

## 브레이크다운전압 특성을 이용한 엔진실화의 검출 및 강도해석

### The Misfire Detection and Intensity Interpretation using Breakdown Voltage Characteristics

고 용 수\*, 박 재 근\*\*, 조 민 석\*\*, 황 재 원\*\*, 채 재 우\*\*\*  
Yongsu Ko, Jaekun Park, Minseok Jo, Jaewon Hwang, JaeOu Chae

#### ABSTRACT

Engine misfire causes the negative effect on exhaust emission such as HC, CO and NOx. Moreover, it causes damage to the three-way-catalyst (TWC) system permanently.

The crankshaft velocity fluctuation(CVF) method has been applied for the real cars as misfire detection system usually, which utilizes the crank angle sensor input to calculate the variation of the crankshaft rotational speed. But this approach has the limit due to the fact that there could be problem under certain engine condition like as deceleration or high speed condition. Therefore the development of new methods are requested today.

This study introduced the new method of misfire detection using breakdown voltage(BDV) characteristics between spark plug electrodes.

주요기술용어 : BDV (Breakdown Voltage; 절연과피전압), Misfire detection (실화검출), Spark plug (점화플러그), OBD(Onboard diagnostics; 자동차고장진단시스템)

#### 1. 서 론

대기 오염은 지역적인 문제가 아니라 지구 전체의 문제로 부각되어 관심이 고조되고 있으며, 그 중 자동차의 배기가스가 대기 오염의 주범으로 인식됨에 따라 그에 따른 각종규제들이 강화

되고 있는 추세이다. 이러한 규제 중 캘리포니아 대기자원국(CARB)에서 정한 OBD-II에 규정된 10가지 감시 항목중의 하나가 실화 검출이다<sup>1)</sup>. 즉, 1997년 이후 모델의 자동차에서는 무부하 운전 영역 및 3000rpm에서 부하가 걸리기 시작하는 시점과 최고 속도에서 부하가 걸리기 시작하는 시점보다 흡기다기관 부압으로 101.6 mmHg 낮은 곳에 해당하는 부하영역을 제외한 모든 부하영역에서 실화 판별 및 실화가 발생한 실린더의 판별이 가능해야 한다는 것이다.

이러한 요구에 부응하여 실화 판정을 위한 각

\* 인하대학교 기계공학과 대학원

\*\* 정희원, 인하대학교 기계공학과 대학원

\*\* 정희원, 인하대학교 기계공학과

중 기관의 실화 진단방법들이 개발되었다. 직접적인 진단법에는 실린더압력 측정법<sup>3)</sup>, 스파크플러그를 이용하는 방법<sup>4,5,6)</sup>, O2센서를 이용하는 방법 등이 있으며, 간접적인 진단법에는 크랭크 각속도 측정법<sup>7)</sup>과 자기변형 측정법 등이 있다. 그러나, 위의 실화 진단법들은 정확성 및 경제성 등에 한계를 가지고 있기 때문에 새로운 실화검출 시스템에 관한 연구가 계속해서 이루어지고 있다.

본 논문은 새로운 실화검출 시스템인 BDV 검출시스템의 구성에 대해서 설명하였으며, 검출된 BDV 신호를 해석함으로써 가솔린기관에서 보다 효과적인 실화 검출방법을 확립하고자 한다.

## 2. 이론적 고찰

BDV는 실제로 실린더내의 스파크플러그 간극 사이에서 전기적 브레이크다운을 유발시키는데 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.

BDV는 바이어스 전압이 인가되는 스파크플러그 간극 사이의 거리, 가스의 조성, 가스의 압력, 가스의 온도에 의해 변화를 하게 된다. 물론 전극의 형상이나 전극의 재료, 가스의 습도, 초기 이온농도 역시 어느 정도의 영향을 미칠 수는 있으나, 앞에서 언급한 4가지 인자와 비교해 볼 때 그 영향력이 미미하기 때문에 무시할 수 있다. 위에서 언급한 BDV에 영향을 주는 네 가지 인자 중, 간극사이의 거리와 압력은 한가지 변수로 취급할 수 있는데, 이는 서로 다른 간극거리와 비교할 때, Pd (P:압력, d:간극간의 거리)라는 개념의 단위를 사용하기 때문이다. 즉 일단 전극간의 거리가 일정한 상태라면, 그때는 단지 전극사이에 존재하는 가스의 압력만을 고려하면 된다. 물론 이 때 가스의 온도는 일정하다는 가정에서만 성립한다.

BDV에 온도의 영향을 고려하기 위해서는 가스 밀도  $n$  이라는 새로운 변수를 도입하여야 하는데, 이것은 단위체적당에 존재하는 가스입자의 수를 나타내는 것이다. 이상기체의 경우에 있어서 다음과 같은 (1)식이 성립하게 된다.

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

여기서 P는 압력, T는 온도, k는 Boltzmann 상수(=  $1.38 \times 10^{-23}$  J/K)를 의미하며, 임의의 nd의 조건하에서 BDV( $V_s$ )는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$V_s = f(nd) \quad (2)$$

위의 (2)식은 Paschen's law<sup>2)</sup>를 나타내고 있는데, 만약 간극간의 거리(d)가 일정하다면, 압력과 온도가 BDV를 결정하는 중요한 인자가 되며, 본 연구에서는 이러한 BDV의 특성을 이용하여 실린더내에서 실화와 정상연소간의 차이를 검출하고자 하였다.

## 3. 실험장치 및 결과

### 3.1 연료 분사량 측정장치

본 실험에 사용된 가솔린 엔진은 배기량 1998cc의 MPI방식이며, 주요 제원은 Table 1과 같다.

실화의 강도를 조절하는 방법으로서 엔진 제어장치인 Motec ECU의 fuel trim기능을 사용하였으며, fuel trim과 인젝터로 분사되는 실제 연료 분사량을 측정 비교하였다. 인젝터로 분사되는 연료량을 측정하기 위한 실험장치는 Fig.1에 나타낸바와 같다. ECU에 내장된 연료 분사량 조절기능(fuel trim function)의 조절범위는 -50~50이며, 0은 정상연소 즉 공연비( $\lambda$ )=1인 상태를 나타내고, 음의 값은 희박(lean)연소, 양의 값은 농후(rich)한 연소를 나타내는 지표로 설정되어 있다. 이러한 Motec ECU 내의 지표와 실린더내에 분사되어지는 실제 연료량과의 관계를 실험을

통하여 확인하였다. 실화는 연료의 희박연소영역에서 발생하는 비율이 높기 때문에 본 실험은 연료 분사량의 조절범위를 -50~0에 초점을 맞추어 실시하였다.

실험방법은 4번 실린더의 fuel trim을 줄여가며, 4번 실린더 인젝터에서의 연료 분사량을 측정하였다. 여러 상황의 엔진 속도, 부하에서 실험을 하였으며, 변화값은 Table 2와 같다.

Table 1 Specification of Test Engine

Description		Specification	
No. of cylinder		4	
Valve timing	Intake valve	Open	BTDC20°
		Close	ABDC64°
	Exhaust valve	Open	BBDC64°
		Close	ATDC20°
Fuel supply system		MPI	
Bore × Stroke		85×88	
Total displacement		1997cc	
Compression ratio		8.6	

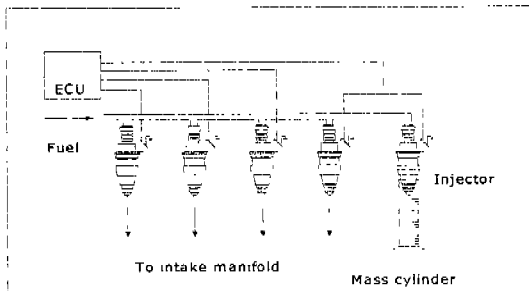


Fig. 1 Schematic Diagram of Injection Measurement and Control

Table 2 Experimental Parameters

Engine Coolant Temperature	88 ± 1°C
Intake Air Temperature	27 ± 1°C
Engine Speed(rpm)	1200, 1800, 2400
Engine Torque	0, 2, 4, 6N·m
Fuel trim (Motec-ECU Trim Function)	0, -20, -30, -40, -50, Fuel-cut

### 3.2 4-Channel BDV Sense

BDV 신호를 측정하기 위하여 스파크플러그에 인가하는 바이어스 전압 설정은 본 시스템이 브레이크다운 현상을 이용하기 때문에, 반드시 브레이크다운임계점(breakdown threshold)보다 높게 설정되어야 한다. 따라서 기초실험을 통하여 배기행정 중의 브레이크다운 임계점은 약 2kV정도임을 확인하였으나, 실화뿐만이 아니라 정상연소시의 압력과 온도에 따른 브레이크다운 전압의 신호까지도 파악하고자 약 30kV정도의 바이어스 전압을 스파크플러그에 인가시켰다. BDV 검출장치는 기존의 점화시스템에서 스파크플러그로 들어가는 배선과 병렬로 연결되며, 점화코일로부터 스파크플러그로 흐르는 고전압이 유입되는 것을 차단하기 위하여 고전압용 다이오드를 사용하였다.

Fig.2는 4채널 브레이크다운전압 측정회로도를 나타낸 것이다. 회로는 바이어스전압 발생을 위한 승압 변환기(step-up converter)와 전압분배기(voltage divider), 그리고 브레이크다운전압 측정부 등 크게 세 부분으로 구성되어 있다.

1차 펄스전압은 자동차용 배터리 전압을 FET (field effect transistor; IRFP250)에 의해 차단함으로써 만들어질 수 있다. 트랜지스터의 게이트는 마이크로칩 7667로 만들어진 멀티바이브레이터에 연결되어 있다. 2차 코일에서 만들어진

고전압 펄스는 고전압 다이오드에 의해 정류되며, 리플(ripple)은 콘덴서에 의해 감소된다. 콘덴서에서 형성된 음의 바이어스 전압은 600MΩ의 동일한 저항들을 통하여 4개의 채널(실린더의 수)로 분배된다. 출력신호는 스파크플러그 간극에 병렬로 연결되어 있는 4개의 전압분배기(voltage divider)를 거쳐 브레이크다운전압 측정부로부터 얻어진다.

BDV와 압력의 관계를 고찰하기 위하여 압력 센서를 4번 실린더에 장착하였으며 TDC를 검출하기 위하여 배전기의 TDC슬릿 신호를 획득하였다.

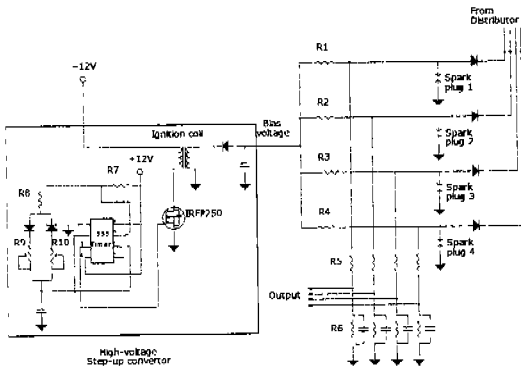


Fig. 2 Four-Cylinder Breakdown Voltage Measurement Circuit

## 4. 실험결과 및 검토

### 4.1 분사량의 선형성

Fig.3과 Fig.4는 fuel trim을 줄여감에 따라 인젝터에서 분사되는 연료량도 선형적으로 감소한다는 것을 나타내고 있으며, 또한 엔진의 회전수와 부하에 상관없이 ECU의 연료 분사신호와 실제 연료 분사량의 선형성은 변화하지 않았다. 이 실험을 통해 실화검출 실험을 수행함에 있어서 ECU의 fuel trim과 연료의 실제적인 분사량이 서로 선형적으로 비례하기에 실화의 강도를 해석하기 위한 방법으로 ECU의 fuel trim을 사용하여도 무방함을 알 수 있다.

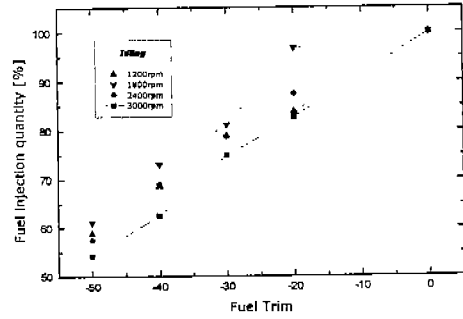


Fig. 3 Fuel Injection Quantity According to the Fuel Trim by rpm at idling

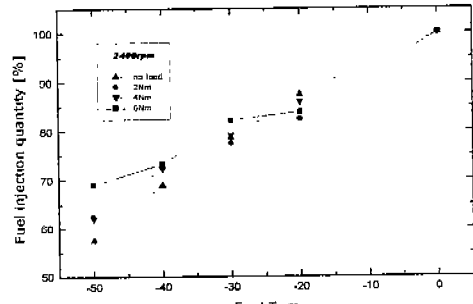


Fig. 4 Fuel Injection Quantity According to the Fuel Trim by Torque at 2400rpm

### 4.2 BDV 검출의 실린더간 독립성

본 실험에서는 BDV 검출의 실린더간 개별적인 실화검출 여부를 확인하기 위하여 2번과 4번 실린더에서 BDV 신호를 동시에 획득하여 비교하였다.

Fig.5는 정상 연소시 2번 실린더에서 검출되는 BDV 신호분포와 fuel trim을 줄여가며 4번 실린더에서 검출되는 BDV 신호를 동시에 나타낸 결과이다. 실험결과 일정 부하시 4번 실린더의 BDV 신호는 fuel trim 감소에 따라 감소는 반면, 2번 실린더의 BDV 신호는 일정한 분포를 가지는 것을 나타냈다. 이 결과로부터 BDV 신호는 실린더별로 실화를 검출할 수 있다는 것을 확인할 수 있다.

본 실험에서는 각 실린더내에서 발생하는 실화의 개별적 제어가 가능하다는 점을 바탕으로 한 개의 실린더(4번 실린더)에 대한 운전조건의 변화(Table 2)를 통하여 BDV 신호를 검출하였다.

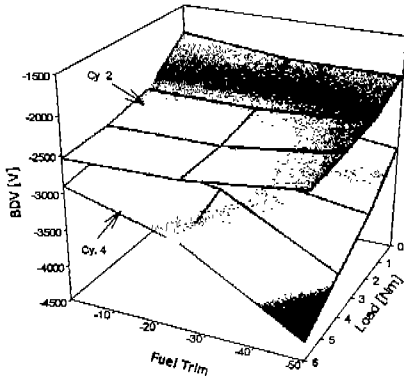


Fig. 5 BDV as a Function of Load and Fuel Trim, 1800rpm

### 4.3 BDV를 이용한 실화강도 해석

Fig.6~Fig.8은 엔진의 회전 및 부하를 일정하게 한 후 fuel trim을 감소시켜가며 BDV 신호와 압력 신호를 나타낸 결과이다. 팽창 행정시(크랭크각도  $0^{\circ}\sim 180^{\circ}$ ) fuel trim이 감소함에 따라 압력 신호가 감소하는 결과로부터 실린더내 실화강도 증가를 간접적으로 알 수 있다.

연소가 끝나고 배기행정(크랭크각도  $180^{\circ}\sim 360^{\circ}$ )이 시작되면 fuel trim 감소에 따른 BDV 신호의 기울기가 뚜렷하게 감소하는 결과를 볼 수 있으며, 본 연구에서는 이러한 차이를 이용하여 실화를 검출하였다.

본 연구에서 배기행정에 기준을 두어 BDV 신호의 기울기를 비교한 이유는 식(1), (2)로부터 알 수 있듯이 BDV가 압력과 온도에 크게 영향을 받게 되는데, 배기행정에서는 Fig.6~Fig.8에서 압력 신호를 보면 알 수 있듯이 fuel trim과 관계없이 압력이 일정하다는 것을 알 수 있다. 그러므로 배기행정의 경우, 압력도 상수로 간주할 수 있고, BDV는 온도만의 영향을 받게 됨을 알 수 있다.

따라서 본 연구에서는 실린더내 연소과정 중 불완전 연소에 의한 배기 가스의 온도감소를 BDV 신호를 이용하여 간접적으로 검출하였다. 이러한 특성을 비교 분석하여 실화를 정의할 수

있고, 더 나아가 실화의 강도 또한 배기행정시 BDV의 증가 정도를 통해 구할 수 있을 것이다.

정상연소와 실화를 구별할 수 있는 크랭크 각도는 Fig.6~Fig.8을 통하여 알 수 있듯이 크랭크 각도기준 하사점(BDC) 전후에서 공통적으로 BDV 신호의 변곡점이 형성되므로 파악이 가능하다. Fig. 6~Fig.8에서 BDV의 증가 정도를 확인하기 위하여 배기행정 부분( $180^{\circ}\sim 360^{\circ}$ )만을 선택하여 BDV signal을 평균한 후 일직선으로 선형화(linear fitting)하여 작은 그래프로 나타내었다. 직선의 기울기를 연료 분사량에 따라 관찰해 보면, fuel trim이 감소할수록 BDV 신호의 선형화한 직선의 기울기가 감소하는 결과가 나타난다. 배기영역에서의 크랭크각도에 따른 BDV의 증가 기울기를 계산하여 비교 분석한 결과, ECU의 fuel trim이 -40일 때 BDV 신호의 기울기가 음의 값을 나타내는 것을 알게 되었으며, Fig. 4에서 보는 바와 같이 이 때의 실제 연료분사량은 정상연소시에 비해 -30%정도 적은 양(당량비 0.7)으로서, 이 값은 촉매장치에 상당한 손상을 가할 수 있는 정도의 HC를 배출하는 임계기준으로 알려져 있다.

Fig.9와 Fig.10은 fuel trim을 감소시키며 BDV 신호의 기울기 경향을 도시하였으며, 이를 토대로 엔진의 속도와 부하에 따라 일정 실화강도 이상에서 실화 검출의 검출 가능성을 확인하였다.

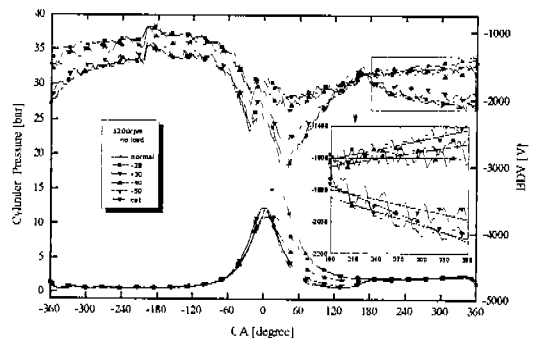


Fig. 6 BDV and Pressure According to the CA at 1200rpm and no load

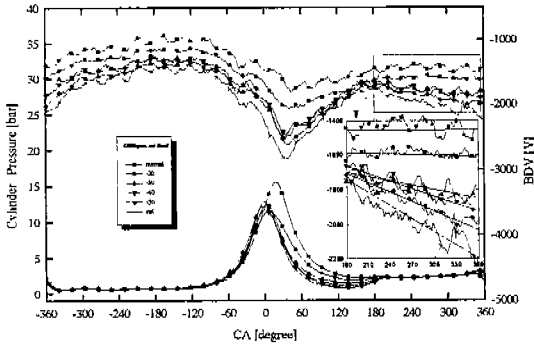


Fig. 7 BDV and Pressure According to the CA at 1800rpm and no load

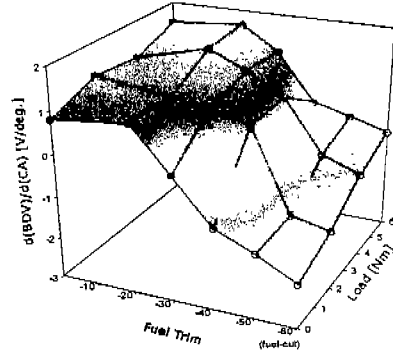


Fig. 9 Slope of BDV at 1200rpm

#### 4.4 도시평균유효압력과 실화강도

실화의 강도(Misfire Intensity)를 측정하기 위하여 다음과 같은 식을 정의하였으며, fuel trim에 따른 실화강도를 Fig.11~12에 나타냈다.

$$Misfire(\%) = \left( \frac{imep_{normal} - imep_{measured}}{imep_{normal} - imep_{fuelcut}} \right) \times 100$$

본 실험에서는 fuel trim -40을 기준으로 그 이하를 실화로 판단하였으며, 이 때 실화강도는 80%이상에 해당된다는 것을 알 수 있다.

Fig.11과 Fig.12는 rpm과 fuel trim에 따른 IMEP와 실화강도를 나타낸 것이다. 그림에서 보면, 분사되는 연료량을 감소시킬수록 실화강도가 증가함을 알 수 있으며, fuel trim이 -50인 경우에는 완전실화가 발생함을 알 수 있다.

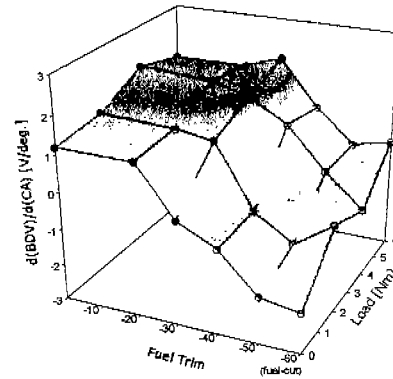


Fig. 10 Slope of BDV at 2400rpm

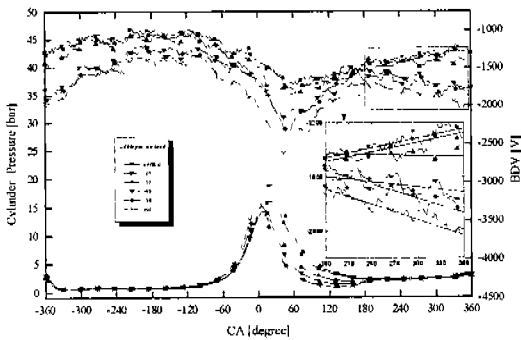


Fig. 8 BDV and Pressure According to the CA at 2400rpm, no load

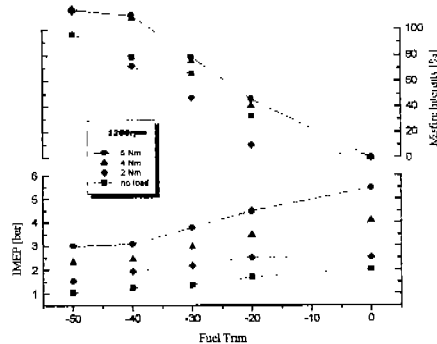


Fig. 11 IMEP and Misfire Intensity According to Fuel Trim at 1200rpm

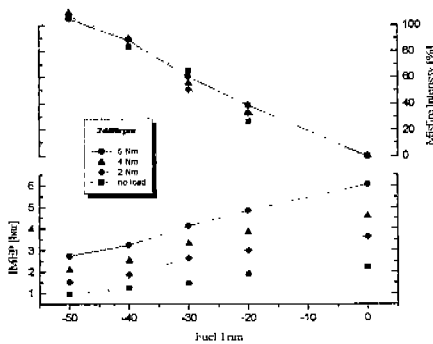


Fig. 12 IMEP and Misfire Intensity  
According to Fuel Trim at 2400rpm

## 5. 결론

본 연구에서는 가솔린기관에서 실린더내 이상 연소 현상인 실화의 검출 및 강도 측정을 위한 방법으로 점화플러그에 높은 바이어스전압(30kV)을 인가한 후 스파크 플러그 간극에 발생하는 BDV 신호와 압력센서로부터 압력신호를 획득하여 파형의 비교를 통해 실화강도를 정량화 하였으며, BDV 신호로 실화강도의 판정을 할 수 있는 기준을 마련하여 다양한 엔진 조건하에서 실화 강도를 비교 분석하였다.

실험은 배기행정에 초점을 맞추어 엔진회전수와 부하조건을 변화시켜가며 BDV 신호와 실린더내 온도와의 관계를 파악하였으며, fuel trim을 감소시킴으로써 실화와 같은 조건인 불완전연소로 인한 배기시의 온도감소를 유발시킨 후 BDV 신호특성을 관찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 본 연구를 통하여 높은 바이어스전압(30kV)을 발생시키는 4채널 BDV 측정회로를 이용하여 스파크 플러그 간극에서 발생하는 브레이크다운 현상을 BDV 신호를 통하여 고찰 하였으며, BDV 신호만을 이용하여 엔진의 회전수에 관계없이 실화를 성공적으로 검출할 수 있었다.
2. 실화와 정상연소사이에는 배기행정시 온도의 차이가 있음을 확인할 수 있었으며, 이러한 배기온도의 차이로 인해 발생하는 BDV 파형의

기울기 변화를 이용하여 실화강도를 판정할 수 있었고, 실화강도를 비교하여 정량화시킬 수 있었다.

3. 4채널 BDV 측정회로를 이용하여 실화를 판정한 결과, 배기 부분의 BDV 기울기가 0인 경우, 즉 수평인 경우가 실화로 판정되는 기준치로써 ECU fuel trim의 -40에 해당되며, 정상연소시(ECU기준 0)보다 실제 연료 분사량에서 30%정도 적은 양이었다.

## 참 고 문 헌

1. Air Resources Board, Hagen-Smit Laboratory, Mail-Out #91-18, Revised On-Board Diagnostics II (OBDII) Requirement, April 8, 1991.
2. Yuri P. Raizer, "Gas Discharge Physics", Springer-Verlag, 1991.
3. Taylor CF, "The Internal Combustion Engine in Theory and Practice", The MIT Press, vol. 1, 2, 1968.
4. Henn M, Kiencke U. "Estimation of In-Cylinder-Pressure Torque from Angular Speed by Kalman Filtering", Advances in Automotive Control, IFAC Workshop, Ascona, Switzerland, pp. 21-26, 1995.
5. Yutaka Ohashi, Wataru Fukui and Atsushi Ueda. "Application of Vehicle Equipped with Ionic Current Detection System For the Engine Management System", SAE paper 970032.
6. Anderson RL, "In-cylinder Measurement of Combustion Characteristics Using Ionization Sensors", SAE paper 860485.
7. Williams J, "An Overview of Misfiring Cylinder Engine Diagnostic Techniques based on Crankshaft Angular Velocity Measurement", SAE paper 960039.