

구리 전선을 통해 전파하는 화염에 대해 피복재 두께에 따른 전기장 인 가효과

강민성* 박수빈** 김경택* 권오봉** 유춘상*† 박정*** 정석호***

Effect of insulator thickness on flame spread over electrical wire with applying AC electric fields to Cu-core metal

M.S. Kang*, S.B Park**, G.T. Kim*, O.B. Kwon**, C.S. Yoo*†, J. Park***, S.H. Chung***

전선 화재는 과열, 누전 등의 원인으로 발생한 다. 이로 인해 발생한 화염은 큰 화재로 이어지 기도 한다. 전선 화재는 우주에서 발생할 수 있는 대표적 화재이며, 이러한 화재사고는 인명피 해와 막대한 손해로 이어진다. 과거 아폴로 1호 (AS-204)의 사고와 미르 국제 우주정거장 사건 등을 예로 들 수 있다. 우주에서 발생하는 화재 외에도 가정 및 산업현장 등 여러 상황에서 예상 치 못하게 생긴다. 스위스 에어 111편 추락 사 고와 세종시 아파트 화재 사고 등의 예가 있다. 전선 화염의 전파속도는 전선 주변의 압력과 온 도, 절연체의 재료, 중력 등에 영향을 받고 이에 대한 연구 또한 진행되어 왔고[1-8] 이를 바탕 으로 전선 화재에 대한 나사 화재 안전 코드가 만들어져있다[9]. 전선 화재는 예상치 못한 전선 의 누전과 과열로 일어나며, 이로 인해 발생한 회로의 단선이 일어난다. 따라서 회로는 개방회 로가 되며, 전압은 여전히 가해지고 있기 때문에 단일 전극 상태가 된다. 이러한 경우, 화염 반응 대 내에 존재하는 대전된 입자들은 로렌츠 힘을 받아 벌크 유동을 만드는 이온풍 영향을 받는다.

전기장의 영향이 고려된 선행연구에서는 니켈 -크롬 전선과 구리 전선을 통해 전파하는 화염 에 대해 여러가지 조건에서 연구되었다[10-15]. 실제 우주 산업에서 용도에 따라 다양한 직경의 전선을 사용하고 있으며, 이에 따라 절연체의 두께도 다르다. 따라서 본 연구는 구리 전선의 절연체 두께에 따른 영향을 실험적 연구를 통해 수행하였다.

Figure. 1은 실험장치에 대한 개략도이다. 실험 장치는 전선과 와이어 홀더, 함수 발생기, 오실로스코프, 비디오 카메라로 구성되어 있다. 전선의 코어 직경은 0.5 mm, 폴리에틸렌으로 피복

된 직경(D_{out}) 0.8, 1.1 mm 전선을 사용하였다. 와이어 홀더의 재질은 비전도성 아세탈 수지이고 전선 한 쪽 끝은 와이어 홀더에 고정되어 전기장 을 직접적으로 인가하였고 다른 한 쪽은 전선에 화염이 전파하여 발생한 열팽창에 의한 변형을 방지하기 위한 스프링을 설치하였다. 와이어 홀더 간 전선의 길이는 213 mm이다. 이 구간에서 점화 천이 구간 70 mm와 와이어 홀더와의 영향 을 고려한 구간을 제외한 구간에서 Matlab 기반 의 코드를 사용하여 화염 위치 분석하였다. 와이어 홀더와의 영향으로 제외한 구간은 직경이 0.8 mm일 때 50mm이고 직경이 1.1mm일 때는 23 mm로, 분석하는 구간은 직경이 0.8 mm 일 때 90mm이고 1.1 mm일 때 120 mm가 된다. 실험 조건으로 전선에 인가되는 교류 전압(V_{AC})의 세 기는 RMS 값으로 1 - 5 kV까지, 주파수(f_{AC}) 10 - 1000 Hz 까지 다양하게 변화시켜가며 실험 을 수행하였다. 교류 전기장은 함수 발생기와 증폭기를 통해 인가되었고, 오실로스 코프를 통해 실제 전선에 인가된 전압과 주파수를 측정하였다. 화염은 에어 실린더 끝에 달린 점화기로 점화하였 고 점화기를 통해 발생할 수 있는 전기장의 교란을 차단하기 위해 PLC(Programmable Logic Controller) 회로를 이용해 전선에서 발생할 수 있는 간섭을 제거하였다.

Figure. 2는 $D_{out} = 0.8, 1.1$ mm인 전선에 전압 을 인가하지 않은 상태(Baseline)로 전파하는 화염의 형상과, $V_{AC} = 4kV$ 을 인가하고 $f_{AC} = 10, 60, 100, 400, 800$ Hz를 인가하였을 때 화염의 형상 을 나타낸 것이다. 전기장이 인가되지 않았을 때 의 모습을 보면, 전선 직경의 크기가 클수록 화염에 공급되는 연료의 양이 많아지기 때문에 화염의 크기가 커진다. 10 Hz인 경우를 보면 화염 이 기연측(burnt side)으로 기울어져 있는 모습 을 보인다. 이후 60 Hz에서도 기연측으로 기울 어진 모습을 보이며 화염의 사이즈가 작아지는 것을 볼 수 있다. 인가되는 주파수가 100 Hz인 경우 화염의 형상이 똑바로 서있는 모습을 보인다. 인가되는 주파수가 400 Hz인 경우, 직경이

* 울산과학기술원 기계공학과

** 부경대학교 기계공학과

*** KAUST Clena Combustion Research Center

*†연락처, csyoo@unist.ac.kr

TEL : (052)217-2322

*†† 연락처, jeongpark@pknu.ac.kr

TEL : (051)629-6141 FAX : (051)-629-6126

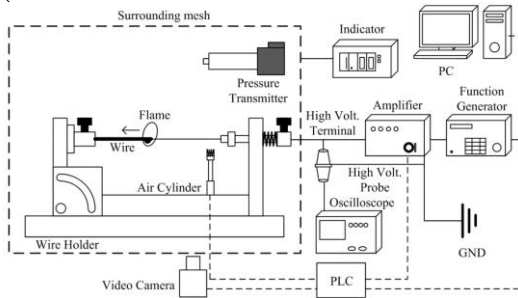


Fig. 1. Schematic illustration of experimental setup.

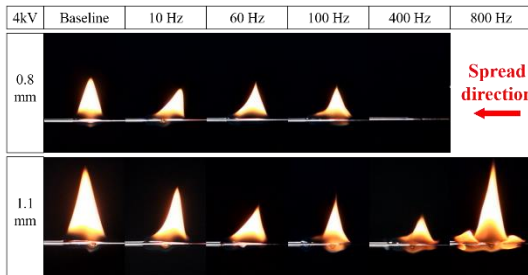


Fig. 2. Instantaneous flame images with applied frequency and wire diameter at $V_{AC} = 4$ kV.

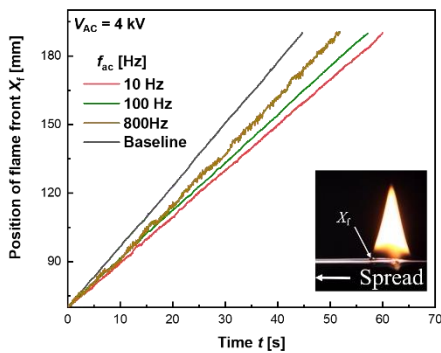


Fig. 3. Temporal position of flame front for various frequencies for $D_{out} = 1.1$ mm at $V_{AC} = 4$ kV.

0.8mm인 전선에서 소화가 일어나지만 직경이 1.1 mm인 경우에는 소화가 일어나지 않지만 매우 화염의 높이는 감소한 것을 확인할 수 있다. 이후 직경이 1.1 mm이고 주파수가 800 Hz인 경우에는 화염의 사이즈가 크게 증가하며 화염 앞뒤로 전선을 감싸는 화염이 생겨났다.

Figure. 3은 Fig. 2에서 나타난 화염의 형상에 대해 직경이 1.1 mm 일 때, 시간에 따른 화염의 위치를 관심 구간인 70 mm에서 190 mm까지인

120 mm구간에서 나타난 그래프이다. 직경이 0.8인 경우는 선행 연구로 선형적으로 전파한다는 것을 밝혔다. [15] 화염의 선단 위치는 화염이 전파할 때, 전선의 절연체와 화염이 맞닿는 부분 중, 화염 전파 방향에서 가장 선단에 있는 곳으로 정의 하였다. 그래프에서 볼 수 있는 것처럼 화염은 전선을 통해 전파하는 동안 시간에 대해 선형적으로 전파한다. 따라서 화염 전파속도는 그래프의 기울기($S_w = \frac{dx}{dt}$)로 정의하였다. 전선의 직경이 증가하면 화염 전파 속도가 감소하는 것을 볼 수 있다. 그리고 인가되는 주파수에 따라 화염의 전파속도가 변하는 것을 알 수 있다. 이를 통하여 화염의 선단 위치는 인가되는 전기장의 세기와 전선의 직경에 의해 변화함을 알 수 있다.

Fig. 4는 전선의 직경과 전기장의 세기에 따른 화염 전파 속도의 변화를 관찰하기 위하여 전선에 인가되는 주파수에 따른 화염 전파 속도를 전압에 따라 나타냈다. 전기장이 인가되지 않았을 때(Baseline)의 화염 전파 속도($S_{w,0}$)는 검은색 선으로 표현되었다. Baseline의 경우를 Figure. 4(a), (b)에서 살펴보면, 직경이 1.1 mm인 경우의 전파 속도가 0.8 mm인 경우의 전파 속도보다 느린 것을 확인할 수 있다.

Figure. 4(a)는 직경이 0.8 mm 일 때 전선에 인가되는 주파수에 따른 화염 전파 속도를 전압에 따라 나타낸 것이다. $V_{AC} = 1$ (2) kV인 경우에 인가되는 $f_{AC} = 100$ (60) Hz까지 화염 전파속도가 감소(증가)한 후, 주파수가 증가함에 따라 화염 전파 속도가 증가(감소)한다. $V_{AC} = 3, 4$ kV인 경우에 인가되는 $f_{AC} = 100, 60$ Hz까지 화염 전파 속도가 증가하며 600, 100 Hz까지 감소 후 주파수가 증가함에 따라 다시 증가한다. $V_{AC} = 4$ kV인 경우에 $f_{AC} > 200$ Hz에서 화염이 소화되었다. $V_{AC} = 5$ kV인 경우 인가되는 주파수가 60 Hz까지 화염 전파 속도가 감소 한 후 주파수가 증가함에 따라 전파속도가 증가한 후 $f_{AC} > 200$ Hz에서 화염이 소화되었다.

Figure. 4(b)는 직경이 1.1 mm 일 때 전선에 인가되는 주파수에 따른 화염 전파 속도를 전압에 따라 나타낸 것이다. 직경이 0.8 mm일 때와 다르게 $V_{AC} = 1$ kV 일 때 $f_{AC} = 80, 200$ Hz까지 증가하다가 $f_{AC} = 400$ Hz까지 감소하고 $f_{AC} = 800$ Hz 까지 다시 증가하는 추세를 보인다. $V_{AC} = 2, 3$ kV 일 때는 $f_{AC} = 60, 200$ Hz까지 증가하다가 이후 주파수가 증가함에 따라 감소하는 추세를 보인다. $V_{AC} = 4, 5$ kV 일 때는 $f_{AC} = 60, 30$ Hz까지 거의 일정하다가 $f_{AC} = 400, 80$ Hz까지 감소하고 $f_{AC} = 1000, 800$ Hz까지 다시 증가한다. $V_{AC} = 5$ kV는 이후 주파수에서 다시 감소한다. 특히 4 kV에서의 화염 전파 속도의 변화를 볼

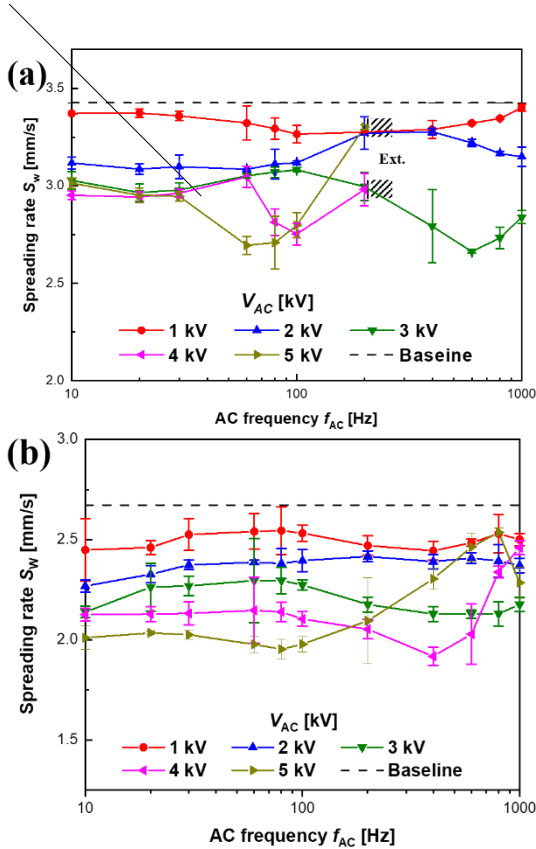


Fig. 4. Flame spread rate against applied frequency at several voltages for of (a) $D_{out} = 0.8\text{mm}$ (b) $D_{out} = 1.1\text{ mm}$.

때, Fig. 2의 화염 높이 및 너비와 연관성이 있으며 이는 선행 연구의 온도 균형 메커니즘(Thermal balance mechanism)을 통해 밝힌 바 있다[10-15].

Fig. 5를 보면 전압과 주파수가 인가되었을 때, molten PE가 전선을 따라 회전하는 연속 이미지이다. 이 현상은 직경인 0.8 mm와 1.1 mm일 때 공통적으로 나오는 현상이다. 이는 molten PE 주위의 유체의 전단 응력에 의한 현상으로 판단하고 있으며, 이 현상을 일으키게 되는 메커니즘과 현상에 대한 주파수 등의 자료를 수집하여 추후 연구에서 밝힐 예정이다.

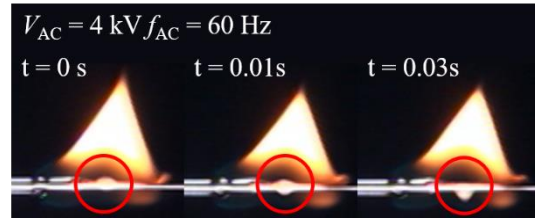


Fig. 5. Sequential images of rotation of molten PE along Wire for $D_{out} = 1.1\text{ mm}$ at $V_{AC} = 4\text{ kV}$ and $f_{AC} = 60\text{ Hz}$.

후 기

이 곳에 후기를 작성해 주시면 됩니다. 예) 본 연구는 지식경제부 에너지자원기술개발사업의 일환(20102030200051)으로 수행되었습니다.

참고 문헌

- [1] O. Fujita, K. Nishizawa and K. Ito, Effect of low external flow on flame spread over polyethylene-insulated wire in microgravity, Proc. Combust. Inst., 29 (2002) 2545-2552
- [2] M. Kikuchi, O. Fujita, K. Ito, A. Sato and T. Sakuraya, Experimental study on flame spread over wire insulation in microgravity, Proc. Combust. Inst., 26 (1998) 2507-2514
- [3] Y. Nakamura, N. Yoshimura, H. Ito, K. Azumaya and O. Fujita, Flame spread over electrical in sub-atmospheric pressure, Proc Combusts. Inst., 32 (2009) 2559-2566
- [4] Y. Nakamura, N. Yoshimura, T. Matsumura, H. Ito and O. Fujita, Opposed-wind effect on flame spread of electric wire in sub-atmospheric pressure, Journal of thermal science and technology, 3 (2008) 430-441
- [5] A. Umemura, M. Uchida, T. Hirata and J. Sato, Physical model analysis of flame spreading along an electrical wire in microgravity, Proc. Combusts. Inst., 29 (2002) 2535-2543
- [6] S. Takahashi, H. Takeuchi, H. Ito, Y.

- Nakamura and O. Fujita, Study on unsteady molten insulation volume change during flame spreading over wire insulation, Proc. Combust. Inst., 34 (2013) 2657-2664
- [7] Y. Nakamura, N. Yoshimura, T. Matsumura, H. Ito and O. Fujita, Flame spread ver polymer-insulated wire in sub-atmospheric pressure : Similarity to microgravity phenomena, Progress in scale modeling, (2008) 17-27
- [8] X. Huang, Y. Nakamura, F. A. Williams, Ignition-to-spread transition of externally heated electrical wire, Proc. Combust. Inst., 34 (2013) 2505-2512
- [9] W.W Youngblood, M. Vedha-Nayagam (1989), NASA Contractor Report 185147.
- [10] M.K. Kim, S.H. Chung and O. Fujita, Effect of AC electric fields on spread rate over electrical wire, Proc. Combust. Inst., 33 (2011) 1145-115
- [11] S.J. Lim, M.K. Kim, J. Park, O. Fujita, S.H. Chung, Flame spread over electrical wire with AC electric fields: Internal circulation, fuel vapor-jet, spread rate acceleration, and molten insulator dripping, Combustion and Flame 162(4) (2015) 1167-1175.
- [12] S.J. Lim, J. Park, M.K. Kim, S.H. Chung, O. Fujita, Experimental Study on Downwardly Spreading Flame over Inclined Polyethylene-insulated Electrical Wire with Applied AC Electric Fields, J. Korean Soc. Combust. 19(4) (2014) 1-7
- [13] S.H. Park, S.J. Lim, O.B. Kwon, J. Park, S. H. Chung, Effect of Diameter on Spreading Flame over Electrical Wire with Applied AC Electric fields, J. Korean Soc. Combust. 22(3) (2017) 1-7
- [14] S.J. Lim, S.H. Park, J. Park, O. Fujita, S.I. Keel, S. H. Chung, Flame spread Over inclined electrical wires with AC electric fields, Combustion and Flame 185 (2017) 82-92.
- [15] M.S. Kang, S.H. Park, D.K. Lee, S.G. Kim, Y.T. Guahk, J. Park, S.H. Chung, Effect of AC Electric Fields on Flame Spread over Polyethylene-insulated Wire with Copper Metal Core, KOSCO SYMPOSIUM 논문집 , (2019) 30-33.