2001 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

아레니우스 식을 이용한 원자력 발전소 케이블의 등가수명 예측방법

Equivalent Lifetime Prediction Method for Nuclear Power Plant's Cable using Arrhenius Equation

안상필, 강윤식, 김철환

성균관대학교
경기도 수원시 장안구 천천동 300

구철수, 김복렬

한국원자력안전기술원
대전광역시 유성구 구성동 19

요 약

원자력 발전소에서 사용되어지는 케이블의 절연 및 피복재료는 종류 및 배합내용이 다양하기 때문에 기존의 자료로부터 전선과 케이블의 열화 또는 수명을 예측하기가 극히 어렵다. 이에 따라 각종 케이블의 가속열화 실험을 통해 케이블의 상태를 판정한다. 따라서 케이블의 가속열화 실험은 필연적이라고 볼 수 있다. 그런데, 케이블의 가속열화 실험을 수행하기 위해서는 케이블 등가수명예측이 필요하며, 이러한 등가수명 예측에 가장 널리 이용되고 있는 방법이 아레니우스 식을 이용한 방법이다. 본 논문에서는 XLPE 절연케이블의 가속열화실험시간과 등가수명과의 상관관계를 예측하였으며, 등가수명 예측시 사용되는 아레니우스 식을 이상기체 상수와 Boltzman 상수를 이용하는 두가지 방식으로 계산하여 비교 분석하였다.

Abstract

As external jackets and insulating materials of cables are made of various co-polymer and some complex compounds, it is difficult to monitor the condition of cables used in nuclear power plants(NPPs). Therefore, it is necessary to perform accelerated aging test for the purpose of deciding condition and lifetime for cables in NPPs. In accelerated aging test, Arrhenius equation is widely used as a physical model for lifetime prediction during thermal aging. In this paper we proposes equivalent lifetime prediction method for XLPE insulation cable used in NPPs. Also these methods and data can be applied to accelerated aging test.

1. 서 론

원자력 발전소는 일반적으로 가능한 오랜 시간동안 연속적인 동작이 요구된다. 그러나, 오랜 시

간동안 연속적인 동작을 하기 위해서는 관련 규제 기관에 연속적인 동작에 대한 안전성을 납득시켜야만 한다[1-3]. 이러한 사실은 발전소 수명 유지 및 발전소 수명 연장이 원자력 발전소의 운영에 있어서 중요한 사항이기 때문이다. 원자력 안전의 관점에서 살펴볼 때, 케이블의 중요성은 교환기와 원자력 발전소 감시·제어를 담당하는 제어·계측 시스템은 물론 긴박한 상황에 있어 발전소 운전의 정지시에 필요한 시스템 사이의 링크를 제공하는 매우 중요한 요소가 케이블이라는 사실로부터 이해될 수 있다[4]. 이러한 케이블의 수명을 평가하기 위해서 케이블이 사용 년수에 따라서 어떻게 반응하게 되는가를 알아야 하며, 온도 및 시간에 따른 케이블 상태에 대해 예측하고 판단하기 위해서는 케이블 가속열화 실험이 필요하다[5-9]. 이러한 가속열화 실험시 등가수명 예측에 이용되는 식에는 아레니우스 식이 있다[10]. 본 논문에서는 아레니우스 방법에서 이상기체 상수와 Boltzman 상수를 이용하는 두가지 방식의 수명예측 방법을 실제 원전케이블의 XLPE 절연케이블에 적용하여 보고 가속열화 실험을 위한 기초 수명예측 데이터를 도출하였다. 또한 이 두가지 방식의 차이점을 비교하였으며, 향후 여러 가지 종류의 케이블에 대한 가속열화 실험시에 쉽게 접근할 수 있는 방향을 제시해줄 것으로 기대된다.

2. 아레니우스 이론

2.1 아레니우스 식

1970년대 이후 L. Simoni와 G.C. Montanari는 일반적인 형태의 열화 이론을 정립하고 실험적으로 증명함으로써 현재 사용되고 있는 열화이론의 기초를 확립하였고, 일반 전력케이블용 절연재료의 대표적인 수명예측 방법으로 1984년 T.W. Dakin은 절연재료의 열적 열화현상을 화학 반응률 법칙으로 가정하여 아레니우스 모델을 제안하였으며 이후 이 모델은 많은 연구자들에 의해 실험적으로 입증되었다. 아레니우식 식은 일반적으로 절연체의 화학적 변화에 따른 수명예측과 균일기체 및 액체상에서의 반응속도 계산, 고체의 열에 따른 화학적 반응속도 계산 등에 이용되고 있으며, 이러한 분야 이외에 확산 및 점성 등의 물질 이동현상 예측과 반도체의 열에 따른 수명예측에도 널리 이용되어지고 있다.

아레니우스 법칙을 이용한 케이블 수명예측 방법은, 온도가 8~10℃ 상승하면 수명이 반감된다는 10℃ 반감 법칙을 이용하여 초기의 수명을 예측하고 그후 반응 속도식에 의한 아레니우스 식을 적용한다. 아레니우스 식은 물질의 반응속도는 온도가 높아질 때 화학적 반응이 빨라짐을 나타내는 식으로 활성화 에너지를 발견하기 위해 사용되어 지기도 하며, 절연체의 온도와 사용기간에 따른 등가 수명을 예측하는데 일반적으로 이용되어지고 있는 방법이다. 아레니우스 식은 식 (1)과 같이 비율 상수 k와 절대온도 T의 관계로 표현할 수 있고, 식 (1)의 양변에 로그를 취해줌으로써 식 (2)와 같이 전개할 수 있다.

$$k = Ae^{-E_a/RT} \tag{1}$$

여기서, k = 비율 상수

E_a = 활성화 에너지

R = 이상기체 상수($8.314[J/(mol\ K)]$)

T = Kelvin 온도

A = 아레니우스 상수

식 (2)의 k_1, k_2, T_1, T_2를 이용한 등가수명 계산방법은 4장에서 자세히 언급하였다.

$$\ln k = \ln A - \frac{E_a}{RT}$$

$$\ln k = \left\{ -\frac{E_a}{R}\left(\frac{1}{T}\right) \right\} + A$$

$$\ln k_2 = -\frac{E_a}{R}\left(\frac{1}{T_2}\right) + A \ , \qquad \ln k_1 = -\frac{E_a}{R}\left(\frac{1}{T_1}\right) + A \tag{2}$$

$$\ln k_2 - \ln k_1 = \left\{ -\frac{E_a}{R}\left(\frac{1}{T_2}\right) + A \right\} - \left\{ -\frac{E_a}{R}\left(\frac{1}{T_1}\right) + A \right\}$$

$$\ln\left(\frac{k_2}{k_1}\right) = -\frac{E_a}{R}\left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}\right)$$

2.2 활성화 에너지(activation energy)

활성화 에너지는 다음 그림 1과 같이 평형상태에 있는 물질계는 다른 평형상태로 옮기는 도중에 두 가지 평형상태보다도 높은 위치에너지를 가진 상태를 경과해야 하는데, 이 위치에너지와 처음 평형상태의 최저에너지와의 차를 뜻하는 것으로 아레니우스 식을 이용한 등가수명 예측시 가장 중요한 요소 중 하나이며, 이러한 활성화 에너지는 고분자일 경우 보통 20~25[kcal/mol]의 값을 가진다. 케이블 절연체의 활성화 에너지를 구하는 방법으로 열 중량적 분석(Thermogravimetric Analysis)방법을 들 수 있으며, 이러한 열 중량적 분석은 시료 온도를 조절된 프로그램에 따라 변화시키면서, 그 시료의 질량을 온도의 함수로서 측정하는 것이며, 열 중량적 분석은 중량을 측정하는 방법이기 때문에 그 결과 데이터로부터 증발, 승화, 분해, 산화 등의 중량 변화에 따른 현상을 분석할 수 있다. 예를 들어 영광원전 3, 4호기 및 울진원전 3, 4호기 내환경 검증시험 결과, XLPE와 EPR 절연케이블의 경우 활성화 에너지는 1.35[eV]를 나타내고 있다. 이러한 활성화 에너지 값은 여러 가지 요인에 의해 좌우되므로 같은 절연체라도 절연체 주변의 환경에 의해 다소 차이를 보이고 있다.

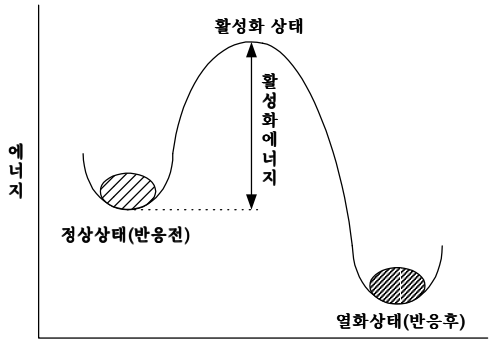

그림 1. 활성화 에너지

3. 원자력 발전소 케이블

아레니우스 식을 이용하여 케이블 등가 수명을 예측하기 위해서는 케이블에 사용되는 절연체의 종류 및 케이블의 운전조건과 케이블 절연체의 열화 및 활성화에너지 등에 대해서 정확히 알아야 한다. 본 장에서는 실제 우리나라 원자력 발전소에 사용되는 케이블의 종류 및 케이블의 운전조건을 살펴보도록 하겠다.

3.1 원전 케이블의 종류 및 운전조건

우리나라 원자력 발전소에 사용되어지고 있는 케이블의 종류는 다음 표 1에서 알 수 있듯이 전력, 제어, 계측용으로 사용되어지며, 이러한 원전 사용 케이블 중 특히, XLPE 및 EPR 절연케이블은 여러 가지 용도로 가장 많은 분야에서 이용되어지고 있다. 본 논문에서는 가장 많이 사용되는 XLPE 절연케이블을 이용하여 케이블 가속열화 실험을 위한 등가수명을 계산 해보도록 하겠다.

표 1. 고리 1호기에 사용되는 케이블 종류

구분	절연재질	기능
고압케이블 (5kV, 15kV)	XLPE, EPR, PVC, Paper	전력
저압케이블 (600V,1000V)	XLPE, FR-XLPE, EPR, FR-EPR, SR, CSPE, PE, PVC, Mineral, ETFE	전력
		제어
		계측
커넥터	Phenolic, EPR, XLPE, SR, PE, Nylon	단말접속

원자력 발전소내에서 이용되어지고 있는 케이블의 운전조건은 일반적으로 60[℃], 200[Mrad]의 환경조건을 발전소 전반에 걸쳐 적용하고 있으며, 또한 이 조건을 사용하여 케이블 절연체의 허용온도를 90℃로 설계하고 있다.

그러나 대다수 지역의 운전온도는 설계온도인 40℃보다 낮으나 증기헤더실의 경우 실제 운전온도가 48℃, 원자로 냉각재 펌프지역의 경우 50℃로 설계온도보다 높으므로 보다 상세한 검토가 필요한 것으로 판단된다.

표 2. 케이블의 절연재료별 운전 허용온도(℃)

절연재료	연속 최고 허용온도(℃)	단시간 최고 허용온도(℃)	단락시 최고 허용온도(℃)
LDPE	75	85~90	190
XLPE	90	105	230
EPR	80	90~95	230

3.2 원전 케이블의 열적 열화

원전에서 사용되는 케이블에 발생 가능한 열화과정은 크게 열적열화, 조사취화, 습분으로 크게 나눌 수 있지만 습분에 의한 열화는 거의 대부분이 케이블 외피에 영향을 많이 미치며, 케이블 시설 위치상 원전 사용 케이블에는 조사취화나 열적 열화가 가장 많은 영향을 미친다. 그러나 아레니우스 식은 열적 열화만을 고려하여 등가수명을 예측하는 방법이다.

열적 열화의 발생 원인은 운전 중 저항열에 의한 국부적인 케이블 온도 상승, 과부하 운전으로 인한 케이블 온도 상승, 외부적 압력에 의해 국부적인 부위에 일어나는 발열반응 등으로 열화현상이 발생할 수도 있다. 케이블 외피 부분에서 수트리가 발생함에 따라 국부적 고전계 발생되고 이에 따른 차폐층 부식 등에 의한 열적 열화가 발생하는 경우도 있다. 열적 열화를 분자구조적인 면에서 보면 다음 그림 2에서 나타낸 바와 같이 분자구조가 딱딱해 짐으로써 분자간의 결합이 끊어지게 되며, 끊어진 분자들이 결합사이에서 이탈함으로써 발생되어지며, 분자의 이탈이 많아짐에 따라 열화의 진행도 빨라진다.

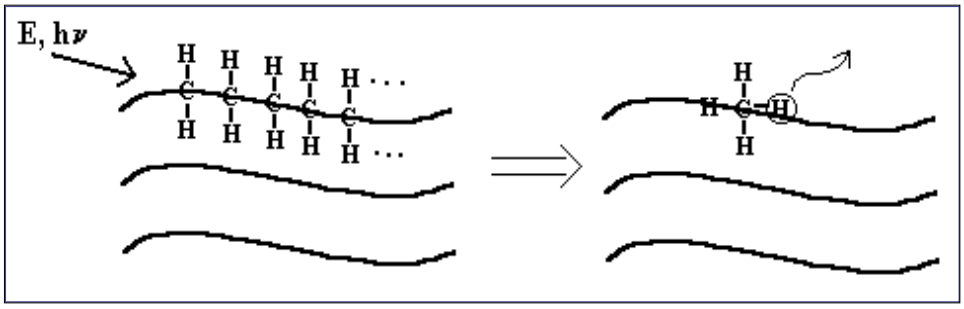

그림 2. 열화현상에 의한 분자구조의 변화

4. 아레니우스 식을 이용한 등가수명 계산

원전 케이블 등가수명 예측에 이용되는 아레니우스 식은 크게 이상기체 상수를 이용하는 방법과 Boltzman 상수를 이용하는 방법으로 구분할 수 있다.

4.1 이상기체 상수를 이용한 아레니우스 식의 등가수명 예측

2장에서 기술한 식 (2)의 각 변수들은 다음 식 (3)과 같이 설명될 수 있다.

$$\ln\left(\frac{k_2}{k_1}\right) = -\frac{E_a}{R}\left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}\right) \tag{3}$$

여기서, E_a = 활성화 에너지 $[KJ/mol]$

R = 이상기체 상수($8.314[J/(mol\ K)]$)

k_1 = 가속열화시간 $[h]$

k_2 = 등가수명 $[h]$

T_1 = 가속열화온도 $[K]$

T_2 = 사용온도 $[K]$

XLPE 절연체의 활성화 에너지는 $131.023[KJ/mol]$를 기준으로 하였으며, 케이블 사용온도는 60[℃](333 $[K]$)를 기준으로 가속열화온도 130[℃](403 $[K]$)에서 각각 10년에서 70년까지의 가속열화 등가수명을 계산하면 다음 식 (4)와 같이 계산이 될 수 있다.

$$\ln(\frac{40years}{k_1}) = -\frac{131.023[KJ/mol]}{8.314[J/molK]}(\frac{1}{333}-\frac{1}{403})$$

$$k_1 = \frac{40years}{3715.327093} = \frac{40\times365\times24[h]}{3715.327093} = 94.312[h]$$

$$k_1 = \frac{30years}{3715.327093} = \frac{30\times365\times24[h]}{3715.327093} = 70.734[h] \quad (4)$$

$$k_1 = \frac{20years}{3715.327093} = \frac{20\times365\times24[h]}{3715.327093} = 47.156[h]$$

$$k_1 = \frac{10years}{3715.327093} = \frac{10\times365\times24[h]}{3715.327093} = 23.578[h]$$

다음 표 3은 식 (4)를 이용한 계산 결과를 여러 가지 등가수명에 대하여 정리한 것이다. 표 3에서 알 수 있는 바와 같이 XLPE 절연케이블의 경우 60[℃]의 사용온도에서 40년간 등가수명을 가지기 위해서는 가속열화온도 130[℃]에서 약 94 시간정도 가속열화를 시켜야 함을 판단할 수 있다.

표 3. 이상기체 상수를 이용할 경우 XLPE 케이블의 등가수명 예측 결과
(사용온도 60℃, 가속열화온도 130℃)

등가수명 [year]	10년상당	20년상당	30년상당	40년상당	50년상당	60년상당	70년상당
가속열화 시간[h]	23.578[h]	47.156[h]	70.734[h]	94.312[h]	117.890[h]	141.468[h]	165.046[h]

4.2 Boltzman 상수를 이용한 아레니우스 식의 등가수명 예측

Boltzman 상수를 이용한 아레니우스 식은 식 (2)에서 이상기체 상수 대신에 Boltzman 상수만 대입되어 다음 식 (5)와 같이 표시할 수 있다.

$$\ln(\frac{k_2}{k_1}) = -\frac{E_a}{k_B}(\frac{1}{T_2}-\frac{1}{T_1}) \quad (5)$$

여기서, E_a = 활성화 에너지 $[eV]$

k_B = Boltzman 상수 $(8.617\times10^{-5}\ [eV/K])$

k_1 = 가속열화시간 $[h]$

k_2 = 등가수명 $[h]$

T_1 = 가속열화온도 $[K]$

T_2 = 사용온도 $[K]$

만약 XLPE 케이블이 사용되는 온도가 60[℃](333 $[K]$)이며, 130[℃](403 $[K]$)에서 가속열화를 시킨다고 가정하고 XLPE 절연케이블의 활성화에너지 E_a는 $1.35[eV]$이므로, 식 (5)에 의해 표 4와 같이 케이블 등가 수명을 예측할 수 있으며, 표 4의 등가수명 예측결과를 바탕으로 하여 그림 3에서와 같이 등가수명에 대한 가속열화시간의 상관관계를 도출할 수 있다. 다음 그림 3은 표4를 바탕으로 하여 그래프로 나타낸 것이다.

표 4. Boltzman 상수를 이용할 경우 XLPE 케이블의 등가수명 예측 결과
(사용온도 60℃, 가속열화온도 130℃)

등가수명 [year]	10년상당	20년상당	30년상당	40년상당	50년상당	60년상당	70년상당
가속열화 시간[h]	24.744[h]	49.4875[h]	74.2312[h]	98.975[h]	123.719[h]	148.462[h]	173.206[h]

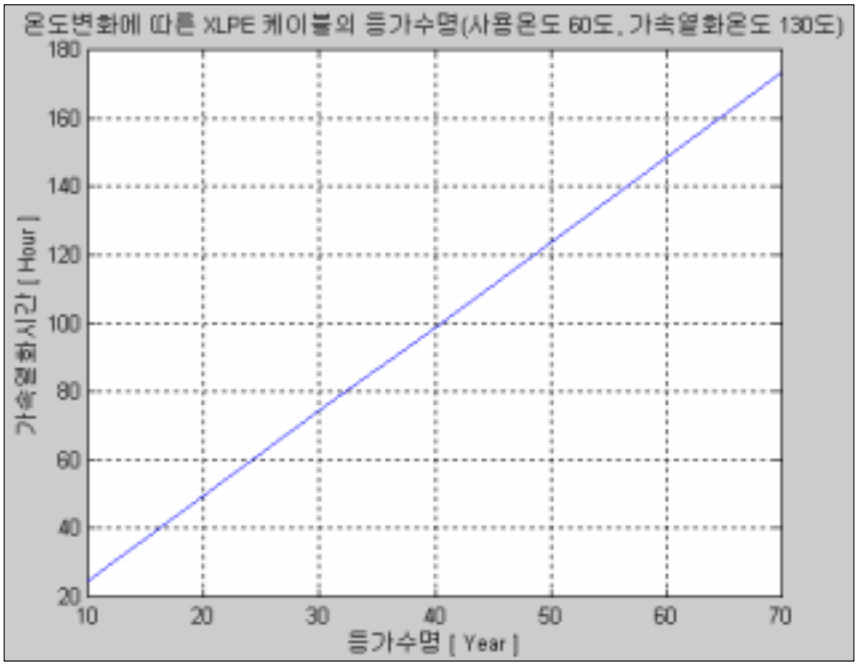

그림 3. XLPE 케이블의 가속열화시간과 등가수명과의 관계

4.3 이상기체 상수와 Boltzman 상수를 이용할 경우의 가속열화시간 비교

다음 표 5는 사용온도 60℃, 열화온도 130℃의 XLPE 케이블을 이상기체 상수와 Boltzman 상수를 이용하여 각각의 등가 수명을 예측하였을 경우를 비교하여 나타낸 것이며, 표 6은 사용온도 40℃, 열화온도 130℃의 XLPE 케이블을 이상기체 상수와 Boltzman 상수를 각각 이용하여 등가 수명을 예측하였을 경우를 비교하여 나타낸 것이다.

표 5. Boltzman 상수와 이상기체 상수를 이용할 경우의 가속열화시간 비교
(사용온도 60℃, 가속열화온도 130℃)

등가수명	가속열화시간(Boltzman상수)	가속열화시간(이상기체상수)
10년상당	24.7437[h]	23.578[h]
20년상당	49.4875[h]	47.156[h]
30년상당	74.2312[h]	70.734[h]
40년상당	98.9750[h]	94.312[h]
50년상당	123.7187[h]	117.890[h]
60년상당	148.4624[h]	141.468[h]
70년상당	173.2062[h]	165.046[h]

표 6. Boltzman 상수와 이상기체 상수를 이용할 경우의 가속열화시간 비교
(사용온도 40℃, 가속열화온도 130℃)

등가수명	가속열화시간(Boltzman상수)	가속열화시간(이상기체상수)
10년상당	1.2243[h]	1.1259[h]
20년상당	2.4486[h]	2.2517[h]
30년상당	3.6729[h]	3.3775[h]
40년상당	4.8972[h]	4.5034[h]
50년상당	6.1215[h]	5.6292[h]
60년상당	7.3458[h]	6.7551[h]
70년상당	8.5701[h]	7.8809[h]

XLPE 케이블 가속열화시 등가수명 예측에 이용되어지는 아레니우스 식은 이상기체 상수를 이용한 방법과 Boltzman 상수를 이용한 방법으로 크게 분류할 수 있으며, 이 두가지 방법에 의한 결과값을 표 5와 표6에서 비교 분석해 본 결과 가속열화 초기에는 어느 정도 유사함을 보이고 있지만 말기에는 약간의 차이를 보여주고 있다. 그러나, 원전 케이블의 수명이 약 40년 정도이라는

예측을 해볼 경우 두 방법의 결과는 거의 동일하다고 볼 수 있다. 또한 사용온도가 낮아짐에 따라 두가지 방법의 결과 값은 거의 차이를 보이지 않고 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 XLPE 케이블을 아레니우스 식을 이용하여 가속열화시 등가수명을 예측하였다. 이러한 아레니우스 식은 XLPE 케이블뿐만 아니라 EPR, SR 등의 여러 가지 절연케이블의 등가수명예측에도 사용 가능하다. 만약, 가속열화 실험을 통한 케이블의 등가수명을 알고자 한다면 사용되어질 절연케이블의 사용온도와 활성화에너지를 알아야 한다. 또한, 이상기체 상수와 Boltzman 상수를 이용한 절연케이블의 사용온도에 등가수명예측 방법은 절연케이블의 사용온도에 따라 가속열화시간의 변화가 있다. 일반적으로 40℃ 이하에서는 가속열화시간의 차이가 적으나, 그 이상에서는 차이가 크므로 이러한 사실을 고려하여야 할 것이다. 결론적으로, 아레니우스 식을 이용함에 있어 이상기체 상수를 이용한 방법과 Boltzman 상수를 이용한 방법을 별도로 사용하거나, 두 가지 방법의 중간값을 사용하면 될 것이다.

6. 참고문헌

[1] 한국원자력안전기술원, “안전관련 케이블 상태 감시 방법에 관한 연구(위탁연구기관보고서)”, 2001. 3.

[2] IAEA, “Assessment and Management of Ageing of Major NPP Components Important to Safety: In-Containment Instrumentation and Control Cables”, vol. Ⅰ, vol. Ⅱ, 2000. 12.

[3] A.M. Bruning, F.J. Campbell, “Ageing in Wire Insulation under Multifactor Stress”, IEEE Trans on Electrical Insulation, vol. 28, no. 5, pp. 729-754, Oct. 1993.

[4] NRC, “Literature Review of Environmental Qualification of Safety-Related Electirc Cables”, vol. Ⅰ, pp. 4.7-4.19, April 1996.

[5] 김종석, “원전 케이블 노후화 진단기술”, 제 5회 원자력 안전 기술정보 회의, pp. 291-292, 1999. 12.

[6] 재료기술연구그룹 성능수명연구팀, 한국전력기술주식회사, “주요기기 수명 평가 및 노화관리 방안 분석(최종보고서)”, pp. 10, 2001. 3.

[7] 한국전기안전공사, “직류 내전압시험이 전력케이블의 열화에 미치는 영향(최종보고서)” pp. 77-96, 1999. 12.

[8] 기초전력공학공동연구소, “전기케이블 피막의 노화현상 규명을 위한 실험연구(최종보고서)”, pp. 22-26, 1999. 10.

[9] 한국전기연구소, “전력기기 절연진단 기술(1998년 제2회 기술교육 교재)” pp. 12-16, 1998.

[10]R. Lyle, “Effect of Testing Parameters on the Outcome of the Accelerated Cable Life Test”, IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 3, no. 2, pp. 434-439, April 1988.