

원자력발전소 케이블 난연성능 검증 방법론 개선을 위한 연구

이상규 · 문영섭* · 유성연*

한국원자력안전기술원 계통평가실 · *충남대학교 기계공학부
(2017. 1. 4. 접수 / 2017. 1. 18. 수정 / 2017. 1. 19. 채택)

A Study on Validation Methodology of Fire Retardant Performance for Cables in Nuclear Power Plants

Sang Kyu Lee · Young Seob Moon[†] · Seong Yeon Yoo^{*}

Department of Reactor System, Korea Institute of Nuclear Safety

^{*}School of Mechanical Engineering, Chungnam National University

(Received January 4, 2017 / Revised January 18, 2017 / Accepted January 19, 2017)

Abstract : Fire protection for nuclear power plants should be designed according to the concept of “Defense in Depth” to achieve the reactor safety shutdown. This concept focuses on fire prevention, fire suppression and safe shutdown. Fire prevention is the first line of “Defense in Depth” and the licensee should establish administrative measures to minimize the potential for fire to occur. Administrative measures should include procedures to control handling and use of combustibles. Electrical cables is the major contributor of fire loads in nuclear power plants, therefore electrical cables should be fire retardant. Electrical cables installed in nuclear power plants should pass the flame test in IEEE-383 standard in accordance with NUREG-0800, “Standard Review Plan for the Review of Safety Analysis Reports for Nuclear Power Plants”. To assure the fire retardant of electrical cables during design life, both aged and unaged cable specimens should be tested in accordance with IEEE-383. It can be generally thought that the flammability of electrical cables has been increased by wearing as time passed, however the results from fire retardant tests performed in U.S.A and Korea indicate the inconsistent tendency of aging and consequential decrease in flammability. In this study, it is expected that the effective methodology for validation of fire retardant performance would be identified through the review of the results from fire retardant tests.

Key Words : fire protection, Defense in Depth, electrical cables, fire retardant performance, IEEE-383

1. 서론

원자력발전소는 발전소 내 어떤 지역에서 화재가 발생하더라도 원자로 안전정지(Reactor Safe Shutdown), 잔열제거 및 방사성물질 누출방지 능력에 지장을 초래하지 않아야 한다. 이를 위해 원자력발전소 화재방호계통은 화재를 예방하고, 화재발생 시 이를 초기에 감지 및 진압하며, 화재가 확대될 경우에도 화재로 인한 피해를 최소화하는 “심층방어(Defense in Depth)” 개념을 기반으로 설계·설치 및 운영된다.

심층방어의 첫 단계인 화재예방은 원자력발전소 내에 가능한 한 비가연성 또는 내화·내열재료를 사용하는 것이다. 원자력발전소에서 사용되는 물질은 내화 및 난연성능이 입증되어야 하며, 인화성 및 가연성 물

질의 사용은 엄격히 관리 또는 제한되어야 한다. 원자력발전소에서 가장 큰 비중을 차지하는 가연성 물질로는 발전소 전반에 설치되어 있는 케이블을 예로 들 수 있다. 케이블은 원자력발전소의 각 방화지역 및 방화구역에 포설되어 있어 화재하중을 이루는 주요 요소일 뿐 아니라 원자력발전소의 안전정지 관련 주요 기기, 설비 및 계기의 작동 및 제어를 위한 신호를 제어실에 공급하고 전력을 공급하는 역할을 수행한다. 따라서 원자력발전소에 설치되는 케이블에 대한 난연성능의 확보는 매우 중요하며 이러한 난연성능을 입증하기 위한 기술기준이 꾸준히 개발되고 있는 추세이다.

원자력발전소에 적용되는 케이블의 난연성능은 미국 원자력규제위원회(NRC, Nuclear Regulatory Commission)의 규제지침인 NUREG-0800, “Standard Review Plan for

[†] Corresponding Author : Young Seob Moon, Tel : +82-42-868-0758, E-mail : k728mys@kins.re.kr
Korea Institute of Nuclear Safety, 62, Gwahak-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34142, Korea

the Review of Safety Analysis Reports for Nuclear Power Plants”¹⁾에 근거하여 국제전기전자기술자협회의 기술기준인 IEEE-383에 따라 입증되어야 한다. IEEE-383은 원자력발전소의 설계기준사건(DBE, Design Basis Event)을 가정한 온도, 압력 및 방사선 등에 대하여 케이블의 건전성을 입증하는 기술기준으로서 화재 역시 하나의 설계기준사건으로 가정하여 케이블의 난연성능을 확보하도록 기술하고 있다. IEEE-383은 1974년에 초판인 IEEE-383, “IEEE Standard for Type Test of Class 1E Electric Cables, Field Splices, and Connections for Nuclear Power Generating Stations”²⁾이 발행된 이후로 2003년에는 개정판인 IEEE-383, “IEEE Standard for Qualifying Class 1E Electric Cables and Field Splices for Nuclear Power Generating Stations”³⁾이 발행되었으며, 2015년에는 IEEE-383, “IEEE Standard for Qualifying Electric Cables and Splices for Nuclear Facilities”, 2015⁴⁾이 발행되었다. 1974년 초판에는 케이블에 대한 난연성능 입증기준이 IEEE-383의 한 절로서 기술되어 있었으나, 2003년 개정판에서부터 케이블의 난연성능에 대한 시험방법을 별도의 기준인 IEEE-1202, “IEEE Standard for Flame Testing of Cables for Use in Cable Tray in Industrial and Commercial Occupancies”⁵⁾로 위임하여 다루고 있다.

IEEE-383은 케이블의 설치수명기간 동안 난연성능을 입증할 수 있도록 비열화시편과 더불어 열화시편도 화염시험 대상으로 선정하고 있다. 케이블 시편의 열화방식은 아레니우스 식(Arrhenius equation)을 이용한 가속열화방식을 채택하고 있으며, IEEE-383에서 요구하는 대표시편 선정기준에 따라 비열화케이블 및 열화케이블 별로 각각 대표시편을 선정하여 화염시험을 수행한다. 일반적으로 열화시편은 구조적인 견고함이 부족하여 화염에 대한 난연성능이 비열화시편 보다 취약할 것이라 생각할 수 있다. 하지만, 근래에 국내에서 수행된 케이블에 대한 화염시험 결과를 살펴보면 열화시편의 난연성능이 감소하기도 하지만, 반대로 비열화시편에 비해 증가하는 경우도 확인되어 열화시편에 대한 난연성능의 변화 양상이 일정하지 않음을 볼 수 있다. 또한, 동일한 재질 및 제작사의 케이블이라 할지라도 수차례 수행한 화염시험의 결과치가 큰 차이를 보이는 경우도 있다.

이처럼 케이블 열화시편의 난연성능은 재질 및 제작 방식에 따라 비열화시편에 비해 증가되거나 감소되어 성능의 변화를 예단할 수 없으며, 동일 조건에서 수차례 수행된 화염시험의 결과치도 큰 차이를 보이므로 케이블의 난연성능을 검증할 수 있는 방법을 쉽게 정립하기 어렵다. 본 연구에서는 지금까지 수행된 케이

블 화염시험 결과를 분석하고, 이를 토대로 효과적인 케이블 난연성능 검증방향을 분석하였다.

2. 케이블 화염시험 결과 분석

원자력발전소에 설치되는 케이블은 원자력발전소의 안전에 직접적인 영향을 줄 수 있는 중요한 설비로서 케이블의 설치 수명기간 동안 난연성능을 확보하기 위한 시험을 지속적으로 수행하고 있다. 본 절에서는 지금까지 국내외에서 수행된 케이블 화염시험 결과를 분석하여 케이블 열화시편에 대한 난연성능의 변화 양상을 확인하고, 이를 통해 효과적으로 케이블의 난연성능을 검증할 수 있는 방향을 모색하였다.

2.1 케이블 화염시험 방법

케이블의 화염시험은 다양한 국제기술기준에 따라 수행된다. 각각의 국제기술기준에 대한 시험조건 및 판정기준은 Table 3에 기술하였으며, 이 중 대표적인 기술기준인 IEEE-1202에 따른 케이블 화염시험 절차는 Fig. 1과 같다.

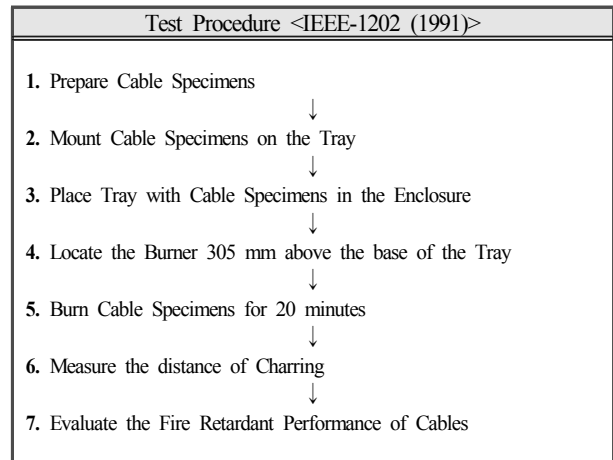


Fig. 1. Flame test procedure according to IEEE-1202(1991).

2.2 국외 케이블 화염시험 결과 분석

미국의 샌디아 연구소(SNL, Sandia National Laboratories)는 케이블의 절연체 및 외피를 구성하는 재질을 케이블의 난연성능에 영향을 미치는 주요 요인으로 고려하여 화염시험을 수행하였다. SNL에서 작성하고 미국 NRC에서 발행한 NUREG/CR-2868, “Aging Effects on Fire-Retardant Additives in Organic Materials for Nuclear Plant Applications”⁶⁾ 보고서는 EPR(Ethylene Propylene Rubber) 절연체 및 CSPE(Chloro-Sulfonated Polyethylene) 외피로 구성된 케이블의 열화시편에 대한 화염시험 결과를 분석

하고 있다. NUREG/CR-2868에 따르면, EPR의 난연성분은 긴 시간에 걸쳐 서서히 감소되므로 열화에 따른 난연성능의 감소는 미미하며, CSPE의 경우 재질에 포함된 휘발성분이 시간이 지남에 따라 급속히 감소하여 결과적으로 케이블의 난연성능이 향상되고 있다.

SNL에서 작성한 NUREG/CR-5619, “The Impact of Thermal Aging on the Flammability of Electric Cables”⁷⁾ 보고서에는 XLPE(Cross-Linked Polyethylene) 절연체 및 Neoprene 외피로 구성된 케이블과 EPR 절연체 및 CSPE 외피로 구성된 케이블에 대한 화염시험 결과를 기술하고 있다. NUREG/CR-5619도 NUREG/CR-2868과 마찬가지로 두 종류의 케이블 모두 열적 열화과정에서 증발된 휘발성분으로 인하여 비열화시편에 비해 열화시편의 난연성능이 향상되었다고 분석하고 있다.

이처럼 SNL에서 수행한 케이블 화염시험의 결과로 미루어 보면 CSPE 및 Neoprene 등 염소(Chlorine)계열의 재질을 사용한 케이블은 시간의 경과 또는 열적 열화과정에서 증발하는 휘발성분으로 인해 비열화시편에 비해 열화시편의 난연성능이 더욱 향상된다고 생각할 수 있다. 하지만 해당 보고서는 염소계열의 케이블만을 화염시험 대상으로 하고 있으며, 두 종류 이하의 케이블에 대해 화염시험을 수행한 결과로서 해당 시험 결과를 열화에 따른 케이블의 난연성능에 대한 일반적인 변화 양상으로 보기에 어려움이 있다. 더욱이 같은 염소계열의 케이블이라 할지라도 주성분 이외에 첨가제의 조성비 및 제작방식에 따라 케이블의 물리적 성질이 완전히 달라질 수도 있다. 또한 해당 보고서에 기술된 케이블은 국외업체에서 제작된 케이블로 국내 원전에 적용되는 모든 케이블에 일괄적으로 적용하기에는 분명히 한계가 있다.

2.3 국내 케이블 화염시험 결과 분석

국내에서는 현재 원자력발전소에 설치된 케이블에 대한 난연성능을 확인하기 위하여 10년 열화를 거친 케이블을 대상으로 화염시험을 수행한 바 있다. 해당 화염시험은 동일 제작사에서 제작한 여러 종류의 케이블을 대상으로 수행되었으며, 케이블 종류별 비열화시편 및 열화시편에 대한 화염시험 결과는 Table 1과 같다.

케이블에 대해 적용된 시험기준은 CSA C22.2, “Test Methods for Electrical Wires and Cables”⁸⁾로서 IEEE-1202와 마찬가지로 케이블의 화염인가 시간을 20분으로 규정하고 있으며, 탄화길이에 대한 허용기준을 버너에서부터 1,500 mm 이내로 요구하고 있다. 총 9종의 케이블에 대한 비열화시편 및 열화시편은 각각 두 번씩 화염시험이 수행(Table 1에 기술된 탄화길이는 두

Table 1. Result of fire retardant test for cables

Standard	Cable type	Aging	Average burning length (mm)
CSA C22.2	EPR/CSPE Type. A	Unaged	525
		Aged	500
	EPR/CSPE Type. B	Unaged	675
		Aged	750
	EPR/CSPE Type. C	Unaged	1250
		Aged	850
	EPR/Hypalon Type. A	Unaged	900
		Aged	1375
	EPR/Hypalon Type. B	Unaged	1300
		Aged	1050
	EPR/Hypalon Type. C	Unaged	1425
		Aged	1200
	EPR/CR Type. A	Unaged	1075
		Aged	900
	EPR/CR Type. B	Unaged	975
		Aged	1025
	EPR/Neoprene	Unaged	625
		Aged	500

번의 화염시험에 대한 평균치)되었으며, 시험결과는 모두 허용기준 이내로 측정되어 10년간의 난연성능이 입증되었다.

하지만 케이블 종류별 비열화시편 및 열화시편의 탄화길이를 비교해 보면 케이블 열화에 따른 난연성능이 일관되게 변하지 않음을 확인할 수 있다. Table 2를 참조하면, 총 9종의 케이블 중 3종의 케이블은 열화시편의 탄화길이가 비열화시편의 탄화길이에 비해 증가하였으나, 6종의 케이블에서는 열화시편의 탄화길이가 오히려 감소하여 서로 반대되는 경향을 보이고 있다. 9종의 케이블은 모두 EPR 절연체로 구성되어 있으며, 외피는 염소계열의 CSPE, Hypalon, CR(Chloroprene Rubber) 및 Neoprene으로 이루어져 있어 SNL에서 수행한 화염시험 대상 케이블과 기본적인 재질이 비슷하다고 할 수 있다. 그러나 케이블 외피의 종류마다 열화에 따른 난연성능의 변화 양상이 다른 것은 SNL의 분석 결과와 상이하다 할 수 있다.

또한 비열화시편 대비 열화시편의 탄화길이가 증가 또는 감소한 케이블 군 내에서도 탄화길이의 증감폭이 케이블의 종류마다 큰 차이를 보이는 것도 생각해 볼 필요가 있다. 비열화시편과 비교하여 열화시편의 탄화길이가 감소한 케이블 중 5번 케이블(EPR/CSPE Type. C)은 비열화시편과 열화시편의 평균탄화길이 차이가 400 mm로서 탄화길이의 허용기준(1,500 mm) 대비 26.7%

Table 2. Fire retardant performance for cables in relation to aging

Burning length for aged specimen	Cable type		Gap between aged & Unaged burning length (mm)	Ratio to criterion (%)
	1	2		
Longer than unaged specimen burning length	1	EPR/CSPE Type. B	75	5
	2	EPR/Hypalon Type. A	475	31.7
	3	EPR/CR Type. B	50	3.3
Shorter than unaged specimen burning length	4	EPR/CSPE Type. A	25	1.7
	5	EPR/CSPE Type. C	400	26.7
	6	EPR/Hypalon Type. B	250	16.7
	7	EPR/Hypalon Type. C	225	15
	8	EPR/CR Type. A	175	11.7
	9	EPR/Neoprene	125	8.3

의 차이를 보이고 있다. 그러나 4번 케이블(EPR/CSPE Type. A)은 평균탄화길이 차이가 허용기준 대비 1.7%에 불과하였다. 반대의 경우도 마찬가지로, 비열화시편 대비 열화시편의 탄화길이가 증가한 케이블 중 2번 케이블(EPR/Hypalon Type. A)은 평균탄화길이 차이가 허용기준 대비 31.7%이나, 3번 케이블(EPR/CR Type. B)은 불과 3.3%의 차이를 보이고 있어 케이블의 난연성능에 대한 일관적이고 정량적인 결론을 도출할 수 없다.

동일한 케이블 시편을 대상으로 두 차례 수행한 화염시험의 결과를 Table에 구분하여 기술하지는 않았지만, 해당 화염시험 결과가 서로 큰 편차를 보이기도 하였다. 2번 케이블(EPR/Hypalon Type. A)의 비열화시편과 4번 케이블(EPR/CSPE Type. A)의 열화시편의 경우, 동일 조건에서 수행한 두 차례 화염시험에서의 탄화길이 차이가 각각 300 mm(1차: 1,050 mm, 2차: 750 mm) 및 200 mm(1차: 400 mm, 2차: 600 mm)로 측정되어 허용기준 대비 각각 30%와 20%의 차이를 나타냄을 확인할 수 있었다. 해당 시험에서는 측정된 케이블의 탄화길이와 허용기준 사이에 많은 여유가 있어 화염시험 수행 시 발생하는 탄화길이의 편차가 합격여부에 영향을 주지 않았지만, 탄화길이가 허용기준에 근접한 경우에는 이러한 편차가 합격여부를 판가름 할 수 있으므로, 이를 보완하여 케이블의 난연성능을 정확히 검증할 필요가 있다.

3. 케이블 난연성능 검증 방향

이처럼 열화에 따른 케이블의 난연성능은 케이블 외피의 재질만 가지고 쉽게 예단할 수 없으며, 같은 종류의 케이블이라 할지라도 탄화길이의 편차가 상당히

때문에 이전에 수행했던 화염시험 결과의 분석만으로는 열화시편 및 비열화시편의 난연성능을 예측할 수 없다. 따라서 다른 어떤 곳보다도 안전이 중요시되는 원자력발전소에 설치되는 케이블에 대해서는 열화시편 및 비열화시편 모두 화염시험을 수행하여 수명기간 동안 난연성능을 직접 검증할 필요가 있다. 케이블의 화염시험 수행 시에도 온도, 습도 등의 초기조건을 동일하게 유지하고, 시험절차 및 방법을 준수하여 환경요인에 의한 영향을 최소화해야 한다.

또한 이번 연구결과는 CSA C22.2를 기준으로 작성되었지만, CSA C22.2는 케이블의 난연성능을 입증하는 수많은 기술기준 중 하나일 뿐이므로 다른 여러 기술기준과의 비교분석을 통해 좀 더 나은 케이블의 난연성능 검증방안을 연구해 볼 필요가 있다. 비교할 수 있는 기술기준으로는 대표적으로 원자력발전소에 사용되는 케이블의 화염시험 기술기준인 IEEE-1202가 있으며, 원자력발전소에 사용되는 케이블을 대상으로 하지는 않지만 케이블의 난연성능 검증을 위한 기술기준으로 참고할 수 있는 NFPA 262, “Standard Method of Test for Flame Travel and Smoke of Wires and Cables for Use in Air-Handling Spaces”⁹⁾와 IEC 기술기준에 따라 작성된 KS C IEC 60332-3-24, “Test for Vertical Flame Spread of Vertically-mounted Bunched Wires or Cables - Category C”¹⁰⁾ 규격 등이 있다. 그리고 이러한 기술기준은 주요 현안 및 개선 요건을 반영하여 지속적으로 개정되므로 기술기준 간 비교분석 뿐 아니라 각 기술기준에 대한 변경이력도 꾸준히 관리하여 발전된 개선 요건을 반영하기 위한 노력을 기울여야 한다. 케이블 화염시험을 위한 기술기준 비교표는 Table 3과 같다.

마지막으로 케이블의 열화방식 및 연소생성물에 대해서도 많은 연구가 진행되어야 할 필요가 있다. 서론에서 설명한 바와 같이 IEEE-383에서는 케이블의 열화방식으로 아레니우스 식을 이용한 가속열화방식을 택

Table 3. International standards for flame tests for cables

	IEEE-1202 (1991)	NFPA-262 (2002)	CSA-C22.2	KSC IEC 60332-3-24
Bumer	• Ribbon gas • 20° Slope	• Dual gas • Vertical	• Ribbon gas • 20° Slope	• Ribbon gas • Horizontal
Burning time	20 min	20 min	20 min	20 min
Burning length criteria	1,500 mm	1,500 mm	1,500 mm	2,500 mm
Heat value	70,000 Btu/hr	294,000 Btu/hr	70,000 Btu/hr	70,000 Btu/hr

하고 있다. 가속열화방식은 케이블이 설치되는 장소의 열적영향과 방사선조사량을 예상하여 인위적으로 케이블을 열화시키는 방식으로서 자연적으로 설치되어 시간이 지남에 따라 열화되는 자연열화방식과의 차이점이 규명되지 않은 상태이다. 따라서 가속열화방식과 자연열화방식을 적용한 케이블의 난연성능이 어떻게 차이가 나는지 확인하여야 하며, 자연열화된 케이블의 상태와 최대한 비슷하게 케이블을 열화시킬 수 있는 가속열화방식을 구현할 필요가 있다. 또한 화재발생시 케이블에서 발생하는 연기 및 독성가스 등의 연소생성물을 분석하여 원자력발전소에서 근무하는 운전원의 안전을 확보하고, 이에 따라 원전 안전정지를 위한 수동조치를 무사히 수행할 수 있는 기틀을 마련해야 한다.

4. 결론 및 고찰

원자력발전소에 사용되는 케이블은 대략 2,000 km 길이로 약 150여개의 방화지역에 설치되며 용도에 따라 다양한 기능을 수행하기 때문에 재질 및 제작방식 등이 매우 다양하다. 따라서 기존에 수행되었던 단편적인 케이블 화염시험의 결과만 가지고는 동일한 재질의 케이블이라 할지라도 케이블이 설치된 수명기간 동안의 난연성능을 검증하는 것이 쉽지 않다. 국내외 화염시험 결과에서 보았듯이 동일한 재질의 케이블이라 할지라도 케이블 종류에 따라 제작방식 및 재료의 구성성분비가 다르기 때문에 서로 다른 화염시험 결과값이 도출될 가능성이 항상 존재한다. 그러므로 원자력발전소에 설치되는 케이블은 각 종류별로 열화시편과 비열화시편에 대한 난연성능이 검증되어야 하며, 이를 위해서는 개별 케이블에 대한 화염시험을 수행하고, 그 결과를 확인하는 방법이 가장 확실하다고 할 수 있다. 최근에 개정된 IEEE-383 2015년판에서 원자력발전소의 중요기기에 적용되는 Class-1E 케이블 뿐 아니라 모든 케이블의 열화시편 및 비열화시편을 대상으로 화염시험을 수행하여 수명기간 동안의 난연성능을 검증할 것을 요구하고 있는 것도 이와 비슷한 맥락이라 할 수 있을 것이다. 이처럼 원자력발전소에 설치된 각 종 케이블에 대해서 난연성능을 직접적으로 검증하기 위해서는 효과적인 케이블 난연성능 검증방안이 마련되

어야 하며, 이를 위해서는 국제적으로 사용되는 기술 기준을 상호 비교하는 노력을 끊임없이 기울여야 한다. 또한 자연열화된 케이블의 상태를 최대한 구현할 수 있는 가속열화방식과 케이블 연소생성물에 대한 연구를 추가적으로 수행하여 수명기간 동안의 난연성능을 효과적으로 검증하고, 운전원의 안전 및 원전의 안전 운전을 보장하는 토대를 마련해야 한다.

감사의 글: 본 논문은 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구사업의 결과입니다. (NRF-2015M2A8A4047734)

References

- 1) NUREG-0800, "Standard Review Plan for the Review of Safety Analysis Reports for Nuclear Power Plants", 2009.
- 2) IEEE-383, "IEEE Standard for Type Test of Class 1E Electric Cables, Field Splices, and Connections for Nuclear Power Generating Stations", 1974.
- 3) IEEE-383, "IEEE Standard for Qualifying Class 1E Electric Cables and Field Splices for Nuclear Power Generating Stations", 2003.
- 4) IEEE-383, "IEEE Standard for Qualifying Electric Cables and Splices for Nuclear Facilities", 2015.
- 5) IEEE-1202, "IEEE Standard for Flame Testing of Cables for Use in Cable Tray in Industrial and Commercial Occupancies", 1991.
- 6) NUREG/CR-2868, "Aging Effects on Fire-Retardant Additives in Organic Materials for Nuclear Plant Applications", 1982.
- 7) NUREG/CR-5619, "The Impact of Thermal Aging on the Flammability of Electric Cables", 1991.
- 8) CSA C22.2, "Test Methods for Electrical Wires and Cables", 2005.
- 9) NFPA 262, "Standard Method of Test for Flame Travel and Smoke of Wires and Cables for Use in Air-Handling Spaces", 2002.
- 10) KS C IEC 60332-3-24, "Test for Vertical Flame Spread of Vertically-mounted Bunched Wires or Cables - Category C", 2013.