

원자력 발전소용 통신케이블 자켓의 가속열화시험

정재한* · 김용수**†

*경기대학교 일반대학원 산업경영공학과

**경기대학교 산업경영공학과

An Accelerated Degradation Test of Nuclear Power Plants Communication Cable Jacket

Jae Han Jung* · Yong Soo Kim**†

*Department of Industrial and Management Engineering, Kyonggi University Graduate School

**Department of Industrial and Management Engineering, Kyonggi University

ABSTRACT

Purpose: The purpose of this study was to estimate the lifetime, and verify the target lifetime at steady state temperature, of communication cable jackets used in nuclear power plants.

Method: This study was completed according to test and analysis methods required by international standards. After measuring the residual elongation(%) of specimens at specific points in time with the accelerated degradation test, average failure time of each temperature was computed. Thus, the activation energy could be derived by applying the temperature-Arrhenius law to estimate cable jacket lifetime at steady state temperature.

Results: The cable jacket lifetime was estimated as 363.8 years assuming a normal nuclear power plant operating temperature of 90 °C.

Conclusion: To ascertain stable operating conditions for a nuclear power plant, accelerated degradation tests were performed according to the Arrhenius law for components of the nuclear power plants. The lifetime was estimated from the degradation data collected during the accelerated degradation test.

Key Words: Accelerated degradation test, Temperature-Arrhenius's law, Activation energy, Nuclear power plants, Cable Jacket

● Received 10 September 2017, 1st revised 7 November, accepted 8 November 2017

† Corresponding Author(kimys@kgu.ac.kr)

© 2017, The Korean Society for Quality Management

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-Commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서 론

현대 사회에서의 원자력 발전소를 통한 전력 생산은 매우 중요하며, 국내 전력 생산의 약 32 %를 차지하는 매우 중요한 에너지 생산력이다. 전체 발전량의 32 %의 발전량이지만, 화력 및 수력, 조력 발전소 대비 3 % (5 개소)의 발전소의 수로 매우 많은 양의 전력량을 생산하고 있다. 원자력 발전소는 핵분열 에너지를 이용하여 화력 발전소의 보일러 부분이 원자로 계통으로 치환되어 포화 증기를 생산 하여 터빈을 회전시켜 전력을 생산하는 방법이다 (ANSI/IEEE Std 1-1986, 1986). 다만, 원자력 발전소의 고장 및 운전 정지는 사회적, 국가적으로 매우 큰 위험을 초래하며, 크게는 인명 및 재산상에 막대한 지장을 초래한다. 잘 알려져 있는 체르노빌 원전 사고 및 일본 원전 사고는 원자력 발전소의 위험성을 보여 주는 매우 중요한 사건이다. 그러한 이유로 원자력 발전소에서 사용되어지는 모든 부품 및 모듈 등은 철저한 품질 시스템과 시험을 통하여 검증된 제품만을 사용하게 되어있다.

본 연구에서는 원자력 발전소에서 사용되어지는 통신용 케이블 자켓의 활성화 에너지를 도출하기 위한 시험으로 정상상태에서 목표수명시간을 확인하기 위함이다. 원자력 발전소에 요구하는 수명은 케이블이 사용되어지는 장소에 따라 온도가 변하지만, 약 50 도 이상에서 60 년 이상을 요구하고 있다. 이러한, 장기간의 수명을 보증하기 위하여, 가속 수명시험을 수행하고 통계적 분석을 통한 도출된 활성화 에너지를 이용, 실제 노화 시험의 기본 데이터로 활용되어진다. 또한, 도출된 활성화 에너지를 이용하여, 아레니우스 관계식을 추정, 실제 노화시험의 시험시간을 결정하는 중요한 인자로 사용되어진다.

가속수명시험에 대한 연구는 인체회로기관의 신뢰성연구를 위해 고온·고습과 불포화형 가압 실험을 통해 두 실험의 비교(Chun and Kwon, 1997)를 하였고 전압가속을 하여 3수준의 시험설계로 의료용 할로겐램프의 가속수명시험(Jung et al., 2013)을 수행하였다. 그리고 가속열화시험에 대한 연구는 인장하중과 부식 기간의 수준을 나누어 가속 열화시험을 수행하였다(Kim and Kim, 2015). 수집한 가속수명의 데이터로 회귀분석을 수행하여 정상사용조건에서의 수명을 추정하였다. 더 나아가서는 열화가 감마과정(Lim and Lim, 2015)과 Wiener process(Lim, 2012)를 따르는 경우를 고려한 가속열화시험의 최적화 계획에 대한 연구가 이루어져있다.

절연 케이블과 같은 고무부품의 수명을 확인하기 위한 가속시험으로는 일반적으로 성능 열화에 영향을 줄 수 있는 스트레스 인자를 온도로 적용하여, 성능 열화 시험을 수행하고, 열화 데이터를 통계적으로 분석하여, 가속 수명 계수를 추정한다. 스트레스 인자로 온도를 사용시에는 매우 높은 스트레스를 이용한 가속 수명 시험을 진행 하면, 제품의 열화 메커니즘을 변화 시킬 수 있기 때문에 시험 설계에서부터 적절한 온도를 선정하여 시험을 수행해야 한다.

본 연구에서는 원자력 발전소의 통신용 케이블의 자켓의 절연 성능을 가속하기 위하여 고장 메커니즘을 변화 시키지 않는 최대 온도에서부터 3 가지의 온도 조건을 이용하였으며, 국제 기준에서 요구하는 시험법 및 분석법을 이용한 가속열화 시험에 대하여 다룬다. 가속 열화시험법 설계시에 정해진 특정시점에 시험편의 연신율 측정 데이터를 이용하며, 구해진 데이터를 이용하여 각 온도에 따른 평균 고장시간을 추정하고, 온도-아레니우스 모형을 적용하여 활성화 에너지를 추정한다. 추정된 활성화 에너지를 활용하여, 정상 온도 상태에서의 수명을 추정함으로써 열적 노화 시험 시간의 자료로 활용한다. Figure 1은 본 연구에서 사용되어지는 통신용 케이블의 성능평가 시험을 위한 시편 외형의 대표적인 형태를 나타낸다.



Figure 1. Specimen of cable jackets for nuclear power plants

2. 고장 메커니즘

고장 메커니즘은 고장이 발생하는 유형에 따라 우발 고장과 마모 고장으로 구분 할 수 있고, 고장 메커니즘을 유발시키거나 가속하는 부하의 성질에 따라 기계 열, 전기, 방사선 및 화학 등으로 분류할 수 있다. 또한 마모 메커니즘은 시간 경과에 따른 부하축적으로 인한 고장을 말한다. 열화 및 피로 파괴는 가장 많이 알려진 마모 메커니즘의 예이다. 본 연구에서는 고무 복합재료에서 주요 고장 메커니즘으로 알려진 열화 메커니즘을 이용하였다. 열화는 제조 공정, 성형가공, 보관, 운반 및 사용 중에 여러 인자로 인하여 서서히 성능이 저하되어 최후에는 파괴에 이르는 현상을 말한다(Han et al., 2014.). 복합 고무 재료의 구성으로 이루어진 통신용 케이블 자켓은 열적 스트레스를 받으면, 화학적 반응에 의하여, 연성이 저하되고, 저하된 연성은 제품의 수명에 영향을 미치는 결과를 보여준다. 이에, 본 연구에서는 고무 부품의 노화 속도를 빠르게 하기 위하여, 노출되는 온도 및 시험시간, 시험편을 사전에 결정하여, 정해진 시험법을 이용하여 가속 수명 시험을 수행하였다.

3. 가속열화시험

3.1 가속열화시험 방법

본 절에서는 원자력 발전소용 광케이블 자켓에 대한 가속 열화시험을 수행하고, 열화 데이터의 분석을 통하여 활성화 에너지 및 정상 상태 온도에서의 수명을 추정 하였다.

시험대상으로는 원자력 발전소용 광케이블 자켓 1종을 선정하였으며, 하기의 Figure 2는 시험대상의 외형을 나타낸다. 본 가속 열화 시험에서 참고한 규격으로는 KEPIC END 3810 전기 1급 케이블 및 현장이음 (IEEE 383-2003), IEEE 101-1987 및 ASTM D412-06a 참조하였다.

가속 열화시험 온도조건의 결정은 'KEPIC END 3810 : 2010' 에서 요구하는 활성화 에너지 결정을 위해 아레니우스 법칙을 활용 할 때에는 최소한 10℃ 이상의 차이가 있는 상태에서 3 개의 데이터를 적용하였으며, 시험온도 및 열화시간 Table 1과 같다.

열적 스트레스를 인가하기 위한 장비로는 온도제어가 가능한 항온기를 이용하였으며, Figure 3는 시험기의 외부를 나타낸다.

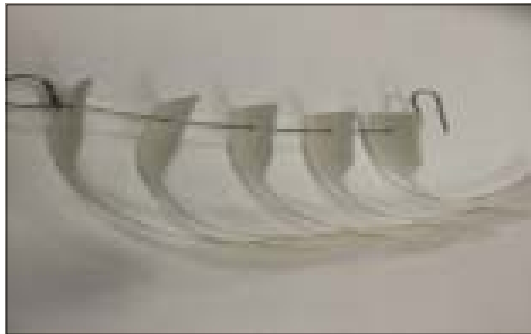


Figure 2. Specimen of cable jackets



Figure 3. Temperature chamber

Table 1. Conditions for degradation test

Temperature (°C)	Duration (hours)
155	0, 48, 96, 144, 192, 240, 288, 336, 384, 432, 480, 528, 576, 624, 672, 720, 768, 816, 864, 912, 960, 984
165	0, 48, 96, 144, 192, 240, 264, 288, 312, 336, 360, 384, 408
175	0, 24, 48, 72, 96, 120, 132, 144, 156, 168, 180, 192, 204

따라서, 본 연구의 가속열화시험의 절차는 아래와 같다.

- (1) 시편을 Table 1 온도별 노출 시간이 적용되는 시점에 5 EA (1 Group) 시료를 항온기에 반출하여, 상온 상태에서 16 시간 이상 안정화 시킨다.
- (2) 열화 스트레스를 인가 한 시편을 상온 상태에서 (16 ~ 96) h 안정화 이후에 인장 시험기를 이용하여, 개별의 시편에 대한 인장력 시험을 수행 한다. 시험기를 통한 개별 시편의 신장률 값을 측정한다.
- (3) 인장력 시험 방법은 NEMA WC 53/ICEA T-27-581-2008을 참고하여 수행을 하였으며, 인장 시험의 속도는 500 mm/min 속도로 수행한다.
- (4) 시험편의 인장 구간의 길이는 25 mm 이며, 신장률은 파단 시점의 최대 변위를 단위 면적을 나누어 백분위 환산한다.
- (5) 시편 총 5 EA (1 Group)의 신장률을 측정 후, 최고 신장률 측정값과 최저 신장률 측정값을 제외한 3개의 데이터의 평균값을 산출한다.
- (6) Table 1의 유지시간에 따라 상기의 인장력 시험을 측정하며, 초기 상태 시료의 신장률을 100 %로 산정한 후 초기 대비 50 %이하의 신장잔율이 측정 될 때까지 시험을 수행한다.

3.2 열화 시험 결과

3.2.1 열화 데이터

온도별 열화시간에 따른 신장률을 초기 대비 변화 신장잔율이며, 이를 데이터 분석을 위하여 정리한 결과는 Table 2와 같다. Figure 4-6는 온도에 따른 시간 대비 신장잔율의 그래프이다.

Table 2. Residual elongation according to duration by temperature

155℃		165℃		175℃	
Duration (hours)	Residual elongation (%)	Duration (hours)	Residual elongation (%)	Duration (hours)	Residual elongation (%)
0	100	0	100	0	100
48	89.11	48	97.9	24	97.98
96	92.16	96	96.6	48	97.9
144	90.7	144	96.13	72	94.36
192	96.17	192	91.49	96	87.58
240	85.63	240	85.59	120	88.97
288	93.55	264	85.06	132	84.78
336	92.12	288	87.93	144	80.44
384	88.5	312	87.01	156	84.29
432	92.55	336	84.73	168	86.69
480	91.02	360	86.63	180	83.39
528	93.51	384	68.31	192	80.81
576	85.59	408	2.1	204	5.58
624	88.07				
672	87.05				
720	87.12				
768	82.11				
816	87.87				
864	82.72				
912	88.36				
960	89.88				
984	1.04				

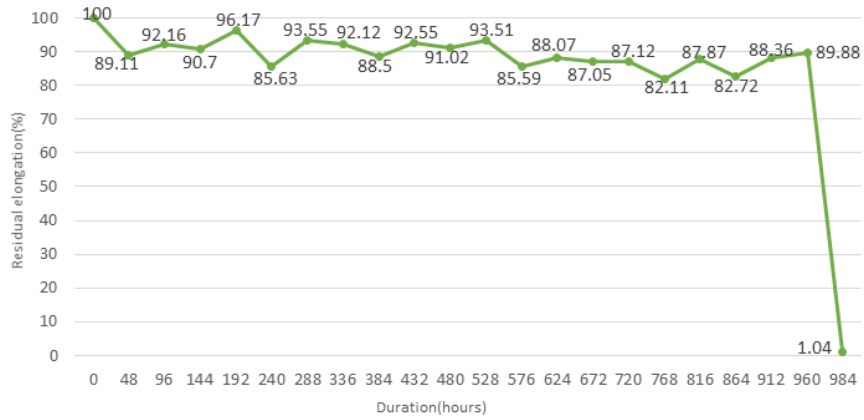


Figure 4. Residual elongation according to duration(155°C)

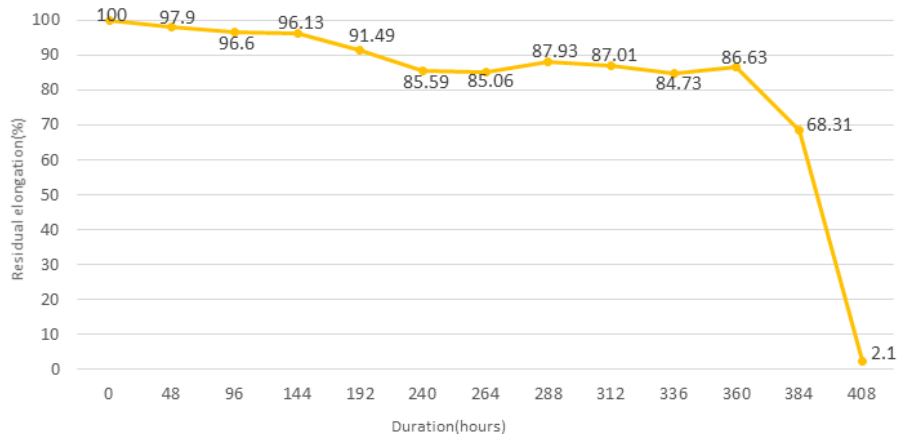


Figure 5. Residual elongation according to duration(165°C)

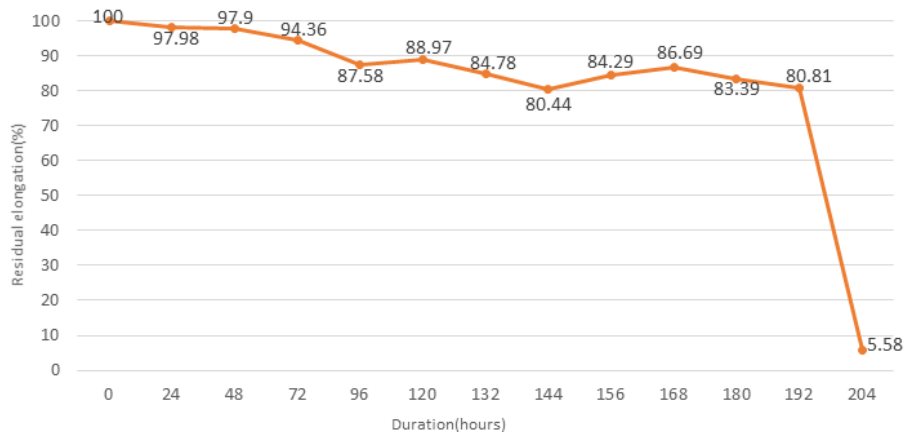


Figure 6. Residual elongation according to duration(175°C)

3.2.2 열화 데이터를 이용한 수명 추정

본 시험의 목적은 온도별 열화 데이터에서 중간수명의 온도에 대한 평균수명을 추정하고 외삽법을 이용하여 사용 온도에서 예상되는 중간수명을 추정함을 두고 있으며, 열화 데이터를 이용한 신장잔율 50 %지점의 추정 방식은 ANSI/IEEE Std. 101 - 1987(R2010)을 참고하여, 다음과 같은 순서로 추정을 수행하였다. 재료의 수명과 온도사이의 관계를 나타내는 화학적 반응물에 대한 아레니우스 공식은 다음과 같다(IEEE Std 98-1984, ANSI/IEEE Std 1-1986, ANSI/IEEE Std 98-1984 and ANSI/IEEE Std 99-1980).

$$k = De \times p\left(\frac{-E}{RT}\right) \tag{1}$$

여기서

k = 반응률

E = 활성화에너지(일정하다고 가정), cal/mol 또는 J/mol 또는 eV

R = Boltzmann기체상수 = $1.987 cal/mol/K$ 또는 $8.314 J/mol/K$ 또는 eV/K

T = 켈빈 온도로 표시된 절대온도 (273 °C에서의 온도)

D = 빈도인자, 일정한 것으로 가정되는 양

본 연구에서 사용되어지는 통계적 분석 방법에서는 아래와 같은 가정을 근거로 데이터를 분석 하였다.

- 아레니우스 공식을 이용하여, 중간 수명 L 은 화학 반응률 k 와 반비례한다.
- 수명 추정에서는 모든 수명 데이터는 Log 수명이 가지는 동일한 표준편차를 가지며, 순수 모집단에 대한 분포선이 직선이며, 평행을 이루고 있다.
- 수치계산법에 의한 추정방식에 대해서는 하기와 같은 가정을 근거로 데이터를 분석하였다.
- 역 켈빈 온도에 대한 log 수명의 관계는 관심의 대상이 되는 온도 범위에 대해 선형이 된다. (시험 및 설계 온도)
- 표본의 수명은 통계적으로 독립적이다. 한 표본의 고장시간은 다른 것에 영향을 주지 않는다.
- 온도 측정 오차는 무시할 수 있다.
- 표본의 관심의 대상이 되는 모집단에서 임의로 선정한다.
- Log 수명의 임의 변동은 관심의 대상이 되는 모든 온도에서 동일한 표준편차를 갖는 정규분포를 가진다.

Log시간 및 역 켈빈 온도로의 데이터 변환은 다음과 같다.

- 각 표본의 섭씨 시험 온도 T 를 역 켈빈 온도로 변환
- 각 표본의 고장 수명 L 을 $Y=\log(L)$ (상용대수)로 변환

모집단 기울기 B 의 표본 추정 값과 절편 A 의 표본 추정 값은 다음과 같다.

$$b = \frac{N\sum(XY) - (\sum X)(\sum Y)}{N\sum(X^2) - (\sum X)^2} \tag{2}$$

$$a = \frac{\sum Y - b\sum X}{N} \tag{3}$$

(2)와 (3)의 식을 이용하여 회귀직선의 기울기 b와 절편 a를 추정한 결과는 Table 3와 같다.

Table 3에 추정된 온도별 기울기 및 절편을 이용하여, 고장시간 (신장잔율 50 %)을 추정한 결과는 Table 4와 같다. Table 4의 열화 온도별 고장시간을 이용하여, 온도와 수명에 따른 회귀직선의 기울기와 절편을 추정한 결과는 Table 5와 같다.

Table 3. Estimation of regression coefficients by temperature

Temperature (°C)	b (slope)	a (intercept)
155	-0.028	100.18
165	-0.121	110.93
175	-0.225	109.14

Table 4. Estimation of failure time by temperature

Temperature (°C)	Failure time (hours)	Note
155	1739.62	Estimation of residual elongation point of 50% to initial as failure time
165	502.31	
175	262.47	

Table 5. Estimation of regression coefficients by temperature

Temperature (°C)	Failure time (hours)	b (slope)	a (intercept)
155	1 739.62	18172.17	-35.08
165	502.31		
175	262.47		

3.2.3 정상 온도에서의 수명 및 활성화 에너지 산출결과

3.2.2 장에서 추정된 기울기 및 절편을 이용하여, 정상온도에서의 수명을 추정한 결과는 Table 6에 나타낸다. Table 5에 추정된 기울기를 이용하여, 활성화 에너지를 추정한 결과는 Table 7에 나타낸다.

Table 6. Estimation of lifetime at steady temperature

Temperature	Hours	Year
90 °C	3 187 058.6	363.8
70 °C	59 033 940.2	6739.0
60 °C	289 775 565.3	33 079.4
50 °C	1 569 660 221	179 184.9

50°C에서의 수명은 179184.9년, 60°C에서의 수명은 33079.4년, 70°C도에서의 수명은 6739년이다. 그러나, 원전의 정상 운행 온도는 90°C로 90°C 미만의 수명에 큰 의미는 없다. 즉, 90°C에서의 수명은 363.8년으로 충분히 안전하게 운영할 수 있는 수명이다.

아래의 Table 7은 원전의 정상 운행 온도에서의 정상 수명을 구하기 위해 필요한 b(y절편), 볼츠만 상수, 활성화 에너지 값 이다.

Table 7. Estimation of activation energy

b (slope)	Boltzmann constant	Activation energy (eV)
18 172.17	$8.617e^{-5}$ eV/K	1.565

추정된 b는 18172.17, 볼츠만 상수는 $8.617e^{-5}$ eV/K이며, 활성화 에너지는 1.565(eV)로 구할 수 있다.

4. 결 론

성능평가는 시험품의 신장률을 초기 대비 50% 열화 되는 시점을 고장으로 판단하여 수명을 추정하는 것으로, 통신 케이블 자켓의 수명을 추정하기 위해 가속열화시험을 실시하였다. 가속열화시험은 5개의 표준을 참고하여 155 ℃, 165 ℃, 175 ℃의 각 세 가지 온도 조건에서 수행되었으며, 각 유지시간에 따른 열화데이터를 수집하였다. 수집된 데이터를 온도-아레니우스 법칙에 기반하여 통신 케이블 자켓의 활성화 에너지를 산출하였으며, 산출된 활성화 에너지를 활용하여 정상 사용 조건의 수명을 추정하였다. 추정된 수명은 일반적으로 원전에서 요구하는 수명보다 긴 363.8년이 도출되었다.

본 논문에서는 원전에서 사용되는 구성품인 통신용 케이블 자켓의 수명을 가속열화데이터 분석법에 의해 추정하였으며, 목표 수명을 충분히 달성한 것을 확인할 수 있었다. 본 연구는 가속열화시험의 사례연구로서, 유사한 항목의 시험 평가에 지침이 될 수 있을 것으로 판단된다.

REFERENCES

- ANSI/IEEE Std 1–1986. 1986. IEEE Standard General Principles for Temperature Limits in the Rating of Electrical Equipment and for the Evaluation of Electrical Insulation : IEEE STANDARDS ASSOCIATION.
- Chun, Y. H., and Kwon, L. J. 1997. “Accelerated Life Test and Data Analysis of the Silver Through Hole Printed Wiring Board.” *J Korean Soc Qual Manag* 25(2):15–27.
- Jung, J. H., Kim, M. S., Lim, H., and Kim, Y. S. 2013. “A Study on Accelerated Life of Halogen Lamps for Medical Device.” *J Korean Soc Qual Manag* 41(4):659–672.
- Kim, S. B., and Kim, S. H. 2015. “Estimation of Elevator Wire Life Using Accelerated Degradation Model.” *J Korean Soc Qual Manag* 43(1):409–420.
- Lim, H., and Lim, D-E. 2015. “Planning Accelerated Degradation Tests: the Case of Gamma Degradation Process.” *J Korean Soc Qual Manag* 43(2):169–184.
- Lim, H. 2012. “Optimal Design of Accelerated Degradation Tests under the Constraint of Total Experimental Cost in the Case that the Degradation Characteristic Follows a Wiener Process.” *J Korean Soc Qual Manag* 40(2):117–125.
- Kim, J-H., Kim, D-H., Hwang, J-K., and Kim, S. 2011. “Research on the Resources Investigations of Small Hydropower Generation in Northern Gyeong-Buk Area.” *Journal of Korea Water Resources Association* 31(5):459–456.
- Han, S. W., Kwak, S. B., and Choi, N. S. 2014. “Accelerated Life Prediction of Ethylene-Propylene Diene Monomer Rubber Subjected to Combined Degradation.” *Trans. Korean Soc. Mech. Eng.* 38(5):505–511.
- ANSI/IEEE Std 98–1984. 1984. IEEE Standard for the Preparation of Test Procedures for the Thermal Evaluation of Solid Electrical Insulating Materials : IEEE STANDARDS ASSOCIATION.
- ANSI/IEEE Std 99–1980. 1980. IEEE Recommended Practice for the Preparation of Test Procedures for the Thermal Evaluation for Insulation Systems for Electrical Equipment : IEEE STANDARDS ASSOCIATION.
- ANSI/IEEE Std 275–1981. 1981. IEEE Recommended Practice for Thermal Evaluation of Systems of Insulating Materials for Random-Wound AC Electric Machinery : IEEE STANDARDS ASSOCIATION.
- Regulatory Guide 1.89 Rev. 1. 1984. Environmental Qualification of Criteria Electric Equipment Important to Safety for Nuclear Power Plants. U.S. Nuclear Regulatory Commission : OFFICE OF NUCLEAR REGULATORY RESEARCH.