

플라이오메트릭스 트레이닝이 족관절 운동 및 점프수행력에 미치는 영향

일본 동해학원대학교 스포츠건강학부, 일본 국립장수의료센터연구소 예방개발부

김 흥 열

Effects of Plyometric Training on Ankle Joint Motion and Jump Performance

Heung Youl Kim, PhD

School of Sport and Health Science, Tokai Gakuen University, Miyoshi,
Department of Preventive Medicine, National Center for Geriatrics and Gerontology, Obu, Japan

The purpose of this study was to quantify the effect of plyometric training (PT) in changes of jump abilities and ankle joint motions on repeated-rebound-jumps exercise without buffer function of lower limb joints. Seven female collegiate runners executed 10-repeated rebound jumps training (10 RJ) on a switch mat with maximum effort. Each subject executed the training program twice a week for 5 consecutive weeks. Parameters of repeated-rebound jumps training involved jump height (m), the contact time (s), flight time (s), and rebound jumps index (=RJ-index). Three-dimensional ankle joint kinematics of each subject were captured using ten motion capture systems (250 Hz). As a result, RJ-index, jump height, and flight time were increased significantly between pre-and post-test ($p < 0.001$). But, the contact time decreased significantly. The relationships between rebound jumps index and jump height and between rebound jumps index and the durations of contact phase were highly correlated ($r=0.858$, $r=-0.739$; $p < 0.001$). In addition, the time (%) between start and finish phase in the dorsiflexion angle of ankle joint was reduced significantly between pre-and post-test ($p < 0.001$). The repeated-rebound-jumps exercise was shown to have an effect on improvement in stretch-shortening cycle (SSC) performance of lower limb joints in distance runners. The RJ-index and the time between start and finish phase in the dorsiflexion angle of ankle joint was shown to be a valid evaluation index of SSC performance. Therefore, repeated-rebound-jumps exercise is a significant training protocol where ankle behavior improves and where the performance of stretch-shortening cycle is enhanced.

Key Words: Plyometric training, Ankle joint motion, Jump performance, RJ-index

서론

모든 스포츠 트레이닝의 목적은 운동수행이나 경기에 요구되는 신체적, 정신적 요소를 극대화하는 것에 중점을 두고 있으며, 스포츠 종목의 특이성에 맞는 전문화된 트레이닝의 적용은 중요하다고 할 수 있다. 특히 최대근력과 파워의 획득은 모든 스포츠 종목의 필수요소라 말할 수 있으며, 그중에서

Received: March 2, 2012 Revised: May 24, 2012

Accepted: May 24, 2012

Correspondence: Heung Youl Kim, PhD

School of Sport and Health Science Tokai Gakuen University,
Nishinohara, Ukiagi-cho, Miyoshi-city, Aichi 474-0207, Japan

Tel: +81-561-36-9706, Fax: +81-561-36-9706

E-mail: hanulhanbyeol7374@hotmail.co.jp

도 육상, 농구, 배구와 같이 최대 점프능력이 요구되는 스포츠 종목에서 플라이오메트릭스 트레이닝(plyometric training, PT)의 도입은 폭발적인 파워능력을 배양하기 위한 방법으로 널리 이용되고 있다.

그리고 PT에 관한 다양한 연구들¹⁻⁶⁾이 이루어지고 있으나 관절의 거동 변화에 미치는 효과에 대한 연구는 지금까지 보고된 사례가 없었다. 즉, PT는 빠르고 강한 신장-단축 사이클(stretch-shortening cycle)을 응용한 훈련으로, 근건복합체(muscle-tendon complex, MTC)의 변화뿐만 아니라 족관절의 운동수행력 개선에도 도움이 될 것으로 생각된다. 이에 본 연구는 비교적 단순한 동작의 PT(연속 리바운드 점프[rebound jump, RJ])를 5주간 실시하여 PT가 족관절의 거동 변화와 점프수행력에 미치는 영향을 규명하고자 하였다.

연구 방법

1. 대상자

본 연구의 대상은 리바운드 점프(RJ)와 같은 PT경험이 적고, 주 4회 이상 지구력 훈련을 하고 있는 대학 여자육상 선수(중·장거리) 7명(연령, 20.0±1.73세; 신장, 160.8±4.55 cm; 체중, 50.6±3.32 kg)을 피험자로 선정하였다. 본 실험에 앞서 대상자에게는 실험의 목적 및 내용에 대해 자세한 설명을 하여, 참가 동의를 받았다.

2. Training protocol

대상자는 최대노력으로 리바운드 점프 트레이닝을 주 2회 5주간 실시하였다. 트레이닝은 1회 6세트씩 반복하였으며, 1세트의 점프 횟수는 10회 연속 리바운드 점프를 실시하였다. 점프 동작은 양손을 허리에 올린 자세(시작)에서 무릎과 고관절의 완충 동작을 최대한 이용하지 않고 족관절의 배측 굴곡과 저측 굴곡을 의식한 동작으로 실시하였다. 한편 트레이닝 실시 전에 피험자들이 점프과제를 무리 없이 수행할 수 있도록 충분한 몸풀기 시간을 부여하였으며, 세트 간의 충분한 휴식 시간도 설정하였다. 또한, 대상자 전원이 PT 경험이 부족하였기 때문에 1차 테스트 전(pre-test)에 충분한 구두 교육시간을 설정하여 족관절의 기능해부학적 거동과 MTC의 신전-단축 사이클에 대한 메커니즘을 설명하여, PT에 대한 이해와 본 연구에 대한 동기유발을 유도하였다. 이후 추가적인 동작에 관한 구두 설명은 실시하지 않았다. 따라서 대상자는 매주 실시하는 훈련을 통해 대형스크린에 투영된 자신의 목표치를

주시하면서 스스로 동작 패턴을 학습할 수 있도록 유도하였다. 이때 최초 목표치의 설정은 1주차 트레이닝에 앞서 실시된 1차 테스트(pre-test)에서 최고 점프 결과치를 채택하여 3주간의 목표치로 설정하였다. 이후 점진성의 원리에 입각한 부하 설정을 위해 3주차 트레이닝 종료 후 개인의 점프 목표치를 상향 조정하였다. 목표치 설정은 각 개인의 3주간 훈련 중에 기록한 데이터를 기준으로 가장 높이 도약한 상위 10회 데이터의 평균값으로 설정하였다.

그리고 점프 중 도약높이, 체공시간, 접지시간, rebound jump index (RJ-index) 등 점프 변인들을 실시간으로 분석하기 위해 전용 점프매트(Multi-Jump-Tester IFS-31D, DKH Inc., Tokyo, Japan)가 사용되었으며, 이때 실시간으로 나타나는 점프 목표치(도약높이)를 피험자의 전방에 설치된 대형스크린에 투영시켜, 자신의 점프 결과를 확인하면서 트레이닝을 실시할 수 있도록 설정하였다.

3. Pre-test와 post-test에 대한 점프능력의 평가

본 연구에서는 리바운드 점프 능력을 평가하기 위해 전용 점프매트를 이용하여 점프 중의 체공시간(t_a)과 접지시간(t_c)을 측정하여, 도약높이($h=1/8 \times g \times t_a^2$)를 산출하였다⁷⁾. 또한 접지시간(t_c)과 도약높이(h)로부터 RJ-index (h/t_c)를 산출하였다. 여기서 g 는 중력가속도를 가리키고 있으며, 연구결과에 사용한 데이터는 1세트 10회 연속 점프를 2세트 실시하여, 각 세트의 연속 5회분(중간치) 총 10회분을 채택하였다. 테스트는 트레이닝 실시 전(pre-test), 후(post-test)로 나누어서 실시하였다.

4. 운동학 데이터의 수집과 평가

연구 대상자는 지면반력기(KISTLER type 9821B, Winterthur, Switzerland)위에서 리바운드 점프(RJ) 평가와 같은 방법으로 연속 10회 점프를 2세트 실시하였다(Fig. 1). 세트별 연속 5회분

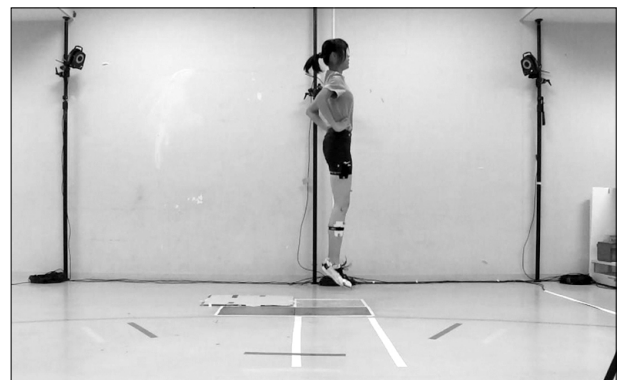


Fig. 1. Experimental setup of rebound jump test.

(중간치) 총 10회분을 분석 데이터로 채택 그 결과를 평균치로 변환하였다. 이때 지면 반력은 샘플링 주파수 1,000 Hz로 기록하였다. 동시에 10대의 광학식 3차원 모션 캡처 시스템(Vicon-MX, Oxford Metrix Group, Oxford, UK)을 이용하여, 골반과 하지의 해부학적 위치에 부착한 반사 마커를 샘플링 주파수 250 Hz로 3차원 위치좌표를 기록하였다. 그 후 3차원 위치좌표는 마커의 좌표 성분별로 최적 차단주파수⁸⁾를 산출하여, Winter⁹⁾의 4차 Butterworth형 저역 필터를 이용하여 평균 차단 주파수 18 Hz로 스무딩(smoothing)하였다. 또한, 점프 중의 접지구면(stance phase)의 결정은 지면 반력 데이터의 수직성분이 20 N을 초과하였을 때를 접지(contact)로 정의하고, 20 N보다 작은 힘이 발생하였을 때 시각을 도약구면(take-off)으로 정의하였다. 연속 도약 중의 각 사이클(10회)의 시각(1 cycle: 도약 → 체공 → 접지 → 도약)은 각각 100%로 정규화하여 평균치로 변환하였다. 하지분절에 대한 족부의 3차원 각도는 Cole 등¹⁰⁾의 방법을 채택한 Cardan 각도로 산출하였다. 각도의 정의는 Xyz 회전 순으로 실시하였으며, 각 분절(하퇴, 족부)에 정의한 이동좌표계를 정지좌표계의 각축에 정렬하기 위해

Areblad 등¹¹⁾의 방법을 이용하였다.

5. 통계처리

통계적인 유의성을 검정하기 위해 운동학 데이터는 최대치로 변환하여 각각 평균(mean)±표준편차(standard deviation)로 표기하였다. 측정 항목의 pre-test와 post-test 사이의 점프능력(RJ-Index, 접지시간, 체공시간, 도약높이) 및 족관절 거동 변화의 차이를 비교하기 위해 paired t-test를 실시하였다. 또한, RJ-Index와 접지시간, 체공시간, 도약높이와의 상관관계 및 족관절 거동 간의 상관관계를 설명하기 위해 Pearson의 상관분석을 실시하였다. 통계 처리는 The Statistical Analysis System release 9.1.2. (SAS Institute Inc., NC, USA)를 사용하였다. 검정에 사용된 α 수준은 0.05이하로 설정하였다.

결 과

RJ-index, 도약높이, 체공시간은 pre-test보다 post-test에서 유의한 증가를 보였으나($p < 0.001$, $p < 0.001$, $p < 0.001$), 접지

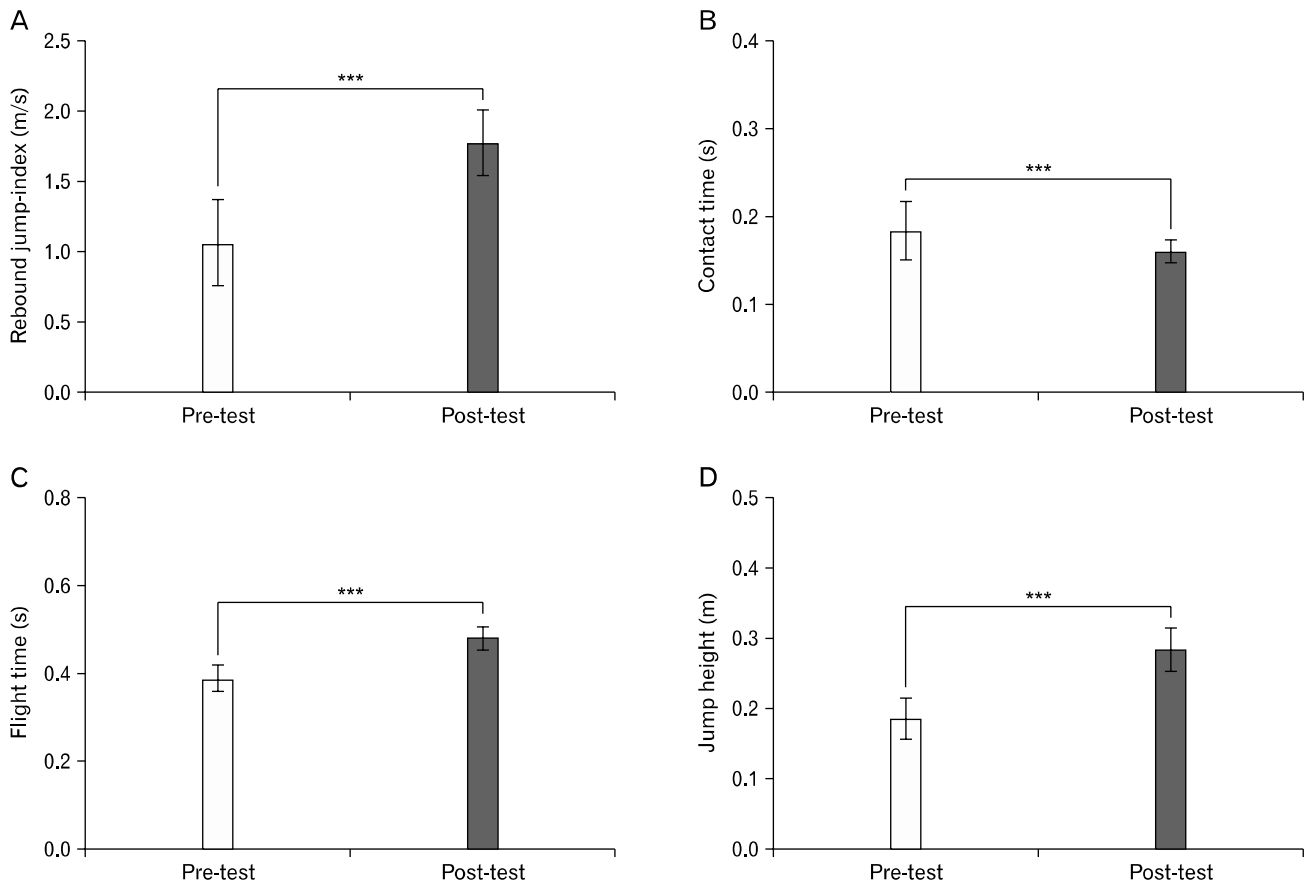


Fig. 2. Comparisons of pre and post-test in each parameter: (A) Rebound jumps index, (B) contact time, (C) flight time and, (D) jump height. $p < 0.001$ ***.

시간은 유의하게 단축되었다($p < 0.001$) (Fig. 2). 한편, 변인 간 상관분석에서 RJ-index와 도약높이 사이에는 통계적으로 유의한 상관관계를 보였다($r = 0.907$, $p < 0.001$) (Fig. 3A). 그러나 RJ-index와 접지시간 사이에는 역상관 관계를 나타내고 있다($r = -0.802$, $p < 0.001$) (Fig. 3B). 또한, RJ-index와 체공시간 사이에는 유의한 상관관계를 보였다($r = 0.903$, $p < 0.001$) (Fig.

3C).

Table 1은 대상자의 pre-test와 post-test 사이의 점프 변인의 결과를 가리키고 있으며, RJ-index, 도약높이, 체공시간은 전 대상자에서 유의한 증가를 보였다. 한편, 접지시간에서는 2명의 대상자를 제외한 나머지 대상자에서 유의한 감소를 보였다.

배측 굴곡 각도의 최대치(maximum dorsiflexion angle, MDA)

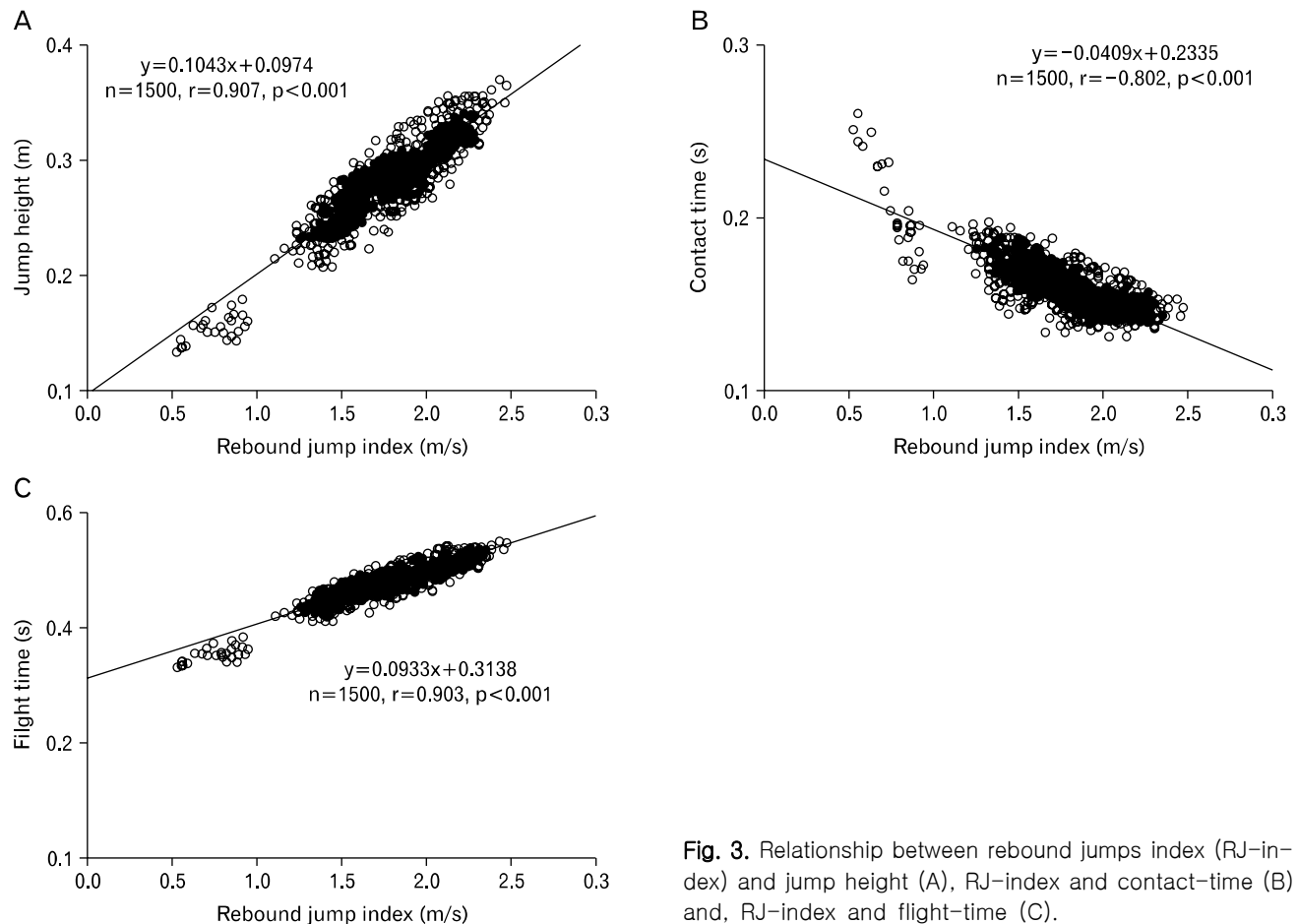


Fig. 3. Relationship between rebound jumps index (RJ-index) and jump height (A), RJ-index and contact-time (B) and, RJ-index and flight-time (C).

Table 1. Comparison of the rebound jump parameters in each subject

Subject	Pre-test				Post-post			
	RJ-index (m/s)	Contact-time (s)	Flight-time (s)	Jump-height (m)	RJ-index (m/s)	Contact-time (s)	Flight-time (s)	Jump-height (m)
1	1.11±0.12	0.18±0.01	0.40±0.01	0.20±0.01	2.15±0.11 [†]	0.16±0.01*	0.53±0.01 [†]	0.34±0.01 [†]
2	0.88±0.03	0.19±0.01	0.37±0.01	0.17±0.01	1.69±0.05 [†]	0.16±0.01 [†]	0.47±0.01 [†]	0.27±0.01 [†]
3	1.40±0.05	0.15±0.01	0.42±0.01	0.21±0.01	1.84±0.06 [†]	0.16±0.01 ^{ns}	0.49±0.01 [†]	0.29±0.01 [†]
4	0.57±0.04	0.25±0.01	0.34±0.01	0.14±0.01	1.57±0.08 [†]	0.18±0.01 [†]	0.48±0.01 [†]	0.29±0.01 [†]
5	1.36±0.05	0.16±0.01	0.42±0.01	0.21±0.01	1.87±0.06 [†]	0.14±0.01 [†]	0.46±0.01*	0.26±0.01 [†]
6	1.32±0.08	0.16±0.01	0.41±0.01	0.21±0.01	1.86±0.10 [†]	0.16±0.01 ^{ns}	0.49±0.01 [†]	0.29±0.01 [†]
7	0.78±0.06	0.20±0.01	0.36±0.01	0.15±0.01	1.45±0.03 [†]	0.17±0.01 [†]	0.44±0.01 [†]	0.24±0.01 [†]

Values are presented as mean±standard deviation.

RJ-index: rebound jumps index, ns: not significant.

* $p < 0.01$, [†] $p < 0.001$.

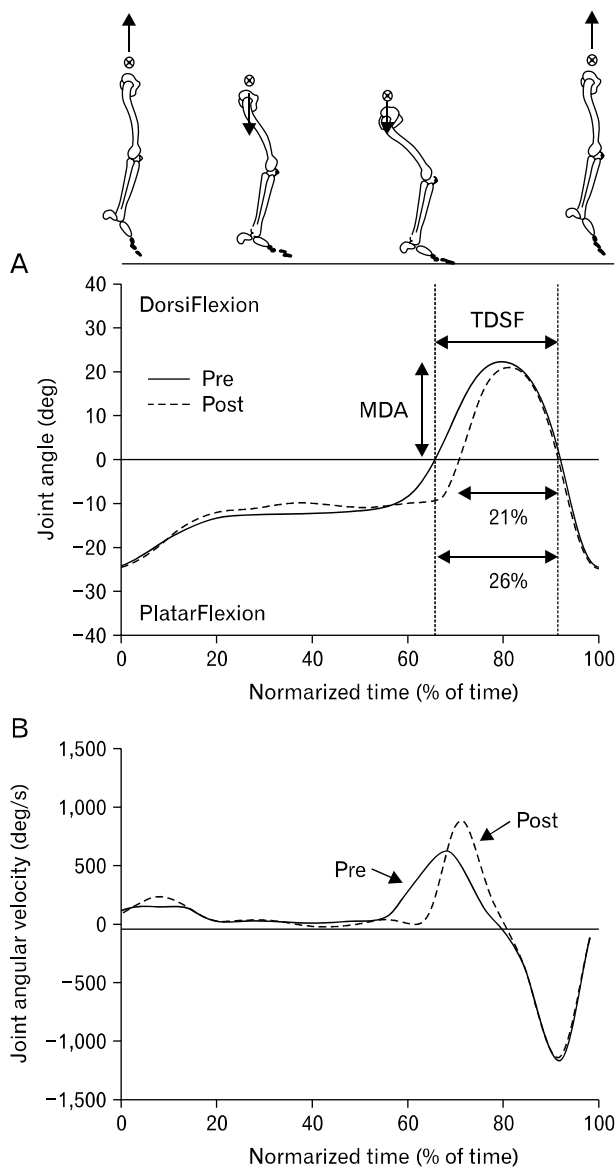


Fig. 4. Changes in mean ankle joint angle (A) and angular velocity (B) during 10-repeated rebound jump between pre and post-test. The start of the movement was taken from the instant of minimum force and terminated at the instant of take-off. Flight phase occurred between the instant of take-off and the instant of contact with the forceplate (landing). Contact phase in each subject is normalized as 100%. MDA: maximum dorsiflexion angle, TDSF: time period of dorsiflexion between start and finish phase.

는 pre-test와 post-test 사이에서 뚜렷한 파형의 변화는 보이지 않았지만(Fig. 4A), 통계학적으로는 유의차를 볼 수 있었다($p < 0.01$) (Fig. 5A). 한편, 배측 굴곡 시작(start)에서 배측 굴곡 종료(finish)까지의 시간(time period of Dorsiflexion between start and finish, TDSF)은 pre-test보다 post-test에서 현저하게

단축되었으며(Fig. 4A), 통계학적으로도 유의한 차이를 나타내고 있다($p < 0.001$) (Fig. 5B). 또한, 각 변위-시간 관계를 1차 비분하여 얻은 각속도의 변화에서도 post-test에서 크게 증가하였다(Fig. 4B).

Fig. 6는 TDSF와 RJ-index, TDSF와 MDA의 상관관계를 나타내고 있다. RJ-index와는 유의한 역상관 관계를 보였으나($r=0.802$, $p < 0.001$) (Fig. 6A), MDA와의 사이에는 유의한 정상관 관계를 보였다($r=0.723$, $p < 0.001$) (Fig. 6B).

고 찰

연속 리바운드 점프 트레이닝이 족관절의 거동 변화와 점프수행력에 미치는 영향을 검토한 결과, 배측 굴곡 시작에서 종료 시까지 소요되는 시간(TDSF)이 짧을수록 RJ-index의 값이 증가하는 것을 알 수 있었다. 한편, 이 시간이 길어지면 RJ-index의 값은 반대로 감소하는 경향을 보이고 있으며, MDA는 오히려 증가하였다. 즉, 접지시간의 단축은 RJ-index의 수치를 높이는 것으로 나타났으며, RJ-index는 도약높이를 결정하는 중요한 변인으로서 선행연구^{7,12)}와 일치하였다. 즉 도약높이(h)와 접지시간(t_c)으로 산출되는 RJ-index (h/t_c)는 MTC의 신전과 단축 사이클의 운동 수행력의 지표로써 사용되고 있다^{7,12-14)}. 또한, 3가지 항목(RJ-Index, 체공시간, 도약높이)의 점프 변인에서 대상자 전원이 테스트 전후로 큰 폭의 증가량을 보였으며, 접지시간은 2명의 대상자를 제외하고 단축되었다. 이와 같은 결과는 본 PT가 점프 수행력 발달에 효과가 있다는 것을 의미함과 동시에 개인에 따른 발달의 차이를 시사하고 있다.

선행연구에 의하면 점프동작과 같이 최대 도약높이를 요구하는 스포츠에서 신체중심을 가속시키는 효과적인 방법으로 고관절 신전 근력의 중요성¹⁵⁾이 강조되고 있으며, drop jump와 리바운드 점프와 같이 단시간에 파워 출력을 수행함으로써 도약능력을 향상할 수 있다고 하였다¹⁶⁻¹⁹⁾. 또한, PT의 생체역학적 특징은 근육(muscle)의 원심성 활동에서 구심성 활동으로 빠르게 전환되는 과정에서 생성되는 MTC의 탄성에너지 효율을 높이기 위한 기전으로 설명되고 있다^{20,22)}. 한편 Zushi와 Takamatsu¹³⁾는 리바운드 점프를 수행할 때 접지시간의 단축에는 동원되는 주동근의 예비신장(preliminary stretching)을 강조하고 있다. 그러나 본 연구에서는 족관절의 거동변화에 통계적으로 유의한 트레이닝의 효과를 확인할 수 있었으며, 특히 배측 굴곡 시작에서 종료 시까지 소요되는 시간(TDSF)이 유익하게 단축하였다. 또한, 배측 굴곡의 최대치(MDA)는 post-test

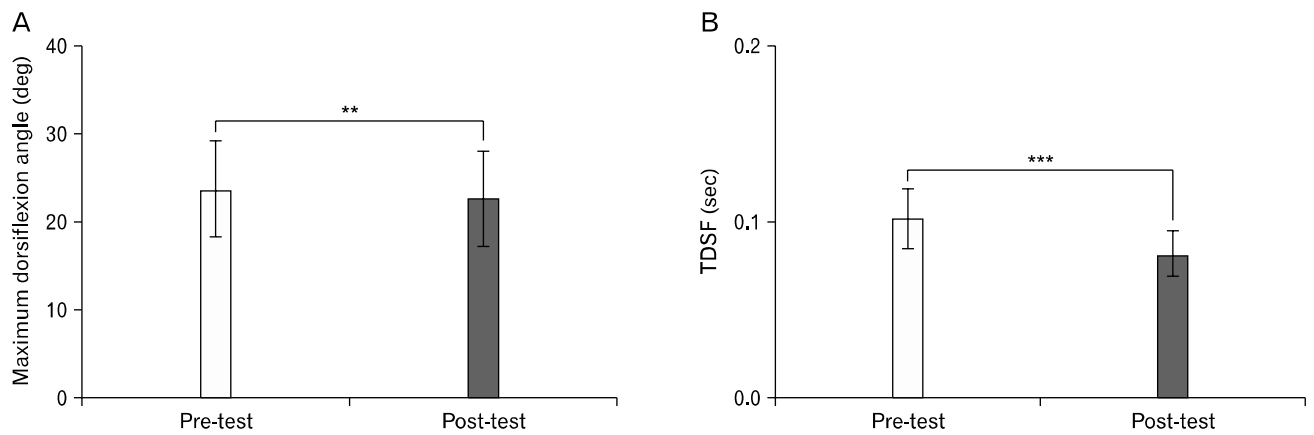


Fig. 5. Comparisons of pre and post-test in maximum dorsiflexion angle (MDA) and time period of dorsiflexion between start and finish phase (TDSF): (A) MDA and, TDSF (B). ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$.

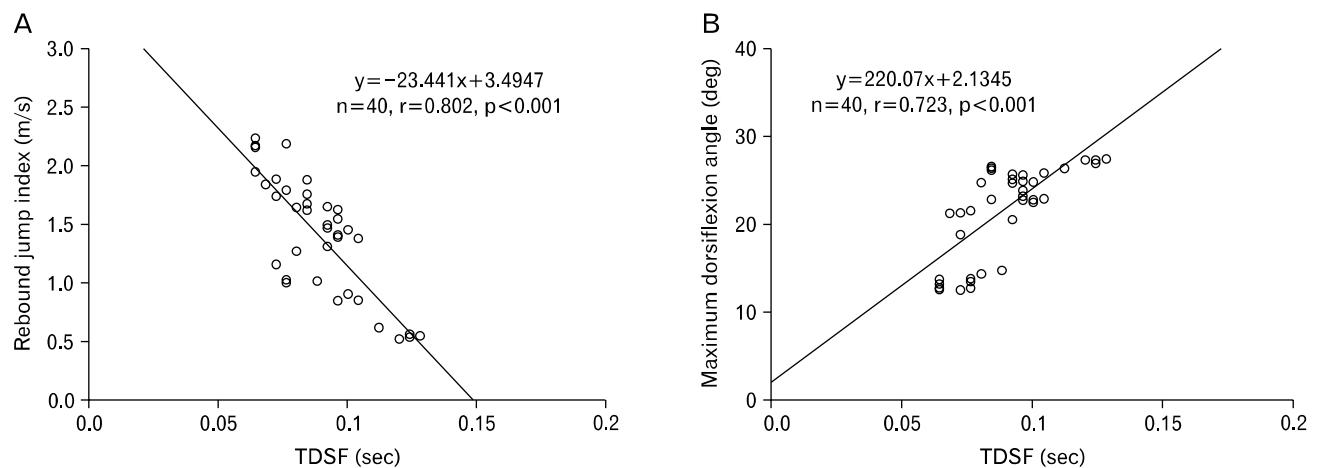


Fig. 6. Relationship between time period of dorsiflexion between start and finish phase (TDSF) and rebound jumps index (A) and, TDSF and maximum dorsiflexion angle (B).

에서 유의하게 감소하였다. 하지만 각변위-시간관계를 나타내고 있는 평균 곡선에서 pre-test와 post-test 사이에 파형의 최대치에서는 큰 차이는 볼 수 없었다.

즉 배측 굴곡의 최대치(MDA)가 테스트 사이에서 비슷한 양상을 보이고 있다는 것은 Stretch 국면으로 정의되는 배측 굴곡에서 MTC에 축적되는 탄성 에너지량 또한 비슷하다는 것을 의미할 수 있다. 하지만 최대 각속도의 변화가 post-test에서 뚜렷하게 증가하고 있다는 사실로 보아, 이후 Shortening 국면으로 정의되는 저측 굴곡에서 방출되는 파워 출력의 크기는 양자 간에 큰 차이를 보일 것으로 생각된다. 그 이유는 MTC 조직의 최대 이동 거리가 같더라도 신전 속도에 따라 신경근 지배 시스템의 생체역학적 기전이 다르기 때문이다. 즉 근생리학적으로 신전에 의한 근방추의 활성화는 반사적인 근수축을 유발하여, 장력 발생을 생성할 수 있다. 그러나 신체

중심을 상승시킬 정도의 파워를 생성하기는 현실적으로 불가능하므로 이에 부합되는 능동적인 근활동이 필요하며, 동원되는 신전반사와 능동적 근활동의 타이밍은 점프 수행력 향상에 중요한 역할을 할 것으로 해석할 수 있다. 따라서 본 연구와 같이 MDA의 크기가 대부분 같아도 TDSF의 소요 시간이 감소하면 MTC의 거동에 영향을 미칠 수 있다고 생각되며, 이에 따른 각속도의 증가가 점프능력의 발달로 이어졌다고 해석할 수 있다.

즉 배측 굴곡 시작에서 종료까지 소요되는 시간이 짧을수록 MTC에 축적된 탄성에너지를 보다 효율적으로 이용할 수 있다는 것을 의미하며, 실제로 최대 각속도의 출현 지점이 저측 굴곡에서 나타나지 않고 TDSF 사이에서 보이고 있다는 점을 유추해 볼 때, 이 지점에서 강하고 빠른 저측 굴곡 운동은 신체 중심을 상승시키기 위해 중요한 역할을 하는 것으로

생각된다. 한편 배측 굴곡 종료 이후에 나타나는 저측 굴곡은 TDSF에서 일어난 운동의 반동에 의한 효과로 해석된다.

따라서 본 연구와 같이 빠르고 강한 신장-단축 사이클을 응용한 연속 점프 트레이닝의 실시는 근 신경 적응(neural mechanism adaptation)의 발달과 함께 족관절 운동의 타이밍 개선에 매우 효과적인 방법으로 생각되며, 조직에 축적된 탄성 에너지를 효율적으로 재이용하기 위한 신장-단축 사이클 운동 수행력의 발달로 이어질 것으로 해석된다. 또한, 전용 점프 매트와 해석용 프로그램을 적절히 사용함으로써 대상자는 트레이닝 중에 자신의 점프 결과에 대한 평가와 수정을 할 수 있어, 동작에 대한 학습 효과와 동기 유발을 이끌어 내는데도 큰 도움이 되었다고 해석된다.

그러나 스포츠 종목에 따라서는 주 운동방향이 수직 방향으로 한정되어 있지 않고, 실제로는 다양한 방향으로 특정 운동이 수행되고 있기 때문에, 이에 따른 관절의 회전운동 형태도 종목의 특이성에 따라 달라질 수 있다. 따라서 PT의 종류에 따른 관절운동의 특징을 규명하는 것은 종목별 PT 방법의 프로그램 작성 시, 보다 의미 있는 트레이닝 효과를 기대할 수 있을 것이다. 그리고 근 활동과 MTC의 거동 변화를 기록하지 못한 점은 본 연구의 한계였다. 따라서 후속 연구에서는 이러한 문제점을 보완함과 동시에 여러 방향으로 PT를 실시하여 이에 따른 점프 변인과 관절 운동의 변화를 규명해야 할 것으로 판단된다.

본 연구는 5주 동안 연속 리바운드 점프 트레이닝을 실시하여 족관절의 거동변화와 도약능력(RJ-Index, 접지시간, 체공시간, 도약높이)의 변화를 검토하였다. 결과, RJ-index, 도약높이, 체공시간은 pre-test보다 post-test에서 유의한 증가를 보였으나, 접지시간은 유의하게 단축되었다. 한편 배측 굴곡 시작에서 종료 시까지 소요되는 시간(TDSF)이 통계적으로 유의하게 단축되었으며, 배측굴곡의 최대치(MDA)도 post-test에서 유의하게 감소하였다. 특히 MDA의 크기가 대부분 같아도 TDSF의 소요 시간의 단축은 점프 수행력을 증가시켰다. 따라서 본 연구에서 실시한 PT는 MTC의 신장-단축 사이클(SSC)의 운동 수행력 개선에 도움이 될 뿐만 아니라 족관절의 거동변화에 긍정적인 효과를 나타내는 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

- Herrero JA, Izquierdo M, Maffiuletti NA, Garcia-Lopez J. Electromyostimulation and plyometric training effects on jumping and sprint time. *Int J Sports Med* 2006;27:533-9.
- Kubo K, Morimoto M, Komuro T, et al. Effects of plyometric and weight training on muscle-tendon complex and jump performance. *Med Sci Sports Exerc* 2007;39:1801-10.
- Arabatzi F, Kellis E, Saez-Saez De Villarreal E. Vertical jump biomechanics after plyometric, weight lifting, and combined (weight lifting + plyometric) training. *J Strength Cond Res* 2010;24:2440-8.
- Wu YK, Lien YH, Lin KH, Shih TT, Wang TG, Wang HK. Relationships between three potentiation effects of plyometric training and performance. *Scand J Med Sci Sports* 2010; 20:e80-6.
- Wilson GJ, Newton RU, Murphy AJ, Humphries BJ. The optimal training load for the development of dynamic athletic performance. *Med Sci Sports Exerc* 1993;25:1279-86.
- Young W, McLean B, Ardagna J. Relationship between strength qualities and sprinting performance. *J Sports Med Phys Fit* 1995;35:13-9.
- Zushi K, Takamatsu K, Takayoshi K. The specificity of leg strength and power in several sport athletes. *Jpn Soc Phy Educ* 1993;38:265-78.
- Yu B, Gabriel D, Noble L, An KN. Estimate of the Optimum cutoff frequency for the butterworth low-pass digital filter. *J Appl Biomech* 1999;13:318-29.
- Winter DA. Biomechanics and motor control of human movement. New York: Wiley; 1990.
- Cole GK, Nigg BM, Ronsky JL, Yeadon MR. Application of the joint coordinate system to three-dimensional joint attitude and movement representation: a standardization proposal. *J Biomech Eng* 1993;115:344-9.
- Areblad M, Nigg BM, Ekstrand J, Olsson KO, Ekstrom H. Three-dimensional measurement of rearfoot motion during running. *J Biomech* 1990;23:933-40.
- Young W, Wilson G, Byrne C. Relationship between strength qualities and performance in standing and run-up vertical jumps. *J Sports Med Phys Fitness* 1999;39:285-93.
- Zushi K, Takamatsu K. Determinants of ability to achieve ballistic stretch-shortening cycle movement: with special reference to strength and power. *Jpn J Phys Fit Med* 1995;44:147-54.
- Zushi K, Takamatsu K. Factors to shorten the contact time in rebound drop jump: with special reference to work done by the lower limb joints and anticipation of the landing. *Jpn Soc Phy Educ* 1995;40:29-39.
- Delecluse C. Influence of strength training on sprint running performance. Current findings and implications for training. *Sports Med* 1997;24:147-56.
- Tsiokanos A, Kellis E, Jamurtas A, Kellis S. The relationship between jumping performance and isokinetic strength of hip

- and knee extensors and ankle plantar flexors. *Isokinet Exerc Sci* 2002;10:107-15.
17. Fukashiro S, Kobayashi T, Wakayama A, Yanagi H, Kojima T. The comparison of power output developed with selected vertical jumps to two ergometer test. *Jpn J Sports Sci* 1993; 12:326-32.
 18. Chelly SM, Denis C. Leg power and hopping stiffness: relationship with sprint running performance. *Med Sci Sports Exerc* 2001;33:326-33.
 19. Iwatake J, Suzuki T, Nakamura N, Oda H, Nagasawa T, Iwakabe T. Relationship between anaerobic power on rebound jump and sprint running performance in track and field athletes. *Res Phys Educ* 2002;47:253-61.
 20. Komi PV. The stretch-shortening cycle and human power output. In: Jones NL, McCartney N, McComas AJ, editors. *Human muscle power*. Champaign (IL): Human kinetics; 1986. p. 27-39.
 21. Cavagna GA, Saibene FP, Margaria R. Effect of negative work on the amount of positive work performed by an isolated muscle. *J Appl Physiol* 1965;20:157-8.
 22. Komi P. Measurement of the force-velocity relationship in human muscle under concentric and eccentric contractions. In: Cerquidini S, Venerando A, Wartenweiler J, editors. *Medicine and sport series, Vol. 8, Biomechanics III*. Basel: Karger; 1973. p. 224-9.