

지중 배전케이블의 고장원인 특성분석

논문
12-5-6

Characterization of Failed Underground Distribution Cables

정창수*, 이우선**, 한재홍***

(Chang-soo Jung*, Woo-sun Lee**, Jae Hong Han***)

Abstract

This study presents the characterization and AC breakdown test for identifying the cause of premature failure of 6 URD power cables which failed during service. The failed cables used for more than 10 years showed that the main cause of failure was water tree growth due to the water penetration. Almost trees grew from interface between insulation shield and insulation layer. Especially, there was a close relation between water tree length and content of ionic impurities. On the other hand, the failed cable used for less than 1 year has protrusion and void at the same position. From this, it can be concluded that the main cause of premature failure was the defects from manufacturing processes. In order to prevent the premature failure of URD cable, it is needed to improve the service environment, raw materials and manufacturing process.

Key Words(중요용어) : Premature failure(조기파괴), URD power cable(지중 배전케이블), Characterization(특성분석), Failure investigation(고장조사)

1. 서 론

고도의 산업발전과 인구밀집 현상으로 인한 도심 지역에서의 전력수요 급증에 따라 공공의 안전과 도시의 미관을 위하여 70년대 후반부터 송배전선로를 지중화하는 작업이 지속되고 있다. '98년 12월 말까지 14,600 C-km가 포설되어 있으며, 가공선로를 포함한 전체 선로 중에서 8.9%를 점유하고 있다.

가교폴리에틸렌(crosslinked polyethylene ; XLPE)을 절연층으로 사용하는 지중 배전케이블은 3중 압출공정에 의해 제조된다. 일반적으로 전력케이블의 수명은 30년으로 알려져 있으나, 실제로는 포설후 10년 정도에 조기파괴되어 고장이 발생

하는 경우가 많다. 지중 배전케이블은 중요선로의 전력공급을 담당하고, 또한 고장 발생시 복구에 많은 비용과 시간이 요구되기 때문에 이러한 조기파괴 원인을 정확하게 규명하여 대책을 수립하는 것이 매우 중요하다.

그 동안 국내에서 많은 케이블 고장이 발생하였음에도 불구하고 케이블 고장원인 분석이 체계적으로 이루어지지 못한 것은 사실이다. 실제 현장에서는 지중 배전케이블에 고장이 발생하면 고장 부위를 발취하여 외상이나 수트리 발생 여부를 확인한 후 다시 접속하여 사용하는 실정이다. 그러나 외국의 경우에는 고장 발생시 원인규명을 위한 절차가 구체적으로 정립되어 있으며, 전기적 방법과 병행하여 고분자 특성분석을 통해 케이블의 고장원인 및 열화 정도를 파악하고 있다^{1,2)}. 최근 국내에서도 지중 배전케이블의 고장원인 분석에 대한 내용이 발표되고 있지만, 한 종류의 케이블에만 국한되어 있다³⁾.

본 연구에서는 현장에서 운전중 고장이 발생한 6개 선로의 케이블을 수거한 후 특성분석과 절연파괴 시험을 실시하였으며 그 결과를 고장원인과 연계하여 고찰하였다. 이와 같은 연구를 통하여 지중

* : 한국전력공사 광주전력관리처
(광주시 광산구 소촌동 654, Fax : 062-940-3509 E-mail : 81109311@dava.kepco.co.kr)

** : 조선대학교 전기공학과

*** : 한국전력공사 전력연구원

1999년 3월 30일 접수, 1999년 4월 20일 심사완료

배전케이블의 문제점을 파악하여 대책을 강구한다면 전력공급의 신뢰도를 향상시킬 수 있을 것이다.

2. 시편제작 및 측정

2.1 시료 수거 및 준비

특성분석을 위해 수거한 지중 배전케이블의 세부 내용이 표 1에 나와 있다. 모든 케이블은 22.9 kV CN/CV 케이블로써, 표에서 알 수 있는 것처럼 포설 후 1년 내에 고장이 발생한 경우도 있지만 대부분 10년 정도 운전중 절연파괴로 인한 고장이 발생하였다.

표 1. 고장케이블의 세부 내용
Table 1. Details of failed distribution cables

시료	규격 (mm ²)	포설 년도	고장발생 년도	운전기간 (년)
A	325	1984	1997	13
B	325	1984	1997	13
C	325	1985	1997	12
D	200	1985	1998	13
E	325	1986	1997	11
F	325	1996	1997	<1

시료는 정확한 원인규명을 위해 고장 부위로부터 30 cm 이내에서 채취하여 도체를 제거한 다음 그림 1과 같은 방법으로 선반을 이용하여 나선형 시료 및 리본형 시료를 제작하였다. 나선형 시료는 수트리, 계면 불규칙 및 화학구조 분석을 위한 것이며, 리본형 시료는 가교도 및 산화유도시간 분석을 위한 것이다. 또한 절연층 내부의 결합 관찰을 위

해 실린더 형태의 시료도 준비하였다.

2.2 특성분석 방법

고장원인을 규명하기 위한 첫 단계로서 중성선 및 도체의 부식상태를 확인한 후 수트리 및 계면 불규칙 분석을 위해 나선형 시료를 연속 20매 정도의 길이로 절단하였다. 수트리는 250 ml의 증류수, 0.5 g의 methylene blue 및 8 ml의 암모니아로 만들어진 염색용액에 절단한 시료를 넣어 염색한 후 광학현미경을 이용하여 관찰하였으며, 이물질과 계면 불규칙 분석도 동시에 실시하였다.

절연층의 열화에 따른 화학구조 변화를 측정하기 위해 나선형 시료를 μ -FTIR(micro-fourier transform infrared spectroscope)로 분석하였는데, 이때 FTIR은 Perkin-Elmer(모델명 : Paragon 1000)를 사용하였으며 이때 μ -FTIR beam 크기는 50 μ m \times 50 μ m이었다. 내부반도전층에서 외부반도전층으로 이동하면서 약 500 μ m 마다 FTIR 스펙트럼을 얻었으며, 각 특성피크의 흡광도(absorbance)를 구한 후 다음 식 (1)을 이용하여 1000개 탄소원자당 구조결합의 농도를 구하였다⁴⁾.

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

여기에서 n은 1,000개 탄소원자당 화학결합의 수이며 ϵ 은 흡광계수(extinction coefficient), A는 흡광도, ρ 는 시료의 밀도, 그리고 t는 시료의 두께를 의미한다. 본 연구에서는 열화반응의 대표적 특성 피크인 카보닐기와 불포화 탄화수소 결합에 대해 분석하였다. 이들 각 특성 피크의 화학식과 흡광계수가 표 2에 나와 있다⁴⁻⁵⁾. 흡광도의 결정은 컴퓨터를 이용한 피크분리법을 이용하였다.



그림 1. 케이블 시료 준비 : (a) 리본형 시료, (b) 나선형 시료
Fig. 1. Preparation of cable samples : (a) ribbon sample, (b) coil sample

표 2. 산화된 폴리에틸렌의 특성피크
Table 2. Characteristic peaks of oxidized polyethylene

wave number (cm ⁻¹)	structure		extinction coefficient
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'	0.14
1700	acid	$\begin{matrix} \text{O} \\ \\ \text{R}-\text{C}-\text{OH} \end{matrix}$	0.132
1720	ketone	$\begin{matrix} \text{O} \\ \\ \text{R}-\text{C}-\text{R}' \end{matrix}$	0.055
1736	aldehyde	$\begin{matrix} \text{O} \\ \\ \text{R}-\text{C}-\text{H} \end{matrix}$	0.0426
1742	ester	$\begin{matrix} \text{O} \\ \\ \text{R}-\text{C}-\text{O}-\text{R}' \end{matrix}$	0.162

가교도 측정에서는 리본형 시료로부터 일정 크기로 시료를 채취한 다음 150 mesh의 스테인리스망에 넣고 xylene 용액속에서 2일간 끓인 다음 진공오븐에서 건조시켜 무게 변화를 측정하였다. 가교도는 아래 식에 따라 구하며 백분율로 표시하였다.

$$\text{가교도}(\%) = \frac{\text{xylene에 끓인 후 남은 무게}}{\text{xylene에 끓이기 전 무게}} \times 100 \quad (2)$$

산화에 대한 저항성을 분석하기 위하여 시차주사 열량기(differential scanning calorimeter : DSC)를 이용하여 산화유도시간(oxidation induction time : OIT)을 측정하였다. 리본형 시료에서 7~10 mg을 채취한 다음 알루미늄팬을 사용하여 측정하였으며, 측정 전에 인듐을 이용하여 측정 온도범위를 보정하였다. 실험조건은 상온에서 200℃까지 50 ml/min의 질소 분위기에서

10℃/min의 속도로 온도를 올린 다음 5분간 등온으로 유지한 후 산소를 주입하여 산화반응을 대표하는 발열반응이 시작하는 시간을 측정하였다. 이때의 산소유량은 50 ml/min이었다.

케이블의 반도전층과 절연층에 들어 있는 이온성 불순물은 ICP-AES(inductively coupled plasmaatomic emission spectrophotometer) 장치를 이용하여 측정하였으며, 시료의 전처리하는 전기로를 이용하여 시료를 태운 후 잔류물을 질산으로 용해시키는 방법을 사용하였다. 이때 시료를 놓지 않은 도기니를 동일한 방법으로 처리하여 기준시료로 하였다.

케이블 절연층에 존재하는 보이드를 관찰하기 위한 hot oil 시험에서는 실린더 형태로 가공된 케이블 시료의 외부반도전층을 벗겨 낸 다음 실리콘 오일 중에서 끓이면서 관찰하였다. 단, 관찰은 불투명한 가교 폴리에틸렌 절연층이 투명해지면 바로 실시하였다.

2.3 절연파괴 시험

고장이 발생한 지중 배전케이블의 열화정도를 판단하기 위해 한국전력 표준규격에 의거하여 교류 절연파괴시험을 실시하였다. 절연파괴 시험은 시료 및 설비확보 문제로 모든 시료에 대해서 실시하지는 못하였다. 시험은 약 10 m 정도의 케이블 시료에 30 kV의 전압을 5분간 인가한 후 전압을 단계적으로 10 kV씩 승압시켜 가면서 5분간 인가하였으며, 케이블의 절연파괴가 일어날 때까지 시험을 진행하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 부식 및 계면 불규칙 관찰

수분 침투에 의한 중성선 및 도체의 부식은 케이블 B, C, D, E에서 나타났다. 이러한 부식 현상은 접하고 있는 고분자층과 산화반응을 일으킬 수 있으며, 전압 변동을 유발할 수 있다¹⁾. 계면 불규칙 관찰에서는 그림 2와 3에 보여지는 것처럼 케이블 E에서 500 μm의 함몰(collapse)이 보였으며, 케이블 F에서 1 mm 이상의 돌기(protrusion)가 발견되었다. 한국전력의 규격에서는 함몰에 대해 언급하고 있지 않으며, 단지 돌기의 경우만 250 μm로 제한하고 있다²⁾. 이러한 계면 불규칙은 제조결함에 의해 발생하는 것으로 국부적인 전계집중을 유발하여 절연파괴가 일어나게 할 수 있다.



그림 2. 반도전층/절연층 계면의 함몰
Fig. 2. Collapse at interface between insulation shield and insulation layer



그림 3. 반도전층/절연층 계면의 돌기
Fig. 3. Protrusion at interface between insulation shield and insulation layer

3.2 수트리 분석

케이블 B, C, D, E에서 수트리가 관찰되었으며, 모두 절연층과 반도전층 계면에서 성장한 vented 트리가었다. 이와 같은 결과는 증성선 부식이 발견된 결과와 잘 일치한다. 수트리 길이는 2~6.5 mm 범위에서 성장하였으며, 케이블 E에서 수트리가 최대로 성장하였다. 그림 4는 대표적인 수트리 형태로 케이블 B의 결과를 나타낸 것이다. 특이한 사항은 일부 케이블에서 수트리가 발생한 부분에 검은 반점들이 다수 발견된다는 사실이다. 이와 같은 반점은 압출시 탄화된 불순물이거나 혹은 제조 공정에서 혼입된 것으로 생각된다.

한편 케이블 D의 경우에는 절연층에서 bow-tie

트리도 발견되었는데, 이러한 트리는 이물질에 의해 전계방향으로 성장한다고 알려져 있다⁸⁾. 그러므로 절연층 내부에 이물질이 있었던 것으로 생각된다.

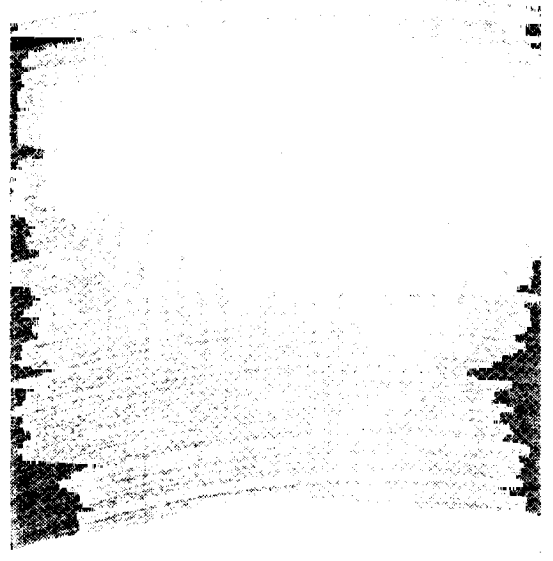


그림 4. 대표적인 수트리 형상
Fig. 4. Typical shape of water tree

3.3 화학구조 분석

그림 5는 케이블 A의 절연층에서 측정된 카보닐기와 불포화 탄화수소 결합의 특성피크 분포도를 나타낸 것이다. 그림에서 가로축의 거리는 절연층 두께를 의미하는 것으로, "0"은 내부반도전층 부근 절연층을 의미하고, "7"은 외부반도전층 부근의 절연층을 의미한다. 그림에서 알 수 있는 것처럼 화학구조는 분포를 갖고 있으며, 10년 정도 운전된 케이블의 경우에는 거의 유사한 경향을 나타내었다. 열화에 의해 외부반도전층 부근에서 acid 성분이 급격히 증가하는 경향이 보였다. 한편 1년 이내에 고장이 발생한 케이블 F의 경우에는 ester 성분이 다른 종류의 케이블보다 다소 높게 나타났는데, 이는 케이블 F 시료가 신품이기 때문에 ester 성분을 나타내는 산화방지제가 많이 존재하는 것으로 추정된다.

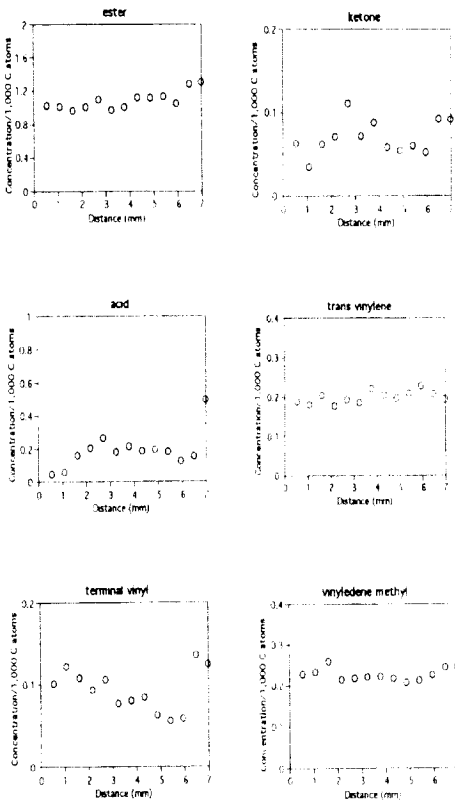


그림 5. 케이블 A의 화학구조 분포도 : (a) 카보닐 성분, (b) 불포화 탄화수소 결합 성분
Fig. 5. Radial profiles of chemical structure of the cable A : (a) carbonyls, (b) unsaturations

3.4 가교도 및 산화유도시간 분석

그림 6은 고장케이블의 가교도를 대표적으로 나타낸 것으로서, 케이블 F의 결과이다. 모든 케이블에서 80%에 근접하는 양호한 결과를 나타내어 고장의 직접적인 원인은 아닌 것으로 판단된다.

그림 7에 절연층 두께방향으로의 산화유도시간 분포가 나와 있는데, 케이블 D의 결과를 대표적으로 나타내었다. 10년 정도 운전된 케이블은 3~10분 범위에서 산화반응이 일어났지만, 신제품인 케이블 F의 경우에는 20분 이상의 산화유도시간을 나타내었다. 이와 같은 결과는 케이블 F의 경우 10년 정도 운전된 케이블과는 완전히 다른 메커니즘에 의해 고장이 발생했음을 암시한다.

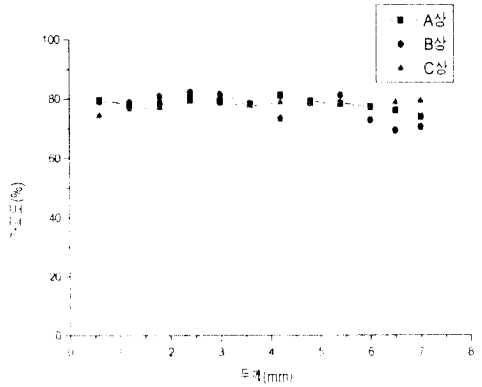


그림 6. 케이블 F의 가교도 분포도
Fig. 6. Radial profile of degree of crosslinking in the cable F

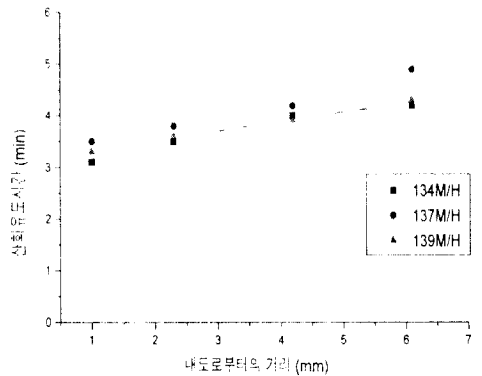


그림 7. 케이블 D의 산화유도시간 분포도
Fig. 7. Radial profile of OIT of the cable D

3.5 불순물 분석

고장이 발생한 케이블 E의 반도체층 및 절연층에 대한 불순물 분석 결과가 표 3에 나와 있다. 케이블 E의 불순물 함량은 다른 케이블보다도 상당히 높게 나타났으며, 특히 Mg 원소의 함량이 매우 큰 차이를 보였다. 전체적으로 외부반도체층이 내부반도체층보다 불순물 함량이 매우 높게 나타났으며, 절연층은 매우 적게 나타났다. 이러한 이온성 불순물은 고분자 사슬을 왜곡시켜 수분의 유입을 증가시키며, 따라서 수트리의 성장을 촉진하는 것으로 알려져 있다⁹⁾. 흥미로운 사실은 케이블 E의 불순물 분석결과와 수트리 분석결과가 잘 일치한다

는 것이다. 즉, 케이블 E가 불순물 함량이 가장 높았고, 또한 수트리의 길이도 가장 크게 나타났다. 또한 케이블 E는 전계집중을 유발하는 계면 불규칙도 발견된 점에 유의해야 한다. 모든 고장 케이블의 불순물 함량은 기존에 발표된 외국 케이블에 비하여 월등히 높은 것이다¹⁰⁾.

표 3. 케이블 E의 이온성 불순물
Table 3. Ionic impurities of the cable E

원소	외도	내도	절연체
Ti	11.74	1.83	ND
Ca	1476.63	899.25	0.27
Mn	30.40	ND	ND
Si	249.79	77.50	4.59
Fe	44.46	5.12	ND
Pb	124.76	ND	ND
Al	195.65	ND	ND
Zn	1789.67	2005.77	ND
Cu	28.80	72.59	1.32
V	39.88	5.64	ND
Mg	28647.15	10960.87	0.30
Cr	24.34	7.16	ND
K	555.68	ND	ND
Na	219.15	91.80	4.00
Mo	41.29	8.54	ND
P	142.97	35.95	ND
Ni	352.28	35.96	ND

* ND : Not detected

3.6 Hot oil 시험

케이블 A, D, F의 절연층에서 보이드가 발견되었으며, 그림 8은 케이블 F에서 발견된 보이드를 대표적으로 나타낸 것이다. 이러한 보이드는 내부에서 부분방전이 발생하기 때문에 전계가 국부적으로 왜곡된다. 케이블 A와 D는 보이드가 존재함에도 불구하고 10년 정도 운전되었으나, 케이블 F의 경우에는 1년 이내에 고장이 발생하였다. 이러한 원인을 규명하기 위하여 케이블 D를 hot oil 시험 후 냉각한 다음 선반으로 계속적으로 가공한 결과, 보이드 발생위치와 돌기의 발생위치가 일치하는 사실을 발견하였다. 이와 같은 사실로 미루어 케이블

F는 2종류의 제조결함에 의해 국부전계가 고도로 집중하여 고장이 발생한 것으로 판단된다.

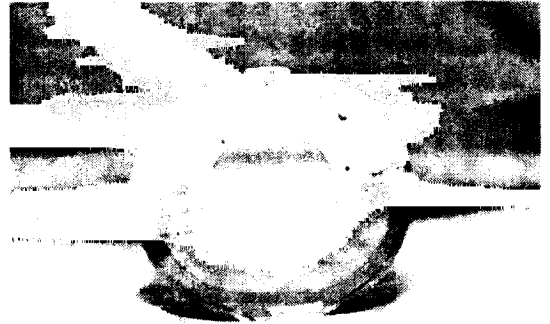


그림 8. 케이블 F에 존재하는 보이드
Fig. 8. Void in the cable F

3.7 절연파괴 시험

절연파괴 시험은 10 m 이상의 시료가 필요하기 때문에 모든 시료에 대해 실시하지는 못하였으며, 케이블 B, C, F에 대해 시험하였다. 표 4는 케이블 B, C, F의 교류절연파괴 강도를 나타낸 것이다. 표에서 알 수 있는 것처럼 케이블 B와 C의 경우는 절연파괴 강도가 비교적 낮게 나타났으나, 케이블 F의 경우에는 200~260 kV 부근에서 나타났다. 이와 같은 결과는 케이블 B와 C의 경우 4~5 mm 정도의 수트리가 발견된 사실로부터 수트리에 의한 열화로 생각되며, 케이블 F는 신제품임에도 비교적 낮은 절연파괴강도를 보이므로 제조결함 요인에 의한 것으로 추정된다. 참고적으로 한전에서는 160 kV/5분을 견디도록 규정되어 있다.

표 4. 케이블 B, C, F의 교류절연파괴 강도
Table 4. AC Breakdown strength of the failed cable B, C, F

시료	교류절연파괴강도 (kV)
B	50
C	120
F	200

3.8 고찰

본 연구는 고장이 발생한 6개 선로의 케이블을 수거하여 특성을 분석한 내용으로 다음과 같은 사실

을 발견하였다. 케이블 A와 D의 경우에는 거의 모든 분석에서 양호한 결과를 보였으나, 절연층 내부에 존재하는 보이드에 의해 고장이 발생한 것으로 나타났다. 그러나 보이드와 돌기가 같은 위치에 동시에 존재한 케이블 F의 경우에는 1년 이내에 고장이 발생하였다. 이와 같은 사실로부터 케이블 F의 고장원인은 두 가지의 결합이 동시에 작용하여 국부적인 전계집중이 일어났기 때문인 것으로 판단된다.

또한 수트리 성장이 매우 크게 일어난 케이블 B, C, E의 경우에는 모두 중성선의 부식이 심한 것으로 나타났으며, 특히 케이블 E는 이온성 불순물 함량과 수트리 길이가 최대이었다. 이러한 사실은 이온성 불순물이 수트리의 성장을 가속한다는 연구 결과를 입증하는 것으로서 매우 흥미로운 점이다.

위와 같은 특성분석의 결과를 표 5에 요약하였다. 표에서 알 수 있는 것처럼 고장의 가장 큰 원인은 수분 침투에 의한 수트리 성장과 제조결함에 의한 계면 불규칙이었다. 전자의 경우에는 10년 정도 현장에서 장기간 운전된 케이블의 주요 고장원인이었으며, 후자의 경우는 1년 이내의 단기고장의 직접적인 원인으로 작용하였다. 그러므로 고장을 방지하기 위해서는 케이블 운전환경 및 제조공정을 개선해야 한다.

표 5. 고장케이블 특성분석 요약
Table 5. Summary of characterization of the failed cables

특성 시료	수트리	이온성 불순물	중성선 부식	보이드	계면 불규칙
A	×	×	×	○	×
B	○	×	○	×	×
C	○	×	○	×	×
D	△	×	○	○	×
E	○	○	○	×	○
F	×	×	×	○	○

○ : 심함, △ : 보통, × : 양호

4. 결 론

본 연구에서는 지중 배전케이블 조기고장의 원인 규명을 위하여 고장이 발생한 6개 선로의 케이블을

수거해 특성분석과 절연과피 시험을 실시하였다. 10년 이상 운전중 고장이 발생한 케이블에서는 수분 침투에 의한 수트리 성장이 주요 원인인 것으로 나타났으며, 특히 수트리 길이와 이온성 불순물 함량 사이에 밀접한 관련이 있음을 발견하였다. 반면 포설후 1년 이내에 고장이 발생한 케이블의 경우에는 동일한 위치에서 돌기와 보이드가 발견되었다. 이와 같은 결과로부터 제조공정에서 발생한 결함이 고장의 직접적인 원인으로 작용하였음이 추정된다. 본 연구를 통하여 지중 배전케이블의 조기고장을 방지하기 위해서는 케이블 운전환경, 원재료 및 제조공정의 개선이 필요하다.

참 고 문 헌

1. *Diagnostic Techniques for Cable Characterization*, EPRI report, EL-6207, 1989.
2. T. C. Champion, "An Overview of Failure Analysis", *Proc. T&D Conference and Exposition*, pp. 1-17, 1996.
3. 김상준, 한재홍, 김주용, "특성분석 방법에 의한 지중배전케이블의 사고원인 분석", *전기학회논문지*, Vol. 17, No. 1, pp. 32-38, 1998.
4. E. Cernia, C. Mancini, and G. Montaudo, "Contribution to the Investigation of Polyethylene by Infrared Techniques", *Polymer Letters*, Vol. 1, pp. 371, 1963.
5. E. M. Rieg, J. J. Smith, and R. C. Bacon, "Infrared Spectrophotometric Studies on Polyethylene. II. Oxidation", *J. Polym. Sci.*, Vol. 13, pp. 535, 1954.
6. H. Orton, Private Communication, Harry Orton Consulting Engineering.
7. "22.9 kV 중심중성선 전력케이블", 한국전력표준규격 ESB 126, 1992.
8. M. T. Shaw, S. H. Shaw, "Water Treeing in Solid Dielectrics", *IEEE Trans. Electr. Insul.*, Vol. 19, pp. 419-452, 1993.
9. M. J. Given, R. A. Fouracre and B. H. Crichton, "The Role of Ions in the Mechanism of Water Tree Growth", *IEEE Trans. Electr. Insul.*, Vol. 22, pp. 151-156, 1987.
10. "배전케이블 수명예측 기준설정 및 열화진단 시스템 구축", 전력연구원 연구과제, 전력연구원, 1997.