



수온 차이에 의한 하이드로테라피 적용이 편심성 운동 후 근손상 발현 및 회복에 미치는 영향

조현덕 MA, 김춘섭 PhD, 김맹규 PhD

경북대학교 체육교육과 스포츠의학실험실

Effects of Hydrotherapy on Muscle Damage and Recovery Profile After Eccentric Exercise in Arm

Hyeon-deok Jo MA, 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 effect of hydrotherapy at different temperatures following eccentric exercise on muscle damage and recovery profiles in young men.

METHODS: Male college students without any cardiovascular or orthopedic disorders were randomly assigned to three hydrotherapy groups: a 5°C group (cold water, COLD), a 15°C group (cool water, COOL), and a control group (CON). Thirty maximal eccentric exercises were performed using the participants' nondominant elbow flexor muscles. Each treatment consisted of immersion five times for 1 minute, along with a 1-minute rest between each immersion trial. Each intervention was conducted immediately after the eccentric exercise and every 24 hours. Changes in the level of exercise-induced muscle damage (EIMD), circumference, muscle soreness, range of motion (ROM), maximum voluntary isometric contraction (MVIC), muscle dynamic stiffness, and muscular echo intensity (EI) were measured. All parameters were measured at 24, 48, 72, and 96 hours after exercise, as well as immediately before and after exercise.

RESULTS: Muscle soreness was significantly higher in the COLD group than in the other groups. Moreover, the muscle circumference tended to increase in the COLD group than in the other groups. However, an increase in the dynamic stiffness and EI, promoting the recovery of MVIC, was observed in the COOL group. In addition, ROM tended to return more rapidly in the COOL group than in the other groups.

CONCLUSIONS: This study suggests that hydrotherapy at moderately low temperatures compared with that at extremely low temperatures may induce relatively positive effects on EIMD and recovery phases following eccentric exercise in the arms.

Key words: Hydrotherapy, Cold water immersion, Water temperature, Eccentric exercise, Exercise-induced muscle damage

서론

편심성 근수축(eccentric muscle contraction)은 단축성수축(concentric muscle contraction)과 비교해 낮은 대사 소비량으로 같은 힘을 발

휘하기 때문에 효율적인 훈련기법으로 활용되고 있다[1]. 이러한 동일 장력을 출력 대비 낮은 에너지소비량을 소모하는 장점을 가지고 있음에도 불구하고 고강도의 편심성 근수축을 함유한 운동을 수행할 경우 편심성 근수축의 특성으로 인해 운동 유발성 근손상(exercise-in-

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 연구되었음(NRF-2017R1C1B1006196).

Keywords 하이드로테라피, 저온 수침, 수온, 편심성 근수축, 운동 유발성 근손상

Received 21 Apr 2021 **Revised** 21 May 2021 **Accepted** 24 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.

duced muscle damage, EIMD)을 유발할 수 있으며[2-4], 이에 따른 손상 징후로 인해 운동수행력의 저하를 초래할 뿐만 아니라 규칙적인 운동 프로그램 참여를 제한할 수 있다[5,6]. 이러한 증상은 운동 초보자에게서 심각한 수준으로 나타나며 심지어 숙련된 선수에서도 증상이 발견할 수 있기 때문에, EIMD의 예방 및 치료를 위한 임상적 근거를 마련하는 것은 최적의 운동 트레이닝 환경을 구축하는데 유효한 단서를 제공할 수 있다.

EIMD의 발생을 설명하는 대표적인 생리학적 기전은 편심성 근수축으로 인한 근섬유의 기계적 손상과 대사적 손상으로 대별된다[7,8]. EIMD에 의해 발현되는 증상은 수일간 지속되는 관절가동범위(range of motion, ROM) 저하 및 최대 자발적 등척성 수축(maximal voluntary isometric contraction, MVIC) 근력 손실이 수반된다[2]. 근육 기능의 저하뿐만 아니라 운동 후 24시간부터 발생하여 96시간 이상 지속될 수 있는 지연성근통증(delayed onset muscle soreness, DOMS)도 동반하며, 발현된 증상은 일반적으로 24시간에서 72시간 사이에서 정점에 도달한 뒤 5-7일 후에 경감되는 경향이 있다[8]. 뚜렷한 징후를 가진 EIMD는 근형질막의 손상, 혈관 병변, 세포 골격 손상과 부종 그리고 염증 반응을 초래하여 결과적으로 완전한 회복 및 재생은 수일에서 수개월에 걸쳐 이루어진다[9].

많은 선행연구에서는 EIMD를 예방 및 치료하기 위한 목적으로 마사지(massage), 스트레칭(stretching), 보충요법(supplementation), 크라이오테라피(cryotherapy) 및 하이드로테라피(hydrotherapy)와 같은 다양한 전략의 효과를 검증하였다[10-12]. 오늘날 임상 스포츠현장에서 널리 사용되는 저온 수침 요법(cold water immersion, CWI)은 하이드로테라피의 일종으로, 15°C 미만의 온도로 설정된 냉수에 목표 근육을 침수시켜 체온 변화를 통한 대사적 변화를 유도하는 크라이오테라피의 특성과, 침수된 부위에 수압을 통해 생리적 변화를 유도하는 하이드로테라피의 특성을 함께 적용하는 전략이다[11]. CWI의 기전은 완전히 밝혀지지 않았지만, 근육 온도의 저하 또는 정수압의 영향으로 모세혈관 수축을 통해 대사율 저하, 반응성 산소종(reactive oxygen species)의 생성과 염증 과정을 완화시켜 2차성 손상을 최소화할 수 있다고 제안되었다[12,13]. 실제로 급성의 근육 손상 후 염증 발생의 결과로 인해 혈관 투과성이 증가하는 것으로 알려져 있으며, 투과성이 증가함에 따라 혈관 확장과 함께 세포 외 단백질 농도가 증가하여 동원된 조직의 부종(edema)을 야기시킨다[14]. 또한, 낮은 조직 온도에서는 신경 전도속도가 낮아지며, 근방추의 활성이 감소하며[13], 그로 인해 신장 반사 반응(stretch reflex)과 근육 강직(spasticity)을 감소시켜 통증 완화에 기여할 수 있는 것으로 제안되었다[14]. 따라서 운동에 직접 동원된 근육에 CWI를 적용하는 것은 근육 손상 후 발현되는 징후를 완화시킬 수 있는 것으로 기대된다. 그러나 여전히 근기능 및 근통증의 변화를 살펴볼 때 CWI의 효과는 연구 간 합치된 결론에 도달하지 못

하였다[10-13].

근생검을 이용한 EIMD의 수준을 평가하는 것은 운동성 손상과 근생검에 의한 손상을 구분하기 어려운 점 때문에[15], 현재까지 근육 부종, DOMS 및 근기능 변화 등의 간접적 지표를 활용하여 근손상 여부 및 EIMD의 수준을 추정 및 평가하여 왔다[5,16,17]. 그럼에도 불구하고 EIMD의 근육형태학적, 기능학적인 학술적 접근으로 한계에 그치고, 이에 EIMD 증상인 염증 또는 대사물질의 세포 침투에 관한 가시적 정보를 얻기 위해 근래에는 비침습적이고 쉽게 접근 가능한 초음파 영상 분석을 채택하고 있다[5,16,17]. 따라서 초음파 영상학적 정보를 토대로 국소 근육에서 나타나는 근육의 질적 변화를 분석하는 것은 ‘EIMD-CWI’의 영향을 평가하는데 있어 핵심 역할이라 볼 수 있다. 또한, EIMD로 인한 근육의 기계적 손상은 근육의 경직도(muscle stiffness)를 변화시킬 수 있는 것으로 보고되었다[18]. 근육의 기계적 속성을 평가하는 것은 비침습적이고 반복적으로 측정할 수 있으므로 근생검의 일회성 측정 단점을 보완하여 EIMD의 발현 및 회복과정을 평가하는데 기여할 수 있다. 최근 Pinto et al. [19]의 연구에서 근손상 유발 운동 후 근육의 기계적 속성을 평가하여 CWI의 영향을 확인하였지만 [19], EIMD 반응 양상이 다른 하지를 대상으로 한 점, 다시 말해 상대적으로 근육량이 많은 부위에서 운동스트레스의 반응을 평가하는 것은 쉽지 않다. Pinto et al. [19]의 연구에서 EIMD 발현 후 CWI의 적용이 긍정적 결과를 미치지 못하였지만 이러한 결과는 CWI의 적용 기간, 설정된 수온, 침수 시간 및 동원된 근육과 운동 방법 등에 의한 것으로 판단된다. 따라서 근육량이 상대적으로 적고 짧은 기간임에도 불구하고 EIMD의 반응성이 큰 상지에 대한 CWI의 적용에 따른 변화 양상에 대한 평가도 필요할 것으로 판단된다.

CWI의 적용이 EIMD 발현 완화에 긍정적 효과를 나타낼 수 있다는 것이 알려져 있음에도 불구하고 최적의 프로토콜이 정립되어 있지 않다. 구체적으로 CWI 중에서도 수온의 차이에 따라 상이한 결과가 보고되었고 [11], 특히 초저온과 저온에 대한 비교는 구체적으로 밝혀지지 않았다. 그러므로 EIMD 발현에 대한 수온의 차이를 종래의 전통적인 근통증 지표뿐만 아니라 근육 초음파 영상에서의 비교검토 및 근육의 기계적 속성에 대한 평가를 실시함으로써 편심성 근육수축 후 회복과정에서의 비교 및 평가를 하고자 한다. 따라서 본 연구는 서로 다른 두 온도의 CWI 적용군과 하이드로테라피를 적용하지 않는 대조군을 설정하여 근손상 후 각각의 CWI 적용이 미치는 효과를 검증하려는 목적으로 수행되었다.

연구 방법

1. 연구 대상

심혈관 및 대사질환이 없으며 운동검사가 불가능할 수준의 정형의

과적 문제가 없는 20대 남자 대학생을 연구 대상으로 설정하고, 근손상 발현을 위한 운동 모형에 영향을 줄 수 있는 규칙적인 신체활동 및 저항운동 참여자는 제외하였다. 연구 참여자 모집을 위해 D광역시 소재 K대학 홈페이지 광고를 이용하여 남자 재학생들을 모집하였으며, 미국스포츠의학회(American College of Sports Medicine)에서 제공하는 한국어판 운동 참여 전 신체활동 준비설문지(Physical Activity Readiness Questionnaire, PAR-Q) [20] 및 미국 심장협회(American Heart Association)의 건강/체력 시설 참여 전 검진 설문지(Health/fitness Facility Pre-participation Screening Questionnaires)를 통해 심혈관 질환 및 정형외과적 문제가 없는 인원을 선별하였다. 구체적인 제외기준은 다음과 같다: i) 심뇌혈관 및 정형외과적 질환이 있는 자; ii) 당뇨병, 고혈압을 포함한 대사질환이 있는 자; iii) 체온기능조절 불능자 또는 자율신경조절 이상자; iv) 실험 참여 최소 12개월 전 또는 현재 의사 처방에 따른 약물 복용자; v) 과도한 비만자(체질량지수 > 30 kg/m²); vi) 규칙적인 고강도 신체활동 및 저항운동 참여자; vii) 기타 연구자가 부적합하다고 판단되는 자.

참여자들의 임상적 특성은 Table 1과 같다.

2. 연구절차

서로 다른 온도의 하이드로테라피의 적용이 편심성 근수축에 동원된 근육의 EIMD 발현 정도 및 회복양상에 미치는 영향을 평가하기 위해 근손상 유발 편심성 운동 수행 직후를 포함해 회복기 5일 동안 각각 물이 없는 수조에 팔꿈치 굴곡근을 넣고 앉은 자세로 휴식(control, CON), 5°C 물로 채워진 수조에 팔꿈치 굴곡근을 넣고 앉은 자세로 휴식(cold water, COLD) 및 15°C 물로 채워진 수조에 팔꿈치 굴곡근을 넣고 앉은 자세로 휴식(cool water, COOL)하는 각 집단으로 참여자들을 무작위 배정(random assignment) 하였다. 하이드로테라피 처치는 모든 세션에서 운동 직후를 포함해 회복기 5일 동안 측정 변인 수집 전 실시하였다. 각 데이터 표본은 각각의 운동 직전과 운동 직후

Table 1. Clinical characteristics of subjects

Variables	Body composition and hemodynamic parameters			
	CON (n=10)	COLD (n=10)	COOL (n=10)	p value
Age (yr)	22.8±0.51	22.90±0.81	22.40±1.01	.898
Height (cm)	174.07±1.67	175.93±1.51	175.41±1.39	.678
Weight (kg)	71.40±1.52	65.66±1.69	70.17±2.35	.096
Body fat (%)	16.54±0.59	14.80±1.25	15.57±1.38	.557
SBP (mmHg)	113.8±4.64	115.4±3.11	114.2±4.05	.957
DBP (mmHg)	71.00±2.72	72.20±2.21	67.50±3.13	.455
MHR (beats/min)	71.20±2.56	73.20±3.43	72.10±3.52	.907

Values are means ± SEM.

SBP, systolic blood pressure; DBP, diastolic blood pressure; MAP, mean arterial pressure; MHR, mean heart rate.

p values are calculated by one-way analysis of variance (ANOVA).

를 포함한 운동 후 회복기 24, 48, 72 및 96시간에서 각각 수집하였다.

본 연구는 K대학교 생명윤리심의위원회(Institutional Review Board, IRB)에 의해 연구윤리에 관한 승인을 획득한 후 실시되었다(승인번호: 2019-0063). 실험대상자에게 연구 절차, 연구 참여 시 수반되는 이득 및 부작용과 함께 연구 참여의 위험과 주의사항을 상세히 설명하고 자발적 참여 의사를 가지는 인원을 대상으로 IRB로부터 승인된 연구 참여에 관한 서면동의서에 서명을 획득하였다.

3. 근손상 프로토콜

MVIC 토크 값이 100%로 설정된 자체 제작한 덤벨(dumbbell)을 사용하여 비우세측 팔꿈치 굴곡근을 대상으로 편심성 근수축 운동을 실시했다. 각 편심성 수축에 대해 참여자는 덤벨을 이용하여 팔꿈치 굴곡 상태에서 신전 상태로 수행하였다(50°-170°의 관절가동범위). 각 편심성 수축이 완료된 후 검사자는 덤벨을 제거하고 참여자가 부하 없이 팔을 굴곡 상태로 복귀하도록 지시하였다. 편심성 수축은 총 30회로 구성되며 각각의 수축 간 45초의 휴식을 부여하였다. 검사자는 참여자가 근수축 동안 최대한 저항할 수 있도록 구두로 장려하였고, 덤벨을 5초 동안 내릴 수 있도록 수축 속도를 제어하였다[21].

4. 중재처치

서로 다른 온도의 하이드로테라피를 적용하기 위해 상완부위가 완전히 침수될 수 있도록 제작된 수조를 사용하였으며, 각각의 목표 수온을 유지하기 위하여 수온 조절용 냉각기(DBA 075, Daeil Co. Ltd., Busan, Korea)를 사용하였다. 검사자는 하이드로테라피 적용 시 참여자의 액와선까지 수침될 수 있도록 팔꿈치 굴곡근을 수조에 넣도록 지시하였으며, 말단 부위의 불편감을 최소화하기 위해 팔을 구부려 손과 손가락은 물에 잠기지 않도록 위치시켰다[22]. 각각의 처치는 회당 1분 동안 수침하는 5회로 구성하였으며[23], 수침 간 1분의 휴식을 설정하여 총 9분 동안 실시하였다[24].

5. 측정방법 및 변인

1) 상완둘레

편심성 운동 후 근육 부종 변화를 평가하기 위해 Gulick 인체계측 테이프(Baseline anthropometric measuring tape, Fabrication Enterprises Inc., New York, USA)을 이용해 상완의 둘레를 측정하였다. 구체적으로 바로 선 자세에서 팔을 늘어뜨리고 있는 동안 팔꿈치 주름과 견봉 사이 원위부 1/3 지점에서 측정하였다. 모든 측정 시기에서 측정의 재현성을 확보하기 위해 반영구적 잉크펜으로 측정 위치를 마킹하고 2회 측정 후 평균값을 채택하였다[25].

2) 근육통증(muscle soreness)

팔꿈치 굴곡근의 전체적인 근통증 수준 평가를 위해 실험실 방문 시 short-form McGill Pain Questionnaire (SF-MPQ)를 기록하였다. 팔꿈치 굴곡근의 국소 부위에서 초래되는 근 통증을 평가하기 위해 통증 없음을 가리키는 “0”과 극심한 통증을 뜻하는 “100”으로 된 100-mm visual analogue scale (VAS)를 이용하였다. 구체적으로 평면의 원형 프로브(flat circular probe, 1.52 cm²)를 장착한 hand-held dial pressure algometer device (Baseline Push Pull force Gauge Model 12-0304, Fabrication Enterprise Inc., New York, USA)를 이용해 피험자가 누워 있는 동안 팔꿈치 주름에서 견봉 사이 원위부 1/3 지점의 근육(muscle belly)에 4 kg/s의 압력 적용 시 인지된 통증을 VAS에 기록하도록 지시하였다. 2회 측정 결과의 평균값으로 채택하였으며, 정확한 통증 인지를 위해 각 측정 간 최소 30초의 휴식기를 부여했다. 평가의 재현성을 확보하기 위해 반영구적 잉크펜을 이용해 측정 부위를 표시하였다[26].

3) 관절가동범위(range of motion, ROM)

인체 측정용 고니오미터(Baseline Goniometer, Fabrication Enterprise Inc., New York, USA)를 이용해 최대 자발적 굴곡 (joint angle of voluntary maximal flexion, FLX) 및 자발적 최대 신전 시 각도(joint angle of voluntary maximal extension, EXT)를 측정하고 EXT에서 FLX를 감산한 값을 ROM 척도로 이용하였다. ROM 측정 시 어깨관절의 외전 각은 0°로 설정하고 EXT는 선 자세로 팔꿈치 관절의 최대 신전 시 각을, FLX는 동일한 자세에서 어깨 관절이 굴곡하지 않고 팔꿈치 관절을 굴곡하여 손바닥을 동측 어깨에 닿도록 시도할 때의 각으로 각각 설정하였다. 팔꿈치 관절에 대한 ROM 측정의 재현성을 확보하기 위해 반영구적 잉크펜을 이용해 상완골(humerus) 외측 상과(lateral epicondyle), 견봉돌기(acromion process) 및 요골 경상돌기(styloid process of the radius)를 각각 표시하고, 모든 측정은 2회 실시 후 평균값을 채택하였다 [6].

4) 최대 자발적 등척성 수축(maximal voluntary isometric contraction, MVIC) 근력

팔꿈치 굴곡근의 MVIC 토크 값을 평가하기 위해 편심성 운동 시 이용되는 preacher curl 벤치에 앉아 어깨관절 45° 굽힘 및 0°외전 상태에서 90°굴곡된 팔꿈치관절 각을 유지하도록 지시하였다. 손목은 force 게이지(SS300, SEWHACNM, Bucheon, Korea)와 연결된 스트립으로 고정하고 3초 동안 발휘하는 최대 등척성 토크 값을 전자 인디케이터(AD-4321C, A&D Company Ltd., Tokyo, Japan)를 통해 확인하였다. 수축 간 45초의 휴식을 부여하여 총 3회 측정하였으며, 추출된 값 중 최대치를 통계분석에 이용하였다[21].

5) 근육 기계적 속성

팔꿈치 굴곡근의 기계적 속성 변화를 평가하기 위해 바로 누운 상태에서 체간 안정화를 확보한 후 팔꿈치 관절을 자연스럽게 신전 이완한 상태로 측정하였다. 측정은 3축 디지털 가속도 센서를 장착한 접촉식 연부조직 측정기 MyotonPRO (Myoton AS, Tallinn, Estonia)를 이용했다. 측정 위치는 근육 둘레 및 압통 측정 위치와 일치시켰으며 측진을 통해 적합한 측정위치를 설정하고, 세션 간 동일한 측정 부위를 유지하기 위해 반영구적 잉크펜으로 표시하였다. 멀티 스캔 모드를 이용하여 Tap 반복 횟수, 임펄스 전달 시간, 전달 간격은 측정 동안 모두 동일하게 유지하였다. 측정 변수로 산출되는 dynamic stiffness (N/m)는 동적 경도를 의미하며, 기계적 근속성은 2회 반복 측정하되 측정오차가 3% 이상일 경우 1회 더 측정하며, 2회 측정치의 평균값을 분석에 이용하였다.

6) 초음파 영상 분석

영상(B-mode) 획득을 위해 초음파 기기(S12, SonoScape Co., Shenzhen, China)에 장착된 9.1-13 MHz를 가진 50 mm 선형 탐촉자(linear probe)를 이용하였다. 측정위치는 팔꿈치 주름과 견봉 사이 1/3 지점에서 근육 횡단면 영상을 수집하였으며, 측정 동안 바로 누운 자세에서 안정 상태를 유지하도록 지시하였다. 일관된 영상 추출을 위해 반영구적 잉크펜을 이용해 측정 부위를 표시하고 검사자(1인)가 모든 이미지를 획득하였으며, 측정 동안 초음파 시스템의 밝기(gain), 명암(contrast) 및 초점(focus)을 모두 동일하게 유지하였다. 추출된 3개의 영상은 PC에 저장한 후 가장 유사한 방향세기를 가지는 2개의 영상을 채택하여 분석에 활용하였다[5,27]. 모든 이미지는 1024×768 해상도의 TIF 포맷으로 디지털화 후, ImageJ 소프트웨어(version 1.52a, National Institutes of Health, Washington, USA)를 이용해 1×1 cm의 관심영역(region of interest, ROI)내 근육 초음파 반향세기(echo intensity, EI)를 산출하였다. ROI는 상완골, 격막 및 근막을 포함하지 않도록 하였으며, 영상 내 landmark를 기반으로 목표 근육(상완이두근)만을 대상으로 설정하였고, EI는 영상의 회색조 히스토그램 분포(grayscale histogram distribution, 0 = black to 255 = white)의 평균을 채택하였다.

6. 자료처리방법

자료처리는 윈도우용 IBM SPSS Statistics (Statistical Package for the Social Sciences software, Versions 25.0, Chicago, IL, USA) 프로그램을 사용하여 항목별 평균(mean)과 표준오차(standard error of mean, SEM)를 각각 산출하였다. Shapiro-Wilk test를 이용해 표본의 정규분포를 확인하고 Levene's test로 분산의 동질성(homogeneity of variance)을 판별하였다. 각 집단 내 baseline 값으로부터 운동 직후를 포함한 회복기 모든 종속변수들의 변화를 검증하기 위해 Bonferroni *post-hoc*

test와 함께 일원배치분산분석(one-way analysis of variance, ANOVA)을 실시하였다. 이원반복측정분산분석(two-way repeated measures ANOVA)은 시간에 따른 집단 간 상호작용(interaction) 효과를 검출하기 위해 활용하였으며, 특정 변수에서 유의한 상호작용효과가 있을 경우, 각각의 시간 포인트에서 측정 변인 간 차이를 분석하였다. 모든 통계적 유의수준은 $\alpha=.05$ 미만으로 설정하였다.

연구 결과

1. 근육 형태학적 변화 및 통증 변화

상완돌레의 경우 CON 집단과 COOL 집단은 24, 48, 72 및 96시간에서, COLD 집단은 48, 72 및 96시간에서 운동 전과 비교하여 통계적으로 유의하게 증가하였지만($p<.05$, respectively), 시간 경과에 따른 집단 간 유의한 상호작용 효과는 나타나지 않았다(Table 2).

편심성 운동 후 상완의 전반적인 근 통증을 평가한 결과 SF-MPQ의 변화는 다음과 같다. CON 집단, COOL 집단 및 COLD 집단은 공통적으로 24, 48 및 72시간에서 운동 전과 비교하여 통계적으로 유의하게 증가하였으며, COOL 집단은 96시간, COLD 집단은 운동 직후에서 운동 전과 비교하여 통계적으로 유의하게 증가하였다($p<.05$, respectively). 또한, 시간 경과에 따른 집단 간 유의한 상호작용 효과가 나타났으며, 48시간에서 CON 집단과 COLD 집단 간, 72 및 96시간에서 COOL 집단과 COLD 집단 간 통계적으로 유의한 차이가 나타났다($p<.05$, respectively; Fig. 1).

근육 압통을 수치화한 VAS의 경우 CON 집단과 COLD 집단은 24,

48 및 72에서, COOL은 24 및 48시간에서 운동 전과 비교하여 통계적으로 유의하게 증가하였지만($p<.05$, respectively), 시간 경과에 따른 집단 간 유의한 상호작용 효과는 나타나지 않았다(Table 2).

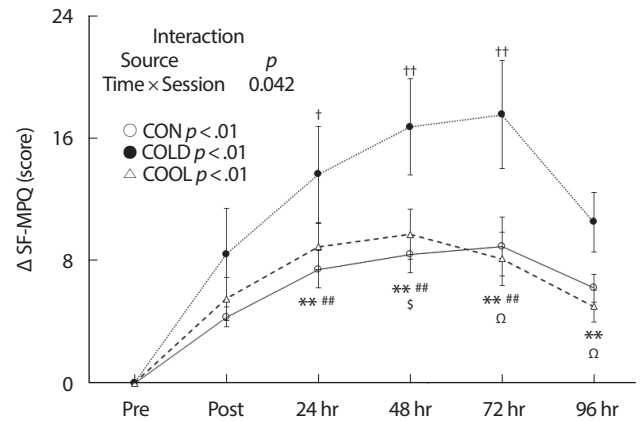


Fig. 1. Changes of SF-MPQ score at each time period. Values are mean \pm SEM. SF-MPQ, short form McGill pain questionnaire; CON, control group; COLD, cold water group; COOL, cool water group. p values are calculated by one-way analysis of variance (ANOVA). Interaction is examined by repeated measures ANOVA. ** $p<.01$, difference between Pre and each time point in CON determined by Bonferroni *post-hoc* test. † $p<.05$, †† $p<.01$, difference between Pre and each time point in COLD determined by Bonferroni *post-hoc* test. ## $p<.01$, difference between Pre and each time point in COOL determined by Bonferroni *post-hoc* test. § $p<.05$, difference between CON and COLD at each time point determined by Bonferroni *post-hoc* test. Ω $p<.05$, difference between COLD and COOL at each time point determined by Bonferroni *post-hoc* test.

Table 2. Changes of EIMD markers after eccentric exercise

Variables	Post	24 hr	48 hr	72 hr	96 hr	p value	Session \times Time
CIR (cm)							
CON	0.49 \pm 0.10	0.66 \pm 0.12*	0.70 \pm 0.11*	0.99 \pm 0.20**	1.13 \pm 0.22**	.000	0.098
COLD	0.54 \pm 0.14	0.77 \pm 0.12	1.24 \pm 0.26†	1.63 \pm 0.36††	1.85 \pm 0.38††	.000	
COOL	0.38 \pm 0.06	0.65 \pm 0.09##	0.76 \pm 0.11##	1.00 \pm 0.16##	1.00 \pm 0.18##	.000	
DOMS (score)							
CON	1.01 \pm 0.54	2.58 \pm 0.58*	2.58 \pm 0.57*	2.79 \pm 0.60**	1.61 \pm 0.47	.001	0.109
COLD	0.90 \pm 0.49	2.48 \pm 0.62†	3.06 \pm 0.63††	2.59 \pm 0.53†	0.93 \pm 0.56	.000	
COOL	1.21 \pm 0.37	2.12 \pm 0.23##	2.06 \pm 0.51##	1.27 \pm 0.47	0.23 \pm 0.39	.000	
ROM (degree)							
CON	-28.1 \pm 3.31**	-30.45 \pm 4.04**	-27.90 \pm 4.95**	-28.35 \pm 5.04**	-23.95 \pm 6.20**	.000	0.098
COLD	-23.20 \pm 2.7	-28.7 \pm 3.85††	-31.50 \pm 6.83††	-35.40 \pm 7.92††	-31.60 \pm 7.07††	.000	
COOL	-17.05 \pm 2.76##	-16.8 \pm 2.36##	-15.35 \pm 2.25##	-18.25 \pm 3.51##	-12.75 \pm 2.77#	.000	

Values are means \pm SEM.

CIR, circumference; DOMS, delayed onset muscle soreness; ROM, range of motion; CON, control group; COLD, cold water group; COOL, cool water group. p values are calculated by one-way analysis of variance (ANOVA).

Interaction is examined by repeated measures ANOVA.

* $p<.05$ and ** $p<.01$, difference between Pre and each time point in CON determined by Bonferroni *post-hoc* test

† $p<.05$ and †† $p<.01$, difference between Pre and each time point in COLD determined by Bonferroni *post-hoc* test

$p<.05$ and ## $p<.01$, difference between Pre and each time point in COOL determined by Bonferroni *post-hoc* test.

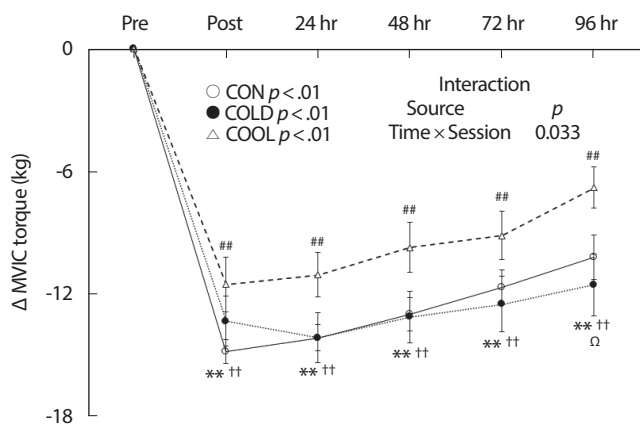


Fig. 2. Changes of MVIC torque at each time period. Values are mean \pm SEM. MVIC, maximal voluntary isometric contraction; CON, control group; COLD, cold water group; COOL, cool water group. *p* values are calculated by one-way analysis of variance (ANOVA). Interaction is examined by repeated measures ANOVA. *******p* < .01, difference between Pre and each time point in CON determined by Bonferroni *post-hoc* test. **††***p* < .01, difference between Pre and each time point in COLD determined by Bonferroni *post-hoc* test. **†††***p* < .01, difference between Pre and each time point in COOL determined by Bonferroni *post-hoc* test. **Ω***p* < .05, difference between Pre and each time point in COOL determined by Bonferroni *post-hoc* test. **§***p* < .05, difference between COLD and COOL at each time point determined by Bonferroni *post-hoc* test.

2. 근육 기능적 특성 변화

편심성 운동으로 인한 ROM의 변화를 평가한 결과 CON 집단과 COOL 집단은 운동 직후를 포함해 24, 48, 72 및 96시간에서, COLD 집단은 24, 48, 72 및 96시간에서 운동 전과 비교하여 통계적으로 유의하게 감소하였지만(*p* < .05, respectively), 시간 경과에 따른 집단 간 유의한 상호작용 효과는 나타나지 않았다(Table 2).

MVIC의 경우 CON 집단, COOL 집단 및 COLD 집단 모두 운동 직후를 포함해 24, 48, 72 및 96시간에서 운동 전과 비교하여 유의하게 감소하였다(*p* < .01, respectively). 또한, 시간 경과에 따른 집단 간 유의한 상호작용 효과가 나타났으며, 운동 후 96시간에서 COOL 집단과 COLD 집단 간 통계적으로 유의한 차이가 나타났다(*p* < .05, Fig. 2).

3. 근육 기계적 속성 및 초음파 영상학적 변화

근육 기계적 속성 변화의 경우 CON 집단과 COLD 집단은 운동 직후를 포함해 24, 48, 72 및 96시간에서, COOL 집단은 운동 직후에만 운동 전과 비교하여 통계적으로 유의하게 증가하였다. 또한, 시간 경과에 따른 집단 간 유의한 상호작용 효과가 나타났으며, 운동 후 24, 72 및 96시간에서는 COOL 집단과 COLD 집단이, 72시간에서는 CON 집단과 COOL 집단 간 통계적으로 유의한 차이가 나타났다(*p* < .05, respectively; Fig. 3).

편심성 운동으로 인한 근육 EI의 변화를 평가한 결과는 다음과 같다. CON 집단과 COOL 집단은 24, 48, 72 및 96시간에서, COLD 집단

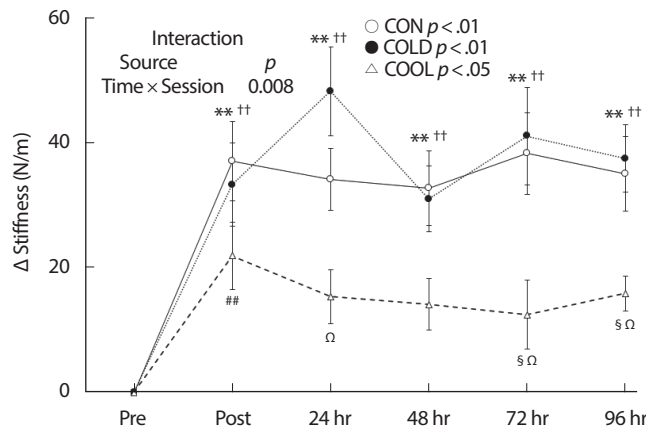


Fig. 3. Changes of Stiffness at each time period. Values are mean \pm SEM. CON, control group; COLD, cold water group; COOL, cool water group. *p* values are calculated by one-way analysis of variance (ANOVA). Interaction is examined by repeated measures ANOVA. *******p* < .01, difference between Pre and each time point in CON determined by Bonferroni *post-hoc* test. **††***p* < .01, difference between Pre and each time point in COLD determined by Bonferroni *post-hoc* test. **†††***p* < .01, difference between Pre and each time point in COOL determined by Bonferroni *post-hoc* test. **§***p* < .05, difference between CON and COOL at each time point determined by Bonferroni *post-hoc* test. **Ω***p* < .05, difference between COLD and COOL at each time point determined by Bonferroni *post-hoc* test.

은 운동 직후를 포함해 24, 48, 72 및 96시간에서 운동 전과 비교하여 통계적으로 유의하게 증가하였다(*p* < .05, respectively). 또한, 시간 경과에 따른 집단 간 유의한 상호작용 효과가 나타났으며, 운동 후 24, 48, 72 및 96시간에서는 COOL 집단과 COLD 집단 간, 96시간에서는 CON 집단과 COOL 집단 간 통계적으로 유의한 차이가 나타났다(*p* < .05, respectively; Fig. 4).

논 의

본 연구는 서로 다른 온도로 설정된 하이드로테라피의 적용이 편심성 운동으로 유발된 근손상의 발현 수준 및 회복 양상에 미치는 영향을 비교 검증하려는 목적으로 수행되었으며, 주된 연구 결과는 다음과 같다. 첫째, 근육 부종의 경우 집단 간 차이가 나타나지 않았으나, 근통증의 경우 5°C의 CWI를 적용할 때 오히려 더 크게 증가하였다. 둘째, 15°C의 CWI를 적용하는 것이 편심성 운동 후 빠른 근력 회복을 촉진하는 것으로 나타났다. 셋째, 근육 강직도의 경우 15°C의 CWI를 처치하는 것이 더 빠르게 회복하는 것으로 나타났으며, 편심성 운동 후 팔꿈치 굴곡근의 EI는 5°C 또는 처치를 하지 않는 것보다 15°C의 CWI를 적용하는 것이 더 적게 증가하는 것으로 나타났다.

편심성 운동으로 유도된 근손상 이후 상완둘레는 모든 집단에서 96시간까지 지속적인 증가를 보여주었다. 상완둘레의 증가는 EIMD의 대표적인 증상으로 알려져 있으며 부종의 발생여부를 판단하는 간접

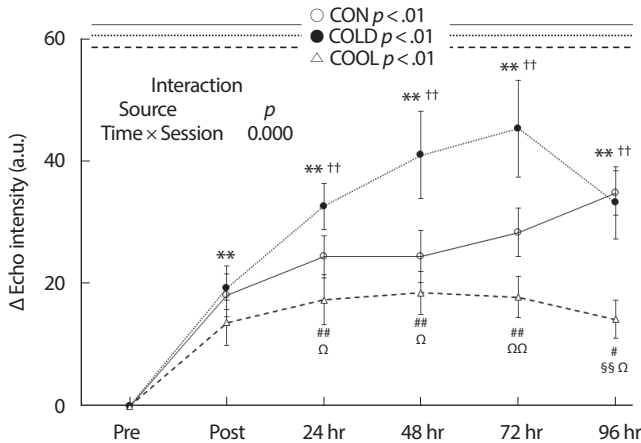


Fig. 4. Changes of Echo intensity at each time period. Values are mean \pm SEM. CON, control group; COLD, cold water group; COOL, cool water group. p values are calculated by one-way analysis of variance (ANOVA). Interaction is examined by repeated measures ANOVA. ** $p < .01$, difference between Pre and each time point in CON determined by Bonferroni *post-hoc* test. †† $p < .01$, difference between Pre and each time point in COLD determined by Bonferroni *post-hoc* test. # $p < .05$, ## $p < .01$, difference between Pre and each time point in COOL determined by Bonferroni *post-hoc* test. Ω $p < .05$, ΩΩ $p < .01$, difference between CON and COOL at each time point determined by Bonferroni *post-hoc* test. ΩΩΩ $p < .01$, difference between COLD and COOL at each time point determined by Bonferroni *post-hoc* test.

적 지표이다[5]. CWI의 대표적 효과는 염증 발생을 약화시켜 부종의 발생을 완화할 수 있는 것으로 기대하고 있으나, 본 연구의 결과에서 집단 간 상완둘레의 차이는 나타나지 않았다. 즉 CWI 처치는 온도의 차이와 상관없이 근육 부종의 발생에 긍정적 영향을 미치지 않는다는 것을 시사한다. 이러한 결과는 일부 선행연구의 결과와 합치되는 것을 확인할 수 있다[14,28]. 이들의 연구에서 부종의 발생은 염증에 의한 결과로 설명하고 있으며, 일부 CWI가 부종 발생을 완화시키지 못하는 것은 염증을 발생시키는 요인 중 참여 인원의 특성, 동원된 근육, 운동 강도 및 근손상 수준 등의 차이로 인한 것으로 설명될 수 있다[14,28].

팔꿈치 굴곡근에서 편심성 운동 후 발생하는 근통증 즉 DOMS는 운동에 동원된 근육군의 전반적인 불편감과 함께 통증을 초래한다 [29,30]. 이를 바탕으로 SF-MPQ를 이용하여 상완의 전반에 발현된 근통증을 평가한 결과, COLD 집단이 CON 집단 및 COOL 집단과 비교해 통계적으로 더 큰 증가를 보여주었다. 일반적으로 근손상에 대한 CWI의 적용은 통증을 완화시키는 것으로 여겨진다[13]. 그러나 본 연구의 결과에서 5°C의 온도로 설정된 CWI를 적용한 COLD 집단의 경우 더 높은 근통증 수준이 발현된 원인은 불분명하다. Davis & Pope [31]에 따르면 한랭 자극은 온도수용기(thermoreceptor)와 통각수용기(nociceptor)가 매개하는 냉감뿐만 아니라 따끔거림과 통증까지 다양한 감각을 유발하는 것으로 보고하였다. 구체적으로 15°C 미만의 온도를 적용하는 것은 통증과 유사한 감각을 불러일으키며, 3°C에 근접할

수목 통증 수준이 최고조에 이른다[31]. 따라서 본 연구에서 COLD 집단에서 나타난 통증 수준의 증가는 EIMD에 의한 통증 수준에 매우 낮은 수온으로 유발된 통증 감각이 증첩되어 나타난 결과로 보여진다. 현재 연구 결과를 통해 CWI 적용 시 근통증 완화를 위해 극저온 CWI를 적용하는 것은 부정적 효과를 미칠 수 있다는 것을 확인할 수 있다. COOL 집단에서 CON 집단과 유의한 차이가 나타나지 않은 것은 DOMS의 발생 기전이 대사적 손상뿐만 아니라 복합적 요소에 의해 발현되는 것[28,29]을 감안하여, 추후 연구는 다양한 접근을 통해 그 원인을 규명할 필요가 있다.

EIMD의 발현 수준을 평가하기 위해 MVIC 토크를 측정하는 것은 많은 선행연구에서 수행되어 왔으며 일반적으로 편심성 운동 직후 급격하게 감소하여 점차 회복하는 경향으로 나타난다[5,6]. 현재 연구 결과에 따르면 편심성 운동에 따른 MVIC 급격한 감소 이후 5°C의 CWI 처치하는 것보다 15°C의 CWI를 실시할 경우 근력 회복을 증진하는 것으로 나타났다. 또한, 편심성 운동 후 ROM 변화에서 통계적으로 유의한 효과는 없었지만 15°C의 CWI를 처치한 COOL 집단에서 다른 두 집단에 비해 더 빠른 회복 경향을 보여주었다. 근손상 이후 CWI의 적용은 모세혈관을 수축시키고 혈류를 감소시켜 염증 발현을 약화시키고 MVIC 및 근육 기능의 저하를 완화시키기 위해 사용될 수 있다고 제안되어왔다[32]. 예를 들어, Eston & Peters [14]의 연구에 의하면 상완근을 대상으로 EIMD를 유발한 뒤 15°C의 CWI를 처치한 결과 비록 통계적 유의한 결과는 나타나지 않았지만 대조군보다 빠른 회복 경향을 보여주었다[14]. 그러나 Paddon-Jones & Quigley [28]의 연구에서는 상완에 발현된 EIMD를 완화하려는 목적으로 5°C의 CWI를 처치한 결과 대조군과 유사하게 회복하는 경향이 나타났다[28]. 본 연구에서도 15°C의 CWI를 적용한 COOL 집단은 COLD 집단에 비해 빠른 회복을 보였으나 5°C의 CWI를 적용한 COLD 집단은 CON 집단과 유사한 경향이 나타났다. 이러한 차이는 CWI의 설정된 수온에 따른 차이로 설명될 수 있는데 CWI의 설정 온도에 따라 혈류 변화는 다른 양상으로 나타난다. 구체적으로 14-42°C의 온도를 적용할 경우 혈류는 감소하지만, 10°C 이하의 온도에서는 오히려 혈류가 증가하는 것으로 보고되었다[13,33]. 이는 CWI의 적용에 따라 근육으로의 혈류를 감소시키는 것은 동일하지만, 피부 온도를 10°C 미만으로 감소시키는 CWI의 경우 혈관확장반사(vasodilatory reflex)로 인한 피부로의 혈류 증가에 의한 것으로 판단된다[33]. 그로 인해 극저온의 CWI 적용 시 동원된 근육으로의 혈류는 감소하지만 해당 분절의 혈류량은 큰 변화가 나타나지 않으며[34], EIMD로 발생한 근육 섬유의 투과성 증가와 삼투압효과로 인해 주변 조직(증가된 피부 혈류)으로부터 대사물질의 유입이 증가될 수 있을 것으로 유추된다. 그러므로 본 연구에서는 비록 혈류역학적 수준을 반영하는 지표는 측정되지 않았지만, 15°C의 CWI를 적용하는 것은 혈류를 제한하여 염증 발현을 완화시켜 MVIC

의 회복을 촉진시킬 수 있는 것으로 시사된다. 그러나 EIMD로 인한 MVIC의 감소 및 회복 기전은 단순 염증에 의한 것이 아닌 다양한 요소에 의해 발현된다[35]. 본 연구에서 COLD 집단과 CON 집단의 MVIC 회복 경로가 비슷한 경향을 보여준 것은 염증 반응에 의한 결과로만 해석할 수 없다. 또한, CWI에 설정되는 수온뿐만 아니라 적용 시간 등 다양한 요소에 따라 CWI의 효과를 다른 양상으로 유도할 수 있다[36]. 따라서 추후 다양한 설정을 통해 생리학적 기전은 밝혀낼 필요가 있다.

본 연구에서 근육 강성(stiffness)의 변화를 살펴보면 MVIC의 경향과 비슷한 것을 확인할 수 있다. 다른 두 집단과 달리 15°C의 CWI를 적용한 COOL 집단이 가장 빠른 회복이 나타났는데(Fig. 3) 이는 앞서 설명한 것과 같이 CWI의 적용에 따른 혈류 감소에 의한 것으로 판단된다. 혈류가 감소함에 따라 동원된 근육 조직 내 체액 및 사이토카인의 축적이 줄어들어 감소한 것으로 유추할 수 있다. COLD 집단과 CON 집단 간 유사한 경향이 나타난 것 또한 CWI에 설정된 다양한 조건에 의해 혈류의 영향뿐만 아니라 다양한 기전에 의해 회복 기간 초기에 나타난 변동과 느린 회복에 기여한 것으로 생각된다. 초음파 영상 내 EI 증가는 동원된 근육 내 구조 단백질 분해에 따른 근세포 내 혈액 및 림프의 침투 및 체액의 증가와 관련할 수 있다[27,37]. 이미 선행연구에서 EIMD 유발 후 EI의 증가가 확인되었으며[5,38], 팔꿈치 굴곡근을 대상으로 편심성 운동 후 120시간까지 회복하지 못하는 경향을 보고하였다[5]. 본 연구에서도 COLD 집단은 CON 집단에 비해 측정 종료까지 상대적으로 높은 증가를 보여주었으며, COOL 집단은 CON 집단에 비해 측정 종료까지 상대적으로 낮은 증가가 나타났다(Fig. 4). 각각의 집단에서 나타나는 EI의 변화 경향은 CWI의 적용 효과를 확인할 수 있는 것으로 판단된다. 15°C에 설정된 CWI를 적용할 경우 혈류가 감소하여 조직 내 체액 및 기타 물질 축적이 감소한 것으로 판단되며, 5°C에 설정된 CWI를 적용할 경우 혈류의 증가에 따른 결과로 생각된다.

본 연구는 일부 제한점을 가진다. 먼저 연구대상으로 젊고 건강한 남성만을 선정했기 때문에 연령과 성차 및 근육의 구조적 특성에 영향을 줄 수 있는 병리적 상태를 반영할 수 없다. 비록 노인과 청년 또는 남녀 간 EIMD의 발현 정도는 현저한 차이가 없는 것으로 알려져 있다[39]. 그러나 정상집단의 초음파 영상으로부터 추출된 EI와 달리 근육 병증(myopathy)을 가진 집단의 경우 유의하게 증가된 양상을 보였다[27]. 또한, MyotonPro로부터 산출되는 근육의 기계적 속성은 근육 긴장병증(paratonia)를 가진 집단과 정상 집단 간 유의한 차이가 나타나는 것으로 보고되었다[40]. 즉, EIMD 지표의 초기값에서 발생할 수 있는 간섭을 배제하기 위해 젊고 건강한 남성으로 구성된 동질집단을 연구대상으로 설정하여 하이드로테라피에 의한 EIMD 발현 수준을 객관적으로 평가하였다. 마지막으로 EIMD 발현 후 96시간까지 변화 양

상을 평가하였기 때문에, CWI의 장기적 효과(long-term effects)는 확인할 수 없다. 본 연구의 결과에서 근육 부종과 ROM, MVIC 및 EI는 96시간까지 모든 집단이 운동 전 수준으로 회복하지 못했지만, 압력 적용 시 나타나는 통증 수준은 운동 후 72시간 내 최고점에 도달한 뒤 96시간 내 운동 전 수준으로 회복했다. 또한, 상완의 전반적인 통증 수준은 CWI를 적용한 두 집단은 96시간에 운동 전 수준으로 회복하는 양상이 나타났으나, CON 집단은 96시간까지 운동 전 수준으로 회복하지 못했다. 근육의 기계적 속성 중 근육 강성의 경우 COOL 집단은 24시간에서 최고점에 도달한 뒤 96시간까지 운동 전 수준으로 회복하는 경향을 보여주었으나, COLD 집단과 CON 집단은 96시간까지 운동 전 수준으로 회복하지 못했다(Fig. 3). 근육 부종과 기계적 속성 변화는 독립적 양상으로 발현될 뿐만 아니라[41], EIMD의 발현 수준과 회복 양상을 평가하는 다양한 지표들은 다른 경향으로 나타난다[39]. 서로 다른 온도로 설정된 CWI의 영향은 적용 기간에 따라서 다른 효과를 초래할 수 있지만 본 연구에서는 아무런 처치를 하지 않는 회복과 비교 관찰함으로써 연구 목적에 부합하는 결과를 도출하였다.

결론

본 연구는 서로 다른 온도로 설정된 하이드로테라피가 EIMD의 발현 및 회복에 미치는 영향을 비교 검증하기 위해 실시되었다. 그 결과 근육 부종의 경우 집단 간 차이가 나타나지 않았으나, 5°C의 CWI를 처치할 경우 오히려 근 통증 수준과 EI가 증가하였다. 그러나 15°C의 CWI를 실시할 경우 근력 회복 촉진, 근육 강성 증가 완화 및 EI의 증가 완화를 도출하였다. 본 연구 결과를 통해 근 통증 수준 완화 및 EIMD로부터 빠른 회복을 위해 사용되었던 CWI는 극저온(5°C)으로 설정할 경우 오히려 부정적 효과를 초래할 수 있으며, 적절한 수온(15°C)으로 설정할 경우 상대적으로 보다 긍정적인 효과를 유도할 수 있다는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 본 연구의 임상 운동의 결과를 토대로, 스포츠 현장에서는 CWI 적용 프로토콜에 기반한 운동과 스포츠용 근육 컨디셔닝의 확립에 기여할 것으로 판단되며, 추후 다양한 연구설정을 통해 운동으로 유발된 근손상에 있어 CWI의 유용성을 추가적으로 평가할 필요가 있을 것으로 생각된다.

CONFLICT OF INTEREST

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

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Conceptualization: MK Kim, Data curation: HD Jo, CS Kim, MK

Kim, Formal analysis: HD Jo, CS Kim, Methodology: MK Kim. Project administration: MK Kim, Writing-original draft: HD Jo, MK Kim, Writing-review & editing: HD Jo, MK Kim.

ORCID

Hyeon-deok Jo <https://orcid.org/0000-0002-7279-153X>
Choun-sub Kim <https://orcid.org/0000-0003-1995-080X>
Maeng-kyu Kim <https://orcid.org/0000-0002-7855-608X>

REFERENCES

1. Armstrong RB, Ogielvie RW, Schwane JA. Eccentric exercise-induced injury to rat skeletal muscle. *J Appl Physiol.* 1983;54(1):80-93.
2. Clarkson PM, Hubal MJ. Exercise-induced muscle damage in humans. *Am J Phys Med Rehabil.* 2002;81(11):S52-69.
3. Nosaka K, Newton M. Difference in the magnitude of muscle damage between maximal and submaximal eccentric loading. *J Strength Cond Res.* 2002;16(2):202-8.
4. Howatson G, Van Someren KA. The prevention and treatment of exercise-induced muscle damage. *Sports Med.* 2008;38(6):483-503.
5. 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.* 2008;106(2):267-75.
6. 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.
7. Armstrong RB, Warren GL, Warren JA. Mechanisms of exercise-induced muscle fibre injury. *Sports Med.* 1991;12(3):184-207.
8. Proske U, Morgan DL. Muscle damage from eccentric exercise: mechanism, mechanical signs, adaptation and clinical applications. *J Physiol.* 2001;537(2):333-45.
9. Castiglioni A, Corna G, Rigamonti E, Basso V, Vezzoli M, et al. FOXP3+ T cells recruited to sites of sterile skeletal muscle injury regulate the fate of satellite cells and guide effective tissue regeneration. *PLoS One.* 2015;10(6):e0128094.
10. Cheung K, Hume PA, Maxwell L. Delayed onset muscle soreness. *Sports Med.* 2003;33(2):145-64.
11. Leeder J, Gissane C, van Someren K, Gregson W, Howatson G. Cold water immersion and recovery from strenuous exercise: a meta-analysis. *Br J Sports Med.* 2012;46(4):233-40.
12. Dupuy O, Douzi W, Theurot D, Bosquet L, Dugué B. An evidence-based approach for choosing post-exercise recovery techniques to reduce markers of muscle damage, soreness, fatigue, and inflammation: a systematic review with meta-analysis. *Front Physiol.* 2018;9:403.
13. Meeusen R, Lievens P. The use of cryotherapy in sports injuries. *Sports Med.* 1986;3(6):398-414.
14. Eston R, Peters D. Effects of cold water immersion on the symptoms of exercise-induced muscle damage. *J Sports Sci.* 1999;17(3):231-8.
15. Van de Vyver M, Myburgh KH. Cytokine and satellite cell responses to muscle damage: interpretation and possible confounding factors in human studies. *J Muscle Res Cell Motil.* 2012;33(3-4):177-85.
16. Flores DF, Gentil P, Brown LE, Pinto RS, Carregaro RL, et al. Dissociated time course of recovery between genders after resistance exercise. *J Strength Cond Res.* 2011;25(11):3039-44.
17. Radaelli R, Bottaro M, Wilhelm EN, Wagner DR, Pinto RS. Time course of strength and echo intensity recovery after resistance exercise in women. *J Strength Cond Res.* 2012;26(9):2577-84.
18. Kisilewicz A, Madeleine P, Ignasiak Z, Cizek B, Kawczynski A, et al. Eccentric exercise reduces upper trapezius muscle stiffness assessed by shear wave elastography and myotonometry. *Front Bioeng Biotechnol.* 2020;8.
19. Pinto J, Rocha P, Torres R. Cold-water immersion has no effect on muscle stiffness after exercise-induced muscle damage. *Clin J Sport Med.* 2020;30(6):533-8.
20. American College of Sports Medicine. ACSM's guidelines for exercise testing and prescription. Lippincott Williams & Wilkins 2013.
21. Chen TC, Nosaka K, Sacco P. Intensity of eccentric exercise, shift of optimum angle, and the magnitude of repeated-bout effect. *J Appl Physiol.* 2007;102(3):992-9.
22. Matos F, Neves EB, Rosa C, Reis VM, Saavedra F, et al. Effect of cold-water immersion on elbow flexors muscle thickness after resistance training. *J Strength Cond Res.* 2018;32(3):756-63.
23. Montgomery PG, Pyne DB, Hopkins WG, Dorman JC, Cook K, et al. The effect of recovery strategies on physical performance and cumulative fatigue in competitive basketball. *J Sports Sci.* 2008;26(11):1135-45.
24. Sellwood KL, Brukner P, Williams D, Nicol A, Hinman R. Ice-water immersion and delayed-onset muscle soreness: a randomised controlled trial. *Br J Sports Med.* 2007;41(6):392-7.
25. 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.
26. Ingham SA, van Someren KA, Howatson G. Effect of a concentric warm-up exercise on eccentrically induced soreness and loss of function of the elbow flexor muscles. *J Sports Sci.* 2010;28(13):1377-82.
27. Pillen S, Arts IM, Zwarts MJ. Muscle ultrasound in neuromuscular disorders. *Muscle Nerve.* 2008;37(6):679-93.
28. Paddon-Jones DJ, Quigley BM. Effect of cryotherapy on muscle soreness and strength following eccentric exercise. *Int J Sports Med.* 1997;18(08):588-90.
29. Armstrong RB. Mechanisms of exercise-induced delayed onset muscular soreness: a brief review. *Med Sci Sports Exerc.* 1984;16(6):529-38.
30. Cleak MJ. Delayed onset muscle soreness and impaired motor performance following intense eccentric exercise. *physiotherapy.* 1991;77(7):493.
31. Davis KD, Pope GE. Noxious cold evokes multiple sensations with distinct time courses. *Pain.* 2002;98(1-2):179-85.
32. Vaile J, Halson S, Gill N, Dawson B. Effect of hydrotherapy on the signs and symptoms of delayed onset muscle soreness. *Eur J Appl Physiol.* 2008;102(4):447-55.
33. White GE, Wells GD. Cold-water immersion and other forms of cryotherapy: physiological changes potentially affecting recovery from high-intensity exercise. *Extreme Physiol Med.* 2013;2(1):1-11.
34. Yanagisawa O, Kudo H, Takahashi N, Yoshioka H. Magnetic resonance imaging evaluation of cooling on blood flow and oedema in skeletal muscles after exercise. *Eur J Appl Physiol.* 2004;91(5):737-40.
35. Tee JC, Bosch AN, Lambert MI. Metabolic consequences of exercise-induced muscle damage. *Sports Med.* 2007;37(10):827-36.
36. Machado AF, Almeida AC, Micheletti JK, Vanderlei FM, Tribst MF, et al. Dosages of cold-water immersion post exercise on functional and clinical responses: a randomized controlled trial. *Scand J Med Sci Sports.* 2017;27(11):1356-63.
37. Fujikake T, Hart R, Nosaka K. Changes in B-mode ultrasound echo intensity following injection of bupivacaine hydrochloride to rat hind limb muscles in relation to histologic changes. *Ultrasound Med Biol.* 2009;35(4):687-96.
38. Matta TT, Pinto RO, Leitão BF, Oliveira LF. Non-uniformity of elbow flexors damage induced by an eccentric protocol in untrained men. *J Sports Sci Med.* 2019;18(2):223.
39. 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.
40. Van Deun B, Hobbelen JS, Cagnie B, Van Eetvelde B, Van Den Noortgate N, et al. 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.
41. Lacourpaille L, Nordez A, Hug F, Couturier A, Dibie C, et al. Time-course effect of exercise-induced muscle damage on localized muscle mechanical properties assessed using elastography. *Acta Physiol.* 2014;211(1):135-46.