

전력케이블용 절연재료의 열화특성 및 수명진단에 관한 연구

논문
12-1-2

A study on the Aging Characteristics and Life Diagnosis of Insulating Materials for Power Cable

박홍태*, 김경석**, 남창우**, 이규철**

(Hong-Tae Park, Kyung-Suk Kim, Chang-Woo Nam, Gyu-Chul Lee)

Abstract

Aging characteristics of the crosslinked polyethylene have been measured after applying electrical, thermal and combined stresses. ICP and FT-IR measurements confirmed diffusion of low molecular weight components such as antioxidant and presence of carbonyl group. Carbonyl group of aged crosslinked polyethylene under combined stress was detected by FT-IR. As deterioration of the crosslinked polyethylene progresses, crystallinity degree and density decrease. Also, dielectric properties have been measured by $\tan \delta$ and ϵ_r measurements. The three-parameter Weibull distribution was found to be the best suited among other probabilistic distribution representing the dielectric breakdown strength of aged crosslinked polyethylene. The scale parameter and location parameter decreases as the applied stress increases. The shape parameter increases as the stress increases.

Key Words(중요용어) : Crosslinked polyethylene(가교폴리에틸렌), Carbonyl group(카르보닐기), Crystallinity degree(결정화도), Three-parameter Weibull distribution(3모수 와이블 분포)

1. 서 론

가교폴리에틸렌은 열적, 기계적 특성이 우수하기 때문에 전력케이블의 절연재료로 가장 널리 사용되고 있다. 그러나 가교과정에서 발생하는 수분, 불순물 및 보이드의 생성과 온도상승에 따른 형태학적인 구조변화는 가교폴리에틸렌의 수명을 단축시켜 절연파괴를 유발하게 한다^[1,2,3,4]. 이러한 절연사고를 방지하기 위해서는 여러 가지 열화조건하에서 수명을 예측하고 사전에 전력사고를 막는 것이 최선의 방법이라 할 수 있다.

1948년 T. W. Dakin은 절연재료의 열적 열화현상을 화학반응률 법칙으로 가정하여 Arrhenius모델

을 제안하였으며^[5,6], 이후 이 모델은 많은 연구자들에 의해 실험적으로 입증되었고 1970년대 이후 L. Simoni와 G. C. Montanari는 일반적인 형태의 열화이론을 정립하고 실험적으로 증명함으로써 현재 사용되고 있는 열화이론의 기초를 확립하였다^[7,8]. 그러나 이들이 행한 연구는 열화특성을 거시적인 관점에서 고찰하였기 때문에 열화기구에 대한 명확한 해석이 부족하다. J. E. Thompson과 A. Rakoska는 폴리에틸렌을 이용하여 전기적 및 열적 스트레스하에서 폴리에틸렌을 열화시킨후, 전기적 성질을 측정하여 폴리에틸렌 내부의 구조적 변화를 측정하였으며^[9], E. Occhini와 G. Pontinari는 에틸렌-프로필렌 고무 절연재료가 전력케이블용 절연재료로서 우수한 특성을 가지고 있다는 것을 제시하였다^[10]. 그리고 J. Densley, R. Bartnikas 및 B. S. Bernstein은 전력케이블의 열화요인과 스트레스의 상관관계에 대해 연구하였지만 직접적인 결과를 제시하지는 못했다. 최근의 연구동향은 실험에 소요되는 시간을

* : LG산전 전력연구소 선임연구원

** : 울산대학교 전기공학과

(울산광역시 남구 무거2동 산 29번지, Fax: 052-259-1684

E-mail : cwnam@uou.ulsan.ac.kr)

1998년 10월 2일 접수, 1998년 12월 22일 심사완료

줄이고 보다 경제적이고 신뢰성이 높은 통계학적인 추정방법을 개발하려고 노력하고 있다.

본 연구에서는 현재 국내에서 전력케이블용 절연재료중에서 가장 많이 사용되고 있는 가교폴리에틸렌을 이용하여 열적, 전기적, 복합적 스트레스하에서 열화시간에 따른 용융열, 결정화도, 밀도, 전기적 절연강도, 유전율특성 및 미세구조분석을 통해 미시적 관찰을 행하였다. 전력케이블용 절연재료의 사용에 대한 신뢰성을 향상시키기 위해 가교폴리에틸렌의 수명을 예측할 수 있도록 최우추정법을 사용하여 3모수 Weibull분포의 모수(α , β , γ)를 추정하였다^[11].

2. 실험장치 및 방법

본 연구에서는 0.92 [g/cm³]인 저밀도 폴리에틸렌 입자형 원료에 0.2 [wt%]의 유기과산화물과 0.2 [wt%]의 페놀을 혼합하여 120 [°C]에서 5분간 가열한 후 순간적으로 가압성형하였다. 이때 시료의 두께는 100 [μ m], 크기는 40×40 [mm]로 하였고 두께의 오차는 ± 5 [%]이다. 가교폴리에틸렌을 DSC(TA Instruments, DSC 2920, USA)로 용융점을 측정하고 열적스트레스의 범위를 그 보다 낮은 50, 70, 90, 110 [°C]로 선택하였다. 전기적 스트레스의 범위는 절연파괴전압의 50~90 [%]내에서 선정하였다. 그림 1에 나타난 실험장치를 통해 일정스트레스하에서 20개의 시편을 가속열화시킨 후 시편의 물성을 측정하였다.

열분석법을 통해 열화된 가교폴리에틸렌 필름의 용융점 및 용융엔탈피를 측정하고 계산식에 의해 밀도와 결정화도를 결정하였다^[11].

$$X_c = \frac{\Delta H_s}{\Delta H_c} \quad (1)$$

$$X_c = \frac{\rho_s - \rho_a}{\rho_c - \rho_a} \quad (2)$$

여기에서 X_c 는 결정화도, ΔH_s 는 DSC에 의해 측정된 시료의 용융열, ΔH_c 는 100 [%]결정질 폴리에틸렌의 용융열 69 [cal/g]이며, ρ_a 는 100 [%]비정질의 밀도인 0.839 [g/cm³], ρ_c 는 100 [%]결정의 밀도인 0.9879 [g/cm³], 그리고 ρ_s 는 시료의 밀도이다. 시료의 절연파괴강도를 측정하기 위해 단계승압법을 사용하였다. 또한 텔렉스브릿지(Tettex AG Instrument, type 2921, Swiss)를 사용하여 주위 온도 20 [°C]에서 주파수 60 [Hz]의 전압을 50 [V]로

가하여 시편의 유전정접 및 비유전율을 측정하였다. 열화된 시편의 미세구조 및 불순물을 분석하기 위해 전자현미경과 ICP(Thermo Jarrell Ash Corporation, Atomscan 25, USA)를 사용하였으며 FT-IR(Bruker, Bruker IFS 66/FRA 106, Germany)을 이용하여 열화된 시료내에 존재하는 관능기를 분석하였다. 실험을 통해 얻은 결과를 Weibull 분포에 적용시켜 분포의 모수를 추정하였으며, 수명모델을 사용하여 복합스트레스하에서 가교폴리에틸렌의 수명을 추정하였다.

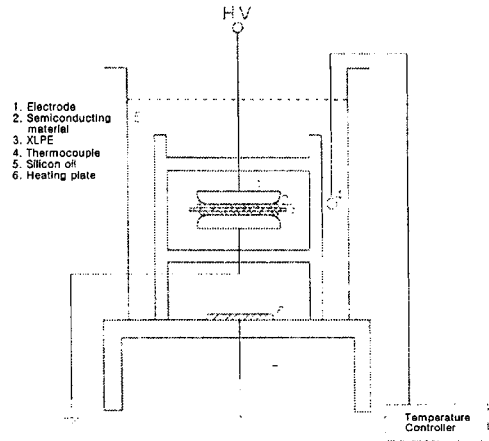


그림 1. 실험장치의 개략도

Fig. 1. A schematic diagram of experimental apparatus

3. 실험결과 및 고찰

그림 2는 열적 스트레스를 90 [°C]로 일정하게 고정하고 전기적 스트레스를 각각 7.5, 8.5, 9.5 [kV]로 가한 복합스트레스하에서의 열화시간에 따른 용융열 특성을 나타내고 있다. 가교폴리에틸렌이 복합스트레스하에서 장시간 열화되면 이온성 불순물, 보이드 및 산화방지제의 확산으로 결정상이 붕괴되고 또한 불안정한 격자의 형성 등으로 인해 가교폴리에틸렌내의 화학적 변화를 가속화하고 가교폴리에틸렌내의 CH₂ 사슬을 약하게 하기 때문에 용융열특성이 감소하는 것으로 판단된다^[9,10]. 이러한 용융열 특성을 이용하여 식(1), (2)를 이용하여 결정화도와 밀도를 구한 결과 용융열특성과 비슷한 경향을 나타내었다.

FR-IR피크의 특성을 통해 화학구조적 결합을 분석한 결과 가속조건에 따라 상이한 구조적 결합을

나타내었다. 그림 3(a)는 9.5 [kV]의 전기적 스트레스하에서 100일 동안 열화시켰을 때의 FT-IR 결과이다. 가교폴리에틸렌은 전기적 스트레스에 의해 열화됨으로써 구조적으로 수산화기와 산소의 이중결합을 이루고 있는 acid(1700 [cm⁻¹])가 발생한 것으로 미루어 보아 산화의 정도를 알 수 있다.

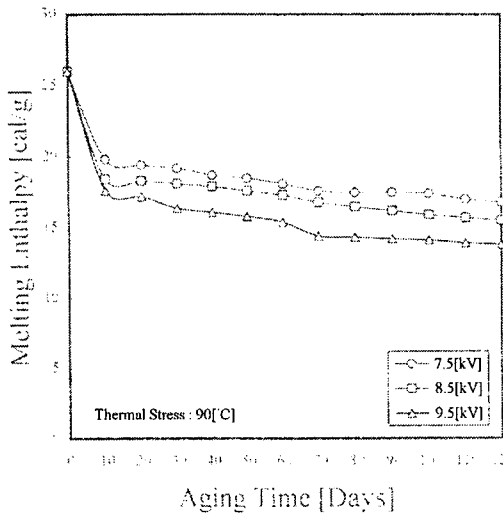
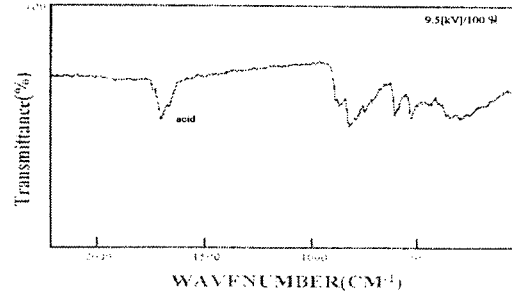


그림 2. 복합스트레스하에서 열화시간에 따른 용융열 특성

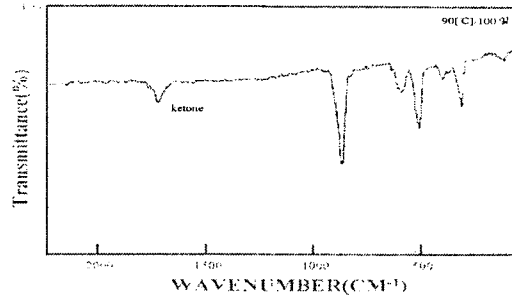
Fig. 2. Aging time vs. melting enthalpy characteristics under combined stress at 90[°C]

또한 trans vinyl기(888 [cm⁻¹])와 전계에 의한 CH₂의 진동운동으로 인해 700~730 [cm⁻¹] 영역에서 C-C기가 발생하였다. 그림 3(b)는 열적 스트레스가 90 [°C]에서 가교폴리에틸렌을 100일 동안 열화시킨 후의 FT-IR 결과이다. 가교폴리에틸렌은 열적 스트레스하에서 1720 [cm⁻¹]영역에서 Ketone성분이 발생하였으며 반면 acid기는 소멸하였다. 이를 통해 가교폴리에틸렌은 열산화가 진행되었음을 알 수 있다. 그림 3(c)는 9.5 [kV], 90 [°C]의 복합스트레스하에서 가교폴리에틸렌을 100일 열화시킨 후 가교폴리에틸렌내에 존재하는 가교부산물 및 산화 정도를 FT-IR을 사용하여 분석한 것이다. 이 분석 결과를 통해 복합스트레스하에서 가교폴리에틸렌이 열화됨에 따라 카르보닐기(1742 [cm⁻¹])가 발생했음을 알 수 있다. 카르보닐기가 발생한 이유는 열적 스트레스에 의해 발생한 이온성 불순물이 전계에 의해 가속화되어 Ketone이 카르보닐기로 변한 것으로 생각된다.

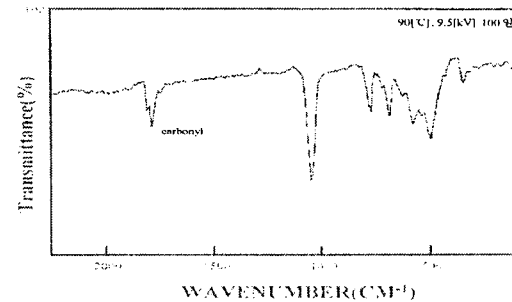
그림 4와 그림 5는 복합스트레스하에서 열화시간에 따른 유전정점 및 비유전율 특성을 나타내고 있다. 복합스트레스하에서 열화시간이 증가할수록 가교폴리에틸렌의 유전정점은 현저히 증가하였다. 이는 열화가 진행됨에 따라 가교폴리에틸렌의 밀도가 감소하여 산화방지제와 같은 저분자량 성분의



(a) 전기적 스트레스



(b) 열적 스트레스



(c) 복합스트레스

그림 3. 열화된 가교폴리에틸렌의 FT-IR분석
Fig. 3. FT-IR analysis of aged crosslinked polyethylene

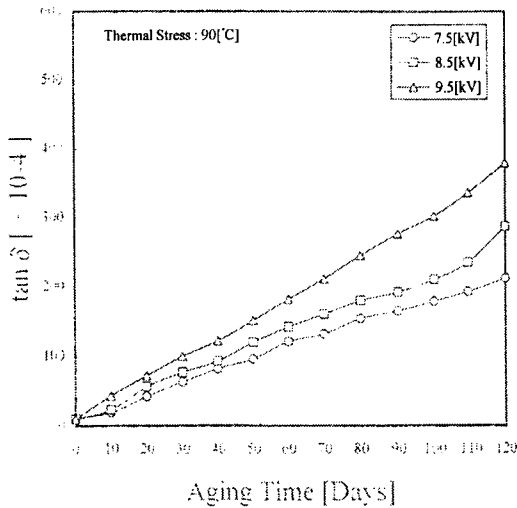


그림 4. 복합스트레스하에서 열화시간에 따른 $\tan \delta$ 특성

Fig. 4. Aging time vs. $\tan \delta$ characteristics under combined stress at 90[°C]

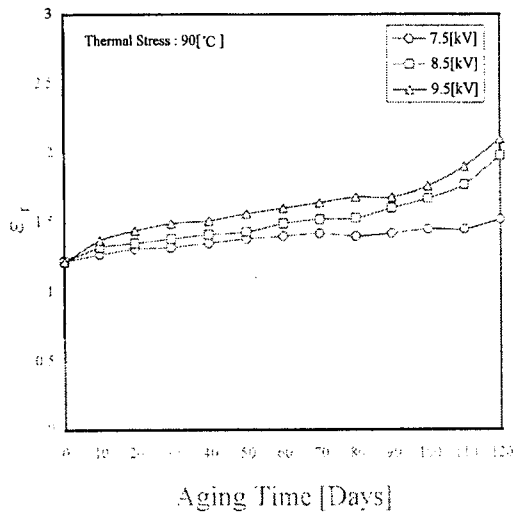


그림 5. 복합스트레스하에서 열화시간에 따른 ϵ_r 특성

Fig. 5. Aging time vs. ϵ_r characteristics under combined stress at 90[°C]

확산으로 불순물의 농도가 증가하고 결정상의 붕괴 시 발생하는 카르보닐기때문인 것으로 생각된다. 비유전율특성은 전기적 스트레스를 단독으로 인가한 경우에는 거의 일정한 값을 나타냈으나 열적스트레스를 가한 복합스트레스하에서 스트레스가 증가할수록 쌍극자 완화시간이 감소하기 때문에 비유전율이 감소하는 것으로 사료된다.

표 1은 전기적, 열적 그리고 복합스트레스하에서 열화된 가교폴리에틸렌내에 존재하는 불순물을 ICP로 분석한 것이다. 전기적 스트레스하에서는 Na, S, Cl과 같은 불순물이 검출되었으며 이러한 오염원들은 시료의 전기적 절연파괴강도를 약하게 하는 요인으로 작용한다. 이는 시료표면 또는 전극의 표면에 존재하는 오염원이 전계를 가하는 동안 시료내부로 침투한 것으로 생각된다. 또한 Si는 전기적 스트레스를 인가할 때 실리콘 오일이 내부로 확산된 것으로 간주된다. 열적 스트레스와 복합스트레스하에서 장시간 열화되면 Na, Al, S, Cl, K, Ca와 같은 이온성 불순물과 Cu의 금속성 불순물이 동시에 발생하였고 인가스트레스가 높을수록 불순물의 농도는 약간 증가하는 경향을 보였다. 이런 오염원들은 전기로내에서 열화시킬 때 시료의 접촉부위나 주변 공기중에 존재하는 성분들이 시료내부로 확산된 것으로 생각된다. 이 실험결과에서 알 수 있듯이 전기적스트레스나 열적스트레스는 불순물의 이동을 가속시키며 시료내부로 확산된 불순물들은 절연재료의 전기적 절연강도를 급속히 감소시킬 수 있다.

표 1. 열화된 가교폴리에틸렌의 ICP 불순물 분석
Table 1. ICP contaminant analysis of aged crosslinked polyethylene.

열화조건 (100일)	불순물 [ppm]							
	Na	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Cu
7.5[kV]	0.12	-	39	13	0.34	-	-	-
8.5[kV]	0.13	-	42	14	0.32	-	-	-
9.5[kV]	0.13	-	41	13	0.35	-	-	-
50[°C]	0.25	0.1	-	32	0.43	0.12	0.23	0.056
70[°C]	0.27	0.12	-	36	0.45	0.12	0.25	0.067
90[°C]	0.3	0.12	-	46	0.52	0.13	0.27	0.075
110[°C]	0.31	0.13	-	52	0.57	0.14	0.28	0.083
50[°C]/9.5[kV]	0.3	0.1	45	46	0.44	0.13	0.24	0.058
70[°C]/9.5[kV]	0.31	0.12	42	49	0.45	0.14	0.25	0.059
90[°C]/9.5[kV]	0.33	0.13	39	51	0.57	0.14	0.28	0.076
110[°C]/9.5[kV]	0.35	0.14	38	53	0.59	0.15	0.3	0.081

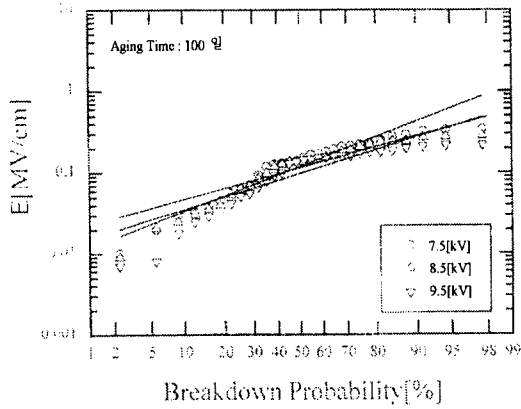


그림 6. 전기적 스트레스하에서 3모수 Weibull분포
 Fig. 6. Three-parameter Weibull distribution under electrical stress

그림 6은 7.5 [kV], 8.5 [kV] 및 9.5 [kV]의 전기적 스트레스하에서 100일 동안 열화시켰을 때 가교폴리에틸렌의 교류절연파괴강도를 Weibull분포로 나타낸 것이다. Weibull분포는 다음과 같다.

$$F(x) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x-\gamma}{\alpha}\right)^\beta\right] \quad (3)$$

여기에서 x 는 확률변수로서 일반적으로 고장시간 또는 전압을 나타내지만 본 논문에서는 교류절연파괴강도를 나타낸다. α 는 척도모수로 누적고장확률에 63.2 [%]일때의 교류절연파괴강도를 나타냈다. 결과에서 스트레스를 증가시키면 α 값은 낮게 나타났다. 형상모수 β 는 동일한 조건에서 30개의 시료의 절연파괴강도를 측정된 결과의 분산정도를 나타낸다. 일반적으로 $\beta \leq 1$ 일 때 고장확률 밀도함수는 지수분포가 되어 시간에 관계없이 항상 일정하게 되고, $\beta > 1$ 인 경우 고장확률 밀도함수는 정규분포가 되어 시간에 따라 고장율이 증가한다. 일반적으로 전력케이블용 절연재료의 수명은 시간에 따라 고장율이 증가하므로 형상모수는 실험결과에서와 같이 $\beta > 1$ 이 되며, 스트레스가 커질수록 β 가 커지므로 데이터의 분산은 작아짐을 알 수 있다. 위치모수 γ 는 고장이 발생하지 않는 교류절연파괴강도의 임계치를 의미하므로 식에서 $x \geq \gamma$ 인 조건을 만족하여야 한다. 결과에서 γ 값은 스트레스에 무관한 것으로 나타났다. 이러한 현상은 열적 스트레스를 가한 그림 7에서도 찾아볼 수 있으며 Weibull분포

의 분산은 전기적 스트레스보다 열적 스트레스에서 더 넓게 나타났다. 그림 8은 7.5 [kV], 8.5 [kV] 및 9.5 [kV]의 전기적 스트레스와 90 [°C]의 열적스트레스를 100일간 동시에 열화시킨 복합스트레스하에서의 가교폴리에틸렌필름의 교류절연파괴강도를 Weibull분포로 나타내고 있다.

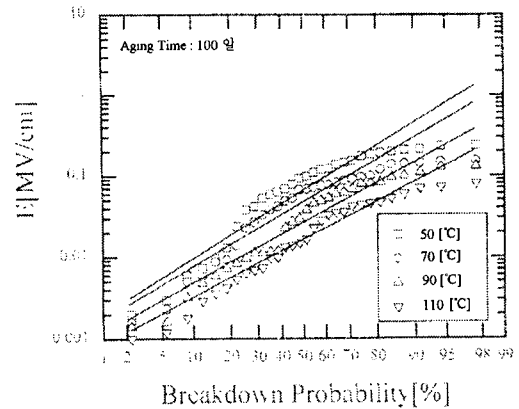


그림 7. 열적 스트레스하에서 3모수 Weibull분포
 Fig. 7. Three-parameter Weibull distribution under thermal stress

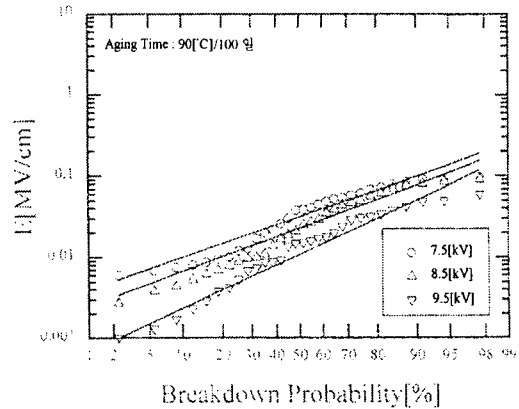


그림 8. 복합스트레스하에서 3모수 Weibull분포
 Fig. 8. Three-parameter Weibull distribution under combined stress

표 2는 전기적 스트레스, 열적 스트레스 및 복합적 스트레스하에서 100일동안 열화한 후의 교류절연파괴강도를 통계학적으로 나타낸 3모수 Weibull 분포의 모수를 추정한 것이다. 모수추정은 최우추정

법을 사용하였으며 그 중 비선형방정식으로 표현되는 β 값의 해를 구하기 위해 반복법의 하나인 Newton-Raphson법을 이용하였다. 척도모수 α 는 누적확률이 63.2 [%]일 때의 교류절연과피강도로서 스트레스가 증가할수록 교류절연과피강도는 낮게 나타났다. 3모수 Weibull분포의 형상모수 β 는 인가 스트레스가 증가할수록 높게 나타났으며 이는 스트레스가 증가할수록 데이터의 분산이 커짐을 알 수 있다. 위치모수 γ 는 인가 스트레스가 높을수록 낮게 나타났다.

표 2. 3모수 Weibull분포의 모수추정

Table 2. Parameters estimation of three parameter Weibull distribution.

열화조건 \ 모 수	α [MV/cm]	β	γ [kV/cm]
7.5[kV]/100일	0.12	1.61	2.66
9.5[kV]/100일	0.102	1.62	2.58
70[°C]/100일	0.07	1.64	2.16
110[°C]/100일	0.031	1.82	1.97
7.5[kV]/70[°C]/100일	0.041	1.84	1.49
9.5[kV]/90[°C]/100일	0.014	1.85	1.47

4. 결 과

본 연구에서 전기적 스트레스, 열적 스트레스 및 복합적 스트레스하에서 가교폴리에틸렌의 열화특성과 수명추정 등을 비교, 분석한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 가교폴리에틸렌이 복합스트레스하에서 장시간 열화됨에 따라 밀도가 감소하여 산화방지제와 같은 저분자량 성분의 확산으로 불순물의 농도가 증가하고, 결정상의 붕괴시 발생하는 카르보닐기에 의해 유전정점이 현저하게 증가하였다.
2. 가교폴리에틸렌이 열화됨에 따라 전기적 스트레스에 대해서는 미량의 Si, Na, S 및 Cl 성분이 나타났으며, 열적 스트레스와 복합스트레스에 대해서는 열화과정에서 발생된 이온성 불순물인 Na, Al, S, Cl, K과 금속성 불순물인 Cu가 각각 검출되었다. 불순물 농도는 인가 스트레스가 높을수록 약간 증가하였다.
3. 가교부산물과 산화반응의 존재를 확인하기 위하여 FT-IR분석을 한 결과 전기적 스트레스에 대해서는 acid가 발생하였으며 열적 스트레스에 대

해서는 Ketone이, 복합적 스트레스에 대해서는 카르보닐기가 발생하였다. 특히 전계에 의한 CH₂의 진동운동으로 인하여 전기적 스트레스와 복합스트레스하에서 C-C기가 발생하였다.

4. 가교폴리에틸렌의 절연과피 강도특성은 3모수 Weibull분포를 사용하여 나타낼 수 있으며 동일한 열화조건에서 분포의 분산특성은 열화가 클수록 넓게 나타났다. 척도모수와 위치모수는 스트레스가 높을수록 낮게 나타났다.

감사의 글

이 논문은 1996년도 한국학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의하여 연구되었음

참 고 문 헌

1. K. S. Suh, "Characteristics of XLPE Underground Distribution Cables", KIEE, Vol.45, No.6, June, p882, 1996
2. K. Uchida, T. Hirata, "Deterioration of Removed XLPE Cables", IEEE Workshop on Underground Cable, June 13~16, Canada, 1994
3. C. Chauvet and C. Laurent, "Weibull Statistics for Short Term Dielectric Breakdown of Thin Polyethylene Films", IEEE Trans. on Elect. Insul., Vol.28, pp. 18~29, 1993
4. J. Crine, S. Pelissou and J. Parpal, "Influence of Insulation Morphology, Impurities and Oxidation on some Electric Properties of Cable", IEEE Trans. Electr. Insul., EI-26, 140, 1991
5. T. W. Dakin, "Electrical Insulation Deterioration", Electrotechnology, pp.124~130, December 1960
6. T. W. Dakin, "Electrical Insulation Deterioration Treated as a Chemical Rate Phenomenon", AIEE Trans. Electrical Insulation, Vol.67, 1948
7. G. C. Montanari, P. K. David, "Correlation of Arrhenius Parameter : the Electrotechnical Aging Compensation Effect", IEEE Trans. on Electrical Insulation, Vol.23, pp. 1057~1063, 1988
8. L. Simoni, "A General Approach to the Endurance of Electrical Insulation under

- Temperature and Voltage", IEEE Trans. on Electrical Insulation, Vol.EI-16, No.4, 1981
9. L. A. Dissado and J. C. Fothergill "Electrical Degradation and Breakdown in Polymers" IEEE Materials and Devices Series 9, chapt.15, ed. G. C. Stevens, 1992
10. E. Occhini, P. Metra, G. Portinari, B. Vecellio "Thermal, Mechanical and Electrical Properties of Insulation Power Cables" IEEE Trans. on P.A.S. Vol.102, pp. 1942~1953, July 1983
11. J. F. Lawless, "Statistical Models and Methods for Lifetime Data", Univ. of Waterloo, 143~347, 1981