

나노입자 유체댐퍼를 이용한 보행 충격 완화 장치의 충격 흡수에 대한 실험적 연구

Experimental Study of Shoe Cushioning System of Shock Absorption Using Fluid Damper with Nano Particles

문 병 영
B. Y. Moon

Key Words : Shoe pocket(신발 부품), Shoe cushioning system(신발 보행 충격 완화), Energy dissipation(에너지 소산), Shock absorption(충격 흡수), Experimental study(실험적 해석), Mechanical characteristic(기계적 특성)

Abstract: This study developed and evaluated a shoe cushioning system to reduce impact force patterns during running. The shoe cushioning system is composed with a poly urethane pocket, which contains water and porous grains to absorb the force against the weight inside the pocket. Load-displacement curves for the shoe cushioning system were obtained from an instrumented testing machine and the results were compared with various pockets that have air, water or grains. Mechanical testings showed that the pocket with 5 g particles was the best for the shoe cushioning system. This founding will be helpful to designing the shoe.

1. 서 론

보행은 인간 특유의 이동운동으로 일상적인 활동에서 기본이 되는 동작이다. 걷기는 뉴턴의 작용과 반작용 법칙에 의해, 발로 지면을 밀면 지면은 체중과 하지의 추진력의 합력과 크기가 같고 방향이 반대인 반작용력이 발에 가해져 신체가 전진하게 된다. 걸을 때 발바닥 어느 부분이 가장 먼저 닿느냐에 따라 체중의 충격도 그 부위에 가장 강하게 나타나게 되는데, 80% 이상이 초기 지면과의 접촉을 신발의 뒷부분으로 한다¹⁾. 보행에 따른 반작용력으로 인해 뒷굽의 충격이 신체의 척추를 통해 전율적인 파동을 준다.

뛰는 동안 신체가 받는 충격은 매 보행시 평균적으로 몸무게의 2~3 배의 힘을 받게 된다. 이렇게 누적된 힘 혹은 충격력은 인간에게 피로를 가져다주고 신체 특히 발목과 무릎 등의 상해 원인이 된다²⁾. 상해 원인이 되는 보행충격을 줄이기 위해 많은 노력이 기울여졌으나, 근래에 후족부에 충격 흡수 장치가 있는 운동화가 충격력을 효과적으로 감소시킨다는

것이 증명되었고 가장 좋은 성능을 발휘한다고 알려져 있다. 여기에서 더 나아가 충격 흡수력과 내구성을 증가시키기 위해 자동차 범퍼의 충격흡수장치를 모방한 것과 같이, 다른 분야에서 사용되는 공학적 개념을 신발의 충격흡수장치에 접목시킨 연구가 계속되고 있다³⁾.

본 연구의 목적은 기존의 신발 쿠션 장치와는 다른 형태의 무기재료 입자를 이용한 새로운 신발의 충격 흡수 장치를 개발하고, 충격 흡수력을 평가하는데 있다.

충격 흡수용 신발부품은 포켓에 무기재료 입자와 물이 혼합된 형태로 존재한다. 사용된 무기재료 입자는 속이 비어 있는 중공형 다공성 입자이면서 수 나노미터 크기의 기공을 가지고 있는 메조 포러스 구조를 가진 형태이다. 외부에서 힘이 가해지면 그 압력으로 물이 입자의 미세한 기공을 통과하면서 에너지를 흡수하는 효과를 얻을 수 있다. 입자를 둘러싸는 포켓의 형상은 보행시 체중에 의한 충격을 제일 먼저 받고, 가장 많이 받는 부위인 발 뒤꿈치를 기준으로 하여, 최대한 발 뒤꿈치를 덮을 수 있고 신발의 제작과 충격 흡수 장치의 장착에 어려움이 없도록 설계하였다. 충격 흡수 장치의 에너지 감쇠량을 구하기 위한 방법으로 만능 재료 시험기를 사용한 단축

접수일 : 2005년 7월 일

문병영(책임저자) : 부산대학교 ILIC

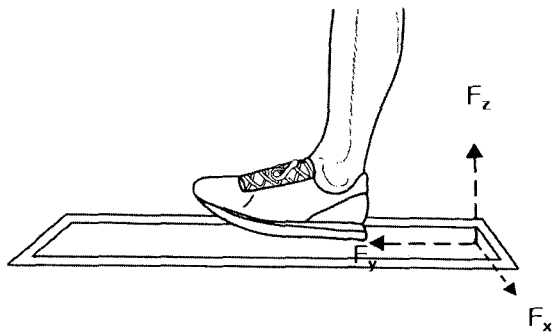
E-mail : moonby@pusan.ac.kr, Tel : 051-510-3696

압축시험 방법이 사용되었다. 포켓에 들어가는 입자와 물의 구성비에 따른 충격 흡수 성능을 평가하기 위해 구성비와 변위량에 따른 실험을 하였다. 입자와 물의 구성비는 입자 함유량이 2~7g까지 1~2g 단위로 증가시키면서 실험하였고, 변위량은 5~8mm까지 1mm 단위로 증가시키면서 실험하였다.

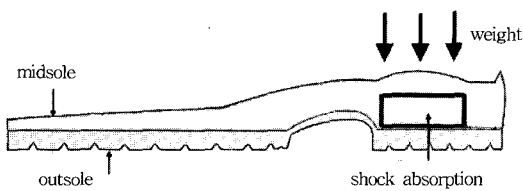
2. 기본 개념 및 작동원리

2.1 기본 개념

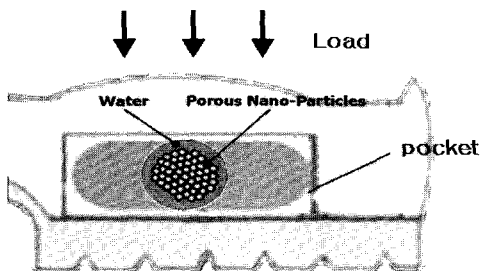
보행시 각 보행에 따른 반작용력으로 인해 뒷굽의 충격이 Fig. 1(a)과 같이 신체의 척추를 통해 전율적인 파동을 준다. 뛰는 동안 신체가 받는 충격은 몸무게의 2~3배의 힘을 받으므로 이를 위한 충격완화 장치에 대한 기본 개념은 Fig. 1(b)와 같다. 이 충격 흡수체는 물과 기공을 가진 무기재료 입자가 혼합된 형태의 Fig. 1(c)와 같은 구조를 가진다.



(a) Walk way and ground reaction force



(b) Mid. outsole and of shock



(c) Shock absorption pocket

Fig. 1 Concept of shoe cushioning system

신발 보행 충격완화 부품에 사용되는 중공형 다공질의 입자는 Fig. 2에서 보는 바와 같이 마이크로 단위 크기의 중공에 나노 단위 크기의 구멍들이 연결되는 구조를 가지고 있다.

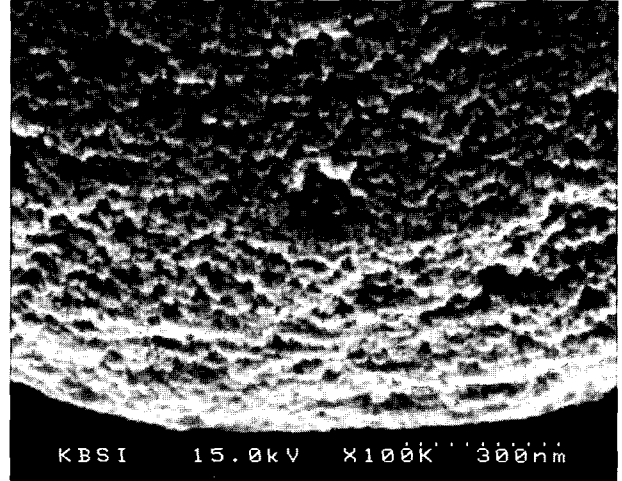


Fig. 2 SEM of mesoporous grain

입자를 이용한 충격 흡수 장치는 이러한 다공질 입자의 내부와 외부 표면에 소수화 특성 코팅 처리를 한 후, 외부의 압력이 가해지고 해제될 때, 10~100nm 크기의 물분자 덩어리가 다공성 나노입자 내부의 유로(mesopore)를 통한 출입에 의하여 발생하는 에너지 소산 기능을 활용한 것이다^{4,5)}. 보행시 신발의 체중에 의한 외부압력이 인솔에 장착된 충격흡수 부품에 작용할 때 쿠션을 흡수하는 입자와 내부 유체(물)의 역할에 있어서 라플라스 모세관 압력과 입자의 중공에서 압축된 기체의 압력이 유체를 밀어내는 작용을 한다. 이렇게 소산된 에너지는 입자와 유체로 이루어진 쿠션 완화 장치의 이력곡선(hysteresis curve)의 면적과 동일하다. 물속에 구성되어진 나노입자에서의 이러한 현상들을 이용하여 전체 구조물에 작용하는 충격으로 발생하는 에너지를 소산시킬 수 있다⁶⁾.

2.2 에너지 소산 원리

새로운 콜로이드 감쇠기와 기존의 유압감쇠기에 대해 에너지 소산 효율 측면에서 비교를 하는 것은 매우 중요한 것이다. 감쇠기의 효율(η)은 외부 하중에 의한 압력 변화 사이클 동안 소산된 에너지, E , 와 사이클 중 압축 공정에서 가해진 에너지, $E_{Loadings}$, 의 비로 다음과 같이 정의할 수 있다⁷⁾.

$$\eta = \frac{E}{E_{Loading}} \quad (1)$$

기존의 유압 감쇠기의 최대 효율 값은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\eta_{max, HD} = 1 - \left(\frac{D_{pr}}{D_p}\right)^2 \quad (2)$$

새로운 무기재료 입자와 물의 특성을 이용한 콜로이드 감쇠기의 최대 효율 값은 다음과 같이 표현할 수 있다⁶⁾.

$$\eta_{max, CD} = 1 - \left(\frac{r_1}{r_3}\right) \quad (3)$$

만일 피스톤 직경 $D_{pr} = 0.7 D_p$, 분말의 입자 크기 $r_1=6.5nm$, 분말 입자의 기공 크기 $r_3=317nm$ 로 가정하면, 각 감쇠기의 최대 효율은 $\eta_{max, HD}=0.51$, $\eta_{max, CD}=0.98$ 과 같이 계산되어진다. 따라서 콜로이드 감쇠기의 효율이 기존의 유압감쇠기의 효율보다 2배 정도 높은 것을 확인할 수 있다^{8,9)}.

2.3 에너지 소산 특성

콜로이드 댐퍼에서 사용되는 역학적인 이론은 기존의 고전역학으로 해석이 어려운 부분이 있다. 콜로이드 댐퍼에 사용되는 입자(실리카겔)의 다공질(pore)를 통과하는 물분자의 흐름에 적용되는 열유체 역학은 지금까지 추측과 예상으로 에너지의 소산을 알 수 있었다. 그러나 이러한 예상은 실험으로 나온 에너지 소산 양을 이론적으로 규명해야하기 때문에 본 연구에서는 나노 기술에 적용할 수 있는 분자 동력학적으로 입자의 에너지 소산을 모델링하여 미시 동력학 및 유체역학을 적용하여 에너지 소산 특성을 설명하고자 한다. 콜로이드 댐퍼의 거시적인 작동과정은 한 개의 병과 병목을 가지고 이상화한 과정을 보일 수 있다. 이 과정을 압축과정과 압축 해제 후 복원 과정으로 나누어 Fig. 3(a), (b)에 나타내었다.

유입되는 에너지는 피스톤을 통하여 압력으로 전달이 되며, 물에 전달되어 유동이 시작이 된다. 물은 압축성의 거의 없으므로, 정적 변화를 시작하며, 병목의 표면장력을 이기는 에너지가 유입되면 병목으로 물이 유입되기 시작한다. 곧 병로 유입된물은 공기를 병 중앙으로 압축해 들어가며 공기의 압축성은 이미 표면장력을 누르기 위해 소모한 에너지외에 잔류 에너지를 흡수하는 완충의 역할을 한다(Fig. 3(a),

1→2→3→4). 복원 과정은 공기의 압축성에 따른 팽창력으로 대기압 수준의 압력이 될 때까지 복원 과정을 거치고 병목 부위의 공기는 물의 표면장력에 의해 밀려 나가게 된다. 이후 물은 원래의 실린더내 상으로 복원된다(Fig. 3(b), 5→6→7→8). 또한 콜로이드 감쇠기에서 다공성 입자의 구조에 따라 감쇠기로서의 기능이 달라짐을 알 수 있다.

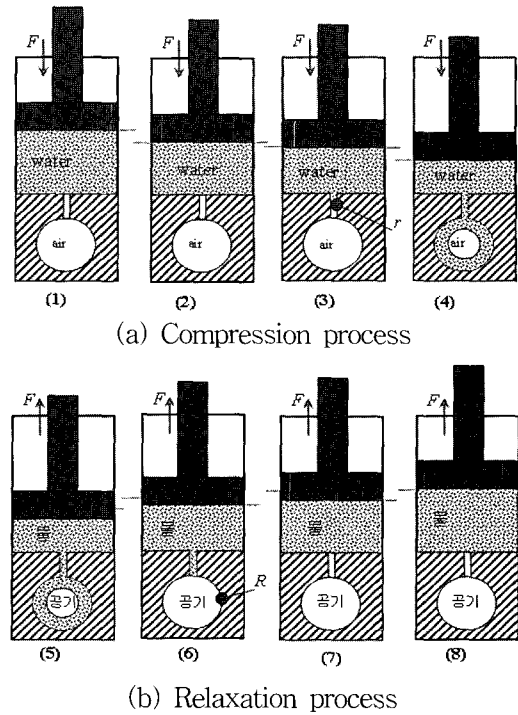


Fig. 3 Process of energy dissipate cycle model

3. 실험

3.1 나노 포켓의 기계적 특성 실험

나노입자를 사용한 충격 흡수 장치의 특성을 정량적으로 규명하기 위해 압축을 통한 기계적 특성 실험을 실시하였다. 충격 흡수 장치에는 Fig. 4와 같이 폴리에탄계열의 포켓 속에 물과 중공성 나노입자를 혼합한 형태이다. 개개의 정확한 기계적 특성을 확보하여도 실제 중공성 나노입자와 물과의 상호작용과 포켓의 영향을 예측하는 것은 대단히 어려운 문제이다.

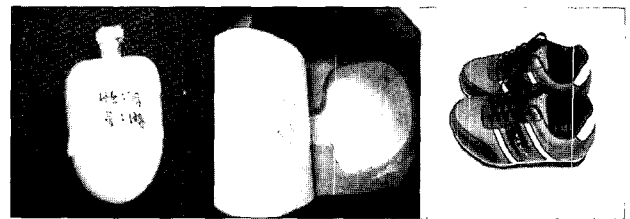
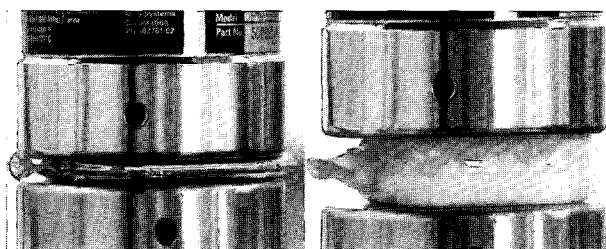


Fig. 4 Tested pocket of shoe

따라서 개개의 물질이 혼합된 것을 하나의 새로운 부품으로 보고, 그에 대한 힘-변위 특성과 에너지 소산율(energy dissipation)을 얻음으로써 충격 흡수 장치로서의 성능을 확인할 수 있다. 물과 증공성 나노입자의 구성비에 대한 효과를 확인하기 위해 구성비의 변화에 따른 결과를 얻은 다음, 최대의 에너지 소산율을 가지는 최적 상태의 물-나노입자의 구성을 결정하였다. 이런 과정을 통해 선정된 것을 최적 충격 흡수 장치로서 신발에 장착하여 응용 실험에 사용하였다.

최대 에너지 소산 효과를 보이는 물-나노입자의 구성비를 알기 위해 함량을 달리한 포켓들을 제작하여 실험하였다. 포켓의 내부 용적이나 물은 부피단위로 측정할 수 있으나, 나노입자의 경우 분말 형태이기 때문에 부피로 측정하는 것은 불가능하다. 따라서 모든 측정단위로 무게단위(g)를 사용하였으며, 그 구성비의 기준을 나노입자의 함량으로 삼았다. 나노입자 함량을 2 g에서 7.2 g까지 1 ~ 2 g만큼 증가시키면서 실험용 포켓을 제작하였다. Table 1은 실험용 포켓의 종류와 그 구성비를 나타낸 것이다.

제작된 포켓에 대해 만능 재료 시험기에서 변위를 일정하게 제어하면서 얻어지는 힘을 구하였다. 변위는 6 mm에서 최대 8 mm까지 1 mm 단위로 제어하였다. Fig. 5는 만능 재료 시험기로 실험하고 있는 과정에서 하중이 800 N일 때 공기 포켓과 나노 포켓의 변형 형상을 보여준다.



(a) Air pocket (b) Nano pocket

Fig. 5 Compression test with MTS(at 800 N)

3.2 나노 포켓의 성능 검증을 위한 비교 실험

물-나노입자의 혼합물 형태인 나노 포켓의 최적 구성비에 대한 성능을 평가하기 위해 비교 실험을 실시하였다. 비교군 으로서 현재 충격 흡수력이 가장 우수하다고 평가되는 공기를 넣은 포켓, 나노 포켓과 동일한 양의 물만을 포함한 포켓으로 비교 실험하였다. 특히 후자의 경우는 순수한 나노 입자로 인한 성능을 검증하기 위한 것이다.

비교 실험 방법은 앞의 나노 포켓의 실험과 같이 6, 7, 8mm로 각각 변위량을 제어하고, 그에 따라 발생하는 힘을 측정하였다. 힘을 가하고 제거하는 동안의 힘-변위 곡선을 얻고, 여기서 발생하는 에너지의 차이인 소산 에너지를 구한다. 이를 정량적으로 분석하여 에너지 소산에 대한 성능을 비교 평가하였다.

4. 결 과

4.1 나노 포켓의 기계적 특성 실험 결과

나노입자-물의 구성비에 따라서 Table 1에 나노 1 ~ 나노 5로 명명된 포켓에 대한 결과를 정리하였다. Figs. 6 ~ 8은 하나의 변위에 대한 포켓들의 힘의 결과 비교 그래프이다.

Table 1 Composition component and ratio of the nano-pocket

(unit : g)

Group	Total weight (T)	Water		Particle		Ratio (N/W, %)
		Water (W)	W/T (%)	Particle (N)	N/T (%)	
Nano 1	20.7	13.5	65.2	7.2	34.8	53.3
Nano 2	21	16	76.2	5	23.8	31.3
Nano 3	22	18	81.8	4	18.2	22.2
Nano 4	24	21	87.5	3	12.5	14.3
Nano 5	24	22	91.7	2	8.3	9.1

최대 변위인 8 mm의 결과 그래프인 Fig. 8을 보면 나노 2와 나노 3이 거의 유사한 에너지 소산을 보이는 것을 확인할 수 있다. 나노 2와 3은 각각 나노입자의 비율이 약 22 %, 약 31 %이다. 이 경우에 대해 그래프로는 정확한 정량적인 결과를 얻을 수 없어, Table 2와 Table 3에 최대 발생 힘과 에너지 소산량에 대해 정리하였다.

Table 3은 포켓별 에너지 소산량을 나타내는데 나노 2와 나노 3 포켓에서 소산되는 에너지량이 각각 2073 N·mm와 1909 N·mm로 비슷하다. 이것은 다른 포켓에 비해 대략 2배 높은 수치이다.

Table 2와 Table 3에서 확인한 것과 같이 나노 2와 나노 3 포켓이 거의 유사한 거동을 보인다. 그러나 8 mm 변위에서 발생하는 최대 힘을 비교해 보면, 나노 2 포켓은 약 3700 N이 발생하고, 나노 3 포켓은 약 3200 N이 발생된다.

에너지 소산량에서도 나노 2 포켓이 약 160 N·mm 정도 더 많은 것으로 나타난다. Fig. 8에서도 변

위가 약 7mm 전까지는 유사한 거동을 보이다가 7mm 부터는 나노 2 포켓이 받는 힘이 급격히 증가하는 것을 볼 수 있다.

Table 4는 시험기를 통해 포켓에 들어온 총 에너지에 대한 에너지 소산량의 비를 도표화한 것이다. 에너지 감쇠율이 가장 높은 것은 8mm 변위에서 37.8 %를 가지는 나노 2 포켓이며, 그 다음이 37 %를 가지는 나노 3 포켓이다. 특히 나노 3 포켓은 Fig. 6~8에서 보는 것과 같이 7mm 변위까지는 나노 2 포켓보다 성능이 좋은 듯하나, 전체 에너지에 대한 소산율을 나타내는 평균값에서 나노 2 포켓이 좋은 것으로 나타났다.

이러한 사실들을 종합해 볼 때 나노 2 포켓은 적은 변형으로 비교적 큰 힘을 전달 뿐 아니라 전달되는 에너지 또한 많이 감쇠시킴을 알 수 있다. 체중이 70 kg인 보행자의 경우, 자중의 1배 정도 되는 약 700 N까지는 완만한 곡선을 그리며 6 mm 정도까지 포켓이 변형된다. 이는 보행시 뒷굽에서 최대 하중이 발생하기까지의 시간을 지연시키는 효과가 있다. 시간을 지연시킴으로써 발바닥에 발생하는 충격 곡선을 완만하게 만드는 역할을 한다.

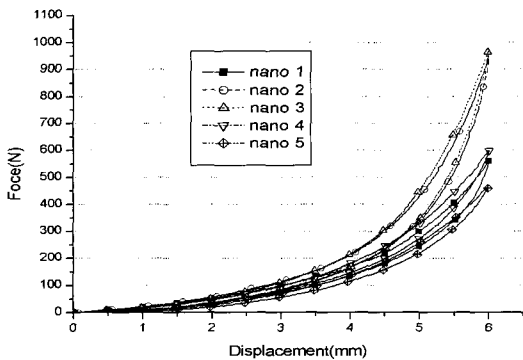


Fig. 6 Force-displacement curve of each pocket for 6 mm displacement

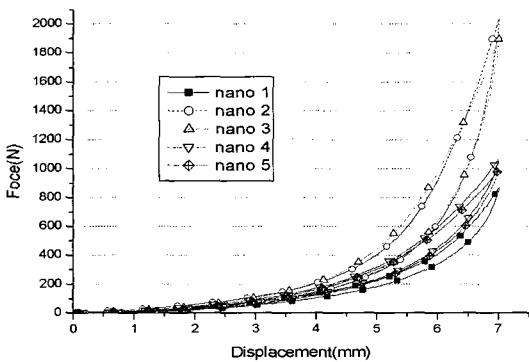


Fig. 7 Force-displacement curve of each pocket for 7 mm displacement

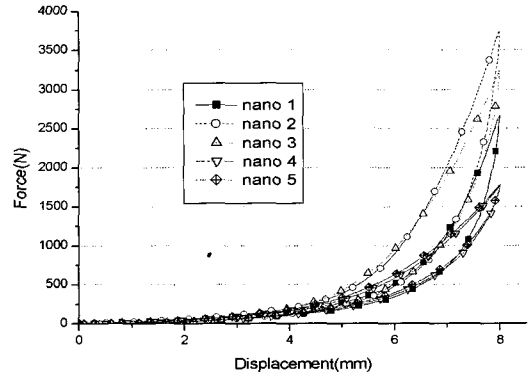


Fig. 8 Force-displacement curve of each pocket for 8 mm displacement

Table 2 Maximum load of each nano pocket (unit : N)

Group	Displacement(mm)		
	6	7	8
Nano 1	559.4	867.8	2602.8
Nano 2	948.8	2031.7	3733.9
Nano 3	997.3	1893.8	3237.7
Nano 4	598.2	1064.3	1751.7
Nano 5	469.9	991.9	1777.5

Table 3 Energy dissipation quantity of each nano pocket (unit : N · mm)

Group	Displacement(mm)		
	6	7	8
Nano 1	183.5	267.7	1120.9
Nano 2	265.2	767.1	2073.9
Nano 3	277.9	800.9	1909.6
Nano 4	160.3	387.6	895.1
Nano 5	105.5	354.8	918.0

Table 4 Energy dissipation rate of each nano pocket (unit : %)

Group	Displacement(mm)			Avg
	6	7	8	
Nano 1	20.6	20.5	32.3	27.7
Nano 2	21.3	28.7	37.8	33.1
Nano 3	21.7	29.9	37.0	32.8
Nano 4	16.9	22.4	28.8	24.9
Nano 5	14.8	21.9	29.1	25.2

어느 정도 초기 충격 시간을 지연시킨 후에는 약 1.4 mm 정도의 변위가 발생하는 동안 하중의 크기는 자중의 3배 정도 되는 2100 N까지 올라간다. 적

은 변형으로도 큰 충격하중을 견딜 수 있을 뿐 아니라 에너지 소산 효과도 크다.

따라서 나노입자-물의 최적 구성비는 나노 2 포켓에서 사용한 비율이 최적임을 알 수 있다. 나노 2의 구성비는 물과 나노입자의 무게비가 약 3:1이며, 전체 무게에 대해서 나노입자의 무게가 약 30%이다.

4.2 구성이 다른 포켓간의 비교 실험 결과

본 장에서는 순수한 나노입자의 충격 흡수 능력 및 성능을 검증하기 위해 실시한 실험의 결과를 변위에 따른 포켓간의 비교, 에너지 소산량에 대한 정량적 분석 결과에 대해 정리하였다.

Fig. 9 ~ 11에 변위가 각각 6, 7, 8mm일 때 각 포켓에 발생하는 힘을 힘-변위 그래프로 도시하였다. 자중이 70 kg인 보행자의 경우 Fig. 9에서 나노 포켓의 에너지 흡수율이 뛰어남을 확인할 수 있다. 특히 공기의 경우는 최대 변형인 8mm에서도 200N 정도의 하중 밖에 견디지 못하는 것을 볼 때, 동일한 조건에서 공기 포켓의 경우는 작은 하중에서 그 효과를 거둘 수 있음을 유추할 수 있다.

Table 5는 공기만 들어 있는 공기 포켓, 나노 2 포켓, 나노 2 포켓에서 나노입자대신 공기를 넣은 포켓 각각의 변위에 대한 최대 발생 힘을 나타낸 정량적 자료이다. 특이할 사항은 Fig. 9 ~ 11의 그래프에 나타난 것처럼 공기만 있는 공기 포켓은 최대 변위 8 mm에 대해서 150 N 정도의 비교적 낮은 힘을 받는다는 것이다. 이는 작은 하중에 대해 큰 변형을 발생시킨다는 것을 알 수 있다.

공기 포켓의 경우처럼 작은 하중에 대해 큰 변형을 일으키는 경우, 보행의 입각기에서 충격을 받는 시간을 늦춤으로써 충격곡선을 완만하게 하는 역할을 한다. 가장 충격 완화에 큰 효과가 있는 것으로 알려진 공기는 작은 하중에 큰 변형을 발생시킴으로써 큰 충격이 발생했을 경우, 지면과 맞닿아 충격이 여과 없이 전달될 수 있다는 단점이 있다. 또한 지속적으로 큰 변형이 생김으로 포켓의 내구성에 문제가 발생한다.

Table 6에 언급된 에너지 소산량 경우를 살펴보면 실제 공기 포켓의 경우는 소산시키는 에너지가 매우 작다. 그러나 입력되는 에너지가 작기 때문에 소산되는 에너지 역시 작으므로 그 양에 대한 직접적 언급은 의미가 없다. 따라서 전체 입력된 에너지에 대한 소산되는 에너지양을 나타내는 에너지 감쇠율을 비교할 필요가 있다.

Table 7은 에너지 감쇠율에 대해 포켓별로 정리한 것이다. 공기 포켓의 감쇠율은 약 16 %로 나노 포켓에 대해 절반 정도이다. 또한 나노입자에 대한 기능 여부 및 성능 정도를 알아보기 위해 나노입자 대신 공기만 채운 물 포켓과의 비교에서는 나노 포켓이 약 1.7 ~ 2.4 배 이상 우수한 것으로 나타났다. 동일 변위에서 견딜 수 있는 최대 하중 역시 약 3.2 ~ 3.8 배나 높았고, 소산된 에너지양 또한 약 3.6 ~ 7.3 배나 많게 나왔다.

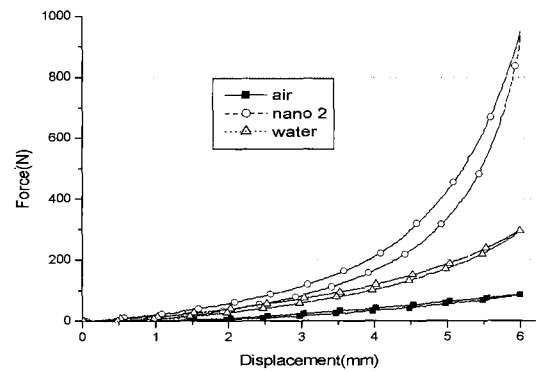


Fig. 9 Force-displacement curve of each pocket for 6 mm displacement

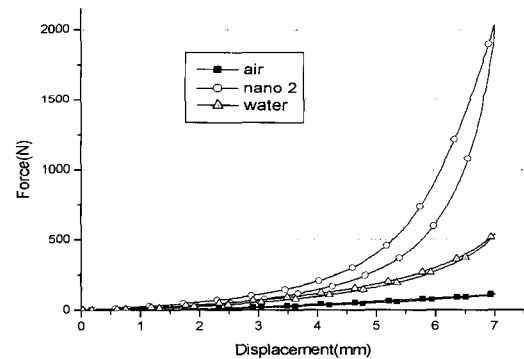


Fig. 10 Force-displacement curve of each pocket for 7 mm displacement

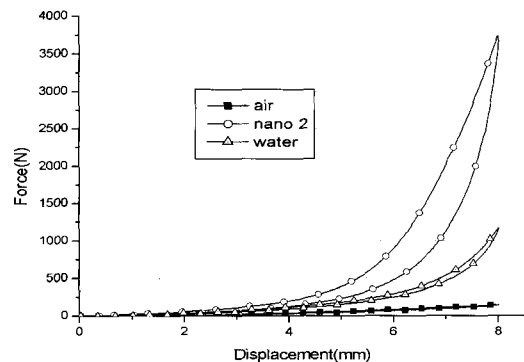


Fig. 11 Force-displacement curve of each pocket for 8 mm displacement

Table 5 Comparison of maximum loads of three pockets

(unit : N)

Group	Displacement(mm)		
	6	7	8
Air	88.2	115.8	146.8
Nano 2	948.8	2031.7	3733.9
Water	299.3	540.5	1173.7

Table 6 Comparison of energy dissipation quantities of three pockets

(unit : N · mm)

Group	Displacement(mm)		
	6	7	8
Air	29.5	45.3	69.3
Nano 2	265.2	767.1	2073.9
Water	74.5	126.1	285.2

Table 7 Comparison of energy dissipation rates of three pockets

(unit : %)

Group	Displacement(mm)		
	6 mm	7 mm	8 mm
Air	15.9	15.9	16.7
Nano 2	21.3	28.7	37.8
Water	12.9	12.8	16.0

따라서 본 실험을 통해 나노입자-물의 혼합물 형태를 이루고 있는 충격 흡수 부품의 성능이 뛰어나며, 총 입력 에너지에 대해 최대 약 38 %까지 충격을 흡수함을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구는 나노 입자를 이용한 새로운 충격흡수 장치를 개발하고 그 장치의 충격흡수 성능을 기계적 실험을 통해 평가하는 것이 목적이었다.

나노 입자와 물의 성분비에 따라 충격흡수장치의 성능이 달라지므로 압축실험을 통해 최적의 성능을 발휘하는 성분비를 찾는 것과 다른 충격흡수장치와의 성능 비교를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

나노 포켓의 기계적 특성 실험을 통해 포켓 속에 들어가는 물과 나노입자의 비율이 3:1이 최적 구성비라는 것을 확인하였다. 이 때 에너지 소산율이 최대

37.8 %의 높은 성능을 가짐을 알 수 있었다. 순수한 나노입자의 성능을 검증하기 위해 최적 구성비를 가지는 나노 포켓과 동일한 비율로 물과 공기를 넣은 포켓(물 포켓)에 대해 비교 실험을 하였다. 동일 변위에 대해 견딜 수 있는 최대 하중의 크기는 물 포켓에 비해 약 3.2 ~ 3.8 배가량 더 크고, 소산된 에너지 양 역시 약 3.6 ~ 7.3 배 더 많았다. 시험기를 통해 포켓에 들어온 총 에너지양에 대한 소산된 에너지양의 비인 에너지 감쇠율에 대해서도 약 1.7 ~ 2.4 배 높아 나노 포켓이 물 포켓에 비해 뛰어난 성능을 발휘하는 것으로 확인되었다.

참고 문헌

- 1) P. R. Cavanagh and M. A. Lafortune, "Ground Reaction Forces in Distance Running," *Journal of Biomechanics*, Vol. 13, Issue 5, pp. 397~406, 1980.
- 2) James, S., Bates, B., and Osternig, L., "Injuries to Runners," *American Journal of Sports Medicine*, Vol. 6, pp. 40~50, 1978.
- 3) Arnel, A. and Andrew, M., "Impact Loading in Running Shoes with Cushioning Column Systems," *Journal of Applied Biomechanics*, Vol. 19, pp. 353~360, 2003.
- 4) Eroshenko, V. A. and Fadeev, A. Y., "Intrusion and Extrusion of Water in Hydrophobized Porous Silica," *Colloid Journal*, No. 57, pp. 480~483, 1995.
- 5) Eroshenko, V. A. and Fadeev, A. Y., "A study of the Surface of Chemically Modified Porous Silicas by Water Porosimetry," *Russian Journal of Physical Chemistry*, No. 70, pp. 1380~1383, 1996.
- 6) Suci, C. V., Iwatsubo, T. and Deki, S., "Investigation of a Colloidal Damper," *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 259, pp. 62~80, 2003.
- 7) Harris, C. M. and Crede, C. E., *Shock and Vibration Handbook*, McGraw-Hill, 1968.
- 8) Fadeev, A. Y. and Eroshenko, A.V., "Study of Penetration of Water into Hydrophobized Porous Silicas," *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 187, pp. 275~282, 1997.
- 9) Snyder, L. R. and Kirkland, J. J., *Introduction to Modern Liquid Chromatography*, John Wiley & Sons, 1979.