

당뇨화 다밀도 안창의 충격특성

금영광¹ · 정임숙¹ · 강성재¹ · 김영길² · 김명웅² · 김영호¹

¹연세대학교 의공학부, ¹의공학연구소, ¹의용계측 및 재활공학 연구센터,

¹첨단의료기기 기술혁신센터, ²오산대학 테크노신발과, ²신발공학연구소

(2002년 7월 25일 접수, 2003년 1월 25일 채택)

Impact Characteristics of Multi-Density Insoles for DM Shoes

Y.K. Keum¹, I.S. Jeong¹, S.J. Kang¹, Y.K. Kim², M.W. Kim², Y.H. Kim¹

¹Dept. of Biomedical Engineering, ¹Research Institute of Medical Engineering,

¹Research Institute for Medical Instruments and Rehabilitation Engineering,

¹Technology Innovation Center for Medical Instruments, Yonsei University,

²Dept. of Shoe Science and Technology, ²Institute of Shoemaking Technology, Osan College

(Received July 25, 2002, Accepted January 25, 2003)

요약: 본 논문에서는 일정한 충격하중을 제공하여 충격특성을 정량적으로 측정할 수 있는 시스템을 개발하고 당뇨화 안창의 소재에 대한 감쇠지수, 중앙주파수, 반발계수 등을 통하여 6종류의 당뇨화 소재와 3종류의 다밀도 당뇨화 안창의 충격특성을 측정하였다. Podian, Plastazote black, Plastazote white, Flexible PU foam, Podialene 200 blue, Podia flex 소재 중에서 감쇠지수와 반발계수는 Podian이 우수하였으며, Flexible PU foam 소재의 중앙주파수가 가장 작음을 알 수 있었다. 3종의 다밀도 안창인 AP 안창, OS 안창, PW 안창을 각각 세 부위로 나누어 안창의 종류와 부위별 충격특성을 비교한 결과 발뒤꿈치 부분이 충격완화 효과가 가장 우수함을 확인할 수 있었다. 반발계수와 중앙주파수에서는 OS 안창이 AP 안창보다 충격완화 효과가 우수함을 보였으나, 감쇠지수는 서로 유사한 결과를 보였다. PW 안창은 두 겹의 폴리우레탄이 전체에 분포되어 있으므로 부위별로 유사한 충격흡수정도를 나타내었다.

Abstract: Impact characteristics of six DM(Diabetes Mellitus) shoe insole materials (Podian, Plastazote black, Plastazote white, Flexible PU foam, Podialene 200 blue and Podia flex) and three multi-density insoles (AP, OS and PW insoles) were determined in the present study, using a self-designed impact measurement system. The coefficient of restitution, the median frequency and the attenuation index were calculated for each material, based on impact forces and linear accelerations. Podian revealed the superiority in the coefficient of restitution and the attenuation index. The median frequency of the Flexible PU foam was the smallest. Results also showed that the heel region was the most impact-attenuated among other areas in the insole. OS insole showed the better characteristics in the coefficient of restitution and the median frequency, but there was no significant difference in the attenuation index. Similar impact characteristics were found in all areas in PW insole, since it was basically of the same dual-density polyurethane.

Key words: Impact characteristic, DM(Diabetes Mellitus) shoe insole, Coefficient of restitution, Median frequency, Attenuation index

서론

최근 식생활 변화와 운동부족, 스트레스 증가 등에 의해서

본 연구는 2001년 교육부 재정지원 사업의 특성화 프로그램 연구 조
성비 지원에 의해 수행되었음

통신저자: 김영호, (220-710) 강원도 원주시 흥업면 매지리 234

연세대학교 의공학부

Tel. (033)760-2492, Fax. (033)760-2197

E-mail. yhkim@dragon.yonsei.ac.kr

당뇨병 환자가 늘어나고 있다. 당뇨병은 신장, 눈, 발 등의 부위에 합병증을 유발하며, 특히 당뇨발(diabetic foot) 환자에게 발생된 궤양(ulcer)은 감염의 원인이 되고 심한 경우에는 발의 일부 또는 전체를 절단하는 외과적 처치가 요구된다. 따라서 당뇨병 환자의 발의 변형과 궤양을 예방하기 위해서 특수하게 제작된 신발을 처방하는 것이 일반적이다[1].

발은 체중을 지지하며 보행 시 발생하는 물리적인 충격을 완화시켜 균형을 유지하도록 한다. 잘 맞는 신발은 발을 편하

게 걷게 해주며 기형을 교정하고 예방할 수도 있지만 반대로 맞지 않는 신발은 보행을 불편하게 할 뿐 아니라 발의 기형을 초래하게 된다. 정상인의 경우 최대압력이 $62.7 \pm 24.4 \text{ N/cm}^2$, 당뇨병 발질환이 있는 경우 최대압력이 $83.1 \pm 24.7 \text{ N/cm}^2$ 이며 종양 유무를 판단하는 임계압력으로 70 N/cm^2 을 제시하고 있다[2]. 다른 연구결과에서는 60 N/cm^2 이상의 발바닥압력을 받는 환자들이 있어서 케양화의 빈도가 약 2배 가량 높다고 발표하였다[3]. 한편 신발을 착용하고 보행 시 발과 안창사이의 압력은 안창 소재에 따라 압력분포가 달라진다[4]. 당뇨병은 발바닥에 작용되는 국부적 이상압력(abnormal pressure)을 경감시키고자 특정한 부위에 특수한 소재를 부착하거나 부분적으로 제거하는 방법이 흔히 사용된다[5]. 안창을 제작할 때 단일소재보다는 다양한 소재를 사용하여 다밀도 안창(multi-density insole)을 제작하는 것이 효과적이다[6]. 안창의 아래층은 딱딱한 소재를 사용하여 내구성을 높이고, 안창의 변형을 방지하여 발의 기능적 조절을 용이하게 하며, 중간층은 복원력이 강한 소재를 사용하여 변형된 발의 구조에 잘 맞도록 한다. 위층은 부드럽고 피부와의 마찰을 줄일 수 있는 소재를 사용한다. 보행 시 편안함은 물론 외부의 충격을 감소하고, 발의 변형에 대한 보호와 신체의 균형 유지에 적합하도록 신발의 구조에 대한 많은 연구가 있었다[7].

일반적으로 딱딱한(rigid) 안창은 스프링 강, Whitman plate, Shaffer plate, 폴리프로필렌(Polypropylene), UCBL 등이 있으며 충격을 정도를 지지할 수 있는 길이부터 발바닥 전체 길이까지 다양하게 제작된다. 이 소재들은 단단하고 내구성이 좋아서 안창의 변형을 방지하여 체중의 이동이나 관절의 운동을 제한하는데 사용된다. 반강체(semi-rigid) 안창은 가죽, Felt, Rubberized cork, Thermoplastic cork, Cellular rubber, Plastazote, 폴리에틸렌(Polyethylene, PE) 등의 소재가 사용된다. 이 소재들은 딱딱한 안창소재보다는 부드러우며 착용감과 충격 흡수가 우수하고 체중의 분배가 용이하여 변형된 발의 구조에 적합하다. 부드러운 안창은 폴리우레탄(Polyurethane, PU) foam, Polyvinyl chloride(PVC) foam, Latex foam 등이 사용되며 충격 흡수력이 가장 좋고, 발바닥의 피부 마찰을 줄이는데 용이하다[8,9].

본 연구에서는 일정한 하중을 제공하는 당뇨병 소재의 충격 특성을 측정할 수 있는 시스템을 개발하고 신발 안창소재의 감쇠지수, 중앙주파수, 반발계수를 측정하여 당뇨병 안창의 충격특성을 파악하고자 하였다.

소재 및 방법

1. 충격특성 측정시스템 구성

충격특성을 정량적으로 측정하기 위해서 가속도 센서와 로드셀을 이용한 충격특성 측정시스템을 개발하였다. 또한, 개발된 시스템을 당뇨병의 여러 소재와 다밀도 안창에 적용하여 충격특성을 측정하였다. 감쇠지수, 반발계수를 정의하고 이에 따라 당뇨병의 소재 및 안창에 대한 충격특성을 분석하며 소

재에 작용된 가속도 데이터를 이용하여 중앙주파수 분석을 통해서 비교하였다.

충격특성 측정시스템은, 그림 1과 같이, 소재 고정부와 충격부로 나뉘어진다. 소재 고정부는 충격 특성 측정 시스템의 몸체로부터 30° 기울어져 있으며 해머가 소재에 충격을 가할 수 있도록 소재의 뒷면을 지지한다. 소재를 강철판에 부착시킨 후 볼트를 사용하여 고정시켰다.

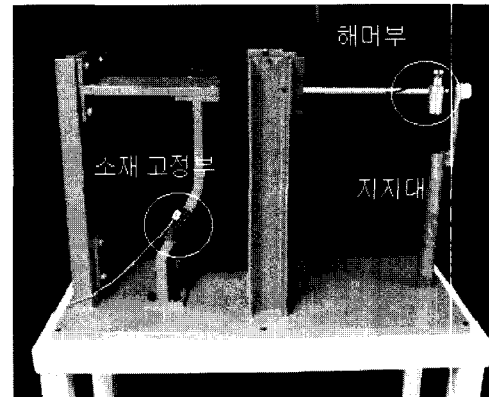


그림 1. 충격특성 측정시스템

Fig. 1. The system for measuring impact characteristics

동일한 충격하중을 제공하기 위하여 충격부는 일정한 위치로부터 진자운동을 하는 0.5kg 의 충격 해머로 설계되었다. 충격부 중심까지의 회전반경은 0.3m 이며 충격 해머는 일정한 위치에 고정되어 있다가 고정나사를 풀면 중력에 의해서 진자운동을 하게 된다[10,11]. 기존의 표준 실험방법은 없었으며 소재의 시편은 가로 80 mm , 세로 50 mm 로 하였다. 충격하중을 측정하기 위해서 해머의 뒤쪽에 로드셀 UMM-K005(다나로드셀, 한국)을 부착하였다. 또한 충격 시 가속도 측정을 위해서 소재 고정부의 뒷면에 가속도 센서 CXL04LP3(Crossbow Technology, 미국)를 부착하였다. 사용된 가속도 센서의 입력 범위는 $\pm 4 \text{ g}$ 이고, 민감도는 500 mV/g 이다.

가속도 센서와 로드셀의 아날로그 출력 신호는 NI-DAQ 1200 카드와 LabVIEW 기반의 측정 프로그램으로 A/D 변환되어 ASCII 파일로 저장되었다. 샘플링율은 감쇠지수 측정에서는 100Hz , 주파수 분석은 10kHz , 반발계수 측정에서는 1kHz 를 사용하였다. 각 실험은 3회 반복 수행하였으며 평균을 취하여 분석하였다.

2. 소 재

그림 2는 다밀도 안창에 사용되는 6종류의 소재들로 Podian, Plastazote black, Plastazote white, Flexible PU foam, Podialene 200 blue, Podia flex 등이다. Podian은 자연 rubber의 탄성을 줄여서 변형한 것이며 Plastazote white와 Plastazote black는 PE계열로써 closed-cell 구조이다. Flexible PU foam은 Polypropylene glycol과 Isocyanate류인 Methylene Diphenyl

Diisocyanate (MDI) prepolymer를 첨가하여 제조한 opened-cell 구조이며 Podia flex는 아크릴과 폴리프로필렌을 아교로 결합한 열가소성(thermoplastic) 소재이다.

그림 3(a)와 그림 3(b)는 다발도 당뇨화 안창의 앞, 뒷면의 사진으로 왼쪽부터 차례대로 AP 안창(Apex사, 미국), OS 안창(하나메디텍, 한국), PW 안창(PW minor사, 미국)이다. 표 1에서는 실험에 사용된 당뇨화용 세 가지 다발도 안창의 부위별 소재를 나타내고 있다. AP 안창의 경우 엄지발가락 부위는 벨벳(velvet)과 PE로 구성되어 있고 중족골과 발뒤꿈치 부위의 상층(top layer)은 벨벳, 중간층(middle layer)은 PE, 하층(bottom layer)은 PU소재로 구성되어 있다. OS 안창의 경우 엄지발가락 부위는 Flexible PU foam이며, 중족골과 발뒤꿈치 부위는 Flexible PU foam, Podia flex, Podialene 200 blue 등 세 가지 소재의 조합으로 구성되어 있다. 특히 충격흡수를 위해서 제2중족골과 제5중족골 사이에는 Flexible PU foam과 Podia flex 사이에 PU 소재의 중족골 패드를 삽입하였으며, 발뒤꿈치 부위는 부드럽고 기공이 큰 Podian을 삽입하였다. AP 안창과 OS 안창의 중족골 부위에 아치 서포트가 있다. PW 안창은 벨벳과 이중구조의 PU를 조합하여 제작된다.

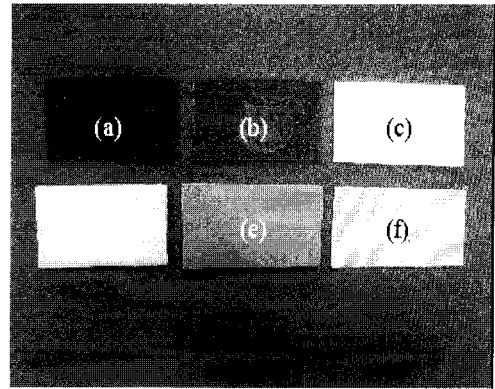


그림 2. 당뇨화 소재

Fig. 2. Insole materials for DM shoes

(a) Podian, (b) Plastazote black, (c) Plastazote white, (d) Flexible PU foam, (e) Podialene 200 blue, (f) Podia flex

3. 방 법

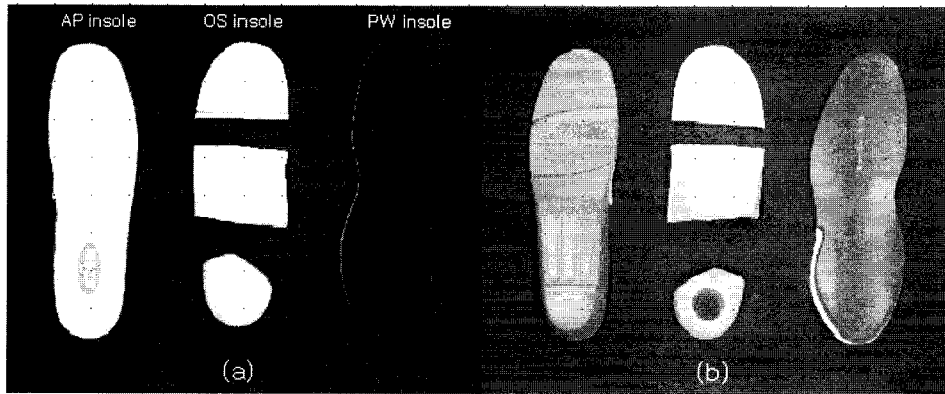


그림 3. 세 가지 당뇨화 안창

Fig. 3. Three different DM shoe insoles (a) 앞면, (b) 뒷면

표 1. 다발도 당뇨화 안창의 부위별 소재

	소재 조합	엄지발가락 부위	중족골 부위	발뒤꿈치 부위
AP 안창	Top	Velvet	Velvet	Velvet
	Middle	PE ²	PE ²	PE ²
	Bottom		PU ³	PU ³
OS 안창 ¹	Top	Flexible PU ³ foam	Flexible PU ³ foam	Flexible PU ³ foam
	Middle		Podia flex	Podia flex
	Bottom		Podialene 200 blue	Podialene 200 blue
PW 안창	Top	Velvet	Velvet	Velvet
	Middle	PU ³	PU ³	PU ³
	Bottom	PU ³	PU ³	PU ³

1) OS 안창의 경우 PU 소재의 중족골 패드와 발뒤꿈치 부위에 Podian 소재를 삽입하였음.

2) PE: polyethylene

3) PU: polyurethane

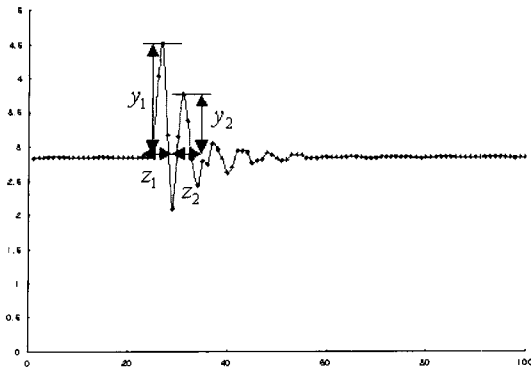


그림 4. 충격에 의한 가속도 신호
Fig. 4. A typical acceleration signal by the impact

그림 4는 충돌 시 소재에서 발생된 가속도 신호이며 감쇠진동 특성을 나타낸다. 감쇠지수 δ 는 가속도 데이터에서 초기 최대값, 두 번째 최대값, 두 최대값 사이의 시간을 이용하여 식 (1)와 같이 정의하였으며 수치가 작을수록 충격완화가 우수함을 의미한다[12].

$$\delta = - \ln \left(\frac{y_2 / z_2}{y_1 / z_1} \right) \quad (2)$$

각 소재는 고유한 진동특성을 지니고 있으며, 이러한 소재에 충격을 가하면 전 주파수 영역을 통하여 임의의 진동주파수 성분이 일정한 크기로 나타난다. 충돌 시 소재에서 측정된 가속도 데이터를 고속 푸리에 변환한 후 중앙주파수를 계산하여 충격에 따른 소재의 주파수 특성을 분석하였다. 파워스펙트럼 분포에서 저주파 특성을 가질수록 충격완화 효과가 우수함을 의미한다. 그림 5는 LabVIEW를 이용하여 푸리에 변환을 수행하는 화면을 보여주고 있다.

그림 6은 로드셀로부터 측정된 충격하중을 나타내고 있다. 반발계수 E 는, 식 (2)와 같이, 충격하중의 첫 번째 최대값에 대한 두 번째 최대값의 비로 정의되며, 수치가 작을수록 충격완화 효과가 우수함을 의미한다[13].

$$E = \frac{\Delta f_2}{\Delta f_1}, \quad 0 < E < 1 \quad (2)$$

결 과

1. 당뇨화의 다밀도 안창 소재

그림 7은 6가지 당뇨화 소재에 대한 충격시험을 통해서 측정된 감쇠지수, 중앙주파수, 반발계수이다. 감쇠지수는 Podian이 가장 크고, Podia flex 소재가 가장 작았다. 중앙주파수를 분석한 결과 Flexible PU foam, Podian의 순으로 충격완화 효과가 우수함을 알 수 있었다. 또한 반발계수는 Podian이 가

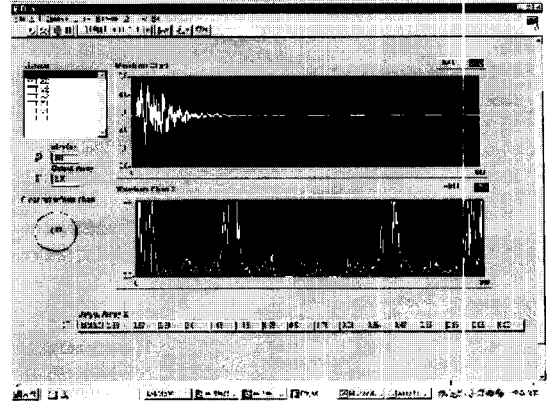


그림 5. FFT 측정 LabVIEW 화면
Fig. 5. LabVIEW display of FFT measurement

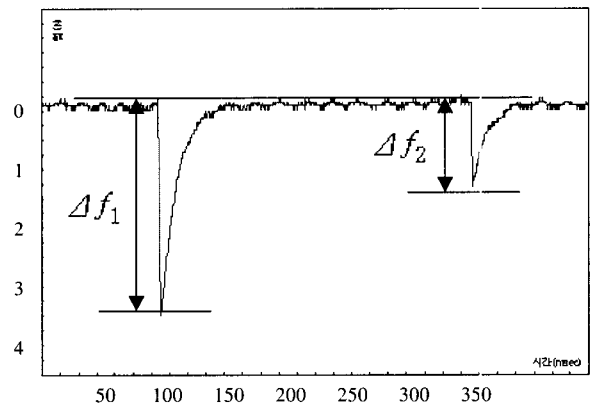


그림 6. 로드셀로부터 측정된 충격하중
Fig. 6. The impact load measured from load cell

장 작고 Flexible PU foam이 가장 큰 것으로 관찰되었다. Podian과 Flexible PU foam은 동일한 두께이고 부드러운 소재로써 모두 충격완화 효과가 우수할 것으로 기대했으나, Flexible PU foam은 기포가 고체형태의 고분자 내에 많이 포함되어 있으므로 반발계수가 크게 나타났다.

감쇠지수, 중앙주파수, 반발계수를 통해서 Flexible PU foam, Podian은 충격완화 효과가 우수한 소재이고 Podialene 200 blue과 Podia flex는 그렇지 않다는 것을 알 수 있었다.

OS 안창에는 발뒤꿈치 부위의 충격흡수를 위해서 Podian이 사용되며 Podia flex는 안창의 전체적인 모양을 유지시키기 위해 중앙 부분에 삽입되었다. Flexible PU foam은 충격완화 효과가 우수하므로 발바닥과 접촉하는 부위에 사용되었다.

그림 8은 두께가 다른 Plastazote white에 충격을 가할 때 측정된 주파수 특성이다. 소재가 두꺼울수록 stiffness가 증가하므로, 그림 8과 같이, 저주파 대역에서 넓게 분포한다. 중앙주파수를 분석한 결과, 3mm의 Plastazote white는 252Hz이고 6mm의 Plastazote white는 245Hz로, 두꺼울수록 충격완화 효과가 우수함을 알 수 있었다.

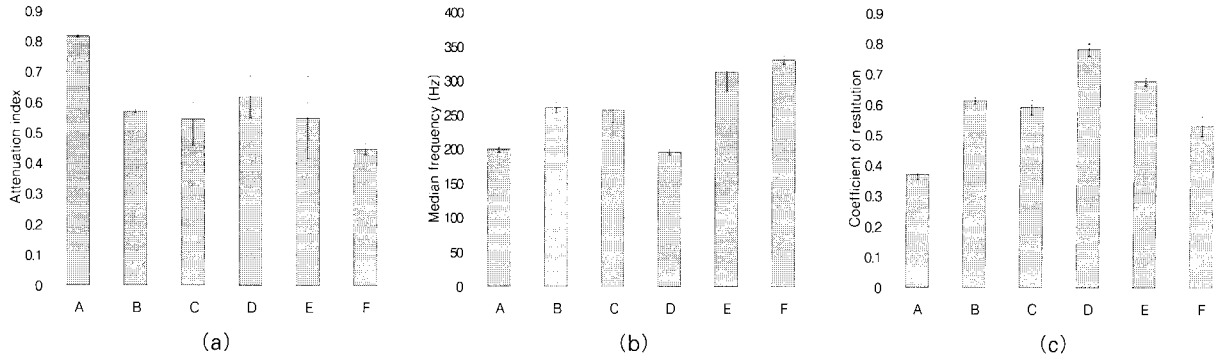


그림 7. 당뇨화 소재의 충격특성

(a) 감쇠지수 (b) 중앙주파수 (c) 반발계수

Fig. 7. Impact characteristics of DM shoe materials

(a) Attenuation index (b) Median frequency (c) Coefficient of restitution

A : Podian B : Plastazote black C : Plastazote white
 D : Flexible PV foam E : Podialene 200 blue F : Podia flex

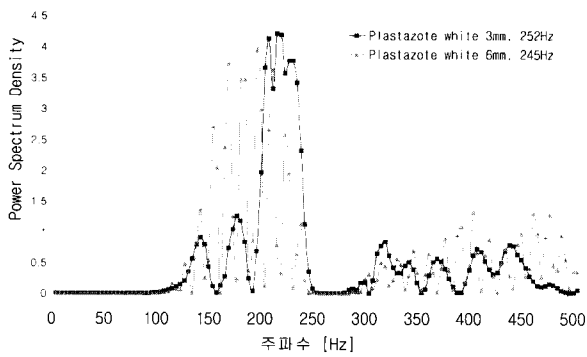


그림 8. Plastazote의 두께에 따른 주파수 특성

Fig. 8. Frequency characteristics of Plastazote with different thickness

그림 9는 당뇨화 다밀도 안창의 부위별 감쇠지수, 중앙주파수, 반발계수를 나타낸 것이다. 감쇠지수를 통해 AP 안창과 OS 안창은 발뒤꿈치와 중족골 부근, 엄지발가락의 순서로 충격완화 효과가 우수한 것을 알 수 있었다. 이는 두 안창의 발뒤꿈치와 중족골 부분이 충격을 흡수하는 소재의 조합으로 되어 있으므로 감쇠지수가 크게 나타난 것이다. 엄지발가락과 중족골 부위에서의 3종의 다밀도 안창에서 중앙주파수 특성은 서로 유사한 결과를 얻었으나 발뒤꿈치 부위에서 안창의 종류에 따라 중앙주파수의 차이를 확인할 수 있었다. AP 안창과 OS 안창을 비교할 때, AP 안창은 발뒤꿈치 부근에서 특히 충격완화 효과가 우수하나, OS 안창은 부위별로 충격이 고르게 분포하는 것을 확인할 수 있었다. PW 안창의 중앙주파수는 부위별로 서로 유사함을 나타냈다.

AP 안창, OS 안창, PW 안창 모두 발뒤꿈치 부근에서 반발계수가 가장 작았으며, 이는 발뒤꿈치 부위에서 충격완화 효과가 가장 우수함을 의미한다. 엄지발가락 부위와 중족골 부위

2. 당뇨화 다밀도 안창

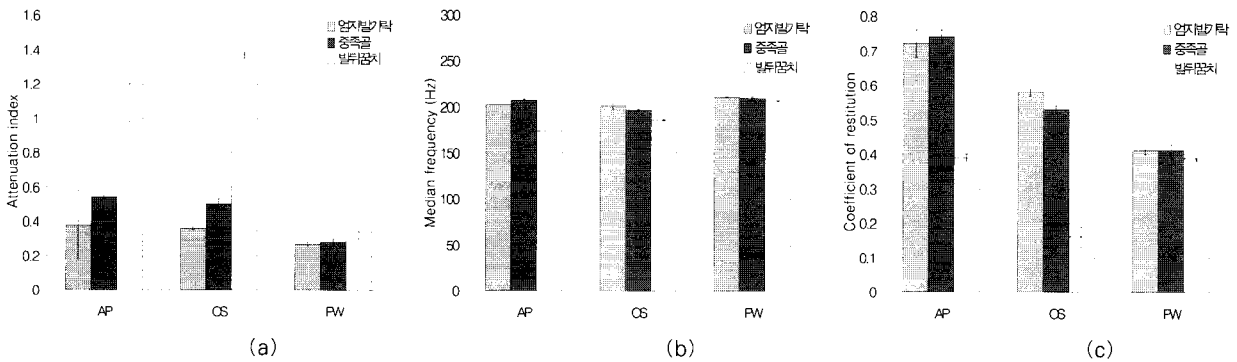


그림 9. 세 가지 당뇨화 안창의 충격특성

(a) 감쇠지수 (b) 중앙주파수 (c) 반발계수

Fig. 9. Impact characteristics of three multi-density DM shoe insole

(1) Attenuation index (b) Median frequency (c) Coefficient of restitution

를 비교한 결과 PW 안창이 우수하고 발뒤꿈치 부위는 OS 안창의 충격완화 효과가 뛰어났다. AP 안창과 OS 안창을 비교하면 모든 부위에서 OS 안창의 충격완화 효과가 우수함을 알 수 있다. OS 안창의 반발계수가 더 작게 나타났으며 Podian이 충격완화 효과가 우수한 소재임을 확인할 수 있다. PW 안창의 경우 모든 부위가 동일한 소재로 이루어져 있으므로 부위별로 반발계수가 서로 유사한 값을 나타내었다.

결 론

본 연구에서는 자체 제작된 충격특성 측정시스템을 이용하여 6종의 당뇨화 소재와 3종의 당뇨화 다밀도 안창의 충격특성을 측정하였다.

당뇨화 소재의 충격특성에서 감쇠지수와 반발계수는 Podian이 우수하였으며, 주파수 분석을 통해서 Flexible PU foam의 중앙주파수가 가장 작음을 알 수 있었다. 3종의 다밀도 안창에 대해서 부위별로 충격실험을 수행한 결과 발뒤꿈치 부분이 충격완화 효과가 가장 우수함을 확인할 수 있었다. 반발계수와 중앙주파수에서는 OS 안창이 AP 안창보다 충격완화 효과가 우수함을 보였으나, 감쇠지수는 서로 유사한 결과를 보였다. PW 안창의 경우는 부분별로 동일한 소재의 조합으로 이루어져 있으므로 부분별로 유사한 충격완화 효과를 나타내었으며, 반발계수가 가장 우수한 안창으로 평가되었다. 본 연구는 당뇨환자들을 위해서 발의 각 부위에 적절한 충격완화 특성을 지니는 다밀도 안창의 소재를 개발함으로써 당뇨발을 예방 또는 치료하는 데에 기여할 수 있을 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

1. 김진호, 오경환, 정진우, *보조기학과 의지학*, 대학서림, 2001
2. D.G. Armstrong, E.J. Peters, K.A. Arthanasiou, L.A.

- Lavery, "Is there a critical level of plantar foot pressure to identify patients at risk for neuropathic foot ulceration" *Journal of Foot and Ankle Surg.*, 37, 303-307, 1998
3. R.G. Fryberg, L.A. Lavery, H. Pham, C. Harvey, L. Harkless and A. Veves "Role of neuropathy and high foot pressures in diabetic foot ulceration.", *Diabetes Care* 21, 1714-1719, 1998
4. S.J. Dixon, C.M. House, and C. Waterworth, "The influence of new and degraded insoles on heel impacts when running in military boots", *Proc. of the 5th on Footwear Biomechanics*, pp. 28-29, 2001
5. 이경태, 당뇨성 족부질환, 최신의학사, 2000
6. 이우천, 정문상, 족부외과학, 군자출판사, 2000
7. M.M. Lusardi and C.C. Nielsen, *Orthotics and Prosthetics in Rehabilitation*, Butterworth Heine mann, 2000
8. B. Goldberg and J.D. Hsu, *Atlas of Orthoses and Assistive Devices*, American Academy of Orthopaedic Surgeons, 1997
9. J.W. Philips, *The Functional Foot Orthosis*, Churchill Livingstone, 1995
10. 정진환, 김성도, 김영찬, 계만수, "교량의 실측 가속도 자료의 적분을 통한 변위 응답 추정에 대한 연구", 부산대학교 생산기술연구소논문집 제55집, pp. 105-114, 1998
11. 박정훈, 유홍희, 황요하, 양현익, "충돌하는 -구속 다물체계의 동역학 해석", 대한기계공학회논문집 A권, 제24권 제2호, pp. 535-545, 2000
12. L.F. Boswell, C. D'Mello, *구조동역학개론*, 기문당, 1998
13. N. Ozkaya and M. Nordin, *Fundamentals of Biomechanics Equilibrium, Motion and Deformation*, Springer-Verlag, 1999