

프렛팅 마모에 의한 커넥터 단자의 접촉불량 재현

김 성 우[†] · 정 원 옥* · 위 신 환** · 김 형 민** · 박 성 배*** · 이 동 훈***

Reappearance of the Electrical Poor Contact in Connectors by Fretting Wear

Kim Seong Woo, Jung Won Wook, Wei Shin Hwan, Kim Hyung Min, Park Sung Bae and Lee Dong Hun

Key Words : Fretting Wear/Corrosion(프렛팅 마모/부식), Poor Contact(접촉 불량), Connectors(커넥터)

ABSTRACT

Failure mechanism of the poor contact is analyzed on the basis of used connectors and this poor contact of connectors is reappeared by the new forced fretting wear method. As the result of failure analysis and reappearance, fretting wear and corrosion of the contact interface causes the contact resistance degradation and the poor contact of connectors. The amount of degradation depends on the fretting stroke. Changes in contact resistance of static contacts are likely to be small and gradual, while motions of contact interface may result in larger and discontinuous changes in resistance and voltage. This voltage drop by fretting motions is large enough to cause the distortion of sensor signal and mis-working of electric components.

1. 서 론

최근 사용자의 안전 및 편의는 물론 차량 성능의 향상을 위한 전장화 추세로 단일 차량에 적용되는 커넥터 수가 400 여 개에 이를 정도로 급격히 증가하고 있다. 이에 대해 필드에서의 커넥터 접촉불량으로 인한 각종 센서 및 전장품의 오 동작은 수십 년간 지속적으로 발생되고 있다. 상기와 같은 커넥터 적용수의 증가 추세 및 접촉 불량 문제의 지속적 발생을 고려할 때 완성차의 내구 신뢰성 향상을 위해서는 커넥터 접촉 불량 개선이 필수적이다.

필드에서의 커넥터 접촉불량으로 인한 센서 신호의 왜곡 및 전장품의 오동작은 매우 간헐적으로 야기된다. 또한 서비스 센터의 고장 확인 과정에서 단 한번의 커넥터 분리 및 조립에 의해서도 고장 현상이 일시적으로 제거되기 때문에 고장 재현은 물론 고장 원인 분석 자체가 매우 힘들다. 그러므로 수십 년간 지속된 고질 문제인 커넥터 접촉불량의 문제를 원천적으로

개선하기 위해서는 커넥터 접촉불량의 현상 및 발생 메커니즘의 규명이 선결되어야 한다. 또한 커넥터 접촉불량으로 인한 이상 현상의 발생 메커니즘에 대한 분석이 절실히 요구된다.

따라서 본 연구에서는 전술한 각각의 고장 메커니즘을 순차적으로 명확히 분석, 재현 하도록 우선적으로 필드 사용품에 대한 열화 분석을 실시한다. 상기 분석 결과를 토대로 커넥터 접촉 불량의 발생 메커니즘을 분석한다. 또한 커넥터 접촉불량으로 인한 센서 신호의 왜곡을 파악 함으로서 커넥터 접촉 불량 고장을 재현한다.

2. 본 론

2.1 필드 사용품 분석

고장 재현 대상품의 고장율 수준은 수백 ppm 수준으로 필드 고장품을 확보하기가 사실상 힘들다. 설사 확보하더라도 전술한 바와 같이 고장 현상의 확인 과정에서 커넥터 분리 및 조립에 의해 고장 원인이 제거되기 때문에 온전한 필드 고품을 확보한다는 것은 거의 불가능하다. 그러므로 고장은 특정 열화의 결과물이라는 점에 착안하여 필드 사용품을 대상으로 분석한다. 필드에서의 고품은 상대적으로 열악한 환경에서 사용된 것이고, 분석 대상인 필드 사용품은

[†] 현대자동차 내구신뢰성팀
E-mail : goodtry@hyundai-motor.com
Tel : 031-368-8786 Fax : 031-368-8183

* 현대자동차 내구신뢰성팀

** 자동차부품연구원 신뢰성기술센터

*** 유라코퍼레이션 기술연구소

평균적인 사용품이다. 따라서 열화 상태 및 인자를 명확히 분석하고자 필드에서 장시간 사용한 부품을 우선 대상으로 분석을 실시한다. 또한 상기의 열화 경향이 그보다 적은 사용기간의 부품에서도 발생되는지를 분석한다.

Fig.1 은 주행거리가 50 만 km 의 차량에서 회수한 필드 사용품 단자의 접촉저항을 신품과 비교한 산점도를 나타낸 것이다. 대상 부품은 엔진 와이어링의 센서 측 커넥터로 그림에서 보는 바와 같이 필드 사용품의 접촉저항은 신품 대비 최대 30% 정도 증가하는 경향이다. 필드에서 커넥터 단자의 전기적 특성인 접촉저항의 열화 경향은 전반적으로 증가하는 경향을 보이나, 그 열화 정도는 커넥터 단자의 종류 및 장착 위치에 따라 차이를 보였다.

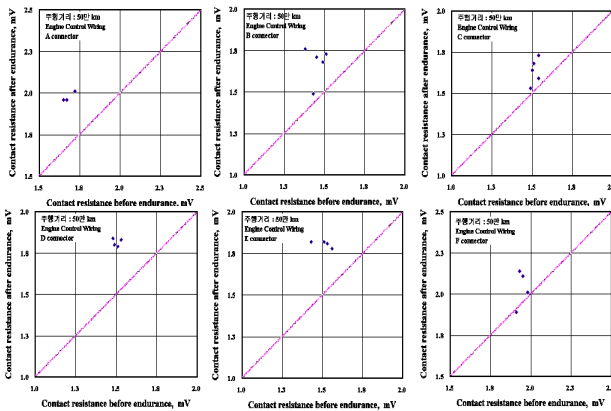


Fig. 1 Scatter diagram of the contact resistance

상기와 같은 필드 사용품 단자의 접촉 저항 증가 원인을 파악하고자 해당 커넥터의 단자에 대한 SEM 분석을 실시하였으며, 그 결과를 Fig.2 에 나타낸다. 그림에서 보는 바와 같이 저 배율의 사진에서는 단자 접촉부의 국부적으로 도금막이 파손된 것을 볼 수 있다. 또한 고 배율의 사진에서는 접촉부의 도금막 파손 부위 내에 작은 입자(particles)가 분포되어 있음을 볼 수 있다. 상기와 같은 암수 단자 표면의 도금막 파손에 의한 단자 접촉부의 입자분포가 암·수 단자간 실 접촉면적을 감소시켜 Fig.1 에서와 같은 접촉저항의 증가를 가져오는 것으로 파악된다. 도금막의 파손 및 입자의 생성 정도는 커넥터 하우징과 단자의 종류에 따라 큰 차이를 보인다. 동일한 하우징과 단자를 채택한 커넥터라도 장착 위치에 따라 접촉 저항은 큰 차이를 보였다. 이는 동일한 엔진 룸 조건이더라도 진동 및 온도 등의 사용환경이 현저히 다르기 때문에 발생하는 것을 시사하는 것이다. 단자 접촉부의 도금 막의 파손 여부원인을 다음과 같이 파악한다.

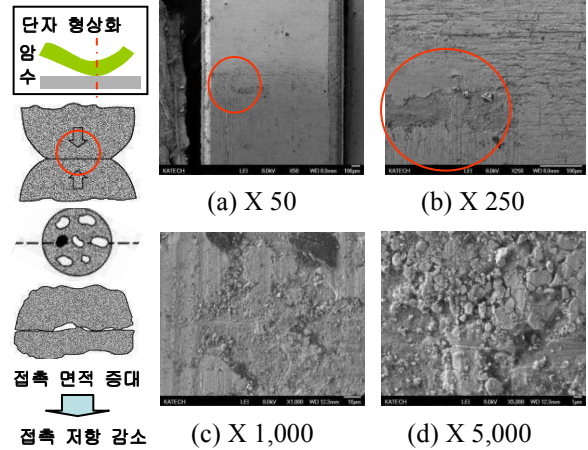


Fig. 2 Wear characteristics of the interface by SEM

상기의 접촉 부 도금막 파손 및 입자 생성의 원인을 파악하기 위하여 단자 삽탈을 10 회 실시한 신품 단자와 주행거리 35 만 km 의 필드 사용품을 비교한 것이 Fig.3 이다. (a)에서 보는 바와 같이 단자 삽탈을 10 회 실시한 신품 단자의 경우 그림 상의 상하방향인 삽입 방향의 긴 scratch 만을 볼 수 있다. 이에 반해 (b)에서 보는 바와 같이 필드 사용품은 삽입방향의 긴 scratch 외에 국부적인 도금막의 파손된 것을 볼 수 있다. 도금막 파손 위치가 암·수단자의 접촉부와 일치하며, 국부적으로 발생하는 것으로부터 암·수단자간 상대운동에 기인한 마모에 의해 발생하는 것으로 파악된다.

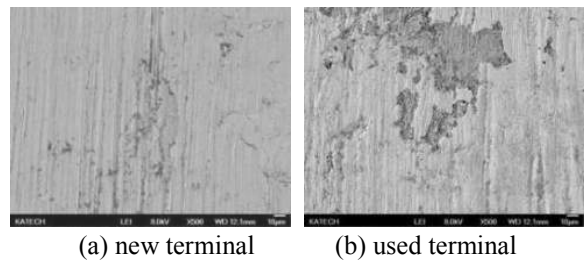


Fig. 3 Comparison of wear characteristics by SEM

단자 접촉부의 마모 정도가 차량의 주행거리에 따라 차이를 발생하는지 파악하고자, Fig.4 와 같이 주행거리별 단자 표면의 마모 정도를 비교하였다. 그림에서 보는 바와 같이 커넥터 단자의 마모 경향은 주행거리의 증가에 따라 마모 면적이 증가하고, 그 윤곽이 뚜렷해지는 것을 경향을 보인다. 또한 일부 35 만 km 의 주행품 단자는 마모가 발생된 단자 표면에 부식이 진전된 것도 있음을 볼 수 있다. 주행거리에 따라 단자 표면의 마모 및 부식 정도가 증가하는 경향은 다른 커넥터 단자에서도 거의 동일한 경향이다.

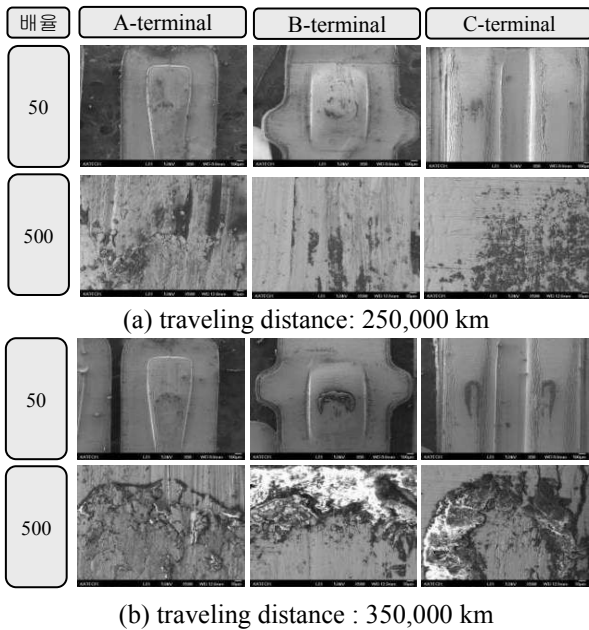


Fig. 4 Wear and corrosion characteristics of the Interface on the traveling distance

2.2 커넥터 접촉불량의 발생 메커니즘

커넥터의 전기적인 연결은 기본적으로 암·수단자의 금속간 접촉으로 이루어지는데, 여기서 제일 중요한 것은 금속 상호간에 접촉 안정성이다. 이것은 곧 단자의 전기적 신호 안정성을 좌우하게 되는 것이다. 커넥터 단자에서 금속간에 μm 단위의 상대운동에 의한 국부적인 마모 및 부식에 의한 고장 메커니즘이 프렛팅 마모 및 부식(fretting wear and corrosion)이론이다.¹⁾ 상기의 이론은 금속간 접촉에 의한 피로파괴 이론이나 최근 커넥터 단자의 접촉불량 발생 메커니즘을 설명하는데 있어 적절한 것으로 평가되고 있다.²⁾ 상기의 프렛팅 마모는 (1) 구성 부품간 마이크로 모션의 상대운동, (2) 상대운동 부품간 작용하중에 의해 발생된다. 상기의 마모면에 (3)습도 및 온도에 의한 부식 및 산화가 촉진됨으로써 프렛팅 마모/부식이 발생된다. (1)의 마이크로 모션은 차량의 각종 진동에 기인하며, 암·수 커넥터간 유격 및 하우징과 단자간 유격, 접압력 등에 좌우된다. (2)의 상대 부품간 하중은 단자 스프링 탄성에 의한 단자 접압력이다.

Fig.5 는 커넥터 접촉불량의 발생 메커니즘을 나타낸 그림이다. 진동에 의해 발생하는 암·수 단자간 상대운동에 의해 단자 표면의 마모가 발생된다. 이 마모 입자는 상대운동에 의해 접촉부에 국부적으로 퇴적된다. 상기의 퇴적 마모 입자는 작아질수록 공기와의 접촉이 용이하므로 산화 및 부식이 촉진되어 결국 Fig.1 에서와 같은

전기적 접촉저항의 증가를 가져온다. 특히 차량 운행 중 커넥터가 진동하는 동적 상태에서 암단자 접촉부가 마모 입자 퇴적부에 놓일 경우 커넥터의 접촉불량이 발생된다. 마모 면이 불균일하므로 동적 상태에서의 접촉 위치에 따라 간헐적으로 발생한다. 필드 사용품의 분석결과, 커넥터의 전기적 접촉 불량은 단자 표면의 마모 등과 같은 물리적 열화와 마모 면의 부식 등과 같은 화학적 열화로 인해 결국 접촉면의 안정성이 저하로 인해 발생하는 것으로 해석된다.

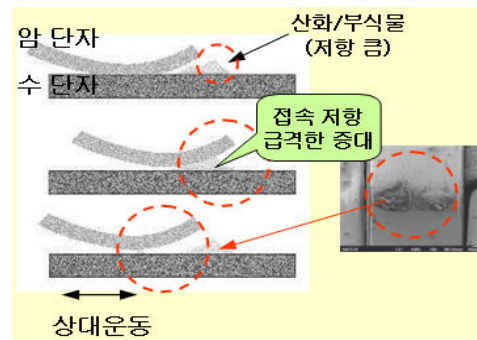


Fig. 5 Failure mechanism of the poor contact

2.3 커넥터 접촉불량의 고장 재현

암단자와 수단자간의 프렛팅 마모에 의해 접촉불량이 발생하는지를 파악하기 위하여 Fig.6 과 같은 단자 프렛팅 마모 시험기를 개발하였다. 이 시험기는 크게 마이크로 모션에 의한 프렛팅 마모 발생기, 온습도 챔버, 제어 및 측정부로 구성된다. 프렛팅 마모 발생기는 전자식 리니어 액추에이터에 의해 작동되며, 변위 센서에 의해 피드백 제어됨으로서 변위 가변의 마이크로 모션을 실현한다.

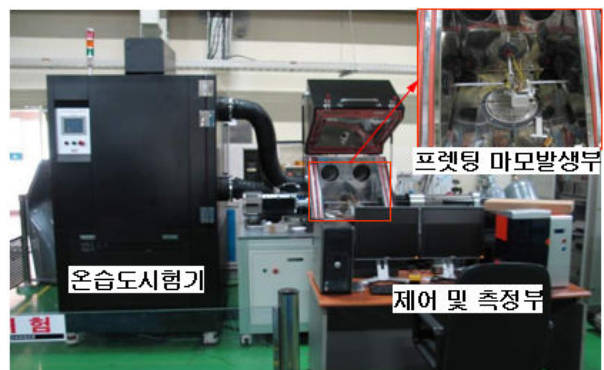


Fig. 6 Photograph of the forced fretting tester.

Fig.7 은 단자 프렛팅 마모 사이클 횟수에 따른 접촉저항 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 접촉부 저항은 거의 변화가 없다가 5 만회 이상의 프렛팅 사이클이 진행된 후 급격한

저항 변화가 간헐적으로 발생하는 것을 볼 수 있다. 이는 전술한 바와 같이 암·수단자간 상대운동에 의한 마모 입자의 생성 및 퇴적 후 발생하는 것을 의미하는 것이다. 급격한 저항 변화가 발생하는 프렛팅 사이클 횟수는 동일한 단자 종류일지라도 시료 별로 큰 차이를 보였다.

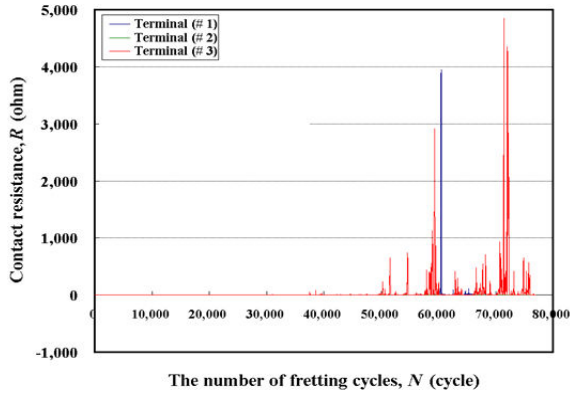


Fig. 7 Contact resistance in fretting conditions.

상기와 같은 단자의 접촉저항 변화에 의한 단자 접촉부 전압강하 특성을 동적 상태에서 파악하기 위하여 7 만 사이클 이후에 저항 변화가 발생되기 시작한 시료에 대해 DC 5V 의 순간 단락 검증 회로를 통해 전압강하를 측정하였다. Fig.8 은 각각의 프렛팅 사이클 횟수에 따른 전압 파형을 나타낸 것이다. 프렛팅 사이클 7 만회 이전에는 파형의 변화가 거의 없다가 특정 횟수 이후 약 0.5V 의 전압 변동이 간헐적으로 발생된다. 전압 강하의 크기는 프렛팅 사이클 횟수가 증가함에 따라 1V 에서 5V 까지 점진적으로 커지는 경향을 볼 수 있다. 각각의 순간 단락 파형 변화는 무작위적으로 발생하며, 단락 시간은 수 μ s 에서 수천 μ s 에 이른다.

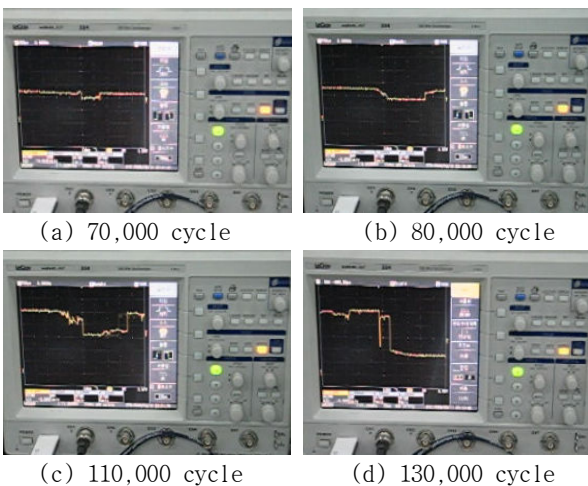


Fig. 8 Voltage drop on the state of fretting wear

필드에서 커넥터 접촉불량에 의한 고장이 발생하는 경우 고장 현상을 파악하기 위해 차량 운행을 정지하면 고장 현상이 사라지는 사례가 많다. 이는 차량 운행 정지에 의해 프렛팅 현상이 일시적으로 사라지는 것이다. 이때의 영향을 파악하기 위하여 프렛팅 마모에 의해 접촉부의 급격한 저항 변화가 발생된 시료에 대해 프렛팅 마모가 진행되는 동적 상태와 프렛팅 마모를 중지한 정적 상태에서의 저항 변화를 연속적으로 측정하여 그 차이를 파악한 것이 Fig.9 이다. 그림에서 보는 바와 같이 프렛팅 사이클 시험 중 모든 단자에서 미소한 저항 변화가 발생되었지만 급격한 저항 변화가 발생하는 시료는 4 개 중 1 개로 8 만 사이클 이후에 급격한 저항 변화를 보였다. 프렛팅 마모 중인 동적 상태에서의 저항 변화는 초기치 대비 약 760 m Ω 이며, 프렛팅 마모가 멈춘 정적 상태에서의 저항 변화는 6.3 m Ω 이다.

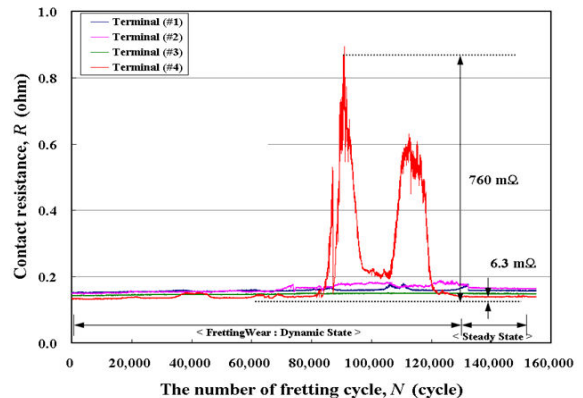


Fig. 9 Contact resistance at the dynamic state and the steady state

초기치 대비 내구 후의 접촉 저항이 크다는 것이 커넥터 접촉불량과 직접 관계되는지를 파악하기 위하여, 초기치 대비 저항 상승치를 정적 상태와 동적 상태에서 비교한 것이 Fig. 10 이다. 그림에서 보는 바와 같이 프렛팅 마모 완료 후의 정적 상태에서의 저항 변화가 제일 큰 것은 2 번 단자이나, 실제 동적 상태에서 저항 변화가 가장 크게 발생된 것은 4 번 단자이다. 기존의 정적 상태에서의 저항 측정방법은 동적 상태에서 저항이 급격히 증가하는 4 번이 고장이 아닌 2 번과 같은 정적 상태에서 저항이 큰 것이 고장으로 판별되는 오류가 발생할 수 있음을 보이는 것이다. 이것은 기존의 고장 판별기준인 정적 상태의 저항 측정법은 단자와 전선의 고정부인 단자 클램핑 부에 의한 접촉불량 등을 분석하는 기준으로 동적 상태의 단자 접촉부의

접촉불량을 판별하는 기준이 될 수 없음을 보이는 것이다.

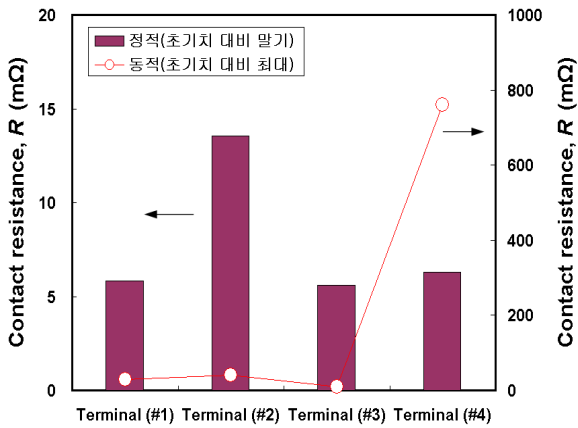


Fig. 10 Comparison of the contact resistance at the dynamic state and steady state

Fig.11 는 프렛팅 마모시험 중 접촉불량이 발생된 시료의 단자 접촉부 표면을 분석한 SEM 사진을 나타낸 것이다. 암·수 단자 모두 Fig.2 의 필드 사용품에서와 같이 저 배율 사진에서는 단자 접촉부의 마모면이 관찰되고, 고 배율 사진에서는 단자 접촉부의 마모 입자를 관찰할 수 있다. 단자의 전기적 접촉은 암단자간 수단자간 기본적으로 양쪽 면으로 이루어져 있고 상기의 양쪽 면이 모두 프렛팅에 의한 마모가 동시에 진전되어야 접촉불량이 발생한다. 이것이 필드에서 프렛팅 마모가 발생하더라도 발생빈도가 상대적으로 적은 이유이다. Fig.4 에서와 같은 마모면의 부식 생성을 재현하기 위해서는 추후 연구가 진행되어야 할 것으로 보인다.

암·수단자간 마이크로 모션을 재현한 커넥터 단자 프렛팅 마모시험기를 통해 필드 사용품과 동일한 단자 접촉부의 프렛팅 마모를 재현하였다. 또한 상기의 프렛팅 마모에 의해 급격한 접촉저항 변화 및 전압 강하와 같은 전기적 접촉불량을 재현하였다.

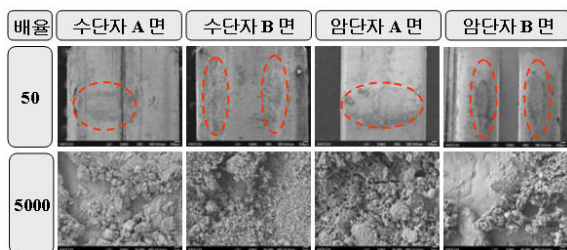


Fig. 11 Wear characteristics of the terminal after forced fretting test

2.4 접촉불량에 의한 센서 신호의 왜곡 재현

프렛팅 마모 시험을 통해 재현된 전압강하 및 단락시간의 수준이 차량에서 사용하는 센서에 영향을 미치는지를 파악하였다. 기계적 방식의 단자 프렛팅 마모 시험에 의해 재현된 전기적 접촉불량은 간헐적으로 발생할 뿐 아니라 단락시간이 수 μs 에서 수천 μs 수준으로 무작위적이다. 따라서 상기의 간헐적이고 무작위적인 과형을 실차 적용시 그 영향을 명확히 분석하기 힘들기 때문에 전자적으로 단락시간을 제어할 수 있는 접촉불량 시뮬레이터를 새로이 개발하였다. 이 시뮬레이터는 센서의 전원 회로를 전자 스위칭 소자를 이용하여 $1\mu\text{s}$ 에서 $1,000\mu\text{s}$ 까지 임의적으로 단락 시킬 수 있도록 제작 되었다.

Fig.12 은 회전속도를 검출하는 센서의 전원을 $1\mu\text{s}$ 간격으로 단락 시간을 증가시켰을 때 이상 신호가 발생하는 과형을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 일정한 속도로 회전하는 Target 에 대해 특정 단락시간 이전까지는 노이즈 수준의 신호만 발생할 뿐 일정한 주기의 과형이 발생된다. 하지만 특정 단락시간 이후에는 두 개의 과형이 중첩되는 신호 왜곡이 발생됨을 볼 수 있다.

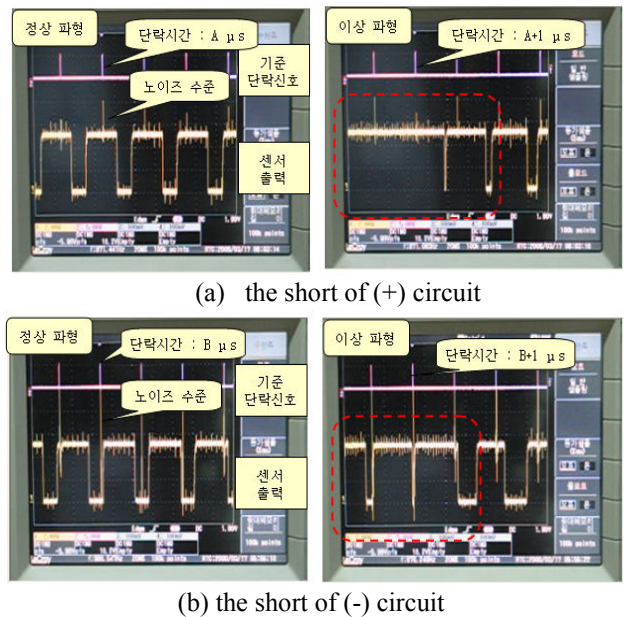


Fig. 12 Distortion of sensor signal by short of micro-second level

상기와 같이 커넥터의 접촉불량에 의해 센서 신호의 왜곡이 발생됨이 접촉불량 시뮬레이터에 의해 해석 되었다. 이것이 실차 엔진 이상현상을 발생 시킬 수 있는지를 파악하기 위하여 공회전(idling) 상태의 실차 조건에서 중요 센서에 대해 검증하였다. 센서의 전원을 단락 시켰을 때

특정 시간에 센서 신호의 왜곡이 생기며, 이것이 반복되면 엔진 공회전이 불안정해지는 현상을 보이고, 단락 시간이 더 늘어나면 엔진 시동이 꺼지는 현상도 볼 수 있다.

상기와 같이 필드 사용품 분석 결과를 토대로 커넥터의 접촉불량 현상을 파악한 결과, 커넥터의 접촉불량은 급격한 저항 변화로 인한 순간단락 및 이로 인한 신호 또는 전원의 왜곡임이 파악되었다. 커넥터 접촉불량의 발생원인은 프렛팅 마모 및 부식 등에 의한 단자 접촉부의 내구 안정성 저하에 기인한다. 진동에 의한 암·수 단자간 상대 운동을 갖는 동적 상태에서 주로 발생됨이 파악되었다. 프렛팅 마모에 의한 커넥터의 접촉 불량의 수준은 센서 신호의 왜곡 및 경고등 점등은 물론 전장품의 간헐적 작동불량을 발생시킬 수 있는 수백, 수천 μs 에 이름이 해석되었다.

3. 결 론

상기와 같은 고장 분석 및 재현시험을 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 필드 사용품에 대한 고장 분석 결과, 커넥터 접촉 불량은 진동에 의한 암·수 단자간 상대 운동을 갖는 동적 상태에서 크게 발생되며, 근본 원인은 프렛팅 마모·부식에 의한 단자 접촉부의 안정성 저하이다.
- 2) 상기의 암·수 단자간 프렛팅 마모에 의한 전기적 접촉불량의 크기는 수 μs 수준에서 수천 μs 에 이름이 파악되었다.
- 3) 단자간 상대 운동이 없는 정적 상태에서의 접촉저항의 변화 및 전압강하는 작으나, 단자간 상대운동을 갖는 동적 상태에서는 접촉저항은 크고 불연속적임이 밝혀졌다. 이는 커넥터 접촉불량의 문제가 진동 하에서 주로 발생되므로 이에 기초한 신뢰성 검증 방안이 필요함을 보이는 것이다.
- 4) 상기의 프렛팅 마모 시 발생하는 수준의 접촉 불량을 실차 상태에서 커넥터 단자 부에 발생시켰을 때 센서 신호의 왜곡이 발생되며, 이로 인해 엔진의 시동 꺼짐과 같은 이상현상이 발생될 수 있다.
- 5) 추후 프렛팅 마모에 대한 단자 자체 및 커넥터 어셈블리 상태의 신뢰성 검증 및 설계 개선 대책에 대한 연구가 수행되어야 할 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 지식경제부의 신뢰성기반확산사업의 일환으로 수행되었으며, 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) “신뢰성 용어 해설서,” 기술표준원, pp.180~182, 2005.
- (2) “Performance Specification for Automotive Electrical Connector Systems,” SAE/USCAR-2 Revision 4, pp.67~69, 2004.
- (3) “Fretting Performance of Lead Free Surface Finishes,” Tyco Electronics, Technical Paper, 2004.