

승용차 프론트 사이드 조립체 부품의 역할과 붕괴모드에 관한 역설계적 유한요소 충돌해석

김용우¹⁾ · 김정호^{*1)} · 정경신²⁾

순천대학교 기계우주항공공학부¹⁾ · 순천대학교 대학원 기계공학과²⁾

Crash FE Analysis of Front Side Assembly of Passenger Cars for Identifying the Roles of Major Parts Influencing on Collapse Mode with Reverse Engineering

Yong-Woo Kim¹⁾ · Jeong-Ho Kim^{*1)} · Kyung-Shin Jeong²⁾

¹⁾Department of Mechanical Engineering, Suncheon National University, Cheonnam 540-742, Korea

²⁾Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Suncheon National University, Cheonnam 540-742, Korea

(Received 24 August 2006 / Accepted 8 December 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 auto-makers and size of vehicles. 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 passenger cars to identify the mechanical roles of major parts in relation to collapse modes from the viewpoint of reverse engineering. To do this, we have performed crash FE analysis for the two different assemblies of small car and heavy passenger car and have compared dynamic behaviors of the two.

Key words : Crash(충돌), Front side assembly(프론트 사이드 조립체), Finite element analysis(유한요소해석), Reverse engineering(역설계), Collapse mode(붕괴 모드), Small passenger Car(소형 승용차), Heavy passenger car(중형 승용차)

1. 서론

충돌에 관한 연구는 자동차 산업계 및 교통안전 분야에서 관심을 쏟고 있는 분야로서 차량의 구조적 안전성과 충돌시 객실의 보전에 주안점을 두고 이에 대비한 설계 및 평가를 위해 행해지고 있다. 차량 충돌시 탑승자의 부상 정도는 충돌 세기와 밀접한 관련이 있으며, 탑승자가 있는 객실 공간을 충분

히 유지하면서 구조물이 충돌 에너지를 흡수하는 능력과 직접적인 연관이 있다.

따라서 '충돌시 어떻게 탑승자를 보호할 수 있는가'하는 것이 충돌문제 연구의 중요한 주제 중의 하나가 된다. 충돌시 탑승자의 안전을 확보하기 위해, 충돌방지시스템, 구속 장비, 차량 구조물의 충돌 에너지의 제어 및 처리 능력, 재료 등 여러 분야의 연구가 이루어지고 있다.¹⁻⁶⁾

본 연구에서는 차량의 정면 충돌시 충돌에너지

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

흡수의 기능을 가진 부재중의 하나인 프론트 사이드(front side) 조립체를 대상으로 PAM-Crash 2G를 사용하여 유한요소 해석을 실시하고자 한다.⁷⁾ 이 조립체의 형태와 부품은 차량 제조사 또는 차종마다 달라서, 정면 충돌시 이 조립체의 각 부품이 담당하는 역학적 역할을 파악하기 쉽지 않다.

중형(heavy passenger car, 2050kg) 및 소형(small passenger car, 1330kg) 외국 승용차의 프론트 사이드 조립체를 역설계적 기법으로 모델링하고 유한요소 해석을 실시하여, 에너지 흡수능력, 충돌하중, 변형 속도, 응력분포 및 변형형상을 검토함으로써 프론트 사이드 조립체 및 주요 부품의 역학적 역할을 파악하고자 한다. 이를 바탕으로 중형 승용차와 소형 승용차의 설계의 주안점의 차이와 이에 따른 프론트 사이드 조립체의 구조상의 차이 그리고 붕괴모드(collapse mode)에 대해 검토하고자 한다.

2. 해석대상

프론트 사이드 조립체의 형태 및 부품은 차종마다 약간씩 또는 크게 다를 수 있다. 그러나 이들이 담당하는 역할과 목적은 대동소이하다. 본 연구에서는 두 가지의 외국산 승용차 프론트 사이드 조립체를 해체하여 확보한 부품들을 3차원 스캐닝하여 CAD 도면을 얻고 이를 이용하여 유한요소해석 모델을 작성하였다.

Fig. 1과 Fig. 2는 각각 중형 승용차 및 소형 승용차의 프론트 사이드 조립체로서 backward assembly 부분은 차체와 연결되는 부분으로 차체에 용접되는 부위를 모두 고정시키고 해석을 실시하였다.

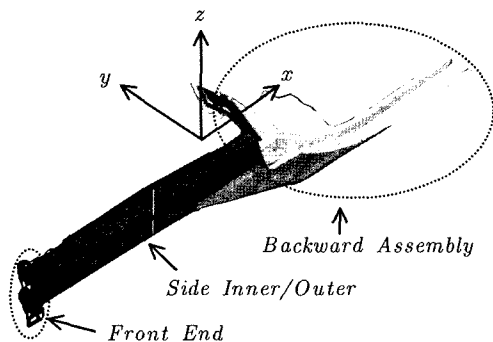


Fig. 1 Front side assembly of a car(B) with 2050kg

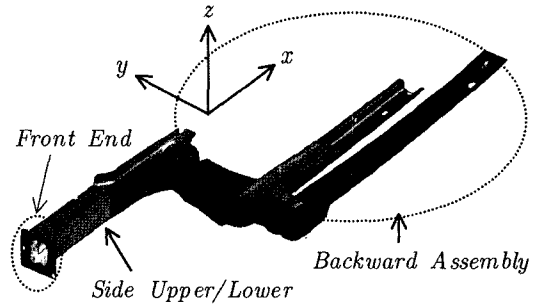


Fig. 2 Front side assembly of a car(P) with 1330kg

프론트 사이드 조립체의 해체한 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. 셸 요소의 선택

본 연구에서는 충돌해석 전용 프로그램의 하나인 PAM-Crash 2G를 사용하였는데, PAM-Crash 2G는 Table 1과 같은 4종류의 4절점 셸 요소를 제공하고 있다.⁷⁾ Table 1의 4가지 셸 요소 중 어느 셸 요소를 선택하여 모델링에 이용할 것인지를 검토하기 위해, 프론트 사이드의 부분 조립체를 대상으로, 4가지 셸 요소를 사용하여 각각 충돌해석을 실시하였다. 충돌하는 충돌체의 질량과 속도는 160kg과 50km/h로 각각 설정하여, 사용한 셸 요소에 따른 에

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.

너지 보존, 흡수에너지, 충격하중, 변형형상, 응력분포, 변형속도분포 등을 검토하였다.

에너지 보존은 셀 요소의 종류에 상관없이 잘 지켜지고 있으나 요소에 따라서 운동에너지 및 내부에너지가 전체에너지에 기여하는 크기가 다를 수 있었다. 즉, BT 및 BWC 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 요소의 결점(hour-glass 에너지 모드의 존재)으로 인해 내부에너지가 적게 계산되고 있으며, 이는 감차적분을 적용함에 따라 강성이 실제보다 작게 계산되어 변위 및 변형속도가 크게 계산되고 변형에너지는 작게 계산되기 때문이다. 이러한 사실은 수치실험의 결과에서도 확인할 수 있었다.^{8,9)} 따라서 본 연구에서는 결점이 없는 FBWC 셀 요소를 사용하여 수치해석을 실시하였다.

4. 역설계적 유한요소해석

Fig. 3과 같은 중형 승용차 프론트 사이드 조립체의 주요 부품(Side Inner/Outer, Front End, Reinforce^{1,3)}의 역학적 역할을 파악하기 위하여, FBWC 셀 요소를 사용하여 Table 2와 같은 4가지 모델에 대하여 수치해석을 실시하였다.

또한, Fig. 4의 소형 승용차 프론트 사이드 조립체의 주요 부품(Side Lower/Upper, Front End)의 역학적 역할을 파악하기 위하여, FBWC 셀 요소를 사용하여 Table 3과 같은 3가지 모델에 대하여 수치해석을 실시하였다.

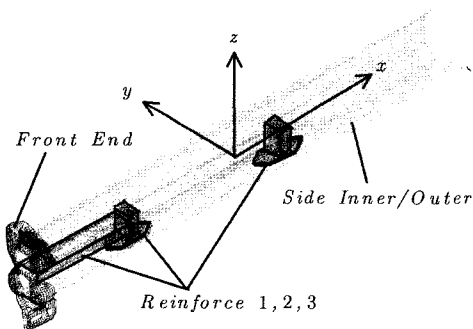


Fig. 3 Major parts concerned of a car(B) with 2050kg

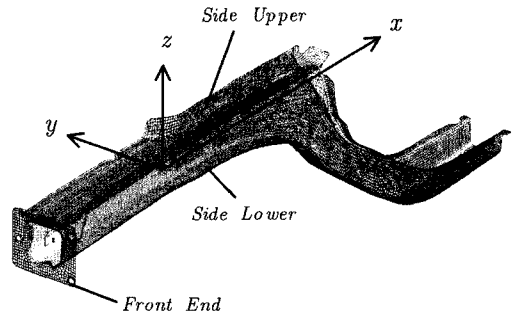


Fig. 4 Major parts concerned of a car(P) with 1330kg

Table 2 Test models of a car(B)

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

Table 3 Test models of a car(P)

Model	Constructions of model
Model-A	□ + Side Lower/Upper
Model-B	□ + Side Lower/Upper + Front End

where □ denotes 'Backward assembly' in Fig. 2

충돌하는 충돌체의 질량과 속도는 3결과 동일하게 설정하여, Table 2와 Table 3 각각 모델에 대하여 흡수에너지, 충격하중, 변형형상, 응력분포, 변형속도분포 등을 검토하였다.

4.1 흡수에너지

4.1.1 중형 승용차의 경우

Fig. 5에서 보는 바와 같이 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 에너지흡수 능력에 미치는 영향은 거의 없음을 알 수 있다. 즉, Front End를 부착하면 변형이 약간 지연되나 에너지흡수 능력에는 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

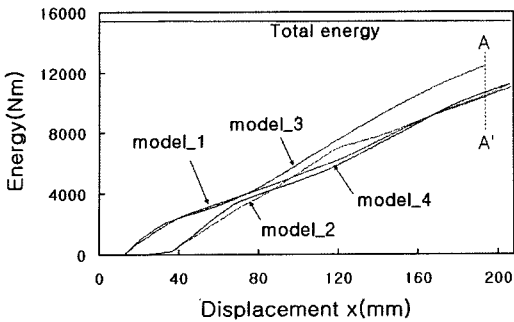


Fig. 5 Absorbed energies of the four models in Table 2

그리고 model-1과 model-3을 비교하면, Reinforce가 있음으로써 에너지흡수 능력이 현저히 증가됨을 알 수 있다. Fig. 5는 동일한 시간 내(20ms)에 일어나는 흡수 에너지를 도시한 것으로 model-3은 x방향(길이 방향)의 변형속도가 다른 모델에 비해 느린 관계로(즉, 충돌하중에 대한 저항이 상대적으로 커서) 변형길이가 짧게 나타나고 있다(Fig. 5의 A-A' 참조).

4.1.2 소형 승용차의 경우

Fig. 6에서 보는 바와 같이 Front End가 있는 모델(model-B)의 경우가 없는 경우(model-A)보다 흡수 에너지가 약간 높다. 이는 Front End가 있음으로써 Front End의 바로 뒤쪽의 국부변형이 증가하기 때문이다. 이러한 국부변형의 시간에 따른 차이를 비교하면 다음과 같다. 즉 Front End가 있는 경우(부록 Table B) Lower/Upper의 끝단에서부터 길이방향(x-방향)과 단면의 둘레 방향의 접힘(folding)이 유도되는데 반해, Front End가 없는 경우에는 길이방향(x-방향)만의 접힘(folding)이 유도된다. 이로 인해 흡수 에너지의 차이를 보이는 것으로 판단된다.

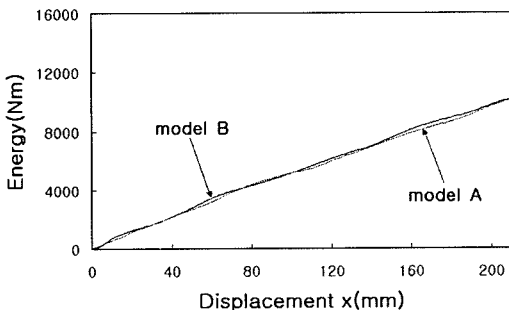


Fig. 6 Absorbed energies of the two models in Table 3

4.2 변형형상과 응력분포

4.2.1 중형 승용차의 경우

Table 2의 4가지 모델의 변형에 대한 시간에 따른 변형형상을 비교해본 결과, 다음과 같은 사실을 알 수 있었다. model-1과 model-2를 비교하고, model-3과 model-4를 각각 비교해보면, 변형이 지연이 되는 것은 Front End의 부착으로 인한 것임을 알 수 있다. 이는 4.1.1절에서 검토한 바와 일치한다.¹⁰⁾

Reinforce가 없는 경우(model-1과 model-2)와 Reinforce가 있는 경우(model-3과 model-4)를 비교하면, 전자의 경우가 후자의 경우에 비해 접힘(folding)이 발생하는 앞부분 단면의 형상이 심하게 폭 방향(y방향)으로 수축된다. 따라서 Reinforce는 굽힘형 접힘이 일어나는 전방 부분을 보강해주는 역할을 하고 있는 것으로 판단된다.

부록 Table A에 보인 바와 같이 Reinforce가 없는

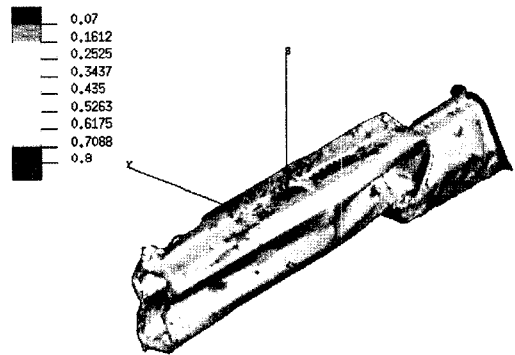


Fig. 7 Maximum equivalent stress distribution of model-1 at t=18ms

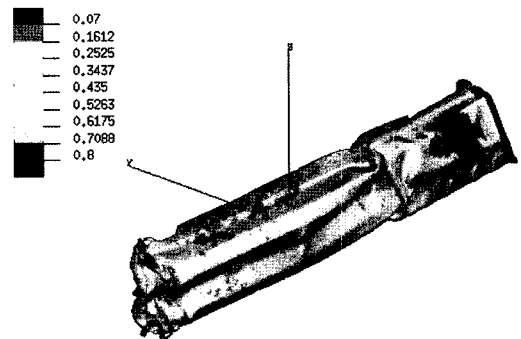


Fig. 8 Maximum equivalent stress distribution of model-2 at t=18ms

경우, 접합이 발생하는 부분의 앞쪽은 엔진 룸 안쪽 (-y방향)으로 휘게 되며, Reinforce가 있는 경우 집합이 발생하는 부분의 앞쪽은 엔진 룸 바깥쪽(+y방향)으로 휘다. 여기서 model-3의 길이방향의 변형량이 작은 것은 부록 Table A의 x-z 평면에서 변형을 보면 그 이유를 알 수 있다. 즉, 다른 모델들은 접합(folding)의 위치 부근에서만 주요 변형이 발생하나, model-3은 Backward Assembly에서도 큰 변형이 유도되고 있다. 이로 인해 충격력에 대한 저항이 커진 것으로 판단된다. 또한, model-4에 비해 Backward Assembly에 큰 응력이 유도되어 객실의 보전에 문제가 있는 것으로 판단된다.

4.2.2 소형 승용차의 경우

Table 3의 2가지 모델의 변형형상(t=18ms)을 비교하면 Fig. 9, 10과 같다. Front End가 있음으로써 전체적인 응력값은 Front End가 없는 것에 비해 높은 편이나, 특히 유의할 점은 Front End가 있는 경우(model-B)의 후방부(Backward Assembly에 가까운 쪽의 격인 부분)의 응력이 Front End가 없는 경우(model-A)에 비해 현저히 낮다는 점이다. 이 점은 Fig. 10과 같이 Front End를 부착함으로써 굽힘형 붕괴를 방지하면서 축방향의 붕괴가 쉽게 진행되도록 돕는 역할을 하고 있음을 알 수 있다.

4.3 충격력

4.3.1 중형 승용차의 경우

Fig. 11에서 보는 바와 같이 Front End가 없는 경우(model-1과 model-3)와 Front End가 있는 경우(model-2와 model-4)를 비교해보면, Front End를 부

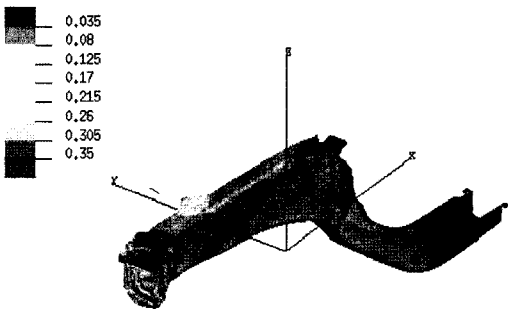


Fig. 9 Maximum equivalent stress distribution of model-A at t=18ms

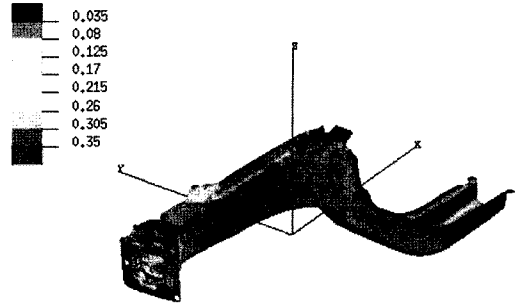


Fig. 10 Maximum equivalent stress distribution of model-B at t=18ms

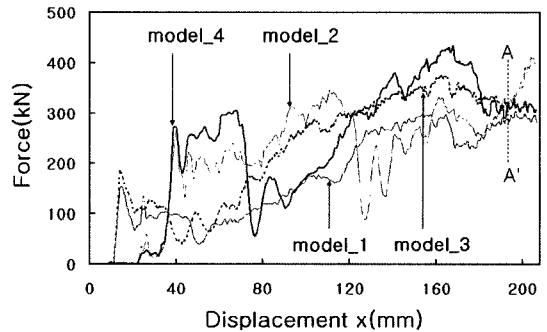


Fig. 11 Crash force-displacement history of the four models

착함으로써 초기의 충격력이 크게 작용함을 관찰할 수 있다. 또한, Front End가 없는 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 보이거나, model-2의 경우 120~160mm 사이에서 큰 변화를 보인다. 또한, model-1과 model-3을 비교해보면, Reinforce가 있음으로써 전반적으로 충격력이 약간 증가함을 알 수 있다.

4.3.2 소형 승용차의 경우

Fig. 12에서 보는 바와 같이 Front End가 있는 경우(model-B)가 없는 경우(model-A)에 비해 초기 충격력의 피크가 크게 나타나고 있으며, 전반적으로 충격력도 크게 작용함을 알 수 있다.

4.4 종합적 검토

중형 승용차(2050kg)의 프론트 사이드 조립체와 소형 승용차(1330kg)의 프론트 사이드 조립체의 붕

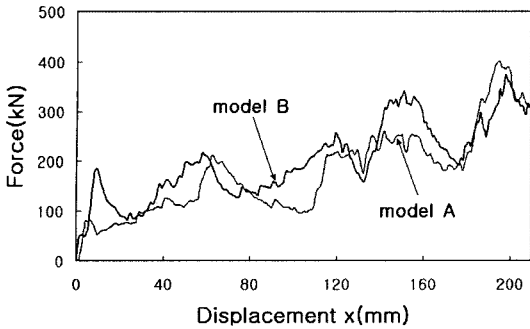


Fig. 12 Crash force-displacement history of the two models

피 과정을 살펴보면, 소형 승용차의 경우 중형에 비해 강성이 작은 관계로 충돌에너지를 효과적으로 흡수할 수 있도록, 즉 축방향 접힘 모드(axial folding crush mode)가 발생하도록 설계되었음을 확인할 수 있으며, 중형의 경우 소형차에 비해 강성이 충분히 크므로 객실의 보전을 위해 축방향 접힘 후 굽힘이 진행되는 혼합형 붕괴모드가 발생하도록 설계하였음을 확인할 수 있다. 이와 같은 붕괴모드는 부록 Table A의 model-1 및 Fig. 9의 model-A의 변형 형상에서 보는 바와 같이 주요 부품이 부착되지 않은 상태에서 결정되고 있다.

Front End는 프론트 사이드 조립체를 차체와 연결시키는 부품으로서 중형 및 소형에 관계없이 이 부품이 부착됨으로써 충돌시 이 부품의 바로 뒤쪽에 높은 응력의 발생을 유도되며, 동시에 초기 충격력 피크의 출현시기를 지연시키면서 초기 충격력의 피크치를 증가시킨다. 또한, Backward Assembly에 가까운 쪽의 격임 부분인 후방부의 응력이 Front End가 없는 경우에 비해 현저히 낮춤으로써 굽힘형 붕괴형태를 억제하는 역할을 한다. 이러한 역할은 소형차량의 것에서 두드러지게 나타나도록 설계하여 에너지흡수가 효율적인 축방향 접힘 붕괴형의 발생을 돕고 있다. 한편, 소형에 비해 중형의 경우 Reinforce를 설치함으로써 굽힘형 붕괴를 유도하고 있다. 즉 Reinforce는 접힘부의 앞쪽의 강성을 증가시켜 접힘부 뒤쪽에 높은 응력과 변형을 유도시킴으로써 굽힘형 붕괴를 유도하는 역할을 한다.

5. 결론

본 연구에서는 충돌시 프론트 사이드 조립체 및

그것의 주요 부품들의 역학적 역할을 파악하기 위하여, 두 종의 외국 승용차의 프론트 사이드 조립체를 역설계적 기법으로 모델링하고 유한요소 해석을 실시하여, 에너지 흡수능력, 충돌하중, 변형속도, 응력분포 및 변형형상을 검토하였다. PAM-Crash 2G가 제공하는 FBWC 셀 요소에 채용하여 충돌해석을 수행하였다. 시뮬레이션 결과를 분석 검토하여 중형 승용차의 것과 소형 승용차의 것의 차이점, 설계의 주안점 및 주요부품의 역할을 규명하였다.

- 1) 중형 승용차(2050kg)의 프론트 사이드 조립체와 소형 승용차(1330kg)의 프론트 사이드 조립체의 붕괴과정을 살펴보면, 소형승용차의 경우 중형에 비해 강성이 작은 관계로 충돌에너지 흡수하는 구조물이 효율적으로 에너지를 흡수하기 위해 축방향 접힘모드(axial folding crush mode)가 발생하도록 설계되었음을 확인할 수 있으며, 중형의 경우 소형차에 비해 강성이 충분히 크므로 객실의 보전을 위해 축방향 접힘 후 굽힘이 발생하는 혼합형 붕괴 모드가 발생하도록 설계하였음을 확인할 수 있다. 이러한 붕괴모드는 기본적으로 프론트 사이드 부재의 기본 구조만으로 결정이 된다.
- 2) Front End는 프론트 사이드 조립체를 차체와 연결시키는 부품으로서 중형 및 소형에 관계없이 이 부품이 부착됨으로써 충돌시 이 부품의 바로 뒤쪽에 높은 응력의 발생을 유도되며, 동시에 초기 충격력 피크의 출현 시기를 지연시키면서 초기 충격력의 피크치를 증가시킨다. 또한, 후방부(Backward Assembly에 가까운 쪽의 격임 부분)의 응력을 Front End가 없는 경우에 비해 현저히 낮춤으로써 굽힘형 붕괴모드를 억제하는 역할을 한다. 이러한 역할은 중형보다는 소형 승용차의 것에서 두드러지게 나타나도록 설계하여 에너지흡수가 효율적인 축방향 접힘 모드를 유도하고 있다.
- 3) 중형승용차의 Reinforce는 접힘부의 앞쪽의 강성을 증가시켜 접힘부 뒤쪽에 높은 응력과 변형을 유도시킴으로써 굽힘형 붕괴를 유도하는 역할을 한다.

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 in 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) P. D. Bois, C. C. Chou, B. B. Fileta, T. B. Khalil, A. I. Crashworthiness and Occupant Protection, King, H. J. Mertz and J. Wisman, Vehicle American Iron and Steel Institute, 2004.
- 7) Theory Notes Manual of PAM-CRASH/PAM-SAFE, PAM System International S. A., 2000.
- 8) T. J. R. Hughes, The Finite Element Method. Linear static and Dynamic Finite Element Analysis, Prentice Hall, New Jersey, 1987.
- 9) K. J. Bathe, Finite Element Procedures, Prentice Hall, New Jersey, 1996.
- 10) Y. W. Kim, J. H. Kim and K. S. Jeong, "Crash FE Analysis of Structural Parts of a Car for Reverse Engineering," Fall Conference Proceedings, Vol. III, KSAE, pp.1565-1573, 2005.

후 기

이 논문은 2005년도 교육인적자원부의 지방대학 혁신역량 강화사업(NURI)에 의하여 지원되었음.

부 록

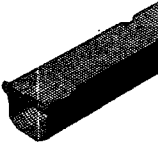

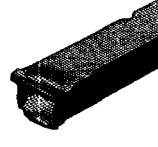
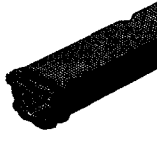
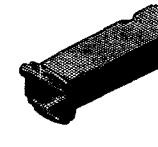
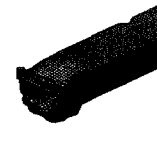
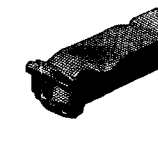
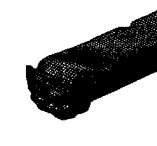
Table A Deformation and Maximum equivalent stress distribution of four models in Table 2

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

Maximum equivalent stress over thickness [Gpa]

	0.05
	0.0987
	0.1475
	0.1962
	0.245
	0.2937
	0.3425
	0.3912
	0.44

Table B Deformation history of the two models in Table 3

Time	Model-A	Model-B
1ms		
3ms		
5ms		
7ms		
9ms	