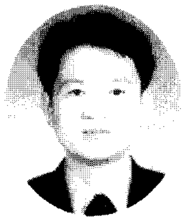
학술기사

거친 표면에서의 접촉



장 용 훈*

1. 서 론

접촉하고 있는 물체간의 전기 열 기계적 거동은 상당한 중요성을 갖는 문제로서 저항용접, 전기코넥터, 카본 브러시와 MEMS 장비와 나노단위의 시스템에서와 같이, 매크로에서 나노 단위에 걸쳐 그 중요성을 더해 가는 분야이다. 특히 마이크로와 나노단위의 시스템에서 접촉거동은 그 자체가 가지고 있는 작은 스케일로 인해 그 정확성이 시급히 요구되며, 마모와 마멸에 대해 제품의 신뢰성과 내구성을 확보하기 위해, 학계와 산업계에서 많은 연구를 하고 있다.

접촉문제가 재료/고체역학의 중심이 되는 이유는 접촉이 하중을 물체에 전달하는 주된 방법이며, 그로 인해 접촉 부분에 응력집중이 발생하기 때문이다. 접촉은 물리적으로 인장 접촉 트랙션과 재료의 상호침투(interpenetration)로 기술되는 unilateral 부등식에 의해 특징을 이룬다. 부가적인 부등식 그리고 비선형성등이 마찰법칙을 고려할 때 도입된다. 이러한 복잡한 경계 조건들은 준정적 해(quasi-static solution)의 존재성과 유일성의 문제로 귀착이 되며, 수치 알고리듬을 수렴이 어렵게 된다. 특히 실제 접촉표면이 거친 경우, 마이크로 크기의 실제 접촉면적이 군(cluster)으로 이루어진 접촉집중형태를 이룬다. 이러한 형태는 경계면 상의 기계적인 접촉과정외에 열 그리고 전기 전도에 영향을 준다. 이러한 시스템을 기술하기 위해 불규칙 과정(random process) 혹은 통계적 처리 등이 필요하며, 그리고 최근에 나타나는 결과에 의해 차원분할도형 성질을 갖는 표면이 보다 효과적인 수학특징을 얻는데 사용된다. 본 기사에서는 거친 표면에서의 접촉에 대한 학문적인 성과를 살펴봄으로서 이 동향을 파악하기로 한다.

2. 본 론

실제표면은 미시적인 스케일에서 거칠며, 접촉과정에서 거칠기의 영향은 특히 미끄럼 접촉시, 마찰과 마모의 대부분의 모델에 근간을 이루고 있다. 이러한 접촉은 일반적으로 거친 표면의 피크(peak) 혹은 "돌기(asperity)" 주위에 위치하는 수 많은 미소의 "실제 접촉 면적"들로 국한이 된다. 그러므로 공통된 이론방법은 실제 표면을 위에서 기술된 돌기(asperity)의 통계적인 분포로서 모델을 만든다.

* 연세대학교 기계공학과 조교수

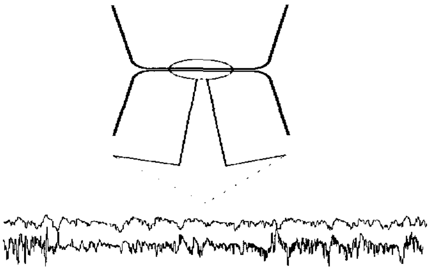


Fig. 1 거친표면에서의 접촉

전체 하중은 초기 높이에 의해 결정되는 거리만큼 압축되는 접촉 돌기에 작용하는 각각 하중들의 합이다.

이 분야는 Greenwood와 Williamson(1966)에 의해 초기에 비약적인 발전을 했다. 그들은 이러한 접촉의 많은 중요한 성질들이, 만일 돌기의 높이 분포가 정규분포일 때 국부적인 돌기(asperity)의 자세한 거동과는 무관하다는 것을 발견했다. 동일한 돌기들이 특별한 형태의 지수 함수 분포로 이루어진 경우, 전체 하중, 열 그리고 전기 접촉전도 컨덕턴스(conductance), 그리고 전체 접촉면적 간의 관계들이 모두 선형이며, 실제 접촉면적상의 접촉 과정을 기술하는 구성 법칙(constitutive law)과는 관계가 없다라는 사실을 보였다.(Fig. 1). 그러므로 보다 최근에 발전된 이론들은 접촉 표면을 정적 불규칙 과정(stationary random process)으로서 기술하는 데 집중하고 있는 경향이다(Nayak 1971, Whitehouse와 Phillips 1978, 1982), Greenwood 1984) 이후 Greenwood(1984)는 이러한 종류의 여러 시도와 표면 조도계(profilometer)와 표면 성질 간의 관계를 연결하였다.

측정하는 실험기술들이 발전함에 따라 표면 형상을 측정치의 대역폭(bandwidth)이 증가하고 있으며 계층적인 스케일이 실험적으로 분간할 수 있는 한계에까지 이르게 되었다. 특이한 표면에서는 스펙트럼 밀도 $P(\omega)$가 높은 주파수 대에서 멱급수(Power law) 형태 $P(\omega)=C\omega^{\ n}$으로 나타나지만, 낮은 주파수대에서는 그 이하로 떨어진다(Mandelbrot 1982, Russ 1994, Lopez et al. 1994, Majumdar, Bhushan 1995). 이러한 낮은 주파수 감쇠 현상은 물체의 유한한 길이와 연관이 있을 수 있지만, 아마도 “성공적인” 생산과정에 기인하는 경향이 있는 것으로 본다. 결국 모든 표면들이 길이 스케일에 따라 불규칙 과정(random process)을 필연적으로 겪는다면, 규정된 형상의 표면을 생산하려는 우리의 능력을 크게 비하하게 할 수 있다.

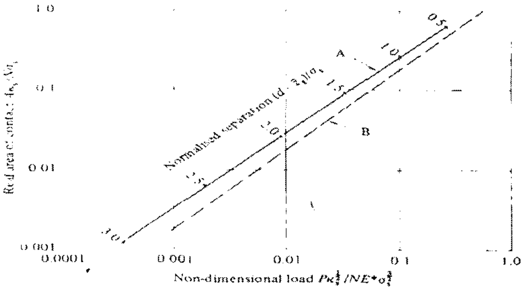


Fig. 2 돌기의 높이에 대한 정규분포(실선)와 지수함수 분포(점선)상의 무차원 하중과 실제접촉면적의 변화

점점 더 작은 길이 스케일이 무한히 존재한다는 것은 돌기 모델이론(asperity model theory)에게는 난처한 일이다. 왜냐하면 돌기에 대한 정의가 스케일과 관련이 있기 때문이다. 그러므로 sampling interval이 큰 시스템에서는 곡률 반경 상에 작은 돌기만을 볼 수 있지만, 측정 시스템이 보다 세밀하게 되면, 점점 더 많은 돌기가 생기며 그 크기는 줄어든다. 전부 다 그런 것은 아니지만, 접촉에 대한 몇몇 성질들은 표면을 점점 작게 측정하면 그대로 유지된다. 예를 들어, 전체 실제 접촉 면적 A와 수직력 P는 모든 스케일에서 거의 선형(A=CP)으로 예견되지만, 그러나 비례상수 C는 스케일에 따라 감소한다. 더욱이 Greenwood와 Williamson의 소성지수(plasticity index) (탄소성 접촉에서 예견되는 소성변형의 정도를 정의)는 sampling interval이 줄어듦에 따라 계속해서 증가해서, 보다 작은 스케일의 돌기는 항상 소성변형하는 것으로 보여주고 있다.

이러한 스케일의 영향과 스펙트럼 밀도의 지수함수 거동은 표면과 그 접촉 과정을 차원분열(fractal) 방법으로 기술해야 보다 적당할 수 있다는 것을 강력하게 제시하고 있다 (Komvopoulos, Yan 1997, Lopez et al. 1994, Majumdar, Bhushan 1990, 1995, Borri-Brunetto et al. 1998). 오래 전에 연구된 바로서, Archard(1957)는, 큰 스케일 상에 보다 작은 반구의 돌기를 연속적으로 중첩시켜 한계점에서

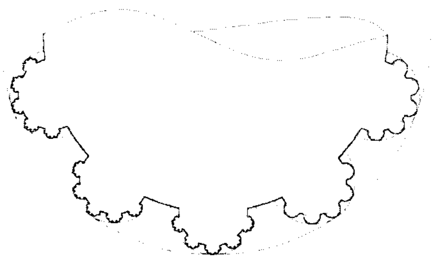


Fig. 3 Archard 모델

차원분열표면으로 정의되는, 거친 표면의 접촉모델을 제안하였다(Fig. 3). Archard는 그의 모델을 사용하여 총실제접촉면적이 Hertzian 접촉 방정식의 비선형성에 불구하고 작용 하중에 비례한다는 사실을 입증하였다.

거친 표면에 대한 차원분할 성질은 로그함수 스케일상에서 표면형상을 다양한 통계적인 측정치로 나타낼 수 있으며, 이 경우 true fractal은 직선으로 표현된다. Majumdar 과 Bhushan(1995)는 이 주제에 대한 실험적 그리고 이론적인 면을 포괄적으로 검토였으며 다음과 같은 구조함수가 사용될 것을 제안했다.

$$S(\tau)=\frac{1}{L}\int_0^L[z(x+\tau)-z(x)]^2dx$$

여기서 z(x)는 x위치에서 표면의 높이를 말하며 L은 샘플의 길이이다. 만일 표면이 차원분할형상이라면, 구조함수는 다음과 같이 멱급수(power law)의 형태를 나타낸다.

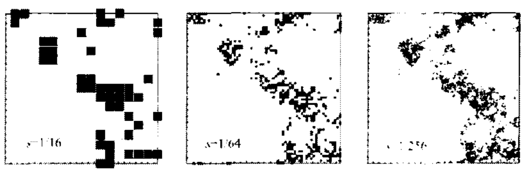
$$S(\tau)=(G^{D-1}\tau^{2-D})^2$$

여기서 D는 차원분열 도형의 크기이고 G는 거칠기의 진폭과 관련이 있는 길이단위의 스케일 상수이다. 전형적인 거친표면의 형상은 $1<D<1.5$의 구간에서 존재함을 알 수 있다. 차원분할도형의 유익한 것은 그것이 똑같은 멱급수 거동이 임의의 t=0 까지 제한 없이 계속된다고 가정함으로써 작은 스케일에서 표면이 잘려나간 부분만을 고려하지 않는다는 점이다. 같은 방법으로 스펙트럼 밀도 P(w)는 임의의 큰 w에서 똑같은 멱급수를 가진다고 가정한다. 최근 차원분할 특징과 접촉문제에 대한 수학적인 조사가 Borodich와 Onishchenko(1997)에 의해 수행되었다. Wang과 Komvopoulous(1995)는 유사한 방법을 사용하여 미끄럼이 있을 때 표면온도의 분포를 예측하였다.

Majumdar과 Bhushan(1991)은 차원분할표면에서의 실제 접촉면적 분포는 일정한 높이 z에서 표면을 자름으로서 생성된 일련의 "섬"모양의 그것과 동일하다는 가정을 근간으로 접촉이론을 개발하였다. 그들은 불규칙 과정(random process) 이론에 의해 정의된 돌기에 대한 확률을 얻고 특정 깊이에 따른 돌기의 변형에 요구되는 힘의 분포를 예측하였다. Borri-Brunetto 등(1998a)은 차원분할 접촉문제에 직접적으로 다루어 요구되어지는 성질을 갖는 차원분할표면을 생성시켰으며 수치적인 방법을 통해 탄성문제를 공간 분할의 여러 단계에서 다루어, 세밀하지 않은 분할 단계에서 몇 개의 커다란 실제 접촉면적을 얻었고, 격자(grid)를 보다 세밀하게 하였을 때는 커다란 실제 면적이 점차로 쪼개어져 보다 작은 면적의 군으로 진행되고, 전체 실제 접촉면적은 감소한다는 사실을 얻었다. 이것은 Archard의 모델과 일치하지만 차원분할도형의 접촉면적 분포가 유한하다고 예측하는 Majumdar과 Bhushan의 모델과는 대조를 이루고 있다.

Borri-Brunetto등(1998a)는 주어진 어떠한 스케일에서의 접촉면적은 다음단계의 작은 스케일에서 분열되어 접촉면적의 군을 이룬다고 보였다. 이러한 군집화와 더불어 한쪽의 접촉 힘에 의해 야기되는 다른 돌기의 변위인 상호작용영향을 포함시켜야 한다. 전기적 그리고 열 접촉 저항에 대한 예측을 할 때도 유사하게 고려할 수 있다.

위 두 모델에서 나타나고 있는 차이점을 설명하기



(a) (b) (c)

Fig. 4 접촉면의 해상도가 감소함에 따라 실제 접촉면적 쪼개어져 보다 작은 면적의 군으로 진행되고, 전체 실제 접촉면적은 감소하고 있다.

위해 Ciavarella등(2000)은 Weierstrass 급수로 표현되는 차원분할 강체(rigid) 표면이 2차원 탄성 면에 접촉하는 모델을 연구하였다. 그들은 접촉면적이 스케일이 줄어듦에 따라 감소하며, 멱급수 형태로 거동하여 차원분할 크기가 (2-D)인 극한값을 가진다고 밝혔다(Fig. 5). 이것은 Borri-Brunetto등(1998)에 의해 수치적으로 수행된 결론을 확인했다. 스케일이 줄어듦에 따라 총 접촉 수는 점점 증가함을 보여주고 있다(Fig. 6)

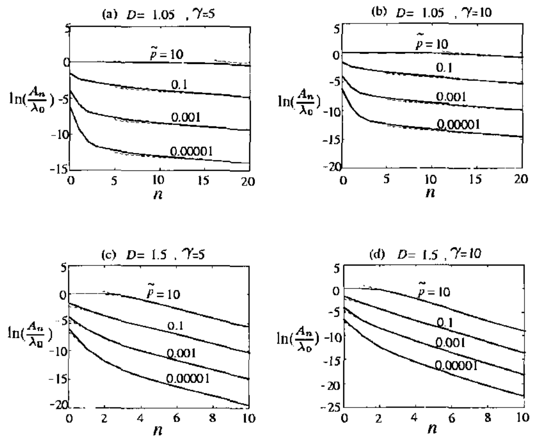


Fig. 5 스케일에 따른 접촉면적의 변화. 스케일이 줄어듦에 따라 (n이 커짐) 접촉면적이 멱급수 형태로 감소하고 있다.

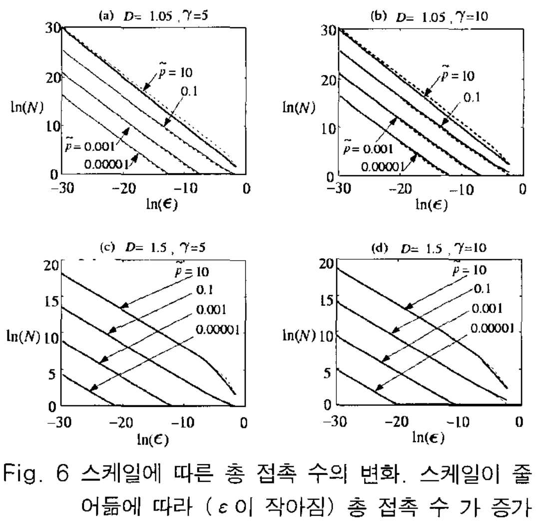


Fig. 6 스케일에 따른 총 접촉 수의 변화. 스케일이 줄어듦에 따라 (ε이 작아짐) 총 접촉 수 가 증가하고 있다.

3. 결 론

이상과 같이 접촉역학 구체적으로 거친 표면에서의 접촉에 의한 여러 거동을 살피는 역학에 대해 개략적인 동향을 살펴보았다. 특히 차원분할도형을 이용한 접촉문제는 현재까지 표면에 대한 측정 연구에 의해 나타난 여러 사실들을 충분히 부합시키는 중요한 도구로서 사용되며, 거친 표면에서의 접촉문제에 대한 수긍할 수 있는 결론을 제공하고 있다. 다만, 제한된 영역에서 그 결과를 보여주므로 발전가능성은 많은 것으로 보고있으며, 수치적인 방법을 사용하는 분야에서는 표면 거칠기를 다루는 유용한 도구가 희박하므로 앞으로 이 분야에 대해서는 상당한 연구가 있어야 되리라 사료된다.

참 고 문 헌

1. Archard, J. F. "Elastic Deformation and the Laws of Friction", *Proc. R. Soc. (London)* Vol. A243, 1957, pp.190~205
2. Borri-Brunetto, M., Carpinteri, A. and Chiaia, B., "Lacunarity of the Contact Domain Between Elastic Bodies With Rough Boundaries", In *Probamat-21st Century : Probabilities and Materials,* Frantziskonis, G. ed., Kluwer, 1998, pp.45~64, Dordrecht
3. Ciavarella, M., Demelio, G, Barber, J. R., and Jang, Y. H., "Linear Elastic Contact of the Weierstrass Profile", *Proc. Roy. Soc. (London)*, A456, 2000, pp.387~405
4. Greenwood, J. A., "A Unified Theory of Surface Roughness", *Proc. Roy. Soc. (London)*, Vol. 393, pp.133~157
5. Greenwood, J. A. and Williamson, J. B. P., "The Contact of nominally Flat Surfaces", *Proc. Roy. Soc. (London)*, Vol. A295, 1966, pp.300~319
6. Komvopoulos, K. and Yan, W. "A Fractal Analysis of Stiction in Microelectromechanical

Systems", *ASME J.Tribology*, 119,, 1997, pp. 391~400

7. Lopez, J., Hansali, G., Le Bosse, J. C., and Mathia, T., "Caracterisation Fractale de la Rugosit\'{e} Tridimensionelle d'une Surface", *J.Phys.III(France)*, Vol. 4, 1994, pp.2501~2219
8. Maj umdar, A. and Bhushan, B., "Role of Fractal Geometry in Roughness Characterization and Contact Mechanics of Surfaces", *ASME J. Tribology*, Vol. 112, 1990, pp.205~216
9. Majumdar, A. and Bhushan, B., "Fractal Model of Elastic-Plastic Contact Between Rough Surfaces", *ASME J. Tribology*, 113, 1991, pp.1~11.
10. Majumdar, A. and Bhushan, B., "Characterization and Modeling of Surface Roughness and Contact Mechanics", *Handbook of Micro/Nano Tribology*. CRC Press, 1995, New York, pp. 109~165.
11. Mandelbrot, B.B., *The Fractal Geometry of Nature*,Freeman, 1982, San Francisco.
12. Nayak, P.R. 1971, "Random Process Model of Rough Surfaces", *ASME J.Lubrication Technology*, 93, 1971, pp.398~407.
12. Russ, J.C., *Fractal Surfaces*, Plenum Press, 1984, New York.
13. Whitehouse, D.J. and Phillips, M.J., "Discrete Properties of Random Surfaces", *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, A290, 1978, pp.267~298.
14. Whitehouse, D.J. and Phillips, M.J., "Two-Dimensional Discrete Properties of Random Surfaces", *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, A305, 1982, pp.441~468