

코로나 방전을 이용한 고에너지 점화 시스템 개발

박 경 석¹⁾ · 최 두 원²⁾ · 강 혜 현²⁾ · 이 종 화²⁾ · 박 진 일^{*2)}

금오공과대학교 기계시스템공학과¹⁾ · 아주대학교 기계공학과²⁾

Development of a High Energy Ignition System Using Corona Discharge

Kyongseok Park¹⁾ · Duwon Choi²⁾ · Hye Hyun Kang²⁾ · Jonghwa Lee²⁾ · Jinil Park^{*2)}

¹⁾Department of Mechanical System Engineering, Kumoh National Institute of Technology, Gyeongbuk 39177, Korea

²⁾Department of Mechanical Engineering, Ajou University, Gyeonggi 16499, Korea

(Received 17 September 2015 / Revised 6 October 2015 / Accepted 6 October 2015)

Abstract : A high energy ignition system is essential for lean burn or high EGR gasoline engine, which is getting more and more interest to improve fuel economy. The high energy ignition systems comprise plasma jet, laser beam, corona discharge and so on. In this study, a high energy ignition system using corona discharge is developed and tested in a constant volume combustion chamber. The developed system shows extension of lean limit of propane-air mixture and enhancement of combustion speed. Various shape of corona discharge plugs are also tested and compared in this study.

Key words : High energy ignition system(고에너지 점화시스템), Corona discharge(코로나 방전), Constant volume combustion(정적연소), Lean limit(희박 가연 한계)

1. 서 론

급속하게 강화되고 있는 차량 연비 규제에 대응하기 위해 다양한 기술들이 개발 적용되고 있다. 특히 엔진의 효율 향상을 위한 연구는 지속적인 관심 대상이다.¹⁾

내연기관 내에서의 에너지 손실은 열손실, 마찰손실, 펌핑손실 등을 포함하는데, 이 중에서 펌핑 손실은 저부하에서 연비에 상당히 큰 영향을 주는 부분이 될 수 있으므로 배기가스재순환(EGR)과 희박연소(Lean-burn)와 같은 기술을 이용하여 펌핑 손실을 줄이기 위한 연구가 이루어져 오고 있다.²⁾

그런데 현재 가솔린엔진에서 사용되는 점화코일 점화 방식은 희박조건으로 갈수록 착화성의 저하로 인해 연소 안정성이 떨어지는 문제가 발생할 수 있다. 즉, 이론공연비 부근에서 연소가 이루어질 경

우에는 작은 점화에너지로도 충분한 화염핵을 만들어 낼 수 있으나, 공연비가 희박해질수록 화염 전파에 필요한 점화에너지는 급격히 증가한다. 하지만 현재의 코일 점화시스템의 인덕터 사용 방식으로는 에너지를 충분히 공급할 수 없다. 따라서 희박조건에서 연소 안정성 문제를 해결하기 위해서는 고에너지 점화 시스템을 고려해볼 필요성이 있다.³⁾

고에너지 점화 방식에 대한 연구들은 완성차업체와 부품업체에서 지속적으로 연구되고 있다. 이 중에서 플라즈마 방식이라고 불리는 점화방식은 일단 아크 방전이 일어난 후에 비교적 낮은 직류전압(600 V 정도)을 전원으로부터 지속적으로 공급하여 코일에 저장된 에너지보다 훨씬 많은 에너지를 공급해 주는 방식이다.

한편, 다른 고에너지 점화 방식으로는 아크로 진행되기 직전에 고전압을 유지하면서 방전하는 코로나 상태의 방전방식을 들 수 있는데, 이것은 방전 과

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

정에서 아크 방전으로 진행되는 것을 방지하면서 많은 에너지를 전달하는 방식이다. 아크방전은 (+)와 (-) 전극 사이에 하나의 전류 통로 또는 방전 라인이 형성되는 반면, 코로나 방전은 방전이 일어나는 전극을 여러 개로 만들 수 있으며 방사형으로 분산시킬 수 있다는 특징을 가진다. 이것은 아크나 플라즈마처럼 한 지역에 점화에너지를 집중하는 것과는 달리 넓게 여러 지역에서 점화를 동시에 발생시킬 수 있다는 장점이 있다.

그런데, 이러한 코로나 방전방식에서는 적어도 수 10,000 V 이상의 고전압과 수 100 kHz의 이상의 고주파 교류전압을 이용해야 하는데, 이것은 회로적으로 볼 때, 지금의 점화코일 방식이나 플라즈마 방식에 비해 상당히 난이도가 있는 방식이라고 볼 수 있다. 플라즈마 방식에 대한 연구에 비해 코로나 방전을 이용한 점화 방식에 대한 연구가 활발하지 않는 이유는 이러한 기술적으로 해결해야 할 문제가 어렵기 때문인데, 기본적인 전기 절연 문제뿐만 아니라 교류 전압을 생성 제어하는 회로 구성, 주파수 특성과 매칭 등의 기술적 문제와 이를 위한 과다 비용 등 복합적인 문제가 있으므로 아직까지 연구가 미진한 것으로 생각된다.^{4,6)}

본 연구에서는 코로나 방전 방식의 기초 연구를 위해 실험실 수준에서 사용할 수 있는 코로나 방전 회로를 자체적으로 개발하였고, 이 방식의 적용 가능성을 알아보기 위해 간단히 정적챔버에서 연소 실험을 수행해 보았다.

연소 실험에서는 코로나 방전 방식의 공기 과잉률 차이 및 연소 속도 차이를 기존의 점화 플러그와 비교하였으며, 또한 코로나 방전 방식의 점화 플러그의 형상별 차이를 비교해 보았다.

2. 실험 장치

2.1 코로나 방전 점화 시스템

방전은 (+)와 (-)의 두 전극 사이에서 전하의 인력에 의해 일어나는 현상으로서 방전의 진행과정에 대한 연구는 고전 플라즈마 물리학 분야에서 많이 이루어져 왔다.

Fig. 1은 방전과정 중에 전류 전압 관계를 표현한 그래프이다. 방전이 길게 진행되면 결국에는 방전

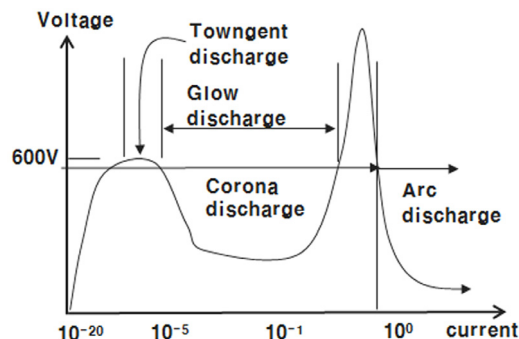


Fig. 1 Explanation graph of the ignition process

경로가 1개로 합쳐지면서 저전압 고전류로 넘어가는 상황이 발생하는데, 이것을 아크 방전이라고 부르고, 그 이전에 방전이 넓게 분포하는 상황을 코로나 방전 상태라고 부른다.

선행 연구자들의 연구에 따르면, 방전은 코로나 형태의 방전에서 아크 방전의 형태로 진행되는 것으로 알려져 있는데, 코로나는 방전 초기에 (-)전극에서 전자가 여러 갈래의 길로 나뉘어져 주도적인 전자 이동 경로가 결정되는 아크 방전 이전에 발생하는 것으로 알려져 있다. 코로나 방전에서 아크 방전으로 천이되는 것은 직류 전압을 계속 유지함에 따른 것인데, 만약 교류가 된다면 방전은 아크로 천이되지 않으면서 공기 중에 방전이 넓게 유지되는 코로나 형태의 방전을 유지할 수 있게 된다.

그런데, 아크 방전은 현재 점화 방식처럼 단순히 고전압의 직류만 만들어 주면 되지만, 코로나는 고주파의 교류 고전압을 만들어 주어야 하므로 회로를 구성하기가 상당히 까다로워진다.

따라서 본 연구에서는 자동차에 직접 사용하기 위한 코로나 방전 시스템을 개발하기 보다는 코로나 방전의 가능성을 검토해 볼 수 있는 정도의 점화 시스템만을 구성하였다.

Fig. 2는 본 연구에서 자체 제작한 코로나 방전 시스템을 간략하게 나타낸 그림이다. 이 시스템의 구성 요소에 대해 간략히 설명하면 다음과 같다.

Fig. 2에 나타낸 고전압 교류용 점화코일은 자체 제작하여 사용하였는데, 그 이유는 현재 가솔린엔진에서 상용으로 쓰이는 점화코일은 인덕턴스가 너무 커서 고주파용으로 사용할 수가 없기 때문이다.

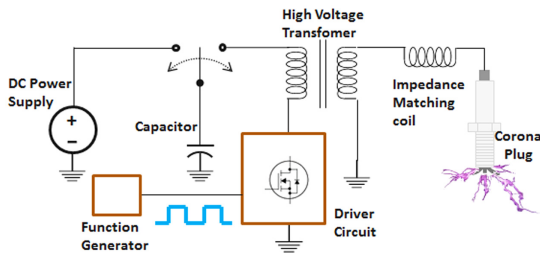


Fig. 2 Schematic diagram of the corona ignition circuit

점화코일은 직경 20 mm, 길이 100 mm 정도인 PVC 파이프에 위에 직경 0.16 mm 에나멜선을 약 2000번 정도 감아서 안쪽에 2차 측 코일을 만들었으며, 0.4 mm 에나멜선을 약 100회 정도 감아서 바깥쪽에 1차 측 코일을 구성하였다.

임피던스 매칭 코일은 교류 회로에서 주파수에 따라 전달 전압이 달라지는 것을 고려해 주기 위해 필요하다고 알려져 있으나 본 연구에서는 실험적으로 확인해 본 결과 큰 효과가 없는 것으로 나타났다.

수 100 kHz, 수 10 kV 교류전압을 순간적으로 발생시키기 위해서는 점화코일의 승압비가 낮을수록 유리하기 때문에 점화코일의 1차 전압을 높게 사용할수록 점화코일의 제작 부담이 적어진다. 그렇지만, 1차 코일의 구동 전압을 높게 사용하면 구동부 트랜지스터의 내압이 높은 것을 사용해야 하는 문제가 발생한다. 본 연구에서는 일단 시중에서 구할 수 있는 트랜지스터 중에서 내압이 최대인 약 900 V 정도인 것을 사용했으며, 트랜지스터의 보호를 위해 1차 측 역전압이 최대 800 V를 넘지 않는 조건이 되도록 실험적으로 회로를 조정하여 사용하였다. 이 과정 중에서 몇 차례의 실험적 과정을 걸친 후에 1차 측 코일에 사용하는 전압을 150 ~ 300 V 수준으로 결정하였다.

DC 파워 서플라이는 가변 전원 형식으로 600 V 까지 제어가 가능하도록 제작하였으나, 높은 전압 때문에 전류 용량은 최대 0.5 A로서 충분하지 않은 단점이 있다.

한편 방전에 일어나는 시간은 불과 0.01초 이내이지만 이 동안 1차 코일에는 수 10 A의 큰 전류가 필요하기 때문에 단순히 전압만 높은 전원으로는 해결이 되지 않는다. 그런데 반대로 고전압 고전류가 수 초 동안 오랫동안 지속된다면, 이 또한 점화 코일

과 드라이버 회로를 훼손할 수 있으므로 바람직하다고 볼 수 없다. 따라서 적절한 시간동안 고전압을 통제할 수 있는 회로가 필요하지만, 본 연구에서는 상용의 목적이 아니므로 최대한 단순한 회로만 있으면 충분하기 때문에 캐패시터와 스위치를 이용하였다. Fig. 2 회로에서 스위치를 왼쪽으로 연결하여 수 초 동안 기다리면 캐패시터에 전원전압으로 충전이 된다. 멀티미터로 충전전압을 확인한 다음, 스위치를 오른쪽으로 전환하면 1차 코일에 전원을 대신하여 고전압을 가해주면서 전류도 순간적으로 충분히 공급해 줄 수가 있다. 또한 캐패시터의 용량에 의해 0.1 초 이내에 전압이 급격히 떨어지므로 실험 장치도 안전하게 보호된다.

코로나 방식 플러그에 공급되는 전력은 현재 사용되는 아크 방식의 점화플러그(수 mJ 수준)에 비해 약 10배 수준으로 측정되었다.

함수발생기에서는 150 ~ 300 kHz 수준의 고주파 신호를 사각파 형태로 발생시킨다. 이 신호는 1차 코일에 연결된 트랜지스터를 반복적으로 on, off 시킴으로 1차측에 교류 전압을 형성한다. 이 교류 전압은 점화코일을 통해 수십 kV로 증폭이 되어 점화플러그로 전달된다. 함수발생기의 주파수는 매우 미세하게 조정할 필요가 있는데, 그 이유는 공진 주파수 근처에서 최대 교류 전압이 형성되지만, 주파수가 조금이라도 틀어지게 되면, 교류 전압은 급격히 낮아지기 때문이다.

코로나 점화 방식의 특징은 전극 형상이다. 일반적인 아크 점화방식인 경우에는 방전이 형성되는 두 전극이 가까이 붙어 있어야 하지만, 코로나 방식은 반대로 전극이 멀리 떨어져야 한다. 거리가 가까운 전극이 있으면 방전이 그 점으로 몰려서 아크 방전으로 진행되기 때문이다. 실린더 벽면이나 헤드 등의 넓은 평면 형태의 도체를 하나의 전극으로 설정하고, 다른 전극은 탐침 형태로 만들어 방출되는 전하가 집중되도록 만든다. 탐침의 형태는 단수 또는 복수 형상으로 만들 수 있는데, 복수 개의 경우에는 방전에너지가 여러 장소로 분산되는 효과를 만들 수 있다. 이것은 화염을 여러 장소에서 동시에 만들 수 있다는 장점을 가질 수도 있지만, 방전에 필요한 에너지가 부족한 경우에는 오히려 연소에 부정적인 효과를 줄 수 있을 것이다.

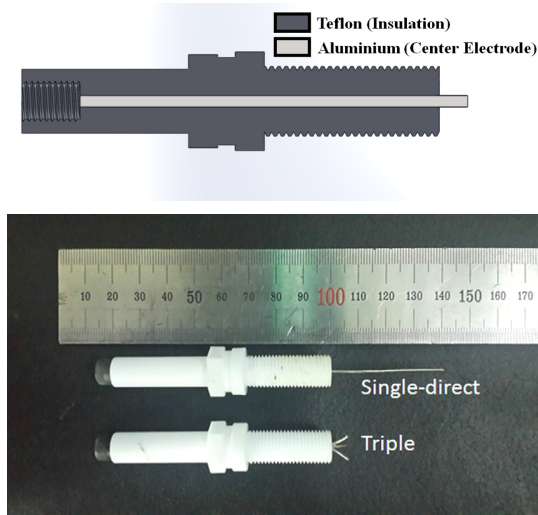


Fig. 3 Types of ignition plug for corona discharge

일반 점화플러그의 몸체는 세라믹 재질로서 절연성, 내열성, 내구성 등에서 매우 우수한 재질이다. 그러나 대량 생산이 아닌 실험실 차원에서는 이러한 재질을 이용한 플러그 제작이 불가능하므로 본 연구에서는 절연성과 가공성이 뛰어난 테플론을 사용하였다.

Fig. 3은 본 연구에서 자체 제작한 코로나 방전 점화 플러그의 형상을 나타낸 것이다. 중심 전극은 방전특성 및 실험을 위해 형태를 쉽게 변화시킬 수 있도록 알루미늄으로 제작되었다.

실험에는 총 세 가지 형태의 플러그가 사용되었는데, 이 중 Single-direct, Triple 타입의 점화플러그의 사진은 위와 같다.

Single-direct 타입은 하나의 중심전극을 가진 형태이며, Triple 타입은 세 개의 중심전극이 여러 곳으로 코로나 방전 에너지를 분산시키는 형태이다. Single-bended 타입은 단순히 Single-direct 타입을 구부려 그 끝부분이 벽면 근처에 접근하여 아크 방전 (Arc discharge)이 발생하도록 한 형태이다. 이 타입은 기존 점화방식을 모사해서 같은 환경에서 점화 방식에 따른 차이를 알아보기 위해 사용되었다.

Fig. 4는 챔버 내 연료가 없는 공기 중에서 코로나 방전이 일어날 때 촬영한 사진 중 하나이다. 보는 바와 같이 3개의 탐침에서 수없이 많은 방전라인들이 공기 중으로 갈라져 나오면서 형성되는 것을 볼 수 있다.

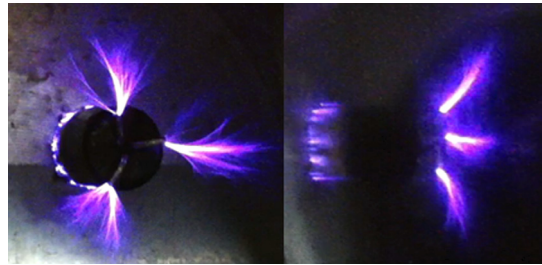


Fig. 4 Picture of corona ignition on triple probe

2.2 정적 연소 실험 장치

Fig. 5는 실제 연소 실험을 수행하기 위해 제작한 정적 연소실 형상을 나타낸 것이다. 정적 연소실은 약 400 cc의 체적을 갖는 원통형의 구조로 되어 있으며 점화 플러그에서 일어나는 현상을 잘 관측할 수 있도록 정면과 측면에 모두 석영 유리로 제작된 가시화 창을 가지고 있다. 정면의 창은 반경 40 mm, 측면의 창은 반경 30 mm로 설계되었다.

정적 연소실은 스파크 플러그 형태의 압력센서가 설치되어 있어 내부 압력을 오실로스코프를 이용해 확인할 수 있으며, 오실로스코프에서 동시에 각각의 코일들의 전압 또한 확인할 수 있다.

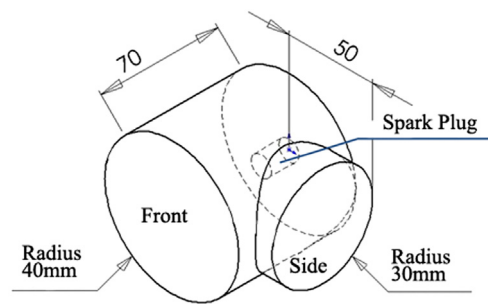


Fig. 5 Constant volume combustion chamber

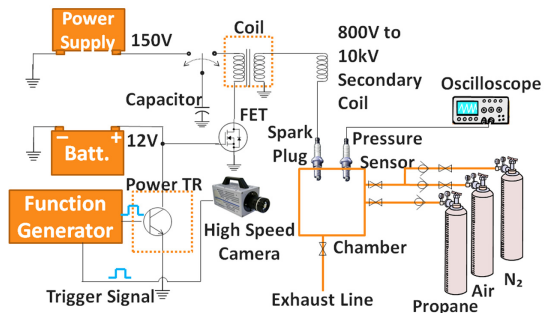


Fig. 6 Constant volume combustion experiment system

Fig. 6은 정적 연소 실험 및 가시화를 위해 구성한 실험 장치의 개략도이다. 정적 연소실은 고압으로 충전되어있는 공기, 질소 그리고 프로판이 연결되어 있으며, 공기와 프로판은 정밀 압력계와 레귤레이터를 이용해 공연비와 EGR 비율을 변화시켜 정적 연소실로 공급된다.

점화플러그가 작동하는 시점에서 방전을 확인할 수 있도록 고속카메라가 연결되어 있으며, 함수발생기에서 발생한 첫 번째 트리거 신호를 받아 동시에 촬영을 실시하도록 고속카메라를 설정하였다.

3. 정적 연소 실험

3.1 플러그 형상별 연소압력 특성

실험은 먼저 연소실에 1 bar의 공기를 채운 후 0.05 bar의 연료를 추가하고 다시 추가 공기량을 조절하여 공연비를 변화시키면서 수행하였다. 이론공연비에서의 연소실 초기 압력은 약 1.2 bar가 된다. 실험을 통해 확인한 코로나 방전 식 교류 점화 플러그의 연소 가연한계는 $\lambda = 1.55$ 로 나타났다.

이론공연비에서 점화플러그에 따른 압력 상승 특성을 Fig. 7에 나타내었다. Triple 코로나 플러그의 압력 상승이 가장 빨랐으며 이는 전체 실험 조건에서 동일하게 나타났다. 최고압력에 도달하기까지 걸린 시간을 Fig. 8에 나타내었다.

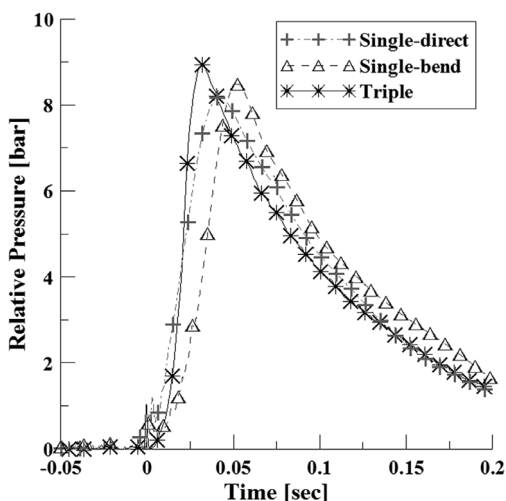


Fig. 7 Result of pressure measurement of the combustion chamber ($\lambda = 1.0$)

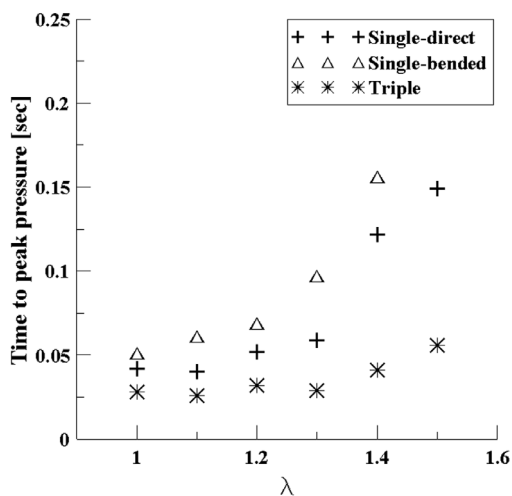


Fig. 8 Difference of the time to peak pressure between the plug types as a function of excess air ratio

3.2 플러그 형상 별 연소 가시화

Fig. 9는 세 가지 형태의 점화플러그에 대해 각 연소 과정을 고속카메라로 촬영하여 동일한 시간대로 정리하여 비교해 놓은 것이다. 가시화 된 사진들을 보면, 왼쪽의 Triple 타입에서 가장 빨리(5ms) 화염 핵이 만들어졌음을 볼 수 있다. 기존 아크 점화방식이 가장 느린 연소 진행을 보여주고 있다. 이 가시화 사진들은 앞서 Fig. 8, 9의 데이터와 일관성 있는 결과임을 상호 확인시켜준다.

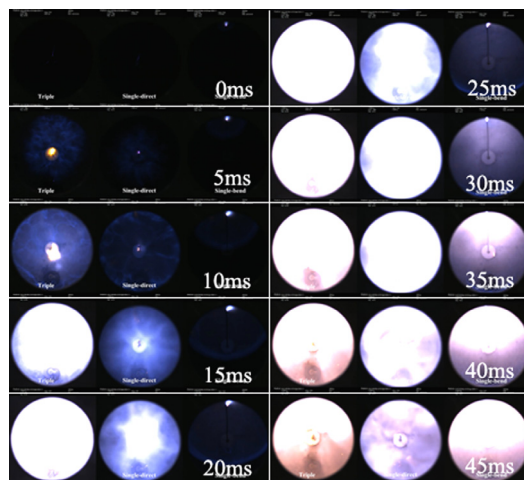


Fig. 9 Difference of combustion process between the plug types (Left : Triple type, Center: Single direct type, Right : Single bend type)

4. 결 론

본 연구를 통해서 살펴 본 코로나 방식의 고 에너지 점화 방식은 연소속도와 연소한계성 등의 측면에서 기존의 점화방식에 비해 우수한 점화 성능을 보여준다고 할 수 있다.

따라서 코로나 점화방식이 희박 엔진의 개발에 사용할 가능성은 충분하다고 볼 수 있다. 다만, 실제 엔진에 적용해 보지 않은 상태이므로 구체적으로 얼마나 많은 문제점을 가질 것인지 쉽게 예측할 수는 없다. 단순 점화테스트 과정상에서도 회로적인 측면과 점화코일 측면에서 난점이 상당히 보이고 있으므로 실제 상용 엔진 개발에 적용하기까지는 상당히 많은 개발 노력이 소모될 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 금오공과대학 학술지원사업의 일환으로 수행되었습니다. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

References

- 1) S. 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) S. S. Moon, "Engine Research Trend in Japan : Highly-efficient Gasoline Engine Technology," Auto Journal, KSAE, Vol.35, No.3, pp.43-49, 2013.
- 3) H. Yamamoto, S. Horita and T. Matsoka, "Surround Combustion Precess(SCP)-New Concept for Lean Burn Engine," SAE 920058, 1992.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) S. Bohne, G. Rixecker, V. Brichzin and M. Becker, "High-frequency Ignition System Based on Corona Discharge," MTZ Worldwide, Vol.75, Issue 1, pp.30-35, 2014.