

〈논문〉 SAE NO. 2000-03-0062

## 스파크 플러그를 이용한 혼합기 농도 측정 Measurements of Mixture Strength Using Spark Plug

조상현\*, 임명택\*\*  
Sanghyun Cho, Myung Taeck Lim

### ABSTRACT

Ion current in an S.I engine cylinder is measured with the spark plug as a probe. The peak values are confirmed to show a fair correlation with local air-fuel ratio and engine speed, which implies that the ion current measured at the spark plug may provide a signal for the local mixture strength, which is the key parameter in precise fuel control for future engines especially of gasoline direct-injected lean burn engines.

주요기술용어 : Ion current(이온전류), Air-fuel ratio(공연비), Spark Ignition engine(스파크 점화기관), Engine control(엔진제어)

### 1. 서론

점점 강화되는 각국의 연비와 배출가스 규제에 대응하기 위하여 다양한 연구들이 수행되고 있다. 공연비의 정밀한 제어는 삼원촉매변환장치의 정화효율을 제고하여 배기를 개선하고 또한 연비를 향상하는 데에 매우 중요한 요소이기 때문에 집중적인 연구가 이루어지고 있는 분야이다.<sup>1)</sup> 정밀한 공연비 제어를 위하여 장래에는 실린더별 공연비 제어가 불가피할 것으로 예측되는데 여기에는 실린더별로 공연비를 정확하게 측정하는 기

술이 반드시 필요하다.<sup>1,2)</sup>

현재 가솔린 엔진에 사용되는 MPI 연료분사 장치에서는 배기관에서 측정된 산소농도를 이용하여 폐회로제어방식(closed-loop control)으로 평균공연비를 제어한다. 이 방식에서는 이론공연비에서 "on-off" 출력특성을 가진 산소센서가 여러 실린더의 배기가 혼합된 후의 평균공연비(산소농도)를 감지하기 때문에 개별 실린더의 공연비를 측정할 수 없다. 극단적인 예를 들면 반수의 실린더가 농후하고 나머지 실린더들이 희박하게 운전되더라도 산소센서는 이를 감지하지 못한다. 공연비는 실제로 실린더별로 상이하고 한 실린더 내에서도 위치에 따라 상당한 차이가 있을 수 있다는 것이 이미 잘 알려진 사실이다.<sup>2,3)</sup>

현재까지 알려진 가장 효과적인 실린더별 공연비 제어방법은 배기다기관에 실린더별로 광역산

\* 회원, 전남대학교 대학원

\*\* 회원, 전남대학교 자동차공학부

소센서를 부착하고 이들의 출력을 이용하여 연료 분사량을 폐회로제어하는 방법이나 이는 비용 측면에서 매우 불리하다. 배기다기관을 합류점에 한 개의 광역산소 센서를 설치하고 각 실린더로부터 배출되는 가스가 이 센서에 도달하는 시간차를 감안하여 실린더별 공연비를 추정하는 방식도 연구되고 있으나 아직 실용 가능한 수준까지는 도달하지 못한 상태이다.<sup>1,2)</sup>

최근 일본을 선두로 국외에서 각광을 받고 있는 가솔린 직접분사식 성층연소기관에서는 실린더 내에서도 스파크 플러그 주변의 공연비가 특별히 중요하다.

실린더 내에서 연소시에 발생하는 이온은 실린더 내의 직접적인 정보를 제공할 수 있기 때문에 이온전류를 측정하여 실화 및 Knocking 검출에 적용하려는 연구들이 수행되고 있다.<sup>4,5,6,7,8)</sup> 또한 최근에는 공연비 제어에 활용하려는 연구들이 행해지고 있는데 Asano<sup>9)</sup> 등은 공연비의 변화에 따른 이온전류의 파형변화를 분석하여 이를 공연비 제어에 간접적으로 활용하였다. Reinmann<sup>2)</sup> 등은 보다 직접적인 공연비 제어에 활용을 염두에 두고 이온전류와 공연비의 상관관계를 밝히고 스파크 플러그 위치에서의 공연비 측정을 시도 하였다.

이 연구에서는 국산 자동차용 가솔린 엔진을 대상으로 스파크 플러그에서 이온 전류를 측정하고, 별도의 계측기로 측정한 공연비와 비교 검토함으로써 이들 사이의 상관관계를 찾아서 실린더 내 스파크 플러그 간극의 공연비 추정에 활용하도록 제시하고자 하였다.

## 2. 이온 전류의 생성 및 측정

연소중에는  $\text{CH}_3^+$ ,  $\text{H}_3\text{O}^+$ ,  $\text{OH}^-$ ,  $\text{O}_2^-$ ,  $\text{C}_3\text{H}_3^+$  등 수많은 이온들이 존재하며, 이러한 이온들은 인근에 전압이 인가된 전극이 있으면 반대 극성의 전극으로 끌려가면서 전극간에 이온전류가 발생된다.<sup>2,4,10)</sup>

스파크 플러그를 전극으로 사용하여 이온전류

를 측정하는 경우에는 바이어스 전압을 스파크 플러그의 중심전극이 양극(+)이 되도록 인가하는 방법(양극성, positive polarity)과, 음극(-)이 되도록 인가하는 방법(음극성, negative polarity)이 있는데, 상대적으로 무거운 양이온을 넓은 면적의 접지 단자에 모을 수 있는 양극성 방식이 강한 이온 전류를 얻기에 유리하다.<sup>10)</sup>

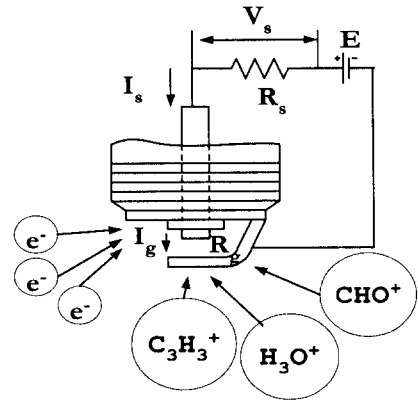


Fig. 1 Formation and measurement of ion current

스파크 플러그에 일정한 방향과 크기의 바이어스 전압을 인가하면 엔진 운전조건에 따라서 변화하는 이온전류가 매 사이클 발생하는데 Fig. 1 과 같이 이온전류가 흐르도록 회로를 구성하고 저항에서의 전압강하를 측정하면 다음의 식 (1)로부터 이온전류를 구할 수 있다.<sup>4,8,10,11)</sup>

$$I_g = I_s = V_s / R_s \quad (1)$$

## 3. 실험 장치 및 방법

### 3.1 실험 장치의 구성

실험 장치를 개략적으로 나타낸 Fig 2에서 동력계는 70 kW급의 국산 와전류형식이고 엔진은 무배전기식(DLI) 점화장치와 MPI식 연료분사계가 탑재된 배기량 1.5 l의 국산 가솔린 엔진이다. 원하는 엔진 회전수와 토크 조건에서 공연비를 임의로 변경하기 위하여 기존의 ECU 이외에 PC-ECU를 추가하고, 설정된 공연비를 확인하기 위하여 배기다기관의 1번 실린더용 통로에 광역

산소센서(WEGO)를 설치하였다.

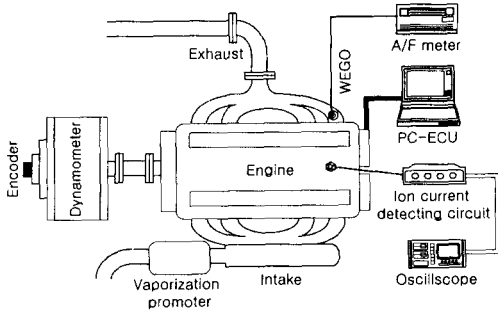


Fig. 2 Schematic of experimental setup

Table 1 Specifications of test equipments

Item	Specification
Engine	1.5/ DOHC DLI
Dynamometer	Eddycurrent type 70kW
Oscilloscope	Lecroy 9314A
WEGO	ECM lambda Pro
Engine control	PC-ECU
C.A. Encoder	OMRON E6B2-CWZ3E

이온 전류를 측정하기 위하여 구성된 전자회로는 Fig. 3과 같다. 스파크 플러그에 DC-100V의 전압을 양극성으로 인가하는 이 회로에서는 점화 코일로부터 스파크 플러그로 흐르는 고전압이 유입되는 것을 차단하기 위하여 고압용 다이오드 C가 사용되었다. 전압분배를 위하여 저항  $R_1$ 을 추가하고 저항  $R_m$  전후의 전압강하를 디지털 오실로스코프로 측정 기록한 다음에 이온전류로 환산하였다.

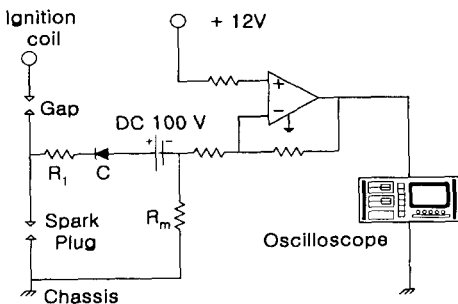


Fig. 3 Measurement of ionic current

정도를 알 수는 없지만 실험에 사용된 엔진의 연소실내 혼합기 농도는 실린더별로 상이하고 동일한 실린더 내에서도 위치에 따라 다를 것이다. 이온전류와 배기관에서 측정된 공연비 사이의 관계를 정확하게 분석하려면 가급적 한 개의 실린더에서 이온전류를 측정하고 그 실린더로부터 배출되는 가스의 공연비를 측정하여 비교하되 실린더내의 혼합기 농도가 균일하도록 하는 것이 필요하다. 이 연구에서는 실린더간의 공연비 차이로 인한 영향을 배제하기 위하여 이온전류를 측정하는 1번 실린더의 배기 흐름 속에 WEGO 센서를 설치하였고, 실린더내의 균질한 혼합기 형성을 위하여서 Fig. 4와 같은 연료증발촉진장치를 부착하였다. 이 장치는 PTC 발열판이 내장된 통에 기존 MPI 시스템의 인젝터가 장착된 구조로서, 쓰로틀바디의 상류에 설치될 경우 분사된 연료가 PTC 소자로 가열된 다음 비교적 먼 거리를 이동하면서 보다 완전하게 증발 혼합된 후 연소실로 들어가도록 보조하는 기능을 갖는다.

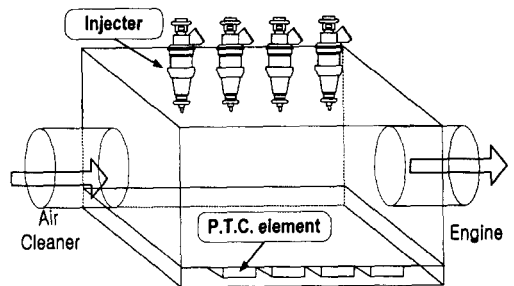


Fig. 4 Vaporization promoter

### 3.2 실험방법

1번 실린더의 스파크 플러그에 흐르는 이온전류와 1번 실린더 배기의 공연비를 측정한다. 이 실험에서 엔진은 회전속도 1,500, 2,000, 2,500, 및 3,000 rpm에서 제동평균 유효압력(bmep)을 각각 2.5, 5.0 또는 7.5 kg/cm<sup>2</sup>로 설정하고 공기과잉율( $\lambda$ )을 0.9부터 1.1까지의 범위에서 0.05씩 변화시키면서 운전하였다. 실린더내 공연비 분포의 영향

을 보기 위하여 먼저 엔진 본래의 MPI 연료 분사장치를 변조 없이 이용하여 위와 같은 시험을 수행한 다음에 증발촉진장치를 장착하고 반복 실시하였다.

#### 4. 실험결과 및 고찰

Fig. 5는 전형적인 이온전류의 파형을 나타낸다. 이온전류에는 두 개의 극대점이 존재하는데 본 연구에서는 화염의 전면에서 발생하는 첫 번째 극대점의 전류 값 즉, 최대이온전류( $I_p$ )와 공연비 사이의 관계를 규명하고자 하였다.

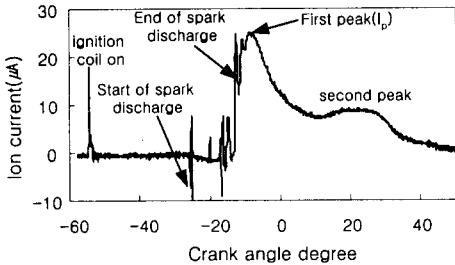


Fig. 5 Shape of ion current signal

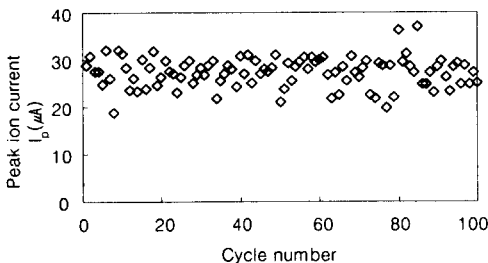


Fig. 6 Cycle variation of peak ion current.  
Engine speed = 3000 rpm, bmep = 5.0 kg/cm<sup>2</sup>,  $\lambda = 1.0$ . 표준편차 = 3.16, 평균(최대이온전류) = 27.36, 변동계수 = 11.55 %

이온전류의 파형은 다른 엔진 변수와 마찬가지로 사이클마다 변동하기 때문에 이 연구에서는 정상상태로 엔진을 운전하면서 연속된 사이클로부터 측정된 이온전류의 극대값을 누적 평균해보

고 100 사이클 정도의 평균값을 취하면 의미있는 대표값이 된다고 판단하였으며 따라서 모든 이온전류는 100 사이클 평균값을 구한 다음 분석하였다. Fig. 6은 특정한 엔진 운전조건에서 100개의 연속 사이클로부터 취득한 이온전류 극대값의 변동을 보여주는데 변동계수(100\*표준편차/평균값)가 약 12 %이다. 여타 운전조건에서의 변동계수도 대체로 10-20 % 정도였는데 이 값은 측정 신호의 전처리 과정에서 필요한 잡음 제거가 불완전한 관계로 실제 현상의 변동보다 다소 확대된 수치라고 판단된다.

Fig. 5에서 볼 수 있는 바와 같이 이온전류 신호에는 점화방전으로 인한 잡음이 중첩되어 나타난다. 또한 점화기간(즉, 잡음 지속기간)은 대략 일정함에 반하여 이온전류가 점화 시작 후 첫 번째 극대점에 도달하기까지 경과하는 시간은 엔진 회전속도가 빨라짐에 따라 점차 짧아지면서 점화로 인한 잡음이 첫 번째 극대값으로 접근하는 것이 관찰되었다. 어느 수준 이상의 회전속도에서는 결국 점화 방전이 미처 끝나기 전에 첫 번째 극대점이 발생하여 이온 전류의 극대값 결정이 불가능해지는데 이 연구에서는 3,500 rpm 이상에서 이러한 현상이 발생하였다. 점화계통을 수정하여 방전기간을 짧게 하면 이러한 현상을 방지할 수 있겠으나 이는 점화 에너지의 변경으로 인한 영향을 추가적으로 검토 연구해야 되는 부담 때문에 연구의 초점이 흐려지기 쉬우며, 가급적 실제 차량을 수정 없이 이용하기 위하여 스파크 플러그를 센서로 이용하는 이 연구의 취지와도 부합하지 않는다고 판단하여 시험을 3,000 rpm 이하로 제한하였다.

Fig. 7은 연료증발촉진장치를 작동하고 일정 부하(bmep 5.0 kg/cm<sup>2</sup>) 조건으로 엔진을 운전하며 측정된 최대이온전류와 엔진 회전속도 및 공연비의 관계를 보여준다. 혼합기의 공연비가 일정한 조건에서는 엔진 회전수가 증가할수록 이온전류가 증가하는 경향을 보이는데 이는 엔진회

전수가 증가하면 연소속도가 커지고 단위시간당 이온 발생량이 증가하기 때문으로 해석될 수 있다. 엔진 회전속도가 일정한 조건에서는 혼합기가 희박할수록 최대이온전류가 작아지는 경향을 보인다. 이는 혼합기가 희박하면 화염의 온도가 낮고 산화 및 해리 반응이 저하되어 이온 발생량이 감소하기 때문에 이온전류가 감소하는 현상으로 풀이된다.

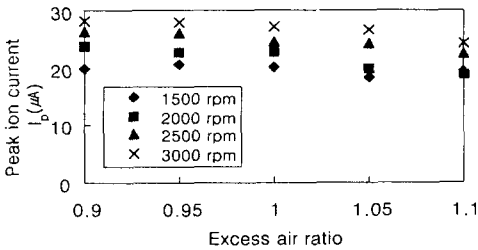


Fig. 7 Peak ion current versus excess air ratio and engine speed. bmep 5.0 kg/cm<sup>2</sup>. Vaporization promoter employed

Fig. 8은 일정한 회전수(2,000 rpm) 조건으로 엔진을 운전하며 측정된 최대이온전류와 엔진 회전속도 및 공연비의 관계를 보여준다. 농후한 혼합기 영역에서는 부하가 증가함에 따라서 이온전류도 미세하게 증가하는 것으로 보이지만 희박한 영역에서는 오히려 반대의 경향을 보인다. 여타의 회전속도에서 측정된 자료를 검토해보아도 일관성 있는 부하의 영향은 찾을 수 없었다. 한편 Fig. 7과 Fig. 8을 비교해보면 혼합기 농도와 엔진 회전수에 비하여 부하 변화가 이온전류에 미치는 영향은 훨씬 작음을 관찰할 수 있다. 따라서 이 실험의 오차범위 내에서는 이온전류에 대한 부하의 미세한 영향에 대하여 뚜렷한 경향을 논의할 수 없는 것으로 보인다.

Fig. 9는 Fig. 7과 동일한 운전조건에서 연료증발촉진장치를 설치하지 않고 본래의 MPI 시스템으로 엔진을 운전하며 측정된 이온전류의 최대값과 혼합기 농도의 관계를 나타낸 것이다. Fig. 7의 결과에 비하여 이온전류가 전반적으로 약화되었기 때문에 증발촉진장치를

사용하지 않으면 점화 플러그 간극에서의 혼합기 농도가 평균값보다 약간 희박해지는 것으로 보이지만 정확한 판단을 위해서는 더 많은 실험 결과가 필요하다. 일반적인 경향은 Fig. 7과 유사한데 근본적으로 균질혼합기 연소방식이라 말할 수 있는 이 엔진의 경우에 실린더내의 평균혼합기 농도는 점화직후 스파크 플러그 위치에서의 혼합기 농도와 대략적으로 같거나 비례하기 때문에 판단된다.

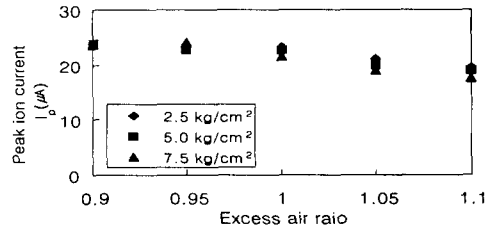


Fig. 8 Relationship between peak ion current and excess air ratio. Engine speed at 2,000 rpm. Vaporization promoter employed

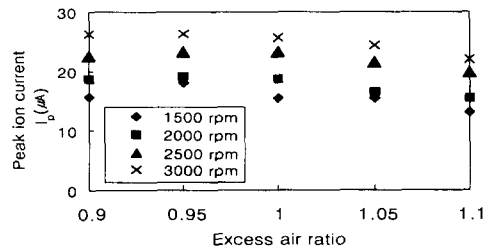


Fig. 9 Relationship between peak ion current and excess air ratio. bmep = 5.0 kg/cm<sup>2</sup>. MPI fuel system employed

Fig. 10과 Fig. 11에는 상대적으로 미약한 부하의 영향을 배제하기 위하여 동일한 bmep(5.0 kg/cm<sup>2</sup>) 조건에서 측정된 최대이온전류를 공기와 잉울과 회전속도의 함수로 나타내고 선형 근사선을 추가하였다.

Fig. 10에서 엔진 회전수가 변화하면 최대이온전류의 근사선들은 기울기 보다 세로축 절편에서 더 큰 변화를 보여주고 있는데, 이것은 혼합기의

농도 보다도 사실은 엔진의 회전수가 이온전류에 더 큰 영향을 미친다는 것을 의미하고 Fig. 11은 그 관계가 정비례에 가까움을 보여준다.

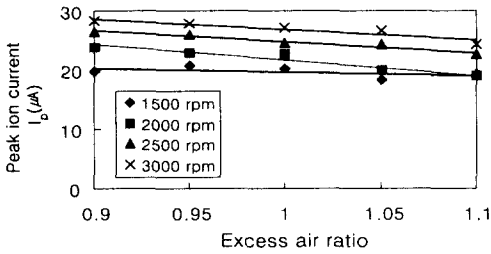


Fig. 10 Linearized peak ion current versus excess air ratio. bmep = 5.0 kg/cm<sup>2</sup>. Vaporization promoter employed

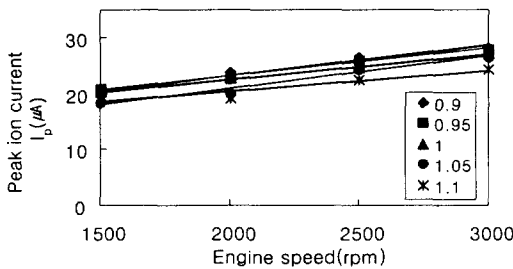


Fig. 11 Linearized peak ion current versus engine speed. bmep = 5.0 kg/cm<sup>2</sup>. Vaporization promoter employed

Reinmann<sup>2)</sup> 등은 스파크 방전의 시작 시점부터 최대이온전류 발생 시점까지의 크랭크각으로 엔진회전수에 대한 영향을 반영하여 다음과 같은 실험식을 제안하였다.

$$\lambda = \frac{A - \frac{I_p}{\Delta\theta}}{B} \quad (2)$$

$$I_p = (A - B\lambda)\Delta\theta$$

위 식에서  $I_p$ 는 최대이온전류,  $\lambda$ 는 공기과잉율,  $\Delta\theta$ 는 점화 방전 시작부터 최대 이온전류가 발생하는 시점까지의 크랭크 각도(Fig. 5 참고)를 의미하고  $A$ 와  $B$ 는 상수이다. Reinmann의

실험에서 측정된 최대이온전류는 식 (2)로 계산된 값과 잘 일치하였다.

상수  $A$ 와  $B$ 를 이 연구에서 취득한 실험자료에 맞도록 조정된 다음에 식 (2)를 이용하여 계산된 최대이온전류를 측정된 결과와 함께 Fig. 12에 제시하였다. Fig. 12에서 식 (2)는 엔진 회전수나 공기과잉율의 영향을 적절히 반영하지 못하고 있는데 그 이유를 면밀히 검토한 결과, Reinmann의 실험에서는  $\Delta\theta$ 의 값이 엔진 회전수에 따라 선형적으로 증가하였으나 이 연구에서는 Fig. 13과 같이 상당히 큰 산포도를 갖기 때문에 판명되었다. 엔진의 회전속도와  $\Delta\theta$ 가 물리적으로 선형관계라고 하더라도 크랭크각의 정확한 측정은 측정 센서의 위치와 크랭크축의 비틀림 진동 때문에 용이하지 않고, 회전수 값은 이미 엔진제어 장치에 확보되어 있다는 사실을 고려하면 식 (2)에는  $\Delta\theta$ 보다 회전수를 사용하는 것이 훨씬 합리적이라고 판단된다. 특히 이 연구에서는 Fig. 2와 같이 편의상 동력계 축의 엔진 반대편 끝에 엔코더가 설치된 관계로 엔코더와 1번 실린더간에는 크랭크축, 연결축, 및 동력계의 축을 포함하여 약 1 m 정도의 거리가 있고, 또한 연결축의 엔진 축 끝은 측정렬의 오차를 수용하기 위하여 고무 판으로 연결되어 있다. 따라서 크랭크각을 엔진의 앞에서 측정하는 경우에 비하여 이 연구에서 측정된 크랭크각과 실제 크랭크의 위치 사이에는 훨씬 큰 차이가 있을 수 있다고 판단된다.

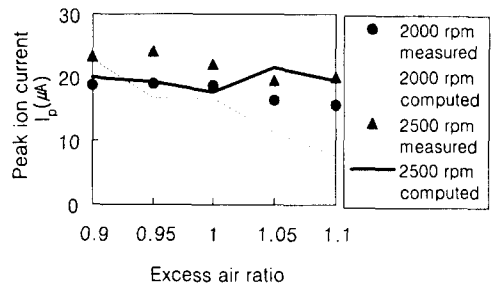


Fig. 12 Comparison of measured peak ion currents with computed values by Reinmann's equation

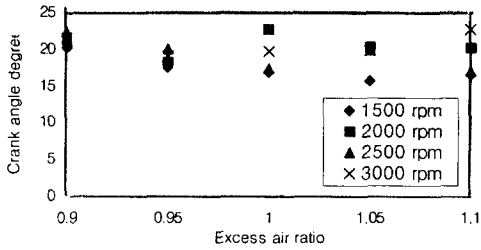


Fig. 13 Correlation with excess air ratio of crank angles from spark to position of peak ion current

이온의 발생량 또는 이온전류의 최대치는 엔진의 회전수, 공기과잉율, 부하 및 바이어스 전압 등 여러 인자에 따라서 증감하는 복잡한 함수로서 간단한 이론으로 예측하기가 매우 곤란하지만 Fig. 8, Fig. 10 및 Fig. 11의 관찰결과는 비교적 단순하게 정리될 수 있다. 즉, 최대이온전류는 부하 변화보다 주로 엔진회전수와 공기과잉율에 민감하고 그 각각에 대하여 대략 선형적인 함수관계를 갖는 것으로 보인다. 이러한 실험적인 관찰을 근거로 다음 형태의 실험식을 제안하고 그 적합성을 검토하고자 한다.

$$I_p = a\lambda + bN + c$$

여기에서  $N$ 은 엔진의 회전수(rpm)이고,  $a$ ,  $b$  및  $c$ 는 엔진 및 측정장치 등에 의존하는 상수들이다. 측정된 최대이온전류가 위의 실험식 형태를 잘 따르는지 확인하기 위하여 Fig. 7의 자료를 재정리하여 Fig. 14에 제시하였다. 상수  $a$ ,  $b$  및  $c$ 를 각각  $-17.22$ ,  $0.00494$  및  $29.37$ 로 결정하고, 공기과잉율의 영향을 보다 쉽게 확인할 수 있도록 아래의 식과 같이 측정 및 계산된 최대이온전류에서 실험식에 따른 속도항을 차감한 후 비교한 Fig. 14에서 실험식과 측정치는 상당히 잘 일치하는 것을 볼 수 있다.

$$I_p - bN = a\lambda + c$$

이 연구에서 제안된 실험식에는 이온전류에 대한 부하의 영향이 전혀 고려되지 않았다. Fig. 15는  $b_{mep} = 5 \text{ kg/cm}^2$  조건에서 측정된 자료만으로 작성된 Fig. 14에  $b_{mep}$ 가  $2.5$  및  $7.5 \text{ kg/cm}^2$

조건에서 측정된 자료를 추가한 그림으로서 부하 변동의 영향을 보여준다. 실험결과와 계산값의 산포가 Fig. 14보다는 다소 증가하지만 실험식을 비교적 잘 따름을 확인할 수 있고 앞서 밝힌 바와 같이 부하의 영향은 그다지 크지 않음을 알 수 있다. 그러나 Fig. 14와 Fig. 15 사이의 일치도 차이는 부하의 영향을 전혀 고려하지 않은 이식의 한계를 의미하며 향후 측정 및 자료 처리의 정밀도를 더욱 향상시킨 실험적 연구를 통하여 부하의 영향을 파악하고 실험식에 반영해야 할 필요성을 제시한다.

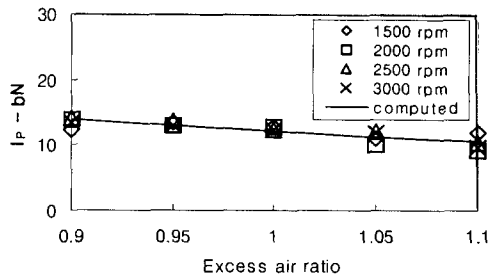


Fig. 14 Correlation of measured ion current by a proposed empirical equation.  $b_{mep} = 5.0 \text{ kg/cm}^2$

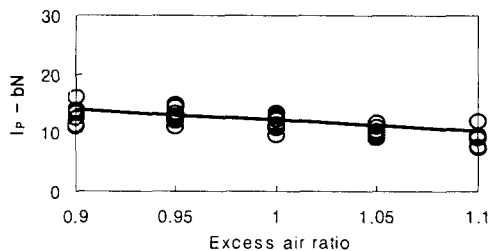


Fig. 15 Correlation of measured ion current by the empirical equation.  $b_{mep} = 2.5 \sim 7.5 \text{ kg/cm}^2$

## 5. 결론

양산되는 자동차용 가솔린 기관에서 점화를 목적으로 설치된 스파크 플러그를 센서로 사용하여 이온전류를 측정하고 동시에 WEGO로 공연비를

측정하여 비교 분석하였다. 이 연구에 동원된 특정 엔진의 측정 가능한 운전범위에서는 이온전류의 특성에 대하여 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 1) 이온전류는 엔진의 회전수, 혼합기의 당량비 및 부하에 따라 변화하며 통상적인 운전범위 내에서는 회전수의 영향이 가장 크고 부하의 영향은 그다지 크지 않다.
- 2) 일정한 부하 조건에서 당량비(1/공기과잉율)와 엔진의 회전수가 증가하면 이온전류는 거의 선형적으로 증가한다.
- 3) 일정한 부하 조건에서는 이온전류의 최대값이 다음과 같은 공기과잉율 및 속도의 식으로 정리될 수 있다.

$$I_p = a\lambda + bN + c$$

이 식은 부하 변화가 있는 경우에도 이온전류의 최대값을 근사적으로 대표한다.

고회전수 영역에 존재하는 이온전류 검출상의 문제점이 해결되고, 위와 같은 관계식의 타당성이 엔진 운전의 전영역에서 검증된다면 향후 MPI 및 GDI 방식의 엔진에서는 이 기술을 이용한 보다 정밀한 공연비 제어가 실현될 수 있을 것이다.

## 참 고 문 헌

- 1) 김혜순, 박진일, 고상근, "광역산소 센서를 이용한 실린더별 공연비 제어" 한국자동차공학회 춘계학술대회논문집 Volume 1, 1998.
- 2) R. Reinmann, A. Saitzkoff and Fabian Mauss "Local Air-Fuel Ratio Measurements Using the Spark Plug as an Ionization Sensor" SAE paper 970856, 1997.
- 3) J.B.Heywood Internal Combustion Engine Fundamentals. McGraw-Hill.
- 4) 최동천, "스파크플러그를 이용한 실린더 내 Misfire 센서 개발에 관한 연구" 인하대 대학원 석사학위논문 1996.
- 5) 최상민, 정영교, 김형현, "엔진 실화 감지 관련 기술" 자동차공학회지/ Vol. 19, No. 5, 1997/1.
- 6) N. Collings and S. Dinsdale, D. Eade, "Knock Detection by Means of the Spark Plug" SAE paper 860635, 1986.
- 7) A. Lee and J. S. Pyko, "Engine Misfire Detection by Ionization Current Monitoring" SAE paper 950003, 1995.
- 8) J. Auzins, J. Johansson and J. Nytomt, "Ion-Gap Sense in Misfire Detection Knock and Engine Control " SAE paper 950004, 1995.
- 9) M. Asano, K. Kajitani, T. Kuma and M. Takeuchi, Y. Fukumura, " Development of New Combustion Control System by Ion Current" JSAE paper 963314, 1996.
- 10) S. Miyata, Y.Ito and Y. Shimasaki, " Flame Ion Density Measurement Using Spark Plug Voltage Analysis" SAE paper 930462, 1993.
- 11) Y. Shimasaki, M. Kanehiro, S. Baba, S. Maruyama and T. Hisaki, S, Miyata, " Spark Plug Voltage Analysis for Monitoring Combustion in an internal Combustion Engine " SAE paper 930461, 1993.