

외측웨이진솔이 대퇴절단자의 무릎내전모멘트에 미치는 영향

Biomechanical Effect on Knee Adduction Moment by Lateral Wedge Insole in Transfemoral Amputee

장윤희^{1,2,✉}, 이완희²
Yun Hee Chang^{1,✉} and Wan Hee Lee²

1 재활공학연구소 (Korea Orthopedics and Rehabilitation Engineering Center)
2 삼육대학교 물리치료학과 (Department of Physical Therapy, Sahmyook Univ.)
✉ Corresponding author: yhchang@korec.re.kr, Tel: 032-500-0773

Manuscript received: 2011.10.18 / Accepted: 2011.10.31

The prevalence of knee osteoarthritis was higher people with lower limb amputation. This was identified that transfemoral amputees have a greater external knee adduction moment than able-bodied subjects by biomechanical studies. Therefore, they need rehabilitative intervention for prevention and reduction of knee osteoarthritis. The purpose of this study was to determine the effect of lateral wedge insole used in the treatment of knee osteoarthritis. This study was participated in fourteen unilateral transfemoral amputees and we were analyzed the difference gait variables between without lateral wedge insole and with 5° and 10° lateral wedge insole during gait. Our results showed that step length ratio was more symmetrical and, hip adduction and ankle inversion angle were more close to normal value, and knee adduction moment was decreased as the wedge angle increases. We proposed that these data would be utilized conservative treatment of knee osteoarthritis in lower limb amputees.

Key Words: Knee Osteoarthritis (무릎골관절염), Transfemoral Amputee (대퇴절단자), External Knee Adduction Moment (무릎내전모멘트), Lateral Wedge Insole (외측 웨지인솔)

1. 서론

Hungerford 와 Cockin 은 절단자를 대상으로 무릎골관절염에 대한 유병률을 조사한 결과 비절단자 21%, 대퇴절단자 63%, 하퇴절단자 41%로 하지절단자들이 비절단자에 비해 유병률이 높다고 하였으며, 특히 절단수준이 높은 대퇴절단자군의 유병률이 증가한다고 하였다.¹ 또한 Norvell² 등의 연구에서는 하지절단자와 비절단자 간 무릎골관절염 증상을 비교한 결과 비절단자와 하지절단자의 각각 20.2%, 40.3%가 무릎의 통증을 호소하였으며, 절단자의 무릎 통증이 비절단자에 비해 2 배 정도

높다고 하였다. 특히 이들 중에서도 대퇴절단자(50%)는 하퇴절단자(36.4%)에 비해 무릎 통증 정도가 높게 나타났다. 하지절단자들의 건측 무릎골관절염(knee osteoarthritis) 발생 원인은 절단자들의 비대칭적인 보행 특성과 상대적으로 의지측보다 건측의 의존도가 증가하기 때문이다.³ 편측 하지절단자는 의지측의 걸음길이가 건측의 걸음길이보다 길어짐으로써 좌우 비대칭적인 보행을 형성한다. 또한 의지측보다 건측의 입각기 시간이 증가하고 의지측보다 건측의 발목과워가 상대적으로 증가하는 보행 특성은 건측의 높은 의존도를 잘 반영하고 있다.⁴ 이러한 비대칭적인 보행 특성은 근육의

약화, 감각피드백(sensory feedback)의 결여, 의지측의 불안정성, 단단부의 통증 등이 복합적으로 작용하여 발생한다고 한다.³ 편측 하지절단자들의 무릎관절염 관련 생체역학적 특성 연구에서 Royer와 Wasilewski⁵는 하퇴절단자들의 건측 무릎내전모멘트가 의지측에 비해 46%더 높다고 하였으며, Chang⁶ 등의 연구에서도 대퇴절단자의 건측 무릎내전모멘트는 의지측보다 32% 증가하며, 정상인에 비해서는 2 배나 높다고 하였다. 무릎내전모멘트(knee adduction moment)의 증가는 무릎관절 내측 부위의 과도한 압력(compressive force) 형성을 의미하며, 실제로 내측 무릎관절염에 이환된 환자들이 보행 중 무릎내전모멘트가 유의하게 증가하는 것이 확인되었다.^{7,8} 또한 무릎내전모멘트는 무릎관절염 관련 생체역학적 지표로써 이와 관련 연구분야에서 중요한 요인으로 분석되고 있다.

무릎관절염은 조기에 위험 인자를 발견하여 예방하는 것이 중요하며, 또한 보존적 치료요법 등을 통해 질병의 진행을 지연시키는 재활적 치료도 매우 중요하다. 현재 임상에서 무릎관절염 치료를 위한 보존적 요법으로 무릎 보조기나 웨지, 인솔 등을 사용하여 하지의 전체적인 정렬상태를 변화시켜 통증을 경감시키는 방법들이 사용되고 있다.⁹ 특히 외측웨지인솔(lateral wedge insole)은 무릎의 통증을 경감시키고, 무릎내전모멘트를 감소시키는데 효과가 있다고 알려져 있다.⁸ 그러나, 편측 하지절단자들이 건측 무릎관절염에 대한 조기 발병률이 높음에도 불구하고 이를 치료하기 위한 재활적 측면의 연구는 매우 미흡한 실정이다.

따라서, 본 연구는 무릎관절염 유병률이 높은 편측 대퇴절단자를 대상으로 외측웨지인솔을 적용한 후 건측 무릎내전모멘트에 미치는 영향을 알아보고자 한다.

2. 연구방법

2.1 연구대상자

본 연구는 재활공학연구소에 방문한 대퇴절단자 14 명과 정상인 20 명을 대상으로 실시하였다. 이들은 재활 과정을 종료한 상태로 평균 13.9 년 동안 의지를 착용하였으며, 현재 본인의지에 충분히 적응된 상태로써 숙련된 의지제작기사에 의해 의지정렬상태를 재확인하였다. 대상자 선정 기준은 사고로 인한 외상성 대퇴절단자, 의지착용기간이 최소한 2년 이상인 자, 보행에 영향을 줄 만한

Table 1 General characteristics of subjects

	TFA ^a (n=14)	Normal ^b (n=20)
Age (yrs)	40.30±5.85	36.95±8.13
Height (m)	1.72±0.05	1.73±0.05
Weight (kg)	70.22±6.84	70.12±6.87
BMI (kg/m ²)	23.71±1.69	23.46±1.52
Stump length (cm)	22.28±2.69	
Prosthesis use (yrs)	13.90±7.39	

^aTrans-Femoral Amputee, ^bNormal control

신경 및 근골격계 이상이 없는 자, 의지의 정렬 및 소켓의 적합성이 적절한 자, 보행 시 증대한 파행이 없는 자로 하였다. 연구대상자들에게 연구의 내용과 목적을 설명하고 연구동의서에 서명 후 실험을 실시하였다.(Table 1)

2.2 측정도구 및 실험절차

보행분석을 위해 4 개 힘측정판(600mm×900mm, Kistler, UK), 적외선 카메라 8 대(Eagle4, Motion Analysis, USA), 10mm 반사마커, CCD 카메라 2 대, 데이터 처리장치, PC 등으로 구성되어 있는 3 차원 동작분석기(Motion Analysis, USA)를 사용하였다. 보행분석을 위한 마커 셋팅은 Helen Hayes marker set 을 사용하여 해부학적 위치에 총 19 개의 마커를 부착하고 정적 검사(static pose)를 시행하였으며, 이후 내측 4 개의 마커를 제거한 후 보행을 실시하였다. (Fig. 1)

EvaRT 소프트웨어(EvaRT 5.0.4, Motion Analysis Corp., USA)를 이용하여 모든 마커의 운동형상학적 데이터와 힘측정판에서 측정된 아날로그 신호는 120Hz 로 샘플링하였으며, 각각의 마커 데이터는 6Hz Butterworth filter 에 의해 평활화 처리되었다.



Fig. 1 Replacement of Helen-Hayes marker sets and the application of lateral wedge insole into the shoes

인솔은 5° 및 10° 각도의 외측웨이인솔을 사용하였으며, 각각 3.175mm, 6.35mm 두께의 필라이트 재질(Ottobock, Germany)로 환자의 건축 발에 맞추어 재단한 후 사용하였다.⁸ 실험은 순서에 의한 영향을 배제하기 위하여 1) 외측웨이인솔을 적용하지 않은 상태(no insole), 2) 5° 외측웨이인솔을 적용한 상태(5°insole), 3) 10° 외측웨이인솔을 적용한 상태(10°insole)의 3 가지 조건을 무작위로 실시하였다. 보행 속도는 평상 시 일반적인 보행 상태를 평가하기 위해 본인이 선택한 보행 속도(SSWS, self selected walking speed)로 실시하였고, 매번 실험할 때마다 변하는 보행의 특성을 감안하여 5 회 이상 실험한 후 이들에 대한 평균값을 사용하였다.

2.3 데이터 분석 및 통계처리방법

측정된 데이터는 Orthotrak Software(Motion Analysis Corp., Santa Rosa, USA)를 사용하여 분석하였다.

측정변수는 보행속도, 걸음길이비율(step length ratio), 각 하지 관절의 각도 및 모멘트이다. 걸음길이 비율은 의지측의 걸음길이를 건축의 걸음길이에 나눈 비율로써 정상인의 경우 1 이 되며, 1 에 근접할수록 양하지 대칭적인 보행을 의미한다. 또한 각도 및 모멘트 값은 입각기 동안 보행 주기별 측정된 최고값(peak value)을 사용하였다. 통계 분석은 SPSS(SPSS Ver 17.0, SPSS Inc., USA)를 사용하였으며, 대퇴절단자군과 정상대조군의 비교는 독립표본 t 검정(independent t test)을 사용하였으며, 대퇴절단자군내 no insole 과 5° , 10° insole 각각 전후 차이 비교는 대응표본 t 검정(paired t test)을 실시하였다. 통계적 유의수준은 p<0.05 로 설정하였다.

3. 연구결과 및 토론

3.1 시공간적 변수

3.1.1 보행속도(Walking speed)

시공간적 변수 결과는 Table 2 와 같다. 연구 결과 대퇴절단자군은 no insole 상태에서 정상군(1.08 vs 1.21m/s)보다 보행속도가 느리며, 대퇴절단자군내 insole 적용에 따른 보행속도의 유의한 차이는 없었다. 또한 10° insole 에서는 오히려 no insole 이나 5° insole 보다 속도가 조금 감소하였으며, 이는 외측웨이인솔 각도가 증가할수록 무릎내전모멘트를 감소시키기는 하지만, 실제로 보행에 있어서는 불편감을 유발하여 전반적인 보행속도 저하를 가져온 것으로 보이며, 실제 외측웨이인솔의 적용에 있어 이러한 점을 유의하여야 할 것이다.⁸

3.1.2 보행의 대칭성(gait symmetry)

연구 결과 대퇴절단자군과 정상군간의 유의한 차이를 보였으며(p<0.001), no insole 보다 5° insole 및 10° insole 상태에서 전반적인 보행의 대칭성이 향상되었으며, 웨지 각도가 증가할수록 걸음길이 비율이 1 에 근접하였다. (Table 2) 일반적으로 대퇴절단자는 의지측의 걸음길이가 건축의 걸음길이에 비해 길며, 이로 인해 양하지 걸음길이의 비대칭성을 나타내게 된다. 이는 의지측 좌골타입 소켓(ischial socket)이 엉덩관절의 굴곡과 신전을 제한하게 되고,¹¹ 이로 인해 반대쪽 건축 하지의 원활한 보행 진행을 방해하게 된다. 또한 양하지 체중부하 정도의 차이는 이러한 특성을 더욱 가중시켜 전체적인 보행의 비대칭성이 더욱 증가된다.¹²

Table 2 Differences in spatio-temporal, kinematic and kinetic parameter with and without lateral wedge insole

	No insole (1)	5 insole (2)	10 insole (3)	Normal (4)	t-value		
					(1)-(2)	(1)-(3)	(1)-(4)
Walking speed (m/sec)	1.08±0.14	1.09±0.12	1.03±0.08	1.21±0.10	-0.384	1.481	-3.275**
Step length ratio	1.25±0.09	1.23±0.06	1.18±0.07	1.00±0.04	0.921	3.048**	11.690***
Hip adduction angle (TS, °)	0.36±2.22	0.07±2.21	1.11±1.78	5.87±1.67	0.617	-1.431	-8.281***
Knee varus angle (TS, °)	4.20±2.24	3.91±2.38	3.36±2.77	5.39±3.08	1.016	2.192*	-1.238
Ankle inversion angle (MS, °)	13.46±3.35	10.08±1.95	8.29±1.96	-4.76±2.82	5.097***	6.321**	17.168***
Hip adduction moment (TS, Nm/kg)	0.72±0.08	0.66±0.12	0.66±0.07	0.65±0.10	3.090**	3.866**	2.871**
Knee adduction moment (TS, Nm/kg)	0.41±0.09	0.36±0.07	0.32±0.04	0.34±0.08	4.933***	4.572***	3.183**
Ankle inversion moment (MS, Nm/kg)	-0.06±0.06	-0.07±0.09	-0.08±0.10	-0.08±0.04	0.542	0.596	1.323

* p<0.05, ** p<0.01, *** p<0.001; TS, Terminal stance; MS, Mid Stance

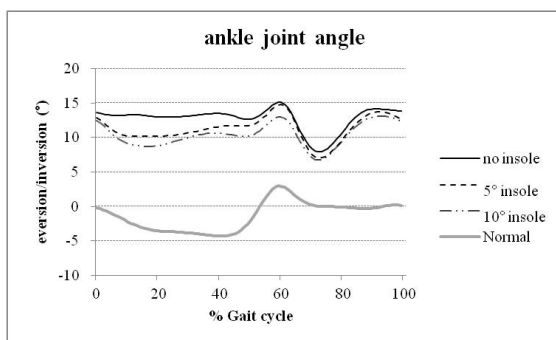


Fig. 2 Variation of ankle inversion angle according to the three insole conditions

건측 외측웨이인솔의 적용은 건측에서 의지측으로의 체중심 이동을 더 용이하게 함으로써 의지측의 한걸음길이는 짧아지고 상대적으로 건측의 걸음길이는 증가하여 전체적인 걸음길이비율의 향상을 가져온 것으로 보인다.¹³

3.2 운동형상학적 변수

3.2.1 엉덩 및 무릎관절 내전각도(Hip and knee adduction angle)

연구결과 대퇴절단자군은 정상군에 비해 엉덩관절이 외전되었으며(0.36° vs 5.87° , $p < 0.01$), 이는 대퇴절단자의 절단측 중둔근(Gluteus medius) 약화와 연관성이 높다. 중둔근의 약화는 보행 시 몸통의 과도한 좌우 움직임을 유발하게 되며, 이를 보상하기 위해 대퇴절단자는 보행 시 넓은 지지면을 확보하게 되며, 이 과정에서 보폭의 증가와 엉덩관절 외전각도의 증가를 가져오게 된다.¹⁴ 또한 대퇴절단자군 내 10° insole 에서 엉덩관절이 조금 내전되었지만 통계적으로 유의한 차이를 보이지 않았으며, 무릎관절 각도도 정상군과 대퇴절단자군 간 유의한 차이가 없었다. 외측웨이인솔은 대퇴절단자의 엉덩 및 무릎관절각도의 변화에 영향을 미치지 않았다. (Table 2)

3.2.2 발목내반각도(Ankle inversion angle)

연구 결과 보행 시 중기입각기(mid stance)동안 정상군의 발목은 외반되어 있는데 반해 대퇴절단자군의 발목은 과도하게 내반되었으며, 통계적으로 유의한 차이를 보였다(13.46° vs -4.76° , $p < 0.001$).

또한, no insole 보다 5° insole 및 10° insole 에서 각각 건측 발목내반각도가 유의하게 감소하였으며, 외측웨이인솔 각도가 증가할수록 발목내반

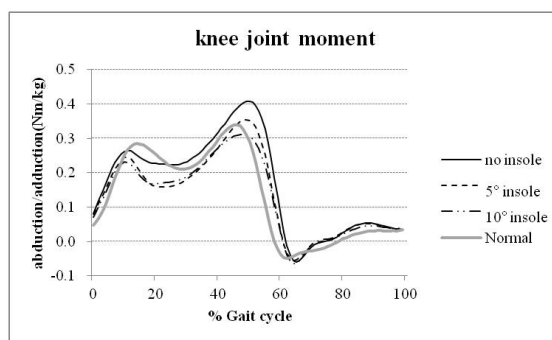


Fig. 3 Variation of knee adduction moment according to the three insole conditions

각이 감소함을 알 수 있다. (Table 2, Fig. 2)

Hof 등에 의하면, 편측 대퇴절단자들의 양하지 비대칭적인 보행 특성은 좌우 압력 중심과 체중심 간격(COP-COM margin)의 비대칭을 유발하며, 이를 교정하기 위해 편측 대퇴절단자는 건측의 측면 풋롤 오프(lateral foot roll off)를 이용해 보행을 추진한다고 하였다. 건측과 의지측의 압력중심과 체중심 간격이 비대칭적인 것은 의지측과 건측의 엉덩관절 외전각도가 동일하게 형성되지 않은 점과 그로 인해 넓게 형성된 보폭, 그리고 건측보다 의지측의 짧은 입각기 시간 등이 원인이라고 하였다.¹⁵

편측 대퇴절단자들의 발목내반각도의 과도한 증가는 측면 풋롤 오프를 이용하는 과정에서 발목내반을 유도한 것으로 보인다. 또한 외측웨이인솔의 적용은 발의 외측면 경사 부여와 함께 발목내반각도를 감소시킨 것으로 사료된다.

3.3 운동학적 변수

3.3.1 엉덩관절 내전모멘트(Hip adduction moment)

엉덩관절 내전모멘트의 증가는 무릎내전모멘트와 마찬가지로 엉덩관절염의 위험성을 증가시킨다.¹⁶

연구결과 대퇴절단자군과 정상군 간 엉덩관절 내전모멘트는 대퇴절단자군에서 유의하게 증가하였으며($p < 0.01$), 대퇴절단자군 내 엉덩관절 내전모멘트는 no insole 보다 5° insole 및 10° insole 에서 유의하게 감소하였으며, 웨지 각도에 따른 5° insole 및 10° insole 간 유의한 차이는 보이지 않았다. (Table 2) 외측웨이인솔의 적용은 발목내반각도의 감소와 함께 전반적인 하지정렬 변화를 유도하며 이는 엉덩관절 내전모멘트를 감소시킨 것으로 보인다.

3.3.2 무릎내전모멘트(Knee adduction moment)

무릎내전모멘트는 무릎관절 내외측의 압력을 유추할 수 있는 주요한 인자이다. 앞서 언급한 바와 같이 무릎내전모멘트의 증가는 대퇴경골관절 내측의 압력 증가로 해석되며, 대퇴절단자의 경우 입각기 말기 내전 모멘트가 정상인에 비해 유의하게 증가된다고 하였다.⁸ 연구결과 대퇴절단자군과 정상군간 무릎내전모멘트의 유의한 차이를 보였으며($p<0.01$), 대퇴절단자군에서 유의한 증가를 확인하였다. (Table 2, Fig. 3) 또한 대퇴절단자군 내 no insole 보다 5° insole 및 10° insole 상태에서 무릎내전 모멘트가 감소하였으며(0.41 vs 0.36 vs 0.32Nm/kg), 웨지 각도가 증가할수록 무릎내전모멘트도 유의하게 감소하였다($p<0.001$). 또한 10° insole 에서는 오히려 정상군보다 낮은 값을 나타내었다(0.34 vs 0.32Nm/kg). 외측웨이인솔 적용은 발목관절의 교정과 함께 전체적인 하지정렬 상태를 변화시켜 무릎내전모멘트를 감소시키는 것으로 나타났으며, 웨지 각도가 증가할수록 무릎내전모멘트가 한다는 선행 연구와 유사한 결과를 나타내었다.^{8,9}

3.3.3 발목내반모멘트(Ankle inversion moment)

대퇴절단자군과 정상군 간 발목내반모멘트는 유의한 차이를 보이지 않았으며, 대퇴절단자군 내 외측웨이인솔 적용에 따른 유의한 차이도 나타나지 않았다. (Table 2) 발목내반각도는 인솔 적용으로 유의하게 감소하였지만, 실제적으로 발목내반모멘트에는 큰 영향을 미치지 않은 것으로 보인다. 통계적 유의성은 보이지 않았지만 웨지인솔 각도가 증가할수록 발목내반모멘트가 감소하여 정상군 값에 근접하는 것을 알 수 있었다. 과도한 발목내반각도와 모멘트는 발목관절 외측 구조물의 과도한 신장과 내측관절의 압박을 가져올 것으로 예상되지만 이와 관련 유병률 연구나 생체역학적 연구는 아직 진행되지 않고 있다. 외측웨이인솔 적용을 통해 대퇴절단자의 과도한 발목내반각도 및 모멘트의 감소는 이차적인 장애 발생과 관련하여 매우 의미있는 결과라 사료되며, 사후 추가 연구가 진행되어야 할 것으로 보인다.

4. 결론

본 연구를 통하여 대퇴절단자 건축 하지의 외측웨이인솔 적용은 대퇴절단자의 보행 시 대칭적인 걸음길이 비율과 발목내반각도의 감소를 가져

왔으며, 특히 엉덩 및 무릎관절 내전모멘트의 유의한 감소를 확인하였다. 외측웨이인솔은 과도한 발목내반각도를 교정하여 환측으로의 체중심 이동을 용이하게 함으로써 좌우 걸음길이가 대칭적으로 향상된 것으로 보이며, 발목내반각도 감소로 인한 전체적인 하지정렬의 변화가 엉덩관절 및 무릎내전모멘트에 영향을 미친 것으로 보인다. 본 연구는 대퇴절단자의 건축 무릎골관절염 관련 예방 및 치료적 측면에 활용하고자 하며, 향후 추가 연구에서 외측웨이인솔 적용에 따른 실제 압력중심의 이동과 발목내반각도의 상관관계 등을 분석해 보행에 미치는 객관적인 근거를 제시하고자 한다.

참고문헌

1. Hungerford, D. S. and Cockin, J. N., "Fate of the retained lower limb joints in Second World War amputees," *J. Bone Joint Surg. Br.*, Vol. 57 B, No. 1, p. 111, 1975.
2. Norvell, D. C., Czerniecki, J. M., Reiber, G. E., Maynard, C., Pecoraro, J. A., Weiss, N. S., "The prevalence of knee pain and symptomatic knee osteoarthritis among veteran traumatic amputees and nonamputees," *Arch. Phys. Med. Rehabil.*, Vol. 86, No. 3, pp. 487-493, 2005.
3. Sanderson, D. J. and Martin, P. E., "Lower extremity kinematic and kinetic adaptations in unilateral below-knee amputees during walking," *Gait and Posture*, Vol. 6, No. 2, pp. 126-136, 1997.
4. Lelas, J. L., Merriman, G. J., Riley, P. O. and Kerrigan, D. C., "Predicting peak kinematic and kinetic parameters from gait speed," *Gait and Posture*, Vol. 17, No. 2, pp. 106-112, 2003.
5. Royer, T. D. and Wasilewski, C. A., "Hip and knee frontal plane moments in persons with unilateral, trans-tibial amputation," *Gait Posture*, Vol. 23, No. 3, pp. 303-306, 2006.
6. Chang, Y. H., Bae, T. S., Kim, S. K., Mun, M. S. and Lee, W. H., "Intact hip and knee joint moment in coronal plane with unilateral transfemoral amputee," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 12, No. 1, pp. 129-134, 2011.
7. Sharma, L., Hurwitz, D. E., Thonar, E. J., Sum, J. A., Lenz, M. E., Dunlop, D. D., Schnitzer, T. J., Kirwan-

- Mellis, G. and Andriacchi, T. P., "Knee adduction moment, serum hyaluronan level, and disease severity in medial tibiofemoral osteoarthritis," *Arthritis & Rheumatism*, Vol. 41, No. 7, pp. 1233-1240, 1998.
8. Kerrigan, D. C., Lelas, J. L., Goggins, J., Merriman, G. J., Kaplan, R. J. and Felson, D. T., "Effectiveness of a lateral-wedge insole on knee varus torque in patients with knee osteoarthritis," *Arch. Phys. Med. Rehabil.*, Vol. 83, No. 7, pp. 889-893, 2002.
9. Yasuda, K. and Sasaki, T., "The mechanics of treatment of the osteoarthritic knee with a wedged insole," *Clin. Orthop. Relat. Res.*, No. 215, pp. 162-172, 1987.
10. Jaegers, S. M., Arendzen, J. H. and de Jongh, H. J., "Prosthetic gait of unilateral transfemoral amputees: a kinematic study," *Arch. Phys. Med. Rehabil.*, Vol. 76, No. 8, pp. 736-743, 1995.
11. Rabuffetti, M., Recalcati, M. and Ferrarin, M., "Trans-femoral amputee gait: Socket-pelvis constraints and compensation strategies," *Prosthetics and Orthotics International*, Vol. 29, No. 2, pp. 183-192, 2005.
12. Segal, A. D., Orendurff, M. S., Klute, G. K., McDowell, M. L., Pecoraro, J. A., Shofer, J. and Czerniecki, J. M., "Kinematic and kinetic comparisons of transfemoral amputee gait using C-Leg and Mauch SNS prosthetic knees," *Journal of Rehabilitation Research and Development*, Vol. 43, No. 7, pp. 857-870, 2006.
13. Kakou, H., Nagao, Y., Omine, S., Ochi, M., Wada, F., Hachisuka, K. and Togami, H., "The clinical effect of lateral wedge on hemiplegic weight bearing," *J. UOEH*, Vol. 25, No. 4, pp. 441-446, 2003.
14. Su, P. F., Gard, S. A., Lipschutz, R. D. and Kuiken, T. A., "Gait characteristics of persons with bilateral transtibial amputations," *Journal of Rehabilitation Research and Development*, Vol. 44, No. 4, pp. 491-501, 2007.
15. Hof, A. L., van Bockel, R. M., Schoppen, T. and Postema, K., "Control of lateral balance in walking. Experimental findings in normal subjects and above-knee amputees," *Gait & Posture*, Vol. 25, No. 2, pp. 250-258, 2007.
16. Hurwitz, D. E., Foucher, K. C., Sumner, D. R., Andriacchi, T. P., Rosenberg, A. G. and Galante, J. O., "Hip motion and moments during gait relate directly to proximal femoral bone mineral density in patients with hip osteoarthritis," *Journal of Biomechanics*, Vol. 31, No. 10, pp. 919-925, 1998.