

승용차 충돌시 승객해석을 위한 모델링의 예

A Modeling Example of Occupant Analysis for Crashworthiness in a Passenger Car

신 문 균*, 박 경 진**, 이 완 익*, 김 형 증*** 정 근 섭***
M. K. Shin, K. J. Park, W. I. Lee, H. J. Kim, K. S. Jung,

ABSTRACT

Real automobiles have been utilized to study the occupant behaviors and the response of the structures in the crash environment. Since various parameters are involved in the automobile crashworthiness, a number of experiments must be conducted. The experiments have been contributed to increasing the cost due to the fact that the test is quite expensive. Therefore, computer simulation is adopted to reduce the number of experiments. A few computer programs have been developed specifically to solve the occupant responses in the crash environment. In this research, a software is used to study the occupant dynamic analysis. A modeling of occupant analysis is established for a passenger car and the results are verified through comparisons with real experiments. In the modeling, data are tuned very carefully so that the simulated results such as HIC (Head Injury Criterion) and acceleration of each body may approximate to the experimental results. The compared experiment is a barrier test which is carried out by frontal impact. A feedback to the design process is suggested from the result of this research.

1. 서 론

자동차에서 승객의 안전도 및 차량의 충돌 현상을 해석하는 일반적인 방법으로 차량을 직접 부수어 측정하는 충돌실험이 행해진다. 이 충돌실험에는 완성된 차를 부수어 해석하는 실차실험(Barrier Test)과 차체, 의자, 승객 등 간단한 구조를 한 차에 실차실험에서 측정된 감속도(Deceleration)등을 입력으로 넣어 실험

하는 썰매실험(Sled Test)이 있다. 그러나 이러한 충돌실험을 통해서 여러가지 매개변수(Parameter)들의 영향을 계산하기 위해서는 수없이 많은 실험횟수가 요구되고 있으며, 동적인 상태에서 하는 실험으로 인해 상당히 고가의 실험장비와 경비가 요구된다. 따라서 최근 안전도를 중요시하는 추세에 비추어 볼 때 실험이 자동차의 원가에 차지하는 비중이 대단히 커지고 있다. 그러므로 선진 여러나라에서

* 한양대학교 대학원 기계설계학과

** 한양대학교 기계공학과

*** 대우자동차㈜ 기술연구소

는 실험비용이 많이 드는 충돌실험의 횟수를 줄여 자동차 생산원가를 줄이기 위한 방법으로 컴퓨터 시뮬레이션을 이용하고 있다.¹⁾ 이러한 시뮬레이션에서는 실험중 일부 매개변수를 바꾸어 실험할 경우 이 실험값을 컴퓨터로 예측함으로써 비용을 줄이려 한다. 컴퓨터 시뮬레이션 프로그램중 승객자동차해석을 통하여 안전도를 예측하는 프로그램으로는 MVMA2D, MADYMO, CAL3D라고 불리는 소프트웨어가 많이 사용되고 있다.¹⁾²⁾ MVMA2D는 승객자동차해석의 초기단계로 2차원상의 승객을 해석하고 있으나, 그 간단함으로 인해 현재도 많이 사용되고 있다. 최근 3차원 해석을 위해 MADYMO, CAL3D 등의 프로그램이 개발되었으나, 프로그램의 우수성에 비해 사용자가 프로그램을 사용하기가 불편하고, 모델링의 낙후성 때문에 현재도 계속 연구가 진행중에 있다. 충돌시 일어나는 여러가지 동력학적, 재료역학적 문제 등을 컴퓨터를 이용해 해를 구할 수 있도록 모델링하는 것은 대단히 어려운 일이며, 특히 각 차종마다 모델링을 다르게 해야 하는 것이 큰 문제가 되고 있다. 본 논문에서는 현재 국내에서 생산되고 있는 승용차의 승객자동차해석을 위한 모델링 및 그의 검토를 위하여 3차원 해석이 우수하고 사용이 용이하다고 알려진 CAL3D를 이용하였다. 이 프로그램은 미국정부(National Highway Traffic Safety Association)가 코넬대학에 의뢰해서 만든 것으로, 다자유도 동력학(Multi-Body Dynamics)개념을 기초로 해서 제작된 프로그램으로서 공용(Public Domain)에 나와 있는 프로그램이다. 이 프로그램에 국산승용차의 충돌실험 결과와 동력학적 상태를 입력하고, 시뮬레이션한 결과를 실차의 충돌실험 결과인 HIC(Head Injury Criterion)값, 머리의 가속도, 가슴의 가속도에 근사하게 되도록 입력자료를 조절(Tuning)함으로써, 승객의 안전도 문제에 있어서 국산 승용차의 충격모델을 확립하였다.³⁾⁴⁾⁵⁾⁶⁾

2. 충격모델의 확립

승용차 충돌을 컴퓨터로 해석함에 있어서 가

장 중요한 사항은 충돌실험시의 상황을 컴퓨터에 맞게 모델링하여 입력하는 것이다. 즉 CAL3D에서는 다자유도 동력학으로 계산을 하기 때문에 이에 맞게 모델링을 해야 하는 것이다. 차체, 승객, 자동차 내부, 안전띠, 조향계 등은 질량과 부피가 있는 강체, 평면, 용수철 및 감쇠기 등으로 모델링할 수 있다. 충돌시 강체로 가정한 것들의 움직임은 동력학적으로 해석될 수 있으나 그들이 서로 접촉하게 되면 이는 동력학적으로 해결이 안된다. 강체로 가정한 것들이 서로 부딪힐 때 즉 접촉시 실제 상황에서는 탄성 및 소성 변형이 되는 것이다. 따라서 이러한 변형에 관한 것들은 따로 힘·변형량 함수를 정의하여 입력하게 된다. CAL3D에서는 동력학적으로 계산시 접촉이 되는 순간을 감지하여 접촉시 내부의 힘·변형량 상태를 입력된 자료를 통해 계산하고 이를 다시 동력학적 과정에 포함시키게 된다.

힘·변형량 함수는 모델링 과정의 대부분에서 사용되는데 이는 독립된 실험과정을 거쳐서 추출되며 각 사용되는 재료마다 힘·변형량 함수를 정의하여 입력으로 넣어주게 된다. 차체의 충돌을 나타내는 차체 감속도 함수는 실차의 충돌실험에서 측정된 감속도 상태를 그대로 사용한다. 각 용수철이나 감쇠기의 계수, 힘·변형량 함수는 실험을 통해 얻어진 자료를 사용하는데 모델과정의 타당성 입증을 위해서는 충돌실험시의 머리, 가슴, 대퇴부 등에 발생하는 가속도나 힘 등을 기준삼아 시뮬레이션 결과와 비교하게 된다. 이 과정에서 두 결과를 맞추기 위해 모델링 자료를 조절(Tuning)하게 된다. 즉 용수철이나 감쇠기의 계수 혹은 힘·변형 함수들의 추세를 약간씩 바꾸어 가면서 실험결과와 맞추어 나간다. 충돌실험에 가까이 각 입력자료를 조절하는데 있어서 아직은 일반적인 방법이 세워져있지는 않으며 어떤 특정자료의 변형시 결과변화에 대한 민감성 등도 해석의 복잡성 등으로 인하여 연구되어 있지 않다. 단지 이는 거의 해석자의 경험에 의존하고 있는 형편이며 충돌실험에서 측정된 결과와 가속도나 힘의 경향이 큰 오차를 보이지 않을때 모델링이 이룩되었다고 본다. 따라서

같은 차종을 다루더라도 각 연구자마다 입력 자료의 계수 등이 약간씩 차이남을 볼 수 있다. 참고로 본 논문의 저자들의 경험으로 조절한 자료를 실험자료의 20~30% 범위내에서 조절하는 것이 좋다고 사료된다.

2.1 승객의 모델링

승객(Occupant)은 강체(Rigid Body) 요소로 모델링하였으며, 요소와 요소는 다자유도 동역학(Multi-Body Dynamics)개념을 이용해 조인트로 연결되어 있다. 충돌실험시 승객에 대한 표준실험 장치로서 더미(Dummy)가 사용되는데 이는 생체역학적으로 사람과 비슷한 충격응답이 얻어지도록 제작된 것이다. 승객을 모델링한 더미(Dummy)의 종류에는 Part 572, Hybrid II, Hybrid III가 있으며, Hybrid III 더미(Dummy)는 Part 572 더미(Dummy)를 생체역학적으로 개선한 것으로 정면충돌(Frontal Impact)을 모델링하기 위한 가장 발전된 더미(Dummy)이다. 본 논문에서는 최근 많이 사용되고 있는 Fig.1에 보여지는 바와 같은 Hybrid III 모델을 채택하였는데 사람의 몸을 18개의 요소로 나누어서 각 부분을 특성에 맞게 타원체로 정의한 것이다.^{8),9)} 이 Hybrid III 모델에서는 불필요한 계산을 줄이기 위하여, 승객의 안전도 해석에 영향을 거의 주지않는 척추(Lumbar Spine)는 몸통 윗부분(Upper Torso)과 아랫부분(Lower Torso)에, 손은 팔 하단부(Lower Arm)에 포함시켜 단순화시켰다.¹⁰⁾ 각 요소의 질량이나 관성모멘트 등은 50% 더미(Dummy) 모델, 즉 몸무게가 가장 작은 성인남자를 0으로 놓고, 몸무게가 가장 많이 나가는 성인남자를 100으로 하였을 때 50에 해당하는 남자의 것을 택하였다. 본 논문에서는 승객을 모형화한 더미를 운전석에 위치하여 시뮬레이션 하였다.

2.2 자동차 내부의 모델링

충격이 영향을 미치는 내부구조는 의자, 바닥, 무릎판(Knee-Bolster), 앞유리창 등이 있는데 Fig.2에 보여지는 바와 같이 그들의 위치를 대상차의 설계 도면에서 공간상의 좌표를

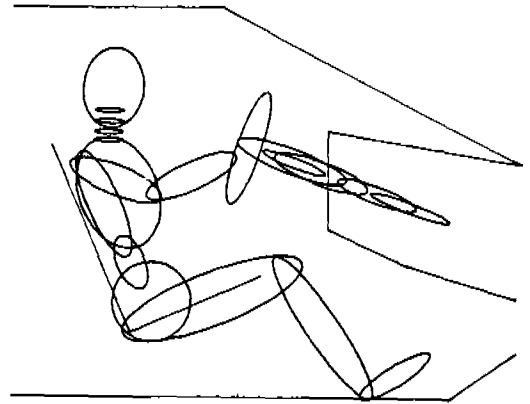


Fig.1 Hybrid III Dummy Model

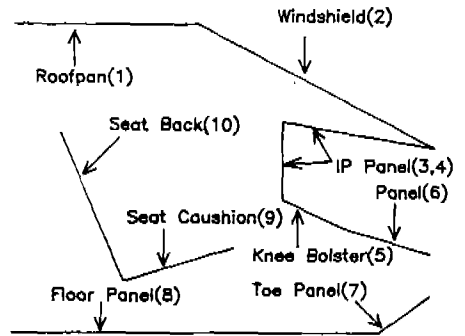


Fig.2 Contact Panels To Represent Parts of The Vehicle Interior

이용하여 표현한다. 즉 내부의 각 부분을 평면으로 가정하여 각 평면의 좌표 및 방향벡터를 설정하게 된다. 충돌시 이들 평면은 승객의 몸체 각 부분과 접촉하게 되며 앞에서 설명한 것과 같이 접촉시의 힘·변형 곡선은 실험에서 얻은 것으로 입력하게 된다.

2.3 안전띠의 모델링

승용차의 운전자나 승객의 안전띠를 모델링하는 방법에는 2가지가 있다. 첫째는 Fig.3에서 보여지는 원래의 안전띠모델(Original Belt Model)로서, 이 안전띠는 차에 붙은 2개의 고정점(Anchor Point)과 승객의 몸통에 붙은 점을 따라가는 곡선으로 정의하는데 복잡한 안전띠의 거동해석에는 그 간단한 모델

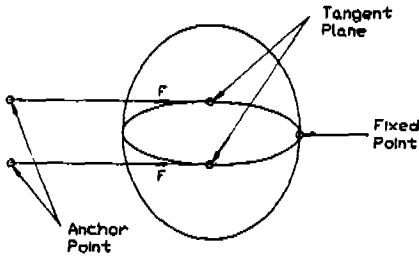


Fig. 3 Original Belt Model

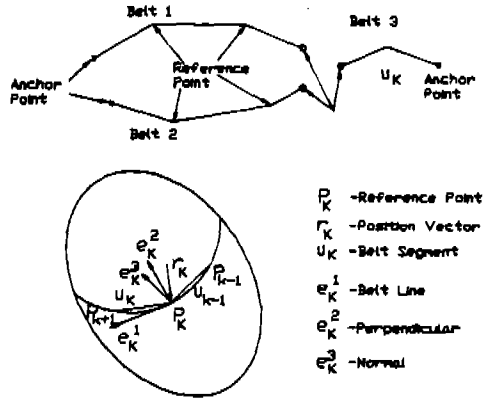


Fig. 4 Harness Model in CAL3D

이 적합치 않다는 평가로 인해 현재는 많이 사용되지 않고 있다. 둘째는 안전띠의 정확한 해석을 위해 비행기 조종사의 해석에 쓰이는 알고리즘을 승용차에 도입하였는데 이것을 하니스(Harness) 알고리즘이라 한다.^{10),11)} 이 하니스 알고리즘은 하나의 안전띠를 여러 띠의 조합으로 나누어서 해석의 정확성을 높인다. 여기서는 Fig. 4에 보여지는 바와 같이 여러 개로 나누어진 띠의 위치로 여러개의 기준점(Reference Point)을 연결시켜 만들었다. 따라서 본 논문에서는 해석의 정확도를 높이기 위하여 하니스 알고리즘을 사용하였다.

2.3.1 기준점을 만드는 방법

하니스 모델은 각 띠마다 하나의 평면을 가지고 있으며, 이 모델에서 기준점을 만들기 위해서는 먼저 Fig. 5의 왼쪽부터 시작해서 순차적으로, 왼쪽 고정점(점 1), 첫번째 접촉 타원체인 좌측 윗다리, 두번째 접촉 타원체인 골반의 중심을 선으로 연결하고, 이 타원체의 중심을 연결한 선이 타원체와 만나 이루어진 호에 입력으로 지정된 점 6을 기준으로 해서 좌우 각각 점 6을 포함 지정된 수(Fig. 5에서는 5개)만큼의 점을 만든다. 다음, 두번째 접촉 타원체인 골반, 그리고 세번째 접촉 타원체인 우측 윗다리의 중심을 선으로 연결하고 위와 같은 방법으로 점을 만들며, 오른쪽 고정점까지 계속한다.

2.3.2 기준점 선정방법

위의 알고리즘에 의해서 만들어진 기준점 중에서 실제로 띠의 모양을 형성하기 위해서 모든 기준점이 사용되는 것은 아니다. 그러므로

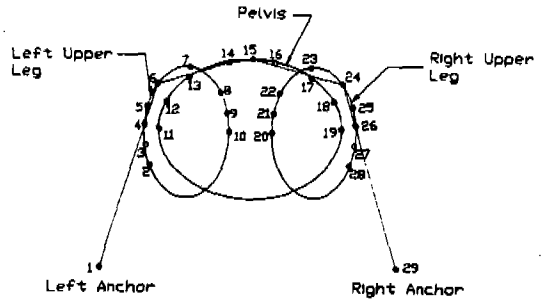


Fig. 5 Schematic View of the Reference Point

이 점들중에서 띠모양을 형성하기 위해서 쓰이는 기준점을 선정해야 한다. 이 기준점을 선정하는 방법에는 다음 3가지가 있다.

- 1) 모든 기준점이 포함되는 경우
- 2) 다른 타원안에 있는것을 빼는 경우
- 3) 컨벡스 시험(Convexity Test)를 만족시키는 점만을 포함하는 경우

Fig. 5에 보여지듯이 선정된 기준점들은 충돌시 기하학적 조건에 따라 안전띠가 인장하중을 받는 상태를 계산하기 위해 사용되는데 이에 대한 자세한 내용은 참고문헌에 있다.^{7),10)}

2.3.3 안전띠의 잠금장치(Belt Locking Mechanism)

자동차의 충돌시 띠의 반응장치(Reactor)가 반응하기 전에 띠의 풀림(Spool-Out)을

시뮬레이션하기 위하여 잠김장치(Locking Mechanism)가 하니스 알고리즘에 알맞게 개발되었다.¹⁰⁾ 띠 풀림의 멈춤은 자동차나 띠에 장치된 속도와 가속도를 측정하는 센서에 의해서 작동되는데, 일정한 속도나 가속도에 도달하기 전에는 반응장치가 작동하지 않아서 띠의 길이는 증가하고, 승객에게는 이 띠에 의해서 저항을 받지 않는다. 그러나 일단 풀림이 잠기게(Lock)되면, 잠긴 현재상태의 띠길이가 띠의 처음길이가 되어 띠의 변형률을 계산하는데 사용되며, 띠에 작용하는 힘은 이때에 대해서 입력된 힘·변형 함수에 의해서 계산되는데 이 역시 실험식으로 대처하여 사용하고 있다.

2.4 조향계(Steering System) 모델링

자동차 충돌시 승객의 안전도를 높이고, 조향계(Steering System)의 충격응답을 시뮬레이션하기 위한 모델로 에너지흡수 조향계(Energy Absorbing (EA) Steering System) 모델이 있다. 본 논문에서는 Fig. 6에 보이는 것같이 에너지흡수 조향계(EA System)를 실제처럼 모델링하기 위해서 이전 모델에 슬립 조인트와 용수철-감쇠기(Spring-Damper)의 2가지 특징을 첨가하였다. 용수철-감쇠기는 Fig. 6에 보이듯이 조향계의 컴플라이언스를 모델링하기 위해 사용되며 슬립 조인트는 컬럼의 압축을 시뮬레이션하기 위해 사용되었다.

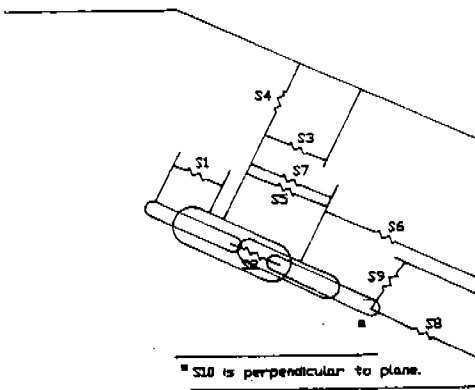


Fig. 6 Spring-Damper System

에너지흡수 조향계(Energy Absorbing System)는 Fig. 7~8에 보여지는 바와 같이 휠, 허브와 컬럼 2개의 부분으로 나뉘어진다. 휠은 휠(Wheel)-가슴(Chest) 접촉으로부터 받은 힘을 컬럼에 전달하며 충돌(Crash) 동안 전체 에너지의 일부분만을 흡수한다. 컬럼은 휠로부터 전달된 힘을 받고, 휠이 흡수하고 남은 에너지를 흡수하기 위해서 설계하중 이상의 힘을 받으면 컬럼축을 따라 파괴된다. 그러므로 휠과 컬럼을 따로 생각할 수 있다.

컬럼은 Fig. 8에서와 같이 하단부 자켓, 하단부 축, 상단부 자켓, 상단부 축 등 4개의 요소로 모델링하였으며, 하단부 컬럼은 볼 슬립 조인트에 의해서 차에 연결되었다. 이 컬럼들은 축 방향으로 움직이고, 차와 컬럼의 조인트 부분에서 볼 슬립 조인트에 의해서 컬럼축이 3방향으로 회전하고, 축 방향으로 움직일 수 있도록 모델링 되었다. 휠과 허브의 모델링은 Fig. 8에서 처럼 요소를 사용하지 않고, 휠과 허브에 각각 접촉 타원체(Ellipsoid)를 정의하였으며, 다른 요소와 이 타원체 사이 접촉력은 접촉 알고리즘에 의해 계산되는데 접촉 알고리즘은 참고문헌에 자세히 나와 있다.¹²⁾

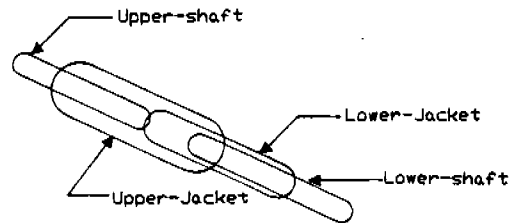


Fig. 7 A Four-Body Steering Column Model

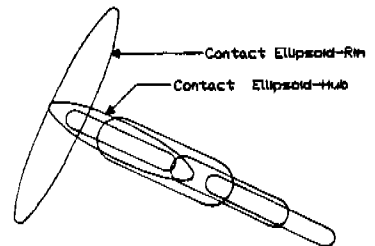


Fig. 8 A Steering System With Two Contact Ellipsoid for Representing the Wheel Rim and Hub

2.5 힘·변형률 함수

각 요소들 간의 접촉이나 요소에 작용되는 힘과 변형 함수는 앞에서 설명한 바와같이 해석시 유한요소법 등을 이용하여 탄성이나 소성변형 효과 등을 이용하여 직접 계산하지 않고 각 부품들의 정적, 동적 실험을 이용하여 힘·변형 관계를 이용하여 이를 함수로 표현, 입력자료로 활용하게 된다. 힘·변형 함수에 대한 실험에서 얻어지는 결과는 여러가지 복잡한 형태를 갖고 있으므로 이를 단순화하여 표현하기 위한 수단이 필요한데 CAL3D에서는 다음과 같은 세가지 방법을 채택한다.

- i) 상 수
- ii) 표(Tabular)
- iii) 다항식 :

$$F = A_0 + A_1 * X + A_2 * X^{**2} + A_3 * X^{**3} + A_4 * X^{**4} + A_5 * X^{**5}$$

본 논문에서는 더미를 강체(Rigid Body)로 모델링하였기 때문에, 판넬(Panel)-더미 요소 접촉, 요소-요소 접촉이 일어났을 경우, 탄성 혹은 소성변형을 실제 모습으로 나타낼 수 없다. 따라서 이 접촉이 일어났을 경우 접촉에 의한 변형, 즉 윗식의 X를 접촉되는 두 요소의 중첩량으로 간주하여 각 요소에 대해 실험으로 얻어진 힘·변형 함수를 이용하여 반력계산에 사용된다. 이는 모든 접촉에 공히 적용되는데 예를 들어 자동차 내부의 판넬과 더미의 접촉, 더미와 조향계의 접촉, 안전띠와 더미 몸통의 접촉시 등에 이용된다. 또한, 조향계의 용수철-감쇄기의 용수철 힘과 감쇄력은 다음과 같으며 여기서 사용되는 상수들이 실험에 의해 결정되어 입력된다.

용수철 힘 :

$$FS = (D - D0) * (|A1| + A2 * |D - D0|)$$

감쇄력 :

$$FD = DV * (B1 + B2 * |DV|)$$

여기서, D0 = 용수철의 처음길이
 D = 늘어났을 때의 길이
 DV = D의 시간 도함수
 A1, A2, B1, B2 = 상수

3. Head Injury Criterion (HIC)

자동차의 안전도해석에서 Head Injury Criterion은 자동차 충돌시 머리에 받는 충격크기를 판정하는 기준(Criterion)으로서 일정한 값을 기준으로 최대허용 위험치 또는 Injury Threshold(HIC=1000)를 넘었는지를 결정하는 값이다. HIC는 미국정부(NHTSA)에 의해서 인정된 해석방법이며, 또한 FMVSS 208에 의해서 자동차 안전도 해석에서 사용이 규정되었다.^{5),6)} Head Injury Criterion의 계산에서는 머리의 중력중심에서 가속도 값이 필요로 하며 다음과 같이 정의되었다.

$$HIC = \text{SUP}_{t_1, t_2} \left\{ \left[\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} a(t) dt \right]^{2.5} (t_2 - t_1) \right\} \quad (1)$$

여기서 a(t) : 머리무게 중심에서의 가속도 값
 t₁, t₂ : 충돌 기간동안 HIC 값을 최대화시키는 시간의 간격

식(1)은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$f(t_1, t_2) = \left[\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} a(t) dt \right]^{2.5} (t_2 - t_1), \quad 0 \leq t_1 \leq T, 0 \leq t_2 \leq T \quad (2)$$

HIC를 계산하기 위해서 f의 극한값이 필요하다. f(t₁, t₂)는 내부점(t₁^{*}, t₂^{*})에서 최대값을 갖는다고 가정한다. 함수 f(t₁, t₂)가 극한값을 갖기 위해서는 다음과 같은 조건을 만족해야만 한다.

$$\frac{\partial f}{\partial t_1} = \frac{\partial f}{\partial t_2} = 0 \quad \text{at } (t_1^*, t_2^*) \quad (3)$$

위의 식(3)을 만족하는 점을 극점(Critical Point)이라 하고, 식(3)은 최대, 최소에 대한 필요조건이지 충분조건이 아니기 때문에, 극점에서 최대, 최소가 존재하는지를 알기 위해서는 식(3)을 만족하는 점 (t_1^*, t_2^*) 의 주변에서 아래첨자를 첨자에 대한 편미분 값으로 정의할 때 함수 $f(t_1, t_2)$ 의 2계 도함수에 대한 다음 정리를 적용하면 된다.

만약 $f_{t_1 t_1}(t_1^*, t_2^*) = f_{t_2 t_2}(t_1^*, t_2^*) = 0$ 이고

$$D = \begin{vmatrix} f_{t_1 t_1}(t_1^*, t_2^*) & f_{t_1 t_2}(t_1^*, t_2^*) \\ f_{t_2 t_1}(t_1^*, t_2^*) & f_{t_2 t_2}(t_1^*, t_2^*) \end{vmatrix} < 0 \text{ 이면 (4)}$$

그때

$$f(t_1, t_2) = \text{Max} \quad \text{if } f_{t_1 t_1} < 0$$

$$f(t_1, t_2) = \text{Min} \quad \text{if } f_{t_1 t_1} > 0 \text{ 된다. (5)}$$

HIC의 극한값을 구하기 위하여 위의 정리를 이용한다. $f(t_1, t_2)$ 를 t_1 으로 미분하고, 0으로 놓고 정리하면

$$1.5 \int_{t_1}^{t_2} a(t) dt - 2.5 a(t_1)(t_2 - t_1) = 0 \quad (6)$$

t_2 로 미분하면

$$1.5 \int_{t_1}^{t_2} a(t) dt - 2.5 a(t_2)(t_2 - t_1) = 0 \quad (7)$$

위의 2개의 식을 연립해서 풀면

$$2.5(t_2^* - t_1^*)[a(t_2^*) - a(t_1^*)] = 0 \quad (8)$$

된다. 한편 $t_2^* \neq t_1^*$ 라면, 해가 존재하기 위해서 HIC가 최대가 되는 점 (t_1^*, t_2^*) 에서 t_2^* 과 t_1^* 에서 가속도의 크기가 같아야만 한다.

$$\text{즉 } a(t_1^*) = a(t_2^*) \text{ 된다 (9)}$$

식(6), (7)을 다시쓰면

$$\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} a(t) dt = \frac{5}{3} a(t_1) \quad (10)$$

$$\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} a(t) dt = \frac{5}{3} a(t_2) \quad (11)$$

식(10)은 $a(t_1)$ 은 $\partial f / \partial t_1$ 일 경우이며, 이 식은 t_1 과 임의의 t_2 사이 평균가속도는 t_1 에서의 가속도 크기에 5/3가 된다는 것을 나타낸다. 식(11) 또한 $\partial f / \partial t_2$ 일 경우이며, 식(10)과 비슷하다. 그러므로 HIC가 최대의 값을 갖기 위해서 점 $(t_1, t_2) = (t_1^*, t_2^*)$ 에서 $a(t_1^*) = a(t_2^*)$ 가 되어야 하고, t_1^* 와 t_2^* 사이의 평균가속도는 t_1^* 에서의 가속도의 5/3이 된다.

지금 현재 자동차의 안전도 검사에서 HIC값의 통과치는 1000인데 이는 꼭 통과해야만 되는 중요한 기준(Criterion)이다. HIC값을 효율적으로 계산하는 알고리즘은 참고문헌에 자세히 보여지고 있다.^{3),4),5)}

4. 시뮬레이션 결과와 실험결과의 비교

본 논문에서는 국산 승용차의 충돌시 승객 거동해석을 위한 모델링 및 그의 검토를 위하여 충돌실험에서 측정된 차의 주행속도, 차가 벽에 충돌했을 때의 감속도와 각 판넬의 힘·변형 함수, 안전띠의 힘·변형 함수, 조향계를 모델링한 용수철의 힘·변형 함수, 각 판넬의 마찰계수 등을 입력자료로 입력하여 시뮬레이션 하였다. 시뮬레이션시 차의 주행속도는 56.3 km/h였으며, 더미의 위치는 의자가 앞뒤로 이동할 수 있기 때문에 의자의 위치를 임의로 바꾸어 실험할 수 있으나, 이 실험에서는 의자를 중간위치(Mid Position)에 놓고 실험하였다. 시뮬레이션의 타당성을 검토하기 위하여 충돌실험에서 추출된 HIC(Head Injury Criterion), 머리, 가슴, 골반의 가속도와 시뮬레이션에서의 HIC(Head Injury Criterion), 머리, 가슴, 골반 가속도 형태를 비교하였다. 본 논문에서는 우선 충돌실험의 결과와 비슷하게 자료를 준비하고 앞에서 설명한 대로 각 계수등을 알맞게 조절(Tuning)하여 모델을 확립하는데 중점을 두었다.

먼저, 머리의 가속도를 보면 Fig. 9에서 보여지는 바와같이 시뮬레이션에서 최대 가속도의 크기는 99 msec에서 98.67(g) (= 96696.6 cm/sec²)으로, 머리의 가속도가 최대가 된 원인은 이 시간에 머리와 허브(Hub) 사이 접촉에 의한 변형이 최대가 되며, 이 변형에 의하여 머리와 허브 사이에 접촉력이 최대가 되기 때문이다. 충돌실험에서는 93 msec에서 102(g) (= 99960.0 cm/sec²)으로 두 결과 사이에 최대 가속도가 일어나는 시간은 6 msec 오차가 발생하였으며, 최대 가속도 크기는 3.3% 오차가 발생하였다. 최대 가속도가 발생하는 시간이 실험에 비해서 6 msec 늦어진 이유는 다음과 같다. 머리의 최대 가속도는 머리와 조향계의 접촉시 발생하는 것으로 관찰되었는데 실차의 충돌실험시는 조향계가 머리와 조향계의 접촉 이전에 소성변형이 되어 승객 쪽으로 가까이 가게 되는데 본 논문에는 이것이 포함되어 있지 못하다. 즉 시뮬레이션시 접촉전에는 Fig. 7~8에 보이는 조향계 형상이 그대로 유지된다. 따라서 시뮬레이션에서는 머리와 조향계의 접촉이 약간 늦게 발생하고 이에 따라 최대 가속도도 늦게 발생하게 된다. HIC (Head Injury Criterion)를 비교해보면, 시뮬레이션에서는 814 이고, 충돌실험에서는 751.0으로 두 결과 사이에 8.3%의 오차가 발생하였다.

골반(Pelvis)의 가속도는 Fig. 10에서 보여지는 바와 같이 최대 가속도는 71 msec에서

50.8(g) (= 49784 cm/sec²)으로, 이 시간에 골반의 가속도가 최대가 되는 원인은 Fig. 1에서 발과 7번 판넬에 접촉이 일어났으며, 또한 같은 시간에 무릎띠(Lap Belt)의 장력이 최대가 되어 무릎띠(Lap Belt)에 의해서 골반(Pelvis)에 최대의 힘을 받기 때문이다. 97 msec와 124 msec에서도 가속도가 갑자기 커지는데 이 원인은 아직 정확히 밝혀지지 않았다. 충돌실험에서 골반(Pelvis)의 최대 가속도는 68 msec에서 50.0(g) (= 49000 cm/sec²)으로 두 결과에서 최대 가속도가 발생한 시간에서는 3 msec의 오차가 발생하였으며, 최대 가속도 크기는 시뮬레이션과 충돌실험이 정확히 일치하였다.

가슴(Chest)의 가속도에서는 최대 가속도의 크기가 실험과 많은 차이가 발생하였다. 먼저 최대 가속도의 크기를 보면 Fig. 11에서 보여지는 바와같이 71 msec에서 43.9(g) (= 43022

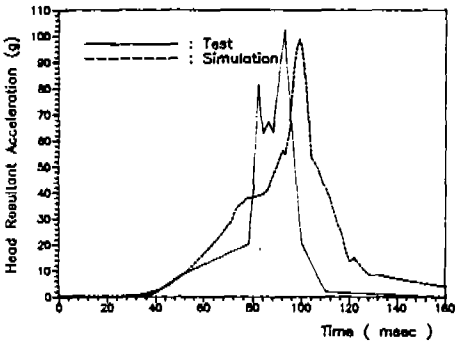


Fig. 9 Head Resultant Acceleration

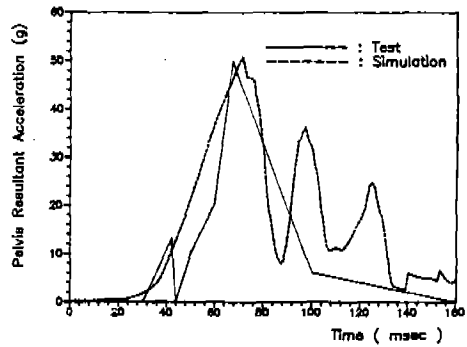


Fig. 10 Pelvis Resultant Acceleration

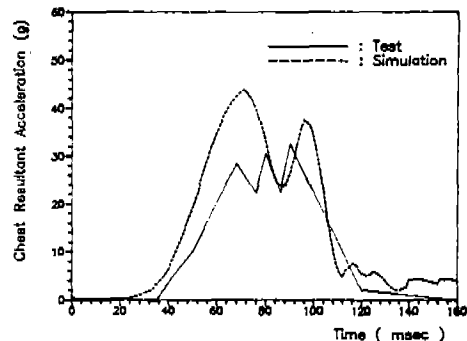


Fig. 11 Chest Resultant Acceleration

cm/sec²)으로 이 시간에 가슴의 가속도가 최대인 원인은 어깨띠(Shoulder Belt)의 하단부 지점(Lower Anchor Point)에서 장력이 이 시간에 최대이기 때문에 안전띠에 의해서 승객의 가슴에 가장 큰 힘을 받고, 또한 골반에서 처럼 발과 7번 판넬사이 접촉이 일어나기 때문이다. 실험에서는 90 msec에서 32.7(g) (= 32046 cm/sec²)로 시간에서는 19msec 오차가 일어났으며, 최대 가속도 크기에서는 34.3% 오차가 발생하였으나, 그래프에서 보는바와 같이 가속도 값의 크기만 작을뿐 경향은 비슷하다.

현재로서는 시뮬레이션에서의 가속도와 실험에서 가속도 사이 허용오차에 대한 명확한 기준이 확립되어 있지 않은 상태이므로 시뮬레이션 결과의 타당성은 경험 및 공학적 센스에 의해서 결정한다. 예를들면, GM(General Motors)자동차의 연구소에서 시뮬레이션한 결과를 보면 가속도 크기 오차가 20~40%가 되어도 결과가 맞았다고 간주하는 것을 볼 수 있다.¹⁰⁾ 또한, 최대 가속도가 일어난 시간을 보면 가속도 크기와 마찬가지로 최대 가속도가 발생하는 오차에 대한 기준은 없으며, 사용자가 경험에 의해서 시뮬레이션의 타당성을 결정한다.

본 논문에서 모델링에 의한 시뮬레이션은 골반의 최대 가속도와 최대 가속도가 일어나는 시간에서 오차가 컸을뿐, 대체로 가속도 분포 형태가 충돌실험과 비슷하고, 골반 이외의 가속도는 잘 일치하기 때문에 이 시뮬레이션은 아주 좋은 결과를 얻었다고 본다. 따라서 여기서 사용된 자료는 충격모델로서 타당하다고 본다. 공학적 문제에서 시뮬레이션은 그 결과가 설계에 반영될 때 큰 의의를 가진다는 것이 주지의 사실이다. 본 논문에서의 시뮬레이션의 타당성 검토를 통해서 확립된 해석모델은 충돌에 관계된 여러가지 부품의 설계에 이용될 수 있다. 즉 충돌실험시 얻지 못한 결과를 시뮬레이션 모델에 의해 구할 수 있는데 예를들어, 시뮬레이션에서 안전띠가 받는 하중을 보면 Fig. 12, 13과 같다. 이를 통해서 우리는 이 안전띠가 차에 연결된 부분에서 어깨

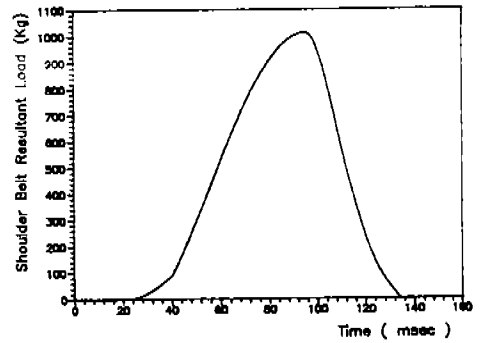


Fig. 12 Shoulder Belt Load

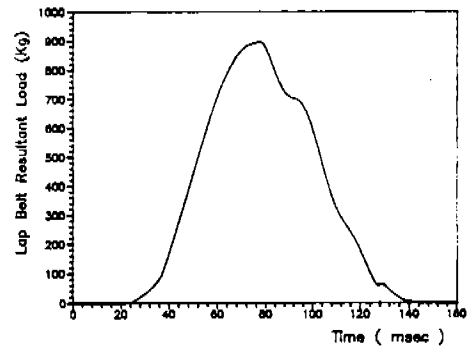


Fig. 13 Lap Belt Load

띠(Shoulder Belt)가 승객과의 접촉에 의해서 받는 최대하중은 고정점(Upper Anchor Point)에서 1014 kg (= 9.94 KN)이 됨을 볼 수 있다. 따라서 설계시 이 고정점에서의 설계하중이 1014 kg (= 9.94 KN) 이상 되도록 하는 것이 제안될 수 있다. 무릎띠(Lap Belt)가 받는 하중은 아래 고정점(Lower Anchor Point)와 버클(Buckle)사이에서 걸리는 하중으로, 이 힘은 버클(Buckle)에 작용하는 어깨띠(Shoulder Belt)의 하중과 무릎띠(Lap Belt)의 힘을 벡터적으로 합한 것으로, 아래 고정점(Lower Anchor Point)에서 이 하중을 지지하기 위해서는 안전띠 설계시 898.2 kg (= 8.9 KN) 이상의 하중을 견디도록 설계해야 한다. 또한 본 논문에서는 안전띠의 힘·변형률 함수, 무릎의 조인트가 멈추는 각도 지정, 운전자의 의자 위치, 에어백을 넣었을 때의 각 경우에 대해서 시뮬레이션을 통해 반응을 예상해 보았는데, 각

Table 1 HIC Values According To Parameter Change

항 목	HIC Value
Joint Stop Angle	793.82
Seat Position 변화	596.38
안전띠 (Scale Factor = 2.0)	558.62
안전띠 (Scale Factor = 0.5)	758.24
AirBag 첨가	492.88

경우에서의 HIC 값은 Table 1 과 같으며, 자세한 것은 참고문헌에 수록되어 있다.” 따라서 컴퓨터로 시뮬레이션시 이러한 결과를 설계값이 바뀔때의 반응에 대한 예측으로 충돌실험이 없이 구할 수 있다는데 큰 잇점이 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 국산 승용차의 충돌시 승객 거동해석을 위한 모델링 및 그의 검토를 위하여, 국산차의 Crash Test 결과와 동력학적인 상태를 시뮬레이션하였으며, 이 시뮬레이션 결과의 타당성을 검토하기 위하여 앞장에서 HIC (Head Injury Criterion), 머리, 가슴, 골반의 가속도를 실험결과와 비교하였다. 이 비교 결과를 보면, HIC 값은 실험과 8.3% 오차가 일어나 잘 일치하였으며, 머리의 가속도에서는 시뮬레이션에서는 실험보다 최대 가속도가 일어나는 시간이 6 msec 늦추어졌는데, 앞에서 설명한 대로 이후의 연구에서는 조향계와 머리의 접촉전 조향계의 대변형에 의한 변위가 고려되어야 될 것으로 사료된다. 이 경우 실험에서 측정된 변위가 포함된 모델로 시뮬레이션을 시작할 수 있겠다. 골반의 가속도는 97 msec 와 124 msec 에서 가속도가 갑자기 커졌으나, 이것은 머리가 허브에 부딪치고 몸이 뒤로 후퇴하는 과정에 일어났고 그 크기가 크지 않기 때문에 이 현상은 중요하지 않다고 본다. 가슴의 가속도에서는 최대 가속도가 일어나는 시간이 19 msec 오차가 발생하고, 최대 가속도 크기는 34.3% 오차가 발생하였으나, 가속도 경향이 충돌실험과 비슷하기 때문에 이 결

과는 좋은 것으로 생각한다. 그러므로, 이 시뮬레이션은 실험에 잘 일치한다고 볼 수 있으며 이를 위한 모델링이 타당하다고 하겠다. 실험결과가 없는 경우의 시뮬레이션의 이용예로서 안전띠가 차에 연결되는 고정점에서의 장력을 예측할 수가 있었다. 한편, 충돌실험이 고가인 관계로 여러 경우를 시도할 수 없는 경우 즉, 조인트 성격 변화, 의자 위치, 에어백의 장착여부 등의 변화가 있을 시 확립된 모델을 가지고 반응을 예측할 수 있었다. 본 논문에서는 비록 우수한 모델링이 확립되었다 할지라도, 차종이나 주변환경이 바뀔때는 다시 모델링을 해야되는 문제가 남아있다. 따라서 본 논문을 통해 얻어진 결과를 좀더 다양하게 일반화하는 작업이 필요하다고 생각된다.

후 기

본 연구 논문은 대우자동차주식회사의 산학협동 연구비 지원에 의해 이루어졌으며 이에 감사를 드립니다. 아울러 컴퓨터 사용시 도움을 주신 대우자동차주식회사 중앙연구소 권성은, 반영무씨 등께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 신문균, 박경진, 김형중, 정근섭, “국산차의 충격시 승객해석에 대한 모델링 및 분석”, 춘계 자동차학술대회, 1991.
2. Fleck, J.T., “Validation of the Crash Victim Simulator, Volumes I Through IV,” Report No. DOT HS-806 279, December 1981.
3. Chou, C.C. and Gerald W. Nyquist, “Analytical Studies of the Head Injury Criterion (HIC),” SAE Paper No. 740082.
4. Chou, C.C., Howell, R.J. and Chang, B.Y., “A Review and Evaluation of Various HIC Algorithms,” SAE Paper No. 880656.
5. Newman, J.A., and Ottawa, “Head Injury Criterion in Automotive Crash Testing,” SAE Paper No. 801317.

6. Rodden, B.E., Bowden, T.J. and Reichert, J.K., "An Algorithm for Determining the head Injury Criterion from Records of Head Acceleration," SAE Paper No. 830469.
7. 박경진, 김형중, 신문균, "CAL3D를 이 용한 승객의 안전도 Simulation", 한양대 학교 산업경영연구소, 1991.
8. Prasad, P., "An Overview of Major Occupant Simulation Models," SAE Paper No. 840855, 1984.
9. Foster, J.K., Kortge, J.O., and Wolanin, M.J., "Hybrid III - A Biomechanically-Based Crash Test Dummy," Proceedings of the 21st Stapp Car Crash Conference, SAE Paper No. 770983.
10. Deng, Y.C., "Analytical Study of the Interaction Between the Seat Belt and a Hybrid III Dummy In Sled Tests," SAE International Congress and Exposition, Detroit, Michigan, Feb. 29-Mar. 4, 1988, SAE Paper No. 880648.
11. Butler, F.E. and Fleck, J.T., "Advanced Restraint System Modeling," AFAMRL-TR 80-14, May 1980.
12. Wang, J.T. and Kuang-Huei Lin, "A Cal3d Steering System Impact Model," SAE Paper No. 880650.