[Research Paper]

천장 은폐장소 전선관 연소에 따른 화재확산 및 피난 위험도에 관한 연구

박광묵 · 전재감* · 방선배**†

한국전기안전공사 전기안전연구원 선임연구원, *한국전기안전공사 전력설비검사처 검사부장,

**한국전기안전공사 전기안전연구원 수석연구원

A Study on Fire Spread and Evacuation Risk of Conduit Combustion in Ceiling Hiding Place

Kwang-Muk Park · Jae-Kam Jeon* · Sun-Bae Bang**†

Junior Researcher, Korea Safety Research Institute,

*Department Head, Office of Electrical Power Facility Inspection,

**Senior Researcher, Korea Safety Research Institute

(Received November 18, 2019; Revised January 14, 2020; Accepted January 21, 2020)

요 약

본 연구에서는 천장 은폐장소에 공사 가능한 전기설비 중 배선공사에 사용되는 합성수지관(CD, VE) 및 금속관(ST)을 대상으로 연소실험 및 ISO 5660 실험, ISO 5659 실험을 실시하였으며, 측정 데이터를 바탕으로 화재 확산 및 피난 위험도를 분석하였다. ISO 5660 총열방출량 실험결과 CD관 120.5 MJ/m², VE관 81.9 MJ/m², ST관 4.9 MJ/m²이 측정되었다. ISO 5659 연기밀도 실험결과 CD관 1320, VE관 731, ST관 102이 측정되었으며, 최대연기밀도가 측정된 시간은 CD관 605 s, VE관 740 s, ST관 1,200 s이다. 화재 확산 및 피난 위험도에서 CD관, VE관, ST관 순으로 나타났다. 화재 확산 위험도 분석 시 총열방출량은 CD관 4,820 MJ/m², VE관 4,267 MJ/m², ST관 196 MJ/m²로 산출되었다. 피난 위험도 분석결과 투과율 89% 때의 시간은 CD관 127 s, VE관 35 s, ST관 969 s, 거의 앞이 보이지 않을 정도의 농도를 나타내는 투과율 79% 때의 시간은 CD관 157 s, VE관 50 s로 나타났다. CD관과 VE관은 화재 확산 및 피난 위험도 수치가 높았던 반면 ST관의 경우 화재 확산에 거의 영향이 없었고, 피난 위험도에서도 화재발생 인지 후 피난하는데 문제가 없는 것으로 나타났다.

ABSTRACT

In this study, the ISO 5660 and ISO 5659 combustion tests were conducted with synthetic resin conduits (CD, VE) and metal conduit (ST) used for wiring work in electrical facilities, which can be installed in ceiling concealed places. Then, fire spreading and evacuation risks were analyzed based on the measured data. In the ISO 5660 test, CD of 120.5 MJ/m², VE of 81.9 MJ/m², and ST of 4.9 MJ/m² were measured. In the ISO 5659 test, the CD 1320, VE 731, and ST 102 were measured, and then the maximum smoke densities were measured for CD 605 s, VE 740 s, and ST 1,200 s. In terms of fire spreading and evacuation risk, the CD conduit, VE conduit, and ST conduit were in order. In the fire spreading risk analysis, total heat emission was calculated as 4,820 MJ/m², 4,267 MJ/m², and 196 MJ/m² for CD, VE, and ST, respectively. Evacuation risk analysis shows at transmittance of 89%, CD is 127 s, VE is 35 s, and ST is 969 s. At transmittance of 79%, representing almost invisible concentration, CD is 157 s and VE is 50 s. The CD and VE conduits had a high fire spreading and evacuation risks, while the ST conduit had little effect on fire spreading and evacuation risk.

Keywords : Ceiling hiding place, Conduit, Smoke density, Fire spread, Evacuation risk

1. 서 론

2018년 8월 21일 15시 43분, 인천광역시 남동구 논현동에 위치한 전자부품용 인쇄회로기판 생산 업체인 세일전자

에서 화재로 인해 9명이 사망하고 6명이 부상을 당하는 사고가 발생하였다. 인천공단소방서 선착대가 신고 접수 4분 후에 화재현장에 도착해 화재진화를 시작했고, 45분 후 화재진화를 완료하였다. 그러나 사망자 9명 중 2명이 이미 선착대

† Corresponding Author, E-Mail: bsb1586@kesco.or.kr. TEL: +82-63-716-2355, FAX: +82-63-716-9660

© 2020 Korean Institute of Fire Science & Engineering. All right reserved.

가 도착하기 전에 화재를 피하기 위해 건물 밖으로 투신하면서 사망하였으며, 나머지 사망자 7명은 공장 내부에서 발견되었다. 인명피해가 컸던 이유는 불이 난 초기에 연기가 대량으로 발생했고, 이후 불길과 연기가 급속도로 퍼졌기 때문이다. 인천소방본부 확인결과 최초발화지점은 4층 화물용 엘리베이터 앞 사무실 천장, 화재의 원인은 전기적 요인에 의한 것으로 추정되고 있다⁽¹⁻⁴⁾.

일반적으로 화재로 인해 사망에 이르는 과정에서 화재에 의한 열기보다 발생한 연기와 유독가스에 의해서 피난하지 못하고 사망하는 비율이 약 60%를 차지한다. 화재가 발생한 것을 인지했을 때는 이미 화재와 연기에 둘러싸여 도망갈 수 없기 때문이다. 물질로부터 발생한 연기의 양은 물질의 종류와 연소 조건에 따라 달라진다⁽⁵⁾.

이중 천장구조 건축물에서 조명 및 석고보드 층과 지붕 안쪽 콘크리트 층 사이의 은폐장소에 설치되는 주 건축자재는 우레탄폼으로 불이 붙으면 삽시간에 연소가 확산된다. 전기적 측면에서 공장, 사무실 등의 천장 은폐장소에 설치되는 전기설비에는 전선, 전선관, 케이블트레이, 기타 부속자재 등이 있다. 그 중 유기물에 해당하는 합성수지관에서 연기가 다량 발생할 것으로 판단된다.

천장 은폐장소의 전기배선은 건축물 시공 시 설치되고, 특별한 문제가 발생되지 않는 경우 장시간 방치되는 경향이 있다. 설비가 증설되거나 인테리어 변경 시에는 전기배선이 변경되면서 천장 은폐장소가 난잡해지곤 한다. 변경공사 시에 접속박스 안의 접속이 미흡했을 경우 접속불량에 의한 발열과 단락이 순차적으로 진행되면서 전선피복에 착화 또는 합성수지관에 착화되어 화재로 진전될 위험이 있다. 인천 남동공단 세일전자 발화지점과 같은 최상층부의 천장은 여름철에 온도가 상승하여 가연물의 열적 변형이 취약한 곳이며, 통풍이 미흡하여 가연물 발열에 의한 열분해 시 발생하는 가스로 인해 착화가 용이한 환경이다.

이러한 은폐장소의 전기설비에서 발생하는 화재는 전문가에 의한 적합한 시공과 올바른 점검 및 검사로 예방할 수 있다. 그러나 일단 발화원에 의해 가연물 착화로 이어지면 화재의 진전이 급속히 진행되기 때문에 전기설비 측면에서도 연기 발생으로 인한 인명피해를 최소화 할 수 있는 방안 마련이 필요한 시점이다.

본 연구에서는 전기설비 기술기준의 판단기준 180조에 따라 천장 은폐장소에 공사 가능한 합성수지관 및 금속관을 대상으로 연소실험과 ISO 5660-1 “연소성능시험-열방출률(콘칼로리미터법)” 실험 및 ISO 5659-2 “연기발생-단일 연소챔버 시험에 의한 광학 밀도의 측정” 실험을 실시하였다. 연소실험에서는 연기발생과 연소의 확산을 시각적으로 확인하고 비교분석하였다. ISO 5660 실험에서는 열방출량을 측정하였으며, 열방출량으로 인한 화재 확산 위험도를 분석하였다. ISO 5659 실험에서는 연기밀도를 측정하였고, 측정 데이터를 바탕으로 피난이 어려운 상황의 시간을 산출하여 그에 따른 위험도를 분석하였다.

2. 이론적 배경

2.1 전선관 공사

전기설비기술기준의 판단기준 제180조(저압 옥내배선의 시설장소별 공사의 종류) 1항에 따라 저압 옥내배선은 합성수지관 공사, 금속관 공사가요전선관 공사 또는 케이블 공사에 의하여 시설하여야 한다. 2항에서는 건축물 빈공간의 공사방법에 전선관 공사, 케이블덕트공사, 케이블트레이공사 등이 포함되어 있다. 내선규정 제2210절에는 시설 장소에 따른 배선방법이 구체적으로 명시되어있다. Table 1은 내선규정 2210절 시설장소의 배선방법을 나타낸 것이다.

전기설비기술기준의 판단기준 제180조와 내선규정 제2210절에 따라 천장 은폐장소에서는 합성수지관 또는 금속가요전선관을 사용할 수 있도록 규정되어 있다. 합성수지관은 합성수지 가요전선관(CD관)과 경질염화비닐관(VE관)으로 나뉜다^(6,7).

Figure 1 (a)는 인천남동공단 세일전자 4층 화재현장의 천장을 나타낸 것이다. 전선관, 케이블 트레이 등이 탄화된 것을 확인할 수 있다. Figure 1 (b)는 동일 장소의 화재피해가 없었던 3층 천장을 나타내고 있다. Figure 1 (c), (d)는 Figure 1 (b) 3층 천장 은폐장소이다. 사용되는 전기설비는 조명 등의 부하에 전원을 분기하기 위해서 설치하는 접속박스를 포함해 합성수지 가요전선관, 금속 가요전선관, IV 전선, CV케이블, 케이블 트레이 등이 있다. 배선된 일부 전선과 테이핑 처리된 전선 간 접속 부위가 노출된 것 등이 확인된다.

2.2 총열방출량 측정

열방출률은 화재가 발생했을 경우 화재의 성장과 전파에 직접적인 영향을 미치기 때문에 화재안전에 매우 중요한 요소로 인식되고 있다. ISO 5660-1 “연소성능시험-열방출률(콘칼로리미터법)”은 산소 소모법으로 측정한다⁽⁸⁾. 열방출률 생성이 재료의 연소에 필요한 산소의 양에 비례한다는 원리를 이용한 시험으로 산소 소모를 측정하여 시간간으로 열방출률을 계산한다. 열방출률은 산소 1 kg이 소모되면 약 13.1 MJ의 열이 발생하는 기본원리를 이용하여 식(1)과 같이 계산되어진다. 총열방출량(Total heat released, THR)은 시험시작부터 일정시간 또는 종료까지 열방출률의 합산으로 계산되며 MJ/m²로 표현된다^(9,10).

$$q(t) = \left(\frac{\Delta h_c}{r_o}\right)(1.10)C\sqrt{\frac{\Delta p}{T_e}} \frac{X_{O_2}^0 - X_{O_2}}{1.105 - 1.5X_{O_2}} \quad (1)$$

- q : 열방출률(kW)
- Δh_c : 순연소열(kJ·g⁻¹)
- r_o : 양론적 산소/연료 질량비
- C : 오리피스 유량계 교정상수(m^{1/2} · g^{1/2} · K^{1/2})
- Δp : 오리피스미터 압력차(Pa)

Table 1. Extension Regulations - Section 2210

Wiring Practice		Inside					
		Exposing Place		Hiding Place			
				Inspection Possible		Inspection Impossible	
		Dry	Moisture or Water	Dry	Moisture or Water	Dry	Moisture or Water
Insulator Wiring		○	○	○	○	×	×
Metallic Conduit Wiring		○	○	○	○	○	○
Poly-vinyl Conduit Wiring	Poly-vinyl Conduit (Except CD Conduit)	○	○	○	○	○	○
	CD Conduit	①	①	①	①	①	①
Flexible Conduit Wiring	First-class Flexible Conduit	○	×	○	×	×	×
	Vinyl Coating First-class Flexible Conduit	○	○	○	○	×	×
	Second-class Flexible Conduit	○	×	○	×	○	×
	Vinyl Coating Second-class Flexible Conduit	○	○	○	○	○	○
Cable Wiring		○	○	○	○	○	○
Cable Tray Wiring		○	○	○	○	○	○

○ : Installation Possible

× : Installation Impossible

CD : No Smoke Tolerance

① : Except in the Case of Direct Embedding in Concrete, It Can be Installed Only If It is put in a Dedicated Ronflammable or Self-flammable Pipe or Duct.

(a) Seil-electron 4 floor ceiling

(b) Seil-electron 3 floor ceiling

(c) Wiring work

(d) Wring work

Figure 1. Incheon seil-electronics fire site. T_e : 오리피스미터 내에서 가스 절대온도(K) $X_{O_2}^0$: 산소 분석기 눈금의 초기값 X_{O_2} : 산소 분석기 눈금값

2.3 연기밀도 측정

케이블 연소에서 발생하는 연기밀도 측정은 시험표준 KS IEC 61034-2에 의해 가능하다. 그러나 합성수지관, 금속관과 같은 배선공사 재료에는 해당되지 않으며, 배선공사 재료 관련 연기밀도 측정에 대한 시험표준은 없는 상태

이다. 일반적인 고체물질에서 발생하는 연기밀도 측정 방법은 챔버 내에 연소가스를 평가하는 ISO 5659-2 “연기발생-단일 연소챔버 시험에 의한 광학 밀도의 측정”을 따른다⁽¹¹⁾. ISO 5659-2 시험방법은 건축, 차량 등 다양한 산업분야에서 여러 가지 재료 등의 연기발생에 대한 연구에 쓰이고 있다. 시험편을 수평으로 놓고 밀폐된 공간에서 점화불꽃을 사용하여 시험편의 노출면으로부터 발생하는 연기를 측정한다. 발생하는 연기는 챔버 내에 모아지게 되고 수직으로 설치된 광학장치에 통과된 빛의 강도를 측정한다. 연기밀도에 대한 계산을 식 (2)와 같다^(12,13).

$$D_s = G(\log_{10} \frac{100}{T}) \quad (2)$$

D_s : 연기밀도
 G : V/AL
 V : 시험 챔버의 체적, m³
 A : 시험편의 노출 면적, m²
 L : 광 경로의 길이
 T : 투과율, %

2.4 연기밀도와 피난 위험도의 관계

연기는 시야를 떨어뜨려 화재 시 사람의 대피를 방해하기 때문에 연기밀도는 연기의 질을 나타내는 중요한 인자이다. 연기밀도는 일반적으로 연기의 Light obscuration나 연기의 광밀도(Optical density)항으로 표시한다. Light obscuration은 광선이 연기를 통과할 때 빛의 세기 변화를 측정한다. 만약 입사평행광의 세기를 I_0 , x거리 만큼의 연기층을 통과한 후 수광부가 받는 빛의 세기를 I_x 라 하면 obscuration S_x 는 식 (3)과 같이 %로 나타낼 수 있다.

$$S_x = 100(1 - \frac{I_x}{I_0}) \quad (3)$$

광밀도는 빛이 연기를 통과한 후 광도의 감소는 대수법칙에 따른다. 예를 들어 광도가 1 m거리의 연기층을 통과한 후에는 50%까지 떨어진다면, 2 m 연기층을 통과할 때는 그것의 반인 25%까지 떨어지고 3 m의 연기층을 통과하

면 다시 원래의 12.5%까지 떨어진다. 이러한 법칙을 람버트 법칙(Lambert's law)이라 한다. 빛이 x길이의 연기를 통과할 경우 광밀도 OD_x 를 수학적으로 표시해 보면 식 (4)와 같다.

$$OD_x = \log_{10} \frac{I_0}{I_x} \quad (4)$$

그러므로 광밀도가 1.0이라는 것은 입사광 광도의 90%가 감소했다는 것을 의미한다. 연기밀도는 이상과 같이 두 가지 방법으로 표현하기 때문에 혼돈하기 쉽다. 이들 사이에는 다음과 같은 관계가 있다.

$$OD_x = 2 - \log_{10}(100 - S_x) \quad (5)$$

연기의 농도는 절대농도와 상대농도로 나눌 수 있는데, 시야 문제와 밀접한 관계가 있는 연기의 농도에서는 광학적 상대농도가 중요하며 가장 대표적인 것으로는 감광계수가 있다. 감광계수는 연기의 농도에 따른 투과량으로부터 계산된 농도로 시야상태를 문제로 하는 화재에 있어서 가장 적절한 농도 표현의 하나이다. 연기의 농도와 감광량 사이에는 다음의 Lambert-Beer 법칙이 성립한다.

$$C_s = \frac{1}{L} \ln \frac{I_0}{I} \quad (6)$$

C_s 는 Concentration of smoke의 의미이며, 연기 입자의 크기가 같다면 단위체적당 존재하는 연기의 입자수라고 생각할 수 있다. 즉, C_s 가 크면 입자수가 많은 것이고 작으면 입자수가 적은 것을 의미한다.

연기의 농도가 진해지면 연기 입자에 의해 빛이 차단되기 때문에 가시거리는 짧아진다. 감광계수 C_s [m-1]와 가시거리 D [m] 사이에는 「 $C_s \cdot D = \text{일정}$ 」의 관계가 성립한다. 감광계수로 표현되는 연기의 농도는 광밀도와 비례하며 가시거리와는 반비례의 관계를 가진다. 또한 연기발생이 많을수록 투과율은 낮아진다. 화재감지 및 알람에 대한 시험 표준인 ISO-7240-9에서는 광밀도와 투과율의 관계를 나타내고 있다. Table 2는 등가적으로 감광계수를 광밀도로 치환하여 ISO-7240-9에 따른 투과율과 감광계수 및 가시거리

Table 2. Relationship of Transmission & Depreciation Coefficient & Visibility

Transmission (%)	Depreciation Coefficient	Visibility (m)	Situation
97.7	0.1	20~30	Evacuation Limit Concentration of Unfamiliar Person in Building
93.3	0.3	5	Evacuation Limit Concentration of Familiar Person in Building
89.1	0.5	3	Concentration Feeling to be Dark
79.4	1.0	1~2	Concentration that Cannot see the Front
Less Than 30	10	0.2~0.5	Concentration of Peak Time on Fire

의 관계를 나타낸 것이다. 가시거리에 따른 상황 또한 표현하였다. 화재 발생 시 화재 공간에서 연기밀도에 의한 투과율이 89.1%일 경우 가시거리는 20~30 m으로 어두침침한 것을 느낄 정도의 농도를 나타낸다. 연기밀도에 의한 투과율이 79.4% 미만일 경우 가시거리는 1 m 미만으로 피난이 어려운 상황에 직면하게 된다^(14,15).

3. 실험

본 연구에 사용된 실험시료는 천장 은폐장소에 대표적으로 쓰이는 합성수지 가요전선관(CD관), 경질염화비닐 전선관(VE관), 금속 가요전선관(ST관)을 사용하였다. 각각의 실험에서 전선관 내에는 조명회로 배선으로 주로 사용되는 HFIX 2.5 mm² 전선을 전선관과 동일한 길이로 잘라 각각의 전선관에 삽입하여 실험을 진행하였다.

3.1 전선관 연소실험

연구원 사무실과 동일한 가로 0.6 m, 세로 0.3 m의 천장 텍스에 시료 3종을 각각 부착하였다. 시료의 길이는 0.6 m으로 잘라 텍스 가로방향으로 중앙에 고정하였다.

Figure 2와 같이 시료 부착 면을 하부로 향하게 한 다음 시료 아래에서 등산용 버너를 사용하여 수직으로 화염을 가하였다. 화염 인가 시간은 동일하게 3분으로 하였다.

3.2 총열방출량 측정실험

전선관의 총열방출량을 측정하기 위해 ISO 5660-1 규격

을 만족하는 콘칼로미터(영국, FFT사)를 사용하였다. 전선관 시료는 Figure 3 (a)와 같이 홀더 크기에 맞게 0.1 m 길이로 절단하였다. 전선관 시료 내부에 HFIX 2.5 mm² 전선을 삽입 한 후 Figure 3 (b), (c), (d)와 같이 전선관 시료를 홀더에 넣어 화원에 노출시킨다. 실험시간은 20분이다. Table 3은 실험에 사용된 시료의 길이를 나타낸 것이다. CD관은 0.1 m 4개로 총 길이 0.4 m, VE관은 0.1 m 3개로 총 길이 0.3 m, ST관은 0.1 m 4개로 총 길이 0.4 m가 실험에 사용되었다.

3.3 연기밀도 측정실험

연기밀도를 측정하기 위해 ISO 5659-2 규격을 만족하는 연소챔버(영국, FFT사)를 사용하였다. 시료는 홀더 크기에 맞게 0.065 m 길이로 절단하여 열방출량 측정실험과 동일

Figure 2. Conduit combustion test.

(a) CD + HFIX

(b) CD with holder.

(c) VE with holder.

(d) ST with holder.

Figure 3. Specimen condition for smoke density test.

Table 3. Test Specimen Length

	CD	VE	ST
Specimen Number	4	3	4
Total Length (m)	0.4	0.3	0.4

Length of one Specimen : 0.1 m

Table 4. Test Specimen Length

	CD	VE	ST
Specimen Number	4	3	4
Total Length (m)	0.26	0.195	0.26

Length of one Specimen : 0.065 m

Figure 4. Conduit combustion test.

한 방식으로 홀더에 넣어 화원에 노출시킨다.

실험은 10분간 실시하며, 만약 10분간의 노출시간동안 최소 광투과율에 이르지 못하였을 경우 추가적으로 10분 동안 시험을 계속한다. Table 4는 실험에 사용된 시료의 길이를 나타낸 것이다. CD관은 0.065 m 4개로 총 길이 0.26 m, VE관은 0.065 m 3개로 총 길이 0.195 m, ST관은 0.065 m 4개로 총 길이 0.26 m가 실험에 사용되었다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 전선관 연소실험 결과

Figure 4는 시료에 화염 인가 후 시간에 따른 연소상태를 나타낸 것이다. Figure 4 (a), (b), (c)는 1분이 경과한 시점,

Figure 4 (d), (e), (f)는 2분이 경과한 시점, Figure 4 (g), (h), (i)는 3분이 경과한 시점의 상태이다. CD 관의 경우 시간이 경과함에 따라 시료가 급격히 탄화되면서 연소가 확산되었으며, 연기발생도 늘어났다. VE관의 경우 시간이 경과함에 따라 탄화는 진행되었으나 연소 확산은 CD관에 비해 미미하였다. 연기발생은 시각적으로 CD관과 비슷한 상황이었다. VE관의 연소 확산이 CD관에 비해 약했던 이유는 VE관의 재료가 염화비닐수지로써 자기소화성 특징을 가지는 염소가 다량 함유되어 있기 때문으로 판단된다. ST관의 경우 표면이 변색되는 것 외에 연소 확산 및 연기발생이 일어나지 않았다. 천장 텍스는 실험이 진행되는 시간동안 연소 확산 및 연기발생에 거의 영향을 끼치지 못했다.

Figure 5는 실험 이후 시료의 소손 상태를 나타낸 것이

Figure 5. Post-test status.

Figure 6. Post-test status.

Figure 7. Heat release rate (HRR)-time graph.

다. CD관 실험의 경우 CD관은 0.38 m, HFIX 전선은 0.33 m가 탄화 및 소실되었다. VE관 실험의 경우 VE관은 0.24 m, HFIX 전선은 0.19 m가 탄화 및 소실되었다. ST관 실험의 경우 ST관은 0.15 m가 변색되었으며, HFIX 전선의 경우 0.11 m가 탄화 및 소실되었다.

CD관이 가장 급격하게 연소가 확산되면서 연기를 많이 발생시켰다. VE관은 CD관에 비해 연소의 확산이 약하게 나타났다. ST관은 불연

성 소재로써 연소 확산 및 연기발생이 일어나지 않았다.

4.2 총열방출량 측정결과 및 화재 확산 분석

Figure 6은 ISO 5660 시험 실시 후 시료의 소손상태를 나타낸 것이다. (a) CD관, (b) VE관은 검게 탄화되었으며 소손이 심한 상태이다. 반면 (c) ST관은 표면이 변색되긴 하였으나, 형체가 일그러지거나 소실되지는 않았다.

Figure 7은 ISO 5660 시험에 따른 열방출률 측정결과 그

Figure 8. Total heat released (THR)-time graph.

Figure 9. Field size.

Table 5. Test Specimen Length & Field Wiring Length

	CD	VE	ST
Specimen Total Length (m)	0.4	0.3	0.4
Wiring Total Length (m)	16	16	16

래프, Figure 8은 총열방출량 측정결과와 그래프를 나타낸 것이다. 열방출률 측정결과와 CD관의 최대열방출률은 526.22 kW/m^2 로 245 s만에 도달하였으며, 이후 급격히 줄어들었다. VE관의 경우 최대열방출률이 150.16 kW/m^2 로 CD관에 비해 약 3.5배 낮게 측정되었으나, 측정시간동안 비슷한 수치가 지속된 편이다. ST관은 최대열방출률이 35.98 kW/m^2 로 가장 낮게 측정되었다. 총열방출량에서는 CD관이 120.5 MJ/m^2 로 400 s 만에 도달하였다. VE관의 경우 총열방출량이 측정시간동안 꾸준히 증가하였으며, 81.9 MJ/m^2 까지 상승하였다, ST관의 총열방출량은 4.9 MJ/m^2 로 가장 낮게 측정되었다.

현장 크기를 일반적인 건물의 사무실용도 공간을 생각하여 Figure 9와 같이 천장 은폐장소 높이를 1 m로 가정하였다. Table 5는 측정 시료의 총 길이와 현장을 가정한 현장 배선 길이를 나타낸 것으로 현장에 배선된 CD관과 ST관의 길이는 측정 시료에 비해 약 40배, VE관은 약 53배

Figure 10. Total heat released (THR).

차이가 난다. Figure 10는 전선관 시료의 ISO 5660 시험 총열방출량 수치에 배선의 길이 배수를 곱한 수치를 그래프화한 것이다. CD관은 총열방출량이 $4,820 \text{ MJ/m}^2$, VE관은 $4,267 \text{ MJ/m}^2$, ST관이 196 MJ/m^2 로 나타났다.

측정결과 및 가상의 현장크기로 판단할 때 CD관은 연소가 빠르게 진행되어 화재가 급격하게 확산될 것으로 판단된다. VE관은 연소가 꾸준하게 진행되어 화재 확산의 지속성을 유지할 것으로 판단된다. 현장에서의 총 열방출량은 CD관과 VE관이 유사하게 산출되었다. ST관은 화재 확산에 거의 영향이 없는 것으로 나타났으며, 총열방출량에서 CD관과 비교했을 때 CD관이 ST관에 비해 약 25배 많은 수치이다.

4.3 연기밀도 측정결과

Table 6은 실험결과로 최대연기밀도 수치와 시간대를 나타낸 것이며, Figure 11은 시간에 따른 연기밀도를 그래프로 나타낸 것이다. 최대연기밀도가 가장 높게 측정된 실험은 CD관으로 실험장치 측정가능 최대치인 1320으로 나타났다. VE관 실험은 731, ST관 실험은 102로 측정되었다. 최대연기밀도가 측정된 시간은 CD관 605 s (10 min 5 s), VE관 740 s (12 min 20 s), ST관 실험 1,200 s (20 min)으로 나타

Table 6. The Maximum Smoke Density & Time

	CD	VE	ST
Max Smoke Density	1320	731	102
Max Smoke Density Time (s)	605	740	1,200

Table 7. Test Specimen Length & Field Wiring Length

	CD	VE	ST
Specimen Total Length (m)	0.26	0.195	0.26
Wiring Total Length (m)	16	16	16

Figure 11. Smoke density-time graph. **Figure 12.** Chamber & field size.

났다. 최대연기밀도가 측정된 시간은 시료가 가장 활발하게 연소되는 최성기를 의미할 수 있다.

그래프 형태로 판단할 때 CD관은 급격히 연소되면서 연기가 다량 발생하였으며, VE관은 자체 성분 중 하나인 염소에 의한 자기소화성을 유지하면서 지속적으로 비슷한 양의 연기를 발생시켰다. ST관의 경우 시험 종료 시까지도 연기가 거의 발생하지 않았으며, 약 700 s 이후에 측정된 연기 발생은 전선관 내부에 있던 HFIX 전선이 소손되면서 발생한 연기로 판단된다.

CD관 실험 그래프의 경우 780 s 이후부터 연기밀도 수치가 하강하였다. CD관은 급격히 연소되면서 다량 연기를 발생하였으나, 일정 시간 이후 더 이상 연소되지 않고 연기 발생이 줄어들었을 것으로 판단된다. 또한 ISO 5659-2 시험 특성상 발생된 연기가 시험 종료 시까지 챔버 외부로 배기되지 않기 때문에 기체 상태의 연기가 액적 상태로 상

변화를 일으키며 챔버 내부 표면에 부착되면서 챔버 내의 연기 밀도가 줄어든 것으로 판단된다.

4.4 연기발생으로 인한 피난 위험도 분석

ISO 5659 측정 챔버 크기는 가로 0.914 m, 세로 0.914 m, 높이 0.610 m로 약 0.51 m³이다. 현장 크기를 일반적인 건물의 사무실용도 공간을 생각하여 가로 10 m, 세로 10 m, 천장 은폐장소 높이 1 m, 실내장소 높이 2.5 m로 350 m³를 가정하였을 때 측정 챔버 크기와 현장 크기의 배수는 약 686배이다. Figure 12는 ISO 5659 측정 챔버 크기와 현장 크기를 나타낸 것이다. Table 7은 측정 시료의 총 길이와 현장 배선 길이를 나타낸 것으로 현장에 배선된 CD관과 금속관의 길이는 측정 시료에 비해 약 60배, VE관은 약 80배 차이가 난다.

현장에서 발생한 연기는 배기되지 않고, 350 m³ 체적에

Table 8. Danger Time According to Calculated Transmission

	CD	VE	ST
Time (s) on Transmission 89%	127	35	969
Time (s) on Transmission 79%	157	50	-
Time (s) on Transmission 30%	477	148	-

고루 분포되었다고 가정한다. ISO 5659 시험에 의해 측정된 CD관 VE관, 금속관 연기밀도 수치에 체적 배수 686을 곱하고, 배선의 길이 배수를 나누어 현장크기에 따른 연기밀도 수치를 산출한다. 연기밀도 식 (2)를 아래 식 (7)과 같이 투과율에 의한 식으로 변환하여 Table 2를 통해 화재 발생 시 화재 공간에서 투과율에 따른 가시거리로 피난 위험도를 나타내었다.

$$T = 100(10^{-\frac{D_s}{G}}) \quad (7)$$

Table 8는 산출된 투과율에 따른 위험상황에 도달하는 시간을 나타낸 것이다. 어두침침한 것을 느낄 정도의 농도를 나타내는 투과율 89% 때의 시간은 CD관 127 s, VE관 35 s, 금속관 969 s이다. 거의 앞이 보이지 않을 정도의 농도를 나타내는 투과율 79% 때의 시간은 CD관 157 s, VE관 50이다. 화재 최성기 때의 농도를 나타내는 투과율 30 미만 일 때의 시간은 CD관 477 s, VE관 148 s이다. Figure 13은 투과율에 산출된 투과율에 따른 위험상황에 도달하는 시간을 그래프로 표현한 것이다.

위험도 분석 결과 CD관과 VE관 모두 가시거리 1 m 미만까지 떨어지면서 화재 시 피난이 어려운 상황에 직면하게 되었다. 산출된 투과율의 시간대를 보면 VE의 경우 50 초 만에 가시거리가 1 m 미만이 되었다. 최대연기밀도 수치가 가장 높았던 CD관이 VE관 보다 약 3배인 157 s (2 min 37 s) 시간 경과 후 가시거리가 1 m 미만이 되었는데, 이것은 ISO 5659-2 시험에서 CD관이 급격한 연소와 함께 초반에만 연기가 다량 발생되고 점차 연기발생이 줄어들었으며, 기체 상태의 연기가 액적 상태로 챔버 내부 표면에 부착되면서 연기 밀도가 줄어든 결과가 반영된 것으로 판단된다. 반면 VE관은 지속적으로 연기가 발생한 것으로 판단된다. ST관의 경우 969 s (16 min 9 s) 16 min이 지났을 때 어두침침한 것을 느낄 정도에 도달했기 때문에 화재발생 인지 후 피난하는데 문제가 없을 것으로 판단된다.

5. 결 론

전기설비 기술기준의 판단기준 180조에 따라 천장 은폐 장소에 공사 가능한 합성수지관 및 금속관을 대상으로 연소실험과 ISO 5660 및 ISO 5659 실험을 실시한 결과는 다음과 같다.

(a) CD

(b) VE

(c) ST

Figure 13. Transmittance- time graph.

가. 연소실험 - CD관은 탄화 및 소실이 급격히 진행되면서 연소가 확산되었다. VE관은 CD관에 비해 탄화 및 소실, 연소 확산이 미미하였다. ST관의 경우 표면이 변색되었으나, 연소가 확산되지 않았다.

나. 총열방출량 측정실험 - CD관은 120.5 MJ/m²로 400 s 만에 도달하였다. VE관의 경우 측정시간동안 꾸준히 증가하였으며 81.9 MJ/m²까지 상승하였다. ST관은 4.9 MJ/m²로 가장 낮게 측정되었다.

다. 연기밀도 측정실험 - CD관은 1320, VE관은 731, ST관은 102이 측정되었으며, 최대연기밀도가 측정된 시간은 CD관 605 s, VE관 740 s, ST관 1,200 s이다. 그래프 형태로 판단할 때 CD관은 급격히 연소되면서 연기가 다량 발생하였으며, VE관은 지속적으로 비슷한 양의 연기를 발생시켰

다. ST관의 경우 시험 종료 시까지도 연기가 거의 발생하지 않았다.

측정데이터를 통한 화재 확산 및 피난 위험도 분석결과 위험도는 CD관, VE관, ST관 순으로 나타났다. CD관과 VE관은 화재 확산 및 피난 위험도 수치가 높았던 반면 ST관의 경우 화재 확산에 거의 영향이 없었고, 피난 위험도에서도 ST관의 경우 화재발생 인지 후 피난하는데 문제가 없는 것으로 나타났다. 분석결과는 다음과 같다.

가. 화재 확산 분석 - 화재 확산 위험도 분석결과 총열방출량은 CD관 4,820 MJ/m², VE관 4,267 MJ/m², ST관 196 MJ/m²로 산출되었다. ST관의 경우 화재 확산에 거의 영향이 없는 것으로 나타났다.

나. 피난 위험도 분석 - 피난 위험도 분석결과 어두침침한 것을 느낄 정도의 농도를 나타내는 투과율 89% 때의 시간은 CD관 127 s, VE관 35 s, ST관 969 s, 거의 앞이 보이지 않을 정도의 농도를 나타내는 투과율 79% 때의 시간은 CD관 157 s, VE관 50 s로 나타났다. 화재 최성기 때의 농도를 나타내는 투과율 30 미만일 때의 시간은 CD관 477 s, VE관 148 s로 나타났다.

2003년 발생했던 대구지하철 화재 때 많은 인명피해의 원인 중 하나였던 불에 잘 타는 지하철 내장재를 참사 이후 불연성 소재로 바꾼 것처럼 이번 연구의 분석결과를 토대로 전기설비 측면에서 천장 은폐장소의 배선공사에 사용되는 전선관 또한 유기물인 합성수지관(CD, VE) 사용을 지양하고 불연성이 금속관(ST) 사용을 지향할 수 있는 방향으로 제도가 개선될 필요가 있다.

References

1. Kookmin Daily, <http://news.kmib.co.kr/article/view.asp?arcid=0012619342>.
2. News1, <http://www.news1.kr/articles/?3406589>.
3. Chosun.com, http://news.chosun.com/site/data/html_dir/2018/08/21/2018082103550.html.
4. JTBC, http://news.jtbc.joins.com/article/article.aspx?news_id=NB11684259.
5. M. H. Yoon and Y. J. Kwon, "A Study on the Reaction Mechanism on the Harmful Gases Related to the Human Physiology Caused by Fire and Panic Phenomenon", 2008 Spring Conference, Korean Institute of Fire Science & Engineering, pp. 337-340 (2008).
6. Electrical Equipment Technical Standards and Judgment Standards, Section 180.
7. Extension Regulations, Section 2210.
8. ISO 5660-1, "Reaction-to Fire Tests, Part 1 : Heat Release Rate (Con Calorimeter)" (2015).
9. S. Y. Park, W. S. Lee, H. S. Yeo and H. S. Lim, "The Experimental Study for the Smoke Optical Density and Toxic Gases of Sandwich Panel Insulations", Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering, Vol. 20, No. 4, pp. 26-32 (2006).
10. Y. J. Park and Y. T. Kim, "A Study on the Fire Risk Comparison of Building Flooring Materials by External Heat Flux", Journal of the Korean Society of Safety, Vol. 32, No. 5, pp. 20-24 (2017).
11. ISO 5659-2, "Smoke Generation, Part 2 : Determination of Optical Density by a Single-chamber Test" (2017).
12. Y. J. Park, "An Experimental Study on Smoke Generation of Rubber Floor for Railway Vehicle", Journal of the Korean Society of Safety, Vol. 33, No. 4, pp. 15-20 (2018).
13. H. J. Park, "Evaluation of Smoke Density and Noxious Gas for Phenol Foam Insulation", Journal of the Korean Society of Safety, Vol. 25, No. 1, pp. 38-43 (2010).
14. Y. O. Kim and K. H. Jang, "Professional Engineer Fire Fighting", Kimoonsa, p. 141 (2010).
15. ISO 7240-9, "Fire Detection and Alarm Detectors, Part 9 : Test Fire for Fire Detectors" (2006).