

〈論 文〉

다기통 전기점화기관의 혼합기 불균일화가 사이클 변동에 미치는 영향(I)

연소해석 시스템의 구성

송재학* · 이용길** · 박경석*** · 양옥룡****

(1992년 1월 26일 접수)

Effect of Non-Uniform Mixture on Cycle Fluctuation of Multi-Cylinder Spark Ignition Engine(I)

A Development of Combustion Analyzing System for the Multi-Cylinder Engine

Jae-Hak Song, Yong-Gil Lee, Kyoung-Suk Park and Ok-Yong Yang

Key Words : Mixture Behavior (연료거동), Intake Manifold (흡기관), Combustion Analyzer (연소해석 장치), Fuel Supply System (연료공급 장치), Liquid Film Fuel(연료액막), Rate of Heat Release(열발생율), Rate of Mass Burned(질량 연소율)

Abstract

The combustion in the cylinder of spark ignition engine is completed after the delayed time that the liquid film fuel is vapourized as flowing into the combustion chamber. It is necessary to enhance the homogeneity of mixture and the combustion phenomenon in order to improve the heat efficiency and the emission characteristics of spark ignition engine. The main purpose of this paper is to manufacture a combustion analyzing system and examine closely the influence of non-uniformity due to the liquid film fuel flowing in the intake manifold on the combustion characteristics by using a 4 stroke multi-cylinder spark ignition engine. Moreover, with each cylinder, the interpretation of combustion characteristics by indicator diagram and the concentration of exhaust gas were investigated.

1. 서 론

현재 자동차용 원동기로 널리 사용되고 있는 가솔린기관에 관한 연구는 한정된 에너지자원 및 선진 각국의 배기규제 강화 등으로 인하여 연료의 경

제성 향상과 백기가스 저감에 중점을 두는 경향으로 전환되고 있다.

가솔린기관의 각 운전상태에 있어서 항상 적정한 혼합기를 실린더에 공급하기 위해서는 연료공급장치에서 분출되는 연료유량과 분무상태를 정확히 파악함과 동시에, 연료가 분출된 후 실린더내에 도달하기까지 흡기관내의 연료거동을 명확히 파악하여야에 대처할 필요가 있다.⁽¹⁾⁽²⁾

특히 부하변동이 많은 자동차용 실용기관에 있어서는 각 운전조건에 따른 적절한 혼합기의 형성이

* 대우자동차 기술연구소

** 정회원, 교통안전교육원

*** 정회원, 경희대학교 기계공학과

**** 정회원, 인하대학교 기계공학과

요구되고 있지만, 무화의 불충분으로 인하여 공급 연료의 상당량이 흡기관벽에 부착하여 연료액막 흐름을 형성하게 되어 연소와 배기가스 특성에 나쁜 영향을 초래할 뿐만 아니라 다기통기관에 있어서는 혼합기 분배의 불균일을 가져오는 직접적 원인이 되고 있다.⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾

따라서 흡기관내 액막유량 제거에 의한 연료공급의 혼합기 형성에 관한 개선은 다기통 가솔린기관의 배기특성과 연료분배의 향상에 필연적인 요구사항이 되고 있다.⁽⁷⁾

이에 대한 일책으로 가솔린기관의 연료공급 장치로서 전자제어 시스템을 도입한 연료분사장치를 채택하여 연료액막량을 감소시키고, 보다 정량적이고 균일한 혼합기를 실린더내로 공급함으로써 양호한 연소를 기대할 수 있고, 또 연료소비율의 감소 및 유해 배기가스의 저감을 기하는 장치가 연구되고, 실용화 되고 있다.⁽⁸⁾⁽⁹⁾ 그러나 기화기방식, SPI (single point injection) 방식과 같은 연료공급장치에서는 액막형성 및 불균일, 수송 지연 등의 문제가 현저하고, 이를 최소화하는 MPI (multi point injection) 방식의 기관에서도 기관상태나 부하상태의 변화에 따른 연료의 수송지연 등으로 실린더내 혼합기 불균일의 문제가 현존하고 있다.⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾ 일반적으로 흡기관내 혼합기에 있어서 연료의 상태는 기상 액상의 2상의 흐름이며, 기관의 연소실내에서 최종적으로 형성된 혼합기가 완전균질의 기체상태로 되는 것은 어렵고, 이러한 혼합기의 형성은 연소에 큰 영향을 주는 것으로 지적되고 있다.

다기통 전기점화기관에서 흡기관벽에 부착하여 흐르는 연료액막 및 흡기관내를 부유하는 연료액적에 관해서는 이미 그 현상이 연구되고 있지만, 다기통 전기점화기관에 있어서 흡기관내 부유액적 및 액막흐름이 연소특성에 미치는 영향에 대해서는 고속, 간헐적으로 연소되는 실린더내의 연소특성을 예측하기가 어려움이 따르기 때문에 연구의 어려움을 갖고 있다. 특히 기관의 연소실내로 유입되는 연료액막은 지연시간을 경과한 후 연소가 이루어지므로 가솔린 전기점화기관의 성능과 배기특성을 개선하기 위해서는 혼합기의 균일성을 높이고, 혼합기저동 및 연소과정을 명확히 파악할 필요가 있다.

따라서 본 연구에서는 기화기부착 4행정 4기통 전기점화기관을 사용하여 흡기관내 액막흐름에 의한 연료의 불균일화가 기관의 연소특성과 배기특성에 미치는 영향을 규명하는데 궁극적인 목적을 두

고 우선, 연소특성을 해석하기 위하여 비교적 고가인 연소해석 시스템을 개발하는데 1차적인 목적으로 하였으며, 시험제작한 연소해석 시스템으로 액막흐름의 가시화 및 배기가스 농도측정과 지압선도 해석을 행하여 구조적으로 대칭인 1번과 4번 실린더의 연소특성과 배기특성을 비교 검토하였다.

2. 연소특성 해석의 일반식

본 연구에서 규명하고자 하는 실린더내 연소특성의 해석은 다음의 일반식들을 사용하여 해석하였다.⁽¹²⁾

2.1 임의의 크랭크각도에서의 평균압력

임의의 크랭크각에서 기관의 연소변동으로 인한 영향을 줄이기 위하여 N사이클 분량의 순간압력 값은 다음의 식으로 평균압력을 구한다.

$$P(\theta) = \frac{\sum_{i=0}^n P(\theta_i)}{N}$$

여기서, N : 샘플링된 사이클수

$P(\theta_i)$: 크랭크각 θ 에서의 순간압력값

$P(\theta)$: 크랭크각 θ 에서의 순간 평균압력값

2.2 압력상승률

압력상승률은 크랭크각의 변화에 따른 압력변화량으로 평균처리된 압력값으로 부터 1차미분을 하여 얻는다.

$$\frac{dP}{d\theta} = \frac{P(\theta-2) - 8P(\theta-1) + 8P(\theta+1) - P(\theta+2)}{12h}$$

여기서, $(dP/d\theta)$: 임의의 크랭크각에서의 압력상승률

h : (720/ND)

ND : 1사이클에서 채취된 데이터 수

2.3 열발생률

연소에 의한 열발생률은 점화가 이루어지는 점으로부터 배기밸브가 열리는 점까지의 지압선도의 시간축을 n등분하여 열역학 제1법칙에서 유도된 다음의 식으로 구한다.

$$\frac{dQ}{d\theta} = A \frac{k}{k-1} P(\theta) \left(\frac{dV}{d\theta} \right) + \frac{A}{k-1} V(\theta) \left(\frac{dP}{d\theta} \right)$$

여기서, $dQ/d\theta$: 임의의 크랭크각 θ 에서의 열발생률

$dV/d\theta$: 임의의 크랭크각 θ 에서의 체적변화률

$dP/d\theta$: 임의의 크랭크각 θ 에서의 압력상승률

k : 비열비 ($k=1.3$)

A : 일의 열당량 ($1/427.92 \text{ kcal/kg f}\cdot\text{m}$)

2.4 질량연소율

질량연소율은 열발생율에서 구한 발생열을 기초로 하여 구하고, 임의의 크랭크각 θ 에서의 질량연소율은 다음과 같다.

$$Z_i(\theta) = \frac{\sum_a^{\theta} dQ}{\sum_a^{\theta} dQ}$$

여기서, $Z_i(\theta)$: 크랭크각 θ 에서의 질량연소율

θ : 임의의 크랭크각

a : 연소시작의 크랭크각

b : 연소끝의 크랭크각

2.5 P-V 선도

임의의 크랭크각 θ 에서 실린더체적을 구하기 위한 상사점으로 부터의 피스톤 변위를 구하는 식은 다음과 같다.

$$V_i = V_c + \frac{\pi}{4} D^2 \cdot X$$

$$X = R[(1 - \cos \theta) + \frac{R}{4L}(1 - \cos 2\theta)]$$

여기서,

L : 커넥팅로드의 길이

D : 실린더 직경

R : 크랭크 반경

V_c : 행정체적

V_i : 전연소실 체적

X : 상사점으로 부터의 피스톤 변위

3. 연소해석 시스템의 시작

전기점화기관의 실린더내 연소는 그 진행속도가 고속이므로 해석장치는 짧은 시간내에 충분한 실험 데이터 얻기 위하여 초고속의 응답속도와 신속하고

정확한 데이터 처리능력을 갖추어야 한다.

3.1 하드웨어 (Hardware)의 시작

본 연구에서는 고속의 처리능력을 갖는 12비트 (1/4096) A/D변환기와 16비트 마이크로 컴퓨터 그리고 1회전당 원점신호와 360개의 신호를 내는 로타리 엔코더(Rotary Encoder)를 사용하여 연소해석 시스템의 하드웨어를 구성하였다. 압력센서로는 점화플러그형 압력변환기 (KISTLER제 Model 6001)를 사용하여 실린더내 압력을 전기적인 신호로 검출하고 증폭기에서 증폭시킨후 오실로스코프를 통하여 정상적인 연소가 이루어짐을 확인하였다. 정상적인 연소상태에서 로타리 엔코더에서 발생하는 원점신호와 1°마다의 신호를 동기신호로 하여 A/D변환기를 통하여 디지털화된 압력값을 얻었다. 일반적으로 상사점 신호의 처리는 아나로그 스위치를 통과시켜 압력신호와 동기시켜 처리하는 방법¹⁹⁾, 시작 신호로 처리하는 방법 등이 있으나 본 연구에서는 시작신호로 처리하는 방법을 채택하였다.

본 시스템의 검증은 입력측에 직류 전압을 PRECISION CURRENT SUPPLY (YEW TY PE 2854)를 사용하여 출력측의 신호변환 특성을 확인하였으며, 신호 발생기를 이용하여 A/D 변환기의 동특성을 검증하였다. Fig.1은 본 시스템의 구성도를 나타낸 것이다.

3.2 소프트웨어 (Software)의 시작

A/D변환된 압력 데이터는 컴퓨터의 주기억장치

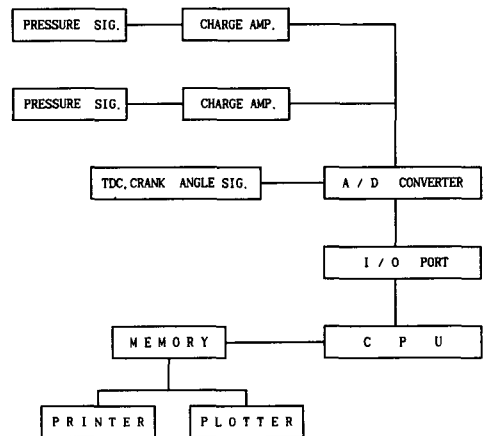


Fig. 1 Blockdiagram of pressure aquisition system

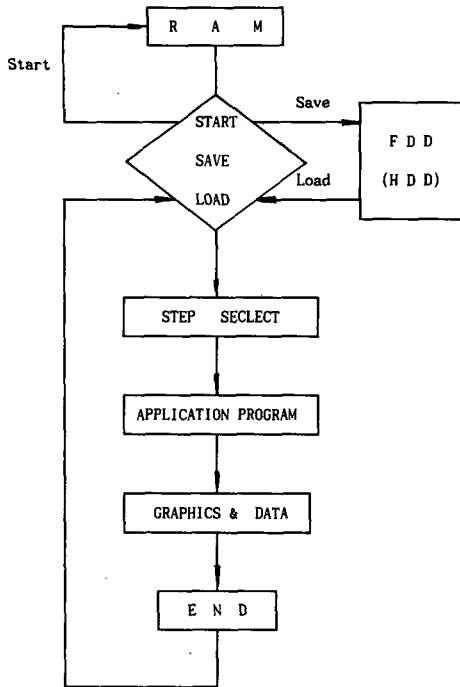


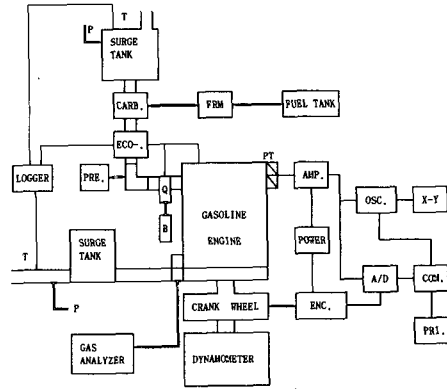
Fig. 2 Combustion analyzer programme software flow-chart

에서 일시 저장된 후 모니터와 오실로스코프를 통하여 신호의 정상유무를 확인하였다. 본 연구에서는 4기통 기관에서 1번과 4번 실린더의 압력값을 연속적인 50사이클 분량의 데이터를 평균하여 연소 해석시스템의 입력데이터로 사용하였다.

Fig.2는 샘플링하는 사이클수와 A/D 변환기를 조절하는 구동프로그램의 흐름을 나타낸 것이다. 평균된 1사이클의 압력값은 연소해석 프로그램에 의해 $p-\theta$ 선도, 압력상승률 선도, 열발생률 선도, 질량연소율 선도, $p-V$ 선도 등의 연소 특성치를 데이터와 그래프로 일괄 처리하였다.

4. 실험장치 및 방법

본 연구의 실험장치는 Fig.3과 같다. 배기량 1138cc 압축비 8:1의 4행정 4기통 전기점화기관과 와전류식 전기동력계를 기본으로 하고, 액막흐름의 가시화장치와 연소해석 장치, 배기가스 측정장치로 구성된다. 실험은 기관의 냉각수 온도를 $80 \pm 5^\circ\text{C}$ 범위내로 일정하게 유지시키고 점화시기는 MBT, 공연비는 기화기로 공급되는 연료공급 밸브를 조절하



- A/D : A/D CONVERTER
- CAR. : CARBURETOR
- ENC. : ENCODER
- P : MANOMETER
- T : THERMOCOUPLE
- Q : LIQUID FILM REMOVING APPARATUS
- AMP. : CHARGE AMPLIFIER
- COM. : 16 BIT COMPUTER
- FPM. : FLOW RATE METER
- PRE. : PRESSURE METER
- PT : PRESSURE TRANSDUCER
- B. : BULLET
- ECO. : ECO-RING
- OSC. : OSCILLOSCOPE
- PRI. : PRINTER
- X-Y : X-Y RECORDER

Fig. 3 Schematic diagram of experimental apparatus

여 트로틀밸브의 개도에 관계없이 항상 13:1로 일정하게 유지하였으며, 트로틀개도를 25%, 50%, 75%의 단계로 변화시키면서 동력계의 전류를 조절하여 2000 rpm인 상태를 유지하며 실험하였다.

액막흐름의 가시화는 공기기관의 흡기계를 실험 대상으로 개조하여 액막흐름을 관찰하는 부분으로 본래의 흡기관 형상에 맞게 1, 2번 실린더와 3, 4번 실린더에 연결된 흡기관을 내열 고강도 유리로 제작·장착하였으며, 사진촬영장치를 이용하여 구조적으로 대칭인 실린더의 액막유량을 흡기관의 말단 부분에서 액막류의 거동을 관찰하였다. 또한 연소 해석장치는 1번과 4번 실린더의 연소실 압력변동을 측정하고 지압선도의 해석을 통하여 연소특성치를 구하였으며, 배기가스 측정장치에 의해 1번과 4번 실린더의 배기가스의 특성치를 비교·측정하였다.

본 연구에서는 공급연료의 균질분배에 관한 실험을 목적으로 하였기 때문에 연료조성에 의해 생성되는 CO, HC가스에 대해서만 검토하였다.

5. 실험결과 및 고찰

5.1 연소해석 시스템의 고찰

시스템중 제작된 A/D변환기의 교정은 D/C전원 발생기에 의해서 입력전원을 발생시켜 연소해석장

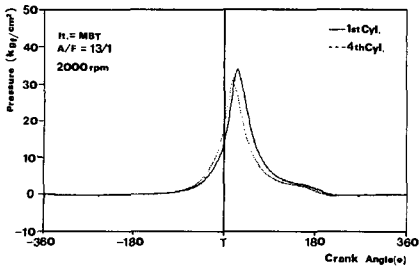


Fig. 4 P- θ Diagram for 1st Cyl. vs 4th Cyl. at 25% throttle opening degree

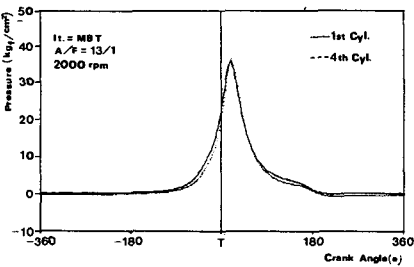


Fig. 5 P- θ Diagram for 1st Cyl. vs 4th Cyl. at 50% throttle opening degree

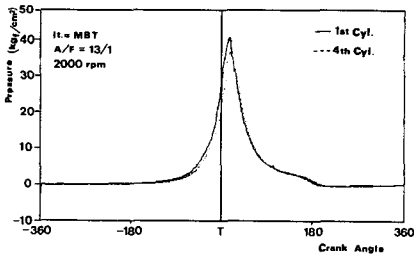


Fig. 6 P- θ Diagram for 1st Cyl. vs 4th Cyl. at 75% throttle opening degree

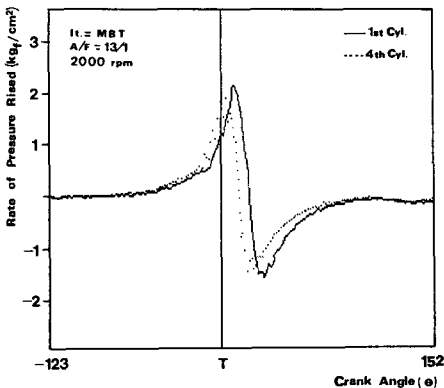


Fig. 7 $dp/d\theta$ Diagram for 1st Cyl. vs 4th Cyl. at 25% throttle opening degree

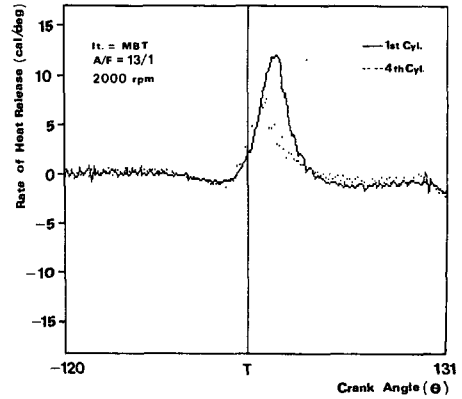


Fig. 8 $dQ/d\theta$ Diagram for 1st Cyl. vs 4th Cyl. at 25% throttle opening degree

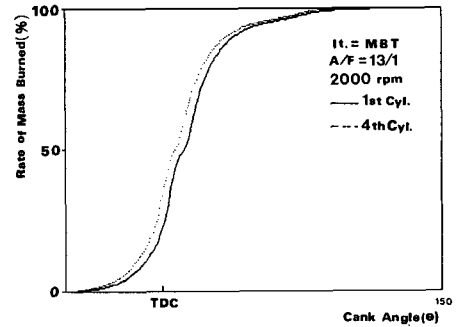


Fig. 9 $Z_i/d\theta$ Diagram for 1st Cyl. vs 4th Cyl. at 25% throttle opening degree

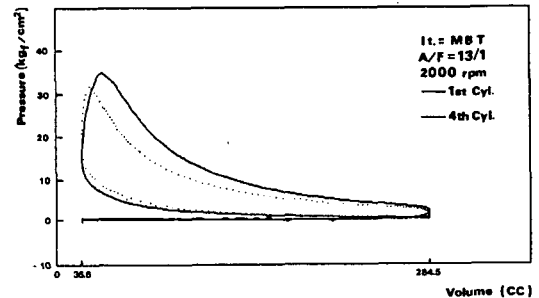


Fig. 10 P-V Diagram for 1st Cyl. vs 4th Cyl. at 25% throttle opening degree

치를 거쳐서 나오는 출력의 Digital값을 비교·검정한 후 사용하였다. 반복되는 실험으로 여러사이클을 채취하여 분석한 결과, Computer RAM용량 및 처리속도에 알맞는 50사이클에 대해서 산술평균한 압력값을 연소해석에 이용하였다.

Fig.4의 $p\theta$ 선도에서 1번과 4번실린더의 P_{max} 점이 각각 ATDC 22° ATDC16°이며, Fig.7의 압력상승율선도에서 $dp/d\theta=0$ 인 점의 크랭크각도와 잘 일치하였다. 이를 바탕으로 연산한 Fig.8의 열발생율선도에서 열발생률은 연소가 시작되는 점과 끝나는 점이 BTDC(16°)와 ATDC(52°)인데 이것은 Fig.9에 표시된 질량연소율 선도에서 연소가 시작되는 점과 끝나는 점이 일치하여 본 시스템구성의 기능이 잘 나타났으며, 이는 같은 내용의 연구결과¹⁴⁾⁽¹⁵⁾와도 잘 일치하고 있다.

5.2 연소특성 해석의 고찰

혼합기 불균일화를 측정하기 위해서 시작한 연소해석 시스템의 성능을 검토한 후 기하학적으로 대칭이 되는 1번과 4번 실린더의 연소특성을 해석함으로써 다기관내 연료공급 불균일에 관한 결과를 고찰하면 다음과 같다.

Fig. 4, 5, 6은 기관 회전수 2000 rpm, 점화시기 MBT, 공기 : 연료의 혼합비 13 : 1일 경우의 트로틀밸브 개도가 25%, 50%, 75%일때 1번과 4번 실린더의 압력-크랭크각 선도이다. 실험에서 트로틀밸브의 개도가 50%인 경우에 최대압력이 발생하였으며, 1번과 4번 실린더의 압력차가 거의 없이 일치되었다. 이는 트로틀밸브 개도가 25%, 75%인 경우보다 50%인 경우가 다기관내의 혼합기분배의 불균일정도가 적게 되어 실린더내의 연소불균일이 개선됨을 알 수 있다. 이러한 현상은 압력 상승율, 열발생율, 질량연소율, P-V선도 및 배기가스특성에서도 같은 경향이 나타나고 있다. Fig.7은 트로틀밸브 개도가 25%인 경우의 압력상승율 선도로서 트로틀밸브 개도 50%를 기준으로 하여 밸브개도가 작아지거나 커질수록 1번과 4번실린더의 변동값이 커지고 있었으며, Fig.8은 트로틀밸브개도 25%에서의 열발생율 선도를 나타낸 것으로서 트로틀밸브의 개도 50%를 전후하여 열발생의 정도차가 커짐을 알 수 있다. Fig.9는 질량연소율 선도로서 트로틀밸브 개도가 25%인 경우 1번과 4번 실린더의 연소지연이 크게 나타나고 있으며, 트로틀밸브 개도 50%에서 지연의 정도차가 가장 적게 나타났다.

Fig. 10은 트로틀밸브 개도가 25%인 경우 평균사이클의 압력과 체적(P-V)선도를 나타낸 것으로 트로틀밸브 개도가 50%인 경우에 1번과 4번 실린더의 평균유효압력의 차이가 적게 나타났다.

5.3 배기가스 분석

Fig.11은 1번과 4번 실린더의 배출가스의 분석을 나타낸 것으로 CO와 HC가스를 1번 실린더와 4번 실린더의 농도비로 트로틀밸브 개도에 따라 표시한 것이다. 트로틀밸브 개도에 따라 HC가스와 CO가스 모두 트로틀밸브의 개도가 50%를 기준으로 작거나 커질수록 실린더간 연소가스특성의 차이가 커짐을 알 수 있었다.

이는 전술한 연소특성의 불균일 경향과 잘 일치하고 있으며, 흡기다기관내의 액막흐름이 혼합기의 균질분배에 크게 영향을 미치고 있으며, 이것은 결국 불완전 연소에 원인이 되고 있는 것으로 사료된다.

5.4 흡기관의 가시화

Fig.12는 흡기관을 내열고강도 유리로 제작하여 트로틀개도 25% 50%, 75%에서 1,2번 실린더로 향하는 흡기관과 3,4번실린더로 향하는 흡기관내 혼합기의 흐름을 사진촬영한 것으로 액막류의 흐름은 트로틀밸브 개도의 정도가 커질수록 감소하고

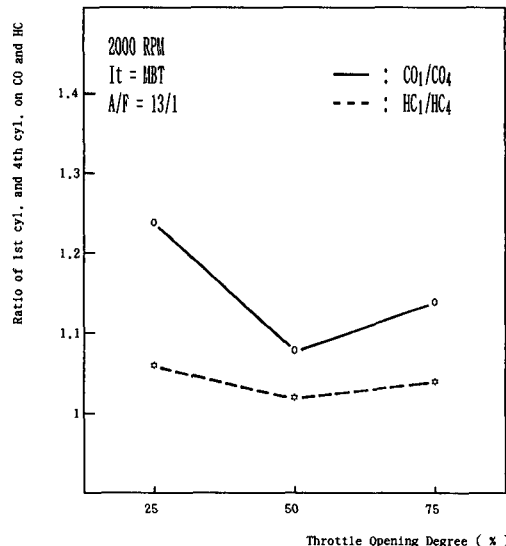


Fig. 11 CO and HC concentration for throttle opening degree

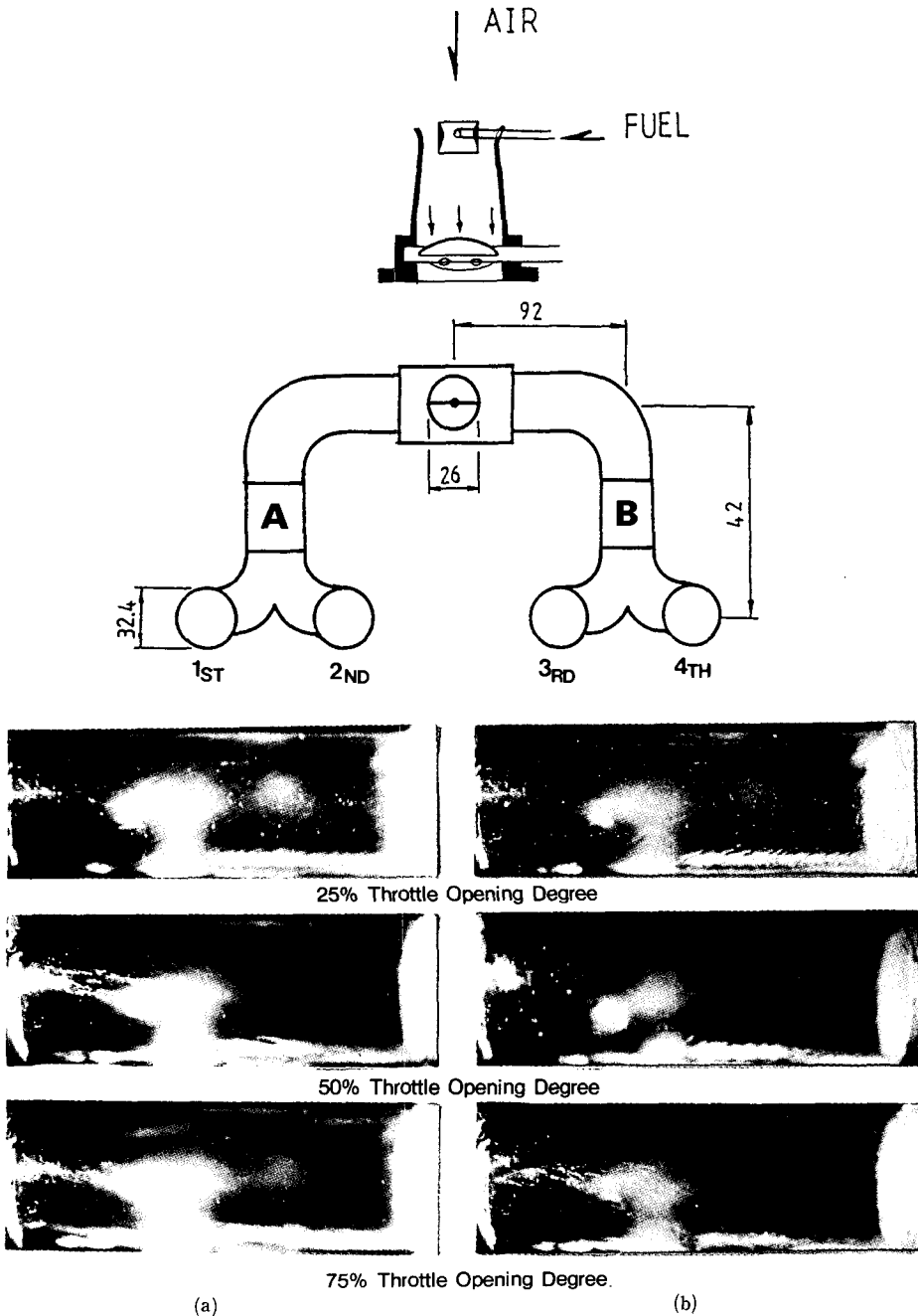


Fig. 12 Photo of liquid film fuel in three throttle opening degree

있었으며 혼합기중 액막의 존재를 확인할 수 있었다.

6. 결론

본 연구는 현용되고 있는 자동차용 다기통 전기

점화 기관과 같이 연료를 예혼합시켜 각 실린더에 분배하는 흡기다기관을 갖는 다기통 가솔린기관의 혼합기 균질분배에 관한 실험적 연구이다. 본 연구에서는 혼합기 불균일의 원인을 찾고, 이 불균일한 혼합기의 공급이 각 실린더내의 연소특성에 어떤

영향을 미치는가를 규명하고자 하였다.

따라서 각 실린더내의 연소특성을 해석하기 위해서는 연소특성해석 시스템의 개발이 우선임을 인식하고, 본 실험을 위한 연소해석 시스템을 시작하여 그 성능을 검토하였으며, 구조적으로 대칭되고 있는 2개의 실린더내 연소압력 데이터를 채취하여 마이크로 컴퓨터에 송출, 입력 시킬수 있는 온라인 시스템을 구성하고 전산처리에 의해 연소특성 해석을 실시하고 연소불균일을 고찰하였다.

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 본 연구에서 시작한 연소해석 시스템은 기관 회전수 3000 rpm까지 2개의 실린더내 연소특성을 동시에 50사이클의 평균값을 해석할 수 있다.

(2) 동일한 공연비에서 트로틀밸브의 개도를 25%, 50%, 75%로 변화시켰을 때 50%를 전후하여 각실린더의 연소특성 불균일이 크게 나타났으며, 액막유동은 트로틀밸브의 개도가 작을 수록 많아짐을 알 수 있었다.

(3) 지압선도에 의한 연소특성과 배기가스의 분석 및 흡기관내의 관찰로 연료액막유동이 연소특성의 불균일에 밀접한 영향을 미치는 것으로 판단되었다.

후 기

본 연구는 일부 1989년도 한국과학재단의 도움으로 이루어졌으며 이에 사의를 표하는 바입니다.

7. 참고 문헌

(1) William R. Matthes and Ralph N. McGill, 1976, "Effect of the Degree of Fuel Automization on Single-Cylinder Engine Performance," SAE Trans., 760117, pp.413~433.
 (2) 人木 静夫 外, 1969, "4 사이클가솔린엔진의 흡, 배기관계의 기관 성능에 오요보스影響について", 自動車技術 Vol 23, No.5, pp 439~450.
 (3) 朴 涇錫, 1982, "가솔린 기관의 燃料 供給狀態에 關한 實驗的 研究", 慶熙大學校 産業科學技術

研究所 論文集 第8輯.

(4) Trayser.D.A, 1969, "Effect of Induction System Design on Automotive Engine Emission," ASME paper, 69-WA/AP-C-7.
 (5) 創林 俊雄外, 1971, "吸氣 氣流中に 噴射れた 液體の 浮遊流動について", 日本機械學會 論文集 35號, pp.1474~1481.
 (6) 大山 宣茂 外, 1975, "氣化器付がソリエンソジ 燃料供給系の 送達遅れの 検討", 日本 機械學會 論文集 B輯 51券 601號, pp241~247.
 (7) Limata.D.R., 1971, "Effect of Mixture Distribution on Exhaust Emission as Indicated by Engine data and the Hydraulic Analogy," SAE Trans., 710618.
 (8) Grimm.R.A, Bremer.R.J. and Stonestrect.S.P., 1980, "GM Micro-Computer Engine Control System," SAE Trans., No.800053.
 (9) Hansjorg Manger, 1982, "Electronic Fuel Injection", SAE Trans., No.820903.
 (10) Mark G.Kosowski, 1985, "Soot Formation in a Multi-point Fuel Injection Spark Ignition Engine," SAE Trans., No.850294, pp. 2786~2796.
 (11) 西村 豊 外, 1980, "氣化器付き がソリエンソジ 燃料供給系の 流動遅れ" 內燃機關, Vol.19, No.240, pp9~18.
 (12) Henry J.C.Yu, 1969, "Fuel Distribution Studies-A New Look at an old Problem," SAE Trans., 690117.
 (13) Steve Meisner & Sorenson.S.C., 1986, "Computer Simulation of Intake and Exhaust Manifold Flow and Heat Transfer," SAE Trans., No.860242.
 (14) 李 載淳 外2名, 1989.6, "The Development of Engine Analyzer", 自動車工學會誌, Vol.11, No.6, pp.89~96.
 (15) 河 鐘律, 1989.9, "內燃機關 燃燒室內의 壓力 測定에 關한 研究", 對韓機械學會 에너지 및 動力 工學部門 學術講演會 論文集, pp.38~42.