

원전 노출 화재시 케이블 기능상실 온도에 관한 연구

김두현^{*} · 임혁순^{*}

충북대학교 안전공학과 · *한국수력원자력(주) 한수원중앙연구원
(2011. 6. 4. 접수 / 2011. 9. 30. 채택)

A Study on Cable Functional Failure Temperature by Exposed Fire in Nuclear Power Plants

Doo-Hyun Kim^{*} · Hyuk-Soon Lim^{*}

Department of Safety Engineering, Chungbuk National University

*Central Research Institute of Korea Hydro & Nuclear Power Co., Ltd

(Received June 4, 2011 / Accepted September 30, 2011)

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, the cables of the representative nuclear power plant in Korea is selected and the cable functional failure temperature by exposed fire using Cable Response to Live Fire(CAROLFIRE) is studied. It is expected that the results are very useful to know the cable failure temperature by exposed fire. We confirmed the safety and integrity of the cable by exposed fire and those results will use the based data of cable exposed fire characteristics.

Key Words : cable fire, electrical problem, open circuit, CAROLFIRE, cable failure, nuclear power plant

1. 서론

원자력발전소 케이블의 경년 열화시 방화지역에서 화재가 발생할 경우 안전정지 케이블의 단락, 접지, 단선 등으로 인한 전기적 고장으로 안전정지계통 설비 및 정지 기능이 상실될 수 있다¹⁾.

원자력발전소 케이블은 발전소 안전설비의 전력 및 신호를 전달하는 매우 중요한 설비이다²⁾. 발전소 정상 운전 중 케이블 교체가 어렵기 때문에 열화에 대한 관리가 필요하고 열화에 의한 전기화재 발생시 기기 기능상실 및 오동작으로 원자로 안전정지 기능을 저하시킬 수 있다.

미국 원전 사업자 경우 원전 노출 화재시 케이블에 대한 신뢰성을 확보하기 위하여 미국 전력연구소중심으로 화재시 케이블 기능상실에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으나 국내 경우는 연구 초

기단계에 있다. 따라서 국내 원자력발전소에서 사용중인 케이블에 대한 노출 화재시 케이블 신뢰성 평가에 대한 연구가 필요하다³⁾. 본 논문에서는 원전 방화지역에서 케이블 노출 화재시 케이블 기능상실 및 전기적 고장에 대한 화재 실험 및 평가를 통하여 원전 케이블의 안전성을 확인하고자 한다.

2. 실험 케이블 선정 및 방법

노출 화재 발생시 케이블의 전기적 기능 상실을 평가하기 위하여 국내원전에 사용중인 케이블, 절연물질의 종류 및 특성 등을 조사하여 실험 케이블을 선정하였다. 본 실험에서는 케이블 화재에 대한 기능상실 초기 온도 및 전기적 기능상실의 객관적 평가를 위해 CAROLFIRE(Cable Response to Live Fire)를 이용하여 실험을 수행 하였다⁴⁾.

^{*} To whom correspondence should be addressed.
dhk@chungbuk.ac.kr

2.1. 실험 케이블

본 실험에서 사용된 원자력발전소 계기용, 제어용, 전력용 케이블의 재질은 EPR(Ethylene Propylene Rubber)/CSP(Chloro Sulfonated Polyethylene), EPR/CR(Polychloro Rubber)이고, 재킷은 EPR로 절연되어 있으며 CSP, CR으로 구성되어 있다. Table 1에 실험 케이블을 정리하였으며, 형태는 Fig. 1과 같다^{5,6)}.

선정된 케이블 6종을 Table 2와 같이 실험 Matrix를 구성하여 실험을 수행하였다.

2.2. 실험방법

2.2.1. IRMS 이용한 케이블 기능상실 온도분석

IRMS(Insulation Resistance Measuring System)는 케이블 화재 발생시 표면의 온도가 상승하여 절연 물질이 변형되어 도체와 도체 또는 도체가 케이블 트레이 등과 접촉할 경우 절연저항이 감소하는 현상을 측정한다. Fig 2와 같이 Penlight라는 원통형 복사열 가열장치를 사용하여 노출 화재상태를 만들어 주고 가열에 의한 케이블 기능상실 초기온도 측정하였다.

Table 1. Cable Test List

ID	Insulation/Jacket	#of conductors	Size	Sample length	Cable type
1	EPR/CSP	6	16AWG ¹⁾	15m	Instrument
3	EPR/CSP	2	16AWG	12m	Instrument
5	EPR/CSP	9	14AWG	12m	Control
8	EPR/CR	9	14AWG	12m	Control
10	EPR/CSP	2	16AWG	12m	Power
13	EPR/CSP	3	14AWG	12m	Power

※ ¹⁾ AWG : American Wire Gauge

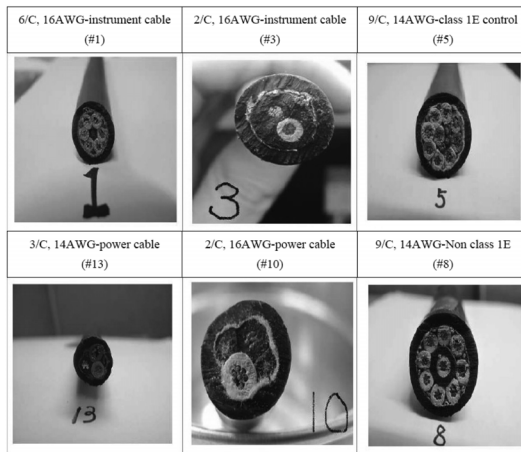


Fig. 1. Cross-sectional views of the test cables.

Table 2. Cable Penlight test matrix

ID	Insulation/Jacket	Type	Electrical Diagnostics	
			IRMS	SCDU
1	EPR/CSP	Instrument	○	
3	EPR/CSP	Instrument	○	
5	EPR/CSP	Control	○	
8	EPR/CR	Control	○	
10	EPR/CSP	Power	○	
13	EPR/CSP	Power	○	
1	EPR/CSP	Instrument	○	
3	EPR/CSP	Instrument	○	
5	EPR/CSP	Control	○	
8	EPR/CR	Control	○	
10	EPR/CSP	Power	○	
13	EPR/CSP	Power	○	
1	EPR/CSP	Instrument		○
1	EPR/CSP	Instrument		○
1	EPR/CSP	Instrument		○
5	EPR/CSP	Control		○
5	EPR/CSP	Control		○
8	EPR/CR	Control		○
8	EPR/CR	Control		○
13	EPR/CSP	Power		○
13	EPR/CSP	Power		○
3	EPR/CSP	Instrument		○
3	EPR/CSP	Instrument		○
10	EPR/CSP	Power		○
10	EPR/CSP	Power		○

먼저 실험용 케이블은 동일한 종류와 사양의 케이블을 두 개 인접하게 설치한 후 열전대에 의해 온도를 측정하며 케이블 표면, 재킷 하부, 케이블 중심부에 Temperature monitored cable을 설치한 다음 각각의 온도를 측정하였다. 이와 동시에 Electrically monitored cable은 절연저항을 측정하도록 배치하였다. 만일 케이블 화재로 접지저항이 1,000 Ω 이하로 떨어질 경우 전기적 고장이 난 것으로 판단하고 그 때의 시간과 열전대 온도를 측정하고 기능상실 온도 데이터를 취득하였다⁷⁾.

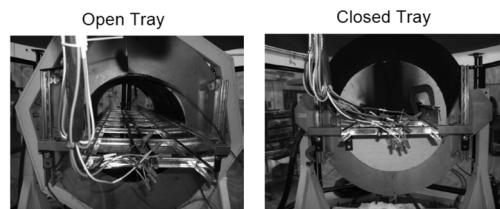


Fig. 2. Open and closed view of Penlight test equipment.

2.2.2. SCDU 이용한 전기적 기능상실 분석

SCDU(Surrogate circuit diagnostic units) 실험 장치는 케이블 도체간 단락, 접지, 단선에 의한 전기적 고장을 분석한다. Fig. 3과 같이 케이블에 번호를 명기한 다음 케이블의 전기적 고장시 전원 측 도체와 부하 측 도체간의 고장을 측정하였다. 전원 측 도체의 단락으로 원하지 않는 부하 도체에 전원이 공급될 경우 DEVICE 1, 2, 3가 동작하여 2 [Targets]의 부하 등의 오동작을 유발하거나 오 신호를 제공하는 전기적 고장 모드를 분석하였다^{8,9)}.

- 1 [Sources] : 전력이 공급되는 도체
- 2 [Targets] : 저항 장치, 램프, 계전기를 이용하여 케이블의 이상 여부를 판단
- 3 [Grounds] : SCDU를 접지함(실드가 존재할 경우 실드에 접지)

2.3. 원전 케이블의 기능상실 기준

원전에서 사용중인 열가소성(Thermoplastic) 및 열경화성(Thermoset) 케이블 기능상실 온도 기준은 Table 3에 정리하였다⁴⁾.

또한, 케이블의 절연저항을 기준으로 100 Ω 이하로 절연저항이 감소될 경우 케이블의 전기적 기능이 상실하는 것으로 기준은 Table 4에 정리하였다⁴⁾.

Table 3. Damage criteria for electric cable fire

Cable type	Temperature criteria	Radiant heat criteria
Thermoplastic cable	205 °C(400 °F)	6 kW/m ²
Thermoset cable	330 °C(625 °F)	11 kW/m ²

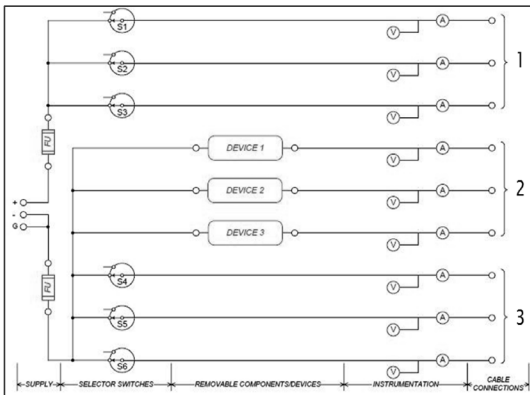


Fig. 3. SCDU test(source, target, and ground cables).

Table 4. Case sample tests for thermal damage

Cable insulation material	Failure temp. range(°C)	No of tested samples	Recommended failure threshold
XLPO/ XLPE ¹⁾	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

※ ¹⁾ XLPO : Cross-linked Polyolefin, XLPE : Cross-linked Polyethylen

3. 결과 및 고찰

Penlight 실험장치의 원통형 외곽을 형성하는 슈라우드 표면을 일정한 온도로 375~475°C까지 가열한 후 케이블 노출 화재 상태에서 실험을 수행하였으며 다음과 같은 결과를 얻었다.

3.1. 케이블 기능상실 거동

Fig 4와 같이 Penlight 초기온도 250°C에서 케이블의 전기적 기능상실을 일어날 때 까지 매 5분마다 25°C로 증가시켰다. 케이블 표면온도 421°C, 열속 14.5 kW/m²에서 케이블의 전기적 성능 고장이 2,906초에서 발생하였다. 고장과 함께 케이블은 점화 되었으며 점화 후 열 반응으로 온도가 급격히 상승하였다.

3.2. 케이블 전기적 기능상실 거동

Fig 5와 같이 Penlight 온도 450°C, 816초에서 첫 번째 케이블 기능 상실이 발생하였다. S2에 의해 Hot shot이 발생되어 24초 동안 지속되고 케이블 온도 451°C, 열속 12.6 kW/m²에서 T6이 오신호가

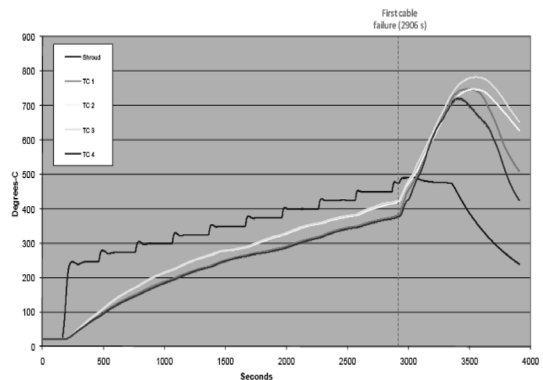


Fig. 4. Penlight and Cable Temperatures Cable Test #1.

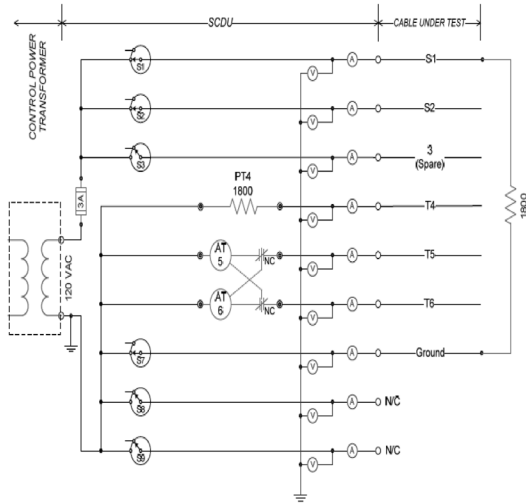


Fig. 5. Cable conductor connections to SCDU during Test #13.

작동하였다. 첫 번째 케이블이 상실된 후 내부 케이블 상호간의 단락에 의한 오동작이 되어 151초 경과 후 퓨즈가 용융되었다. 과전류가 유발되어 회로 보호용 퓨즈를 트립시켰다. 회로 T6번은 처음 고장모드로서 Hot shot가 되고 오동작이 되었다. 잠시 후 회로 T5, T4번 케이블 고장으로 오동작이 되었다. 이후 점진적인 고장을 일으켜 최종적으로 퓨즈가 용융되었다.

Fig 6과 7은 퓨즈가 용융되어 케이블 상호간 단락으로 일시적 전류의 흐름과 전압이 상승하는 것을 감지하여 결과를 나타내었다.

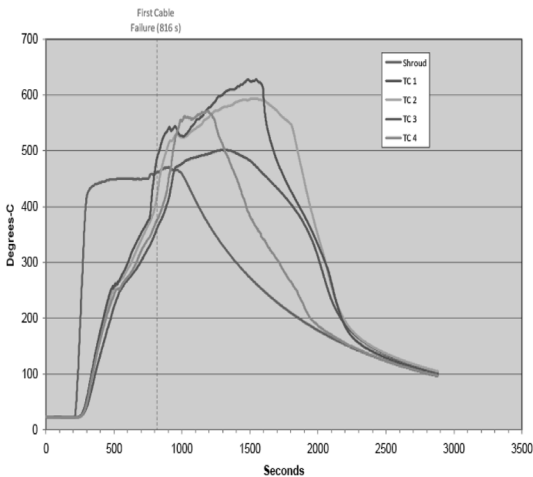


Fig. 6. Penlight Shroud and Cable Temperatures Test #13.

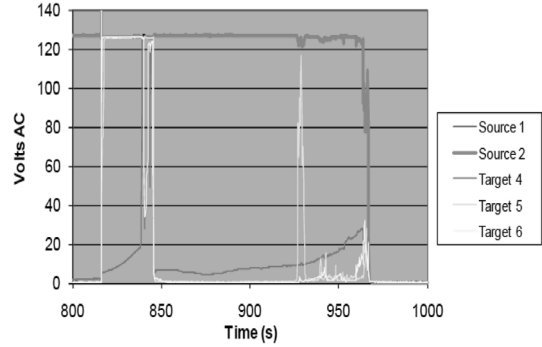


Fig. 7. Source and Target Voltage Response Cable Test #13.

3.3. 실험고찰

원자력발전소에서 사용중인 케이블에 대하여 실험을 25회 수행하였다. Table 5, 6과 같이 원자력발전소 케이블 노출 화재시 기능상실 온도는 최초 377 °C에서, 평균 461 °C에서 기능이 상실되었다.

전기적 오동작은 451 °C, 임계열속 12.6 kW/m², 1 초~56초 사이에서 발생하였다. 종합적 분석결과, 미국 원전 케이블의 기능상실 온도(400~530 °C)와 유사한 것으로 분석되었으며 일부 국내 케이블 경우 화재시 높은 내화성능과 우수한 특성을 가지고 있는 것으로 분석되었다.

Table 5. Cable test failure temperature summary

ID	Minimum cable failure temp.(°C)	Average cable temp. at failure(°C)
1	421	491
3	377	412
5	404	451
8	411	424
10	525	553
13	398	437

Table 6. Cable test spurious actuations summary

ID	Length of 1st Spurious Actuation(s)	Time period between 1st Spurious Actuation to Fuse Clear(s)
1	24	151
1	1	52
1	9	29
5	12	12
13	37	75
13	10	54
3	56	107
3	39	39

4. 결론

원자력발전소 케이블 안전성과 신뢰성을 확보하기 위해 국내 원자력발전소에서 사용중인 케이블을 검토한 후 6종을 선정하여 실험을 수행하였다. 실험결과 케이블 노출 화재시 평균 461℃에서 케이블 기능이 상실되고, 전기적 오동작은 케이블 온도 451℃, 임계열속 12.6 kW/m²에서 상실되는 것으로 분석되었다.

종합적으로 분석결과 국내 원전 케이블 특성이 미국 원전 케이블의 기능상실 및 시간에 따른 특성이 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) 한수원, 울진3·4호기 원자력발전소 주기적 안전성평가, 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.
- 4) Technical Review Report of CAROLFIRE Experimental Results, KHNP/2008-0500-단-0002, 2008.
- 5) 임혁순, 김두현, 원전 케이블 화재 열속평가 및 열화진단방법에 관한 연구, 한국안전학회지, 제25권, 제2호, 2010.
- 6) 한수원, EPRI Power Cable Aging Management Training 교재, 2010.
- 7) U.S. NRC, Cable Response to Live Fire, (CAROLFIRE), App. B., “The SANDIA Insulation Resistance Measuring System(IRMS)”, NUREG /CR-6931, Vol. 1, SAND 2007-600/V1
- 8) U.S. NRC, Cable Response to Live Fire, (CAROLFIRE), App. C., “Surrogate Circuit Diagnostic Units (SCDU)”, NUREG/CR-6931, Vol. 1, SAND 2007-600/V1
- 9) KAERI/TS-238/2010 & KEPRI/TM.F02.P2010.029 (10전력연-단0297) “화재로 인한 안전정지 영향 회로분석 지침”, 2010.