

케이블 화재의 발화원인 및 케이블 난연성능 시험방법에 대한 고찰

1. 서론

최근 건축기술의 진전과 더불어 현대 건물은 단순히 주택으로서의 역할 자체에 그치지 않고, 인간이 보다 더 안락한 문화생활을 영위할 수 있도록 대형화, 첨단화가 수반되어지고 있다. 이와 같이 대형화, 첨단화가 되어 갈수록 전기공급이나 통신 등을 위한 다양한 케이블이 수반되는 것은 필연적이다.

케이블 화재는 케이블 자체의 연소뿐만 아니라 케이블이 매개체가 되어 연소를 확대시키는 위험성이 있기 때문에 매우 중요하게 방재대책을 수립해야 한다. 또한 매년 전기화재는 총화재에 비하여 높은 비중을 차지하고 있으며, 2010년 전기화재 통계자료¹⁾에 의하면 전체 전기화재 건수 중 배선 및 배선기구에 의한 건수가 21 %로 가장 높은 비율을 차지하고 있는 것으로 나타나 케이블에서의 방재대책이 중요한 것을 알 수 있다.

본 원고에서는 이러한 케이블에서의 화재원인과 케이블 화재예방을 위한 근원대책으로 사용되는 케이블 난연에 대한 성능을 평가하는 시험방법에 대하여 고찰하고 적절한 난연성능 시험방법을 살펴보고자 한다.

2. 케이블 화재의 발화메커니즘 및 원인

2.1 케이블 화재의 발화메커니즘²⁾⁻³⁾

2.1.1 유기질 절연물의 탄화에 의한 발화

탄화는 두 전극간의 절연물 중의 일부분에서 시작되는데 탄화로 인하여 고유저항이 감소되면 그 부분의 전류밀도가 증가하여 국부가열 현상이 일어난다. 이 발생열이 주위의 열보다 많으면 열이 누적되어 온도상승과 동시에 국부적인 탄화현상이 가속된다. 이러한 과정이 진전되면 탄화 영역이 확대되고 전위경도가 강한 곳이 발생하여 점차적으로 절연파괴 현상이 일어난다.

유기질 옥내 접속기의 경우 절연물의 탄화로 인한 절연저항의 감소로 누설전류가 흐르나 그 값이 미소하므로 이로 인한 온도상승은 아주 작다. 그러나 탄화정도가 어느 정도로 진전되면 절연저항치가 특정치(약 1,600 Ω ~ 2,000 Ω)에 도달하면 온도가 급격히 상승하여 발화하게 된다. 이러한 임계저항치 외에 유기질의 발화현상은 열과파괴론에 입각한 절연파괴와 관련이 있다.

열과괴론에 의하면 온도상승으로 인한 고유 저항치의 저하 이외에 탄화로 인한 고유 저항치의 저하에 의해서도 절연이 파괴되어 발화할 수 있게 된다. 특히 표면이 약하여 절연이 파괴되는 경우 열방신이 공기 중으로만 일어난다고 가정하면 시료가 밀폐되어 있거나 공기의 소통이 나쁠 때에는 임계 고유 저항치가 비교적 커도 발화할 수 있게 된다.

2.1.2 접속부 과열에 의한 발화

접속부의 접촉저항에 의한 국부가열로 인해 화재가 발생할 수도 있다. 특히 유기질 전기접속기의 접속부 과열에 의한 발화의 경우와 전선이나 케이블 접속부분에서의 과열 또는 전선과 철선과의 접속부분의 과열에 의한 발화의 경우가 가장 많다. 유기질 전기접속기 내의 접속상태가 불완전하면 접촉저항의 증가로 가열이 일어나 유기질 절연물이 발화 또는 착화하는 경우가 있다. 이 경우 접속기의 잔유물에는 다른 것에 비하여 절연물의 연소경로는 양 전극 또는 한 전극을 중심으로 하여 국부적이고, 발열부분의 금속편은 산화, 열팽창, 수축 등의 작용에 의하여 접속부에는 거칠고 특수한 부식 등을 발견할 수 있는 특징이 있다.

2.1.3 누전에 의한 발화

누전화재는 전선이나 전기기기에서 전류가 유출하는 부분에 위치하고 있는 금속재의 발열하는 부분 등의 메커니즘이 각양각색이며, 또 전류의 통로인 금속재의 상태도 다양하므로 발화의 위치와 양상도 일률적으로 언급하기는 곤란하다. 충전부와 대지 사이에 누설전류 경로가 형성되면 이로 인해 열이 절연체를 국부적으로 파괴시키게 되고 시간의 경과에 따라 누설전류가 커지게 된다. 따라서 이러한 환경이 장시간 경과되면 발열이 누적되어 주위 가연물로 작용하는 케이블 피복에 발화가 발생하게 된다.

2.2 케이블 화재의 원인

케이블이 고전압화, 대형화, 다양화되어 감에 따라 케이블이 발화원이 될 잠재성은 더욱 커지고 있으며, 더욱이 케이블 화재는 일단 화재가 발생하면 케이블이 도화선이 되어 피해가 확대될 위험성이 증가된다.

케이블 화재 원인은 케이블 자체가 발화한 경우와 외부로부터의 연소에 의한 경우로 크게 구분될 수 있지만 어느 경우든지 케이블 난연성의 고도화를 포함한 전선로의 방화대책이 요구된다. 케이블 화재의 원인으로 케이블 자체의 발화에 의한 경우를 살펴보면 다음과 같다.

- 지락, 단락 고장시 대전류 Arc에 의한 발열 착화
- 다회선 포설에 따른 허용전류 저감률 부족으로 온도상승 발화
- 시공불량 등에 의한 온도상승으로 부분 발열 발화
- 외상, 약품, 절연체의 열화 등으로 절연과괴에 의한 발화

외부로부터 기인한 발화의 경우를 살펴보면 다음과 같다.

- 공사 중 용접불꽃 등에 의한 발화
- 케이블 주변에서 기름 등의 가연물이나 구축물의 연소에 의한 발화
- 케이블이 접속되어 있는 기기류의 과열에 의한 발화

전기화재 중 케이블에 의한 화재가 차지하는 비율은 상당히 높다. 케이블에서 과열로 화재가 발생하였거나 외부의 요인으로 케이블에 착화되었을 때 케이블이 매개체가 되어 화재가 확대되는 경우가 많다. 따라서 케이블 화재에 대한 방재대책이 매우 중요하다. 케이블 화재예방을 위하여 가장 기본적으로 사용되는 방법은 케이블 자체의 난연화이다. 최근에는 케이블 화재예방을 위하여 전력용, 통신용 등 다양한 난연케이블이 사용되고 있다. 이러한 난연케이블의 적정 성능을 검증하기 위하여 IEC, IEEE 등에서는 케이블 난연성능을 검증하는 시험방법을 규정하고 있고, 우리나라도 이러한 국제규격에 따라 케이블의 난연성능을 검증하고 있다. 다음 절에서는 이러한 케이블 난연성능 시험기준을 소개하고 상호 비교·검토하였다.

3. 케이블 난연성능 시험방법 고찰

케이블의 난연성능을 검증하는 시험방법으로는 IEC 60332-3, IEEE 383 등이 가장 많이 사용되고 있다. 특히, IEEE 383은 국내 내화전선의 성능시험 기술기준이나 연소방지설비 화재안전기준에 적용되고 있는 기준이며, 국내 케이블 제조업체 등에서도 케이블의 난연성능을 검증하는 방법으로 IEEE 383이 가장 많이 사용되고 있다. IEEE 383에 대한 세부적인 사항은 다음과 같다.

3.1 IEEE 383⁴⁾⁻⁶⁾

케이블 설치상태를 화염전파가 가장 잘 일어나는 수직상태로 재현하여 인위적인 Ribbon-type 가스버너의 불꽃을 격렬한 아크나 대형 오일화재를 재현한 발화원으로 가정하여 이 불꽃에 의한 수직 연소확대 상태를 평가하기 위한 기준으로, 외부 발화원에 의한 연소확대를 판정하기 위해 미국의 전기전자기술자협회(IEEE)가 시험방법초안(P383)을 개발, 1974년 원자력발전소에 사용되는 전선, 케이블의 연소확대방지를 위한 성능기준으로 제정하였다.

IEEE 383은 1974년에 제정되어 사용되다가 2003년에 개정되었다. 본 절에서는 1974년판과 개정된 2003년판을 비교·검토하였다.

3.1.1 IEEE 383 - 1974년판

1) 시험방법

- 가) 시험은 자연통풍이 되는 실이나, 심한 바람은 막고 인공통풍이 되는 실내에서 실시
- 나) 시험시료의 길이는 2.4 m
- 다) 트레이의 중앙부분에 150 mm 이상으로 시료를 설치
(시료의 굵기에 따라 설치 개수가 정해짐)
- 라) 시료와 시료사이는 케이블 직경의 1/2 간격으로 배열하여 트레이에 고정
- 마) Ribbon-type 버너는 바닥에서 600 mm 높이로 시료의 표면에서 75 mm 떨어진 위치에서 수평으로 장착하여 불꽃을 인가
- 바) 불꽃의 온도는 시료의 표면에서 3 mm 떨어진 위치에서 Thermo couple로 측정할 때 816 °C(1500 °F)로 20분 동안 인가

2) 성능기준

- 가) 시험 종료 후 화염을 제거 시 자기소화성이 있어야 한다.
- 나) 시료는 전소되지 않아야 한다.

3.1.2 IEEE 383 -2003년판

IEEE 383 - 2003년판에서는 1974년판처럼 세부적으로 시험절차나 판정기준 등을 규정하지 않고 난연성능 시험에 대한 것은 IEEE 1202에서 정한 절차와 화원 등을 사용하여 성능기준에 만족하도록 규정하고 있다. 따라서 IEEE 383 - 2003년판은 IEEE 1202라고 간주할 수 있다. 이 IEEE 1202 시험장치 및 절차 등은 다음과 같다.

1) 시험장치 개요

- 가) 시험실 : 2.4 m × 2.4 m × 3.3 m
- 나) 벽체의 구성 : 152 mm 콘크리트 벽돌
- 다) 관찰창 : 1.86 m² 이하
- 라) 공기유입 : 출입문 쪽과 반대쪽 2개소의 하부에 균등하게 설치
공기유입구의 면적은 1.45 ± 0.03 m²
- 마) 출입문 : 적절한 개소에 설치
- 바) 배기구 : 천정부에 설치
- 사) 집합함 설치 : SUS재질로서 914 mm × 914 mm × 914 mm크기의 함을 천정 상부에 설치(그림 1 참조)
- 아) 배기덕트 : 집합함에 직경 406 mm의 배기덕트를 수평으로 설치
덕트 말단에 속도조정이 가능한 배기팬이 설치되어야 함.
- 자) 실내에서 공기유동 : 유입구와 배기구를 열고 버너를 정지시 바닥부분과 바닥에서 1.5 m 높이에서 측정된 유속이 1 m/s를 초과하지 않아야 한다.
- 차) 케이블 트레이 : 금속제, 305 mm(폭) × 76 mm(깊이) × 2,438 mm(길이), 229 mm 간격으로 25 mm × 6 mm 가로대 설치

- 카) 버너 : 254 mm의 Ribbon-type 버너, 바닥에서 305 mm 높이에 설치, 수평으로 20도 경사지게 설치(그림 2 참조)
- 타) 유량계 : 시험중 프로판가스와 공기유량 측정용으로 설치

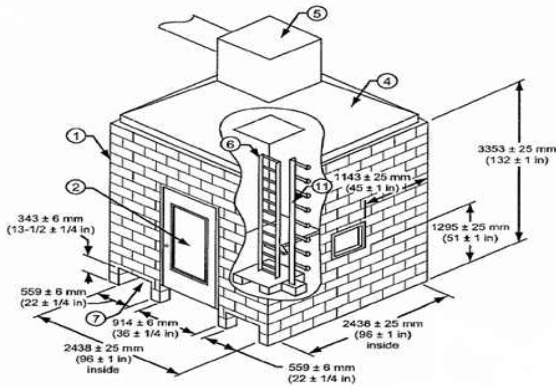


그림 1. IEEE 1202 시험설비

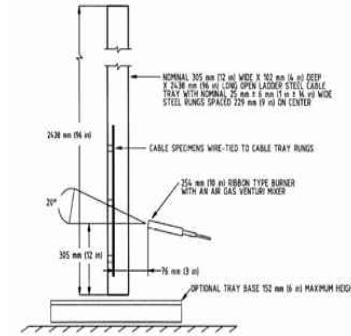


그림 2. 버너 접합 각도

2) 시험방법

가) 케이블 설치 : 길이 2.4 m, 케이블 외경에 따라 단일형태나 다발형태로 케이블 트레이에 단층으로 설치

① 13 mm 이하의 케이블

직경이 13 mm 이하인 시료는 다음 표에 의한 방법으로 다발로 묶어져 다발 직경의 1/2간격으로 트레이에 설치

케이블 직경(mm)	각 다발에 케이블 수	트레이에 설치되는 다발수
3 미만	19	13
3 이상 5 미만	19	8
5 이상 6 미만	7	9
6 이상 9 미만	3	10
9 이상 11 미만	3	8
11 이상 13 미만	3	7

② 13 mm 초과하는 케이블

13 mm를 초과하는 케이블인 경우 다음 표에 의한 각 시료가 케이블 트레이에 1/2간격이하로 부착된다.

케이블 직경(mm)	트레이에 설치되는 다발수
13 이상 15 미만	11
15 이상 19 미만	9
19 이상 21 미만	8
21 이상 26 미만	7
26 이상 28 미만	6
28 이상 39 미만	5
39 이상 52 미만	4
52 이상 73 미만	3
73 이상 120 미만	2

나) 시험절차

① 케이블과 케이블 트레이

- 케이블 트레이에 부착되는 케이블은 시험전 최소 3시간 동안 18 ℃의 온도에서 전처리되어야 한다.
- 트레이는 벽과 평행하게 설치되고 시료는 버너 상부에서 203 mm 하부에 시료의 끝이 설치되도록 한다.

② 배기덕트의 유량

0.65 m³/s ± 0.02 m³/s가 되도록 조정.

③ 프로판 버너

- 수평으로 20도 경사시켜 설치하고 시료표면으로부터 75 mm 이격시켜 설치한다.
- 프로판 유량은 표준조건인 20 ℃, 101 kpa에서 220 cm³/s ± 8 cm³/s가 되도록 조정한다.
- 이 프로판 유량은 이론적으로 20 kW 열방출량과 같으나 실제 열방출량은 버너의 불완전 연소로 인해 이보다는 작다.

④ 공기유입

공기유입량은 표준온도, 압력하에서 1,280 cm³/s ± 80 cm³/s이어야 한다.

⑤ 시험시간

- 버너의 불꽃은 시료에 20분간 계속해서 화염을 가한다.
- 시험종료시 버너의 불꽃을 끄고 케이블의 연소는 자기소화가 될 때까지 방치한다.
- 자기소화시간을 기록한다.

3) 시험결과와 평가

가) 손상부분의 평가

- 연소가 중지된 후 케이블을 잘 닦고 시료가 탄화되거나 영향을 받은 부분까지의 길이를 최소 25 mm 단위로 측정, 기록한다.
- 케이블 손상은 버너 표면의 하부로부터 수평상단으로 영향을 받은 부분 또는 탄화된 부분까지 측정하여 결정한다.
- 탄화범위는 뾰족한 물체로 케이블을 눌러 결정한다.

나) 성능기준

손상된 길이가 1.5 m 이하이면 이 기준의 성능에 적합한 것으로 한다.

3.1.3 1974년판과 2003년판 비교·검토

IEEE 383 - 1974년판과 IEEE 383 - 2003년판(IEEE 1202)는 수직트레이에 케이블을 설치하고 화염을 가하여 화염전파에 따라 난연성능을 평가하는 기본 성능검증방법은 유사하지만 가장 큰 차이점은 1974년판은 개방된 공간에서 시험을 하는 것이고, 2003년판에서 규정하고 있는 IEEE 1202는 일정하게 구획된 폐쇄된 챔버에서 시험을 실시하는 것과 판정기준이다. 표 1은 1974년판과 2003년판을 서로 비교한 것이다.

표 1. IEEE 383 - 1974년판과 2003년판 비교

시험비전 항목	IEEE 383 - 1974년판	IEEE 383 - 2003년판 (IEEE 1202)
시험실	자연통풍이 되거나 심한 바람이 없는 개방된 공간	2.4 m × 2.4 m × 3.3 m
공기유량조건	없음	1,280 cm ³ /s
화염원	약 816 °C의 화염원	20 kW 화염원
시험체 설치방법	30 cm × 2.4 m 트레이에 케이블 직경의 1/2간격으로 설치	30 cm × 2.4 m 트레이에 케이블 직경의 1/2간격으로 설치
화염인가시간	20분	20분
성능요건	전소되지 않아야 함(2.4 m)	손상된 길이 1.5 m 이하

표 1에서 보듯이 1974년판과 2003년판은 화염인가시간이나 시험체 설치방법 등이 유사하지만 성능요건이 1974년판에 비하여 2003년판이 보다 엄격한 것을 알 수 있다.

국내에서는 아직도 이미 오래된 기준인 1974년판에 따라 케이블의 난연성능을

평가하고 있고 일부 기업에서는 구매시방서에 적용하고 있다. 물론 1974년판이 큰 오류가 있는 것은 아니지만 점차 성능이 강화되고 있는 최근 케이블의 난연 성능을 정확하게 평가하기 위해서는 보다 엄격한 성능요건을 규정하고 있고, 이미 오래된 기준보다는 최신 기준인 2003년판을 적용하여 케이블의 난연성능을 평가해야 할 것으로 사료된다.

3.2 IEC 60332-3⁷⁾

IEC 60332-3은 수직으로 배치, 고정시킨 상태의 케이블에 대한 수직 불꽃 전파를 평가하는 시험이다. 이 기준은 시험시간, 시험체의 비금속 물질의 양, 시험시 시험체의 부착방법에 따라 카테고리를 A F/R, A, B, C, D로 구분하였다. 모든 카테고리에서 최소 도체 단면적이 35 mm²이상인 케이블은 간격이 떨어진 형태로 시험을 한다. 도체 단면적이 35 mm²미만인 케이블은 접촉방식으로 시험을 한다.

3.2.1 시험장치

1) 시험챔버

시험챔버는 폭 1,000 ± 100 mm, 깊이 2,000 mm ± 100 mm, 너비 4,000 mm ± 100 mm의 크기를 갖는 수직형태의 시험챔버이고, 시험챔버 바닥은 지상에서 들어올려진 형태이어야 하고 챔버는 밀폐구조로써 시험챔버 전면으로부터 150 ± 10 mm의 위치에 400 mm ± 10 mm, 800 mm ± 10 mm 크기를 갖는 구멍을 통하여 공기가 공급될 수 있도록 한다. 배출구는 300 mm ± 10 mm, 1,000 mm ± 100 mm 크기로 챔버 상부 뒤쪽에 설치된다.(그림 3 참조)

2) 공기공급

공기공급장치로 버너점화전 시험시작 전 입구측에서 일정하게 조절된 온도 20 °C ± 10 °C, 대기압하에서 5,000 ℓ/min ± 500 ℓ/min의 비율로 공기를 공급한다.

3) 사다리 형상

두가지 형태의 파이형 사다리가 있으며 표준사다리는 폭 500 mm ± 5 mm이며 광폭사다리는 폭이 800 mm ± 10 mm이다.(그림 4 참조)

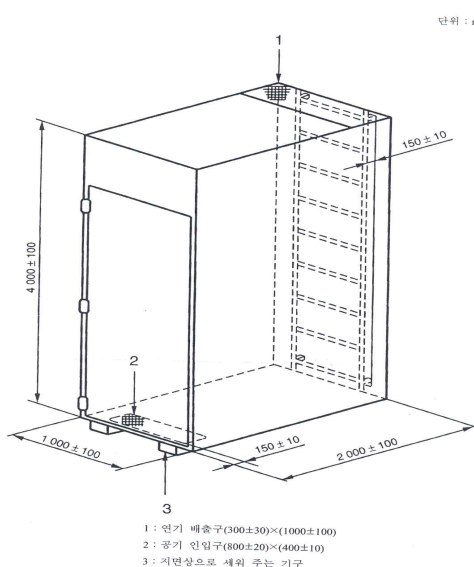


그림 3. 시험챔버 구조

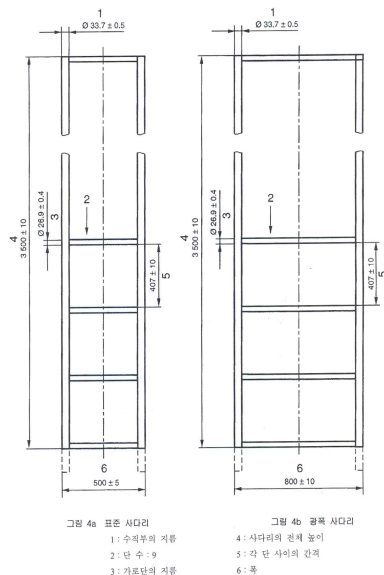


그림 4. 사다리 형상

3.2.2 시험방법

- 1) 사다리는 버너가 사다리의 축과 거의 대칭이 되도록 설치하고 버너는 시험조의 바닥에서부터 600 mm ± 5 mm의 높이에, 시험체의 전면에서부터 75 mm ± 5 mm의 거리에 수평이 되도록 한다.
- 2) 버너 화염의 인가점은 사다리의 2개의 가로단 사이의 중앙에 위치하고 적어도 시험체의 하부 끝단에서 500 mm 높이에 있게 한다.
- 3) 화염을 시험체에 규정된 시간(20분 또는 40분) 가하고, 시험조의 공기 흐름은 5 000 L/min ± 500 L/min가 되도록 유지한다.
- 4) 시험조를 흐르는 공기의 흐름은 시험체의 연소나 발화가 중지되거나 최대 지속 시간이 1시간이 될 때까지 유지한다.
- 5) 연소가 중지되면 버너의 바닥 모서리 부분으로부터 탄화물의 개시까지의 거리를 측정한다.

3.2.3 시험결과의 평가

1) 손상부분의 평가

연소가 정지된 후 시료를 깨끗이 세척한 후 원래의 표면에 손상이 없다면 그 을음은 무시할 수 있다. 또한 비금속 재료의 연화, 변형도 무시할 수 있다. 버너 하부에서부터 탄화물의 개시부분까지를 측정한다. 날카로운 물체로 케이블 표면을 눌러 표면이 깨지기 쉬운 표면이 되는 부분까지가 탄화의 개시점이다.

2) 성능기준

탄화된 길이가 2.5 m를 초과하지 않아야 한다.

3.3 IEEE 817⁸⁾

IEEE 817은 절연케이블에 처리된 연소방지재의 적정성을 표시하기 위한 시험에 대해 정의한 기준이다. 연소방지재는 기 설치된 케이블에 성능을 개선하기 위하여 테이프, 포(布), 액체, 수지형태로 설치하거나 도포한 것을 말한다.

IEEE 817에서는 절연케이블에 처리된 연소방지재의 케이블 허용전류에 미치는 영향, 설치기간 중 원형상태로의 유지, 화염전파억제성능에 대한 지침을 정하고 있다. 이 기준에서 정하는 시험의 분류는 다음과 같다.

- 화염전파성능 : 연소방지재가 화염전파를 억제하는 것을 판정하기 위한 시험
- 허용전류시험 : 케이블의 통전능력에 대한 연소방지재의 영향을 평가하기 위한 시험
- 노화시험 : 연소방지재가 가열노화시험 후 화염전파 억제능력상실, 갈라짐, 부서짐 등이 없어야 함을 평가하기 위한 시험

이 기준의 화염전파성능에 대한 것은 난연성능을 평가하기 위한 항목으로써 IEEE 383 - 2003년판과 마찬가지로 IEEE 1202에서 정하는 시험절차와 화원을 사용하여 난연성능을 평가하도록 규정되어 있다.

4. 결론

케이블의 발화원인과 메커니즘에 대하여 살펴보았고, 이러한 케이블의 화재예방을 위해서는 케이블의 난연화가 근본 대책임을 확인하였다. 최근의 복잡, 다양한 건축물에 적합하도록 다양한 난연케이블이 사용되고 있다. 본 원고에서는 국내에서 적용되고 있는 다양한 난연케이블의 성능을 평가하는 난연성능 시험방법에 대하여 소개하고 난연케이블 성능시험방법의 적용에 대한 적절성을 논하였다.

국내에서 난연케이블 성능을 검증하기 위한 시험방법으로 가장 많이 적용되고 있는 IEEE 383은 1974년에 제정되어 2003년에 개정되었다. 케이블 난연성능을 보다 적절하게 평가하기 위해서는 이미 오래된 규정인 IEEE 383 - 1974년판보다는 최신 개정된 IEEE 383 - 2003년판에서 규정하고 있고, 보다 엄격한 IEEE 1202에 따라 난연성능을 평가해야 할 것으로 사료된다. 특히, 난연도료, 난연테이프 등과 같은 연소방지재는 연소방지재의 성능IEEE 817에서 규정된 바와 같이 IEEE 1202에 따라 난연성능을 평가해야 한다.

- 1) 한국전기안전공사, 전기재해 통계, 2010년
- 2) 박양범, 한상옥, “케이블 화재 방재대책”, 한국화재소방학회지, Vol.9, No.2, pp.47~56, 1995
- 3) 우형주, “전기화재의 원인 및 감식에 관한 연구”, 대한전기학회지, No.15, Vol.4, pp.1~9, 1975
- 4) IEEE 383, Standard for type test of class 1E electric cables, field splices, and connections for nuclear power generating stations, 1974
- 5) IEEE 383, Standard for qualifying class 1E electric cables and field splices for nuclear power generating stations, 2003
- 6) IEEE 1202, Standard for flame testing of cables for use in cable tray in industrial and commercial occupancies, 1991
- 7) IEC 60332, Test on electric cables under fire conditions, Part 3-10, Test for vertical flame spread of vertically-mounted bunched wires of cables, apparatus, 2003
- 8) IEEE 817, Test procedure for flame-retardant coatings applied to insulated cables in cable trays, 1993