

원전 케이블 화재 열속평가 및 열화 진단방법에 관한 연구

임혁순[†] · 김두현^{*}

원자력발전기술원 · ^{*}충북대학교 안전공학과

(2011. 1. 4. 접수 / 2011. 4. 5. 채택)

A Study on Heat-Flux Evaluation for Cable Fire Including Diagnostic Methodology for Degradation in Nuclear Power Plants

Hyuk-Soon Lim[†] · Doo-Hyun Kim^{*}

Reliability Engineering Team, Nuclear Engineering & Technology Institute

^{*}Department of Safety Engineering, Chungbuk National University

(Received January 4, 2011 / Accepted April 5, 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 multi-core 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 characteristic of cable fire is investigated and the heat-flux evaluation for cable fire is studied. Moreover, a diagnostic methodology for degraded cable in nuclear power plants is presented.

Key Words : cable fire, ground fault, conductor, heat flux, circuit, nuclear power plant

1. 서론

최근 원전 사업자는 신규원전 건설보다 비용대비 효과 측면에서 현재 운영중인 원자력발전소의 설계수명을 40년에서 60년 또는 80년으로 연장하기 위하여 장기운전(LTO : Long term operation)을 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 케이블의 건전성이 유지 되어야 한다¹⁾.

원자력발전소에서 케이블은 원전 안전설비의 운전 에너지와 신호를 전달하는 매우 중요한 설비이다. 원자력발전소 정상 운전중 케이블 교체가 어렵기 때문에 열화에 대한 관리가 필요하고 열화에 따른 전기화재 발생시 기기 기능상실 및 오동작으로 원전 안전정지 기능을 저하 시킬 수 있다. 미국의

외 원전 사업자 경우 원전 케이블 열화에 대한 신뢰성 평가하기 위하여 미국 전력연구소(EPRI) 등에 의뢰하여 케이블 열화에 대한 관련 연구가 활발히 진행되고 있으나 국내는 연구 개발 초기 단계에 있다³⁾.

본 논문에서는 원전 케이블 화재 조사 및 분석, 케이블 화재온도 및 시간특성, 국내 원자력발전소 내에 설치되어 있는 케이블 특성 및 국내 최초 운전 중 고압케이블의 부분방전 진단 및 평가를 수행하여 원전 케이블의 안전성 확보에 기여하고자 한다.

2. 원전 케이블 화재조사 및 분석

미국 원자력안전규제위원회(NRC)에 의하면 Fig. 1과 같이 미국원전에서 매년 약 10건 정도의 화재 사고가 발생하였다.

미국원전에서 발생한 화재사고에 대한 원인을 분석한 결과 Table 1과 같이 전체 125건 중 전기관련 원인이 41%, 유지보수 작업이 14%, 윤활유와 절연

[†] To whom correspondence should be addressed.
lhs6169@khnp.co.kr

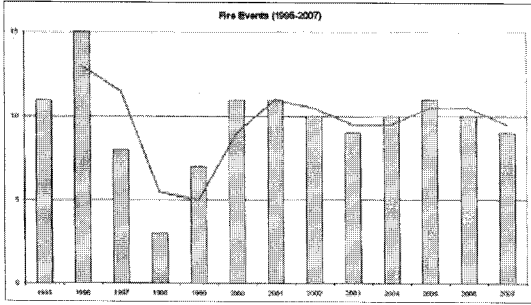


Fig. 1. Number of fire events in USA NPP(1995~2007).

Table 1. Case of fire events at U.S. NPPs(June 2008)

Information on report causes of fires at nuclear units from January 1995 through December 2007		
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

Source : GIAO analysis of NRC data

물질이 7%, 기타 원인 또는 원인 미상의 사건이 38%를 차지하는 것으로 분석되었다. 국내원전의 경우 발생 사례가 없는 것으로 조사되었다.

3. 케이블 화재온도 및 시간특성

3.1. 케이블 화재로 인한 전기적 기능상실

원전 방화지역의 가연성 물질중 가장 많은 양을 차지하는 것이 케이블 절연물질이며 케이블 대부분은 방화지역에 위치하고 있다. Fig. 2와 같이 원전 케이블 연소의 주요 특징은 연소성, 열적손상, 절연물 물성치, 화염 전파성 등이다. 케이블 화재는 절연물의 연소의 이어 단락, 지락, 단선, 절연저하

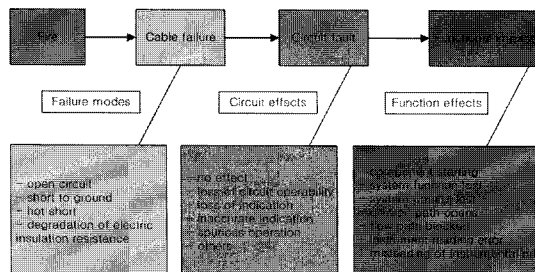


Fig. 2. Cable fire effects(excerpted from NUREG/CR-6834).

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 준다²⁾.

3.2. 케이블 기능상실 점화시간

전력케이블에 연소가 일어나기 위해서는 가연성 물질, 점화원, 산소 등 가연성가스가 존재하여야 하며 연소가 지속되기 위해서는 연료의 보유 에너지가 최소 임계에너지 이상 유지되어야 한다. 그러나 이러한 구비조건에서 반드시 연소가 일어나는 것은 아니다. 가연성물질의 종류와 점화원, 산소 농도, 잉여에너지에 따라 점화 여부가 결정되며 점화시간도 변동된다. 가연성물질에서 발화가 일어나기 위해서는 점화원에 의한 인화점(Flash point), 점화원 없이 자연적으로 발화가 될 경우 자연발화점(AIT : Auto-ignition temperature) 이상이여야 한다. 액체와 고체 연료 이외 기체연료는 확산(Diffusion) 또는 예혼합(Pre-mixture) 연소가 일어난다.

케이블을 포함한 고체연료의 점화시간은 임계열유속(CHF ; Critical heat flux)과 열적반응계수(TRP ; Thermal response parameter)을 고려하여 점화시간은 Janssens 관계식에 의하여 계산할 수 있다.

$$t_{ig} = 0.563 \left[\frac{kpc_p}{h_{ig}^2} \right] \left[\frac{\dot{q}_e'''}{CHF} - 1 \right] \quad (1)$$

여기서 t_{ig} : 연료의 점화시간[sec]

kpc_p : 물질의 열관성(thermal inertia) [$\text{kJ}^2/\text{m}^4 \cdot \text{sec} \cdot \text{K}^2$]

h_{ig} : 점화시 열전달계수 [$\text{kW}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$]

\dot{q}_e''' : 외부에서 연료 표면에 가해진 열유속 [kW/m^2]

CHF : 임계열유속 [kW/m^2]

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.

Table 2. 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

Table 3. Case sample tests for thermal damage

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

미국 원자력안전규제위원회와 전력연구소(EPRI) 공동으로 원전의 확률론적 화재 위험성 분석을 위한 방법론 NUREG/CR-6850에 따르면 실제 화재실험에서 대부분의 케이블은 손상 기준치 온도보다 높은 온도에서도 전기적 기능을 유지하였다³⁾.

전기적 기능은 케이블의 절연저항을 기준하였으며 100Ω/100 m 이하로 절연저항이 감소하여 케이블 기능이 상실하는 것으로 가정하였으며 케이블 재질에 대한 실험 결과는 Table 3과 같다.

4. 국내원전 케이블 특성 및 신뢰성 향상방안

본 연구에서는 국내원전에서 사용되는 케이블 재질 및 특성, THIEF(Thermally-induced electric failure) 모델을 이용한 일정 임계 열속 분석, 케이블 기능 상실 온도 및 신뢰도 향상방안에 대하여 연구를 수행하였다.

4.1. 국내원전의 전력 케이블 재질 및 특성

국내 원전에서 사용되는 케이블을 조사하고 데이터를 분석하였다. 원자력발전소에서 사용되는 케이블은 Fig. 3과 같이 케이블 재킷(Jacket), 절연물질(Insulation), 충전물질(Filler), 도체(Conductor), Drain, Wire, 피막으로 구성되어 있다.

케이블 재킷과 절연물질이 모두 열경화성 물질로 이루어져 있는 케이블은 열경화성 케이블(ther-

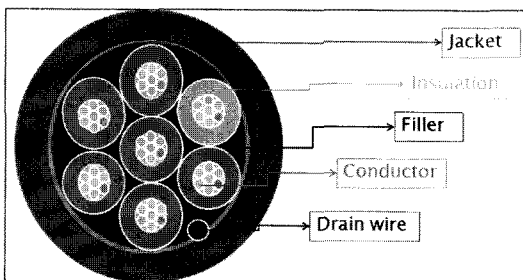


Fig. 3. Electrical cable construction and configuration.

Table 4. Case sample tests for thermal damage

케이블 재질종류	특성
FR-XLPE : flame retardant cross-linked polyethylene	열경화성
XLPE : cross-linked polyethylene	열경화성
CSPE : chloro-sulfonated polyethylene	열경화성
EPR : Ethylene propylene rubber	열경화성
CPE : Chlorinated-Polyethylene	열경화성
XLPO : cross-linked polyolefin	열경화성
CSM(CSP) : cross-linked chloro-sulfonated polyethylene	열경화성
KAPTON	열경화성
Polyamide	열경화성
PE : polyethylene	열가소성
POLYETHYLE	열가소성
Tefzel	열가소성
CR : polychloro rubber	열가소성
PVC : polyvinyl chloride	열가소성

moset cable)로, 재킷과 절연물질 모두 열가소성 물질로 이루어진 경우 열가소성 케이블(thermoplastic)이라고 한다.

Table 4와 같이 국내 원전 발전소에서 사용되는 대부분의 케이블은 안전등급 기기와 관련된 케이블 재질은 절연재 및 재킷 물질 모두가 열경화성 재질로 이루어졌고, 비 안전등급 관련 기기들 일부의 절연재는 열경화성이고 재킷은 열가소성, 일부는 절연재와 재킷 모두가 열가소성인 재질로 사용하고 있다.

4.2. 국내원전 케이블 분석 및 선정

국내원전 케이블의 절연물질과 재킷물질 대부분 재질은 열경화성 케이블인 EPR/CSP 또는 동등한 EPR/CSM 케이블이 58% 사용하고 있다. 그 다음으로 EPR/CR이 34%로 사용되고 있다.

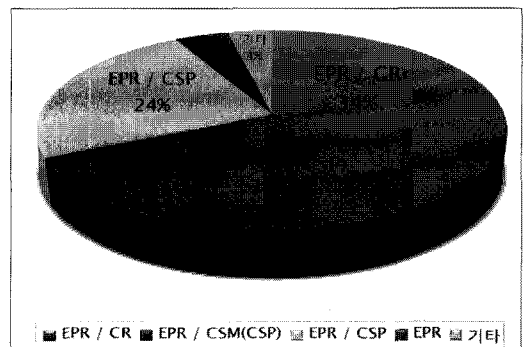


Fig. 4. Ratio of cable instalment for A plants.

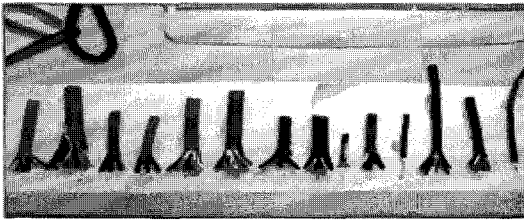


Fig. 5. Koreans NPPs' sample cables.

케이블 재킷물질은 CR(polychloro rubber)이 가장 많이 사용되고 있으며 그 다음으로는 CSPE(Chloro-sulfonated polyethylene)가 사용되었다. 그 밖의 재킷 물질로 PVC와 Neoprene을 사용하였다. 케이블 절연물질은 열경화성 물질인 EPR, XLPE를 사용하였으며 일부는 열가소성물질인 PVC를 사용하였다.

국내 표준원전인 울진 A,B호기와 신형경수로인 신고리 A,B 원전의 케이블 14종을 확보 하였다.

Fig. 5의 국내원전 샘플 케이블 14종에 대하여 외경, 총면적, 재킷 두께 등 상세한 규격을 측정하고 단위질량을 분석하였다. Table 5와 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. 특히 케이블의 절연물질과 재킷물질은 전량 열경화성 케이블로 구성되었다.

4.3. THIEF 모델을 이용한 일정 임계열속에서의 케이블 기능상실 시간 분석

미국원전의 열경화성 및 열가소성 케이블에 대한 기능상실 온도와 시간을 CAROLFIRE 실험에서

Table 5. Detail specification for Korean NPPs' sample cables

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

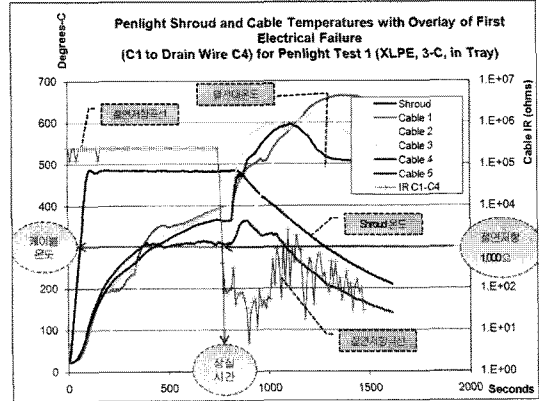


Fig. 6. Sample graph for fire experimental test for PT-01 cable.

분석하였다. 이 실험에 사용된 기기는 PENLIGHT 실험 장비로서 원통형 외곽을 형성하는 슈라우드(shroud) 표면을 일정한 온도로 가열하여 PENLIGHT 중심부에 설치된 케이블에 열에너지를 공급하였다. 이 실험에서 열경화성 케이블의 경우 슈라우드 표면온도는 407~475℃이었으며 열가소성 케이블의 경우 300~325℃이었다⁴⁾.

Fig. 6은 열경화성 케이블 PT(Penlight test)-01에 대하여 슈라우드 온도를 초기 실내온도에서 470℃까지 증가시켜 그 상태를 유지하였다. 470℃에 해당하는 열에너지는 PENLIGHT 내부에 설치된 케이블의 표면온도를 높였으며 771초에서 케이블 단락에 의하여 절연저항이 1,000 Ω 이하로 떨어져 전기적 기능상실이 발생하였다.

THIEF 모델 개발팀에서 개발한 실제 화재실험의 결과를 화재모델링에 의해 모사하기 위해 개발된 프로그램을 이용하였다. 이 프로그램은 FDS(Fire Dynamics Simulator)의 서버모델로서 FDS 사용자는 대상 케이블의 물성치와 위치정보를 입력하면 분석할 수 있다. PT-01 케이블의 경우 입력 방법은 다음과 같다.

```
&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 미국 원전의 열경화성 및 열가소성 케이블에 대한 화재

Table 6. Comparison of threshold time by experiment and THIEF modeling

Test	Cable No.	Cable 구성 (절열/자켓)	제한치 온도(°C)	측정된 시간(S)	분석된 시간(S)
Thermostates					
PT-1	14	XLPE/CSPE	400	800	800
PT-2	14	XLPE/CSPE	400	761	747
PT-3	14	XLPE/CSPE	400	694	671
PT-7	14	XLPE/CSPE	400	1660	2196
PT-9	14	XLPE/CSPE	400	1009	1115
PT-11	10	XLPE/CSPE	400	835	993
PT-12	10	XLPE/CSPE	400	740	887
PT-13	10	XLPE/CSPE	400	761	885
PT-17	2	EPR/CPE	400	545	533
PT-18	9	SR/Aramid	400	157	-
PT-19	8	XLPO/XLPO	400	710	810
PT-20	3	XLPE/PVC	400	585	575
PT-22	12	TEP/TEP	400	518	530
PT-23	10	XLPE/CSPE	400	1488	1434
PT-24	10	XLPE/CSPE	400	1532	1608
Thermoplastics					
PT-4	5	PVC/PVC	200	588	631
PT-5	5	PVC/PVC	200	639	649
PT-6	5	PVC/PVC	200	693	571
PT-8	5	PVC/PVC	200	1570	1692
PT-10	5	PVC/PVC	200	599	807
PT-14	15	PE/PVC	200	715	750
PT-15	15	PE/PVC	200	378	471
PT-16	15	PE/PVC	200	532	566
PT-21	1	PVC/PVC	200	342	598
PT-25	15	PE/PVC	200	1382	1467

모델링 분석 결과는 Table 6과 같다. 이 표에서 제시된 바와 같이 열경화성 케이블과 열가소성 케이블의 손상 임계온도는 400°C와 200°C를 기준하였다. 이 온도에서 실제 실험에서 측정된 시간과 THIEF 모델에서 분석된 시간은 Table 6 가장 우측 열의 값이다.

실험에서 측정된 값과 THIEF 모델에서 분석된 값에 대한 불확실성 해석을 모든 케이블에 대하여 수행되었다. Fig. 7과 같이 실험치와 모델링 분석치에 대한 불확실도 범위로서 평균 3%의 오차와 20% 표준편차를 보여 THIEF 모델의 유효성을 확인하였다.

4.4. 국내원전 케이블 기능상실 온도 분석

국내원전 케이블의 화재실험을 수행 한 결과가

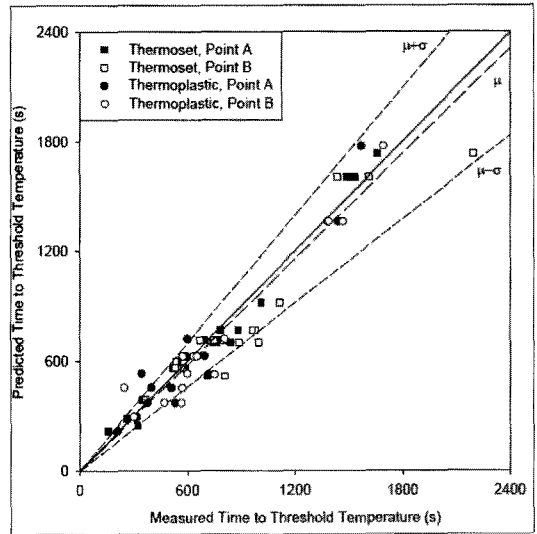


Fig. 7. Uncertainty analysis for experiment and THIEF model result.

Table 7. Specific data for Korean sample cables

NO	도체 개수 (N)	도체 총면적	도체체적 분율	도체질량 분율	단위체적 중량	단위길이 중량
		[mm ²]	[%]	[%]	[kg/m ³]	[kg/m]
1	6	11.361	8.2	38.2	1,927.3	0.265
2	14	25.979	8.9	40.4	1,980.4	0.576
3	2	3.416	2.8	16.8	1,514.4	0.182
4	3	5.299	5.0	26.6	1,679.7	0.178
5	9	26.180	12.4	49.5	2,249.3	0.473
6	12	34.907	13.4	51.6	2,320.6	0.606
7	2	5.818	4.2	23.3	1,619.3	0.224
8	9	27.558	10.6	45.1	2,112.4	0.547
9	4	5.808	14.2	53.3	2,384.0	0.098
10	2	5.520	5.1	27.1	1,688.2	0.182
11	1	2.760	9.2	41.1	2,000.0	0.060
12	2	5.668	6.4	32.1	1,786.7	0.158
13	3	8.955	10.1	43.7	2,071.3	0.183
14	1	2.909	9.4	41.6	2,013.7	0.063

없지만 미국원전 케이블의 화재실험 자료와 THIEF 모델을 이용하여 그 특성을 분석하였다. Table 7에 기술된 것 같이 샘플 케이블의 규격을 측정하고 THIEF 모델에 필요한 입력정보를 조사 및 데이터를 이용하여 국내원전 케이블의 특성을 분석하였다.

THIEF 모델에서 계산된 케이블 재킷 하부의 온도는 화재가 발생한 이후 Table 8과 같이 300초 및 570초에서 측정되었다.

Table 8. Cable temperature of Korean sample cable by use THIEF model

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

4.5. 원전 케이블 신뢰도 향상방안

원자력발전소에 설치되어 있는 케이블 화재 사고 유형을 보면 절연체 내부의 초기 결함이나 시공 불량에 의한 초기 고장이 대부분이지만, 사용년수 증가에 따른 전기적, 기계적, 열적 및 방사능 스트레스에 의한 열화에 의한 사고이다. 본 논문에서 고압케이블에 대한 신뢰성 향상 방안으로 열화 진단 고주파 부분방전 측정(HFPD: High Frequency Partial Discharge Measurement)법으로 불리는 이 기술을 사용하여 수~수백 MHz 대역의 주파수 영역에서 부분방전을 측정하여 케이블에 대하여 열화 진단을 수행하였다.

Fig. 8은 국내 원자력발전소 고압펌프 전동기의 전력케이블(13.8 kV)에 대한 측정주파수에 따른 부분방전 검출 결과로서 12 MHz대역에서 측정하는 경우 노이즈로 인하여 부분방전 펄스를 구분할 수 없

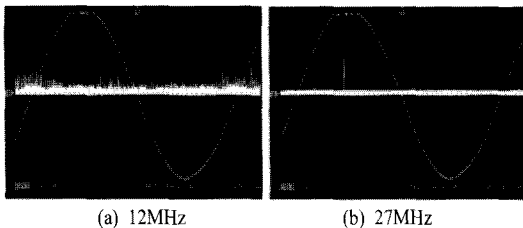


Fig. 8. Low(a) and High(b) Frequency band.

었다. 그러나 27 MHz 대역의 경우 부분방전 펄스를 확연히 구분할 수 있다⁶⁾. 따라서 부분방전 신호의 주파수 특성을 이용하여 최적의 부분방전 신호/노이즈(S/N) 비를 가지는 고주파 대역을 선정하여 부분방전 시험을 통하여 실 선로에서 열화 결함을 진단 할 수 있었다⁷⁾.

5. 결론

국내외 원전의 케이블 화재 발생건수 조사결과 매년 약 10건 내외의 화재사고 발생하였으며 그중 전기관련 원인이 약 41%를 차지하는 것으로 분석되었다. 원전 케이블의 화재로 인한 전기적 기능상실 판단온도 열경화성 케이블(thermoset cable) 경우 330°C, 열가소성 케이블 (thermoplastic)은 205°C이다. THIEF 모델에서 계산된 케이블 재킷 하부의 온도는 화재가 발생한 이후 300초 및 570초에서 측정되었다. 향후 국내원전 케이블의 실제 화재실험을 통하여 임계열속을 비교평가 할 예정이다. 고주파 부분방전 측정이용하여 원자력발전소를 정지하지 않고 진단하는 실 선로의 결함 여부를 주기적으로 수행함으로써 원자력발전소 안전 운전에 기여할 것으로 사료된다.

참고문헌

- 1) 한수원, 울진3,4호기 원자력발전소 주기적안전성 평가, 전력계통, 2010.05.
- 2) J.L. Lachance, et al. "Circuit Analysis : Failure mode and Likelihood Analysis", (NUREG/CR-6834), 2003. 09.
- 3) EPRI/NRC-RES Fire PRA Methodology for Nuclear Power Facilities,(NUREG/CR-6850), 2005.09.
- 4) Thchnical Review Report of CAROLFIRE Experimental Results, KHNP/2008-0500-단-0002, 2008.12.
- 5) Development of Nondestructive Aging Evaluation Technique for Nuclear Cable, KHNP, 2010.09.
- 6) Su-Kil Lee, et al., "Characteristics of high frequency partial discharge for artificially defected extra high voltage accessories", IEEE conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pp. 682~685, 2000.
- 7) E.Pultrum, E.F.Steennis, M.J.M.Vanreit, "Test after laying, diagnostic testing using partial discharge testing at site", CIGRE session 15/21/33-12, 1996.