

스쿼트 동작 시 수동적 발목 가동범위와 무릎 관절 운동역학적 변인 간 상관성 분석

이재우^{1,*} · 박준성¹ · 임영태^{1,2} · 권문석^{2,†}

¹건국대학교 스포츠헬스과학부, 학생

²건국대학교 스포츠헬스과학부, 교수

³건국대학교 스포츠융복합연구소, 교수

(2020년 6월 7일 접수: 2020년 6월 16일 수정: 2020년 6월 22일 채택)

Analysis of correlation between passive ankle movement range and knee joint kinetic variables during squat movement

JaeWoo Lee^{1,*} · JunSung Park¹ · Young-Tae Lim^{1,2} · Moon-Seok Kwon^{3,†}

¹*Department of Sports Health Science, Konkuk University*

²*Sports Convergence Institute, Konkuk University*

(Received June 7, 2020; Revised June 16, 2020; Accepted June 22, 2020)

요 약 : 본 연구의 목적은 딥 스쿼트 동작 시 발목 관절 유연성이 무릎 관절의 운동역학적 요인들간의 관련성을 분석하는데 있었다. 본 연구는 최근 1년간 하지 근골격계 병력이 없는 성인 남성 19명과 여성 8명이 연구대상자로 참여하였다. 딥 스쿼트 시 발목 관절 유연성과 하지 관절의 운동역학적 요인들과 상관관계를 검증하기 위해 pearson의 적률상관계수(pearson's correlation coefficient)를 이용하였고(SPSS 24.0, Armonk, NY, USA), 통계적으로 유의미한 상관성을 나타낸 변인들은 단순회기분석(simple regression analysis)을 실시하였으며, 유의 수준은 .05로 설정하였다. 본 연구를 통해 발목 관절 유연성과 무릎 관절의 압력을 결정하는 최대 관절모멘트와 관절반발력 요인들 간의 관련성을 확인할 수 있었다. 그러므로 근력 트레이닝 시 딥 스쿼트와 같은 무릎 관절에 많은 부하를 발생시킬 수 있는 운동을 적용할 때 개인에 신체적 특성 중 발목 관절의 유연성의 정도를 확인하는 것은 신체의 안정성과 무릎 관절의 상해 위험성을 감소시킬 수 있는 운동 강도를 설정하는데 도움이 될 수 있을 것으로 기대한다.

주제어 : 스쿼트, 발목 관절 유연성, 관절모멘트, 관절반발력

Abstract : The purpose of this study was to analyze the correlation between passive ankle movement range and knee joint kinetic variables during squat movement. In this study, a total of 27 subjects participated in this study, 19 men and 8 women, who had no history of the musculoskeletal system of the lower extremity. To verify the correlation between the ankle joint flexibility and the

[†]Corresponding author
(E-mail: rnjsanstjr@kku.ac.kr)

knee joint kinetic variables during deep squat, it was performed pearson's correlation coefficient and variables showing statistically significant correlation were performed by simple regression analysis at a significant level of α .05. Through this study, the relationship between the peak joint moment and joint reaction force factors that determine ankle joint flexibility and knee joint pressure was confirmed. Therefore, when applying an exercise that can generate a lot of load on the knee joint such as deep squats during strength training, checking the degree of flexibility of the ankle joint among physical characteristics to the individual may reduce the stability of the body and the risk of injury to the knee joint. It is expected to be helpful in setting the intensity of exercise that can be done.

Keywords : Squat, Ankle joint Flexibility, Joint moment, Joint reaction force

1. 서론

스쿼트 시 하지와 코어 근육들의 강력한 수축을 지원하는 대표적 저항성 운동 중 하나이다[1, 2]. 스쿼트는 무릎 관절의 굴곡 운동을 통해 앉은 자세를 완성하며, 발목과 힙 관절의 굴곡을 동반한다[3, 4]. 대퇴 근육들은 스쿼트 운동 시 무릎 관절 운동에 작용하여 신체와 외부 중량을 운동시키는 기능을 수행하며, 이로 인해 무릎 관절에는 다른 관절에 비해 큰 부하가 발생한다[5]. 이에 스쿼트 시 중량과 앉은 자세에 따른 운동 강도는 개인의 근력, 근지구력, 유연성 등의 신체적 특성을 고려하여 결정하여야 한다[6, 7].

스쿼트 동작은 개인의 신체적 특성에 따라 동작을 수행 능력에 차이를 유발될 수 있으며, 이러한 신체적 특성 중 지면과 가장 가까운 발목 관절의 운동 범위는 스쿼트 시 동적 균형성과 높은 연관성을 가지고 있는 것으로 보고되고 있다[8]. 운동형상학적 사슬(kinematic chain)의 관절에서 발목 관절의 유연성은 무릎 관절의 굴신 각도에 영향을 주어 무릎 관절에 작용하는 대퇴 근육들의 수축력에 차이를 가져옴으로써 무릎 관절에서 발생하는 부하의 크기에 차이를 유발할 수 있다[9, 10]. 더욱이 스쿼트 동작 시 발목 관절의 굴신 운동 범위는 개인의 관절 유연성(flexibility)에 의해 결정되며 고강도의 부하 운동 시 발목 관절 운동 범위의 증가는 종아리 근육들의 수축을 증가시키는 반면 대퇴근육들의 수축을 상대적으로 감소시켜 무릎 관절에 발생하는 큰 부하를 감소시킬 수 있는 요인 중 하나로 보고되고 있다[11].

스쿼트 운동 시 무릎 관절의 굴곡 각도의 변화에 따라 쿼터(quarter) 스쿼트, 하프(half) 스쿼트,

딥(deep) 스쿼트로 구분되며, 관절의 굴곡 각도가 증가될수록 무릎 관절의 부하도 증가한다. 또한 외부 중량의 증가 요인도 무릎 관절의 부하를 상승시키는 요인으로 작용한다. 무릎 관절 각도가 가장 큰 딥 스쿼트는 무릎 관절 부하를 결정하는 관절 반발력과 모멘트 요인들을 가장 많이 유발하는 운동이다[12]. 무릎 관절의 굴곡 상태에서 대퇴근육들의 강력한 수축력은 관절 반발력을 증가시킬 뿐만 아니라 최대 신전 모멘트의 발생을 동반하기 때문에 이로 인한 무릎 관절의 압축력과 전단력의 증가는 무릎 관절의 상해 위험성을 증가시키게 된다[13]. 부하 운동 시 무릎 관절에 발생할 수 있는 상해 위험성은 특정 관절에 집중되어지는 부하로 인해 발생하는 빈도가 높다. 하지만 하지 관절을 통한 부하 운동 시 발목 관절의 유연성은 신체 운동성과 안정성에 영향을 미치는 대표적인 신체 특성 중 하나이다.

그러므로 본 연구에서는 무릎 관절 굴신 각도와 부상 위험성이 가장 큰 딥 스쿼트 동작을 대상으로 개인의 발목 관절 유연성이 무릎 관절의 운동역학적 요인들에 미치는 영향을 분석하는데 목적이 있다. 이를 통해 딥 스쿼트 운동 시 개인의 운동 능력과 무릎 관절 상해 위험성을 고려함에 있어서 발목 관절 유연성의 적용에 대한 근거를 제시하고자 한다.

2. 연구 방법

2.1. 연구대상

본 연구는 최근 1년간 하지 근골격계 병력이 없고 주동다리가 오른다리인 성인 남성 19명과 여성 8명으로 총 27명의 연구대상자가 참여하였

다<Table 1>. 모든 연구대상자들은 본 연구의 목적과 절차를 충분히 설명 받고 실험 참가 동의서를 작성한 뒤 본 실험에 참여하였다.

2.2. 실험방법

본 연구에 참여한 연구대상자들은 신장과 체중을 측정한 뒤 인체계측용 측정기를 이용하여 각 신체 분절 길이와 둘레를 측정하였고 전자 고니어미터(electronic goniometer)를 이용하여 발목 관절의 유연성 요소를 계측하였다. 이후 각 연구대상자들은 부상 방지를 위해 약 10분 동안 스트레칭과 딥 스쿼트 예비동작을 통해 충분한 준비

운동을 실시하였다.

발목 관절 유연성 요소는 능동적 배측굴곡각도(passive dorsi-flexion angle)와 능동적 저측굴곡각도(passive plantar-flexion angle)를 이용하였다. 발목 관절의 유연성 측정은 검사자가 전자 고니어미터의 중심축을 연구대상자의 발목 관절 외측과(lateral malleolus)에 고정시킨 뒤, 고니어미터의 한쪽 끝은 오른다리의 비골 중간부(fibular shaft), 반대쪽 끝은 오른발의 다섯 번째 중족골두(5th metatarsal head)에 각각 위치시켜 오른쪽 발목 관절의 내각을 산출하였다<Table 1>. 발목 관절 유연성의 수치 증가는 저측굴곡의

Table 1. Physical characteristics of participants

Subject number.	Gender	Age(yrs)	Weight(kg)	Height(cm)	Passive ankle flexibility(degree)	
					Ankle joint dorsi-flexion angle[ADFA]	Ankle joint plantar-flexion angle[APFA]
1	M	20	58	168	97	170
2	F	21	46.3	159	100	162
3	M	20	68	172	106.7	162.7
4	M	24	73	179	102	162
5	M	18	72	179	104	160
6	M	18	60	173	99	175
7	M	18	65	180	89	172
8	F	21	60.7	169	108	168
9	M	24	82	182	104	176
10	M	23	79	168	133.2	180
11	M	19	76	180	118	166
12	F	23	59	162	99	174
13	M	20	68	173	104.5	158.6
14	F	21	62	168	91	172
15	M	23	74	175	107	163
16	M	23	73	186	105	170
17	M	23	75	178	94	160
18	M	24	80	180	96	170
19	F	22	54.3	161	112	170
20	F	20	56	162	120	178
21	F	21	55	161	106	167
22	M	19	67	174	102	168
23	M	18	75	177	98	160
24	F	20	63.8	166	120	180
25	M	21	77	189	120	173.6
26	M	20	97	180	120	165
27	M	19	70	177	120	160
Mean±SD	-	20.9±2.0	68.4±10.7	173.3±0.1	106.5±10.7	168.3±6.5

Note, M = male, F = female

증가를 의미하고 반대로, 수치 감소는 배측굴곡이 증가되는 것을 의미한다.

이후 연구대상자들은 spandex 소재의 실험복으로 환복한 뒤, vicon plug-in-gait model을 기반으로 인체의 주요 관절과 분절에 15mm 반사마커 47개를 부착하였다. vicon사에서 제공하는 active wand를 이용하여 calibration을 실시하였으며 좌우 방향을 X 축, 전후 방향을 Y축, 수직 방향을 Z축으로 전역좌표계를 설정하였다. 딥 스쿼트 동작 시 3차원 위치데이터를 수집하기 위해 8대의 적외선 모션캡처 카메라를 이용하여 statics와 dynamics trial을 촬영하였으며 (sampling rate: 250Hz), 무릎 관절에서 발생하는 peak moment와 peak force를 산출하기 위해 2대의 지면반력기(QR6-7-1000, AMTI, .Inc, Watertown, MA, USA)를 이용하였다(sampling rate: 1000Hz).

본 연구에 참여한 피험자들은 지면반력기 위에 올라가 양 발을 어깨너비로 벌리고 약 15도 외회전 시켰으며 중량부하인 바벨을 승모근 상부에 위치시켜 준비 자세를 취하였다. 이후 시작 신호에 맞춰 딥 스쿼트 1회를 실시하였다. 정확한 딥 스쿼트를 수행하기 위해 대퇴와 하퇴의 후면이 서로 접촉하도록 무릎 관절을 굴곡 시켰으며[12], 중량부하의 무게는 연구대상자 간 상이한 신체적 능력을 고려하여 체중의 50%로 설정하였다[14].

2.3. 자료처리

딥 스쿼트 동작에서 수집한 인체 마커의 위치 데이터와 지면반력 데이터는 nexus 1.8.5(Vicon Inc., Denver, CO, USA) 소프트웨어를 이용하여

데이터 처리하였다. 주요 관절과 분절에 부착한 반사마커는 fourth-order butterworth filter를 이용하여 8Hz로 smoothing하였으며, 지면반력 데이터는 fourth-order low-pass butterworth filter를 이용하여 50Hz로 smoothing 한 뒤 c3d 형태의 파일로 저장하였다. 무릎 관절의 운동역학적 자료를 수집하기 위해 c3d파일을 kwon3d 소프트웨어에 입력하여 데이터를 변환하였다. 무릎 관절의 운동역학적 자료는 각 연구대상자들의 신체 분절 관성치와 운동학적 데이터, 지면반력 데이터를 inverse dynamics 방법에 대입하였으며 무릎 관절에서 발생하는 peak moment와 peak force를 계산하였다. 무릎 관절의 지역좌표계는 x 축을 ML(medial lateral)축, y축을 AP(anterior-posterior)축, z축을 VT(vertical)축으로 정의하였으며 무릎 관절의 ML 축에서 양(+의) 수치는 extension, 음(-)의 수치는 flexion, AP 축에서 양(+의) 수치는 adduction, 음(-)의 수치는 abduction, 수직 축에서 양(+의) 수치는 internal rotation, 음(-)의 수치는 external rotation으로 계산하였다. 모든 연구대상자들의 좌,우 다리의 움직임이 동일하다는 가정 하에 주동다리인 오른 쪽 다리의 무릎 관절 peak moment와 peak force를 산출하였다. 산출된 무릎 관절의 운동역학적 자료는 각 연구대상자의 체중과 중량부하를 합한 값(BW*1.5)으로 나누어 표준화하였다. 딥 스쿼트 시 무릎 관절의 peak moment와 peak force를 분석하기 위해 ready(RD), max knee flexion(MKF), finish(FIN)으로 3개의 이벤트를 정의하였다(Figure 1).

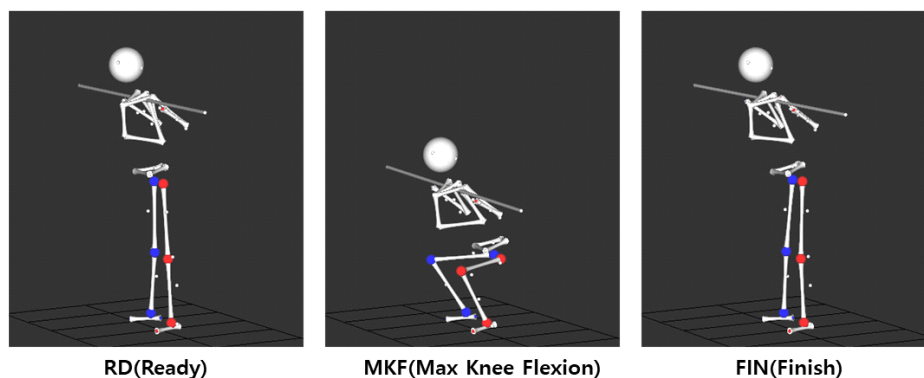


Fig. 1. Event of deep squat.

2.4. 통계처리

본 연구에서 수집된 자료는 평균(mean)과 표준편차(standard deviation)을 산출하여 SPSS 24.0(IBM, Armonk, NY, USA) 통계프로그램에 입력하였다. 딥 스쿼트 시 발목 관절의 유연성 요소와 무릎 관절에서 발생하는 방향별 peak moment, peak force 간 상관관계를 검증하기 위해 pearson의 적률상관계수(pearson's correlation coefficient)를 이용하여 분석하였으며, 통계적으로 유의미한 상관성을 나타낸 변인들은 단순회귀 분석(simple regression analysis)을 실시하였다. 통계적 유의 수준은 .05로 설정하였다.

3. 결과 및 고찰

본 연구는 연구 참여자 27명을 대상으로 측정된 발목 관절의 유연성 요소와 딥 스쿼트 시 무릎 관절에서 발생하는 peak moment와 peak force 요인들 간의 관련성을 검증하기 위하여 상관관계 분석을 한 결과는 <Table 2>과 같다. 그리고 통계적으로 의미 있는 상관관계를 나타낸 변인들 간의 단순회귀분석을 실시한 결과는 <Figure 2>과 같다.

발목 관절의 유연성 요소와 무릎 관절의 3축에 대한 peak moment 요인들의 상관관계를 확인한 결과, <Table 2>에서 보는 바와 같이, 발목 관절의 dorsi-flexion angle과 무릎 관절의 외전 모멘트(abductor moment) 요인과 통계적으로 부적(-) 상관관계를 나타내었다($r = -.430$, $p = .025$). <Figure 2. A>와 같이, 발목 관절의 수동적 유연

성이 증가할수록 딥 스쿼트 시 무릎 관절에서 발생하는 최대 외전 모멘트의 수치가 증가하는 것을 확인할 수 있었다($R^2 = .185$). 발목 관절의 유연성과 무릎 관절의 3축에 대한 peak force 요인들 간의 상관관계를 분석한 결과, 발목 관절의 dorsi-flexion angle과 딥 스쿼트 동작 시 무릎 관절의 최대 전방 반발력(anterior force) 요인과 정적(+) 상관관계를 나타내었다($r = .475$, $p = .012$). <Figure 2. B>와 같이, 발목 관절의 수동적 유연성이 증가할수록 딥 스쿼트 시 무릎 관절에서 발생하는 최대 전방 반발력 수치가 증가하는 것을 확인할 수 있었다($R^2 = .475$).

신체 관절의 유연성의 증가는 운동의 가동 범위를 증가시키는 효과를 발생시키지만[15], 과도한 근육의 수축에 의한 긴장상태에서는 오히려 관절의 가동범위의 제약시키는 역할로 작용한다[16]. 특히, 딥 스쿼트와 같이 강한 강도의 운동을 수행하는데 있어서 강력한 대퇴근육들의 수축력은 무릎 관절의 운동을 감소시킬 수 있을 것이다. 하지만 본 연구에서 나타난 결과와 같이, 딥 스쿼트 시 무릎 관절의 최대 굴곡 후 중량부하를 중력의 역방향으로 운동시키기 위해 무릎 관절을 신전시킬 때 발목 관절의 유연성이 높은 피험자들일수록 무릎 관절에서 발생하는 최대 외전 모멘트와 최대 전방 반발력 요인들의 증가를 확인할 수 있었다. 이는 무릎 관절에 작용하는 대퇴근육들의 강력한 수축에 의해 발생되는 요인들로서 무릎 관절에 많은 부하를 유발함으로써 관절의 상해 위험성을 증가시킬 있는 요인으로 작용할 수 있다[17]. 더욱이, 최대 무릎 관절 굴곡 후 수직으로 중량을 운동을 시킬 때 무릎 관절에서

Table 2. Results of correlation between passive ankle flexibility and kinetic variables of knee joint during deep squat

Knee joint variables	Passive ankle flexibility			
	Dorsi-flexion angle		Plantar-flexion angle	
	<i>r</i>	<i>p</i>	<i>r</i>	<i>p</i>
Knee joint peak moment				
Extensor moment	-0.083	0.679	0.077	0.701
Abductor moment	-.430	0.025*	-0.048	0.812
Internal rotator moment	-0.005	0.980	-0.004	0.982
Knee joint peak force				
ML shear force	0.055	0.784	0.061	0.763
AP shear force	.475	0.012*	0.180	0.369
Compressive force	-0.323	0.101	0.046	0.821

Note. * a <.05

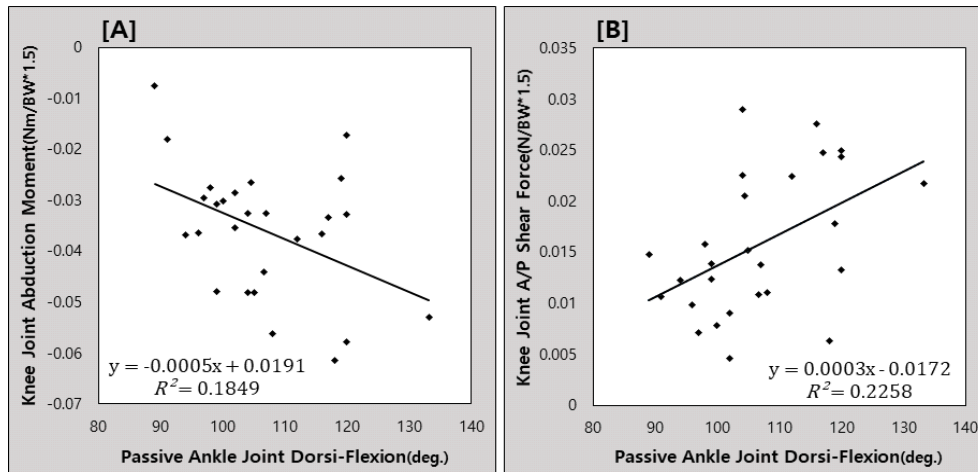


Fig. 2. Results of simple regression analysis between passive ankle joint dorsi-flexion and knee joint kinetic variables during deep squat.

발생하는 최대 외전 모멘트의 증가와 최대 전방 반발력은 하퇴의 후방 회전력을 감소시킴으로서 무릎 관절의 신전 운동을 저하시킬 수 있다. 이는 원활한 스쿼트를 저해시킬 수 있을 뿐만 아니라 무릎 관절에 많은 부하가 오랜 시간 발생하는 요인으로 작용함으로써 무릎 관절의 운동역학적 요인들에 영향을 줄 수 있는 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구의 목적은 딥 스쿼트 동작 시 발목 관절 유연성이 무릎 관절의 운동역학적 요인들간의 관련성을 분석하는데 있었다. 본 연구를 통해 발목 관절 유연성과 무릎 관절의 압력력을 결정하는 최대 관절모멘트와 관절반발력 요인들 간의 관련성을 확인할 수 있었다. 발목 관절의 유연성 요소와 무릎 관절의 외전모멘트 그리고 최대 전방 반발력요인들 간에 통계적으로 유의한 관련성이 있음을 확인할 수 있었다. 그러므로 근력 트레이닝 시 딥 스쿼트와 같은 무릎 관절에 많은 부하를 발생시킬 수 있는 운동을 적용할 때 개인에 신체적 특성 중 발목 관절의 유연성의 정도를 확인하는 것은 신체의 안정성과 무릎 관절의 상해 위험성을 감소시킬 수 있는 운동 강도를 설정하는데 도움이 될 수 있을 것으로 기대한다. 다만, 본 연구에서는 피험자들의 대퇴근력과 속력도

요인들을 고려하지 않아 일반화하는데 있어서 제한점을 가지고 있으며, 차후 연구에서는 이러한 요인들을 고려한 연구들이 수행되어야 할 것으로 생각된다.

감사의 글

이 논문은 2019년도 건국대학교 연구마일리지 연구비 지원에 의한 논문임

References

1. R. F. Escamilla, G. S. Fleisig, T. M. Lowry, S. W. Barrentine, J. R. Andrews, "A three-dimensional biomechanical analysis of the squat during varying stance widths", *Medicine & Science in Sports & Exercise*, Vol.33, No.6 pp. 984-998, (2001).
2. P. Kasim, "Optimizing squat technique", *Strength and Conditioning Journal*, Vol.29, No.6 pp. 10, (2007).
3. H. Hartmann, K. Wirth, M. Klusemann, "Analysis of the load on the knee joint and vertebral column with changes in squatting depth and weight load", *Sports*

- medicine*, Vol.43, No.10 pp. 993-1008, (2013).
4. D. R. Clark, M. I. Lambert, A. M. Hunter, "Muscle activation in the loaded free barbell squat: a brief review", *Journal of Strength and Conditioning Research*, Vol.26, No.4 pp. 1169-1178, (2012).
 5. A. Heijne, B. C. Fleming, P. A. Renstrom, G. D. Peura, B. D. Beynnon, S. Werner, "Strain on the anterior cruciate ligament during closed kinetic chain exercises", *Medicine & Science in Sports & Exercise*, Vol.36, No.6 pp. 935-941, (2004)
 6. R. J. Butler, P. J. Plisky, C. Southers, C. Scoma, K. B. Kiesel, "Biomechanical analysis of the different classifications of the Functional Movement Screen deep squat test", *Sports Biomechanics*, Vol.9, No.4 pp. 270-279, (2010).
 7. A. Caterisano, R. F. Moss, T. K. Pellingier, K. Woodruff, V. C. Lewis, W. Booth, T. Khadra, "The effect of back squat depth on the EMG activity of 4 superficial hip and thigh muscles", *Journal of Strength and Conditioning Research*, Vol.16, No.3 pp. 428-432, (2002).
 8. B. P. Boden, G. S. Dean, J. A. Feagin, W. E. Garrett, "Mechanisms of anterior cruciate ligament injury", *Orthopedics*, Vol.23, No.6 pp. 573-578, (2000).
 9. M. Kritz, J. Cronin, P. Hume, "The bodyweight squat: A movement screen for the squat pattern", *Strength & Conditioning Journal*, Vol.31, No.1 pp. 76-85, (2009).
 10. B. J. Schoenfeld, "Squatting kinematics and kinetics and their application to exercise performance", *Journal of Strength and Conditioning Research*, Vol.24, No.12 pp. 3497-3506, (2010).
 11. E. Macrum, D. R. Bell, M. Boling, M. Lewek, D. Padua, "Effect of limiting ankle-dorsiflexion range of motion on lower extremity kinematics and muscle-activation patterns during a squat", *Journal of Sport Rehabilitation*, Vol.21, No.2 pp. 144-150. (2012).
 12. R. F. Escamilla, "Knee biomechanics of the dynamic squat exercise", *Medicine & Science in Sports & Exercise*, Vol.33, No.1 pp. 127-141, (2001).
 13. K. E. Dill, R. L. Begalle, B. S. Frank, S. M. Zinder, D. A. Padua, "Altered knee and ankle kinematics during squatting in those with limited weight-bearing-lunge ankle-dorsiflexion range of motion", *Journal of athletic training*, Vol.49, No.6 pp. 723-732, (2014).
 14. M. R. McKean, P. K. Dunn, B. J. Burkett, "Quantifying the movement and the influence of load in the back squat exercise", *Journal of Strength and Conditioning Research*, Vol.24, No.6 pp. 1671-1679, (2010)
 15. A. Yoshida, L. Kahanov, "The effect of kinesio taping on lower trunk range of motions", *Research in sports medicine*, Vol.15, No.2 pp. 103-112, (2007).
 16. D. Lumbroso, E. Ziv, E. Vered, L. Kalichman, "The effect of kinesio tape application on hamstring and gastrocnemius muscles in healthy young adults", *Journal of Bodywork and Movement Therapies*, Vol.18, No.1 pp. 130-138, (2014).
 17. B. Yu, C. Lin, W. E. Garrett, "Lower extremity biomechanics during the landing of a stop-jump task", *Clinical Biomechanics*, Vol.21, No.3 pp. 297-305, (2006).