

점화시스템의 종류와 가솔린 엔진 성능과의 상관관계에 대한 연구 (I)

선우명호*, 송정훈**
 (* 한양대학교 자동차공학과, ** 한양대학교 대학원)

A Study on Relationship between Ignition Systems and the Performances of Gasoline Engines (I)

Myoungho Sunwoo*, Jeonghoon Song**
 (* Dept. of Automotive Engineering, Hanyang Univ., ** The Graduate School of Hanyang University).

Abstract - Fast burning achieves higher efficiency, and reduces cycle variations which is able to improve vehicle driveability. Furthermore, the greater resistance to knock with fast burning can allow the fuel economy advantages associated with higher compression ratio to be realized.

One way of increasing the combustion speed is to enhance the performance of ignition systems which were able to reduce the early period of combustion. It is well known that shortening the initial stage of combustion also reduces the cyclic variations.

This literature survey deals with the papers which have studied the ignition process or various ignition systems. Those systems increasing the combustion speed, extending the lean misfire limit, reducing the exhaust gas and stabilizing the operating condition of the spark ignition engine by modifying the ignition process or increasing ignition energy.

(capacitive discharge ignition (CDI) system) ③ 자기 점화 시스템(magneto ignition system) ④ 플라즈마 젯 점화 시스템(plasma jet ignition system) ⑤ 화염 젯 점화 시스템(flame jet ignition system) 등이다.

2.1 점화 시스템의 종류

유도성 방전 점화 시스템은 1차측 코일에 전원으로부터 전류를 흐르게 하여 에너지를 저장시킨 후, 1차 전류를 차단하여 2차 코일에 고전압을 발생시키는 장치이다. 에너지의 저장과 방출에 코일을 이용하여 코일 점화 시스템라고도 하며 이 장치에 의한 전류 및 전압 파형을 Fig. 1에 나타내었다³⁾.

이 시스템은 지금까지 일반 차량의 엔진에 가장 많이 사용되고 있으나 점화 플러그의 수명을 증가시키기 위해서는 점점(breaker point)에서의 기계적, 전기적 마모의 방지 및 정확한 전류 단속이 요구되어 진다. 따라서 이러한 계약을 극복하기 위해 한층 더 발전한 형태인 트랜지스터 코일 점화 시스템(transistor coil ignition system, TCI)이 사용된다. 이 트랜지스터 점화 시스템은 기계 접촉식이 가진 결점을 거의 100% 해결하고 있고 고회전까지 높은 전압을 공급할 수 있으며 점화 시기도 정확하게 제어할 수 있다⁴⁾. 한편 화약연소 및 EGR 운전시의 점화 성능을 개선하기 위해서는 높은 출력 전압이 필요하게 되고 이를 위해 코일의 인덕턴스가 커져야 하며 이에 따라 코일의 크기가 커져야 하는 단점이 발생한다.

용량성 방전 점화 시스템은 Maly 등⁴⁾ 많은 사람들에 의해 연구되어졌으며 코일 대신 주로 커패시터에 점화 에너지를 저장하는 방식이다. 순간적으로 (0.1~0.3ms) 매우 높은 에

1. 서 론

현재 사용되고 있는 가솔린 엔진의 매 사이클 당 연소 상태 변화량을 줄이고 연비를 높이기 위해 급속연소 (fast burn)에 대한 연구가 이루어지고 있다.

최적화 된 급속연소는 연소가 약 25° CA 정도 내에 일어나며, 짧은 시간에 연소가 이루어질수록 이론 사이클인 등적 사이클 (constant volume cycle, Otto cycle)에 가깝게 되므로 최고압력이 증가되어 유효일이 많아지게 된다. 또 운전 안정성을 얻을 수 있으며 실린더 벽면으로의 열손실을 방지할 수 있고 이상연소 (knock)의 발생을 감소시킬 수 있다. 급속연소 시 NOx나 HC 등의 유해 배기 가스량이 다소 증가하게 되나 EGR 도입 등의 방법으로 감소시킬 수 있다^{1),2)}.

효과적으로 급속연소를 이루기 위해서는 엔진 내 유동의 개선이 이루어져야 한다. 또 정밀한 공기 및 연료량의 측정 및 공급이 이루어져야 하고 이에 따른 인젝터의 개선이 필요하다. 그리고 점화 시스템의 개선 등이 실현되어야 한다¹⁾.

이 연구에서는 급속 연소 가솔린 엔진에서 초기 화염의 발생 및 성장을 좌우하는 점화 시스템에 대하여 조사·정리할 것이다. 특히 점화 시스템의 종류, 특성 - 점화 에너지, 방전시간, 최고 전압- 들이 엔진 성능 - 배출 가스, 연비 등에 미치는 영향 등에 대하여 기술할 것이다.

2. 점화 시스템

최근 가솔린 엔진의 발달과 더불어 점화 시스템의 발달 역시 빠르게 이루어져 왔다. 점화 시스템의 발달은 점화 에너지 및 일률(Watt = voltage×current)의 증대로 이어졌으며 이러한 발전은 다음과 같은 종류의 점화 시스템에 의해 이루어졌다. ① 유도성 방전 점화 시스템(inductive discharge ignition (IDI) system) ② 용량성 방전 점화 시스템

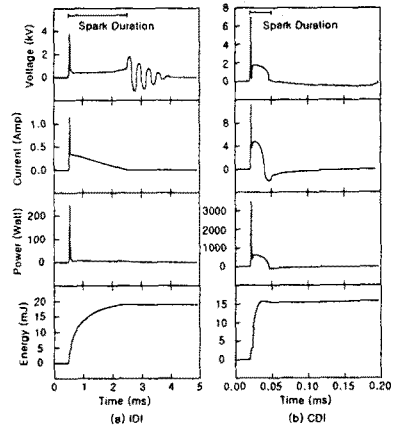


Fig. 1 Electrical characteristics of IDI and CDI system (3)

너지를 방출하는 특성이 있다 (Fig. 1).

자기 점화 시스템은 배터리 없이 자기력을 이용하여 발전하므로 주로 소형 엔진에 사용되며 엔진 속도에 따라 발생하는 점화 에너지가 달라진다.

플라즈마 젯 점화 시스템은 70년대부터 연구되어 왔으며 요즘 희박연소 엔진에서 점화 에너지의 증대에 대한 요구가 증가하면서 많이 연구되고 있는 장치이다. 이는 초기 화염핵 생성 및 성장기간을 상당히 단축시킬 수 있고 점화한계를 현저히 증가시킬 수 있다는 장점이 있으나 에너지의 소비가 많으며 플러그의 수명이 매우 짧은 단점이 있다.

화염 젯 점화 시스템은 토치 셀 (torch cell), 부연소실 식 등 종류가 많다. 이것 역시 희박한계를 증가시키나 부연소실에 신기 (新氣)의 출입이 자유롭지 못하며 최고연소온도의 증가로 NO_x의 배출량이 증가하며 표면적/체적 비 (surface/volume ratio)의 값이 커져 HC의 배출량 및 열손실이 증가한다는 단점이 있다.

2.2 방전 과정

일반적으로 엔진에서 이용되는 J 형태의 점화 플러그를 사용하는 점화 시스템에서 발생하는 방전은 절연파괴 (breakdown), 아크(arc), 글로우(glow)의 세 가지 방전으로 나눌 수 있다.

Maly 등⁴⁾의 논문을 참조하면 절연파괴 방전의 특징은 매우 높은 전압 (약 10kV)과 전류 (약 200A)가 매우 짧은 시간 (1~10nsec)에 방전되며 콜드 캐소드(cold cathode) 상태를 유지하는 것이다. 최소 지름이 40μm인 원통모양의 도전로(channel)가 생성되며 최고 온도는 60000K에 달하게 된다. 도전로 내의 분자들은 충분히 산란되며 이온화된다. 압력은 약 200bar 정도로 상승하여 강력한 충격파가 생성되며 이에 따르는 압력차가 플라즈마의 팽창을 결정하게 된다.

아크와 글로우 방전은 반드시 절연파괴 방전이 일어난 후 발생되며 절연파괴 방전이 두 방전에 필요한 두 전극 사이의 도전로를 만들게 된다.

아크 방전은 매우 낮은 전압 (<100V)을 가지지만 전류는 점화 시스템이 허용하는 가장 높은 값 (500mA~수천kA)을 가지게 된다. 단지 1%의 입자만이 이온화되며 산란율은 방전이 발생하는 중심점 부근에서 상당히 높은 값을 가지게 된다. 캐소드(cathode)와 애노드(anode) 전극에서의 전압강하(fall)에 의해 부분적인 에너지 손실이 발생하게 된다. 아크는 캐소드의 한 지점에서 지속적으로 발생되기 때문에 심각한 전기적 마모-증발에 의해-가 발생된다. 연속적인 에너지 손실에 의해 가스의 온도는 6000K 이상이 되지 못하며 온도와 산란 정도는 중심 축에서 거리가 멀어질수록 급격히 떨어지게 된다.

전류가 200mA 보다 작으며 캐소드에서 많은 량의 전압강하 (300~500V)가 발생되며 콜드 캐소드 상태를 유지하고 입자 중 0.01% 만 이온화되는 것이 글로우 방전의 특징이다. 총 에너지 손실은 아크 방전시 보다 많으며 화염핵의 온도는 약 3000K 정도가 되어 확산의 크기도 작아진다. 전극의 마모는 무시할 만큼 작으나 다른 특성들은 아크 방전 시와 매우 비슷하다.

Ward⁵⁾ 등은 방전시기를 절연파괴 시기와 스파크 시기로 나누었다. 절연파괴는 수 μsec의 짧은 시간의 방전이며 스파크 시기는 긴 방전시간 (10~1000 μs)의 "아크/글로우" 방전으로 정의하였다. 점화 플러그를 포함한 이차 회로 내에 존재하는 약 100pF 정도의 커패시턴스에 저장된 에너지를 순차적으로 방출함으로써 절연파괴 방전이 발생하며 아크/글로우 방전은 일차회로 쪽의 코일이나 커패시터에 저장된 에너지를 방전함으로써 발생한다고 설명하고 있다. 일반적인

로 절연파괴 시기에서는 몇 mJ의 에너지만을 이용할 수 있으나 높은 전류 (100A)와 국소적으로 고열이 발생한다. 아크/글로우 시기에는 30~100mJ의 에너지를 이용할 수 있고 비교적 낮은 전류와 열을 발생하는 특징이 있다.

한편, 절연파괴 시기에는 매우 효과적으로 (50% 이상, Maly 등의 논문³⁾에서는 94%) 에너지를 혼합기로 전달할 수 있으나 아크/글로우 시기에는 비교적 낮은 전달율 (아크 시 50%, 글로우 시 30%)만 보인다.

3. 점화 시스템의 성능

점화 시스템은 적절한 점화시기에 적절한 량의 점화 에너지를 점화 플러그에 공급하여 안정적인 점화가 일어나도록 하여야 한다. 동일한 량의 에너지를 방전하였다고 하더라도 점화 시스템 또는 엔진의 운전조건에 따라 방전시간 또는 일율이 변화하며 이에 따라 엔진의 운전성능도 영향을 받게 된다.

그 외 점화 플러그의 형상이나 전극의 간극이 변화함에 따라 점화 에너지의 전달 효율이나 방전시간이 변화하게 된다.

3.1 점화 에너지

점화 시스템이 공급하여야 할 점화 에너지란 점화 플러그의 전극에 높은 절연파괴 전압을 공급하여야 하며 동시에 전기적 "점화 전류"를 공급하여 혼합기를 착화시킬 수 있는 에너지이다⁶⁾.

가솔린 엔진에 있어서 최적화 된 점화 에너지는 점화가 시작되고 약 1msec 까지 화염의 성장에 영향을 미치며 이때 혼합기의 유동이 없다면 화염팽창속도는 약 1m/s가 된다. 또 유동이 있다면 화염팽창속도는 급격히 증가하게 된다. 그 이후에는 혼합기가 가진 화학적 에너지 및 엔진 내의 난류유동 등에 의해 영향을 받게 된다. 일반적으로 점화에너지의 량을 증가시키으로써 연소 안정성을 증가시킬 수 있고 초기 화염의 성장 지연시간을 줄여 연소 시간을 단축시킬 수 있다고 알려져 있다.

절연파괴 에너지를 증가시키면 화염핵의 온도가 올라가는 것이 아니라 도전로의 지름이 커져 활성화 된 가스의 체적이 커지게 된다. 반대로 에너지가 감소하면 아크와 글로우 방전시의 화염핵 온도가 감소하게 된다. 또 점화 에너지가 과도하게 많아지게 되면 전기 에너지가 손실되며 점화 플러그의 수명이 단축된다. 그 반대의 경우, 실화의 가능성이 증가되어 급속 또는 희박연소에는 알맞지 않기 때문에 적절한 에너지의 량을 방전하는 것이 중요하다.

전극으로 전달된 점화 에너지의 량은 다음과 같이 표현되어진다⁶⁾.

$$\begin{aligned} E_{\text{gap}} &= E_b + E_{a,g} \\ &= \frac{1}{2} C V_b^2 + \int_0^t V_{a,g} I_{a,g} dt \end{aligned} \quad (1)$$

단, E_{gap} : 점화 플러그 전극에 전달된 전기 에너지

E_b : 절연파괴 방전 에너지

E_{a,g} : 아크와 글로우 방전 에너지

C : 커패시턴스

V_b : 절연파괴 방전 전압

V_{a,g}, I_{a,g} : 아크와 글로우 방전 전압과 전류

아크 방전이나 글로우 방전 기간동안 도전로(spark channel)는 Fig. 2와 같이 컬럼 구간(positive column)과 전압강하 구간(fall region) 두 가지로 나눌 수 있으며 전압강하 구간에서의 에너지는 전극으로 빼앗겨 손실되므로 혼합기에

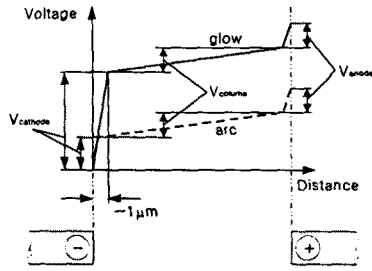


Fig. 2 Diagram showing axial voltage distribution for glow and arc discharge mode (6)

전달되는 에너지는 컬럼 구간에서의 에너지뿐이다.

따라서 혼합기에 전달되어지는 에너지의 양은

$$E_{gas} = E_b + E_{col} \\ = \frac{1}{2} C V_b^2 + \int_0^l V_{col} Idt \quad (2)$$

이며 컬럼 구간에서의 전압 V_{col} 은 다음과 같다.

$$V_{col} = V_{gap} - V_{fall} \quad (3)$$

여기서 E_{gas} : 혼합기에 전달된 전기 에너지
 E_{col} : 컬럼 구간에서의 전기 에너지
 V_{gap} : 전극사이의 전압
 V_{fall} : 전압강하 구간에서의 전압

(1) 식에서 볼 수 있듯이 절연파괴 시기에는 전압강하 손실이 발생하지 않는다. 그리고 식 (2)을 살펴보면 점화 에너지를 증가시키는 방법으로 커패시턴스를 증가시키는 방법, 절연파괴 전압을 증가시키는 방법과 방전시간을 증가시키는 방법, 2차 전류를 증가시키는 방법 등이 있음을 알 수 있다. 커패시턴스를 증가시키기 위해서는 점화 플러그 전극의 간극을 넓히는 것이 가장 쉽게 사용되어지는 방법이며 2차 전류의 값을 높이기 위해서는 평행하는 전극의 넓이를 좁게 하거나 뾰족하게 만드는 방법 등이 있다.

이 연구에서는 절연파괴 전압과 방전시간을 증가시키는 방법에 대해 논의할 것이다.

3.2 방전시간(discharge time)의 증가

이 방법은 엔진 내 특히 점화 플러그 부근의 국소 난류 강도가 강해질수록 초기 화염핵의 소멸현상(quenching) - 화염핵이 점화 플러그의 전극에서 떨어져 나와 꺼져 버리는 - 의 발생 가능성을 줄일 수 있는 방법 중 하나이며 MBT (Minimum Advance for best Torque)를 정밀하게 제어하지 않아도 된다는 장점이 있다.

주로 유도성 방전 점화 시스템을 이용하여 아크나 글로우 방전의 시간을 확장시킴으로써 점화 에너지를 증가시킨다. 하지만 방전시간을 늘리기 위해서는 코일의 인덕턴스(inductance) 값이 커져야 하며 이에 따라 코일의 크기가 커져야 한다. 또, 충전시간이 길어져야 하며 전류를 높이면 (200mA 이상) 아크 방전으로 전이되어 점화 플러그의 전극에 심각한 부식이 발생하여 수명이 짧아지게 되는 단점을 가지고 있다⁴⁾.

한편 방전시간이 길어지게 됨에 따라 혼합기의 유동은 점화 성능에 많은 영향을 미치게 된다. 즉 글로우 방전 시기 동안, 도전로는 유체의 유동에 의해 U자 형태로 휘어지게 되어 도전로와 혼합기와의 접촉 면적이 넓어져 에너지의 전달 효율이 높아지게 된다. 하지만 유동속도가 지나치게 커지게 되면 도전로가 끊어지거나 너무 길어지게 되어 점화는 다시 일어나 새로운 도전로가 생기게 된다. 점화가 다시 발생하게 되면 그에 해당하는 만큼 점화 에너지의 손실이 발생하게 된다⁷⁾.

3.3 점화 시스템의 2차 전압 증가

2차 전압을 증가시키는 방법으로는 주로 CDI 시스템을 이용한다. IDI 시스템의 절연파괴 방전을 이용하는 경우, 이 시스템의 전기적 특성 때문에 최고전압의 값은 CDI의 것보다 작으며 방전시간도 길어지게 된다. 점화 에너지의 전달 효율이 가장 큰 절연파괴 방전 구간인 짧은 시간 (2~25nsec)에 점화 에너지의 대부분을 방전하며 짧은 아크 방전 및 글로우 방전이 뒤따르게 된다.

일반적으로 승용차보다는 높은 회전속도를 요구하는 모터 사이클 엔진에 주로 사용된다.

Maly 등⁴⁾은 방전시간을 1msec 이상 증가시키는 것은 점화에 별 효과가 없다고 주장하였다. 이는 방전시간이 1msec가 넘을 경우, 점화 에너지의 전달효율은 급격히 떨어지고 고속회전으로 갈수록 점화 코일이나 커패시터에 전기 에너지를 저장할 시간이 줄어들음에 따라 충분한 에너지의 공급이 어려워지며 특히 아크 방전시간이 길어질수록 플러그의 수명이 짧아지기 때문이라고 설명하였다. 따라서 그들은 점화 에너지는 절연파괴 방전으로 공급하여야 하며 비록 그 방전시간이 매우 짧다 하더라도 점화나 그 후의 화염 성장에 충분한 에너지를 공급할 수 있다고 설명하였다.

이상과 같이 화박연소 엔진에서 점화 시스템을 이용하여 점화성능을 개선시키는 두 가지 방법 즉, 방전시간을 증가시키는 것과 최고전압을 증가시키는 방법을 살펴보았다. 방전시간을 늘리는 것은 지속적으로 에너지를 혼합기에 공급할 수 있어 매 사이클의 운전 상태의 변화에 따른 점화 플러그 부근의 공연비 변화 및 유체 유동에 민감하지 않으며 또한 점화시기의 변화 등에도 민감하지 않다는 장점이 있다. 하지만 가솔린 엔진에서 절연파괴 에너지를 증가시키면 전기 에너지가 열 에너지로 변환 효율이 높아지며 이에 따른 연소 속도의 증가로 MBT의 값을 작게 할 수 있어 급속연소를 할 수 있다는 장점이 생기게 된다⁸⁾.

4. 정리 및 결론

이 논문에서는 점화 시스템의 종류 및 특징, 그리고 방전 과정 등에 대하여 기술하였다. 점화 시스템의 차이는 전기 에너지를 충전하는 방법 및 방전시간에서 차이가 있으며 각 기장, 단점을 가지고 있어 각 엔진에 알맞은 점화 시스템을 선택하여야 한다.

여러 논문을 비교, 조사하여 정리한 결론은 다음과 같다.

- 1) 급속 연소 엔진에서 사용되는 점화 시스템은 일반 엔진에서 사용되는 점화 시스템보다 높은 에너지 또는 일률을 공급하여야 한다. 이러한 높은 에너지 또는 일률은 방전시간을 증가시키거나 방전 전압을 증가시킴으로써 얻을 수 있다.
- 2) 방전은 절연파괴, 아크, 글로우 방전의 순으로 진행되며 각 방전 기간마다 전압과 전류, 지속시간 그리고 전기 에너지의 전달 효율은 다른 값을 가진다.
- 3) 방전시간을 증가시키는 방법은 주로 유도성 방전 점화 시스템을 이용하며 글로우 방전 기간 동안 점화 에너지의 대부분을 방전한다. 점화 플러그 부근에서 짧은 순간 동안의 공

기/연료 혼합비의 변화나 유체유동의 변화 등에 큰 영향을 받지 않아 사이클간의 변화가 작으며 특히 실린더 내의 난류 강도가 강하여 질수록 전기 에너지의 전달효율은 높아지게 된다.

4) 최고전압을 증가시키는 방법은 주로 용량성 방전 점화 시스템을 사용하며 보다 우수한 점화 성능을 얻기 위해서 절연 파괴 방전을 더욱 강화시킨 시스템으로 개량하여 사용하기도 한다. 절연파괴 방전을 이용함으로써 전기 에너지의 전달 효율을 높일 수 있으며 엔진의 고속회전 시에도 충분한 량의 전기 에너지를 공급할 수 있고 점화 플러그의 수명을 늘릴 수 있는 장점이 있다.

[참 고 문 헌]

- 1) 조 진호, "내연기관공학", 학연사, 1993
- 2) Mattavi, J. N.: "The Attributes of Fast Burning Rates in Engines", SAE paper 800920, SAE Trans 1980
- 3) Arcoumanis, C., and Bae, C., "Correlation between Spark Ignition Characteristics and Flame Development in a Constant-Volume Combustion Chamber", SAE paper 920413, SAE Trans, 1992
- 4) Maly, R., and Vogel, M., "Ignition and Propagation of Flame Fronts in Lean CH₄-Air Mixtures by the Three Modes of the Ignition Spark", 17th Symposium (International) on Combustion, p. 821, The Combustion Institute, 1981
- 5) Ward, M. A. V., "A New Spark Ignition System for Lean Mixtures Based on a New Approach to Spark Ignition", SAE paper 890475, SAE Trans, 1989
- 6) Pischinger, S., and Heywood J. B., "How Heat Losses to the Spark Plug Electrodes Affect Flame Kernel Development in an SI-Engine", SAE paper 900021, SAE Trans, 1990
- 7) Ziegler, G. F. W., Maly, R., and Wagner, E. P., "Effect of Ignition System Design on Flammability Requirements in Ultra-lean Turbulent Mixtures", I. Mech. E C47/83, 1983
- 8) Anderson, R. W., "The Effect of Ignition System Power on Fast Burn Engine Combustion", SAE paper 870549, SAE Trans, 1987