Journal of the Ergonomics Society of Korea
Vol. 25, No. 4 pp.93-101, November 2006

관절각도에 따른 근 피로도와 등척성 훈련 전이효과

송 영 희[1] · 권 오 윤[2]

[1]연세대학교 대학원 재활학과 /
[2]연세대학교 보건과학대학 물리치료학과, 보건환경대학원 인간공학치료학과, 보건과학연구소

Muscle Fatigue according to Joint Angle and the Transfer Effect with Isometric Training

Young Hee Song[1], Oh-Yun Kwon[2]

[1]Department of Rehabilitation Theraphy, The Graduate School, Yonsei University, Wonju, 220-710
[2]Department of Ergotheraphy, The Graduate School of Health and Environment,
Institute of Health Science, Yonsei University, Wonju, 220-710

ABSTRACT

This study examined whether there is a transfer effect to other joint angles and the angular specificity of muscle fatigue after 6 weeks of isometric training of the vastus medialis. Twenty subjects were randomly assigned to 30° and 90° knee flexion groups and were trained at 80% maximal voluntary isometric contraction(MVIC) three times a week for 6 weeks. The pre-and post-training values of the 80% holding time(endurance time) of MVIC, the Fatigue Index(FI), and the MVIC at 30°, 60°, and 90° were compared. After isometric training for 6 weeks, in the 30° knee flexion group, FI decreased significantly(p<0.05) only at 30°, which was the training angle; there was no change at other angles. By contrast, in the 90° knee flexion group, FI decreased significantly(p<0.05) at both the trained angle and at the other angles, indicating a transfer effect of training. MVIC did not increase significantly(p<0.05) at any trained angle in either the 30° or 90° knee flexion groups after 6 weeks of isometric training, neither did the 80% holding time of MVIC differ significantly compared with pre-training in either group. These findings suggest that training at 90° of knee flexion is more effective than training at 30° of knee flexion for obtaining a training transfer effect on muscle fatigue in the vastus medialis.

Keyword: Angular specificity, Fatigue index, Isometric exercise, Transfer effect

1. 서 론

운동 특이성으로 언급되기도 하는 훈련 특이성(specificity of training)은 특정한 목적을 계획한 상태에서 훈련할 경우, 목적으로 하는 운동효과만 있을 뿐 다른 목적의 효과가 부가적으로 발생하지 않는 것으로, 필요에 따라 신진대사와 생리적 체계가 적응한다는 이론이다. 훈련 특이성은 운동 프로그램을 계획하기 위한 기초가 되며, 근력과 일률, 그리고 지구력 향상과 같은 특별한 운동효과를 기대하거나, 기능적 필요와 목표과제를 이루기 위한 운동처방 시 고려되어야 한다. 따라서 효과적인 운동치료계획의 수립을 위해서는 운

교신저자: 송영희
주 소: 강원도 원주시 흥업면 매지리 234, 전화: 033-760-2196, E-mail: tabby0628@hanmail.net

동 목적에 따라 운동자세나 관절각도, 운동의 형태와 속도까지 고려해야 한다. 훈련 특이성은 운동학습과 관련이 있는 훈련자극에 의한 신경적응뿐만 아니라, 근육 내 형태학적 변화 그리고 신진대사 변화와 관련이 있기 때문에 운동선택 시 항상 강조되고 있다(Kisner와 Colby, 2002).

수술 후 관절운동에 제한이 있거나 스포츠 손상 후, 근력 강화를 위해 사용되는 운동방법 중 하나인 등척성 운동프로그램을 계획할 때도 목표로 하는 운동효과를 이루기 위해서는 훈련 특이성을 반드시 고려해야 한다. 등척성 운동프로그램의 훈련 특이성을 위해 일반적으로 고려되어야 할 요건들로는 근 수축 강도(intensity), 근 수축 시간(duration), 근 수축의 반복(repetitive contraction) 그리고 관절각도 등이 있다. 이중 관절각도에 관한 기존 연구들은 등척성 훈련에 의한 근력의 향상이 훈련각도에 국한되거나 혹은 훈련각도와 매우 인접한 각도에서만 발생한다고 보고하였다(Belka, 1968; Fleck과 Schutt, 1983; Gardner, 1963; Lindh, 1979). 이러한 훈련효과를 각도 특이성(angular specificity)이라고 하며, 일반적으로 특정 훈련각도로부터 10° 이내의 한정된 각도에서만 전이효과를 기대할 수 있으므로, 전체 관절가동범위 내의 여러 다른 각도에서 훈련을 하여야 한다(Kisner와 Colby, 2002). 반면, 등척성 운동의 각도 특이성 효과가 근육의 길이가 단축된 자세일수록 훈련각도에 국한되고, 근육의 길이가 신장된 자세에서 훈련할 경우에는 훈련하지 않은 다른 각도에서도 훈련효과가 나타난다고 보고한 연구들도 있다(Bandy와 Hanten, 1993; Knapik 등, 1983; Meyers, 1967; Thepaut-Mathieu 등, 1988). 훈련을 위해 선택된 각도에서 수행된 등척성 운동이 선택된 각도에서만 근력강화의 효과를 보일 것인가 혹은 훈련하지 않은 다른 각도에서도 효과를 보일 것인가 하는 것은 임상적으로 중요한 의미가 있다. 무릎관절의 전체 가동범위에서 넙다리네갈래근(quadriceps femoris)의 근력이 많이 요구되는 걷기와 계단 오르기 같은 기능들 은 훈련각도뿐만 아니라 훈련하지 않은 다른 각도로의 훈련 전이효과가 발생하지 않으면 기능적인 향상을 기대하기 어렵기 때문이다(Marks, 1994).

등척성 운동 프로그램을 계획하는데 있어 골격근의 피로에 대한 길이-특이 적응성(length-specific adaptability) 즉, 피로에 대한 각도 특이성 또한 반드시 고려되어야 하는 요건이다. 반복적인 고강도의 등척성 운동 시 시간이 지남에 따라 힘의 소실이 일어날 수 있기 때문이다. 피로란 반복적인 근 자극 후 발생하는 활동력의 감소(Rassier, 2000)이며, 이전 근 활동의 결과로 인한 힘 생성 능력의 가역적 상실이라고 할 수 있다(Edwards 등, 1977; Green과 Jones 1989). 그러나 피로에 있어서 근 길이(관절각도)의 중요성을 연구한 논문은 많지 않으며, 몇몇 연구들만이 힘의 상실 정도와 근전도 주파수의 변화를 측정하여 근 길이가 근 피로에 영향을 준다는 것을 보여주었다. 그러나 그 결과 역시 서로 다른 결과를 제시하는 경우가 많다. Sacco 등(1994)의 앞정강근(tibialis anterior)을 대상으로 한 연구결과와 Doud와 Walsh(1995)의 위팔두갈래근을 대상으로 한 연구결과에 의하면, 근 길이가 단축되었을 때가 신장되었을 때보다 중앙주파수가 급격히 감소하여 더 빨리 피로하다고 하였다. 또한 Willems와 Stauber(2002)의 쥐의 발바닥굽힘근(plantar flexor muscle)을 대상으로 한 6주 동안의 고속 원심성 훈련(high speed eccentric training) 연구결과에 의하면 훈련 후 근 피로적응과 회복은 근 길이가 신장된 자세(lengthened position)에서만 나타났으며, 근 길이가 단축된 자세(shortened position)에서는 나타나지 않았다고 하였다. 반면 Fitch와 McComas(1985), McKenzie와 Gandevia(1987)는 근 길이가 단축된 자세에서 피로가 감소한다고 하여 Sacco 등(1994)의 연구결과와 상반된 연구결과를 보고하였다.

등척성 운동과 관련된 훈련의 각도 특이성과 근 길이에 따른 피로도의 차이에 관해서는 광범위하게 연구되지 않았으며(Bandy와 Hanten, 1993), 특히 피로의 각도 특이성에 관한 연구는 드물다. 따라서 본 연구에서는 첫째, 근 길이의 변화에 따라 피로도 차이가 발생하는지 둘째, 6주 동안의 등척성 훈련 후 근 피로감소와 근 수축력의 증가, 그리고 지구력 향상이 훈련각도뿐만 아니라 훈련하지 않은 다른 각도에서도 훈련 전이효과가 나타나는지 알아보고자 하였다.

2. 연구방법

2.1 연구 대상

본 연구에서는 25명(남자 17명, 여자 8명)의 건강한 성인 남녀를 대상으로 6주 훈련을 시작하기 전 무릎 굴곡각도에 따른 피로지수와 MVIC를 비교하였다. 이 중 5명이 6주 훈련에 들어가기 전 중도 탈락하여 대상자 20명(남자 12명, 여자 8명)을 대상으로 30° 훈련군과 90° 훈련군으로 나누어 각도 별로 MVIC, 피로지수, MVIC 80% 유지시간이 훈련 전후간에 차이가 있는지 비교하였고 훈련의 전이효과가 발생하는지 알아보았다.

대상자 선정기준은 하지에 신경계 및 근골격계의 병리학적 소견이 없고, 정기적으로 운동을 하고 있지 않으며, 무릎 굴곡각도가 정상관절가동범위이고, 우세다리가 오른쪽인 자로 하였다. 모든 대상자는 실험 참가 전 연구내용에 대해 충분한 설명을 듣고 자발적인 동의 후 실험에 참가하였다. 연구대상자의 평균 키는 170.4cm, 평균연령은 23.2세, 체중은 64.2kg 이었다.

2.2 근전도 신호측정 및 신호처리

근전도 신호를 측정하기 위하여 속근섬유(fast muscle fiber)와 지근섬유(slow muscle fiber)가 거의 균일하게 분포되어 있고 촉지하기 쉬운 안쪽넓은근(vastus medialis)을 대상근육으로 설정하였다(Arendt-Nielson 등, 1992). 전극은 DE-3.1 이중차등전극(double differential electrodes; Delsys Inc., Boston, MA, USA)을 사용하였다. 전극부착부위는 오른쪽 무릎관절을 편 상태에서 대퇴부 내측의 원위부 20% 지점으로, 무릎뼈(patella)와 각도가 45° 되는 지점에 부착하였다(Geiringer, 1999). 근전도 신호에 대한 피부저항을 최소화하기 위해 전극부착부위를 면도하였고 사포로 문지른 후 알코올(isopropyl alcohol)로 잘 닦아냈다. 알코올이 마르면 겔을 골고루 묻힌 전극을 전극부착부위에 테이프로 단단히 고정하였다. 접지전극(ground electrode)은 오른쪽 손목에 부착하였다.

근전도 신호처리를 위한 설정 중 필터는 대역통과필터(bandpass filter) 20~450Hz로 설정하였으며, 표본수집률은 1000Hz로 하였다. 근전도의 신호저장과 신호처리를 위해 Acqknowledge 3.7.2(Biopac System Inc., Santa Barbara, CA, USA) 프로그램을 사용하였다. 토크감지기(YDN-50K. SETech Instrument Co., Korea)가 부착된 N-K 테이블(Preston, NJ, USA)에 대상자의 무릎관절 중심과 토크감지기의 축을 맞춘 후 30°, 60°, 90° 중 무작위로 선정된 각도로 고정시켰다. 대상자가 힘을 완전히 뺀 상태에서 나온 근 수축력 값(N · m)과 자료의 분석과 저장을 위한 MP150WSW(Biopac System Inc. Goleta, CA, USA)에서 나온 신호의 평균값을 무부하 상태의 값으로 간주하여 영점처리(zero setting) 하였다.

2.3 MVIC 측정

대상자는 토크감지기가 장착된 N-K 테이블에 등을 대고 편하게 앉은 상태에서 10cm 너비의 벨트에 의해 상체는 등받이에, 대퇴부는 테이블에 고정되었으며, 상지는 편안한 상태로 양쪽 손잡이를 잡았다. 대퇴 원위부 아래에 수건을 말아 넣어 대퇴부와 테이블이 수평을 유지할 수 있도록 하여, 대퇴부 신전 시 테이블 표면에 가해지는 마찰력으로 인한 통증을 줄였다. 무릎은 30°, 60°, 90° 굴곡각도 중 무작위 순서로 선정된 각도에 고정되었으며, 발목 또한 움직이지 않도록 스트랩으로 고정되었다(그림 1). 토크감지기는 MP150WSW에 연결되어 화면을 통해 대상자가 내는 토크값(N · m)을 볼 수 있도록 연결하였다.

연구자는 대상자가 5초 동안 최대 장력으로 무릎을 신전하도록(Weir 등, 1996) 구두로 격려하였으며, 각 횟수마다

그림 1. 측정자세

10분 동안의 휴식시간을 주었고, 3회 반복하여 산출된 평균을 분석에 사용하였다.

2.4 근전도 중앙주파수 수집과 피로지수 측정

피로를 유발하기 위해 30°, 60°, 90° 중 무작위로 선정된 각도에서 MVIC 80% 범위에 해당하는 힘을 주도록 MP150WSW를 설정하였다. 대상자가 MVIC 75%에서 85% 범위의 힘을 줄 경우 모니터 상에 평행한 직선이 나타나 시각적 피드백이 제공되며, 모니터를 보면서 MVIC 80% 범위로 힘을 유지하도록 구두로 격려하였다. 근 피로로 인하여 MVIC 80%를 더 이상 유지하지 못하면 측정을 종료하였다. 피로지수는 3회 측정되었고 측정 간에는 10분씩 휴식시간을 주었다.

대상자는 일주일에 세 번, 이틀 간격으로 실험실을 방문하였으며, 각 각도마다 1회씩 피로지수가 측정되었다. 즉, 처음 실험 시에는 세 개의 각도 중 하나가 무작위로 선택되었고, 다음에는 두 개의 각도 중 하나, 마지막에는 남은 각도로 피로지수를 측정하였다.

중앙주파수 수집을 위해서는 Matlab version 6.5(Math Works Inc., MA, USA)에서 짜여진 프로그램을 사용하였다. 중앙주파수는 초기 5초에 해당하는 중앙주파수의 변이가 심하므로(원종임, 2001) 안정된 값을 얻기 위해 초기 5초 이후의 20초 동안 수집된 자료의 평균을 초기중앙주파수 값으로 사용하였고, 마지막 5초를 제외한 20초 동안 수집된 자료의 평균값을 마지막중앙주파수 값으로 사용하였다.

피로지수(fatigue index)는 다음과 같은 공식으로 구하였다.

$$\text{피로지수} = \frac{\text{초기중앙주파수} - \text{마지막중앙주파수}}{\text{초기중앙주파수}}$$

2.5 등척성 훈련

2.5.1 등척성 훈련

대상자는 동전을 던져 30° 훈련군이나 90° 훈련군에 남녀구분 없이 각각 10명씩 무작위로 배정되었다. 30° 훈련군이란 훈련기간 동안 선택된 각도인 30°에서만 훈련 받은 군을 말하여, 90° 훈련군이란 훈련기간 동안 선택된 각도인 90°에서만 훈련 받은 군을 의미한다. 훈련기간은 6주였으며 일주일에 세 번씩 이틀 간격으로 동일한 시간대에 훈련을 받았고, 6주간 선택된 무릎각도에서만 훈련을 받았다(Kitai와 Sale, 1989; Weir 등, 1995).

먼저 선택된 훈련각도에서 MVIC를 세 번 측정하여 평균을 산출한 후 MVIC의 80%를 결정하였고, 모니터를 보면서 더 이상 힘을 내지 못할 때까지 MVIC의 80%를 유지하도록 구두로 격려하였다. 휴식시간은 충분히 주었으며 MVIC의 80%를 더 이상 유지하지 못하면 훈련을 종료하였다. 훈련은 평균 4회 실시하였다.

2.5.2 분산의 동질성

30° 훈련군이나 90° 훈련군의 동질성을 알아본 결과 키, 나이, 몸무게 모두 두 훈련군 간에 차이가 없었다(표 1).

표 1. 30° 훈련군과 90° 훈련군의 동질성 비교

	t-값	자유도
키	0.353	19
나이	1.282	19
몸무게	-0.361	19

2.6 자료 분석

무릎각도 별, 남녀 별로 MVIC와 피로지수에 차이가 있는지 알아보기 위해 이원분산분석(two-way ANOVA)을 하였다. 6주 동안 훈련 전후의 피로지수, MVIC, MVIC 80% 유지시간에 대한 각도 별 반복요인 유의성 검정을 위해 일요인 반복측정에 따른 분산분석 검정(one-way repeated ANOVA)을 하였다. 훈련효과를 비교하기 위하여 30° 훈련군과 90° 훈련군으로 나누어 30°, 60°, 90° 별로 쌍체표본 t-검정(paired sample t-test)을 하였다. 통계학적 유의성을 검정하기 위한 유의수준은 α=0.05 이하로 하였다. 자료의 통계처리는 윈도용 SPSS(Statistical Package for the Social Sciences) 12.0을 사용하였다.

3. 결 과

3.1 훈련 전 성별과 무릎각도에 따른 MVIC

훈련 전 전체 대상자 25명(남자 17명, 여자 8명)의 각도별 MVIC 평균값은 30°에서 53.09 N · m, 60°에서 99.50 N · m, 90°에서는 127.58 N · m로 각도가 클수록 MVIC 값이 컸다(표 2). 남녀별 MVIC 평균값은 남자가 113.402 N · m, 여자가 57.826 N · m 였다.

표 2. 훈련 전 각도에 따른 MVIC†

(단위: N · m)(N=25)

각도	MVIC
30°	53.09(24.86)[a]
60°	99.50(42.91)
90°	127.58(60.36)

[a]평균(표준편차)
†MVIC: Maximal voluntary isometric contraction

MVIC 값이 성별, 각도 별로 유의한 차이가 있는지 알아본 결과 각도와 성별 간에 교호작용이 있었다(p<0.05). 성별로는 남자가 여자에 비해 MVIC 값이 유의하게 높았다(p<0.001), 각도 별 MVIC 값에 유의한 차이가 있어 사후검정으로 쉐페(Scheffe) 수정법을 실시한 결과, 30° 보다는 60°가 MVIC 값이 유의하게 높았고(p<0.001), 60° 보다는 90°가 유의하게 높았으며(p<0.05), 30° 보다는 90°가 유의하게 높았다(p<0.001)(표 3).

표 3. MVIC에 대한 분산분석 결과

조건	평방합	자유도	F
각도	51555.806	2	21.459**
성별	53373.207	1	44.431**
각도×성별	10222.075	2	4.255*

*p<0.05, **p<0.001

3.2 훈련 전 성별과 무릎각도에 따른 피로지수

훈련 전 전체 대상자 25명의 무릎각도에 따른 피로지수를 비교한 결과 성별에 따른 피로지수에는 유의한 차이가 없었다(표 4). 무릎각도에 따른 피로지수에는 유의한 차이가 있어(표 4) 사후검정으로 쉐페(Scheffe) 수정법을 실시한 결과, 30°에 비해 60°에서 피로지수가 유의하게 낮았고(p<0.05), 30°에 비해 90°에서 피로지수가 유의하게 낮았다(p<0.05). 60°와 90° 사이에는 피로지수간에 유의한 차이가 없었다.

표 4. 피로지수에 대한 분산분석 결과

조건	평방합	자유도	F
각도	0.020	2	3.542*
성별	0.001	1	0.301
각도×성별	0.001	2	0.226

*p<0.05

3.3 훈련 전 무릎각도에 따른 유지시간

전체 대상자 25명의 무릎각도에 따른 유지시간을 비교해 본 결과 30°에서는 평균 45.3초에 표준편차 21.5초, 60°에서는 평균 57.4초에 표준편차 24.2초, 90°에서는 평균 35.8초에 표준편차 11.9초 동안 유지했다. 각도 별 유지시간에 유의한 차이가 있어(p<0.05)(표 5) 사후검정으로 쉐페(Scheffe) 수정법을 실시한 결과, 60°에서의 유지시간이 90°보다 유의하게 길었고(p<0.05), 30°와 60°의 유지시간에는 유의한 차이가 없었다.

표 5. 유지시간에 대한 분산분석 결과

조건	평방합	자유도	F
각도	3769	2	4.666*
훈련군	14.7	1	0.036
각도×훈련군	914	2	1.132

*p<0.05

3.4 등척성 훈련 전후의 피로지수

3.4.1 훈련 전후의 피로지수

대상자 20명을 각각 10명씩 30° 훈련군과 90° 훈련군으로 남녀구분 없이 무작위로 분류하여 6주 동안 등척성 훈련을 실시한 후, 각 각도 별로 훈련 전후의 피로지수에 차이가 있는지 알아보았다.

그 결과, 30° 훈련군에서는 30°에서만 피로지수가 유의하게 감소되었고(p<0.05), 60°와 90°에서는 피로지수에 유의한 차이가 없었다. 90° 훈련군에서는 30°, 60°, 90° 모두 훈련 전에 비해 훈련 후 피로지수에 유의한 차이가 있었다(p<0.05)(표 6).

3.4.2 피로지수에 대한 반복측정 분산분석

30° 훈련군의 피로지수에 대한 훈련 전후 변화량을 종속변수로 하여 30°, 60°, 90° 별로 분산분석을 한 결과, 유의한 차이가 있어(p<0.05)(표 7) 사후검정으로 쉐페(Scheffe) 수정법을 실시하였다. 그 결과 30°에서의 변화량이 90°에서의 변화량 보다 유의하게 높았다(p<0.05).

표 6. 훈련 전후의 피로지수

		30°	60°	90°
30° 훈련군	훈련 전	0.101 (0.068)[a]	0.063 (0.039)	0.078 (0.043)
	훈련 후	0.070 (0.046)*	0.061 (0.037)	0.077 (0.042)
	변화량	0.031 (0.022)	0.002 (0.001)	0.001 (0.001)
90° 훈련군	훈련 전	0.085 (0.077)	0.059 (0.044)	0.047 (0.036)
	훈련 후	0.076 (0.069)*	0.049 (0.037)*	0.032 (0.022)*
	변화량	0.009 (0.008)	0.010 (0.007)	0.015 (0.014)

[a]평균(표준편차), *p<0.05

90° 훈련군의 피로지수에 대한 훈련 전후 변화량을 종속변수로 하여 각도 별 분산분석을 한 결과 간에는 유의한 차이가 없었다(표 7).

표 7. 피로지수에 대한 반복측정 분산분석

	평방합	자유도	평방평균	F
30° 훈련군	0.005	2	0.002	4.366*
90° 훈련군	0.000	1.234	0.000	0.938

*p<0.05

3.5 등척성 훈련 전후 MVIC

3.5.1 MVIC 비교

6주 간의 등척성 훈련 전후 MVIC 값에 차이가 있는지 알아본 결과, 30° 훈련군과 90° 훈련군 모두 훈련각도뿐만 아니라 훈련하지 않은 다른 각도에서도 훈련 전에 비해 훈련 후 MVIC 값이 유의하게 향상되었다(p<0.05)(표 8).

3.5.2 MVIC에 대한 반복측정 분산분석

MVIC의 훈련 전후 변화량을 종속변수로 하여 30°, 60°, 90° 별로 분산분석을 한 결과 30° 훈련군과 90° 훈련군 모두 유의한 차이가 없었다(표 9).

3.6 등척성 훈련 전후 MVIC 80% 유지시간

3.6.1 MVIC 80% 유지시간 비교

대상자 20명의 훈련 전후 MVIC 80% 유지시간에 차이가 있는지 알아본 결과 두 훈련군 모두 통계학적으로 유의한 차이가 없었다(표 10). MVIC 80% 유지시간의 훈련 전후 변화량을 종속변수로 하여 각도 별로 분산분석을 한 결과

표 8. 훈련 전후의 MVIC 비교

(단위: N · m)

		30°	60°	90°
30° 훈련군	훈련 전	63.15 (22.2)[a]	116.47 (45.9)	133.55 (37.5)
	훈련 후	82.39 (27.7)*	139.30 (43.2)*	148.19 (47.6)*
	변화량	19.24 (14.7)	22.83 (25.4)	14.63 (15.7)
90° 훈련군	훈련 전	45.65 (17.2)	86.46 (32.1)	131.94 (68.5)
	훈련 후	52.74 (14.9)*	122.63 (50.8)*	173.35 (80.0)*
	변화량	7.08 (9.4)	36.17 (35.8)	41.4 (37.8)

[a]평균(표준편차), *p<0.05

표 9. MVIC 변화량에 대한 각도 별 반복측정 분산분석

	평방합	자유도	평방평균	F
30° 훈련군	202.276	2	101.138	0.701
90° 훈련군	4787.015	2	2393.508	3.768

표 10. 훈련 전후의 MVIC 80% 유지시간

(단위: 초)

		30°	60°	90°
30° 훈련군	훈련 전	49(24.5)[a]	52(13.9)	38.7(9.5)
	훈련 후	59(19.8)	67(10.3)	37.7(10.6)
	변화량	9(28.6)	15(11.5)	−1(14.4)
90° 훈련군	훈련 전	42.4(18.1)	62.8(31.4)	33.3(14.6)
	훈련 후	66.4(38.8)	81.1(45.4)	49.8(15.7)
	변화량	24(37.0)	18.3(38.26)	16.5(23.0)

[a]평균(표준편차)

두 훈련군 모두 유의한 차이가 없었다.

4. 고 찰

4.1 근 길이와 근 피로

일반적으로 많은 연구들이 근 길이에 따른 피로지수를 비교하기 위해 근 길이가 단축되었을 때나 신장되었을 때와 이상적 근 길이일 때를 비교하거나, 혹은 근 길이가 단축되었을 때와 근 길이가 신장되었을 때를 비교하였다. 본 연구에서는 세 가지 상황을 모두 비교하기 위해 무릎각도를 30°, 60°, 90° 굴곡자세로 나누어 피로지수를 비교하였다.

본 연구결과 근 길이가 단축된 30° 무릎 굴곡자세보다는 근 길이가 신장된 90° 무릎 굴곡자세에서 피로지수가 낮게 나왔다. 이러한 피로의 근 길이 의존성은 근육의 내재적 요소로 반복적인 자극 동안 발생하는 신진대사 변화와 관계있거나 혹은 근 활동과 관계 있는 기전일 수도 있다. 또한 피로가 유발되는 동안 운동단위 동원과정과 운동단위 동원율에 있어서의 차이 때문일 수도 있다(Weir 등, 1996). 단축된 근 길이에서 반복적인 근 자극 동안 세포외 공간에서는 Na^{2+}/K^{+} 농도의 불균형이 있을 수 있는데, 특히 가로소관(T−tubulae)에서 증가된 K^{+} 농도는 세포막의 과분극 상태를 만든다. 이러한 과분극은 가로소관 안으로 활동전위 전도의 실패와 섬유 중심부에서의 비활동성 때문이다. 이것은 근 길이가 신장되었을 때 보다는 근 길이가 단축되었을 때 힘 생성을 감소시킨다. Taylor와 Rudel(1970)에 의하면 이러한 결과는 골격근의 단세포(single cell)들이 짧아졌을 때 말초부터 중추 근원섬유(myofibril)까지 활동전위 전도의 실패를 보이기 때문이라고 하였다. Doud와 Walsh(1995)는 위팔두갈래근을 대상으로 근 길이가 단축되었을 때와 신장되었을 때 중앙주파수의 감소 정도를 비교하였는데 그 결과, 근 길이가 단축되었을 때가 신장되었을 때 보다 중앙주파수가 급격히 감소하여 근 길이가 단축되었을 때가 더 빨리 피로하다고 보고하였다. 이들은 단축된 근 길이에서 중앙주파수의 급격한 감소로 인한 과제 불이행이 근 수축 내 기전 때문이라고 하였다. 이러한 근 수축 내 기전은 피로 그 자체가 될 수 있으며 수축시간이 길어짐에 따라 확대될 수 있다.

반면, McKenzie와 Gandevia(1987)는 위팔두갈래근을 대상으로 이상적 근 길이(90° 팔꿈치관절 굴곡)와 단축된 근 길이(25%의 근력감소를 보이는 45° 팔꿈치관절 굴곡)에서의 근 지구력을 비교한 결과, 근 길이가 단축된 경우가 피로시점이 지연되었다고 하였다. 이러한 결과는 힘을 생성하기 위해 비축된 능력이 피로가 발달되면서 동원될 수 있다는 것을 의미한다. 이러한 결과에 대한 근거로 Aljure와 Borrero(1968)는 액틴과 마이오신 필라멘트 사이의 효과적인 결합(cross−bridge)의 수가 감소된 것과 관계 있다고 하였다. Fitch와 McComas(1985)는 발등굽힘근(ankle dorsiflexor) 연구에서 단축된 근 길이에 비해 신장된 근 길이에서 힘 생성 능력의 손실이 큰 이유는 더 많은 ATP를 소비하는 액틴과 마이오신의 상호작용 때문이라고 해석하였다. 반면에 근육이 단축되었을 때에는 근 긴장도가 감소함으로써 전체 혈류는 어느 정도 보존될 수 있고 이것이 피로발달을 지연시킬 수 있다고 제시하였다. 또한 Weir 등(2000)의 연구결과에서도 근 길이가 단축되었을 때보다 근 길이가 신장된 상태에서 피로를 유도했을 때 운동단위 동원율이 더 크다고 보고하였다.

이러한 여러 연구결과들은 Doud와 Walsh(1995)의 연구결과와 상반된다. 이는 단축된 근 길이에서의 피로율 감소를 보고한 연구자들이 근 길이가 단축되었을 때나 신장되었을 때나 피로지수를 항상 이상적 근 길이에서 평가했기 때문이다. 이러한 경우 반복적 자극 동안 수축반응의 결과로 발생하는 단축된 근 길이에서의 피로반응이 피로지수의 측정을 위해 이상적 근 길이로 이동할 때 사라질 수 있다고 Sacco 등(1994)은 지적하였다.

4.2 근 길이에 따른 MVIC와 유지시간

무릎 굴곡자세에 따른 MVIC 값과 수축유지시간(대상자가 더 이상 수축을 유지할 수 없을 때까지의 시간)을 비교한 결과, MVIC 값은 각도가 클수록 증가하였다. 또한 30° 무릎 굴곡자세에서 발생하는 MVIC 값은 90° 무릎 굴곡자세에서 발생하는 값의 42%, 60° 무릎 굴곡자세에서 발생하는 MVIC 값은 90° 무릎 굴곡자세에서 발생하는 값의 78% 수준이었다. 그러나 수축유지시간은 60° 무릎 굴곡자세에서 가장 길었다. 이는 Arendt-Nielson 등(1992)의 연구결과와 유사한데 그의 연구결과에 의하면 45°의 무릎 굴곡자세에서 생성되는 MVIC 값이 90° 무릎 굴곡자세에서보다 35% 낮았지만 수축유지시간은 두 배 이상 길었다고 하였다. 또한 수축유지시간은 45°에서 평균 52초에 표준편차 8초, 90°에서 평균 24초에 표준편차 5초였고, 45°무릎 굴곡자세에서 생성되는 MVIC 값은 90° 무릎 굴곡자세에서 생성되는 힘의 64% 수준이었다고 보고하였다.

MVIC 값이 근 길이가 단축되었을 때 감소하는 이유는 길이-장력관계(length-tension relationship) 때문이다. 힘 또는 장력은 근육이 자극 받았을 때 놓여있는 길이에 따라 다양하게 발휘되는데, 최대 장력은 근-선(Z-line) 간격이 거의 느슨한 길이이거나 2.0~2.25 μm 일 때 발휘된다. 이는 액틴과 마이오신 필라멘트가 전체 길이에 걸쳐 중첩되어 있고 교차연결의 수가 최대이기 때문이다. 근 섬유의 길이가 신장되거나 단축되었을 때의 장력 변화는 일차적으로 근절에서의 구조적 변화에 의해 일어난다. 반면, 근절의 길이가 이상적 길이보다 짧아질 경우, 근절의 반대쪽 끝에서 가는 필라멘트의 중첩이 허용되어 반대방향에서의 기능적 분극화가 되며 능동 장력은 감소된다(Nordin과 Frankel, 2001). Gandevia와 McKenzie(1988)에 의하면 근 길이가 단축되었을 때의 MVIC 값이 평균 21~49% 감소한다고 하였다.

위의 연구결과들은 근 길이가 활동전위의 전달속도와 고정적 근 피로 발달을 위한 중요한 변수라는 것을 의미하며, 충분한 근력과 관절움직임을 생성할 수 없어 사지가 약화되거나 기능장애가 남아있을 수 있는 환자들의 재활계획에 고려되어야 할 것이다.

4.3 근력과 근 피로에 대한 각도 특이성

6주간의 등척성 훈련군은 30°와 90° 무릎 굴곡군으로만 나누어 60° 훈련군은 제외하였는데 이는 각도 특이성의 존재여부를 알아보는 동시에 훈련효과의 전이범위를 넓은 범위에서 알아보기 위한 것이었다.

각도 특이성의 존재와 범위는 몇 가지 요소에 의해 결정될 수 있는데 훈련을 위해 선택된 관절각도, 그리고 훈련의 강도와 기간이다. 훈련을 위해 선택된 관절각도에 관한 특이성은 근육의 길이가 신장된 자세에서 훈련할 때 보다는 근육의 길이가 단축된 자세에서 훈련할 때 가장 명백하게 나타난다. Thepaut-Mathieu 등(1988)은 세 개의 다른 각도(25°, 80°, 120°)에서 등척성 팔꿈치관절 굴곡을 실시한 세 개의 실험군을 대조군과 비교하였다. 그 결과 근육의 길이가 단축된 자세에서 훈련한 경우(25° 팔꿈치관절 굴곡)의 힘의 증가는 훈련각도에 국한되었으며(운동각도에서 20° 떨어진 각도에서만 힘의 증가가 보고), 근육의 길이가 신장된 자세(120° 팔꿈치관절 굴곡)에서 훈련한 경우에는 훈련각도에 국한되지 않고 넓은 범위에서 힘의 증가가(운동각도로부터 75° 떨어진 각도에서도 힘의 증가가 보고) 있었다고 보고하였다. 또한 Bandy와 Hanten(1993)은 107명의 여성을 네 개의 군으로 나누어(30°, 60°, 90°, 운동을 하지 않는 대조군) 8주간 넙다리네갈래근(quadriceps femoris muscle)을 대상으로 등척성 운동을 실시하였다. 그 결과 30°와 60°에서 훈련한 군은 각도에 대한 특이성을 보였으나 90° 각도에서 훈련한 군은 75° 떨어진 각도인 15° 뿐만 아니라, 전반적인 토크값과 근전도 활동성의 증가가 나타났다고 보고하였다. 따라서 일반적으로 근육의 길이가 단축된 자세에서 등척성 훈련을 한 연구결과들은(Gardner, 1963; Belka, 1968; Lindh, 1979; Kitai와 Sale, 1989) 등척성 수축을 통해 얻어진 근력강화가 운동이 수행된 관절각도에 매우 민감하기 때문에, 전체 관절가동범위의 근력강화를 위해서는 전체 운동범위 중 여러 각도에서 훈련이 수행되어야 한다고 주장한다(Fleck과 Schutt 1983). 그러나 본 연구결과에서는 안쪽넓은근의 길이가 단축된 자세인 30° 훈련군에서도 훈련 전이효과가 나타나 근 길이에 따라 각도 특이성을 보인다는 Thepaut-Mathieu 등(1988)의 연구결과와 차이가 있다. 이는 훈련방법이나 훈련근육, 훈련강도, 훈련기간 등이 다른 연구와 차이가 있기 때문인 것으로 사료된다. 본 연구결과는 단축된 근 길이에서 훈련할 경우에도 훈련각도에서만 힘의 증가를 보이지 않고, 훈련하지 않은 다른 각도에서도 훈련의 전이효과가 나타날 수 있다는 것을 제시한다.

중간범위에 대한 연구로는 Marks(1994)의 골 관절염 환자를 대상으로 한 연구결과가 있다. 연구결과에 의하면 골관절염이 있는 환자에게 중간범위에서 고강도 등척성 무릎

신전 운동을 수행하게 했을 때, 훈련각도에서 무릎신전의 토크값 향상이 있었을 뿐만 아니라 훈련각도의 30° 범위 내에서도 토크값이 향상되었다. 반면, 특이성이 없었다는 연구결과도 있다(Knapik 등, 1983).

근육의 길이가 신장된 자세에서 등척성 훈련을 한 연구결과들은 전반적인 힘의 증가를 보고하였다. 본 연구결과에서도 힘의 증가가 훈련각도인 90°와 훈련하지 않은 다른 각도인 30°와 60°에서도 나타나 훈련 전이효과가 있었다. Meyers(1967)는 등척성 팔꿈치 굽힘력을 90°와 170°에서 33명을 대상으로 연구하였다. 그 결과 운동각도인 170°와 운동하지 않은 90° 모두에서 힘의 유의한 증가가 나타났다. Knapik 등(1983)도 12명을 대상으로 90°에서 등척성 팔꿈치 폄 운동프로그램을 시행하였다. 그 결과 운동각도뿐만 아니라 다른 각도인 70°와 110°에서도 등척성 수축력의 유의한 증가가 있었다. 그는 한 각도에서의 등척성 훈련은 훈련각도로부터 팔꿈치 관절이 20° 떨어진 위치에서도 근수축력을 증가시킨다고 결론지었는데 이러한 연구결과들은 본 연구결과와 유사하다.

근 피로 각도 특이성에 관한 본 연구결과는 근육의 길이가 단축된 자세일 때 보다는 근육의 길이가 신장된 자세일 때 훈련의 전이효과가 나타났다. 즉, 30° 훈련군에서는 훈련각도인 30°에서만 훈련 전에 비해 훈련 후 피로지수가 유의하게 낮아져 피로도의 향상이 있었다(p<0.05). 그러나 훈련하지 않은 각도인 60°와 90°에서는 훈련 전후간에 피로지수의 유의한 차이가 없었다. 피로지수에 대한 훈련 전후 변화량을 종속변수로 하여 각도 별로 분산분석 한 결과 30°와 90°간에 유의한 차이를 보여(p<0.05) 운동효과가 훈련각도에 국한되었다. 반면, 90° 훈련군에서는 훈련각도인 90° 뿐만 아니라 훈련하지 않은 각도인 30°와 60°에서도 훈련 전에 비해 훈련 후 피로지수가 유의하게 낮아졌다. 훈련 전후 변화량에 대한 각도 별 분산분석에서는 유의한 차이가 없어, 넓은 범위의 훈련 전이효과가 있었다. 따라서 근육의 길이가 단축된 자세인 30° 보다는 근육의 길이가 신장된 자세인 90°에서 운동하는 것이 근 피로감소에 대한 전이효과를 얻을 수 있을 것이다.

4.4 연구의 제한점과 앞으로의 연구방향

본 연구결과들은 토대로 안쪽넓은근의 등척성 운동계획 시 근 피로와 토크값의 생성 그리고 훈련의 전이효과를 고려한다면, 피로지수가 높고 토크값의 생성이 적으며 훈련 전이효과가 발생하지 않는 30° 무릎 굴곡자세보다는 피로지수가 낮고, 토크값의 생성이 크며, 훈련의 전이효과가 발생하는 90° 무릎 굴곡자세에서의 등척성 운동을 계획하는 것이 바람직할 것이다.

본 연구의 제한점으로는 30°에서 90°까지로 범위를 제한하여 90° 이상으로의 전이효과를 알아보지 못하였다는 점과 넙다리네갈래근 중 안쪽넓은근만을 대상근육으로 선정하였다는 점이다.

관절각도 특이성의 정도는 여러 연구결과에도 불구하고 여전히 명백하지 않다. 각도 특이성은 운동하는 근육과 관절각도에 따라 다른 반응들을 나타내기 때문이다(Kitai와 Sale, 1989; Thepaut-Mathieu 등, 1988; Weir 등, 1994). 따라서 연구결과의 일반화를 위한 앞으로의 연구에서는 각도의 범위를 10° 단위로 좀 더 세분화하고 각도범위를 넓혀야 하며, 좀 더 다양한 근육을 대상으로 한 다각적인 연구가 필요할 것이다. 또한 건강한 사람이 아닌 등척성 훈련이 실제적으로 필요한 환자를 대상으로 한 연구가 필요하겠다.

5. 결 론

본 연구에서는 등척성 운동의 제한점으로 제시되고 있는 근 수축력에 대한 각도 특이성과 근 피로에 대한 각도 특이성, 그리고 훈련의 전이효과 범위를 알아보았으며, 근 길이에 따라 피로도의 차이가 발생하는지 알아보았다.

등척성 훈련의 전이효과 범위를 알아보기 위해 무릎 굴곡각도를 30°, 60°, 90°로 나누어 각도에 따른 피로지수, MVIC, MVIC 80% 유지시간을 측정하였고, 무릎각도 30°와 무릎각도 90° 훈련군으로 나누어 선택된 훈련각도에서 6주간 등척성 훈련을 한 후 재 측정하여 훈련 전과 비교하여 훈련의 전이효과 범위를 알아보았다.

본 연구결과, 근 길이가 단축된 30° 훈련군은 피로지수에서 훈련각도인 30°에서만 훈련효과가 나타나고, 다른 각도로의 훈련 전이효과가 없어 각도 특이성을 보였다. 그러나 상대적으로 근 길이가 신장된 90° 훈련군에서는 훈련각도뿐만 아니라 훈련을 하지 않은 다른 각도에서도 근 피로감소의 훈련 전이효과가 나타나 각도에 대한 특이성을 보이지 않았다. 또한 무릎 굴곡각도가 90°인 경우에는 무릎 굴곡각도가 30°일 때보다 MVIC 값이 크고, 피로지수가 낮아 무릎각도가 30°일 때보다는 무릎각도가 90°일 때 피로에 강하고 근 수축력 값이 크다는 것을 알 수 있었다. 따라서, 등척성 훈련 시 근 길이가 단축된 30° 무릎 굴곡각도에서 훈련하는 것보다는 피로에 강하고 근 수축력 값의 생성이 크며, 근 피로감소 효과의 전이가 발생하는 90° 무릎 굴곡각도에서 등척성 훈련을 하는 것이 효율적일 것이다.

참고 문헌

원종임, 등속성 운동 시 근전도 주파수 분석에서 얻은 피로지수의 특성, 박사학위논문, 연세대학교 대학원, 재활학과, 2001.

Aljure, E. F. and Borrero, L. M., The influence of muscle length on the development of fatigue in toad sartorius, *J Physiol*, 199, 241-252, 1968.

Arendt-Nielson, L., Gantchev, N. and Sinkjaer, T., The influence of muscle length on muscle fiber conduction velocity and development of muscle fatigue, *Electroencephalogr Clin Neurophysiol*, 85, 166-172, 1992.

Bandy, W. D. and Hanten, W. P., Changes in torque and electromyographic activity of the quadriceps femoris muscles following isometric training, *Phys Ther*, 73(7), 455-465, 1993.

Belka, D., Comparison of dynamic, static and combination training on dominant wrist flexor muscles, *Res Q*, 39, 241-250, 1968.

Doud, J. R. and Walsh, J. M., Muscle fatigue and muscle length interaction: Effect on the EMG frequency components, *Electromyogr Clin Neurophysiol*, 35, 331-339, 1995.

Edwards, R. H. T., Hill, D. K., Jones, D. A. and Merton, P. A., Fatigue of long duration in human skeletal muscle after exercise, *J Physiol*, 272, 769-778, 1977.

Fitch, S. and McComas, A. J., Influence of human muscle length on fatigue, *J Physiol*, 362, 205-213, 1985.

Fleck, S. J. and Schutt, R. C., Types of strength training, *Orthop Clin North Am*, 14, 449-458, 1983.

Gandevia, S. C. and McKenzie, D. K., Activation of human muscles at short muscle lengths during maximal static efforts, *J Physiol(Lond.)*, 407, 599-613, 1988.

Gardner, G., Specificity of strength changes of the exercised and nonexercised limb following isometric training, *Res Q*, 34, 98-101, 1963.

Geiringer, S. R., Anatomic localization for needle electromyography, 2nd ed., Philadelphia, HANLEY & BELFUS, INC, 1999.

Green, H. J. and Jones, S. R., Does post-tetanic potentiation compensate for low frequency fatigue?, *Clin Physiol*, 9, 499-514, 1989.

Kisner, C. and Colby, L. A., Therapeutic exercise, 4th ed., Philadelphia, F.A. Davis Co, 2002.

Kitai, T. A. and Sale, D. G., Specificity of joint angle in isometric training, *Eur J Appl Physiol*, 58, 744-748, 1989.

Knapik, J. J., Mawdsley, R. H. and Ramos, M. U., Angular specificity and test mode specificity of isometric and isokinetic strength training, *J Orthop Sports Phys Ther*, 5, 58-65, 1983.

Lindh, M., Increase of muscle strength from isometric quadriceps exercises at different knee angles, *Scand J Rehabil Med*, 11, 33-36, 1979.

Marks, R., The effects of 16 months of angle-specific isometric strengthening exercises in midrange on torque of the knee extensor muscles in osteoarthritis of the knee: a case study, *J Orthop Sports Phys Ther*, 20(2), 103-109, 1994.

McKenzie, D. K. and Gandevia, S. C., Influence of muscle length on human inspiratory and limb muscle endurance, *Respir Physiol*, 67, 171-182, 1987.

Meyers, C. R., Effects of two isometric routiners on strength size and endurance in exercised and nonexercised arms, *Res Q*, 38, 430-440, 1967.

Nordin, M. and Frankel, V. H., Basic biomechanics of the muschulo-skeletal System, third ed., Lippincott Williams & Wilkins, Inc., 2001.

Rassier, D. E., The effects of length on fatigue and twitch potentiation in human skeletal muscle, *Clin Physiol*, 20(6), 474-482, 2000.

Sacco, P., Mclntyre, D. B. and Jones, D. A., Effects of length and stimulation frequency of fatigue of the human tibialis anterior muscle, *J Appl Physiol*, 77, 1148-1154, 1994.

Taylor, S. R. and Rudel, R., Striated muscle fibers: inactivation of contraction induced by shortening, *Science*, 167, 882-884, 1970.

Thepaut-Mathieu, C., Van Hoecke, J. and Maton, B., Myoelectrical and mechanical changes linked to length specificity during isometric training, *J Appl Physiol*, 64, 1500-1505, 1988.

Weir, J. P., Ayers, K. M., Lacefield, J. F. and Walsh, K.L., Mechanomyographic and electromyographic responses during fatigue in humans: Influence of muscle length, *Eur J Appl Physiol*, 81, 352-359, 2000.

Weir, J. P., Housh, T. J. and Weir, L. L., Electromyographic evaluation of joint angle specificity and cross-training after isometric training, *J Appl Physiol*, 77, 197-201, 1994.

Weir, J. P., Housh, T. J., Weir, L. L. and Johnson, G. O., Effects of unilateral isometric strength training on joint angle specificity and cross-training, *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 70(4), 337-343,1995.

Weir, J. P., McDonough, A. L. and Hill, V. J., The effects of joint angle on electromyographic indices of fatigue, *Eur J Appl Physiol,* 73, 387-392, 1996.

Willems, M. E. T. and Stauber, W. T., Fatigue and recovery at long and short muscle lengths after eccentric training, *Med Sci Sports Exerc*, 6, 1738-1743, 2002.

저자 소개

❖ 송 영 희 ❖ tabby0628@hanmail.net
연세대학교 이학박사
관심분야: 통증, 노인물리치료

❖ 권 오 윤 ❖ kwonoy@yonsei.ac.kr
계명대학교 보건학 박사
현 재: 연세대학교 보건과학대학 물리치료학과 학과장
관심분야: 운동손상증후군 진단 및 관리, 동작분석

논 문 접 수 일 (Date Received) : 2006년 09월 04일
논 문 수 정 일 (Date Revised) : 2006년 10월 26일
논문게재승인일 (Date Accepted) : 2006년 11월 12일