

# KIMM의 가솔린 엔진 급속연소 연구 및 관련 측정 기술(III)



정 동 수 (동력기계 실장)

- '70-'77 서울대학교 기계공학과 졸업(학사)
- '78.2-'79.1 독일 OPEL 자동차 엔진공장(기술연수)
- '82.1-'82.6 미국 SWRI 내연기관 연구부(공동연구)
- '84.1-'84.6 영국 Ricardo 엔진연구소(공동연구)
- '84-'88 한국과학기술원 기계공학과 졸업(석사)
- '77.1-현재 한국기계연구원 책임연구원

1. 서론: 4권 1호에 게재
2. 실린더내 가스유동 측정: 4권 1호에 게재
3. 엔진연소실내 화염전파의 측정: 4권 2호에 게재

## 4. 엔진연소 안정성의 측정

### 4.1 개 요

2 사이클 엔진이나 4 사이클 엔진을 막론하고 전기 점화식 엔진에서는 엔진 사이클에 따른 연소압력의 변동을 수반하게 되는데 이것은 자동 차용 엔진에서 특히 불쾌감을 주는 진동과 배기 소음의 원인이 되고 있다. 최근들어 관심이 고조되는 배출가스 청정화를 위하여 이 연소 변동을 극소화 해야 할 필요가 있고 특히 희박연소의 경우는 연소변동 현상이 극심할 것으로 예상되므로 이를 최소화 하기 위해서 시도되고 있는 급속연소 효과에 대하여 엔진연소 변동 현상의 정량적, 정성적 해석이 많이 요구되고 있다.

연소변동의 원인이나 변동인자를 정확히 파악하는 것이 어렵기 때문에 원인의 근본적인 해명이 충분하지 못하다고 할수 있다. 따라서 실제 엔진에서 연소의 불안정, 실화등 연소변동을 관측하기 위해서는 결국 연소압력이나 화염전파 등을 검출해서 그 사이클의 변동을 구하는 것으로 귀착이 된다.

연소변동의 상태를 단순히 측정하는 것은 의미가 없고 변동이 무엇 때문인가를 밝히는 것이 중요하므로 목적에 따라 편리한 데이터 처리방법이 고안되어 사용되고 있다.

### 4.2 연소 안정성의 측정 방법[1]

간단한 연소의 변동이라 하더라도 이것을 어

뿔게 잘 나타내느냐 하는 것은 쉽지 않다. 그림 1과 같이 엔진 연소실에 직접 압력 센서를 장착하여 그림 2와 같이 연소압력과 크랭크 각과의 관계를 나타내는 연소압력 선도를 여러 사이클에 대하여 기록해서 이들을 중첩시킬 경우 사이클 변동이 연소의 변동을 표시하고 있다고 할 수 있다. 따라서 각 크랭크 각  $\theta$ 에 대응하는 압력값의 변동을 알기 위해서는 특정점의 값을 대표적으로 선정해야 하는데 주로  $P_{max}$ 와  $P_{max}$ 에 대응하는 크랭크 각  $\theta(P_{max})$ , 연소 압력과 압축압력과의 차이가 최대인  $\Delta P_{max}$ 와 이것이 나타나는 시기  $\theta(\Delta P_{max})$  등이 이용되며, 또한 연소압력 곡선의 기울기  $(dp/d\theta)$ 도 연소변동을 나타내는 한 지표가 될 수 있다.

일반적으로 연소변동 상태를 표시하기 위하여 표준편차와 변동율을 사용하고 있는데 압력을  $p$ 라 할때

$$p = \bar{p} + \delta p$$

로 표시되고, 여기서  $\bar{p}$ 는 평균치,  $\delta p$ 를 변동분으로 표시하면, 표준편차  $S_p$ 는

$$S_p^2 = \frac{1}{N}(\delta p)^2, i=1, 2, \dots, N$$

이 되고, 변동율  $C_p$ 는

$$C_p = S_p / \bar{p}$$

로 나타낼 수 있다.

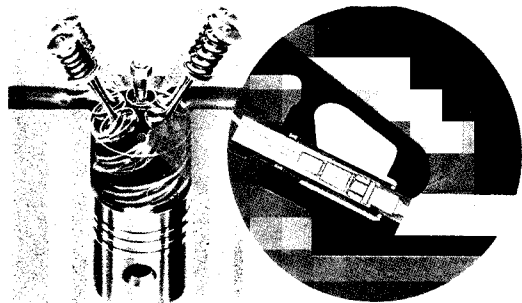


그림 1. 연소실내 압력센서장착위치

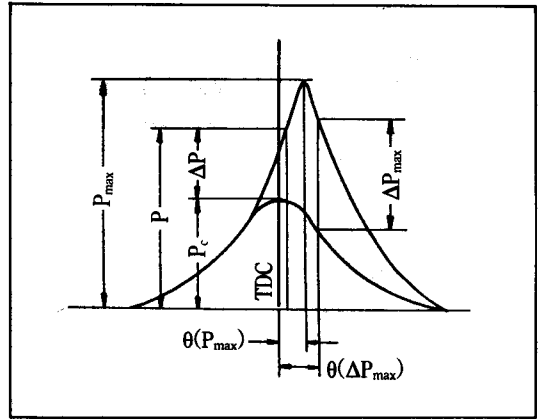


그림 2. 연소압력 경과를 나타내는 물성치

전기 점화식 기관의 연소에는 화염전파가 수반되므로 화염면의 이동을 검출해서 이 변동을 알아낼 수도 있다. 화염 전면이 가솔린내 특정 지점에 도달한 시기를 검출해 내는 방법으로 옛날부터 많이 이용되어 온 이온 전류법이 있다. 즉 이온 프로브에 전압을 걸어주어 화염면이 프로브에 도착할 때 이온 전류가 생겨서 전류가 흐르기 시작한 시기에 의해 화염 도달을 알수 있게 된다. 따라서 이때 화염 도달 시기의 변동을 가지고 연소변동을 표시할 수가 있다.

그 외의 방법으로는 연소 상태에 변동이 일어나면 당연히 평균 유효 압력에 변동이 생기는 점을 이용하는 평균유효압력의 변동으로 측정하는 방법이 있다.

#### 4.3 KIMM의 엔진 연소 안정성 실험[2]

엔진실린더내에 적절한 유체유동을 흡기포트 변화를 통하여 만들어 주어 엔진연소를 향상시키고, 배기가스 배출을 줄이며 성능을 향상시키는 기술은 일반화되어 있다[3, 4]. 현재까지 알려진 바로는, 연소과정시 난류가 연소속도를 증가시키는 방법은 두가지로서 하나는 화염면의 두께보다 작은 크기의 난류기능으로 이는 화염내에서의 열전달 및 질량전달률을 증가시켜 연소속도를 증가시키고, 둘째는 화염면의 두께보다 큰 크기의 난류 기능으로서 이는 화염면의 형상을 주름지게

하여 연소속도를 증가시킨다는 주장이지만, 유체 유동과 연소의 상관관계에 대한 근본적인 규명은 아직까지 되어 있지 못한 상태이다. 따라서 당 연구소에서는 지금까지 연구에서 Masked Shroud Head(MSH) 장착엔진이 모터링 실험시 강력한 swirl 및 난류가 생성되고 급속연소가 일어난다는 실험 결과를 기초로 하여, MSH 장착엔진에 대한 연소 안정성 실험으로 swirl 및 난류가 연소 안정성에 미치는 영향을 실험적으로 알아보고자 하였다. 연소 안정성 해석은 연소실내의 압력측정값을 이용하는 간접적 해석 방법과 연소실 벽면에 이온프르브를 장착하여 화염전파속도를 측정하는 직접적 해석방법을 모두 이용하였다.

4.3.1 연소압력 측정을 통한 연소 안정성 해석

연소실내 압력을 측정하기 위해 실험엔진에 100 bar용량의 압전식 압력센서를 장착하였고, 캠축에 360 pulse/rev의 엔코더를 설치하여 크랭크각도에 따른 압력값을 얻을 수 있도록 하였다. 고속의 데이터처리 장치를 통해서 받아들인 압력값은 크랭크각도 2도의 해상도를 가지며, 22개 사이클 동안 압력변화를 컴퓨터에 전송시킬 수 있도록 하였다. 기존엔진은 다중 연료 분사 방식(MPI) 엔진으로서 ECU에 의해서 산소센서의 신호를 피드백 하여 연료량을 제어하며, 보정된 값을 이용해 점화시기가 자동적으로 조절되게 되어 있다. 따라서 기존엔진에 MSH를 장착한 엔진에 대해서도 이와 같은 ECU내 조절기능에 따라 기존엔진과 같게 점화시기 및 연료분사량이 조절된다. 사용된 동력계는 130KW용량의 와전류 방식으로 엔진회전수와 부하상태를 정밀조절하도록 되어 있다. 실험조건은 기존엔진과 MSH엔진의 각 경우에 대해서 2000rpm, 3000rpm의 회전수에서 부하가 40N(1/3부하), 80N(2/3부하), 120N(전부하)일 경우에 대해서 압력측정을 수행하였다.

측정된 압력선도를 이용해 연소해석을 효율적으로 수행하기 위하여 아래 방법을 이용하였다. 우선 연소실내 유동의 향상으로 인해 연소에 영향을 줄수 있는 요인을 생각해 보면, 난류강도의 증가로 인해 화염속도가 빨라지는 급속연소가 일어나고, 연소의 안정성으로 인해 연소특성의

사이클별 변동이 작아진다. 따라서 이와같은 급속연소 정도와 연소의 사이클 변동량을 기존엔진과 MSH엔진에서 비교하기 위한 방법을 수행해야 한다. 급속연소는 그림 3에서와 같이 점화시기가 같다고 가정했을 때 압력의 최고치에 도달하는 시간이 짧아지며( $\theta_2$ ), 그에 따라 최고압력값도 커지게 된다. 그러므로 각 사이클에 있어서 최고압력 도달시간과 최고압력치를 구한 다음, 그 값들을 22개 사이클에 대해서 ensemble 평균을 수행하므로써 각각의 그 대표값을 구했다. 연소의 사이클간 안정성을 평가하기 위해서는 최고압력 도달시간과 최고압력치의 각 사이클간의 표준편

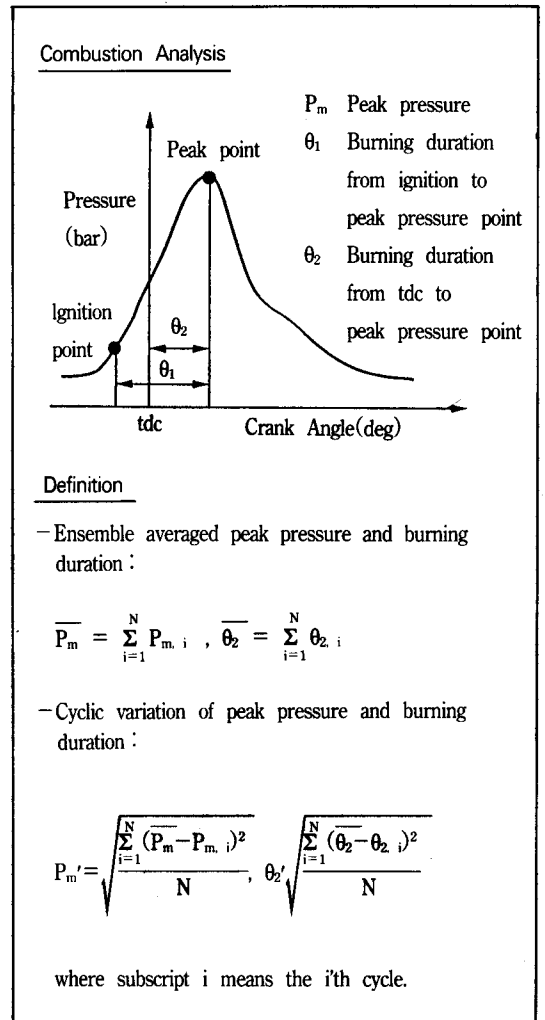


그림 3. 연소압력 해석 및 결과치 계산 정의

차값으로서 정의하여 그 값의 사이클 변동량을 계산하였다.

엔진의 회전수가 2000rpm과 3000rpm 상태에서 엔진부하를 40N, 80N, WOT로 변화시켰을 때 기존엔진과 MSH엔진과의 ensemble 평균치로서의 최고압력값과 최고압력 도달기간의 변화를 실험한 결과 최고 압력도달 기간은 MSH엔진이 기존엔진에 비해 현저히 짧게 나타나고 있고, 특히 WOT에서는 그 차이는 더욱 커지고 있다. 최고압력값도 MSH엔진의 경우가 높게 나타나고 있으며, 역시 WOT에서는 더욱 심하게 차이를 보이고 있다. 이와같은 연소 시간의 짧아짐과 최고압력의 상승의 결과는 교과서적인 내용으로서 이론적으로 잘 일치하므로 MSH엔진에서의 연소가 기존엔진에 비해 급속하게 일어나고 있음을 말해준다.

그림 4는 2000rpm일 때 엔진부하에 따른 최고압력의 사이클변동치와 연소기간의 사이클 변동치의 변화를 두 엔진의 경우에 대해서 보여주고

있다. 연소기간의 사이클변동은 두 엔진의 모두에 있어 부하가 증가함에 따라 감소하고 있으나, 두 엔진의 값의 차이는 현저히 나타나고 있다. 연소기간의 사이클 변동은 MSH엔진이 기존엔진에 비해 약 2-3도 작게 나타나고 있다. 최고압력의 사이클 변동도 MSH엔진이 현저히 작게 나타나, 전부하에 걸쳐 1-2.5bar 정도 낮은 값을 갖는다. 이와같은 최고압력 및 연소기간의 사이클변동이 MSH엔진에서 작게 나타나고 있음은 기존 엔진에 비해 매 사이클마다 균일하고 안정되게 연소가 진행됨을 알 수 있게 한다. 3000rpm의 결과도 2000 rpm의 결과와 마찬가지로 MSH엔진에서의 연소가 각 사이클간의 변동없이 안정되게 일어나고 있음을 확인하였다.

#### 4.3.2 이온전류에 의한 연소안정성 측정

엔진실험은 부하 40N, 80N, WOT의 부하 변화에 따라 엔진회전수 2000rpm, 3000rpm에서 수행하였

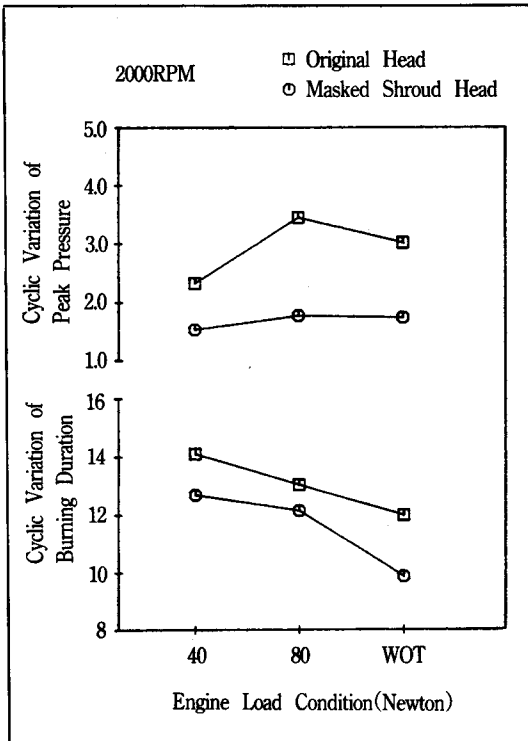


그림 4. 기존엔진과 MSH엔진의 최고압력 및 연소기간의 사이클 변동 비교(2000rpm)

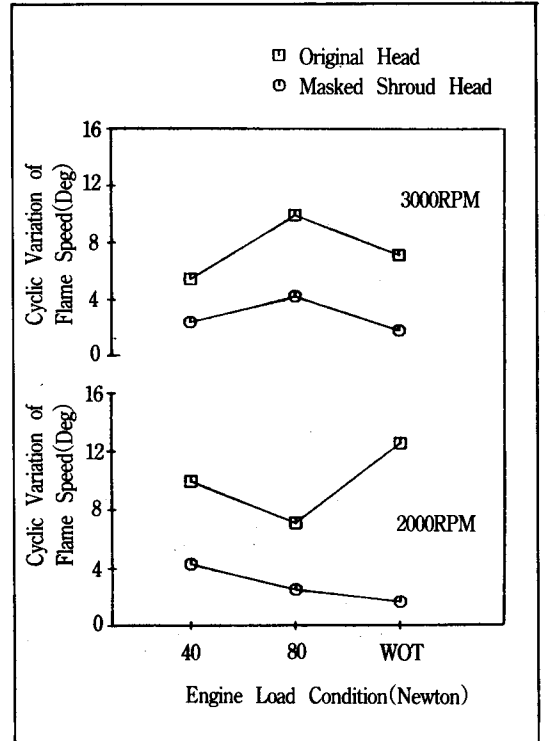


그림 5. 기존엔진과 MSH엔진의 화염 전파속도 사이클변동 비교(2000rpm, 3000rpm)

으며 이온전류법에 의한 화염속도 산출은 점화가 시작된 후 화염이 점화플러그로부터 가장 먼 2 지점에 도달할때까지의 시간을 측정해서 두 지점간의 직선거리를 나누어 줌으로서 평균화염속도를 구했다. 따라서 화염전파시간에 점화지연시간도 포함되어 있으므로 평균화염속도는 다소 낮게 나타나지만 MSH엔진과 기존 엔진에서의 화염전파속도의 상대적인 비교는 가능하다. 또한 사이클 변동에 따른 화염속도 오차를 줄이기 위해 연속적인 9개 사이클의 평균화염속도를 계산해 이들 값을 ensemble 평균함으로서 그 대표값을 정했다. 연소의 안정성을 규명하기 위해 화염속도의 사이클별 변화량, 즉 사이클 변동을 계산하였으며 여기서 화염속도의 사이클 변동과 앞에서 설명된 압력데이터로 구한 연소안정성과 비교를 위해 사이클 변동치의 단위를 크랭크 각도로 하였다.

그림 5는 엔진회전수 2000rpm과 3000rpm 일 때 엔진부하에 따른 화염의 사이클 변동치를 두 엔진에 대해서 비교한 것으로 MSH엔진에서 화염전파의 사이클 변동은 기존엔진에 비해 현저히

감소해 사이클별 연소가 안정되고 있음을 보여 준다.

이상에서와 같이 연소실내의 유동개선을 통해 확인된 급속연소효과로 인하여 희박연소시 연소 불안정의 문제점을 해결할 수 있는 간접적인 증명이 되었으며, 희박연소의 한계에 대해서는 계속 연구가 진행되고 있다.

### 참 고 문 헌

- [1] 川井正男, “內燃機關の燃燒に関する計測”, 山海堂, 「內燃機關」72年 8月號 臨時 增刊, 1972.
- [2] 정동수의, “고성능 가솔린 엔진용 배기가스 감소기술 개발(III)”, 한국기계연구소보고서, 1991.
- [3] N. Okanishi et al, “Jet Air Suction Port(JASP) Improves Fuel Consumption of 4-Stroke Cycle Gasoline Engines at Idle”, SAE Paper 820155.
- [4] Y. Nakamura et al, “Development of A New Combustion System(MCA-JET) in Gasoline Engine”, SAE Paper 780007, Presented at the SAE Congress, Detroit, 1978.