

정적챔버에서 스파크 플러그 이온프로브를 이용한 공연비와 이온신호와의 상관관계에 대한 연구

박종일* · 전광민** · 한재원**, 박철웅***

A Study on Correlation between A/F and ion signal in a Constant-Volume Chamber Using Spark-plug Ionization Probe Itself

Jongil Park, Kwangmin Chun, Jaewon Hahn and Chulwoong Park

ABSTRACT

Spark plug ionization signal could be useful in an internal combustion engine as a feedback signal for combustion diagnostics such as misfire detection, knocking detection and lambda control, but the signal has high level of cyclic fluctuation in an internal combustion engine due to residual gas, pressure, temperature, mixture composition in the spark gap. Because of this reason it is very difficult to apply ion signal to commercial engine control. In this Study, a correlation between A/F and spark plug ionization signal was studied in a constant volume chamber. Constant volume chamber with gas phase fuel(Propane) has homogeneous fuel composition, no mixture flow, same pressure and temperature on each test. The results show that mean chemi-ion signal has the highest correlation with A/F and initial pressure change has an effect on the thermal-ion signal and not on chemi-ion signal.

Key Words : Ionization Probe, A/F, Chemi-ion, Constant Volume Chamber

기 호 설 명

COV : Coefficient of Variation
A/F : Air Fuel Ratio
 λ : Relative air fuel ratio

1. 서 론

최근의 내연기관은 정밀한 연소제어를 통하여 고효율, 고연비와 함께 유해한 배출물을 저감하는 것을 목적으로 하고 있다. 이러한 목적을 달성하기 위해서는 연소과정에 대한 정보를 실시간으로 피드백하고 그 신호를 이용하여 연소조건을 제어하는 것이 필요하다. 현재의 내연기관은 배기 포

트에 장착된 Lambda 센서 또는 산소 센서를 공연비 제어에 이용하고 있으나 이러한 방법은 센서 자체의 응답뿐만 아니라 그 신호를 이용하여 새로운 연소조건이 조성되기까지의 시간 지연이 상당히 크므로 따라서 이온프로브를 이용한 효율적인 연소진단이라 할 수 없다. 따라서 좀 더 정밀한 연소제어를 위해서는 연소실내의 연소현상을 직접 진단하여 그 신호를 피드백 신호로 활용하는 것이 바람직하다고 볼 수 있다. 이러한 방법으로 제안되고 있는 것은 엔진 가시화를 통한 레이저 진단법, 직접 연소실 내의 가스를 샘플링 하는 방법, 이온프로브 신호를 이용하는 방법 등이 있다. 레이저 진단법은 비용과 엔진의

* 연세대학교 기계공학과 대학원

† 연락처자 drk211@empal.com

** 연세대학교 기계공학과

*** 한국 표준과학 연구원

가시화가 필요하다는 점, 샘플링 또한 비용과 분석하는데 시간이 오래 걸린다는 점에서 실 엔진에서의 적용과는 거리가 있다. 이온프로브를 이용한 연소 진단법은 장치가 간단하고 엔진에 큰 변경을 가하지 않는다는 점에서 실제 엔진에의 적용가능성이 있으며 그 동안 많은 연구가 수행되어 왔다. 신호의 파형 변화로부터 실화 감지(misfire detection), 노킹감지(knocking detection)를 하려는 연구와 그 크기로부터 연소실내의 압력 및 공연비를 추정하려는 연구들이 주로 진행되어 왔는데 Ohasi등은 이온신호로부터 노킹과 실화를 검출하는 방법에 대한 연구를 수행하였고 Balles 등은 엔진 운전 속도와 공연비를 변화시켜 가면서 이온 신호를 측정하여 공연비와 부하에 따라 이온신호의 크기가 변화함을 밝혔다. 이온신호의 발생 위치 및 파형의 변화를 이용하는 노킹, 실화 및 화염전파에 대한 연구에서는 이온신호를 이용하는 것이 매우 유용한 방법이라는 것이 밝혀졌고 신호 자체의 크기를 이용하여 공연비를 측정하려는 실험에서는 공연비와 이온신호와의 관계가 정성적으로는 어느 정도 밝혀졌다. 그러나 실제 내연기관에서는 온도, 압력, 잔류가스의 각 사이클 당 편차가 심하고 이것이 이온신호에 영향을 미치므로 이온신호 자체가 큰 편차를 가지게 되어 정량적으로 정밀한 분석을 하는 데에 어려움이 있었다.

따라서 본 실험에서는 자동차에 쓰이는 내연기관과 같이 연료와 공기가 간혀 있는 상태에서 연소를 일으키는 정적 챔버 내에서 스파크 플러그 자체를 이온 프로브로 이용하여 공연비와 이온신호의 관계를 분석하는 것을 목표로 하고 있다. 균일한 혼합기 분포를 만들기 위해 연료는 기체 연료(프로판, C₃H₈)를 사용하였고 정적 챔버안에는 연료와 공기가 균일하게 섞여 있고 잔류가스도 없으며 그 초기압과 온도를 일정하게 유지시킬 수 있으므로 공연비 변화만에 따른 이온신호의 변화를 알 수 있다. 최근 많이 연구되고 있는 직접 분사식 가솔린 엔진의 경우 초회박 연소를 하기 위해 연소실내에서 전체적으로 회박하며 스파크 플러그 주변의 국소 공연비만 농후한 상태를 만들게 되므로 이온프로브를 이용하여 스파크 플러그 주변의 국소 공연비를 측정하면 엔진제어에 유용하게 쓰일 수 있을 것으로 기대된다.

2. 실험장치

2.1 이온프로브

이온 프로브란 Fig.1과 같이 두 전극 사이에 DC 200V 정도의 직류 고전압을 인가하여 그 사이의 전기 전도성 변화를 검출하는 장치를 말한다. 본 실험에서는 이온프로브로 그림과 같이 스

파크 플러그 자체가 사용되었으며 연소 후에 화학반응에 의하여 생기는 이온들의 밀도에 따라서 스파크 플러그 간극사이의 전기 전도성의 변화가 생기는 원리를 이용하여 이온의 밀도를 측정하는 것이다. Fig.2에는 이온프로브 실험 장치의 개략도를 나타내었다. 스파크 방전 전압에 의하여 증폭회로가 영향을 받지 않게 하기 위하여 스파크 플러그와 증폭 회로 사이에 고전압 다이오드가 설치되었다.

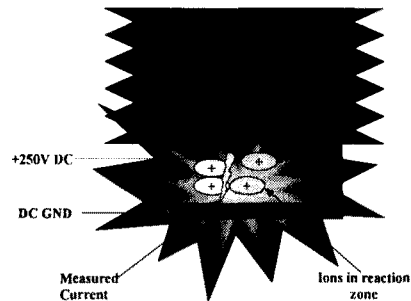


Fig.1 Spark Plug as an Ionization Probe

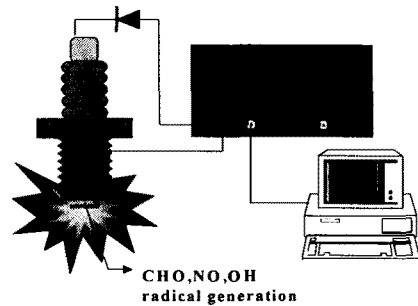


Fig. 2 Schematic Diagram of Ion Probe System

2.2 정적 챔버

Fig.3은 본 실험에 사용된 정적 챔버의 개략도를 나타낸다. 그림에서 볼 수 있듯이 정적 챔버는 스파크로 점화가 되는 방식이며 온도와 압력을 측정 할 수 있도록 열전대와 압력 센서가 장착되어 있다. 또한 연료 또는 혼합기의 흡입과 연소 가스를 내보내기 위한 고압용 밸브가 장착되어 있다. 챔버 중심부의 원통형의 공간은 지름이 100mm이며 깊이는 50mm 로서 부피가 392.7 cm³이 된다. 그러나 밸브로 연결되는 통로 부위와 스파크 플러그 그리고 광학 윈도우를 위한 공간 등으로 인하여 총부피는 414.34 cm³ 정도가 된다. 그림에서 볼 수 있듯이 정면과 측면에 광

학적인 접근이 가능하도록 quartz 윈도우가 장착되어 있으나 본 실험에서는 광학적 접근을 이용하지 않았다.

2.2 예비 챔버

기체 연료를 사용하는 경우 정적 챔버안에 일정한 성분비를 가진 연료 공기 혼합기를 안정적으로 공급하는 것이 요구된다. 따라서 정적 챔버 보다 부피가 큰 예비 챔버를 제작하여 같은 조성비를 가진 연료공기의 혼합기를 여러차례에 걸쳐 이용할 수 있도록 하였으며 본 실험에서는 부피 9300cc의 예비 챔버를 제작하여 사용하였다. Fig.4와 같이 정적 챔버는 원통형의 모양이며 기상의 연료와 공기를 정적한 비율로 혼합하기 위한 압력 제어 장치들이 설치되어 있다.

본 실험에서는 실험 기체로 프로판을 사용하였고 상온에서 프로판의 증기압이 9.4Bar 정도 이므로 예비 챔버에 그 이상의 압력을 가하게 되면 프로판 가스의 응축 현상이 진행되어 원하는 공연비를 맞추지 못하게 될 가능성이 있다. 예비 챔버를 가열하여 압력을 더 높일 수도 있으나 그렇게 하기 위해서는 히터 등의 가열장치가 필요하고 공간적인 온도 편차가 날 수도 있기 때문에 본 실험에서는 예비 챔버의 총 압력을 9Bar로 맞추후 실험하였다.

3. 실험 방법

3.1 공연비 변화 실험

본 실험은 정적 챔버에서 스파크 플러그 이온화 프로브를 이용하여 이온신호와 공연비 사이의 관계를 밝히려는 목적으로 수행되었다. 연료는 기체 연료(프로판, C₃H₈)를 사용하였으므로 연소실 내부는 균일한 혼합기 상태를 유지하며 이러한 조건에서 점화를 시키고 그 때 나오는 이온신호를 측정하였다. 실험은 λ 값을 0.8 ~ 1.3 까지 0.1 단위로 변화시켜 가며 실험을 하였다. 프로판에 대하여 A/F_{stoi} 값은 15.64 이며 Table 1에 각 공연비에 대한 실험 조건을 나타내었다.

Table 1 A/F and $\overline{A/F}$ for propane

λ	A/F	$\overline{A/F}$	초기압(Bar)
0.8	12.514	20.04	4
0.9	14.078	22.42	4
1.0	15.642	23.8	4
1.1	17.206	26.18	4
1.2	18.770	28.56	4
1.3	20.335	30.94	4

3.1.1 공연비 제어

정적 챔버내의 혼합기를 일정한 공연비로 맞추어 주기 위하여 챔버에 들어가는 압력을 조절하였다. 공기와 프로판 기체를 이상기체로 가정하였을 때, 기체의 몰수 비는 같은 온도 조건에서 압력의 비이므로 압력 조절을 통해서 기체의 공연비를 조정할 수 있다. 본 실험은 앞 절의 그림과 같이 예비 챔버를 제작하여 여기서 일정한 공연비를 가진 혼합기를 만들고 그 혼합 기체를 가지고 실험을 진행 하였다. 또한 상온에서 프로판의 포화 증기압력은 9.4Bar 정도 이므로 예비 챔버에서의 총 압력이 9Bar를 넘지 않도록 압력비를 조절 하였다.

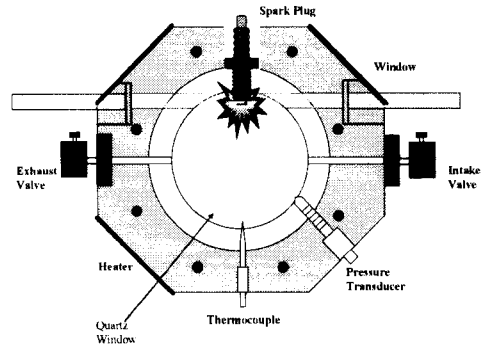


Fig. 3 Configuration of Constant Volume Chamber

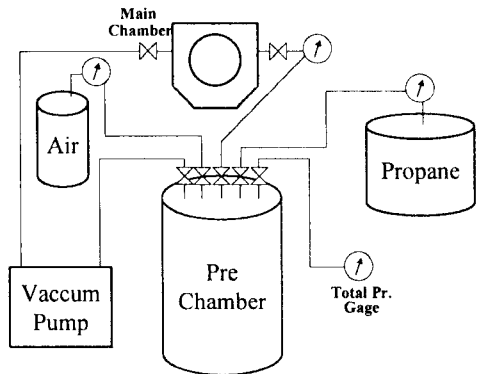


Fig. 4 Experimental apparatus for mixture preparation

3.1.2 실험 순서

예비 챔버에 균일한 혼합기를 조성한 후 밸브를 조절하여 정적 챔버 내로 혼합기체를 일정 압력(주로 4 Bar)으로 유입시킨다. 온도 구배를 일정하게 하기 위하여 혼합기가 유입된 후 대략 1분 정도의 시간 후에 스파크를 점화시키고 이 때 발생하는 이온 신호를 측정한다. 실험 후에는 진공 펌프를 이용하여 다시 정적 챔버를 진공 상태로 만든 후 다시 새로운 혼합기를 유입하여 실험을

진행하였다. 실험은 공연비(λ) 0.8부터 1.3까지 6가지 경우에 대하여 진행하였으며 각 공연비 당 10회에서 15회 실험을 한 후 그 평균값을 이용하여 결과를 분석하였다.

3.1.2 이온 신호의 처리

Fig.5는 정적 챔버에서 연소가 일어난 후의 스파크 플러그 이온신호와 압력 신호의 파형을 나타낸다. 그림에서 볼 수 있듯이 이온신호는 크게 두 개의 피크로 구성되며 연소가 일어난 직후에 나타나는 첫 번째 피크에 해당하는 신호를 Chemi-ion 신호라 한다. 이 신호는 연료의 화학반응에 생기는 라디칼(Radical) 중 이온을 띄는 화학종에 의하여 생기는 것이며 두 번째 피크에 해당하는 이온신호는 Thermal-ion 신호라 불리는 것으로 연소 후기의 온도와 압력 상승에 의한 열해리에 의하여 생성되는 이온신호이다. 이중 공연비와 관련이 있는 이온은 Chemi-ion으로 알려져 있으며 본 실험에서는 이온신호와 공연비의 관계에 대한 상관관계를 밝히는 것을 목적으로 하고 있으므로 chemi-ion 신호만을 분석의 대상으로 삼았다. 실험 결과 처리는 chemi-ion에서 세가지 변수를 이용하여 수행되었는데 그것은 Chemi-ion Peak, Chemi-ion Area, Chemi-ion Duration이다. Chemi-ion Peak는 Fig.5와 같이 처음 발생하는 chemi-ion 신호의 최대값을 의미하며 Chemi-ion Duration은 chemi-ion 신호가 나오는 기간이다. 마지막으로 Chemi-ion Area는 chemi-ion Duration 동안의 Chemi-ion 신호 밑의 총 면적으로 발생하는 이온의 총량을 나타내는 척도라고 할 수 있다.

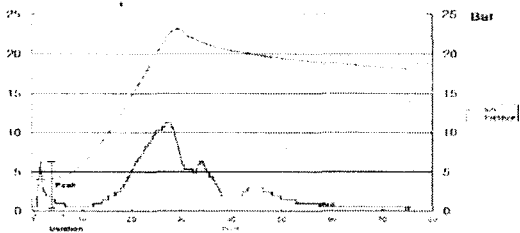


Fig. 5 Typical Ion Signal in a constant volume chamber

3.2 초기 압력 변화 실험

본 실험은 이온신호와 공연비의 상관 관계를 밝히려는 목적으로 수행되었다. 모든 실험 조건은 초기압력 4Bar 상태에서 수행 되었으므로 초기압력이 이온신호에 미치는 영향을 알아보기 위하여 이론 공연비에 대하여 초기압력 2Bar에서 6Bar 까지 1Bar 간격으로 변화시켜 가며 실험을 하였다.

4. 실험 결과

4.1 공연비 변화 실험

예비 챔버에서 만들어진 혼합기를 공연비를 변화시켜 가며 정적 챔버에 초기압 4Bar의 상태로 채운 다음 연소시켰을때의 Chemi-ion 신호를 분석하였다.

4.1.1 Chemi-ion Peak의 분석

Fig.6 과 Fig.7에 Chemi-ion Peak 의 평균값과 COV에 대한 결과를 나타내었다. 결과를 보면 공연비가 희박해 질 수록 Peak의 크기도 역시 작아짐을 알 수 있다. 그러나 이러한 변화는 이론 공연비 근처에서 보다 희박영역 쪽으로 갈수록 그 변화 정도가 더욱 심해진다. 또한 λ 값 0.8 정도로 공연비가 너무 농후(Over Rich)하게 되면 오히려 Peak의 값이 작아지게 된다. 이것은 공연비가 농후할 수록 초기 화학반응이 활발해 지지만 너무 농후하게 되면 오히려 반응이 활발하게 이루어지지 못함을 의미한다.

최근의 연소 경향은 연료의 양을 적게 하여 희박 상태에서 반응을 시켜서 높은 효율을 얻으려 함으로 λ 0.8 정도의 연소현상에 대해서는 큰 의미를 두지 않는다고 할 때, λ 0.9에서부터 1.3 정도 까지는 비교적 선형적인 관계를 갖는다고 할 수 있다.

Fig.7에는 Chemi-Peak 의 COV 값을 나타내었다. COV 값은 이론 공연비 일때 약간 크게 나온 경우를 제외하면 비교적 공연비가 희박해 질수록 커진다고 할 수 있다. 이것은 공연비가 희박해 질수록 초기 화염의 반응이 일정하게 일어나지 않을 가능성이 높아진다는 것을 의미한다. 또한 내연기관의 실험에서 Chemi-Peak의 COV 값이 보통 40~ 60 % 정도의 크기를 갖는데에 비해 정적 챔버에서는 20% 정도의 COV 값을 갖는 것을 볼 수 있는데 이것은 내연기관의 경우에 비하여 이온신호에 영향을 주는 다른 인자들 예를 들면 온도 변화, 압력 변화, 플러그 간극사이의 공연비 변화, 유동 변화가 없기 때문이다. 그러나 이러한 변화가 없음에도 20%정도의 COV 값을 갖는 것은 이온신호의 사이클당 편차에 영향을 주는 다른 요인이 있음을 의미하는 것으로 추측된다.

4.1.2 Chemi-ion Area의 분석

이온 신호의 크기는 전류의 양을 상대적으로 나타내는 값이므로 단위 시간에 대한 이온신호의 양을 의미한다. 따라서 이온신호를 시간에 따라

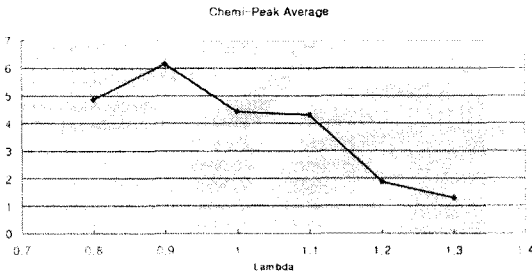


Fig. 6 Chemi-peak as a fuction of λ

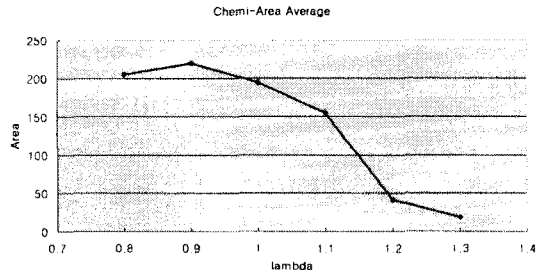


Fig. 8 Chemi-area as a fuction of λ

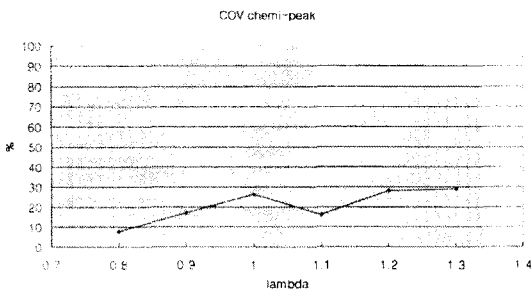


Fig. 7 COV chemi-Peak as a fuction of λ

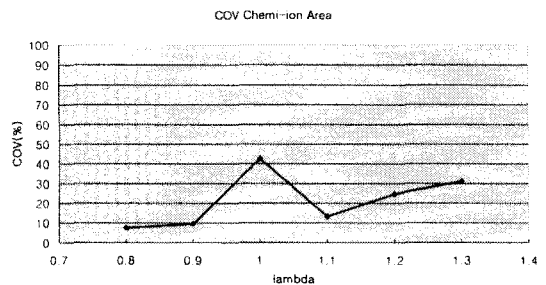


Fig. 9 COV chemi-area as a function of λ

적분한 값은 화학 반응이 일어나는 동안 발생하는 이온의 총량을 상대적으로 나타낸다고 볼 수 있다. Fig.8 과 Fig.9에는 Chemi-ion Area 의 크기와 COV 값을 그래프로 정리하였다.

Fig.8을 보면 Chemi-Peak의 결과에서와 같은 경향으로 lambda 0.8 인 경우를 제외하면 공연비가 희박해질 수록 이온신호의 넓이도 줄어드는 것을 알 수 있다. 그러나 Chemi-Peak 에 비하여 공연비에 따른 변화정도가 크며 선형적이다. Fig.9 에서는 Chemi-Area의 COV 값은 나타내고 있는데 이론공연비에서만 높은 값을 가지며 그 이외에는 공연비가 희박해질수록 증가하는 경향을 보인다. Chemi-Area의 COV 값은 그 선내 값이나 경향이 Chemi-Peak의 COV 경향과 매우 유사하다. 이로부터 스파크 점화시 발생하는 이온의 총량도 공연비와 관계가 있으며 너무 농후한 혼합기에서는 이온의 발생량이 오히려 감소한다는 것을 알 수 있다.

4.1.3 Chemi-ion Duration의 분석

Chemi-ion이 나오는 기간에 대한 분석을 실시하였다. Fig.10의 결과에서 볼 수 있듯이 Chemi-ion 이 나오는 기간은 이론공연비 근처에서는 거의 일정하며 공연비가 농후하면 증가하고 희박해지면 감소하는 경향을 보인다. 한가지 특이한 것은 공연비 0.8에서도 이온신호가 나오는 기간이 길어진다는 것인데 이렇게 신호가 나오는

기간은 길어짐에도 Fig.8처럼 Area가 줄어드는 것은 그 만큼 Peak 값이 낮아지고 있다는 것을 의미한다. 즉 공연비가 매우 농후한 환경에서는 초기에 반응속도가 느린 상태로 비교적 오래 지속되며 결국에 발생하는 이온의 양도 작게 되는 것으로 판단된다.

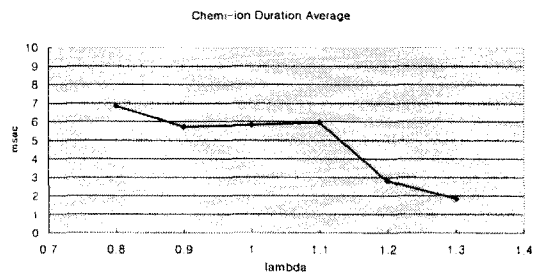


Fig. 10 Chemi-Duration as a fuction of λ

4.1.4 Chemi-ion의 평균값 분석

앞에서 분석한 자료로부터 Mean chemi-ion Value를 정의하고 그 값을 Fig.11에 도시하였다. Mean chemi-ion value는 Chemi-ion Area를 Chemi-ion Duration으로 나눈 값으로 이온신호가 나오는 기간 동안 평균적으로 어느 정도의 수준으로 이온신호가 나오는 가를 나타내는 값이라고 할 수 있다. Fig.11로부터 Mean chemi-ion

값은 lambda 0.8인 경우를 제외하면 매우 선형적으로 공연비에 비례함을 볼 수 있다.

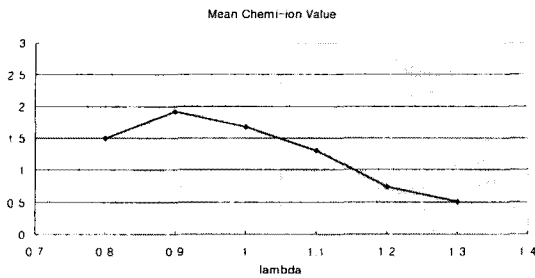


Fig.11 Mean chemi-ion signal as a function of λ

4.1.4 공연비와 Chemi-ion의 상관관계

Fig.6, Fig.8, Fig.11로부터 공연비 0.8인 경우를 제외하면 공연비가 희박해질수록 각 이온신호의 크기가 작아지는 것을 확인 하였다. 따라서 이온신호와 공연비와의 상관관계를 파악하기 위해 Chemi Peak, Area, Mean value의 세가지에 대하여 선형으로 커브 피팅(Curve fitting)하였고 그 중 가장 선형성이 높았던 Mean chemi-ion signal에 대한 결과를 Fig.12에 나타내었다.

결과에서 볼 수 있듯이 매우 농후한 영역인 lambda 0.8인 경우를 제외하고 선형 회귀를 해본 결과 Mean Chemi-ion Value의 경우 상관계수가 0.9802로 가장 높았으며 소개하지 않았지만 Chemi-ion Peak (0.9417), Chemi-ion Average (0.9336)순으로 공연비와 상관관계가 높은 것으로 나타났다. 또한 상관관계가 모두 0.93 이상으로 매우 높은 상관관계를 가지고 있다는 것을 알 수 있다. 결론적으로 이온신호는 공연비와 관련이 있으며 극단적으로 농후하지 않은 조건에서는 Mean Chemi-ion과 높은 상관관계를 갖는다는 결론을 내릴 수 있다.

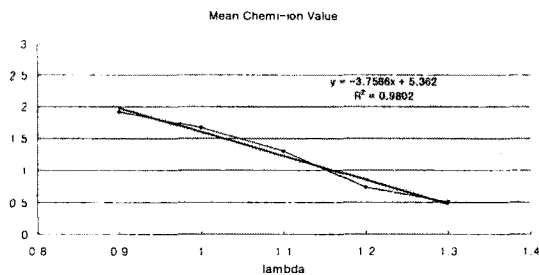


Fig.12 Linear fitting result of mean chemi-ion signal

4.2 초기 압력 변화 실험

초기 압력은 예비챔버로부터 정적 챔버로 초기에 혼합기를 채울때의 압력을 말하는 것으로 같은 공연비에서 초기압력이 커지면 들어간 공기의 양 뿐만 아니라 연료의 양도 많아지므로 연소시에 나오는 발열량도 많아지고 압력 상승도 많아진다. 실험은 이론 공연비상에서 초기 압력을 2Bar에서 6Bar 까지 바꿔가며 Chemi-ion Peak, Chemi-ion Area, Chemi-ion Duration, Thermal-ion Peak를 측정하는 것으로 진행하였으며 이 결과를 바탕으로 Fig.12 과 Fig.13에는 Chemi-ion 신호와 Thermal 이온신호가 초기 압력 변화에 따라 어떻게 변하는지를 그래프로 나타내었다.

이 그래프에서 점선으로 표시된 영역은 이론 공연비 상에서 표준 편차를 기준으로 했을 때의 $m \pm \sigma/2$ 영역을 나타낸다. 물론 이론공연비 초기압 4Bar에서 실험한 실제 데이터의 최소값과 최대값은 이보다 훨씬 더 크다. 이 결과에서 알 수 있듯이 초기압력 변화에 대하여 Chemi-Peak와 Chemi-Area는 4Bar에서 실험된 실험치와 크게 벗어나지 않는다고 볼 수 있다. 그러나 Thermal Peak를 살펴보면 초기압이 증가함에 따라 계속 증가함을 알 수 있다.

Thermal ion은 연소후기의 고온, 고압상태에서 NO, NO2 기체가 이온화 되면서 생긴다고 알려져 있다. 초기압이 높아지면 압력도 높아지고 따라서 기연가스의 온도도 높아지므로 기체의 열해리에 의한 이온화정도가 더 높을 것이다. 따라서 이 실험 결과로부터도 초기압 증가에 따른 연소후기의 압력과 온도 상승이 Thermal 이온의 크기를 크게 한다는 이론을 뒷받침할 수 있다. 본 실험은 공연비와 Chemi-ion 신호와의 상관성에 관심이 있으므로 Thermal ion에 대해서는 Peak 값 이외의 더 이상의 분석은 수행하지 않았다.

즉 같은 공연비 상에서의 초기 압력의 변화는 Chemi-ion 에는 큰 변화를 주지 않는다는 것을 알 수 있으며 공연비와 Chemi-ion의 관계를 파악하는 데 있어서 연소시점에서의 초기 압력을 크게 고려하지 않아도 된다는 결론을 얻을 수 있다.

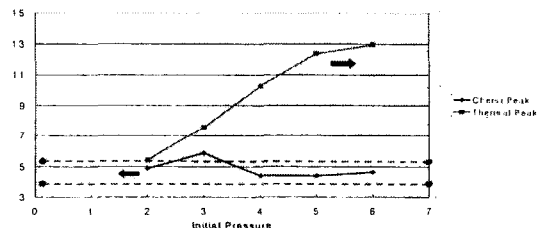


Fig. 13 Chemi-peak and Thermal-peak as a function of initial pressure

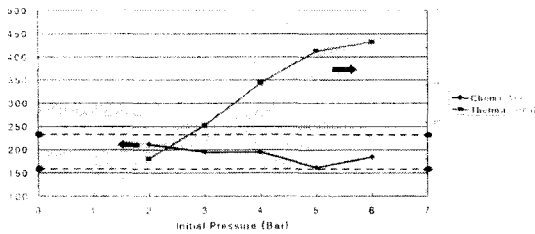


Fig. 14 Chemi-area and Thermal-peak as a function of initial pressure

4. 결론

정적 챔버에서 스파크 플러그를 이온프로브로 사용하여 공연비와 이온신호와의 상관관계에 대한 연구를 한 결과 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) Chemi-ion의 크기는 공연비와 관계가 있으며 lambda 0.8 정도의 농후한 영역을 제외하고는 공연비가 희박해 질수록 이온신호의 크기는 감소한다.
- 2) 정적 챔버에서는 유동, 온도, 압력 조건이 내인 기관의 경우보다 일정하므로 이온신호의 편차가 작다. 그러나 COV 20% 정도의 값을 갖는 것은 이온신호에 영향을 미치는 다른 인자가 있다는 것을 의미한다.
- 3) Chemi-ion 신호 분석 결과 공연비와 매우 높은 상관관계를 가지고 있으며 그 중 Mean chemi-ion 값이 상관계수 0.98 정도로 공연비와 가장 높은 상관관계를 가지고 있다.
- 4) 초기압력의 변화는 chemi-ion 신호에 영향을 주지 않으며, thermal-ion의 크기 및 파형에 영향을 준다.

후 기

본 연구를 수행하는 데에 있어서 도움을 주신 표준과학 연구소 레이저 계측 그룹 관계자님께 감사의 마음을 전합니다.

참고문헌

[1] Andre' Saizkoff, Raymond Reinmann and Thomas Berglinf, "An Ionization Equilibrium Analysis of the Spark Plug as an Ionization Sensors", SAE 960.37

[2] Shigeru Miyata and Yasuo Ito, "Flame Ion Density Measurement Using Spark Plug Voltage Analysis", SAE 930462

[3] Raymond Reinmann, Andre' Saizkoff and Fabian Mauss, "Local Aor-Fuel Ratio Measurements Using the Spark Plug as an Ionization Sensors", SAE 970856

[4] Chao F.Daniels "The Comparison of Mass Fraction Burned Obtained from the Cylinder Pressure Signal and Spark Plug Ion Signal", SAE 980140

[5] 박종일, 전광민 "스파크플러그 이온프로브를 이용한 직접분사식 가솔린 엔진에서의 연소안정성에 관한 연구", 2000 춘계자동차 공학회

[6] Henrik Klovmark, Patrik Rask and Urban Forssell, "Estimating the Air/Fuel Ration from Gaussian Parameterizations of the Ionization Currents in Internal Combustion SI Engines", SAE 2000-01-1245

[7] Stephen Russ, Gregory Pett, William Stockhausen, "Measurements of the effect of in-cylinder motion on flame development and cycle-to-cycle variations using an ionization probe head gasket", SAE 970507

[8] Kyung Hwan Lee, David E. Foster "Cycle-by-cycle variations in combustion and mixture concentration in the vicinity of spark plug gap", SAE 950814

[9] Zhihong Sun, Perry L. BlackShear, David B. Kittelson "Spark-ignition engine knock detection using in-cylinder optical probes", SAE 962103

[10] Michael H. Koenig, Matthew J. Hall, "Cycle-resolved measurements of precombustion fuel concentration near the spark plug in a gasoline SI engine", SAE 981053

[11] Ingemar Andersson, Lars Eriksson, "Ion sensing for combustion stability control of a spark-ignited, direct-injected engine", SAE 2000-01-0552