

운전석 에어백을 장착한 중형 트럭의 승객거동해석을 위한 유한요소 모델의 개발

홍창섭*, 오재윤**, 이대창***

Development of a Finite Element Model for Studying the Occupant Behavior of a Mid-Size Truck with a Driver Side Airbag

Chang-Seob Hong*, Chae-Youn Oh**, Dae-Chang Lee***

ABSTRACT

This paper develops a finite element model for studying occupant behavior of a mid-size truck equipped with a driver side airbag. The developed model simulates an occupant behavior using PAM-CRASH/PAM-SAFE in super computer SP2. The model is developed based on a sled test. A 50% hybrid dummy III is used for measuring head and chest accelerations and femur loads, and major injury coefficients such as HIC, CA and femur load. Interior components such as foot rest, seat, kneebolster, crash pad, etc. are roughly modeled and defined by a rigid material model. And contact type II is used for detecting a contact with dummy. Contact type II definition uses force-deflection relationship of each body. Such components as steering column which directly affect on the occupant injury are modeled in detail and defined by an elastic-plastic material model. Airbag cushion is modeled using shell elements. Airbag cover groove is modeled using rivet elements. Airbag tether is modeled as nonlinear bar elements. Airbag model has two vent holes to ventilating the exploded gas. Airbag is folded close to the real airbag folding procedure, and folded cautiously in order not to have initial penetration. A vehicle pulse acquired from 31mph frontal barrier test is used as input signal for the simulation. The simulation conditions are tuned to the sled test ones. The measured dummy accelerations and major injury coefficients, and filmed dummy behavior and airbag inflation process using high speed camera are compared to the simulation results to verify the developed finite element model.

Key Words : Sled test(썰매시험), Barrier test(고정벽 시험), Injury coefficient(인체 상해치), Vehicle pulse(가속도 파형), Airbag(에어백)

1. 서론

자동차 산업 뿐 아니라 이에 관련된 전자산업의 발전에 따라 차량의 주행안전성과 더불어 충돌 안전성에 관한 소비자의 관심이 높아지고 있다. 이에

따라 세계 각국들은 차량의 충돌시 승객 보호를 위한 차량 안전성에 관련된 법규를 강화해 나가고 있는 추세이다. 상용차 충돌 안전성에 관련된 의무 규제는 현재는 제정되어 있지 않으나, 새로이 이들을 의무 규제로 제정하기 위한 논의가 심도 있게 진행되고 있다. 모노코크 타입(monocoque type) 승

* 전북대학교 정밀기계공학과 대학원

** 전북대학교 기계공학부, 자동차신기술연구소

*** 현대자동차 상용구조연구팀

용차에 비해 프레임을 기본 골격으로 하는 캡오버 타입(cab-over type)상용차는 전방에 엔진룸이 없으므로 해서 충돌시 변형이 객실 내부로 직접 전달되므로 충돌 안전성 측면에서 승용차에 비해 매우 열악할 뿐 아니라 승용차와는 매우 다른 충돌 특성을 보일 것이다.

차량의 충돌은 아주 짧은 시간에 엄청난 충돌에너지를 교환하고 차량의 많은 변형을 수반하는 아주 복잡한 현상이므로 차량의 충돌 특성 및 승객 거동 양상 해석을 위하여 많은 횡수의 실차 충돌 시험 혹은 썰매 시험을 수행해야 한다¹⁾. 일반적으로 실차 충돌시험은 많은 비용과 많은 시간이 소요되므로 개발 초기 단계에서는 변형이 되지 않는 시험대에 차체와 의자 및 더미 등을 실차와 같은 구조로 배치하여 간이로 시험하는 썰매시험²⁾을 이용한다. 썰매시험은 실차 시험에서 얻은 가속도 파형과 유사한 가속도 파형이 나오도록 발사장치의 유압을 튜닝한 후 시험대를 튜닝된 유압으로 발사하여 이에 대한 반작용으로 움직이는 더미를 고속 카메라로 촬영하여 승객의 거동 양상을 해석하는 시험법이다. 이 같은 간이 시험법인 썰매시험도 각 설계변수에 대한 올바른 평가를 위해서는 많은 횡수의 시험이 수행되어야한다. 그리고 매 시험마다 에어백, 인스트루먼트 패널, 스티어링 컬럼 및 휠, 안전 벨트(safety belt) 등과 같은 차량 내장 부품들을 교환해야 하므로 많은 시간과 비용이 소요된다. 승용차에 비해 많은 어려움이 있는 상용차의 썰매 시험 횡수를 줄여서 개발기간과 개발비용을 줄이고 초기 차량 개발단계에서 더 많은 설계 결정과 평가하기 위해서는 승객거동해석용 유한요소 모델을 개발하여 승객거동 양상을 해석하는 것이 필요하다³⁻⁵⁾.

본 연구에서는 운전석 에어백이 장착된 중형 트럭의 승객 거동해석용 유한요소 모델을 개발한다. 개발된 유한요소 모델을 이용하여 슈퍼컴퓨터 SP2에 탑재된 승객거동해석 상용 소프트웨어인 PAM-CRASH/PAM-SAFE⁶⁾에서 승객 거동해석을 수행한다. 승객거동해석을 위한 가속도 파형은 실차 충돌 시험으로부터 얻어진 가속도 파형을 이용한다. 운전석 에어백을 장착한 상태에서 수행되는 썰매 시험으로 얻어진 더미의 주요 상해치와 더미 주요 쿠위의 가속도 파형 및 더미 거동 양상을 모의시험으로부터 얻어진 결과와 비교하여 개발된 승객거동 해석용 유한요소 모델의 신뢰성을 검증한다. 그리

고 개발된 모델을 이용하여 다양한 여러 조건들의 변화에 따른 승객 상해치 변화 양상 해석을 수행한다.

2. 승객거동해석을 위한 유한요소 모델의 개발

본 연구에서는 트럭 승객 거동해석을 위한 유한요소 모델을 개발한다. 본 연구에 이용된 트럭의 총 중량은 2922kg이고, 총 길이는 6670mm이고, 축거리는 3735mm 이다.

외관상으로 실제 차량과 비슷하게 만든 유한요소 모델은 보기는 좋을지 모르지만 승객 거동해석에 불필요한 부분이 많이 포함되어 실제 해석 결과에는 큰 영향을 미치지 않는다고 계산 시간만이 많이 소모된다. 그래서 에어백 장착을 고려한 설계 변수를 정하는 문제와 같이 많은 설계 변수 변화에 따른 승객거동을 해석해야하는 문제에는 적합하지 않다. 따라서 본 연구에서는 썰매시험(sled test)을 기준으로 하여 승객거동 해석을 위한 모의시험 목적에 적절하게 단순화시킨 유한요소 모델을 개발하였다. CATIA를 이용하여 작성된 차실 형상 CAD 데이터를 근간으로 하여 Hyper-Mesh를 사용하여 삼차원 유한 요소 모델링을 수행하였다.

객실 내부는 충돌시 승객과 직접적인 접촉이 발생하므로 승객거동 양상에 많은 영향을 미치는 아주 중요한 부분이다. 발판(foot rest), 시트, 니 볼스터(kneebolster), 크래쉬 패드, 윈드쉴드 등은 대략적인 유한 요소 모델을 구성하고 강체 재료 모델(rigid material model)로 단순화 시켜 정의하였다. 스티어링 휠의 경우와 같이 승객 상해에 직접적인 영향을 미치는 부품은 상세하게 유한 요소 모델을 구성하고 탄소성 재료모델(elastic-plastic material model)로 정의하였다.

승객 모델은 50% Hybrid Dummy III를 사용하였다. 더미는 안전벨트에 구속된 상태로 운전석에 장착되며 승객을 대신하여 승객 거동해석과 상해치를 산출하게 된다. Hybrid Dummy III는 강체로 모델링되어 있어 강체로 정의된 객실 내부 부품과 접촉을 감지하기 위해 일반적인 접촉조건을 사용하기가 용이하지 않다. 따라서 이 같이 승객거동 해석시 더미와 접촉이 일어나는 강체로 정의된 부품은 PAM-CRASH에서 제공하는 접촉조건인 contact type II를 사용하여 모델링 하였다. Contact type II를 정의하

는데 단품시험을 통해 얻어진 각 단품의 힘-변위(force-deflection) 관계를 이용하였다.

안전벨트는 비선형 장력(tension-only) 바 요소의 히스테리시스 모델 type B로 모델링하였다. 이 type B는 하중이 가해질 때(loading)와 하중이 제거될 때(unloading)의 F-ε 커브 2개와 이들 사이에 천이 기울기(transition slope)를 가지는 형태이다.

본 연구에서는 운전석에 에어백을 장착한 상태에서 에어백의 전개시 승객거동을 해석한다. 일반적으로 에어백은 설치대(mounting plate), 인플레이터(inflator), 커버(cover), 백, 테더(tether) 등으로 구성된다^[7]. 백이 뒤로 밀리는 것을 방지해주는 역할을 수행하는 설치대는 강체벽(rigid wall)으로 모델링하였다. 에어백을 순간적으로 전개시켜주는 인플레이터를 모델링하는 방법은 탱크 테스트(tank test) 결과를 이용하는 방법과 측정된 질량 흐름율(mass flow rate)을 이용하는 두 가지가 있다^[8]. 본 연구에서는 탱크 테스트 결과를 이용하여 에어백을 전개시키는 인플레이터를 모델링 하였다. 에어백 커버는 셸 요소를 이용하여 모델링 하였다. 에어백 커버에는 에어백의 압력이 정해진 한계치를 넘었을 때 갈라지면서 에어백이 밖으로 나오게 해주는 홈이 파져있다. 이 같은 에어백 홈 부위는 에어백의 팽창 압력에 의한 인장력이 임계치를 넘었을 때 자동적으로 분리되는 리벳요소를 사용하여 모델링하였다. 백은 다층 멤브레인(multi-layered membrane) 요소를 사용하여 모델링 하였다. 에어백이 전개된 후 에어백을 원하는 형상으로 유지 할 수 있도록 하는 테더는 비선형 바(non-linear bar)요소를 사용하여 모델링 하였다. 또한 에어백이 전개된 후에 가스를 방출시키기 위한 두 개의 방출 구멍(vent hole)을 에어백 모델에 포함하였다.

에어백을 모델링할 때 위와 같은 에어백의 형상 모델링 뿐 아니라 에어백 접는 방식도 에어백 모델링에서 중요한 부분이다^[9]. 본 연구에서는 차량 운전석에 장착된 에어백의 접어진 절차를 참조로 하여 가능한 한 접는 절차를 유사하게 하여 실제 에어백의 전개 양상과 유사하도록 하였다. PAM-GENERIS에서 제공하는 에어백을 접는 도구(airbag folder)를 이용하여 에어백을 접었다. 에어백을 접을 때 요소들 사이에서 초기침투(initial penetration)가 발생되지 않게 에어백을 접는 과정에서 백의 간격을 적절히 조정했다. 그리고 에어백을 완전히 접은 후 면적을 체크하여 초기 면적과 유사하게 조정하

였다.

Fig. 1은 본 연구에서 개발한 승객거동 해석용 유한요소 모델에 50% Hybrid Dummy III 더미가 안전벨트를 착용하고 운전석 시트 위에 앉아있는 상태를 보여주는 그림이다.

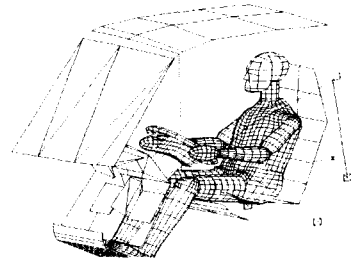


Fig. 1 Simplified model for sled test simulation

3. 개발된 유한요소 모델의 검증

썰매시험은 안전 벨트와 에어백이 장착된 상태에서 수행되었다. 썰매시험은 31mph 실차 정면충돌 시험으로부터 측정된 B-pillar 하단 부위의 가속도 파형(vehicle pulse)을 입력으로 사용하였다. 썰매시험으로부터는 주요 상해치인 머리 상해치(HIC, head injury coefficient), 가슴 가속도(CA, chest acceleration), 대퇴부 하중(femur load) 값들과 머리와 가슴 가속도 및 좌우 대퇴부 하중 파형을 측정하였다. 또한 썰매시험으로부터 고속 카메라를 이용하여 더미 거동과 에어백 전개 양상을 촬영하였다. 이 같이 썰매시험으로부터 측정된 주요 상해치와 더미 및 에어백 거동 양상을 본 연구에서 개발된 승객거동 해석용 유한요소 모델을 이용한 해석 결과와 비교하여 본 연구에서 개발한 모델의 신뢰성을 검증하였다. 본 연구에서는 승객 거동 해석을 위한 모의 시험에 PAM-CRASH/PAM-SAFE를 이용하였다.

승객거동을 해석하기 위한 모의시험은 에어백 가스 방출구 크기(vent hole size), 테더 길이(tether length), 에어백 전개 시간(time-to-fire) 등을 썰매시험과 같은 조건으로 맞춘 후 수행하였다.

Fig. 2는 모의시험과 썰매시험을 수행한 후 주요 시간대에서 승객거동 양상을 비교하여 보여준다.

이 그림에서 보여주는 바와 같이 모의시험과 썰매 시험은 승객거동 양상뿐 아니라 에어백 전개 양상도 매우 유사함을 알 수 있다.

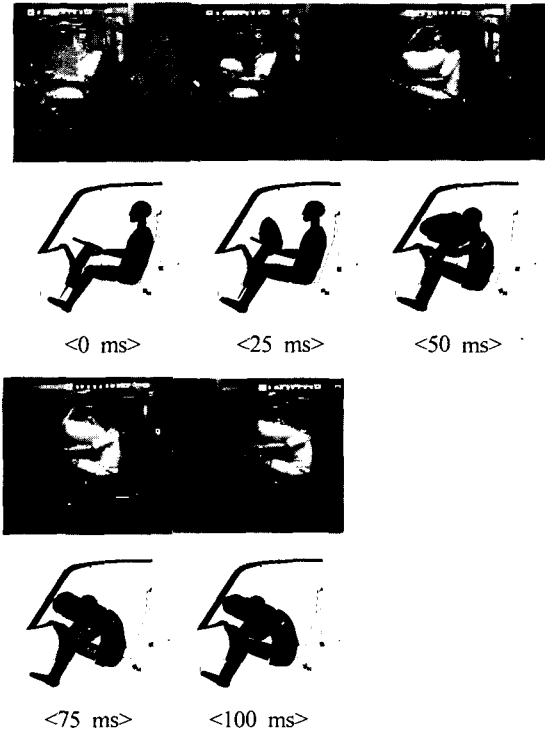


Fig. 2 Behavior of driver-side dummy

Fig. 3 - Fig. 6은 모의시험과 썰매시험에서 측정된 머리와 가슴 가속도 및 오른쪽과 왼쪽 대퇴부 하중 파형을 비교한 그림이다. Fig. 3에서 보여주는 머리 가속도의 경우에는 초기 30msec부터 머리의 가속도가 상승을 시작하여 50msec에서 첫 번째 피크를 이루고 감소하다가 다시 75msec에서 두 번째 피크를 이루는 것을 볼 수 있다. 그리고 이 그림으로부터 실차 충돌 시험, 썰매 시험, 모의시험 세 경우 모두 크기의 차이는 약간 있으나 경향은 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. Fig. 4에서 보여주는 가슴 가속도의 경우에는 모두 37msec 부근에서 첫 번째 피크를 이루고 57msec에서 다시 두 번째의 피크를 이루고 있다. 그리고 실차 충돌 시험, 썰매 시험, 모의시험 세 경우 모두 크기뿐만 아니라 경향까지도 매우 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. Fig. 5에서

보여주는 오른쪽 대퇴부의 경우 피크 값은 약간 차이를 보이거나 경향은 매우 유사함을 알 수 있다. Fig. 6에서 보여주는 왼쪽 대퇴부의 경우는 썰매 시험과 모의시험이 크기 뿐 아니라 경향도 매우 유사함을 알 수 있다.

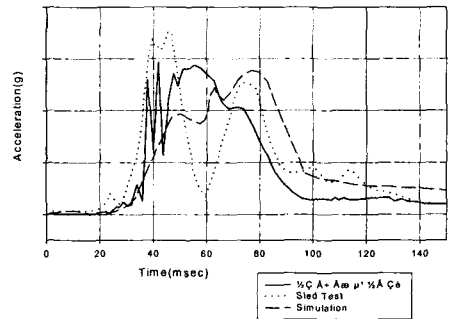


Fig. 3 Head acceleration

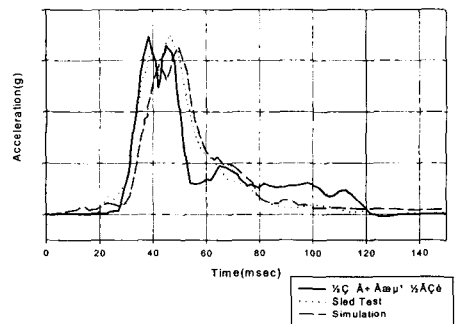


Fig. 4 Chest acceleration

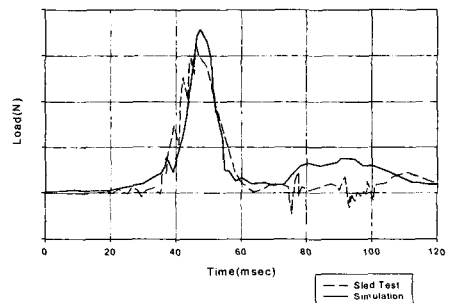


Fig. 5 Femur load - right

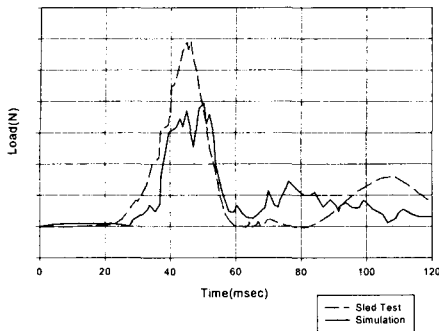


Fig. 6 Femur load - left

본 연구를 통해 개발된 유한 요소 모델을 이용한 모의시험으로부터 얻은 주요 상해치를 썰매 시험으로부터 얻은 값과 비교해 본 결과 HIC 값은 15%이내로, CA 값은 3%이내로, 왼쪽 대퇴부 하중은 2%이내로, 그리고 오른쪽 대퇴부 하중은 48%이내로 예측하였다. 이와 같이 개발된 모델은 HIC 값과 오른쪽 대퇴부 하중 값은 약간의 오차를 보여주고 있으나 CA 값과 왼쪽 대퇴부 하중 값은 아주 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

본 연구를 통해 개발된 유한요소 모델을 이용하여 여러 가지 다양한 조건에서 승객 상해치의 변화양상을 해석하였다. 본 연구에서는 에어백 재질 밀도, 에어백 전개 시간(time to fire), 안전벨트 락킹 시간(retractor locking time), 테더 길이, 에어백 방출구 크기와 같은 다섯 가지의 조건을 고려하였다. 위의 다섯 가지 조건을 초기 값으로부터 $\pm 10\%$, $\pm 20\%$ 변화시켰을 때 상해치 변화율을 계산하기 위하여 다음 식 (1)을 이용하였다.

$$\text{상해치 변화율} = \frac{F(x+\Delta x) - F(x)}{\Delta x} \quad (1)$$

식 (1)에서 “F” 는 다음 식 (2)와 같은 형태로 HIC 값과 CA 값을 조합한 상해치이고, x 는 현재 고려하고 있는 조건의 초기 값이고 Δx 는 이 조건의 변화량이다.

$$F = \left[w_{HIC} \times \left(\frac{HIC}{HIC_C} \right)^2 + w_{CA} \times \left(\frac{CA}{CA_C} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (2)$$

상용차는 승용차에 비해 수평면으로부터 측정된 스티어링 컬럼의 각도가 크므로 에어백에 의한 승객의 보호 능력이 가슴보다는 머리 쪽으로 치우치는 경향이 있다. 본 연구에서는 이 같은 경향을 보상

하기 위하여 식 (2)에서 가중치인 w_{HIC} 는 0.8로 하고 w_{CA} 는 1.2로 하였다.

Table 1은 이와 같은 조건들의 변화에 따른 식 (1)과 같은 형태로 나타낸 상해치 변화 양상 해석을 수행한 결과를 정리한 것이다. 이 표에서 각 조건 값을 초기 값보다 증가하거나 감소하면 식 (2) 형태로 나타낸 상해치가 전반적으로 감소함을 알 수 있다. Table 1로부터 본 연구에서 활용한 중형 트럭의 경우에는 본 연구에서 고려한 다섯 가지의 조건들 중에서 에어백 방출구 크기가 인체의 상해치에 가장 큰 영향을 미치고, 다음으로 테더 길이가 많은 영향을 미침을 알 수 있었다. 그리고 에어백 재질 밀도는 거의 영향을 미치지 않음을 알 수 있었다.

Table 1 Comparison of injury coefficients

Conditions	-20%	-10%	10%	20%
Airbag material density	0.0023	0.0044	-0.0047	-0.0023
Time to fire	0.2231	0.4304	-0.4237	-0.1851
Retractor locking time	0.0570	0.1103	-0.0876	-0.0544
Tether length	0.6375	1.7400	-1.8390	-0.8956
Vent hole size	0.5969	1.3126	-1.4356	-6.4144

4. 결론

본 연구에는 운전석에 에어백이 장착된 트럭의 승객 거동해석용 유한요소 모델을 개발하여 슈퍼컴퓨터 SP2에 탑재된 PAM-CRASH/PAM-SAFE를 이용하여 승객 거동해석을 수행하였다. 승객거동해석에 입력으로 사용되는 가속도 파형은 31mph 정면충돌 실차 시험으로부터 측정된 B-pillar 하단 부위의 가속도 파형을 사용하였다.

객실 내부의 내장재중 발판, 시트, 니 볼스터, 크래쉬 패드 등은 대략적으로 모델링하고 강체 재료로 정의한 후 더미와 접촉을 감지하기 위해 PAM-CRASH에서 제공하는 접촉조건인 contact type II를 사용하였다. Contact type II를 정의하는 데는 단품시험을 통해 얻어진 힘-변위 선도를 이용하였다. 그리고 승객 상해에 직접적인 영향을 미치는 부분들은 상세히 모델링하고 탄소성 재료모델로 정의하였다. 승객 모델은 50% Hybrid Dummy III를 사용하였다.

에어백 설치대는 강체로 모델링 하였다. 탱크 테스트 결과를 이용하여 에어백 가스 방출상황을

모델링 하였다. 에어백은 셀 요소를 이용하여 모델링 하였으며, 에어백 커버의 홈 부위는 리벳요소로 모델링 하였다. 테더는 비 선형 바 요소를 이용하여 모델링 하였으며, 두 개의 방출구를 에어백 모델에 포함하였다. 초기 침투가 생기지 않도록 주의하여, 최대한 실제 에어백의 초기 면적과 접는 방식이 유사하도록 에어백 폴더를 이용하여 에어백을 접었다.

썰매시험 조건과 같도록 세팅하여 수행된 모의 시험으로부터 본 연구를 통해 개발한 승객거동 해석용 모델은 고속 카메라를 이용하여 썰매시험으로부터 촬영한 승객거동 영상 및 에어백 전개영상과 매우 유사한 양상을 보여주었다. 그리고 머리와 가슴 가속도 및 좌우 대퇴부 하중 등의 피크 값 뿐 아니라 경향을 잘 예측하였고, 주요 상해치도 상당히 정확하게 예측하였다. 본 연구에서 개발한 모델을 이용하여 여러 조건들의 변화에 따른 승객 상해치 변화 영상 해석을 수행한 결과 본 연구에서 고려한 조건들 값의 증가나 감소는 전반적으로 상해치의 감소를 초래하였다. 그리고 에어백 방출구 크기가 인체의 상해치에 가장 큰 영향을 미치고, 다음으로 테더 길이가 많은 영향을 미침을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 현대자동차와 전북대학교 자동차신기술 연구소(연구과제번호:AR9810)의 지원을 받아 수행하였으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. H. Mellander and M. Koch, "Restraint System Evaluation - A Comparison between Barrier Crash Tests, Sled Tests and Computer Simulation," SAE Paper 780605.
2. Dimitrios Kallieris, Dietmar Otte, Rainer Mattern and Peter Wiedmann, "Comparison of Sled Tests with Real Traffic Accidents," SAE 952707.
3. P. Guyon, E. Haug, and P. Ullrich, "Optimization of an Occupant Restraint System Using PAM-OPT and PAM- SAFE," ESI Group.
4. Rainer C. Hoffmann, "Occupant and Restraint System Simulation with the Finite Element Program PAM-CRASH," 1st International AKZO

- Symposium on Occupant Restraint Systems.
5. D. Lasry, R. Hoffmann, and J.-B. Proard, "Numerical Simulation of Fully Folded Airbags and Their Interaction with Occupants with PAM-SAFE," Engineering System International GMBG.
6. PAM system international, PAM-SAFE reference manual, PSI, 1998.
7. R. Hoffmann, A.K. Pickett , D. Ulrich, E. Haug, D. Lasry and J. Clinkemallie, "A Finite Element Approach to Occupant Simulation : The PAM-CRASH Airbag Model," SAE International Congress & Exposition Detroit 1998.
8. P. Groenenboom, D. Lasry, Th. Subbian and G. Narwani, "A Diffusive Gas Jet Model in PAM-SAFE for Inflation," SAE Paper 930238.
9. V. Lakshminarayan and David Lasry, "Finite Element Simulation of Driver Folded Air Bag Deployment," SAE Paper 912904.