

3차원 영상을 이용한 다투 던지기 운동에서의 주상골, 유두골, 월상골의 움직임 분석

박찬수¹ · 김광기¹ · 김유신¹ · 정창부¹ · 장익규¹ · 이상림² · 오수찬² · 유도현¹ · 백구현³

¹국립암센터 융합기술연구부 의공학연구과, ²인제대학교 상계백병원 정형외과
³서울대학교 의과대학 정형외과학교실

The Motion Analysis of the Scaphoid, Capitate and Lunate During Dart-Throwing Motion Using 3D Images

Chan Soo Park¹, Kwang Gi Kim¹, Yu Shin Kim¹, Chang Bu Jeong¹, Ik Gyu Jang¹,
Sang Lim Lee², Su Chan Oh², Do Hyun Yu¹ and Goo Hyun Baek³

¹Biomedical Engineering Branch, Division of Convergence Technology, National Cancer Center

²Department of Orthopedic Surgery, Sanggye Paik Hospital, Inje University

³Department of Orthopedic Surgery, Seoul National University College of Medicine

(Received December 14, 2010. Accepted April 28, 2011)

144

Abstract: The primary purpose of this study was to analyze the motion of the scaphoid, capitate, and lunate during dart-throwing motion by three-dimensional modeling. Five series of CT images of five normal right wrists were acquired from five motion steps from radial extension to ulnar flexion in the dart-throwing motion plane. Segmentation and three-dimensional modeling of bones from CT images was performed using Analyze. Distances among centroids of the scaphoid, capitate and lunate and angles between principal axes of three carpal bones were calculated to analyze the motion by using MATLAB. As the wrist motion changed from radial extension to ulnar flexion, the distance between two adjacent bones decreased. The scaphoid and lunate rotated less than the capitates during dart-throwing motion. This study reports the Three-dimensional in vivo measurement of carpal motion using CT images.

Key words: Carpal bone, Dart-throwing motion, Three-dimensional, CT images

1. 서 론

3차원 영상 의학 장비(CT, MRI 등)의 발전은 체내를 가시화 하여 진단 및 치료에 많은 발전을 이루었으나, 손의 움직임에 중요한 역할을 담당하고 있는 수근 관절(손목 관절)

의 구조는 공학과 연관된 연구에서 발표 사례가 많지 않으며, 수근 관절은 다른 신체 부위보다 동역학적으로 복잡한 구성을 이루고 있기 때문에 다양한 접근 방법이 요구된다[1,2,3,4].

수근골은 주상골(scaphoid), 월상골(lunate), 삼각골(triquetrum), 두상골(pisiform)로 이루어진 근위 수근열(proximal carpal row)과 대능형골(trapezium), 소능형골(trapezoid), 유두골(capitate), 유구골(hamate)로 이루어진 원위 수근열(distal carpal row)로 구성되어 있고 이 중 두상골은 삼각골의 전면만이 관절을 이루고 있다. 중수골(metacarpal bone) 기저부에 있는 원위 수근열의 움직임에 따라 근위 수근열에 회전을 유발하여 전체적인 수근 관절의 운동이 이루어 지도록 한다. 이때 주상골은 근위 수근열과

Corresponding Author : 김광기
경기도 고양시 일산동구 정발산로 111 국립암센터 (410-769)
TEL: +82-31-920-2241 / FAX: +82-31-920-2242
E-mail: kimkg@ncc.re.kr

Corresponding Author : 이상림
서울시 노원구 상계7동 761-1 (139-707)
TEL: +82-2-950-1026 / E-mail : honeybud@empal.com

본 연구는 2009년도 서울대학교병원 일반연구비(연구번호 04-2009-0260), 2006년도 인제대학교 학술연구조성비 보조, 서울시 산학연 협력사업(과제번호: ST090809) 지원금에 의한 것임

원위 수근열을 연결하는 중요한 역할을 하고 있으며 원위 수근열은 수근골에 단단한 인대로 연결되어 있어 수근골 사이의 운동은 크지 않다. 반면 근위 수근열 또한 인대로 연결되어 있지만, 수근 관절의 운동 중에 각각의 수근골의 움직임의 정도가 달라 수근골 사이의 운동이 존재한다[1].

수근 관절은 요골(radius)과 척골(ulna)의 원위부, 수근골 그리고 중수골(metacarpal bone)들의 기저부에 의해 복합적으로 구성된 관절로, 60-70도의 신전과 70-80도의 굴곡, 20도의 요측 변위 및 30도 정도의 척측 변위 그리고 요척 관절과 함께 작용하여 80-90도의 회외, 회내전이 가능한 만능관절(universal joint)로, 회내전 및 회외전 운동을 합하면, 세 개의 자유도(degree of freedom)를 갖고 있는 관절이다.

수근 관절의 운동은 인체의 움직임 중에서 가장 중요하고 많이 사용되는 동작으로, 굴곡 및 신전, 요측 및 척측 변위의 직각 운동으로 표현하고 측정 하였다. 이 동작은 도구나 무기 사용, 던지기 등 인간의 활동에 매우 다양하게 활용되는 특징적인 동작으로, 돌을 던지거나 몽둥이를 휘두르는 등 먹먹을 것을 경쟁하고 맹수나 동물로부터 방어하는데 유리하여, 원시 인류의 생존에 있어서 중요한 동작으로 추정 되었다. 그러나 대부분의 일상적인 활동이나 작업에서 수근 관절의 운동은 주로 신전과 요측 변위, 굴곡과 척측 변위가 짝을 이루는 비스듬한 방향에서 일어난다. 신전-요측 변위가 동시에 일어나는 동작을 요측 신전이라고 하기도 하고, 굴곡-척측 변위는 척측 굴곡이라고도 한다. 이러한 요측 신전과 척측 굴곡이 짝이 되며, 시상면의 이루는 각이 23-45도에 이르게 되는데 이러한 동작을 닳트 던지기 운동(dart-throwing motion)이라고 한다. 닳트 던지기 운동은 가장 최소한의 근력을 사용하여, 자연스러운 회전이 가능하도록 하여 수근관절의 골절 치료 후 운동의 재활 상태를 파악 하거나 인체의 의수 및 재활 치료 장비 제작 등에 사용 되면서 정상적인 움직임을 판단 하는데 사용한다[1,2].

이처럼 복잡한 구조와 움직임으로 인해 과거 수근관절의 움직임 분석에 많은 어려움이 있었지만 20세기 초부터 다양한 방법의 연구가 진행되었다[5,6,7].

수근 관절의 운동에 대한 초기 연구는 단순 X선 촬영을 이용한 2차원적인 분석을 시도하거나, 광반사 표면 표지자(light-reflective surface marker)를 통한 수근부의 외형적인 운동 분석이 주로 이용 되었다[8,9,10]. 다른 연구 방법으로 수근골 내부의 움직임 분석을 위해 사체에 금속 마커를 삽입하여 촬영하거나[11,12], 자기 추적 장치(magnetic tracking device) 등을 이용한 in vitro 연구 등이 있었다[2,6,12,13].

이러한 In vitro 연구 방법은 심각한 관절 손상을 판단 하는데 유용하지만 측정을 위해 인체에 부착한 장치가 측정에 방해 요소로 작용 하여 자연스러운 관절의 움직임을 파악

하는데 한계가 있었다. 반면 In vivo 연구 방법은 비침습적인 방법의 측정이 가능하며, 데이터를 통해 관절 치료의 예후 판단, 근육 및 관절의 구조 및 움직임에 관한 연구가 가능하다. 더욱이 최근에는 영상 장비의 발달로 인해 3차원 영상을 이용한 In vivo 연구가 진행 되고 있다[1,14,15,16].

본 연구팀은 수근관절 운동(다트 던지기 운동)을 전산화 단층 촬영(CT)을 시행하여 3차원 영상으로 재구성하고, 3차원 영상에 대해 수근골(주상골, 유두골, 월상골)의 움직임을 분석 하고자 하였다(그림 1 참조).

II. 대상 및 방법

1. 연구 대상

수근 관절에 골절 등 외상이나 질환의 병력이 없는 성인 5명을 대상으로 하였다. 여자 4명, 남자 1명으로 평균 나이는 71.6세였다. 본 연구는 인제대학교 상계 백병원의 임상 시험 심사위원회(IRB)의 허가를 받고 수행 하였다(그림 2 참조).

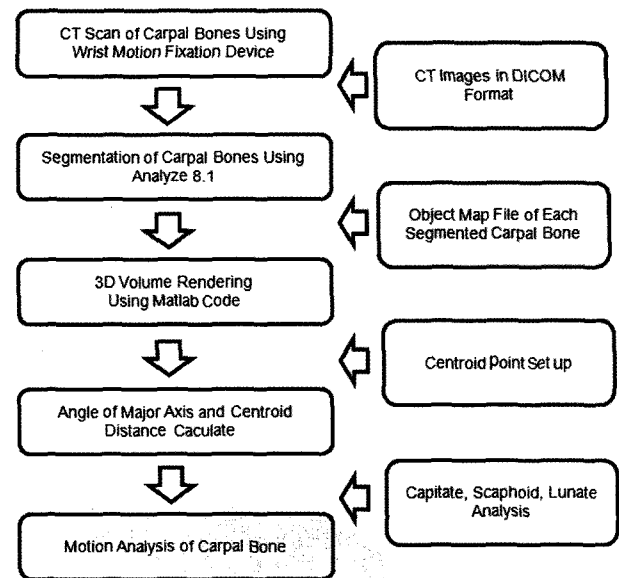


그림 1. 수근골의 움직임 분석 순서도

Fig. 1. Flow chart for kinematic analysis of carpal bones

No.	Gender	Age	Dominant side	Height	Weight
1	Male	85	Right	152	54
2	Female	66	Right	157	61
3	Female	60	Right,Left	154	49
4	Female	77	Right,Left	158	65
5	Female	70	Right,Left	140	38

그림 2. 측정 피험자 조건표

Fig. 2. Subject table

2. 연구 방법

수근골의 CT 영상 획득

다트 던지기 운동을 피험자가 시행 하면서 임의로 최대 신전부터 최대 굴곡 사이를 5단계로 나누어 각각의 동작을 정지한 상태에서 전완의 원위 1/3으로부터 중수골 기저부가 포함되도록 CT 촬영을 시행 하였다. 피험자가 최대로 신전한 위치를 ‘최대 요측 신전’, 최대 굴곡한 위치를 ‘최대 척측 굴곡’이라 표시하고, 운동 중 최대한 중립에 가까운 위치를 ‘중립’이라 정하였으며, 최대 척측 굴곡과 중립 사이에서 촬영한 위치를 ‘중간 척측 굴곡’, 최대 요측 신전과 중립 사이에서 촬영한 위치를 ‘중간 요측 신전’이라고 정하였다. 앞선 언급한 5가지의 움직임의 정의에 따라 ‘최대 요측 신전-중간 요측 신전-중립-중간 척측 굴곡-최대 척측 굴곡’으로 CT영상

을 촬영하는 동안 피험자의 손목을 고정하여 다트 던지기 운동을 구현 할 수 있도록 손목 고정 장치를 제작 하였다. 손목 고정 장치는 각 피험자의 신체 사이즈에 맞도록 조절이 가능하며, 손목의 위치 및 상하, 좌우의 움직임은 물론 전완 회전 운동까지 고려하여 조절할 수 있도록 설계 하여 피험자가 자연스러운 동작을 구현 할 수 있도록 제작 하였다(그림 3 참조).

수근골의 영상 분할

획득한 CT 영상에서 각각의 뼈는 Analyze(version 8.1, Mayo, USA) 소프트웨어를 이용하여 수동으로 영상 분할 하였으며, 동작 분석 시에 구분이 용이하도록 분할된 각각의 뼈에 서로 다른 색상을 지정 하였다(그림 4(A, B) 참조). 촬영된 CT 영상의 이웃하는 단면간의 거리는 0.6~ 0.8 mm이고, 각 CT 영상은 평균 130개의 단면으로 이루어져있고, 각 피험자당 5개의 정지 동작을 촬영하여 모두 25개의 CT 영상을 수집하였다. 영상 분할 수행 시 수근골 영상의 선명한 경계선 구분을 위해 다양한 범위의 Windows Level/Width 적용하여 이 중 가장 선명한 영상을 확인 할 수 있는 범위를 300/2000으로 설정하여 가시화 하였고, 각 뼈의 경계면은 경계치 값을 300으로 자동 검출한 뒤, 필요에 따라 수동분할을 수행 하였다(그림 5 참조).

수근골 3차원 영상 재구성

Analyze 소프트웨어에서 분할 된 요골, 척골, 중수골 및 수근골의 총 15개의 수근골 영상을 MATLAB(version 10.0, Mathworks, USA)을 이용하여 각 피험자 별로 다트 던지기 운동의 순차적인 5가지 정지 동작의 3차원 영상으로

146



그림 3. CT영상 촬영을 위한 손목 고정장치
Fig. 3. Wrist motion fixation device for CT images

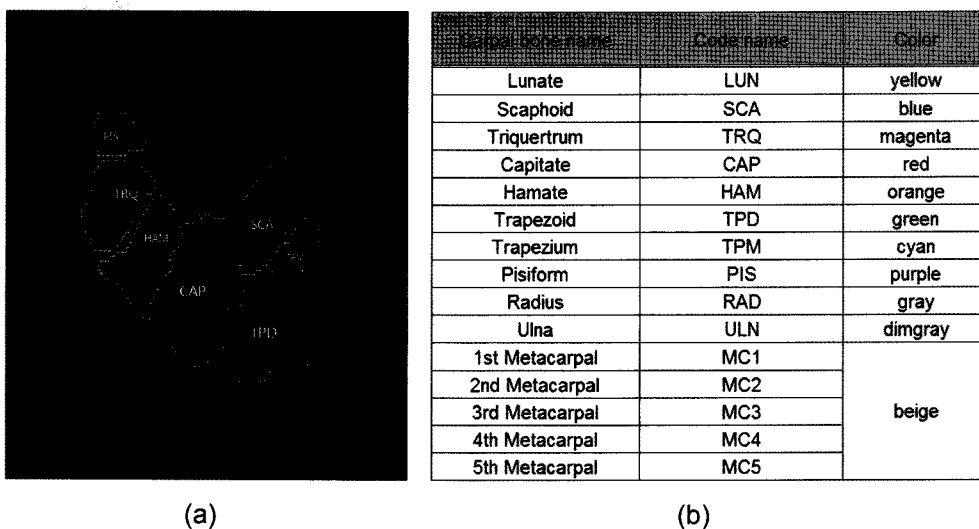


그림 4. (A) Analyze Software 를 이용한 수근골의 영상 분할 (SCA = 주상골, LUN = 월상골, CAP = 유두골) (B) 수근골 색상표
Fig. 4. (A) Segmentation of carpal bones using Analyze software (SCA = Scaphoid, LUN = Lunate, CAP = Capitate) (B) Color table of the carpal bones

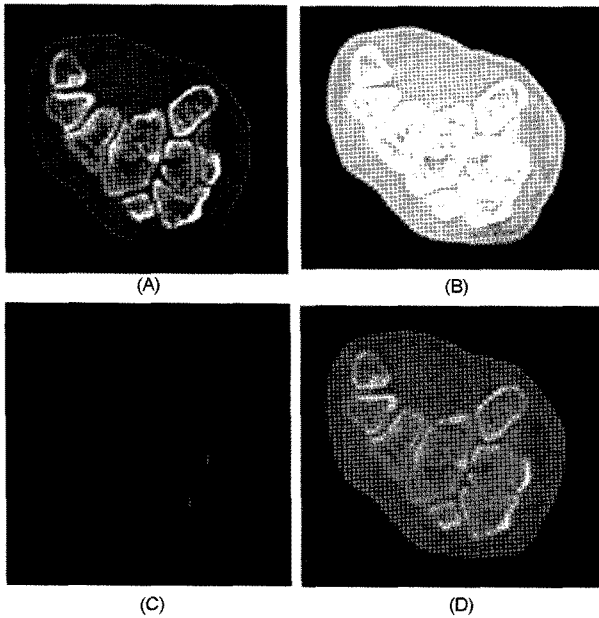


그림 5. Windows Level/Width에 따른 CT영상의 차이 ((A) Windows Level/Width = 200~300/2000 (B) Windows Level/Width = 200이하/2000 (C) Windows Level/Width = 300이상/2000 (D) Windows Level/Width = 200~300/2000이상)
 Fig. 5. CT image differences of Windows Level/Width ((A) Windows Level/Width = 200~300/2000 (B) Windows Level/Width = below 200/2000 (C) Windows Level/Width = over 300/2000 (D) Windows Level/Width = 200~300/over 2000)

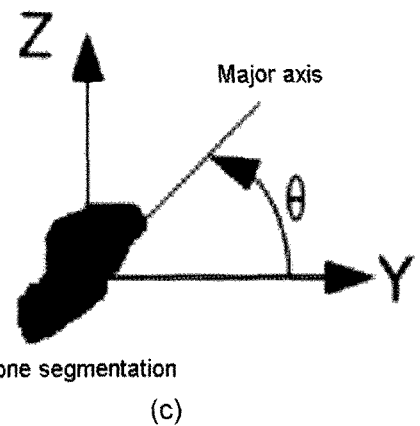
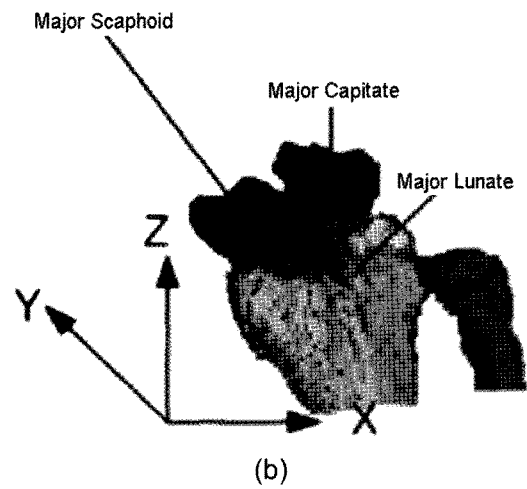
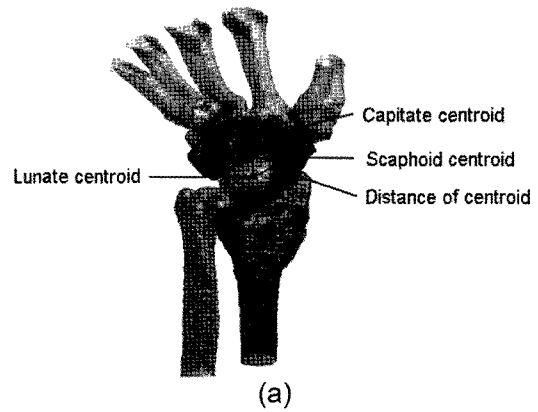


그림 7. (A) 3차원 수근골 영상과 유두골, 주상골, 월상골의 중심점 연결선 (B), (C) 수근골 주축의 각 변화

Fig. 7. (A) 3D images of reconstructed wrist bones and centroids (black dot) and inter-centroid lines (red lines) of the capitate, lunate and scaphoid (B), (C) Angular changes of the principal axes of the capitate, lunate, and scaphoid

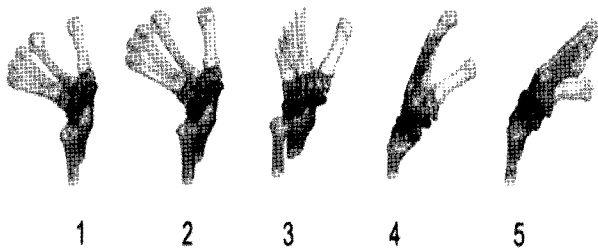


그림 6. 다트 던지기 운동의 최대 요측 신전(1)부터 최대 척측 굴곡 (5)까지 3차원 영상

Fig. 6. 3D volume rendering of carpal bones during dart-throwing motion. Wrist motions were captured from maximum radial extension (1) to maximum ulnar flexion (5)

재구성 하였다(그림 6 참조).

수근골의 움직임 측정

MATLAB으로 재구성된 3차원 수근골 영상을 측정 대상으로 하고 다트 던지기 운동 중 수근골이 움직인 거리와 수근골 간의 각 변화를 측정 항목으로 하였다. 특히 15개의 수근골 영상에서 수근골의 움직임에서 주요 역할을 하는 수근골로 알려진 주상골(scaphoid), 월상골(lunate), 유두골(capitate) 3개의 뼈들을 측정 대상 수근골로 하여 MATLAB 연산을 통해 각각의 체적에 대해 중심점(centroid)의 좌표를

계산하여 설정 하였다. 수근골이 움직인 거리는 서로 이웃하는 두 수근골 사이의 중심점 거리(mm)변화를 측정하는 방법으로 하였다(그림 7(A) 참조). 또한 움직임을 정량화하기 위하여 원위부 방향의 Z축, 중립에서 손바닥 방향의 Y축, 척측의 X축을 설정하였다(그림 7(B) 참조). 영상이 촬영된 다

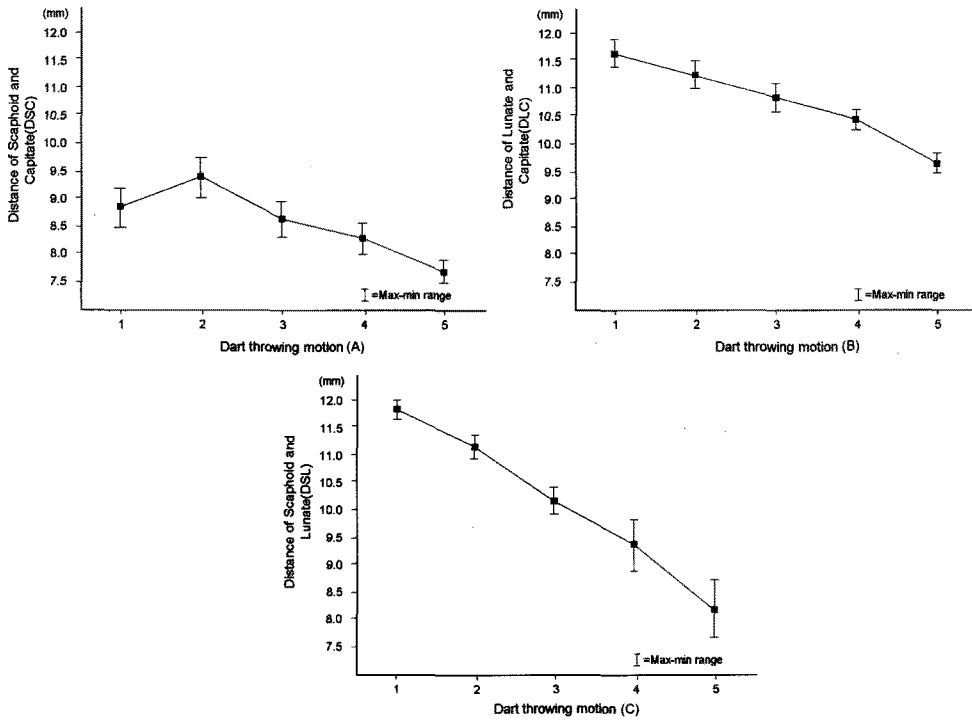


그림 8. 다트 던지기 운동에서의 수근골 중심점 사이의 거리 변화

Fig. 8. Change in the inter-centroid distances between two adjacent carpal bones during dart-throwing motion

148

트 던지기 운동에서 주상골, 월상골, 유두골의 움직임은 시상면, 즉 설정된 좌표계의 Y,Z 평면 상에서 가장 크기 때문에, 세 수근골의 움직임은 각 수근골의 주축이 시상면(Y, Z 평면)에서 Y축과 이루는 각(θ)의 변화로 측정하였다(그림 7(C) 참조).

III. 결 과

그림 8의 그래프 X축은 다트 던지기 운동을 5가지로 나눈 영역을 표시 하였으며, Y축은 이웃한 두 수근골 중심점의 거리를 평균값과 최대-최소범위로 나타낸다. 주상골과 유두골 간의 거리는 중간 요측 신전에서 증가한 후 중립이나 약간 신전된 위치에서 가장 먼 것으로 관찰 되었다(그림 8(A) 참조). 월상골과 유두골 사이의 거리는 요측 신전에서부터 척측 굴곡으로 가면서 점진적으로 감소하는 양상을 보였다(그림 8(B) 참조). 주상골과 월상골 간의 거리는 각 피험자 간의 최대-최소구간이 다른 거리 변화 그래프보다 큰 것으로 확인 되었고, 3번째 중립 구간까지는 동일한 형태를 보였으나 중립 구간 이후 부터 거리가 급격히 감소 하였다(그림 8(C) 참조).

그림 9(A, B, C)는 세 수근골의 주축이 다트 던지기 운동의 5가지 정지 동작시 시상면 상에서 Y축(중립에서의 손바닥 방향)과 이루는 각을 평균값과 최대-최소범위로 나타내었다. 그림 9(A)는 다트 던지기 운동시 유두골의 시상면 상의

각 운동을 보여주며, 증가하는 주축과 Y축의 각도는 수근 관절의 운동이 시상면 상에서 신전에서 굴곡으로 변화하는 동작을 나타낸다. 굴곡으로 진행 될수록 증가하는 최대-최소 범위는 피험자간의 운동범위에 차이가 커짐을 보여주고 있다. 그림 9(B)는 주상골의 각 변화로 3번째 중립 구간 이후 각 변화와 최대-최소범위 구간도 증가하여, 역시 피험자간의 운동범위 차이가 커짐을 알 수 있다. 그림 9(C)는 월상골을 나타냈으며 그림 9(B)와 유사한 형태로 3번째 중립 구간부터 증가하는 모습을 보이지만 최대-최소 범위 구간은 크지 않아 피험자간의 차이가 크지 않음을 보여주었다.

IV. 고 찰

본 연구는 일상 생활에서 가장 많이 사용될 뿐 아니라 기능적으로도 중요한 손목의 움직임을 다트 던지기 운동을 통해 주상골, 유두골, 월상골의 움직임을 분석하고자 하였으며 이는 외국에서 주로 CT나 MRI 영상을 이용하여 수행된 연구로, 국내에서는 보고된 바가 없었다. CT, MRI의 수근골 영상을 3차원 영상으로 재구성하여 운동관계를 파악하는 과정의 연구 방법은 손목 관절의 굴곡과 신전, 요측 변위와 척측 변위 구간에서의 변화 차이만을 측정하여 각 구간 사이의 수근골 움직임 변화를 분석하는데 있어 어려움이 있었다. 또한 수근골의 3차원 영상에 있어서도 단순히 수근골의 형태만을 구현하여 수근관절이 움직일 때 수근골의 움직임을 가시

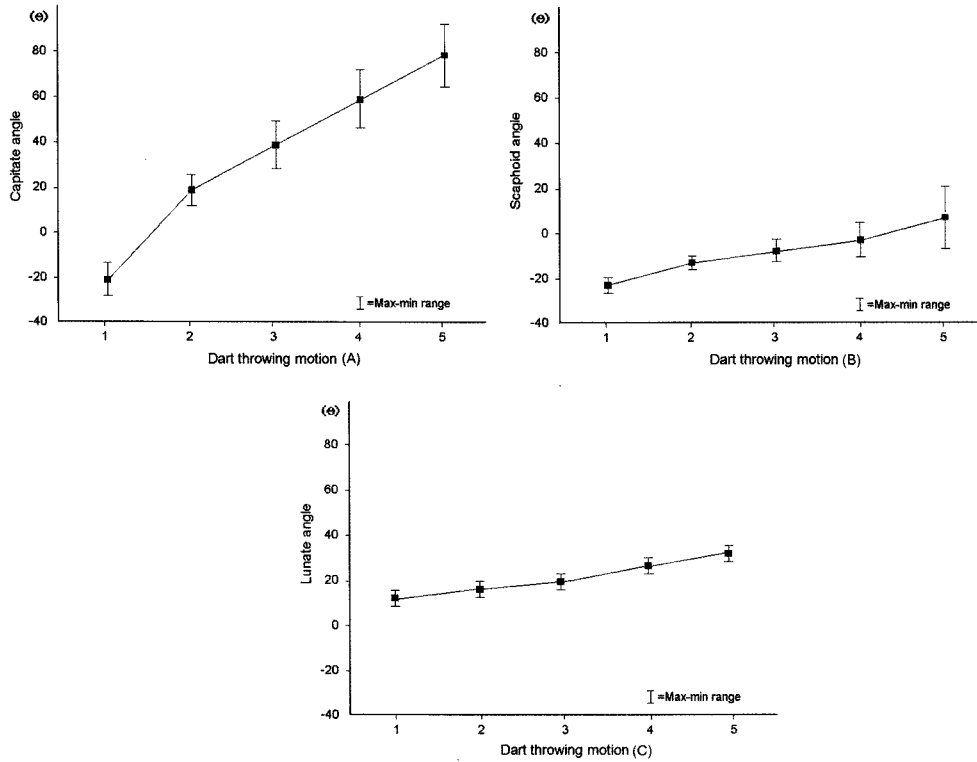


그림 9. 닳트 던지기 운동에서의 (A) 유두골, (B) 주상골, (C) 월상골 주축의 각 변화

Fig. 9. Change in the angles of the principal axes of the capitate (A), scaphoid (B) and lunate (C) during dart-throwing motion

화 하는 점에 있어서도 한계가 있었다[14,15,16]. 이러한 점을 보완하기 위해 제작한 손목 고정 장치는 최대 척측 굴곡 부터 최대 요측 굴곡 까지의 운동 범위 설정이 가능하며, 설정한 운동 범위 내에 ‘중간 운동 구간’과 ‘중립 구간’을 추가적으로 설정하여 손목 관절을 고정 시켜 운동 구간 사이의 움직임 변화 측정이 가능 하도록 하였다. 측정자가 사체의 수근골을 움직여 측정하는 기존의 연구법과는 다르게 피험자에게 자연스러운 수근관절의 움직임을 유도하도록 하여 측정 오차를 감소 시키고 객관성을 높였다는 점에서 의미를 둘 수 있다[3,5]. 추가적으로 손목고정장치를 이용하여 5개의 운동 구간이 촬영된 CT영상은 각 구간별로 3차원 영상으로 구성하여 각 운동 구간에서의 수근골의 움직임 변화를 가시화 할 수 있도록 하였다.

또한 방사선 촬영술, 관절 조영술 등을 통해 획득한 2차원 영상은 외형적인 움직임만을 확인 할 수 있다는 한계가 있어 복잡한 수근 관절의 해부학적 구조를 이해하는데 어려움이 있었지만 전산화 단층 촬영(CT) 장비를 이용하여 3차원으로 재구성된 영상을 통해 수근 관절을 해부학적 구조를 쉽게 확인 할 수 있게 되었고 이를 통해 수근 관절의 손상이나 질환을 더 잘 이해 할 수 있게 되었다.

다트 던지기 운동은 수근 관절 중 주로 근위 수근열과 원위 수근열 사이에서 이루어 진다. 이 동작에서 가장 중심이 되는 뼈는 원위 수근열의 중심인 유두골로 알려져 있으며,

다트 던지기 운동에서 특히 유두골의 운동이 중요하다고 한다[7,8]. 유두골은 그 두부의 형태가 거의 반구와 유사하여 여러 방향으로의 운동이 가능하다. 닳트 던지기 운동에서 최대 요측 신전과 최대 척측 굴곡 때는 주상골과 유두골 간의 거리가 중립에 비해 감소되는 것이 관찰되는데, 이는 동작의 마지막 단계에서 유두골이 주상골에 의해 그 운동을 제한 받아 안정성을 부여 받는 것으로 생각된다.

유두골-월상골 간의 간격은 요측 신전에서 척측 굴곡으로 가면서 조금씩 감소되나 그 차이는 미미한 것으로 생각된다. 닳트 던지는 운동이 주로 공이나 물건을 던지거나, 몽둥이나 망치로 내리치는 동작 등으로, 수근 관절의 요측 신전의 젖히기 단계(cocking phase)와 척측 굴곡의 스윙 단계(swing phase)로 이루어짐을 생각하면, 이 동작의 최종 동작인 최대 척측 굴곡에서 유두골의 안정성을 부여하기 위해 척측 굴곡에서 세 수근골 간의 간격이 줄어든다고 추정해 볼 수 있다[1].

이번 연구에서 5단계의 동작 중 주상골과 월상골의 중심의 거리는 신전에서 굴곡으로 갈수록 감소되었다. 주상월상 인대 파열에서는 그 중심간의 거리는 더 증가되며, Werner 등은 이러한 두 골간의 거리의 변화와 각 운동 변화를 통해 주상월상 인대의 파열을 진단할 수 있는 모델을 제시하기도 하였다[17]. 주상월상 인대의 손상이 있으면 두 골간의 거리가 증가되어, 그림 8(C)처럼 일정하게 감소하지 않을 가능성도 있으나, 수근관절의 움직임에 따른 변화량을 제시한 논문

은 찾을 수가 없어, 저자들의 연구와 비교할 수는 없었다. 개인의 수근골의 크기 차이나 인대의 두께 등의 차이, 연부 조직의 탄성 등이 다르겠지만, 수근골 간의 크기에 대한 상대적인 거리나, 수근관절 움직임에 따른 수근골의 각 운동의 변화는 일어날수 있는 가능성이 높으므로, 본 연구의 기법을 응용하여 더 많은 정상인의 수근 관절 영상을 확보하여 이러한 데이터의 평균값이나 정상 범위를 얻는다면, 수근골 사이의 인대 손상을 CT영상을 이용하여 진단하는데 도움을 받을 수 있을 것이다.

수근 관절의 전체 운동은 제 3 중수골의 원위 요골에 대한 운동으로 측정되어야 하지만, 제 3 중수골은 유두골과 거의 움직임이 없기 때문에 원위 요골에 대한 유두골의 운동을 전체 수근 관절의 운동으로 가정하여도 무방하다. 따라서 측정된 유두골의 각 변화가 전체 수근관절의 운동이라고 할 수 있으며 닥트던지기 운동에서는 유두골의 근위 수근열 위에서의 운동, 즉 중수근 관절(midcarpal joint)에서의 운동이 중요함을 알 수 있다. 본 연구에서 얻은 측정값은 닥트 던지기 운동에 대한 유사한 연구에서 측정된 값과 유사하거나 다소 작게 측정되었다[18]. 유두골의 각 변화에 비해, 주상골과 월상골의 변화가 상대적으로 많이 작은 것을 볼 수 있는데, 닥트 던지기 동작을 구현하는데 있어 고정장치의 사용 여부에 따라 측정되는 각 변화 수치는 큰 차이가 있지만 닥트 던지기 운동에서 주상골과 월상골은 움직임이 최소화된다는 점은 과거의 연구와 유사한 결과를 얻었다[14,15]. 반면 유두골의 각 변화의 경우 남성과 여성 피험자에서 각 변화가 거의 나타나지 않아 성별에 따른 수근골의 각 변화 움직임이 차이가 있는 기존의 연구와는 차이가 있으나, 성별의 차이인지, 체격이나 수근골 크기의 차이에 의한 것인지는 대상 수가 작아 더 많은 수를 분석해 볼 필요가 있을 것이다[14].

본 연구는 CT를 이용하여 3차원으로 영상을 획득하고 정량적으로 분석할 수 있는 방법으로 일상 생활에서 가장 많이 사용되는 닥트 던지기 운동을 통해 수근관절의 움직임을 재현하여 수근골의 움직임을 분석 하였다. 향후 다양한 연령층과 성별 등 다수의 대상자를 통해 정상적인 움직임에 대한 데이터의 정량화가 이루어지면, 한국인의 평균치 등의 데이터를 통해, 기존의 고가의 MRI나 관절경적 수술을 통해서만 진단할 수 있었던 인대 손상이나 수근관절의 운동에 영향을 주는 질환을 CT영상을 통해 진단할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

- [1] S. Wolfe, et al., "The dart-throwing motion of the wrist: is it unique to humans," *J Hand Surg Am*, vol. 31, pp. 1429-1437, 2006.
- [2] J. Ishikawa, et al., "The effects of wrist distraction on carpal kinematics," *J Hand Surg Am*, vol. 24, pp. 113-20, Jan 1999.
- [3] J. J. Crisco, et al., "In vivo radiocarpal kinematics and the dart thrower's motion," *J Bone Joint Surg Am*, vol. 87, pp. 2729-40, Dec 2005.
- [4] H. Moritomo, et al., "In vivo three-dimensional kinematics of the midcarpal joint of the wrist," *J Bone Joint Surg Am*, vol. 88, pp. 611-21, Mar 2006.
- [5] F. Werner, et al., "Scaphoid and lunate motion during a wrist dart throw motion," *J Hand Surg Am*, vol. 29, pp. 418-422, 2004.
- [6] R. Berger, et al., "The three-dimensional rotational behaviors of the carpal bones," *J Orthop Res*, vol. 167, p. 303, 1982.
- [7] R. Berger, "The anatomy of the ligaments of the wrist and distal radioulnar joints," *J Orthop Res*, vol. 383, p. 32, 2001.
- [8] A. K. Palmer, et al., "Functional wrist motion: a biomechanical study," *J Hand Surg Am*, vol. 10, pp. 39-46, Jan 1985.
- [9] S. K. Sarrafian, et al., "Study of wrist motion in flexion and extension," *J Orthop Res*, pp. 153-9, Jul-Aug 1977.
- [10] Z. M. Li, et al., "Coupling between wrist flexion-extension and radial-ulnar deviation," *J Biomech (Bristol, Avon)*, vol. 20, pp. 177-83, Feb 2005.
- [11] M. Kobayashi, et al., "Normal kinematics of carpal bones: a three-dimensional analysis of carpal bone motion relative to the radius," *J Biomech*, vol. 30, pp. 787-793, 1997.
- [12] H. H. Savelberg, et al., "Human carpal ligament recruitment and three-dimensional carpal motion," *J Orthop Res*, vol. 9, pp. 693-704, Sep 1991.
- [13] F. W. Werner, et al., "The relative contribution of selected carpal bones to global wrist motion during simulated planar and out-of-plane wrist motion," *J Hand Surg Am*, vol. 22, pp. 708-13, Jul 1997.
- [14] C. P. Neu, et al., "In vivo kinematic behavior of the radio-capitate joint during wrist flexion-extension and radio-ulnar deviation," *J Biomech*, vol. 34, pp. 1429-38, Nov 2001.
- [15] S. W. Wolfe, et al., "In vivo scaphoid, lunate, and capitate kinematics in flexion and in extension," *J Hand Surg Am*, vol. 25, pp. 860-9, Sep 2000.
- [16] J. J. Crisco, et al., "Noninvasive technique for measuring in vivo three-dimensional carpal bone kinematics," *J Orthop Res*, vol. 17, pp. 96-100, Jan 1999.
- [17] F. W. Werner, et al., "Identifying scapholunate ligamentous injury," *J Orthop Res*, vol. 27, pp. 394-9, Mar 2009.
- [18] E.L. Leventhal, et al., "Carpal and forearm kinematics during a simulated hammering task." *J Hand Surg Am*, vol 35, pp. 1097-104, Jul 2010.