

# 경년열화 기간에 따른 원자력발전소용 비안전등급 케이블의 연소특성 분석

김민호\* · 이석희\*\* · 이민철\*\*\*† · 이상규\*\*\*\* · 이주은\*\*\*\*\*

## Combustion Characteristics Analysis of a Non-class 1E Cable for Nuclear Power Plants according to Aging Period

Min Ho Kim\* · Seok Hui Lee\*\* · Min Chul Lee\*\*\*† · Sang Kyu Lee\*\*\*\* · Ju Eun Lee\*\*\*\*\*

### †Corresponding Author

Min Chul Lee

Tel : +82-32-835-8295

E-mail : LMC@inu.ac.kr

Received : April 21, 2020

Revised : May 26, 2020

Accepted : September 22, 2020

**Abstract** : In this study, combustion and smoke release characteristics of a non-class 1E cable for nuclear power plants were investigated according to aging period. The aging was reproduced through an accelerated aging method for interval of 10 years :10, 20, 30 and 40 year, which was applied the Arrhenius equation. The cable was subjected to accelerated aging. In order to understand combustion and smoke release characteristics, the cone calorimeter test was performed according to the standard code of KS F ISO 5660-1. Heat release rate, mass loss rate, average rate of heat emission and smoke production rate were examined through cone calorimeter test. Fire performance index, fire growth index and smoke factor were derived from test results for the comparison of quantitative fire risk. When comparing the fire performance index and the fire growth index, the early fire risk tends to decrease as aging progresses, which might be attributed from the fact that the volatile substances of cables were evaporated. However, when comparing the heat release rate, average rate of heat emission and mass loss rate, which represent the mid and late periods of the fire risk, the values of accelerated aging cables were much higher than those of non-aged cable, which signifies the unstable formation of the char layer resulted in the change in the performance of flame retardants. In addition, the results from the smoke characteristics show that the accelerated aging cables were larger than the non-aged cables in terms of overall fire risk. These results can be used as baseline data when assessing fire risk of cables and establishing fire safety code for nuclear power plants.

**Key Words** : non-class 1E cable, cone calorimeter, combustion characteristics, fire safety, smoke risk

Copyright©2020 by The Korean Society of Safety All right reserved.

## 1. 서론

원자력발전소 케이블은 전력 및 신호를 전달하는 중요 설비로서<sup>1)</sup> 다양하게 구성됨과 동시에 원자력발전소 전 범위에 걸쳐 광범위하게 설치되어있다. 최근 원자력발전소는 설계수명을 40년에서 60년으로 연장하는

장기운전계획을 추진하여<sup>2,3)</sup> 신고리 3,4호기가 가동중에 있다. 설계수명이 길어짐에 따라 원자력발전소에 설치된 구조물, 계통 및 기기들에 대한 경년열화(Aging)관리의 중요성이 대두되고 있다<sup>4)</sup>.

경년열화는 케이블을 구성하는 피복재(Sheath) 및 절연재(Insulation)의 성질 변화를 야기시킬 수 있으며, 이

\*인천대학교 안전공학과 석사과정 (Department of Safety Engineering, Incheon National University)

\*\*인천대학교 안전공학과 학사과정 (Department of Safety Engineering, Incheon National University)

\*\*\*인천대학교 안전공학과 교수 (Department of Safety Engineering & Fire Disaster Prevention Research Center, Incheon National University)

\*\*\*\*한국원자력안전기술원 계통평가실 책임연구원 (Department of Reactor System, Korea Institute of Nuclear Safety)

\*\*\*\*\*한국원자력안전기술원 계통평가실 주임연구원 (Department of Reactor System, Korea Institute of Nuclear Safety)

러한 성질변화는 케이블의 난연성능을 변화시켜 케이블에 화재가 발생하였을 시 기능상실을 유발할 수 있다<sup>2)</sup>. 그러나 케이블 화재 시, 직접적인 불꽃 접촉으로 인한 케이블의 기능상실뿐만 아니라 케이블이 연소하면서 발생하는 연기로 인한 위험도 존재한다.

앞선 선행연구<sup>5,6)</sup>에서는 열화가 되지 않은 비안전등급 케이블의 연소 시 발생하는 유독성 가스에 대해서 연구가 진행되었다. 그러나 경년열화가 진행됨에 따라 케이블의 성능변화에 따른 화재위험성을 고려할 필요가 있다. Seo et al<sup>7)</sup>, Jang et al<sup>8)</sup>이 보고한 바에 따르면 경년열화가 진행된 케이블의 연소 시 방출되는 가스의 독성지수가 비노화 케이블에 비해 높게 측정되었다고 보고하였다. 그러나 케이블 화재 시 연기의 유독성뿐만 아니라 연기로 인한 시야 확보의 어려움과 화재 시 방출되는 열특성의 위험이 존재하기에 전반적인 화재 위험성에 대해 분석할 필요가 있다.

본 연구에서는 원자력발전소에서 사용되는 비안전등급 케이블 1종에 대해 콘 칼로리미터 시험장비를 이용하여 연소특성 및 연기특성을 측정하여 경년열화 기간에 따른 화재위험성의 변화에 대해 분석하였다.

## 2. 시험재료 및 방법

### 2.1 시험재료

본 연구에서는 국내 원자력발전소에서 사용되는 비안전등급 케이블 1종을 선정하였고 케이블의 경년열화는 가속열화 시험을 통해 재현하였다. 해당 케이블의 성분은 Table 1에 제시하였으며, 구조는 Fig. 1과 같다.

Table 1. Specification of experimental cable specimens

Division		Detail
Application		Power/control
voltage [V]		600
Total thickness [mm]		25
Material properties	Sheath	Polychloroprene rubber (CR)
	Insulation	Ethylene propylene rubber (EPR)
	Conductor	Copper

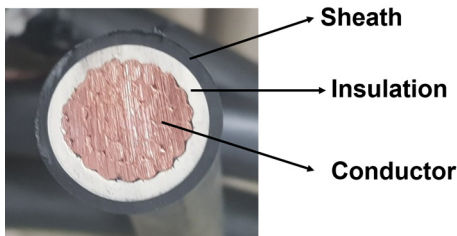


Fig. 1. Non-class 1E cable cross section.

본 연구에서 사용된 케이블은 전력/제어용 케이블로서 Polychloroprene rubber (CR)의 피복재, Ethylene-propylene rubber (EPR)의 절연재 그리고 동선으로 구성되어있다.

### 2.2 시험방법

#### 2.2.1 가속열화 시험

가속열화는 TGA (Thermalgravimetric analysis) 실험을 통해 활성화에너지를 산출 후 Arrhenius 식을 통하여 가속열화 시간을 계산하여 가속열화를 진행하였다.

TGA 실험은 상온에서 600°C까지 승온속도 5, 10, 15, 20°C/min의 조건으로 실험을 진행하였다. 해당 승온속도에 따른 열분해 온도를 측정하여 Kissinger 식<sup>7)</sup>을 통하여 활성화에너지를 산출하였다. Kissinger 식은 식 (1)과 같으며, 승온속도에 따른 TGA 실험 결과를 Table 2에 제시하였다.

$$-\ln\left(\frac{\beta}{T_m^2}\right) = \frac{E_a}{RT_m} - \ln\left(\frac{AR}{E_a}\right) \quad (1)$$

- $\beta$  : 승온속도 (°C/min)
- $T_m$  : 승온속도에 따른 열분해 온도 (K)
- $E_a$  : 활성화에너지 (kJ/mol)
- $R$  : 이상기체상수 (J/K · mol)
- $A$  : 사전지수상수

Table 2. TGA test results at different heating rates

$\beta$ (°C/min)	$T_m$ (K)	$1/T_m \times 10^3$	$-\ln(\beta/T_m^2)$
5	613.32	1.63047	11.22833
10	626.13	1.59711	10.57653
15	633.14	1.57942	10.19333
20	636.92	1.57005	9.91755

식 (1)의 좌변과 우변의  $1/T_m$ 의 선형함수를 통해 기울기를 산출 후 이상기체상수로 나누어 활성화에너지를 산출하였다. 산출된 활성화에너지는 177.0 kJ/mol (=1.834 eV)이며 해당 값을 Arrhenius 식에 적용하여 가속열화시간을 산출하였다.

Arrhenius 식은 사용온도에 따른 반응속도에 관련한 식으로 이에 의해 화학적 반응의 속도 예측에 사용되며, 사용온도와 기간에 따른 가속열화 시간을 예측하는데 일반적으로 사용된다<sup>9)</sup>. Arrhenius 식은 가속계수 k, 활성화에너지  $E_a$ , 볼츠만 상수 R, 온도 T의 관계로 표현되며 식 (2)와 같다.

$$\ln\left(\frac{k_2}{k_1}\right) = \left(\frac{E_a}{R}\right) \times \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}\right) \quad (2)$$

- $k_1$  : 가속열화시간(hour)
- $k_2$  : 등가수명(hour)
- $E_a$  : 활성화에너지(eV)
- $R$  : 볼츠만상수(eV/K)
- $T_1$  : 가속열화온도(K)
- $T_2$  : 사용온도(K)

여기서  $T_2$ 는 원자력발전소 내의 600V급 제어 케이블의 내환경검증시험의 정상조건인 120F(=322.04K)<sup>10</sup>보다 더 보수적으로 11K정도 더 높게 333K(=60°C)을 적용하였고,  $T_1$ 은 열화챔버의 운전조건과 적절한 가속열화시간의 산출을 고려하여 373K(=100°C)으로 설정하였다. 본 연구에서는 10년 단위로 40년까지 가속열화를 진행하였으며, 식 (2)와 상기 설정된 온도조건으로부터 계산된 가속열화에 필요한 시간은 Table 3과 같다.

**Table 3.** Required time for the accelerated aging calculated by the Arrhenius equation

Aging period [year]	Required time for the Accelerated aging [hour]
10	92
20	185
30	277
40	369

**2.2.2 ISO 5660-1 콘 칼로리미터 시험**

시험편의 연소 및 연기특성을 확인하기 위하여 KS F ISO 5660-1<sup>11</sup>규격에 의거하여 콘 칼로리미터 시험법을 수행하였다. 해당 시험방법은 시험편들의 화재 거동에 대한 평가 인자들을 측정할 수 있으며<sup>12</sup>, 열방출률(Heat Release Rate, HRR), 총 방출열량(Total Heat Release, THR), 질량감소율(Mass Loss Rate, MLR), 평균 열방사율(Average Rate of Heat Emission, ARHE) 등의 연소특성에 대한 인자와 배기 덕트에 있는 연기를 통해 투과되는 레이저 빛 세기의 비율을 측정하여 감광계수(Extinction coefficient, k)를 계산 후 연기발생률(Smoke production rate, SPR), 총 연기발생량(Total Smoke Release, TSR) 등 연기특성에 대한 인자 측정이 가능하다.

본 시험의 조건을 Table 4에 나타내었다. 콘 히터는 열유속 50 kW/m<sup>2</sup>, 배출유량 0.024±0.002 m<sup>3</sup>/s의 조건으로 3회 시험을 진행하여 평균을 구하여 결과를 도출함으로써 실험의 신뢰도를 제고시키고자 하였다. 시험편은 해당 규격에 의거하여 가로, 세로 100×100 mm<sup>2</sup> 크기로 제작하였다.

**Table 4.** Test conditions of cone calorimeter

Division	Detail
The size of specimens [mm <sup>3</sup> ]	100×100×25
A number of tests per specimens	3
Test running time [s]	2400
Heat flux of cone heater [kW/m <sup>2</sup> ]	50
Exhaust flow [m <sup>3</sup> /s]	0.024±0.002

**3. 연구 결과**

**3.1 연소특성 분석**

비안전등급 케이블의 화재 거동 및 화재 특성 분석을 위해 콘 칼로리미터 시험을 통한 연소특성 인자들을 분석하였다. 연소특성에 대해서는 초기 연소특성과 전반적인 연소특성으로 나누어 분석하였다.

초기 연소특성에 대해서는 화재성장지수(Fire-Growth Index, FGI), 화재성능지수(Fire Performance Index, FPI)를 이용하였다. 화재성장지수는 초기 열방출률 피크값(Peak of Heat Release Rate, PHRR)과 초기 열방출률 피크값에 도달하는 시간(Time to PHRR)에 대한 비로 구해지며, 식 (3)과 같다.

$$FGI = \frac{PHRR_{1st}}{time\ to\ PHRR_{1st}} \tag{3}$$

화재성능지수는 착화시간(Time to Ignition, TTI)과 초기 열방출률 피크값에 대한 비로 구해지며, 식 (4)와 같다.

$$FPI = \frac{TTI}{PHRR_{1st}} \tag{4}$$

화재성장지수와 화재성능지수는 플래쉬오버(Flash-over)의 경향을 나타내는 지표로 사용되었다<sup>13,14</sup>. 화재위험성은 식 (5)와 같은 상관관계를 가진다.

$$Fire\ Risk \propto \frac{FGI}{FPI} \tag{5}$$

비안전등급 케이블의 경년열화 기간에 따른 시험결과를 Table 5에 나타내었고, 화재성능지수와 화재성장지수를 Fig. 2에 도시하였다.

화재성장지수의 경우에는 비노화 케이블과 10년 경년열화 케이블이 큰 차이를 보이지는 않았으며, 이후 20년 경년열화 케이블부터 경년열화 기간이 길어질수

Table 5. Combustion characteristics obtained from cone calorimeter test

Aging period [year]	PHRR <sub>1st</sub> [kW/m <sup>2</sup> ]	time to PHRR <sub>1st</sub> [s]	TTI [s]	FGI [kW/m <sup>2</sup> · s]	FPI [s · m <sup>2</sup> /kW]	Initial mass [g]
0	257.64	60	41	4.29	0.1591	700
10	262.64	62	40	4.24	0.1523	694.3
20	243.10	64	40	3.80	0.1645	681.3
30	204.87	60	37	3.41	0.1806	651.7
40	195.88	58	38.5	3.38	0.1965	667

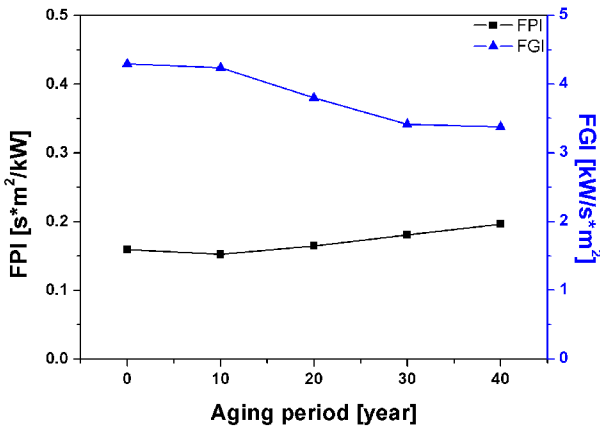


Fig. 2. FPI and FGI with respect to accelerated aging period.

록 낮게 측정되었다. 이와는 반대로 화재성능지수의 경우 경년열화 기간이 길어질수록 크게 측정되었다. 식 (5)의 상관관계에 따라 경년열화 기간이 길어질수록 화재위험도는 낮아지는 경향을 보였다. 이는 초기 열방출률 피크값이 10년 이후의 경년열화가 진행됨에 따라 큰 수치로 감소하는 것이 주요 요인으로 판단된다. 이는 케이블에 존재하던 휘발성 물질이 열화과정을 거치면서 증발됨에 따라 초기 최대 열방출률 값에 영향을 준 것으로 판단된다. 휘발성 물질의 증발은 시험편의 질량을 통해서 확인할 수 있다<sup>15,16)</sup>. 비노화 케이블보다 열화가 진행된 케이블들의 질량이 감소하는 경향을 보였고 이는 열화 과정 중 휘발성 물질의 증발이 이루어져 중량이 감소된 것으로 판단된다. 그러나 초기 열방출률 피크값이 낮아짐에 따라 비노화 케이블이 경년열화 케이블보다 화재위험성이 낮다고 보기에는 어려움이 따른다. 경년열화가 진행됨에 따라 물리적, 화학적 성질의 변화가 생길 수 있고<sup>17)</sup> 케이블의 난연제의 성능저하로 이어져 화재위험성이 높아질 수 있다.

비노화 케이블과 열화케이블들의 전반적인 화재위험성을 확인하기 위해 Figs. 3-6에 시간에 따른 열방출률, 총 방출열량, 질량감소율, 평균 열방사율을 도시하였다.

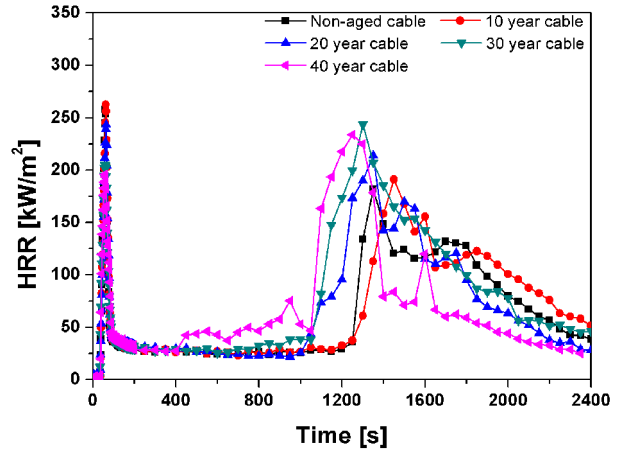


Fig. 3. Time series HRR with respect to accelerated aging period.

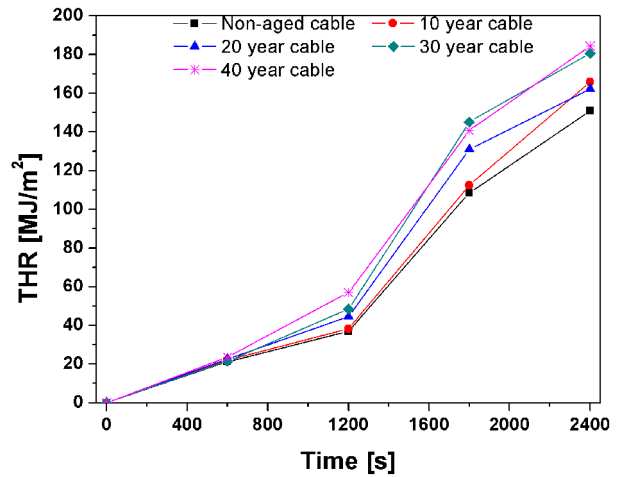


Fig. 4. Time series THR with respect to accelerated aging period.

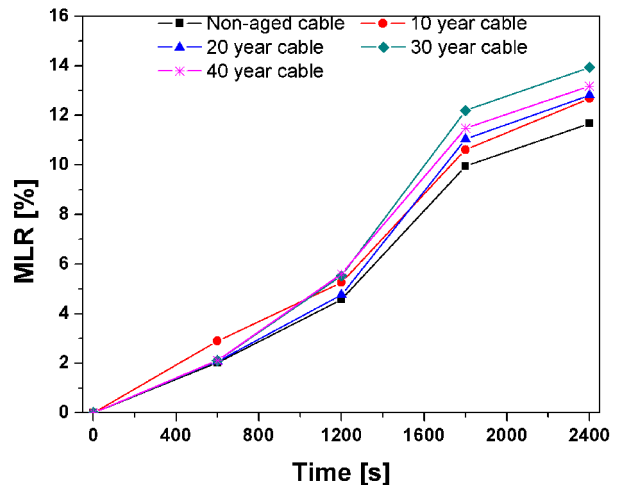


Fig. 5. Time series MLR with respect to accelerated aging period.

Fig. 3의 열방출률의 경우, 60초 내외로 초기 열방출률 피크값에 도달 후 급격히 감소 후 1200초까지 낮은 열방출률값을 유지하였다. 이는 char층의 형성되어 내

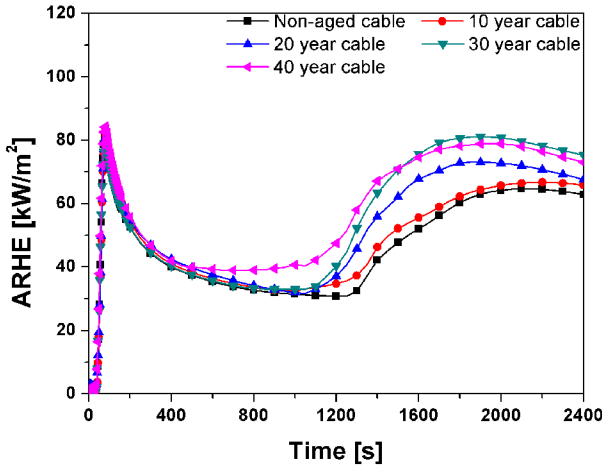


Fig. 6. Time series ARHE with respect to accelerated aging period.

부로의 열침투를 막아 열분해를 지연시키는 것으로 판단된다. 경년열화가 진행됨에 따라 char층이 불안정하게 유지되는 경향을 보였으며, 400초대 이후 경년열화 케이블들의 열방출률이 일정하게 유지되는 시간이 짧아지는 것으로 확인이 가능하다. 이는 재료 표면의 char층이 형성되고 분해되는 과정이 계속됨에 따라 열이 흡수되고 방출되는 과정이 계속되고 있음을 의미한다<sup>18)</sup>. 이후 2차 열방출률 피크값은 비노화 케이블이 181 kW/m<sup>2</sup>으로 측정되었으며, 경년열화 케이블들은 비노화 케이블보다 10-60 kW/m<sup>2</sup> 높게 측정되었다. 열방출률은 비감쇠면적(Specific Extinction Area, SEA), 질량감소율 등과 같은 중요한 화재반응 특성과 관련이 있으며, 화염 확산을 판단하는데 중요 요소로 간주된다<sup>19)</sup>.

Fig. 4에 600초 단위로 시험편의 총 방출열량을 나타내었다. 총 방출열량의 경우, 600초 이후 경년열화가 진행됨에 따라 높아지는 경향이 나타났다. 모든 케이블에서 char층이 분해되어 2차 열방출률 피크값으로 도달하는 1200초 이후 총 방출열량값이 급격히 커짐을 확인하였다. 2400초에서 측정된 총 방출열량의 경우, 비노화 케이블이 150 MJ/m<sup>2</sup>이며, 경년열화 케이블들은 비노화 케이블보다 약 10-35 MJ/m<sup>2</sup> 높게 측정되었다.

Fig. 5에 600초 단위로 시험편의 질량감소율을 나타내었다. 질량감소율은 식 (6)과 같이 초기 질량값에 대한 감소율로 표현된다.

$$MLR(\%) = \frac{m_0 - m_t}{m_0} \times 100 \quad (6)$$

$m_0$  : 초기 질량(g)  
 $m_t$  : 시간 t에서의 질량(g)

질량감소율은 경향성은 열방출률 피크값과 유사한 경향을 보였는데, 초기 열방출률 피크값이 가장 크게 측정된 10년 경년열화 케이블이 600초에서 가장 큰 질량감소율을 보였으며, 2차 열방출률 피크값이 가장 크게 측정된 30년 경년열화 케이블이 1200초 이후 가장 큰 질량감소율을 보였다. 이는 열방출률과 마찬가지로 char층의 불안정한 형성이 지속적인 열방출을 기인하여 비노화 케이블보다 경년열화 케이블에서 더 큰 질량감소율을 보인 것으로 판단된다.

Fig. 6의 평균 열방출율을 나타내었다. 평균 열방출율은 누적된 열 방출을 시간으로 나눈 값으로 식 (7)과 같이 산출된다. 평균 열방출율과 최대 평균 열방출율(Maximum Average Rate of Heat Emission, MARHE)은 화재 성장에 관한 경향을 파악하는데 주요 인자로 고려된다<sup>20-21)</sup>.

$$ARHE(t_n) = \frac{\sum_{t=2}^n ((t_n - t_{n-1}) \times \frac{q_n + q_{n+1}}{2})}{t_n - t_0} \quad (7)$$

$t_n$  : 시간(s)  
 $q_n$  :  $t_n$ 일 때 열방출률(kW/m<sup>2</sup>)

최대 평균 열방출율은 모든 케이블에서 78~80초에 측정되었으며, 80 kW/m<sup>2</sup> 내외로 큰 차이를 보이지는 않았다. 그러나 1200초 이후 평균 열방출율은 비노화 케이블보다 경년열화 케이블에서 큰 차이를 보였는데, 1200초 이후 최대 평균 열방출율은 비노화 케이블이 64.7 kW/m<sup>2</sup>으로 측정되었으며 20년 이후 경년열화 케이블은 비노화 케이블보다 약 10-15 kW/m<sup>2</sup> 크게 측정되었다.

케이블의 전반적인 연소특성의 측면에서 비열화 케이블과 비교하였을 때, 30년 이상 경년열화 케이블의 2차 열방출률 피크값은 약 30%, 그에 따른 총 방출열량은 약 18% 증가하여 열방출 특성의 위험성이 증가함을 확인하였다. 또한 최대 평균 열방출율의 경우, 30년 이상 경년열화 케이블에서 약 20% 이상 증가하여 화염 확산의 위험성이 높아질 수 있다. 이는 열화가 진행됨에 따라 char층이 불안정하게 형성되어 지속적인 열방출이 발생된 것으로 판단된다.

### 3.2 연기특성 분석

케이블 화재 발생 시 방출되는 연기에 대한 위험도 분석을 위해 콘 칼로리미터 시험을 통하여 측정가능한 연기특성 인자들을 분석하였다. Figs. 7-9에 연기특성 인자들을 도시하였다.

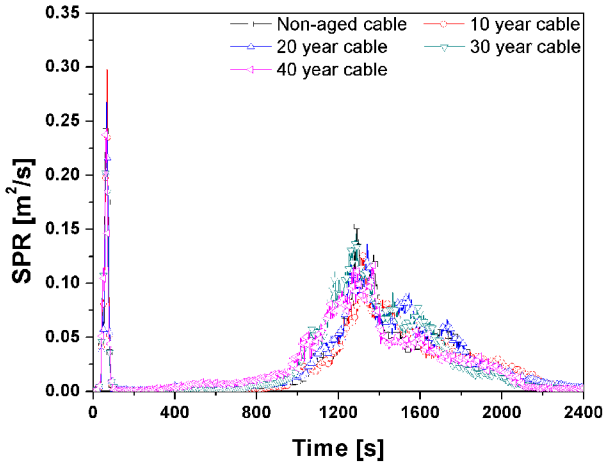


Fig. 7. Time series SPR with respect to accelerated aging period.

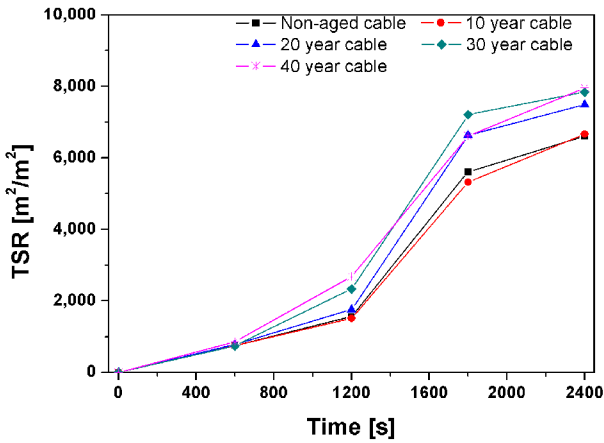


Fig. 8. Time series TSR with respect to accelerated aging period.

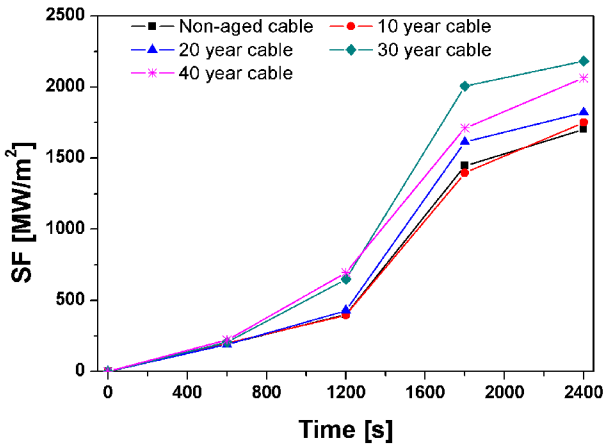


Fig. 9. Time series SF with respect to accelerated aging period.

Fig. 7에 연기발생률을 나타내었다. 연기발생률(SPR,  $m^2/s$ )은 감쇠계수(Extinction coefficient,  $k$ )와 연기배출량의 곱으로 산출된다. 모든 케이블들이 60초대에 초기 연기발생률 피크값에 도달했으며, 10년 경년열화

케이블이  $0.298 m^2/s$ 로 가장 크게 측정되었다. 비노화 케이블은  $0.263 m^2/s$ 로 측정되었으며, 20년, 30년, 40년 경년열화 케이블들보다 큰 값이 측정되었다. 그러나 열방출률 그래프와 유사하게 400초대 이후 40년 경년열화 케이블의 연기발생률이 가장 먼저 증가하는 경향을 보였으며, 비노화 케이블이 1000초 이후에 증가하는 경향을 보였다. 그에 따른 총 연기발생량에 영향을 주었다.

Fig. 8에 600초 단위로 시험편의 총 연기발생량을 나타내었다. 총 연기발생량은 시험편의 노출면적에 따른 연기발생량으로 식 (8)에 의해 계산된다.

$$TSR(m^2/m^2) = A^{-1} \sum_{i=s}^n \dot{V}_S k \Delta t \quad (8)$$

$A$  : 시험편의 노출면적 ( $m^2$ )  
 $\dot{V}_S$  : 연기배출량 ( $m^3/s$ )  
 $k$  : 감쇠계수 ( $1/m$ )

총 연기발생량의 경우, 초기 연기방출률 피크값 도달 후 축적된 연기량은 40년 경년열화 케이블이  $859 m^2/m^2$ 으로 가장 크게 측정되었으며, 나머지 케이블들은  $750 m^2/m^2$  내외로 큰 차이를 보이지 않았다. 그러나 40년 경년열화 케이블은 400초 이후, 20년, 30년 경년열화 케이블은 800초 이후에 연기발생률이 증가함에 따라 1800초의 총 연기발생량이 비노화 케이블과 10년 경년열화 케이블보다 큰 값으로 측정되었다. 따라서 초기 화재가 진행된 후 약 5분이 경과한 뒤에는 경년열화가 진행될수록 연기발생량의 차이가 크게 발생됨을 확인하였다.

Fig. 9에는 연기지수(Smoke factor, SF)를 나타내었다. 연기지수는 최대 열방출률값과 총 연기발생량의 곱으로 표현되며<sup>22,23</sup>, 난연재료의 연기억제 성능을 비교하는 지수로서 사용된다<sup>24</sup>. 연기인자의 경우, 경년열화 케이블들은 비노화 케이블보다 약 2.8~28%까지 값이 증가하였다. 30년, 40년 경년열화 케이블들의 경우 비노화 케이블보다 20% 이상 값이 증가하였는데, 이는 1200초 이후 2차 열방출률 피크값이 초기 열방출률 피크값보다 큰 값이 측정되어 연기인자에 영향을 주었으며, 총 연기발생량도 약 20% 내외로 값이 증가하여 연기인자 값도 30년 이상 경년열화 케이블에서 큰 값으로 증가하였다.

연기특성은 연소특성과 유사한 경향을 보였는데, 초기 연기발생률 피크값은 경년열화가 진행됨에 따라 낮아지는 경향을 보였으나, 400초 이후 경년열화가 된 케이블에서 연기발생률이 증가하게 되면서 600초 이후

총 연기발생량과 연기인자의 값이 비노화 케이블과 비교하였을 시, 크게 증가됨을 확인하였다. 특히, 30년, 40년 경년열화 케이블들에 경우, 비노화 케이블에 비해서 약 20% 이상 값이 증가하여, 전반적인 화재위험도는 경년열화가 진행된 케이블이 더 위험하다고 판단된다.

#### 4. 결론 및 고찰

본 연구에서는 원자력발전소에서 사용되는 비안전등급 케이블에 대하여 가속열화 시험을 진행하여 경년열화에 따른 화재위험성 분석을 실시하였다. 화재위험성 분석은 KS F ISO 5660-1 규격에 의거하여 콘 칼로리미터 시험을 통해 측정된 연소특성 및 연기특성 인자들을 비교 분석하였으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) 비안전등급 케이블의 연소특성의 경우, 초기 연소특성과 전반적인 연소특성을 비교 분석하였다. 초기 연소특성의 경우, 화재성능지수와 화재성장지수를 산출하여 비교하였다. 두 지수 모두 초기 열방출률 피크값에 큰 영향을 받았으며, 경년열화가 진행될수록 화재성능지수는 증가하는 경향을 보였고 화재성장지수는 감소하는 경향을 보였다. 이는 열화과정 중 케이블 내 휘발성 물질들의 증발로 이어져 초기 열방출률 피크값이 감소한 것으로 판단된다. 그렇지만 초기 열방출률 피크값의 감소가 경년열화가 진행됨에 따라 화재위험성이 낮아진다고 보기에는 어려움이 있으며, 시간에 따른 열방출률, 총 열방출량, 질량감소율 등을 통해 초기 이후 연소특성을 분석함으로써 경년열화가 진행됨에 따라 화재위험성이 높아지는 것으로 확인하였다. 이는 열화과정 중 케이블에 첨가된 난연제의 성능 저하로 인하여 char층 유지시간이 짧아져 지속적인 열방출을 통해 열분해가 이루어진 것이 주된 원인으로 판단된다.

2) 연기특성의 경우, 연기지수를 통해 연기위험도에 대해서 정량적인 비교를 하였다. 연기지수는 연기위험도와 비례적인 관계에 있다. 연기지수의 경우, 경년열화가 진행됨에 따라 28%까지 값이 증가하는 경향을 보였으며, 30년 이상 경년열화 케이블이 1200초 이후 열방출률값이 초기 열방출률 피크값보다 크게 증가하면서 연기인자에 영향을 주었다. 또한 총 연기발생량도 경년열화가 진행됨에 따라 약 20% 내외로 증가하는 경향을 보였다.

3) 따라서, 연소특성 및 연기특성의 인자들이 비열화

케이블에 비해 30년 이상 열화된 케이블에서 약 20% 증가하는 경향을 보였으며, 그에 따른 화재위험성이 증가한다고 판단된다.

추후 연구에서는 원자력발전소의 방사선이라는 특수한 경우를 고려하여 방사선이 케이블 화재에 미치는 영향에 대해서 연구를 진행하고자 한다.

**감사의 글:** 본 연구는 원자력안전위원회의 재원으로 한국원자력안전재단의 지원을 받아 수행한 원자력안전연구사업의 연구결과입니다 (No. 1705002).

#### References

- 1) D. H. Kim and H. S. Lim, "A Study on Cable Functional Failure Temperature by Exposed Fire in Nuclear Power Plants", J. Korean Soc. Saf., Vol. 26, No. 5, pp. 41-45, 2011.
- 2) 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", J. Korean Soc. Saf., Vol. 26, No. 2, pp. 20-25, 2011.
- 3) L. J. Bond, P. Ramuhalli, M. S. Tawfik and N. J. Lybeck, "Prognostics and Life Beyond 60 Years for Nuclear Power Plants", 2011 IEEE Conference on Prognostics and Health Management, Montreal, QC, pp. 1-7, 2011.
- 4) T. H. Kim, "Sicherheitssysteme durch Atonrechtssystem", Administrative Law Journal, Vol. 30, pp. 39-65, 2011
- 5) H. J. Seo, N. K. Kim, J. M. Jo, M. C. Lee, S. K. Lee and Y. S. Moon, "A Study on the Human Toxicity of Combustion Products for Non Class 1E Cables", J. Korean Soc. Hazard Mitig., Vol. 18, No. 2, pp. 215-222, 2018.
- 6) H. J. Seo, N. K. Kim, M. C. Lee, S. K. Lee and Y. S. Moon, "An Experimental Study on the Combustion Characteristics of Non Class 1E Cables", J. Korean Soc. Combust., Vol. 24, No. 1, pp. 15-24, 2019.
- 7) 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 Aging Period", Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 34, pp. 1785-1794, 2020.
- 8) E. H. Jang, M. H. Kim, M. C. Lee, S. K. Lee and Y. S. Moon, "Experimental Study on the Toxicity Characteristics of Non-Class 1E Cables according to Accelerated Deterioration", Fire Sci. Eng., Vol. 33, No. 6, pp. 1-9, 2019.
- 9) C. Lee, K. Y. Kim and P. H. Kang, "Evaluation of Electrical and Mechanical Properties of Thermally Deteriorated

- Cables for Nuclear Power Plant”, Applied Chemistry, Vol. 10, No. 1, pp. 13-16, 2006.
- 10) KINS Technical Review Report, “Technical Review Report on the Results of Device Verification of a Class 1E Low Voltage Cable (for 600V Control and Instrumentation) for SKN unit 3&4”, 2014.
  - 11) ISO 5660-1, “Reaction to Fire Tests - Heat Release, Release Rate(cone calorimeter method) and Smoke Production Rate(Dynamic Measurement)”, 2015.
  - 12) G. Makhlof, M. Hassan, M. Nour, Y. K. Abdel-Monem and A. Abdelkhalik, “Evaluation of Fire Performance of Linear Low-density Polyethylene Containing Novel Intumescent Flame Retardant”, J Therm Anal Calorim., Vol. 130, pp. 1031-1041, 2017.
  - 13) M. S. Cross, P. A. Cusack and P. R. Hornsby, “Effects of Tin Additives on the Flammability and Smoke Emission Characteristics of Halogen-free Ethylene-vinyl Acetate Copolymer”, Polymer Degradation and Stability, Vol. 79, Issue 2, pp. 309-318, 2003.
  - 14) M. M. Hirschler, “Use of Heat Release Rate to Predict whether Individual Furnishings would Cause Self Propagating Fires”, Fire Safety Journal, Vol. 32, Issue 3, pp. 273-296, 1999.
  - 15) I. Janajreh, M. Alshrah and S. Zamzam, “Mechanical Recycling of PVC plastic Waste Streams from Cable Industry: A Case Study”, Sustainable Cities and Society, Vol. 18, pp. 13-20, 2015.
  - 16) B. S. Lim and H. H. An, “A Study on the Pyrolysis and Combustion Properties on Industrial Plastics”, The Korean Institute of Gas, Vol. 20, No. 1, pp. 46-51, 2016.
  - 17) J. Y. Shin, K. H. Kim and W. S. Nah, “A Study on the Deterioration Diagnosis of 600V Shielded Twisted Pair Control/Measurement Cable using Resonance Frequency”, The Transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers, Vol. 64, No. 12, pp. 1768-1775, 2015.
  - 18) H. J. Seo, N. K. Kim, J. M. Jo and M. C. Lee, “An Experimental Study on the Development of Fire-retardant Treated Wood for Construction”, J. Korean Soc. Saf., Vol. 32, No. 5, pp. 149-156, 2017.
  - 19) L. Ahmed, B. Zhang, R. Shen, R. J. Agnew, H. Park, Z. Cheng, M. S. Mannan and Q. Wang, “Fire Reaction Properties of Polystyrene-based Nanocomposites using Nanosilica and Nanoclay as Additives in Cone Calorimeter Test”, J Therm Anal Calorim., Vol. 132, pp. 1853-1865, 2018.
  - 20) M. Sacristán, T. R. Hull, A. A. Stec, J. C. Ronda, M. Galià and V. Cádiz, “Cone Calorimetry Studies of Fire Retardant Soybean-oil-based Copolymers Containing Silicon or Boron: Comparison of Additive and Reactive Approaches”, Polymer Degradation and Stability, Vol. 95, Issue 7, pp. 1269-1274, 2010.
  - 21) E. Jin and Y. J. Chung, “Fire Risk of Wood Treated With Boron Compounds by Combustion Test”, Fire Sci. Eng., Vol. 32, No. 3, pp. 19-26, 2018.
  - 22) M. R. Ricciardi, V. Antonucci, M. Zarrelli and M. Giordano, “Fire Behavior and Smoke Emission of Phosphate-based Inorganic Fire-retarded Polyester Resin”, Fire Mater, Vol. 36, pp. 203-215, 2011.
  - 23) C. Jiao, M. Li, X. Zhang and X. Chen, “Smoke Suppression of [Glu]H<sub>2</sub>PW<sub>12</sub>O<sub>40</sub> in Thermoplastic Polyurethane Elastomer”, J Therm Anal Calorim 2019, <https://doi.org/10.1007/s10973-019-09134-3>, 2019
  - 24) J. Hu and F. Zhang, “Self-assembled Fabrication and Flame-retardant Properties of Reduced Graphene Oxide/Waterborne Polyurethane Nanocomposites”, J Therm Anal Calorim, Vol. 118, pp. 1561-1568, 2014.