

점화에너지 및 방전시간이 스파크 점화 기관의 성능에 미치는 영향

A Study on the Effects of Ignition Energy and Discharge Duration on the Performances of Spark Ignited Engines

송정훈*, 서영호**, 선우명호***
Jeonghoon Song, Youngho Seo, Myoungho Sunwoo

ABSTRACT

An experimental investigation is proceeded to study on the relationship between spark ignition characteristics and the performances of an S. I. engine. The ignition parameters examined in this study are the ignition energy and discharging duration. The combustion pressure and exhaust gas are measured during the experiment. From the measured data of cylinder pressure, the heat release rate, the mass fraction burned, and the COV of IMEP are calculated. The dwell time and the injection time are varied. A single cylinder engine and a 30kW dynamometer are employed. Four different kinds of ignition systems are assembled, and one commercial ignition system is adopted.

The experimental results show that the ignition energy is increased as the dwell time extended until the ignition energy is saturated. The higher ignition energy is effective in achieving the faster burning velocity and less producing HC emission. However, when the amount of ignition energy is similar, while the discharge duration becomes longer, the burning velocity is reduced but the engine operation becomes stable in terms of the COV of IMEP.

주요기술용어 : Charge/Discharge duration(충전/방전기간), Ignition system(점화장치), Ignition energy(점화에너지), Combustion pressure(연소압력)

1. 서론

희박연소 엔진에 대한 연구가 진행됨에 따라 보다 안정적인 초기화염의 성장에 대하여 많은 연구가 진행되고 있다. 초기화염의 성장에 영향

을 미치는 많은 변수들 중에서 전기에너지의 양과 방전시간은 화염핵의 성장에 큰 영향을 미치게 된다. 방전시간이 길어질수록 방전에너지의 양은 증가하게 되나 너무 길어지면 전기에너지의 손실이 발생하며 전극에서의 마모가 빨라지고 너무 짧아지면 안정적인 점화가 어려워진다.

Anderson^{1,2)}은 두 종류의 CDI(capacitive discharge ignition) 점화장치를 사용하여 방전시간

* 회원, 인제대학교

** 회원, 자동차부품연구원

*** 회원, 한양대학교

과 엔진 성능과의 상관관계를 살펴보았다. 그의 실험결과에 따르면 동일한 양의 점화에너지(50 mJ)를 방전시킨다면, 방전시간이 짧을수록, 즉 방전 전력이 커질수록 연료소비율이 감소하며 연소 시간도 짧아져 급속연소에 유리하게 된다. 또한 점화시기의 변화에도 큰 영향을 받지 않고 안정적인 연소를 하게 된다는 결과를 발표하였다.

하지만 그의 연구결과는 일반적으로 내연기관에 사용되어지는 IDI(inductive discharge ignition) 점화장치를 사용한 것이 아니며 방전시간이 긴 점화장치도 약 5×10^{-5} msec에 불과하여 보편적인 실험결과라고 보기에는 어려움이 있다.

한편 Nakai 등³⁾은 IDI 점화장치를 사용하여 방전시간과 방전전류를 변화시켜 점화장치에 의한 점화성능의 변화를 살펴보았다. 그들의 실험결과를 방전시간이 늘어날수록 보다 안정적인 점화가 가능하다는 것을 보여주고 있으나 실제 엔진에서 사용하기에는 너무 긴 방전시간(7 msec) 및 큰 방전에너지(200mJ)를 사용하였다.

따라서 이 연구에서는 일반적인 내연기관에서 사용되는 IDI 점화장치를 이용하여 방전에너지와 방전시간의 변화가 엔진에서의 화염전파 속도와 배기가스의 양, 그리고 운전안정성에 미치는 영향에 대하여 살펴보았다. 이 연구를 통하여 희박연소엔진에 요구되어지는 안정적인 초기화염의 성장을 위한 점화장치의 특성과 요구 조건 등에 관한 기반 정보를 제공하고자 한다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 실험 장치

2.1.1 엔진 및 엔진 구동장치

실험에 사용되어진 엔진은 리카르도 사에서 제작한 단기통 450cc 엔진이며 동력계는 Cusson 회사의 30kW 직류 동력계가 사용되었다. 엔진에 대한 보다 자세한 제원은 Table 1에 나타내었다.

또한 엔진의 분사시기와 분사량 그리고 점화시기와 충전시간의 조절을 위하여 한양대학교 ACELab에서 제작한 엔진제어시스템(Engine Con-

Table 1 Test engine specification

Bore	80.3	
Stroke	88.9	
Compression ratio	8.9:1	
Displacement volume	450	
Cam and valve	DOHC 4valve	
Intake valve	open	BTDC 9.5
	close	ABDC 51.5
Exhaust valve	open	BDDC 48.5
	close	ATDC10.5

rol System)을 이용하여 실험을 수행하였다.

2.1.2 배기가스 측정 장치

각 점화장치와 점화에너지의 변화 그리고 운전조건의 변화에 의한 HC의 배출량을 알아보기 위하여 MEXA-324-G CO/HC analyzer를 이용하여 배기가스의 성분을 분석하였다.

2.1.3 점화 장치 종류 및 특성

이 연구에서는 일반적으로 사용되는 유도성 방전 점화(IDI) 장치를 이용하여 방전에너지와 방전시간이 스파크 점화기관의 성능에 미치는 영향을 고찰하고자 하였다. 이를 위하여 네 종류의 점화장치를 구성, 제작하였다. 먼저 직접점화장치(DIS, Direct Ignition System)는 일반적으로 많이 사용되고 있는 점화장치이며 하나의 점화코일로 두 개의 점화플러그를 구동하는 장치이다. 둘째, 직렬연결 고에너지점화장치(HEIS, High Energy Ignition-Series connected) 및 셋째, 병렬연결 고에너지점화장치(HEIP, High Energy Ignition-Parallel connected)는 DIS의 일차 및 이차회로를 변형하여 점화에너지 및 방전시간을 증가시킨 것이다. 이 장치들은 두 개의 점화코일이 두 개의 점화플러그를 구동하는 형태이다. HEIS의 경우, 이차측이 직렬로 연결되어 병렬로 연결된 HEIP보다 긴 방전시간을 가진다. 넷째, I_{DIS}(IGBT based DIS)는 점화시기 및 저장되는 점화

에너지 양을 조절하기 위하여 일반적으로 사용되는 BJT(Bipolar Junction Transistor) 대신 IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)를 채용한 장치이다. 각 장치의 자세한 회로도 및 방전 형태는 참고문헌 (4)에 나타내었다. 또한 실험 결과의 비교를 위하여 LUCAS 사에서 경주용 자동차용으로 제작되어진 점화장치(SPORT)를 사용하여 실험을 수행하였다.

한편 각 점화장치에서 발생하는 방전에너지를 구하기 위하여 점화 전류 및 점화 전압을 각각 전류 프로브(Tektronix A6303) 및 전압 프로브(Tektronix P6015)를 이용하여 측정하였다.

2.2 연소압력의 측정 및 해석

연소 압력 데이터를 이용하여 화염전파특성을 분석하는 방법으로는 여러 가지 있으나 이 연구에서는 열발생률과 질량연소율을 이용하여 해석하였다.

2.2.1 열발생률의 해석

열발생의 해석은 연소실 내부를 단일 영역(single zone)으로 취급하며 열역학 제1법칙을 이용하여 압력변화로부터 쉽게 유도해 낼 수 있는 장점이 있다.

이 연구에서는 Heywood⁵⁾ 책에 기술된 수식을 이용하여 열발생률을 계산하였다.

$$\delta Q_{ch} = \left(\frac{c_v}{R}\right) + \left(\frac{c_v}{R} + 1\right)pdV - (h' - u + c_v T)dm_{cr} + \delta Q_{ht} \quad (1)$$

여기서 h'는 $dm_{cr} > 0$ 일 경우, 실린더 내 기체의 엔탈피를, $dm_{cr} < 0$ 일 경우, 크랭크 케이스 내 기체의 상태를 나타낸다.

2.2.1 질량연소율의 해석

질량연소율은 다음과 같은 Wiebe 함수를 사용하여 계산하였다.^{6,7)}

$$x_b = 1 - \exp\left[-a\left(\frac{\theta - \theta_0}{\Delta\theta}\right)^{m+1}\right] \quad (2)$$

여기서 a 및 m은 수정계수이며 운전조건에 따라 적절한 값을 대입하여 계산한다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 충전시간 변화에 따른 점화 에너지의 변화

Fig. 1은 충전시간의 변화에 따른 점화에너지의 변화를 나타내고 있다. 점화 전류 및 전압은 각 실험 조건에서 약 300회 측정되었으며, 측정시의 엔진 운전조건은 1200rpm, 0.6bar MAP이다.

LUCAS 점화장치를 제외한 다른 모든 점화장치에서의 방전에너지는 약 1~2.5msec까지 증가하다 일정한 값을 가지게 된다. 이는 방전기간이 약 1~2.5msec이라는 것을 나타낸다.⁸⁾ LUCAS 점화장치의 경우, 방전기간이 길지만 방전전력(=방전에너지/방전시간)은 적음을 알 수 있다.

충전시간이 1.5msec에서 3.5msec로 길어지면 방전에너지는 DIS의 경우 12.7mJ에서 21.0mJ로, HEIS는 24.3mJ에서 39.0mJ로, HEIP는 20.0mJ에서 30.0mJ로, 그리고 I_DIS는 12.0mJ에서 30.8mJ로 각각 증가한다. 하지만 DIS, HEIS 그리고 HEIP의 경우, 충전시간이 3msec 이상으로 길어지면 충전에너지의 포화현상이 발생하여 충전시간이 길어지더라도 방전에너지는 증가하지 않음을 알 수 있다.

한편 LUCAS 점화장치의 경우, 방전에너지는 점화 후 3msec에서 약 19.2mJ의 점화에너지만을 발생한다.

3.2 점화에너지의 변화에 따른 열발생률의 변화

Fig. 2는 충전시간을 변화시켰을 때 1200rpm, 0.6bar에서의 열발생률 변화를 나타낸 그림이다. 그림에 나타낸 것처럼 충전시간이 증가함에 따라 열발생률은 빨라지고 커짐을 알 수 있다. 즉 점화에너지가 증가하면 연소속도가 증가하며 열발생률도 빨라진다.

이 실험의 결과를 살펴보면 DIS를 사용한 경우, 충전시간이 1.5msec에서 3.5msec로 증가하

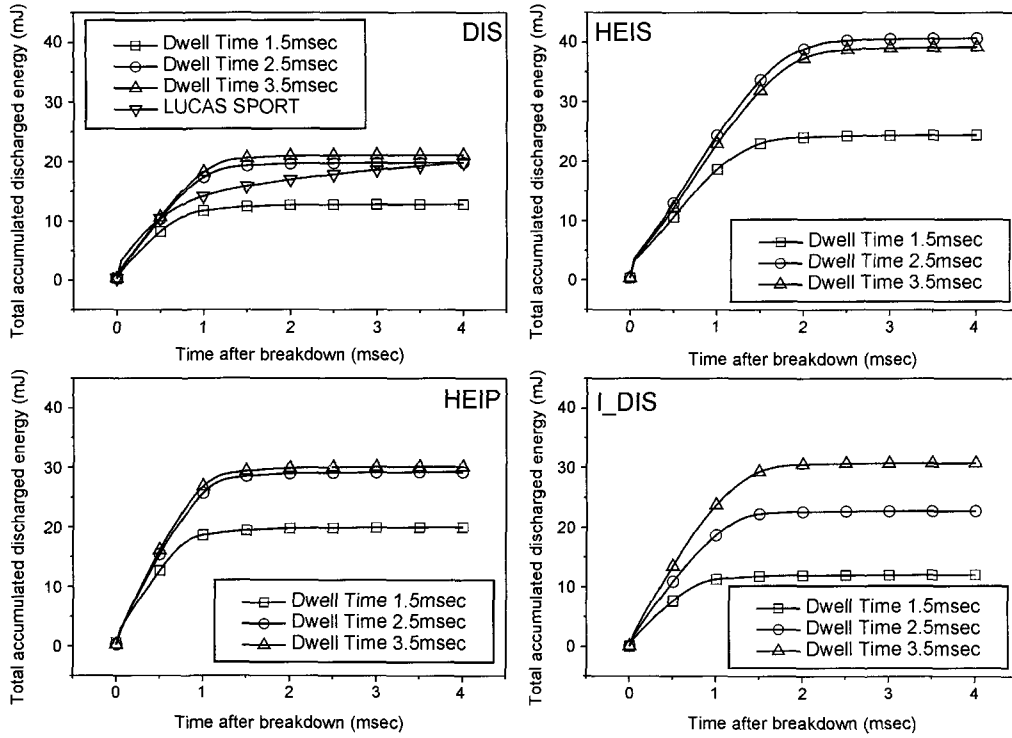


Fig. 1 Variation of discharged energy at 0.6bar MAP, 1200rpm

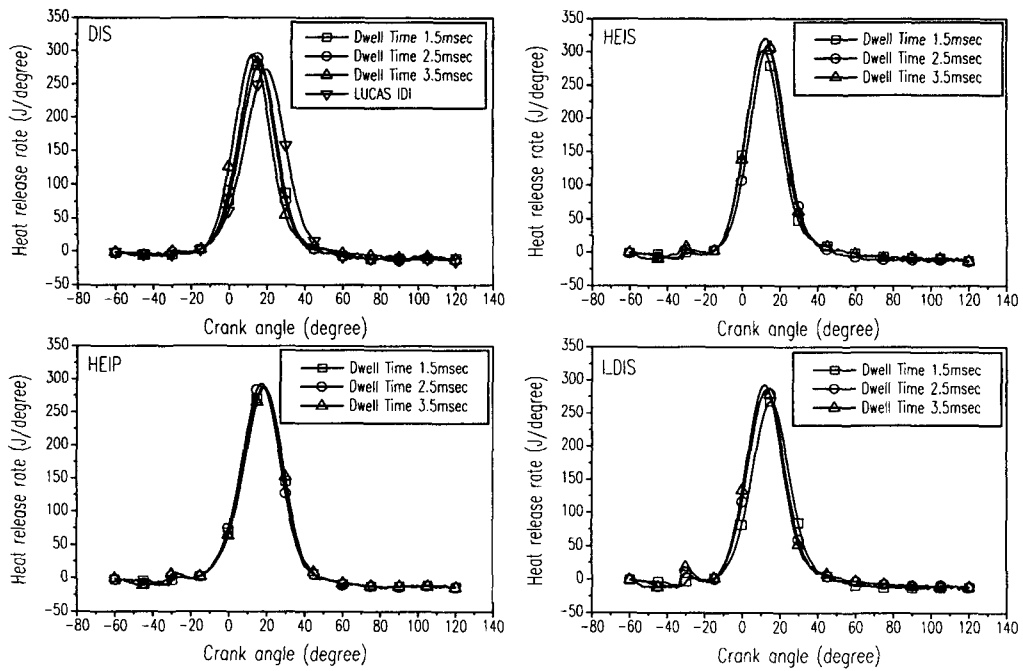


Fig. 2 Variation of heat release rate at 1200RPM and 0.6bar MAP

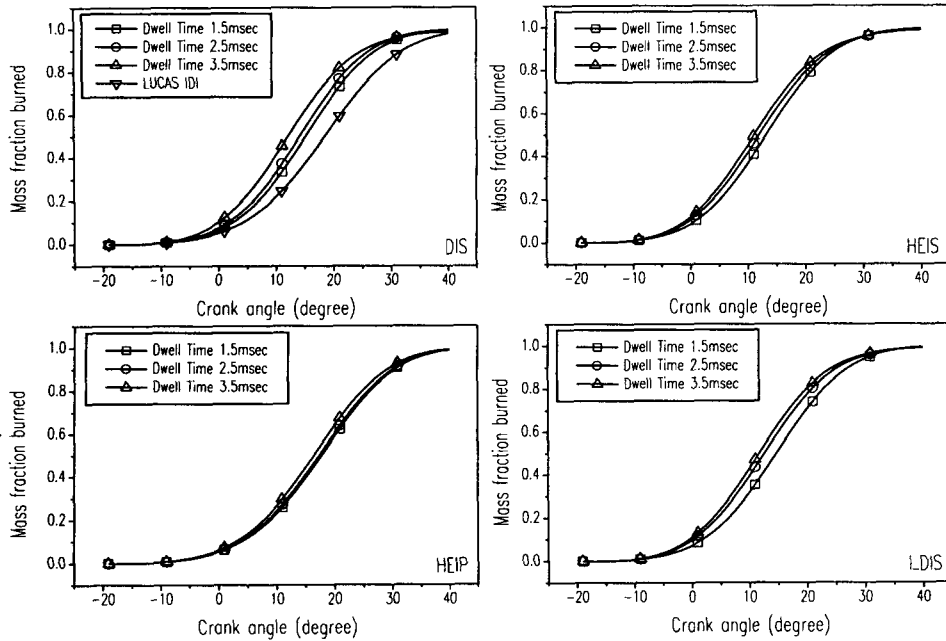


Fig. 3 Variation of mass fraction burned at 1200RPM and 0.6bar MAP

면 최고 열발생률은 약 5% 증가하였으며 최고 열발생률이 발생할 때까지의 기간은 약 3% 정도 짧아짐을 알 수 있다.

3.3 점화에너지의 변화에 따른 질량연소율의 변화

질량연소율의 계산에서도 고점화에너지의 효과를 확인할 수 있다. Fig. 3에 나타난 것과 같이 실험이 실시된 모든 운전조건에서 질량연소율은 충전시간이 증가하면 빨라지는 것을 알 수 있다.

LUCAS 점화장치의 경우, 방전에너지가 비슷한 DIS의 충전시간 3.5msec일 때의 조건보다 느린 질량연소율을 보이고 있다. 이는 초기 화염핵의 성장기간 동안 방전에너지를 충분히 공급하면 화염핵 성장이 빨라지기 때문으로 사료된다. 즉, 점화에너지가 비슷하더라도 방전시간이 길어지면 초기연소속도의 증가에는 불리함을 알 수 있다.

3.4 점화에너지의 변화에 따른 배기가스의 변화

Fig. 4는 앞에서 설명된 다섯 개의 점화장치와

세 가지의 다른 충전시간 그리고 분사시기를 폭 발행정 ATDC 180°CA와 BTDC 180°CA로 변화시켜 실험한 결과를 나타내고 있다. 운전조건은 1200rpm, 0.6bar와 1800rpm, 0.7bar이며, 공연비는 희박운전조건인 18.4로 조정하였다.

실험결과는 모든 운전조건에서 충전시간이 증가하면 HC의 배출량은 감소하는 것으로 나타났다. 즉 점화에너지가 증가하면 초기화염핵의 성장이 빨라지며 안정되므로 실화 및 부분 연소의 발생이 감소하여 HC의 배출이 감소되기 때문이다. 이러한 이유로 DIS를 사용한 경우, 충전시간이 증가하면 HC의 배출량은 약 35% 감소하였으며 I_DIS의 경우, 약 16% 감소하였다.

한편 LUCAS 점화장치를 사용한 경우, 점화에너지가 비슷한 DIS나 I_DIS의 경우보다 HC의 배출량은 분사시기에 비교적 적게 영향을 받는 것을 알 수 있다. 이는 LUCAS 점화장치가 다른 점화장치보다 긴 방전시간을 가지기 때문으로, 방전시간이 길어지면 화염핵의 생성시, 점화플러그 주위의 공연비나 난류유동 변화에 의한 영향을 적게 받기 때문이다. 따라서 방전시간이 길

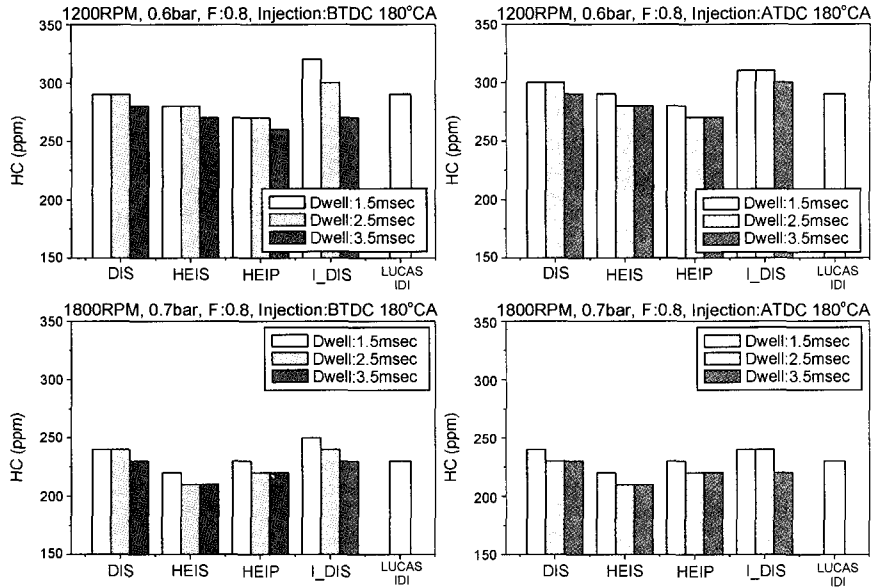


Fig. 4 Variation of HC emission with various operating conditions

어지면 엔진의 운전조건이 변화하더라도 화염의 생성 및 성장은 안정되는 것을 확인할 수 있다.

3.5 점화에너지의 변화에 따른 엔진 안정성의 변화

고점화에너지가 엔진의 운전안정성에 미치

는 영향을 살펴보기 위하여 실험이 실시되었으며 결과는 Fig. 5에 나타내었다. 실험 조건은 배기가스 측정 실험과 동일하다.

분사시기가 폭발행정 BTDC 180°CA일 경우, 분사된 연료는 기화될 시간이 모자라 연소가 약화되므로 실화 또는 부분 연소가 발생하게 된다.

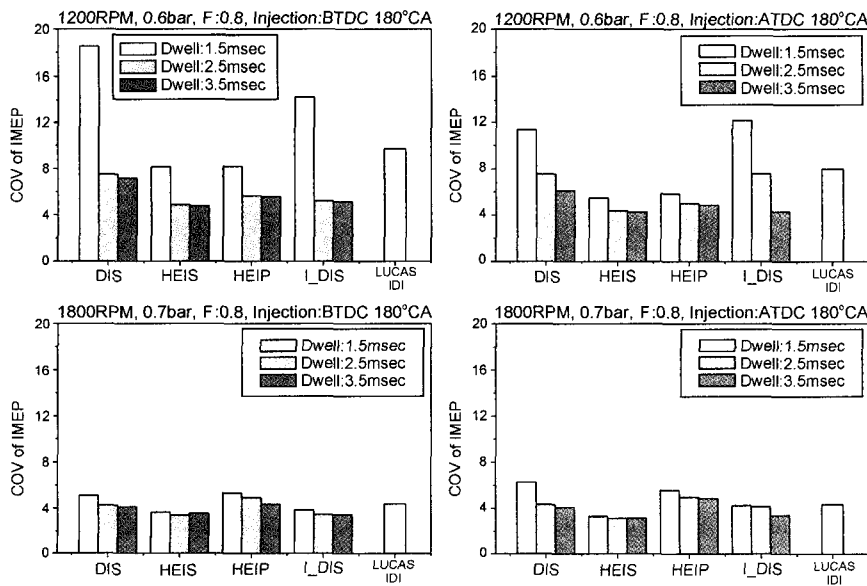


Fig. 5 Variation of COV of IMEP with various operating conditions

하지만 충전시간이 증가하면 연소는 개선되며 운전안정성은 증가하게 된다.

일반적으로 운전안정성을 나타내는 IMEP의 COV 값은 충전시간이 증가하면 DIS의 경우 약 61.3%, 그리고 I_DIS의 경우, 약 64.2% 감소하여 점화에너지가 증가하면 운전안정성은 개선되는 것을 알 수 있다.

또한 LUCAS 점화장치의 경우, 분사시기가 변화하더라도 IMEP의 COV는 크게 변화하지 않는다는 것을 확인할 수 있다. 즉, 방전시간이 길어짐에 따라 연소는 안정되며 따라서 운전안정성도 증가함을 알 수 있다.

4. 결 론

이 연구는 점화에너지 및 방전시간이 변화함에 따른 엔진의 성능변화에 대하여 실험적 방법을 통하여 알아보았다. 이를 위하여 5개의 점화장치가 사용되었으며 충전시간을 변화시켜 각 점화장치의 점화에너지를 변화시켰다.

이 연구를 통하여 얻는 결론은 다음과 같다.

1) 충전시간이 1.5msec에서 3.5msec로 증가하면 DIS, HEIS 그리고 HEIP의 경우, 점화에 영향을 미치는 총방전에너지가 약 60~67% 증가하였으며 I_DIS의 경우, 약 160%까지 증가하였다. 하지만 충전시간이 길어지면 포화현상이 발생하였으며 포화현상이 발생하면 충전시간이 증가하더라도 점화에너지는 증가하지 않았다.

2) 연소속도는 방전에너지가 증가할수록 빨라지며 이러한 사실은 열발생률과 질량연소율이 빨라지는 것으로 확인할 수 있다.

3) 점화에너지가 증가하면 화염핵의 성장은 안정화되어 실화 및 부분 연소의 발생가능성이 감소한다. 이는 HC 발생량의 감소와 IMEP의 COV 값이 줄어드는 것으로 확인할 수 있다.

4) 비슷한 양의 점화에너지가 방전될 경우, 방전시간이 길어질수록 연소속도는 감소하게 되나 연소안정성은 개선됨을 알 수 있다.

참 고 문 헌

- 1) R. W. Anderson, "The Effect of Ignition System Power on Fast Burn Engine Combustion," SAE 870549, 1987.
- 2) R. W. Anderson and J. R. Asik, "Lean Air-fuel Ignition system comparison in a Fast-burn Engine," SAE 850076, 1985.
- 3) M. Nakai, Y. Nakagawa, K. Hamai, M. Sone, "Stabilized Combustion in a Spark Ignited Engine through a Long Spark Duration," SAE 850075, 1985.
- 4) 송정훈, 신우명호, 김우태, "희박연소기관에서 고점화 에너지에 의한 기관 성능 향상에 관한 연구," 자동차공학회논문집, 제7권 제2호, pp.31-40, 1999.
- 5) J. B. Heywood, "Internal Combustion Engine Fundamentals," McGraw-Hill, Chap.9 pp.371-490, 1988.
- 6) C. R. Ferguson, "Internal Combustion Engines," John Wiley & Sons, Chap.4, pp.149-189, 1986.
- 7) L. Eriksson, "Spark Advance for Optimal Efficiency," SAE 1999-01-0548, 1999.
- 8) 송정훈, "SI 기관의 초기화염 생성 모델과 점화장치가 기관성능에 미치는 영향," 한양대학교 박사학위논문, 2000.