

표면막과 표면거칠기가 접촉 저항에 미치는 영향

이현철 · 이보라 · 유용훈 · 조용주[†]

부산대학교 기계공학부

Effect of Surface Film and Surface Roughness on Contact Resistance

HyeonCheol Lee, Younghun Yu, Bora Lee and Youngjoo Cho[†]

Graduate School, Dept. of Mechanical Engineering, Pusan National University

(Received November 30, 2018; Revised January 8, 2019; Accepted January 31, 2019)

Abstract – In this study, we aim to analyze the effects of both contact layer properties and surface roughness on contact resistance. The contact has a great influence on performance in terms of electrical conduction and heat transfer. The two biggest factors determining contact resistance are the presence of surface roughness and the surface layer. For this reason we calculated the contact resistance by considering both factors simultaneously. The model of this study to calculate contact resistance is as follows. First, the three representative surface parameters for the GW model are obtained by Nayak's random process. Then, the apparent contact area, real contact area, and contact number of asperities are calculated using the GW model with the surface parameters. The contact resistance of a single surface layer is calculated using Mikic's constriction equation. The total contact resistance is approximated by the parallel connection between the same asperity contact resistances. The results of this study are as follows. The appropriate thickness with reduction effect for contact resistance is determined according to the difference in conductivity between the base layer and surface layer. It was confirmed that the standard deviation of surface roughness has the greatest influence on surface roughness parameters. The results of this study will be useful for selecting the surface material and surface roughness when the design considering the contact resistance is needed.

Keywords – surface film (표면막), surface roughness (표면거칠기), GW model (GW모델), contact resistance (접촉 저항), constriction resistance (수축 저항)

Nomenclature

A_a : Apparent contact area (m^2)(겉보기 접촉 영역)
 A_r : Real contact area (m^2)(실제 접촉 영역)
 a : Radius of a contact area (m)(돌기 접촉 반경)
 b : Radius of flow channel (m)(흐름채널 반경)
 b_1 : Hypothetical intermediate radius (m)(가상 중간 반경)

k_B : Base conductivity (W/m·K)(베이스층 전도도)
 k_F : Surface film conductivity (W/m·K)(표면막 전도도)
 n : Number of the asperities (접촉점 수)
 R_B : Contact resistance of base layer (K/W)
(베이스층 접촉 저항)
 R_F : Contact resistance of surface film (K/W)
(표면막 접촉 저항)
 R' : Contact resistance of single asperity (K/W)
(돌기 당 저항)
 R_T : Total contact resistance (K/W)(전체 접촉 저항)
 r : Average radius of asperity (m)(평균 돌기 반경)

[†]Corresponding author: yjcho@pusan.ac.kr
Tel: +82-51-510-3069, Fax: +82-51-512-9835
<http://orcid.org/0000-0003-1447-9529>

© 2019, Korean Tribology Society

- σ_a : Standard deviation of distribution of asperities heights (돌기 높이의 표준편차)
 η : Density of asperities on nominal contact area ($\#/m^2$)(돌기의 공간밀도)
 * : Dimensionless value (무차원 값)

1. 서 론

기술 발전으로 인해 최근 설계 시 접촉 저항에 대한 정확한 해석이 요구되고 있다. 특히, 전기전도나 열전달 측면에서 접점의 성능을 결정하는데 접촉 저항이 큰 영향을 미치는 것으로 알려져있다. 접촉 저항은 표면 거칠기와 표면막에 의해 크게 좌우된다. 기계부품에서 두 물체가 접촉하게 할 때 그 접촉면이 완벽한 평면이 될 수 없기 때문에 수 많은 돌기들의 미소접합부에서 국부적인 접촉이 일어난다. 실제 접촉력은 표면 위의 수 많은 돌기들의 점 접촉들로 구해진다. 이 때, 돌기들이 접촉하는 실제 접촉면적은 겉으로 보이는 면적에 비해 상대적으로 매우 작다. 접촉 저항은 돌기들의 실제 접촉점을 통과할 때 전류나 열 흐르는 통로가 좁아지게 된다. 이 때 흐름의 수축 현상이 일어나고 수축에 의한 접촉 저항이 발생한다. 그러므로 접촉 저항에 가장 큰 영향을 미치는 요인 중 하나는 실제접촉면적을 결정하는 요인인 표면의 거친정도라고 할 수 있다. 접촉 저항을 고려함에 있어 중요시 되는 또 다른 요인은 기층과 다른 재질로 구성된 표면막의 존재이다. 표면막은 기판과 달리 다른 성질을 가지며 기층에 비해 매우 얇고 마이크로 단위를 가진다. 트라이블로지적으로 표면막은 스커핑 방지나 마찰저감 등의 유익한 효과를 발휘할 수 있다. 실제로 화이트메탈, DLC (Diamond Like Carbon), CFRP (Carbon Fiber Rainforced Polymer) 등의 다양한 재질을 가진 표면막이 기계부품에 적용되고 있다[1, 2]. 기층과 표면막의 재질이 다르면 전도도 차이가 발생하게 되는데 이를 원인으로 접촉 저항에 영향을 미치게 되고 거친 표면 간의 접촉 연구와 접촉 저항 관련연구는 아래와 같이 진행되어 왔다.

거친 표면 간의 접촉에 대한 대표적인 연구로는 아직도 학계 및 산업계에서 광범위하게 활용되고 있는 Greenwood and williamson 제시한 GW모델이 있다[3]. 이 모델은 거친 두 표면의 접촉 문제를 강체 평면과 동일한 곡률 반경을 가지는 수 많은 구로 이루어진 탄성면의 접촉으로 등가하였다. 이들은 탄성체인 구들이 높이 방향으로 정규 분포를 따른다고 가정하고, 구의 접

촉문제는 Hertz이론을 이용하여 확률에 기반하여 접촉 현상을 다루었다. GW 모델을 활용하기 위해서는 표면을 나타내는 세 가지 대표값인 돌기의 밀도, 돌기 평균 곡률반경, 돌기 높이 표준편차가 필요하다. Nayak은 거친 표면의 랜덤 프로세스를 통해 표면의 프로파일로부터 쉽게 표면 대표값을 분석하는 방법을 개발하였다[4]. 거친 표면 접촉문제에 대한 국내 연구로는 김태완 등에 의해 거친 표면의 돌기 방향성에 따른 탄성 유체 윤활 해석이 수행되었고[5], 유용훈 등은 접촉면의 거칠기 프로파일을 측정하고 GW모델을 확용하여 Cuvic 커플링의 접촉 및 굽힘강성을 해석하였다[6].

접촉 저항 관련한 연구는 Cooper 등이 TCR(Thermal contact resistance) 모델을 개발하며 시작되었다. 이들은 동일한 재질로 구성된 두 물체가 접촉할 때, 흐름의 수축으로 인한 저항 계산하였다[7, 8]. Mikic는 여기에 표면막을 고려한 접촉 저항식을 제시하였다[9]. 하지만 Mikic의 연구는 표면 거칠기보다는 단일 접촉 저항에서 표면막의 영향을 살펴본 것으로 국한되어 있다.

본 연구에서는 표면막과 표면 거칠기가 접촉 저항에 미치는 영향을 정량적으로 분석하고자 하였다. 우선 GW모델에 적용하기 위한 표면 특성들을 실제 표면 프로파일로부터 Nayak의 랜덤 프로세서 방법을 활용하여 획득하였다. 이 표면 특성들을 가지고 GW모델을 이용하여 겉보기 접촉면적과 실제 접촉면적, 접촉 수를 계산하였다. 전체 접촉 저항은 GW모델에서 계산된 돌기 분포들을 다시 한번 동일한 돌기 저항들의 병렬 연결으로 근사하였다. 그리고 단일 표면막의 접촉 저항은 Mikic모델 식을 이용하였다. 전체 접촉 저항을 계산하여 압력, 표면막의 두께, 기층과 표면막의 전도도 차이 및 표면 거칠기 특성별로 접촉 저항에 미치는 영향을 평가하였다.

2. 연구방법 및 내용

2-1. 거친 표면의 접촉

2-1-1. 랜덤프로세서 이론

본 연구에서는 거친 표면의 특성을 분석하기 위해서 랜덤 프로세서 이론을 바탕으로 2차원의 등방성 정규분포 특성을 가지는 거친 표면을 모델링한 Nayak의 연구 결과를 이용하였다. GW모델을 이용하여 접촉해석에 필요한 표면의 세가지 특성인 돌기 높이 분포의 표준편차 σ_a , 평균 돌기 반경 r , 돌기의 공간 밀도 η 는 다음과 같이 계산되어진다. 돌기 높이 분포의 표준편차 σ_a 의 관계는 식 (1)와 같다.

$$\sigma_a = \left(1 - \frac{0.8968}{\beta}\right) \sigma \quad (1)$$

Where, $\beta = \left(\frac{D_{extrema}}{D_{zero}}\right)^2$

여기서, D_{zero} 는 거친 표면 프로파일에서 단위 길이당 영점을 지나는 개수이고 $D_{extrema}$ 는 단위 길이당 극값의 개수이다. 돌기 높이 분포의 표준편차 σ_a 는 평균과 거친 표면의 기준면 간극 d 를 결정하기 위한 중요한 특성으로 활용된다. 평균 돌기 반경의 계산 식은 (2)와 같다. GW모델은 접촉하는 모든 돌기들은 모두 같은 곡률 반경을 가진다고 가정한다. 거친 평판에서 평균 돌기 반경 r 을 가진 다수 돌기가 무작위로 분포되어 있다.

$$r = \frac{3}{8} r \sqrt{\frac{\pi}{m_4}} \quad (2)$$

돌기의 공간 밀도 η 는 단위 면적 내에 돌기가 얼마나 분포하고 있는지를 나타낸다. 그리고 두 표면의 접촉이 일어날 때, 접촉 돌기 수를 산정하는 중요한 특성이 되고 식 (3)와 같다.

$$\eta = \frac{1}{6\pi\sqrt{3}} \frac{m_4}{m_2} \quad (3)$$

2-1-2. Greenwood-Williamson 접촉 모델(GW 모델)

가공에 의해 형성된 금속의 표면을 육안으로 볼 때는 매끄러운 표면을 가진 것처럼 보이나 어떤 표면이든지 자세히 보면 산과 골로 형성되어진 표면 거칠기를 가지고 있다. 이런 거칠기를 가진 두 물체가 어떤 하중 P 를 받아 접촉이 일어날 때 두 물체의 표면은 완벽한 접촉은 불가능하고 Fig. 1과 같이 양 표면의 표면 돌기와 과형으로 인해 접합부의 국부적 돌기 접촉이 일어나게 된다.

이 때 겉보기 접촉 면적 A_0 와 실제 접촉 면적 A_c 의 개념이 도입된다. 실제로 돌기에 의해 접촉이 일어나는 면적을 A_c 라 하고 일반적으로 A_0 은 A_c 보다 크다. 실접촉 면적은 접촉 표면의 탄성 또는 소성변형과는 관계 없이 물체에 가해지는 하중과 비례하게 된다. 실제 접촉 면적율(A_c/A_0)은 낮은 하중에서는 하중이 증가함에 따라서 실제 접촉 면적율이 선형적으로 증가한다. 반면에 높은 하중에서는 돌기들의 탄성작용에 영향을 받게되고 선형적인 관계가 나타나지 않는다.

거친 표면 접촉문제를 다루는 Greenwood-williamson

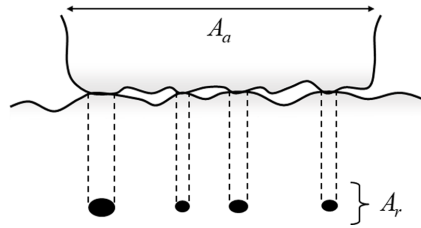


Fig. 1. Real contact area and Apparent contact area.

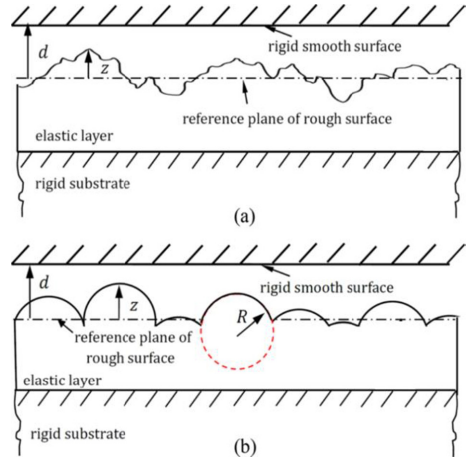


Fig. 2. Contact between a rigid smooth surface and a randomly rough elastic surface in (a) a real case and (b) a simplified model (GW model).

모델을 본 연구에서는 활용하였다. 표면이 거친 두 표면의 접촉을 Fig. 2(a)처럼 어떤 기준면에서 z 의 높이를 가진 거친 탄성면(Rough elastic surface)과 경한 평판(Rigid smooth surface)의 접촉으로 등가한다. 이때 거친 표면은 Fig. 2(b)와 같이 다시 한번 동일한 곡률 반경 r 을 가지고 총 N 개의 접촉 돌기 수를 가지는 구형 돌기들로 구성된 탄성면과 경한 평판의 접촉으로 가정하게 된다. 여기서 돌기의 높이 분포는 정규분포로 가정한다.

GW모델에서 돌기의 높이가 z 와 $z+dz$ 사이에 존재할 확률은 돌기 높이의 분포함수 $\phi(z)$ 를 사용한 무차원 정규 분포식을 표준화 변수 $s = z/\sigma_a$ 를 사용하여 식(4)로 표현한다.

$$\phi^*(s) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}s^2} \quad (4)$$

돌기의 높이가 s 와 $s+ds$ 사이에 존재할 확률은 $\phi^*(s)ds$

가 되며, 이 때 예상되는 돌기의 수는 식 (5)과 같다.

$$dn = N\phi^*(s)ds \quad (5)$$

여기서 N 은 총 돌기의 개수이며 $N = \eta A_s$ 의 관계가 성립한다. 각각의 돌기들이 Hertz 접촉 거동을 보인다고 가정하면 단위 면적당 접촉력은 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$dF = \frac{4}{3}E'r^{\frac{1}{2}}\sigma_a^{\frac{3}{2}}(s-h<)^{\frac{3}{2}}\phi^*(s)ds \quad (6)$$

$$h = d/\sigma_a$$

접촉점의 수는 다음과 같다.

$$n = N\int_h^\infty \phi^*(s)ds \quad (7)$$

실제 접촉면적 및 접촉력은 식 (8)-(9)로 계산할 수 있다.

$$A_r = \pi Nr\sigma_a \int_h^\infty (s-h<)\phi^*(s)ds \quad (8)$$

$$F = \frac{4}{3}\eta E'r^{\frac{1}{2}}\sigma_a^{\frac{1}{2}} \int_h^\infty (s-h<)\phi^*(s)ds \quad (9)$$

2-2. 접촉 저항

2-2-1. 표면막을 가진 거친 두 물체의 접촉 저항

Fig. 3은 본 연구의 해석모델로 전도도가 높은 물질로 얇게 코팅된 두 거친 표면의 접촉을 평판과 거친면의 접촉으로 근사한 것이다. 이 때 접촉면은 거친 돌기들의 집합체인 기층과 기층 표면을 얇게 덮고 있는 표면막으로 구성된다. 기층과 표면막에 대한 변수는 각각 하첨자 B , F 로 구분하였다. 기층-표면막 구조를 가진 물체 A가 동일한 재료 및 구조의 물체 B와 접하면서 수직하중 F 를 받으면 Fig. 3(a)와 같이 접촉면을 형성한다. Fig. 3(b)는 접촉부를 미시적 관점에서 표현한 것이다. 열 또는 전류의 흐름은 각 접촉지점에서 국부적으로 수렴하여 상대물질로 전달되고, 그 과정에서 수축저항이 발생한다.

Fig. 4는 Mikic의 모델로 단일 접촉지점에서의 수축을 반경 b 인 만부한 실린더에서 반경 a 접촉점에서의 수축으로 근사하여 수축저항을 계산하였다. 실제 접촉에서는 Fig. 3(b)와 같이 무작위의 접촉이 일어나기 때문에 접촉 저항을 정확하게 산정하는 것은 매우 어려운 일이다. 그리하여 두 거친 표면의 접촉을 Fig. 3(c)와 같

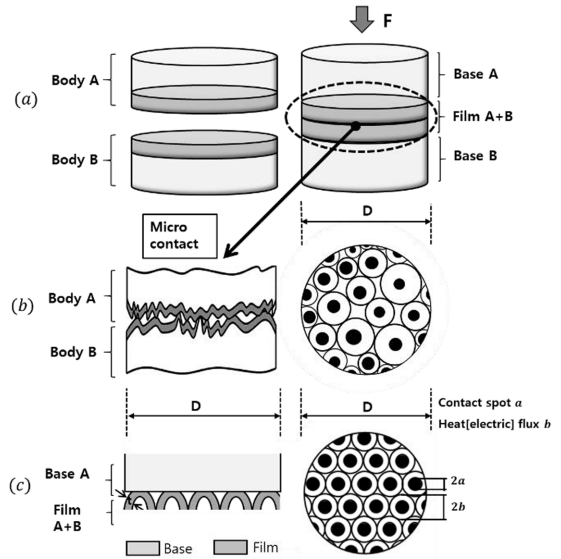


Fig. 3. Contact resistance (a) Apparent contact (b) randomly distributed real contact resistance (c) Uniform distributed contact resistance model.

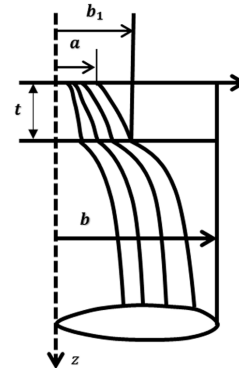


Fig. 4. Contact resistance a single plated contact model.

이 일정한 두께 t 의 표면막으로 덮혀있고 동일한 곡률 반경 r 을 가진 구형 돌기들과 매끈한 평판의 접촉으로 상당했다. 여기서 두께는 두 표면막의 평균 두께로 가정하였다. 불규칙한 돌기 접촉은 돌기의 평균 접촉반경 a 와 열 또는 전류의 평균흐름반경 b 가 일정한 흐름다발로 증가되었다.

본 연구에서는 돌기 사이에 형성된 갭에서 열 또는 전류의 흐름이 없으며, 수축에 의한 흐름은 다른 접촉 지점의 영향을 받지 않는다고 가정한다. 또한 돌기 자체의 저항은 수축저항에 비해 무시할 수 있는 수준이며

로 접촉면에서 발생하는 접촉저항은 수축저항만 고려하였다.

돌기의 평균접촉반경 a 와 열 또는 전기의 평균 흐름 반경 b 는 길보기면적 A_c 와 GW모델로 계산된 실접촉면적 A_r 및 접촉수 n 을 이용하여 다음 식으로 계산한다.

$$a = \sqrt{\frac{A_r}{\pi n}} \tag{10}$$

$$b = \sqrt{\frac{A_c}{\pi n}}$$

거친표면의 전체수축저항을 단일 돌기에 의한 수축저항을 n 개의 병렬연결로 증가하였으므로, 전체 수축저항은 단일 돌기 접촉 저항 R 을 이용하여 다음과 같이 표현된다.

$$R_i = \frac{R'}{n} \tag{11}$$

2-2-2. 단일 돌기 접촉 모델

식 (11)의 전체 접촉 저항 R 를 계산하기 위해서 단일 돌기 접촉 저항 R' 을 구해야 한다. 단일 돌기 접촉 저항 모델은 Mikic(1970)가 제안한 모델을 참고하였다. Fig. 4는 단일 돌기 채널 반경의 b 에서 반경 a 로 수축되는 흐름을 도시한 것이다.

전체 수축저항은 기층에서의 수축저항과 표면막에서의 수축저항의 합성저항으로 볼 수 있다. $z=r$ 에서 기층과 표면막간 에너지 전달이 일어나는 영역의 반경을 중간접촉반경, b_1 이라고 하자. 표면막에서 발생하는 수축저항 R_1 은 두께 t 인 디스크에서 $z=r$ 이고 반경 b_1 인 영역에서 $z=0$ 이고 반경 a 인 영역으로의 수축에서 발생하는 저항으로 증가할 수 있다. 실린더에서 반경 b_1 으로 수축할 때의 수축저항으로 증가한다. 각 영역에서의 수축저항은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$R_1 = \frac{4}{\pi k_1 a} \phi' \left(\frac{t}{a}, \frac{a}{b_1} \right) \tag{12}$$

$$R_2 = \frac{1}{4k_2 b_1} \psi \left(\frac{b_1}{b} \right) \tag{13}$$

이 때 평균 돌기 접촉 반경 a 와 열 및 전류 흐름 반경 b 는 식 (10)을 참고한다. 가상 중간 반경 b_1 은 $a \leq b_1 \leq b$ 의 범위에서 단일 돌기 접촉 저항 R' 을 최소화 하는 값으로 결정된다. R' 은 식 (12)와 (13)을 더하여

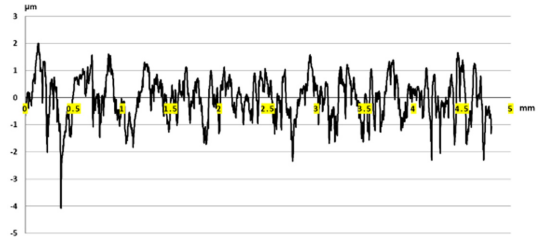


Fig. 5. Roughness analysis result of contact surface.

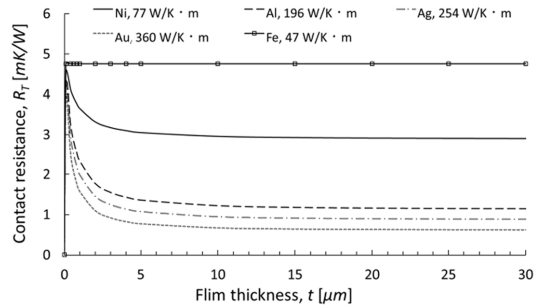


Fig. 6. Contact resistance with film thickness variation.

Table 1. Material conductivity [W/K] [10]

Fe	Ni	Al	Ag	Au
47	77	196	254	360

다음 식 (14)로 표현된다.

$$R' = \frac{1}{4k_2 a} \left[\frac{16k_2}{\pi k_1} \phi' \left(\frac{t}{a}, \frac{a}{b_1} \right) + \frac{a}{b_1} \psi \left(\frac{b_1}{b} \right) \right] \tag{14}$$

3. 결과 및 고찰

3-1. 표면 파라미터

Fig. 3(c)와 같이 거친 표면의 기층 위에 얇고 균일한 두께의 표면막이 형성되어 있고 2 MPa의 압력이 가해 질 때 접촉저항을 계산하고 그 특성을 분석하였다. 접촉저항 계산에 앞서, 기층의 표면거칠기를 고려하기 위해 표면조도 측정기로 실제 표면을 측정하여 Fig. 5에 도시하였다. $D_{z=0}$ 와 $D_{extreme}$ 는 각각 33,337와 224,607였고, 측정 결과와 Nayak 이론을 이용하여 계산한 표면 파라미터들은 다음과 같다. 표면의 돌기 높이 표준편차 (σ_w), 평균 돌기반경 (R_r), 돌기 공간 밀도 η 는 각각, 11.6 μ m, 11.59 μ m, 1524 $e7/m^2$ 였다. 이러한 표면 파

라미터와 GW 모델을 이용하여 계산된 돌기 평균접촉 반경 a 는 1.59 μm 였다.

분석된 표면거칠기 데이터를 바탕으로, 다양한 재질의 표면막에 대해 접촉 저항을 계산하고 그 결과를 Fig. 6에 도시하였다. 이 때 기층은 열전도도가 47 W/mK인 EN3B steel이고, 표면막은 열전도도가 약 50~360 W/mK 범위의 5가지 재질(철, 니켈, 알루미늄, 은, 금)을 선정하였다. 각 재질에 대한 열전도도는 Table 1에 표기하였다.

표면막이 없는 경우, 즉 steel 기관만 존재할 경우의 접촉저항은 약 4.8 mK/W였다. 전도도가 큰 재질에서 수축저항은 완화되므로, 기관 위에 기관보다 전도도가 좋은 표면막을 올리는 것은 전체 수축저항을 낮추는 효과가 있다. Fig. 6 그래프를 참고하면 표면막의 두께가 두꺼워질수록 수축저항이 급격히 감소하는 현상을 볼 수가 있고, 결과 상의 한 예시로 표면막을 알루미늄으로 하여 10 μm 두께로 표면막을 생성하면 기존 steel의 약 26% 수준으로 접촉저항이 떨어진다. 이는 표면막의 두께가 두꺼울수록 전도도가 높은 재질이 차지하는 비율이 상대적으로 늘어났기 때문이다.

반면 약 10 μm 이상의 두께에서는 거의 일정한 접촉 저항을 유지하였다. 표면막이 일정 두께 이상으로 두꺼워지면 대부분의 수축이 표면막에서 일어나, 표면막만 존재하는 경우와 거의 비슷한 결과로 수렴하게 된다. 이러한 결과를 통해, 표면막이 기층보다 전도도가 클 경우에는 표면막이 두꺼울수록 수축저항의 경감 측면에서 유리함을 알 수 있다. 또한, 접촉 저항감소 효과를 보이는 적절한 두께를 파악할 수 있다.

표면막을 다른 재질 코팅하였을때의 접촉저항은 니켈 >알루미늄>은>금 순으로 낮아졌다. 각 재질로 10 μm 의 표면막을 형성했을 때, 금은 니켈보다 접촉저항이 약 23% 더 감소하였다. 이는 각 재질의 열전도도 순서를 통해 예상할 수 있듯, 표면막의 전도도가 클수록 총 수축저항이 감소한 것이다.

전도도가 높은 표면막이 접촉저항에 어떠한 영향을 미치는지 좀 더 알아보기 위해, 전체 접촉저항 대비 기층에서의 접촉저항을 Fig. 7에 실선으로 도시하였다. 이 때 표면막 두께는 1 μm , 기층의 재질은 철로 설정하였고, 가로축은 기층 대비 표면막의 상대 전도도를 나타내었다. 표면막의 전도도가 기층 대비 2배일 때 수축저항은 1/4로 감소한다. 표면이 기층에 비해 전도도가 높으면 기층 대비 표면막의 두께가 아주 작은데도 불구하고 대부분의 수축이 표면막에서 일어나게 됨을 의미한다. 이는 Fig.

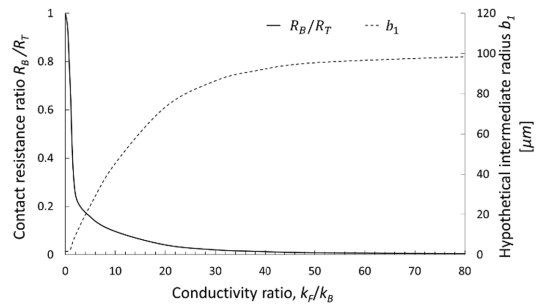


Fig. 7. Schematic of contact resistance ratio versus Conductivity.

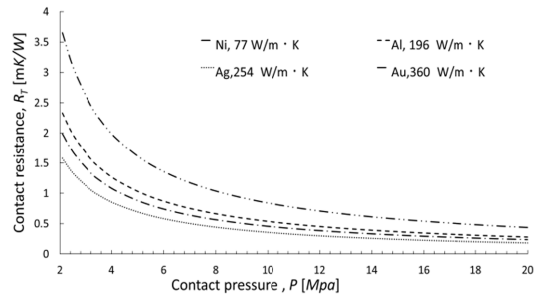


Fig. 8. Contact resistance with pressure variation.

7에서 점선으로 표현된 가상중간반경(b_1) 변화를 통해서 더욱 확실히 알 수 있다. 가상중간반경 b_1 은 기층과 표면막의 계면에서의 열 또는 전류의 흐름반경을 의미하고, 기층에서의 수축량이 적을수록 크다. 그래프에서 보이다시피, 표면막의 상대 전도도가 클수록 표면막에서의 수축저항이 감소하여 열 또는 전류는 기층보다 표면막에서 더 많이 수축하게 된다. 그 결과로 접촉저항이 최소가 되도록 가상중간반경 b_1 이 증가하였다.

Fig. 8은 표면막 재질별로 접촉 압력이 접촉 저항에 미치는 영향을 표현한 것이다. 2~20 MPa의 압력 범위에서, 접촉압력이 작을수록 접촉저항은 급격히 증가하였다. 접촉압력이 낮으면 실접촉면적 A 이 감소하고, 이는 평균접촉반경 a 의 축소로 이어진다. 접촉반경이 작으면 급격한 수축이 요구되기 때문에 접촉저항은 증가하게 된다.

3-2. 거친 표면 파라미터와 접촉 저항의 관계

접촉 수 n 역시 줄어들지만, 실접촉면적의 감소율이 상대적으로 더 크기 때문에 식 (10)에 의해 평균접촉반경은 작아진다. 접촉 수 n 의 감소는 식 (11)에 의해 전

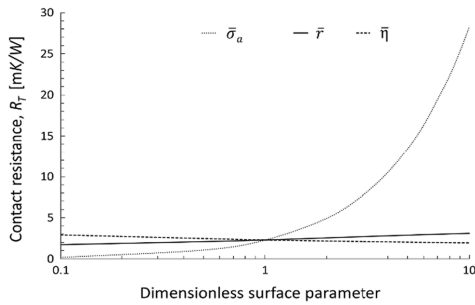


Fig. 9. Contact resistance with surface parameter variation.

체 수축저항 증가에 직접적으로 기여한다. 그러므로 접촉압력이 낮은 작동조건일수록, 접촉저항을 감소시키기 위하여 표면을 전도도가 더 큰 물질로 코팅해야 할 필요가 있다.

GW 모델에서 표면의 거친 정도는 돌기 높이 분포 표준 차 σ_a , 평균 돌기 반경 R , 돌기 공간 밀도 η 로 세 가지 표면 파라미터로 표현된다. 표면 파라미터는 σ_a 가 작고 R 와 η 가 클수록 표면이 매끄러움을 의미한다. Fig. 9은 각각의 표면 파라미터가 접촉저항에 미치는 영향을 알아보기 위해, 표면 파라미터들을 변화시켜 접촉저항을 분석한 결과이다. 표면을 변화시킬 때, 나머지 표면 파라미터는 고정된 상태에서 분석 대상인 하나의 표면 파라미터만 변화하여 결과를 도출하였다. 해석에 기준은 Fig. 5의 표면을 바탕으로 분석한 표면 파라미터를 이용하였다. Fig. 9의 가로축은 무차원 표면 파라미터로 기준 표면 파라미터에 대한 분석대상 파라미터의 비를 의미하며, 표면 파라미터 기호 상단에(̄)로 표시하였고 0.1~10 범위로 변화를 주었다.

표면 파라미터 변화에 따른 결과는 다음과 같다. η 가 커지거나 σ_a 와 R 이 작아질 때, 접촉 저항은 감소하였다. η 와 σ_a 에 대해서는 표면이 매끄러울수록 접촉 저항이 감소한다는 직관적인 예측에 부합하는 결과를 얻었다. 하지만 R 에 대해서는 그 값이 감소하면 표면이 거칠어짐에도 불구하고 저항이 감소하였다. 이는 R 감소에 따라 접촉면적 증가보다 접촉 수 증가의 영향이 더 크게 나타났기 때문이다. 접촉저항은 η 에 R 대해서는 선형적으로 변화하는 반면 σ_a 에 대해서는 지수적으로 변화하였다. 그러므로 표면 거칠기에 대한 세 가지 표면 특성 중에서 접촉 저항에 영향을 가장 크게 미치는 것은 σ_a 라고 볼 수 있다.

실제적으로, 접촉 저항을 감소시키기 위해 표면 연

마 등의 가공과정을 거칠 경우, 세 가지 표면 변수는 서로 복잡하게 변화하게 되기 때문에 세 가지의 각각의 표면 파라미터를 따로 조절하는 것은 매우 어려운 일이다. 그러나 각 파라미터에 따른 접촉 저항의 변화를 살펴봄으로써, 실제 표면 변화에 따른 접촉 저항의 변화를 파라미터 값만으로 유추할 수 있다. 또한, 산업 현장에서 σ_a 이외의 다른 파라미터까지 표면을 관리하기는 쉽지 않으므로 σ_a 가 접촉 저항에 가장 큰 영향을 미친다는 결과를 확인한 것에는 의미가 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 표면막과 표면거칠기가 접촉 저항에 미치는 영향에 대한 연구를 수행하였다.

표면거칠기를 고려한 두 물체의 접촉 해석은 Nayak의 거친 표면의 랜덤 프로세서를 기초로 표면 파라미터 값을 도출하고, 이를 GW모델에 대입함으로 수행되었다. 거친 표면은 균일하게 분포된 동일한 돌기 저항의 병렬 연결로 근사하여 접촉 저항 계산에 고려하였다. 각 단일 돌기에서의 접촉 저항은 표면막을 고려한 Micky의 모델을 사용하였다. 기층의 재질은 철로 설정하고, 기층보다 높은 전도도를 가지는 니켈, 알루미늄, 은, 금의 4가지 표면막에 대해서 해석을 수행하였다. 해석을 통해 도출한 결과는 다음과 같다.

표면막의 재질과 접촉 압력이 정해졌을 때, 접촉 저항감소 효과를 보이는 적절한 두께를 파악할 수 있다.

접촉압력과 표면막의 전도도가 클수록 접촉저항은 감소한다. 이 현상은 거친 표면 접촉 측면에서는 접촉압력이 커지면 접촉 수 증가로 인한 저항감소 요인이 크게 작용하기 때문이며, 전도도 측면에서는 돌기 접촉 시 동일한 수축으로 인한 흐름의 저항이 발생하더라도 전도도가 높을수록 그 저항 값이 작기 때문이다.

표면 거칠기 특성 중에서는 σ_a 가 접촉 저항에 가장 큰 영향을 미침을 확인하였다.

향후 본 연구는 접촉 저항을 고려한 설계가 필요할 때, 표면막의 재질과 표면 거칠기를 선정하는데 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

Acknowledgements

이 논문은 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었음.

References

- [1] Kim, T. G., Oh, J. S., Yoon, H. K., "Characteristics of DLC films incorporated HMDS by RF PECVD", *International Journal of Modern Physics B (IJMPB)*, Vol.24, No.15n16, pp.2999-3004, 2010.
- [2] Jeong, J. I., Kim, D. H., Park, J. Y., Choi, S. G., Kim, S. S., Choi, Y. T., Ham, H. S., "Comparison of mechanical properties and surface friction of white metal produced by centrifugal and laser cladded on SCM 440", *Tribol. Lubr.*, Vol.34, No.3, pp.84-92, 2018, doi:10.9725/kts.2018.34.3.84
- [3] Greenwood, J. A., Williamson, J. B. P., "Contact of nominally flat surfaces", *Proceedings of the Royal Society of London. A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, Vol.295, No.1442, pp. 300, 1966.
- [4] Nayak, P. R., "Some aspects of surface roughness measurement", *Wear*, Vol.26, No.2, pp.165-174, 1973.
- [5] Kim, T. W., Cho, Y. J., "EHL analysis for rough surface with directional roughness", *J. Korean Soc. Tribol. Lubr. Eng.*, Vol.25, No.5, pp.342-347, 2009.
- [6] Yu, Y. H., Cho, Y. J., "Analysis of contact stiffness and bending stiffness according to contact angle of curvic coupling", *Tribol. Lubr.*, Vol.34, No.1, pp.23-32, 2018, doi:10.9725/kts.2018.34.1
- [7] Cooper, M. G., Mikic, B. B., Yovanovich, M. M., "Thermal contact conductance," *Int. J. Heat Mass Transf.*, Vol.153, pp.317-323, 1969.
- [8] Madhusudana, C. V., "Thermal contact conductance", Second edi. Sydney: Springer, 2014.
- [9] Mikic, B., Carnasciali, G., "The effect of thermal conductivity of plating material on thermal contact resistance", *Trans. ASME J. Heat Transfer*, pp. 475-482, 1970.
- [10] Ikeda, E., "Electrical Construction Design Practical Data Book", ISBN - 9788985485166, 2007.