

한국전기전자재료학회 춘계 학술대회 논문집 1997.

## 지중배전 케이블의 특성분석 - 화학구조결함, 불순물, 가교도, 수축율 -

### Characterization of Undergrounded Distribution Cables – Chemical Structural Defects, Impurities, Degree of Crosslinking and Shrinkage

김종은 고려대학교 재료·금속 공학부  
고정우 고려대학교 재료·금속 공학부  
서광석 고려대학교 재료·금속 공학부

Jong Eun Kim Dept. of Materials Science and Metallurgy, Korea university  
Jung Woo Ko Dept. of Materials Science and Metallurgy, Korea university  
Kwang S. Suh Dept. of Materials Science and Metallurgy, Korea university

#### Abstract

The structural defects, impurities, degree of crosslinking and shrinkage of 38 field-aged distribution cables have been analyzed. For the comparison of data, 9 new cables were also subjected to an analysis. It is observed that the structural defects and degree of crosslinking show a radial profile. The structural defects are different depending on the manufacturer. A large amount of impurities is present in the insulation shield, which hold true for the new cables manufactured recently. The degree of crosslinking near both shields is lower than that at the central region of the insulation layer. It was also found that, in some cables, the insulation was not fully crosslinked. The shrinkage of field-aged cables is higher than that of new cables.

#### 1. 서론

케이블의 특성분석은 최근 많은 연구자에 의해서 이루어지고 있다 [1]. 이들이 주로 이용한 분석방법은 적외선 분광기를 이용한 화학결합의 측정 및 불순물의 종류 및 농도측정이다. 또한 케이블 제조공정과 관련된 고분자 특성 중에서 중요한 특성은 가교도 및 수축율 등이라고 할 수 있다.

이에 본 분석에서는 경년 케이블 및 최근 제작된 새 케이블로부터 절연층을 가공하여 화학구조결함, 불순물, 가교도 및 수축율 등에 대한 분석을 실시하였다.

#### 2. 시편제작 및 측정

#### 2.1. 시편제작

시편은 전력케이블이 사고 난 직후 사고부위로부터 30cm이내의 시료를 채취하였으며 특성분석 용 시료는 그림 1에 나와 있는 바와 같이 선반을 이용하여 나선형 및 리본형 시료를 제작하였다. 코일 시료는 FTIR 분석을 위한 것으로 두께는 300~400 μm이고 리본형 시료는 수축율과 가교도를 위한 것으로 두께는 약 300 μm이었다. 모든 시료는 측정 전의 습기의 유입을 방지하기 위하여 데시케이터 안에 보관하였고 분석직전에 에틸알콜로 세척하였다.

#### 2.2. 특성분석

FTIR은 Nicolet (모델명: Nicolet 800, Nic-

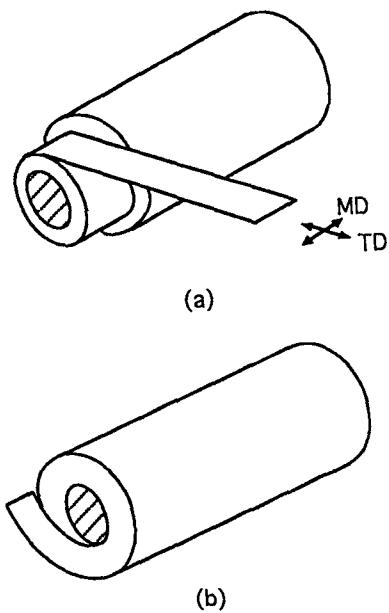


그림 1. 케이블 시료의 개략도: (a) 리본시료,  
(b) 코일시료

plan)으로 적외선빔의 크기를  $30\text{ }\mu\text{m} \times 30\text{ }\mu\text{m}$ 까지 축소시킬 수 있는 소위 Micro-FTIR을 사용하였다. 내도로부터 외도로 가면서 매  $500\text{ }\mu\text{m}$ 마다 FTIR 스펙트럼을 얻었으며 각 특성피크의 흡광도 (absorbance)를 결정한 후 다음 관계식 (1)을 이용하여 1000개 탄소원자당 화학구조결합의 농도를 구하였다.

$$n = \frac{\epsilon A}{\rho t} \quad (1)$$

여기에서  $n$ 은 1000개 탄소원자당 화학구조결합의 갯수이며  $\epsilon$ 은 상관계수 (extinction coefficient),  $A$ 는 흡광도,  $\rho$ 는 시료의 밀도, 그리고  $t$ 는 시료의 두께를 의미한다. 본 분석에 사용된 카보닐기와 불포화 탄화수소 결합피크의 화학식과 상관계수는 표 1에 나와 있다 [2].

불순물은 ICP-AES (Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectroscopy) 장치를 이용하여 분석하였다. 일정량의 시료를  $400^\circ\text{C}$ 에서 4시간,  $800^\circ\text{C}$ 에서 6시간 열분해 시킨 다음 잔류물을 5% 질산으로 용해하여 불순물을 측정하였다.

가교도 측정을 위하여 리본형 시료 일정양을 채취하여 무게를 측정한 다음 이를 150 mesh망에 넣고 xylene 용액 속에서 48시간 끓인 후 진공오

표 1. 산화된 폴리에틸렌의 FTIR피크 특성

wave number (cm <sup>-1</sup> )	structure		extinction coefficient
888	vinylidene methyl	$\text{RR}'\text{C=CH}_2$	0.116
909	terminal vinyl	$\text{R-CH=CH}_2$	0.099
966	trans vinylene	$\text{R-CH=CH-R}'$	0.14
1700	acid	$\begin{matrix} \text{O} \\    \\ \text{R-C-OH} \end{matrix}$	0.132
1720	ketone	$\begin{matrix} \text{O} \\    \\ \text{R-C-R}' \end{matrix}$	0.055
1736	aldehyde	$\begin{matrix} \text{O} \\    \\ \text{R-C-H} \end{matrix}$	0.0426
1742	ester	$\begin{matrix} \text{O} \\    \\ \text{R-C-O-R}' \end{matrix}$	0.162

븐에서 건조시킨 후 무게를 측정하여 추출된 무게를 원래 무게로 나눈 값을 백분율로 표시하여 가교도를 구하였다.

수축율 실험은  $1.5\text{ cm} \times 1.5\text{ cm}$  크기의 시료를 채취하여 가로 및 세로의 크기를 측정한 후 이를 150 mesh 망속에 넣고 열 순환 오븐에 넣어  $130^\circ\text{C}$ 에서 1시간 방치한 후 다시 가로 및 세로의 크기를 측정하여 그 크기 차이를 원래 크기로 나눈 후 이를 백분율로 표시하여 수축율을 구하였다.

### 3. 결과

#### 3.1. FTIR 분석

그림 2와 3에 대표적인 화학구조결합인 카보닐과 불포화 탄화수소결합의 결과가 나와 있다. 이는 특별히 증감을 보이는 결과만을 선택하여 나타낸 것으로, 화학결합의 농도가 절연층의 두께방향으로 일정한 값을 갖는 것이 아니라 두께방향으로 분포도를 갖는 것을 보여준다. 화학구조결합의 분포를 보면 먼저 카보닐 성분의 경우 ester, ketone은 특별한 증감없이 균일한 분포를 보이며 aldehyde는 거의 모든 케이블에서 관찰되지 않았다. 그러나 acid의 경우 대부분의 케이블에서 불균일하게 분포하거나, 도체차폐층쪽 절연층에서 절연층의 중심부에 이르기 까지는 균일한 분포를 보이다가 절연차폐층쪽 절연층에서 급격히 증가하는

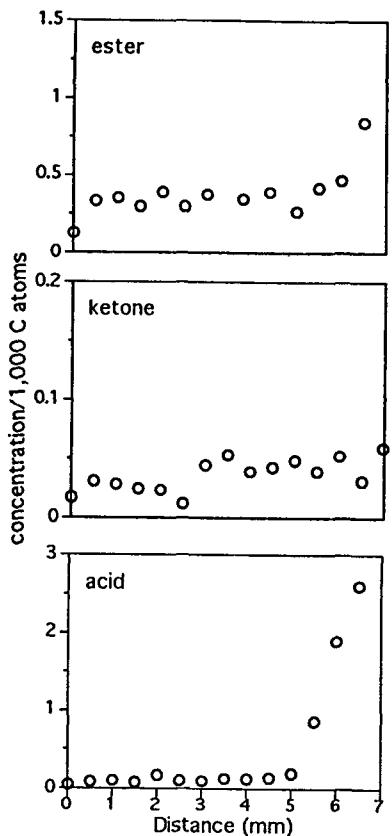


그림 2. 경년 케이블의 대표적인 카보닐 성분 분포도

경향이 관찰되었다. 불포화 탄화수소 결합의 농도 분포가 그림 3에 나와있다. 대부분의 케이블이 균일한 분포를 보이나 한 회사의 경우 그림 3의 terminal vinyl과 vinyledene methyl에서 보듯이 각 성분의 농도가 불균일하고 도체차폐층쪽 절연 층으로 갈수록 농도가 증가하는 경향을 보였다.

### 3.2. 불순물 분석

표 2에 차폐층 및 절연층에 들어있는 불순물의 총량이 나와있다. 이 표를 보면 불순물의 함량이 매우 높은데, 특히 Mg, Ca, Fe, Cu, K 등의 함량이 다른 종류에 비해서 높다. 절연차폐층의 불순물 총량은 10,000ppm을 넘을 정도로 많은 양이기는 하나 상당량은 Mg와 Zn성분으로서 이는 반도전 컴파운드 제조시 일부러 첨가된 것으로 보인다. 최근 제작된 새케이블의 총량을 보면 한 회

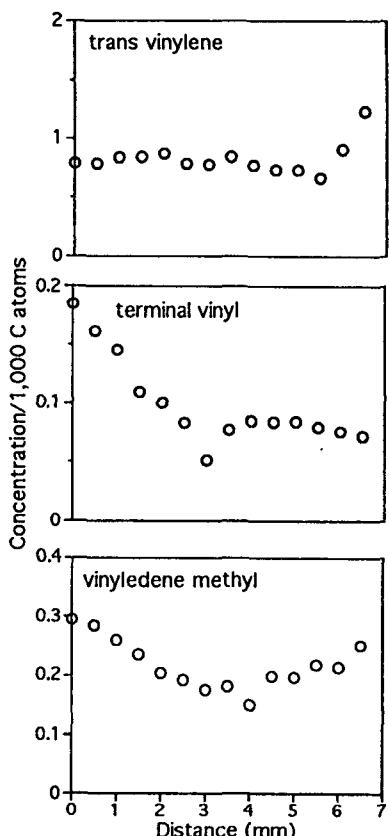


그림 3. 경년 케이블의 대표적인 불포화 탄화 수소 결합 분포도

사의 제품을 제외하고 모든 제품이 매우 높은 함량의 불순물을 포함하고 있음을 알 수 있다. 그러나 이중 상당한 부분은 Mg와 Zn성분에서 기인한 것이고, 도체차폐층의 불순물 함량은 전보다 증가 했음을 알 수 있다.

### 3.3. 가교도 분석

그림 4에 대표적인 가교도 분포가 나와있다. 케이블 대부분의 가교도는 80% 내외로 나타났다. 대부분의 케이블에서 그림 4와 같은 대표적인 3가지 유형의 가교도 분포를 보여준다. 첫째로 가교도가 80% 내외에서 특별한 중감없이 균일한 값을 보이는 경우, 둘째로 절연층 중심부의 가교도는 80%에 달하나 양 차폐층으로 갈수록 가교도가 감소하는 경우, 마지막으로 도체차폐층쪽 절연층의 가교도가 감소하여 심지어는 거의 0%에 달하는

표 2. 경년 케이블과 새 케이블의 차폐층에 들어 있는 불순물의 총량

제조회사	제조년도	Total Impurities	
		Ins. Shield	Cond. shield
A	84	2424	-
	85	8552	501
	87	5360	-
	90	2807	233
	91	1921	-
B	87	2451	365
	90	3256	-
C	84	7032	946
	85	11154	454
	86	5348	732
	87	2894	1313
	94	4688	1118
a	96	15232	5055
b		12573	3216
c		20915	6215
d		19160	-
e		13976	3082
f		1365	-
g		23572	4846

-: Not tested

경우이다. 경년 케이블 분석결과를 보면 몇 개의 케이블에서 양 차폐층쪽 절연층에서 다소 감소하는 하나 대부분 케이블의 가교도가 비교적 80% 내외의 균일한 분포를 보이나, 한 회사 대부분의 케이블이 앞에서 언급했던 것처럼 도체차폐층쪽 절연층의 가교도가 급격히 감소하다가 심지어는 0%에 이르는 것이 발견되었다. 새 케이블에서는 한 회사의 가교도가 도체차폐층 쪽에서 60% 정도로 감소하는 것을 제외하고 거의 모든 케이블의 가교도가 80% 내외의 균일한 분포를 보였다.

### 3.4. 수축율 분석

케이블의 양 차폐층쪽 절연층의 수축율결과가 표 3에 나와있다. 전력케이블이 과도하게 압출되면 수축하려는 경향이 크고 이는 케이블의 장기신뢰성에 문제가 될 수 있다. 분석결과를 보면 거의 모든 경년 케이블의 수축율은 평균적으로 압출방향(Machine Direction: MD)은 5-6%, 이에 수직인 방향(Transverse Direction: TD)은 3%정도의 높은 값을 보였으며 심지어는 8%에 달하는 케이블도 있었다. 그에 비해 새 케이블의 수축율은 경년케

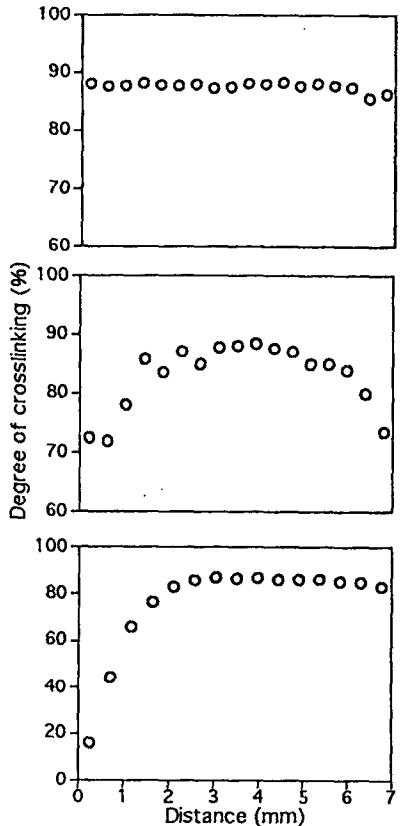


그림 4. 경년케이블의 대표적인 가교도 분포도

이를에 비하여 낮은 값을 나타내었다.

### 3.5. 고찰

본 연구에서 발견한 현상은 첫째 화학구조결합과 가교도가 절연층의 두께방향으로 분포도를 가진다는 것인데 이는 절연층의 두께방향으로 많은 결과를 얻어 분포도를 구해야 한다는 것이며 산화반응에 의해 생성되는 acid등의 성분이 도체차폐층쪽 절연층에 비해서 절연차폐층쪽 절연층에서 높은 농도로 관찰되는 것으로 보아 절연차폐층과 접해 있는 절연층이 열화되어 있는 것으로 보인다.

불순물 분석결과를 보면 국내 지중배전 케이블의 차폐층에는 상당량의 불순물이 들어있음을 알았다. 이들 불순물 중에서 Fe, Cu, Ni 등의 성분은 이온상태가 변화할 수 있는 성분으로 이들이 고분자와 반응하면 소위 자동산화반응에 의하여 고분자는 급격히 산화반응을 겪게 되고 중국에는

표 3 경년 케이블과 새 케이블의 수축율

제조 회사	제조 년도	Distance*	Shrinkage (%)	
			MD	TD
A	84	0.35	4.13	1.17
		6.30	6.21	3.47
	85	0.67	5.18	3.67
		6.30	7.27	4.20
	87	1.05	3.75	3.32
		5.95	2.10	1.27
	90	0.82	4.62	3.06
		6.18	6.48	2.23
B	91	0.74	4.36	3.47
		5.89	4.06	2.24
	87	0.26	7.86	3.86
		6.74	2.89	2.59
	90	0.82	8.20	1.46
		6.18	4.10	2.78
	84	0.62	3.63	3.39
		6.38	6.75	3.45
C	85	0.47	4.15	3.97
		6.53	5.06	3.16
	87	0.37	5.98	4.12
		6.26	7.89	2.33
	94	0.33	4.53	2.68
		6.67	5.34	2.54
	a	0.70	3.60	3.18
		6.65	4.65	2.42
b	96	0.28	3.04	1.31
		7.72	4.49	0.32
	c	0.37	3.94	2.62
		6.63	3.69	1.47
d	96	0.27	3.02	2.89
		6.73	3.19	2.38

\*: Distance from cond. shield

고분자를 극심하게 열화시키는 역할을 한다 [3]. 이들 성분이 차폐층에 들어있으면 절연차폐층과 절연층 계면, 즉 절연층 표면에서 산화반응에 의한 열화가 심하게 일어날 것으로 생각된다. 따라서 차폐층에 들어있는 불순물의 함량을 줄여야 할 것으로 사료된다.

#### 4. 결론

사고난 경년 케이블 및 새 케이블을 분석한 결과 화학구조결합은 절연층의 두께방향으로 분포도를 갖고 있고 제조회사별로 화학구조결합의 특성이 서로다르며 절연차폐층과 접촉되어있는 절연층이 월등히 더 열화 되었음을 알았다. 불순물 분석 결과 경년 케이블과 새 케이블 모두 절연차폐층에는 상당히 많은 양의 불순물이 들어 있으며 도체

차폐층의 불순물은 비교적 낮은 함량인 것으로 밝혀졌다. 가교도 분석결과 화학구조결합과 마찬가지로 두께방향으로 분포도를 갖고 있으며 주로 도체차폐층쪽의 절연층의 가교도가 감소하는 경향을 보임을 알았고, 한 회사의 특정 제조년도의 제품은 가교도가 아주 낮은 값을 보임을 알았다. 수축율 분석결과 경년 케이블의 수축율이 새 케이블에 비하여 훨씬 낮은 값을 가짐을 알았다. 이 네가지 분석결과를 비교하여 보면 절연차폐층과 접촉된 절연층이 열화된 이유는 절연차폐층에 들어있는 불순물이 절연층의 자동산화반응을 유발했기 때문인 것으로 보이며, 경년 케이블의 경우 새 케이블에 비하여 가교도가 낮고 수축율이 큰 것으로 보아 제조공정상의 차이가 있는 것으로 보인다.

#### 참고문헌

- [1] Diagnostic Techniques for Cable Characterization, EPRI report EL-6207, (1989).
- [2] F. M. Rugg et al., *J Polym Sci.*, 13, 535 (1954).
- [3] P. R. Paolino, *Antioxidants*, in *Thermoplastic Polymer Additives*, Edt. J. T. Lutz, Jr., Marcel Dekker, New York, 1989.