

직류 전력케이블용 반도체 복합체의 전기적·기계적 특성

이기정¹, 서범식¹, 양종석², 성백룡², 박대희^{1,a}

¹ 원광대학교 정보통신과

² (주)디와이엠

Electrical and Mechanical Properties of Semiconductive Composites for DC Power Cable

Ki-Joung Lee¹, Bum-Sik Seo¹, Jong-Seok Yang², Baeg-Yong Seong², and Dae-Hee Park^{1,a}

¹ Department of Information & Communication Engineering, Wonkwang University, Iksan 570-749, Korea

² DYM Co. Ltd., Cheonan 330-290, Korea

(Received December 6, 2012; Revised December 20, 2012; Accepted December 22, 2012)

Abstract: In this paper, semiconducting shield specimens for a DC cable is fabricated and characterized by measurement of volume resistance, tensile strength, and the coefficient of expansion to show the electrical and mechanical characteristics of the semiconducting shield. Due to the PTC phenomenon, the volume resistance at 25°C increases rapidly in comparison to the volume resistance at 90°C. Since the compounding ratio of carbon black is low, the tensile strength and density become lower and the coefficient of expansion is increased. As the general specification of the tensile strength and density is 0.8 kgf/mm² and 150%, respectively, the fabricated specimen in this paper has excellent mechanical characteristic.

Keywords: DC Cable, Semiconductive material, Acetylene carbon black, Volume resistivity, Stress-strain

1. 서 론

최근 전력 수요가 증가함에 따라 안정적인 전력을 공급하기 위해 대규모 해상풍력단지 및 해저케이블의 포설로 장거리 송전이 늘어나고 있다. 이는 전원입지로부터 장거리 대용량 직류 송전방식이 적용되고 있다 [1]. 직류송전은 전력손실이 적고 교류에 비해서 전압이 낮아 케이블의 절연이 쉽다. 그러나 직류전압 하에서 절연재료내의 공간전하의 형성은 절연성능을

저하시키고, 극성반전 시 발생하는 절연파괴가 문제가 되고 있다. 이를 위해 공간전하가 적고 체적저항이 높은 폴리에틸렌이 사용되고 있다. 케이블의 폴리에틸렌을 압출 후 가교 시에 DCP (dicumyl peroxide) 부산물이 발생한다. 따라서 가능하면 부산물의 발생을 억제하기 위한 연구가 진행되고 있다. 그에 따라 절연체에 표면이 개질된 산화마그네슘 등 무기첨가제를 사용함으로써 공간전하 형성을 억제하는 연구가 진행되고 있다 [2,3]. 전력케이블의 반도체층은 절연층과 계면을 이루고 있으며, 공간전하의 주입과 계면의 평활성이 절연성능을 좌우한다. 반도체 재료 내의 카본 블랙은 공간전하의 형성과 생성, 이동에 좌우되어 공간전하 소스를 막거나, 줄일 수 있는 연구가 주목되고 있다 [4,5]. 반도체 재료의 연구는 카본나노튜브와 기핵제 같은 나노재료를 이용하여 공간전하 억제시킬 수

a. Corresponding author: parkdh@wku.ac.kr

Copyright ©2013 KIEEME. All rights reserved.
 This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

있는 반도체 재료에 관한 연구가 보고되고 있다 [6].

또한 나노 유·무기물질들을 첨가에 따른 전기적, 열적특성에 관한 결과가 발표되고 있다 [7]. 직류 케이블용 반도체에 필요한 특성은 공간전하 발생에 의한 국부 고전계가 없어야 하며, 또한 반도체층의 돌기를 감소시킴으로써 전계집중을 방지할 수 있는 초평활성을 가지는 반도체이어야 한다. 직류 케이블용 반도체의 특성을 갖기 위해서는 카본블랙의 특성향상과 베이스 폴리머의 선택이 중요하다. 카본블랙과 베이스 폴리머는 반도체층 주요 특성인 기계적 및 전기전도성 등을 좌우하는 가장 중요한 요소이다. 카본블랙은 도전성 첨가제로서 분산이 불량하거나 외래입자가 존재하면 전기적 특성에 나쁜 영향을 줄 수 있다.

따라서 불순물이 적은 깨끗한 카본블랙의 적절한 분산이 중요하다. 베이스 폴리머의 선택은 비극성 폴리머를 사용해야 한다. 극성 폴리머를 비극성 폴리머로 대체하면 공간전하 억제 특성이 향상되는데 이는 극성 폴리머의 극성기는 공간전하에 반응하기 때문에 공간전하가 축적될 수 있다.

본 논문에서는 전력케이블용 반도체층의 성능 향상을 위하여 첨가되는 조성물에 따른 특성과 반도체 재료의 물성인 체적저항과 그의 온도 의존성, 기계적 특성, 밀도 등을 측정하고 검토하였다.

2. 실험 방법

2.1 시편 제작

반도체 재료의 조성은 베이스 폴리머로서 EBA (Ethylene Butyl Acrylate, Mitsui DuPont)과 LDPE (Low Density Polyethylene, 삼성토탈)과 함께 도전성을 부여하기 위한 충전제로 Carbon Black (Acetylene Black, DENKA)을 사용하였다. 본 시편 제조에 사용된 카본블랙은 기존의 카본블랙에 비하여 불순물이 적고 평균입자 사이즈 35 nm로 입자가 미세하며 순도가 높아 전기적 특성을 만족시킬 수 있는 아세틸렌 블랙을 사용하였다. 극성 폴리머의 극성기는 공간전하에 반응하기 때문에 비극성 폴리머를 사용하였다. 사용된 첨가제로는 절연파괴의 원인 제공을 하는 압출 공정상의 문제점인 초기가교 현상 스코치를 미연에 방지해주는 스코치 억제제와 반도체와 절연층 간의 계면 특성을 향상시켜 뇌전압 파괴 특성을 향상시킬 수 있는 전압 안정제, 산화에 의한 수지분해를

Table 1. Composition of specimens.

Specimens	(Unit:wt%)						
	T-1	T-2	T-3	T-4	T-5	T-6	T-7
EBA	63.5	52.8	65.7	65.8	65.8	65.7	65.4
LDPE	-	13.3	-	-	-	-	-
Carbon Black	35.6	33	33	33	33	32.8	32.7
Scorch Inhibitor	-	-	-	0.3	-	0.3	0.3
Voltage Stabilizer	-	-	-	-	0.3	0.3	0.3
Antioxidant	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
Lubricant	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
Cross-linking agent	0.3	0.3	0.7	0.3	0.3	0.3	0.7
Total	100	100	100	100	100	100	100

방지하기 위해 산화 방지제, 카본블랙의 분산을 돕고 점도를 감소시켜 압출 가공성을 증가시키기 위한 활제를 첨가하고 분자구조가 선상인 구조를 가교결합을 형성함으로써 그물과 같은 망상구조로 변경시킴으로써 열적, 기계적, 화학적 물성을 보강시키기 위해 가교제가 사용되었다. 시편은 80℃ 오븐에서 24시간 건조한 펠렛형 시료와 충전제를 Haake Internal Mixer 사용하여 180℃, 60 rpm에서 용융 혼합하고 그 후 혼합된 시편에 가교제를 첨가하기 위해 Two-Roll Mill 사용하여 15 rpm 조건으로 5분 간 혼합 후 압축 프레스를 통하여 180℃에서 20분 간 200 kg/cm²의 압력으로 압축성형을 하였으며 가로 세로 각각 100 mm, 두께 1 mm의 시트 형태로 제작하였다. 반도체 시편은 표 1과 같이 조성물의 첨가에 따라 T-1~T-7로 각각 준비하였다. T-1은 현재 초고압 전력 케이블에 사용되고 있는 반도체 시편이고, 첨가제 A, 첨가제 B, 가교제 함량과 LDPE와의 blending을 변수로 T-2~T-7을 각각 제조하였다.

2.2 평가 방법

2.2.1 체적저항 측정

체적저항 실험에서 사용된 시편은 두께 1 mm의

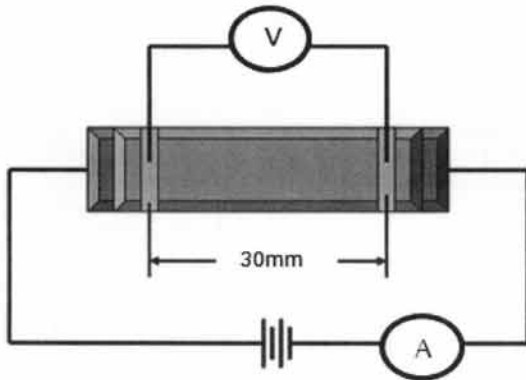


Fig. 1. Experimental device for measurement of volume resistivity.

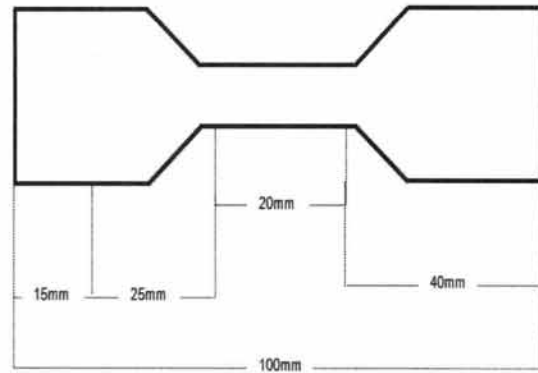


Fig. 2. Structure of specimen.

시트로서 폭 30 mm, 길이 64 mm이다. ASTM D991에 의해 그림 1과 같이 시편의 양 끝에 전극 간 거리가 50 mm가 되도록 silver paint를 양 끝단에 발랐다 [8]. 상온에서 최소 1시간 이상 건조시킨 후, 실험을 진행하였다. 시험 환경은 상대 습도 50%에서 25℃와 90℃로 각각 예열된 오븐에 시료를 넣고 30분 간 방치한 후 Mitsubishi Chemical사의 Hiresta-UP MCP-450 장비를 사용하여 복합체 시편의 체적저항과 그의 온도 의존성을 측정하였다.

2.2.2 기계적 특성

시편들은 실험 규격인 ASTM D638에 의해 그림 2와 같이 아령형 시편으로 측정하였다 [9]. (주)명지테크 Tensometer 2000 장비를 사용하여 측정 조건은 400 kgf/mm²와 600%이었으며, 측정속도는 200 mm/min으로 하여 파단 시 인장강도와 신장율을 측정하였다. 실험은 5회 측정 후 측정치의 평균값을 나타내었다. 인장강도는 크게 항복점에서의 인장강도와 파단점에서의 인장강도로 나뉘며 본 실험에서는 재료가 끊어지는 시점인 파단점에서의 인장강도와 신장율을 확인하였다.

2.3 밀도 측정

실험 규격인 ASTM D792에 의하여 공기 중에서 측정 시료의 무게를 재고 나서 이미 밀도를 알고 있는 화학적으로 상호 작용이 없는 불활성 액체에 담긴 다음 부피를 측정하며 단위는 g/cm³으로 나타내는 수중치환법으로 Mirage사의 EW-200SG 장비를 사용하여 밀도를 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 체적저항 측정

일반적으로 전기 전도도의 값은 체적저항의 값으로 대신할 수 있다. 보통 반도체층 재료의 경우에는 10⁰ Ω·cm ~ 10⁴ Ω·cm 정도의 저항값을 갖는다. 고분자에 카본블랙이 혼련된 경우 전도성을 나타내는데 이러한 카본블랙의 전도기구는 매우 복잡하나 일반적으로 2가지 이론이 유력시되고 있다.

첫째, 구조설 (structure theory)로 연쇄상의 카본사슬을 통해서 전도가 일어난다는 이론이고, 둘째, 점핑설 (jumping theory)로 분산된 카본 입자 사이를 전자가 점핑하여 전도된다는 이론이다. 참고로 두 번째 이론의 현상은 터널효과 (tunnel effect)라고 한다. 우수한 전기 전도도를 얻기 위해서 카본블랙이 갖추어야 할 중요한 성질은 첫째, 입자 크기가 미세해야 한다. 즉, 입자 크기가 미세해지면 단위 부피 당 카본 블랙의 수가 증가되므로 입자 간 거리가 좁아져서 전도성이 커지게 된다.

둘째, high structure를 가진 카본블랙일수록 전자가 통과할 수 있는 통로가 증가 하게 되므로 전도성이 향상된다.

셋째는 기공도 (porosity)가 높으면 단위중량당 카본블랙의 수가 증가되므로 입자 간 거리가 줄게 되어 전도도가 커진다.

넷째로는 휘발 성분이 전자의 터널링 (tunneling)을 방해하여 전도도를 저하시키는 역할을 하므로 낮은 휘발성을 가진 카본블랙이어야 한다 [10].

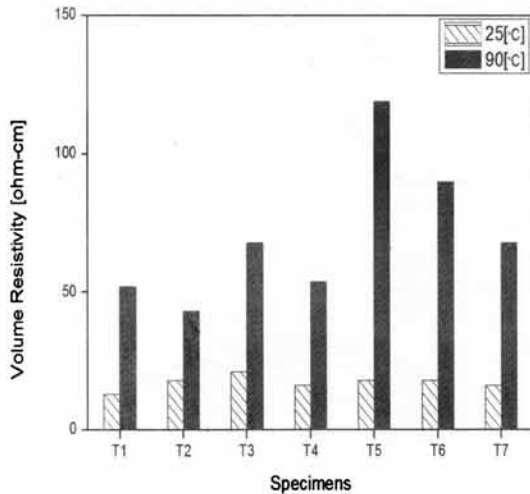


Fig. 3. Volume resistivity of specimens by temperature.

그림 3은 25°C와 90°C에서 체적저항의 온도 의존성을 나타내기 위한 그래프로 25°C에 비해 90°C에서 체적 저항이 급격하게 증가하는 것을 알 수 있다. 이것은 용융온도 이전에서, 베이스 수지 내 온도 상승에 따라 체적 팽창이 증가하여 카본블랙 간격이 늘어나는 정온도계수 (Positive Temperature Coefficient, PTC) 현상으로 본 실험을 통해 확인할 수 있었다.

즉, 온도가 상승함에 따라 용융온도 근처로 오면 베이스 수지 내 카본블랙의 이격거리 증가로 인해 전도성 네트워크가 파괴되었다고 할 수 있다. 이러한 전도성 네트워크 파괴는 전자의 통로를 방해하므로 체적저항이 증가를 하게 된다.

상기 그래프를 수치적인 데이터로 비교 분석하기 위해 표 2로 나타내었다. 표 2에서 보는 바와 같이 25°C에서는 13 Ω·cm ~ 21 Ω·cm 범위 내에서 체적저항을 나타냈다. 90°C에서는 52 Ω·cm ~ 119 Ω·cm 범위로 체적저항이 증가함을 보였다. 또한 T-1 ~ T-3 시편이 25°C와 90°C의 온도에 의한 체적저항의 증가율이 25 ~ 39 Ω·cm로 낮게 나타났고 T-4 ~ T-5시편의 경우에는 42 ~ 101 Ω·cm로 다른 시편에 비해 높게 확인되었다. T-1의 체적저항은 카본블랙이 35.6 W%로 다른 시편에 비해 첨가량이 높음으로 인하여 90°C에서 그만큼 베이스 수지 내 카본블랙 입자간 이격거리가 커지지 않았기 때문에 체적저항이 낮은 수치로 나타났게 되었다. 즉, 카본블랙의 전도기구 이론 중 카본블랙 입자간 거리가 짧게 되는 구조설 (structure theory)에 의해 전기 전도성이 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

Table 2. Volume resistivity of specimens by temperature.

Specimens	25°C (Ω-cm)	90°C (Ω-cm)
T-1	13	52
T-2	18	43
T-3	21	68
T-4	16	54
T-5	18	119
T-6	18	90
T-7	16	68

T-2의 체적저항의 경우 용융점이 EBA보다 높은 LDPE와의 blending으로 인하여 90°C에서 열에 의한 고분자 복합체의 체적팽창이 더디게 되어 베이스 수지 내 카본블랙 간의 이격거리가 커지지 않았기 때문에 체적저항이 가장 낮은 수치로 나타나게 되었다.

T-4 시편은 절연파괴의 원인 제공을 하는 압출공정상의 문제점인 초기가교 현상 스코치를 미연에 방지해주는 스코치 억제제의 영향으로 인하여 T-1, T-2와 마찬가지로 완성된 시편의 체적저항이 낮은 것으로 판단된다. 그러나 T-3은 가교제의 함량이 다른 시편에 비해 높음으로 인하여 가교도의 향상과 낮은 체적저항을 예상 했으나 시편제조과정 중 부분적으로 가교가 덜되어 가교도가 낮아진 것으로 판단된다.

전압 안정제가 첨가된 T-5 ~ T-7의 경우는 체적저항이 다른 시편에 비해 높게 나왔으며, 특히 전압 안정제가 첨가된 시편이 체적저항이 비교적 높은 것으로 나타났다.

T-6과 T-7시편의 경우에는 첨가제등 조성비가 거의 같으나, T-7시편이 T-6보다 가교제 함량이 더 높기 때문에 가교도가 향상이 되어 체적저항이 더 낮게 나온 것으로 판단된다.

3.2 인장강도-신장을 측정

점탄성을 갖는 본 시료는 강도와 신장률이 함께 작용한다. 순수한 탄성을 보이는 물질의 강도 (stress, σ)와 신장률 (strain, ϵ)의 관계는 선형으로 식 (4)와 같이 표현할 수 있다. 여기서 C는 상수를 의미한다.

$$\sigma = C \times \epsilon \quad (4)$$

한편 순수한 점성을 보이는 물질의 전단강도 (shear stress, τ)는 신장률 속도 (rate of strain, $d\epsilon/dt$)에 비례하여 식 (5)와 같이 표현된다.

$$\tau = C \times d\epsilon/dt \quad (5)$$

상기의 식 (4)와 (5)를 각기 Hook 법칙과 Newton 법칙이라고도 하며, 전자의 경우에는 강도가 신장률에 비례하지만 신장률 속도에는 무관하고, 후자는 강도가 단지 신장률 속도와 관련되어 있고 신장률 자체의 크기에는 의존하지 않는다는 것을 의미한다.

또한 에너지 측면에서 비교하면 자극으로 공급되는 에너지가 아무런 손실 없이 물질에 전달되는 성질의 것을 탄성이라 하며 공급된 에너지의 일부가 열 등의 에너지 형태로서 손실되는 성격을 지닌 것을 점성이라 할 수 있다. 그러나 위의 식 (4)와 (5)는 이상적인 상황을 의미할 뿐이며, 실제로 존재하는 물질 중에 두 식을 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 [12].

본 실험에 사용된 시편들은 점탄성을 갖는 반도체 재료로서 일정 하중에 의해 어느 지점까지 직선적으로 강도를 발휘하는 탄성 영역과 이 영역을 벗어난 후 강도와 함께 신장율이 급격하게 증가하는 점성 영역이 동시에 나타난다.

표 3은 인장강도와 신장율을 표로 나타냈다. 보는 바와 같이 T-1~T-3은 첨가제가 첨가되지 않은 시편으로 첨가제가 첨가된 T-4~T-7보다 대체적으로 인장강도가 높게 나타났다. 이는 첨가제가 가교반응을 방해하여 가교도가 낮아짐으로 판단이 되며, 시편 중에 가교제의 함량이 높고 첨가제가 첨가되지 않은 T-3이 인장강도가 1.477 kgf/mm²로 다른 시편에 비하여 가장 높은 특성을 나타내었다. 일반적으로 플라스틱 수지로서 신장율을 가지고 있는 기저 고분자에 전기적 특성을 만족시키기 위해 카본블랙을 함유하게 되면 고분자 본연의 신장율은 떨어지게 된다. 즉 카본의 함량이 많을수록 고분자 복합체 시편의 신장율은 낮아지게 된다. 그에 따라 본 실험 신장율의 경우 T-1에 비하여 카본블랙이 적게 첨가되었기 때문에 230% ~ 296% 범위에서 증가하며 모두 높은 특성을 나타내는 것을 알 수 있다.

Table 3. Stress, strain of specimen.

Specimens	Tensile strength (kgf/mm ²)	Strain (%)
T-1	1.344	215
T-2	1.354	230
T-3	1.477	296
T-4	1.120	238
T-5	1.285	256
T-6	1.179	237
T-7	1.165	242

3.3 밀도 측정

밀도는 고분자의 기본 물성으로 거의 대부분의 물성에 광범위하게 미치므로 매우 중요하다고 할 수 있다. 그림 4는 반도체 재료의 밀도를 나타냈다.

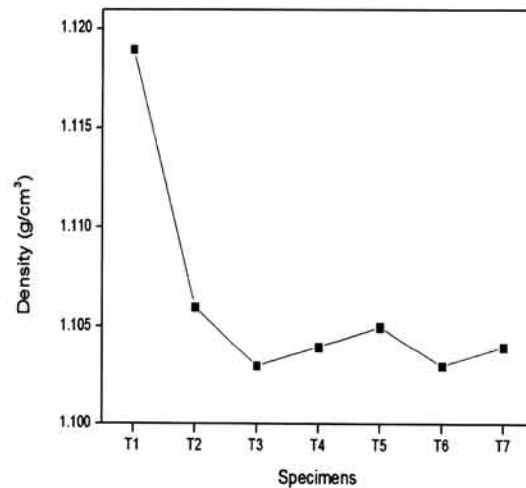


Fig. 4. Density property in specimens.

그림 4에서 보이는 바와 같이 T-1시편에 비해 다른 시편은 밀도가 1.103 g/cm³에서 1.106 g/cm³의 범위로 감소하는 것을 알 수 있다.

T-1의 밀도는 카본블랙의 함량이 35.6 W%로 높기 때문에 변수로 작용해 다른 시편에 비해 밀도가 높은 것으로 판단된다.

일반적으로 밀도는 고분자의 분자 중 단쇄분자

(short chain branch, SCB)의 수에 따라 결정될 수 있는데, 단쇄분지가 많으면 결정화도가 낮아져 밀도가 낮아진다. 즉, 중합 과정에 의해 생성된 단쇄분지는 결정화 과정에서 결정구조가 생성되는 것을 방해하게 되어 고분자의 밀도를 저하시키며 다른 물성에도 큰 영향을 주는 것으로 알려져 있다.

본 실험에 쓰인 시편의 재료인 LDPE는 에틸렌을 중합하여 제조하는 합성수지로서 40℃ 이하의 온도에서 분취된 성분의 단쇄분지를 60개 ($C_4/1,000 CH_2$) 이하로 가지고 있는 것으로 알려져 있다 [13]. 단쇄분지가 많이 포진되어 있으면 결정화 구조를 완성하기가 어려우므로 밀도가 감소한다.

4. 결 론

직류케이블의 반도체 재료의 물성을 연구하기 위하여, 첨가제와 함량에 따른 체적저항, 기계적 특성, 밀도 등을 평가하고 아래와 같은 결과를 얻을 수 있었다.

1. 각 시료의 체적저항은 상온에서 13 ~ 20 $\Omega \cdot cm$ 가 얻어지고 90℃에서는 크게 증가된 결과가 각각 얻어졌다. 상온에서는 첨가제에 따른 체적저항의 영향은 크지 않으나, 고온에서는 급격하게 증가되는 경향을 확인할 수 있었다. 또한 상온과 고온에서 체적저항의 큰 증가는 첨가제의 영향이라기 보다는 카본블랙과 기저 고분자에 따른 영향으로 판단된다.

2. 조성된 반도체 재료의 기계적인 물성은 인장강도 1.1 ~ 1.3 kgf/mm², 신장율 215 - 296%의 범위 결과가 얻어졌다. 이 결과는 반도체 재료의 기계적인 물성은 첨가제와 함량에 의존되는 것을 확인하였으며, 특히 첨가제 함량의 증가에 따라 인장강도는 감소하고, 신장율은 증가하는 결과가 얻어졌다.

3. 본 실험에서 제작된 각 반도체 재료의 밀도는 1.12 g/cm³ ~ 1.1 g/cm³ 범위로서 0.93 g/cm³의 밀도를 지닌 기저 고분자와 카본블랙에 비해서 미량의 첨가제는 밀도에 크게 영향을 미치지 못하는 것으로 판단된다.

4. 위 실험을 바탕으로 전기적 특성을 가장 만족하는 시편은 T-2로 T-1과 비교하여 적은 카본블랙의 함량과 LDPE와의 블렌딩으로 인하여 낮은 체적저항을 갖으며, 기계적 특성을 가장 만족하는 시편은 T-3으로

T-1과 비교하여 가교제의 함량이 높아 가교결합을 형성함으로 가교도가 높아져 인장강도가 가장 높고 적은 카본블랙 함량과 가교제에 의하여 신장율 또한 가장 높게 나타났다.

위 실험의 결과는 KS C 3405 [154 kV 고압가교 폴리에틸렌 절연 전력케이블] 한국 산업표준을 통하여 직류케이블용 반도체층에 적합한 전기적, 기계적 물성을 확인할 수 있었고 적용 가능성이 있다고 판단하였다. 그러나 첨가제가 첨가여부에 따라 체적저항이 비교적 높게 확인되었고 파단강도 또한 감소하였다. 따라서 첨가제가 가교를 방해하여 가교도를 저해함으로 판단된다.

본 논문은 기존의 초고압 케이블용 반도체보다 우수하거나 최소 동일하고 공간전하 억제 특성이 우수한 직류 케이블용 반도체 제조를 위해 시작되었으며 비극성 폴리머와 아세틸렌블랙을 적용하였다. 절연파괴의 원인 제공을 하는 압출공정상의 문제점인 초기가교 현상 스코치를 미연에 방지해주는 스코치 억제제와 반도체와 절연층 간의 계면특성을 향상시켜 뇌전압 파괴 특성을 향상시킬 수 있는 전압 안정제를 통하여 그 특성에 따라 가교제를 소량 첨가할 수 있었고 공간전하의 원인이 되는 가교제와 가교에 따른 가교 부산물이 적어짐으로 예상됨에 따라 직류용 반도체의 전하축적과 공간전하 특성이 함께 연구되어야 한다고 판단된다.

REFERENCES

- [1] G. Asplund, *Presented at the International Council on Large Electric Systems (CIGRE)* (2000 Session, Panel 2, 2000) p. 2-4
- [2] T. Katagai, *Hitachi Cable Ltd., Japanese Patent JP11086634* (1999).
- [3] M. S. Khalil, *IEEE Elect. Insul. Mag.*, 13, 35 (1997).
- [4] S. Ou, M. Fujita, H. Tanimoto, and F. Aida, *Showa Electric Wire and Cable Co. Ltd., Japanese Patent JP9245521* (1997).
- [5] S. L. Green, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 10, 23 (1994).
- [6] J. S. Yang, D. H. Shin, H. Yang, J. H. Kook, N. J. Park, C. W. Nah, and D. H. Park, *International Conference on Solid Dielectrics* (Winchester, UK, 2007) p. 322-325.
- [7] Y. Hayase, H. Aoyama, K. Matsui, T. Takada, Y. Tanaka, and Y. Murata, *Jpn. Trans. IEEE FM*, 126, 1084 (2006).

- [8] Standard Test Method for Rubber Property—Volume Resistivity of Electrically Conductive and Antistatic Products, Annual Book of ASTM Standards D991, 08, 172 (1998).
- [9] Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics, Annual Book of ASTM Standards D638, 08, 52 (1998).
- [10] K. Y. Lee, J. S. Yang, Y. S. Choi, and D. H. Park, *Trans. KIEE*, 54, 45 (2005).
- [11] J. S. Yang, K. Y. Lee, and D. H. Park, *J. KIEEME*, 18, 134 (2005).
- [12] J. S. Yang, K. Y. Lee, D. H. Shin, and D. H. Park, *Trans. KIEE*, 55, 381 (2006).
- [13] Honam Petrochemical Corporation, KIPRIS Application Number 1020080114334 (2008).