린 관계로(즉, 충돌하중에 대한 저항이 상대적으로 커서) 변형길이가 짧게 나타나고 있다(Fig. 4의 A-A' 참조).

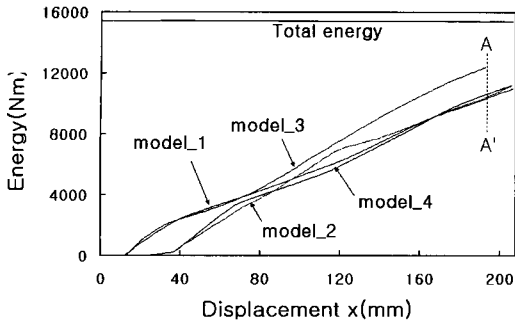


Fig. 4 Absorbed energies of the four models in Table 2

4.2 변형형상 및 응력분포

Table 2의 4가지 모델의 변형에 대한 시간에 따른 변형형상과 응력분포를 Table 3과 4에 Inner reinforce가 없는 경우(Model-1과 2)와 Inner reinforce가 있는 경우(Model-3과 4)를 각각 비교하였다. 두 경우를 비교해보면, 변형이 지연이 되는 것은 Front end의 부착으로 인한 것임을 알 수 있다. 이는 4.1절 흡수에너지에서 검토한 바와 일치한다.

Inner reinforce가 없는 경우가 Inner reinforce가 있는 경우에 비해 접힘(folding)이 발생하는 앞부분 단면의 형상이 심하게 폭 방향(y 방향)으로 수축된다. 따라서 Inner reinforce는 압축이 일어나는 전방 부분을 보강해 주는 역할을 하고 있는 것으로 판단된다. 또한, Table 5의 Inner reinforce가 없는 경우, 접힘이 발생하는 부분의 앞쪽은 엔진 룸 안쪽(-y 방향)으로 휘게 되며, Inner reinforce가 있는 경우 접힘이 발생하는 부분의 앞쪽은 엔진 룸 바깥쪽(+y 방향)으로 휘다. Fig. 4에서 Model-3의 길이방향의 변형량이 작은 것은 Table 6의 z-x 평면에서 본 변형을 보면 그 이유를 알 수 있다. 즉, 다른 모델들은 접힘(folding)의 위치 부근에서만 주요 변형이 발생하나, Model-3은 Backward assembly에서도 큰 변형이 유도되고 있다. 이로 인해 충격력에 대한 저항이 커진 것으로 판단된다.

4.3 충격력

Front end가 없는 경우(Model-1과 Model-3)와 Front end가 있는 경우(Model-2와 Model-4)를 비교해보면, Front end를 부착함으로써 초기의 충격력이 크게 작용함을 관찰할 수 있다. 또한, Front end가 없

Table 3 Deformation history of the Model-1 and Model-2

Time	Model-1
5ms	
15ms	
Time	Model-2
5ms	
15ms	

Table 4 Deformation history of the Model-3 and Model-4

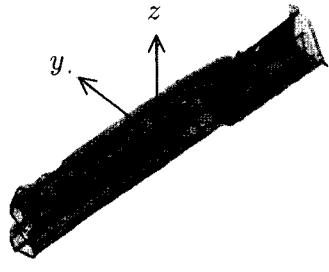
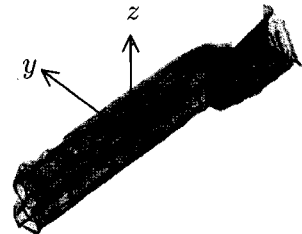
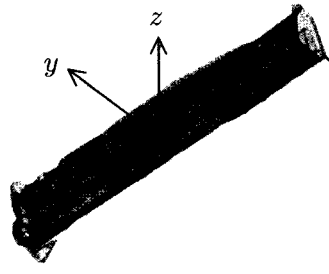
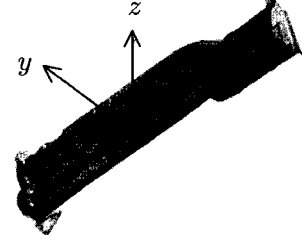
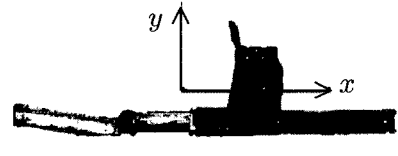
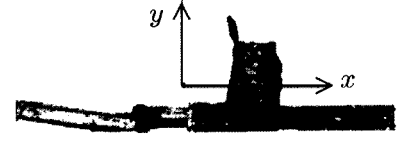
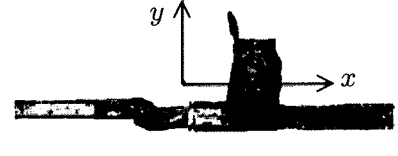
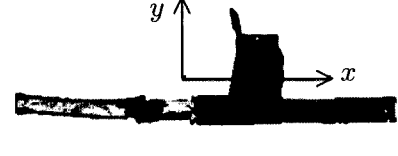
Time	Model-3
5ms	
15ms	
Time	Model-4
5ms	
15ms	

Table 5 Deformation and maximum equivalent stress

Model	y ^L x plane(20ms)
Model-1	
Model-2	
Model-3	
Model-4	

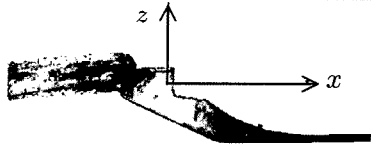
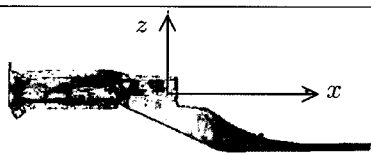
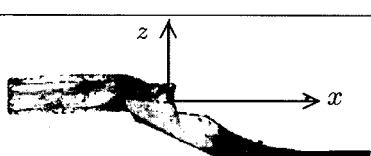
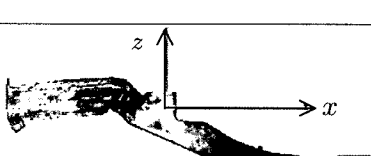
는 경우 초기 충격력의 피크가 나타난 다음 약간 감소하다가 전반적으로 증가하는 경향을 보이는 반면, Front end가 있는 경우에는 충격력의 변화가 심하다. 즉, Model-4의 경우 40~80mm 사이에서 큰 변화를 보이나, Model-2의 경우 120~160mm 사이에서 큰 변화를 보인다.

Model-1과 Model-3을 비교해보면, Inner reinforce가 있음으로써 전반적으로 충격력이 약간 증가함을 알 수 있다.

4.4 종합적 검토 및 제안

다른 차량 또는 물체와 충돌시, ‘탑승자 보호를 어느 정도 달성할 수 있는가’하는 문제는 객실의 보전에 관한 문제로서, 객실 보호의 가장 근간이 되는 요소이다. 이런 관점에서 충돌시 차체와 연결되는 Backward assembly부에 큰 변형이 유도되는 프론트 사이드 조립체는 탑승자 보호에 문제를 야기시킬

Table 6 Deformation and maximum equivalent stress

Model	z x plane(20ms)									
Model-1										
Model-2										
Model-3										
Model-4										
Maximum equivalent stress over thickness [Gpa] <table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"> <tr><td>0.05</td></tr> <tr><td>0.0987</td></tr> <tr><td>0.1475</td></tr> <tr><td>0.1962</td></tr> <tr><td>0.245</td></tr> <tr><td>0.2937</td></tr> <tr><td>0.3425</td></tr> <tr><td>0.3912</td></tr> <tr><td>0.44</td></tr> </table>		0.05	0.0987	0.1475	0.1962	0.245	0.2937	0.3425	0.3912	0.44
0.05										
0.0987										
0.1475										
0.1962										
0.245										
0.2937										
0.3425										
0.3912										
0.44										

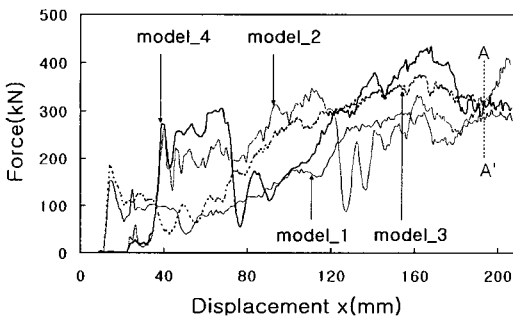


Fig. 5 Crash force-time history of the four models

수 있다. Model-3과 같은 경우가 이에 해당한다고 볼 수 있다.

Table 5와 6에서 Model-1과 Model-4의 변형형상

을 비교해 보면, 두 모델의 변형 모드가 비슷함을 알 수 있다. 그러나 Model-4는 Model-1에 Front end 및 Inner reinforce 등의 부품을 장착하여 강성을 훨씬 증가시킨 조립체이다. 여기서 주목할 만한 사실은 칫재, 추가적인 부품을 사용하여 변형 모드를 제어할 수 있다는 사실과 둘째, 추가적인 부품의 사용이 부적절한 경우 오히려 Model-3과 같은 문제를 발생시킬 수 있다는 점이다.

Front end는 프론트사이드 조립체의 가장 앞부분에 위치하는 부품으로서 이 부품이 부착됨으로써 충돌시 부착된 바로 뒤에서 높은 응력의 발생이 유도되며, 동시에 초기 충격력 피크부의 출현 시기를 지연시키며 초기 충격력의 피크치를 증가시킨다. Inner reinforce는 접힘 부분 앞쪽의 강성을 증가시켜, 접힘 부분 뒤쪽에 높은 응력과 변형을 유도하는 역할을 한다.

Front end 및 Inner reinforce의 강성을 적절히 취함으로써 Front end와 접힘 부분사이에 고른 응력분포의 발생을 유도시켜, 에너지 흡수능력을 높이고 충격력의 분포 변화가 한 곳에 집중하지 않도록 설계할 수 있는 가능성을 검토하기 위하여, Model-4에 대하여 Front end와 Inner reinforce의 σ'_y/σ_y (σ_y ; 현 모델의 항복강도, σ'_y ; 시뮬레이션을 위한 항복강도)를 Table 7과 같이 변화시켜 에너지 흡수능력, 충격력, Von Mises 응력분포를 검토하였다.

Front end와 Inner reinforce의 σ'_y/σ_y 의 변화에 의한 에너지 흡수능력을 시뮬레이션 하여 대표적인 조합을 Fig. 6에 도시하였다. Fig. 6에서 보는 바와 같이 조합 Y-B (Front end $\sigma'_y/\sigma_y=1.0$ (Y)와 Inner reinforce $\sigma'_y/\sigma_y=1.0$ (B))보다 조합 W-D 경우가 변형의 중반부(70~160mm부근)에서 에너지 흡수능

Table 7 Variations of yield stresses of Model-4

Part	Type of Model-4	σ'_y/σ_y
Front end	W	1.4
	X	1.2
	Y	1.0
	Z	0.8
Inner reinforce	A	1.2
	B	1.0
	C	0.8
	D	0.6

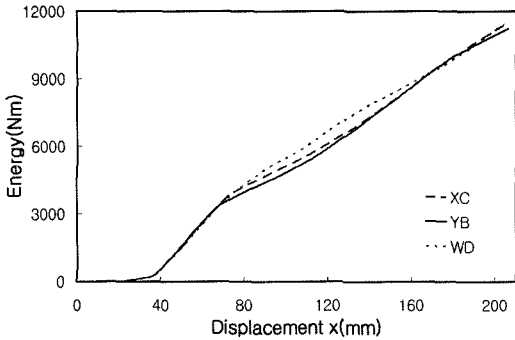


Fig. 6 Absorbed energies of the typical combinations of yield stresses in Table 7

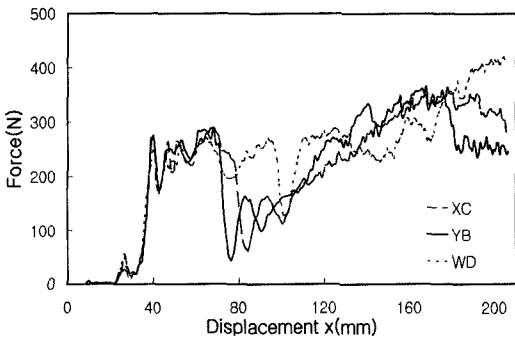


Fig. 7 Crash force-time history depending on the combinations of yield stresses in Table 7

력이 크게 나타났다. 즉, Front end와 Inner reinforce의 적절한 강도의 변화로 에너지 흡수능력을 향상시킬 수 있음을 알 수 있다.

충격력은 초기 충격력의 변화는 거의 없으나 변형의 중반부 즉, 70~160mm 부분(Fig. 7)에서 Front end $\sigma_y'/\sigma_y = 1.4$ 와 Inner reinforce $\sigma_y'/\sigma_y = 0.6$ 으로 구성된 Type W-D 경우가 충격력이 더 크게 나타나고 있으나, 충격력을 변형과정 전체에 고르게 분포하도록 할 수 있음을 알 수 있다.

σ_y'/σ_y 의 변화에 의한 변형형상(Table 8)은 기존의 모델(Model-4의 Y-B)에서는 접힘의 위치 부근에서만 주요 변형이 발생하였으나, 이에 비해 W-D의 경우(Front end의 $\sigma_y'/\sigma_y = 1.4$, Inner reinforce $\sigma_y'/\sigma_y = 0.6$)는 접힘 부분과 Front end 뒷부분 등 전체적으로 고르게 응력이 분포한다. 즉, Front end 및 Inner reinforce의 강도의 비를 적절히 취함으로써 Front end와 접힘 부분 사이에서 응력이 고르게 분포하여

Table 8 Deformation and maximum equivalent stress

Combination type	z L x plane(20ms)																		
Y-B																			
X-C																			
W-D																			
Maximum equivalent stress over thickness [Gpa] <table style="float: right; border: none;"> <tr><td></td><td>0.045</td></tr> <tr><td></td><td>0.1206</td></tr> <tr><td></td><td>0.1962</td></tr> <tr><td></td><td>0.2719</td></tr> <tr><td></td><td>0.3475</td></tr> <tr><td></td><td>0.4231</td></tr> <tr><td></td><td>0.4987</td></tr> <tr><td></td><td>0.5744</td></tr> <tr><td></td><td>0.65</td></tr> </table>			0.045		0.1206		0.1962		0.2719		0.3475		0.4231		0.4987		0.5744		0.65
	0.045																		
	0.1206																		
	0.1962																		
	0.2719																		
	0.3475																		
	0.4231																		
	0.4987																		
	0.5744																		
	0.65																		

전체적으로 변형이 발생하도록 유도할 수 있음을 알 수 있다.

5. 결론

- 1) PAM-Crash 2G가 제공하는 4가지 셀 요소 중에서, BT 및 BWC 셀 요소를 사용하면, HT 및 FBWC 셀 요소에 비해 내부에너지가 작게 계산되는 반면 운동에너지는 더 크게 계산된다. 이는 BT 및 BWC 셀 요소의 결점(hourglass 에너지 모드 존재)으로 인해 내부에너지가 적게 계산되기 때문이다. 또한, 이 셀 요소들은 감차적분을 적용함에 따라 강성이 실제보다 작게 계산되어 변위 및 변형속도가 크게 계산되거나 변형에너지는 작게 계산되기 때문이다. 계산의 정확도를 향상시키기 위해서는 FBWC 또는 HT 셀 요소의 사용을 추천한다.
- 2) 프론트 사이드 조립체는 그 부속부품을 사용하

Table A Deformation and plastic strain(Model-1)

Time	Model-1																		
2ms																			
5ms																			
9ms																			
14ms																			
Maximum plastic strain over thickness <table border="0" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"> <tr><td></td><td>0</td></tr> <tr><td></td><td>0.125</td></tr> <tr><td></td><td>0.25</td></tr> <tr><td></td><td>0.375</td></tr> <tr><td></td><td>0.5</td></tr> <tr><td></td><td>0.625</td></tr> <tr><td></td><td>0.75</td></tr> <tr><td></td><td>0.875</td></tr> <tr><td></td><td>1</td></tr> </table>			0		0.125		0.25		0.375		0.5		0.625		0.75		0.875		1
	0																		
	0.125																		
	0.25																		
	0.375																		
	0.5																		
	0.625																		
	0.75																		
	0.875																		
	1																		

Table B Deformation and plastic strain(Model-2)

Time	Model-2																		
2ms																			
5ms																			
9ms																			
14ms																			
Maximum plastic strain over thickness <table border="0" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"> <tr><td></td><td>0</td></tr> <tr><td></td><td>0.125</td></tr> <tr><td></td><td>0.25</td></tr> <tr><td></td><td>0.375</td></tr> <tr><td></td><td>0.5</td></tr> <tr><td></td><td>0.625</td></tr> <tr><td></td><td>0.75</td></tr> <tr><td></td><td>0.875</td></tr> <tr><td></td><td>1</td></tr> </table>			0		0.125		0.25		0.375		0.5		0.625		0.75		0.875		1
	0																		
	0.125																		
	0.25																		
	0.375																		
	0.5																		
	0.625																		
	0.75																		
	0.875																		
	1																		

Table C Deformation and plastic strain(Model-3)

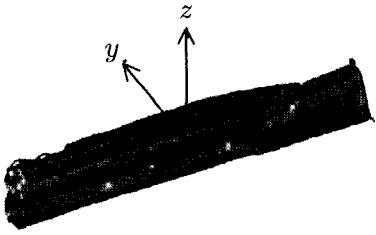
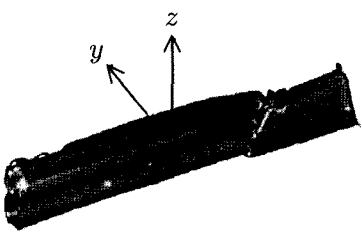
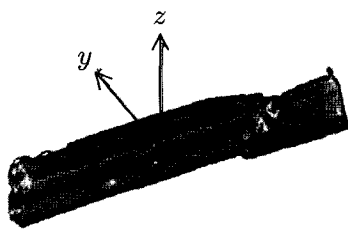
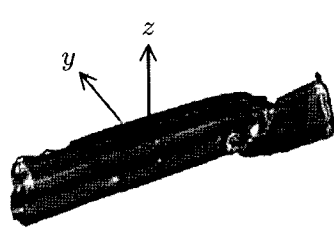
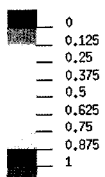
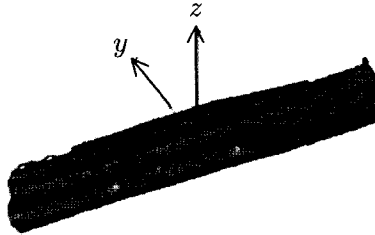
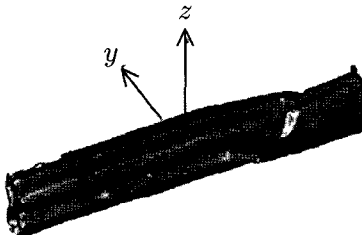
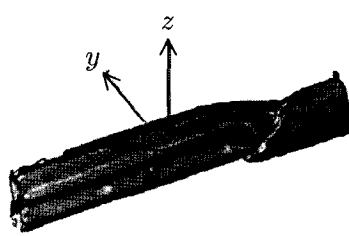
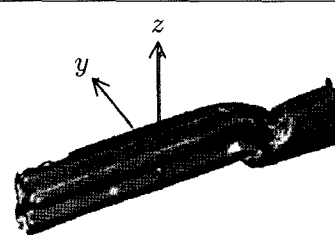
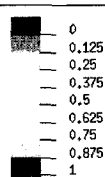
Time	Model-3
2ms	
5ms	
9ms	
14ms	
Maximum plastic strain over thickness 	

Table D Deformation and plastic strain(Model-4)

Time	Model-4
2ms	
5ms	
9ms	
14ms	
Maximum plastic strain over thickness 	

여 변형 모드를 제어할 수 있으며, 이때 잘못된 설계는 오히려 객실의 보전을 해치는 문제를 발생시킬 수 있다.

- 3) 프론트 사이드 조립체의 부속부품인 Front end 및 Inner reinforce의 강도의 비를 적절히 선택함으로써 Front end와 접합 부분 사이에서 고르게 응력이 분포하여 전체적으로 변형이 발생하도록 유도할 수 있으며, 충격력을 변형과정 전체에 고르게 분포하도록 하여, 에너지 흡수능력을 향상시킬 수 있다.

후 기

이 논문은 2004년도 교육인적자원부의 지방대학 혁신역량 강화사업(NURI)에 의하여 지원되었음.

References

- 1) J. Belwafa, "Vehicle Crashworthiness and Occupant Protection," Great Designs in Steel 2004, Seminar Presentations, American Iron and Steel Institute, 2004.
- 2) S. R. Veeramallu, "Collision Avoidance Systems," 2000 MTC Transportation Scholars Conference, pp.173-183, 2000.
- 3) Report: Task 4.6 State-of-art Review - Vehicle Structural Crashworthiness, European Vehicle Passive Safety Network 2, 2004.
- 4) H. Kurtaran, A. Eskandarian, D. Marzougui and N. E. Bedewi, "Crashworthiness Design Optimization Using Successive Response Surface Approximation," Computational Mechanics, Vol.29, pp.409-321, 2002.
- 5) J. H. Lim, J. M. Lim and H. I. Bae, "Development of B.I.W Crash Test and Simulation Technique for Simulation Accuracy Improvement," 10th HanPAM 2004 Users Conference in Korea, pp.93-100, 2004.
- 6) H. Y. Lee, J. Y. Lim and H. T. Bom, "The Finite Element Analysis of Car Seat Frame According to The FMVSS Strength Test," SAE 99370210, pp.241-247, 1999.
- 7) PAM-Crash/Safe Users and Theory Manual, Version 2004, ESI Group, France, 2004.
- 8) Y. W. Kim, J. H. Kim and K. S. Jeong, "Crash FE Analysis of Structural Parts of a Car for Reverse Engineering," Spring Conference Proceedings, KSAE, pp.1565-1573, 2005.
- 9) T. J. R. Hughes, The Finite Element Method Linear Static and Dynamic Finite Element Analysis, Prentice Hall, New Jersey, 1987.
- 10) K. J. Bathe, Finite Element Procedures, Prentice Hall, New Jersey, 1996.