



Tensiomyography Variable Trend of Changes after Acute Muscle Fatigue Induced by Acute Exercise: A Systematic Review and Meta-Analysis

Seunghyeok Yeom⁵, Hyungwoo Lee^{2,5} and Kyoungkyu Jeon^{1,3,4,5*}

¹Division of Sport Science, Incheon National University, Incheon, Republic of Korea

²Department of Human Movement Science, Incheon National University, Incheon, Republic of Korea

³Sport Science Institute, Incheon National University, Incheon, Republic of Korea

⁴Health Promotion Center, Incheon National University, Incheon, Republic of Korea

⁵Functional Rehabilitation Biomechanics Laboratory, Incheon National University, Incheon, Republic of Korea

Article Info

Received 2022.01.18.

Revised 2022.03.11.

Accepted 2022.03.21.

Correspondence*

Kyoungkyu Jeon

jeonkay@inu.ac.kr

Key Words

Tensiomyography (TMG),

Muscle fatigue,

Acute exercise,

Meta-analysis

PURPOSE The purpose of this study was to establish the criteria for measuring acute muscle fatigue using tensiomyography (TMG) by quantifying the trend of changes in TMG variables. **METHODS** Searches were conducted in the Web of Science and Pubmed databases using the keyword "Tensiomyography". Sixteen studies which used TMG to measure acute muscle fatigue caused by acute exercises in rectus femoris or biceps femoris were included. All statistical data analyses were performed using Comprehensive Meta-Analysis software program. **RESULTS** The meta-analysis results indicated that the biceps femoris showed a significant ($p < .05$) decrease in all TMG variables of the elite athletes. Also, in the overall effects of maximum displacement and mean velocity until 90% Dm (Vc90) showed a significant ($p < .05$) decreasing trend. The rectus femoris showed a significant ($p < .05$) decreasing trend for maximum displacement (Dm) in the average person, while contraction time (Tc) showed a decreasing trend in elite athletes and overall. **CONCLUSIONS** These results suggest that TMG could be used as an indicator of muscle fatigue indicator, and will help to develop a more proper protocol to test the response of the body to muscle fatigue.

서론

Tensiomyography(TM)는 골격근의 기계적 특성 및 신경근을 비 침습적으로 평가하는 기계근육운동평가(Mechanomyography) 평가방법 중 하나로써 단일 근육의 강성 및 신경근의 피로를 측정할 수 있는 도구로 사용되며, 특히 일회성 운동 후에 근육의 급성피로를 측정하는 연구가 많이 진행되고 있다(García-García et al., 2020; Macgregor et al., 2018; Pereira et al., 2020; Rusu et al., 2013). TMG는 1ms의 시간 동안 0~100mA의 단일 전기자극으로 근육을 자극하여 기계적인 수축을 유도한 후 반응을 측정한다(García-Unanue et al., 2020). TMG는 근육의 최대 수축 변위를 기록하는 Maximum radial displacement(Dm)와 최대 수축 변위의 10~90%까지 수축하

는데 걸리는 시간인 Contraction time(Tc), 자극의 시작부터 최대 수축 변위의 10%까지 걸리는 시간인 Delay time(Td), 최대 수축변위의 50%에서 하강곡선의 50%까지 유지되는 시간인 Sustain time(Ts), 그리고 하강 곡선에서 최대 수축 변위의 90~50%까지 걸리는 시간인 Relaxation time(Tr)로 구성되어 평가한다. 측정-재측정 및 평가자 내 신뢰도 지수는 intraclass correlation coefficient(ICC)의 95% 신뢰구간을 기반으로 평가되며, TMG의 변인 중 Dm(0.91-0.99) 그리고 Tc(0.70-0.98)는 반복 측정 시 가장 신뢰도 있는 변인이다(Križaj et al., 2008; Martín-Rodríguez et al., 2017). 그러나 Tc는 Dm의 90%에 도달하는 시간으로 Dm의 크기에 영향을 받을 수 있기 때문에, 이를 보완하여 근육의 수축 속도를 계산한 Vrn(normalized response speed), Vc10(mean velocity until 10% Dm) 및 Vc90(mean velocity until 90% Dm)가 있다(de Paula Simola et al., 2015; Križaj et al., 2008; Lohr et al., 2018; Loturco et al., 2016; Pereira et al., 2020).

스포츠에서 매우 흔하게 나타나는 달리기, 점프, 및 방향전환 동작

© This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://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.

등은 하체에서 일어나며, 슬관절의 굴곡과 신전이 많이 일어난다. 달리기 중 피로에 의한 비복근의 활동 감소를 슬관절 굴곡근 및 신전근이 보완하여 보폭 패턴을 유지하는 역할을 수행하고(Rabita et al., 2013), 또한 점프동작에서 햄스트링과 대퇴사두근은 신장되면서 탄성 에너지를 저장하고 힘을 발휘하는데 중요한 역할을 한다(Padulo et al., 2013; Peng et al., 2011; Struminger et al., 2013). 이처럼 햄스트링과 대퇴사두근은 하체의 움직임에서 역할이 크기 때문에 운동 후 피로 측정에 많이 사용된다. TMG를 사용한 피로 측정 연구도 대퇴이두근(biceps femoris, BF)과 대퇴직근(Rectus femoris, RF)에서 많이 이루어지고 있으나(García-Manso et al., 2011; García-Unanue et al., 2020; López-Fernández et al., 2017; Santana et al., 2018), TMG로 피로를 측정한 선행연구에서 각각 다른 결과를 보고하고 있어 피로 정도의 파악 기준은 모호하다. 피로 유발 후 근육의 경직도 증가로 인한 Dm의 감소를 보고하는 연구도 있으나(Berzosa et al., 2020; Calderón-Pellegrino et al., 2020; García-García et al., 2020; Martín-San Agustín et al., 2020; Sánchez-Sánchez et al., 2019), 다른 연구들에서는 근육의 경직도 감소로 인한 Dm의 증가를 보고하는 연구도 있다(López-Fernández et al., 2017; Rojas-Barrionuevo et al., 2017). 이러한 결과뿐만 아니라 같은 동작 후 BF와 RF의 반응은 다르게 나타나며, 이는 동작 수행 시 근육의 역할이 달라 나타나는 반응인 것으로 판단된다(Bourne et al., 2017; García-Unanue et al., 2020; Nicola & Jewison, 2012; Sánchez-Sánchez et al., 2018; Sánchez-Sánchez et al., 2019).

이처럼 TMG는 피로 측정에 대한 잠재적 이점이 있지만 각 문헌이 보고하는 경향성이 일정하지 않아 결과 해석에 대한 모호함이 있다. 그러나 현재까지 급성 운동 후 근육의 피로에 대한 TMG 변인의 변화 경향에 대해 메타 분석 접근 방식을 통해 분석한 연구는 전무한 실정이다. 따라서 본 연구는 일회성 운동 후 급성 근육피로로 인한 변화를 메타 분석을 통한 효과크기로 분석하여 해석 기준점을 제시하고, 이중관절 근육인 BF와 RF 그리고 TMG변인 중 신뢰성이 높은 변인인 Dm, Tc와 피로 감지에 민감한 Vc90을 추가하여 분석할 변화 경향을 정량화하여 TMG를 이용한 피로 측정의 기준을 마련하는 목적이 있다.

연구방법

문헌 조사 방법

문헌 검색과 연구 식별 검토 그리고 메타 분석 방법에 대한 선호 보고 항목 순서로 체계적인 검토 및 메타 분석을 수행하였다. 문헌 검색은 급성 운동 후 근육의 상태 변화를 검토하기 위해 일회성 운동으로 인한 근육의 피로 전후를 TMG로 측정한 연구에 중점을 두었다. 검색 엔진은 PubMed와 Web of Science를 통해 검색을 하였고, 2020년 12월 06일에 시작하여 2021 1월 7일에 종료하였다. 키워드는 "Tensiomyography"로 설정하였다. 문헌 포함 기준은 급성 운동 전후 TMG 측정 연구; RF 또는 BF 측정 연구; 그리고 운동 피로 직후 TMG 측정 연구로 하였다. 제외 기준에는 리뷰 논문, 사례 연구 그리고 동물 연구 등 관련 없는 문헌은 제외하였으며, 한 명의 연구원이 문헌 검색을 전담하여 수행하였다. 연구 포함 및 제외 절차는 <Figure 1>과 같이, 최초 전산화된 문헌 검색을 통해 282개의 문헌을 검색하였고, 제목 및 요약은 읽은 후 다음과 같은 이유로 총 226개의 문헌을

제외하였다. 중복되는 문헌 107개; 리뷰 문헌 11개; 케이스 문헌 32개; 관련 없는 주제의 문헌 116개를 제외하였고, 최종적으로 16개 문헌을 메타 분석에 사용하였다(Barcala-Furelos et al., 2020; Beato et al., 2019; Berzosa et al., 2020; Calderón-Pellegrino et al., 2020; García-García et al., 2020; García-Unanue et al., 2020; López-Fernández et al., 2017; Martín-San Agustín et al., 2020; Pereira et al., 2020; Rodríguez-Matoso et al., 2015; Rojas-Barrionuevo et al., 2017; Rojas-Valverde et al., 2020; Sánchez-Sánchez et al., 2018; Sánchez-Sánchez et al., 2019; Santana et al., 2018; Ubago Guisado et al., 2017).

Tensiomyography(TMg)

관련된 16개 문헌에서 급성 운동으로 유발된 근육피로를 평가하기 위한 측정 도구로 TMG를 사용하여 BF, RF, Vastus Lateralis (VL), Vastus Medialis (VM), Semitendinosus (ST), Medial Gastrocnemius (GM) 근육을 평가하였다. 또한, TMG의 측정변인으로 Dm, Tc, Td, Ts, Tr, Vrn, Vc90이 사용되었다. Vrn은 계산식 $Vrn = \frac{0.8}{Tc}$ 을 사용하여 Tc로 변환 후 분석에 사용하였다(Park, 2020). 그리고 근육의 수축 속도를 계산하기 위해 $Vc90 = \frac{Dm \times 0.9}{Tc + Td}$ 을 이용해 Vc90을 계산하였다(de Paula Simola et al., 2015). 모든 문헌은 운동 전후로 하여 TMG를 측정하였으며, 사후 측정은 운동 직후 측정되었다. 또한, 포함된 문헌들의 측정방법은 BF 측정 시 엎드린 상태에서 wedge foam cushion을 사용하여 5~15° 굽힌 상태를 유지하고 측정하였으며, RF 측정 시 똑바로 누운 상태에서 special triangular wedge foam cushion을 사용하여 무릎을 140~150° 편 상태를 유지하고 측정되었다(García-García et al., 2018; Rodríguez-Ruiz et al., 2014). 측정 시 전위는 1ms의 시간 동안 0~100mA의 강도로 처치되었으며, 최대 변위(Dm)가 나타날 때까지 점진적으로 증가시켰

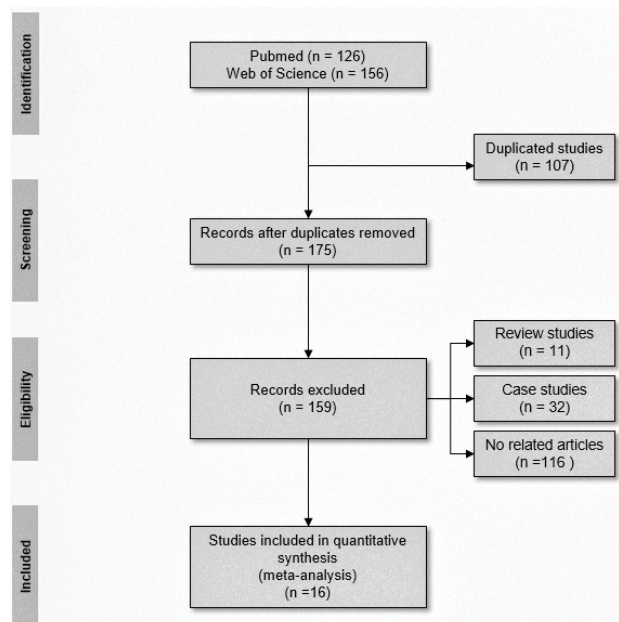


Fig. 1. PRISMA flow chart for the study inclusion

고, 측정 간 쉬는 시간은 10초 이상 실행되었다(Hunter et al., 2012).

본 연구에서는 2개의 근육(BF, RF) 그리고 TMG의 중재 변인 3개(Dm, Tc, Vc90)에 대해 분석하였으며, 각 변인들은 실험에서 처치한 운동으로 인해 피로가 유발되며(Hanon et al., 2005; Pereira et al., 2020), TMG 측정 시에 신뢰도가 있는 근육과 변인들을 사용하였다(Martin-Rodríguez et al., 2017; Šimunič, 2012).

급성 운동

관련된 16개 문헌들에서 피로를 유발하기 위해 일회성 운동을 repeated sprint ability(RSA), maximal incremental cycling test(MICT), maximal voluntary isometric contraction(MVIC), training exercises, running, swimming, forward tucked somersaults, surfing과 같이 수행하였다고 보고하였다.

Meta-analytic approaches

본 연구는 Comprehensive Meta-analysis software(version 3.0, Biostat Inc., USA)를 사용하여 모든 통계 데이터 평가 절차를 실행하였다. 개별 및 전체의 효과 크기(ES)는 95% 신뢰 구간(CI)으로 Hedges's g를 사용하여 계산하였다(Hedges & Olkin, 2014).

각 변인들의 변화 값이 증가한 것을 positive로 감소한 것을 negative로 평가하였으며, Tc, Dm, Vc90에서 양의 Hedges's g값은 운동 후 각 변인이 증가하였음을 나타낸다. 또한, 평가의 신뢰성을 위하여 모든 값의 ES를 계산하여 moderate 과정을 통해 표준편차의 2배가 넘는 값은 제거하였다(Bodner, 2017). 개별연구들에서 공통된 효과 크기가 나타나지 않는다는 가정을 하고, 무선 효과 메타 분석 모형을 사용하였다(Borenstein et al., 2010). ES의 평가는 매우 작음(0.2; 0.2≤작음<0.6; 0.6≤보통<1.2; 1.2≤큼<2.0; 2.0≤매우 큼으로

평가하였다(Hopkins et al., 2009).

문헌들의 이질성 수준을 확인하기 위해 Higgins and Green I2 test를 사용하였으며 50% 이상의 I2는 이질성이 있는 것으로 판단하였으며(Higgins & Thompson, 2002), 문헌 편향 검사에는 다음과 같은 방법이 사용되었다. trim-and-fill 기술을 사용하여, 원래 모양의 funnel plot과 뒤집은 모양의 funnel plot을 비교하였으며(Duval & Tweedie, 2000), Egger regression test를 사용하였으며(Egger et al., 1997), 이 방법은 funnel plot에 대칭이 존재한다는 null hypothesis에 근거하고, intercept(β_0)의 $p < .05$ 일 경우 대칭 가정에 위배되어 높은 편향성을 나타낸다.

마지막으로 포함된 연구들에 대해 critical appraisal tool(CAT) 척도를 사용하여 방법론적 품질을 추정하였다(Brink & Louw, 2012). CAT는 13개의 질문으로 구성되었으며, 5개 항목은 연구의 타당성과 신뢰도와 관련이 있으며, 4개 항목은 연구의 타당성, 다른 4개의 항목은 신뢰도에 관련이 있다(Table 1). 질문에 대한 답은 yes, no, 및 not applicable로 되어있으며, yes는 1점 no는 0점으로 하였다. CAT는 전체적인 품질 점수를 제공하지 않으므로 Carlsson과 Rasmussen-Barr(2013)의 평가방법을 각색하여 11개의 답변 항목 중 8점 이상이면 편향 위험이 낮고 방법론적 품질이 우수하며, 7개이면 편향위험과 방법론적 품질이 중간, 6개 이하이면 편향 위험이 높고 방법론적 품질이 낮은 것으로 평가하였다. 품질 평가는 3명의 연구원이 각각 실시한 후, 논의를 통해 최종 점수를 도출하였다.

연구결과

참가자 및 연구 특성

메타 분석에 적합한 총 16개의 문헌들에서 건강한 참가자 393명의

Table 1. The CAT explanation of 13 questions

Question	Contents
Question 1	If human subjects were used, did the authors give a detailed description of the sample of subjects used to perform the (index) test?
Question 2	Did the authors clarify the qualification, or competence of the rater(s) who performed the (index) test?
Question 3	Was the reference standard explained?
Question 4	If interrater reliability was tested, were raters blinded to the findings of other raters?
Question 5	If intrarater reliability was tested, were raters blinded to their own prior findings of the test under evaluation?
Question 6	Was the order of examination varied?
Question 7	If human subjects were used, was the time period between the reference standard and the index test short enough to be reasonably sure that the target condition did not change between the two tests?
Question 8	Was the stability (or theoretical stability) of the variable being measured taken into account when determining the suitability of the time interval between repeated measures?
Question 9	Was the reference standard independent of the index test?
Question 10	Was the execution of the (index) test described in sufficient detail to permit replication of the test?
Question 11	Was the execution of the reference standard described in sufficient detail to permit its replication?
Question 12	Were withdrawals from the study explained?
Question 13	Were the statistical methods appropriate for the purpose of the study?

Table 2. Information of the study |

Study (Year of publication)	Study design	Participants	Age (Year±SD)	Gender	Training level
Barcala-Furelos (2020)	Single group / Pre-post test	20	24.0±4.9	Male / Female	Active
Beato (2019)	Randomized controlled trial	32	21±3	Male	Amateur
Berzosa (2020)	Crossover	10	27±1.5	Male	Active
Calderón-Pellegrino (2020)	Single group / Pre-post test	32	23±5	Male	Elite
García-García (2020)	Single group / Pre-post test	48	20.2±2.3	Male	Elite
García-Unanue (2020)	Single group / Pre-post test	33	23.4±4.4	Male	Elite / Amateur
López-Fernández (2017)	Crossover	16	22.2±3.4	Male	Amateur
Martín-San Agustín (2020)	Single group / Pre-post test	35	22.0±2.0	Male / Female	Active
Pereira (2020)	Crossover	14	21.8±2.6	Male	Elite
Rodríguez-Matoso (2015)	Single group / Pre-post test	11	28.2±2.9	Male	Elite
Rojas-Barrionuevo (2017)	Crossover	14	20.7±3.1	Male	Elite
Rojas-Valverde (2020)	Crossover	20	20.4±3.2	Male	Active
Sánchez-Sánchez (2018)	Single group / Pre-post test	20	25.5±6.1	Male	Elite
Sánchez-Sánchez (2019)	Single group / Pre-post test	62	14.6±2.0	Male / Female	Elite
Santana (2018)	Single group / Pre-post test	11	20.8±3.2	Male	Elite
Ubago Guisado (2017)	Crossover	15	23.4±3.4	Female	Amateur

급성 운동으로 인한 근육피로에 대해 TMG로 분석한 연구를 조사하였다. 8개의 문헌들은 엘리트선수들을 대상으로 하며, 7개의 문헌들은 아마추어 및 활동적인 사람을 대상으로 하고 1개의 문헌은 프로와 아마추어를 대상으로 하였다. 연구 디자인은 single group pre-post test 연구 9개, crossover 연구 6개, randomized controlled trial 연구 1개였으며, <Table 2>에 자세한 내용을 표기하였다.

운동 프로토콜

분석에 사용된 16개의 문헌들 중 급성 근육피로를 위한 운동처치로 RSA 4개, Maximal incremental cycling test 1개, MVIC 1개, weight training 3개, running exercise 3개, swimming 1개, forward tucked somersaults 2개, surfing 1개를 사용하여 근육 피로를 주었고, <Table 3>에 자세한 내용을 표기하였다.

Tensiomyography(TMg)

포함된 16개 문헌들 모두 RF를 분석하였으며, BF 측정 13개, VL 측정 6개, VM 측정 5개, ST 측정 1개, GM 측정 2개였다. 또한, 신경근의 변화를 측정하기 위한 TMG의 변인으로는 Dm 측정 14개, Tc 측정 13개, Td 측정 9개, Vc 90 측정 3개, Vc10 측정 1개, Ts 측정 5개, Tr 측정 4개, Vrn 측정 3개, Vrd 측정 1개였다. Dm, Tc, Td를 함께 제시한 문헌은 이를 Vc90 계산 공식을 사용하여 Vc90으로 변환하여 제시하였으며, <Table 3>에 자세한 내용을 표기하였다.

방법론적 편향성 및 이질성 수준 평가

선정된 16개의 문헌들의 CAT 점수의 평균 및 SD는 9.5±1.5(6~11 범위)였으며, 14개의 문헌들은 편향 위험이 낮고 방법론적 품질이 좋았으며, 1개의 문헌은 편향위험과 방법론적 품질이 중간, 1개의 문헌은 편향 위험이 높고 방법론적 품질이 낮았다. <Table 4>에 각 연구에 대한 CAT 점수를 제시하였다.

이질성 수준은 $I^2=35.77 \pm 30.30$ (SD)였으며, 이는 중간 수준이다. 일부 연구에서는 이질성이 중간 또는 높은 수준이었지만, 유의한 수준은 아니었으며, 모든 연구의 출판 편향은 없었다.

엘리트 선수와 일반인 비교

무선 효과 메타 분석 모형으로 일회성 운동 후 BF와 RF의 근육 피로를 측정하는 TMG 변인에 대한 차이를 분석하였다.

BF의 Dm 변화의 효과크기에서 일반인은 유의하지 않았지만 (Hedges's g: 0.007, 95% CI: -0.189~0.202, $p=0.946$; $I^2: 0.00\%$), 엘리트 운동선수는 작고 유의한 감소를 보여주었다(Hedges's g: -0.386; SE: 0.086, 95% CI: -0.565~-0.207, $p=0.000$, $I^2: 9.50\%$). 전체효과는 작고 유의한 감소가 나타났다(Hedges's g: -0.207, 95% CI: -0.339~-0.075, $p=0.002$; $I^2: 24.51\%$)<Figure 2>. RF Dm의 효과크기에서는 일반인에서 작지만 유의한 감소를 보였지만(Hedges's g: -0.298, 95% CI: -0.518~-0.078, $p=0.008$; $I^2: 34.94\%$), 엘리트 운동선수에서는 유의하지 않았다(Hedges's g: 0.132, 95% CI: 0.101~0.366, $p=0.266$; $I^2:$

Table 3. Information of the study II

Study (Year of publication)	Exercise protocol	Measure muscle	TMG variables
Barcala-Furelos (2020)	Swimming / 100m with fins to the victim, and towing the victim 100 m back (victim: height, 160–190cm; weight, 60–90kg)	RF	Dm, Tc
Beato (2019)	Training / 15min workout programs	VL, VM, RF	Dm, Tc, Td, Vc10, Vc90
Berzosa (2020)	Squat / Each exercise session consisted of 4 sets of 7 repetitions interspersed by 2min between-set rest intervals.	RF, BF	Dm, Tc
Calderón-Pellegrino (2020)	RSA / Seven repeated sprints of 30m, with 20s of active recovery between	RF, BF	Dm, Tc, Td
García-García (2020)	Maximal incremental cycling test / Increased 20 W·min ⁻¹ , frequency of 80–90 rev·min ⁻¹ , reached an average of 393.8±41.6 W (5.8±0.4 Wpeak·kg ⁻¹) test duration was 1228±120s	VL, RF, BF	Dm, Tc, Td, Ts, Vrd
García-Unanue (2020)	RSA / Seven repeated sprints of 30m, with 20s of active recovery between	RF, BF	Dm, Tc, Td, Ts, Tr
López-Fernández (2017)	Soccer simulation protocol / 3 bouts of the SSP, Each bout last 16min with 3min of rest between bouts.	RF, BF	Dm, Tc, Td, Ts, Tr
Martín-San Agustín (2020)	MVIC / Measure 3 MVIC, and 60s fatiguing isometric contraction at 70% MVC	VL, VM, RF	Dm, Tc, Vc10, Vc90
Pereira (2020)	Training / 40-50min workout programs	RF, BF	Vc90
Rodríguez-Matoso (2015)	Surfing / Wave size 1 – 1½m wave length 6-9s wave direction right distance paddling 40-50m, heat length 20min	VL, VM, RF, BF, ST	Dm, Ts, Tr, Vrn
Rojas-Barrionuevo (2017)	Forward tucked somersaults / 12 sets of 6 repetitions of forward tucked somersaults, a rest period of 2min between sets, 5s between repetitions was implemented	VL, VM, RF, BF, GM	Vrn
Rojas-Valverde (2020)	Running / 30 min running	RF, BF	Dm, Tc
Sánchez-Sánchez (2018)	RSA / Seven repeated sprints of 30m, with 20s of active recovery between	RF, BF	Dm, Tc, Td, Ts
Sánchez-Sánchez (2019)	RSA / Seven repeated sprints of 30m, with 20s of active recovery between	RF, BF	Dm, Tc, Td
Santana (2018)	Forward tucked somersaults / 12 sets of 6 repetitions of forward tucked somersaults, A rest period of 2min between sets, 5s between repetitions was implemented	VL, VM, RF, BF, GM	Dm, Tc, Td, Vrn
Ubago Guisado (2017)	Modified RSA / consisted of six sprints of 40m (20+20m) with 20s of passive recovery	RF, BF	Dm, Tc, Td, Tr

RSA repeated sprint ability, MVIC maximal voluntary isometric contraction, BF biceps femoris, RF rectus femoris, VL vastus lateralis, VM vastus medialis, ST semitendinosus, GM medial gastrocnemius, Dm maximum displacement, Tc contraction time, Td delay time, Ts sustain time, Tr relaxation time, Vrd radial displacement velocity, Vrn normalized response speed, Vc10 mean velocity until 10% Dm, Vc90 mean velocity until 90% Dm.

Table 4. Result of rist of bias with CAT

Study (Year of Publication)	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	Q7	Q8	Q9	Q10	Q11	Q12	Q13	Total	Risk of bias
Barcala-Furelos (2020)	Y	Y	Y	N/A	N/A	N	Y	N	N	Y	Y	Y	Y	8/11	Low
Beato (2019)	Y	N	Y	N/A	N/A	Y	N	Y	Y	Y	Y	Y	Y	9/11	Low
Berzosa (2020)	Y	N	Y	N/A	N/A	N	Y	N	N	Y	Y	Y	Y	7/11	Moderate
Calderon-Pellegrino (2020)	Y	Y	Y	N/A	N/A	Y	N	Y	Y	Y	Y	Y	Y	10/11	Low
Garcia-Garcia (2020)	Y	N	Y	N/A	N/A	Y	N	Y	Y	Y	Y	Y	Y	9/11	Low
Garcia-Unanue (2020)	Y	Y	Y	N/A	N/A	Y	N	Y	Y	Y	Y	Y	Y	10/11	Low
Lopez-Fernandez (2017)	Y	Y	Y	N/A	N/A	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	11/11	Low
Martin-San Agustin (2020)	Y	Y	Y	N/A	N/A	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	11/11	Low
Pereira (2020)	Y	Y	Y	N/A	N/A	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	11/11	Low
Rodriguez-Matoso (2015)	Y	N	N	N/A	N/A	Y	N	Y	Y	N	N	Y	Y	6/11	High
Rojas-Barrionuevo (2017)	Y	Y	Y	N/A	N/A	Y	Y	N	Y	Y	Y	Y	Y	10/11	Low
Rojas-Valverde (2020)	Y	N	Y	N/A	N/A	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	10/11	Low
Sanchez-Sanchez (2018)	Y	Y	Y	N/A	N/A	Y	N	Y	Y	Y	Y	Y	Y	10/11	Low
Sanchez-Sanchez (2019)	Y	Y	Y	N/A	N/A	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	11/11	Low
Santana (2018)	Y	N	Y	N/A	N/A	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	10/11	Low
Ubago (2017)	Y	Y	Y	N/A	N/A	Y	N	N	Y	Y	Y	Y	Y	9/11	Low

Q question, Y yes, N no, N/A not applicable

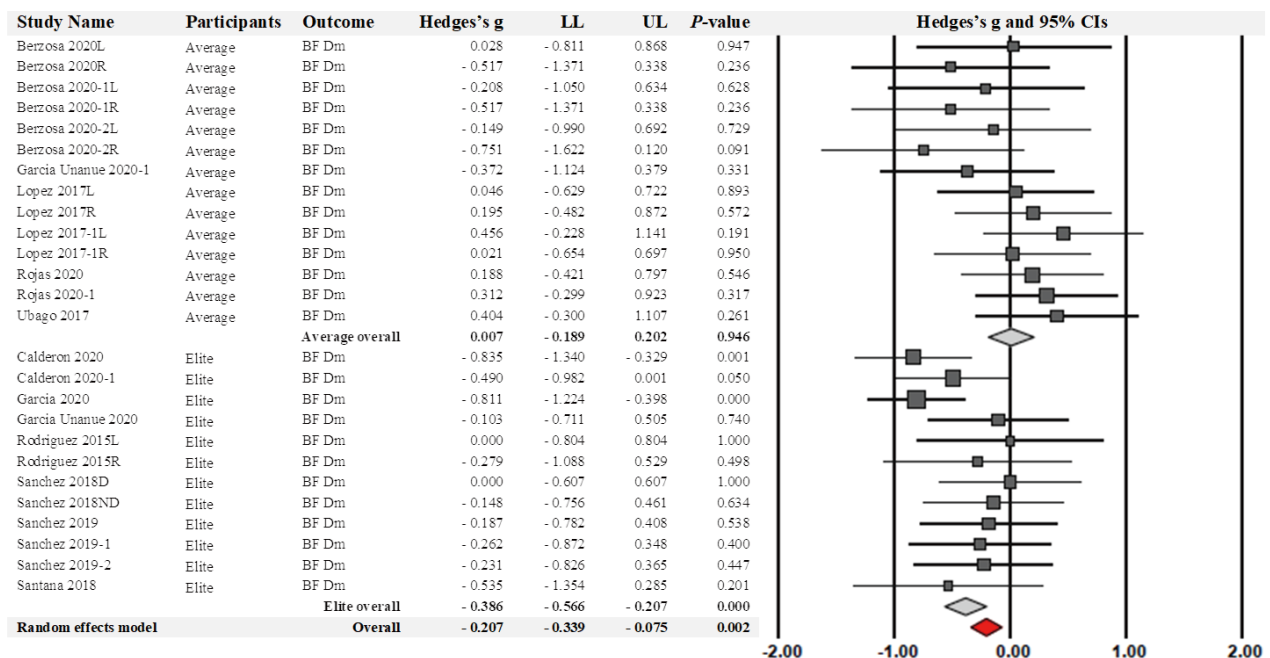


Fig. 2. Results of the biceps femoris maximum radial displacement meta-analysis

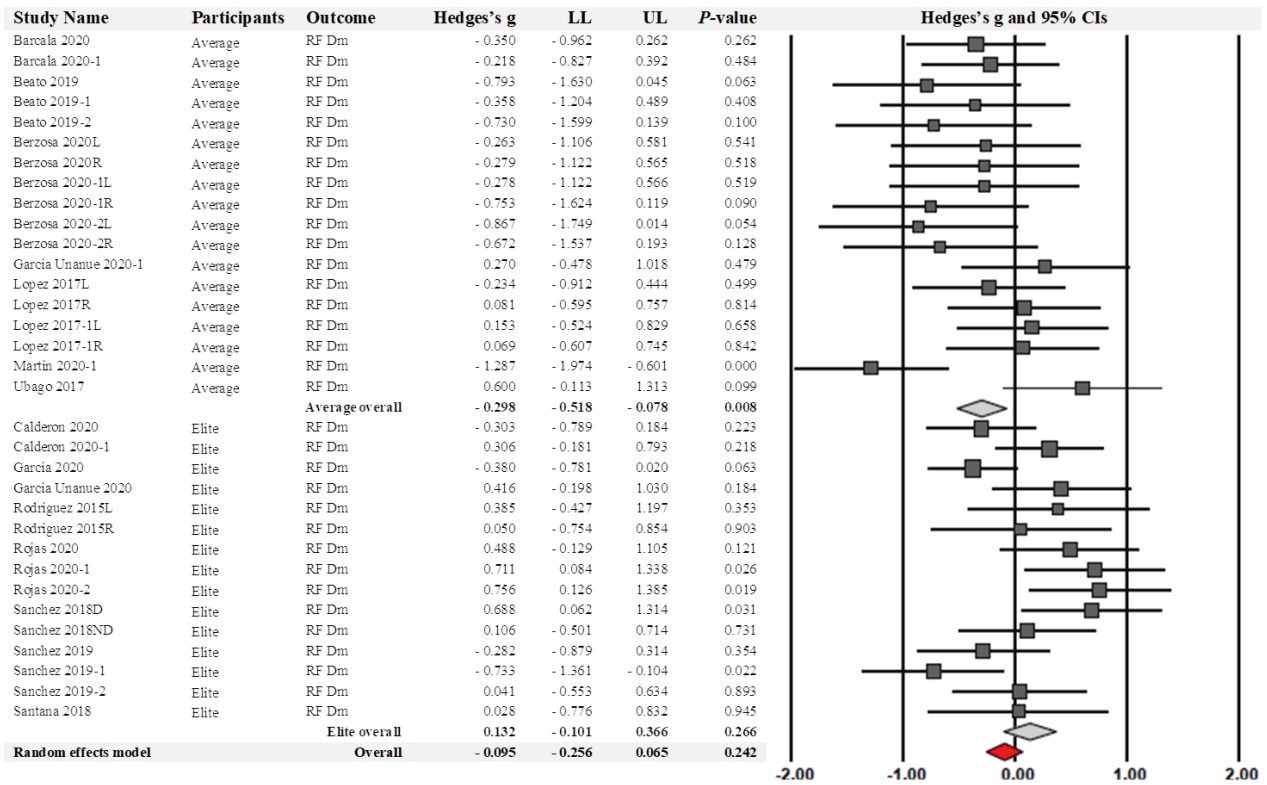


Fig. 3. Results of the rectus femoris maximum radial displacement meta-analysis

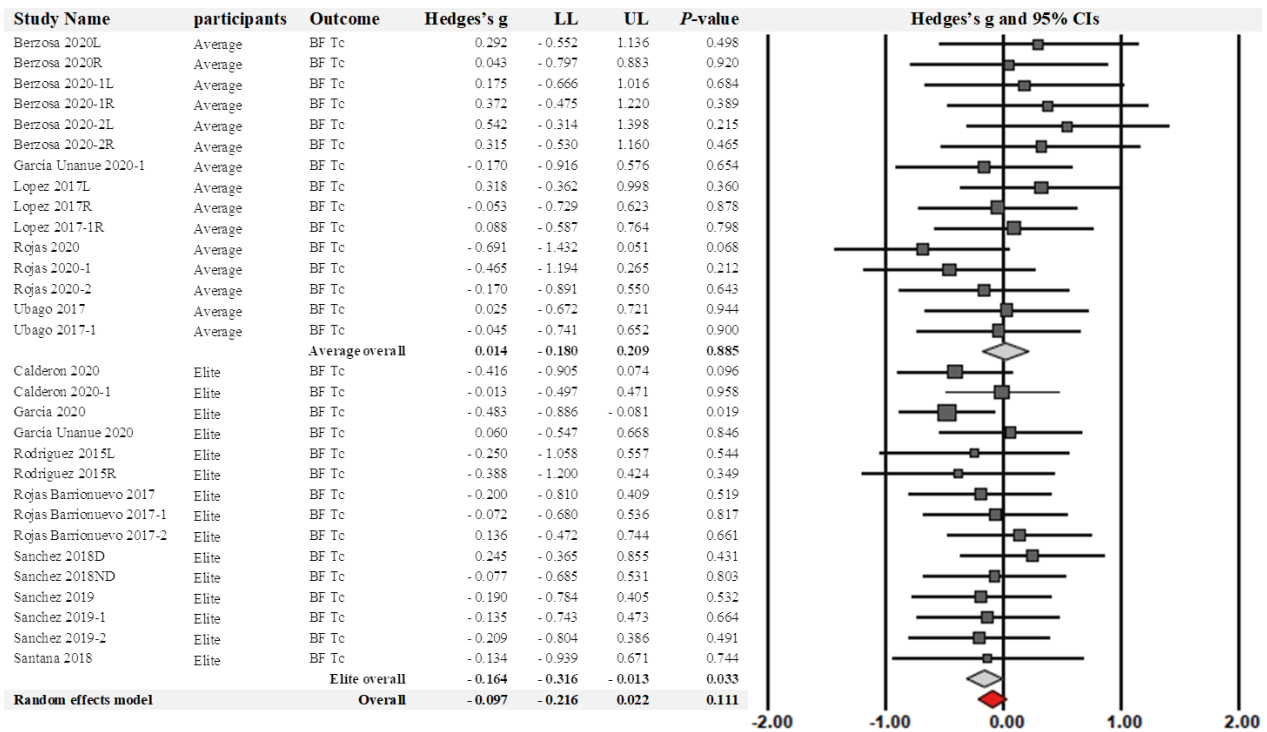


Fig. 4. Results of the biceps femoris contraction time meta-analysis

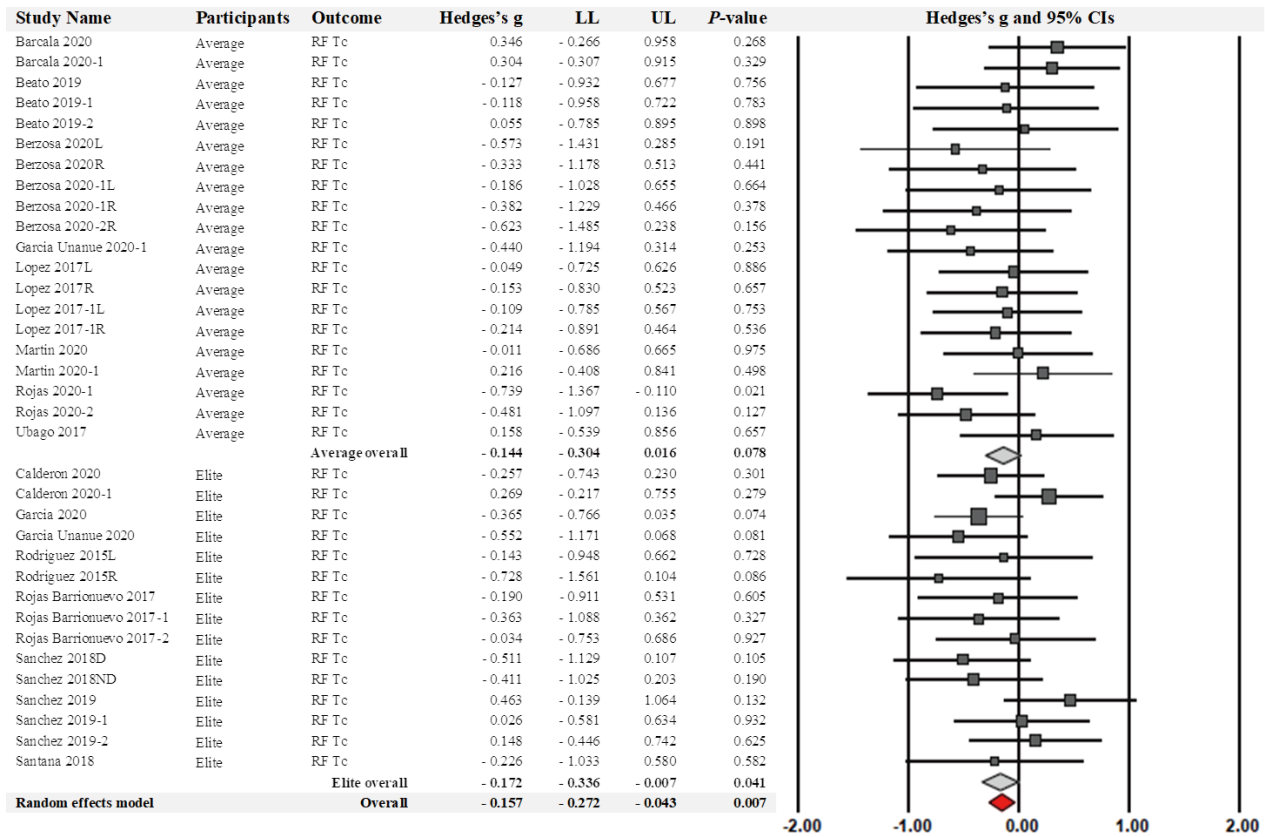


Fig. 5. Results of the rectus femoris contraction time meta-analysis

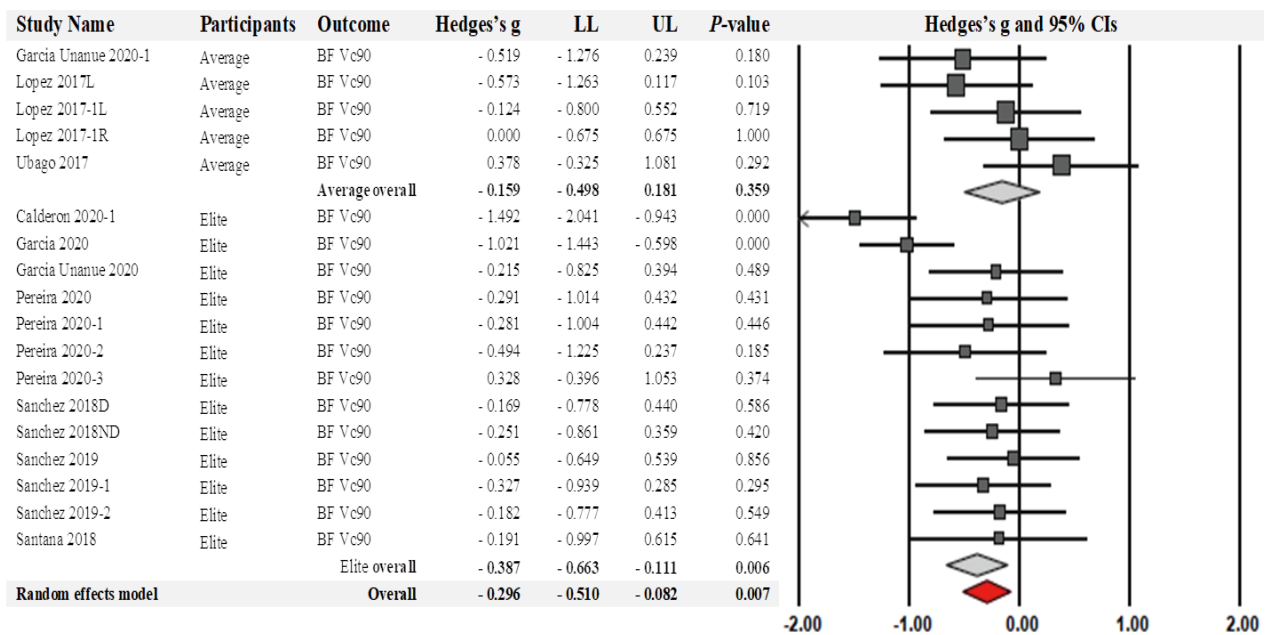


Fig. 6. Results of the biceps femoris mean velocity until 90 % Dm meta-analysis

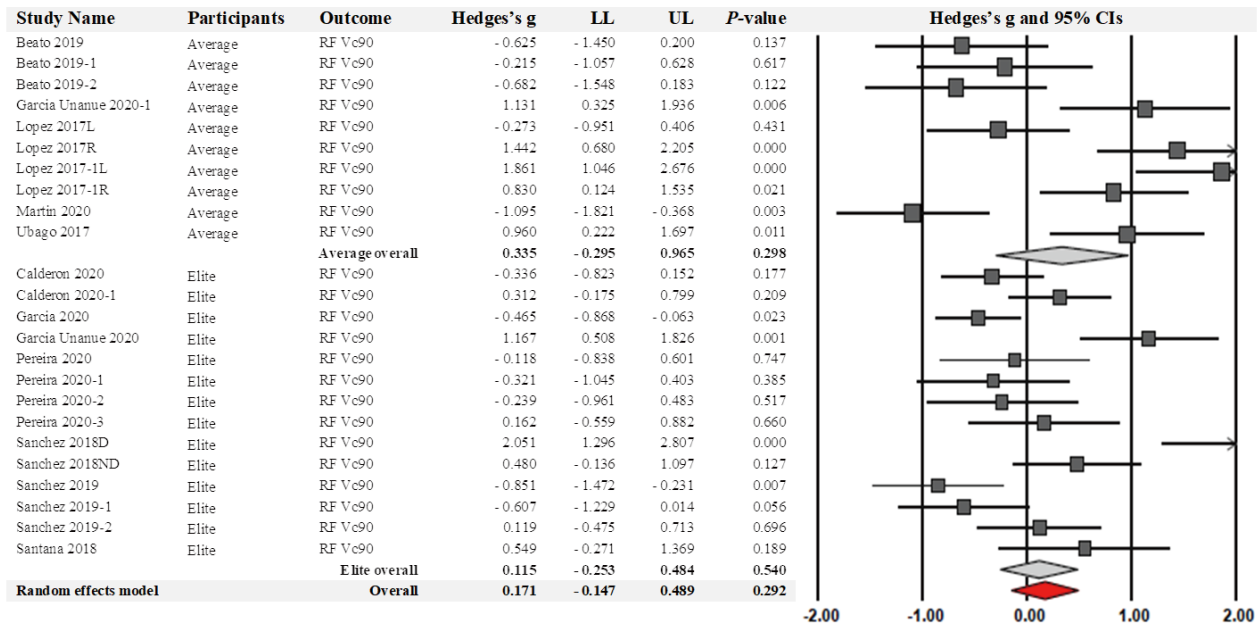


Fig. 7. Results of the rectus femoris mean velocity until 90 % Dm meta-analysis

55.47%). 또한 전체 효과에서도 유의하지 않았다(Hedges's g: -0.095, 95% CI: -0.256~0.065, $p=0.242$; $I^2: 52.67\%$)(Figure 3).

BF의 Tc 변화의 효과크기에서 일반인에서는 유의하지 않았지만(Hedges's g: 0.014, 95% CI: -0.180~0.209, $p=0.885$; $I^2: 0.00\%$), 엘리트 운동선수에서는 아주 작지만 유의한 감소가 나타났다(Hedges's g: -0.164, 95% CI: -0.316~-0.013, $p=0.033$; $I^2: 0.00\%$). 전체효과에서는 유의하지 않았다(Hedges's g: -0.097, 95% CI: -0.216~0.022, $p=0.111$; $I^2: 0.00\%$)(Figure 4). RF의 Tc 변화의 효과 크기에서 일반인에서는 유의하지 않았지만(Hedges's g: -0.144, 95% CI: -0.304~0.016, $p=0.078$; $I^2: 0.00\%$), 엘리트 운동선수에서는 아주 작지만 유의한 감소가 나타났으며(Hedges's g: -0.172, 95% CI: -0.336~-0.007, $p=0.041$; $I^2: 8.51\%$), 전체효과에서도 유의한 감소가 나타났다(Hedges's g: -0.157, 95% CI: -0.272~-0.043, $p=0.007$; $I^2: 0.00\%$)(Figure 5).

BF의 Vc90 변화의 효과크기에서 일반인에서는 유의하지 않았지만(Hedges's g: -0.159, 95% CI: -0.498~0.181, $p=0.359$; $I^2: 15.20\%$), 엘리트 운동선수에서는 아주 작지만 유의한 감소가 나타났으며(Hedges's g: -0.387, 95% CI: -0.663~-0.111, $p=0.006$; $I^2: 60.71\%$), 전체효과에서도 유의한 감소가 나타났다(Hedges's g: -0.296, 95% CI: -0.510~-0.082, $p=0.007$; $I^2: 55.15\%$)(Figure 6). RF의 Vc90 변화의 효과크기에서는 일반인(Hedges's g: 0.335, 95% CI: -0.295~0.965, $p=0.298$; $I^2: 85.01\%$), 엘리트 운동선수(Hedges's g: 0.115, 95% CI: -0.253~0.484, $p=0.540$; $I^2: 80.11\%$), 전체효과(Hedges's g: 0.171, 95% CI: -0.147~0.489, $p=0.292$; $I^2: 82.28\%$) 모두 유의하지 않았다(Figure 7).

결과적으로 엘리트 운동선수들에서는 BF의 모든 변인과 RF Tc의 변화 효과크기에서 유의한 감소가 나타났지만, 일반인에서는 RF Dm 변화에서만 유의한 감소가 나타났다. 전체효과에서는 BF의 Dm, Vc90, RF의 Tc 변화에서 유의한 감소가 나타났다.

논의

본 연구는 많은 수의 문헌을 사용하여 급성 운동에 의해 유발된 급성 근육 피로를 TMG를 활용해 측정 변인의 변화 경향성에 대한 체계적 문헌고찰과 메타 분석을 수행하였다.

연구에 사용된 문헌들의 CAT평가 결과 편향위험과 방법론적 수준은 우수한 것으로 나타났다. 또한 메타 분석결과, 일회성 운동으로 유발된 급성 근육 피로를 TMG로 측정 시 특정 변화 경향성이 나타나는 것을 확인하였으며, BF와 RF의 경향성은 다르게 나타났다.

전체 문헌을 분석한 결과 BF의 Dm(Hedges's g: -0.207), Vc90(Hedges's g: -0.296)과 RF의 Tc(Hedges's g: -0.157)에서 전체효과의 유의한 감소 경향이 나타났다. 엘리트 운동선수는 일회성 운동 후 BF의 모든 변인 Dm(Hedges's g: -0.386), Tc(Hedges's g: -0.164), Vc90(Hedges's g: 0.387)과 RF의 Tc(Hedges's g: -0.172)에서 유의한 감소 경향이 나타났지만, 일반인은 RF의 Dm(Hedges's g: -0.298)에서만 유의한 감소 경향이 나타났다.

전체적인 효과(overall ES)에서 BF의 Vc90에서 유의한 감소 경향이 나타났는데, 이는 일회성 운동 후 Vc90의 감소를 보고한 연구와 일치하는 결과이다(Beato et al., 2019; Pereira et al., 2020). 이는 급성 근육 피로로 인한 근섬유 내부의 pH 감소가 활동전위의 전달속도 감소에 영향을 주어 수축력과 수축속도 감소에 영향을 줄 수 있고, Adenosine triphosphate 수의 감소는 Actin-Myosin 교차결합을 감소시켜 수축력의 감소를 유발할 수 있으며, 또한 대퇴사두근과 햄스트링은 속근섬유 (TypeII)의 비율이 지근섬유 (Type I)의 비율보다 높으며, TypeII 근섬유는 Type I 근섬유보다 더 낮은 미토콘드리아의 함량과 에너지 생산을 위한 oxidative metabolism이 적기 때문에 피로 저항성이 낮아 운동 시 먼저 피로해져 잠재적으로 수축 속도의 감소를 유발할 것으로 사료된다(Ahn et al., 2018; Boyas & Guével, 2011; Evangelidis et al., 2017; Fitts, 2008; Li et al.,

2020; Meznaric & Cvetko, 2016). 또한 Dm에서 유의한 감소 경향이 나타났으며, 이는 다른 선행연구들에서 운동 후 근육의 피로가 긴장도와 경직도를 증가시킨다고 보고한 결과와 일치한다(Berzosa et al., 2020; Calderón-Pellegrino et al., 2020; García-García et al., 2020; Rodríguez-Matoso et al., 2015; Sánchez-Sánchez et al., 2019). 근육 피로는 근섬유 내부에 H⁺와 Pi를 축적하여 pH를 감소를 유발하고, 이로 인해 근섬유 내부에 Ca²⁺가 증가하여 troponin의 Ca²⁺에 대한 민감도를 감소시키고, 근형질 세망(Sarcoplasmic reticulum)에서 재흡수가 억제되며, Actin-Myosin 결합의 분리 속도 감소 인해 경직도가 증가한다고 보고하였다(Boyas & Guével, 2011; Fitts, 2008). 이러한 현상은 근육 피로가 증가하였을 때 근육 활성이 감소하는 대신, 근육 강성을 증가시켜 운동 시 발생하는 에너지를 더 많이 저장하기 위한 것으로 생각할 수 있다(Dumke et al., 2010).

RF는 Tc에서만 유의한 감소 경향이 나타났고, 다른 변인들에서는 유의한 차이가 나타나지 않았으며, 이는 각 연구에서 사용된 일회성 운동이 근육에 큰 피로를 유발하지 않았기 때문이라고 생각된다. 포함된 문헌들 중 RF의 피로를 유발하기에 운동이 충분하지 않았다고 보고한 연구들이 있으며(Barcala-Furelos et al., 2020; Rojas-Valverde et al., 2020), Beato et al.(2021)으로 운동 후 PAP(post activation potentiation) 반응으로 인한 동작 시 반응시간의 향상이 있었다고 보고하였으며, 이러한 결과로 Tc의 감소가 유발될 수 있다. 또한, 전체적인 효과에서 유의하지 않지만 RF의 Vc90이 약간 증가하였는데, 이러한 결과를 보고한 연구들이 포함되어 영향을 준 것으로 판단된다.

일반인과 선수의 근육 피로 측정 결과에서 차이가 나타났으며, 일반인은 RF의 Dm에서만 유의한 감소 경향이 나타났지만, 선수는 BF의 모든 변인들과 RF의 Tc에서 유의한 감소 경향을 나타냈다. 이러한 차이는 문헌들에서 사용한 일회성 운동이 달리기와 점프처럼 폭발적인 근력의 발휘가 필요한 동작이 많기 때문으로 생각되며, 이는 햄스트링의 활성이 매우 중요한 동작이다(Morin et al., 2015). 또한 선행연구들과 같이 일반인과 선수의 훈련상태와 수행능력 차이로 인해 운동 시 근육의 활성 정도에 차이가 나타나 피로 정도에 영향을 미쳤을 것이라 생각할 수 있다(Bert-Losier et al., 2015; Maniar et al., 2020; Zhang et al., 2021). 선행연구들(Higashihara et al., 2018; Janusevicius et al., 2017; Schoenfeld et al., 2014)에서 보고한 내용에 의하면 훈련될수록 근육의 빠르고 강한 힘의 발현과 더 큰 활성을 보인다는 결과를 바탕으로, 엘리트 운동선수가 일반인보다 운동 시 햄스트링에서 강한 힘의 발현을 생산하여 운동 후 더 큰 피로가 유발된 것으로 생각할 수 있다(Chumanov et al., 2011; Janusevicius et al., 2017; Zhang et al., 2021). 대퇴사두근은 운동 중 무릎의 안정성을 조절하는 역할을 하며, 폭발적인 운동 시 고관절 신전근과 협응하여 동작을 만들어 낸다(Kakehata et al., 2021; Lewek et al., 2002; Shaw et al., 2005). 처치된 일회성 운동에서 RF가 이러한 역할을 수행하기 때문에 선수와 일반인에서 Tc, Dm의 감소가 유발된 원인으로 생각된다.

결론 및 제언

본 연구 결과 일회성 운동 후 TMG 측정 시 Dm, Tc, Vc90의 감소가 나타나면 급성 근육 피로가 유발된 것으로 확인할 수 있고, 근육 피로 유발 목적으로 운동처치가 이루어졌을 때 피로 유발을 확인할 수

있는 지표가 될 수 있을 것이며, 이는 근육 피로에 의한 인체의 반응 검사를 위한 근육 피로 유발 프로토콜의 개발에 기여할 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 선수는 하지에서 복합 운동 후 피로에 대한 지표로 BF에서 Dm, Tc, Vc90의 감소를 확인하여 운동 후 근육 피로 수준을 확인할 수 있으므로 운동 프로그램을 최적화하는데 기여할 수 있을 것으로 생각된다. 본 연구의 제한점은 메타분석에서 사용된 선행 연구에서 실시한 급성 운동 프로토콜의 통일성이 없다는 점이기에, 추후에 측정 부위에 정확히 피로를 유발하는 운동을 사용하여 운동량 및 운동 강도에 대한 충분한 추가적 연구가 필요하다.

참고문헌

- Ahn, J. S., Kim, D. H., Park, H. B., Han, S. H., Hwang, S., Cho, I. C., & Lee, J. W. (2018). Ectopic overexpression of porcine Myh1 increased in slow muscle fibers and enhanced endurance exercise in transgenic mice. *International Journal of Molecular Sciences*, 19(10), 2959.
- Barcala-Furelos, R., González-Represas, A., Rey, E., Martínez-Rodríguez, A., Kalén, A., Marques, O., & Rama, L. (2020). Is low-frequency electrical stimulation a tool for recovery after a water rescue? A cross-over study with lifeguards. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(16), 5854.
- Beato, M., Madruga-Parera, M., Piqueras-Sanchiz, F., Moreno-Pérez, V., & Romero-Rodríguez, D. (2019). Acute effect of eccentric overload exercises on change of direction performance and lower-limb muscle contractile function. *The Journal of Strength and Conditioning Research*, 35(12), 3327-3333.
- Bert-Losier, K., Mourot, L., & Holmberg, H. C. (2015). Elite and amateur orienteers' running biomechanics on three surfaces at three speeds. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 47(2), 381-389.
- Berzosa, C., Sanz-López, F., Gonzalo-Skok, O., Valero-Campo, C., Arjol-Serrano, J. L., Piedrafita, E., ... & Bataller-Cervero, A. V. (2020). Effect of three half-squat protocols on the tensiomyographic twitch response and tissue damage of the rectus femoris and the biceps femoris. *Journal of Human Kinetics*, 75, 15-27.
- Bodner, T. E. (2017). Standardized effect sizes for moderated conditional fixed effects with continuous moderator variables. *Frontiers in Psychology*, 8, 562.
- Borenstein, M., Hedges, L. V., Higgins, J. P., & Rothstein, H. R. (2010). A basic introduction to fixed-effect and random-effects models for meta-analysis. *Research Synthesis Methods*, 1(2), 97-111.
- Bourne, M. N., Williams, M. D., Opar, D. A., Al Najjar, A., Kerr, G. K., & Shield, A. J. (2017). Impact of exercise selection on hamstring muscle activation. *British Journal of Sports Medicine*, 51(13), 1021-1028.
- Boyas, S., & Guével, A. (2011). Neuromuscular fatigue in healthy muscle: underlying factors and adaptation mechanisms. *Annals of Physical and Rehabilitation Medicine*, 54(2), 88-108.
- Brink, Y., & Louw, Q. A. (2012). Clinical instruments: reliability and validity critical appraisal. *Journal of Evaluation in Clinical Practice*, 18(6), 1126-1132.
- Calderón-Pellegrino, G., Gallardo, L., Paredes-Hernández, V., García-Unanue, J., Giménez, J. V., Colino, E., ... & Sánchez-Sánchez, J. (2020). Influence of artificial turf temperature on physical performance and muscle contractile properties in football players after a repeated-sprint ability test. *Scientific Reports*, 10(1), 1-8.
- Carlsson, H., & Rasmussen-Barr, E. (2013). Clinical screening tests for assessing movement control in non-specific low-back pain. A systematic review of intra-and inter-observer reliability studies. *Manual Therapy*, 18(2), 103-110.
- Chumanov, E. S., Heiderscheit, B. C., & Thelen, D. G. (2011). Hamstring musculotendon dynamics during stance and swing phases of high speed running. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 43(3), 525-532.
- de Paula Simola, R. Á., Harms, N., Raeder, C., Kellmann, M., Meyer, T., Pfeiffer, M., & Ferrauti, A. (2015). Assessment of neuromuscular function after different strength training protocols using tensiomyography. *The Journal of Strength and Conditioning Research*, 29(5), 1339-1348.
- Dumke, C. L., Pfaffenroth, C. M., McBride, J. M., & McCauley, G. O. (2010). Relationship between muscle strength, power and stiffness and running economy in trained male runners. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 5(2), 249-261.
- Duval, S., & Tweedie, R. (2000). Trim and fill: A simple funnel-plot-based method of testing and adjusting for publication bias in meta-analysis. *Biometrics*, 56(2), 455-463.
- Egger, M., Smith, G. D., Schneider, M., & Minder, C. (1997). Bias in meta-analysis detected by a simple, graphical test. *Bmj*, 315(7109), 629-634.
- Evangelidis, P. E., Massey, G. J., Ferguson, R. A., Wheeler, P. C., Pain, M. T., & Folland, J. P. (2017). The functional significance of hamstrings composition: is it really a "fast" muscle group?. *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports*, 27(11), 1181-1189.
- Fitts, R. H. (2008). The cross-bridge cycle and skeletal muscle fatigue. *Journal of Applied Physiology*, 104(2), 551-558.
- García-García, O., Cuba-Dorado, A., Fernández-Redondo, D., & López-Chicharro, J. (2018). Neuromuscular parameters predict the performance in an incremental cycling test. *International Journal of Sports Medicine*, 39(12), 909-915.
- García-García, O., Cuba-Dorado, A., Riveiro-Bozada, A., Carballo-López, J., Álvarez-Yates, T., & López-Chicharro, J. (2020). A maximal incremental test in cyclists causes greater peripheral fatigue in biceps femoris. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 91(3), 460-468.
- García-Manso, J. M., Rodríguez-Ruiz, D., Rodríguez-Matoso, D., de Saa, Y., Sarmiento, S., & Quiroga, M. (2011). Assessment of muscle fatigue after an ultra-endurance triathlon using tensiomyography (TMG). *Journal of Sports Sciences*, 29(6), 619-625.
- García-Unanue, J., Felipe, J. L., Bishop, D., Colino, E., Ubago-Guisado, E., López-Fernández, J., ... & Sánchez-Sánchez, J. (2020). Muscular and physical response to an agility and repeated sprint tests according to the level of competition in futsal players. *Frontiers in Psychology*, 11, 3671.
- Hanon, C., Thépaut-Mathieu, C., & Vandewalle, H. (2005).

- Determination of muscular fatigue in elite runners. *European Journal of Applied Physiology*, 94(1), 118-125.
- Hedges, L. V., & Olkin, I. (2014).** *Statistical methods for meta-analysis*. London: Academic press.
- Higashihara, A., Nagano, Y., Ono, T., & Fukubayashi, T. (2018).** Differences in hamstring activation characteristics between the acceleration and maximum-speed phases of sprinting. *Journal of Sports Sciences*, 36(12), 1313-1318.
- Higgins, J. P., & Thompson, S. G. (2002).** Quantifying heterogeneity in a meta-analysis. *Statistics in Medicine*, 21(11), 1539-1558.
- Hopkins, W., Marshall, S., Batterham, A., & Hanin, J. (2009).** Progressive statistics for studies in sports medicine and exercise science. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 41(1), 3-12.
- Hunter, A. M., Galloway, S. D., Smith, I. J., Tallent, J., Ditroilo, M., Fairweather, M. M., & Howatson, G. (2012).** Assessment of eccentric exercise-induced muscle damage of the elbow flexors by tensiomyography. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 22(3), 334-341.
- Janusevicius, D., Snieckus, A., Skurvydas, A., Silinskas, V., Trinkunas, E., Cadefau, J. A., & Kamandulis, S. (2017).** Effects of high velocity elastic band versus heavy resistance training on hamstring strength, activation, and sprint running performance. *Journal of Sports Science and Medicine*, 16(2), 239-246.
- Kakehata, G., Goto, Y., Iso, S., & Kanosue, K. (2021).** Timing of rectus femoris and biceps femoris muscle activities in both legs at maximal running speed. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 53(3), 643-652.
- Križaj, D., Šimunič, B., & Žagar, T. (2008).** Short-term repeatability of parameters extracted from radial displacement of muscle belly. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 18(4), 645-651.
- Lewek, M., Rudolph, K., Axe, M., & Snyder-Mackler, L. (2002).** The effect of insufficient quadriceps strength on gait after anterior cruciate ligament reconstruction. *Clinical Biomechanics*, 17(1), 56-63.
- Li, B., Yin, D., Li, P., Zhang, Z., Zhang, X., Li, H., ... & Wu, W. (2020).** Profiling and functional analysis of circular RNAs in porcine fast and slow muscles. *Frontiers in Cell and Developmental Biology*, 8, 322.
- Lohr, C., Braumann, K. M., Reer, R., Schroeder, J., & Schmidt, T. (2018).** Reliability of tensiomyography and myotonometry in detecting mechanical and contractile characteristics of the lumbar erector spinae in healthy volunteers. *European Journal of Applied Physiology*, 118(7), 1349-1359.
- López-Fernández, J., García-Unanue, J., Sánchez-Sánchez, J., León, M., Hernando, E., & Gallardo, L. (2017).** Neuromuscular responses and physiological patterns during a soccer simulation protocol. Artificial turf versus natural grass. *The Journal of Sports Medicine Physical Fitness*, 58(11), 1602-1610.
- Loturco, I., Pereira, L. A., Kobal, R., Kitamura, K., Ramírez-Campillo, R., Zanetti, V., ... & Nakamura, F. Y. (2016).** Muscle contraction velocity: a suitable approach to analyze the functional adaptations in elite soccer players. *Journal of Sports Science and Medicine*, 15(3), 483-491.
- Macgregor, L. J., Hunter, A. M., Orizio, C., Fairweather, M. M., & Ditroilo, M. (2018).** Assessment of skeletal muscle contractile properties by radial displacement: The case for tensiomyography. *Sports Medicine*, 48(7), 1607-1620.
- Maniar, N., Schache, A., Heiderscheidt, B., & Opar, D. (2020).** Hamstrings biomechanics related to running. In K. Thorborg, D. Opar, & A. Shield (Eds.), *Prevention and rehabilitation of hamstring injuries* (pp.65-81). Cham, Switzerland: Springer.
- Martín-Rodríguez, S., Loturco, I., Hunter, A. M., Rodríguez-Ruiz, D., & Munguia-Izquierdo, D. (2017).** Reliability and measurement error of tensiomyography to assess mechanical muscle function: A systematic review. *The Journal of Strength and Conditioning Research*, 31(12), 3524-3536.
- Martín-San Agustín, R., Medina-Mirapeix, F., Casaña-Granell, J., García-Vidal, J. A., Lillo-Navarro, C., & Benítez-Martínez, J. C. (2020).** Tensiomyographical responsiveness to peripheral fatigue in quadriceps femoris. *PeerJ*, 8, e8674.
- Meznaric, M., & Cvetko, E. (2016).** Size and proportions of slow-twitch and fast-twitch muscle fibers in human costal diaphragm. *BioMed Research International*, 2016, 5946520.
- Morin, J.-B., Gimenez, P., Edouard, P., Arnal, P., Jiménez-Reyes, P., Samozino, P., ... & Mendiguchia, J. (2015).** Sprint acceleration mechanics: the major role of hamstrings in horizontal force production. *Frontiers in Physiology*, 6, 404.
- Nicola, T. L., & Jewison, D. J. (2012).** The anatomy and biomechanics of running. *Clinics in Sports Medicine*, 31(2), 187-201.
- Padulo, J., Tiloca, A., Powell, D., Granatelli, G., Bianco, A., & Paoli, A. (2013).** EMG amplitude of the biceps femoris during jumping compared to landing movements. *SpringerPlus*, 2(1), 1-7.
- Park, S. (2020).** Theory and usage of tensiomyography and the analysis method for the patient with low back pain. *Journal of Exercise Rehabilitation*, 16(4), 325-331.
- Peng, H. T., Kernozek, T. W., & Song, C. Y. (2011).** Quadricep and hamstring activation during drop jumps with changes in drop height. *Physical Therapy in Sport*, 12(3), 127-132.
- Pereira, L. A., Ramirez-Campillo, R., Martín-Rodríguez, S., Kobal, R., Abad, C. C., Arruda, A. F., ... & Loturco, I. (2020).** Is tensiomyography-derived velocity of contraction a sensitive marker to detect acute performance changes in elite team-sport athletes?. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 15(1), 31-37.
- Rabita, G., Couturier, A., Dorel, S., Hausswirth, C., & Le Meur, Y. (2013).** Changes in spring-mass behavior and muscle activity during an exhaustive run at VO₂max. *Journal of Biomechanics*,

- 46(12), 2011-2017.
- Rodríguez-Matoso, D., Mantecón, A., Barbosa-Almeida, E., Valverde, T., García-Manso, J. M., & Rodríguez-Ruiz, D. (2015).** Mechanical response of knee muscles in high level bodyboarders during performance. *Revista Brasileira de Medicina do Esporte*, 21, 144-147.
- Rodríguez-Ruiz, D., Díez-Vega, I., Rodríguez-Matoso, D., Fernandez-del-Valle, M., Sagastume, R., & Molina, J. J. (2014).** Analysis of the response speed of musculature of the knee in professional male and female volleyball players. *BioMed Research International*, 2014, 239708.
- Rojas-Barrionuevo, N. A., Vernetta-Santana, M., Alvariñas-Villaverde, M., & López-Bedoya, J. (2017).** Acute effect of acrobatic jumps on different elastic platforms in the muscle response evaluated through tensiomyography. *Journal of Human Sport and Exercise*, 12(3), 728-741.
- Rojas-Valverde, D., Ugalde-Ramírez, J. A., Sánchez-Ureña, B., & Gutiérrez-Vargas, R. (2020).** Influence of altitude and environmental temperature on muscle functional and mechanical activation after 30*time trial run. *MHSalud*, 17(1), 19-33.
- Rusu, L. D., Cosma, G. G., Cernaianu, S. M., Marin, M. N., Rusu, P. A., Ciocănescu, D. P., & Neferu, F. N. (2013).** Tensiomyography method used for neuromuscular assessment of muscle training. *Journal of Neuroengineering and Rehabilitation*, 10(1), 1-8.
- Sánchez-Sánchez, J., Bishop, D., García-Unanue, J., Ubago-Guisado, E., Hernando, E., López-Fernández, J., ... & Gallardo, L. (2018).** Effect of a repeated sprint ability test on the muscle contractile properties in elite futsal players. *Scientific Reports*, 8(1), 1-8.
- Sánchez-Sánchez, J., García-Unanue, J., Hernando, E., López-Fernández, J., Colino, E., León-Jiménez, M., & Gallardo, L. (2019).** Repeated sprint ability and muscular responses according to the age category in elite youth soccer players. *Frontiers in Physiology*, 10, 175.
- Santana, M. V., Rojas, N. A., Montosa, I., & Bedoya, J. L. (2018).** Application of tensiomyography to assess the muscle response in the lower limbs of acrobatic gymnasts. *European Journal of Human Movement*, 40, 96-110.
- Schoenfeld, B. J., Contreras, B., Willardson, J. M., Fontana, F., & Tiryaki-Sonmez, G. (2014).** Muscle activation during low-versus high-load resistance training in well-trained men. *European Journal of Applied Physiology*, 114(12), 2491-2497.
- Shaw, T., Williams, M. T., & Chipchase, L. S. (2005).** Do early quadriceps exercises affect the outcome of ACL reconstruction? A randomised controlled trial. *Australian Journal of Physiotherapy*, 51(1), 9-17.
- Šimunič, B. (2012).** Between-day reliability of a method for non-invasive estimation of muscle composition. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 22(4), 527-530.
- Struminger, A. H., Lewek, M. D., Goto, S., Hibberd, E., & Blackburn, J. T. (2013).** Comparison of gluteal and hamstring activation during five commonly used plyometric exercises. *Clinical Biomechanics*, 28(7), 783-789.
- Ubago-Guisado, E., Rodríguez-Cañamero, S., López-Fernández, J., Colino, E., Sánchez-Sánchez, J., & Gallardo, L. (2017).** Muscle contractile properties on different sport surfaces using tensiomyography. *Journal of Human Sports and Exercise*, 12(1), 167-179.
- Zhang, J. H., Chan, Z. Y., Lau, F. O., Huang, M., Wang, A. C., Wang, S., Au, I. P., Wang, S., ... & Cheung, R. T. (2021).** How do training experience and geographical origin of a runner affect running biomechanics?. *Gait and Posture*, 84, 209-214.

급성 운동으로 인한 급성 근육 피로 후 Tensiomyography의 변화 경향성: 체계적 고찰 및 메타 분석

염승혁, 이형우, 전경규

인천대학교

[목적] 본 연구는 Tensiomyography(TMГ) 변인의 변화 양상을 정량화하여 TMГ를 이용한 급성 근육 피로 측정 기준을 정립하는데 목적이 있다.

[방법] 본 연구의 목적을 달성하기 위해 Tensiomyography라는 키워드를 사용하여 Web of Science와 Pubmed에서 검색을 수행하였다. 대퇴직근, 대퇴이두근의 급성 운동으로 인한 급성 근육 피로를 측정하기 위해 TMГ를 사용한 16개의 연구가 포함되었다. 모든 통계 데이터 분석은 Comprehensive Meta-Analysis software 프로그램을 사용하였다.

[결과] 메타분석 결과 대퇴이두근에서 엘리트 운동선수의 모든 TMГ 변인에 유의한 감소가 나타났다($p < .05$). 또한 전체 효과에서 최대 변위(Dm)과 90% Dm까지의 평균 속도(Vc90)에서 유의한 감소가 나타났다($p < .05$). 대퇴직근에서는 일반인은 Dm에서 유의한 감소 경향이 나타난($p < .05$) 반면, 엘리트 운동선수와 전체 효과에서는 수축 시간(Tc)이 감소하는 경향이 나타났다.

[결론] 본 연구의 결과는 TMГ는 근육 피로의 지표로 사용될 수 있으며, 근육 피로에 대한 신체 반응을 확인하기보다 적절한 프로토콜을 개발하는 데 도움이 될 수 있을 것으로 사료 된다.

주요어

Tensiomyography (TMГ), 근육피로, 급성운동, 메타분석