

熱接觸 抵抗의 理論的 解析

金哲圭◆◆◆◆◆

〈成均館大學校 機械工學科 教授〉

1. 머리 말

주어진 물체의 접촉경계면이 갖는 열접촉 저항값을 결정하는 일은 지난 60년대초 이후 수많은 실험적, 이론적 연구결과에도 불구하고 연구자 또는 산업체 그리고 엔지니어 모두에게 신중하고 어려운 과제이다. 더우기 오늘날 산업기계의 설계추이가 높은 열효율을 얻기 위하여 고온 및 고열속을 적용함에 따라 경제성 뿐만 아니라 안정성 차원에서 열접촉 저항의 해석이 더욱 중요시 되고 있다. 그런데 열접촉 저항의 해석이 난해한 주요 요인은 다음과 같다.

실험적 연구의 관점에서 동일한 재료와 동일한 가공방법을 적용한 경우에 대해서도 열접촉 저항의 실험적 측정 결과가 서로 일치하지 아니하며 그 차이의 범위도 매우 분산되어 있다. 또한 이론적 연구의 관점에서는 이론적 해를 얻는 모든 경우 물체의 기계적 성질, 표면의 기하학적 형상, 주위 환경등 예상되는 모든 관련 인자들을 염격하게 규정하고 있으며, 이러한 조건들은 실제 보편적 기계가공법을 적용하는 어떠한 물체표면의 조건과도 크든, 적든, 서로 차이로 나타내며 이 결과 어떠한 이론적 모델도 실용적으로 실제 표면에 적용하기가 어렵다. 이러한 특성에 따라서 그동안 이분야에 적립된 수 많은 실험적, 이론적 연구 결과들은 실제 주어진 물체의 열접촉 저항의 한계 범위 내지는 변화 경향을 추정하는데에 이용될 수 있으면 보다 엄밀

한 저항값의 결정에 실제 측정에 의존하는 것이 꼭 수적으로 요청된다.

이러한 배경으로 부터 본 해설에서는 이론적 해석의 접근방법을 통하여 열접촉 저항의 기본적인 구조를 이해하는데 목적을 두었으며, 여러 형태의 이론적 모델중에서 비교적 단순한 Cetinkale & Fishenden의 연구 결과를 이용하여 이 모델에 포함된 각 인자들을 실제표면에 대해 어떻게 적용하는가를 검토하였다.

2. 이론모델의 설정 및 관련인자의 결정

2.1 접촉면의 열전달 구조

그림 1에서 보는 것과 같이 거시적 관점에서 평면을 이루는 두면이 접촉상태에 있다. 이때에 이들의 경계면에서는 각 표면의 기하학적 상태가 미시적으로는 복잡한 굴곡을 이루는 불완전한 평면 상태이므로 두 물체 I, II 사이에는 실제 접촉이 매우 제한된 수의 점을 통해서 이루어지고 있다. 이러한 접촉상태에서는 실제 접촉점들의 면적을 합한 크기는 전체 경계면의 면적에

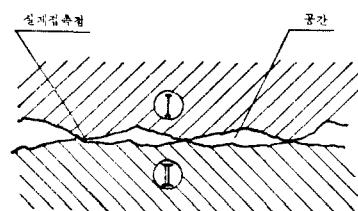


그림 1 금속체 I, II의 경계면에서의 접촉 구조

熱接觸 抵抗의 理論的 解析 ◇

비해 매우 낮은 비율(예 1/100)을 나타낸다. 이러한 접촉조건에서 두 물체 I, II 사이의 가능한 경계면 열전달 경로는 다음과 같다.

- (1) 물체 접점을 통한 전도.
 - (2) 두 표면 사이의 공간에 내재되어 있는 유체층을 통한 전도 또는 대류.
 - (3) 서로 마주보는 표면 사이의 복사.

그런데 경계면에서의 유체층의 평균 두께는 두겹축면의 기하학적 조건(평면도, 거칠기 등)에 의해 결정되지만, 대체적으로 매우 작은 값 ($1\sim 20 \mu$)을 나타낸다. 이러한 유체층에서의 Gr 수의 계산에 의하면 유체층을 통한 열전달은 전 도현상에 지배적으로 위존하며 상대적으로 대류의 영향은 매우 작게 나타나고 있다.

또한 복사 열전달의 효과는 경계면의 평균온도
값의 크기에 따라서 다른 인자들에 대한 상대적
중요성이 결정되며, Bardon⁽²⁾의 연구에 의하면
상온의 범위에서 구한 복사에 의한 상당 conductance
값은 전도에 의한 conductance 값에 약
3/1000에 해당되고 있다. 또한 Fenech & Rose-
now⁽³⁾에 의하면 600°C 미만의 경계면 온도 범
위에서는 복사에 의한 효과는 전체 전열량의 약
1% 미만으로 나타나고 있다. 이러한 열전달 혈
장으로 인하여 물체 I, II 사이의 경계면 열전
달 경도는 다음의 두 과정에 집약된다.

- (1) 고체 접촉점을 통한 열전도
 - (2) 경계면 유태증을 통한 열전도

이러한 접촉경계면의 열전달 구조로 부터 주어진 경계면의 열접촉 저항을 이론적으로 계산하는 데에는 다음의 과정에 대한 해결이 요구된다.

- 접촉경계면의 기하학적 모델의 설정
- 위의 설정된 모델에 대한 열전달 해석
- 실제접촉면에 대한 각 관련 인자의 크기를
결정

2. 2 모델의 설정

Cetinkale & Fishenden은 다음과 같은 가정 조건을 적용하여 해골 구하였다. 접촉점은 전체 접촉경계면에 균일하게 분포되어 있는 것으로 가정한다. 이 경우 접촉하고 있는 두 물체는 그

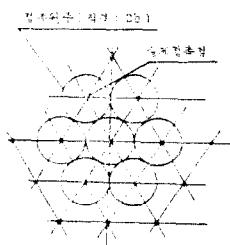


그림 2 접촉접의 이상적인 분포

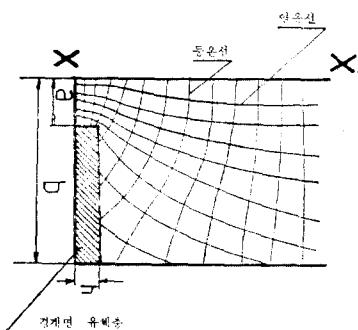


그림 3 접촉구조의 모델 ($X-X'$: 접촉원주의 축)

림 2에서 보는 것과 같이 직경 2b의 두 개의 원주가 축 중심점에서 접촉하고 있는 원주들이 균일하게 분포된 것으로 볼 수 있다. 그리고 이들 각 원주의 둘레 표면을 따라서는 서로 단열 상태로 생각할 수 있다. 이 결과 그림 3에서 도시한 바와 같이 원주의 접촉구조와 그 내부의 온도분포상태로 단순화 할 수 있다. 즉 접촉점의 직경은 2a의 원형단면을 이루고, 유체층의 평균 두께는 h 로 각각 균일하다.

그림 3의 열접촉구조의 모델에 대한 열전달 해석을 수치해석 및 해석적 접근을 통한 접촉면 thermal conductance a_c 는

$$\alpha_t = \frac{K_f}{h} + \frac{a K_s}{b^2 \tan^{-1} \left(\frac{b}{a} \sqrt{1 - \frac{K_f}{\alpha_t h}} - 1 \right)} = \frac{1}{R_t}$$

여기서 K_ϵ : 유체층의 역저도율

K_s : 물체 I, II의 조화평균 예전도율

$$\frac{1}{K_1} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{K_1} + \frac{1}{K_2} \right)$$

h: 유체 층의 상당 두께

R_t : 열전 측 저항

에 대해서는 상수 ϵ, ψ, C 에 대한 실험적 결정이 필요하며 보다 복잡한 관계가 예상이 된다. 이러한 표면조건에 대해서는 오히려 Bardon, 또는 Fenech & Rorenow 등의 해석모델이 보다 접근된 결과를 나타내고 있는 것으로 알려져 있다. 이상에서 언급된 해석의 결과들은 모두 접촉경계면에서 접접촉을 전제조건으로 하고 있으며 그 반면에 선반, 밀링등에 의한 선접촉에 접근된 표면형상에 대해서는 Padet⁽⁴⁾의 모델이 보다 접근된 상관관계를 보이는 것으로 알려져 있다.

참 고 문 헌

- (1) Cetinkale T.M. and Fishenden M.; Thermal Conductance of Metal Surfaces in Contact.

토막 소식

플타즈마를 이용한 폐기물 처리공정 개발

미 웨스팅하우스 일렉트릭사와 필로리시스 시스템사는 플라즈마를 이용 유독한 폐기물을 처리하는 공정을 개발하였다.

이 공정은 5,000°C 까지 올라가는 웨스팅하우스의 플라즈마 토오치를 연소실 입구에 설치 유독한 폐기물이 통과할 때 고온의 플라즈마를 이용 분자 조직을 재 구성함으로써 처리하기 쉽고 무해한 화합물로 분해 시키는 공정이다.

이 공정의 특징은 모든 장비와 공정 제어 및 감지기기들이 45피트의 이동 트레일러에 설치되어 있으므로 상수도와 하수도 시설이 있는 곳이면 어느 곳이라도 작동이 가능한 이동 플라즈마 기기는 운송과 처리에 드는 비용이나 어려움 없이 화학 폐기물을 현장에서 처리할 수 있고, 첨단의 컴퓨터장비는 모든 폐기물이 안전한 부산물로 전환되는지의 여부와 기계가 안전하며 효율적으로 가동 되는지를 계속 확인할 수 있다. 또한 이 시스템이 미국 EPA 요구 기준을 능가하는 처리 능력을 갖추고 있음이 증명되었다.

이와 같이 높은 효율성과 낮은 비용을 겸비한 웨스팅하우스 플라즈마 시스템은 미국과 캐나다에서 매년 3천 3백만톤씩 발생되는 유독 폐기물 처리에 매우 적절한 시스템으로 기대되고 있으며 앞으로, 군용 화학 및 생물 농약 등 각종 폐기를 처리 이외에도 귀중한 금속 조각의 효율적인 재생 및 가스 스트림의 황과 질소의 산화 방지 그리고 전기화로 재처리 등에도 이용될 것으로 전망된다.

General Discussion on Heat Transfer, Proceedings of Inst. of Mech. Eng. and ASME. London, p. 271, 1951

- (2) Bardon J.P.; Contribution à l'étude du Transfert de Chaleur au Contact de deux Matériaux, Thèse de Doctorat ès Sciences. Poitiers, France, 1962
 - (3) Fenech H. and Rosenow W.M.; Prediction of Thermal Conductance of Metallic Surfaces in Contact, Journal of Heat Transfer, Vol. 85, No. 1, p.15, Feb, 1963
 - (4) Padet J.P.; Etude du Transfert de Chaleur à Travers une Couche de Structure Hétérogène. Thèse de Doctorat ès Sciences, Poitiers, France, 1969



웨스팅 하우스의 플라즈마 토오치