

배전용 폴리머애자의 현장열화 특성평가

Characterization of Field-Aged Polymer Insulators for Distribution Power Systems

이병성*, 김찬영*, 한재홍*

(Byung-Sung Lee*, Chan-Young Kim*, Jae-Hong Han*)

Abstract

The aging characteristics of 2 kinds of 3 years field-aged distribution polymer insulators which were dismantled from 5 regions have been investigated by electrical test and material characterization. Although the $\tan \delta$ of specimens prepared from weathershed was increased with surface aging, the $\tan \delta$ and leakage current of real products had no differences between virgin and dismantled ones. Due to the aging, all dismantled polymer insulators had micro-cracks on the surface of weathershed and only the products of manufacturer B showed the reduction of OIT(oxidation induction time). But, there were no differences between virgin and dismantled products in contact angle and chemical structure. Therefore, it can be considered that the aging is only limited on the surface of dismantled polymer insulators and that NMR techniques are very useful to evaluate the aging of polymer materials.

Key Words(중요용어) : Polymer Insulators, Characterization, Aging, Electrical Properties, Surface

1. 서론

전력설비의 소형화·경량화 추세와 유지보수의 편의성 도모를 위해 배전계통에서 대부분을 차지하던 자기 절연물이 점차 폴리머 절연물로 대체되고 있으며, 그 중에서도 폴리머애자가 주요 관심대상으로 부상하고 있다. 폴리머애자는 기존의 자기애자에 비교하여 여러 가지 장점이 있기 때문에 전세계적으로 사용량이 증가하고 있으며, 특히 경량이면서도 오손 특성 등의 내환경성이 우수하여 자기애자의 대체품으로 사용범위가 상당히 넓어지고 있다.

외국의 경우 배전선로는 물론 송전선로에서도 폴리머애자를 적용한 기간이 30여년에 이르고 있으며,

특히 북미의 경우에는 신규애자 물량의 거의 대부분을 폴리머애자가 차지하고 있다^{1, 2)}. 국내의 경우에도 한국전력공사가 1990년대 중반부터 매년 수 만개의 폴리머애자를 외국으로부터 수입하여 실선로에서 사용 중에 있으며, 국내에서 개발된 제품도 최근에 약 2년간의 시험사용이 완료되어 확대 적용이 예상되고 있다³⁻⁵⁾. 향후 폴리머애자의 장기신뢰성이 입증된다면 이러한 적용 추세는 급속히 확대될 것으로 판단된다.

폴리머애자는 많은 장점에도 불구하고 재료의 특성상 장기간 사용하는 경우에는 열화에 의해 여러 성질이 저하되며⁶⁾, 자기재료와는 달리 신소재이기 때문에 상대적으로 운전경험이 짧다. 따라서 폴리머애자의 장기신뢰성을 평가하기 위해서는 가속열화에 의한 특성 평가와 더불어 현장에서의 경년에 따른 특성 변화를 파악하는 것이 매우 중요하다. 하지만 국내에서는 현장에서의 경년열화 특성에 대한 체계

* 한국전력공사 전력연구원

(대전시 유성구 문지동 103-16, Fax: 042-865-5804

E-mail : leeb@kepri.re.kr)

2000년 1월 28일 접수, 2000년 9월 29일 심사완료

적인 연구나 데이터를 거의 얻을 수 없는 실정이다.

본 연구에서는 폴리머애자의 경년특성을 파악하기 위해 현장에서 3년간 운전중인 2종류의 외산 폴리머 애자를 5개 지역에서 발채하여 재료 및 전기적 특성 변화를 분석하여 신품과 비교하였다. 국산 폴리머애자의 경우에는 현장 사용기간이 매우 짧기 때문에 본 연구에서는 제외하였다. 이와 같은 연구는 향후 폴리머애자의 장기신뢰성 평가 및 수명예측에 기초 자료로 활용이 기대된다.

2. 시료발채 및 실험

2.1 시료발채 및 육안조사

국내 배전선로에서 3년간 사용중인 2종류(A사 및 B사)의 외산 폴리머 현수애자를 5개 지역(거제, 목포, 제주, 포항, 서울)에서 각각 4개씩 발채하였다. A사의 폴리머애자는 5개 지역 모두에서 발채가 가능하였지만, B사의 경우에는 거제, 목포 및 제주지역에서만 발채할 수 있었다. 발채장소는 서울지역을 제외하고는 바다로부터 1 km 이내에 존재하는 해안의 염해지역이며, 서울지역은 인구밀집된 서울역 뒤의 공해지역이다. 참고적으로 모든 폴리머애자가 운전기간중 고장은 발생하지 않았다. 제조업체에 따르면 A사 폴리머애자의 재질은 EPDM(ethylene propylene diene terpolymer) 고무와 실리콘 고무가 혼합된 형태이고, B사의 재질은 EPDM 고무인 것으로 알려져 있다.

발채한 시료 외관을 육안으로 관찰한 결과, 시료 모두에서 트래킹 및 침식 현상은 발견되지 않았으나, 표면에 충전재 노출(chalking)과 오손물 부착이 관찰되었다. 일반적으로 재료 특성분석을 위해서는 시료를 파괴해야 하기 때문에 우선 전기적 시험을 실시한 다음 재료 특성분석을 시행하였다.

2.2 전기적 시험

현장에서 발채한 폴리머애자의 전기적 특성변화를 파악하기 위하여 유전손실, 누설전류, 부분방전 등을 측정하여 신품과의 특성 차이를 분석하였다.

실제품 폴리머애자의 금구 양단에 교류전압을 인가하면서 capacitance and dissipation factor 시험기를 사용하여 상온에서 $\tan \delta$ 및 누설전류의 변화를 측정하였다. 시료에 인가한 교류전압은 2~10 kV이며, 2 kV 단위로 승압하면서 측정하였다.

폴리머애자의 계면특성 및 내부결함을 검출하기 위하여 상온 기중상태에서 부분방전량을 측정하였으며, 실험전에 방전전하량 보정기를 이용하여 보정을

실시하였다. 교류전압을 인가하였으며, 최대 전압은 50 kV이다. 결과의 재현성을 확인하기 위하여 각각의 애자에 대하여 2~3회의 실험을 실시하였다.

시료형태의 전기적 특성평가에서는 온도 및 주파수 변화에 따른 유전특성의 변화를 측정하기 위하여 유전열분석기(dielectric thermal analyzer; DETA)를 사용하였다. 액체질소를 사용하여 -50~100°C의 온도범위에서 주파수를 10 Hz에서 1 MHz까지 변화시키면서 $\tan \delta$ 변화를 측정하였다. 측정시료는 폴리머애자의 갓(weathershed) 표면 부분을 1 mm 정도의 두께로 얇게 가공한 다음 양면에 금 증착을 하여 사용하였다.

2.3 재료 특성분석

폴리머애자의 오손성능을 결정하는 주요특성인 표면 발수성 변화를 측정하기 위하여 접촉각 측정기(Kyowa Interface Science Co., 모델명: CA-V)를 사용하였으며, 이때 시료표면에 떨어뜨린 증류수 체적은 13 μ l 이다. 시료는 별도로 세척하지 않았으며, 10회 측정하여 평균값을 취하였다.

표면 미세구조 및 성분 분석을 위하여 mapping 기능을 가진 SEM(scanning electron microscope; Jeol, 모델명: JSM-840A)을 사용하였다.

시차주사열량계(differential scanning calorimeter; DSC)를 이용하여 열적 특성을 측정하였다. 산화 저항능력의 척도인 산화유도시간(oxidation induction time; OIT)을 측정하기 위하여 ASTM에 나와 있는 측정조건을 사용하였다. 먼저 시료의 온도를 질소분위기에서 10°C/min의 속도로 200°C까지 승온한 다음 이 온도에서 5분간 유지한 후 산소분위로 바꾼 상태에서 발열반응인 산화반응이 나타나는 시간을 측정하였다⁷⁾. 이때 질소와 산소의 유량은 50 ml/min이며, 시료량은 약 10 mg이었다. 측정에는 알루미늄팬을 사용하였으며 측정 전에 인듐을 이용하여 측정 온도범위를 보정하였다.

폴리머애자 갓 표면의 화학구조는 시료가 불투명하므로 얇게 절단하여 적외선분광기-전반사(fourier transform infrared spectroscopy-attenuated total reflection; FTIR-ATR)로 분석하였는데, Perkin-Elmer사(모델명: Paragon 1000)의 FTIR을 사용하였다. 시료 표면은 별도로 세척하지 않았다.

경년에 따른 폴리머애자 재질의 조성변화를 관찰하기 위하여 고체상의 ¹H NMR(nuclear magnetic resonance)과 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. NMR 측정시 100℃에서 3 kHz와 4 kHz의 spinning rate를 사용하였으며, 자세한 측정방법은 다른 논문에서 언급한 바 있다⁸⁾.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 전기적 특성

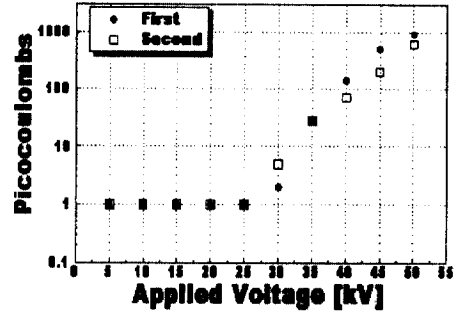
Capacitance and dissipation factor 시험기로 실제 품 애자의 $\tan \delta$ 및 누설전류의 변화를 측정한 결과가 표 1에 나와 있다. 표에서 보여지는 것처럼 전압이 증가함에 따라 $\tan \delta$ 및 누설전류는 증가하기는 하지만, 신품과 경년품 사이에는 차이가 거의 없었다. 이와 같은 결과는 실제품에서 전기적 특성변화를 일으킬만한 열화가 나타나지 않았음을 의미한다.

표 1 인가전압에 따른 A사 및 B사 폴리머애자의 $\tan \delta$ 와 누설전류

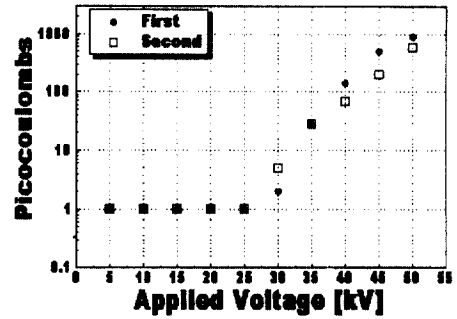
Table 1 Tan δ and leakage current of polymer insulators of manufacturer A and manufacturer B with applied voltage

제작 회사	시료	전압 (kV)	$\tan \delta$ (%)	누설전류 (mA)	시료	전압 (kV)	$\tan \delta$ (%)	누설전류 (mA)
A사	신품	2	3.20	0.026	거제 지역	2	3.18	0.026
		4	3.29	0.053		4	3.27	0.053
		6	3.32	0.079		6	3.29	0.079
		8	3.39	0.106		8	3.45	0.106
		10	3.69	0.132		10	3.71	0.133
	목포 지역	2	3.17	0.026	제주 지역	2	3.15	0.027
		4	3.27	0.052		4	3.25	0.053
		6	3.39	0.079		6	3.32	0.079
		8	3.41	0.105		8	3.46	0.105
		10	3.63	0.132		10	3.70	0.132
	포항 지역	2	3.19	0.026	서울 지역	2	3.19	0.026
		4	3.28	0.053		4	3.28	0.053
		6	3.30	0.079		6	3.30	0.079
		8	3.44	0.106		8	3.44	0.106
		10	3.70	0.133		10	3.71	0.133
B사	신품	2	3.20	0.027	거제 지역	2	3.21	0.026
		4	3.28	0.053		4	3.28	0.053
		6	3.31	0.079		6	3.32	0.080
		8	3.46	0.105		8	3.45	0.106
		10	3.73	0.134		10	3.72	0.133
	목포 지역	2	3.22	0.027	제주 지역	2	3.22	0.027
		4	3.28	0.053		4	3.31	0.053
		6	3.31	0.079		6	3.33	0.079
		8	3.49	0.107		8	3.43	0.106
		10	3.65	0.133		10	3.74	0.133

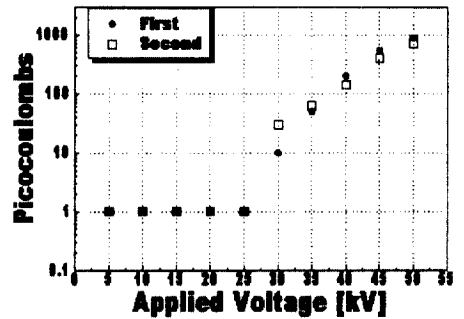
그림 1과 그림 2는 폴리머애자의 금구 양단에 50 kV까지 교류전압을 인가하면서 부분방전량의 변화를 측정한 결과이며, 대표적으로 신품·거제지역·목포지역만 나타내었다. 그림 1과 같이 A사 폴리머애자의 부분방전량은 30 kV 이하에서는 10 pC 이하



(a) 신품



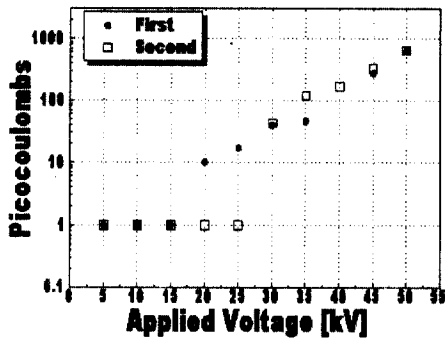
(b) 거제



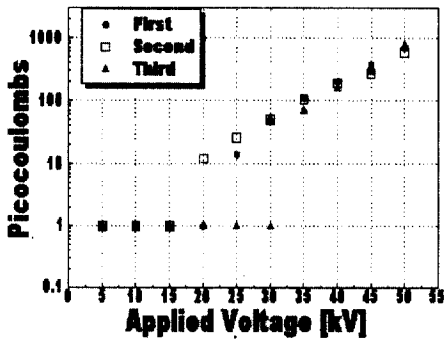
(c) 목포

그림 1 A사 폴리머애자의 부분방전량: (a) 신품, (b) 거제, (c) 목포

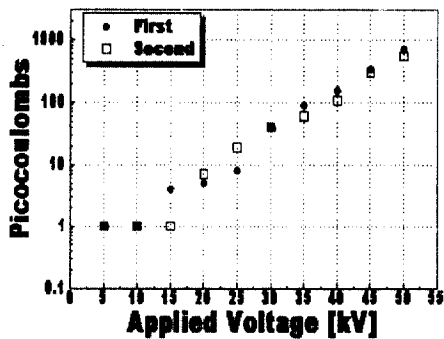
Fig. 1 PD amount of polymer insulators of manufacturer A: (a) virgin, (b) Gyoje, (c) Mokpo



(a) 신품



(b) 거제



(c) 목포

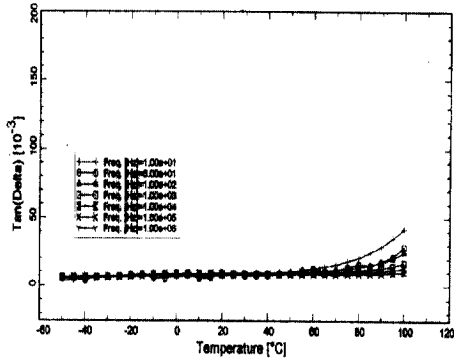
그림 2 B사 폴리머애자의 부분방전량: (a) 신품, (b) 거제, (c) 목포

Fig. 2 PD amount of polymer insulators of manufacturer B: (a) virgin, (b) Gyoje, (c) Mokpo

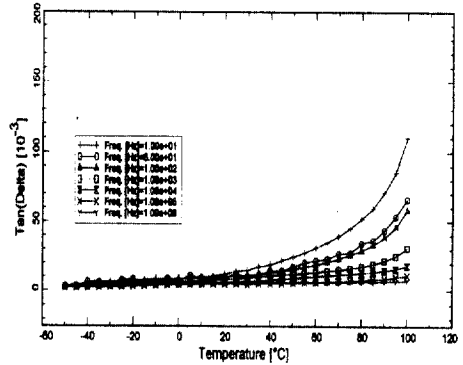
로 낮게 나타났고, 인가전압이 30 kV를 초과하면 비례적으로 증가하는 경향을 보이며, 최고 인가전압인 50 kV에서는 약 1000 pC 정도를 나타냈다. 그러나 목포지역의 경우에는 30 kV에서 10 pC 이상의 부분방전량을 보여 가장 취약하였다. 반면 B사 폴리머애자의 경우에는 그림 2와 같이 A사보다 다소 높은 부분방전량을 보였는데, 신품의 경우에도 부분방전특성이 나쁘게 나타났다. 방전개시점을 10 pC로 설정한 경우 A사 제품들은 목포지역을 제외하고는 35 KV 정도의 방전개시전압을 보였으며, B사 제품들은 모두 방전개시전압이 약 20 kV 정도인 것으로 나타났다. 두 제품에서 열화에 의한 전기적 특성변화는 관찰되지 않았다. 참고적으로 결과의 재현성을 확인하기 위하여 실험을 2~3회 반복하였다.

유전열분석기를 이용하여 A사 폴리머애자의 $\tan \delta$ 변화를 측정된 결과가 그림 3에 나와 있다. 대표적으로 신품·거제지역·포항지역만 나타내었으며, 기타 지역은 거제지역과 유사한 결과를 보였다. 그림 3과 같이 모든 시료가 온도증가에 따라 $\tan \delta$ 가 증가하는 일반적인 경향을 나타내었다. 이와 같은 손실은 온도증가에 따른 폴리머 사슬의 운동과 밀접한 관련이 있는 것으로 알려져 있다. 즉, 이러한 $\tan \delta$ 증가는 높은 온도에서 증가한 폴리머 사슬의 운동이 교류 전기장 변화를 따라가지 못하는 "lag" 현상 때문이다. 또한 주파수가 높을수록 $\tan \delta$ 가 적어지는 경향을 보이는데, 이는 주파수가 매우 높으면 폴리머 사슬이 전기장에 따라 분자배향의 평형을 얻지 못하기 때문에 손실이 작아진다⁹⁾. 전체적으로 신품과 비교하여 경년품에서 $\tan \delta$ 가 약간 증가하는 경향을 보이고 있지만 거의 유사하였으며, 포항지역애자의 경우에만 고주파 영역(100 kHz 이상)에서 모든 온도에 걸쳐 $\tan \delta$ 가 많이 증가하였다. 이와 같은 $\tan \delta$ 변화는 폴리머애자의 갓 표면에서 열화로 인해 산소성분이나 염해에 의한 알카리 금속 등의 증가로 극성기가 증가하여 나타났다고 판단된다. 이는 포항지역이 타 지역보다 염해가 심하다는 사실을 통해서 고찰한 것이다¹⁰⁾.

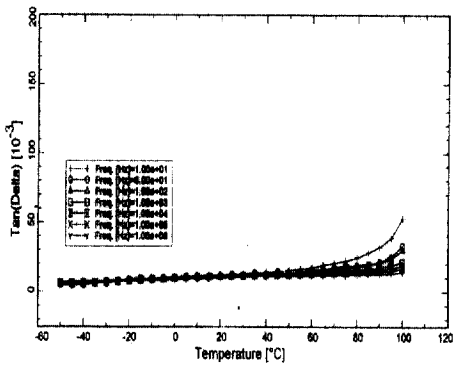
그림 4는 B사 폴리머애자의 $\tan \delta$ 측정결과이다. 대표적으로 신품·거제지역만 나타내었으며, 기타 지역은 거제지역과 유사한 결과를 보였다. A사 제품의 특성과 마찬가지로 모든 시료가 온도증가에 따라 $\tan \delta$ 가 증가하는 경향을 나타내었으며, 신품과 비교하여 경년품에서 $\tan \delta$ 가 높았다. A사 제품과 비교해서는 B사 제품이 다소 높은 $\tan \delta$ 를 나타내었다.



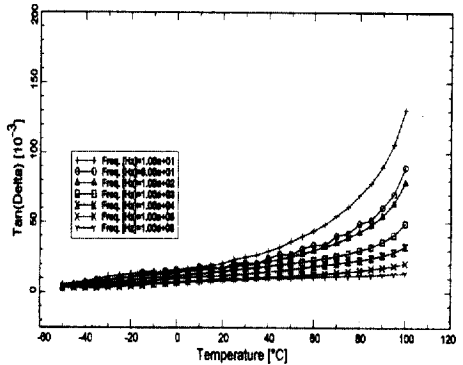
(a) 신품



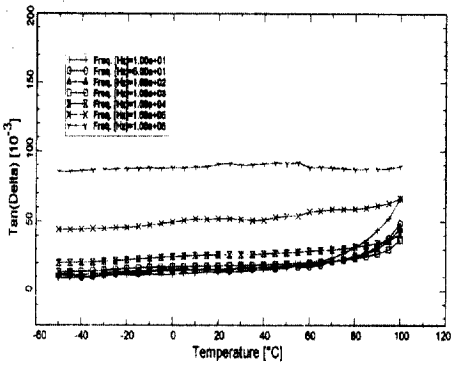
(a) 신품



(b) 거제



(b) 거제



(c) 포항

그림 4 B사 폴리머애자 갖의 $\tan \delta$: (a) 신품, (b) 거제

Fig. 4 $\tan \delta$ of weathersheds of manufacturer B: (a) virgin, (b) Gyoje

접촉각 측정기를 이용해 측정한 폴리머애자 표면의 접촉각이 표 2에 나와 있다. 전체적으로 신품에 비하여 경년품에서 접촉각이 증가하는 경향을 보였으며, 이는 킴파운드 가공시 첨가하는 저분자량의 오일성분이 내부로부터 표면으로 확산되기 때문인 것으로 알려져 있다¹¹⁾. 단, A사 서울지역의 애자에서 약간의 접촉각 감소가 나타났는데, 이는 해안에서 가까운 다른 지역과는 달리 서울지역이 자외선 강도가 비교적 온화하기 때문에 오일성분의 확산이 느리기 때문에 발생한 것으로 판단된다.

3.2.2 표면 미세구조 및 성분 분석

그림 5는 A사 폴리머애자 갖의 표면 미세구조를 SEM을 사용하여 1000배 확대해 측정한 결과이다. 경년에 따라 서울지역을 제외한 모든 경년품의 표면

그림 3 A사 폴리머애자 갖의 $\tan \delta$: (a) 신품, (b) 거제, (c) 포항

Fig. 3 $\tan \delta$ of weathersheds of manufacturer A: (a) virgin, (b) Gyoje, (c) Pohang

3.2 재료 특성평가

3.2.1 접촉각 분석

에서 일부 크랙이 발견되었으며, 거제지역·목포지역·포항지역의 애자가 표면 미세구조에서 변화가 크게 보였다. 반면 서울지역 애자의 경우에는 신품과 거의 유사한 미세구조를 나타내었는데, 이러한 결과는 염해지역에서 운전되지 않았기 때문인 것으로 보인다. 즉, 시료 표면의 크랙은 자외선 조사에 의해 발생하며, 자외선 강도와 밀접한 관련성이 있다. 기후 데이터에서 자외선 강도는 해안지역이 내륙보다는 높은 것으로 알려져 있으며, 따라서 해안지역의 시료에서 크랙이 더욱 진전된 것으로 판단된다.

육안조사에서 나타난 충전재 노출 현상으로부터 충전재 성분 및 성분의 분포를 분석한 결과가 그림 6과 그림 7에 나와 있다. 그림 6은 EDX(energy dispersive X-ray)로 분석한 결과로써 대표적으로 제주지역의 결과만을 나타내었다. 모든 경년품은 신품에 비해 산소와 Al 성분이 크게 나타났으며, 이는 표면 열화와 충전재 chalking 현상에 의한 것으로 판단된다. 또한 그림 7은 성분의 분포를 조사하기 위하여 제주지역 폴리머애자의 표면을 mapping한 것으로, 분석결과 Al과 Si 성분은 국부적으로 모여 있는 것이 아니고, 표면 전체에 폭넓게 분포하고 있음을 발견하였다.

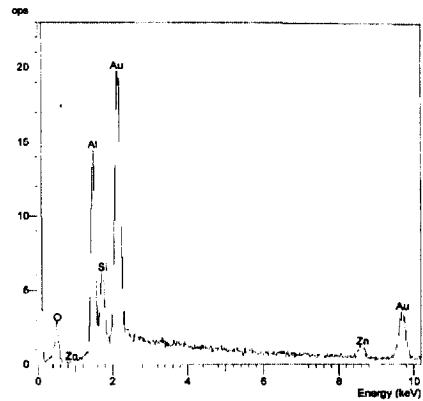
그림 8은 B사 폴리머애자의 표면 미세구조이며, A사의 경우와 유사하게 경년에 따라 모든 폴리머애자의 표면에서 일부 크랙이 발견되었다. 이상의 결과로부터 표면에서 약간의 열화가 진전함을 알 수 있었다.

표 2 현장발채한 폴리머애자의 접촉각 변화
Table 2 Contact angle of dismounted polymer insulators

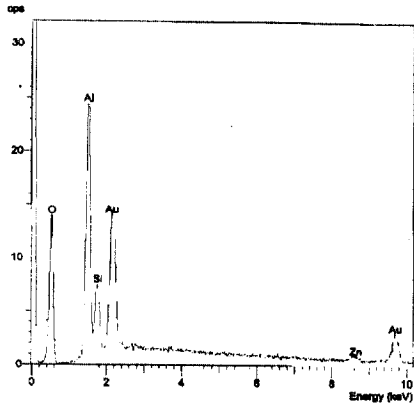
시 료		접촉각 (°)	비 고
A사	신 품	90.1	10회 측정후 평균값
	거제지역	98.4	
	목포지역	106.8	
	제주지역	109.1	
	포항지역	112.6	
	서울지역	82.3	
B사	신 품	89.1	
	거제지역	100.5	
	목포지역	95.4	
	제주지역	96.9	

그림 5 A사 폴리머애자의 표면 미세구조: (a) 신품, (b) 거제, (c) 목포, (d) 제주, (e) 포항, (f) 서울

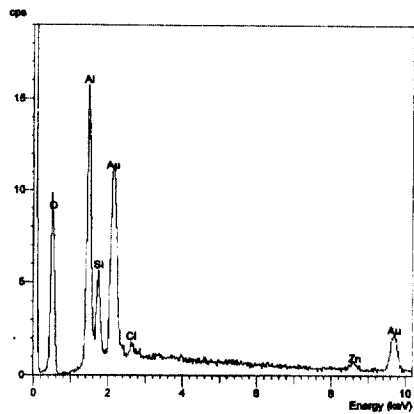
Fig. 5 Surface microstructure of polymer insulators of manufacturer A: (a) virgin, (b) Gyoje, (c) Mokpo, (d) Cheju, (e) Pohang, (f) Seoul



(a) 신품



(b) 경년품(제주)



(c) 경년품(포항)

그림 6 A사 폴리머애자의 EDX 스펙트럼: (a) 신품, (b) 경년품(제주), (c) 경년품(포항)

Fig. 6 EDX spectrum of polymer insulators of manufacturer A: (a) virgin, (b) Cheju, (c) Pohang

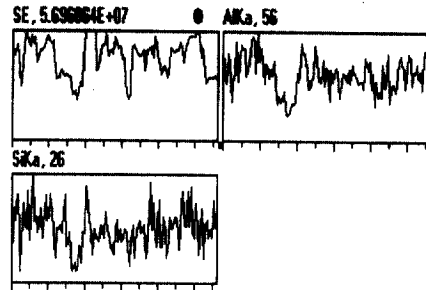


그림 7 A사 폴리머애자의 표면 mapping (제주)

Fig. 7 Surface mapping of polymer insulators of manufacturer A (Cheju)

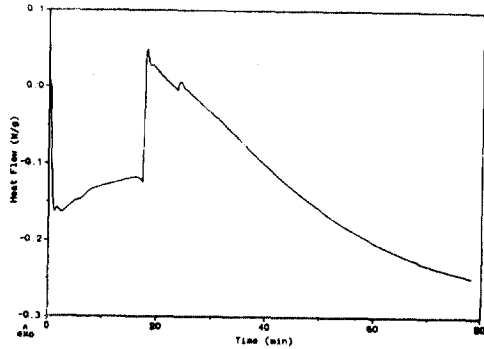
그림 8 B사 폴리머애자의 표면 미세구조: (a) 신품, (b) 거제, (c) 목포, (d) 제주

Fig. 8. Surface microstructure of polymer insulators of manufacturer B: (a) virgin, (b) Gyoje, (c) Mokpo, (d) Cheju

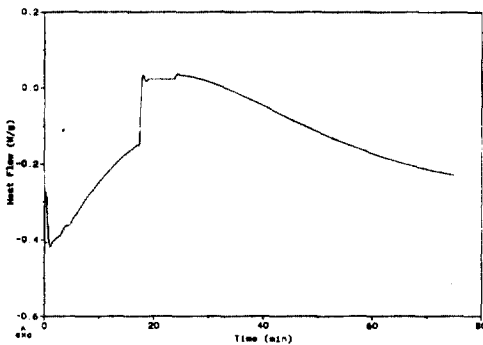
3.2.3 산화유도시간 분석

그림 9와 그림 10은 A사 및 B사 폴리머애자의 산화유도시간을 측정한 DSC thermogram이다. 산화유도시간은 기준선과 발열반응의 가장 큰 기울기에서 접선을 그어 산화반응이 시작되는 시간을 구하는 것이다. 산화유도시간은 열화에 대한 저항성을 알려주는 중요한 인자로서 산화방지제(antioxidant)의 잔류량과 밀접한 관련이 있으며, 산소 투입후 바로 또는 수 분내에 발열반응이 일어나는 경우가 위험하다고 할 수 있다¹²⁾. 본 연구에서는 산소투입이 약 22분부터 시작되었다. A사 제품은 신품과 경년품 모두에서 산화반응에 의한 발열피크가 관찰되지 않았다. 산화유도시간은 매우 짧은 경우만 문제가 되기 때문에 60분에 근접하면 실험을 인위적으로 중단하였다. 반면 B사 제품의 경우에는 신품은 약 20분 정도로 나

타났으며, 경년품은 지역에 따라 2.3~9분 정도의 산화유도시간을 보였다. 목포지역의 폴리머애자가 2.3분으로 가장 짧게 나타났으며, 거제지역의 애자가 9



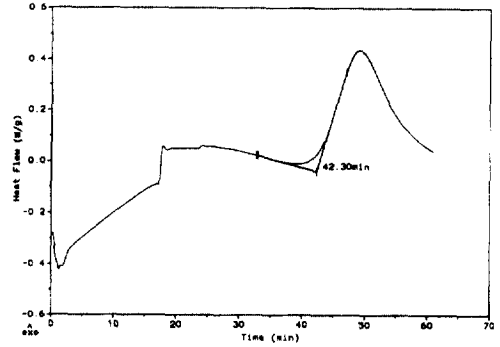
(a) 신품



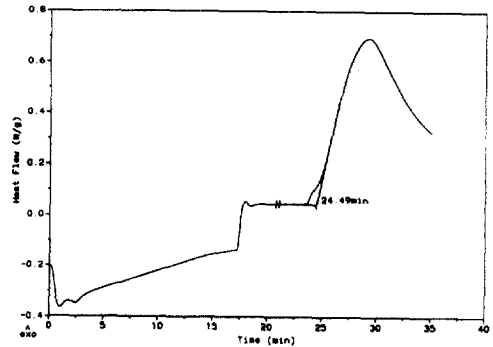
(b) 경년품 (제주)

그림 9 A사 폴리머애자의 산화유도시간: (a) 신품, (b) 경년품 (제주)

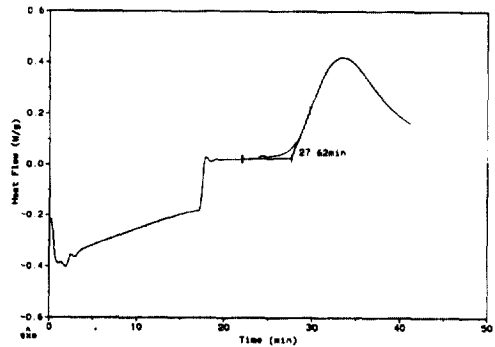
Fig. 9 OIT of polymer insulators of manufacturer A: (a) virgin, (b) Cheju



(a) 신품



(b) 목포



(c) 거제

그림 10 B사 폴리머애자의 산화유도시간: (a) 신품, (b) 목포, (c) 거제

Fig. 10 OIT of polymer insulators of manufacturer A: (a) virgin, (b) Mokpo, (c) Gyeosu

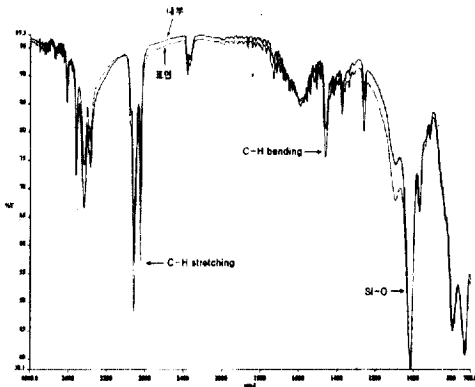
분으로 가장 길게 측정되었다. 이와 같이 두 회사 제품 사이에서 큰 차이를 보이는 이유는 제품의 내열성과 밀접한 관련이 있는 것으로 생각된다. 즉, A사 제품에는 열분해온도가 높은 실리콘 고무가 혼합되어 있기 때문에 EPDM 재질인 B사 제품보다 내열성이 우수할 것으로 보인다. B사 제품의 경우에는 경년에 따라 산화방지능력이 다소 저하된 것으로 보여진다.

3.2.4 화학구조 분석

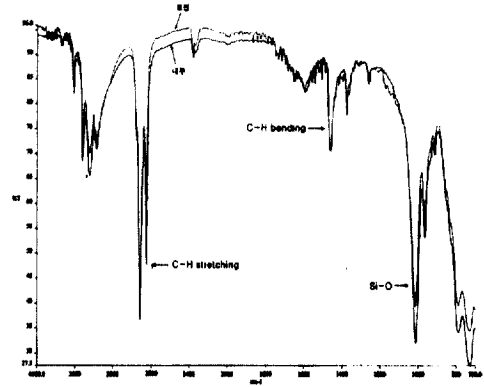
그림 11과 그림 12는 경년에 따른 화학구조의 변화를 분석한 결과이며, 표면과 내부로 구분하여 측정하였다. 특히 표면의 경우에는 건전부와 오염부에 대해서도 측정하였다.

EPDM 고무와 실리콘 고무 제품에서 발견할 수 있는 관능기(functional group)가 표 3에 정리되어 있다¹³⁾.

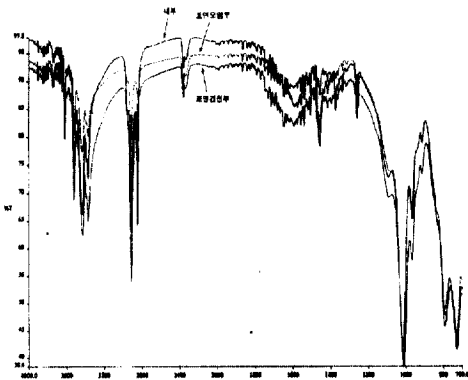
분석결과 A사 폴리머애자는 그림 11 (a)와 같이 신제품의 경우 표면과 내부의 화학구조가 거의 동일하며, 단지 표면보다는 내부에서 ATH 수소결합($3600\sim3200\text{ cm}^{-1}$)에 의한 피크가 상대적으로 크게 나타났다. 이는 표면에서 ATH가 내부보다 적게 노출되기 때문인 것으로 판단된다. 전체적으로 경년품의 경우는 그림 11 (b)와 같이 내부에서는 신제품과 거의 유사한 경향을 보였으나, 표면에서는 2950 cm^{-1} 과 1460 cm^{-1} 피크가 크게 감소되었다. 피크의 크기는 내부 > 표면 건전부 > 표면 오염부의 순으로 나타났



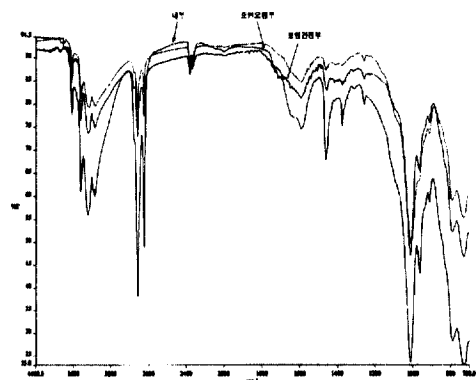
(a) 신제품



(a) 신제품



(b) 경년품 (거제)



(b) 경년품 (목포)

그림 11 A사 폴리머애자의 화학구조: (a) 신제품, (b) 경년품 (거제)

Fig. 11 Chemical structure of polymer insulators of manufacturer A: (a) virgin, (b) Gyoje

그림 12 B사 폴리머애자의 화학구조: (a) 신제품, (b) 경년품 (목포)

Fig. 12 Chemical structure of polymer insulators of manufacturer B: (a) virgin, (b) Mokpo

표 3 EPDM 및 실리콘 고무의 관능기
Table 3 Functional groups of EPDM and silicone rubber

관능기	파수 (cm ⁻¹)	설명
OH	3600-3200	stretching, ATH의 수소결합
CH	3300-2850	stretching, 대부분 유기분자에 존재
CH ₂ /-CH=CH ₂ / -C-CH ₂ -CH ₂	1500-1350	절단 또는 bending
Si-CH ₃	1270-1255	비대칭 C ₃ 변형
Si-O-Si/C-O	1100-1000	비대칭 stretching
(CH ₂) _m /-CH=CH	870-700	

으며, 경년품에서 피크 감소는 표면 열화 및 chalking 현상에 의한 것으로 생각된다. 한편 경년품은 신품보다 1650 cm⁻¹에서 수산화기(-OH)가 약간 증가하였다.

B사 폴리머애자는 그림 12의 (a)에 보여지는 것처럼 A사 제품의 경우와 마찬가지로 신품의 경우 표면과 내부의 화학구조가 거의 동일하며, 단지 표면보다는 내부에서 ATH 수소결합에 의한 피크가 상대적으로 크게 나타났다. 그림 12 (b)의 경년품에서도 A사 유사하게 피크 감소가 나타났다. 결국 관능기 피크의 크기가 오염과 열화 정도에 크게 의존함을 보여준다.

폴리머애자의 내부에서 신품과 경년품의 화학구조가 거의 동일하게 나타났기 때문에 열화는 표면에서만 진행중인 것으로 판단된다.

3.2.5 조성변화 분석

폴리머애자 재료의 조성과 경년에 따른 변화를 파악하기 위하여 ¹³C NMR과 ¹H NMR을 사용하여 측정된 결과가 각각 그림 13과 그림 14에 나와있다. 그림 13은 100°C에서 4 kHz의 spinning rate와 MASDD(magic angle spinning dipolar decoupling) pulse를 사용해서 측정된 결과이다. A사 시료에서는 130 ppm에서 미량의 첨가제에 의한 피크가 나타났다. 특이한 사실은 1 ppm 근처에서 실리콘화합물에 의한 피크가 나타났다는 것이다. EPDM과의 실리콘의 상대적인 비를 계산한 결과, 약 13:1 정도의 비율로 나타났다. 이와 같은 결과로부터 A사 폴리머애자

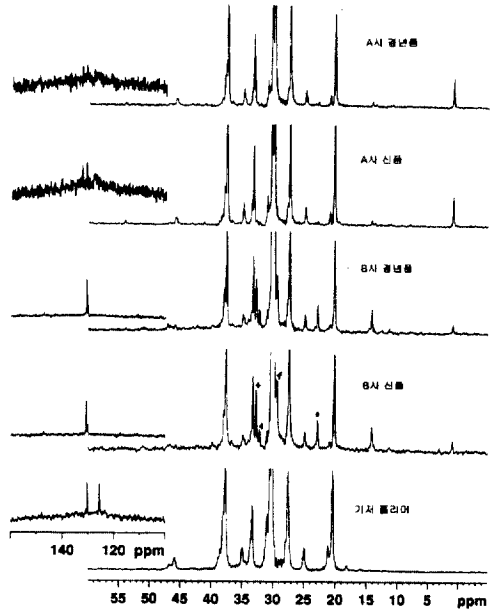


그림 13 폴리머애자의 ¹³C NMR 스펙트럼
Fig. 13 ¹³C NMR spectrum of dismantled polymer insulators

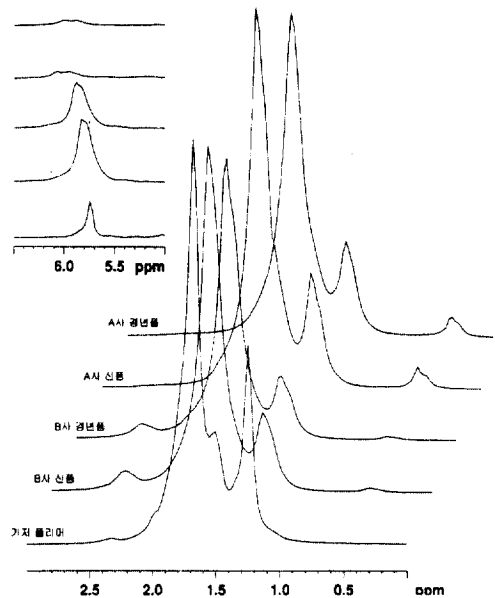


그림 14 폴리머애자의 ¹H NMR 스펙트럼
Fig. 14 ¹H NMR spectrum of dismantled polymer insulators

에는 실리콘이 매우 소량 첨가되어 있는 것으로 밝혀졌다. 한편 B사 폴리머애자의 경우에도 130 ppm 근처에서 첨가제에 의한 피크만이 나타났다.

그림 14는 100°C에서 3 kHz의 spinning rate와 single pulse를 사용해서 측정된 결과이다. 그림에서 보여지는 것처럼 A사 제품의 경우에는 디엔이 거의 보이지 않으나, B사 제품에서는 5.6 ppm 근처에서 미량의 디엔 부분이 보여진다. 또한 경년에 따라 디엔이 감소하는 경향도 발견할 수 있었다.

3.3 고찰

본 연구는 현장에서 3년간 운전중인 2종의 폴리머애자를 발취하여 경년에 따른 특성변화를 연구한 것으로서, 실제제품으로 실시한 $\tan \delta$, 누설전류 및 부분방전량의 실험에서 신제품과 경년품 사이는 차이가 거의 나타나지 않았다. 따라서 실제의 제품에서 전기적 특성변화를 유발할만한 열화가 일어나지는 않은 것으로 판단된다. 하지만 유전열분석기를 이용한 $\tan \delta$ 측정에서 포항지역 A사 폴리머애자의 경우에만 100 KHz 이상의 고주파 영역에서 모든 온도에 걸쳐 $\tan \delta$ 가 많이 증가하였다. 이와 같은 현상은 표면 열화에 의해 증가한 극성기가 $\tan \delta$ 에 영향을 미친 것으로 판단되며, 포항지역에 대한 EDX 스펙트럼에서 산소 피크가 증가한 결과가 이를 반증한다.

폴리머애자 갖의 표면 접촉각은 경년에 따라 오히려 신제품보다 증가하는 경향을 나타내었는데, 이는 재료 내부에서 표면으로 확산된 가공 오일 등이 표면에너지를 감소시키기 때문인 것으로 판단된다. 반면 서울지역의 애자에서는 접촉각이 감소하는 결과가 얻어졌는데, 이는 운전환경 차이에 의해 오일성분의 확산이 적었기 때문인 것으로 보인다.

표면 미세구조 분석에서는 경년에 따라 서울지역을 제외한 모든 회사의 경년품에서 표면 크랙이 일부 발견되었으나, 서울지역에서 발취한 폴리머애자의 경우에는 신제품과 거의 유사한 미세구조를 나타내었다. 표면 미세구조가 차이를 나타내는 이유는 크랙이 자외선 강도와 밀접한 관련이 있다는 사실로부터 유추할 수 있다. 즉, 해안지역이 내륙지역보다 자외선 강도가 높기 때문인 것으로 판단된다. 한편 EDX 분석을 통해 표면에 노출된 충전재 성분은 주로 ATH의 Al과 실리카의 Si인 것으로 나타났으며, mapping을 통해 이러한 성분이 표면 전체에 폭넓게 분포하고 있음을 알았다. 이러한 충전재 성분의 노출은 자외선 조사에 의해 발생하며, 수명에는 별 다른 영향을 미치지 않는다고 알려져 있다¹⁴⁾.

산화유도시간 분석에서 A사 제품은 산화반응에 의한 발열피크가 관찰되지 않았지만, B사 제품의 경우에는 경년에 따라 산화유도시간이 감소하는 경향을 나타내었다. 두 회사 제품 사이에서 차이가 나타나는 이유는 제품의 내열성과 밀접한 관련이 있을 것으로 판단된다. A사 제품의 경우 EPDM보다 내열성이 높은 실리콘 고무가 혼합된 컴파운드라는 점에서 이러한 고찰이 가능하다.

경년에 따른 화학구조의 분석에서는 표면 오염 및 충전재 노출에 의한 피크 감소가 나타났으나, 경년품의 내부가 신제품과 동일한 화학구조를 나타내어 열화가 표면에 국한된 것임을 알았다.

¹³C NMR 측정으로부터 A사 폴리머애자에 미량의 실리콘 고무가 존재함을 알았으며, 두 제품 모두 130 ppm 근처에서 첨가제에 의한 피크가 나타났다. 또한 ¹H NMR 측정에서는 경년에 따라 EPDM중 디엔이 약간 감소하는 경향도 발견할 수 있었다. 이중결합의 디엔은 분해되어 단일결합의 에틸렌이나 프로필렌으로 변했을 것으로 생각된다. 이러한 조성변화는 폴리머애자가 운전되는 환경에 의해 조성 변화함을 나타내는 것으로 폴리머재료의 열화특성 분석에 NMR 기법을 이용하는 것은 매우 유용할 것으로 기대된다.

4. 결론

본 연구는 현장에서 3년동안 운전된 2종류의 폴리머애자를 발취하여 특성 변화를 신제품과 비교분석한 것으로서, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다. 실제 제품에 대한 전기적 실험에서 신제품과 경년품 사이의 특성 차이가 나타나지 않았기 때문에 성능에 영향을 줄 수 있는 심각한 열화는 진전되지 않은 것으로 판단된다. 하지만 재료 특성분석에서는 표면 열화를 나타내는 약간의 변화가 관찰되었다. 즉, 표면 열화에 의한 chalking과 크랙이 발견되었고, 화학구조에서도 특성피크의 감소가 관찰되었다. 이상의 결과로부터 3년간 현장운전에 의한 폴리머애자의 열화는 표면에 국한되는 것으로 판단되며, 향후 지속적인 현장 데이터의 축적이 필요할 것으로 생각된다.

참고 문헌

- [1] G. G. Karady, "Flashover Mechanism of Non-ceramic Insulators", *IEEE Trans. Dielect. Electr. Insul.*, Vol. 6, No. 5, pp. 718-723, 1999.
- [2] M. A. R. M. Fernando and S. M. Gubanski, "Leakage Currents on Non-ceramic Insulators

- and Materials", *IEEE Trans. Dielec. Electr. Insul.*, Vol. 6, No. 5, pp. 660-667, 1999.
- [3] 배전용 폴리머애자의 신뢰성 평가 및 운용기준 제정, KEPRI Report, M.98PS07. M1999.185, 1999.
- [4] 한재홍 외, "현장열화에 따른 폴리머애자의 전기적 특성", 한국전기전자재료학회 춘계학술 대회, pp. 522-525, 1999.
- [5] 조한구 외, "신소재 옥외 절연물의 성능평가 및 진단기술", 전기전자재료, 11(3), pp. 225-232, 1998.
- [6] 이병성 외, "트래킹 휠 시험에 의해 열화된 폴리머애자의 섬락특성 평가", 한국전기 전자재료학회 춘계학술대회 논문집, pp. 82-85, 2000.
- [7] Oxidative Induction Time of Polyolefins by Thermal Analysis, ASTM Std. D3895-80.
- [8] 한재홍 외, "배전용 케이블 종단접속재의 경년특성", 대한전기학회 논문지, 48C-8-5, pp. 580-586, 1999.
- [9] C. C. Ku and R. Liepins, *Electrical Properties of Polymers*, Hanser Publishers, 1987.
- [10] 내오손 보수기준, 한국전력공사 배전분야 설계 기준, 기준번호 3910, 1997.
- [11] M. Zinbo, L. M. Skewes and A. N. Theodore, "The Structure Migration of Extender Oil in EPDM Vulcanizates", *J. Appl. Polym. Sci.*, Vol. 5, No. 41, pp. 835-843, 1990.
- [12] 배전케이블 수명예측 기준결정 및 열화진단 시스템 구축, KEPRI 보고서, TR.95YJ16.L. 199787, 1997.
- [13] R. S. Gorur and B. S. Bernstein, "Field and Laboratory Aging of Polymeric Distribution Cable Terminations: Part I -Field Aging", *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 13, No. 2, pp. 316-322, 1998.
- [14] *Field Inspection of Composite Insulators*, STRI Guide 3, 1996.