Effects of skill levels and feet widths on the kinematic and kinetic variables during jump rope single under

Abstract

Objective: The purpose of this study was to analyze the effects of skill level and feet widths on the kinematic and kinetic variables during jump rope single under with both feet.
Method: 15 skilled group (age: 10.85±0.40 yrs, height: 142.13±5.41 cm, weight: 36.97±6.65 kg) and 15 unskilled group (age: 10.85±0.40 yrs, height: 143.31±5.54 cm, weight: 40.81±10.39 kg) participated in this study.
Results: The results showed that the skilled group minimized the anteroposterior displacement of the center of mass with the preferred width, and the range of motion of the trunk segments on sagittal plane as much as possible. The preferred width during the jump rope decreased by 5.61-6.11 cm (32-37%) compared with the static standing position. The induced width increased by 16.44-16.67 cm (82-85%), regardless of the skill level. The unskilled group was significantly difference between left and right legs in ROM of hip, knee, and ankle joint. Otherwise, the skilled group showed highly consistency in the kinematic variables in right and left legs.
Conclusion: The preferred width of the jump rope was suggested as a beneficial strategy for maintaining dynamic stability. The unskilled group exhibited asymmetry left and right motions within the ranges of motion of the ankle, knee, and hip joints, regardless of the width. Therefore, long-term accurate jump rope motions will contribute to the improvement of the left and right imbalances of the entire body.

Keywords: Jump, Kinematics, kinetic, Feet width, Balance, Landing

Introduction

줄넘기(jump rope)는 오랜 옛날부터 건강과 체력을 증진하기 위한 수단으로 수행되어 왔으며(Miyaguchi, Sugiura, & Demura, 2014), 특별한 사전 연습 없이 쉽게 친숙해질 수 있고, 언제 어디서나 할 수 있는 활동이다(Miyaguchi, Demura, & Omoya, 2015; Orhan, 2013). 줄넘기는 상지와 손을 이용하여 발 아래와 머리 위로 줄을 회전시키는 동시에 두 하지의 연속적인 점프를 수행하는 것이며(Gowitzke & Beown, 1989; Miyaguchi et al., 2015), 호흡순환 기능을 향상시킬 수 있는 대표적인 유산소 운동 중 하나이다(Chen & Lin, 2012; Gowitzke & Beown, 1989; Hatfield, Vaccaro, & Benedict, 1985; Am Jung, Lee, Hwang, & Song, 2009; Miyaguchi et al., 2015). 이러한 줄넘기 운동의 효과는 심폐지구력, 근력, 근지구력, 순발력, 민첩성, 뼈 건강, 신경근 기술의 협응, 자세제어 능력을 향상 시키는 것으로 보고되었다(Arnett & Lutz, 2002; Hawkins & Kennedy, 1980; Miyaguchi et al., 2014; Miyaguchi et al., 2015; Ozer, Duzgun, Baltaci, & Colakoglu, 2011; Solis, 1988; Weeks, Young, & Beck, 2008; Wielligh, 2011).
국내의 경우, 약 1,100 여개의 줄넘기 클럽이 활동하고 있으며, 또한 축구, 배드민턴, 농구와 더불어 가장 인기 있는 프로그램으로써 초·중·고등학생의 방과 후 운동 프로그램과 토요 스포츠 프로그램의 중 하나로 발전되었다(Korea Rope Skipping Association, 2016; Ministry of Culture, Sport and Tourism, 2015). 국외의 경우, 캐나다는 약 4,000 개 이상의 학교에서 약 100 만 명의 학생들이 줄넘기 운동에 참여하고 있으며(Jump Rope for Heart, 2014), 미국은 줄넘기 대회에 참여하는 선수가 약 3 백만 명에 이르는 것으로

보고되었다(American Heart Association, 2014). 이와 같이 국내·외에서 학생들의 체력 및 건강 증진을 위한 줄넘기 운동과 함께 경기 스포츠로서 줄넘기 운동이 발전되고 있는 실정이다.

줄넘기 운동 프로그램은 초등학생의 체력 증진뿐 아니라 학교 체육 프로그램 및 다른 엘리트 스포츠 종목의 트레이닝 프로그램 중 하나로 큰 비중을 차지하고 있다. 특히 배구, 농구, 축구, 체조, 리듬 체조, 복싱, 레슬링, 테니스, 무술 등과 같은 많은 스포츠에서 주요한 신전단축기전(stretch shortening cycle)의 효과를 극대화 할 수 있는 트레이닝 방법으로 사용되고 있다(Duzgun, Baltaci, Colakoglu, Tunay, & Ozer, 2010; Orhan, 2013; Ozer, et al., 2011; Trecroci, Cavaggioni, Caccia, & Alberti, 2015; Wielligh, 2011). 이와 같은 줄넘기 동작은 대퇴사두근과 장딴지 근육이 반복적으로 수축하고 신전하는 신전단축기전의 형태이며, 이러한 신전단축기전은 보다 큰 순발력을 발생시키는데 도움이 된다(Komi, 1984; Miyaguchi et al., 2015; Norman & Komi, 1979). 나아가 줄넘기 운동 프로그램은 정기적으로 특정 스포츠를 훈련하는 유소년 선수들의 체력과 생리학적 컨디셔닝(conditioning)을 향상시키는데 도움이 된다(Baker, Côté, & Abernethy, 2003).

줄넘기 운동 시 발생되는 연속적인 점프 동작은 발목관절, 무릎관절, 엉덩관절의 굴곡이 거의 없이 수행되는 빠른 반동 점프 동작의 형태로 수행되며, 이와 같은 점프 동작은 지면에 힘을 가할 수 있는 시간을 최소화하여 빠른 동작으로 연결되는 특성을 가진다(Butler, Crowell, & Davis, 2003). 이러한 줄넘기의 연속적인 점프는 동적 안정성과 관련되며, 동적안정성(dynamic stability)은 신경근 시스템의 노이즈 즉, 운동 변동성에 의해 발생된 동요에 대한 운동 시스템의 수용 민감도로 정의된다(Stergiou, 2004). 운동학과 운동역학적으로 인간은 기능적 활동 중에 관절의 안정성을 유지하려고 하는 특징이 있으며, 점프에서의 착지는 동적안정성을 필요로 하는 인간의 신체 활동 중에서 가장 대표적인 활동인 동시에 하지 관련 상해의 일반적인 기전이다(Wright, Arnold, & Ross, 2016). 이와 같이 충격흡수에 다소 불리한 특성을 가진 줄넘기 동작은 부정확한 점프 및 착지 동작 혹은 이에 따른 충격흡수기전의 부전과 부적절한 운동 강도 및 빈도 설정으로 인한 과사용증후군을 초래하게 되며 이는 곧 발목관절과 무릎관절 주변의 연결조직 상해위험성 증가에 영향을 미치게 된다(Bennell, Malcolm, Wark, & Brukner, 1996; Grimston & Zernicke, 1993; Karim & Bruker, 1998; Kim & Youm, 2013; McNitt-Gray, 2000; Pittenger, et al., 2002; Tanikawa et. al., 2014). 게다가, 성장 발달의 측면에서 불균형한 움직임으로 인한 하지의 비대칭은 영유아 및 어린이에게 정형외과적 질환을 발생 시키는 주요 요인이 되며, 특히 내반슬, 스트레스성 골절, 통증 및 골관절염과 같은 질환이 비대칭으로 인해 발생될 수 있다고 보고되어 왔다(Sánchez et al., 2013). 따라서, 불균형한 점프 동작의 분석은 어린이뿐 아니라 성인의 하지 비대칭을 탐지 할 수 있는 과업이라고 판단되며(Paterno, Ford, Myer, Heyl, & Hewett, 2007), 성장기 아동의 양 하지의 불균형 정도를 줄넘기 동작을 통해 분석해 볼 필요성이 있다고 판단된다. 또한, 많은 스포츠에서 수행되는 점프 동작은 다양한 발폭(width)을 가지고 있는데, 배구의 스톱-점프와 같은 점프 동작은 발폭을 어깨 너비 범위로 권장되나, 농구 점프 슛과 같은 상·하지 협응을 위한 점프 동작은 가능한 발폭을 좁히는 것을 권장하고 있다. 그러나 줄넘기 동작 시 발폭과 관련된 정량적 자료에 대한 연구는 거의 없는 실정이다.

선행연구를 살펴보면, Kim & Kim(2015)은 줄넘기 지도자 자격증 소지자 중 성인 남성 7 명을 대상으로 줄넘기 양발 1 회선 1 도약과 2 회선 1 도약 동작의 차이를 분석한 결과, 양발 2 회선 1 도약이 1 회선 1 도약보다 신체중심의 상하 움직임, 하지관절의 가동범위, 수직지면반력이 큰 것으로 보고하였다. Ghafouri et al.(2014)는 유소년 여자 12 명을 대상으로 줄넘기 3 분 번갈아뛰기 시 주관적 운동 강도(Rating of perceived exertion, RPE)를 이용하여 피로 효과를 분석한 결과, 피로 요인은 발목관절 각도와 발목관절의 이동 거리인 것으로 보고하였다. Yoshioka et al.(2015)는 줄넘기 여자선수 12 명을 대상으로 2 회선 1 도약 동작 시 손과 손목 관절의 움직임에 대한 분석 결과, 손과 손목관절의 숙련도는 2 회선 1 도약 동작 기술의 성공 여부를 판별할 수 없는 변수로 제안하였다.

이와 같이 줄넘기 운동에 대한 생리학적 연구, 트레이닝방법 및 효과에 대한 연구, 상해와 관련된 연구가 다소 진행되어 왔으나, 줄넘기 운동과 관련된 운동학과 운동역학적 접근 및 상해 예방 및 최대 수행을 위한 최적의 발폭 및 바람직한 자세에 대한 연구는 부족한 것으로 판단된다. 따라서 이 연구는 줄넘기 운동 경력 2 년 이상의 초등학생 숙련그룹 15 명과 6 개월 이내의 미숙련 그룹 15 명을 대상으로 줄넘기 양발 1 회선 1 도약 동작의 시 숙련도와 발폭의 차이가 운동학 및 운동역학적 변인에 미치는 영향을 분석하는데 그 목적이 있다.

Method

1. Participants

이 연구 대상자는 최근 6 개월 이내에 정형외과적 병력과 일상생활에 지장이 없는 초등학교 남녀 4 학년을 대상으로, 주 5 회 1 일 30 분씩 주기적으로 줄넘기 운동을 실시하고 있는 경력 2 년 이상의 숙련 그룹 15 명(남 7 명, 여 8 명)과 6 개월 이하의 미숙련 그룹 15 명(남 7 명, 여 8 명)으로 나누어 선발하였다. 모든 대상자는 실험 전 동아대학교 연구윤리위원회(IRB)의 심의와 대상자 및 보호자의 실험 동의서를 받았으며, 실험이 진행되는 동안 대상자는 일상생활 이외 다른 운동 프로그램 참여를 제한하였다. 대상자들의 신체적 특성은 <Table 1>과 같다.

Table 1. Physical characteristics

	Age (yrs)	Height (cm)	Left leg length (cm)	Right leg length (cm)	Weight (kg)	BMI (kg/m^2)	Career (yrs)
Skilled (n=15)	10.85± 0.40	142.13±5.41	73.97±3.75	73.70± 3.63	36.97±6.65	18.57±2.32	2.44±0.49
Unskilled (n=15)	10.85± 0.40	143.31±5.54	73.30±3.93	73.40± 3.87	40.81± 10.39	19.72±4.27	0.55±0.06*

BMI : Body mass index, *Independent sample t-test* between Skilled and Unskilled, * is $p<.05$

2. Procedure

이 연구는 9 대의 적외선 카메라(MX-T10, Vicon, UK)와 1 대의 지면반력판(AMTI OR6-7, Watertown, MA, US)을 이용하였으며, 실험에 사용되는 줄넘기와 운동화는 분석의 일관성을 위하여 동일한 제품으로 이용하였다. 이 연구의 실험 절차는 2 일간 진행하였으며, 첫째 날은 동의서 작성, 신체적 특성 측정, 실험 환경 적응 훈련 및 사전 연습을 실시하였다. 사전 연습 시 모든 연구 대상자들은 동작의 일관성을 위하여 줄넘기 속력을 일치시켰으며, 속력은 메트로놈을 이용하여 135 beat/min(Metronome, SMM-88)로 설정하였다(Pittenger, McCaw, & Thomas, 2002). 그리고 양발 1 회선 1 도약 시 일관성 있는 속력에 적응할 수 있도록 충분히 사전 연습을 실시하였다. 둘째 날은 상해예방을 위해 충분한 스트레칭과 줄넘기 양발 1 회선 1 도약 동작을 이용하여 워밍업을 실시한 다음, 본 실험을 진행하였다. 실험이 이루어지는 공간 내에 실험 동작이 완전하게 수행될 수 있는 공간을 확보하여, 적외선 카메라 9 대와 1 대의 지면반력 시스템을 설치하였다. 전역좌표계는 대상자의 좌측후방 지면의 위치를 원점으로 하여 대상자의 좌우방향을 X 축, 전후방향을 Y 축, 수직방향을 Z 축으로 설정하였다(Figure 1).

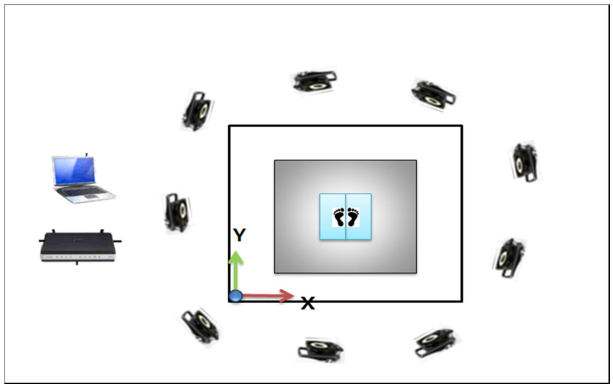

Figure 1. Setting up an experimental apparatus

모든 대상자들은 실험 시 스판 소재의 셔츠와 반바지를 착용하였으며, 안전을 위해 운동화를 착용하고 실시하였다. 대상자의 신체적 특성은 신장 측정이 가능한 체성분 분석기(GL-150KT, G-TECH, Korea)를 이용하여 신장과 체중을 측정한 다음, 체질량지수를 산출하였다. 그리고 줄넘기 동작 시 각 관절의 운동학자료를 산출하기 위하여 대상자의 어깨 너비(shoulder width), 팔꿈치 너비(elbow width), 손목 너비(wrist width), 손바닥 두께(hand thickness), 다리 길이(leg length), 무릎 너비(knee width), 발목 너비(ankle width)는 줄자와 캘리퍼를 이용하여 측정하였다. 신체 모델은 Vicon(Oxford, UK)사의 Plug in Gait Full Body Model 을 이용하여, 14 mm 구형 반사마커 39 개를 부착하여 구성하였다.

3. Data processing

양발 1 회선 1 도약 동작 시 영상자료와 지면반력 자료의 수집 및 분석은 Nexus software(Vicon, UK)를 이용하였으며, 영상자료의 샘플링 주파수는 200 Hz, 지면반력자료의 샘플링 주파수는 1000 Hz 로 설정하였다. 수집된 모든 자료는 Butterworth low-pass filter 2 차를 이용하여 차단주파수 6 Hz 로 필터링하였다(Decker, Torry, Wyland, Sterett, & Steadman, 2003; Pappas, Sheikhzadeh, Hagins, & Nordin, 2007), 양발 1 회선 1 도약 동작은 선호하는 발폭과 유도된 10 cm 발폭으로 구분하여 양발 1 회선 1 도약을 10 회 연속으로 실시하였으며, 10 회 연속 동작 중 안정적인 5, 6, 7 번째 자료를 분석하였다. 유도된 발폭의 경우 최소 범위를 10 cm 로 지정하였으며, 지면반력판 위에 최소 범위인 10 cm 를 표시하였다.
양발 1 회선 1 도약 동작 분석을 위해 총 다섯 개의 이벤트(E1, E2, E3, E4, E5)와 네 개의 구간(P1, P2, P3, P4)으로 나누어 분석하였다. E1 은 발이 지면과 접촉하는 순간(수직 지면반력 값이 10 N 이상인 순간), E2 는 수직 지면반력 값이 최대인 순간, E3 는 발이 지면반력 판에서 떨어지는 순간(수직 지면반력 값이 10N 이하인 순간), E4 는 신체 무게중심이 최대수직위치에 이르는 순간, E5 는 E1 과 동일한 시점으로 설정되었다. 구간은 각 이벤트 사이로 정의되었다. 분석 변수는 구간별 시간, 질량중심점 변위, 몸통분절의 가동범위, 좌·우 하지의 엉덩관절, 무릎관절, 발목관절 가동범위와 운동역학적 변수인 최대수직지면반력, 부하율을 분석하였다.

4. Statistical analysis

통계 처리는 SPSS 23.0 을 이용하여 각 변수들에 대한 평균과 표준편차를 산출하였으며, 모든 자료의 정규성 검정은 *Shapiro-Wilk test* 를 이용하여 검정하였다. 몸통관절, 엉덩관절, 무릎관절, 발목관절의 가동범위는 숙련도(숙련, 미숙련), 발폭(선호 발폭, 10 cm 발폭), 하지(왼 하지, 오른 하지) 간의 평균차이를 알아보기 위하여 반복측정에 의한 *MANOVA* 를 이용하였다. 또한 숙련도(숙련, 미숙련)와 발폭(선호 발폭, 10 cm 발폭)간의 평균차이를 알아보기 위하여 반복측정에 의한 *two-way ANOVA* 를 이용하였다. 숙련도간 사후검정은 독립

표본 *t*-검정, 발폭과 하지에 따른 사후검정은 대응표본 *t*-검정을 이용하였다. 모든 변수들의 통계적 유의수준(α)은 0.05 로 설정하였다.

Results

1. 구간별 시간

구간별 소요시간에 대한 결과, P4 의 경우, 그룹 간 주효과($F_{1,28}$=5.509, p=.033)에서 유의한 차이가 나타났으며, 사후검정 결과, 선호 발폭(t_{28}=2.424, p=.022)에서 숙련그룹보다 미숙련그룹이 유의하게 짧은 것으로 나타났다(Table 2).

Table 2. Elapsed time (Unit : s)

		PW	IW	t^a	F
	Skilled	0.14±0.01	0.14±0.02	0.465	0.002(W)
P1	Unskilled	0.14±0.02	0.14±0.02	0.579	0.062(G)
	t^b	0.546	0.062		0.511(W×G)
	Skilled	0.13±0.01	0.14±0.01	0.172	0.048(W)
P2	Unskilled	0.14±0.03	0.14±0.02	0.138	0.510(G)
	t^b	0.614	0.710		0.000(W×G)
	Skilled	0.09±0.02	0.09±0.02	0.093	0.005(W)
P3	Unskilled	0.10±0.01	0.10±0.01	0.447	2.076(G)
	t^b	1.326	1.093		0.060(W×G)
	Skilled	0.10±0.02	0.11±0.02	0.658	0.034(W)
P4	Unskilled	0.12±0.02	0.12±0.01	1.037	5.509*(G)
	t^b	2.424*	1.271		1.040

All data means mean and standard deviations, [a]: *Paired sample t-test* within PW and IW, [b]: *Paired sample t-test* between Skilled and Unskilled, P1 is phase 1, P2 is phase 2, P3 is phase 3, P4 is phase 4, PW means preferred width, IW means induced width, W: Main effect between widths, G: Main effect between groups, W× G: Interaction effects, * is p<.05

2. 발폭

발폭에 대한 결과(숙련그룹의 선호 발폭: 6.11±1.61, 숙련그룹의 유도된 발폭: 16.67±5.35, 미숙련그룹의 선호 발폭: 5.61±2.73, 미숙련그룹의 유도된 발폭: 16.44±4.04), 발폭 간 주효과($F_{1,28}$=205.395, p=.000)에서 유의한 차이가 나타났으며, 사후검정 결과, 숙련그룹(t_{14}=7.828, p=.000)과 미숙련그룹(t_{14}=16.969, p=.000)에서 선호 발폭이 유도된 발폭보다 유의하게 작은 것으로 나타났다(Figure 2).

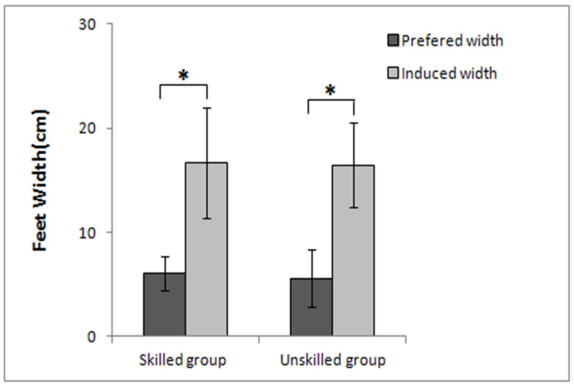

Figure 2. Feet width

3. 질량중심점 변위

질량중심점의 변위에 대한 결과, 좌우와 수직 변위의 경우, 주효과 및 상호 작용효과에서 유의한 차이는 나타나지 않았으나, 전후 변위에서(숙련그룹의 선호 발폭: 2.07±0.79, 숙련그룹의 유도된 발폭: 2.13±1.14, 미숙련그룹의 선호 발폭: 2.80±0.79, 미숙련그룹의 유도된 발폭: 2.64±1.08), 그룹 간 주효과($F_{1,28}$=5.481, p=.027)에서 유의하게 나타났으며, 사후검정 결과, 선호 발폭(t_{28}=2.497, p=.019)에서 숙련그룹이 미숙련그룹보다 유의하게 작은 것으로 나타났다(Figure 3).

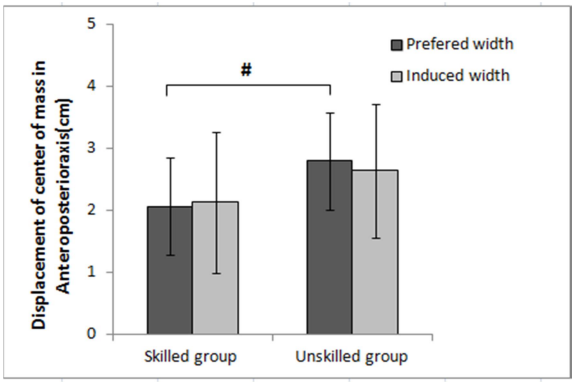

Figure 3. Displacement of center of mass

4. 몸통분절의 가동범위

몸통분절 가동범위에 대한 결과, 굴곡/신전 움직임에서(숙련그룹의 선호 발폭: 6.20±1.85, 숙련그룹의 유도된 발폭: 6.88±1.95, 미숙련그룹의 선호 발폭: 8.72±3.5, 미숙련그룹의 유도된 발폭: 9.30±2.65), 그룹 간 주효과($F_{1,28}$=8.141, p=.008)에서 유의한 차이가 나타났다. 사후검정 결과, 선호 발폭(t_{28}=2.426, p=.022)과 유도된 발폭(t_{28}=2.849, p=.008)에서 숙련그룹이 미숙련그룹 보다 유의하게 작은 것으로 나타났으며, 숙련그룹(t_{14}=2.773, p=.015)의 선호 발폭이 유도된 발폭보다 유의하게 작은 것으로 나타났다(Figure 4).

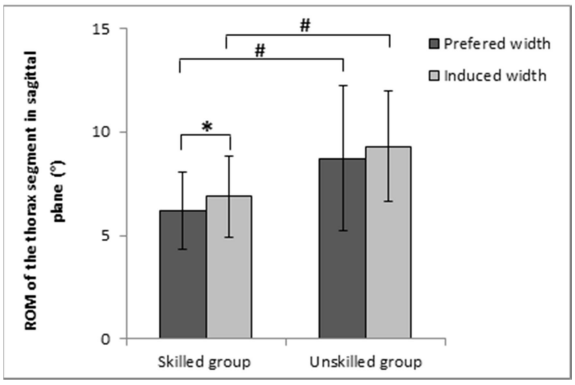

Figure 4. The ROM of thorax segment

5. 좌우 하지 관절의 가동범위

5.1 엉덩관절 가동범위

엉덩관절 가동범위에 대한 결과, 굴곡/신전 움직임에서의 가동범위는(숙련그룹의 선호 발폭: L: 12.66±4.96 / R: 12.66±4.96, 숙련그룹의 유도된 발폭: L: 13.85±5.43 / R: 14.42±5.74, 미숙련그룹의 선호 발폭: L:15.35±7.64 / R: 17.42±8.94, 미숙련그룹의 유도된 발폭: L: 16.73±7.36 / R: 18.94±8.67) 발폭 간의 주효과($F_{1,28}$=5.643, p=.025), 왼쪽 발과 오른쪽 발 간의 주효과($F_{1,28}$=10.924, p=.003)에서 유의한 차이가 나타났다. 사후검정 결과, 숙련그룹에서 선호 발폭의 오른쪽 발과 유도된 발폭의 오른쪽 발(t_{14}=2.813, p=.014)에서 유의한 차이가 나타났으며, 미숙련그룹의 선호 발폭(t_{14}=3.102, p=.008)과 유도된 발폭(t_{14}=2.781, p=.015)에서 왼쪽 발이 오른쪽 발보다 유의하게 작은 것으로 나타났다.
내전/외전 움직임에서의 가동범위는(숙련그룹의 선호 발폭: L: 3.97±1.67 / R: 4.29±1.806, 숙련그룹의 유도된 발폭: L: 5.09±1.89 / R: 4.64±1.52, 미숙련그룹의 선호 발폭: L: 4.51±1.97 / R: 4.65±1.88, 미숙련그룹의 유도된 발폭: L: 6.44±2.82 / R: 6.31±2.73) 가동범위는 발폭 간의 주효과($F_{1,28}$=5.643, p=.025), 왼쪽 발과 오른쪽 발 간의 주효과($F_{1,28}$=10.924, p=.003) 발폭 간의 주효과($F_{1,28}$=11.675, p=.002)에서 유의한 차이가 나타났다. 사후검정 결과, 미숙련그룹의 선호 발폭의 왼쪽 발과 유도된 발폭의 왼쪽 발(t_{14}=3.439, p=.004)에서 유의하게 나타났으며, 선호 발폭의 오른쪽 발과 유도된 발폭의 오른쪽 발(t_{14}=2.381, p=.032), 유도된 발폭(t_{28}=2.069, p=.048)에서 숙련그룹이 미숙련그룹보다 유의하게 작은 것으로 나타났다.
회전 움직임에서의 가동범위는(숙련그룹의 선호 발폭: L: 17.66±7.26 / R: 13.36±1.79, 숙련그룹의 유도된 발폭: L: 17.83±8.64 / R: 9.77±4.24, 미숙련그룹의 선호 발폭: L: 16.27±8.44 / R: 6.67±2.38, 미숙련그룹의 유도된 발폭: L: 17.15±8.41 / R: 8.29±3.53) 발폭 간의 주효과($F_{1,28}$=5.643, p=.025), 왼쪽 발과 오른쪽 발 간의 주효과($F_{1,28}$=10.924, p=.003) 가동범위는 왼쪽 발과 오른쪽 발 간의 주효과($F_{1,28}$=20.545, p=.000)에서 유의한 차이가 나타났다. 사후검정 결과, 미숙련그룹의 선호 발폭의 오른쪽 발과 유도된 발폭의 오른쪽 발(t_{14}=2.305, p=.037)에서 유의한 차이가 나타났으며, 숙련그룹의 유도된 발폭(t_{14}=4.906, p=.000)과 미숙련그룹의 선호 발폭(t_{14}=4.659, p=.000) 및 유도된 발폭(t_{14}=4.610, p=.000)에서 왼쪽 발이 오른쪽 발보다 유의하게 큰 것으로 나타났다(Figure 5).

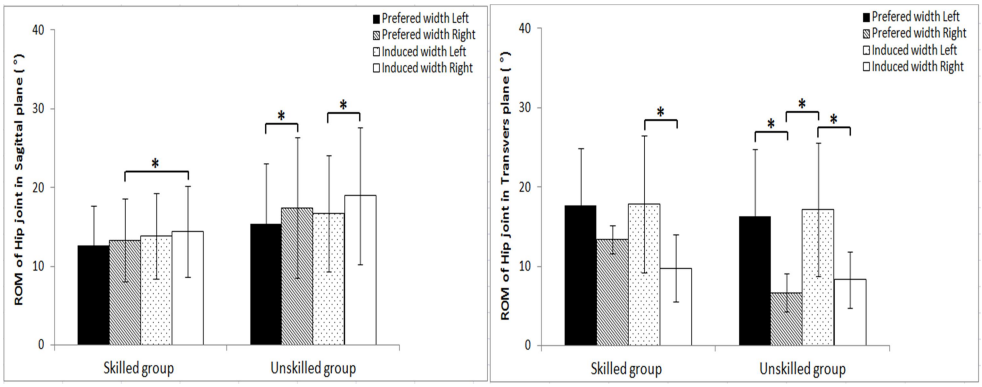

Figure 5. The ROM of hip joint

5.2 무릎관절 가동범위

무릎관절 가동범위에 대한 결과, 굴곡/신전 움직임에서의 가동범위는(숙련그룹의 선호 발폭: L: 34.34±6.29 / R: 36.83±5.60, 숙련그룹의 유도된 발폭: L: 34.93±6.71 / R: 36.42±7.00, 미숙련그룹의 선호 발폭: L: 36.70±7.69 / R: 36.83±9.13, 미숙련그룹의 유도된 발폭: L: 39.97±6.37 / R: 41.09±8.61) 왼쪽 발과 오른쪽 발 간의 주효과($F_{1,28}$=4.580, p=.041)에서 유의한 차이가 나타났다.
회전 움직임에서의 가동범위는(숙련그룹의 선호 발폭: L: 19.17±9.39 / R: 16.49±7.16, 숙련그룹의 유도된 발폭: L: 18.28±6.55 / R: 14.93±3.76, 미숙련그룹의 선호 발폭: L: 19.73±4.00 / R: 15.20±3.54, 미숙련그룹의 유도된 발폭: L: 20.93±3.29 / R: 16.12±3.00) 왼쪽 발과 오른쪽 발 간의 주효과($F_{1,28}$=14.608, p=.001)에서 유의한 차이가 나타났으며, 사후검정 결과, 미숙련그룹의 선호 발폭(t_{14}=4.007, p=.001)과 유도된 발폭(t_{14}=5.106, p=.000)에서 왼쪽 발이 오른쪽 발보다 유의하게 큰 것으로 나타났다(Figure 6).

5.3 발목관절 가동범위

발목관절 가동범위에 대한 결과, 내전/외전 움직임에서의 가동범위는(숙련그룹의 선호 발폭: L: 8.62±4.48 / R: 7.11±3.18, 숙련그룹의 유도된 발폭: L: 9.43±4.31 / R: 7.21±2.71, 미숙련그룹의 선호 발폭: L: 9.13±4.85 / R: 6.95±2.16, 미숙련그룹의 유도된 발폭: L: 9.85±4.52/ R: 7.31±2.99) 왼쪽 발과 오른쪽 발 간의 주효과($F_{1,28}$=14.608, p=.001)와 왼쪽 발과 오른쪽 발 간 주효과($F_{1,28}$=6.562, p=.016)에서 유의한 차이가 나타났으며, 사후검정 결과, 미숙련그룹의 유도된 발폭(t_{14}=2.337, p=.035)에서 왼쪽 발이 오른쪽 발보다 유의하게 큰 것으로 나타났다.
회전 움직임에서의 가동범위는(숙련그룹의 선호 발폭: L: 26.61±6.45/ R: 24.23±9.80, 숙련그룹의 유도된 발폭: L: 28.20±8.90 / R: 24.78±8.14, 미숙련그룹의 선호 발폭: L: 27.59±6.24 / R: 23.20±5.69, 미숙련그룹의 유도된 발폭: L: 30.73±9.91 / R: 24.06±7.62) 왼쪽 발과 오른쪽 발 간 주효과($F_{1,28}$=9.880, p=.004)에서 유의한 차이가 나타났으며, 사후검정 결과, 미숙련그룹의 선호 발폭(t_{14}=2.614, p=.020)과 유도된 발폭(t_{14}=2.458, p=.028)에서 왼쪽 발이 오른쪽 발보다 유의하게 큰 것으로 나타났다(Figure 7).

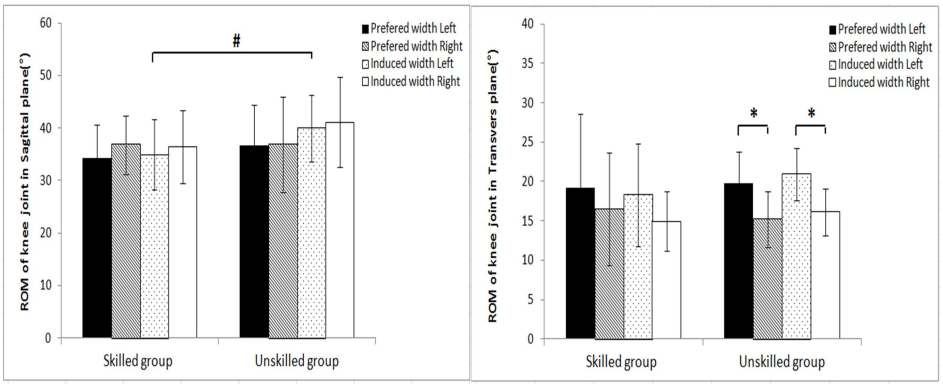

Figure 6. The ROM of knee joint

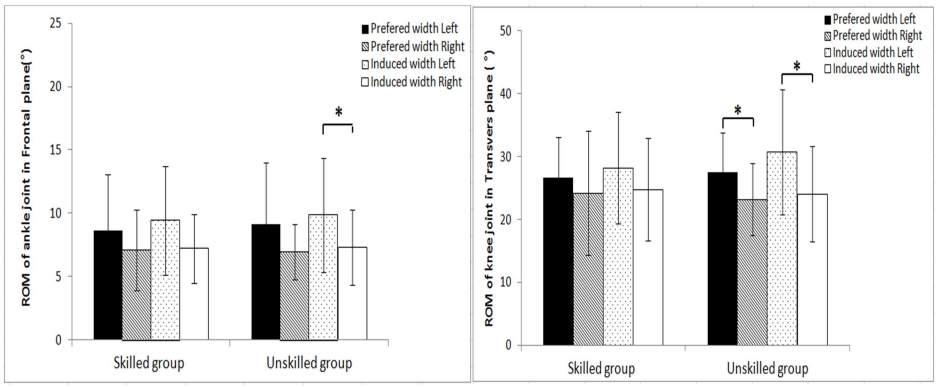

Figure 7. The ROM of ankle joint

6. 운동역학적 변수

최대수직지면반력과 P1구간의 부하율에 대한 결과, 주효과 및 상호 작용효과는 유의한 차이가 나타나지 않았다 (Table 3).

Table 3. The kinetic variables

		PW	IW	t^a	F
peak VGRF (Unit : N/kg)	Skilled	35.96±5.80	37.27±4.17	1.307	0.084(W)
	Unskilled	36.50±6.31	35.57±5.76	1.155	0.090(G)
	t^b	.248	.928		3.037(W×G)
Loading rate of P1 (Unit : N/kg/s)	Skilled	244.25±66.45	272.87±57.79	1.538	2.020(W)
	Unskilled	261.22±97.81	263.29±71.90	.190	0.025(G)
	t^b	.592	.428		1.510(W×G)

All data means mean and standard deviations, [a]: *Paired sample t-test* within PW and IW, [b]: *Paired sample t-test* between Skilled and Unskilled, P1 is phase 1, PW means preferred width, IW means induced width, W: Main effect between widths, G: Main effect between groups, W× G: Interaction effects, VGRF : Vertical ground reaction force, * is $p<.05$

Discussion

본 연구의 독립변인으로 설정된 발폭에 대한 결과, 숙련그룹은 선호 발폭이 6.11 cm, 유도된 발폭이 16.67 cm로 나타났으며, 미숙련그룹은 선호 발폭이 5.61 cm, 유도된 발폭이 16.44 cm로 나타났다. 따라서 선호 발폭과 유도된 발폭은 통계적으로 유의한 차이를 가지고 수행되었다. 일반적으로 정적기립자세 시 발목관절 내측과 사이의 평균거리는 약 9 cm(Murray, Seireg, & Sepic, 1975; Perry & Burnfield, 2010)와 동적 보행동작 시 발목관절 내측과 사이의 평균거리는 여자 약 7 cm, 남자 약 8 cm로 보고되었다(Murray, Kory, & Sepic, 1970; Perry & Burnfield, 2010). 이러한 특징은 정적안정성(static stability)과 동적안정성과 관련되며, 동적보행 시 발폭이 다소 감소하는 이유는 동적안정성과 추진력 확보를 위한 전략이며, 정적기립자세 유지 시 발폭이 다소 증가하는 이유는 기저면(base of support)을 넓혀 정적안정성 확보를 위한 전략이다(Shin, Youm, & Son, 2013). 이 연구의 줄넘기 동작 시 선호 발폭은 숙련도와 관계없이 정적기립자세보다 약 32~37% 감소하였으며, 유도된 발폭은 82~85% 증가하였다. 따라서 이 연구의 줄넘기 동작 시 정적안정성과 동적안정성 측면에서 운동학적 차이를 비교하기 위한 요인으로 발폭은 의미가 있는 것으로 판단되며, 이 연구 결과에 따른 줄넘기 1회선 1도약 동작 시 권장 발폭은 약 6 cm로 수행 시 최적의 줄넘기 동작을 할 수 있을 것으로 판단된다.

이 연구의 발폭에 따른 운동학적 차이에 대한 결과, 숙련그룹은 선호 발폭의 굴곡/신전 움직임에서 오른 엉덩관절 가동범위와 몸통분절의 가동범위가 유도된 발폭보다 작게 나타났다. 그리고 미숙련그룹은 내전/외전 움직임의 왼 엉덩관절 가동범위와 오른 엉덩관절 가동범위와 회전 움직임의 오른 엉덩관절 가동범위가 유도된 발폭보다 작게 나타났다. 따라서 줄넘기 동작 시 발폭이 증가할수록 발목관절과 무릎관절보다는 엉덩관절과 몸통관절에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 이 연구의 줄넘기 동작은 일관된 동작으로 반복하는 것이 그 특성이며, 이러한 움직임속에서 에너지를 최소화할 수 있어야 한다. 그러나 유도된 발폭의 엉덩관절과 몸통관절의 가동범위 증가는 이러한 전략과 대치하는 것이다. 일반적인 점프 동작 시 하지관절은 지면에 힘을 가할 수 있는 충분한 시간을 가지기 위하여 발목관절, 무릎관절, 엉덩관절을 크게 굴곡하고 신전하는 형태로 수행되며, 착지 구간에서는 점프 구간에서 발생된 충격을 흡수하기 위해 하지의 보다 큰 가동범위를 통하여 수행된다(Kim, 2000; Aragon-Vargas & Gross, 1997; Decker et al., 2003; Dowling & Vamos, 1993; Markovic, Dizdar, Jukic, & Cardinale, 2004). 그러나 줄넘기 동작은 발목관절, 무릎관절, 엉덩관절의 굴곡이 거의 없이 빠르게 반동을 이용하여 이루어지며, 이와 같은 줄넘기 동작의 점프는 지면에 힘을 가할 수 있는 시간을 최소화하여 가능한 빠르고 규칙적이며 일관된 동작으로 이루어진다(Butler et al., 2003). 따라서 이 연구의 줄넘기 동작의 선호 발폭이 동적 안정성을 유지하는데 유리한 전략인 것으로 판단된다.

숙련그룹은 선호 발폭의 줄넘기 동작 시 미숙련 그룹보다 질량중심점 전후변위를 작게, 굴곡/신전 움직임과 회전 움직임의 몸통분절 가동범위를 작게 하는 전략을 사용하는 것으로 나타났으며, 유도된 발폭의 줄넘기 동작 시 미숙련 그룹보다 굴곡/신전 움직임의 왼무릎관절 가동범위를 작게, 내전/외전 움직임의 오른엉덩관절 가동범위를 작게, 굴곡/신전 움직임의 몸통분절 가동범위를 작게 하는 전략을 사용하는 것으로 나타났다. 또한 숙련그룹은 선호 발폭의 질량중심점 전후변위, 굴곡/신전 움직임의 몸통분절 가동범위를 가능한 최소화하여 신체 전체의 전후 일관성 유지를 통하여 정확하게 반복 수행할 수 있는 것으로 판단된다. 또한 구간별 시간의 분석 결과 P4에서 선호 발폭과 유도된 발폭 모두에서 숙련그룹이 미숙련 그룹보다 시간 소요가 짧은 것으로 나타났다. 이는 숙련 그룹이 줄넘기 동작 시 질량중심점의 최고 높이에서부터 착지까지의 소요시간이 짧고 질량중심점의 높이가 낮은 점프 및 착지 동작을 수행하는 것으로 판단되며, 이는 숙련그룹이 같은 템포의 동작인 줄넘기 동작 시 동적 안정성을 유지하며 미숙련 그룹보다 효율적으로 동작을 수행한다는 것으로 판단된다.

인체는 점프 후 착지 시 신체 질량중심점 속도를 감소시켜 충격을 줄이는 역할을 수행하여야 하며, 이를 위하여 하지근 그룹의 역할이 필요하다(Devita & Skelly, 1992). 특히 착지 동작 시 질량중심점의 수직 각속도와 수평 각속도의 감소는 신체 질량중심점의 균형제어를 위하여 필수적인 요인이다(Wooten & Hodings, 2000; Kim & Youm 2015). 이 연구에서 착지 구간의 부하율과 지면반력에서 유의한 차이는 나타나지 않았으나 숙련 그룹의 경우 선호 발폭 시 부하율이 유도된 발폭 시 부하율 보다 큰 것을 확인 할 수 있었다. 따라서, 몸통분절의 움직임을 최소화하고 착지 시 자세유지와 에너지 효율을 보존하고 있는 이론적 근거를 제시할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 점프 후 발이 지면에 접촉하는 부위에 따라 전족 착지(forefoot landing)와 후족 착지(hindfoot landing) 형태로

나누어지며(Cortes et al., 2007), 전족 착지는 발의 앞꿈치(toe) 부분이 먼저 지면에 닿으며, 주로 점프 후 착지 동작에서 발생되고, 무릎관절의 경도(stiffness)에 영향을 미친다. 그리고 후족 착지는 발의 뒤꿈치(heel) 부분이 먼저 지면에 닿으며 주로 걷기와 조깅과 같은 보행 착지 동작에서 발생되고, 발목 관절의 경도에 영향을 미친다(Butler et al., 2003). 따라서 이 연구의 줄넘기 동작은 질량중심점의 높이를 최소화하는 전족 착지의 형태를 유지하고 있는 것으로 나타나 무릎관절의 경도와 기여도에 대한 추가의 연구를 통하여 발목관절과 무릎관절 간의 관계를 명확하게 구명할 필요가 있을 것으로 판단된다.

신체의 왼쪽과 오른쪽 분절간의 차이에 대한 결과, 선호 발폭에서 미숙련그룹은 회전 움직임의 왼 발목관절의 가동범위가 오른쪽보다 크게, 굴곡/신전 움직임의 왼 무릎관절의 가동범위가 오른쪽보다 크게, 굴곡/신전 움직임의 왼 엉덩관절의 가동범위가 오른쪽보다 작게, 회전 움직임의 왼 엉덩관절 가동범위는 오른쪽보다 작게 나타났다. 또한 유도된 발폭에서 미숙련그룹은 내전/외전 움직임과 회전 움직임의 왼 발목관절 가동범위가 오른쪽보다 크게, 회전 움직임의 왼 무릎관절 가동범위가 오른쪽보다 크게, 회전 움직임의 왼 엉덩관절 가동범위가 오른쪽보다 크게 나타났다. 그러나 숙련그룹은 선호 발폭에서 좌·우 하지 관절 간의 유의한 차이가 나타나지 않았다. 이와 같이 미숙련그룹은 발폭과 관계없이 발목관절, 무릎관절, 엉덩관절 가동범위에서 좌우 움직임의 불균형이 존재하며, 이러한 불균형은 차후 근골격계 상해에 영향을 미칠 수 있을 것으로 판단된다. 성장기 어린이들의 신체 자세 불균형은 척추 변형과 같은 다양한 신체 부위에서 부작용이 나타나며, 이러한 불균형에 대한 기전과 중재를 위한 연구는 요가, 유연성 운동, 발레, 교정체조 등을 이용하여 다소 이루어져 왔다(Choi, 2008; Lim, Kang & Kim, 2004). 이 연구의 결과에서 나타난 장기간의 줄넘기 운동을 수행해온 숙련그룹은 줄넘기 동작 시 좌우 하지 정렬의 일치성이 높은 것으로 나타났다. 이러한 결과는 장기간의 정확한 줄넘기 동작이 신체 전체의 좌우 불균형을 개선하는데 도움이 되는 것으로 판단된다.

Conclusion

줄넘기 동작 시 선호 발폭은 숙련도와 관계없이 정적기립자세보다 약 5.61~6.11 cm(32 ~ 37%) 감소가 나타났으며, 유도된 발폭은 16.44-16.67 cm(82 ~ 85%) 증가되어 나타났다. 그리고 줄넘기 동작 시 발폭이 증가할수록 발목관절과 무릎관절보다는 엉덩관절과 몸통관절에 영향을 미치며, 줄넘기 동작의 선호 발폭이 동적안정성을 유지하는데 유리한 전략인 것으로 판단된다. 숙련그룹은 선호 발폭의 질량중심점 전후변위, 굴곡/신전 움직임의 몸통분절 가동범위를 가능한 최소화하여 수행하는 것으로 나타났다. 그리고 이 연구의 줄넘기 동작은 질량중심점의 높이를 최소화하는 전족 착지의 형태를 이용하고 있는 것으로 나타났다. 미숙련그룹은 발폭과 관계없이 발목관절, 무릎관절, 엉덩관절, 몸통관절 가동범위에서 좌우 움직임의 불균형이 나타났으며, 장기간의 정확한 줄넘기 동작은 신체 전체의 좌우 불균형을 개선하는데 기여할 수 있을 것이다.

Reference

American Heart Association (2014). http:www.heart.org.

Am Jung, K., Lee, S. C., Hwang, S. H., & Song, M. B. (2009). ACL injury while jumping rope in a patient with an unintended increase in the tibial slope after an opening wedge high tibial osteotomy. *Arthroscopy And Sports Medlclne. 129(8)*, 1077-1080.

Aragon-Vargas, L. E., & Gross, M. M. (1997). Kinesiological factors in vertical jump performance: Differences within individuals. *Journal of Applied Biomechanics, 13(1),* 45-65.

Arnett, M., & Lutz, B. (2002). Effects of rope-jump training on the os calcis stiffness index of postpubescent girls. *Medicine and Science in Sports and Exercise, 34(12),* 1913-1919.

Baker, J., Côté, J., & Abernethy, B. (2003) Sport-specific practice and the development of expert decision-making in team ball sports. *Journal of Applied Sport Psychology, 15,* 12-25.

Bennell, K. L., Malcolm, S. A., Wark, J. D., & Brukner, P. D. (1996). Models for the pathogenesis of stress fractures in athletes. *British Journal of Sports Medicine, 30(3),* 200-204.

Butler, R. J., Crowell, H. P., & Davis, I. M. (2003). Lower extremity stiffness: implications for performance and injury. *Clinical Biomechanics, 18(6),* 511-517.

Chen, C. C., & Lin, Y. C. (2012). Jumping rope intervention on health-related physical fitness in students with intellectual impairment. *The Journal of Human Resource and Adult Learning, 8(1),* 56.

Choi, S. W. (2008). Effect of a 12 weeks of posture exercise program on body composition, physical fitness and cobb's angle of spinal of middle school students. *The Korea Jounal of Sports Science, 17(3),* 1045-1052.

Cortes, N., Onate, J., Abrantes, J., Gagen, L., Dowling, E., & Van Lunen, B. (2007). Effects of gender and foot-landing techniques on lower extremity kinematics during drop-jump landings. *Journal of Applied Biomechanics, 23(4),* 289.

Decker, M. J., Torry, M. R., Wyland, D. J., Sterett, W. I., & Steadman, J. R. (2003). Gender differences in lower extremity kinematics, kinetics and energy absorption during landing. *Clinical Biomechanics, 18(7)*, 662-669.

Devita, P. A. U. L., & Skelly, W. A. (1992). Effect of landing stiffness on joint kinetics and energetics in the lower extremity. *Medicine and Science in Sports and Exercise, 24(1),* 108-115.

Duzgun, I., Baltaci, G., Colakoglu, F., Tunay, V. B., & Ozer, D. (2010). The effects of jump-rope training on shoulder isokinetic strength in adolescent volleyball players. *Journal of Sport Rehabilitation, 19(2)*, 184-199.

Dowling, J. J., & Vamos, L. (1993). Identification of kinetic and temporal factors related to vertical jump performance. *Journal of Applied Biomechanics, 9(2),* 95-110.

Ghafouri, A., Hojat, S., & Irandoost, K. The Effects of the Fatigue with 3 Min of Rope Skipping Jogging on Kinematic Data's. *International Journal of Basic Sciences & Applied Research, 3*, 196-201.

Gowitzke, B. A., & Beown, L. (1989). Kinematic and Kinetic Components of Rope Skipping: A Pilot Study. *In ISBS-Conference Proceedings Archive,1(1).*

Grimston, S. K., & Zernicke, R. F. (1993). Exercise-related stress responses in bone. Journal of Applied Biomechanics, 9(1), 2-14.

Hatfield, B. D., Vaccaro, P., & Benedict, G. J. (1985). Self-concept responses of children to participation in an eight-week precision jump-rope program. *Perceptual and Motor Skills, 61(3),* 1275-1279.

Hawkins, R. J., & Kennedy, J. C. (1980). Impingement syndrome in athletes. *American Journal of Sports Medicine, 8(3),* 151-158.

Jump Rope for Heart (2014). http:www.heart.org

Karim, K., & Bruker, P. (1998). Ankle acute injuries. In: Encyclopedia of Sports Medicine and Science, TD Fahey (Editor). *Internet Society for Sports Science,* 74.

Kim, C. K. (2000). The Effect of Muscle Stretch Types and Pre-strech Angles on Vertical Jumping Movement. *Journal of Sport and Leisure Studies, 13(5), 575-588.*

Kim, T. H., & Youm, C. H. (2013). Effects of knee joint muscle fatigue and overweight on the angular displacement and moment of the lower limb joints during landing. *Korean Journal of Sport Biomechanics, 23(1),* 63-76.

Kim, Y. K., & Youm, C. H. (2015). Effects of Landing Height and Knee Joint Muscle Fatigue on Movement of the Lower Extremity during Cutting After Landing. *Korean Journal of Sport Biomechanics, 25(3),* 312-323.

Kim, Y. S. & Kim, D. H. (2015). A Comparative Analysis on the Kinematic and Ground Reaction Force Factors by Rope Skipping Types. *Korea Society for Wellness, 10(2),* 77-77.

Korea Rope Skipping Association (2016). http:www.skiprope.co.kr

Komi, P. V. (1984). Physiological and biomechanical correlates of muscle function: Effects of muscle structure and stretch-shortening cycle on force and speed. *Exercise and Sport Sciences Reviews, 12(1),* 81-121.

Lim, Y. T, Kang, S. Y. & Kim, J. W. (2004). Effect of a Three-Month Stretching Program on Flexibility and Curvature in Middle-School Girl Students with Mild Scoliosis. *The Korean Society for the study of Physical Education, 9(1),* 186-194.

Markovic, G., Dizdar, D., Jukic, I., & Cardinale, M. (2004). Reliability and Factorial Validity of Squat and Countermovement Jump Tests. *Journal of Strength & Conditioning Research, 18(3),* 551-555.

McNitt-Gray, J. L. (2000). Subject specific coordination of two- and one-joint muscles during landings suggests multiple control criteria. *Motor Control, 4(1),* 84-88. 15.

Ministry of Culture, Sport and Tourism (2015). http:www.mcst.go.kr

Miyaguchi, K., Sugiura, H., & Demura, S. (2014). Posibility of stretch-shortening cycle movement training using a jump rope. *Journal of Strength & Conditioning Research, 28(3)*, 700-705.

Miyaguchi, K., Demura, S., & Omoya, M. (2015). Relationship between jumo rope double unders and sprint performance in elementary schoolchildren. *Journal of Strength & Conditioning Research, 29(11),* 3229-3233.

Murray, M. P., Kory, R. C., & Sepic, S. B. (1970). Walking patterns of normal women. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation, 51(11)*, 637-650.

Murray, M. P., Seireg, A. A., & Sepic, S. B. (1975). Normal postural stability and steadiness: quantitative assessment. *International Bone Joint Surgery, 57A(4)*, 510-516.

Norman, R. W., & Komi, P. V. (1979). Electromechanical delay in skeletal muscle under normal movement conditions. *Acta Physiologica Scandinavica, 106(3),* 241-248.

Orhan, S. (2013). Effect of weighted rope jumping training performed by repetition method on the heart rate, anaerobic power, agility and reaction time of basketball players. *Advance in Environmental Biology 7,* 945-951.

Ozer, D., Duzgun, I., Baltaci, G., Karacan, S., & Colakoglu, F. (2011). The effects of rope or weighted rope jump training on strength, coordination and proprioception in adolescent female volleyball players. *Journal of Sports Medicine and Physical Fitness, 51(2),* 211.

Paterno, M. V., Ford, K. R., Myer, G. D., Heyl, R., & Hewett, T. E. (2007). Limb asymmetries in landing and jumping 2 years following anterior cruciate ligament reconstruction. *Clinical Journal of Sport Medicine, 17(4),* 258-262.

Pappas, E., Sheikhzadeh, A., Hagins, M., & Nordin, M. (2007). The effect of gender and fatigue on the biomechanics of bilateral landings from a jump: Peak values. *Journal of Sports Science and Medicine*, *6(1),* 77-84.

Perry, J. & Burnfield, J. M. (2010). Gait analysis: Normal and pathological function, 2nd eds. NJ; Slack Inc.

Pittenger, V. M., McCaw, S. T., & Thomas, D. O. (2002). Vertical ground reaction forces of children during one and two-leg rope jumoing. *Research quarterly for exercise and sport, 73(4),* 445-449.

Sánchez, S., Ortega, X., Baar, A., Lillo, S., De la Maza, B., Moenne, K., ... & Pérez, C. (2013). Lower limb asymmetry:Imaging evaluation in children. *Revista chilena de radiología, 19(4),* 177-186.

Shin, Y. H., Youm, C. H., & Son, M. J. (2013). Effects of Foot Type and Ankle Joint Fatigue Levels on the Trajectories of COP and COM during a Single-Leg Stance. *Korean Journal of Sport Biomechanics, 23(4),* 335-345.

Solis, K., Foster, C., Thompson, N., & Cefalu, C. (1988). Aerobic requirements for and heart rate responses to variations in rope jumping techniques. *The Physician and Sportsmedicine, 16(3),* 121-128.

Stergiou, N. (2004). *Innovative analyses of human movement.* Human Kinetics Publishers.

Tanikawa, H., Matsumoto, H., Harato, K., Kiriyama, Y., Suda, Y., Toyama, Y., & Nagura, T. (2014). Female recreational athletes demonstrate different knee biomechanics from male counterparts during jumping rope and turning activities. *Japanese Orthopaedic Science, 19(1),* 104-111.

Trecroci, A., Cavaggioni, L., Caccia, R., & Alberti, G. (2015). Jump Rope Training: Balance and Motor Coordination in Preadolescent Soccer Players. *Journal of Sports Science and Medicine, 14(4),* 792-798.

Weeks, B. K., Young ,C. M., & Beck, B. R. (2008). Eight months of regular in-school jumping improves indices of bone strength in adolescent boys and Girls: *Journal of Bone and Mineral Research. 23(7),* 1002-1011.

Wielligh, V. C. (2011). Ajax cape town football club youth academy- physical development program. *Performance Conditioning Soccer, 16(5)*, 6-7.

Wooten, W. L., & Hodgins, J. K. (2000). Simulating leaping, tumbling, landing and balancing humans. *In Robotics and Automation, IEEE International Conference 1,* 656-662.

Wright, C. J., Arnold, B. L., & Ross, S. E. (2016). Altered Kinematics and Time to Stabilization During Drop-Jump Landings in Individuals With or Without Functional Ankle Instability. *Journal of Athletic Training, 51(1),* 5-15.

Yoshioka, Shinya, Kenji Matsuura, & Naka Gotoda. (2015). Hand-motion Analysis for Development of Double-unders Skill. *Procedia Computer Science, 60,* 775-783.