

2001 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

내화전선의 케이블 격리요건 면제 가능성에 대한 실험적 연구
An experimental study on fire rated cables for the exemption from cable separation requirements

*정창기, 김기옥, 박찬호, 안병호, 이복영, 박상태

방재시험연구원
경기도 여주군 가남면 심석리 69-1

박준현

한전 전력연구원
대전시 유성구 문지동 103-16

요 약

FY'01 춘계 원자력학술발표회에서 원전의 화재안전정지능력 확보를 위한 케이블의 내화 성능에 대하여 발표한 바, 화재시에는 케이블에 주수(Water Spray) 소화기 시도될 것이고 내부의 케이블 트레이들이 화염에 의해 탈락하게 되는 상황 하에서도 케이블의 건전성이 유지될 것이냐에 대한 질문이 있었다. 본 연구는 이러한 질문에 부응하여 화재시 케이블의 건전성에 대하여 기존의 시험기준인 IEC 60331과 질의 요건에 부응한 시험기준인 BS 6387(화재시 회로의 건전성 유지를 위한 케이블의 성능요건에 대한 시험기준)에 따라 화재시 케이블의 건전성을 심층분석하였다. 이와 관련하여 원자력발전소의 케이블 격리요건에 부응하기 위한 실행방안의 하나로서 케이블을 1시간 이상 내화성능으로 Wrapping하는 방안을 검토하였으나, 케이블의 Wrapping에는 매우 많은 비용이 소요되므로 케이블의 Wrapping을 최소한으로 하는 방안을 검토하였다. 검토결과, 1시간 이상 내화성능의 케이블 Wrapping을 대신하여 내화전선(NFR-8)의 사용을 긍정적으로 받아드릴 수 있는 실험결과가 도출되었다.

Abstract

I stated on the fire resistibility of cables for providing fire shutdown capability in nuclear power plant at the Korean Nuclear Society FY '01 Spring Meeting. During the meeting, I was asked if cables' integrity could be maintained under condition that water spray was applying at cables and cable trays were escaped from its position by flame. In accordance with this question, we analyzed the result of tests which is described in IEC 60331 and BS 6387. As one of methods for implementation to conform to separation requirements in nuclear power plant, we reviewed the fire wrapping method by fire barrier having a 1-hour fire resistance rating. However, it costs too much to wrap cables. Therefore, we had tried to find out alternative to minimize fire wrapping. As a result, we have obtained test results on using fire resistance cable (i.e. NFR-8) which is an affirmative substitution instead of fire wrapping.

1. 서론

원자력 발전소에서는 모든 안전전략에 기본적으로 심층방호 전략을 채택하고 있는데, 그러한 심층방호 전략의 예로써 다중성(Redundancy), 다양성(Diversity), 독립성 (Independence)을 들 수 있다. 이 중에서도 다중성과 독립성이 특히 본고와 관련되어 있는데 다중성은 원자력 발전소가

정상상태를 벗어나 심각한 상태로 발전하는 것을 방지하기 위하여 동일한 시스템을 2중으로 운영하는 방식을 의미한다고 할 수 있으며, 이들 각각을 A, B 트레인이라고 할 때, A, B 트레인은 상호 방해받지 않고 독립적이어야 하며, 이중 어느 한 트레인은 다른 트레인의 화재로부터 안전하게 방호되어야 한다는 것이다. 본고에서는 이러한 다중성과 독립성에 근거하여 케이블의 격리요건에 부응하기 위한 실행방안의 하나로써 케이블을 1시간 이상 내화성능으로 Wrapping하는 방안을 유력하게 검토하였으나, 케이블의 Wrapping에는 매우 많은 비용이 소요되므로 케이블의 Wrapping을 가급적 감소시키자는 측면에서 케이블 Wrapping의 최소화 방안을 검토하였다.

이와 관련된 또 하나의 문제는 FY'01 춘계 원자력학술발표회에서 원전의 화재안전정지능력 확보를 위한 케이블의 내화 성능에 대하여 발표한 바 있었는데, 당시 질의사항 중에서 보다 현실적인 화재 시나리오를 구성하여 시험에 임해줄 것을 요청 받은 바 있다. 말하자면 화재시에는 케이블에 주수(Water Spray) 소화가 시도 될 것이고 내부의 케이블 트레이들이 화염에 의해 탈락하게 되는 상황 하에서도 케이블이 건전하게 유지될 것이냐에 대한 의문의 제기였다. 본 연구에서는 이러한 질의에 부응하고자 화재시 케이블의 건전성에 대하여 기존의 시험기준인 IEC 60331과 화재시 회로의 건전성 유지를 위한 성능요건인 BS 6387 시험기준에 따라 화재시 케이블의 건전성을 분석하였다.

2. 다중 케이블의 격리요건

원자력 발전소에서는 다중성(Redundancy)의 견지에서 2-Way System을 채택하고 있으며, 이들 상호간에는 독립적이어야 할 것을 요구하고 있다. 이와 관련하여, 미. 원자력법 10CFR50, Appendix R, III.G.2 에서는 안전정지에 중요한 구조물, 계통, 기기에 대해 상기 다중성 및 독립성의 견지에서 격리요건을 준수토록 규제하고 있는데, 본고의 주요 검토대상인 격납건물 외부에서의 격리요건에 대한 주요내용을 도시하면 아래와 같다.

- (가) 다중 트레인의 케이블, 기기 및 그와 연계된 비안전관련회로는 3시간 내화등급의 방화벽으로 격리해야 한다.
- (나) 다중트레인의 케이블, 기기 및 연계된 비안전관련회로는 중간에 가연물이나 화재위험이 없도록 하되 수평거리 20ft (6.1m) 이상 격리시켜야 하며, 화재감지장치 및 자동소화설비를 당해 화재지역에 추가 설치해야 한다.
- (다) 다중트레인의 케이블, 기기 및 연계된 비안전관련회로는 1시간 내화등급의 방화체로 둘러 싸고(Enclosed) 화재감지장치 및 자동소화설비를 당해 화재지역에 부설해야 한다.

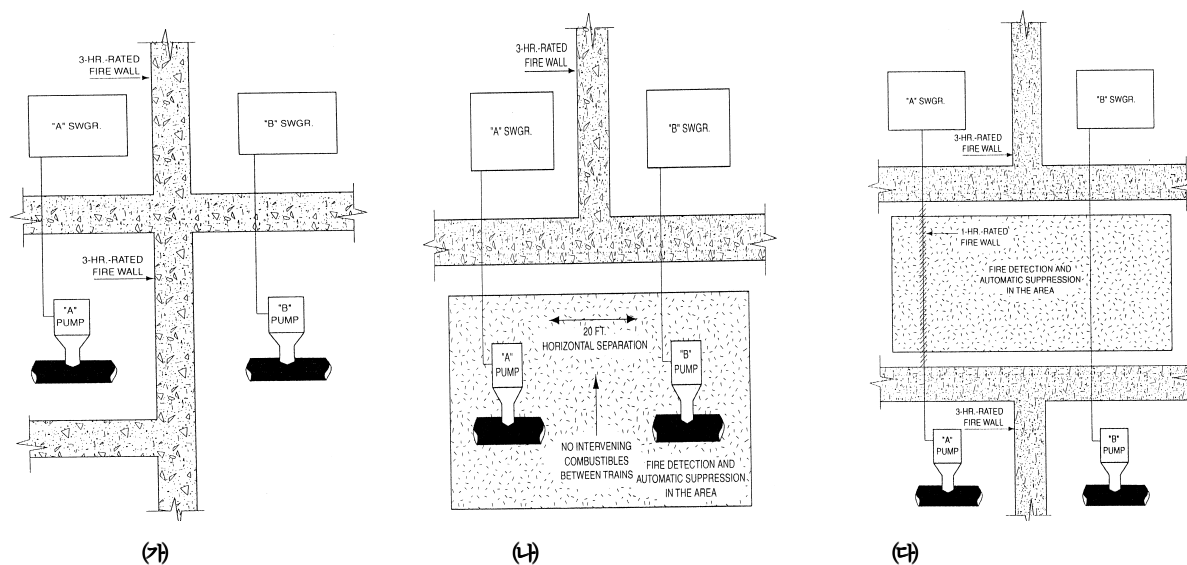


그림 1. 격리 기준 상황도

3. Fire Wrapping 검토

상기 격리기준 중에서도 격리요건 준수의 가장 바람직한 형태는 “(가)”항에 따라 규제요건을 준수하는 것이지만 본 기준은 초기 원자력 발전소(79.1.1 이전의 발전소)의 건설 이후에 제정되었기 때문에 상기 격리요건에 맞추어 준수하기란 발전소의 구조상 거의 불가능하다. 그 다음으로 바람직한 격리요건은 “(나)”항을 준수하는 것으로, 이는 20 ft 이상의 공간적 격리를 요구하고 있어 “(나)”항에 의한 격리요건 준수는 구조적으로 더욱 불가능하여 현실적으로 가장 가능한 “(다)”항에 의하여 격리요건을 준수할 수밖에 없는 실정이다.

“(다)”항에 의한 격리요건을 준수하기 위해서는 다중 트레인의 어느 한 트레인을 내화성능이 1시간 이상인 방화체로 Enclosed(즉, Fire Wrap)할 것을 요구하고 있어, 당초부터 본 규제요건을 고려하지 않고 건설된 발전소는 이와 같은 격리요건 준수에 상당 비용의 지출이 요구되고 있다. 따라서, 이러한 비용의 지출을 방지하기 위해서는 가능한 방법론을 검토하여 Fire Wrapping을 최소화할 필요가 있다. 이를 위하여 발전소를 화재구역별로 세분하여 각 화재구역에 위치한 기기에 대한 케이블의 경로를 추적하여 그에 따른 격리상황을 검토하기로 하였다. 왜냐하면, 일단 화재구역을 달리 하면 상기 “(가)”항의 격리요건을 구조적으로는 준수하는 것으로 생각되기 때문이다. 이러한 부분을 검토하여 제외시킴으로써 Fire Wrapping이 필요한 부분을 가급적 줄여야 비용을 절감할 수 있기 때문이다. 이를 위해 아래와 같은 분석단계를 거쳐 1시간 내화등급으로 Fire Wrapping이 필수적인 부분만을 발췌하였다.

- (1) 화재구역별로 안전정지관련 기기 및 케이블을 분류하고
- (2) 화재구역별로 계열별 혼재 정도를 유형(Type)별로 분류하였다.

화재구역별 케이블, 기기에 대한 현황을 검토한 결과 다음 4가지 유형(Type)으로 분류할 수 있었다.

표 1. Fire Wrapping의 필요성에 따른 화재구역별 유형 분류

구분	정 의	Fire Wrapping 필요성
유형 1	안전정지관련 기기/케이블이 미설치된 화재구역의 경우	Fire Wrapping 필요성 없음
유형 2	화재구역별로 A, B계열이 분리되어 설치된 화재구역의 경우	Fire Wrapping 필요성 없음
유형 3	A(또는 B)계열 화재구역에 소수의 B(또는 A)계열 기기가 소수(1~10 여개)가 혼재된 화재구역의 경우	이설할 경우, Fire Wrapping 필요성 없음
유형 4	동일 화재구역에 다수의 A, B 계열 기기 및 케이블이 혼재되어 있는 화재구역의 경우	Fire Wrapping이 필요함

이들 유형에 해당하는 화재구역을 아래와 같이 분류하였다.

표 2. 유형별 화재구역 분류

구분	해당 화재구역 수		
총 화재구역수	53개 구역		
유형 1	4개 구역		
유형 2	17개 구역 (A계열 : 10개 구역, B계열 : 7개 구역)		
유형 3	혼재기기갯수	A계열에 소수의 B계열 혼재	B계열에 소수의 A계열 혼재
	1	4개 구역	2개구역
	2	2개 구역	
	3	2개 구역	4개구역
	4		1개구역
	6		1개구역
유형 4	16개 구역		

상기 분석에서, 1시간 내화성능의 방화체로 Wrapping하여야 할 경우는 동일 화재구역에 다수 설비의 A,B 계열이 혼재되어 있는 유형 4의 경우로 전체 53개 구역중 16개 구역이다. 그러나, 10CFR50, Appendix R, III.G.3와 III.L요건을 검토해보면 다음 2가지 사항의 결론에 도달할 수 있다. 즉,

- (1) 저온정지 기능의 기기 및 케이블 : 72시간 이내 정비절차서 개발로 대응
- (2) 고온정지 기능의 기기 및 케이블: 격납건물 외부는 1시간 내화성능으로 Wrapping 및 자동 소화설비 및 탐지설비 부설, RSP보수 및 기기 증설, Alternative Shutdown Panel (ASP) 설치 방안 등을 채택하고, 격납건물 내부의 경우에는 30분 이상 내화성능의 불연성 차폐체로 차단

따라서, 1시간 이상의 방화체로 Wrapping 해야 할 대상은 유형 4에 해당하는 화재구역에 위치하는 기기 및 케이블 중 고온정지 기능의 기기 및 케이블만이 해당됨을 알 수 있다.

4. BS 6387 시험기준에 의한 화재 실험

가. 실험의 필요성

이상의 검토에서 보는 바와 같이, 화재구역 53개소 중 유형 4에 해당하는 16개 화재구역만이 Fire Wrap이 필요하고, 그 중에서도 고온 정지계통에 해당하는 기기 및 케이블 만이 Fire Wrap이 필요함을 알게 되었다. 여기서 Fire Wrap의 의미를 검토할 필요가 있다. Fire Wrap은 케이블이나 트레이를 내화성능이 1시간 이상인 방화체(예컨대, 방화 Tape)로 둘러 쌓는다(Enclosed)는 의미이다.



- (1) 도체 : 연동선
- (2) 내화층 : Mica/Glass 테이프
- (3) 절연체 : 폴리 에틸렌
- (4) 충전물
- (5) 내화보호층 : 유리사 테이프
- (6) 피복 : 난연무독 폴리올레핀

그림 2. NFR-8 케이블의 피복상황

상기 그림 2는 내화 전선의 단면으로 도체(Core)에 대한 피복상황을 보여주고 있다. 피복물질이 모두 불연성의 물질은 아니지만 5개 층으로 도체를 둘러 싸고(Enclosed) 있는 상황이다. Fire Wrapping은 케이블을 보호하기 위하여 케이블 트레이를 1시간 이상의 방화체로 둘러싸는 것이고, 그림 2의 경우는 케이블 자체를 방화체로 둘러 싸는 것이라고 말 할 수 있다. 이는 케이블의 방호형태는 다르지만 케이블에 대한 방호의미는 같은 것으로 생각하였다. 바로 이러한 관점 하에서 그림 2의 케이블이 1시간 이상의 내화성능을 보일 것인지 실험의 필요성이 제기되어, 내화전선으로 알려진 NFR-8 케이블을 선정하여 케이블의 건전성 측면에서 IEC 60331 및 BS 6387 시험기준에 의해 실험을 수행하였다. 다만, IEC 60331은 실험결과가 원자력학회 춘계학술대회에서 발표되었으므로 생략하고 BS 6387에 의한 실험을 주로 기술하였다.

나. BS 6387 시험기준의 개요

본 시험기준은 화재시 케이블의 건전성 유지를 위해 요구되는 성능요건을 시험하는 기준으로 시험항목이 ① 화재시험, ② 주수(Water Spray) 시험, ③ 기계적 충격(Mechanical Shock)시험의 3가지 항목으로 구성되어 있으며, 3가지 시험기준을 통과하였을 때 합격 판정을 얻을 수 있다.

유럽에서 주로 활용되는 IEC 60331 기준이 화재시험 한 분야만을 시험하는데 비하여 본 기준은 주수시험과, 기계적 충격을 요구하고 있어 까다로운 성능을 요구하는 시험기준으로 알려져 있다. 본 기준에서 주수시험을 요구하는 근거는 화재시 스프링클러 등 물 소화설비에 의한 쏫트 위험성에 대한 성능검증을 하기 위함이고, 기계적 충격시험을 요구하는 근거는 화재시 내부 설비의 탈락으로 약해진 케이블에 타격을 가하여 생길 수 있는 쏫트 위험성을 규제하기 위함이다.

본 기준은 BS 6207에 따라 광물질이 함유된 절연케이블 및 450/750V(대지전압/선간전압)를 초과하지 않는 전압에서 내화성을 요하는 케이블에 적용가능한 기계적 및 화재시험을 위한 시험방법과 성능요건을 명시한 것이다.

판정기준은 화재시험의 경우, $650\pm 40^{\circ}\text{C}$ 의 온도에서 3시간 동안의 시험기간 중 케이블 쏫트가 없어야 하며, 주수 시험의 경우 $650\pm 40^{\circ}\text{C}$ 의 온도로 접염하여 15분간 수행하고 지속적 화염하에서 표준형 스프링클러($2.5\sim 3.5\text{ kg/cm}^2$, $0.25\sim 0.30\text{ l/m}^2/\text{sec}$)에 의한 주수를 15분간 수행하여 이상(쏫트)이 없어야 한다. 또한 기계적 충격시험에서는 그림5와 같은 지름 25 mm내외, 길이 60mm 내외의 봉으로 지지 구조물인 Rubber bush를 쳤을 경우 이상이 없어야 한다. 아래에 각 시험장치를 보여주고 있는데 이를 조합하여 하나의 실험장치를 만든다.

본 연구에서는 이들 실험장치를 조합하여 실험에 임하였다.

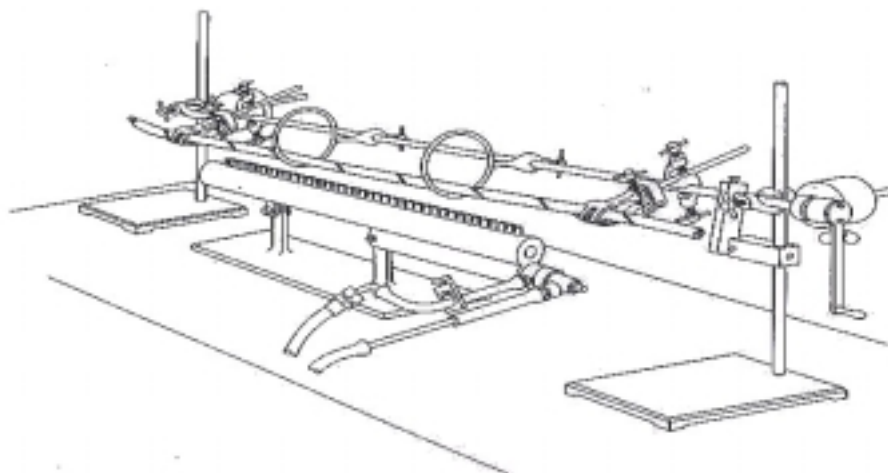


그림 3. 화재실험 장치(IEC 60331과 BS 6387 기준이 동일함)

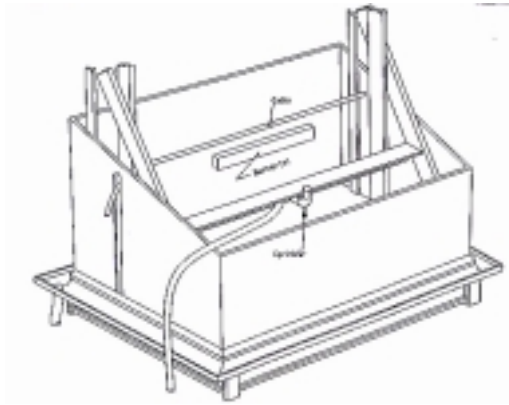


그림 4. 주수(Water Spray)
실험장치(BS 6387)

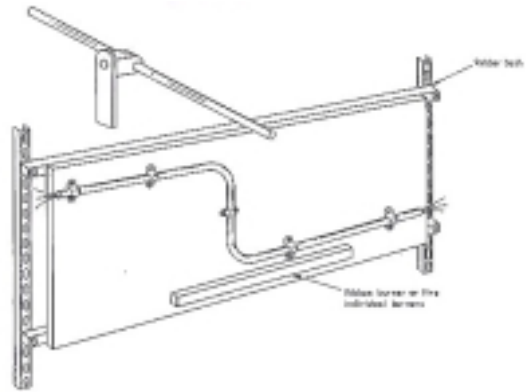


그림 5. 기계적 충격(Mechanical Shock)
실험장치(BS 6387)



그림 6. IEC 60331에 의한
케이블 화재실험 장면



그림 7. BS 6387에 의한
케이블 화재실험장면



그림 8. 접염 15분후 스프링클러에
의한 소화순간 (BS 6387)



그림 9. 접염후 스프링클러에 의한
소화장면(BS 6387)

다. 검토방향

본 기준의 적용목적은 내화케이블인 NFR-8 케이블의 10CFR50, Appendix R, III.G.2에 의한 격리요건 부합여부에 초점이 맞추어져 있다. NFR-8 케이블의 격리요건은 다음 두 가지 측면에서 검토하였다.

- (1) 케이블 화재시 노출된 케이블 심선(Core)의 접촉으로 숏트 발생여부, 즉 화재사고로 이어질 수 있는 케이블의 고장(Failure) 발생여부를 판단한다. 여기서, 고장이란 합선, 지락, 단선, 통전합선을 말한다.
- (2) 케이블이 물리적으로 격리됨이 입증되었음에도 불구하고 화재 시 케이블에 가해지는 열에 의하여 전류량의 변화(즉, 전류의 세기 감소)가 발생하며 이것이 정상작동을 방해할 가능성이 있는지 즉, 전기적 격리여부에 대한 판단이다.

라. 성능요구조건

성능평가는 통전중인 케이블에 Burner를 통해 90분간 화염을 가하고 Burner를 소화한 후 계속해서 15분간 전압을 가한다. 이 기간 중 통전기능이 유지되어야 하며, 도체의 파손(단락으로 인해 전원공급 Lamp가 꺼짐)이 없어야 한다.

마. 시험결과

시험체	인가 전압	시험 회수	시험시간(min)			시험결과 (단락시간)	비고
			접염	접염 + 주수	합계		
EPR/CSP (A사)	600 V	1회	2분56초	-	2분56초	2분56초	접염시간은 90분 예정
		2회	2분47초	-	2분47초	2분47초	
		3회	3분38초	-	3분38초	3분38초	
		4회	2분30초	-	2분30초	2분30초	
EPR/CSP (B사)		1회	3분 8초	-	3분 8초	3분 8초	
		2회	1분25초	-	1분25초	1분25초	
NFR-8 (C사)		1회	15분	15분	30분	이상없음	Failure 발생여부
		2회	15분	15분	30분	이상없음	
		3회	165분	15분	180분	이상없음	
		4회	165분	15분	180분	이상없음	
	5회	15분	15분	30분	이상없음	전기적 격리	

바. 결과분석

(1) 통전 기능

- EPR/CSP 케이블은 국내 가동중인 원전에서 RSP(Remote Shutdown Panel: 원격정지패널) 용으로 사용되고 있는 케이블이다. 그러나, 4분 이내에 모두 숏트가 발생하였다
- 케이블의 사용목적이 화재 시에도 완벽하게 유지될 수 있는가에 대한 건전성 시험에서 NFR-8 케이블은 시험기간 중(최대 180분)중 통전 기능을 상실하지 않았다.
- 또한, 화염을 동반한 주수시험에서도 시험기간 중(최대 180분) 통전기능을 상실하지 않았다.
- 그리고, Rubber Bush에 대한 타격(Mechanical Shock) 시험에서도 통전기능을 상실하지 않았다.

(2) 케이블의 고장(Failure) 발생 여부에 대한 검토

- 15분, 165분의 화재시험에서 NFR-8 케이블은 합선에 의한 숏트 현상이 없었다.
- 30분, 180분간의 화염을 동반한 주수시험에서도 NFR-8 케이블은 합선에 의한 숏트 현상이 없었다.
- 또한, Rubber Bush에 대한 타격(Mechanical Shock) 시험에서도 NFR-8 케이블은 합선에 의한 숏트 현상이 없었다.

상기 실험결과로 케이블 트레이에서 합선의 원인이 되는 도체(연동선)의 노출이 없어 케이블 사이는 물리적으로 잘 격리되고 있음이 입증되었다.

5. 케이블의 전기적 격리여부에 대한 검토

지금까지는 화재구역을 기반으로 하여 케이블의 Wrapping 및 NFR-8 케이블의 사용성에 대한 물리적 격리 측면에서 검토하였다. 그러나 화재상황 하에서는 화염에 의해 많은 에너지가 발생하므로 케이블 외부로부터 케이블 내부의 심선에 에너지가 전파되어 안전정지 관련기기의 작동을 방해할 수 있다는 우려성이 제기되었다. 이를 위해 다음과 같은 검토가 수행되었다.

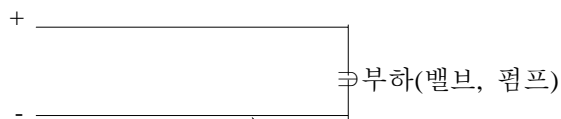
일반적으로 도선의 온도가 높아지면 도체 내부에서 전자와 원자들의 충돌 횟수가 많아지므로 저항이 커진다. $V=IR$ 에서 V 가 일정할 경우, 저항 R 이 커짐에 따라 전류의 세기는 작아진다. 따라서, 정격전류에 의하여 작동되어야 할 안전정지 관련 Pump가 전류량의 감소로 작동되지 못하는 사례가 발생할 수 있다. 이것은 케이블 외부의 화재에 의해 열이 가해졌을 때, 일반적으로는 전류량이 감소된다는 이론에 근거한 것이다.

온도계수(α)는 온도의 증가에 따른 저항의 증감비율이다. 또한, 온도계수는 $\alpha = \frac{1}{R_0} \frac{dR}{dT}$ 로 저항(R)에 반비례한다. 연동선의 온도계수는 $\alpha = 1/(234.5+t)$ 로 계산할 수 있으며, 계산결과는 아래와 같다.

- 상온(20℃)에서 연동선의 온도계수 : $\alpha_{20} = 3.93 \times 10^{-3}$
- 케이블에 접염(650℃)시 연동선의 온도계수 : $\alpha_{650} = 1.13 \times 10^{-3}$

따라서, 케이블에 접염시 즉, 케이블 외부에서의 화재시(650℃) 저항의 증가는 3.5배 ($3.93 \times 10^{-3} / 1.13 \times 10^{-3}$)에 이른다.

그런데,



상온에서의 케이블(연동선)의 저항 : $1.7241 \times 10^{-8} \Omega / M$

상온에서의 케이블(연동선)의 저항은 $1.7241 \times 10^{-8} \Omega / M$ 로서 극히 적은 값으로 무시할 수 있는 값이다. 그 값에 3.5배 증가한 $6.0343 \times 10^{-8} \Omega / M$ 의 값도 결국은 무시할 수 있는 값이다. 따라서, 케이블 사용시(NFR-8 케이블 사용시) 외부의 온도증가에 의한 전기적 결함은 발생하지 않을 것으로 결론지었다.

6. 결론

미. 원자력법 10CFR50, Appendix R, III.G.2에 의한 케이블 격리기준을 적용함에 있어 화재구역별 분석을 통해 다수의 화재구역에서 고가의 Fire Wrapping을 제외할 수 있었다. 그러나, Fire Wrapping이 요구되는 부분에 내화전선인 NFR-8 케이블이 사용될 수 있다면 아마도 더욱 많은 비용을 절감할

수 있을 것으로 생각된다. 내화케이블은 미국, 영국, 독일 등에서는 석유 시추선 등 주로 선박용품으로 사용된 예가 보고되고 있고, 프랑스에서는 철도 차량용으로, 일본에서는 전화용으로 사용된 예가 보고되고 있다. 그러나 유감스럽게도 해외 원전에서 본 내화 전선이 사용된 사례는 보고되지 않고 있다. 본고는 이러한 상황 하에서 내화 전선의 성능실험을 통하여 케이블 격리요건의 면제 가능성을 찾아보고자 수행한 연구결과이다. 결과는 기대한 바대로 바람직한 결과로 도출되었으나, Fire Wrapping을 대신할 내화전선의 사용문제는 많은 비용을 절약할 수 있음에도 불구하고, 원전의 특수성 때문에 혹 있을지도 모를 상황을 신중히 고려하여 결정해야 할 것으로 결론지었다. 그것은, 아직 해외 원전에서 사용사례가 보고되지 않고 있기 때문이다.

참고문헌

1. 10CFR50, Appendix R, Fire Protection Program for Nuclear Power Facilities Operating Prior to Jan 1, 1979
2. British Standard 6387, Specification for Performance Requirements for Cables Required to Maintain Circuit Integrity under Fire Conditions, 1994
3. 10CFR50, Appendix A, Criterion 3, Fire Protection
4. USNRC Standard Review Plan(Branch Technical Position) 9.5-1, Fire Protection Program
5. 10CFR50.48, Fire Protection
6. Appendix A to BTP APCS 9.5-1, Guidelines for Fire Protection for Nuclear Power Plants Docketed Prior to January 1,1979
7. USNRC BTP CMEB 9.5-1, Guidelines for Fire Protection for Nuclear Power Plants
8. IEEE Standard 383-1974, Type Test of Class IE Electric Cables, Field Splices and Connections for Nuclear Power Generating Stations
9. IEC Standard 60331, Tests for Electric Cables under Fire Conditions – Circuit Integrity, 1999
 - Part 11, Apparatus-Fire Alone at a Flame Temperature of at least 750 °C
 - Part 21, Procedures and Requirements- Cables of Rated Voltage up to and Including 0.6/1.0 kV
10. USDOE/NE-0113(REV.1),Energy Reactor Core Protection Evaluation Methodology for Fires at RBMK and VVER Nuclear Power Plants, 1997
11. USNRC, Appendix R to Fire Protection Audit Report for Cooper Nuclear Station, 1989