

외국 지중배전케이블의 특성분석

Characterization of Foreign Undergrounded Distribution Cables

고정우 고려대학교 재료·금속 공학부

오우정 고려대학교 재료·금속 공학부

김종은 고려대학교 재료·금속 공학부

서광석 고려대학교 재료·금속 공학부

Jung Woo Ko Div. of Materials Science and Metallurgy, Korea University

Woo jeong Oh Div. of Materials Science and Metallurgy, Korea University

Jong Eun Kim Div. of Materials Science and Metallurgy, Korea University

Kwang S. Suh Div. of Materials Science and Metallurgy, Korea University

Abstract

In order to compare with domestic underground distribution cables, the foreign cable which was manufactured in USA, 1982 and has been serviced in field for 13 years was characterized with several tests. Water trees, voids, and convolutions are not found in insulation. In hot oil test, insulation is very clean and there was no separation of insulation and conductor shield. The results of degree of crosslinking, FTIR, and DSC are also usual. Specially, the distribution of OIT is very good, which is different from that of domestic cables. The content of impurities is relatively small. This cables was manufactured with good state and no extraordinary degradation is found.

1. 서론

국내 지중배전 케이블에 대해서 행해진 특성 분석을 보면, 경년 케이블이나 사고 케이블의 경우, 육안 검사나 수트리 검사 등에서 상당한 열화 현상이 발견되었다. 그리고 케이블 제조 공정과 관련된 특성인 가교도 및 수축률 등에서도 일부 문제점이 관찰되었다 [1]. 설계 내용년수가 30년임에도 불구하고 실제 수명은 8~12년에 불과한 국내 지중배전 케이블의 실정을 볼 때 이와는 다른 외국 케이블의 특성 분석이 필요하다 할 수 있다.

이에 본 연구에서는 미국에서 1982년 제조되어 지중에 매설돼 13년 사용된 경년케이블에 대해서 육안 검사와 수트리 검사, 핫 오일 테스트, 가교도, DSC 분석, 적외선 분광기를 통한 화학결합 분석, 체적고유저항, 수축률 측정, 불순물 분석, SEM 관찰 등의 특성분석을 실시하였다.

2. 시편제작 및 특성분석

2.1 시편제작

분석에 사용된 케이블은 도체가 Aluminum, 507.0 mm²이고, 절연체는 XLPE로 두께는 6.6 mm이다. 소형정밀선반을 이용하여 그림 1과 같이 시료를 제작하였다. 나선형 시료는 수트리 검사, FTIR 분석 및 체적고유저항 측정을 위한 것으로 두께는 300~400 μm이고 리본형 시료는 수축률 측정, 가교도 및 DSC 분석을 위한 것으로 두께는 약 300 μm이었다.

SEM 분석과 핫 오일 테스트에는 10 cm의 외도를 제거한 케이블을 사용하였다.

2.2. 특성분석

수트리 검사는 나선형 시료를 끊는 메틸렌 블루 용액에 담가서 염색한 후 현미경을 이용하여 정확한 수트리의 위치와 길이를 측정하였다.

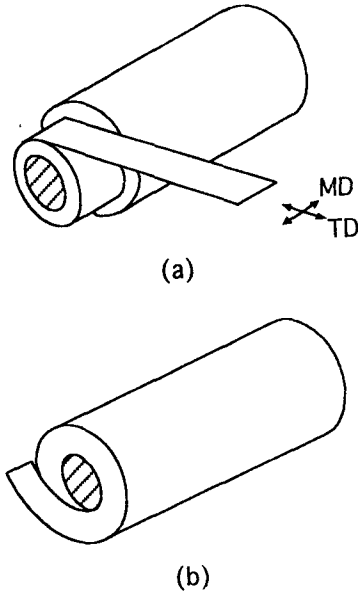


그림 1. 케이블 시료의 개략도: (a) 리본형 시료, (b) 나선형 시료

핫 오일 테스트는 외도를 제거한 케이블을 실리콘 오일에 넣어 120 ~ 130 °C로 가열하고, 투명해진 시료의 아래쪽에 밝은 빛을 놓아 절연층 내부를 관찰하였다.

가교도 측정을 위하여 리본형 시료를 채취하여 무게를 측정 후 150 mesh망에 넣고 xylene 용액 속에서 48시간 동안 추출한 후 진공오븐에서 건조시켜 무게변화를 측정하여 구하였다.

FTIR은 Nicolet (모델명: Nicolet 800, Nicplan)으로 적외선빔의 크기를 30 μm × 30 μm까지 축소시킬 수 있는 Micro-FTIR을 사용하였다. 내도에서 외도 쪽으로 가면서 매 500 μm마다 FTIR 스펙트럼을 얻었고 각 특성피크의 흡광도 (absorbance)를 결정한 후 1,000개 탄소 원자 당 화학구조결합의 농도를 구하였다 [2].

DSC 분석은 TA2000 기종을 사용하였고 시료의 무게는 약 7 mg, 속도는 10 °C/min로 200 °C까지 승온하였고 산화유도시간측정을 위한 산소의 유속은 50 ml/min으로 하였다. 여기서 얻은 용융피크로 용융열, 결정화도 및 밀도를 구하였다.

체적고유저항은 코일형 시료를 원형으로 잘라서 끝부분을 테스터기로 집어서 저항을 측정 후 다은 식을 이용하여 체적고유저항으로 환산하였다.

$$\rho = \frac{R \times A}{\ell} \quad (1)$$

여기서, R = 측정 저항값, A = 단면적, ℓ = 길이

수축률 시험은 리본형 시료를 1.5 cm × 1.5 cm 크기로 채취하여 열 순환 오븐에 넣어 130 °C에서 1시간 방치한 후 치수변화를 측정하였다.

불순물 분석은 ICP-AES (Inductively Coupled-Atomic Emission Spectroscopy) 장치를 이용해 분석하였다. 일정량의 시료를 400 °C에서 4시간, 800 °C에서 6시간 열분해 시킨 다음 잔류물을 5 % 질산으로 용해하여 불순물을 측정하였다.

SEM 관찰은 먼저 케이블의 외도를 벗겨낸 후 절연층과 외도의 반점 유무를 확인하고 이를 SEM으로 관찰하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 육안검사와 수트리 및 핫 오일 테스트

외도 표면에 중성선 부식 자국이 있으나 심하지 않았고, 국내 케이블에서 흔하게 발견되는 convolution은 전혀 관찰되지 않았다. 또한 염색한 후 수트리를 관찰한 결과 발견되지 않았다. 그리고 외도를 제거한 케이블을 실리콘 오일에 넣고 끓인 후 관찰한 결과 절연층 내부의 기포나 보이드, 내도와 절연층의 계면 분리 현상 등이 없이 깨끗한 것이 관찰되었다.

3.2. 가교도 분석

그림 2에 가교도 분포를 나와 있는데 절연층의 모든 부분이 고르게 84 % 정도의 값을 보이나 외도 쪽에서 약 80 % 정도로 감소하였다. 이러한 가교도 분포는 케이블 제작시 나타나는 전형적인 결과라 할 수 있다.

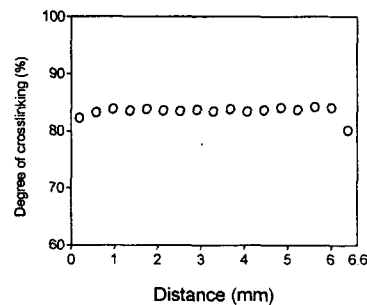


그림 2. 가교도 분포도

3.3. FTIR 분석

그림 3과 4에 대표적인 화학구조결합인 카보닐과 불포화 탄화수소결합의 결과가 나와있다. 가교도와 마찬가지로 두께 방향으로 분포도를 갖는 것

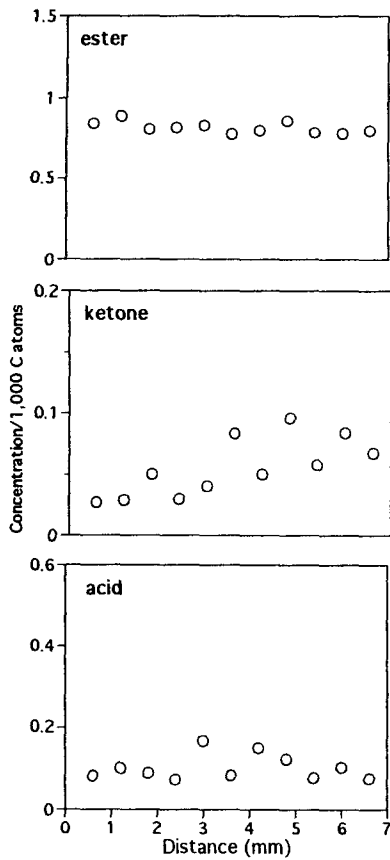


그림 3. 카보닐 성분 분포도

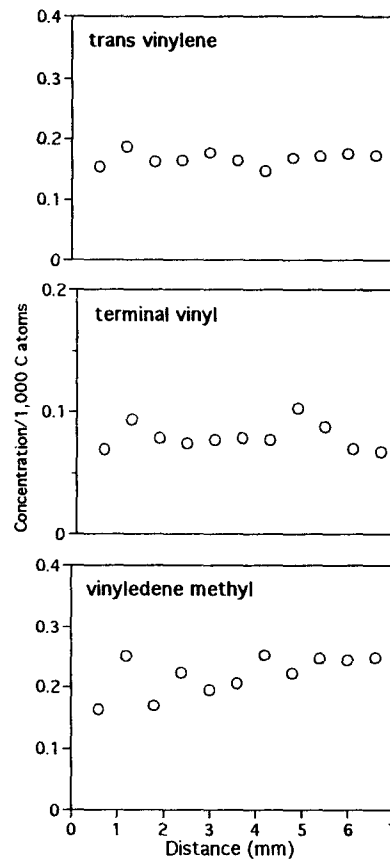


그림 4. 불포화 탄화수소결합 분포도

을 보여준다. 국내 케이블 결과와 비교할 때 ester와 ketone은 높은 값을 보이며 나머지 성분들은 비슷한 값을 나타낸다. ketone은 높은 값을 가지면서 매우 불균일한 분포를 가진다. 그리고 acid 분포는 국내 케이블이 외도 쪽에서 급격하게 증가하는 경향이 자주 보이는데 비하여 [1] 이 케이블은 절연층 중심부에서 약간 높은 값이 관찰되었다.

3.4. DSC 분석

표 1과 그림 5에 DSC를 이용한 열분석 결과를 정리하였다. 이 외국 케이블의 경우 용융열, 결정화도, 밀도, 용융점 모두 국내 케이블에 비하여 낮은 값을 가진다 [1]. 산화유도시간은 5 ~ 12분 사이의 값을 가지며 외도 쪽으로 갈수록 증가하는 경향을 보였다. 이는 산화요인이 많은 외부와 가까운 외도 쪽의 산화방지 능력이 큰 것으로 볼 수 있으므로 바람직한 현상이라 할 수 있다.

3.5. 체적고유저항 및 수축률

체적고유저항은 내도가 1,000 Ωm 이상일 때와 외도가 500 Ωm 이상일 때 규격을 벗어나는 값인

데 이 케이블의 경우 내도가 5.1 Ωm, 외도가 4.1 Ωm로 규격을 벗어나지 않는 작은 값을 보인다.

수축률 값은 MD의 값이 5정도이고 TD의 값이 3정도이다. 이 값은 국내에서 최근에 제작된 케이블의 수축률과 비슷한 결과이다 [2].

3.6. 불순물 분석 및 SEM 관찰

표 2에 차폐층 및 절연층에 들어있는 불순물의 총량이 나와있다. 그 분석 결과를 보면 인위적으로 첨가된 Mg와 Zn을 제외하고 Ca, Si, Fe, Na 등이 검출되었는데 많은 종류의 이온이 검출된 것은 아니며 Mg와 Zn을 제외한 불순물 총량은 그리 많다고 볼 수 없는 결과이다.

케이블의 외도를 제거하고 절연층 표면과 외도를 관찰한 결과 절연층에 다수의 검은 반점이 존재하고 있으며 국내 케이블과 마찬가지로 절연층에 검은 반점이 있으면 외도에 함침자국이 있고 외도에 불순물이 있으면 절연층에 함침자국이 있는 것을 발견할 수 있었고, 이를 SEM을 통하여 관찰하였다. 이 검은 불순물의 크기는 약 100 ~ 150 μm이었다.

표 1. DSC/OIT 분석 결과

Distance* (mm)	T _m (°C)	ΔH (cal/g)	OIT (min)	Crystallinity (%)	Density (g/cm ³)
0.2	108	24	5	35	0.885
0.6	108	24	5	35	0.885
1.4	107	24	6	34	0.885
2.5	108	24	6	30	0.878
4.1	105	23	8	33	0.883
5.2	105	24	8	34	0.885
6.0	107	22	10	32	0.881
6.4	107	22	12	33	0.882

*: 내도쪽으로 부터의 거리

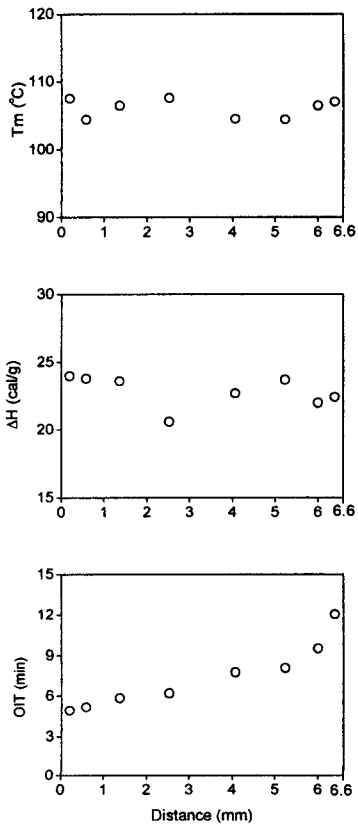


그림 5. T_m, ΔH, OIT 분포도

표 2. 불순물 함량

(unit: ppm)

	Ins. shield	Con. shield	Ins.
Ca	254	-	-
Si	529	48	-
Fe	64	-	-
Zn	3,366	-	-
Mg	826	-	-
Na	11	-	-
total	5,050	48	-

∴ 미검출

4. 결론

본 연구에서 나타난 분석 결과를 종합하면 이 케이블은 1982년에 제조되어 10년 이상 사용되었으나 매우 양호한 특성을 보인다. 즉, 절연층 내부의 수트리나 보이드는 관찰되지 않았고 convolution 현상도 관찰되지 않았다. 핫 오일 테스트 결과 절연층 내부가 굉장히 깨끗했으며 내도와 절연층의 분리현상은 관찰되지 않았다. 가교도, FTIR, DSC 등의 분석에서도 특이한 현상은 관찰되지 않았다. 특히 산화유도시간의 분포가 국내케이블과는 달리 매우 양호한 분포를 보인다. 불순물 역시 비교적 많지 않은 양호한 상태를 나타냈다. 분석결과를 종합해 보면 이 케이블은 매우 양호한 상태로 만들어졌으며 오랜동안 지중에서 사용되었음에도 아직 특별한 열화현상은 발견되지 않았다.

참고문헌

- [1] 서광석외, *Proc. Spring Sympo. KIEEME*, 130 (1997)
- [2] 서광석외, *Trans. KIEE*, Vol. 46, No. 8, 1249 (1997)