하지관절의 에너지 반환을 이용한 배구화 Sole의 최적 굴곡강도 분석*

전민주¹⁾ · 곽창수^{2)**} · 홍재승²⁾

1) 한림성심대학교 2) 한림대학교

ABSTRACT

Min-ju Jeon · Cahng-soo Kwak · Jea-seung Hong. The Study of Optimal Bending Stiffness of Volleyball Shoe Sole by Using Energy Return Method in Lower Extremity Joint. *KINESIOLOGY*, 2015, 17(2): 83-92 [PURPOSE] The purpose of this study was to determine the optimal bending stiffness of volleyball shoe soles by using energy return method as a new shoe evaluation method. [METHODS] Nine healthy male college students were recruited for this study, who had previously attended a volleyball class. The running motion at the speed of 4.0 ± 0.4 m/sec and the volleyball jumping motion were measured and analyzed by using 3D motion analysis system and a force platform. [RESULTS] The maximal flexion power at each joint was increased as the mid-sole hardness decreased. The maximal extension power was increased as the mid-sole hardness increased. The energy absorption of each joint was increased as the mid-sole hardness was decreased. The energy production was increased as the mid-sole hardness increased. [CONCLUSIONS] Our study suggests that the energy return method may be a reliable bio-mechanical assessment technique to determine the optimal bending stiffness of volleyball shoes. Future studies with various shoes are warranted for determining the optimal bending stiffness.

Key words : volleyball shoe, bending stiffness, power, energy return

주요어 : 배구화, 굴곡강도, 파워, 에너지 반환

서론

선수의 스포츠경기력을 향상시키기 위하여 에너지 반환과 손실의 두 요인을 스포츠 현장에서 활용하면 좋은 성과를 거둘 수 있다. 선수의 경기력을 향상시키기 위한 첫째 요인인 에너지 반환에 대한 연구는 그 동안 스포츠지면과 운동화를 대상으로 이루어졌다(Nigg & Segesser, 1992). 체조경기의 마루운동, 육상경기의 지면 등은 스포츠지면을 잘 조절하여 에너지 반환을 잘 이루어지도록 한 것이다. 두 번째 요인인 에너지 손실도 스포츠의 여러 분야에서 이를 감소시키기 위하여 이용되고 있다. 예를 들어 크로스컨트리경기의 스키 부츠의 경우 발목의 외측 움직임을 감소시키기 위하여 종래의 low-cut에서 high-cut으로 heel counter부위를 높였다. 그러나 에너지 손실의 감소는 이론적인 측면보다는 경

험적인 측면이 강하기 때문에 극히 제한적이었다.

에너지 반환(energy return)과 손실에 대한 연구는 그 동안 많이 이루어졌다. Elftman(1939a, 1940b)은 관절 파워법(joint power method)을 이용하여 하지의 기계적 에너지의 생성과 흡수에 대하여 연구하였다. 또한 부상으로 인한 이동운동 중의 발목관절, 무릎관절, 엉덩관절 등의 관절 파워에 대하여 많은 선행연구자들이 연구하였다(Buczek & Cavanaugh, 1990; Czernicki et al., 1991; Devita et al., 1992; Devita & Stribling, 1991; Goh et al., 1994; Martin et al., 1993; Simpson & Bates, 1990). Kim(1987)은 인체와 신발을 기계공학적 개념을 도입하여 수학적 모델을 세우고, 에너지소비량을 최소화할 수 있는 신발 중저의 경도를 구하였다. 또한 인체에 충격력으로 작용하는 지면반력을 최소화할 수 있는 중저의 설계 조건에 관해서도 연구하

* 이 논문은 전민주의 2012년도 한림대학교 박사학위논문 일부를 이용하였음.

이 연구는 2013년도 한림대학교 Group 연구활성화지원사업에 의해 지원된 것임.(HRF-G-2013-4)

** 교신저자: cskwak@hallym.ac.kr

였다. 그는 다리의 강성계수가 일정하고 인체는 질점(mass point)으로 이루어졌다는 운동역학적 가정 하에서 인체를 스프링과 감쇠기(damper)구조로 모델을 세웠다. Carlin & Dressendorfer(1979)는 신발 무게에 따른 에너지 변화 연구에서 신발의 전체 무게가 100g 증가할 때마다 에너지 소비량이 1% 정도 증가한다고 보고하였다.

이렇듯 스포츠 지면에 대한 연구가 성공적으로 이루어졌고(McMahon & Greene, 1978; McMahon & Greene, 1979), 신발 개발 분야에서도 에너지 반환에 대해 제한적인 이긴 하지만 성공적으로 이루어졌다(Alexander & Bennet, 1989; McMahon, 1987). 최근에는 신발부위의 에너지와 스포츠경기력과의 관계를 규명하려는 연구가 시도되고 있으나(Stefanyshyn & Nigg, 2000; Roy & Stefanyshyn, 2006) 아직은 초기단계에 있다고 할 수 있다.

지금까지 에너지 반환에 대한 연구의 문제점은 하지관절을 대상으로 한 연구에서 단일관절만을 대상으로 연구하였고, 관절간의 에너지 전이는 하지관절 전체가 아니라 일부관절만을 대상으로 연구되었다. 또한 하지부위의 관절은 다축관절로서 3차원 공간상에서 주로 전후면, 좌우면, 수평면에서 움직임이 발생하는데 대부분의 연구는 전후면상에서 2차원적 분석으로 시도되었다. 중족지골관절(metatarsophalangeal joint)의 경우 관절축이 1cm 전방으로 이동하게 될 때 에너지 흡수의 27%가 감소된다는 하였고(Stefanyshyn & Nigg, 1997), 신발 중저를 강화시키는 것은 중족지골관절에서 에너지 손실을 감소시키고 그러한 방법은 움직임에 있어 긍정적인 영향을 미친다고 보고하였다. 중족지골관절은 한발로 수직 점프를 하는 동안 평균 24J(5.76cal)을 흡수한다고 보고하였다(Stefanyshyn, 1997). 이는 체중이 70kg 이라고 가정할 때 약 3.5cm에 상응하는 점프높이의 차이를 가져올 수 있는 에너지의 양이다.

또한 에너지 반환이 점프높이에 얼마나 많은 효과를 나타낼 수 있는가에 대한 연구결과 1.7cm 까지 증가시킬 수 있다고 보고하였다(Stefanyshyn, 1997). Nigg & Segesser(1992)는 런닝 시 신발의 증가된 경도 굴곡 강도가 에너지 흡수를 감소시킨다는 것을 밝혔으나, 이 경우에 운동수행은 측정되지 않았다. 이론적인 계산으로 한 보폭에 500J(120cal)을 소비하는 마라톤 선수의 경우 보폭 당 약 2%의 에너지 절약이 된다는 것에 근

거를 두고 있다. 그러나 명확한 생리학적 효과를 보여 주는 구체적인 증거는 나타나지 않았다.

중저 경도 굴곡 강도에서 에너지 손실을 감소시키는데 목적을 둔 이러한 변화들이 런닝과 같은 특정한 움직임에 어떻게 영향을 미치는지에 따라 문헌상의 차이가 존재한다는 것은 분명하다. 런닝에 대한 이론적인 평가는 이루어졌지만 실제 운동수행에 대한 변수들은 분석되지 않았다. 게다가 운동수행에 있어서 증가를 가져올 수 도 있는 경도 굴곡 강도 변형과 관련된 근본적인 메커니즘은 아직 모호한 상태이다.

이러한 선행연구자들에 의해서 얻어진 자료들은 전족(foot)이나 중족지골관절의 굴곡이 런닝, 단거리, 점프 하는 동안 에너지 손실이나 소비를 일으킨다는 것을 보여 주었다. 연구자들은 신발의 중저 경도 굴곡 강도를 증가시키고 중족지골관절의 운동 활동범위를 줄임으로써 런닝과 점프 시 이 관절의 에너지 손실의 양을 줄이는 것이 가능하다는 것을 보여 주었다.

지금까지 스포츠 신발 개발을 위한 연구방법은 주로 신발소재의 물성개발과 선수의 발에 맞는 화형개발, 그리고 인체공학적 디자인이 주류를 이루어왔다. 또한 지금까지의 스포츠 신발의 주 개발방향은 선수의 경기력 보다는 선수의 부상방지 차원에서 연구가 시도되었다고 할 수 있으며, 이를 위하여 영상분석을 이용한 발목 관절 부위의 후족제어분석, 지면반력측정을 통한 충격력 흡수분석, 압력분포분석을 통한 힘의 분산 등을 연구하였다. 보행, 주행효율 및 점프를 높이기 위한 근본적인 연구는 자주 시도되지 않았다고 할 수 있다.

따라서 본 연구는 배구 경기화를 개발하기 위한 기초연구로서 신발의 새로운 연구방법인 에너지 반환법을 이용하여 배구화의 에너지 손실을 적게 하고 에너지 생성을 크게 하는 중저의 적정경도를 연구하는데 그 목적이 있다. 또한 본 연구에서 시도되는 관절 파워법은 여러 가지 운동 중 하지의 파워출력의 실질적인 근원은 어느 관절이며 각 관절의 역할은 무엇이며 각 신발바닥의 경도와 수행상황 등 조건을 달리 했을 때 나타나는 각 관절의 에너지 생성과 흡수는 어떻게 일어나는지를 밝히는데 유용하다고 할 수 있다. 이러한 연구는 경기력 향상을 위한 신발 개발에 있어서 중요한 자료로 활용 될 수 있을 것으로 판단된다.

연구 방법

피험자 선정

본 연구의 피험자는 과거 6개월 동안 하지에 부상경험이 없고 1학기 이상 배구수업에 참여한 경험이 있는 20대의 건강한 체육전공 남자대학생 9명을 선정하였다. 이들은 정상적인 발(normal foot)의 형태를 지니고 있으면서 후족착지형(heel striker)이었다. 이들은 본 연구의 취지를 설명들은 후 자발적인 연구 참여의사를 나타낸 사람들로써 연구윤리강령에 의거한 연구 참여 동의서에 서명한 사람들로만 선정되었으며, 이들의 신장은 $178 \pm 2.50\text{cm}$, 체중은 $75.33 \pm 5.09\text{kg}$, 발의 크기는 $268 \pm 2.21\text{cm}$ 이었다.

실험용 운동화의 시작품 제작

본 연구의 실험에 사용된 실험용 운동화는 5가지의 운동화 굴곡강도가 되도록 제작하였다. 그런 다음 굴곡강도가 본 연구에서 목표로 한 일정한 값 범위에 포함될 수 있도록 신발의 외저(outsole)와 내저(insole)의 물성경도를 조절하였다. 본 연구에서 요구되는 운동화의 굴곡강도는 $0.50 \text{ N/mm} - 1.20 \text{ N/mm}$ 이다. 이를 위하여 운동화 중저의 경도가 shore A 40도, shore A 50도, shore A 60도, shore A 70도, shore A 80도의 5가지 배구화를 대상으로 발포와 압축을 하여 제작하였다. 운동화의 크기는 피험자의 발 크기를 고려하여 270mm로 하였다.

실험기자재

본 연구에 사용된 실험기자재는 에너지 반환을 측정하기 위한 장비로서 Motion Analysis System(Motion Analysis Corp., USA)의 적외선 카메라 12대와 Force Platform(Kistler-9260AA6) 1대이었다. 그 외에 지면반력자료와 영상분석자료를 동조시키는 이벤트동조기(National Instruments USB-6225)와 주행속도를 통제하는 구간속도측정기가 있다.

실험방법

본 연구에서 구하고자 하는 에너지 반환과 관련된 분

석변인은 하지관절의 파워와 에너지이다. 이들 분석변인을 구하기 위하여 3차원 영상분석법에 의한 영상자료와 지면반력 자료를 이용하여 하지관절에서의 합 모멘트와 관절 각속도를 산출하였다. 실험 대상은 배구경기에서 가장 많이 일어나는 점프동작과 달리기동작이었다.

실험장비의 배치는 <Figure 1>와 같이 지면반력판이 매설된 주로 옆에 달리기 속도를 통제하기 위하여 구간속도측정기를 설치하였다. 하지부위의 3차원 좌표를 구하기 위하여 12대의 적외선 카메라를 양 측면에 각각 설치하였다. 영상분석자료와 지면반력자료의 동조는 지면반력판의 전압 변화에 따른 타이머의 작동을 이용하였다.

실제실험은 모든 실험장비가 배치된 다음 먼저 실공간좌표를 산출하기 위하여 실험 전과 후에 L자형 Frame과 T형 Wand를 사용하여 60초 동안 전역좌표계(global coordinate system)를 형성하는 캘리브레이션(Calibration)을 실시하였으며 이때 sampling rate는 120frames/sec로 설정하였다. 각 카메라는 데이터 케이블을 통하여 동조(synchronization)되어 있으며 1대의 마스터 카메라는 랜 케이블을 통하여 측정용 데스크톱 컴퓨터로 데이터를 전송하게 된다. 전송된 데이

Figure 1. Experimental Apparatus

Table 1. Joint point and anatomical markers

분절	관절점 및 해부학적 표시점
골반 (Pelvis)	좌, 우 전상장골극 : L, R. ASIS
	천골 ; Sacrum
대퇴 (Thigh)	좌, 우 대전자 : L, R. Greater Trochanter
	좌, 우 대퇴 중앙 : L, R. Mid-Thigh
하퇴 (Shank)	좌, 우 외측상과 : L, R. Lateral Epicondyle
	좌, 우 내측상과 : L, R. Medial Epicondyle
하 지 (Leg)	좌, 우 하퇴 중앙 : L, R. Mid-Shank
	좌, 우 외측 복사 : L, R. Lateral Malleolus
발 (Foot)	좌, 우 내측 복사 : L, R. Medial Malleolus
	좌, 우 중족골두 : L, R. Head of Metatarsal Bone
후족 (Rear foot)	좌, 우 종골 : L, R. Calcaneus
	우, Right Upper Achilles
	우, Right Lower Achilles
	우, Right Upper Heel
	우, Right Lower Heel

터는 Cortex 3.0(Motion Analysis, USA)버전을 이용하여 저장하였다. 복장은 마커로 오인할 수 있는 영향을 배제하기 위하여 검은색 타이즈를 착용 시킨 후 하지관절과 일부 분절 및 운동화에 반사마커를 부착하였다<Table 2>. 실험은 무작위 방법(random order)으로 실시하였으며 각 시기마다 3회 반복 측정하였다. 실험 시 주행속도는 $4.0 \pm 0.4 \text{ m/sec}$ 로 하였다. 관찰자와 피험자가 동시에 만족한 시기만을 성공한 횟수로 간주하고 만족스러울 때까지 계속 실험을 실시하였다.

자료처리방법

본 연구에서 3D 좌표값의 산출은 Motion Analysis System(USA, Santa Rosa, CA)의 Cortex 3.0 프로그램을 활용하여 좌표화와 인체관절중심점의 좌표화, 동조 등을 한 후 c3d 포맷으로 변환하였다. 사후분석은 Visual3D(C-motion Inc., Germantown, MD, USA)를 이용하여 회내운동 관련 변인과 각 관절모멘트를 산출하였다. 지면반력변인은 반복 측정된 자료 중에서 지면반력 그래프를 이용하여 가장 정상적인 구간을 선택하여 Fz의 힘과 시간변인을 구하였다.

산출된 3차원 영상자료와 지면반력자료를 활용하여 하지관절의 합 모멘트와 각속도를 산출하였다. 각 관절의 합 모멘트는 inverse dynamics를 이용하여 구하였고, 일량(work)은 관절 파워 곡선을 적분(integration)하여 구하였다.

통계처리

본 연구에서 통계처리의 목적은 신발의 경도별 종속변인의 차이를 검증하는 것이다. 굴곡강도의 조건별 종속변인의 평균과 표준편차를 비교할 수 있도록 기술통계분석을 실시하였다. 또한 굴곡강도의 조건별 차이 여부를 규명하기 위하여 일원변량 분산분석(one-way ANOVA)을 실시하였으며, 사후분석으로는 LSD를 사용하였다. 이 때 유의수준(α)은 .05로 하였다.

연구결과

최대파워

발목관절

런닝 시 굴곡 파워는 접지 시부터 중간지지기까지 높게 나타났고 그 후부터 신전 파워를 나타냈다. 반면 점프 시에는 접지 초기에 상대적으로 신전파워에 비하여 약하게 굴곡 파워를 나타냈고 중간지지기 이후부터 신전 파워를 나타냈다.

런닝 시 발목관절의 최대 굴곡 파워는 경도 40에서 -6.991Watt/B.W.로 가장 크게 나타났고, 경도 80에서 -5.784Watt/B.W.로 가장 낮게 나타내 연질 일수록 파워가 증가하는 경향을 나타냈다. 발목관절의 최대 신전 파워는 경도 70에서 10.718Watt/B.W.로 가장 크게 나타났고, 경도 40에서 8.950Watt/B.W.로 가장 낮게 나타내 경질일수록 파워가 높은 경향을 나타냈다.

점프 시 최대 굴곡 파워는 경도 40에서 -8.243Watt/B.W.로 가장 크게 나타났고, 경도 80에서 -5.803Watt/B.W.로 가장 낮게 나타내 연질일수록 파워가 높게 나타나는 경향을 나타냈다. 최대 신전 파워는 경도 80에서 34.767Watt/B.W.로 가장 크게 나타났고, 경도 50에서 29.027Watt/B.W.로 가장 낮게 나타내 경질일수록 파워가 높게 나타나는 경향을 나타냈다.

Table 2. Maximal power of ankle joint at each mid-sole hardness in running and jumping

(Unit:Watt/B.W.)

구분	경도	Mean	SD	P	Post Hoc(LSD)
런닝	40	-6.991	2.410	.828	-
	50	-6.119	3.398		
	60	-5.916	2.061		
	70	-6.043	1.984		
	80	-5.748	1.681		
	40	8.950	3.204	.647	-
	50	9.991	2.735		
	60	10.430	2.836		
	70	10.718	2.535		
	80	10.443	1.655		
점프	40	-8.243	2.808	.716	-
	50	-7.675	2.770		
	60	-7.043	4.450		
	70	-7.055	3.932		
	80	-5.803	4.158		
	40	31.579	8.142	.770	-
	50	29.027	10.665		
	60	32.707	8.951		
	70	33.755	11.099		
	80	34.767	9.918

Figure 2. Variations of ankle joint power in running (top) and jumping (bottom)

무릎관절

무릎관절의 굴곡파워와 신전파워는 발목관절과 비슷한 경향을 나타냈으나 점프 시 굴곡 파워의 크기가 더 크게 나타났다. 무릎관절의 최대 굴곡 파워는 런닝 시에는 경도 80에서 -9.128Watt/B.W.로 가장 크게 나타났고, 경도 40에서 -7.2034Watt/B.W.로 가장 낮게 나타났으며 연질일수록 파워가 증가하는 것으로 나타났다. 최대 신전 파워는 경도 80에서 8.803Watt/B.W.로 가장 크게 나타났고, 경도 40에서 7.417Watt/B.W.로 가장 낮게 나타나 경질 일수록 파워가 높게 나타나는 경향을 나타냈다.

점프 시 최대 굴곡 파워는 경도 40에서 -15.884Watt/B.W.로 가장 크게 나타났고, 경도 80에서 -13.184Watt/B.W.로 가장 낮게 나타내 연질일수록 증가하는 경향을 나타냈다. 점프 시 최대 신전 파워는 경도 80에서 18.669Watt/B.W.로 가장 크게 나타났고 경도 40에서 15.820Watt/B.W.로 가장 낮게 나타내 경질 일수록 파워가 증가하는 것으로 나타났다. 또한 런닝 및 점프 시 발목관절의 무릎 굴곡 및 신전 최대 파워(X)의 평균 차이를 알아보기 위하여 분산분석 결과 경도에 따른 통계적 유의한 차이는 나타나지 않았다.

Table 3. Maximal power of knee joint at each mid-sole hardness in running and jumping (Unit:Watt/B.W.)

구분	경도	Mean	SD	P	Post Hoc(LSD)	
런닝	굴곡	40	-9.128	3.424	.807	-
		50	-8.831	3.605		
		60	-8.840	3.956		
		70	-8.184	2.980		
		80	-7.203	4.188		
	신전	40	7.417	3.798	.944	-
		50	7.968	2.565		
		60	7.883	3.318		
		70	8.237	3.440		
		80	8.803	4.307		
점프	굴곡	40	-15.884	4.823	.719	-
		50	-14.774	3.577		
		60	-14.672	5.862		
		70	-14.719	5.765		
		80	-13.184	6.878		
	신전	40	15.820	5.365	.998	-
		50	18.148	9.031		
		60	18.200	7.999		
		70	18.527	7.862		
		80	18.669	9.538

Figure 3. Variations of knee joint power in Running (top) and jumping (bottom)

엉덩관절

엉덩관절의 굴곡과 신전 파워는 런닝 시에는 접지 초기에 신전 파워가 먼저 나타나고 그 후에 굴곡 파워가 크게 나타난 반면 점프 시에는 접지 초기 짧은 시간에 굴곡 파워가 나타나고 그 후에 신전 파워가 크게 나타났다.

런닝 시 엉덩관절의 최대 굴곡 파워는 경도 40에서 -7.942Watt/B.W.로 가장 크게 나타났고, 경도 70에서 -6.244Watt/B.W.로 가장 낮게 나타나서 연결일수록 파워가 증가하는 경향을 나타냈다. 엉덩관절의 최대 신전 파워는 경도 70에서 2.563Watt/B.W.로 가장 크게 나타났고 경도 40에서 2.107Watt/B.W.로 가장 낮게 나타나 연결일수록 파워가 증가하는 경향을 나타냈다.

점프 시 최대 굴곡 파워는 경도 40에서 -8.674Watt/B.W.로 가장 크게 나타났고 경도 70에서 -4.9180Watt/B.W.로 가장 낮게 나타나 경도가 연결일수록 파워가 증가하는 경향을 나타냈다. 최대 신전 파워는 경도 80에서 19.811Watt/B.W.로 가장 크게 나타났고 경도 40에서 15.190Watt/B.W.로 가장 낮게 나타나 경도가 연결일수록 증가하는 경향을 나타냈다.

Table 4. Maximal power of hip joint at each mid-sole hardness in running and jumping (Unit:Watt/B.W.)

구분	경도	Mean	SD	P	Post Hoc(LSD)	
런닝	굴곡	40	-7.942	3.535	.892	-
		50	-7.385	4.194		
		60	-7.227	3.634		
		70	-6.244	3.776		
		80	-6.466	4.581		
	신전	40	2.107	1.070	.939	-
		50	2.183	2.397		
		60	2.217	1.265		
		70	2.563	1.195		
		80	2.547	0.857		
점프	굴곡	40	-8.674	8.027	.585	-
		50	-8.233	7.270		
		60	-8.225	7.261		
		70	-4.918	5.111		
		80	-4.930	4.467		
	신전	40	15.190	4.448	.532	-
		50	18.677	6.747		
		60	18.272	6.891		
		70	19.337	4.926		
		80	19.811	6.718

Figure 4. Variations of hip joint power in Running (top) and jumping (bottom)

관절별 에너지

발목관절

제1국면에서 에너지 흡수는 런닝 시 -0.228~-0.268J/B.W., 점프 시 -0.434~-0.617J/B.W.의 범위를 나타냈으며, 점프 시가 더 많이 흡수되었고 통계적으로 경도별 차이는 나타나지 않았다. 그러나 통계적으로 유의한 차이는 나타나지 않았지만 런닝과 점프 시 경도가 연결일수록 감소하는 경향을 나타냈다.

제2국면의 경우 런닝 시에는 에너지 생성이 0.561~0.645J/B.W., 점프 시 2.249~2.520J/B.W.로 런닝 시보다 약 4배 정도 더 많이 생성되는 것으로 나타났다. 또한 경도는 에너지 생성에 통계적으로 차이를 나타내지 않았으나 런닝과 점프 시 경도가 연결일수록 증가하는 경향을 나타냈다.

Table 5. Maximal energy of ankle joint at each mid-sole hardness in running and jumping (Unit:J/B.W.)

국면	에너지	경도	Mean	SD	p	Post Hoc(LSD)
런닝	1국면	40	-0.268	0.129	.934	-
		50	-0.256	0.129		
		60	-0.233	0.112		
		70	-0.236	0.111		
		80	-0.228	0.075		
	2국면	40	0.561	0.172	.561	-
		50	0.593	0.144		
		60	0.647	0.131		
		70	0.645	0.136		
		80	0.654	0.120		
점프	1국면	40	-0.617	0.416	.908	-
		50	-0.506	0.434		
		60	-0.469	0.497		
		70	-0.494	0.308		
		80	-0.434	0.400		
	2국면	40	2.520	0.538	.954	-
		50	2.249	1.031		
		60	2.263	0.740		
		70	2.265	0.759		
		80	2.305	0.995		

무릎관절

제1국면에서 무릎관절의 에너지 흡수는 런닝 시에는 -0.350~-0.486J/B.W., 점프 시에는 -1.228~-1.624J/B.W.의 범위를 나타냈으며, 점프 시가 약 3배 이상 흡수가 많이 되었고 경도별 통계적인 차이는 나타나지 않았다. 런닝과 점프 시 경도가 연질일수록 증가하는 경향을 나타냈다. 또한 발목관절에 비하여 무릎관절의 에너지 흡수는 약 2배 가량 더 많이 되는 것으로 나타났다.

제2국면의 경우 런닝 시에는 에너지 생성이 0.471~0.563J/B.W., 점프 시에는 1.502~2.283J/B.W.로 런닝 시보다 약 4배 정도 더 많이 생성되는 것으로 나타났다. 런닝과 점프 시 경도가 경질일수록 증가하는 경향을 나타냈고 발목관절에 비하여 무릎관절의 에너지 생성은 약간 작게 나타났다.

Table 6. Maximal energy of knee joint at each mid-sole hardness in running and jumping (Unit:J/B.W.)

국면	에너지	경도	Mean	SD	p	Post Hoc(LSD)
런닝	1국면	40	-0.486	0.192	.561	-
		50	-0.434	0.215		
		60	-0.451	0.290		
		70	-0.373	0.207		
		80	-0.350	0.267		
	2국면	40	0.471	0.231	.920	-
		50	0.482	0.194		
		60	0.510	0.237		
		70	0.520	0.204		
		80	0.563	0.255		
점프	1국면	40	-1.624	0.764	.921	-
		50	-1.376	0.623		
		60	-1.337	0.884		
		70	-1.277	1.140		
		80	-1.228	1.267		
	2국면	40	1.502	0.872	.552	-
		50	1.621	1.068		
		60	1.901	0.950		
		70	1.869	1.052		
		80	2.283	1.184		

논의

신체활동과 관련된 에너지 측면에서 선수의 경기력을 향상시키기 전략은 에너지 손실을 최소화하여 에너지 효율을 최대로 향상시키는 것과 에너지 반환을 최대화하는 것이다. 첫 번째 전략인 달리기 시 에너지 손실을 최소화시키는 주행효율(running economy)에 대한 연구가 많이 수행되었으며, 그 중에서도 최근 여러 스포츠종목에서 많은 연구의 초점이 되는 요인이 운동화이다. 운동화 경도에 관한 연구의 경우 Frederick 등(1986)은 연질의 EVA신발이 경질의 신발보다 약 2.8% 산소 소비량이 적게 나타났다고 하였고, Frederick 등(1983)은 약간의 차이는 있었지만 이와 비슷한 결과를 보였다고 하였다. Berg & Sady(1985)는 충격 흡수력이 높은 100g의 운동화 깔창을 사용하였지만 에너지 소비량에 큰 차이를 나타내지 않았다고 하였다.

두 번째 전략인 에너지 반환은 경기력 향상을 위한 선수와 스포츠장비 사이의 에너지 전이의 최적화가 중요한 문제이기 때문에 그 동안 스포츠지면과 운동화를

대상으로 많은 연구가 이루어져 왔다(Nigg & Segesser, 1992). 예를 들면, 체조경기의 마루운동바다, 육상경기의 지면 등은 에너지 반환이 잘 이루어지도록 한 것이다. 이러한 측면에서 선수의 경기력을 향상시키기 위한 운동화의 에너지 반환에 대한 연구도 시도해 볼 만하다.

지금까지의 선행연구 문제점은 하지관절을 대상으로 한 연구에서 단일관절만을 대상으로 연구하였고, 관절 간의 에너지 전이는 하지관절 전체가 아니라 일부관절만을 대상으로 연구되었다. 또한 하지관절은 주로 3차원 공간상에서 회전운동이 일어나는데 대부분의 연구는 전후면상에서 2차원적 분석으로 이루어졌다. 그리고 그 동안 신발연구에 사용된 재질의 형태는 연구의 특성상 에너지의 반환 측정이 용이한 딱딱한 것이었다.

본 연구의 관절 파워는 관절모멘트와 각속도의 곱으로 구하며, 파워의 +값은 모멘트와 각속도가 동시에 같은 방향으로 값이 나올 때이고 이 때 파워가 생성되는 것이다. 모멘트와 각속도가 다른 방향일 때는 -값이 나오고 이때는 흡수되는 것이라고 할 수 있다. 굴곡파워는 수동적인 파워로서 운동 중 충격흡수 파워를 의미하는 것으로 파워가 증가하는 것은 관절에 그 만큼 부하가 증가하는 것을 말한다(Zhang et al., 2000).

최대 굴곡 파워는 발목관절의 경우 배구화 경도상 이에는 통계적으로 유의한 차이를 나타내지 않았으나 경도 40의 굴곡 파워가 가장 큰 것으로 나타났다. 운동 시 발생하는 대부분의 발목 부상은 전·후·좌·우 꺾임에 의한 염좌 부상이다. 본 연구에서 경도 80에서 나타난 최대 굴곡 파워는 발목의 전후 움직임에 부하가 적게 나타나는 것을 의미하는 것으로 경도가 적은 경도 40의 신발을 신었을 경우 발목 부상 위험성이 가장 높은 것으로 판단된다. 따라서 발목 신전 파워를 최대와 하고 굴곡 파워를 최소화하여 부상의 위험성을 줄이기 위해서는 경도가 경질인 신발이 적절하다고 판단된다. 무릎관절의 경우 최대 굴곡 파워는 신발의 경도에 따른 통계적인 차이를 나타내지 않았다. 그러나 런닝과 점프 시 경도가 경질일수록 최대 굴곡 파워가 작게 나타났다. 이러한 결과에 비추어 볼 때 경도가 연질일수록 파워 발현이 커지기 때문에 신발 바닥의 경도가 연질일 경우 무릎 관절의 굴곡 운동에 불리하다고 판단된다. 엉덩관절의 최대 굴곡 파워는 런닝 시 경도 40일 경우에 가장 크게 나타났다. 따라

서 경도가 40의 신발을 착용 했을 시 엉덩관절의 전체 부하가 가장 많이 작용하는 것으로 보인다. 결과적으로 런닝과 점프 시에는 경도가 작은 신발을 피하는 것이 바람직하다고 판단된다.

관절의 신전 파워는 동작 시 발생하는 관절의 능동적인 파워를 의미한다. Beli 등(2002)의 연구에 따르면 달리기 속도가 증가함에 따라 관절 파워가 증가한다고 하였는데, 이는 런닝 스피드가 커지게 되는 것은 결국 관절 파워가 커지게 된다는 것을 의미한다고 할 수 있다. 본 연구에서 런닝 시 경도가 클 때 파워가 크게 나타났고 경도가 40일 경우 파워가 가장 작게 나타났다. 이것은 경도가 클 때 발목 신전 시 더 큰 파워를 내도록하여 런닝 동작 시 유리하게 작용할 수 있다고 판단된다. 점프 동작의 경우에도 높은 경도에서 발목 관절의 신전 파워가 높게 나타났는데, 이러한 결과 역시 높은 경도의 신발을 신었을 경우 점프 동작 시 관절 파워 발현에 이득이 생기는 것으로 판단된다. 따라서 런닝 시 발목 신전 파워를 최대로 하기 위해서는 경도가 경질인 신발이 가장 적당한 것으로 판단된다.

무릎관절의 최대 신전 파워는 통계적으로 유의한 차이를 나타내지 않았지만 최대 파워 중 신발의 경도가 높을수록 파워가 가장 크게 나타나 런닝과 점프 시 파워 발현의 측면에서 살펴보면 경도가 높은 신발이 가장 적절한 것으로 판단된다.

발목관절의 에너지 손실과 생성은 에너지 흡수가 나타나는 제1국면에서 런닝 시 경도가 경질일수록 감소하는 경향을 나타내므로, 경도가 연질일수록 에너지 손실이 더 많이 되는 것으로 나타났다. 에너지가 생성되는 제2국면에서는 경도가 경질일수록 증가하는 경향을 나타내 경도가 경질일수록 에너지 생성이 더 많이 되는 것으로 나타났다. 무릎관절의 에너지 손실과 생성은 제1국면에서 경도가 연질일수록 증가하는 경향을 나타내어 경도가 연질일수록 에너지 손실이 더 많이 되는 것으로 나타났다. 제2국면에서는 경도가 경질일수록 증가하는 경향을 나타내어 경도가 경질일수록 에너지 생성이 더 많이 되는 것으로 나타났다.

에너지 반환방법에 의한 연구결과를 종합하면 대체적으로 하지관절에서 굴곡파워와 에너지 손실은 경도가 연질일수록 증가하는 경향을 나타냈고 신전파워와 에너지 생성은 경도가 경질일수록 증가하는 경향을

나타냈다. 배구경기의 경기력을 향상시키기 위한 조건으로서 배구화는 접지국면에서 에너지가 최소한 적게 손실되고 이지국면에서 최대한 많이 생성되어야만 한다. 새로운 배구화를 개발하기 위한 조건을 만족시키는 배구화의 적정경도를 선택한다면 굴곡강도가 경질인 조건의 배구화가 유리하다고 할 수 있다.

결론 및 제언

본 연구결과에 의하면 배구화의 경도사이에는 통계적으로 유의한 차이는 나타나지 않았지만 하지관절의 최대 굴곡 파워는 배구화 바닥의 경도가 연질일수록 증가하는 경향을 나타냈고 최대 신전 파워는 경도가 경질일수록 증가하는 경향을 나타냈다. 또한 에너지 흡수는 신발바닥의 경도가 연질일수록 증가하는 경향을 보였고, 에너지 생성은 경도가 경질일수록 증가하는 경향을 나타냈다. 이러한 연구결과는 배구화를 개발하는데 좋은 자료가 될 것이다. 지금까지 신발을 개발하기 위하여 에너지 반환방법이 많이 이용되지 않았기 때문에 뚜렷한 결론을 내릴 수는 없지만, 추후 에너지 반환을 적용할 수 있는 분야의 연구가 더 많이 수행된다면 에너지 반환방법을 어느 정도 신발평가에 적용할 수 있는지에 대한 해답을 기대할 수 있을 것이다.

참고문헌

- Alexander, R. M., Bennett, M. B., & Kester, R. C., (1989). Foot strike and the properties of the human heel pad, *Proc. Inst. Mechanical Engineering* H 203: 191-196.
- Belli, A., Kyrolainen, H., & Komi, P. V. (2002). Moment and power of lower limb joints in running, *International Journal of Sports Medicine* 23(2): 136-141.
- Buczek, F. L. & Cavanagh, P. R. (1990). Stance phase knee and ankle kinematics and kinetics during level and downhill running, *Medicine Science & in Sports & Exercise*, 22: 669-677.
- Caltin, M. J. & Dressendorfer, R. H. (1979). Effects of shoe weight on the energy cost of running, *Medicine Science & in Sports & Exercise* 11(1): 80.
- Czernieki, J. M., Gitter, A. & Munro, C. (1991) Joint moment and muscle power output characteristics of below knee amputees during running; the influence of energy storing prosthetic feet, *J. Biomech*, 24: 63-75.
- Devita, P. & Stribling, J. (1991). Lower extremity joint kinetics and energetics during backward running, *Medicine Science & in Sports & Exercise* 23: 602-610.
- Devita, P., Blankenship Hunter, P. & Skelly, W. A. (1992). Effects of a functional knee brace on the biomechanics of running, *Medicine Science & in Sports & Exercise*, 24: 797-806.
- Elftman, H. (1939a). Forces and energy changes in the leg during walking, *Am Journal of Physiology*, 125: 339-356.
- Elftman, H. (1939b). The function of muscles in locomotion, *Am Journal of Physiology*, 125: 357-366.
- Frederick, E. C. (1986). Kinetically mediated effects of sport shoe design, *Journal of Sports Sciences*, 4: 169-184.
- Goh, J. C., Tan, P. H., Toh, S. L. & Tay, T. E. (1994). Gait analysis study of an energy storing prosthetic foot-a preliminary report, *Gait and Posture* 2: 95-101.
- Kwak, Chang-Soo (1993). *The Influence of Midsol Hardness of Sport Shoes on Pressure Distribution and Shock Attenuation during Running* Seoul National University Doctoral Dissertation: 64-87.
- Kim, Jae-Hwan (1987). *Optimal Design of Marathon Shoe Sole for Running Performance*, KAIST Master Degree Thesis.

- Martin, P. E., Heise, G. D. & Morgan, D. W. (1993). Interrelationships between mechanical power, energy transfers, and walking and running economy, *Medicine Science & in Sports & Exercise* 25: 508~515.
- McMahon T. A. and Greene P. R. (1979). The influence of track compliance on running, *Journal of Biomechanics* 12: 893-904.
- McMahon, T. A. & Greene P. R. (1978). Fast running tracks, *Sci Am* 239: 148-163.
- McMahon, T. A., Valiant, G., and Frederick, E. C. (1987). Ground running, *Journal of Applied Physiology*, 62 : 2326-2337.
- Nigg B. M. & Segesser, B. (1992). Biomechanical and orthopedic concepts in sport shoe construction, *Medicine Science & in Sports & Exercise* 24: 595-602.
- Roy, J-P. R. & Stefanyshyn, D. J. (2006). Shoe Mid-sole Longitudinal Bending Stiffness and Running Economy, Joint Energy, and EMG. *Medicine Science & in Sports & Exercise* 38: 562-569.
- Simpson, K. J. & Bates, B. T. (1990). The effects of running speed on lower extremity joint moments generated during support phase. *Inter. Journal of Sport Biomechanics*, 6: 309-324.
- Stefanyshyn, D. J. and Nigg, B. M. (2000). Influence of mid-sole bending stiffness on joint energy and jump height performance, *Medicine Science & in Sports & Exercise* 32 : 471-476.
- Stefanyshyn, D. J. & Nigg, B. M. (1997). Mechanical energy contribution of the metatarsophalangeal joint to running and sprinting, *Journal of Biomechanics*, Vol. 30, No.11/12: 1081-1085.
- Zhang S. N., Bates, B. T., Dufek, J. S. (2000). Contributions of lower extremity joints to energy dissipation during landings, *Medicine and Science in Sports and Exercise* 32(4) : 812-819.