

원자력발전소 케이블의 건전성 평가방법 및 수명관리방안에 관한 고찰

이창수, 최미령, 진태은, 임우상*, 한성흠*
한국전력기술(주), * 원자력환경기술원

A Study on Integrity Assessment and Lifetime Management of Cables in the Containment of the Nuclear Power Plant

Chang-Soo Lee, Mi-Ryoung Choi, Tae-Eun Jin, Woo-Sang Lim*, Sung-Heum Han*
Korea Power Engineering Comp any, Inc., * Nuclear Environment Technology Institute

Abstract-A number of the power cables are installed in the containment of the nuclear power plant. According to the IEEE Standard 835, the calculation of the temperature rise shows the operation possibility of power cables in the containment. In this paper, we expect the integrity of the power cables by using the calculation of the temperature rise and the development of the lifetime extension of the cables.

1. 서 론

격납용기 내부 케이블은 열 및 방사선 환경에 노출되어 있는 가혹한 환경과 설계, 제작, 시공과정에서 발생할 수 있는 오류로 인한 조기 손상으로 케이블의 수명단축이 일어날 수 있다. 케이블은 원자력발전소 내에서 전력 공급 및 기기제어 등을 수행하는 안전성 관련 기기이므로 원전의 수명관리연구대상으로 대상 계통, 구조물, 기기의 분류 및 선정에서 주요 기기로 선정되었다.

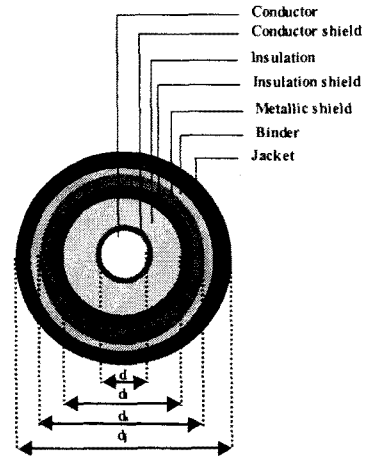
격납건물내의 케이블은 IEEE 기준에 규정되어있는 전기적, 물리적 특성을 만족해야 하며, 또한 예상 수명 기간동안 격납건물 내에서 발생할 수 있는 가혹한 환경과 설계기준사고(Design Basis Accident)인 냉각재상실사고(Loss-of-Coolant-Accident : LOCA)에서도 충분히 견딜 수 있어야 한다. 이러한 케이블의 수명에 가장 큰 영향을 미치는 환경인자는 온도이고 케이블 구성요소 중에서 절연재질이 가장 중요하다. 온도는 외부온도와 케이블 자체 발생열이 고려되어야 한다. 자체 발생열은 도체, 절연체, 차폐 및 자켓에서 발생되고, 열적 등가회로 등을 통해 해석이 가능하다. 본 논문에서는 격납건물 내 가장 열악한 환경에서 존재하는 원자로냉각재펌프(RCP) 및 가압기하부용 전력케이블을 대상으로 IEEE Std. 835를 활용하여 케이블 자체 발생 열을 계산하였다.

2. 본 론

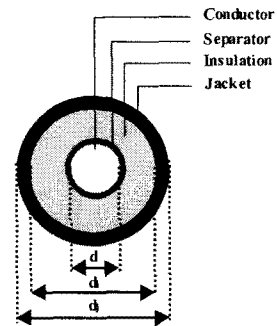
2.1 평가방법

격납건물 내의 원자로냉각재펌프(RCP)용 전력케이블과 가압기하부용 전력케이블을 선정하였으며 케이블은 15kV 및 600V EPR 절연재질 케이블을 사용하였다. 두 전력케이블은 모두 격납건물 내에 있으므로 열이나 방사선의 환경 하에 있으며 설계기준사고인 냉각재상실사고의 위험에 견딜 수 있도록 설계된 케이블이다.

IEEE Std. 835를 활용한 방법은 케이블 내의 도체, 절연체, 차폐 또는 자켓에서 발생하는 열을 열적등가회로(Thermal Circuit)를 이용하여 계산하는 것이다. 케이블은 [그림 1],[그림 2]에서와 같이 고압 및 저압 케이블의 종류에 따라 케이블 내의 층이 다르게 배열되어 있다.



[그림 1. 고압 케이블(15kV) 단면도]



[그림 2. 저압 케이블(600V) 단면도]

케이블 내의 온도는 도체에서 흐르는 전류에 의해 상승하는데 케이블은 절연온도인 90℃를 넘지 않아야 케이블로 사용하는데 있어 건전하다는 것을 의미한다. 본 논문에서는 원자로냉각재펌프(RCP) 및 가압기하부용 전력케이블의 물리적 조건을 적용하여 계산하였으며 주변 온도와와의 합이 실제 케이블의 온도라고 가정한 후 평가한다.

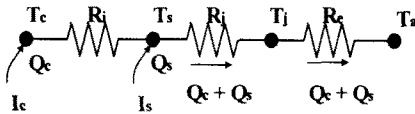
2.2 케이블 내의 도체에 의한 자체 발생 열 계산방법

케이블의 온도 측정 시, 실제 자켓 표면에서 측정된 온도가 케이블 내의 도체온도라고 정확하게 말할 수는 없

다. 이는 케이블 내에서 절연체 및 차폐 등을 고려하지 않았기 때문에 실제 케이블 내에서 발생한 열의 경로를 알아야 도체의 온도를 정확하게 알 수 있기 때문이다. 직접 내부의 온도 측정이 어렵기 때문에 도체, 절연체, 차폐 및 자켓 재료의 종류, 물리적 조건 등을 고려하여 IEEE Std. 835에서 제시한 오옴과 키르히호프 법칙과 유사한 열적 등가회로를 이용한 근사 값을 계산한다.

2.2.1 열적등가회로(Thermal Equivalents Circuit)

케이블 내의 열은 도체, 절연체, 차폐에서 발생한다. 부하된 전류가 도체에 흐를 때 도체의 열이 발생하며 발생된 열은 절연체, 차폐, 자켓을 거쳐 외부로 흐른다. 이는 [그림 3]에서와 같이 오옴과 키르히호프의 열적등가회로 법칙과 유사함을 알 수 있다.



[그림 3. 열적등가회로]

$$T_c = Q_c R_i + (Q_c + Q_s) R_j + (Q_c + Q_s) R_s + T_a$$

도체에서 흐르는 전류에 의해 열이 발생하여 온도가 상승하게 되는데 각 층에서 상승한 온도와 주변온도인 T_a 합이 도체온도인 T_c 임을 알 수 있다.

2.2.2 도체저항에 의한 저항열

금속도체에서 흐르는 전류에 의해 발생하는 열은 다음과 같이 계산된다.

$$Q_c = I_c^2 R_c \quad (\text{watt/ft})$$

- Q_c : 금속도체에서 발생된 저항열(watt/ft)
- I_c : 전류(A)
- R_c : 정격온도에서의 교류 도체저항

2.2.3 유전체에서의 열

도체에서 발생하는 유전체 열은 다음과 같다.

$$Q_d = \frac{0.000106 f E^2 K \cos \phi}{\ln \frac{d_i}{d}} \quad (\text{watt/ft})$$

- Q_d : 유전체에서 발생된 저항열
- f : 주파수(Hz)
- E : 상전압, 실효값(kV)
- K : 유전율
- $\cos \phi$: 절연체 역률
- d_i : 절연체 외경(inch)
- d : 도체 외경(inch)

유전체에 의해 발생된 열은 7500V이하에서는 무시해도 좋다.

2.2.4 차폐에서의 발생열

$$Q_s = I_c^2 R_s 10^{-6} \frac{X_m^2}{R_s + X_m^2} \quad (\text{watt/ft})$$

- Q_s : 순환전류로 1개 차폐에 발생하는 열 (watt/ft)
- I_c : 1개 도체의 전류 (A)
- R_s : 차폐의 저항 (Micro-ohms/ft)

$$R_s = \frac{\rho_s}{8trm} \quad (\text{micro-ohms/ft})$$

- ρ_s : 차폐의 전기적 저항률(ohms-cmil/ft)
- trm : 차폐의 평균지름(inch)
- t : 차폐, 시스 또는 외장의 두께(inch)

$$X_m = 0.3831 \left[f \left(\ln \frac{\sqrt{(D_{12})(D_{13})(D_{23})}}{trm} \right) \right]$$

- D_{12}, D_{23}, D_{13} : 차폐와 도체 중심들 간의 거리 (inch)

2.2.5 절연체 및 자켓의 온도강하

$$\begin{aligned} \Delta T_{ij} &= (T_c - T_{cs}) \\ &= 0.00522 \left[(Q_c + Q_d) \rho_i \left(\ln \frac{d_i}{d} \right) \right. \\ &\quad \left. + (Q_c + Q_d + Q_s) \rho_j \left(\ln \frac{d_j}{d} \right) \right] \end{aligned}$$

- ΔT_{ij} : 금속도체로부터 자켓 표면으로의 온도강하
- T_c : 도체온도 (°C)
- T_{cs} : 케이블 표면온도 (°C)
- ρ_i : 절연체의 열저항률 (°C-cm/watt)
- ρ_j : 비금속 자켓 재료의 열저항률 (°C-cm/watt)

2.2.6 케이블 표면으로부터 전선관 내부로의 온도강하

하나 또는 여러 케이블이 하나의 전선관내에 사용될 때, 케이블 표면으로부터 전선관 내부 표면으로의 온도강하는 다음의 식으로 계산된다. 온도강하는 케이블 표면과 전선관 내부 사이의 저항열에 의해 계산된다.

$$\Delta T_{sc} = R_{sc} \times Q_{cd}$$

- T_{sc} : 케이블 표면으로부터 전선관 내부 표면으로의 온도강하
- Q_{cd} : 전선관 내 총 열생성

$$R_{sc} = \frac{A'}{D's + B'}$$

- R_{sc} : 케이블 표면과 전선관 내부 사이의 열저항
- $D's$: 전선관 내 케이블들의 전체지름
- A', B' : 전선관 재질과 주변에 의해 결정되는 상수

2.2.7 전선관에 의한 온도강하

전선관의 축에 대해 수직방향으로 전선관 열저항은 다음과 같다.

$$R_{cd} = 0.00522 \rho_{cd} \ln \frac{D_{co}}{D_{ci}}$$

R_{cd} : 전선관의 열저항(°C-ft/watt)
 ρ_{cd} : 전선관 재료의 열지항률(°C-cm/watt)
 D_{co} : 전선관이 외부지름(inch)
 D_{ci} : 전선관의 내부지름(inch)

전선관의 열저항 및 전선관 내에서 발생한 총열량을 이용한 전선관의 의한 온도강하는 다음과 같다.

$$\Delta T_{cd} = R_{cd} \times Q_{cd}$$

각 층에서 상승한 온도와 주변온도의 합이 실제 케이블의 절연온도이다. 제한 절연온도인 90°C를 넘지 않는 범위 내에서 설계 및 관리가 되어야 한다.

2.3 케이블 내의 도체에 의한 온도상승 계산 결과

격납건물 내의 13.8kV 원자로냉각재펌프(RCP) 전력케이블 및 480V 가압기하부용 전력케이블의 실제 물성 값을 이용하여 계산하였다. 13.8kV 원자로냉각재펌프 전력케이블은 15kV EPR 케이블(3-1/C, 750 MCM)을 사용하였으며 480V 가압기하부용 전력케이블은 600V 케이블(3-1/C, 500MCM)을 사용하였다. 도체 저항에 의한 저항열 및 7500V 이상에서만 가능한 유전체 열, 차폐에서의 발생 열과 절연체, 차폐에 의한 온도강하, 케이블 표면과 전선관 내부사이의 온도강하 등의 계산 결과 [표 1]에서 처럼 합이 17.35°C, 13.58°C로 제한 절연 온도인 90°C보다 적은 값으로 제시되었다. 참고로 미국의 Oconce 1, 2&3의 운영허가제정정보고서에 제시된 자체 발생열은 29.65°C까지 온도 상승이 가능하다고 제시하였다.

[표 1. 격납건물 내 전력케이블의 상승온도 결과]

	구분	상승온도 [°C]	
		13.8kV(15kV)	480V(600V)
		원자로냉각재펌프	가압기하부용
1	절연체 및 자켓	13.6	11.3
2	케이블 표면	3.23	2.07
3	전선관	0.52	0.21
	합 계	17.35	13.58

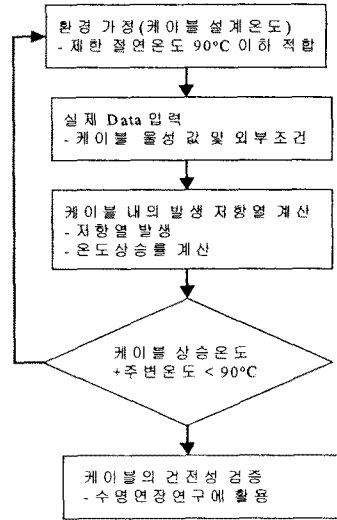
2.4 케이블의 건전성 평가방법 및 수명관리방안

실제 격납건물 내에서 사용하고 있는 케이블의 물리적 조건을 IEEE Std. 835에 제시된 계산식에 적용하여 케이블내의 도체에 흐르는 전류에 의해 상승하는 온도를 계산해낼 수 있다. [표 2]에서는 케이블 건전성 평가 및 수명관리방안을 위해 단계적으로 접근할 수 있는 방법을 제시하였다. 각 층에서 상승한 온도와 주변온도의 합이 절연체의 제한 온도 최고치인 90°C보다 낮은 온도일 때 케이블은 설계 기준에 적합하며 운전 가능하다고 짐작할 수 있다. 따라서 본 논문에서 케이블내의 자체 발생열에 관한 수학적 모델링을 제시하여 케이블의 수명연장 개발에 적용하여 최적의 수명관리방법론을 개발해야 할 것이다.

4. 결 론

초기 발전소 설계 시에 고려된 보수성으로 인해 격납 건물 내에 설치된 케이블은 설계수명 40년 동안 모든 환경조건(정상운전 및 사고 시)에서도 고유의 안전기능을 수행할 수 있도록 제작 및 검증되었다. 계속운명을 위한 온도 재해석 방법은 과도한 보수성을 줄임으로써 검증기간을 연장하기 위해 수행된다. 따라서 본 논문에서 적용

[표 2. 케이블 건전성평가 및 관리방안 방법]



한 IEEE Std. 835의 자체 발생 열 계산법은 도체, 절연체, 차폐 및 자켓 재료의 종류, 물리적 조건 등을 고려하므로써 평가의 신뢰성을 향상시킴과 동시에 계속운영 시에 케이블평가 기초 자료로 활용될 것으로 사료된다.

[참 고 문 헌]

- [1] Power Cable Ampacities, Volume I - Copper Conductors, ICEA, Publication No. P-46-426, 1962.
- [2] Thermoplastic Insulated Wire and Cable for the Transmission and Distribution of Electric Energy (NEMA-WC 5), ICEA-NEMA Standards Publication, Publication No. S-61-402.
- [3] Cross Linked Thermosetting Polyethylene Insulated Wire and Cable for the Transmission and Distribution of Electrical Energy (NEMA WC-7), ICEA-NEMA Standards Publication, Publication No. S-66-524, 1982.
- [4] Rubber Insulated Wire and Cable for the Transmission and Distribution of Electrical Energy (NEMA-WC-3), ICEA, Publication No. S-19-81, 1980.
- [5] Ethylene Propylene Rubber Insulated Wire and Cable for the Transmission and Distribution of Electrical Energy (NEMA WC-8), ICEA-NEMA Standards Publication, Publication No. S-68-516, 1982.
- [6] J.H.Neher and M.H.McGrath, "The Calculation of the Temperature Rise and Load Capability of Cable System", AIEE Transactions, Paper 57-66, 1957.
- [7] J.H.Neher, "The Temperature Rise of Cable in a Duct Bank", Transactions, Paper 49-134, 1949.
- [8] J.H.Neher, "The Temperature Rise of Buried Cable and Pipes", Transactions, Paper 49-2, 1949.
- [9] The Okonite Company, "Engineering Data for Copper and Aluminum Conductor Electrical Cables", Bulletin EHB-81, 1984.
- [10] Standard Handbook for Electrical Engineers, McGraw Hill Book Co., Section 4, pages 531~536, 1933.
- [11] R.G.Hudson, The Engineer's Manual, John Wiley & Sons Publishers, page 317, 1961.
- [12] The Rome Cable Manual of Technical Information, page 240, 1987.
- [13] 박진석, 진태은, "원자력발전소 격납용기 내 케이블의 수명 관리", 한국원자력학회, 1997.
- [14] 박진석, 진태은, "원전 격납용기 내 케이블의 노화손상평가", 한국원자력학회, 1997.