

차량용 주석 도금된 구리 커넥터에서 미세진동에 의한 전기접촉 저항변화에 관한 연구

A study on change in electric contact resistance of the tin-plated copper connector of automotive sensor due micro-vibration

유환신*, 박형배**

Hwan-Shin Yu* and Hyung-Bae Park**

요 약

자동차에 적용되는 각종 전자 부품의 복잡도는 21세기를 맞이하면서 급속도로 변화하고 있다. 특히, 각종 전기, 전자 시스템의 급증은 자동차의 안전과 직결되는 문제로 인식되고 있다. 차량의 전장 및 전자부품을 연결해주는 커넥터는 인간의 신경망과 같아서 조그마한 접촉 불량도 차량의 운전에 심각한 영향을 미칠 수 있다. 차량의 진동과 커넥터 단자의 열 변형으로 인한 프레팅 부식은 산화막을 형성하여 접촉저항을 증가시키고 특히 산화층은 진접촉면적의 감소와 상승저항 등 터널효과에서 급격한 상승을 보이는 결과로 제어신호를 왜곡하여 작동기의 동작오류를 초래한다. 본 논문에서는 이러한 프레팅 부식 현상을 검증하기 위한 주석으로 도금된 구리 커넥터에 스텝핑 모터를 사용하여 일정한 변위를 갖는 미세 진동을 유발하여 프레팅 부식의 진행과 접촉 저항의 변화를 고찰하여 이에 대한 대비책을 강구하고자 한다.

Abstract

The automotive environment is particularly demanding on connector performance, and is characterized by large temperature changes, high humidity and corrosive atmospheres. Fretting is a contact damage process that occurs between two contact surfaces. Fretting corrosion refers to corrosion damage at the asperities of contact surfaces. This damage is induced under load and in the presence of repeated relative surface motion, as induced for example by vibration. This paper critically reviews the works published previously on fretting corrosion of electrical connectors. Various experimental approaches such as testing machines, material selection, testing environments, acceleration testing techniques and preventing methods are addressed. Future research prospects are suggested.

Key words : Fretting Corrosion, Apparent Contact Surface, Load-Bearing Contact Area, True Contact Area, Fretting Wear Rate

* 호원대학교 자동차기계공학부(Howon University)

** 경기공업대학 자동차과(Kyonggi Institute of Technology)

· 교신저자 (Corresponding Author) : 박형배

· 투고일자 : 2008년 11월 10일

· 심사(수정)일자 : 2008년 11월 12일 (수정일자 : 2008년 12월 19일)

· 게재일자 : 2008년 12월 30일

I. 서 론

자동차에 전자부품의 비중도가 점점 증가하는 추세이다. 그리고 전장 시스템은 자동차의 안전과 직결되는 문제로 인식되고 있다. 차량의 전장부품을 연결해주는 커넥터는 인간의 신경망과 같아서 조그마한 접촉 불량도 차량의 운전엔 심각한 영향을 미칠 수도 있다. 접촉 불량을 일으키는 원인중의 하나로 차량의 진동과 커넥터 단자의 열 변형으로 인한 프레팅 부식이 있다. 프레팅 부식은 자동차의 환경적인 요소로 진동 및 온도 변화에 따른 열팽창에 의한 접촉 점 이동에 따른 커넥터 접촉부의 미세한 마모 현상에 따른 부식현상을 말한다. 프레팅 부식으로 인해 생성되는 산화막은 접촉저항을 증가시켜 센서에서 출력하는 신호의 값을 왜곡하여 결과적으로 액츄에이터 동작의 오류를 초래한다. 최근에는 선진국에서는 단자 내부 접촉부 몸체의 구조적 설계로 인하여 진동조건에서 접촉부가 앞, 뒤, 상, 하로 진동과 동일한 조건으로 따라서 움직이는 Spring 구조로 설계되어 있어 프레팅 부식 현상을 방지하는 접촉 구조로 설계를 하고 있다. 이를 통하여, 진동 및 온도 조건에서 뛰어난 안정성이 입증된 커넥터를 차량에 적용하고 있다. 따라서 본 연구에서는 자동차에서 일반적으로 많이 사용하는 주석으로 도금된 구리 커넥터에 스텝핑 모터를 사용하여 일정한 변위를 갖는 미세 진동을 유발하여 프레팅 부식의 진행과 접촉저항의 변화에 대하여 고찰하고자 한다.

II. 이론적 배경

커넥터의 접촉저항은 접촉면적과 역비례 하며 접촉면적에는 유관접촉면적 (A_a), 하중지지접촉면적 (A_b) 그리고 진접촉면적 (A_c)으로 나눌 수 있다 [1]. 하중지지접촉면적 [A_b], 접촉하중 [P], 평균 압력 [\tilde{p}] 과의 관계는

$$P = \tilde{p} A_b \tag{1}$$

이다.

국부 압력 [P]는 접촉부 마다 다양하다. 따라서 탄성 또는 소성 변형이 접촉면에 생길 수 있다. 전기 전도의 측면에서 보면 하중지지 접촉면적은 [A_b]는 크게 세부분으로 나누어 생각할 수 있다. 금속끼리 접촉 하는 부분은 전류가 접촉부를 큰 저항 없이 통하여 흐르는 부분이고, 유사 금속 접촉은 터널효과로 전하가 침투할 수 있는 상당히 얇은 막에 의해 덮여있는 부분이며, 비교적 두터운 층에 덮인 부분은 부분적으로 절연되고 있는 부분이다. 즉, 전기 전도에 관여하는 면적은 접촉하는 두 금속편의 넓이 보다 상당히 작을 수 있으며 접촉하중 [P]와 비례하고 금속표면에 존재하는 화학 층의 영향도 받는다.

금속 접촉에서 전류는 a-spots를 통하여 흐르는데 이때 전류는 a-spots 부근에서 압축되어 접촉면을 통과하게 된다. [그림2] 이 a-spots의 집합을 생각해볼 수가 있는데 이들 접점은 각기 병렬로 연결된 것과 같으므로 [식 2] 전류는 저항에 역비례하고 전압은 같아 두 접촉면에서 등전위선이 형성된다. [그림3][2]

$$R_c = R + \frac{1}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{R_i}} \tag{2}$$

여기에서 R_c : 접촉저항, R : 전류가 압축되며 생기는 저항, N : 접점의 수, R_i : 접점표면의 저항이다.

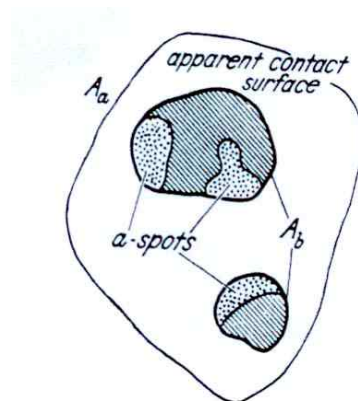


그림 1. 접촉면적 A_a, A_b, A_c
Fig. 1. Contact Surface, A_a, A_b, A_c

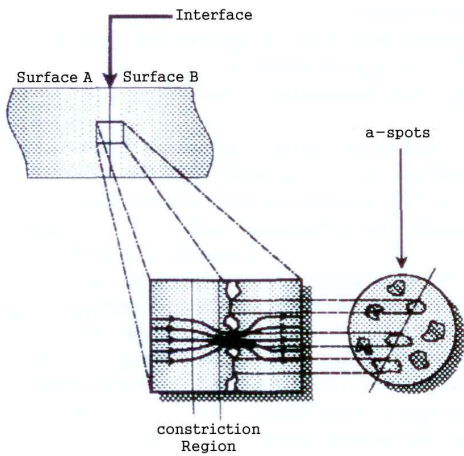


그림 2. 접촉면에서의 전류의 흐름

Fig. 2. The flow of the current in contact surface

Slip의 진폭이 커지면 그에 따라 프레팅 마멸율도 증가한다. 진폭이 10-25 μm 정도의 작은 진폭에서 프레팅 마멸율은 낮아지고 종종 일정하게 유지되며

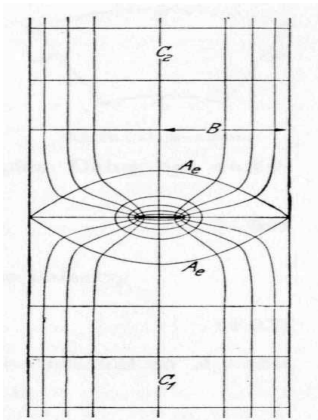


그림 3. 전류의 흐름선도와 등전위선

Fig. 3. The flow curve of the current and Iso - line

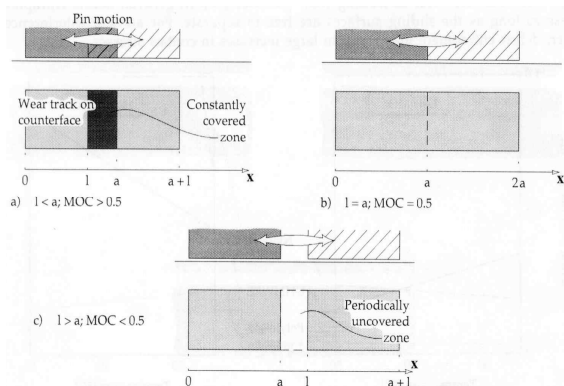


그림 4. 상호 겹침 계수

Fig. 4. Mutual Overlap Coefficient

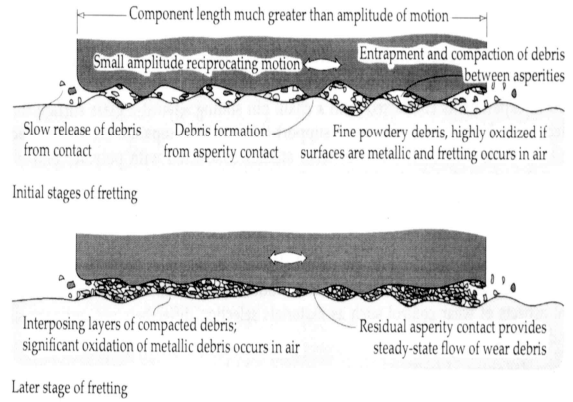


그림 5. 부스러기가 축적되는 과정

Fig. 5. The processor reducing debris

진폭이 약 20-100 μm 일 때 프레팅 마멸율은 선형적으로 증가하다가 진폭 100 μm 이상에서 또 다시 일정하게 유지된다. debris의 보존은 'Mutual Overlap Coefficient'(MOC) 라는 Slip중에 접촉 면적이 겹치는 비율로 설명할 수 있다.

[그림4]에 나타낸 바와 같이 대부분의 실제 현상에서 MOC 값은 0.1보다 작다. 대표적인 예가 피스톤링과 엔진블록간의 마찰이다. 그러나 프레팅 마멸율에서는 MOC 값은 거의 1에 도달한다. 낮은 MOC 값에서 노출된 표면에 남은 부스러기는 마멸이 진행될 때 제거되지 않고 높은 MOC 값에서 마멸된 표면은 드러나지 않기 때문에 대부분의 부스러기는 표면에 그대로 남아 있게 된다. 따라서 이 부스러기는 새로운 조각에 의해 제거 될 때까지 축적된다. 대부분의 경우에 25 μm 보다 낮은 단계에 국한된다[3]. 부스러기는 적어도 10^5 Cycle이 지난 후에 마멸된 자국에 포화되고 이 단계를 넘어서면 두층은 부스러기에 의해 분리 된다. [그림5]에 나타낸 바와 같이 진동에 의해 Pin 표면이 지속적인 흔들림 마찰에 노출되어 산화막의 손상부분은 더욱 크게 증대 되고 접촉저항도 급격하게 증대 되어 정상적인 신호의 전달이 어려워진다.

III. 실험

실험은 [그림6]과 같이 실험 장비를 구성하였다. 커넥터의 접촉저항을 측정하기 위해 정전류-저항 측정법을 사용하였다. 그러나 Power Supply에서 정전류

를 내보내기 어렵기 때문에 LM317T 정전압 조정용 칩을 사용하였다.

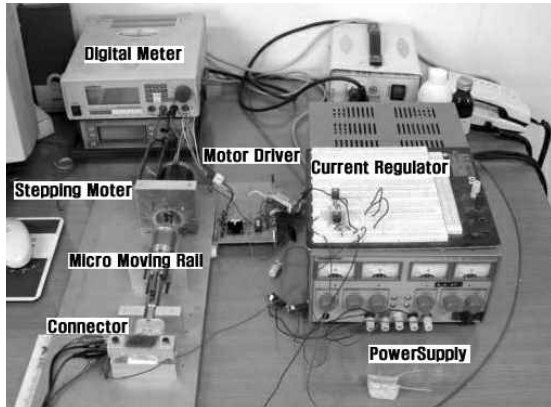


그림 6. 실험장비
Fig. 6. Experimental Equipment

LM317T 칩에서 나온 정전류를 곧바로 커넥터에 보내고 커넥터에서 70 mm 떨어진 곳에서 전압을 측정하였다. 이때 정전류는 115 mA이다. 커넥터는 주석을 도금한 구리로 제작된 것으로 실제 커넥터에서 일어나는 현상을 관찰하기 위하여 수직하중은 커넥터의 내부 장력을 그대로 이용하였다. 미세한 진동을 만들어 주기위해 Micro Moving Rail 로서 마이크로미터를 사용하였다. 그 중심의 한쪽 끝에 200 스텝을 가지고 있는 Stepping Motor를 사용하여 $5 \mu m$ 씩 제어하도록 하였으며 반대쪽 끝에는 커넥터를 고정할 수 있도록 하였다. 또한, 실험대와 커넥터의 절연을 위하여 액화수지와 경화제를 이용하여 커넥터를 플라스틱 블록에 넣어 절연과 위치고정을 가능하게 하였다.

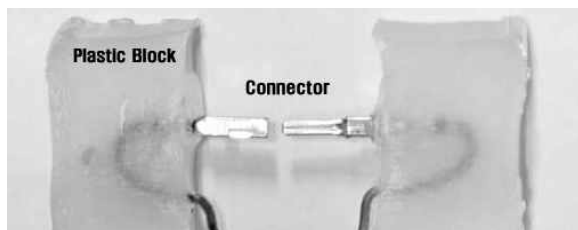


그림 7. 접촉블록
Fig. 7. Connector Block

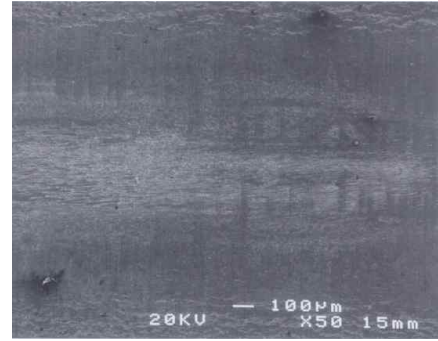


그림 8. The connector with friction

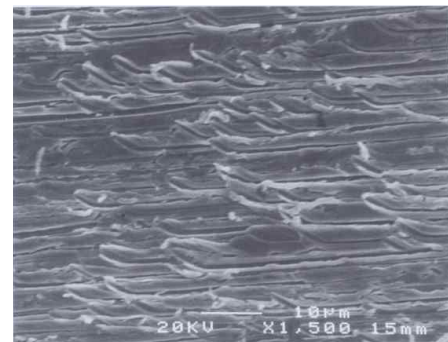


그림 9. The connector without friction

스텝핑모터 구동드라이버는 L298 과 L297 칩을 이용하였다. LabVIEW 프로그램을 이용하여 디지털 메타로 부터 오는 계측정보를 직렬 포트로 읽어서 그래프로 표시하고 그 데이터를 저장하며 병렬포트를 이용하여 스텝모터를 구동하고 제어한다. 실험조건은 상온($20 \pm 5 \text{ }^\circ C$)에서 마찰시 일어나는 열에 의한 영향을 최소화하기위해 진동수는 가능한 작게 할 필요가 있으므로 이 실험에서는 0.5 Hz의 진동수로 마찰과정을 진행했다.

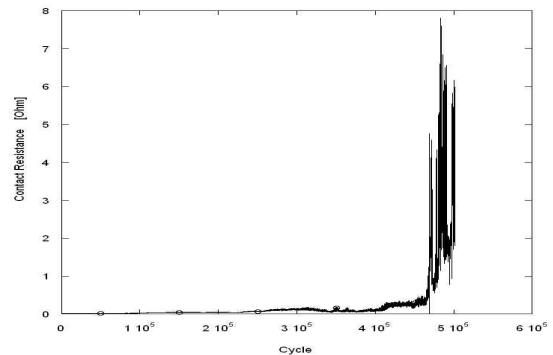


그림 10. Fretting Cycle에 따른 접촉저항의 변화
Fig. 10. The variable of the contact resistance flowing fretting cycle

마찰의 진폭은 20 μm 로써 이는 커넥터의 Housing에 의해 커넥터가 고정 되기 때문에 큰 진폭으로는 마찰 하지 않으며 25 μm 보다 작은 진폭에서 접촉면에 마멸된 층이 축적되고 또 대부분의 참고 문헌 [4][5]들도 이 범위를 크게 벗어나지 않기 때문에 마찰 진폭이 20 μm 로 결정 하였다. 커넥터의 양단에서 발생하는 전압강하와 정전류를 이용하여 옴의 법칙으로 커넥터의 저항을 디지털 마이크로 멀티미터에서 측정하였다. 공급된 정전류는 115mA로 LM317T 칩을 이용하여 제어하며 디지털 멀티미터로 측정하였다.

IV. 실험 결과

그림10은 마멸이 진행됨에 따라 커넥터의 접촉면에서의 저항변화를 보여준다. 마멸이 처음 진행될 때의 접촉저항은 1 $\mu\Omega$ 이며 서서히 증가와 하락을 반복하다가 10^5 Cycle 이 조금 지났을 때 1-2회의 비교적 큰 폭의 상승이 있다. 이와 같은 현상은 참고문헌[6]과 동일한 현상으로서 접촉면의 산화막이 반복으로 파괴되면서 쌓인 Oxide Particles가 접촉면의 일부분을 차단하였기 때문으로 추정된다. 이러한 큰 폭의 상승은 커넥터가 오작동을 일으키기 전까지 두세 차례 더 일어난다. 4×10^5 Cycle 을 조금 넘어서면서부터 접촉 저항은 불안정하고 크게 상승하다가 4.7×10^5 부근에서 거의 수직으로 상승하며 커넥터의 오작동을 일으킨다. 이후에도 커넥터는 매우 불안정 하게 상승한다. 이는 Oxide Particles의 축적이 더욱 진행되어 두 커넥터의 접촉면 사이에 두껍게 쌓여 발생한다. 또 이러한 마멸과정에서 발생하는 Oxide Film이 두꺼워짐에 따라 금속의 실제 접촉면 [A_c]의 면적 또한 줄어들기 때문이다. 프레팅 부식이 일어난 부분은 금속표면에 검게 나타나게 되는데 금속 표면의 SEM 사진을 보면 산화층의 정확한 모습을 알 수 있다. 마찰이 있기 전의 커넥터의 표면[그림8]은 비교적 깨끗하고 1500배 확대 했을 때 [그림9]에 나타난 바와 같이 표면에 상처가 보이지만 이는 제조 공정 중에서 생긴 것으로 사료 되며 금속표면이 눈에 보이는 것처럼 완전한 평면이 아니라는 것을 보여준

다. 특히 주목할 점은 접촉저항의 수직 상승이 있을 후 즉 커넥터가 오작동을 일으킨 후의 현상이다. 5×10^5 Cycle 이 지난 후에 수단자의 표면[그림11]에는 유관상 뚜렷한 상처가 보이며 실제로는 금속표면 위에 검게 나타난다. 1500배 확대한 사진 [그림12]에서 보듯이 표면에 비교적 두꺼운 산화층이 불규칙적인 형태로 생겨있음을 알 수 있다. 이러한 산화층은 진접촉면적 [A_c]를 감소하게 하며 동시에 전류의 압축에 의한 저항을 상승시키고 또 이산화층의 두께에 따라 터널효과에서 저항 또한 급격히 상승한다[7].

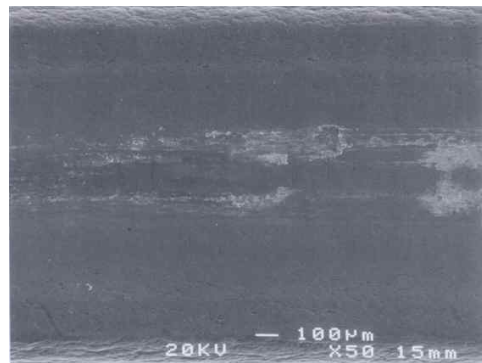


그림 11 The surface after 5×10^5 Cycle ($\times 50$)

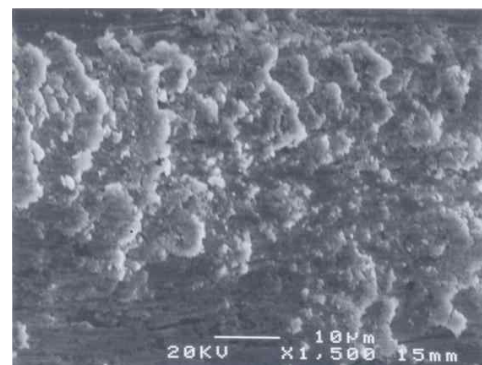


그림 12 The surface after 5×10^5 Cycle ($\times 1500$)

V. 결 론

프레팅 부식현상으로 일정 Cycle(약 5×10^5) 이후 접촉저항이 불안정하고 크게 상승하여 결과적으로 커넥터 오작동을 유발하고 동시에 센서의 신호를 왜곡하여 차량제어의 오류로 이어진다. 마멸부식으로 인해 접촉단자 표면에 산화물 조각의 축적이 진행됨

에 따라 생성되는 산화층이 진접촉면적을 감소시키고 산화층의 두께가 증가함에 따라 두 금속편은 점차 분리되어 저항이 급상승하는데 진폭의 크기, 수직하중과 관련이 있다. 즉 커넥터가 노후되어 내부 장력이 감소했을 때 하중지지면적 $[A_b]$ 이 줄어들고 동시에 산화층이 쌓이면서 a-spot의 면적은 점점 줄어들어 마침내 커넥터는 오작동을 일으키게 되는 것이다. 차량의 커넥터 설계 시 미세 마찰이 발생하지 않도록 설계하거나 산화물 축적을 억제하고 전도성이 좋은 재료로 코팅이 필요하다.

감사의 글

본 연구는 2008년도 호원대학교 교내 학술연구비에 의해 조성된 연구로서, 관계부처에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] R. Holm, "Electric Contacts", 4th Edition Springer Verlag, New York, 1979, pp 7-8
- [2] M. Catelani, M. Mugnaini, R. Singuaroli "Effects of test sequences on the degradation analysis in high speed connectors", *Microelectronics Reliability* 40, 2000, pp1461-1465.
- [3] Gwidon W. Stachowiak, Andrew W. Batchelor, "Engineering Tribology", *Butterworth Heinemann*, pp 594-599
- [4] Anthony Lee, Michael S. Mamrick, "Fretting Corrosion of Tin-plated Copper Alloy", *IEEE Transaction On Components, Hybrids and Manufacturing Technology*, VOL. CHMT-10, NO.1, MARCH 1987, pp 63-67
- [5] Morton Antler, "Fretting Corrosion of Solder-Coated Electrical Contacts", *Transaction on Components, Hybrids and Manufacturing Technology*, VOL. CHMT-10, NO.1, MARCH 1987, pp 129-138
- [6] 이용준, 권영택, "Wiring 접촉 불량 문제점 및 대책에 관한 연구", *현대자동차 연구발표논문집* 2000, pp 70-79
- [7] R. Holm, "Electric Contacts- 26. Tunnel effect 'introduction' ", *4th Edition Springer Verlag, New*

York, 1979, pp 118-122

유 환 신 (劉桓臣)



1993년 2월: 동국대학교 전자공학과(공학사)
 2001년 2월: 국민대학교 자동차공학전문대학원 (공학석사)
 2006년 2월: 국민대학교 자동차공학전문대학원 (공학박사)
 관심분야 : car electronics

박 형 배 (朴亨培)



1993년 2월: 서울산업대학교 기계공학과(공학사)
 1996년 2월: 홍익대학교 기계공학과대학원 (공학석사)
 2003년 8월: 홍익대학교 기계공학과대학원 (공학박사)
 관심분야 : 유공압 시스템 제어