

C-03

공동구내에서의 연기 이동 속도 특성에 관한 연구

이재하**, 이윤희*, 홍기배*, 유홍선**

충주대학교 에너지시스템공학과

A Study on the Characteristics of Smoke Movement Velocity in the Underground Utility

Jae-Ha Lee**, Yung-Hi Lee*, Gi-Bae Hong*, Hong-Sun Ryou**

Thermal Engineering, Chungju National University

1. 서 론)

지하공동구 및 전력구 화재는 외부로부터 소화 작용이 어렵고 지하구를 따라 설치된 가연물이 지속적인 연소로 인해 화재의 대형화를 가져올 수 있을 뿐만 아니라 기간산업의 마비로 인한 2차적 피해를 가져올 수 있다. 이러한 손실을 최소화하기 위한 화재 원인 분석 및 화재 예방과 방재대책 마련이 시급히 요구된다.

국내외적으로 많은 사고사례가 있으며 최근 2000년 2월 18일에 발생한 여의도 공동구 화재와 2002년 2월 8일 신양재 지역 지하 전력구의 지중 송전계통에서 케이블 화재가 발생하였다. 그리고 선진국에서도 공동구 화재가 빈번히 발생하여 이에 대한 연구가 진행되어왔다. 미국에서 발생한 화재의 원인별 건수는 Table 1과 같으며 화재 발생원인을 케이블 및 케이블 접속부의 자체 연소에 의한 원인 및 용접불꽃으로 인한 발화, 그리고 전력구내 내부조명의 누전이나 환기구를 통한 인화성 물질의 유입에 의한 기타 요인으로 분석되었다.

Table 1. 미국에서 발생한 케이블 화재 원인별 건수

발생연대	자료	화재 원인별 건수			
		케이블 자체열화	접속함에서 발화	용접, 용단등의 작업중 발화	기타 (원인불명)
1960	NFPA	9건	7건	4건	4건
1970	IEEE	3건	27건	4건	2건
1980	FM	120건		25건	62건
합계		160건		33건	68건

** 중앙대학교 기계공학과

* 충주대학교 에너지시스템공학과

박승민, 김운형, 윤명오⁽¹⁾ 등은 지하 전력구에 설치되는 cable의 연소특성실험을 통하여 케이블 재료의 연소특성 및 발생가스의 유독성을 정량적으로 제시하였다. 김상훈 등⁽²⁾은 축소 모형 실험을 통하여 연기의 거동을 해석하였으며 이를 수치 해석과 비교하였다. 김성찬 등^(3,4)은 짧은 터널에서 연기의 거동을 수치적으로 해석하였다. 이성룡 등^(5,6)은 일반 터널 및 수직갱이 설치된 터널에서 연기의 거동과 배연 효과를 실험하였으며, 배연 방식에 따른 배연 성능을 평가하였다. 유영일 등⁽⁷⁾은 모형 터널 실험을 실시하여 온도 분포와 CO농도 측정을 통해 임계속도를 측정하였으며 터널내 차량 정체로 인한 영향을 평가하였다. 서정필 등⁽⁸⁾은 alkyl -benzene oil(절연유)의 전기 절연 특성 및 유전특성을 정량적으로 제시하였다. 윤구섭 등⁽⁹⁾은 OF 케이블의 사용기간 변화에 따른 전기적 특성치가 변화하여 절연유의 성능이 저하되는 것을 입증하였다. 김명배⁽¹⁰⁾ 등은 유동에 의한 연층 확산에 관한 실험적 연구를 통해 연기의 전파속도를 제시하였다. 그러나 지하전력구내의 화재 특성을 파악하기 위해서는 타당성 있는 실험을 통하여 전력구내 화재에 대한 방화기준을 마련하는 것이 중요하다. 그리고 공동구 화재에 대한 연구는 일반화재와는 달리 모형실험이 어렵고 실제공간에 대한 해석이 필요하여 경제적으로나 기술적으로 많은 어려움이 있다. 국내외 연구는 단순히 화재 방재를 위한 연소특성과 가스 발생 등에 대해서만 연구되어 있지만 실질적인 전력구의 화재 방재대책을 위해서는 화재 적용케이블의 화재특성을 분석하는 것이 중요하다.

따라서 본 연구에서는 공동구내의 실증실험을 통하여 공동구 내에서의 연기 거동속도를 측정하고 이를 바탕으로 공동구 화재에 관한 물리적 이해를 증진시키고 공동구 설계시 이론적, 정성적 자료를 제공하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

Figure. 1에서 보여주는 것과 같이 공동구 구조는 철근콘크리트조로 중형비가 1인 2m(H)×2m(W)×22m(D)의 크기이며, 공동구 양쪽에는 방화문(0.9×1.6m)이 설치되어있다. 공동구 내 화원과 실험용케이블은 한 쪽문으로부터 10m위치 벽으로부터 중심부에 위치하였다.

Figure 2에서는 화원용 pool과 열전대의 설치 위치를 나타냈으며 화원의 연료로는 절연류와 OF 케이블을 사용했다. 온도측정범위가-200~1200℃인 K-type인 열전대의 정확한 위치는 수평 방향의 연기 거동 속도를 측정하기 위해 천정에 1m간격으로 17개, 연층 하강 속도를 측정하기 위해 수직 방향으로0.5m간격으로 9개를 설치하였다. 온도측정은 Fig 3에서 보여주고 있는 NI Data logger와 Lab View 6.0을 이용해 실시간으로 data를 저장하였다. 화원주변에 발생하는 열이 공동구 벽과 천장부분 콘크리트의 열화에 미치는 영향을 고려하여 화원주변에 불연내장재로 사용되는 석고보드1.8×4.5m를 화원 천장으로부터 0.1m거리를 두고 화원 직상부에 설치, 측면부에는 벽체와 0.2m거리를 두고 시멘트보드 1.8×3.6m를 설치하였다. 여러 번 반복되는 실험에서 발생하는 각종 유해한 가스등 대기오염물질이 발생되기 때문에 대기오염을 방지하기 위하여 공동구 중심부분에 배기 덕트와

내부공기 순환용 덕트를 설치, 덕트 토출구에 카본필터설치와 물분무 소화시스템을 이용하였다. 그리고 소화를 위한 물분무 시스템을 작동 후 배출되는 폐수는 집수조로 집수한 뒤 oil은 부직포를 이용하여 1차로 걸러낸 다음 폐수는 폐수처리장에서 처리하였다.

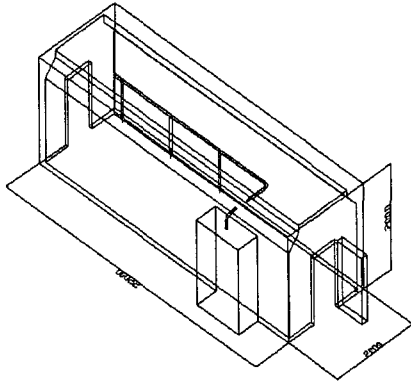


Fig. 1. 실험용 전력구의 형태 및 size.

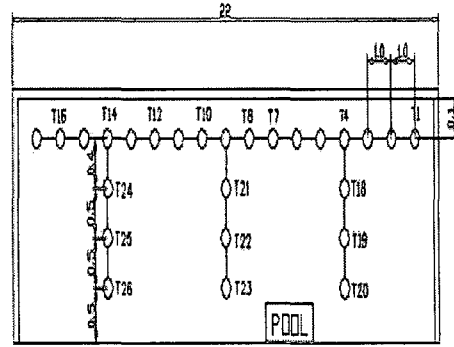


Fig. 2. 전력구내 열전대 설치 위치.

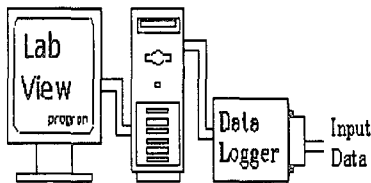


Fig. 3. Data Logging System.

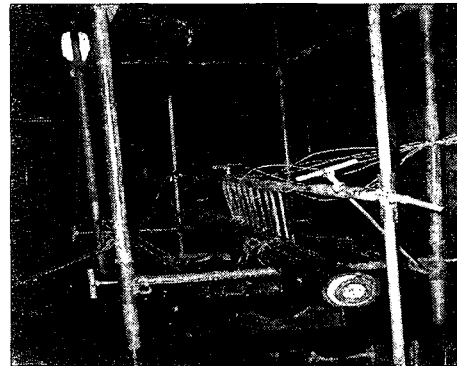


Fig. 4. 케이블과 화원 설치 사진.

Fig 4 화원을 위치시킨 모습과 OF 케이블의 고정을 위한 지지대를 나타낸 사진이다.

실험에 사용된 OF 케이블 구조는 방식층, 씨스, 절연재, 도체로 구성되어있고 구성요소 중 절연체는 크라프트지와 압력이 가해지는 오일로 구성되어 있다.

일반적으로 절연지위에 동선직접포로 감싸 있는 절연지는 가스를 배제한 고도로 정제된 낮은 점성의 절연유로 주입하여 사용한다. 이때 주입된 절연유는 알킬벤젠계(alkylbenzene) 합성유로 절연과피전압, 체적 저항률 등이 극히 우수하므로 고전압에 대한 절연내력이 커서 전압을 가했을 때 단락하지 않는 특성이 탁월하며 단위 체적당 전기 에너지가 열로서 손실되는 것이 적고 산화 안정성이 우수하여 전기 특성의 저하나 오일이 노화되는 현상이 없으며 고온고전계하에서도 수소 가스 흡수성이 우수하여 절연유, 절연지 등이 열분해 하는 이상 현상을 막아 준다. 그리고 인화점이 높으며 또한 유동점이 낮아 냉

각 성능이 우수하다. 케이블을 구성하고 있는 절연유 외의 구조물들은 모두 고체로 구성 되어있다. 케이블의 화재의 발생과 연기를 생성케 하는 매개체는 고체로 된 케이블뿐만 아니라 유체상태인 절연유와의 복합적인 요인으로 다량의 연기가 발생한다고 예상할 수 있다. 그러므로 절연유의 화염특성분석을 위하여 연소율을 측정하였다. 연소율의 측정은 Fig. 5와 같이 load cell을 이용한 미소중량측정장치 위에 0.02×0.2×0.05m 크기의 pool에 절연유를 2/3가량 넣고 전열기로 착화점까지 가열한 후 점화한 상태에서 연소율을 측정하였다. Table 2에 절연유와 헥산의 연소율(2) 및 착화점을 나타내었다.

$$\text{절연유의 연소율} = \frac{\text{연료감소량}}{\text{Pool단면적} \times \text{시간변화량}}$$

Table 2. 헥산과 절연유의 착화점과 연소율

구분	착화점 ℃	연소율 Kg/m ² · s
헥산 (C ₆ H ₁₄)	-7	0.07 ~ 0.08
절연유(alkyl-benzene)	142	0.016



Fig. 5. load cell을 이용한 질량 감소율 측정.

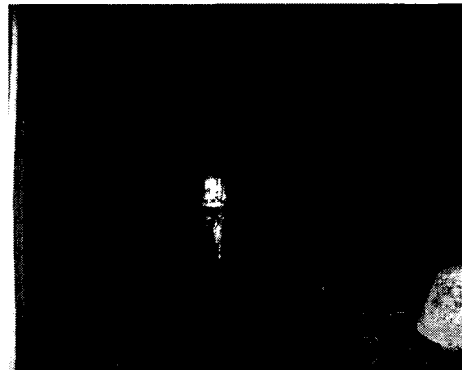


Fig. 6. 연층 형성.

Table 3. 실험에 사용된 케이블의 규격(Φ90mm) 및 실험조건

회차	케이블규격		Hole 수량	화원의size 및 절연유량	
	길이m	케이블 수량		화원 단면적	절연유량(헥산의 량)
1	1.5	4	26	400×250	2400
2	1.5	3	26	400×250	2400
3	1.5	2	26	400×250	2400
4	1.5	1	26	400×250	2400
5	1.5	1	0	900×450	2400
6	1.5	1	26	450×450	2400
7	1.5	1	0	Φ300	2400

공동구 내 화재 시 OF케이블과 절연류의 연소로 발생하는 연기의 거동 속도를 측정하기 위한 실험은 다음과 같이 실시하였다.

먼저 예비실험으로는 절연유와 핵산을 이용하여 케이블에 화염이 착화될 수 있는지를 관찰하였다. 핵산은 착화점이 낮고 기화가 잘되기 때문에 점화가 용이하였지만 절연유는 착화점이 높기 때문에 점화방법을 두 가지 형태로 바꾸어 가면서 실험을 하였다. 점화는 절연유면에 심지를 이용하여 유면 전체를 덮은 상태에서 점화하는 방법과 전열기를 이용하여 절연유를 착화점까지 가열한 후 점화하는 방법을 사용하였다. 심지를 이용하여 점화시킨 경우는 점화는 간단했지만 항상 일정한 화염을 유지하면서 연소되었고 전열기를 이용하여 oil을 가열 후 점화시켰을 때는 착화된 뒤 시간이 지남에 따라 화염의 크기가 점점 증가하는 것을 보였다. 심지나 기타 다른 물질로 OF 케이블의 피복재를 착화점까지 올리려면 인화에 필요한 열량으로 가열해야 연속적인 연소가 가능한데 면섬유나 기타 발열량이 적은 물질로는 연속적인 연소가 불가능하며 또한 지하 공동구 내부에는 그런 요소들이 다량으로 존재할 수 없기 때문에 이후 실험에서는 전열기로 가열하여 유증기를 발생시켜 점화하는 방법을 택하였으며 또한 Table 3에서 보여주는 바와 같이 절연류 량, 절연류 가열시간, 케이블의 화염전위 속도를 높이기 위해 뚫은 Hole의 수 등의 조건을 동일하게 하여 Pool의 표면적과 케이블의 수에 따라 연기 거동 속도 측정에 관한 실험을 하였다. 이때 사용한 케이블은 케이블 내에 절연유를 장시간 침투시켜 실험에 사용하였다.

3. 실험결과 및 분석

공동구 내에서 화재가 발생하면 연기가 상승하여 천장에 도달한 후 천장을 따라 공동구 길이 방향으로 전파된다. 따라서 본 실험에서는 천장을 따라 설치된 열전대의 반응시간을 이용하여 연기 선단의 이동 속도를 계산하였다. 종횡비가 1.0인 공동구에서 케이블 수에 따른 화재에 대하여 화재 발생 초기 천장에 설치된 열전대의 온도 변화를 Fig 7에 나타내었다. 초기 온도 상태에 있는 열전대들이 연기 선단과 만나면서 순간적으로 온도가 상승하는 것을 확인 할 수 있다. Fig 7에서 열전대간의 온도가 상승하는 시간차를 알 수 있으므로 이를 이용하여 연기 선단의 이동속도를 계산할 수 있다.

이상과 같은 방법으로 측정된 연기 선단의 전파속도를 Table 4·5에 정리하였다.

Table 4에서 보는 바와 같이

1. 케이블이 개수가 같을 때 화원으로부터 멀수록 속도가 감소한다.
2. 케이블의 개수가 많아 질수록 연기 거동속도도 증가한다.

Table 5에서 보는 바와 같이

1. Pool size가 같을 때 화원으로부터 멀수록 연기 거동 속도가 감소한다.
2. Pool size가 커질수록 부력의 증가로 연기 거동 속도도 또한 증가한다.

화원에서 멀수록 연기 선단의 이동속도가 감소하는데, 이는 연기가 갖고 있는 열에너지의 손실과 천장과의 마찰 등으로 인해 부력이 감소하기 때문이다. Cable의 수와 Pool의 표면적이 넓을수록 부력의 증가로 화염이 천장에 도달하여 직접 가열하게 되어 연기의

이동속도가 증가함을 Fig9 · 10그리고 Fig 11 · 12에서 평균값으로 나타내고 있다. Fig 8에서 케이블 4개일 때 T8~T16사이의 연기의 온도차가 456.19℃, 케이블 1개일 때 50.89℃의 차이가 발생함을 보이고 있고 이 차이만큼 천장에 손실되었으며 T8~T16사이의 연기 거동 속도도 또한 케이블이 4개일 때 0.21[m/s], 1개일 때 0.11[m/s]의 차를 보이고 있다. 이는 케이블 4개 일 때가 1개일 때 보다 약 1.9배 빠름을 본 실험으로 확인되었다.

또한 Pool의 표면적의 차이에 따라T8~T16사이 온도 차와 속도차가 나타남을 Fig 10으로 나타내고 있다.

외부에서 유입되는 신기의 량과 밖으로 배출되는 연기의 량이 균형을 이루게 되면 연기의 거동이 느려지게 되어 연층은 어느 높이를 유지할 한다. 이는 Fig 6에서 보여주고 있다

Table 4. OF 케이블(90Φ)의 수에 따른 구간별 연기 거동속도

Cable Count[EA]	Section	Velocity[m/s]
1 EA	T8 ~ T10	0.29
	T10 ~ T12	0.25
	T12 ~ T14	0.2
	T14 ~ T16	0.18
2 EA	T8 ~ T10	0.33
	T10 ~ T12	0.29
	T12 ~ T14	0.22
	T14 ~ T16	0.22
3 EA	T8 ~ T10	0.4
	T10 ~ T12	0.33
	T12 ~ T14	0.29
	T14 ~ T16	0.25
4 EA	T8 ~ T10	0.5
	T10 ~ T12	0.4
	T12 ~ T14	0.33
	T14 ~ T16	0.29

Table 5. Pool Size에 따른 구간별 연기 거동 속도

Pool Size[mm]	Section	Velocity[m/s]
φ300	T8~T10	0.5
	T10~T12	0.4
	T12~T14	0.33
	T14~T16	0.29
400×250	T8~T10	0.29
	T10~T12	0.25
	T12~T14	0.2
	T14~T16	0.18
450×450	T8~T10	0.67
	900×450	0.5
	T12~T14	0.4
	T14~T16	0.25
900×450	T8~T10	1
	T10~T12	0.5
	T12~T14	0.4
	T14~T16	0.25

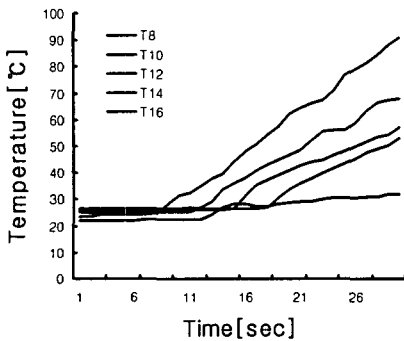


Fig. 7. 연기 도달시간에 따른 온도 변화(Pool Size: 400×250).

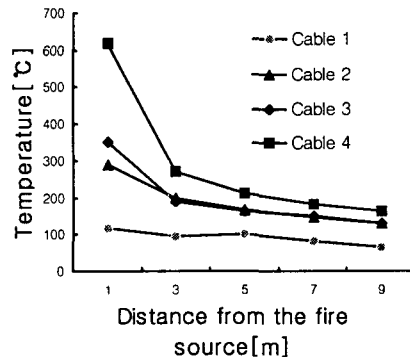


Fig. 8. 케이블의 수에 따른 수평방향의 최고 온도 분포.

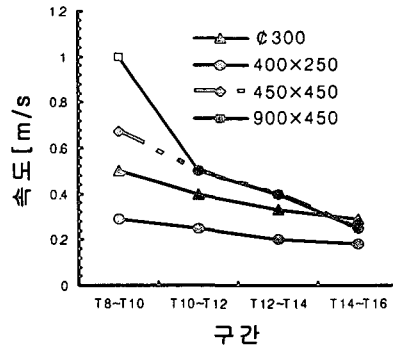
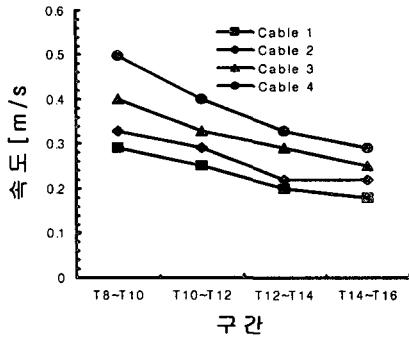


Fig. 9. 케이블 수에 따른 구간별 속도.

Fig. 10. Pool Size에 따른 구간별 속도.

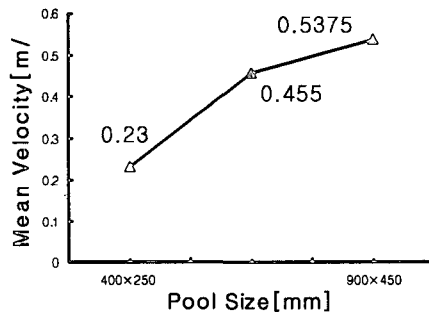
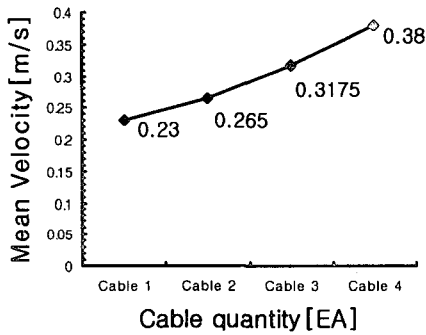


Fig. 11. 케이블 수에 따른 평균 속도.

Fig. 12. Pool Size에 따른 평균 속도.

4. 결론

본 실험에서는 지하공동구 내의 화재발생 시 연기거동속도를 측정하였으며 현재 국내에서 많이 활용하고 있는 Ø 90mm의 OF 케이블을 이용한 화재실험을 수행하여 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 케이블 수가 1개에서 4개로 증가하면 연기 거동 속도도 증가한다. 4개선의 평균 연기 거동 속도가 0.38[m/s]로서 1개선의 0.23[m/s]보다 1.65배 빠르게 나타났다.
2. Pool Size 450×250mm로부터 900×450mm로 증가함에 따라 연기 거동 속도도 증가한다. 900×450mm의 Pool 표면적일 때 평균 연기 거동 속도가 0.5375[m/s]로서 450×450mm의 평균 연기 거동 속도 0.38[m/s]보다 1.4배 빠르게 나타났다.

실험결과 얻어진 연기 거동 속도는 화재 시 발생하는 재산피해의 규모와 유독가스나 soot의 양 등을 추산하는 중요한 파라메타가 될 수 있으며, 케이블의 연기 거동 속도는 케이블의 수, 화원의 단면적 크기에 비례한다.

참고문헌

1. 박승민, 김운형, 윤명오 “지하구 케이블의 연소특성실험” 화재소방학회, 제16권 제2호, (2002년2월)
2. 김상훈, 김성찬, 김충익, 유홍선, 터널내에서 화재 발생시 연기거동에 대한 연구, 한국화재·소방학회논문집, 제 14권 제2호 (2000)
3. 김성찬, 유홍선, 김충익, 홍기배, A Study on Smoke Movement in a short Tunnel, 터널과 지하공간, 제12권 제1호 (2002)
4. 김성찬, 유홍선, 이성룡, 김충익, 자연 배기 터널에서의 연기거동에 관한연구, 대한기계학회논문집 B권, 제 26권 제 7호 (2002)
5. 이성룡, 김충익, 유홍선, 터널 화재시 자연 배기에 의한 연기거동에 관한 실험적 연구, 한국화재·소방학회논문집, 제 5권 제1호(2001)
6. 이성룡, 박현태, 김충익, 유홍선, 터널화재시 자연환기에 의한 연기거동에 관한 실험적 연구, 설비공학논문집, 제 14권 제3호(2002)
7. 유영일, 이회근, 일방향 도로터널내 화재 발생시 역류를 막는 환기속도결정에 관한 축소모형실험, 터널과 지하공간, 제 8권,(1998)
8. 서정필, 감왕곤, 신성권, 조경순, 홍진용 “Oil Filled 케이블용 절연유의 유전특성” 한국전기전자재료학회 추계학술대회 논문집, (1994)
9. 윤구섭, 정우성, 김철운, 김태성 “OF 케이블 절연유의 특성변화에 따른 경년열화진단” 한국전기재료학회 춘계학술대회 논문집 (1997)
10. 김명배, 한용식, 유동에 의한 연층 확산에 관한 실험적 연구, 한국화재·소방학회 논문집, 제 11권 3호(1997)
11. 김운형, 김종훈, 박승민, 김태수, 민인홍, 전동일, 김상욱 “지하구 미분무수 소화설비 적용에 관한 연구” 한국화재·소방학회, 제16권1호, (2002)
12. Quintiere, James G. “Principles of Fire Behavior” Thomson Learning, (1997)