

지중 케이블의 외피 재질 및 구조에 따른 수분침투 특성

Water Ingress of URD Power Cables with the Jacketing Materials and the Cable Structures

한재홍, 김동명, 이재봉

(Jae Hong Han, Dong Myung Kim, Jae Bong Lee)

Abstract

In order to evaluate the water ingress to URD power cables with the jacketing materials and the cable structures, water vapor transmission (WVT) tests were carried out by the ASTM and the TEPCO's specification. All polyolefin compounds showed the superior water suppression to conventional PVC. Especially, linear polyethylenes have very low WVT. In case of cable structures, Al laminate cables showed the significant water suppression due to the watertight structure. Accordingly, it can be concluded that jacketing material and cable structure play an important role in the water suppression of URD power cables.

Key Words : URD power cable, Jacket compound, Cable structure, Water vapor transmission

1. 서 론¹⁾

지중 배전케이블은 중요 수용가에 전력을 공급하는 기자재이며, 고장발생시 복구에 많은 인력과 비용이 소요된다. 국내에서 발생하고 있는 고장의 대부분은 외상에 의한 것을 제외하고는 수분침투가 가장 중요한 문제로 알려져 있다[1]. 지금까지 대부분의 연구들은 절연층 재료의 개선에만 국한되어 왔으며[2-3], 도체 수밀한 케이블의 도입에도 불구하고 고장은 감소되지 않고 있는 실정이다.

현재의 지중 케이블 구조를 고려해보면 도체가 수밀되어 있고, 중성선의 상하부에 부풀음테이프를

적용하기 때문에 케이블 방향 (machine direction) 으로의 수분침투는 일어나기 곤란하다. 하지만, 전력케이블에서의 수분침투가 확산과정에 의존하기 때문에 외피를 통한 radial 방향의 수분침투가 불가피하며[4], PVC (polyvinyl chloride)가 중성선 위에 overlaying 되어 있는 케이블 구조의 경우에는 PVC가 극성기를 가진 재료이기 때문에 궁극적으로 수분침투를 억제하기는 곤란하다[5]. 따라서 최근의 케이블 연구동향은 외피재료 및 케이블 구조개선을 통해 절연성능을 향상시키는 방향으로 나아가고 있다[6-8]. 따라서 전력케이블을 원래의 기대수명까지 사용하기 위해서는 외피 재료 및 케이블 구조에 대한 면밀한 검토가 수반되어야 한다.

본 연구에서는 기존 PVC 외피 재료를 대체하기 위하여 폴리올레핀 (polyolefin) 컴파운드를 개발하였으며, 그 특성을 비교평가하였다. 또한 케이블

한국전력공사 전력연구원
(대전시 유성구 문지동 103-16)
Fax : 042-865-5804
E-mail : jhhan@kepri.re.kr

구조에 따른 수분침투 특성을 평가하기 위해 3가지 구조에 대한 수분침투시험을 실시하였다.

2. 실험

2.1 컴파운드 제조

기존의 PVC 외피 재료를 대체할 수 있는 컴파운드를 개발하기 위하여 현재 국내에서 시판되고 있는 총 6종의 폴리에틸렌을 기저수지 (base resin)로 선정하였다. 외피 재료로써 폴리에틸렌을 선정한 이유는 저가이면서도 가공이 용이하고, 물리적 특성이 우수하다고 알려져 있기 때문이다[7]. 본 연구에서는 LDPE 2종, LLDPE 2종, MDPE 및 HDPE 각각 1종을 사용하였다.

외피용 컴파운드의 조성은 표 1과 같으며, 기저수지의 종류만을 변화시켰다. 제조방법은 기저수지를 용융시킬 수 있는 적당한 온도 (약 125~135℃)의 two-roll mill에서 수지를 충분히 용융시킨 후 여기에 카본블랙 및 기타 첨가제를 순서에 따라 투입하여 제조하였다. 제조시 roll 간격을 조절하는 등의 방법으로 충전제가 잘 분산되도록 하였다.

표 1. 외피 컴파운드의 조성

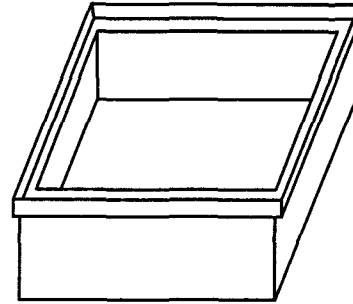
Table 1. Compositions of jacket compounds

요 소	합 량 (pphr)
기저수지	100
산화방지제	0.5
가공조제	0.2
카본블랙	2.6

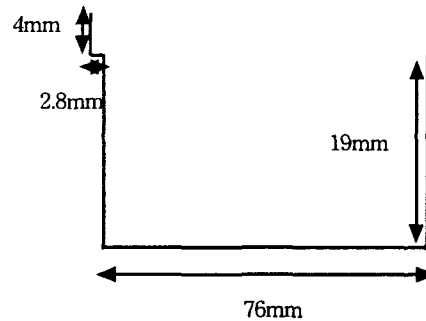
2.2 시험방법

외피 재료에 따른 수분침투 특성을 평가하기 위하여 ASTM E 96에 의거하여 수증기투과 (water vapor transmission; WVT) 시험을 실시하였다[9]. 본 시험에 사용한 시험접시는 알루미늄 재질이며, 자세한 크기 및 모양은 그림 1과 같다.

시험에 사용한 desiccant는 크기가 2~3 mm 정도인 무수 염화칼슘 (CaCl₂)이며, 시료를 시험접시에 부착하는데 실란트를 사용하였다. 이와 같이 시험접시에 시료를 조립한 다음 무게를 측정하고, 온습도 조절이 가능한 시험챔버에 설치하였다. 시험조건은 온도 32±0.6℃, 상대습도는 50±2%를 선택하였다. 한편 시험시간에 따른 주기적 중량측정에 전자저울을 사용하였으며, 수증기투과율을 얻기 위하여 8~10개의 데이터를 확보하였다.



(a) 전체 모형



(b) 단면도

그림 1. 수증기투과 시험용 접시

Fig. 1. Dish for water vapor transmission test

시험시료는 hot press를 사용하여 180℃ 온도에서 10분간 압축성형하여 0.8 mm의 두께로 제작하였다. 각각의 재질별로 3개의 시료를 시험접시에 설치하여 동시에 시험하였으며, 접착불량에 의해 오차가 크게 나타난 시료는 분석에서 제외하였다.

수증기 투과율의 계산에서는 시험시간에 따른 중량변화를 plot한 다음 직선을 그어서 기울기를 구하였다. 수증기투과율은 아래와 같은 식으로 표현되는데,

$$WVT = G/tA = (G/t)/A \dots \dots \dots (1)$$

여기에서 G는 직선에서의 중량변화 (g), t는 시간 (h), 직선 기울기 (g/h), A는 시험접시 입구면적 (m²), WVT는 수증기투과율 (g/h·m²)이다.

한편 케이블 구조에 따른 수분침투 특성을 연구

하기 위하여 다음과 같이 3종류의 케이블을 제조하였다. 즉 기존 CNCV-W 케이블, 캡슐형 외피 케이블, laminate 외피 케이블이다. 각각의 케이블에서 외피 재료는 순서대로 PVC, LLDPE, LLDPE를 사용하였다. 실제 케이블에 대한 수분침투 시험에서는 ASTM 방법을 적용하기 곤란하므로, 실제 케이블에 대한 시험규격인 동경전력 (TEPCO)의 방법을 사용하였다[10]. 완제품으로부터 약 0.3 m 정도의 코어를 제거한 다음 외피내에 실리카겔 100 g을 채운다. 60℃의 물에 케이블 시료를 침수하여 10일, 20일, 30일의 중량변화를 측정하며, 아래의 식을 사용하여 투습도를 계산하였다.

$$\text{투습도}(P) = \frac{Q}{L} \times \log\left(\frac{R_2}{R_1}\right) \dots \dots (2)$$

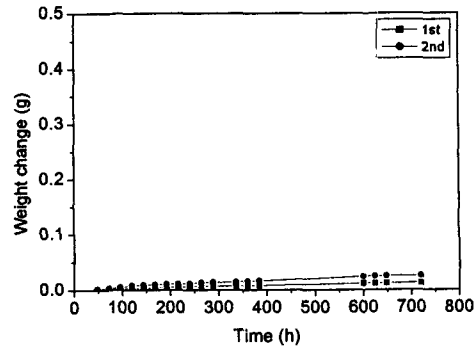
여기에서 Q는 투과수분량 (g), L은 시료길이 (cm), R₁은 차수층 내경 (cm), R₂는 외피 외경 (cm), d는 시험온도에 따른 포화수증기압 (mmHg, 60℃의 경우 149.5 mmHg), t는 시험시간 (day)이다. 따라서 단위는 g·cm/cm²·day·mmHg이다. 케이블 구조에 따라 각각 3개를 동시 시험하였으며, 중량 변화를 평균하여 투습도를 구하였다.

3. 결과 및 고찰

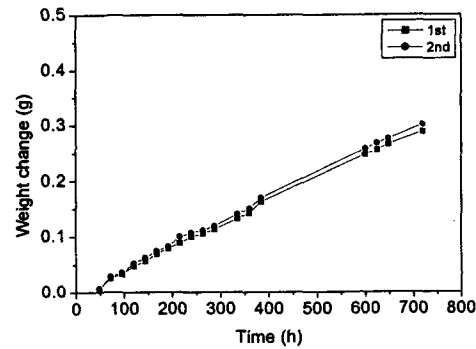
3.1 외피 재료에 따른 수분침투 특성

외피용 컴파운드에 대해 수증기투과 시험을 실시한 결과가 그림 2에 나와 있으며, MDPE 및 PVC 컴파운드의 경우를 대표적으로 나타내었다. 그림과 같이 시험시간의 증가에 따라 수증기 투과는 약간 증가하는 경향이 나타났으며, 15일 이후에는 큰 변화가 나타나지 않았다. 그림의 기울기로부터 구해진 수증기 투과율이 표 2에 나와 있다. HDPE>MDPE>LLDPE>LDPE 순으로 수증기투과에 대한 저항성이 우수한 것으로 나타났다. 수증기 투과율은 재료의 밀도와 상관성이 있음을 알 수 있으며, 또한 선형 고분자에서 특성이 우수하므로 사슬의 분지도 (degree of chain branching)도 영향이 있는 것으로 판단된다.

한편 기존 PVC 컴파운드는 폴리올레핀 컴파운드보다 수 십배 이상의 높은 수증기 투과율을 나타내었다. 이는 PVC 분자구조내에 존재하는 극성기에 의해 나타나는 것으로 판단된다[5].



(a) MDPE 컴파운드



(b) PVC 컴파운드

그림 2. MDPE 및 PVC 컴파운드의 수증기투과
Fig. 2. WVT of MDPE and PVC compounds

표 2. 외피용 컴파운드의 수증기투과율
Table 2. WVT rate of compounds
(단위: g/h·m²)

시료명	1차	2차
LDPE1	0.0076	-
LDPE2	0.0061	-
LLDPE1	0.0063	0.0058
LLDPE2	0.0068	0.0051
MDPE	0.0030	0.0052
HDPE	0.0033	0.0034
PVC	0.0718	0.0742

-: not tested

3.2 케이블 구조에 따른 수분침투 특성

표 3은 3가지 구조의 케이블에서 30일간 측정된 투습도를 나타낸 것이다. 표에서 알 수 있는 것처럼 완전차수 형태인 Al laminate 케이블이 가장 우수한 수분억제 특성을 보였다. 이는 케이블 외피 내로 수분이 통과하더라도 laminate층이 완전한 방수를 하기 때문인 것으로 보인다. 이러한 수치는 송전케이블에서 요구하는 $1 \times 10^{-7} \text{ g} \cdot \text{cm}/\text{cm}^2 \cdot \text{day} \cdot \text{mmHg}$ 이하를 충분히 만족하는 수준이다.

그 다음으로 성능이 우수한 것은 폴리올레핀 재료를 사용한 캡슐형 외피 케이블이며, 가장 취약한 특성을 보인 것은 CNCV-W 케이블이다. 이러한 두 종류의 케이블에서 차이가 나타난 주요 이유는 구조적인 것보다는 재료 자체의 고유한 특성에 기인한 것으로 판단된다. 즉, 캡슐형 외피 케이블이 폴리올레핀 재료를 사용했기 때문에 수분침투 저항성이 더 높게 나타난 것으로 보인다.

표 3. 케이블 구조에 따른 투습도

Table 3. Permeability with cable structures

케이블 구조	투습도
CNCV-W	9.12×10^{-7}
캡슐형 외피	6.38×10^{-7}
Laminate 외피	1.60×10^{-8}

4. 결론

본 연구에서는 지중 배전케이블의 외피 재료 및 케이블 구조에 따른 수분침투 특성을 평가하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 외피 재료에 따른 수분침투 특성시험에서 모든 폴리올레핀 컴파운드는 PVC보다 수 침투 이상의 우수한 저항성을 나타내었으며, 분자구조 및 밀도가 수증기투과 특성에 큰 영향을 주었다.

2) 케이블 구조에 따른 수분침투 특성시험에서는 laminate 외피 케이블이 가장 우수한 성능을 나타내었으며, 폴리올레핀 재료를 사용한 캡슐형 외피가 좋은 성능을 나타내었다. 반면 PVC를 사용한 CNCV-W 케이블은 수분침투에 가장 취약한 것으로 나타났다.

3) 상기의 결과로부터 지중 배전케이블에서 수분침투를 억제하기 위해서는 외피 재료 및 케이블 구조에 대한 검토가 필요함을 알 수 있었다.

참고 문헌

- [1] 설규환 외, "2000년 지중고장 분석 및 대책", 한전 서울지역본부, pp. 10, 2001.
- [2] S. Nagasaki et al., "Development of Water-Tree-Retardant XLPE Cables", *IEEE Trans. PAS*, PAS-203, pp. 536, 1984.
- [3] 한민구 외, "수트리 억제형 22.9 kV CN/CV 케이블 개발", 한국전력공사 생산기술발전 연구과제, pp. 73, 1998.
- [4] W. S. M. Geurts et al., "Moisture Penetration in XLPE and PILC Cables", *Proc. of Jicable'99*, pp. 353, 1999.
- [5] G. Graham and S. Szaniszló, "Insulating and Semiconductive Jackets for Medium and High Voltage Underground Power Cable Applications", *IEEE Trans. Electr. Insul., Magazine*, Vol. 11, pp. 5, 1995.
- [6] "지중 배전케이블의 절연성능 향상에 관한 연구", 한전전력연구원 연구과제 중간보고서, TM.00PC02.M2001.451, pp. 7, 2001.
- [7] O. Henschke et al., "New polyethylene compounds for cable jacketing applications", *Proc. of Jicable'99*, pp. 636, 1999.
- [8] J. P. Crine, "Future R&D Needs and Development for HV Cables", *Proc. of 2002 ISEI*, pp. 124, 2002.
- [9] ASTM E 96, "Standard Test Methods for Water Vapor Transmission of Materials", 1995.
- [10] "154 kV CV 케이블 규격", 동경전력 구매 구매시방서 5A-5, 1995.