

[Research Paper]

## 가속열화에 따른 비안전등급 케이블의 독성특성에 관한 실험적 연구

장은희 · 김민호 · 이민철<sup>†</sup> · 이상규<sup>\*\*</sup> · 문영섭<sup>\*\*\*</sup>

인천대학교 안전공학과 학사과정, <sup>\*</sup>인천대학교 안전공학과/소방방재연구센터 교수, <sup>\*\*</sup>한국원자력안전기술연구원 책임연구원,  
<sup>\*\*\*</sup>한국원자력안전기술연구원 선임연구원

## Experimental Study on the Toxicity Characteristics of Non-Class 1E Cables according to Accelerated Deterioration

Eun-Hui Jang · Min-Ho Kim · Min Chul Lee<sup>†</sup> · Sang-Kyu Lee<sup>\*\*</sup> · Young-Seob Moon<sup>\*\*\*</sup>

Undergraduated Student, Dept. of Safety Engineering, Incheon National Univ.,

<sup>\*</sup>Professor, Dept. of Safety Engineering/Fire Disaster Prevention Research Center, Incheon National Univ.,

<sup>\*\*</sup>Principle Researcher, Dept. of Reactor System Performance, Korea Institute of Nuclear Safety,

<sup>\*\*\*</sup>Senior Researcher, Dept. of Reactor System Performance, Korea Institute of Nuclear Safety

(Received November 8, 2019; Revised November 27, 2019; Accepted November 27, 2019)

### 요 약

본 연구에서는 원자력발전소용 비안전등급케이블 2종(보안상 A사, B사로 지칭기로 함)을 대상으로 가속열화 기간에 따른 독성 특성을 분석하였다. NES 713 시험장비 및 규격에 의거하여 비노화, 20년, 40년으로 가속열화한 케이블에 대해 피복재 및 절연재로 구분하여 시험하였다. 시험결과 20년, 40년 가속열화 케이블의 독성지수가 비노화 케이블의 독성지수보다 높았으며 A, B사 케이블 공통적으로 20년 가속열화 케이블에서의 독성지수가 높게 산출되었다. 이는 급증한 일산화탄소의 방출량과 더불어 염화수소와 브롬화수소의 할로겐계 가스 방출량이 높은 것이 주된 원인으로 파악되었다. 또한, 피복재와 절연재를 구분하여 분석 시 A, B사 케이블 일부 피복재의 독성지수가 높게 나타났다. 또한, 피복재와 절연재의 독성지수를 구체적으로 분석하고자 미국 국방성 규격인 MIL-DTL을 적용하여 독성지수 허용치 초과 여부를 판단하였으며, 이 중 절연재의 경우 상당량 초과하여 방출되는 결과를 보였다.

### ABSTRACT

This study investigates the toxicity characteristics of two Non-Class 1E Cables (For security reasons, we refer to company A and company B) used in nuclear power plants according to the accelerated deterioration period. In accordance with NES 713 test equipment and standards, tests were carried out on non-aged cables and the cables subjected to 20- and 40-year-accelerated-deterioration; each of the cables was further classified into sheath and insulation. The test results showed that the toxicity indices of 20- and 40-year-accelerated-aged cables were higher than those for the non-aged cables, and 20-year-aged cables of both A and B companies showed the highest toxicity indices. This is attributed to the extensive emissions of carbon monoxide and halide gases such as hydrogen chloride and hydrogen bromide. Furthermore, to analyze the toxicity indices of sheath and insulation in detail, the US Department of Defense standard (MIL-DTL) was applied to determine whether the Toxicity index (T.I.) allowance was exceeded, and the results showed that the insulating materials emitted considerably more than the allowable limit.

**Keywords** : Non-class 1E cable, NES 713, Toxicity index, Combustion gas, Human hazardousness

### 1. 서 론

우리나라는 한강의 기적이라고 불리는 급격한 산업발전과 함께 전력분야에 있어서 전력소비량의 양적 증가, 전력시설물의 대형화, 초고압 전력시설의 건설 등 기술의 고도

화를 이루어 왔다<sup>(1)</sup>. 이를 대표할 수 있는 통계량 중 하나로서, 1인당 전력소비량은 1981년 915 kWh에서 2017년 9,869 kWh로 10배 이상 증가하였다. 이러한 전력소비를 담당하기 위한 발전원으로써 원자력발전소는 국내 전체 발전량의 33.5%(2018년 기준)를 차지하면서 화력발전소와 더불어

<sup>†</sup>Corresponding Author, E-Mail: [LMC@inu.ac.kr](mailto:LMC@inu.ac.kr). TEL: +82-32-835-8295, FAX: +82-32-835-0779

© 2019 Korean Institute of Fire Science & Engineering. All right reserved.

어 국내 에너지 생산에 있어 중요한 역할을 담당하고 있다. 그러나 원자력발전소는 방사성물질을 취급하고 있으며 방사성물질의 위험성에 대한 안정적 운용 및 안전한 설계를 위하여 심층방어(Defense-in-depth) 개념을 통한 다중방호를 적용하고 있다. 심층방어란 사고 예방 및 완화를 목적으로 다단계의 장벽(Barrier) 체계를 갖추어 방사성유출을 억제함으로써 자연 및 사람에게 도달하지 않게 방어하는 시스템이다. 2006년 국제 원자력 기구(International atomic energy agency, IAEA)에서는 심층방어를 원자력 발전소 사고 예방 및 완화를 위한 가장 중요한 수단으로 정의하였다<sup>(2)</sup>.

원자력발전소 화재방호 계통 또한 심층방어를 활용하여 설계, 설치 및 운영되며 방어체계의 첫 단계인 화재예방을 위하여 원전 안전에 중요한 구조물·계통 및 기기에 관해서는 가능한 내화, 내열재료로 사용한다. 현재 원자력 발전소 내 설치되어 있는 가연성 물질 중 가장 많은 양을 차지하고 있는 것은 케이블 피복재 및 절연재이며 이는 내화 및 난연성능이 입증되어야 한다<sup>(3)</sup>. 원자력발전소에 설치되는 케이블은 안전등급케이블(Class 1E)과 비안전등급케이블(Non-class 1E)로 구분하여 사용한다. 또한, 화재 시험 시 케이블의 외부 피복 및 절연재가 파괴되더라도 케이블이 화재를 확산시키지 않음을 입증해야 한다<sup>(4)</sup>. 그러나 케이블은 염화비닐(PVC, Polyvinyl chloride), 가교폴리에틸렌(XLPE, Cross-linked polyethylene) 및 기타 합성고무 등 주로 유기고분자 소재로 구성되기에 열 및 방사선에 취약하다는 단점이 있으며<sup>(5,6)</sup> 화재 시 원자력발전소의 안전정지 및 사고완화를 위한 안전계통 기기 등에 손상을 유발할 수 있다. 또한, 화재 시 질식성 가스(CO, HCN, CO<sub>2</sub>) 및 자극성 가스(HCl, HBr, HF, SO<sub>2</sub>) 등 유독성 가스를 배출하며, 이를 함유한 짙은 연기는 피난자의 시야를 방해하여 피난시간을 지연시키고 소방활동에 장애를 초래할 수 있다. 유독가스 중 특히 일산화탄소(CO)의 경우 공기 중의 1.28%의 CO 농도에 1-3분 노출되면 사망하는 등 인체에 치명적인 영향을 준다<sup>(7,8)</sup>. 통계청에서 보고한 바에 의하면 2018년 화재유형별 발생건수(총 2,110건) 중 건축·구조물 화재는 1,750건이었으며 연기, 유독가스 흡입으로 인한 사망(202건)은 화상으로 인한 사망(143건)보다 높았다. 이는 실제로 화재가 발생하면 화염, 고온으로 인한 화상사망보다 유독성 가스 및 다량의 연기 흡입으로 인해 의식을 잃거나 질식사할 가능성이 더 높다는 것을 통계적으로 보여주는 결과이다.

특히, 원자력발전소의 경우 이러한 화재 독성에 대한 정보는 더욱 중요하다. 원자력발전소 주제어실(Main control room)은 원전 정상운전시 뿐만 아니라, 화재, 지진 등 재난으로 인한 비정상 운전 시에도 원자로를 안전하게 운전 및 정지하기 위해 운전원이 상시 근무하여야 한다. 그러나, 화재시 발전소 계측·제어·전력용 케이블이 건물 벽을 관통하여 관련된 주제어실 제어반과 전기 캐비닛에 연결되어 있기에 완벽한 방화구역으로 구분되기 어렵고, 벽과 바닥의 관통부(Penetration)를 통해 주제어실로 연기가 유입되면

운전원의 정상적인 활동이 어려워진다<sup>(9)</sup>.

또한, 원자력발전소의 운전 수명을 안전하게 연장시키기 위해서는 원전 주요 기기구조 및 계통의 열화관리가 필요한 실정<sup>(10-12)</sup>이며, 특히 케이블은 원전가동 중 교체가 어려워 열화관리가 더욱 중요시 된다. 그럼에도 불구하고, 국내에는 케이블의 내용연수에 대한 연소 배출가스의 독성에 대한 명확한 기준이 마련되어있지 않기 때문에<sup>(4)</sup>, 본 연구를 통하여 케이블의 열화정도에 따른 화재시 발생하는 가스의 독성을 파악하고, 기술기준을 제시할 수 있는 시험데이터를 도출하고자 한다.

본 연구에 앞서 Seo 등<sup>(13)</sup>은 비노화케이블의 연소특성 및 독성특성을 분석한 선행연구를 수행하였으나, 이는 열화되지 않은 신제품의 케이블에 대한 시험연구이었으며, 본 연구에서는 가속열화된 케이블에 대해 시험을 수행하고, 열화에 따른 독성가스 배출특성을 파악하였다. Naval engineering standard (NES) 713 기술기준<sup>(14)</sup>에 따라 시험을 수행하였으며 케이블의 가속열화 기간에 따라 발생하는 연소생성물 및 방출량, 독성지수(Toxicity index) 데이터를 산출하여 정량적으로 분석하였다. 또한 산출된 독성지수는 미국국방성 규격인 MIL-DTL-24640/15D기준<sup>(15)</sup>과 비교하여 기준치를 초과하는지 여부를 판단하였다. 이러한 시험결과 및 도출된 결론은 궁극적으로 원자력발전소의 노후화에 따른 선제적 안전조치 및 수명연장시 고려해야할 위험성에 대한 기초자료로 활용됨은 물론 케이블의 내용연수에 대한 기준제시에도 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

## 2. 시험장치 및 시험방법

본 시험연구를 위해서 원자력 발전소에서 사용되는 비안전등급 케이블 2종(본 논문에서는 보안상 A사, B사로 지칭기로 함.)을 선정하고, 열화에 따른 독성특성을 분석하기 위해 비노화, 20년, 40년 가속열화를 시킨 시험편을 제작하여 시험에 사용하였다.

### 2.1 시험편

시험에 사용된 케이블 2종 모두 전압 600 V, 두께는 25 mm이다. 피복재는 도체의 기계적 손상을 방지하기 위한 것으로 Polychloroprene rubber (CR)성분으로 구성되어 있다. 절연재는 전기절연을 목적으로 Ethylene propylene rubber (EPR) 성분으로 이루어져 있다<sup>(16)</sup>. 본 케이블은 전력/제어용 케이블로 Figure 1과 같이 피복재(Sheath), 절연재(Insulation), 내부동선(Conductor)으로 구성되며, 피복재 및 절연재에 대해 각각 시험을 수행하였다.

시험 전 온도 및 수분이 시험결과에 영향을 미칠 수 있으므로 시험의 신뢰도 및 반복도를 제고하기 위해  $23 \pm 2$  °C의 온도와  $50 \pm 10\%$ 의 상대습도(Relative humidity) 조건 하에서 24시간 보존하였다. 또한, NES 713 규격에 의거하여 1-1.050 g의 무게로 2-3개의 시험편을 제작하였다.

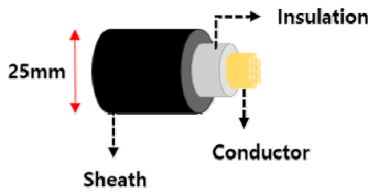


Figure 1. Structure of Non-class 1E cable.

케이블의 가속열화를 위해 Kissinger method(식 2.1)<sup>(17)</sup>을 이용하여 건전한 상태의 비노화 케이블로부터 활성화에너지(Activation energy,  $E_a$ )를 산출하였다. 이는 반응 및 분해 곡선에서 활성화에너지와 온도 상승속도 및 피크 포인트 온도간의 관계를 설명하고 Arrhenius방정식과 속도방정식을 결합한다.

$$-\ln\left(\frac{\beta}{T_m^2}\right) = \frac{E_a}{R} \cdot \frac{1}{T_m} - \ln\left(\frac{AR}{E_a}\right) \quad (2.1)$$

여기서,  $\beta$ 는 분당승온속도 ( $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ),  $T_m$ 은 최대 질량변화율에서의 온도 (K),  $E_a$ 는 활성화에너지 (kJ/mol),  $R$ 은 기체상수 (kJ/mol·K),  $A$ 는 재료에대한 상수 ( $\text{min}^{-1}$ )를 의미한다. TGA시험을 통해 산출된 활성화에너지는 A사 케이블이 163.2 kJ/mol, B사 케이블은 177.0 kJ/mol로 산출되었다. 이후 최종적으로 100  $^{\circ}\text{C}$  정온 챔버에서 목표 노화기간인 20년, 40년을 대상으로 각각 열화를 진행하였다.

## 2.2 시험방법

NES 713 규격에 따라 밀폐된 챔버에서 소량의 시험편(약 1 g)으로부터 발생하는 연소 생성물의 종류 및 방출량을 측정하여 독성지수(Toxicity index)를 산출하였다. NES 713 장비는 버너(Burner), 시험편지지대(Specimen support), 혼합팬(Mixing fan), 시간측정장치(Timing device), 가스샘플링(Gas sampling), 강제배출기(Forced air extraction system) 등으로 구성되며, NES 713의 시험조건과 개략도에 대해서 각각 Table 1 및 Figure 2에 제시하였다.

챔버내부 바닥 중앙에 버너를 설치하였으며 사용되는 기체의 혼합비율은 메탄가스 2 L/min, 공기 15 L/min로 하였다. 열전대(Thermocouple)를 이용하여 가장 뜨거운 지점에서의 온도가  $1150 \pm 25$   $^{\circ}\text{C}$ 가 되도록 하였으며 불꽃의 높이는 100-125 mm로 유지하였다. 케이블만의 독성을 파악하기 위해 메탄가스 및 공기로부터 발생 될 수 있는  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{NO}_x$ 에 대한 보정시험을 먼저 수행한 후, 실제 시험편을 연소시켰을 때 측정된 농도와 보정시험을 통해 측정된 농도 간 차이를 계산하여 메탄가스 및 공기에 의한  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{NO}_x$  발생량을 제거하였다. 즉, 시험편지지대(Specimen support)가 없는 조건에서 1 min 동안 연소시킨 후, 30 s 동안 혼합 팬(Mixing fan)을 작동시켜 균질한 연소가스 조성을 만든 후 가스검지관(Gas detector tube)을 이용하여 3종

Table 1. NES 713 Standards

Division	Detail
Specimen	- Mass : 1 + 0.050 [g]
Burner	- Flame · Height : 100-125 [mm] · Temperature : $1150 \pm 25$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]
Time	- Burning : $60 + 15 n$ [s] ( $n = 1, 2, 3 \dots$ ) - Stirring : 30 [s] - Extraction : at least 3 [min]
Gas detection tube	- Measurable gas : $\text{CO}_2$ , $\text{CO}$ , $\text{H}_2\text{S}$ , $\text{NH}_3$ , $\text{HCHO}$ , $\text{HCl}$ , $\text{H}_2\text{CHCN}$ , $\text{SO}_2$ , $\text{NO}_x$ , $\text{C}_6\text{H}_5\text{OH}$ , $\text{HCN}$ , $\text{HBr}$ , $\text{HF}$

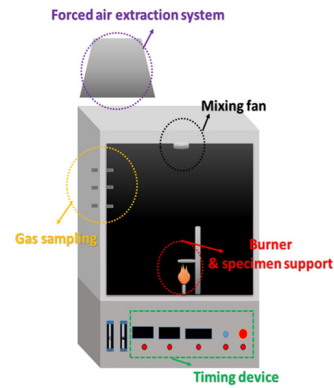


Figure 2. Structure diagram of NES 713.

류의 가스를 검출하였다. 이 후 보정시험 잔류물들은 강제추출배기장치(Forced air extraction system)를 통하여 배출하였으며 가동시간은 3 min 이상으로 하여 충분한 배기가 이루어지도록 하였다.

본 시험 수행시에는 보정시험과 동일 조건하에서 시험편 지지대의 위치를 조절한 후 케이블시험편의 전체가 화염에 60 s 동안 노출되게 하였고, 케이블의 완전연소 여부를 판단하여, 완전연소가 되지 않을 경우 15 s 단위로 추가 연소를 진행하였다. 30 s 동안 교반 후 가스 샘플링을 실시하였고, 순서는 HF, HCl, HBr,  $\text{C}_6\text{H}_5\text{OH}$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{HCN}$ ,  $\text{CH}_2\text{CHCN}$ ,  $\text{HCHO}$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{NH}_3$ 로 진행하였다. 샘플링 시간은 25 min 이내에 완료될 수 있도록 하였으며, 시험데이터의 신뢰성을 향상시키기 위해 상기 언급된 시험과정을 최소 2회 이상 반복한 후 시험결과의 유사도를 비교하여 시험결과 채택여부를 결정하였다.

NES 713 기술기준은 챔버 부피 및 케이블시험편의 질량을 고려하여 식 (2.2)에 따라 케이블시험편 1 g의 완전연소 후 생성되는 가스들의 샘플링 결과로부터 100 g의 시험편이 연소되었을 때 방출되는 가스량( $C_g$ )을 산출한다.

$$C_{\theta} = \frac{C_i \times 100 \times V}{m} \quad (2.2)$$

$C_i$  : Concentration of gas  $i$  in test chamber, resulting from combustion of the test specimen [ppm]

$V$  : Volume of test chamber [ $m^3$ ]

$m$  : Mass of test specimen [g]

독성지수(Toxicity index, 이하 T.I.)는 식 (2.3)와 같이 각 각의 독성가스 평균방출가스량( $\bar{C}_{\theta}$ )을 독성가스 임계치( $C_f$ , Critical factor)로 나눈 후 합산함으로써 산출한다. 이 때 오차를 줄이기 위하여 2회 이상의 시험결과로 산출된 각각의  $C_{\theta}$ 값을 평균하여 가스농도의 평균치( $\bar{C}_{\theta}$ )를 계산하였다. 오차율은 피복재는 0.16-3.01%, 절연재는 0.03-1.45% 이다.  $C_f$ 는 30 min 동안 노출시 인체에 치명적인 것으로 간주되는 가스의 농도를 ppm으로 나타낸 값이다. Table 2에 각 가스별 Critical factor를 제시하였다.

$$T.I. = \frac{\bar{C}_{\theta 1}}{C_{f1}} + \frac{\bar{C}_{\theta 2}}{C_{f2}} + \dots + \frac{\bar{C}_{\theta n}}{C_{fn}} \quad (2.3)$$

### 3. 시험 결과 및 고찰

본 연구는 A사, B사 2종의 케이블을 3개 경년수준으로 가속열화 시켜 피복재 및 절연재 시험편 각각에 대해 시험을 하였다. 이에 총 시험케이스는 12개(= 2종 케이블 × 3수준 경년열화 × 2종 케이블 구성품)이다. 각각의 시험케이스에 대해 13종의 연소가스를 측정하여 가스별 방출 가스량을 산출하였고, 화재 발생 시 케이블의 피복재 및 절연재가 모두 연소되므로 Sheath와 Insulation 각각의 독성지수를 총합하여 나타내었다. 이후 파레토 선도(Pareto diagram)를 통하여 독성지수가 큰 가스부터 작은 가스순으로 나열함으로써, 독성강도를 용이하게 판단할 수 있도록 하였으며, 이 독성지수가 1을 초과하는지 여부, 즉  $C_f$ 를 초과하였는지 여부에 따라 메이저 가스(Major gas)와 마이너 가스(Minor gas)로 구분하였다. 특히 본 연구에서는 독성지수가 크게 나온 메이저 가스에 대해 집중하여 시험결과 분석 및 고찰을 실시하였고, 독성 효과가 적은 마이너 가스에 대해서는 경년열화에 따른 경향성에 대해서만 언급하였다.

본 시험의 반복성을 확인하기 위해 앞서 언급한 바와 같이 2회 시험을 한 후 식 (2.4)에 따라 반복도를 계산한 결과 96.99-99.97%으로 매우 높은 수준임을 확인하였다.

$$Repeatability = \left( 1 - \frac{|\bar{C}_{\theta} - C_{i,1th}|}{\bar{C}_{\theta}} \right) \times 100\% \quad (2.4)$$

**Table 2.**  $C_f$ , The Toxicity Concentration Fatal to Human for a 30 min Exposure Time

Combustion product gas	Chemical formula	$C_f$ [ppm]
Carbon dioxide	CO <sub>2</sub>	100,000
Carbon moNOxide	CO	4,000
Hydrogen sulphide	H <sub>2</sub> S	750
Ammonia	NH <sub>3</sub>	750
Formaldehyde	HCHO	500
Hydrogen chloride	HCl	500
Acrylonitrile	CH <sub>2</sub> CHCN	400
Sulphur dioxide	SO <sub>2</sub>	400
Nitrogen oxides	NOx	250
Phenol	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> OH	250
Hydrogen cyanide	HCN	150
Hydrogen bromide	HBr	150
Hydrogen fluoride	HF	100

### 3.1 가속열화기간에 따른 A사 비안전등급케이블의 독성특성 분석

A사 케이블에 대한 각 가스별 상세 분석결과는 Figure 3에 도시하였다. 이산화탄소, 일산화탄소, 염화수소, 아크릴로니트릴, 질소산화물, 시안화수소, 브롬화수소는 가속열화가 진행됨에 따라 모든 절연재와 피복재에서 지속적으로 방출되었다. 포름알데히드는 절연재에서 지속적으로 방출되었으며 이산화황은 20년, 40년 가속열화케이블의 피복재에서만 검출되었다. 또한, 황화수소, 암모니아, 페놀, 불화수소는 모든 케이블의 연소과정에서 검출되지 않았음을 확인하였다.

#### 3.1.1 일산화탄소(CO) 방출 특성

CO는 전 경년수준에서 가장 높은 T.I.를 보였고, 특히 20년 열화 케이블에서 높은 수치를 보였다. 케이블 피복재의 경우 가속열화가 진행됨에 따라 T.I.는 감소하는 경향이 있었지만, 절연재의 경우 20년, 40년 가속열화케이블에서 비노화 케이블보다 약 2배 높은 T.I.를 보였다. 피복재의 경우 경년열화에 따라 케이블 표면에 있던 휘발성 물질들이 제거되었고, 일부 유기 고분자 플라스틱이 경년열화과정에서 일부 탄화가 이루어짐으로써, 시험편이 연소화염에 노출되었을 때 비노화 시험편에 비해 일산화탄소의 방출이 다소 적은 것으로 판단된다. 반면 절연재의 경우 가속열화 케이블에서 비노화 대비 높은 T.I.를 보였다. 이는 가속열화 시 절연재 내 가교분자구조가 딱딱해지고, 해당 결합이 끊어져 난연제의 성능이 감소한 것으로 판단된다. 그로인한 연소성의 강화 효과가 균형을 이루며 CO의 발생<sup>(18)</sup>에 있어 적정 수준의 환경을 조성한 것으로 추정된다. 즉, 20년 경년수준에서 가장 최적의 CO방출 조건이 형성되었다가 40년 경년수준에서 더 높은 수준의 분자 간 결합력 약화와 끊어

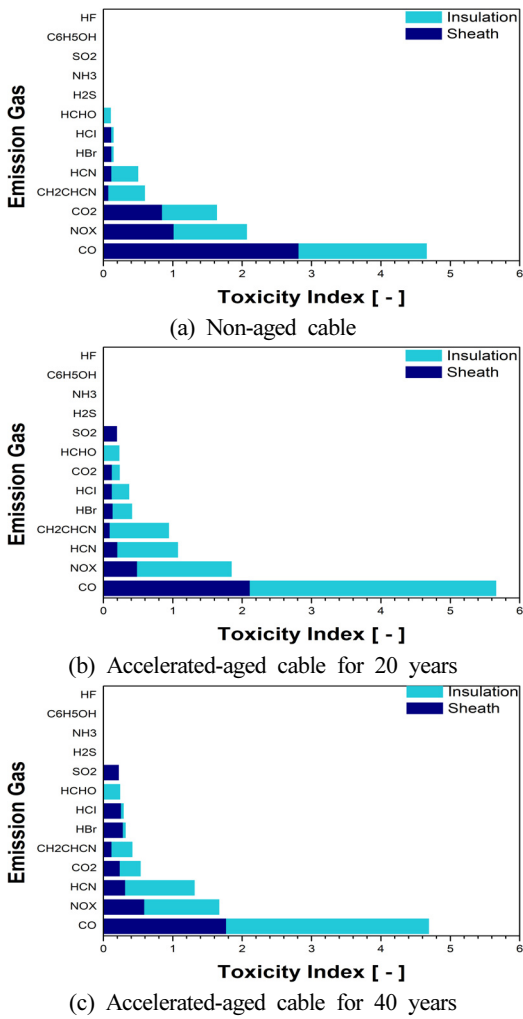


Figure 3. Toxicity Index obtained from “A” company's non-class 1E cables.

진 결합사이로 분자의 이탈로 인한 가연성 물질의 감소로 인해 20년 경년수준보다 CO가 덜 방출된 것으로 사료된다.

### 3.1.2 질소산화물(NO<sub>x</sub>) 방출 특성

NO<sub>x</sub>는 비노화, 20년, 40년 가속열화시험편 모두 CO 다 음으로 높은 T.I.를 보였고, 전 경년수준에 대해 비슷한 수치를 보였다. 이는 케이블의 구성성분 상 질소 성분이 거의 없음을 가정할 때, 대부분 열적 NO<sub>x</sub> 메커니즘<sup>(19)</sup>을 통해 공기 중 질소가 고온에 노출되면서 질소의 삼중결합이 끊어져서 방출되는 것으로 사료된다. 즉, 이 경우 경년열화에 따른 케이블의 최고 연소온도는 가연성가스인 메탄의 불꽃 온도에 의해 주로 결정되고, 경년열화에 따른 케이블의 연소온도의 변화가 크지 않아, 모든 시험편에 대해 유사한 수준의 NO<sub>x</sub>가 방출된다고 할 수 있다.

### 3.1.3 시안화수소(HCN) 방출 특성

HCN은 가속열화가 진행됨에 따라 절연재 및 피복재 모

두 T.I.가 증가하는 경향을 보였다. HCN은 주로 연료 상 질소가 있는 경우 혹은 연료 과농 상태에서 CH라디칼이 공기 중 질소분자와 만나서 신속하게 생성이 되는 신속 NO<sub>x</sub> (Prompt NO<sub>x</sub> 메커니즘<sup>(19)</sup>)에 의해 생성되는 것으로 알려져 있다. 그러나 케이블 제작사의 기밀상 케이블의 첨가제가 정보가 제공되지 않은 상황에서 질소 성분을 포함하는 케이블이 아닌 것으로 가정할 때, 열화에 따른 시험편의 결합력 약화와 이에 따른 CH라디칼의 용이한 생성이 HCN의 다량 방출하는 결과를 보였다고 추정된다.

### 3.1.4 이산화탄소(CO<sub>2</sub>) 방출 특성

CO<sub>2</sub>는 비노화 시험편에서 가장 높은 T.I.를 보였으며 20년 가속열화 시험편에서 낮은 수치를 보이다가 40년 가속열화 시험편에서는 소폭 상승된 수치를 보였다. 20년 가속열화 케이블의 경우에는 케이블 자체에 존재하고 있던 휘발성 유기화합물(Volatile organic compounds, VOC)이 가속열화 과정에서 100 °C의 지속적인 열의 영향으로 분해반응을 일으켜<sup>(20)</sup> 완전 연소되는 가연성 물질의 양이 줄어들었기 때문에 판단된다. 또한, 다른 가스들에 비해 CO<sub>2</sub> 절연재 및 피복재에서 산출된 T.I. 수치가 비슷하게 측정되었다는 점을 확인하였다.

### 3.1.5 마이너 가스 방출 특성

한편 마이너 가스에 해당되는 아크릴로나이트릴(CH<sub>2</sub>CHCN)은 피복재에서 방출량은 가속열화가 진행됨에 따라 큰 차이를 보이지는 않았으며 절연재에서 높은 T.I.를 보였다. 20년 가속열화 절연재 시험편에서 가장 높은 T.I.를 보였으나 40년 가속열화 시험편에서는 비노화 시험편보다 낮은 수치를 보였다. 또한 CR 및 EPR의 구성 성분인 염화수소(HCl)의 경우 20년 가속열화 시험편까지는 방출량이 증가하였고, 이후 피복재에서는 방출이 증가하였으나 절연재에서는 감소하는 경향을 보였다. 이는 열화기간 동안 피복재의 내부에 있는 절연재는 안정화되어 반응이 더디게 진행되는 반면, 피복재는 지속적으로 외부에 노출됨에 따라 열에 의한 반응이 계속해서 진행되었기 때문에 판단된다. 브롬화수소(HBr)의 경우 HCl과 거의 비슷한 T.I.를 보였으며 가속열화가 진행됨에 따른 형상도 비슷한 경향을 보였다. 또한, 피복재에서의 방출량이 시간이 지남에 따라 증가한 점, 절연재의 방출량이 시간이 지남에 따라 증가하였다가 감소하는 점이 주목할만하다. 이는 케이블의 절연재 및 피복재에 할로젠계열의 난연제를 첨가하여, 시간이 지남에 따라 난연제 성분의 결합력이 약해지는 것이 주된 현상의 이유인 것으로 사료된다. 포름알데히드(HCHO)의 경우, 절연재 성분에서 소량 검출되었다. 20년, 40년 가속열화 케이블에서 비슷한 방출량이었으며 비노화 케이블에서의 방출량보다는 높게 측정되었으나, 모두 0.3이하로 유의미한 수준으로 방출되지 않았다. 이산화황(SO<sub>2</sub>)은 비노화 시험편에서는 검출되지 않았지만, 20년 및 40년 가속열

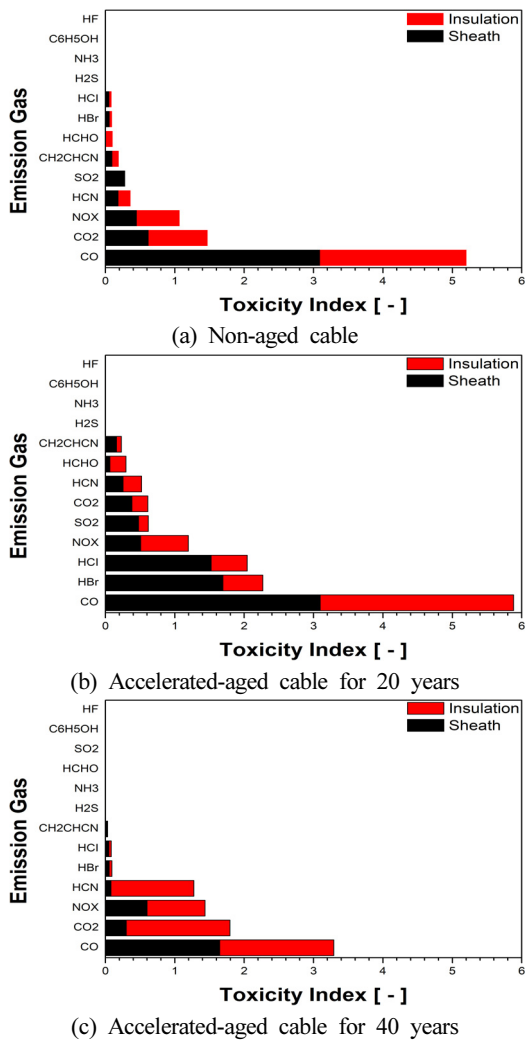


Figure 4. Toxicity Index obtained from “B” company's non-class 1E cables.

화 시험편에서는 피복재에서 소량 검출 되었으나, 이 또한 T.I.가 0.2 이하로 큰 독성을 보이지 않았다.

### 3.2 가속열화기간에 따른 B사 비안전등급케이블의 독성특성 분석

B사 케이블에 대한 가스별 상세 분석결과는 Figure 4에 도시하였다. 이산화탄소, 일산화탄소, 염화수소, 아크릴로니트릴, 질소산화물, 시안화수소, 브롬화수소는 모든 경년 수준 케이블에서 방출되었다. 포름알데히드와 이산화황은 0년, 20년 가속열화 케이블의 연소 시에는 검출되었으나 40년 가속열화 케이블에서는 검출되지 않았다. 또한, A사 시험결과와 같이 황화수소, 암모니아, 페놀, 불화수소는 모든 케이블의 연소과정에서 검출되지 않았다.

#### 3.2.1 일산화탄소(CO) 방출 특성

CO는 전체 시험조건에서 높은 방출량을 보였으며 특히

20년 가속열화케이블에서 가장 높은 T.I.를 보였는데, 이는 A사 케이블의 결과와 매우 유사하다. 이러한 유사한 결과에 대한 원인으로 3.1.1장에 제시된 것과 동일한 원인을 우선적으로 적시할 수 있다. 또한, B사 비노화 케이블의 경우에는 피복재의 방출 비중이 높았으나 20년, 40년 가속열화 케이블에서는 피복재와 절연재 방출비중이 비슷하였다. 특이사항으로는 40년 가속열화 케이블의 절연재에서 다른 케이블들에 비해 CO<sub>2</sub>의 T.I.는 높은 수치를 보이고, CO의 T.I.는 유독 낮은 수치를 보였다. 이는 가속열화가 진행됨에 따라 난연제의 난연성능이 저하되어 완전 연소 가능성이 커졌기 때문으로 판단된다.

#### 3.2.2 이산화탄소(CO<sub>2</sub>) 방출 특성

CO<sub>2</sub>는 비노화 케이블에서 상대적으로 높은 T.I.를 보였으나 20년 가속열화 케이블에서는 낮은 T.I.로 감소하는 경향을 보인다 다시 40년 가속열화 케이블에서는 다시 급증하여 비노화 케이블에서의 T.I.보다 높은 수치를 보였다. 여기서 주목할만한 사항은 CO<sub>2</sub> 배출량과 CO 배출량의 상관관계이다. CO가 불완전연소의 산물이고, CO<sub>2</sub>가 완전연소의 산물임으로 고려할 때, CO가 높은 경우 CO<sub>2</sub>가 낮게 나타나는 현상을 공통적으로 확인할 수 있고, A사 케이블의 CO와 CO<sub>2</sub> 방출에서도 유사한 경향성을 보였다. 경년열화에 따른 CO<sub>2</sub>의 방출량 증가와 감소는 경년열화에 따른 난연성능의 일반적 저하로 인한 가연성의 증가적 요소와 20년 경년열화시 할로젠 계열의 원소(Cl, Br)의 결합력 약화로 인한 불완전 연소성의 증가로 인한 결과가 상충되어 나타난 현상으로 판단된다.

#### 3.2.3 질소산화물(NO<sub>x</sub>) 방출 특성

NO<sub>x</sub>의 경우 가속열화가 진행됨에 따라 방출량이 미량 증가하는 경향이 있으나, 거의 동등한 수준이었고, 이는 3.1.2장에서 앞서 기술한 바와 같이 케이블의 최고 연소온도는 가연성가스인 메탄의 불꽃 온도에 의해 주로 결정되고, 경년열화에 따른 케이블의 연소온도의 변화가 크지 않아, 모든 시험편에 대해 유사한 수준의 열적 NO<sub>x</sub>가 방출된 것으로 보인다.

#### 3.2.4 염화수소(HCl) 및 브롬화수소(HBr) 방출 특성

HCl과 HBr은 할로젠화수소로서 방출특성이 매우 유사하였다. 비노화, 40년 가속열화 케이블에서는 입계치에 훨씬 못 미치는 극소량 방출 되어 낮은 T.I.를 보였으나, 20년 가속열화 케이블에서는 CO 다음으로 높은 T.I.를 보였다. 특히 피복재에서 많은 양이 방출되었는데, 이는 피복재에 할로젠계열 난연제를 첨가하였으나 열화가 진행됨에 따라 결합력이 저하되어 나타난 결과로 판단된다. 40년 가속열화 케이블에서 방출량이 감소한 것은 난연성 첨가제로 적용된 할로젠족 원소들의 열화가 진행됨에 따라 화합물 내부에서 재안정화되는 성질 때문인 것으로 사료된다<sup>(21)</sup>.

### 3.2.5 시안화수소(HCN) 방출 특성

가속열화가 진행됨에 따라 T.I.가 증가하였으며 이는 A사 케이블과 같은 경향을 보였다. 특히 40년 가속열화 케이블에서는 유독 높은 T.I. 수치를 보였다. 이는 A사, B사 케이블에서 공통적으로 나타난 결과로, 모두 열화가 진행됨에 따라 HCN의 방출 비중이 높아졌다. 특히 40년 가속열화 케이블의 절연재에서 피복재보다 약 15배 높은 방출량을 보였는데, 이 역시 3.1.3장에서 기술한 바와 같이 열화에 따른 시험편의 결합력 약화와 이에 따른 CH라디칼의 용이한 생성으로 인해 HCN이 다량 방출되는 결과를 보였다고 추정된다.

### 3.2.6 마이너 가스 방출 특성

A사 케이블의 피복재 및 절연재에서는 황화수소(H<sub>2</sub>S), 암모니아(NH<sub>3</sub>), 페놀(C<sub>6</sub>H<sub>5</sub>OH), 불화수소(HF)가 공통적으로 검출되지 않았다. 포름알데히드(HCHO)의 경우 비노화케이블은 절연재에서만 검출되었으며 20년 가속열화케이블에서는 피복재, 절연재에서 모두 검출되었다. 이는 포름알데히드가 탄화수소 불완전 연소의 일반적 산물<sup>(21)</sup>임을 고려할 때 CO<sub>2</sub> 방출이 적고 CO 방출이 많았던 20년 가속열화 케이블에서 모두 검출된 것으로 보인다. 아크릴로나이트릴(CH<sub>2</sub>CHCN)은 A사 케이블과 비슷한 경향성을 보였으나 방출량은 다소 차이가 있었다. 절연재 성분에서 많은 방출량을 보였던 A사 케이블과는 달리 B사 케이블에서는 피복재의 방출 비중이 더 높았으며 40년 가속열화 케이블의 절연재에서는 검출되지 않았다. 한편 A사 가속열화 케이블 피복재의 20년, 40년 가속열화 케이블에서만 검출되었던 이산화황(SO<sub>2</sub>)은 B사 비노화케이블의 피복재, 20년 가속열화 케이블의 피복재, 절연재 모두에서 검출되었으며, 20년 가

속열화 케이블에서는 피복재에서의 발생 비중이 더 높았다.

### 3.3 A사, B사 케이블의 독성지수 종합 비교

Table 3에 앞서 모든 시험을 통해 얻은 연소가스의 농도를 종합하여 제시하였고, 식 (2.2)에 따라 Table 3의 각각의 가스 농도로부터 가속열화기간에 따른 A사, B사 케이블의 독성지수를 피복재와 절연재로 구분하여 합산하고 Figure 5에 도시하였다. 이 종합 T.I.값과 미국국방성 규격인 MIL-DTL-24640/15D기준에 명시되어있는 허용기준값(피복재의 최대값은 '5', 절연재의 최대값은 '1.5')을 비교하였다. A사 케이블의 피복재는 전 가속열화 기간에 대해 허용치를 초과하지는 않았으나 비노화 케이블에서 허용치에 인접하는 T.I.를 보였다. B사 피복재의 경우 비노화, 40년 가속열화 케이블에서는 허용치를 초과하지 않았으나 20년 가속열화 케이블에서는 기준치를 크게 초과하였다. 이는 B사의 경우 20년 열화시 CO, HBr, HCl이 크게 발생한 것이 주된 원인이며, 이 각각의 가스가 다량 방출되는 원인은 화학적으로는 케이블 내 할로겐계 원소의 결합력의 약화와 물리적으로는 휘발성 물질의 감소가 주된 원인이라 할 수 있다.

또한 A, B사 절연재의 경우에는 모든 시험케이스에 대해 기준치인 1.5를 크게 상회하였으며 비노화 케이블보다 가속열화 케이블에서 높은 T.I.를 보였다. 이러한 결과를 모두 종합할 때 피복재와 절연재를 통합하여 판단하면, 경년열화가 진행될수록 케이블의 연소 시 독성가스의 방출이 비노화의 경우보다 증가하는 것으로 볼 수 있고, 일정 수준 이상으로 열화 시 가연성 물질의 감소로 적은 CO 및 CO<sub>2</sub>를 방출하여 결과적으로 독성가스 방출이 다시 낮아진다고 할 수 있다.

Table 3. Summary of Toxic Gas Concentration for All Test Specimens [Unit : ppm]

Combustion Product Gas	Accelerated Deterioration Period											
	A Company						B Company					
	0 Year		20 Year		40 Year		0 Year		20 Year		40 Year	
	Sheath	Insulation	Sheath	Insulation	Sheath	Insulation	Sheath	Insulation	Sheath	Insulation	Sheath	Insulation
CO <sub>2</sub>	84,377	79,208	12,055	11,369	23,591	29,969	62,178	84,832	38,087	22,993	29,955	149,464
CO	11,250	7,393	8,438	14,211	7,077	11,688	12,371	8,439	12,378	11,152	6,590	6,576
H <sub>2</sub> S	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NH <sub>3</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
HCHO	0	53	0	114	0	120	0	51	32	115	0	0
HCl	56	16	60	125	127	18	28	15	762	259	24	18
CH <sub>2</sub> CHCN	28	211	36	341	47	120	40	36	63	29	12	0
SO <sub>2</sub>	0	0	78	0	88	0	113	0	190	57	0	0
NO <sub>x</sub>	253	264	121	341	147	270	113	154	127	172	150	209
C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> OH	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
HCN	17	58	30	131	47	150	28	26	38	40	12	179
HBr	17	5	20	42	42	6	9	5	254	86	8	6
HF	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

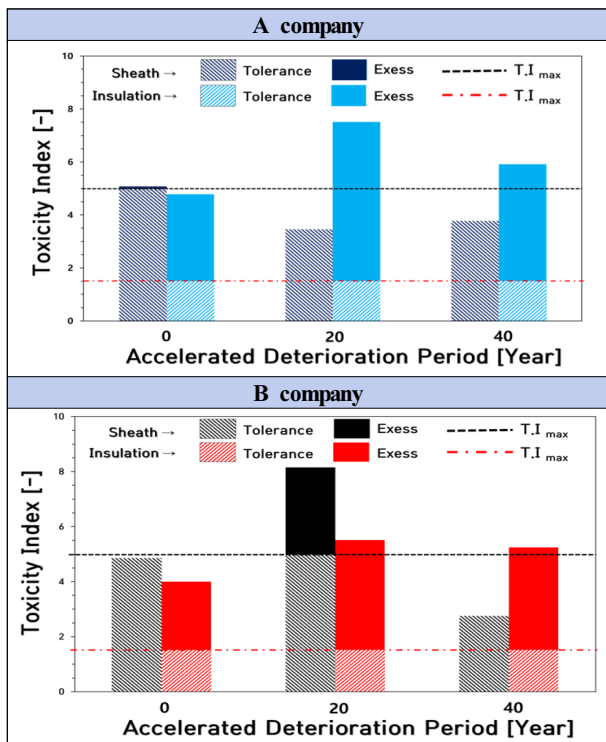


Figure 5. Toxicity Index obtained from non-class 1E cables of both "A" and "B" companies.

#### 4. 결 론

NES 713 규격 적용하여 A, B사 비안전등급 케이블을 대상으로 피복재와 절연재를 분리하여, 경년 수준에 따른 독성가스 특성을 파악하였다. A사와 B사는 CR과 EPR로 같은 성분의 절연재 및 피복재를 사용하고 있다. 따라서 방출되는 가스의 종류에는 차이를 보이지 않았으며 일부 가스 발생량에 따라 첨가된 물질의 차이가 있음을 확인하였다. 가속열화가 진행됨에 따라 A, B사 공통적으로 HCN이 높은 독성지수 비중을 차지하고 있으며, 특히 B사의 20년 열화 케이블에서 다량의 HBr 및 HCl이 검출되었다. 가속열화가 진행됨에 따라 난연제의 난연성능이 떨어지는 것이 독성가스의 방출의 증가원인이 되었고, 분자 간 결합력 약화 또한 할로젠계 독성가스의 방출원인이 되었다. A, B사의 비안전등급 케이블의 독성지수를 MIL-DTL 규격에 의거하여 종합 독성지수 허용치 초과 여부를 판단하였다. 두 케이블 모두 경우 모두 절연재가 기준치인 1.5를 크게 초과하였다. 연소 후 배기가스가 독성 기준치를 일부 초과하는 점과 가속열화에 따른 독성이 다소 증가하는 경향은 원자력 발전소의 노후화에 따른 안전성 향상을 위해 원전 케이블의 화재 안전성 향상을 위해 설계·규제적 측면에서 개선되어야 할 요소이다.

본 연구의 결과는 가속열화 된 케이블의 연소특성 및 연소생성물 분석을 통하여 난연성능의 변화 및 인체 유해성을 평가하였다. 이러한 독성특성 연구의 결과는 원자력발

전소의 케이블 설치 기준 및 화재위험도 평가 기준 데이터와 화재 전산해석 및 피난 시뮬레이션 시 기초 데이터로 활용될 수 있다. 본 연구 결과가 이러한 응용연구와 결합되었을 경우 운전원의 피난 및 수동조치의 신뢰성 및 안전성을 확보하고 원자력발전소의 종합적인 화재 안전성을 증진하는 데 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

#### 후 기

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

#### References

1. S. K. Song, "A Study on the Combustion Characteristics According to the Aging of Communication Cables and Power Cables", Master's Thesis, Kangwon National University (2010).
2. M. S. Ho, J. Y. Lee and D. I. Kang, "Development of Fire Ignition Frequency Calculation program Using NUREG/CR-6850 Method", Proceedings of 2010 Spring Annual Conference, Korean Institute of Fire Science & Engineering, pp. 109-112 (2012).
3. S. K. Lee, Y. S. Moon and S. Y. Yoo, "A Study on Validation Methodology of Fire Retardant Performance for Cables in Nuclear Power Plants", Korean Society of Safety, Vol. 32, No. 1, pp. 140-144 (2017).
4. K. Y. Kim, C. Lee, J. H. Kim and J. M. Seo, "Accelerated Aging Test of Cable Materials used in Nuclear Power Plants for the Evaluation of lifetime", KAERI/TR-2424/2003, Korea Atomic Energy Research Institute (2003).
5. E. M. Shin, "Technology of Electrical Barrier Material", Elastomers and Composites Vol. 46, No. 1, pp. 22-28 (2011).
6. K. Y. Kim, C. Lee, P. J. Kim, J. A. Kim and B. H. Ryu, "Evaluation on Thermal Ageing of Cable in Nuclear Power Plant", Proceedings of 2004 Spring Annual Conference, Korean Nuclear Society, pp. 1-12 (2004).
7. Y. J. Park and H. P. Lee, "Identification on Carbon Oxide and Smoke Release Change of Aging Wire Cables", Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation, Vol. 15, No. 4, pp. 107-113 (2015).
8. KFPA, "Fire Prevention Education Guide Book", Korea Fire Protection Association, pp. 68-74 (2014).
9. J. H. Park and J. H. Kim, "The Measures for Operators Habitability Against Smoke Inflow to NPP's Control Room", Proceedings of 2017 Spring Annual Conference, Korean Institute of Fire Science & Engineering, pp. 117-118 (2017).



10. 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", Korean Society of Safety, Vol. 26, No. 2, pp. 20-25 (2011).
11. B. G. Kim, H. S. Lim, Y. S. Lee and M. S. Kim, "Effect of the HVAC Conditions on the Smoke Ventilation Performance and Habitability for a Main Control Room Fire in Nuclear Power Plant", Fire Science and Engineering, Vol. 30, No. 5, pp. 74-81 (2016).
12. H. S. Lim, I. H. Kim and M. S. Kim, "Cable Functional Failure Time Evaluation for a Main Control Room Fire using Fire Dynamic Simulator", Fire Science and Engineering, Vol. 30, No. 3, pp. 79-85 (2016).
13. 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", Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation, Vol. 18, No. 2, pp. 215-222 (2018).
14. Ministry of Defence Defence Standard 02-713, Issue 3 Publication (2012).
15. MIL-DTL-24640/15D, Cable, Electric, 600 Volts, Lightweight, Multi-pair, AWG 22, Type 2XSAW (Including Variation type 2XSAOW) (2002).
16. T. Hull, A. A. Stec, K. Lebek and D. Price, "Factors Affecting the Combustion Toxicity of Polymeric Materials", Polymer Degradation and Stability, Vol. 92, No. 12, pp. 2239-2246 (2007).
17. H. Kissinger, "Variation of Peak Temperature with Heating Rate in Differential Thermal Analysis", Journal of Research of the National Bureau of Standards, Vol. 57, No. 4, 217-221 (1956).
18. 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).
19. S. R. Turns, "An introduction to Combustion : Concepts and Applications", McGraw-Hill, (2012).
20. B. N. Raol, R. Arunjothi and A. R. Srinivasan, "Evaluation of Fire Gases from Polymeric Materials", 2012 IEEE 10th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials, pp. 24-28 (2012).
21. Final Report of a Co-ordinated Research Project. Stability and Stabilization of Polymers Under Irradiation, IAEA-TECDOC-1062 (1994-1997).
22. J. G. Calvert, J. A. Kerr, K. L. Demerjian and R. D. McQuigg, "Photolysis of Formaldehyde as a Hydrogen Atom Source in the Lower Atmosphere", Science, Vol. 175, pp. 751-752 (1972).