

접촉 저항법을 응용한 트라이볼로지 문제점의 해석

김 청 균

홍익대학교 기계공학과

1. 서 언

금속과 금속이 접합할 때 발생하는 고유 저항값은 접촉소재의 종류, 접촉면의 상태, 접촉 조건(하중, 온도, 정적 또는 동적인 접촉 등), 주변환경에 따라서 변한다. 소재가 접촉할 때 발생하는 저항값의 변화특성을 적극적으로 이용한 것이 전기 접촉 저항법(Electrical Contact Resistance Method)이다. 접촉 저항법의 특징은 접촉시 발생하는 저항값이 미세하게 변화한다 할지라도 모두 계측이 가능하다는 점이다.

상대접촉 운동면에서 발생하는 마찰, 마멸이나 윤활접촉 특성을 해석하는 방법에는 여러가지가 있으나, 최근에 전기/전자기계나 컴퓨터와 같은 초정밀 기계의 수요가 급격하게 증가되면서 전기 접촉 저항법을 응용한 연구가 많이 진행되고 있다. 접촉면에서 발생하는 전기적인 접촉 저항치에 관련된 분야는 Fig. 1과 같이 금속과 금속 간에 실제로 접촉하는 부위를 통하여 통전하는 전도(Conductivity)에 의하여 결정되는 미시적 관점의 초정밀 트라이볼로지(Nanotribology) 영역이다.

전기적인 접촉저항 방식으로 상대 접촉면의 접촉거동상태, 즉 마찰, 마멸 및 윤활적 특성을 해석하려는 노력은 Holm[1]에 의하여 처음 제기된 이후로 Bowden and Tabor[2]들에 의하여 많은 발전을 가져왔고, Greenwood[3]는 접촉점 상호간의 영향이 접촉저항에 미치는 영향을 해석하였으며, 최근에는 Myshkin[4-7]에 의하여 접촉점군 상호간의 간접현상에 따른 영향을 고려한 연구도 활발하게 진행되고 있다.

고체마찰 상태에서 운전되는 대표적인 트라이볼로지적 요소인 모터 브러시는 발생하는 마찰열을 억제하여 전기 접촉저항을 줄여줌으로써

전류운동이 원활하게 이루어질 수 있도록 브러쉬에서의 마찰과 마멸 특성을 해석하였고[8-10], 접촉소재내의 전류유동 패턴을 해석하기 위한 연구도 많이 진행되었기는 하지만 경계 접촉면에서의 산화층 해석이 어렵기 때문에 전기접촉 저항법을 많이 응용하고 있다.

기계의 상대 접촉면 운동은 대부분 경계윤활 상태에서 사용되기 때문에 경계윤활 조건에서 발생할 수 있는 접촉저항 특성치의 변화에 대한 연구가 많이 진행되고 있다. Jibiki[11] 등은 평면위에 볼이 접촉하는 형태의 미끄럼 마찰면에서 수분에 의하여 발생하는 마멸문제를 전기 접촉 저항법으로 해석하였다.

그동안의 연구는 주로 단일 접촉점(Single Contact Spots) 위주의 단편적인 실험적 연구를 통하여 접촉 저항법에 대한 신뢰도 확보에 노력하였으나, 최근에는 접촉점이 인접한 다른 접촉부위에 미치는 영향, 즉 다수 접촉점군(Multiple Contact Spots and Clusters)의 거동해석에 더욱 큰 연구 비중을 두고 있다. 접촉점군 상호간의 영향에 관한 연구가 많이 진행되기는 하였지만 해석모델의 적절성 여부가 실험적 데이터를 통하여 확인이 아직 안되었기 때문에 기존의 접촉저항 추정식을 직접 사용하기가 어려웠으나 최근에 불균-원판 모델에 대한 접촉점과 다수의 접촉점군 상호간에 발생할 수 있는 접촉저항 특성을 실험적으로 해석하여 보다 정확한 해석모델이 제시되었다[12].

2. 접촉모델의 이론

접촉면에 유막이 없는 상태에서 금속과 금속이 접촉하는 단일 접촉면 모델에 대한 전기 접촉 저항식이 Holm에 의하여 처음 제시된 이후로

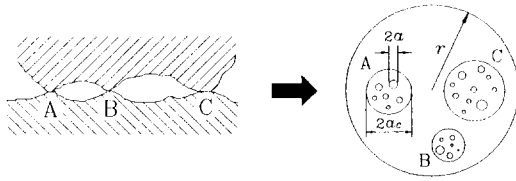


Fig. 1. Model of multiple contact spots and clusters.

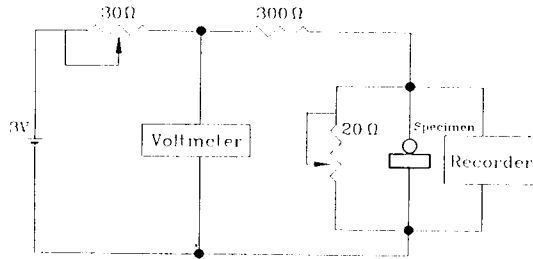


Fig. 2. Circuit of electrical contact resistance measurement.

접촉점 상호간의 영향을 일부 고려한 방정식을 Greenwood가 수정 제안하였다. 그러나 이들 방정식은 접촉점(Contact Spots) 상호간의 영향이나 접촉점군(Contact Spots Cluster) 상호간에 미치는 영향을 고려하지 않았기 때문에 그동안 문제가 되었다. 그래서 이와 같은 문제점을 해결하기 위하여 수행된 Myshkin의 연구결과에 따르면 특히 접촉하중이 클수록 접촉경계면에서의 탄소성 변형에 의한 영향이 증대된다는 사실이 알려지게 되었고 이점을 보완한 기본 방정식을 발표하였다.

대표적인 접촉모델을 도시한 Fig. 1은 임의의 접촉점과 접촉점군의 배열 형태를 보여주고 있다. 단일볼과 시험편이 접촉한 상태에서 접촉저항 변화량을 측정하기 위한 기본적인 실험장치 배열도는 Fig. 2에서 보여주고 있다.

여기서 볼이 원판에 압입할 경우 접촉정점(Asperity Junction)의 크기는 서로 같고, 이것은 시험편의 크기에 비하여 작다는 가정을 하게 되면 접촉점에서 발생하는 저항치 R 은 Holm에 의하여 다음의 식으로 제시된다.

$$R = \frac{\rho}{2} \left(\frac{1}{na} + \frac{1}{r} \right) \quad (1)$$

여기서 ρ 는 시험편의 비저항값, n 는 접촉점의 총갯수, a 는 단일 접촉점의 반경, r 은 접촉점을 모두 포함한 겉보기 접촉면적(Nominal Contact Area)의 접촉반경을 각각 나타낸다.

접촉점 상호간의 간접작용이 경우에 따라서는 접촉저항에 미치는 영향이 크기 때문에 Holm이 제안한 접촉 저항 방정식으로 해석하기에는 문제가 있으므로 이 점을 보완하여 Greenwood는 다음과 같이 제시하였다. 즉,

$$R = \frac{\rho}{2} \left(\frac{1}{na} + \frac{32}{3\pi^2 n_c a_c} \right) \quad (2)$$

여기서 n_c 는 접촉점군의 총갯수, a_c 는 접촉점군의 평균 유효반경을 각각 의미하는 것으로 접촉점의 배열형태에 따라서는 접촉점 상호간의 거리를 나타내는 s_{ij} 와의 관계식을 다음과 같이 제시할 수 있다. 즉,

$$a_c^{-1} = \sum_{i \neq j} \frac{1}{s_{ij}}$$

또한 Myshkin은 접촉하중이 증가할수록 접촉점보다는 접촉점군 상호간의 영향이 커진다는 사실에 기초한 수정된 접촉 저항식을 다음과 같이 제시하였다.

$$R = \frac{\rho}{2} \left(\frac{1}{na} + \frac{32}{3\pi^2 n_c a_c} + \frac{32}{3\pi^2 r_c} \right) \quad (3)$$

여기서 r_c 는 접촉점과 접촉점군을 모두 포함한 접촉원의 반경으로 겉보기 접촉면적의 반경보다는 작거나 같다.

3. 접촉 저항법의 분류

초정밀 기계에 대한 수요가 크게 증가함에 따라서 미시적 관점의 접촉면 상태에 대한 연구가 활성화 되면서 전기적인 접촉 저항법을 활용한 응용연구가 많이 수행되고 있다.

접촉저항 방법을 이용한 마멸해석, 윤활유막 두께 측정, 산화막에 관한 연구, 접촉면에서 마찰력 감소를 위한 계면활성제에 대한 연구, 마찰 특성해석, 실제 접촉면적이거나 접촉압력에 관한 미시적 연구가 많이 수행되었으며, 최근에는 다

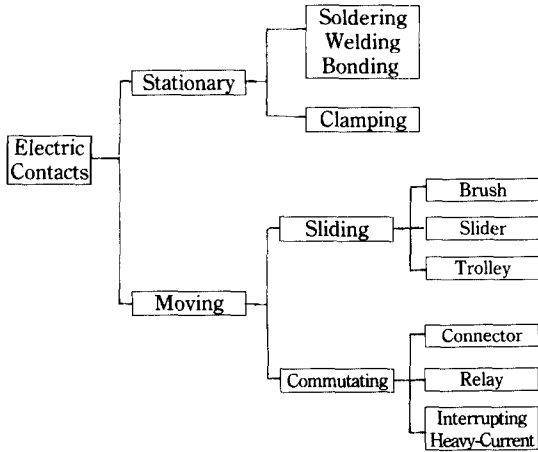


Table 1. Classification of electric contacts.

수 접촉점(Multiple Contact Spots) 상화간의 영향에 대한 연구도 많이 수행하고 있다.

전기 접촉 저항법의 응용예를 접촉면의 운동 상태에 따라서 분류하면 Table 1과 같이 제시할 수 있다. 또한 기계요소에서 트라이볼로지적 문제에 의하여 발생할 수 있는 마찰과 마멸의 손상을 해석을 접촉형태에 따라서 분류하면 Table 2와 같이 주어지는 마찰과 마멸의 손상을 해석을 접촉형태에 따라서 분류하면 Table 2와 같이 주어질 수 있다.

전기 저항법을 이용하여 접촉조건의 문제점을 해결한다면 다음과 같은 내용을 다루는 것이 일반적이다.

- 마찰계수의 감소
 - 마멸율의 감소
 - 실제 접촉면적과 접촉 열전달 계수의 증가
 - 접촉표면의 산화층과 윤활유막의 오염방지
- 상기의 접촉조건에서 기술한 문제는 전기 저항법으로 획득한 자료를 바탕으로 다음과 같이 대처함으로써 해결될 수 있다. 즉,

- ① 소재의 형상
- ② 표면가공에 의한 설계의 최적화
- ③ 최적의 소재 선정
- ④ 최적의 윤활유 선정

4. 전기 저항법의 응용예

Table 2. Failure rate of various contact types.

Contact types	Failure rates ($\times 10^6$), 1/hr
• Soldered connections	0.004
• Clamped connections	0.005
• Various connectors	0.4~2.0
• Connector assemblies	0.175
• Various relays	0.4~0.7
• Selector switches	0.05~0.5
• Rheostats	1.1
• Contactors	0.25
• Interrupters	0.5
• Electric motors and generators with slip rings	0.3
• Electric motors and generators with commutators	To 2.9

트라이볼로지 분야의 에너지 절약측면에서 전기 저항 측정기술을 응용하면 상대 접촉면에서의 윤활 유막두께, 마찰계수 해석 그리고 정밀공학에서 필요한 실제 접촉면적과 실제접촉면압, 마찰상태(고찰마찰, 경계마찰, 유체마찰 등) 분석, 접촉점 상호간의 탄소성 영역해석에 대단히 유용한 데이터를 제공할 수 있다. 여기서 획득한 데이터는 브레이크, 피스톤-실린더, 전기 스위치, 전자 개폐기, 모터 부러쉬, 컴퓨터의 HDD, VCR 드럼, 베어링, 시일, 정밀기계 부품, 윤활유 개발을 위한 업체에서 간단하게 활용될 수 있다.

접촉면에서 마찰 조건에 따른 현상파악은 마찰/마모 시험기와 같은 고가의 장비를 사용했으나 접촉저항법은 측정방법이 간단하고 신뢰도가 높기 때문에 응용예가 급격하게 증가하고 있다. 특히 정밀부품에서 계면상의 문제점 해석은 접촉저항법을 이용할 수 있기 때문에 대단히 유용하다.

경계 윤활유막이나 소재의 접촉계면층에서 발생하는 동적특성을 해석하기 위해서는 ASTM B667-80의 기준을 이용하기도 하지만 최근에는 전기 저항법을 사용하기도 한다. 전기 저항법을 사용하면 금속표면을 보호해 주는 경계유막층에 대한 해석이 가능하기 때문에 윤활유의 개발, 코우팅 두께 또는 접촉강도의 해석, 마찰력과

마멸율에 대한 연구가 용이하고, 유막의 동적거동 상태를 정확하게 추정할 수 있는 데이터를 제공한다.

5. 결 언

마찰 접촉면에서의 윤활제 특성, 산화막, 윤활유막 거동, 코우팅막 등에 관한 연구를 수행하기 위해서는 4-볼 시험기나 핀-디스크와 같은 고가의 실험장치가 필요하다. 그러나 이들 장비는 정밀도면에서 한계가 있으며, 고가라는 측면에서 사용상 제한적이고, 또한 실험의 재현성에 문제가 있다.

접촉 저항법은 초창기에 미시적 관점의 접촉 공학에 관련된 기초연구가 주류를 이루었으나 최근에는 트라블로지 분야의 활성화, 특히 초정밀 가공분야의 응용이 확대되면서 커다란 관심을 모으고 있다. 전기 저항법을 활용하면 표면의 윤활조건 해석에 정확한 정보를 제공할 수 있다는 측면에서 윤활유 개발, 마찰특성 해석 등에서 활용도가 크리라 생각된다. 전기 저항법을 이용한 연구는 간단하게 정확한 데이터를 획득할 수 있다는 장점이 있지만 아직은 이론적으로 체계화가 안되었고, 다분히 실험결과가 연구자의 기술축적 정도에 많이 의존한다는 단점이 있다.

참 고 문 헌

1. Holm, R., "Electrical Contacts," Springer Verlag, Berlin, 1967.
2. Bowden, F.P. and Tabor, D., "The Friction and Lubricant of Solids," Clarendon Press, Oxford, 1950.
3. Greenwood, J.A., "Constriction Resistance and the Real Area of Contact," British J. of Appl. Phys., Vol. 17, pp. 1621-1631, 1966.
4. Myshkin, N.K., "Effect of Surfactant on Lubrication for Electrical Contacts," Soviet Journal of Friction and Wear, Vol. 4, No. 3, pp. 566-569, 1983.
5. Myshkin, N.K., "On the Calculation of Contact Conductivity," Proc. Int. Conf., Eurotrib-85, Lion, 1985.
6. Myshkin, N.K., "Tribological Problems in Electrical Contacts," Tribology International, Vol. 24, No. 1, pp. 35-49, 1991.
7. Myshkin, N.K. and Konchits, V.V., "Evaluation of the Interface at Boundary Lubrication Using the Measurement of Electric Conductivity, Wear(Accepted), 1994.
8. McNab, I.R., "Recent Advances in Electrical Current Collection," Wear, Vol. 59, pp. 259-276, 1980.
9. Dow, T.A. and Kannel, J.W., "Thermomechanical Effects in High Current Density Electrical Slip Rings," Wear, Vol. 79, pp. 93-105, 1982.
10. Bryant, M.D. and Burton, R.A., "Thermal Deformation in Brushes for Current Passage Through a Steadily Moving Patch," Wear, Vol. 79, pp. 83-92, 1982.
11. Jibiki, T., Shima, M. and Sato, J., "Electrical Contact Resistance Measurement in Fretting," Japanese Journal of Tribology, Vol. 36, No. 4, pp. 367-376, 1991.
12. Kim, C.K. and Myshkin, N.K., "Studies in the Effect of Array, Number and Size of Metal Contact Spots on Conductivity," J. of Friction and Wear, UDC.621.316, 1994.