

탄소나노튜브(CNT) 함량에 따른 전력케이블용 반도체 재료(층)의 전기적/기계적 특성 연구

論 文
55C-8-1

Electrical and Mechanical Properties of Semiconducting Shield for Power Cable by Carbon Nanotube Content

梁鍾錫* · 李慶龍** · 申同訓* · 朴大熙†
(Jong-Seok Yang · Kyoung-Yong Lee · Dong-Hoon Shin · Dae-Hee Park)

Abstract - In this study, we have investigated electrical and mechanical properties of semiconducting materials for power cable caused by CNT. Specimens were made of sheet form with the four of specimens for measurement.

Volume resistivity of specimens was measured by volume resistivity meter after 10 minutes in the pre-heated oven of both 23 ± 1 [°C] and 90 ± 1 [°C]. And stress-strain of specimens was measured by TENSOMETER 2000. A speed of measurement was 200[mm/min], ranges of stress and strain were 400[Kgf/Cm²] and 600[%].

From this experimental results, the volume resistivity had different properties because of PTC/NTC tendency at between 23[°C] and 90[°C]. Also volume resistivity was low by increasing the content of CNT. It means that a small amount of CNT has a excellent electrical properties. And stress was increased, while strain was decreased by increasing the content of CNT. Thus, we could know that a small amount of CNT has a excellent electrical and mechanical properties.

Key Words : Semiconducting Materials, CNT, EEA, Volume Resistivity, Stress-Strain

1. 서 론

재료 부품의 고기능, 집적화, 소형화 됨에 따라 재료의 구조와 화학 조성을 나노 단위로 제어하려는 연구가 현재 활발히 진행되고 있다. 이러한 연구는 나노 과학이라는 학문의 한 분야로 자리 잡고 있다. 재료의 크기가 줄어들어서 나노 크기가 되면 그것의 특성이 변하게 된다. 이러한 변화로 인해서 기존 재료와는 현저하게 다른 특성을 나타내게 되며, 이러한 특성을 이용하여 더욱 우수한 특성을 갖는 소재를 개발하고 이것을 활용하는 연구가 활발하게 이루어지고 있다 [1]. 이러한 나노 소재들 중 가장 주목을 받고 있는 재료 중의 하나가 탄소나노튜브(CNT, Carbon nanotube)이다.

탄소나노튜브는 Kroto 와 Smally가 탄소의 동소체의 하나인 풀러린(Fullerene)을 처음으로 발견한 이후, 1991년 일본 NEC 연구소의 Iijima 박사가 TEM을 이용하여 두 개의 탄소 전극간의 아크에 의해 발생된 탄소 부산물을 관찰하는 과정에서 탄소나노튜브를 발견하였다. 탄소나노튜브는 탄소 원자들이 육각형 벌집 모양의 원통형 구조로 강한 공유결합을 가지고 있다. 일반적으로 1~100nm 직경을 지니며 아스펙트비(길이/직경)가 대략 100~1000으로 높은 이방성을 가진다.

따라서 적은 첨가량(1~6[wt%])으로도 우수한 전기전도성과 높은 기계적 특성을 보여서 도전성 소재로서의 응용 검토가 활발히 이루어지고 있다.

지중송배전 케이블 반도체층에는 전도성 카본 블랙이 다량 함유 되어 있다. 구 형태를 갖는 카본블랙은 긴 튜브 형태의 탄소나노튜브 보다 비중이 매우 높다. 이러한 특성을 기반으로 하여, 반도체층 재료 공정에서 반도체성을 갖게 하기 위해 약 35[wt%]~40[wt%]의 카본블랙을 첨가하는 제조 과정을 고려 해볼 때, 적은 양을 갖고서 충분한 전기적 특성 및 기계적 특성을 나타낼 수 있는 탄소나노튜브를 사용하는 것을 매우 의미 있는 연구라고 하겠다.

본 논문에서는 높은 이방성을 갖는 탄소나노튜브를 베이스 수지인 EEA (Ethylene Ethyl Acrylate, Mitsui Dupont)에 첨가하여 우수한 분산성을 도모하였다. 그리고 카본블랙/EEA와 카본나노튜브/EEA의 전기적 및 기계적 특성을 비교 및 분석하였다.

2. 시편제작 및 실험방법

2.1 시편 제작

본 논문에서는 EEA를 베이스 폴리머로 사용하였다. 조성비는 표 1과 같다. 표 1에서 보는 바와 같이 전도성 탄소나노튜브 (Hollow CNT75, (주)나노카본)의 함량을 변수로 하였으며 그 함량은 각각 2[wt%], 4[wt%], 그리고 6[wt%]이었다. 탄소나노튜브는 기상합성법 (VG, Vapor Phase Growth)으로 제조 하였다. 기상합성법은 탄소나노튜브를 대량으로 합성하기에 유리한 방법으로 제안되고 있으며, 기판을 사용하지 않고 반응로 안에 반응가스와 촉매금속을 직접 공급하여 기상에서 탄소나노튜브를 합성하는 방법이다.

그림 1에서 보는 바와 같이 사용된 탄소나노튜브는 다층

† 교신저자, 終身會員 : 圓光大 電氣電子및情報工學部 教授 · 工博

E-mail : parkdh@wonkwang.ac.kr

* 學生會員 : 圓光大 電氣電子및情報工學部 碩士課程

** 正 會 員 : 圓光大 電氣電子및情報工學部 博士課程

接受日字 : 2006年 5月 6日

最終完了 : 2006年 7月 4日

벽 탄소나노튜브 (MWCNT)로써, 대통형태로 감기는 흑연 층의 두께 이상의 층으로 이루어져 있으며 튜브로 말리는 흑연층이 탄소나노튜브의 길이 축에 평행하지 않고 사선으로 감겨있으면서 마치 종이컵이 계속해서 쌓여서 만들어져 있는 형태를 지니고 있다고 하여 지어진 이름으로 탄소나노튜브의 기본 형태에서 벗어나 있으나 분산성이 높아 복합재료 분야에서 주로 유용한 형태이다.

표 1. 시편들의 조성

Table 1. Composition of specimens

Unit: wt%

Specimen	EEA	CNT	CB	Antioxidant	Additive	Agent	Total
CNT2	95.5	2	-	0.3	0.2	2	100
CNT4	93.5	4	-	0.3	0.2	2	100
CNT6	91.5	6	-	0.3	0.2	2	100
CB30	69	-	30	0.3	0.2	0.5	100

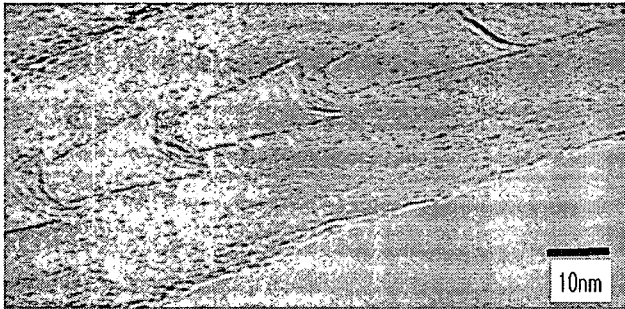


그림 1. MWCNT의 TEM사진

Fig. 1. TEM image of MWCNT

그리고 편의상 측정용 시료를 각각 CNT2, CNT4, 그리고 CNT6, 현재 반도체층 재료로 사용되고 있는 시편을 CB30으로 명명하였다. 시편은 펠렛형의 시료를 70[°C]~100[°C]의 롤러에서 5분간 1차 혼련을 한 후 180[°C]에서 20분간 200[kg/cm²]의 압력으로 프레스를 하여 시트상으로 제작하였다. 그림 2는 본 실험에서 사용된 EEA 베이스 수지의 화학적 구조를 나타낸다.

EEA = Poly(Ethylene-CO-Ethyl Acrylate)

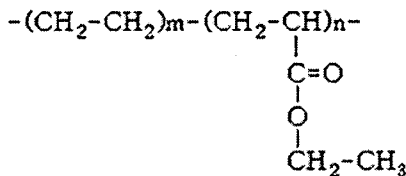


그림 2. 시편의 화학적 구조

Fig. 2. Chemical structure of specimens

2.2 실험방법

2.2.1 체적저항 측정

체적저항은 주어진 순수한 물질의 고유저항이며 다음의 식과 같이 계산된다. 전기 이온에서 어떤 물질의 저항 R 은

전류가 흐르는 방향에 수직인 단면 A에 반비례하고 전류가 흐르는 방향과 평행한 방향의 L에 비례한다. 이것을 수식으로 나타내면 식(1)과 같다.

$$R \propto L/A, R = (\text{상수}) \times L/A \tag{1}$$

여기서 상수는 체적저항으로 알려져 있다. 단위는 [Ohm-cm/cm] 이므로 [Ohm-cm]가 된다. 그러므로 위의 식은 식 (2)와 같다.

$$\rho v = RA/L \tag{2}$$

순수한 물질의 저항은 치수를 알고 있는 물질 (즉 길이 : L, 폭 : W, 두께 : t)의 저항을 측정하여 얻을 수 있다. 본 실험에서 사용된 시편은 두께 1[mm]의 시트로써 폭 30[mm], 길이 64[mm]이다. 그림 3과 같이 ASTM D991 [2]에 의해 시편의 양끝에 전극간 거리가 50[mm]가 되도록 silver paint를 양 끝단에 발랐다.

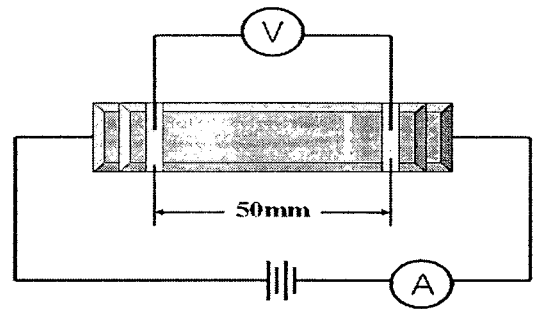


그림 3. 체적저항 실험 장치

Fig. 3. Volume resistivity experimental device

상온에서 최소 1시간 이상 건조시킨 후, 각 전극에 외부연결용 단자를 연결한다. 시험 환경은 상대 습도 50±5[%]에서 23±1[°C] 및 90±1[°C]로 예열된 oven에 시료를 넣고 10분간 방치한 후 저항을 측정하였다.

2.2 인장강도 측정

인장강도 특성은 재료의 인장 (시편을 양쪽에서 잡아당김) 시 재료가 받는 여러 가지 특성을 측정하는 시험항목으로서 플라스틱의 기계적 물성 시험 중 가장 일반적인 항목이다. 인장강도 (Tensile Strength)는 크게 항복점에서의 인장강도와 파단점에서의 인장강도로 나뉜다.

그림 4의 참고자료에서 보는 바와 같이 항복점 (Yield Point)은 재료가 받는 최고점에서의 힘을 의미하며, 파단점 (Break Point)은 재료가 끊어지는 시점에서의 힘을 말한다. 인장신율(Tensile Elongation)은 항복점, 파단 점에서 재료가 늘어난 정도를 측정하는 방법이며, 인장 신율은 길이변화 / 원래의 길이로 표현될 수 있다.

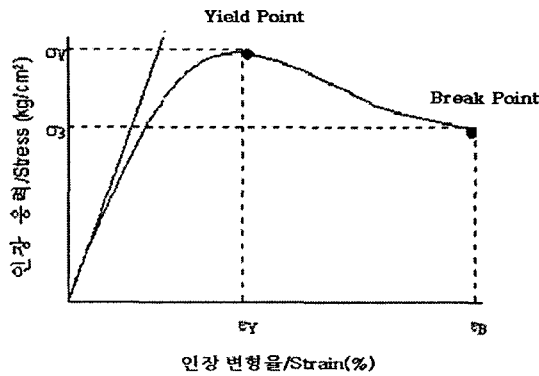


그림 4. 고분자의 전형적인 인장응력-인장변형 곡선[3]
Fig. 4. Typical stress-strain curve of polymer[3]

인장강도 (TENSOMETER 2000, Lab Tech) 실험은 그림 5에 나와 있듯이 ASTM D638 [4]에 의해 진행되었다. 측정 속도는 200[mm/min]이었고 stress-strain의 측정범위는 400[kgf/cm²]와 600[%]이었다. 그리고 실험은 3회 측정 후 측정치의 평균값을 제시하였다.

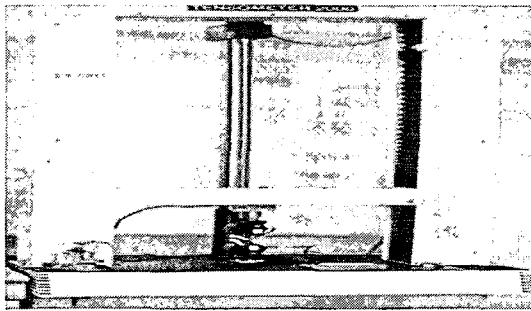


그림 5. 인장강도-신장을 실험 장치
Fig. 5. Stress-strain experimental device

3. 결과 및 검토

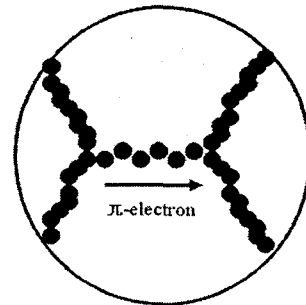
3.1 체적저항 측정

일반적으로 전기 전도도의 값은 체적저항의 값으로 대신 할 수 있다. 보통 반도체 재료의 경우에는 $10^0[\Omega \cdot \text{cm}] \sim 10^4[\Omega \cdot \text{cm}]$ 정도의 저항값을 갖는다. 실제적으로 모든 카본블랙은 어느 정도의 전기 전도기능을 갖고 있다. 고분자에 카본블랙이 혼련된 경우 전도성을 나타내는데 이러한 카본블랙의 전도기구는 매우 복잡하나 일반적으로 2가지 이론이 유력시 되고 있다.

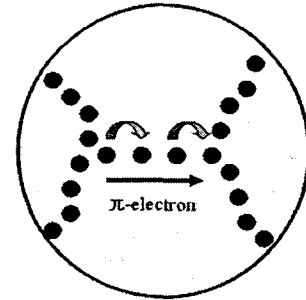
첫째, 구조설 (structure theory)로 연쇄상의 카본사슬을 통해서 전도가 일어난다는 이론이고, 둘째, 점핑설 (jumping theory)로 분산된 카본입자 사이를 전자가 점핑하여 전도된다는 이론이다. 참고로 두 번째 이론의 현상은 "Tunnel Effect"라고 한다. 그림 6 (a)와 같이 연쇄상의 카본사슬을 통한 전도기구에서는 연쇄상을 형성하기 위하여 카본블랙의 양이 충분해야 한다. 그러나 구조설로는 설명하기 곤란한 넓게 분산된 카본입자 사이의 전도 (그림 6 (b))는 전자가 수 nm의 갭 (최대 gap: 100[Å], gap이 100[Å] 이상이면 비전도성이 된다.)을 호핑해야만 일어날 수 있다. 따라서 소위 "Tunnel Effect"라고 알려진 전도기구가 제안되고 있다[5, 6].

아스펙트비 (길이/직경)가 대략 100~1000으로 높은 이방성을 가지는 탄소나노튜브 전도기구는 그림 6(c)와 같다. 높은 아스펙트비를 가지는 탄소나노튜브끼리 얽혀서 도전 네트워크를 형성한다. 이러한 나노 스케일의 네트워크가 모재를 빈틈없이 잘 눌러 열팽창을 억제하는 효과도 지니고 있다.

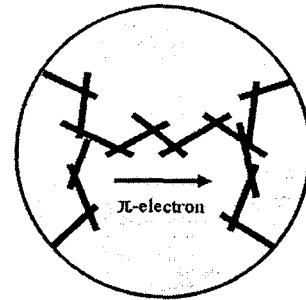
우수한 전기 전도도를 얻기 위해서 카본블랙이 갖추어야 할 중요한 성질은 첫째, 입자 크기가 미세해야 한다. 즉, 입자크기가 미세해지면 단위 부피당 카본블랙의 수가 증가되므로 입자간 거리가 좁아져서 전도성이 커지게 된다. 둘째, high structure를 가진 카본블랙일수록 전자가 통과할 수 있는 통로가 증가하게 되므로 전도성이 향상된다. 셋째는 기공도 (porosity)가 높으면 단위중량당 카본블랙의 수가 증가되므로 입자간 거리가 줄게 되어 전도도가 커진다. 넷째로는 휘발성분이 전자의 tunneling을 방해하여 전도도를 저하시키는 역할을 하므로 낮은 휘발성을 가진 카본블랙이어야 한다 [7~11].



(a) 구조설 (structure theory)



(b) 점핑설 (jumping theory)



(c) 탄소나노튜브

그림 6. 카본블랙과 탄소나노튜브의 전도기구
Fig. 6. Carbon black and Carbon nanotube conductivity mechanism

그림 7은 23℃ 및 90℃에서 시편들의 체적저항을 나타낸 것이다. 체적저항은 카본블랙 함량 30[wt%], 23[℃]에서는 98[Ω · cm]로 나타났으며 90[℃]에서는 267[Ω · cm]로 나타났다. 카본나노튜브의 함량이 2[wt%]에서 6[wt%]로 증가함에 따라 23[℃]에서는 82[Ω · cm]~176[Ω · cm]의 범위에서 감소하였다. 90[℃]에서는 23[℃]에서와 마찬가지로 카본블랙의 함량이 증가함에 따라 체적저항은 감소하지만 23[℃]에 비해 체적저항이 급격하게 증가하는 것을 알 수 있다. 이것은 용융온도 이전에서, 베이스 수지 내 온도 상승에 따라 체적팽창이 증가하여 탄소나노튜브 간격이 늘어나는 PTC (positive temperature coefficient)현상과 용융온도 이후에 탄소나노튜브가 재배열을 하여 새로운 전도성 네트워크를 형성하는 NTC (negative temperature coefficient)현상 때문이다[12, 13].

즉, PTC 현상은 온도의 상승에 따라 용융온도 근처에 오면 베이스 수지 내 탄소나노튜브 이격거리의 증가로 인해 전도성 네트워크가 파괴되었다고 할 수 있다. 이러한 전도성 네트워크 파괴는 전자의 통로를 방해하므로 체적저항이 증가를 하게 된다. 반면 NTC 현상은 베이스 수지의 결정 용융이 진행됨에 따라 유동성을 가진 탄소나노튜브 들이 자유로이 재배열하여 새로운 전도성 네트워크를 형성하게 됨으로써 전자들의 이동통로가 증가하게 되고, 이로 인하여 체적저항 값이 낮아지는 것으로 설명된다. 참고로 본 실험에 사용된 시편들은 용융온도가 63[℃]~73.61[℃]의 범위이다. 따라서 시편들은 이 온도 근처까지는 체적팽창으로 인한 체적저항이 급속히 증가할 것이다. 반면 이 온도 이후부터는 카본블랙의 재배열에 따른 새로운 전도성 네트워크가 형성됨으로써 다소 체적저항이 감소할 것이다.

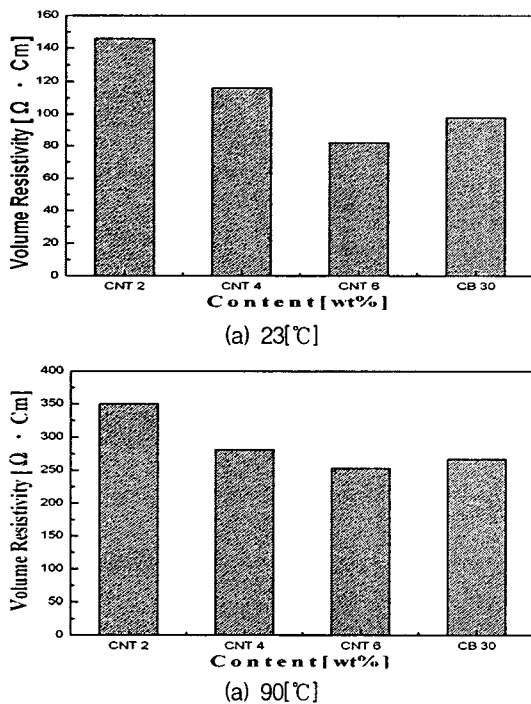


그림 7. 카본블랙, 탄소나노튜브 함량과 온도에 따른 시편들의 체적저항

Fig. 7. Volume resistivity of specimens by content and temperature of CB, CNT

그림 7에서는 23[℃]에서 90[℃] 사이의 체적저항 값이 제시되어 있지 않다. 그래서 참고자료 그림 8을 보면, 용융온도가 약 150[℃]인 대부분의 시편들은 150[℃] 부분까지 체적저항이 급속히 증가하고 있으며, 이후부터는 체적저항이 서서히 감소하고 있는 것을 알 수 있다. 즉, 용융온도 이전까지는 PTC 현상이, 이후부터는 NTC 현상이 가장 두드러진 것을 알 수 있다. 이로써 본 실험에서 사용된 시편들도 용융온도를 기점으로 하여 23[℃]에서 용융온도 근처까지는 PTC 현상이, 용융온도 이후부터는 NTC 현상이 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 또한 그림 7에서 EEA/카본블랙과 EEA/탄소나노튜브는 체적저항이 대체적으로 유사한 것을 알 수 있다. 한 가지 주목할 점은 탄소나노튜브는 일반 카본블랙에 비해 첨가량이 약 1/7 정도로 적게 첨가되었다는 것이다.

위 결과로부터 체적저항은 CNT6[wt%]가 가장 적게 나타났다. 또한 PTC와 NTC의 영향은 카본블랙을 사용하였을 때보다 탄소나노튜브를 사용하였을 때 적게 나타났다. 이로써 탄소나노튜브의 적은 첨가량으로도 충분히 반도체 조성물의 전기적 특성을 향상시킬 수 있음을 알 수 있다.

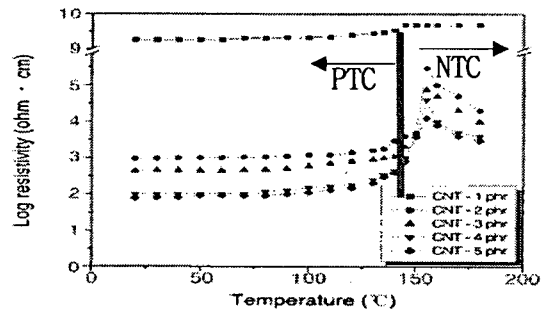


그림 8. 탄소나노튜브의 함량에 따른 CNT/HDPE 복합재료의 PTC와 NTC 곡선[14]

Fig. 8. PTC and NTC curves of CNT/HDPE composite by CNT content[14]

3.2 인장강도-신장을 측정

그림 9는 CNT함량 2[wt%]에서 6[wt%], 카본블랙 함량 30[wt%]에 따른 반도체층 재료의 강도와 신장율을 나타내고 있다. 점탄성을 갖는 본 시료는 stress (강도)와 strain (신장율)이 함께 작용한다. 순수한 탄성을 보이는 물질의 강도 (stress, σ)와 신장율 (strain, ϵ)의 관계는 선형으로서 식 (3)과 같이 표시할 수 있다. 여기서 C는 상수를 의미한다.

$$\sigma = C \times \epsilon \tag{3}$$

한편 순수한 점성을 보이는 물질의 전단강도 (shear stress, τ)는 신장율 속도 (rate of strain, $d\epsilon/dt$)에 비례하여 식 (4)와 같이 표시된다.

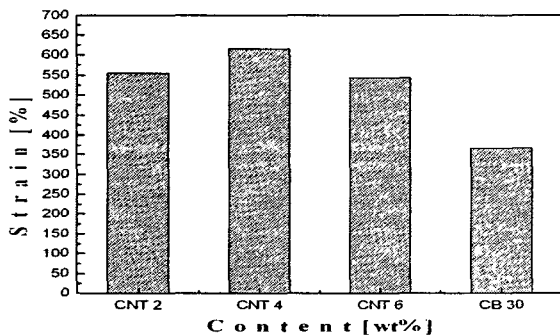
$$\tau = C \times d\epsilon/dt \tag{4}$$

상기의 식 3과 4를 각기 Hook의 법칙과 Newton의 법칙이라고도 하며, 전자의 경우에는 강도가 신장율에 비례하지만 신장율 속도에는 무관하고, 후자는 강도가 단지 신장율

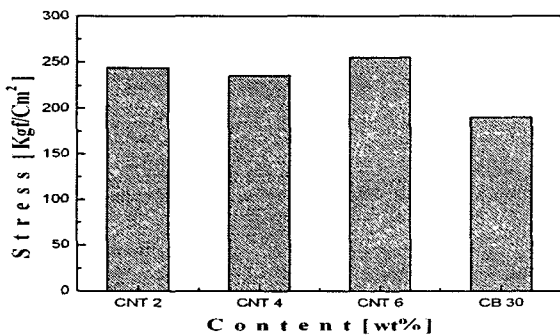
속도와 관련되어 있고 신장을 자체의 크기에는 의존하지 않는다는 것을 의미한다.

또한 에너지 측면에서 비교하자면 자극 (input)으로 공급되는 에너지가 아무런 손실 없이 물질에 전달되는 성질의 것을 탄성이라 하며 공급된 에너지의 일부가 열 등의 에너지 형태로 손실되는 성격을 지닌 것을 점성이라 할 수 있다. 그러나 위의 식 3 및 4는 극히 이상적인 상황을 의미할 뿐이며, 실제로 존재하는 물질 중에 두식을 완벽히 만족하는 것은 없다. 고분자의 경우에는 이 두 가지의 이상적인 물질의 어느 중간 성격에 해당하는 거동을 보이며, 따라서 점성과 탄성을 함께 지니고 있다는 의미에서 점탄성을 지니고 있다 [3, 15].

그림 9의 시편들은 점탄성을 갖는 고분자로서, 일정 하중에 의해 어느 지점까지 직선적으로 강도를 발휘하는 탄성영역 (식 (3)에 따름)과 이 영역을 벗어난 후 강도와 함께 신장율이 급격하게 증가하는 점성영역 (식 (4)에 따름)이 동시에 나타나고 있다. 탄소나노튜브 함량이 2[wt%]에서 6[wt%]로 증가할 수록 인장강도 수치는 244[kgf/cm²]에서 255[kgf/cm²]로 증가하였다. 신장율은 탄소나노튜브 함량이 4[wt%]일 때 가장 높게 나타났다. 반면 카본블랙 30[wt%]일 때는 다량의 함량에도 불구하고 신장율은 365[%], 인장강도는 190[kgf/cm²]로 나타나서 탄소나노튜브보다 현저하게 낮게 나타났다.



(a) Strain



(b) Stress

그림 9. 카본나노튜브와 카본블랙의 함유량에 따른 인장강도-신장율

Fig. 9. Stress-Strain of semiconducting materials by CNT and carbon black content

EEA/탄소나노튜브의 인장강도는 EEA/카본블랙 보다 더 우수한 것을 알 수 있다. 특히 일반 카본블랙이 함유된 조성

물에 비해 첨가량이 약 1/7 정도로 적게 첨가된 탄소나노튜브 함유 혼합물의 인장강도가 일반 카본블랙 함유 혼합물에 비하여 매우 우수함을 나타냈다.

4. 결 론

체적저항 측정에서는 탄소나노튜브의 함량이 증가함에 따라 체적저항이 감소하였다. 이것은 탄소나노튜브 간격이 줄어들어 전기 전도성이 향상되었기 때문이다. 또한 23[°C]와 90[°C]에서 알아본 체적저항은 서로 큰 차이를 나타내는 것을 알 수 있었다. 이것은 온도 상승에 따라 용융온도 이전에서 베이스 수지의 체적팽창으로 인해 탄소나노튜브 간격이 늘어남으로써 발생하는 PTC 현상과 용융온도 이후 베이스 수지내의 탄소나노튜브가 재배열하여 새로운 전도성 네트워크를 형성함으로써 체적저항이 다소 감소하는 NTC 현상 때문이다. 또한 카본블랙을 함유한 시편에서도 위와 같은 현상이 나타났다. 이 실험에서 탄소나노튜브의 적은 첨가량으로도 충분히 반도체 조성물의 전기적 특성을 향상시킬 수 있음을 알 수 있었다.

인장강도 측정에서 탄소나노튜브의 함량이 증가함에 따라 인장강도는 증가하였다. 신장율은 탄소나노튜브 함량이 4[wt%]일 때 가장 높게 나타났다. 그러나 카본블랙을 함유한 시편에서는 인장강도와 신장율 모두 현저하게 낮게 나타났다. 따라서, 적은 함량의 탄소나노튜브를 사용하더라도 높은 인장강도를 갖는 반도체 조성물의 기계적 특성을 만족시킬 수 있음을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력연구원 (R-2005-7-100)주관으로 수행된 과제임.

참 고 문 헌

- [1] 김현철, "탄소나노튜브를 첨가한 나노 복합재료의 기계적/물리적 특성 변화 연구" pp. 1-2, 2002
- [2] Standard Test Method for Rubber Property-Volume Resistivity of Electrically Conductive and Antistatic Products, Annual Book of ASTM Standards D991, Vol. 08.01, pp. 172-176, 1998.
- [3] 김성철 외, 고분자공학I, 회중당, 1994, pp. 2-337.
- [4] Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics, Annual Book of ASTM Standards D638, Vol. 08.01, pp. 52-64, 1998.
- [5] 한재홍, 김상준, 권오형, 강희태, 서광석, "반도체층 내 불순물이 전력케이블의 신뢰도에 미치는 영향", 대한전기학회 논문지, Vol. 46, No. 1, pp. 19-27, 1997.
- [6] S. A. Boggs, M. S. Mashikian, "Role of Semiconducting Compounds in Water Treeing of XLPE Cable Insulation", IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 10, No. 1, pp. 23-28, 1994.

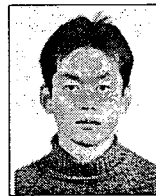
- [7] 한재홍, 입장섭, 이동영, "전력케이블용 반도체 재료의 설계기술", 한국전기전자재료학회 논문지, Vol. 13, No. 2, pp. 12-17, 2000.
- [8] J. Hjerrild, J. Holboll, M. Henriksen, S. Boggs, "Effect of semicon-dielectric interface on conductivity and electric field distribution", Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on, Vol. 9, No. 4, pp. 596-693, Aug. 2002.
- [9] Technical Report S-39, "Conductive Carbon Black in Plastics", Cabot Corporation.
- [10] S. S. Bamji, A. T. Bulinski, R. J. Densley, M. Matsuki, "Degradation mechanism at XLPE/semicon interface subjected to high electrical stress", Electrical Insulation, IEEE Transactions on, Vol. 26, No. 2, pp. 278-284, April 1991.
- [11] S. A. Boggs, "500Ω-m-Low Enough Resisitivity for a Cable Ground Shield Semicon?", IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 17, No. 4, pp. 26-32, 2001.
- [12] 김재철, 이종훈, 남재도, "HDPE 가교 결합과 계면 접촉력에 변화에 따른 PTC 특성 변화", polymer(korea), Vol. 27, No. 4, pp. 275-284, 2003.
- [13] 박수진, 송수완, 서민강, 이재락, "나노구조 카본블랙/HDPE 복합재료의 전기적 특성: 전자선 조사에 의한 PTC 특성변화", 한국복합재료 학회지, Vol. 16, No. 1, pp. 19-25, Feb. 2003.
- [14] 박수진 석수자, 이재락, 홍성권, "오존처리에 따른 탄소 나노튜브 강화 고밀도 폴리에틸렌 기지 복합재료의 PTC/NTC특성", polymer(korea), Vol. 29, No. 1, pp. 32-35, 2005.
- [15] J. S. Yoon, S. H. Oh, M. N. Kim, I. J. Chin, Y. H. Kim, "Thermal and mechanical properties of poly(l-lactic acid)-poly (ethyleneco-vinyl acetate) blends1," Polymer, Vol. 40, No. 9, pp. 2303-2312, April 1999.

저 자 소 개



양 증 석 (梁 鍾 錫)

1980년 06월 07일생. 2005년 원광대학교 전기 전자및정보공학부 졸업. 2006년 현재 원광대학교 대학원 전자재료학과 석사과정.
 Tel : 063-850-6349
 Fax : 063-857-6890
 E-mail : yjs8628@wonkwang.ac.kr



이 경 응 (李 慶 龍)

1976년 06월 07일생. 2003년 원광대학교 전기전자및정보공학부 졸업. 2005년 현재 원광대학교 대학원 전자재료학과 박사과정.
 Tel : 063-850-6349
 Fax : 063-857-6890
 E-mail : leeky@wonkwang.ac.kr



신 동 훈 (申 同 訓)

1981년 02월 25일생. 2006년 원광대학교 전기 전자및정보공학부 졸업. 2006년 현재 원광대학교 대학원 전자재료학과 석사과정.
 Tel : 063-850-6349
 Fax : 063-857-6890
 E-mail : shin99@wonkwang.ac.kr



박 대 희 (朴 大 熙)

1954년 11월 10일생. 1979년 한양대학교 전기공학과 졸업(학사). 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1989년 일본 오사카대학 대학원 졸업(공학박). 1979년~1991년 LG 전선연구소 선임연구원. 1999년~2000년 미국 미시시피 주립대학교 교환교수. 1992년~현재 원광대학교 전기전자 및 정보 공학부 교수. 2004~현재 전기융합신기술 연구센터 소장.
 Tel : 063-850-6349
 Fax : 063-857-6890
 E-mail : parkdh@wonkwang.ac.kr