

냉간 시동 조건에서 산소센서 히터 가열률 기반 고장 분리 진단 방법

박 형 주^{*1)}, 한 승 택²⁾, 정 찬 호³⁾, 김 상 민⁴⁾

현대케피코¹⁾, 현대케피코²⁾, 현대케피코³⁾, 현대케피코⁴⁾

Heating-Rate-Based Fault Isolation for Oxygen Sensor Heater under Cold Start Conditions

Hyungju Park^{*1)} · Seungtaek Han²⁾ · Chanho Jeong³⁾ · Sangmin Kim³⁾

Hyundai Kefico¹⁾, Hyundai Kefico²⁾, Hyundai Kefico³⁾, Hyundai Kefico⁴⁾

Key words : ECU(엔진컨트롤유닛), Oxygen sensor heater(산소 센서 히터), Heating rate(가열률), Cold start(냉간 시동), Fault isolation(고장 분리)

교신저자, E-mail: Hyungju.Park@hyundai-kefico.com

산소센서 히터는 냉간 시동 조건에서 센서 온도를 상승시켜 페루프 연료 제어 전환 시간을 단축하고 배출가스 저감을 가능하게 한다. 그러나 실제 차량 환경에서는 히터 소자 열화, 와이어 하네스 및 접지 경로의 전압 강하, 구동 회로 미구동 등 다양한 요인으로 인해 유사한 증상을 나타내기 때문에 고장 원인 구분이 어렵다.

기존 산소센서 히터 진단은 주로 회로의 단선/단락의 전기적 이상 검출에 초점을 두고 있어, 동일한 활성화 지연 증상을 유발하는 다양한 원인을 분리하는 데 한계가 있다. 특히 와이어 하네스 저항 증가나 히터의 열적 특성 변화와 같은 열화는 단순 임계값 기반 진단으로 구분하기 어려워 불필요한 부품 교체를 유발하거나 정확한 고장 원인 파악을 어렵게 만드는 요인이 될 수 있다.

본 논문에서는 냉간 시동 초기 구간에서 히터 가열률에 기반하여 산소센서 히터 고장을 원인별로 분리 진단하는 방법을 제안한다. 히터 유효 전력과 센서 활성화 지연 시간 사이의 관계를 열특성 모델로 표현하고, ECU에서 배터리 전압 모니터링과 산소센서 히터의 Low-side switch 구동 구조에서 셉트 저항 및 OPAMP 증폭을 통해 히터에 흐르는 전류를 측정한다. 이를 통해 추가 센서 없이 히터 전압, 전류, PWM 듀티 및 센서 활성화 지표와 같은 기존 제어기 신호만으로 구현 가능한 구조로 고장 유형을 분리한다.

산소센서와 히터를 열특성 모델로 근사한 결과는 초기 가열률은 유효 전력에 비례하며, 활성화 온도에 도달하는 시간은 유효 전력이 감소할수록 증가하는 특성을 갖는다. 이러한 관계를 이용하면 동일한 활성화 지연 현상이 발생하더라도 유효 전력 감소 여부에 따라 고장 원인을 구분할 수 있다.

고장 원인 분리는 세 가지 유형으로 정의하였다. 첫 번째는 히터 구동 회로가 동작하지 않아 전류가 발생하지 않는 미구동 고장이다. 두 번째는 와이어 하네스 또는 접지 경로의 전압 강하로 인해 히터에 전달되는 유효 전력이 감소하는 경우이다. 세 번째는 히터의 열화로 인해 동일한 유효 전력이 공급되더라도 가열률이 감소하는 경우이다. 제안된 진단 로직은 히터 전류 측정을 이용하여 미구동 여부를 우선 판별하고, 이후 유효 전력과 활성화 지연 시간의 관계를 이용하여 와이어 하네스 전압 강하와 가열 성능 저하를 분리한다.

또한 열 저항 및 열 용량 변화에 대한 강건성 분석을 통해 열 파라미터 변화에 따라 활성화 시간이 변할 수는 있으나, 유효 전력 감소 여부를 기준으로 한 고장 분리 기준은 유지됨을 확인하였다. 이는 실제 차량 환경에서 발생할 수 있는 다양한 열 조건 변화에도 불구하고 제안된 가열률 기반 고장 분리 진단 방법이 안정적으로 적용될 수 있음을 의미하며, 산소센서 히터 관련 고장 원인 파악의 정확도를 향상시키고 불필요한 부품 교체를 줄이는 데 기여할 수 있다.