

원자력발전소 케이블 노출 화재 시 기능상실온도 분석 Cable Functional Failure Temperature Evaluation of Cable Exposed to the Fire of Nuclear Power Plant

임혁순[†] · 배연경 · 지문구

Hyuk-Soon Lim[†] · Yeon Kyoung Bae · Moon-Goo Chi

한수원 중앙연구원

(2011. 9. 19. 접수/2012. 1. 19. 수정/2012. 2. 10. 채택)

요 약

원전 방화지역에서 화재가 발생할 경우 안전정지 케이블은 단락, 접지, 단선 등 전기적 고장으로 케이블에 고장이 발생하여 그 결과로 안전정지계통의 설비와 기기는 안전정지 기능을 상실할 수 있다. 따라서 원자력 발전소 안전정지계통의 설비와 기능은 다중설계, 계열간 독립 및 분리 원칙에 따라 운영되고 있다. 케이블 화재의 경우 기기 오동작과 오지시 또는 잘못된 계측을 유발할 수 있으며 운전원의 상황 판단에 오류를 일으켜 안전정지 기능을 저해할 수 있다. 본 논문에서는 원자력발전소 케이블 화재 조사 및 원인 분석, 케이블 화재온도 및 기능상실 기준 및 국내 원자력발전소에서 사용중인 케이블을 선정하여 노출 화재 시 케이블 기능상실 온도를 분석하여 케이블 안전성을 확인하였다.

ABSTRACT

The fire event occurred in fire proof zone often causes serious electrical problems such as shorts, ground faults, or open circuits in nuclear power plants. These would be directed to the loss of safe shutdown capabilities performed by safety related systems and equipments. The fire event can treat the basic design principle that safety systems should keep their functions with redundancy and independency. In case of a cable fire, operators can not perform their mission properly and can misjudge the situation because of spurious operation, wrong indication or instrument. These would deteriorate the plant capabilities of safety shutdown and make disastrous conditions. In this paper, investigation and cause analysis of cable fire in Nuclear Power Plant, we described the cable fire temperature and functional failure criteria and the cable functional failure temperature evaluation by exposed fire is studied.

Key words : Cable fire, Shorts, Ground fault, Circuit, Safety shutdown, Nuclear power plant

1. 서 론

최근 원전 사업자는 신규원전 건설보다 비용대비 효과 측면에서 현재 운영중인 원자력발전소의 설계수명을 40년에서 60년 또는 80년으로 연장하기 위하여 장기운전을 추진하고 있다. 설계수명 이상으로 원자력발전소를 계속 운전하기 위해서는 전력, 계측 및 제어 케이블이 설계수명 이후 10년 이상 계속 사용하기 위해 케이블의 열화 및 이에 대한 전기화재 등에 대한 케이

블의 건전성이 유지 되어야 한다.¹⁾ 원자력발전소에서 케이블은 원전안전설비의 운전 에너지와 신호를 전달하는 매우 중요한 설비로 정상 운전중 케이블 교체가 어렵기 때문에 열화 관리가 필요하고 열화에 따른 전기화재 발생 시 기기 기능상실 및 오동작으로 원전 안전 정지 기능을 저하 시킬 수 있다.²⁾ 미국의 원전 사업자 경우 원전 케이블 열화에 대한 신뢰성 평가하기 위하여 미국 전력연구소(EPRI) 등에 의뢰하여 화재 시 케이블 기능상실에 대한 관련 연구가 활발히 진행되고 있으나 국내는 연구 개발 초기 단계에 있다.³⁾

본 논문에서는 원전 케이블 화재 조사 및 분석, 케

[†]E-mail: lhs6169@khnp.co.kr

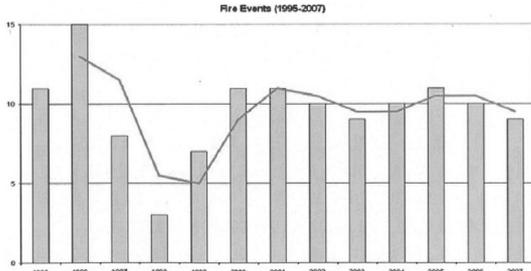


Figure 1. Number of fire events in USA NPP (1995~2007).

Table 1. Case of Fire Events at U.S. NPPs (June 2008)

Cause of Fire	Number of Reported Fire Events	Percent of Total Reported Fire Events
Electrical-related	51	41
Maintenance-related	17	14
Oil-based lubricants or insulation	9	7
Other causes	48	38
Total	125	100

이들 화재온도 및 기능상실 기준, 국내 원자력발전소 내에 설치되어 있는 케이블 특성 및 국내 최초 사용중인 케이블을 선정하여 화재 시 케이블 기능상실을 평가하여 원전 케이블의 안전성을 확인하고자 한다.

2. 원전 케이블 화재조사 및 분석

미국 원자력안전규제위원회에 의하면 Figure 1과 같이 미국원전에서는 매년 약 10건 정도의 화재사고가 발생하는 것으로 조사되었다.⁴⁾

1995년~2007년도 미국원전에서 발생한 화재사고에 대한 원인을 분석한 결과 Table 1과 같이 전체 125건 중 전기관련 원인이 41%, 유지보수 작업 14%, 윤활유와 절연물질 7%, 기타 원인 미상의 사건이 38%를 차지하는 것으로 분석되었다. 국내원전의 경우 발생 사례가 없는 것으로 조사되었다.

3. 노출화재 시 케이블 상실 기준

3.1 케이블 화재로 인한 전기적 기능상실

원전 방화지역의 가연성 물질중 가장 많은 양을 차지하는 것은 케이블 절연물질이며 케이블 대부분은 방화지역에 위치하고 있다. 원전 케이블 연소의 주요 특

징은 연소성, 열적손상, 절연물 물성치, 화염 전파성 등이다. 케이블 화재는 절연물의 연소에 이어 단락, 지락, 단선, 절연저하 등 케이블의 고유한 전기기능이 상실되어 전기설비 정지, 오동작, 오신호 등의 능동형 설비의 고장을 유발한다. 이에 따라 전기적 회로와 설비가 포함된 계통의 고유한 기능이 상실되어 원전의 안전정지 기능 및 안전상태 유지에 영향을 준다.

3.2 노출화재 시 열유속 분석

고온 열기류 또는 고온 가스층의 온도와 방사율을 고려하여 정량적으로 임계 열유속을 계산한다. 전형적인 바닥면 화재(Pool fire)의 경우 화염기둥과 열기류가 상류로 이동하면서 주변의 대상물에 대류와 복사에너지가 전달된다. 열유속은 화재발생 시 고온 열기류 또는 고온가스층의 온도와 방사율을 사용하여 계산한다. 케이블이 화원의 바닥면과 동일한 위치에 있거나 바닥보다 상부에 있는 케이블에 전달되는 열유속은 다음과 같은 관계식(1)으로 계산한다.

$$\dot{q}'' = F_{1 \rightarrow 2} E = F_{1 \rightarrow 2} (\epsilon \sigma T^4) \quad (1)$$

여기서

\dot{q}'' : 열유속[kW/m²]

$F_{1 \rightarrow 2}$: 형상인자

E: 화염표면에서의 평균방사에너지[kW/m²]

ϵ : 방사율

σ : 스테판 볼츠만 상수[kW/m²-K⁴]

T: 화원의 복사온도[K]

3.3 원전 케이블의 기능상실 기준

원전 케이블에 대한 고유특성은 미국 샌디아 국립연구소 연구결과를 바탕으로 화재로 인한 케이블의 전기적 기능상실 판단 기준은 Table 2와 같다.⁴⁾

미국 원자력안전규제위원회와 전력연구소 공동으로 원전의 확률론적 화재 위험성 분석을 위한 방법론에 따르면 실제 화재실험에서 대부분의 케이블은 손상 기준치 온도보다 더 높은 온도에서도 전기적 기능을 유지하였다.⁵⁾

전기적 기능은 케이블의 절연저항을 기준하였으며

Table 2. Damage Criteria for Electric Cable Fire

Cable Type	Temperature Criteria	Radiant Heat Criteria
Thermoplastic Cable	205 (400)	6 kw/m ²
Thermoset Cable	330 (625)	11 kw/m ²

Table 3. Case Sample Tests for Thermal Damage

Cable Insulation Material	Failure Temp. Range (°C)	No of Tested Samples	Recommended Failure Threshold (°C)
XLPO/XLPE	299~388	13	299
EPR	370~400	16	370
Silicone Rubber	396~400	2	396
Kerite FR	372~382	2	372
Polyimide Kapton	399	1	399

100 Ω/100 m 이하로 절연저항이 감소하여 케이블 기능이 상실하는 것으로 케이블 재질에 대한 실험 결과는 Table 3과 같다.⁶⁾

4. 케이블 노출화재 실험 및 고찰

본 연구에서는 국내원전에서 사용되는 케이블 재질 및 특성, THIEF(Thermally-induced electric failure) 모델을 이용한 일정 임계 열속 분석에서 케이블 기능상실 온도분석 및 케이블 화재실험 수행하여 안전성을 분석 하였다.

4.1 국내원전 케이블 분석 및 선정

국내원전 케이블의 절연물질과 재킷물질 대부분 재질은 Figure 2와 같이 열경화성 케이블인 EPR/CSP (Ethylene Propylene Rubber/Chloro Sulfonated Polyethylene) 또는 동등한 EPR/CSM 케이블이 58 % 사용하고 있다. 그 다음으로 EPR/CR(Polychloro Rubber)이 34 %로 사용되고 있다. 케이블 재킷물질은 CR이 가장 많이 사용되고 있으며 그 다음으로는 CSPE(Chloro-sulfonated polyethylene)가 사용되었다. 그 밖의 재킷물질로 PVC와 Neoprene을 사용하였다. 케이블 절연물질

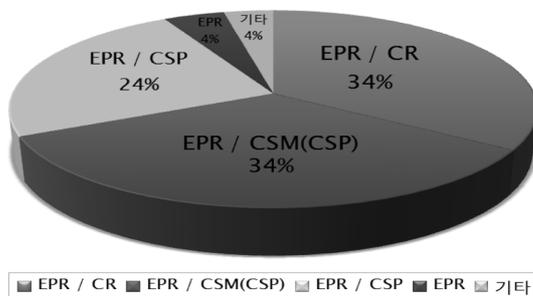


Figure 2. Ratio of cable installmt for A plants.

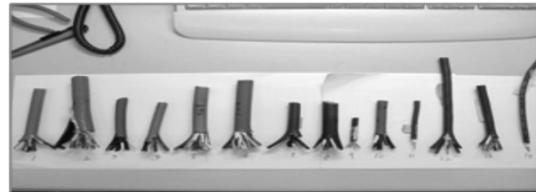


Figure 3. Koreans NPPs' sample cables.

은 열경화성 물질인 EPR, XLPE(Cross-linked Polyethylene)를 사용하였으며 일부는 열가소성물질인 PVC를 사용하였다.

국내 표준 원전인 울진 A, B호기와 신고리 A, B 원전에서 사용중인 케이블 샘플 14종을 확보 하였다.

Figure 3은 국내원전에서 사용중인 케이블 샘플 14종에 대한 그림이다. 각 케이블에 대하여 외경, 총면적, 재킷 두께 등 상세한 규격을 측정하고 단위질량을 분석하였다. Table 4와 같이 케이블 외경은 6~7 mm, 10~13 mm, 16~19 mm의 등급을 가지며 재킷의 두께는 1.5~3.1 mm이다. 도체 단위질량은 0.06~0.58 kg/m이다.

4.2 THIEF 모델을 이용한 일정 임계열속에서 기능상실 온도 분석

THIEF는 실제 화재실험 결과를 화재모델링에 모사한 프로그램이다. 이 프로그램은 FDS(Fire Dynamics

Table 4. Detail Specification for A Plant Sample Cables

No	외경	총면적	재킷두께	단위질량
	[mm]	[mm ²]	[mm]	[kg/m]
1	13.233	137.463	1.673	0.265
2	19.250	209.892	1.688	0.576
3	12.379	120.293	1.686	0.162
4	11.621	106.012	1.908	0.178
5	13.269	138.212	2.496	0.224
6	16.375	201.490	1.931	0.473
7	18.238	261.110	1.950	0.606
8	18.156	258.766	2.272	0.547
9	7.219	40.909	1.931	0.096
10	11.731	108.029	1.950	0.182
11	6.188	30.059	1.910	0.060
12	10.625	66.610	2.272	0.156
13	10.621	88.552	1.511	0.183
14	6.292	31.076	3.110	0.063

Table 5. Cable Temperature of Korean Sample Cable by Using THIEF Model

No	외경 (Φ)	총면적 (A)	Jacket 두께	300초 경과온도	570초 경과온도
	[mm]	[mm ²]	[mm]	[°C]	[°C]
1	13.233	137.463	1.673	261	373
2	19.250	209.892	1.688	204	311
3	12.379	120.293	1.686	319	403
4	11.621	106.012	1.908	301	398
5	13.269	138.212	2.496	292	391
6	16.375	201.490	1.931	191	310
7	18.238	261.110	1.950	175	287
8	18.156	258.766	2.272	174	294
9	7.219	40.909	1.931	351	414
10	11.731	108.029	1.950	313	401
11	6.188	30.059	1.910	396	420
12	10.625	66.610	2.272	329	407
13	10.621	88.552	1.511	68	117
14	6.292	31.076	3.110	393	420

Simulator)의 서버모델로서 FDS 사용자는 대상 케이블의 물성치와 위치정보를 입력하면 분석할 수 있다. 분석하고자 하는 케이블 물성치 정보를 다음과 같이 입력한다.

```
&PROP ID='PT-01 cable'
QUANTITY='CABLE TEMPERATURE'
CABLE_MASS_PER_LENGTH=0.310
CABLE_DIAMETER=0.0163
CABLE_JACKET_THICKNESS=0.00152/
&DEVC ID='PT-01', PROP_ID='PT-01 cable',
XYZ=..., ORIENTATION =.../
```

상기에서 설명한 THIEF 모델을 이용하여 국내원전의 열경화성 및 열가소성 케이블 특성 분석 결과는 Table 5와 같다.⁷⁾

4.3 실험 및 고찰

4.3.1 실험방법

IRMS(Insulation Resistance Measuring System)는 케이블 화재 시 표면의 온도가 상승하여 절연물질이 변형되어 도체와 도체 또는 도체가 케이블 트레이 등과 접촉할 경우 절연저항이 감소하는 현상을 측정하는 것

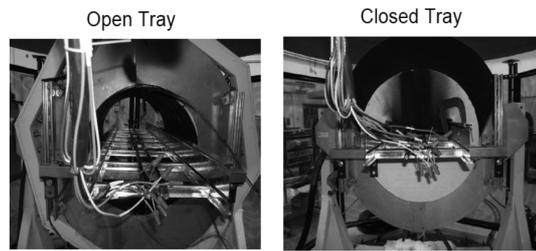


Figure 4. Open and closed view of Penlight test equipment.

이다. Figure 4와 같이 Penlight라는 원통형 복사열 가열장치를 사용하여 노출 화재 환경을 만들어 주고 가열에 의한 케이블 기능상실 초기온도를 측정한다. 먼저 실험용 케이블은 동일한 종류와 사양의 케이블을 두 개 인접하게 설치한다. 한 개의 케이블(Temperature Monitored Cable)은 열전대에 의해 온도를 측정하며 케이블 표면, 재킷 하부, 케이블 중심부에 측정용 케이블을 설치한 다음 각각의 온도를 측정한다. 이와 동시에 다른 케이블(Electrically Monitored Cable)은 절연저항을 측정하도록 배치한다. 만일 케이블 화재로 접지 저항이 1,000 Ω 이하로 떨어질 경우 전기적 고장이 난 것으로 판단하고 그 때의 시간과 열전대 온도를 측정하고 기능상실 온도 데이터를 취득한다.⁸⁾

4.3.2 결과 및 고찰

샘플 케이블 14종에서 계측용, 제어용 및 전력용 케이블을 선정하여 PT-01~012 케이블을 Penlight 슈라우드 온도초기 실내온도 250 °C에서 475 °C까지 증가시켜 케이블을 노출 화재 상태로 유지하였다. Figure 5는 PT-01에 대한 결과로 2,906초에서 케이블 단락이 발생하여 절연저항이 1,000 Ω 이하로 떨어지고 전기적 기능상실이 발생하였다.

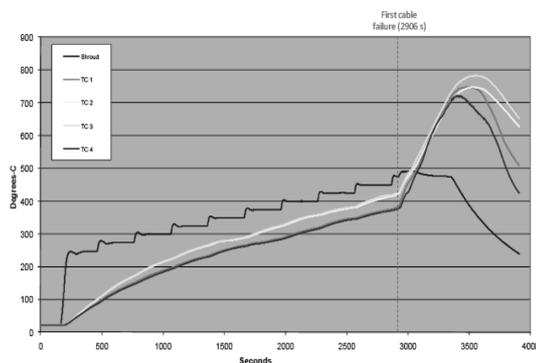


Figure 5. Penlight and cable temperatures cable test #1.

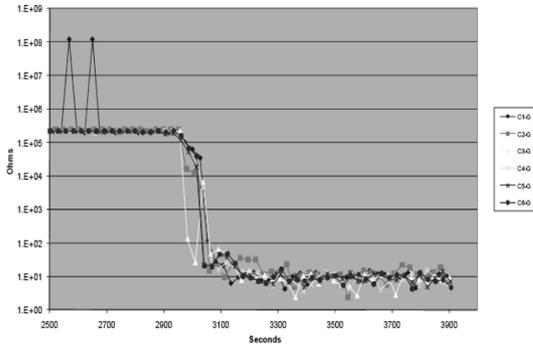


Figure 6. Average conductor to ground resistances cable test #1.

Figure 6는 PT-01 실험결과로 케이블 기능상실 온도를 나타낸 것이다. 분석결과 Table 6과 같이 케이블 노출 화재 시 기능상실 케이블 온도는 최저 377 °C에서, 최고 545 °C에서 발생하였으며 평균 449 °C에서 기능이 상실되었다.

THIEF 코드로 분석한 온도 및 미국원전 케이블의 기능상실(400~530 °C) 온도와 비교결과 케이블 기능상실 온도가 유사한 것으로 분석되었다. 또한, 일부 국내 원전 전원 케이블 경우 기능상실온도가 545 °C로 화재 시 높은 내화성능과 우수한 특성을 가지고 있는 것으로 분석되었다. Table 6은 계측용, 제어용 및 전력용 케이블 대한 기능상실 온도 실험결과이다.

5. 결 론

국외 원전의 케이블 화재 발생건수 조사결과 매년 약 10건 내외의 화재사고 발생하였으며 그중 전기관련 원인이 약 41 %를 차지하는 것으로 분석되었다. 국내 원자력발전소 케이블 안전성과 신뢰성을 확보하기 위해 사용중인 케이블 선정하여 실험결과 케이블 노출 화재시 평균 449 °C, 임계열속 12.3 kw/m²에서 케이블 기능이 상실되었으며 전기적 오동작이 발생하는 것으로 분석되었다.

국내 원전 케이블에 대한 노출화재 시 기능상실 분석 결과 미국 원전 케이블의 기능상실 및 시간에 따른 특성과 유사하였으며, 일부 국내 원전 케이블의 경우 화재시 높은 내화성능과 우수한 특성을 가지고 있는 것으로 분석되었다. 본 연구 결과는 향후 국내 모든 원전에 적용할 수 있는 기반 및 기초 자료로 활용될 것이다.

참고문헌

1. 한국수력원자력(주), 울진3, 4호기 원자력발전소 주기적안전성평가, 전력계통(2010).
2. 한국수력원자력(주), 원자력계통기초(II), 발전소 전력설비, pp.257-259(2005).
3. 한국수력원자력(주), 한국전력, 원자력안전기술원, 한국전력기술주식회사, 화재방호 컨소시엄, Technical Review Report of PRISME Experimental Results (2008).

Table 6. The Result Summary from the IRMS Diagnostic Tests

ID	Type	Penlight Shroud Temp. (°C) Setting Prior to Failure	Corresponding Heat Flux (kW/m ²)	Time of 1st Failure after on	Cable Temp. at Failure (°C)
1	Instru.	475	14.5	2906	421
3	Instru.	450	12.6	2501	435
5	Control	450	12.6	2452	404
8	Control	375	8.1	1859	411
10	Power	450	12.6	2593	525
13	Power	450	12.6	2548	475
1	Instru.	450	12.6	639	468
3	Instru.	450	12.6	485	377
5	Control	450	12.6	790	492
8	Control	450	12.6	637	442
10	Power	440	11.9	735	545
13	Power	450	12.6	485	398
평균 온도(°C)					449

4. Technical Review Report of CAROLFIRE Experimental Results, KHNP/2008-0500-단-0002(2008).
5. EPRI/NRC-RES, Fire PRA Methodology for Nuclear Power Facilities(2005).
6. KAERI/TS-238/2010 & KEPRI/TM .F02 .P2010 .029(10전력연-단0297), “화재로 인한 안전정지 영향 회로분석 지침”(2010).
7. 임혁순, 김두현, 원전 케이블 화재 열속평가 및 열화 진단방법에 관한 연구, 한국안전학회지, Vol.26, No.2 pp.20-25(2011).
8. U.S. NRC. Cable Response to Live Fire, (CAROLFIRE), App.B “The SANDIA Insulation Resistance Measuring System(IRMS), NUREG/CR-6931, Vol.1, SAND(2007).