

충돌 안전도 해석을 위한 5th percentile 성인 여성 유한요소 모델 개발 - Part I 다물체 동역학 모델 개발

나상진¹, 최형연¹, 이진희²

¹홍익 대학교 기계시스템디자인 공학과

²아이피에스 인터내셔널

(2004년 2월 5일 접수, 2004년 7월 22일 채택)

Development of 5th percentile Female Finite Element Model for Crashworthiness Simulation - Part I Articulated Rigid Body Model

Sang jin Na¹, Hyung Yun Choi¹, Jin hee Lee²

¹Department of mechanical and system design Engineering, Hongik University

²IPS international

(Received February 6, 2004. Accepted July 22, 2004)

요 약 : 자동차 충돌 시 신체의 크기가 작은 여성 승객의 거동 및 상해 기구를 조사하기 위하여 5% percentile의 여성 유한 요소 모델을 개발하였다. 본 모델은 작은 신체 여성의 형상을 대표하는 분절된 강체와 해부학적으로 상세하게 묘사된 내부 요소들로 구성되어 있다. 분절된 강체 모델은 상세한 골격 및 장기 등의 플랫폼 역할을 수행하며 또한 작은 여성 승객의 전체적인 운동역학을 표현하기도 한다. 본 논문에서는 분절된 강체 모델의 체형 구성 및 유한요소 구조 등에 대한 자세한 내용이 모델의 검증과 함께 소개되어 있다. 모델링의 후반부 즉 작은 여성의 해부학적으로 상세한 내부 요소는 연이은 part II 논문에서 다루게 된다.

Abstract : In order to investigate the small female occupant behavior and accompanying injury mechanisms in vehicular crash event, a finite element model of 5th percentile female has been developed. The model consists of articulated rigid body, which represents the morphology of small female body, and internal components with anatomical details. Articulated rigid body model serves as a basic platform for joining the detail internal skeletons and organs, while itself can be used for representing the overall kinematics of small female occupant. The modeling details such as anthropometry and finite element structure as well as validation results for the articulated rigid body model are introduced in this paper. The second part of the modeling, i.e. the internal components with anatomical details of small female are presented in subsequent part II of the paper.

Key words : Finite element small female model, 5th percentile, articulated rigid body model

서 론

승객의 상해와 충돌 안전도에 관한 관심은 자동차 메이커 뿐 아니라 일반인들에게도 날로 증가하는 추세에 있다. 자동차의 충돌 사고 시 차량의 상대 운동에 의한 감속도 및 차량 내부와의 2차 충돌로 인해 승객은 상해를 입게 된다. 따라서 자동차 메이커를 비롯한 여러 기관에서 승객의 상해를 줄이고 안전도를 높이기 위한 많은 연구들이 수행되어 왔으며 차량의 안전을 확보하기 위한 기준이 법규의 형태로 제시되고 있다. 이들 법규에서는 충돌용 더미를 이용하여 승객의 상해 정도를 평가·예측하며 충돌 시물레이

션에서도 유한요소 더미 모델이 사용되고 있다. 이러한 충돌용 더미와 유한요소 더미 모델은 성별과 크기에 따라 남성(50th percentile, 95th percentile), 여성(5th percentile) 그리고 유아(3세, 6세 등)등으로 구성되어 있으며 정면, 측면 및 후면 충돌용이 각각 별도로 제안되고 있다. 그러나 충돌용 더미는 정면, 후면과 같은 정형화한 상황에 대해서 승객의 거동 특성을 어느 정도 표현할 수 있지만 그 이외의 복합적인 경우에 대해서는 사용하기에 많은 어려움이 따른다.

또한 더미는 충돌 시 관성 및 접촉 하중으로 인하여 발생하는 각 부위의 변형, 가속도 그리고 하중 등을 다양한 센서로 측정 및 기록 하며 이들의 이력곡선을 상해판정식 등에 대입하여 상해 정도를 정량화된 수치로 표현하게 된다. 반면에 실제 인체에서는 뼈의 부러짐, 장기의 손상과 같은 다양한 상해를 입게 되는데 충돌용 더미는 각 기관에서의 실제 상해가 아닌 그 개연성을 표현한다는 한계를 지니고 있다. 더구나 이들 더미들은 법규가 제정되는 시기에

본 연구는 과학기술부에서 지원하는 엔지니어링핵심공통기반기술개발사업 3단계(과제명 : 충돌안전도 해석용 정밀 인체 모델 개발, 과제번호 : M10139080002-03B0808-00210)를 통하여 수행 되었음.

통신저자 : 최형연, (121-791) 마포구 상수동 72-1

홍익대 기계시스템디자인 공학과

Tel. (02)320-1699 .011-419-1699 Fax. (02)322-7003

E-mail. hychoi@hongik.ac.kr

제작된 것들이기에 현재 문제가 되고 있는 많은 상해들에 대해서는 대응 할 수 없다는 단점을 가지고 있다. 이러한 문제점들을 보완하기 위해서 여러 연구기관들은 지원자를 통한 시험이나 사체를 이용하여 시험을 수행하고 있으나 이 또한 실제 상해를 표현하는 데에는 한계가 있고 여러 가지 윤리적인 제약이 따른다. 이와 같은 충돌 더미의 생체충실도 부족이나 사체 시험의 한계를 극복하고자 인체의 해부학적인 부분을 잘 표현하며 승객의 상해를 직접적·해석적으로 평가하고 표현할 수 있는 유한요소 인체 모델의 개발이 필요하게 되었고 그 노력이 계속되고 있다. 그 결과 본 논문의 저자를 포함하여 많은 기관에서는 50th percentile 남성을 표현하는 유한요소 모델¹⁾을 개발하였다.

반면 차량 사고 시 신체 크기가 작은 여성은 남성보다 큰 상해를 입을 가능성이 높다. 이로 인해 신체 크기가 작은 여성에 관한 연구가 최근 들어 더욱 활발하게 이루어지고 있다²⁾. 5th percentile로 작은 여성의 크기를 대표하는 여성 더미가 정면 및 측면 충돌용으로 각각 제안되고 있으며 이를 사용하는 규제 역시 시행되고 있다.

일반적인 신체의 크기는 통계적으로 종 모양의 "정규분포" 꼴을 따른다. 다수의 사람은 분포의 중앙부분에 밀집하고 있으며 소수는 양극단에 존재한다. 백분위수는 만약 각기 다른 크기의 100명이 어떤 특성 치 별로 가장 큰 값에서부터 나열하였을 때 각 사람에게 해당되어지는 값이다. 즉 5th percentile이라 함은 그 집단의 5%가 그 값보다 작으며 나머지 95%는 그 값보다 크다는 뜻이다.

그러나 작은 여성의 충돌 상해에 관한 광범위하고 심도 있는 연구는 관련 자료가 충분치 않으며 아직은 초기 단계라 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 신체 크기가 작은 여성에서 자동차 충돌 시 발생하는 상해 기구의 해석을 위해 H-female이라 이름 지어진 해부학적 유한요소 여성 모델을 개발하였다. 이 모델은 다물체 동력학적 강체 모델인 FARB(Female Articulated Rigid Body)와 각 부위를 상세히 표현한 세부 모델로 구성되어 있다.

FARB 모델은 인체의 각 부위를 22개의 강체들로 모델링 한 후 각각의 강체를 신체 부위의 실제 동작한계(Range of Motion)가 표현된 6 자유도계의 관절 요소로서 결합한 다물체 동력학 모델이며 충돌 하중을 받는 승객의 전체적인 거동 표현에 적합한 모델이다.

또한 FARB 모델은 경질조직(skeleton), 연질조직(soft tissue) 그리고 장기들이 해부학적 형상으로 모델링 되어 있는 상세 인체 모델의 플랫폼 역할을 한다.

본 논문에서는 표준 5th percentile 여성의 체위와 기계적인 물성값 들을 소개하고 FARB 모델의 구성 및 검증 등에 대한 설명과 더불어 그 응용의 예로 정면충돌 Sled 해석결과를 소개하고자 한다.

5th percentile 여성에 관한 연구

5th percentile 여성 각 부위의 신체 크기는 여러 보고서에서 보고 되고 있으며 그 결과는 조사 대상 국가와 조사된 해에 따라 조금씩 다르게 나타난다. 한국표준과학연구원(KRISS)에서는 한국인의 표준체격 및 체형 분류의 기초 자료 제공과 산업제품의 표준화를 위해 1997년에 국민표준

체위조사 사업³⁾을 실시하여 그 결과를 발표하였다. 이 보고서에 따르면 선(standing) 자세에서부터 앉은(sitting) 자세에 이르기까지 신체 각 부위의 길이와 체중을 121가지의 항목으로 조사하였으며 또한 성별 및 연령층별로 나누어 대표되는 백분위수 사람의 측정값을 기술하였다.

미 공군에서는 차량 및 항공기에서의 충돌 및 사출시 인체의 거동과 응답 특성을 해석하기 위해 다물체 동력학적인 프로그램인 GEBOD(Generator of Body Data) 프로그램⁴⁾을 개발하였다. 이 프로그램은 인체 외형의 복잡함을 단순화하기 위해 신체 각 부위를 타원 형태의 강체 모델로 표현하고 그에 따른 각 강체의 질량, 관성 모멘트 그리고 조인트의 위치를 제공한다. GEBOD 프로그램에서는 인체의 체위 및 기계적인 특성을 두 가지 형태로 얻을 수 있다. 첫 번째 "User-define" 모드는 세분화된 32가지의 체위를 입력하면 이를 GEBOD 알고리즘에 따라 계산하여 질량 등의 물성치를 나타내는 것이고 두 번째 모드는 "Adult male and female"이다. 이는 미리 측정되고 계산된 미국 표준 백분위수 사람의 결과 값을 보여준다.

D. H. Robbin은 "Anthropometry of Motor Vehicle Occupant series"⁵⁾를 통해 50th percentile, 95th percentile 남성과 5th percentile 여성의 신체 크기, 무게 중심점, 관절 위치 그리고 동작범위(Range of Motion)등의 값을 발표하였다. 이 보고서는 각 크기별로 운전하는 자세를 가진 사람을 진흙모델로 만들었고 주요 신체 부위의 점들을 절대 공간좌표로 나타내고 있다. 또한 각 부위의 무게 중심점과 관절의 위치뿐만 아니라 그 방향 벡터까지 기술 하고 있다.

본 연구에서는 위의 3가지 데이터 중 KRISS 측정값을 본 모델 체위의 기준으로 삼아 GEBOD의 "User-define" 모드에서 계산을 수행하여 각 부위의 무게 및 관성모멘트 값을 얻었다. 그러나 KRISS 측정 결과에 없는 5개의 값(Head to chin height, upper leg circumference, chest breadth, forearm-hand length 그리고 biceps circumference)은 GEBOD (Version 4.0, 1994년)내에 포함되어 있는 여성 모델의 동적 물성치를 사용하였다. 또한 서있는 자세를 한 모델의 동적 물성치는 GEBOD의 계산 결과를 사용하였으나 운전하는 자세의 모델인 경우에는 Robbin 보고서⁵⁾의 결과를 사용하여 완성하였다.

다음의 표 1은 표 2에서 보여주고 있는 동적 물성치인 질량과 관성모멘트 값을 구하기 위하여 GEBOD 프로그램에 입력된 한국 표준 5th percentile 여성의 32가지 인체 측정 (anthropometric) 데이터를 보여주고 있다.

표 1. 한국 표준 5th percentile 여성의 체위
Table 1. Anthropometric survey of Korea standard 5th percentile female

Measurement items	Length(cm)	Measurement items	Length(cm)
Standing Height	152.1	Forearm Circumference	19.9
Shoulder Height	123.1	Wrist Circumference	13.5
Armpit Height	113.7	Knee Height	40
Waist Height	92.2	Thigh Circumference	16.2
Seated Height	82.9	Knee Circumference	31
Head Length	20.2	Calf Circumference	30.1
Head Breadth	14	Ankle Circumference	21.4
Neck Circumference	28.3	Ankle Height	5.3
Shoulder Breadth	31.7	foot Breadth	8.3
Chest Depth	18	Foot Length	21.4
Waist Depth	13.7	Head to Chin Height	21.1
Waist Breadth	20.5	Upper Leg Circumference	41.9
Buttock Depth	17.7	Chest Breadth	26
Hip Breadth	28	Forearm-Hand Length	39.2
Shoulder to Elbow Length	28.5	Biceps Circumference	23.3
Elbow Circumference	19.9	Weight	43 Kg

표 2. 한국 표준 5th percentile 여성의 각 부위 질량과 관성모멘트
Table 2. Estimated segment mass and MOI(Moment of Inertia) of Korea standard 5th percentile female

Segment	Mass (Kg)	I _x (Kg-mm ²)	I _y (Kg-mm ²)	I _z (Kg-mm ²)
Head	4.222	14,615	17,291.9	13,171.5
Neck(C1)	0.08	82.13	128.39	138.98
Neck(C2)	0.091	93.33	145.88	157.93
Neck(C3)	0.088	89.56	139.99	151.54
Neck(C4)	0.084	85.85	134.18	145.26
Neck(C5)	0.084	85.85	134.18	145.26
Neck(C6)	0.088	89.56	139.99	151.54
Neck(C7)	0.08	82.13	128.39	138.98
Thorax	8.619	154,280.6	116,123.8	120,862.6
Abdomen	1.6	14,348.4	10,146.3	20,571.5
Pelvis	7.625	32,624.4	28,287.2	57,415.8
Upper Arm	0.858	4,998	5,113.50	816.8
Lower Arm	0.901	14,151.5	12,940.20	834.2
Upper Leg	5.521	73,141.6	70,095.30	15,385.7
Lower Leg	2.280	26,141.4	26,192.20	2,313.5
Foot	0.594	344.1	1,842.80	1,661.4
Clavicle	0.175	107.29	107.29	62.5
Scapula	0.35	1,250	627.1	627.1

5th percentile 유한요소 모델의 구성

본 연구에서 개발된 5th percentile 유한요소 여성 인체 모델 (이후부터 H-female로 명명) 두 종류의 모델로 구성 되어 있다. 즉 FARB(Female Articulated Rigid Body)라고 불리는 강체관절 모델과 각 인체의 신체 부위들에 대하여 해부학적으로 상세히 표현한 내부 모델이다.

FARB 모델은 인체의 전체적인 거동을 간단히 평가하는데 유용한 모델로써 22개의 강체 분절(머리, 목, 가슴, 배, 골반, 좌우 어깨, 상부 팔-다리, 하부 팔-다리 그리고 발)과 이 분절들을 연결하는 24개의 관절요소들로 구성된다. 특히 목과 어깨 부위의 움직임을 보다 정밀하게 묘사하기 위해 목에는 7개의 강체 분절로 어깨 부위에는 3개의 강체분절로 각각 세분화 하였다. FARB의 외부 형상은 Viewpoint⁶⁾에서 제공하는 22개의 여성 모델 중 한국표준 과학연구원에서 조사한 한국 5th percentile 표준 여성과 가장 유사한 모델을 선택한 후 스케일하여 확보하였고 각 부위(rigid body)의 질량, 관성모멘트, 무게 중심, 관절의 위치는 Robbin's 데이터와 GEBOD 프로그램에서 계산된 값을 사용하였다. 이와 같은 FARB 모델의 geometry와 기계적 물성치를 충돌해석전용 외연 유한요소 해석 프로그램인 Pam-Crash⁷⁾의 입력포맷에 맞게 완성하였다. 그림 1은 FARB의 모습을 각 강체의 무게중심 및 관절(joint)들의 위치와 함께 보여주고 있다.



그림 1. FARB의 관절과 무게중심점
Fig.1. FARB joint & COG

FARB의 각 마디들은 kinematic joint요소들로 연결되어 오픈 트리 형태의 링크구조를 형성한다. 본 모델에 사용된 Kinematic joint 요소들은 비선형 스프링, 댐퍼의 병렬연결로 구성되며 위치에 따라 실제 인체의 거동에 맞게 각기 다른 형태의 조인트요소로 이루어져있다. 머리와 상체를 연결하는 목의 8개의 조인트요소는 각 방향의 선형 움직임 및 회전이 자유로운 general 타입으로, 또한 흉추와 요추를 표현하는 두개의 조인트요소와 사지를 연결하는 14개의 조인트요소는 각 방향의 회전이 구속된 flexion-torsion과 spherical 타입의 조인트요소로 각각 이루어져 있다. 이러한 조인트 요소들에는 하중-변위 및 모멘트-회전의 특성 곡선을 부여하여 일정한 회전 및 움직임 후에는 더 이상의 거동이 매우 힘들어 지게 하여 신체 각 부위의 실제 동작 한계(Range of Motion)가 적절히 표현하도록 하였다.

FARB의 안쪽에는 79개로 구성된 골격이 위치하고 있으며 이 또한 Viewpoint사에서 제공되는 형상 데이터를 유한요소 망으로 구성한 후 완성하였다. 골격은 강체로 모델링 되어 변형하지 않으나 FARB와 같이 관절요소로 체결되어 상대적인 운동을 허용하고 FARB의 관절 거동을 시

각적으로 확인하도록 도와준다.

FARB 어깨부위의 정밀한 묘사를 위해 앞서 언급한 세분화된 관절요소 이외에도 9개의 어깨 근육을 추가하여 주었다. 이는 어깨 관절을 이루고 있는 견갑골(scapula), 쇄골(clavicle), 상완골(humerus) 등의 운동을 원활하게 표현하기 위함이며 1차원 바 요소를 사용하여 모델링을 수행하였다. 이러한 어깨 골격근은 해부학적 고찰⁸⁾을 통해 실제 인체와 같이 시작점(origin)과 삽입점(insertion)이 엄격히 고려되었으며 Hill Type Muscle 이론⁹⁾을 적용하였다. 추돌시 승객이 사고를 사전에 인지하지 못하였거나 또는 추돌과정이 빨라 능동적 근력을 생성하지 못한다고 가정하여 모든 근육은 수동적인 근력만을 포함하도록 모델링 하였으며 Hill Type 모델에 사용되는 생리적 근육 단면적, 최적 길이 등의 해석 변수들은 참고문헌¹⁰⁾으로부터 인용하였다.

그림 2는 골격 및 어깨 근육을 포함한 FARB의 모습을 보여주고 있으며, 표 3은 완성된 FARB 어깨 근육의 종류와 기능을 나타내고 있다.



그림 2. FARB 골격과 어깨 근육
Fig. 2. FARB skeleton & shoulder muscle

표 3. FARB 어깨 근육의 종류와 기능
Table 3. Function of shoulder muscle

Muscle	Origin	Insertion	Function
Subclavius	Clavicle	Sternum	Depresses the shoulder, carrying it downward and forward
Pectoralis minor	3, 4, 5 ribs	Scapula	Elevates ribs if scapula fixed, retracts scapula
Pectoralis major	Clavicle, sternum	Humerus	Fixes, adducts and medially rotates arm
Rhomboid minor	C7, T1	Scapula	Retracts scapula. Rotates lower scapula back to rest position
Rhomboid major	T2 - T5	Scapula	Retracts scapula. Rotates scapula to rest position
Levator scapula	C1 - C4	Scapula	Raises medial border of scapula
Trapezius	Skull, C1 - T12	Scapula	Laterally rotates, elevates and retracts scapula
Latissimus dorsi	T7 - T12, sacrum, pelvic bone	Humerus	Extends, adducts and medially rotates arm
Sub scapularis	scapula	humerus	Medially rotates arm and stabilizes shoulder joint

FARB 모델 검증 및 해석 결과

1. 동작범위(Range of Motion) 해석

FARB 모델 관절부의 거동 적합성 및 동작 범위를 확인하기 위해 각 관절부에 ROM test를 실시하였다. 각 신체 부위에 외력을 가한 후 그로 인한 shoulder, hip, knee, 그리고 ankle joint의 굴곡/신전, 내전/외전, 그리고 회전각 등을 계산하였으며 그 동작 범위가 실제 인체의 동작 범위와 적합 한지를 확인 하였다. 이때 부여한 외력(follower force)은 작용점의 이동에 따라 그 하중의 방향벡터가 상대적으로 일정하게 유지되도록 하였다.

그림 3은 ROM 해석 결과 중 hip joint의 내전/외전의 해석 결과를 보여주고 있다.

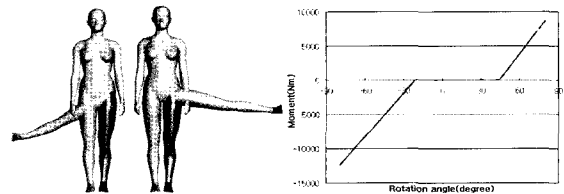


그림 3. 고관절의 내/외전 동작한계
Fig. 3. Adduction/abduction ROM of hip joint

2. 경부의 신전 및 굴곡 운동

FARB 모델의 경부 동작 거동을 확인하기 위하여 후두부 과상돌기(occipital condyle) 부위에서 발생하는 모멘트-회전각 관계 특성을 HYBRID III 5th percentile 여성 더미의 생체 적합성 판단 기준¹¹⁾과 비교하였다. FARB 흉부에 전방 그리고 후방 충돌 하중을 가한 후 머리 중심점에서 발생하는 회전각의 이력을 계산하였다. 머리 중심점의 회전각은 후두부 과상돌기에서 발생하는 회전 모멘트와 신전과 굴곡 거동에서 각기 다른 비선형 관계를 보이며 인체 거동의 상한 및 하한 한계 곡선 안에 위치하고 있음을 그림 4에서 볼 수 있다.

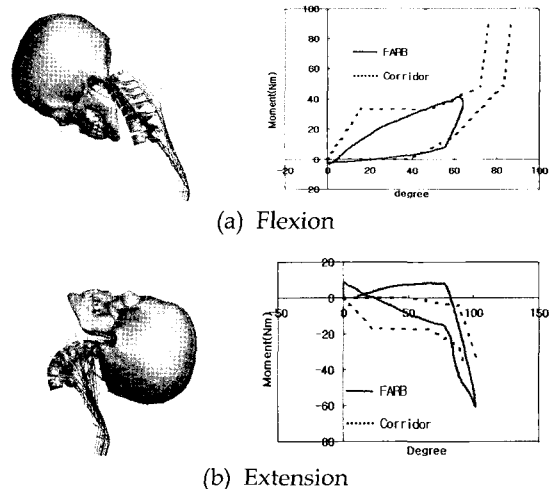


그림 4. FARB 굴곡/신전 해석
Fig. 4. FARB flexion/extension simulation

3. 정면 충돌 Sled 해석

충돌하중 하에서 FARB 모델의 전체적인 거동을 분석하기 위하여 sled 해석을 수행하였다. Alem¹²⁾등이 수행했던 충돌 더미 및 사체를 이용한 정면충돌 sled 실험으로부터 가속도 파형을 인용하였다. Sled 해석에는 일반적으로 사용되는 1차원 바 요소로 모델링 된 3점 벨트와 강제 시트가 첨부 되었으며, FARB 모델과 강제 시트간의 접촉 해석은 승객-시트 접촉 시에 보이는 보편적인 하중-변형량 곡선이 사용되었으며 따라서 승객 둔부 및 후배 부위와 저밀도 폼층 사이에서 발생하는 접촉 압력 분포를 보다 실제적으로 구현하였다. 골격과 9개로 구성된 어깨근육이 추가된 FARB 모델을 이용하여 해석을 수행하였다.

5th percentile 여성에 대한 sled 실험 데이터를 확보하지 못하여 보다 정량적인 검증을 수행하지는 못하였으나 해석 결과 FARB 모델의 거동이 전반적으로 자연스러움과 모델링 된 근육의 힘의 전달이 잘 이루어짐을 확인할 수 있었다. 그림 5는 sled 해석 시 FARB 모델의 거동과 뒷면에서 본 어깨 근육의 passive force의 변화를 보여 주고 있다.

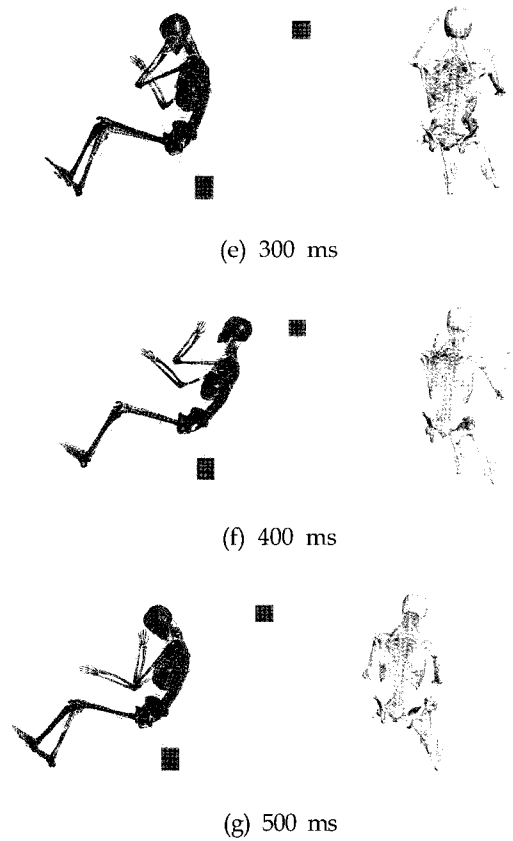
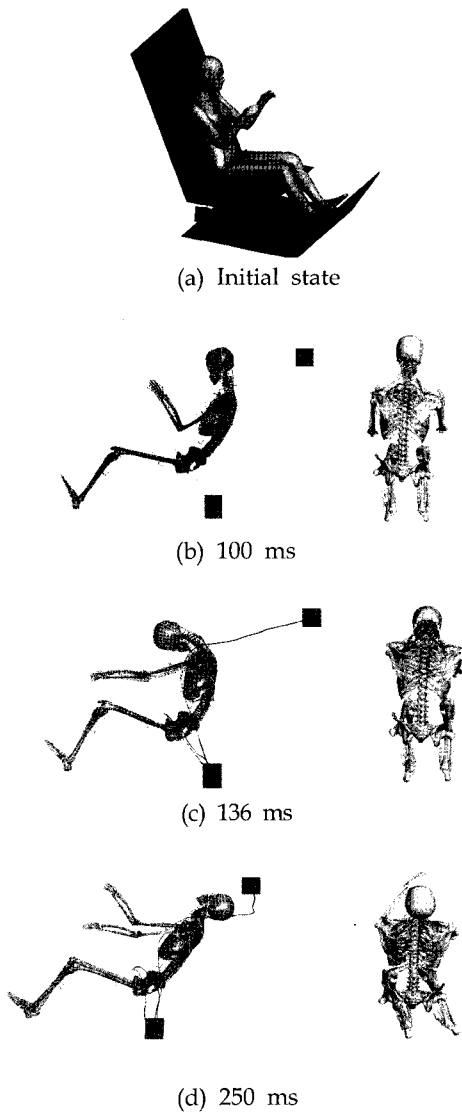


그림 5. 썰매 해석
Fig. 5. Sled simulation

결론

본 연구를 통하여 한국 표준 5th percentile 여성의 신체를 표현하는 유한요소 모델이 개발되었으며 이중 승객의 전체적인 거동을 평가하기 위한 다물체 동력학적 모델인 FARB (Female Articulated Rigid Body)가 완성되었다.

FARB 모델은 Sled 등의 다양한 해석을 통해 그 모델링과 거동의 생체 충실도가 검증되었다. 그러나 5th percentile 여성의 실험 데이터가 충분치 못한 관계로 Sled 같은 보다 실제적인 응용 해석은 주로 정성적인 수준에 머물러 있는 실정이다. 향후 더 많은 실험 결과를 확보하여 보다 정량적인 검증을 수행할 예정이며 FARB 안에 삽입된 신체 각 부위 별 상세 모델의 개발과 검증은 본 논문의 후편인 Part II에서 보고 되어 있다.

참고 문헌

1. 이인혁, 윤석배, 이진희, 최형연, "자동차 충돌안전도 해석용 유한요소 인체 모델 개발 : Part I - 50% 성인 남성 모델", 추계 자동차공학회, 2002
2. C. Rudolf and M. Beaugonin, et al, "OOP simulation

- with a 5th percentile deformable Human Model", EUROPAM, 2002
3. 한국 표준 과학 연구원 "국민 표준 체위 조사 보고서", 국립 기술 품질원, 1997
 4. H. Cheng, L. A. Obergefell and A. L. Rizer "Generator of Body Data(GEBOD) Manual", Amstrong Laboratory Report No. AL/CF-TR-1994-0051, WPAFB Ohio, March 1994
 5. D. H. Robbin, "Anthropometry of Motor Vehicle Occupants", Vol 3, small female, 1983
 6. <http://www.viewpoint.com/vp/index.jsp>
 7. "Pam-crash SOLVER NOTES manual version 2002", ESI software
 8. R. Putz and R. Pabst, "Sobotta- Atlas of Human Anatomy", 13th edition, Lippincott Williams & Wilkins
 9. V. H. Frankel, "Basic Biomechanics of the Musculoskeletal System", Lippincott Williams & Wilkins, 2001
 10. 이상업, "충돌안전도 해석을 위한 인체 상지의 유한요소 모델링", 홍익대학교 석사학위 논문, 2000
 11. K. Yang and J. Le, "Finite Element Modeling of Hybrid III Head-Neck Complex", SAE paper No. 922526, 1992
 12. N. M. Alem, B. M. Bowman, J. W. Melvin and B. M. Benson, "Whole-body human surrogate response to three-point harness restraint" SAE paper No. 780895, 1978
 13. 나상진, 최형연, 이진희, "충돌 안전도 해석을 위한 5th percentile 성인 여성 유한요소 모델 개발 - Part II 각 부위 상세 모델 개발" 의용생체공학회지 심사 중, 2004