

트라이볼로지 기소의 멀티접촉에서 전기접촉저항 모델해석에 관한 연구

김 청 균

홍익대학교 트라이볼로지 연구센터

Analysis of Electrical Contact Resistance Model in Multi-Contact of Tribological Elements

Chung Kyun Kim

Tribology Research Center, Hongik University

Abstract—The results of the electrical contact conductivity of multi-contact spots accounting the surface roughness and the non-conductive films of different origins such as air, water, cutting oil, and machining oil are presented. The array of metal spheres compressed between two flat plates has been used for simulation of the contact behavior of multiple contact of solids under normal loading. 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 spot number and array on conductivity of contact has been evaluated. The results of the experiments show that the contact resistance are closely related to the number of loading cycles, form of surface roughness, and presence of non-conductive films that reduce the size of the real electrical contact spots.

Key words—electrical contact resistance, nanotribology, ball cluster, single contact spot, multiple contact spot, contact spot cluster, indent circular spot.

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. 접촉면에서의 전기적인 접촉저항방식은 금속과 금속간의 실제접촉면적(Real contact area)에서 발생하는 전도(Conductivity)에 의하여 결정되는 미세적 관점의 초정밀 트라이볼로지(Nanotribology) 영역이다[1]. 산화현상에 의한 윤활유의 오염 또는 산화된 마멸입자는 전기 저항치가 높게 나타나기 때문에 미

세한 접촉조건에서 발생하는 마찰 접촉면 상태나 마멸입자 해석에도 대단히 중요한 정보를 제공한다.

금속-금속간의 마찰접촉은 전기적 저항값을 변화시키므로, 이것은 접촉거동 상태를 진단하는 측정도구로 사용할 수 있다. 전기적으로 도체인 물체는 접촉면의 접촉상태에 따라서 마찰력, 윤활유막 두께, 또는 마멸정도를 측정할 수 있는 미세기술로 발전하게 되었다. 두개의 물체가 접촉하면서 전기를 통해야 하는 접촉제면을 갖는 전기 스위치, 자기 개폐기, 판토히아프(Pantograph)와 유막두께를 정밀하게 측정해야 하는 건조마찰과 경계윤활 마찰상태에서 운전하는 기계요소들의 접촉상태를 해석하기 위하여 전기 저항법이 많이 응용되고 있다.

트라이볼로지 분야에서 접촉 저항법은 Bowden과 Tabor[2]가 표면의 접촉상태 해석, 즉 실제접촉면적(Real contact area)과 접촉점 수량 등을 측정할 연구결과가 발표되면서 응용되기 시작하였다. 금속간의 접촉 메카니즘이 건조마찰 상태에 있다면 접촉면의 거칠기, 표면박막(Surface film)과 하중의 변화에 따른 미세한 접촉 저항값도 정밀하게 측정할 수 있다는 사실에 많은 관심을 갖게 되었다[3]. 최근에는 경계윤활 마찰상태에서의 접촉특성을 해석할 수 있는 단계로 발전하였다[4]. 이 측정법은 마찰 접촉 저항값이 작게 검출되는 마찰력[5]도 용이하게 모니터링 할 수 있고, 크게 측정되는 전기연마(Electro-grinding), 용접(Welding)과 접촉지역가열(Contact zone heating) 상태[6]를 효과적으로 진단할 수 있다.

초창기에는 Holm[7], Shobert[8], Greenwood[9] 등에 의하여 접촉 고체면에서 발생하는 전기적 유도에 대한 기초적 연구가 진행되었지만, 접촉소재의 기계적 특성, 가공경화, 접촉점 상호간의 영향, 표면조도, 전류유동에 관련된 열적문제를 고려한 실제적인 접촉 문제에 대한 연구는 거의 없는 실정이다.

그래서 본 연구에서는 접촉면의 표면 거칠기와 접촉계면의 윤활박막상태, 즉 접촉환경 변화에 따른 접촉저항을 측정하고, 이들 파라미터가 접촉저항에 미치는 영향을 분석하여 기존의 이론적 모델에 대해 개선된 결과치와 비교·해석하고자 한다.

2. 접촉저항 모델해석

접촉면에 유막이 없는 상태에서 금속과 금속이 접촉하는 단일 접촉면 모델에 대한 전기 접촉 저항식이 Holm[7]에 의하여 처음 제시된 이후로 접촉점 상호간의 영향을 일부 고려한 수정 방정식이 Greenwood[9]에 의하여 제안되었다. 그러나 이들 방정식은 접촉점(Contact spots) 상호간의 영향이나 접촉점군(Contact spot cluster) 상호간에 미치는 영향을 고려하지 않았기 때문에 사용상 문제가 되었다. 그래서 이와 같은 문제점을 해결하기 위하여 수행된 Myshkin[10-12]의 연구결과에 따르면 특히 접촉하중이 클수록 접촉계면에서의 탄소성 변형에 의한 영향이 증대된다는 사실이 알려지게 되었고, 이점을 보완한 기본 방정식을 발표하였다.

실제의 기계가공 표면은 완벽한 평면이 아니라

Fig. 1에서 보여주는 것과 같이 표면의 거칠기가 불규칙하게 분포되어 있다. 접촉표면의 한쪽면은 완벽한 평면이라고 가정하고, 다른 한쪽면은 Fig. 1과 같이 실제적인 가공면과 접촉할 경우는 Fig. 2(a)에서 제시하는 것과 같은 접촉점(Contact spots)들이 모여서 접촉점군(Contact clusters)이 형성하게 된다. 이들의 집합체가 Fig. 1의 실제적인 접촉면 형상을 대표한다고 가정하면 금속간 접촉표면에서 발생하는 트라이볼로지적 접촉특성을 접촉 저항법으로 미시적 관점에서 용이하게 해석할 수 있는 장점이 있다.

대표적인 접촉모델을 도시한 Fig. 2는 임의의 접촉점과 접촉점군의 배열 형태를 보여주고 있다. 여기서 볼이 원판에 압입할 경우 접촉정점(Asperity junction)의 크기는 서로 같고, 이것은 시험편의 크기에 비하여 작다는 가정을 하게 되면 접촉점에서 발생하는 저항치는 Holm[7]에 의하여 다음 식으로 제시된다.

$$R = \rho \left(\frac{1}{2n a} + \frac{1}{2r} \right) \tag{1}$$

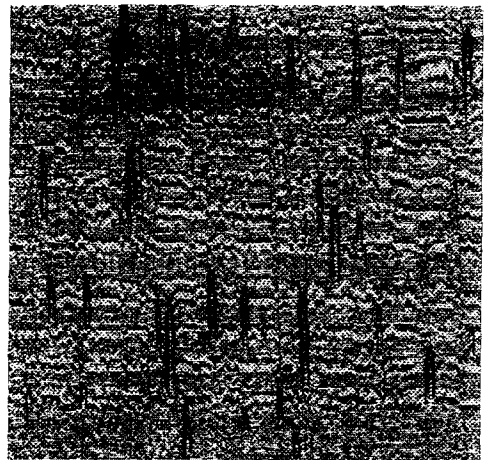


Fig. 1. Typical 3-D contact geometry of the solid body, which is measured by Kosaka 3D AK-11 roughness tester.

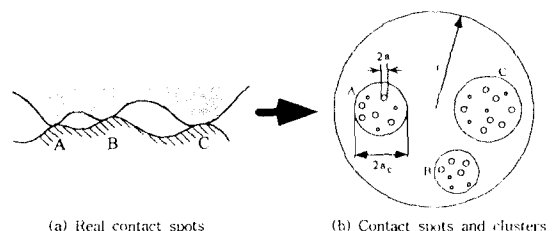


Fig. 2. Model of multiple contact spots and clusters.

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 간섭작용이 경우에 따라서는 접촉 저항에 미치는 영향이 크기 때문에 Holm이 제안한 접촉 저항 방정식으로 해석하기에는 문제가 있으므로, 이 점을 보완하여 Greenwood[9]는 다음과 같이 제시하였다. 즉,

$$R = \rho \left(\frac{1}{2n a} + \frac{16}{3\pi^2 n_c a_c} \right) \quad (2)$$

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

$$a_c^{-1} = \sum_{i \neq j} \frac{1}{s_{ij}} \quad (3)$$

상기의 접촉저항 계산식 (1)과 (2)를 실제의 접촉문제에서 사용하기 위해서는 실험적 결과를 통하여 과파메터 값을 획득해야 하기 때문에 직접 활용할 수는 없다. 또한 Myshkin은 접촉하중이 증가할수록 접촉점보다는 접촉점군 상호간의 영향이 커진다는 사실에 기초한 수정된 접촉 저항식을 다음과 같이 제시하였다.

$$R = \rho \left(\frac{1}{2n a} + \frac{16}{3\pi^2 n_c a_c} + \frac{16}{3\pi^2 r_c} \right) \quad (4)$$

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. 이 때에 접촉점의 반경 a 는 볼의 직경 D 에 비하여 대단히 작다고 가정하면 여기서 발생하는 접촉저항 R' 는 다음과 같이 표현된다.

$$R' = \rho_1 \left(\frac{1}{2a} - \frac{1}{\pi D} \right) \quad (5)$$

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

구이므로 볼 자체의 저항에 대한 해석은 고려하지 않는다.

또한 볼이 원판에 압입될 경우 원판의 두께에 비하여 접촉점의 크기는 무시될 정도로 작기 때문에 접촉점에 대한 원판의 저항값은 다음의 식으로 표현된다.

$$R = \frac{\rho_2}{4a} \quad (6)$$

본 연구에서 고려한 접촉모델에서는 볼과 원판사이에서 n 개의 접촉점이 존재할 경우 볼군과 원판사이의 접촉 저항값을 계산하기 위한 접촉저항 방정식은 다음의 식으로 주어진다.

$$R = \frac{1}{n} \left(\frac{\rho_1}{2a} - \frac{\rho_1}{\pi D} + \frac{\rho_2}{2a} \right) + \frac{8\rho_2}{3\pi^2 n_c a_c} \quad (7)$$

3. 시험편 및 실험방법

3-1. 시험편 및 실험조건

다수의 접촉점 해석모델에서 저항값을 측정하기 위한 기본적인 설계와 실험방법은 저자에 의하여 수행된 논문에서 기술되었다[13]. 즉, 다수의 강재볼(Multiple steel balls)이 상호간에 접촉하지 않고, 임의로 배열될 수 있도록 케이지를 Fig. 3과 같이 제작하였다. 볼군과 두개의 원판은 외부하중에 의하여 접촉하게 되고, 접촉계면의 접촉조건에 따라서 접촉 저항값은 변하게 된다. 이 때에 볼군과 원판간에 발생하는 접촉 저항값을 측정하기 위한 실험장치 개략도는 Fig. 4에서 보여 주고 있다.

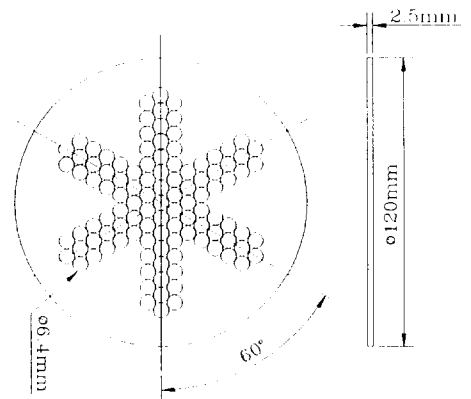


Fig. 3. Scheme of plastic cage retaining the balls between the disc plate.

여기서 사용된 케이지는 볼을 임의로 배열할 수 있고, 볼이 원판에 압입할 때 발생될 수 있는 작은 양의 미끄럼이라도 방지할 수 있도록 제작하였으며, 케이지 소재를 통하여 볼 상호간에 접촉저항이 전달되지 않도록 설계하였다. 볼과 접촉하는 원판은 직경이 120 mm이고, 두께가 2.5 mm인 탄소강 소재(SM45C)를 사용하였으며, 볼은 6.4 mm의 크롬 베어링강(Cr: 1.5%, C: 1%)을 이용하여 실험을 수행하였고, 이들의 기계적 성질과 실험조건은 Table 1에서 각각 주어진다. 실험에서 볼의 표면 거칠기는 늘 균일하다고 가정하였고, 원판의 접촉면 표면 거칠기는 3가지($R_a=0.4607, 0.5684, 0.7968$), 접촉계면의 마찰 접촉환경은 4가지(공기, 물, 절삭유: 11 CS at 40°C, 기계유: 32.3 CS at 40°C)로 변화시켜 가면서 접촉 저항값을 측정하였다.

3-2. 실험장치 및 실험방법

볼과 원판 사이에 600~4400 kg의 하중을 균일하게 가하기 위하여 Fig. 4에서 보여주는 것과 같은 통상의 유압 프레스를 사용하였으며, 여기서 발생하는 접촉 저항의 크기는 Fig. 4와 같이 표준 저항기를 사용하여 접촉저항의 초기 상태를 보정한 후 측정하였다. 본 실험에서 사용한 표준 저항치와 전위차계는 초기에 영점조절과 시험편에서 발생하는 전위차를 정확하게 계측하여 보정하였고, 볼 압입시의 상대 변위량은 직선 변위계(LVDT)를 사용하여 정밀하게 측정하였다. 또

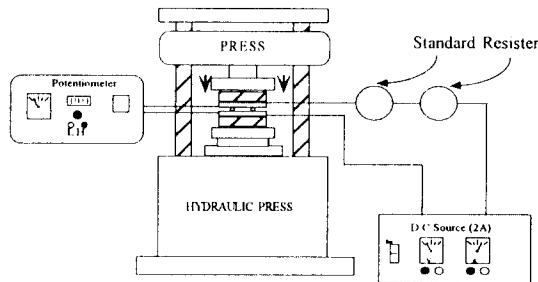


Fig. 4. Schematic of electrical contact resistance measurement.

한 볼 압입시 평판에 나타나는 소성변형 구역에서의 탄성 복원력을 배제하기 위하여 일정시간 동안 하중을 가한 상태로 유지시켰으며, 압입 원형점 자국(Indent circular spots)의 크기와 압입깊이는 광학 현미경을 사용하여 측정하였다.

시험편의 접촉면은 아세톤으로 세척하여 항상 동일한 가공상태와 작동조건에서 5~6번의 반복실험을 통하여 신뢰도 있는 데이터를 구축하였으며, 특히 하중을 증가시킨 상태, 즉 실제접촉면적이 증가될수록 실험 데이터의 반복성은 우수하게 나타났다.

4. 실험결과 및 토의

시험편의 접촉면 가공정도를 중심선평균거칠기(Center line average roughness)로 표시하면 $R_a=0.4607 \mu\text{m}$ 로 나타낼 수 있고, 접촉표면에서의 접촉정도는 볼 수량에 따라서 결정되며, 측정된 접촉 저항값은 Figs. 5~8에서 제시하고 있다. 이들의 측정결과에 따르면 접촉점 하중이 증가함에 따라서 저항값은 급격하게 감소하고, 수렴정도는 대단히 빠르게 진행되고 있다. 또한 볼의 갯수가 증가함에 따라서 저항치도 감소하지만, 접촉환경에 따른 접촉 저항값의 변화가 크게 발생되고 있음을 알 수 있다. 이것은 접촉하중, 접촉점의 환경조건, 접촉면적 상호간에 밀접한 관계가 있다는 사실을 증명하는 데이터이다.

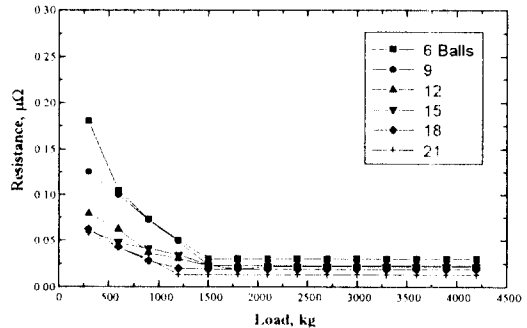


Fig. 5. Variation of dry contact resistance as a function of the load with number of contact balls.

Table 1. Basic data for the electrical contact resistance

Specimen	Materials	Specific resistance $\rho(\mu\Omega \text{ mm})$	Roughness $R_a (\mu\text{m})$	Hardness	Surface treatment
Disc	Steel 45	300	0.4	HB 170	Plane grinding
Ball	Ball bearing steel	600	<0.05	HRC 62~66	Polishing

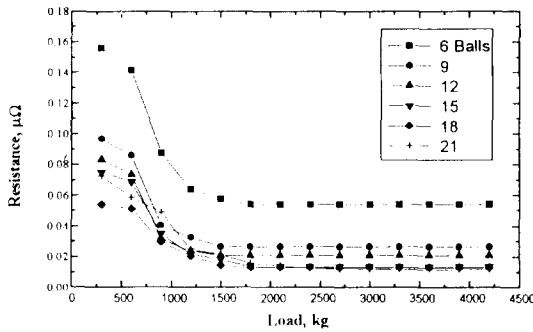


Fig. 6. Variation of water contact resistance as a function of the load with number of contact balls.

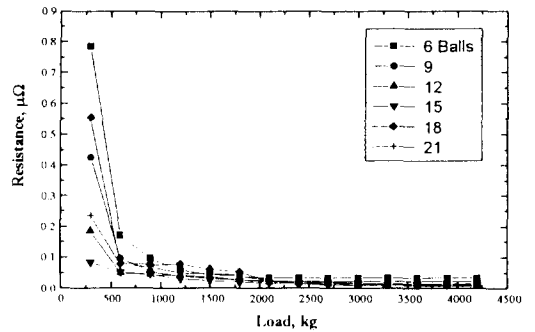


Fig. 8. Variation of machining oil contact resistance as a function of the load with number of contact balls.

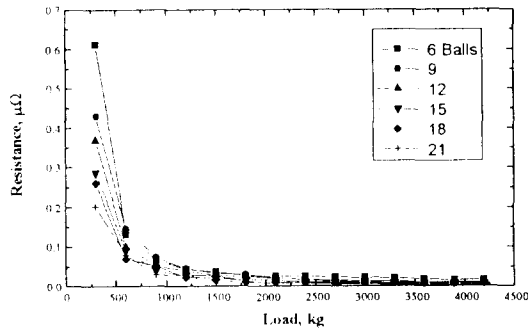


Fig. 7. Variation of cutting oil contact resistance as a function of the load with number of contact balls.

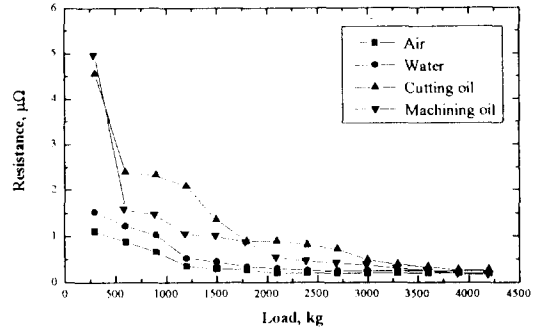


Fig. 9. Variation of dry contact resistance as a function of the load for various contact films.

Fig. 9는 21개의 볼이 평판과 접촉한 상태에서 접촉 환경(공기, 물, 절삭유, 기계유)의 변화에 따른 접촉 저항값을 측정된 결과이다. 여기서 제시된 결과에 따르면 건조마찰(공기) 접촉상태나 물접촉과 같이 점도가 대단히 낮아서 유막형성이 어려운 박막접촉 환경에서는 실제로 형성된 초박막에 의하여 접촉조건이 크게 변화되었다고 보기는 어려운 결과를 제시하지만 접촉 초기에는 미세박막이 접촉 저항값에 분명히 영향을 주고 있다. 이것은 전기적으로 도체인 스위치나 개폐기 등에서는 실제의 접촉저항이 크지 않다 할지라도 초기의 저항값이 성능에 큰 영향을 미치고 있다는 사실을 고려하면 중요할 수 있다. 그러나 기계적인 마찰접촉운동을 하는 기계요소 부품에서는 정상상태에 도달한 마찰조건을 많이 고려하므로 초기의 박막상태는 커다란 문제가 안된다. 즉, 유막형성이 어려운 조건에서 운전되는 경우는 하중이나 실제접촉면적이 증가함에 따라서 저항값은 완만하게 감소하는 특징을 보여주고 있다. 그러나 절삭유나 기계유와 같이 일정

한 점도를 갖는 매개체와 같이 윤활박막이 존재하는 접촉조건에서 초기의 마찰 저항값은 높지만, 접촉면 하중이 증가되어 유막이 파손되는 임계값을 지나게 되면 접촉 저항값은 급격히 감소하면서 수렴하게 된다. 즉, 접촉 저항값이 급격히 감소한다는 사실은 유막이 파손되었다고 생각할 수 있으며, 그 이후는 경계 마찰 상태에서 건조마찰 접촉상태로 변화하는 과정이므로 완만한 감소를 지속하게 된다.

Fig. 10은 21개의 볼이 평판계면에서 수막(Water film)에 의하여 분리된 경우의 접촉 저항값으로 하중이 증가함에 따라서 급격하게 수렴하고 있음을 보여 주고 있다. 이 그림에서 600 kg 정도의 하중이 가해지면 저항값은 급격히 줄어들고, 하중이 더욱 증가하면 완만한 저항치 감소를 보여주고 있다. 또한 접촉하중이 증가함에 따라서, 그리고 접촉표면의 거칠기 정도가 높을수록($R_a=0.7968$) 접촉 저항값은 높게 나타났고, 가공 표면이 매끄러울수록($R_a=0.4607$) 접촉 저항값은 낮게 측정되었다. 이 경우는 수막이 형성된 초기

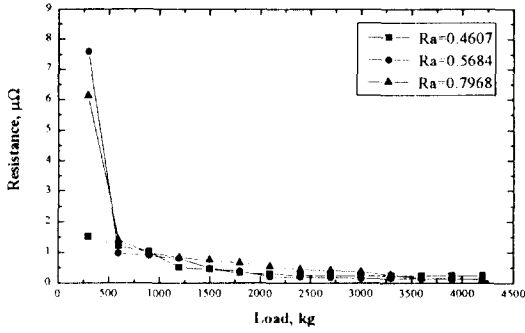


Fig. 10. Contact resistance as a function of the load for 21 contact balls with water film.

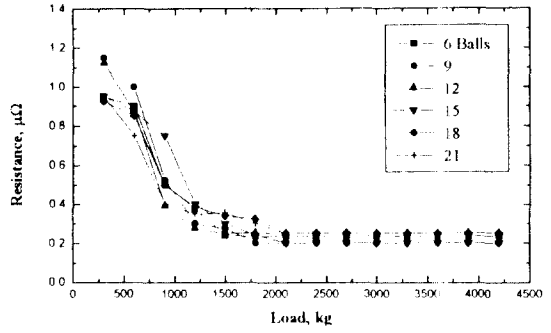


Fig. 12. Variation of contact resistance as a function of the load for $R_a=0.7968$ and water contact with number of contact balls.

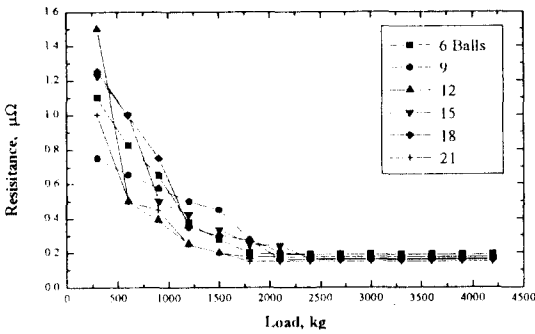


Fig. 11. Variation of contact resistance as a function of the load for $R_a=0.7968$ and dry contact with number of contact balls.

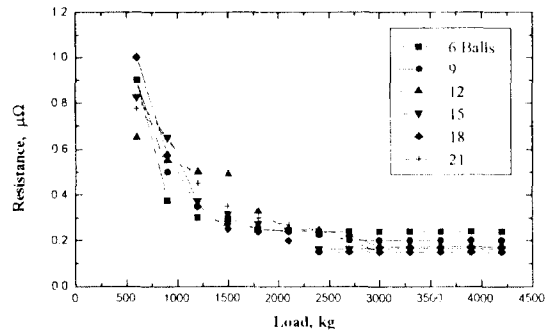


Fig. 13. Variation of contact resistance as a function of the load for $R_a=0.7968$ and cutting oil contact with number of contact balls.

에 비하여 하중이 증가하면 수막이 파손되어 매끄러운 표면일수록 실제 접촉면적이 크게 증가하게 되어 접촉 저항치는 그 만큼 줄어들기 때문에 감소된 결과를 얻게 된다. 이들의 실험결과는 표면의 거칠기 정도가 높을수록 저항값은 증가하고, 표면이 매끄러울수록 낮게 나타났다.

Figs. 11~14는 가공 표면 거칠기 $R_a=0.7968$ 인 경우 여러 가지의 접촉환경(공기, 물, 절삭유, 기계유)에서 접촉점 갯수를 변화시켜 가면서 접촉 저항값을 측정 한 결과이다. 이들의 측정결과에 따르면 접촉점 하중이 증가함에 따라서 저항값은 급격하게 감소하고, 접촉볼의 갯수가 증가함에 따라서 수렴정도는 빠르게 진행된다. 접촉하중이 증가함에 따라서 건조마찰의 접촉 저항값은 0.2 정도로 가장 낮으나, 기계유와 같이 점도가 높은 분위기에서의 접촉 저항값은 약간 높게 유지되었으며, 유막이 파손된 상태에서의 저항값은 0.2 정도로 거의 같게 수렴되고 있음을 알 수 있다.

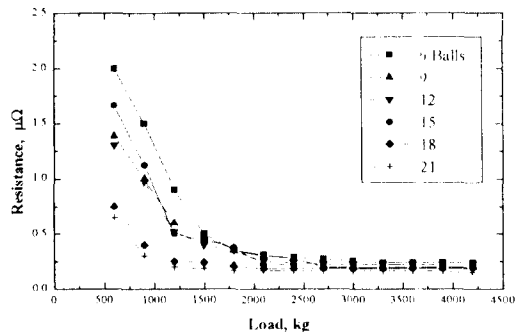


Fig. 14. Variation of contact resistance as a function of the load for $R_a=0.7968$ and machining oil contact with number of contact balls.

Table 2는 불균과 원판사이의 접촉볼수에 따른 접촉상태와 접촉 저항값에 대한 실험적 결과를 제시하였고, 강구와 탄소강 원판을 접촉시켰을 경우 실험과 이론적 수치의 오차는 약 21~51% 정도로 나타났다.

Table 2. Comparison of calculations and measured results of disc plate on contact resistance for $R_0=0.5684 \mu\text{m}$ and machining oil contact

Number of balls	Load (kg)	$2a_m$ (mm)	Calculation			Test		R_0/R_i (%)
			R_1 ($\mu \Omega$)	R_2 ($\mu \Omega$)	R_c ($\mu \Omega$)	R_t ($\mu \Omega$)		
3	4,200	5.00	40.0	1.98	49.2	24.0	48.8	
6	4,200	4.95	20.2	2.08	26.0	18.8	72.3	
9	4,200	4.90	13.6	4.16	20.3	18.0	78.3	
12	4,200	4.70	10.7	8.02	20.8	15.0	72.1	
15	4,200	4.65	8.60	15.44	25.8	16.0	62.0	
18	4,200	4.60	7.30	13.81	22.6	13.5	59.7	
21	4,200	4.50	6.30	23.16	30.9	42.8	72.2	

이것은 겉보기 접촉면적과 실제 접촉면적의 크기는 접촉환경 조건에 따라서 크게 다르다는 사실이다. 저자가 건조마찰상태에 대한 접촉저항을 측정하였던 실험결과가 8~43%[13] 정도였다는 사실에 비교하면 그 오차정도는 더 크다. 이것은 볼과 탄소강 원판 사이에 유막이라는 접촉환경을 변화시켰기 때문에 오차는 더욱 커진 것으로 생각된다. 그래서 이와 같은 오차를 축소시키기 위해서는 이론식에 접촉면에서의 실제 접촉면에 대한 항과 접촉환경 조건을 반영시켜야 한다. Table 2에서 계산된 결과를 보면 볼의 갯수가 작을수록 발생된 접촉저항 R_i 가 지배적인 인자가 되고, 볼의 갯수가 증가할수록 볼군 상호간의 영향이 상대적으로 크게 증가하고 있음을 보여주는 결과이다. 측정된 데이터를 분석하면 동일한 하중에 대하여 볼 한개당의 평균 접촉 반경 α_m 의 크기는 볼의 갯수가 증가할수록 수렴하며, 이들의 저항값은 대체적으로 감소한다. 즉, 접촉점이 비교적 균일하고, 접촉점군의 밀도가 낮을수록 작은 접촉 저항치를 나타내며, 접촉점 갯수가 증가할수록 또는 접촉소재의 경도가 높을수록 이와같은 경향은 명백해진다.

이들의 실험적 결과를 요약하면 접촉점에서의 박막 존재는 Myshkin이 제시하였던 소성변형 경화문제와 실제접촉면적을 고려한 결과보다도 더 큰 문제가 있다는 사실을 제시하고 있다. 이것은 기존의 어떠한 이론식도 실제의 접촉환경인 표면 거칠기와 접촉면의 환경조건을 고려한 새로운 접촉저항 이론식이 개발되어야만 이와 같은 오차를 줄여줄 수 있을 것으로 생각된다.

이들의 결과에 의하면 접촉계면의 접촉 저항값은 박막(산화막, 흡착 가스층, 오염된 이물질막, 윤활유막

등)에 의하여 크게 영향을 받고 있음을 보여주고 있다. 접촉계면에 박막이 형성되어 있어도 접촉면에서의 터널 효과(Tunnel effect), 열전자 방출(Thermal electron emission), 박막전도(Film conductivity), 또는 이들의 복합효과에 의하여 전류가 통한다는 사실이다. 그래서 접촉면에서 통과하는 저항치는 금속과 금속의 직접접촉에 의한 저항값과 박막 저항값의 요소를 동시에 고려해야 정확한 이론적 추정치가 예상된다.

5. 결 론

다수의 볼군과 평판이 접촉하는 경우 접촉표면의 거칠기와 접촉환경을 변화시켜 가면서 접촉 저항을 측정하였고, 이들을 기존의 이론적 계산치와 비교하였다. 기존의 이론적 수식은 실제의 접촉상태인 표면 거칠기와 접촉박막의 상태를 고려하지 않았기 때문에 많은 오차를 나타냈다.

접촉표면의 가공상태가 매끄럽고, 윤활유와 같이 접촉계면 박막 두께가 큰 경우는 접촉 저항값이 높게 나타나지만, 윤활박막이 손상을 입게되면 금속간 접촉비율이 증가하면서 마찰 저항값은 민감한 반응을 나타내고 있다. 그러나 공기나 산화막층과 같이 초기의 접촉박막이 대단히 작고 불안한 경우는 하중이 증가하여도 완만하게 접촉 저항이 감소하는 경향을 보여주고 있다.

후 기

이 논문은 1995년도 한국학술진흥재단의 공보과제 연구비에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

1. Bhusan, B., "Micro/nanotribology and Its Applications," J. of the KSTLE, Vol. 11, No. 5, pp.128-135, 1995.
2. Bowden, F. P. and Tarbor, D., "The Friction and Lubrication of Solids," Oxford University Press, pp.25, 1950.
3. Wilson, W., "The Contact Resistance and Mechanical Properties of Surface Films," The Proc. of the Phys. Soc., Vol. 68, Pt. 9, No. 429B, pp.625-641, 1955.
4. Marui, E. and Endo, H., "Significance of Contact

- Resistance in Boundary Lubrication," *Wear*, Vol. 156, pp.49-55, 1992.
5. Sviridenok, A. I., Myshkin, N. K., Kalmykova, T. F., and Kholodilov, O. V., "Acoustic and Electrical Methods in Triboengineering," Allerton, New York, 1988.
 6. Bowden, F. P. and Williamson, J. B. P., "Electrical Conduction in Solids," *Proc. Royal Soc.*, Vol. 246A, pp.1-31, 1958.
 7. Holm, R., "Electrical Contacts," Springer, New York, 1979.
 8. Shobert, E., "Carbon Brushes," New York Chemical Publishing Co., 1965.
 9. Greenwood. J. A., "Constriction Resistance and the Real Area of Contact," *Brit. J. of Appl. Phys.*, Vol. 17, pp.1621-1631, 1966.
 10. 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.
 11. Myshkin, N. K., "On the Calculation of Contact Conductivity," *Proc. Int. Conf., Eurotrib-85, Lion, 1985.*
 12. Myshkin, N. K., "Tribological Problems in Electrical Contacts," *Tribology International*, Vol. 24, No. 1, pp. 35-49, 1991.
 13. Myshkin, N. K. and Kim, C. K., "Studies in the Effect of Array Number and Size of Metal Contact Spots on Conductivity," *J. of Friction and Wear*, Vol. 15, No. 4, pp.54-58, 1994.