

지하 전력구내 OF 케이블의 화염전파속도 특성 실험

이재하[†] · 정진용* · 홍기배* · 유홍선**

중앙대학교 기계공학과 · *충주대학교 에너지시스템공학과 · **중앙대학교 기계공학부
(2003. 10. 10. 접수 / 2005. 4. 28. 채택)

Experiments on the Characteristics of Surface Flame Propagating Velocity of Oil Filled Cable in the Underground Utility

Jae-Ha Lee[†] · Jin-Yong Jeong* · Gi-Bae Hong* · Hong-Sun Ryou**

Department of Mechanical Engineering, Chung-Ang University Engineering

*Thermal Engineering, Chungju National University

**School of Mechanical Engineering, Chung-Ang University

(Received October 10, 2004 / Accepted April 28, 2005)

Abstract : Real-scale experimental study was performed to characterize the surface flame propagating velocity along the OF cable in the underground utility fire. Temperatures of oil filled OF cable and dried OF cable with the diameter of 90 mm were measured using thermocouple and data log system. The hexane and alkyl-benzene oil were used as a fire source using the ignition device. As a result, while the surface flame propagating velocity of the three cables was 0.06~0.09cm/s, the surface flame propagating velocity of the one cable was 0.028~0.032cm/s. Therefore, it was found that the surface propagating flame velocity of the three OF cables is 2.1~2.8 times faster than that of one OF cable case. The results show that the surface propagating flame velocity became larger as increase of the number of cable, the volume of alkyl-benzene oil in the cable. The characteristics of surface propagating flame velocity in the OF cable can be helpful to fire suppression system in utility.

Key Words : surface flame propagating velocity, OF cable, utility, alkyl-benzene oil

1. 서 론

최근 국내에서는 지중 송전계통인 지하공동구 및 전력구 화재의 발생으로 경제적, 사회적 손실이 커지고 있다. 이러한 손실을 최소화하기 위한 화재 원인 분석 및 화재 예방과 방재대책 마련이 시급히 요구된다.

지하 전력구와 공동구는 다양한 전력, 통신, 가스, 용수관등이 설치되어 있으며 도시 미관과 유지보수의 편리성으로 인하여 지하 전력구 및 공동구 설치는 증가하는 추세이다. 그러나 국가의 기간시설이 설치되어 있는 지하구의 안전장치에 대한 대책은 상대적으로 미흡한 실정이며 화재와 같은 인위적인 재해는 외부로부터 소화작용이 어렵고 지하구를 따라

설치된 가연물이 지속적으로 연소가 가능하기 때문에 그 피해 이외에 기간산업의 마비로 인한 2차적 피해를 가져온다. 국내외적으로 많은 사고사례가 있으나 2000년 2월 18일에 발생한 여의도 전력구 화재와 2002년 2월 8일 신양재 지역 지하 전력구의 지중 송전계통에서 케이블 화재가 발생하였다. 이 같이 밀폐되고 협소한 지하 전력구 및 공동구에서 발생된 화재에는 질은 연기와 일산화탄소 등의 가스 발생으로 접근이 어려워 진화에 어려움이 있으며, 절연유 및 난연성 재료가 아닌 케이블 방식층(PVC, PE)을 통해 화재가 확산될 가능성이 높다.

일반적으로 전력구 화재는 크게 누전, 단락, 과전류 등과 같은 전기적인 문제로 인하여 전력구 설치물 자체에서 발화하는 경우와 외부의 요인에 의해 발화하는 경우로 나눌 수 있는데 전자의 경우 다양한 제어장치의 도입으로 대책이 마련되고 있

[†] To whom correspondence should be addressed.
jahlee6180@yahoo.co.kr

으나 전력구 화재에 대한 체계적이고 기술적인 접근은 부족한 실정이다.

선진국에서도 공동구 화재가 빈번히 발생하여 이에 대한 연구가 진행되어왔다. 미국에서 발생한 화재의 원인별 건수는 Table 1과 같으며 화재 발생 원인을 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.

박승민, 김운형, 윤명오¹⁾ 등은 지하 전력구에 설치되는 cable의 연소특성실험을 통하여 케이블 재료의 연소특성 및 발생가스의 유독성을 정량적으로 제시하였다. 조영길²⁾은 다양한 전력케이블의 화염전파특성을 분석하였다. 서정필 등³⁾은 alkyl-benzene oil(절연유)의 전기 절연 특성 및 유전특성을 정량적으로 제시하였다. 윤구섭 등⁴⁾은 OF 케이블의 사용기간 변화에 따른 전기적 특성치가 변화하여 절연유의 성능이 저하되는 것을 입증하였다. 김운형⁵⁾ 등은 지하구라는 공간적 특성에 적합한 미분무수헤드의 특성을 설정하고 그 성능을 입증하였다. 그러나 지하전력구내의 화재특성을 파악하기 위해서는 타당성 있는 실험을 통하여 전력구내 화재에 대한 방화기준을 마련하는 것이 중요하다. 그리고 전력구 화재에 대한 연구는 일반화재와는 달리 모형 실험이 어렵고 실제공간에 대한 해석이 필요하여 경제적으로나 기술적으로 많은 어려움이 있으므로 국내의 연구는 단순히 화재 방재를 위한 연소특성과 가스 발생 등에 대해서만 연구되어있지만 실질적인 전력구의 화재 방재대책을 위해서는 화재 적용케이블의 화재특성을 분석하는 것이 중요하다.

따라서 본 연구에서는 전력구내의 실증실험을 통하여 OF 케이블의 화염전파속도를 측정하고 이를 바탕으로 화재의 진행속도와 피해정도를 예측하여 지중케이블 및 설비의 방재 대책과 지하 전력구 화재의 초동 진화 대책을 수립하기 위한 자료로써 제시하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

Fig. 1에서 보여주는 것과 같이 전력구 구조는 철근 콘크리트로 2m(H)×2m(W)×22m(D)의 크기이며, 전력구 양쪽에는 방화문(0.9×1.6m)이 설치되어있다.

전력구내 화원과 실험용케이블은 한 쪽문으로부터 10m위치 벽으로부터 중심부에 위치하였다. Fig. 2

Table 1. Summary of the cable fire happened in USA

| 발생연대 | 자료 | 화재 원인별 건수 | | | |
|------|------|-----------|-----------|------------------|-----------|
| | | 케이블 자체연화 | 접속함에 서 발화 | 용접, 용단 등의 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 |

에서는 화원용 pool과 케이블의 설치형태와 고정용 지지대를 나타냈다. Pool 크기는 0.4×0.25×0.07m 와 0.4×0.3×0.07m이고 화원과 시편의 거리는 0.2m로 동일한 위치에서 실험하였다. 열전대는 온도측정범위가 -200~1200℃인 K-type으로 사용하였고 온도 측정은 NI Data logger와 Lab View 6.0을 이용해 실시간으로 data를 저장하였다. 화원주변에 발생하는 열이 전력구 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 시멘트보드1.8×3.6m를 설치하였다. 여러 번 반복되는 실험에서 발생하는 각종 유해한 가스등 대기오염물질이 발생되기 때문에 대기오염을 방지하기 위하여 전력구 중심부문에 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 정화처리 하였다. Fig. 3에서는 실험장치 내에서 OF 케이블 상단과 측면에 5cm 간격으로 설치된 열전대의 형태를 보여주고 있다. Fig. 4는 케이블과 화원, 열전대의 정확한 설치를 위한 지지대 이다.

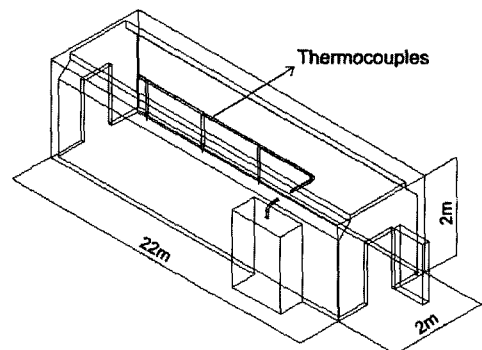


Fig. 1. Schematic diagram of the utility

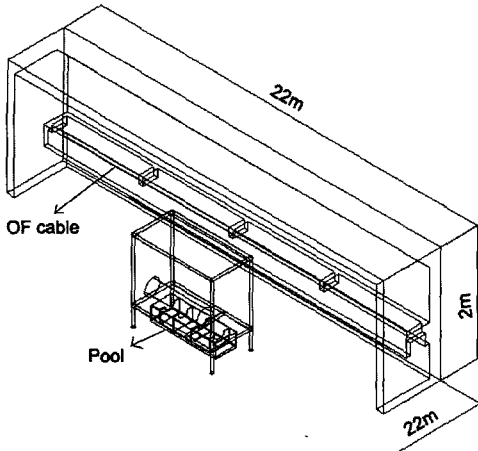


Fig. 2. Location of OF cable and fire source in utility

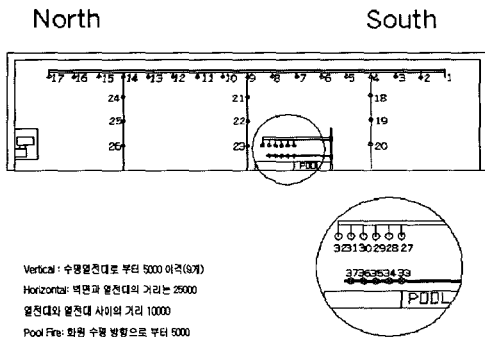


Fig. 3. Thermocouple location in utility

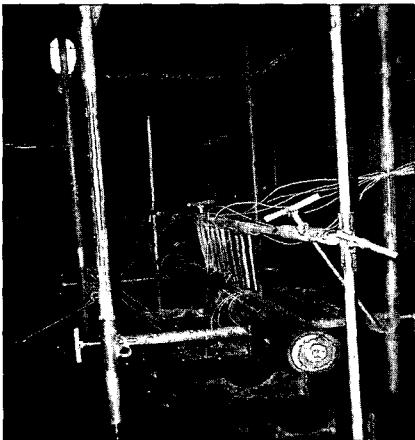


Fig. 4. Photography of the cable and fire source

전력구 내에서의 OF케이블의 화염전파속도를 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 점화하였다. 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 상당한 면적을 필요로 하기 때문에 지하 전력구 내부에는 그런 요소들이 다량으로 존재할 수 없고 있다고 가정해도 그 양이 무시될 정도이기 때문에 이후 실험에서 배제하고 전열기로 가열하여 유증기를 발생시켜 점화하는 방법을 택하였다. 절연유 함유량이 적은 건조된 상태의 케이블을 시편으로 사용, 화염전파가 일어나는지 관찰하였다.

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 합성오일(alkyl-benzene)을 절연유로 주입하여 사용한다.

절연유는 일킬 벤젠계 합성유로 절연과피 전압, 체적 저항률 등이 극히 우수하므로 고전압에 대한 절연내력이 커서 전압을 가했을 때 단락하지 않는 특성이 탁월하며 단위 체적 당 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. 인화점이 높으며 또한 유동점이 낮아 냉각 성능이 우수하다. 케이블을 구성하고 있는 절연유 외의 구조물들은 모두 고체로 구성되어있고 불연성 또는 난연성 재질이므로 케이블 화재의 발생과 화염전파 매체는 유체상태인 절연유라고 예상할 수 있다. 그러므로 절연유의 화염특성분석을 위하여 연소율을 측정하였다. 연소율의 측정은 Fig. 5와 같이 load cell을 이용한 미소중량 측정 장치 위에 0.02×0.2×0.05m 크기의 pool을 놓고 절연유를

Table 2. Ignition point and burning rate of the hexane and alkyl-benzene

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

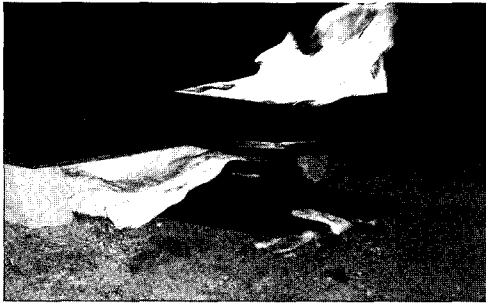


Fig. 5. Measurement of the burning rate

2/3가량 넣고 전열기로 착화점까지 가열한 후 점화한 상태에서 식 (1)과 같이 연소율을 측정하였으며 Table 2에 절연유와 헥산 연소율⁶⁾ 및 착화점을 나타냈다.

$$\text{절연유 연소율} = \frac{\text{연료감소량}}{\text{플랜면적} \times \text{시간변화량}} \quad (1)$$

케이블 화재에서 화염 전파속도를 측정하기 위하여 여러 가지 조건으로 실험하였다. Table 3에는 본 실험에 사용된 여러 가지 조건의 케이블의 가공상태, 길이, 수량, 절연유의 함유상태, 화원용 pool의 크기, 화원으로 사용되는 연료의 종류 및 양 등을 나타내었다. 실험에 사용된 시편은 장시간 창고에서 보관되면서 케이블 내에 잔류 오일의 양이 누유 및 증발이 되어 현장에 적용되는 케이블과는 차이가 있었다. 여기서 건조된 케이블은 창고에서 보관되었던 시편을 어떠한 처리도 하지 않은 케이블을 건조 케이블이라 하였고 절연유를 침투시킨 케이블과 구분하여 실험하였다.

케이블 상층부 표면에 설치되었던 열전대로부터 획득한 온도데이터의 평균값을 구해 케이블의 화염전파속도를 계산했다.

난연성 케이블을 사용하는데 있어 범규는 없지만 그 성능시험방법으로 IEEE Std 383에 의한 중형 트레이 실험방법과 이와 유사한 형태의 실험방법들이 있다⁷⁾, IEC를 위시하여, 미국, 영국, 독일 일본 등 대동소이한 시험방법을 택하고 있습니다. 이

러한 방법은 무풍상태에서 또는 Chamber내에서 케이블을 수직, 경사 또는 수평으로 설치하고 그 외면에 가스버너로 착화시킨 경우 자연 소화하는 것이 기본이며 이것이 세계적인 공통사항입니다. 그러나 본 실험에서는 실제 지하 전력구에 설치된 형태와 가장 근접하게 실험을 하기 위해 실제상황과 가까운 조건을 만들어 전파속도를 측정하였습니다.

3. 실험결과 및 분석

화염의 전파속도는 케이블 상단에 설치된 열전대가 최고온도에 도달하는 시간으로부터 다음 열전대가 최고온도에 도달하기까지 시간으로 계산하였으며, Table 4에 OF 케이블의 수와 절연유 가열시간, 연소시간 등에 따른 화염전파 속도 측정결과를 요약하였다.

Fig. 6은 Table 4의 2회 실험에 해당되며 화원 직상부로부터 5cm 떨어진 cable상의 지점에서 화염의 온도를 측정한 결과로서 온도분포곡선이 초기에는 완만하고 시간이 지남에 따라 경사각이 커진다. 이것은 복사열이 열전대의 측정부 까지 미치는 영향으로 판단된다.

Fig. 7은 Table 4의 5회 실험에 해당되며 온도분포곡선이 급경사를 이루는 것은 복사열에 대한 영향이 작고 케이블 표면에서 직접 연소가 나타나고 있는 상태이며 설치된 8개의 열전대에서 측정된 최고온도는 800℃ 정도이며 화염의 전파속도가 화원으로부터 멀어질수록 느려지는 경향을 알 수 있다. Fig. 6과 Fig. 7을 비교해볼 때 복사열의 영향이 없는 Fig. 7의 경우가 최고온도에 도달하는 시간이 짧았다.

Table 3. Experimental conditions used in present study

| 회차 | 케이블규격 | | Hole 수량 | 화원의size 및 절연유량 | | 케이블내 절연유 유무 |
|----|-------|--------|---------|----------------|--------------|-------------|
| | 길이 m | 케이블 수량 | | 화원 단면적 | 절연유량 (헥산의 량) | |
| 1 | 0.75 | 3 | 26 | 0.4×0.3 | 2400 | ○ |
| 2 | 0.75 | 3 | 26 | 0.4×0.3 | 2400 | |
| 3 | 1.5 | 3 | 26 | 0.4×0.3 | 2400 | |
| 4 | 1.5 | 3 | 1 | 0.4×0.3 | 1200 | × |
| 5 | 1.5 | 1 | 0 | 0.45×0.45 | (10000) | |
| 6 | 0.75 | 1 | 26 | 0.4×0.25 | 3000 | ○ |
| 7 | 1.5 | 1 | 0 | 0.4×0.25 | 1000 | |
| 8 | 1.5 | 1 | 1 | 0.4×0.3 | 2400 | |
| 9 | 1.5 | 1 | 1 | 0.4×0.3 | 600 | |

Table 4. Surface flame propagating velocity of OF cable with the diameter of 90mm as function of the ignition and burning time

| 회차 | 내용 | 케이블의 수 | 절연유 가열시간 (sec) | 연소시간 (hr) | 케이블화염전파속도(cm/s) |
|----|----|--------|----------------|-----------|-----------------|
| 1 | | 3 | 151 | 27분17초 | 0.093 |
| 2 | | 3 | 190 | 9분30초 | 0.096 |
| 3 | | 3 | 144 | 29분16초 | 0.091 |
| 4 | | 3 | 75 | 29분25초 | 0.054 |
| 5 | | 1 | (핵산) | 5분58초 | - |
| 6 | | 1 | 120 | 9분12초 | - |
| 7 | | 1 | 65 | 1시간26분 | 0.032 |
| 8 | | 1 | 205 | 1시간 5분46초 | 0.032 |
| 9 | | 1 | 70 | 1시간15분10초 | 0.028 |

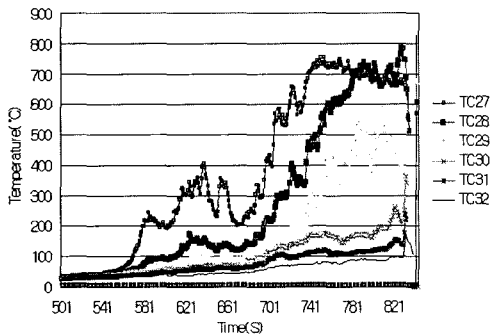


Fig. 6. Surface flame temperature distribution above three OF cables (at the 5cm height from fire source)

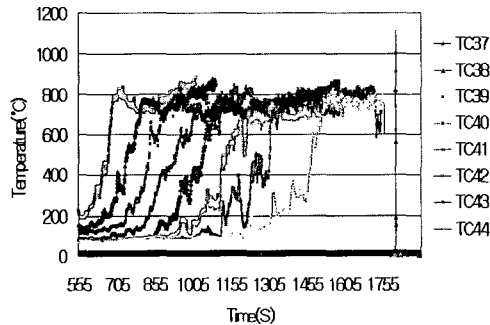


Fig. 7. Surface flame temperature distribution above OF cable (at the 20cm height from fire source)

Fig. 8은 Table 4의 1회, 2회, 3회, 4회 실험에 해당되며 OF 케이블 3개선을 사용했다. 화원 직상부로부터 5cm와 20cm씩의 거리를 각각 두고 실험한 결과로서 복사열이 화염전파속도에 영향을 미치는 것을 알 수가 있다. 화원으로부터 5cm일 때 화염전파속도는 $0.093 \pm 0.0023 \text{ cm/s}$ 이고 화원으로부터 20cm일 때는 0.054 cm/s 를 나타내고 있다.

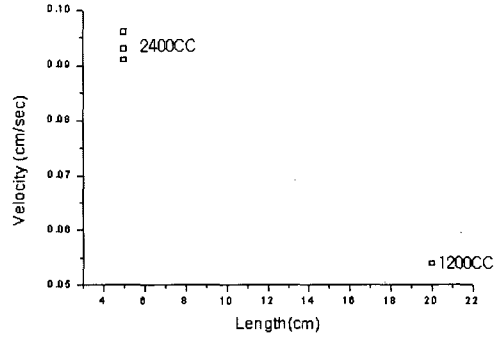


Fig. 8. Surface flame propagating velocity as fire location for three OF cables

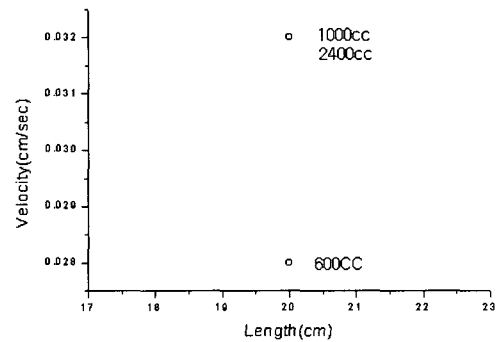


Fig. 9. Surface flame propagating velocity as the fuel decrease for one OF cable



Fig. 10. Combustion result of the dried cable

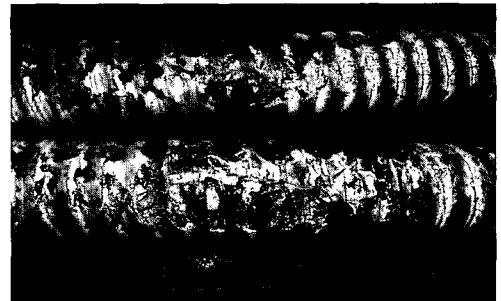


Fig. 11. Combustion result of the alkyl-benzene oil filled cable

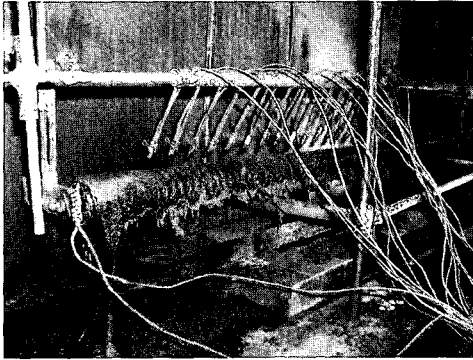


Fig. 12. Combustion result of the long and alkylbenzene oil filled cable

Fig. 9는 Table 4의 7회, 8회, 9회 실험에 해당되며 복사열이 최대한 배제되도록 화원으로부터 거리를 20cm 떨어진 곳에 열전대 센서를 설치하고 케이블 수량을 1개만 사용했을 때를 나타냈다. 화원의 열량이 작아지면 화염의 전파속도도 작아짐을 알 수 있다.

Fig. 8과 9를 비교하면 3개선의 화염전파속도가 $0.093 \pm 0.0023 \text{ cm/s}$ 로서 1개선의 $0.03 \pm 0.02 \text{ cm/s}$ 보다 2.45±0.35배 더 빠르게 나타나고 있음을 알 수 있다.

Fig. 10은 Table 4의 5회, 6회에 해당되며 실험에 사용된 케이블 내에 절연유를 충전하지 않은 건조한 상태의 케이블을 사용했을 때 절연유와 핵산 모두 케이블에 화염전파를 시키지 못하고 화원의 연료가 모두 소진되었을 때는 더 이상 케이블에서 화염전파는 일어나지 않았다.

Fig. 11은 Table 4의 2회에 해당되며 케이블의 방식층이 전소되었다. 케이블 표면을 13Φ로 천공하여 전열 면을 넓힌 상태에서의 실험결과 화염전파는 매우 원활하였다.

Fig. 12는 Table 4의 9회에 해당되며 화원용 절연유를 600cc로 주고 절연유의 충전방법은 케이블을 수직방향으로 한 다음 연소시킨 경우를 나타냈다. Fig. 11은 복사열과 피복재, 케이블내의 절연유가 함께 연소하기 때문에 피복재가 전부 연소될 수 있었다. Fig. 12는 케이블 길이를 길게 하고 화원의 절연유를 케이블에 화염전파만 시킬 목적으로 수행하였더니 케이블은 지속적인 연소반응을 보였고 피복재가 완전 전소되지는 않았다.

4. 결론

본 연구에서는 지하전력구의 OF 케이블의 화염 전파속도를 측정하였으며 현재 국내에서 많이 활용하고 있는 Ø 90mm의 OF 케이블을 이용한 화재 실험을 수행하여 얻은 결론은 다음과 같다.

케이블이 1개일 때가 3개일 때보다 전파속도가 작다. 3개선의 화염전파속도가 0.06~0.09cm/s로서 1개선의 0.028~0.032cm/s보다 2.1~2.8배 빠르게 나타났다.

실험결과 얻어진 화염전파속도는 화재 시 발생되는 재산피해의 규모와 유독가스나 soot의 양 등을 추산하는 중요한 파라메타가 될 수 있으며, 케이블의 화염전파속도는 케이블의 수, 케이블내의 절연유 함유량 등에 의한 영향을 받게 된다. 이러한 화염전파속도는 전력구 화재 방재 시스템에 필요한 Data로 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글 : 이 논문은 2003년도 충주대학교 학술연구조성비 지원에 의해서 연구되었습니다. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- 1) 박승민, 김운형, 윤명오, “지하구 케이블의 연소 특성실험”, 화재소방학회, 제16권, 제2호, 2002.2.
- 2) 조영길, “전력케이블의 화염전파특성에 관한 연구”, 건국대학교 석사학위논문(1998).
- 3) 서정필, 감왕곤, 신성권, 조경순, 홍진용, “Oil Filled 케이블용 절연유의 유전특성”, 한국전기전자재료학회 추계학술대회 논문집, 1994.
- 4) 윤구섭, 정우성, 김철운, 김태성, “OF 케이블 절연유의 특성변화에 따른 경년열화진단”, 한국전기재료학회 춘계학술대회 논문집(1997).
- 5) 김운형, 김종훈, 박승민, 김태수, 민인홍, 전동일, 김상욱, “지하구 미분무수 소화설비 적용에 관한 연구”, 한국화재·소방학회, 제16권, 제1호, 2002.
- 6) Quintiere, James G., “Principles of Fire Behavior”, Thomson Learning(1997).
- 7) IEEE 383, IEEE Standard for Type Test of class IE Electric Cables, Field Splices, and Connections for Nuclear Power Generating Stations, 1974.