

지중 배전케이블의 열화에 미치는 온수의 영향

Effects of Hot Water on the Aging of URD Power Cables

한재홍, 송일근, 김주용, 이병성, 정종욱

(Jae Hong Han, Il Keun Song, Ju Yong Kim, Byung Sung Lee, and Jong Wook Jeong)

Abstract

In this study, we investigated the effects of hot water on the aging of URD power cables due to the hot water ingress to power distribution lines. Hot water contacted and non-contacted cables extracted from 2 distribution lines were characterized by the measurement of oxidation induction time(OIT) and chemical structure. In OIT measurement, hot water contacted cables showed the shorter OIT than non-contacted ones. Especially, hot water contacted insulation layer near insulation shield showed the shortest OIT. In chemical structure analysis, the antioxidant content was decreased and the acid concentration was increased by hot water ingress. From this results, it can be concluded that the hot water ingress to power cable may be accelerate the aging by means of antioxidant consumption.

Key Words : URD power cable, Aging, Hot water, Antioxidant

1. 서론

산업발전이 고도화되고 환경친화가 강조되면서 가공으로 전력을 공급하던 방식이 점차 지중공급 방식으로 전환되고 있다. 2001년 기준으로 하여 전체 배전선로에서 지중선로가 8.9% (15,247 C·km)를 점유하고 있으며, 지중화가 많이 진행된 서울지역의 경우에는 약 50%에 육박하는 지중화율을 보이고 있다[1,2].

이러한 지중화를 증가는 전력공급에서만 국한된 것이 아니고 다른 시설 및 설비에서도 나타나고 있는 현상이다. 실제로 지중에는 배전케이블 외에도 통신 케이블, 상하수도관, 지역난방관 등이 매우 혼잡하게 설치되어 있다. 따라서 전기공사가 아닌 다른 공사로 인해 외상고장이 크게 증가하고

있는 실정이며, 타 설비고장으로 인해 전력설비가 피해를 입는 경우도 발생하고 있다[3,4].

현재 한국전력공사에서는 이러한 상황을 고려하여 지중 배전선로와 타 시설과의 이격 거리를 규정하고 있다[5]. 예를 들면 지역난방관과 같은 비가연성, 비유독성 관의 경우에는 30 cm의 이격을 명시하고 있다. 하지만 현장 여건상 이러한 이격이 곤란한 경우가 발생할 수 있으며, 따라서 이러한 영향에 대해 연구할 필요성이 높아지고 있다.

최근 지중 배전케이블과 인접해 설치되어 있던 지역난방관에서 온수가 누수되어 지중 배전케이블이 포설되어 있는 판로내로 유입된 사건이 발생하였다. 따라서 이러한 온수유입이 케이블 열화에 미치는 영향을 조사하기 위해 온수 접촉부와 비접촉부의 절연층에 대한 특성분석을 아래와 같이 실시하였다.

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

2002년 2월 20일 접수, 2001년 3월 22일 1차 심사 완료,
2002년 4월 9일 최종 심사 완료

2. 실험

본 연구에서는 장기간 온수유입이 발생한 2개

배전선로의 케이블을 대상으로 온수에 접촉된 부분과 온수에 접촉되지 않은 부분에서 각각 케이블 시료를 발췌하였다. 온수에 접촉되지 않은 케이블은 온수유입 개소로부터 먼 부분에 위치한 케이블로써, 온수접촉 케이블과 동일한 케이블이다. 발췌한 케이블 시료는 모두 1993년 설치되어 약 8년간 운전 중이던 것이며, 325 mm²의 CNCV 케이블이다. 각 시료의 구분을 위해서 지역난방관과 가장 근접한 배전선로를 A D/L, 그 옆의 배전선로를 B D/L로 명명하였다. 또한 접촉부 및 비접촉부로 온수유입 여부를 나타내었다.

온수가 케이블 열화에 미치는 영향을 분석하기 위하여 그림 1과 같이 케이블 도체를 제거한 후 선반을 이용하여 리본형과 코일형으로 가공하였다[6]. 리본형으로 가공한 시료는 산화저항성 분석에 사용하였으며, 코일형 시료는 화학구조결합 분석에 사용하였다.

우선 산화저항성 분석에서는 시차주사열량계(differential scanning calorimeter; DSC)를 이용하여 내부반도전층 부근 및 외부반도전층 부근의 절연층에 대해 산화유도시간(oxidation induction time; OIT)을 측정하였다. 측정조건은 ASTM에 의거하여 시험하였는데, 먼저 시료의 온도를 질소 분위기에서 10°C/min의 속도로 200°C까지 승온한 다음 이 온도에서 5분간 유지한 후 산소분위기로 바꾼 상태에서 발열반응인 산화반응이 나타나는 시간을 측정하였다[7]. 산화유도시간의 결정은 그림 2와 같이 DSC thermogram으로부터 구해진다. 이때 질소와 산소의 유량은 50 ml/min이며, 시료량은 약 10 mg이었다. 측정에는 알루미늄팬을

사용하였으며 측정 전에 인듐을 이용하여 측정 온도범위를 보정하였다.

한편 화학구조결합의 분석에서는 마이크로 적외선분광기(micro-fourier transform infrared spectroscopy; micro-FTIR)를 사용하였는데, Perkin-Elmer사(모델명: Paragon 1000)의 기기를 사용하였다. 시료두께에 걸쳐 화학구조결합의 변화를 측정하였으며, 각 특성피크의 흡광도(absorbance)를 peakfit 프로그램을 사용하여 구한 후 식(1)을 이용하여 1,000개 탄소당 화학구조결합의 농도를 계산하였다[8].

$$n = \frac{\epsilon A}{\rho t} \tag{1}$$

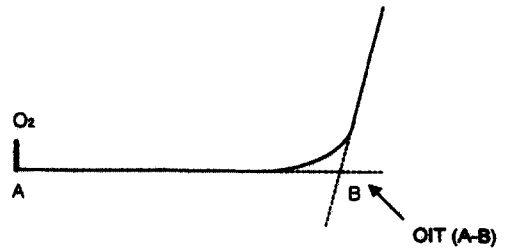


그림 2. DSC thermogram에서의 OIT 분석.

Fig. 2. OIT analysis from DSC thermogram.

표 1. 산화 폴리에틸렌의 FTIR 피크특성.

Table 1. FTIR peak characteristics of oxidized polyethylene.

파수 (cm ⁻¹)	구조		흡광계수
888	vinylidene methyl	RR'C=CH ₂	0.116
909	terminal vinyl	R-CH=CH ₂	0.099
966	trans vinylene	R-CH=CH-R'	0.140
1700	acid	R-COO-H	0.132
1720	ketone	R-CO-R'	0.055
1736	aldehyde	R-CO-H	0.0426
1742	ester	R-COO-R'	0.162

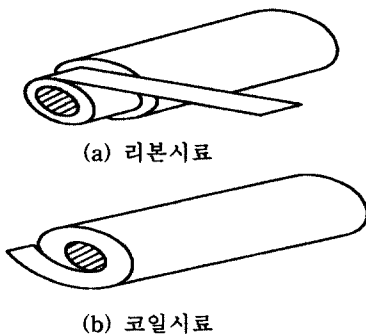


그림 1. 시료 가공.

Fig. 1. Preparation of specimen.

여기에서 n 은 1,000개 탄소당 화학구조결합의 농도, ϵ 은 흡광계수(extinction coefficient), A 는 흡광도, ρ 는 시료밀도, 그리고 t 는 시료두께이다. 표 1은 산화된 폴리에틸렌에서 발견되는 화학구조결합의 피크특성을 나타낸 것이다[9-10]. 표에서 주요 관심이 되는 피크는 산화방지제 잔류량과 관련이 있는 ester기[11]와 열화시 증가하는 acid기이다.

3. 결과 및 고찰

3.1 산화저항성 변화

그림 3은 A D/L 케이블에서 온수에 접촉된 외부반도전층 부근 절연층의 산화유도시간을 측정하는 thermogram을 대표적으로 나타낸 것이며, 표 2는 발췌한 케이블 절연층에 대해 각각 2개 위치(내부반도전층 부근 및 외부반도전층 부근)에서 측정된 산화유도시간을 나타낸 것이다.

표에서 알 수 있는 것처럼 온수에 접촉된 케이블이 접촉되지 않은 케이블보다 짧은 산화유도시간을 보인다. 또한 온수 접촉 케이블의 경우에는 외부반도전층 부근 절연층이 더욱 짧은 산화유도시간을 보이고 있다. 반면 온수에 접촉되지 않은 케이블의 경우에는 반대로 외부반도전층 부근 절연층이 더 긴 산화유도시간을 나타내고 있다. 이러

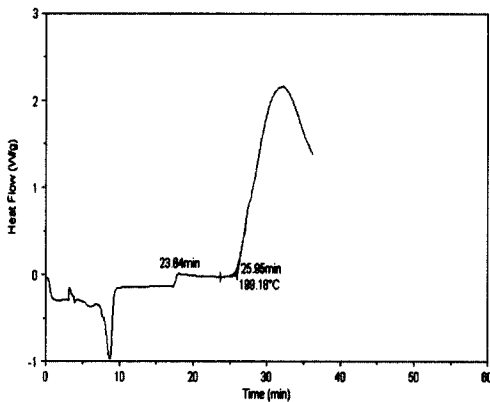


그림 3. OIT 측정 예(A D/L, 온수에 접촉된 외부반도전층 부근 절연층).

Fig. 3. Example of OIT measurement (A D/L, hot water contacted insulation layer near insulation shield).

한 결과는 온수가 관로내로 유입되어 외부반도전층 부근의 절연층에 더욱 영향을 미쳤기 때문인 것으로 판단되며, 온수유입은 산화저항성을 감소시키는 요인으로 작용함을 알 수 있다.

또한 표에서 온수에 접촉된 A D/L 케이블이 온수에 접촉된 B D/L 케이블보다도 더 짧은 산화유도시간을 보이는 이유로는 A D/L이 지역난방관과 더욱 가깝게 위치하고 있기 때문인 것으로 판단된다. 실제로 그림 4에 나타난 것처럼 온수에 접촉된 A D/L 케이블의 자켓이 심한 열변형을 나타내었다.

표 2. 온수 접촉/비접촉 케이블의 산화유도시간.

Table 2. OIT of hot water contacted/non-contacted cables.

시료명		OIT(분)
A D/L 접촉부분	내부반도전층 부근	5.0
	외부반도전층 부근	4.0
A D/L 비접촉부분	내부반도전층 부근	11.5
	외부반도전층 부근	18.9
B D/L 접촉부분	내부반도전층 부근	7.5
	외부반도전층 부근	6.8
B D/L 비접촉부분	내부반도전층 부근	8.9
	외부반도전층 부근	11.3

그림 4. A D/L 케이블 자켓에서 나타난 열변형.

Fig. 4. Thermal deformation of jacket in A D/L cable.

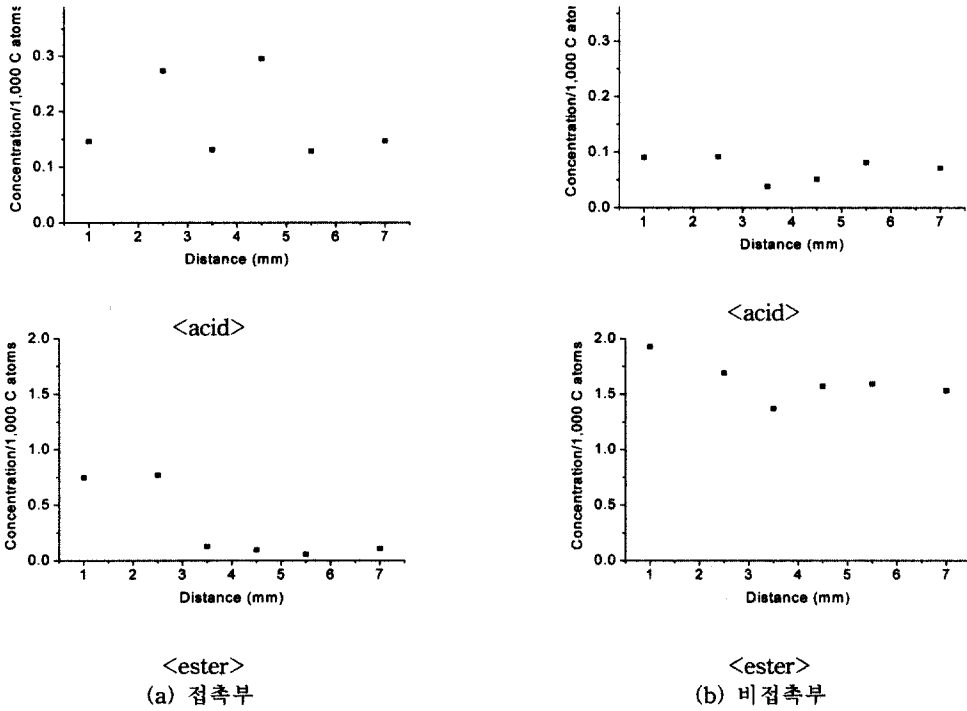


그림 5. A D/L 케이블의 화학구조결함 분포도(a: 접촉부, b: 비접촉부).

Fig. 5. Distribution of chemical structural defects of A D/L cables(a: contact, b: non-contact).

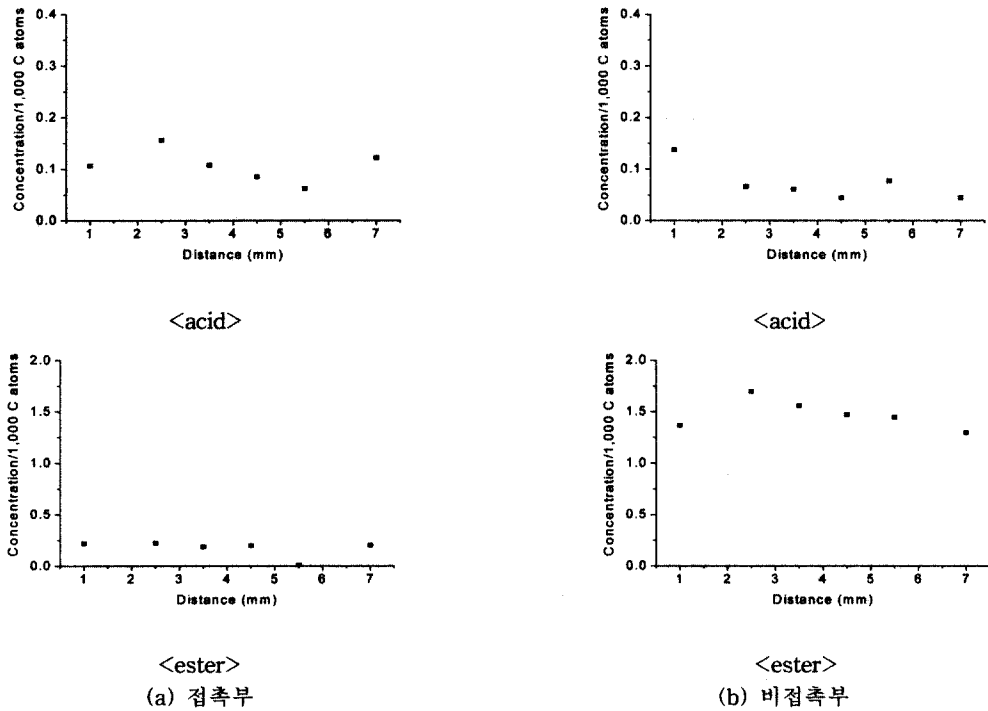


그림 6. B D/L 케이블의 화학구조결함 분포도(a: 접촉부, b: 비접촉부)

Fig. 6. Distribution of chemical structural defects of B D/L cables(a: contact, b: non-contact)

3.2 화학구조결합 변화

Micro-FTIR을 이용하여 화학구조결합의 변화를 측정된 결과가 그림 5 및 그림 6에 나와 있다. 그림의 가로축에서 "1"은 내부반도전층 부근의 절연층을 의미하여, "7"은 외부반도전층 부근의 절연층을 나타낸다. 그림으로부터 알 수 있는 것처럼 온수 접촉 케이블의 경우에는 acid기의 분포가 매우 불균일하고, 농도가 높게 나타났다. 한편 산화방지제 잔류량과 관련이 있는 ester기의 경우에는 온수 접촉에 의해 농도가 매우 감소되는 결과가 나타났다. 특히 온수의 영향을 더 받은 외부반도전층 부근의 절연층에서 이러한 감소 현상이 두드러지게 나타났다. 이와 같은 결과로부터 온수는 산화방지제의 잔류량을 감소시키고, 열화를 증가시키는 요인으로 작용한다고 판단된다.

3.3 고찰

온수유입이 케이블 열화특성에 미치는 영향을 파악하기 위하여 산화저항성 및 화학구조결합 변화를 분석하였다. 분석결과, 온수에 접촉된 케이블의 경우에는 산화유도시간이 감소하는 것으로 나타났으며, 특히 온수의 영향을 더 받은 외부반도전층 부근 절연층에서 이러한 현상이 더욱 심하였다. 산화유도시간은 산화방지제 잔류량과 밀접한 관련이 있는 것으로 알려져 있으며[11-12], 따라서 온수 접촉에 의한 산화유도시간의 감소는 산화방지제의 소모에 의한 것으로 판단된다.

또한 화학구조결합의 분석에서 온수유입은 ester기를 감소시키고, acid기를 증가시키는 것으로 나타났다. Ester기가 산화방지제 함량과 직접적인 관련이 있다는 점에서 이러한 농도 감소는 산화저항성의 감소를 의미한다고 판단되며, 이는 산화유도시간의 분석결과와 잘 일치하는 것으로 나타났다. 결국 온수유입에 의해 산화유도시간이 감소하는 것은 화학구조결합 분석에서 알 수 있는 것처럼 산화방지제가 열화방지를 위해 소모되었기 때문이다. Acid기는 케이블 가교 직후에는 매우 높은 농도를 보이다가 운전시간의 경과에 따라 거의 소멸되는 것으로 알려져 있으므로, 절연층 자체가 열화되어 농도가 증가한 것으로 판단된다[13].

4. 결 론

본 연구에서는 온수유입이 지중 배전케이블의 열화에 미치는 영향을 조사하였으며, 다음과 같은

결론을 얻었다.

1. 온수에 접촉된 케이블은 접촉되지 않은 케이블보다 더 짧은 산화유도시간을 나타내었으며, 따라서 온수는 케이블 절연층의 산화저항성을 감소시키는 요인임을 알았다.
2. 케이블로의 온수유입은 화학구조결합에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 즉, ester기를 감소시키고 acid기를 증가시켰다.
3. Ester기가 산화방지제 잔류량과 밀접한 관련이 있다는 점에서 온수는 산화방지제의 소모를 가속시켜 케이블 열화를 촉진하는 것으로 판단된다.

참고 문헌

- [1] 한재홍, 김주용, 김동명, "지중 배전케이블의 절연성능 향상에 관한 연구(TM.00PC02. M 2001.451)", 한전전력연구원 연구 과제중간 보고서, p. 3, 2001.
- [2] 한재홍, 송일근, 임장섭, 이동영, "전력케이블용 반도체재료의 설계기술", B. of KIEEME, Vol. 13, No. 2, p. 12, 2000.
- [3] 정창수, 이우선, 한재홍, "지중 배전케이블의 고장원인 특성분석", 전기전자재료학회논문지, 12권, 5호, p. 423, 1999.
- [4] 설규환, "2000년 지중고장 분석 및 대책", 한전 서울지역본부, p. 10, 2001.
- [5] 김병숙, 조성수, "지중배전 설계편람(TM. 96E J30. 1999.102)", 한전전력연구원 연구과제 최종보고서, p. 52, 1999.
- [6] K. S. Suh, C. H. Lee, M. K. Lee, J. H. Han, and S. J. Kim, "Characterization of XLPE- Insulated Underground Residential Power Cables", Trans. KIEE, Vol. 45, No. 6, p. 882, 1996.
- [7] Oxidative Induction Time of Polyolefins by Thermal Analysis, ASTM Std. D3895, 1980.
- [8] E. Cernia, C. Mancini, and G. Montaudo, "Contribution to the investigation of polyethylene by infrared techniques", Polym. Lett., Vol. 1, p. 371, 1963.
- [9] T. Niwa, S. Nakayama, K. Kobayashi, T. Nakatsuka, and T. Takahashi, "Characterization of polyethylene for power cable

- insulation", Trans. IEEJ, Vol. A-113, p. 638, 1993.
- [10] K. Iida, J. S. Kim, S. Nakamura, and G. Sawa, "Effects of molecular structure on electrical conduction in low-density polyethylene above its melting point", IEEE Trans. Electr. Insul., Vol. 2, p. 391, 1992.
- [11] J. E. Kim, K. S. Suh, H. G. Yoon, J. S. Lim, J. H. Han, S. J. Kim, and G. J. Lee, "A technique for estimation of residual lifetime of underground distribution cables by antioxidation of insulation", Trans. on KIEE, Vol. 47, No. 12, p. 2064, 1998.
- [12] 김상준, 한재홍, 김주용, 송일근, "배전케이블 수명예측 기준결정 및 열화진단 시스템 구축 (TR.95YJ16.L. 199787)", 한전전력연구원 연구과제 최종보고서, p. 368, 1997.
- [13] 박정기, 이우선, 한재홍, "방사선조사에 따른 원전 저압케이블용 절연재료의 특성분석", 전기전자재료학회논문지, 14권, 5호, p. 397, 2001.