편심성 운동 후 상완이두근의 국소부위 간 기계적 속성의 차이

김춘섭 PhD, 김맹규 PhD

경북대학교 체육교육과 스포츠의학실험실

Regional Differences of Mechanical Properties in a Biceps Brachii Following Eccentric Exercise

Choun-sub Kim PhD, Maeng-kyu Kim PhD

Sports Medicine Lab, Department of Physical Education, Kyungpook National University, Daegu, Korea

PURPOSE: This study aimed to examine the effects of eccentric exercise (ECC) on the indices of mechanical properties together with markers of exercise-induced muscle damage (EIMD) in different sites of the biceps brachii (BB) muscle.

METHODS: ECC using an elbow joint was performed in 13 non-trained, college men. Global symptoms of EIMD were identified through changes in muscle soreness and serum creatine kinase (CK) activity, including muscle function following ECC. To evaluate regional EIMD, muscle swelling and tenderness as well as muscular echo intensity were measured at distal (4 cm above the elbow joint) and middle (30% of the distance from the antecubital crease to the acromion) sites within the BB muscle. A handheld myotonometer was used to estimate changes in mechanical properties, that is, oscillation frequency (F), dynamic stiffness (S), and relaxation time (R), of BB muscles after ECC.

RESULTS: A significant difference in the major markers of EIMD, such as muscle soreness and serum CK activity, along with parameters of muscle function, was observed after ECC compared to baseline. Although all indirect markers of regional muscle damage demonstrated meaningful differences between before and after ECC, no statistically significant interaction between the distal and middle sites was observed in any of the markers. After ECC, both distal and middle sites showed significant changes in F, S, and R, but no statistical differences in changes in muscle mechanical properties were observed between localized muscle sites within BB muscles.

CONCLUSIONS: Changes in mechanical properties, including regional muscle damage, seem to be uniformly influenced by different anatomical locations within the BB muscle, such as elbow flexors, following ECC.

Key words: Eccentric exercise, Biceps brachii, Regional muscle damage, Muscle mechanical properties

서 론

길어지는 동안 힘이 발생하는, 소위 편심성 근수축(eccentric muscle contraction, ECC)으로 불리는 근활동은 동심성 근수축(concentric muscle contraction)과 비교해 상대적으로 낮은 대사 소비 요구량에도 불구하고 큰 힘을 생산하기 때문에 근력 강화 및 근 비대를 촉진을 위

한 효율적 훈련기법으로 활용될 수 있다[1]. 그러나 익숙하지 않은 고강도 ECC는 운동 유발 근 손상(exercise-induced muscle damage, EIMD)을 초래할 수 있으며[2], EIMD의 다양한 근 손상 징후들은 운동 수행력 감소는 물론 지속적인 훈련프로그램 참여를 제한하는 요인이 된다[3].

현재까지 EIMD를 완전히 설명할 수 있는 생리학적 메커니즘은 정립되지 못했지만, ECC 후 수일 동안 이어지는 근 기능 감소와 혈중 크

Corresponding author: Maeng-kyu Kim Tel +82-53-950-5937 Fax +82-53-955-4235 E-mail kimmk@knu.ac.kr

*이 논문은 2017년도 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 연구되었으며(NRF-2017R1C1B1006196), 경북대학교 김춘섭의 박사학위 논문의 일부를 수정한 것임.

Keywords 편심성 근수축, 상완이두근, 국소 근손상, 기계적 근손상

Received 3 Mar 2021 **Revised** 16 Apr 2021 **Accepted** 3 May 2021

© This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

레아틴 키나아제(creatine kinase, CK) 활동 증가를 포함해 근육 부종 (swelling) 및 지연성 근통증(delayed onset muscle soreness, DOMS)의 발현 등이 근 손상 여부 및 심각성을 추정하는 데 이용되어 왔다[4]. 그러나 이 같은 간접 표지자(markers)들은 대부분 운동 시 동원된 근육 집단 전체를 표적으로 한 포괄적 평가척도(global measures)로써 ECC에 노출된 개별 근육 반응을 판별하는 데는 한계가 있다[5]. 흥미롭게도 자기공명영상(magnetic resonance imaging, MRI)으로부터 산출된 결과들은 EIMD가 ECC 동안 동원된 근육 집단 내에서 개별 근육 간 차별적으로 발현될 개연성이 있으며, 심지어 단일 근육 내에서도 해부학적 위치에 따라 이질적으로 나타날 수 있다는 사실을 밝혀냈다[6]. 이론적 견지에서도 DOMS가 가벼운 1도 근좌상으로 분류되며 근좌상은 근건접합부(myotendinous junction)에서 더 심각한 양상을 보이기 때문에[7], 단일 근육 내에서도 해부학적 위치에 따라 EIMD의 발현 및 심각성은 불균일하게 발생할 가능성이 있다. 따라서 ECC에 의한 단일 근육 내 국소 부위 간 손상 차를 식별하기 위한 전략이 마련되어야 하며 이를 위해서는 기존 EIMD의 간접 표지자들의 응용과 함께 새로운 척도의 도입이 통증과 컨디셔닝 관리 측면에서 반드시 필요하다.

이론적 추론과 함께 근생검에 의한 결과들은 ECC에 따른 EIMD가 상대적으로 약한 교차결합(cross-bridge) 내 근절 분열로 인한 기계적 손상으로 제안되어 왔다[8,9]. 근육의 기계적 손상은 근육의 점탄성 속성에 영향을 미침으로써 결국 근육 경직도(muscle stiffness)를 변화시킬 수 있다[5,10]. 한 예로써 ECC 실시 후 상부승모근의 기계적 속성을 평가한 결과, 동적 경직도(dynamic stiffness)에서 유의한 감소가 관찰되었으며, 나아가 이러한 근 속성 변화가 단일 근육 내 해부학적 위치에 따라 서로 다르게 반응할 수 있다는 사실이 밝혀졌다[10]. 근생검과 같은 침습적 기법과 달리 근육의 기계적 근속성은 비침습적이며 반복적으로 측정할 수 있으며 국소적인 근육 반응을 탐지할 수 있다는 관점에서[10], 동적 경직도와 같은 근속성 지표의 활용은 EIMD의 발현 및 회복과정을 확인하는데 있어 적절한 정보를 제공할 수 있다.

계단을 내려가는 활동과 같이 일상생활에서 ECC를 빈번하게 경험하는 무릎 신근과 비교해 ECC 자극에 대한 노출 빈도가 적은 팔꿈치 굴곡근(elbow flexors)은 상대적으로 EIMD에 더 민감한 경향을 나타낸다[11]. 실제 팔꿈치 굴곡근을 이용한 고강도 ECC로 인해 수일 동안 상완이두근(biceps brachii, BB)의 근육 초음파 에코 강도(ultrasound echo intensity) 증가를 포함한 EIMD 징후들이 명백히 나타났으며[12], ECC의 결과로 BB의 경직도 증가와 같은 기계적 근속성 변화가 운동 후 120시간까지 지속하는 것으로 보고되었다[13]. 팔꿈치 굴곡근은 스포츠 활동에서 빈번하게 손상을 받는 근육이며[14], ECC 후 근 손상 정도가 심각함을 고려할 때, BB 내 해부학적 위치에 따른 근 손상의 이질성 식별은 EIMD의 발생 기전을 규명하고 효율적인 치료요법을 개발하는데 중요한 정보를 제공할 것으로 기대된다.

이러한 배경으로 현재 연구는 팔꿈치 관절을 활용한 최대 ECC 후 EIMD의 전통적인 간접 표지자들을 포함한 근육의 기계적 속성 변화를 평가함으로써, BB 내 해부학적 위치에 따른 국소 부위 간 근손상 차이를 규명하기 위한 목적으로 수행되었다.

연구 방법

1. 연구 대상

Cohen이 제시한 F-분포에서 중간크기의 effect size (=0.25)로 표본 수를 산출했다[15]. Repeated measures, within factors, ANOVA approach에서 각각의 input parameter들을 i) α err prob (the probability for type I error)=0.05, ii) Power (1- β err prob; type II error)=0.8, iii) Number of groups=2 (4 cm versus 30%) 및 iv) Number of measurements=6 (Pre, Post, 24 hours, 48 hours, 72 hours, and 96 hours)으로 설정하였다. 표본 수 산출 결과 actual power는 0.84 수준으로 실제 요구되는 총 표본 수(total sample size)는 최소 20이었다. 4 cm 및 30% 부위에서 표본 수를 각각 10 이상으로 설정하고 연구참여를 희망한 지원자 중 연구 포함기준을 만족한 13명(total sample size=26)을 최종 연구대상으로 선정하였다.

연구대상은 D광역시 소재 K대학 홈페이지 광고를 통해 모집되었으며, 건강한 남자 대학생들을 연구대상으로 선별하기 위해 미국스포츠 의학회(American College of Sports Medicine)가 제공하는 사전 신체활동 준비설문지(Physical Activity Readiness Questionnaire, PAR-Q) 및 미국심장협회(American Heart Association)의 건강/체력 시설 참여 전 검진설문지(Health/Fitness Facility Preparticipation Screening Questionnaires)를 활용하였다. 사전 훈련 효과를 배제하기 위해, 실험 전 최소 12개월 이상 저항 훈련은 물론 팔꿈치 굴곡근을 중심으로 한 정기적 운동프로그램에 참여하지 않은 비훈련자를 연구대상으로 모집하였다. 이외 구체적인 제외기준은 다음과 같다; i) 심혈관 및 대사질환이 있는 자, ii) 팔꿈치 관절의 운동을 제한하는 정형외과적 문제가 있는 자, iii) 연구 참여 최소 12개월 내 처방된 약물을 복용하는 자, iv) 연구 참여 최소 12개월 내 근육에 영향을 줄 수 있는 영양 보충제를 복용하는 자, v) 불법적인 약물 복용 등 연구자의 판단 아래 실험 참여가 부적절하다고 판단되는 자.

본 연구 프로토콜은 K대학교 생명윤리심의위원회를 통해 연구윤리에 관한 검토 및 승인(승인번호: 2018-0067)을 사전 취득하였으며, 연구자들은 연구 절차 및 연구에 수반되는 위험과 연구 참여 시 주의사항을 상세히 설명하고 각 참여자로부터 연구 참여에 관한 서면 동의를 획득하였다. 본 연구의 참여자들의 임상적 특징은 Table 1과 같다.

Table 1. Clinical characteristics of subjects (n=13)

Variables	
Age (yr)	23.31 ± 0.90
Height (cm)	172.72 ± 1.87
Weight (kg)	73.96 ± 2.79
BFP (%)	17.69 ± 1.48
SBP (mmHg)	118.54 ± 2.54
DBP (mmHg)	69.00 ± 1.88
MAP (mmHg)	85.51 ± 1.89
MHR (beats/min)	66.77 ± 2.59

Values are means ± SEM.

BFP, body fat percentage; SBP, systolic blood pressure; DBP, diastolic blood pressure; MAP, mean arterial pressure; MHR, mean heart rate.

2. 연구절차

근육의 기계적 속성과 함께 EIMD의 간접 표지자들은 비주축(non-dominant) 팔꿈치 관절을 이용한 최대 ECC 운동 전과 직후 및 운동 후 24, 48, 72 그리고 96시간까지 평가되었다. 팔꿈치 굴곡근의 최대 수의적 등척성 수축 (maximal voluntary isometric contraction, MVIC) 토크 측정은 기계적 근속성 외 EIMD의 간접 표지자들에 급성적인 영향을 미칠 수 있으므로 매 측정 시 마지막 순서로 수행하였으며, 각 시기에서 전체 측정 과정은 혈액 표본 채취, 상완 둘레 측정, 근육 초음파 검진, 근육의 기계적 속성 평가, 압통 역치 및 기능학적 평가[MVIC 토크 및 관절가동범위(range of motion)] 순으로 진행되었다. 실험기간 동안 참여자들은 평소 생활 습관을 유지하고, ECC 전 48시간 동안 격렬한 운동을 삼가고 24시간 전부터 카페인 및 알코올이 함유된 음료의 섭취를 금하도록 지시하였다. 또한 ECC 적용 후 추적 기간 동안 마사지, 찜질 및 비스테로이드성 소염진통제와 같은 약물 복용 등 EIMD 발현 및 회복 양상에 영향을 미칠 수 있는 교란변수(confounding variables)를 통제하였다. 참여자들은 최소 5일 전 실험실에 방문하여 기초 임상 정보를 평가 받은 후 모든 실험 과정들을 미리 경험하였다.

3. ECC protocol

ECC는 등속성 측정장비(computer-controlled dynamometer HUMAC NORM, CSMi Medical Solutions, Stoughton, MA)를 활용해 팔꿈치 관절에서 실시되었다. 전체 프로토콜은 선행 연구를[11] 바탕으로 90°/sec (1.57 rad/s) 각속도에서 최대 ECC를 6회 반복하는 5세트로 구성하였다. 관절범위는 해부학적 0°에서 90°로 일치시켰으며 각 수축 시 등속성 검력계는 6°/sec의 각속도에서 초기 위치로 관절을 되돌리도록 프로그래밍하였다. 각 수축 간 약 10초, 세트 간에는 2분의 휴식이 부여되었다. 본 연구에서 사용된 등속성 검력계의 경우 팔꿈치 굴곡근의 ECC는 누운 자세에서 전완과 손이 회외시킨 자세(supinated position)로 실시되었다. 이때 적합한 근수축이 이루어질 수 있도록 검력계 축과 관절 회전축을 일치시키고, 부가적 움직임을 제한하기 위해 전용벨트

및 패드를 이용해 체간을 비롯해 수축하지 않는 인체 분절들을 고정하였다. 검사자는 각각의 수축 시마다 참여자가 최대 노력을 발휘할 수 있도록 구두로 독려했다.

4. 포괄적 근 손상 척도들(global measures of muscle damage)

1) 근통증(muscle soreness)

ECC 후 팔꿈치 굴곡근의 전체적인 근통증 수준 평가를 위해 참여자들은 매번 실험실 방문 시 단편형 맥길 통증 설문지(short-form McGill Pain Questionnaire, SF-MPQ)를 먼저 작성하였다. 실제 SF-MPQ는 임상 및 실험 연구에서 널리 이용되어 왔으며, 감각 및 정서적 차원 등 다양한 통증 경험을 평가한다[16].

2) 혈청 CK 활성도(serum CK activity)

각 측정구간에서 정맥천자(venipuncture)를 통해 자쪽 피부정맥(an-tercubital vein)으로부터 약 5 mL을 채혈하고 혈청분리관(serum separator tubes, SST)에 주입하였다. 혈액을 응고(clotting) 시키기 위해 SST는 30분 이상 상온에 방치 후, 3,000 rpm (4°C)으로 5-10분 동안 원심분리하여 분리된 상층액(혈청)을 분석 시까지 -80°C 이하로 보관하였다. 이후 CK 수준은 전용 분석키트(Roche Diagnostics, Germany)를 이용해 Cobas® 8000 modular analyzer (Roche Diagnostics, Mannheim, Germany)에서 enzymatic UV-assay로 분석하였다.

3) MVIC torque

ECC를 수행한 등속성 검력계를 이용해 팔꿈치 굴곡근의 MVIC 토크를 산출했으며 앞서 기술한 바와 같이 활용한 등속성 검력계의 특성상 누운(supine) 자세에서 측정되었다. 구체적으로 ECC 후 팔꿈치 굴곡근의 MVIC 토크변화를 관찰한 선행 연구[11]를 참조하여 90° 관절 각에서 3초 동안 측정하였으며, 각 측정 간 45초간의 휴식을 부여하였다. 측정 동안 참여자가 최대 노력을 기울이도록 검사자들은 지속적인 구두 격려를 제공했으며 총 2회 반복측정 후 최대값을 이용해 자료 분석을 수행했다.

4) ROM

인체 측정용 고니오미터(Baseline® Goniometer, Fabrication Enterprises Inc., White Plains, NY)를 이용해 팔꿈치 관절에서 자발적 최대 굴곡 시(joint angle of voluntary maximal flexion, FANG) 및 최대 신전 시 각도(joint angle of voluntary maximal extension, EANG)를 측정하고, EANG와 FANG 간 차이 값을 ROM의 척도로 이용하였다[11]. ROM 측정 시 어깨 관절의 외전각은 0°로 설정하고, EANG은 선 자세로 팔을 늘어뜨리고 있는 동안 팔꿈치 관절의 최대 신전 시 각을,

FANG는 동일한 자세에서 손바닥을 동측(ipsilateral) 어깨에 닿도록 시도할 때 각으로 설정하였다. 팔꿈치 관절의 ROM 측정 동안 재현성 확보를 위해 반영구적 잉크펜을 이용해 상완골(humerus)의 외측상과(lateral epicondyle), 견봉돌기(acromion process) 및 요골 경상돌기(styloid process of the radius)를 각각 표시하였다. 2회 반복측정의 평균값이 자료 분석을 위해 채택되었다.

5. 국소 근 손상의 간접 표지자들(indirect markers of regional muscle damage)

1) 상완 둘레(upper arm circumference)

ECC 후 근육 부종을 평가하기 위해 인체 측정용 줄자(gulick tape measure)로 BB의 해부학적 위치에 따라 원위부와 중간 부위(distal and middle sites)의 상완둘레를 측정하였다. 구체적으로 원위부는 선 자세에서 팔을 늘어뜨리고 있는 동안 팔꿈치 주름 위 4 cm [17]에서 평가되었고, 중간 부위는 팔꿈치 주름과 견봉 사이 30% 부위에서[18] 상완둘레를 각각 평가하였다. 각 시기에서 측정 재현성 확보를 위해 반영구적 잉크펜으로 측정 위치를 표시하였으며 2회 반복측정 후 평균값을 자료분석에 이용하였다.

2) 근육 압통(muscle tenderness)

근통증 수준은 “통증 없음”을 가리키는 0과 “극심한 통증”을 표시하는 100으로 된 100 mm visual analogue scale (VAS)을 이용해 평가하였다. 구체적으로 flat circular 프로브(1.52 cm²)를 장착한 hand-held dial Pressure Algometer 장치(Baseline Push Pull Force Gauge Model 12-0304; Fabrication Enterprises Inc., New York, USA)를 이용해 참여자가 누워 있는 동안 각각 4 cm 및 30% 부위에서 BB의 근육 belly)을 초당 4 kg 압력으로 눌렀을 때 인지된 통증을 VAS에 기록하도록 지시하였다[19]. 각 부위별 2회 반복측정 결과의 평균값을 채택하였으며 정확한 압통 인지를 위해 각 측정 간 최소 30초의 휴식기를 부여했다.

3) 근육 에코 강도

이전 연구의 측정 절차를 참조하여 B-mode 이미지 획득을 위해 Logiq 200 PRO system (GE Medical Systems, Milwaukee, USA)에 장착된 초음파 탐촉자(7.5-MHz LH linear transducer, GE Healthcare, Milwaukee, WI, USA)를 전체 측정 구간에 걸쳐 동일한 각도와 압력으로 각 측정 부위에 위치시켰다[20]. BB의 해부학적 위치에 따라 4 cm 및 30% 부위에 탐촉자를 적용하여 각각의 횡단 이미지(transverse images)를 획득하였다. 일관된 초음파 탐촉자 배치를 위해 반영구적 잉크펜을 이용해 각 측정 부위를 표시하고 한 명의 검사자가 모든 이미지를 획득하였으며, 초음파 기기의 focus, gain 및 contrast를 포함한 모든 설정을 실험 종료까지 동일하게 유지시켰다. 획득한 모든 초음파 영상이미지는 분

석용 PC에 저장 후 ImageJ 소프트웨어(Version 1.52a, National Institutes of Health, Bethesda, Maryland)를 통해 관심영역(region of interest, ROI: 1 cm²)의 회색조 히스토그램(gray scale histogram, 0=black, 256=white)으로 평균 에코 강도를 계산했다.

6. 근육의 기계적 속성(mechanical properties of muscle)

3축 가속도 센서를 장착한 접촉식 연부조직 측정기 MyotonPRO (Myoton AS, Tallinn, Estonia)를 이용해 ECC 후 BB의 기계적 속성 변화를 평가했다. 측정 오차를 최소화하기 위해 참여자는 바로 누운 자세로 10분간 안정을 취하고, 측정 시 불필요한 긴장을 하지 않고 최대한 이완 상태를 유지했다. BB의 해부학적 위치를 따라 4 cm 및 30% 부위 근육에서 기계적 속성을 각각 평가했으며, Multi-scan mode를 이용하여 Tap 반복 횟수는 5회, 기계적 임펄스 전달 시간(tap time)은 15 millisecond, 전달 간격은 0.8초로 설정하였다. MyotonPRO를 통해 산출되는 F (oscillation frequency, Hz)는 근육의 긴장(tone)을 나타내며, S (dynamic stiffness, N/m)는 동적 경직도로 수축 혹은 근육의 형태를 변형시키는 외부 힘에 대한 저항으로 특징되는 생체역학적 속성을 의미한다. R (mechanical stress relaxation time, ms)은 자발적 수축 혹은 외부적 힘이 제거된 후 변형된 근육 형태가 회복하는 시간을 의미한다[21]. 각 측정 부위에서 2회 반복 측정되었으며 MyotonPRO 기기 화면에서 측정오차가 3% 이상일 경우 1회 더 측정한 후 2회 측정치의 평균값을 자료 분석에 이용하였다[22].

7. 자료 처리 방법

모든 자료처리는 윈도우용 SPSS 통계프로그램(Statistical Package for the Social Sciences software, versions 25.0, Chicago, IL, USA) 프로그램을 사용하여 각 항목별 평균(mean)과 표준오차(standard error of mean, SEM)를 산출하였다. Shapiro-Wilk test를 이용해 표본의 정규분포를 확인하고 Levene's test로 분산의 동질성(homogeneity of variance)을 판별하였다. 최대 ECC 후 각 측정 변인들의 시간에 따른 주효과를 확인하기 위해 Bonferroni 사후검정(Bonferroni post hoc test)과 함께 일원 배치 분산분석(one-way analysis of variance (ANOVA))을 실시하였다. 이원배치 반복측정 분산분석(two-way repeated measures ANOVA)은 각각의 측정 변인들에서 시간에 따른 부위 간 상호작용(interaction) 효과를 확인하기 위해 실시되었다. 모든 통계적 유의 수준은 $p < .05$ 로 설정하였다.

연구 결과

1. Changes in global measures of muscle damage

혈청 CK 활동은 ECC 후 점차 증가하였으며, 운동 전과 비교해 운동

Table 2. Changes in global measures of muscle damage

Variables	Post	24 hours	48 hours	72 hours	96 hours	p
Δ Serum CK activity (IU/L)	5.77 ± 2.00	43.77 ± 10.6	123.77 ± 43.07	405.31 ± 194.75	934.85 ± 442.56 *	<.01
Δ MVIC torque (Nm)	-19.17 ± 2.09 **	-15.75 ± 2.96 **	-12.08 ± 2.86 *	-8.83 ± 2.22	-6.33 ± 3.07	<.01
Δ ROM (degree)	-9.69 ± 2.03 **	-7.42 ± 1.76 *	-8.19 ± 1.43 *	-4.31 ± 2.03	-4.38 ± 1.99	<.01
Δ SF-MPQ (score)	2.85 ± 0.49	4.31 ± 1.23 **	4.08 ± 0.74 **	3.31 ± 1.02	2.38 ± 0.58	<.01

Values are means ± SEM.

CK, creatine kinase; MVIC, maximal voluntary isometric contraction; ROM, range of motion; SF-MPQ, short-form McGill pain questionnaire.

* $p < .05$, ** $p < .01$, difference between baseline value and each time point after eccentric exercise determined by Bonferroni *post-hoc* test.

Fig. 1. Changes in indirect markers of regional muscle damage.

후 96시간째 유의하게 증가하였다(Table 2). 근육 기능 변화 측면에서, MVIC torque와 ROM은 ECC 직후 급격히 감소하였으며 운동 전과 비교해 운동 후 48시간까지 유의하게 감소한 것으로 나타났다(Table 2). 팔꿈치 굴곡근에서의 전반적 통증 인지를 반영하는 SF-MPQ 점수 역시 ECC 후 24시간째 최대 증가 폭이 나타났으며 운동 전과 비교해 24 및 48시간에서 유의하게 증가하였다(Table 2).

2. Changes in indirect markers of regional muscle damage

상완 둘레는 모든 측정 부위에서 증가하였으며, 4 cm의 경우 운동 전과 비교해 각각 운동 후 24, 48, 72 및 96시간까지 각각 유의하게 증가하였다. 30% 또한 운동 전과 비교해 각각 24, 48 및 72시간에서 각각 통계적으로 유의하게 증가하였으며, 4 cm와 30% 부위의 상완 둘레 변화량에서 시간에 따른 측정 부위 간 유의한 상호작용효과는 나타나지 않았다(Fig. 1A). 모든 측정 부위에서 압통은 ECC 후 48시간째 최고조에 도달하였으며, 운동 전과 비교해 운동 후 48시간에서만 통계적으로

Fig. 2. Changes in mechanical properties of muscle.

증가하였다. 그러나 4 cm 및 30% 부위의 압통 변화량에서 시간에 따른 측정 부위 간 유의한 상호작용효과는 없었다(Fig. 1B). 근육 에코 강도는 모든 측정 부위에서 운동 전과 비교해 ECC 후 48, 72 및 96시간째 각각 유의하게 증가하였으나, 4 cm 및 30% 부위의 근육 에코 강도 변화량에서 시간에 따른 측정 부위 간 유의한 상호작용효과는 없었다(Fig. 1C).

3. Changes in mechanical properties of muscle

근 긴장도를 나타내는 F의 경우 모든 측정 부위에서 ECC 후 24시간째 최고조로 증가하였으며, 4 cm 및 30% 부위 모두 운동 전과 비교해 운동 후 24시간째에만 유의한 차이가 나타났다. 4 cm 및 30% 부위의 F 변화량에서 시간에 따른 측정 부위 간 유의한 상호작용 효과는 나타나지 않았다(Fig. 2A).

동적 근육 경직도를 반영하는 S의 경우 4 cm 및 30% 부위 모두 ECC 후 24시간째 최고조로 증가하였다. 구체적으로 4 cm에서는 운동 전과 비교해 운동 후 24시간째에만 통계적으로 증가했던 반면 30% 부

위의 경우 운동 직후부터 운동 후 24, 48, 72 및 96시간까지 각각 운동 전과 비교해 유의하게 증가하였다. 그러나 4 cm 및 30% 부위의 S 변화량에서 시간에 따른 측정 부위 간 유의한 상호작용 효과는 없었다(Fig. 2B).

근육 이완 상태를 보여주는 R의 경우 모든 측정 부위에서 ECC 후 24시간째 최대 감소가 나타났다. 구체적으로 4 cm에서는 운동 전과 비교해 운동 직후부터 운동 후 24 및 72시간째 각각 유의한 감소가 나타났으며, 30%에서는 운동 직후와 운동 후 24, 48 및 72시간째 각각 통계적으로 감소하였다. 그러나 4 cm 및 30% 부위의 R 변화량에서 시간에 따른 측정 부위 간 유의한 상호작용 효과는 없었다(Fig. 2C).

논 의

팔꿈치 굴곡근은 대퇴사두근과 같은 무릎 신전근보다 상대적으로 근 손상에 민감하고 EIMD가 단일 근육 내에서도 해부학적 위치에 따라 이질적으로 발현될 수 있다는 점을 고려하여, 현재 연구는 팔꿈치

관절을 이용한 최대 ECC 후 근 손상 정도를 포함한 기계적 속성 변화에서 BB의 해부학적 위치에 따른 국소 부위 간 차이를 규명하기 위한 목적으로 수행되었다. 주된 연구 결과는 다음과 같다. 첫째, 혈청 CK 활동 및 근기능 표지자들의 변화를 통해 확인된 사실로써, 팔꿈치 관절을 이용한 최대 ECC는 팔꿈치 굴곡근의 EIMD를 유도하였다. 둘째, 근육 부종, 압통 및 초음파 에코 강도와 같은 EIMD의 전통적인 간접 표지자들의 변화를 통해 확인된 사실로써, 최대 ECC 후 BB의 해부학적 위치에 따라 설정된 4 cm와 30% 부위 간 근 손상 정도는 유의미한 차이가 없었다. 셋째, 국소적 근 손상을 반영하는 간접 표지자들의 변화와 마찬가지로 최대 ECC 후 기계적 속성 변화에서도 BB의 원위부와 중간 부위 간 통계적 차이는 나타나지 않았다.

본 연구와 유사하게 Chen et al. [23]의 연구에서도 훈련 경험이 없는 남자 대학생 15명을 대상으로 등속성 검력계를 이용한 팔꿈치 관절의 최대 ECC가 시행되었다. 120시간 동안 추적 결과 팔꿈치 굴곡근을 표적으로 한 총 30번의 최대 자발적 ECC는 운동 직후 근력 및 ROM의 급격한 저하를 유발했으며, 이와 같은 근 기능 저하는 수 일에 걸쳐 회복되었다[23]. 게다가 운동 후 24시간째 최대 통증 수준에 도달하며, 혈중 CK 활동이 최대 96시간 이상 계속 증가했다는 점에서 Chen et al. [23]의 연구 결과는 현재 연구 결과와 상당 부분 일치한다. 결국 훈련하지 않은 젊은 남성들에게서 팔꿈치 굴곡근을 표적으로 한 최대 ECC는 EIMD를 초래하며, 근 기능적 지표들을 포함한 DOMS 및 혈중 단백질 활동 같은 포괄적 근 손상 척도들은 이러한 사실을 확인할 수 있는 대표적인 표지자로 재확인되었다.

무릎 신전근 중 대퇴직근(rectus femoris)의 경우, 무릎 관절의 ECC 후 원위부와 비교해 근위부(proximal site)에서 MRI 횡축이완시간(transverse relaxation time, T2)을 포함한 국소 압통이 가장 큰 영향을 받는 것으로 보고되었다[6]. 대조적으로 팔꿈치 굴곡근의 ECC 후 BB에서 최대 압통과 근육 부종은 근위부가 아니라 원위부 주변에서 발생하는 것으로 보고되었다[24]. 현재 연구 결과에서도 해부학적으로 BB의 원위부로 해석할 수 있는 4 cm 부위에서 상완돌레와 압통이 유의하게 증가한 것으로 나타났다. 이에 더해 4 cm 부위에서 BB의 초음파 에코 강도 또한 통계적으로 증가한 것으로 나타났다. 결과적으로 이러한 결과들은 대퇴직근과 달리 ECC 후 BB는 원위부에서 더 심각한 EIMD를 겪을 수 있음을 암시한다. 다만 본 연구의 결과에서 중간 부위로 해석할 수 있는 30% 지점의 근육 부종, 압통 및 초음파 에코 강도의 변화는 4 cm 부위와 유사한 정도로 나타났다. 이는 Cleak과 Eston의 결과[24]와 일치하는데, 그들의 연구에서 팔꿈치 굴곡근의 격렬한 ECC 후 압통 및 근육 부종의 변화는 중간 부위와 원위부에서 유의하게 증가한 반면 근위부에서는 통계적 변화가 없었다. 본 연구의 결과에서도 ECC 후 BB의 근위부(팔꿈치 주름과 견봉 사이 50%)에서 측정된 근육 부종 및 압통은 유의미한 변화가 나타나지 않았다(data not

shown). ECC 후 단일 근육이라는 대퇴직근 내에서의 국소변화와 본 연구에 적용된 상완이두근에서의 국소변화는 왜 다소 상이한 패턴을 보이는가에 관한 해석은 다음과 같다. 첫째, 대퇴직근과 상완이두근 둘 다 이관절근육(bi-articular muscles)임에도 불구하고 근육의 형태가 다르다. 이를테면 대퇴직근은 깃털형 근육(pennate muscle)인 반면, 상완이두근은 방추형 근육(fusiform muscle) 형태를 띠고 있다. 둘째, 상반신과 하반신의 차이에 기인할 수 있다. 통상 ECC에 대한 혈청 CK반응은 대퇴직근에 대한 ECC 적용과 상완이두근에 대한 ECC 적용에서 아주 다른 패턴을 보여준다[5,6,24]. 이러한 점에서 동일한 이관절근육에 ECC를 적용하더라도 단일 근육 내 국소손상 양상은 다른 패턴을 보일 수 있다는 점을 시사한다.

ECC는 근육량 증가 및 건병증(tendinopathies)에 대해 적용할 수 있는 유효한 처치일 수 있으나 운동에 동원된 근육군에 걸쳐 균일하지 않은 ECC 자극은 국소적 근 손상을 초래할 수 있다[25]. 이러한 사실을 입증하기 위한 시도로써, 최대 ECC 후 BB의 서로 다른 국소 부위 간 국소적 근 손상 차를 비교하기 위해 MRI T2 값과 함께 기계적 근 속성을 반영하는 전단 탄성 계수(shear elastic modulus)의 변화를 정량화하려는 시도가 있었다[5]. 이 연구의 결과 BB의 MRI T2 값은 물론 전단 탄성 계수가 ECC 후 유의하게 변화되었지만, 두 변수의 변화량은 BB의 근위부, 중위부 및 원위부 국소 부위에서 동등한 정도로 나타났다[5]. 이와 일치하는 결과로써 본 연구에서도 MyotonPro를 이용해 BB의 근 긴장도, 동적 경직도 및 근이완 시간을 산출한 결과 ECC 후 유의한 변화가 나타났지만, 모든 기계적 근속성 변수들의 변화량에서 4 cm와 30% 부위 간 통계적 차이는 없었다. 이상의 결과들은 팔꿈치 굴곡근에서 ECC로 인해 유발된 BB의 기계적 속성 변화가 해부학적 위치에 따른 국소 부위 간 균일하게 나타난다는 사실을 암시한다. 또 하나 간과할 수 없는 사실은 근육의 기계적 속성 변화가 이것을 평가하기 위한 도구들마다 독립적인 양상을 보인다는 것이다. ECC 후 승모근의 기계적 속성 변화를 탐색하기 위해 횡파 탄성 초음파영상(shear wave elastography)로 측정된 탄성 계수와 MyotonPro를 통해 동적 경직도를 평가한 결과 두 변수 모두에서 유의한 감소가 나타났지만 탄성 계수와 동적 경직도 간 유의미한 관련성은 없었다[10]. 따라서 ECC 후 EIMD에 따른 기계적 속성 변화를 정량화하는데 있어서 평가도구의 특성을 고려하는 것이 매우 중요할 수 있다. Lacourpaille et al. [5]의 연구에서 탄성 계수로 평가된 팔꿈치 굴곡근의 근속성 변화는 ECC 후 1시간째 유의하게 증가하였지만 48시간째 초기값으로 회복되었다. 그러나 이 연구에서 DOMS는 운동 후 1시간째부터 유의하게 증가하여 48시간째 최고조에 이르렀으며, 이 같은 EIMD 징후는 MVIC torque에서도 유사하게 나타났다[5]. 결과적으로 ECC 후 횡파 탄성 초음파영상으로 추출한 BB의 탄성 계수 변화는 너무 짧은 시간 동안 발현될 수 있으므로 EIMD의 발현 및 회복 경로를 적절히 모니터링하는 데 한계

가 있다. 본 연구의 결과에서도 EIMD의 혈청 CK 활동, MVIC 토크와 ROM, 근통증 및 근육 부종 등 EIMD의 전형적 간접 표지자들은 최소 48시간째 또는 최대 96시간까지 지연된 기간 동안 발현되었다. MyotonPro를 통해 산출된 기계적 근속성 중 동적 경직도는 BB의 30% 부위에서 ECC 직후부터 96시간까지 유의하게 증가하였으며, 근이완 시간은 모든 측정 부위에서 운동 직후부터 72시간까지 유의한 감소가 나타났다. Janecki et al. [13]의 연구에서도 MyotonPro의 이전 모델(Myoton-3 device)을 이용해 ECC 후 BB에서 산출한 경직도의 증가는 운동 직후부터 120시간까지 지속했다. 이상의 결과들은 MyotonPro를 이용한 기계적 근속성 측정이 간단하고 비침습적으로 이루어질 뿐만 아니라 산출된 변수를 통해 오랜 기간 근속성 변화를 탐지할 수 있다는 점에서, ECC 후 EIMD의 진단 및 평가를 위해 이 같은 측정 기법의 활용이 적극적으로 검토될 필요가 있다는 사실을 시사한다. 추후 해당 기법으로 산출된 기계적 근 속성 변화와 EIMD 징후 간 관련성 규명은 또 하나의 흥미로운 주제가 될 수 있다.

본 연구는 몇몇 제한점을 내포하고 있다. 첫째, 젊고 건강한 남성만을 연구대상으로 선별했기 때문에 연령과 성차 및 근육의 기계적 속성에 영향을 줄 수 있는 병리적 조건을 고려할 수 없다. 어린이는 성인보다 EIMD에 덜 민감하지만, ECC에 따른 근 손상의 정도는 노인과 젊은이 혹은 남녀 간 현저한 차이가 없는 것으로 알려져 있다[26]. 그러나 MyotonPro로 산출되는 근육의 기계적 속성이 건강한 모집단 내에서 높은 재현성을 나타낸 반면, 근육긴장병증(paratonia)이 있는 모집단에서 경직도가 건강한 사람들과 유의한 차이를 보였다[27]. 따라서 본 연구에서는 이러한 혼란 요인을 통제하기 위하여 젊고 건강한 남성으로 구성된 동질집단을 연구대상으로 설정하였다. 둘째, ECC 후 96시간까지 BB의 기계적 속성 변화를 추적하였기 때문에, 장기적 효과(long-term effects)는 확인할 수 없다. 본 연구의 결과에서 혈청 CK 활동, 근육 부종 및 근육 에코 강도 변화가 ECC 후 96시간까지 운동 전 수준으로 회복하지 못했지만 기계적 근속성 변수들은 대부분 운동 후 24시간을 최고점으로 72시간 내 운동 전 수준으로 회복하는 양상을 나타내었다. 더구나 근 기능적 표지자들을 포함해 DOMS 또한 최대 72시간 내 운동 전 수준으로 되돌아갔다. 근육 부종과 기계적 속성 변화가 독립적인 뿐만 아니라[5], 현재까지 제안되고 있는 전통적인 EIMD 간접 표지자들의 발현 정도와 회복 양상은 서로 관련하지 않는다[26]. 따라서 본 연구에서는 주된 변수로 설정된 근육의 기계적 근속성 변화가 명확히 식별되는 기간을 추적 관찰함으로써 연구 목적에 부합하는 결과를 도출하였다.

결 론

현재 연구에서는 팔꿈치 관절의 최대 편심성 운동 후 상완이두근의

국소 부위 간 근 손상 차이를 확인하기 위한 시도로써 EIMD의 간접 표지자들과 함께 근육의 기계적 속성 변화를 정량화하였다. 실험 결과 편심성 운동 후 근육 부종, 압통 및 초음파 근육 에코 강도와 같은 간접 표지자의 변화를 통해 상완이두근의 해부학적 위치에 따른 4 cm 부위와 30% 부위 간 국소 부위 EIMD의 발생 정도에서 유의미한 차이가 없었을 뿐만 아니라 동일 위치들 간 기계적 근속성 변화에서도 명백한 차이는 나타나지 않았다. 결과적으로 팔꿈치 굴곡근을 표적으로 한 최대 편심성 근수축 후 상완이두근의 국소 부위 간 근 손상 정도뿐만 아니라 기계적 속성 변화는 해부학적 위치와 독립적으로 균일하게 발현될 수 있다는 점을 시사한다.

CONFLICT OF INTEREST

The authors have no conflicts of interest relevant to this study.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Conceptualization: MK Kim; Data curation: CS Kim, MK Kim; Formal analysis: CS Kim, MK Kim; Methodology: MK Kim; Project administration: MK Kim; Writing-original draft: CS Kim, MK Kim; Writing-review & editing: MK Kim.

ORCID

Choun-sub Kim	https://orcid.org/0000-0003-1995-080X
Maeng-kyu Kim	https://orcid.org/0000-0002-7855-608X

REFERENCES

1. Douglas J, Pearson S, Ross A, McGuigan M. Chronic adaptations to eccentric training: a systematic review. *Sports Med.* 2017;47(5):917-41.
2. Gleeson N, Eston R, Marginson V, McHugh M. Effects of prior concentric training on eccentric exercise induced muscle damage. *Br J Sports Med.* 2003;37(2):119-25.
3. Byrne C, Twist C, Eston R. Neuromuscular function after exercise-induced muscle damage. *Sports Med.* 2004;34(1):49-69.
4. Harty PS, Cottet ML, Malloy JK, Kerkick CM. Nutritional and supplementation strategies to prevent and attenuate exercise-induced muscle damage: a brief review. *Sports Med-open.* 2019;5(1):1-17.
5. Lacourpaille L, Nordez A, Hug F, Couturier A, Dibie C, Guilhem G. Time-course effect of exercise-induced muscle damage on localized

- muscle mechanical properties assessed using elastography. *Acta Physi-ol.* 2014;211(1):135-46.
6. Maeo S, Saito A, Otsuka S, Shan X, Kanehisa H, Kawakami Y. Localization of muscle damage within the quadriceps femoris induced by different types of eccentric exercises. *Scand J Med Sci Sports.* 2018;28(1):95-106.
7. Cheung K, Hume PA, Maxwell L. Delayed onset muscle soreness. *Sports Med.* 2003;33(2):45-164.
8. Stupka N, Tarnopolsky MA, Yardley NJ, Phillips SM. Cellular adaptation to repeated eccentric exercise-induced muscle damage. *J Appl Physiol.* 2001;91(4):1669-78.
9. Tee JC, Bosch AN, Lambert MI. Metabolic consequences of exercise-induced muscle damage. *Sports Med.* 2007;37(10):827-36.
10. Kisilewicz A, Madeleine P, Ignasiak Z, Cizek B, Kawczynski A, Larsen RG. Eccentric exercise reduces upper trapezius muscle stiffness assessed by shear wave elastography and myotonometry. *Front Bioeng Biotechnol.* 2020;8.
11. Chen TC, Lin KY, Chen HL, Lin MJ, Nosaka K. Comparison in eccentric exercise-induced muscle damage among four limb muscles. *Eur J Appl Physiol.* 2011;111(2):211-23.
12. Nosaka K, Sakamoto KEI. Effect of elbow joint angle on the magnitude of muscle damage to the elbow flexors. *Med Sci Sports Exerc.* 2001;33(1):22-9.
13. Janecki D, Jarocka E, Jaskolska A, Marusiak J, Jaskolski A. Muscle passive stiffness increases less after the second bout of eccentric exercise compared to the first bout. *J Sci Med Sport.* 2011;14(4):338-43.
14. Magra M, Caine D, Maffulli N. A review of epidemiology of paediatric elbow injuries in sports. *Sports Med.* 2007;37(8):717-35.
15. Faul F, Erdfelder E, Lang AG, Buchner A. G* Power 3: A flexible statistical power analysis program for the social, behavioral, and biomedical sciences. *Behav Res Methods.* 2007;39(2):175-91.
16. Trost Z, France CR, Thomas JS. Pain-related fear and avoidance of physical exertion following delayed-onset muscle soreness. *PAIN[®].* 2011;152(7):1540-7.
17. Chen TC, Nosaka K. Responses of elbow flexors to two strenuous eccentric exercise bouts separated by three days. *J Strength Cond Res.* 2006;20(1):108.
18. Pillen S. Skeletal muscle ultrasound. *Eur J Transl Myol.* 2010;20(4):145-56.
19. Ormsbee MJ, Ward EG, Bach CW, Arciero PJ, McKune AJ, Panton LB. The impact of a pre-loaded multi-ingredient performance supplement on muscle soreness and performance following downhill running. *J Int Soc Sports Nutr.* 2015;12(1):1-9.
20. Kim CS, Sun MG, Kim MK. Cardiac Autonomic Responses and Adaptation to repeated bouts of eccentric exercise. *Exerc Sci.* 2020;29(4):359-67.
21. Schneider S, Peipsi A, Stokes M, Knicker A, Abeln V. Feasibility of monitoring muscle health in microgravity environments using Myoton technology. *Medical & biological engineering & computing.* 2015;53(1):57-66.
22. Kim CS, Kim MK. Mechanical properties and physical fitness of trunk muscles using Myoton. *Korean J Phys Educ.* 2016;55(1):633-42.
23. Chen TC, Chen HL, Lin MJ, Wu CJ, Nosaka K. Muscle damage responses of the elbow flexors to four maximal eccentric exercise bouts performed every 4 weeks. *Eur J Appl Physiol.* 2009;106(2):267-75.
24. Cleak MJ, Eston RG. Muscle soreness, swelling, stiffness and strength loss after intense eccentric exercise. *Br J Sports Med.* 1992;26(4):267-72.
25. Hedayatpour N, Falla D. Non-uniform muscle adaptations to eccentric exercise and the implications for training and sport. *J Electromyogr Kinesiol.* 2012;22(3):329-33.
26. Hyldahl RD, Chen TC, Nosaka K. Mechanisms and mediators of the skeletal muscle repeated bout effect. *Exerc Sport Sci Rev.* 2017;45(1):24-33.
27. Van Deun B, Hobbelen JS, Cagnie B, Van Eetvelde B, Van Den Noortgate N, Cambier D. Reproducible measurements of muscle characteristics using the MyotonPRO device: comparison between individuals with and without paratonia. *J Geriatr Phys Ther.* 2018;41(4):194-203.