

Tensiomyography 측정 방법의 신뢰도 평가

을지대학교 의과대학 약리학교실¹, 고려대학교 사회체육과², 순천향대학교 스포츠의학과³, 글로벌튼튼병원⁴채정훈¹ · 김보경² · 최혁재³ · 배상원⁴

Evaluation of Reliability of Tensiomyography Measurement

Jung-Hoon Chai¹, Bo-Kyeong Kim², Hyuk-Jae Choi³, Sang-Won Bae⁴¹Department of Pharmacology, Eulji University, Daejeon, ²Department of Sport and Leisure Studies, Korea University, Sejong,³Department of Sports Medicine, Soonchunhyang University, Asan, ⁴Global Teun Teun Hospital, Daejeon, Korea

Purpose: This study is designed to evaluate the reliability for studies of tensiomyography (TMG). TMG can evaluate muscle function noninvasively and selectively.

Methods: We measured 12 male volunteers (age, 26.5±7.6 years; height, 175.3±4.7 cm; weight, 78.8±13.3 kg) in this study and measured TMG during three occasions over 3 consecutive days. None of the participants has had any history of neuromuscular disorders or muscle diseases. Vastus lateralis, vastus medialis (VM), rectus femoris (RF) in quadriceps and biceps femoris, semitendinosus in hamstrings muscles were measured. Coefficient of variation (CV%) and intraclass correlation coefficient (ICC) have been calculated about maximal displacement (Dm, mm) and contraction time (Tc, ms) which are main parameters.

Results: Most of the ICC of Dm were over 0.8 and the highest among the muscles except both VM. And, most ICC of Tc was lower than Dm except both BF (right, 18.31; left, 15.03). But, the ICC of Tc was lower than Dm except left RF (0.890) and VM (0.859).

Conclusion: This study has shown that the Dm is high levels of the ICC and CV(%) in thigh muscle except VM. In the future, we plan to establish the method of measurement more clearly for reducing the errors of measurements. The technique of correct palpation of measurable muscles using TMG devices is also necessary.

Keywords: Contraction time, Maximal displacement, Reliability, Tensiomyography

Received: July 12, 2018 Revised: August 8, 2018

Accepted: August 13, 2018

Correspondence: Sang-Won Bae

Global Teun Teun Hospital, 516 Gyejok-ro, Dong-gu, Daejeon 34542, Korea

Tel: +82-42-220-2315, Fax: +82-42-226-0128

E-mail: yodeo@hanmail.net

*This work was supported by the Ministry of Education of the Republic of Korea and the National Research Foundation of Korea (NRF-2015S1A5B5A07041728).

Copyright ©2018 The Korean Society of Sports Medicine

© 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.

서론

Tensiomyography (TMG)는 비침습적인 방법으로서 전기적 자극에 의한 근육의 변위(displacement)와 수축하는 시간을 통해 근육의 기능을 평가하는 방법으로 소개되고 있으며^{1,2}, 정식 한국어로 번역되지는 않았으나, Kim 등³은 근장력계 정도로 소개하고 있다. TMG는 슬로베니아의 Ljubljana 대학 전자공학과(faculty of electrical engineering)의 재활연구소에서 개발되었으며¹, 축구선수들에게서 나타나는 근육의 손상⁴, 및 인대의 손상^{5,6} 외에도 보행에 문제가 있는 환자들의 근평가⁷

등의 연구가 보고된 바 있다.

TMG는 전기적 자극에 의해 근수축을 유도하고, 이때 근육(muscle belly)이 최대로 이동하는 변위와 그로 인해 나타나는 수축시간(contraction time [Tc])을 측정하여 시간과 거리의 단위로서 5가지의 다양한 결과 변인을 제시하고 있다^{3,8}.

이 중, maximal displacement (Dm)는 타 변인에 비해 비교적 변화폭이 크지 않고 일관적인 특징을 가진다고 하였으며⁹, TMG의 변인 중 결과로서 가장 많이 보고되고 있다⁸. Dm은 근육의 강직도와 환자 근육 및 운동선수들의 좌우 대칭성의 평가지표로서 소개된바 있고^{10,11}, 그 외에도 근피로를 측정하는 데 있어 효율적인 변인으로 보고되기도 하였다^{8,11-13}. 이러한 이유로 TMG의 신뢰도 연구에서 Dm은 반드시 분석되어 설명되고 있다¹⁴⁻¹⁸. 한편, Dm과 함께 소개되는 변인인 Tc는 골격근의 myosin heavy chain I과 TMG 변인들 간의 유의한 상관관계 및 높은 수준의 결정계수($r=0.933$)를 제시하고 있으며¹⁴, 사체 연구를 통해 골격근의 지근섬유인 type I의 비율과 높은 상관관계($r=0.93$)가 있다고 하였다².

비침습적으로 근육을 선택하여 평가할 수 있는 TMG는 이러한 특장점을 통해 현재 스포츠의학 분야에 큰 도움을 줄 것으로 예측하고 있으나¹⁵, 측정기기인 만큼 측정자의 오류가 존재할 수 있으므로, 최근에도 측정자 간의 신뢰도 평가¹⁶, 측정날짜에 따른 신뢰도 평가¹⁷ 외에도 전극 간격에 따른 신뢰도 연구¹⁸ 등이 계속해서 보고되고 있다. 그러나 국내에서는 기기에 대한 신뢰도 연구는 보고되지 않았고, 환자의 평가와 운동선수들의 평가와 같은 횡단적 연구들만 진행되고 있다^{8,19,20}. 한편, TMG 신뢰도 연구에서 평가된 근육은 안쪽넓은

근(vastus medialis [VM]), 가쪽넓은근(vastus lateralis [VL]), 넙다리곧은근(rectus femoris [RF]), 넙다리두갈래근(biceps femoris [BF]) 등의 대근육 위주로 평가되고 있다^{16,17,21}. TMG는 중간넓은근(vastus intermedius)과 같은 심부근육의 측정이 불가하며, 넙다리뒤근육(hamstrings)의 경우, 소프트웨어에서 RF와 BF만을 검사할 수 있게 되어있다. 그러므로 본 연구에서는 측정이 비교적 쉬우면서도 소프트웨어에서 검사가 가능한 근육을 평가하고자 하였다.

이 연구는 국외에서 보고된 신뢰도 연구를 참고하여 선행연구들과 유사한 높은 신뢰도를 재현할 수 있는지 평가하고자 하였다. 또한, 기존 선행논문에서 측정한 근육 외에 TMG 소프트웨어에서 평가가 가능한 하지의 다양한 근육을 검사하고 높은 신뢰도를 나타내는지 확인하고자 기획되었다.

연구 방법

1. 연구 대상

이 연구는 순천향대학교 윤리위원회의 승인(201510-BM-045)을 받아 진행하였다. 연구대상은 20-30대의 근·골격계 질환이 없는 건강한 남성으로 선정하였다. 선정된 연구대상자들에게는 참여 의사를 묻고 연구의 배경과 목적을 설명하였으며, 참여 의사를 밝힌 연구대상자들에게 한하여 동의서를 받아 실험을 진행하였다. TMG의 신뢰도 평가 선행연구에서는 건강한 남성 피험자를 대상으로 선정하였으며, Krizaj 등²¹은 13명, Tous-Fajardo 등¹⁶이 18명, Simunic¹⁷은 10명으로 구성하여 보고하였다. 선행연구를 참고하여 본 연구의 대상자는 최초 20명을 모집하여 진행하였으나, 모든 실험에 참여하지 못한 피험자들

Table 1. Physical characteristics (n=12)

Sex	Age (yr)	Height (cm)	Weight (kg)
Male	26.5±7.6	175.3±4.7	78.8±13.3

Values are presented as mean±standard deviation.

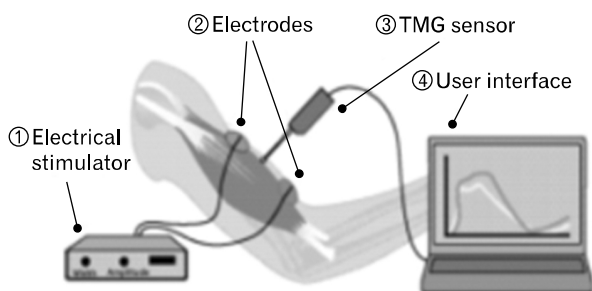


Fig. 1. Composition of tensiomyography (TMG).

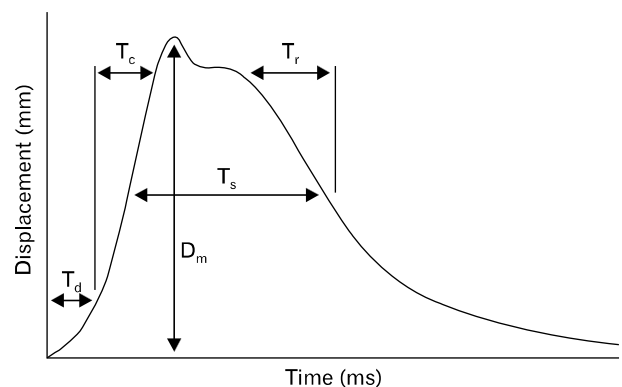


Fig. 2. Tensiomyography parameters. Tc: contraction time, Tr: relaxation time, Ts: sustain time, Td: delay time, Dm: maximal displacement.

제외하여 총 12명의 결과 얻었으며 기본 정보는 Table 1에 나타내었다.

2. 실험 도구 및 측정 방법

이 실험에 사용된 TMG SI은 근육에 전기적 자극을 전달하는 자극기(electrical stimulator)와 근육의 반응을 컴퓨터로 전달하는 센서(sensor), 그리고 근육의 반응을 확인할 수 있는 소프트웨어 프로그램(user interface)으로 구성되어 있다(Fig. 1).

TMG에서 제시하는 변인은 수축에 의한 근육의 변위를 나타내는 Dm을 Fig. 2와 같이 중심으로 delay time (Td), Tc, sustain time (Ts), relaxation time (Tr)과 같은 총 5개의 변인으로 제시하여 있으며, 각 변인들의 약어와 설명은 다음과 같다. (1) Dm: 근수축에 의해 형성되는 그래프로서 최초 곡선이 최대에 이를 때까지의 거리(mm)를 의미한다. (2) Td: 0%에서 Dm의 10%까지 이르는 시간을 의미한다. (3) Tc: Dm의 10%에서 90%까지 이르는 시간을 의미한다. (4) Ts: Dm의 50% 구간에서 그래프 사이의 거리 시간을 의미한다. (5) Tr: Dm의 90%에서 50%에 이르는 시간을 의미한다.

실험 기간은 총 3일로서 3회 연속으로 검사를 하였고, 모든 연구대상자들은 한 명의 측정자에 의해 진행되었다. 연구대상자들의 스케줄을 고려하되, 가능하면 동일한 시간에 검사할 수 있도록 조율하였으며, 측정 전에는 침상에서 20분 이상의 휴식을 취하게 하였다. 이때, 측정 기간에는 연구대상자들에게 스포츠 활동을 제한하도록 권고하였으며, 전극을 부착하는 부위에 landmark 등의 체크는 하지 않았다.

측정방법은 TMG 소프트웨어에서 제시하는 방법을 참고로 하여 진행하였다²². 먼저 TMG 센서를 측정하고자 하는 근육의 근복에 위치시킨 후 전극을 센서로부터 약 2-3 cm 이격시켜 근육면을 따라 부착시켰다. 이후 20 mA의 자극부터 시작하여

10 mA씩 증가시켜 측정하였으며, 근복의 변위가 최대에 이를 때까지 진행하였다. 이때, 이전 자극에 의한 효과로서 일어날 수 있는 상승효과와 피로를 최소화하기 위해 10초간의 여유를 두고 검사를 진행하였다.

측정 근육으로는 넙다리네갈래근(quadriceps) 중 VL, VM과 RF를, 넙다리뒤근육에서는 BF와 반힘줄모양근(semi-tendinosus [ST])을 양쪽 다리에서 모두 측정하였다. 이때, VL, VM, RF의 측정은 누운 자세(supine position)에서 무릎의 각도를 120°로 유지해주는 패드를 대고 측정하였으며(Fig. 3A), BF와 ST는 엎드린 자세로서 무릎의 각도가 150°를 유지해주는 패드를 발목 앞부분에 대고 검사를 하였다(Fig. 3B). 측정 변인은 TMG 연구에서 보고되고 있는 Dm, Td, Tc, Ts, Tr을 측정하였다.

3. 자료 처리

실험을 통해 얻은 결과치들은 Microsoft Excel (Microsoft, Redmond, WA, USA)을 이용하여 입력하였으며, 기술통계(mean±standard deviation)로 나타내었고, 변동계수(coefficient of variation [CV%])를 산출하였다. 이후, IBM SPSS ver. 20.0 (IBM SPSS Corp., Armonk, NY, USA)을 이용하여 intraclass correlation coefficient (ICC)와 95% 신뢰구간(confidence interval)을 산출하였으며, 통계적 유의 수준(α)은 0.05로 설정하였다.

결 과

3회 연속적인 TMG 측정으로 얻은 넙다리네갈래근과 넙다리뒤근육의 ICC 및 CV(%)의 결과는 Tables 2와 3에 나타내었다. Table 2는 Dm의 양쪽 다리를 평가한 것으로서, 측정했던 근육에서 VM을 제외한 나머지 모든 근육에서 15% 이내의 CV(%) 수준을 보였으며, ICC 또한 0.8 이상의 높은 수준을

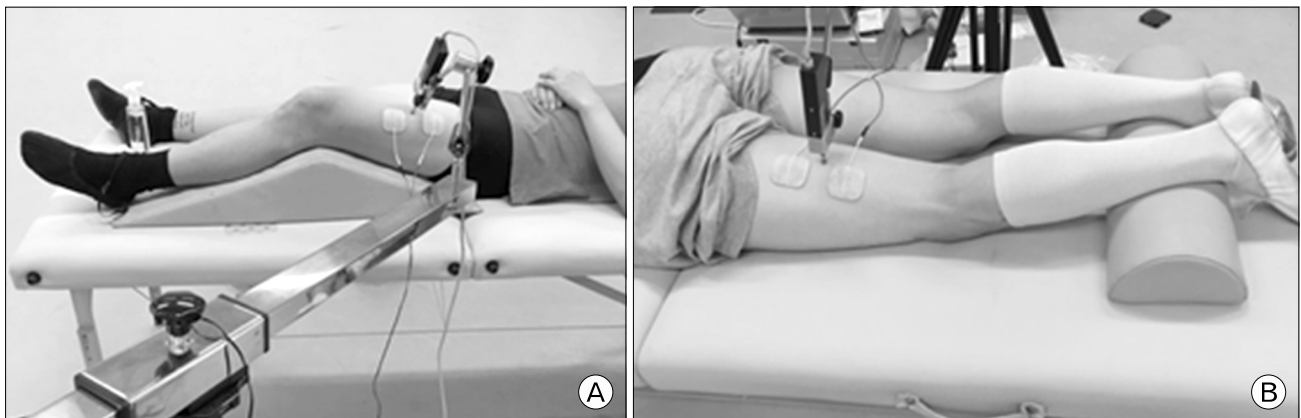


Fig. 3. Tensiomyography measurements in (A) quadriceps and (B) hamstring muscles.

Table 2. Maximal displacement (mm)

Side	Muscle		1st	2nd	3rd	Mean±SD	CV(%)	ICC (95% CI)
Left	Hamstrings	BF	6.86±2.66	7.24±2.88	7.09±2.35	7.06±2.57	14.28	0.832 (0.625–0.943)
		ST	8.66±2.18	8.38±2.33	8.54±2.36	8.53±2.23	9.68	0.853 (0.665–0.951)
	Quadriceps	RF	6.58±2.83	6.65±2.95	6.28±3.01	6.50±2.85	14.57	0.897 (0.754–0.966)
		VL	5.99±2.18	5.89±2.93	6.14±2.38	6.00±2.45	9.47	0.922 (0.809–0.975)
		VM	7.93±1.50	8.21±1.66	7.95±1.77	8.03±1.61	8.3	0.702 (0.405–0.892)
Right	Hamstrings	BF	6.77±3.16	6.56±3.13	6.29±3.12	6.54±3.06	13.93	0.911 (0.785–0.971)
		ST	7.72±2.23	8.14±2.49	7.60±2.69	7.82±2.42	10.99	0.839 (0.638–0.946)
	Quadriceps	RF	7.28±2.30	7.14±2.32	6.48±2.47	6.97±2.32	13.72	0.816 (0.595–0.937)
		VL	5.87±1.56	5.98±1.83	5.67±2.04	5.84±1.77	9.93	0.856 (0.670–0.952)
		VM	7.50±1.53	7.35±1.57	7.14±1.70	7.33±1.56	8.69	0.776 (0.523–0.922)

Values are presented as mean±standard deviation (SD).

CV: coefficient of variation, ICC: intraclass correlation coefficient, CI: confidence interval, BF: biceps femoris, ST: semitendinosus, RF: rectus femoris, VL: vastus lateralis, VM: vastus medialis.

Table 3. Contraction time (ms)

Side	Muscle		1st	2nd	3rd	Mean±SD	CV(%)	ICC (95% CI)
Left	Hamstrings	BF	39.23±14.63	44.96±19.66	40.47±14.07	41.56±16.04	18.31	0.559 (0.214–0.827)
		ST	46.49±9.21	44.45±9.29	43.77±11.08	44.91±9.68	10.09	0.682 (0.376–0.883)
	Quadriceps	RF	28.44±7.06	29.01±6.10	29.00±6.89	28.82±6.51	6.62	0.890 (0.741–0.964)
		VL	23.20±2.87	25.01±6.74	24.57±2.60	24.26±4.43	8.53	0.537 (0.187–0.816)
		VM	23.43±2.98	23.60±2.95	23.71±3.16	23.58±2.95	4.2	0.859 (0.678–0.953)
Right	Hamstrings	BF	37.24±10.50	35.42±9.77	36.95±17.75	36.54±12.82	15.03	0.533 (0.183–0.814)
		ST	45.99±6.54	49.93±7.84	43.38±10.63	46.43±8.70	11.65	0.413 (0.055–0.749)
	Quadriceps	RF	27.78±5.15	27.54±6.21	25.36±4.72	26.89±5.35	8.48	0.783 (0.537–0.926)
		VL	26.12±5.58	26.89±7.38	25.96±35.40	26.32±6.01	8.84	0.753 (0.485–0.913)
		VM	23.79±2.11	23.74±2.09	24.12±2.62	23.88±2.23	4.44	0.698 (0.400–0.890)

Values are presented as mean±standard deviation (SD).

CV: coefficient of variation, ICC: intraclass correlation coefficient, CI: confidence interval, BF: biceps femoris, ST: semitendinosus, RF: rectus femoris, VL: vastus lateralis, VM: vastus medialis.

나타내었다. 한편, Tc는 왼쪽의 RF와 VM에서 0.8 이상의 ICC를 보였으며, 오른쪽 RF와 VL에서 0.7 이상의 ICC를 나타냈다. 그러나, 나머지 근육에서는 0.4–0.7 수준의 ICC를 보였다 (Table 3).

고 찰

이 연구는 새로운 근육의 평가도구로 비침습적이며 근육을 선택적으로 평가할 수 있는 TMG를 국외에서 진행되었던 신뢰도 연구를 재현함으로써, 기기의 신뢰도를 평가하고자 기획되었다. Dm은 근육의 강직 및 긴장도와 상관관계가 높은 것으로 보고되고 있다^{3,8-12}. Neamtu 등¹⁰은 보행이 불편한 다발성경화증 환자의 양쪽 다리근육과 일반인들을 비교하여 환자들의 다리 근육에서 강직도가 높아져 있고, 이를 Dm으로 제시하여

Dm이 감소할수록 근육의 강직과 긴장도가 증가하는 것을 보고하였다. 또한, Dm은 근피로도(muscle fatigue)의 평가지표로도 연구되었는데^{11,12}, Garcia-Manso 등¹²은 고강도 고반복 저항성 운동을 적용하여 근피로를 유발하였으며, 유발된 근피로에 의해 근육의 강직도가 증가하고 이로써 Dm이 감소한다고 보고하였다. 그뿐만 아니라, 전기적 자극으로 근피로를 유발했던 Macgregor 등¹³의 연구에서도 피로해진 근육에서 Dm이 감소함을 제시한 바 있다. 한편, Chai 등¹⁹은 보디빌더와 일반인의 넵다리네갈래근과 넵다리뒤근육을 비교하여, 근비대(muscle hypertrophy)가 발생하면 Dm이 감소하는 결과를 보고하였다. 따라서, Dm의 감소는 근육의 강직과 긴장도가 증가한 경우에서 나타날 수 있으며, 근육 강화 운동에 의한 근육의 비대가 있는 경우에도 Dm의 감소는 나타날 수 있다는 것을 알 수 있었다.

한편, Pisot 등⁹은 근위축이 유발된 경우 Dm의 증가가 발생한다고 보고 하였다. 이러한 결과는 35일간의 침상안정(bed rest) 실험을 통해 근위축을 유발하여 위축된 근육에서 Dm이 증가함을 보였는데, 이는 근강직도 혹은 긴장도의 감소에 의해 일어날 수 있다고 하였다. 이러한 Dm의 상징적인 이유로 TMG의 Dm에 대한 신뢰도 평가는 최근에도 계속해서 연구되는 것으로 보인다^{16-18,21}.

3일간의 연속측정으로 TMG의 신뢰성을 평가했던 Simunic¹⁷의 연구에서는 vastus medialis obliquus와 VL, BF의 Dm이 10% 미만의 CV(%)와 0.8 이상의 높은 ICC를 보였는데, 이 연구에서도 VM을 제외한 나머지 근육에서 0.8 이상의 높은 ICC와 15% 미만의 CV(%)를 나타내었다. 이때, 양쪽 VM에서의 Dm은 0.7 정도 수준의 ICC를 보였는데, 스포츠활동 자제를 권고하였고 근육의 움직임을 배제하기 위한 노력으로 20분 이상의 침상안정을 유도하였으나, 측정 전 보행 및 계단으로의 이동 등의 완벽한 통제가 이루어지지 못한 가능성도 있었을 것이다. 또한, VM은 측정했던 타 근육에 비해 근육의 길이가 짧아 전극을 붙일 때, 측정자의 관점에 의해 조금씩 달라질 수 있으므로 오차가 발생했을 것이라고 예측하고 있다. VM의 측정과 관련된 신뢰도 연구에서는 VM 측정 시 전극의 간격 및 센서의 위치를 고려한 정확한 기준이 필요하다고 하였다¹⁶. 따라서, VM 측정 시에는 정확한 기준을 설정하여 검사를 할 필요가 있겠다. 한편, Tc는 왼쪽의 RF와 VM에서만 높은 ICC를 나타냈는데, 본 연구의 제한점으로서 피험자가 적은 문제라고 예상된다. 그러므로 추후 연구에서는 충분한 피험자를 확보하여 신뢰도 평가를 해볼 필요가 있다고 생각한다. 본 연구의 결과에서 Td, Ts, Tr의 경우 0.8 이상의 높은 ICC를 보이는 근육도 있었으나, 대부분의 근육에서 낮은 ICC를 보였다(data is not shown). Tous-Fajardo 등¹⁶의 선행연구에서도 Tc는 비교적 높은 신뢰도를 보고하였으나 Tr, Ts, Td의 낮은 신뢰도의 원인에 대해서는 명확한 설명이 없었다. 아마도, 각 변인들에 대한 정의가 불분명함으로 논의에서 제외된 것이라 생각한다. 최근 Lohr 등²³도 근수축 능력을 평가하는 myotonometry와 TMG의 신뢰도 평가를 하였는데, Dm, Tc의 높은 신뢰도 결과(ICC>0.8)를 보고하였으나, Tr, Td, Ts 등의 변인에 대해서는 결과를 제시하지 않았다. Td, Tc, Tr, Ts는 길이 단위인 Dm (mm)을 기준으로 결정되는 미세시간 단위(ms)인 이유 외 피험자들의 철저한 통제가 되지 않을 경우 편차 발생률이 높을 것이다. 또한, 피험자의 긴장도가 높을 경우 검사 근육 외 주변 근육의 동시수축(cocontraction)의 작용으로 특히 Tr과 Ts는 수치가 일정하지 않았을 가능성도 배제하지 않고 있다. 한편, Td는 Dm의 10%에

이르는 시간으로 정의되지만, 자극에 의한 반응이 컴퓨터로 전달되는 과정에서 지연이 발생할 수 있으므로 편차가 클 수 있어 연구결과로 보고하지 않는 것이라고 예측하고 있다.

TMG 개발된 이후로 TMG기기를 이용하여 신뢰도를 평가한 연구는 위팔 두갈래근(biceps brachii)을 단기간 여러 번 반복 측정하여 높은 ICC를 보고한 연구가 있다^{16,21}. 그리고, 가장 최근에는 전극 거리에 따른 신뢰도 평가 연구가 RF를 기준으로 하여 보고되었다¹⁸. 이러한 신뢰도 평가에 대한 연구에서 측정되었던 근육들은 비교적 측정이 쉬운 근육으로 TMG 측정방법의 원리와 소프트웨어에서 제시하는 측정 방법상의 차이가 없었기에 가능했을 것으로 예상된다. 다만, 추후 연구에서는 좀 더 다양한 근육에 대한 평가 연구와 전극의 크기, 거리 및 부착지점 등을 명확하게 설정한 신뢰도 평가 연구가 필요할 것이다.

비침습적인 방법으로 필요한 근육을 선택하여 평가할 수 있는 기기로 소개되는 TMG는 근손상 환자와 같은 임상적 적용 외에도 운동선수들의 퍼포먼스 향상에 도움을 줄 수 있을 것이라 예상하고 있다^{20,24}. 그러나 현장에 적용하기 전에 기기와 측정자에 대한 신뢰도 평가는 반드시 이루어져야 할 것으로 생각한다²³. 이 연구를 통해 TMG의 주요 변인인 Dm은 비교적 높은 신뢰도와 변동계수 수준을 나타냈으나, 나머지 변인들은 상대적으로 낮은 신뢰도를 보였다. 아마도, 이 연구의 제한점으로서 신뢰도 평가에 참여한 피험자가 부족한 점(n=12)이 문제일 수 있다²⁵. 신뢰도 연구에서 피험자의 수가 작을 경우 정밀도와 확실성이 낮아질 수 있으므로, 반드시 피험자의 수를 고려해야 한다²⁶. 따라서, 추후 신뢰도 연구에서는 반드시 충분한 피험자의 확보가 되어야 할 것이다. 또한, 신뢰도 연구 진행 시 측정자는 측정하고자 하는 근육의 정확한 축지 외에도 TMG검사의 숙련이 필요할 것이다.

Conflict of Interest

No potential conflict of interest relevant to this article was reported.

References

1. Valencic V, Knez N. Measuring of skeletal muscles' dynamic properties. *Artif Organs* 1997;21:240-2.
2. Dahmane R, Valen i V, Knez N, Er en I. Evaluation of the ability to make non-invasive estimation of muscle contractile properties on the basis of the muscle belly response. *Med*

- Biol Eng Comput 2001;39:51-5.
3. Kim C, Chai JH, Kim BK, Kim CH, Bae SW. A novel method for the assessment of muscle injuries. Korean J Sports Med 2015;33:59-66.
4. Rey E, Lago-Penas C, Lago-Ballesteros J. Tensiomyography of selected lower-limb muscles in professional soccer players. J Electromyogr Kinesiol 2012;22:866-72.
5. Alvarez-Diaz P, Alentorn-Geli E, Ramon S, et al. Effects of anterior cruciate ligament injury on neuromuscular tensiomyographic characteristics of the lower extremity in competitive male soccer players. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc 2016;24:2264-70.
6. Alvarez-Diaz P, Alentorn-Geli E, Ramon S, et al. Effects of anterior cruciate ligament reconstruction on neuromuscular tensiomyographic characteristics of the lower extremity in competitive male soccer players. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc 2015;23:3407-13.
7. Neamtu MC, Rusu L, Neamtu OM, et al. Analysis of neuromuscular parameters in patients with multiple sclerosis and gait disorders. Rom J Morphol Embryol 2014;55:1423-8.
8. Chai JH, Kim C, Kim CH. TMG(tensiomyography): non-invasive method of evaluation of muscle function. Korean J Phys Educ 2017;56:519-26.
9. Pisot R, Narici MV, Simunic B, et al. Whole muscle contractile parameters and thickness loss during 35-day bed rest. Eur J Appl Physiol 2008;104:409-14.
10. Neamtu MC, Rusu L, Rusu PF, Neamtu OM, Georgescu D, Iancu M. Neuromuscular assessment in the study of structural changes of striated muscle in multiple sclerosis. Rom J Morphol Embryol 2011;52:1299-303.
11. Rodriguez-Ruiz D, Diez-Vega I, Rodriguez-Matoso D, Fernandez-del-Valle M, Sagastume R, Molina JJ. Analysis of the response speed of musculature of the knee in professional male and female volleyball players. Biomed Res Int 2014; 2014:239708.
12. Garcia-Manso JM, Rodriguez-Matoso D, Sarmiento S, et al. Effect of high-load and high-volume resistance exercise on the tensiomyographic twitch response of biceps brachii. J Electromyogr Kinesiol 2012;22:612-9.
13. Macgregor LJ, Ditroilo M, Smith IJ, Fairweather MM, Hunter AM. Reduced radial displacement of the gastrocnemius medialis muscle after electrically elicited fatigue. J Sport Rehabil 2016;25:241-7.
14. Simunic B, Degens H, Rittweger J, Narici M, Mekjavic IB, Pisot R. Noninvasive estimation of myosin heavy chain composition in human skeletal muscle. Med Sci Sports Exerc 2011;43:1619-25.
15. Martin-Rodriguez S, Alentorn-Geli E, Tous-Fajardo J, et al. Is tensiomyography a useful assessment tool in sports medicine? Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc 2017;25:3980-1.
16. Tous-Fajardo J, Moras G, Rodriguez-Jimenez S, Usach R, Doutres DM, Maffiuletti NA. Inter-rater reliability of muscle contractile property measurements using non-invasive tensiomyography. J Electromyogr Kinesiol 2010;20:761-6.
17. Simunic B. Between-day reliability of a method for non-invasive estimation of muscle composition. J Electromyogr Kinesiol 2012;22:527-30.
18. Wilson HV, Johnson MI, Francis P. Repeated stimulation, inter-stimulus interval and inter-electrode distance alters muscle contractile properties as measured by Tensiomyography. PLoS One 2018;13:e0191965.
19. Chai JH, Kim BK, Kim C, Kim CH, Bae SW. Analysis of bodybuilder's skeletal muscle characteristics using tensiomyography. Korean J Sports Med 2016;34:146-52.
20. Bae SW, Chai JH, Kim BK, Kim CH, Kim C. Evaluation and application of muscle injuries using tensiomyography. Korean J Sports Med 2015;33:143-6.
21. Krizaj D, Simunic B, Zagar T. Short-term repeatability of parameters extracted from radial displacement of muscle belly. J Electromyogr Kinesiol 2008;18:645-51.
22. Delagi EF, Perotto AO, Iazzetti J, Morrison D. Anatomical guide for the electromyographer: the limbs and trunk. 4th ed. Springfield: Charles. C. Thomas; 2005.
23. Lohr C, Braumann KM, Reer R, Schroeder J, Schmidt T. Reliability of tensiomyography and myotonometry in detecting mechanical and contractile characteristics of the lumbar erector spinae in healthy volunteers. Eur J Appl Physiol 2018;118:1349-59.
24. Garcia-Garcia O, Serrano-Gomez V, Hernandez-Mendo A, Morales-Sanchez V. Baseline mechanical and neuromuscular profile of knee extensor and flexor muscles in professional soccer players at the start of the pre-season. J Hum Kinet 2017;58:23-34.
25. Downing SM. Reliability: on the reproducibility of assessment data. Med Educ 2004;38:1006-12.
26. Zou GY. Sample size formulas for estimating intraclass correlation coefficients with precision and assurance. Stat Med 2012;31:3972-81.