

< 논문 >

## 사격시험 및 인체구조해석

이세훈\* · 이영신† · 최영진\* · 최의중\*\* · 체재욱\*\*  
(2007년 3월 14일 접수, 2007년 6월 9일 심사완료)

### Firing Experiments and Structural Analysis of Human Body

Se-Hoon Lee, Young-Shin Lee, Young-Jin Choi,  
Eui-Jung Choi and Je-Wook Chae

**Key Words:** Human Body Impact(인체충격), Muscle-Skeleton Model(근-골격모델), Structural Analysis(구조해석), Firing Impact(사격충격)

#### Abstract

On the human-rifle system, the human body is affected by the firing impact. The firing impact will reduce the firing accuracy and change the initial shooting posture. Therefore the study of biomechanical characteristics using human-rifle modeling and numerical investigation is needed. The musculoskeletal model is developed by finite element method using beam and spar elements. In this study structural analysis has been performed in order to investigate the human body impact by firing of 5.56mm small caliber machine gun. The firing experiments with the standing shooting posture were performed to verify analytical results. The result of this study shows analytical displacements of the human-rifle system and experimental displacements of the real firing. As the results, the analytical displacement and stress of human body are presented.

#### 1. 서론

21세기 디지털 전장환경에서 병사는 하나의 전투시스템이며 동시에 실시간 정보를 제공하는 정보센서의 역할을 수행할 것이다. 선진국에서는 미래의 전장환경에서 전투력을 극대화할 수 있는 미래형 병사체계를 개발하기 위한 계획이 진행 중이다. 병사체계 중 개인 및 공용화기로 분류되는 소구경 화기를 사용하는 전투상황에서 전투효율을 극대화시키기 위한 다양한 연구들이 수행되

고 있다. 소구경화기는 인체와 접촉되어 운영되며 사격시 화기 충격력에 따라 최초 조준된 자세 또는 계획된 운동형태를 교란시켜 명중률을 저하시킴으로써 결과적으로 개인전투력 저하를 초래한다는 것이 극복해야 할 하나의 과제이다. 즉 화기 자체의 개선과 발전에 국한시키지 않고 인체를 고려한 전체적인 시스템을 병사와 화기의 체계로 해석하고 설계를 최적화하는 연구가 요구된다. 이러한 측면에서 사수 개인의 생체역학적 특성과 화기 자체의 물리학적 특징이 고려된 인체-화기 시스템(human-rifle system)에 대한 연구의 필요성이 증대된다.

인체는 골격계통, 관절계통, 근육계통, 순환기계통, 소화기계통 등 다양한 형태와 기능을 가진 기관(organ)으로 구성되어 있으며 운동시 동작 자유도가 매우 높다. 따라서 인체를 정확하게 모델링하고 시뮬레이션하기 위해서는 인체를 골격구조 뿐 만 아니라 근육을 고려한 모델로 완성해야

† 책임저자, 회원, 충남대학교 기계설계공학과,  
BK21 메카트로닉스 사업단장  
E-mail : leeys@cnu.ac.kr

TEL : (042)821-6644 FAX : (042)821-8894

\* 충남대학교 대학원 기계설계공학과,  
BK21 메카트로닉스 사업단

\*\* 국방과학연구소

한다. 그러나 유한요소해석에서 인체의 모든 골격과 근육을 포함하는 모델을 구현하는데 많은 문제점이 있다. 그러므로 가능한 인체의 운동을 정확하게 표현할 수 있는 단순한 모델로 구성해야 한다.

본 논문과 관련된 인체 모델링 및 해석, 사격 충격특성해석에 관한 연구 동향은 다음과 같다.

신체부위별 인체 모델링 및 해석 연구동향은 다음과 같다. Meyer<sup>(1)</sup> 등은 두개골과 7개의 경추, 1번 흉추 및 각 골격들을 연결하는 인대로 구성되는 유한요소 모델을 개발하였고, 근육에 작용하는 충격하중에 대한 유한요소해석을 수행하였으며 Choi<sup>(2)</sup> 등은 인체의 두부 움직임을 근-골격 운동으로 정의하고 역학적으로 연구하였다. Tropiano<sup>(3)</sup> 등은 유한요소법을 이용하여 인체를 모델링하고 충격시 목뼈의 상해에 대한 결과를 해석하였다. 전창수<sup>(4)</sup> 등은 유한요소해석을 통한 보행시 발바닥의 응력분포 해석 및 깔창 형상에 대한 해석을 수행하여 평평한 깔창과 전접촉 깔창을 비교하고 깔창의 탄성계수 변화에 따른 발의 응력분포에 미치는 영향을 비교 분석하였다.

또한, 인체 전신체 분석에 관련된 연구 동향을 살펴보면, 미국 Iowa 대학의 Virtual Soldier Research 연구실에서는 미육군의 지원을 받아 'SANTOS' 라는 가상 인체모델을 현재 개발하고 있으며<sup>(5)</sup> 국내에서도 정보통신부 지식정보자원관리 사업으로 'Digital Korean' 프로젝트<sup>(6)</sup>를 수행하여 인체정보 시스템을 구축하여 골격/피부 형상 모델, 미세골격모델, 골격물성정보, 하중정보 등 한국인의 인체 정보를 제시하였다.

사격시 인체 거동특성 분석에 관련된 연구동향을 살펴보면, 김효준<sup>(7)</sup> 등은 폭발 가스압으로 인해 발생하는 에너지를 동력으로 사용하는 발사기와 이를 지지하는 인체를 대상으로 인체에 전달되는 충격력 및 완충특성에 대한 연구를 수행하였다. 이영신<sup>(8,9)</sup> 등은 사격실험을 통한 충격력-시간 이력을 적용한 인체-화기 시스템에서 주요 사격자세에 대한 충격특성을 동력학적 관점에서 연구하였다. 또한 인체-화기 시스템을 빔 요소를 이용한 골격구조로 구성하고 사격충격에 대한 유한요소해석을 수행하여 충격전달경로 및 인체 주요 부위의 응력을 제시하였다.<sup>(10)</sup>

생체역학과 관련된 다양한 분야의 연구가 수행되었으나 대부분의 경우 인체의 부분적인 부위에



Fig. 1 The scene of firing experiment

대한 유한요소법이나 수학적 접근 방법에 대한 연구가 주를 이루고 있다. 그러나 신체 부분적인 부위를 해석하는 방법은 인체를 하나의 분석대상으로 해석하는데 부적절하며 인체 전신에 대한 모델 개발과 해석에 관한 연구는 미비한 실정이다. 또한 인체 전신에 대한 연구 또한 인체 특성을 완벽히 표현하는데 많은 제약이 따른다. 따라서 본 연구에서는 인체특성을 구현할 수 있도록 근-골격 모델을 적용한 인체-화기 시스템에 대한 해석 모델을 개발하고 이에 대하여 사격 충격에 의한 인체거동의 특성에 대해 연구하고자 한다.

## 2. 사격 충격에 대한 인체거동 실험

### 2.1 시험개요 및 방법

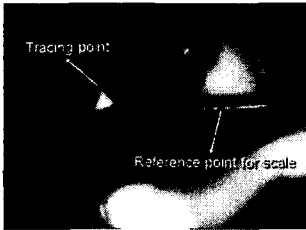
사격충격에 의한 인체의 거동을 측정하기 위하여 5.56 mm 소구경화기 발사충격으로 인한 인체의 거동을 측정하는 실험을 실시하였다.

실험은 (주)대우정밀 야의 사격장에서 실시되었으며 Fig. 1에 실제 사격시험 장면을 나타내었다. 서서췌 자세에서 K-2 소총을 단발 격발하였을 경우 인체의 거동을 측정하기 위하여 고속카메라를 이용하여 초당 500 프레임으로 촬영하였다. 촬영된 영상의 해상도는 512 × 512 pixel로 설정하였으며 원활한 측정을 위하여 조명을 설치하고 피험자의 어깨부위에 반사마커를 부착하였다.

사격시험에 참가한 피시험자는 Table 1과 같다. 총 3명의 피험자가 사격시험에 참가하였으며 피시험자의 신체특성에 따른 인체거동의 변화를 측정하기 위하여 각각 다른 신체 특성을 지닌 피시험자를 선정하였다. 또한 2005년 기술표준원에서 발표된 자료에 기초하여 20대 남성의 신체특성과 비교하였다.

**Table 1** Anthropometrical information of subjects

	Height (cm)	Weight (kg)
Subject 1	183 (95 %tile)	67 (50 %tile)
Subject 2	173 (50 %tile)	63 (25 %tile)
Subject 3	169 (25 %tile)	75 (75 %tile)



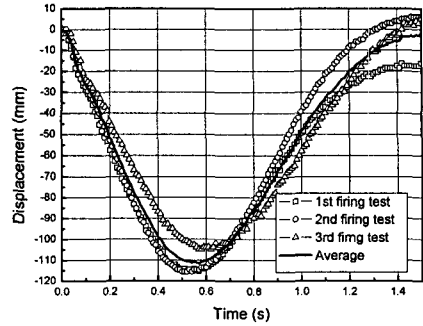
**Fig. 2** The tracing point and the reference point

인체의 거동을 측정하기 위하여 피험자의 오른쪽 어깨 부위에 측정점을 설정하였다. 또한 측정점의 변위를 측정하기 위하여 피험자의 뒷부분에 50 mm × 50 mm의 기준판을 설치하였으나 측정점과의 거리차로 인하여 정확한 변위를 산출할 수 없으므로 측정점과 같은 거리상에 있는 화기의 개머리판 부위에 Fig. 2와 같이 10 mm와 50 mm의 기준점을 설정하였다.

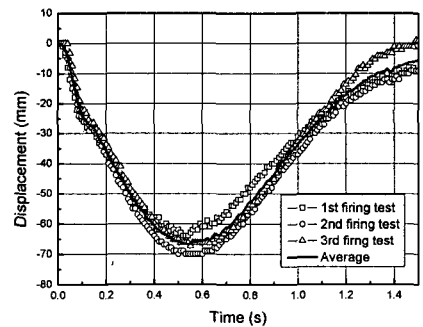
본시험 전 데이터 확인 및 실험의 재현성을 높이기 위하여 단발 사격 10회의 예비사격을 실시하였으며 본사격은 각각의 피시험자에 대하여 단발 사격 5회씩 실시하였다. 화기의 격발은 영상에서 개머리판의 초기 변위로 확인하였다. 사격 시험에서 격발 후 2초까지의 인체의 거동을 촬영하였으며 각각의 시험당 1000 프레임의 영상데이터를 획득하였다.

2.2 데이터 처리

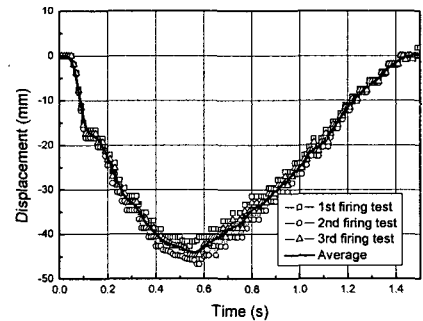
데이터 처리는 Phantom Camera Control Ver.7.0에서 실시되었으며 0.01초 간격으로 측정점의 변위를 분석하였다. 각각의 피시험자의 고속카메라 촬영데이터를 확인한 결과 K-2화기의 경우 단발 사격시 1.5 초 이내에 피시험자의 사격자세가 초기의 사격자세로 돌아오는 것을 확인하였고 이를 근거로 격발 후 1.5 초까지의 촬영데이터를 분석하였다. 각각의 피시험자의 고속카메라 촬영테



(a) Subject 1



(b) Subject 2



(c) Subject 3

**Fig. 3** Displacement of right shoulder in anterior-posterior direction

이터를 처리하였으며 측정점의 앞뒤방향의 변위 데이터를 획득하였다. 이때 재현성이 떨어지는 두 개의 실험데이터를 삭제하고 3회의 실험결과를 정리하였다.

2.3 실험결과

피험자의 오른쪽 어깨의 앞-뒤 방향(총구기준) 변위를 Fig. 3에 나타내었다. 그래프에서는 총 3

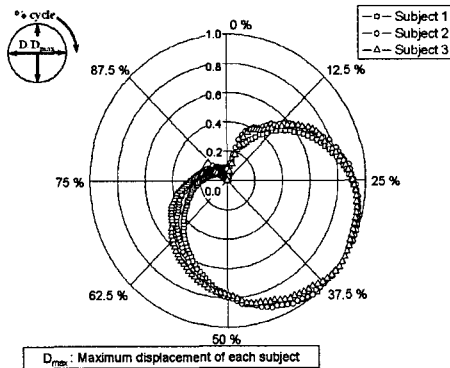


Fig. 4 Normalized displacement of right shoulder in anterior-posterior direction under K-2 single shoot

번의 사격시험결과를 나타내었으며 각각의 변위의 평균값을 함께 나타내었다. 피험자의 우측 어깨의 변위 측정 결과 세 번의 시험결과가 변위의 크기도 비슷한 값을 나타내었으며 초기 사격자세로 돌아오는 시간이력 즉, 최대변위가 발생하고 다시 회복되는 시간도 거의 유사함을 알 수 있었다. Fig. 3(a)에서는 첫 번째 피시험자의 거동을 나타내었다. 우측 어깨의 최대변위는 격발 후 0.57 초후에 -111.5 mm였다. Fig. 3(b)에서는 두 번째 피시험자의 거동을 나타내었으며 우측 어깨의 최대변위는 격발후 0.55 초 후에 -66.8 mm였다. Fig. 3(c)에는 세 번째 피시험자의 거동을 나타내었으며 우측 어깨의 최대변위는 격발 후 0.55초 후에 -44.2 mm를 나타내었다. 피시험자의 신체특성에 따라 인체의 변위는 다른 특성을 나타낸다. 첫 번째 피시험자의 변위가 가장 큰 값을 나타내었으며 두 번째 피시험자의 인체변위는 첫 번째 피시험자의 인체변위에 60 % 수준이었고 세 번째 피시험자의 인체변위는 첫 번째 피시험자의 40 % 수준으로 나타났다.

Fig. 4에서는 피시험자의 신체적 특징에 따른 인체 거동의 특성 배제하고 K-2 사격 충격 특성에 의한 인체의 변위를 분석하기 위하여 세명의 피시험자의 변위의 평균값을 각각의 변위의 최대값으로 나누어 정규화를 실시하고 그 값을 원점 좌표계에 도식한다. 원점좌표계의 반경반향은 변위의 정도를 나타내고 원주방향은 격발 후 1.5초까지를 1 주기의 백분율로 나타내었다. Fig. 5와 같이 정규화를 실시한 결과 피시험자의 변위



Fig. 5 FE analysis model of human skeleton and joint

이력은 3명의 피시험자에게서 비슷한 양상을 나타냈다. 피시험자들은 1 주기 중 0 ~ 37.5 %까지 사격충격으로 인하여 몸이 뒤로 밀리는 현상을 보였으며 37.5 % 부근에서 최대변위를 나타내었고 37.5 % 이후로는 초기의 사격자세로 복귀하는 시간에 따라 유사한 거동을 보였다.

### 3. 유한요소 해석모델 개발

#### 3.1 근골격 해석 모델의 개발

인체의 골격과 관절은 인체의 운동을 결정짓는 중요한 역할을 수행한다. 그러나 인체에는 200여 개의 크고 작은 뼈와 각각의 뼈들을 일정한 방식으로 연결하는 관절, 인대 및 연골로 구성되어 전체적인 골격을 형성하고 신체를 지지한다. 또한 골격에는 골격근이 붙어있어 그 수축에 의한 뼈의 위치 또는 상호관계가 변화하여 운동이 일어나게 된다. 유한요소해석 과정에서 200여개의 뼈와 다양한 관절로 구성되는 골격구조를 생성하는 것은 불가능하므로 단순화한 모델을 만들어야 한다.

#### 3.2 골격 및 관절 구조

Fig. 5는 인체 전신의 골격구조를 나타내고 있다. 인체의 골격구조는 크게 몸통골격(axial skeleton)과 사지골격(appendicular skeleton)으로 분류한다. 해석 모델에는 총 19개의 체절과 18개의 관절로 단순화하였다.

인체의 골격에는 상용코드의 BEAM4 요소를 사용하였다. BEAM4요소는 3차원 탄성 범요소로 각 절점에 6개의 자유도를 가진다. 각각의 체절

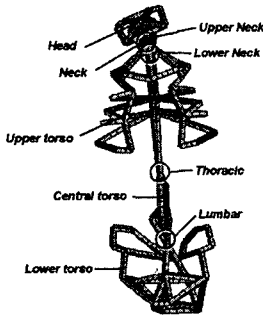


Fig. 6 FE analysis model of axial skeleton

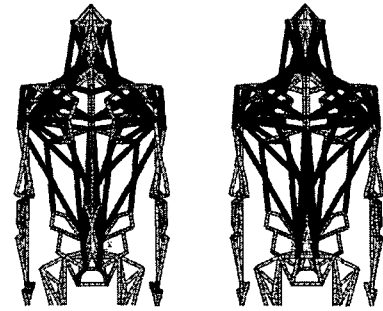
은 근육이 부착되어 인체의 운동을 표현할 수 있도록 고려하였다. 인체골격의 탄성계수는 20 GPa이며 밀도가  $2000 \text{ kg/m}^3$ 이며 푸아송비는 0.3으로 일정하게 적용하였다. 일반적으로 치밀골의 탄성계수는 10~20 GPa으로<sup>(11)</sup> 인체가 사격충격을 받을 경우 탄성범위 안에서 인체의 거동이 발생한다는 가정하에 일정한 물성치를 적용하였다.

인체모델의 관절에는 COMBIN7 조인트요소를 적용하였다. COMBIN7 요소는 3차원 회전조인트로 2개 혹은 그 이상의 파트를 연결할 수 있다. 이 요소의 특징은 큰 회전에 대한 해석이 가능하고 정해진 각도 범위내에서 운동을 정의할 수 있다.

인체 골격해석 모델 중 대표적으로 몸통골격을 Fig. 6에 도시하였다. 몸통골격에는 머리, 목, 위 몸통, 중앙 몸통 및 아래 몸통 골격 등 총 5개의 체절과 요추부관절, 흉추부관절, 아래 목관절 및 위 목관절 등 총 4개의 관절이 존재한다. 유한요소해석모델에서 머리부위 골격은 두개골과 안면골을 포함하고, 목부위 골격은 경추골(cervical vertebra) 1~7번을 간략화해서 나타내었다. 위 몸통 골격에는 흉추골(thoracic vertebra) 1~12번과 늑골 및 흉골을 포함하며 중앙 몸통골격은 요추골 1~5번을 단순화하여 하나의 체간으로 모델링하였다. 또한 아래 몸통 골격은 천골(sacrum) 및 골반(pelvis)을 포함하는 모델을 형성화하였다.

### 3.3 근육구조

유한요소 해석모델에서 근육은 LINK10 요소를 사용하였다. LINK10 요소는 3차원 끈(spar)요소로 인장하중이나 압축하중을 선택적으로 지지하는 요소이다. 해석모델에서 근육은 단지 인장하중 만을 지지할 수 있는 요소를 적용하였다. 인장하중 만을 지지하도록 설정하였을 경우 요소



(a) Anterior

(b) Posterior

Fig. 7 Skeletal muscle of axial skeleton part

에 압축하중이 작용할 때는 강성이 제거되어 압축하중을 지지할 수 없도록 구성하였으며 이 요소에서의 응력값은 요소 전체에 대하여 균일한 값을 가지게 된다. LINK10 요소는 탄성계수, 요소의 단면적, 요소의 길이 및 초기 변형률로 정의된다. 해석모델에서 근육의 물성치에는 탄성계수가 40 MPa이며 초기 변형률은 0로 설정하였다. 요소의 단면적과 요소의 길이는 고려된 근육에 따라 각각 다른 값을 설정하였다.

사격충격해석을 위한 인체 모델을 확립하기 위해서 ADAMS/ LifeMOD의 근육조직을 기본으로 사격시 인체의 거동을 지배하는 주요 수의근을 결정하고 근육의 부착위치를 결정하였다. 해석모델에서 몸통골격에 15개, 상지골격에 11개 및 하지골격에 13개의 근육을 선정하였다.

각각의 근육은 다양한 모양과 다양한 힘살을 가지고 있어서 하나의 근육을 하나의 요소로 표현하는 것이 불가능할 뿐만 아니라 세모근이나 넓은 등근을 하나의 요소로 표현하였을 경우에는 인체의 운동을 효과적으로 표현할 수 없다. 그러므로 해석모델의 근육에서 넓게 퍼져 분포하고 있는 근육과 힘살의 수가 많은 근육은 하나의 근육을 다수의 근육요소로 표현하였다.

Table 2 ~ 4는 본 연구에서 고려한 주요 근육 목록으로 부착 분절과 주요 기능을 나타내었다. Table 2는 인체 길이방향 주요 근육 목록이며, Table 3에 상지 근육, Table 4에는 하지 근육을 목록화 하였다.

Fig. 7에 몸통 골격 부위에 위치하는 근육의 형상을 나타내었고 대표적으로 몸통 골격에는 허리를 굽히고 펴는 근육인 배곧은근과 척추세움근이 있다. 몸통 골격은 15개의 근육으로 모델링하였으며 총 30개의 근육으로 구성하였다.

Table 2 Muscle list with attached segment and main function of axial skeleton part

Muscle name	Muscle ID	Attach Proximal	Attach Distal	Main Function
Rectus abdominis	RecAbd	upper torso	lower torso	waist flexion
Erector spinae	ErecSpin1	upper torso	lower torso	waist extension
	ErecSpin2	upper torso	central torso	
	ErecSpin3	central torso	lower torso	
Latissimus dorsi	Lat1	upper torso	upper arm	humerus adduction
	Lat2	upper arm	central torso	
	Lat3	upper arm	lower torso	
Obliquus extremus abdom	Obliq	upper torso	lower torso	waist flexion
Trapezius	Trap1	neck	scapula	scapula rotation, elevation, and retraction
	Trap2	upper torso	scapula	
	Trap3	scapula	central torso	
	Trap4	scapula	central torso	
Pectoralis major	Pmaj1	upper torso	upper arm	humerus rotation
	Pmaj2	upper torso	upper arm	
	Pmaj3	upper torso	upper arm	
	Pmaj4	scapula	upper arm	
	Pmaj5	scapula	upper arm	
Pectoralis minor	Pmin1	scapula	upper torso	scapula abduction, downward rotation and depression
	Pmin2	scapula	upper torso	
	Pmin3	scapula	upper torso	
Scalenus posterior	ScalPos	neck	upper torso	neck flexion and rotation
Splenius capitis	SplCap	head	upper torso	head and neck extension and hyperextension
Scalenus medius	ScalMed	neck	upper torso	neck flexion
Scalenus anterior	ScalAnt	neck	upper torso	neck flexion
Subclavius	Subcl	upper torso	scapula	scapula depression
Splenius cervicis	SplCerv	head	neck	head and neck extension and hyperextension
Sternocleidomastoideus	Sterno	head	scapula	head rotation
Deltoideus	Delt1	scapula	upper arm	humerus abduction and rotation
	Delt2	scapula	upper arm	
	Delt3	scapula	upper arm	

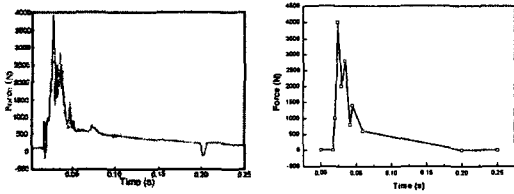
Table 3 Muscle list with attached segment and main function of upper limb skeleton part

Muscle name	Muscle ID	Attach Proximal	Attach Distal	Main Function
Biceps Brachii	Bic1	scapula	lower arm	flexes and supinates the forearm at the elbow
	Bic2	scapula	lower arm	
Triceps Brachii	Tric1	scapula	lower arm	extends forearm at the elbow
	Tric2	upper arm	lower arm	
	Tric3	upper arm	lower arm	
Brachioradialis	Brac1	upper arm	lower arm	elbow flexion, semipronator and semisupinator of the forearm
Pronator teres	Pron1	upper arm	lower arm	pronation of forearm and flexion at the elbow
Flexor carpi ulnaris	Fcarp2	upper arm	hand	flexes and adducts the hand at the wrist
Flexor carpi radialis	Fcarp1	upper arm	hand	flexes and abducts the hand at the wrist
Extensor carpi radialis longus	Ecarp1	upper arm	hand	extends and abducts the hand at the wrist
Flexor digitorum superficialis	Fdig1	lower arm	hand	hand at the wrist, flexes the forearm at the elbow
Flexor pollicis longus	Fpol1	upper arm	hand	flexes the interphalangeal joint of the thumb
Abductor pollicis longus	Abdp1	lower arm	hand	abducts and assists in flexion of the thumb carpmetacarpal
Extensor digiti minimi	Edig1	lower arm	hand	extends the middle and distal phalanges

Table 4 Muscle list with attached segment and main function of lower limb skeleton part

Muscle name	Muscle ID	Attach Proximal	Attach Distal	Main Function
Tibialis anterior	TibAnt	lower leg	foot	dorsiflexes and inverts foot at the ankle
Gastrocnemius	Gast1	upper leg	foot	plantar flexion of the foot; flexes leg at the knee
	Gast2	upper leg	foot	
Soleus	Soleus	lower leg	foot	plantar flexion of the foot at the ankle
Semitendinosus	SemTen	lower torso	lower leg	flexes and medially rotates the calf at the knee; extends, adducts and medially rotates the thigh at the hip
Biceps femoris	BicFem1	upper leg	lower leg	flexion and lateral rotation of the leg at the knee, extends, adducts and laterally rotates the thigh at the hip
	BicFem2	lower torso	lower leg	
Vastus lateralis	VasLat	upper leg	lower leg	extends the leg at the knee and draws the patella lateral
Rectus femoris	RecFem	lower torso	lower leg	flexes the pelvis on the femur
Vastus medialis	VasMed	upper leg	lower leg	extends the leg at the knee and draws the patella medially
Gluteus maximus	GlutMax1	upper torso	upper leg	extends thigh at the hip, assists in laterally rotating the thigh
	GlutMax2	upper torso	upper leg	
Adductor magnus	AddMag	lower torso	upper leg	adduction of the thigh at the hip
Psoas major	PsoasMaj	central torso	upper leg	flexion of the thigh at the hip; minimal action in lateral rotation and abduction of the thigh
Iliacus	Iliac	lower torso	upper leg	flexes thigh at the hip, minimal activity on lateral rotation of the thigh
Gluteus medius	GlutMed1	lower torso	upper leg	abducts femur at the hip and rotates it medially
	GlutMed2	lower torso	upper leg	





(a) Experimental impulse (b) Modified impulse

Fig. 8 Experimental and modified impulse history on the rifle at single shoot

### 3.4 해석조건

인체-화기 시스템은 인체와 화기로 구성되며 인체는 수동적인 운동기관인 뼈 및 관절과 능동적인 운동기관인 근육, 신체 대사를 조절하는 내장기관, 그리고 중추기능을 담당하는 신경기관 등으로 구성되어 있다. 인체 시스템의 거동은 뼈와 근육에 의해 주로 결정되며 내장기관과 신경기관 등은 시스템의 거동에 많은 영향을 주지 않는다. 그러므로 본 연구에서는 인체 시스템의 모델을 뼈, 관절, 근육으로 구성하였다.

또한 인체-화기 시스템의 모델은 생체역학의 복잡성 때문에 해석시 호흡으로 인한 인체의 거동과 지면과 사수 신체의 상호관계는 완전고정으로 고려하였다.

인체-화기 유한요소 해석에서 경계조건은 다음 같이 설정하였다. 서서썩 자세에서는 양 발을 지면에 완전고정하여 인체 모델을 지지하였다. 또한 화기와 인체사이의 견착부는 조인트 요소를 사용하여 연결하였다.

하중조건은 K-2 화기를 화기시험용 지그에 장착하여 개머리판에 충격센서를 장착하고 단발 사격시의 충격 이력을 단순화하여 적용하였다. 이때 하중조건은 Fig. 8과 같다. Fig. 8(a)는 실험에 의한 충격이력이며 Fig. 8(b)는 유한요소 해석에 적용된 하중이력이다. K-2 화기를 단발 사격하였을 때의 최대충격력은 0.03 초일 때 4000 N이다.

## 4. 유한요소 해석결과

### 4.1 신체조건에 따른 유한요소 해석 결과

서서썩 자세에서 인체-화기 시스템의 좌표계는 Fig. 9와 같다. 직각좌표계의 원점은 유한요소 해

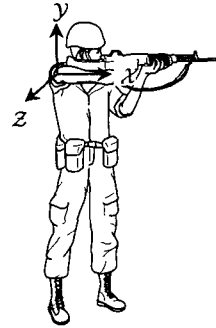


Fig. 9 Coordinate setting of standing shooting posture

석결과 검증을 위한 사격시험에서의 인체거동 측정위치인 사수의 우측 어깨와 일치시켰다. 인체-화기 시스템에서 사수의 우측 어깨부위는 화기와 견착부와 근접한 위치이며 사격 충격으로 인한 인체의 거동을 가장 뚜렷하게 나타내는 부위이다.

좌표계에서 X축은 사격간 총구의 방향으로 설정하였으며 탄두의 진행방향이 양의 값을 가지도록 설정하였다. 즉 사격충격으로 인한 인체의 X축 거동은 대부분 음의 값을 가진다. 좌표계에서 Y축은 사수 신체의 위-아래 (superior-inferior) 방향으로 위 방향이 양의 값을 가지도록 설정하였다. 마지막으로 Z축은 총구 방향의 좌-우 방향으로 화기를 기준으로 오른쪽 방향이 양의 값을 가지도록 설정하였다.

사격 충격으로 인한 인체거동 측정시험과 마찬가지로 사수의 신장과 체중 등의 신체조건에 따른 인체거동에 대한 연구를 수행하기 위하여 Table 1과 같은 모델을 대상으로 해석을 수행하였다. 본 연구에서 인체 실험과 해석의 기본이 되는 두 번째 피시험자와 다른 피시험자의 비교는 인체충실지수 R을 적용하였다. 인체충실지수는 대상의 신장을 한 번으로 하는 입방체라 하고 입방체에 체중이 어느 정도 공간을 차지하는가에 대한 지표로 다음 식으로 표현된다.

$$R = \frac{\text{Weight}}{\text{Height}^3} \times 10^5 \quad (1)$$

여기서 R의 단위는  $\text{kg}/\text{cm}^3$  이다.

일반적으로 1.2 미만은 수척체형, 1.2~1.5는 정상체형, 1.5 초과는 비만체형으로 구분한다. 첫 번째 피시험자는 두 번째 피시험자보다 신장과

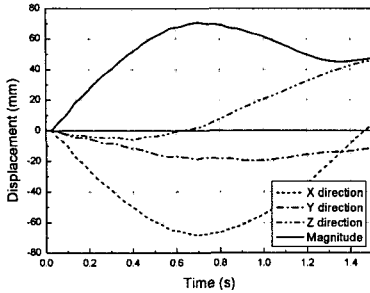
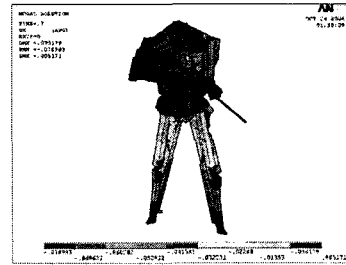


Fig. 10 Analytical displacement of right shoulder of subject 2

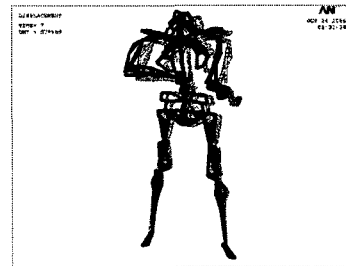
체중이 더 크지만 인체충실지수를 통하여 비교하였을 때 더 마른 체형이라고 할 수 있다. 또한 세 번째 피험자는 기본 모델보다 신장과 체중이 모두 작다. 각각의 피험자의 인체충실지수는 각각 1.09, 1.22 및 1.55로 첫 번째 피시험자는 수척한 체형이며 두 번째 피시험자는 정상 체형이고 세 번째 피시험자는 비만 체형으로 구분할 수 있다.

두 번째 피시험자의 해석모델의 경우 근-골격 유한요소해석모델의 골격 및 근육의 변수를 정의하는 기본 모델로 연령이 20대인 남성중 신장 174 cm, 체중 63 kg의 모델로 인체치수 조사 자료와 비교하면 신장 50 %tile, 체중 25 %tile로 20대 남성의 평균신장과 평균체중에 가장 근접한 해석 모델이다. Fig. 10은 사수의 우측어깨 부위의 변위해석 결과를 나타낸 것이다. 총구방향의 최대변위는 격발 후 0.7 초에서 발생하였으며 인체의 변위는 -68.2 mm로 계산되었다. 인체는 사격 충격으로 인하여 0.7 초까지 뒤로 밀리는 현상을 보였고 이후 초기 사격자세로 회복되는 결과를 확인할 수 있다. 또한 인체는 사격간 상하 방향을 기준으로 근소하게 아랫방향으로 처지는 것으로 계산되었으나 시간이 지남에 따라 초기 사격자세로 복귀하는 양상을 보였다. 그러나 사격간 좌우방향의 움직임은 Z방향으로 비교적 큰 거동을 보이고 있었으나 이는 실질적인 화기의 충격력에 의한 거동이 아니라 체질 및 근육 요소의 상대적인 운동에 의한 거동으로 사료된다. X, Y 및 Z 방향의 변위를 합성한 절대 변위를 검은 실선으로 표현하였다.

Fig. 11은 사격간 어깨부위가 최고변위를 기록한 시간인 격발 후 0.7초 후의 인체의 변위 분포와 변형 형상을 나타낸 것이다. Fig. 11(a)에 인체



(a) Displacement distribution



(b) Deformed shape

Fig. 11 Displacement distribution and deformed shape of human body with stand shooting posture

의 X방향에 대한 변위를 나타내었다. 가장 큰 변위를 나타내는 부위는 우측 어깨를 비롯한 우측 어깨 전체와 머리 상단 부위이다. Fig. 11(b)는 인체를 지지하는 골격구조의 변형 형상을 나타낸다. 화기와 근육 요소를 제외한 골격구조의 변형 형상으로 사격간 인체의 거동을 명확하게 확인할 수 있다. 인체는 초기 사격자세에서 탄두 진행 방향과 반대로 이동하였고 충격으로 인하여 상체 부위에 큰 변위가 발생한다. 골격구조에서 최대 변위는 -79.5 mm로 우측 팔꿈치에서 발생하였다.

해석결과 첫 번째 모델의 변위가 가장 큰 값을 나타내었으며 두 번째 모델의 인체변위는 첫 번째 모델의 인체변위에 80 % 수준이었으며 세 번째 모델의 인체변위는 첫 번째 모델의 70% 수준으로 계산되었다.

피시험자의 신체적 특징에 따른 거동특성을 배제하고 K-2 사격 충격 특성에 의한 인체의 변위를 분석하기 위하여 3명의 피시험자의 변위의 평균값을 각각의 변위의 최대값으로 나누어 정규화를 실시하였다. 정규화 결과를 Fig. 12에 나타냈었으며 원점좌표계의 반경방향은 변위의 정도를 나타내고 원부방향은 격발 후 1.5초 까지를 1주기의 백분율로 나타내었다. 정규화 결과 피시험

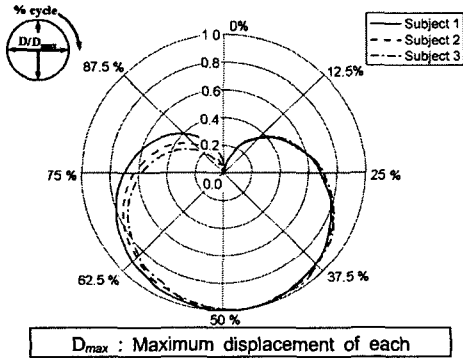


Fig. 12 Normalized displacement of right shoulder in anterior-posterior direction under K-2 single shoot (polar coordinates)

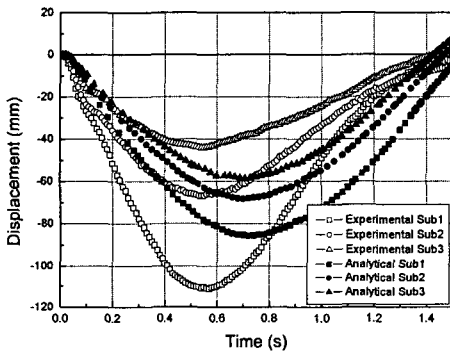


Fig. 13 Experimental and analytical displacement of right shoulder part in anterior-posterior direction

자의 변위 이력은 3명의 피시험자에서 비슷한 양상을 보였다. 피시험자는 1주기 중 0~45 % 까지 사격 충격으로 인하여 몸이 뒤로 밀리는 현상을 보였으며 45 % 부근에서 최대변위를 나타내었고 45 % 이후로는 초기의 사격자세로 복귀하는 거동을 보였다.

4.2 해석모델의 검증

다른 신체조건에 의한 서서좌 자세에서 격발간 우측어깨의 거동특성을 파악하고 해석결과를 검증하기 위하여 3명의 피시험자의 우측 어깨 변위 이력의 실험값과 해석값을 Fig. 13에 도시하였다.

신체 특성에 따라 어깨부의 변위는 실험값과 해석값에서 각각 다른 값을 나타냈다. 실험값

Table 5 Comparison of experimental results and analytical results

	Experimental results		Analytical result		Error (%)
	Time (s)	Displacement (mm)	Time (s)	Displacement (mm)	
Sub. 1	0.53	-111.5	0.73	-85.6	14
Sub. 2	0.53	-67.0	0.70	-68.2	2
Sub. 3	0.54	-44	0.70	-58.8	32

과 해석값 모두에서 신장이 작고 체중이 많아 나가는 사수일 때 충격으로 인한 인체의 변위가 작은 값을 나타냈다. 이것은 상대적으로 중량이 무거운 신체조건인 사수일수록 안정감 있게 사격이 가능하다는 것을 의미한다. 반대로 체중에 비하여 신장이 큰 사수일수록 변위가 커지면서 사격시 안정성이 떨어질 것이다.

그러나 인체의 거동의 이력이라는 측면에서는 사수의 신체특성이 큰 영향을 주지 않는다. 모든 피시험자의 변위이력은 유사한 시간에서 최대값을 나타내고 최대값을 나타낸 전후로 인체가 충격으로 인하여 뒤로 밀리고 다시 초기 사격자세로 복귀하는 양상은 모든 결과에서 동일하게 나타났다.

Table 5에 각각의 피시험자에 대한 오른쪽 어깨부위의 최대변위 발생시간과 변위를 나타내었다. 실험에의 최대변위 발생시간은 0.53~0.54 초이며 해석에서 최대 변위 발생시간은 0.70~0.73 초이다. 즉 최대변위 발생시간은 근-골격 탄성체 인체모델이 실제 인체에 비해 시간지연이 발생하였다.

기본모델인 두 번째 피험자에서 최대변위의 실험값과 해석값은 각각 -67 mm와 -68.2 mm로 해석결과가 실험값과 거의 일치하였다. 그러나 첫 번째 피험자의 최대변위는 각각 -111.5 mm와 -85.6 mm로 14 %의 오차를 보였으며 세 번째 피험자의 최대변위는 각각 -44 mm와 -58.8 mm로 약 30 %의 오차를 보였다. 이는 해석에서 모델생성 과정 중 기본모델을 생성하고 그 이외의 모델은 기본모델에서 해석적 변수를 조절하여 생성했

기 때문에 발생한 오차로 고려된다. 해석 변수는 근육의 단면적과 골격의 크기 변화이며 체중의 변화를 근육단면적이 바뀌는 것으로 설정하였고 신장의 변화를 골격의 크기 변화로 설정하였다. 세 번째 피험자의 모델에서 가장 큰 오차가 발생한 것은 체중의 변화를 근육요소의 단면적 변화가 효과적으로 표현하지 못하는 것으로 판단된다. 그러나 전체적인 거동특성으로 볼 때 신장과 체중변화로 인한 인체거동의 특성을 실제 사격시험과 유사하게 재현할 수 있다고 판단된다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 소구경 화기 사격간 인체-화기 시스템의 거동을 해석하기 위하여 생체역학적 접근에 의한 모델링 및 시뮬레이션 기법을 연구하고 근육과 골격을 지닌 인체 유한요소해석모델을 개발하고 사격간 서서좌 사격자세에 대한 충격특성을 연구하였으며 연구결과는 다음과 같다.

(1) 사격간 인체의 거동을 인체-화기 시스템으로 정의하고 인체의 거동을 수치적으로 계산할 수 있는 근-골격해석 모델을 개발하였다. 이를 통하여 소구경화기 단발 사격간 시간에 따른 인체의 거동을 계산하였다.

(2) 실사격을 통한 인체거동 측정시험 결과를 기준으로 근-골격 인체 모델 해석 결과값을 비교·검증하였으며 해석의 정확도 및 재현성을 검증하여 해석결과의 신뢰성을 확인하였다.

(3) 신체 특성이 다른 피시험자를 대상으로 사격시험을 실시하고 근-골격 인체모델 해석을 수행하여 신체특성이 사격간 인체의 거동에 미치는 영향에 대한 연구를 수행한 결과 사수의 신장이 작고 체중이 많이 나가는 신체조건일 때 사격충격으로 인한 인체변위가 작았으며 인체거동의 시간이력은 신체특성에 무관함을 확인하였다.

또한 본 논문에서 연구한 인체거동에 대한 해석적 방법을 통하여 사격간 인체거동 뿐만 아니라 정적자세에 충격이나 하중을 받는 경우의 해석에 적용될 수 있을 것으로 기대된다.

## 후 기

본 연구는 국방과학연구소 기초연구(UD040002 AD)의 지원을 받았으며 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

- (1) Meyer, F., Willinger, R. and Legall, F., 2004, "The Importance of Modal Validation for Biomechanical Models, Demonstrated by Application to the Cervical Spine," *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol. 40, pp. 1835~1855.
- (2) Choi, H. K., Emily, K., Barry, W. and Peterson, W., 2003, "Musculoskeletal Kinematics During Voluntary Head Tracking Movements in Primate," *KSME International Journal*, Vol. 17, No. 1, pp. 32~39.
- (3) Tropiano, P., Thollon, L., Amoux P. and Huang, J., 2004, "Using a Finite Element Model to Evaluate Human Injuries Application to The HUMOS Model in Whiplash Situation," *SPINE*, Vol. 29, No. 16, pp. 1709~1716.
- (4) Hwang, S. J., Kim, Y. H., Choi, H. S. and Lee, K. T., 2006, "3D Motion Analysis on the Hallux Valgus by Using the Multi-Segment Foot Model," *Key Engineering Materials*, Vol. 326-328, pp. 988~991.
- (5) Virtual Soldier Research Program, <http://www.digital-humans.org/>, 2007.
- (6) Digital Korean, <http://digitalman.kisti.re.kr/digital/summary.php>, 2006.
- (7) Kim, H. J., Park, Y. P., Yang, H. S., Choi, E. J., Lee, S. B. and Hong, K. J., 2002, "Investigation of Dynamic Absorbing Aystem in the Gas-Operated Gun with High Transmitted Shock Force," *Journal of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 12, No. 5, pp. 389~396.
- (8) Lee, Y. S., Choi, Y. J., Han, K. H., Chae, J. W., Choi, E. J. and Kim, I. W., 2005, "A Study on the Human Impulse Characteristics with Standing Shooting Posture," *Key Engineering Materials*, Vol. 297~300, pp. 2314~2319.
- (9) Lee, J. W., Lee, Y. S., Choi, Y. J., Chae, J. W. and Choi, E. J., 2005, "A Study on Impact Analysis of the Korean Anthropometric Characteristic on Shooting," *Proceeding of the KSNVE Annual Spring Conference*, pp. 150~153.
- (10) Lee, S. H., Lee, Y. S., Choi, Y. J., Chae, J. W.,

Choi, E. J. and Hong, S. K., 2005, "Structural Analysis of Human Body Impact," *Proceedings of the KSME 2005 Fall Annual Meeting*, pp.

2501~2506.

(11) Stephen, C. C., 2001, *Bone Mechanics Handbook*, CRC Press, ISBN:0-8493-9117-2.