

HIPS 복합재의 전기적 및 마모 특성에 미치는 다중벽 탄소나노튜브의 영향

정연우¹ · 김경식¹ · 이현우² · 정만우³ · 이재혁⁴ · 김재현¹ · 이학주¹ · 김광섭^{1*}

¹한국기계연구원 나노융합기계본부 나노역학실, ²한라비스테온공조 압축기팀
³한화케미칼중앙연구소 신소재연구센터, ⁴노스웨스턴대학 재료공학과

Effects of Multi-walled Carbon Nanotubes on Electrical and Wear Characteristics of High Impact Polystyrene Composites

Yeon-Woo Jeong¹, Kyung-Shik Kim¹, Hyun-Woo Lee², Man-Woo Jeong³, Jae-Hyeok Lee⁴,
Jae-Hyun Kim¹, Hak-Joo Lee¹ and Kwang-Seop Kim^{1*}

¹Dept. of Nano Mechanics, Nano-convergence Mechanical Systems Research Division,
Korea Institute of Machinery & Materials (KIMM)

²Halla Visteon Climate Control Corp., ³Hanwha Chemical

⁴Dept. of Materials Science and Engineering, Northwestern University

(Received April 8, 2015; Revised May 6, 2015; Accepted May 17, 2015)

Abstract – Carbon nanotubes (CNTs) are widely used in polymer composites as filler materials to enhance various characteristics of the composites because of their remarkable mechanical, electrical, and thermal properties. In this study, we investigate the effects of MWCNTs on the electrical and wear characteristics of high-impact polystyrene (HIPS) composites, and compare the results with the effects of carbon black (CB). The HIPS composites are classified as Bare-HIPS, MWCNT-HIPS composites containing 2, 3, 4, and 5 wt% MWCNTs, and CB-HIPS containing 17 wt% CB. Electrical characteristics are evaluated by measuring the surface resistance using a 4-point probe. Wear characteristics are evaluated using the reciprocating wear test, and a chrome steel ball with a curvature of 6.3 mm is used as the counterpart. The results show that the addition of MWCNTs or CB can improve the electrical and wear characteristics of HIPS composites. In the case of MWCNT-HIPS composites, surface resistance, friction coefficient, and specific wear rate decrease as the concentrations of MWCNTs increase. Moreover, the addition of MWCNTs is more effective in improving the electrical and wear characteristics of HIPS composites compared to the addition of CB. To fabricate the HIPS composite with appropriate electrical and wear characteristics, more than 4 wt% MWCNTs is added to HIPS.

Keywords – friction coefficient (마찰계수), high impact polystyrene (HIPS, 고충격 폴리스티렌), multi-walled carbon nanotube (MWCNT, 다중벽 탄소나노튜브), surface resistance (표면 저항), wear (마모)

Nomenclature

V : Wear volume (mm³) (마모량)

L : Normal load (N) (수직 하중)

x : Total sliding distance (m) (총 미끄럼거리)

k_s : Specific wear rate (mm³/Nm) (비마모율)

1. 서론

*Corresponding author : kskim@kimm.re.kr
Tel: +82-42-878-7770, Fax: +82-42-878-7884

과학기술 산업이 발전함에 따라 용도에 적합한 소재
를 선정하는 것은 단일 재료가 지니고 있는 특성만으

로는 만족되지 않는 경우가 많으며, 보다 우수하고 원하는 특성을 갖는 재료의 필요성이 요구되고 있다. 이러한 필요성으로부터 서로 다른 두 가지 이상의 재료를 조합하여 복합재라고 하는 다양한 특성을 갖는 재료가 꾸준히 개발되고 있으며, 이를 통해 단일 재료에서는 구현할 수 없었던 우수한 특성을 얻는 것이 가능해졌다[1].

복합재는 여러 가지 금속, 세라믹 및 폴리머 등의 재료를 조합함으로써 제조되며, 특히 폴리머 소재의 특성을 용도에 적합하도록 변경하기 위해 충전제(fillers)와 같은 물질을 첨가하는 방법이 이용되고 있다. 충전제의 첨가로 인해 폴리머 복합재의 인장 및 압축 강도와 내마모성 및 내충격성, 열안정성 등의 특성이 향상되는 효과를 기대할 수 있으며, 충전제로는 탄소나노튜브(carbon nanotube, CNT), 카본 블랙(carbon black, CB), 금속 입자(metal particles) 등이 사용된다[2]. 그 중에서도 탄소나노튜브는 탄소 원자들로 구성된 고분자 탄소 동소체를 말하며, 육각형의 벌집 모양으로 배열된 탄소원자 단일층이 원통형태로 말려있는 구조로 이루어져 있다. 또한, 탄소 벽의 개수에 따라 단일벽 탄소나노튜브(single-walled carbon nanotube, SWCNT), 이중벽 탄소나노튜브(double-walled carbon nanotube, DWCNT), 다중벽 탄소나노튜브(multi-walled carbon nanotube, MWCNT)로 분류되며, 탄소 층의 배열 방법 및 말린 각도 등에 따라 강도나 기타 물성이 달라지는 특징이 있다[3, 4]. 이러한 특징을 지닌 탄소나노튜브는 우수한 기계적, 전기적, 열적 특성을 가지고 있으며, 이러한 특성을 활용하여 복합재의 다양한 특성을 향상시키는 연구가 활발히 진행되고 있다[5-7].

High impact polystyrene(HIPS)은 전기전자 제품의 외장재에 주로 사용되는 폴리머 소재이며, HIPS를 반도체 이송용 트레이의 구성 소재로 사용하기 위한 개발이 현재 진행 중에 있다. 반도체 소자는 공정 과정에서 발생하는 정전기와 마모 입자에 의해 손상이 야기될 수 있기 때문에 반도체를 운반할 때 사용되는 트레이는 마찰에 의한 정전기 및 마모 입자의 발생이 적은 소재로 제조되어야 한다. 이를 위해서는 전기 전도성과 마모 특성이 우수한 소재의 사용이 요구된다. 그러나 HIPS는 폴리머 소재로써 금속과는 달리 전기 절연성이라는 특징이 있으며, 다른 물체와의 마찰로 인해 발생된 정전기를 축적하게 되어 반도체의 손상을 야기시킬 수 있다. 따라서 전기적 및 기계적 특성이 우수하여 전도성 첨가제로 사용되거나 타이어의 기계

적 강도 및 마모 특성을 향상시키는데 주로 이용되는 카본 블랙(CB)[8]을 HIPS에 첨가함으로써 용도에 적합한 특성을 갖는 HIPS 복합재를 제조하고자 하였다. CB-HIPS 복합재는 충전제가 첨가되지 않은 Bare-HIPS에 비해 향상된 전기 전도성 및 내마모성을 갖는 것으로 나타났지만, CB이 17 wt% 이상 첨가된 CB-HIPS 복합재의 경우에만 반도체 이송용 트레이로써 적합한 전기 저항($10^3 \Omega$ 이하)[9]을 갖는 것이 확인되었다. 이러한 결과를 통해 CB보다 적게 첨가하여도 용도에 적합한 특성을 갖는 HIPS 복합재를 제조하기 위하여 충전제로써 MWCNTs를 고려하였다.

따라서 본 연구에서는 MWCNTs가 각각 2, 3, 4, 5 wt% 첨가된 MWCNT-HIPS 복합재를 제조하고, MWCNT-HIPS 복합재의 전기적 및 마모 특성을 실험적으로 평가하였다. 또한, MWCNTs가 HIPS 복합재의 전기적 및 마모 특성에 미치는 영향에 대하여 조사하였으며, 그 결과를 CB이 HIPS 복합재에 미치는 영향과 비교하였다.

2. 시험 방법 및 조건

MWCNT-HIPS 복합재는 다음과 같은 과정을 거쳐 제작되었다. 먼저 합성 후 정제하지 않은 MWCNTs와 모재인 HIPS(HI-425, Kumho Petrochemical Co., Ltd.) 고분자 60 kg을 준비한다. HIPS 고분자 60 kg에 함량이 각각 2, 3, 4, 5 wt%가 되도록 MWCNTs를 계량하여 첨가한 후, 텀블러 믹서를 이용하여 균일하게 혼합한다. 균일하게 혼합된 HIPS 복합재 분말을 스크류 직경이 50 mm이고 길이가 1500 mm인 이축압출기의 호퍼에 투입하여 200°C에서 100 kg/hr의 토출 속도로 MWCNT-HIPS의 복합재 펠렛을 제조하였다.

상기의 과정을 통해 제작된 HIPS 복합재는 어떠한 충전제도 첨가되지 않은 Bare-HIPS와 MWCNTs가 2, 3, 4, 5 wt% 첨가된 MWCNT-HIPS 복합재, 카본 블랙(CB)이 17 wt% 첨가된 CB-HIPS 복합재로 분류된다.

HIPS 복합재의 전기적 특성은 4-point probe를 이용하여 샘플의 표면 저항을 측정함으로써 평가 하였으며, 측정법은 JIS K 7194에 따른다. 마모 특성은 ball on flat 타입의 왕복동 마모시험을 통해 평가하였으며, 시험 조건 및 개략도는 Table 1 및 Fig. 1과 같다. 복합재 샘플을 적절한 크기로 재단한 후, 이소프로필알코올(Isopropyl alcohol, IPA) 용액에 담가 5분간 초음파 세척을 수행함으로써 표면의 이물질을 제거하였다.

상대 마찰 재료로써 직경이 6.3 mm인 크롬 스틸 볼 (Chrome steel ball)을 사용하였으며, 샘플과 동일한 방식으로 세척을 수행하였다. 세척이 끝난 크롬 스틸 볼은 로드셀 하단부에 체결되어 샘플 위를 5 mm/s의 속도로 왕복동 운동한다. 매 시험마다 볼을 교체하여 시험을 진행하였으며, 마모 시험은 총 800 s 동안 수행되었다. 이때의 미끄럼 거리와 총 마모거리는 각각 10 mm와 4 m이다. 접촉 하중을 10, 30, 50, 70 N으로 증가시키며 MWCNTs의 함량 변화에 따른 마찰계수의 변화를 측정하였다. 이때의 최대 접촉 압력의 범위는 60~120 MPa이며, 최대 접촉 압력은 Hertzian 접촉 이론에 근거하여 구하였다[10]. 계산에 사용된 HIPS와 크롬 스틸 볼의 탄성계수는 1.9와 210 GPa이며, 푸아송비로는 각각 0.35와 0.3의 값이 사용되었다[11, 12]. 또한, HIPS 복합재의 내마모성을 조사하기 위하여 Archard 마모 방정식을 통해 비마모율(k_s)을 구

하였으며, 수식은 아래의 식 (1)과 같다.

$$k_s = \frac{V}{Fx} = \frac{Al}{Fx} \quad (1)$$

여기서 V 는 마모량을 뜻하며, F 와 x 는 각각 접촉 하중과 총 마모거리를 의미한다. 마모량은 마모 시험 후 형성된 마모 트랙의 단면적과 미끄럼거리의 곱을 통해 구하였으며, 마모 트랙의 단면적은 접촉식 표면 형상 측정장비인 스타일러스 프로파일러를 이용하여 측정하였다. 마모 트랙의 표면 형상이 고르지 않기 때문에 보다 정확한 마모량을 구하기 위하여 각 샘플별 마모 트랙의 단면적을 총 6번 측정하였으며, 그 값의 평균을 적용하여 비마모율을 구하였다.

3. 결과 및 고찰

Table 2는 MWCNTs의 함량에 따른 MWCNT-HIPS 복합재의 표면 저항을 나타내고 있으며, 이를 Bare-HIPS와 CB-HIPS 복합재의 표면 저항과 비교하고 있다. Bare-HIPS의 경우 표면 저항이 $13 \log(\Omega/\text{square})$ 이상의 값을 갖는데 비해, CB-HIPS 복합재와 MWCNT-HIPS 복합재는 각각 2.10 및 $3.09 \log(\Omega/\text{square})$ 이하의 표면 저항이 측정되었다. MWCNTs의 함량이 0 wt%에서 5 wt%로 증가할수록 표면 저항이 감소하였으며, 5 wt% 첨가하였을 경우 $1.83 \log(\Omega/\text{square})$ 까지 감소함을 알 수 있었다. 또한, MWCNTs가 4 wt% 이상 첨가된 MWCNT-HIPS 복합재는 CB이 17 wt% 첨가된 CB-HIPS 복합재와 유사하거나 보다 낮은 표면 저항을 갖는 것을 알 수 있다.

Fig. 2는 각 하중 조건에서 MWCNTs의 함량에 따른 MWCNT-HIPS 복합재의 마찰계수 변화를 보여주고 있으며, 이를 Bare-HIPS와 CB-HIPS 복합재의 마

Table 1. Experimental conditions for wear test

Contact geometry	Ball on flat, Reciprocating wear test
Materials	Bare-HIPS, MWCNT-HIPS composites, CB-HIPS composite, Chrome steel ball (dia. 6.3 mm)
Load [N]	10-70
Contact pressure [MPa]	60-120
Sliding speed [mm/s]	5
Stroke length [mm]	10
Total sliding distance [m]	4
Test duration [s]	800
Temp & RH	$22 \pm 2^\circ\text{C}$, $45 \pm 5\%$

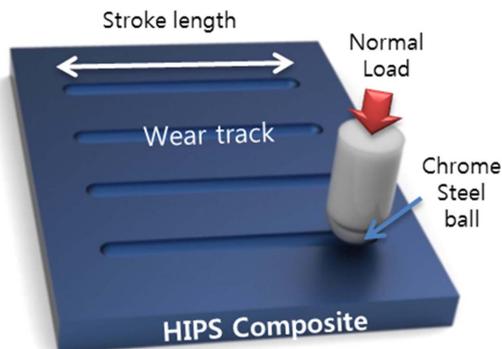


Fig. 1. Schematic diagram of wear test.

Table 2. Surface resistances of HIPS composites

	Concentration of MWCNT[wt%]	HIPS-Bare [log(Ω/square)]
MWCNT-HIPS composites	0	Over than 13
	2	3.09
	3	2.46
	4	2.16
	5	1.83
CB-HIPS composite	17 (CB)	2.10

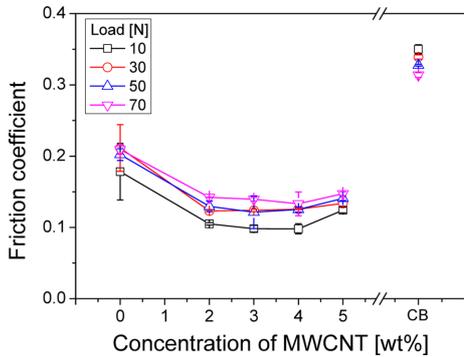


Fig. 2. Friction coefficient of HIPS composites containing MWCNTs and CB with respect to the concentration of MWCNTs.

찰계수와 비교하고 있다. Bare-HIPS의 경우, 0.18~0.22 사이의 마찰계수를 갖는데 비해 MWCNT-HIPS 복합재는 0.1~0.15 정도의 비교적 낮은 마찰계수를 갖는 것으로 나타났다. 반면, CB-HIPS 복합재의 마찰계수는 0.31~0.35 정도로 오히려 Bare-HIPS보다 높은 값이 측정되었다. 이는 MWCNTs의 첨가가 HIPS 복합재의 마찰계수를 감소시키는 반면, CB의 첨가는 오히려 마찰계수를 증가시키는 효과가 있음을 의미한다. MWCNT-HIPS 복합재의 경우, 동일한 하중조건에서 MWCNTs의 함량 증가에 따른 마찰계수의 변화는 미미하나, MWCNTs가 5 wt% 첨가된 경우에는 하중조건에 관계없이 마찰계수가 증가하는 경향이 나타났다. 또한, 하중이 증가함에 따라 MWCNT-HIPS 복합재의 마찰계수는 증가하는 반면, CB-HIPS 복합재의 마찰계수는 반대로 감소하였다.

Fig. 3은 30 N의 하중조건 하에서 마모 시험 후 형성된 각 샘플의 마모 트랙 표면 형상을 optical microscope(OM)를 이용하여 측정된 사진이며, 이를 통해 두 재료의 접촉이 일어나는 표면의 형상을 관찰하고자 하였다. 그 결과, Bare-HIPS와 MWCNT-HIPS 복합재의 마모 트랙은 매끄러운 표면을 갖는 것을 알 수 있으며, 마모 입자가 거의 발생되지 않은 것을 확인하였다. 반면, CB-HIPS 복합재의 마모 트랙은 Bare-HIPS와 MWCNT-HIPS 복합재에 비해 거친 표면을 지니며, 비교적 많은 양의 마모 입자가 발생한 것을 알 수 있었다.

Fig. 4는 Bare-HIPS와 MWCNT-HIPS 복합재, CB-HIPS 복합재 간의 마모 트랙의 단면적을 각 하중 조건별로 비교하고 있다. 접촉 하중이 증가함에 따라 함

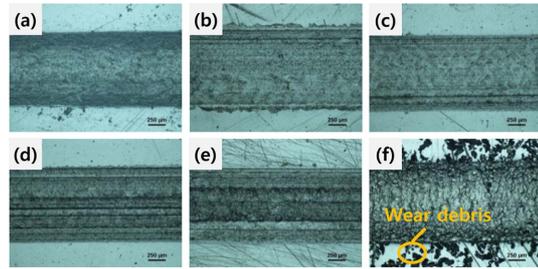


Fig. 3. Optical microscope images of wear track surfaces on HIPS composites with respect of MWCNTs concentrations when the contact load was 30 N : (a) Bare-HIPS (0 wt%), (b) MWCNT-HIPS composite (2 wt%), (c) MWCNT-HIPS composite (3 wt%), (d) MWCNT-HIPS composite (4 wt%), (e) MWCNT-HIPS composite (5 wt%), (f) CB-HIPS composite (17 wt%).

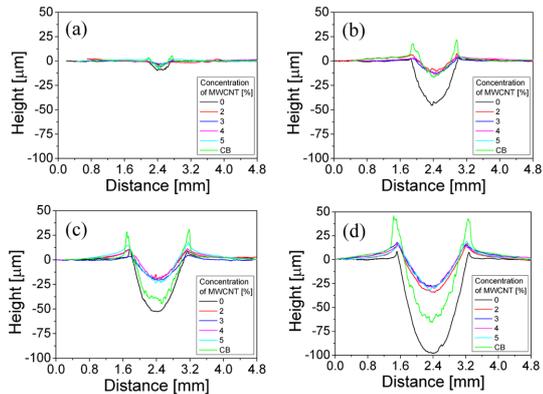


Fig. 4. Depth profiles of wear track with respect to the contact load of (a) 10 N, (b) 30 N, (c) 50 N, (d) 70 N.

량 조건에 관계없이 마모 트랙의 단면적이 증가하였으며, 단면적의 증가는 마모량의 증가를 의미하므로 마모 시 샘플 표면에 높은 하중이 가해질수록 마모량이 증가함을 의미한다. 10 N의 하중 조건에서 형성된 각 샘플의 마모 트랙의 단면적은 거의 유사한 형상을 갖는 것으로 측정 되었으며, 각 샘플간의 마모 트랙 단면적의 차이가 뚜렷하게 나타나지 않았다. 또한, Fig. 4의 (b), (c), (d)를 보면 하중 조건이 30 N 이상인 경우에는 어떠한 충전제도 첨가되지 않은 Bare-HIPS의 마모 트랙의 단면적이 가장 넓은 것을 알 수 있으며, MWCNTs와 CB이 첨가된 MWCNTs-HIPS 복합재와 CB-HIPS 복합재의 마모 트랙 단면적은 Bare-HIPS에 비해 작은 것을 알 수 있다. Fig. 4의 (c)와 (d)에서 보여지듯 하중 조건이 50 N 이상인 경우에는 CB-

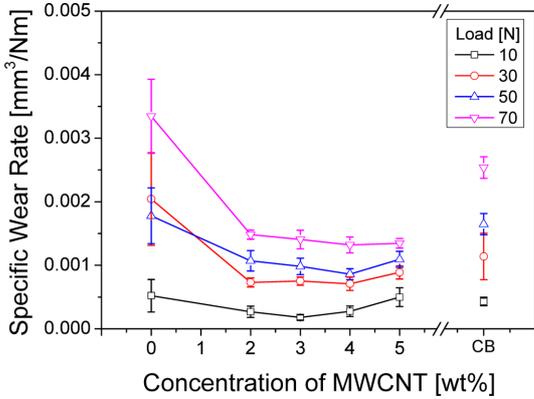


Fig. 5. Specific wear rate of HIPS composites with respect to the concentration of MWCNTs.

HIPS 복합재의 마모 트랙의 단면적은 MWCNT-HIPS 복합재의 마모 트랙의 단면적보다 넓게 측정된 것을 알 수 있으며, 따라서 Bare-HIPS, CB-HIPS 복합재, MWCNT-HIPS 복합재 순으로 마모 트랙의 단면적이 작아지는 것을 알 수 있다. 이는 MWCNTs와 CB의 첨가가 HIPS 복합재의 마모량을 감소시키는 효과가 있다는 것을 의미하며, MWCNTs가 CB보다 HIPS 복합재의 마모량 감소에 더 큰 영향을 미친다는 것을 알 수 있다. 또한, 동일한 하중 조건에서 MWCNT-HIPS 복합재 간의 마모 트랙의 단면적은 MWCNTs의 함량에 관계없이 거의 동일한 면적과 형상을 갖는 것으로 나타났다. 이는 마모 시험 시, MWCNT-HIPS 복합재와 크롬 스틸 볼 간의 접촉 면적이 거의 동일하다는 것을 나타내며, 5 wt%의 MWCNTs가 첨가된 경우에 마찰계수가 증가하는 경향이 접촉 면적의 증가로 인한 것이 아님을 의미한다.

Fig. 5는 각 하중조건에서의 Bare-HIPS, MWCNT-HIPS 복합재, CB-HIPS 복합재 사이의 비마모율을 비교하고 있으며, MWCNTs의 함량 변화에 따른 MWCNT-HIPS 복합재의 비마모율 변화를 나타내고 있다. 그 결과, 하중이 증가함에 따라 비마모율도 증가하였으며, 30 N 이상의 하중조건에서 Bare-HIPS, CB-HIPS 복합재, MWCNT-HIPS 복합재 순으로 작은 값의 비마모율을 갖는 것을 알 수 있었다. 각각의 함량 조건에 따른 MWCNT-HIPS 복합재의 비마모율을 비교해볼 때, 70 N의 하중조건에서는 MWCNTs의 첨가 함량이 증가할 수록 비마모율이 점차적으로 감소하였으나, 비교적 낮은 하중인 30-50 N의 하중 조건에서는 MWCNTs를 첨가할 수록 비마모율이 감소하다가

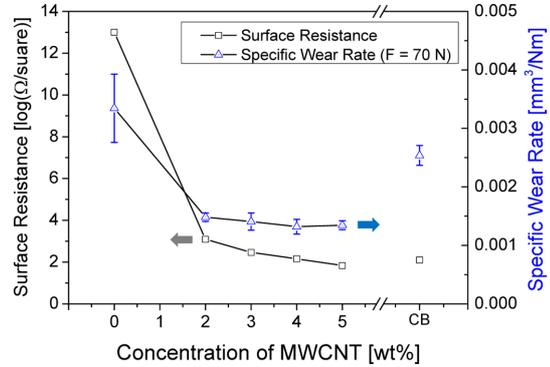


Fig. 6. Surface resistance and specific wear rate(F=70 N) of HIPS composites with respect to the concentration of MWCNTs.

5 wt% 첨가할 경우 오히려 4 wt% 첨가된 MWCNT-HIPS 복합재에 비해 비마모율이 증가하였다. 또한, 10 N의 하중 조건에서도 이와 유사하게 MWCNTs의 첨가 함량이 3 wt%를 기준으로 비마모율이 감소하다가 다시 증가하는 경향이 나타났다. 이러한 결과를 통해 MWCNTs를 5 wt% 이상 첨가할 경우 오히려 비마모율이 증가하므로 HIPS 복합재의 내마모성 향상을 위한 MWCNTs의 최대 첨가 함량은 4 wt%임을 알 수 있다. 또한, MWCNTs를 4 wt% 첨가할 경우, 마모 특성뿐만 아니라 전기적 특성 측면에서도 기준에 부합하는 표면 저항을 지니므로 용도에 적합한 특성을 갖도록 하기 위해서는 MWCNTs를 4 wt% 첨가하는 것이 최적의 조건이라고 판단된다.

Fig. 6는 Bare-HIPS와 MWCNT-HIPS 복합재, CB-HIPS 복합재 사이의 표면 저항과 비마모율의 변화를 나타내고 있으며, 이를 통해 MWCNTs와 CB의 첨가가 HIPS 복합재의 전기적 및 마모 특성에 미치는 영향을 종합적으로 분석하고자 하였다. 표면 저항은 Table 2에서 언급한 것과 동일하며, 비마모율은 하중 조건이 70 N인 경우의 비마모율을 의미한다. 그 결과, MWCNTs의 첨가 함량이 증가할수록 MWCNT-HIPS 복합재의 표면 저항이 점차적으로 감소함을 알 수 있었으며, MWCNTs가 4 wt% 이상 첨가된 MWCNT-HIPS 복합재가 CB이 17 wt% 첨가된 CB-HIPS 복합재에 비해 유사하거나 보다 낮은 표면 저항을 갖는 것을 알 수 있었다. 마모 특성의 경우, 70 N의 하중 조건에서 Bare-HIPS는 $33.5 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ 의 비마모율을 갖는 반면, CB이 첨가된 CB-HIPS 복합재는 Bare-HIPS에 비해 $8.1 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ 만큼 감소한 $25.4 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ 의 비

마모율을 갖는 것을 알 수 있었다. 또한, MWCNTs의 첨가 함량이 2 wt%인 경우에는 Bare-HIPS에 비해 $18.7 \times 10^{-4} \text{mm}^3/\text{Nm}$ 만큼 감소한 $14.8 \times 10^{-4} \text{mm}^3/\text{Nm}$ 의 비마모율을 갖으며, MWCNTs의 첨가 함량이 증가할수록 비마모율이 낮아져 5 wt%인 경우에는 Bare-HIPS에 비해 $20.0 \times 10^{-4} \text{mm}^3/\text{Nm}$ 만큼 감소한 $13.5 \times 10^{-4} \text{mm}^3/\text{Nm}$ 의 비마모율을 갖는 것을 알 수 있었다. 따라서 MWCNTs의 첨가 함량이 증가할수록 MWCNT-HIPS 복합재의 비마모율이 감소하는 것을 알 수 있었다. 이러한 결과를 통해 MWCNTs와 CB의 첨가가 HIPS 복합재의 전기 전도성 및 내마모성을 향상시키는 것을 확인할 수 있으며, MWCNTs가 CB보다 적은 함량으로도 HIPS 복합재의 전기 전도성 및 내마모성 향상에 더 큰 효과가 있는 것을 알 수 있다. 또한, 목적에 적합한 특성을 지닐 경우 MWCNT-HIPS 복합재가 CB-HIPS 복합재보다 사용 중에 발생할 수 있는 마모량이 적으며, 마모 입자가 함유하고 있는 나노 소재의 양이 적은 것을 알 수 있다. 따라서 MWCNT-HIPS 복합재가 CB-HIPS 복합재에 비해 나노 소재를 함유하고 있는 마모 입자의 유출 가능성이 더 낮으며, 나노 소재가 인체 및 환경에 노출될 수 있는 가능성이 낮아 나노안전성 측면에서도 더 우수한 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 Bare-HIPS, MWCNT-HIPS 복합재, CB-HIPS 복합재의 전기적 및 마모 특성을 실험적으로 평가하고, MWCNTs가 HIPS 복합재의 전기적 및 마모 특성에 미치는 영향에 대하여 조사하였으며, 그 결과를 CB-HIPS 복합재와 비교하였다. 전기적 특성은 표면 저항측정을 통해 평가하였으며, 그 결과 MWCNTs와 CB이 첨가됨으로 인해 HIPS 복합재의 표면저항이 감소됨을 확인할 수 있었다. 마모 특성은 마찰 계수와 비마모율을 측정함으로써 평가하였으며, CB이 첨가됨으로 인해 CB-HIPS 복합재는 Bare-HIPS에 비해 마찰계수가 증가하였으나 비마모율은 반대로 감소하였다. 반면, MWCNTs가 첨가된 MWCNT-HIPS 복합재는 Bare-HIPS에 비해 마찰 계수와 비마모율이 모두 감소하였다. 결과적으로 MWCNTs 및 CB의 첨가로 인해 HIPS 복합재의 전기 전도성 및 내마모성이 향상됨을 알 수 있었으며, HIPS의 전기적 및 마모 특성 향상에 MWCNTs가 CB보다 더 큰 영향을 미치는

것을 확인하였다. 또한, 용도에 적합한 HIPS 복합재 제조를 위해서는 MWCNTs를 4 wt% 첨가하는 것이 소재의 전기적 및 마모 특성 측면에서 가장 적합하며, MWCNT-HIPS 복합재가 CB-HIPS 복합재에 비해 재료의 원가 절감 및 나노안전성 측면에서 더 우수하다고 판단된다.

Acknowledgements

본 연구는 산업통상자원부의 플랫폼 기술개발 사업(10034751)과 나노소재 응용 고성능 유연소자 기술기반 구축사업(SC1090)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

References

- [1] William, D. C, Jr., Composites. In: William, D. C, Jr. (ed.) *Materials Science and Engineering an Introduction*, pp.577-620. John Wiley & Sons, Inc., New York, 2007. (ISBN 0-471-73696-1)
- [2] Choudhary, V., Gupta A., Polymer/Carbon Nanotube Nanocomposites, In: Yellampalli S. (eds.) *Carbon Nanotubes – Polymer Nanocomposites*, pp. 65-90. In Tech, 2011. (ISBN 978-953-307-498-6)
- [3] Breuer, O., Sundararaj, U., “Big Returns From Small Fibers: A Review of Polymer/Carbon Nanotube Composites”, *Polymer composites*, Vol. 25, No. 6, pp. 630-645, 2004.
- [4] Dai, H., “Carbon Nanotubes: Synthesis, Integration, and Properties”, *Accounts of Chemical Research*, Vol. 35, No. 12, pp. 1035-1044, 2002.
- [5] Zoo, Y. S., An, J. W., Lim, D. P., Lim, D. S., “Effect of Carbon Nanotube Addition on Tribological Behavior of UHMWPE”, *Tribology Letters*, Vol. 16, No. 4, pp. 305-309, 2004.
- [6] Xue, Y., Wu, W., Jacobs, O., Schädel, B., “Tribological Behaviour of UHMWPE/HDPE Blends Reinforced with multi-wall Carbon Nanotubes”, *Polymer Testing*, Vol. 25, No. 2, pp. 221-229, 2006.
- [7] Chen, W. X., Li, F., Han, G., Xia, J. B., Wang, L. Y., Tu, J. P., Xu, Z. D., “Tribological Behavior of Carbon-nanotube-filled PTFE Composites”, *Tribology Letters*, Vol. 15, No. 3, pp. 275-278, 2003.
- [8] Zois, H., Apekis, L., Omastova, M., “Electrical Properties of Carbon Black-filled Polymer Composites”, *Macromolecular Symposia*, Vol. 170, No. 1, pp. 249-256, 2001.
- [9] Huang, J. C., “Carbon Black Filled Conducting Polymers and Polymer Blends”, *Advances in Polymer Technology*, Vol. 21, No. 4, pp. 299-313, 2002.
- [10] Popov, V. L., Rigorous Treatment of Contact Prob-

- lem – Hertzian Contact. In: Popov, V. L. (ed.) *Contact Mechanics and Friction: Physical Principles and Applications*, pp. 55-70. Springer Science & Business Media, Heidelberg, 2010. (ISBN 978-3-642-10802-0)
- [11]Matweb, Retrieved May 13, 2015, from <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=d0b0a51bff894778a97f5b72e7317d85>.

- [12]Make It From, Retrieved May 13, 2015, from <http://www.makeitfrom.com/material-properties/High-Impact-Polystyrene-HIPS/>.