대한기계학회 2001년도 춘계학술대회논문집 C pp. 293~298 KSME 01S331

높은 구름/미끄럼 비를 갖는 점 접촉 EHL 하에서의 온도분포와 유막 두께 분포의 측정

김성기* · 八木和行** · 中原綱光** · 京極啓史** · 김경웅*

Measurements of film thickness and temperature distribution in EHL point contact at high roll/slip ratios

Sung-Gi Kim, Kazuyuki Yagi, Tsunamitsu Nakahara,
Keizi Kyougoku and Kyung-Woong Kim

Key Words : Dimple(딤플), EHL(탄성유체윤활), Viscosity wedge(점도쐐기), High roll/slip ratios(높은 구름/미끄럼 비), Infrared temperature mapping(적외선온도측정)

Abstract

In this paper, film thickness and temperature distribution are measured in EHL point contact at high roll/slip ratios. Infrared temperature mapping with two band pass filters, proposed by Ausherman (1976), is used to measure temperature distribution. And the optical interferometric method with two filters (red and green filters) is used to measure film thickness. Result of experiment showed that temperature rising at film and ball surface occurred very dramatically in Dimple zone. As slip velocity, roll/slip ratio and load increased, size of Dimple and temperature rising became more large. In addition, position and shape of Dimple were changed by roll/slip ratios, and increasing of Dimple size decreased traction coefficient. In short, it is appointed that the Dimple phenomenon be developed by the effect of viscosity wedge.

기호설명

a	헤르쯔(Hertz) 반지름 (m)
E	탄성계수 (Pa)
h	유막 두께 (m)
N	적외선 방사량
N_A	필터 A를 통해 측정한 적외선 방사량
N_B	필터 B를 통해 측정한 적외선 방사량
ΔN_A	N_A값의 증가량 (22°C 기준)
ΔN_B	N_B값의 증가량 (22°C 기준)
n	유막의 굴절율
P	압력 (Pa)
R	볼의 반지름 (m)
r	굴절각
r_f	간섭 무늬의 반지름 (m)
S	구름/미끄럼 비, $(U_1-U_2)/U_1$
T	온도 (Temperature)
ΔT	22°C을 기준으로 한 온도의 증가량
U_1	접촉 중심의 볼의 선 속도 (m/s)
U_2	접촉 중심의 디스크의 선 속도 (m/s)
ΔU	U_1-U_2
W	하중
x	접촉 중심으로부터 미끄럼 방향으로의 수평 거리 (m)
ϕ	간섭을 일으키는 두 광원의 보정항
η	Kinetic viscosity (mm^2/s)
μ	접선력 계수 (Traction coefficient)
σ	포아송 비

* KAIST (한국과학기술원)
** TIT (東京工業大學)

서 론

기어, 캠, 트랙션 드라이브 등의 많은 기계 요소들이 탄성유체윤활 하에서 운전되기 때문에 탄성유체윤활상태에 대한 연구는 이전부터 많이 이루어져 왔다. 그러나 구름/미끄럼 비가 높아질수록 수치 해석의 수렴성이 안 좋아 대부분의 연구가 낮은 구름/미끄럼 비의 운전상태에서 이루어졌다.(4-7) 하지만 캠-태핏(cam-tappet) 같은 기계요소에서 역 미끄럼 상태에 가까운 운전조건이 발생하며, 구름/미끄럼 비가 높아질수록 그때 유막에서 발생하는 열이 유막 두께에 큰 영향을 준다는 사실이 알려지면서(4), 높은 구름/미끄럼 비에 관한 연구가 활발히 이루어지기 시작했다. 그리고 최근 Fig. 1 과 같은 딤플이라는 특이한 유막형상이 존재한다는 것이 발견되면서 그에 관한 연구도 활발히 이루어지기 시작했다.(11-15)

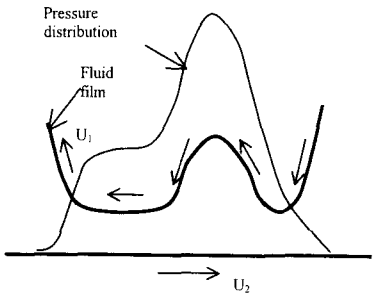

Fig. 1 Pressure distribution and fluid film at Dimple

이 딤플의 원인에 대해 많은 이론이 제시되고 있는데,(12,13,14) 본 저자는 그 중 Cameron 이 제시했던 점성구배효과(1)가 그 원인이 된다는 이론이 가장 타당한 것으로 본다. 이 점성구배효과는 Fig. 2 와 같이 접촉하고 있는 두 면의 온도 차에 의해 유막 두께 방향으로의 점성 변화가 발생해 유막이 형성되는 것을 말한다. 역 미끄럼 상태에서의 유막 발생 원리가 점성구배효과라는 것과 구름/미끄럼 비가 높아짐에 따라 유막에서 발생하는 열이 유막에 큰 영향을 준다는 사실에 근거해서 딤플이 유막 두께 방향으로의 온도변화에 의해 발생된다고 생각하게 되었다.

이에 본 논문은 높은 구름/미끄럼 비의 윤활조건에서 유막 두께 분포와 그때의 온도 분포를 실험적으로 구해 딤플의 발생원리를 밝히려 한다.

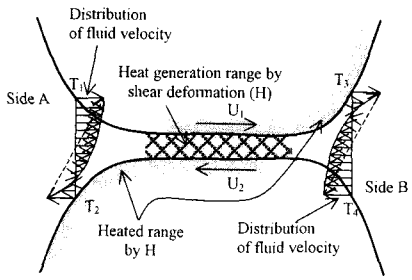

Fig. 2 Effect of contact surface temperature with zero-entraintment

2 장 실험

본 실험에서는 볼-디스크 형 마찰시험기를 이용하였는데, 볼과 디스크의 위치관계는 Fig. 3, Fig. 4 와 같으며, Fig. 3 의 빗금 친 영역을 실험대상으로 하였다. 이 영역의 유막 두께 분포와 온도 분포를 측정하여, 유막 두께 측정은 적색광과 녹색광을 광원으로 해서 광학간섭측정법을 이용하였고,(9) 온도 측정은 두개의 밴드패스필터를 사용하는 적외선방사측정법을 이용하였다.(8) 볼과 디스크의 회전 속도를 변화 시키면서 유막 두께 분포, 볼 표면과 유막의 온도 분포 그리고, 트랙션 계수를 측정했다.

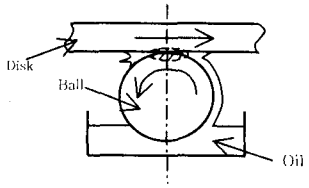

Fig. 3 Object

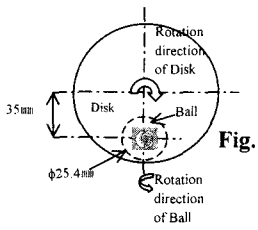

Fig. 4 Relationship of rotation directions between ball and disk.

Table 1 Properties of ball and disk

	Disk(Al_2O_3)	Ball(SUJ2)
Young's modulus(Gpa)	365	210
Poisson's ratio	0.2	0.3
Thermal conductivity(W/mK)	27	41
Specific heat(J/KgK)	577	418
Ra(μm)	0.002	0.08

Table 2 Properties of lubricant

	Molecular weight	Density (kg/m^3)	Viscosity ($Pa \cdot s$)	Coefficient of P-μ (GPa^{-1})
P100 (298K)	522	875	0.213	25.77

Table 1, Table 2 은 디스크, 볼 그리고, 윤활유의 물성치를 나타내고 있다. 적외선 카메라의 측정 속도는 1/60sec, 공간분해능은 20 ㎛, 초점거리는 25 ㎜, 감지가능 주파수 영역은 3-5 ㎛이다.

3 장 실험결과 및 고찰

1.1 딤플과 온도의 관계

본 실험결과, Fig. 5 와 같이 딤플이 발생하는 영역에서 볼과 유막의 온도가 크게 증가함이 발견되었다. 그러나 Fig. 5 에서 볼 수 있었던 특이할 만한 적외선 방사량의 증가는 Fig. 6 과 같이 딤플이 발생하지 않는 조건에서는 나타나지 않았다. 실제의 온도분포를 보아도, 딤플이 발생하는 S=2.0, ΔU=2.0m/s 의 경우에는 유막의 온도상승의 최고 값이 약 225K 였으나, 딤플이 발생하지 않는 S=0.8, ΔU=2.0m/s 의 경우에는 약 120K 정도에 머물렀다. (Fig. 6) 접촉영역의 온도가 증가할수록 점성구배효과가 증가해 더욱 큰 딤플이 발생되는 것으로 보인다.

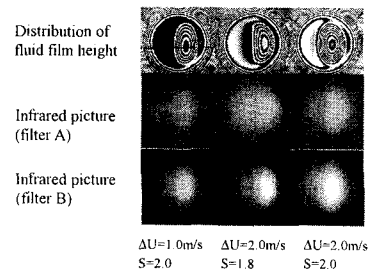

Fig. 5 Radiation of infrared rays and distribution of fluid film height.

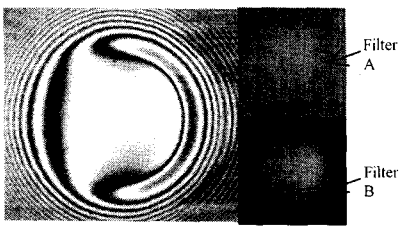

Fig. 6 Case of no Dimple (S=0.8, ΔU=2.0 m/s , W=100N)

1.2 미끄럼 속도, 구름/미끄럼 비, 하중이 딤플에 미치는 영향

Fig. 7 은 미끄럼 속도에 따른 딤플의 발생 및 온도 증가의 변화를 나타내고 있으며, Fig. 8 은 구름/미끄럼 비에 따른 변화를, Fig. 9 은 하중에 따른 변화를 나타내고 있다. 이 그림들을 보면 앞서 지적했듯이 딤플의 발생 영역에서 온도 상승이 급격히 일어나는 것을 볼 수 있다. 그리고, 미끄럼 속도나 구름/미끄럼 비 또는 하중이 증가할수록 딤플이 증가하며, 구름/미끄럼 비에 따라서 딤플의 형상 및 위치가 달라지는 것이 확인 되었다. 모든 실험에서 볼이 디스크에 비해 접촉영역에서의 선 속도가 빨랐다.

1.3 딤플과 트랙션 계수와의 관계

Fig. 10 을 보면 ΔU=0.5m/s 하에서는 구름/미끄럼 비가 증가함에 따라 트랙션 계수도 증가 하였으나, 그 외의 경우에서는 구름/미끄럼 비가 1.6 보다 커지면 트랙션 계수가 감소함을 알 수 있다. 이는 딤플의 발생이 평균 유막 두께의 증가를 가져와 마찰을 줄이고, 트랙션 계수의 감소를 가져오는 것으로 보인다. 비슷한 현상이 Fig. 11 에도 나타나는데, 하중에 따라 딤플이 증가하는 S=2.0 의 경우에는 하중의 증가에 따라 트랙션 계수가 감소하는 것이 확인 되었다. S=0.8 의 경우에는 딤플이 발생하지 않았다.

1.4 딤플의 발생원인에 관해

이 실험에서 밝혀진 딤플 영역에서의 온도상승은 유막의 고형화가 딤플의 원인이라는 이론(13)에 정면으로 위배되는 결과이며, 나아가 온도가 딤플의 발생과 밀접한 관련이 있다는 증거가 된다. 하지만 이것만으로는 딤플의 원인이 점성구배효과라고 단정 지어 말할 수는 없다. 딤플에 대한 더 나은 해석을 위해선 디스크 표면의 온도 측정이 필수적이다. Fig. 7, Fig. 8, Fig. 9 에서 유막이 볼 표면에 비해 온도가 높은 것은 확인되나, Fig. 2 와 같은 온도 분포를 확인하기 위해선 디스크 표면의 온도 측정이 필수적이기 때문이다. Qu 의 수치해석 결과(12)를 보면, Fig. 2 와 같은 온도 분포를 확인할 수 있다. 또한, 윤활유의 고형화 여부를 판단하기 위해서는 유막 두께 분포와

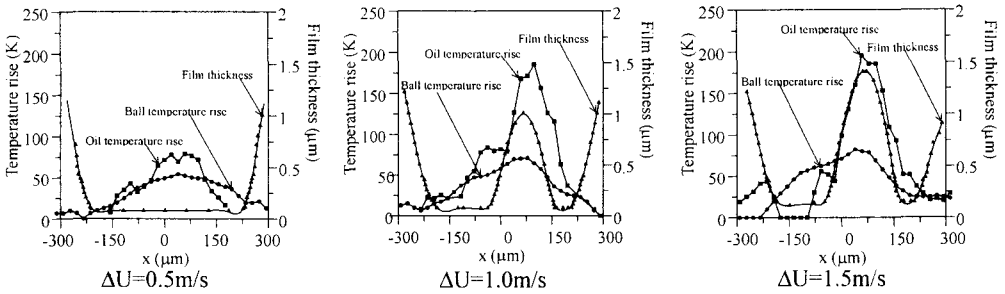

Fig. 7 Effect of slip velocity (center line of sliding direction, S=2.0, W=100N)

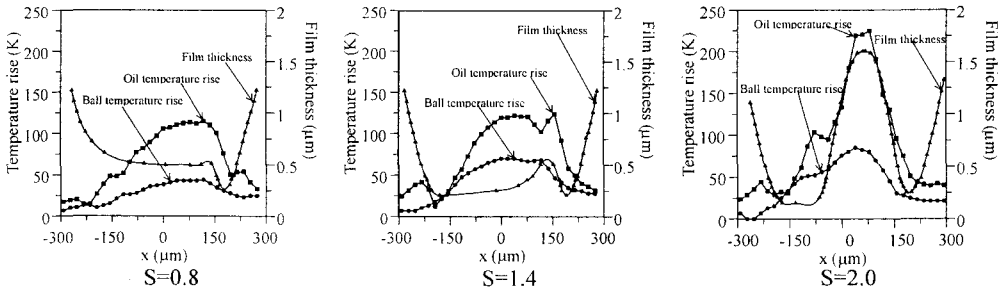

Fig. 8 Effect of roll/slip ratio (center line of sliding direction, ΔU=2.0m/s, W=100N)

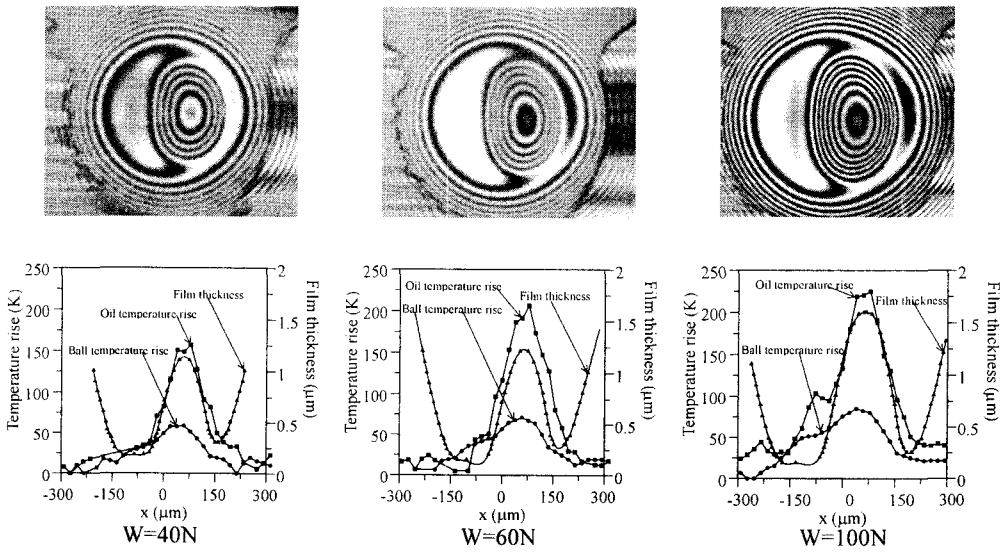

Fig. 9 Effect of weight (center line of sliding direction, ΔU=2.0m/s, S=2.0)

온도 분포를 이용한 열 탄성 윤활해석을 수행해 윤활영역에서의 압력 분포를 구해야 한다. 또한 디스크와 볼, 그리고 윤활유의 재질을 다양하게 바꾸어 실험하여 재질의 영향을 검토해 봐야 할 것이다.

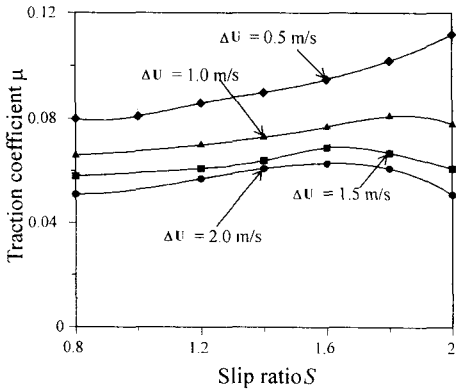

Fig. 10 Traction coefficient according to roll/slip ratio (W=100)

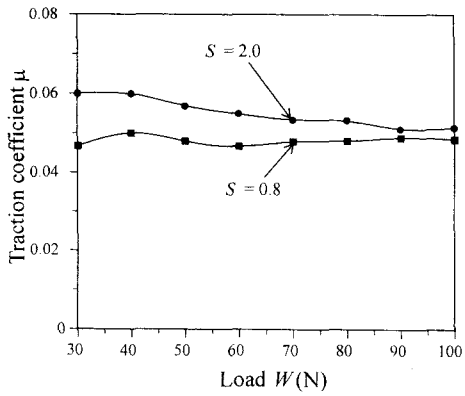

Fig. 11 Traction coefficient according to weight (ΔU=2.0m/s)

결 론

높은 구름/미끄럼 비의 점 접촉 탄성윤활 영역을 대상으로 온도분포 측정과 유막 두께분포 측정을 행해 다음과 같은 결론을 얻었다. 온도 측정은 두개의 밴드패스 필터(Band pass filter)를 이용한 적외선 방사 측정법을 이용하였고, 유막 두께는 두개의 광원(光源)을 이용한 간섭무늬 측정을 통해 얻어내었다.

1. 딤플이 발생하는 영역에서 매우 높은 온도가 발생한다.
2. 딤플이 발생하는 영역에서 유막이 고형화 된다는 유막의 고형화 이론에 반대되는 실험데이터를 제시하였다.
4. 딤플은 미끄럼 속도와 구름/미끄럼 비 그리고 하중이 증가함에 따라 증가한다. 이는 점성구배효과가 딤플의 중요한 원인이 된다는 증거이다.
5. 구름/미끄럼 비에 따라 딤플의 형상 및 위치가 달라진다.
6. 딤플의 증가에 의해 트랙션계수가 작아진다.

후 기

본 연구의 지도를 맡아주신 東京工業大學의 中原先生님과 京極啓史先生님, 그리고 함께 연구하였던 八木상께 감사 드립니다.

참고문헌

(1) A. Cameron, 1951, "Hydrodynamic Lubrication of Rotating Disks in Pure Sliding. A New Type of Oil Film Formation", J. Inst. Petrol., pp. 37~471
(2) A. Cameron, 1966, "Principle of Lubrication", LONGMANS, pp. 147~150
(3) A. Dyson, A. R. Wilson, 1968~69, "Film Thicknesses in Elastohydrodynamic Lubrication at High Slide/Roll Ratio", Proc. Insn. Mech. Engrs., Vol. 183, Pt 3p, pp. 81~97
(4) F. Sadeghi, T. A. Dow, R.R. Johnson, 1987, "Thermal Effects in Rolling/sliding Contacts: Part3 – Approximate Method for Prediction of Mid-Film Temperature and Sliding Traction", Journal of Tribology, Vol.109, pp. 519~524
(5) F. Sadeghi, P. C. Sui, 1990, "Thermal Elastohydrodynamic Lubrication of Rolling/Sliding Contacts", , Journal of Tribology, Vol.112, pp. 189~195
(6) R. K. Pandey, M. K. Ghosh, 1998, "Temperature rise due to sliding in rolling/sliding elastohydrodynamic lubrication line contacts: an efficient numerical analysis for contact zone temperatures", Tribology International, Vol.31, pp. 745~752

(7) Ming-Tang Ma, 1998, "Effects of the Non-Newtonian Behavior of Lubrication on the Temperature, Traction, and Film Thickness in an Elliptical EHD Contact Under Heavy Loads", Journal of Tribology, Vol.120, pp. 685~694
(8) V. K. Auserman, H. S. Nagaraj, 1976, "Infrared Temperature Mapping in Elastohydrodynamic lubrication", Trans. Of the ASME, APRIL, pp. 236~243
(9) L.D. Wedeven, 1970, "Optical Measurements in Elastohydrodynamic Rolling-Contact Bearing", University of London
(10) G. J. Johnston, R. Wayte, H. A. Spikes, 1991, "The Measurement and Study of Very Thin Lubrication Films in Concentrated Contacts", Tribology Transactions, Vol. 34, pp. 187~194
(11) Kaneda M, Nishikawa H. Kameishi K, Matuda K, 1996, "Abnormal phenomena appearing in EHL contacts.", ASME J. Tribol., Vol.118, pp. 886~892
(12) Shiyue Qu, Peiran Yang, Feng Guo, 2000, "Theoretical investigation on the dimple occurrence in the thermal EHL of simple sliding steel-glass circular contacts.", Tribology International, Vol.33, pp. 59~65
(13) P. Ehret, D. Dowson, C. M. Taylor, 1999, "Transient EHL Solutions With Interfacial Slip", Transactions of the ASME, Journal of Tribology, 121, pp.886~892
(14) I. I. Kudish, 1999, "Analysis of Abnormal Phenomena in EHL Contacts", The Advancing Frontier of Engineering Tribology, Proceedings of the 1999 STLE/ASME H.S.Cheng Tribology Surveillance, pp.188~196
(15) K. Yagi, Y. Ito, S. Momozono, K. Kyogoku, T. Nakahara, 1999, "Temperature Mesurements of Oil Film and Surface in Point Contact EHL under High Slip Ratio Condition", Proc. JAST Trib. Conf., Tokyo, pp. 165~166
(16) H. S. Hsiao, B. J. Hamrock, 1994, "Temperature Distribution and Thermal Degradation of the Lubrication in EHL Line Contact Conjunctions", Transactions of the ASME, Vol. 116, pp. 794~803