

자켓 컴파운드용 절연재의 수증기투과 및 절연파괴 특성

Characterization of Water Vapor Transmission & Dielectric Breakdown in Insulation Materials for Jacket Compound

송 재주*, 한 재홍**, 송 일근**, 한 용희***, 한 병성****

(Jae-Joo Song*, Jae-Hong Han**, IL-Keun Song**, Yong-Hee Han***, Byung-Sung Han****)

Abstract

Experiments of 2 type on insulating compounds accomplished to change PVC using in URD(Underground) power cable jacketing. one was DB(Dielectric Breakdown) test on the pure base resins and the others were WVT(Water Vapor Transmission) test on the compounds which contained C/B(Carbon Black), anti-oxidant to base resin. a kind of specimens made by pressing to resin of pellet or lump form was HDPE(High Density Polyethylene), MDPE(Medium Density Polyethylene), LDPE(Low Density Polyethylene), LLDPE(Linear Low Density Polyethylene), PVC(Polyvinyl Chloride). As a results of AC DB and WVT test, we saw that strength of Insulation was HDPE > LLDPE ≈ MDPE > LDPE and WVT ratio was HDPE < LLDPE < MDPE ≈ LDPE << PVC. WVT of PVC using for jacket showed characteristic 15 times more than MDPE or LLDPE. Therefore, to development of watertightness cable, our works present need of Changing in insulating materials

Key words: HDPE(High Density Polyethylene), MDPE(Medium Density Polyethylene),
LDPE(Low Density Polyethylene), LLDPE(Linear Low Density Polyethylene)
DB(Dielectric Breakdown), WVT(Water Vapor Transmission), URD(Underground)

1. 서 론

지중 배전케이블은 절연재료의 취약성과 열악한 운전환경으로 인해 절연열화가 가속되어 케이블의 기대수명인 30년보다 훨씬 빠른 10~15년 이내에 고장을 일으켜 전력공급의 신뢰도를 저하시키는 요인이 되고 있다.[1] 절연층 재료의 품질을 기본재료 및 제조단계에서 엄격히 제한하는 송전용 케이블과는 달리 물의 침입을 방지할 수 있는 구조가 아니기 때문에 운전 중 많은 문제점이 발생한다. 즉, 절연층 내에서 전계집중과 내, 외부 반도전층 및 자켓을 통한 수분침투가 고장의 큰 원인이 되고 있다.[2] XLPE

경우는 교류 절연파괴 강도가 30~40 [kV/mm]이상이기 때문에 수트리가 일정크기로 성장하더라도 이론적으로는 고장이 일어나지 않아야 한다.[3] 그러나 실제로는 서어지와 같은 이상 전압의 유입에 의해 고장이 발생하고 있다. 그러므로 배전 케이블의 수명연장과 고장방지를 위해 외피 절연층으로부터 수분침투를 억제하고 포설 또는 취급시 발생하는 기계적 손상을 막도록 이들의 재질 및 구조개선을 통한 절연성능의 향상이 필요하다. 해외에서는 15~35 [kV]에 적용하는 지중 배전케이블의 자켓의 절연 컴파운드로 LLDPE, MDPE가 많이 사용되고 있으며, LMDPE에 대한 연구가 보고되었다.[4],[5] 따라서 기존의 PVC외피를 대체할 수 있는 절연재를 개발하기 위해 현재 국내에서 생산중인 6종의 기저수지(Base Resin)를 선정하여 새로운 자켓 컴파운드를 조성하였다. 컴파운드 개발에서 가장 중요한 것은 최적의 조성을 구하는데 있으므로 본 연구에서는 컴파운드를 평가하기 위한 방법으로 수지를 변종시켜

* : 순천청암대학 컴퓨터 정보과학부
(전남 순천시 덕월동 224-9,
Fax : 061-740-7312
E-mail : jjsong@scjc.ac.kr)
** : 한국전력 연구원
*** : 한국전력
**** : 전북 대학교 전자정보공학부/ 전기공학과

서 첨가제의 조성을 고정하고 특성변화를 평가하는 수지변종과 산화방지제를 변량하여 시료를 만들었다. 시료의 종류는 HDPE, MDPE, LLDPE, LDPE이며, 기저수지로 만든 시료에 대해서는 교류 절연 파괴 실험(DB: Dielectric Breakdown)을, 첨가물이 포함된 시료는 DB실험과 수증기 투과(WVT: Water Vapor Transmission)실험을 수행하였다.

2. 실험

2.1 시료 제작

시료는 기저수지와 자외선 차단용의 반도체성 카본, 산화반응 억제용의 산화방지제, 가공성 향상을 위한 활제 등 첨가물이 함유된 2 가지를 사용하였다. 이 시료들은 Pellet 또는 Bulk 형태에서 발취하였으며, 이것을 프레스 성형기에 넣고 쭈그러짐이나 갈라지는 현상이 시료의 표면에 나타나지 않도록 성형 하였다. 1차 성형온도가 너무 높으면 2차 가교가 어려우므로 120[°C] 정도의 낮은 온도를 인가하여 1차 가교한다. 2차 가교는 공기의 유입으로 인한 기포나 흠이 생기지 않도록 하기 위해 180[°C]의 높은 온도로 20[Min]간 최대 10~13[Ton]의 압력을 순차적으로 가해 제작하는데 크기는 가로, 세로가 10 X 10[Cm]에 두께는 0.8[mm]로 일정하다.

표 1. 자켓 컴파운드용 시료들의 특성 비교
Table 1. A comparison of properties in specimens for jacket compound

	PVC	LLDPE (T1)	MDPE (T5)	HDPE (T6)
Density at 23°C [g/cm ³]	0.149	0.921	0.935	0.942
Melt Index at 190°C, 2.16 kg [g/10 min]	5.50	2.38	0.24	0.21
Tensile Strength [kg/mm ²]	1.45	2.02	3.56	2.89
Tensile Elongation [%]	295	872	860	865
Moisture Content [ppm]	518	379	342	397
Retention of Tensile[%]	109	104	95.5	95.4
Retention of Elongation[%]	58	90	96.1	96.5-
130±3°C, 1kgf [%]	8.2	13.0	10.1	9
Flexural Modulus [Mpa]	-	450.8	787	882
Shore D Hardness	28	48	54.0	60

한편, 이 시료들의 물리적 특성은 PRAMKOR에서 실험한 결과로서 표 1과 같다.

2.2 실험 방법

2.2.1 교류 절연 파괴 실험

실내온도 20~26 [°C], 습도 50~58[%]인 실험실에서 단상 교류용 절연 파괴 시험기(AIKOKU DENKI, 최대전압 100[KV])를 사용하여 실험하였다. 절연유는 KSC -2301 규격에 적합하며, 방전 갭은 전극에 대한 ASTM규정에 따라 구 직경 12.5[mm]를 사용하였다. 상용주파수 60[Hz]상태에서 단시간 시험법을 적용하여 일정한 비율로 전압을 인가하였다.[6] 시료는 두께 0.8[mm]로 성형한 후 100 x 100(mm)로 만들어 플라스틱 용기속의 절연유 중에 넣고, 전압을 구상의 실험전극을 통해 양쪽 면에서 가하여 절연 파괴 전압을 측정하였다. 절연유는 실험 중에 발생하는 기포가 실험결과에 영향을 미칠 수 있으므로 8 회를 사용하고 난 후에는 교환하였다.

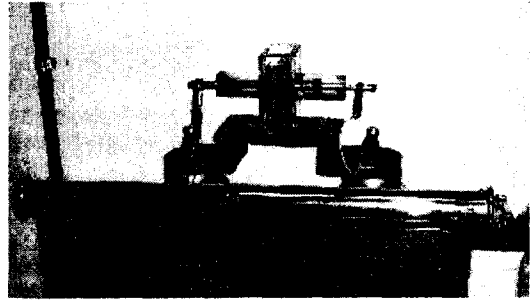


그림 1. 교류 절연 파괴 실험기기
Fig1. Testing apparatus of AC dielectric breakdown

2.2.2 수증기투과(WVT) 실험

WVT(Water Vapor Transmission) 실험은 기저수지의 특성을 평가하기 위해 ASTM E96규정에 따라 온도 32[°C], 습도 50±2[%]를 자동으로 유지하고, 공기는 자동으로 순환되고, 습도조절을 위해 증류수가 사용되는 항온항습기 내에서 단위면적을 통해 단위 시간동안 지속적으로 수증기가 전달되는 투과율을 결정하게 된다. 실험용기(접시)는 그림 2와 같은 모양으로 크기는 76 x 76 x 19[mm]로 면적이 약 5700[mm²]인 무게가 가볍고 부식되지 않는 알루미늄 재료로 만들었다. 실험방법은 건식방법(Desiccant method)과 습식방법(Water method) 2가지로 나눌 수 있다.[7] 그 중 Desiccant법은 접시 속에 크기가 2~3[mm]인 수분측정용 염화칼슘 CaCl₂(Calcium Chloride)를 넣게 되는데, 접시의 깊이 19[mm]중에서 6[mm]정도의 여유를 남기고 13[mm]정도를 채운

다. 테두리부분은 시료로 접시의 입구를 덮을 때 시료 부착이 용이하고 휨이나 수축에 대비해 3[mm]정도를 확보하여 턱(ledge)을 만들었으며, 또 4[mm]정도의 높이로 턱위에 Rim을 만들어 측면으로부터의 수분침투도 막았다. 한편, 실험용기인 접시의 입구를 밀봉하기 위해 PE 전용 도포제와 강력한 접착제(Wax or Activator Cyanoacrylate Adhesive)로 처리하여 공기나 수분의 침투를 차단한다. 또한, Water법은 CaCl₂ 대신 순수한 증류수를 넣어 시료로 용기를 덮은 후 Desiccant법과 같이 완전하게 밀봉하고 은박지(Al Foil)로 3[mm]정도 밀봉된 부분을 감싼 후 물의 증발량을 측정하게 된다. 실험 방법은 항온항습기 속에 그림 2와 같이 준비된 실험용기를 넣고 하여 24시간 혹은 48시간단위로 측정하며, 단위는 0.1[mg]까지 측정 가능한 전자저울을 사용하였다. 또한 수증기의 투과율은 중량변화를 시간으로 나누어 구한 직선 기울기를 다시 면적으로 나누면 된다. 한편, 실험은 Water법 1회, Desiccant 3회를 실시하였다. 실험기간은 최소 15일에서 최대 60일까지 장시간 수행하여 변화율을 측정하였다.

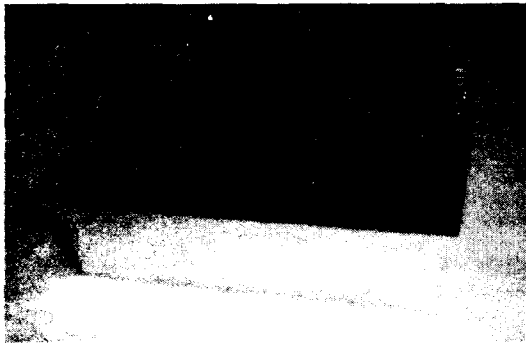


그림 2. 실험용기의 형태
Fig 2. Figure of test dish

3. 결과분석

3.1 교류 절연파괴시험

기저수지로 만든 시료에 대한 교류 절연파괴 시험 결과를 그림 3에 최대, 최소, 평균값으로 나타내었다. 실험은 LLDPE, LDPE, HDPE, MDPE 각 2종류 16개 시료에 대하여 수행하여 얻은 값들을 평균하여 나타낸 것이다. 한편, 시료별 절연파괴 강도는 단위 기준[mm]으로 환산하였을때 LDPE < MDPE ≃ LLDPE < HDPE 값이다. 표 2은 0.7[mm] 두께의 시료에 대한 실험을 수행한 후 정확한 데이터를 위해 절연이 파괴된 부분을 찾아 버어니어 캘리퍼스를 이용해 주위 두께를 측정하여 나타내었으며, LLDPE 경우를 나타내었다.

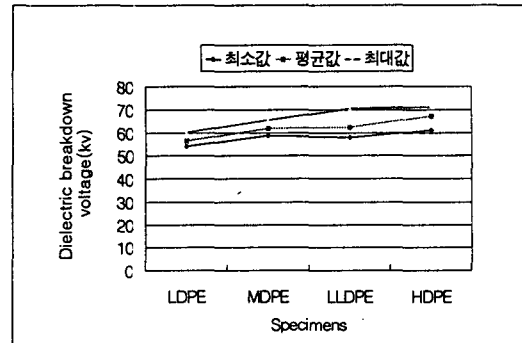


그림 3. 자켓 컴파운드들의 절연파괴시험 결과
Fig 3. Test results of DB in jacket compounds

표 2. 절연 파괴 전압과 실제 측정된 시료의 두께
Table 2. Voltage of DB and real thickness of specimens

no	Breakdown Voltage[kV]	Thickness [mm]	average [kV/mm]
1	45.3	0.754	60.1
2	43.5	0.752	57.8
3	48.3	0.686	70.4
4	44.1	0.746	59.1
5	43.0	0.677	63.5
6	44.2	0.673	65.6
7	40.9	0.686	59.6
8	46.4	0.715	64.9
평균	44.5	0.711	62.5

3.2 WVT 실험 결과 및 분석

Water 법에 의한 단기간(7일) 실험에서는 정확한 측정보다는 시료들의 WVT특성 흐름을 파악하는데 그쳤다. 왜냐하면, 실험용기에 들어있는 증류수의 증발량의 무게가 처음에는 많은 변화가 발생하여 정확한 측정값 얻기가 어려웠다. 그러나 Water법으로 단 시간 동안 실험한 데이터는 표 4와 같이 HDPE < MDPE < LLDPE < LDPE 순으로 나타나는 경향을 알 수 있었다. 따라서 이후 실험 데이터는 보다더 정확한 Desiccant method로 진행하였으며, 데이터는 편차가 크게 나타나는 시료는 접촉불량으로 제외하였다. 1종류의 4개 시료 중 가장 적은 값을 나타내는 1개의 값을 택하여 오차를 최대한 줄였다.

표 3. 기저수지에서 습식방법에 의한 WVT 특성
Table 3. WVT properties with water method in base resin

시료명	Water method	
	[g] / 170 hrs	WVT [g/h · m ²]
HDPE	0.0195	0.020
MDPE	0.0263	0.027
LLDPE	0.0329	0.034
LDPE -1	0.0556	0.057
LDPE -2	0.0359	0.037

한편, 표 4의 결과는 동일한 첨가물을 넣고 수지변종 실험을 위해 시료를 만들어 720시간 동안 실험한 것이다. 그리고 1500시간 데이터는 일부 시료에 대해서만 실험하였으나, 결과는 720 시간 데이터와 큰 차이 없이 일정한 비율로 증가하였다. 또 단 기간의 Water법과도 수증기 전달 특성이 유사하였다. WVT 특성은 HDPE < MDPE < LLDPE < LDPE < PVC 순으로 투과율을 나타내었다. 그림 4는 720시간보다 1500시간 시험하였을 때 WVT특성이 약간 상승하는 것을 보이는데 이는 수증기의 투과가 진전되기 시작하면 더욱 가속이 되리라 보여진다.

표 4. 수지변종에 의한 WVT 특성
Table 4. WVT properties with variable of resin

시료명	산화방지제1, 2 - 각 0.25(phr) 활제 - 0.7(phr), C/B-2.7(phr) 수지-100(phr)			
	[g] / 720hrs	WVT [g/h · m ²]	[g] / 1500hrs	WVT [g/h · m ²]
LLDPE -1 (T1)	0.0264	0.0064	0.0833	0.0097
LLDPE -2 (T2)	0.0227	0.0055	-	-
LDPE -1 (T3)	0.0309	0.0075	-	-
LDPE -2 (T4)	0.0241	0.0059	-	-
MDPE -1 (T5)	0.0126	0.0031	0.0531	0.0062
HDPE -1 (T6)	0.0123	0.0030	-	-
PVC	0.2876	0.070	0.6480	0.076

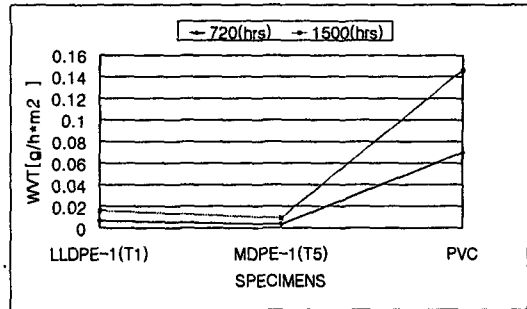


그림 4. 시간에 따른 투과율의 변화
Fig 4. Change of WVT with test time

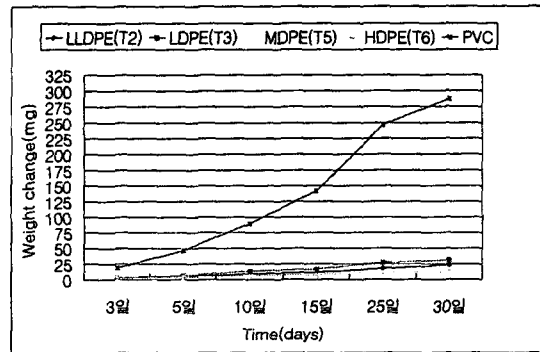


그림 5. 수지변종에 따른 무게 변화
Fig 5. Weight change with variable of resin

그림 5는 30일 동안 1차로 실험한 값으로 수지변종에 따른 시료들의 무게변화를 나타내었다. 실험결과 기준에 사용중인 PVC와 MDPE나 LLDPE경우를 비교하면 약15~ 20배 이상으로 무게변화 및 투과율이 높게 나타났는데 이는 PVC 분자내에 존재하는 극성기에 의해 나타난 것으로 보인다. 한편, 산화방지제는 절연재의 가공 중 과다한 기계적 가공 및 운전 중 발생할 수 있는 열화요인을 억제하기 위하여 사용하는데, 1차 산화방지제는 고분자 사슬에 생성된 라디칼을 소멸시키는 Hindered Phenol 혼합물이고, 2차 산화방지제는 산화반응 중 생성된 과산화물을 분해하여 산화능력이 없는 화합물로 만드는데 쓰여진다. 대부분의 케이블 절연재는 1,2차 산화 방지제를 혼용한다. 표 6은 자켓 컴파운드 절연재가 산화방지제 1, 2에 의해서 얼마나 영향을 받는지 알기 위해, LLDPE 2종, MDPE 2종, PVC에 대해 산화방지제를 변량시켜 시료들을 만들어 실험하여 보았다. 이 시료들에 대해 720시간 동안 실험한 결과 WVT 특성은 MDPE < LLDPE < PVC로 나타났으며 표 3과 4의 실험과 거의 유사하게 나타나 산화방지제 변량에 의한 영향은 거의 없는 것으로 보인다.

표 5. 산화방지제 변량에 따른 WVT 특성
Table 5. WVT properties with variable of anti-oxidant

변화량 시료명	720 [g/hrs]	WVT [g/h · m ²]	산화방지제 변량 (phr)
LLDPE -1 (A01)	0.0207	0.005	산방제1-0.10 산방제2-0.25
LLDPE -1 (A04)	0.0195	0.0048	산방제1-0.25 산방제2-0.10
MDPE -1 (A07)	0.0126	0.0031	산방제1-0.10 산방제2-0.25
MDPE -1 (A10)	0.0151	0.0037	산방제1-0.25 산방제2-0.10
PVC	0.2708	0.066	기존 Jacket 절연재

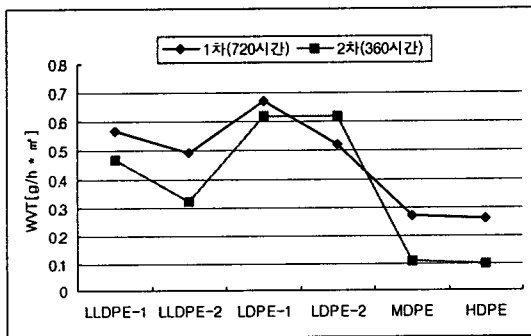


그림 6. 1차 및 2차 실험에 따른 WVT 특성
Fig 6. WVT properties of specimens with 1st, 2nd test

그림 6은 LDPE, LLDPE, MDPE, HDPE 시료에 대해 표 4에서 1차로 720시간 동안 실험하여 나타난 WVT 특성과 2차로 360 시간을 추가로 실험하여 얻은 WVT[g/h · m²] 특성을 도표로 나타내었는데, 그림에서 알 수 있듯이 비슷한 결과를 얻었다.

4. 결론

자켓 컴파운드용 절연재를 기존의 PVC에서 새로운 컴파운드로 바꾸어 절연특성이 양호한 지중 절연케이블을 개발하기 위해 시료 LDPE, LLDPE, MDPE, HDPE를 만들어 교류 절연파괴 실험(AC DB) 과 WVT 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 교류 절연파괴 시험 결과 LDPE(56.4 [kV]) < MDPE(61.7[kV]) ≈ LLDPE(62.5[kV]) < HDPE(67[kV]) 순서로 높게 나타났다.
 2. 지중 절연케이블의 가장 중요한 특성인 수증기 투과시험을 수행한 결과 WVT[g/h · m²] 특성은 HDPE < MDPE < LLDPE < LDPE < PVC이다.
 3. 산화방지제를 첨가한 실험결과는 기존의 방식과 거의 차이가 없었다.
- 따라서, 향후에는 지중 절연 케이블의 자켓 절연용 컴파운드로는 WVT 특성과 AC DB 특성만을 놓고 볼 때 PVC 대신 가공성이 좋고 특성이 우수한 새로운 절연재료의 대체가 요구된다.

REFERENCE

- [1] “배전케이블 수명예측 기준결정 및 열화진단 시스템 구축” KEPRI Report, TR.95YJ16.S.199787, 1997.10
- [2] 구자윤외 1명, “송전 CV 케이블 절연층의 열화 요인 분석”CIGRE 한국위원회, power cable conference, 6호, 1999년 7.
- [3] 김충배외5명, “22.9[kV] 지중배전용 전력케이블의 전기적 특성과 파괴수명 고찰” Trans. KIEE, Vol.48C, No.9, p628~633, SEP.1999
- [4] Gordon Graham, et al, “Insulating and semi-conductive jackets for medium and high voltage underground power cable applications.” IEEE. Electrical Insulation Magazine, vol.11, no.5, 1995
- [5] Henschke, et al, “New Polyethylene Compounds for Cable Jacketing Applications” JICABLE '99 B10.3, 1999
- [6] “Standard Test Method for Dielectric Breakdown Voltage and Dielectrics Strength of solid Electrical Insulating Materials at Commercial Power Frequencies” D149-92, 1981
- [7] “ Standard Test Methods for Water Vapor Transmission of Materials”E96-95, 1995