

지면조건에 따른 코트 스포츠화 착지 충격력의 전달특성 수치해석

류성헌* · 최주형* · 김성호* · 조진래† · 부진후**

(2004년 8월 3일 접수, 2004년 9월 16일 심사완료)

Numerical Analysis of Impact Force Transfer Characteristics of Court Sport Shoes to Surface Condition

Sung-Heon Ryu, Joo-Hyung Choi, Sung-Ho Kim, Jin-Rae Cho and Jin-Hoo Bu

Key Words: Court Sport Shoes(코트 스포츠화), Landing Impact Force(착지 충격력), Sports Surface Condition(스포츠 지면상태), Transfer Characteristics(전달 특성), Nonlinear Finite Element Analysis(비선형 유한요소해석)

Abstract

This paper is concerned with the numerical investigation of the transfer characteristics of the landing impact force exerted on court sport shoes to the sport surface condition. The reaction force occurred by the impact between court sport shoes and sport surface is absorbed by shoes to some extent, but the remaining impact force is to transfer the human body from the sole of a foot. We consider four surface conditions, asphalt, urethane, clay and wood court surfaces. For the dynamic response analysis, we construct a coupled leg-shoes FEM model and create the multi-layered composite surface model. The numerical simulations are performed by an explicit nonlinear finite element method. Through the numerical experiments, we examine the transfer characteristics of the landing impact force to the surface condition.

1. 서론

수직 점프(vertical jumping) 동작은 스포츠 경기 중 많은 비중을 차지하는 움직임이며, 이러한 동작 분석의 인체 역학적 이해는 부상방지 및 경기력 향상에 큰 영향을 미친다. 일반적인 수직점프 동작은 무릎 굽힘(knee flexion)의 하향동작으로부터 시작하여, 무릎의 신장과 동시에 지면으로부터 점프 후 무릎과 힘의 굽힘과 함께 착지 동작이 이루어지며, 인체의 기본동작 중 신장-압축(stretch-shortening cycle)

단계의 한 예를 일컫는다. 운동 역학적 측정요소를 기반으로 수직 점프와 관련된 동작분석이 수행되고 있으며, 이와 같은 연구는 이론적이며 체계적인 역학적 접근방식으로 이루어진다.

운동 역학적 요소는 동적 요소(dynamic factors)와 경계 요소(boundary conditions)로 나눌 수 있다. 동적 요소는 운동타입(type of movement), 자세(posture), 근육 운동(muscular activity) 등이 있으며, 경계 요소는 스포츠 슈즈(sports shoes), 지면(surface), 장애물(obstacles), 인체측정학 요소(anthropometric facts) 등이 있다. 동적 요소는 운동선수의 성향에 의존적이며, 스스로의 인지에 의하여 쉽게 변화될 수 있는 특징이 있는 반면에, 경계 요소는 변화가 능성의 한계가 있다. 경계 요소 중 스포츠 슈즈와 지면은 가장 쉽게 변경될 수 있는 항목이며, 이러한 경계 요소는 스포츠 운동성능 향상 및 부상 매커니즘과 밀접한 관련이 된다.^(1,2)

인체 역학적 연구 방법은 크게 두 가지로 분류

† 책임저자, 회원, 부산대학교 기계공학부
E-mail : jrcho@hyowon.pusan.ac.kr
TEL : (051)510-2467 FAX : (051)514-7640

* 부산대학교 대학원 기계설계공학과

** (주) 화승 개발센터

되며, 수학적 기반의 이론적 기법(theoretical technique)과 측정 시스템을 이용한 실험적 기법(experimental technique)이 있으며, 이상의 방법을 통하여 경계요소를 고려한 운동학적 연구가 진행되고 있으며, 특히 착지 충격시 인체의 부하 및 충격 전이 특성에 관한 실험적, 수치적 연구는 중요한 과제로 분류될 수 있다. 이론적 기법으로, Nigg과 Liu는 러닝시 미드솔의 경도에 따른 충격 특성에 대하여 수학적 모델을 제안하였으며, Shorten과 Himmelsbach는 Hertz 접촉 이론을 사용하여 스포츠 표면의 충격흡수 특성을 분석하였다. 실험적 기법으로, Henning과 Lafortune는 러닝시 발생하는 지면반력(ground reaction force), 경골 가속도(tibial acceleration) 등을 비교 분석하였으며, Tillman 등은 러닝시 지면조건을 고려한 운동학적 요소를 평가하였다.^(3~6)

스포츠 역학에서 주요 연구 대상으로 신발-인체간의 상관관계를 들 수 있으며, 주요 인자별 즉, 신발의 기하학적 형상 및 물성, 그리고 스포츠 표면 등의 효과를 과학적으로 평가하는 것이 무엇보다 중요하다. 일반적으로 이러한 연구는 실험적 기반에서 출발하였으며, 다양한 조건에 대한 환경 변화의 제약을 많이 받고 있다.

본 연구에서는 이와 같은 실험적 기반의 문제점을 해결하기 위하여 컴퓨터 수치해석 기반의 스포츠 인체-슈즈-지면간의 상관관계를 규명하였다. 3차원 캐드 프로그램을 사용하여 신발-족(shoes-foot) 연계 모델을 개발하였으며, 상용 해석 프로그램인 ANSYS-LSDYNA를 통하여 착지충격 특성을 분석하였다. 본 연구에서 제안된 경계 조건으로 지면의 효과를 고려하였으며, 착지 충격시 지면조건에 따른 지면반력 및 충격 전이 특성을 분석하였다.

2. 문제 정식화

코트 스포츠화는 지면 뿐만 아니라 내부적으로 접촉 경계를 이루고 있으며 아웃솔 등 고무재질의 거동을 구현하기 위해서는 다양한 특성을 고려하여야 한다. 이를 위해서 본 연구에서는 기하학, 물성, 경계 비선형성(nonlinearity)을 반영하여 동적 해석을 수행하였다. 3차원 동해석 지배방정식은 다음과 같다.^(7,8)

$$\sigma_{ij,j}(\mathbf{u}) + f_i = \rho \ddot{u}_i \quad \text{in } \Omega \quad (1)$$

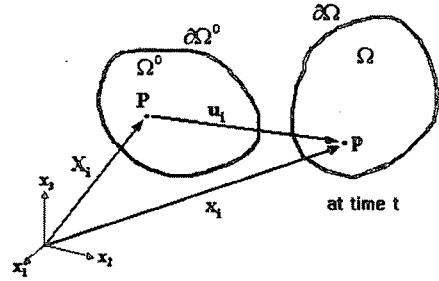


Fig. 1 Definition of the large deforming body

여기서, σ_{ij} 는 Cauchy 응력 텐서, f_i 는 체적력, ρ 는 밀도를 나타낸다.

지배방정식 식 (1)을 t 시점에서의 변형 후 형상 Ω 에서의 약 정식화(weak formulation)를 적용하면 식 (2)의 적분식을 얻을 수 있다.

$$\int_{\Omega} (\sigma_{ij}(\mathbf{u}) \varepsilon_{ij}(\mathbf{v}) + \rho \ddot{u}_i v_i) d\Omega = \int_{\Omega} f_i v_i d\Omega + \int_{\partial\Omega_n} t_i v_i dS \quad (2)$$

식 (2)에서 기하학적 형상이 뚜렷한 대변형 문제의 정식화를 위하여 초기 형상 Ω^0 의 참조형상을 사용한 Total Lagrangian 정식화를 취하고, penalty method를 사용한 접촉 조건(contact condition)을 적용하면 식 (3)과 같이 유도된다.

$$\int_{\Omega^0} (S_{ij}(\mathbf{u}) \widetilde{E}_{ij}(\mathbf{v}) + \rho^0 \ddot{u}_i v_i) d\Omega^0 = \int_{\Omega^0} f_i^0 v_i d\Omega^0 + \int_{\partial\Omega_n^0} t_i^0 v_i dS^0 + \int_{\partial\Omega_c^0} k_{\rho g} v_n dS^0 \quad (3)$$

여기서, S_{ij} 는 초기형상에 대한 변형 후 상태의 2nd Piola-Kirchhoff(PK2) 응력을 의미하며, 변형 증분율(deformation gradient), $F_{ik} = \partial x_i / \partial X_k$ 와 함께 다음과 같은 관계식에 의해 정의된다.

$$\sigma_{ij} = J^{-1} F_{ik} S_{kl} F_{jl} \quad (4)$$

또한, E 는 시험함수, v 에 의해 정의되는 변형률과 관계된 텐서이다. 그리고, 식 (3) 우변의 세 번째 항은 접촉조건을 나타내었으며, k_p 는 penalty parameter, g 는 접촉 영역에서의 간격 함수(gap function)을 나타낸다.

식 (3)에서 유한요소 근사화(finite element approximation)를 시키면 다음과 같은 행렬 형태의 운동방정식을 얻을 수 있다.

$$M \ddot{u} + F_{int} + F_c = F_{ext} \quad (5)$$

여기서, M 은 물성 행렬을, F_{int} 와 F_{ext} 는 각각 내력 벡터(internal force vector) 및 외력 벡터(external force vector)를 나타내며, F_c 는 접촉력을 의미한다.

본 해석에서는 외연적 시간적분법을 사용하였으며, t 시점에서 중앙 차분법(central difference method)을 도입하면 가속도를 다음 식과 같이 적용할 수 있다.

$$\ddot{U}^n = \frac{1}{\Delta t^2} (U^{n+1} - 2U^n + U^{n-1}) \quad (6)$$

식 (6)을 식 (5)에 대입하면 미지수 U^{n+1} 를 계산할 수 있다.

외연적 시간적분법에서 해의 안정성을 위해서 시간 간격, Δt 는 식 (7)의 CFL 조건(Courant-Friedrichs-Levy criterion)을 만족해야 한다.

$$\Delta t \leq \min(h/s), \quad s = \sqrt{E/\rho} \quad (7)$$

여기서, h 는 인접 노드간의 최소 거리이며, s 는 파동 전파 속도(wave speed)를 나타낸다.

3. 유한 요소 해석

3.1 해석 모델링 및 물성치

3.1.1 스포츠 슈즈-족 연계 모델링

일반적인 코트 스포츠화는 솔(sole)부, 중족보강

재(midfoot reinforcement) 그리고 감피(upper)로 구성되며, 피부 조직 및 뼈로 구성된 인체의 발을 포함시켜 신발-족 연계 모델을 구성하였다.

아웃솔은 비압축성, 비선형성, 초탄성을 갖는 고무 재질로 가정하였으며, 식 (8)과 같은 변형률 에너지 함수(strain energy function)로 구성되는 Mooney-Livlin 모델을 적용하였다. 본 연구에서는 결정상수 5항인 Mooney-Livlin 모델을 채택하였으며, 이들은 재료의 1축 인장실험을 통하여 결정된다.⁽⁸⁾

$$W = \sum_{i+j=1}^N C_{ij} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j \quad (8)$$

$$\begin{aligned} W = & C_{10} (I_1 - 3) + C_{01} (I_2 - 3) + C_{20} (I_1 - 3)^2 \\ & + C_{11} (I_1 - 3)(I_2 - 3) + C_{02} (I_1 - 3)^2 \\ & + \frac{1}{d} (J - 1)^2 \end{aligned} \quad (9)$$

여기서, C_{ij} 와 d 는 물질의 특성상수이고, I_1 , I_2 , J 는 불변계수로서 다음 식과 같이 주 신장률(principal stretch ratio), λ 의 함수로 정의된다.

$$I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \quad (10)$$

$$I_2 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_3^2 \lambda_1^2 \quad (11)$$

$$J = \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 = \sqrt{I_3} \quad (12)$$

미드솔(midsole)과 인솔(insole)은 폴리우레탄 고무로서 폼(foam) 형태의 압축성 거동을 보인다. 이에 대한 에너지 변형률 함수는 초기 전단계수의 함수로서 표현되며, 다음과 같은 변형률 에너지 밀도 함수를 가진다.⁽⁸⁾

$$W = \frac{G}{2} \left(\frac{I_2}{I_3} + 2\sqrt{I_3} - 5 \right) \quad (13)$$

여기서, G 는 전단계수(shear modulus)를 나타낸다. 감피는 가죽 재질로서 그 거동을 반영하기 위하여 일정한 두께의 셸(shell) 요소를 사용하였고, 솔부, 중족 보강재, 피부조직, 그리고 뼈는 4-노드 사면체(4-node tetrahedron) 요소를 사용하였다. 총 요소 수는 81084개이며, 피부조직과 뼈로 구성되

는 하지(lower extremity)를 제외한 솔부 및 갑피는 완전히 결합되었다고 가정하였다. Fig. 2와 Table 1은 본 해석에 사용된 유한요소 모델 및 물성치를 나타낸다.⁽⁹⁾

본 해석에서는 3차원 전용 캐드프로그램인 프로엔지니어(Pro/E)를 사용하여 모델링을 수행하였으며, 상용 해석 프로그램인 ANSYS를 사용하여 유한요소모델을 생성하였다. 해석에는 충격해석 전용 프로그램인 Explicit LS-DYNA Solver를 사용하였다.

3.1.2 스포츠 지면 모델링

착지 동작시 인체의 충격 특성을 파악하기 위한 주요 인자로서 스포츠 지면 효과를 고려하였으며, 각종 스포츠 종류와 관련된 지면 조건에 따른 인체의 충격 전이 특성을 분석하였다. 본 연구에서는 Fig. 3에서 알 수 있듯이 네 가지 지면 구조를 분석하였고, 이를 참조하여 Fig. 4의 유한요소 모델을 생성하였다. Table 2는 관련 물성치를 나타내었다.

아스팔트(asphalt), 우레탄(urethane), 그리고 클레이

(clay) 코트는 각 층에 대하여 균질 등방성(isotropic) 재질을 사용하였으며, 특히 클레이 코트는 표층 상, 하부 및 마사층을 동일한 클레이 재질로 가정하였다. 또한, 나무(wood) 코트는 직교 이방성(orthotropic) 재질로 가정하였으며 Table 3의 9개의 물성 파라미터를 적용하였다.^(10,11)

Table 1 Material properties of shoes-foot model

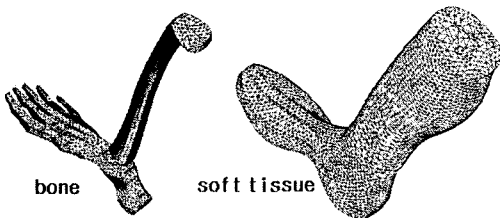
Parts	Properties	Value
Outsole	C1	-0.00149
	C2	0.11732
	C3	-0.00182
	C4	0.01720
	C5	-0.02000
Midsole	G(MPa)	0.921
	ν	0.35
Insole	G(MPa)	0.735
	ν	0.35
Midfoot-reinforcement	E(MPa)	48.39
	ν	0.35
Upper	E(MPa)	11.76
	ν	0.35
Bone	E(MPa)	10,000
	ν	0.34
Soft tissue	E(MPa)	1.15
	ν	0.49

Table 2 Material properties of the surfaces

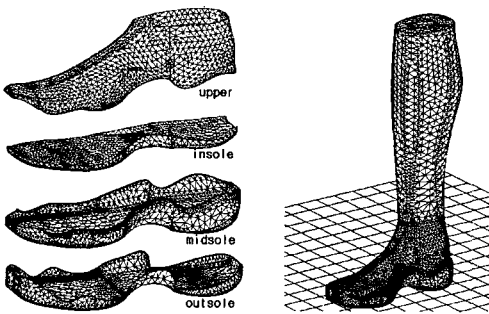
Surfaces		E(MPa)	ν
Asphalt	asphalt	10,500	0.35
	base	300	0.35
	subgrade	100	0.35
Urethane	urethane	4.8	0.4
	ASCON	10,000	0.3
Clay	clay	10	0.35
	mixed stone	20,000	0.3
Wood	beech	Table 3	Table 3
	white pine	10,000	0.3

Table 3 Material properties of wood

Ex (MPa)	Ey (MPa)	Ez (MPa)	ν_{xy}	ν_{yz}	ν_{zx}	$G_{xy}=G_{yz}=G_{zx}$ (MPa)
10,000	600	600	0.2	0.3	0.2	600



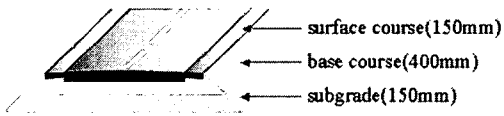
(a) Lower extremity



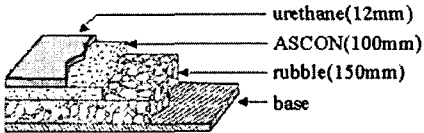
(b) sole parts

(c) Assembly model

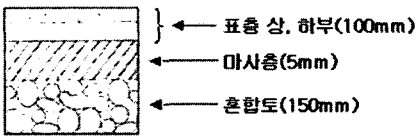
Fig. 2 Coupled 3-D shoes-foot finite element model



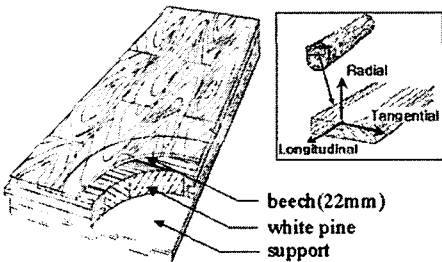
(a) Asphalt pavement



(b) Urethane court



(c) Clay court

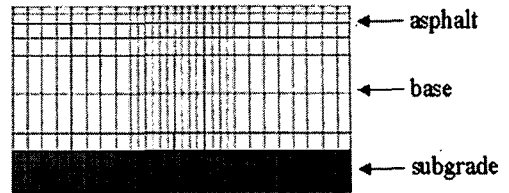


(d) Wood court

Fig. 3. Structure of the surfaces

3.2 경계 조건

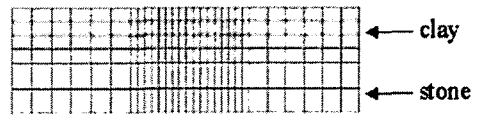
본 연구에서는 스포츠 지면의 착지충격 특성을 분석하기 위하여 신발-족 연계 모델의 0.3 m 자유낙하로 가정하여 경계 조건을 적용하였다. Fig. 5에서 알 수 있듯이 인체의 체중을 고려하여 무게중심에 질량 요소를 생성하였고, 초기 속도 및 중력을 부여하였다. 그리고, 각 지면조건을 고려하여 바닥면에 변위경계조건을 적용하였다. 즉, 아스팔트, 우레탄, 클레이 코트는 바닥 밑면에 변위구속을 주었고, 나무 코트는 지지대 위치에 모든 절점의 자유도를 구속하였다. 접촉경계조건으로는 지면과 아웃솔, 그리고 인솔, 갑피와 피부조직에 대하여 실제 실험 데이터를 참조한 마찰계수($\mu=0.2$)를 적용하였다.



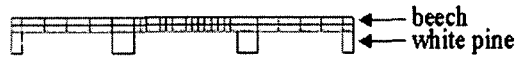
(a) Asphalt court



(b) Urethane court



(c) Clay court



(d) Wood court

Fig. 4 Finite element model of the surfaces

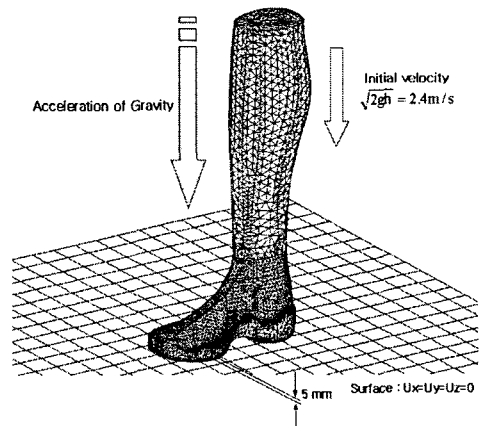


Fig. 5 Loading and boundary conditions

3.3 수치해석 결과

3.3.1 지면 반력 평가

수직 지면 반력(vertical reaction force)은 충격원에 대한 인체의 부하 정도의 평가기준이 되며, 아웃솔과 지면의 수직 접촉력(contact normal force)에 의하여 분석이 가능하다. 충격량-운동량 이론(impulse-momentum theory)에서 낙하 충격시 운동량의 변화는 충격량과 같으며 운동량 보존 법칙에 따라서 각 지면의 충격흡수 효과를 판단할 수 있다.

Table 4는 지면 반력의 기하학적 분석을 통한 수치해석 결과로서 최대 충격력(peak impact force) 및 충격 시간(contact times)을 나타내고 있다.

여기서, 충격력 단위는 $BW = \frac{\text{impact force}}{\text{body weight}}$ 로 정의된다. 인체 부하률(loading rate)은 지면 반력의 시간에 대한 미분값으로 표시되며, 최대 충격력 시점까지 선형적으로 가정하여 직선의 기울기로서 부하률을 결정하였다.

Fig. 6 및 Table 4에서 알 수 있듯이 아스팔트(9.5 BW)에서 높은 충격력을 보이는 반면 접촉 시간(13 ms)은 낮게 나타나며, 이에 따른 높은 부하률(0.73 BW/ms)은 부상발생의 직접적인 원인이 될 수 있다. 나무 코트에서는 상대적으로 낮은 충격력(6.9 BW)을 보이며 이와 같은 결과는 충격시 나무의 굽힘의 기하학적 변형에 의한 접촉시간의 지연에 기인한다고 판단된다.

3.3.2 가속도 전달 특성

착지 충격시 발 뒤꿈치(heel)에서 무릎까지 골격 시스템을 통하여 충격이 전달된다고 가정하였을 때, 뒤꿈치, 관절(ankle), 정강이(shank), 그리고 무릎(knee)에서 발생하는 최대 가속도(peak acceleration)를 평가하였다. Fig. 7는 지면조건에 따른 인체 각 부위별 최대 가속도를 비교하였으며, 표에서 알 수 있듯이 아스팔트 코트에서 나무 코트 까지 20~40%의 최대 가속도 감쇠 특성을 보이고 있다. 무릎 방향으로의 가속도 감쇠 현상은 모든 지면에서 동일하게 확인할 수 있으며, 발 뒤꿈치에서 관절까지 최대 가속도 감쇠율(50~60%)을 보인다. 이상의 가속도 측정을 통하여 지면 충격 시 발생하는 인체 내 충격력을 예측할 수 있으며, 부상 메커니즘을 설명하는데 중요한 운동학적 요소가 된다.⁽¹²⁾

일반적인 실험에서는 가속도계(accelometer)를 피부

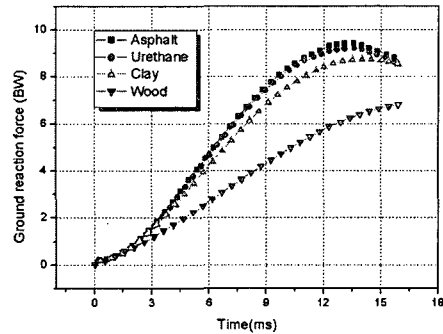


Fig. 6 Impact force-time history to the surface conditions during landing

Table 4 Kinetic variable values to different surface conditions

	Peak impact force(BW)	Contact times(ms)	Loading rate (BW/ms)
Asphalt	9.5	13	0.73
Urethane	9.2	13.5	0.68
Clay	8.5	14.5	0.59
Wood	6.9	16	0.43
Experiment data	4.2~8.5	15~2.0	2.1~0.56

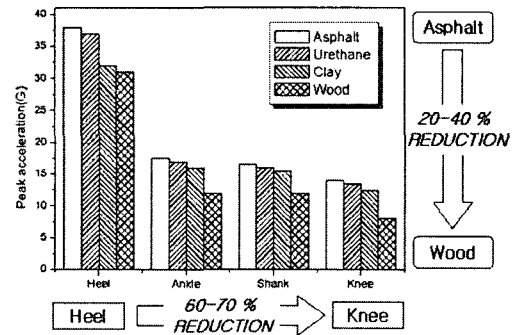


Fig. 7 Peak acceleration of body segments to the surface conditions

조직에 부착하는 방법을 사용한다. 정확한 측정을 위해 골격계에 직접 부착하는 것이 좋지만, 현실적으로 불가능한 일이며 이에 따른 제약사항 때문에 약 50%의 오차를 포함하는 것이 현실적 문제이다. 본 연구

에서는 해석 모델의 피부조직에서 가속도를 측정하여 동일 위치의 실험 데이터와 비교, 분석하였다.

대개, 측정은 정강이의 피부조직에서 가속도를 측정하고 있으며, 트레드밀(treadmill)에서 러닝 충격 시 약 9 G의 최대 가속도가 측정되며,^(1,2) 본 해석치에 비해 약 60 %의 차이를 보이고 있다. 인체의 발의 구조는 해부학적으로 충격흡수 기능을 담당하고 있으며 특히 관절의 굴곡운동 및 무릎의 굽힘 동작에서 자체적 흡수 기능을 발휘한다. 이와 같은 제약사항들로 인해 실험 데이터 비교에서 상대적으로 높은 최대 가속도 값을 보이며 이에 대한 보정이 필요하다고 사료된다.

3.3.3 주파수 응답 해석

본 연구에서는 가속도의 시간함수를 푸리에 변환(fourier transform)을 사용하여 주파수 영역(frequency domain)으로 변환하여 지면조건에 따른 각 부위별 주파수 감쇠현상을 분석하였다. 시간과 주파수 영역의 신호는 푸리에 변환을 통하여 서로간의 도메인으로 변환이 가능하며, 가속도의 시간변수를 $x(t)$ 라 하고, 연속적인 신호를 식 (14)와 같이 샘플링한 신호로 이산화 하여 푸리에 변환에 적용하면 식 (15)의 이산 푸리에 변환(DFT: discrete fourier transform)식으로 전환된다.⁽¹³⁾

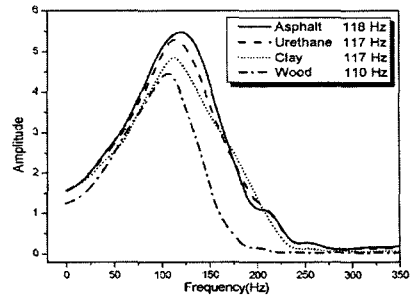
$$x(t) \rightarrow x(n\Delta t) = x(n) \quad (14)$$

$$X(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n) W_N^{nk}, k = 0, 1, 2, \dots, N-1$$

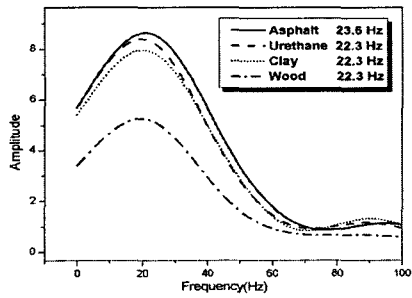
$$W_N^{nk} = e^{-i \frac{2\pi nk}{N}} = \cos\left(\frac{2\pi nk}{N}\right) - i \sin\left(\frac{2\pi nk}{N}\right) \quad (15)$$

여기서, N은 샘플링 수(sampling number), Δt 는 샘플링 간격(sampling interval)을 나타낸다.

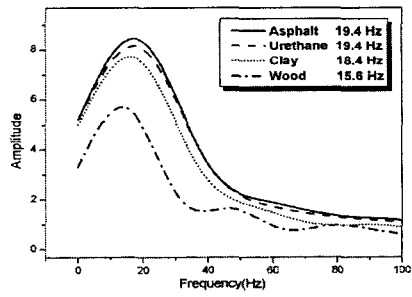
Fig. 8은 각 지면조건별 주파수 응답이며, Fig. 9는 중심 주파수 대역을 비교, 분석하였다. 그림에서 알 수 있듯이 지면 조건에 따른 중심주파수는 정강이 부위를 제외하고 약 5 %의 미소한 차이를 보이고 있기 때문에, 전반적으로 주파수 성분에 대한 지면 조건의 영향은 찾을 수 없었다. 하지만, 하지의 발 뒤꿈치에서 110~118 Hz의 고주파수 성분이 나타나며, 무릎 방향으로 12~13 Hz의 저주파 성분이 증가하는 현상을 보인다.



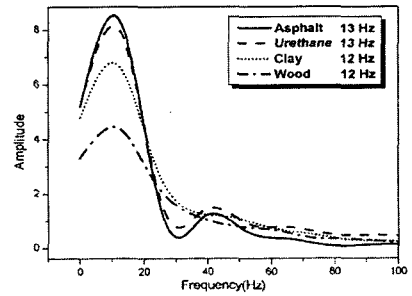
(a) Heel



(b) Ankle



(c) Shank



(d) Knee

Fig. 8 Frequency responses of acceleration

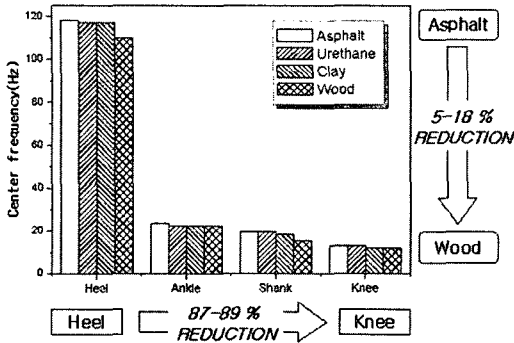


Fig. 9 Comparison on frequency responses to the surfaces

4. 결론

본 연구에서는 다양한 지면조건에 대하여 수직 점프 동작에서의 충격 시뮬레이션을 통하여 부상과 관련된 충격력 및 인체 내 가속도 특성을 분석하였다. 이를 위하여 신발-족 연계 유한요소 모델을 개발하였고 외연적 시간적분법의 LS-DYNA 충격 전용 프로그램을 사용하여 해석을 수행하였다.

지면 반력 분석을 통하여 충격원에서의 부하 강도를 예측하였다. 여기서, 지면 반력의 기하학적 분석을 통하여 최대 충격력 및 충격 시간의 평가가 가능하였다. 그리고, 인체의 충격력 전달 특성은 가속도 및 주파수 분석을 통하여 확인하였다. 착지 충격시 발생하는 각 부위별 가속도 시간 이력을 통하여 지면 조건의 영향을 분석하였고, 가속도의 시간 응답에 대하여 푸리에 변환을 사용하여 주파수 성분을 분석하였다.

본 연구에서는 운동학적 경계요소의 지면조건을 고려하여 인체의 충격전이 특성을 예측하였다. 이러한 연구 결과들은 수직 점프 동작에서 지면조건의 충격흡수성과 관련된 기초자료로서 활용 될 수 있으며 신발 개발 및 부상 방지 측면에서 합리적으로 적용될 수 있다고 사료된다. 이상의 결과를 보완하기 위하여 동등 조건의 실험데이터와의 비교를 통하여 신뢰성을 확보하는 것이 중요한 과제이며, 주파수 성분과 관련된 부상 매커니즘의 지속적인 연구가 진행되어야 한다고 판단된다.

후 기

본 연구는 산업자원부 지역특화기술개발사업

(신발기초기술분야, 과제번호:10012718) 지원으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분들께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Nigg, B. M., 1986, *Biomechanics of Running Shoes*, Human Kinetics.
- (2) Cavanagh, Peter. R., 1990, *Biomechanics of Distance Running*, Human Kinetics.
- (3) Nigg, B. M. and Liu, W., 1999, "The Effect of Muscle Stiffness and Damping on Simulated Impact Force Peaks During Running," *J. Biomechanics* Vol. 32 pp. 849-856.
- (4) Shorten, M. R. and Himmelsbach, J. A., 2002, "Shock Attenuation of Sports Surfaces," *Sports Engineering* Vol. 4, pp. 152-158.
- (5) Henning, E. M. and Lafortune, M. A., 1991, "Relationships Between Ground Reaction Force and Tibial Bone Acceleration Parameters," *J. sport Biomechanics* Vol. 7 pp. 303-309.
- (6) Tillman, M. D., Fiolkowski, P., Bauer, J. A. and Reisinger, K. D., 2002, "In-Shoe Plantar Measurements During Running on Different Surfaces" Changes in Temporal and Kinetic Parameters," *Sports Engineering* Vol. 5, p. 121.
- (7) Bathe, K. J., 1996, *Finite Element Procedures*, Prentice Hall.
- (8) Belytschko, T., 2000, *Nonlinear Finite Elements for Continua and Structures*, Wiley.
- (9) Kim, S. H., Ryu, S. H., Choi, J. H. and Cho, J. R., 2004, "Finite Element Analysis for the Landing Impact Evaluation of Court Sport Shoes," *Proc. KSME 2004 Spring Annual Meeting*, p. 76.
- (10) Duskov, M. and Scarpas, A. 1997, "Three-Dimensional Finite Element Analysis of Flexible Pavements with an EPS Sub-Base," *Geotextiles and Geomembranes* Vol. 15, pp. 29-38.
- (11) Tabiei, A. and Wu, J., 2000, "Three-Dimensional Nonlinear Orthotropic Finite Element Material Model for Wood," *Composite Structures* Vol. 50, pp. 143-149.
- (12) Voloshin, A., Verbitsky, O., Mizrahi, J., Treiger, J. and Isakov, E., 1998, "Shock Transmission and Fatigue in Human Running," *J. Appl. Biomechanics* Vol. 14, pp. 300-311.
- (13) ORIGIN User's Manual, Ver. 6, Microcal