

## MWCNT 첨가에 의한 PA66/PPE 블렌드의 전기적 기계적 성질

이영실 · 이슬기 · 김재형 · 윤관한<sup>†</sup>

금오공과대학교 화학공학과, 환경공학과, 산학협력단

(2018년 11월 16일 접수, 2019년 1월 14일 수정, 2019년 2월 4일 채택)

### Electrical and Mechanical Properties of PA66/PPE Blend Containing MWCNT

Young Sil Lee, Seul Ki Lee, Jae Hyung Kim, and Kwan Han Yoon<sup>†</sup>

Dept. of Chemical Engineering, Dept. of Environmental Engineering, Industry-Academic Cooperation Foundation,  
Kumoh National Institute of Technology, 1 Yangho-dong, Gumi 39177, Korea

(Received November 16, 2018; Revised January 14, 2019; Accepted February 4, 2019)

**초록:** 본 연구에서는 multi-walled carbon nanotube(MWCNT)가 첨가된 polyamide 66(PA66)/poly(2,6-dimethyl-4,4-phenylene ether)(PPE) 블렌드를 제조하였다. 이때 용융점도가 다른 2종류의 PPE-H(높은 점도)와 PPE-L(낮은 점도)이 사용되었다. 블렌드 제조 시에 3 phr의 styrene-ethylene-butadiene-styrene(SEBS)가 내충격성 개량제로 사용되었고 2 phr의 MWCNT가 사용되었다. 기계적인 성질과 전기적인 성질을 고려하였을 때 PA66/PPE의 중량비가 (80/20) 및 (60/40)인 블렌드의 성질이 우수하였다. MWCNT의 함량에 따라 PA66/PPE-L(80/20) 블렌드의 기계적 성질은 MWCNT 2 phr까지는 증가하다가 그 이상의 함량에서는 MWCNT의 응집에 의해 감소하였다. PA66/PPE-L(80/20) 블렌드의 전기 전도도는 기계적 성질과 유사하게 MWCNT의 함량에 따라 증가하였고 MWCNT 2 phr에서 임계농도를 나타내었다.

**Abstract:** Polyamide 66 (PA66)/poly(2,6-dimethyl-4,4-phenylene ether) (PPE) blends containing multi-walled carbon nanotube (MWCNT) were prepared. PPE-L and PPE-H having different melt viscosity were used. During blending, 3 phr of styrene-ethylene-butadiene-styrene (SEBS) as an impact modifier and 2 phr of MWCNT were added. The PA66/PPE (80/20) and (60/40) blends were considerable in terms of the electrical and mechanical properties. The mechanical properties of PA66/PPE-L (80/20) blends were increased up to 2 phr MWCNT and decreased at the higher composition of MWCNT due to the aggregation of MWCNT. The surface resistivity of PA66/PPE-L (80/20) blends was decreased with the MWCNT composition, and showed the percolation threshold at 2 phr MWCNT.

**Keywords:** polyamide 66, poly(2,6-dimethyl-4,4-phenylene ether), blend, mechanical properties, electrical properties.

## 서 론

자동차 산업계에서 기존 금속 소재를 가벼운 고분자로 대체하는 것은 오래된 화두이다. 기존의 무거운 금속 대신에 가벼운 고분자 물질을 사용하게 된다면 더욱 가볍고 연비가 좋은 자동차의 출현이 가능할 것이기 때문이다. 최근에 활발히 개발되고 있는 전기가동차의 경우 특히 배터리의 지속시간으로 인해서 일회 충전으로 주행할 수 있는 거리가 제한적으로 더더욱 자동차의 무게를 줄이는 것이 중요한 이슈로 떠오르고 있다. 그렇지만 고분자가 기존 차체를 완전히 대체하려면

금속 차체만큼 강한 기계적 특성과 열 안정성이 필요하다. 그리고 자동차의 본체를 도장할 때 정전도장을 하게 되는데 이 때 차체가 전기전도가 되어야 그라운드로 연결되었을 때 페인트가 흡착이 되게 되기 때문에 플라스틱으로 차체를 제조 시 전기 전도도를 가지게 하는 것이 중요하다. 기존의 플라스틱 소재는 전기가 통하지 않기 때문에 전도성 프라이머로 플라스틱 표면을 전 처리한 후 전기를 통하게 하는 추가적인 공정이 필요한데 이로 인해서 제조비용 및 시간이 증가하게 되는 문제점을 전도성 블렌드를 개발하여 해결하기 위한 노력이 수행되어져 왔다.

Nylon 66라는 명칭으로도 널리 알려져 있는 polyamide 66(PA66)는 우수한 기계적 특성(강도와 인성), 내화학성, 우수한 가공성 등의 장점으로 인해 다양한 분야에 널리 쓰이고 있는 대표적인 엔지니어링 플라스틱이다.<sup>1-3</sup> Poly(2,6-dimethyl-

<sup>†</sup>To whom correspondence should be addressed.  
khyoon@kumoh.ac.kr

©2019 The Polymer Society of Korea. All rights reserved.

4,4-phenylene ether)(PPE)는 열적 안정성과 치수안정성이 우수한 고분자로 알려져 있지만 용융점도가 매우 높아 가공성이 떨어진다는 치명적인 단점을 가지고 있다.<sup>4</sup> 가공성이 매우 나쁘기 때문에 PPE 단일재료로 쓰이기보다는 주로 내충격성 스티렌(high-impact polystyrene, HIPS)과 합금된 형태의 modified-PPE(mPPE)로 많이 쓰이고 있다.<sup>5,6</sup> 최근에 연구되고 있는 것이 바로 각각 단점을 지니고 있는 PA66와 PPE를 블렌드하여 단점을 보완하고 여기에 다중벽 탄소나노튜브(MWCNT)를 첨가하여 전기전도성을 부여, 정전도장용 복합 소재를 만드는 것이다.

MWCNT가 PA66/PPE의 블렌드에서 PA66에 우선적으로 분산되는데 이것은 PPE보다 PA66와의 친화성이 더 높기 때문이다.<sup>7,8</sup> Lee 등은<sup>8</sup> PA66/(PS/PPE)/CNT 나노복합체에서 CNT의 위치와 이동에 따른 전기 전도도의 연구에서 CNT를 첨가한 PS/PPE를 PA66와 용융혼합하였을 경우, 공정 과정에서 CNT가 PA66 상으로 이동, 분산되면서 전기 전도도가 상승함을 보고하였다.

고분자 블렌드의 유변학적 특성과 상용성에 의해 나타나는 모폴로지는 고분자 블렌드의 최종적인 특성과 직접적인 관련이 있다.<sup>9</sup> 고분자 블렌드를 사용할 때 최소한의 상용성 확보는 매우 중요하다. 그렇지만 대부분의 고분자 블렌드는 비상용성이어서 상간의 약한 접착력을 갖고 있어 매우 거친 모폴로지를 나타내며 기계적 특성 또한 매우 약하다.<sup>10</sup> 블렌드에 상용화제를 첨가함으로써 상간의 상용성을 증대시킬 수 있으며, 이는 고르고 안정한 모폴로지, 상간 접착력 향상으로 이어지며 결국 최종 제품의 특성 향상으로 나타난다.<sup>11,12</sup> 만약 상용화제를 첨가하지 않는다면 블렌드의 각 상을 이루고 있는 고분자의 계면 장력 등의 특성에 따라 모폴로지가 변화하고 이에 따라 최종적인 물성도 차이가 있다.

본 연구에서는 서로 비상용성으로 섞이지 않는 PA66/PPE 블렌드에 상용화제겸 충격보강제로 maleic anhydride(MAH)가 그래프트된 styrene-ethylene-butylene-styrene(SEBS) (MA-graft-SEBS)를 3 phr로 첨가하여 MWCNT의 분산 및 응집의 영향을 관찰하였으며 보다 효율적인 MWCNT를 포함하는 PA66/PPE 블렌드를 제조하고 블렌드의 전기전도성과 기계적 성질을 측정하였다.

## 실 험

**시약 및 재료.** 본 실험에서 사용한 PA66는 Solvay SA에서 구매하였다. PPE는 LG Chem., Inc에서 유변학적 특성이 다른 2 종류인 PPE-L(GP 1000D)과 PPE-H(GP 1000A)를 구매하여 사용하였으며 HIPS와 alloy된 형태의 mPPE이다. MWCNT는 Applied Carbon Nano Technology Co., Ltd.에서 구매하였으며, 순도는 95%, 평균 직경은 5~20 nm, 길이는 10  $\mu\text{m}$  이하이다. 압출을 통한 블렌드 과정에서 충격보강제로

넣어준 SEBS는 MAH가 그래프트된 형태로 Asahi Kasei Chemicals Co., Ltd에서 구매하였다.

**MWCNT를 포함하는 PA66/PPE 블렌드의 제조.** 블렌드는 co-rotating twin screw extruder(LG Machinery, L/D=42)를 이용하여 제조하였다. 이때 압출기의 온도는 hopper의 180 °C로부터 믹싱구간에서 250~260 °C를 지나 다이의 240 °C로 고정하였고 screw speed는 50 rpm으로 하였으며 feed rate는 5 kg/hr로 하였다. PPE의 유변학적 특성에 따른 블렌드의 특성과 MWCNT의 함량에 따른 영향을 알아보기로 먼저 MWCNT를 포함하는 PA66/PPE 블렌드에서 2 종류의 PPE를 PA66와 섞어 비교하였다. 복합점도가 상대적으로 낮은 것을 PPE-L, 높은 것을 PPE-H로 구분하였으며, PA66/PPE 블렌드의 조성비를 기준으로 해당 PPE의 함량이 x라고 하였을 때 PPE-L<sub>x</sub> 또는 PPE-H<sub>x</sub>로 표기하였다. MWCNT는 2 phr로 고정하였으며, 충격보강제 MA-graft-SEBS는 3 phr로 고정하였다.

MWCNT의 영향을 알아보기로 PA66/PPE-L을 80/20의 조성비로 고정하고, MWCNT의 함량을 0, 0.5, 1.0, 2.0, 3.0 phr로 하여 블렌드를 제조하였다. 충격보강제 SEBS의 함량은 3 phr로 고정하였다.

**특성분석.** 블렌드의 기계적 성질 및 전기 전도도를 측정하기 위하여 모든 시편은 사출기(PRO-WD 80, 동신유압)를 이용하여 제작하였다. PA66, PPE-L 및 PPE-H의 용융점도를 측정하기 위하여 rheometer(Discovery HR-2, TA instruments)를 사용하였다. 300 °C의 질소 분위기하에서 변형률을 1%로 고정하고 angular frequency 10<sup>0</sup>~10<sup>2</sup> rad/s의 범위에서 측정하였다. MWCNT를 포함하는 PA66/PPE 블렌드의 모폴로지 관찰을 위하여 Izod 충격시험 시편의 단면을 FE-SEM (JSM-6500F, JEOL)으로 관찰하였다. 인장시험과 굴곡시험은 UTM(AG-50 kNX, Shimadzu)을 사용하여 측정하였고 인장시험은 ASTM D638 규격을 따라 150 mm×12.5 mm×3 mm의 dog-born 형태의 시편을 사용하였다. 50 kN 로드셀을 사용하였으며 crosshead speed는 50 mm/min, gage length는 100 mm로 설정하였다. 굴곡시험은 ASTM D790을 따라 125 mm×12.5 mm×3 mm의 시편을 사용하여 3-point flexural test를 실시하였다. 50 kN 로드셀을 사용하였고 support span은 25 mm, crosshead speed는 5.1 mm/min로 하였다. 또한 Model 92T(Tinius Olsen)를 사용하여 Izod 충격 시험을 실시하였다. 실험규격은 ASTM D256 규격을 따 V자 형태로 깊이 2.5 mm 노치(notch)를 만들었다. 열 변형 온도는 열변형 온도측정기(Model 603 HDTM, Tinius Olsen)를 이용하여 ASTM D648에 따라 125 mm×12.5 mm×3 mm의 시편을 사용하여 3-point bending mode를 사용하였다. 승온 속도는 2 °C/min로 하고 0.455 MPa의 응력을 가해준 뒤 시편이 0.254 mm 변형된 시점의 온도를 측정하였다. MWCNT 도입으로 인한 전기전도성 여부 및 각 함량에 따른 전기적 특성

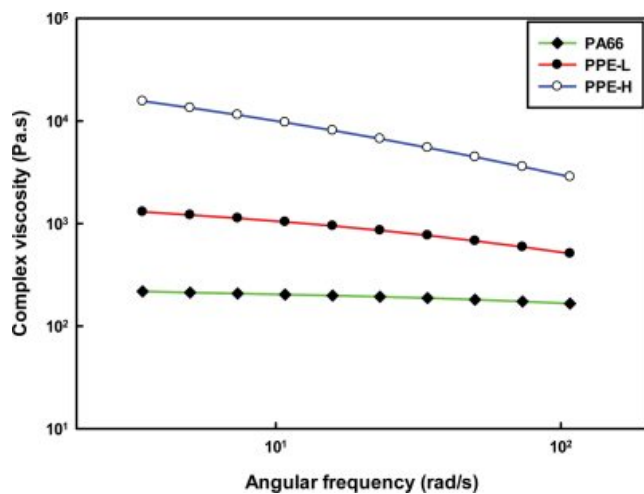
을 알아보기 위해 2-point probe인 ACL 800 Megohmmeter (ACL staticide)를 사용하여 표면 저항을 측정하였다.

## 결과 및 토론

**Complex Viscosity.** PA66과 점도가 다른 2종류의 PPE의 complex viscosity를 Figure 1에 나타내었다. PA66는 shear rate에 따라 점도가 거의 변하지 않는 Newtonian 거동을 보이고 있고 PPE는 shear rate에 따라 점도가 감소하는 shear thinning 거동을 보이고 있다. 사용된 PPE는 PA66보다 점도가 큰 것을 알 수 있고 2종류의 PPE를 점도의 크기에 따라 PPE-L과 PPE-H로 명명하였다.

**형태학.** MWCNT를 포함하는 PA66와 2종류의 PPE 및 PA66/PPE 블렌드의 형태학은 Figure 2에 나타내었다. Figure 2(a)에서 보여 지는 것처럼 MWCNT는 상대적으로 친화성이 높은 PA66에 분산이 잘 되어 있고 상대적으로 친화성이 낮은 PPE에는 분산이 잘 안되고 Figure 2(b)와 2(d)에서 보여 주는 것처럼 큰 덩어리를 형성하는 것을 볼 수 있다. 이것은 블렌드에서도 잘 나타나고 있다. Figure 2(c)와 2(e)에서 보여 주듯이 PPE-L 20과 PPE-H 20의 블렌드 조성에서 MWCNT가 PPE 도메인상에는 존재하지 않고 PA66 매트릭스에만 분산되어 있는 것을 볼 수 있었다.

**블렌드의 물리적 성질.** PA66/PPE 블렌드의 물리적 성질을 측정하여 Table 1에 나타내었고 Figure 3에 MWCNT의 함량이 2 phr인 PA66/PPE 블렌드의 인장 시험 결과를 나타내었다. Table 2에 보여진 바와 같이 전기적 특성인 표면저항값을 제외하고는 대부분의 기계적 물성이 MWCNT의 함량이 2 phr일 때 최적의 값을 나타내고 있기 때문에 블렌드의 특성을 2 phr일 때를 기준으로 해석하였다. Figure 3(a)에서 보이



**Figure 1.** Complex viscosity of PA66, PPE-L and PPE-H with angular frequency.

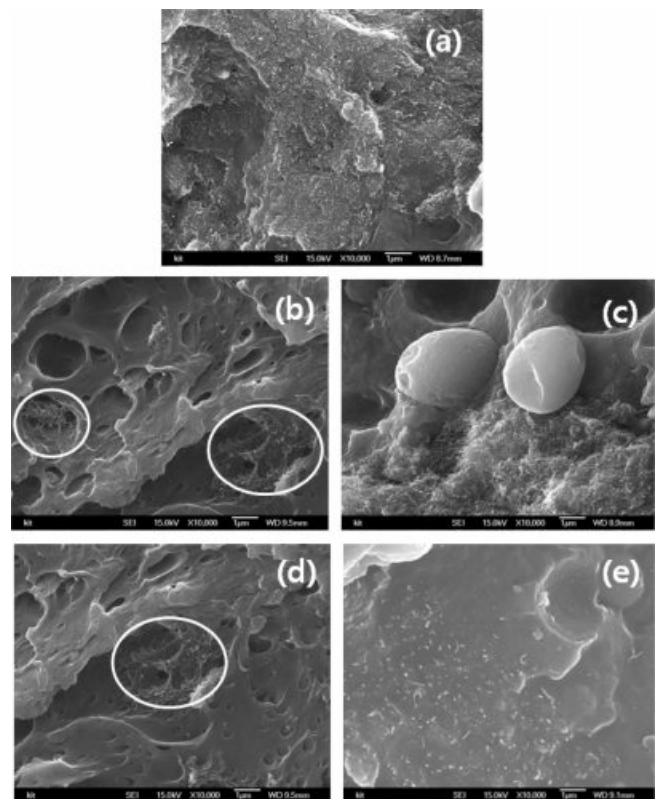
는 인장 강도를 보면 높은 점도를 가지는 PPE-H가 PPE-L보다  $13 \text{ N/mm}^2$  더 큰 인장강도를 보이고 있다. 이 차이는 블렌드 조성에 따라 인장강도의 값이 조금 차이는 보이나 전체적으로 PA66/PPE-H 블렌드가 PA66/PPE-L 블렌드보다 큰 인장강도를 나타내는 원인으로 판단된다. Nolley와 Paul<sup>13</sup>의 하면 상용성이 없는 블렌드의 인장강도 값은 식 (1)과 같이 주어진다라고 보고하였다.

$$\sigma_b = \sigma_{11}\phi_1^2 + \sigma_{22}\phi_2^2 \quad (1)$$

여기서,  $\sigma_{11}$ 과  $\sigma_{22}$ 는 각각 순수한 성분의 인장강도를 나타내고  $\phi_1$ 과  $\phi_2$ 는 각각의 부피분율을 나타낸다. 이때 부피분율은 식 (2)로 구해진다.

$$\phi_1 = \frac{w_1/\rho_1}{w_1/\rho_1 + w_2/\rho_2} \quad (2)$$

여기서,  $w_1$ ,  $w_2$ 는 1과 2성분의 무게 분율이고,  $\rho_1$ ,  $\rho_2$ 는 1과 2성분의 각각의 밀도이다. 상용성이 없는 블렌드의 경우는 식 (1)에 의해 계산된 인장강도의 값을 따를 것으로 예상했으나 결과를 보면 위의 계산 값으로부터 양성(positive deviation)쪽



**Figure 2.** SEM images of (a) PA66; (b) PPE-L; (c) PA66/PPE-L (80/20) blend; (d) PPE-H; (e) PA66/PPE-H (80/20) blend (All images contain 2 phr of MWCNT.).

**Table 1. Physical Properties of PA66/PPE Blends Containing 3 phr MWCNT**

| Polymer codes     | Tensile strength (N/mm <sup>2</sup> ) | Tensile modulus (N/mm <sup>2</sup> ) | Tensile elongation (%) | Flexural strength (N/mm <sup>2</sup> ) | Flexural modulus (N/mm <sup>2</sup> ) | Impact strength (J/m) | Surface resistivity (ohms/sq)( $\times 10^{-8}$ ) |
|-------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|------------------------|--|---------------------------------------|-----------------------|---|
| PA66              | 62( $\pm 2$ )                         | 2170( $\pm 10$ )                     | 6.8( $\pm 0.5$ )       | 62( $\pm 1$ )                          | 2090( $\pm 10$ )                      | 72( $\pm 3$ )         | 1340  |
| PA66/PPE-L(80/20) | 47( $\pm 1$ )                         | 2130( $\pm 10$ )                     | 5.9( $\pm 0.3$ )       | 44( $\pm 1$ )                          | 1580( $\pm 10$ )                      | 41( $\pm 1$ )         | 2.1   |
| PA66/PPE-L(60/40) | 43( $\pm 1$ )                         | 2090( $\pm 10$ )                     | 2.9( $\pm 0.1$ )       | 46( $\pm 1$ )                          | 1750( $\pm 25$ )                      | 26( $\pm 1$ )         | 6.2   |
| PA66/PPE-L(40/60) | 37( $\pm 1$ )                         | 1920( $\pm 20$ )                     | 3.8( $\pm 0.3$ )       | 49( $\pm 1$ )                          | 1870( $\pm 20$ )                      | 26( $\pm 3$ )         | 10.3  |
| PA66/PPE-L(20/80) | 39( $\pm 1$ )                         | 1860( $\pm 10$ )                     | 6.8( $\pm 0.5$ )       | 45( $\pm 1$ )                          | 1610( $\pm 10$ )                      | 29( $\pm 1$ )         | 32.5  |
| PPE-L             | 41( $\pm 1$ )                         | 1910( $\pm 10$ )                     | 11.7( $\pm 1.0$ )      | 51( $\pm 1$ )                          | 1790( $\pm 10$ )                      | 70( $\pm 3$ )         | 1850  |
| PA66/PPE-H(80/20) | 60( $\pm 2$ )                         | 2130( $\pm 10$ )                     | 7.7( $\pm 0.3$ )       | 57( $\pm 1$ )                          | 1940( $\pm 10$ )                      | 44( $\pm 3$ )         | 1.9   |
| PA66/PPE-H(60/40) | 56( $\pm 1$ )                         | 2100( $\pm 10$ )                     | 4.9( $\pm 0.1$ )       | 57( $\pm 1$ )                          | 1950( $\pm 10$ )                      | 28( $\pm 1$ )         | 5.2   |
| PA66/PPE-H(40/60) | 43( $\pm 1$ )                         | 1950( $\pm 12$ )                     | 3.4( $\pm 0.1$ )       | 44( $\pm 1$ )                          | 1750( $\pm 10$ )                      | 22( $\pm 3$ )         | 11.3  |
| PA66/PPE-H(20/80) | 46( $\pm 1$ )                         | 1800( $\pm 10$ )                     | 4.9( $\pm 0.1$ )       | 41( $\pm 1$ )                          | 1360( $\pm 5$ )                       | 27( $\pm 1$ )         | 34.6  |
| PPE-H             | 58( $\pm 2$ )                         | 1900( $\pm 10$ )                     | 7.1( $\pm 0.2$ )       | 48( $\pm 1$ )                          | 1500( $\pm 10$ )                      | 60( $\pm 1$ )         | 1750  |

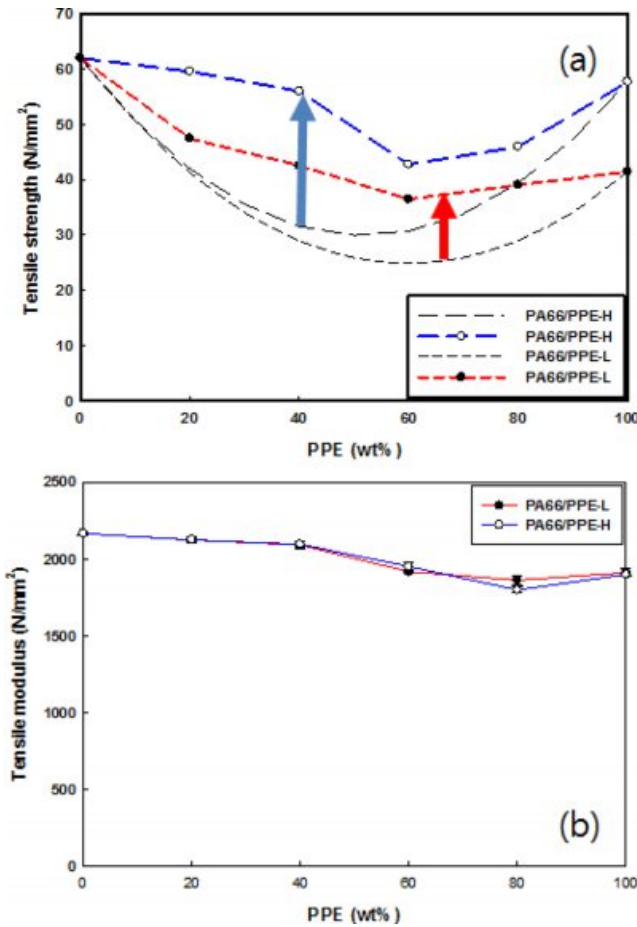
**Table 2. Physical Properties of PA66/PPE-L (80/20) Blends with MWCNT Content**

| Polymer codes                | Tensile strength (N/mm <sup>2</sup> ) | Tensile modulus (N/mm <sup>2</sup> ) | Tensile elongation (%) | Flexural strength (N/mm <sup>2</sup> ) | Flexural modulus (N/mm <sup>2</sup> ) | Impact strength (J/m) | Surface resistivity (ohms/sq)( $\times 10^{-8}$ ) |
|------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|------------------------|--|---------------------------------------|-----------------------|---|
| PA66/PPE-L                   | 36( $\pm 1$ )                         | 1870( $\pm 10$ )                     | 7.5( $\pm 0.5$ )       | 52( $\pm 1$ )                          | 1090( $\pm 50$ )                      | 32( $\pm 2$ )         | $1 \times 10^8$                                   |
| PA66/PPE-L(0.5) <sup>a</sup> | 38( $\pm 1$ )                         | 1930( $\pm 10$ )                     | 7.4( $\pm 0.4$ )       | 50( $\pm 1$ )                          | 1180( $\pm 50$ )                      | 35( $\pm 1$ )         | -   |
| PA66/PPE-L(1.0)              | 41( $\pm 2$ )                         | 1990( $\pm 10$ )                     | 7.2( $\pm 0.1$ )       | 49( $\pm 2$ )                          | 1350( $\pm 50$ )                      | 39( $\pm 1$ )         | 1350  |
| PA66/PPE-L(2.0)              | 47( $\pm 1$ )                         | 2130( $\pm 10$ )                     | 5.9( $\pm 0.3$ )       | 44( $\pm 1$ )                          | 1580( $\pm 10$ )                      | 41( $\pm 1$ )         | 2.1   |
| PA66/PPE-L(3.0)              | 43( $\pm 1$ )                         | 2060( $\pm 10$ )                     | 2.9( $\pm 0.3$ )       | 41( $\pm 1$ )                          | 1460( $\pm 50$ )                      | 36( $\pm 1$ )         | 0.1   |

<sup>a</sup>Blank represents for the MWCNT content (phr).

으로 벗어나는 것을 알 수 있다. 이는 MWCNT의 첨가로 부터 온 결과로 생각된다. 흥미로운 것은 PA66가 상대적으로 많은 블렌드에서 PA66/PPE-H가 PA66/PPE-L보다 계산 값으로부터 더 양성쪽으로 벗어나는 것을 알 수 있다. 이는 점도가 높은 PPE-H가 점도가 낮은 PPE-L보다 PA66와 MWCNT와의 친화력을 더 증가시킨 결과로 판단된다. Figure 3(b)를 보면 PPE 함량에 따라 인장탄성률은 점차 감소하는 경향을 보이고 있지만 점도가 다른 2종류의 PPE에 따른 차이점은 발견되지 않았다. Table 1에서 보이는 것과 같이 굴곡강도의 경우도 인장강도의 경우와 비슷한 경향을 보이고 있다. 그러나 PPE의 함량이 많은 PA66/PPE(40/60, 20/80) 블렌드의 경우 인장강도의 경우와 달리 PA66/PPE-L 블렌드의 굴곡강도 값이 PA66/PPE-H의 블렌드의 값보다 크게 나타나는 것은 PPE-L과 PPE-H의 굴곡강도의 차이로부터 기인한 것이고 MWCNT의 영향은 없는 것으로 판단된다. 굴곡탄성률의 경우도 굴곡강도의 경우와 같은 결과를 보이고 있다. Figure 4(a)에서 보이는 충격강도의 경우 전형적인 비상용 블렌드의 거동을 보이고 있다. 비록 3 phr의 MA-graft-SEBS가 사용되

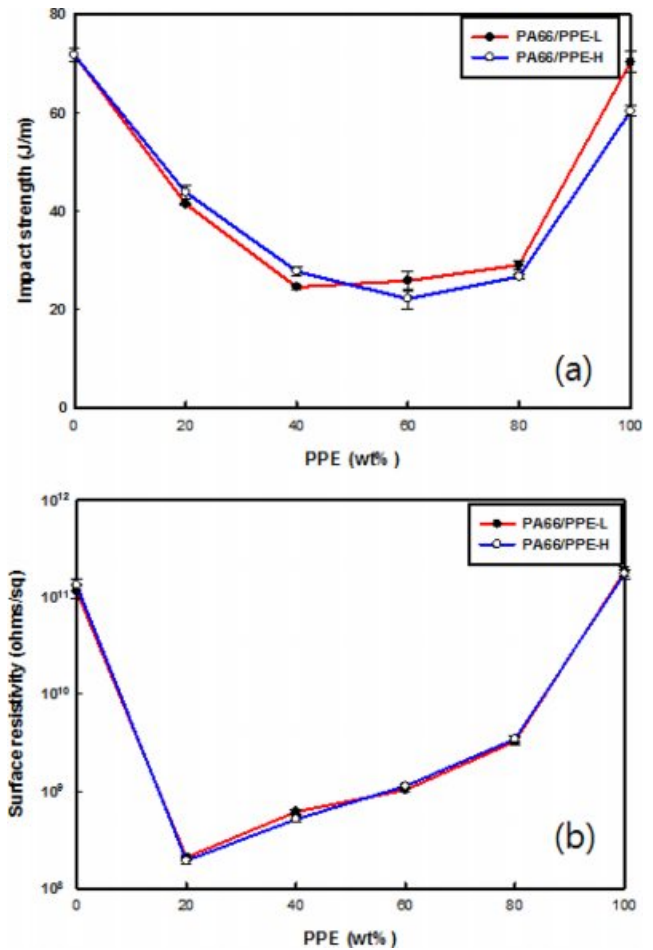
었으나 그 효과가 미비하여 단순히 섞여있는 상태이기 때문에 강한 충격에 대한 접착성이 굉장히 낮은 상태이기 때문이다. 이는 Figure 2(c)의 SEM 이미지에서 PA66과 PPE 계면 간의 경계가 뚜렷한 것에서도 확인할 수 있다. Figure 4(b)에서 보이는 블렌드의 표면저항의 경우는 점도가 다른 2종류의 PPE에 따른 차이는 관찰되지 않았지만 PA66/PPE(80/20) 블렌드에서 가장 낮은 값의 표면저항 값을 관찰할 수 있었다. 흥미로운 것은 Figure 2에서 보였듯이 상대적으로 MWCNT는 PPE보다는 PA66에 분산이 잘되는 것을 알 수 있었다. 그러나 표면저항값을 측정 한 결과 PA66는  $1.34 \times 10^{11} \Omega/\text{sq}$ 의 값이 측정되었고 PPE-H와 PPE-L의 평균값으로는  $1.81 \times 10^{11} \Omega/\text{sq}$ 의 값으로 큰 차이가 관찰되지 않았다. 이는 첨가된 MWCNT의 양인 2 phr은 PA66에는 임계농도에 충분히 도달하지 않은 농도임을 알 수 있고 상대적으로 분산이 안되는 PPE는 비록 큰 덩어리로 존재하지만 덩어리들 사이에 MWCNT가 어느 정도 가교역할을 하는 것으로 생각된다. PA66/PPE(80/20) 블렌드에서 낮은 값의 표면저항을 나타내는 이유는 효과적인 MWCNT의<sup>14</sup> 양(PA66/PPE/MWCNT



**Figure 3.** (a) Tensile strength; (b) tensile modulus of PA66/PPE-L and PA66/PPE-H containing 2 phr MWCNT with PPE content. Dotted lines are the values calculated with eq. (1).

에서 PA66에 있는 MWCNT의 양)이 PA66에 있는 MWCNT의 양의 1.3배에 해당하므로 표면저항값이 PA66에 비해 낮은 값이 얻어진다고 생각된다. PPE의 함량이 증가하면서 다시 블렌드의 표면저항값이 증가하는 것은 효과적인 MWCNT의 양은 증가하지만 PA66 도메인에서 MWCNT의 응집이 심하게 되어 결국 표면저항값이 증가하는 것으로 판단된다.

**MWCNT 함량에 따른 PA66/PPE 블렌드의 물리적 성질.** PA66/PPE 블렌드에서 전기전도성이 가장 우수한 PA66/PPE-L(80/20) 블렌드를 선정하여 MWCNT의 함량에 따른 물리적 성질을 측정하고 그 결과를 Table 2에 나타내었다. MWCNT 함량별 인장 시험에서는 MWCNT의 함량이 증가할수록 인장강도와 인장탄성률은 증가하다가 MWCNT의 함량이 2 phr인 경우에 인장강도와 인장탄성률이 각각 47 N/mm<sup>2</sup>과 2130 N/mm<sup>2</sup>의 최대값을 보이고 함량이 더 증가하면 약간 감소하는 경향을 보이고 있다. 이는 PA66/PPE-L 블렌드에 MWCNT 2 phr까지는 분산이 잘 되어 인장성질이 증가하다가 그 이상의 함량에서는 MWCNT가 응집이 되어 인장성질



**Figure 4.** (a) Impact strength; (b) surface resistivity of PA66/PPE-L and PA66/PPE-H containing 2 phr MWCNT with PPE content.

이 감소하는 경향을 보인다. 굴곡탄성률과 충격강도의 경우도 인장성질과 유사한 결과를 나타내고 있지만 굴곡강도의 경우는 PA66/PPE-L 블렌드와 MWCNT의 계면 결합력이 약하여 MWCNT의 함량에 따라 일정하게 감소하는 경향을 보이고 있다. PA66/PPE-L(80/20) 블렌드의 표면저항값은 MWCNT의 함량에 따라 감소하다가 2 phr에서 임계농도를 보이고 있다. 이는 앞에서 설명한대로 PA66에 MWCNT의 2 phr 함량은 임계농도에 도달하지 못했지만 PA66/PPE-L(80/20) 블렌드에서는 효과적인 MWCNT의 함량으로 인해 임계농도에 도달하였다고 생각된다.

### 결론

본 연구에서는 용융점도가 다른 2종류의 PPE를 사용하여 MWCNT 2 phr를 함유한 PA66/PPE-L과 PA66/PPE-H 블렌드를 제조하여 물리적 성질을 측정하였고 PA66/PPE-L(80/20) 블렌드에 MWCNT의 함량에 따른 물리적 성질의 변화를 관

찰하였다. 용융점도의 차이가 있는 2종류의 PPE를 사용한 결과 MWCNT로 인한 PA66와 PPE 계면의 변화가 생기고 이로 인해 최종 블렌드의 물리적 성질의 차이가 있음을 알 수 있었다. 또한 PA66와 PPE의 함량에 따른 매트릭스와 도메인의 분포가 달라짐으로 인해 나타나는 물리적 성질의 차이도 관찰되었다. 특히 PA66와 PPE의 함량이 80/20인 경우에 MWCNT의 투입으로 인한 전기전도성 부여 효과 또한 가장 컸다. PA66/PPE-L 블렌드의 함량을 80/20으로 고정하고 MWCNT의 함량을 변화시켜가며 물리적 성질을 측정한 결과 MWCNT의 함량이 2 phr까지는 MWCNT의 보강 효과로 인한 물리적 성질의 향상이 얻어졌고 그 이상의 함량에서는 MWCNT의 응집으로 인하여 물리적 성질의 감소가 나타났다. MWCNT 2 phr의 함량에서 PA66/PPE-L(80/20) 블렌드의 전기전도성이 가장 우수하고 물리적 성질을 고려할 때 정전도장용 복합소재로서의 가능성이 있다고 판단된다.

**감사의 글:** 본 연구는 금오공과대학 학술연구비에 의하여 연구된 논문으로 이에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

1. M. I. Kohan, *Nylon Plastics Handbook*, Hanser, Cincinnati, 1995.
2. J. L. Yang, Z. Zhang, and H. Zhang, *Compos. Sci. Technol.*, **65**, 2374 (2005).
3. W. Tang, X. Hu, J. Tang, and R. Jin, *J. Appl. Polym. Sci.*, **106**, 2648 (2007).
4. C. R. Chiang and F. C. Chang, *Polymer*, **38**, 4807 (1997).
5. Y. Pan, Y. Huang, B. Liao, and G. Cong, *J. Appl. Polym. Sci.*, **61**, 1111 (1996).
6. S. C. Tjong and Y. C. Ke, *Polym. Eng. Sci.*, **36**, 2626 (1996).
7. S. Wu, *Polymer Interface and Adhesion*, Dekker, New York, 1982.
8. C. J. Lee, R. Salehiyan, D. S. Ham, S. K. Cho, S. J. Lee, K. J. Kim, and W. J. Choi, *Polymer*, **84**, 198 (2016).
9. B. D. Favis and J. M. Willis, *J. Polym. Sci., Part B: Polym. Phys.*, **28**, 2259 (1990).
10. P. H. P. Macaubas and N. R. Demarquette, *Polymer*, **42**, 2543 (2001).
11. M. Xanthos, *Polym. Eng. Sci.*, **28**, 1392 (1988).
12. M. J. Folkes and P. S. Hope, *Polymer blends and alloys*, Chapman and Hall, London, 1994.
13. E. Nolley, J. W. Barlow, and D. R. Paul, *Polym. Eng. Sci.*, **20**, 364 (1980).
14. S. C. Mun, M. Kim, C. S. Lee, M. H. Lee, Y. Son, and O. O. Park, *Macromol. Res.*, **21**, 356 (2013).