

대형트럭 승객거동과 상해치 해석을 위한 유한요소모델의 개발

오재윤[†] · 김학덕^{*} · 송주현^{**}
(2001년 11월 17일 접수, 2002년 5월 2일 심사완료)

Development of a Finite Element Model for Studying the Occupant Behavior and Injury Coefficients of a Large-sized Truck

Chae-Youn Oh, Hak-Duck Kim and Ju-Hyun Song

Key Words: Finite Element Model(유한요소모델), HIC(머리 상해치), CA(가슴 상해치), Occupant Behavior(승객거동), Injury Coefficient(상해치), Vehicle Pulse(감가속도 파형)

Abstract

This paper develops a finite element model for studying the occupant behavior and injury coefficients of a large-sized cab-over type truck. Since it does not have a room to absorb collision energy and deformation in front of the passenger compartment, the deformation is directly transmitted to the passenger compartment. Moreover, since its steering column is attached on the frame, severe deformation of the frame directly affects on the steering wheel's movement. Therefore, if the occupant behavior and injury coefficients analysis is performed using a finite element model developed based on a sled test, it is very difficult to expect acquiring satisfactory results. Thus, the finite element model developing in this paper is based on the frontal crash test in order to overcome the inherent problems of the sled test based model commonly used in the passenger car. The occupant behavior and injury coefficients analysis is performed using PAM-CRASH installed in super-computer SP2. In order to validate the reliability of the developed finite element model, a frontal crash test is carried out according to a test method used for developing truck occupant's secondary safety system in european community and japan. That is, test vehicle's collision direction is vertical to the rigid barrier and collision velocity is 45kph. Thus, measured vehicle pulses at the lower parts of the left and right B-pillar, dummy chest and head deceleration profiles, HIC(head injury criteria) and CA(chest acceleration) values, and dummy behavior from the frontal crash test are compared to the analysis results to validate reliability of the developed model.

1. 서론

유럽지역에서는 지난 10년 동안에 트럭이 다른 차종에 비해 월등히 빠른 비율로 증가하고 있다.

[†] 책임저자, 회원, 전북대학교 기계공학부,
메카트로닉스연구센터

E-mail : ohcy@moak.chonbuk.ac.kr

TEL : (063)270-2377 FAX : (063)270-2388

^{*} 회원, 전북대학교 정밀기계공학과 박사과정

^{**} 현대자동차 상용구조 연구팀

그리고 실제 트럭의 주행 거리의 증가 비율 또한 다른 차종에 비해 월등히 빠른 비율로 증가하고 있다.⁽¹⁾ 이에 따라 유럽지역에서 트럭과 관련된 치명적인 교통 사고 비율이 증가하고 있으며, 대략 전체 치명적인 교통사고의 30% 정도에 달하고 있다.⁽²⁾ 이 같은 트럭 안전성에 관한 심각한 상황을 깊이 인식하여 최근 들어 유럽지역과 미주지역 및 일본에서 트럭의 충돌 안전도 법규 제정에 관한 연구를 활발하게 진행하고 있다. 현재

에는 트럭과 후면 충돌하는 승용차가 *underrun*하는 것을 막기 위한 방안만이 의무 규제에 되어 있으나, 향후에는 승용차의 안전 법규에 버금가는 정도로 안전도 법규를 제정할 전망이다.

그리고 트럭의 *knee bolster*, 충격 흡수식 스티어링 컬럼, 붕괴식 스티어링 휠(*collapsible steering wheel*), 에어백 등과 같은 승객보호장구를 개발하여 충돌 안전성을 능동적으로 혹은 수동적으로 개선하고자 하는 연구도 활발히 수행하고 있다.^(1~5) 이와 같은 승객보호장구의 개발을 위해서는 많은 횟수의 충돌시험을 수행해야 한다. 그러나 대형 트럭의 경우에는 승용차에 비해 시험 차량의 확보, 시험 장소, 시험 비용 등 여러 점에 있어서 많은 어려움이 있으므로 실차 충돌시험에 의존하여 승객보호장구를 개발하기는 매우 어렵다. 그러므로 개발비용과 시간을 줄이기 위해서 신뢰성 있는 유한요소모델을 개발하여 활용하는 것은 필수라고 할 수 있다.

승용차의 경우는 통상적으로 에어백 등과 같은 승객보호장구 개발을 위해서 슬레드 시험(*sled test*)을 기반으로 하는 승객거동해석용 유한요소모델을 이용하고 있다. 그러나 캡 오버 타입인 트럭의 경우는 승용차와는 달리 충돌이 일어났을 때 차량 전방에 충돌에너지 및 변형을 흡수해 줄 수 있는 공간이 없으므로 전방의 변형은 그대로 객실 변형으로 전가된다. 또한 트럭은 스티어링 컬럼이 프레임에 장착되어 있어서, 프레임의 변형이 스티어링 컬럼의 움직임에 직접적인 영향을 미친다. 그러므로 프레임의 변형은 승객의 상해치에 많은 영향을 미친다. 따라서 트럭의 경우에는 승용차와 같이 슬레드 시험을 기반으로 하는 유한요소모델을 이용하여 승객보호장구를 개발하는데는 많은 문제점이 있다.

최근 들어 컴퓨터 하드웨어 및 소프트웨어의 급격한 발전에 힘입어 과거에 비해 상대적으로 큰 모델도 용이하게 다룰 수 있게 되었다. 그러므로 대형트럭의 경우는 슬레드 시험에 기반하는 승객거동해석용 모델 대신에 실차 충돌해석을 위한 모델을 이용하여 승객거동해석을 수행하는 것이 바람직하다 할 수 있다.

충돌특성 해석을 수행하기 위해 개발된 모델을 기반으로 하여 승객거동해석까지를 동시에 수행하면 슬레드 시험을 기반으로 하는 승객거동해석 모델을 이용하는 것에 비해 해석 시간은 많이 걸

릴 것이다. 그러나 이 기법을 활용하면 객실 및 프레임의 변형 등이 승객거동 및 상해치에 미치는 영향을 반영할 수 있으므로 해서 슬레드 시험을 기반으로 하는 승객거동해석 모델을 이용했을 때는 불가능했던 객실 내부의 승객 상해치에 직접적인 관련이 있는 부품(니볼스터, 스티어링 컬럼, 스티어링 휠 등)이나 에어백 등과 같은 승객보호장구의 설계에 활용할 수 있다. 그리고 실제 프레임과 같은 충돌과 관련된 주요 부품 등이 승객거동 및 승객 상해치에 미치는 영향을 예측할 수 있으므로 충돌 안전성 측면에서 효율적인 차량 설계를 수행할 수 있다.

본 연구에서는 대형트럭의 승객거동 및 상해치 해석을 수행하기 위한 유한요소모델을 개발한다. 승객거동해석은 슈퍼컴퓨터 SP2에 설치된 PAM-CRASH⁽⁶⁾를 이용하여 수행한다. 개발된 승객거동해석 모델의 신뢰성을 검증하기 위하여 45kph로 고정벽에 시험차량을 충돌시키는 실차충돌시험을 수행한다. 실차충돌시험으로부터 얻어진 주요 감속도 파형, 더미 머리와 가슴 가속도 파형, 승객거동 양상 및 주요 승객 상해치를 승객거동 및 상해치해석으로부터 얻은 결과와 비교하여 개발된 모델의 신뢰성을 검증한다.

2. 대형트럭 승객거동 해석을 위한 유한요소모델의 개발

본 연구에서 개발하게 되는 유한요소모델에서 충돌특성에 많은 영향을 미치는 부분은 프레임, 캡, 플로어, 범퍼 등이다. 그리고 승객거동 및 상해치에 많은 영향을 미치는 부분은 정면 충돌이 일어날 때 더미와 직접 접촉하거나 더미를 구속하여 더미의 거동 양상과 더미 상해치에 많은 영향을 미치는 스티어링 시스템, 크래쉬 패드, 시트, 안전벨트 등이다.

본 연구에서는 각 단품들의 물성치를 나타내기 위하여 PAM-CRASH에서 제공하는 네 가지 재료 모델을 사용하였다. 탄성재료모델은 엔진이나 변속기 등의 단품 등에 사용되었다. 강재료모델은 엔진 마운팅 등과 같은 각 단품의 마운팅 점에 사용되었다. 고무류는 충돌해석을 수행하는데 많은 역할을 담당하지 않으므로 간단한 선형모델로 근사하여 사용하였다. 탄소성(*elastic-plastic steel*)재료모델은 프레임, 전면 판넬, 범퍼 등과

같이 변형되면서 충돌 특성에 직접적인 영향을 미치는 부품들에 사용되었으며, Table 1과 같은 특성 값들을 가진다. Table 1의 비선형 부분은 Fig. 1에서 보여주는 바와 같이 piece-wise linear 하게 모델링하였다.

대형트럭과 같은 상용차의 경우에 프레임은 차량 전체 충돌에너지의 60~70% 정도를 흡수하고 전달하는, 차량 전체의 충돌 특성을 좌우하는 가장 중요한 부재이다.^(7,8) 프레임은 충돌시 전반부에서 거의 대부분의 변형이 일어나므로 이곳의 요소 크기를 작게 모델링하였다. 특히 프레임 앞부분 두 곳이 심하게 좌굴되면서 크게 변형이 일어나므로 인해 프레임과 라디에이터가 접촉을 하게된다. 따라서 라디에이터와 프레임사이 접촉을 정의하여 적절한 변형을 모사할 수 있도록 하였다. 프레임 모델은 16개의 부품으로 구성하였으며, 18,323개의 요소를 이용하여 모델링하였다. Fig. 2는 프레임 유한요소모델을 보여준다.

캡은 차량이 고정벽에 충돌할 때 앞부분과 뒷부분이 변형되면서 충돌에너지의 상당 부분을 흡수해 준다. 캡 앞부분은 정면 충돌에 의해 변형이 되며, 이 변형은 곧바로 A-Pillar 및 크래쉬 패드를 통해 객실의 변형으로 이어진다. 그리고 차량 충돌시 카고 박스는 관성에 의해 앞으로 밀리면서 캡의 뒷부분과 2차 충돌을 일으키는데, 이 또한 캡의 변형에 상당한 영향을 미친다. 캡 바닥에 위치하는 플로어는 캡의 구조적인 강성을 유지해주고 있는 부분으로, 충돌에 의한 범퍼, 프레임, 캡의 변형은 최종적으로 플로어의 변형으로 바뀌면서 객실의 변형으로 반영된다. 그러므로 플로어는 안전공간의 확보 및 승객 상해치에 직접적으로 영향을 미치게 되는 중요한 부분이라 할 수 있다. 이와 같은 대형트럭 캡 및 플로어의 변형 특성 및 양상을 잘 반영할 수 있도록 캡과 플로어를 모델링하였다. 캡과 플로어 모델은 25개의 부품으로 구성하였으며, 17,673개의 요소를 이용하여 모델링하였다. Fig. 3은 캡과 플로어 유한요소모델을 보여준다.

범퍼는 충돌 초기에 맨 먼저 고정벽에 부딪히면서 충돌에너지를 흡수하는 부재로, 대형트럭의 경우 범퍼는 2~3% 이내의 아주 적은 양의 충돌에너지만을 흡수하므로 전체 충돌 특성에는 거의 영향을 미치지 않는다.^(7,8) 그러나 차량이 고정벽에 충돌을 할 때 초기에 급격한 충돌에너지의 상

Table 1 Elastic-plastic material model

Elastic-Plastic	Material Type 102
Density	$7.85 \times 10^{-9} \text{ kg/mm}^3$
Young's Modulus	210 KN/mm^2
Poisson's Ratio	0.3
Non-Linear Part	Piece-wise Linear

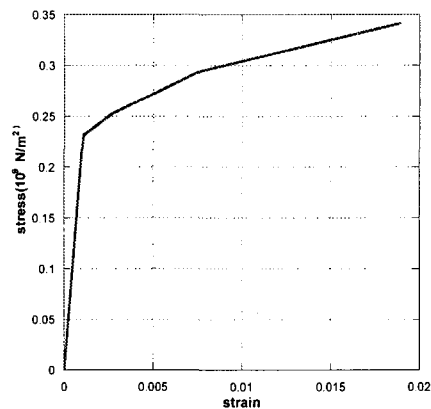


Fig. 1 Stress and strain curve of non-linear parts

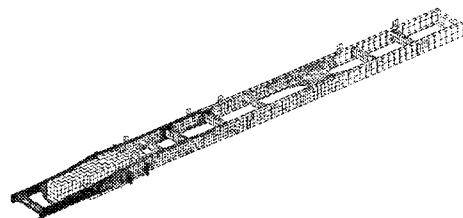


Fig. 2 Frame finite element model

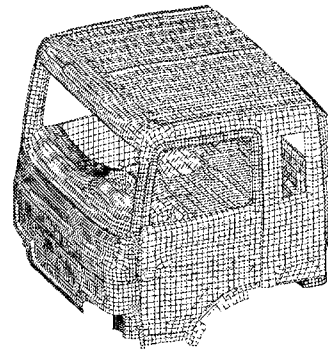


Fig. 3 Cab and floor finite element model

승을 안정화 시켜주는 부품이다. 그러므로 범퍼는 승객거동 및 상해치 해석을 초기에 안정화시키는데 중요한 역할을 수행한다. 범퍼 모델은 4개의 부품으로 구성하였으며, 1,582개의 요소를 이용하여 모델링하였다.

타이어는 차량 정면 충돌에서 충돌에너지를 흡수하는 양이 적고, 전반적인 충돌 양상에 미치는 영향이 작다. 그래서 2,120개의 쉘요소를 사용하여 상대적으로 간략하게 모델링하였다.

스티어링 시스템은 스티어링 컬럼과 스티어링 휠로 구성되어 있다. Fig. 4는 승용차와 대형트럭의 스티어링 휠의 기울기를 비교해서 보여준다. 이 그림에서 보여주는 바와 같이 승용차의 경우 스티어링 휠이 큰 각도로 기울어져 있는 반면, 대형트럭 경우는 이에 비해 훨씬 더 평평하다. 그래서 승용차의 경우 일반적으로 더미 머리부위가 스티어링 휠에 먼저 부딪히는 반면, 대형트럭의 경우는 더미 가슴부위부터 스티어링 휠에 부딪히게 된다.

충돌이 일어날 때 스티어링 컬럼의 거동 양상은 스티어링 휠의 거동에 직접적으로 영향을 미치므로 더미와 스티어링 휠과의 접촉 양상에도 영향을 미친다. 결과적으로 스티어링 컬럼의 거동 양상은 승객거동 양상 및 승객 상해치에 많은 영향을 미친다. 대형트럭의 경우에는 스티어링 컬럼의 아래 부분이 프레임 위에 장착되어 있으므로 프레임 앞부분 두 곳에서 일어나는 좌굴과 같은 프레임의 심한 변형 양상은 스티어링 컬럼을 통해 스티어링 휠에 직접 전달된다. 따라서 프레임과 연결되는 스티어링 컬럼 아래 부분과 스티어링 휠과 연결되는 스티어링 컬럼 윗 부분 사이의 연결 부위의 모델링이 매우 중요하다. 본 연구에서는 스플라인 매커니즘과 접촉조건을 이용하여 프레임의 좌굴에 의한 변형이 스티어링 휠의 급격한 움직임으로 전가되는 것을 방지하여 실차충돌시험에서와 유사하게 스티어링 휠이 거동하도록 모델링하였다. 스티어링 시스템 모델은 5개의 부품으로 구성하였으며, 673개의 요소를 이용하여 모델링하였다. Fig. 5는 스티어링 시스템 유한요소모델을 보여준다.

시트는 충돌이 일어났을 때 더미의 거동에 많은 영향을 미치는 부품 중에 하나이다. 시트는 더미가 장착되는 부분과 시트가 플로어에 장착되는 두 부분으로 크게 나눌 수 있다. 더미가 장착

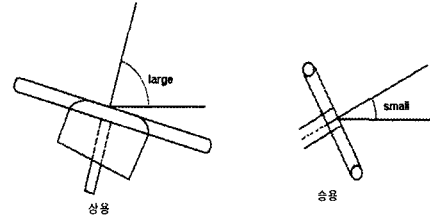


Fig. 4 Steering wheel inclination angle comparison system

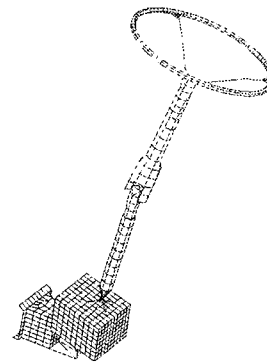


Fig. 5 Steering system (steering column and wheel) finite element model

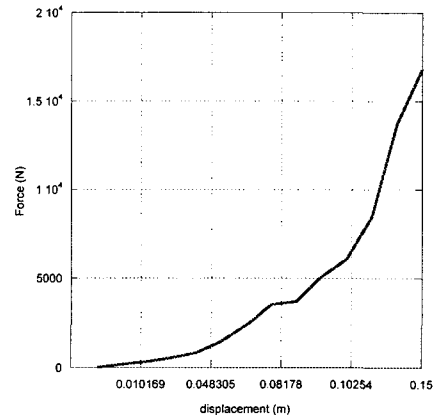


Fig. 6 Force and displacement curve for seat and dummy contact

되는 시트 부위는 다시 안장 부분과 등받이 부분으로 나누어진다. 고정벽에 차량이 충돌함에 따라 더미가 앞으로 급격하게 움직이는데 이때 더미가 밀로 쳐지지 않고 너무 과도하게 앞으로 밀리지 않게 시트의 안장 부분을 모델링하였다. 그리고 시트와 더미의 접촉은 Fig. 6에서 보여주

는 바와 같은 F-d Curve를 이용하여 모델링하였다.

또한 시트가 플로어에 장착되는 부분은 플로어에 고정된 시트 트랙과 시트와 스티어링 휠 사이의 거리를 조절할 수 있게 하는 가이드 레일 부분으로 나누어진다. 더미가 장착되는 운전석 시트의 우측하단에 안전벨트 텅이 버클에 끼워지는 부분이 장착되기 때문에, 심한 충격력이 가해지는 경우 시트의 우측하단이 들려지는 현상이 발생한다. 이는 더미의 거동에 영향을 미치게 되는데 이 같은 현상을 반영할 수 있도록 모델링하였다. 시트는 3개의 부품으로 구성하였으며, 28개의 요소를 이용하여 모델링하였다. Fig. 7은 시트 유한요소모델을 보여준다.

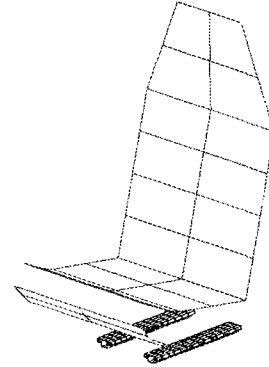


Fig. 7 Seat finite element model

안전벨트는 충돌이 일어날 때 더미의 거동을 구속하는 부품으로, 더미의 거동양상 및 상해치에 많은 영향을 미친다. 본 연구에 이용된 대형트럭의 3점식 안전벨트는 벨트의 본체를 이루는 섬유로 만들어진 웨빙(webbing), 벨트를 탈착하기 위한 버클, 감가속도 변화(급정거, 충돌시)에 따라 승객을 보호하도록 웨빙의 풀림을 잡아주는 리트랙터(retractor) 및 웨빙이 자연스럽게 미끄러지면서 풀리도록 하는 슬립링 등으로 구성되어 있다. 리트랙터는 실차와 같은 감가속도 조건에서 안전벨트 웨빙의 풀림을 잡아줄 수 있도록 모델링하였다. 안전벨트가 해석 초기에 더미의 과도한 움직임을 방지하기 위하여 약간의 프리텐션(pre-tension)을 안전벨트에 부여하였다. 안전벨트의 웨빙은 비선형 장력 바 요소(nonlinear tension only bar element)의 이력 모델 B-형(hysteresis model B-type)으로 모델링하였다. 안전벨트는 3개의 부품으로 구성되어 있으며, 120개의 쉘 요소와 빔 요소를 이용하여 모델링하였다.

본 연구에서는 안전벨트에 구속된 상태로 운전석에 장착되어 승객을 대신하여 승객 상해치와 승객거동 양상을 해석하기 위하여 PAM-CRASH와 같이 제공되는 50% Hybrid Dummy III를 사용하였다. 이 더미 모델은 가슴 부위를 제외한 나머지 부분들이 강체로 모델링 되었다.

위에서 언급한 승객거동 및 상해치 해석에 중요한 역할을 수행하는 주요부재 외의 직접적인 접촉이 일어나지 않는 부재 등은 가능한 간단히 모델링하였다. 전체 차량의 하중 분포는 고정벽에 1차 충돌할 때 뿐 아니라 카고 박스 등과 같

Table 2 Summary of the full vehicle finite element model

주요부재	요소수	노드수	부품수
프레임	18,323	19,609	16
캡	13,970	14,381	21
플로어	3,703	3,896	4
범퍼	1,582	1,826	4
스티어링 시스템	673	695	5
시트	28	48	3
안전벨트	120	123	3
기타	31,495	30,333	175
총계	69,073	70,041	220

은 부분들이 관성력에 의해 밀리면서 발생하는 2차 충돌에 많은 영향을 미치므로 차량 모델이 실차와 하중 분포가 유사하게 모델링하였다. 승객거동 및 상해치 해석을 수행할 때 단품 자신에서 뿐 아니라 단품 상호간에 충돌이 일어나는 부위에서 상호 침투가 일어나지 않도록 접촉이 일어나는 영역 전체를 type 36번의 self-impact type으로 접촉면을 정의하였다.

다음 Table 2는 본 연구에서 개발한 대형트럭 승객거동해석 및 상해치 해석을 위한 유한요소모델을 요약하여 보여준다. 이 표에서 보여주는 바와 같이 유한요소모델은 69,073개의 요소, 70,041개의 노드 및 220 개의 부품으로 구성되었다. 그리고 Fig. 8은 본 연구에서 개발한 대형트럭 유한요소모델을 보여준다.

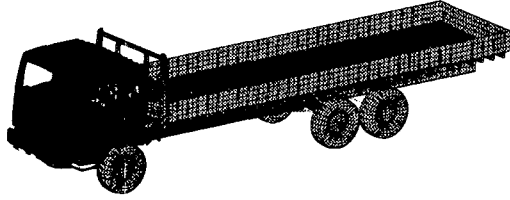


Fig. 8 Full vehicle finite element model

3. 개발된 유한요소모델의 검증

본 연구에서 개발된 승객거동 양상 및 승객 상해치 해석을 위한 유한요소모델의 신뢰성을 검증하기 위하여 실차충돌시험을 수행하여 해석 결과와 실차충돌시험 결과를 비교하였다. 현재 대형 트럭 정면 충돌시험 규정은 법규로 제정되어 있지 않다. 따라서 실차충돌시험은 유럽 및 일본의 트럭 승객 안전보조장치를 개발할 때 기준으로 사용하는 45kph (11.417 m/s) 속도로 정면으로 고정벽에 시험차량을 충돌시키는 방법에 따라 수행하였다.

Fig. 9와 Fig. 10은 B-pillar 좌측과 우측 하단에서 실차충돌시험으로부터 얻은 감가속도 파형(vehicle pulse)과 해석으로부터 얻은 감가속도 파형을 비교하여 보여주는 그림이다. 이 그림에서 보여주는 바와 같이 B-pillar 좌측에서는 해석 결과의 감가속도 피크 값이 실차충돌시험 결과보다 10% 정도 작았으나, 우측에서는 해석 결과의 감가속도 피크 값이 실차충돌시험 결과보다 10% 정도 컸다. 그리고 해석으로부터 얻은 좌측과 우측의 감가속도 파형은 실차충돌시험으로부터 얻은 감가속도 파형과 경향이 상당히 유사하였다.

Fig. 11은 승객거동해석과 실차충돌시험으로부터 얻은 더미 머리 감가속도 파형을 비교하여 보여준다. 이 그림으로부터 더미 머리의 전반적인 감가속도 경향과 최고 값이 매우 유사함을 볼 수 있다. 특히 초반 70msec까지의 경향이 매우 유사함을 보여주었다.

Fig. 12는 승객거동해석과 실차충돌시험으로부터 얻은 더미 가슴 감가속도 파형을 비교하여 보여준다. 이 그림으로부터 승객거동해석 결과와 실차충돌시험의 가슴 감가속도 경향이 상당히 유사하였다. 특히 실차충돌시험의 가슴 가속도 최대치가 발생하는 시점(45msec)을 매우 정확하게 예측하였다.

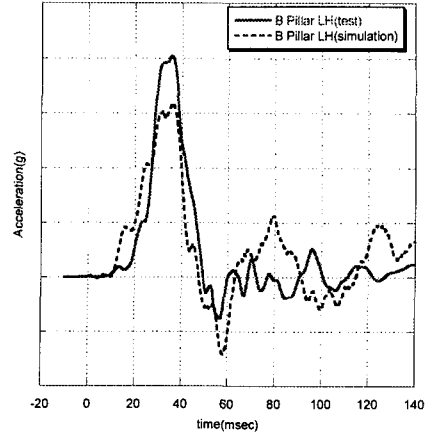


Fig. 9 Comparison of vehicle pulse at the lower left part of B-pillar

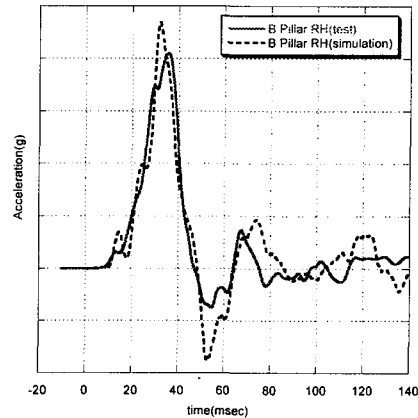


Fig. 10 Comparison of vehicle pulse at the lower right part of B-pillar

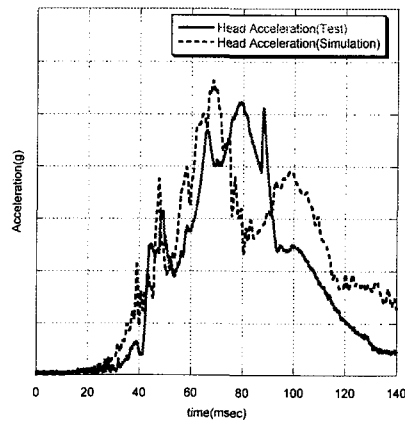


Fig. 11 Comparison of dummy head deceleration

Fig. 13은 차량을 좌측에서 바라보았을 때 승객 거동해석과 실차충돌시험의 더미거동 양상을 충돌 시작점으로부터 20msec 간격으로 비교하여 보여준다. 승객거동해석 결과를 보여주는 그림들은 더미 하지의 거동 양상까지를 상세히 보여주기 위하여 좌측 도어를 제거하였다. 이 그림들이 보여주는 바와 같이 개발된 유한요소 모델은 실차충돌시험의 더미거동 양상을 상당히 정확하게 나타내고 있음을 알 수 있었다. 그리고 이 그림이 보여주는 바와 같이 충돌초기에 더미가 시트와 함께 앞으로 움직였다. 그 다음 스티어링 휠이 프레임의 좌굴에 의해 약간 위로 들리면서 평평해지는 경향을 보이므로 더미의 가슴 부위가 먼저 스티어링 휠과 충돌하였다. 일단 가슴 부위가 충돌한 후에 더미가 약간 뒤로 튕겨났다. 그리고 프레임의 2차 좌굴이 일어나면서 스티어링 휠이 더욱 위로 들리면서 더미의 머리부위가 스티어링 휠 중앙 부위와 부딪혔다. 또한 차량 전면부위의 변형이 객실의 변형으로 그대로 전가될 뿐 아니라 더미가 앞으로 밀리면서 더미의 무릎부위가 차량의 대쉬보드 부위와 부딪혔다.

본 연구를 통해 개발된 유한요소모델을 이용한 얻은 승객상해치는 실차충돌시험에서 얻은 더미의 머리 상해치(HIC)와 가슴 상해치(CA)보다 20% 정도 큰 값을 보여주었다.

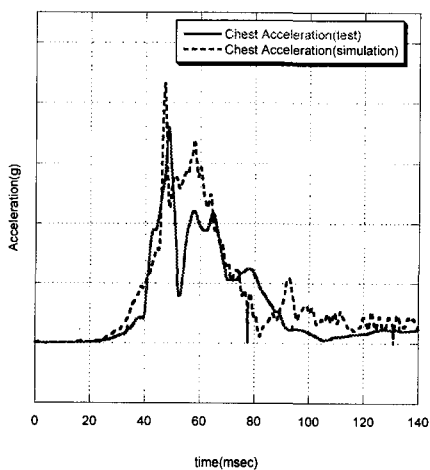


Fig. 12 Comparison of dummy chest deceleration

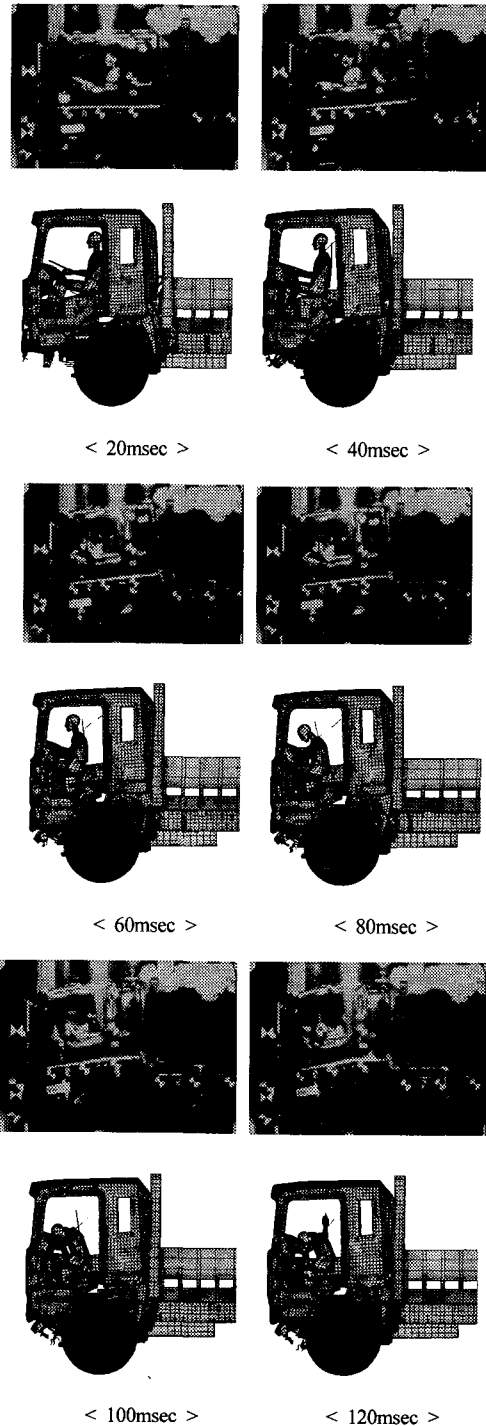


Fig. 13 Comparison of dummy behavior

4. 결 론

본 연구에서는 대형트럭의 승객거동과 상해치를 해석을 수행할 수 있는 유한요소모델을 개발하였다. 개발된 승객거동 및 승객상해치 해석을 위한 유한요소모델의 신뢰성은 해석 결과로부터 얻어진 ① B-pillar 좌측과 우측 하단 감가속도 파형, ② 더미 머리와 가슴 부위 감가속도 파형, ③ 더미 머리와 가슴 상해치 및 ④ 더미의 거동 양상 등을 실차충돌시험으로부터 얻어진 결과와 비교하여 검증하였다. 실차충돌시험에서는 45kph 속도로 정면으로 대형트럭을 고정벽에 충돌하였다. 승객거동 및 상해치 해석은 슈퍼컴퓨터 SP2에 설치된 PAM-CRASH를 이용하여 수행하였다.

B-pillar 좌측에서는 해석으로부터 구한 감가속도 피크 값이 실차충돌시험으로부터 측정된 값보다 10% 정도 작았으나, B-pillar 우측에서는 10% 정도 컸다. 그리고 해석으로부터 얻은 B-pillar 좌측과 우측의 감가속도 파형은 실차충돌시험으로부터 측정된 감가속도 파형과 경향이 상당히 유사하였다. 더미 머리 감가속도의 경우는 파형과 피크 값이 해석 결과와 실차충돌시험 결과가 매우 유사하였다. 더미 가슴 감가속도의 경우도 해석 결과가 실차충돌시험과 경향이 상당히 유사하였으며, 최대 가슴가속도가 발생하는 시점을 정확하게 예측하였다. 더미거동 양상을 충돌시작점으로부터 20msec 간격으로 비교하여 본 결과, 개발된 유한요소 모델은 실차충돌시험의 더미거동 양상을 상당히 정확하게 나타내었다. 주요 상해치인 머리 상해치(HIC)와 가슴 상해치(CA)값에서는 해석 결과가 실차충돌시험 결과보다 20% 정도 큰 값을 보였다.

참고문헌

- (1) Niewohner W., Berg F. A. and Froncz M., 2001, "Accidents with Vans and Box-type Trucks (transporters): Results from Official Statistics and Real-life Crash Analysis," *The 17th ESV Conference*, NHTSA, Amsterdam Netherland, pp. 883~891.
- (2) Langwieder K. and Baumler H., 1996, "European Accident Statistics Related to Car-to-truck Frontal Collision," *The 15th ESV Conference*, Melbourne Australia, pp. 1814~1822.
- (3) Simon M., Botto P., Page Y., and Paulhet F., 2001, "The Potential Gain to be Achieved by Generalization of Seat Belts and Airbags in Trucks," *The 17th ESV Conference*, NHTSA, Amsterdam Netherland.
- (4) Breittling U., 2000, "Crash Simulation and Tests to Improve Occupant and Partner Safety," MAN Nutzfahrzeuge AG, Munich Allemagne, Dekra.
- (5) Mariolani J., Arruda A. and Schmutzler L., 2001, "Development of New Underride Guards for Enhancement of Compatibility between Trucks and Cars," *The 17th ESV Conference*, NHTSA, Amsterdam, Netherland.
- (6) PAM-CRASH Reference Manual, 2000, *PAM System International*, France.
- (7) Kim H., Song J. and Oh C., 2001, "Development of a Finite Element Model for Frontal Crash Analysis of a Large-Sized Truck," *Proceedings of the KSME 2001 Fall Annual Meeting*, pp. 489~494.
- (8) Hong C., Oh C. and Lee D., 2000, "Development of a Finite Element Model for Frontal Crash Analysis of a Mid-Size Truck," *Journal of Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 17, No. 4, pp. 226~232.