

# 세 가지 주요 검도 공격 동작에서의 근-골격계 응력과 변형을 해석에 관한 연구

이중현\*, 이영신#

## A Study on the Stress and Strain Analysis of Human Muscle Skeletal Model in Kendo Three Typical Attack Motions

Jung Hyun Lee\* and Young Shin Lee#

### ABSTRACT

Kendo is one of the popular sports in modern life. Head, wrist and thrust attack are the fast skill to get a score on a match. Human muscle skeletal model was developed for biomechanical study. The human model was consists with 19 bone-skeleton and 122 muscles. Muscle number of upper limb, trunk and lower limb part are 28, 60, 34 respectively. Bone was modeled with 3D beam element and muscle was modeled with spar element. For upper limb muscle modelling, rectus abdominis, trapezius, deltoideus, biceps brachii, triceps brachii muscle and other main muscles were considered. Lower limb muscle was modeled with gastrocnemius, gluteus maximus, gluteus medius and related muscles. The biomechanical stress and strain analysis of human muscle was conducted by proposed human bone-muscle finite element analysis model under head, wrist and thrust attack for kendo training.

**Key Words** : Human Muscle Skeletal Model (인체 근-골격 모델), Stress and Strain Analysis (응력과 변형률해석), Finite Element Method (유한 요소 해석), Kendo (검도)

### 1. 서론

검도 경기는 호구를 착용하고 죽도를 사용하는 경기로 격렬한 신체의 움직임이 요구되는 스포츠이며, 예절을 중요시하는 스포츠이다. 또한 검도는 폭넓게 칼, 혹은 검술(劍術)의 역사와 그 맥을 같이한다. 검도는 타격의 원리를 바탕으로 이루어진 스포츠 종목으로 상대방을 제압하기 위해서 상대방보다 먼저 순간적, 또는 기습적으로 짧은 시간 내에 공격을 해야만 이길 수 있다. 따라서 좋은 기술

이외에도 정신 집중력이 대단히 요구되는 스포츠이다. 또한 경기에서 승리하기 위해서는 소극적인 방어기술보다는 적극적인 공격기술의 비중이 더 크게 작용한다.

인체는 골격계통, 관절계통, 근육계통, 순환기계통, 소화기계통 등 다양한 형태와 기능을 가진 기관으로 구성되어 있으며 근육은 운동시 다양한 자유도를 갖는다. 따라서 인체를 정확하게 모델링하고 시뮬레이션하기 위해서는 인체를 골격구조뿐만 아니라 근육을 고려한 모델로 완성해야 한다.

접수일: 2008년 1월 2일; 게재승인일: 2008년 6월 2일

\* 충남대학교 대학원 기계설계공학과

# 교신저자: 충남대학교 기계설계공학과

E-mail: leeys@cnu.ac.kr Tel. (042) 821-6644

그러나 유한요소해석을 위한 인체모델의 경우 모든 골격계통과 근육계통을 포함하는 모델을 구현하는데 한계가 있다. 가능한 인체의 운동을 정확하게 표현할 수 있는 단순한 모델 개발과 이를 활용한 생체 역학적 응력해석이 필요하다.<sup>1</sup>

기본 공격 형태로는 머리, 손목, 허리 치기와 찌름, 그리고 응용기로 구분된다.<sup>2</sup> 본 논문과 관련된 저자들이 수행한 인체 모델링 및 해석, 검도의 동작특성해석에 관한 연구 동향은 다음과 같다.

인체 거동특성 분석에 관련된 연구동향을 살펴보면, 이영신 등은 시뮬레이션 기법을 이용하여 차량에 탑승시 휠체어를 좌석으로 사용하는 탑승자가 전방 충돌사고를 당하게 되는 경우 발생하는 동적 거동에 관하여 연구하였다.<sup>3</sup> 이세훈 등은 인체모델의 유한요소해석을 이용하여 소구경 화기 사격간 인체-화기 시스템의 거동을 연구하였다.<sup>4</sup> 최근에 이중현 등은 태권도 옆차기 동작의 동역학 해석과 충격해석에 대해 연구하였다.<sup>5</sup>

검도에 관한 연구들은 경기에 대한 결과 분석과 운동학적인 분석들이 몇몇 연구자들에 의해 진행되어 왔다. 이중현 등은 인체 근-골격 모델의 유한요소해석을 이용하여 검도 머리치기 동작시 발생하는 충격에 따른 인체의 동적 거동 및 근-골격 응력해석을 수행하였다.<sup>6</sup> 이외에도 여러 연구들은 선수들의 공격 타이밍과 훈련 경향에 따라 여러 가지의 공격 스타일로 나눈다. 이러한 분류에 대한 과학적인 자료 분석이 이루어져야 하겠다. 이에 검도 경기에서 있어서 수행되는 머리치기, 손목치기, 찌름 동작에 대한 운동학적 변인을 분석하며, 공격 동작시 동원되는 주요 근육들에 대한 운동학적 요인의 분석이 필요하다고 사료된다.

본 논문은 검도 머리치기, 손목치기, 찌름 동작에 따른 근-골격 응력해석을 위하여 생체역학적 접근에 의한 모델링 및 시뮬레이션 기법을 연구하기 위하여 근육과 골격을 지닌 인체 유한요소해석모델을 개발하고 공격 시 머리치기, 손목치기, 찌름 자세에 대한 충격 특성을 연구했다.

## 2. 인체 근-골격 모델개발

### 2.1 인체모델의 선정

선정된 인체모델은 유한요소 해석결과와 근전도 실험 결과를 비교하기 위하여 연령이 20 대인 신장 180 cm, 체중 67 kg 의 검도 유단자 모델로 선

정하였다. 한국인 인체 치수 조사 자료와 비교하면 신장 90 % tile, 체중 42 % tile 에 해당한다.<sup>7</sup>

### 2.2 인체 골격, 관절 및 근육 구조

인체의 골격과 관절은 인체의 운동을 결정짓는 중요한 역할을 수행한다. 또한 골격에는 골격근이 붙어있어 그 수축에 의한 뼈의 위치 또는 상호관계가 변화하여 운동이 일어나게 된다.<sup>7,8</sup> 인체의 골격구조는 크게 몸통골격(axial skeleton)과 사지골격(appendicular skeleton)으로 분류한다. 해석 모델에는 총 19 개의 체절과 18 개의 관절로 단순화하였다.<sup>9</sup>

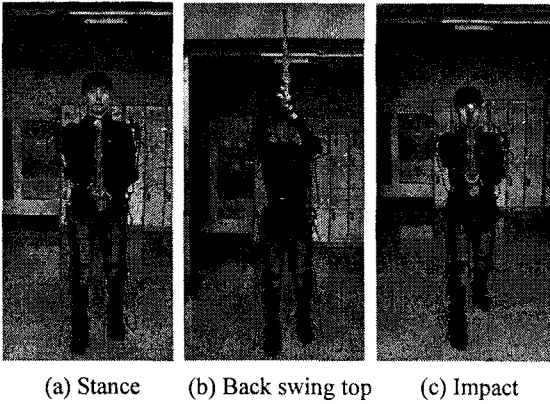
인체의 골격에는 BEAM4 요소를 사용하였다. BEAM4 요소는 3 차원 탄성 빔 요소로 각 절점에 6 개의 자유도를 가진다. 각각의 체절은 근육이 부착되어 인체의 운동을 표현할 수 있도록 고려하였다.<sup>6</sup> 인체골격의 탄성계수는 20 GPa 이며 밀도가 2000 kg/m<sup>3</sup> 이며 포아송비는 0.3 으로 일정하게 적용하였다. 일반적으로 치밀골의 탄성계수는 10~20 GPa 으로<sup>10</sup> 인체가 충격을 받을 경우 탄성범위 안에서 인체의 거동이 발생한다는 가정하에 일정한 물성치를 적용하였다. 인체모델의 관절에는 COMBIN7 조인트요소를 적용하였다. COMBIN7 요소는 3 차원 회전조인트로 2 개 혹은 그 이상의 파트를 연결할 수 있다. 이 요소의 특징은 큰 회전에 대한 해석이 가능하고 정해진 각도 범위 내에서 운동을 정의할 수 있는 것이다.<sup>11,12</sup>

유한요소 해석모델에서 근육은 LINK10 요소를 사용하였다. LINK10 요소는 탄성계수, 요소의 단면적, 요소의 길이 및 초기 변형률로 정의된다. 해석모델에서 근육의 물성치에는 탄성계수가 40 MPa 이며<sup>4</sup> 초기 변형률은 0 으로 설정하였다. 요소의 단면적과 요소의 길이는 고려된 근육에 따라 각각 다른 값을 설정하였다.<sup>13,14</sup>

### 2.3 세 가지 자세의 검도 인체모델

검도의 머리치기 동작해석을 위한 인체 모델을 확립하기 위해서 ADAMS/LifeMOD 의 근육조직을 기본으로 충격시 인체의 거동을 지배하는 주요 수의근을 결정하고 근육의 부착위치를 결정하였다. 우선 ADAMS/LifeMOD 에 검도 인체 모델을 구현하기 위하여 실제 검도 동작을 획득(capture)하였다. 여기에 사용한 모션캡처 장비는 두모션社의 '3D Motion capture system'을 이용하였다. 이 장비는 x, y, z, 3 축으로 구성된 16 개의 관절을 사

용하여 자연스러운 3 차원 동작을 연출하며 유선과 무선이 선택적으로 사용할 수 있게 설계되었다. Fig. 1 은 모션 캡처장비를 착용하고 머리 치기 동작을 실시한 모습이고, Fig. 2 는 모션 캡처 결과를 점 (node)과 선(line)으로 나타내고 있는 모습이다.



(a) Stance (b) Back swing top (c) Impact  
Fig. 1 Motion capture of kendo posture

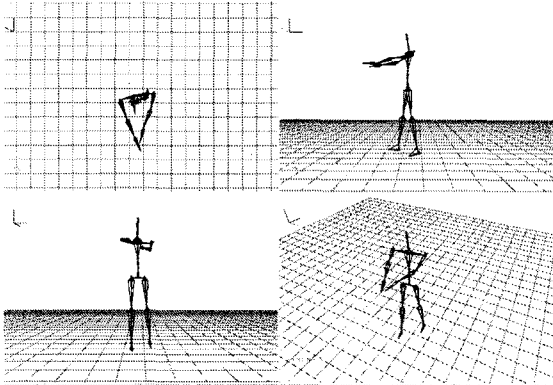
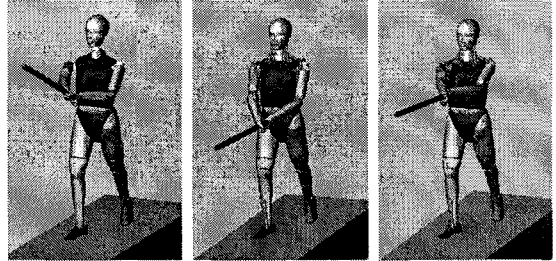
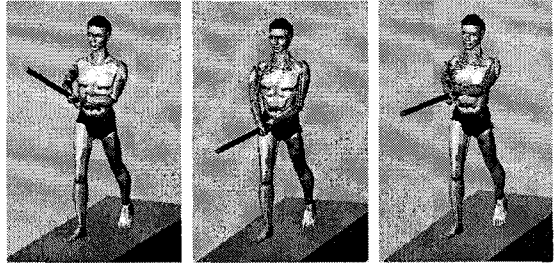


Fig. 2 Simulation picture of motion capture system

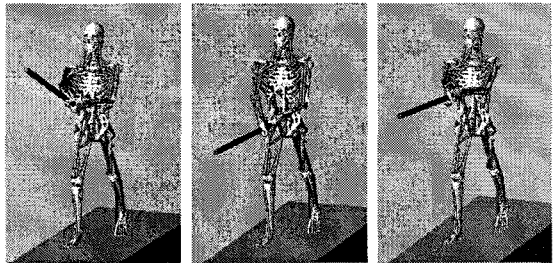
개발된 전체 근육모델은 122 개로 몸통골격에 28 개, 상지골격에 60 개 및 하지골격에 34 개의 근육이 선정되었다.<sup>15, 16</sup> 각각의 근육은 다양한 모양과 다양한 힘살을 가지고 있어서 하나의 근육을 하나의 요소로 표현하는 것이 불가능할 뿐만 아니라 등세모근이나 넓은 등근을 하나의 요소로 표현하였을 경우에는 인체의 운동을 효과적으로 표현할 수 없다. 그러므로 해석모델의 근육에서 넓게 퍼져 분포하고 있는 근육과 힘살의 수가 많은 근육은 하나의 근육을 다수의 근육요소로 표현하였다.



(a) Dummy model



(b) Skin model



(c) Musculoskeletal model

Fig. 3 Three typical posture of ADAMS/LifeMOD by the dummy model, skin model and musculoskeletal model

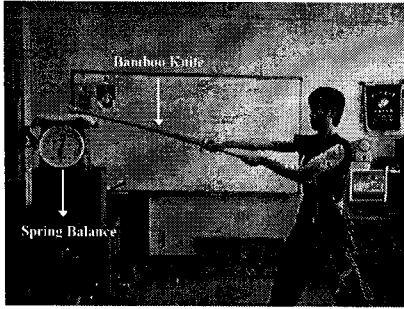
Fig. 3 은 앞서 모션캡처 장비를 이용하여 획득한 세가지 주요 검도 동작을 동력학 해석용 상용 프로그램인 ADAMS/LifeMOD 에서 검도 인체 모델로 구현한 것을 나타내고 있다. Fig. 3 (a), (b), (c) 는 각각 더미모델, 피부모델, 근-골격 모델을 나타내고 있다.

#### 2.4 해석조건 및 경계조건과 하중조건

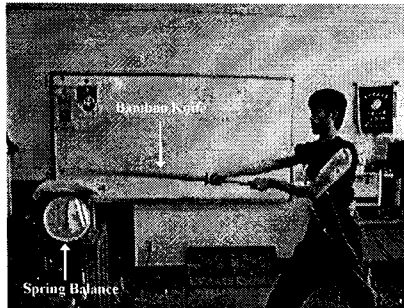
인체 근-골격 검도모델은 인체와 죽도로 구성되며 인체는 수동적인 운동기관인 뼈 및 관절과 능동적인 운동기관인 근육, 신체 대사를 조절하는 내장기관, 그리고 중추기능을 담당하는 신경기관 등으로 구성되어 있다. 인체 시스템의 거동은 뼈

와 근육에 의해 주로 결정되므로 본 연구에서는 인체 시스템의 모델을 뼈, 관절, 근육으로 구성하였다. 그리고 인체 근-골격 검토모델은 생체역학의 복잡성 때문에 단순화 하였다.

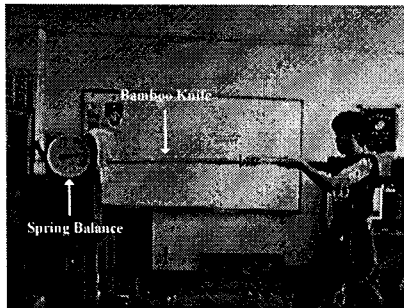
에서 각각 50 N, 50 N, 70 N 이며 시간은 0.02 s 동안 적용하였다. 충격력은 Fig. 4 와 같이 스프링 저울을 이용하여 측정하였으며 충격시간은 영상 분석을 통해서 추정하였다.



(a) Head attack motion



(b) Wrist attack motion



(c) Thrust attack motion

Fig. 4 Experiment for kendo impact force at three attack motions

인체 근-골격 검토모델의 유한요소 해석에서 경계조건은 머리치기 자세에서 양 발을 지면에 완전 고정하였고, 손과 죽도의 손잡이 부분은 조인트 요소를 사용하여 연결하였다. 죽도 끝에 수직으로 작용하는 최대 충격량은 머리치기, 손목치기, 찌름

### 3. 검토 머리치기 동작의 근-골격 응력해석

#### 3.1 근-골격 응력해석 결과

Fig. 5 는 상지부위의 근-골격 형상과 응력과 변형률을 분석할 부위를 나타내고 있다. 아래에 선정한 네 개의 근육은 검토 공격 동작시 사용되는 주동근이며,<sup>2</sup> 상지부위 근육에는 삼각근(Deltoid), 상완두갈래근(Biceps Brachii), 상완세갈래근(Triceps Brachii)이 표현되어 있고, 하지 근육에서는 손목을 굽히는 역할을 하는 긴요골쪽손목뿔근(Extensor Carpi Radialis Longus)을 나타내고 있다. 최대 응력 집중은 죽도와 손잡이 부분에서 머리치기, 손목치기, 찌름에서 각각 12.4 MPa, 12.8 MPa, 19.9 MPa 이 발생하였다(Fig. 6). Fig. 7, 8, 9 는 세가지 공격자세에 따른 변형형상과 변위분포를 나타내고 있다.

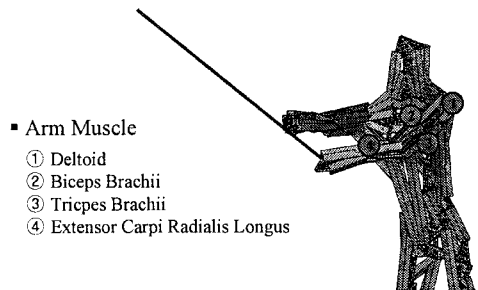


Fig. 5 Human arm muscle model

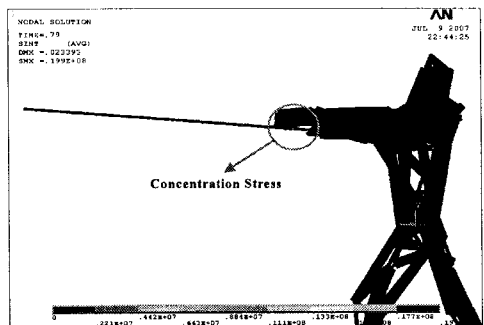
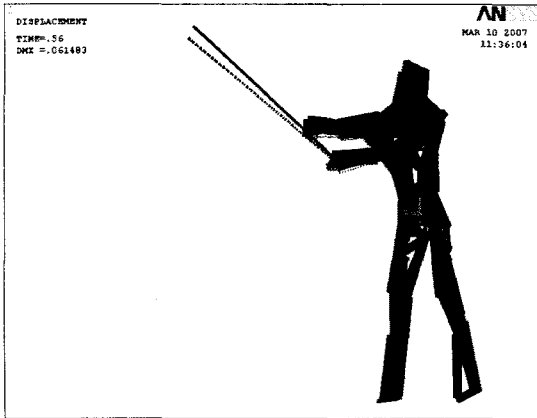
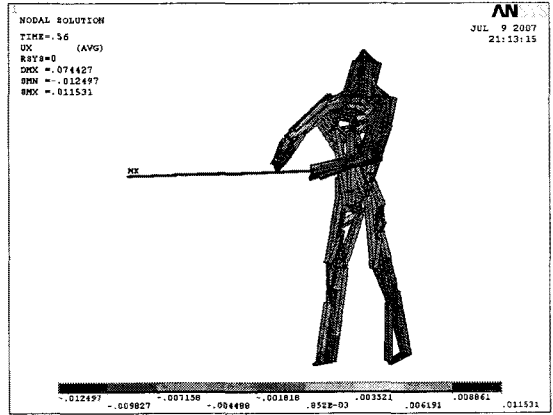


Fig. 6 Analytical stress distribution of thrust attack posture at 0.56 sec.

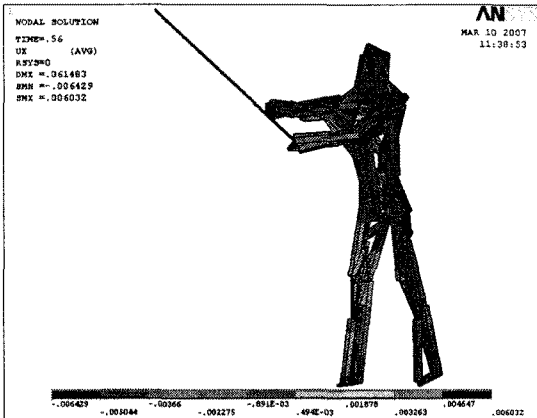


(a) Deformed shape



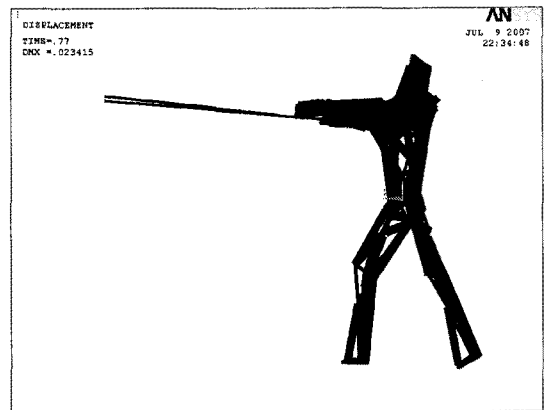
(b) Displacement distribution

Fig. 8 Analytical deformed shape and displacement distribution of wrist attack motion at 0.56 sec.

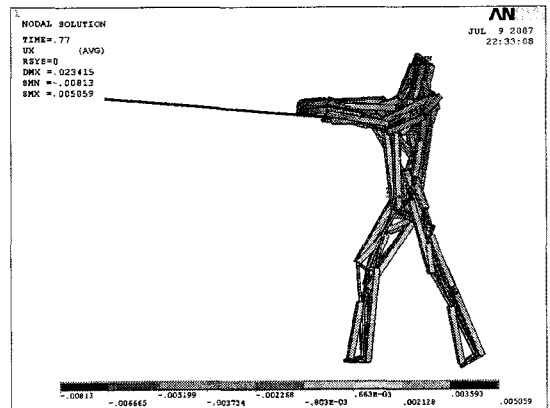


(b) Displacement distribution

Fig. 7 Analytical deformed shape and displacement distribution of head attack motion at 0.56 sec.

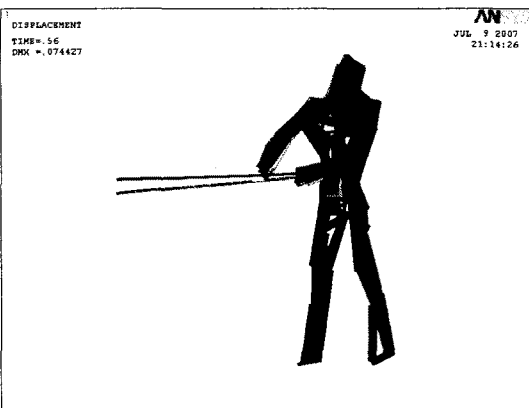


(a) Deformed shape



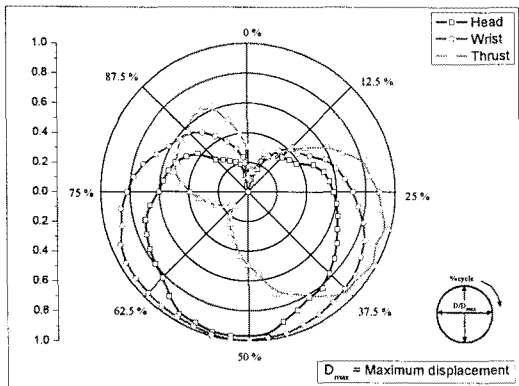
(b) Displacement distribution

Fig. 9 Analytical deformed shape and displacement distribution of thrust attack motion at 0.56 sec.

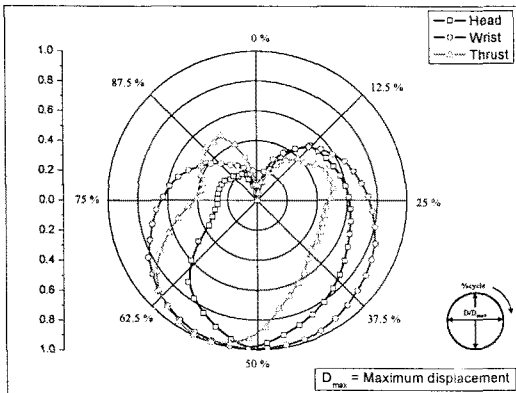


(a) Deformed shape

Fig. 10 (a)와 (b)는 각각 측면에서의 오른 손목과 죽도의 칼 끝부분의 변위를 각각의 변위의 최대값으로 나누어 정규화하여 극 좌표계로 나타낸 것이다. Fig. 11은 죽도의 칼 끝부분의 시간에 따른 변위를 직교 좌표계를 이용하여 나타내었다.



(a) Right wrist



(b) End of a bamboo knife

Fig. 10 Normalized displacement of right wrist and the end of a bamboo knife in anterior-posterior direction (polar coordinates)

극 좌표계의 반경방향은 변위의 정도를 나타내고 원주방향은 머리치기 충격 후 1.1 s 까지를 1 주기의 백분율로 나타내었다. 해석결과 오른 손목의 동적변위는 머리치기와 손목치기 모두 충격 후 52 % 부근에서 최대 변위를 나타내었고, 손목치기는 처음 30 % 부근에서 최대변위를 나타내었다가 62.5 % 에서 복원되는 경향을 보이다가 다시 한번 90 % 부근에서 두 번째로 큰 변위를 보였다. 이것은 머리치기와 손목치기는 충격에 따른 동작이 유

사한 반면 찌름의 경우에는 큰 충격력이 손목으로 수직으로 전달되어 손목이 꺾이는 동작에서 기인한다. 반면에 죽도의 칼 끝 부위의 거동은 세 가지 동작 모두 전체주기에서 충격 후 52 % 까지 충격으로 인하여 뒤로 밀리는 현상을 보였으며 52 % ~ 55 % 부근에서 최대 변위를 나타내었고 52 % ~ 55 % 이후부터 초기의 죽도의 위치로 복원하는 거동을 보였다.

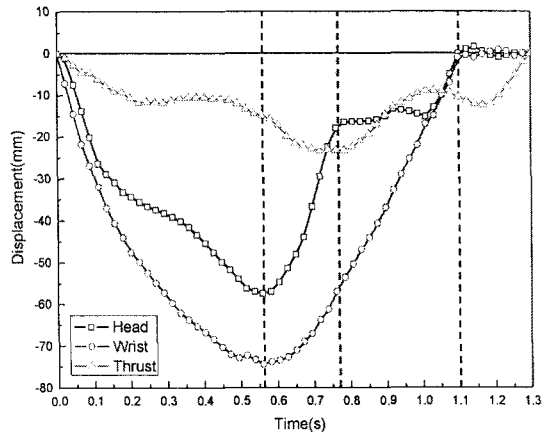


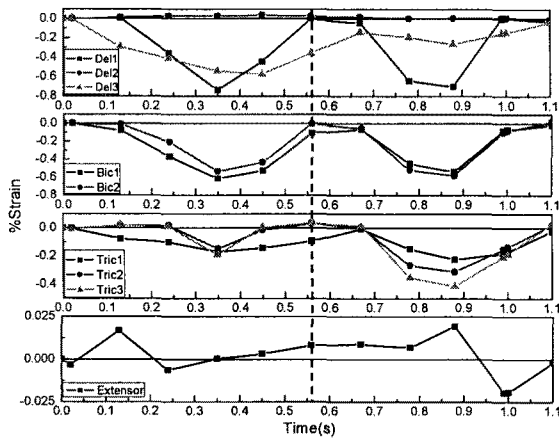
Fig. 11 Entire displacement of the end of a bamboo knife in anterior-posterior direction (rectangular coordinates)

Fig. 12 (a)와 (b)는 머리치기 공격시 각각 왼팔, 오른팔의 삼각근, 상완두갈래근, 상완세갈래근, 긴요골쪽 손목뾰근의 % 변형률을 나타내고 있다. Fig. 13 과 14 는 각각 손목치기, 찌름 공격에 대한 네 가지 근육의 % 변형률을 나타내고 있다.

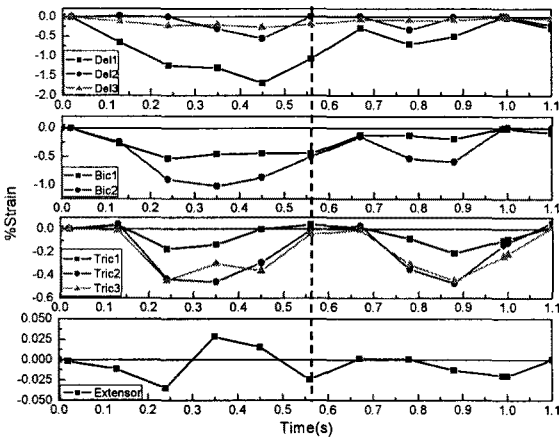
머리치기 충격 후에 유한요소해석에 의한 결과를 보면 1.1 s 의 시간이 흐른 후에 초기 머리치기 동작의 자세로 복구하였다. 삼각근, 상완두갈래근, 상완세갈래근은 전체적으로 음의 값이 나왔고, 긴요골쪽 손목뾰근은 음의 값과 양의 값이 주기적으로 번갈아 가면서 세 번의 수축과 이완을 나타냈다. 왼쪽 팔의 삼각근, 상완두갈래근, 상완세갈래근은 0.35 s와 0.9 s에서 각각 최대 압축 변형률이 발생했다. 반면에 긴요골쪽 손목뾰근은 0.13 s와 0.89 s에서 각각 최대 인장 변형률이 나타났고, 0.25 s와 1.0 s에서 각각 최대 압축 변형률이 나타났다. 오른팔의 삼각근, 상완두갈래근, 상완세갈래근은 0.35 ~ 0.45 s와 0.8 ~ 0.9 s에서 각각 최대 압

축 변형률이 나타났다. 반면에 긴요골쪽 손목편근은 0.35 s에서 최대 인장 변형률이 나타났고, 0.25 s, 0.56 s와 1.0 s에서 각각 최대 압축 변형률이 나타났다.

해석결과 인체의 변위는 머리치기, 손목치기, 찌름에서 각각 충격 후의 1.1 s, 1.1 s, 1.3 s 가 지난 다음 초기의 자세로 복원하는 거동을 보였다. 또한 타격 후 삼각근, 상완두갈래근, 상완세갈래근은 전체적으로 음의 변형률을 나타냈고, 긴요골쪽 손목편근은 음의 값과 양의 값이 주기적으로 변갈아가면서 세 번의 수축과 이완을 나타냈다.

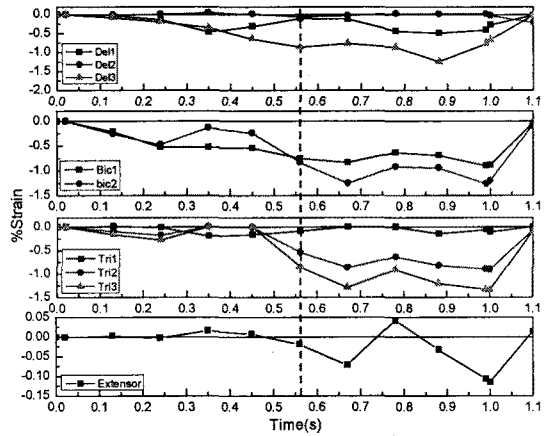


(a) Strain response of left arm's muscle

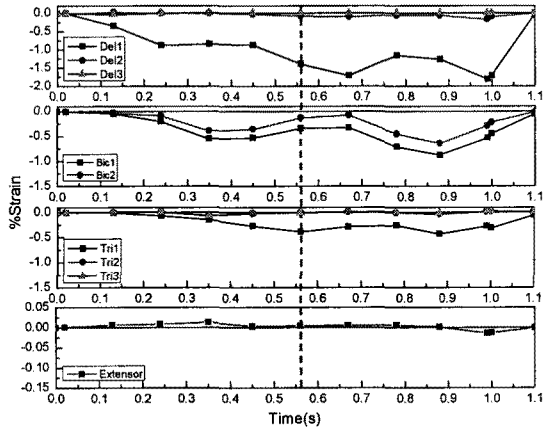


(b) Strain response of right arm's muscle

Fig. 12 Analytical strain response of kendo head hitting posture

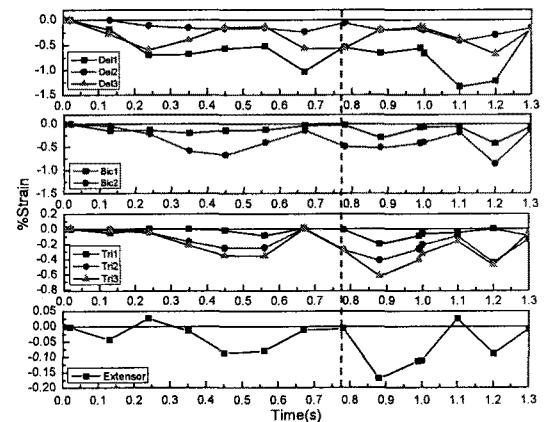


(a) Strain response of left arm's muscle

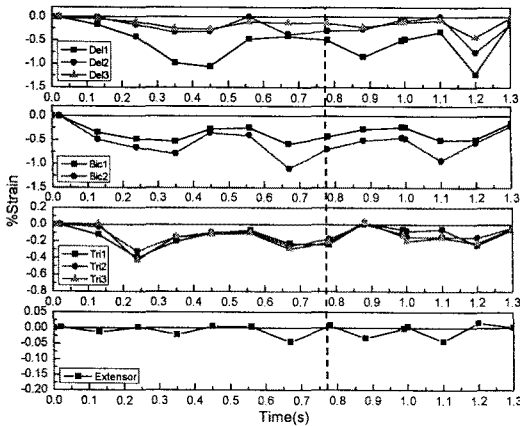


(b) Strain response of right arm's muscle

Fig. 13 Analytical strain response of kendo wrist hitting posture



(a) Strain response of left arm's muscle



(b) Strain response of right arm's muscle

Fig. 14 Analytical strain response of kendo thrust hitting posture

#### 4. 결론

본 연구에서는 유한요소 해석모델의 개발을 통해 근-골격 검도 모델의 세가지 주요 공격동작에 대한 충격 특성 연구 및 골격과 근육의 응력, 변형을 분석을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 검도 머리치기 동작의 근-골격 응력해석을 위한 유한요소 인체모델을 개발하였다.

2) 실험에 의한 세 가지 자세에서의 충격력은 찌름 공격에서 각각 50 N, 50 N, 70 N으로써 찌름 공격에서 가장 큰 힘이 측정되었다.

3) 해석결과 인체의 변위는 머리치기, 손목치기, 찌름에서 각각 충격 후의 1.1 s, 1.1 s, 1.3 s가 지난 다음 초기의 자세로 복원하는 거동을 보였다.

4) 최대 응력집중은 세가지 자세 모두 족도와 손잡이 부분에서 머리치기, 손목치기, 찌름에서 각각 12.4 MPa, 12.8 MPa, 19.9 MPa 이 발생하였다.

5) 유한요소 해석결과 변형률을 살펴보면 타격 후 삼각근, 상완두갈래근, 상완세갈래근은 전체적으로 음의 변형률을 나타냈고, 긴요골쪽 손목평근은 음의 값과 양의 값이 주기적으로 번갈아 가면서 세 번의 수축과 이완을 나타냈다.

본 논문에서 연구한 인체 근-골격 모델을 이용한 인체거동에 대한 해석적 방법은 다른 스포츠 및 정적 자세의 충격이나 하중을 받는 경우의 인체 구조해석에 적용 할 수 있으리라 사료된다.

#### 참고문헌

1. Lee, Y. S., Choi, Y. J., Han, K. H., Chae, J. W., Choi, E. J. and Kim, I. W., "A Study on the Human Impulse Characteristics with Standing Shooting Posture," Key Engineering Materials, Vols. 297-300, pp. 2314-2319, 2005.
2. Park, J. R., "The Analysis of Electromyography and Kinematic of Kumdo Player's Head Hitting," Korean Journal of Sport Biomechanics, Vol. 15, No. 1, pp. 63-74, 2005.
3. Lee, Y. S., Lee, K. D. and Lim, H. K., "The Safety Assessment of Wheelchair Occupants in Road Passenger Vehicles with the Frontal Crash: a Computer Simulation," Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A, Vol. 29, No. 11, pp. 1518-1526, 2005.
4. Lee, S. H., Lee, Y. S., Choi, Y. J., Choi, E. J. and Chae, J. W., "Firing Experiments and Structural Analysis of Human Body," Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A, Vol. 31, No. 7, pp. 764-776, 2007.
5. Lee, J. H., Lee, Y. S., Han, K. H., Lee, H. S. and Lee, E. Y., "A Study on the Dynamic and Impact Analysis of Side Kick in Taekwondo," Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A, Vol. 32, No. 1, pp. 85-92, 2008.
6. Lee, J. H., Lee, Y. S. and Lee, S. H., "Development on Human Muscle Skeletal Model and Stress Analysis of Muscle Skeleton under Kumdo Head Hitting Motion," Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 23, No. 11, pp. 116-125, 2007.
7. KATS, "The 5<sup>th</sup> Korean Anthropometrical Inquiry Data-Statistics of Anthropometrical Immediateness Measurement," KATS, Registered Number : 11-1410119-000018-13, 2005.
8. Choi, Y. J., Lee, Y. S., Lee, S. H., Chae, J. W., Choi, E. J. and Hong, S. K., "Impact Path Analysis of Human Body with Three Typical Shooting Postures," Key Engineering Materials, Vols. 326-328, pp. 899-902, 2006.
9. Lee, S. H., Lee, Y. S., Choi, Y. J., Choi, E. J. and Chae, J. W., "Firing Experiments and Structural



- Analysis of Human Body,” Transactions of Korean Society of Mechanical Engineers A, Vol. 31. No. 7, pp. 764-776, 2007.
10. Stephen, C. C., “Bone Mechanics Handbook,” CRC Press, 2001.
  11. Alan, L., Kirth, S., Mark, C. and Andrew, G., “Finite Element Modeling of the Impact Loading on Tissue Simulations,” ABAQUS User’s Conference, pp. 409-420, 2004.
  12. Tropiano, P., Thollon, L., Amoux, P. and Huang, J., “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, 2004.
  13. Meyer, F., Willinger, R. and Legall, F., “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, 2004.
  14. Cho, H. S., Bae, T. S., Kang, S. J., Lee, J. Y. and Moon, M. S., “Bio-mechanical Study on Human Muscle Parameters,” Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 22, No. 11, pp. 16-23, 2005.
  15. Lee, Y. S., Lim, H. K., Kim, C. J., Lee, N. S. and Park, S. J., “Biodynamic Characteristics of Korean Male in Twenties-Mass, Center of Mass and Moment of Inertia Characteristics of Body Segments,” Transactions of Korean Society of Mechanical Engineers, Vol. 18. No. 8, pp. 1952-1966, 1994.
  16. Lee, S. H., Lee, Y. S., Choi, Y. J., Chae, J. W., Choi, E. J. and Hong, S. K., “Structural Analysis of Human Body Impact,” Proceedings of the KSME 05 Fall Annual Meeting, pp. 2501-2506, 2005.