

Aging Characteristics of Cable Terminations for Distribution Power System

韓在鴻* · 李丙成** · 金相俊*** · 李喆浩§ · 金商郁§§ · 金容愛§§§

(Jae Hong Han · Byung Sung Lee · Sang Joon Kim · Chul Ho Lee · Sang Wook Kim · Yong Ae Kim)

Abstract - Aging characteristics of 13 years service-aged distribution cable terminations which dismantled from 3 regions were investigated by material characterization and electrical test. All dismantled terminations have propagating micro-cracks on the surface of weathershed and chalking fillers from bulk. Elemental analysis of these terminations showed that the carbon was decreased and the oxygen was increased on the surface of weathershed due to a little oxidation reaction. Contact angle of terminations was abnormally increased with time. In the analysis of anti-oxidation ability and chemical structure, there were no differences between new and dismantled terminations. All terminations showed satisfactory results in electrical test. Therefore, it can be considered that aging is only propagating on the surface of dismantled terminations. Also, it was confirmed that environmental factors such as UV, pollution and salt have an effect on the aging through the observation of polymer composition change.

Key Words: Cable terminations, Characterization, Aging, Environmental factors

1. 서 론

배전케이블 종단접속재 (cable termination)는 지중계통과 가공계통을 연계하는데 필요한 배전기자재이며, 절연을 목적으로 고분자재료를 사용한다. 고분자재료는 가볍고 성형이 쉬우며 우수한 절연특성을 갖는 반면, 경년에 따라 열화되어 고장이 발생하는 특성을 나타낸다. 특히 장기간에 걸쳐 환경적 요인에 노출되는 경우 열화현상이 가속되어 본래의 기대수명에 이르지 못하는 것으로 알려져 있다. 따라서 장기 신뢰성과 수명에 큰 영향을 미치는 경년열화 특성을 분석하는 것은 매우 중요하다고 할 수 있다.

이제까지 열화현상에 대한 연구는 주로 전기적인 방법으로만 접근하였으나, 최근에는 고분자 특성분석을 이용한 재료 특성평가를 실시하고 있다. 외국에서는 이미 10여년 전부터 사용하고 있는 방법으로서[1], 이 방법은 외적 요인이 재료구조의 변화를 유발하고 이 구조변화가 결국 특성변화와 직결되어 있다는 원리에 기초한다. 따라서 구조변화를 측정하면 특성변화의 정도를 평가할 수 있다. 이러한 재료

특성평가와 전기적 시험을 병행하면 보다 신뢰성 있는 결과를 얻을 것으로 기대된다.

국내에서 종단접속재를 사용한지 약 20년이 경과하였지만, 경년열화 특성에 대한 체계적인 연구나 데이터는 거의 없었다. 그 동안 종단접속재의 조기파괴로 인한 문제는 대두되지 않았지만, 실제 현장에서 장기간 사용한 종단접속재를 발채하여 열화상태를 평가하는 것은 매우 중요한 일이다. 이에 본 연구에서는 현장에서 10년 이상 장기간 운전중인 EPDM (ethylene propylene diene terpolymer) 종단접속재를 3개 지역에서 발채하여 경년에 따른 특성의 변화를 조사하였다. 이와 같은 연구는 향후 종단접속재의 성능 개선, 신뢰성 평가 및 수명 예측에 기초자료로 활용이 기대된다.

2. 시료발채 및 실험

2.1 시료발채

배전선로에서 사용중인 EPDM 종단접속재를 3개 지역에서 발채하였으며, 자세한 내역이 표 1에 나와 있다. 표에서 알 수 있는 바와 같이 13년 동안 사용한 제품이며, 신제품과 특성변화를 비교하였다. 신제품의 경우 13년 전의 제품을 구하기 어려워서 최근에 생산된 제품으로 대신하였다. 시료 외관을 육안으로 관찰한 결과, 시료 모두에서 트래킹 및 침식 현상은 발견되지 않았으며, 표면에 오손물이 부착되어 있는 상태였다. 일반적으로 재료 특성분석을 위해서는 시료의 일정량을 절단해야 하기 때문에 우선 전기적 시험을 실시한 다음 재료 특성분석을 시행하였다.

*正會員 : 韓電 電力研究院 先任研究員 · 工博

**正會員 : 韓電 電力研究院 研究員

***正會員 : 韓電 電力研究院 責任研究員 · 工博

§正會員 : 平一産業(株) 技術研究所 責任研究員

§§正會員 : 서울시立大 化學工學科 教授 · 工博

§§§正會員 : LG化學 技術研究院 分析센터 先任研究員 · 理博

接受日字 : 1999年 3月 18日

最終完了 : 1999年 7月 8日

2.2 전기적 시험

표 1 종단접속재 발체 내역

Table 1 Details of dismantled terminations

시료	규격 (mm ²)	설치 장소	설치 년도	철거 년도	사용 기간	비고
신품	325	-	-	-	-	-
No. 1	200	영등포	1985	1998	13	공해 지역
No. 2	325	해운대	1985	1998	13	염해 지역
No. 3	325	동인천	1985	1998	13	염해 지역

열화된 케이블에 의한 영향을 배제하기 위하여 신품 케이블로 교체하여 시험하였으며, 장기간 사용에 따른 접속부위 확장으로 기존 200 mm² 제품은 240 mm², 325 mm² 제품은 400 mm²의 케이블로 조립하여 시험하였다. 전기적 시험은 IEEE 48 규격에 따라 건조 내전압, 부분방전, 임펄스 내전압 등을 측정하였다[2].

온도변화에 따른 유전특성의 변화를 측정하기 위하여 유전열분석기 (dielectric thermal analyzer; DETA)를 사용하였다. -50~100°C의 온도범위에서 주파수를 변화시키면서 tan δ 변화를 측정하였다. 갓 표면을 1 mm 정도의 두께로 얇게 가공한 후 양면에 금 증착을 하여 측정을 실시하였다.

2.3 재료 특성분석

시료의 균일성을 보장하기 위하여 동일하게 종단접속재의 상부에서 2번째 갓 (weathershed)을 절단하여 분석하였다.

갓 표면의 화학구조 변화는 시료가 불투명하기 때문에 얇게 절단하여 FTIR-ATR (Fourier transform infrared spectrometer-attenuated total reflection)로 분석을 실시하였는데, FTIR은 Nicolet (모델명: Spectrometer 550)을 사용하였다. 시료 표면을 초음파 세척기내에서 isopropyl alcohol로 5분간 세척한 후 증류수로 씻은 다음 건조시켜 측정하였다.

시차주사열량기 (differential scanning calorimeter; DSC)를 이용하여 종단접속재 표면의 산화유도시간을 측정하였다. 산화유도시간 (oxidation induction time; OIT)은 ASTM에 나와 있는 측정조건에 따라 먼저 시료의 온도를 질소분위기에서 10°C/min의 속도로 200°C까지 승온한 다음 이 온도에서 5분간 유지한 후 산소분위기로 바꾼 상태에서 발열 반응인 산화반응이 나타나는 시간을 측정하였다[3]. 이때 질소와 산소의 유량은 50 ml/min이며, 시료량은 약 10 mg이었다. 측정에는 알루미늄팬을 사용하였으며 측정 전에 인듐을 이용하여 측정 온도범위를 보정하였다.

종단접속재 표면의 원소조성 변화를 관찰하기 위하여 ESCA (electron spectroscopy for chemical analysis)를 사용하였는데, 이때 분석은 단지 10~50 Å 정도의 깊이에서만 가능하다[4]. 스펙트럼은 ESCA Lab. MK-II 시스템으로 Mg K-α 소스로 사용하여 얻었으며, 시료는 별도로 처리하지 않았다. 표면 미세구조 분석에서는 Jeol사 (모델명: JSM-840A)의 SEM (scanning electron microscope)을 사용하였으며, 시료표면에 금을 증착하였다.

표면 발수성 변화를 측정하기 위하여 Kyowa Interface

Science사 (모델명: CA-V)의 접촉각 측정기를 사용하였으며, 이때 시료표면에 떨어뜨린 증류수 체적은 13 μl 이다. 시료는 세척하지 않았으며, 10회 측정하여 평균값을 취했다.

지역에 따른 종단접속재 재료의 조성변화를 관찰하기 위하여 고체상의 ¹H NMR (Nuclear Magnetic Resonance) 및 ¹³C NMR을 사용하여 분석하였다. ¹H NMR 분광기로는 Jeol GSX 500 MHz NMR (carbon 5 mm 프로브) 분광기를, ¹³C NMR 분광기로는 Bruker DSX 300 MHz NMR (4 mm CP/MAS 프로브) 분광기를 이용하였다. 액체상 NMR에서는 용매로 1,2,4-trichlorobenzene과 Benzene-d6를 섞어서 사용하고 120°C에서 측정하였다. 고체상 NMR 측정시에는 상온과 80°C에서 5 kHz와 14 kHz의 spinning rate를 사용하였으며, 100°C에서는 5 kHz와 11 kHz의 spinning rate로 CPMASDD (cross polarization magic angle spinning dipolar decoupling)와 MASDD pulse를 이용하여 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 전기적 특성

25 kV급 종단접속재에 대한 IEEE 48 규격시험 결과가 표 2에 나와 있다. 표에서 알 수 있는 것처럼 발체품의 특성은 기준치는 물론 신품과도 거의 차이가 없는 결과를 나타냈다. 이와 같은 결과로부터 전기적 특성변화를 일으킬만한 재료구조 변화가 나타나지 않았음을 의미한다.

표 2 발체 종단접속재의 전기적 성능

Table 2 Electrical performance of dismantled terminations

시험항목	기준	신품	No. 1	No. 2	No. 3
1분 건조내전압 (kV)	65	통과	통과	통과	통과
10초 주수내전압 (kV)	60	통과	통과	통과	통과
6시간 건조내전압 (kV)	55	통과	통과	통과	통과
부분방전 (21.5 kV/3 pC)	3	1	1	1	1
뇌충격 섬락전압 (kV)	150	245	245	250	245
15분 직류 건조 내전압 (kV)	105	통과	통과	통과	통과

한편 유전열분석기를 이용한 tan δ 측정에서는 그림 1과 같이 모든 시료가 온도증가에 따라 손실이 증가하는 일반적인 경향을 보이고 있다.

이와 같은 손실은 온도증가에 따라 증가한 고분자 사슬의 운동이 교류 전기장 변화를 따라가지 못하기 때문으로 알려져 있다. 또한 높은 주파수보다는 낮은 주파수에서 tan δ가 커지는 경향을 보이는데, 이는 주파수가 매우 높으면 고분자 사슬이 전기장에 따라 분자배향이 평형을 얻지 못하기 때문에 손실이 작아진다[5]. 전체적으로 경년에 따라 tan δ는 거의 변화가 보이지 않으나, No. 1 시료 (영등포)의 경우에만 1 MHz에서 손실이 커지는 현상이 나타났다. 이와 같은 현

상은 열화에 따라 산소를 포함하는 극성기의 증가가 다소 일어났기 때문인 것으로 추정된다.

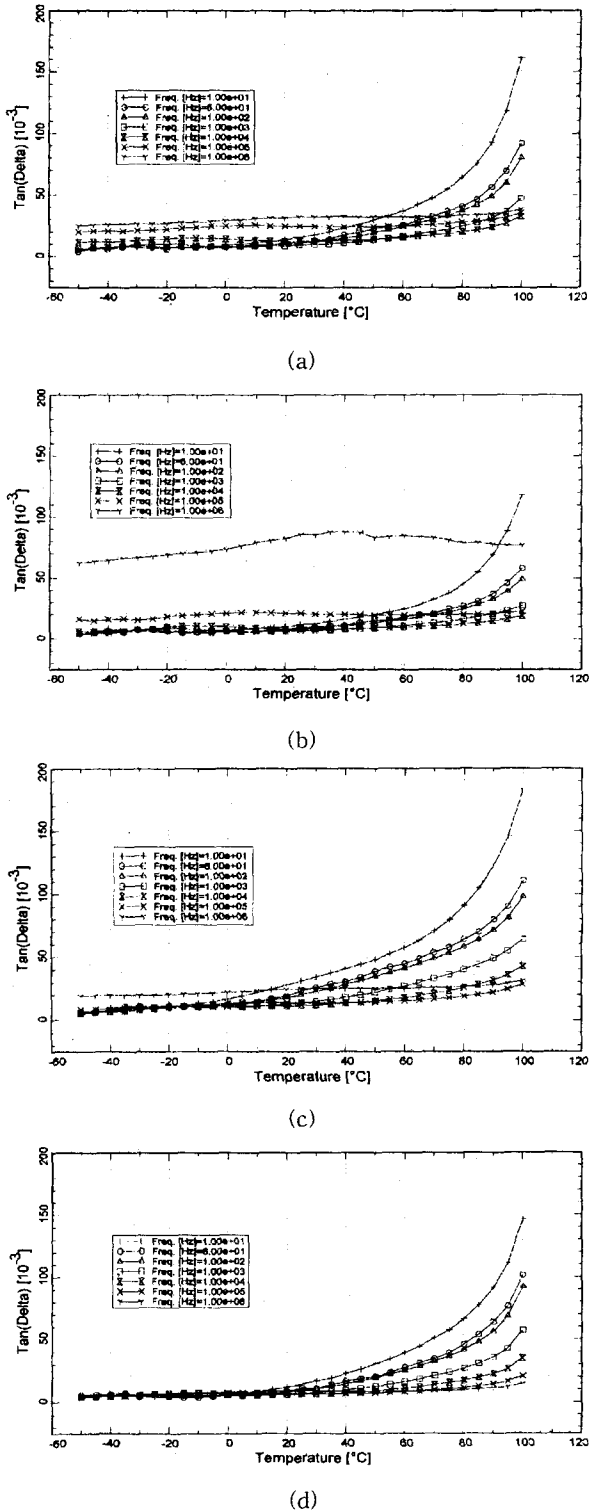


그림 1 종단접속재 갖의 $\tan \delta$: (a) 신품, (b) No. 1, (c) No. 2, (d) No. 3
 Fig. 1 $\tan \delta$ of termination weathersheds: (a) new, (b) No. 1, (c) No. 2, (d) No. 3

3.2 화학구조 변화 분석

ATR로 종단접속재 갖 표면을 측정된 결과가 그림 2에 나와 있다. 표면열화에 따라 수산화기 (1655 cm^{-1})가 약간 증가하였고 메틸기 ($2950, 1460 \text{ cm}^{-1}$)는 감소하였다. 메틸기는 고무의 탄성과 밀접한 관련이 있으며, 수산화기는 산화현상과 관련이 있다. No. 1 (영등포) 시료에서 메틸기의 감소가 가장 크게 나타났으며, No. 2 (해운대)와 No. 3 (동인천) 시료에서는 상대적으로 적게 나타났다. 수산화기면에서는 No. 1과 No. 3 시료가 약간 크게 나타났다. 측정결과를 통해 약간의 화학구조 변화는 알 수 있었으나, 열화의 진행은 크지 않은 것으로 판단된다.

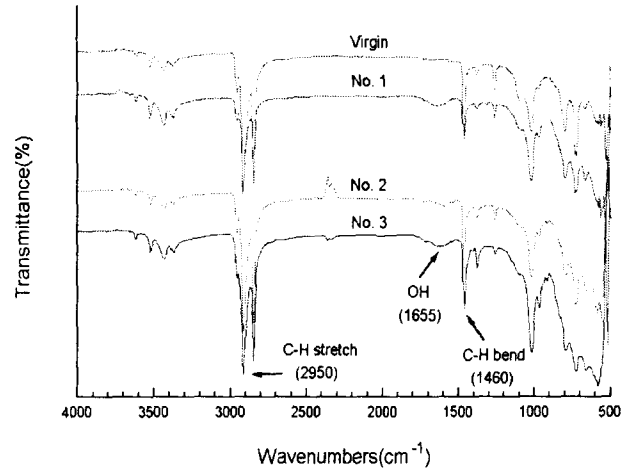
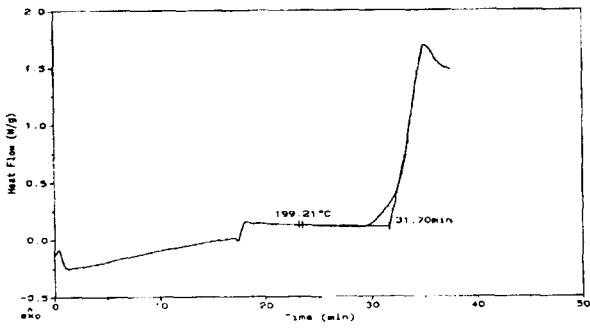


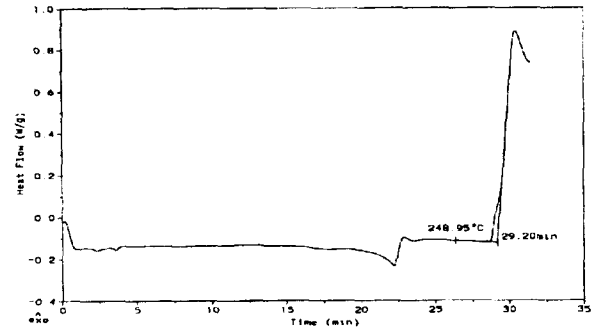
그림 2 발체 종단접속재 갖의 화학구조
 Fig. 2 Chemical structure of termination weathersheds

3.3 산화유도시간 분석

그림 3에 EPDM 기저고분자 (base polymer), 신품 및 발체 종단접속재의 산화유도시간을 측정된 thermogram이 나와 있다. 산화유도시간은 기준선과 발열반응의 가장 큰 기울기에서 접선을 그어 산화반응이 시작되는 시간을 구한다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 충전제가 들어 있지 않은 EPDM 기저고분자는 약 9분 30초만에 산화에 의한 발열피크가 관찰되었다. 그러나 신품과 발체 종단접속재의 경우에는 발열피크가 나타나지 않는다. 산화유도시간은 열화에 대한 저항성을 알려주는 중요한 인자로서 산화방지제 (anti-oxidant)의 잔류량과 밀접한 관련이 있으며, 산소 투입후 바로 또는 수 분내에 발열반응이 일어나는 경우가 위험하다고 할 수 있다[6]. 그러나 본 실험에서는 수 십분 이상의 산화유도시간을 나타내어 강제적으로 실험을 중단하였다. 신품과 발체 종단접속재에서 매우 긴 산화유도시간이 보여지는 것은 제품의 조성과 밀접한 관련이 있는 것으로 생각된다. 참고적으로 250°C 에서 산화유도시간을 측정된 결과, 신품과 발체품 모두에서 약 1분 정도의 산화유도시간이 나왔으며, 그 결과가 그림 4에 나와 있다. 이와 같이 신품과 발체품 사이에 차이가 나지 않는 이유는 250°C 이전에 산화방지제가 완전히 소모되어 산화유도시간이 기저고분자의 열적 특성에만 의존하기 때문인 것으로 판단된다.



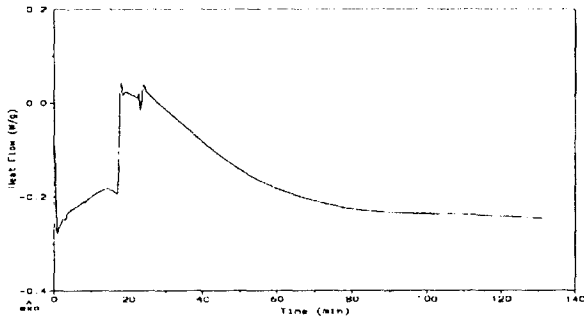
(a)



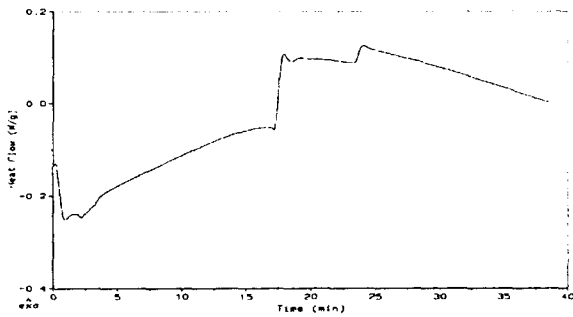
(b)

그림 4 종단접속재의 산화유도시간 (250°C): (a) 신품, (b) 발체품

Fig. 4 OIT of termination specimens (250°C): (a) new, (b) dismantled



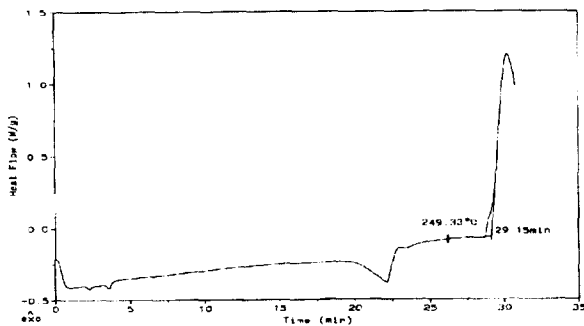
(b)



(c)

그림 3 종단접속재의 산화유도시간 (200°C): (a) EPDM 기저 고분자, (b) 신품, (c) 발체품

Fig. 3 OIT of termination specimens (200°C): (a) EPDM base polymer, (b) new, (c) dismantled



(a)

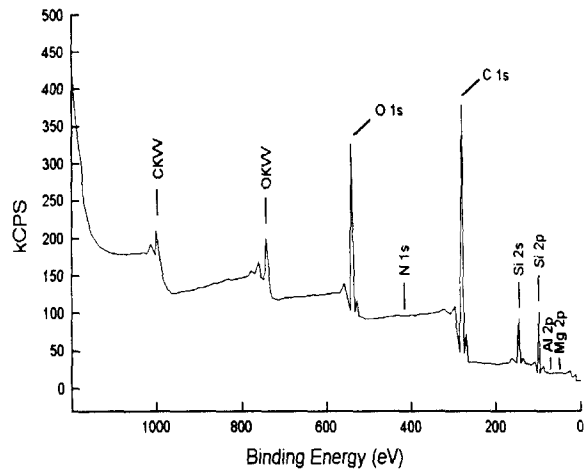


그림 5 대표적인 ESCA 스펙트럼

Fig. 5 Typical spectrum by ESCA

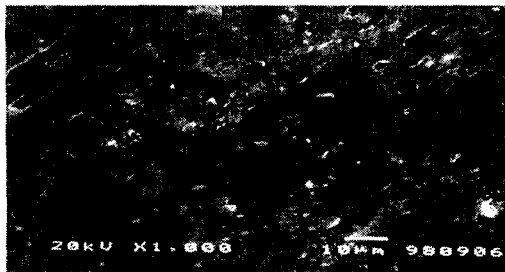
표 3 종단접속재 표면의 원소분석

Table 3 Elemental analysis of surface of terminations

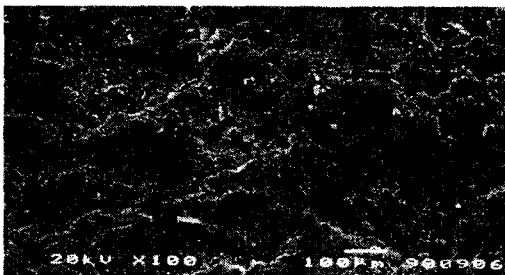
원소 시료	C	O	Si	N	Al	Mg
신 품	76.4	14.2	9.4	-	-	-
No. 1	67.9	18.4	12.7	0.2	0.1	0.7
No. 2	61.4	22.1	15.6	0.2	0.1	0.6
No. 3	72.8	16.3	9.6	0.2	0.4	0.7

3.5 표면 미세구조 분석

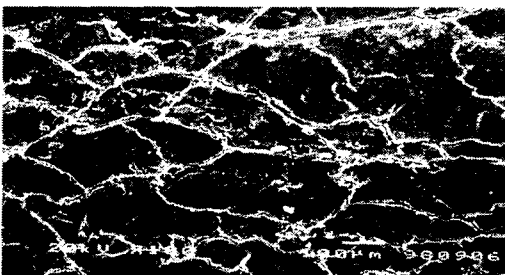
종단접속재 표면의 미세구조를 분석한 결과가 그림 6에 나와 있다. 시료표면을 100배의 배율로 분석한 결과로 신품과 비교하여 발체품 모두에서 부분적으로 미세한 균열(crazing)이 발견되었으며, 특히 No. 1 시료의 균열 깊이가 타 시료보다 다소 크게 나타났다. 또한 발체품 모두에서 내부 충전제의 노출에 의하여 표면에서 다량의 충전제가 관찰되었다. 이러한 충전제의 노출은 자외선 방사에 의해 표면이 열화되어 나타나는 것으로 알려져 있으며, 수명에는 별다른 영향을 미치지 않지만 표면 발수성을 저하시킨다[8].



(a)



(b)



(c)



(d)

그림 6 종단접속재의 표면 미세구조: (a) 신품, (b) No. 1, (c) No. 2, (d) No. 3

Fig. 6 Surface microstructure of dismantled terminations:

(a) new, (b) No. 1, (c) No. 2, (d) No. 3

3.6 접촉각 분석

일반적으로 고분자재료는 낮은 표면에너지를 갖고 있기 때문에 초기에는 우수한 발수성 (hydrophobicity)을 보이지만 열화가 진행되면 표면에너지가 증가하여 접촉각이 저하된다. 이러한 발수성은 갓 표면에서 일어나는 누설전류의 거동과 밀접한 관련이 있으며, 발수성이 상실되는 경우에는 심락 (flashover)을 발생하게 한다. 표 4에 갓 표면의 접촉각을 측정된 결과가 나와 있다. 표에서 알 수 있는 것처럼 신품보다 발체품에서 접촉각이 증가하는 경향을 보이고 있는데, 이는 컴파운드 가공시 첨가한 저분자량의 오일 성분이 표면으로 확산되었기 때문인 것으로 생각된다[9].

표 4 종단접속재의 접촉각

Table 4 Contact angle of dismantled terminations

시료	접촉각 (°)	비고
신 품	106.0	10회 측정후 평균값
No. 1	123.0	
No. 2	106.8	
No. 3	120.6	

3.7 조성변화 분석

지역에 따른 종단접속재 재료의 고체상 NMR 스펙트럼이 그림 7과 8에 나와있다. 액체상 NMR로는 종단접속재가 가교된 상태이기 때문에 120°C의 고온과 가혹한 용매에서도 주성분인 EPDM보다는 상대적으로 양이 적은 오일 성분이 더 많이 녹아 나와 디엔의 상태변화를 알기 어려웠다. 그림 7은 80°C에서 14 kHz의 spinning rate와 MASDD pulse를 사용해서 측정된 결과이며, 그림 8은 상온에서 14 kHz의 spinning rate와 single pulse를 사용해서 측정된 결과이다. 또한 표 5는 재료의 조성변화를 mole비와 중량비로 나타낸 것이다. 스펙트럼에서 디엔은 ¹³C NMR의 경우 18.8, 126, 130 ppm에서 특성 피크를 보이며, ¹H NMR의 경우에는 5.6 ppm에서 에틸렌과 구분되는 피크를 나타낸다. 그림 8에서 보여지는 것처럼 발체품 사이에서 지역에 따라 스펙트럼에서 차이가 보인다. 이와 같은 원인으로는 운전되는 환경차이에 의하여 열화정도가 서로 다르기 때문인 것으로 판단된

표 5 중단접속재의 조성변화

Table 5 Composition change of dismantled terminations

시료	몰비 (mole %)			중량비 (wt%)		
	에틸렌	프로필렌	디엔	에틸렌	프로필렌	디엔
기저고분자	72.5	26.8	0.6	46.4	51.4	2.2
신 품	70.0	30.0	0	43.8	56.2	0
No. 1	65.7	34.3	0	39.0	61.0	0
No. 2	68.0	32.0	0	41.4	59.6	0
No. 3	70.7	28.7	0.6	44.1	53.7	2.2

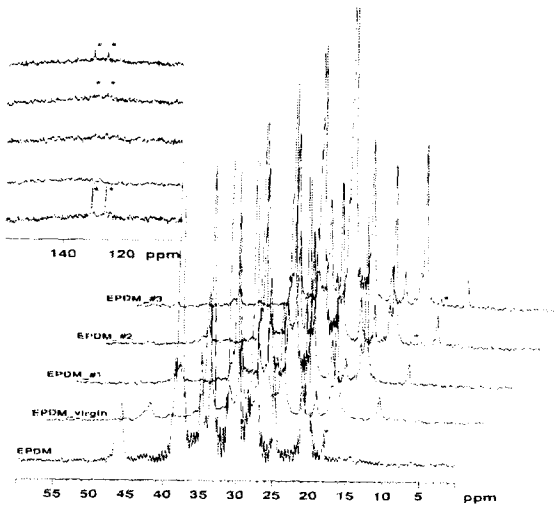


그림 7 중단접속재의 ¹³C NMR 스펙트럼

Fig. 7 ¹³C NMR spectrum of dismantled terminations

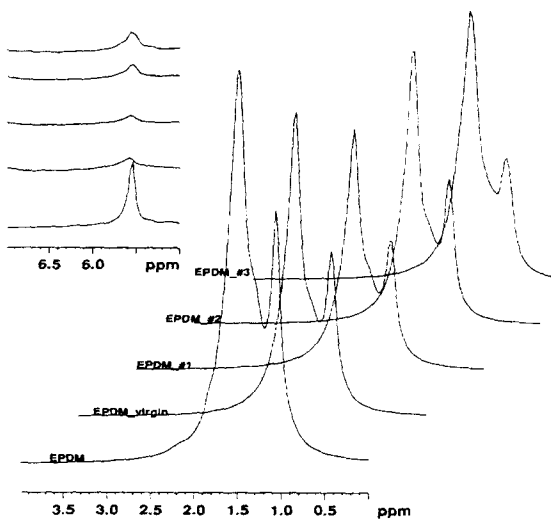


그림 8 중단접속재의 ¹H NMR 스펙트럼

Fig. 8 ¹H NMR spectrum of dismantled terminations

다. 또한 No. 1 시료의 경우 모든 온도에서 디엔이 관찰되지 않지만, No. 2 시료의 경우에는 80°C 이상에서 소량의 디엔이 관찰된다. 한편 No. 3 시료는 모든 온도에서 디엔이

관찰된다. 표 5에서 알 수 있는 것처럼 경년에 따라 EPDM 고분자에서 에틸렌과 디엔의 함량이 감소되었다. 이와 같은 현상은 열화에 의해 폴리에틸렌과 디엔의 결합이 분해되는 현상이 나타나기 때문인 것으로 생각된다. 한편, 특이한 것은 EPDM 기저고분자와 일부 발취품에서는 디엔이 관찰되었으나, 신품에서는 디엔이 거의 관찰되지 않았다. 신품에서 디엔이 관찰되지 않은 현상은 정확하게 설명하기 어렵지만 신품과 발취품의 제조방법상 문제이든지 혹은 가공과정중 디엔이 분해되어 다른 형태로 변화되었을 가능성이 높다.

3.8 고찰

본 연구는 13년 경과한 중단접속재의 전기적 성질과 재료 특성을 분석한 연구로서, 본 중단접속재의 절연특성 분석결과 신품과 거의 차이가 없었으나, $\tan \delta$ 측정에서 발취품 No. 1 시료의 경우만 1 MHz의 고주파 영역에서 손실이 다소 크게 나타났다. No. 1 시료는 공해지역에서 운전되던 중단접속재로 타 지역의 시료와 비교하여 열화가 가장 심한 것으로 나타났다. 즉, NMR을 사용한 조성변화 분석, 화학구조 분석 및 SEM에 의한 미세구조 분석에서 가장 취약한 결과를 보였다. 이러한 결과로부터 No. 1 시료는 열화에 의한 극성기의 도입으로 손실이 증가한 것으로 보인다.

화학구조 분석에서는 경년에 따라 메틸기는 감소하고 수산화기는 약간 증가하는 경향을 보였다. 메틸기가 약간 감소하는 이유로는 비록 표면을 세척하여 측정하였지만 열화에 의해 표면으로 나온 충전제가 적외선을 차폐하였기 때문인 것으로 고려된다. 측정결과로부터 표면에서 열화가 다소 보이기는 하지만 열화 진행은 크지 않은 것으로 나타났다.

산화유도시간 측정에서는 신품과 발취품 모두에서 산화반응이 발견되지 않았다. 일반적으로 전력케이블에 사용되는 가교폴리에틸렌 (crosslinked polyethylene; XLPE)의 경우 약 0.5%의 산화방지제를 사용하며, 10년 정도 사용하면 산화유도시간이 약 10분내로 단축된다고 알려져 있다[6]. 하지만 중단접속재의 경우에는 전력케이블보다 많은 양의 산화방지제를 사용하며, 또한 재질 자체가 내열성이 우수하기 때문에 산화반응이 발견되지 않는 것으로 생각된다.

원소분석에서는 발취품의 경우 표면산화에 의해 탄소가 감소하고 산소가 증가하는 현상이 나타났다. 또한 질소, 마그네슘, 알루미늄 등이 소량 증가하였는데, 이는 환경 오손물의 부착이나 고분자 열화에 의한 충전제의 노출 때문인 것으로 판단된다.

접촉각 측정에서 경년에 따라 오히려 증가하는 경향이 나타났는데, 이는 재료 내부에서 확산된 가공성 향상제 등이 표면에너지 낮추기 때문인 것으로 생각된다. 예를 들어 실리콘 고무와 같은 재료는 발수성을 완전히 상실한 다음 수 시간 정도만 경과하면 내부의 저분자량 실리콘이 표면으로 확산되어 발수성이 회복되는 것으로 알려져 있다[10].

중단접속재 재질의 조성변화 측정으로부터 중단접속재가 운전되는 환경에 따라 조성이 변화함을 알 수 있었다. 특히 경년에 따라 EPDM중 디엔의 함량이 감소되는데, 이는 결합이 분해되면서 1,4-hexadiene 형태의 구조가 다른 구조로 변했을 것으로 생각된다.

4. 결론

본 연구는 현장에서 13년 동안 운전된 케이블 종단접속재를 발취하여 특성을 분석한 것으로서, 종단접속재의 전기적 특성에서 신품과 거의 차이가 없었다. 갓 표면에서 미세한 크랙이 진전하였으며, 원소분석을 통해 표면열화 현상을 확인하였다. 화학구조 분석에서는 경년에 따라 별 다른 열화 피크가 보이지 않았고, 신품과 발취품에 대한 산화유도시간 측정에서 산화반응이 발견되지 않았으며, 경년에 따라 접촉 각이 증가하는 경향을 보였다. 전체적으로 열화는 표면에서만 진행중인 것으로 판단된다. 한편 NMR로 재질의 조성변화를 측정한 결과, 운전 환경에 따라 조성이 변화함을 알 수 있었다. 지역별 열화 정도는 영등포, 해운대, 동인천의 순으로 심하게 나타났으며, 영등포에서 발취한 제품에서 가장 심한 열화를 보인 것은 심각한 도시공해와 인구과밀지역으로 전기적 스트레스를 많이 받았기 때문인 것으로 추정된다.

참 고 문 헌

[1] *Diagnostic Techniques for Cable Characterization*, EPRI Reports, EL-6207, 1989.
 [2] *High-Voltage Alternating-Current Cable Terminations*, IEEE std. 48, 1990.

[3] *Oxidative Induction Time of Polyolefins by Thermal Analysis*, ASTM Std. D3895-80.
 [4] A. E. Vlastos and S. M. Gubanski, "Surface Structural Changes of Naturally Aged Silicone and EPDM Composite Insulators", *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 6, No.2, pp. 888-900, 1991.
 [5] C. C. Ku and R. Liepins, *Electrical Properties of Polymers*, Hanser Publishers, 1987.
 [6] *배전케이블 수명예측 기준결정 및 열화진단 시스템 구축*, KEPRI Report, TR.95YJ16.L199787. 1997.
 [7] R. S. Gorur et al., "Surface Hydrophobicity of Polymers Used for Outdoor Insulation", *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 5, No. 4, pp. 1923-1929, 1990.
 [8] *Field Inspection of Composite Insulators*, STRI Guide 3, 1996.
 [9] M. Zinbo, L. M. Skewes and A. N. Theodore, "The Surface Migration of Extender Oil in EPDM Vulcanizates", *J. Appl. Polym. Sci.*, Vol. 41, pp. 835-843, 1990.
 [10] R. S. Gorur, et al., "Aging in Silicone Rubber Used for Outdoor Insulation", *IEEE trans. Power Delivery*, Vol. 7, No. 2, pp. 525-538, 1992.

저 자 소 개



한재홍 (韓在鴻)
 1967년 10월 5일생. 1990년 단국대 공대 재료공학과 졸업. 1992년 동 대학원 재료공학과 졸업(석사). 1996년 고려대 대학원 재료공학과 졸업(공학박). 현재 한국전력 전력연구원 연구원. Tel: 042-865-5921



이철호 (李喆浩)
 1959년 11월 19일생. 1982년 인하대 공대 고분자공학과 졸업. 1995년 서울시립대 대학원 화학공학과 졸업(석사). 1982년~1995년 한국전기연구소 근무. 1995년~현재 평일산업(주) 기술연구소 책임연구원 및 화인폴리머(주) 대표이사



이병성 (李丙成)
 1968년 8월 17일생. 1993년 충남대 공대 전기공학과 졸업. 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 한국전력공사 전력연구원 전력계통연구실 연구원



김상욱 (金商郁)
 1952년 3월 24일생. 1979년 한양공대 대학원 화학공학과 졸업(박사). 1980~1981 NRC 연구원, U. of Ottawa 연구교수. 현재 서울시립대학교 공과대학 화학공학과 교수, 한국공업화학회 부회장.



김상준 (金相俊)
 1951년 2월 7일생. 1986년 서울산업대 전기공학과 졸업. 1887년 발송배전기술사. 1991년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1999년 고려대 대학원 재료공학과 졸업(공학박). 1976년~현재 한국전력공사 전력연구원 전기이용기술그룹장



김용애 (金容愛)
 1962년 7월 5일생. 1985년 고려대 화학과 졸업. 1987년 고려대 대학원 화학과 졸업(석사). 1990년 미국 펜실바니아대학교 대학원 화학과 졸업(석사). 1993년 동 대학원 화학과 졸업(박사). 1995년~현재 LG 화학 기술연구원 고분자연구소 및 분석센터 선임연구원