

## 폴리에틸렌으로 피복된 전선화염의 전파에 교류전기장이 미치는 영향에 관한 실험적 연구

진영규\* · 김민국\*\* · 박 정† · 정석호\*\* · 김태형\*\*\* · 박종호\*\*\*\*

\* 부경대학교 기계공학부, \*\* KAUST CCRC, \*\*\* 한국전력연구원 수화력발전팀, \*\*\*\* 충남대학교 기계공학과

### Experimental Study on the Effects of AC Electric Fields on Flame Spreading over Polyethylene-insulated Electric-Wire

Young Kyu Jin<sup>\*</sup>, Min Kuk Kim<sup>\*\*</sup>, Jeong Park<sup>\*†</sup>, Suk Ho Chung<sup>\*\*</sup>,  
Tae Hyung Kim<sup>\*\*\*</sup>, and Jong Ho Park<sup>\*\*\*\*</sup>

<sup>\*</sup> Dept. of Mechanical Engineering, Pukyong Nat'l Univ.,

<sup>\*\*</sup> Clean Combustion Research Center, King Abdullah University of Science and Technology.,

<sup>\*\*\*</sup> Power Generation Laboratory, Korea Electric Power Research Institute, KEPCO.,

<sup>\*\*\*\*</sup> Dept. of Mechanical Engineering, Chungnam Nat'l Univ.

(Received August 5, 2010 ; Revised September 16, 2010 ; Accepted September 16, 2010)

**Key Words:** AC Electric Field(교류전기장), Polyethylene-insulated Electric Wire(폴리에틸렌 피복된 전선), Flame Spread Rate(화염전파율)

**초록:** 본 연구는 교류전기장이 인가된 전선에서의 화염전파특성에 전기장이 미치는 영향에 대한 실험적 연구이다. 폴리에틸렌으로 피복된 전선에서 인가된 교류전압과 주파수에 따라 화염전파율을 도출하였다. 그리고 화염전파는 선형적 화염 전파와 비선형적으로 가속된 화염 전파로 구분되어졌다. 이것은 전선에 인가된 교류전기장에 따라 형성된 전기장 세기의 축방향 분포가 원인이 된다. 그리고 기울어진 전선화염의 화염전파율이 상대적으로 높게 나타났다. 이러한 현상은 온도균형메커니즘으로 설명이 가능하다.

**Abstract:** In this present study, we experimentally investigated the effects of electric fields on the characteristics of flames spreading over electric-wires with AC fields. The dependence of the rate at which a flame spreads over polyethylene-insulated wires on the frequency and amplitude of the applied AC electric field was examined. The spreading of the flame can be categorized into linear spreading and non-linearly accelerated spreading of flame. This categorization is based on the axial distribution of the field strength of the applied electric field. The rate at which the flame spreads is highly dependent on the inclined direction of the wire fire. It could be possible to explain the spreading of the flame on the basis of thermal balance.

#### 1. 서론

우주선에서의 전선 화재는 우주인의 안전과 생존가능성이 직결된 중요한 문제이다. 1967년 아폴로 1호의 발사를 위해 수행된 지상 훈련에서 전선 화재로 인해 우주인들이 목숨을 잃은 사건을 시발로 하여, 실제로 국제우주정거장에서 화재가 발생하고 있고, 그 원인은 과도한 전기 누전으로 발생하는 것으로 알려져 있다. 따라서 우

주 개발 사업의 중요 아이템으로서 오랜 기간 전선화재의 기구를 이해하기 위한 노력이 경주되어 왔고, 화재 발생 시 우주인들에게 해가 없는 가스 소화 약재의 개발을 위한 연구들이 수행되어 왔다. 이러한 인식하에 전선의 크기, 전선의 유형, 피복제의 종류, 중력수준, 분위기 압력 등과 같은 다양한 요인에 대해서 지상과 우주 환경에서 많은 연구들이 수행되어 왔다.<sup>(1~4)</sup> 그러나 실제 전기 누전에 따른 화재 문제는 전기장이 인가된 피복된 전선에서의 화염 전파 특성을 연구하여야 함에도 불구하고 전기장이 인가된 화염전파 특성을 이해하기 위한 연구는 보고된 예가 드물

† Corresponding Author, jeongpark@pknu.ac.kr

© 2010 The Korean Society of Mechanical Engineers

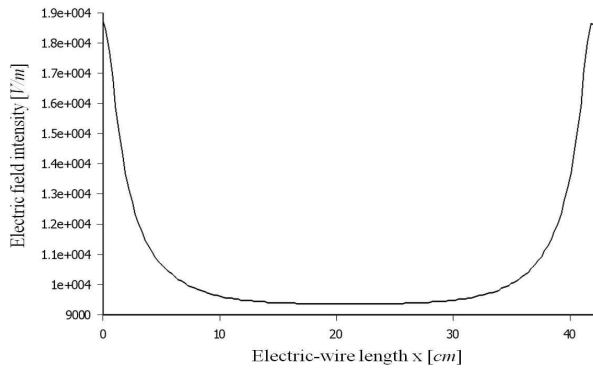


Fig. 1 Electric field intensity of wire according to applied electric field at  $r = 10\text{mm}$

다. 최근 RMS(Root Mean Square)값으로  $1\sim 7\text{kV}$  사이의 교류전압범위에서 주파수를 다양하게 변화시켜가며 인가했을 경우 평행한 전선에서의 화염전파에 관한 영향과 관련된 연구<sup>(5)</sup>가 수행되었고, 교류전압의 인가에 따른 전선 화염 전파 거동이 화염 표면적과 상관관계가 있음을 보여 3차원적 해석이 요구됨을 밝힌 바가 있지만 여전히 분야에 대한 연구는 많이 이루어지지 않았다.

현재 미국의 NASA NHB8060.1C<sup>(6)</sup>에서는 전기장이 인가되지 않은 전선 화재 실험에 사용되는 전선의 길이를 6인치(inch)로 제한하고 있다. 하지만 Fig. 1에서 FEMM 4.2<sup>(7)</sup>를 이용한 수치해석을 통해 전기장이 인가된  $420\text{mm}$ 의 전선 반경방향  $10\text{mm}$ 에서 전기장의 세기를 나타낸 결과 전선 양 끝부분에서 전기장의 세기가 비선형적인 감소와 증가의 거동이 나타남을 확인할 수 있었으며, 이것이 전선 화염의 전파에 대해 선형적 특성과 비선형적 특성을 나타낼 것으로 기대되어 이를 명확히 확인하고자 전선 길이를 증가시켜 본 실험을 수행하였다. 따라서 본 연구에서는 선형적 화염 전파와 화염 전파의 가속 특성을 보고하고, 관찰된 화염 전파 모드와 화염 전파의 가속 특성을 온도 균형 메커니즘(Thermal Balance Mechanism)에 의해 논의하고자 한다.<sup>(8)</sup>

## 2. 실험 방법

Fig. 2는 실험에 사용된 전선점화장치의 개략도이다. 전선화염의 장치는 외부에 교란되는 화염을 제거할 수 있는 구조로 제작되었다. 실험에 사용된 전선은 폴리에틸렌(Polyethylene)으로 피복

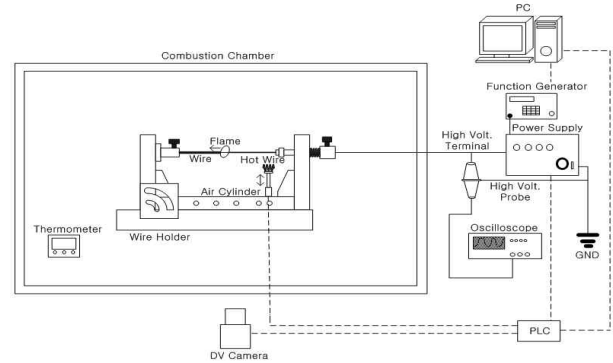


Fig. 2 Schematic diagram of experimental setup

된 니크롬(Ni-Cr)전선을 사용하였다. 전선의 외경과 내경은 각각  $0.8\text{mm}$ 와  $0.5\text{mm}$ 이며, 총 길이는  $420\text{mm}$ 로 고정하였다. 전선은 홀더(Holder)에 고정되어 실험을 수행하였고, 홀더의 소재는 전기장의 영향을 배제하기 위해 비전도성의 아세탈레진(Acetal Resin)으로 제작하였다. 전선의 한쪽은 홀더 고정체에 고정되었으며, 다른 한 쪽은 스프링에 고정하여 지속적인 장력을 부여함으로써 화염이 전파하는 동안 열팽창에 의한 전선의 변형을 방지하였다. 홀더와 스프링에 고정된 부분을 제외한 전선의 총 길이는  $230\text{mm}$ 이다. 전선점화는 열선점화기(Hot-wire Ignitor)에 의해 이루어졌고, 점화장치와 전기장이 인가된 전선 사이의 상호작용을 최소화하기 위해 열선점화기는 에어 실린더(Air-Cylinder)에 설치되어 점화 이후에는 전선에서 바로 제거되도록 PLC 장치로 제어하였다. 본 실험은 PLC를 이용하여 실험시간과 순서가 순차적으로 제어되는데, 처음 20초 동안 열선점화기로 전기전원을 공급하여 점화한 후 에어실린더를 작동하여 전선으로부터 열선점화기를 분리하였다. 또한 교류 전원 공급 장치(Trek, 10/10B-FG)를 작동하여 전선에 교류전압과 주파수를 인가하였다. 교류전원 공급 장치의 고전압 터미널은 전선의 한 쪽 끝부분과 직접적으로 연결되었으며, 다른 터미널은 접지함으로써 개방회로로 간주할 수 있다.<sup>(9)</sup> 이전의 연구<sup>(5)</sup>를 통해 RMS값으로  $1\sim 7\text{kV}$  사이의 교류전압범위에서 실험이 진행되었으나, 본 실험에서는 교류전압  $3\text{kV}$  이후의 화염특성변화가 동일한 현상으로 판단되어 교류전압은 RMS값으로  $1\sim 5\text{kV}$ 까지 변화시켜가며 실험하였고, 주파수는 함수발생기(VLT, VF1005A)를 이용하여  $10\sim 1000\text{Hz}$  범위에서 변화시켜가며 실험하였다. 인가된 전압과 주파수는

오실로스코프(Tektronix, TDS1001B)와 1:1000 고전압 프로브(Tektronix, P6015A)를 사용하여 관찰하였다. 전선길이(420mm)는 전선내경(0.5mm)에 비해 상대적으로 월등히 크기 때문에 인가된 전기장은 전선을 따라 대칭적으로 형성될 것으로 판단되며, 화염전파 거동은 디지털 미디어 카메라로 촬영하고, Matlab 기반의 S/W를 이용하여 분석하였다.

### 3. 결과 및 논의

#### 3.1 교류전기장에 의한 화염전파특성의 변화

Fig. 3은 교류전압 1~2kV 구간에 대해서 다양하게 주파수를 변화시켰을 경우 상관시간에 따른 화염위치변화를 도출해 낸 결과이고, Fig. 4는 교류전압 3~5kV 구간에 대해서 다양하게 주파수를 변화시켰을 경우 상관시간에 따른 화염위치변화를 도출해 낸 결과이다. 이 경우의 상관시간은 화염이 73mm 전파하였을 경우를 기준으로 하여 이전의 연구와 동일하게 설정하였다.<sup>(5)</sup> Figs. 3

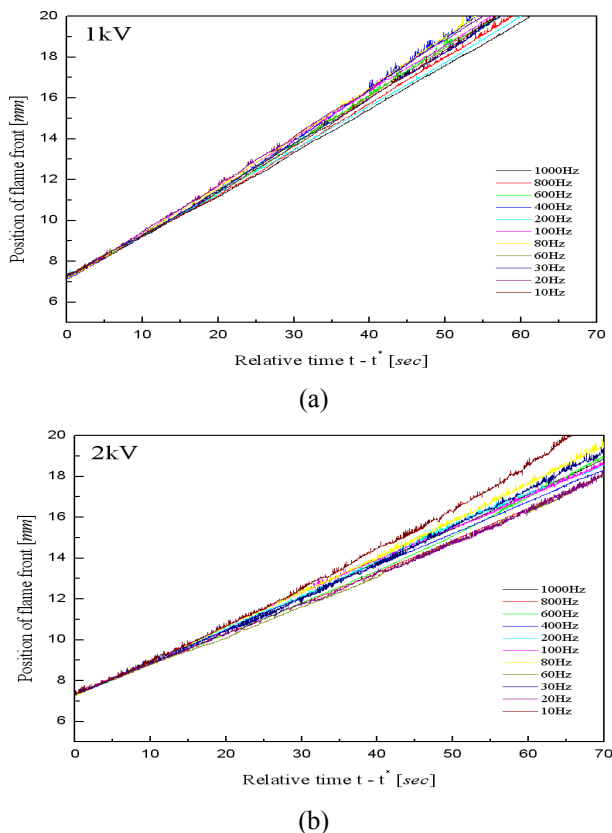


Fig. 3 Position of flame front with time for the fixed voltage of (a) 1kV, (b) 2kV

과 4에 도시된 그래프에서 알 수 있듯이 교류전압 1~2kV 구간에서는 전체적으로 그래프의 기울기가 선형적인 증가의 거동을 보이나, 3~5kV 구간의 경우 비선형적인 증가의 거동이 나타남을 알 수 있다.

이러한 교류전압 1~2kV 구간에서의 선형적인 증가 거동은 전기장의 인가에 따라 화염전파속도가 가속되지 않는 것을 의미한다. 그리고 2kV의 경우가 1kV의 경우보다 상대적으로 그래프 기울기가 더 완만한 것으로 보아 본 구간에서는 인가된

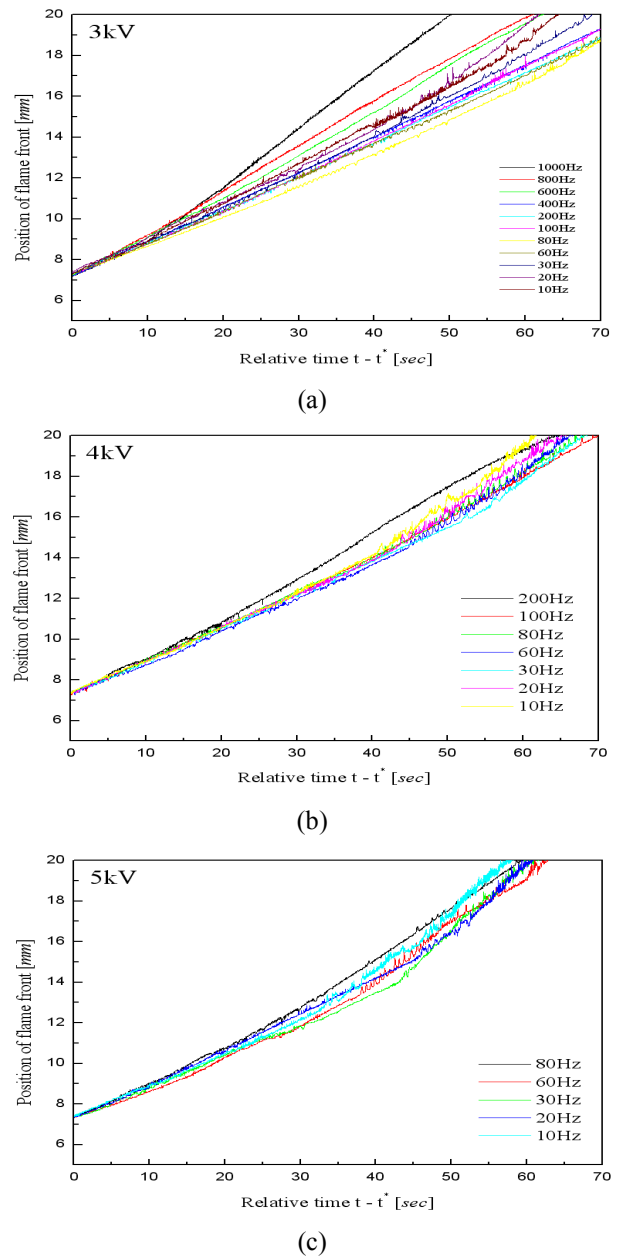


Fig. 4 Position of flame front with time for the fixed voltage of (a) 3kV, (b) 4kV, (c) 5kV

교류전압이 증가함에 따라 화염전파속도가 감소하는 것으로 알 수 있다.

반면 교류전압 3~5kV 구간에서는 교류전압이 증가할수록 그래프의 기울기가 비선형적으로 급격히 변화하는 것을 알 수 있다. 이것은 교류전압의 증가에 따라 화염전파속도가 증가하는 것을 의미한다. 그리고 본 구간에서는 화염전파 초반에는 화염전파속도가 선형적인 증가 경향을 보이다가 일정거리 이상을 전파하면 비선형적으로 증가하는 것을 알 수 있다. 이러한 경향은 앞선 Fig. 1에 도시된 그래프에서 전기장의 세기가 전선 중앙부에서 선형적인 거동을 보이며, 끝부분으로 갈수록 비선형적인 증가의 경향과 일치하는 것을 알 수 있다. 그리고 3kV의 경우는 그래프 경향이 가장 불규칙적이며, 이러한 원인은 이후 논의하도록 하겠다.

Fig. 5는 교류전압 1~5kV 구간에서 다양한 주파수를 인가하였을 경우 화염전파율을 나타낸 결과이다. 도시된 그래프에서 알 수 있듯이 화염전파율은 교류전압 1~2kV 구간에서는 감소하는 경향으로 나타났으며, 교류전압 2kV의 경우 모든 교류주파수에 대하여 화염전파율이 최소가 된다. 그리고 이후 교류전압 3~5kV 구간에서는 화염전파율이 증가하는 것을 알 수 있다.

여기서 교류전압 3kV의 1000Hz, 5kV의 10, 20Hz에서의 화염전파율이 전기장을 인가하지 않은 경우의 화염전파율보다 더 높은 수치로 도출되었는데, 이것은 전선화염의 전파에 있어서 교류전기장의 인가는 화염전파율을 증가시킬 수 있음을 의미한다. 그러나 앞선 연구결과를 살펴보면 교류전압 3kV의 400~1000Hz 구간을 제외하고는 모든 경우에서 화염전파율이 감소하는 경향이 나타났으나, 본 실험결과는 이러한 결과와는 상이한 거동으로 도출되었다.<sup>(5)</sup> 따라서 이러한 차이점을 이해하기 위해 Fig. 6에 앞선 연구를 통해 수행된 실험구간에 대해 화염전파율을 도출하여 나타내었다. 그 결과 이전의 연구결과와 잘 일치하는 거동으로 도출되었다. Figs. 5와 6의 비교를 통해 기존의 연구결과<sup>(5)</sup>와는 상이한 화염전파거동이 나타났고, 이러한 원인을 이해하기 위해 촬영된 화염 이미지 분석을 실시한 결과 전선을 따라 전파하는 화염모양의 변화가 화염전파특성에 큰 영향을 끼친다는 것을 알 수 있었다.

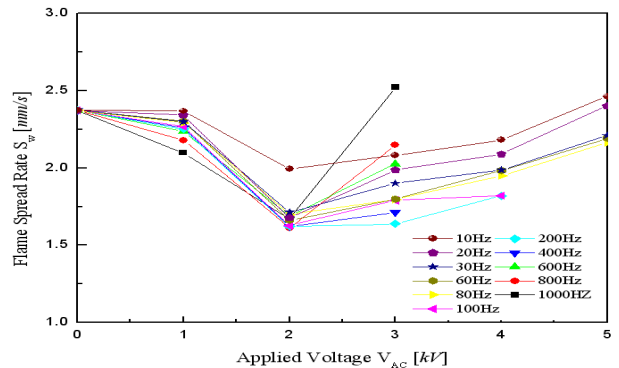


Fig. 5 Flame spread rate of wire flame with applied voltages( $V_{AC}$ ) for frequencies

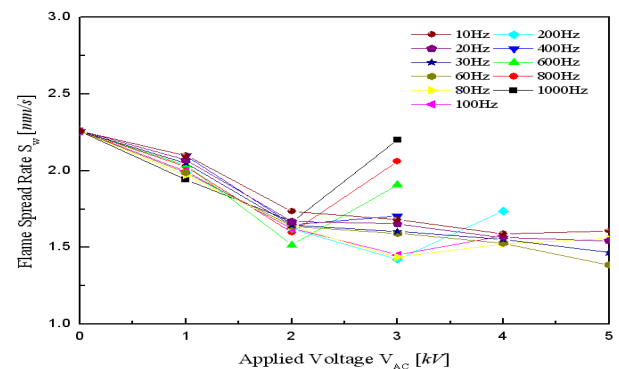
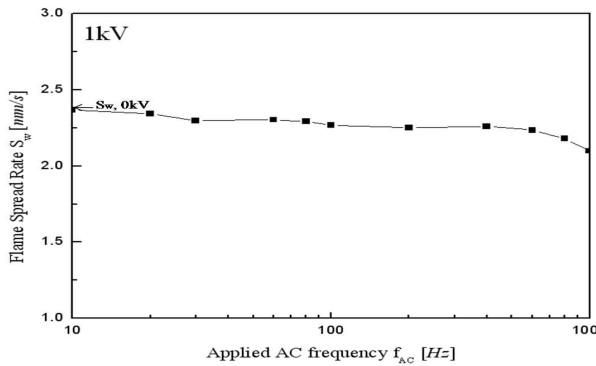


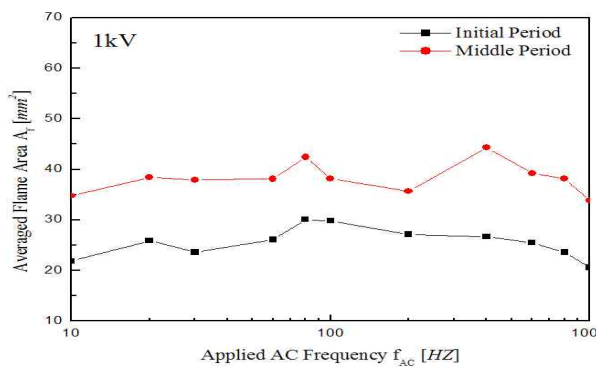
Fig. 6 Flame spread rate of wire flame with applied voltages( $V_{AC}$ ) for frequencies

### 3.2 교류전압 1kV의 전선화염의 전파특성

Fig. 7(a)는 교류전압을 1kV로 고정하고, 다양하게 주파수를 변화시켰을 경우 화염전파율의 변화를 나타낸 결과이고, (b)는 획득한 이미지를 통해 화염의 2차원 단면적을 도출한 결과이다. 그리고 (c)는 이때의 화염모양의 변화를 촬영하여 나타낸 결과이다. 도출된 결과에서 알 수 있듯이 화염전파율 변화가 크지는 않지만 교류주파수가 증가함에 따라 전체적으로 감소하는 경향을 보인다. 또한 화염전파가 진행되는 동안 모든 교류주파수 구간에서 전파초반 화염이 전기장을 인가한 방향으로 기울어졌다가 일정거리를 전파하자 수직방향으로 변화하며 전파한다는 것을 알 수 있다. 그리고 전파 초반 기울어진 화염의 단면적이 수직한 형태의 단면적보다 작은 것을 알 수 있다. 이러한 2가지 형태의 화염모양 변화의 원인을 전기장에 의한 영향으로 판단하여, 이를 분석하기 위해 우선 Fig. 8에 FEMM 4.2<sup>(7)</sup>를 이용하여



(a)



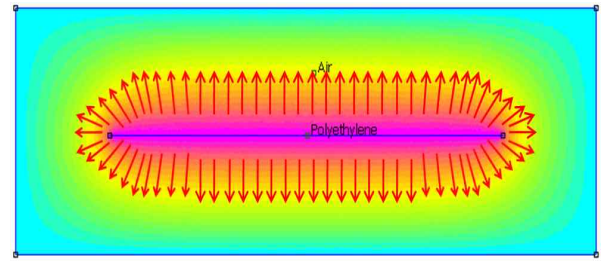
(b)

Initial Period			Middle Period		
10Hz	20Hz	30Hz	60Hz	80Hz	100Hz
2.00	2.43	2.18	2.36	2.07	2.37
1.99	2.40	2.18	2.34	2.17	2.29
200Hz	400Hz	600Hz	800Hz	1000Hz	
2.17	2.31	2.02	2.32	2.05	2.27
		2.03	2.19	1.88	2.12

(c)

**Fig. 7** (a) Flame spread rate of wire with applied AC frequency for fixed voltage of  $V_{AC} = 1kV$ . (b) Averaged Flame area of wire with applied AC frequency for fixed voltage of  $V_{AC} = 1kV$ . (c) Instantaneous images and flame spread rate at various frequencies for fixed voltage of  $V_{AC} = 1kV$

화염이 존재하지 않을 경우 피복된 전선 주변에 형성된 전기장을 도식화하여 나타내었다. 표시된 화살표는 이때 등전위선에 수직인 방향으로 작용하는 전기력선을 나타낸 것이다. 본 실험은 개방 회로로 간주할 수 있기 때문에 전선에서 전류는 흐르지 않으며, 전선 내의 전압강하 역시 존재하지 않는다고 할 수 있다. 그리고 이전의 연구를 통해 알 수 있듯이 화염의 반응영역에서 전기장



**Fig. 8** Contour of numerical analysis of wire for applied voltage

의 영향을 받는 충분한 전하수송자(Charge Carriers)가 존재한다.<sup>(10)</sup> 또한 화염영역에 존재하는 대전된 입자들이 로렌츠의 힘(Lorentz Force)에 의해 가속되어 불규칙적인 충돌(Random Collision)에 의해 중성자에게 모멘텀(Momentum)을 전달하여 화염내부에서 벌크유동(Bulk Flow)이 생성되는 이온풍(ionic wind)효과가 존재하게 된다. 또한 교류 전기장의 인가에 따라 이온보다 전자가 더 긴 자유행정거리를 지니게 되면 전압이 인가되어 대전된 전선과 상호작용이 발생한다는 사실도 알려져 있다.<sup>(5)</sup>

결국 본 실험의 경우 교류전압의 (+)와 (-)가 반복되는 거동으로 인해 화염내부의 전하 수송자들이 화염 외부로 방출되지 못하며, 이는 화염내부에서 일종의 이온 덩(ion trap)현상과 유사한 거동으로 나타나게 되는 것으로 판단된다.<sup>(11)</sup> 따라서 전기력선 방향으로 화염내부의 전하수송자들은 영향을 받게 되고, 이 영향으로 인해 전파 초반 전기장이 인가된 방향으로 기울어졌다가 일정거리를 전파하면 수직인 형태로 화염이 변화하며 전파하는 것을 알 수 있다. 그리고 Fig. 1에서 도시된 바와 같이 전기장의 세기가 비선형적인 감소와 증가의 거동이 나타나는 것은 전선의 끝부분으로 갈수록 등전위선의 간격이 조밀하기 때문이며 이러한 전기장 세기 증가에 따른 화염전파의 영향에 대해서는 차후 설명하도록 하겠다.

교류전압 1kV의 결과에서 도출된 화염 모양의 변화를 상세히 이해하기 위해 Fig. 9(a)와 (b)에 Nakamura가 제안한 온도 균형 메커니즘(Thermal Balance Mechanism)으로 2가지 유형의 화염을 나타내었다.<sup>(8)</sup> Fig. 9(a)에 도시된 화염의 경우처럼 전기장이 인가된 방향으로 기울어지게 되면, 화염 크기의 축소로 인한 적분된 열 생성률(Integrated heat generation rate)이 감소하고, 또한 화염 부피와 관련된 복사열전달 역시 감소하게

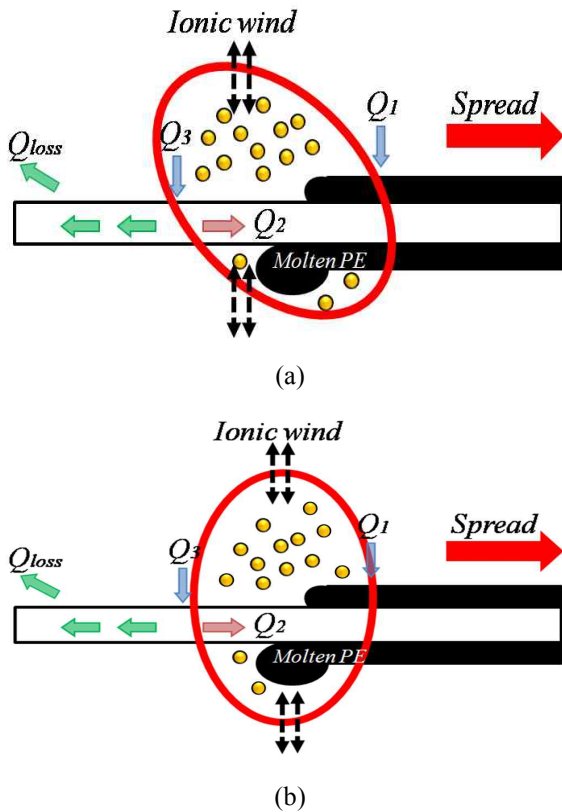
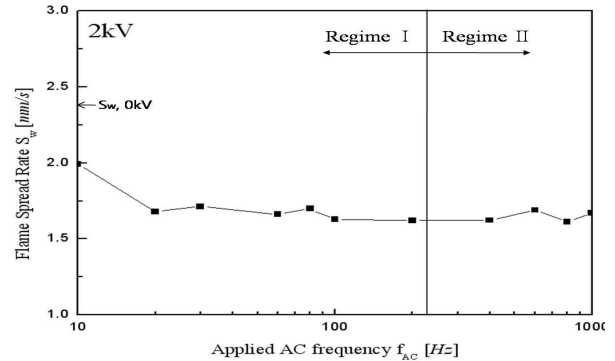
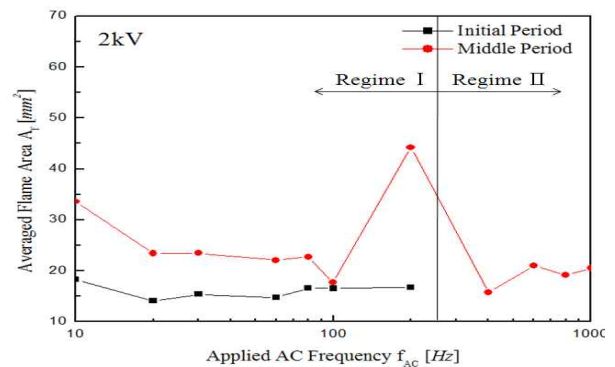


Fig. 9 Schematic of spreading flame for fixed voltage of  $V_{AC} = 1kV$

된다. 따라서 연소되지 않은(unburned) 피복제로의 열전달  $Q_1$ 이 감소하게 되고, 연소된(burned) 전선에 접촉된 열전달  $Q_3$  역시 감소하게 되며, 전도 열손실  $Q_{loss}$ 가 화염 모양에 따라 크게 변하지 않는다고 가정하면 순차적으로 전선을 따라 연소되지 않은 피복제와 화염 내부의 녹은 폴리에틸렌(Molten PE)으로의 전도 열전달  $Q_2$ 가 감소하게 되어 폴리에틸렌의 증발은 감소하게 된다. 이것이 화염강도를 약화시켜 화염전파율을 감소시키게 된다. 결국 전기장이 인가된 방향으로 기울어진 화염의 존재는 전기장을 인가하지 않았을 때의 경우보다 화염전파율을 감소시키는 원인이 된다. 그리고 Fig. 7(a)에 도시된 그래프에서 알 수 있듯이 교류전압  $1kV$ 에서 주파수가 증가함에 따라 화염전파율이 감소하는 경향이 나타난다. 이것은 교류주파수의 증가에 따라 전기장이 인가된 방향으로 기울어졌을 경우 화염내부의 전하수송자와 교류전압 사이의 상호작용이 상대적으로 강해지는 것에 기인하는 것으로 판단된다. 그리고 화염이 전선의 일정거리 이상을 전파하게 되어 수직한 형태로 변화하게 되면 화염 크기의 증



(a)



(b)

Regime 1						Regime 2	
1.82	2.33	1.55	1.66	1.66	1.83	1.57	1.66
1.72	1.91	1.72	1.91	1.72	1.91	1.59	1.97
200Hz	400Hz	600Hz	800Hz	1000Hz			
1.61	1.63	1.62	1.52	1.59	1.67		

(c)

Fig. 10 (a) Flame spread rate of wire with applied AC frequency for fixed voltage of  $V_{AC} = 2kV$ . (b) Averaged Flame area of wire with applied AC frequency for fixed voltage of  $V_{AC} = 2kV$ . (c) Instantaneous images and flame spread rate at various frequencies for fixed voltage of  $V_{AC} = 2kV$

가로 인한 연소되지 않은 피복제로의 열전달  $Q_1$ 이 증가하게 된다. 또한 전선을 따라 연소되지 않은 피복제와 화염내부의 녹은 폴리에틸렌으로의 열전달  $Q_2$ 는 증가하게 된다. 따라서 화염 내부의 녹은 폴리에틸렌으로부터 증발에 기여하게 되므로, 결과적으로 화염강도가 상대적으로 커지면서 화염전파율을 증가시키게 된다. Fig. 7(c)에서 확인할 수 있듯이 실제로 모든 경우에서 수직



한 형태의 화염이 전기장이 인가된 방향으로 기울어진 화염보다 화염전파율이 높게 나타났다. 여기서 수직한 형태의 화염 모양은 화염 중앙부와 화염 끝단이 일직선이 되는 순간으로 정의하였다.

### 3.3 교류전압 2kV에서 전선화염의 전파특성

Fig. 10(a)는 교류전압을 2kV로 고정하고, 다양하게 주파수를 변화시켰을 경우 화염전파율의 변화를 나타낸 결과이고, (b)는 획득한 이미지를 통해 화염의 2차원 단면적을 도출한 결과이다. 그리고 (c)는 이때의 화염모양의 변화를 촬영하여 나타낸 결과이다. 본 실험 데이터들에서 알 수 있듯이 교류주파수가 증가함에 따라 전체적으로 화염전파율이 감소하는 경향을 보이거나 간헐적으로 비정상적인 거동을 포함하고 있음을 알 수 있다. 그리고 화염모양의 변화를 촬영하여 나타낸 결과 교류전압 2kV의 경우 전파하는 화염모양의 변화에 따라 2가지 Regime으로 나눌 수 있었다. Regime 1에 해당하는 교류주파수 10~200Hz 구간에서는 1kV의 경우와 동일한 거동의 화염모양의 변화가 나타났지만, Regime 2의 400~1000Hz 구간에서는 전기장이 인가된 방향으로 기울어진 화염이 나타나지 않고, 삼각뿔 모양의 형태로 화염전파 방향 전후로 넓어진 화염의 형태로 전파하는 경향을 보인다. 그리고 Regime 2에서는 상대적으로 화염내부의 녹은 폴리에틸렌의 양이 매우 증가되었다는 것을 알 수 있다. 따라서 Regime 1에서의 화염 모양 변화는 앞선 교류전압 1kV의 경우로 설명이 가능하나 이런 Regime 2에서의 화염모양 변화는 설명이 충분하지 못하므로 Fig. 11에 교류전압 2kV의 Regime 2에서의 온도 균형 메

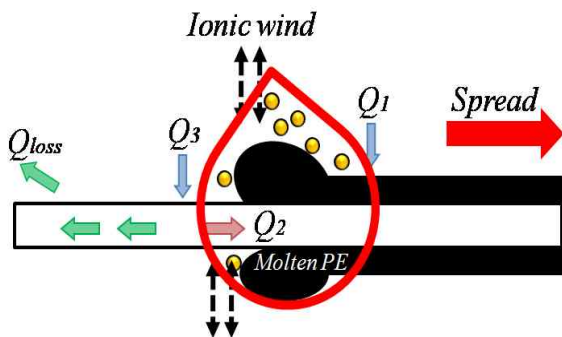
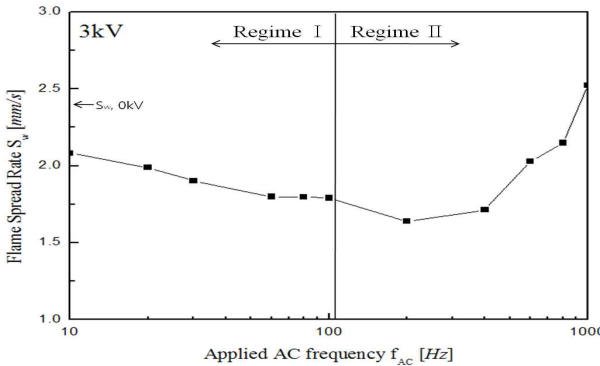


Fig. 11 Schematic of spreading flame for fixed voltage of  $V_{AC} = 2kV$  in Regime 2

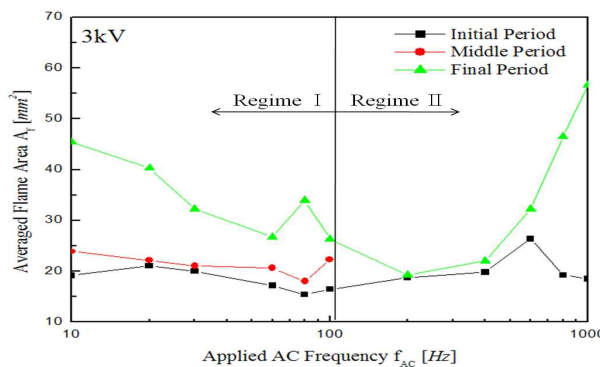
커니즘을 도시하였다. 이전의 연구를 통해 교류전기장이 인가된 피복된 전선의 화염전파에서 400Hz 이상의 높은 교류주파수영역에서 화염내부의 그을음(Soot)의 생성이 전압의 증가에 따라 증가된다는 결과가 도출된 바가 있다.<sup>(5)</sup> 이런 그을음의 증가는 화염내부의 녹은 폴리에틸렌의 양의 증가와 연관되어진다. 즉, 화염내부의 녹은 폴리에틸렌의 증가에 따라 화염의 크기 역시 증가하여야 하지만 더불어 증가된 그을음이 화염 강도를 약하게 만드는 원인이 되어 결국 화염내부에 녹은 폴리에틸렌의 증가에 따라 증발하려고 대기 상태에 있는 연료의 증가와 화염내부의 그을음 증가에 따른 화염 온도 감소에 따라 두 가지 효과가 서로 경쟁하면서 비정상적 거동을 유발하는 것으로 판단된다. Fig. 10(b)와 (c)에서 알 수 있듯이 Regime 1구간에서는 교류전압 1kV와 마찬가지로 수직한 형태의 화염이 전기장이 인가된 방향으로 기울어진 화염보다 화염전파율과 화염단면적이 높게 나타났다. 하지만 Regime 2구간에서는 화염전파율과 화염단면적의 변화가 데이터가 어떤 경향성을 보이지 않았다.

### 3.4 교류전압 3kV에서 전선화염의 전파특성

Fig. 12(a)는 교류전압을 3kV로 고정하고, 다양하게 주파수를 변화시켰을 경우 화염전파율의 변화를 나타낸 결과이고, (b)는 획득한 이미지를 통해 화염의 2차원 단면적을 도출한 결과이다. 그리고 (c)는 이때의 화염모양의 변화를 촬영하여 나타낸 결과이다. 교류전압 3kV의 경우 역시도 화염모양의 변화를 촬영하여 분석한 결과 전파하는 화염모양의 변화에 따라 2가지 Regime으로 나눌 수 있었다. 본 실험 데이터에서 알 수 있듯이 도출된 교류주파수에 따른 화염전파율의 그래프 경향은 이전에 수행된 연구결과와 잘 일치하였다.<sup>(5)</sup> 그리고 교류전압 3kV의 2가지 Regime에서 화염모양 변화는 교류전압 1, 2kV와는 상이하게 나타났다. Regime 1 구간인 10~100Hz 구간에서는 전파 초·중반에는 앞선 결과와 마찬가지로 전기장을 인가한 방향으로 화염이 기울어졌다가 일정거리를 전파하자 수직한 형태의 화염모양으로 변화하였다. 그러나 전파 후반에는 연소되지 않은 피복재 방향으로 기울어져 전파하였다. 이러한 현상은 이전의 연구에서는 언급되지 않은 현상이다. 이러한 원인에 대해서는 이후 논의하도



(a)



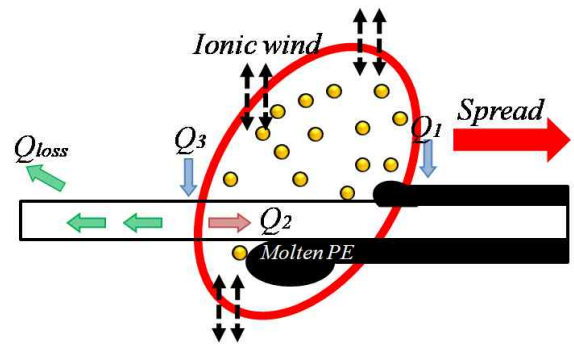
(b)

Regime 1			Regime 2		
10Hz	20Hz	30Hz	60Hz	80Hz	80Hz
1.7:1.82.5	1.68 1.91 2.37	1.67 1.75 2.11	1.55 1.65 2.03	1.46 1.68 2.26	
100Hz	200Hz	400Hz	600Hz	800Hz	
1.5:1.71.9	1.59 1.66	1.68 1.71	1.93 2.06	1.87 1.99	
1000Hz					
1.86 2.68					

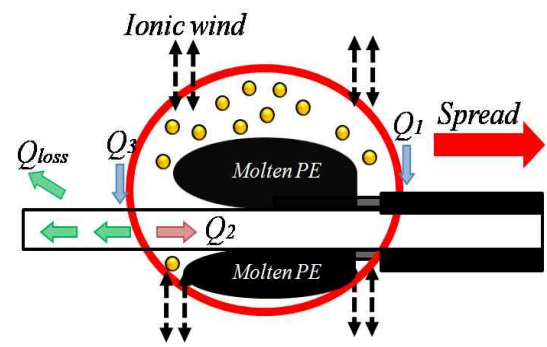
(c)

**Fig. 12** (a) Flame spread rate of wire with applied AC frequency for fixed voltage of  $V_{AC} = 3kV$ . (b) Averaged Flame area of wire with applied AC frequency for fixed voltage of  $V_{AC} = 3kV$ . (c) Instantaneous images and flame spread rate at various frequencies for fixed voltage of  $V_{AC} = 3kV$

록 하겠다. 그리고 Regime 2구간인 200~1000Hz 구간에서는 역시 전파초반에는 전기장을 인가한 방향으로 기울어졌다가 일정거리를 전파하자 화염이 전후로 넓어지며 화염이 급격히 불안정한 거동을 보였다. 이는 이전의 연구결과에서 나타난 교류전압 3kV에서의 400Hz 이상의 고주파수영



(a)



(b)

**Fig. 13** (a) Schematic of spreading flame for fixed voltage of  $V_{AC} = 3kV$  in Regime 1. (b) Schematic of spreading flame for fixed voltage of  $V_{AC} = 3kV$  in Regime 2

역에서 나타난 현상과 유사하다.<sup>(5)</sup> 따라서 각각의 Regime에서의 화염 모양 변화의 특성을 이해하기 위해 우선 Fig. 13에서 교류전압 3kV의 Regime 1과 Regime 2에서의 온도 균형 메커니즘을 나타내었다.

교류전압 3kV의 Regime 1의 경우 화염전파 초반에 전기장을 인가한 방향으로 화염이 기울어졌다가 이후 수직인 형태의 화염이 되는 것은 앞선 교류전압 1kV와 2kV의 Regime 1의 경우로 이해되어진다. 하지만 전파 후반 Fig. 13(a)에 도시된 그림과 같이 화염이 기울어지게 되는 것은 앞선 Fig. 8에서와 같이 전기력선의 방향이 앞쪽으로 기울어지는 것에 기인하며, 또한 전기장의 세기가 전선 끝부분으로 갈수록 비선형적으로 증가하는 것에 기인한다. 이런 화염모양에서는 화염이 연소되지 않은 피복체와의 접촉점의 증가로 인해 열전달  $Q_1$ 이 증가되며, 화염 후면이 내부의 녹은 폴리에틸렌과 더욱 근접해짐에 따라 연소된 전선에 접촉된 열전달  $Q_3$ 가 증가하게 되어 전선을 따



라 연소되지 않은 피복제와 화염 내부의 녹은 폴리에틸렌(Molten PE)으로의 전도 열전달  $Q_2$ 가 증가하게 된다. 이러한 영향으로 인해 연소되지 않은 피복제로 기울어진 화염의 존재는 화염전파율을 증가시키게 되는 원인이 된다. 그리고 Regime 1에서는 교류주파수가 증가함에 따라 화염전파율은 감소하였다. 이러한 현상은 앞서 설명한 교류전압 1kV에서의 경우와 유사하다. 더불어 화염 내부에 생성되는 그을음의 양도 고주파수 구간에 비해 그 양이 상대적으로 적지만 주파수의 증가에 의존하므로 화염전파율을 감소시키는 원인으로 작용하게 된다. 그리고 Fig. 12(c)에서 각각의 화염모양에 따른 화염전파율을 도출해 본 결과 모든 경우에서 전파초반과 중반, 후반의 화염전파율이 순차적으로 증가하는 경향을 나타냈다. 앞선 교류전압 1.2kV에서 길이방향에 따라 전기장의 세기가 증가함에도 불구하고, 화염이 연소되지 않은 피복제 방향으로 기울어지지 않은 이유는 이때의 전압강도가 화염을 연소되지 않은 피복제 방향으로 기울이기에는 충분치 못한 것으로 판단된다. 이것이 사실이라면 화염진행방향에 따라 화염을 기울이는 힘이 작용하는 천이 교류전압을 3kV로 말할 수 있으며, 이것은 앞서 도시한 Fig. 5에서의 교류전압 2kV를 기점으로 화염전파율이 천이되어 증가하는 거동과도 일치한다.

Fig. 13(b)는 교류전압 3kV의 Regime 2에서의 온도 균형 메커니즘을 나타낸 것이다. 앞서 설명하였듯이 피복된 전선의 화염전파에서 400Hz 이상의 높은 교류주파수영역에서 화염내부의 그을음과 녹은 폴리에틸렌의 생성이 매우 증가된다. 이때 교류전압 3kV의 Regime 2에서는 화염내부의 녹은 폴리에틸렌의 증가가 그을음의 증가에 비해 더 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다. 따라서 화염강도가 강해지며, 화염의 크기 역시도 커지게 되어 적분된 열 생성물이 증가하여 화염전파율이 증가하는 것으로 판단된다. 이때의 열전달 특성은 앞선 교류전압 2kV의 Regime 2의 경우와 일치한다.

### 3.5 교류전압 4.5kV에서 전선화염의 전파특성

Fig. 14는 교류전압을 4kV와 5kV로 고정하고, 다양하게 주파수를 변화시켰을 경우 화염전파율의 변화를 나타낸 결과이다. Fig. 12(a)에 도출된 결과처럼 교류전압 4kV의 경우 역시 화염 모양의 변화에 따라 2가지 Regime으로 나눌 수 있었는

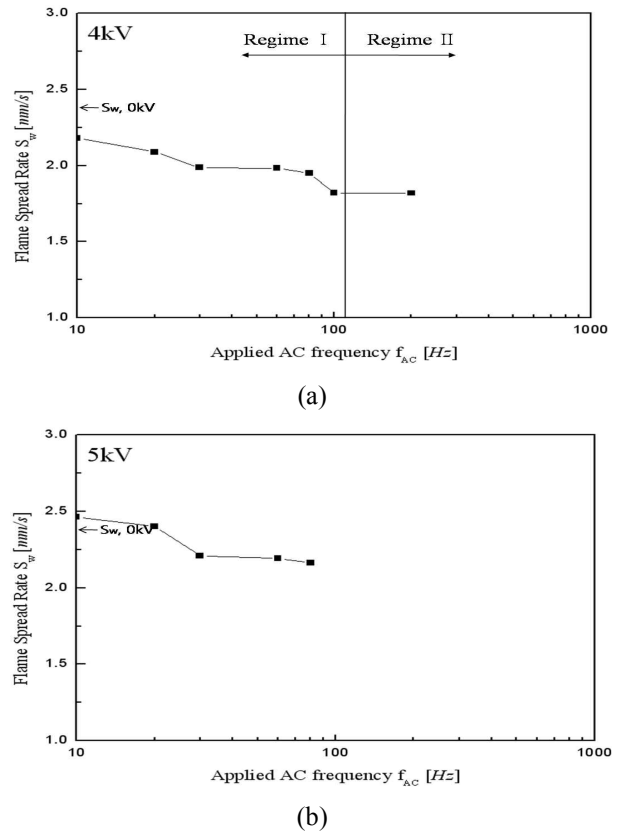


Fig. 14 (a) Flame spread rate of wire with applied AC frequency for fixed voltage of  $V_{AC} = 4kV$ . (b) Flame spread rate of wire with applied AC frequency for fixed voltage of  $V_{AC} = 5kV$

데, 이전의 Fig. 12에서 도출한 교류전압 3kV의 거동과 매우 유사한 거동을 보이는 것을 알 수 있다. 또한 Fig. 14(b)에서 도출된 교류전압 5kV의 경우의 결과 역시도 앞선 교류전압 3kV의 Regime 1, 4kV의 Regime 1과 그 특성이 매우 유사하게 나타났다. 그리고 교류전압 4kV의 200Hz와 교류전압 5kV의 80Hz이후의 교류주파수에서는 화염 내부에 생성되는 녹은 폴리에틸렌의 양이 매우 증가하여 그 무게를 견디지 못하고, 떨어져 버려 소화되거나 화염이 전파하면서 녹은 폴리에틸렌 일부가 떨어지며 전파하는 경향을 보였다. 이러한 영향으로 Fig. 12에 도시된 바와 같이 3kV에서 고주파수 영역에서 화염전파율이 증가하는 특성이 본 구간에서는 나타나지 않았다.

## 4. 결론

교류전기장이 인가된 피복된 전선에서의 화염

전파의 특성에 대한 실험을 교류전압 1~5kV 범위에서 다양하게 주파수를 변화시키면서 수행하였다. 이상의 결과들을 정리하면 다음과 같은 결론들을 얻을 수 있다.

(1) 실험되었던 모든 교류전압에 대해서 다양한 주파수로 변화시켰을 경우 화염전파율을 도출해 낸 결과 교류전압 2kV의 경우 모든 교류주파수에 대하여 화염전파율이 최소값으로 나타나는 것을 알 수 있다. 그리고 교류전압 3kV를 기점으로 화염전파율이 증가하는 경향을 보인다. 이런 화염전파율의 거동은 화염 모양의 변화에 따른 화염전파율의 결과를 도출함으로써 설명이 가능하다.

(2) 화염모양 변화의 원인으로는 교류전압과 주파수 인가에 따른 화염 내부의 녹은 폴리에틸렌과 그을음의 생성, 그리고 전기력선을 따르는 화염내부의 전하수송자와의 교류전압과의 상호작용, 그리고 화염모양에 따른 열전달 특성의 복합적인 관계에 기인한다.

(3) 각각의 화염 모양에 따른 온도 균형 메커니즘으로 전체적인 화염 전파 거동을 잘 묘사할 수 있다.

(4) 교류전기장을 인가한 방향으로 기울어지는 화염의 존재는 화염전파율을 감소시키는 역할을 한다. 이런 현상은 화염전파 초반에 발생하며, 이 때의 전기력선 방향이 전기장을 인가한 방향이므로 기울어져 형성되므로 화염 내부의 전하수송자와 교류전압과의 상호작용에 따른 이온 뿔 현상으로 인해 전기력선 방향으로 기울어지게 된다. 그리고 이런 상호작용의 힘은 교류전압과 주파수의 증가에 따라 증가하게 된다.

(5) 교류전압 3kV 이상의 구간에서는 길이방향에 대하여 전기력선 방향이 앞쪽으로 기울어짐과 동시에 전기장의 세기의 증가에 기인하여 연소되지 않은 피복재 방향으로 화염이 기울어지게 된다. 이러한 화염의 존재는 화염전파율 증가의 원인이 된다. 이런 이유로 전기력선을 따르는 전기장의 세기가 화염내부에 생성되는 녹은 폴리에틸렌의 증가와 결부되어 화염전파율을 증가시키는 것이 교류전압을 3kV로 유추할 수 있으며, 이런 설명은 화염전파율의 거동으로 잘 묘사된다.

(6) 교류전압 4kV와 5kV의 경우 화염전파율과 화염표면적, 그리고 화염모양 변화의 특성 역시 교류전압 3kV의 결과와 동일한 거동을 보이는 것을 알 수 있다. 그리고 특정 교류주파수 영역 이

후에는 화염 내부에 생성되는 녹은 폴리에틸렌의 양이 매우 증가하여 그 무게를 견디지 못하고, 떨어져 버려 소화되거나 화염이 전파하면서 녹은 폴리에틸렌 일부가 떨어지며 전파하게 되어 3kV에서와 같이 고주파수 영역에서 화염전파율이 주파수에 따라 증가하는 특성은 나타나지 않았다.

## 후 기

본 연구는 한국연구재단 중견연구자 핵심기초 연구사업의 연구비를 지원받아 수행되었고 이에 감사를 드립니다.

## 참고문헌

- (1) Kikuchi, M., Fujita, O., Ito, K., Sato, A. and Sakuraya, T., 1998, "Experimental Study on Flame Spread over Wire Insulation in Microgravity," *Proc. Combust. Inst.*, Vol 27, pp. 2507~2514.
- (2) Fujita, O., Nishizawa, K. and Ito, K., 2002, "Effect of Low External Flow on Flame Spread over Polyethylene-insulated Wire in Microgravity," *Proc. Combust. Inst.*, Vol 29, pp. 2545~2552.
- (3) Kido, Y., Fujita, O., Kyono, T., Ito, H. and Nakamura, Y., 2009, "Observations of Wire Ignition Phenomena at Excess Electric Current Application in Reduced Gravity," *22nd ICDERS*.
- (4) Nakamura, Y., Yoshimura, N., Ito, H., Azumaya, K. and Fujita, O., 2009, "Flame Spread over Electric Wire in Sub-atmospheric Pressure," *Proc. Combust. Inst.*, Vol 32, pp. 2559~2566.
- (5) Kim, M. K., Chung, S. H. and Fujita, O., 2009, "Effect of AC Electric Fields on Flame Spread over Electric Wire," *IAC*, A2.4.6.s.
- (6) NASA Handbook 8060.1C "Flammability, Odor, and Offgassing Requirements and Test Procedures for Materials in Environments that Support Combustion"
- (7) Finite Element Method Magnetics 4.2, <http://www.femm.info/wiki/HomePage>
- (8) Nakamura, Y., Yoshimura, N., Matsumura, T., Ito, H. and Fujita, O., 2008, "Opposed-wind Effect on Flame Spread of Electric Wire in Sub-atmospheric Pressure," *JTST*, Vol. 3, pp.

430~441.

- (9) Won, S. H., Ryu, S. K., Kim, M. K., Cha, M. S. and Chung, S. H., 2008, "Effect of Electric Fields on the Propagation Speed of Tribrachial Flames in Coflow Jets," *Combust. Flame*, Vol. 152, pp. 496~506.
- (10) Lawton, J. and Weinberg, F., 1969, "Electrical

Aspects of Combustion," *Clarendon Press*.

- (11) Heber, O., Altestein, N., Ben-Itzhak, I., Diner, A., Rappaport, M., Strasser, D., Toker, Y., Zajfman, D., 2004, "Electrostatic Ion Beam Trap," *Nuclear Science Symposium Conference Record*, Vol. 2, pp. 1110~1113.