〈논 문〉 SAE NO. 97370004

스파크플러그를 이용한 실화감지에 관한 연구

Development of Misfire Detection Using Spark-plug

채 재 우*, 이 상 만***, 정 영 식**, 최 동 천***
J. O. Chae, S. M. Lee, Y. S. Jung, D. C. Choi

ABSTRACT

Internal combustion engine is the main source of environmental pollutants and therefore better technology is required to reduce harmful elements from the exhaust gases all over the world. Especially, harmful elements from the exhaust gases are caused by incomplete combustion of mixture inside the engine cylinder and this abnormal combustion like misfire or partial burning is the direct cause of the air pollution and engine performance degradation.

The object of this research is to detect abnormal combustion like misfire and to keep the engine performance in the optimal operating state. Development of a new system therefore could be applied to a real car. To realize this, the spark-plug in a conventional ignition system is used as a misfire detection sensor and breakdown voltage is analyzed. In this research, bias voltage(about 3kV) was applied to the electrodes of spark-plug and breakdown voltage signal is obtained. This breakdown voltage signal is analyzed and found that a combustion phenomena in engine cylinder has close relationship with harmonic coefficient K which was introduced in this research. Newly developed combustion diagnostic method(breakdown voltage signal analysis) from this research can be used for the combustion diagnostic and combustion control system in a real car.

주요기술용어 : Misfire(실화), Spark-plug(점화플러그), Breakdown Voltage(충전에 의한 전압강하), Fourier Transformation(프리에 변환), Spectrum Analysis(스펙트럼분석), Harmonic Coefficient(조화계수)

* 정회원, 인하대학교 기계공학과
** 정회원, 서울대학교 터보동력기계 연구센터
*** 인하대학교 기계공학과 대학원

1. 서 론

자동차 보유대수의 증가는 급속한 산업, 경제 발전에 의해 발생되는 불가피한 현상으로 특히 자동차 배기가스에 의한 대기오염은 날로 그 심각성을 더해 가고 있다.[1] 이와 같은 문제는 가솔린 엔진을 포함한 각종 열기관에 있어서도 예외는 아니며, 이러한 배기가스에 의한 대기오염 대책이 전세계적으로 강력히 요구되고 있음은 주지의 사실이다.[2]

대기오염의 심각성을 최초로 겪은 California 주를 비롯한 몇몇 나라에서 자동차 배기가스 규제에 관한 법이 제정되기에 이르렀고, 특히 California주에서는 보다 강화된 자동차 배기가스 규제 조치가 1990년 9월에 통과되었으며, 이에 따라 1994년부터 미국 시장(California)으로 수출되는 자동차에 단계적으로 보다 엄격해진 자동차 배기가스 규제를 적용하게 되었다. 특히 미국 California주 및 EPA(Environmental Protection Agency)의 자동차 배기가스 규제는 기존의 자동 고장 진단 기능(OBD-I, On-Board Diagnostic Ⅰ)보다 더욱 엄격한 기능(OBD-Ⅱ)을 요구하고 있다. 1994년부터 강화된 OBD-Ⅱ 규정에서는 기존의 연료계통, 산소센서, EGR(Exhaust Gas Recirculation)에 대한 진단방법을 개선하는 것을 포함하여 실화감지, 촉매장치 효율 등을 새로운 추가진단 항목으로 설정하고 있으며, 또한 이들 진단방법을 표준화할 것을 요구하고 있다.

내연기관에 있어 배기가스의 발생은 불가피한 현상이므로 이러한 배기가스 중의 유해성분을 최소화하려는 기술이 전세계적으로 강력히 요구되고 있다. 특히 배기가스 중의 유해성분으로 smoke, CO 및 THC등은 주로 엔진 연소실내 혼합기의 불완전연소에 기인하며, 이러한 불완전연소는 가연혼합기에 점화가 되지 않는 실화현상, 점화가 되더라도 부분적인 연소가 발생되는 부분연소와 공연비의 부조화로 인한 불완전연소로부터 발생한다. 따라서 실화나 부분연소와 같은 비정상연소는 대기오염 및 엔진 성능저하의 직접적이고 주요한 원인이 된다. 따라서 본 연구는 완전실화 및 부분연소와 같은 불완전연소 발생시 연소실내의 연소를 완전연소에 가까운 상태로 엔진을 제어하여 대기오염 물질을 감소시키고 엔진성능을 향상시키는데 그 목적이 있다.

본 연구에서는 실화 감지센서를 별도로 부착하지 않고 점화를 목적으로 장착된 기존의 스파크 플러그를 실화 감지센서로 겸용하는 방식을 채택하여 엔진 구조변경의 번거로움을 없애는 간편성과 경제성을 꾀하였다. 또한 기존의 산소센서는 배기다기관에 장착되어 불완전 연소나 공기량 과다시 신호를 출력하여 공연비를 전체적으로 조절하게 되어 있으나, 이러한 각각의 실린더마다 장착되어 있는 스파크 플러그를 실화 감지센서로 활용한다면 보다 직접적인 위치의 정보를 얻을 수 있어, 각 실린더의 공연비를 개별적으로 제어할 수 있다는 장점이 있다.

2. 이온 전류(ionic current) 발생 원리

연소가스내에는 이온이 존재하며, 전위차를 가진 두개의 전극(ion probe)을 이러한 연소가스내에 삽입하면 전류가 흐르는데 이것을 이온전류라 한다[3]. 이와 같이 이온농도가 증가할수록 두 이온프루브 전극사이의 저항이 감소되어 이온전류의 양이 증가하게 된다. 따라서, 이러한 이온전류를 측정하는 방법에 의해 이온농도의 크고 작음과 그 변화를 알아내는 것이 가능하다[7)~18)].

연소장에서 생성되는 이온전류의 대부분은 연료의 화학적 반응에 기인하므로 엔진 연소실내에서의 이온화 과정은 대부분 화학 이온화 과정의 지배를 받는다. 탄화수소 연소시 수많은 기초반응(elementary reaction)이 존재하며, 이러한 기초반응의 대부분은 탄소를 함유한 여러 가지 형태의 래디컬(radical) 생성반응(이온 생성 반응)이다[7)~21)].

이러한 이온프루브를 이용한 연소해석 장치는 다른 연소해석 장치와는 달리 제작 및 설치가 용이하며 값이 싸다.

3. 부분연소(partial burn) 및 실화(misfire)

불충분한 연료분사나 과다한 흡입 공기, 연소실내의 연소 잔존 가스(burned residual gas) 및 배기가스 재순환(EGR, Exhaust Gas Recirculation)의 증가에 의해 엔진 엔소실내에서 혼합기가 희박해지면 연소의 불안정에 의해 연소과정중의 사이클당의 연소변동치가 증가하게 된다[4)~6)]. 결과적으로 엔진의 작동이 불안정해지고, 미연 탄화수소의 배출이 급격히 증가하게 된다. 이러한 현상이 발생되는 시점을 엔진의 희박한계(lean operation limit or engine's stable operating limit)라고 한다. 이러한 가연혼합기가 더욱 희박해질수록 연소실내에서의 혼합기의 연소속도가 느려지고 결국 배기밸브가 열리기 전까지 완전연소를 시키지 못하며, 또한 화염이 연소실내에서 전파되기도 전에 소염(flame extinguishment)이 발생되어 타지않은 혼합기의 일부가 배기관을 통해 대기중으로 배출되는 부분연소가 발생한다. 결국, 혼합기가 더욱 희박해지면 전혀 점화되지 않는 완전실화가 발생하게 되므로 이처럼 혼합기가 희박해질수록 부분연소 및 실화의 가능성은 점차 증가한다.

부분연소나 실화와 같은 비정상연소의 발생원인으로는 위에서 설명한 희박혼합기에 기인하는 것 이외에도, 스파크플러그 두 전극 사이의 과다한 수트(soot)나 습기에 의한 스파크 플러그의 불충분한 방전 에너지에도 기인하며, 또한 불충분한 흡입 공기에 의한 농후한 혼합기에도 기인한다[22)]. 이러한 부분연소나 실화가 발생하면 혼합기가 가지고 있는 화학에너지가 연소에 의한 열에너지로 효과적으로 전환되지 못하여 결과적으로 유효한 운동에너지로의 전환도 기대할 수 없어 엔진 출력의 저하, 연료의 손실 및 비정상 진동의 발생으로 엔진 및 차체의 손상을 초래하여 자동차 수명의 단축과 운전의 안정성이 저하되고, 미연 탄화수소가 대기중으로 방출되어 대기오염의 주 원인으로 된다.

4. 실험장치 및 방법

본 연구에 사용된 가솔린엔진은 수냉식 4기통 4사이클 엔진으로 인젝터(injector)를 각 실린더의 흡기다기관에 각각 1개씩 설치하여 연료를 분사하는 MPI(multi point injection) 방식의 연료분사 장치를 장착하였다.

4.1 연료량 조절 및 측정 장치

본 연구에서는 Fig.1과 같은 연료량 조절 및 측정장치를 설치하였다. 공급 연료량의 측정을 위하여 4번째 인젝터와 똑같은 양의 연료를 공급하도록 연료공급 라인에 여분의 인젝터를 병렬로 연결, 메스실린더를 사용하여 4번째 인젝터로부터 엔진에 공급되는 연료의 양을 측정하였다. 연료량 조절을 위하여 그림에서와 같이 가변저항기(rheostat)를 4번째 인젝터와 여분의 인젝터에 연결하여 인젝터로 공급되는 전압을 변화시켜 연료분사 기간을 조절하여 공급연료량과 당량비를 조절하였다.

또한 본 연구에서는 이러한 가변저항기를 인젝터와 연결하여 연료의 불완전분사에 기인하는 부분실화 및 완전실화 발생장치로 작동되도록 하였다.

4.2 이온전류 및 breakdown 전압 검출 회로

본 연구에서는 연소실내 이온전류 및 breakdown 전압을 측정하기 위하여 Fig.2와 같은 전기 회로를 제작하였다. 그림에서와 같이 4번 스파크플러그를 이온프루브로 겸용하기 위하여 배

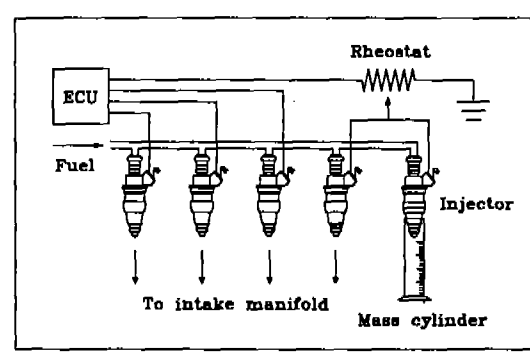

Fig.1 Schematic diagram of injection measurement and control system

전기(distributor)로부터 스파크플러그로 연결된 전선의 중간에 bias 전압공급을 위한 전기회로를 제작하여 연결하였다. 즉, 상용 전원 110V를 이용하여 스파크플러그의 두 전극 사이에 약 3kV의 바이어스 전압을 발생시키도록 하였다. 다이오드 D1과 D2는 스파크플러그 점화장치와 breakdown 전압 측정장치 사이에서 발생하는 비정상 전류를 제거하기 위해 사용되었다. 저항 R1은 breakdown 전압의 조절을 위해 사용되었고, 출력신호는 저항 R2와 R3의 비인 R2/R3의 비로 얻어지며, 이는 자료취득 장치인 CAMAC 시스템의 아날로그/디지탈 변환기를 거쳐 컴퓨터로 전송된다.

4.3 실험조건 및 방법

Table 1은 본 연구에서 설정한 실험조건을 나타낸 것으로 당량비, 엔진회전수, 토오크 등을 변화시켰다.

5. 실험 결과

5.1 정상연소(normal combustion)와 완전실화(total misfire)의 비교

Fig.3과 Fig.4는 각각 공회전 상태에서 정상연소와 완전실화 발생시 임의의 사이클의 크랭크각도의 변화에 따른 압력 및 breakdown 전압신호의 변화를 나타내고 있다. 각각의 breakdown 전압신호에서 크랭크각도 0° 부근의 스파크 펄스(spark pulse)는 혼합기의 점화를 위해 배전기(distributor)로부터 발생된 스파크 신호이며, 나머지 미소 스파크 펄스는 전자기적 노이즈(electromagnetic noise)에 의해 발생된 신호이다. Fig.3과 Fig.4의 압력신호는 각각 정상연소와 완전실화의 발생을 잘 나타내 주고 있다. 정상연소와 완전실화 발생시 크랭크각도 180° 부근에서 각각의 breakdown 전압신호가 매우 뚜렷이 구

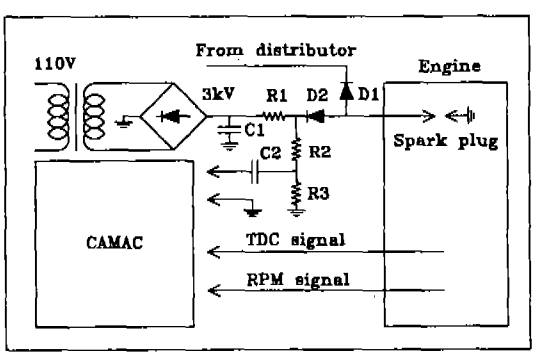

Fig.2 Schematic diagram of breakdown voltage detection system

Table 1 Experimental parameters

Constant of experimental test	Experimental parameters
idling	equivalence ratio : 0~1.27
engine load : 25% of full load for each rpm	engine speed : 1500, 2000, 2500, 3000, 3500rpm
engine speed : 2000rpm and normal combustion	engine load : 1/4, 2/4, 3/4, 4/4

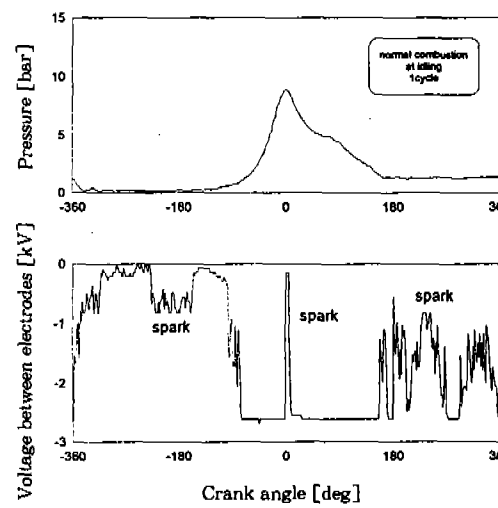

Fig.3 Combustion pressure [top] and breakdown voltage diagram [bottom] of 1 cycle in case of the normal combustion at idling

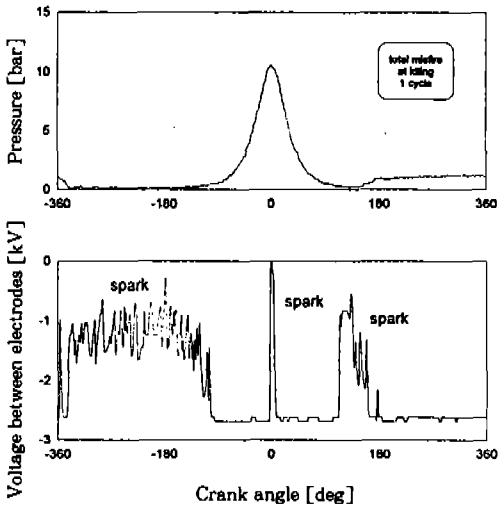

Fig.4 Cylinder pressure [top] and breakdown voltage diagram [bottom] of 1 cycle in case of the total misfire at idling

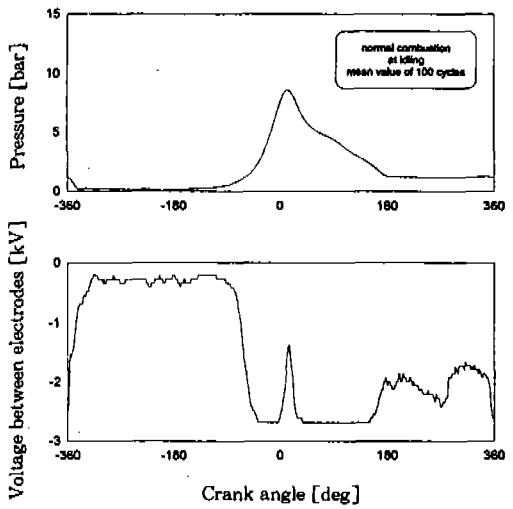

Fig.5 Combustion pressure [top] and breakdown voltage diagram [bottom] of mean value of 100 cycle in case of the normal combustion at idling

별됨을 알 수 있다. 즉, 정상연소에서는 크랭크각도 160°부근에서 신호변화가 발생하기 시작하며, 완전실화에서는 크랭크각도 110° 부근에서 신호변화가 발생하기 시작한다. 이는 breakdown 전압신호가 연소실내 압력에 매우 민감하게 반응한다는 것을 보여주는 예로서, 정상연소인 경우에는 연소에 기인하는 연소실 압력상승이 실화인 경우에 비하여 매우 크기때문에 배기밸브가 열리더라도 부압이 증가되지 않은 것에 기인하는 것으로 판단된다. 또한 크랭크 각도 0° 이전에서의 breakdown 전압신호를 비교하여 보면 정상연소시의 두 전극간의 전압차가 완전실화 발생시의 두 전극간의 전압차보다 현저히 작음을 알 수 있는데 이는 두가지 경우간의 연소실내 압력외에 온도차에 의해서도 변화한다는 것을 보여준다. 이들의 결과로부터 breakdown 전압신호는 연소실 압력에는 반비례하고 온도에는 비례하는 관계가 있음을 알 수 있다. 이처럼 breakdown 전압신호는 연소압력뿐만 아니라 연소온도 및 연소실내의 전자기적 물질에 의해서도 영향을 받으며 특히 내연기관의 적용에서는 압력이 가장 민감한 역할을 한다는 것이 확인되었다.

Fig.5와 Fig.6은 각각 공회전 상태에서 정상연소와 완전실화 발생시 크랭크각도의 변화에 따른 압력 및 breakdown 전압 신호의 100 사이클을 평균한 그림으로, 압력신호는 각각 정상연소와 완전실화의 발생을 잘 나타내 주고 있다. 특히, 크랭크각도 180° 부근에서 각각의 breakdown 전압신호는 매우 뚜렷이 구별되고 있으며, 또한 크랭크각도 0° 이전에는 각각 두 전극간의 전압차에서 현저한 차이가 있음을 확인할 수 있다. 본 연구에서는 이러한 breakdown 전압신호를 정량화하여 실화의 강도를 수치적으로 나타내기 위하여 breakdown 전압신호에 Fourier 변환을 적용하여 Fig.7와 같은 스펙트럼 신호(spectrum signal)를 취득하였다. Fig.7의 스펙트럼 신호에서 알 수 있는 바와 같이 정상연소와 완전실화 발생시 각각 a2(10Hz)에서의 진폭(amplitude)이 현저한 차이를 나타내고 있다. 따라서 본 연구에서는 각각의 breakdown 전압신호에 대한 스펙트럼 분석(spectrum analysis)을 수행하였으며, 다음과 같은 harmonic coefficient K를 도입하여 실화의 강도를 수치화 하였다.

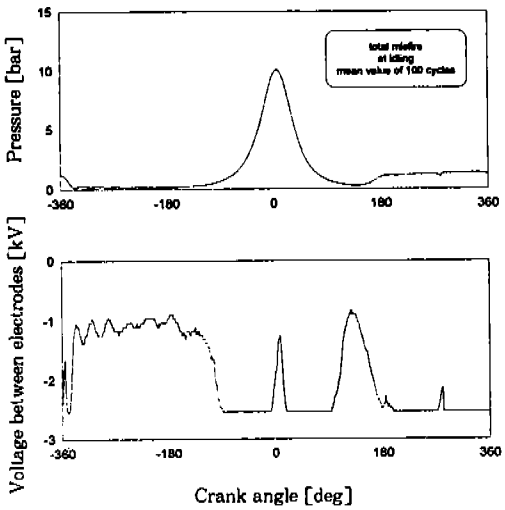

Fig.6 Cylinder pressure [top] and breakdown voltage diagram [bottom] of mean value of 100 cycle in case of the total misfire idling

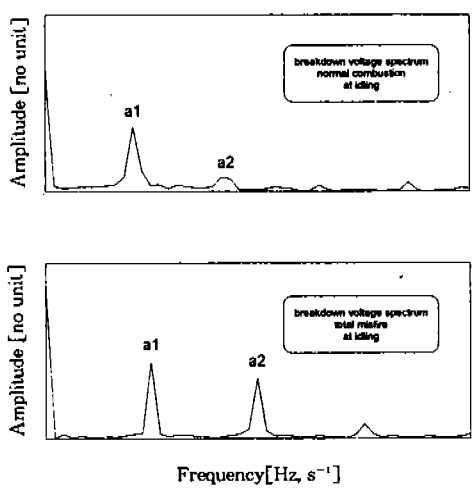

Fig.7 Spectral analysis of breakdown voltage in case of the normal combustion [top] and total misfire [bottom] at idling

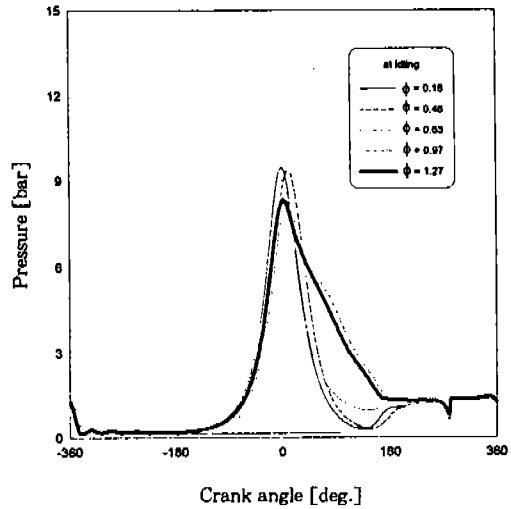

Fig.8 Combustion pressure diagram according to the equivalence ratio ϕ at idling

$$K=\frac{a2}{a1}$$

여기서, a1 = the first(fundamental) harmonic amplitude

a2 = the second harmonic amplitude

5.2 당량비 변화의 영향

Fig.8과 Fig.9는 각각 공회전 상태에서 당량비의 변화에 따른 압력 및 breakdown 전압의 변화를 나타낸다. Fig.8의 압력신호에서와 같이 당량비가 감소함에 따라 모터링시의 압력신호에 가까워짐을 알 수 있다. 특히 당량비가 0.63보다 작은 경우에는 각각의 압력신호가 모터링시의 압력신호와 유사함을 알 수 있으며 이로부터 비정상연소인 실화가 발생함을 예측할 수 있다. Fig.9는 각 당량비 변화에 따른 breakdown 전압 신호의 임의 cycle을 FFT를 이용하여 취득한 breakdown 전압신호이다. 그림에서와 같이 크랭크각도 180° 부근에서는 당량비의 변화에 따라 breakdown 전압 신호가 매우 상이함을 알 수 있으며, 특히 크랭크각도 180° 부근에서 당량비가 0.63

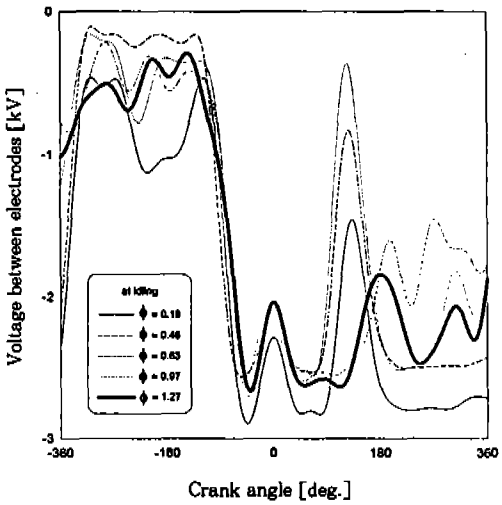

Fig.9 Breakdwon voltage diagram according to the equivalence ratio ϕ at idling

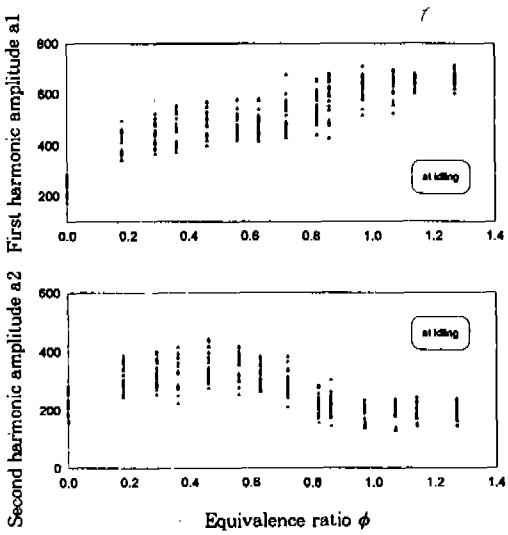

Fig.10 First [top] and second harmonic amplitude [bottom] according to the equivalence ratio ϕ at idling

보다 작은 경우에는 각각 breakdown 전압신호가 같은 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다. 이 경향을 Fig.8의 압력신호와 비교하여 보면 전술한 바와 같이 압력변화가 breakdown 전압 신호 변화에 주요한 영향을 준다는 것을 알 수 있다.

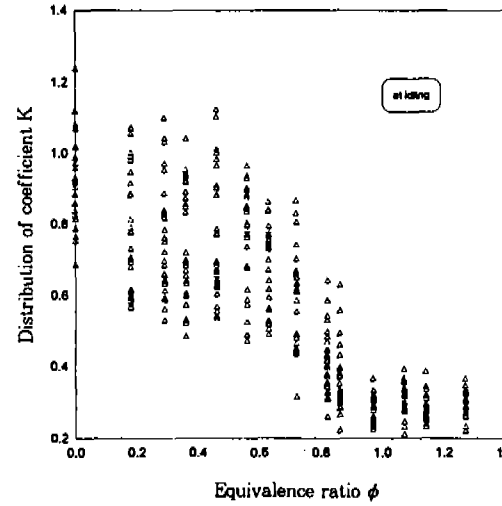

Fig.11 Distribution of harmonic coefficient K according to the equivalence ratio ϕ at idling

Fig.10은 각각 공회전 상태에서 당량비의 변화에 따른 first harmonic amplitude a1과 second harmonic amplitude a2의 변화를 나타낸다. 공회전 상태에서는 연소변동이 급격하므로 각각의 당량비에서 30 points의 자료를 취득하였다. 그림에서와 같이 진폭 a1, a2 모두 당량비가 감소함에 따라 그 변동영역이 증가함을 알 수 있는데 이 현상은 연료희박 영역에서 매 cycle마다 연소현상의 불안정성으로 판단된다. 반면에 정상연소(ϕ=1부근)에 가까워질수록 연소는 안정되어져 진폭 a1, a2의 변동영역이 상대적으로 감소함을 알 수 있다.

Fig.11은 Fig.10의 진폭 a1, a2로부터 취득한 harmonic coefficient K의 분포를 나타낸 그림이다. 당량비가 감소함에 따라 harmonic coefficient K의 변동영역이 급격히 증가하고 있음을 쉽게 알 수 있으며 반면에 정상연소에 가까워질수록 이러한 harmonic coefficient K의 변동치는 급격히 감소하여 0.2~0.4 사이에 안정적으로 분포함을 알 수 있다.

Fig.12는 Fig.11 harmonic coefficient K의 평균치를 나타낸다. 그림에서와 같이 당량비의 변화에 따라 harmonic coefficient K가 뚜렷이

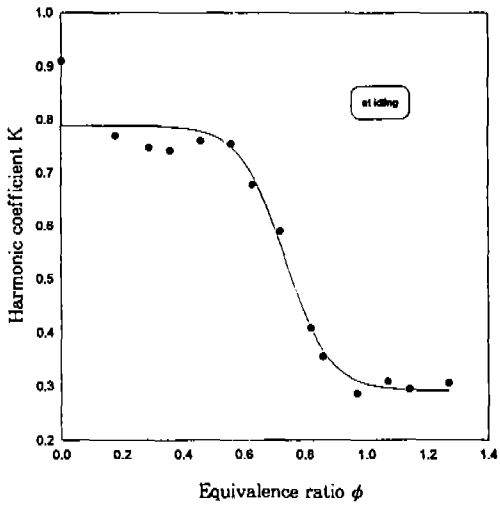

Fig.12 Harmonic coefficient K according to the equivalence ratio ϕ at idling

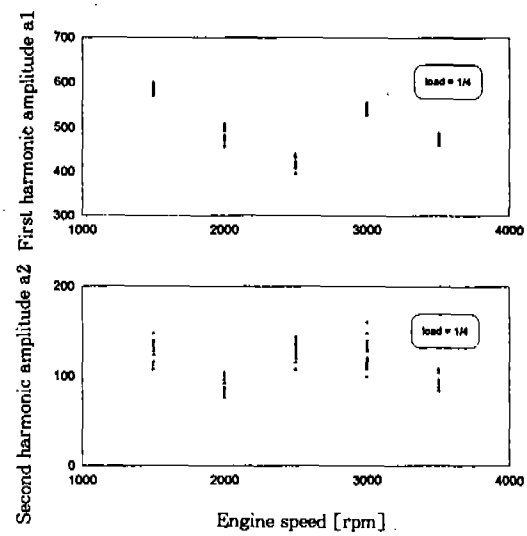

Fig.14 First [top] and second harmonic amplitude [bottom] according to the engine speed at 1/4 load

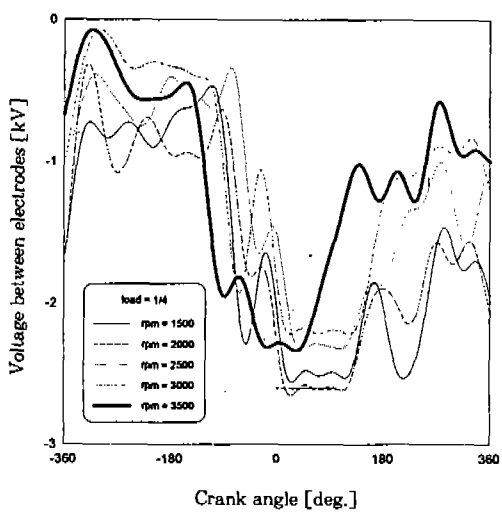

Fig.13 Breakdown voltage diagram according to the engine speed at 1/4 load

구별됨을 알 수 있다. 당량비 0~0.6까지는 Fig. 8의 압력신호와 잘 일치하듯이 강한 실화의 발생으로 판단되며, 이때 harmonic coefficient K는 0.7~0.8 사이에 분포한다. 또한 당량비 0.6~0.9까지는 강한 실화와 정상연소 사이의 과도기적 상태(transient state)임을 이해할 수 있다. 당량비 0.9~1.2까지는 정상연소로 판단되며, 이때 harmonic coefficient K는 대략 0.3에 가깝다.

5.3 엔진회전수 변화의 영향

Fig.13은 각각 정상연소 상태의 1/4 부하에서 엔진회전수를 변화시키면서 취득한 임의의 사이클에 대한 breakdown 전압 신호를 FFT를 이용하여 취득한 것이며 또한 Fig.14는 Fig.13과 동일한 조건에서의 first harmonic amplitude a1과 second harmonic amplitude a2의 변화를 나타낸 그림이다. 전술한 바와같이 공회전 상태보다 연소가 안정되어 있으므로 각각의 엔진회전수에서 진폭 a1, a2의 변동치가 공회전 상태의 진폭 a1, a2의 변동치보다 작음을 알 수 있다.

Fig.15는 각 정상연소 상태의 1/4 load에서 엔진회전수의 변화에 따른 harmonic coefficient K의 분포 및 평균치를 나타낸 것으로서 harmonic coefficient K의 값이 공회전 상태의 정상연소시(K=0.3부근)보다 적어진 K=0.2~0.3으로 나타났다.

5.4 엔진부하 변화의 영향

Fig.16은 2000rpm 정상연소 상태에서 엔진

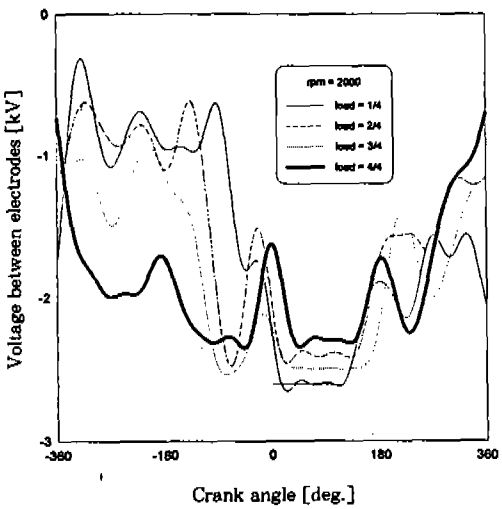

Fig.15 Distribution of harmonic coefficient K [top] and harmonic coefficient K [bottom] according to the engine speed at 1/4 load

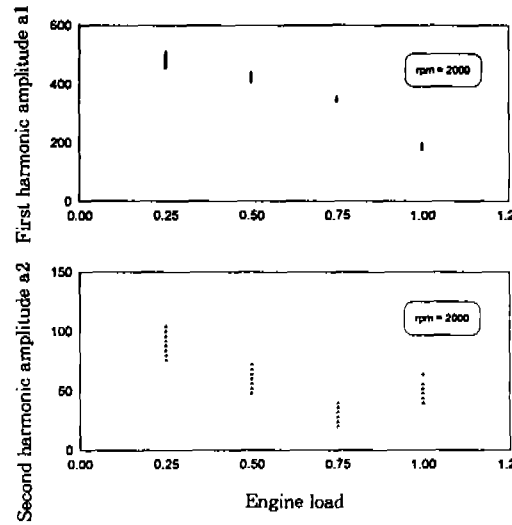

Fig.17 First [top] and second harmonic amplitude [bottom] according to the engine load at 2000 rpm

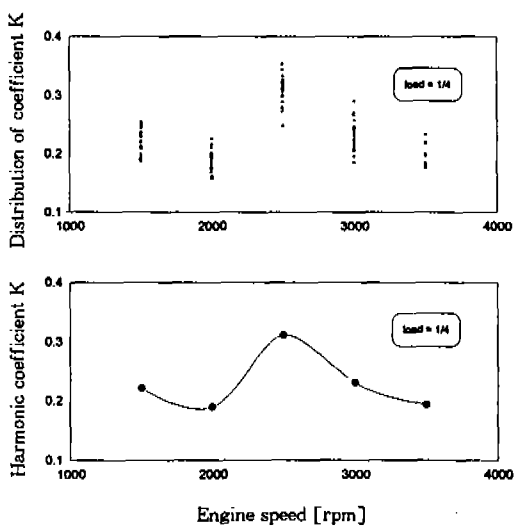

Fig.16 Breakdown voltage diagram according to the engine load at 2000 rpm

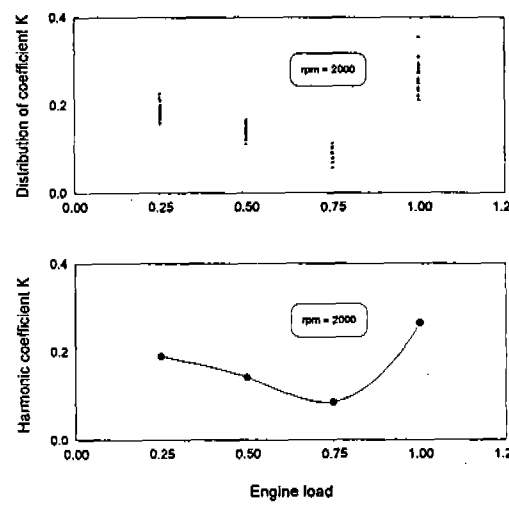

Fig.18 Distribution of harmonic coefficient K [top] and harmonic coefficient K [bottom] according to the engine load at 2000 rpm

부하 변화에 따른 breakdown 전압 신호의 임의 사이클을 FFT를 이용하여 취득한 breakdown 전압 신호이며 Fig.17은 Fig.16과 동일한 조건에서의 first harmonic amplitude a1과 second harmonic amplitude a2의 변화를 나타낸 그림이다. Fig.14의 경우와 마찬가지로 공회전 상태보다 연소가 안정되어 있으므로 그림에서와 같이 각 부하에서 진폭 a1, a2의 변동치가 공회전 상태의 진폭 a1, a2의 변동치보다 작음을 알 수 있다.

또한 Fig.18은 동일한 조건에서의 harmonic coefficient K의 분포 및 평균치를 나타낸 것으로 harmonic coefficient K의 값이 공회전 상태의 정상연소시(K=0.3부근)보다 적어진 K=0.1~0.3으로 나타났다.

6. 결 론

본 연구는 점화를 목적으로 장착된 기존의 스파크플러그를 이온센서로 겸용하는 방식을 채택하여 보다 진보된 이온전류 해석(breakdown 전압 신호의 해석) 방법을 도입함으로서 향후 실차에서도 적용 가능한 새로운 시스템을 개발하는데 그 목적을 두었으며 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 스파크플러그 두 전극간에 약 3kV의 바이어스 전압을 인가시켜 얻은 breakdown 전압 신호의 분석을 통하여 연소실내의 연소현상은 본 연구에서 도입한 harmonic coefficient K와 밀접한 관계가 있음을 알았다.
2) 공회전 상태에서 당량비 0~0.6(강한 실화)까지 K는 0.7~0.8 사이에 분포하며, 당량비 0.6~0.9까지는 강한 실화와 정상연소 사이의 과도기적 상태(K는 0.3~0.7)이며, 당량비 0.9~1.2(정상연소)까지의 K는 0.3으로 나타났다.
3) 정상연소 상태의 1/4 부하에서 엔진회전수를 변화시키면서 구한 조화계수(harmonic coefficient) K는 0.2~0.3에 분포하였다.
4) 정상연소 상태의 2000rpm에서 엔진부하를 변화시키며 구한 harmonic coefficient K는 0.1~0.3 사이에 분포하였다.
5) 본 연구에서 적용한 breakdown 전압 신호의 분석방법은 연소성, 특히 실화의 진단방법으로 매우 유용하며 이를 연소제어 시스템과 병용한다면 엔진 연소실내의 연소진단에 효과적으로 사용될 수 있다.

참 고 문 헌

1. 송재익, 노석홍, "희박 연소 기관의 연구동향", 한국자동차공학회 1992년도 기관, 공해, 연료 및 윤활유 부분 학술강연 초록집, pp. 33, 1992
2. 정영식, "가솔린-알코올 혼합연료의 연소 및 배기 특성에 관한 연구" 인하대학원 기계공학과(열 및 유체전공) 박사학위논문, 1995
3. Yuichi Shimasaki, Masaki Kanehiro, et al., Shigeru Miyata, "Spark Plug Voltage Analysis for Motoring Combustion in an Internal Combustion Engine", SAE paper 930461, 1993
4. 이성렬, "내연기관", pp. 183, 1995
5. John B. Heywood, "Internal Combustion Engine Fundamentals", pp. 427~450, 1988
6. 이홍주, 은정표, "자동차 정비공학", pp. 315~325, 1993
7. S. De Jaegere, J. Deckers and Van Tiggelen, "Identity of the most Abundant Ions in Some Flames", pp. 155~160
8. G. Wortberg, "Ion-concentration Measure-ments in a Flat Flames at Atmospheric Pressure", Tenth Symposium(International) on Combustion, pp. 651~655, The Combustion Institute, 1965
9. A. Feugier and A. Van Tiggelen, "Identification of Negative Flame-ions", Tenth Symposium(international) on Combustion, pp. 621~624, The Combustion Inst., 1965.

10. H. F. Calcote, S. C. Kurzius and W. J. Miller, "Negative and Secondary Ion Formation in Low-pressure Flames", Tenth Symposium(International) on Combustion, pp. 605~619, The Combustion Inst., 1965
11. H. F. Calcote, "Ion Production and Recombination in Flames"
12. Takeyuki Fueno, Nalin R. Mukherjee, T. Ree and Henry Eyring, "Mechanism of Ion Formation in High-temperature Flames", pp. 222~229
13. H. F. Calcote and I. R. King, "Studies of Ionization in Flames by Means of Lanmuir Probes", pp. 423~434
14. B. E. L. Travers and H. Williams, "The Use of Electrical Probes in Flame plasmas", Tenth Symposium(International) on Combustion, pp. 657~672, The Combustion Institute, 1965
15. D. B. Olson and H. F. Calcote, "Ions in Fuel-rich and Sooting Acetylene and Benzene Flames", pp. 453~462
16. V. I. Vedeneyev, L. V. Gurvich, V. N. Kondratiev et al, "Bond energies, ionization potentials and electron affinities", Arnold Press, London, 1966
17. Shigeru Miyata, Yasuo Ito and Yuichi Shimasaki, "Flame Ion Density Measurement Using Spark Plug Voltage Analysis", SAE paper 930462, 1993
18. James Lawton, Feliz J. Weinberg, "Electrical Aspects of Combustion", Clarendon press, OXFORD, pp. 6~7, 1969.
19. Ko Terada and Shin Suzuki, "Measuring Ignition Combustion by Detecting Ionization Current", Internal Comb. Engines Vol. 17, 1978
20. H. F. Calcote, "Ion and Electron Profiles in Flames", 9th Symposium on combustion, Academic, New York
21. Kim Yongkil, "Effect of Operating Conditions on flame Conductivity", JSAE Vol. 21 No. 10, 1967
22. B. D. Peters, "Mass Burning Rates in a SI Engine Operating in the Partial-burn Regime", Conference Proceedings on Fuel Economy and Emissions of Lean Burn Engines, Institution of Mechanical Engineers, London, June 12~14, 1979, paper C92/79