

접점표면의 형상에 따른 접촉저항 계산

오연호, 송기동, 김진기*, 김귀식*
한국전기연구원, *진광이엔씨

Calculation of the Contact Resistance by Contact Surface

Yeon-ho Oh, Ki-dong song, Chin-ki Kim* and Kwi-sik Kim*
Korean Electrotechnology Research Institute, *Jin Kwang E&C Corp.

Abstract - This paper deals with the calculation of contact resistance depending on the applied force by modeling surface roughness. The true contact surface area is made up of many asperities of varying heights which is close to Gaussian distribution. The mean square deviation and the mean value of the Gaussian distributed asperity heights were determined in this paper.

The elastic deformation of the surface asperities according to the increasing of applied force were considered. The contact resistance was also calculated by using the Greenwood analysis.

1. 서 론

전기접점의 접촉저항은 접점의 성능을 결정하는데 큰 영향을 미친다.

접촉저항은 접점의 전기저항과 기계적 특성, 접점 표면의 거칠기, 그리고 표면에 존재하는 산화막(contaminating film) 등에 따라 달라진다. 또한 접점 사이에 작용하는 힘이 증가할수록 접촉저항은 줄어든다. 이는 실제 접점의 표면이 수 많은 돌기(asperities)들로 이루어져 있으며, 이러한 돌기들로 인해 두 접점의 표면이 완벽하게 접촉되지 않기 때문이다[1,2,3].

이들 돌기들의 높이와 반지름은 거의 정규분포를 이루고 있으며[2,3], 접점에 힘이 작용할 때 탄성 및 소성 변형을 일으킨다. 본 연구에서는 접점표면에 정규분포에 의한 돌기를 생성한 후, 접점에 힘이 작용할 때 발생하는 돌기들의 변형을 계산하였다. 그리고 돌기의 변형에 따른 접점 사이의 실 접촉면적(real contact area)과 접촉저항을 계산하였다. 또한 접점의 크기와 힘에 따른 실 접촉면적 및 접촉저항을 계산하였으며, 그 결과를 본 논문에 제시하였다.

2. 해석모델

2.1 접점표면의 모델링

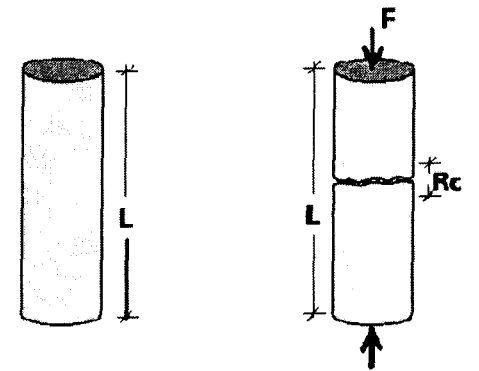
접촉저항은 두 전기접점 사이에 존재한다. 그림 1(a)에서 길이 L을 가진 전기접점의 저항을 R1이라 하자. 이 접점을 두 개의 접점으로 나누면 두 접점사이에는 접촉저항 Rc가 존재하게 되며, 전체 저항 R2는 R1+Rc가 된다.

두 접점 사이에 접촉저항이 존재하게 되는 이유는 접점 표면에 존재하는 수 많은 돌기들로 인해서 접점이 서로 완벽하게 접촉되지 않기 때문이다(그림 1(b) 참조).

이 때 전류를 흘리게 되면 전류는 접촉면 전면을 통하여 흐르는 것이 아니고 극히 일부의 전기적으로 접촉된

부분만을 흐른다. 따라서 전류는 국부적으로 집중하게 되고, 과도한 열이 발생하여 접점이 용융될 우려가 있다.

두 접점간에 힘이 작용하게 되면 돌기들의 변형이 발생하게 되고, 실 접촉면적은 증가한다. 힘이 커질수록 실 접촉면적은 증가하며, 접촉저항은 줄어든다(그림 2 참조).



$R1 = \rho \cdot L / A$ $R2 = \rho \cdot L / A + R_c$

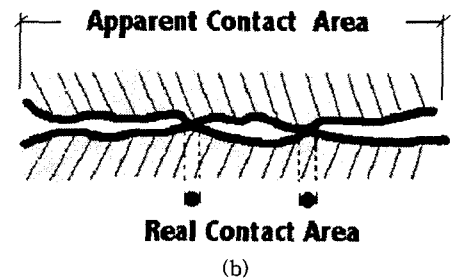


그림 1. 전기 접점의 접촉저항

돌기의 높이는 수 [μm]로서 접점의 가공정도에 따라 달라지며, 반지름은 높이의 3~100배 정도로 알려져 있다.

접점 표면의 모델링을 위하여 그림 2와 같이 편평한 표면에 원형의 돌기를 생성하였다. 여기서 z는 돌기의 높이로서 그 분포는 평균값 μ_{a1} 과 표준편차 σ_{a1} 을 갖는 정규분포 함수 $\phi_{a1}(z)$ 와 거의 동일하다[2,3].

$$\phi_{a1}(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{a1}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{z - \mu_{a1}}{\sigma_{a1}} \right)^2 \right] \quad (1)$$

돌기의 반경 r_i 또한 평균값과 표준편차를 갖는 정규 분포를 이룬다.

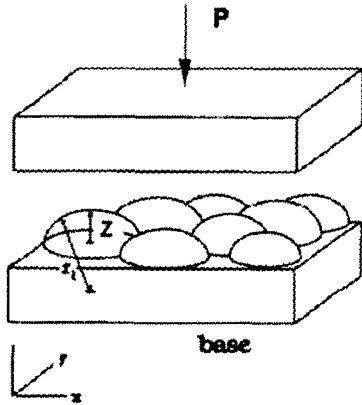


그림 2. 점점 표면의 모델링

2.2 힘에 따른 돌기의 변형

본 연구에서는 표면의 각 돌기는 순수한 탄성변형 (elastic deformation)을 한다고 가정하였다. 표면에서 마찰이 없는 완전탄성체인 두 반구가 접촉할 때, 외부에서 가해주는 힘(P)과 이때 발생하는 접촉면의 반경(a)과의 관계식으로서 Hertz 방정식이 널리 알려져 있다 [2,4,5].

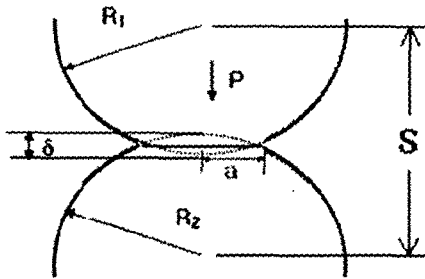


그림 3. 두 반구간에 발생하는 변형

$$a = \left[\frac{3}{4} P \left(\frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2} \right) \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \right]^{\frac{1}{3}} \quad (2)$$

$$\delta = a^2 \left[\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right] \quad (3)$$

a : 접촉면의 반경, P : 하중
 δ : 수직변위, R : 구의 반경,
 E : 탄성계수(elastic modulus)
 μ : 포와송 비(Poisson's ratio)

변위 δ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\delta = \begin{cases} R_1 + R_2 - S & \text{if } S < R_1 + R_2 \\ 0 & \text{if } S \geq R_1 + R_2 \end{cases} \quad (4)$$

표면의 돌기들은 서로간의 상호작용을 무시하고 각각 독립적으로 변형된다고 가정하였다. 본 연구에서는 점점의 한 쪽 면은 불균일한 돌기들이 존재하며, 다른 한 쪽 면은 완전히 편평한 것으로 설정하였다. 두 점점이 모두 돌기를 가진 불균일한 면인 경우, 계산시간이 너무 길어지기 때문이다. 이 경우 식 (2)와 식 (3)에서 $R_2 = \infty$ 이며, P는 점점에 수직으로 작용한다. 또한 $R_1=R_i$, $\mu_1=\mu_2=\mu$, $E_1=E_2=E_i$, 그리고 $P=P_i$ 이므로 돌기 i에 대한 탄성변형을 계산할 수 있다.

2.3 접촉저항 계산

점점간의 접촉저항 R_C 는 접촉점간의 병렬저항 및 상호작용에 따라 다음 식과 같이 나타낼 수 있다[2,3,5].

$$R_C = \frac{\rho}{2 \sum_{i=1}^n a_i} + \frac{\rho}{\pi n^2} \sum_{i=1}^n \sum_{j \neq i}^n \frac{1}{S_{ij}} \quad (5)$$

ρ : 점점의 전기저항률, n : 접촉점의 수,
 S_{ij} : i와 j 사이의 거리

모든 접촉점의 반경을 동일한 평균반경 \bar{a} 로 나타내면 접촉저항 계산식은 다음과 같이 간략화할 수 있다[3].

$$R_C = \frac{\rho}{2na} + \frac{\rho}{\pi n^2} \sum_{i=1}^n \sum_{j \neq i}^n \frac{1}{S_{ij}} \quad (6)$$

3. 해석결과 및 검토

서술한 계산방법을 Butt형 등(Copper) 점점에 적용하였다. 표 1은 접촉저항 계산시 입력한 데이터를 나타내고 있다.

표 1. 접촉저항 계산을 위한 데이터

내용	데이터	
단위면적당 돌기수 [mm ²]	100	
접촉면의 크기 [mm ²]	65×15	
탄성계수 [pa]	1.15×10 ¹¹	
Poisson's ratio	0.35	
전기저항률[Ωm]	1.7×10 ⁻⁸	
점점에 작용하는 힘[N]	200	
돌기의 높이	μ_{a1}	5.0[μm]
	σ_{a1}	$\left(\frac{\mu_{a1}}{3}\right)^2$
돌기의 반경	μ_{a1}	0.0005[m]
	σ_{a1}	$\left(\frac{\mu_{a1}}{3}\right)^2$

계산결과 접촉면적은 18.9[mm²]이며, 전체 면적 65×15[mm²]에 대비 약 19.5%의 실 접촉면적을 갖는 것으로 나타났다. 접촉저항은 3.46[μΩ]이다.

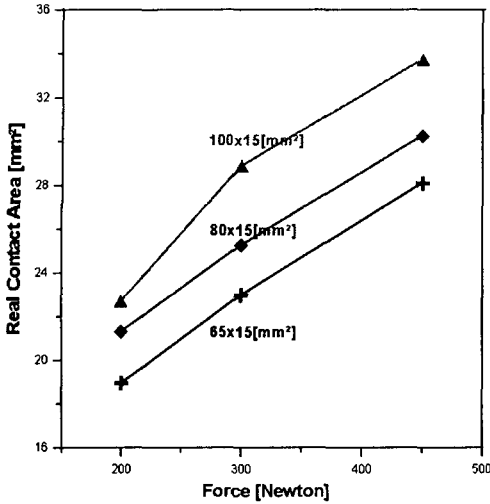


그림 4. 힘에 따른 실 접촉면적 변화

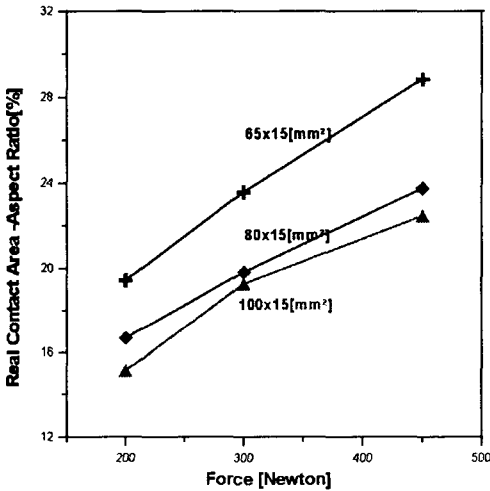


그림 5. 힘에 따른 실 접촉면적-전체면적비 변화

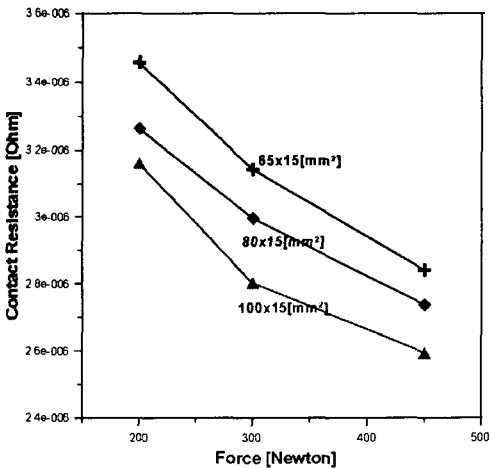


그림 6. 힘에 따른 접촉저항 변화

그림 4는 접점에 작용하는 힘을 증가시킬 경우 실 접촉면적의 변화를 나타내었다. 접점의 크기는 65×15, 80×15, 100×15[mm]이며, 크기와 힘이 클수록 실 접촉면적은 커짐을 나타내고 있다.

그림 5는 전체 면적 대비 실 접촉면적의 비를 나타내고 있으며, 크기가 작을 수록 실 접촉면적의 변화가 크다. 그림 6은 힘에 대한 접촉저항의 변화를 나타내고 있다. 동일 힘에 대해 크기가 클수록 접촉저항은 감소하나 실 접촉면적 비율은 줄어든다(그림 5참조).

힘 300[N]에서 80×15[mm] 접점은 3.0[μΩ]이며, 힘을 450[N]으로 증가시킬 경우 접촉저항은 2.7[μΩ]이다. 이는 크기가 100×15[mm]이고, 힘이 300[N]인 접점의 접촉저항인 2.8[μΩ]과 비슷하다.

크기가 65×15[mm]이고 힘 300[N]인 접점에서, 접촉저항을 줄이기 위해 힘을 450[N]으로 증가시킬 경우 접촉저항은 2.8[μΩ]이다. 반면 힘 300[N]에 크기를 80×15[mm]으로 늘릴 경우 접촉저항은 3.0[μΩ]으로서, 힘을 450[N]으로 증가시키는 것보다 접촉저항을 줄이는 데 비효율적임을 알 수 있다. 그러나 접점의 크기가 작을 경우 통전전류에 따른 온도 상승이 커지므로, 전류 크기에 따른 접점의 크기와 힘의 상관관계를 최적화할 필요가 있으며, 이 때 본 연구결과가 유용한 도구가 되리라 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 전기접점의 접촉저항을 계산하기 위해, 정규분포에 따른 표면의 돌기를 생성하고, 접점에 작용하는 힘에 따른 돌기의 변형을 계산하였다. 각 돌기의 변형에 따른 실 접촉면적을 구하였으며, 이를 통해 접점의 접촉저항을 계산하였다.

접점의 크기와 접점에 작용하는 힘에 따른 접촉저항을 계산하였으며, 이를 통해 최적화된 설계변수를 구하는데 본 연구결과가 유용한 도구가 되리라 판단된다.

[참 고 문 헌]

- [1] Ragnar Holm, Electrical Contacts : Theory and Applications 4th Ed., Berlin, Springer Verlag, pp. 1 26, 1979
- [2] R. W. Caven, Jr. and J. Jalali, Predicting the contact resistance distribution of electrical contacts by modeling the contact interface, Proc. of the Thirty-seventh IEEE Holm Conf. Electrical Contacts, pp. 83-89, 1991
- [3] Stephan Schoft, Josef Kindersberger and Helmut Lobl, Joint Resistance of Busbar Joints with Randomly Rough Surfaces, Proc. of the 21th Conf. on electrical Contacts, pp230-237, 2002
- [4] Paul G. Slade, Electrical Contacts : Principles and Applications, Marcel Dekker, Inc., pp. 1 83
- [5] J. A. Greenwood, Constriction resistance and the real area of contact, Brit. J. Appl. Phys., Vol.17, pp. 1621-1632, 1966
- [6] J. A. Greenwood, A unified theory of surface roughness, Proc. R. Soc. Lond. A 393, pp. 133-157, 1984
- [7] Peter Wriggers, Computational Contact Mechanics, Wiley, pp. 55 71, 2002
- [8] J. A. Greenwood, the area of contact between rough surfaces and flats, Journal of Lubrication Technology, pp. 81-91, 1967