

[Research Paper]

## 배터리화재를 모사한 이온화 메탄의 연소특성 및 모델링

고혁주 · 이의주<sup>\*†</sup>

부경대학교 안전공학과 대학원생, \*부경대학교 안전공학과 교수

## Combustion Characteristics and the Modeling of Ionized Methane for Battery Fires

Hyuk-Ju Ko · Eui-Ju Lee<sup>\*†</sup>

Graduate Student, Dept. of Safety Engineering, Pukyong National Univ.,

<sup>\*</sup>Professor, Dept. of Safety Engineering, Pukyong National Univ.

(Received December 24, 2018; Revised January 28, 2019; Accepted February 7, 2019)

### 요 약

리튬이온 배터리와 같은 충전식 배터리는 에너지의 저장장치로서 최근의 에너지 이용의 변화에 따라 크게 주목받고 있을 뿐 아니라 실제로 다양한 소형 전기기기 및 전기 자동차의 전기에너지 저장시스템으로 폭넓게 적용되고 있다. 하지만 리튬이온 배터리는 화재나 폭발 등의 위험성이 항상 존재하여 사용의 폭을 제한시키고 있다. 배터리화재가 일반적인 화재와의 다른 특성은 여러 가지가 있지만 그 중에 가연물질이 전해질에서 이온화 되어있다는 특성이 있다. 본 연구에서는 배터리 화재를 이해하기 위해서 양이온과 전자 등으로 이온화된 메탄 제트화염에서의 연소특성을 실험적으로 관찰하였다. 화염 형상 및 화염안전성은 현재의 실험조건에서는 연료 이온화 효과가 없었고, 제트화염 후류에서 측정된 CO와 NO<sub>x</sub>의 농도가 이온화연료에서 모두 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 이온화 메탄 연소 특성의 파라미터 연구를 위하여 수치해석의 반응기구를 수소첨가의 형태로 단순화하여 이온화연료의 연소특성을 모사할 수 있는지에 대한 모델링 검토를 수행하였다. 연료 이온화의 영향으로 수소의 농도는 증가시키면 반응 후 온도는 일정함을 가정하여 모델링하면 실험결과와 일치하는 결과를 얻을 수 있었다.

### ABSTRACT

Rechargeable battery such as lithium-ion battery has been noticed as a kinds of the energy storage system in the recent energy utilization and widely used actually in various small electronic equipment and electric vehicles. However, many thermal runaway caused battery accidents occurred recently, which still is obstacle for advanced application of lithium ion battery. One of the main differences to general fires is the existence of ionized electrolyte with electron during combustion. Therefore, we simply simulated the ion addition effects of battery fires by introducing an ionized fuel in jet diffusion flames. When the ionized methane through a corona discharge was used as fuel, the overall flame stability and shape such as flame length showed no significant difference from normal methane flame, but NO<sub>x</sub> and CO emissions measured at the post flame region decreased. The ion addition effect of methane oxidation was also numerically simulated with the modeling of hydrogen addition in the mixture. It was confirmed that the hydrogen addition at a fixed temperature had a similar effects on ionization of methane and hence could be modeled successfully.

**Keywords** : Battery fire, Ionization, Methane jet flames, NO<sub>x</sub>, Carbon monoxide

### 1. 서 론

오랜 기간 동안 가정의 난방이나 산업과 수송기관의 동력원으로서 화석연료를 사용해왔다. 하지만 화석연료 중심

의 에너지 경제는 최근 심각한 위기를 가져왔는데, 이는 화석연료가 비가역적인 비재생에너지(Nonrenewable energy)라는 측면과 더불어 기후변화, 산성비 그리고 오존생성과 같은 다양한 환경문제를 야기 시키기 때문이다. 일반적으

<sup>†</sup> Corresponding Author, E-Mail: [ejlee@pknu.ac.kr](mailto:ejlee@pknu.ac.kr), TEL: +82-51-629-6471, FAX: +82-51-629-6463

© 2019 Korean Institute of Fire Science & Engineering. All right reserved.

로 연소과정을 통해 에너지 생산을 하는 화석연료는 이러한 문제들을 완전히 극복하기 어려워 에너지의 선택기준이 현재에는 신재생에너지와 친환경에너지의 사용으로 급격히 변화하게 되었다.

리튬이온 배터리와 같은 충전식 배터리는 에너지의 저장장치로서 최근의 에너지 이용의 변화에 따라 크게 주목받고 있을 뿐 아니라 실제로 다양한 소형 전기기기 및 전기 자동차의 전기에너지 저장시스템으로 폭넓게 적용되고 있다. 이 배터리는 리튬이온을 한 전극에서 다른 전극으로 이동하며 전기에너지를 생산하는데 이 과정에서 전기에너지와 화학에너지를 방전과 충전과정 동안 서로 교환한다. 리튬이온 배터리는 전해액과 활성화 물질들로 이루어져 있는데 이러한 구성은 다른 에너지 저장방법에 비해 가볍고 높은 에너지 밀도를 가지고 있는 좋은 특성이 있다. 따라서 경량화가 가능하여 노트북과 같은 모바일 기기에 매우 적합할 뿐 아니라 최근에는 자동차와 같은 대형 수송시스템의 주 에너지원으로서도 크게 각광받고 있다. 또한 리튬이온 배터리는 기억효과(Memory effect)가 없고 납, 수은, 카드뮴과 같은 독성 중금속 물질을 사용하지 않으므로 환경적으로도 다른 방식의 배터리에 비해서 장점이 많음을 확인할 수 있다. 하지만 이 배터리는 그 장점에 비해서 상업적으로는 사용이 제한적인데, 이는 안전성, 가격 그리고 저온에서의 성능의 저하 등에 기인하는데 이러한 문제점은 모두 배터리의 열적 특성과의 밀접한 관련이 있다. 특히 리튬이온 배터리는 상당한 반응성이 있는 전극과 가연성 전해질을 포함하고 있기 때문에 과충전(Over charging), 내부 단락(Short circuit) 등과 같은 비정상적인 조건에서 열이 발생할 수 있으며 이러한 열발생이 열폭주(Thermal runaway) 반응으로 천이되어 심각한 배터리 사고로 이루어질 수 있다<sup>(1-3)</sup>. 이러한 배터리 화재사고는 최근에 빈번히 발생되었는데 보잉 787 드림라인 배터리 화재나 테슬라 전기자동차 S 모델의 화재가 대표적이다<sup>(4)</sup>. 이러한 안전문제는 리튬배터리의 큰 규모의 적용에 걸림돌이 되고 있다. 많은 연구들이 배터리의 열폭주 등에 의한 화재 및 폭발현상을 이해하기 위하여 수행되었다<sup>(1-8)</sup>. 대표적인 환경 인자는 배터리 온도로서 어떤 특정 임계 온도이상에서는 일련의 반응들이 연쇄적으로 발생하였음을 확인하였다. 또한 배터리의 안전성은 충전정도, 배터리 용량, 배터리의 외관 및 포장, 음극과 양극 물질, 전해액 등과 같이 다양한 인자에 의해 관계된다는 결과를 얻었다<sup>(4-8)</sup>. 하지만 현재의 연구결과가 배터리 화재를 이해 가능하게 하는 물리적 기구를 제시해 주지는 못하고 있는데 이는 기존의 잘 알려진 일반 가연물의 화재와 리튬이온배터리 화재와의 차이점에 대한 정보가 부족하기 때문이다. 두 화재에서의 차이점은 다양한 원인에서 발생되는데 그 중의 하나는 반응연료의 상태(State)이다. 리튬이온 배터리는 수용성 전해액 대신 휘발성이 있는 유기성 전해액이 사용되는데 이 전해액이 반응성이 높아 일반적으로 휘발유보다 연소가 용이하다. 따라서 다양한 양

이온과 전자 등이 있는 이온화연료는 기존 연료와 어떤 반응의 차이가 존재하는지는 배터리 화재와 폭발을 이해하는데 있어서 매우 중요하다고 할 수 있다<sup>(9)</sup>. 또한 실험을 통한 실제적인 배터리 화재의 특성을 확인하는 연구와 더불어 보다 명확한 이해를 위해서는 수치해석 등을 통해 파라미터에 따른 연구가 가능하여야 하는데, 아직 이온화연료의 상세한 반응기구가 알려져 있지 않아 수행이 어려운 단계이다. 물질의 이온화는 일반적으로 기체를 방전시켜 플라즈마 상태로 만든다. 코로나 방전, 전자기파 방전이나 글로우 방전과 같이 저온 플라즈마의 경우에는 손쉽게 이온을 만들 수 있지만 그 밀도가 매우 낮다는 한계가 있으며 이를 극복하기 위해서는 아크와 같은 고온 플라즈마를 이용한다. 일부 여러 레이저 계측을 통해 얻어진 결과에 의하면 플라즈마 단계에서 메탄과 같은 탄화수소연료에서는 수소원자 또는 수소분자가 유리되는데 이러한 분해반응은 자유전자에 의해 촉진된다고 알려져 있다<sup>(10)</sup>. 하지만 이후의 과정에서 생성되는 물질은 라디칼과 전자와 같이 상태가 매우 불안정하여 직접적으로 화학종과 농도를 측정하기는 매우 힘들다. 따라서 여러 연구에서는 이들 물질이 안정화된 화학종을 가스크로마토그래피 등을 이용하여 계측한다. 저온플라즈마이면서 밀도가 높은 방전 방식인 글라이딩 아크를 이용하여 순수메탄의 변환물질을 계측한 연구에 의하면 전체 메탄에서 30-40%가 수소로 전환되었고, 다음에는 에틸렌이 20% 정도로 생성되었다<sup>(11)</sup>. 따라서 코로나 방전을 이용하는 경우는 밀도가 매우 낮은 이온화과정이고, 이를 통해 유리된 수소원자와 수소분자를 탄화수소 연료에 수소를 첨가하는 것으로 모사할 수 있을 지에 대한 검토가 필요하다.

본 연구는 배터리화재가 기존의 화재와 차별되는 특성 중 하나인 연료내의 이온과 전자의 효과를 규명하기 위해 실험적 연구와 수치적 모델링 연구를 함께 수행하였다. 실험적으로는 노즐 형태의 방전식 이온라이저에서 이온화된 메탄을 연료로 한 제트화염에서의 연소특성을 조사하였다. 화염의 형태나 길이 등의 화염 구조적 특성과 환경안전과 관련된 대기오염물질인 질산화합물(NOx)과 일산화탄소(CO)의 배출 특성을 제트화염 후류에서 조사하였다. 또한 수치적 연구로서 이온화 메탄의 반응기구를 수소첨가의 형태로 모사할 수 있는지에 대한 모델링 검토를 수행하였다.

## 2. 연구방법

### 2.1 이온화 메탄제트화염 실험

Figure 1은 이온발생기(Ionizer)를 이용한 이온화 연료의 연소 실험 계략도이다. 실험에 사용된 버너는 일반 제트화염을 위한 원형단면 노즐로 구성하였고, 내경이 4.0 mm인 스테인리스강으로 제작되었다. 또한, 연료 노즐은 튜브 벽으로부터의 이온 흡수를 최소화하기 위해 가능한 짧게 설계 하였다.

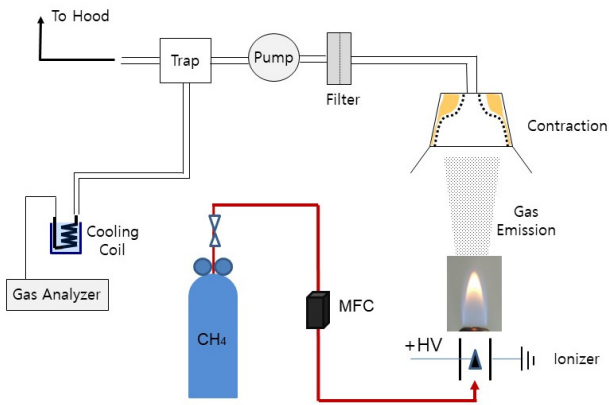


Figure 1. Schematics of experimental setup.

연료는 순도 99.9%의 고순도 메탄을 사용 하였고, 유량은 mass flow controller (MFC)를 통해 제어하였는데 MFC는 포말유량계로 보정하였으며 유량의 오차범위는 ±1% 미만이다. 화염 형상을 촬영하고 분석은 60 FPS의 캠코더(SONY, HXR-NX30N)을 사용하였다. 연료를 이온화하기 위하여 상용제품인 온오프 인가 코로나 방전방식의 이온라이저(SUNJE, SPN-11)를 사용하였다. 코로나 방전이란 공기와 같은 중성유체 속의 높은 전위의 전극으로부터 발생하는 주로 지속적인 전류에 의한 반응으로, 유체가 전극 주위에 플라즈마를 형성하도록 이온화 되는 반응이다. 사용된 이온라이저는 바늘 형상을 한 텅스텐 정(+)의 방전침과 부(-)의 방전 전극으로 구성되어 있으며, 전압을 인가함으로써 전극 선단의 방전부에서 코로나 방전을 발생시켜 이온을 반송시킨다. 이온의 양은 이온밀도 측정기(SUNJE, SICA-2)를 통해 측정 하였다. 이 계측기는 포집된 기체 부피에서 존재하는 다양한 이온 중 전자의 수만 측정하여 전체 밀도를 나타낸다. 본 연구에서는 이온 밀도의 포집 지점을 노즐 출구 바로 위에 위치시켜 측정하여 주위 공기가 혼합되지 않도록 하였다. 또한 연소에서 발생하는 생성 가스를 분석하기 위해 가스분석기(Servomex 4100c)를 사용하여 산소와 일산화탄소 및 질산화합물(NOx)의 농도를 분석하였다. 이 경우 연소반응에서 나올 수 있는 매연 등을 제거하기 위하여 가스분석 전 상류에 입자필터시스템을 설치하여 사용하였다.

2.2 모델링 및 WSR 수치해석

본 연구의 목적은 이온화된 메탄의 연소특성 및 오염물질 배출특성을 살펴보는 것이다. 파라미터 연구를 위하여 연소과정을 수치해석하기 위해서는 이온화된 탄화수소의 자세한 반응기구가 요구된다. 플라즈마 연소현상의 수치적 모델링을 위해 자세한 반응 기구를 연구하고 있지만 아직 검증된 반응 기구는 존재하지 않는다. 일반적으로 탄화수소 연료를 플라즈마 상태로 전기적 분해하면 전자, 수소이온, 수소라디칼, 탄화수소라디칼 등 다양한 활성화된 화학

종이 나타난다. 하지만, 본 연구에서처럼 연료를 이온화하지만 그 양 또는 에너지가 작아 플라즈마 상태로는 천이되지 않는 연료의 경우에는 연소시 반응물질 중 라디칼이나 전자 보다는 연료로부터 해리된 수소의 영향이 보다 크게 나타날 것으로 판단된다. 따라서 수치해석 연구에서는 이온화된 탄화수소를 수소의 첨가로서 모델링하여, 연료에서 수소의 혼합을 또는 부피분율로서 이온화 정도를 정성적으로 나타내었다.

수치해석 모델로서는 완전화학반응로(Ell stirred reactor, WSR)를 도입하였는데, WSR는 물리적 차원이 없는 반응로로서 혼합기의 유체역학적 특성을 배제하고 화학반응에 중심을 둔 모델이다. WSR 수치해석에서는 정상상태를 가정하였고 CHEMKIN Pro의 PSR 코드를 이용하였다<sup>(12)</sup>. 이 조건에서 방정식은 식 (1)과 (2)의 대수방정식으로 간략화 된다.

$$\dot{m}(Y_k - Y_k^*) - \dot{\omega}_k W_k V = 0 \tag{1}$$

$$\dot{m} \sum_{k=1}^K (Y_k h_k - Y_k^* h_k^*) + Q = 0 \tag{2}$$

$$\tau = \rho V / \dot{m} \tag{3}$$

여기서  $\dot{m}$ 은 질량유량,  $Y_k$ 는 K 화학종의 질량분율,  $\dot{\omega}_k$ 는 화학종의 몰생성율(Molar production rate),  $W_k$ 는 화학종의 분자량,  $V$ 는 체적을 의미한다.  $h_k$ 는 화학종의 단위질량당 엔탈피(Specific enthalpy)이고,  $Q$ 는 반응로의 외부 열손실을 의미하는데 본 연구에서는 단열조건이라 가정하여  $Q=0$ 으로 가정하였다. 그리고 상첨자(\*)은 입구조건을 의미한다. 반응로에서의 체류시간,  $\tau$ 는 식 (3)으로 정의되는데 혼합기의 체류시간이 매우 크면 평형상태로 간주될 수 있다. 본 연구의 WSR 수치해석은 상압인 1 atm과 0.01 s의 체류시간에서 수행하였다. 또한, 제트화염의 연소가스는 주로 화염면 근처에서 발생하므로 WSR 혼합기의 당량비는 0.9, 1.0, 1.1 등 세 당량비에서 계산하였다. 메탄의 산화반응에 대한 반응기구(Reaction mechanism)는 많이 검증된 GRI 3.0 모델을 사용하였다<sup>(13)</sup>.

3. 연구결과 및 토의

실험에 사용된 이온라이저는 상용제품으로서 방전전압이나 강도를 변화시킬 수 없는 형태이므로 연료제트의 유량에 따라 생성되는 이온의 밀도 또는 전체 이온 수를 측정할 필요가 있다. Figure 2에 메탄의 유량에 따른 부피당 이온의 개수와 전체 이온발생량을 도시하였다. 이온밀도의 경우에는 연료유량에 따라 선형적으로 증가함을 알 수 있었다. 이러한 선형성은 이온라이저의 특성상 기체분자 수가 많아지면 이온생성 또한 커지는 방전의 구조적 특성을 보여준다. 또한 전체 이온생성량은 연료유량에 제공에 비례하는 2차 곡선의 특성을 보여주고 있다.

Figure 3은 연료유량에 따른 메탄 제트화산화염의 사진

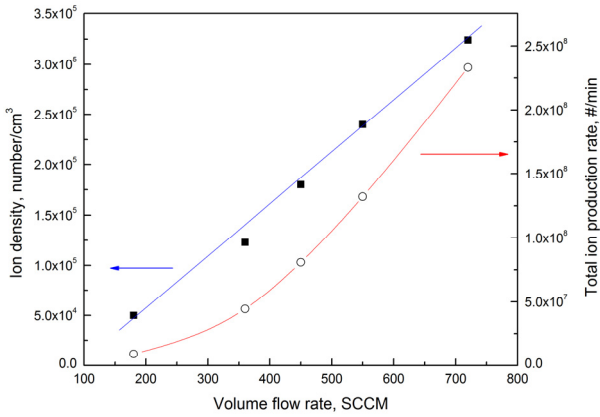


Figure 2. Ion density with respect to fuel flow rate.

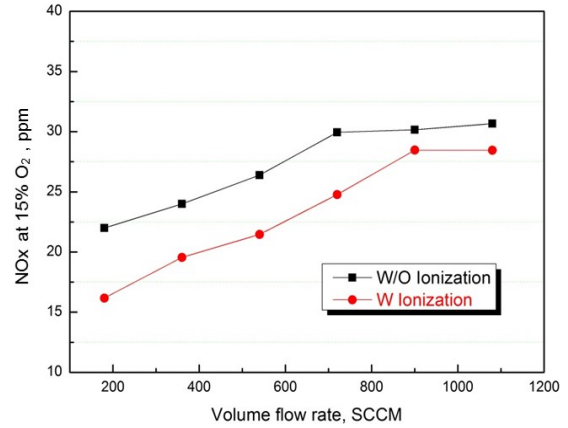


Figure 4. The effect of methane ionization on NOx emission.



Figure 3. Direct photos of methane jet diffusion flames as increasing fuel flow rate. The numbers below each picture indicates the flow rates (sccm) of methane.

을 나타내었다. 메탄유량이 증가함에 따라 화염 길이가 길어지는 것을 확인 할 수 있어 실험에 사용된 유량범위는 난류로 천이되기 전의 영역임을 확인 할 수 있었다. 이 사진과 함께 이온화된 메탄으로 제트화염을 같은 유량조건에서 촬영하여 비교하였다. 하지만 이온화하지 않은 일반 제트 화염과 비교하였을 때 화염의 높이, 화염의 폭, 화염의 색 등 어떠한 화염 형태의 변화도 확인할 수 없었고 완전히 같은 형상을 보인다고 할 수 있었다. 겉보기 다른 특성이 나타나지 않는 이유는 현재 사용하고 있는 이오나이저의 이온화량으로는 화염 형태의 변화를 가져올 만큼 충분하지 않기 때문이다. 하지만 이러한 화염구조의 동일성은 제트화염 후류에서 측정된 연소가스의 분석에서 화염구조에 의한 변수를 제거할 수 있으므로 연소가스에 대한 이온화 효과를 연구하는데 있어서는 매우 중요한 특성임을 확인할 수 있다.

메탄 제트화염의 후류에서 이온화한 연료를 사용한 경우와 이온화하지 않은 연료를 사용한 각각의 경우에 NOx의 농도를 Figure 4에 도시하였다. 대표 오염물질의 농도를 측정하기 위해 실험에서 사용된 시스템은 Figure 1과 같이 유선형의 급축소관(Contraction) 형태의 후드를 사용하였으

므로 주변의 공기가 유입되어 연소가스를 희석하게 된다. 매 실험에서 유입된 공기의 양은 모두 다르므로 후류에서 측정된 특정가스농도는 보정할 필요성이 있다. 본 실험에서는 산소의 농도를 함께 측정하였는데 각 유량조건별 측정된 산소의 농도가 18%에서 19.5% 까지 변함을 확인할 수 있었다. 따라서 본 연구에서는 후류에서 측정된 가스의 농도를 모두 산소농도 15%의 값으로 환산하였고, Figure 4의 NOx 농도 또한 환산농도로써 식 (4)를 이용하였다. 여기서 [%O<sub>2</sub>]는 측정된 산소농도(%)이고, [NO<sub>x</sub>]와 [NO<sub>x</sub>]<sub>15</sub>는 각각 측정된 질산화합물의 농도와 산소 15%에서의 환산 농도를 나타낸다.

$$[NO_x]_{15} = \frac{21 - 15}{21 - [\%O_2]} [NO_x] \tag{4}$$

NOx 농도는 연료의 유량이 커질수록 증가함을 볼 수 있는데, 모든 유량에서 이온화된 메탄을 사용하는 경우에 보다 낮은 NOx 농도를 나타낸다. 일반적으로 이온화된 연료에는 전자나 수소반응기 등과 같이 반응성이 큰 화학종이 많이 분포되어 있을 것으로 판단되는데 NOx의 농도가 감소한 것은 온도에 대한 효과라기보다는 질소와 산소의 결합을 둔화시키는 반응특성으로 생각되어 진다.

Figure 5에는 이온화 메탄과 일반 메탄을 사용한 제트화염 후류에서 측정된 CO의 농도를 산소농도 15%로 환산된 값으로 도시하였다. NOx와 같이 CO의 농도 또한 유량 증가에 따라 증가하고, 이온화 메탄의 경우에 CO의 농도가 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 일반적으로 일산화탄소는 불완전 연소의 결과물인데, CO가 줄어드는 것을 보아 연료이온화가 연소반응을 원활 하게 함을 확인할 수 있다.

실험에서 얻은 화염특성과 환경오염물질인 NOx와 CO 농도를 모사하기 위해 WSR에 수소를 첨가하여 메탄 이온화에 따른 효과를 확인하였다. 이 때 혼합기에 첨가된 수소 함량을 정확히 실험결과와 일대일로 대응시킬 수는 없으므로, 계산에서는 0%에서 30%까지 늘려가며 조사하였다.

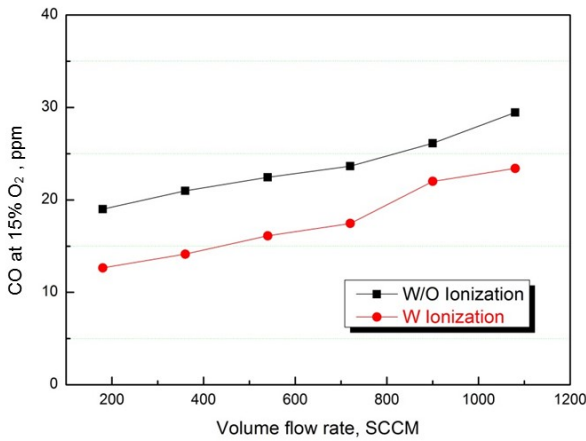


Figure 5. The effect of methane ionization on CO emission.

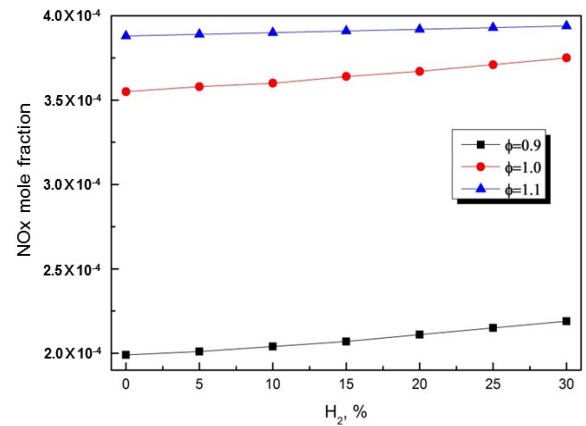


Figure 7. The effect of hydrogen addition on NOx emission in methane/air mixture calculated with energy equation.

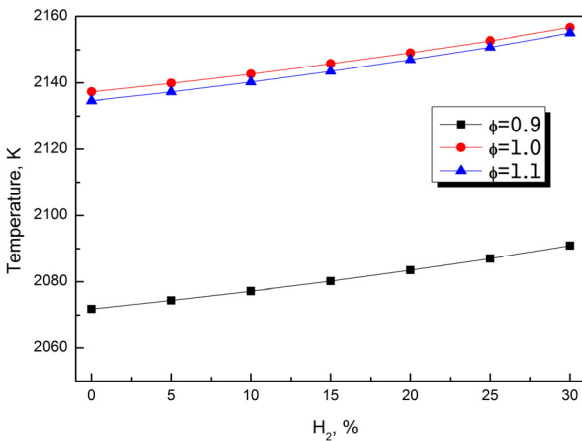


Figure 6. The effect of hydrogen addition on the combustion gas temperature in methane/air mixture calculated with energy equation.

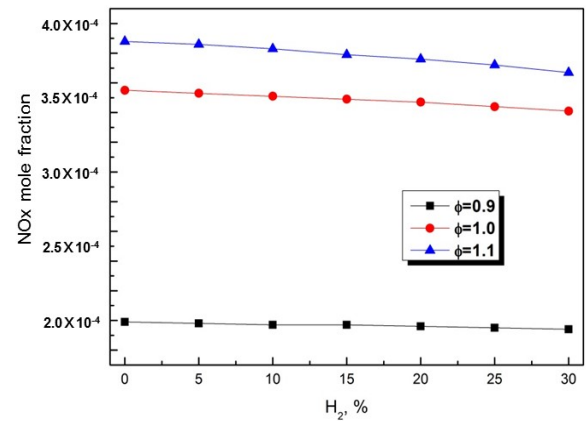


Figure 8. The effect of hydrogen addition on NOx emission in methane/air mixture at a fixed temperature.

WSR의 반응장을 얻는데는 크게 2가지의 방법이 있다. 하나는 에너지 방정식을 푸는 방법이고, 다른 하나의 방법은 특정온도를 주어지고 그 온도에 따른 화학종의 평형농도를 계산하는 방식이다. 먼저 에너지 방정식을 이용하여 얻은 수소의 분율에 따른 연소 후 온도를 각 당량비에 대해서 Figure 6에 도시하였다. 모든 당량비에서 수소의 분율이 증가하면서 온도가 증가하였다. 또한 같은 분율에서는 당량비가 1인 경우 가장 높은 온도를 보이는데 이는 과잉연료 또는 산화제가 없는 완전화학반응에 가깝기 때문이다.

다음에 Figure 7에 NOx의 두 성분인 NO와 NO2의 몰농도 합을 도시하였다. 도시하지는 않았지만 WSR에서의 NO2의 농도는 NO에 비해 매우 적어 NOx의 대부분이 NO로 배출됨을 알 수 있다. 연료의 수소분율 증가에 따른 NOx의 배출은 단조 증가함을 볼 수 있는데, 이는 수소 첨가에 따른 NOx의 생성 증가는 Figure 6의 온도 상승에 따른 Zeldovich 기구에 의한 NOx 생성 때문으로 판단된다. 이 결과는 앞의 실험결과인 이온화연료에서 NOx의 배출농도가 감소하는 사실과 반대의 경향을 보이고 있을 뿐 아니라

온도가 상승한다면 화염구조가 변하게 되는데 앞의 실험인 Figure 3의 화염 형상이 메탄 이온화에 무관함을 설명할 수 없다. 따라서 이온화 연료를 수소첨가로 본 실험을 적절히 모사하기 위해서는 에너지 방정식을 푸는 것이 아니라 특정 온도를 고정시키고 모델링하는 것이 보다 현실적인 방법임을 확인 할 수 있다.

앞에서의 사실을 연료 이온화 실험결과 모사를 위한 WSR 수치해석 방법에서 이온화의 영향으로 수소의 농도는 증가시키되 WSR의 온도는 특정 당량비에서 수소의 분율에 따라 변하지 않고 일정함을 가정하여 모델링하였다. 이 고정된 WSR 온도는 특정 당량비에서 수소를 섞지 않았을 때의 온도와 같게 일정하다고 가정하였고, NOx와 CO 농도를 Figure 8과 9에 도시하였다. 그림에서 보듯이 온도를 고정하고 수소의 분율을 높였을 경우 NOx와 CO의 생성이 감소함을 볼 수 있다. 이러한 모델링 결과는 앞에서의 실험결과를 잘 예측해 주며, 고온 분위기에서 여기상태 (Excited state) 산소가 질소보다는 수소와 활발히 반응하기 때문으로 판단된다.

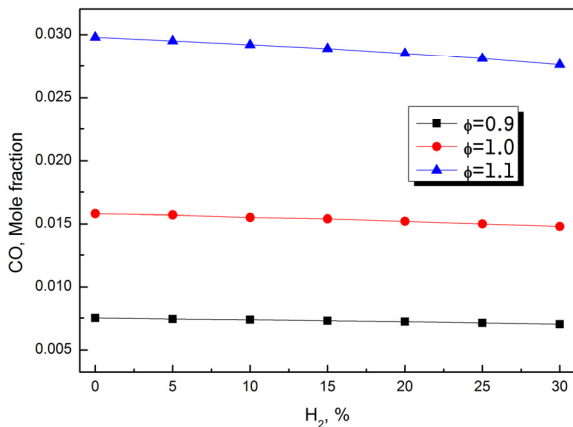


Figure 9. The effect of hydrogen addition on CO emission in methane/air mixture at a fixed temperature.

#### 4. 결 론

본 연구는 연료내의 이온과 전자의 포함에 따른 연소특성을 규명하기 위해 실험적 연구와 수치적 모델링 연구를 함께 수행하였고 다음의 결과를 얻었다.

1) 실험적으로는 노즐 형태의 방전식 이온화장치를 사용하여 메탄을 이온화하여 제트화염을 만들어 다양한 연소특성을 조사하였다. 메탄의 유량이 증가함에 따라 이온의 양도 선형적으로 증가하는 것을 확인 할 수 있었다. 화염 형상 및 화염안전성은 본 연구의 이온량 정도로는 육안으로 판별하기가 불가능 하였고 현재의 실험조건에서는 연료 이온화 효과가 없음을 확인하였다. 이온화 연료를 사용하는 경우에 제트화염 후류에서 측정된 CO와 NO<sub>x</sub>의 농도가 모두 감소하는 것을 확인할 수 있었다.

2) 수치연구에서는 이온화된 메탄을 수소의 첨가로서 WSR에서 모델링하여, 연료에서 수소의 부피분율로서 이온화 정도를 정성적으로 나타내었다. 모든 당량비에서 수소의 몰분율이 증가하면서 온도가 증가하였고, 동일한 수소 몰분율에서는 완전화학반응에 가장 가까운 당량비가 1인 경우 가장 높은 온도를 보였다. NO<sub>x</sub>의 경우 NO<sub>2</sub>의 농도는 NO에 비해 매우 적어 NO<sub>x</sub>의 대부분이 NO로 배출됨을 알 수 있다. 연료의 수소분율 증가에 따른 NO<sub>x</sub>의 배출량 조사를 위해서는 이온화의 영향으로 수소의 농도는 증가시키되 WSR의 온도는 일정함을 가정하여 모델링하였는데 그 결과 CO와 NO<sub>x</sub>의 양이 모두 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 결과는 앞선 실험을 적절히 설명하고 있으며 이온화 연료의 연소특성을 고정된 온도의 수소첨가 모델로 모사할 수 있음을 확인하였다.

3) 이러한 기초적 결과를 보다 발전시키면 근본적으로 일반적인 화재와 이온화된 물질로 구성되어있는 배터리화재의 차이점을 알 수 있으며, 또한 배터리의 충전을 같이 전자나 이온의 양에 따른 배터리화재의 특성을 이해하는데도 기여할 수 있을 것이다.

#### 후 기

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2017년)에 의하여 연구되었음.

#### References

1. M. M. Thackeray, C. Wolverton and E. D. Isaacs, "Electrical Energy Storage for Transportation-Approaching the Limits of, and Going beyond, Lithium-Ion Batteries", *Energy & Environmental Science*, Vol. 5, No. 7, pp. 7854-7863 (2012).
2. D. Lisbona and T. Snee, "A Review of Hazards Associated with Primary Lithium and Lithium-Ion Batteries", *Process Safety and Environmental Protection*, Vol. 89, No. 6, pp. 434-442 (2011).
3. P. Huang, Q. Wang, K. Li, P. Ping and J. Sun, "The Combustion Behavior of Large Scale Lithium Titanate Battery", *Scientific Reports*, Vol. 5, No. 7788, pp. 1-12 (2015).
4. Q. Wang, P. Ping, X. Zhao, G. Chu, J. Sun and C. Chen, "Thermal Runaway Caused Fire and Explosion of Lithium Ion Battery", *Journal of Power Sources*, Vol. 208, pp. 210-224 (2012).
5. N. S. Spinner, C. R. Field, M. H. Hammond, B. A. Williams, K. M. Myers, A. L. Lubrano and S. G. Tuttle, "Physical and Chemical Analysis of Lithium-Ion Battery Cell-to-cell Failure Events Inside Custom Fire Chamber", *Journal of Power Sources*, Vol. 279, pp. 713-721 (2015).
6. H. S. Lee and S. K. Kim, "Experimental Study on the Explosion and Fire Risks of Mobile Phone Batteries", *Fire Science and Engineering*, Vol. 30, No. 4, pp. 111-120 (2016).
7. S. B. Sim, C. H. Lee and S. K. Kim, "Study on the Explosion and Fire Risks of Lithium Batteries due to High Temperature and Short Circuit Current", *Fire Science and Engineering*, Vol. 30, No. 2, pp. 114-122 (2016).
8. M. E. Karp, "Flammability Limits of Lithium-Ion Battery Thermal Runaway Vent Gas in Air and the Inerting Effects of Halon 1301", *Doctoral Dissertation, Rutgers University-Graduate School-New Brunswick* (2016).
9. H. J. Ko and E. J. Lee, "Combustion Characteristics of Ionized Fuels for Battery System Safety", *Journal of the Korean Society of Safety*, Vol. 33, No. 1, pp. 22-27 (2018).
10. A. Starikovskiy and N. Aleksandrov, "Plasma-Assisted Ignition and Combustion", *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 39, pp. 61-110 (2013).
11. A. Indarto, J. W. Lee, H. Lee and H. K. Song, "Effect of Additive Gases on Methane Conversion Using Gliding Arc Discharge", *Energy*, Vol. 31, pp. 2986-2995 (2006).

12. Chemkin-Pro, Release 15082, Reaction Design: San Diego (2009).
13. C. Bowman, T. Hanson, D. F. Davidson, W. C. Gardiner Jr., V. Lissianski, G. P. Smith, D. M. Golden, M. Frenklach and M. Goldenberg, "GRI-Mech 3.0", The Gas Research Institute, [http://www.me.berkeley.edu/gri\\_mech/](http://www.me.berkeley.edu/gri_mech/)