

코트 스포츠화의 착지충격 평가를 위한 유한요소 해석

김성호[†] · 조진래* · 류성현** · 최주형**

Finite Element Analysis for the Landing Impact Evaluation of Court Sport Shoes

Seong-Ho Kim, Sung-Heon Ryu, Joo-Hyung Choi, Jin-Rae Cho

Key Words: Finite Element Method(유한요소법), Bio mechanics(생체역학), Dynamic transient analysis(동적과도해석), Landing impact (착지충격)

Abstract

Court sport shoes is consisted of several functional parts such as soles, upper and midfoot reinforcements. Currently, intensive research for court sport shoes considering functional parts is in progress world widely, but the shoes design relies only on the view nt of kinesiology and biomechanics until now. Thus, more scientific and reliable evaluation of shoes characteristics is definitely required. In this paper, we evaluate the landing impact of court sport shoes by using finite element method. We construct a shoes-leg coupled FEM model which can simulate effectively impact in running mode. From the numerical analysis results, the designer can establish the advanced design concepts and build up the detailed design standard for the specific court sport shoes under consideration.

1. 서 론

농구, 배구, 테니스, 배드민턴, 마라톤 등의 각종 코트 경기들에서 착용되어지는 코트 스포츠화(court sport shoes)는 경기에서 중요한 역할을 차지하고 있다. 이는 안락성, 내구성, 안정성, 경량성, 충격흡수성(shock absorption), 반발탄성(viscoelasticity) 등의 다양한 기능성들의 복합체로서 구성된다.

현재의 코트 스포츠 슈즈시장은 이러한 복합적인 기능들을 갖춘 전문 코트 스포츠화의 개발을 요구하고 있다. 외국의 주요 브랜드에서는 이미 오래 전부터 스포츠역학(kinesiology)과 생체역학

(bio mechanics) 및 전산설계에 기반을 둔 제품을 생산하고 있는 것에 반해서, 현재 국내 코트 스포츠화 브랜드들은 외국의 OEM으로 시작하여 생산 기술은 충분히 습득한 반면 제품의 설계 및 개발에 핵심이 되는 prototype과 같은 기술의 원천(resources)을 확보하지 못하고 있는 실정이다.^{1,9)} 이로 인한 국내 코트 스포츠화 브랜드의 경쟁력 약화를 극복하기 위해서는 보다 진보된 개념의 설계리소스(design resources) 및 과학적인 제품 설계기준(design standards)의 확보가 시급하다고 볼 수 있다.

본 연구에서는 이러한 관점에서 기존의 스포츠역학 및 생체역학에만 의존해오던 코트 스포츠화의 개발기술에 유한요소 해석기법(finite element method)의 도입을 시도하였다. 이로서 과학적인 수치데이터에 의한 현재 제품의 진단 및 평가는 물론, 신제품의 설계 및 생산 등에 대한 시간과 비용을 크게 절감하는 효과를 기대할 수 있다.

신발개발에 대한 연구는 1930년대부터 시작되

† 부산대학교 대학원 기계설계공학과

E-mail : superalloy@empal.com

TEL : (051)510-3206 FAX : (051)514-7640

* 책임저자, 정회원, 부산대학교 기계공학과

** 부산대학교 대학원 기계설계공학과

었으나 정량적인 분석이 아닌 단지 피험자의 주관적인 감각이나 시행착오에 의한 비과학적인 방법으로 연구가 이루어졌다. 1950년대에 들어서야 유럽의 신발회사들이 운동선수용 신발을 제작하기 시작하면서 신발연구에 대한 관심이 급증하였는데, 1970년대 초에 이르러서야 비로소 Hennig (1975) 등에 의해 직접 아날로그 출력을 압력분포로 측정하는 축전기법 (capacitive method) 등이 소개되기 시작하였다. 이후 컴퓨터와 고속영상분석기 등의 등장으로 운동역학적인 검사가 가능해져 현재에 이르고 있다.^{2,3)}

최근의 생체역학 연구자들이나 임상 의학자들은 런닝시 인간의 몸에 가해지는 수직지면반력 (ground reaction force) 등의 크기나, 부상과 관계된 충격 (impact) 또는 쇼크 (shock)와의 관계를 정량화 하려는 연구를 계속하고 있으며, 이를 바탕으로 런닝 착지동작시 발생하는 충격의 흡수와 지면에 떨어질 때의 과다회외 (oversupination) 등을 방지할 수 있는 고기능성 스포츠화를 설계하는데 주로 관심을 가지고 있다.

그리고, 코트 스포츠화의 런닝 착화테스트의 목적도 발의 해부학적 기능이나 운동시의 생체역학적인 특성, 플레이어 개인간의 차이 등의 인간의 특성연구와 스포츠화설계의 여러 주요한 인자들과의 적합여부를 과학적으로 입증하는데 있다. 인간특성연구는 인체에 미치는 부하 (load)의 크기에 주로 관심을 두는데, 이는 플레이어의 운동 형태, 속도, 자세, 근 활동 (muscle action), 반복수, 지면상태, 스포츠화종류, 개인적인 특성 등에 따라 다양하게 나타난다. 이러한 다양한 특성들을 스포츠화개발에 반영하기 위해 사용되는 연구방법으로는 영상분석법, 지면반력 측정법, 압력분포 측정법 등이 있으나 연구 및 개발, 평가, 피드백 등의 상황에서 시간과 비용이 많이 소요되므로 그 한계를 드러내고 있는 실정이다.

따라서 위와 같은 생체역학을 기반으로 하고 차세대 기술로 부각되고 있는 유한요소법을 접목시키는 것은 한단계 진보된 설계라 할 수 있다.

본 연구에서는 이러한 관점에서 코트스포츠화에 대한 전산해석 및 설계시에 실제 신발을 착용하고 하지 (leg)와 함께, 런닝동작 착지시의 거동을 수치적으로 시뮬레이션 함으로서 고기능성 코트 스포츠화 개발에 반영하고자 시도하였다.

2. 문제 정식화

2.1 지배방정식 및 정식화

코트 스포츠화는 항상 외부적으로는 지면과, 내부적으로는 인체의 일부분인 발과 접촉을 이루고 있다. 또한 각종 코트 운동경기에서 코트 스포츠화 의 영향을 평가하기 위해서는 시간을 고려한 동적 특성을 평가하여야 한다. 따라서 이러한 코트 스포츠화의 유한요소 해석을 수행하기 위해서는 3차원 동적 접촉 문제를 고려하여야 한다.

$$\sigma_{ij,j} + f_i = \rho \ddot{u}_i + c \dot{u}_i \in {}^t\Omega \quad (1)$$

여기서, $\sigma_{ij,j}$ 는 응력텐서, f_i 는 물체력, ρ 는 밀도를 나타낸다. 동적 지배방정식인 식 (1)에 가상일의 원리 (principal of virtual work)를 적용하고, 대변형 해석을 위해서 Total Lagrangian 정식화를 취하면 내부응력, 관성력 및 외부하중과 경계조건, 접촉력을 모두 포함하는 동적 접촉 문제의 비선형 운동방정식으로 유도된다. 이 지배방정식을 형렬형태의 비선형 방정식으로 표현하고 이를 시간에 대해 연속적으로 적분하면 속도와 변위를 계산할 수 있게 된다. 이를 위해 직접 적분법 (direct integration method) 중에서 뉴마크법 (newmark method)을 사용하였다.^{4,5)}

3. 유한요소 해석

3.1 코트스포츠화 형상 및 FEM 모델링

본 연구에서는 코트 스포츠화의 구성부품인 아웃솔 (outsole), 미드솔 (midsole), 인솔 (insole), 중족보강재 (midfoot reinforcement), 갑피 (upper) 등을 형상모델화 하였다. 추가적으로 이 코트 스포츠화를 신고 실제와 같은 런닝시 착지동작을 구현하기 위한 인체의 하지 (leg) 또한 고려하였다.

3차원 전용 CAD모델러인 프로엔지니어 (Pro/E)를 사용하여 형상모델링을 실시하였으며, 유한요소모델 (finite element model)을 생성하기 위하여 전용 유한요소프로그램인 ANSYS를 사용하였다.

Fig. 1에는 각부분의 형상 및 전체의 조립형상을 도시하였다.

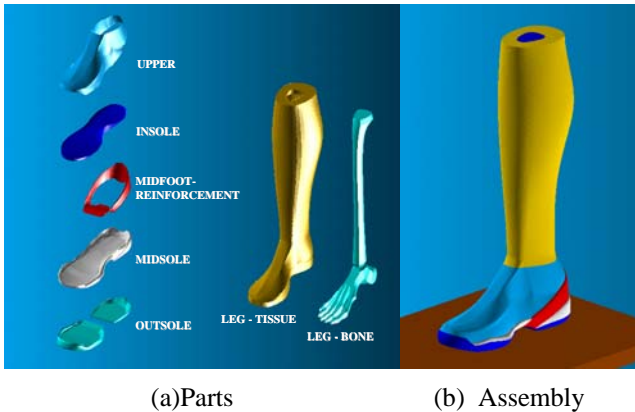


Fig. 1 Geometric model (by Pro/E)

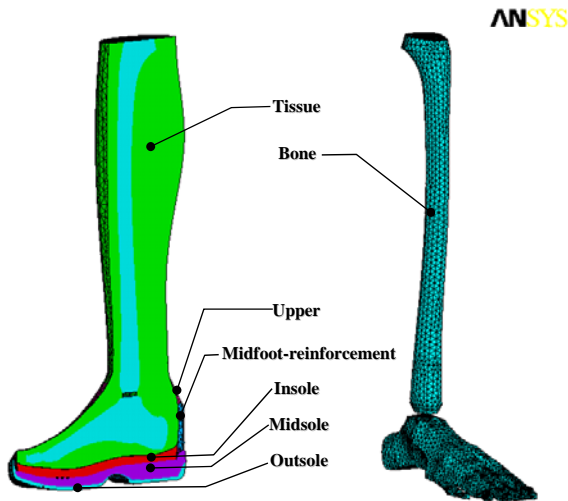


Fig. 2 Numerical analysis model (by ANSYS)

Table 1 Material properties of shoe & leg

Parts	Coefficient	Value
Outsole	C1	-0.00149
	C2	0.11732
	C3	-0.00182
	C4	0.01720
	C5	-0.02000
Midsole	E (kgf/mm ²)	9.4e-2
	ν	0.35
Insole	E (kgf/mm ²)	7.5e-2
	ν	0.35
Midfoot-reinforcement	E (kgf/mm ²)	4.9
	ν	0.35
Upper	E (kgf/mm ²)	1.2
	ν	0.35
Bone	E (kgf/mm ²)	10
	ν	0.34
Tissue	E (kgf/mm ²)	1.15e-3
	ν	0.49

그리고, Fig. 2에는 유한요소로 구성되는 수치 해석 모델을 나타내었으며, 전체격자는 약 15만

개로 구성된다. Table 1에는 수치해석 모델에 사용된 물성치를 나타내었다.

아웃솔은 비압축성, 비선형성, 등방성 및 초탄성을 갖는 고무재질로서 이를 표현하기 위하여 다음과 같은 Mooney-Rivlin 모델을 사용하였다.⁶⁾

$$W = \sum_{i+j=1}^N C_{ij} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j \quad (2)$$

여기서, C_{ij} 는 재료의 실험결과로부터 결정되는 물질의 상수이고, I_1, I_2 는 다음과 같다.

$$I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2$$

$$I_2 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_3^2 \lambda_1^2 \quad (3)$$

미드솔과 인솔은 압축성을 가지는 폼 (foam) 재질의 고무로서 이를 반영하기 위해서 Blatz-Ko 폼 모델을 사용하였다.⁷⁾

$$W = \frac{G}{2} \left(\frac{I_2}{I_3} + 2\sqrt{I_3} - 5 \right) \quad (4)$$

그리고, 갑피는 가죽재질로서 두께가 일정하고 굽힘과 인장력만을 받는 셸 (shell) 요소로 구성하였으며, 각각의 코트스포츠화 부품들은 실제와 같이 완전히 결합되었다고 가정하였다.

또한, 인체의 하지를 무릎까지로 제한하여 모델링 후 코트 스포츠화와 연계시켰다. 실제 발의 하지구조는 뼈, 인대, 피부, 근육 등의 매우 복잡한 구조이지만 본 해석모델에서는 하지의 피부 (tissue)와 뼈 (bone)로 그 모델을 비교적 단순화하였다. 또한 Fig. 3에 도시한 것처럼 하지뼈의 경골 (tibia)과 종골 (calcaneus)사이의 발목관절 (ankle joint)과 거골하관절 (subtalar joint)을 반영하기 위한 JOINT element를 생성하였다. 이는 후속제어평가에 적용될 수 있다.

3.2 경계조건 적용

런닝동작은 인간의 기본운동 중 하나로서 일반적으로 발의 후족 (rearfoot)이 지면에 닿는 충격단계 (passive step)와 중족 (midfoot)과 전족 (forefoot)이 차례로 닿는 추진단계(active step)로 구분된다. 본 연구에서는 후자와 같은 발목 배저굴 (dorsiflexion)운동에 의한 복잡한 동작을 단순한 착지에 의한 점핑동작만으로 가정하였다.

실제 코트 스포츠운동을 참조한 런닝동작시 착지동작 (landing impact)의 경계조건을 Fig. 3에 도시하였다.

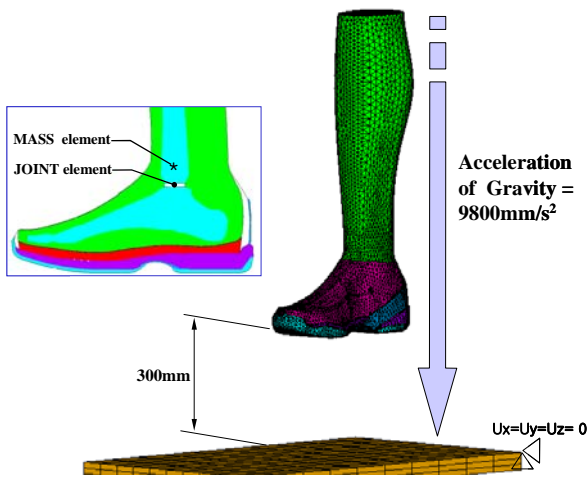


Fig. 3 Boundary condition for landing impact

런닝시 착지충격모드의 공중기의 정점을 300mm로 가정하였다. 정점에서 받은 정지하므로 중력하에서 체중만이 적용되는 순수자유낙하로 고려할 수 있다. 이러한 착지충격모드에서 인체의 체중(60kg)을 적용하기 위해 하지의 무게 중심에 MASS element를 생성하였다. 그리고, 하중경계조건으로 중력가속도 (acceleration of gravity = 9800mm/sec²)를 적용하였다. 변위경계조건으로 지면의 모든 절점의 자유도 (degree of freedom)를 구속하였다. 또한, 접촉경계조건으로는 지면과 아웃솔, 그리고 인솔과 발의 바닥면 피부, 갑피와 하지의 족 (foot)은 접촉상태가 되므로 실제실험 데이터를 참조한 0.2의 마찰계수를 적용한 접촉조건을 부여하였다.¹⁾

해석 조건으로 동적과도해석 (dynamic transient analysis)을 수행하였으며, 비선형 조건을 해석하기 위해 Newton-Rapson법, 시간적분을 위하여 Newmark-β법을 사용하였다.

3.3 수채해석 결과

3.3.1 착지충격 시뮬레이션

런닝시의 착지충격 (impact in running) 시뮬레이션에서, 300mm높이의 중력하에서 자유낙하에 의한 인체 하지의 착지초기속도 (V_f)와 도달시간 (t_{300mm})을 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$y = y_0 + v_{0y}t + (1/2)a_y t^2$$

$$v^2 = v_0^2 + 2a(x - x_0)$$

$$v_f = \sqrt{2gh} = v_{f=300mm} = \sqrt{2 \times 9800 \times 300} = 2424.871 \text{ (mm/sec)}$$

$$t_{300mm} = \sqrt{\frac{2h}{g}} = \sqrt{\frac{2 \times 300}{9800}} = 0.2574 \text{ (sec)} \quad (5)$$

Fig. 4에는 수치해석후의 변형된 모습 및 등가 변형률분포를 나타내었다.

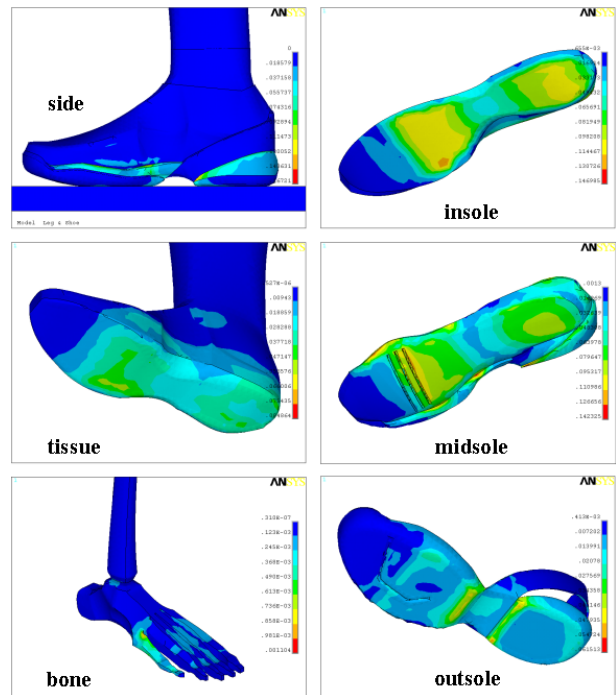


Fig. 4 Equivalent strain distribution during landing impact mode

특히, 체중의 전달경로인 발목과 후족부위, 활모양의 족궁인 아치 (arch) 등에서 가장 높은 응력이 발생하였다. 이는 생체역학적으로도 보고되는 결과로서 체중이 집중되고 분산되는 거동을 나타낸다.²⁾

3.3.2 압력분포 측정

생체역학에서 압력분포측정 (pressure distribution measurement)은 일반적으로 EMED system 등의 압력분포측정기를 사용한다. 약 2000여개 정도의 capacitor를 일정한 판에 부착하여 scanning 하는 방식으로 스포츠화 각각의 솔 (sole)부의 영향은 파악할 수 없는 한계가 있다. 그러나 FEM에서는 Fig. 4와 Fig. 5에서 보여지는바와 같이 각 파트별 거동 및 영향의 확인이 가능하며 응력 및 변형률, 접지압 (contact pressure)등의 특성 파악이 가능하다.

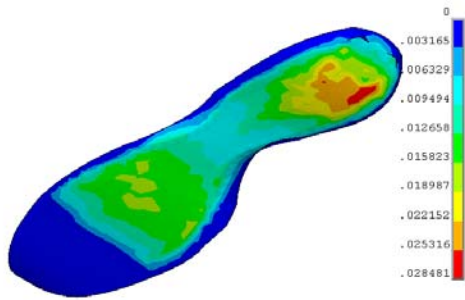


Fig. 5 2D-Contact pressure distribution of insole

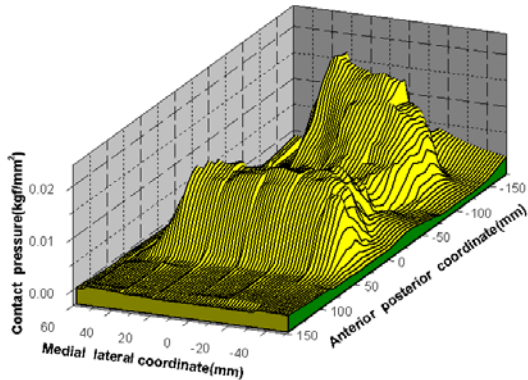


Fig. 6 3D-Contact pressure distribution of insole

Table 2 Comparison of Experiment and FEM

	pressure(kgf/mm ²)
Experiment	0.0163
FEM	0.0169

Fig. 5와 Fig. 6에는 착지동작모드 해석후의 코트 스포츠화 인솔의 접지압 (contact pressure)의 분포상태를 나타내었다. 그림에서 보여지는바와 같이 발의 아치 (arch)부분과 발끝을 제외한 전족 및 후족부분에 많은 접지압이 발생하고 있다. Table 2에는 본 해석의 인솔 후족부위의 접지압 결과를 선행된 실제 backward jumping의 데이터와 비교한 것으로 근사한 수치를 보이고 있다.¹⁾

3.3.3 지면반력 측정

생체역학에서 런닝시 수직방향의 지면반력 (Ground Reaction Force)은 일반적으로 체중의 2~3배가 되며, 가속도는 중력가속도의 20~50배의 가속도가 후족부위에 발생한다고 보고되고 있다.³⁾ 최대 수직지면반력 (vertical peak force)은

생체역학에서는 AMTI system 등의 지면반력 측정기 (force platform)의 Fz (;기계공학에서 Fy성분) 방향의 힘으로 판단하며, 본 연구에서도 지면반력을 측정하여 그 특성을 파악하였다. Fig. 7에는 본 해석에서 나타난 시간에 따른 지면반력의 변화를 실험데이터와 함께 도시하였다. 그리고, Fig. 8에는 시간에 따른 아웃솔과 인솔의 접지압을 비교하여 나타내었다.

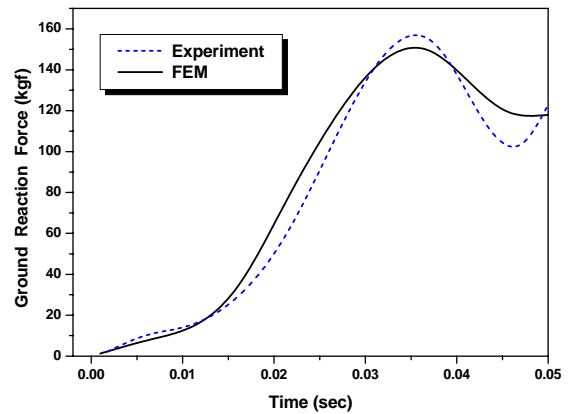


Fig. 7 Ground reaction force during landing impact, showing a pronounced heelstrike transient

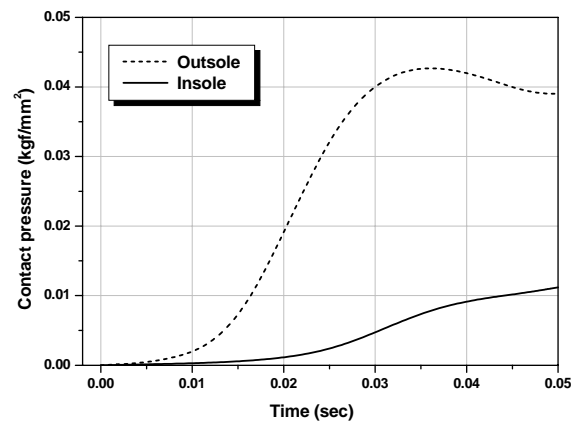


Fig. 8 Shock absorption of outsole and insole

Fig. 7의 그래프에서 보여 지듯이 최대지면반력이 149.970kgf로 체중의 약 2배가 넘게 나오는데 이는 생체역학의 체중의 2~3배의 범위 (일반적으로 약 1200~2000N=122.448~204.081kgf)를 만족한다. 또한 Fig. 8에서는 아웃솔에서 인솔로 충격이 전이되어 흡수되는 거동을 확인할 수 있다.

3.3.4 충격력 측정

지면 착지시 충격량 측정 (impulse measurement)은 아래의 식 (6)에 의해서 구해진다.³⁾

$$\begin{aligned} I(\text{Impulse}) &= \int_{t_i}^{t_f} F_i(t) dt = mv_f - mv_i \\ &= mv_f - mv_i = 0 - (61\text{kg} \times 2.424\text{m/sec}) \\ &= 149.917\text{kg} \cdot \text{m/sec} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F(\text{Impact force}) &= \frac{I}{dt} \\ &= \frac{149.917\text{kg} \cdot \text{m/sec}}{0.03\text{sec}} = 4997.233\text{N} = 509.402\text{kgf} \end{aligned} \quad (6)$$

여기서, I (impulse)는 충격량으로 정의되고 운동량의 변화량이다. 충돌 후에 정지된다고 가정하면, t_i 는 신체가 지면에서 떨어진 초기시간, t_f 는 신체가 지면에 착지한 시간, F는 전체 수직 충격력 (vertical impact force)이다. dt는 후족이 충격력을 발휘하는 충격시간으로 Fig. 7에서 약 0.03sec로 적용한다. 따라서, 중력하에서 이론에 의한 착지충격시 전체 충격력이 509.402kgf이고, FEM에서 최대지면반력이 149.970kgf으로 측정될 때 신발에 의해서 흡수되는 충격흡수력은 509.402-149.970=359.432kgf로 정량화할 수 있다.

4. 결 론

본 연구의 동적 시뮬레이션의 구현으로 얻어진 결과를 요약하면 아래와 같다.

첫째, 실제 코트 스포츠화를 착용하고 런닝시의 거동을 동적시뮬레이션으로 구현하였다. 모델의 검증을 위하여 선행된 연구의 실험데이터와 비교 및 분석하여 신뢰성을 확보하였다.

둘째, 시간에 따른 지면반력을 측정하고 실제 실험치와 비교한 결과 유사한 거동을 보였다.

셋째, 충격력을 계산하여 신발 솔(sole) 부의 충격흡수력 및 효과를 정량적으로 파악하였다.

그 동안 코트 스포츠화를 비롯한 각종 스포츠화의 성능을 평가한 많은 연구가 선행되었지만, 필드실험에만 의존하거나 전산해석시에는 단순 모델로 가정하는 경우가 대부분이었다. 유한요소법이 적용된 본 연구와 같이 스포츠역학 및 생체역학적 측면에 기반을 두고 사람의 발과 연계된 스포츠화를 통한 완전한 운동모드의 시뮬레이션 해석은 많은 가능성을 가질 수 있다. 이러한 연

구를 계기로 차기에는 고급 설계리소스 및 제품 설계기준을 마련하기 위한 연구가 활발히 진행될 것으로 보며, 나아가 외국브랜드와의 경쟁에서도 독창적인 기술로 우위에 서기를 기대해 본다.

향후에는 아웃솔 패턴 (pattern)이 모델에 포함될 수 있으며, 실제 런닝 굴곡동작인 발목 배저굴 (dorsi-plantar flexion)운동에 대한 동적 시뮬레이션이 고려될 수 있다. 또한, 후족제어 영향 및 특성평가, 다양한 평가방안 적용 및 각종 신발 인자별 평가 등의 여러가지 연구가 진행될 수 있을 것이다. 그리고, 본 연구의 해석에서는 내연적 시간적분법 (implicit method)을 사용하였는데, 동적해석에서 보다 나은 정확성과 수렴성확보를 위해 중앙차분법 (central differential method)에 기초한 외연적 시간적분법 (explicit method) 해석을 고려하여 비교해 볼 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 산업자원부 지역특화기술개발사업 (신발기초기술분야, 과제번호:10012718) 지원으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분들께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Hallym University, 2002, Technical Report : *Development of Tennis shoes Design and Production.*
- (2) B. M. Nigg, 1986, *Biomechanics of Runnig Shoes: Human Kinetics.*
- (3) Peter. R. Cavanagh, 1990, *Biomechanics of Distance Running: Human Kinetics.*
- (4) O. C. Zienkiewicz and R. L. Taylor, 1991, *The Finite Element Method vol.2: McGraw Hill.*
- (5) K. J. Bathe, 1996, *Finite Element Procedures: Prentice Hall.*
- (6) M. A. Crisfield, 1991, *Non-Linear Finite Element Analysis of Solids and Structures, John Wiley & Sons.*
- (7) ANSYS User's Manual, Ver 5.3: ANSYS Inc.
- (8) S. H. Kim, J. H. C, S. H. R, J. R. C and J. H. B, 2003, *Finite Element Analysis for Evaluating Torsion and Bending Strengths of Tennis Shoes, KSME spring pusan, pp.10~15.*