

높은 미끄럼 비의 점 접촉 EHL 하에서 발생하는 딴플 영역의 온도 분포와 유막 두께 분포의 측정

김성기[†] · 八木和行^{*} · 中原綱光^{*} · 京極啓史^{*} · 김경웅^{**}

(2001년 10월 8일 접수, 2003년 2월 28일 심사완료)

Measurements of Film Thickness and Temperature Distribution in Dimple Zone Developed in EHL Point Contact at High Slip Ratios

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

Key Words : Dimple(딴플), EHL(탄성유체윤활), Viscosity Wedge(점도췌기), High Slip Ratios(높은 미끄럼 비), Infrared Temperature Mapping(적외선온도측정)

Abstract

In this paper, film thickness and temperature distribution are measured in EHL point contact at high 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, slip ratio and load increased, size of Dimple and temperature rising became more large. In addition, position and shape of Dimple were changed by 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

- S : 미끄럼 비, $(U_1 - U_2) / U_1$
 T : 온도 (Temperature)
 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)
 μ : 트래션 계수 (Traction coefficient)

1. 서론

기어, 캠, 트랙션 드라이브 등을 비롯한 많은 기계 요소들이 탄성유체윤활 하에서 운전되는데, 이 탄성유체윤활 상태에 대한 연구는 이전부터 많이 이루어져 왔다. 그러나 미끄럼 비가 높아질수록 수치 해석의 수렴성이 안 좋아 대부분의 연구가 낮은 미끄럼 비의 운전 상태에서 이루어졌다.⁽¹⁻⁴⁾ 하지만 캠-태핏(cam-tappet) 같은 기계요소에서 역 미끄럼 상태에 가까운 운전 조건이 발생하며, 미끄럼 비가 높아질수록 그때 유막에서 발생하는 열이 유막 두께에 큰 영향을 준다는 사실이 알려지면서,⁽¹⁾ 높은 미끄럼 비에 관한 연구가 활발히 이루어지기 시작했다. 그 결과 Fig. 1과 같은 딴플(Dimple)이라는 특이한 유막 형상이 발견되었는데, 최근 그 원인 규명을 위해 많은 연구가 진행 중이다.⁽⁵⁻⁹⁾ Fig. 1은 딴플이 존재할 때의 접촉 영역에서의 압력 분포와 유막 두께 분포를 나타내

[†] 책임저자, 회원, KAIST 기계공학과
 E-mail : holybowl@kaist.ac.kr
 TEL : (042)869-3255 FAX : (042)869-3210

^{*} TIT(東京工業大學)

^{**} 회원, KAIST 기계공학과

는 개략도 이다.

이 덩플의 원인에 대해 많은 이론이 제시되고 있는데, 그 중 Cameron이 제시했던 점성구배효과⁽¹⁰⁾가 그 원인이 된다는 이론이 Shiyue에 의해 제시되었다.⁽⁶⁾ 이 점성구배효과는 Fig. 2와 같이 접촉하고 있는 두 면의 온도 차에 의해 유막 두께 방향으로 점성의 변화가 발생해 유막이 형성되는 것을 말한다.^(11,12) 유막 두께 방향으로의 점성의 변화는 접촉 영역으로의 유량 입 출입의 평형을 깨뜨려 그에 상응하는 접촉 영역의 압력 상승을 야기한다.(Fig. 1) 이처럼 역 미끄럼 상태에서의 유막 발생 원리가 점성구배효과라는 것과 미끄럼 비가 높아짐에 따라 유막에서 발생하는 열이 유막에 큰 영향을 준다는 사실에 근거해, 덩플이 유막 두께 방향으로의 온도 변화에 의해 발생된다는 견해가 제시되고 있다. 참고로, 유막 두께 방향으로의 점성 변화가 발생하지 않을 때의 속도 분포를 파선으로 나타내었다.

이에 본 논문은 높은 미끄럼 비의 윤활 조건에서 유막 두께 분포와 그때의 온도 분포를 실험적으로 측정해 덩플과 온도 분포와의 관계를 밝히고 덩플의 발생 조건과 원리에 대해 고찰해본다.

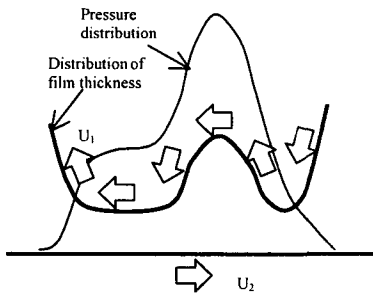


Fig. 1 Distribution of pressure and film thickness at Dimple zone

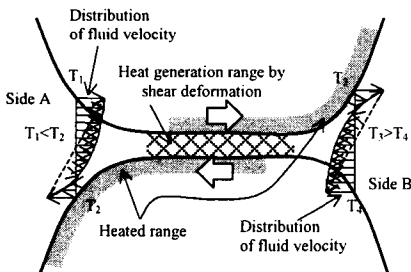


Fig. 2 Viscosity wedge effect

2. 실험

본 실험에서는 볼-디스크 형 마찰시험기를 이용하였는데, 볼과 디스크의 위치 관계는 Fig. 3, Fig. 4와 같으며, Fig. 3의 빗금 친 영역을 실험 대상으로 하였다. 실험 장치를 Fig. 3의 위쪽에서 보았을 때 Fig. 4와 같이 된다. 윤활유는 Fig. 3과 같이 공급하였으며, 볼과 디스크의 회전 속도는 각각 독립적으로 조절 가능하다. 볼과 디스크의 회전 속도를 각각 독립적으로 변화 시키면서 유막 두께 분포, 볼 표면과 유막의 온도 분포 그리고, 트랙션 계수를 측정했다. 유막 두께 분포 측정은 적색광과 녹색광을 광원으로 한 광학간섭측정법을 이용하였고,⁽¹³⁾ 온도 측정은 두개의 밴드패스필터(Band pass filter)를 사용하는 적외선방사측정법을 이용하였으며,⁽¹⁴⁾ 트랙션 계수의 측정에는 로드셀을 사용하였다. U_1 , U_2 그리고 x 의 양의 방향을 Fig. 3에 표시하였는데, Fig. 3과 Fig. 4의 디스크의 회전방향은 U_2 가 음수일 때를 나타내고 있다. Fig. 5는 실험 장비의 개략도이며, 유막 두께 분포를 측정할 때는 Fig. 5의 Infrared microscope detector를 CCD 카메라로 대치 사용하였다.

Table 1, Table 2는 디스크, 볼 그리고, 윤활유의 물성치를 나타내고 있다. 적외선 카메라의 측정 속도는 1/60sec, 공간 분해능은 20 μ m, 초점 거리는 25mm, 감지 가능 주파수 영역은 3-5 μ m이다. 필터

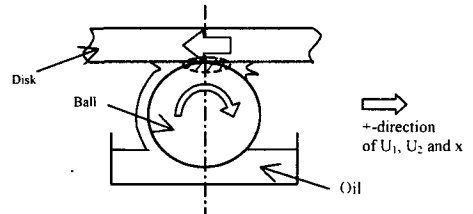


Fig. 3 Experimental object and rotation directions of ball and disk

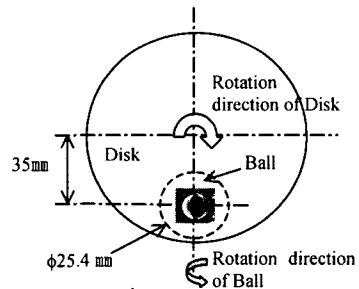


Fig. 4 Relationship of rotation directions between ball and disk

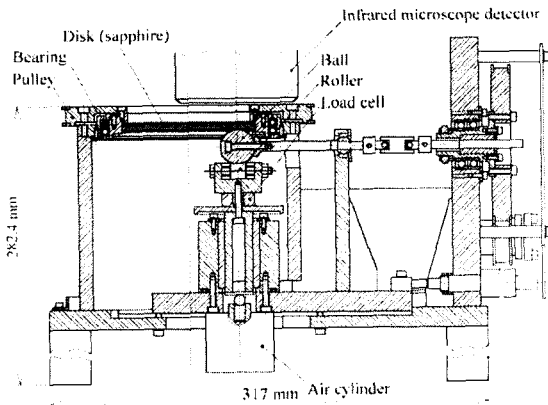


Fig. 5 Experiment apparatus

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·s)	Pressure-viscosity Coefficient (GPa^{-1})
P100 (298K)	522	875	0.213	25.77

A를 이용해서는 4~5 μm 의 파장을 갖는 볼의 적외선을 측정하였고, 필터 B로는 3~4 μm 의 파장을 갖는 볼과 유막의 적외선을 측정하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 딥플과 온도의 관계

본 실험 결과, Fig. 6과 같이 딥플이 발생하는 영역에서 볼과 유막의 온도가 크게 증가하였다. 그러나 Fig. 6에서 볼 수 있었던 특이할 만한 적외선 방사량의 증가는 Fig. 7과 같이 딥플이 발생하지 않는 조건에서는 나타나지 않았다. 실제의 온도 분포를 보아도, 딥플이 발생하는 $S=2.0$, $\Delta U=2.0m/s$ 의 경우에는 유막의 온도 상승 최고 값이 약225K 였으나, 딥플이 발생하지 않는 $S=0.8$, $\Delta U=2.0m/s$ 의 경우에는 약120K정도에 머물렀다.(Fig. 9) 이는 접촉 영역의 온도가 증가할수록 T_1 과 T_2 및 T_3 과 T_4

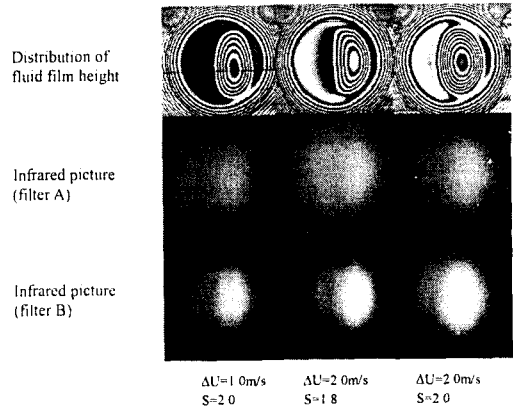


Fig. 6 Radiation of infrared rays and distribution of fluid film height.($W=100N$)

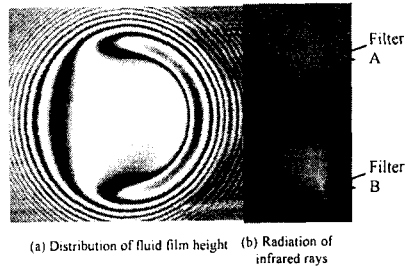


Fig. 7 Case of no Dimple ($S=0.8$, $\Delta U=2.0 m/s$, $W=100N$)

사이의 차가 커지게 되고 이에 따라 점성구배효과가 증가해 더욱 큰 딥플이 발생하는 것으로 보인다. S는 미끄럼 정도를 나타내는 값으로, 그 값이 0일 때는 미끄럼이 없을 때이고, 1일 때는 디스크는 정지해 있고 볼만 회전하여 미끄러지는 경우이며, 2일 때는 서로 반대 방향으로 같은 속력을 가지고 미끄러지는 경우를 나타낸다.

3.2 미끄럼 속도, 미끄럼 비, 하중이 딥플에 미치는 영향

미끄럼 비가 $S=2.0$ 으로 일정할 때에, 다양한 미끄럼 속도에 대하여 미끄럼 방향의 중심선을 따라 볼 표면의 온도 분포, 유막의 온도 분포, 그리고 유막 두께 분포를 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 6을 통해서 예상했던 것처럼 딥플이 발생한 $\Delta U=1.0m/s$ 와 $\Delta U=1.5m/s$ 의 경우에는 딥플이 나타나는 위치에서 볼 표면과 유막의 온도가 현저히 증가했으나, 딥플이 발생하지 않은 $\Delta U=0.5m/s$ 의 경우에는 특이할 만한 온도 상승이 일어나지 않았다. 이들 그래프를 보면, 볼 표면보다는 유막 쪽이 온도 상승도 크고, ΔU 의 변화에 따른 온도 변화도 큰

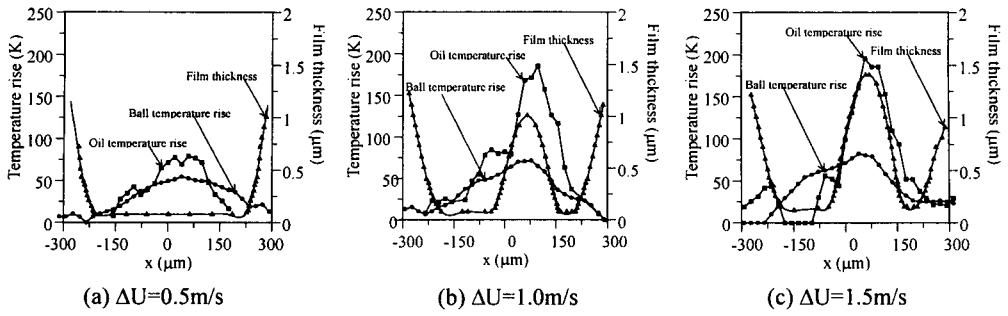


Fig. 8 Effect of slip velocity (center line of sliding direction, $S=2.0$, $W=100N$)

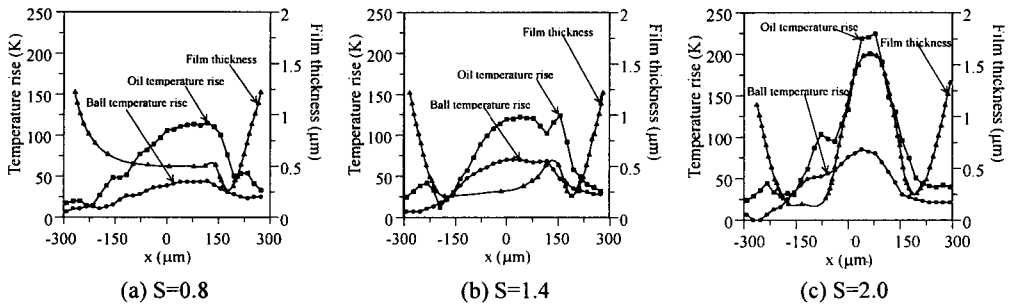


Fig. 9 Effect of slip ratio (center line of sliding direction, $\Delta U=2.0m/s$, $W=100N$)

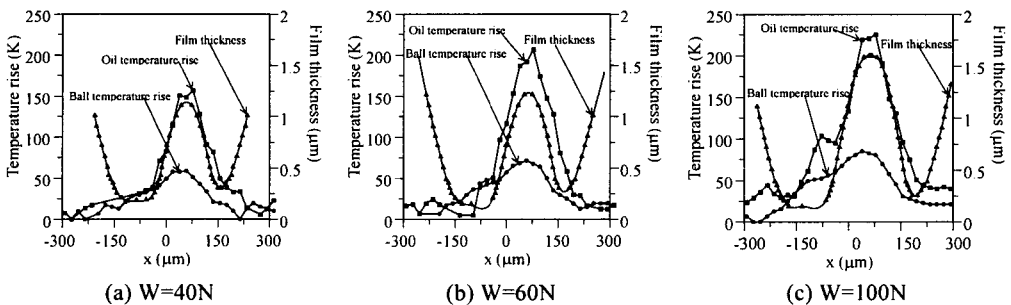
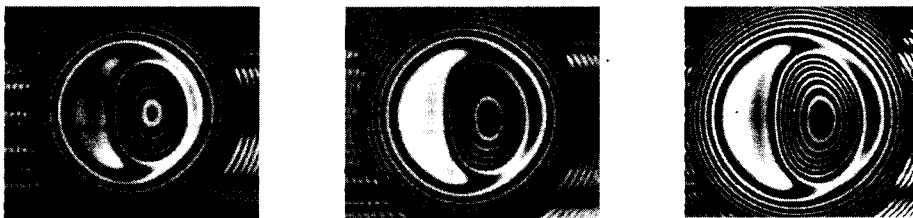


Fig. 10 Effect of load (center line of sliding direction, $\Delta U=2.0m/s$, $S=2.0$)

것을 알 수 있는데, 이 점들은 이전에 발표되었던 연구의 내용과 일치하는 것들이다.^(3,9) 또한 Fig. 8을 통해서 같은 미끄럼 비에서 미끄럼 속도가 커짐에 따라 덩플이 크게 발생하고 그에 따라 온도 상승도 증가함을 볼 수 있다.

Fig. 9는 S에 따른 덩플의 변화를 나타내고 있다. 이 그래프를 통해 S가 증가함에 따라 덩플도 증가하는 것을 알 수 있다. 그리고 S=1.4의 경우를 보면 덩플 영역과 온도 상승 영역이 놀랍게 일치하고, 그 분포 형상마저 비슷한 것을 볼 수 있다. 또한 Fig. 8, Fig. 9, Fig. 10을 종합해서 보면, S가 같을 때는 덩플의 모양도 비슷한 것을 확인할 수 있고, 아울러 ΔU 는 덩플의 크기에 관계함을 확인할 수 있다. S=2.0의 경우를 제외하고는 모두 볼 쪽이 디스크보다 선 속도의 크기가 컸기에 덩플은 사진의 오른쪽에서 발생했다. 하지만 S=2.0의 경우에도 덩플이 사진의 오른쪽으로 조금 치우친 것을 볼 수 있는데, 이는 급유 방향의 영향으로 보인다. 급유는 Fig. 3과 같은 방법으로 Fig. 9의 각 그래프의 왼쪽에서 이루어진다.

Fig. 10은 하중의 증가에 따른 덩플의 변화를 나타내고 있다. 하중이 증가함에 따라 덩플의 크기가 크게 변화하고 있는데, 이는 유막의 두께가 하중에 거의 영향을 받지 않는다고 하는 EHL의 일반적인 이론과 위배되는 현상이다. 하지만, 최소 유막 두께 및 평탄부의 유막 두께는 하중의 증가에 관계없이 거의 일정해 덩플 외의 영역은 EHL의 일반적인 이론을 따르는 것으로 나타났다.

3.3 덩플과 트랙션 계수와의 관계

Fig. 11과 Fig. 12를 통해서 덩플이 트랙션 계수에 미치는 영향에 대해서 생각해 보자. Fig. 11을 보면 $\Delta U=0.5\text{m/s}$ 에서는 S가 증가함에 따라 트랙션 계수도 증가 하였으나, 그 외의 경우에는 S가 1.6보다 커지면 트랙션 계수가 감소함을 알 수 있다. 또한 실험 데이터로부터 Fig. 11에 있는 점선의 오른쪽에서 덩플이 발생함을 알 수 있었는데, 이와 같은 덩플의 발생이 평균 유막 두께의 증가를 가져와 마찰을 줄이고, 트랙션 계수의 감소를 가져오는 것으로 보인다.

이와 비슷한 현상을 Fig. 12에서도 확인할 수 있다. Fig. 12를 보면 S가 2.0의 경우는 하중이 증가함에 따라 트랙션 계수가 감소하고, S가 0.8의 경우에는 하중에 관계없이 트랙션 계수가 일정하다. 여기서 S가 0.8일 때는 하중에 관계없이 덩플이 발생하지 않는 것에 반해, S가 2.0일 때는 하중의 증가에 따라 덩플의 크기도 커짐을 실험을 통해

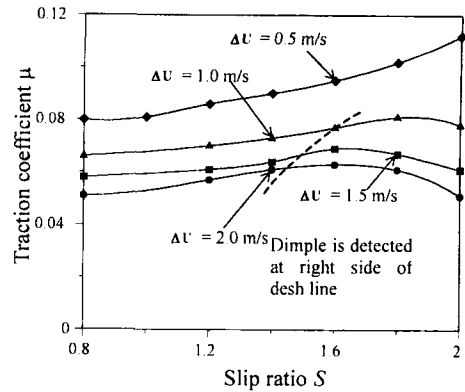


Fig. 11 Traction coefficient according to slip ratio (W=100N)

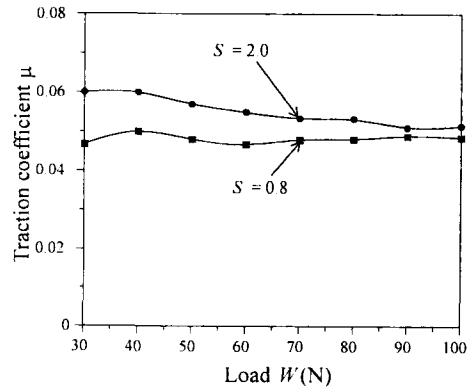


Fig. 12 Traction coefficient according to load ($\Delta U=2.0\text{m/s}$)

확인하였는데, 역시 덩플의 발생이 트랙션 계수를 감소시킨 것으로 보인다.

3.4 덩플의 발생원인에 관해

이 실험에서 밝혀진 덩플 영역에서의 유막의 온도상승은 유막의 고형화를 어렵게 해, 유막의 고형화가 덩플의 원인이라는 이론⁽⁷⁾에 반하는 결과이며, 나아가 온도가 덩플의 발생과 밀접한 관련이 있다는 증거가 된다. 하지만 이것만으로는 덩플의 원인이 점성구배효과라고 단정 지어 말할 수는 없다. 덩플에 대한 더 나은 해석을 위해선 디스크 표면의 온도 측정이 필수적이다. Fig. 8, Fig. 9, Fig. 10에서 유막이 볼 표면에 비해 온도가 높은 것은 확인되나, Fig. 2와 같은 온도 분포($T_1 < T_2$, $T_3 > T_4$)를 확인하기 위해선 디스크 표면의 온도 측정이 필수적이기 때문이다. Qu의 수치해석 결과⁽⁶⁾를 보면, Fig. 2와 같은 온도분포를 확인할 수 있다. 또한, 윤활유의 고형화 여부를 판단하기 위해서는

유막 두께 분포와 온도 분포를 이용한 열 탄성유체윤활해석을 수행해 윤활 영역에서의 압력 분포를 구해야 한다. 나아가 덤플 현상의 폭 넓은 이해를 위해서는 디스크와 볼, 그리고 윤활유의 재질을 다양하게 바꾸어 실험하여 재질의 영향을 검토해 봐야 할 것이다.

4. 결 론

덤플 영역의 온도 분포 측정과 유막 두께 분포 측정을 위해 다음과 같은 결론을 얻었다. 온도 측정은 두개의 밴드패스필터를 이용한 적외선방사측정법을 이용하였고, 유막 두께는 두개의 광원(光源)을 이용한 광학간섭측정법을 이용하였다.

(1) 덤플이 발생하는 영역에서 매우 높은 온도가 발생한다.

(2) 덤플이 발생하는 영역에서 유막이 고형화된다는 유막의 고형화 이론에 반대되는 실험데이터를 제시하였다.

(3) 덤플은 미끄럼 속도와 미끄럼 비 그리고 하중이 증가함에 따라 증가한다.

(4) 미끄럼 비에 따라 덤플의 형상 및 위치가 달라진다.

(5) 덤플의 증가에 의해 트랙션 계수가 작아진다.

참고문헌

- (1) Sadeghi, F., Dow, T. A. and Johnson R.R., 1987, "Thermal Effects in Rolling/sliding Contacts: Part3 - Approximate Method for Prediction of Mid-Film Temperature and Sliding Traction," *ASME J. Tribol.*, Vol. 109, pp. 519~524.
- (2) Sadeghi, F., Sui, P. C., 1990, "Thermal Elasto hydrodynamic Lubrication of Rolling/Sliding Contacts," *ASME J. Tribol.*, Vol. 112, pp. 189~195.
- (3) Pandey, R. K., Ghosh, M. K., 1998, "Temperature Rise due to Sliding in Rolling/Sliding Elasto hydrodynamic Lubrication Line Contacts: An Efficient Numerical Analysis for Contact Zone Temperatures," *Tribology International*, Vol. 31, pp. 745~752.
- (4) Ma, M. T., 1998, "Effects of the Non-Newtonian Behavior of Lubrication on the Temperature, Traction, and Film Thickness in an Elliptical EHD Contact Under Heavy Loads," *ASME J. Tribol.*, Vol. 120, pp. 685~694.
- (5) Kaneda, M., Nishikawa, H., Kameishi, K. and Matuda, K., 1996, "Abnormal Phenomena Appearing in EHL Contacts," *ASME J. Tribol.*, Vol. 118, pp. 886~892.
- (6) Shiyue, Q., Peiran, Y. and Feng, G., 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.
- (7) Ehret, P., Dowson, D. and Taylor, C. M., 1999, "Transient EHL Solutions with Interfacial Slip," *ASME J. Tribol.*, 121, pp. 886~892.
- (8) Kudish, I. I., 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.
- (9) Yagi, K., Ito, Y., Momozono, S., Kyogoku, K. and Nakahara, T., 1999, "Temperature Measurements of Oil Film and Surface in Point Contact EHL under High Slip Ratio Condition," *Proc. JAST Trib. Conf.*, Tokyo, pp. 165~166.
- (10) Cameron, A., 1951, "Hydrodynamic Lubrication of Rotating Disks in Pure Sliding. A New Type of Oil Film Formation," *J. Inst. Petrol.*, pp. 37~471.
- (11) Cameron, A., 1966, "Principle of Lubrication," LONGMANS, pp. 147~150
- (12) Dyson, A., Wilson, A. R., 1968~69, "Film Thicknesses in Elasto hydrodynamic Lubrication at High Slide/Roll Ratio," *Proc. Instn. Mech. Engrs.*, Vol. 183, Pt 3p, pp. 81~97.
- (13) Wedeven, L. D., 1970, "Optical Measurements in Elasto hydrodynamic Rolling-Contact Bearing," University of London.
- (14) Auserman, V. K., Nagaraj, H. S., 1976, "Infrared Temperature Mapping in Elasto hydrodynamic lubrication," *ASME J. Tribol.*, APRIL, pp. 236~243.