비 안전등급 케이블의 연소생성물 및 인체유해성 평가 연구 필요성

A Study on the Human Toxicity of Combustion Products for Non Class 1E Cables

서현정* · 김남균** · 조정민*** · 이민철**** · 이상규***** · 문영섭*****

Seo, Hyun Jeong*, Kim, Nam Kyun**, Jo, Jeong Min***, Lee, Min Chul****, Lee, Sang Kyu*****,
and Moon, Young Seob*****

Abstract

The present study has been conducted to investigate the gas toxicity of two kinds of non class 1E cable jackets and insulations (produced by A company and B company) according to Naval Engineering Standard (NES) 713. From the NES 713 standard, CO₂, CO, NO_x, HCHO, HCl, HBr, and HCN were detected for both types of cable jacket and insulation materials, and the toxicity index was calculated according to the standard code of US Department of Defense (MIL-DTL). The toxicity factors were obtained as 5.08 for the cable jacket of A company, 4.78 for cable insulation of A company, 4.85 for the cable jacket of B company, and 4.01 for the cable insulation of B company. These results can be used as basic data to increase the necessity of establishment of the regulation standards to evaluate the human hazardousness of non class 1E cables.

Key words : Combustion Gas, NES 713, Non Class 1E Cables, Toxicity Index, Human Hazardousness

요 지

본 연구에서는 비안전등급 케이블의 피복재 및 절연재의 연소가스 유해성을 영국 해군 규격인 Naval Engineering Standard (NES) 713 규격에 의거하여 분석하였다. 또한 독성지수의 구체적인 분석을 위해 미국국방성 규격(MIL-DTL)을 적용하여 세분화하여 유해성을 평가하였다. 케이블은 A사와 B사 등 국산 케이블 2종을 적용하였고, 각 케이블의 피복재 및 절연재에서는 이산화탄소, 일산화탄소, 질산화물, 염화수소, 브롬화수소가 공통적으로 방출되었다. 독성 지수는 A사 케이블 피복재 5.08, 절연재가 4.78, B사 케이블 피복재가 4.85, 절연재가 4.01로 산출되었다. 해당 데이터는 비 안전등급 케이블의 인체유해성을 평가하는 규격의 필요성을 재고하기 위한 기초 데이터로 활용될 예정이다.

핵심용어 : 연소가스, NES 713, 비 안전등급 케이블, 독성 지수, 인체유해성

*정회원, 인천대학교 안전공학과 박사과정(E-mail: sincedeni@naver.com)

Member, Ph.D. Candidate, Department of Safety Engineering, College of Engineering, Incheon National University

**정회원, 인천대학교 안전공학과 박사과정(E-mail: kimnk009@gmail.com)

Member, Ph.D. Candidate, Department of Safety Engineering, College of Engineering, Incheon National University

***정회원, 인천대학교 안전공학과 학사과정(E-mail: akafjgmal@naver.com)

Member, Student, Department of Safety Engineering, College of Engineering, Incheon National University

****교신저자, 정회원, 인천대학교 안전공학과 교수(Tel: +82-32-835-8295, Fax: +82-32-835-0779, E-mail: LMC@inu.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Professor, Department of Safety Engineering, College of Engineering, Incheon National University

*****한국원자력안전기술연구원 책임연구원(E-mail: sklee@kins.re.kr)

Korea Institute of Nuclear Safety, Reactor System Performance Department, Principle Researcher

*****한국원자력안전기술연구원 선임연구원(E-mail: firemoon@kins.re.kr)

Korea Institute of Nuclear Safety, Reactor System Performance Department, Senior Researcher

1. 서 론

원자력 발전소에서의 화재 사고는 원자로의 정지 및 사고 완화를 위한 안전계통 기기 등의 손상을 유발하여 원자력 발전소 안전제어 기능을 마비시키고, 심층 방어 시스템을 무너뜨려 방사능 유출이라는 재난을 유발할 수 있는 요인이다(Kang, 2015). 이러한 케이블의 화재 위험성에 대한 초기연구는 1975년 미국 Brown Ferry 원전 1호기의 케이블 포설실(Cable spreading room)에서의 케이블 관통부 밀봉재 건전성 검사 과정에서 발생한 화재 사고에서 기인되었다. 해당 사고는 케이블 관통부 밀봉재 건전성 검사 과정에서 화재가 발생하여 원자로 건물로 화재가 확산되었던 사고로서, 해당 사고로 인하여 미국 원자력 규제 위원회(Nuclear Regulatory Commission; NRC)는 화재 관련 법규 및 지침서를 제작하고 사업자로부터 화재위험도분석을 수행하도록 요구하였다(Eom, 1996). 해당 사고 이후 원자력 발전소에서의 화재 안전에 대한 대책이 중요 사항으로 대두되었으며, 세계 각국에서는 화재로 인한 발전소의 운전 정지나 방사성 물질 누출에 따른 피해를 감소 및 예방하기 위하여 화재 예방에 관련된 규제를 점차 강화하였다(Eom, 1996; Lee and Yang, 2002).

Lim et al.(2011)의 보고에 의하면 현재 원자력 발전소 내 가연성 물질 중 가장 많은 양을 차지하고 있는 것이 케이블 피복 및 절연물질이며 이는 대부분이 열경화성, 열가소성 소재이다. 또한 현재 국내 원자력 발전소에서 사용되는 케이블은 안전등급 및 비 안전등급으로 구별되며, 모두 화재 시 확산 위험성을 억제하기 위하여 일정 수준의 화재 성능 시험을 만족하는 것을 사용하도록 규정되어 있다. 국내 케이블 화재에 관한 시험은 미국 원자력 규제 위원회에서 규정하고 있는 규제 지침인 Reg. Guide 1.189, "Fire Protection for Nuclear Power Plants"에 의거하여, 원자력 발전소에 적용되는 케이블은 IEEE-383에 따라 검증되어야 한다(Lee et al., 2017). 그러나 케이블 화재의 경우, 화염 확산의 문제뿐만 아니라, 피복 및 절연물질에서 방출되는 연기의 밀도와 유해성분 또한 실내 작업자 및 재실자의 안전에 영향을 줄 수 있다(Hull et al., 2007; Hull et al., 2008; Stec and Hull, 2011). 특히, 원자력 발전소에서는 화재로 인해 안전정지 달성을 위한 운전원 수동조치가 요구되는 상황에서 화재 발생 지역에서의 연기로 인하여 운전원의 활동이 영향을 받을 수 있다. 미국 원자력규제위원회 규정과 NFPA의 경우, 운전원의 수동조치가 필요한 구역이나 소방대의 화재 진압을 위하여 다량의 연기가 발생하는 구역인 케이블 배분실, 스위치 기어실 등의 경우 제연설비, 연기감지기 등의 구체적인 규정이 제시되어 있다. 따라서 원자력 발전소에서의 화재 발생은 해당 시설의 안전성 확보에 큰 위협 요인이 될 수 있는 화재 시 안전정지를 위한 운전원 조치의 신뢰성을 확보할 수 있도록 케이블로부터 방출되는 연소가스의 인체 유해성에 대한 연구가 필요한 실정이다.

현재 국내의 원자력 발전소 케이블 화재 관련 연구로 전력, 계측 및 제어케이블의 설계 수명에 대한 연구가 주로 진행 중이며, 특히 한국수력원자력 중앙연구원에서는 케이블 열화 관리의 필요성에 대한 연구를 수행한 바 있으며(Lim and Kim, 2011), 해당 연구는 환경에 따른 케이블의 열화 정도와 이로 인한 전기화재 발생의 위험성 등에 대한 내용이 주를 이루고 있다. 또한 회로의 건전성을 유지하여 화재 확산을 방지하기 위한 시나리오 분석이 주를 이루고 있다. 국외에서도 케이블 화재 시 원자력 발전소 내부 전력, 제어, 통신 등의 시스템이 작동하지 않아 발생하는 노심용융, 냉각수 상실 사고 등에 대한 대책 및 예방관련 규정 수립을 점차 수행 중이지만(Kang, 2015; Cho et al., 2017), 케이블 피복재에서 방출 가능한 유해가스 관련 연구는 아직 초기 단계로 판단된다.

따라서 본 연구에서는 비 안전등급 케이블 두 종을 대상으로 연소 시 발생하는 유해성분 및 방출량, 독성지수를 측정 및 산출하고, 해당 결과를 바탕으로 비안전등급 케이블의 인체유해성 평가 규격 적용 필요성을 살펴보고자 한다. 또한 해당 시험결과를 활용하여 케이블에서 발생하는 연소가스 유해성분 및 독성지수에 대한 데이터베이스를 구축하여, 운전원 수동조치의 신뢰성과 화재안전성을 향상하는데 기여하고자 한다.

2. 시험 재료의 특성 및 방법

2.1 공시재료

본 실험에서는 비안전등급 케이블 중 동일 성분의 피복재를 사용하는 두 종(A사, B사)을 선정하여 시험을 수행하였으며, 시험편 각각의 조건을 Table 1에 정리하였다. 본 실험에서 사용된 케이블은 제어용으로 피복재 및 절연재, 내부 동선으로 구성되었다. 각 시험편들은 영국 해군 기준 "Naval Engineering Standard (NES) 713(1990)"에 의거하여 피복 및 절연체를 1 ± 0.25 g의 무게로 3~5개 씩 절취하여 제작하였다.

2.2 실험 방법

NES 713 규격에 의거하여 챔버 내부에 버너를 설치하고 시료를 완전 연소시켜 챔버에 연결된 가스검지관을 통해 검출된 가스를 분석하였다. 본 규격에서 정하고 있는 연소가스 독성평가 기기를 Fig. 1에 제시하였다.

본 실험에서의 챔버 크기는 0.6 m^3 의 것을 사용하였고, 기체 혼합비율은 메탄가스가 2 l/min , 공기는 15 l/min 로 설정하여 진행하였다. 버너의 불꽃 높이는 약 100 mm 로 유지하고, 화염의 온도는 $1,150 \pm 25 \text{ }^\circ\text{C}$ 가 되도록 유량을 조절하였다. 이 때 화염에 노출된 시험편은 완전 연소가 되도록 하였으며, 연소 후 버너 불꽃을 점화하고 30초 동안 mixing fan을 가동하여 챔버 내부의 연소가스를 각각의 검지관을 통해서 차례로 가스를 검출하여 샘플링하였다. 샘플링

Table 1. Specification of Experimental Specimens

Cable type		Maker A	Maker B
Application		Control	Control
Power capacity (kV)		0.6	0.6
Characteristics		Thermoset	Thermoset
Material property	Jacket	CR	CR
	Insulation	EPR	XLPE
Mass (g)	Jacket	1 ± 0.07	1 ± 0.06
	Insulation	1 ± 0.13	1 ± 0.17

* CR: Polychloro rubber

* EPR: Ethylene propylene rubber

* XLPE: Cross-linked polyethylene

Fig. 1. NES 713 Toxicity Test Apparatus

후, 즉시 강제배출 장치를 통해 챔버 내부의 잔류물들을 배출하는 데 이 때 시간은 3분 이상 지속되게 하였다. Fig. 2에 해당 시험 방법에 대해 나타내었다.

해당 규격은 시험편의 완전 연소 후 발생되는 가스를 샘플 링한 뒤, 챔버의 부피 및 시험편의 무게를 적용하여, 100 g의 시험편이 연소되었을 때 방출되는 가스량을 산출한다(Seo and Son, 2015; NES, 713; Park and Lee, 2015). 이 때 적용되는 가스 발생농도(C_θ) 산출식을 Eq. (1)에 나타내었다.

$$C_\theta = (C_i \times 100 \times V) / m \quad (1)$$

이 식에서 C_i 는 시료의 연소 결과 측정된 가스성분 각각의 농도(ppm), m 은 시험에 사용된 시험편의 질량(g), 그리고 V 은 챔버의 부피(m^3)를 의미한다.

Fig. 2. Test Process of Combustion Gas Toxicity Evaluation According to NES 713

Eq. (1)에 의해 산정된 C_θ 는 시료의 독성지수 산출 계산식에 적용된다.

$$\text{Toxicity Index} = \frac{C_{\theta 1}}{C_{f1}} + \frac{C_{\theta 2}}{C_{f2}} + \dots + \frac{C_{\theta n}}{C_{fn}} \quad (2)$$

위의 식에서 C_f 는 화재 발생 시 재실자가 유해가스에 노출 시 30분 간 해당 가스에 노출되었을 경우의 치사량(ppm)을 의미한다. 유해가스의 치사 농도를 Table 2에 나타내었다. 해당 평가에서의 독성지수에 따른 위험성에 대하여 구체적으로 평가하기 위해서 미국국방성 규격(Military Detail

Table 2. The Toxicity Concentration Fatal to Human (NES 713 1990)

Gases	Chemical formula	Cr (Critical limit, ppm)
Carbon dioxide	CO ₂	100,000
Carbon monoxide	CO	4,000
Phenol	C ₆ H ₅ OH	250
Ammonia	NH ₃	750
Hydrogen sulfide	H ₂ S	750
Sulfur dioxide	SO ₂	400
Formaldehyde	HCHO	500
Hydrogen chloride	HCl	500
Hydrogen bromide	HBr	150
Hydrogen cyanide	HCN	150
Nitrogen oxides	NO _x	250
Hydrogen fluoride	HF	100
Acrylonitrile	CH ₂ CHCN	400

Technical standard; MIL-DTL)에서 정하고 있는 난연성 케이블의 독성지수 규격을 적용하였다(Kannan et al., 2005; Seo and Son, 2015; MIL-DTL-24643B; MIL-DTL-24640/15D). 해당 규격은 케이블의 구성 재료를 피복재(Jacket), 충전재(Filler), 그리고 절연재(Insulation)로 구분하고 있으며, 설치 위치 및 용도에 따라 독성 지수의 한계치를 각각 5, 5, 1.5로 규정하고 있다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 연소생성물

연소가스의 독성지수에 대해 위험성을 세분화하여 평가하기 위해 MIL-DTL 규격을 준용하였으며, 각각의 케이블 피복재와 절연재에 대한 실험 결과를 Table 3에 나타내었다. 또한, NES 713 시험 후의 가스검지관을 Fig. 3에 각각 제시하였다.

연소 종료 후 검지된 연소 가스는 모든 시험편에서 전체적으로 이산화탄소와 일산화탄소가 다량 검출되었으며, 특히 두 종류의 케이블 모두 피복재에서 일산화탄소 검출량이 더 높게 측정되었다. 절연재의 경우에는 소량이지만 포름알데히드가 검출되었다. 또한, 염화수소, 아크릴로니트릴, 이산화황, 질산화물, 시안화수소 및 브롬화수소가 부분적으로 검출되었으며, 황화수소와 암모니아, 폐놀은 모든 시험편에서 검출되지 않았다. 케이블 두 종 모두 난연 처리한 시험편으로서 화염 전파를 억제하고, 열분해의 진행이 더디게 되어 발생하는 불완전 연소로 인하여 일산화탄소 및 유해가스의 일부 종류가 방출되는 것을 확인하였다.

케이블의 피복재의 경우, 케이블 두 종 모두 CR 재질로서, 염소원자 성분이 함유되어 있어 난연 특성을 지니고 있다. 염소 원자의 경우, 고무 재질인 폴리클로로프렌 등에서 방염

Table 3. Toxic Contents of the Specimens (ppm)

Gas	Cr (Critical limit; ppm)	Test specimens			
		A-Jacket	A-Insulation	B-Jacket	B-Insulation
Carbon dioxide	100,000	84,377	79,208	62,178	84,832
Carbon monoxide	4,000	11,250	7,393	12,371	8,439
Hydrogen sulphide	750	0	0	0	0
Ammonia	750	0	0	0	0
Formaldehyde	500	0	53	0	51
Hydrogen chloride	500	56	16	28	15
Acrylonitrile	400	28	211	40	36
Sulphur dioxide	400	0	0	113	0
Nitrogen oxides	250	253	264	113	154
Phenol	250	0	0	0	0
Hydrogen cyanide	150	17	58	28	26
Hydrogen bromide	150	17	5	9	5
Hydrogen fluoride	100	0	0	0	0

Fig. 3. Gas Detection Tube After Combustion Gas Toxicity Detection Test According to NES 713

성능을 향상시킬 수 있다는 Park et al.(1992) 보고가 있었다. 그러나 최근 연구에 의하면 할로젠계 화합물들의 경우, 화재 발생 시 난연제로서 적용될 경우 유해가스를 방출할 수 있어 유럽의 일부 국가에서는 사용이 금지되고 있는 추세이

다(Seo et al., 2017; Liang and Ho, 2007; Lowden and Hull, 2013). 본 연구에서의 방출실험 결과에서도 피복재에서의 염화수소 방출량이 A사 케이블의 경우 56 ppm, B사 케이블의 경우 28 ppm이 방출된 것으로 확인되었다. 이러한 염화수소의 경우 눈이나 상부 기도의 점막을 자극하고, 기도 손상으로 인한 질식을 유발할 수 있어(Ham, 2001; Kim, 2009) 유독성이 높은 물질로 분류된다.

A사의 피복재의 경우, 질산화물의 방출 농도는 253 ppm으로 NES 713의 규격 기준치를 상회하였으며, B사 피복재에서는 이산화황이 113 ppm 추가적으로 방출되었다. 또한, 아크릴로니트릴의 경우 A사 피복재에서는 28 ppm, B사 피복재에서는 40 ppm이 방출되었는데, 이러한 유해가스의 방출은 선행 연구에서 보고된 바와 같이 폴리에틸렌 및 폴리비닐클로라이드 등의 성분이 포함된 재료의 연소 시 열분해가 진행되면서 유기산, 방향족 물질(Lee et al., 2008; Seo and Son, 2015)이 발생한 결과로 사료된다.

또한, 두 종의 케이블 피복재가 모두 폴리클로로프렌을 기반으로 구성되어 있지만, 연소생성물에서 차이가 있는 것은 폴리클로로프렌 사용 시 추가적으로 처리되는 첨가제의 종류에서 기인된다고 판단된다.

폴리클로로프렌의 경우, 절연성이 우수하고 난연성능도 가지고 있어 케이블의 피복재료로 주로 사용되지만 저온 특성이 있어 일정량의 첨가제를 사용하는데, 황산 또는 브롬을 첨가하는 경우 난연 효과에 있어 공동상승효과(Synergy effect)가 발휘된다(Mok, 1977). 그러나 해당 성분들의 경우, 연소 시 황화수소나 이산화황, 브롬화수소 등의 유해성 가스 배출의 원인이 될 수 있어 첨가제 사용 시 추가적인 고려가 필요하다고 판단된다. 케이블 두 종의 피복재에서는 시안화수소와 브롬화수소가 소량 방출하였는데, 이는 각각의 케이블 제작 시 적용된 난연제에서 기인된 것으로 판단된다. 케이블 피복재의 난연성능을 향상하기 위하여 일반적으로 질소계, 브롬계 첨가제가 적용되며 이는 염소원소와 마찬가지로 화염 억제 성능을 가지고 있고 휘발성이 없어 난연성능을 오래 유지하게 할 수 있다.

최근 Non-Halogen 내화 전선의 사용이 일부 건축물에서는 진행되고 있으나 아직까지 규격화 되지 않아 밀폐 공간으로 구성된 곳에서의 인체 유해성이 문제시 될 수 있다고 판단된다.

케이블 두 종의 절연재에서는 포름알데히드가 A사 제품 및 B사 제품에서 각각 53 ppm, 51 ppm 방출되는 것을 확인하였다. 이는 재료 구성 성분 중 에틸렌의 열분해에서 기인되며, NES 713 규격의 기준치를 초과하지는 않았다. 단, 포름알데히드는 0.1 ppm 이하의 농도에서도 두통이나 기침, 가슴 조임 등의 증상이 발생할 수 있어 유해하다고 사료된다. 아크릴로니트릴, 질산화물, 시안화수소 및 브롬화수소 또한 방출되었으며, A사 절연재의 경우 질산화물의 방출량이 264 ppm로 확인되었다.

NES 713 시험을 통한 연소가스 독성 성분 방출 특성의 경우, A사 케이블에서의 질산화물 방출 외에 한계치를 초과하는 방출량은 나타나지 않았다. 그러나 각각의 케이블에서 방출되는 브롬화수소나 포름알데히드, 질산화물 등과 같은 독성가스의 경우, 소량이라 하더라도 인체유해성이 문제되는 물질(Cho et al., 2012; Boningari and Smirniotis, 2016; Huang et al., 2017)이므로 화재 위험성 평가 시 고려가 필요한 부분으로 사료된다.

3.2 연소가스 독성지수

Table 4에는 각각의 시험편에서 발생된 가스 검출량 값을 Eq. (2)에 적용하여 산출한 연소가스의 독성 지수를 제시하였다. MIL-DTL에서 규정한 독성지수 한계치는 인간이 30분간 해당 환경에 노출되었을 경우 사망에 이르는 농도를 지수화 한 값으로써 값이 높을수록 위험도도 높아진다(Kim et al., 2013).

Table 4. The State of Toxicity Index for Test Specimens

Specimens		Toxicity index
A-Jacket	CR	5.08
A-Insulation	EPR	4.78
B-Jacket	CR	4.85
B-Insulation	XLPE	4.01

케이블 두 종의 피복재 및 절연재의 독성지수는 A사 피복재가 5.08, 절연재가 4.78, B사 피복재가 4.85, 절연재가 4.01로 산출되어 MIL-DTL-24640/15D를 기준으로 보았을 때 화재 시 유해한 가스 농도가 형성될 것으로 판단된다. 선행 연구에서 발표된 바에 의하면 실내 공간에 설치된 케이블에서의 독성지수가 1.5 이상의 수치를 나타내는 경우, 해당 환경에 5분 이상 노출되었을 때 재실자가 의식 장애를 일으킬 수 있는 위험성이 높다(Liang and Ho 2007). 따라서 운전원 수동조치 신뢰성 및 화재안전성을 향상하고, 원자력 발전소 종사자의 안전성을 확보하기 위하여 이런 부분에 대한 고려가 필요하다고 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 비안전등급 케이블 두 종에 대하여 화재 시 발생할 수 있는 유해가스 성분 및 독성지수를 확인하였고 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 두 종의 케이블 피복재 모두 이산화탄소의 방출량은 NES 713 규격의 기준치를 초과하지 않았다. 일산화탄소의 경우, A사와 B사의 피복재 및 절연재에서 다량으로 검출되었다.

- (2) 포름알데히드는 폴리에틸렌 및 에틸렌 프로필렌 계열의 성분으로 구성되어 있는 EPR 절연재와 XPLE 절연재에서 각각 53 ppm, 51 ppm이 방출되었다.
- (3) 질산화물의 경우 A사의 피복재 및 EPR 절연재에서 각각 253 ppm, 264 ppm 방출되었다. B사의 피복재와 XPLE 절연재에서는 질산화물이 각각 40 ppm, 36 ppm 검출되었다.
- (4) 염화수소와 브롬화수소 등 할로젠계 화합물은 소량이지만 두 종의 케이블 피복재와 절연재에서 모두 검출되었고, 시안화수소의 방출 또한 확인되었다. 해당 화합물들은 소량이어도 인체에 대한 유해성이 상당하므로 방출량을 낮추거나 억제하는 추가 연구가 필요하다고 판단된다.
- (5) 독성 지수는 미국국방성규격(MIL-DTL)을 적용하여 평가하였으며, A사 케이블 피복재 5.08, 절연재가 4.78, B사 케이블 피복재가 4.85, 절연재가 4.01로 산출되었다.

본 연구에서는 비 안전등급 케이블 화재 시 발생하는 연소가스를 측정 및 분석하고, 유해가스의 독성지수를 확인하였다. 이러한 케이블의 인체유해성 분석에 활용된 NES 713 규격 등 연소가스의 독성을 제한하는 규정이 화재 발생 시 운전원 조치가 중요한 원자력 발전소에도 적용이 필요할 것으로 판단되며, 이에 대한 연구가 지속적으로 수행될 필요성이 있다고 사료된다. 본 연구는 케이블 연소생성물 방출 및 독성 성분에 대한 기초 데이터를 구축하기 위하여 진행되었으며, 향후 연구에서는 케이블의 활성화 에너지를 산출하여 가속열화를 진행하고 열화정도에 따른 연소생성물 및 독성지수의 변화를 확인하고자 한다. 또한 독성지수를 파악함에 있어서 본 연구에서는 NES 713규격을 적용하였으나, 30분 노출시간에 대한 인체독성 지수의 산출이므로 다양한 작업환경에 따라 증가된 노출시간의 적용도 필요하다고 할 수 있으며, 다양한 노출시간에 대한 독성지수의 산출연구도 추가적으로 수행될 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 원전 화재 안전성 증진을 위한 케이블 화염시험 방법론 및 연소특성 평가기술 개발(1705002)의 일환으로 수행되었습니다.

References

- Boningari, T., and Smirniotis, P.G. (2016) Impact of Nitrogen Oxides on the Environment and Human Health: Mn-based Materials for the NO_x Abatement. *Current Opinion in Chemical Engineering*, Vol. 13, pp.

- 133-141.
- Chauhan, M., Gupta, M., Singh, B., Bhattacharyya, S.K., Singh, A.K., and Gupta, V.K. (2013) Pretreatment of Pine Needles/Wood Particles and Their Composites with Isocyanate Prepolymer Adhesive. *Polymer Engineering and Science*, Vol. 53, No. 8, pp. 1740-1750.
- Cho, N., Im, D., Kim, D., and Yun, K. (2017) Safety Evaluation for Maintenance Facilities of Nuclear Power Plant Using Computational Fluid Dynamics Analysis. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 17, No. 1, pp. 177-182.
- Cho, N.W., Shin, H.J., Lee, I.K., and Oh, E.H. (2012) A Study for Bioassay on the HBr Combustion Toxicity. *Journal of Oil & Applied Science*, Vol. 29, No. 4, pp. 545-551.
- Eom, S. (1996) Fire Hazard Assessment for the Nuclear Power Plant. *Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering*, Vol. 10, No. 2, pp. 52-64.
- Han, S.B. (2001) *A Study on the Toxic Gases Released from Interior Upholstery Fires*. Master's thesis, Hoseo University.
- Huang, C., Liu, W., Cai, J., Wang, X., Zou, Z., and Sun, C. (2017) Household Formaldehyde Exposure and Its Associations with Dwelling Characteristics, Lifestyle Behaviours, and Childhood Health Outcomes in Shanghai, China. *Building and Environment*, Vol. 125, pp. 143-152.
- Hull, T.R., Lebek, K., Pezzani, M., and Messa, S. (2008) Comparison of Toxic Product Yields of Burning Cables in Bench and Large-Scale Experiments. *Fire Safety Journal*, Vol. 43, No. 2, pp. 140-150.
- Hull, T.R., Stec, A.A., Lebek, K., and Price, D. (2007) Factors Affecting the Combustion Toxicity of Polymeric Materials. *Polymer Degradation and Stability*, Vol. 92, No. 12, pp. 2239-2246.
- Kang, D.I. (2015) *A Study on Abandonment Risk Evaluation for a Main Control Room Fire in Nuclear Power Plants*. Ph.D. dissertation, Chungnam National University.
- Kannan, G.K., Gupta, M., and Kapoor, J.C. (2005) Estimation of Gaseous Products and Particulate Matter Emission from Garden Biomass Combustion in a Simulation Fire Test Chamber. *Atmospheric Environment*, Vol. 39, pp. 563-573.
- Kim, W.J., Park, Y.J., Lee, H.P., Lim, S.H., and Kim, J.I. (2013) A Study on the Toxicity Analysis of Combustion Gases of Architectural Surface Materials and Architectural Adhesives. *Journal of The Korean Society of Safety*, Vol. 28, No. 4, pp. 48-52.
- Kim, Y.T. (2009) *A Study on the Combustion of Car Interior Materials*. Master's thesis, Kangwon National University.
- Lee, D.H., Choi, H.J., Kim, D.S., and Lee, B.H. (2008) Distribution Characteristics of Pyrolysis Products of Polyethylene. *Polymer Korea*, Vol. 32, No. 2, pp. 157-162.
- Lee, D.M., Cho, Y.S., and Yim, H.T. (2011) Comparison of Korean and Foreign Standards for Cable Flame Tests. *Proceedings of Korean Institute of Fire Science & Engineering Conference*, pp. 94-99.
- Lee, S.K., Moon, Y.S., and Yoo, S.Y. (2017) A Study on Validation Methodology of Fire Retardant Performance for Cables in Nuclear Power Plants. *Journal of The Korean Society of Safety*, Vol. 32, No. 1, pp. 140-144.
- Lee, Y.H., and Yang, J.E. (2002) Fire Safety Assessment of Nuclear Power Plant. *Proceedings of Korean Institute of Fire Science & Engineering Conference*, pp. 307-315.
- Liang, H.H., and Ho, M.C. (2007) Toxicity Characteristics of Commercially Manufactured Insulation Materials for Building Applications in Taiwan. *Construction and Building Materials*, Vol. 21, pp. 1254-1261.
- Lim, H.S. (2012) *Degradation Diagnosis and Heat-Flux Analysis of Cable Exposed to the Fire of Nuclear Power Plant*, Ph.D. dissertation, Chungbuk National University.
- Lim, H.S., and Kim, D.H. (2011) A Study on Heat-Flux Evaluation for Cable Fire Including Diagnostic Methodology for Degradation in Nuclear Power Plants. *Journal of The Korean Society of Safety*, Vol. 26, No. 2, pp. 20-25.
- Lowden, L.A., and Hull, T.R. (2013) Flammability Behaviour of Wood and a Review of the Methods for Its Reduction. *Fire Science Reviews*, Vol. 2, No. 4, pp. 1-19.
- MIL-DTL-24640/15D (2002) *Cable, Electric, 600 Volts, Lightweight, Multi-pair, AWG 22, Type 2XSAW (Including variation type 2XSAOW)*.
- MIL-DTL-24643B (2002) *Cables and Cords, Electric, Low Smoke, for Shipboard Use General Specification for (22 Aug 2002)*.
- Mok, Y.I. (1977) A Review of the Flame Retardation of Flammable Polymer. *HWAHAK KONGHAK*, Vol. 15, No. 4, pp. 211-224.

NES 713 (1990) *Determination of the Toxicity Index of the Products of Combustion from Small Specimens of Materials*. U.K. Ministry of Defence Naval Engineering Standards, Foxhill Bath, U.K.

NUREG-0800 (2009) *Standard Review Plan for the Review of Safety Analysis Reports for Nuclear Power Plants*.

Park, C.K., Kang, D.I., Ha, C.S., Lee, J.K., and Cho, W.J. (1992) Properties of Blends Containing Polychloroprene of Poly(vinylchloride) with AES. *Polymer Korea*, Vol. 16, No. 3, pp. 305-311.

Park, Y., and Lee, H. (2015) Identification on Carbon Oxide and Smoke Release Change of Aging Wire Cables. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 15, No. 4, pp. 107-113.

Seo, H.J., and Son, D.W. (2015) Hazard Assessment of

Combustion Gases from Interior Materials. *Fire Science and Engineering*, Vol. 29, No. 4, pp. 49-56.

Seo, H.J., Hwang, W., and Lee, M.C. (2017) Fire Properties of Pinus densiflora Utilizing Fire-retardant Chemicals based on Borated and Phosphorus (I) - Combustion Characteristics. *BioResources*, Vol. 12, No. 3, pp. 5417-5427.

Stec, A.A., and Hull, T.R. (2011) Assessment of the Fire Toxicity of Building Insulation Materials. *Energy and Buildings*, Vol. 43, No. 2-3, pp. 498-506.

Received	November 27, 2017
Revised	November 29, 2017
Accepted	December 8, 2017