

Tensiomyography를 이용한 보디빌더 근육의 특성 분석

을지대학교 의과대학 생리학교실¹, 고려대학교 사회체육과², 순천향대학교 스포츠의학과³, 글로벌튼튼병원⁴채정훈^{1*} · 김보경^{2*} · 김 찬¹ · 김철현³ · 배상원⁴

Analysis of Bodybuilder's Skeletal Muscle Characteristics Using Tensiomyography

Jung Hoon Chai^{1*}, Bo Kyeong Kim^{2*}, Chan Kim¹, Chul Hyun Kim³, Sang Won Bae⁴¹Department of Physiology and Biophysics, Eulji University School of Medicine, Daejeon, ²Department of Sport and Leisure Studies, Korea University, Sejong, ³Department of Sports Medicine, Soonchunhyang University, Asan, ⁴Global Teun Teun Hospital, Daejeon, Korea

The aim of this study is to evaluate the contractile properties of thigh muscles in bodybuilders through tensiomyography (TMG). Our hypothesis is that maximal displacement (Dm) in bodybuilders would be lower than in controls because Dm is increased when the muscle is stiffed or hypertrophied. Nine bodybuilder athletes and 15 university students were assessed by TMG. The biceps femoris (BF), semitendinosus (ST), vastus lateralis, vastus medialis (VM), and rectus femoris (RF) were evaluated. The TMG parameters obtained for each muscle were Dm, contraction time (Tc). And we calculated contraction velocity (Vc) as the rate of the radial displacement occurring during the time period of Tc with respect to Tc. Dm values of all muscles in bodybuilders were significantly higher compared to the control group. There were no significant differences in Tc values of most muscles except right BF and ST muscles. Vc values of VM, RF, and ST muscles were lower in bodybuilders than in the control group. This is the first report about TMG assessment of muscle hypertrophy. We found that Dm was most effective in detecting muscle hypertrophy and muscle stiffness secondary to muscle hypertrophy could induce decrease in Dm and Vc.

Keywords: Tensiomyography, Bodybuilder, Maximal displacement, Contraction velocity

서론

고강도 저항성 운동의 효과는 근섬유 수의 증식(hyperplasia) 보다는 근비대(hypertrophy)이다¹⁾. 저항성 운동을 통한 근육 크기의 증가는 근섬유 내의 속근(fast-twitch fiber)과 지근(slow-twitch fiber)이 모두 비대해지는 것이며, 특히 속근의 비대가 더 많이 일어나는 것으로 알려져 있다^{2,3)}. 이러한 선행 연구들은 1970년대 후반에서 80년대 근생검 방법을 통해 소개 되었으나, 훈련을 통한 근비대 기전에 대해서는 명확히 밝혀지지 않고 있다⁴⁾.

근 기능을 평가하는 근생검 방법은 형태진단학으로 분자생물학과 동시에 많은 발전이 이루어졌으나, 최근에는 영상학

Received: June 20, 2016 Revised: October 7, 2016

Accepted: October 28, 2016

Correspondence: Sang Won Bae

Global Teun Teun Hospital, 9 Mokjung-ro, Jung-gu, Daejeon 34815, Korea

Tel: +82-42-220-2300, Fax: +82-42-226-0128

E-mail: yodeo@hanmail.net

*These authors contribute equally to this study.

Copyright ©2016 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.

및 전자기학의 발전을 기반으로 하는 비침습적 방법을 선호하고 있다⁵⁾. 비침습적 방법 중 가장 선호하는 자기공명영상(magnetic resonance imaging, MRI)은 높은 해상도로서 평가가 가능한 장점이 있으나, 경제적인 부담이 클 수 있으며⁵⁾, 최근 Ekstrand 등⁶⁾은 넓다리뒤근육(hamstring muscles)이 손상된 프로축구선수의 70%에서 MRI상의 큰 변화가 없음을(grade 0 혹은 1) 보고하여 MRI가 정확한 근 기능을 평가하는 데 한계가 있음을 주장하였다. 또 다른 비침습적 방법으로 사용되는 표면근전도(surface electromyogram)는 잡음 및 외부의 간섭이 심해 환경적 제한과 사용 범위의 제한이 크고, 결과물로 제시되는 변인들의 분석이 매우 복잡한 단점이 있다⁷⁾.

본고에서 소개되는 tensiomyography (TMG)는 비침습적인 방법으로 특정 근육을 선택적으로 검사할 수 있고, 현장에서의 활용도가 높으며, 연속적인 측정이 가능할 뿐만 아니라 결과로 제시되는 변인들이 간단하게 나열되어 근 기능을 이해하기 쉽다는 장점을 가지고 있다⁵⁾.

TMG를 이용한 연구의 주제들은 크게 생리적 연구, 근 손상과 근 피로, 인대 손상, 근육 관련 질환 외 TMG 기계의 신뢰도와 타당도 측정 등으로 나눌 수 있으며, 그 중 대부분은 생리적 연구들이 주를 이루고 있다⁹⁾. 한편, TMG는 운동선수들을 대상으로 한 연구가 상당 수 보고되고 있으나, 주로, 축구, 마라톤, 사이클 등과 같은 근지구력이 요구되는 종목에 국한되고 있다⁸⁻¹¹⁾. 근 기능을 평가하는데 있어 근비대 및 근위축을 함께 평가할 수 있다면 경기 전략의 구상 혹은 손상 후 치료 및 경기로의 복귀를 결정하는데 큰 역할을 할 수 있을 것이다. TMG에서 제시하는 변인은 (1) maximal displacement (Dm, 근수축 시 일어나는 근배위의 최대이동거리), (2) delay time (Td, Dm의 10%에 이르는 시간), (3) contraction time (Tc, Dm의 10%에서 90%까지 이르는 시간), (4) sustain time (Ts, Dm의 50% 구간에서 수축과 이완되는 과정까지의 시간), (5) relaxation time (Tr, 90% Dm에서 이완기의 50%까지 이르는 시간) 등 총 5가지로 나타나며, 이 중 주요한 변인은 Tc와 Dm으로 보고되고 있다¹²⁾. Tc는 근수축시간을 의미하여 근피로도와 높은 상관관계가 있고, 지근섬유의 비율(%)과 Tc간에 매우 높은 상관관계수($r=0.93$)가 보고되었다¹²⁾. Dm은 근배위(muscle belly)의 이동 변위로서 근강직도(muscle stiffness)와 관련이 있는 것으로 알려져 있고, 근위축이 심할수록 Dm이 크게 증가하는 것으로 보고된 바 있다^{12,13)}. 또한 몇몇의 선행논문에서는 수축속도가 증가했음에도 불구하고 Dm이 현저하게 증가함으로써 Tc가 증가하는 것을 보정하기 위해 Dm을 Tc로 나눈 contraction velocity (Vc)를 제시하기도 하였다^{10,14,15)}. 그러나 TMG 변인들

과 관련하여 근비대와 관련된 연구는 매우 부족하다.

이 연구는 근육이 발달되어 있는 보디빌더들을 대상으로 TMG 검사를 실시하여 TMG의 결과로서 제시되는 변인들이 근비대를 간접적으로 평가할 수 있는 가능성을 확인하고자 기획되었다. 따라서 이 연구는 근육이 잘 발달되어 있는 보디빌더들을 대상으로 일반인들과 비교하여, TMG에서 제시하는 변인들과 어떤 차이가 있는지를 확인하고, 각 변인들과 근비대와의 상관관계를 확인해 보고자 한다.

연구 방법

1. 연구 대상

이 연구는 순천향대학교 윤리위원회의 승인을 받아 진행하였다. 현역 보디빌더 선수 9명(age, 23.3 ± 5.0 years; height, 174.0 ± 6.4 cm; mass, 84.8 ± 11.1 kg), 순천향대 재학생(control) 15명(age, 22.3 ± 4.3 years; height, 174.3 ± 4.4 cm; mass, 75.5 ± 14.5 kg)이 참여하였다. 모든 대상에게는 실험참여의사를 묻고 연구의 배경과 목적을 설명하였으며, 참여의사를 밝힌 대상자들에게 동의서를 받아 실험을 진행하였다.

2. 실험 도구

실험도구로서 사용되는 TMG SI모델은 근육에 전기적 자극을 전달하는 자극기(stimulator)와 근육의 반응을 컴퓨터로 전달하는 센서(sensor), 그리고 근육의 반응을 확인할 수 있는 소프트웨어 프로그램으로 구성되어 있다. TMG는 비침습적인 방법을 이용하여 근육의 수축속도와 변위(muscle belly displacement)를 그래프와 수치로 제시해주며, 기본 구성은 Fig. 1에 제시하였다.

센서를 통해 컴퓨터로 전달된 내용은 소프트웨어 프로그램

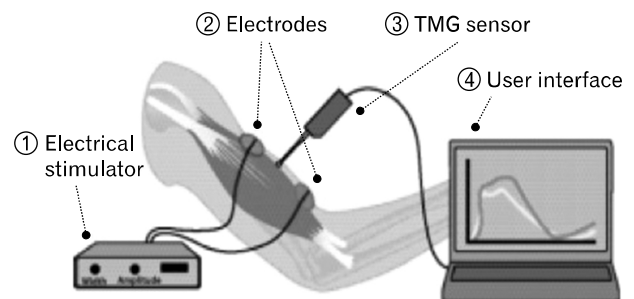


Fig. 1. System components of tensiomyography (TMG) include electrical stimulator, electrodes, TMG sensor, and user interface.

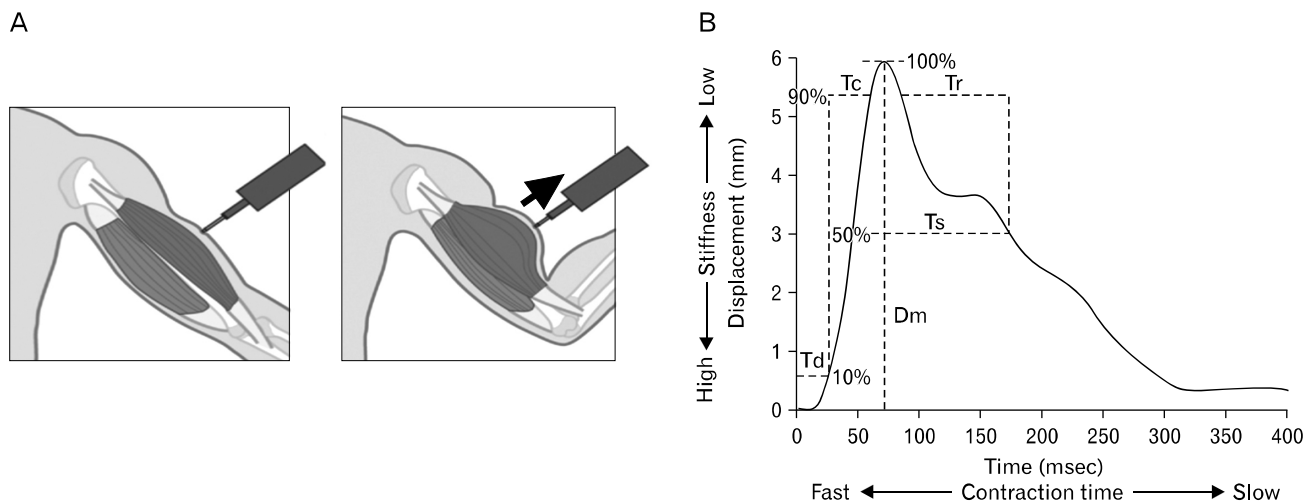


Fig. 2. Tensiomyography record with parameters' definitions. (A) Basic principle of tensiomyography. Arrow: direction of muscle contraction. (B) Basic result of tensiomyograph. Tc: contraction time, Tr: relaxation time, Ts: sustain time, Dm: maximal displacement, Td: delay time.

을 통해 Fig. 2와 같은 수축곡선으로 나타내어지며, 총 5개의 변인으로 나눌 수 있으나, 주요한 변인은 자극에 의한 근육의 수축 속도(Tc)와 근육의 최대 변위(Dm)이다. 이 때, Dm은 근수축에 의한 근배위의 최대 이동거리(mm)를 나타내며, 근수축 시간인 Tc는 Dm의 10%에서 90%까지 이르는 시간(msec)이다.

또한 각 근육의 실제적인 수축 속도를 평가하기 위해 근배위의 이동변위(Dm)를 근수축시간으로 나누어(Dm80/Tc) 근수축 속도(Vc, mm/sec)를 산출하였다.

측정방법은 확인하고자 하는 근육의 배위를 중심으로 약 5 cm 간격으로 이격시켜 근위부(proximal)와 원위부(distal)에 각각 전극(electrode)을 부착한 후 배위 중앙에 센서를 고정시킨다. 최초 20 mA의 자극에서 시작하여 10 mA씩 서서히 증가시켜 Dm이 최대수치에 이를 때까지 실시하였다.

3. 방법

측정 전날 과도한 운동과 음주 및 카페인 섭취를 금지시켰으며, 중도탈락이나 포기에 대한 불이익이 없음을 교육하였다. 또한, 측정 직전에도 근육의 휴식을 위해 5분 이상 침상에서의 안정 시간(bed rest)을 가지도록 하였다. 넙다리네갈래근(quadriceps muscles) 중 가쪽넓은근(vastus lateralis, VL), 넙다리곧은근(rectus femoris, RF), 안쪽넓은근(vastus medialis, VM)을 측정하였고, 넙다리뒤근육에서는 넙다리두갈래근(biceps femoris, BF), 반힘줄모양근(semi-tendinosus, ST)을 측정하였다. 좌우 근육의 우세성(dominancy)을 고려하지 않기 위해 양쪽 모두 측정하였다.

4. 자료처리

실험을 통해 얻어진 결과치들은 Microsoft Excel (Microsoft, Redmond, WA, USA)을 이용하여 입력하였으며, 기술통계(mean±standard deviation)로 산출하였다. 실험데이터는 SPSS for Mac ver. 20.0 (IBM Co., Armonk, NY, USA)을 이용하여 정규성분포를 확인하였으며, 보디빌더군과 대조군의 비교를 위해 independent t-test를 실시하였다. 이 때 정규성분포가 확인되지 않은 자료들은 비모수통계인 Mann-Whitney U test를 실시하였으며, 이 연구의 통계적 유의수준은 0.05로 설정하였다.

결 과

보디빌더군과 대조군을 대상으로 TMG를 분석한 결과는 Tables 1-3에 제시하였다.

왼쪽 다리의 VM을 제외한 모든 측정근육의 Dm은 보디빌더군에서 대조군보다 유의하게 낮게 나타났다($p < 0.05$). 왼쪽 다리의 VM 역시 보디빌더군에서 Dm이 작았지만 통계적 유의성은 없었다($p = 0.068$).

넙다리네갈래근(VL, RF)의 Tc는 보디빌더군과 대조군 사이에 큰 차이가 없었지만, 넙다리뒤근육(BF, ST)의 Tc는 보디빌더군에서 대조군에 비해 유의하게 낮았다($p < 0.01$). 또한 넙다리뒤근육의 유의성은 주로 오른쪽 다리에 근거한 것이며, 왼쪽 다리에서는 통계적 차이는 없었지만 보디빌더군의 Tc가 대조군보다 짧은 경향을 보였다.

넙다리뒤근육 중 ST의 Vc는 보디빌더군이 대조군보다 유의

Table 1. Dm values for the analyzed muscles in each group

Variable	BB (n=9)	Con (n=15)	p-value
Sum			
BF	9.47±3.44**	15.14±4.93	0.006
ST	9.51±3.17**	18.71±5.10	0.001
VL	9.73±3.12*	13.42±3.89	0.025
VM	11.91±2.51**	16.18±3.00	0.002
RF	9.72±2.35**	16.08±4.81	0.001
Right leg			
BF	4.86±2.17*	7.45±3.06	0.037
ST	3.95±1.70**	8.63±2.59	0.001
VL	4.52±1.69*	6.41±2.12	0.033
VM	5.35±2.04**	8.40±1.68	0.001
RF	4.79±1.28**	7.21±1.85	0.002
Left leg			
BF	4.61±1.56**	7.69±2.85	0.007
ST	5.56±2.20**	10.08±3.21	0.001
VL	5.21±1.64*	7.00±2.07	0.038
VM	6.56±1.05	7.78±1.72	0.068
RF	4.93±1.94**	8.87±3.32	0.001

Values are presented as mean±standard deviation.
Dm: maximal displacement, BB: body builder, Con: control, Sum: summation of right and left, BF: biceps femoris, ST: semitendinosus, VL: vastus lateralis, VM: vastus medialis, RF: rectus femoris.
*p<0.05, **p<0.01.

Table 2. Tc values for the analyzed muscles in each group

Variable	BB (n=9)	Con (n=15)	p-value
Sum			
BF	57.27±25.68**	97.77±26.90	0.001
ST	55.70±23.66**	80.91±16.06	0.005
VL	50.06±7.36	51.16±5.07	0.666
VM	49.79±6.02*	45.20±3.17	0.022
RF	57.66±8.56	57.28±4.49	0.886
Right leg			
BF	25.86±11.58**	52.79±18.75	0.001
ST	22.49±11.45**	39.80±8.83	0.005
VL	26.14±6.68	25.45±4.52	0.766
VM	25.32±2.66*	22.92±1.75	0.014
RF	30.29±9.16	29.93±3.35	0.91
Left leg			
BF	31.42±14.75	44.98±16.05	0.051
ST	33.22±15.43	41.11±9.85	0.194
VL	23.92±4.15	25.71±2.83	0.221
VM	24.48±3.65	22.28±1.80	0.06
RF	27.37±5.20	27.35±3.58	0.992

Values are presented as mean±standard deviation.
Tc: contraction time, BB: body builder, Con: control, Sum: summation of right and left, BF: biceps femoris, ST: semitendinosus, VL: vastus lateralis, VM: vastus medialis, RF: rectus femoris.
*p<0.05, **p<0.01.

Table 3. Vc values (mm/sec) for the analyzed muscles in each group

Variable	BB (n=9)	Con (n=15)	p-value
Sum			
BF	137.88±33.30	130.26±47.36	0.677
ST	143.64±32.73*	186.62±41.84	0.015
VL	161.32±70.44	212.29±63.97	0.082
VM	191.25±37.25**	287.66±56.79	0.001
RF	137.29±39.47**	225.55±65.17	0.001
Right leg			
BF	153.46±49.96	123.11±56.99	0.2
ST	145.12±45.13	176.00±41.25	0.1
VL	148.88±80.36	205.86±70.10	0.081
VM	165.92±61.83**	295.71±68.11	0.001
RF	133.18±50.49**	195.94±53.18	0.009
Left leg			
BF	126.46±34.51	150.44±67.49	0.263
ST	141.35±28.09**	98.07±50.19	0.005
VL	180.30±70.58	220.42±67.17	0.178
VM	218.71±45.26*	279.93±61.13	0.03
RF	146.38±53.80**	260.34±91.63	0.001

Values are presented as mean±standard deviation.
Vc: contraction velocity, BB: body builder, Con: control, Sum: summation of right and left, BF: biceps femoris, ST: semitendinosus, VL: vastus lateralis, VM: vastus medialis, RF: rectus femoris.
*p<0.05, **p<0.01.

하게 낮았으며(p=0.015), 이러한 유의성은 왼쪽 다리에 근거한 것이다. 그러나 BF는 양측 모두 유의한 차이가 없었다(p>0.05). 넵다리네갈래근(quadriceps) 중 VM과 RF는 보디빌더군이 대조군보다 유의하게 낮았고(p<0.01), 이것은 양측다리 모두에서 유의하게 나타난 것이다. VL 또한 통계적인 유의성은 없었지만, 보디빌더군이 대조군보다 느려져 있는 경향성을 보였다(p=0.082).

보디빌더군과 대조군의 넵다리뒤근육과 넵다리네갈래근에서 가장 대표적인 결과 그래프를 Fig. 3에 제시하였다. 가장 큰 특징은 보디빌더군의 Dm이 대조군에 비해 유의하게 작다는 것이다.

고 찰

이 연구는 비침습적으로 근육을 평가할 수 있는TMG로서 보디빌더와 일반인을 비교하여 근비대가 되어 있는 근육의 특성을 확인해보고자 설계되었다. 근위축에 대한 TMG 연구는 국외에 보고된 바 있으나, 근비대와 관련하여 TMG 측정 결과는 국내 및 국외를 통틀어 처음으로 시도되는 것이다.

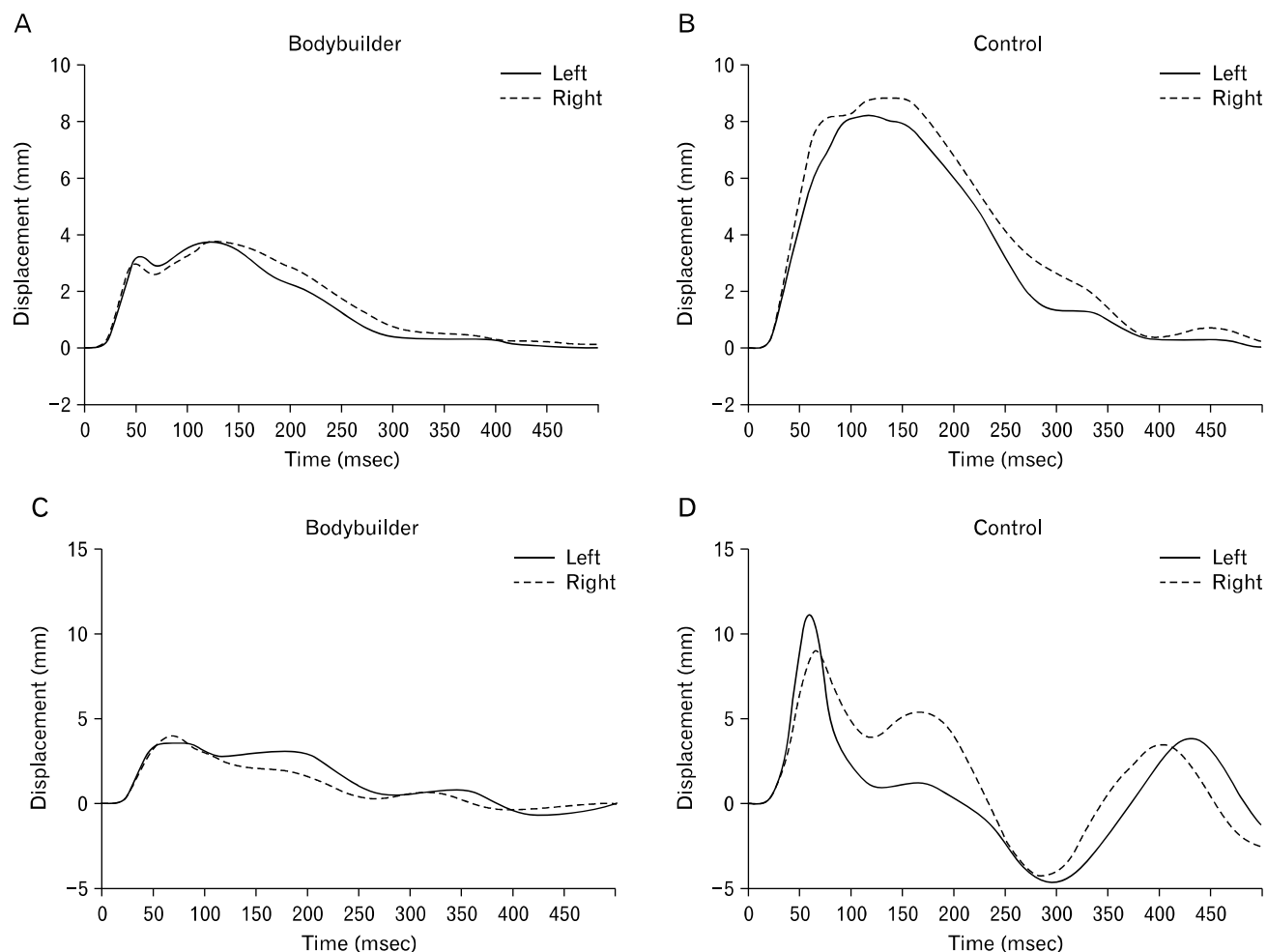


Fig. 3. Representative tensiomyography records of bodybuilder and control groups. (A, B) Biceps femoris. (C, D) Rectus femoris.

이 연구의 결과에서 넙다리뒤근육(BF, ST)과 넙다리내갈래근(VL, VM, RF)의 Dm이 보디빌더군에서 대조군보다 유의하게 작음을 확인할 수 있었다($p < 0.05$). Pisot 등¹³⁾은 35일간의 침대 안정 전후에 TMG를 측정하여 비교하였는데, 이두박근에서는 변화가 없었지만 반중력근(antigravity muscles) 등에서 Dm이 크게 증가함을 보고하였다. 이는 장기간의 비활동 결과로서 나타나는 근육의 위축, 근육과 건의 강직도 감소에 의한 것으로 볼 수 있다. 현재까지 근비대와 관련된 연구는 없었지만 본 연구에서 근비대가 뚜렷하게 나타나는 보디빌더군의 Dm이 대조군에 비해 작게 나타난 것은, 보디빌더의 근육이 일반인에 비해 단단해져 있으므로, 위 선행연구의 결과와는 반대로 근육과 건의 강직도 및 근 긴장도(muscle tone)가 증가되어 있기 때문일 것이다. 또한 비침습적인 방법으로 근 기능을 간접적으로 평가할 수 있다는 가능성과 근 긴장도가 증가한 양상은 근배위의 강직도를 기계적근운동기록기(mechanomyography)의 진폭으로 측정 가능하다고 주장한 Evetovich 등¹⁶⁾의 연구 결과와도 유사하게 나타났다.

한편, 근육의 수축시간인 Tc는 지근 섬유가 차지하는 비율(%)과 매우 높은 상관관계를 가지는 것으로 알려져 있다^{12,17,18)}. 본 연구에서는 보디빌더군의 오른쪽 넙다리뒤근육(BF, ST)의 Tc가 대조군보다 짧았으며($p < 0.01$), 역시 오른쪽 VM의 Tc는 대조군보다 길었고, 대부분은 차이가 없었다. 보디빌더 선수들을 대상으로 한 근생검 연구는 많지 않은데, Tesch와 Larsson¹⁹⁾은 보디빌더의 VL과 어깨세모근(deltoids)의 근생검 결과 근섬유 비율에 차이가 없다고 보고하였고¹⁹⁾, Jurimae 등²⁰⁾과 Kesidis 등²¹⁾은 VL의 지근섬유 비율이 대조군과 큰 차이가 없음을(42.1% vs. 37.5%) 보고하였다. 본 연구에서 각 군 간의 Tc에 차이가 있는 것으로 알려진 근육들(BF, ST, VM)에 대한 보디빌더의 근생검 연구가 없어 확인할 수는 없지만, 기존의 연구에서 근섬유 비율에 차이가 없는 것으로 알려진 VL의

경우 보디빌더군과 대조군 간의 Tc 역시 차이가 없었다.

Tc는 TMG 기계 자체에서 제공하는 변인이긴 하지만 Dm의 크기에 큰 영향을 받으므로(즉, Dm이 커지면 Tc 또한 커지므로), 근육의 수축속도를 파악하기에는 한계가 크다. 따라서 이를 보정하기 위해 Dm을 Tc로 나눈 근 수축속도($Vc=Dm/Tc$)의 개념을 제시하기도 하였다^{10,14,15}. 본 연구에서는 BF와 VL을 제외한 모든 측정근(ST, VM, RF)에서 보디빌더군의 근 수축속도가 대조군에 비해 유의하게 낮았으며, VL에서도 통계적 유의성은 없지만 낮은 경향을($p=0.082$) 보였는데, 이는 보디빌더군의 근수축 속도가 대조군에 비해 느리다 것을 의미한다. Shoop 등²²은 장기간의 저항성운동을 시킨 운동군과 대조군을 비교하여 근섬유의 횡단 면적의 증가를 통한 근비대를 보고하였으나, Vc에는 차이가 없다고 하였고, Widrick 등²³도 12주의 단기간 저항성 훈련을 통해 근비대가 이루어진 연구에서도 근수축 속도에는 차이가 없다고 보고하였다. 한편 D'Antona 등²⁴은 보디빌더군에서 지근섬유의 근수축 속도가 대조군에 비해 감소되어 있음을 보고하였다.

일반적으로 잘 알려진 힘-속도 관계(force-velocity relation)는 속도와 힘 간의 반비례 관계를 말하는데, 즉 더 빠를수록 발생하는 힘은 작아진다²⁵. 왜냐하면 액틴(actin)과 미오신(myosin) 근원섬유가 높은 속도로 움직일 때 교차결합(cross bridge)의 형성이 감소하여 수축력이 감소하기 때문이다²⁶. 보디빌더들의 경우 근육의 비대를 위해 더 큰 힘을 필요로 하는 고강도 저항성 운동(high resistance training)을 하기 때문에, 훈련 시 근육의 수축속도는 매우 느리다. 따라서 보디빌더 선수들의 근수축 속도는 본 연구에서와 같이 낮은 Vc를 보일 수 있는 것이다. 또한 보디빌더군이나 저항성 훈련군에서의 근비대가 지근섬유보다 속근섬유에서 더 크다고 하더라도, 근강직도의 증가로 인해 수축속도는 증가하지 않거나 오히려 감소할 수 있음을 시사한다.

근육의 특성을 위해 침습적인 근생검에 비해, TMG는 비침습적인 방법으로 다양한 근육을 선택적으로 측정할 수 있는 장점을 갖고 있다. 본 연구는 근비대의 전형적인 모델인 보디빌더 선수들을 대상으로 TMG 측정을 실시하여 근비대의 TMG 특성을 최초로 보고하였다. 가장 중요한 특징으로 근배위의 Dm이 모든 근육에서 감소하였고, Vc 또한 대조군에 비해 대부분의 근육에서 감소하였다. Dm의 감소는 근비대로 인한 근육 및 건의 긴장도 및 강직도의 증가에 기인한 것이며, Vc의 감소는 힘-속도 관계에 근거한 지속적 훈련의 결과로 생각된다. 비록 연구대상의 표본수가 충분하지 않았지만, 근육의 특성을 확인하는데 무리가 없었으며, 향후 다양한 운동

종목 선수들의 근특성을 구명하기 위한 TMG를 이용한 연구가 필요할 것이다.

Conflict of Interest

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

References

1. McCall GE, Byrnes WC, Dickinson A, Pattany PM, Fleck SJ. Muscle fiber hypertrophy, hyperplasia, and capillary density in college men after resistance training. *J Appl Physiol* (1985) 1996;81:2004-12.
2. MacDougall JD, Ward GR, Sale DG, Sutton JR. Biochemical adaptation of human skeletal muscle to heavy resistance training and immobilization. *J Appl Physiol Respir Environ Exerc Physiol* 1977;43:700-3.
3. Gonyea W, Ericson GC, Bonde-Petersen F. Skeletal muscle fiber splitting induced by weight-lifting exercise in cats. *Acta Physiol Scand* 1977;99:105-9.
4. MacDougall JD, Sale DG, Elder GC, Sutton JR. Muscle ultrastructural characteristics of elite powerlifters and bodybuilders. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 1982;48:117-26.
5. 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.
6. Ekstrand J, Healy JC, Walden M, Lee JC, English B, Hagglund M. Hamstring muscle injuries in professional football: the correlation of MRI findings with return to play. *Br J Sports Med* 2012;46:112-7.
7. Ma MY. MMG sensor for muscle activity detection: low cost design, implementation and experimentation [dissertation]. Auckland: Massey University; 2009.
8. Garcia-Manso JM, Rodriguez-Ruiz D, Rodriguez-Matoso D, de Saa Y, Sarmiento S, Quiroga M. Assessment of muscle fatigue after an ultra-endurance triathlon using tensiomyography (TMG). *J Sports Sci* 2011;29:619-25.
9. Rey E, Lago-Penas C, Lago-Ballesteros J, Casais L. The effect of recovery strategies on contractile properties using tensiomyography and perceived muscle soreness in professional soccer players. *J Strength Cond Res* 2012;26:3081-8.
10. Garcia-Garcia O. Preseason neuromuscular profile of knee extensor and flexor muscles in elite amateur road cyclist's assessment through tensiomyography. *Ann Sports Med Res*

- 2015;2:1024.
11. Gil S, Loturco I, Tricoli V, et al. Tensiomyography parameters and jumping and sprinting performance in Brazilian elite soccer players. *Sports Biomech* 2015;14:340-50.
12. 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.
13. 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.
14. 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.
15. Rodriguez-Ruiz D, Garcia-Manso JM, Rodriguez-Matoso D, Sarmiento S, Da Silva-Grigoletto M, Pisot R. Effects of age and physical activity on response speed in knee flexor and extensor muscles. *Eur Rev Aging Phys Act* 2013;10:127-32.
16. Evetovich TK, Housh TJ, Stout JR, Johnson GO, Smith DB, Ebersole KT. Mechanomyographic responses to concentric isokinetic muscle contractions. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 1997;75:166-9.
17. Valencic V, Knez N, Simunic B. Tenziomyography: detection of skeletal muscle response by means of radial muscle belly displacement. *Biomed Eng* 2001;1:1-10.
18. Dahmane R, Djordjevic S, Simunic B, Valencic V. Spatial fiber type distribution in normal human muscle Histochemical and tensiomyographical evaluation. *J Biomech* 2005;38:2451-9.
19. Tesch PA, Larsson L. Muscle hypertrophy in bodybuilders. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 1982;49:301-6.
20. Jurimae J, Abernethy PJ, Quigley BM, Blake K, McEniery MT. Differences in muscle contractile characteristics among bodybuilders, endurance trainers and control subjects. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 1997;75:357-62.
21. Kesidis N, Metaxas TI, Vrabas IS, et al. Myosin heavy chain isoform distribution in single fibres of bodybuilders. *Eur J Appl Physiol* 2008;103:579-83.
22. Shoepe TC, Stelzer JE, Garner DP, Widrick JJ. Functional adaptability of muscle fibers to long-term resistance exercise. *Med Sci Sports Exerc* 2003;35:944-51.
23. Widrick JJ, Stelzer JE, Shoepe TC, Garner DP. Functional properties of human muscle fibers after short-term resistance exercise training. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol* 2002;283:R408-16.
24. D'Antona G, Lanfranconi F, Pellegrino MA, et al. Skeletal muscle hypertrophy and structure and function of skeletal muscle fibres in male body builders. *J Physiol* 2006;570: 611-27.
25. Wickiewicz TL, Roy RR, Powell PL, Perrine JJ, Edgerton VR. Muscle architecture and force-velocity relationships in humans. *J Appl Physiol Respir Environ Exerc Physiol* 1984; 57:435-43.
26. Gray V, Rice CL, Garland SJ. Factors that influence muscle weakness following stroke and their clinical implications: a critical review. *Physiother Can* 2012;64:415-26.