

케이블 내부온도 분석용 화재모델(THIEF)을 이용한 원전 케이블 배치에 따른 온도 분포 평가

지문학 · 박상진
한전 전력연구원

Temperature profile evaluation for cable tray arrangements at NPP by cable internal temperature analysis model (THIEF)

MoonHak Jee, SangJin Park
KEPCO Research Institute (KEPRI)

요 약

원자력발전소의 방화지역에서 화재가 발생할 경우 케이블의 화재리스크는 온도, 열속, 화염 등 열적 특성에 의해 평가된다. 원전의 안전정지 기능에 사용되는 각종 케이블은 설계관리 및 성능분석을 위해 화재실증실험으로 열적 특성을 실측하여야 하지만 다양한 화재시나리오에 대한 실험 조건 확보와 실험 비용 등 제약이 따른다. 이에 따라 화재모델 FDS (Fire Dynamics Simulator)의 최신버전에 포함된 THIEF (Thermally-Induced Electrical Failure) 모델을 이용하여 국내 원전의 안전정지 케이블에 대한 화재모델링 분석을 수행하였다. 이 연구에서는 케이블이 설치된 형태에 따라 일정 열속에 대한 자켓 온도와 경계조건에 대한 온도분포를 분석하였다. 본 연구 결과 THIEF 모델은 원전 방화지역의 화재에서 안전정지 케이블의 내부온도를 예측할 수 있는 화재모델로 사용가능한 것으로 확인되었다.

1. 서 론

원자력발전소(원전)의 방화지역에는 원자로의 안전정지 기능을 담당하는 계통, 기기, 케이블, 계측기 등 화재로 인한 열에너지의 영향을 받을 수 있는 다수의 대상물이 설치되어 있다. 원전에서는 이들 대상물중 가장 많은 양을 차지하며 넓은 지역에 분포된 케이블을 주요 목표대상물로 취급한다. 따라서 원전 방화지역에 화재가 발생할 경우 화재로 인하여 중대한 영향을 받으며 고장을 일으킬 가능성이 높은 것이 전력용, 제어용, 계측용 등의 전기 케이블이다. 이들 케이블은 단일 또는 다중의 도체로 구성되어 있으며 도체를 둘러싼 재질에 따라 열경화성 또는 열가소성 케이블로 분류된다.

열경화성 케이블은 화재로 피복재 표면에 열에너지가 유입될 경우 표면에서 열분해가

일어나며 열분해에 의해 생성된 가연성가스가 연소범위에 들게 될 경우 점화된다. 열가소성 케이블은 열경화성 케이블과 달리 피복재가 액체형태로 용융되어 표면에서 가연성가스의 증발이 일어나 쉽게 점화된다. 일반적으로 모든 종류의 케이블은 점화가 일어날 경우 전기적 기능을 상실하는 것으로 실험에 의해 확인되었다. 따라서 원전의 안전정지 케이블은 설계단계에서 용도와 목적에 따라 화재로 인한 열적특성에 대한 기준이 필요하며, 케이블을 구매하거나 사양을 변경할 경우 화재시나리오에 따른 화재리스크의 분석이 필수적이다.

일반적으로 원전의 안전정지 케이블은 IEEE-383 규정에 따른 내화케이블을 사용하며 각 방화지역의 요구 내화등급에 따른 설계기준을 적용하여 안전정지 케이블을 설치한다. 그러나 방화지역에서 화재가 발생할 경우 가연물량, 점화원, 화재의 세기에 따라 내화등급 케이블일지라도 수백초 내지 수십분만에 점화되어 단락, 접지, 단선 등의 전기적 고장을 일으킬 가능성이 높으며 이로 인하여 계통과 설비의 오동작 또는 오신호를 일으켜 운전원의 올바른 상황 판단 및 조치에 오류를 유발할 수 있다. 이에 따라 원전에서는 심층화재 방호 설계기준에 따라 안전정지 계열을 다중으로 설치하고 계열간 격리시켜 한 지역에서 화재가 발생할 경우일지라도 정상적인 다른 계열을 이용하여 원자로의 안전정지 기능을 확보한다. 따라서 화재로 인한 안전정지 기능의 상실 시간 및 그로 인한 영향을 분석하여 설계에 반영하고 발전소 정상운전 과정에서 화재가 발생할 경우 화재리스크 분석 결과를 반영하여 필요한 대응조치가 필요하므로 원전 케이블에 대한 화재리스크 분석은 운영원전 및 해외수출 원전의 안전에 매우 중요한 사안으로 판단된다.

2.1 화재리스크 분석 방법

원전 케이블에 대한 화재실증실험은 1980년대 이후 미국의 연구소 및 화재실험기관을 중심으로 수행되었다. 이들 실험은 케이블의 용도, 규격, 절연물 재질, 설치상태 등을 기준으로 다수의 실험을 실시하여 케이블의 전기적 기능상실 메커니즘과 한계치를 제시하였다. 미국 원전 규제기관인 NRC는 이러한 화재실험 결과와 엔지니어링 경험치를 기준으로 열경화성 케이블과 열가소성 케이블의 전기적 기능상실 온도 및 열속 임계치를 아래의 Table 1과 같이 제시하였다. 이들 값은 케이블의 기능상실을 일으킬 수 있는 한계치로서 전기적 기능상실을 판단하는 지표로 사용하기에는 다소 보수적이다. 최근 화재실험 결과는 Table 2에 제시된 바와 같으며 열경화성 케이블의 기능상실 온도가 기존 기준치인 330°C보다 훨씬 높은 것으로 밝혀져 선별 기준치는 상당히 보수적이라는 평가를 내릴 수 있다.

원전 케이블의 오동작을 분석하기 위한 목적으로 NRC는 미국 표준기술원(NIST)과 공동으로 원전의 대표 케이블을 선정하여 다수의 화재실험을 실시하였다. 이 실험은 실제 화재에서의 케이블 반응, 즉 CAROLFIRE(Cable Response to Live Fire)라는 과제로 2006년 착수되었으며 NIST는 화재실험 결과를 이용하여 케이블 내부온도를 분석할 수 있는 화재모델인 THIEF를 개발하였다. THIEF는 FDS의 내부 프로그램으로 이용되며 케이블 내부 자켓온도를 분석할 수 있는 알고리즘을 갖고 있다. 이 모델을 이용하여 화재실증 실험 결과치와 화재실험 측정치를 비교한 결과 케이블 내부온도를 정량적으로 유효하게

분석할 수 있는 도구로 확인되었으며 그 결과는 NRC에서 발생한 화재실험보고서, NUREG/CR-6931에 제시되었다.

국내원전 케이블의 경우 화재실험을 수행하여 열적특성을 분석하는 것이 가장 바람직하다. 그러나 미국의 화재실험과 동일한 실험장치를 확보하지 못한 현 실정을 고려하여 국내 케이블의 열적특성은 THIEF 모델을 사용하여 분석하였다. 화재시나리오에 케이블 배치 상태에 따라 트레이(cable tray)에 설치한 경우, 전선관(conduit)에 매립된 경우, 독립설치(air drop)된 경우의 3가지 조건에 대하여 화원 열속을 일정하게 유지한 상태에서 케이블 내부온도인 자켓온도를 분석하였다. 또한 THIEF 모델은 외곽 경계조건을 초기값(default)인 INERT 상태를 적용하였으나 본 연구에서는 방화지역 내부화재를 기준하여 외곽 경계에 금속판이 설치된 것을 기준으로 분석하여 경계조건을 비교하였다.

Table 1. Damage criteria for electric cable fire

Cable type	Temperature criteria	Radiant heat criteria
Thermoplastic cable	205°C (400°F)	6kW/m ² (0.5BTU/ft ² · sec)
Thermoset cable	330°C (625°F)	11kW/m ² (1.0BTU/ft ² · sec)

Table 2. Cable sample tests for thermal damage (from NUREG/CR-6850)

Cable material	Fail temperature (°C)	No. of samples	Recommended (°C)
XLPO including XLPE	299-388	13	299
EPR	370-400	16	370
Silicone rubber	396-400	2	396
Kerite FR	372-382	2	372
Polyimide or Kapton	399	1	399

2.2 화재모델 입력자료

미국의 NIST에서 케이블 실험에 사용한 장비는 PENLIGHT라는 이름의 가열장치로서 내경 0.45m, 길이 0.6m의 원통형 챔버와 원주 방향에 복사열 가열장치가 설치되어 있다. Figure 1에서 보는 바와 같이 챔버의 중심에 케이블 트레이를 설치한 다음 규격과 재질이 완전히 동일한 케이블을 2셋트 설치하였다. 한 개의 실험용 케이블은 온도를 측정하는 thermal cable이며 다른 케이블은 전기적 특성을 측정하는 electric cable이다. thermal cable에는 케이블 표면 및 내부에 열전대를 설치하여 온도를 측정하며, electric cable 말단은 연속 데이터측정장치(DAS)에 연결되어 전기적 기능상실 여부 판단에 사용된다. 따라서 전기적 기능이 상실되는 시점의 온도를 측정하여 케이블의 기능상실 온도와 시간을 확인할 수 있다. THIEF 모델을 이용하기 위해서는 케이블 단위중량, 케이블 직경, 온도측정 지점, 자켓 두께, 케이블 위치가 결정되어야 한다. 이에 따라 본 연구에서는 화재실험결과와 동일한 상태를 모사하기 위하여 국내 케이블의 화재모델 입력조건을 아래와 같이 적용하였다.

- 케이블 단위중량 : 국내 케이블의 절연물질, 도체수, 도체직경을 조사한 다음 12 종류의 국내 케이블에 대한 단위 중량 값을 사용함
- 케이블 직경 : 국내 케이블의 외경을 원주 방향으로 각 지점마다 4회 측정하여 평균한 값을 사용
- 온도 측정지점 : 온도는 케이블 표면이 아니라 자켓과 내부 절연물질이 접촉하는 자켓 두께의 열전대값과 동일한 위치를 선정함
- 케이블 위치 : 케이블 위치는 각 화재구역에서 정해진 위치의 좌표를 기준함
- 화재성장속도 : ultrafast fire를 기준하였으며 t-square 공식을 이용하여 10초에 정상상태에 이르는 것으로 입력조건을 정함
- 방사율 : 화재실험에서 적용한 0.81~0.82의 평균값을 적용함
- 실내온도 : 일반적인 실내온도인 24℃를 기준함
- 화원 조건 : 단위면적당 14.58 kW/m²의 열속을 기준하였으며 원통형 챔버의 온도는 480℃를 열복사식을 이용하여 아래의 식을 사용함

$$\dot{q}''(t_n) = \epsilon\sigma[T_g^4(t_n) - T_s^4(t_n)] + h[T_g(t_n) - T_s(t_n)]$$

여기에서 $\dot{q}''(t_n)$: n번째 단위시간에서 표면의 순수 열속 [kW/m²]

ϵ : 케이블 표면의 방사율 [0.815]

σ : 스테판볼츠만 상수 [5.67x10⁻⁸ W/m²K⁴]

T_g : n번째 단위시간에서 유효가스온도 [K]

T_s : n번째 단위시간에서 케이블 표면온도 [K]

h : 대류열전달계수. [10W/m²K at free convection]

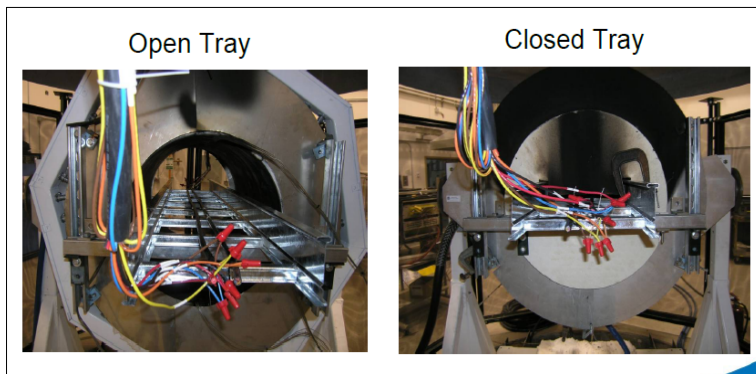


Figure 1. View of PENLIGHT test equipment

Table 3. Input conditions for fire scenarios

Fire Scenario	Case-01	Case-02	Case-03	Case-04	Case-05	Case-06
Boundary condition	Inert condition (default)			Steel plate (real situation)		
Cable arrangement	Air drop	Cable tray	Conduit	Air drop	Cable tray	Conduit
Zone geometry [m]	0.6 × 0.45 × 0.45			0.6 × 0.48 × 0.48		
Number of cells	288,000			327,680		
Minimum cell size [m]	0.0075			0.0075		
Fire source	At outside boundary (walls, ceiling, floor)					
Intensity of fire source	15.74 [kW] (480 [°C])					
Fire grow-rate	Ultrafast fire					
Ambient temperature [°C]	24					
Fire duration [sec]	1,800					

상기 입력조건을 이용하여 PENLIGHT 화재구역을 직사각형으로 증가한 다음 경계구역에 대한 비교를 하였다. 즉, NIST에서 수행한 THIEF 모델에서는 경계면을 inert 상태로 처리하였으나 본 연구에서는 실제 방화구역의 내화벽체를 고려하여 금속판이 설치된 경우를 가정하여 그 결과를 상호 비교하였다. 또한 상기 화재시나리오에서 격자의 최소값은 0.0075 m로 정하였으며 이에 따라 화재모델의 불확실도는 간접적으로 평가할 수 있는 특성길이 무차원값이 24.17로서 FDS 매뉴얼에서 요구하는 4~16보다 크므로 불확실도는 크게 감소할 것으로 예상된다.

3. 화재 모델링 분석

화재모델링 분석에서 케이블 배치는 실제 화재실험과 동일한 방법에 따라 케이블 표면 및 내부온도 측정을 위한 thermal cable을 설치하고 동일한 electric cable을 인접되게 설치하여 케이블의 온도와 전기적 기능상실 시간을 분석하였다. 한편 THIEF 모델 자체는 케이블의 전기적 기능상실을 직접적으로 보여주지 않는다. 이에 따라 두 종류의 변수인 시간과 온도를 기준으로 케이블의 기능상실 여부를 판단하여야 한다. 즉, 케이블의 기능상실 시간을 엔지니어링 분석 또는 보조 프로그램에 의해 사전에 알고 난 다음 해당 시점에서 케이블의 온도를 분석하여 케이블의 기능상실 온도를 결정하는 방법이 전자의 변수를 기준한 방법이다. 만일 케이블의 기능상실 온도를 알고 있을 경우 THIEF 분석에서 케이블의 내부온도가 임계치에 이르는 시간을 측정함으로써 기능상실 시간을 결정하는 방법이 후자의 변수를 기준한 방법이다.

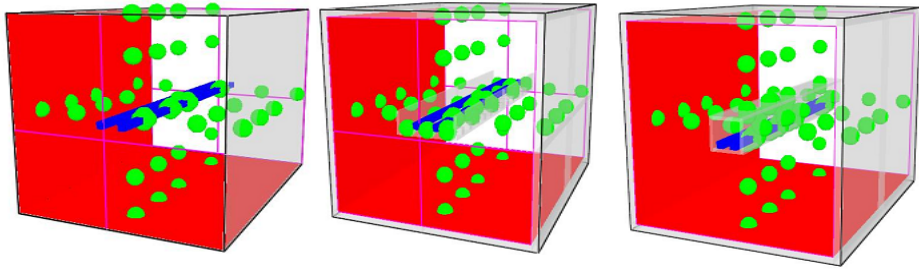


Figure 3. Cable tray arrangement (air drop / cable tray / conduit)

일반적으로 화재모델에 의해 화원을 정하는 방법의 하나로서 화재구역 내부에 화원을 설치한다. 그러나 PENLIGHT 실험장치의 경우 가열장치의 내부 표면이 모두 열원이 되므로 FDS 입력조건인 SURF_ID(6)를 사용하여 열원의 위치를 결정하였다. 따라서 INERT 또는 금속판을 설치한 경계조건에 따라 3 종류의 케이블 배열에 미치는 입열에너지의 차이가 발생할 것으로 예상하였다. PENLIGHT 내부에 케이블이 독립(air drop), 트레이(cable tray), 전선관(conduit)의 형태로 설치된 모습은 Figure 2에 표시하였으며 중앙을 관통하는 두 개의 사각형 막대가 케이블이며 내부의 각 원점은 온도, 열속, 압력 등을 측정하기 위한 변수들의 위치를 의미한다.

Table 4에는 케이블 물성치가 다른 12종의 케이블 내부온도(자켓온도), 케이블 표면온도, 표면열속, 화재구역 공간온도, 공간압력을 분석한 값을 기록하였다. 이 결과에서 확인할 수 있는 바와 같이 케이블 내부온도는 경계조건 및 케이블 배열에 따라 특이한 경향을 보였다. 즉, 화재구역 외곽의 경계부에 금속판을 설치한 경우 air drop과 cable tray의 케이블 내부온도는 금속판을 설치하지 않은 경우에 비하여 약 28~29℃ 낮은 값을 보였으나 conduit의 경우 경계조건에 무관하게 유사한 값을 보였다. 이러한 경향은 화재구역 내부의 공간온도, 케이블 표면온도와 열속에서 추정할 수 있는 바와 같이 경계구역을 통하여 외부로 약 8% 내외의 열전달 손실에 기인한 것으로 판단되므로 실제 원전 방화지역의 화재로 인한 케이블 내부온도 분석은 경계조건을 반영하여 THIEF 모델을 적용하는 것이 바람직한 것으로 판단된다.

Figure 3은 경계조건의 차이가 있을 경우 케이블 배열에 따른 내부온도 변화를 나타낸 것이다. 전체적으로 케이블의 물성치 조건을 달리하였을 경우 THIEF 모델은 케이블 내부온도를 각각의 열적특성에 따라 분석하였다. 또한 화재구역 내부의 공간에 개방된 조건인 air drop과 cable tray의 경우 외부 조건이 유사하므로 거의 유사한 값을 보였으며 화재구역 외부에 금속판을 설치한 경우 열전달에 의한 영향을 명확히 보여주었다. 반면 화재구역 내부 공간과 단절이 이루어진 conduit의 경우 경계조건에 무관하여 conduit 표면을 통한 전도, 대류, 복사의 영향으로 인해 거의 유사한 내부온도를 보였다.

Table 4. Analysis result of THIEF modeling

Measure Variables		Inert condition (default)			Steel plate (real situation)		
		Air drop	Conduit	Cable tray	Air drop	Conduit	Cable tray
Cable Inner (jacket) temperature (°C)	C1 cable	349.94	347.56	345.88	321.88	348.74	316.67
	C2 cable	361.54	332.4	356.66	332.92	333.18	327.15
	C3 cable	347.31	354.57	343.43	319.43	355.94	314.38
	C4 cable	344.01	340.81	340.02	315.95	341.92	310.81
	C5 cable	352.05	314.61	346.91	323.08	315.09	317.11
	C6 cable	354.74	313.44	349.43	325.7	313.92	319.61
	C7 cable	350.67	359.46	346.59	322.73	360.87	317.62
	C8 cable	357.54	321.61	352.45	328.74	322.25	322.8
	C10 cable	345.03	353.2	341.21	317.17	354.57	312.16
	C11 cable	313.96	361.04	310.31	286.28	362.88	282.36
	C12 cable	340.62	354.6	336.93	312.84	356.03	307.92
	C13 cable	339.49	337.79	335.56	311.31	338.75	306.25
	Average	346.41	340.92	342.12	318.17	342.01	312.90

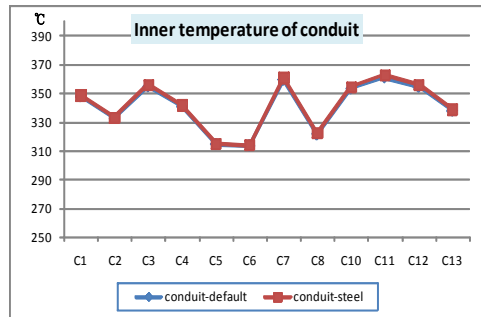
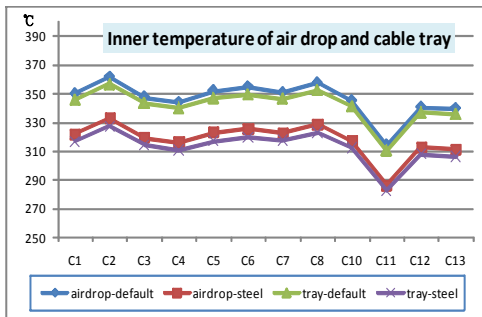


Figure 4. Inner temperature of cable for air drop/cable tray/conduit for boundary condition

4. 결론

원전에서 케이블의 전기적 기능상실을 일으키는 열적요소인 케이블 자켓부 온도 또는

경과시간은 방화지역에서 화재가 발생한 경우 운전원이 필요한 조치를 취할 수 있는 시간 및 안전정지 기능의 신뢰성 확보를 위한 중요한 판단요소이다. 이러한 열적 영향을 실제 화재실험에 의하지 않고 화재모델을 이용하여 분석할 수 있는 기술은 경제성 및 안전성 측면에서 매우 바람직하다. 특히 국내의 운영원전이 2기에 달하며 건설 및 해외수출을 위한 원전을 대상한 다수의 케이블에 대한 물량을 고려할 때 케이블의 기능상실 요소를 정량적으로 분석할 수 있는 요소기술은 앞으로 더욱 심도있게 개발되어야 할 것이다. 이런 측면에서 본 연구에서는 다음과 같은 소기의 목적을 얻었으며 향후 이러한 기술을 활용할 수 있는 방안을 제시하였다.

- FDS의 THIEF 모델을 이용할 경우 원전 케이블 규격, 사양, 물성치 조건에 따라 자켓부의 내부온도를 허용된 불확실도 범위에서 분석할 수 있음을 확인하였다.
- 외부경계조건을 달리하여 케이블 내부온도를 분석한 경우 초기값인 INERT에 비하여 금속관을 설치한 경우 케이블 내부온도는 케이블 배열조건에 따라 서로 다른 결과를 보였다.
- THIEF 모델은 원전 방화구역의 경계조건 및 화재구역 내부 상황을 반영한 입력조건에 따라 케이블의 온도 및 온도 상승시간을 예측할 수 있는 도구로 확인되었다.
- THIEF 모델은 케이블 기능상실을 직접적으로 예측할 수 없으므로 화재발생후 경과 시간, 화원의 규모, 화재성장율, 열발생율 등을 고려한 보조 프로그램의 개발로 케이블 기능상실 여부를 판단할 수 있는 기술의 개발이 필요하다.

참고문헌.

1. U.S. NRC, Cable Response to Live Fire (CAROLFIRE) Volume 3, April 2008
2. Kevin McGrattan, et al., Fire Dynamics Simulation (version5) User's Guide, Sep. 2009
3. U.S. NRC, Inspection Manual Chapter 0609, Appendix F "Fire Protection SDP" Feb. 2005
4. NEI 00-01, "Guidance for post fire safe shutdown circuit analysis", Aug. 2009