

〈論 文〉

불균의 다수 접촉점이 접촉저항에 미치는 영향

김청균* · N. K. Myshkin**

(1994년 5월 24일 접수)

Effect of Multiple Contact Spots Simulated by Array of Balls on Contact Resistance

Chung Kyun Kim and N. K. Myshkin

Key Words : Electrical Contact Resistance(전기 접촉저항법), Nanotribology(초정밀 트라이볼로지), Ball Cluster(불균), Single Contact Spots(단일 접촉점), Multiple Contact Spots(다수 접촉점), Contact Spots Cluster(접촉점군), Indent Circular Spots(압입 원형자국), Plastic Strain Hardening(소성 변형경화)

Abstract

The multiple character of the contact interaction and the collective behavior of elementary microcontacts play a significant role in all the processes occurring in the surface layers, including the failure due to friction and wear. The array of metal spheres compressed between flat plates has been used for simulation of the contact behavior of multiple contact of solids under normal loading. An experimental design has been made providing regular array of the spheres at the same size with different spatial order. Measurement of electrical contact resistance has been made using the equipment providing the adequate accuracy in the range of micro Ohms. The data on electrical contact resistance have been compared with theoretical predictions using the multiple contact model of constriction resistance. The effect of single spots number and array on conductivity of contact has been evaluated.

1. 서 론

상대접촉 운동면에서 발생하는 마찰, 마멸이나 윤활접촉 특성을 해석하는 방법에는 여러가지가 있으나, 최근에 전기/전자기계나 컴퓨터와 같은 초정밀 기계의 수요가 급격하게 증가되면서 전기 접촉저항법(electrical contact resistance)을 응용한 연구가 많이 진행되고 있다. 접촉면에서 발생하는 전기적인 접촉저항치에 관련된 분야는 Fig. 1과 같

이 윤활유막이 제거된 상태에서 금속과 금속간에 실제로 접촉하는 부위를 통하여 통전하는 전도(conductivity)에 의하여 결정되는 미시적 관점의 초정밀 트라이볼로지(nanotribology) 영역이다.

전기적인 접촉저항 방식으로 상대 접촉면의 접촉 거동상태, 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 간섭형상에 따른 영향도 고려하여 연구를 활발하게 진행

*정회원, 홍익대학교 트라이볼로지 연구센터

**Metal-Polymer Research Institute, Belarus Republic

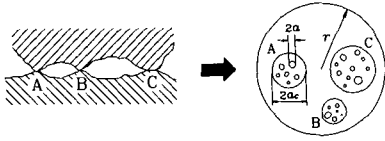


Fig. 1 Model of multiple contact spots and clusters

하고 있다.

전기모터 브러쉬에서 발생하는 마찰열을 억제하여 전기 접촉저항을 줄임으로써 전류유동이 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 전기 접촉저항법을 많이 응용하고 있다. (11)

기계의 상대 접촉면 운동은 대부분 경계운할 상태에서 사용되기 때문에 경계운할 조건에서 발생할 수 있는 접촉저항 특성치의 변화에 대한 연구가 많이 진행되고 있다. (12~14) Jibiki 등 (15)은 평면 위에 불이 접촉하는 형태의 미끄럼 마찰면에서 수분에 의하여 발생하는 마멸문제를 전기 접촉저항법으로 해석하였다.

기존의 전기저항법 연구는 단일 접촉점(single contact spots) 위주의 단편적인 실험적 연구를 통하여 접촉저항법에 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. 그동안 접촉점군 상호간의 영향에 관한 연구가 많이 진행되기는 하였지만 실험적 데이터를 통한 확인이 안되었기 때문에 기존의 접촉저항 추정식을 직접 사용하기가 어려웠던 점을 고려하여, 본 연구에서는 불군-원판 모델에 대한 접촉점과 다수의 접촉점군 상호간에 발생할 수 있는 접촉저항 특성을 실험적으로 해석하여 이론 추정치와 비교하고자 한다.

2. 실험방법 및 시험편

다수의 불군(multiple ball clusters)을 임의로 배열할 수 있는 플라스틱 케이지를 Fig. 2와 같이 제작한 후 이것을 두개의 원판 사이에 설치하여 불 또는 불군이 하중을 담당할 수 있도록 한다. 불군과 원판간의 접촉에 의하여 발생하는 접촉저항을

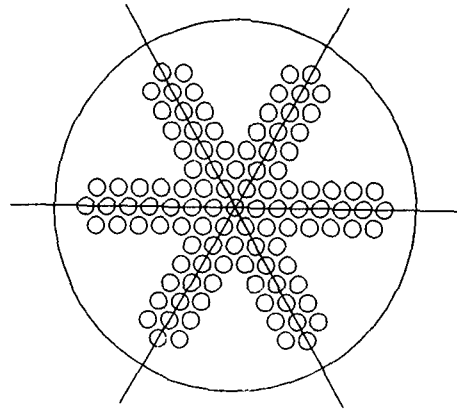


Fig. 2 Plastic cage retaining the balls between disc plates

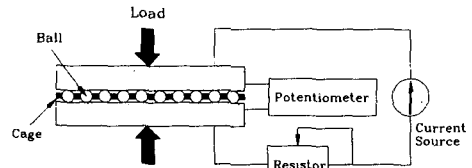


Fig. 3 Circuit of electrical contact resistance measurement of multiple contact

측정하기 위한 실험 장치도를 Fig. 3에서 보여주고 있다.

여기서 사용된 플라스틱 케이지는 109개의 불을 임의로 배열할 수 있고, 불이 원판에 압입할 때 발생할 수 있는 작은 양의 미끄럼이라도 방지할 수 있도록 제작하였으며, 케이지 소재를 통하여 불 상호간에 접촉저항이 전달되지 않도록 설계하였다. 불과 접촉하는 원판은 직경이 130 mm이고, 두께가 15 mm인 탄소강 소재(SM45C)를 사용하였으며, 불은 6.3 mm의 크롬 베어링강(1.5% Cr, 1% C)을 이용하여 실험을 수행하였고, 이들의 기계적 성질과 실험조건은 Table 1에서 각각 주어진다.

불과 원판 사이에 150 kN의 하중을 균일하게 가하기 위하여 통상의 유압 프레스를 사용하였으며, 여기서 발생하는 접촉저항의 크기는 Fig. 3과 같이 표준 저항기를 이용하여 접촉저항의 초기 상태를 보정한 후 측정하였다. 본 실험에서 사용한 표준 저항치와 전위차계는 초기에 영점조절과 시험편에서 발생하는 전위차를 정확하게 계측하여 보정하였고, 불 압입시의 상대 변위량은 정밀 직선변위계(LVDT)를 사용하여 측정하였다. 또한 불 압입시

Table 1 Test specimens

Specimen	Material	Specific resistance ρ ($\mu\text{Ohm}\cdot\text{mm}$)	Roughness R_a (μm)	Hardness	Heat treatment
Disc	Steel 45	300	0.4	HB 170	Plane grinding
Ball	Ball-bearing steel	600	< 0.05	HRC 62~66	Polishing

평판에 나타나는 소성변형 구역에서의 탄성 복원력을 배제하기 위하여 일정시간 동안 하중을 가한 상태로 유지시켰으며, 압입 원형자국(indent circular spots)의 크기와 깊이는 광학 현미경을 사용하여 측정하였다.

아세톤으로 세척된 볼과 원판 등의 시험편은 동일한 가공상태와 작동조건에서 5~6회의 반복실험을 통하여 신뢰도있는 데이터를 구축하였고, 특히 하중을 증가시킨 상태에서 접촉저항 실험을 수행할 수록 실험 데이터의 반복성은 우수하게 나타났다.

3. 볼군-원판 접촉모델 해석

접촉면에 유막이 없는 상태에서 금속과 금속이 접촉하는 단일 접촉면 모델에 대한 전기 접촉저항식이 Holm⁽¹⁾에 의하여 처음 제시된 이후로 접촉점 상호간의 영향을 일부 고려한 방정식을 Greenwood⁽³⁾가 수정 제안하였다. 그러나 이들 방정식은 접촉점(contact spots) 상호간의 영향이나 접촉점군(contact spots cluster) 상호간에 미치는 영향을 고려하지 않았기 때문에 문제가 되었다. 그래서 이와 같은 문제점을 해결하기 위하여 수행된 Myshkin⁽⁴⁻⁶⁾의 연구결과에 따르면 특히 접촉하중이 클수록 접촉계면에서의 탄소성 변형에 의한 영향이 증대된다는 사실이 알려지게 되었고, 이점을 보완한 기본 방정식을 발표하였다.

대표적인 접촉모델을 도시한 Fig. 1은 임의의 접촉점과 접촉점군의 배열형태를 보여주고 있다. 여기서 볼이 원판에 압입할 경우 접촉정점(asperity junction)의 크기는 서로 같고 이것은 시험편의 크기에 비하여 작다는 가정을 하게 되면, 접촉점에서 발생되는 저항치는 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 은 접촉점의 총

개수, a 는 단일 접촉점의 반경, r 은 접촉점을 모두 포함한 겉보기 접촉면적(nominal contact area)의 접촉반경을 각각 나타낸다.

접촉점 상호간의 간섭작용이 경우에 따라서는 접촉저항에 미치는 영향이 크기 때문에 Holm이 제안한 접촉저항 방정식으로는 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 총 개수, 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,

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

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. ($r_c \leq r$)

본 연구에서 수행된 실험은 볼이 상하면의 평판에 의하여 동시에 접촉하는 형태를 하고 있으므로 전류는 상부의 접촉점으로부터 볼의 반대편에 있는 하부의 접촉점으로 유동하게 된다. 이때 접촉점의 반경 a 는 볼의 직경 D 에 비하여 대단히 작다고 가정하면 여기서 발생하는 접촉저항 R' 는 다음과 같이 표현된다.

$$R' = \frac{\rho_l}{2} \left(\frac{1}{a} - \frac{2}{\pi D} \right) \quad (4)$$

상기식에서 볼에 작용하는 하중을 크게 증가시키면 접촉점의 반경 a 는 볼의 최대값인 반경에 근접하게 된다. ($a=0.5D$)

또한 볼이 원판에 압입될 경우 원판의 저항값은 다음의 식으로 표현된다.

$$R'' = \frac{\rho_2}{4a} \quad (5)$$

볼과 원판 사이에 n 개의 접촉점이 존재할 경우 볼과 원판 사이의 접촉 저항값을 추정하기 위한 접촉저항 방정식은 다음의 식으로 주어진다.

$$R = \frac{1}{n} \left(\frac{\rho_1}{2a} - \frac{\rho_1}{\pi D} + \frac{\rho_2}{2a} \right) + \frac{8\rho_2}{3\pi^2 n c a c} \quad (6)$$

4. 실험결과 및 토의

Table 2에서는 볼군과 원판사이의 접촉특성에 따른 접촉점이나 접촉점군에서 이들 상호간의 영향에 관련된 접촉저항에 대한 결과를 보여주고 있는데, 대체적으로 강구(steel ball)와 탄소강 원판을 접촉시켰을 경우에 대한 실험과 이론치의 오차범위는 약 8~43% 정도로 나타났다. 이것은 겉보기 접촉면적과 실제 접촉면적이 접촉조건에 따라서 크게 다르다는 점과 원판의 소성변형경화(plastic strain hardening)현상을 고려하면 커다란 오차라고 생각

Table 2 Comparison of the calculation and test data of disc plate on electrical contact resistance

Nos.	Array	Load (kN)	$2a_m$ (mm)	Calculation			Measurement	R_c/R_t (%)
				R_1 (μOhm)	R_2 (μOhm)	R_c (μOhm)	R_t (μOhm)	
1	6 balls at the periphery of discs ($s_{ij} \geq 45$ mm)	150	2.88	49.5	6	55.5	60	92.5
2	12 balls in 6 groups by 2 at the periphery of discs ($s_{ij} \geq 14.6$ mm)	150	2.68	26.7	1.9	28.6	48	59.6
3	12 balls in 3 groups by 4 in the middle part of discs ($s_{ij} \geq 7.3$ mm)	150	2.67	26.8	7.4	34.2	53	64.5
4	12 balls in one group in the center	150	2.63	27.3	13.5	40.8	56	72.9
5	18 balls in 3 groups by 6 at the periphery of discs ($s_{ij} \geq 7.3$ mm)	150	2.1	23	7.4	30.4	39	77.9
6	18 balls in one group in the center	150	2.03	23.8	9.0	32.8	45	73
7	21 balls in 3 groups by 7 at the periphery of discs ($s_{ij} \geq 7.3$ mm)	150	1.98	20.9	7.4	28.3	38	74.5
8	21 balls in one group in the center	150	1.99	20.8	7.7	28.5	50	57

되지 않는다. 그러나 이와 같은 오차를 줄이기 위해서는 접촉면에서의 실제 접촉면에 대한 항을 반영시켜야만 한다. 예를 들어 6개의 볼을 접촉점 상호간의 영향이 배제될 수 있도록 원판 주위에 고르게 배열한 후 수직하중을 가한 상태에서 접촉저항을 측정하면 오차가 약 8% 정도 발생하는데, 이때 실제 접촉면적의 크기는 겉보기 접촉면적에 비하여 약 60% 정도에 불과하다는 점을 고려하면 이것은 무시할 수 있는 정도라 생각된다.

실험결과에 의하면 볼군을 원판 중심 가까이 배열하는 것보다는 중심에서 가능한 멀리 외곽지역으로 위치시킬수록 접촉 저항값은 감소하는데, 특히 볼의 개수가 많을수록 이와같은 현상은 두드러지게 나타난다. 즉, 동일한 $s_w \geq 7.3 \text{ mm}$ 를 나타내는 Nos. 3~8의 경우, 계산된 저항치 $R_c = 0.2 \sim 6.6 \mu \text{ Ohm}$ 정도의 접촉 저항치가 변화하는 반면에 측정된 저항값은 $R_t = 3 \sim 12$ 정도로 커다란 차이를 보여주고 있다. 이것은 볼 또는 볼군 상호간의 간섭에 의한 영향이 작기 때문에 발생하는 결과로 생각된다. 계산된 데이터를 보면 볼이 원판에 접촉할 때 발생하는 접촉저항은 R_t 이 지배적인 인자가 되나 볼의 개수나 볼군의 배열형태에 따라서는 볼군 상호간의 영향이 상대적으로 크게 증가되고 있음을 명백하게 보여주는 것은 기존의 Holm이나 Greenwood 등의 제시했던 방정식으로는 정확한 접촉저항을 추정하기가 어렵다는 것을 의미한다. 이러한 연구결과는 Holm이나 Greenwood에 의하여 제시된 이론식으로부터 예측될 수는 있으나 아직까지 실험적으로 명확하게 증명되지는 않았으며, 비로소 본 연구를 통하여 처음 확인되었다.

측정된 데이터를 분석하면 동일하게 하중에 대하여 볼 1개당의 평균 접촉반경 a_m 의 크기는 볼의 갯수나 볼의 위치에 따라서 약간 변하기는 하나 특히 볼의 개수가 증가할수록 수렴하는 결과를 보여주고는 있으며, 이들의 저항값은 대체적으로 감소하고 있다. 즉, 접촉점이 비교적 균일하고 접촉점군의 밀도가 낮을수록 작은 접촉 저항치를 나타내며, 접촉점의 개수가 증가할수록 또는 접촉소재의 경도가 높을수록 이와같은 경향은 더욱 명백하게 나타난다.

5. 결 론

다수의 볼군과 평판이 접촉할 경우 발생하는 접

촉저항 문제를 실험적으로 수행하였고, 이들 데이터를 활용하여 이론식에 대한 타당성을 검토하였다. 실험적으로 측정된 접촉 저항값은 이론적 해석치에 비하여 크게 나타났지만, 이것은 실험에서 고려하지 않았던 몇가지 조건때문이라 생각된다. 즉, 시험편 접촉면의 거칠기 상태, 표면 산화막의 제거 정도, 접촉점 상호간의 미세한 변화에 의한 변형경화 현상, 즉 실제 접촉면적의 크기를 정확하게 이론식에 반영시키면 가능하리라 생각된다. 그래서 차후에 수행할 연구에서는 이들의 문제점을 고려하면 좀더 명확하게 해석된 결과를 얻을 수 있을 것으로 생각된다.

참고문헌

- (1) Holm, R., 1967, *Electrical Contacts*, Springer Verlag, Berlin.
- (2) Bowder, F. P. and Tabor, D., 1950, "The Friction and Lubricant of Solids," Clarendon Press, Oxford.
- (3) Greenwood, J. A., 1966, "Constriction Resistance and the Real Area of Contact," *British J. of Appl. Phys.*, Vol. 17, pp. 1621~1631.
- (4) Myshkin, N. K., 1983, "Effect of Surfactant on Lubrication for Electrical Contacts," *Soviet Journal of Friction and Wear*, Vol. 4, No. 3, pp. 566~569.
- (5) Myshkin, N. K., 1985, "On the Calculation of Contact Conductivity," *Proc. Int. Conf., Eurotrib-85*, Lion.
- (6) Myshkin, N. K., 1991, "Tribological Problems in Electrical Contacts," *Tribology International*, Vol. 24, No. 1, pp. 35~49.
- (7) Myshkin, N. K. and Konchits, V. V., 1994, "Evaluation of the Interface at Boundary Lubrication Using the Measurement of Electric Conductivity," *Wear*(Accepted).
- (8) McNab, I. R., 1980, "Recent Advances in Electrical Current Collection," *Wear*, Vol. 59, pp. 259~276.
- (9) Dow, T. A. and Kannel, J. W., 1982, "Thermomechanical Effects in High Current Density Electrical Slip Rings," *Wear*, Vol. 79, pp. 83~92.
- (10) Bryant, M. D. and Burton, R. A., 1982, "Ther-

- mal Deformation in Brushes for Current Passage Through a Steadily Moving Patch," *Wear*, Vol. 79, pp. 83~92.
- (11) Myshkin, N. K. and Konchits, V. V., 1992, "Friction and Wear of Metal-Composite Electrical Contacts," *Wear*, Vol. 158, pp. 119~140.
- (12) Konchits, V. V., 1991, "Electric Conductivity of Point Contacts at Boundary Lubrication, Part I," *Soviet Journal Friction and Wear*, Vol. 12, No. 2, pp. 65~75.
- (13) Konchits, V. V., 1991, "Electric Conductivity of Point Contacts at Boundary Lubrication, Part II," *Soviet Journal Friction and Wear*, Vol. 12, No. 3, pp. 39~46.
- (14) Konchits, V. V. and Korotkevich, S. V., 1992, "Investigation of Lubricant Film Strength in Molecular Scale Boundary Layer," *Soviet Journal of Friction and Wear*, Vol. 13, No. 6, pp. 47~54.
- (15) Jibiki, T., Shima, M. and Sato, J., 1991, "Electrical Contact Resistance Measurement in Fretting," *Japanese Journal of Tribology*, Vol. 36, No. 4, pp. 367~376.