2004년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집 2004.7.14-16

원자력 발전소 전기1급 케이블의 60년 사용에 대한 고찰

진석일, 배장호
한국전력기술(주)

A Study of 60-Year Lifetime of Class 1E Cables in the Nuclear Power Plants

Sug-Il Jin, Jang Ho Bae
KOPEC

Abstract - 전기1급 케이블의 활성화에너지, 가속노화 온도 및 가속노화시간 등을 이용하여 아레니우스(Arrhenius) 방정식에 근거한 케이블 정격온도 및 실제 사용 가능한 운전온도에서 이론적 수명을 계산하고, 정격온도 이외에서의 허용전류를 계산하였다. 또한, 정격온도를 어느 정도 낮추어 사용하면 표준원전에서 기 검증된 전기1급 케이블을 차세대원전 설계수명인 60년간 사용이 가능한지 계산 및 정격온도 감소 적용시 전력케이블 설계영향 등을 고찰해 보았다.

1. 서 론

원자력 발전소에 주로 사용되는 케이블의 절연재질은 EPR (Ethylene Propylene Rubber) 또는 XLPE (Cross-Linked Polyethylene)이며 재킷 재질은 Hyp-alon 또는 Neoprene 이다. 국내 원자력 발전소 전기1급 케이블은 대부분 국내 케이블 제작사(대한전선(주), LG 전선(주) 및 (주)진로산업 등)에 의해 그리고 일부는 해외 케이블 제작사(Rockbestos, Habia, EGS 등)에 의해 공급되며 모두 표준원전 설계수명인 40년 이상 수명이 검증 되었다.

2. 본 론

2.1 원자력 전기1급 케이블 수명검증 현황

국내 및 국외에서 공급되는 주요 전기1급 케이블의 수명검증 현황은 표 1과 같다.

표 1. 전기1급 케이블 수명 검증 현황[1]~[6]

항목 / 제작사	절연 재질	활성화 에너지 (eV)	가속 노화 온도 (℃)	가속 노화 시간 (Hr)	비고
대한전선 LG 전선	EPR주1)	1.351	150	769	90℃에서 40년
진로산업	EPR주1)	1.30	150	989	90℃에서 41년
Rock-bestos	XLPE주2)	1.35	150	900	90℃에서 46년
	Cellular XLPE주3)	2.75	100	120	68℃에서 42년
	SR주4)	1.65	180	1400	125℃에서 56년
Habia	HFI 260주2)	1.20	180	2184	90℃에서 40년 훨씬 초과
EGS	XLPE주5)	1.34	155	524	90℃에서 40년

주 1) 일반 전력(600V/5kV/15kV), 제어 및 계장용 케이블에 사용
2) 특수 계장용 및 온도보상용 케이블에 사용
3) 동축케이블에 사용
4) 가압기 후비가열기 케이블에 사용 (SR : Silicone Rubber)
5) RSPT(Reed Switch Position Transmitter)등의 케이블에 사용

2.2 운전온도에 따른 수명 예측

표 1에서 기술된 바와 같이 동축케이블에 사용된 Rockbetos사의 Cellular-XLPE를 제외하고 케이블의 종류에 관계없이 모두 정격온도 90℃로 표준원전 설계수명인 40년 이상 수명이 검증되었다. 그러나 실제 케이블은 전력케이블을 제외하고 90℃ 정도로 사용되는 경우는 거의 없다. 제어 및 계장케이블의 경우 도체에 흐르는 전류가 작으므로 이 전류로 인하여 도체온도가 90℃ 되는 경우는 거의 없으며, 특히 4~20 mA가 흐르는 계장케이블의 경우 도체 운전온도는 주위온도와 거의 같다고 보아도 된다. 또한 전력케이블의 경우도 케이블 선정 시 다음과 같은 많은 설계여유도가 적용되기 때문에 특별한 경우를 제외하고 실제 도체가 90℃로 운전되는 경우는 거의 없다고 판단된다.

- 최대주위온도 적용(40℃ 또는 50℃ 적용)
- 케이블 보호를 위한 설계여유도(15%~ 25%)
- 화재 관통부 통과 감쇄 15% 적용
- 허용전류 계산시 최대저항 적용
- 전동기의 경우 실부하전류가 아닌 정격전류 적용

2.2.1 아레니우스 모델[7]

아레니우스 방정식을 이용하여 각 케이블의 정격온도 및 실제 예상 운전온도별 등가 수명은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$tser = \frac{tage \cdot \exp\left(\frac{Ea}{Kb} \cdot \left(\frac{1}{Tser+273} - \frac{1}{Tage+273}\right)\right)}{365 \times 24} \quad -(1)$$

여기서,

tser : Tser에서 사용수명(년)
tage : Tage에서의 가속노화시간(hours)
Tser : 운전온도(℃)
Tage : 가속노화온도(℃)
Ea : 활성화 에너지(eV)
Kb : Boltzmann 상수(8.617×10^{-5} eV/K)

2.2.2 수명 예측

표 1의 수명검증 데이터와 아레니우스 식 (1)을 기준으로 국내 원자력발전소에서 많이 사용되는 국내 케이블의 운전온도별 수명예측 결과는 그림 1, 그림 2와 같으며, 발전소에 소량 사용되는 국외 케이블의 수명예측 결과는 그림 3 ~ 그림 6과 같다.

■ 국내 제작사 EPR 케이블

그림 1 및 그림 2에서 알 수 있듯이 국내 원자력발전소 전기1급 케이블의 거의 대부분을 차지하는 EPR 케이블의 사용온도별 예상수명은 제작사와 상관없이 거의 동일하다.

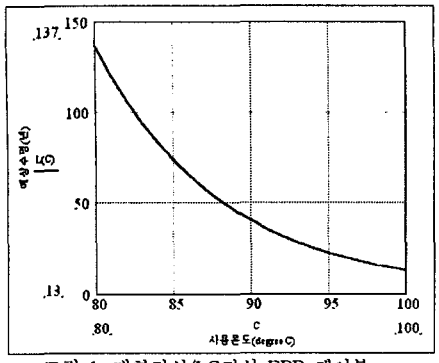

그림 1. 대한전선/LG전선 EPR 케이블

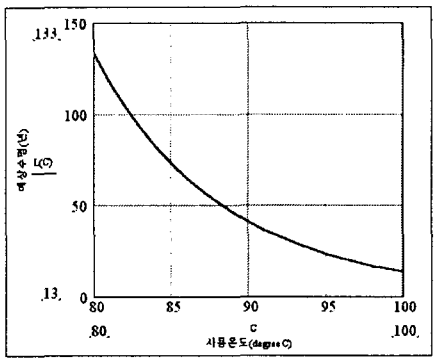

그림 2. 진로산업 EPR 케이블

그림 1 및 그림 2에서는 판독하기 어려우나 사용온도를 86.5℃로 할 경우, 식 (1)로 계산하면 예상수명은 대한전선/LG전선의 EPR 케이블은 약 60.9년 그리고 진로산업 EPR 케이블은 약 61.5년이 된다.

■ 국외 제작사 케이블

- Rockbestos(RB) 사

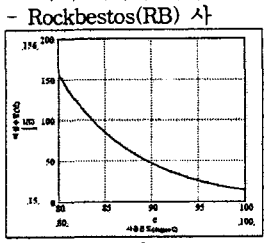
그림 3. RB사 XLPE

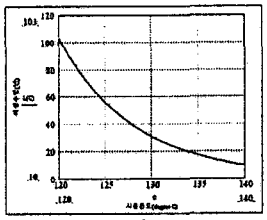
그림 4. RB사 SR

그림 3의 XLPE는 특수계장 및 온도보상용 케이블에 사용되고 있으며, 그림 4의 SR(Silicone Rubber)는 가압기 후비가열기 케이블로 사용되고 있다. RB사의 XLPE는 90℃로 약 46년 SR은 125℃로 약 56년 수명이 검증 되었다. 그러나, RB사의 동축케이블용 Cellular-XLPE는 68℃로 약 42년 수명이 검증되었다.

- Habia 사

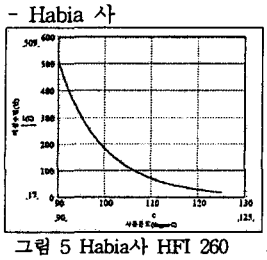
그림 5 Habia사 HFI 260

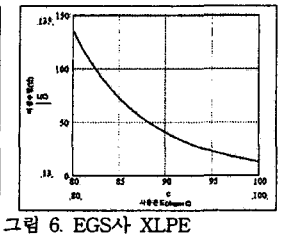
그림 6. EGS사 XLPE

그림 5의 HFI 260은 특수계장 및 온도보상용 케이블에 사용되고 있으며, 그림 6의 XLPE는 RSPT 케이블 등에 사용되고 있다. 그림 5 및 그림 6에서 알 수 있듯이 Habia사의 HFI 260은 90℃로 40년을 훨씬 초과하게 그리고 EGS사의 XLPE는 90℃로 40년 수명이 검증되었음을 알 수 있다.

2.3 60년 사용 가능성에 대한 고찰

표준원전에 기 검증된 전기1급 케이블을 차세대원전 설계수명인 60년간 사용하려면 앞에서 기술된 아레니우스 방정식에 의한 60년 수명검증 이외에 케이블이 설치된 지역에서 발생 가능한 설계기준사고(LOCA/MSLB, 화재 등)에 검증이 되어야 한다. 따라서 기 수행된 표준원전 LOCA/MSLB profile과 60년에 해당하는 차세대원전 LOCA/MSLB profile이 상세히 비교/검토되어 신규 시험을 수행하던지, 아니면 분석 등의 방법으로 사고에 대한 입증이 되어야 한다. 본 논문의 전기1급 케이블 60년 사용 가능성에 대한 고찰은 격납건물 외부 그리고 60년간 총 방사선양이 현재 전기1급 케이블의 방사선내력(대부분 2 $\times 10^6$ Gy이상)이하인 지역에 국한하기로 한다.

2.3.1 국내 케이블

국내 전력케이블은 표 1, 그림 1 및 그림 2에서 알 수 있듯이 정격온도 90℃로 약 40년 검증되었으며 최대 운전온도를 86℃로 제한하면 아레니우스 방정식에 의거 60년간의 사용이 가능하다. 따라서, 전류에 의한 온도상승이 전력케이블에 비해 상대적으로 작은 제어 및 계장 케이블은 60년 사용에 별 어려움이 없을 것으로 예측된다. 전력케이블도 전력케이블 선정시 많은 설계여유도가 고려되었기 때문에 대부분 케이블의 운전온도가 86℃ 이하일 것으로 예측 가능하다. 그러나, 이 설계여유를 전력케이블의 개패서지에 의한 피로, 기동전류, 운전 열사이클 등에 대한 보상으로 고려하고 케이블의 운전온도를 86℃ 이하로 제한하여 사용할 경우 이에 따른 전력케이블관련 설계 영향에 대한 검토는 다음과 같다.

■ 허용전류

케이블의 허용전류는 일반적으로 정격온도 90℃에서의 값이고 정격온도 및 주위온도가 변화할 경우 이에 따른 케이블 허용전류는 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$I_2 = I_1 \times \sqrt{\frac{T_{2C} - T_{2A} - dTD_2}{T_{1C} - T_{1A} - dTD_1}} \times \frac{234.5 + T_{1C}}{234.5 + T_{2C}} \quad \text{--------(2)}^{[8]}$$

여기서,

- I_1 : 도체온도 T_{1C}, 주위온도 T_{1A}에서의 허용전류(A)
- I_2 : 도체온도 T_{2C}, 주위온도 T_{2A}에서의 허용전류(A)
- $T_{1C}, T_{2C}/T_{1A}, T_{2A}$: 도체온도(℃)/주위온도(℃)
- dTD1,dTD2 : 유전체손에 의한 온도상승(℃)

상기 식 (2)에서 유전체손에 의한 온도상승은 원자력발전소 EPR 전력케이블의 경우 작으므로 이를 고려하지 않고 도체온도(80℃~100℃)에 따른 허용전류를 식 (2)에 따라 계산한 결과는 그림 7 ~ 그림 12와 같다. 케이블 형식은 600V 케이블은 3/C, 5kV 및 15kV 케이블은 3/C-Triplex 이다.

- 그림 7, 그림 8, 그림 9[9] : 사용온도에 따른 트레이에서의 600V, 5kV 및 15kV 케이블 허용전류
  - 주위온도 40℃, Random fill 포설
  - 사다리형 바닥 및 상부 개방형 트레이
  - CDC(Calculated Depth of Cable) : 1.3 in

- 그림 10, 그림 11, 그림 12[8] : 사용온도에 따른 공기 중에서의 600V, 5kV 및 15kV 케이블 허용전류

▪ 주위온도 40°C

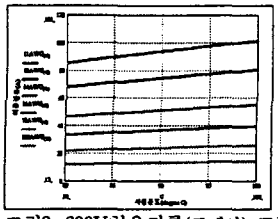

그림9. 600V허용전류(트레이)

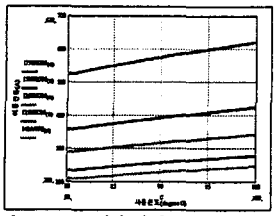

그림10. 5kV 허용전류(트레이)

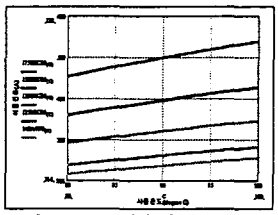

그림11.15kV 허용전류(트레이)

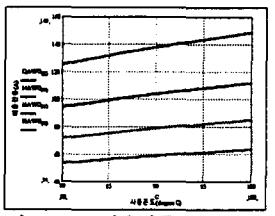

그림12. 600V허용전류(기중)

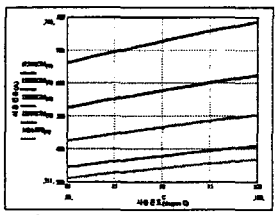

그림13. 5kV허용전류(기중)

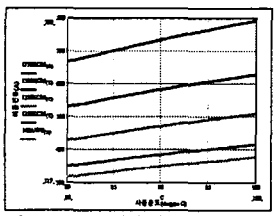

그림14. 15kV 허용전류(기중)

그림 9 ~ 그림 14에서 알 수 있듯이 사용온도의 변화로 인한 허용전류의 변화가 그리 크지 않음을 알 수 있다. 식 (2)로 계산 시, 정격온도 90°C인 케이블을 86°C로 사용하면 허용전류는 약 3% 감소된다. 따라서, 허용전류 3%의 감소로 인한 전력케이블 선정 영향은 미미할 것으로 예측된다.

■ 전압강하

전력케이블은 전압강하로 인해 케이블의 길이가 제한되나, 도체 운전온도를 낮추어 사용 시 구리도체의 경우 식 (3)에 따라 도체저항이 작아지므로 전압강하가 작아지고 허용길이가 증가하므로 이로 인한 설계영향은 없다.

$$R_2 = R_1 \times \frac{234.5 + T_2}{234.5 + T_1} \quad \text{----------(3)}$$

여기서, R_1, R_2 : 도체온도 T_1, T_2에서의 동도체 저항(Ω)
T_1, T_2 : 도체온도(°C)

■ 단락내력

최대 단락전류에 견딜 수 있는 최소 동 도체치수는 단락전류, 단락전류 지속시간, 절연 정격온도 및 절연 최대정격온도에 의해 식 (4)와 같이 결정되며, 최대운전온도 감소 시 최소 도체치수는 감소되므로 이로 인한 설계영향은 없다.

$$CM = \sqrt{I^2 \times \frac{t}{0.0297 Log_{10} \frac{(TM + 234)}{(TR + 234)}}} \quad \text{----------(4)}^{[10]}$$

여기서, CM : 동 도체치수(Circular mils)
TM : 단락시 최대도체온도(°C)
TR : 최대연속 운전온도(°C)
I : 단락전류(A, rms)
t : 단락전류 지속시간(초)

2.3.1 국외 케이블

아레니우스 방정식에 의하면 Rockbestos사 XLPE 절연은 87.5°C, Cellular-XLPE 절연은 66.5°C, 그리고 Silicone Rubber절연은 124°C에서 운전시 각각 약 62년, 63년, 63년 사용이 가능한 것으로 계산된다. XLPE절연은 특수계장용, 온도보상용 및 동축용 케이블로 사용되어 도체온도는 주위온도와 거의 비슷할 것으로 예측되고, Silicone Rubber 케이블도 정격요구인 125°C보다 1°C만 낮추어 사용하면 되므로 60년 사용이 가능할 것으로 예측된다. Habia사 HFI 260은 90°C에서 500년 이상 검증되었으므로 60년 사용에 문제가 없을것으로 예상된다.

3. 결 론

원자력발전소에 사용되고 있는 전기1급 케이블의 수명검증 데이터를 기준으로 주요 케이블에 대하여 아레니우스 방정식에 의한 사용온도별 예상수명, 사용 온도별 트레이 및 공기중의 허용전류를 계산함으로서 정격온도 또는 허용전류를 벗어나 운전되는 케이블에 대한 예상수명을 쉽게 예측할 수 있는 기준을 제시하였다.

국내 기 검증된 전기1급 케이블이 격납건물 이외 그리고 60년간 총 방사선양이 현재 전기1급 케이블의 방사선내력(대부분 2 $\times 10^6$ Gy이상)이하인 지역에서 차세대 원전 설계수명인 60년간 사용이 가능한지 아레니우스 방정식을 기준으로 검토한 결과, 제어 및 계장케이블은 별 문제가 없을 것으로, 전력케이블은 실제 주위온도 또는 실제 사용온도가 정격온도보다 4°C이상 작거나 또는 허용전류를 약 3% 감소하여 사용할 경우 가능할 것으로 고찰되었다. 또한 전력케이블의 허용전류를 약 3% 감소하여 사용하여도 표준원전 대비 설계영향은 미미할 것으로 검토되었다. 국외에서 공급되고 있는 Rockbe-stos사 XLPE절연 케이블 및 Silicone Rubber절연 케이블 그리고 Habia사의 HFI 260절연 케이블도 60년간 사용이 가능할 것으로 고찰되었다.

[참 고 문 헌]

[1] 대한전선(주), TEC-UC56-E241-20, "Environmental Qualification Document", 2001
[2] LG전선(주), LGS-QER-01, "Environmental Qualification Documentation", 1999
[3](주)진로산업, JRI-EQ-R, Environmental Qualification Document", 2001
[4] Rockbestos, ROCK 1500, "Environmental Qualification Document", 2002
[5] Habia, 002-33303-D9-002, "Environmental Qualification Document", 2002
[6] EGS, EGS-TR-23031-28, "Environmental Qualification Procedures Item 2-5, 2001
[7] IEEE Std 101-1972, "IEEE Guide for the Statistical Analysis of Thermal Life Test Data"
[8] "AIEE S-135-1", Power Cable Ampacities, 1962
[9] "NEMA WC51", Ampacities of Cables in Open-Top Trays, 1992
[10] "IEEE 242", Protection and Coordination of Industrial and Commercial Power Systems, 1986