[Research Paper]

원자력발전소용 안전등급 케이블의 경년열화에 따른 연소 및 연기특성 분석

이석희 · 김민호 · 이상규* · 이주은** · 이민철***†

인천대학교 안전공학과 대학원생, *한국원자력안전기술원 계통평가실 책임연구원, **한국원자력안전기술원 계통평가실 연구원,

***인천대학교 안전공학과/소방방재연구센터 교수

Analysis of Combustion and Smoke Characteristics According to the Aging of Class 1E Cables in Nuclear Power Plants

Seok-Hui Lee · Min-Ho Kim · Sangkyu Lee* · Ju-Eun Lee* · Min-Chul Lee***†

Graduate Student, Department of Safety Engineering, Incheon National University,

*Principal Researcher, Department of Reactor System Evaluation, Korea Institute of Nuclear Safety,

**Researcher, Department of Reactor System Evaluation, Korea Institute of Nuclear Safety,

***Professor, Department of Safety Engineering / Fire Disaster Prevention Research Center, Incheon National University

(Received November 23, 2020; Revised January 20, 2021; Accepted January 20, 2021)

요 약

본 연구에서는 원자력 발전소에서 사용되는 안전등급 케이블을 대상으로 경년열화에 따른 연소 및 연기특성을 콘 칼로리미터 시험을 통해 분석하였다. 열발생률의 1st peak 구간인 초기 특성의 경우, 비열화 케이블이 열화 케이블에 비해 20-50 kW/m² 높게 측정되었으나, 2nd peak인 중/후기에는 열화에 따른 난연성능의 저하에 기인하여 비열화 케이블에 비해 열화 케이블들이 높게 측정되었다. 또한, Char 층이 불안정하게 형성됨에 따라 char 층의 유지시간이 비열화 케이블에 비해 열화 케이블들이 약 200 s 단축됨을 확인하였다. 총발열량은 열화 케이블이 비열화 케이블에 비해 약 1.4배 높게 측정되었다. 연기특성의 경우, 연기발생률은 열발생률과, 총 연기발생량은 총발열량과 비슷한 양상을 띄며, 총 연기발생량은 열화 케이블이 비열화 케이블보다 높게 측정되었다. 연기인자는 열화 기간이 증가함에 따라 증가하는 경향성을 보였으며, 4년 이상 열화된 케이블들은 비열화 케이블에 비해 약 1.76-2.0배 정도 차이가 났다. 따라서 경년열화가 진행된 케이블일수록 열 및 연기방출의 위험성이 증가하였다.

ABSTRACT

In this study, combustion and smoke characteristics according to the aging of class 1E cables in nuclear power plants were analyzed through a cone calorimeter test. In the case of combustion characteristics, during the early period, which was the first peak of the heat release rate, the peak value of the non-aged cable was higher by approximately 20-50 kW/m² than that of aged cables. However, in the mid-late periods, which was the second peak, the value of the aged cables were higher than the non-aged cable due to the decrease in flame retardant performance with aging deterioration. In addition, the duration of the char layer of the aged cables was shortened by 200 s than that of the non-aged cables due to the unstable formation of char layer. The total heat release measured was approximately 1.4 times higher in the aged cables than in the non-aged cables. In the case of smoke characteristics, the smoke production rate and total smoke release show a similar trend with the heat release rate and total heat release. The total smoke release of the aged cables was measured to be higher than that of the non-aged cables. The tendency of the smoke factor increased with aging deterioration, and the values of the smoke factor in the aged cables beyond 4 years were approximately 1.76-2.0 times different from those in the non-aged cables. Consequently, the smoke risk increased with aging deterioration. Therefore, the risk of heat and smoke release increased as aging progressed.

Keywords : Accelerated aging, Class 1E cable, Cone calorimeter, Combustion characteristics, Smoke factor

1. 서 론

원자력발전소의 운영허가기간(설계수명)은 설계시 안전

성과 성능 기준을 만족하며 운전이 가능한 최소 설정 기간으로, 국내 원자력발전소의 운영허가기간은 대부분 30~40년이다. 하지만 최근에는 운영허가기간에 도달한 원자력발

† Corresponding Author, TEL: +82-32-835-8295, FAX: +82-32-835-0779, E-Mail: LMC@inu.ac.kr

© 2021 Korean Institute of Fire Science & Engineering. All right reserved.

전소에 대해 원자력안전법 기술기준에 따라 주기적으로 안전성과 주요기기의 수명평가를 실시하여 운영허가기간이 만료된 이후에도 운전을 계속하는 장기운전계획을 추진되고 있으며⁽¹⁾, 고리1호기와 월성1호기의 경우 30년의 운영허가기간 만료 이후에도 10년의 계속운전을 시행하였다. 또한 APR 1400노형의 신고리3호기는 운영허가기간이 60년으로 국내 대다수의 원자력발전소의 설계수명보다 20년 더 길게 설정되어 있다. 이처럼 원자력발전소의 계속운전이 추진되고 설계수명이 증가함에 따라 원자력발전소 내의 기기 및 구성재료들의 관리와 경년열화에 따른 상태 평가 등, 안전성과 관련된 연구의 필요성이 대두되고 있다.

원자력발전소의 일부 케이블들은 발전소의 사고 완화를 위한 안전계통 및 안전정지 기기들과 연결되어 있어 발전소의 운영허가기간 동안 정상 작동이 요구된다. 그러나 원자력발전소의 특성상 방사선 및 열 등의 환경 조건이 존재하며, 이러한 환경 조건은 발전소 내에 설치된 케이블들의 피복재 및 절연재의 경년열화를 야기한다⁽²⁾. 특히 고온의 조건에서 발생하는 경년열화의 경우, 고분자 물질인 피복재와 절연재의 화학적 구조와 난연성능에 부정적인 영향을 주어⁽³⁾ 케이블의 초기 물성치를 유지하지 못할 뿐만 아니라 케이블의 열화를 촉진하여⁽²⁾ 수명 저하 및 화재위험성 증가를 유발할 가능성이 존재한다.

안전등급 케이블은 안전 관련 기능 수행에 필요한 안전 관련 기기의 전력공급 및 제어를 위하여 원자력발전소 전반에 설치되어 있다. 그중 격납건물 내에 설치된 안전등급 케이블의 경우에는 고온, 고압의 대기와 방사능 물질 등의 영향으로 열화에 더욱 취약한 환경 조건에 지속적으로 노출된다. 열화에 의한 안전등급 케이블의 변화는 케이블과 관련된 기기들의 오작동뿐만 아니라 안전계통 및 안전정지와 관련된 다중 기기들의 기능상실까지 연결되어⁽⁴⁾ 긴급 상황에 적절한 대처가 불가하여 더 큰 피해를 유발할 가능성이 있다. 따라서, 원자력발전소에 설치된 안전등급 케이블의 안전성을 확보하기 위해 안전등급 케이블의 경년열화 정도에 따른 화재 특성과 위험성에 대한 연구 또한 필요한 실정이다.

앞선 선행연구에서 Seo et al.⁽⁵⁾과 Jang et al.⁽⁶⁾은 비안전등급 케이블에 대하여 경년열화별로 케이블 연소 시 발생하는 독성가스를 분석하였으며, Kim et al.⁽⁷⁾은 비안전등급 케이블을 대상으로 경년열화별로 케이블의 연소 및 연기특성에 대하여 분석하였다. 앞선 연구들은 경년열화 기간을 10년 단위로 40년까지를 보았으며, 결과의 변화량을 비교하였을 때 10년 열화부터 40년 열화까지의 변화량보다 비열화에서 10년 열화까지의 변화량이 더 큼을 확인하였다.

이러한 배경하에, 본 연구에서는 선행연구에서 진행되지 않은 안전등급 케이블의 경년열화별 연소 및 연기특성을 분석할 필요가 있다고 판단하였다. 비안전등급 케이블의 피복/절연재를 구성하는 고분자 물질과 마찬가지로 안전등급 케이블 또한 고분자 물질로 구성되어 있음을 고려하였을 때, 선행연구에서 확인한 바와 동일하게 10년 열화까지

Figure 1. Structure of Class 1E cable.

Table 1. Specification of Class 1E Cable

Division		Detail
Application		Power/Control
Voltage [V]		600
Diameter [mm]		14.5
Material Properties	Sheath	Chloro-Sulfonated Polyethylene Rubber (CSPE)
	Insulation	Ethylene Propylene Rubber (EPR)
	Core	Copper

의 변화가 클 것으로 판단하여 2년 단위로 10년까지 경년열화를 진행하여 열화 초기 특성에 따른 안전등급 케이블의 연소 및 연기특성을 분석하였다.

2. 시험 재료 및 방법

본 연구에서는 원자력발전소에서 전력 및 제어의 용도로 사용되는 600 V급의 안전등급 케이블 1종을 선정하였으며, 해당 케이블에 대하여 가속열화 시험을 진행하여 2년, 4년, 6년, 8년, 10년 경년열화를 재현하였다.

2.1 시험재료

시험에 사용된 케이블의 외경은 14.5 mm이며, 케이블은 Figure 1의 구조와 같이 피복재(Sheath)와 절연재(Insulation), 도체(Core)로 구성되어 있다. 피복재와 절연재의 구성성분을 포함한 케이블의 세부 정보는 Table 1과 같다. 케이블의 피복재는 Chloro-sulfonated polyethylene rubber (CSPE) 성분, 절연재는 Ethylene propylene rubber (EPR) 성분으로 구성되어 있다.

2.2 가속열화

본 연구에서 케이블의 가속열화는 아레니우스 모델을 적용하여 온도에 의한 가속열화 시험을 진행하였다⁽⁸⁾. 아레니우스 모델은 식 (1)과 같이 가속계수를 통해 목표 경년열화 수준에 해당되는 가속열화 시간을 산출할 수 있다.

$$\ln\left(\frac{k(T)}{k(T_{Aging})}\right) = \left(\frac{E_a}{k_B}\right) \times \left(\frac{1}{T_{Aging}} - \frac{1}{T}\right) \quad (1)$$

Table 2. Required Thermal Aging Time According to Aging Period

Aging period	Thermal aging time
Non-aged	0 h (0day)
2 year	39 h (1day 15 h)
4 year	78 h (3day 6 h)
6 year	116 h (4day 20 h)
8 year	155 h (6day 11 h)
10 year	194 h (8day 2 h)

여기서 k 는 해당 온도에서의 가속 계수, T 는 사용온도(K), Taging은 열화 온도(K), kB 는 Boltzmann 상수(eV/K), E_a 는 활성화에너지를 의미한다. 이때 주요 인자 중 하나인 활성화에너지에 대한 정보($= 130.3 \text{ kJ/mol} (= 1.35 \text{ eV})$)는 제조사로부터 제공받았다. 사용온도(T)는 원전의 전력, 제어 및 계측 케이블의 설계 사양⁽⁴⁾에 따라 최대 계속운전조건인 $90^\circ\text{C} (= 363.15 \text{ K})$ 로 계산하였으며, 열화온도의 경우 사용온도와 열화 챔버의 온도를 고려하여 $150^\circ\text{C} (= 423.15 \text{ K})$ 로 계산하였다. 해당 값들을 식 (1)에 적용하여 경년열화 수준에 따른 가속열화 시간을 산출하였으며 해당 결과를 Table 2에 제시하였다.

본 논문에서는 열화를 진행하지 않은 케이블의 경우 비열화 케이블, 열화를 진행한 케이블의 경우 2년, 4년, 6년, 8년, 10년 열화 케이블이라고 지칭한다.

2.3 콘 칼로리미터

본 연구에서는 안전등급 케이블의 연소 및 연기특성을 확인하기 위하여 ISO 5660-1규격⁽⁹⁾을 적용하여 콘 칼로리미터 시험을 수행하였다. 본 시험법은 콘 히터(Cone heater)와 스파크형 점화기(Spark igniter)를 이용하여 시험편을 가열 및 점화시킨 후, 시험편의 연소가 진행되는 동안 배기 덕트에 위치한 가스 샘플링 장치를 통하여 가스상의 연소생성물을 측정하는 화재 안전성 평가 기기이다. 산소 1 kg 소비시, 약 $13.1 \times 103 \text{ kJ}$ 의 열을 방출한다는 원리를 이용하여, 이동 중인 연소 생성물의 산소 농도와 산소 소비량을 실시간으로 측정하여 열발생률을 결정한다. 본 연구에서는 콘 칼로리미터 시험법을 통하여 측정된 열발생률(Heat release rate, HRR), 총발열량(Total heat release, THR), 연기발생률(Smoke production rate, SPR), 총 연기발생량(Total smoke release, TSR)을 통하여 시험편의 연소 및 연기특성을 분석하였으며 이를 통해 연기인자(Smoke factor, SF)를 계산하였다.

본 시험에 대한 조건을 Table 3에 명시하였다. 시험편은 시험규격에 적합한 크기($100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$)로 제작하였으며, 시험 중 시험편의 이탈을 방지하기 위하여 Figure 2와 같이 시험 틀에 최대한 여백이 없도록 케이블을 일렬로 배열하였다. 콘 히터의 열유속은 50 kW/m^2 , 배출유량은 $0.024 \pm 0.002 \text{ m}^3/\text{s}$ 의 조건으로 진행되었다. 시험편 당 3회

Table 3. Conditions of Cone Calorimeter Test

Division	Detail
The size of specimen [mm^2]	100×100
Heat flux of cone heater [kW/m^2]	50
Exhaust flow [m^3/s]	0.024 ± 0.002
Test running time [s]	1200
A number of test per specimens	3

Figure 2. Photographs of the specimen.

의 시험을 진행하여 시험의 신뢰도를 제고시키고자 하였으며, 3회 시험에 대한 결과를 시계열로 평균을 구하여 경향성을 분석하였다.

3. 시험결과 및 고찰

3.1 열방출특성 분석

경년열화에 따른 안전등급 케이블의 대표적인 연소특성으로서 시간에 따른 열발생률 및 총발열량을 Figures 3-4과 같이 나타내었다.

열발생률 그래프인 Figure 3를 보면 전반적으로 모든 케이블이 100 s 이전에 1st PHRR에 도달 후 급격히 감소하였으며 일정 시간 동안 20 kW/m^2 정도의 낮은 열발생률 값을 유지하였고, 이후 $500\text{-}600 \text{ s}$ 사이에 다시 2nd PHRR를 나타내는 경향을 보였다.

1st PHRR의 경우 비열화 케이블이 184.0 kW/m^2 으로 가장 높은 값을 나타냈으며, 열화된 케이블의 경우 2년 열화 케이블은 131.2 kW/m^2 , 4년 열화 케이블은 166.3 kW/m^2 , 6년 열화 케이블은 164.0 kW/m^2 , 8년 열화 케이블은 149.1 kW/m^2 , 10년 열화 케이블은 158.4 kW/m^2 로 비열화 케이블에 비해 약 $20\text{-}50 \text{ kW/m}^2$ 낮게 측정되었다. 고분자 재료는 열에 의하여 열화가 진행되는 경우 산화반응에 의해 열화가 더욱 촉진되는 특성이 있으며, 열화에 의해 고분자를 구성하는 주쇄가 절단되는 과정에서 분해 생성물이 휘발한다⁽¹⁰⁻¹¹⁾. 이에 따라 비열화 케이블에 포함된 휘발성 물질들이 경년열화가 진행될 경우 2년 이내의 시간에 대부분 증발되거나 휘발됨으로 인해 상대적으로 가연 물질이 감소하여, 비열화 케이블과 2년 이상의 열화 케이블 사이에 큰 차이를 보이는 것

Figure 3. Time series HRR with accelerated aging period.

으로 판단된다.

한편, 2nd PHRR의 경우 1st PHRR과는 반대로 열화가 진행된 케이블일수록 큰 값이 측정되었다. 이는 열분해를 지연시키는 목적으로 케이블에 첨가되는 난연 성분들이 열화 과정에서 휘발됨에 따라 난연성능이 저하되어 열화가 진행된 케이블일수록 2nd PHRR이 더 크게 측정된 것으로 판단된다. 열화 케이블들은 500 s대에 2nd PHRR를 형성하였으며 2년 열화 케이블을 제외한 4년, 6년, 8년, 10년 열화 케이블의 경우 열발생률이 210.0 kW/m²을 상회하였다. 비열화 케이블의 경우, 열화 케이블보다 100 s 늦은 600 s대에 2nd PHRR를 형성하였으며, 열발생률이 131.5 kW/m²로 1st PHRR보다 낮은 값이 측정되었다.

1st PHRR와 2nd PHRR 사이에 열발생률이 낮은 값으로 일정 시간 유지되는 구간은 char 층 형성 구간이다. 케이블에 첨가된 난연제로 인하여 연소 시 케이블 표면에 Solid phase 형태의 char 층이 형성되며, 이는 케이블 내부로 열이 침투되는 것을 막아 열분해를 지연시키는 역할을 한다⁽¹²⁻¹³⁾. Figure 3에서 확인할 수 있는 바와 같이, 경년열화가 진행된 케이블일수록 char 층의 형성 구간이 짧아지고 재착화가 진행되는 시간이 단축되며, 2nd PHRR의 크기도 큰 것을 확인할 수 있는데, 이는 가속열화에 따른 케이블의 난연성능 저하⁽¹⁴⁾에 기인한 것으로 판단된다. 난연성능의 저하는 char 층의 불안정한 형성을 야기하며, char 층의 균열이 발생한 경우 지속적으로 연소와 열분해가 진행되어 열발생률이 증가한다. 비열화 케이블의 경우 난연성능이 유지되어 100 s부터 500 s까지 char 층의 형성이 안정적으로 유지되는 것에 비해, 가속열화로 인해 난연성능이 저하된 열화 케이블들은 char 층의 형성 시간이 100 s부터 300 s 사이로 비열화 케이블에 비해 유지시간이 단축된 것을 확인하였다.

Figure 4은 경년열화에 따른 안전등급 케이블의 총발열량을 나타낸 그래프이다. 점화 후 1,200 s에 측정된 총발열량을 보았을 때, 2년 열화 케이블을 제외한 4년, 6년, 8년, 10년 열화 케이블은 각각 119.0 MJ/m², 125.6 MJ/m², 116.7

Figure 4. Time series THR with accelerated aging period.

MJ/m², 123.7 MJ/m²로, 비열화 케이블의 총발열량인 86.2 MJ/m²에 비해 약 1.4배 높게 측정되었다. 2년 열화 케이블의 경우, 최종 측정된 총발열량의 값은 83.7 MJ/m²로 비열화 케이블과 큰 차이를 보이지 않았으나, 500-700 s대부터 총발열량의 증가폭이 비교적 가파르게 상승하였다. 이는 앞서 열발생률 그래프에서도 언급하였듯이, 가속열화가 진행됨에 따라 난연성능이 저하되어 2nd PHRR에 도달하는 시간이 단축되고 2nd PHRR가 크게 측정됨에 기인한 것으로 판단된다. 이와 같은 이유로 4년, 6년, 8년, 10년 열화 케이블의 경우, 400-600 s대에 총발열량 그래프의 기울기가 비교적 급격히 증가하는 경향을 보였다.

3.2 연기특성 분석

경년열화가 진행된 케이블 화재 발생 시 생성되는 연기의 특성 및 위험도를 분석하기 위하여 연기발생률(SPR), 총 연기발생량(TSR), 연기인자(SF)를 사용하였다. Figures 5-6에 연기특성 인자들을 도시하였다.

Figure 4는 경년열화에 따른 안전등급 케이블의 연기발생률을 나타낸 그래프이다. 연기발생률은 연소 특성을 예측하고 파악하기 위한 가장 중요한 매개변수 중 하나이며⁽¹⁵⁾, 식 (2)과 같이 계산된다.

$$SPR(m^2/s) = V_s \times k \quad (2)$$

여기서 V_s 는 연기배출량이며, k 는 감광 계수 (Extinction coefficient)를 의미한다. 시간에 따른 연기발생률은 열발생률과 유사한 양상을 보이는데, 이는 연소시 발생하는 열과 연소생성물로서의 연기가 연소반응의 진행정도를 나타내는 지표로서 동일하다는 측면에서 쉽게 이해될 수 있다. 모든 케이블이 70초 부근에서 0.120 m²/s 정도의 값으로 1st PHRR를 나타내었으며, 2nd PHRR의 경우 비열화 케이블을 제외한 열화 케이블은 1st PHRR보다 큰 값이 측정되었다.

2nd PHRR은 열발생률과 동일한 시간대에 형성되는데,

Figure 5. Time series SPR with accelerated aging period.

비열화 케이블은 700 s대에 0.059 m²/s의 값을 나타내며, 열화된 케이블은 모두 600 s 부근에서 2nd PHRR이 관찰된다. 이때 2nd PHRR의 크기는 10년 열화 케이블은 0.154 m²/s, 8년 열화 케이블은 0.150 m²/s, 6년 열화 케이블은 0.154 m²/s, 4년 열화 케이블은 0.147 m²/s의 값으로 모두 유사한 수준으로 측정되었다. 2년 열화 케이블의 경우 4년 이상 열화 케이블에 비해 상대적으로 낮은 2nd PHRR가 측정되었는데, 이는 고분자 물질에 첨가되어있는 휘발 성분들이 열적 열화에 의해 모두 휘발되기에는 2년 경년열화 수준을 재현하는 39 hr의 가속열화 시간이 충분하지 않아 4년 이상 열화된 케이블들에 비해 휘발성 물질이 일부 존재하여 난연성을 유지한 것으로 판단된다.

Figure 6는 경년열화가 진행된 안전등급 케이블의 연소 시간에 따른 총 연기발생량을 나타낸 그래프이다. 총 연기발생량은 시험편의 노출 면적에 따른 연기발생량으로, 식 (3)과 같이 배출유량을 시간으로 적분 후 시험편의 노출면적을 나누어 계산한다. 이때, 표면이 평평하지 않고 일정 부분 곡률을 이루고 있는 케이블의 특성상 시험편의 표면적을 고려하여 계산하였다.

$$TSR(m^2/m^2) = A^{-1} \int_0^n \dot{V}_s k \Delta t \quad (3)$$

여기서 $\dot{V}_s$ 는 배출유량이며, A는 시험편의 노출면적을 의미한다. 1st PHRR에 도달 후 축적된 연기량은 10년 열화 케이블이 914.9 m²/m²으로 가장 크게 측정되었으며, 나머지 케이블은 경년열화 수준에 따라 순차적으로 작은 값이 측정되었고, 비열화 케이블의 연기량은 617.4 m²/m²으로 가장 작은 값이 측정되었다. 총 연기발생량 그래프의 기울기는 연기발생속도를 나타내며, 기울기가 급할수록 연기가 그 순간에 급격히 많이 발생됨을 의미한다. 열화된 케이블의 경우 총 연기발생량이 600 s대에서 크게 증가함에 따라 500-600 s 사이에 그래프의 기울기가 급격히 상승하는 것

Figure 6. Time series TSR with accelerated aging period.

을 확인할 수 있으며, 비열화 케이블의 경우 600-700 s에 그래프의 기울기가 급격히 상승하는 것을 확인할 수 있다. 케이블은 경년열화로 인해 연소성과 난연성에 차이가 발생하며, 특히 케이블 피복재의 난연성능이 저하되는 경우 연기가 다량 발생한다⁽¹⁶⁾. 최종 측정된 비열화 케이블의 총 연기발생량과 6년, 8년, 10년 열화 케이블의 총 연기발생량이 크게 차이나는 것은 경년열화가 진행된 케이블일수록 난연성능이 저하되어 연기가 다량 발생하는 것으로 판단된다.

3.3 열방출 및 연기특성을 동시에 고려한 연기인자 분석

3.1절에서 연소특성의 대표적 인자로 열방출특성을 확인하였고, 3.2절에서는 연기특성을 확인하였다. 본 절에서는 이 두 가지 특성을 동시에 고려한 연기인자 (Smoke Factor, SF)를 이용해 경년열화에 따른 케이블의 대표적인 화재위험도 수준을 확인하였다.

Figure 7은 케이블의 경년열화 수준에 따른 연기인자를 나타낸 그래프이다. 연기인자는 연소 시 발생하는 연기와 화재를 함께 고려하여 화재위험성 및 연기의 성향⁽¹⁷⁾을 파악하기 위한 정량적인 연기지수로 활용되고 있으며⁽¹⁸⁾ 식 (4)와 같이 총 연기발생량과 최대 열발생률 (PHRR)의 곱으로 계산된다⁽¹⁹⁻²⁰⁾. 즉, 연기발생이 많을수록, 최대 열발생률이 클수록 SF는 커지므로, 큰 SF값은 더욱 화재의 위험도가 크다고 할 수 있다.

$$SF = TSR \times PHRR \quad (4)$$

원자력발전소는 다른 시설에 비해 사고에 따른 피해가 심각하기 때문에 매우 보수적인 안전해석 방법론을 사용하여 안전성을 평가하는데, 이때 실제로 발생 가능한 화재 현상에 대한 평가는 고려하지 않고 보수적 가정만을 통해 화재 안전성 평가가 수행되는 실정이다⁽²¹⁾. 본 연구에서는 현실적인 화재 현상을 고려하여 화재 위험성을 파악하고자, 앞서 분석한 열방출 특성을 활용하여 연기인자를 계산하였다.

Figure 7. Smoke factor with respect to accelerated aging period.

보수적 관점에서 연기인자를 계산하는 경우 열발생률의 최댓값을 사용하여 계산한다. 하지만 본 연구에서 열방출 특성을 분석한 결과, Figure 3의 열발생률 그래프를 통해서도 알 수 있듯이 케이블의 연소 시 열발생률은 1st PHRR 이후 일정 시간 동안 25 kW/m² 부근에서 유지된 후 재착화하는 현상을 보이고, 그로 인한 2nd PHRR은 열화된 케이블에서 더 높게 형성되는 현상이 확인된다.

본 연구는 이러한 현상을 케이블 연소의 초기와 중/후기 특성이라고 구분하였으며, 현실적인 화재 현상을 위험성 평가에 반영하기 위해서는 연소의 초기와 중후기를 각각 고려하여 연기특성을 분석할 필요가 있다고 판단하였다. 그에 따라 1st PHRR과 2nd PHRR을 구분하여 연기인자를 계산하였으며, 계산에 사용된 PHRR 결과값을 Table 4에 정리하였다.

1st PHRR 값으로 연기인자를 계산한 경우, 비열화케이블은 100 s 이후의 중/후기 연소특성을 반영하지 못하였으며, 열화 케이블들의 경우 100 s 이전의 초기 연소특성을 반영하지 못하였다. 이와 마찬가지로 2nd PHRR 값으로 계산한 경우, 비열화 케이블의 초기 연소특성을 반영하지 못한 결과가 산출되었다. 따라서 본 연구는 케이블의 연소특성의 초기와 중/후기인 1st PHRR과 2nd PHRR를 모두 고려한 원자력발전소의 종합적인 케이블 화재 연기특성을 분석을 위하여, 두 PHRR의 평균값인 Average_Peak (Figure 7의 적색 선)를 이용하여 연기지수를 계산하는 것이 더 합리적이고, 유의미하다고 판단하였다.

두 PHRR의 평균값을 이용하여 연기인자를 계산한 결과, 비열화 < 2년 < 4년 < 6년 < 8년 < 10년 열화 케이블 순서로 크게 측정되었다. 여기서, 특별히 주목할 점은 4년 열화 케이블의 연기인자는 비열화 및 2년 케이블보다 약 1.76배로 급격하게 증가하였다는 것이다. 반면 6년, 8년, 10년 열화 케이블은 비열화 케이블 대비 SF값이 약 2배 정도로 열화에 따른 차이가 크지 않았다. 이는 600 s 이후에 형성된 2nd PHRR의 큰 차이로 인한 영향으로 보이며, 가속열화 과

Table 4. PHRR, 1st PHRR, 2nd PHRR, Average_Peak of Accelerated Aging Cable

	Non-aged	2 year	4 year	6 year	8 year	10 year
PHRR	187.12	150.14	216.54	220.77	216.49	227.64
1 st PHRR	187.12	131.67	179.01	166.60	155.83	158.42
2 nd PHRR	134.74	150.14	216.54	220.77	216.49	227.64
Average	160.93	140.91	203.36	193.692	186.16	193.03

정으로 인한 난연성능의 저하로 2nd PHRR에서 열발생률의 차이가 4년 열화 케이블에서부터 크게 발생하고, 그 이후는 크지 않은 것이 주된 원인으로 판단된다.

Figures 5-7을 통하여 분석한 연기특성은 연소특성과 유사한 경향성을 보인다. 초기 화재 구간인 100 s 이전에서 연기발생률의 1st PHRR는 비열화 케이블과 열화 케이블 모두 값의 차이가 10% 내외로 비슷한 경향을 보였다. 중/후기 화재 구간인 600-700 s의 2nd PHRR 값은 비열화 케이블에 비해 열화 케이블이 최소 70%에서 최대 157%로 큰 차이를 보였으며, 이에 따라 연기발생량과 연기인자 값 또한 열화 케이블이 비열화 케이블에 비해 크게 증가함을 확인하였다. 특히 4년 이상 열화 케이블일수록 비열화 케이블에 비해 약 150% 정도로 크게 증가하였으며, 이는 경년열화가 진행될수록 전반적인 화재위험도 또한 증가한다는 것을 의미한다.

4. 결 론

본 연구에서는 원자력발전소에서 사용되는 안전등급 케이블에 대하여 가속열화 시험을 통해 경년열화를 재현하였으며, 해당 케이블에 대한 연소 및 연기특성을 비교 분석하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) 열발생률을 통해 연소특성을 분석할 때, 1st Peak 구간을 초기, 2nd PHRR 구간을 중/후기로 구분하여 비교 분석하였다. 초기(100 s 부근) 연소 특성의 경우, 비열화 케이블이 열화 케이블보다 약 20-50 kW/m² 높은 값을 나타냈으며, 재착화가 일어나기 전까지의 구간인 char 층의 유지시간이 가장 길었다. 반면, 열화가 진행된 케이블은 모두 중/후기 구간인 600 s 이후 비열화 케이블에 비해 상당히 높은 값이 측정되었으며, 재착화가 일어나는 시간도 단축되었다. 이는 가속열화로 인해 케이블에 첨가된 난연제의 성능 저하로 인한 char 층의 불안정한 형성이 주된 원인으로 판단되며, 그로 인하여 열방출이 지속적으로 발생함에 따라 2nd PHRR의 차이 또한 발생한 것으로 판단된다. 전반적으로 경년열화가 진행된 케이블일수록 열발생률이 높게 측정되었으며, 특히 4년 이상 열화된 케이블부터 비열화 케이블과의 차이가 확연히 나타난다.

2) 총발열량의 경우, 비열화 케이블에 비해 4년, 6년, 8년, 10년 열화 케이블이 약 1.4배 정도 크게 측정이 되었으

며, 600-800 s대에 증가 양상을 보이는 비열화 케이블에 비해 200 s 이룬 400-600 s대에 급격한 증가 양상을 보였다.

3) 연기특성의 경우, 연기와 열적 특성을 함께 고려한 정량적 인자인 연기인자(SF)를 통해 경년열화에 따른 비교 분석을 진행하였다. 기존의 연기인자 계산에 따라 최대 열발생률(PHRR) 값을 사용하였을 경우, 비열화 케이블의 경우 중/후기 특성을 고려하지 못하고 열화 케이블들의 경우 초기 특성을 고려하지 못하는 것을 확인하였다. 따라서, 본 연구는 1st PHRR 이후 일정 시간이 지나고 재착화가 진행되어 1st PHRR보다 더 높은 2nd PHRR이 형성되는 케이블의 특성을 고려하여 연기인자를 산출하는 것이 적절하다고 판단하였으며, 1st PHRR과 2nd PHRR의 평균인 Average_Peak 값을 사용하여 연기인자를 계산하였다. 그에 대한 결과는 비열화 < 2년 < 4년 < 6년 < 8년 < 10년 열화 케이블 순서대로 연기인자 값이 증가하였다. 특히 4년 이상 열화된 케이블 일수록 연기위험도의 증가 폭이 비열화 케이블에 비해 약 1.76-2.0배 정도로 크게 차이가 났다.

4) 경년열화에 따른 연소 및 연기특성을 비교하였을 때, 4년 이상 열화가 진행된 케이블일수록 열 및 연기방출의 위험성이 증가하여 열화에 따른 화재위험성이 증가하였음을 확인하였다.

추후 연구에서 연기의 독성 특성을 함께 고려하여 열화 기간에 따른 케이블 화재의 연기 발생과 그에 따른 독성 측면의 인체 위해도를 평가한다면 원자력발전소의 화재 안전성을 위한 연구결과로 더욱 적합할 것으로 예상된다. 케이블의 가속열화 기간에 따른 연소 및 연기특성을 분석한 본 연구의 데이터는 향후 화재 전산해석 시뮬레이션(Fire dynamic simulator, FDS)의 기초 데이터로 활용될 수 있으며, 그 결과 원자력발전소의 수명을 고려하여 케이블 화재 상황을 구현하여 거주하는 운전원의 피난 및 수동 조치의 신뢰성을 확보하는 데 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 원자력안전위원회의 재원으로 한국원자력안전재단의 지원을 받아 수행한 원자력안전연구사업의 연구 결과입니다(No.1705002).

References

1. Y. S. Jung, "Evaluation for Continuous Operation of Nuclear Power Plant", Journal of The Electrical World/Monthly Magazine, Vol. 464, pp. 34-38 (2015).
2. C. H. Kim, S. P. An, S. M. Yeo, Y. S. Kang, S. M. An, I. S. Kim, D. S. Kim and J. S. Kang, "A Study on the Condition Monitoring for the Safety-related Electric Cables", KINS/HR-351, Korea Institute of Nuclear Safety (2001).
3. K. H. Um and K. W. Lee, "A Study on Lifetime Evaluation of High-power Cables Based on Temperature Changes", The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication, Vol. 15, No. 2, pp. 273-278 (2015).
4. D. I. Kang, G. Y. Kim and K. Y. Park, "Safety Assessment on Multiple Spurious Operation of Fire-induced Cable Failures and Their Effect on Pilot Systems", KAERI/CR-404/2010, Korea Atomic Energy Research Institute (2011).
5. H. J. Seo, N. K. Kim, M. C. Lee, S. K. Lee and Y. S. Moon, "Investigation into the Toxicity of Combustion Products for CR/EPR Cables Based on Sging Period", Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 34, No. 4, pp. 1785-1794 (2020).
6. E. H. Jang, M. H. Kim, M. C. Lee, S. K. LEE and Y. S. Moon, "Experimental Study on the Toxicity Characteristic of Non-Class 1E Cables according to Accelerated Deterioration", Fire Science and Engineering, Vol. 33, No. 6, pp. 105-113 (2019).
7. M. H. Kim, S. H. Lee, M. C. Lee, S. K. Lee and J. E. Lee, "Combustion Characteristics Analysis of a Non-class 1E Cable for Nuclear Power Plants according to Aging Period", Korean Society of Safety, Vol. 35, No. 5, pp. 22-29 (2020).
8. S. W. Han, S. B. Kwak and N. S. Choi, "Accelerated Life Prediction of Ethylene-Propylene Diene Monomer Rubber Subjected to Combined Degradation", Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers - A, Vol. 38, No. 5, pp. 505-511 (2014).
9. ISO 5660-1, "Reaction to Fire Tests - Heat Release, Smoke Production and Mass Loss Rate - Part 1 : Heat Release Rate (Cone Calorimeter Method) and Smoke Production Rate (Dynamic Measurement)" (2015).
10. Y. S. Cho, M. J. Shim and S. W. Kim, "Thermal Degradation Kinetics of PE by the Kissinger Equation", Materials Chemistry and Physics, Vol. 52, pp. 94-97 (1998).
11. W. S. Ahn and S. K. Choi, "Life Time Prediction of a Rubber Composite Using Non-Isothermal Thermogravimetric Analysis", Proceeding of 2014 Annual Conference, Korea Academy Industrial Cooperation Society, pp. 843-845 (2014).
12. B. N. Jang, I. C. Jung and J. H. Choi, "Study of a Novel Halogen-Free Flame Retardant System through TGA and Structure Analysis of Polymer", Chemicals and Electronic Materials, Vol. 112, Issue. 5, pp. 2669-2675 (2009).
13. J. Xiao, Y. Hu, L. Yang, Y. Cai, L. Song, Z. Chen and W. Fan, "Fire Retardant Synergism between Melamine and Triphenyl Phosphate in Poly(Butylene Terephthalate)", Polymer Degradation and Stability, Vol. 91, Issue. 9, pp. 2093-2100 (2006).
14. S. H. Cho and J. W. Ha, "A Study on the Synthesis of

- Organic/Inorganic Flame Retardant and Its Application”, Korea Academy Industrial Cooperation Society, Vol. 4, No. 3, pp. 218-222 (2003).
15. A. Tewarson, “Heat Release Rate in Fires”, Fire and Materials, Vol. 4, Issue. 4, pp. 185-191 (1980).
 16. Y. J. Park and H. P. Lee, “Identification on Carbon Oxide and Smoke Release Change of Aging Wire Cables”, Korean Society of Hazard Mitigation, Vol. 15, No. 4, pp. 107-113 (2015).
 17. B. W. Shin, D. S. Bang, K. S. Chung and Y. H. Song, “The Analysis of Smoke Characteristics for Wood Flour-High Density Polyethylene Composites”, Korean Society of Hazard Mitigation, Vol. 12, No. 1, pp. 141-146 (2012).
 18. H. S. Lim and D. H. Kim, “A Study on Heat-Flux Evaluation for Cable Fire Including Diagnostic Methodology for Degradation in Nuclear Power Plants”, The Korean Society of Safety, Vol. 26, Issue. 2, pp. 20-25 (2011).
 19. L. Liu, X. Chen and C. Jiao, “Influence of Ferrocene on Smoke Suppression Properties and Combustion Behavior of Intumescent Flame-Retardant Epoxy Composites”, Thermal Analysis and Calorimetry, Vol. 122, pp. 437-447 (2015).
 20. X. Chen, Y. Jiang and C. Jiao, “Smoke Suppression Properties of Ferrite Yellow on Flame Retardant Thermoplastic Polyurethane Based on Ammonium Polyphosphate”, Hazardous Materials, Vol. 266, pp. 114-121 (2014).
 21. Y. H. Lee, J. E. Yang and J. H. Kim, “Comparison of Zone Model and Field Model for Fire Risk Assessment of Nuclear Power Plant Safety Pump Room”, Proceeding of the Korean Institute of Industrial Safety Conference, pp. 540-546 (2005).