

가솔린기관에서 스파크플러그를 이용한 노크 및 실화의 동시검출시스템 개발에 관한 연구

A Study on the knock and misfire detection system using
by Spark-plug in a Gasoline Engine

조민석*, 박재근*, 황재원*, 채재우**
MinSerk Jo, JaeKeun Park, JaeWon Hwang, JaeOu Chae

ABSTRACT

Knock and misfire, kinds of abnormal combustion, are highly undesirable effect on the internal combustion engine. So, it is important to detect these abnormal combustion and control the ignition timing etc. to avoid these mal-effect factors in real engine system. In this study, the system which detects the knock and the misfire using by spark plug is presented. This system is based on the effect of modulation breakdown voltage(BDV) between the spark gaps. The voltage drop between spark plug electrodes, when an electrical breakdown is initiated, depends on the temperature and pressure in combustion chamber. So, we can detect knock and misfire that produce changes in gas temperature and pressure (consequently, its density) using by BDV signal change which carries information about the character of combustion.

주요기술용어 : Knock detection(노크검출), Misfire detection(실화검출),
Spark-plug gap(점화플러그 간극), Breakdown voltage(브레이크다운 전압)

1. 서론

최근 환경문제와 에너지문제가 대두됨에 따라, 모든 산업분야에서 이를 해결하기 위한 방법을 모색하고 있는 가운데, 자동차 산업 역시

이를 대처하기 위한 많은 연구가 이루어지고 있다. 그 중에서도 특히 자동차로부터 배출되는 유해배기가스문제는 사회적으로 그 인지도가 높아짐에 따라, 각 국가에서 이를 위한 기구를 설립하고 정책적으로 규제를 가함으로써 심각성이 더해 가고 있다. CARB (Califor-

* 정회원, 인하대학교 기계공학과 대학원

** 정회원, 인하대학교 기계공학과

nia Air Resource Board)나, OBD-II(On-Board Diagnostic-II)규제 등이 이러한 일례들이다.

엔진의 배기가스 중에서 유해성분은 주로 엔진 연소실내 혼합기의 이상연소에 의한 불완전연소에 기인하며, 이러한 불완전연소는 가연 혼합기에 점화가 되지 않는 실화(misfire) 현상, 그리고 점화가 되더라도 부분적으로 연소가 발생하는 부분연소와 공연비의 부조화로 인하여 발생한다. 이 중 실화는 촉매에서의 후연소로 인해 촉매온도의 급격한 상승을 유발하여 삼원촉매장치에 치명적인 손상을 줌으로 배기가스 제어시스템의 기능을 마비시켜 유해배기가스인 HC, NOx 및 CO등을 다량 배출시킨다^{2,2)}.

또한, 엔진에 대하여 최근 고효율, 고성능 및 저공해 유지를 위한 요구가 대두됨에 따라 효율과 출력을 동시에 높이기 위해 엔진의 압축비가 계속 증가하고 있다. 그러나 이러한 압축비 증가는 노크의 발생을 용이하게 하므로 그 한계점을 가지고 있다. 이에 엔진의 출력 및 열효율의 향상에 가장 문제가 되는 노크 현상에 대한 관심이 고조되고 있으며, 더욱 정확한 노크 검출을 위하여 고정밀도의 센서와 장착방법, 자료 취득 방법 그리고 자료 보정 기법 등이 활발히 개발되고 있다. 실차 엔진에서는 노크를 방지하기 위해 출력의 손실을 감수하면서 점화시기를 최적점화시기(MBT timing)로부터 어느 정도 지연시켜 노크를 방지하고 있는 경우가 많다. 그러므로 노크에 의한 엔진 손상을 피하면서 노크 한계 근처의 점화시기를 설정하여 연비 및 출력 손실을 최소화하기 위해서는 보다 정확한 노크 검출 방법이 요구된다^{3,4)}.

이에 본 연구에서는 스파크 점화기관에서 가장 중요하게 인식되어지는 제어요소인 실화와 노크를 동시에 검출할 수 있는 시스템을 개발하고자 한다.

2. 이론적 고찰

Fig. 1에 나타낸 것과 같이 평행평판 전극을 비교적 낮은 압력의 기체 중에 놓고 전원을 공급하여주면, Fig. 2와 같은 전압-전류의 특성곡선을 구할 수 있다.

Fig. 1에서 초기의 전류는 간극 사이를 흐르지 못하지만, 계속해서 전압을 상승시켜 인가하면 임의의 순간에 급작스러운 전류의 도통으로 방전이 일어나게 된다. 이때의 조건을 스파크 조건(sparking criterion), 또는 자속방전 조건(self-sustained discharge criterion)이라고 부르며, 이러한 스파크 방전조건을 성립시키는 데 필요한 인가전압을 브레이크다운전압(breakdown voltage, 이하 BDV)이라고 한다.

BDV는 실제로 실린더내의 스파크플러그 전극 사이에서 전기적 브레이크다운을 유발시키

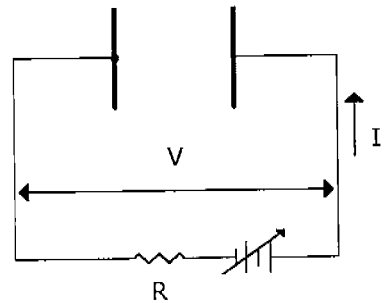


Fig. 1 V-I measuring circuit with parallel electrodes

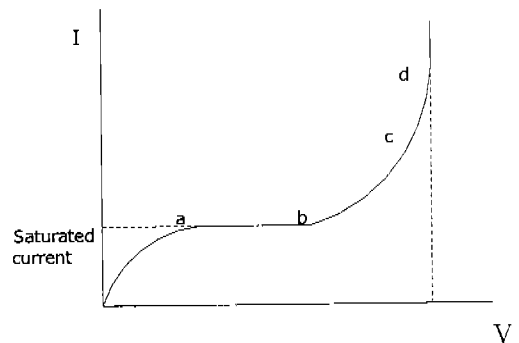


Fig. 2 V-I characteristics with parallel electrodes

는데 필요한 전압을 말한다. 이 때 스파크플러그 간극 사이에 존재하는 가스의 상태는 엔진의 작동에 따라 변화하는데, 이로 인해 스파크플러그 간극에서 브레이크다운을 발생시키는 전압도 역시 변하게 된다.

1889년에 파쉬엔(Paschen)은 일정한 간격 d 를 사이에 둔 상태에서 전극 사이에 고전압을 인가하면 임의의 전압이상에서 브레이크다운현상이 일어나는 것을 고찰하였는데, 이 때 발생하는 브레이크다운전압이 간극 사이의 가스 조성, 압력, 온도 및 거리에 영향을 받는다는 사실을 발견하였다. 그 주요 내용은 간극 사이의 브레이크다운전압이 비록 선형은 아니지만 압력과 간극 사이의 거리와 비례한다는 사실이다. 그 이후 수 많은 연구결과를 통하여 브레이크다운전압이 온도와 압력뿐만 아니라 가스의 조성, 이온화, 분진 및 표면의 거칠기 등에도 영향을 받는다는 것을 알게 되었다.

브레이크다운전압현상에 온도의 영향을 고려하기 위해서는, 가스 밀도 n 이라는 변수를 도입하여야 하는데, 이것은 단위체적당에 존재하는 가스입자의 수를 나타내는 것이다.

이상기체의 경우에 있어서 다음과 같은 식이 성립하게 된다.

$$n = \frac{P}{kT} \quad (1)$$

여기서 P 는 압력, T 는 온도, k 는 볼츠만(Boltzmann)상수($=1.38054 \times 10^{-23}$ J/K)를 의미한다. 그리고 일정한 d 와 n 의 조건하에서 브레이크다운전압 V_s 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$V_s = f(n \cdot d) \quad (2)$$

위의 식 (1)과 (2)는 파쉬엔의 법칙(Paschen's law)을 나타내고 있는데, 만약 n 과 d 의 변화가 넓은 영역에 걸쳐 일어난다면, $n \cdot d$ 값은 브레이크다운전압을 결정하는 중요한 인자가 된다.

본 연구에서는 파쉬엔의 법칙을 통해 온도가 높을수록, 압력이 낮을수록 브레이크다운전압이 낮아지는 것을 알 수 있었으며, 이러한 브

레이크다운전압 특성을 이용하여 연소실내에서의 실화와 노크 및 연소특성을 파악하고자 하였다.

3. 실험장치 및 방법

본 연구의 실험 장치 개략도를 Fig. 3에 나타내었다. 본 연구에 사용된 엔진은 4기통 MPI 연료분사시스템 가솔린 엔진으로 4번 실린더헤드에 압력센서를 장착하여 압력 신호를 취득하였으며, 배전기와 스파크 플러그 사이에 BDV 발생 및 검출 시스템을 병렬로 설치하여 30kV의 바이어스전압을 인가하였다. Fig. 4는 BDV 발생 및 검출 시스템회로도이다. 기초실험을 통해 배기행정 중의 브레이크다운 임계점은 약 2kV 정도임을 알 수 있었으며, 연소시의 압력과 온도 및 스파크플러그의 마모로 인한

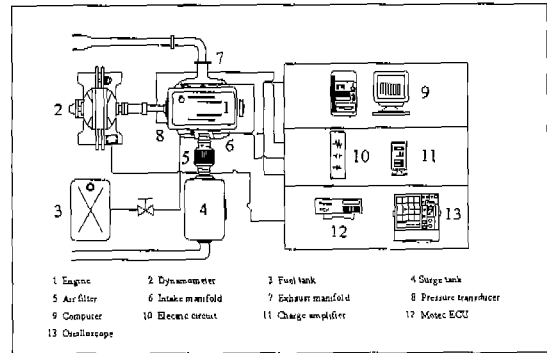


Fig. 3 Schematic diagram of the experimental apparatus

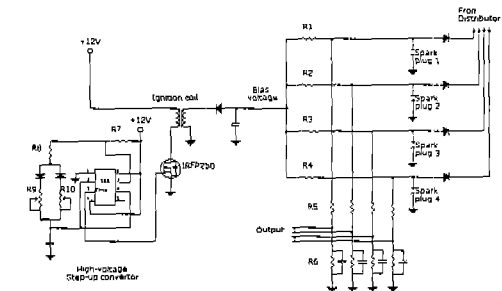


Fig. 4 Breakdown voltage measurement circuit

영향을 고려한다면, 적어도 3~4kV정도의 바이어스 전압이 요구된다. 하지만, 본 연구에서는 실화 노크이외에 몇 가지 연소 현상을 동시에 검출하고자 30kV의 바이어스 전압을 인가하였다. 각 실린더의 스파크플러그 간극에서 발생하는 BDV 신호는 오실로스코프를 사용하여 취득하였다.

본 연구에서는 실화를 발생시키기 위해 엔진에 장착되었던 ECU를 Motec사의 연구목적 ECU로 교체하였다. Motec ECU에서는 인젝터에서 분사되는 연료량과 점화시기의 제어가 가능하다.

데이터 취득시 동일 실험 조건하에서 50 사이클에 해당하는 연소실의 압력 자료를 연속적으로 취득하였으며, 또한 각각의 실험 조건마다 흡입 공기의 온도, 대기의 온도, 압력 그리고 엔진 각 부위의 온도, 점화진각, 공연비 등을 측정하였으며, 또한 동력계로부터 토크와 회전속도를 측정하였다.

본 연구에서는 노크를 검출하기 위해 점화시기를 실린더 압력데이터를 기준으로 노크가 발생하지 않는 최대제동토크(MBT)까지 충분히 진각시킨 후, 이 지점을 노크발생시의 신호와 비교하기 위한 기준값으로 설정하였다. 노크강도를 증가시키는 방법으로 이 지점부터 크랭크 각도 5° 단위로 20°까지 4단계로 진각시켰다. 엔진 회전속도 및 부하는 동력계 제어기의 정속 운전 모드로 제어하였다. 엔진속도는 1800rpm에서 3000rpm까지 3단계로 수행하였으며, 부하는 9kgf·m로 하였다. 실화를 임의로 발생시키기 위해 Motec ECU에서의 Fuel trim 기능을 사용하여 0%부터 -50%까지 10%단위로 6단계로 나누어 실험하였으며, 완전실화는 4번 실린더의 인젝터로 들어가는 신호를 차단하여 실험하였다. 위와 같은 방법으로 노크 및 실화를 임의로 발생시킨 후, 본 연구 시스템을 통하여 검출하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 노크검출

Fig. 5 ~ Fig. 7은 엔진의 회전속도를 1800, 2400, 3000rpm으로 고정하여 각 엔진회전속도의 최대부하상태에서 BDV와 실린더내 압력을 크랭크 각도에 따라 나타낸 그림이다. 각각의 조건에서 점화진각을 일정한 간격으로 진각시

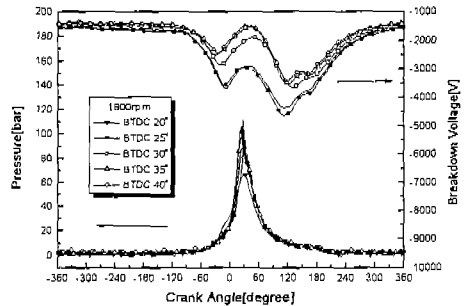


Fig. 5 BDV and Pressure according to crank-angle at 1800rpm

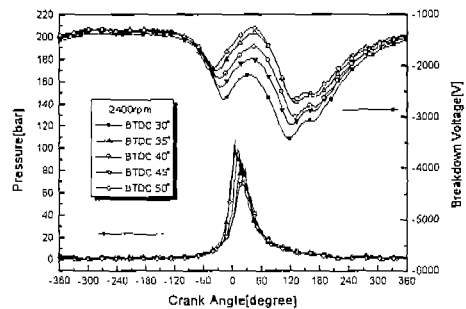


Fig. 6 BDV and Pressure according to crank-angle at 2400rpm

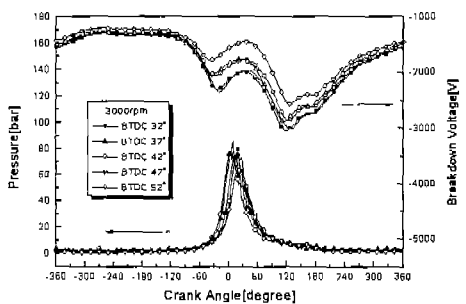


Fig. 7 BDV and Pressure according to crank-angle at 3000rpm

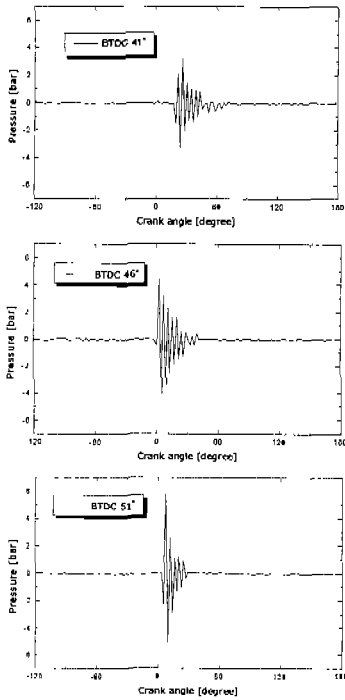


Fig. 8 Knock intensity by low-pass filtering in 1800rpm

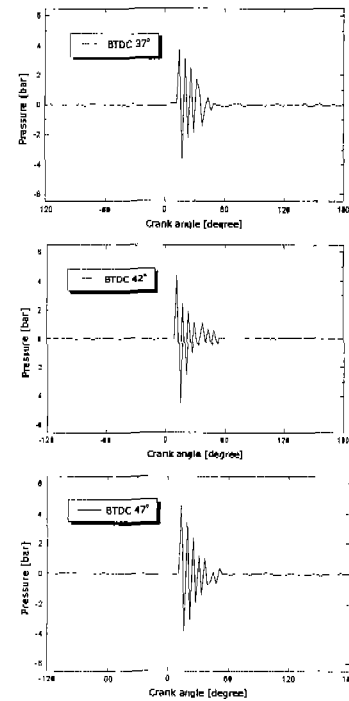


Fig. 9 Knock intensity by low-pass filtering in 2400rpm

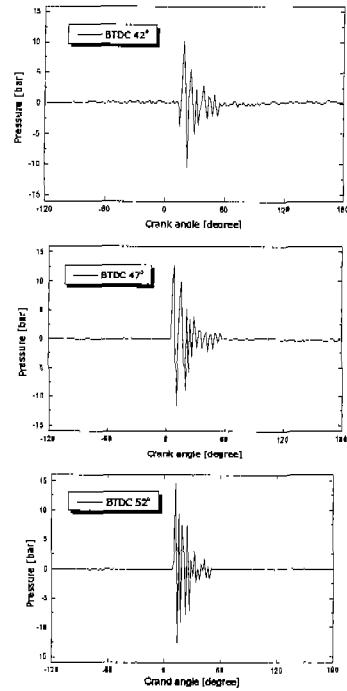


Fig. 10 Knock intensity by low-pass filtering in 3000rpm

켜 노크강도를 증가시켰으며, 그에 따른 조건에서 BDV와 실린더내 압력의 변화를 고찰하였다. 모든 엔진회전속도에서 공통적으로 점화진각이 증가함에 따라 연소구간에서 압력파는 증가하고, BDV는 감소하는 것을 알 수 있다. 그림에서 BDV는 (-)를 나타내는데, 이는 스파크플러그에 인가해주는 바이어스 전압이 (-)이기 때문이다.

본 연구에서는 노크를 검출하기 위하여 크랭크각도 $0^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 를 노크 검출 구간으로 설정하고, BDV를 분석하였다. 이 구간을 검출영역으로 설정한 근거는 압력 데이터에서 노크 압력파가 공통적으로($0^{\circ} \sim 60^{\circ}$) 발생하며, 엔진 사이클에서 연소구간이 이 구간으로 알려져 있기 때문이다^[5].

노크검출 구간에서 노크강도가 증가할수록(점화시기 진각) BDV가 감소하는 이유는 노크가 발생할 때 실린더내 열에너지가 5배 이상 급격히 증가하며, 이러한 열에너지 증가

폭으로부터 그림에서 보여지는 압력증가폭보다 온도증가폭이 더 크다는 것을 알 수 있고, 그 결과 BDV가 감소함을 알 수 있다.

본 연구에서는 노크 신호를 해석함에 있어서 저역통과필터를 사용한 분석법을 이용하였다. Fig. 8 ~ Fig. 10은 엔진회전속도 1800rpm, 2400rpm, 3000rpm에서 점화각도를 최대제동토크(MBT)기준으로 5° 단위로 일정하게 진각시키며 노크가 발생하는 압력신호를 필터링하여 나타낸 것이며, 각각의 회전속도에서 점화진각이 증가할수록 최대 압력이 증가하는 것을 알 수 있다. 최대 노크강도는 임의의 한계 점화시기를 지나게 되면 연소실내에서 노크가 발생하는 것이 아니라 오히려 불완전연소가 발생하게 됨으로 불완전연소가 발생하기 직전의 한계 점화시기에서 발생하는 노크로 설정하였다

노크강도는 각 엔진회전속도에서 직접비교가 곤란하므로, 그림 Fig. 8 ~ Fig. 10에서의 최대 압력값을 노크강도로 정의한 후, 이를 무차원화하여 노크 비율로 나타내었다. 정상연소인 경우를 노크비율 0%(노크강도: $Knock_{0\%}$), 최대로 점화 시기를 진각한 경우의 노크비율을 100%(노크강도: $Knock_{100\%}$)로 정의하였으며, 각각의 점화진각에서 노크강도($Knock_{measured}$)를 노크비율로 정의하였다. 노크비율 정의식은 다음과 같다.

$$Knock(\%) = \left(\frac{Knock_{measured} - Knock_{0\%}}{Knock_{100\%} - Knock_{0\%}} \right) \times 100$$

Fig. 5 ~ Fig. 7에서 점화진각에 따라 노크강도가 증가할수록 BDV는 연소영역에서 감소한다는 것을 알 수 있으나, 노크비율에 따라 비교하기가 어렵기 때문에 BDV 역시 무차원화하여 BDV비율로 나타내었다. 우선 검출구간(0°~60°)에서 BDV의 평균값을 계산한 후, 일정한 압력 및 온도를 유지하는 압축 시작 크랭크각도(-180°)에서의 BDV와의 차이를 100분율로 나타내었다. BDV비율을 아래의 식과 같이

정상연소에서의 BDV를 0%, 최대노크강도에서의 BDV를 100%로 하여 각각의 경우에서의 BDV의 비율을 나타내었다.

$$BDV(\%) = \left(\frac{BDV_{Normal} - BDV_{Measured}}{BDV_{Normal} - BDV_{Knock100\%}} \right) \times 100$$

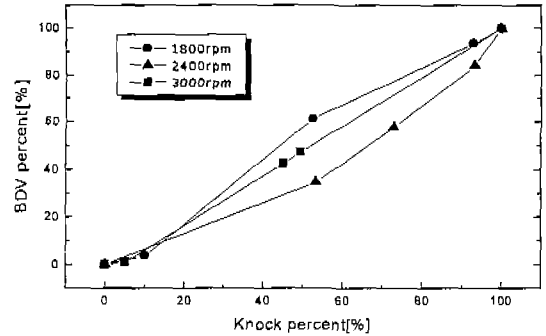


Fig. 11 BDV ratio according to knock intensity at 1800, 2400, 3000rpm

Fig. 11은 엔진회전속도 1800, 2400, 3000rpm에서 노크비율에 따른 BDV비율을 나타낸 것으로서, 모든 엔진의 회전수에 공통적으로 노크비율이 증가함에 따라 BDV비율이 선형적으로 증가하는 것을 알 수 있다. 따라서 모든 영역에서 노크강도의 기초 데이터만 있다면, BDV비율만으로 노크비율을 정의 및 검출이 가능함을 보여주고 있다.

4.2 실화검출

Fig. 12 ~ Fig. 14는 부부하시 각각의 엔진회전속도에서, 연료분사량을 Motec ECU를 사용하여 fuel trim 0, -10, -20, -30, -40, -50%로 변화시켜가면서 크랭크각도에 따른 실린더내 압력과 BDV의 변화상을 나타낸 그림이다.

모든 엔진회전속도에서 공통적으로 연료분사량이 감소할수록 BDV가 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 연료량이 줄면 열발생률이 감소하고 이로 인해 실린더내 연소가스온도가 감소하여 스파크플러그 간극의 가스온도에 반비례하는 BDV가 증가하기 때문이라고 사료된다. 특

히 연료감소 -40%이하부터는 BDV 증가폭이 커지는데, 그 이유는 엔진에서 연소 한계 연료/공기비가 약 0.6~0.7이므로 그 이하에서는 연소가 일어나지 않기 때문이라 사료된다. 그림들에서 특히 배기 행정에서의 BDV 증가가 뚜렷이 나타난다. 이는 배기 행정에서 실린더내 압력이 대기압보다 조금 높은 압력으로 일정하게 유지되므로 BDV를 결정하는 인자가 온도 한가지만 되기 때문이다. 그러므로 실화에 의한 온도 감소를 다른 행정에서보다 배기 행정에서의 BDV 변화를 통해 좀더 정확히 검출할 수 있으며, 이런 이유로 실화 검출을 위한 BDV 측정 구간을 배기행정 크랭크각도 (180° ~ 360°)로 정의하였다.

실화의 강도를 나타내는 방법으로 압력 신호를 획득 후 도시평균유효압력(imep)을 구하여 정의하였으며, 정상연소시를 실화강도 0%, 연료 차단 상태를 실화강도 100%로 하였다. 실화 강도를 나타내는 식은 다음과 같다.

$$Misfire(\%) = \left(\frac{imep_{Normal} - imep_{Measured}}{imep_{Normal} - imep_{Motoring}} \right) \times 100$$

또한, BDV를 비교값으로 나타내고자 실화 측정 구간(180°~360°)에서 BDV를 평균한 후, 압력이 일정하게 되는 크랭크각도(180°)에서의 BDV와의 차이를 100분율로 나타내었다. Fig. 14는 엔진회전속도 1800, 2400, 3000rpm에서 실화강도에 따른 BDV 변화비를 나타낸 것으로서, 엔진의 회전수에 관계없이 실화 강도가 증가할수록 BDV 변화비도 증가하는 것을 알 수 있으며, 특히 실화 강도 80% 이상(Fuel trim : -40 이상)에서는 정확히 정상연소와 실화를 검출할 수 있음을 보여 주고 있다.

실차에서는 여러 가지 원인으로 인하여 실화가 발생을 하나, 본 연구에서는 연소시의 연료량 감소에 의한 실화만을 고려하였다. 그러나 공통적으로 모든 종류의 실화는 불완전연소를 유발하고 이로 인한 배기가스의 온도저감현상이 동일하게 발생하므로, 본 연구에서의 연소

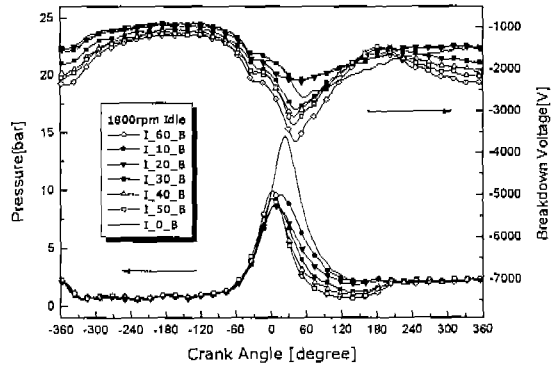


Fig. 12 BDV and Pressure according to crank-angle at 1800rpm, Idle

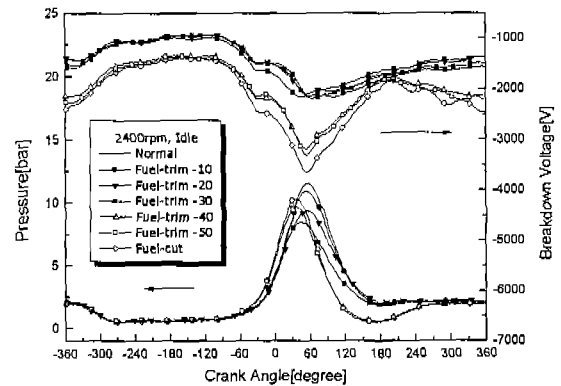


Fig. 13 BDV and Pressure according to crank-angle at 2400rpm, Idle

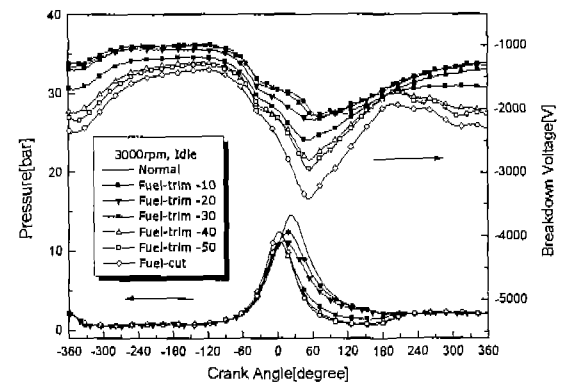


Fig. 14 BDV and Pressure according to crank-angle at 3000rpm, Idle

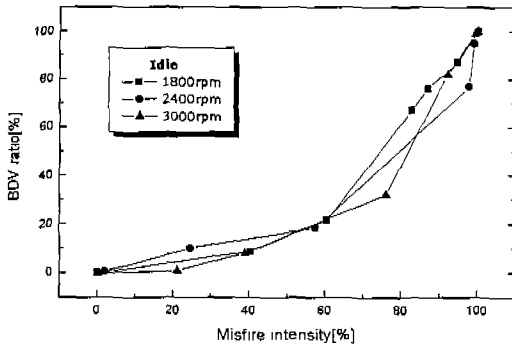


Fig. 15 BDV ratio according to misfire intensity at 1800, 2400, 3000rpm

가스의 온도저감 효과를 이용한 실화 검출 시스템을 사용하여 다른 원인으로 발생한 실화의 검출도 가능하리라 사료된다.

4. 3 노크 및 실화 동시 검출

Fig. 16은 실화 강도를 증가시켰을 경우(그림 위)와 노크 비율을 증가시켰을 경우(그림 아래) 크랭크각도에 따른 BDV 변화를 동시에 나타낸 것이다. 그림을 보게 되면 실화 강도가 증가할수록 BDV는 전체적으로 증가하는 반면, 노크 비율이 증가하게 되면 BDV는 감소한다.

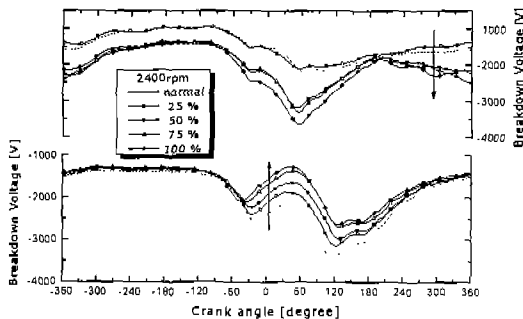


Fig. 16 Breakdown voltage and pressure data as a function of crank angle

이를 통해서 실화 발생 시 노크 검출 신호가 나오거나, 노크 발생 시 실화 검출 신호가 나오는 오류는 발생하지 않는다.

그리고 실차에서는 발생하는 경우가 아주 드물지만 실화와 노크가 동시에 발생하는 경우, BDV 신호에서 노크와 실화의 검출 구간이 다르기 때문에 동시에 개별적으로 검출이 가능하다.

5. 결 론

본 연구에서는 가솔린엔진에서의 이상연소현상인 실화와 노크를 검출하는 방법으로 스파크 플러그 간극에 마이어스전압을 인가해줌으로 브레이크다운 전압을 발생시켜 이로부터 얻은 신호변화를 해석함으로써 연소현상을 진단하는 방법을 제시하였다.

노크현상은 연소구간에 초점을 맞추었고, 실화현상은 배기구간에 초점을 맞추어, 각각의 엔진속도와 부하조건에서 BDV와의 관계를 도출하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 노크와 정상연소는 연소구간에서 온도가 차이나는 것으로 알려져 있으며, 본 연구에서는 이러한 온도차이로 발생하는 BDV 변화를 이용하여 노크의 발생유무 및 강도를 간접적으로 측정할 수 있었다.
2. 실화는 정상연소와 비교하여 혼합가스의 불완전연소로 인해 배기행정(180° ~ 360°)에서 연소가스 온도가 상대적으로 낮으며, 이로 인해 나타나는 BDV의 변화를 이용하여 실화강도를 간접적으로 측정 및 검출 할 수 있었다.
3. BDV 신호를 취득 후 분석하여 노크와 실화를 각각 다른 엔진행정 영역에서 서로 독립적으로 동시에 검출할 수 있었다.

참 고 문 헌

1. Jurgen Forster, Andrea Lohmann, Manfred Mezger, and Klaus Ries-Muller "Advanced Engine Misfire Detection for SI-Engine", SEA paper 970855.

2. Piero Mario Azzoni, Carlo Maria Pocreddu Cillone, Giorgio Rizzoni , "MisfireDetection in a High-Performance Engine by the Principal Component Analysis Approach", SAE paper 960622.
3. Zhihong Sun, Perry L. Blackshear and David B. Kittelson, "Spark Ignition Engine Knock Detection Using In-Cylinder Optical Probe", SAE paper 962103.
4. Bahman Samimy, Giorgio Fizzoni, "Engine Knock Analysis and Detection Using Time-Frequency Analysis", SAE paper 960618.
5. John B. Heywood, "Internal Combustion Engine Fundamentals", Mcgraw-hill international editions.
6. Samimy B, Rizzoni G, Leisenring K, Improved Knock Detection by Advanced Signal Processing, SAE paper 950845.
7. Auzins J, Hasse J, and Nytomt J, Ion-Gap Sense in Misfire Detection, Knock and Engine Control, SAE paper 950004.