

산소센서의 열화에 관한 연구(II)

A Study of Aging of Oxygen Sensor (II)

손건석*, 윤승원*, 고성혁*, 이귀영*
Geon Seog Son, Seung Won Yun, Seong Hyuk Ko, Kwi Young Lee

ABSTRACT

Oxygen sensors taken from the aftertreatment systems of 4 vehicles which had been aged in domestic filed were examined for aging effects on emissions using a idle engine bench. Also the artificial sensor signal generated by function generator was supplied to ECU, instead of oxygen sensor to simulate aging effects of oxygen sensor. This study shows that reduction of amplitude, deformation and shift of mean value of aged sensors seriously affect on the engine out emissions and the performance of TWC.

주요기술용어 : Oxygen sensor(산소센서), Aging(열화), Amplitude(진폭), Shift(이동), TWC(삼원촉매), OBD(자기진단기능), Deformation(변형)

Nomenclature

cpsi : cell per square inch
ECU : engine control unit
UEGO : universal exhaust gas oxygen
OBD : on board diagnostics
TWC : three way catalyst¹⁾

1. 서론

강화되는 배기규제 대응 기술로 사용하고 있는 삼원촉매(TWC, Three Way Catalyst)는 활성화된 이후 엔진의 정상적인 운전조

건에서 95% 이상의 높은 정화성능을 유지한다. 그러나 이러한 정화성능은 엔진이 이론공연비 부근에서 운전될 때만 가능하다. 삼원촉매에 있어 규제대상인 미연 탄화수소와 일산화탄소는 산소와의 산화반응에 의해, 질소산화물은 탄화수소, 일산화탄소와 같은 환원제와의 환원반응에 의해 정화된다. 따라서 삼원촉매 반응에서 배기 내 산소 농도는 중요하며, 이에 따라 정화성능이 결정된다. 즉 엔진이 연료희박영역에서 지속적으로 운전되어 배기 내에 산소가 다량 존재하면 질소산화물의 정화성능이 저하되고, 반대로 엔진이 연료농후영역에서 지속적으로 운전되어 배기 내 산소가 부족하면 미연 탄화수소 및 일산화탄소의 정화성능이 급격히 저하된다. 따라서 엔진이 다양한 운전조건에서 이론공연비 영역에서

* 회원, 고등기술연구원

운전되도록 하기 위해 연소 후 배기 내에 존재하는 산소분압으로 이론공연비 여부를 판가름하여 이를 엔진 전자제어장치(ECU, Engine Control Unit)로 피이드백(feedback)하는 산소센서의 역할이 매우 중요하다.

산소센서는 삼원촉매와 같이 배기의 고온과, 수분, 그리고 엔진 윤활유 성분 등에 노출되며, 특히 삼원촉매보다 상단에 위치하므로 열적 열화가 심하게 발생할 수 있다.

선행연구에 의하면 산소센서의 열화는 센서 출력신호의 진폭 감소, 주기 감소, 파형 변화, 중심선의 이동 등의 영향을 미친다.¹⁾

본 연구에서는 상기 열화거동이 엔진의 배출가스 성분 및 삼원촉매 정화성능에 미치는 영향을 아이들엔진벤치(idle engine bench)를 이용하여 평가하였다.

2. 실험

2.1 산소센서

본 실험에 사용한 산소센서는 선행연구¹⁾와 동일하며, Table 1에 장착되었던 차량의 운행적산계 거리를 나타내었다.

Table 1 Specification of oxygen sensors

Sample	Vehicle	Odor Meter
A-1	A	43,000km
A-2	A	44,000km
A-3	A	80,000km
B-1	B	50,000km
B-2	B	52,000km
B-3	B	80,000km

2.2 아이들엔진벤치 장치

열화된 산소센서가 엔진 배기에 미치는 영향을 평가하기 위해 Fig. 1과 같은 장치를 구성하였다. 사용한 엔진은 1.5 DOHC, 97MY이며, ECU는 국내시판용이다. 엔진은 가속 또는 감속 없이 무부하 상태에서 3000 rpm 정속으로 운전하였으며, 산소센서 및 엔진이 충분히 활성화된 후에 데이터를

수집하였다. 배기성분의 농도는 HORIBA MEXA9100 배기분석기로 삼원촉매기 전후에서 분석하였다. 배기온도 및 삼원촉매의 온도를 측정하기 위해 고응답성 열전대를 삼원촉매기의 입구와 각 삼원촉매 담체 중앙에 설치하였다. 삼원촉매기는 0.9L 체적의 세라믹 담체(400cpsi) 2개를 갖는 Pd/Rh 계열의 촉매를 사용하였다. 산소센서, 엔진, 배기분석기, 열전대로부터의 데이터는 10ms 간격으로 PC(Personal Computer)에 저장, 분석하였다.

ECU로 입력되는 공연비 신호는 차량에서 수거한 센서로 입력하였으며, 위치는 배기다기관 하단이다. 신속하며 정확한 산소농도 변화를 측정하기 위해 ECU 입력 산소센서보다 15cm 하류에 UEGO(Universal Exhaust Gas Oxygen) 센서를 장착하여 데이터를 함께 수집하였다.

2.3 산소센서 열화 모사 실험

선행연구¹⁾에서 얻은 산소센서 열화거동을 모사하기 위해 인위적인 산소센서 신호를 발생시켜 ECU에 입력하였다.(참조 Fig. 1) 인위적 신호는 신호발생기(function generator)를 사용하여 진폭은 0.3Volt.에서 0.2Volt.로, 주기는 3Hz에서 2.5Hz로, 중심선은 0.5Volt.에서 ± 0.2 Volt.까지 변화를 시켰다. ECU 입력신호 변화에 따른 배기성분 변화 및 온도변화를 측정하였다.

3. 시험 결과 및 고찰

3.1 산소센서 열화 모사

Fig. 2는 신호발생기 신호를 진폭은 0.2V로, 주기는 3.0Hz로 고정하여 중심선을 0.5Volt. 중심으로 상하로 변화시켜 가며 ECU로 입력하였을 때의 엔진 배기결과 및 온도변화를 나타낸다. 그림에서 세로축의 값은 정상 산소센서의 신호에 해당하는 주기 3.0Hz, 진폭 0.3V, 중심선 이동이 없는 신호를 ECU에 입력하였을 때 배출되는 값으로 각 변형 신호의 결과를 나눈 값이다. HC의 경우, 중심선 이동을 제외하고는 모

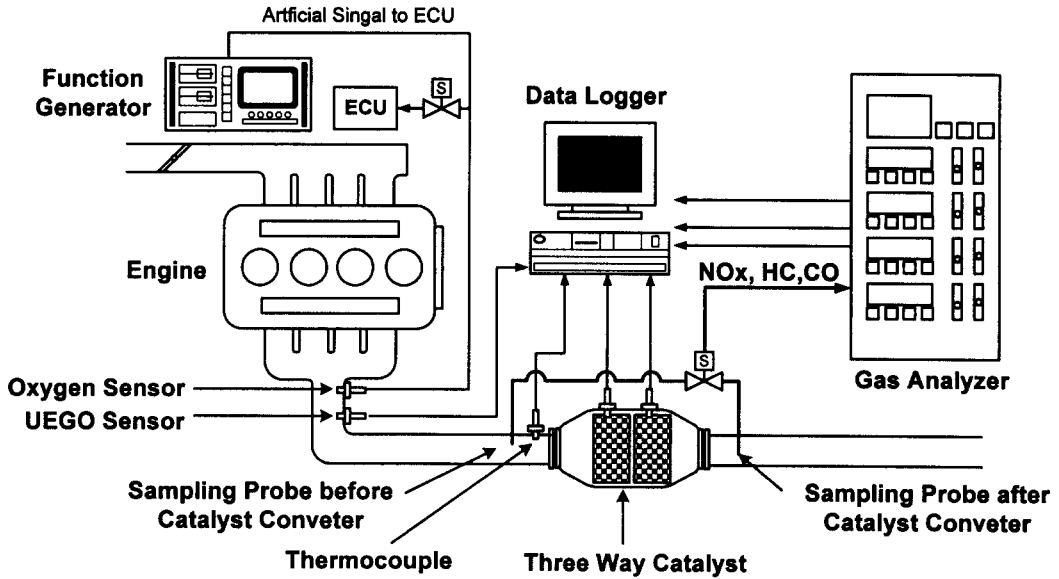


Fig. 1 Apparatus diagram for engine-bench test

든 경우에서 배출량이 증가한다. 중심선을 하향 조정한 경우(정상배기를 연료희박으로 판단)에는 이동 폭이 클수록 배출량이 증가하였다. 중심선을 상향한 경우(정상배기를 연료농후로 판단)한 경우 예상과 달리 배출량이 크게 증가하였다. NO_x와 CO의 결과로 유추해보면 연료분사량 감소로 이상연소가 발생한 것으로 판단된다. 즉 HC와 CO가 동시에 증가한 것이 아니라 HC는 크게 증가하고 NO_x와 CO가 감소한 것은 부분 실화보다는 완전 실화에 가까운 이상연소가 있었을 것으로 추정된다. CO의 경우, 중심선을 상향 조정할 경우를 제외한 모든 경우에서 크게 증가하였다. 중심선을 하향 조정할 경우, ECU는 공연비가 연료희박영역에 있다고 판단하여 연료분사량을 증가한 결과로 판단된다. 삼원촉매기 입구에서는 큰 변화가 없던 배기온도가 촉매에서는 중심선 상향에서 증가하였는데 이는 배기 중의 미연 탄화수소성분이 촉매 상에서 산화되었기 때문이다.

Fig. 3은 신호발생기 신호를 진폭은 0.2V로, 주기는 2.5Hz로 고정하여 중심선을 0.5Volt.에서 상하로 변화시켜 가며 ECU로 입력하

였을 때의 엔진 배기결과 및 온도변화를 나타낸다. Fig. 2의 3.0Hz 결과와 유사한 경향을 나타내나, 중심선을 상향 조정할 경우, HC성분이 크게 증가하는 중심선 이동 값이 0.1V 증가하였다. 3.0Hz 결과와 비교하였

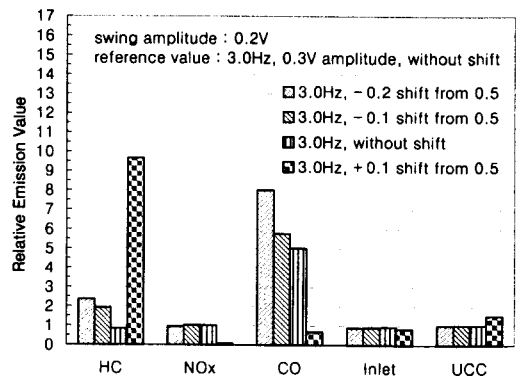


Fig. 2 Relative engine out emission value (3.0Hz frequency, 0.2V amplitude)

을 때 배출량 증가폭이 증가하거나 감소하는 일관된 경향을 보이지 않는 것으로 보아 2.5Hz까지의 주기 감소는 엔진 배출량에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다.

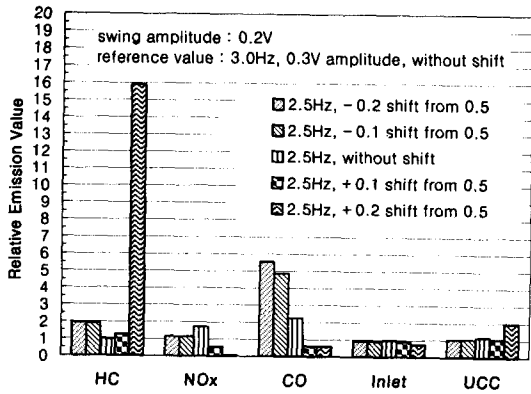


Fig. 3 Relative engine out emission value (2.5Hz frequency, 0.2V amplitude)

3.2 열화 산소센서

Fig. 4는 승용차에서 수거한 산소센서를 ECU로 입력한 경우의 엔진 배출량을 새 산소센서에 대해 상대 비교하여 나타낸다.

선행결과¹⁾에 의하면 모든 산소센서가 정상배기를 연료농후상태로 지시하여 연료분사량을 감소시켜 HC 배출량이 감소할 것으로 예측되나, 두 경우를 제외하고는 HC 배출량이 증가하였다. 이는 세 가지 경우로 해석할 수 있다. 첫 번째는 A-1과 A-3의 결과처럼 HC는 증가하나 NOx는 감소하는 경우로 산소센서 신호가 ECU에서 정상 산소센서로 판단하지 않는 경우이다. 이러한 경우, ECU는 운전자에게 이상 신호를 알리며, 사전에 입력된 자료를 근거로 연료분사량을 설정하는 개회로(open loop)로 들어간다. 따라서 엔진의 운전상태에 관계없이 연료분사량이 결정되므로 정확한 공연비 제어가 이루어지지 않아 HC와 NOx가 불규칙하게 배출되며, 주도적인 공연비 영역에 따라 두 성분 중에 한 성분이 증가한다. 본 경우에는 HC가 증가하고 NOx는 감소하였다. 두 번째는 A-2와 B-2의 결과처럼 HC는 감소하고 NOx는 증가하는 경우로 산소센서가 정상배기를 연료농후상태로 지시하여 ECU가 연료분사량을 감소시켜 연료희박영역에서 운전한 경우에 해당한다. 세 번째는 B-1과 B-3의 결과처럼 HC와 NOx가 동시에 증가하는 경우로 센서 신호의 중

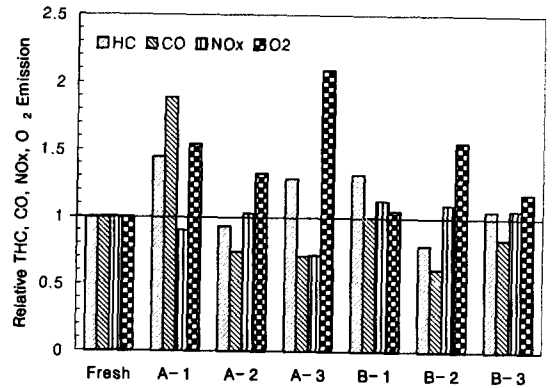


Fig. 4 Relative engine out emissions according to aged oxygen sensors

심선이 평균적으로 연료농후영역으로 다소 치우치며 파형이 변형된 것을 제외하고는 주기와 진폭이 거의 정상 산소센서와 같은 경우이다.¹⁾ 이 경우 엔진은 거의 정상적으로 작동하나 순간 순간 변형된 산소센서 파형에 의해 연료농후영역 또는 희박영역에서 운전되는 것으로 HC와 NOx 모두 증가하게 된다. 산소의 경우는 모든 열화 산소센서의 결과에서 증가하였다. 배기 내에 산소농도의 증가는 삼원촉매의 질소산화물 정화 성능에 지대한 영향을 미친다. 즉 질소산화물의 환원에 필요한 미연 탄화수소와 일

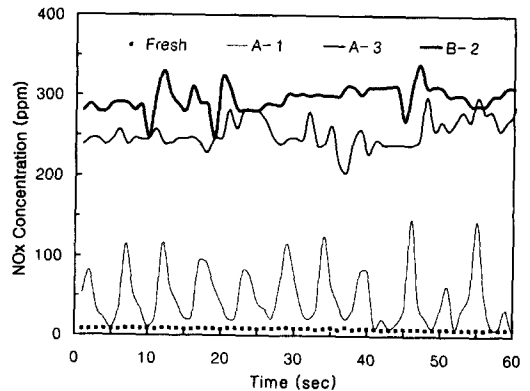


Fig. 5 Tailpipe NOx emission according to aging of oxygen sensor

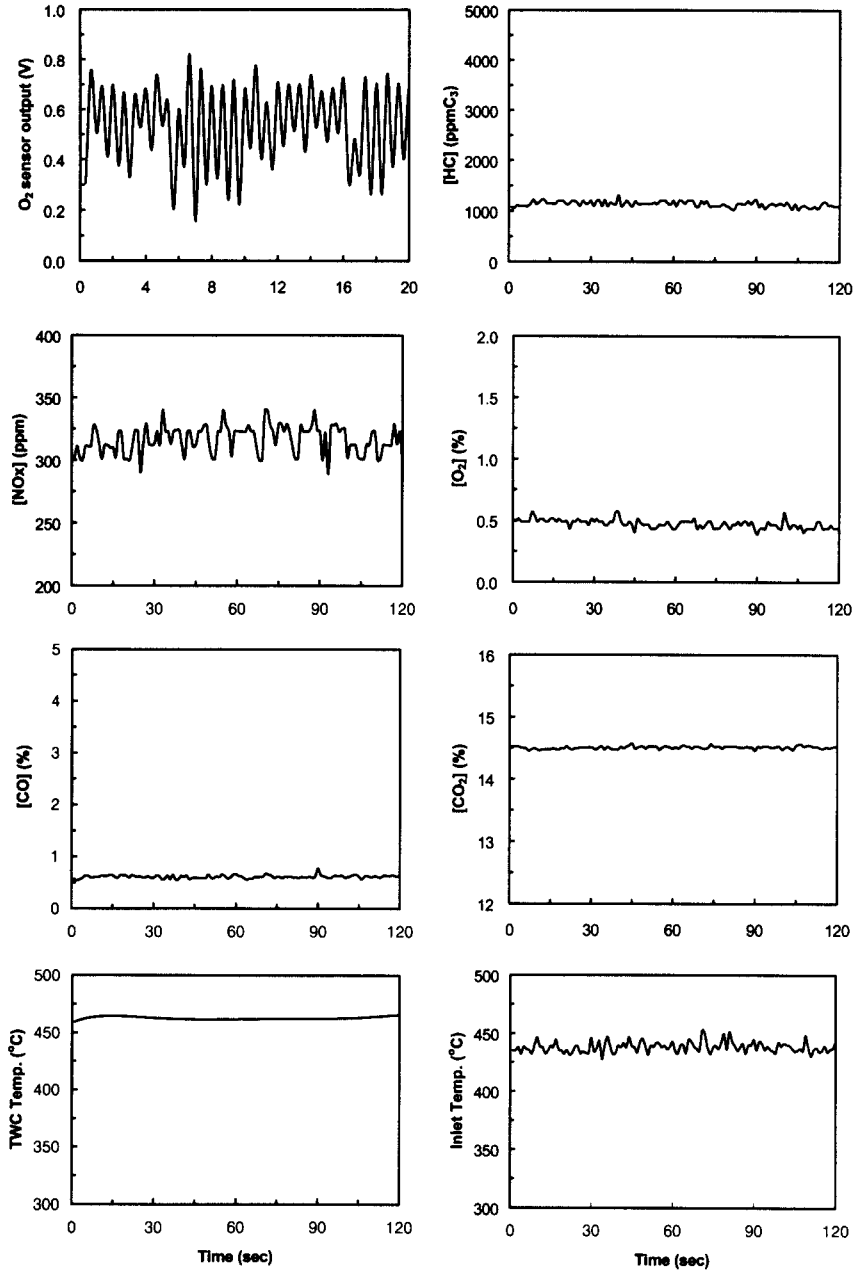


Fig. 6 Sensor signal, engine out emissions and exhaust temperature when fresh oxygen sensor was used for ECU

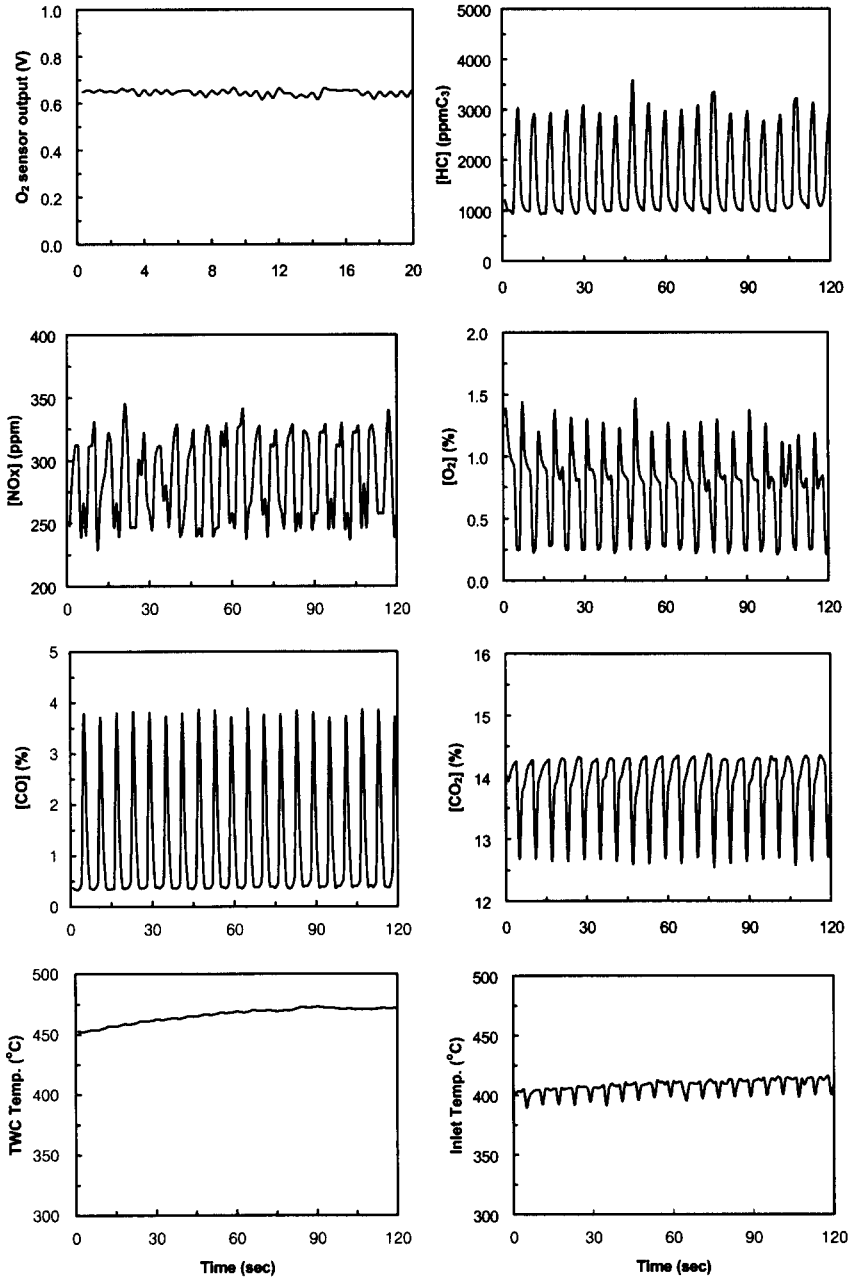


Fig. 7 Sensor signal, engine out emissions and exhaust temperature when A-1 oxygen sensor was used for ECU

산화탄소와 같은 환원제가 산소와 반응하여 소모되어 환원반응이 저하되며, 촉매인 금속 상이 산화되어 촉매 자체적으로 환원 반응에 절대적으로 불리한 조건으로 변형됨에 따라 질소산화물 정화성능이 급격히 저하한다.²⁾

Fig. 5는 삼원촉매기를 통과한 후에 측정된 배기 내 질소산화물의 농도를 정상 산소센서, A-1, A-3 및 B-2 산소센서에 대해 나타낸다. 예측한 바와 같이 정상 산소센서가 ECU로 입력된 경우 농도변화가 없이 거의 모든 양이 정화되었으나 촉매가 열화됨에 따라 농도변화도 크며 정화성능도 크게 저하되어 다량의 질소산화물이 배출되고 있음을 알 수 있다.

상기 가정된 산소센서의 열화에 따른 엔진 운전 조건을 배기로 확인하기 위해 Fig. 6과 Fig. 7에 정상 산소센서와 A-1 산소센서를 각각 사용한 경우의 엔진 배출량 및 배기온도 결과를 나타내었다. 정상 산소센서 결과 HC, CO, NOx, O₂, CO₂ 성분 등이 안정적으로 배출되며 삼원촉매기 입구에서의 온도도 일정하게 유지됨을 알 수 있어 엔진 내에서 연료가 안정적으로 일정하게 연소되었음을 유추할 수 있다. 반면에 열화가 진행되어 진폭과 주기가 감소하고 파형이 변형된 A-1 센서의 경우, 모든 배기성분이 심한 변화를 보이며, 삼원촉매기 입구 온도도 변하고 있어 엔진 내 연소조건이 매우 불안정함을 알 수 있다. 이는 앞서 설명한 개회로 공연비 운전조건에 의해 공연비가 정교하게 제어되지 못했음을 의미한다.

4. 결 론

아이들엔진벤치를 이용하여 국내에서 운행중인 승용차로부터 수거한 산소센서와 신호발생기를 이용한 열화 센서의 모사 시험을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 산소센서의 열화는 엔진의 공연비 제어에 큰 영향을 미쳐 엔진 배출가스 성분 및 배기온도를 변화시킨다.
- 2) 산소센서 신호의 주기와 진폭, 파형이 심하게 변형된 경우, ECU가 개회로 공연비 운전모드로 전환되어 HC 배출량이 크게 증가하며, 엔진 연소가 지극히 불안정하게 된다.
- 3) 산소센서 신호의 진폭과 주기는 거의 유지되며 파형과 중심값이 변한 경우, 순간순간의 공연비 제어가 불안정하여 전체적으로는 HC와 NOx가 동시에 증가한다.
- 4) 산소센서가 열화된 경우, 열화 정도 및 경향에 관계없이 배기 내 산소농도가 증가하고 촉매 자체 특성 및 환원제 감소에 따라 삼원촉매기의 질소산화물 정화성능이 크게 저하된다.

참 고 문 헌

- 1) 손건석, 윤승원, 이귀영, "산소센서의 열화에 관한 연구(1)," 한국자동차공학회 논문집 제8권 1호, pp.85-91, 2000.
- 2) R.J. Brisley, et al., "The Effect of High Temperature Aging on Platinum-Rhodium and Palladium-Rhodium Three Way Catalysts," SAE 910175, 1991.