온도변화에 따른 주석 도금한 전기 커넥터의 미동마멸 부식 거동

오만진¹ · 강세형² · 이만석² · 김호경^{3*}

¹서울과학기술대학교 NID융합기술대학원, ²서울과학기술대학교 자동차공학과 대학원

³서울과학기술대학교 기계 · 자동차공학과

Fretting Corrosion Behavior of Tin-plated Electric Connectors with Variation in Temperature

Man-Jin Oh¹, Se-Hyung Kang², Man-Suk Lee² and Ho-Kyung Kim^{3*}

¹Graduate School of NID Fusion Technology, Seoul National University of Science and Technology

²Graduate School, Dept. of Automotive Engineering, Seoul National University of Science and Technology

³Dept. of Mechanical and Automotive Engineering, Seoul National University of Science and Technology

(Received March 2, 2014 ; Revised April 19, 2014 ; Accepted April 23, 2014)

Abstract – In this study, we conduct fretting corrosion tests on tin-plated brass coupons to investigate the effect of temperature on fretting corrosion for various span amplitudes. We prepare a coupled fretting corrosion specimens using a tin-plated brass coupon with a thickness of 10 μm . One specimen is a flat coupon and the other specimen is a coupon with a protuberance in 1 mm radius, which is produced using 2 mm diameter steel ball. We conduct fretting corrosion tests at 25°C, 50°C, 75°C, 100°C by rubbing the coupled coupons together at the contact between the flat and protuberance coupons. We measure electric resistance of the contact during the fretting corrosion test period. There is increase in resistance with fretting cycles. It is found that rate of increase in electric resistance becomes faster with increase in testing temperature. Magnitude of friction coefficient increases with fretting span amplitudes. And, change in friction coefficient becomes desensitized to the increment in span amplitude. Assuming that failure cycle is the cycle with an electric resistance of 0.01 Ω , we find that failure lifetime (N_f) decreases with increase in testing temperature. Furthermore, based on the assumption that the damage rate of the connector is inversely related to the failure cycle, we calculate the activation energy for fretting damage to be 13.6 kJ/mole by using the Arrhenius equation. We propose a method to predict failure cycle at different temperatures for span amplitudes below 30 μm . Friction coefficients generally increase with increase in span amplitude and decrease in testing temperature.

Keywords – electric connector (전기 커넥터), electric resistance (전기저항), fretting corrosion (미동마멸부식), friction coefficient (마찰계수), failure lifetime (고장 수명)

1. 서 론

최근 자동차에 적용되는 각종 첨단 전기, 전자 시스템의 장착이 급증하고 있으며 이와 관련하여 전자 부

품의 연결 커넥터의 사용도 증가하고 있다. 또한 현장에서 통계에 의하면 이들 전자 시스템의 전기적 고장에 대하여 커넥터로 인한 문제가 많은 것으로 보고되고 있다. 이러한 전기적 고장문제는 높은 접촉 저항이나 전기신호의 단락 문제로 알려져 있다. 특히 차량의 전장 및 전자부품을 연결해주는 커넥터는 인간의 신경망과 같아서 신뢰성 측면에서는 가장 취약한 연결부

*Corresponding author : kimhk@seoultech.ac.kr
Tel: +82-2-970-6348, Fax: +82-2-979-7032

의 하나이며 조그마한 접촉 불량도 차량의 운영 및 안전에 심각한 영향을 미칠 수도 있다. 이러한 접촉불량을 초래하는 주요 메카니즘은 주변 환경에 의한 화학적 부식, 진동에 의한 미동마멸 부식(fretting corrosion), 접촉점으로서의 먼지나 불순물 유입, 마모 등의 복합적인 상호작용이다[1,2].

커넥터의 접촉 불량을 일으키는 주요 원인중의 하나인 커넥터 단자의 미동 마멸부식은 커넥터 단자 접촉부의 상대적 이동으로 인한 미세한 마모 현상을 동반한 부식현상을 말한다. 예로 엔진 센서 커넥터 단자의 경우 차량의 진동과 엔진의 정지 및 재가동으로 인한 온도 차이로 단자 접촉점의 미세한 이동 및 마모를 유발한다. 또한 엔진 주변의 고온 효과로 접촉점의 산화막이 생성되는 현상을 촉진하여 전기 접촉저항의 증가를 유발하게 된다. 최종적으로 센서에서 출력하는 신호의 값을 왜곡하여 차량 ECU에서 잘못된 출력 신호를 보내어 관련 액츄에이터 동작의 오류를 초래할 수 있다.

미동마멸부식에 영향을 미치는 주요인자로는 전류크기, 접촉하중, 상대습도, 미동마멸 주기, 미동마멸 변위 진폭, 온도, 접촉변위, 분위기 가스 등으로 알려져 있다. 커넥터 단자의 미동마멸부식에 영향을 미치는 인자들에 대하여 국내외적으로 많은 연구가 진행되어 왔다[3-5]. 예로 Park과 Lee[3]는 주석 도금한 황동 시험편에 대하여 미동마멸부식 실험을 통하여 미동마멸 주파수와 온도에 대하여 2차 관계식을 3차원의 평면모델로 제안하였다. Oh 등[4]은 온도금한 전기 커넥터의 미동마멸부식 실험을 통하여 통상적인 파손 접촉저항인 0.01Ω 에 도달하지 않기 위해서는 접촉부의 평균 접촉압력이 159 MPa 이상을 확보하는 것이 요구된다고 보고하였다. Jędrzejczyk 등[5]은 부분적인 미끄럼과 전반적인 미끄럼의 전이구간에 대한 온도, 수직하중의 영향에 대하여 연구를 수행하였다. 반복적인 변위 폭이 접촉시의 실제 변위를 특성화하는 매개변수이며 수직하중이 증가하면서 부분적 미끄럼의 적용범위가 확장되며 온도가 증가하면서 부분적 미끄럼이 주도하는 범위가 확장되는 모델을 제안하였다.

본 연구에서는 자동차에서 일반적으로 많이 사용하는 주석으로 도금된 구리합금 커넥터 단자와 유사한 시험편에 일정한 접촉하중하에서 다양한 온도에서 접촉변위진폭을 변화시키며 저항수명과 마찰계수 변화 등을 분석하고자 한다. 또한 다양한 온도에서의 접촉변위 진폭에 대하여 저항수명을 예측하는 관계식을 도

출하고자 한다. 이를 통하여 전기저항이 급격히 증가하는 파손수명측면에서의 커넥터 단자의 설계시 필요한 기초 자료로 제공하고자 한다.

2. 실험 방법

2-1. 시험 방법 및 시험편

본 연구에서는 미동마멸 시험을 위하여 스텝핑 모터를 적용하여 정교한 이동변위를 제어하는 시스템을 설계 및 제작하였다. 시험편에 추를 적용하여 일정한 하중을 작용시키는 시스템으로 설계하였다. 실험장치 개념도는 Fig. 1과 같다. 두 접점의 상대 이동변위를 측정하기 위하여 비접촉식인 해상도 $0.5\mu\text{m}$ 의 고해상도 CCD 카메라를 적용하였다.

실험에 사용된 시험편은 두께 0.3 mm 의 황동(JIS C2600)판재에 주석을 $10\mu\text{m}$ 도금한 판재이다. 주석 도금의 접착력 향상을 위하여 우선 구리로 매우 얇게 도금 후에 주석을 전기 도금을 하였다. 단일 접촉점을 구현하기 위하여 시험편 상부 시험편은 곡률반경 1.04 mm 의 볼록 시험편으로 제작되었으며 하부 시험편은 평판으로 제작하였다.

시험편에 소형의 챔버를 장착하여 시험편 온도를 25°C , 50°C , 75°C , 100°C 에서 수행하였다. 또한 시험기의 주변온도에 의한 온도차이로 발생하는 변위제어의 오차를 제거하기 위하여 시험기 전체를 외부 챔버 안에서 장착하여 시험을 수행하였다. 시험에 가해진 미

Fig. 1. Schematic of the fretting test system.

Fig. 2. Change in contact resistance of the connector across the contact zone as a function of fretting cycles with an amplitude of $34\ \mu\text{m}$ at (a) 25°C , (b) 50°C , (c) 75°C , and (d) 100°C .

동 변위진폭을 $\pm 25, 28.5, 30, 32, 34, 50, 77\ \mu\text{m}$ 로 수행하였다. 마찰로 인한 발열에 의한 영향을 최소화하기 위하여 약 $0.003\ \text{Hz}$ 의 주파수로 실험을 수행하였다. 상세한 시험기의 원리와 실험방법은 이전의 온도급한 커넥터의 미동마멸부식에 관한 연구[4]와 유사하다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 접촉전기저항의 변화

전기접촉저항의 증가와 관련된 실험적 인자로는 윤활, 접촉하중, 미동변위진폭, 온도 등이 있다. 본 연구에서는 접촉하중을 0.85N 으로 고정하고 온도 25°C , 50°C , 75°C , 100°C 에서 미동변위진폭을 변화시키면서 전기접촉저항의 변화를 관찰하였다. 실험 결과 온도가 증가하면서 저항이 증가되는 속도가 빠르며 대부분의 조건에서 저항 변화 양상이 유사한 것으로 나타났다. Fig. 2(a), (b), (c), (d)는 $34\ \mu\text{m}$ 에서의 각 온도별로 전기저항의 변화를 나타낸 그래프이다. 초기 수 사이클까지 접촉저항이 증가한 후에 급격히 저항이 감소하는 것은 초기 도금층에 생성된 산화물로 인하여 저항이 증가한 후 바로 파쇄되어 주석과 주석이 일부 접촉을 하면서 감소하는 것으로 판단된다.

Fig. 2(a)는 80 사이클 전후로 안정적인 접촉저항이 유지되었으나 이후 계속적인 증가를 보였다. 이와 같은 현상은 다른 연구[6]에서 서술한 바와 같이 접촉면의 산화막이 반복으로 파쇄되면서 쌓인 산화물 입자(oxide particles)가 접촉면의 일부분을 차단하였기 때문으로 추정된다. 225 사이클 부근에서 최초로 $0.01\ \Omega$ 이상의 접촉저항 피크가 발생하였으며, 그 이후 불안정하게 변화함을 알 수 있다. 이는 산화물 입자가 양적으로 축적이 더욱 진행되어 두 커넥터의 접촉면 사이에 두껍게 쌓여 발생하며, 마멸 과정에서 발생하는 산화물 박막이 두꺼워짐에 따라 주석의 실제 접촉면의 면적이 줄어들기 때문으로 판단된다.

3-2. 전기 접촉부의 이론적 접촉 저항

Fig. 2(a)의 시험편에서 초기에 전기저항이 $0.002\ \Omega$ 수준에서 약 5사이클 정도에서 갑자기 감소하는 것은 초기 산화막이 파괴되는 현상으로 판단된다. 만일 미동마멸 시험 초기에 산화막 SnO_2 이 존재한다면 전기저항이 $0.002\ \Omega$ 수준으로 증가하며 미동마멸로 인하여 산화막이 증가시 바로 아래층인 주석 도금이 서로 접촉을 하므로 접촉 저항이 감소할 수 있다고 판단된다. 따라서 이와 같은 현상의 가능여부를 확인할 필요가

있다. 두께 d 인 도막층의 접촉반경 a 일 경우 전기저항 R 은 다음과 같다.

$$R = \frac{\rho d}{\pi a^2} \quad (1)$$

SnO_2 의 전기저항계수 $\rho = 67 \Omega \text{m}$ [7]을 적용하여 산화막 두께를 결정하였다. 주석 도금층을 고려하여 탄소성 상태로 가정하여 하중 $P=0.85 \text{ N}$ 에 대한 구조해석 결과 접촉면의 반경은 $67 \mu\text{m}$ 로 나타났으며 최대 접촉압력은 89.5 MPa 로 나타났다. 따라서 접촉면적은 구조해석시의 접촉반경으로 가정할 경우 산화막의 도막층 두께는 다음과 같다.

$$R = \frac{\rho d}{\pi a^2} = \frac{67 \Omega \text{m} \cdot d}{\pi \times (0.000067 \text{m})^2} = 0.002 \Omega \quad (2)$$

이 식을 통하여 SnO_2 의 두께 d 는 $d=0.42 \times 10^{-12} \text{m} = 0.0042 \text{ \AA}$ 으로 결정된다. 그러나 실제 순수 주석에 전기를 가하여 인위적으로 SnO_2 의 두께를 측정한 결과 $20\text{--}40 \text{ \AA}$ [8]으로 알려져 있다. 본 시험편의 경우 자연적으로 산화막이 형성된 점을 고려한다면 계산된 두께 $0.0042 \text{ \AA}$ 은 너무 작은 값이다. 즉 시험이 시작시 산화막이 완전히 접촉점을 차단하기 보다는 도금 주석이 부분적으로 접촉함을 의미한다고 판단된다.

한편, 두께 d 인 주석 도금층의 접촉반경 a 일 경우 전기저항 R 은 주석의 전기저항계수 $\rho = 115 \times 10^{-9} \Omega \cdot \text{m}$, 두께 $d=10 \mu\text{m}$ 로 가정시 다음과 같다.

$$R = \frac{\rho d}{\pi a^2} = \frac{115 \times 10^{-9} \times 10^{-5}}{\pi \times (0.000067 \text{m})^2} = 8 \times 10^{-7} \Omega \quad (3)$$

이 값은 실제 관찰된 전기저항 0.002Ω 에 비하여 약 $1/2500$ 배 정도로 매우 작다. 이와 같은 이유는 단일접점이 아닌 다접점으로 접촉되어 실제 유효 접촉면적은 겉보기 접촉면적인 $\pi \times (67 \mu\text{m})^2$ 보다 훨씬 작다고 판단된다. 결론적으로 초기에 전기저항이 증가하는 것은 시험을 시작할 때 하중을 가하자마자 SnO_2 이 파손되어 주석 대 주석의 접촉이 부분적으로 이루어지고 있다고 추정된다. 그 이후로 미동마멸이 발생하면서 주석 대 주석의 다접점 접촉이 형성되어 저항이 감소된다. 또한 미동마멸이 계속 진행되면서 산화물 계재물이 혼입되면서 점차적으로 저항이 증가한다고 판단된다. Fig. 3(a)와 (b)는 Fig. 2(b)의 초기 5 사이클에서의 표면상태와 이를 확대한 그림이다. 그림을 통하여

(a)

(b)

Fig. 3. (a) SEM micrograph of the fretting wear surface of the specimens after 5 cycles at 50°C with a span amplitude of $34 \mu\text{m}$ and (b) its magnified surfaces.

시험 초기에 도금층이 파괴되는 모습이 관찰된 것을 확인하였다.

3-3. 접촉마찰계수의 변화

마찰계수 μ 는 미동 마멸 시험중에 각 사이클당 최대마찰하중 (T_{max})과 수직하중(P)의 비로 다음과 같이 결정하였다.

$$\mu = \frac{T_{\text{max}}}{P} \quad (4)$$

Fig. 4(a), (b), (c)는 상온에서 수직하중 0.85 N 의 하중이 가해질 때 미동변위 $25, 34, 77 \mu\text{m}$ 일 때의 마찰계수의 변화를 나타내고 있다. Fig. 4(a), (b), (c)를 통하여 미동변위가 증가하면서 전반적으로 마찰계수의 크기도 같이 증가함을 알 수 있다. 또한 미동변위가 증가하면서 사이클당 마찰계수의 변화가 둔감해짐을 나타내고 있다. 특히 미동변위가 $31.6 \mu\text{m}$ 이후

Fig. 4. Variation of friction coefficient with fretting cycles at a span amplitude of (a) 25 μm , (b) 34 μm , and (c) 77 μm at 25°C, respectively.

Fig. 5. Variation of friction coefficient with fretting cycles at (a) 25°C, (b) 50°C, 75°C, and (d) 100°C with a span amplitude of 50 μm , respectively.

에는 마찰계수의 변화의 경향이 유사하게 관찰되었다. 그러나 29.8 μm 이하의 미동변위에서는 사이클 수에 따라 마찰계수의 변화가 매우 불안정하게 나타나고 있

다. 예로, 미동변위 진폭이 25 μm 인 Fig. 4(a)의 경우 매우 불안정한 마찰계수의 변화를 보여주고 있다. 이는 접촉부가 좌우로 상대적으로 25 μm 정도의 매우

작은 양을 이동하면서 파쇄된 산화물 입자들을 좌우로 밀어내면서 좌우로 쏘여서 이동시 마찰계수가 매우 민감하게 변화하는 것으로 판단된다. 즉 시험편의 상판인 반경 1 mm의 돌기가 미끄러질 때 돌기 앞에서 산화물이 걸림돌로 작용하는데 이때 산화물의 크기가 작으면 분쇄하면서 이동하게 된다고 판단된다.

Fig. 4(b)는 상온에서의 미동변위진폭 34 μm 에 대한 마찰계수의 변화로 마찰계수는 초기에는 매우 낮으나 15 사이클까지 사이클수가 증가하면서 급격히 증가한다. 그 이후에는 불안정하게 간헐적으로 증가함을 보이고 있다. 초기의 낮은 마찰계수는 표면의 산화막이 존재함으로 야기된다고 판단된다. 그러나 산화막이 제거되면 주석-주석 혹은 주석-마멸 산화막 입자간의 상호작용이 시작되어 마찰계수가 증가한다고 판단된다. 미동변위진폭 77 μm 에 대한 마찰계수의 변화를 나타내는 Fig. 4(c)의 경우는 25 μm , 34 μm 에 비하여

변화가 둔감한 것을 알 수 있다. 한편, Fig. 5(a), (b), (c), (d)는 미동변위 50 μm 일 때의 25°C, 50°C, 75°C, 100°C에서 마찰계수의 변화를 나타내고 있다. 온도가 증가할수록 평균 마찰계수가 감소함을 알 수 있다.

3-4. 표면형상 분석

미동변위 32 μm 에서 시험한 평편한 시험편의 미동마멸이 발생한 부분을 SEM으로 관찰하였다. Fig. 6(a), (b), (c), (d)는 각각 온도 25°C, 50°C, 75°C, 100°C에서의 표면 형상이다. 본 사진을 통하여 수 μm ~100 μm 이상의 크기의 산화물이 퇴적된 것을 확인할 수 있다. 마멸접촉면에 많은 산화물 덩어리들이 산재함을 알 수 있으며 이들로 인하여 전기저항이 증가하였음을 알 수 있다. 또한, 온도가 증가하면서 손상부 주변에 산화물의 입자가 적으며 손상면의 거칠기가 더

Fig. 6. SEM micrographs of the fretting wear surface of the specimens at (a) 25°C, (b) 50°C, (c) 75°C, and (d) 100°C, respectively, with a span amplitude of 32 μm .

Fig. 7. (a) SEM micrographs of the fretting wear surface and (b) EDS results of the specimens at 100 with a span amplitude of 25 μm .

매끄러짐을 알 수 있다. 이와 같은 사실은 온도가 증가하면서 전반적인 마찰계수의 크기가 감소하는 관찰 결과와 일치한다.

미동마멸로 인한 표면 손상을 SEM에 설치된 에너지 분산분석기(EDS, energy dispersive spectroscopy)를 이용하여 손상된 부분의 성분을 분석하였다. Fig. 7(a), (b)는 100°C에서 25 μm 의 변위진폭에서 저항이 1 Ω (640 사이클)까지 실험한 시험편의 형상과 분석 결과이다. Fig. 7(a)를 통하여 주석이 표면을 덮고 있는 상태에서 미동마멸로 인한 표면 손상으로 움푹 파이고 주변에 약간의 산화물 입자가 존재함을 알 수 있다. Fig. 7(b)를 통하여 미동마멸이 발생하지 않은 부분은 약 80% 정도의 주석 성분과 약 20% 정도의 산소가 검출되었다. 아연과 구리는 매우 소량이 검출되었다. 그러나 미동마멸이 발생한 부분에서는 주석 성분의 비율은 35% 정도로 감소하고 산소 성분이 약 55%로 증가하는 것으로 확인되었다. 이와 같은 사실은 절연체 역할을 하는 주석 산화물이 시험편의 전기접촉부 사이에 유입되어 접촉저항을 증가시킨 것으로 판단된다. 4개의 시험온도에서의 시험편에서도 유사한 경향을 나

타냈다.

3-5. 커넥터 수명 예측

Whitley와 Malucci[9]는 금과 같은 귀금속 전기 접점에서의 파손기준을 표면이 깨끗한 접점의 전기저항의 10배에 도달할 때로 제안하였다. 그러나 주석함금 커넥터의 경우에는 초기에 주석표면에 산화막이 발생하여 이와 같은 기준의 적용에 어려움이 있다. Mroczkowski[10]는 접촉저항에 대한 파손기준은 제품의 접촉저항보다는 적용하는 분야에 대하여 일정 값으로 정하는 것이 바람직하다고 제안하였다. 특정 적용 분야에서 사용자는 사용 시스템의 기능이 중단되는 접촉저항의 수치를 확립해야 한다. 예로, 신호용 접점의 경우와 파워 접점의 경우 파손기준 접촉저항의 값은 다르며 회사마다 기준도 다르다.

본 연구에서는 시험편인 주석 도금 커넥터를 신호용 접점에 적용한다고 가정하여 파손기준을 0.01 Ω 로 설정하였다. Fig. 8은 작용하중에 대한 파손 사이클 수를 나타낸 그래프이다. Fig. 8을 통하여 일정한 접촉하중($=0.85\text{N}$)조건에서 온도가 증가하면서 수명이 저하됨을 알 수 있다. 이와 같은 이유는 온도가 증가하면서 주석 도금층에 산화물의 발생이 증가하며 이들 산화물로 인하여 접촉저항이 증가하여 커넥터의 수명이 감소하는 것으로 판단된다. 또한 동일한 온도에서 변위가 증가하면서 수명이 감소함을 알 수 있다. 수명 선도가

Fig. 8. Fretting cycles to 0.01 Ω of tin-plated brass as a function of span amplitude at different temperatures.

Fig. 9. Fretting cycles to 0.01Ω of tin-plated brass as a function of span amplitude at different temperatures in the range over 30 μm span amplitude.

Fig. 8에서 표시를 하였듯이 변위진폭이 약 30 μm 근처에서 서로 기울기가 다른 양상을 보여주고 있다. 이와 같은 거동은 30 μm 근처에서 0.01Ω에 도달하는 열화(degrading)기구가 그 이전과 그 이후가 상이함을 의미한다고 판단된다. 그러나 정확한 기구의 차이는 현재로서는 불분명하다. 추후 이에 관련된 상세한 연구를 진행할 예정이다. 따라서 30 μm 이전과 이후를 두 구간으로 구분하여 변위와 수명과의 선도를 통하여 변위와 수명과의 관계식을 도출하고자 한다.

Fig. 9는 30 μm 이상의 변위 구간에 대한 수명과 변위진폭과의 관계를 나타내는 그래프이다. 변위진폭과 수명과 반비례하는 것을 알 수 있으나 각 온도별로 그 기울기가 서로 상이함을 알 수 있다. 이는 변위진폭에 의한 수명에 영향을 미치는 기구가 동일하지 않음을 암시한다.

Fig. 10은 30 μm 이하의 변위 구간에 대한 수명과 변위진폭과의 관계를 나타내는 그래프이다. 변위진폭과 수명과 반비례하는 것을 알 수 있으며 각 온도별로 그 기울기가 약 0.1로 거의 동일함을 알 수 있다. 이는 변위진폭에 의한 수명에 영향을 끼치는 기구가 동일함을 암시한다. 따라서 다음과 같이 가정하여 관계식을 도출하였다. 첫째, 커넥터의 열화에 의한 손상도($\dot{D}$)는 사이클수에 선형으로 반비례하여 수명(N_f)의 역수로 가정한다. 둘째, 온도가 증가하면서 커넥터의 프레

Fig. 10. Fretting cycles to 0.01Ω of tin-plated brass as a function of span amplitude at different temperatures in the range of below 30 μm span amplitude.

팅에 의한 손상도(dF/dN)가 증가하여 온도에 관련된 아레니우스 식을 적용이 가능하다. 셋째, 커넥터의 열화에 의한 손상도는 직접적으로 프레팅에 의한 손상도(dF/dN)로 가정한다. 넷째, 커넥터의 열화에 의한 손상도는 Fig. 10과 같이 변위진폭의 지수승으로 표현이 가능하여 이를 적용하여 다음과 같은 식의 정립이 가능하다.

$$\frac{1}{N_f} \equiv \dot{D} = \frac{dD}{dN_f} \approx \dot{F} = A \delta^n \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (5)$$

여기서 Q 는 프레팅 손상에 대한 활성화에너지이며, R 은 가스상수($=8.31$ J/mole), T 는 절대값으로 표시되는 사용온도, n 은 변위진폭에 대한 지수로 Fig. 9를 통하여 약 0.1에 해당되며, A 는 재료상수이다.

활성화에너지를 결정하기 위하여 Fig. 11에서 변위진폭 28.5 μm에서 1000/T에 대하여 $\log \dot{D}$ 로 작성시 기울기는 $-2.3R \frac{d \log \dot{D}}{d(1/T)}$ 에 해당된다. 그래프의 기울기가 $\log 4 = 0.602$ 로 인하여 최종적으로 프레팅 손상에 대한 활성화에너지는 13.6 kJ/mole로 결정하였다. 현재로서는 이 활성화 에너지의 크기는 물리적으로 상관을 시키는 어렵다. 예로 SnO_2 에서의 주석의 자기화산에 대한 활성화에너지나 산소의 자기화산에 대한 활성화에너지는 발표된 값을 확인할 수 없다. 또한 주석의 자기화산 활성화 에너지는 24.7 kJ/mole[11]로 본 프레팅 손상에 대한 활성화 에너지는 55%에 해당하는 크

Fig. 11. Calculation of activation energy for fretting damage rate at span amplitude of 28.5 μm .

기이다. 주석의 용융점인 227°C를 고려할 경우 주석 도금의 실험 온도가 25-100°C일 경우 절대값으로 환산하면 0.6-0.74 T_m 에 해당한다. 절대 온도로 용융점의 75%정도에서는 자기확산 활성화 에너지에 해당한다. 따라서 본 연구에서 결정된 활성화 에너지가 주석의 자기확산에 의한 산화로 인한 거동으로 1대1로 관련시키는 어렵다. 한편 재료상수 A는 0.29로 결정되었다. 결과적으로 실험식은 다음과 같이 도출이 가능하다.

$$\frac{1}{N_f} = 0.29 \delta^{0.1} \exp\left(-\frac{13,600 \text{ J/mole}}{RT}\right) \quad (6)$$

한편 이들 커넥터의 프레팅에 의한 손상도($\dot{D}$)를 적용한 이론적 수명과 실제 실험 데이터와를 Fig. 12에 비교하였다. Fig. 12를 통하여 30 μm 이하의 변위 구간에 대하여 25-100°C 온도 구간에서 4배 이내에서 수명 예측이 가능함을 나타내고 있다. 추후 다양한 온도와 변위진폭에 대하여 추가적인 데이터를 확보하여 좀 더 정확한 수명 예측식의 도출에 관한 연구가 필요하다.

4. 결 론

전기적 커넥터의 미동마멸부식 현상에 있어서 접촉 변위의 효과를 분석하기 위하여 온도 25°C, 50°C, 75°C, 100°C에서 하중을 0.85 N으로 고정하고 실험을 수행하였다. 두께 0.3 mm 황동판에 주석을 10 μm 로

Fig. 12. Comparison between observed lifetime(N_f) and predicted lifetime(N_p) at different temperatures in the range below 30 μm span amplitude.

도금한 시험편을 적용하여 평판을 고정된 상태에서 반경 1.04 mm의 돌기에 일정한 반복변위를 가한 상태에서 전기저항과 마찰계수의 변화를 측정하였다. 실험 결과는 다음과 같다.

1. 미동마멸 부식시험을 수행한 결과 사이클이 증가하면서 전기저항의 증가하였다. 증가경향에 따라 저항이 매우 낮은 단계를 거쳐 최종적으로 간헐적으로 저항이 급격히 증가하는 거동을 확인하였다.
2. 전기저항이 0.01 Ω 이 발생하는 반복수를 파손기준으로 가정시, 온도가 증가하면서 수명이 저하되었다. 또한 변위진폭이 약 30 μm 근처에서 서로 기울기가 다른 양상을 보여주고 있다.
3. 변위진폭이 약 30 μm 이하 구간에서 커넥터의 열화에 의한 손상도($\dot{D}$)는 사이클수에 선형으로 반비례하여 수명(N_f)의 역수로 가정하여 아레니우스 식을 적용시 활성화에너지는 13.6 kJ/mole이며 수명식은 다음과 같이 도출되었다.

$$\frac{1}{N_f} = 0.29 \delta^{0.1} \exp\left(-\frac{13,600 \text{ J/mole}}{RT}\right)$$

4. 미동변위가 증가하면서 전반적으로 마찰계수의 크기도 같이 증가하며, 사이클당 마찰계수의 변화가 둔감함을 나타내고 있다. 또한 온도가 증가할 수록 평균 마찰계수가 감소하였다.

Acknowledgement

이 연구는 서울과학기술대학교 교내연구비의 지원으로 수행되었습니다.

References

- [1] Swingler, J., McBride, J. W., "The synergistic relationship of stresses in the automotive connector", Proc. 19th Int. Conf. Electric Contact Phenom., Nuremberg, Germany, pp. 141-145, 1998.
- [2] Swingler, J., McBride, J. W., Maul, C., "Degradation of road tested automotive connectors", IEEE Trans. Components and Packag. Tech., Vol. 23, No. 1, pp. 157-164, 2000.
- [3] Park, Y. W., Lee, K. Y., "Development of empirical equations for fretting-corrosion failure-time of tin-plated contacts," *Wear*, Vol. 265, pp. 756-762, 2008.
- [4] Oh, M. J., Kim, M. J., Kim, T. Y., Kang, S. H., Kim, H. K., "Fretting corrosion behavior of silver-plated electric connectors with constant displacement amplitude", *J. Korean Soc. Tribol. Lubr. Eng.*, Vol. 30, No. 2, pp. 99-107, 2014.
- [5] Jedrzejczyk, P., Fouvry, S., Chalandon, P., "A fast methodology to quantify electrical-contact behaviour under fretting loading conditions", *Wear*, Vol. 267, pp. 1731-1740, 2009.
- [6] Narayanan, S., Park, Y. W., Lee, K. Y., "Fretting-corrosion mapping of tin-plated copper alloy contacts", *Wear*, Vol. 262, pp. 228-233, 2007.
- [7] Fukuda, T., Nakajima, M., Isono, Y., J. Japan Copper and Brass Research Assoc. Vol. 26, pp.174-182, 1987.
- [8] Cho, S., Yu, J., Kang, S., Shin, D., "Oxidation study of pure tin and its alloys via electrochemical reduction analysis", *J. Electr. Mater.*, Vol. 34, No. 5, pp. 635-642, 2005.
- [9] Whitley, J. H., Malucci, R. D., "Contact resistance failure criteria", Proceedings of the 9th Int. Conf. on Electric Contact Phenomena, 24th IEEE Holm Conf., pp. 111-116, 1978.
- [10] Mroczkowski, R. S., "*Electronic connector handbook*", New York, McGraw-Hill, 1998.
- [11] Frenkel, R. E., Sherby, O. D., Dorn, J. E., "Activation energies for creep of cadmium, indium, and tin", *Acta Metallurgica*, Vol. 3, No. 9, pp. 470-472, 1955.