

ATB 프로그램에서 삼점식 좌석 벨트 모델의 구현

전 규 남¹⁾ · 손 권^{*2)} · 최 경 현³⁾

부산대학교 대학원¹⁾ · 부산대학교 기계공학부^{*2)} · 제주대학교 기계생산에너지공학부³⁾

Implementation of 3-point Seat Belt Model into ATB Program

Kyunam Jeon¹⁾ · Kwon Son^{*2)} · Kyung-Hyun Choi³⁾

¹⁾Department of Mechanical Design Engineering, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

^{*2)}School of Mechanical Engineering, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

³⁾Faculty of Mechanical, Energy and Production Engineering, Cheju National University, Jeju-do 690-756, Korea

(Received 7 January 2003 / Accepted 17 April 2003)

Abstract : Occupant simulation models have been used to study trends or specific design changes in several typical crash situations. The ATB, Articulated Total Body, was developed and used to predict gross human body responses to vehicle crashes and pilot ejections. Since the ATB source code is open to public, the user can add their own defined modules and functions. The introduction of seat belts into cars significantly decreased the injury risk of passengers in frontal impacts. In this paper, a new seat belt model was developed and implemented into the ATB. For this purpose, a subroutine of the new seat belt was constructed. A force-deflection function was added to replace an existing function to consider energy absorption. The function includes hysteresis effects of the experiment data of the loading and unloading parts of the seat belt load-extension curve. Moreover, this belt model considers a slip between ellipsoid and belt segments. This paper attempted to validate the ATB program which includes the subroutine of new belt models comparing with the real car frontal crash experiments and MADYMO frontal models. The analysis focusses on the human movement and body accelerations.

Key words : ATB(Articulated Total Body), MADYMO(Mathematical Dynamic Model), Lap belt(몸통벨트), Shoulder belt(어깨벨트), Force-elongation function(힘-신장률 함수)

1. 서론

승객의 안전을 고려한 차량의 설계와 해석에서 컴퓨터 시뮬레이션 모델을 이용하여 설계시간을 단축하려는 노력이 계속 되고 있다. 실차 실험(barrier test)과 충돌 모의 실험(sled test)같은 실제 충돌실험은 많은 실험횟수, 고가의 실험장비, 엄청난 경비를 요구한다. 그뿐 아니라 실험의 결과는 같은 조건 하에서도 시간과 장소에 따라 상이한 결과를 발생시

킬 수 있기 때문에 각각의 매개 변수에 대한 정확하고 정량적인 평가가 어려워진다. 따라서 운동법칙에 근거한 컴퓨터 시뮬레이션 모델이 많이 이용되고 있다.¹⁾

컴퓨터 시뮬레이션에는 ATB, MADYMO, PAM-SAFE 등과 같은 프로그램이 사용되고 있다. ATB²⁾는 다양한 충돌과 탈출 환경에서 탑승자의 거동을 예측하는 프로그램으로 AFRL(Air Force Research Laboratory)을 중심으로 개발되었고, 1975년 Calspan 회사가 항공역학과 하니스 벨트 알고리즘을 추가하면서 기능이 확충되었다. 특히 복잡한 자동차 사고

*To whom correspondence should be addressed.
kson@pusan.ac.kr

와 비행기 조종석 탈출에 대한 시뮬레이션에 중점을 두고 작성되었다. MADYMO³⁾는 네덜란드의 TNO에서 개발되어 상용화된 인체 안전도 해석 프로그램으로 다물체 동역학 해석과 유한요소 해석을 지원하고 있다. PAM-SAFE⁴⁾는 프랑스의 ESI(Engineering Systems International) Group에서 개발되어 상용화된 인체 안전도 해석 프로그램이다.

ATB의 장점으로는 다른 고가의 상용 프로그램과 달리 공용으로 사용되며 소스 코드가 공개되어 있다는 점이다. 사용자는 해석 목적에 따라 사용자 정의 모듈을 추가하여 기능을 부여할 수 있기 때문에 확장성 및 응용성이 크다.¹⁾ 따라서 이러한 ATB를 이용해서 자체적으로 충돌프로그램을 개발하고 상용화하려는 노력이 시도되고 있다. 상용화를 위해서는 정면, 측면, 후면, 전복(rollover)과 같은 특정 충돌 상황에 대한 검증을 필요로 한다.⁵⁾

ATB는 해석과정에서 차량과 인체 모델의 접촉에 의한 상호 작용으로 구속력이 발생하게 되고 이러한 구속하중에 의해서 인체가 반응하게 된다. 프로그램에서 제공하는 구속력의 종류는 접촉평면과 접촉 타원 접촉, 접촉타원과 접촉타원 접촉, 세그먼트와 벨트 접촉, 세그먼트와 에어백 접촉 등이 있다.⁶⁾ 보통 좌석 벨트 시스템은 에어백과 더불어 차량의 충돌 상황에서 운전자를 보호하여 인체 상해를 최대한 줄이려는 시도에서 비롯되었으며 이에 따라 여러 가지 방법이 연구되고 있다.⁷⁾

본 논문에서는 ATB가 가지고 있는 기존 벨트의 장점을 이용하면서 동시에 입력이 간편하고 설계에서 확장이 용이한 삼점식 좌석 벨트 모델을 개발하고자 한다. 이를 위해서 ATB 프로그램내에 새로운 벨트 모델을 서브루틴으로 구현하였다. 벨트 모델에 적용할 힘-신장률 함수도 여러 계수 값을 입력해서 에너지 소산을 고려하는 기존의 함수 대신에 히스테리시스 효과를 줄 수 있도록 구성한다. 더불어 벨트 세그먼트와 인체 모델 사이의 미끄러짐도 포함하도록 한다. 마지막으로 정면 충돌 상황에 대한 기존 하니스 벨트와 MADYMO와의 비교 시뮬레이션을 통해서 새로운 벨트의 신빙성을 검증한다. 또한 결과 비교를 통해 개선 사항을 확인한다.

2. ATB 프로그램

이장에서는 ATB의 다물체계^{2,8)}와 동역학적 구성,^{9,10)} ATB 모델에 사용되는 단순 벨트 시스템(simple belt system)^{8,11)}과 하니스 벨트 시스템(harness belt system)^{8,12)}에 대해서 간략히 서술한다.

2.1 다물체계와 동역학적 구성

ATB의 다물체계는 일반적으로 Fig. 1과 같이 강체 요소와 조인트로 표현될 수 있다. 여기서 X_m 과 X_n 은 관성 좌표계에서 각각의 세그먼트 무게 중심점까지의 거리를 나타내며 r_m 과 r_n 은 무게 중심에서 조인트까지의 거리를 나타낸다. F와 T는 외부에서 세그먼트에 작용하는 힘과 모멘트이다.

다물체계를 구성하는 물체는 크게 두 개의 요소에 의해 정의된다. 동역학 모델을 구성하기 위한 질량, 관성모멘트 등 물성값과 구속 모델과의 상호작용을 정의하기 위한 접촉타원이다. 하나의 물체에는 1개 이상의 접촉타원이 존재해야 하며 접촉타원은 물체의 기하학적 형상을 결정한다. 물체는 조인트에 의해 다른 물체와 연결된다. ATB에서는 자유 조인트(free joint), 핀 조인트(pin joint), 미끄럼 조인트(slip joint), 볼·소켓 조인트(ball and socket joint), 오일러 조인트(Euler joint)를 사용한다. 조인트에서는 스프링과 댐퍼 요소에 의해 운동에 대한 조인트 저항력을 정의할 수 있다.

구속 모델은 물체에 부착된 접촉타원과 접촉에 의해 구속력을 발생시킨다. 구속 모델과의 상호작용은 접촉에 의해서 정의된다. 접촉에는 미끄럼(slip)과 관통(penetration)이 있다. 미끄럼은 상수형

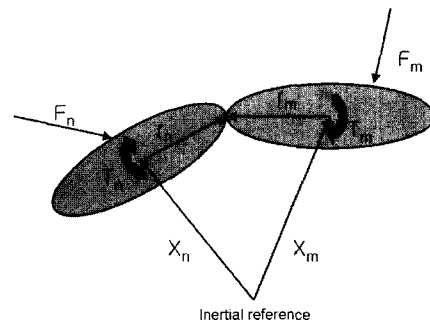


Fig. 1 System of connected rigid bodies

태의 마찰계수에 의해 표현되며, 관통은 힘-변형량의 함수로 표현된다. ATB에서 사용되는 구속 모델에는 접촉평면, 접촉타원, 벨트, 하니스 벨트, 에어백, 스프링-댐퍼, 풍력이 있다.

2.2 단순 벨트 시스템

단순 벨트 시스템의 요소는 Fig. 2에서와 같이 두 개의 차량 고정점(anchor point)과 한 개의 접촉 타원 부착점(contact point)로 되어있다. 한 개의 차량 고정점과 접촉 타원 부착점의 연결을 한 개의 벨트 세그먼트로 가정하면, 사용자는 1번과 2번, 두 개의 벨트 세그먼트로 이루어진 완전한 벨트 요소에 대해서만 힘-신장률 함수와 좌표값의 입력을 줄 수 있으며, 각각의 세그먼트에 대해서 독립적으로 입력을 줄 수 없다.

전체 벨트의 길이는 타원 부착점과 각각의 차량 고정점에 의해서 정의되며, 구속력은 한 개의 접촉 물체에만 영향을 미친다. 벨트와 접촉타원과의 접촉은 ATB내에서 사용되는 일반적인 힘-신장률 함수를 따른다.

단순 벨트 시스템의 단점은 하나의 부착점으로 접촉 평면에서 접촉을 정의한다는 것이다. 따라서 실제 좌석 벨트가 인체 모델에 접촉되는 모양과는 상당히 다른 모습을 보일 수 있으며 벨트의 장력 방향도 달라 질 수 있다. 또한 접촉 평면의 부착점이 세그먼트에 고정되어 있어서 항상 세그먼트 국소 좌표계의 원점과 일정한 거리를 유지하며 같이 움직인다는데 있다.

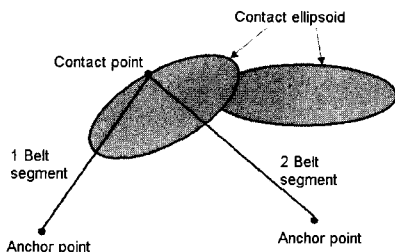


Fig. 2 Simple belt system

2.3 하니스 벨트 시스템

하니스는 여러 개의 벨트 세그먼트가 연결되어 있는 형상을 뜻하는 것으로, 하니스 벨트 시스템은

하나 혹은 여러 개의 벨트 세그먼트로 이루어지며 각각의 벨트 세그먼트는 기준점들로 연결된 직선으로 형성된다. Fig. 3에서와 같이 하니스 벨트의 기준점은 벨트 세그먼트와 접촉 타원의 부착점이 된다. 이러한 여러 개의 기준점을 통해서 벨트의 변형, 미끄러짐, 침투길이(penetration)이 계산되어진다. 특히 벨트의 신장률과 힘은 각각의 벨트 세그먼트에 대해서 독립적으로 계산된다. 힘 벡터는 인접하는 벨트 세그먼트들의 상호 작용하는 인장력으로 구하며 기준점에서 그 값이 계산된다. 기준점은 벨트에 걸리는 힘과 인체와 벨트가 접촉할 때 발생하는 마찰력의 상호작용이 평형을 이룰 수 있도록 접촉 타원 위에서 움직일 수 있다. 하니스 벨트 시스템은 단순 벨트의 단점을 극복하여 세그먼트와 인체에 대해서 미끄러짐을 구현할 수 있다. 하나의 벨트 요소에서 여러 개의 벨트 세그먼트들을 고려하며 벨트 세그먼트간의 상호작용을 허락하여 미끄러짐을 구현할 수 있지만, 하니스 시스템의 문제는 시뮬레이션 해석상에서 수치 해석적으로 불안정함을 야기시키며 잘 수렴하지 않는다는 데 있다.

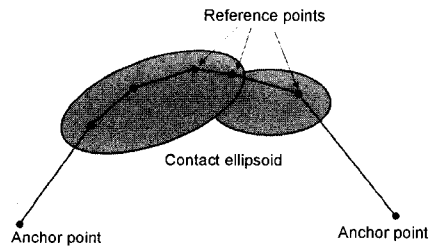


Fig. 3 Harness belt system

3. 벨트 프로그램

이 논문에서 개발하려는 삼점식 벨트 모델에 대해서 소개한다. 더불어 개발된 서브루틴의 흐름도와 그 기능들에 대해서 기술한다.^{3,7,13)}

3.1 개발된 삼점식 벨트 모델

개발된 삼점식 벨트 시스템은 단순한 스프링-감쇠기 요소와 같이 모델링되어 벨트에 의한 인체 구속을 간단하게 정의할 수 있다. 또한 하니스 벨트와 같이 미끄러짐에 대한 기능을 부여할 수 있고, 입력하는 힘 데이터에 대해서 히스테리시스 효과를 줄

수 있는 기능을 넣었다.

단순 벨트와는 달리 하나의 접촉타원에 두 개의 부착점을 Fig. 4에서와 같이 정의한다. 따라서 바다 세그먼트는 두 개의 독립된 벨트 세그먼트에 의해 구속을 받게된다. 이와 같이 두 개의 부착점만으로 미끄러짐과 히스테리시스 효과를 줄 수 있으므로 여러 개의 기준점으로 구성되는 하니스 벨트의 복잡성과 그에 따른 수렴성의 문제를 극복할 수 있다. 또한 여러 서브루틴을 거치지 않고 계산되므로 시뮬레이션 시간을 줄일 수 있다.

벨트를 모델링함에 있어서 삼점식 벨트 시스템의 어깨 벨트와 골반 벨트 부분을 네 개의 벨트 세그먼트로 나누었다. Fig. 5에서와 같이 윗몸통(upper torso)에 두 개의 고정점, 아랫몸통(lower torso)에 고정점 두 개, 그리고 차량에 네 개의 고정점을 지정했다. 바깥쪽 D링과 윗몸통 윗부분의 고정점 사이를 1번 세그먼트, 윗몸통 아랫부분의 고정점과 안쪽 D링 사이를 2번 세그먼트, 안쪽 D링과 아랫 몸통 고정점 사이를 3번 세그먼트, 바깥쪽 차량 고정점(outer anchor)과 아랫 몸통 고정점 사이를 4번 세그먼트로 각각 정한다.¹³⁾ 벨트 구속력은 이들 고정점

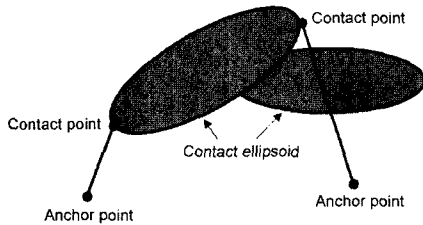


Fig. 4 New belt system

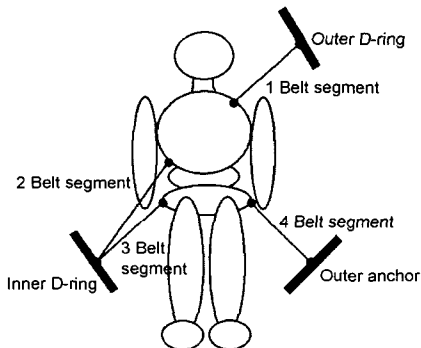


Fig. 5 Seat belt modeling

사이의 거리에 따른 인장력으로 계산되며 이들 고정점이 구속력의 작용점으로 작용한다.

3.2 해석절차

개발된 서브루틴의 흐름도와 그 기능들에 대해서 소개한다. 물체에 작용하는 외부 힘과 토크를 계산하는 CONTACT 루틴 내부에 새로운 좌석 벨트 기능을 수행하는 SBELT를 추가한다. CONTACT함수는 기존의 벨트와 새로운 벨트에 대한 기능을 가지게 되며, 부호로써 원하는 벨트를 선택할 수 있도록 실현했다. 양의 값은 기존의 벨트를 가리키고 음의 값을 사용하면 SBELT를 호출하여 입력값을 받는다.

Fig. 6에 SBELT의 흐름도를 나타내었다. SBELT 내부에 미끄러짐 량을 계산하는 서브루틴 SFCE와 신장률에 대한 힘을 구하며 히스테리시스 효과를 고려하는 FUN을 구성했다. SBELT는 차량의 고정점과 인체 접촉타원의 부착점 사이의 거리를 매 시간마다 계산하고 이 값을 SFCE에 넘겨준다. 그리고 SFCE에서 계산된 힘과 토크에 대한 결과 값을 받아서 바다 물체에 작용될 수 있도록 해당되는 행렬에 입력한다. SFCE는 미끄러짐량을 계산하고 FUN함수를 호출하여 신장률에 대한 힘을 구하고 이 값을 SBELT에 넘겨준다. SPOLT는 각각의 벨트에 걸리는 장력을 매 시간마다 출력한다.

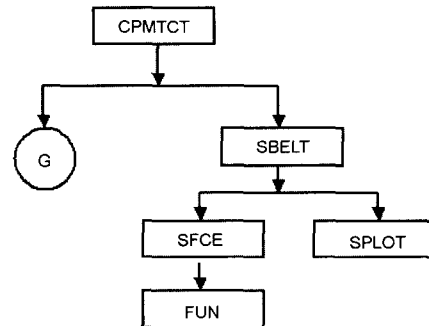


Fig. 6 Flow chart of the new belt

3.3 히스테리시스 효과

현재 ATB에서 사용되는 힘-신장률 함수는 Fig. 7과 같다. 관성을 고려한 상승값(inertial spike)와 기존 힘에 의한 변형, 비선형 또는 선형 탄성 변형을 고려하기 위한 에너지 흡수 인자 R과 영구 변형량을 나

타내는 G인자로써 힘을 구한다. 에너지 흡수 인자 $R=1$ 이면 에너지 방출이 없는 변형 상태가 되며 선형 또는 비선형 탄성 상태를 의미한다. 영구 변형은 영구변형량을 최대 변형량으로 나눈 값이다. R과 G 인자는 ATB 자체에서 히스테리시스 효과를 위해 도입되었으며 신장률에 대한 함수이다. 프로그램 내에서 이 인자들을 이용하여 하중 제거 과정과 재부하 과정을 표현한다. 사용자는 이와 같은 R과 G 인자들을 계산에 의해서 구해야 한다.⁹⁾

새로 추가된 서브루틴들에서는 이러한 사용상의 불편을 해소하기 위해서 실험에서 구한 힘-신장률에 대한 결과값을 직접 활용할 수 있도록 한다. 이러한 데이터의 활용을 위해서 히스테리시스 모델을 도입하였다.

Fig. 8은 히스테리시스 모델에 대해서 간단히 설명하고 있다. 힘을 주었을 경우와 제거했을 경우에 대한 각각의 결과 값을 직접 입력하여 실제 시뮬레이션에서 구현할 수 있도록 했다. 힘을 주는 경우와 힘을 제거하는 경우의 힘-신장률 곡선이 다르므로 이러한 벨트 거동을 나타내기 위해서는 보통 사용되는 히스테리시스 모델을 사용한다.¹³⁾ 인장 하중이 주어지 신장률이 늘어나는 경우는 하중곡선을 따라서 내부 하중이 지속적으로 증가하고, 신장률이 줄어들면 하중 제거 곡선에 의해서 내부 하중이 급격하게 떨어진다.

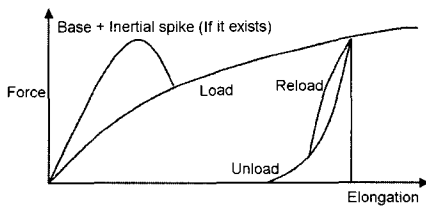


Fig. 7 ATB force-elongation curve

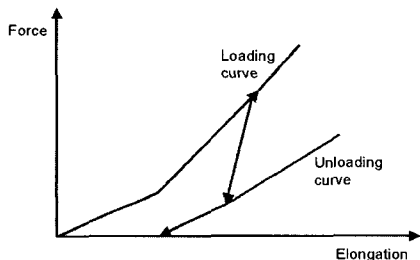


Fig. 3 Hysteresis curve

3.4 미끄러짐 효과

실제 차량의 좌석 벨트는 하나로 되어 있고 전체적으로 동일한 장력이 걸리게 된다. 편의상 서브루틴을 구성하는데 있어서 벨트가 여러 개의 세그먼트로 나누어 있다고 정의했다. 따라서 프로그램에서는 승객의 거동에 의해서 벨트 세그먼트들이 각각 늘어나게 되고 신장률도 달라져서 시뮬레이션 해석상으로 각각 다른 힘이 걸리게 된다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 실제와 마찬가지로 벨트와 인체 접촉평면과의 미끄러짐을 고려하도록 한다. 벨트 미끄러짐을 모델링하기 위해 다음과 같은 가정을 한다.

- 1) 미끄러짐은 벨트 세그먼트의 장력 방향으로 일어난다.
- 2) 미끄러짐 모델은 림-풀리(rim-pulley)모델을 따른다.

림-풀리 모델은 Fig. 9와 같다. Fig. 9에서 F_1 이 F_2 보다 크다면 F_1 방향으로 미끄러지며 마찰력이 발생할 것이다. 이러한 미끄러짐을 고려함에 있어서 가장 중요한 점은 벨트 세그먼트들 사이의 신장률에 의한 각각의 힘들이 평형이 되도록 해야 한다는 것이다. 힘이 평형이 되도록 하는 벨트 세그먼트들의 상대적인 미끄러짐 양을 구하여 인체와 벨트 사이의 미끄러짐을 구현할 수 있다.

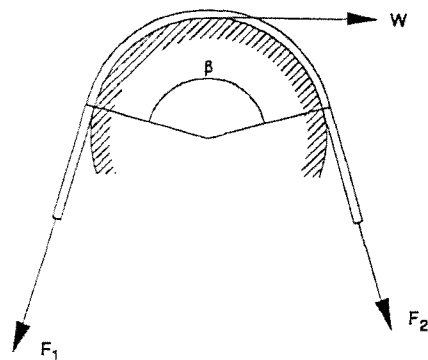


Fig. 9 Rim-pulley model

4. 시뮬레이션 해석 결과

이 장에서는 본 논문에서 제시하고 있는 좌석 벨트 모델의 신뢰성을 검증하고자 한다. 정면 충돌 사항에 대해서 수행한 실차 실험 데이터¹⁴⁾와

MADYMO의 시뮬레이션 해석 결과, ATB에서 하니스 벨트로 모델링한 결과를 이용해서 새로운 좌석 벨트 모델로 해석한 ATB 결과 값과 비교한다. 검증용 위해서 ATB와 MADYMO의 계산 결과로 나온 가속도 데이터와 실차 실험의 결과 값을 비교한 후, ATB와 MADYMO의 인체 거동을 살펴볼도록 한다. 이를 위해 먼저 실차 실험 자료에 대해서 언급한 후에 ATB와 MADYMO의 입력 사항을 정리한다.

4.1 실차 실험 자료

본 논문에서는 교통 안전 공단 자동차 성능 시험 연구소에서 제공받은 범규상 안전시험 속도인 30mph(48.3 km/h)의 평가 시험 데이터를 이용하였다. 신차 평가 시험은 운전자석(driver seat)과 전방탑승자석(passenger seat)에 인체 모형을 탑재한 시험 차를 콘크리트 고정벽에 정면 충돌 시켰을 때 머리와 흉부의 충격량을 인체 모형에 설치한 센서로부터 측정하여 평가한다. 이 시험은 반대방향으로부터 달려오는 같은 종류의 자동차와 정면 충돌한 경우와 동일한 상황을 재현한 것이다.

연구의 관심대상은 에어백이 없는 전방 탑승자석의 터미이다. 사용 차량은 티뷰론이며, 인체터미는 각종 가속도 센서가 부착된 하이브리드(Hybrid)III 50%ile 성인남자로 에어백(air bag)과 3점식 벨트 시스템(3-point restraint system)으로 보호되는 운전자석과 벨트 시스템으로만 보호되는 전방탑승자석에 각각 앉혔다.

충돌시 차체의 감속도는 시험차의 B-필라 하단 좌우에 단축 가속도계를 장착하여 측정하며 충돌시 차체 변형 분석을 위하여 9대의 고속 카메라를 설치하여 촬영한다. 시험 속도는 고정벽 전면에 설치된 레이저 측정기로 측정한다. 각각의 지체 가속도 데이터는 시험 차량의 뒤 트렁크에 실린 64개의 입력 채널을 갖는 계측장비를 통해서 측정되었다. 측정 결과 데이터를 획득하기 위한 조건은 Table 1과 같다. 측정된 여러 데이터 중 연구의 대상인 머리와 가슴, 차량에 대한 값만 고려하기로 한다. 실험에서 얻은 차량의 가속도는 200msec까지만 출력했으며 Fig. 10과 같다.

Table 1 Measurement condition

Number of channels	32	
Duration time	300 msec	
Number of data	3000	
Sampling time	Head	1000 Hz
	Chest	150 Hz
	Vehicle	60 Hz

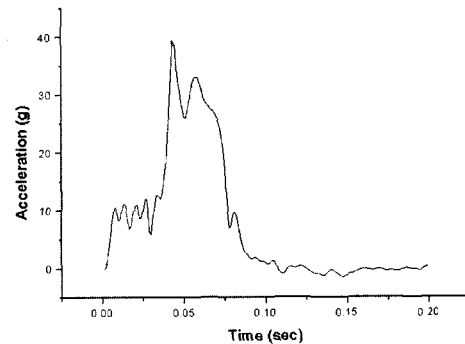


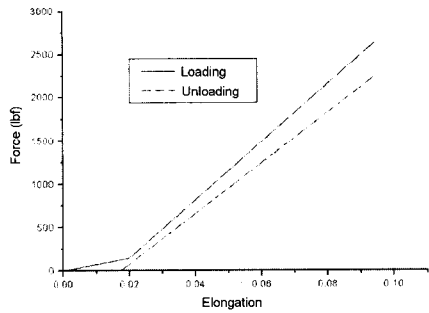
Fig. 10 Vehicle acceleration in frontal crash

4.2 ATB 모델링

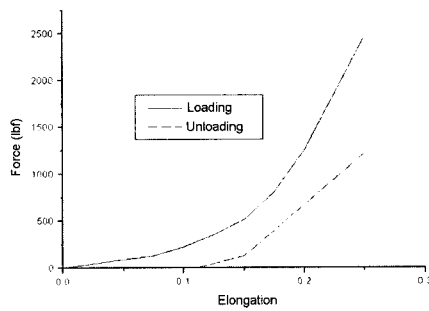
ATB에서는 새롭게 추가된 벨트 모델과 하니스 벨트 모델, 두 가지에 대해서 시스템을 구성한다. 총 시뮬레이션 해석 시간은 200msec로 하였다. 먼저 추가된 벨트에서 보면 다음과 같다.

차량의 정면 충돌 사항에 대해서 모델링을 수행한다. 입력되는 차량의 가속도 데이터 값은 Fig. 10의 값을 사용한다. 인체 모델은 GEBOD에서 생성된 17지체의 앉아 있는 하이브리드 III 50%ile 성인 남자 터미를 사용한다. 차량은 강체로서 여섯 개의 접촉 패널로 구성한다. 인체의 구속 모델은 새롭게 개발된 좌석 벨트 모델을 사용하며 벨트의 초기 느슨함은 없는 것으로 가정한다. 벨트와 인체 모델사이의 마찰계수는 0으로 둔다.

실제 차량의 좌석 벨트는 하나로 이루어져 있으며 힘-신장률 함수는 유일하지만, 실제 충돌 해석 결과에서는 부분별로 각기 다른 값을 가진다.¹¹⁾ 각각의 벨트 세그먼트에 입력되는 힘-신장률 함수는 포드자동차의 쉘매 실험에 사용된 힘-신장률 함수의 데이터로 Fig. 11의 값을 사용한다. 이 데이터에서 무릎벨트의 강성자료는 아랫 몸통 살(flesh)의 압축 효과를 고려하여 보정된 것이다.¹⁵⁾ Fig. 12은 모델링된 WinATB 전처리기의 화면을 보여준다.¹⁾



(a) Shoulder belt



(b) Lap belt

Fig. 11 Force-elongation curve of belt segments

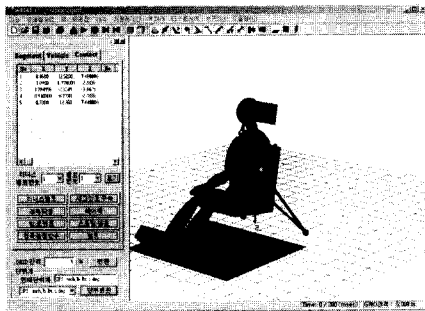


Fig. 12 WinATB preprocessor

하니스 벨트에서의 시스템 구성을 보면 인체 모델은 GEBOD에서 생성된 17지체의 앉아 있는 하이브리드 III 50%ile 성인 남자 터미를 사용한다. 차량은 강체로서 여섯 개의 접촉 패널로 구성한다. 구속 모델은 하니스 벨트 모델을 사용한다. 힘-신장률 함수는 ATB 자체적으로 제공하는 함수를 사용한다. 인체 모델과 벨트의 마찰계수는 0으로 둔다.

4.3 MADYMO 모델링

MADYMO에서는 자체 데이터 베이스 파일로 제

공되는 37지체의 인체 모델을 사용한다.¹⁷⁾ 총 시뮬레이션 해석 시간은 200msec로 한다. 차량은 ATB와 마찬가지로 여섯 개의 접촉 패널로 구성하였으며, 차량의 가속도는 Fig. 10의 데이터를 사용한다. 구속 모델은 유한 요소 벨트를 사용하고 좌석 벨트의 초기 느슨함은 없는 것으로 가정한다. Fig. 13은 HyperView에서 MADYMO의 애니메이션 파일을 불러들인 초기 화면이다.



Fig. 13 HyperView

4.4 결과 및 고찰

Fig. 14는 가슴이 받는 가속도를 나타낸다. 그림에 표시된 가속도 데이터는 합성 가속도(resultant acceleration)값이다. Fig. 14에서 보면 실차 실험 데이터와 ATB, MADYMO 모두 대략 0.07초 부근에서 각각의 최대 가속도 값이 나타남을 알 수 있고, 전체적으로 0.05초부터 0.1초 사이에서 가속도가 급격히 증가하고 감소함을 볼 수 있다. 새로운 좌석 벨트로 모델링한 ATB결과와 MADYMO결과가 유사하게 나타났다. 최대 가속도 값은 실차 테스트보다 낮게 나왔지만, 전반적인 가속도 곡선에서의 경향은 비

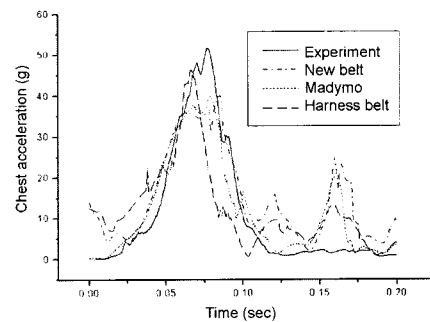


Fig. 14 Chest resultant acceleration

슷한 모양임을 알 수 있다. 하니스 벨트로 모델링한 ATB결과에서는 최대가속도 값이 실차 실험 결과와 유사하게 나타남을 알 수 있다. 그리고 가속도 값이 0.02초 정도 빠른 시간에서 감소하지만, 새로운 좌석 벨트와 MADYMO로 모델링한 결과와 마찬가지로 경향은 유사하게 나타났다.

Fig. 15는 머리 가속도 데이터이다. 새롭게 개발된 좌석 벨트의 해석 결과가 최대 가속도가 발생하는 시간과 가속도 값에서 실험 데이터에 상당히 근접함을 볼 수 있고 전반적인 경향에서도 유사함을 알 수 있다. 또한 MADYMO의 시뮬레이션 해석 결과값도 경향이나 가속도 값에서 상당히 타당한 값을 보인다. 반면에 하니스 벨트의 경우는 최대가속도가 실제보다 낮게 나온 것을 확인할 수 있다.

이러한 사실을 근거로 컴퓨터 시뮬레이션에서 벨트의 구속력이 인체 모델에 적절하게 작용하고 있다는 타당성을 제시한다. 새로 개발된 벨트와 하니스 벨트로 시뮬레이션한 결과에서 유의할 점은 실차 실험과 같이 0.1초 이후의 급격한 가속도의 감소를 보이지 않는다는 것이다. 반면에 MADYMO의 경우는 실험 데이터보다 0.02초 정도 늦게 가속도가 감소하지만, 실험 데이터와 마찬가지로 급격한 감소를 보인다. 이러한 이유는 인체 더미의 차이로 사료된다. MADYMO의 경우는 인체를 37지체로 나누었고 목 부분을 세분화하여 굽힘(bending)과 병진(translation)등의 여러 가지 운동을 재현하고 그에 따른 조인트 반력 등을 계산할 수 있는데 반해 ATB는 17지체의 인체에서 목 부분을 1개의 세그먼트로 구현하였으며 굽힘 운동에 대해서만 제약이 있다.

Fig. 14와 15를 보면 컴퓨터 시뮬레이션 모두에서

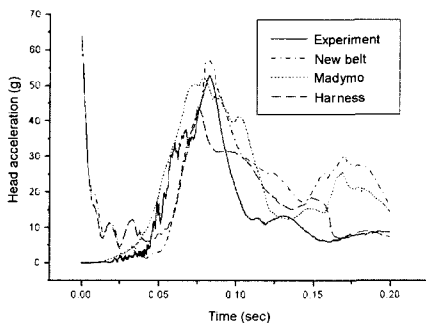


Fig. 15 Head resultant acceleration

0.15와 0.175초 사이에서 가속도가 다시 증가하게 된다. 이는 머리받침대(head rest)와 인체 머리와의 접촉을 정의하지 않았기 때문에 순간적으로 머리가 젖혀지면서 발생한 것으로 판단된다.

Fig. 16와 17은 시간에 대해서 어깨 벨트와 골반 벨트의 힘을 출력한 그래프이고, Fig. 18은 신장물에 대한 힘을 출력한 그래프이다. Fig. 16와 17에서 0.075와 0.1초 사이에 벨트의 장력이 급격히 감소함을 볼 수 있다. Fig. 18에서는 최대 장력이 작용할 때까지는 하중곡선을 따르고 이후에는 하중 제거 곡선을 따름을 알 수 있다. 미끄러짐과 히스테리시스 효과가 제대로 구현됨을 확인할 수 있다.

MADYMO 해석 결과가 실차 실험 결과와의 비교에서 타당성을 얻었다. 이와 같은 사실을 바탕으로 새로 개발된 좌석벨트로 시뮬레이션한 결과와 인체 거동을 비교하도록 한다. 개발된 벨트는 WinATB 후처리기를 이용해서 거동을 보여주고 MADYMO는 4.3장에서 언급한 HyperView를 사용한다.

Fig. 19의 왼쪽은 WinATB 화면이고 오른쪽은 MADYMO에서 해석된 결과를 보여주는 HyperView 모습이다. 40 msec 간격으로 인체 거동을 출력했다.

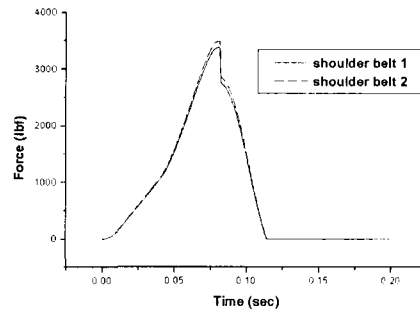


Fig. 16 Result force of the shoulder belt

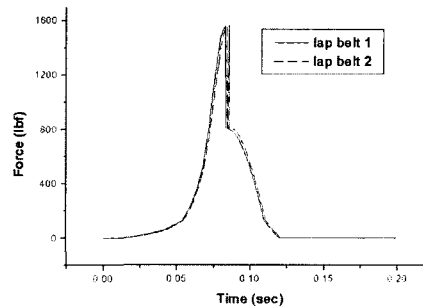


Fig. 17 Force of the lap belt

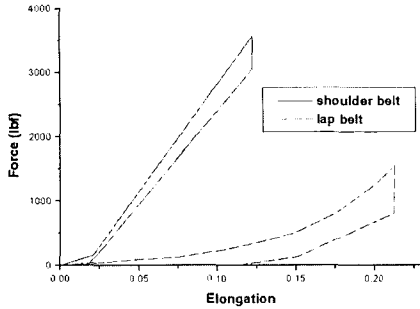


Fig. 18 Force-elongation curve of the belts

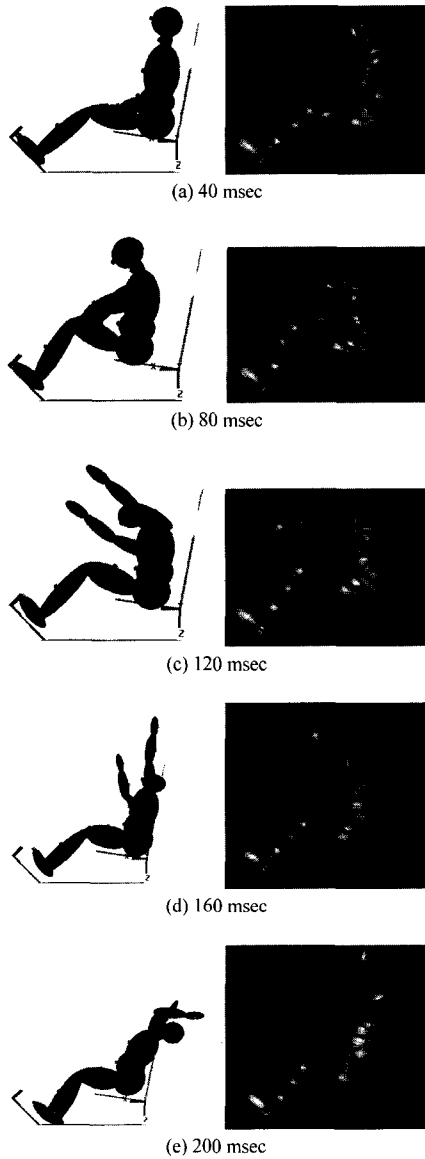


Fig. 19 Comparison of occupant motion

전반적인 경향은 WinATB와 MADYMO가 서로 유사하다는 사실을 보여준다. 40과 80msec사이에서 WinATB를 보면 MADYMO와 마찬가지로 전반적으로 인체가 차량의 진행방향으로 밀려나가는 모습이다. 이런 경향은 관성에 의한 것으로 사료되며 아직까지 벨트 구속력이 크게 작용하지 않음을 알 수 있다. 80과 120 msec사이에서 인체는 최대가속도가 발생하게 되고 이에 따라 벨트에 상당한 저항력이 걸리게 된다. 또한 인체는 최대한 차량 진행 방향으로 많이 쏠리게 되는데 이러한 사실을 Fig. 19의 (b)와 (c)에서 보여주고 있다. 120msec에서 ATB와 MADYMO 모두 몸이 구부정한 모습으로 차량 진행 방향으로 많이 쏠리면서 양팔을 쭉 뻗는 모양을 볼 수 있다. 160msec에서는 팔이 위쪽으로 향하면서 몸이 뒤로 젖혀지는 경향을 볼 수 있다. 200 msec에서는 몸이 완전히 젖혀지는 모습을 볼 수 있는데, 머리 받침대와 머리 사이의 접촉이 정의되지 않아서 머리가 받침대를 완전히 통과하는 것을 볼 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 ATB 프로그램에 새로운 좌석 벨트 모델을 개발하였다. ATB의 소스가 공개되어 있다는 장점을 이용해서 내부 서브루틴을 추가하여 이를 구현하였다. 그리고 새로운 벨트에 맞는 힘-신장률 함수를 만들었으며, 벨트와 인체 더미 사이의 미끄러짐 효과도 구현하였다. 차량의 정면 충돌에 대해서 시뮬레이션 결과와 실차 실험 결과를 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 기존 ATB의 힘-신장률 함수를 변형하여 하중이 주어지는 과정과 하중이 제거되는 과정을 구현하였다. 이를 위해 히스테리시스 효과를 반영하는 새로운 힘-신장률 함수를 제시하고 서브루틴으로 추가하였다.

2) 좌석 벨트와 인체 더미 사이의 상대적인 마찰력과 그에 따른 미끄러짐 현상을 구현하기 위해서 림-폴리 미끄러짐 모델을 적용시켰다.

3) 개발된 좌석 벨트로 해석한 시뮬레이션 결과와 자동차 성능 시험 연구소에서 행한 차량의 전방 충돌 실험에서 나온 가속도 값과의 비교를 통해 새로운 벨트로 해석한 결과가 신빙성이 있음을 확인

할 수 있었다. 또한 MADYMO와의 인체 더미 거동 비교에서도 이러한 사실을 관찰할 수 있었다.

4) 벨트에 걸리는 힘 데이터를 출력하는 서브루틴을 구현하였다. 이를 통해 시간에 따른 벨트의 힘, 벨트의 신장률과 힘과의 관계를 얻을 수 있었다. 결과에서 보면 추가된 힘-신장률 함수와 미끄러짐 현상을 위해 개발된 서브루틴이 제대로 기능함을 확인할 수 있었다.

5) 실차 실험과 MADYMO와의 비교 검증을 통해 ATB 프로그램 내에서 개발된 좌석 벨트의 신뢰성을 확보하였다.

본 연구에서 개발된 좌석 벨트가 보다 나은 신빙성을 가지기 위해서는 벨트의 초기 느슨함에 대한 여러 가지 사례를 조사하여 최적의 값을 찾아내서 입력 모델에 추가 할 수 있도록 하며 수축기(retractor)를 포함하여야 한다고 사료된다. 또한 벨트는 보통 하나의 끈으로 연결되어 있으므로 이를 위해서 미끄러짐을 구현할 때 모든 벨트 세그먼트를 복합적으로 고려해야 될 것으로 본다.

References

- 1) J. M. Lim, J. W. Choi, G. J. Park, "Establishment of an Occupant Analysis Modeling for Automobile Side Impact Using ATB Software," Transactions of KSAE, Vol.4, No.6, pp.85-96, 1996.
- 2) L. A. Obergefell, T. R. Gardner, I. Kaleps, J. T. Fleck, Articulated Total Body Model Enhancements Volume II: User's Guide, Harry G. Armstrong Aerospace Medical Research Laboratories, 1988.
- 3) TNO Automotive, MADYMO Theory Manual Version 5.4, 2001.
- 4) Hankook ESI Co., <http://www.esi.co.kr>
- 5) M. B James, R P. Nordhagen, C. Y. Warner, "Limitations of ATB/CVS as an Accident Reconstruction Tool," SAE 971045, 1997.
- 6) D. J. Lee, K. Son, K. H. Choi, K. N. Jeon, "Development of a Preprocessor Program for Articulated Total Body," Transactions of KSAE, Vol.10, No.5, pp.214-222, 2001.
- 7) E. Fraterman, H. A. Lupker, "Evaluation of Belt Modelling Techniques," SAE 930635, 1993.
- 8) H. Cheng, A. L. Rizer, L. A. Obergefell, Articulated Total Body Model Version V User's Manual, Crew Survivability and Logistics Division Human Effectiveness Directorate Air Force Research Laboratory, 1998.
- 9) J. M. Lim, "Software Development for the Occupant Crash Analysis and Recommendations for the Related Part Design," Ph. D. Dissertation, Hanyang University, 1992.
- 10) J. T. Fleck, F. E. Butler, Validation of the Crash Victim Simulator Volum I: Engineering Manual-Part I: Analytical Formulation, Calspan Corporation Advanced Technology Center, 1981.
- 11) J. T. Fleck, F. E. Butler, Validation of the Crash Victim Simulator Volume IV: Programmer's Manual, Calspan Corporation Advanced Technology Center, March, 1982.
- 12) Y. C. Deng, "Analytical Study of the Interaction Between the Seat Belt and a Hybrid III Dummy in Sled Tests," SAE 880648, 1988.
- 13) L. A. Obergefell, "Harness Belt Restraint Modeling," Ph.D. Dissertation, University of Cincinnati, 1992.
- 14) T. S. Jang, "Occupant Behavior Simulation Using DADS and Seat Belt Design," M.E. Dissertation, Korea Advanced Institute of Science and Technology, 1995.
- 15) Korea Transportation Safety Authority, 2000 Korea NCAP Crach Tests, 2000.
- 16) J. Wismans, J. Hermans, "MADYMO 3D Simulations of Hybrid III Dummy Sled Tests," SAE 880645, 1988.
- 17) TNO Automotive, MADYMO Database Manual Version 5.4, 2001.