

## 교류전기장이 인가된 폴리에틸렌으로 피복된 기울어진 전선을 통해 하향으로 전파하는 화염에 대한 실험적 연구

임승재\* · 박 정\*\*\* · 김민국\*\*\* · 정석호\*\*\*\* · Osamu Fujita\*\*\*\*\*

\*부경대학교 의생명융합공학협동과정 · \*\*부경대학교 기계공학과 · \*\*\*한국기계연구원 환경에너지기계연구본부

\*\*\*\*King Abdullah University of Science and Technology, Clean Combustion Research Center

\*\*\*\*\*Hokkaido University, Division of Mechanical and Science Engineering

## Experimental Study on Downwardly Spreading Flame over Inclined Polyethylene-insulated Electrical Wire with Applied AC Electric Fields

Seung Jae Lim\*, Jeong Park\*\*\*, Min Kuk Kim\*\*\*, Suk Ho Chung\*\*\*\* and Fujita Osamu\*\*\*\*\*

\*Interdisciplinary Program of Biomedical Engineering, Pukyong National University

\*\*Department of Mechanical Engineering, Pukyong National University

\*\*\*Environmental & Energy System Research Division, Korea Institute of Machinery and Materials

\*\*\*\*King Abdullah University of Science and Technology, Clean Combustion Research Center

\*\*\*\*\*Hokkaido University, Division of Mechanical and Science Engineering

(Received 25 September 2014, Received in revised form 27 October 2014, Accepted 2 December 2014)

### ABSTRACT

An experimental study on downwardly spreading flame over slanted electrical wire, which is insulated by Polyethylene (PE), was conducted with applied AC electric fields. The result showed that the flame spread rate decreased initially with increase in inclination angle of wire and then became nearly constant. The flame shape was modified significantly with applied AC electric field due to the effect of ionic wind. Such a variation in flame spread rate could be explained by a thermal balance mechanism, depending on flame shape and slanted direction of flame. Extinction of the spreading flame was not related to angle of inclination, and was described well by a functional dependency upon the frequency and voltage at extinction.

**Key Words** : AC electric field, Electrical wire, Angle of inclination, Flame spread rate

### 1. 서론

최근 세계 여러 나라에서는 우주개발을 위한 기술개발에 투자를 아끼지 않고 있으며, 앞으로의 우주개발은 국제우주정거장(ISS)에 이어 우주기지, 우주공장, 우주호텔 등 미래에 인간이 우주에서 생활이 가능하도록 발전해 나아가갈 것이다. 하지만 이러한 우주개발에서는 우주에서의 우주인에 대한 안전과 생존가능성에 관한 여러 가지 문제를 해결해야

할 필요가 있다. 이 중에서 화재는 막대한 예산이 투입된 미션의 실패로 이어질 수 있다는 점과 우주인의 생명에 치명적인 영향을 미칠 수 있다는 점에서 반드시 막아야 할 재난으로 여겨지고 있다. 특히, 전선 화재는 우주선에서 화재를 일으키는 주된 원인으로 여겨지고 있으며, 우주선에서 사용되는 많은 전기장치에서 쉽게 발생할 수 있다는 점에서 주목할 만한 이슈로 대두되고 있다. 이러한 관점에서 전선을 통해 전파하는 화염에 대해 주위의 유동과 압력, 피복의 종류, 중력의 세기 등 화염전파에 미치는 요인에 대한 다양한 연구가 수행되어 왔으며, 이를 토대로 전선 화재에 대한 화재안전코드가 존재해 왔다[1-8].

하지만 전선에 화재가 발생했을 경우에 전선은 전기장이나 자기장 등의 다양한 환경에 놓이게 된다. 이 중 전기장은 화염의 반응대(Reaction zone) 내에

† Corresponding Author, jeongpark@pknu.ac.kr

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

존재하는 양이온과 음이온 같은 대전된 입자들에 직접적으로 영향을 주고, 다양한 화염의 모습의 변화와 연소특성의 변화를 야기한다. 그러나 전선을 통해 전파하는 화염에 대한 연구는 전선에 전기장이 인가되지 않았을 경우에 국한되어 있으며, 전선에 전기장이 인가되어 있을 경우의 화염전파에 대한 연구가 필요한 시점이다. 하지만 이러한 전기장이 인가되어있는 상태의 화염전파에 대한 연구는 제한적으로 되어 있다.

선행연구에서는 지면과 수평하게 놓인 전선에 교류전기장을 인가하였을 경우의 화염전파특성에 대해 보고한 바 있다[9]. 이 연구에서 화염전파속도는 전선에 인가되는 교류전기장의 세기와 주파수에 따라 변화하며, 화염전파속도의 증가와 감소를 온도균형매커니즘을 통해 설명하였다. 하지만 지상에서의 경우 전선은 중력의 영향 하에 존재하게 된다. 따라서 전선이 지면과 수평이 아닌 기울어진 상태가 되면, 이는 전선을 통해 전파하는 화염에 영향을 미칠 것이다. 이에 본 연구에서는 기울어진 상태의 전선에 교류전기장이 인가되었을 경우, 위에서 아래로 전파하는 화염에 대한 실험적 연구에 대해서 보고하고자 한다.

## 2. 실험 방법

Fig. 1은 전선과 와이어홀더(Wire Holder), 함수발생기(Function Generator), 증폭기(Amplifier), 비디오 카메라로 구성된 본 연구의 실험장치 개략도이다. 길이가 350 mm이고 직경이 0.5 mm인 니크롬선에 폴리에틸렌(Polyethylene)으로 피복된 직경 0.8 mm의 전선이 사용되었으며, 비전도성 아세탈 수지로 만들어진 와이어홀더에 설치되었다. 전선의 한쪽 끝은 와

이어홀더의 고정체에 연결되었으며, 다른 한쪽 끝은 스프링과 연결하여 화염이 전파하는 동안 열팽창에 의한 전선의 변형을 방지하였다. 전선을 단일전극상태로 만들기 위해 전선의 한쪽 끝에만 고전압 터미널에 연결되었다. 전선에 인가되는 교류전기장은 함수발생기와 증폭기에 의해 인가되었으며, 오실로스코프를 통해 전선에 인가된 전압과 주파수를 확인하였다. 화염은 에어실린더(Air Cylinder) 끝에 설치된 점화기에 의해 기울어진 전선의 위에서 아래로 전파되도록 전선의 위쪽 끝에서 점화되었으며, 점화기에 의해 발생할 수 있는 전기장 교란을 방지하기 위해 PLC(Programmable Logic Controller)회로를 이용하여 점화 후 전선에서 제거되도록 하였다.

전선에 인가되는 교류전압의 세기는 RMS값으로 0-3 kV까지 다양하게 변화시켰으며, 교류주파수는 0-1000 Hz까지 변화시켜가며 실험을 수행하였다. 실험은 와이어홀더에 연결된 부분을 제외한 213 mm구간에서 실험이 수행되었으며, 점화 후 점화천이구간 70 mm와 끝에서 와이어홀더와의 영향을 고려한 10 mm를 제외한 133 mm구간에서 Matlab기반의 코드를 사용하여 분석하였다.

## 3. 결과 및 논의

### 3.1. 전파하는 화염의 전체적인 특징

Fig. 2(a)는 전선에 전기장이 인가되지 않았을 경우 전선이 기울어진 각도별 시간에 따른 화염선단의 위치를 나타낸 그래프이다. 앞에서 언급한 것처럼 화염선단의 위치는 점화 후 70 mm부터 133 mm만큼 전파한 경우에 한해서 도시화되었으며, 시간은 화염이 70 mm만큼 전파하였을 경우를 기준으로 하

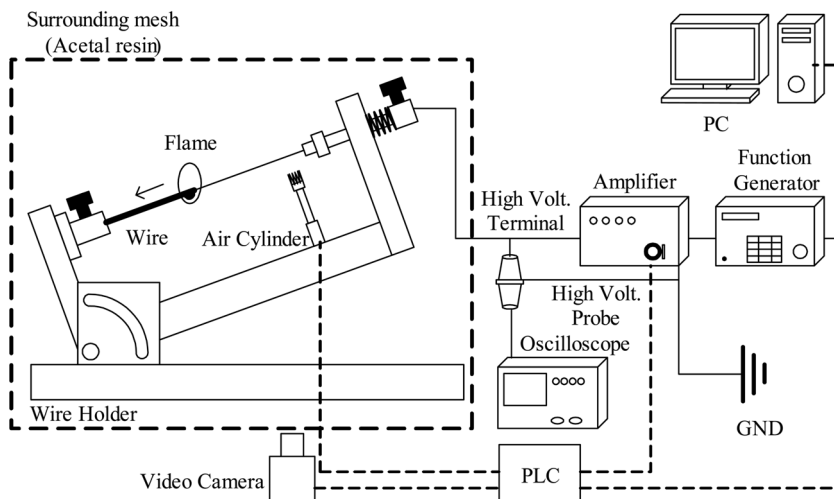
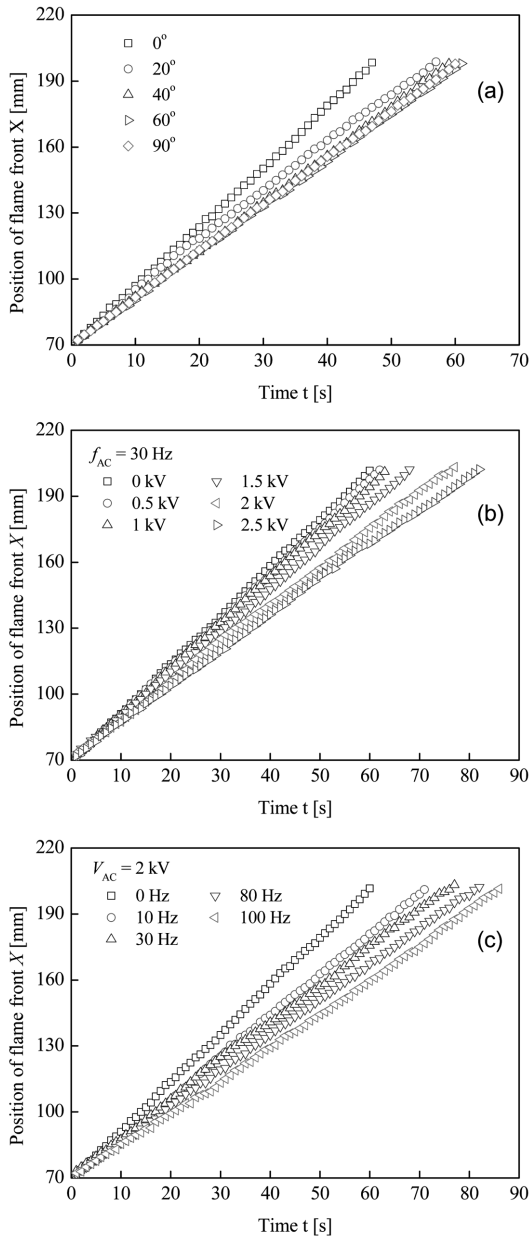
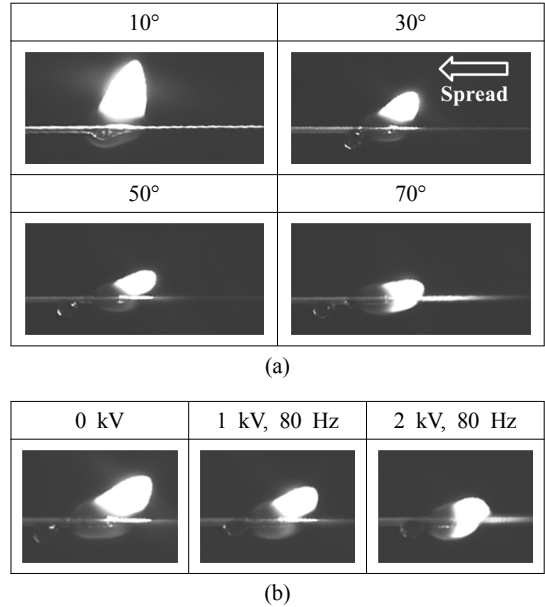


Fig. 1. Schematic illustration of experimental setup.



**Fig. 2.** Temporal position of flame front with the time (a) for several slanted angle, (b) several voltages at 30 Hz and (c) several frequencies at 2 kV with 30°.

었다. 그래프에 나타난 것처럼 각각의 전선이 기울어진 각도에 대해 화염은 전선을 통해 전파하는 동안 시간에 따라 거의 선형적으로 전파한다는 것을 알 수 있다. 또한 전선이 기울어진 각도에 따라 시간에 대한 화염 위치의 기울기가 다르다는 것을 알 수 있다. 이는 전선이 기울어진 각도에 따라 전선을 통해 전파하는 화염의 속도가 달라짐을 의미한다. Fig. 2(b)는 전선이 기울어진 각도가 30도이고 전선에 인가



**Fig. 3.** Spreading flame images relative to electrical wire (a) without electric field for slanted angle and (b) with applied voltage for 80Hz at 40°.

되는 교류주파수가 30 Hz일 경우 전선에 인가되는 전압별 시간에 따른 화염선단의 위치를 나타낸 그래프이다. 전선에 전기장이 인가되었을 경우에도 시간에 대한 화염선단의 위치는 거의 선형적인 거동을 보이며, 인가된 전압에 따라 화염전파속도가 감소한다는 것을 알 수 있다. 마찬가지로 Fig. 2(c)처럼 전선이 기울어진 각도가 30도이고 인가되는 전압이 2 kV로 일정할 경우의 인가되는 교류주파수별 화염선단의 위치는 시간에 따라 선형적으로 변하며, 인가되는 교류주파수의 크기에 따라 그 기울기가 감소함에 따라 화염전파속도가 감소함을 보여준다.

전선에 교류전기장이 인가되면 화염의 반응대(Reaction Zone)내에 존재하는 양이온과 음이온 같은 대전된 입자들은 로렌츠(Lorentz Force) 힘에 의해 가속되고, 이 입자들은 주위의 중성입자(Neutral Particle)에 운동량을 전달하여 벌크유동(Bulk Flow)을 만드는 이온풍 효과(Ionic Wind Effect)를 일으키게 된다. 선행연구에서 전선에 교류전기장이 인가되었을 경우의 전선을 통해 전파하는 화염의 모양이 변화한다는 것을 보고한 바 있다[9]. Fig. 3은 (a) 전선에 전기장이 인가되지 않았을 때 전선이 기울어진 각도에 따른 화염의 모습과 (b) 전선이 기울어진 각도가 40도일 때 인가되는 교류주파수가 80 Hz일 경우 전선에 인가되는 전압에 따른 화염의 모습을 전선에 대해 상대적으로 나타낸 사진이다. Fig. 3(a)에 나타난 것처럼 전선이 기울어진 각도가 증가할수록 전선에 전기장이 인가되지 않았을 경우의 화염은 전선에 대

해 기연측 방향(Burnt Side)으로 기울어짐을 알 수 있다. Fig. 3(b)도 마찬가지로 전선에 인가되는 전압의 크기가 증가할수록 화염은 기연측 방향으로 기울어진다는 것을 알 수 있다. 이는 선행연구[9]에서 보였던 전선에 인가되는 전압의 증가에 따른 기연측 방향으로 기울어지는 결과와 동일함을 보여준다. 또한 화염의 크기는 Fig. 3(a)에서와 같이 전선이 기울어진 각도가 10도에서 30도로 증가함에 따라 급격히 감소하며 이후에는 화염크기의 변화가 적음을 알 수 있다. 그리고 Fig. 3(b)와 같이 전선에 인가되는 전압의 크기가 증가할수록 화염의 크기가 작아짐을 관찰할 수 있다.

화염이 전선을 통해 전파하는 동안 녹은 폴리에틸렌(Molten polyethylene)은 전선이 기울어진 각도가 10도인 경우에 화염의 내부에서 미연측 방향(Unburned Side)으로 치우쳐진 상태로 형성되었으며, 30도 이상의 각도에서는 화염 밖의 미연측 방향에서 형성되었다. 또한 선행연구에서 보인 바 있는 전선에 인가되는 전압과 주파수의 증가에 따라 녹은 폴리에틸렌 안에 형성되는 그을음(Soot)의 양이 증가했던 결과[9]와는 달리 전선이 기울어진 상태에서 녹은 폴리에틸렌이 화염의 밖에서 형성이 된 경우에는 녹은 폴리에틸렌 안에 존재하는 그을음이 거의 관찰되지 않았다. 하지만 Fig. 3(b)의 인가되는 전압의 크기가 2 kV이고 주파수의 크기가 80 Hz와 같은 경우에는 기연측 전선의 표면에 그을음이 존재함을 관찰할 수 있었는데, 이러한 현상은 선행연구에서 보고한 것[9]과 같으며 상대적으로 높은 인가전압과 주파수에서 관찰되었다.

### 3.2. 화염전파속도

앞에서 언급했던 것처럼 전선을 통한 화염의 전파는 시간에 대해 거의 선형적으로 변하며 전선이 기울어진 각도, 인가되는 전압과 주파수에 따라 시간에 따른 화염위치의 기울기가 변화한다는 것을 보였다. 이로부터 화염전파속도를 선형근사(Linear Fitting)를 통해 구할 수 있다. Fig. 4는 전선이 기울어지지 않았을 경우 전선에 인가되는 주파수별 인가전압에 따른 화염전파속도를 나타낸 그래프이다. 그래프에서 알 수 있는 것처럼 화염전파속도는 점선으로 표시된 인가주파수가 80 Hz 이하인 경우 전선에 인가되는 전압에 따라 감소하였다. 반면에 100 Hz 이상에서의 화염전파속도는 초기에 전선에 인가되는 전압이 증가함에 따라 감소하였으며, 100 Hz와 200 Hz의 경우는 인가되는 전압이 3 kV인 지점에서 최솟값을 나타내며 다시 증가하였고 400 Hz 이상의 경우에는 2 kV 지점에서 다시 증가하는 경향을 보였다. 이러한 결과는 선행연구의 결과[9]와 잘 일치한다는 것을 보여준다.

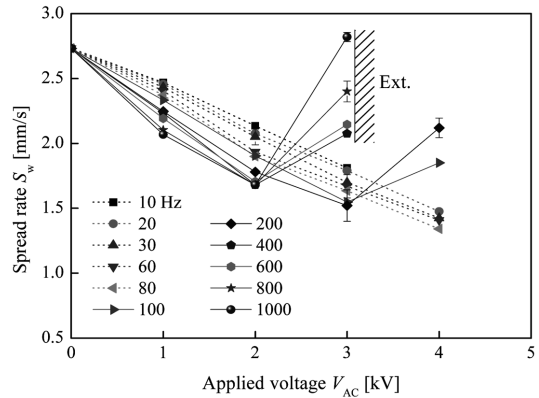
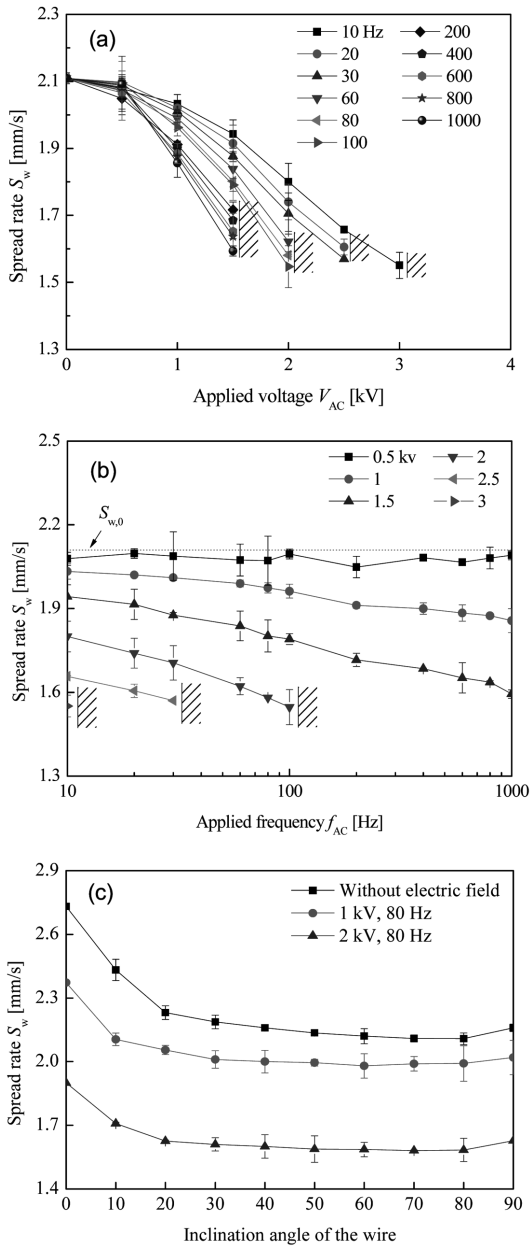


Fig. 4. Flame spread rate with applied voltage for several frequencies at inclination angle of  $0^\circ$  (Horizontal case).

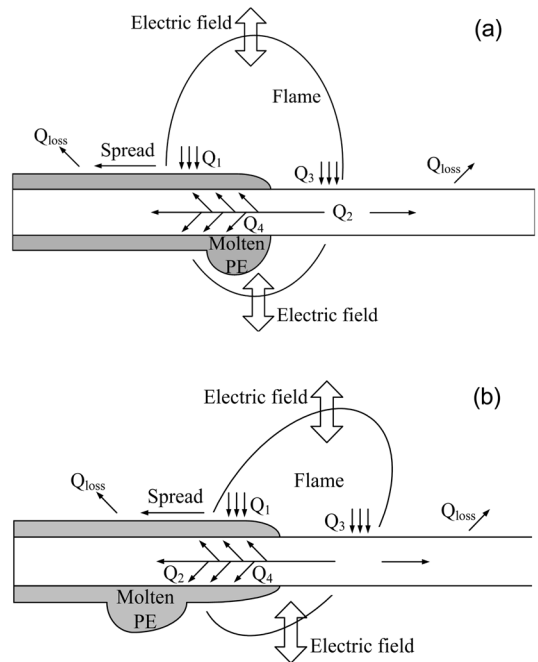
Fig. 5(a)와 (b)는 전선이 기울어진 각도가 70도로 일정할 경우에 전선에 인가되는 전압과 주파수에 따른 화염전파속도를 도시화한 그래프이다. 다른 각도에서의 경향도 비슷하기에 70도만큼 기울어졌을 때의 결과만 나타내었으며, Fig. 5(b)에는 전기장이 인가되지 않았을 경우의 화염전파속도  $S_{w,0}$ 를 함께 표시하였다. Fig. 5(a)에서 알 수 있듯이 화염전파속도는 전선에 인가되는 전압의 크기가 증가할수록 감소하는 경향을 보인다. 이러한 경향은 Fig. 4에서 상대적으로 낮은 인가전압에서 나타나는 화염전파속도의 거동과 비슷하다는 것을 알 수 있다. Fig. 5(b)에서는 전선에 인가되는 교류주파수에 따라 화염전파속도가 인가주파수의 로그스케일 값에 거의 선형적인 거동을 보인다는 것을 알 수 있는데, 전선에 인가되는 전압이 0.5 kV에서는 화염전파속도가 인가주파수에 대해서 거의 변하지 않았으며 1 kV 이상의 경우에는 로그스케일의 주파수에 대해 감소하는 경향이 나타났다. 또한 전선을 통해 전파하는 화염은 전선에 인가되는 전압의 크기가 증가할수록 더 낮은 인가주파수에서 소화가 일어난다는 것을 알 수 있다. Fig. 5(c)는 전선에 전기장이 인가되지 않았을 경우와 전선에 인가되는 교류주파수가 80 Hz이고 인가전압이 1 kV와 2 kV일 경우의 화염전파속도를 전선이 기울어진 각도에 따라 도시화한 그래프이다. 그래프에서 알 수 있듯이 전선에 인가되는 교류전압과 주파수가 일정할 때의 화염전파속도는 전선이 기울어진 각도가 30도까지 급격히 감소한다. 이후 80도까지 거의 일정하다가 전선이 기울어진 각도가 90도일 때 조금 증가하는 경향을 보인다. 하지만 그 증가량이 작기 때문에 화염전파속도는 30도와 80도사이의 화염전파속도와 거의 비슷하다고 볼 수 있다. 이는 전선이 기울어진 각도가 30도보다 클 경우에 전선을 통해 위에서 아래로 전파하는 화염의 화염전파속도



**Fig. 5.** Flame spread rate with (a) voltage for several frequencies, (b) frequency for several voltages at fixed inclination angle of 70° and (c) inclination angle of the wire without electric field and for 1 and 2kV at 80Hz.

는 전선이 기울어진 각도에 대한 영향을 미미하게 받으며 전선이 기울어진 각도보다 전선에 인가되는 전압과 주파수에 영향을 더 크게 받는다는 것을 의미한다.

앞에서 언급했던 것처럼 전선에 전기장이 인가되면 화염의 모습이 변화하게 되며, 화염전파속도는 폴



**Fig. 6.** Schematic diagram of thermal balance mechanism for (a) horizontal wire and (b) slanted wire.

리에틸렌으로의 열전달양이 많아질수록 증가하게 된다. Nakamura 연구 그룹은 온도균형메커니즘(Thermal Balance Mechanism)을 통해 압력과 주위의 유동에 의해 변하는 화염의 모습을 통하여 화염전파속도의 변화를 설명한 바 있다[4]. 또한 선행연구에서는 이를 통해 교류전기장이 인가된 지면과 수평하게 놓인 전선을 통해 전파하는 화염전파속도의 변화를 설명하였다[9].

Fig. 6에서와 같이 온도균형메커니즘은 화염으로부터 미연측(Unburned side) 폴리에틸렌으로의 열전달( $Q_1$ )과 기연측(Burnt side) 전선으로의 열전달( $Q_3$ ), 전선을 통한 녹은 폴리에틸렌으로의 열전달( $Q_2$ )과 피복으로의 열전달( $Q_4$ ), 주위로의 열손실( $Q_{loss}$ )로 화염전파속도의 변화를 설명할 수 있다. Fig. 3(b)와 같이 전선이 기울어진 각도가 일정할 경우에 전선에 인가되는 전압이 증가할수록 화염은 상대적으로 기연측 전선으로 기울게 되는데, 이는 화염으로부터 미연측 폴리에틸렌으로의 열전달( $Q_1$ )의 감소로 이어지게 된다. 뿐만 아니라 화염의 크기 또한 작아지게 되는데, 이러한 화염크기의 감소는 화염으로부터 기연측 전선으로의 열전달( $Q_3$ )의 감소를 일으키게 된다. 그리고 이로 인해 전선을 통한 녹은 폴리에틸렌과 피복으로의 열전달인  $Q_2$ 와  $Q_4$ 이 감소하게 된다. 따라서 녹은 폴리에틸렌과 피복으로의 전체적인 열전달은 감소하게 되는데, 이로 인해 녹은 폴리에틸렌의 증발률과 생성물이 감소하게 되고, 결과적으로 화염전

파속도가 감소하게 된다.

마찬가지로 전선이 기울어진 각도가 증가하게 되면 Fig. 3(a)와 같이 화염은 기연측 방향으로 기울어지게 되는데, 이 또한 Q1의 감소를 일으키게 되어 Fig. 5(c)와 같이 화염전파속도가 감소하게 된다. 또한 전선이 기울어지는 각도가 증가하게 되면, 녹은 폴리에틸렌이 화염의 밖에 형성이 되기 때문에 화염을 유지시키기 위한 폴리에틸렌으로부터 화염으로의 증발률이 감소하게 된다. 그리고 Fig. 3(a)에서 전선이 10도만큼 기울어졌을 경우와 30도만큼 기울어졌을 경우의 화염과 같이 화염의 크기가 감소하게 된다. 따라서 이러한 요인들로 인해 화염전파속도는 감소하게 된다. 하지만 전선이 기울어진 각도가 30도 이상의 경우와 같이 화염전파속도의 변화가 미미한 부분은 전선이 기연측으로 기울게 되어 Q1이 감소하더라도 화염크기의 변화가 작기 때문에 상대적으로 Q3가 증가하게 된다. 그리고 Q3의 증가로 인해 전선을 통해 폴리에틸렌으로 전달되는 열전달이 증가하게 되고, 이로 인해 화염전파속도의 변화가 적게 일어나게 된다.

### 3.3. 화염소화영역

화염에 교류전기장을 인가하면 화염모양과 전파속도가 변화하게 되고, 높은 인가전압과 주파수에서는 화염이 소화된다. Fig. 7은 전선이 기울어진 각도별 인가되는 주파수에 따른 화염소화전압을 나타낸 그래프이다. 주파수는 로그스케일의 값으로 나타내었다. 그래프에서 볼 수 있는 것처럼 화염소화전압은 로그스케일의 주파수에 선형적인 관계를 보임을 알 수 있으며, 전선에 인가되는 주파수의 크기가 작을수록 더 높은 인가전압에서 화염이 소화됨을 알 수 있다. 또한 전선이 기울어진 각도에 관계없이 모두

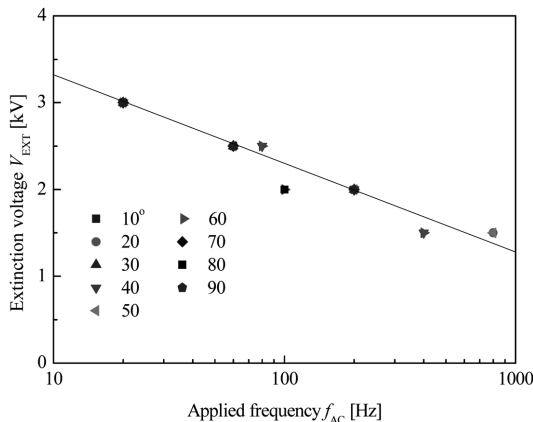


Fig. 7. Flame extinction with applied voltage and frequency at several angle of inclination.

거의 동일한 화염소화영역을 보임을 알 수 있는데, 이는 전선이 기울어지게 되면 화염소화는 전선이 기울어진 각도에 관계없이 발생한다는 것을 의미하며 전선에 인가되는 주파수와 화염소화전압과의 관계식은 다음과 같이 나타났다:

$$V_{EXT} = \log f_{AC}^{-1.015} + 4.305 [kV] \text{ with } R=0.96$$

이와 같이 전선에 인가되는 전압과 주파수에 대한 화염소화영역은 다양한 환경에서 발생할 수 있는 전선에서의 화재에 대한 화재안전코드의 수립에 기여할 수 있을 것이다.

## 4. 결론

지금까지 기울어진 상태의 전선을 통해 위에서 아래로 전파하는 화염에 교류전기장을 인가하였을 경우의 화염전파에 대한 실험적 연구가 수행되었으며 결과는 다음과 같다.

- 1) 전선을 통해 전파하는 화염에 교류전기장이 인가되면 인가되는 전압의 크기가 증가함에 따라 화염은 기연측 방향으로 기울어졌다. 또한 전선이 기울어진 각도가 증가하게 되면 화염은 기연측 방향으로 기울며, 녹은 폴리에틸렌은 화염의 앞부분에 형성되다가 더 큰 기울기에서는 화염의 밖에 형성되었다.
- 2) 화염전파속도는 전선에 인가되는 전압의 크기가 증가할수록 감소하였으며, 인가되는 주파수의 로그스케일의 값에 대해 선형적인 변화를 보였다. 전선의 기울기가 증가하게 되면 낮은 각도에서는 화염전파속도가 감소하다가 30도 이상의 각도에서는 화염전파속도의 변화가 미미하게 나타났다. 그리고 화염전파속도의 변화는 온도균형메커니즘과 녹은 폴리에틸렌의 생성율과 증발률을 통해 설명할 수 있었다.
- 3) 화염은 전선에 인가되는 전압의 크기가 증가할수록 낮은 인가주파수에서 소화되었으며, 전선이 기울어진 각도에 관계없이 비슷한 인가전압과 주파수에서 화염이 소화된다는 것을 관찰할 수 있었다. 또한, 화염이 소화되는 지점에서의 전압과 로그스케일의 주파수는 선형적인 관계를 보였으며, 관계식을 통해 특성화되었다.

## 후기

본 연구는 우주핵심기술개발사업(CD20140908)으로부터 지원을 받아 수행되었습니다.

### 참고문헌

- [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. Combust. 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. Combust. 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 over 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] 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) 1145-1151