

〈논문〉 SAE NO. 2000-03-0106

이온프로브 장착 점화플러그를 이용한 노크발생 판정 Knock Detection Using an Ionization Probe Installed Spark Plug

한성주*, 이용규*, 민경덕**, 김응서**
Seongjoo Han, Yonggyu Lee, Kyoungdoug Min, Eungseo Kim

ABSTRACT

A new method of knock detection in SI engines, using a change of ion concentration in the combustion chamber, was developed. In order to measure in-cylinder ionization current, ionization probes were installed at spark plug and cylinder head of production engine.

It was found that the electric current generated by ionized gas in core burned gas region of knocking cycle is between 2 and 10 times larger than that of normal cycle, because the burned gas temperature which is the dominant parameter of a change of ion concentration increases. However, a change of ionization current in boundary region of burned gas is relatively weak. Hence a change of ion concentration in core burned gas region can be used for knock detection.

주요기술용어 : Knock(노크), Knock detection(노크 판정), Core burned gas region(중심
기연가스 영역), Ionization current(이온화전류), Ionization probe(이온프로브)

1. 서론

전기점화기관의 출력 및 열효율 향상에 큰 제약이 되는 노크발생을 판정하기 위해 일반적으로 압력센서, 진동센서, 이온프로브 등이 사용되었다.^{1,2,3)} 압력센서를 이용하여 노크를 판정하는 방법은 그 측정 결과를 신뢰할 수 있지만 압력센서가 고가라는 단점 때문에 양산 차량에 적용하기 어렵다. 진동 센서를 이용하여 노크를 판정하는 방법은 비용 면에서는 저가이지만 고속 운전

중의 측정 결과를 기관 자체의 노이즈와 구별하기 어렵다는 단점이 있다.⁴⁾

최근 노크를 판정하는 새로운 방법으로 이온프로브 센서를 이용한 판정법에 관한 연구가 진행되고 있다. Curry⁵⁾는 연소실에 장착된 이온프로브 신호가 노크 사이클의 경우 정상사이클과 다르다는 것을 언급한 바 있다. Auzins³⁾는 점화플러그의 간극을 이온프로브로 사용하여 노크발생 시 이온화전류 진동(oscillation)을 측정하여 노크발생을 판정하였다. 그러나 이러한 방법은 고주파 진동을 감지할 수 있는 부대 장비가 필요하고 노이즈에 의한 전류 진동의 영향을 배제하기 어렵다는 문제점을 내포하고 있다. 국내에선 채재우 등⁴⁾이 점화플러그 전극에 고전압을 가하여 발생한 브레이크다운 전압 특성으로 노크발

* 회원, 서울대학교 대학원

** 회원, 서울대학교 기계항공공학부

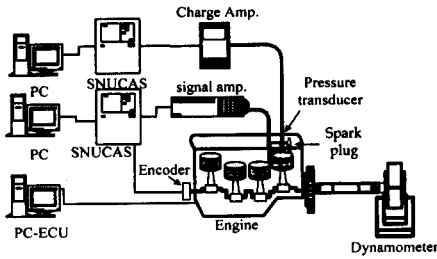


Fig. 1 Schematic of experimental apparatus

생을 판정하는 연구를 수행한 바 있으나 이러한 방법은 별도의 고전압 발생장치가 필요하다.

본 연구에서는 이온프로브를 이용한 새로운 판정 방법을 찾기 위해 측정된 연소실 압력을 이용하여 이론적인 이온화전류 특성을 해석하였다. 그리고 노크 센서로서 이온프로브의 사용 가능성을 확인하기 위해 점화플러그와 연소실 헤드면에 이온프로브를 장착하여 실험을 수행하였다. 이를 통해 본 연구에서는 이온화전류량 크기를 이용하여 노크발생을 판정하는 방법을 개발하였다.

2. 실험 장치

본 연구에서는 전기점화기관의 연소실에 발생하는 이온화전류를 측정하기 위해 점화플러그와 연소실 헤드면에 이온프로브를 설치하고 연소실 압력과 이온프로브 신호를 동시에 획득하였다.

Fig. 1은 전체 실험 장치의 개략도이다. 본 연구에서는 배기체적 1,500 cm³ 상용 4 실린더 기관이 사용되었다. 기관의 4번 연소실에 압력 변환기를 설치하고 이온프로브는 동일 연소실의 점화플러그와 연소실 헤드 바닥면에 설치하였다. 측정 연소실 압력을 이용하여 노크발생을 확인하기 위해 0.1° 해상도로 압력을 측정하였다. 강제적인 노크발생을 위해서 PC-ECU를 이용하여 점화 시기를 제어하였다.

Fig. 2는 이온프로브를 장착한 점화플러그 개략도와 기관 헤드 사진이다. 이온프로브는 일정한 바이어스(bias) 전압이 걸려 있는 두 도선 사

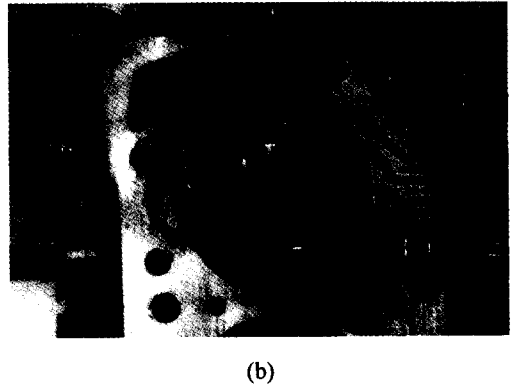
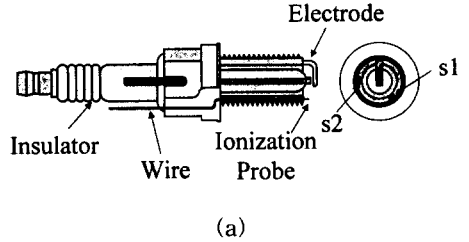


Fig. 2 (a) Schematic diagram of ionization probe installed spark plug (b) Picture of ionization probe installed cylinder head

이에 존재하는 이온화 가스에 의해 발생된 전류를 감지하는 장치이다.^{6,7)} 본 연구에서는 지름 0.3 mm의 도선이 이온프로브로 사용되었다. Fig. 2에 표시된 바와 같이 도선사이의 거리는 점화플러그에 설치한 s1의 경우는 1.2 mm, s2는 0.6 mm, 기관 헤드에 장착한 경우는 1.5 mm이고 프로브의 돌출부 길이는 1.0 mm로 하였다. 점화플러그와 기관 헤드 바닥면에 홈을 가공하여 애자로 절연된 이온프로브를 장착한 후에폭시 수지 접착제로 고정하였다. 바이어스 전압은 직류 107 V로 고정하였다.

본 연구에서는 기관 속도 1300 rpm, 1500 rpm의 전부하 조건에서 노크를 발생시키기 위해 점화 시기를 전각시키며 실험을 수행하였다. 0.1° 해상도 신호 획득은 A/D 변환기의 한계로 인해 기관 속도 1500 rpm 이하로 제약되었다. 0.1° 해상도의 연소실 압력 신호와 1° 해상도의 이온프로브 신호를 각각의 점화 시기마다 동시에 100 사이클씩 측정하였다. 본 연구에서 측정

된 이온화전류 신호는 1 kHz 고역 통과 필터 (High pass filter)를 통과하여 PC에 저장되었다.

3. 이온화전류 해석

전기점화기관의 연소실에서 화염내 이온은 주로 CHO^+ , CH_3^+ , CH_3O^+ 등으로 구성되어 있는데 비해 기연가스 영역의 이온은 주로 NO^+ 이다.⁸⁾ NO의 농도는 기연가스 주성분인 N_2 , H_2O , CO_2 에 비해 미량이지만 이온화도(degree of ionization)가 높아서 이온화전류의 90% 이상을 차지하고 있다.⁸⁾ 그러므로 본 연구에서는 기연가스 영역의 이온화전류를 NO^+ 의 이온화전류로 해석하였다.

본 연구에서 사용된 이온화전류식은 아래의 식 (1)과 같다.^{8,9)}

$$I = U \cdot \frac{A}{l} \cdot \text{unit conductivity} \cdot \text{degree of ionization} \quad (1)$$

여기서 I 는 이온화전류, U 는 이온프로브에 부가된 전압, A/l 은 도선 사이의 단면적과 도선 사이 거리의 비이다. 위 식으로부터 이온화 전류는 이온화 가스의 단위 전기 전도성(unit electrical conductivity)과 가스 이온화도에 비례함을 알 수 있다. 여기서 단위 전도성은 단위 면적·길이 저항의 역수를 말한다.

위 식 (1) 우변의 이온화도는 분자의 이온화를 계산하는 Saha의 식으로부터 아래 식 (2)와 같은 비례 관계를 유도할 수 있다.

$$\text{Degree of ionization} \propto \sqrt{\phi_s} \sqrt{\frac{T^{3/2} \exp\left[\frac{-E_i}{kT}\right]}{n_{tot}}} \quad (2)$$

여기서 ϕ_s 는 화학종의 몰분율, 즉, 본 연구에서는 NO의 몰분율이고 T 는 가스의 온도, E_i 는 이온화 에너지, k 는 볼츠만(Boltzmann) 상수,

n_{tot} 은 전체 분자의 수밀도(number density)이다.

그리고 단위 전기 전도성은 아래 식 (3)과 같은 관계에 있다.

$$\text{Unit conductivity} \propto \frac{1}{T} \quad (3)$$

그러므로 이온화 전류는 식 (4)와 같은 비례 관계에 놓여있다는 것을 알 수 있다.

$$I \propto U \frac{A}{l} \sqrt{\frac{\phi_s \sqrt{T} \exp\left(\frac{-E_i}{kT}\right)}{n_{tot}}} \quad (4)$$

위 식으로부터 가스온도가 지수함수에 포함되어 있어 이온화전류 증가의 지배적인 인자가 됨을 알 수 있다. 본 연구에서는 기연가스 영역의 온도를 계산하기 위해 측정 연소실 압력을 이용한 열역학적 모델링을 이용하였다.¹⁾ NO의 농도는 확장 Zeldovich 메커니즘을 이용하여 계산하였다.¹⁾

4. 결과 및 검토

Fig. 3은 기관 속도 1300 rpm, 전부하 실험 조건에서 측정된 연소실 압력을 이용하여 계산된 이온화전류를 나타낸 것이다. 본 연구에서 코어 기연가스 영역은 연소 초기에 형성된 기연가스로서 계속되는 연소실 압력 상승으로 인해 압축되는 영역을 말한다.

정상사이클의 경우 코어 기연가스의 온도는 최대 2800 K이다. 이로 인해 이온프로브 s2의 경우 최대 50 μA 의 미약한 이온화전류가 발생함을 알 수 있다. 노크 사이클의 경우 정상사이클보다 코어 기연가스의 온도가 최대 100 K 높게 나타나고 있다. 이러한 차이로 인해 노크 사이클은 정상사이클보다 이온화전류가 약 50 μA 높게 나타난다. 이것은 앞서 말한 바와 같이 가스 온도에 의해 이온화전류량이 민감하게 변

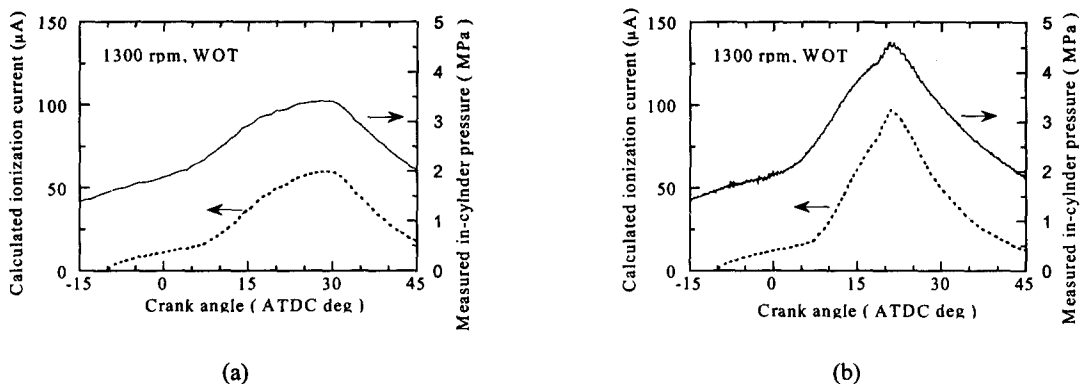


Fig. 3 Measured in-cylinder pressure and calculated ionization current (a) at normal cycle (b) at knocking cycle

화하기 때문이다. 이온프로브 s1을 해석할 경우 도선 사이 거리 l의 차이로 인해 s2 이온화전류의 1/2 크기로 나타난다.

이를 통해 본 연구에서 개발된 코어 기연가스 영역의 온도차로 인한 이온화전류량 변화를 이용한 노크 판정의 이론적 가능성을 확인할 수 있다.

Fig. 4는 노크 사이클에서 코어 기연가스 영역의 온도가 아닌 기연가스 경계 영역의 온도로 이온화전류를 계산한 경우이며 코어 영역보다 가스 온도가 낮아서 이온화전류가 정상 사이클과 비슷한 상태로 미약하게 발생함을 나타낸 것이다.

이를 통해 이온화전류를 이용하여 노크를 판

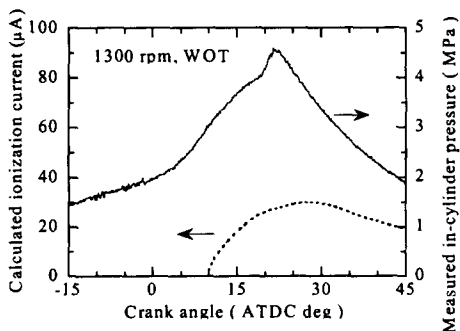


Fig. 4 Measured in-cylinder pressure and calculated ionization current at knocking cycle in boundary burned gas region

정하는 방법은 기연가스 영역 중 점화플러그 주위와 같은 코어 영역에서만 가능하다는 것을 알 수 있다.

본 연구에서는 위와 같은 이온화전류 해석 결과를 입증하기 위하여 기관 실험을 통해 이온프로브를 이용한 새로운 노크발생 판정의 가능성을 확인하였다.

Fig. 5는 기관 속도 1300rpm에서 이온프로브로 획득한 실험 데이터로서 정상 사이클과 노크 사이클을 비교한 것이다. 크랭크 각도 0° 부근에서 스파이크 형태의 신호가 발생하는데 이것은 이온프로브를 지나는 정상 화염에 의한 것이다. 정상 사이클의 경우 화염에 의한 신호 발생 후 크랭크 각도 27° 에서 2.0 V의 최대 신호를 나타내었다. 그 반면 노크 사이클에서는 21° 에서 3.4V의 최대 신호를 나타내었다. 이러한 신호 크기 차이로 정상과 노크 사이클을 구분할 수 있음을 알 수 있다. 이론적 해석과 동일하게 실험에서도 최대 압력 시점에서 최대 신호가 발생함을 알 수 있다.

Fig. 6의 경우 강한 노크가 발생한 사이클로서 최대 압력 시점에서 최대 9.5V의 강한 신호가 발생함을 알 수 있다. 실험적으로 노크 발생 시의 신호는 정상 사이클의 경우에 비해 2~10 배정도 높아서 충분히 노크 발생 여부를 판정할 수 있다.

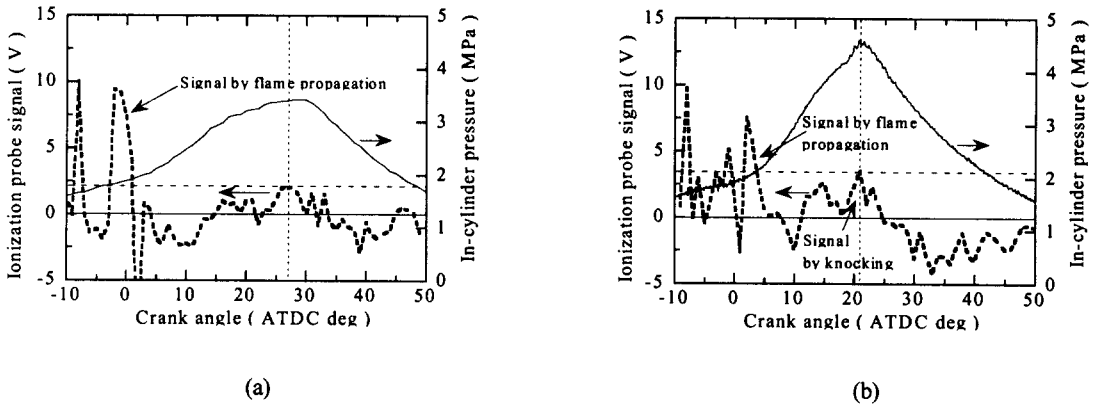


Fig. 5 Typical ionization probe signal of (a) normal cycle and (b) knocking cycle

Fig. 7은 연소실 최대 압력과 고역 통과 필터링된 이온프로브 s2 신호의 최대값의 관계를 나타낸 것이다. 신호 처리 회로에 내장된 필터로 인한 신호 크기 감소 영향을 배제하기 위해 신호 크기를 정규화하였다. 본 연구에서는 최고 연소실 압력이 4 MPa 일때의 평균 이온화 전류 크기를 단위 정규값으로 사용하였다. 최대 압력이 증가함에 따라 이온프로브 신호 크기가 지수 함수 형태로 증가한다. 이것은 앞서 설명한 식 (4)와 같이 이온화전류는 가스 온도의 지수 함수 형태로 증가하고 가스 온도는 연소실 압력에 비례하기 때문이다. 노크 사이클과 정상사이클을 구분할 수 있는 이온프로브 신호 경계를 정규값 1.12 로 볼 수 있다. 그러므로 본 연구에서는 이온프로브 s2의 노크발생 판정 기준을 정규화된

신호 1.12 로 설정하였다.

측정된 이온프로브 s2의 평균적인 신호 크기는 s1의 2.1배로서 신호 크기가 2 배라는 식 (1)의 해석과 일치하고 있다. 이온프로브 s1의 판정 기준값도 위와 동일한 방법으로 설정하였다.

이온프로브 신호를 이용한 노크발생 판정법은 화염 도달에 의한 이온프로브 신호와 혼동하기 쉽다. 이러한 혼동을 방지하기 위하여 정상 화염이 이온프로브가 장착된 점화플러그를 통과하는 시점을 피해 판정 구간을 설정하였다. 일반적으로 화염이 점화플러그를 통과했다고 볼 수 있는 시점은 질량 연소율이 2%가 된 시점인 점화 후 20° 이내이다.¹⁰⁾ 그러므로 본 연구에서는 노크발생을 판정하는 구간 즉 노크 판정 구간을 점화 후 30° 이후 구간으로 정했다.

본 연구에서는 위와 같이 선정된 노크 판정법으로부터 노크발생 빈도를 측정하였다. 본 연구에서 노크발생 빈도(knock percent)는 다음과 같이 정의되었다.

$$Knock\ percent\ (\%) = \frac{Knocking\ cycle\ number}{Total\ cycle\ number} \times 100 \quad (5)$$

Fig. 8은 1° 해상도 연소실 압력으로 판정한 노크발생 빈도와 이온프로브 신호를 이용한 노

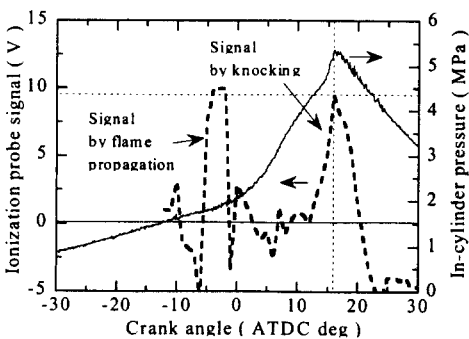
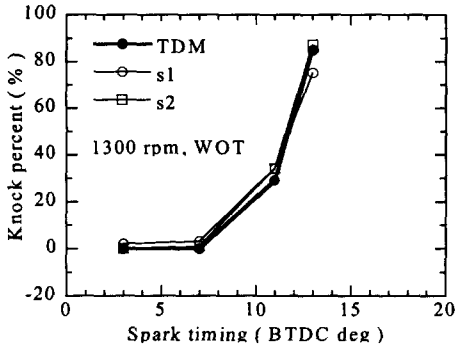
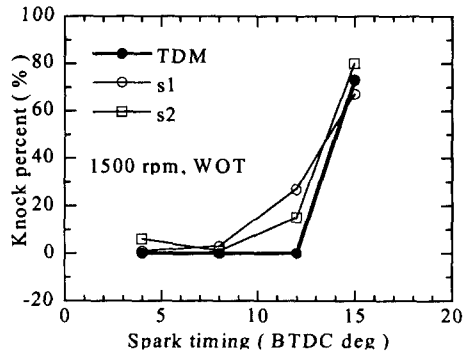


Fig. 6 Typical ionization probe signal of heavy knocking cycle



(a)



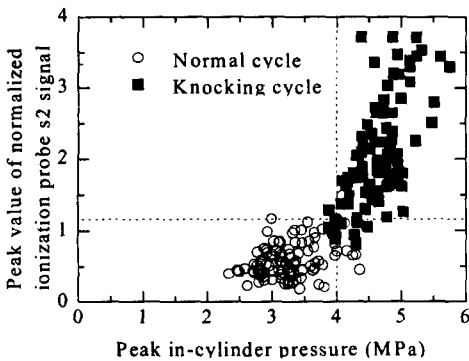
(b)

Fig. 7 Relation between peak in-cylinder pressure and peak value of normalized ionization probe s2 signal (a) 1300 rpm, WOT (b) 1500 rpm, WOT

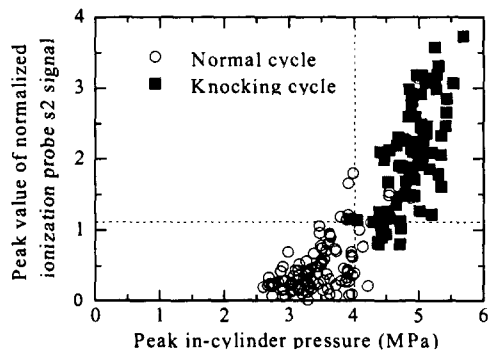
크발생 빈도 판정을 비교한 것이다. 본 연구에서 측정된 0.1° 해상도의 연소실 압력 신호의 경우 지나친 신호 잡음으로 인해 노크발생 판정용으로 사용할 수 없으므로 1° 해상도의 압력 신호로 노크를 판정하였다.¹¹⁾ 연소실 압력을 이용한 노크 발생 판정 방법으로는 가장 널리 사용되는 3차 미분법(third derivative method, TDM)^{2,11)}을 사용하였다. 기관 ECU 상태, 즉 정상 상태에서 측정한 압력 데이터의 3차 미분값 최대 크기를 노이즈라고 간주하고 이 값을 노크 발생 기준값(threshold)으로 선정하였다. 본 연

구에서는 이 기준값을 $-8 \times 10^{-9} \text{ Pa/sec}^3$ 로 선정하여 그 값의 미만을 노크 사이클로 판정하였다. 이온프로브 신호를 이용한 노크발생 빈도가 3차 미분법 판정 빈도 경향과 일치함을 알 수 있다. 기관속도 1500 rpm, 점화 각도 12° 의 결과를 제외한 경우 노크 발생 빈도가 평균 3.7% 차이가 난다.

기관속도 1500 rpm, 점화 각도 12° 의 결과를 보면 이온프로브를 이용한 판정의 결과가 압력 신호를 이용한 경우보다 매우 크게 나타난다. 이것은 1° 해상도를 갖는 연소실 압력을 이용한



(a)



(b)

Fig. 8 Knock percent using ionization probe signal and third derivative method(TDM) as a function of spark timing (a) 1300 rpm, WOT (b) 1500 rpm, WOT

노크 판정의 경우 압력 펄스가 미약한 노크 (slight knock)를 판정하지 못하기 때문이다. 이에 비해 이온프로브 신호를 이용한 경우 노크 발생에 지배적인 영향을 주는 연소실내 온도의 미미한 변화에 의한 이온화 전류 변화를 감지할 수 있기 때문이라고 추측한다.

이온프로브 s1, s2의 경우 A/I 비가 다르지만 판정 결과는 비슷한 경향을 보였다. 이를 통해 A/I 비가 상이해도 노크발생 기준값을 조정하면 거의 동일한 판정 결과를 나타냄을 알 수 있다.

앞의 이온화전류 해석으로부터 연소실 최고 압력 시점에서 이온프로브 신호 크기가 최대임을 알 수 있다.^{5,9)} 일반적으로 노크는 연소실 최고 압력 시점 2°~3° 전에 발생한다. 그러므로 최대 이온프로브 신호 시점으로부터 노크발생 시점을 알 수 있다. Fig. 9는 노크발생 시점과 이온프로브의 최대 신호 시점을 비교한 것이다. 이온프로브의 최대 신호 시점은 평균적으로 노크발생 시점보다 1.7° 이후이고 표준 편차는 1.3°이다. 그러므로 이러한 시점 차이를 보정하면 노크발생 시점을 판정할 수 있다.

본 연구에서는 직류 107 V의 전원을 사용하였지만 A/I 비가 큰 점화플러그 전극을 이용하면 이온화전류량이 충분히 커서 기관 배터리(직류 12V)와 같은 저전압 전원으로도 노크발생 판정이 가능할 것이다. 그리고 이온프로브에 접촉

되는 퇴적물(deposit)과 기관속도가 신호 특성에 주는 영향에 대한 연구를 수행할 필요가 있다. 향후 연구에서는 고역 통과 필터(high pass filter)가 없는 회로를 구성하여 실험을 수행할 계획이다.

5. 결론

연소실의 코어 기연가스 영역 이온농도 변화를 이용한 노크발생 판정을 위하여 상용 기관의 연소실에 압력 센서를 장착하고 점화플러그와 연소실 헤드면에 이온프로브를 장착하여 실험을 수행하였다. 정상사이클과 노크 사이클의 압력 신호와 이온프로브 신호를 이용한 해석과 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 코어 기연가스 영역에서 발생하는 이온화 전류는 노크발생 시, 정상사이클 경우보다 2~10 배 발생한다. 따라서 이온화전류 변화를 이용하여 노크발생 여부를 판정할 수 있고 가스의 온도가 상대적으로 높은 코어 기연가스 영역, 즉 점화플러그에 이온 프로브를 설치해야 한다.
- 2) 점화플러그에 장착된 이온프로브 최대 신호 크기를 이용하여 노크발생 여부를 판정할 수 있다.
- 3) 이온프로브 신호가 최대값을 나타내는 시점은 연소실 압력으로부터 결정한 노크발생 시점보다 평균적으로 크랭크 각도 1.7° 이후이다. 그러므로 이 시점 차이를 보정하면 점화 플러그 장착 이온프로브를 이용하여 노크발생 시점을 판정할 수 있다.

참고 문헌

- 1) J. B. Heywood, Internal Combustion Engine Fundamentals, Mc-Graw Hill, pp.376~389, pp.450~478, pp.572~577, 1988.
- 2) K.M. Chun and K.W. Kim, "Measurement and Analysis of Knock in

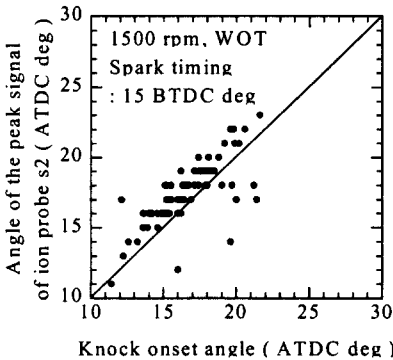


Fig. 9 Knock onset angle using ionization probe signal versus using pressure data

- a SI Engine Using the Cylinder Pressure and Block Vibration Signals“, SAE paper No. 940146, 1994.
- 3) J. Auzins, H. Johansson and J. Nytomt, “Ion-Gap Sense in Misfire Detection, Knock and Engine Control” SAE paper No. 950004, 1995.
 - 4) 채재우, 박재근, 고용수, 조민석, 황재원, A. A. Martychenko, “스파크플러그를 이용한 실린더내의 이상폭발검출에 관한 연구”, 한국자동차공학회 1998년도 춘계학술대회논문집, Volume 1 pp.385~390, 1998.
 - 5) S. Curry, “A Three-Dimensional Study of Flame Propagation in a Spark Ignition Engine”, SAE paper No. 630487, 1963.
 - 6) 김만식, “전기점화기관에서 이온프로브를 이용한 노크 위치 판정”, 공학 석사 학위 논문, 서울대학교 대학원, 1998.
 - 7) 이용규, “전기점화기관에서 자발화 발생 위치의 예측”, 공학 박사 학위 논문, 서울대학교 대학원, 1999.
 - 8) A. Saitzkoff, R. Reinmann, T. Berglind and M. Glavmo, “An Ionization Equilibrium Analysis of the Spark Plug as an Ionization Sensor”, SAE paper No. 960337, 1996.
 - 9) L. Eriksson, L. Nielsen and J. Nytomt, “Ignition Control by Ionization Current Interpretation”, SAE paper No. 960045, 1996.
 - 10) Y. Bianco, W. K. Cheng, and J. B. Heywood, “The Effects of Initial Flame Kernel Conditions on Flame Development in SI engine”, SAE paper No. 912402, 1991.
 - 11) M. D. Checkel and J. D. Dale, “Testing a Third Derivative Knock Indicator on a Production Engine”, SAE paper No. 861216, 1986.