

60TRIP강을 적용한 차체의 측면충돌 해석

임지호* · 김기풍 · 허훈

한국과학기술원 기계공학과

Side Impact Analysis of an Auto-body with 60TRIP Steel for Side Members

JiHo Lim* · KeePoong Kim · Hoon Huh

*Department of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon 350-701, Korea
(Received 7 October 2002 / Accepted 30 December 2002)*

Abstract : The side impact behavior has been investigated when the high strength steel 60TRIP(Transformation Induced Plasticity) is replaced for the conventional low-carbon steel for weight reduction of an auto-body. The side impact analysis was carried out as specified in US-SINCAP with the center pillar and the side sill of the conventional steel or 60TRIP. For accurate impact analyses, the dynamic material properties are adopted with the Johnson-Cook model. The analysis results demonstrate that the penetration of the side members is remarkably reduced when 60TRIP is employed for the center pillar and the side sill replacing the conventional steel. The crashworthiness in the side impact is considerably improved with less penetration of the side members and less acceleration of the opposite floor.

Key words : Side impact analysis(측면충돌해석), TRIP steel(트립 강), Johnson-Cook model(존슨-쿡 모델), Crashworthiness(충돌안전성)

1. 서론

환경오염이 사회적으로 중요한 문제로 부각되면서 세계적으로 자동차 배기가스 및 연비의 규제가 강화되고 있다. 충돌 안전성에 대한 규제도 계속 강화되고 있어 이에 대응하여 각국의 자동차사는 가볍고 충돌 안전성이 우수한 자동차를 개발하려고 연구-노력하고 있다. 차량의 경량화는 교통 환경의 변화와 차량의 증가에 따른 자동차 사고 유형의 변화를 고려하여 충돌 안전성을 확보할 수 있도록 수행되어야 한다. 자동차의 측면충돌은 정면충돌에 비하여 충돌에너지의 대부분을 흡수할 수 있는 구

조물이 없고, 승객과 차량사이에 제한된 공간으로 인하여 승객에게 치명적인 상해를 줄 수 있다. 아직까지 정면충돌이 전체 교통사고의 높은 비중을 차지하고 있지만 도시지역을 중심으로 측면충돌에 의한 사고의 빈도가 증가하고 있어, 최근에는 측면충돌 거동이 안전도 향상의 중요한 관건이 되고 있다.

이런 측면충돌 사고의 심각성에 따라 미국과 유럽 등의 각국에서는 측면충돌에 대한 법규를 지정하였고, 최근에는 충돌안전성에 관한 상품성 검사가 각국이 지정한 충돌 법규보다도 엄격하게 실시되어 시판 중인 자동차에 대한 등급을 매기고 있는 실정이다. 따라서 자동차 제조업체들은 충돌 관련 법규 뿐만 아니라 상품성 검사에서도 좋은 결과를 얻기 위하여 개발단계에서부터 많은 비용과 시간

* To whom correspondence should be addressed.
ager73@mail.kaist.ac.kr

을 투자하여 충돌해석과 실차 시험을 하고 있다. 근간에는 신차의 개발기간이 줄어들고 개발비용을 줄이기 위한 노력이 요구되고 있어서 자동차 개발 단계에서의 유한요소 충돌해석이 보다 중요해지고 있다.

자동차를 가볍게 만들면서 충돌 안전성을 향상시키기 위하여는 강도가 높은 재료를 사용한 자동차를 제조하여야 한다. 특히 자동차 전체 중량의 30% 정도를 차지하는 강판의 고강도화는 자동차 경량화에 있어 매우 중요하다. 높은 강도뿐만 아니라 다양한 형상의 자동차 부품을 성형하기 위하여는 우수한 성형성도 요구되는데 TRIP강(Transformation Induced Plasticity Steel)은 이러한 요구에 부응하는 재료로서 현재 연구가 활발히 진행되고 있다. TRIP강은 1960년대에 Zackay 등에 의하여 처음 개발된 것으로 강 중에 잔류한 오스테나이트가 변형 중에 변태하는 변태유기소성의 기구를 이용한 강을 말한다. 성형중에 잔류 오스테나이트가 높은 강도의 마르텐사이트로 변태하면서 가공경화 속도가 빨라져서 연신율이 증가한다.

본 논문의 목적은 60TRIP 강판을 차체 측면부재에 적용하였을 경우 적용부위에 따른 측면충돌 특성을 고찰하는 것이다. 이를 위하여 센터 필러(center pillar)와 사이드 실(side sill)에 60TRIP 강판을 적용하여 각각에 대한 측면충돌 유한요소해석을 수행하였고, 해석결과의 신뢰도를 높이기 위하여 변형률 속도가 고려된 동적 물성모델을 사용하였다.¹⁾ 60TRIP강을 적용한 경우에 대하여 센터 필러와 사이드 실의 변형형상과 충돌 반대편 바닥의 가속도를 비교함으로써 60TRIP 강판의 적용이 충돌거동에 미치는 효과를 분석하였다.

2. 측면충돌 법규

측면충돌에 관한 법규는 북미의 NHTSA의 법규와 유럽의 법규가 대표적인데 북미의 FMVSS(Federal Motor Vehicle Safety Standard) 214 시험방법은 15mph로 진행되는 차량을 30mph로 달리는 차량이 측면에서 충돌하는 상황을 재현한 것으로, 시험방법은 27의 경사를 가진 대차가 정지된 시험 차량의 측면을 33.5mph(53.9km/h)의 속도로 충돌하는 시험

방법이다. Fig. 1은 FMVSS 214 시험방법을 나타낸 그림이다.²⁾

이동 대차는 전체 무게가 1367 kg으로 이동 대차의 왼쪽 끝단이 차체의 바퀴축 간의 중간지점에서부터 940 mm 떨어진 A 필러의 지점에 충돌하게 위치되어야 한다. 대차의 전방부에 있는 이동 충돌벽(moving deformable barrier)은 벌집형 알루미늄 구조로 되어 있고, 다른 강성을 갖는 범퍼부와 전면부로 구성되어 있어서 실차처럼 충돌 변형하도록 되어

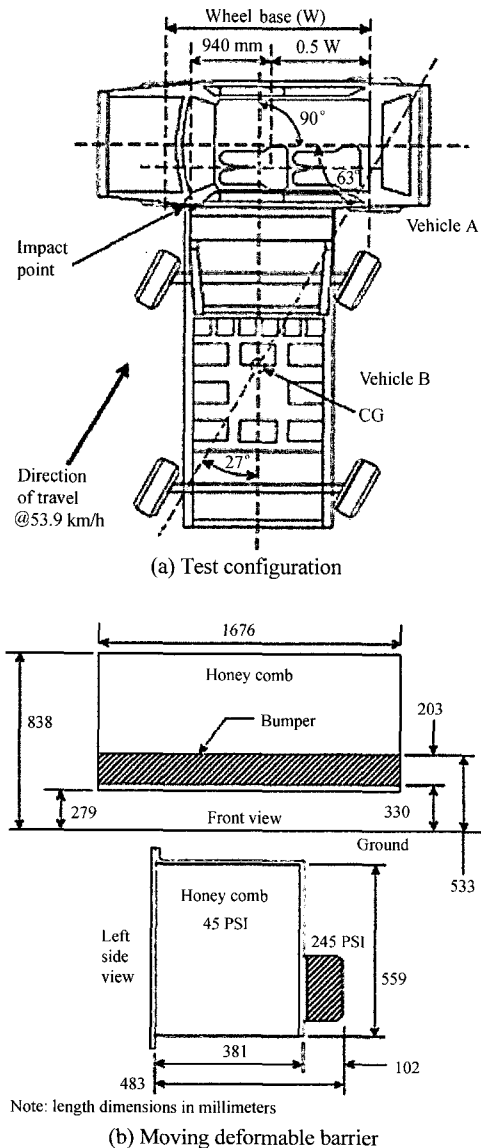


Fig. 1 FMVSS 214 test

있다. 실제 시험 시에는 인체모형을 좌석에 위치시키고 인체모형에서 측정된 가속도와 하중 등을 평가하여 차체의 안전성을 평가한다.

최근에는 상품성 평가제도로서 NCAP(New Car Assessment Program)이 시행되고 있는데 북미의 측면충돌인 US-SINCAP은 FMVSS 214보다 엄격하게 시행되어 평가항목은 변화가 없지만 대차의 충돌 속도를 38.5mph로 높여서 정하고 있다. 본 논문에서는 US-SINCAP에 의거하여 측면충돌해석을 수행하였다.

3. 차체의 측면충돌 해석

3.1 측면충돌 모델

본 논문에서 고려한 측면충돌 해석모델은 Fig. 2와 같다. 차체모델은 쉘요소, 보요소로 구성되어 있고 대차모델은 연속체 요소, 쉘요소로 구성되어 있으며, 대차의 이동벽은 벌집구조를 표현하기 위한 연속체 요소로 구성되어 있다.

해석은 외연적 유한요소 프로그램으로 충돌해석에 많이 사용되는 LS-DYNA3D³⁾를 이용하였다. 해석은 US-SINCAP에 의거하여 측면충돌 해석을 수행하였고, 승객 상해치를 고려하기 위한 인체모형은 적용하지 않았다. 충돌 시간은 70 msec이고 총 해석시간은 HPC320에서 약 24시간 정도 소요되었다.

본 논문에서는 차체용 강판의 동적 거동을 Johnson-Cook 물성모델⁴⁾을 사용하여 고려하였다. Johnson-Cook 물성모델은 Ludwick 방정식을 기초로 하여 재료의 동적 거동을 나타낸 식으로 철, 구리, 알루미늄, 탄소강, 공구강 등 많은 재료에 관하여 이용 가능한 데이터가 많으며 유한요소 해석 프로그램에의 적용성이 용이하기 때문에 많이 사용되고 있다. 이 물성모델은 로그 함수를 이용하여 변형률 속도 민감도를 표현하고 있으며, 변형률 속도가 1/sec인 경우에 대하여 정규화하여 사용하게 된다. Johnson-Cook 물성모델은 다음과 같이 표현된다.

$$\bar{\sigma} = (A + B \bar{\epsilon}^n)(1 + C \ln \bar{\dot{\epsilon}})(1 - T^{*m}) \quad (1)$$

where,

$$T^* = \frac{T - T_{room}}{T_{melt} - T_{room}} \quad (2)$$

물성모델의 첫 번째 항은 재료의 변형률 경화효과를 나타내며, 두 번째 항은 변형률 속도경화를 나타낸다. 세 번째 항은 열적 연화 효과를 나타낸다. 본 논문에 사용된 Johnson-Cook 물성모델의 계수는 인장형 홉킨슨바 시험기 (tension split Hopkinson bar)와 인장시험기를 이용하여 얻은 것이다.^{5,6)}

Fig. 3은 센터 필러와 사이드 실에 적용한 60TRIP 강판과 현재 사용중인 강판의 하나인 SPCC 강판의 변형률 속도가 1/sec일 때의 응력-변형률 선도를 비교한 것이다. TRIP강은 변형 중에 잔류 오스테나이트가 높은 강도의 마르텐사이트로 변태하면서 가공경화속도가 빨라져서 인장강도가 증가하기 때문에 60TRIP 강판이 SPCC 강판보다 유동응력이 두 배 이상 크면서도 가공 경화률이 더 큰 것을 알 수 있다.

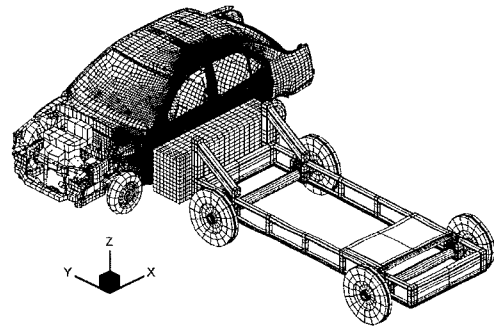


Fig. 2 Finite element model for side impact analysis

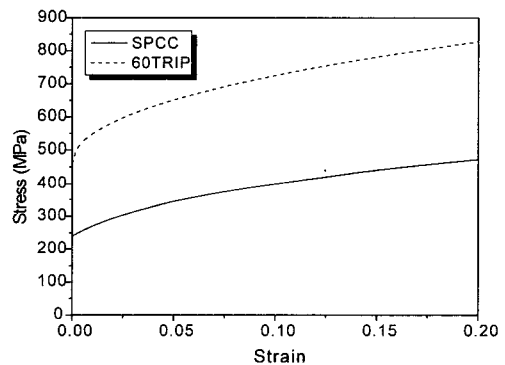


Fig. 3 Load-displacement curves of 60TRIP steel and the conventional steel SPCC at 1/sec

3.2 측면충돌 해석

60TRIP 강판을 차체 측면부재에 적용하였을 경우 차체 충돌 시 차체의 변형 및 안전성에 미치는 영

향을 확인하였다. 극단적인 경향을 확인하기 위하여 센터 필러를 모두 60TRIP 강판으로 대체한 경우, 사이드 실을 60TRIP 강판으로 모두 대체한 경우, 두 부재 모두 60TRIP 강판으로 대체한 경우에 관하여 측면충돌 해석을 수행하였고, 기존의 물성을 적용한 모델과 비교하여 각 측면 부재에 고장력 강판의 적용효과를 고찰하였다.

Fig. 4와 Fig. 5는 기존의 강판을 적용한 현재 모델과 센터 필러와 사이드 실 모두에 60TRIP 강판을 적용한 모델의 충돌 후 35msec과 70msec일 때의 차체의 변형형상을 나타낸 그림이다. 약 35msec까지는 관성 때문에 차체가 뒤로 밀리지 않고 대차의 충돌에 의한 변형이 측면부에 집중되지만 약 40msec 이후는 차체 전체가 강제운동을 하면서 변형량의 증가도 작아진다. 두 모델의 측면충돌은 그 경향은 비슷하지만 60TRIP강을 적용한 모델의 전체적인 변형정도가 기존 모델에 비하여 감소하였다.

측면충돌이 일어난 후 차체는 강제운동과 변형이 동시에 일어난다. 따라서 실제 차체의 변형량을 관찰하기 위하여 강제운동을 제외한 차체의 변형을 확인할 필요가 있다. 측면 부재의 객실 방향으로의 침입량을 정확하게 고려하기 위하여 Fig. 2와 같이 X축은 차체의 길이 방향, Y축은 차체의 폭 방향, Z축은 차체의 높이 방향으로 정의하고, YZ평면에 관하여 센터 필러의 변형량을, XY 평면에 관하여 사이드 실의 변형량을 Fig. 7처럼 그래프로 도시하였다. 그래프에 표시된 센터 필러와 사이드 실의 위치는 Fig. 6과 같다. 변형 형상의 차이를 정상적으로 쉽게 확인하기 위하여 그래프에서 X, Y, Z 각 축의 비율을 다르게 하였고 그래프에는 차체의 강제운동으로 나타나는 각 부재의 변위량은 제거한 순수한 변형량만을 도시하였다. 본 논문에서는 조수석 쪽의 앞문을 간략화한 강체를 기준으로 차체의 변형에서 강체의 운동을 제외하였다.

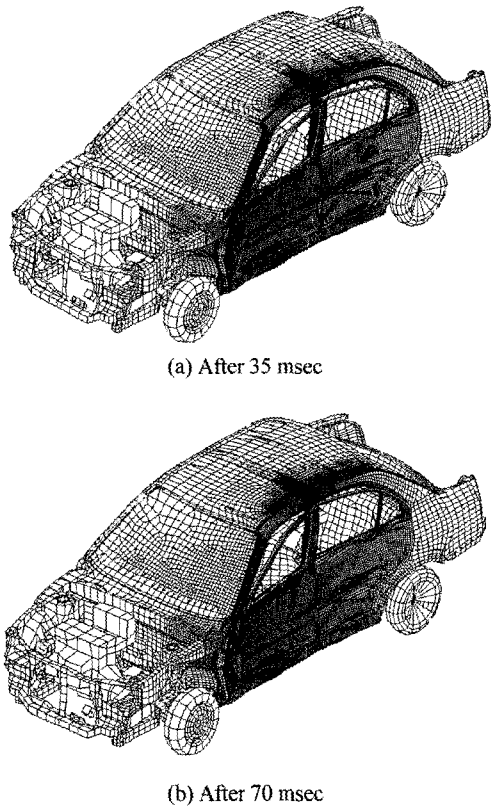


Fig. 4 Deformed shapes of an autobody with conventional material

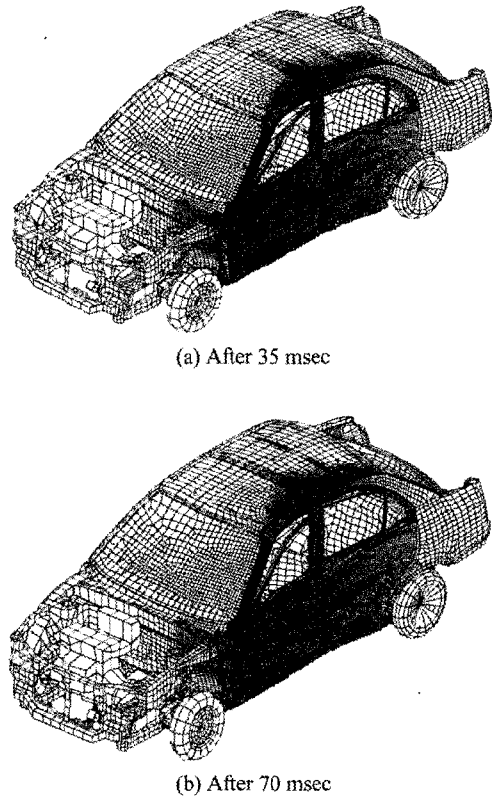


Fig. 5 Deformed shapes of an autobody applied 60TRIP steel to center pillar and side sill

이러한 방법으로 US-SINCAP에 의거한 유한요소 해석 결과의 센터 필러와 사이드 실의 내측 판넬과 외측 판넬의 시간에 따른 변형 모습을 Fig. 7에 표시하였다. 내측 판넬과 외측 판넬의 변형경향은 비슷하고 외측판넬이 보다 더 많이 변형하지만, 측면충돌 시 인체에 직접적인 영향을 주는 부분은 내측 판넬이기 때문에 이후로는 내측 판넬만을 고찰한다.

Fig. 8은 센터 필러에 60TRIP을 적용하였을 경우

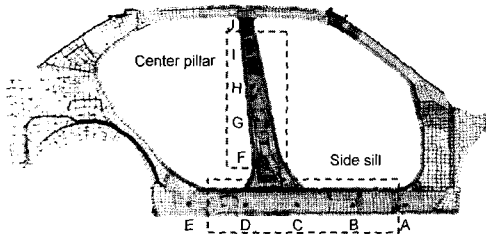
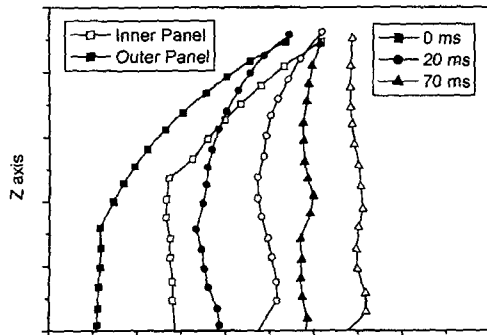
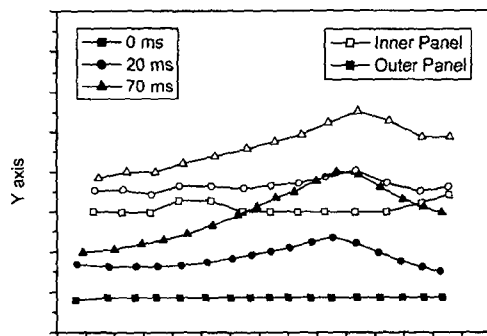


Fig. 6 Center pillar and side sill



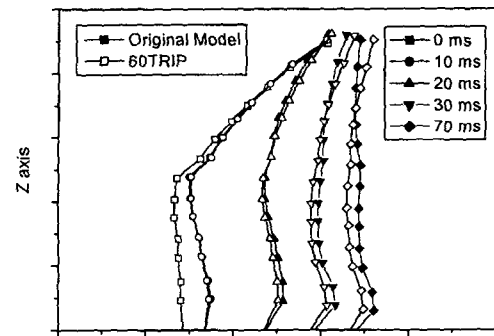
(a) Center pillar



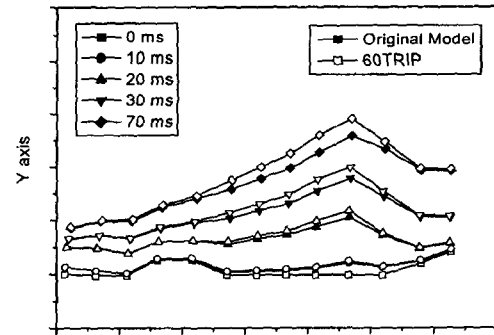
(b) Side sill

Fig. 7 Deformed profile of inner and outer panel of an auto-body with conventional materials for the US-SINCAP test

에 대한 센터 필러와 사이드 실의 강체운동을 제외한 내측 판넬의 변형형상을 나타낸 것이다. 대차의 범퍼가 부딪히는 센터 필러의 하단부에서 변형이 크게 발생하고, 사이드 실에서는 센터 필러와 연결되는 부분에서 안쪽으로 크게 변형하는 경향이 나타난다. Fig. 8(a)에서 볼 수 있듯이 센터 필러의 전체적인 변형량은 기존의 물성을 사용한 모델의 경우보다 60TRIP 강판을 사용한 경우가 작지만, 사이드 실과 연결된 센터 필러 하단부로 갈수록 그 차이가 감소하고 센터 필러 상단부는 60TRIP 강판을 적용한 모델의 변형이 오히려 더 크다. Fig. 8(b)에서 60TRIP 강판을 적용한 경우가 기존의 물성을 갖는 모델에 비하여 사이드 실이 더 많이 변형함을 알 수 있다. 즉, 60TRIP 강판을 센터 필러에 적용하면, 센터 필러의 강성은 증가하여 전체적인 변형량은 감소하지만 사이드 실의 변형은 증가한다. 그 이유는 센터 필러의 강성이 증가하면 센터 필러 자체의 변



(a) Center pillar



(b) Side sill

Fig. 8 Deformed profile of inner panel of an auto-body

형은 억제되지만 센터 필러의 상단부와 사이드 실은 센터 필러가 흡수하지 못한 충돌에너지가 전달되기 때문에 더 큰 변형이 발생하게 된다. 이 결과는 측면충돌 시 승객의 흉부 높이에서의 변형은 억제되면서 상체의 상해가 줄어드는 반면에, 골반 높이에서의 변형이 증가하여 승객의 상해치를 골반부분으로 집중시키는 효과가 있다는 것을 의미한다.

Fig. 9는 사이드 실에 60TRIP 강판을 적용한 모델에 대한 센터 필러와 사이드 실의 변형 형상을 나타낸 그림이다. 센터 필러 하단부와 사이드 실은 센터 필러의 강도가 증가하였기 때문에 변형이 감소하지만, 센터 필러의 상단부는 사이드 실에 대한 60TRIP 강판의 적용 효과가 거의 없어서 기존의 재료를 사용한 모델에 비하여 루프 레일(roof rail)과 연결된 부분이 조금 더 변형했다. 사이드 실에 고장력강을 적용하여도 센터 필러의 변형은 크게 변하지 않고 사

이드 실과의 접합부의 변형이 감소하는 정도이다.

Fig. 10은 센터 필러와 사이드 실 모두에 60TRIP 강판을 적용한 경우에 측면부재의 변형형상을 나타낸 그림이다. 이 경우는 센터 필러와 사이드 실에 60TRIP 강판을 각각 보강한 효과가 합쳐져서 나타난다. 따라서 센터 필러 중단부의 변형이 크게 감소하지만, 사이드 실의 변형은 센터 필러와 사이드 실에 60TRIP 강판을 적용한 효과가 서로 상반되므로 변형 양상이 크게 변하지 않았다. 센터 필러의 상단부는 센터 필러가 변형하지 못하여 흡수하지 못한 에너지가 루프 레일을 통하여 전달되기 때문에 오히려 변형이 증가하였다.

실차 실험의 가속도 측정 부위인 Fig. 11의 충돌면 반대편 바닥 P점과 Q점에 대하여 차체 측면충돌 해석 시 가속도를 추적하였다. Fig. 12(a)의 P점에서의 가속도는 60TRIP 강판의 적용에 큰 영향을 받지

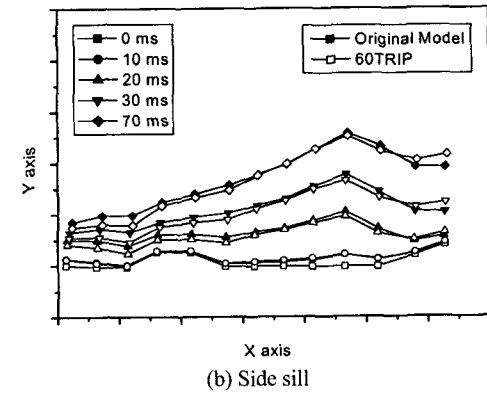
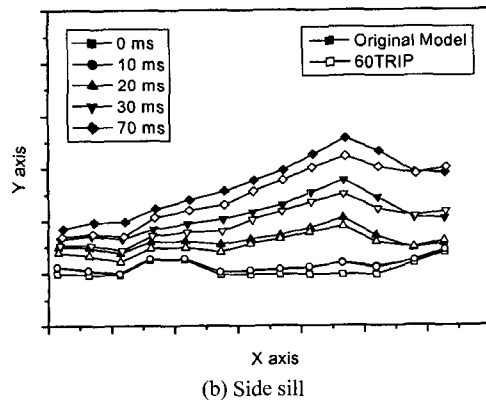
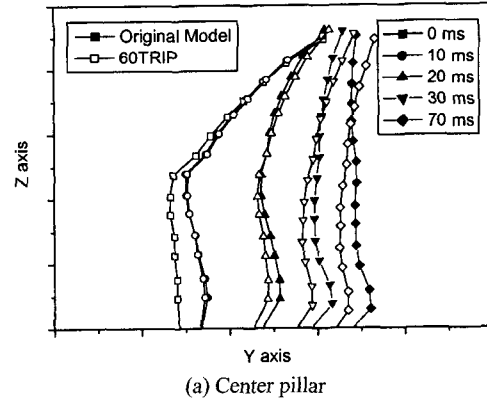
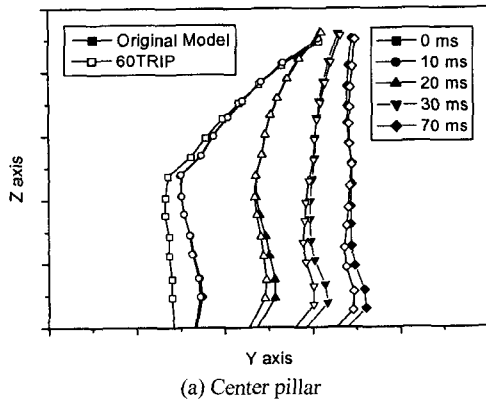


Fig. 9 Deformed profile of inner panel of an autobody applied 60TRIP steel to side sill

Fig. 10 Deformed profile of inner panel of an autobody applied 60TRIP steel to center pillar and side sill

않지만, Fig. 12(b)의 Q점의 가속도는 센터 필러에 60TRIP 강판이 적용될 뉼 경우 그 크기가 작아지고 가속도의 진동도 크게 감소한다. Fig. 6에 표시된 내측 센터 필러 중단의 H점의 상대속도는 센터 필러에 60TRIP 강판을 보강하는 경우 그 크기가 감소했지만, 그 경향은 거의 변하지 않는 것을 Fig. 13에서 알 수 있다.

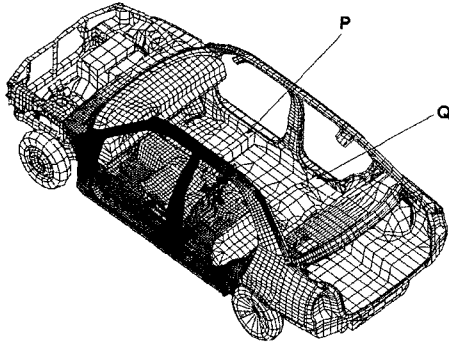
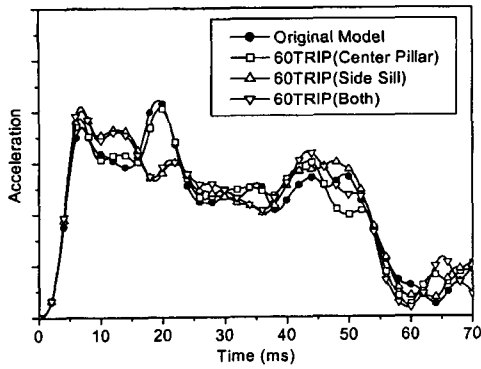
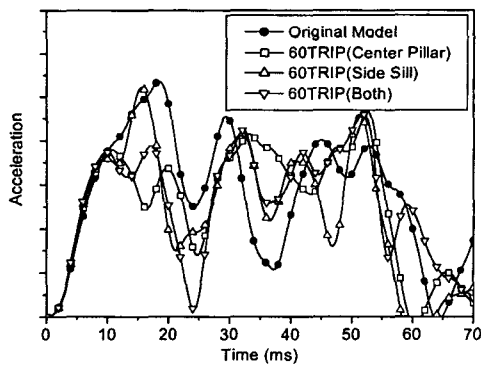


Fig. 11 Tracing points for acceleration



(a) Point P



(b) Point Q

Fig. 12 Acceleration of tracing points

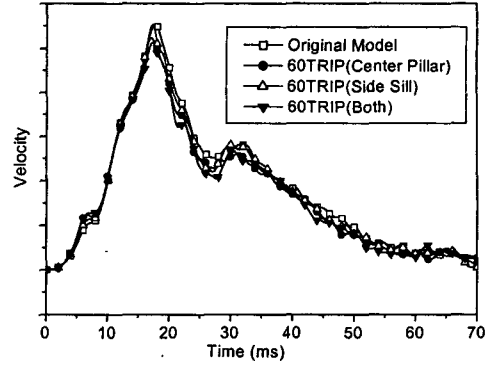


Fig. 13 Relative penetrating velocity of at the point H

4. 결론

본 논문에서는 US-SINCAP에 의거하여 차체의 측면충돌해석을 수행하여 차체의 변형거동 특성을 살펴보았다. 차량 경량화의 방법으로 차체 측면부재에 고장력 강판을 적용하였을 때의 효과를 알아보기 위하여 센터 필러와 사이드 실에 60TRIP 강판을 적용하여 측면충돌 유한요소해석을 수행하였다. 60TRIP 강판을 적용한 경우에 대하여 센터 필러와 사이드 실의 변형형상을 비교하였고, 이를 위하여 측면충돌모델에 대한 유한요소 모델링을 수행하고 변형률 속도를 고려한 동적 물성모델을 해석에 적용하기 위하여 Johnson-Cook 모델을 채용하였다.

센터 필러에만 60TRIP 강판을 적용하였을 경우 센터 필러 중단부는 변형이 감소하지만 센터 필러 하단부와 사이드 실은 변형이 증가하였다. 사이드 실에만 60TRIP 강판을 적용하였을 경우 센터 필러 중단부는 변형에 거의 영향을 받지 않지만 센터 필러 하단부와 사이드 실은 변형이 감소하는 결과를 보였다. 센터 필러와 사이드 실 모두에 60TRIP 강판을 적용한 경우는 센터 필러와 사이드 실에 대한 효과가 혼합되어 센터 필러의 변형량이 감소하지만 사이드 실의 변형은 크게 영향을 받지 않음을 알 수 있었다.

고장력 강판을 센터 필러에 적용시킬 경우, 충돌 가속도와 충돌 속도를 감소시키면서 차체의 변형이 차체 하단에서 집중됨으로서 승객의 상체부분에 가해지는 충격이 감소하여 측면충돌 안전도가 향상될 것으로 예상할 수 있다. 고장력 강판을 센터필러와

사이드 실 모두에 적용시킬 경우, 사이드 실의 변형은 약간 작아지지만 센터 필러의 변형은 크게 작아지고 가속도도 현저히 감소하므로 승객에 대한 측면충돌 안전도가 매우 향상되는 것을 알 수 있다.

References

- 1) H. Huh, W. J. Kang, "Crash-worthiness assessment of Thin-walled Structures with the High-strength Steel Sheet," *Int. J. Vehicle Design*, Vol.30, Nos.1/2, pp.1-21, 2002.
- 2) NHTSA, Federal Motor Vehicle Safety Standard (FMVSS) 214, Side Impact Protection, 1990.
- 3) LSTC, LS-DYNA Keyword User's Manual, 1999.
- 4) G. R. Johnson, W. H. Cook, "A Constitutive Model and Data for Metals subjected to Large Strains, High Strain Rates and High Temperatures," *Proc. of 7th Int. Symposium on Ballistics*, pp.115-120, 1983.
- 5) W. J. Kang, S. S. Cho, H. Huh, D. T. Chung, "Modified Johnson-Cook Model for Vehicle Design," *Int. J. Vehicle Design*, Vol.21, Nos.4/5, pp.424-435, 1999.
- 6) H. Huh, W. J. Kang, S. S. Han, "A Tension Split Hopkinson Bar for Investigating the Dynamic Behavior of Sheet Metals," *Experimental Mechanics*, Vol.42, No.1, pp.8-17, 2002.