

플라즈마를 이용한 매연여과장치 재생용 버너 개발

차민석 · 이대훈 · 김관태 · 이재옥 · 송영훈[†] · 김석준

Development of Plasma Assisted Burner for Regeneration of Diesel Particulate Filter

Min Suk Cha, Dae Hoon Lee, Kwan-Tae Kim, Jae-Ok Lee, Young-Hoon Song[†], Seock Joon Kim

ABSTRACT

Plasma assisted combustion is an old subject for the combustion society, but recently, the subject is refocused partly because techniques for non-thermal plasmas are progressed significantly, and partly because there are lots of applications which need to be overcome by a new reaction technology. In the present study, we have developed plasma assisted burner (plasma burner), which can be used as a heating source in a diesel particulate filter system. The burner can burn 20 - 60 cc/min of diesel fuel with 50 lpm of fresh air in an exhaust pipe of 2.0 liter diesel engine. Using 20 cc/min of diesel fuel, an exhaust temperature for 2.0 liter diesel engine can be raised up to around 600 °C for the range of engine speeds is idle - 3,000 rpm. The characteristics of the plasma burner are reported, and the possible operating mechanism of it will be discussed based on the effects of an electric field and a plasma on flames.

Key Words : plasma assisted combustion, diesel particulate filter, plasma burner

1. 서론

플라즈마 및 전기장이 연소 현상에 미치는 영향에 대한 연구는 지난 1960년대부터 활발히 진행되어왔으며, 주 관심사는 전기장 하에서 약하게 이온화되어 있는 화염의 거동 특성, 전기장 및 플라즈마를 이용한 화염전파속도의 변화 혹은 화염 안정성 영역의 증대 여부에 대한 것들이었다 [1, 2]. 그러나 당시에 주 관심사였던 플라즈마는 대부분이 아아크(arc) 등에 의한 열플라즈마 (thermal plasma)가 주를 이루었으며, 이로 인하여 연소에 영향을 미치는 화학 반응, 화염 구조 보다는 엔탈피 상승에 의한 열적 효과만이 주 검토 대상이었다고 할 수 있다. 이로 인하여 플라즈마 및 전기장을 이용한 연소 현상의 현저한 상업적인 이용가치를 발견하기 어려웠으며, 현재까지 이렇다 할 산업적 적용처를 만들어내지 못하고 있는 실정이다.

그러나 2000년대에 들어오면서부터 많은 연구자들이 다시금 플라즈마 및 전기장에 의한 연소 현상의 변화에 대한 연구에 관심을 가지게 되었다. 예를 들어 30차 국제연소학회에서 플라즈마 이용 연소기술에 대한 초청강연이 있었으며 [3], 국제전기전자학회 및 국제플라즈마화학학회 등에서도 플라즈마 이용 연소기술에 대한 정기 논문집을 비롯 관련 학회의 독립 세션을 마련하고 있는 추세이다.

이는 열플라즈마와는 구별되는 화학적 선택성을 가질 수 있는 저온플라즈마 (non-thermal plasma) 기술의 발달과 무관하지 않으며, 한편으로는 산업의 다변화와 기술의 발달에 의하여 연소 영역이 담당해야하는 기술적 과제의 고도화에 기인한다고 할 수 있겠다. 이러한 현실이 반영된 최근의 연구결과들은 전기장 및 플라즈마에 의하여 예혼합화염 및 확산화염의 안정화영역이 크게 증대될 수 있음을 보여주고 있으며 [3-6], 전기장의 영향만으로도 연료 성층화된 유동장에서 선단 화염의 전파속도를 크게 증가시킬 수 있음을 나타내고 있다 [7]. 또한, 저온플라즈마의 영향으로

한국기계연구원

[†] 연락저자, yhsong@kimm.re.kr

인하여 확산화염의 매연발생을 원천적으로 억제할 수 있어, 연소 관련 배출물 저감에 능동적으로 대처할 수 있는 가능성을 보여주고 있다 [8]. 다른 한편으로는 최근에 화석연료의 고갈 및 공해 문제로 인하여 기존 연료의 수소화 혹은 수소과농 합성가스(hydrogen enriched syngas)등과 관련된 연구가 활발히 진행중인데, 플라즈마를 이용한 연료개질기(fuel reformer)는 소형, 휴대가능성(on board), 초기시동의 용이성 등의 장점으로 많은 연구의 관심이 되고 있다 [9].

현재 연소관련 산학계가 당면하고 있는 문제점 중에는 가스터어빈 연소기의 불안정성, 디젤엔진(혹은 연료희박 엔진)의 질소산화물 및 매연의 저감 등이 있을 수 있으며, 이 들 분야에도 플라즈마 및 전기장을 적용하려는 시도들이 있는 것으로 알려져 있다. 이 중에서 국내의 현실과도 매우 잘 부합되는 분야는 디젤 차량의 매연저감장치와 관련된 것으로서 수도권에서 이미 매연저감장치를 의무적으로 부착하도록 시행 중에 있다.

매연저감장치는 매연입자를 여과시키는 필터와 이 필터에 일정량 이상의 매연이 포집되었을 때 포집된 매연을 산화시켜 주는 재생 기구가 필요한 디젤 차량 후처리 장치이다. 이러한 재생방식으로는 자연재생(passive DPF) 방식과 강제재생(active DPF) 방식으로 크게 나눌 수 있는데, 자연재생 방식은 매연여과필터 내에 첨가된 산화촉매에 의하여 배기중의 산소(혹은 이산화질소)를 이용하여 매연을 산화시키는 방식이다. 그러나 도심권과 같이 출발과 정지를 반복하는 주행 상태나 최근에 생산된 차량일수록 차량 배기가스의 온도가 자연재생에 필요한 촉매(혹은 산화반응) 활성화 온도에 크게 미치지 못하기 때문에 원활한 매연여과필터의 재생을 기대하기 어려운 실정이다.

한편, 강제재생 방식은 능동재생 방식으로서 일정량의 매연이 포집되었을 때에 강제적인 가열수단을 이용하여 배기의 온도를 매연의 산화온도(혹은 산화촉매의 활성온도)까지 상승시켜, 적절한 시기마다 매연여과필터를 재생시킴으로써, 지속적인 매연저감장치의 성능 및 차량의 성능을 유지시킬 수 있는 수단이다. 이러한 강제적인 가열수단으로는 버너, 촉매연소기, 전기가열기(electric heater) 등을 들 수 있다. 전기가열기의 경우에는 온도상승을 위한 과도한 전력의 소모로 인하여 차량의 발전기 부분까지 영향을 미칠 수 있는 요인이 있을 수 있으며, 버너 및 촉매연소기의 경우에는 디젤연료의 추가적인 연소로 인하여 필요한 여분의 공기가 많은 양 필요하게 될 뿐 만 아니라, 산소농도가 희박하고 고속인 배기관 내의 유동에서 안정성을 유지하기가 어려운 문제점이 있다. 이와 같이 사용 가능 공기량, 전

력량, 크기 등에 제한이 있고, 산소농도가 희박하고 고속인 극한상황에서 기존의 연소기술로 극복하기 어려운 원활한 연소상태를 유지하기 위해서는 앞서 언급한 플라즈마 및 전기장을 이용해 보는 시도가 필요할 수도 있다고 판단된다.

이에 따라 본 연구에서는 매연여과장치의 강제 재생 수단으로써 플라즈마를 이용하여 디젤연료를 연소시키는 연소기(이후 플라즈마 버너)를 개발하여 그 특성 및 실제 운용가능성을 검토하고자 한다.

2. 실험 장치 및 방법

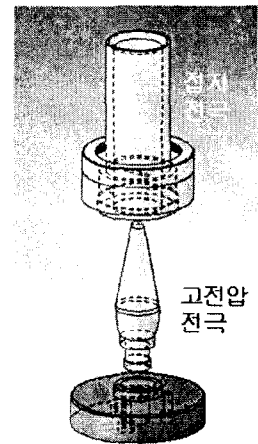


Fig. 1 플라즈마 버너의 개략도

매연저감장치 재생용 플라즈마 버너는 회전 글라이딩 아아크 플라즈마를 기본으로 하여 설계되었으며, 그 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 회전 글라이딩 아아크 플라즈마 방식은 수소과농 합성 가스를 생성시키는 연료개질기 [9] 로도 많이 이용되는 것으로서 회전 글라이딩 아아크 반응기 내부에 디젤연료와 공기의 혼합기를 분사하여 플라즈마 버너를 구성한다. 사용한 전력공급장치는 10 kHz 주파수에 소모전력은 300 W 정도이다.

2,000 cc 디젤 엔진의 배기계를 이용하여 타당성 검토가 진행되었으며, 그 구성 사진을 Fig. 2에 나타내었다. 2,000 cc 엔진의 아이들링 상태의 배기온도는 약 110 °C 정도이며, 이 상태의 배기온도를 매연의 자연 산화온도인 600 °C 정도까지 승온 시키기 위해서 디젤연료를 분당 20 cc 연소시키고자 한다. 디젤연료 20 cc/min 을 이론 당량비로 연소시키기 위해서는 약 210 lpm 정도의 공기가 추가로 필요하게 되는데, 통상 압축기를 탑재하고 있는 대형 디젤 차량의 경우에도 여분으로 사용할 수 있는 공기량이 최대 100 lpm 정도이기 때문에 현실적인 측면에서 이론 당량비 수준에서 운전되는 버너를 개발하는 것은 무의미하게 된다. 만약 10 리터 엔진의 경우에는 대략

100 cc/min 의 디젤연료를 연소시켜야 하는데 이 경우에 필요한 공기의 량의 1000 lpm에 이르기 때문에 실제 차량에 적용하기 위해선 소모 가능 공기량 100 lpm 정도에 제한을 두고 접근하여야 한다. 본 연구에서는 50 lpm 의 추가 공기를 사용하여 플라즈마 버너를 운전시키고자 한다. 본 플라즈마 버너는 배기관 내부에 삽입되는 형태의 버너가 아니라 기존 배기계의 측면에 수직으로 부착되는 형태이며, 참고로 각종 계산 및 예측에 사용된 자료는 표 1에 나타내었다.

Table 1 디젤 특성 자료

디젤밀도 [kg/m ³]	발열량 [MJ/l]	(A/F) _{stoi}	가연한계 Vol. % in air	대표 화합종
850	41	14.5	0.6-5.5	C ₁₂ H ₂₆

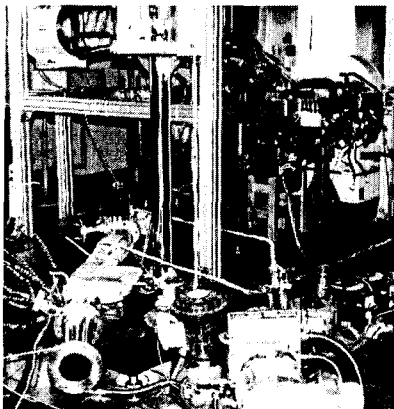


Fig. 2 2.0 liter 엔진을 이용한 실험장치 setup.

3. 결과 및 토의

3.1 작동 특성 및 승온 효과

본 플라즈마 버너에 20 cc/min 의 디젤연료와 50 lpm의 추가 공기를 사용하여 2,000 cc 디젤 엔진의 배기계에 장착하여 화염의 안정성 및 승온 능력을 여러 엔진 조건에 대하여 검토하였다. 디젤연료 20 cc/min 과 공기 50 lpm 일 때의 연료 부피비는 디젤연료의 대표화합종 C₁₂H₂₆을 기준으로 예측하여 4.5 % 정도로 과농 가연한계 근처에 있음을 알 수 있으나 여전히 연소가 충분히 일어날 수 있는 조건이다.

검토 대상으로 한 엔진 조건은 엔진회전수 1,500 rpm/ 엔진부하 4.7 kg·m, 2,000 rpm/ 8.0 kg·m 및 3,000 rpm/ 9.5 kg·m 등 세 가지 조건이었으며, 1,500 rpm/ 4.7 kg·m 인 경우의 플라즈마 작동 사진을 Fig. 3에 나타내었다. 사진에서 볼 수 있듯이 과농 예혼합화염과 배기 중의 산소

를 이용하여 형성되는 2차 확산화염이 매연의 자발광으로 인한 황색의 발광 없이 청염을 이루며 안정되게 연소되고 있음을 알 수 있다.

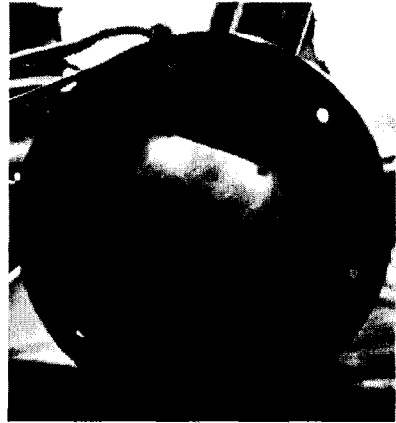


Fig. 3 배기관에 부착된 플라즈마 버너의 작동 사진.

각 검토 조건에 대한 플라즈마 버너 장착 후단의 온도를 측정하여 그 결과를 Fig. 4에 나타내었는데, 세 경우 모두에 있어서 매연의 자연 산화 온도인 600 °C 근처까지 온도가 올라가 있음을 알 수 있으며, 만약에 디젤산화촉매 (DOC)가 장착된 매연저감장치의 경우에는 300 °C 이상으로만 승온해주면 되기 때문에 디젤연료의 양을 반 정도로 줄여주어도 실제 적용에는 무리가 없을 것으로 판단된다.

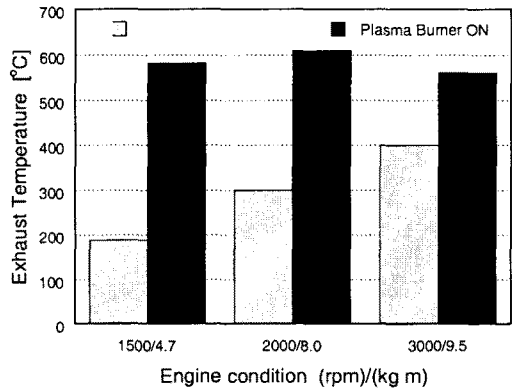


Fig. 4 엔진조건에 따른 플라즈마 버너를 이용한 승온 특성.

본 플라즈마 버너의 연소능력을 평가하기 위하여 본 연구개발에 사용한 연료공급장치 가용 범위인 60 cc/min 의 디젤 연료를 동일한 량의 공기인 50 lpm 을 이용하여 연소 시켜 보았으나 매연에 의한 약간의 황색 발광만이 발생될 뿐 여

전히 안정적인 연소 상태를 유지하는 것을 확인할 수 있었다. 이경우의 공기중 연료 부피비는 13.4 % 정도로 이미 가연한계를 넘어선 부피비이며, 이러한 극한 상황에서도 안정적으로 연소 상태를 유지하는 것으로 미루어 불 때 플라즈마 및 전기장에 의한 연소 특성의 변화가 매우 큰 것을 짐작할 수 있다.

3.2 연소특성 평가

3.1에서 언급한 연소 상태의 육안관찰 및 승온 결과만으로 실용적으로 사용가능하다고 판단하는 것에는 무리가 있다. 실제로 여러 사업자들이 디젤연료를 강제 가열 수단으로 이용하고자 할 때 우려하는 부분이 투입된 연료가 연소되지 못하고 대기 중에 백연 상태로 방출되는 슬립 현상이기도 하다. 이에 따라 본 절에서는 플라즈마 버너를 이용한 연료의 연소 정도를 파악하고자 한다. 연료의 연소정도를 확인하기 위하여 배기가스 성분 분석기를 이용하여 플라즈마 버너 작동 전 후의 배기 가스중의 산소 농도를 측정하고, 배기가스 중에 없어진 산소의 절대량과 20 cc/min의 디젤 연료를 완전연소하기 위하여 필요한 산소의 량을 비교하고자 한다.

연료 20 cc/min 을 완전연소시키기 위한 산소의 양은 표 1의 이론 당량비에서의 공연비, (A/F)stoi = 14.5 임을 기준으로 하여 계산하여 약 43.7 lpm의 산소가 필요하게 됨을 알 수 있으며, 외부에서 플라즈마 버너를 통하여 추가적으로 공급되는 공기의 양이 50 lpm 이므로 추가공급되는 산소의 양은 10.5 lpm 에 이르게 된다. 따라서 희박연소를 기본으로 하는 디젤 엔진의 배기가스에 남아 있는 산소 중에서 33.2 lpm (43.7 - 10.5) 의 산소가 소모되었다면 완전 연소가 이루어 졌다고 판단할 수 있을 것이다.

Table 2 엔진조건에 따른 산소농도 변화

엔진조건 (rpm)/(kg·m)	산소농도 [%]		배기유량 [lpm]
	PB OFF	PB ON	
800/ idle	17.7	12.7	800
1,500/ 4.7	14.1	11.3	1,500
2,000/ 8.0	11.5	9.4	2,000
3,000/ 4.5	10.7	9.4	3,000
1,000/ 10.2	8.2	5.1	1,000
2,000/ 15.2	6.2	5.1	2,000

PB: 플라즈마 버너

산소 농도 변화를 위한 엔진의 조건은 엔진 회전수 800 rpm/ 엔진부하 아이들상태, 1,500 rpm/ 4.7 kg·m, 2,000 rpm/ 8.0 kg·m, 3,000 rpm/ 4.5

kg·m, 1,000 rpm/ 10.2 kg·m, 2,000 rpm/ 15.2 kg·m 등 모두 6가지 경우이다. 각각의 엔진 조건에 대한 결과를 다음의 표 2에 나타내었으며, 엔진 회전수에 따른 배기유량은 화학반응에 의한 부피변화 및 터보차징 등에 의한 엔진 실린더 내부 공기의 밀도변화 등을 고려하지 않은 실린더 부피에 의한 유량 (engine cylinder displacement volume flow rate) 이다.

이 때 각 엔진 조건에 따른 배기 중에 남아있던 산소의 소모량은 플라즈마 버너 작동 전 후의 농도 차이에 배기 유량을 곱하여 얻을 수 있으나, 이 경우에 배기 중에 새롭게 투입된 20 cc/min 의 연료와 50 lpm 의 공기를 고려하지 않게 되어 소모된 실제 산소의 양을 예측하는데 문제가 되게 된다. 이를 보완하기 위해서 디젤의 대표 화학조성인 C₁₂H₂₆ 의 이론 당량비 반응식 으로부터 20 cc/min 의 디젤이 완전연소 되었을 시 늘어나는 부피의 수정을 할 수 있게 된다.

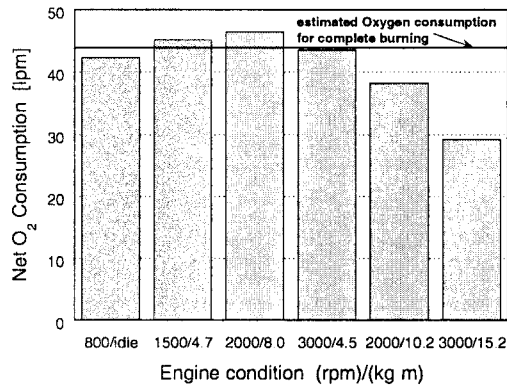
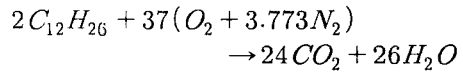


Fig. 5 엔진 조건에 따른 플라즈마 버너에 의한 산소 소모량.

위의 식을 고려할 때 20 cc/min 의 연료는 약 2.24 리터의 부피에 해당하게 되며, 이를 기준으로 50 lpm 추가 공기와 배기 중에서 소모되는 산소의 부피 등을 고려한 알짜(net) 추가 유량은 약 65 lpm 이 되게 된다. 이를 근거로 플라즈마 버너의 작동으로 인하여 실제로 소모된 산소의 량은 다음의 Fig. 5와 같다. 그래프에서 볼 수 있듯이 대부분의 운전영역에서 연료의 슬립이 거의 없이 완전한 연소가 일어난다고 판단할 수 있으며, 엔진회전수 변화에 따른 플라즈마 버너의 1차 화염에 횡풍(cross flow)으로 작용하는 배기 관내의 속도는 큰 영향이 없음을 알 수 있다. 한편, 고부하로 인하여 엔진 배기내의 산소농도가

회박해 질수록 플라즈마 버너에서 누출되는 연료와 배기 내의 잔여 산소가 만들어내는 2차 확산 화염이 완전하게 형성되기 어려워짐을 알 수 있다. 그러나, 본 실험에서는 플라즈마 버너의 후단에 디젤산화촉매를 장착하고 있었기 때문인지 대기 중으로 유출되는 연료 증기에 의한 백연은 관찰되지 않았다.

3.3 플라즈마 버너 작동원리

현재로서는 정확한 플라즈마 버너의 작동 메커니즘에 대하여 규명된 것은 아무것도 없다고 할 수 있다. 그 이유로는 본 연구가 학문적인 측면보다는 개발에 초점을 맞추어 진행되었기 때문이기도 하지만, 아직까지 어떠한 기초 실험에서도 명확하게 플라즈마나 전기장의 영향을 설명해줄 만한 근거를 찾기 어렵기 때문이다. 그래도 본 절에서는 본 플라즈마 버너가 전술한 바와 같이 열악한 상황에서도 우수하게 작동될 수 있는 까닭에 대하여 논의하고자 한다.

우선, 회전 아아크 플라즈마에 의한 효과이다. 아아크 플라즈마에 의한 영향은 크게 두 가지로 생각할 수 있으며, 하나는 아아크에 의한 플라즈마 버너 내에서 연료/공기 혼합기가 점화되는 것이다. 플라즈마가 작동되는 동안 아아크는 플라즈마 버너 내부에서 회전유동에 의하여 회전하게 되며, 이 아아크가 점화원이 되어 연속적인 점화(혹은 pilot heat source 개념)가 일어나게 되어 화염의 안정성에 기여하게 될 것으로 판단된다. 그리고 플라즈마에 의하여 생성되는 수소 및 낮은 탄소수를 갖는 탄화수소 등이 연소반응에 긍정적으로 기여할 것으로 생각된다 [9].

플라즈마 버너 내부는 고전위 전기장에 노출되어 있는 상태로서 이러한 경우에 삼지화염의 전파속도가 매우 빨라지고, 화염의 안정성 영역도 증대된다는 보고들이[3-7] 있어서 극한 상황의 연소 안정성에 고전위 전기장 또한 긍정적으로 작용하게 될 것으로 기대된다. 또한 전기장 및 플라즈마의 영향으로 인하여 플라즈마 버너 내부에서 발생될 수 있는 매연의 발생량도 최소화시킬 수 있을 것으로 판단된다[8].

마지막으로 플라즈마 및 연소에 의하여 발생되는 열을 투입공기의 예열 및 연료의 기화에 효과적으로 사용하기 때문에 연소 전 단계에서의 효과 또한 연소현상에 긍정적으로 작용하고 있을 것으로 판단된다.

4. 결 론

회전 글라이딩 아아크 플라즈마를 이용한 플라즈마 버너를 개발하였다. 본 플라즈마 버너의 적

용치는 디젤 차량의 매연저감장치를 위한 강제 가열 수단으로 사용될 수 있을 것으로 기대된다. 개발 과정에서 사용한 추가 공기는 50 lpm 으로 압축기가 장착된 차량의 가용 공기량의 절반 수준이었으며, 2,000 cc 엔진의 경우에 안정된 상태로 연소 가능한 연료량은 20 - 60 cc/min 이었다. 2,000 cc 엔진의 배기관에 20 cc/min 의 연료를 플라즈마 버너를 이용하여 연소시킨 경우에 배기온도는 매연의 자연 산화온도인 600 °C 근처까지 비교적 넓은 범위의 엔진회전수와 부하 조건에서 승은 시킬 수 있었다. 플라즈마 버너를 이용한 화염의 연소상태는 엔진회전수에는 비교적 둔감하였으나, 배기 내의 잔여 산소농도에 영향을 주는 엔진 부하가 높아지면 배기 내의 회박한 산소의 영향으로 미연 연료가 발생할 가능성이 있다. 그러나 디젤 산화촉매를 장착한 경우에는 대기 중으로 방출되는 기화된 연료인 백연은 관찰되지 않았다. 이렇듯 연소가 안정적으로 일어나기 어려운 환경에서도 안정적인 연소상태를 유지할 수 있는 원인으로는 아아크에 의한 연속적인 점화, 플라즈마에 의한 연료 개질 효과, 전기장에 의한 연소속도의 증가, 플라즈마에 의한 매연 발생억제, 발생열의 효율적인 재사용 등을 들 수 있다.

후 기

이 연구는 한국기계연구원의 Buy KIMM Tech 프로그램으로 이루어 졌습니다.

참고문헌

- [1] J. Lawton, F. J. Weinberg, *Electrical Aspects of Combustion*, Clarendon Press, Oxford (1969).
- [2] F. J. Weinberg, *Advanced Combustion Method*, Academic Press, New York (1986).
- [3] A. Y. Starikovskii, *Proc. Combust. Inst.*, 30 (2005) 2405-2417.
- [4] S. M. Lee, C. S. Park, M. S. Cha, S. H. Chung, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 33 (5) (2005) 1703-1709.
- [5] K. Criner, A. Cessou, J. Louiche, P. Vervisch, *Combust. Flame*, 144 (2006) 422-425.
- [6] S. H. Won, M. S. Cha, C. S. Park, S. H. Chung, *Proc. Combust. Inst.*, 31 (2007) pp.963-970.
- [7] 원상희, 정석호, 차민석, 제33회 KOSCO Symposium 논문집 (2006) pp.220-226.
- [8] M. S. Cha, S. M. Lee, K. T. Kim, S. H. Chung, *Combust. Flame*, 141 (2005) 438-447.
- [9] D. H. Lee, K.-T. Kim, M. S. Cha, Y.-H. Song, *Proc. Combust. Inst.*, 31 (2007) pp.3343-3351.