<학술논문> DOI https://doi.org/10.3795/KSME-B.2017.41.4.277 ISSN 1226-4881(Print)
2288-5324(Online)

반동을 이용한 수직 점프 시 높이 변화에 따른 운동역학 및 상변화 시점에서의 지면반력 벡터 변화

김 세 영*†
* 한국기계연구원 로봇메카트로닉스연구실

Change in Countermovement Jump Strategy by Varying Jump Height Based on Simplified Framework for Center of Mass Mechanics

Seyoung Kim*†
* Dept. of Robotics and Mechatronics, Korea Institute of Machinery & Materials(KIMM)

(Received November 10, 2016 ; Revised December 30, 2016 ; Accepted January 4, 2017)

Key Words: Countermovement Jump(반동점프), Vertical Jump Strategy(수직점프전략), Resultant Force Vector(합력벡터), Force Advantage(힘이득), Ground Reaction Force(지면반력)

초록: 본 연구에서는 높이에 따른 점프 전략 변화를 이해하기 위해 반동을 이용한 수직 점프 시 상변화 시점에서의 지면반력 벡터가 높이에 따라 어떻게 변하는지 분석하였다; 반동과 추진 구간에서 유사한 힘 작용선을 갖는 수직 점프의 경우, 상변화 시점에서 반동의 이득을 나타내는 합력 벡터의 크기와 방향이 일정한 경향성을 가지고 높이에 따라 변화할 것이라 가정하였다. 9명의 청년군 모두는 정해진 5 종류의 높이를 총 5세트에 걸쳐 랜덤 방식으로 점프하였으며, 해당 높이를 유도하기 위해 지면으로부터 191 cm에서 221 cm 사이에 일정한 간격을 두고 마커를 배치하였다. 점프 높이가 증가함에 따라 반동 시 무게중심을 낮추고, 수평, 수직 방향의 힘을 증가시키는 것이 관찰되었는데, 이는 추진일을 증가시키기 위해 관절의 가용범위를 넓히고 초기 힘(또는 가속도) 이득을 늘리기 때문으로 생각된다.

Abstract: In this study, we investigated how a jumping strategy changes with an increase in the vertical jump height for a resultant ground reaction force (GRF) vector. We expected that the resultant force vector between two sequential motion phases (i.e., countermovement and push-off) of the countermovement jump would significantly change with the vertical jump height to take advantage of the resulting supportive force (i.e., an initial push-off force larger than the body weight) through the countermovement phase. Nine healthy young subjects were instructed to jump straight up to five different height levels ranging from 191 cm to 221 cm, and the kinematic and kinetic data were obtained in regular trials. The results showed that a lower center of mass position and larger resultant force vector were clearly observed in a higher jump, implying that the countermovement strategy changed with the vertical jump height to prepare for sufficient joint deviation and obtain a force advantage for larger push-off work.

1. 서 론

반동을 이용한 수직 제자리 점프는 낮게 웅크린 자세에서 바로 뛰어 오르는 Squat Jump에 비해 일반적으로 더 높은 점프 최대치를 보인다고 알려져 있다.[1,2] 이는 생리학적인 관점에서 근수축 단계 이전의 스트레칭이 힘 최대치 발현을 돕기 때문이라는 주장과,[2,3] 근육과 건이 탄성체 역할을 하여 반동 시 에너지가 저장되었다 방출되는 효과 때문이라는 연구결과[4,5] 등으로 해석될 수 있다. 이와 달리, 역학적인 관점에서는 반동을 하는 경우 추진 시작 순간에 수직 방향의 힘 이득을 전달 받게 되어 추진 구간 동안 무게중심에 가해지는 총 일의 양을 증가시키는데 유리하기 때문이라는 방식으로 힘-변위 그래프를 통해 이를 설명하였다.[1,6]

† Corresponding Author, seyoungkim@kimm.re.kr
© 2017 The Korean Society of Mechanical Engineers

반동 점프의 특징에 관한 연구는 체육, 공학을 비롯한 여러 분야에서 다양한 방식으로 진행되어 왔다. 다자유도 근골격계 모델을 이용하여 반동 시 주요 하지 근육의 힘, 파워 등을 예측하였으며,[7] 관절의 최대 토크치 및 파워 등 각종 운동역학 파라미터가 개인차에 미치는 영향을 분석하고,[8] 또한, 하지 관절의 일, 에너지 변환 등 관절 역학을 중심으로 연령별 차이를 이해하고자 하는[9] 등 점프에 관한 다양한 연구가 수행되어 왔다.

위와 같이 반동 점프의 비교 우위적 또는 고유한 특징에 관한 연구는 다양하게 수행되어 오고 있지만, 점핑 전략 변화에 관한 연구는 지극히 제한적이다. 최근, 점프 높이가 증가함에 따라 반동을 통해 얻는 수직 힘 이득 또한 비례하여 증가한다는 연구 결과가 발표되었으며,[6] 이는 반동 전략의 변화를 힘-변위 그래프 상에서 정량적으로 설명할 수 있는 계기가 되었다. 하지만, 해당 연구는 수직 방향의 지면반력 분석에만 국한되었으며, 실제 무게중심을 향하는 합력 벡터의 크기와 방향, 그리고 높이에 따른 성분 변화는 고려하지 않았다.

이를 보완하기 위해 본 연구에서는 점프 높이에 따른 반동의 전략 변화를 설명하기 위해 수평, 수직 방향 성분을 모두 포함하는 지면반력의 합력 벡터를 도입하였으며, 상변화 시 제안된 힘 벡터의 크기 및 방향 성분 변화를 관찰하고자 하였다. 반동을 통해 수직 힘 이득을 얻기 위해선 필연적으로 하향 모멘텀을 발생시키고 이를 제동하며 무게중심을 낮추는 과정을 거치게 되는데, 이 때, 무게중심을 향하는 합력 벡터 개념을 도입하면, 시상단면(sagittal plane) 상의 모든 힘의 크기와 방향 정보를 포괄할 수 있게 되어, 각 개별 방향의 기여도를 도식적으로 나타낼 수 있게 된다. 결과적으로, 본 연구는 무게중심 역학 관점에서 점프 높이 증가에 따른 반동 전략의 변화를 합력 벡터 개념을 이용하여 효율적으로 정량화시키고자 하였다.

2. 실험 및 해석 방법

2.1 피험자

하지 관련 병력이 없는 9명의 건강한 청년군(평균 나이, 27±2세; 평균 신장, 178±4 cm; 평균 질량, 71±5 kg)이 실험에 참가했다. 실험 시작 전 피험자 모두에게 실험의 목적 및 데이터 수집과 이용에 관한 모든 정보 등을 설명하였으며, KAIST 생명윤리위원회가 인정하는 동의서에 서명을 받은 후 파일럿 테스트 및 정규 실험을 진행하였다.

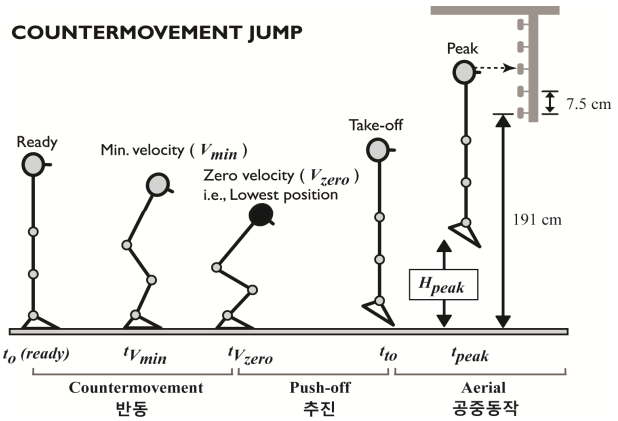

Fig. 1 Sequential steps of a standing vertical jump with countermovement action: countermovement, push-off, aerial, and landing(not shown in the figure)

2.2 실험 절차

모든 피험자는 각각 정해진 5종류의 높이를 총 5세트에 걸쳐 랜덤 방식으로 점프하였으며, 해당 높이를 유도하기 위해 지면으로부터 191 cm에서 221 cm 사이에 7.5 cm 간격을 두고 다섯 개의 검정색 마커를 배치하였다(Fig. 1). 이는 개별 피험자의 키를 기준으로 대략 10 %에서 35 %에 해당하는 높이였으며, 가장 높게 위치한 마커의 경우 Max. 점프가 가장 낮은 피험자를 고려하되 모든 피험자가 본인의 최대 점프 높이치 90 % 이상을 점프할 수 있도록 선정되었다.[6] 피험자는 양손을 골반에 위치 시킨 후 제자리에 선채 감독관의 지시를 기다렸으며, 마커의 번호가 불려지면 해당 마커에 눈높이를 맞출 수 있도록 수직 점프를 수행하였다. 모든 피험자는 요구되는 높이에 일관되게 점프할 수 있도록 정규 실험 전 감독관 입회하에 피드백을 받으며 여러차례 리허설 테스트를 진행하였으며, 정규 실험 시에는 각 세트 사이에 1분 이상의 휴식 시간을 가졌다.

2.3 데이터 수집

적외선 카메라(Hawk®, Motion Analysis, US)를 이용하여 피험자의 천골(sacrum; L5) 부위에 부착된 반사 마커의 3차원 좌표계 상에서의 공간 위치를 추적하였으며, 힘판(AccuGait®, AMTI, US)을 이용해 수직, 수평 방향의 지면반력을 측정하였다. 모든 데이터는 200 Hz 샘플링 속도로 수집되었으며, 모션 데이터의 경우 10 Hz, 힘 데이터의 경우 30 Hz의 차단 주파수를 갖는 5차 Butterworth 저역통

과 필터핑 과정을 거쳤다. 이 때, 필터링에 적용된 차단 주파수는 Residual Analysis 방법을 이용해 원 신호에서 백색잡음을 가장 잘 분리해 낼 수 있는 주파수로 선정되었다.[10~13]

모션 데이터와 지면반력 데이터는 무게중심의 속도와 위치를 계산하는데 사용 되었다. 수직 방향의 지면반력과 중력힘의 차이를 통해 무게중심의 수직 가속도 정보를 획득한 후 이를 적분하여 속도, 위치 정보를 예측하였으며, 천골 부위에 부착된 마커 데이터는 적분 상수로 활용되었다.[14,15] 피험자가 공중동작으로 진입하게 되는 시점에서의 무게중심의 수직 속도(V_{to})는 임펄스-모멘텀 방식을 적용하여 계산하였으며[식 (1)], 이를 이용하여 최대 도달 높이(H_{peak})를 다음과 같이 예측하였다[식 (2)].[1,6] 단, 공기저항은 고려하지 않았다.

$$V_{to} = \frac{1}{M} \cdot \int_{t_0}^{t_{to}} (F_{ver} - M \cdot g) dt \tag{1}$$

$$H_{peak} = V_{to} \cdot (t_{peak} - t_{to}) - \frac{1}{2} \cdot g \cdot (t_{peak} - t_{to})^2 + CoM_{ver}(t_{to}) - CoM_{ver}(t_0) \tag{2}$$

위 수식에서 M, F_{ver}, g, CoM_{ver}, t_o, t_{to}, t_{peak}는 각각 피험자의 질량, 수직 방향의 지면반력, 중력상수, 모션 카메라를 이용해 측정한 천골 마커의 수직 변위, 초기 시간, 공중동작 진입시간, 최대 높이까지 도달하는데 걸린 시간을 의미한다(Fig. 1). 예측된 최대 도달 높이(H_{peak})의 재검증은 천골에 부착된 마커의 변위 데이터를 이용하여 다음과 같이 수행하였다[식 (3)].

$$H_{peak} = CoM_{ver}(t_{peak}) - CoM_{ver}(t_0) \tag{3}$$

2.4 데이터 분석

첫째, 제자리 수직 점프 시 반동 및 추진 구간 동안의 무게중심 수직 변위[Fig. 2(a)], 수직 속도[Fig. 2(b)], 그리고 수직[Fig. 3(a)] 및 수평[Fig. 3(b)] 지면반력의 크기가 점프 높이에 따라 어떻게 변하는지 관찰하였다. 이 때, 반동 및 추진 구간의 경계면(i.e., Lowest position in Fig. 1)에서 점프 높이에 따라 무게중심의 수직 변위 및 수직 지면반력의 크기가 변화하는 추이를 선형회귀분석법을 통해 조사하였다. 둘째, 반동 및 추진 구간의 경계면에서 지면반력의 합력 벡터 크기와 방향이 점프 높이에 따라 각각 어떻게 변화하는지 마찬가지로 선형회귀모델을 이용해 분석하였다[Fig. 4(b) and (c)]. 또한, 수평-수직 방향의 지면반력을 각각 X-Y 축으로 갖는 그래프에 해당 경계면에서의 합벡터가 점프 높이에 따라 어떻게 변하는지를 도식적으로 나타냈다[Fig. 4(a)].

통계처리는 데이터 정규화(normalization) 과정을 거친 후 이루어졌다. 최저와 최고 점프 높이에서의 피크값 비교 등 데이터의 평균값이 유의미하게 다른지를 판단하기 위해서는 t검정(two-sample t-test) 방법을 활용하였으며, 점프 높이 증가에 따른 데이터 변화 경향의 일관성을 판단하기 위해서는 선형회귀법(regression analysis) 방식을 사용하였다. 선형회귀법의 경우 각 점프 높이에 해당하는 모든 데이터의 평균값과 표준 오차값을 플랏한 후 평균값을 중심으로 적용하였으며, 적합도(goodness of fit, R^2)를 제시하고, 해당 기울기 값이 통계적으로 유의미함을 확인하였다. 모든 통계처리는 유의수준 $P < 0.05$를 기준으로 수행하였다.

3. 결 과

3.1 점프 높이 증가에 따른 운동역학 변화

수직 점프 높이가 증가함에 따라 반동 시 무게중심의 최저 위치가 현저하게 낮아지는 것이 관찰되었다($P < 0.05$) [Fig. 2(a); inset]. 무게중심을 기준으로 반동 구간의 시작 및 종료 속도는 점프 높이에 상관없이 제로값을 갖게 되며, 그 구간 사이에 발생하는 하향 모멘텀의 최대 크기는 점프 높이가 증가함에 따라 함께 증가하는 경향을 보였다[Fig. 2(b)]. 공중동작으로 진입하는 순간의 속도 또한 역학적인 관점에서 당위적으로 점프 높이에 따라 증가하였는데, 진입 직전에 살짝 최대치에서 감소하는 현상이 관찰되었다[Fig. 2(b)].

수직 점프 높이가 증가함에 따라 반동으로 부터 얻게 되는 수직 힘 이득의 크기가 통계적으로 유의미하게 증가하는 경향을 보였다($P < 0.05$) [Fig. 3(a); inset]. 하향 모멘텀이 최대치가 되는 순간(V_{min}) 수직 힘은 피험자의 무게와 동일한 값을 나타냈으며, 이 후, 반동 구간 후반부에서 본인 무게의 150% 이상에 달하는 힘 이득을 창출해 내었다[Fig. 3(a)]. 수직 방향 지면반력의 경우 가장 낮게 점프할 때와 가장 높게 점프할 때의 수직 힘 피크치가 유의미하게 다르지 않았으며(P=0.34), 공중동작 진입 직전 피험자의 발이 힘판에서 떨어지며 짧은 시간 내에 제로값으로 수렴했다. 수평 방향 지면반력의 경우 점프 높이가 증가함에 따라 반동 구간 종료 시점(V_{zero})에서 양의 방향으로 힘의 크기 증가를 보였으며, 이 후 추진 구간에서는 음의 방향으로 증가하는 경향을 보였다[Fig. 3(b)]. 반동

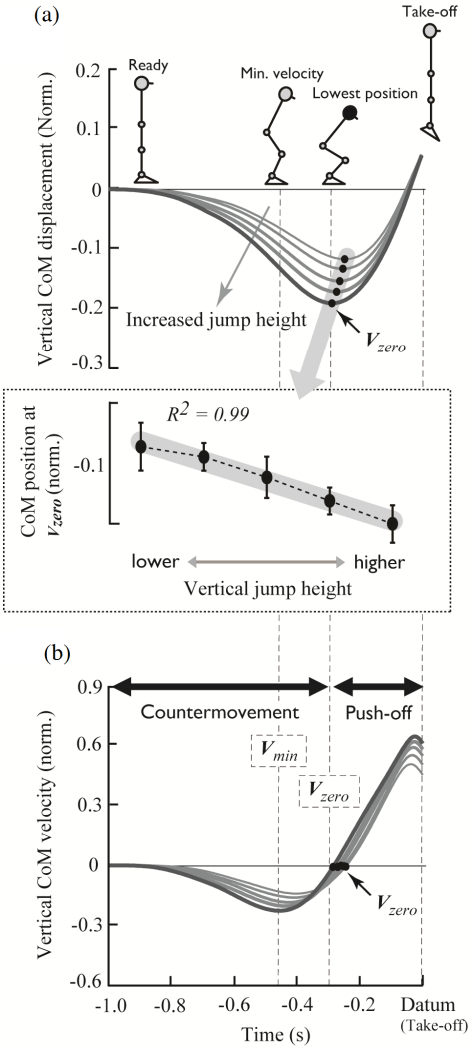

Fig. 2 The mean empirical data of all subjects during the countermovement jump with increasing jump height: (a) Vertical CoM displacement, and (b) vertical CoM velocity. Each trajectory was shifted leftward based on the take-off time, and aligned to visibly compare with each other. The inset in (a) shows how the lowest CoM position changes with increasing vertical jump height, where the error bars indicate SD. The position and velocity data were normalized by the body height (m), and the square root of the body height multiplied by the gravitational acceleration (m/s), respectively

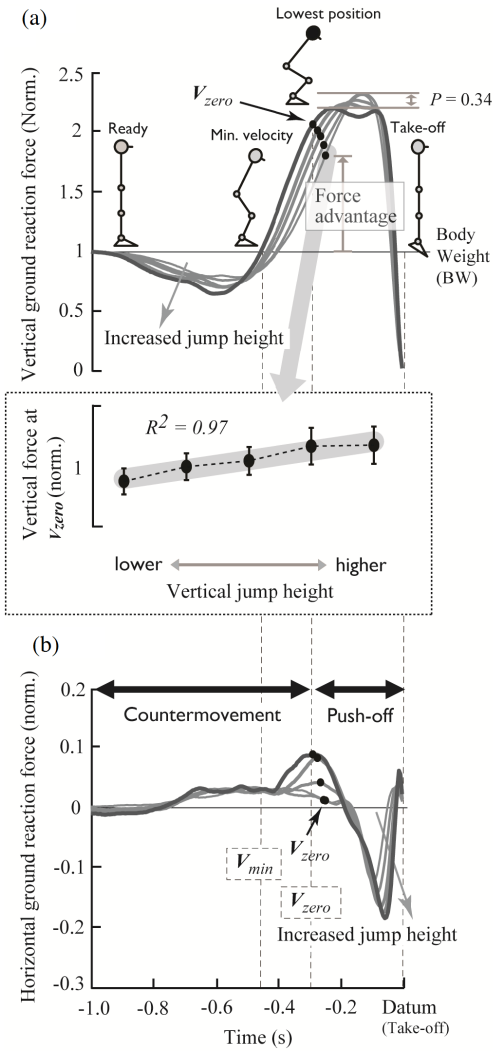

Fig. 3 The mean empirical data of all subjects during the countermovement jump with increasing jump height: (a) vertical and (b) horizontal ground reaction forces (GRFs). Each trajectory was shifted leftward based on the take-off time. The inset in (a) shows how the amount of vertical GRF at zero velocity (i.e., lowest position) changes with increasing vertical jump height, where the error bars indicate SD. The force advantage which is the outcome of the counter-movement, indicates the difference between initial push-off force and the body weight. The ground reaction force data were normalized by the body weight (N)

및 추진 전 구간에서 수평 방향의 지면반력 크기는 피험자 무게의 20% 내외로 수직 방향의 그것에 비해 현저히 작았다[Fig. 3(b)].

3.2 상변화 시점에서의 지면반력 벡터

반동과 추진 구간의 경계면에서, 즉 무게중심의 속도가 제로값을 나타낼 때(V_{zero}), 지면반력의 합력 벡터의 크기와 방향은 점프 높이가 증가함에 따라 일정하게 변화했다(Fig. 4). 점프 높이가 증가함에 따라 합 벡터의 크기는 선형적으로 증가했으며($P < 0.05$) [Fig. 4(b)], 벡터 방향(각도)의 경우 수평면 기준, 반시계 방향을 양의 값으로 정의했을 때, 유의미하게 감소하는 경향을 보였다($P < 0.05$) [Fig. 4(c)]. 즉, 반동 구간에서 추진 구간으로 전환되는 시점에 지면반력의 합력 벡터는 전진/상승 방향을 나타내고 있음이 관찰되었다.

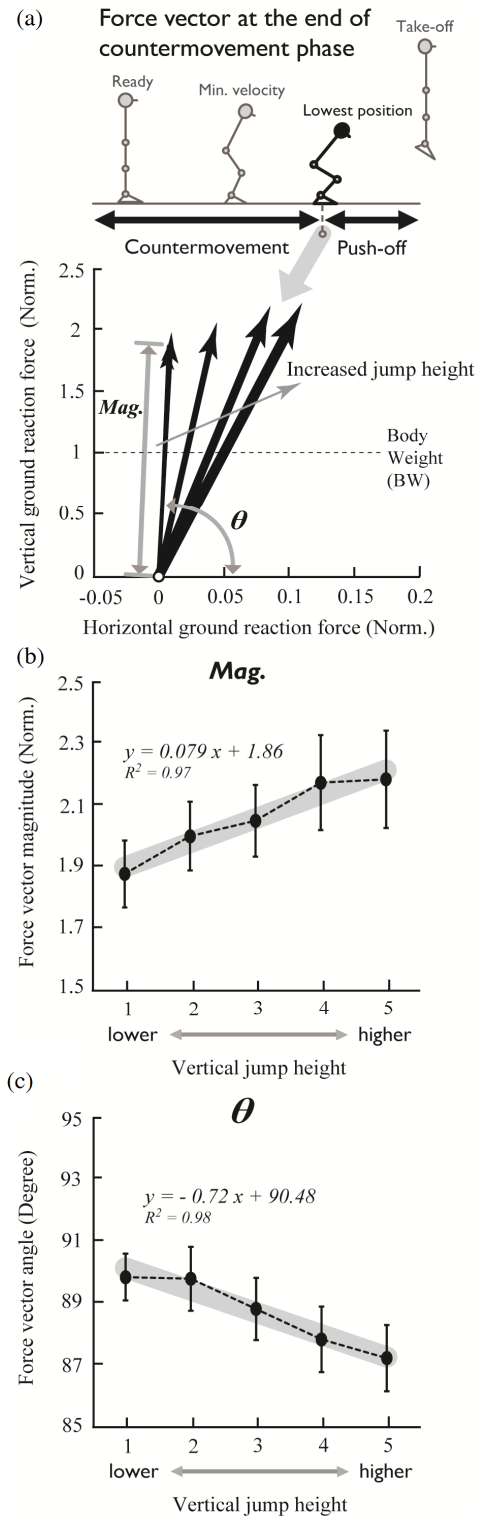

Fig. 4 Resultant GRFs at the lowest CoM positions (i.e., at the end of the countermovement phase; V_{zero}). (A) resultant GRF vectors, (B) their magnitudes, and (C) vector angles (in deg.) with increasing vertical jump height. The full equations for the curve fits are displayed in the form of $y = ax + b$, with goodness-of-fit data (B and C). The GRFs data were normalized by the body weight (N)

4. 고 찰

4.1 높이 증가에 따른 반동 점프 전략 변화

첫째, 무게중심을 낮춰 관절의 가용범위를 증가시키는 방법이 있다. 본 실험 결과[Fig. 2(a)]에서와 같이 높게 뛰어야 하는 상황에서는 하지의 관절을 좀 더 굽혀 무게중심을 낮추게 되는데, 이는 보다 오랜 시간동안 관절 토크를 발생시킬 수 있어 상승 에너지를 확보하는데 유리하기 때문으로 해석할 수 있다. 예를 들어 임펄스-모멘텀 이론에 따르면 공중동작 진입 시 무게중심의 속도를 증가시키기 위해선 수직 방향으로 더 큰 임펄스를 가해야 하는데, 이는 동일한 시간 동안 더 큰 힘을 발생시키거나, 동일한 힘의 크기인 경우 지속 시간을 늘려야 가능하다. 다시말해, 무게중심을 낮추어 각 관절의 편차를 늘리면 기본적으로 상승력을 발생 시킬 수 있는 시간을 확보할 수 있기 때문에 점프 높이를 증가시킬 수 있는 분명한 옵션이 될 수 있다. 하지만, 무게중심의 위치가 물리적인 범위 내에서 마냥 낮아질 것으로 기대하진 않는다. 본 실험의 경우 반동의 이득을 취할 수 있는 범위 내에서 낮출 수 있는 무게중심의 최대 변위를 도출해 낼 수 있도록 디자인 되지는 않았지만, 생체역학적 구속조건이 존재함을 근거로 유추하건데 한계치는 존재할 것으로 생각된다.

둘째, 반동을 통해 힘 또는 가속도 이득을 창출하여 추진 구간 동안 무게중심에 행해지는 일의 총량을 증가시킬 수 있도록 보조하는 방법이 있다. 반동 구간 동안은 무게중심의 속도가 제로값에서 시작하여 다시 제로값으로 회귀하기 때문에[Fig. 2(b)] 해당 구간 동안 무게중심에 행해진 수직 지면반력의 일은 중력일과 상쇄되어 공중동작 진입 시의 속도 결정에 직접적으로 관여하지 못한다. 하지만, 실질적으로 이륙 속도를 결정짓는 추진 구간과 시공간상 연속적으로 맞닿아 있기 때문에 추진 구간의 역할을 간접적으로 보조할 수는 있다.

다시말해, 본 방법의 경우 반동 움직임 직후 추진 구간으로 전환할 때, 즉 상변화 시점(V_{zero})에서, 양의 힘 또는 가속도값을 유지하고 있기 때문에 보다 큰 임펄스를 생산하거나 총 일의 양을 증가시키는데 유리할 수 있다. 이는 점핑 동작 시 서로 맞물려 연속적으로 발생하는 반동과 추진 구간의 힘 작용선이 유사한 방향, 즉 수직 방향으로 무게중심을 낮추었다가 다시 수직 방향으로 상승시키는 과정을 거치기 때문에 반동 움직임을 통해 발생시킨 자중 이상의 힘을 효과적으로 추진 구간에 전달할

수 있기에 가능하다. 다시말해, 제자리 수직 점프의 경우 추진 구간 동안 무게중심을 향해 행해진 수직 방향 일의 총량이 직접적으로 점프 높이를 결정짓게 되므로, 반동 구간에서 추진 구간으로 전달되는 수직 방향의 힘 이득을 상황에 따라 적절히 조정하여 점프 높이를 결정하게 된다[Fig. 3(a)]. 여기에, 실험 결과에서 확인할 수 있듯이 점프 높이가 증가함에 따라 상변화 시점에서 수평 방향의 지면반력 또한 증가하는 것이 관찰되었는데[Fig. 3(b)], 이는 수직 힘 이득을 얻기 위해 무게중심을 낮추는 과정에서 수직 방향으로부터의 편심힘이 함께 증가한 것임을 알 수 있다. 본 연구에서 수행한 실험이 제자리 수직 점프라는 점을 고려할 때, 무게중심 역학 관점에서는 반동 구간 동안 발생한 수평 방향의 임펄스가 추진 구간에서 대부분 상쇄되어야 한다. 그럼에도 불구하고, 수평 방향 지면 반력이 점프 높이가 증가함에 따라 점차 증가한 것은 다관절로 이루어진 신체가 하향 모멘텀을 발생시키며 자세를 낮추는 과정에서 동작의 편의성에 기인하여 자연스럽게 발생된 결과일 수 있다. 이는 추후 다관절 모델로 확장 시 무게중심을 낮추는 과정에서 발생하는 인체의 압력중심, 각운동량 등의 관점을 통해 분석할 수 있을 것으로 생각된다. 결과적으로, 반동과 추진 구간에서 유사한 힘 작용선을 갖는 제자리 수직 점프의 경우 상변화 시점에서 지면반력 합력 벡터의 크기와 방향이 일정한 경향성을 갖고 변화했는데, 이는 피험자 본인이 자신의 인체 다이내믹스를 이해하고 있으며, 점프 높이에 따라 적절히 반동의 이득을 조정하여 주어진 과제를 달성한 것으로 이해할 수 있다.

4.2 생체역학적 구속조건 하에서의 점프 전략

점프 높이 증가에 따른 수직 점프 전략의 변화는 생체역학적 구속조건을 만족시키는 범위 내에서 발생하게 된다. 인체는 다른 생명체와 마찬가지로 최대로 발생시킬 수 있는 근육의 힘이나 관절 토크의 양에 한계가 있는데 이를 생체역학적 구속조건이라 부르며,[16~19] 당연히 인체의 모든 활동은 이러한 구속조건에 의해 제약을 받게 된다. 본 실험의 경우 점프 높이에 관계없이 최대로 발생시킨 수직 방향의 지면반력 크기가 일정한 수치를 보였는데(P = 0.34) [Fig. 3(a)], 최저와 최고 높이 점프에 있어 수직 지면반력의 피크치가 유사하다는 점을 직관적으로 이해하긴 어렵다. 관련 선행연구에서도 최대 점프에서 관찰된 피크값이 오히려 그보다 낮은 점프를 수행했을 때의 값보다 조금 작게 관찰 되는 경우가 발생했는데, 해당 문헌에서는 이를 파라독스라 표현하기도 하였다.[20] 현재로선 이러한 현상에 대한 분명한 해답을 제시하긴 어렵지만, 이 것이 높이 증가에 따른 점프 전략을 운용함에 있어 하나의 구속조건이 되고 있음은 유추할 수 있다. 최대 수직 지면 반력 한계치 조건 하에서 0.3초가 채 되지 않는 짧은 추진 구간 동안 임펄스 또는 일의 총량을 증가시키기 위해, 반동 구간으로 부터 힘(또는 가속도) 이득을 전달 받는 것은 분명 이로운 선택이다.

5. 결 론

본 연구에서는 높이에 따른 점프 전략 변화를 이해하기 위해 반동을 이용한 수직 점프 시 운동역학적 변화와 함께 특별히 상변화 시점에서의 지면반력 합력 벡터의 변화 경향을 분석하였다. 피험자는 점프 높이가 증가함에 따라 무게중심을 낮춰 관절의 가용범위를 증가시켰으며, 반동을 통해 힘 이득을 창출하여 추진 구간 동안 무게중심에 행해지는 일의 총량을 증가시킬 수 있도록 보조하는 전략을 사용하였다. 이 중 상변화 시점에서 반동을 이용한 힘 이득의 증가 경향은 지면반력 합력 벡터를 이용해 도식적으로 나타낼 수 있었는데(Fig. 4), 이를 해당 시점에서의 무게중심 위치[Fig. 2(a); inset] 정보와 결합하면 효과적으로 반동 전략을 설명할 수 있을 것으로 기대한다. 힘과 변위 정보를 모두 포함하여 반동의 이득을 정의한 후 이를 실제 필드에 적용하면, 각기 다른 그룹간 높이에 따른 반동 전략 운용의 차이 등을 관찰할 수 있을 것이며, 나아가 훈련 프로그램 계획에도 활용할 수 있을 것으로 기대한다. 단, 본 연구는 무게중심 역학 관점에서의 점프 전략 변화를 다루고 있기 때문에, 다관절 혹은 생리학적 관점이 충분히 고려되지 못한 한계점이 있다.

후 기

This work was supported by the R&D Program at the Korea Institute of Machinery & Materials (KIMM), funded by the National Research Council of Science & Technology. The authors thank Sungwon Lee, Hyerim Lim, and Hyeob Choi for their contribution to the data collection.

참고문헌
(References)

(1) Linthorne, N. P., 2001, "Analysis of Standing Vertical

Jumps using a Force Platform," *American Journal of Physics*, Vol. 69, No. 11, pp. 1198~1204.
(2) Bobbert, M. F., Gerritsen, K. G., Litjens, and Van Soest, A. J., 1996, "Why is Countermovement Jump Height Greater Than Squat Jump Height?," *Med Sci Sports Exerc*, Vol. 28, No. 11, pp. 1402~1412.
(3) Van Ingen Schenau, G. J., Bobbert, M. F. and De Haan, A., 1997, "Does Elastic Energy Enhance Work and Efficiency in the Stretch-shortening Cycle?," *J. Appl. Biomech*, Vol. 13, No. 4, pp. 389~415.
(4) Anderson, F. C. and Pandy, M. G., 1993, "Storage and Utilization of Elastic Strain Energy During Jumping," *Journal of biomechanics*, Vol. 26, No. 12, pp. 1413~1427.
(5) Komi, P. V., 2000, "Stretch-shortening Cycle: a Powerful Model to Study Normal and Fatigued Muscle," *Journal of biomechanics*, Vol. 33, No. 10, pp. 1197~1206.
(6) Kim, S., Park, S. and Choi, S., 2014, "Countermovement Strategy Changes with Vertical Jump Height to Accommodate Feasible Force Constraints," *Journal of Biomechanics*, Vol. 47, No. 12, pp. 3162~3168.
(7) Nagano, A., Komura, T., Fukashiro, S. and Himeno, R., 2005, "Force, Work and Power Output of Lower Limb Muscles during Human Maximal-effort Countermovement Jumping," *J Electromyogr Kinesiol*, Vol. 15, No. 4, pp. 367~376.
(8) McErlain-Naylor, S., King, M. and Pain, M. T. G., 2014, "Determinants of Countermovement Jump Performance: a Kinetic and Kinematic Analysis," *Journal of Sports Sciences*, Vol. 32, No. 19, pp. 1805~1812.
(9) Raffalt, P. C., Alkjaer, T. and Simonsen, E. B., 2016, "Joint Dynamics and Intra-subject Variability during Countermovement Jumps in Children and Adults," *J Biomech*, Vol. 49, No. 13, pp. 2968~2974.
(10) Sinclair, J., Taylor, P. J. and Hobbs, S. J., 2013, "Digital Filtering of Three-Dimensional Lower Extremity Kinematics: an Assessment," *Journal of Human Kinetics*, Vol. 39, pp. 25~36.
(11) Giakas, G. and Baltzopoulos, V., 1997, "Optimal Digital Filtering Requires a Different Cut-off Frequency Strategy for the Determination of the Higher Derivatives," *Journal of Biomechanics*, Vol. 30, No. 8, pp. 851~855.
(12) Burkhart, T. A., Dunning, C. E. and Andrews, D. M., 2011, "Determining the Optimal System-specific Cut-off Frequencies for Filtering In-vitro Upper Extremity Impact Force and Acceleration Data by Residual Analysis," *J Biomech*, Vol. 44, No. 15, pp. 2728~2731.
(13) Fekete, T., Rubin, D., Carlson, J. M. and Mujica-Parodi, L. R., 2011, "The NIRS Analysis Package: Noise Reduction and Statistical Inference," *PLoS ONE*, Vol. 6, No. 9, pp. e24322.
(14) Kim, S. and Park, S., 2011, "Leg Stiffness Increases with Speed to Modulate Gait Frequency and Propulsion Energy," *Journal of Biomechanics*, Vol. 44, No. 7, pp. 1253~1258.
(15) Donelan, J. M., Kram, R. and Kuo, A. D., 2002, "Simultaneous Positive and Negative External Mechanical Work in Human Walking," *Journal of Biomechanics*, Vol. 35, No. 1, pp. 117~124.
(16) Kim, S., Horak, F. B., Carlson-Kuhta, P. and Park, S., 2009, "Postural Feedback Scaling Deficits in Parkinson's Disease," *J Neurophysiol*, Vol. 102, No. 5, pp. 2910~2920.
(17) Park, S., Horak, F. B. and Kuo, A. D., 2004, "Postural Feedback Responses Scale with Biomechanical Constraints in Human Standing," *Exp Brain Res*, Vol. 154, No. 4, pp. 417~427.
(18) Thomas, C., Jones, P. A., Rothwell, J., Chiang, C. Y. and Comfort, P., 2015, "An Investigation Into the Relationship Between Maximum Isometric Strength and Vertical Jump Performance," *J Strength Cond Res*, Vol. 29, No. 8, pp. 2176~2185.
(19) Yamauchi, J., Mishima, C., Nakayama, S. and Ishii, N., 2009, "Force-velocity, Force-power Relationships of Bilateral and Unilateral Leg Multi-joint Movements in Young and Elderly Women," *J Biomech*, Vol. 42, No. 13, pp. 2151~2157.
(20) Salles, A. S., Baltzopoulos, V. and Rittweger, J., 2011, "Differential Effects of Countermovement Magnitude and Volitional Effort on Vertical Jumping," *European Journal of Applied Physiology*, Vol. 111, No. 3, pp. 441~448.