

지중배전케이블 기저수지의 수증기 투과 전달특성

송재주*, 한병성**

청암대*, 전북대**

Characteristics of Water Vapor Transmission in Base Resin for Underground Residential Distribution Power Cable

Jae-Joo Song, Byung-Sung Han

Abstract

In URD(Underground Residential Distribution) power cable, experiments of WVT(Water Vapor Transmission) test on the Base Resin accomplished to specimens which contained CB(Carbon Black), anti-oxidant to base resin and made by pressing to resin of pellet or lump form. a kind of specimens was HDPE(High Density Polyethylene), MDPE(Medium Density Polyehylene), LDPE(Low Density Polyethylene) , LLDPE(Linear Low Density Polyethylene), PVC(Polyvinyl Chloride). as a results of WVT test, we saw that WVT ratio was HDPE < LLDPE < MDPE ≈ LDPE ≪ PVC. WVT properties of PVC using for jacket showed properties 15~20 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 Polyehylene), LDPE(Low Density Polyethylene), LLDPE(Linear Low Density Polyethylene), WVT(Water Vapor Transmission), URD(Underground Residential Distribution) Cable

1. 서 론

지중 배전케이블은 수용가에 전력을 공급하는 중요 기자재로서 공급력의 확보와 공급신뢰도의 향상, 더불어 쾌적한 생활환경 조성을 위해 도시미관을 고려한 환경 친화적인 면이 강조되어 케이블의 지중화 적용이 증가되는 추세이다. 2001년 기준으로 전체선로 중 지중 배전선로가 차지하는 비율은 9.4%(공장: 16,301 c·km)이며 서울의 경우는 46.8%, 부산 20.2%, 인천 26.3%, 대전 28.3%에 이르고 있다. 그러나 지중선로는 가공선로에 비해 공사비가 10배 이상 소요되며, 고장 발생 시 복구에도 많은 시간과 비용이 소요되기 때문에 지중선로에 대한 유지보수 및 운영에 대한 연구가 중요하게 다뤄지고 있다. 현재 사용중인 지중 배전케이블은 열악한 운전환경과 수분침투, 절연층과 반도전

층의 계면불량에 의한 국부적인 전계 집중으로 고장유발 등 절연열화가 지속적으로 가속되어 기대수명(30년)보다 조기(10~15년)에 고장이 발생되어 전력공급의 신뢰도를 떨어뜨리는 요인이 되고있다¹⁾. 따라서 이러한 유형의 고장발생을 억제하고, 화재의 위험성도 줄일 수 있는 연구가 수행되고 있다. 그 동안은 수명예측 및 진단기법 등을 통해 절연층의 재질을 개선한 트리억제형 케이블이 개발되었으나, PVC외피 케이블 구조로는 완벽한 수분침투를 억제와 반도전층과 절연층 계면의 평활도 개선에는 한계가 있었다²⁾. 따라서 이러한 본질 문제를 개선하기 위해 재질 및 구조에 대한 연구가 필수적이다. 한편, 해외에서는 15~35 [kV]에 적용하는 지중 배전케이블의 자켓의 절연 컴파운드로 LLDPE, MDPE가 사용되고 있으며, LMDPE에 대

한 연구가 수행되고 있다³⁴⁾. 본 논문에서는 수분침투 억제제를 위해 기존의 PVC외피를 대체할 수 있는 최적의 재질선정과 반도전층 개선을 통한 절연 성능의 향상을 기하고자 케이בל 외피용 기저수지를 선정하여 새로운 자켓 컴파운드를 조성하였다. 최적의 기저수지를 조성하기 위해 첨가제를 변량시켜 특성변화를 평가하는 수지변종과 산화방지제를 변량하여 가장 적합한 HDPE, MDPE, LLDPE, LDPE 시료를 만들어 수증기투과전달(WVT: Water Vapor Transmission)실험을 수행하였다.

2. 실험

2.1 시료 제작

시료는 기저수지와 자외선 차단용의 반도전성 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 쭉그러짐이나 갈라지는 현상이 시료의 표면에 나타나지 않도록 성형 하였다.

표 1. 기저수지 시료들의 특성 비교
Table 1. A comparison of properties in specimens for base resin

| | 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 |

1차 성형온도가 너무 높으면 2차 가교가 어려워

므로 120[°C]정도의 낮은 온도를 인가하여 1차 가교를 한다. 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. 한편, 이 시료들의 물리적 특성은 PRAMKOR에서 실험한 결과로서 표 1과 같다.

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 있다⁵⁾. 그 중 Desiccant법은 접시 속에 크기가 2~3[mm]인 수분흡정용 염화칼슘 CaCl₂(Calcium Chloride)를 넣게 되는데, 접시의 깊이 19[mm]중에서 6[mm]정도의 여유를 남기고 13[mm]정도를 채운다. 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 차단하였다. 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 1과 같이 준비된 실험용기를 넣고 하여 24시간 혹은 48시간단위로 측정하며, 단위는 0.1[mg]까지 측정하였으며, 전자저울을 사용하였다. 또한 수증기의 투과율은 증량변화를 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 1. 항온 항습기 내에서의 WVT 실험모습
Fig 1. A View of WVT test in Temperature and Humidity Chamber

3. 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 단시간 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 제외하였다. 1종류의 4개 시료 중 가장 적은 변화를 나타내는 1개의 값을 택하여 데이터로 사용하여 오차를 최대한 줄였다.

한편, 표 3의 결과는 동일한 첨가물을 넣고 수지 변종 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. 또한 기간의 Water법과도 수증기 전달 특성이 유사하였다. WVT 특성은 HDPE < MDPE < LLDPE < LDPE < PVC 순으로 투과율을 나타내었다.

표 2. 기저수지에서 습식방법에 의한 WVT 특성
Table 2. WVT properties with water method in base resin

| 변화량 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 | 0.0359 | 0.037 |

그림 2는 720시간보다 1500시간 시험하였을 때 WVT특성이 약간 상승하는 것을 보이는데 이는 수증기의 투과가 진전되기 시작하면 더욱 가속이 되는 결과일 것으로 보여진다.

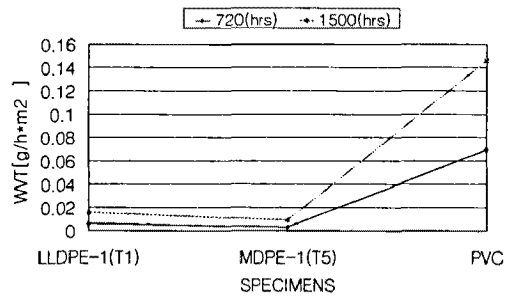


그림 2. 시간에 따른 투과율의 변화
Fig 2. Change of WVT with test time

표 3. 수지변종에 의한 WVT 특성
Table 3. WVT properties with variable of resin

| 변화량 시료명 | 산화방지제 1, 2 - 각 0.25(phr) 황제 - 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 (T1) | 0.0264 | 0.0064 | 0.0833 | 0.0097 |
| LDPE (T3) | 0.0309 | 0.0075 | - | - |
| MDPE (T5) | 0.0126 | 0.0031 | 0.0531 | 0.0062 |
| HDPE (T6) | 0.0123 | 0.0030 | - | - |
| PVC | 0.2876 | 0.070 | 0.6480 | 0.076 |

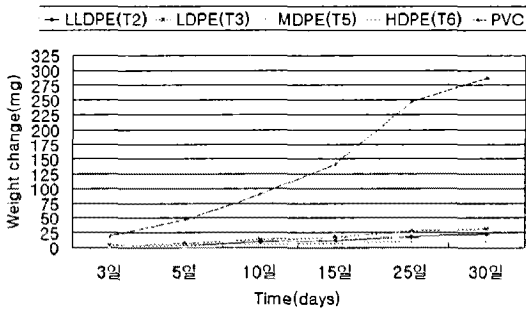


그림 3. 수지변종에 따른 무게 변화
Fig 3. Weight change with variable of resin

그림 3은 30일 동안 1차로 실험한 값으로 수지 변종에 따른 시료들의 무게변화를 나타내었다. 실험결과 기존에 사용중인 PVC와 MDPE나 LLDPE 경우를 비교하면 약15~ 20배 이상으로 무게변화 및 투과율이 높게 나타났는데 이는 PVC 분자내에 존재하는 극성기에 의해 나타난 것으로 보인다.

표4. 산화방지제 변량에 따른 WVT 특성
Table 4. WVT properties with variable of anti-oxidant

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

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 WVT특성은 MDPE < LLDPE < PVC로 나타났으며 표 3과 4의 실험과 거의 유사하게 나타나 산화방지제 변량에 의한 영향은 거의 없는 것으로 보인다.

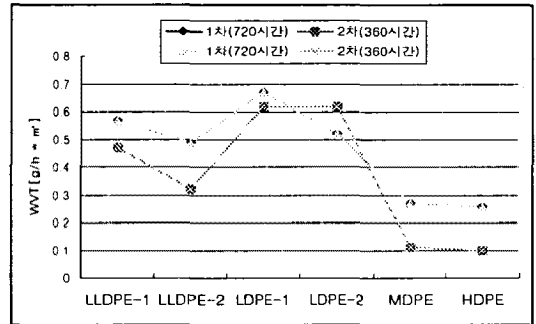


그림 4. 1차 및 2차 실험에 따른 WVT 특성
Fig 4. WVT properties of specimens with 1st, 2nd test

그림 3은 LDPE, LLDPE, MDPE, HDPE 시료에 대해 표 3에서 1차로 720시간 동안 실험하여 나타난 WVT 특성과 2차로 360시간을 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 절연과피 실험(AC DB) 과 WVT 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 지중 절연케이블의 가장 중요한 특성인 수증기 투과시험을 수행한 결과 WVT[g/h · m²] 특성은 HDPE < MDPE < LLDPE < LDPE < PVC이다.
2. 산화방지제를 첨가한 실험결과는 기존의 방식과 거의 차이가 없었다.

따라서, 지중 절연 케이블의 기저수지는 WVT 특성만을 고려하여 불 때 PVC 대신 가공성이 좋고 특성이 우수한 새로운 절연재료의 대체가 요구된다. 특히 화재의 위험측면에서 불 때 난연성에 대한 연구도 있어야 할 것으로 사료되며, LLDPE 와 MDPE 에 대한 연구가 바람직할 것으로 사료된다.

REFERENCE

- [1] “배전케이블 수명예측 기준결정 및 열화진단 시 스텝 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] Gorden 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] “ Standard Test Methods for Water Vapor Transmission of Materials”E96-95, 1995