

〈논 문〉

스파크 점화기관의 점화에너지 변화와 연소 변동과의 관계에 관한 연구

한 성 빈*
(1997년 5월 26일 접수)

A Study on the Cyclic Variability as a Function of Ignition Energy in Spark Ignition Engines

Sung Bin Han

Key Words : Cycle-by-Cycle Variations(사이클 변동), Ignition Energy(점화에너지), Spark Discharge Characteristics(스파크 방전 특성), Inductive Energy(유도에너지), Capacitive Energy(용량에너지), Repetitive Discharge Igniter(반복방전 점화장치)

Abstract

The cyclic variations can be characterized by the variations in different type of parameters. These parameters may be grouped into four main categories: pressure-related parameters, combustion-related parameters, flame front-related parameters, and exhaust gas-related parameters. One of the resultant effects of the cycle-by-cycle variation in the combustion process, which is the most important with regard to the engine performance characteristics, is the cycle-by-cycle variation in IMEP. This paper uses the repetitive discharge igniter, which can change the ignition energy easily, to study on idle stability in a spark ignition engine. From this device, the 6 number of spark and 0.20 ms spark interval, it is very available for the idle stability.

1. 서 론

스파크 점화기관에 있어서 연소의 안정성은 오래 전부터 중요한 연구의 과제로서 많은 연구자들에 의하여 연구가 되어왔다. 이러한 연소의 안정성은 희박연소기관 설계에 많은 데이터로서 제시되어 왔으며, 연료의 경제성과 배출가스 저감 등이라는 차원에서 희박연소는 반드시 이루어야 할 과제 중의 하나이다. 또한, 연소의 안정성은 근본적으로는 사이클 변동에 의존하는 것으로써, 사이클 변동이 만약 사라진다면 같은 연료 소비에 대한 출력이 10% 정도까지 증가 할 수 있다는 보고도 있다.^(1~3)

사이클 변동의 원인으로는 사이클마다의 공기연료비와 혼합기 조성의 변동, 혼합기 중의 연료, 공기, 잔류가스의 혼합이 사이클마다 균일하지 못한 것과 점화지연 등을 지적할 수 있다.^(4,5)

또한 연구자들에 의하여 밝혀진 사이클 변동을 줄일 수 방법은 다음과 같다. 연료의 종류는 먼저 증류화염속도가 최고인 연료를 사용하는 것이 좋고, 공기연료비는 이론공기연료비에서 운전을 하는 것이 사이클 변동을 줄일 수 있으며, 점화시기는 MBT에서 점화를 하여야 연소변동을 최소로 할 수 있다.^(6,7)

또한 전체적인 사이클 변동을 줄일 수 있는 연소실 내의 유동패턴은 텀블이나 스쿼시가 있는 강한 스웰이 유리하며, 스파크 플러그의 간극 근처의 난

*회원, 인덕전문대학 기계과

류 규모는 점화시기에서 작은 테일러 마이크로 스케일이 유리하다.⁽⁸⁾

점화에너지 측면에 대한 연구로는, 스파크 방전 특성은 높은 breakdown에너지와 긴 스파크 기간이 요구되며, 스파크 간극은 가능하면 넓은 것이 사이클 변동을 줄일 수 있다고 보고되어져 있다. 스파크 플러그의 전극의 모양은 얇고 뾰족한 것이 좋으며, 스파크 플러그의 갯수와 위치는 다점점화 즉, 반복 방전 점화장치(Repetitive Discharge Igniter : RDI)가 유리하고, 스파크 플러그가 하나인 통상의 기관인 경우의 삽입 위치는 유동방향에 따라 결정이 되는 것이 사이클 변동을 최소로 할 수 있는 것으로 알려져 있다.^(9,10)

국내의 반복 방전 점화장치를 이용한 연구는 이성열과 한병호^(11,12)가 최초로 희박연소를 확장할 수 있는 다회수 스파크 점화 장치를 개발하여 특허를 얻었고, 이종태^(13~15) 등은 이를 개량하여 초희박연소 영역을 확장하는 연구를 수행하고 있다.

최근 1997년의 Ford 자동차의 Hoard 등은 내도시 교통의 혼잡으로 인한 기관의 공회전 시간이 증가하는 현재 상황으로 볼 때 공회전 상태에서 기관의 안정성은 운전자에게 매우 중요하며 차량의 신뢰성에도 큰 영향을 미치고 있다고 강조를 했다. 아이들링 상태에서의 사이클 변동은 잔류가스를 증대시키며, HC와 CO를 증가시키는 주요 원인이 된다.⁽¹⁶⁾

하지만 이러한 많은 사이클 변동에 관한 연구에서 아직도 계속적으로 연구하여야 할 것은 점화에너지 방전특성에 따른 사이클 변동이라고 생각은

한다.

따라서 본 연구에서는 기존에 이성열등이 개발한 점화에너지 변화 장치인 다회수 스파크 점화장치(본 연구에서는 반복 방전 점화장치라 부른다)를 이용하여 점화에너지 변화에 따른 아이들링 상태에서의 사이클 변동의 특성을 규명하고자 한다.

2. 실험장치 및 실험방법

Table 1은 본 연구에서 사용한 기관의 제원이다. 본 기관은 전자 제어 연료 분사 가솔린 기관으로서 와전류식 동력계에 직결되어 있다.

실험기관을 제어하는 방법으로 기존의 ECU 기능을 하면서 연료 분사 시스템과 점화 시스템을 자유로이 제어가 가능한 엔진 제어 시스템(IC 5460, INTELLIGENT CONTROLS, INC.)을 사용하였으며, 전반적인 실험장치의 대략도는 Fig.1과 같다. 그림과 같이 기관의 스로틀 개도는 컴퓨터에서

Table 1 Specification of test engine

Engine type	4-cylinder, MPI
Bore	75.5 mm
Stroke	82.0 mm
Clearance volume	43.7 cc
Displacement	1468 cc (367 cc/cylinder)
Compression ratio	9.4
Valve timing	IVO 18.5 BTDC IVC 51.5 ABDC EVO 51.5 BBDC EVC 18.5 ATDC

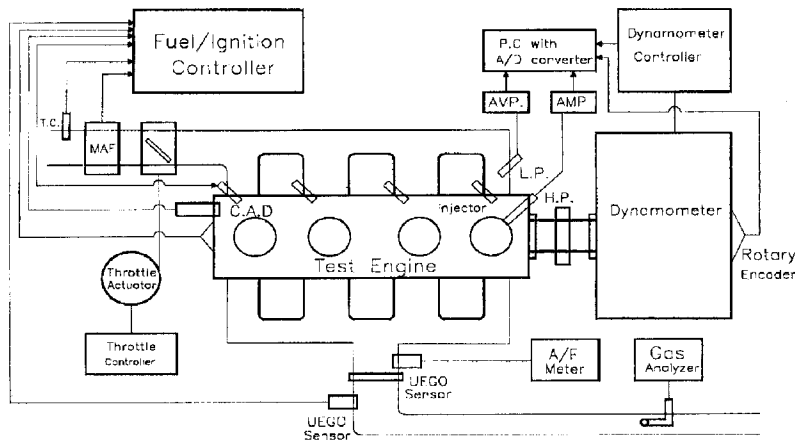


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

자동 제어할 수 있도록 구성되었다. 또한 공기 연료비의 측정은 배기관에 광역 공기 연료비 센서를 삽입하고 공기 연료비 측정기(UEGO Sensor, HORIBA 110λ)를 사용하여 측정하였다.

대표적인 실험변수로는 공회전 상태에서 Repetitive Discharge Igniter(반복 방전 점화장치)를 이용하여 점화에너지의 상태를 변화시키며 실험을 수행한다.

공회전 상태에서 연료 분사 시기의 변화, 공기 연료비의 변화, 점화 시기의 변화에 대한 실험 분석을 하였다.

본 실험에서 공회전이라 함은 동력계에 부하를 전혀 걸지 않고 엔진을 회전시키는 경우이고 이때 회전수는 800 rpm으로 조정하였다. 기존 기관에 부착되어 있는 공회전 자동 조정 장치는 분리하여 작동되지 않도록 하였다. 엔진 냉각수 온도는 기관을 충분히 운전하여 80°C로 일정하게 조정하였다.

점화시기는 10°BTDC로 고정하였으며, 공기연료비는 이론공기연료비로 고정을 시켰다. 이때 연료분사는 상용분사 시기인 흡입 과정 상사점전 100°BTDC로 일정하게 하였다.

연소실내의 연소 압력은 압력 센서(Kistler 6061 B)를 4번 실린더에 삽입하여 250사이클씩 측정하였고 흡기관 압력은 절대압 센서(Kistler 4045A2)를 4번 흡기관에 삽입하여 250사이클씩 측정하였으며, 배기가스, 연료 소비량 등을 측정하였다.

3. 사이클 변동 해석 방법

실제기관은 정상운전에 있어서 실린더 내 압력이 사이클 마다 변동하기 때문에 꼭 같은 지압선도를 나타내지 못하며, 이것을 사이클 변동이라 한다. 연소 변동을 알려 줄 수 있는 방법에는 크게 나누어 다음의 4가지 방법에 의하여 연소의 변동이 일어났는지의 여부를 알 수 있다고 했다. 즉, 첫번째 방법으로 압력에 관계된 변수에 의한 방법으로, 연소실 내의 최고 압력값, 연소실 내의 최고 압력값이 발생하는 크랭크 각, 최고 압력 상승률, 최고 압력 상승률이 발생하는 크랭크 각, 각 사이클의 IMEP을 조사하여 연소의 변동을 해석하는 방법이다. 두번째 방법으로는 연소에 관계되는 변수로써, 최고 열 발생율, 연소실 내의 최고 질량연소율 또는 최고 질량연소율의 변동을, 점화지연, 연소구간, 점화가 시작되어서 어떠한 질량이 타기 시작하

는 순간까지의 경과시간을 이용한 방법이다. 세번째 방법은 화염면에 관계된 변수를 이용하여, 주어진 시간에 대해 화염 반지름, 화염면 면적, 연소된 체적을 계산하고, 주어진 위치에 대해 화염 도달시간을 얻어 연소의 변동을 식별하는 방법, 네번째는 배출가스의 조성을 가지고 연소의 변동을 판단하는 방법 등이다. 이러한 방법 중에서 가장 간단한 방법은 첫번째, 압력에 관계된 변수에 의한 방법을 이용하여 구하는 것이다.^(17,18)

압력 데이터로부터 유도되는 사이클 변동의 중요한 기준의 하나는 평균유효압력 변동계수(coefficient of variation in indicated mean effective pressure)이다.

사이클변동의 크기를 나타내는 IMEP의 COV는 IMEP의 표준편차를 다수 측정된 IMEP의 평균값으로 나누어 백분율로 나타낸다.

4. 점화 에너지 측정

스파크 플러그 근처의 점화에너지를 정확히 측정한다는 것은 쉬운 일은 아니다. 점화코일의 콘덴서 용량과 전압으로 간단히 계산한 값은, 스파크 플러그 근처의 연소에 직접적으로 영향을 미치는 점화에너지량과는 많은 차이가 있으므로, 좀더 정확한 점화에너지량을 측정하기 위해서는 용량방전에너지와 유도방전에너지의 양으로 나누어 계산함이 바람직 하리라 생각이 든다. 즉, 총 점화에너지 (E_s)는 용량방전에너지(E_{sc})와 유도방전에너지 (E_{st})의 합으로 나타낼 수 있다.

$$E_s = E_{sc} + E_{st} \\ = \frac{1}{2} C_2 V_s^2 + \frac{1}{2} V_i I_2 T_2 \quad (1)$$

$$\text{또한 여기서 } I_2 = \frac{I_1}{\frac{N_2}{N_1}} a \text{ 이고} \quad (2)$$

$$I_1 = \frac{E}{R_1} (1 - e^{-\frac{R_1}{L_1} \tau_1}) \text{ 이다.} \quad (3)$$

여기서,

C_2 : 2차 쪽 정전용량

V_s : 방전 전압

V_i : 유도 방전 전압

I_2 : 2차 전류

T_2 : 유도방전 지속기간

I_1 : 1차 차단 전류

- N_1 : 1차 코일 횟수
- N_2 : 2차 코일 횟수
- a : 변환효율
- E : 축전지 전압
- R_1 : 1차 코일 저항
- L_1 : 1차 코일 인덕턴스
- T_1 : 1차 코일 통전 시간

여기서 C는 점화회로 내의 2차 쪽의 정전용량으로 계측기(LCR meter)로 측정하고, 유도방전지속 시간은 2차쪽 전압파형으로 구할 수 있다. 그리고 2차 전류 최대값 I는 높은 내 전압 전류프로브를 이용하여 오실로스코프로 측정하거나 또는 점화회로의 1차 쪽 전압파형과 이론식으로부터 산출할 수 있다.

여기서 2차 전류와 1차 전류는 식 (2)과 식 (3)으로 표시하였다. 이들 식에서 축전지 전압, 1차 코일 저항, 1차 코일 인덕턴스 및 코일의 권선비 (N_2/N_1)는 등은 코일의 제원으로 Table 2에 표시되어 있으며, 1차 코일에 전류가 흐르는 시간은 1차쪽 전압 파형으로부터 계측된다.

Fig. 2는 점화에너지 측정장치를 나타낸다. 점화 에너지를 측정하기 위해서는, 앞에서 제시한 식 (1)을 이용하여 방전전압, 유도방전전압, 유도방전 지속시간, 1차 코일 통전시간을 알아야 정확한 점화

Table 2 Specification of ignition coil used

Item	Value
Voltage type	12 V
Primary resistance	1.5 Ω
Primary inductance	5.6 mH
Secondary resistance	10.3 Ω
Secondary inductance	50.4 mH
Coil turns ratio	90

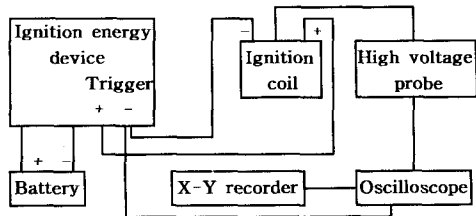


Fig. 2 Schematic diagram of ignition energy measurement apparatus

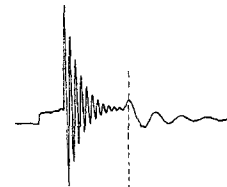
에너지 값을 계산할 수 있다. 즉 전압 파형을 측정하기 위하여 오실로스코프와 기록장치인 X-Y recorder를 설치하였다.

1차 점화 파형을 측정하기 위하여 저전압용 프로브(Textronix 10X)를 점화코일의 (-)단자에 연결하고, 고전압인 2차 점화파형을 측정하기 위하여 고전압 측정용 프로브(Textronix 6015, 40 kV, 1000X)를 스파크 플러그 단자에 연결하여 이들을 오실로스코프(Textronix 5223, 10 MHz)에 입력시켜 X-Y recorder로 기록하였다.

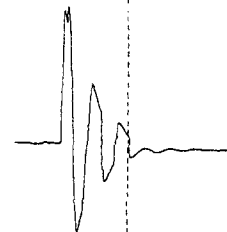
Fig. 3은 통상의 점화장치를 이용한 경우의 점화 파형으로서, 맨 위쪽 파형은 점화코일의 (-)단자 쪽에서 측정한 1차 전압파형이고, 중간파형은 점화코일의 고압단자 쪽에서 측정한 2차 전압파형이며, 맨 밑의 파형은 스파크 플러그에서 측정한 전압파형이다. 이때의 점화에너지는 식 (1)을 이용하여 계산한 결과 3 mJ가 채취됐다.

또한 Fig. 4, Fig. 5, Fig. 6은 RDI(Repetitive Discharge Igniter)를 이용하여 실험한 결과로서 점화에너지를 산출한 결과 각각 14 mJ, 24 mJ, 20 mJ을 나타낸다. Fig. 4~Fig. 6의 전압파형의 2차 쪽 전압을 비교해 보면 통상의 1회 스파크인 경우

Wave form of primary voltage
No. of Spark: 1
Peak voltage: 200V
Spark duration: 1.00ms



Wave form of second voltage
No. of Spark: 1
Peak voltage: 21kV
Spark duration: 1.00ms



Wave form of spark plug voltage
No. of Spark: 1
Peak voltage: 7.7kV
Spark duration: 1.00ms

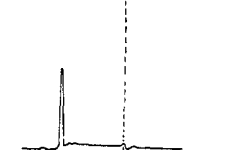


Fig. 3 Ignition wave form of the commercial ignition system(Ignition energy: 3mJ)

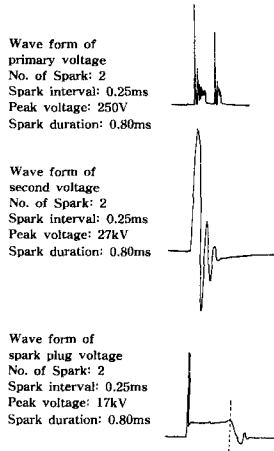


Fig. 4 Ignition wave form of the repetitive discharge igniter (Number of spark: 2, Spark interval: 0.25ms, Ignition energy: 14mJ)

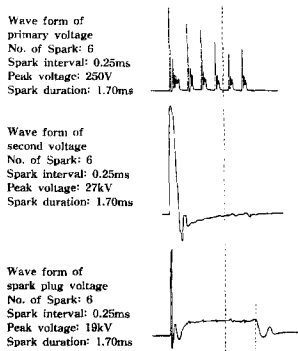


Fig. 5 Ignition wave form of the repetitive discharge igniter (Number of spark: 6, Spark interval: 0.25ms, Ignition energy: 24mJ)

는 21 kV이고, 점화에너지를 증대시킨 경우는 27 kV정도이다. 또한 점화코일에서의 유도 작용에 의하여 고압의 유도전압을 발생하는 스파크 플러그에서의 방전전압은 여러 손실로 말미암아 점화코일의 2차 전압보다 낮은 전압파형을 발생한다. 즉, 기존의 점화장치인 경우는 스파크 플러그에서의 용량방전의 최고 전압이 7.7 kV 정도이며, 점화에너지가 14 mJ인 경우는 17 kV 등을 나타내고 있다. 방출 전압은 코일의 인덕턴스의 특성상 극이 역전되고 있으나 전압이 급격히 감소되는 시점까지는 용량성분, 그 이후를 유도성분이라고 볼 수 있다. 스파크 횟수가 증가함에 따라 스파크 에너지 방출기간이 증가하는 경향이 있다. 하지만, 이러한 방출되는 점화에너지는 전극 간극내의 전리현상으로 도전로

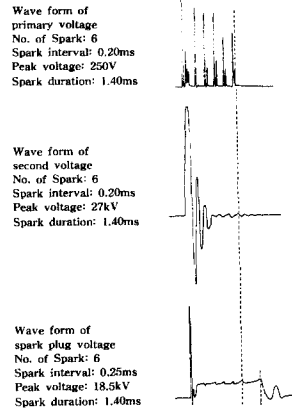


Fig. 6 Ignition wave form of the repetitive discharge igniter (Number of spark: 6, Spark interval: 0.20ms, Ignition energy: 20mJ)

가 형성되기까지 급격히 증가후 감소한다.

5. 실험 결과 해석

Fig. 7, Fig. 8, Fig. 9는 반복방전 점화장치의 스파크 횟수와 스파크 간격에 따른 점화에너지의 방출 패턴이다. 스파크 횟수의 증가에 따라 총 점화에너지는 증가한다. 또한 스파크 간격을 0.15 ms, 0.20 ms와 0.25 ms로 변화시킨 경우의 총 점화에너지가 증가한다.

Fig. 10은 기존의 점화장치와 RDI를 이용한 경우에 대해서 점화에너지를 용량성분과 유도 성분으로 나누어 백분율로 나타낸 그림이다. 그림에서 보는 바와 같이 스파크 횟수와 스파크 간격이 증가함에 따라 방출패턴 E_{st}/E_{sc} 는 증가하고 있어서, 방출패턴은 스파크 횟수와 스파크 간격에 의존한다는 것을 알 수 있다.

Fig. 11은 기존의 점화장치를 이용한 경우의 도시평균유효압력(Indicated mean effective pressure, IMEP)을 매 사이클마다 채취하여 나타낸 선도이다. 800 rpm, 이론공기연료비에서 250 사이클의 평균 IMEP는 약 1.0 bar를 나타내고 있지만, 매 사이클마다 IMEP는 급격히 변하고 있으며, IMEP는 최저 0.5 bar에서부터 최대 1.5 bar까지를 나타내고 있다. 이러한 사이클 변동의 원인으로는 각 사이클 마다 불균등 혼합기에 의한 연소, 잔류가스의 혼합, 점화지연 등을 생각해 볼 수 있다.

Fig. 12는 점화에너지 형식을 변화시킨 경우의 250 사이클을 채취하여 평균한 도시평균유효압력

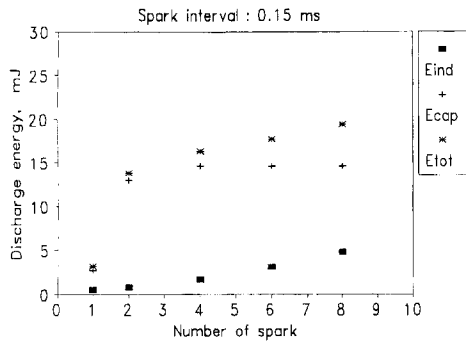


Fig. 7 Discharge energy as a function of number of spark

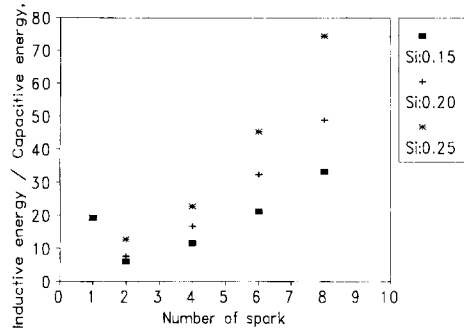


Fig. 10 Inductive/capacitive energy as a function of number of spark (S_i is the spark interval)

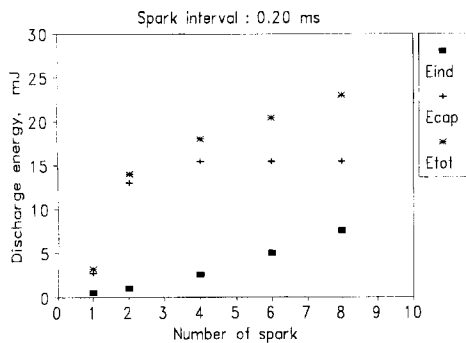


Fig. 8 Discharge energy as a function of number of spark

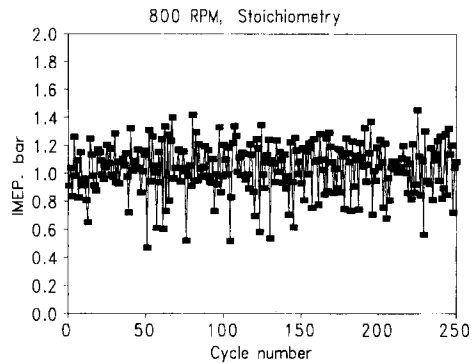


Fig. 11 IMEP as a function of cycle number

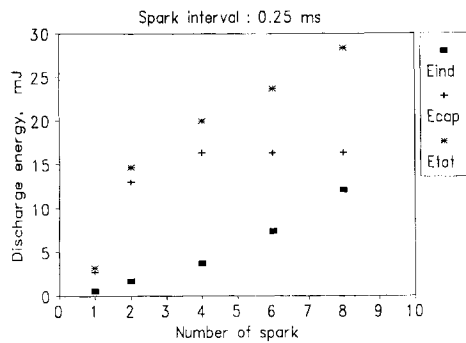


Fig. 9 Discharge energy as a function of number of spark

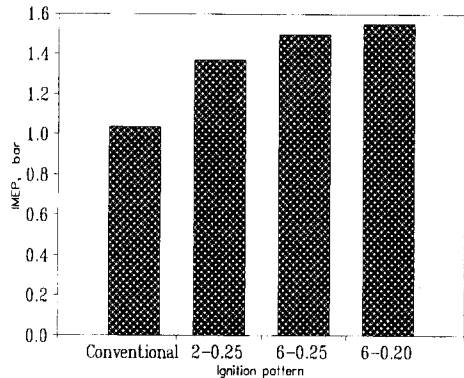


Fig. 12 IMEP as a function of ignition energy pattern

(Indicated mean effective pressure, IMEP)을 나타낸 실험 결과이다. 여기서 점화에너지 형태는 기존의 점화장치를 이용한 점화에너지 3 mJ인 경우, RDI를 이용하여 스파크 횟수를 2회, 스파크 간격을 0.25 ms로 실험한 점화에너지 14 mJ인 경우, RDI를 이용하여 스파크 횟수를 6회, 스파크 간격을 0.25 ms로 실험한 점화에너지 24 mJ인 경우,

RDI를 이용하여 스파크 횟수를 6회, 스파크 간격을 0.20 ms로 실험한 점화에너지 20 mJ인 경우를 말한다. 이 경우 점화에너지가 20 mJ인 스파크 횟수 6회, 스파크 간격 0.20 ms인 경우가 아이들링에서 1.56 IMEP로 가장 큰 값을 나타내고 있다.

Fig. 13는 IMEP의 변동계수(Coefficient of variation, COV)를 점화에너지 패턴에 대해 나타냈다.

여기서 사이클변동의 크기를 나타내는 IMEP의 COV는 IMEP의 표준편차를 다수 측정된 IMEP의 평균값으로 나누어 백분율로 나타낸 것이다. IMEP의 COV는 4가지(3 mJ, 14 mJ, 20 mJ, 24 mJ) 점화에너지 패턴 중에서 점화에너지 20 mJ인 스파크 횟수가 6회이고, 스파크 간극이 0.20 ms인 점화에너지 패턴에서 COV_{IMEP} 는 8.56%로 가장 안정된 연소를 하는 것으로 알 수 있다.

Fig. 14는 아이들링 800 rpm, 250회 사이클 동안, 기존의 점화장치인 3 mJ의 점화에너지를 공급하는 점화장치와 RDI를 이용하여 점화에너지 20 mJ를 공급하는 경우의 질량연소율 0%에서 2%까지의 연소구간의 발생빈도수(Number of occurrences)를 크랭크 각에 대해 나타냈다. 20 mJ인 경우는 약 상사점 후 7도 근방에서 전체 250회 사이클 중에서 56회의 사이클 출현이 있었다. 또한 3

mJ인 경우는 상사점 후 크랭크 각 26도 근방에서 28회의 사이클 출현이 있었다.

Fig. 15는 연소구간 0-10%의 크랭크 각에 대한 출현 횟수를 나타낸 실험 결과이다. 실험 결과에서도 20 mJ인 경우 전체 250사이클 중에서 0-10% 연소구간이 TDC 후 12도에서 41회의 출현이 있었고, 기존의 점화장치인 3 mJ인 경우 전체 250사이클 채취에 대해서 연소구간 0-10%가 TDC 후 36도에서 27회의 사이클 출현이 있었다.

이는 스파크 횟수의 증가로 인하여 점화에너지 및 에너지 방출기간의 증가로 화염전면에서의 화학반응이 활발하게 진행되므로 화염이 성장하는 속도도 빠르게 진행된 것으로 생각된다. 이러한 연소 초기인 연소구간 0-2%, 또는 0-10%는 Fig. 16과 같이 연소구간 0-90%에 그대로 반영이 되고 있다. 즉 초기연소구간의 활발한 연소는 전체 연소 구간

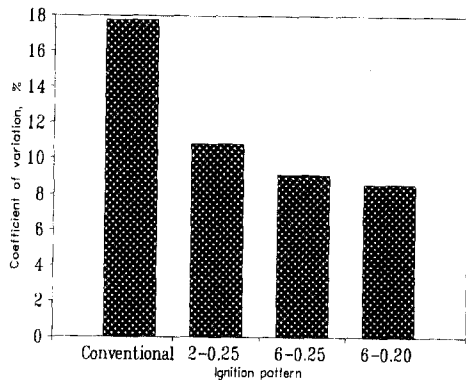


Fig. 13 Coefficient of variation in IMEP as a function of ignition energy pattern

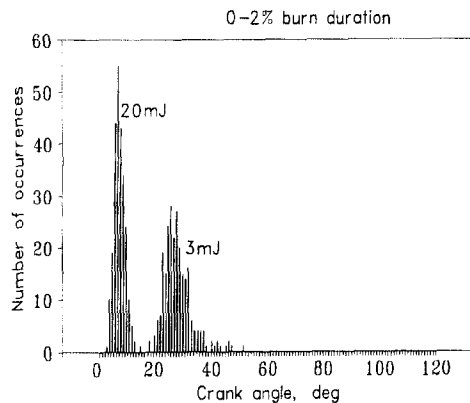


Fig. 14 Number of occurrences as a function of crank angle at 0-2% burn duration

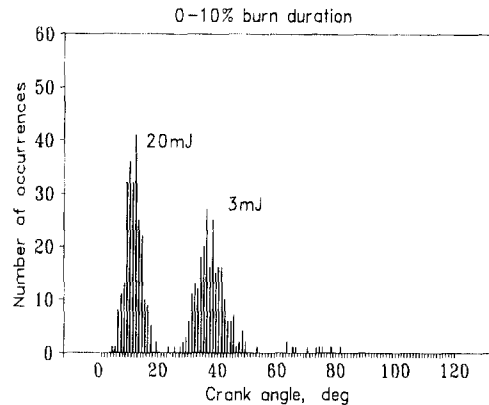


Fig. 15 Number of occurrences as a function of crank angle at 0-10% burn duration

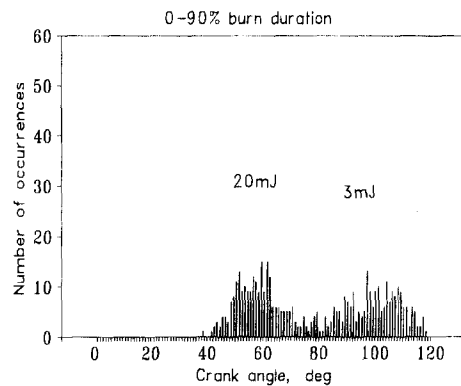


Fig. 16 Number of occurrences as a function of crank angle at 0-90% burn duration

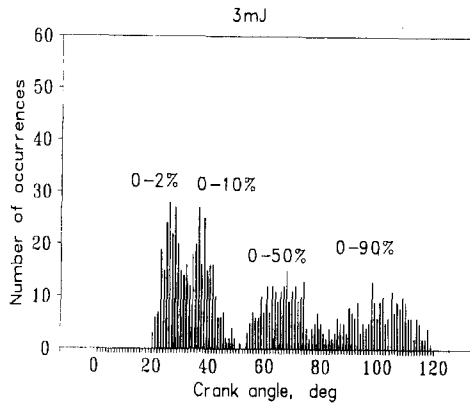


Fig. 17 Number of occurrences as a function of crank angle at 0-2%, 0-10%, 0-50%, and 0-90% burn duration in conventional ignition system, 3mJ

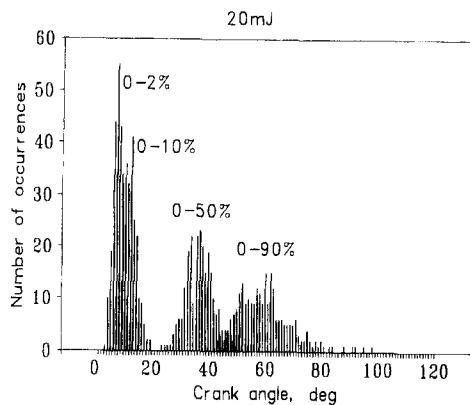


Fig. 18 Number of occurrences as a function of crank angle at 0-2%, 0-10%, 0-50%, and 0-90% burn duration in the RDI, 20mJ

에 직접적인 영향을 미친다. 즉, 초기연소구간에 RDI를 사용해 연속적으로 점화에너지를 방출시켜 지속기간을 길게 하면 초기에 급속연소가 가능하고 연소가 안정된다는 것을 알 수 있다.

Fig. 17과 Fig. 18는 연소구간 0-2%, 0-10%, 0-50%, 0-90%에 대한 전체 250사이클에 대한 사이클 출현 횟수를 점화에너지 변화에 대하여 나타낸 실험 결과이다. 이러한 초기 연소구간 0-2%, 또는 0-10%의 연소는 전 연소구간에 영향을 미쳐 0-90%를 살펴보면, 점화에너지가 20 mJ인 RDI인 경우 3 mJ에 비해 연소 변동이 적고, 초기에 급격 연소를 이룬 안정된 연소를 하고 있음을 알 수 있다. 스파크 횟수가 증가하여 점화에너지가 증가함에 따라 급속연소를 이루어 실린더내 IMEP가 높

아진다. 이것은 초기에 큰 점화에너지의 공급으로, 에너지 방출기간이 길어지는데 따른 화염핵 크기의 증가로 인한 연소의 안정성에 기인하는 것으로 생각된다.

6. 결 론

스파크 점화기관의 사이클 변동을 줄일 수 방법 중의 하나인 반복방전 점화장치(RDI)를 실제기관에 장착하여 성능을 해석한 결과, 사이클 변동이 가장 적은 RDI의 조건은 스파크 횟수 6회, 스파크 간격 0.20 ms가 가장 사이클 변동이 적은 안정된 연소를 한다. 이것은 IMEP 연소해석의 결과 스파크 횟수가 증가하여 점화에너지가 증가함에 따라 급격연소를 이루고, 에너지 방출기간이 길어져서 연소의 안정성에 기인한 것으로 사려된다.

후 기

본 연구는 인덕전문대학에서 연구비 일부를 지원 받아 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) Sztenderowicz, M. L. and Heywood, J. B., 1990, "Cycle-to-Cycle IMEP Fluctuations in a Stoichiometrically-Fueled S. I. Engine at Low Speed and Load," *SAE paper* 902143.
- (2) Lee, K. H. and Foster, D. E., 1995, "Cycle-by-Cycle Variations in Combustion and Mixture Concentration in the Vicinity of Spark Plug Gap," *SAE Paper* 950814.
- (3) Ozdor, N., Dulger, M. and Sher, E., 1994, "Cyclic Variability in Spark Ignition Engines A Literature Survey," *SAE Paper* 940987.
- (4) Ozdor, N., Dulger, M., and Sher, E., 1994, "Cyclic Variability in Spark Ignition Engines A Literature Survey," *SAE Paper* 940987.
- (5) Hill, P. G., 1988, "Cyclic Variation and Turbulence Structure in Spark-Ignition Engines," *Combustion and Flame*, Vol. 72, pp. 73~89.
- (6) Halldin, C., 1992, "Velocity and Turbulence Measurements Close to a Spark Plug," *SAE Paper* 920154.

- (7) Hill, P. G., and Kapil, A., 1989, "The Relationship Between Cyclic Variation in Spark-Ignition Engines and the Small Structure of Turbulence," *Combustion and Flame*, Vol. 78, pp. 237~247.
- (8) Johansson, B., 1993, "Influence of Velocity Near the Spark Plug on Early Flame Development," *SAE paper* 930481.
- (9) Pichinger, S. and Heywood, J. B., 1988, "A Study of Flame Development and Engine Performance with Breakdown Ignition Systems in a Visualization Engine," *SAE paper* 880518.
- (10) Pichinger, S. and Heywood, J. B., 1990, "A Model for Flame Kernel Development in a Spark-Ignition Engine," *Twenty-Third Symposium (International) on Combustion*, pp. 1033~1040.
- (11) 이성열, 1995, "내연기관," 보성각.
- (12) 한병호, 1987, "다회수 스파크 점화기관의 기 관성능 및 방전효과에 관한 연구," 성균관대학교 박사학위 논문.
- (13) 나성오, 한성빈, 최규훈, 이상준, 이종태, 1995, "기관용 용량방전식 다회수 스파크 점화장치
의 희박연소 특성," 대한기계학회 1995년 춘계 학술대회논문집 (Ⅱ) pp. 529~534.
- (14) 이상준, 나성오, 한성빈, 이용균, 이종태, 1995, "희박혼합기에 대한 다점점화의 점화능력 및 연소 특성," 대한기계학회논문집 제19권, 제 10호, pp. 2607~2616.
- (15) Han, S. B., Choi, K. H., Ra, S. O., Lee, S. J. and Lee, J. T., 1995, "Ignitability and Combustion Characteristics of the Multi Spark Capacitor Discharge Ignitor for a Lean Burn Engine," *SAE Paper* 952396.
- (16) Hoard, J. and Rehagen, L., 1997, "Relating Subjective Idle Quality to Engine Combustion," *SAE Paper* 970035.
- (17) Heywood, J. B., 1988, *Internal Combustion Engine Fundamentals*, McGRAW-HILL International Editions.
- (18) Cheng, H. M., 1993, "A Practical Burn Rate Analysis for Use in Engine Development and Design," M. I. T. Thesis.