한국자동차공학회논문집 제8권 제2호, pp.41~49

〈논문〉 SAE NO. 2000-03-0027

실화가스 흐름에 대한 광역 산소센서의 응답특성 및 이를 이용한 실화감지

The Response of a Wide-Range Oxygen Sensor to the Flow of Misfired Gas and Its Application for the Misfire Detection

정 영 교*, 최 상 민**, 배 충 식**, 명 차 리***
Youngkyo Chung, Sangmin Choi, Coongsik Bae, Chalee Myung

ABSTRACT

To understand the signal fluctuation of a wide-range oxygen sensor installed at the exhaust confluence point, when a misfiring is triggered in a cylinder, the steady state and the transient response characteristics of the sensor to the flow of the misfired gas were investigated quantitatively. It was recognized that the steady state output voltage of the sensor increased higher when it contacted the misfired gas even though the fueling condition was the same as the normal combustion case and this characteristic enabled the application of the wide-range oxygen sensor for the misfire detection. The transient response was compared at different engine speeds and it was found that the response speed increased with the engine speed. The signal fluctuation was also estimated quantitatively, using these steady state and transient response of the sensor, and the estimated signal showed satisfactory correlation with the measurements.

주요기술용어 : Wide-Range Oxygen Sensor(광역 산소센서), Misfire Detection(실화감지), Exhaust Confluence Point(배기 합류점), Misfired Gas(실화가스)

1. 서 론

광역 산소센서는 기존의 산소센서와는 달리 공연비에 따라서 출력이 바뀌는 센서로, Yamada 등[1], Suzuki등[2]에 의해 소개되어진 바와 같이 배기계에서의 공연비 측정을 위하여 개발되었다. 이 센서는 지금까지 주로 실린더별 공연비 제어 (Hasegawa등[3]), 정확한 공연비 feedback 제어

* 회원, KAIST기계공학과, 박사과정
** 회원, KAIST 기계공학과
*** 회원, 현대자동차 선행기술연구소

등에 이용되고 있다. Yamada등[1]은 이 센서가 위의 목적 외에 미국 OBD-Ⅱ 법규[4]의 하나인 엔진 실화감지의 목적으로도 사용될 수 있다고 소개는 하였으나 실화감지 방법에 대한 구체적인 언급이 없이 그적용 가능성을 제시한 정도였다.

최근 광역 산소센서의 과도응답성이 빨라지고, 산소센서의 장착위치도 CCC (Close- Coupled Catalyst)의 등장으로 전진됨으로 인해 Chung 등[5,6,7]에 의해 광역 산소센서를 이용한 실화감지 방법이 구체적으로 연구되어지고 있다. Chung등[5]은 CCC가 적용된 엔진의 배기 confluence point에 BOSCH의 LSU 광역 산소센서를 장착, 연구를 수행하였는데, 실화에 따른 센서신호 변동에 대해 정성적으로 제시하였다.

본 연구에서는 실화에 따른, 배기 confluence point 장착 광역 산소센서의 신호변동에 대한 정량적인 분석을 위하여, 먼저 실화가스에 대한 steady state 출력특성 및 이의 원인을 조사하였고, 갑작스런 실화가스 흐름에 대한 과도응답특성도 조사하였다. 그리고 이러한 조사를 바탕으로 실화시 배기 confluence point에서의 농도변화에 따른 광역 산소센서 신호 변동을 정량적으로 예측하였고, 이 결과를 실제의 측정결과와 비교함으로서 정량적인 광역 산소센서 응답특성 결과에 대한 타당성도 확인하였다.

2. 실화시 배기 confluence point에서의 농도변화 및 광역 산소센서 신호변화

Chung등[5]의 연구결과에 의하면 그림 1에서와 같은 장치에서 특정 실린더로의 점화신호를 1회 단락 시킴으로 실화를 발생시킨 경우 실화 실린더로부터의 실화가스와 타 실린더로 부터의 정상 연소가스가 confluence point에서 섞이면서 그림 2의 상단그래프 굵은 실선과 같이 배기 confluence point에서의 미연탄화수소(HC) 농도는 2회의 급격한 변화를 보인다. 그리고 이러한 급격한 농도변화에 따라 같은 위치에서의 BOSCH LSU 광역 산소센서 신호도 파선과 같이 2회의 peak를 갖는 형태로 나타난다. 1차 peak 대비 2차 peak가 강하게 나타나는 것은 Chung등[9]에 의해 설명된 바와 같이 2차 peak 경우 연소가스에 의해 고속으로 배기 매니폴드에 잔류하던 실화가스가 배출될 때의 peak이기 때문이다.

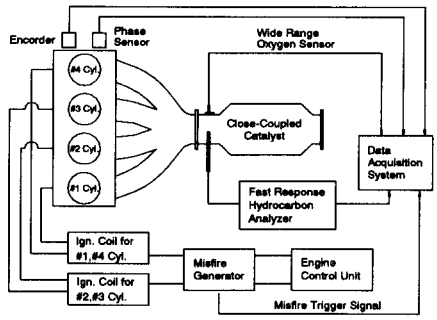

Fig.1 Experimental set-up for the misfire detection using a wide range oxygen sensor

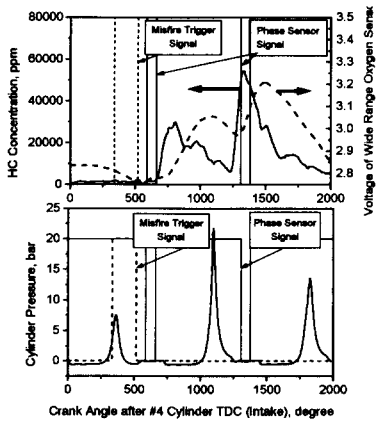

Fig.2 Fluctuation of HC concentration and the signal of a wide range oxygen sensor caused by a single misfiring in #4 cylinder (measured at the exhaust confluence point)

그러나 센서신호는 센서의 실화가스에 대한 출력특성 및 과도 응답특성에 따라 농도변화보다는 훨씬 감쇠된 결과를 보인다. 즉, 실화가스에 대한 센서의 출력특성에 의해 실화시 센서출력신호는 증가하게 되나, 센서자체의 느린 과도 응답특성

(BOSCH LSU의 경우 30msec~100msec)에 의해 그 출력 신호는 농도변화 신호 대비 delay 되고, 감쇠 되어 그 변동 amplitude가 현저히 줄어든 형태로 나타나게 되는 것이다. 따라서 배기 confluence point에 장착되는 광역 산소센서를 이용하여 실화감지를 하는 경우, 실화가스에 대한 광역 산소센서의 정상상태 출력특성 및 과도 응답특성을 정량적으로 조사, 분석하는 연구가 필요하게 된 것이다.

3. 광역 산소센서의 실화가스에 대한 Steady State 출력특성

3.1 실험장치 및 실험방법

실화가스에 대한 광역 산소센서의 출력특성을 조사하기 위하여 그림 3에서와 같이 실화발생 실린더(본 실험의 경우 4번 실린더)의 배기 매니폴드를 분리시킨 후 해당 실린더로의 점화신호를 20~30초 단락 시켜 분리된 배기 매니폴드가 실화가스만으로 가득 차도록 하였다.

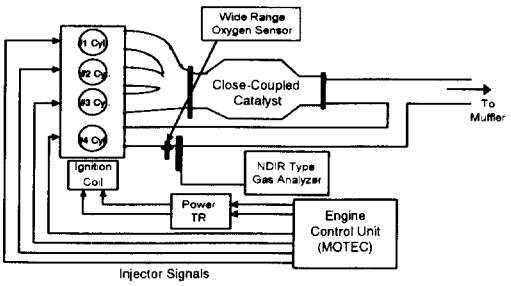

Fig.3 Experimental set-up for the measurement of steady state output voltage of the sensor under misfiring condition

그리고 실화 실린더로의 연료분사 신호를 조절하여 실화가스 중에 포함된 연료량에 따른 광역 산소센서 출력신호 변화도 동시에 조사하였다. 연료량을 변화시킨 이유는 엔진에서의 실화가 점화계 문제로 인해 발생하는 경우 뿐 만 아니라 연료량 부족으로 인해 발생하는 경우도 있기 때문이다.

점화신호 및 연료량을 원하는 cycle 만큼 조절하기 위하여 범용 ECU(Engine Control Unit)인 MOTEC ECU를 사용하였고, 광역 산소센서로는 BOSCH LSU를, 센서 controller로는 ETAS 제품을 사용하였다. 그리고 분리된 배기 매니폴드내 실화가스중의 HC, CO, O_2 등의 농도는 NDIR(Nondispersive Infrared) 방식인 HORIBA MEXA 554JK 분석기를 사용하여 측정, 실화가스중의 연료량 변화로 인한 농도변화 및 이에 의한 광역 산소센서 출력신호 변화를 조사하였다.

3.2 광역 산소센서 출력특성

3.2.1 이론 공연비 조건에서의 특성

정상 연소시 BOSCH LSU 광역 산소센서 출력전압은 이론 공연비에서의 2.5Volt를 기준으로 희박영역에서는 출력전압이 증가하고 농후한 영역에서는 반대로 출력전압이 감소하게 된다. 그러나 이론 공연비 조건이라고 하여도 실화가스를 만나게 되면 그림 4에서와 같이 출력전압이 약 5.2Volt로 상승하게 된다.

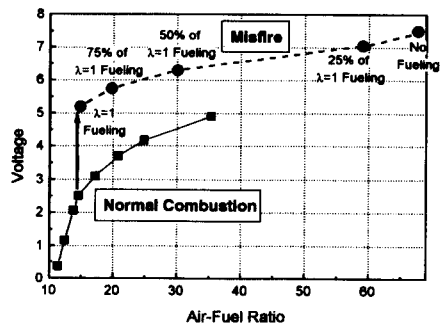

Fig.4 Comparison of the output voltage of BOSCH LSU wide range oxygen sensor under misfiring condition with the voltage under normal combustion condition

이와 같이 이론공연비 조건이라도 실화가 발생하게 되면 출력전압이 상승하게 되는 원인은 주로 실화가스 중에 다량 포함된 산소와 분자량이 큰 HC의 센서 element ceramic layer에서의 diffusion rate차이에 기인하는 것으로 판단된다.

Buglass등[8]에 의하면 그림 5에서와 같이 배기가스중 분자량이 큰 HC 성분의 경우 ceramic layer에서의 diffusion rate가 산소에 비해 감소하게 되기 때문에 비록 이론 공연비 조건이라고 하더라도 ceramic layer 내부의 Pt 전극 부위에서는 공연비가 희박한 것으로 감지된다고 한다. 실화가스와 같이 고분자량 HC성분의 농도가 큰 경우 위와 같은 영향이 더욱 증가하여 출력전압이 5.2volt 까지 증가하게 되고 이러한 광역 산소센서의 실화가스에 대한 출력특성이 실화감지를 가능하게 하는 것이다.

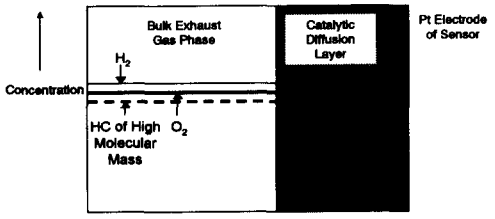

Fig.5 Schematic figure showing relative concentration profiles of HC and oxygen through the porous ceramic layer

3.2.2 연료량 변화에 따른 특성 변화

이론 공연비에서의 실화가스에 대한 광역 산소센서의 출력특성 뿐만 아니라 연료량이 적게 포함된 실화가스의 각종 농도변화 및 이에 따른 센서 출력특성도 조사하였다. 그 결과, 실화시 분사된 연료량이 감소됨에 따라 그림 6에서와 같이 실화가스중의 HC농도는 급격히 감소하게 되고, 산소농도는 21%→22.5%로 약간씩 증가하게 되었다. 이때 광역 산소센서의 출력전압은 이론 공연비 조건에서의 5.2Volt에서 7.6Volt로 크게 증가하게 되는데 이는 주로 산소농도의 증가 보다는 HC농도의 감소로 인한 영향이 큰 것으로 판단된다. 이와 같은 실험결과에 따라 실화시 공급되는 연료량이 적을수록 실화시의 출력전압은 증가하게 되고 연료가 전혀 공급되지 않는 조건의 연료 공급이상으로 인한 실화인 경우에는 그 출력전압이 최대가 된다.

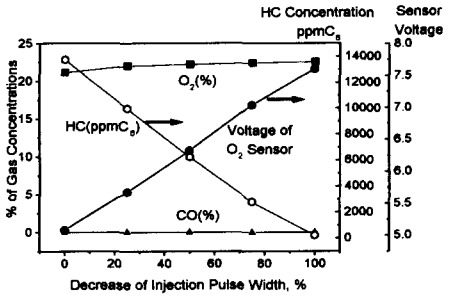

Fig. 6 Relation between gas concentrations and the output voltage of the wide range oxygen sensor in the misfired gas when the fuel content in the gas decreases

3.2 실화발생 원인에 따른 배기 confluence point에서의 센서신호변화

일반적으로 실화는 이론 공연비 조건에서 점화계 이상으로 인해 발생할 수도 있고, 공급되는 연료량의 부족으로 인해 발생할 수도 있다. 각 경우 출력 전압은 그림 4 에서와 같이 5.2Volt 및 7.6Volt로 연료공급 이상으로 인한 실화의 경우 출력신호가 더욱 증가하게 된다. 배기 confluence point에 장착된 광역 산소센서의 경우도 그림 7에서와 같이 연료량 이상으로 인한 실화시, 공급 연료량이 적을수록 실화발생 실린더 배기 매니폴드내 HC농도가 더욱 감소하게 되고 이로 인하여, confluence point 장착 센서신호의 변동이 더욱 증가하게 됨을 알 수 있다.

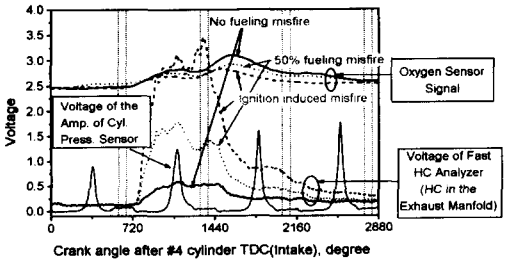

Fig.7 Effect of the misfiring source on the variation in HC concentration in the exhaust manifold and the signal of the sensor at the exhaust confluence point

그리고 이로부터 광역 산소센서를 이용 실화를 감지할 경우 연료량 부족으로 인한 실화의 감지가 점화계 이상으로 인한 실화의 감지보다 더욱 용이해짐을 알 수 있다.

4. 광역 산소센서의 실화가스에 대한 과도 응답특성

산소센서는 배기가스 농도가 급격히 변할 경우, 센서의 protection tube, 센서 element ceramic diffusion layer 등의 영향으로 인해 즉시 출력전압이 변하지 못하고, 센서의 과도 응답속도에 따라 서서히 출력 전압이 변하게 된다. 그런데 센서의 과도 응답속도가 배기 confluence point에서의 농도변화보다 훨씬 느린 관계로 confluence point에서의 센서신호는 실제 농도보다 훨씬 감쇠된 형태로 나타나고, 엔진속도가 증가할수록 엔진 크랭크 각도 기준으로의 응답속도는 더욱 느려져, confluence point에서의 센서신호는 엔진속도 증가에 따라 더욱 감쇠될 것으로 예상되었다.

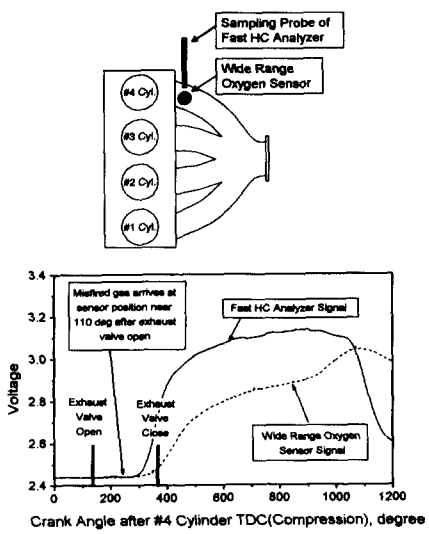

Fig.8 Experimental set-up for the test of transient response of the sensor and the basic response characteristic to a step input of misfired gas

Chung등[5]은 그림 8에서와 같이 광역 산소센서를 장착하고 엔진 무부하 운전상태에서 실화가스의 step input에 대한 과도 응답특성을 엔진 회전속도를 증가시키며 확인하였다. 그 결과 그림 9 에서와 같이 크랭크 각도 기준으로 할 경우 엔진속도 변화에 따라 과도 응답특성이 크게 변화하지 않음을 알 수 있었고 이로 인해 고속의 운전조건에서도 실화시의 센서신호 변동이 크게 감쇠 되지는 않는 것을 알 수 있었다.

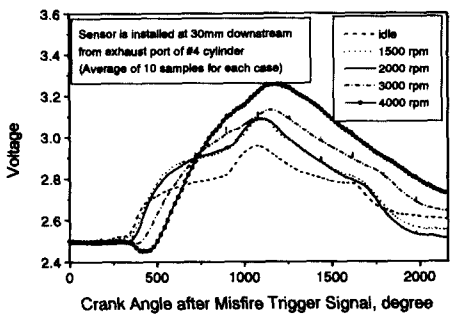

Fig.9 Effect of engine speed on the response speed of the sensor to the step input of misfired gas (engine load : no load)

5. Confluence point 에서의 광역 산소센서 신호 예측 및 측정 결과와의 비교

본 연구에서는 광역 산소센서의 실화가스에 대한 steady state 출력특성 및 과도조건에서의 응답특성 조사결과에 대한 검증 및 응답특성이 다른 센서를 적용할 경우의 센서 신호변동 예측에 이용하기 위하여 BOSCH LSU 광역 산소센서의 steady state 및 과도 응답성 결과를 이용하여, 실화발생시 confluence point에서의 광역 산소센서 신호 변동을 예측하였고 이 결과를 측정치와 비교하였다.

5.1 배기 confluence point에서의 농도변화

Chung등[9]의 실화가스 흐름에 대한 연구결과에 의하면, 특정 실린더에서의 1회의 실화에 의

해 배기 confluence point에서의 HC농도는 실화가스와 타 실린더로부터의 정상 연소가스와의 mixing 현상에 의해 그림 10 에서와 같이 2회 급격히 변하는 것으로 파악되었다. 그리고 이러한 농도변화 특성은 엔진 운전조건이 변하여도 크게 영향을 받지 않는 것으로 조사되었다.

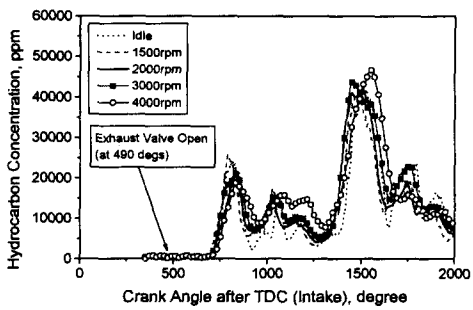

Fig.10 Variation in HC concnetration at the exhaust confluence point caused by a misfiring (effect of engine speed under no load condition)

5.2 배기 confluence point에서의 광역 산소센서 신호변화 예측

배기 confluence point에서의 급격한 농도변화는 같은 위치에서의 광역 산소센서에 입력으로 써 작용하게 되고 센서의 steady state 출력특성 및 과도 응답특성에 의하여 그 출력신호는 delay 되고 감쇠되어 나타난다. Chung등[5]에 의하면 그림 10에서의 각 엔진속도에 따른 농도변화를 입력으로 하고, 그림 9에서의 step input에 대한 각 엔진속도에서의 과도 응답특성을 고려하여 센서 출력신호를 아래의 식에 의해 예측할 수 있다.

$$x(\theta)=\int_0^{\theta} f(\theta-\alpha)h(\alpha)d\alpha \quad \text{또는}$$

$$x(\theta)=\int_0^{\theta} f(\alpha)h(\theta-\alpha)d\alpha \qquad (1)$$

여기서 θ 및 α 는 크랭크 각도,

$f(\theta)$는 exciting function

$x(\theta)$는 크랭크 각 θ 에서의 출력신호

$h(\theta)$는 unit step input에 대한 indicial response의 미분신호로 impulse response를 의미한다.

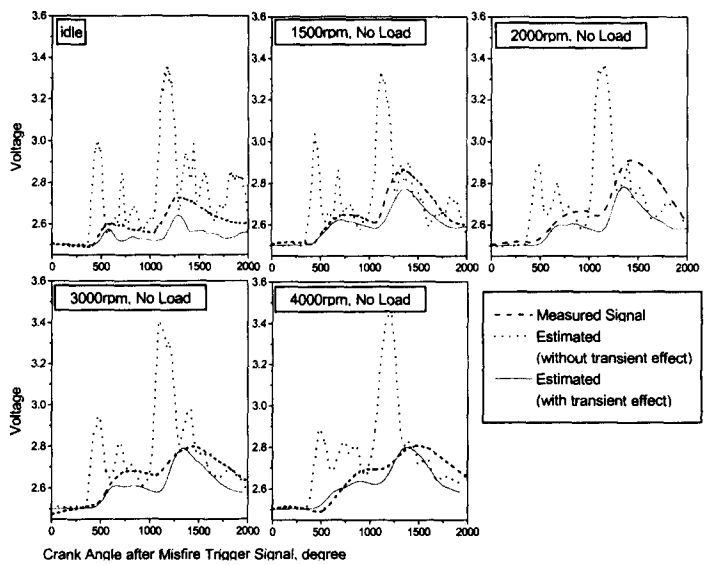

Fig.11 Estimated signal of the wide range oxygen sensor(with the transient response effect and without the effect) and its comparison with the measured sensor signal

Exciting function $f(\theta)$로는 그림 10의 배기 confluence point에서의 농도변화가 사용되고, impulse response $h(\theta)$를 위해서는 그림 9의 실화가스 step input에 대한 센서의 과도 응답 실험결과를 1차 미분하여 사용하였다.

각 엔진속도에서의 계산 결과를 동일 조건에서의 측정결과와 비교한 결과가 그림 11이다. 그림에서와 같이 계산결과가 모든 경우에 측정결과와 정확히 일치하지는 않지만 광역 산소센서의 느린 과도 응답특성에 의해 센서신호가 감쇠되는 정도는 계산으로도 충분히 보여 줌을 알 수 있었다. 그리고, 이로서 실화가스에 대한 광역 산소센서의 출력특성 및 과도 응답특성에 대한 정량적인 평가가 타당성 있게 수행되었다는 것을 확인할 수 있었다.

5.3 광역 산소센서 응답성 개선에 따른 신호변화

그림 11에서와 같이 계산결과 측정결과 모두, 광역 산소센서의 과도 응답특성의 제한에 의해 그 출력신호가 상당히 감쇠되고, 이것이 광역 산소센서를 이용한 실화감지 기술의 가장 큰 장벽이 된다는 것을 알 수 있었다. 차후 과도 응답특성이 빠른 광역 산소센서가 등장할 경우, 본 기술의 과도 응답특성에 의한 장벽은 상당히 제거될 것으로 예상된다. 이러한 경우의 광역 산소센서를 이용한 실화감지 성능을 예측하기 위하여 임의로 2중 구조로 되어 있는 기존의 BOSCH LSU 광역 산소센서 protection tube의 outer layer를 그림 12와 같이 제거하여 과도 응답특성을 개선시켰고, 이를 사용할 경우의 센서신호를 정량적으로 예측하고 측정치와 비교하여 보았다.

5.3.1 응답성 개선

기존의 센서와 임의로 protection tube를 개조한 센서의 실화가스 step input에 대한 과도 응답특성을 비교한 결과, 그림 13에서와 같이 전 엔진 회전수 영역에서 응답성이 크게 개선됨을 알 수 있었다.

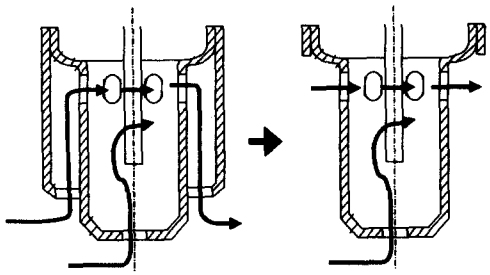

Fig.12 Modification of the sensor protection tube to increase the response speed

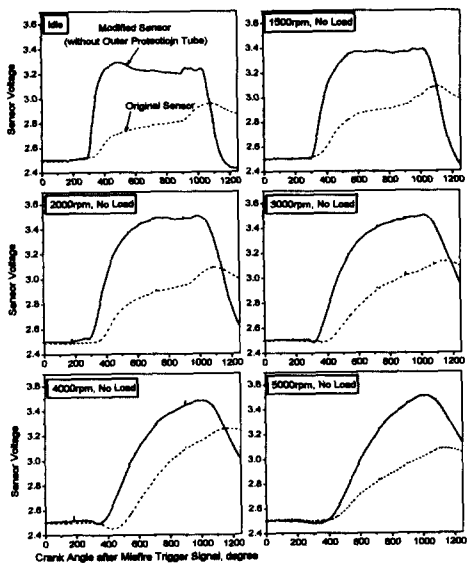

Fig.13 Response speed improvement by the modification of the protection tube

5.3.2 응답성 개선 센서 사용시의 센서 신호

앞에서의 센서신호 예측을 위한 식(1)에 의해 응답성 개선 센서가 confluence point에 장착될 경우의 신호변동을 예측하였고, 그 결과를 응답성 개선 센서를 사용한 측정결과와 그림 14에서와 같이 비교하였다. 그림과 같이 기존센서 대비 농도변화 대비 감쇠되는 정도가 크게 개선되고, 그 변동 진폭도 훨씬 증가함을 알 수 있다. 그리

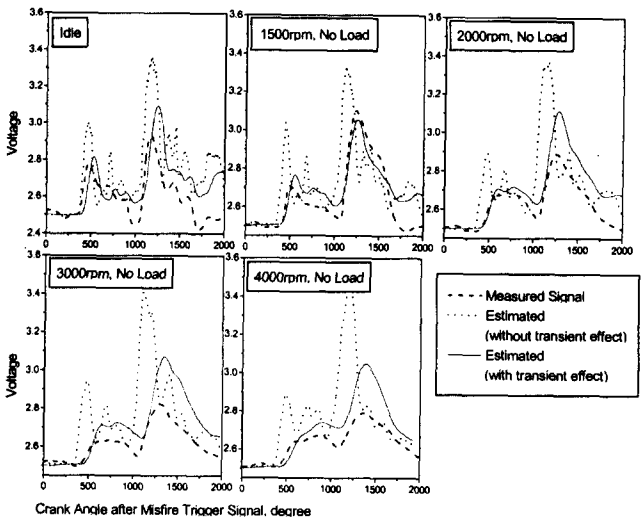

Fig.14 Estimated signal of the fast response wide range oxygen sensor and its comparison with the measured sensor signal

고, 예측치를 측정치와 비교한 결과, 충분히 과도 응답성 개선에 의한 효과를 잘 나타냄을 알 수 있다.

6. 결 론

본 연구에서는 광역 산소센서를 이용한 실화감지 기술개발을 위하여 실화가스에 대한 광역 산소센서의 steady state 및 과도 응답특성에 대하여 정량적으로 조사하였고, 이 결과를 이용하여 실화시 배기 confluence point에서의 광역 산소센서 신호 변동특성에 대하여 예측하여 보았고 이 결과 측정치와 비교하여 정량적인 광역 산소센서 특성조사에 대한 타당성을 확인하였다. 본 연구를 통한 결론은 아래와 같다.

1) 광역 산소센서의 steady state 출력전압은 실화가스와 접촉하게 되는 경우, 정상연소가스와 접촉하게 되는 경우 대비 상승하게 되는데, 이는 실화가스 중에 다량 포함되는 고 분자량의 HC와 산소의 센서 element ceramic layer에서의 diffusion rate차이에 기인한 것이다. 그리고 이러한 특성에 의해 광역 산소센서를 이용하여 실화에 의한 갑작스런 농도 변화를 감지하게 되는 것이다.

2) 광역 산소센서 출력전압은 실화가스중의 연료량이 적을수록 더욱 상승하게 된다. 따라서 연료량 부족으로 인한 실화의 감지가 점화문제로 인한 실화의 감지보다 용이하게 되는 것이다.

3) 실화시 광역 산소센서의 변동은 센서의 과도 응답특성에 의해 크게 영향을 받는다. 이러한 과도 응답성을 고려하여 실화시 배기 confluence point에서의 센서신호변동을 정량적으로 예측할 수 있다. 그리고 이러한 예측으로부터 광역 산소센서의 steady state 및 과도 응답특성의 정량적인 조사결과에 대한 타당성을 확인할 수 있었다.

후 기

이 연구는 산업자원부와 과학기술부에서 시행한 G7 차세대자동차기술의 연구비 지원에

의해 수행된 결과의 일부로서, 연구를 지원해 주신 관계자, 특히 현대자동차 관계자들께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1) Yamada, T., Hayakawa, N., Kami, Y. and Kawai, T., "Universal Air-Fuel Ratio Heated Exhaust Gas Oxygen Sensor and Further Application" SAE Paper 9202341, 1992.
2) Suzuki, S., Sasayama, T., Miki, M., Ohsuga, M., Tanaka, S., Ueno, S. and Ichikawa, N., "Air-Fuel Ratio Sensor for Rich, Stoichiometric and Lean Ranges", SAE Paper 860408, 1986.
3) Hasegawa, Y., Akazaki, S., Komoriya, I., Maki, H., Nishimura, Y. and Hirota, T., "Individual Cylinder Air-Fuel Ratio Feedback Control Using an Observer", SAE Paper 940376, 1994.
4) California's OBD-II Regulation "Malfunction and Diagnostic System Requirement 1994 and Subsequent Model-Year Passenger Cars, Light-Duty Trucks, and Medium-Duty Vehicles and Engines" Mail Out #95-03. 1995.
5) Chung, Y., Choi, S., Bae, C. and Yoon, K., "A New Concept of Misfire Detection Using a Wide-Range Oxygen Sensor in a Spark Ignition Engine", Accepted for Publication in Journal of Automobile Engineering, I Mech E, 1995.
6) Chung, Y., Choi, S., Bae, C. and Yoon, K., "Application of a Wide Range Oxygen Sensor for the Misfire Detection", SAE Paper 1999-01-1485, 1999.
7) Chung, Y., Choi, S., Bae, C. and Yoon, K., "Detection of the Misfired Gas Flow in the Exhaust Manifold", Proceedings of the 15th Internal Combustion Engine Symposium of JSAE in Seoul, pp19~pp24, 1999.
8) Buglass, J.G., Morgan, T.D.B. and Graupner, J.O., "Interactions Between Exhaust Gas Composition and Oxygen Sensor Performance", SAE Paper 982646, 1998.
9) Chung, Y., Kim H., Choi, S. and Bae, C., "Flow Characteristics of Misfired Gas in the Exhaust Manifold of a Spark Ignition Engine", Accepted for Publication in Journal of Automobile Engineering, I Mech E, 1999.