

AC 전기장이 인가된 구리 전선을 통해 전파하는 화염에 대해 피복재의 두께에 따른 화염 거동에 대한 실험적 연구

강민성* · 유춘상* · 박 정** · 정석호*** · 권오봉***†

*울산과학기술원 기계공학과

**부경대학교 기계공학과

***CCRC, KAUST

Effects of Insulation Thickness on Flame Spread over Electrical Copper Wire with Applied AC Electric Fields

Min Sung Kang*, Chun Sang Yoo*, Jeong Park**, Suk Ho Chung*** and Oh Boong Kwon***†

*Department of Mechanical Engineering, Ulsan National Institute of Science and Technology

**Department of Mechanical Engineering, Pukyong National University

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

(Received 11 November 2020, Received in revised form 24 November 2020, Accepted 24 November 2020)

ABSTRACT

Effects of insulation thickness on flame spread over electrical copper wires with applied AC electric fields were experimentally investigated. The AC voltage and frequency varied in ranges of 0-5 kV and 10-1000 Hz, respectively. A one electrode configuration was used such that the electric potential was applied to one wire end and thus the infinite ambience could be a ground. The results showed that the flame shape and the tilting direction were significantly influenced by applied voltage and frequency. The flame spread rate decreased in an increase of insulation thickness as well as varied sensitively with applied voltage and frequency. Additionally, the molten polyethylene (PE) experienced various dynamic behaviors such as dripping of molten PE, electrospray, di-electro-phoresis, and rotation of molten PE, essentially affecting the flame spread rate. These complicated phenomena were systematically analyzed and discussed.

Key Words : Electric field, Electrospray, Di-electrophoresis, Dripping of molten PE

1. 서 론

화재의 원인 중 하나인 전선화재는 전선의 합선, 누전, 과부하 등 다양한 원인에 의해 발생하며 경제 발전과 더불어 전기에너지 사용이 지속적으로 증가함에 따라 전기 사용량에 비례하여 피해 규모 또한 증가하는 추세이다. 특히 지상에서의 화재 뿐만 아니라 우주에서의 화재는 전선화재가 주요 원인으로 지목되고 있다. 우주선에서의 화재는 한번의 화재로 인해 미션에 투자된 천문학적 비용과 시간

의 손실로 이어지고 우주연구에 투입된 우주비행사의 안전에 치명적인 영향을 줄 수 있다. 이와 같은 다양한 이유로 인해 전선 화재에 대한 연구들이 실제로 진행되고 있으며 이에 대한 주요 선행연구들은 피복재의 물성치, 중력 조건, 주변 유동 및 압력과 가스 조성 등 화재 상황에서 화염 전파에 영향을 줄 수 있는 요소들에 대한 연구가 진행되고 있으며[1-8] 이와같은 연구를 기반으로 화재 안전 코드를 수립하였다[9].

하지만, 실제 전선화재의 대부분은 전선의 단락으로 이어지고 인위적으로 전기를 차단하지 않는 이상 단일 전극 상태로 전선 주변에 전기장을 형성하게 된다. 이러한 상황에서 화염 내 반응대 에서 입자들은 대전되어 로렌츠(Lorentz) 힘을 받아 bulk 유동을 만들게 되고 액화된 피복재 또한 액적 상태로 전기장의 영향을 받을 수 있다. 이는

†Corresponding Author, obkwon@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.

전선위의 화염 거동을 충분히 변화시킬 수 있는 요소이지만 이 부분에 관한 연구는 아직 매우 부족한 상황이다. 현재 전기장이 인가된 선형연구는 NiCr 도선에서 기울어진 각도와 피복재의 직경에 따른 화염거동, 전선 다발을 모사한 쌍둥이 전선에서의 화염거동에 대한 연구와 Cu 도선에서 전기장이 인가된 상황에서의 화염 거동을 연구한 바 있다[10-15]. 실제 사용되고 있는 전선은 대부분 Cu, Al, 등 다양한 합금 소재가 사용되고 있으며 그중 전기 전도도가 우수한 Cu도선에 대한 연구가 매우 부족한 상황이다. 또한, 최대허용전류에 따라 요구되는 피복재의 양이 바뀐다는 점에서 전기장이 인가된 Cu 도선에서 피복재 두께에 따라 나타나는 화염거동에 관한 연구는 전선 화재 예방에 필요한 연구이다. 따라서 본 연구는 교류 전기장이 인가된 상황에서 구리 전선을 통해 전파하는 화염에 대해 피복재의 두께에 따른 화염의 전파 거동을 연구하고자 한다.

2. 실험 방법

Fig. 1은 본 실험의 개략도이다. 실험에는 전선을 고정하는 와이어홀더(Wire holder), 교류 전압을 인가할 함수 발생기(Function generator)와 증폭기(Amplifier)가 사용되었고 비디오 카메라를 통해 데이터를 수집하였다. 또한 챔버는 전기장의 영향을 받지 않는 아세탈 수지(Acetal resin)로 제작되었고 에어실린더(Air cylinder) 끝에 고정된 점화기를 통한 전기장 교란을 방지하기 위해 PLC(Programmalbe Logic Controller) 회로를 이용해 점화 후 제거되었다. 실험에 사용된 전선은 Cu 전선에 폴리에틸렌(Polyethylene)으로 피복된 0.8, 1.1, 1.5 mm 전선을 사용하였고, 화염에 의한 열팽창으로 전선이 느슨해지는 것을 방지하기 위해 양끝단을 고정할 때 한쪽 끝은 스프링을 이용해 전선이 변형하는 것을 방지하였다. 교류 전압은 함수 발생기에서 발생하여 증폭기를 통해 고전압 터미널로부터 전선에 인가되며 단일 전극 상태를 만들기 위해 반대 쪽은 인가되지 않은 상태로 두고, 오실로스코프를 통해 실

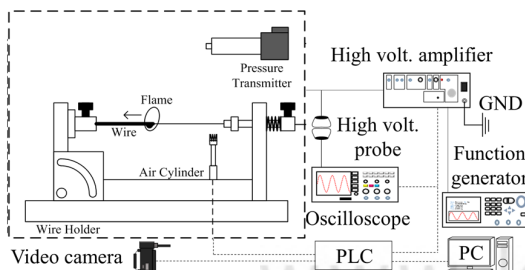


Fig. 1. Schematic of experimental setup.

제 인가된 값을 측정하였다.

전선에 인가되는 교류 전압(V_{AC})은 RMS값으로 0-5 kV 이고, 주파수는 10-1000 Hz까지 다양한 조건으로 인가되었다. 실험에 사용된 전선의 길이는 350 mm 이고 와이어 홀더 사이의 간격은 213 mm 이며 점화 후 화염 전이구간과 와이어 홀더에 의해 교란이 일어나는 구간을 제외한 90 mm가 분석되었다. 이는 Matlab 기반의 Image processing 을 이용하였다.

3. 결과

3.1 전반적 화염 특징

Fig. 2는 피복재를 포함한 전선의 직경 0.8, 1.1, 1.5 mm 인 전선에 전압 5 kV, 주파수 60, 100, 200, 800 Hz를 각각 인가하였을 때 전반적인 화염의 형상을 나타낸 그림이다. 동일한 주파수 조건에 대해 전선의 직경이 커짐에 따라 연료로 사용되는 피복재(Polyethylene)의 양이 많아지면서 전반적 화염의 크기 또한 커지는 것을 확인할 수 있다. 또한 0.8 mm를 제외한 1.1, 1.5 mm 전선에서는 모든 구간에서 dripping 현상이 나타났으며, 마찬가지로 직경이 커짐에 따라 dripping의 빈도수가 높아지는 것을 확인하였다. 인가되는 주파수가 60 Hz에서 800 Hz로 증가할 때 화염의 전반적인 크기가 작아짐과 동시에 화염이 burnt side 측으로 기울어지는 것을 확인할 수 있었으며, 주파수가 200 Hz로 증가하면서 화염의 전반적인 크기가 증가하고 녹은 피복재의 주변으로 화염의 파동(Fluctuation)이 강해지는 것을 확인할 수 있다. 마지막으로 인가된 주파수가 800 Hz 일 때 0.8 mm 전선에서는 화염이 소화되었고 1.1, 1.5 mm 전선에서는 화염대 앞뒤로 vortex가 생기는 현상을 관찰

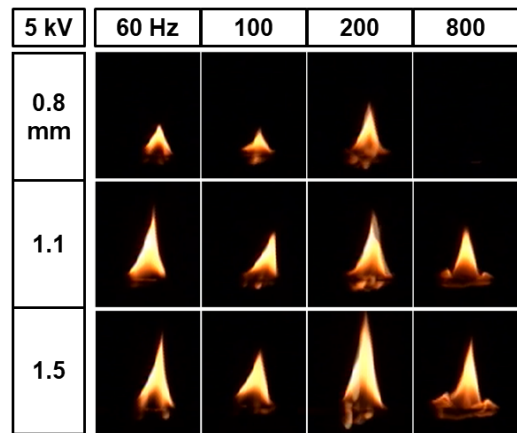


Fig. 2. Overall feature of AC electric fields induced flame with various wire diameter at $V_{AC} = 5$ kV.

할 수 있다. 이 현상은 선행연구를 통해 자기장의 영향에 의해 발생하는 것으로 확인된 바 있었고, 이에 대한 자세한 내용은 추후 설명하겠다.

Fig. 3 (a)는 전선의 두께가 각각 0.8, 1.1, 1.5 mm, 인가된 전압이 5 kV일 때 여러 주파수에 따라 전선 위를 전파하는 화염의 선단 위치를 시간에 따라 나타낸 그래프이다. 점화 후 화염의 선이 구간을 제외한 70 mm를 기준으로 시간을 측정하였으며, 반대 측 와이어홀로부터 발생하는 전기장 교란 영역을 제외한 160 mm 까지 측정하였다. 화염 선단의 위치는 미연측(unburned side) 전선 상단부와 화염이 만나는 지점으로 정의하였고 이는 Matlab code 기반의 image processing을 이용하여 구하였다. 위 그래프를 통해 화염 선단의 위치가 비교적 선형적으로 전파하는 것을 확인할 수 있었으며 이를 기반으로 선형회기(Linear regression)으로 구해진 화염선단 위치의 기울기인 dX/dt 를 화염 전파속도로 정의하였다. 또한, 피복재의 두께가 두꺼워짐에 따라 화염 전파속도가 낮아지는 것을 확인할 수 있었으며 (b)를 통해 $V_{AC} = 5$ kV, $D_{out} = 1.1$ mm 경우 인가된 주파수가 60 Hz에서 800 Hz로 증가시킴에 따라 화염 전파속도가 빨라지는 것을 알 수 있었고, 이를 통해 인가된 교류 전기장의 조건에 따라 화염 전파속도에 영향을 끼치는 것을

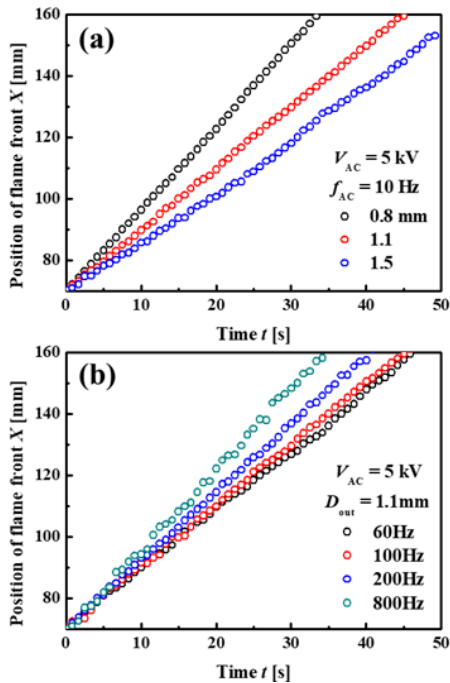


Fig. 3. Position of flame front over time for difference of outer diameter at $V_{AC} = 5$ kV, $f_{AC} = 10$ Hz (a); various frequency at $V_{AC} = 5$ kV, $D_{out} = 1.1$ mm (b).

확인할 수 있다.

3.2 화염 전파속도

Fig. 4는 사용된 전선 피복재 두께에 따라 인가된 교류 전기장에 따른 화염 전파속도를 알아보기 위해 각 전압에 따라 교류 주파수를 따라 나타낸 그래프이다. (a) ~ (c) 그래프를 통해 인가된 전압(V_{AC})가 커짐에 따라 비교적 낮은 주파수 영역(10 Hz ~ 100 Hz)에서는 화염 전파속도가 낮아지는 것을 볼 수 있으며 고주파수 영역(100 Hz ~ 1000 Hz)에서는 화염 전파속도에 비교적 큰 영향을 주는 것을 확인할 수 있다. 전기장이 인가되지 않은 경우(base line) 화염 전파속도($S_{w,0}$)는 점선으로 표시하였다. 전반적인 화염 전파속도는 전기장이 인가된 NiCr 전선을 이용한 선행

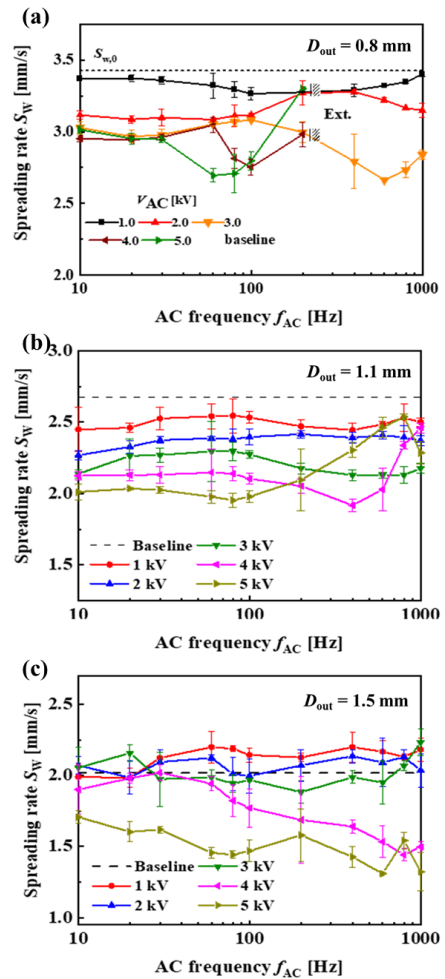


Fig. 4. Flame spread rate for applied AC frequency and voltage at each diameter (a) 0.8 mm, (b) 1.1 mm, (c) 1.5 mm.

연구[14]와 비교해 보았을 때 비교적 복잡 선단을 갖는 것을 확인할 수 있다. 이는 Cu 전선을 이용한 전기장 인가 효과를 밝힌 연구에서 언급한 바와 같이 열 전도율의 차이로 인해 Cu 전선에서의 화염이 NiCr 전선을 통해 거동하는 화염보다 더 큰 화염 구조를 가지고 화염 내부 이온들이 전기장에 의한 반응이 더욱 활발하게 발생하면서 나타나는 현상으로 볼 수 있다. 또한, Fig. 4의 (a) ~ (c) 그래프들을 비교해 보았을 때 전선 피복재의 양이 증가함에 따라 화염 전파속도와 소화 영역이 감소하는 것을 확인할 수 있으며 각 전압에서 주파수에 따라 화염 전파속도가 큰 변화가 없거나 증가 또는 감소하는 선도를 그리는 것을 알 수 있다.

Fig. 4(a) $D_{out} = 0.8$ mm에서 $V_{AC} = 1(2, 3)$ kV인 경우 각각 $f_{AC} < 800(200, 30)$ Hz에서 주파수가 로그스케일로 증가함에 따라 화염 전파속도는 크게 변하지 않는 것을 볼 수 있고, 이후 주파수 $800(200, 30)$ Hz $< f_{AC} < 1000(600, 100)$ Hz 구간에서 화염 전파속도가 증가하고 이후 $V_{AC} = 2(3)$ kV 경우 $600(100)$ Hz $< f_{AC} < 1000(800)$ Hz에서 화염 전파속도가 감소하였으며 $V_{AC} = 3$ kV, 800 Hz $< f_{AC} < 1000$ Hz 구간에서 화염 전파속도가 증가하였다. 또한, $V_{AC} = 4$ kV, $f_{AC} < 60$ Hz에서 화염 전파속도는 증가하였고, $V_{AC} = 4(5)$ kV, $60(10)$ Hz $< f_{AC} < 100(80)$ Hz 영역에서 화염 전파속도가 감소하였으며 이후 $100(80)$ Hz $< f_{AC} < 200(200)$ Hz 영역에서 다시 증가한 후 화염 소화가 나타났다. Fig. 4(b) $D_{out} = 1.1$ mm인 경우 $V_{AC} = 1 \sim 5$ kV가 인가되었을 때 각각 $f_{AC} < 1000, 1000, 100, 80, 30$ Hz 구간에서는 전파속도의 변화가 거의 없거나 미세하게 증가하였고 $V_{AC} = 3(4, 5)$ kV가 인가되었을 때 주파수가 증가함에 따라 $100(80, 30)$ Hz $< f_{AC} < 800(600, 100)$ Hz 영역에서 화염 전파속도가 감소하였으며 이후 $f_{AC} = 1000(1000, 1000)$ Hz 구간까지 다시 증가하는 것을 볼 수 있다. Fig. 4(c)의 경우 (a), (b)와는 다르게 $V_{AC} = 1 \sim 3$ kV인 경우 주파수가 로그스케일로 증가함에 따른 화염 전파속도의 거동이 매우 복잡하게 나타나며 $V_{AC} = 4(5)$ kV에서는 $f_{AC} < 800(600)$ Hz 구간에서 화염 전파속도가 감소하고 이후 증가하는 것을 확인할 수 있다.

3.3 전기장에 의한 현상

Fig. 5는 Fig. 4에서 나타난 화염 전파속도 경향을 분석하기 위해 전기장이 인가된 상황에서 전선을 타고 전파하는 동안 나타나는 현상들을 기반으로 분류한 그래프이다. 본 실험에서 전선의 직경 $D_{out} = 0.8$ mm인 경우를 제외하고 모두 Fig. 6(a)과 같은 dripping 현상이 나타났으며 피복재의 양이 더 많은 1.5 mm 전선에서 dripping의 빈도가 더 많이 관찰되었다. 이 현상은 화재 안전의 관점에서 전선을 통한 화재 뿐만 아니라 주변으로 2차 피해를 유발할 수 있

는 요소로 중요하게 다루어야 할 부분이며, dripping이 화염 전파속도에 미치는 영향과, 전기장이 dripping 현상에 끼치는 영향들은 추후 연구를 통해 자세히 밝힐 예정이다.

그래프에 나타난 Regime I은 전기장에 의해 화염이 전선위를 거동하는 동안 큰 변화가 없는 구간으로 $D_{out} = 1.5$ mm 구간에서는 나타나지 않았고 이는 Fig. 4에서 화염 전파속도가 거의 변하지 않는 구간에 속한다. Regime II는 Di-electrophoresis 현상이 나타나는 구간으로 선행연구에서 밝혀진 바 있다[14]. 이 현상은 Fig. 6(b)에서 보이는 바와 같이 기연측과 미연측에서 발생하는 전기장의 세기 차이에 의해 전기장이 강한 쪽으로 힘이 생긴다고 알려져 있으며 이 구간에서는 화염에 의해 녹은 폴리에틸렌이 기

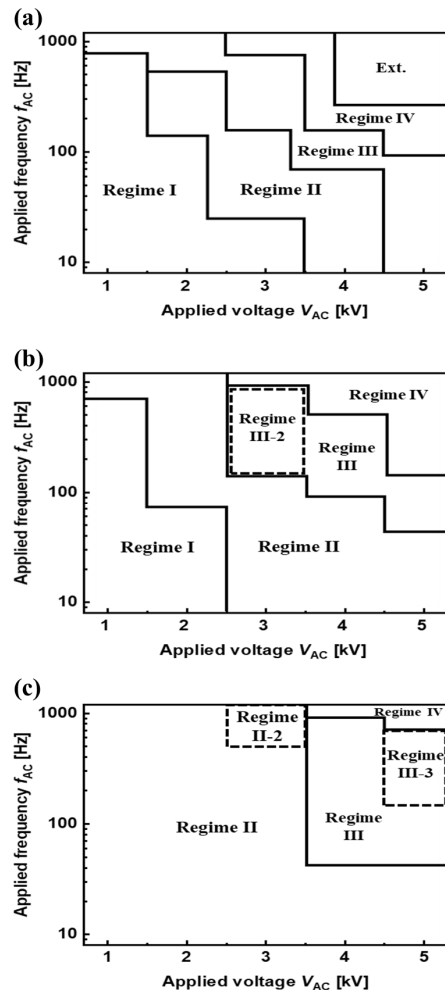


Fig. 5. Regime diagram for applied AC frequency and voltage at each diameter (a) 0.8 mm, (b) 1.1 mm, (c) 1.5 mm.

연측으로 이동하는 현상을 관찰할 수 있고 Fig. 4에서 화염 전파속도가 증가하는 구간에 속한다. 또한, 직경이 커짐과 동시에 인가된 전기장 조건 내 Regime II가 차지하는 범위가 넓어지는 것을 확인할 수 있으며 이는 앞서 말한 기연측과 미연측의 전기장 세기에 의해 나타나는 특징이라고 볼 수 있다. Table 1은 $V_{AC} = 3\text{ kV}$ 일 때 전선 직경에 따른 기연측과 미연측의 전기장 세기 차이를 나타낸 표이며 이는 FEMM-v4.2를 이용해 구하였다[13]. 이를 통해 피복재의 직경이 커짐에 따라 일정한 전기장의 세기를 갖는 미연측에 비해 기연측의 전기장의 세기가 약해지고 그로 인해 미연측과 전기장 강도의 차이 또한 커지는 것을 확인할 수 있다. 전기장 세기의 차이에 비례해 유도되는 di-electrophoresis에 의한 힘이 증가하면서 직경이 클 때 비교적 낮은 전압과 주파수 영역에서도 Regime II가 나타나

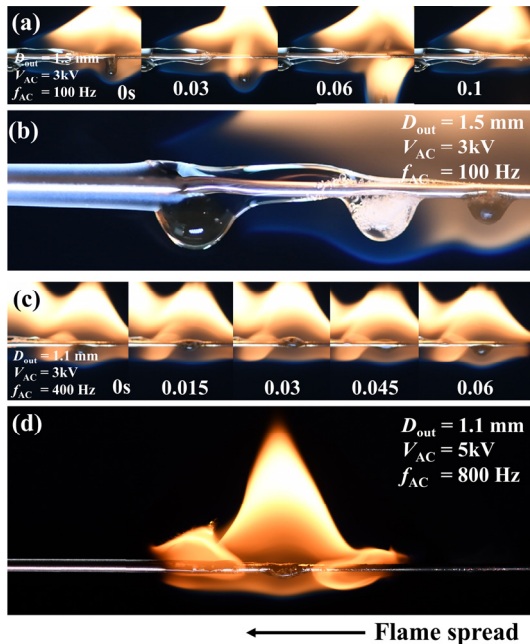


Fig. 6. The phenomenon shown in experiment (a) dripping, (b) di-electrophoresis, (c) rotation of droplet, (d) edge vortex.

Table 1. Electric fields difference between core side and insulated side against each diameter at $V_{AC} = 3\text{ kV}$

Diameter [mm]	$E_{core} - E_{insulated}$ [kV/cm]
0.8	0.63
1.1	0.94
1.5	1.14

는 것으로 볼 수 있다. Regime II-2에서는 Fig. 6(c)을 통해 볼 수 있듯이 Di-electrophoresis 현상과 함께 전선을 통해 전파하는 화염이 도선을 중심으로 회전하면서 전파하는 구간이다. 이 구간 또한 마찬가지로 녹은 폴리에틸렌이 맺힌 부분의 전선 단면을 보았을 때 중력에 의해 아래로 쏠린 녹은 폴리에틸렌을 관통해 나오는 전기장의 세기에 비해 녹은 폴리에틸렌이 닿지 않은 위쪽 부분을 통해 나오는 전기장의 세기가 강하므로 중력 방향의 반대 방향으로 힘이 유도되면서 나타나는 현상으로 볼 수 있다. 이 현상을 통해 녹은 폴리에틸렌이 화염에 의해 heating된 도선의 윗 부분과 효과적인 열 교환을 통해 원활한 기화를 할 수 있고, 화염전파속도가 증가하는데 기여할 수 있다. Regime III는 마찬가지로 선행연구를 통해 밝혀진 바 있는 현상으로 기연측에 녹은 폴리에틸렌이 필름의 형태로 덮혀있는 구간이다. 이 구간은 electrophoresis 현상에 의해 화염 내부의 soot 입자들이 녹은 폴리에틸렌으로 축적되고 그로 인해 어두워진다. 이를 통해 녹은 폴리에틸렌이 화염으로부터 시간당 더 많은 복사에너지를 받아 높은 온도를 갖게 되어 낮아진 표면장력에 의해 film 형태로 나타나는 di-electrophoresis 현상으로 볼 수 있으며 앞서 설명과 함께 직경이 커짐에 따라 대부분의 구간이 Regime II, III에 포함되는 것을 확인할 수 있으며 Fig. 4에서 화염 전파속도가 낮아지는 구간에 속한다. Regime III-2는 Regime II-2와 동일하게 도선을 축으로 녹은 폴리에틸렌이 회전하는 구간이며 Regime III-3은 dripping의 빈도가 증가하는 구간이다. 이 구간을 제외한 Regime III의 화염전파속도는 인가된 주파수가 증가함에 따라 감소하는 경향을 보이지만 Fig. 4에서 일부 III-3 구간 화염 전파속도가 증가하는 것을 볼 수 있는데 이는 dripping에 의해 화염 내부에 기화를 시켜야 할 녹은 폴리에틸렌의 열용량이 줄어들어 효과적인 기화를 할 수 있기 때문이다. 하지만 dripping이 발생하는 원인은 매우 다양하며, 화염 전파에 상당히 복잡한 영향을 미치기 때문에 추후 연구를 통해 자세히 밝히 예정이다. Regime IV는 electrospray 현상과 Fig. 6(d)에서 볼 수 있는 edge vortex 현상이 나타나는 구간이다. 선행연구에서 나타난 현상과 마찬가지로 화염의 형상이 복잡해지며 Fig. 2 $D_{out} = 1.5\text{ mm}$, 800 Hz에서 보이는 바와 같이 화염 양 끝단에 와류가 생긴다. 이는 전기장에 의한 화염 내부 이온들의 움직임으로 유도된 자기장의 효과로 알려져 있다. 이 구간에서는 Fig. 4에서 화염 전파속도가 증가하는 구간에 나타났으며 직경이 커짐에 따라 Regime IV가 차지하는 영역이 줄어드는 것을 알 수 있다. 이는 직경의 증가로 전기장 세기의 차이를 고려하는 Regime II가 확장되는 것과 반대로 electrospray와 edge vortex 현상은 전기장

의 세기가 관여하게 되며 이는 피복재의 두께와 반비례한 관계를 가지므로 Regime IV에서 나타나는 현상이 줄어드는 것을 확인 할 수 있다.

3.4 열균형 메커니즘

전선 화염에 있어 화염 전파속도를 설명하는데 온도균형 메커니즘은 중요한 역할을 한다. Fig. 7은 온도균형 메커니즘을 설명하기 위한 개략도이며 이로부터 폴리에틸렌이 충분한 기화를 하기 위해 Q1과 Q3가 중요한 역할을 하게 된다. 특히 구리 전선같은 경우 열전도 계수가 매우 높은 금속으로 선행연구에서 사용된 니켈-크롬 도선보다 약 20배 이상 높은 것으로 알려져 있다. 이와 같은 경우 도선을 통한 열전달량이 니켈크롬 도선에 비해 매우 높으며 이를 통해 동일한 두께의 전선에서 전반적인 화염 전파속도가 구리전선인 경우 더 빠르다는 것을 설명할 수 있다. 또한, 앞서 설명한 Fig. 5에서 regime II의 경우 di-electrophoresis에 의해 기연측의 길이가 길어짐에 따라 Q3의 양이 증가하므로 전파속도가 빨라지게 된다. Regime III의 경우 di-electrophoresis에 의해 기연측으로 녹은 폴리에틸렌으로 얇은 층을 이루게 되는데 이는 전반적인 열용량을 키울 뿐만 아니라 도선을 통한 열전달 Q3을 방해하는 요소로 작용해 전파속도를 낮추게 된다. Regime IV에서 edge vortex, electrospray 현상으로 인해 전반적 화염의 너비가 넓어지고 이로부터 Q1과 Q3의 양 또한 많아져 화염 전파가 빨라진다. 그러나 열균형 뿐만 아니라 dripping, electrospray, di-electrophoresis와 같은 질량의 유동, regime III 기연측에서 발생하는 기화 형태, 등 다양한 요소들을 동시에 고려해야 하며 이는 향후 더 많은 연구를 통해 해결해야할 문제로 남아 있다.

또한 구리 도선에서 측정된 전류는 0.01 ~ 0.17 mA 이며 이에 해당하는 Joule 열에 의한 영향은 전체 열 전달 양의 약 3%정도로 무시할 수 있다.

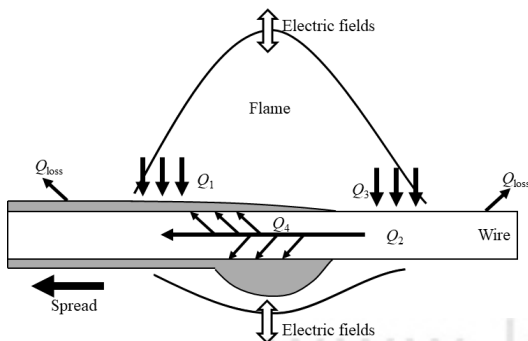


Fig. 7. Schematic of thermal balance mechanism.

4. 결론

교류전기장이 인가된 구리 전선을 통해 전파하는 화염에 대해 피복재 두께의 영향에 관한 연구가 수행되었고 결과는 다음과 같다.

- 1) 교류전기장이 인가된 전선을 통해 전파하는 화염은 피복재의 두께가 두꺼워짐에 따라 전반적인 화염 전파속도는 감소하였으며, $D_{out} = 1.5 \text{ mm}$ 인 경우 화염 전파속도가 전기장이 인가되지 않은 경우보다 더 빨라지는 구간이 존재한다.
- 2) $D_{out} = 0.8 \text{ mm}$ 를 제외한 모든 구간에서 dripping 현상이 나타났으며 화염전파속도가 증가 또는 감소하는 영역과 그 영역에서 관찰된 현상들을 분류할 수 있었다.
- 3) 기연측과 미연측에서 발생하는 전기장 세기의 차이와, 화염 내부 녹은 폴리에틸렌 근처의 전기장 세기에 의해 전선의 직경이 커짐에 따라 regime II, III가 넓어지고 regime I, IV가 좁아진다. 온도균형 메커니즘을 통해 각 현상들이 화염 전파속도의 증감에 직접적인 열전달과 도선을 통한 간접적인 열전달에 어떤 영향을 주는지 알 수 있었고 좀 더 정확한 분석을 위해 피복재의 기화 형태와 같은 정보들을 추가적으로 고려해야 할 필요가 있다.

후 기

이 논문은 부경대학교 자율창의기술연구비(2019년)에 의하여 연구되었음.

References

- [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 subatmospheric 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] 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. Fijita, S.H. Chung, Flame spread over electrical wire with AC electric fields: Internal circulation, fuel vapor-jet, spread rate acceleration, and molten insulator dripping, Combust. 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] Finite Element Method Magnetics v-4.2, <http://www.femm.info/wiki/HomePage>.
- [14] S.H. Park, S.J. Lim, M.S. Cha, S.H. Chung, J. Park, Effect of AC electric field on flame spread in electrical wire: Variation in polyethylene insulation thickness and di-electrophoresis phenomenon, Combust. Flame, 202 (2019) 107-118.
- [15] S.H. Park, M.S. Kang, M.S. Cha, S.H. Chung, J. Park, Flame spread over twin electrical wires with applied DC electric fields, Combust. Flame, 210 (2019) 350-359.

저자정보

강민성

UNIST 석사과정이며, 관심분야는 전기장이 인가된 전선 화염이다.



유춘상

UNIST 기계공학과 교수이며, 관심분야는 수치해석을 이용한 층/난류 화염 해석이다.



박 정

부경대학교 기계공학과 교수이며, 관심분야는 층류화염 및 화염 안정성 해석이다.



정석호

KAUST CCRC의 명예교수이며, 관심분야는 층류화염 및 화염 안정성 해석이다.



권오봉

부경대학교 기계공학과 교수이며, 관심분야는 유체공학 및 열 전달이다.

