

## 폴리에틸렌 피복전선 화염의 전파에 영향을 미치는 직류전기장의 인가 효과에 관한 실험적 연구

진영규\* · 김민국\*\* · 박 정\*† · 정석호\*\* · 윤진한\*\*\* · 길상인\*\*\*

\* 부경대학교 기계공학과, \*\* KAUST CCRC, \*\*\* 한국기계연구원 그린환경에너지기계본부

### Effect of Applied DC Electric Fields in Flame Spread over Polyethylene-Coated Electrical Wire

Young Kyu Jin\*, Min Kuk Kim\*\*, Jeong Park\*†, Suk Ho Chung\*\*, Jin Han Yun\*\*\*, and Sang In Keel\*\*\*

\* Dept. of Mechanical Engineering, Pukyong Nat'l Univ.,

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

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

(Received November 30, 2010 ; Revised December 22, 2010 ; Accepted December 22, 2010)

**Key Words:** DC Electric Field(직류전기장), Polyethylene-Coated Electrical Wire(폴리에틸렌 피복된 전선), Flame Spread Rate(화염전파율), Fuel-Vapor Jet(연료 증발기체 분사)

**초록:** 본 연구는 전선화염의 전파특성에 직류전기장이 미치는 영향에 대한 실험적 연구이다. 화염전파는 0에서  $\pm 7kV$  범위의 음극과 양극의 전기장을 인가하여 실험되어졌다. 본 연구를 통해 앞선 전선화염 전파에 영향을 미치는 교류전기장 효과에 관한 연구결과와 비교하여 관찰된 다양한 화염 모양 변화의 원인을 알아보고, 화염 전파 속도의 가속특성에 대해서도 논의하고자 한다. 직류전기장의 인가가 전선화염에 미치는 영향은 크지 않지만 이온풍 효과에 따른 미미한 영향은 존재하며, 이것은 온도 균형 메커니즘과 연료 증발기체 분사 효과로 설명 될 수 있다.

**Abstract:** We experimentally investigated the effect of applied DC electric fields on the flame spread over polyethylene-coated electrical wire. The flame-spread rates over electrical wire with negative and positive DC electric fields from 0 to  $\pm 7$  kV were measured and analyzed. We compared the results for DC electric fields with previous results for AC electric fields. We explored whether or not various flame shapes could be obtained with DC electric fields and the main reason for the flame-spread acceleration, particularly at the end of the electrical wire, for AC electric fields. We found that DC electric fields do not significantly affect the flame-spread rates. However, the flame shape is mildly altered by the ionic wind effect even for DC electric fields. The flame-spread rate is relevant to the flame shape and the slanted direction in spite of the mild impact. A possible explanation for the flame spread is given by a thermal-balance mechanism and fuel-vapor jet.

### 1. 서 론

우주선에서의 전선 화재는 우주인의 안전과 생존가능성이 직결된 중요한 문제이다. 1967년 아폴로 1호의 발사를 위해 수행된 지상 실험에서 전선 화재에 의해 우주인들이 목숨을 잃은 사건을 시발로 하여, 실제로 국제우주정거장에서 화재가 발생하고 있고, 그 원인은 과도한 전기 누

전으로 발생하는 것으로 알려져 있다. 또한 전기 누전에 의한 전선 화재의 경우 일상생활에서도 빈번하게 발생하고 있는 문제이다. 이러한 인식 하에서 오랜 기간 동안 지상과 우주 환경에서 전선 화재의 기구를 이해하기 위한 노력이 화재안전과 우주 개발 사업의 일환으로 경주되어 왔다.

따라서 화재 발생 시 우주인들에게 해가 없는 가스 소화 약재의 개발을 위한 연구들이 수행되어 왔고, 최근 Fujita 등은 전선의 크기, 전선의 유형, 피복재의 종류, 중력수준, 분위기압력, 외부유동조건 등과 같은 다양한 요인에 대해서 많

† Corresponding Author, jeongpark@pknu.ac.kr

© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

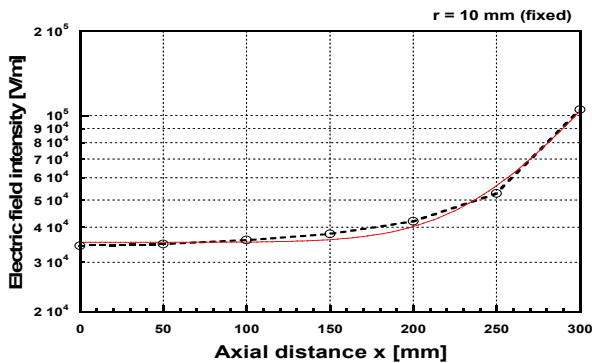


Fig. 1 Electric field intensity of wire according to applied electric field at  $r = 10 \text{ mm}$

유형, 피복제의 종류, 중력수준, 분위기압력, 외부유동조건 등과 같은 다양한 요인에 대해서 많은 연구들이 수행되어 왔다.<sup>(1-5)</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 드물다.

최근 Chung 등은 교류전기장이 인가된 전선에서의 화염전파에 관한 영향과 관련된 연구를 수행하였다.<sup>(6)</sup> 본 연구를 통해 교류전기장의 인가에 따른 전선 화염 전파 거동이 화염 표면적과 상관관계가 있음을 보였으며, 따라서 3차원적 해석이 요구됨을 밝힌 바 있다. 뿐만 아니라 전선 화염의 소화거동 및 교류전기장이 전선화염에 미치는 다양한 효과에 대해 보고하였다. 하지만 직류전기장이 인가된 연소실험은 주로 대항류 확산 화염과 층류 부상화염, 그리고 예혼합 분쇄화염 등에서 행해져 왔으며,<sup>(7-9)</sup> 직류전기장이 인가된 전선화염의 전파특성에 대해 보고된 예는 없다.

본 연구그룹에서는 Fig. 1에 도시된 FEMM 4.2 S/W의 Belasolve를 이용한 수치해석 결과 전선 반경 방향 10 mm에서의 전기장 세기가 전선 끝부분에서 비선형적으로 증가하는 거동이 나타나는 것을 인식하였으며, 이에 따른 화염전파 가속효과와 화염 모양 변화에 대해 논의하였다.<sup>(10)</sup>

따라서 본 연구에서는 이전 연구<sup>(10)</sup>와는 다른 직류 전기장 인가를 통해 교류 전기장의 인가와 상이한 메커니즘에 기인한 화염전파 가속효과와 화염 모양 변화에 대해 논의하고자 하며, 차후 미소중력 조건에서 전기장이 인가된 전선 화염 전파 거동에 대한 연구의 선행적 연구로서 본 연구를 수행하였다.

Table 1 Specifications of each wire

Core material	Nickel-chrome
Thermal conductivity of wire core [ $J/(s \cdot m \cdot K)$ ]	12.57
Core diameter $D_i$ [mm]	0.5
Outer diameter $D_o$ [mm]	0.8
Insulation thickness [mm]	0.15
Insulation material	Polyethylene
Wire length [mm]	420

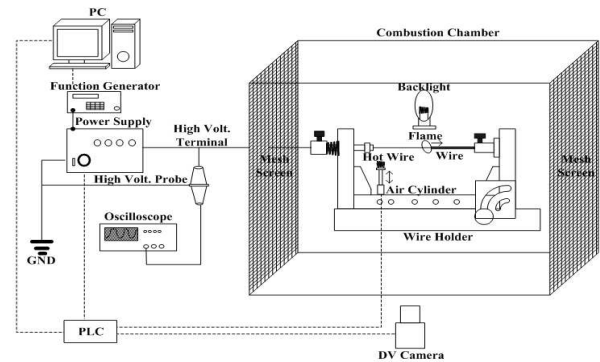


Fig. 2 Schematic diagram of experimental setup

## 2. 실험 방법

Fig. 2는 실험에 사용된 전선점화장치의 개략도이다. 전선화염의 장치는 외부에 교란되는 화염을 제거할 수 있는 구조로 제작되었다. 모든 실험은 비전도성 메쉬스크린(Mesh Screen)을 설치한 연소챔버(Combustion Chamber)에서 수행하여 균일한 외부 공기유입과 기연가스의 외부 유출이 가능하도록 하여 이것에 의한 유동장의 교란이나 국부적인 화염 온도 상승을 배제하였다. 본 실험에 사용된 전선의 규격은 Table 1에 도시하였다. 그리고 전선은 홀더(Holder)에 고정하여 실험을 수행하였고, 홀더의 소재는 전기장의 영향을 배제하기 위해 비전도성의 아세탈 레진(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. 화염 전파 구간은 전선의 150 mm에서 380

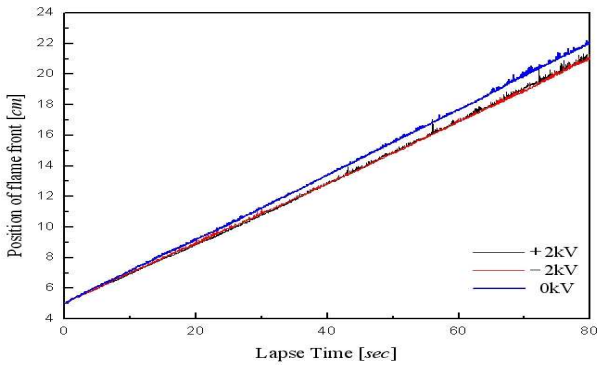


Fig. 3 Position of flame front with lapse time for the fixed voltages( $V_{DC}$ )

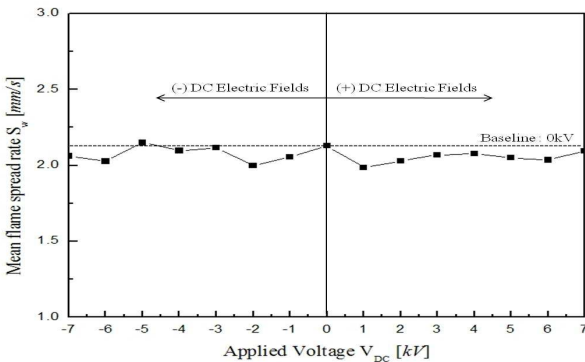


Fig. 4 Mean flame spread rate of wire flame with applied voltages( $V_{DC}$ )

mm까지의 구간으로 고정하였고, 홀더와 스프링에 고정된 부분을 제외한 전선화염의 전파 길이는 230 mm이다. 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 8초 동안 열선점화기로 전기전원을 공급하여 점화한 후 에어실린더를 작동하여 전선으로부터 열선점화기를 분리하였다. 또한 직류전원 공급 장치(Trek, 10/10B-FG)를 작동하여 전선에 직류전압을 인가하였다. 직류전원 공급 장치의 고전압 터미널은 전선의 한쪽 끝부분과 직접적으로 연결되었으며, 다른 터미널은 접지함으로써 개방회로로 간주할 수 있다.<sup>(8)</sup> 그리고 함수발생기(NF, WF1943B)를 이용하여 직류전압을 -7 kV에서 +7 kV까지 변화시켜가며 실험하였다. 인가된 전압은 오실로스코프

(Tektronix, TDS1001B)와 1000:1 고전압 프로브(Tektronix, P6015A)를 사용하여 관찰하였다. 전선 길이(420 mm)는 전선내경(0.5 mm)에 비해 상대적으로 월등히 크기 때문에 인가된 전기장은 전선을 따라 대칭적으로 형성될 것으로 판단된다. 화염전파 거동은 디지털 비디오 카메라(Sony, HDR-SR12)로 촬영하고, Matlab 기반의 S/W를 기반에 둔 이미지 처리(Image Processing) 방법을 이용하여 분석하였고, 이때의 최대 오차범위는  $\pm 0.60$  mm로 나타났다.

### 3. 결과 및 논의

#### 3.1 직류전기장의 인가에 따른 화염전파거동

Fig. 3은 직류전압을 인가했을 경우 시간변화에 따른 화염 위치 변화를 전기장을 인가하지 않았을 경우의 결과와 비교하여 나타낸 결과이다. 여기서  $t = 0$ 가 되는 지점은 화염의 완전발달을 고려하여 화염의 앞부분이 점화구간으로부터 50 mm 전파하였을 경우로 정의하였다. 본 그래프에서 알 수 있듯이 직류전기장의 인가에 따라 시간에 따른 화염위치 변화는 전체적으로 선형적인 증가의 거동을 보이는 것을 알 수 있다. 그리고 양·음극의 직류전기장 인가에 따라 화염 전파속도가 감소하는 것을 알 수 있으며, 이것은 전선 화염의 전파거동에 직류전기장의 인가가 명확한 영향을 미친다는 것을 의미한다.

Fig. 4는 -7 kV에서 +7 kV까지 직류전압을 인가하였을 경우 화염전파율을 나타낸 결과이다. 도시된 결과는 전선끝부분에서 와이어 홀더와의 상호작용에 의한 비정상적인 거동을 고려하여 점화 후 50 mm에서 220 mm까지의 데이터를 분석하였다. 이 때 그래프상의 검은색 점선은 전기장을 인가하지 않았을 경우의 데이터이며 차후 도시될 그래프에서도 동일한 방법으로 표시하도록 하겠다. 도시된 그래프에서 알 수 있듯이 직류전기장의 인가에 따른 화염전파율의 변화는 근소하지만 전기장을 인가하지 않았을 경우와 비교하여 분명한 차이를 나타내는 것을 알 수 있다. 그리고 특징적인 것은 -5 kV의 경우를 제외하고, 모든 경우에서 전기장을 인가하지 않았을 경우보다 화염 전파율이 낮게 나타난 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 이전의 교류전기장에서 전선화염 전파거동의 연구결과<sup>(10)</sup>를 고려해 볼 때 직류전기장의

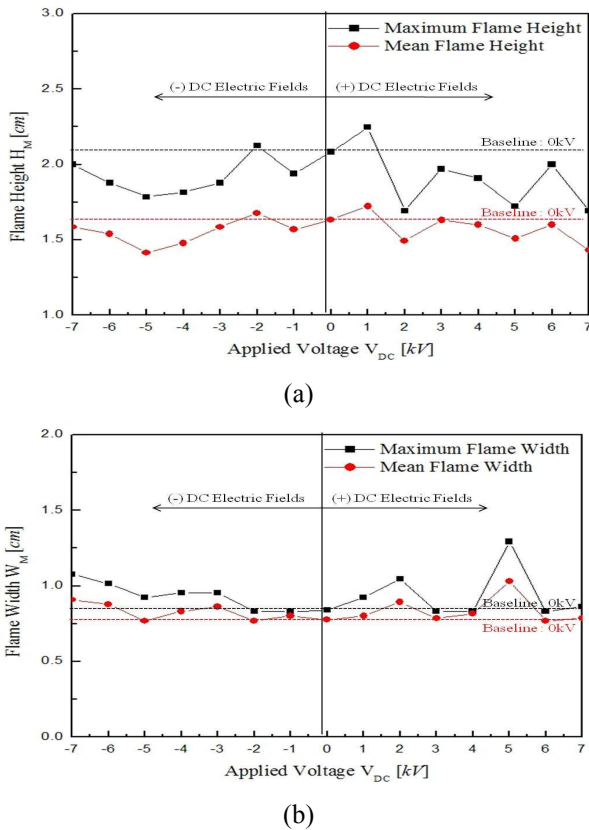


Fig. 5 (a) Mean & Maximum flame height, (b) Mean & Maximum flame width

인가에 따른 화염모양 변화가 원인으로 작용할 것으로 판단되며, 이후 자세히 논의하도록 하겠다. 따라서 전기장을 인가하지 않았을 경우와 직류전기장을 인가하였을 경우의 근소한 화염전파율 차이를 유발하는 원인을 분석하기 위해 우선적으로 Fig. 5에 화염이 전파하는 동안의 높이와 폭의 변화를 평균값과 최대값을 도출하여 나타내었다. 그 결과 전압의 변화에 따른 일정한 경향성을 찾기가 어렵고, 불규칙적인 거동을 포함하고 있지만, 전체적으로 화염의 높이는 전기장을 인가하지 않았을 경우와 비교하여 감소하는 것을 알 수 있으며, 화염의 폭은 증가하는 것을 알 수 있다. 이것은 화염이 직류전기장의 영향에 의해 기울어지는 것에 기인하여 화염높이는 감소하게 되고, 화염 폭은 증가하는 것으로 판단된다. 이때 음극전기장에서 평균 화염높이의 최대변동폭은 2.62 mm이고, 양극전기장일 경우 2.92 mm로 나타났다. 또한 음극전기장에서 평균 화염폭의 최대변동폭은 1.45 mm이고, 양극전기장의 경우 2.62 mm로 나타났다. 이러한 결과는 이전의 연

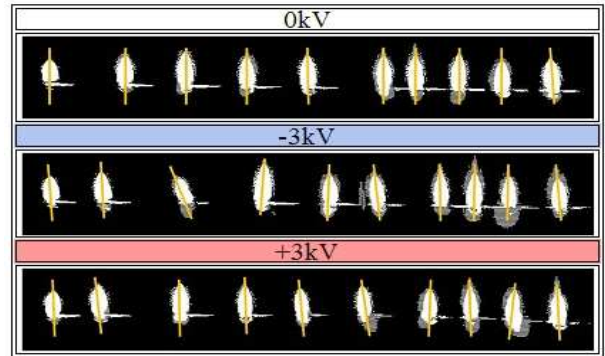


Fig. 6 Binary images of wire flame for fixed voltages( $V_{DC}$ )

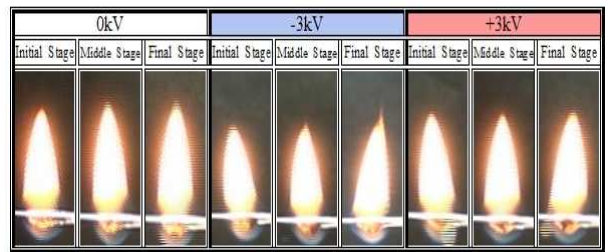


Fig. 7 Instantaneous images of wire flame for fixed voltages( $V_{DC}$ )

구 결과와 상반된 결과였으며, 이러한 원인에 대해서는 이전의 연구<sup>(6)</sup>를 통해 보고된 전선화염에서의 4-8 Hz의 부력에 의한 진동에 기인하여 화염의 높이와 폭이 영향을 받는 것으로 판단되며, 더불어 차후 연료 증발기체 분사(Fuel-vapor jet) 현상으로 상세히 논의하도록 하겠다. 앞서 제시한 바와 같이 미소한 차이기는 하지만 직류전기장이 이전의 교류전기장의 결과와 마찬가지로 화염모양변화를 유발하는 것으로 판단하여 화염 중심축의 변화를 Matlab 기반의 S/W를 이용한 이미지 처리방식으로 도출하여 Fig. 6에 나타내었다. 그 결과 직류전기장을 인가함에 따라 화염중심축이 기울어지는 현상이 나타났으며, 이것은 직류전기장의 인가가 화염 모양 변화에 작지만 분명한 영향을 미친다는 것을 알 수 있다. 이러한 화염 모양변화를 보다 명확히 관찰하기 위해 Fig. 7에 후방조명(Backlight)을 이용하여 전파동안의 화염이미지를 획득하여 나타내었다. 그 결과 전파초반 화염이 전기장이 인가된 방향으로 기울어졌다가 순차적으로 변화하며 전파 후반 미연측 피복체 방향으로도 기울어지는 화염이 존재하는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 화염 모양변화



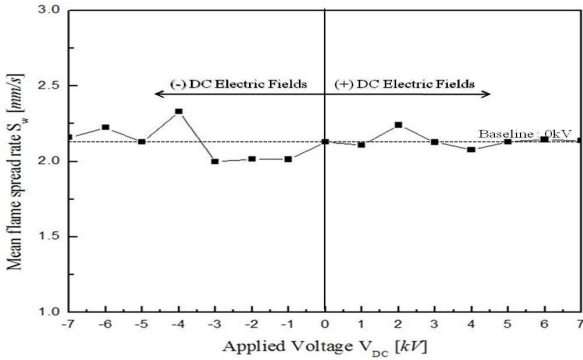
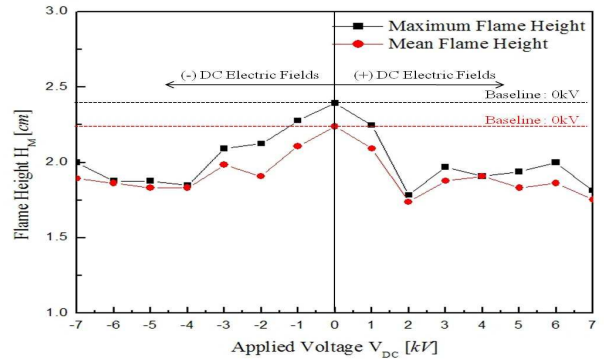


Fig. 8 Mean flame spread rate of wire flame with applied voltages( $V_{DC}$ )

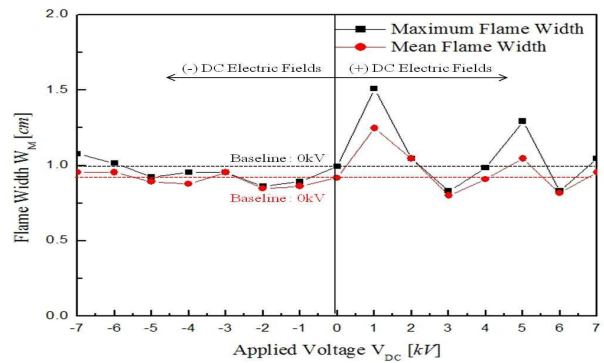
는 이전의 교류전기장의 인가에 따른 전선화염내부의 이온 덩(ion trap) 현상에 따른 모양변화에서도 나타난 현상이다.<sup>(10)</sup> 하지만 이전의 교류전기장에서의 결과와 같이 전압과 주파수에 따른 일정한 경향성을 찾기는 어려웠으며, 전압과 주파수의 증가에 따른 화염 내부의 녹은 폴리에틸렌과 매연의 급격한 증가의 거동 역시 나타나지 않았다. 또한 직류전기장을 인가한 경우 전파 초·중·후반에서 Fig. 7에 도시된 화염의 모양을 지속적으로 유지하며 전파하지는 않았으며, 대체로 전파 초·중반에는 전기장이 인가된 방향으로 기울어진 화염과 수직한 형태의 화염이 혼재되어 나타났다. 이러한 화염 모양 변화의 메커니즘은 교류전기장과는 다를 것으로 판단된다. 또한 전파 후반 미연측 피복재 방향으로 기울어지는 화염의 경우 전기장을 인가하지 않았을 때는 나타나지 않는 현상이며, 이것은 직류전기장 인가 효과에 의한 현상으로 판단된다.

앞선 Fig. 1에 도시된 그래프를 통해 알 수 있듯이 전선 끝부분에서 전기장 세기가 비선형적으로 증가하는 거동이 나타난 것을 알 수 있다. 또한 전파 후반 미연측 피복재 방향으로 기울어지는 화염이 관찰되는 것으로 미루어 보아 전선 끝부분에서 직류전기장 효과가 더욱 확실하게 나타날 것으로 기대되어 점화 후 200 mm에서 220 mm구간의 데이터에 대해 분석을 실시하였다.

Fig. 8은 점화 후 200 mm에서 220 mm구간에서 -7 kV에서 +7 kV까지 직류전압을 인가하였을 경우 화염전파율을 나타낸 결과이다. 도시된 그래프에서 알 수 있듯이 이전의 50 mm에서 220 mm의 구간에서의 결과와는 다르게 -4 kV 이하구간과 +2 kV와 +5 kV 이상구간에서 화염전파율이



(a)



(b)

Fig. 9 (a) Mean & Maximum flame height, (b) Mean & Maximum flame width

전기장을 인가하지 않았을 경우와 비교하여 증가되는 거동이 나타나는 것을 알 수 있다. 이것은 직류전기장의 인가에 따라 미연측 피복재 방향으로 기울어지는 화염의 존재로 인해 화염전파율이 가속될 수 있음을 의미한다. 또한 Fig. 9의 (a)와 (b)에 200 mm에서 220 mm구간에서의 화염 높이와 폭의 변화를 평균값과 최대값을 나타내었다. Fig. 9(a)에 도시된 그래프에서 알 수 있듯이 전선 끝부분에서 전기장을 인가하지 않은 경우와 비교하여 전압에 대한 전체적인 경향성은 불규칙적이거나 확연히 화염높이가 감소되는 경향이 나타나는 것을 알 수 있다. 이것은 미연측 피복재 방향으로 기울어지는 화염의 존재가 화염높이를 감소시키는 결과로 판단되며, 이 때, 음극전기장에서 평균 화염높이의 최대변동폭은 2.77 mm였으며, 양극전기장의 경우 3.54 mm로 나타났다. 하지만 이러한 경향은 앞선 50 mm에서 220 mm구간의 결과와 마찬가지로 이전의 연구결과<sup>(9)</sup>와는 상반된 결과였다. 그리고 200 mm에서 220 mm구간의 경우 50 mm에서 220 mm구간의 결과와 비

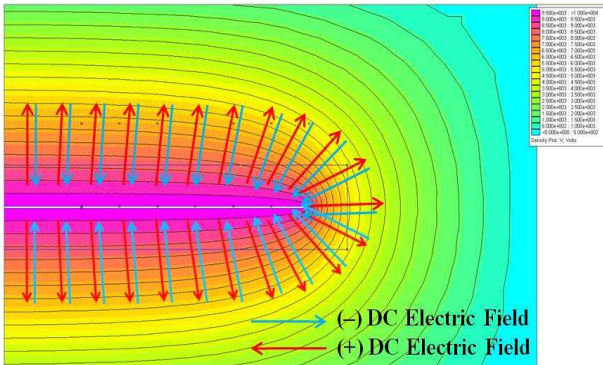


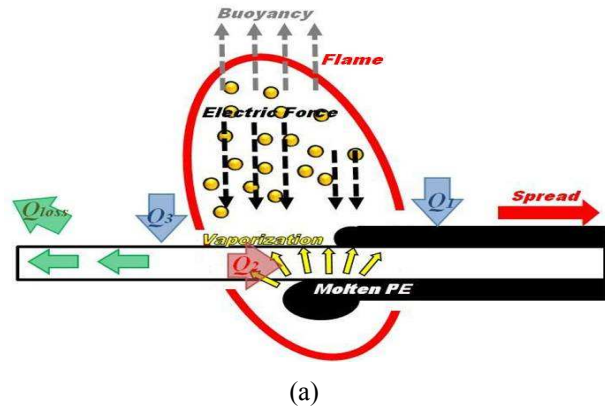
Fig. 10 Contour of numerical analysis of wire for applied DC voltage

교하여 전기장을 인가하지 않았을 경우의 화염 높이의 평균값과 최대값이 모두 증가된 것을 알 수 있다. 이것은 전선화염이 전파하는 동안 화염에 의해 지속적으로 니크롬 도선에 열이 축적되어, 전파가 진행되는 동안 화염 앞부분의 미연층 피복제, 즉 폴리에틸렌이 예열되는 효과로 인해, 화염 내부로 공급되는 녹은 폴리에틸렌의 온도가 증가되어 화염강도의 강화에 따른 화염온도 증가로 인해 전파 후반 부력의 영향이 더 크게 작용하게 되는 것에 기인하는 현상으로 판단된다.

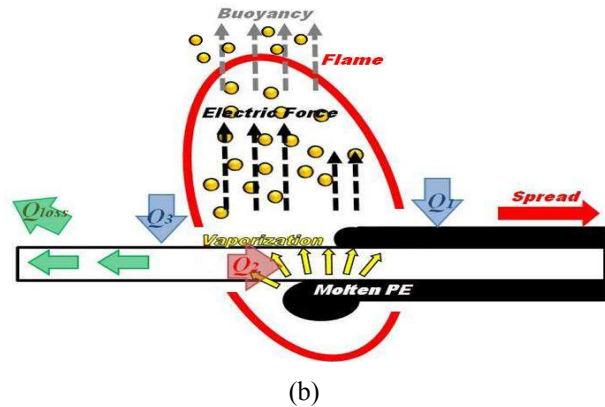
Fig. 9(b)에 도시된 그래프에서 알 수 있듯이 200 mm에서 220 mm구간에서의 화염 폭의 평균값과 최대값의 변화는 특징적인 경향을 찾기는 어려웠다. 이 때, 평균 화염폭의 최대변동폭은 음극전기장의 경우 1.08 mm였으며, 양극전기장의 경우는 4.46 mm로 나타났는데, 양극전기장의 최대변동폭을 50 mm에서 220 mm구간의 결과와 비교해보면 전선 끝부분에서 전기장 세기의 증가에 따라 화염 폭의 변화 역시도 더 큰 영향을 받을 수 있다는 것을 내포하고 있는 것으로 판단된다. 하지만 전반적인 전선화염에서의 화염 높이와 폭의 변화 거동은 불규칙적인 거동을 포함하고 있었고, 앞에서 언급하였듯이 연료 증발기체 분사현상으로 차후 상세히 설명하도록 하겠다.

3.2 직류전기장의 인가에 따른 이온풍 효과

Fig. 6과 7에서 알 수 있듯이 직류전기장의 인가에 따라 화염 모양 변화가 유발되는 것을 알 수 있다. 이러한 화염 모양 변화는 화염전파율의 거동에 영향을 미치는 것을 알 수 있었고, 그 원인을 분석하기 위해 Fig. 10에 FEMM 4.2 S/W의 Belasolve를 이용하여 화염이 존재하지 않을 경우



(a)



(b)

Fig. 11 Schematic of spreading flame for fixed (a) negative DC voltages, (b) positive DC voltages

피복된 전선 주변에 형성된 전기장을 도식화하여 나타내었다. 표시된 화살표는 직류전기장의 극성에 따라 형성된 등전위선에 수직한 방향으로 작용하는 전기력선을 나타낸 것이다. 본 실험은 개방회로로 간주할 수 있기 때문에 전류는 흐르지 않으며, 전선내의 전압강하 역시 존재하지 않는다. 따라서 전류 흐름에 의한 자기장은 형성되지 않으며, 오로지 전기장에 의한 효과만 존재한다고 할 수 있다.

이전의 연구를 통해 화염의 반응영역에서 전기장의 영향을 받는 충분한 전하수송자(Charge Carriers)가 존재한다고 보고된 바가 있다.<sup>(11)</sup> Weinberg 등은 매연 입자의 형성 및 부착 그리고 크기변화가 부가 전기장에 영향을 받음을 보여 입자대전 메커니즘을 설명하였다.<sup>(12)</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

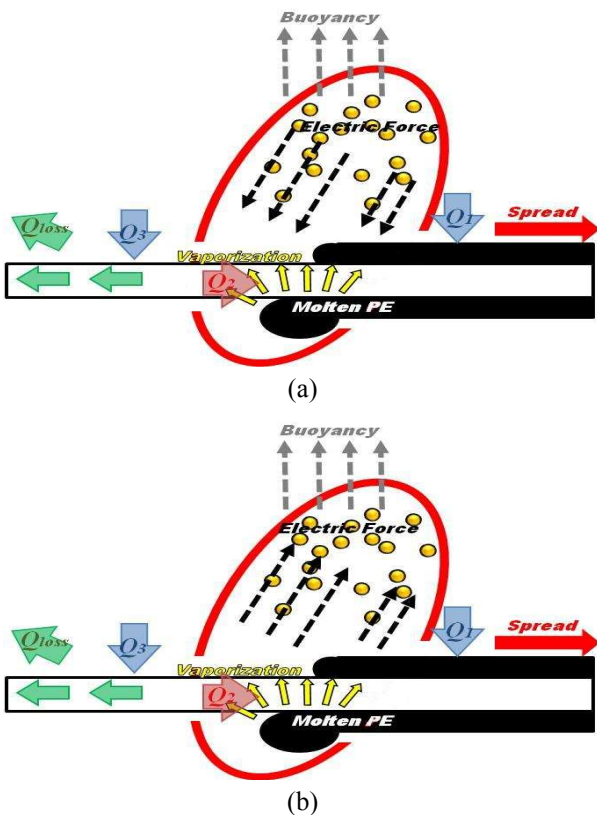


Fig. 12 Schematic of spreading flame for fixed (a) negative DC voltages, (b) positive DC voltages

(Bulk Flow)이 생성되는 이온풍 효과에 대해서도 보고된 바가 있다.<sup>(11)</sup> 또한 Heinsohn 등은 프로판 대향류 확산화염에서 전기장에 의한 화학 반응의 변화에 대해 보고하였다.<sup>(13)</sup> 본 실험의 경우 이온풍 효과가 화염 모양 변화의 주된 원인으로 작용한 것으로 판단된다.

따라서 Fig. 11의 (a), (b) 그리고 Fig. 12의 (a), (b)에 음극전기장과 양극전기장이 인가된 경우의 화염 모양 변화를 Nakamura 등이 제안한 온도 균형 메커니즘(Thermal Balance Mechanism)과 함께 나타내었다.<sup>(14)</sup> 본 직류전기장의 경우 교류전기장에서 나타나는 이온 뒹 현상<sup>(10)</sup>은 존재하지 않는다. 또한 Weinberg 등의 연구에 의하면 매연입자(Soot Particle)는 양입자로 대전된다고 보고하고 있다.<sup>(15)</sup> 그리고 Kono 등은 전기장의 세기가 강해짐에 따라 탄소입자의 이동거리와 평균속도가 증가하는 것에 대해 보고하였다.<sup>(7)</sup>

따라서 Fig. 11(a), (b)에 도시된 결과와 같이 직류전기장을 인가한 경우 양입자로 대전된 매연입자들이 형성된 전기력선의 방향에 따라 영향을

받게 된다. 이때 극성에 따라 매연입자들이 영향을 받게 되는 방향은 정반대로 작용하게 된다. 전선화염의 경우 미연측 피복제와 기연측 전선 사이의 소멸거리(Quenching Distance)의 차이가 발생하는데, 이러한 소멸거리의 차이에 기인한 예지화염(Edge Flame)의 거리 차이가 발생하게 되고, 타지 않은 폴리에틸렌에 비해 상대적으로 타버린 전선 쪽의 전기장 세기(Electric Field Intensity)가 더 강하므로 이러한 반경방향의 전기장 세기 구배 효과가 화염 내부에 존재하는 매연입자들의 이동속도의 구배를 야기하게 되어 전파 초반 화염이 전기장을 인가한 방향으로 기울어지는 것으로 판단된다. 하지만 이전의 연구결과<sup>(10)</sup>에서와 같이 이온 뒹 현상이 없으므로 수직인 형태의 화염과 기울어진 화염이 혼재되어 나타나는 것으로 판단된다.

이렇듯 Fig. 11(a), (b)에서 나타난 화염처럼 전기장이 인가된 방향으로 기울어지게 되면, 미연측(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 되며, 앞서 도시된 Fig. 4에 나타난 결과를 통해 알 수 있다.

또한 도시된 Fig. 10에서 알 수 있듯이 전선 끝부분으로 갈수록 전기력선의 방향이 기울어지는 것에 기인하여 길이방향의 전기장 세기의 구배 효과에 의해 Fig. 12(a), (b)에 도시되었듯이 전파 후반 타지 않은 피복제 방향으로 화염이 기울어지는 것으로 판단된다. 그리고 또한 앞선 Fig. 11(a), (b)와 마찬가지로 극성에 따라 매연입자들이 영향을 받게 되는 방향은 정반대로 작용하게 된다. 이렇듯 Fig 12(a), (b)에 도시된 것과 같이 전파후반 화염이 연소되지 않은 피복제 방향으로 기울어지게 되면, 화염이 연소되지 않은 피복제와의 접촉점의 증가로 인해 열전달  $Q_1$ 이 증가되며, 화염 후면이 내부의 녹은 폴리에틸렌과 더욱





Fig. 13 Instantaneous images of wire flame for fixed exposure

근접해짐에 따라 연소된 전선에 접촉된 열전달  $Q_3$ 가 증가하게 되어 전선을 따라 연소되지 않은 피복제와 화염 내부의 녹은 폴리에틸렌으로의 전도 열전달  $Q_2$ 가 증가하게 된다. 이러한 영향으로 인해 연소되지 않은 피복제로 기울어진 화염의 존재는 화염전파율을 증가시키게 되는 원인이 되며, 앞서 도시된 Fig. 8에 나타난 결과를 통해 알 수 있다.

하지만 이전의 연구결과<sup>(10)</sup>에서와 같은 이온 락

현상이 존재하지 않기 때문에 전파 초·중반에는 전기장이 인가된 방향으로 기울어지는 화염과 수직한 형태의 화염이 전반적으로 혼재되어 나타나는 거동을 나타내게 되며, 이러한 수직한 형태의 화염의 경우 반경방향의 전기장 세기 구배효과에 의한 기울어짐 모드와 길이방향의 전기장 세기 구배 효과에 의한 기울어짐 모드가 상쇄되어 나타나는 현상으로 판단된다. 하지만 Bradley<sup>(16)</sup>는 매연입자가 온도에 따라 양과 음입자의 두 경우로 대전이 가능하다고 보고된 바가 있으며, 이러한 이온풍 효과 역시 더 많은 연구가 필요하다고 판단된다.

### 3.3 전선화염에서 연료 증발기체 분사 현상

이전의 미소중력 하의 고압조건에서 액적배열(Droplet Array)의 연소실험을 통해 액적 표면의 온도구배로 인해 발생된 표면장력(Surface Tension)의 불균형에 의해 유발된 연료 증발기체 분사(Fuel-vapor jet)현상이 보고된 바가 있다.<sup>(17)</sup> 전선화염의 경우 화염 내부의 액상의 녹은 폴리에틸렌을 연료로 볼 수 있으며, 전선화염이 전파하는 동안 화염 아랫부분에서 나타나는 현상이 이러한 연료 증발기체 분사현상과 유사하다고 판단되어 슬리렌 장치를 이용하여 초고속카메라를 통해 1000  $\mu s$ 의 노출시간으로 이미지를 획득한 결과를 Fig. 13에 나타내었다. 도시된 그래프에서 알 수 있듯이 화염내부의 녹은 폴리에틸렌에서 연료 증발 기체가 분사되는 현상이 나타나는 것을 알 수 있다. 이러한 연료 증발기체 분사현상은 화염이 일정시간 동안 전파하고 난 뒤 나타났으며, 전기장을 인가하지 않았을 경우, 그리고 직류와 교류에서 모두 나타났다. 또한 전압과 전기장의 극성, 주파수에 관계없이 전선화염에 있어서 전반적으로 나타나는 현상임을 알 수 있다. 이런 연료 증발기체 분사 방향은 주로 화염의 뒷부분 즉, 전파방향과는 반대방향에서 가장 빈번하게 나타났지만 대부분 불규칙적으로 나타나는 것을 알 수 있었다. 그리고 화염내부에서 생성되는 이러한 연료 증발기체 제트는 화염의 폭과 높이에 분명한 영향을 주고 있으며, 앞서 도시된 Fig. 5와 9에서의 불규칙적인 화염 높이와 폭의 변화와 이전의 음극전기장에서 더 큰 변화양상을 보였던 연구결과와 상반되는 결과로 도출된 이유는 전선화염의 경우 이러한 연료 증발기체 분사



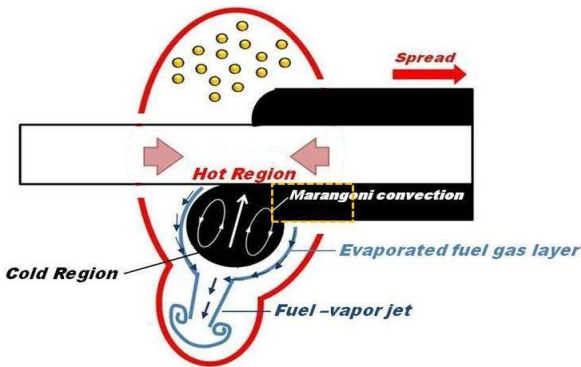


Fig. 5 Schematic of flame by fuel-vapor jet

현상을 포함하고 있기 때문으로 판단된다. 이러한 전선화염에서의 연료 증발기체 분사의 원인을 분석하기 위해 Fig. 14에 화염 내부의 녹은 폴리에틸렌을 확대한 화염 모양을 도식화하여 나타내었다. 전선화염이 전파하는 동안 화염 내부의 녹은 폴리에틸렌은 중력의 영향으로 인해 전선 아랫부분에 매달린 형태로 전파하게 된다. 이 때 니크롬 전선은 화염에 의해 지속적으로 열이 축적되고, 더불어 화염에서 부력에 의해 열이 위쪽으로 빠져나가는 것에 기인하여 상대적으로 화염 내부의 녹은 폴리에틸렌의 윗부분과 아랫부분에서 온도 구배가 발생하게 된다. 이로 인해 화염 내부의 녹은 폴리에틸렌 표면의 뜨거운 영역(Hot Region)과 차가운 영역(Cold Region)사이의 표면장력(Surface Tension)의 불균형이 발생하게 되어 녹은 폴리에틸렌 내부에 마랑고니 대류(Marangoni Convection)가 발생하게 된다. 이때 노란색 점선 상자의 부분에서는 액상과 고상이 동시에 존재할 것으로 판단되며, 이에 따라 마랑고니 대류는 녹은 폴리에틸렌 내부에서 조금 치우친 방향으로 발생할 것으로 판단된다. 그리하여 녹은 폴리에틸렌의 표면이 뜨거운 영역에서 차가운 영역으로 움직이게 되면, 녹은 폴리에틸렌 표면의 전단모션(Shear Motion)에 의해 연료 증발기체 유동이 갈라지게 되고, 이 유동은 뜨거운 영역의 반대편의 한 점에서 만나게 된다. 이후 녹은 폴리에틸렌 표면을 떠나게 되고, 이것은 연료 증발기체 분사로 나타나게 된다. 교류전압 3 kV의 400 Hz에서 이전의 연구<sup>(6)</sup>를 통해 보고되었듯이 화염 내부의 녹은 폴리에틸렌의 양이 급증할 경우 화염 위쪽 방향으로 분사되는 현상도 관찰되었다. 이렇듯 연료 증발기체 분사는 화염 내부의 녹은 폴리에틸렌의 형상과 상태에 큰 연관성

을 지니게 되며, 더불어 화염 내부의 녹은 폴리에틸렌에 공급되는 열에 큰 영향을 받는 것으로 판단된다. 이에 전선화염의 경우 화염내부의 녹은 폴리에틸렌의 형상과 공급되는 열이 일정하지 않으므로 연료 증발기체 분사의 방향성은 불규칙적으로 나타나는 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 폴리에틸렌으로 피복된 전선화염의 전파에 직류전기장이 미치는 영향에 대한 실험을 -7 kV에서 7 kV 직류전압 범위에서 변화시켜가며 실험을 수행하였다. 이로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 직류전기장의 인가에 따라 화염의 모양변화가 유발되며, 이러한 화염 모양변화는 전기력선 방향을 따르는 이온풍 효과를 통한 반경방향과 길이방향의 전기장 세기 구배효과에 기인된 기울어짐 모드로 설명할 수 있다.

(2) 화염전파율은 직류전기장을 인가함에 따라 전기장을 인가하지 않은 경우와 비교하여 감소하였는데, 이것은 전기장을 인가한 방향으로 기울어진 화염이 존재하기 때문이며, 타지 않은 피복체로 기울어지는 화염의 존재로 인해 화염전파율이 가속될 수 있다.

(3) 전선화염의 전파동안 화염 높이와 화염 폭의 변화는 화염 모양의 변화에 의존하여 변화하였으나 불규칙적인 경향으로 나타났다. 그리고 이전의 연구결과와 상이한 거동으로 나타났는데, 그 이유는 전선화염 내부에서 발생하는 연료 증발기체 분사 현상에 기인하는 것으로 판단되며, 이러한 연료 증발기체 분사현상은 전기장의 인가와 관계없이 전선화염에서 발생하는 특징적인 현상으로 판단된다.

#### 후 기

본 연구는 2010년 에너지자원기술개발사업 국세공동연구사업의 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) Onishi, Y., Fujita, O., Agata, K., Takeuchi, H., Nakamura, Y., Ito, H. and Kikuchi, M., 2010, "Observation of Flame Spreading over Electric Wire under Reduced Gravity Condition Given by Parabolic Flight and Drop Tower Experiments," *Trans. JSASS Space Tech. Japan*.
- (6) Kim, M. K., Chung, S. H. and Fujita, O., 2010, "Effect of AC electric fields on flame spread over electrical wire," *Proc. Combust. Inst.*, Article in press.
- (7) Kono, M., Inuma, K. and Kumagai, S., 1981, "The Effect of DC to 10 MHz Electric Field on Flame Luminosity and Carbon Formation," *Proc. Combust. Inst.*, Vol 18, pp. 1167~1174.
- (8) 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.
- (9) Kim, H. H., Kim, M. K. and Chung, S. H., 2010, "Effect of DC Electric Fields on the Stabilization of Premixed Bunsen Flame," *KOSCO Symposium*, Vol 40, pp. 53~59.
- (10) Jin, Y. K., Kim, M. K., Park, J., Chung, S. H., Kwon, O. B. and Bae, D. S., 2010, "Experimental Study on the Characteristics of Flame Spread in Polyethylene-insulated Electric-Wire with AC Electric Fields," *KOSCO Symposium*, Vol 40, pp. 25~37.
- (11) Lawton, J. and Weinberg, F., 1969, "Electrical Aspects of Combustion," *Clarendon Press*.
- (12) Place, E. R. and Weinberg, F. J., "Electrical Control of Flame Carbon" *Proc. Roy. Soc.(London)*, Vol. A289, pp. 192~205.
- (13) Heinsohn, R. J., Wulfhorst, D. E. and Becker, P. M., 1967, "The Effects of an Electric Field on an Opposed-jet Diffusion Flame," *Combust. Flame*, Vol 11, pp. 288~296.
- (14) Nakamura, Y., Yoshimura, N., Matsumura, T., Ito, H., Fujita, O., 2008, "Opposed-wind Effect on Flame Spread of Electric Wire in Sub-atmospheric Pressure," *JTST*, Vol 3, pp. 430~441.
- (15) Mayo, P. J., Weinberg, F. J., "On the Size, Charge, and Number-Rate of Formation of Carbon Particles in Flames Subjected to Electric Fields" *Proc. Roy. Soc.(London)*, Vol. A319, pp. 351~371.
- (16) Bradley, D., *The Effect of Electric Fields on Combustion Processes*, Edited by F. J. Weinberg, Chap. 6 of *Advanced Combustion Methods*, Academic Press.
- (17) Kobayashi, H., Park, J., Iwahashi, T. and Niioka, T., 2002, "Microgravity Experiments on Flame Spread Of n-Decane Droplet Array in a High-Pressure Environment," *Proc. Combust. Inst.*, Vol 29, pp. 2603~2610.