

금속의 평면 접촉면에서 표면부식에 의한 열접촉 저항의 변화

Variation of Thermal Contact Resistance for a Corroded Plane Interface of Metals

김 철 주*, 김 원 근**
C. J. Kim, W. G. Kim

Key Words : Thermal contact resistance (열접촉 저항), Corroded interface (표면부식), Contact structure (접촉구조), Contact pressure (접촉압력)

ABSTRACT

The corrosion effects on thermal contact resistance were experimentally studied for a given contact interface of a couple of metals.

2 cylindrically shaped test pieces, the one was carbon steel whose surface was machined by lathe and the other was stainless steel, ground, were come into contact under pressure, and then submerged to HNO₃ gas environment.

While the corrosion process was going on, the thermal contact resistance was measured with time.

The experiment was performed for 2 cases;

- 1) Highly compress the test pieces and then bring them to HNO₃ gas environment.
- 2) Anteriorly corrode the interface under low contact pressure and then increase the contact pressure.

The results were as follows;

In 1st. case of experiment, the thermal contact resistance seemed to be very stable, and showed low values with a tendency of small decrease with time. But in 2nd. case the resistance was unstable and jumped to a value of 200-250% more then that expected for uncontaminated interface. More over it demonstrated some increase with time.

1. 서 론

금속체의 접촉 경계면에 부식이 발생할 때 열접촉 저항이 어떠한 변화를 하는가 하는 문

제를 실험적으로 검토하였다.

이러한 부식은 접촉 경계면에 공기층이 존재하는 경우에 나타나며, 자연상태에서는 매우 서서히 진행되기 때문에 열접촉 저항에 크

* 정회원, 성균관대학교 기계공학과 교수

** 현대자동차

게 영향을 미치지 않는 것으로 알려져 있다. 그러나 오늘날 NO_x, SO₂ 등에 의한 대기 오염의 증대 또는 우발적 사고 등에 의하여 산성물질의 침투에 의한 접촉 경계면에 부식이 빠르게 진행되는 경우도 있다.

일반적으로 주어진 결합체에서 열접촉 저항은 안정되어 있으며, 이러한 안정성은 열동력 설비, 화학공정, 전기 변압기 등 열에너지 이용 전반에서 매우 중요하다. 그러나 어떠한 요인으로 인하여 열접촉 저항이 변화하게 되면 과열 또는 과냉이 초래되며, 이 결과 예기치 못한 산업적 재해가 생길 수 있다. 따라서 본 연구는 접촉 경계면에 부식이 발생될 경우 열접촉 저항의 변화추이를 분석하여 열적 안정성을 해석하는데 이용될 수 있을 것으로 생각된다.

본 연구에서는 금속 결합체에 NO₂ 가스의 환경을 작용함으로써 평면 접촉을 이루는 경계면에 표면 부식이 빠르게 진행되도록 하였다. 그리고 이 경계면에 표면 부식이 진행됨에 따라서 열접촉 저항의 시간에 대한 변화성향을 측정 검토하였다. 실험에서 열저항에 미치는 부식외에 다른 인자의 영향을 제한하기 위하여 접촉 시편의 표면을 일정한 형상을 갖도록 단순화시켰으며, 또한 측정시 접촉압력값을 일정하게 유지하였다.

2. 평면 열접촉 저항의 실험적 특성

열접촉 저항에 대한 초기연구는 1949년 Weills & Ryder¹⁾에 의해 시작되었다. 그 동안의 연구 진행과정을 요약하면 ;

i) 물체표면의 형상으로부터 접촉구조의 수학적 모델을 해석한 B. Mikic²⁾, W. M. Rosenow³⁾, Fouche⁴⁾ 등의 연구가 있으며, 그리고

ii) 접촉구조를 변화시키는 물리적 인자 즉, 접촉압력, 물체의 열팽창, 경계면에 개입된 제3의 물질의 영향 등에 대한 Cordier⁵⁾, Kim⁶⁾, Leroy⁷⁾ 등의 연구들이 있다.

접촉저항의 주요 관련인자들은 금속체의 물리적 성질, 표면형상 그리고 경계면에 남아있

는 공기 또는 그외의 이물질들이다. 공기 또는 이물질의 영향은 정량적 해석이 어렵기 때문에 실험적 연구에서는 주로 진공의 환경에서 수행되는 경우가 많으며, 우주선 등의 특수한 분야에 응용된다. 그러나 일반적으로 대기중에서는 접촉 경계면에 공기 및 기타 이물질이 개입된다. 공기층의 영향에 대해서는 많은 연구 등이 있으나 상대적으로 부식물질에 의한 영향은 거의 수행되지 않았다. 본 연구가 이 분야의 초기연구로 생각되며, 따라서 실험방법, 결과 등에 관한 비교 또는 참고 연구가 없는 것이 연구진행에 큰 어려움이었다.

본 연구와 관련된 금속체 평면 접촉면의 실험적 특성은 Fig.1과 같다.

주어진 접촉면의 열저항 R 는 압력 P_c 에 의해 가장 큰 영향을 받으며, 압력이 일정할 때 시간의 경과에 따라 미소한 감소를 한다. 이러한 정성적 경향을 분석하면 아래와 같다.

두 금속체를 처음 접촉시키게 되면 금속표면의 불완전한 가공상태에 의해서 두 금속 사이에 실제 접촉을 이루는 곳은 점의 형태로서 매우 분산되어 있다. 그리고 낮은 접촉압력 (P_1)에서 접촉점들의 합은 겉보기 접촉면의 약 1/1,000~1/10,000의 정도로써 매우 큰 열접촉 저항값을 나타낸다. 이후 압력을 P_1 에서 P_2 로 증가시키면 새로운 접촉점들의 증가에 의해 열접촉 저항은 그림에서 1-2과정을 따라 열저항이 감소하며, 더욱 압축을 진행하면 2-5-7과정이 예상되며 함수관계는 $R \propto 1/P$ 를 나타낸다. 그러나 2점에서 하중을 제거하면 2-3과정을 따라 열접촉 저항은 증가한다.

두 시편을 다시 결합하여 압축하게 되면, 표면의 비가역적 현상에 의해 초기과정과 다른 4-5과정을 따라 저항이 변화하며, 이를 hysteresis 현상이라 한다. 하중을 계속하여 증가시킨다면, 초기과정 1-2의 연장선인 1-2-5-7을 따른 변화가 예상된다. 이로부터 1차 압축과정 1-2의 연장선인 1-2-5-7을 주어진 접촉 경계면의 열저항 적응곡선이라 정의한다.

또한 압축력외에 시간도 열저항에 관련된 중요한 인자이다. 만약 임의 압축상태, 즉 점5에서 하중을 고정하고 시간을 지연시키면(100

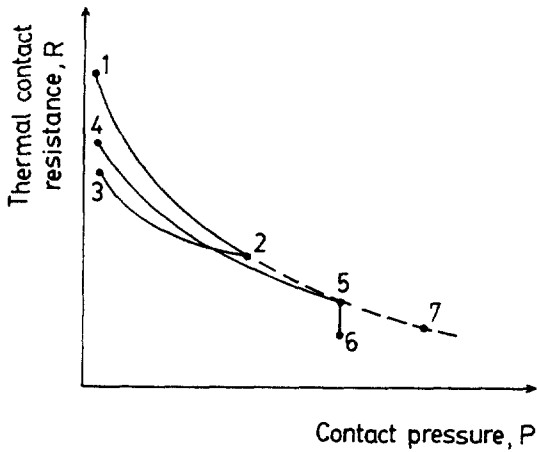


Fig.1 Variation of thermal contact resistance with contact pressure and time, for a given plane contact interface

시간 이상) 열저항은 지속적으로 매우 서서히 감소하며, 그림의 과정 5-6 과 같다. 이러한 시간에 따른 열접촉 저항의 감소는 물질의 Creep 현상과 유사한 형태의 표면 접촉돌기의 소성변형에 주로 기인되는 것으로 Maimi⁸⁾에 의해 Fluage 현상으로 정의하고 있다.

3. 실험장치 및 방법

3.1 실험장치의 개요

실험장치는 전체적으로 시편을 포함한 시험부와 그리고 저울의 원리를 적용하여 시편에 정하중을 작용하는 압축력 제어장치로 구성된다. Fig.2는 시편부의 세부 조립도로서, 시편 ②, ③에 축방향 1차원 정상상태 열전도를 이룰 수 있도록 시편의 양단에 가열①과 냉각④장치가 설치되어 있다. 시편의 주위에는 시편과 동일한 온도분포를 이룰 수 있도록 동일한 재질의 원형의 단열벽 ⑤, ⑥과 가열⑦, 냉각⑧장치를 구성함으로써 시편으로부터 대류열손실을 억제하도록 하였다. 시편은 각각 $\phi 30 \times L 45\text{mm}$ 의 원주형태로서 탄소강②과 스테인레스강③의 결합체이다. 시편의 접촉표면의 구조를 기하학적으로 단순화시키기 위하여 접촉표면은 시편에 따라 선반 및 연삭가공을 적용하였다.

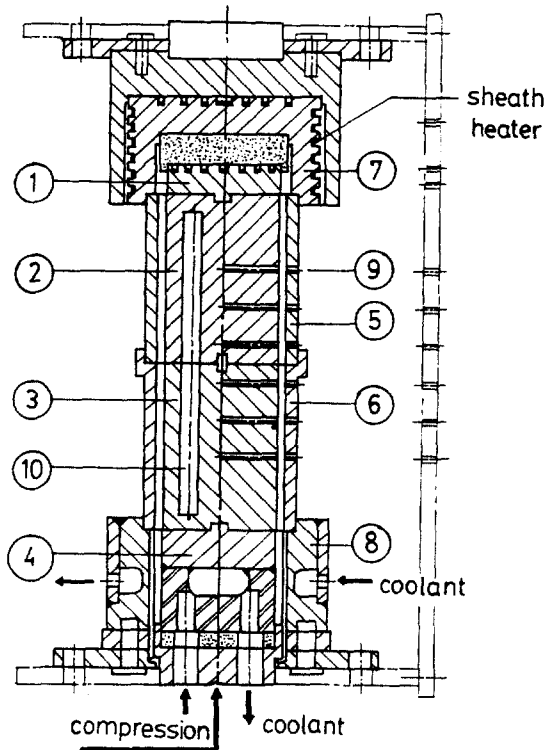


Fig.2 Sectional view of test unit

- ①, ⑦ Heat sources (copper)
- ②, ③ Test pieces
- ④, ⑧ Heat sinks (copper)
- ⑤, ⑥ Thermal guards
- ⑨ Holes for thermocouples
- ⑩ Holes for HNO₃ gas

Table 1 Surface Roughness of Specimens

	Carbon Steel (lathe machined surface)	Stainless Steel (grinded surface)
h_m	500 μm	5 μm
P_m	200 μm	50 μm

금속표면 조도측정기(Surfloom 200, Tokyo Semitus)를 이용하여 측정된 표면돌기의 평균 높이 h_m 및 평균 피치 P_m 의 측정치는 각각 Table 1에 도시하였다.

3.2 열접촉 저항의 측정

열접촉 저항의 측정방법은 아래와 같다.

즉, Fig.3은 1차원 정상상태 열전달 조건

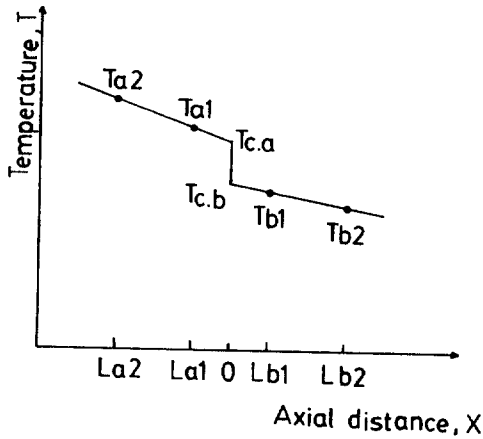


Fig.3 Temperature distributions on test pieces for 1 dimensional steady state conduction

에서 두 시편 Ma, Mb에서의 온도분포를 나타낸다. 이로부터 열접촉 저항 R은 정의로부터;

$$R = \frac{\Delta T_c}{q''} \dots\dots\dots (1)$$

여기서, q'' : 시편의 열속
 ΔT_c : 접촉표면의 온도낙차
 (= $T_{c,a} - T_{c,b}$)

그림에서 T_{a1} , T_{a2} 와 T_{b1} , T_{b2} 는 시편 Ma, Mb의 측정 온도값으로서 이를 이용하여 접촉 표면의 대표온도 $T_{c,a}$ 와 $T_{c,b}$ 를 외삽법으로 구할 수 있다. 즉,

$$T_{c,a} = T_{a1} - L_{a1} \times \frac{T_{a2} - T_{a1}}{L_{a2} - L_{a1}} \dots\dots\dots (2)$$

같은 방법으로 $T_{c,b}$ 를 구한다.

한편 q'' 는 시편 Ma 또는 Mb에 Fourier 법칙을 적용하여 구한다. 즉,

$$q'' = k_a \left| \frac{T_{a2} - T_{a1}}{L_{a2} - L_{a1}} \right| = k_b \left| \frac{T_{b2} - T_{b1}}{L_{b2} - L_{b1}} \right| \dots\dots (3)$$

이상의 관계로부터, 경계면에서 측정점까지의 거리

$$\begin{aligned} |L_{a1}| &= |L_{b1}| = 0.5 \text{ cm} \\ |L_{a2}| &= |L_{b2}| = 1.5 \text{ cm} \end{aligned}$$

를 적용하면, 열접촉저항 R은

$$R = \frac{[T_{a1} - 0.5 \times (T_{a1} - T_{a2})] - [0.5 \times (T_{b1} - T_{b2}) + T_{b1}]}{k_b \times (T_{b1} - T_{b2})}$$

..... (4)

로 표시된다. 여기서 k_b 는 탄소강의 열전도율로서 측정으로 구한 $k_b = 46.38 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ 를 사용하였다. 실험에서 q'' 값은 $1.3 \sim 1.5 \text{ W/cm}^2$ 이었다.

3.3 경계면의 부식 및 압축

Fig.2에서 보는 것과 같이 시편에는 축방향으로 각각 $\phi 5 \times L20 \text{ mm}$ 의 부식가스 유동통로가 가공되어 있다. 시편을 결합한 상태에서 하부에 놓여지는 스텐레스강의 내부 구멍에 20~30%의 질산용액 0.2mg을 주입하면 질산가스가 발생하여 접촉면에 부식성 환경을 일으키며 접촉면 부식이 시작된다. 약 100시간 동안의 부식이 진행될 때 열접촉 저항의 변화를 측정하며 이 과정에서는 압축력을 일정하게 유지하여 압축력 변화의 영향을 배제하였다. 부식의 시작은 시험하중상태에서 시작되는 경우와, 그리고 결합초기에 부식의 영향을 받는 두 경우로 제한하여 아래와 같이 단순화시켰다.

a) 낮은 접촉압력에서의 가스통로에 HNO_3 수용액을 주입한 후 탄소강 시편을 결합하여 낮은 접촉압력 상태에서 표면부식을 시작한다. 이후 압축력을 서서히 증가하여(8~10시간 소요) 일정한 압력상태 즉 시험 접촉압력에 도달된 후 열접촉 저항의 변화를 측정한다.

b) 시험 접촉압력에서의 부식

스텐레스강과 탄소강 시편을 결합하여 먼저 시험하중상태까지 압축한다. 그리고 일정한 접촉압력을 유지하면서 HNO_3 수용액을 주입하고 열접촉 저항의 변화를 측정한다.

시험 접촉압력은 110 kg/cm^2 , 160 kg/cm^2 의 두 경우에 대하여 실시함으로써 접촉압력의 차이에 따른 영향을 배제할 수 있도록 노력하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 부식의 확산과정과 접촉구조

탄소강 시편 위에 유리판을 설치하여 표면의 부식 진행상태를 관찰한 결과는 다음과 같다.

먼저 부식가스 유통통로 주변에서 부식이 시작되어, 환상으로 발전하였다. 전체 단면에 붉은 색의 부식 물질이 형성되는 데는 약 10여 시간이 소요되었다.

Fig. 4-1은 시험 접촉압력에서 수행한 실험에서 스테레스강 표면을 현미경 사진으로 나타낸 것이다. 그림에서 보면 종방향으로 띠를 이루며 탄소강의 부식물질이 부착된 것(두께 : 40~50 μm) 볼 수 있다.

부식의 띠 중앙부에 폭이 약 20 μm 정도의 오염되지 않은 영역이 좁은 선을 이루며 존재한다. 이 영역은 경계면에서 탄소강 표면돌기의 산마루와 스테레스강 표면이 실제 접촉을 이루고 있던 곳으로 보인다. 이러한 그림으로부터 실제 접촉면에서는 큰 압력으로 두 금속이 서로 밀착되어 있기 때문에 부식의 진행이 거의 없음을 나타내며, 접촉점 사이의 빈 공간에서는 부식 가스의 확산으로 탄소강 표면에 부식물질이 층상으로 성장함을 보여주고 있다.

Fig. 4-1으로부터 실제 접촉면을 이루는 지

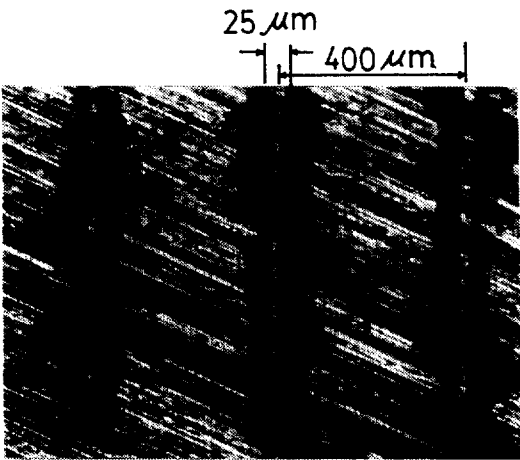


Fig.4.1 Microscopic picture showing corrosives stuck on contact surface of stainless steel

역은 결보기 접촉면에 대하여 면적비로서 약 4~5%를 나타내고 있다. 이러한 고찰내용으로부터 접촉 경계면의 접촉구조와 부식층의 형성 상태를 확대하여 측정한 것이 Fig. 4-2이다.

이 경우 경계면에서는 부식이 없는 경우에 비하여 실제 접촉점을 통한 열전도와 함께 그 주변에 형성된 부식층을 통한 새로운 열전도 경로가 형성됨을 알 수 있다. 일반적으로 부식물질의 열전도율은 매우 작으나 공기의 경우보다는 크기 때문에 위의 그림은 부식층의 형성이 실제 접촉점들에 영향을 미치지 않는 경우에 한하여 열접촉 저항이 약간의 감소를 나타낼 것이라는 그 동안의 일반적인 견해를 뒷받침하는 것으로 보인다.

4.2 부식의 진행에 따른 열접촉 저항의 변화

부식이 시작될 때 충분한 압축력하에서 경계면이 안정된 접촉을 이루고 있는가에 따라서 다음과 같이 서로 다른 현상이 발생되었다.

4.2.1 시험 접촉압력에서의 부식

두 시편을 시험 압력까지 가압하여 일정압력 상태에서 부식을 시켰을 때, 열접촉 저항의 변화 경향은 Fig.5와 같았다. 시간 경과에 따라 열접촉 저항은 감소하며 매우 안정되어 있다.⁸⁾ 이러한 경향은 부식이 없는 경우의 “열접촉 저항-시간” 관계가 일치하고 있다. 이러한 현상은 높은 압축력하에서 부식이 시작되었기 때문에 앞절의 접촉구조에서 언급한 것과 같이 금속간의 실제 접촉점은 부식의 영향을 받지 않는 데 원인이 있는 것으로 보인다.

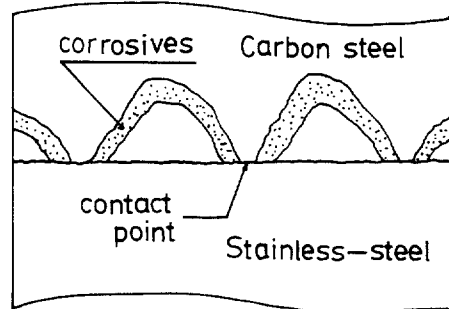


Fig.4.2 Microscopic contact structure at corroded interface

이 점을 고려할 때 측정결과는 앞절에서 소개된 Maimi에 의한 Fluage현상과 부식물질을 통과하는 새로운 전도 열전달 경로의 발전에 따르는 현상 모두에 의존하는 것으로 볼 수 있다. 이들 두 현상에 대한 정량적인 구분은 매우 난해한 것으로 보인다.

그러나 그림에서 초기 일정 시간(약 20) 동안은 그 이후의 과정에서 보다 빠르게 열저항이 감소함을 볼 수 있다. 일반적으로 Fluage 현상에 의한 열접촉 저항의 감소에는 하한 한계가 있으며, 따라서 초기의 감소율은 Fluage 현상에 그리고 이후의 과정은 부식의 효과로 볼 수 있을 것으로 생각한다.

4.2.2 낮은 접촉 압력에서의 부식

낮은 접촉 압력상태에서 부식을 받은 경계면을 시험 접촉상태까지 가압하여 열접촉 저항의 변화를 측정된 결과는 Fig.6이다. 그림에서 초기 20시간 이후부터 열접촉 저항이 증가를 나타낸다. 이와 같이 접촉압력이 시간의 경과에 따라 다시 증가하는 현상이 본 연구의 목적인 열적 안정성 해석에 새로이 고려해야할 매우 중요한 요소로 생각된다. 즉 초기 20시간 동안은 앞절의 경우와 같이 열접촉 저항이 빠르게 감소하는 추세를 나타내었으며, 이른바 Fluage 현상으로 보인다. 그러나 이후 열접촉 저항은 시간 경과에 따라서 다시 증가하고 있으며, 이러한 현상은 압축력 $P=110 \text{ kg/cm}^2$, $P=160 \text{ kg/cm}^2$ 에서 동일하게 확인된다.

그리고 앞절의 실험결과와 비교하여 또다른 차이는 열접촉 저항값이 약 200~250% 정도 크게 나타내고 있다. 이러한 두 현상은 표면 부식에 따라서 아래와 같은 요인들에 기인되는 것으로 생각된다. 일반적으로 접촉하중 증가에 따라서 새로이 접촉을 이루는 점들이 나타나게 되며 이 결과 열저항이 감소된다. 그러나 이 경우에는 초기 부식에 따라 접촉점들의 많은 부분이 이미 부식에 의해 오염되어 있으며, 따라서 상대적으로 큰 열저항을 나타낼 수 있다.

그리고 시간의 경과에 따라 열접촉 저항이 증가하는 요인으로는 압축력의 증가에 따라

새로이 접촉을 이룬 점들에서도 초기 부식에 의해 시간이 경과함에 따라 지속적으로 부식이 진행되기 때문으로 생각된다.

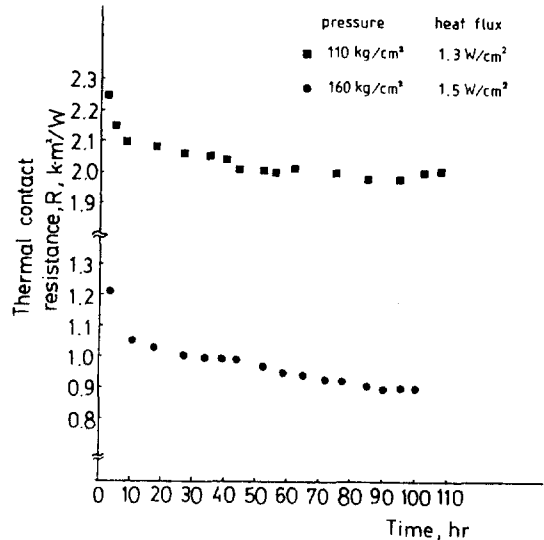


Fig. 5 Variation of thermal contact resistance with time when the interface was anteriorly compressed and then corroded

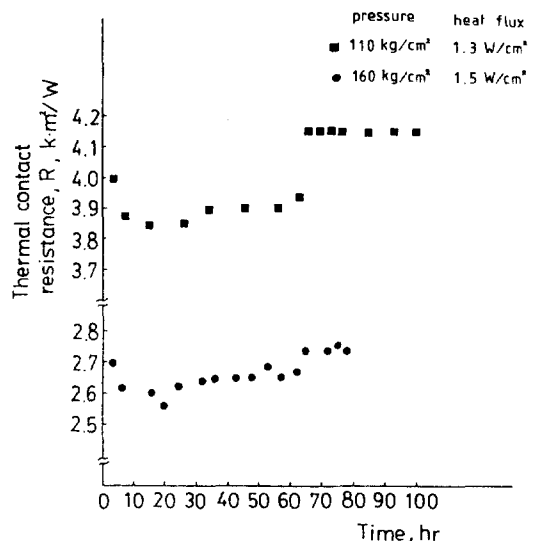


Fig. 6 Variation of thermal contact resistance with time when the interface was corroded under low contact pressure and then compressed to measuring point

5. 결 론

이상의 내용을 정리하면 아래와 같다.

열접촉 저항에 표면부식의 영향이 크지 않다는 그동안의 견해가 부분적으로 옳지 않음이 확인되었다.

먼저 높은 압축력 상태의 경계면 부식이 있는 경우에는 부식이 경계면에서 공기층에만 제한되기 때문에 열저항 변화는 거의 나타나지 않는다. 그러나 낮은 압축력에서 경계면 부식이 시작되는 경우에는 상대적으로 접촉상태가 불안정하기 때문에 경계면 공기층 영역과 실제 접촉점에도 부식이 발생되기 때문에 열접촉 저항의 증가가 일어난다.

따라서 실제의 경우에는 부식의 영향으로 열저항이 증가하는 경우를 고려하여 열저항 변화에 따른 열전달 안정성 해석에 유의할 필요가 있을 것으로 생각한다.

참 고 문 헌

1. Weills, N.D., and Ryder, E.A., 1949, "Thermal Resistance Measurement of Joints Formed Between Stationary Metal Surfaces." *Journal of Heat Transfer*. pp. 159-267.
2. Mikic, B., 1971, "Analytical Studies of Contact of Nominally Flat Surfaces; Effect of Previous Loading." *Journal of Lubrication Technology* pp. 451-456.
3. Fench, H., and Rohsenow, W.M., 1963, "Prediction of Thermal Conductance of Metallic Surfaces in Contact." *Journal of Heat Transfer*. pp. 15-22.
4. Fouche, F., 1966, "Etude Experimentale et Theorique de la Resistance Thermique d'un Contact par Bandes paralleles." *These de Doctorat es Sciences Physiques E.N.S.M.A., France*.
5. Cordier, H., 1961, "Journess internationales de la transmission de la chaleur, Paris.
6. KIM, Chul-Ju, 1982, "Contribution a l'etude des resistances thermiques de contact dans une configuration a symetrie cylindrique", *These de Docteur, E.N.S.M.A., France*.
7. Fletcher, L.S., Smuda, P.A., and Gyorog, D.A., 1969, "Thermal Contact Resistance of Selected Low-Conductance Interstitial Materials", *AIAA Journal*, Vol. 7, No. 7, pp. 1302-1309.
8. Maimin, R., 1962, "Contribution a l'etude de l'influence de la pression sur les resistances thermiques de contact", *These de Doctorat es Sciences Scences, E.N.S.M.A., France*.
9. 김윤재, "평면 열접촉저항에 대한 실험적 연구", 1983. 성균관대 석사학위 청구논문.