

Hybrid III 5% 성인 여성 더미의 유한요소 모델 개발

이 상 일¹⁾ · Pradeep K. Mohan²⁾ · Cing-Dao(Steve) Kan²⁾ · 박 경 진^{*3)}

한양대학교 대학원 기계공학과¹⁾ · National Crash Analysis Center, George Washington University²⁾ · 한양대학교 기계공학과³⁾

Development of Finite Element Model of Hybrid III 5th Percentile Female Dummy

Sang-II Yi¹⁾ · Pradeep K. Mohan²⁾ · Cing-Dao(Steve) Kan²⁾ · Gyung-Jin Park^{*3)}

¹⁾Department of Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

²⁾National Crash Analysis Center, 20101 Academic Way, Ashburn, VA 20147, USA

³⁾Department of Mechanical Engineering, Hanyang University, Gyeonggi 426-791, Korea

(Received 7 April 2009 / Accepted 22 January 2010)

Abstract : As the automobile industry is developing, the number of deaths and injuries has increased. To reduce the damages from automobile accidents, the government of each country proposes experimental conditions for reproducing the accident and establishes the vehicle safety regulations. Automotive manufacturers are trying to make safer vehicles by satisfying the requirements. The Hybrid III crash test dummy is a standard Anthropomorphic Test Device (ATD) used for measuring the occupant's injuries in a frontal impact test. Since a real crash test using a vehicle is fairly expensive, a computer simulation using the Finite Element Method (F.E.M.) is widely used. Therefore, a detailed and robust F.E. dummy model is needed to acquire more accurate occupant injury data and behavior during the crash test. To achieve this goal, a detailed F.E. model of the Hybrid III 5th percentile female dummy is constructed by using the reverse engineering technique in this research. A modeling process is proposed to construct the F.E. model. The proposed modeling process starts from disassembling the physical dummy. Computer Aided Design (CAD) geometry data is constructed by three-dimensional (3-D) scanning of the disassembled physical dummy model. Based on the geometry data, finite elements of each part are generated. After mesh generation, each part is assembled with other parts using the joints and rigid connection elements. The developed F.E. model of dummy is simulated based on the FMVSS 572 validation regulations. The results of simulation are compared with the results of physical tests.

Key words : Hybrid III 5th percentile female dummy(Hybrid III 5% 성인 여성 더미), Finite element modeling(유한요소 모델링), Reverse engineering(역공학), FMVSS 572(미연방 자동차 안전기준)

1. 서 론

자동차 산업의 발전에 따라 자동차 사고에 의한 사상자는 꾸준히 늘어왔다. 이러한 사상자를 줄이기 위해 각국 정부는 자동차의 안전 규정을 제정하였으며, 자동차 제작사는 규정의 만족을 통해 더욱

안전한 차량을 만들기 위하여 노력해 왔다. 그동안 실제 사고 시의 상황을 모사하기 위한 시험 조건에 대한 연구와 이 때 상해의 정도를 근사화 하기 위한 연구는 많이 진행되어 왔다. 이와 함께, 충돌 시의 인체 상해의 측정을 위해 사용되는 인체 시험 장비(Anthropomorphic Test Device; ATD)에 관한 연구도 많이 진행되었다. Hybrid III 충돌 더미는 자동차의

*Corresponding author, E-mail: gjpark@hanyang.ac.kr

전방 충돌 시의 승객 안전도 해석에 표준으로 사용되는 인체 시험 장비이다.

미국 NHTSA(National Highway Traffic Safety Administration)는 1997년 미연방 자동차 안전기준(Federal Motor Vehicle Safety Standards; FMVSS) 208 시험 규정에 Hybrid III 더미만 사용할 것을 법제화하여 도입하였다.¹⁾ 이 때 사용되는 더미는 Hybrid III 50% 성인 남성 더미이다. 이 더미는 성인 남자의 평균 신체 사이즈를 나타낸다. 그러나 이 더미는 표준 남성의 사고 상해치만을 고려할 수 있기 때문에, 각 성별과 연령에 따른 상해 정도 파악을 위한 다양한 크기의 더미 개발이 요구되었다. 이에 따라 6개월 영아, 3세 및 6세 아이, 성인 여성 등의 인체 특성을 표현하는 다양한 더미가 개발되었으며, 최근 미연방 자동차 안전기준의 강화를 통해 위의 더미들이 시험 조건으로 추가 되었다.²⁾

실제 충돌 시험은 실제 차량을 이용하기 때문에 매우 고가이며 반복 및 재현시험이 어렵다. 따라서 충돌을 모사한 상해해석 분야에 컴퓨터 시뮬레이션이 널리 이용되고 있다. 특히, 안전도 향상과 제작비 절감을 위한 자동차의 설계 시에 유한요소법은(Finite Element Methods; F.E.M) 많이 이용된다.³⁾ 그러나 충돌 분야에서는 컴퓨터 해석 시간과 비용의 제약으로 인하여 주로 자동차의 구조 해석 분야에만 유한요소법이 이용되었으며, 인체 모델은 주로 강체 모델을 이용하였다. 최근 정확한 인체 상해치를 얻기 위해 강체 모델이 아닌 유한요소 모델이 요구되고 있다. 이러한 요구에 맞춰 최근 더미의 유한요소 모델을 만들기 위한 연구가 진행되었으며, 점차적으로 자세한 유한요소 모델을 개발하기 위한 연구가 진행되어왔다.^{4,6)} 이러한 기존 연구들은 주로 FMVSS 208 규정의 기본 모델인 Hybrid III 50% 성인 남자 더미만을 그 대상으로 하였다. 그러나 앞서 설명한 바와 같이 규정 강화에 따라 각종 더미의 개발이 필요하게 되었다. 이에 따라 미 국립 충돌센터(National Crash Analysis Center; NCAC)는 일반 제공을 위한 실제더미를 바탕으로 한 각종 크기의 더미 유한요소 모델 개발을 시작하였다.

본 연구에서는 Hybrid III 5% 성인 여성 더미의 상세 유한요소 모델을 개발한다. Fig. 1은 모델링의 대



Fig. 1 Hybrid III 5th percentile female dummy

상인 Hybrid III 5% 성인 여성 더미의 실제 모습이다. 본 연구에서 사용된 더미는 Denton ATD Inc.의 제품으로 NHTSA로부터 제공받아 모델링의 작업을 진행하였다. 실제 측정을 통한 작업이 어려운 부분은 설계도면을 바탕으로 제작하였으며, NHTSA로부터 제공받은 H-III5F Alpha 버전의 상세도면을 이용한다. 이러한 유한요소 모델의 개발을 위해 모델링 순서를 제안한다. 제안된 모델링 순서는 역공학 기술을 이용한다. 기존의 실제 더미 모델을 각 파트 별로 분리하고, 이렇게 분리된 더미의 각 파트를 3차원 디지털 스캔 과정을 통해 CAD(Computer Aided Design) 데이터를 생성한다. 이렇게 생성된 더미의 도면 데이터를 바탕으로 각각의 파트에 대해 유한요소를 생성한다.^{7,8)} 이 때 각 파트는 물성치 시험을 바탕으로 한 물성치 데이터를 입력하였으며, 각 파트 별로 분리된 유한요소 모델은 조인트와 강체 구속 조건 등을 이용하여 각각의 파트들을 결합한다. 위와 같은 과정을 통해 상세 유한요소 모델을 구성한다. 이렇게 구성한 유한요소 모델은 보정시험을 모사한 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하고 그 결과를 실제 시험결과와 비교한다.

2. Hybrid III 더미의 유한요소 모델링 순서

더미는 충돌 시의 인체 상해 측정의 예상을 위해 이용된다. 따라서 최근 상해해석을 위해 널리 이용되고 있는 유한요소 해석에 필요한 더미의 유한요소 모델 개발이 필요하다. 그 중 가장 널리 이용되고 있는 Hybrid III 더미의 상세 유한요소 모델은 그 최

우선 과제라 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 이러한 상세 유한요소 모델 개발을 위한 순서를 제안한다. 이렇게 제안한 개발순서에 따라서 Hybrid III 더미의 상세 유한요소 모델을 개발한다. 본 연구에서는 여러 가지 Hybrid III 더미 모델 중 5% 성인 여성 더미 모델을 그 대상으로 한다. 앞서 설명한 바와 같이 Hybrid III 더미 가족 중 5% 성인 여성 더미는 최근 FMVSS 208 규정의 강화에 따라 전방충돌 규정에 추가적으로 사용되게 되었다. 따라서 이 더미의 유한요소 모델의 개발의 필요성이 대두되고 있다.

Fig. 2는 Hybrid III 더미의 상세 유한요소 모델의 개발을 위한 순서이다. 그림에서 보이는 바와 같이, 더미의 모델링 과정은 실제 더미의 분해에서 시작한다. 더미 유한요소 모델을 실제 해석의 적용할 때, 위치선정 작업과 단품을 이용한 해석을 위해서 더미 모델을 머리, 목, 위/아래 팔, 위/아래 다리, 가슴, 골반구조 등의 서브 컴퍼넌트로 나누어 분해한다. 각기 나누어진 서브 컴퍼넌트는 역공학(Reverse engineering) 기술을 이용하여 CAD 도면 데이터를 생성한다. FARO arm을 이용하여 각 파트의 표면을 3차원 스캐닝하여 도면 데이터를 생성한다. 이렇게 생성된 도면 데이터는 유한 요소 데이터의 생성을

위해 IGES 파일 형식으로 변환한다. 생성한 IGES 데이터는 유한 요소 생성 프로그램의 입력데이터로 사용된다. IGES 파일 데이터를 이용하여 각 서브 컴퍼넌트의 유한요소 데이터를 생성한다. 이 때 각 서브 컴퍼넌트들은 각 물성치 조건과 물리적 성격에 따라 여러 개의 파트로 구성한다.

해석 모델에 사용할 물성치 데이터는 인장 및 압축 등의 물성치 시험을 통하여 얻는다. 물성치 시험의 결과로 얻은 물성치 데이터는 LS-DYNA 입력파일 형식에 맞도록 변환한다.⁹⁾ 각 파트 별 유한요소 모델의 생성을 완료하면, 물성치와 측정된 두께 데이터 등을 입력하여 서브 컴퍼넌트 생성을 완료한다. 이렇게 완성한 각 서브 컴퍼넌트들은 모델링의 과정에서 실제 더미와 약간의 질량 차이를 보이게 된다. 이러한 질량의 차이는 모델의 질량분포를 상이하게 만들어 해석 과정에서 서로 다른 거동을 야기할 수 있다. 이러한 차이를 없애기 위해 각각의 서브 컴퍼넌트 파트에 대해 질량을 측정하고, 유한요소 모델의 밀도를 조절하여 실제 더미 모델과 유한요소 모델 간의 질량을 보정한다. 위와 같은 순서로 생성한 각 서브 컴퍼넌트 모델은 각 관절과 기타 연결부위의 물리적 특성에 맞는 조인트와 강체구속 조건 등을 이용하여 결합한다. 또한 각 파트 사이에 알맞은 접촉 조건을 생성하여 해석 시 각 파트간의 간섭현상을 막는다.

위와 같은 과정을 통해 생성한 유한요소 모델은 실제더미와 같은 크기와 질량분포를 갖는 모델이다. 그러나 새롭게 구성한 유한요소 모델은 실제 더미와는 다른 물리적 특성으로 인하여 해석상에서의 거동이 실제 시험의 거동과 다를 수 있다. 따라서 이에 대한 검증의 과정이 필요하다. 이를 위해서 서브 컴퍼넌트의 보정시험을 실제 시험과 컴퓨터 시뮬레이션을 통해서 각각 수행하고 그 결과를 비교한다. 이때의 시험 조건은 FMVSS 572에 명시된 더미의 각 서브 컴퍼넌트 보정 조건을 이용한다. 위 규정은 실제 더미를 이용한 시험의 결과를 믿을 수 있도록 하기 위하여 더미의 물리적인 특성에 대한 보정의 조건 등을 제시하고 있다. 머리, 목, 흉부의 보정시험을 통해서 새롭게 구성한 유한요소 모델의 물리적 특성을 검증한다.

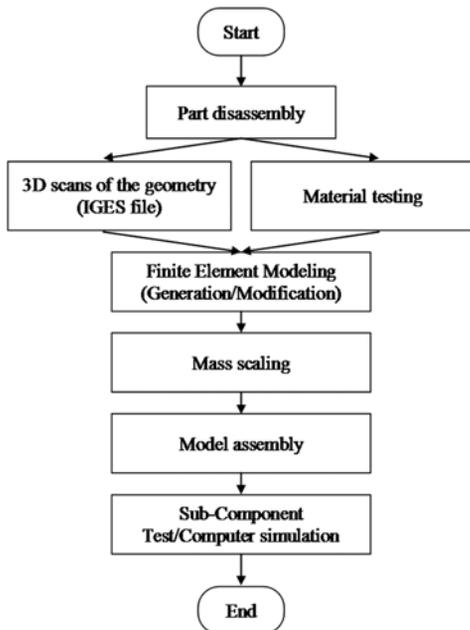


Fig. 2 Hybrid III 5th percentile female dummy

3. Hybrid III 더미 서브 컴퍼넌트 모델링

3.1 역공학을 이용한 3차원 도면의 생성

CAD 기술은 디자인의 과정에서 파트나 전체 모델의 2차원이나 3차원 도면을 그리기 위한 컴퓨터 기술이다. 이와 같은 기술은 가상조립도 등을 만들기 위하여 주로 이용된다. 이러한 가상도면 기술은 실제 제작의 과정에서 간섭의 발생을 막으며, 실제 제작을 위해 사용된다. 이와는 반대로, 역공학 기술은 실제 제품을 바탕으로 도면을 만드는 과정이다.^{7,8)} 역공학 기술은 실제 모델을 바탕으로 CAD나 CAE 기술 소프트웨어에 사용할 수 있는 3차원 도면 및 가상 조립도를 만드는 데에 사용된다. 본 연구에서는 이러한 역공학 기술을 이용하여, 실제 더미를 바탕으로 3차원 도면 생성한다. 이렇게 생성한 3차원 도면은 더미의 유한요소 모델 생성에 사용된다.

2장에서 제안한 모델링 순서에 따라 Hybrid III 더미의 모델링을 진행한다. 이를 위해 먼저 더미 모델을 머리, 목, 위/아래 팔, 위/아래 다리, 가슴, 골반구조 등의 서브 컴퍼넌트로 나누어 분해한다. 이렇게 분해한 더미는 3차원 레이저 스캐너를 이용하여 각 서브 컴퍼넌트 별로 스캔하여 3차원 도면 데이터를 생성한다. Fig. 3은 역공학 기술에 사용되는 3차원 레이저 스캐너 FARO arm이다. FARO arm은 레이저 라인 프로브를 가진 7 축 가진 접촉/비접촉식 측정 장비이다. 레이저 라인 프로브는 50 μ m의 정확도를 가지고 있고, 초당 30프레임을 스캔할 수 있으며, 640 point/line의 공간 해상도를 지니고 있다. 따라서 초당 19,200 개의 점(30fps \times 640 points/line = 19,200 points/sec) 스캔할 수 있다.

분해의 작업을 통해 얻은 각 서브 컴퍼넌트의 내외측 스킨을 FARO arm을 이용하여 스캐닝한다. 이

렇게 생성한 3차원 도면 데이터는 더미 제작에 사용되는 2차원 도면 데이터와 비교 검토한다. 또한 다른 물성치를 지녔지만 실제 분해가 어려운 파트의 경우에는 2차원 도면 데이터를 이용하여 일부 3차원 도면 데이터를 생성한다. 이러한 과정을 통해 구성된 도면 데이터는 유한요소 모델 생성을 위해 IGES 파일 형식으로 변형한다.

3.2 절 서브 컴퍼넌트의 유한요소 모델

2장에서 제시한 모델링 순서에 따라, 3차원 도면 데이터를 바탕으로 하여 유한요소 모델을 구성한다. 3.1 절에서 구성한 각 서브 컴퍼넌트의 3차원 도면 데이터를 생성한다. 앞서 생성한 IGES 파일 형식의 도면 데이터를 상용 유한요소 모델 생성 프로그램의 입력으로 사용하여 유한요소를 생성한다. 이때 사용하는 상용 유한요소 모델 생성 프로그램은 Hypermesh 9.0 이다.¹⁰⁾ 생성하는 유한요소의 크기는 6mm 가 될 수 있도록 일정하게 구성하였다. 유한요소 모델의 크기를 이렇게 결정한 이유는 1) 생성한 유한요소 모델을 이용한 컴퓨터 시뮬레이션의 실행 시 최소 타임 스텝을 1msec 이상으로 보장하고, 2) 실제 컴퓨터 시뮬레이션 시에 차량의 내장 부품과의 접촉이 잘 일어날 수 있도록 하기 위함이다. 이러한 조건에 따라 구성된 각 서브 컴퍼넌트의 유한요소 모델에 대해 아래에 상세히 설명한다.

Fig. 4는 실제 더미의 머리 파트와 유한요소 모델링된 더미 머리 파트들이다. 그림에서 보는 바와 같이 생성한 유한요소 모델은 실제 더미의 모습을 잘 표현하였으며, 7개의 파트로 구성되어 있다. 7개의 파트는 알루미늄으로 구성되어 있는 두개골과 이를 감싸고 있는 비닐로 구성된 피부, 목과 연결되는 브라켓으로 구성되어 있다. 이 브라켓 위에는 머리 가속도 측정을 위한 가속도계가 위치하고 있는데, 가



Fig. 3 3-D laser scanner, FARO arm



(a) Physical model

(b) Finite element model

Fig. 4 Head model

속도계의 안정적인 가속도 측정을 위해서 브라켓과 가속도계 사이에는 안정기 플레이트(ballast plate)가 자리잡고 있다. 머리 부분의 유한요소 모델은 모델의 정확도 향상을 위해 모두 솔리드 요소로 모델링한다. Hybrid III 더미는 전방충돌 시에 사용되는 더미이기 때문에 충돌 시 머리 가속도 정보가 가장 중요하다. 이 머리 가속도 정보는 시간에 따른 적분 형태로 계산되어 머리 상해치(Head Injury Criteria; HIC)로 사용된다. 따라서 가속도계의 모델링이 매우 중요하다. 본 연구에서 진행된 머리모형의 가속도계는 머리모형의 무게중심 부에 위치하고 있으며, LS-DYNA에서 제공하는 안전벨트 가속도계 모델을 이용하여 모델링 하였다.⁹⁾ 또한 두개골과 이를 감싸고 있는 피부 파트 사이는 연결 접촉 조건(tied contact condition)을 설정하여 피부가 두개골을 감싸고 있으면서도 횡 방향으로 작용하는 일정하중에 대해서는 미끄러짐을 표현할 수 있도록 하였다.

Fig. 5는 목 서브 컴퍼넌트에 대한 그림이다. Hybrid III 5% 성인 여성 더미 모델의 목 서브 컴퍼넌트 부분은 크게 목과 몸통을 어어 주는 목 브라켓 부분과 고무와 금속으로 이루어진 디스크 부분으로 나눌 수 있다. 고무와 금속으로 이루어진 디스크 부분은 실제 인간의 목 운동을 모사 하기 위해 고안되었다. 4개의 고무 디스크는 5개의 금속 디스크 사이에 각각 위치하고 있으며, 각 디스크 파트는 서로 접촉되어 붙어있다. Fig. 5에 나타나 있는 바와 같이 고무 디스크 파트는 각각 하나의 구멍이 있으며, 구멍 부위로 부터 더미 앞쪽 방향으로 찢어져 있다. 이는 실제 인체의 앞 뒤 목운동을 표현하기 위해 만들어진 장치이며, 유한요소 모델은 이를 반영하여 최대한 유사하도록 모델링 한다. 이러한 인체의 목 운동을 모사하는데 있어 디스크 구조물 만으로는 모두

표현해 낼 수가 없다. Hybrid III 더미는 앞 뒤 목운동을 좀 더 잘 표현하기 위해 디스크 안쪽으로 강철로 이루어진 와이어 로프를 설치한다. 이 와이어 로프는 수많은 얇은 강철 철사를 꼬아서 만든 형태로 이러한 형태는 유한요소 모델로 직접 표현하기 힘들기 때문에 Fig. 5의 원편 그림과 같이 빔과 셸 요소의 형태로 모델링 한다. 유한요소 모델링 한 와이어 로프 구조는 강성을 나타내는 빔 요소와 이를 둘러싸고 있는 셸 요소로 구성된다. 이 때 이 셸 요소는 빔 요소가 디스크 부분과 접촉이 좀 더 잘 일어날 수 있도록 돕는 역할만을 하기 때문에 물성치를 갖지 않는 요소로 구성한다. 목 부분의 서브 컴퍼넌트는 앞선 머리 부분과 마찬가지로 모델의 해석 정확성 향상을 위해 와이어 로프 구조 부분을 제외한 모든 부분을 솔리드 요소로 유한요소 모델링 하였다.

Fig. 6은 가슴 부위의 서브 컴퍼넌트 모습이다. Hybrid III 더미의 가슴 부위는 크게 늑골 및 쇄골 구조물, 척추, 흉부 자켓, 그리고 흉부 자켓과 늑골 구조 사이에 위치한 턱받이 구조물이 있다. 가슴 부위 서브 컴퍼넌트는 40개의 크고 작은 파트들로 이루어져 있으며, 각각의 파트들은 해석 정확도 향상을 위해 가능한 한 솔리드 요소로 모델링한다. 그 외의 요소들은 각 파트의 물리적 특성에 따라 셸과 빔으로 모델링한다. 솔리드 요소는 각 절점이 3자유도만을 가지고 있어 회전 자유도에 대한 표현이 안되기 때문에 흉부 자켓을 등의 솔리드 요소들은 두 개 층 이상으로 구성한다. 흉부 서브 컴퍼넌트 중에서 흉부 자켓과 늑골 파트는 솔리드 요소로 구성되어 있으며, 이 부분은 다른 파트들과의 접촉이 더 잘 일어날 수 있도록 얇은 셸 요소를 덧씌웠다. 척추 구조물은 육면체 상자의 형태로 이루어져 있다. 흉부 가속도를 측정하기 위해 척추 구조물 상자 안에 3축 가

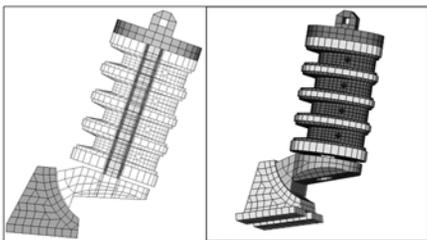


Fig. 5 Neck model

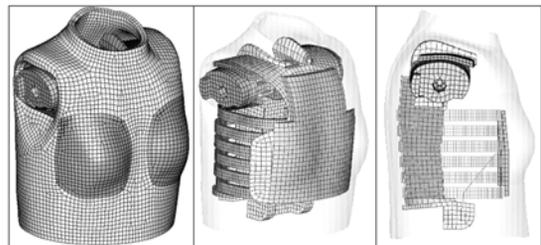


Fig. 6 Thorax model

속도계를 설치한다. 이렇게 구한 흉부 가속도 정보는 흉부 상해치를 구하는 데에 사용된다. 흉부 부위는 가속도 정보 뿐 아니라 흉부의 변형량이 중요하다. 실제 더미는 이러한 변형량을 측정하기 위해 흉골과 전위 부분과 흉부 아래 부분을 잇는 빔과 이 빔의 회전량을 측정하는 전위차계를 이용한다. 본 연구에서 생성한 유한요소 모델은 Fig. 6의 오른쪽 그림과 같이 빔 요소를 설치하며, 흉골과 전위 부분과 흉부 아래 부분은 조인트 요소를 이용하여 빔과 연결한다. 또한 이 빔요소의 회전량을 측정하기 위해 흉부 아랫부분에 회전 가속도계를 설치한다.

Fig. 7은 생성한 골반구조 서브 컴퍼넌트의 유한요소 모델이다. 그림에서 보이는 바와 같이 골반구조는 알루미늄 주조로 만든 골반 뼈, 요추 구조물, 대퇴부와 이를 연결하는 조인트, 골반을 감싸고 있는 폼 구조물, 그리고 복부 구조물로 이루어져 있다. 요추 구조물은 흉부 서브 컴퍼넌트의 척추 구조물과 골반뼈 구조물을 연결해 주는 부분으로 전체적인 더미 거동을 좌우하는 중요한 부분이다. 이 부분은 목 부분과 마찬가지로 요추 부위의 강성을 위해 중심 부위가 강철 로프와이어로 구성되어 있다. 이를 모사하기 위해 빔 요소와 이를 둘러싸고 있는 셸 구조로 모델링한다. 이 때 빔을 둘러싸고 있는 셸 구조물은 접촉을 더욱 잘 일어나도록 도움을 주는 요소로 물성치 데이터를 갖지 않는다. 복부 구조물은 비닐로 둘러 쌓인 폼 구조물로서 이를 모사하여 솔리드 요소로 모델링 하였으며, 흉부 자켓 부위와의 접촉이 잘 일어날 수 있도록 물성치 데이터를 갖지 않는 셸 요소로 둘러쌌다. Fig. 7의 오른쪽 그림과 같이 대퇴부와 연결을 위한 조인트를 모델링 하였으며, 더미의 H-포인트 지점의 가속도 정보를 얻기 위한 3축 가속도계를 모델링 하였다.

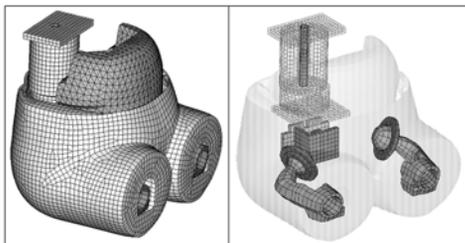


Fig. 7 Pelvis model

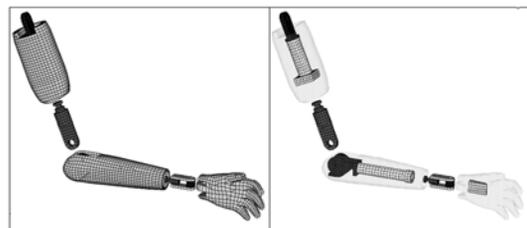


Fig. 8 Upper/Lower arm and hand model



Fig. 9 Upper/Lower leg and foot model

Fig. 8은 더미의 팔 구조를 보이는 그림으로, 팔은 위/아래 팔, 손, 그리고 이를 각각 연결하는 금속으로 만들어진 회전체 구조물로 구성되어 있다. 위팔은 셸 요소로 모델링 한 안쪽 튜브 파트와 솔리드 요소로 모델링 한 금속 연결 요소, 그리고 이를 감싸고 있는 비닐 재료의 살집으로 구성되어 있다. 이 살집은 솔리드 요소로 모델링 되었다. 아래팔 요소는 그림에 보이는 바와 같이 위팔과 유사하게 모델링 한다. 비닐 재료로 이루어진 손의 살집은 솔리드 요소로 모델링 하였으며, 손은 두 개의 금속 재료 평판과 손목을 표현한 연결 파트로 구성되어 있다. 팔 각 부위의 살집들은 실제 컴퓨터 해석 상에서 차량의 안쪽 파트들과의 접촉을 고려해 물성치 정보를 갖지 않는 셸 요소로 둘러 쌓여 있다.

Fig. 9는 위/아래 다리와 발의 유한요소 모델이다. 윗다리 부분은 솔리드로 모델링 된 금속 튜브, 로드 셸, 무릎, 비닐 재료의 살집 등으로 구성되어 있다. 무릎 부위는 아랫다리 부분과의 연결을 위해 모델링 되며, 무릎의 각 운동을 모사하기 위해 두 개의 미끄럼 판과 이를 잇는 조인트 구조로 이루어져 있다. 이 미끄럼판 구조는 구부러져 있는 무릎에 전방에서 하중이 가해질 때, 부드러운 정지 모션을 모사하기 위해 이용된다. 이 때 이용되는 조인트 구성 요소는 회전(revolute) 조인트와 전달(translation) 조인

트이다. 아랫다리의 구성은 Fig. 9에 표현된 바와 같이 윗다리와 비슷하다. 다리 부분의 상해치는 대퇴부와 경골부위에 작용하는 작용력을 통해 구해지며, 이를 측정하기 위해 다리의 작용하는 작용력을 측정하기 위한 로드 셀을 설치한다.

3.3 물성치 데이터의 생성 및 질량 보정

2장에서 제안한 모델링 순서에 따라 각 서브 컴퍼넌트의 3차원 도면 데이터 생성과 유한요소 생성과는 별도의 과정으로 유한요소 모델에 필요한 물성치 데이터를 생성한다. 물성치 데이터는 더미 각 파트에서 추출한 시편에 대해 인장시험과 압축시험을 통해 구한다. 비닐과 고무 등으로 이루어진 재료들은 주로 압축시험을 통해 그 물성치 데이터를 얻는다. 그러나 일부 시험이 힘든 재료의 물성치는 기존 문헌의 데이터를 이용한다.

시험을 통해 얻어진 물성치 데이터는 충돌 해석에 주로 이용되는 비선형 동적 상용 해석기인 LS-DYNA의 입력 파일 형식에 맞추어 변환한다. 더미 모델은 철이나 알루미늄 등의 금속으로 이루어진 부분뿐 아니라 인간의 피부를 모사하기 위한 비닐과 고무 재질로 이루어진 부분도 있다. 이러한 여러 형태의 물성치 특성을 고려하기 위해 LS-DYNA가 지원하는 여러 가지 물성치 형태가 이용된다.^{9,11)} 먼저 철이나 알루미늄과 같은 금속 파트는 주로 탄성체나 강체로 모델링한다. 또한 더미 피부를 이루고 있는 비닐 재질은 주로 점탄성 물성치 모델로 모델링하였으며, 더미에 포함된 몇 개의 고무는 Blatz-ko 고무 모델을 이용하여 모델링한다. 더미에 사용된 폼은 점성 폼 물성치 모델로 모델링한다. 위와 같은 과정을 통해 정리한 물성치 데이터는 각 물성치 형태에 맞는 각 계수를 구하고, 응력-변형률 선도 등을 구하게 된다.

위와 같은 응력과 변형률에 대한 정보와 함께 더미 유한요소 모델의 무게를 맞추는 작업이 중요하다. 더미의 무게 배분은 더미의 전체적인 거동을 결정하게 된다. 따라서 더미 각 파트의 질량 정보를 실제 더미의 질량과 정확히 맞추는 것이 중요하다. 이를 위해 각 파트의 밀도 정보를 보정한다. 각 파트의 밀도는 실제 시편의 질량과 부피 정보를 이용하여

구한다. 이렇게 구한 밀도 정보는 3.2절에서 구성한 각 서브 컴퍼넌트의 유한요소 모델에 대입한다. 밀도를 입력하게 되면 생성된 유한요소의 부피를 계산하여 각 파트의 질량을 구할 수 있다. 이 때 구한 질량정보는 실제 더미의 질량과 다를 수 있다. 그 이유는 모델링의 과정에서 실제 더미의 형태를 완전히 모사할 수 없으며, 볼트와 같은 체결요소를 빔 요소나 강체 구속 조건 등으로 모사할 경우 이러한 체결요소의 질량이 무시되기 때문이다. 따라서 질량 보정의 과정이 필요하다. 더미의 질량분포는 컴퓨터 시뮬레이션 상에서 거동에 영향을 줄 수 있기 때문에 이 과정은 매우 중요하다. 더미 모델의 질량 보정은 실제 더미의 각 파트의 질량을 실제 측정하고, 유한요소 모델의 질량을 측정하여 그 값을 맞춰 줄 수 있도록 각 파트 물성치 상의 밀도 값을 조절하여 보정한다.

4. 서브 컴퍼넌트의 결합

위에서 기술한 바와 같이 역공학을 기반으로 하여, Hybrid III 5% 성인 여성 더미 각 서브 컴퍼넌트의 유한요소 모델을 생성하였다. 2장에서 제안한 모델링 순서에 따라, 유한요소 모델의 생성을 마치고 나면, 생성한 유한요소 모델의 각 부분을 결합하는 과정이 필요하다. 이를 위해 상용 유한요소 해석기들은 다양한 종류의 연결 요소를 제공한다. 유한요소 모델의 여러 결합 요소를 물리적 메커니즘에 따라 선택하여 모델링의 과정에 이용한다. 본 장에서는 모델링에 사용한 결합요소에 대해 설명하고, 이 결합요소를 이용하여 구성된 전체 모델에 대해 설명한다.

4.1 결합 요소

앞서 설명한 바와 같이 유한요소 모델링에 있어서는 각 연결요소의 선택이 무엇보다 중요하다. 각 파트의 결합은 여러 가지 결합 요소를 사용하게 된다. 결합의 방법은 기구학적 구속요소(조인트)와 강체 연결(점용접, 절점의 강체 구속, 유연체 절점의 강체 구조물 연결), 접촉 조건의 설정 등의 다양한 방법이 있다. 이 장에서는 각 연결요소에 대하여 간략하게 알아본다.

먼저, 조인트 요소는 유한요소 모델링에 있어서 꼭 고려되어야 하며 널리 이용되는 요소이다.^{4,11)} 조인트 요소는 두 개 이상의 독립적인 파트에 대하여 상대운동을 하도록 기구학적 구속을 만들어주는 요소이다. 이러한 조인트 요소는 각 파트의 운동 자유도를 줄여주어 일정 자유도에 대해서만 운동이 일어나도록 하는 역할을 한다. 일반적으로 조인트 요소는 강체 요소 사이에서만 작용하지만 유연체 요소로 이루어진 파트들 간에도 일정한 강성을 부여한 조인트 요소의 설정이 가능하다. 이와 같은 효과는 더미에서 머리 부분과 목 부분 사이가 볼트로 체결된 것과 같은 것을 모사할 때 이용된다. 본 연구에서 사용의 목표로 한 상용 유한요소 프로그램인 LS-DYNA는 총 9가지의 조인트 요소를 지원한다. 그러나 본 연구는 그 중 회전(revolute), 구(spherical), 실린더(cylindrical), 전달(translational) 등의 4가지 조인트 요소가 사용된다. 이러한 조인트 요소들은 머리와 목, 팔과 어깨와 같은 서브 컴퍼넌트 간의 연결에 주로 이용되며, 한 서브 컴퍼넌트 안에서도 각 파트의 연결을 위해 이용된다.

위와 같은 조인트 요소는 한 서브 컴퍼넌트 안에서의 파트와 파트 사이 결합이나 서브 컴퍼넌트와 서브 컴퍼넌트 사이의 결합사이에 일정한 자유도를 가지고 운동을 하는 강체나 유연체 사이에 설정을 한다. 이 중 서브 컴퍼넌트 안의 파트와 파트 사이의 연결에 대한 설명은 3.2절에서 일부 설명되어 있다. 각 서브 컴퍼넌트 사이의 결합은 주로 조인트로 연결이 된다. 예를 들어 팔 서브 컴퍼넌트와 가슴 서브 컴퍼넌트 사이를 연결하는 어깨 부위는 회전 조인트로 연결이 이루어지는데, 그 연결은 다음과 같다. 어깨 부위 회전축에 해당하는 자리에 가상의 강체빔 두 개를 만들고 팔과 가슴 서브 컴퍼넌트에 각각 강체 연결을 한다. 이렇게 연결한 강체빔 사이에 회전 조인트를 설정하게 되는데 이 회전 조인트에는 일정한 회전 강성을 부여한다. 이 회전 강성은 선형 스프링 강성으로 모사하여 회전각에 대해 일정한 강성을 갖도록 한다. 이렇게 강성을 부여한 회전 조인트는 볼트와 베어링으로 이루어진 실제 더미의 회전 성분 특성을 모사한다.

조인트 연결과 함께 강체 연결 요소들도 유한요

소 모델링에서 많이 사용되는 연결의 방법이다.^{5,11)} 절점 강체 구속 연결요소(Nodal Rigid Body Constraints)는 두 개나 그 이상의 절점 사이에 강체 구속을 만드는 연결요소이다. 이 연결 요소를 사용하면 이 연결 요소로 연결된 절점들은 응력과 변형률을 공유하게 된다. 이 요소는 실제 더미의 리벳 체결을 모사할 때 주로 이용된다. 이와 더불어 점용접 요소는 실제 더미에서 용접의 형태로 연결되어 있는 파트들을 모사하기 위해 널리 사용된다. 실제 더미에서 용접으로 연결된 부분은 그 물리적 특성을 고려하여 점용접 요소나 강체 구속 연결로 연결 설정한다. 유연체 절점의 강체 구조물 연결은 유연체 파트와 강체 파트를 전달 에너지의 손실 없이 연결하기 위해 사용된다. 이러한 요소는 뼈를 모사하기 위해 강체로 모델링 한 금속 재료의 튜브 요소와 주변 유연체 요소의 접합을 위해 이용된다.

연결을 위해서는 연결요소와 함께 적절한 접촉 조건도 이용된다. 접촉은 주로 각 파트간의 간섭을 막고 해석 상에서 서로 떨어져 있는 파트 간의 접촉 유무를 판단하는 데에 이용된다. 그러나 일부 접촉 요소는 각 파트의 결합을 위해서 설정하기도 한다. 연결 접촉조건은 두 개 이상의 파트 표면이 서로 붙어 있음을 나타내는 접촉 요소로 외부 하중에 대해서도 미끄러짐이나 떨어지는 하중 등을 설정할 수 있다. 이러한 접촉 조건은 머리카락, 다리 부분에서 안쪽 강체 부분과 바깥쪽 피부 부분이 서로 연결되어 있는 형상을 모사할 때 주로 이용된다.

4.2 전체 유한요소 모델의 구성

3장에서는 제시한 유한요소 모델링의 순서에 따라 Hybrid III 5% 성인 여성 더미의 각 서브 컴퍼넌트를 생성하였다. 이렇게 생성한 각 서브 컴퍼넌트는 4.1 절에서 설명한 각 결합 요소를 이용하여 서로 결합하였다. 이 때 사용한 결합 요소는 실제 더미의 연결 상태를 바탕으로 물리적 의미에 맞는 연결 요소를 선정하여 연결하였다. 또한 각 파트 사이에는 알맞은 접촉 조건을 생성하여 실제 해석 시 각 파트간의 간섭을 막는다.

Fig. 10은 이런 과정을 통해 최종적으로 구성한 Hybrid III 5% 성인 여성 더미 유한요소 모델의 모습

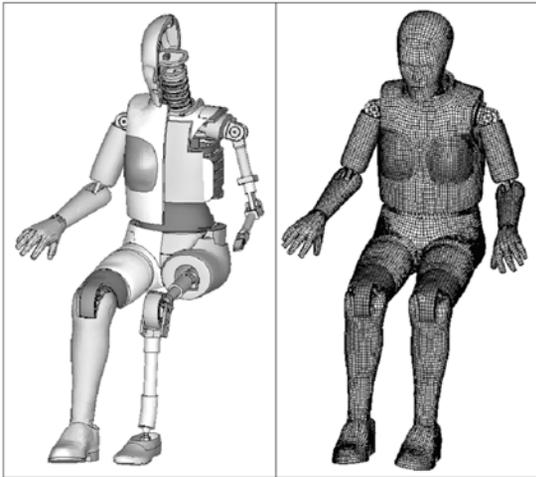


Fig. 10 Assembled F.E. model of a 5th percentile Hybrid III female dummy

이다. Table 1은 이 유한요소 모델의 각 서브 컴퍼넌트 간의 파트 수와 요소, 절점 수와 같은 간략한 정리이다. 표에 나타난 절점과 요소의 수는 조인트 생성을 위해 추가한 빔과 이와 관련된 절점은 포함하지 않는다. 표에 나타난 바와 같이 새롭게 생성한 Hybrid III 5% 성인 여성 더미는 약 14만개의 절점과 17만개의 요소로 구성되어 있다.

Table 1 Model summary

Sub-component	Number of parts	Number of nodes	Number of elements		
			Beam	Shell	Solid
Head	7	8,912			5,303
Neck	6	8,732	18	144	5,561
Thorax	40	37,797	3	5,394	20,121
Pelvis	19	20,972	16	7,606	42,432
Upper leg	18	10,645		7,924	17,230
Lower leg	22	18,626		9,668	14,450
Feet	16	10,178		3,352	7,932
Shoes	4	4,502		2,028	1,422
Shoulder	4	588			282
Upper arm	10	8,846		3,904	6,492
Elbow	2	960			628
Lower arm	10	7,842		4,304	6,100
Wrists	4	480			198
Hands	10	2,606		1,750	1,354
Total	172	141,786	37	46,074	129,685
			175,796		

5. 서브 컴퍼넌트 보정 시험과 유한요소 모델의 검증

2장에서는 Hybrid III 5% 성인 여성 더미의 생성 및 보정의 과정을 정의하였다. 3장과 4장에서는 제안한 모델링 과정을 바탕으로 하여 각 서브 컴퍼넌트 구성과 결합의 과정을 보였다. 위와 같은 과정을 통해서 구성된 유한요소 모델은 컴퓨터 시뮬레이션 상에서 실제의 더미와 물리적으로 같은 거동을 하여야한다. 5장에서는 서브 컴퍼넌트 보정 시험과 이를 모사한 시뮬레이션을 통해서 구성된 유한요소 모델의 타당성을 보인다.

Hybrid III 5% 성인 여성 더미의 각 서브 컴퍼넌트 보정 시험조건은 미연방 자동차 안전기준(Code of Federal Regulations under Title 49, Part 572 subpart O)에 명시되어있다.²⁾ 이 조건은 시험에 사용되는 더미 각 서브 컴퍼넌트의 보정을 위해 사용되며, 만족해야할 조건을 제시하고 있다. 제시하고 있는 보정 시험 조건은 머리 낙하시험, 목의 신장/압축 시험, 흉부 충격 시험 등으로 이루어져 있다. 이러한 보정조건은 시험에 사용되는 더미를 통해 얻은 결과가 믿을 수 있는 데이터 인지를 검증하기 위해 각 서브 컴퍼넌트의 시험 조건과 그 때의 검증 조건을 제시하고 있다. 위의 세 가지 시험 중에서 머리와 목 부분의 시험은 더미의 일부분을 이용하여 중요 부위의 시험 결과를 얻는 가속도계 등의 성능을 평가하고, 흉부 시험은 전체 더미를 이용하여 전체의 거동을 포함한 흉부의 가속도 및 변위에 대한 성능을 평가하게 된다. 본 연구에서는 실제 더미를 이용한 보정 시험과 유한요소 모델을 이용한 컴퓨터 시뮬레이션을 각각 수행하여 그 결과를 비교한다. 이때의 컴퓨터 시뮬레이션은 상용 비선형 동적 반응 해석기 LS-DYNA를 이용하여 수행한다.⁹⁾

머리 부분 서브 컴퍼넌트 부분의 보정시험은 Fig. 11과 같이 머리 서브 컴퍼넌트를 376mm의 높이에서 강체 표면에 자유낙하 하는 시험이다. 이 시험의 결과 얻게 되는 반응장은 머리 중심부분의 가속도 정보로 그 결과 값이 250G에서 300G 사이에 있어야 한다. 구성된 더미 유한요소 모델을 이용한 유한요소 해석 또한 Fig. 11의 시험 조건을 모사하여 적용하여 해석을 수행한다. 시험과 해석을 통해 얻게 되

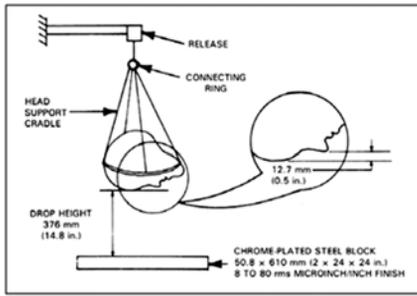


Fig. 11 Head drop test set-up

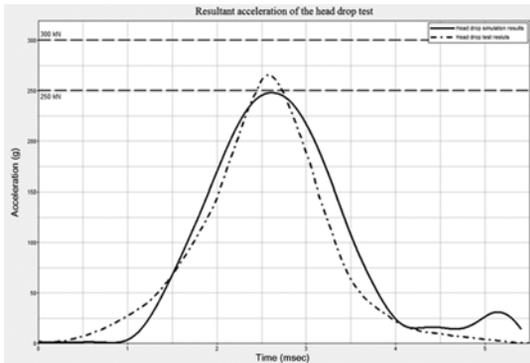


Fig. 12 Comparison of the results - Head drop test

는 가속도 결과는 SAE 분류 1000의 노이즈 필터를 적용하여 사용한다.

위의 보정 시험의 조건을 실제 더미와 구성한 더미의 유한요소 모델에 각각 적용하여 시험 및 컴퓨터 시뮬레이션을 진행한 결과를 기술한다. Fig. 12는 머리 낙하 시험에 대한 결과이다. 그림에서 보이는 바와 같이 머리 서브 컴퍼넌트의 시뮬레이션 결과는 실험의 결과와 유사한 경향성을 보이고 있다. 가속도의 최고치가 발생하는 시간이 거의 일치함을 보이고 있으며 보정 조건을 만족하고 있으나 실험의 결과에 비해서 가속도의 값이 약간 낮은 경향을 보이고 있다.

목 부분 서브 컴퍼넌트 부분의 보정시험은 머리 서브 컴퍼넌트와 목 서브 컴퍼넌트를 Fig. 13과 같이 강체봉으로 이루어진 진자의 끝에 고정된 채로 진자운동을 하여 변형 가능한 알루미늄 허니컴 벽에 충돌시키고, 그 때 목 부분 조인트에 걸리는 모멘트와 변형량 등을 측정한다. 이 때 목과 머리의 방향을 달리하여 목 부위의 굴절(flexion) 시험과 신장(extension) 시험으로 나누어 시행한다. 굴절 시험은

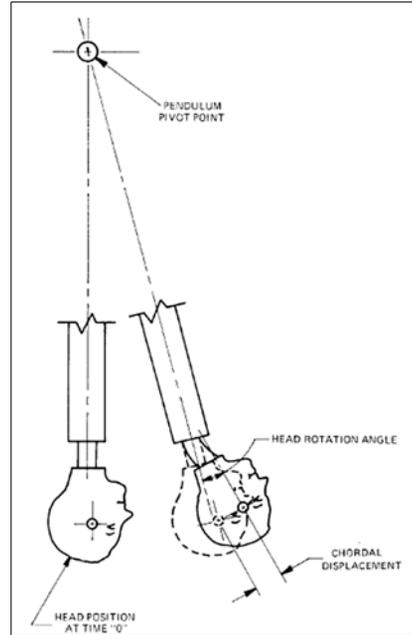
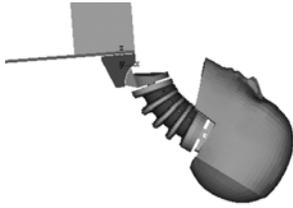


Fig. 13 Neck component test set-up

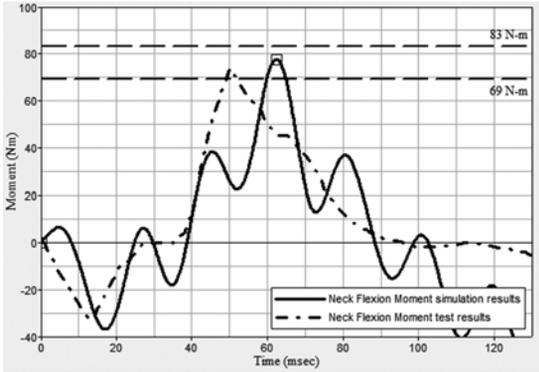
더미의 목이 앞으로 젖혀지는 것을 모사하며, 신장 시험은 목이 뒤로 젖혀지는 것을 모사한다. 굴절 시험의 초기 충격속도는 7 m/s이고, 신장 시험의 초기 충격속도는 5.8 m/s이다. 신장 시험 시에는 조인트 부분의 y-축 모멘트 값의 최소치가 -53 N·m와 -65 N·m 사이에 위치하여야 하며, 굴절 시험 시에는 조인트 부분의 y-축 모멘트 값의 최대치가 69 N·m와 83 N·m 사이에 위치하여야 한다.

Fig. 14(b)는 굴절 시험에서 조인트에 발생하는 y-축 모멘트에 대한 시험과 시뮬레이션의 결과를 비교한 그래프이다. 그림에서 보이는 바와 같이 전체적인 경향은 비슷한 경향을 보이고 있고, 보정 조건을 잘 만족하고 있다. 그러나 최대치가 발생하는 시간이 시험에 비해 약 10msec 정도 늦게 발생하는 것을 알 수 있다. y-축 모멘트의 최대치가 발생했을 때 실제 변형도가 가장 크다. 그리고 Fig. 14(a)는 굴절 시험 중에 최대 변형이 일어났을 때의 머리와 목 부분의 변형 모습을 보여주는 그림이다.

Fig. 15(b)는 신장 시험에 대한 목 조인트 부분에서 발생하는 y-축 모멘트에 대한 시험과 시뮬레이션 결과 비교 그래프이다. 신장 시험의 경우에는 시뮬레이션의 결과가 전체적인 경향은 시험의 것과 유



(a) Maximum flexion of the head-neck assembly



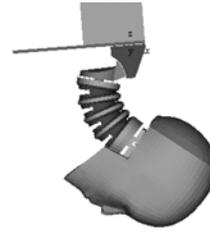
(b) Comparison of the results - Neck moment flexion

Fig. 14 The results of neck moment flexion test

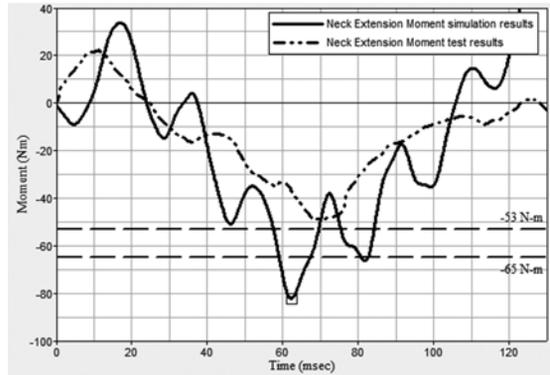
사하지만 그 값이 시험에 비해 작게 나타나고 있으며, 제한 조건을 위배하는 것으로 나타나고 있다. 따라서 목 부위의 물성치 데이터 등을 조절하는 보정이 작업이 필요할 것으로 생각된다. 그러나 이 때 신장 시험과 굴절 시험을 동시에 고려하여야 한다.

Fig. 16은 흉부 충격 시험의 구성 모습이다. 신발을 제외한 전체 더미를 강체 바닥에 위치하게 한 후 13.97 kg의 강체 진자를 더미 흉부에 6.7 m/s의 속도로 가격한다. 이 때 진자는 더미의 세 번째 갈비 중앙선 12.5 mm 아래에 위치시킨다. 이 때 고려하는 보정의 조건은 진자에 가해지는 반력의 크기와 흉부의 변형량이다. 진자에 가해지는 반력의 최대치는 3900 N과 4400 N 사이에 위치하여야 하며, 흉부의 중앙선 부분 변형량의 최대치는 50 mm에서 58 mm 사이에 위치하여야 한다.

Fig. 17(a)는 흉부 충격 시험에서 발생하는 반력에 대한 결과 비교이고, Fig. 17(b)는 이 때 발생하는 흉부 변형량의 비교 그래프이다. 그림에서 보는 바와 같이, 두 그래프 모두 전체적인 경향은 시뮬레이션의 결과가 시험의 결과와 유사한 경향을 보인다. 그러나 흉부 변형량의 값이 제한 조건을 잘 만족시키



(a) Maximum flexion of the head-neck assembly



(b) Comparison of the results - Neck moment extension

Fig. 15 The results of neck moment extension test

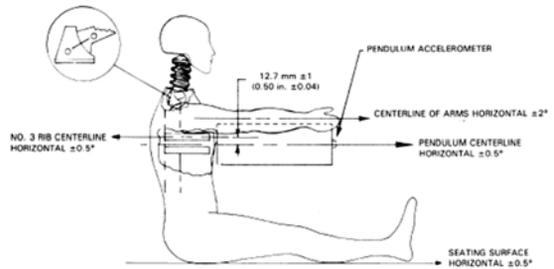
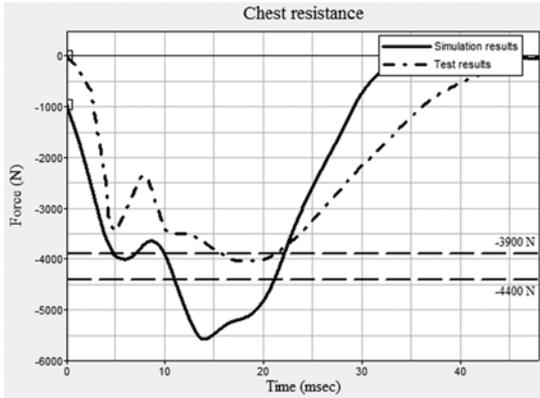


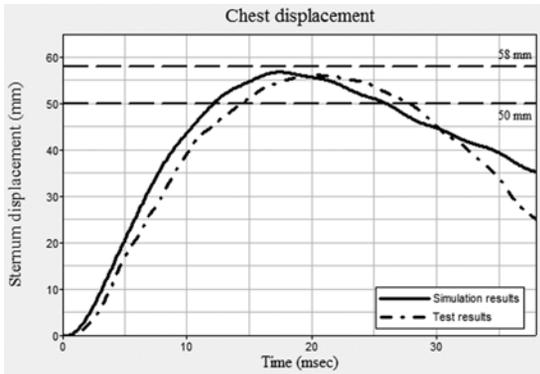
Fig. 16 Thorax impact test set-up

고 있는데 반해, 반력의 크기는 주어진 조건을 만족시키지 못하고 있다. 따라서 이에 대한 보정의 과정이 필요할 것으로 생각된다.

위와 같이 구성된 더미의 유한요소 모델의 검증을 위해 각 서브 컴퍼넌트 보정 시험을 하고 그 결과를 비교하였다. 컴퓨터 시뮬레이션의 결과 전체적인 경향은 시험의 결과와 유사한 경향을 보였으나 일부 시험에서 보정의 조건을 만족하지 못하는 결과를 얻었다. 따라서 시험 보정의 조건의 만족을 위한 추가적인 과정이 필요하다.



(a) Comparison of the results - chest resistance



(b) Comparison of the results - chest displacement

Fig. 16 The results of thorax test

6. 결론

본 연구에서는 역공학을 기반으로 한 Hybrid III의 유한요소 개발 과정을 제안하고, 제한한 과정에 따라 Hybrid III 5% 성인 여성 더미를 그 대상으로 하여 다음과 같이 실제 더미의 상세 유한요소 모델을 개발하였다.

- 1) 3차원 레이저 스캐너 장비를 이용, 더미 각 부분을 스캔하여 3차원 표면 정보 도면을 생성하였다. 생성한 3차원 표면은 2차원 제작 도면과 상호 확인하고, 3차원 표면 데이터와 2차원 제작 도면 데이터를 바탕으로 전체 더미모델의 상세한 3차원 도면을 생성하였다.
- 2) 생성한 3차원 도면을 바탕으로 분해한 각 서브 컴퍼넌트의 상세 유한요소 모델을 생성하였다. 생성한 유한요소 모델은 실제 컴퓨터 시뮬레이

션을 고려하여 일정한 크기의 요소들로 이루어져 있다.

- 3) 실제 더미의 시편을 이용한 재료 물성치 시험을 통해 물성치 데이터를 생성하였다.
- 4) 물성치 정보를 입력한 각 서브 컴퍼넌트의 유한요소 모델은 실제 더미의 물리적 특성을 고려하여 다양한 연결 요소를 통해 결합하였다.
- 5) FMVSS 572에 규정되어 있는 더미의 보정 시험 조건을 실제 더미와 구성한 더미의 유한요소 모델에 적용한 결과, 구성한 유한요소 모델을 이용한 시뮬레이션의 결과 중 일부가 보정 조건을 약간 만족시키지 못함을 알 수 있었다.

후 기

이 논문은 2007년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업(612-2007-1-D00078)과 한국과학재단을 통해 교육과학기술부의 세계수준의 연구중심대학 육성사업(WCU)으로부터 지원받아 수행되었습니다(R32-2008-000-10022-0).

References

- 1) National Highway Traffic Safety Administration, Federal Motor Vehicle Safety Standards; Occupant Crash Protection, Code of Federal Regulations under Title 208, Part 571.
- 2) National Highway Traffic Safety Administration, Federal Motor Vehicle Safety Standards; Anthropomorphic Test Devices, Code of Federal Regulations under Title 49, Part 572.
- 3) R. Cook, D. Malkus, M. Plesha and R. Witt, Concepts and Applications of Finite Element Analysis, 4th Edn, Wiley, 2001.
- 4) A. Nouredine, A. Eskandarian and K. Digges, "Computer Modeling and Validation of a Hybrid III Dummy for Crashworthiness Simulation," Mathematical and Computer Modeling, Vol.25, pp.885-893, 2002.
- 5) J. B. Ennies, D. Marzougui, A. Eskandarian and E. Bedewi, "Finite Element Modeling of Anthropomorphic Test Devices for Vehicle Crashworthiness Evaluation," International Journal of Crashworthiness, Vol.6, No.4, pp.511-

- 524, 2001.
- 6) P. Mohan, D. Marzougui, R. V. Velde and C. D. Kan, Development of Detailed Finite Element Dummy Models, LS-DYNA Users Conference, Frankenthal, Germany, 2007.
 - 7) T. Varady, R. R. Martin and J. Coxt, "Reverse Engineering of Geometric Models - An Introduction," Computer-Aided Design, Vol.29, No.4, pp.255-268, 1997.
 - 8) S. Motavalli, V. Suharitdamrong and A. Alrshdan, "Design Model Generation for Reverse Engineering Using Multi-sensors," IIE Transactions, Vol.30, pp.357-366, 1998.
 - 9) Livermore Software Technology Corporation, LS-DYNA Version 971 User's Manual, 2006.
 - 10) Altair Corporate, HyperWorks Version 9.0 User's Manual, 2008.
 - 11) Livermore Software Technology Corporation, LS-DYNA Theoretical Manual, 1998.