

## 지하구 케이블의 연소특성 실험 Experiments on the Behavior of Underground Utility Cable in Fire

박승민<sup>†</sup> · 김운형\* · 윤명오\*\*

Seung-Min Park<sup>†</sup> · Woon-Hyung Kim\* · Myung-O Yoon\*\*

(주)안국 E&C, \*경민대학 소방과학과, \*\*서울시립대학교  
(2002. 05. 09. 접수/2002. 06. 21. 채택)

### 요 약

지하공동구에 사용되는 케이블의 연소특성 중 열방출량과 연기 유독성 실험을 수행하였다. 열 방출량 실험은 22.9 kv 전력용 케이블을 대상으로 ISO 9705 규격의 공간에서 수행하였으며 유독성가스의 정량적 위험성 평가를 위하여 NES 713(British-Naval Engineering Standard)을 적용하였다. 실험 결과 측정높이 1.2 m를 기준으로 계산한 케이블의 열 방출율은 60 kW로 예측되었다. 한편, 케이블의 연기유독성을 위한 NES 실험 결과, 인체에 치명적인 CO의 경우 30분 노출시 사망에 이를 수 있고 의식불명상태가 될 수 있는 수준으로 판정되었다.

### ABSTRACT

In this paper, some experiments of a heat release rate and toxicity for underground utility 22.9 kv cable in fire was conducted and analysed applying plume equation and smoke chamber test separately. A 22.9 kv power cable is selected for testing heat release in ISO 9705 geometry and toxicity production is measured with NES 713 (British-Naval Engineering Standard) test. In test results, Cable heat release reached about 60 kW above 1.2 m from heptane pan and CO generated lethal concentration under 30 min. exposure condition.

**Keywords :** Underground utility cable, Plume equation, NES 713 test, CO lethal concentration

## 1. 서 론

지하 공동구 케이블 화재는 지하 공간의 특수성과 폭이 좁고 긴 공간특성으로 인하여 화재 위험성이 높으며 화재진압 측면에서도 매우 불리한 상황을 수반한다. 지난 2월 8일에 발생한 신양재 전력구의 케이블 화재는 발화 시 내부의 열기와 유독성가스가 포함된 연기의 배출로 인하여 화재 초기에 진압대원의 신속한 투입이 불가능하고 고압전선에 의한 감전위험으로 주수소화의 한계를 보여주면서 약 6시간 이상 지난 후에야 진화되었다. 전력용 케이블의 외피는 주로 폴리에틸렌이나 폴리비닐클로라이드이며 케이블의 공간배치 특성 상 연속적으로 연소가 확대될 가능성이 높다. 폴

리에틸렌은 인화온도가 340°C, 발화온도가 350°C이며 연소발열량은 11,000 kcal/kg으로 연소 발생량이 매우 높아서 일단 착화하면 용융하면서 연소를 진행한다. 또한 연소 시 생성되는 HCl, CO, CO<sub>2</sub> 등의 유독성 가스는 단시간 흡입하여도 치명적일 수 있다.

이러한 배경에서 본 연구는 전력용 케이블의 연소 특성을 분석하기 위한 열방출량 실험과 유독성 실험을 수행하였다. 본 실험 결과는 공동구 전력용 케이블의 사용시설과 용도에 대한 공학적인 화재 설계 기초 자료로서 활용이 기대된다.

## 2. 케이블의 열방출량 실험

### 2.1 이론적 배경

전력용 케이블의 예상되는 열 방출량(열 방출율,

<sup>†</sup>E-mail: psm@ankugenc.com

Heat release rate)은 연소되는 부분의 면적에 따라 결정된다(Gandhi, Przybyla & Grayson). 본 연구에서는 Heskestad 플럼 식을 이용하여 케이블의 열 방출량을 계산하였다.

2.1.1 화염의 높이

본 실험에 사용한 Heskestad 플럼 식은 Point source 대신에 가상의 화원(Virtual origin)을 제안하여 높이를 보정하였다. 또한 열 방출 율에서 부력에 따른 대류열량을 적용하였다.

$$Z_0 = 0.083 \dot{Q}^{2/5} - 1.02 D \quad (1)$$

여기서,  $Z_0$  = 가상의 화원 높이(m)

$\dot{Q}$  = 열 방출율(kW)

$D$  = 화원의 직경(m)

한편, 화염의 평균 높이는 아래와 같다.

$$Z_L = Z_0 + 0.166 \dot{Q}_c^{2/5} \quad (2)$$

여기서  $\dot{Q}_c$ =대류 열 방출율(kW)

2.1.2 화염의 유속, 온도

플럼에서의 반경, 중심축 상의 온도 및 유속 계산식은 다음과 같다(단 평균높이 이상의 경우).

$$b = 0.12(T_0/T_\infty)^{1/2} (Z - Z_0) \quad (3)$$

$$\Delta T_0 = 9.1[T_\infty/g Cp^2 \rho_\infty^2]^{1/3} \dot{Q}_c^{2/3} (Z - Z_0)^{-5/3} \quad (4)$$

$$U_0 = 3.4[g/Cp T_\infty \rho_\infty]^{1/3} \dot{Q}_c^{1/3} (Z - Z_0)^{-1/3} \quad (5)$$

위 식에서  $T=293$  K,  $g=9.8$  m/s<sup>2</sup>,  $Cp=1.0$  kJ/kg K,  $\rho_\infty=1.2$  kg/m<sup>3</sup>을 대입하면

$$\Delta T_0 = 25[\dot{Q}_c^{2/5}/(Z - Z_0)]^{5/3} \quad (6)$$

$$U_0 = 1.0[\dot{Q}_c/(Z - Z_0)]^{1/3} \quad (7)$$

2.1.3 열 방출량 계산

케이블 화재 시 발생하는 총 열 방출량은 다음과 같다.

$$Q = \dot{m} \Delta H_c, \text{ eff} \quad \text{또는} \quad Q = \dot{m}'' A_f \Delta H_c, \text{ eff} \quad (8)$$

여기서  $\dot{Q}$  = 열 방출열량(kW)

$\dot{m}$  = 연소 율(g/s)

$\dot{m}''$  = 단위면적당 연소 율(g/m<sup>2</sup>-s)

$A_f$  = 연소 표면적(m<sup>2</sup>)

$\Delta H_c, \text{ eff}$  = 유효 연소열(kJ/g)

2.2 열방출량 실험

2.2.1 실험 개요

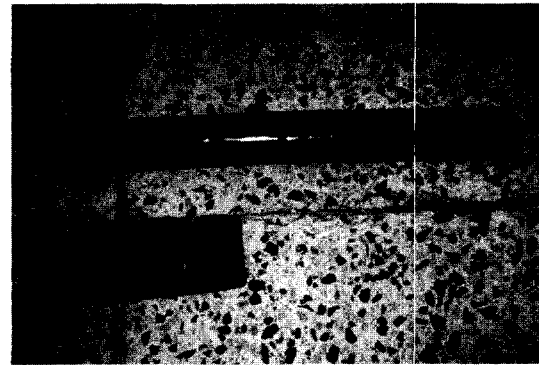
22.9 kV CNCV 전력용 케이블을 대상으로 열 방출

표 1. 케이블 재료의 연소특성

재료	비 중	발화점 (°C)	발열량 (kcal/kg)	산소지수
폴리에틸렌	0.9-1.0	340-350	약 11,000	17-19
EPR	0.9-1.0	-	약 7,000	19
PVC	1.3-1.4	390-454	약 7,000	24-26
클로로프렌	1.4-1.6	-	약 7,000	26-30
참 고	목재	0.2-0.5	260	약 5,000
	석탄	1.2-1.4		325-400



(a)



(b)

그림 1. 실험용 케이블의 형상.

량을 실험하였다. 실험은 ISO 9705 규격의 공간을 기준으로 천장은 철근콘크리트, 벽은 내화벽돌, 바닥은 철재로 된 구조물이다. 개구부는 2.0 m(H)×0.8 m(W)이며 실내에 0.25 m(W)×0.25 m(D)×0.08 m(H) 크기의 팬을 설치하였다. 연료는 n-Heptane을 사용하였다. 열 전대의 설치위치는 화원 직상부에 바닥에서 1.2 m, 1.5 m, 1.8 m, 2.1 m에 각각 설치되었다. 실험은 3회를 진행하였다. 팬의 크기는 250×250×80 mm이며 햄탄

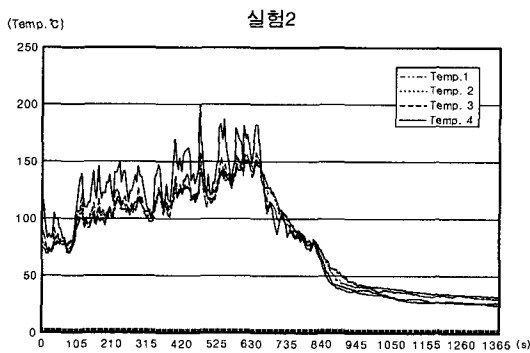
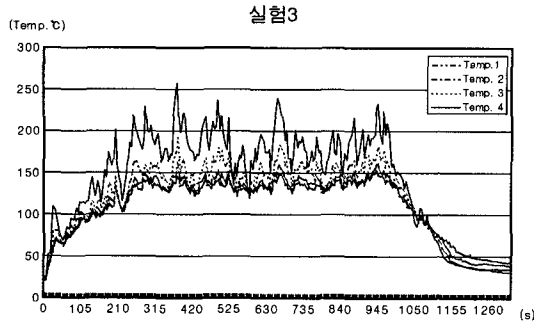


그림 2. 온도 및 가스 분포와 계산된 화원의 열량 변화.

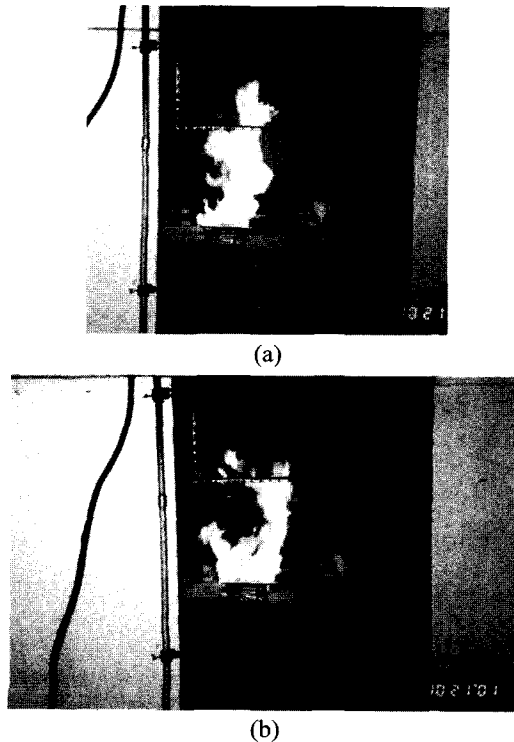


그림 3. 열방출량 실험.

은 1.0리터, 2.0리터 그리고 2.5리터를 사용하였다. 케이블 화재에 의한 상승 온도는 바닥에서 1.2 m, 1.5 m, 1.8 m, 그리고 2.1 m 지점에서 측정하였다. 문의 외부 측에는 가스측정을 위한 가스측정기가 바닥 위 1.8 m에 설치하였다. 공간의 규격은 2.4 m×3.6 m×2.4m(높이)이다. 5초 간격의 온도를 측정하였으며 연소시간은 각각 10분에서 18분을 기록하였다. 헤파탄의 연소율은 평균 약 1.5 g/s로 나타났다. 그림 2는 각 측정높이에서의 공간의 온도분포를 나타낸다.

### 3. 케이블 연기유독성 실험

케이블의 표면재료 연소로 인한 유독성가스의 정량적 위험성 평가를 위한 실험은 정적조건에서 검지관을 사용하여 5회(1차-5차), 동적 조건에서 3분 동안의 연속시간별 4회(6차-9차), 총 9회를 수행하였다. 시험방

표 2. 케이블 재료의 연소가스 농도

가스종류	유독가스 발생량(ppm)			치사량 *C <sub>r</sub> (ppm)
	PE	PVC	Halogen Free 난연	
CO	1,971	5,524	1,405	4,000
CO <sub>2</sub>	125,400	46,300	43,500	100,000
HCl	0	6,173	0	500
NO <sub>x</sub>	3.6	1.5	1.4	250
SO <sub>2</sub>	1.8	324	0	400
HCN or HBr	0	0	0	150

\*C<sub>r</sub> : 30분 폭로 시 치사량(NES 713)

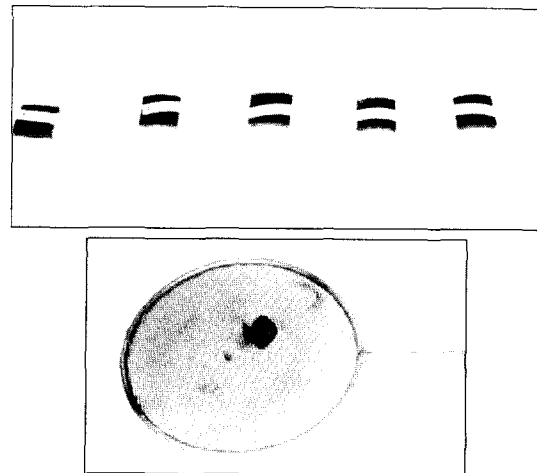


그림 4. 시료 및 연소 후의 상태.

법은 NES 713(British-Naval Engineering Standard)을 적용하였다(표 2).

### 3.1 실험과정

#### 3.1.1 시편

현재 지하구에 사용 중인 케이블은 전압에 따라 22.9 kV, 154 kV, 345 kV등으로 구분된다. 이러한 고압 전선의 피복은 대부분 폴리에틸렌(Polyethylene)이 주 재료이며, 본 실험에서 시편으로 사용된 것은 국내 전력공급을 위해 사용되는 케이블에서 직접 외부피복을 벗겨내어 얻어진 것이다(그림 4).

#### 3.1.2 실험장치

##### ① 연소가스분석장치(NES 713)

실험장치는 체적 0.96 m<sup>3</sup>인 연소 챔버, 분젠버너(높이 125 mm, 구경 11 mm), 연소챔버 벽면에 가스 검지관 삽입구, 강제배출장치, 혼합 팬, 가스 및 공기 조절용 유량조절장치, 시편지지대, 시간측정장치 등으로 구성되어 있다.

##### ② 유독성 측정장치 (ECOM)

Gas 농도에 반응하는 센서를 이용하여 발생하는 전기적 신호를 자동으로 농도 변환하는 것으로 센서의 온도범위는 +5에서 +40°C의 범위내에서 보정된다.

주 측정 가스는 O<sub>2</sub>와 CO이고 추가적으로 NO, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>를 측정할 수 있다(그림 5).

##### ③ 검지관

가스검지관은 내경 2~4 mm의 글래스관 중에 발색 시약을 흡착시킨 검지제(檢知劑)를 충전하여 관의 양 끝을 용봉한 것이다. 사용 시 양끝을 개방하여 가스채취기로 시험가스를 도입한 후 착색 층의 길이 또는 착색 정도에 시험가스의 농도를 측정한다.

##### 3.1.3 실험절차

연소챔버 벽면에 가스 검지관 설치 구를 통하여 고정하고 연소 챔버의 문을 닫고 버너에 연료를 공급과 동시에 점화시킨 다음 시간을 측정하였다. 연소시간은 시편이 완전 연소될 수 있는 충분한 시간동안 작동하며, 이 시간을 기록하고 버너를 끈 후 30초 동안 혼합 팬을 작동시킨 후, 즉시 연소 챔버로부터 각각의 가스 검지관을 통하여 차례로 가스를 뽑아내는 가스 샘플링을 개시하였다. 가스분석이 끝나면 즉시 문을 열고 강제배출장치를 통하여 연소챔버내의 잔류 연소생성물들을 배출시키고 강제배출은 3분 이상 지속하였다.

가스농도 분석 장치(ECOM-JN)로 측정된 경우, 두 결과를 식 (1)을 이용하여 100 g이 연소하여 발생된 각각의 가스농도와 체적 1 m<sup>3</sup>의 공기 중에 확산된 각각

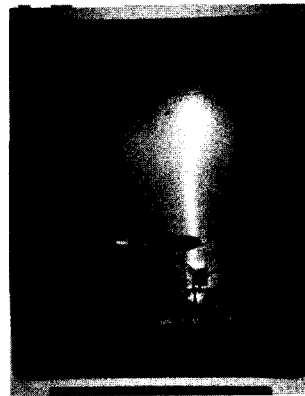
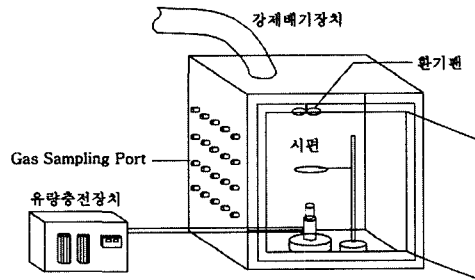


그림 5. NES 713 실험장치와 내부 사진.

표 3. 검지관 측정 결과

시험회수	시료 2 cm×2 cm	CO <sub>2</sub>	CO	NOX	HCl	연소시간
1	1.7 g	1.0%	60ppm	4.0ppm	7ppm	2분 45초
2	1.6 g	1.0%	60ppm	4.0ppm	10ppm	2분 48초
3	1.7 g	0.5%	30ppm	2.0ppm	10ppm	2분 10초
4	1.7 g	1.0%	60ppm	4.0ppm	8ppm	2분 40초
5	시료가 없는 경우	0.8%	0ppm	2.5ppm	1ppm	2분 40초

표 4. 실험 결과에 따른 가스 농도 (체적 0.96 m<sup>3</sup>)

시험회수	시료	CO <sub>2</sub>	CO	NOS	HCl	비고
1	1.7 g		3388.24ppm	225.88ppm	395.294ppm	
2	1.6 g		3600ppm	240ppm	600ppm	
3	1.7 g		1694.12ppm	112.94ppm	564.706ppm	Melting effect
4	1.7 g		3388.24ppm	225.88ppm	451.765ppm	
1,2,4의 평균			3458.83ppm	230.59ppm	482.35ppm	

의 가스농도를 계산하였다. 실험결과 3회의 C<sub>θ</sub> 값을 평균한 값으로 한다. 단 CO, CO<sub>2</sub>, NOx 가스농도는 실험 전 연소 챔버 내에서 버너의 불꽃을 1,150±50°C로 조정된 다음 점화하고 1분 동안 자유 연소시킨 후 연료를 차단하고 30초동안 혼합 팬을 작동시킨 후 CO, CO<sub>2</sub>, NOx 가스농도를 분석(보정값)하고, 최종결과의 값은 C<sub>θ</sub>에서 CO, CO<sub>2</sub>, NOx 보정 값을 제외한 값으로 했다.

$$C_{\theta} = \frac{C \cdot 100 \cdot V}{m} \quad (9)$$

- C<sub>θ</sub> : 분석된 가스농도(ppm)
- C : 연소챔버의 가스농도(ppm)
- m : 시편 질량(g)
- V : 연소챔버의 체적(m<sup>3</sup>)

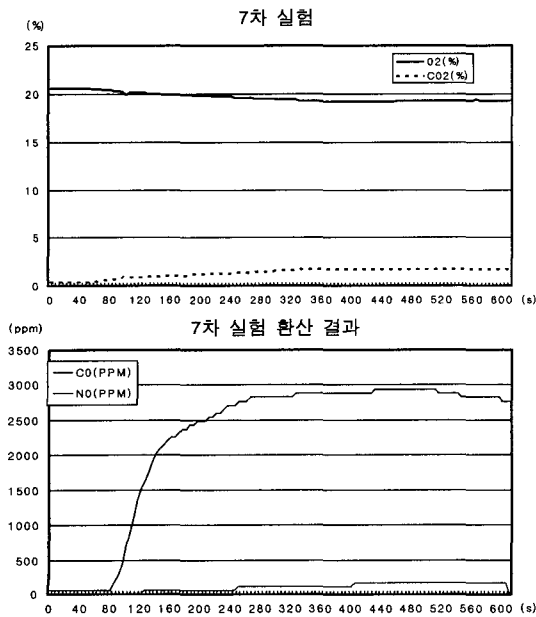


그림 6. 시간별 O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>(%) 및 CO, NO(ppm)의 측정 결과 (7차 실험).

### 3.2 실험 결과 및 분석

#### 3.2.1 검지관 분석

산소가 충분히 공급되는 조건에서 5회의 실험을 실시하였다. 3차 실험 결과는 시료의 용융(Melting effect)이 발생하여 분석에서 제외하였다. 식 (9)에서 환산한 연기농도는 표 3과 같다.

#### 3.2.2 가스측정기 분석

산소를 공급하지 않는 조건에서 가스분석장치인

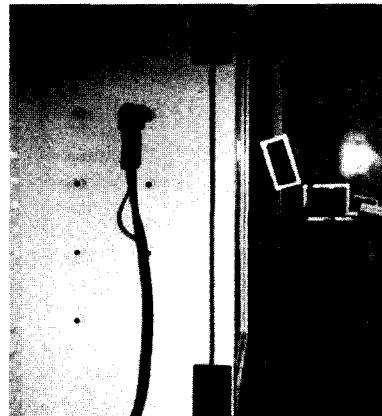


그림 7. 가스측정 장치 설치 및 시료의 연소 장면.

ECOM-JN을 사용하여 4회의 실험을 수행하였다. 시료의 3분 농도를 측정하고 이를 위의 식으로 환산하였다. 7차 실험에서 CO의 농도는 430초에서 510초 동안 2936.47 ppm을 유지하여 BSI에서 제시된 30분 노출시 사망농도인 300 ppm에 근접한 결과를 보여주었다. NO의 경우 405초 이후 169.4 ppm을 계속적으로 유지하였다.

#### 4. 결 론

케이블의 열방출량 실험 결과, 일단 발화된 케이블의 화염 확산은 헵탄 연료가 소진되는 시점 이후에는 자기소화성을 보이면서 연소시간이 단축되어 케이블 외피의 난연 처리 중요성을 입증하였다. 3회 실험 중에 최대온도는 실험3에서 375초 경에 258°C로 나타났으며 측정높이 1.2 m를 기준으로 계산한 케이블의 열방출율은 60 kW로 예측되었다. 이것은 실험 조건 상 케이블이 화염의 중심축 상 위에 설치되었으나 화염에 유입되는 공기흐름에 따른 난류성 화염의 높이 변화와 공간으로의 열 손실 등에 의한 결과로 판단된다. 실제 공동구화재사례에서 관찰된 케이블의 급격한 온도상승과 연소 패턴과는 많은 차이를 보여 주었다. 따라서 본 실험과 실대 화재실험을 통하여 대략적인 열 방출율 자료를 얻을 수 있었지만 추후 실대 화재 실험 또는 Cone Calorimeter 시험, 그리고 케이블 종류에 따른 관련 시험기준(NFPA 262, UL910, UL 1666, UL 1581 등)을 통한 정확한 열 방출율 측정이 필요하다고 판단된다.

한편 케이블의 연기유독성을 위한 NES 실험 결과, 인체에 치명적인 CO의 경우 30분 노출시 사망에 이를 수 있고 의식불명상태가 될 수 있는 수준으로 판정되었다. NOx의 경우 NES713 기준으로 30분 노출에 사망에 이를 수 있는 수준이며, HCl은 30분 노출에 의

식장애틀 유발할 수 있는 농도를 나타내었다. 따라서 소방관의 진압 및 신속한 복구 작업을 위하여 공동구에서 화재가 발생한 경우 최단 시간에 신속하고 완전하게 진압할 수 있는 자동식 소화 시스템의 설치가 필요하다고 판단된다.

#### 참고문헌

1. 김운형, 김종훈, 박승민, 김태수, 민인홍, 전동일, 김상욱, "지하구 미분무수 소화설비 적용에 관한 연구", 한국화재소방학회, 제16권, 제1호(2002. 3).
2. 김운형, 김태수, 김상욱, "전력용 케이블의 열방출량 측정", 한국화재소방학회 추계학술발표대회, pp.280-283(2001).
3. 박승민, 김운형, J. R. Mawhinney, "공동구의 미분무 소화설비 적용", 한국화재소방학회, 추계학술대회 논문집, pp.294-300(2001).
4. V. Babrauskas, "Heat Release in Fires", Elsevier Applied Science(1992).
5. Gunnar Heskestad, "Fire Plumes", SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Section 2 Chapter 2, 2nd Edition(1995).
6. NES 713(Naval Engineering Standard 713), "Determination of the toxicity index of the products of combustion from small specimens of materials Issue 3", March(1985).
7. 김운형, 김현우, 현성호, 이창우, "건축재료의 연기 위험도 실험", 한국화재소방학회 춘계 학술발표회(2000. 4).
8. 홍경표, 이영재, 김선정, "지하공동구의 연소방지설비에 관한 연구", 2001년도 한국화재소방학회 추계학술논문발표회, pp.286-287(2001).
9. 김윤희, "지하공동구의 소방 및 안전대책에 관한 검토", 소방안전, 제58호(1999).
10. 조영길, "전력케이블의 화염전파 특성에 관한 연구", 건국대학교 석사학위논문, (1998).