플라즈마 응용 고 에너지 점화 시스템 개발 및 적용

강 혜 현¹⁾ · 최 두 원¹⁾ · 박 진 일^{*2)} · 이 종 화²⁾ · 박 경 석³⁾ · 안 종 영⁴⁾

아주대학교 대학원 기계공학과 · 아주대학교 기계공학과²⁾ · 금오공과대학교 기계시스템공학과³⁾ · 유라테크 선행개발팀⁴⁾

Development and Application of High Energy Ignition System Using Plasma

Hyehyun Kang¹⁾ · Duwon Choi¹⁾ · Jinil Park^{*2)} · Jonghwa Lee²⁾ · Kyoungseok Park³⁾ · Jongyoung Ahn⁴⁾

¹⁾Department of Mechanical Engineering, The Graduate School of Ajou University, Gyeonggi 442-749, Korea

²⁾Department of Mechanical Engineering, Ajou University, Gyeonggi 442-749, Korea

³⁾Department of Mechanical System Engineering, Kumho National Institute of Technology, Gyeongbuk 730-701, Korea

⁴⁾Proactive Development Team, Yuratech, 380 Pangyo-ro, Bundang-gu, Seongnam-si, Gyeonggi 463-400, Korea

(Received 31 October 2013 / Revised 24 January 2014 / Accepted 25 February 2014)

Abstract : This study is a follow-up study of “Development of Plasma Ignition System” was presented at the 2013 KSAE spring conference. This study compares lean limit of conventional ignition system with plasma ignition system on constant volume combustion test & Engine Combustion test.

Key words : Constant volume combustion(정적 연소), COVimep(Coefficient of variation of IMEP, 도시평균유효압력 사이클 변동계수), Lean burn(희박연소), Lean limit(희박가연한계), Plasma ignition system(플라즈마 점화 시스템)

Nomenclature

λ : excess air ratio, -
COV_{imep} : coefficient of variation of IMEP, %
IMEP : indicated mean effective pressure

1. 서 론

환경오염과 석유자원의 고갈로 강화 되고 있는 연비 및 배기가스 관련 규제를 만족시키기 위해 자동차 업계에서는 하이브리드 자동차나 연료전지 자동차 같은 새로운 동력 시스템의 개발과 더불어 기존의 내연기관 시스템의 개선에도 많은 노력을 기울이고 있다.¹⁾

기존의 내연기관 시스템 중 가솔린 엔진의 경우, 직접 분사 기술과 더불어 배기가스재순환(EGR)나 희박 연소(Lean burn) 기술 같은 희박 공연비 상태에서의 연소기술 개발을 통해 부분 부하에서 펌핑 로스의 저감 및 연소 가스의 온도를 낮춰 열손실을 줄임으로써 연비를 개선하고자 하고 있다.²⁻⁴⁾

그러나 희박 공연비 상태의 연소에서 충분한 점화 에너지를 공급하지 못하는 경우에는 실화(misfire)의 위험이 있다. 따라서 점화 초기의 확실한 점화를 보장하기 위해서는 고 에너지 점화 시스템이 고려되어야 한다.⁵⁾

고에너지 점화를 위해 Federal-Mogul, NGK, Denso 등의 회사에서는 플라즈마 응용 점화 시스템을 대안으로 제시하고 연구하고 있다. 플라즈마는 기존에 여러 분야에서 다양한 형태로 응용되어 왔기 때문에 플라즈마를 발생시키는 방법도 여러 가지가

*A part of this paper was presented at the KSAE 2013 Annual Conference and Exhibition

*Corresponding author, E-mail: jpark@ajou.ac.kr

존재한다. 플라즈마를 점화 시스템에 적용하기 위해서 앞서 언급한 회사들은 크게 아크 방전 시 직류 고전압을 공급하여 플라즈마 제트를 발생시키거나, 펄스 전원을 인가하여 코로나 방전이 일어나게 하는 두 가지 방법을 이용하였다.

플라즈마 제트를 이용한 점화 시스템에 관하여 2000년 대 이전부터 플라즈마 제트 점화 시스템의 개발을 포함하여, 플라즈마 플러그의 형상과 플라즈마 점화 장치의 특성에 따른 플라즈마 제트의 형상에 대한 연구, 플라즈마 플러그의 형상과 정적 연소실의 형상에 따른 연소 특성에 대해 연구한 결과가 존재한다.⁵⁻⁷⁾

그러나 실제 엔진에 적용하였을 경우에 관해서는 아직 연소 특성 및 효과 파악에 대한 연구 결과가 없는 실정이다. 따라서 선행 연구 및 본 연구를 포함, 이어질 후속 연구를 통하여 플라즈마 제트 점화 시스템을 실 엔진에 적용하였을 때의 영향도를 파악하고자 한다.⁸⁾

본 연구에서는 선행 연구를 통해 개발한 플라즈마 제트 점화 시스템을 정적 연소실과 1.6L급 GDI NA 엔진에서 적용하여 기존 점화 시스템과 회박 조건에서의 연소 특성을 비교하였다.

2. 실험 장치

2.1 플라즈마 제트 점화 시스템

Fig. 1은 플라즈마 제트 점화 시스템의 회로와 정적 연소 실험 장치를 간략하게 설명한 그림이다. 플라즈마 전원장치는 커패시터에 400 ~ 700V 정도의 전압을 충전시켜 놓았다가 점화 플러그에서 절연과 파괴가 일어남과 동시에 저 전압 방전 구간에서 커패시터에 저장된 에너지가 일순간에 방출되도록 구성되었다.

Fig. 1 Plasma jet ignition system

본 연구에서는 커패시터 용량은 3μF, 커패시터 충전 전압은 600V로 고정하였다. 이때 점화 에너지는 500mJ 이상으로 기존 점화 시스템의 20 ~ 35mJ과 비교하여 고에너지를 사용한다.

2.2 플라즈마 플러그

Fig. 2와 Table 1은 실험에 사용된 플라즈마 플러그의 형태와 제원을 나타낸 것이다. 선행 연구에서 플라즈마 플러그는 폭이 일정하게 좁은 형태(A 형), 폭이 일정하게 넓은 형태(B 형), 폭이 넓었다가 좁아지는 형태(C 형), 세 가지로 나눌 수 있었고, 플라즈마 제트의 형상은 이 세 가지 형태에 의해 결정되었다.⁸⁾

선행 연구에서는 제원별로 총 8가지 종류의 플러그가 있었지만 연구 결과에 따라 A, B, C 형태의 플러그 각각 1개씩과 플라즈마 제트가 다른 형태의 플러그 보다 두껍고 길게 형성되었던 A 형태의 플러그 하나를 더 추가하여 총 4 종류의 플라즈마 플러그에 대하여 정적 연소 실험을 수행하였다.

Table 1 Plasma plug specifications

플러그 명칭	LC (mm)	DC1 (mm)	DC2 (mm)	내부체적 (mm ³)
A-1.0	1.0	1.0	1.0	0.79
A-1.5	1.5	1.0	1.0	1.18
B-1.0	1.0	2.2	2.2	3.80
C-1.0	1.0	2.2	1.0	3.80

Fig. 2 Plasma plug shape and specifications name

2.3 정적 연소 실험 장치

Fig. 3은 정적연소실의 형상을 나타낸 것이다. 정적 연소실은 약 400cc의 체적을 가지는 원통형의 구조로 점화 플러그가 설치되는 맞은편과 측면에서 연소 과정을 관찰할 수 있도록 창이 나있다. 창은 석영유리를 이용하였으며 정면 창은 반경 30mm 측면 창은 반경 20mm이다.

Fig. 3 Constant volume combustion chamber

Fig. 4는 정적연소 실험을 위한 구성을 나타낸 것이다. 정적 연소실에는 고압으로 충전되어 있는 공기와 프로판이 연결되어 있다. 공기와 프로판은 정밀한 압력계와 레귤레이터를 이용하여 공연비를 조절한다.

또한 점화 플러그 형태의 압력센서가 설치되어 있어 연소실 내부의 압력 변화를 오실로스코프를 이용하여 측정한다. 오실로스코프는 압력 외에도, 1차 코일 전압, 2차 코일 전압, 플라즈마 공급 전압 등을 확인할 수 있도록 연결되어 있다.

절연 파괴가 일어난 시점부터 고속 카메라 촬영을 시작할 수 있도록 오실로스코프를 이용하여 2차 코일 전압이 하강할 때 트리거 신호를 보내주도록 장치하였다.

점화 플러그는 플라즈마 응용 점화 시스템과 연

Fig. 5 Engine test system

결해 주고, Power TR로 보내는 ECU 신호는 함수발생기를 이용하여 만들어 준다.

2.4 엔진 실험 장치

Fig. 5는 엔진 실험 장치의 개략도이다. 엔진 실험을 위해 1.6L GDI NA 엔진을 AVL사의 120kW AC 동력계에 설치하였다. 엔진 헤드를 가공하여 키슬러사의 수냉식 연소압 센서를 설치하여 연소 상태를 측정하였다. 정적 연소 실험에서처럼 직접적으로 공연비를 제어 할 수 없기 때문에, 광대역 산소센서를 배기 다기관에 설치하여 공연비를 측정하였다. 측정 장비는 키슬러사의 KIBOX를 이용하였다. 기존에 있는 점화 코일 선을 변경하여 플라즈마 제

Fig. 4 Constant volume combustion test system

트 점화 시스템을 적용하였다.

엔진을 희박공연비 상태에서 운전시키기 위해 ECU의 공연비제어를 Open loop control 상태가 되도록 산소 센서 신호를 차단하는 스위치를 장치하였다. 또한 엔진의 스로틀을 제어하고, MAP 신호를 중간에서 차단하고 ECU에 가짜 MAP 신호를 입력할 수 있도록 배선하였다.

산소 센서 신호를 차단하여 공연비 제어가 Open loop 상태가 되면, MAP에 의해서만 연료량을 제어하게 된다. 이 때 스로틀을 MAP 0.6bar 정도가 되도록 열어 준 상태에서 MAP 신호를 중간에서 차단하고 0.5bar의 신호를 넣어주면, ECU에서는 0.5bar를 기준으로 연료를 분사하라고 제어신호를 보낸다. 그러나 실제 MAP은 0.6bar로 이론 공연비보다 더 많은 공기가 유입되고 있는 상태, 희박한 상태로 운전을 하게 된다.

위와 같은 방법으로 MAP에 제어신호를 일정하게 주어 연료량을 고정하고 스로틀 개도량을 조절하는 방식으로 공연비를 제어하여 연소실험을 수행하였다.

3. 정적 연소 실험

정적 연소 실험에서는 기존 점화 시스템과 플라즈마 제트 점화 시스템에 대하여 연소 가능한 희박 조건 범위를 비교하였다. 또한 공연비 조건에 따라 연소 특성이 어떻게 변하는지를 실험하였다.

이를 위해 연소 압력을 측정함과 동시에 고속카메라를 이용하여 연소 가시화를 진행하였다. 서로 동일한 시점에서 각각의 결과들을 비교하기 위해, 2차 코일 전압을 측정하여 점연과폭이 일어나는 시점을 트리거로 하여 실험을 진행하였다.

프로판의 양은 모두 동일하게 0.14 bar를 주입하였으나, 공연비 조건을 다르게 만들기 위해 공기량을 바꾸기 때문에 연소가 시작할 때의 압력은 차이가 날 수 있다. 프로판과 공기의 공기연료 부피비는 23.9:1로 계산하여 공기 과잉률이 1(λ , excess air ratio)일 때 연소실 내부 압력은 절대압 3.49 bar이다.

본 연구에서는 압력 상승분만을 비교하기 위해 연소 시작 압력을 0 bar로 놓고 결과를 표시하였다.

3.1 공연비 조건에 따른 연소 특성의 변화

Fig. 6은 기존 점화 시스템에서 공연비 조건을 변화 시키면서 연소시켰을 때의 연소 압력을 측정하고 결과이다. 0초에서 점연과폭이 일어나 점화가 되면서 연소가 시작한다. 공기 과잉률이 1.29 이상에서는 연소가 발생하지 않았다. 따라서 이때를 희박가연한계로 볼 수 있다.

Fig. 7은 플라즈마 제트 점화 시스템에서 공연비 조건을 변화 시키면서 연소시켰을 때의 연소 압력을 측정하고 결과이다. 플러그는 A-1.0 플러그를 사용하였다.

기존 점화 시스템에서 보다 더 희박한 조건인 공기 과잉률 1.5 이상에서 연소가 가능함을 확인하였다. 공연비 조건이 희박해질수록 최고 압력에 도달하는 속도가 느려짐을 확인할 수 있다.

동일한 실험을 플라즈마 제트 점화 시스템에서 다른 형태의 점화 플러그에 대하여 실험한 결과를 정리하여 연소특성을 비교한 그래프가 Fig. 8과 Fig. 9이다.

연소 압력이 가장 높을 때를 표시한 그래프가 Fig. 8이다. 기존 연소 시스템과 플라즈마 제트 연소 시스템을 사용하였을 때 최고 압력의 차이는 거의 없는 것으로 보이나, 대체적으로 기존 시스템의 최고 압력이 아래쪽에 분포하고 있다.

Fig. 6 Result of constant volume combustion test - conventional ignition system

Fig. 7 Result of constant volume combustion test - plasma ignition system, A-1.0 plug

Fig. 8 Result of constant volume combustion test - peak pressure

Fig. 9 Result of constant volume combustion test - time to peak pressure

Fig. 9는 최고 압력 도달 시간을 표시한 그래프로 연소 속도를 나타낸다. 공연비 조건이 희박해질수록 연소 속도가 느려지는 것을 확인할 수 있다.

그래프에 실선으로 표시한 부분이 기존 점화시스템의 결과를 Curve fitting한 것이고, 플라스마 제트 점화 시스템의 플러그별 실험 결과를 모두 모아 Curve fitting하여 점선으로 표시하였다. 따라서 플라스마 제트 점화 시스템을 적용하였을 때 기존 시스템에서보다 연소 속도가 빨라짐을 확인할 수 있다.

이는 기존 시스템에서 보다 점화 에너지가 더 높기 때문인 것으로 생각되며, 플라스마 시스템을 적용하였을 때 플러그 형태 별로 연소속도가 차이 나지 않는 것은 점화 에너지가 동일하기 때문으로 판단된다.⁹⁾

3.2 희박연소한계

정적 연소실에서의 압력변화와 고속 카메라를 이용하여 화염 발생 여부를 촬영하여 연소가 발생했는지 판단하였다. Slow burn이나 Partial burn과 관계 없이 연소 여부만으로 희박연소한계를 판단하여 표시한 것이 Table 2이다.

기존 점화 시스템에서의 희박연소한계는 공기 과잉률 1.3 근처이고 플라스마 제트 점화 시스템에서는 공기 과잉률 1.5 ~ 1.6 사이이다. 따라서 플라스마 응용 점화 시스템을 적용하였을 때 기존의 점화 시스템보다 희박 영역이 약 21% 확장되었음을 알 수 있다.

Table 2 Result of constant volume combustion test - lean limit

Ignition system	Lean limit(λ)
Conventional	1.29
Plasma A-1.0	1.56
Plasma A-1.5	1.58
Plasma B-1.0	1.55
Plasma C-1.0	1.55

3.3 가시화 결과

Fig. 10과 11은 정적 연소실에서의 가시화 결과를 나타낸 것이다. 500 μ s마다 한 장씩 촬영했기 때문에 연소 시작 시점이 최대 500 μ s까지 차이가 날 수 있다. 연소 시 청염이 전파되는 과정은 노출 시간이 짧고 청염을 촬영하기 위한 별도의 필터를 사용하지 않았기 때문에 본문의 사진 상으로는 잘 관찰 되지 않는다.

Fig. 10은 왼쪽이 플라스마 제트 점화 시스템, 오른쪽이 기존 점화 시스템을 사용하였을 때의 연소 과정을 측면에서 가시화 한 것이다. 0초에서 플라스마 플러그에서는 밝은 플라스마 제트가 방출 되고 있고, 기존 플러그에서도 스파크가 보이며 점화가 시작 되었다.

플라스마 제트 점화 시스템에서는 밝고 큰 화염이 퍼지는 것이 보이면서 밝아진다. 기존 점화 시스템에서는 연소실 내부가 전체적으로 점차 밝아진다. 연소가 완료된 지점으로 보이는 연소실 내부가 가장 밝아지는 때는 이미지를 회색조로 변환한 뒤 이미지 값이 250 이상인 픽셀의 수를 세어 판단하였

Fig. 10 Result of constant volume combustion test - visualization at $\lambda = 1.00$

Fig. 11 Result of constant volume combustion test - visualization at $\lambda = 1.35$

다. 연소가 완료되는 시간은 플라즈마 응용 점화 시스템을 적용 했을 때가 약 20ms 정도 더 빠르다.

Fig. 11은 공기 과잉률 1.35의 희박한 조건에서의

연소를 가시화하여 비교한 것이다. 기존 점화 시스템에서 공기 과잉률 1.35일 때는 연소가 되지 않으나, 여러 번 점화를 시도하여 연소가 성공했을 때를 가시화 하였다.

이론 공연비 상태에서의 전체적인 연소과정과 비슷하나, 플라즈마 제트 점화 시스템의 경우 화염이 희미해 졌다. 전체적으로 연소 속도가 느려졌고, 연소실 내부를 밝히는 걸리는 시간은 130ms 이상 이가 난다.

4. 엔진 연소 실험

정적 연소 실험에서 플라즈마 제트 점화 시스템을 적용했을 때, 기존 점화 시스템에서 보다 희박연소한 계가 확장되고, 연소 속도가 더 빠른 것을 확인하였다.

정적 연소실에서 확인한 결과가 실제 엔진에서도 동일하게 나타나는지 확인하기 위해 연소압 센서와 광대역 산소센서를 설치한 1.6L GDI NA 엔진에서 실험을 진행하였다.

본 연구에서는 MAP 센서의 신호를 일정한 흡기 압이 유지되고 있다고 속여 일정한 연료량이 분사 되도록 한 후, 스로틀 개도량을 제어하여 실제 공기량을 조절해 공연비를 제어하였다.

엔진에 흡입되는 정확한 공기량을 파악하기 어렵기 때문에 실제 공연비는 배기매니폴드에 부착한 광대역 산소 센서를 이용하여 확인하였다. 불완전 연소가 발생할 때는 산소 센서의 측정값이 불안정해 지면서 공연비의 측정이 불확실 할 수 있다. 본 연구에서는 산소센서 측정값의 COV를 확인하여 신뢰할 수 있는 영역의 값들을 사용하였으나, 연소가 불안해지는 희박한 영역으로 갈수록 오차가 증가한다. 연소 상태는 실린더 내부에 설치한 연소압 센서를 이용하여 확인하였다.

엔진에 대한 적극적인 제어가 불가능하기 때문에 기존 점화 시스템과 플라즈마 제트 점화 시스템을 동일한 조건에서 비교하기 위해, 1번, 4번 실린더에는 기존 점화 시스템, 2번, 3번 실린더에는 플라즈마 제트 점화 시스템을 적용하여 실험을 진행 하였다.

따라서 본 연구에서는 엔진 속도, 점화시기, 엔진 온도, 엔진 부하, 연료량, 공연비 등이 모두 동일한 조건에서 기존 점화 시스템과 플라즈마 제트 점화

Fig. 12 Result of engine combustion test - engine speed: 1000rpm, fuel input : 33mg/cycle

Fig. 13 Variation of IMEP - engine speed: 1000rpm, fuel input : 33mg/cycle, $\lambda = 1.39$

시스템의 연소 특성 차이만을 비교하였다.

실제 플라스마 제트 점화 시스템의 정확한 영향도를 파악하기 위해서는 점화시기 변경 및 다양한 부하 및 엔진 속도 조건에서의 실험이 필요하다. 이는 엔진에 대한 적극적인 제어가 필요한 사항이기 때문에 엔진 제작사의 협력을 통한 추가 연구가 필요하다.

Fig. 12는 엔진 속도 1000rpm, MAP 0.4bar 기준 연

료량 분사 시에 공연비 조건에 따른 연소 특성이다. 첫 번째 그래프는 각각의 공연비 조건에서 200 cycle 동안의 IMEP를 점화 시스템 별로 평균내서 그린 그래프이고, 두 번째 그래프는 아래의 식으로 계산한 IMEP 변동계수이다.

공연비가 희박지면 동일한 연료량에 대하여 더 많은 공기가 들어오기 때문에 희박 연소에 의한 이득으로 IMEP가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 그러나 공연비가 너무 희박해지면 연소안정성이 떨어지면서 오히려 IMEP가 감소한다.

연소 안정성은 COV_{imep} 로 확인할 수 있으며 일반적으로 10% 이상이 되면 운전성에 문제가 있다고 판단할 수 있다. 플라스마 제트 점화 시스템을 적용하였을 때가 희박한 공연비에서 연소가 더 안정적이다.³⁾

Fig. 13, 14는 Fig. 12에 원으로 표시한 공기 과잉률 1.39에서의 연소 상황을 그린 것이다. Fig. 12은 COV_{imep} 에 따라 각 실린더의 IMEP가 어느 정도의 변동 폭을 보이는지 표시한 것이다. 기존 점화 시스템에 비해 플라스마 제트 점화 시스템이 더 안정적으로 연소가 되고 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 14는 200 cycle 동안의 실린더 내부압력을 평균한 것이다. 동일한 점화 시기에서 연소가 시작되었으나 플라스마 제트 점화 시스템을 적용하였을 때 최고 압력에 도달하는 타이밍이 약 5°정도 더 빠르고, 최고 압력은 약 6.5 bar 더 높다.

Fig. 15는 Fig. 12와 동일 부하에 엔진 속도가 2000rpm으로 증가했을 때의 연소특성을 나타내었고, Fig. 16

Fig. 14 200 cycle average pressure - engine speed: 1000rpm, fuel input : 33mg/cycle, $\lambda = 1.39$

Fig. 15 Result of engine combustion test - engine speed: 2000rpm, fuel input : 33mg/cycle

Fig. 17 Result of engine combustion test - engine speed: 1000rpm, fuel input : 33mg/cycle

Fig. 16 Result of engine combustion test - engine speed: 1000rpm, fuel input : 41mg/cycle

Fig. 18 Result of engine combustion test - engine speed: 1000rpm, fuel input : 33mg/cycle

은 동일 엔진속도에 더 높은 부하인 MAP 0.5bar 기준 연료량을 분사할 때의 연소특성을 나타낸 그래프이다. Fig. 12와 비교하여 큰 특성차이는 나타나지 않는 것으로 보인다.

Fig. 17과 Fig. 18은 각각 플라즈마 플러그 A-1.0과 비교하여 B-1.0, C-1.0의 연소특성을 나타낸 그래프이다. 내부 유동이 없는 상태에서 연소가 시작하는 정적연소실에서의 결과와 달리, 유동이 있는 실제

엔진에서는 성능차이가 존재하는 것으로 나타났다. A 타입의 플라즈마 플러그를 적용하였을 때 공기 과잉률 1.4 이상에서 상대적으로 안정적인 연소를 하는 것을 확인할 수 있다.

5. 결 론

- 1) 정적 연소 실험에서 이론 공연비 조건에서는 기존 점화 시스템과 플라즈마 제트 점화 시스템을 적용하였을 때의 최고 압력 도달 시간은 거의 차이가 나지 않으나, 희박한 영역으로 갈수록 차이가 커진다. 공기 과잉률 1.29 일 때는 플라즈마 제트 점화 시스템의 최고 압력 도달 시간이 기존 점화 시스템보다 약 29% 더 빠르게 나타났다. 최고 압력은 큰 차이를 보이지 않았다.
- 2) 정적 연소 실험에서 플라즈마 제트 점화 시스템을 적용하여 총 4 종류의 플러그를 사용하여 연소특성을 비교하였을 때, 플러그 형태에 따른 연소 특성 차이는 없는 것으로 보인다. 이는 점화 에너지가 동일하기 때문으로 판단된다.
- 3) 정적 연소 실험에서 기존 점화 시스템의 희박연소한계는 공기과잉률 1.29이다. 플라즈마 제트 점화 시스템의 희박연소 한계는 총 4 종류의 플러그를 사용하여 실험했으며 이를 평균 낸 공기 과잉률 1.56이 희박연소한계이다. 따라서 플라즈마 제트 점화 시스템을 적용하였을 때 희박연소한계는 약 21%가 확장 되었다.
- 4) 결론 1)의 내용과 가시화 결과에 따라 플라즈마 제트 점화 시스템은 기존 점화 시스템보다 초기 화염핵 형성 및 화염 전파에 이점이 있음을 판단할 수 있다.
- 5) 엔진 연소 실험에서 COV_{imep} 를 이용하여 연소 안정성을 판단하였을 때, 플라즈마 제트 점화 시스템을 적용하였을 때가 공연비가 희박한 조건에서 연소 안정성이 더 좋은 것으로 나타났다.
- 6) 엔진 속도 1000rpm, 연료량 33mg/cycle, 공기과잉률 1.39에서 플라즈마 제트 점화 시스템의 최고 압력은 기존 점화 시스템보다 약 44% 더 높고 최고 압력에 도달하는 크랭크 앵글은 약 5° 더 앞선다. 플라즈마 제트 점화 시스템의 최고 압력이 더 높고, 연소 속도 또한 더 빠른 것을 확인할 수 있다.

- 7) 엔진 연소 실험에서 엔진 속도 및 부하에 따른 큰 특성차이는 없는 것으로 나타났다. 정적 연소 실험에서의 결과와 달리 플라즈마 제트 점화 시스템의 플러그 형상에 따라 연소 특성에 차이가 존재한다. 이는 정적 연소실에서와 달리 연소실 내부에 유동이 존재하기 때문으로 판단된다. 가장 연소가 안정적인 플러그는 A 형상의 플러그로 나타났다.

References

- 1) S. Moon, "Recent Trend in Eco-car Policies and Vehicle Development in Japan," Auto Journal, KSAE, Vol.34, No.11, pp.50-54, 2012.
- 2) Y. Choi and S. Lee, "Status of Domestic EGR Technology," Auto Journal, KSAE, Vol.34, No.12, pp.55-59, 2012.
- 3) J. B. Heywood, Internal Combustion Engine Fundamentals, McGraw Hill, New York, 1988.
- 4) S. Jo, H. Heo, S. Bae and H. Seo, "CFD Analysis for Development of an Offset Fin Type EGR Cooler for Gasoline Engine," KASE Spring Conference Proceedings, pp.245-250, 2013.
- 5) H. W. Ryu, J. S. Park, H. S. Yoo and M. H. Kim, "Combustion Characteristics Ignited by Plasma Jet Igniter in Constant Volume Vessels Shaped Like Conventional Engine Chamber," KSAE Fall Conference Proceedings, pp.79-86, 1999.
- 6) J. S. Park, B. J. Oh and M. H. Kim, "A Development of Plasma Jet to Realize Ultra Lean Burn," KSAE Spring Conference Proceedings, pp.451-456, 1996.
- 7) B. J. Oh, J. S. Park and M. H. Kim, "Combustion Characteristics on LPG-air Mixture of Various Plasma Jet Plug Shape," KSAE Spring Conference Proceedings, pp.108-115, 1997.
- 8) D. Choi, H. Kang, J. Park, J. Lee and K. Park, "Development of Plasma Ignition System," KSAE Spring Conference Proceedings, pp.48-51, 2013.
- 9) J. Song, Y. Seo and M. Sunwoo, "A Study on the Effects of Ignition Energy and Discharge Duration on the Performances of Spark Ignition Engines," Transactions of KSAE, Vol.9, No.6, pp.40-46, 2001.