Korean Journal of Sport Biomechanics
Vol. 22, No. 2, June 2012, 237-242

ISSN 1226-2226(Print), ISSN 2093-9752(Online)
http://dx.doi.org/10.5103/KJSB.2012.22.2.237
http://www.kssb.or.kr

탄소나노튜브를 기반으로 하는 충격흡수제의 물리적 특성 비교분석

김종우[1]·채원식[2]

[1] 경북대학교 교육대학원 체육학과 [2] 경북대학교 사범대학 체육교육과

The Comparative Analysis on Mechanical Property Test of Carbon Nanotube-based Shock Absorbers

Jong-Woo Kim[1]·Woen-Sik Chae[2]

[1]Department of Physical Education, Graduate School of Education, Kyungpook National University, Daegu, Korea

[2]Department of Physical Education, College of Education, Kyungpook National University, Daegu, Korea

Received 30 April 2012; Received in revised form 1 June 2012; Accepted 10 June 2012

ABSTRACT

The purpose of this study was (a) to develop carbon nanotube-based shock absorbers for reducing potentially harmful impact forces and excessive foot pronation, and (b) to briefly determine how the effects of carbon nanotube-based shock absorbers on biomechanical variance during drop landing. A university student(age: 24.0 yrs, height: 176.2 cm, weight: 679.5 N) who has no musculoskeletal disorder was recruited as the subject. Hardness, specific gravity, tensile strength, elongation, 100% modulus, tear strength, splittear strength, compression set, resilience, vertical GRF, and loading rate were determined for each material. For each dependent variable, a descriptive statistics was used for different conditions. The property test results showed that tensile strenth, tear strength, split tear strength, compression set, and resilience in carbon nanotube-based shock absorbers were greater than general Ethylene Vinyl Acetate(EVA). These indicated that resistance against variable strength in developed carbon nanotube-based shock absorbers were greater than general EVA. In vertical GRF of CNTC was less than those of EVA during drop landing and loading rate of CNTC was greater than EVA. It seems that the use of CNT can be a effective way of reducing and controlling shock from impact.

Keywords : Carbon Nanotube, Shock Absorber, Mechanical Property Test, Sports Injury

Ⅰ. 서 론

일상생활과 다양한 스포츠 활동 상황에서 점프와 착지 동작은 매우 빈번하게 발생되어진다. 점프 후 착지 동작은 매우 강한 충격력을 발생시켜 잠재적인 신체 상해 및 부상의 원인이 될 수 있다. 강한 스트레스가 신체에 지속적으로 작용되면 신체 상해를 유발할 수 있으며 이를 방지하기 위해서는 인체 근골격계에 작용되어지는 충격력을 적절하게 제어하는 것이 매우 중요하다(Nigg & Bobbert, 1990). 충격력은 운동 수행이 이루어지는 지면의 특성과 스포츠 선수들이 착용하는 신발의 특성에 의해 직접적인 영향을 받는다.

Corresponding Author : Woen-Sik Chae
Department of Physical Education, College of Education, Kyungpook National University, 1370 Sangyeok-dong, Buk-gu, Daegu, Korea
Tel : +82-53-950-5932 / Fax : +82-53-955-4235
E-mail : wschae@knu.ac.kr
이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(2010-0024241)

일반적인 스포츠 운동화의 중창 부분에는 EVA(ethylene vinyl acetate) 또는 합성 고무인 폴리우레탄(polyurethane)과 같은 부드러운 재질의 폼을 주로 사용한다. 이러한 재질의 운동화는 내구성이 약해 반복적인 부하에 탄성력이 현저하게 감소되어진다. 또한, 충격 완화를 높이기 위해 에너지 흡수력이 높은 스폰지 폼 형태의 중창 재질을 활용하게 되면 신발이 지면에 착지될 때 신발의 변형률이 높아져 과도한 회내(pronation)가 발생되어진다. 이러한 비정상적인 회내 동작은 발목 관절에 과도한 회전력을 발생시키게 되어 하지 근골격계의 부상 발생 빈도를 증가시키게 된다. 그러나 일반적 신발의 중창으로 활용되는

EVA와 폴리우레탄으로는 충격 흡수력을 증가시키며 회내를 최소화 할 수 있는 물성을 동시에 가질 수가 없다. 재료역학에서는 이러한 특성을 역학적 강도(mechanical strength: compressive stress)와 변형률(compressibility: strain)로 설명하며 두 가지 물성은 서로 상반되는 특성으로 고려되어지고 있다. 금속 구조는 고분자 중합체 보다 높은 역학적 강도를 가지지만 소성 변형 정도가 높아져 탄성력은 줄어들게 된다(Gibson, 2000).

나노기술(nanotechnology)은 원자나 분자 단위의 극 미세 물질을 인위적으로 조작함으로써 새로운 성질과 기능을 가진 물질이나 장치를 만드는 것이다. 현재 스포츠 현장에서도 나노기술은 다양하게 적용되어지고 있다. 스포츠 과학자들은 현존하는 장비나 도구의 특성을 강화시키기 위해 새롭고 창조적인 방법을 모색하고 있으며 이러한 문제의 해결 방법으로 가벼우면서 강도와 탄성을 극대화할 수 있는 나노 탄소 튜브를 개발 연구 중에 있다. 특히 강도와 변형률의 상반되는 물질적 특성에 발생되는 문제점을 해결하기 위해 탄소나노튜브(carbon natotube)가 새로운 신소재로 각광 받고 있다. 탄소나노튜브는 초강도, 초경량, 초탄성력을 가지며 극도의 신축성과 파괴점에 도달하지 않은 상태에서 반복적으로 압축 신장운동을 시킬 수 있는 가장 이상적인 소재이다.

Cao, Dickrell, Sawyer, Ghasemi-Nejhad와 Ajayan(2005)은 수직으로 배열되어진 탄소나노튜브는 고탄성의 성질을 가져 충격 완충적 특성을 지닌다고 보고하였다. 그들은 나노 튜브가 압축력이 주어지면 초기 길이의 15% 이하까지 축소되어질 수 있으며 압축 부하가 소멸되면 원래의 길이로 돌아오는 스프링과 같은 특성을 가지는 것으로 밝히고 있다. 더욱 놀라운 사실은 수천번 이상의 지속적인 부하가 주어지더라도 탄소나노튜브의 구조적 특성이 변화하지 않으며, 압축 부하 제거 시 원래의 상태로 돌아오는 회복 속도가 일반 중합체 보다 매우 빠르게 발생되어진다고 보고하였다.

탄소나노튜브와 고분자 복합체의 cushioning에 대한 고찰(Suhr, Koratkar, Keblinski & Ajayan, 2005)에 따르면 대량의 나노 필터 첨가는 표면적을 증가시켜 필터간의 계면에서 발생하는 마찰 미끄러짐(frictional sliding)을 증가시키며 에너지 분산 성질을 향상시켜 진동은 감소하게 된다고 보고하고 있다.

본 연구를 통해 새로운 신소재로 각광 받고 있는 탄소나노튜브를 기반으로 하는 충격흡수제가 충격 완충에 어떤 영향을 미치는지 밝혀낼 수 있을 것으로 생각된다. 더 나아가 하지 근골격계에 발생되어지는 비정상적인 충격력을 최소화하여 운동에 따른 부상을 현저히 줄일 수 있는 새로운 기술 개발을 위한 기초자료로 본 연구의 결과가 아주 유용하게 사용되어질 수 있을 것이다.

따라서 본 연구의 목적은 충격 흡수력을 증가시키며 동시에 구조적 특성의 변화를 최소화 할 수 있는 탄소나노튜브를 기반으로 하는 충격흡수제를 개발하기 위해 물리적 특성 비교분석(mechanical property)과 사례 연구를 통해 충격흡수제가 인체의 충격력 조율에 미치는 영향을 살펴보는데 있다.

Ⅱ. 연구 방법

1. 탄소나노튜브를 기반으로 하는 충격흡수제 개발 및 물리적 특성 비교

1) 충격흡수제 개발에 사용된 재료

본 연구에 사용된 탄소나노튜브와 PU 제조용 원료는 아래의 <Table 1>과 같다.

Table 1. The raw material of mixture

	Carbon Nanotube	PU base material
Manufacturer	Worldtube Inc.	Dongsung Chemical Inc.
Composition	CNTCek-3.0P (lot No. W110321) CNTC ratio- 3wt% Solvent- MEK	P- (Grade: MP 5460) R- (Grade: MR 5460) Catalyst- (Grade : USC-1)

2) 실험장비

본 연구의 1차 실험에서는 개발된 충격흡수제와 기존 EVA 발포체와의 물리적 특성을 비교 분석하기 위해 <Table 2>에서 제시한 경도계, 비중계, 만능시험기, Aging oven, 반발탄성시험기를 사용하였다.

3) 실험절차

본 연구의 1차 실험은 한국신발피혁연구소에서 탄소 나노튜브를 활용한 충격흡수제의 제조공정이 진행되었다. 실험전, 발포체 제작 시 최상의 교반 및 혼합조건을 위해 금형은 60 ℃ oven에, 본 실험에 사용되어질 P액(MP 5460)과 R액(MR 5460)은 67 ℃ oven에 각각 보관하였다. 30분간 보관 후, R액, 촉매, 탄소나노튜브 분산액을 <Table 3>과 같은 비율로 투입하고 교반기(500rpm)로 1분 간 교반 및 혼합하여 다시 67 ℃ 상태의 oven에 약 10분간 보관하였다<Figure 1>. 이후 P액을 혼합하여 5초간 2000rpm에서 교반한 후 금형에 투입하였다. 용액들이 투입된 금형은 클리퍼로 단단히 고정하여 60 ℃ oven에 5분간 방치하였으며, 이러한 과정을 통하여 최종적인 발포체를 제조하였다<Figure 2>.

개발된 CNT(Carbon NanoTube) 함유 발포체와 기존의 EVA 발포체간의 물성 테스트를 실시하였으며, 테스트 항목은 Hardness, Specific gravity, Tensile strength, Elongation, 100modulus, tear strength, split tear strength, Compression set, Resilience를 측정하였다.

Table 2. Experimental equipments

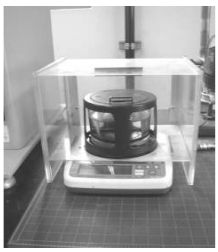
Equipments	Specific	
Hardness tester (ASKER Inc., C Type Hardness tester)	Hardness measurement	
Gravimeter (UESHIMA Inc., DMA-3 model)	Specific gravity measurement	
Universal tester (UTM, ZWICK Inc., model 1435)	Tensile strength, Elongation, 100modulus, tear strength, split tear strength measurement	
Aging oven (Precision Inc., SIN-135 model)	Compression set measurement	
vertical rebound resilience tester (Daesung Science Inc.)	Resilience measurement	

Table 3. The ratio of mixture form

	Reference form (EVA)	CNT form
P- (MP 5460)	100	100
R- (MR 5460)	112	112
Catalyst (USC-1)	0.8	0.8
CNTC (CNTCek-3.0P)	-	21.2 (10% of PU)

Figure 1. Mixing with two different conditions

Figure 2. Manufacturing shock absorber

2. 탄소나노튜브를 기반으로 하는 충격흡수제가 인체의 충격력 조율에 미치는 영향 분석

1) 연구 대상

본 연구의 2차 실험은 탄소나노튜브를 기반으로 하는 충격흡수제가 인체에 어떠한 영향을 미치는지 알아보기 위해 하지 근골격계에 이상이 없는 1명의 피험자를 대상으로 사례연구를 실시하였다. 피험자의 연령은 24.0 yrs, 신장은 176.2 cm, 체중은 69.3 kg이다.

2) 실험장비

본 연구의 2차 실험에서는 아래에 제시된 실험장비가 사용되었다.

① 지면반력기 : 본 연구에서는 지면반력, 부하율(loading rate)과 압력중심의 변위값을 측정하기 위해 지면반력기(AMTI, OR6-5) 1대를 설치하였다. 기본적인 전체 시스템은 센서유닛, 로드셀 구동회로 및 증폭기, 동기화 샘플 및 송신모듈, A/D 변환기로 구성되었다.

② 드롭 점프를 위해 제작된 플랫폼 : 드롭 점프를 위한 플랫폼은 Bobbert, Huijing와 van Ingen Schenau(1987)의 연구에서 제시한 방법에 의해 넓이 0.7 m²와 높이 0.6 m로 제작하여 지면반력기(AMTI OR6-5) 후면 중앙에 설치하였다. 전체 실험장비의 배치는 아래와 같다(Figure 3).

③ 탄소나노튜브를 활용한 충격흡수제(Carbon NanoTube Composites; CNTC) : 본 연구의 피험자는 1차 실험에서 제작된 충격흡수제와 기존 EVA 발포체를 발앞꿈치(가로 4 cm, 세로 8 cm, 두께 1 cm)와 발뒤꿈치(지름 5 cm, 두께 1 cm)에 부착하여 드롭 착지동작을 실시하였다(Figure 4).

Figure 3. Experimental Setup

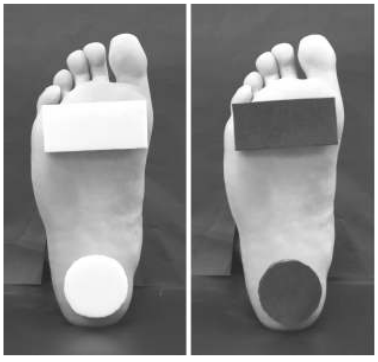


Figure 4. EVA form(L) and CNTC form(R)

3) 실험절차

본 연구의 2차 실험 피험자는 피로를 유발시킬 수 있는 강도 높은 신체 활동을 실험 4주 전부터 금지하였으며, 실험에 앞서 10분간 가볍게 워밍업을 실시하였다. 본 연구에서는 점프에 의한 충격력이 가미되지 않은 순수한 수직 지면반력 데이터를 얻고자 하였다. 따라서 피험자는 왼쪽 무릎을 최대한 신전시킨 상태에서 오른발을 전방으로 내딛음으로써 피험자의 체중이동에 의한 낙하가 이루어질 수 있도록 유도하였다. 이러한 낙하동작을 반복 연습하여 보다 자유낙하에 가까운 동작이 이루어질 수 있도록 요구하였다. 또한 착지동작에서는 피험자의 오른발이 지면반력기 안으로 착지될 수 있도록 유도하였고, 두 발이 완전히 착지된 후에는 자연스러운 굴곡 동작이 유발될 수 있도록 하였다.

피험자는 실험 전 상의를 탈의한 후, 체형에 맞는 동일한 제품의 하의 타이즈를 착용하였다. <Figure 4>와 같이 기존 EVA 발포체를 부착한 상태와 CNTC를 부착한 상태에서의 드롭 착지동작 시 지면반력 측정을 각각 3초씩, 3회 반복하여 수집이 이루어졌으며, 측정한 자료 중 가장 자연스러운 동작 1회를 선정하여 분석하였다.

3. 자료 분석

1) 지면반력 분석

지면반력 데이터 분석은 KwonGRF 2.0 program(Visol Inc, Korea)을 사용하였다. 수집된 지면반력값은 피험자의 체중을 사용하여 표준화하였다.

부하율은 아래와 같은 방식으로 계산하였다.

$$Loding\ Rate = \frac{VGRF_{\max} - VGRF_{initial}}{\Delta t}$$

$VGRF_{\max}$는 최대 수직 지면반력값, $VGRF_{initial}$은 착지 시 수직 지면반력값을 나타낸다.

4. 통계 처리

개발된 CNT(Carbon NanoTube) 함유 발포체와 기존의 EVA 발포체간의 물성 테스트를 실시하여 측정된 항목별 수치와 드롭 착지동작 시 지면반력 변인에 대한 기술통계량(Descriptive statistics)을 제시하였다.

Ⅲ. 결 과

1. 물성 테스트 결과

본 연구의 물성테스트 결과는 탄소나노튜브가 함유된 발포체의 경우 EVA 발포체에 비해 인장강도(tensile strength), 신장률(elongation), 인열강도(tear strength), 스플릿 인열강도(split tear strength), 최대압축률(compression set), 탄성률(resilience)이 높게 나타났다. 반면, 표면의 굳기를 나타내는 경도(Hardness), 표준물

Table 4. The result of property experiment

	Unit	Method	EVA form	CNTC form
Hardness	C type	KS M 6518	15	13
Specific gravity	-	KS M 6519	0.19	0.15
Tensile strength	kg/cm²	KS M 6518	7	9
Elongation	%	KS M 6518	240	250
100% Modulus	kg/cm²	KS M 6518	3.5	2.5
Tear strength	kg/cm	KS M 6518	5.5	6.8
Split tear strength	kg/cm	KS M 6518	1.5	1.6
Compression set	%	KS M 6518	16	31
Resilience	%	BS 903	27	30

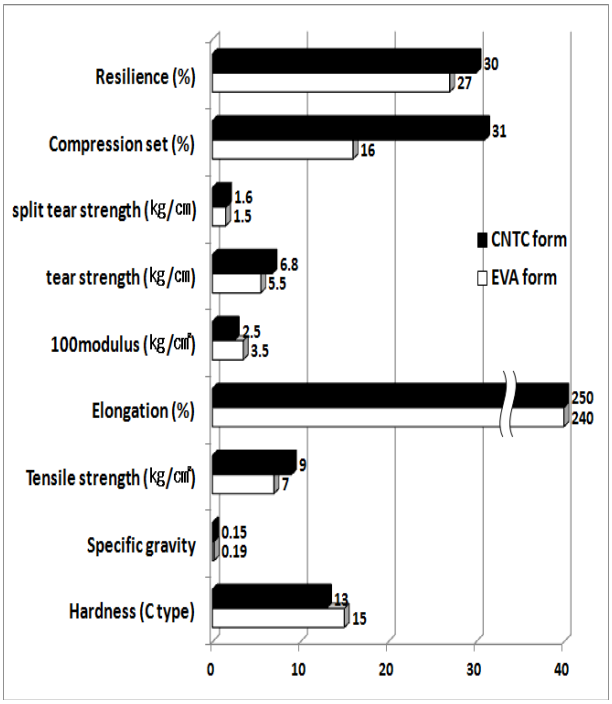


Figure 5. The result of property experiment

질의 질량과의 비율을 나타내는 비중(Specific gravity), 그리고 물체가 100% 늘어난 상태에서 갖는 응력을 나타내는 100% 인장응력(100% Modulus)은 다소 적게 나타났다(Table 4, Figure 5).

2. 지면 반력

최대 수직 지면반력값에서 CNTC를 부착한 상태가 EVA를 부착한 상태보다 19.2% 감소하였다. 또한 부하율에 있어서도 CNTC를 착한 상태가 EVA를 부착한 상태보다 32.8% 감소하였다(Table 5).

Table 5. Peek ground reaction force and loading rate

	EVA form	CNTC form
Peak VGRF (unit: %BW)	7.32	5.91
Loading Rate (unit: N/sec)	199.70	134.1

Ⅳ. 논 의

본 연구의 1차 실험에서는 가장 이상적인 소재로 주목받고 있는 탄소나노튜브를 기반으로 하는 충격흡수제를 개발하는데 그 목적이 있다.

실험결과, 탄소나노튜브가 함유된 발포체는 기존의 일반 스포츠운동화 중창 소재인 EVA에 비해 경도, 비중, 그리고 인장응력은 다소 낮게 나타난 반면, 인장강도(tensile strength), 신장률(elongation), 인열강도(tear strength), 스플릿 인열강도(split tear strength), 최대압축률(compression set), 탄성률(resilience)에서는 다소 높게 나타났다. 인장강도는 인장 하중에 의해 시료편이 끊어질 때까지의 최대응력을 말하고, 신장률은 물질의 늘어남 정도를 뜻 한다. 시험편의 표점거리에 생긴 연신의 원 표점거리에 대한 백분율로 변형률이라고 한다. 인열강도와 스플릿 인열강도는 찢기 시작하거나 지속적인 찢어짐에 대한 물질의 저항정도를 보여준다. 최대압축률은 일정시간이나 일정온도에서 시편에 힘을 가한 후 그 힘을 제거 했을 때 잔존하는 변형을 뜻하며, 재료의 탄성력, 완추형, 유연성, 경도 등의 물성을 평가할 수 있다.

Byrne와 gun'ko(2010)는 탄소나노튜브를 기반으로 하는 복합재료는 분포도(dispersion)가 높음과 동시에 응력-변형률 전이(stress-strain transefer)가 원활하여 화학적 적용이 용이할 뿐만 아니라 최고의 물리적 결과 치를 제시한다고 보고하였다. 또한 그들은, 이러한 복합재료는 섬유처럼 연성이 좋고 가볍지만 열과 마찰에 의한 손상(abrasion)에 탁월한 효과가 있다고 보고하였다.

Zhao et al.(2008)은 폴리프로필렌에 탄소나노튜브를 첨가한 후 물리적 특성을 살펴본 결과, 인장강도가 무려 117%가 증가하였으며(from 51 MPa to 124 MPa), 강도(toughness)는 560%가 증가하였다고 보고하였다(from 6.27 MPa to 41.32 MPa). 그들은 이러한 결과는 기존의 PVA matrix구조와 카본나노튜브 복합체(CNT-COON)가 물리적 개연성이 높아서이기 때문이라 보고하였다.

따라서, 본 실험 시 개발된 CNT 함유 발포체는 기존의 신발의 충격흡수제로 사용되었던 EVA소재의 분자구조와 물리적 개연성이 있는 것으로 판단된다. 또한, 물성테스트 결과 CNT 함유 발포체는 기존의 일반 발포체에 비해 부드럽고 유연하면서도, 다양한 강도에 대한 저항성은 큰 것으로 사료된다.

이는 향후 신발의 Insole과 Outsole에 개발된 물질이 적용될 때 착용 시에는 부드러우면서도 지속적인 착용으로 인한 신발의 변형은 줄여 줄 수 있을 것으로 기대된다. 또한 최초 신발이 가지고 있는 충격력의 흡수전략 혹은 에너지 전달체계를 오랜 기간 지속시켜 줄 수 있을 것이라 사료되어진다.

본 연구의 2차 실험에서는 최적의 비율로 혼합된 탄소나노튜브를 기반으로 하는 충격흡수제가 인체의 충격력 조율에 어떠한 영향을 미치는지 알아보는데 있었다.

최대 수직 지면반력 및 부하율에서는 CNTC를 부착한 상태가 기존 EVA를 부착한 상태보다 낮게 나타났다. Lees(1981)는 경직된 착지와 유연한 착지와의 비교에서 전자가 후자에 비해 짧은 시간 동안에 더 큰 지면반력을 나타냈음을 보고하였다. Jo(1999)는 신발과 맨발간의 드롭착지 동작을 연구한 결과 지면반력의 정점에 있어서 유의한 차이가 나타나지 않았다고 보고하였다. 이는 CNTC를 부착한 경우 지면으로부터 충격에너지가 급격히 전달되는 것을 방지하는데 긍정적인 영향을 미치는 것으로 사료되어 진다.

V. 결 론

본 연구는 새로운 소재로 각광 받고 있는 탄소나노튜브와 기존의 EVA소재의 최적의 비율을 찾아내어 역학적 강도와 변형률 모두를 만족할 수 있는 최적의 충격흡수제를 개발하고자 하였다. 또한 이렇게 개발된 탄소나노튜브를 기반으로 하는 발포체가 인체의 충격력 조율에 어떠한 효과가 있는지 알아보았다.

본 연구의 결과, 탄소나노튜브가 함유된 발포체의 경우 EVA 발포체에 비해 인장강도(tensile strength), 신장률(elongation), 인열강도(tear strength), 스플릿 인열강도(split tear strength), 최대압축률(compression set), 탄성률(resilience)이 증가되어졌다. 또한, 드롭 착지동작 시 인체의 지면반력 변인들을 비교해 본 결과, 최대 수직 지면반력값에서 CNTC를 부착한 상태가 EVA를 부착한 상태보다 감소하였고, 부하율에서도 CNTC를 부착한 상태가 EVA를 부착한 상태보다 감소한 결과를 보였다.

따라서 보다 이상적인 물성을 가진 소재 개발을 위해 탄소나노튜브의 교반 비율에 따른 발포체의 물리적 다양성에 더욱 초점을 맞추고, 개발된 충격흡수제가 최적의 형태로 신발에 적용될 수 있도록 연구를 보완해야 할 것으로 생각된다. 또한 발 자체의 부상 예방과 충격흡수 관점에 국한시켜 연구 개발되는 것이 아니라, 신발 착용 시 하지 관절과 허리의 부상 예방 및 트레이닝의 효과 극대화를 위한 방향으로 연구가 이루어져야 할 것으로 판단된다. 이렇게 개발된 충격흡수제가 적용된 신발이 운동부상 예방을 위한 충격력의 완화뿐만 아니라 엘리트 선수의 운동수행력 향상에 보다 큰 기여를 할 수 있을 것으로 판단된다. 본 실험에서는 최적의 물성을 가진 충격흡수제를 개발하기 위해 주로 기존의 EVA와 탄소나노튜브의 교반 비율과 물리적 특성 테스트에 초점을 맞춰 이루어졌지만, 추후 연구에서는 운동학적, 운동역학적, 그리고 근활성도 비교분석을 통해 이렇게 개발된 탄소나노튜브를 기반으로 하는 충격흡수제가 생체역학적(Biomechanical) 변인에 어떠한 영향을 미치는가에 대한 연구 또한 이루어져야 할 것으로 사료된다.

참고문헌

Bobbert, M. F., Huijing, P. A., & van Ingen Schenau, G. J.(1987). Drop jumping II. The influence of dropping height on the biomechanics of drop jumping. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 19, 339-346.

Byrne, M. T., & Gun'ko, Y. K.(2010). Recent on carbon nanotube-polymer composites. *Advanced Materials*, 22, (13), 1672-1688.

Cao, A., Dickrell, P. L., Sawyer, W. G., Ghasemi-Nejhad, M. N., & Ajayan, P. M.(2005). Super-compressible foamlike carbon nanotube films. *Science*, 310, 1307-1310.

Gibson, L. J.(2000). Mechanical behavior of metallic foams Annual Review of Materials. *Science,* 30, 191-227.

Jo, S. C.(1999). Biomechanical analysis of bare foot landing and shod foot landing in dropJump. *International Journal of Human Movement Science*, 38(3), 715-725.

Lees, A.(1981). Methods of impact absorption when landing from a jump. *Engineering in Medicine,* 10(4), 207-211. Worthington, OH: Bertec Corporation.

Nigg, B. M., & Bobbert, M.(1990). On the potential of various approach in load analysis to reduce the frequency of sports injuries. *Journal of Biomechanics*, 23, 3-12.

Stacoff, A., Kaelin, X., & Stuessi, E.(1988). *The impact in landing after a volleyball block. In: Biomechanics XI-B*. Amsterdam, the Netherlands: Free University Press. 694-700.

Suhr, O., Koratkar, N., Keblinski, P., & Ajayan, P.(2005). Viscoelasticity in carbon nanotube composites. *Journal of Nature Materials*, 4, 134-137.

Zhao, B., Wang, J., Li, Z. J., Liu, P., Chen, D., & Zhang, Y.(2008). Mechanical strength improvement of polypropylene threads modified by PVA/CNT composite coatings. *Materials Letters*, 62, 4380-4382.