한국정밀공학회지 제 30권 8호 pp. 847-853 August 2013 / 847
J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 30, No. 8, pp. 847-853 http://dx.doi.org/10.7736/KSPE.2013.30.8.847
ISSN 1225-9071(Print), ISSN 2287-8769(Online)

탄성중합체 표면의 마이크로 딤플에 의한 발열저감효과

The Effect of Reduction of Friction Heat by Micro Dimple on the Sliding Surface of Elastomer

김건완[1], 유명호[1], 이택성[2,✉]
Gun Wan Kim[1], Myung Ho Yoo[1], and Taek Sung Lee[2,✉]

1 ㈜에스제이테크 (SJTECH Co., Ltd.)
2 한국산업기술대학교 기계설계공학과 (Department of Mechanical Design Engineering, Korea Polytechnic Univ.)
✉ Corresponding author: lts724@kpu.ac.kr, Tel: +82-31-8041-0423

Manuscript received: 2013.2.27 / Revised: 2013.4.17 / Accepted: 2013.7.3

Micro-dimples on sliding surfaces have been investigated to reduce the frictional forces on metal bearing surfaces; however, for an elastomer, such as thermoplastic polyurethane (TPU), this has not been studied. The material properties of an elastomer are affected by temperature, and this can shorten the life of the elastomer. In this paper, micro-dimples were applied on the surface of an elastomer in order to reduce the frictional heating, which was experimentally investigated using pin-on-disk apparatus while the surface temperature was measured. To obtain optimal design parameters, the design of the experiment was applied, and the shape of the section, size, depth and density of micro-dimples were selected as the design parameters. The results show that the size of the dimple is the most important design parameter.

Key Words: Elastomer (탄성중합체), Micro Dimple (마이크로 딤플), Friction (마찰), Reduction of Heat (발열저감)

1. 서론

마이크로 딤플(micro dimple)은 금속 마찰면의 마찰력을 감소시키는 효과가 있다고 연구되었다. Etsion[1,2]은 레이저 가공법을 이용하여 메커니컬 실, 스러스트 베어링 표면에 미세 딤플을 가공하면 마찰력을 감소시키고 수명이 증가한다고 발표하였다. Over[3]등은 딤플 내부의 캐비테이션(cavitation) 효과로 인하여 어느 정도 하중을 지지할 수 있다고 발표하였다. Fowell[4]등은 여러개의 포켓이 있는 평행 베어링의 해석에 1차원 레이놀즈 방정식과 단순한 캐비테이션 조건을 적용하여 하중지지와 마찰력 감소에 미치는 각종 설계변수들의 영향을 조사하였다. 박태조[5,6]등은 그루브 형상이 유동 및 윤활 특성에 미치는 영향을 조사하였다. 미세 딤플이 있는 평행 스러스트 베어링의 윤활특성을 해석하였으며, 딤플의 깊이, 위치, 수, 폭 및 유막두께에 따라서 압력분포가 아주 크게 변화한다고 하였다. 김성기[7]등은 그리스를 유막으로 사용하는 경우 하중이 크고 회전속도가 느릴 때 딤플의 효과로 인하여 마찰계수가 감소된다고 하였다. 채영훈[8] 등은 혼합 윤활 상태에서 미세 딤플의 밀도에 따른 마찰력 변화를 시험을 통해 분석하였으며, 딤플이 없는 것에 비해 마찰계수 저감효과를 보인다고 하였다. 또한 미세 딤플에 대한 크기효과(size effect)를 연구하였으며, 마찰성능의 주요 인자는 딤플직경을 딤플피치로 나눈 값이고, 0.5일 때 마찰성능이 향상됨을 실험을 통해 확인하였다. 이재봉[9] 등은 엔지니어링 플라스틱 표면에 레이저를 이용하여 마이크로 딤플을 가공하고 마찰 거동을 관찰하

였다. 작은 딤플의 크기는 접촉면적의 변화로 인한 마찰의 변화를 일으키기에는 너무 작으므로 같은 밀도의 딤플에 대해서 슬라이딩 사이클에의한 마찰계수 변화는 크게 영향을 받지 않음을 ball-on-disc 시험으로 확인하였다.

하지만 이와 같은 연구는 마찰감소를 목적으로 대부분 금속 또는 엔지니어링 플라스틱 재료에 관한 것이며 탄성중합체(elastomer) 재료에 대한 연구는 진행된 바가 없다. 탄성중합체 중에서 합성고무와 TPU (Thermoplastic Polyurethane)는 유체의 밀봉을 위해 산업현장에 많이 적용되는데 그중 상대물과 접촉되어 마찰에 의해 열이 발생됨에 따라 탄성중합체 재료의 수명에 영향을 주게 된다.

본 연구에서는 탄성중합체 재료 표면에 다양한 형상과 밀도의 마이크로 딤플을 가공하고 윤활실험을 실시하여 마찰면에서 온도를 측정하고, 실험계획법을 이용한 분석을 통하여 발열량이 적은 마이크로 딤플의 형상과 설계변수인 딤플의 크기, 깊이, 밀도의 최적조건을 제시하고자 한다.

2. 실험

2.1 시험편

본 실험에 사용된 시험편은 Fig. 1과 같이 직경 8 mm, 길이 12 mm인 치수를 갖고 마찰면에 마이크로 딤플 패턴을 갖고 있으며, 반대방향에는 마찰로 인한 발열을 측정하기 위한 온도센서(PT 100 Ω type, 열전대)를 삽입할 수 있도록 자리를 마련하였고 온도센서의 직경은 2.3 mm이며, 시험편의 수축을 최소화하기 위해 일정한 살 두께를 갖도록 설계하였다. 시험편의 재료는 TPU이며 사출성형에 의해 제작하였고, 균일한 형태의 요철이 가공된 금형 코어가 금형에 조립되어 사출성형을 하게 되면 요철 형상의 금형 코어로부터 TPU 시험편으로 전사(transfer)되어 딤플 패턴을 얻었다.

Table 1과 Table 2의 형상은 SEM으로 측정한 사각형 단면의 딤플이며 본 연구에서는 Fig. 2와 같이 사각형, 삼각형, 사다리꼴과 같은 3가지 단면의 형상을 갖는 딤플 시험편을 준비하였고, 반원단면의 딤플은 TPU 시험편에 전사 될 것을 고려하였을 때 돔 형상으로 금형 코어에서 가공이 되어져야 하는데 가공비과 가공시간 등 제작에 비효율적인 부분이 많아 본 실험에서 제외하였다.

딤플의 설계인자와 수준으로는 크기 50-150 ㎛, 깊이 25-75 ㎛, 밀도 20-40 %로 설정하였으며, Table

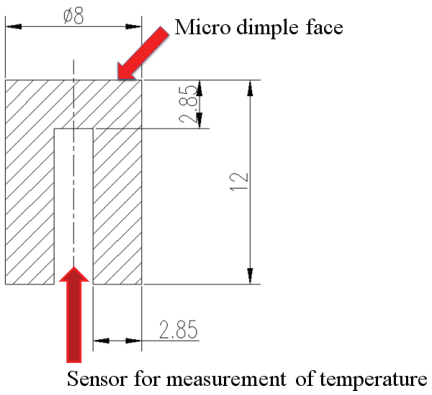


Fig. 1 Drawing of specimen

Table 1 SEM photograph of micro prominence on mold surface

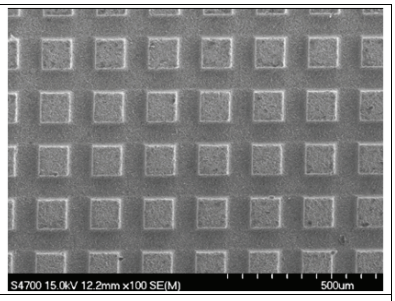
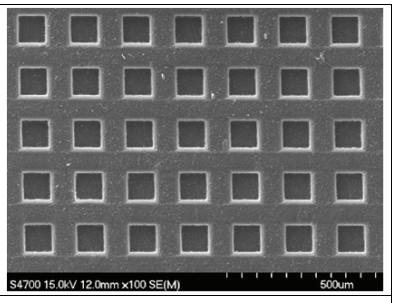
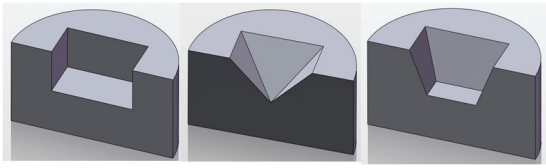
Photograph (x100)	
Size[㎛]	96
Depth[㎛]	49
Pitch[㎛]	180

Table 2 SEM photograph of micro dimple on specimen

Photograph (x100)	
Size[㎛]	95
Depth[㎛]	47
Pitch[㎛]	179

1과 Table 2에서 딤플은 크기 100 ㎛, 깊이 50 ㎛,간격 180 ㎛으로 설계되었는데 간격 180 ㎛은 딤플이 가공될 전체 면적에서 딤플이 차지하는 면적으로



(a) Rectangle (b) Triangle (c) Trapezoid

Fig. 2 Shape of sections of various micro dimple

Table 3 Experimental condition for friction test

Section	Parameters	Condition
Specimen	Material	TPU
	Specific gravity[g/㎤]	1.20
	Hardness[IRHD]	95
	Tensile strength[MPa]	61.5
	Ultimate elongation[%]	436
	Diameter[mm]	8
	Quantity[EA]	3
Disc	Material	SM45C
	Surface roughness[㎛]	Ra 0.1
	Sliding track[mm]	50
Dimple	Size[㎛]	50-150
	Depth[㎛]	25-75
	Density[%]	20-40
Test conditions	Contact pressure[MPa]	6.3
	Sliding velocity[m/s]	0.5
	Lubricant	ISO VG46
	Temperature	Room temp.

밀도 30 %의 경우에 해당된다.

딤플의 형상과 크기는 딤플의 면적과 관계된다. 밀도는 딤플 하나의 면적(A)과 피치(P)로부터 아래의 식으로 계산된다.

$$\rho = \frac{A}{P^2} \quad (1)$$

Table 1은 금형 코어에 프로파일 연삭가공하여 얻은 요철의 형상과 치수이며, Table 2는 사출성형으로 성형된 TPU 시험편의 딤플 형상과 치수를 나타내었는데 측정된 치수를 보면 TPU 시험편의 딤플 형상은 금형으로부터 사출성형을 통해 99 %의 전사율을 갖는 것을 확인 할 수 있다. 시험편에 관한 조건은 Table 3과 같다.

2.2 실험방법

마이크로 딤플의 발열저감 특성을 평가하기 위하여 flat-on-flat 접촉형태인 pin-on-disc 시험장치를 Fig. 3과 같이 고안하였다. 시험편은 탄성중합체 재료로 마찰로 인한 마모분이 발생될 것을 고려하여 시험편을 아래에 설치하였다. 또한 수직하중에 대한 시험편의 변형을 최소화하기 위하여 Fig. 4와 같이 시험편을 지그에 조립하여 시험편을 준비하였고 디스크와 시험편의 마찰면에서 발생되는 열로 인해 상승하는 온도측정을 위하여 온도센서를 시험편 삽입구에 완전히 밀착되도록 설치하였다. 마찰시험을 위하여 시험기는 Fig. 5와 같이 ASTM G99의 pin-on-disc 시험방법에 준하여 제작된시험기를 사용하였으며, 시험조건은 Table 3에 나타내었다.

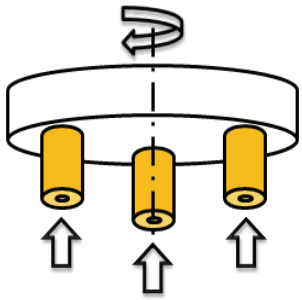


Fig. 3 Schematic for pin-on-disc experiment

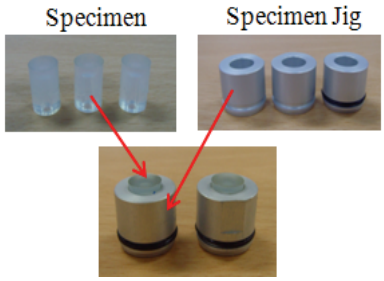


Fig. 4 Specimen jig

탄성중합체 재료의 pin-on-disc 시험조건은 규정되어 있지 않아 유압 왕복동 기관에 사용하는 실(seal)의 성능평가 표준시험방법인 KS B ISO 7986을 활용하여 접촉면압이 6.3 MPa에서 실험되도록수직하중을 950 N을 가압하였고, 미끄럼 속도는 0.5 m/s로 설정하였다.

디스크와 시료가 오일에 잠긴 상태에서 시험을 하였고 오일은 국제규격 동점도 46의 오일인 ISOVG46을 사용한 것으로 40도의 온도에서 동점도가 46 cSt ±10%의 점도를 갖는 오일을 말하며,

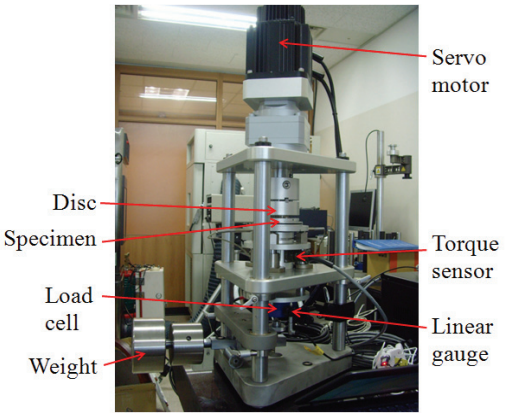


Fig. 5 Pin-on-disc type friction tester

시험편을 교체하고 새로운 시험을 할 때마다 75cc의 새로운 오일을 사용하였다.

새로운 시험편마다 100 m 시운전 후 데이터를 수집하였고 시험종료 거리는 15 km로 설정하였다.

3. 실험결과

3.1 사각단면 형상의 마이크로딤플 설계인자에 따른 발열온도

Table 4는 Table 3에 나타낸 마이크로 딤플의 인자와 수준을 기준으로 실험횟수를 줄이기 위한 실험계획법상의 직교배열표이며, 3인자 2수준 완전요인배치로 설계하였다. 9번에서 11번 시료는 중간 사이즈에 대한 발열저감특성을 보고자 중앙점에서 3회 반복실험을 하였다. 분석은 실험계획법 상용 통계프로그램인 MINITAB을 사용하였다. 반응치 Y는 디스크와 시험편에서 마찰로 인해 발생되는 발열온도로 하였고, Table 4의 발열온도는 시험종료 거리인 15 km의 온도값이다.

Fig. 6은 Table 4에서 작성된 11가지의 시험편에 대하여 시험거리에 따른 발열온도를 그래프로 나타낸 것이다. 크기 50 ㎛, 깊이 25 ㎛, 밀도 40 %에서 발열온도가 가장 낮았고, 다음으로 크기 50 ㎛, 깊이 75 ㎛, 밀도 40 %에서 발열온도가 낮았다. 딤플을 적용하지 않은 시험편에서는 발열온도가 61.5 ℃였는데, 오히려 크기 150 ㎛, 깊이 75 ㎛, 밀도 40 %의 경우와 크기 100 ㎛, 깊이 50 ㎛, 밀도 30 %의 경우처럼 딤플의 적용으로 발열저감 효과를 보지 못한 경우도 있다. 더욱이 일정거리가 지난 후에도 안정된 곡선을 형성하지 못하고 온도가 상승하고 있는 것을 볼 수 있다.

Table 4 Measured temperature of each model at full factorial design (Rectangular section)

No.	Size[㎛]	Depth[㎛]	Density[%]	Temp.[℃]
1	50	25	20	59.9
2	150	25	20	56.5
3	50	75	20	47.5
4	150	75	20	55.3
5	50	25	40	47.2
6	150	25	40	55.1
7	50	75	40	47.5
8	150	75	40	61.5
9	100	50	30	62.4
10	100	50	30	60.0
11	100	50	30	58.9

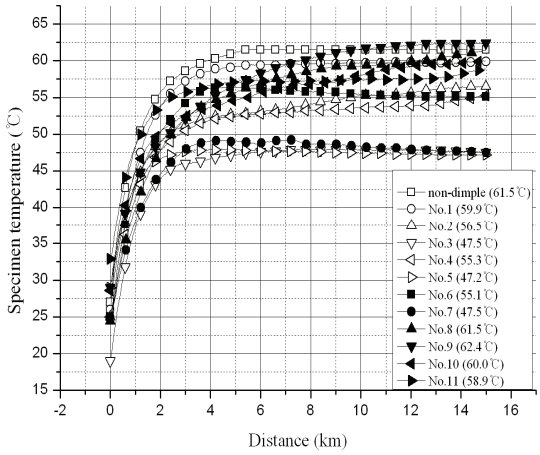


Fig. 6 Temperature on sliding surfaces versus distance

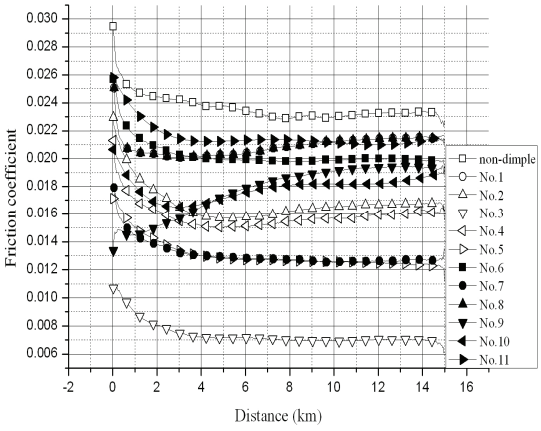


Fig. 7 Friction coefficient on sliding surfaces versus distance

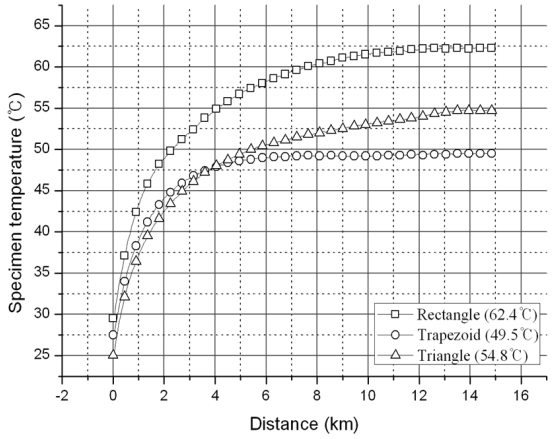


Fig. 8 Temperature on sliding surfaces with various dimple shapes

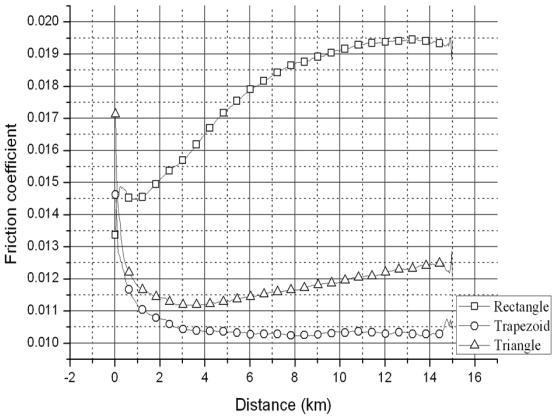


Fig. 9 Friction coefficient on sliding surfaces with various dimple shapes

Fig. 7은 시험거리에 따른 마찰계수의 변화를 나타내었으며 발열온도의 결과와 같은 경향을 보이고 있으며, 딤플을 적용하지 않은 시험편은 가장 높은 마찰계수를 나타내고 있다.

3.2 마이크로딤플의 형상에 따른 발열온도

마이크로 딤플의 단면 형상을 사각형, 삼각형, 사다리꼴의 3가지로 하고, 크기 100 ㎛, 깊이 50 ㎛, 밀도 30 %인 딤플 시험편을 만들었다. Fig. 8에서는 딤플의 형상별로 시험거리에 따른 발열온도를 나타내었으며 결과를 보면 사다리꼴 단면의딤플이 발열온도가 가장 낮고 안정적으로 나타났으며, 사각형 단면의 딤플이 가장 높은 발열온도를 보이고, 삼각형 단면의 딤플은 발열온도가 지속적으로 상승하는 경향을 보였다.

Table 5 Estimated effect and coefficient of Y

Term	Coefficient (coded units)	Coefficient (uncoded units)	T	P
Constant	53.8125	88.9250	84.83	0.000
size	3.2875	-0.1520	5.18	0.014
depth	-0.8625	-0.5210	-1.36	0.267
density	-0.9875	-1.0440	-1.56	0.217
size*depth	2.1625	0.0017	3.41	0.042
size*density	2.1875	0.0044	3.45	0.041
depth*density	2.5375	0.0102	4.00	0.028
Ct Pt	6.6208	6.6208	5.45	0.012

Fig. 9에서는 딤플의 형상별로 시험거리에 따른 마찰계수를 나타내었는데 발열온도의 결과와 같은 경향을 보인다.

또한 마멸량은 1/10,000 g 저울에서 측정하였으나, 마멸량은 측정되지 않을 정도로 작았다.

4. 실험계획법을 이용한 고찰

본 연구에서는 Table 4와 같이 2^3 완전요인 설계에 의하여 중앙점을 포함한 11가지의 시험편을 제작하였고, pin-on-disc 실험을 통하여 발열온도 값(반응치 Y)를 얻었다.

Table 5의 Coefficient는 수학적 모형의 해당 항에 붙는 값이고, T값은 계수를 표준오차로 나눈 값으로 계수에 대한 검정통계량이며, P값은 검정 통계량에 대한 확률 값이다. 각 요인의 영향력을 판단하는 기준으로 P값의 크기로 결정하는데 일반적으로 유의수준 0.05(5 %)를 기준으로 P값이 0.05보다 크면 유의하지 않고 0.05보다 작으면 해당 요인은 유의하다.

중앙점 (Ct Pt)의 P값이 0.05보다 작게 나왔으므로 유의한 인자로 판단할 수 있다. 중앙점이 유의하게 나왔으므로 곡률효과가 있다는 것을 확인할 수 있다. 곡률효과가 나타나면 2차식의 수학적 모형을 도출하기 위해 반응표면분석법을 진행하여야 하나 본 연구에서는 발열온도가 낮으면 낮을수록 좋은 특성을 갖는 경우이므로 곡률효과에 따른 중앙의 구간은 큰 비중을 갖지 않는다고 보았다.

Fig. 10에서는 주효과도 그래프를 나타내었는데 깊이와 밀도는 큰 영향을 주는 인자가 아니고, 가장 발열온도에 영향을 주는 인자는 딤플의 크기이

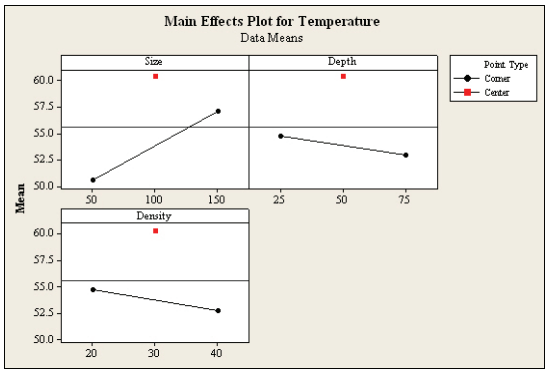


Fig. 10 Main effects plot for Temperature

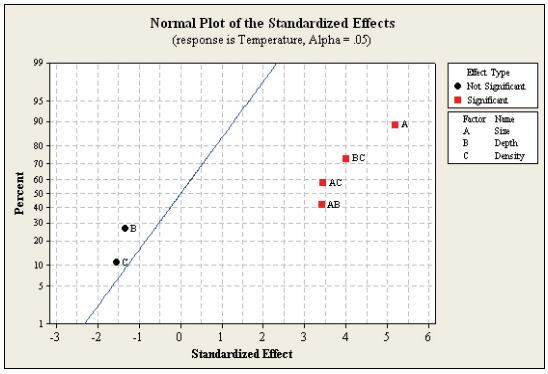


Fig. 11 Normal plot of the standardized effects

며, 크기가 작을수록 발열저감효과는 좋고 마찰계수도 낮게 나타남을 확인할 수 있었다.

본 연구에서는 마이크로 딤플의 크기 50 ㎛, 깊이 75 ㎛, 밀도 40 %에서 발열온도가 가장 낮게 나타났다. 반면, 마이크로 딤플의 크기 100 ㎛, 깊이 50 ㎛, 밀도 30 %인 중앙값에서 높은 발열온도가 나타났다. 마찰면에서 직선 운동시 딤플내의 오일이 하나의 와류를 형성하여 회전유동을 하게 되는데 이로 인하여 유체 압력의 크기가 달라진다. 탄성중합체 재료의 특성상 압력을 받으면 딤플의 형상의 변형이 생기는데 이는 비선형성의 원인이 될 수 있으며, 중앙점에서는 좋은 효과를 주지 못한 것으로 나타났다.

Fig. 11은 정규분포도를 나타내었으며, • 표시는 유의하지 않은 인자를 의미하고 주인자 중 마이크로 딤플의 크기만이 유의하게 나타났지만, 깊이와 밀도는 이를 포함한 교호효과들이 모두 유의하게 나타났으므로 식(2)와 같이 수학적모형을 나타내기 위해서는 고려해야 하는 인자이다.

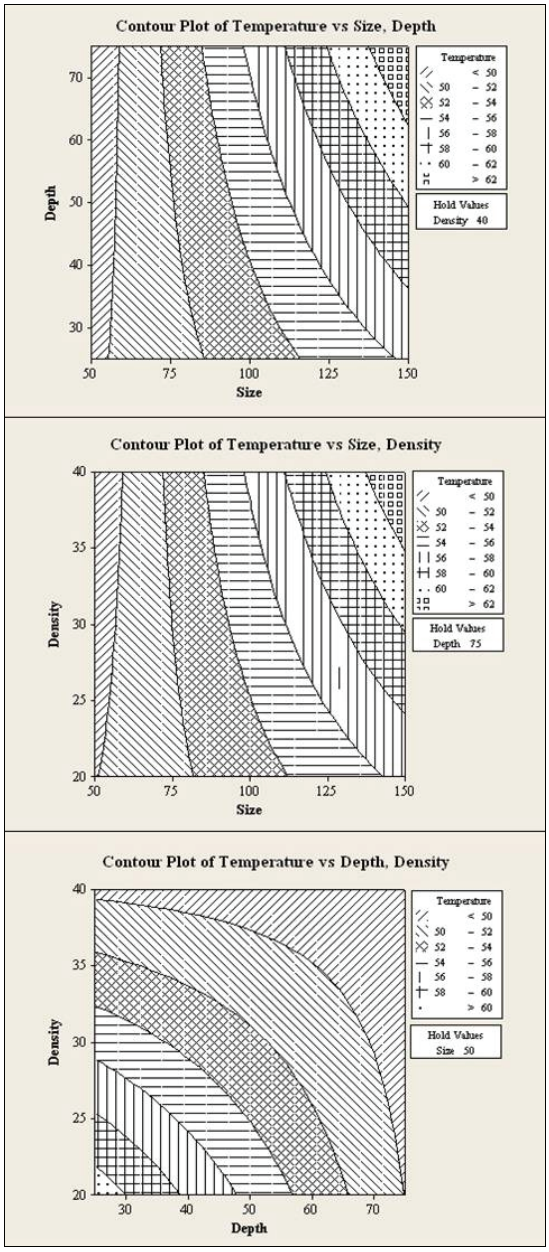


Fig. 12 Contour plot of temperature vs two design factors (unit of shapes:㎛, unit of density:%)

설계인자인 크기, 깊이, 밀도와 발열온도 T의 수학적 모형은 다음과 같다.

Fig. 12는 발열온도에 대하여 각 설계인자별로 발생온도의 등고선도를 나타내었으며, 딤플의 크기는 작을수록 발열저감효과가 좋은 것을 볼 수 있다.

$$
\begin{aligned}
T = {} & 88.925 \\
& - 0.152 \times size \\
& - 0.512 \times depth \\
& - 1.044 \times density \\
& + 0.0017 \times size \times depth \\
& + 0.0044 \times size \times density \\
& + 0.0102 \times depth \times density
\end{aligned} \tag{2}
$$

5. 결론

탄성중합체의 윤활면에서 마이크로 딤플이 발열량 저감에 미치는 영향을 파악하기 위한 실험을 수행하였다. 딤플과 무딤플의 결과를 보면 윤활유 저장소인 딤플의 역할로 인하여 마찰계수와 발열온도가 저감되는 효과가 있는 것으로 나타났다.

발열온도와 마찰계수의 측정결과를 보면 마찰계수의 변화가 발열온도의 결과에 반영됨을 볼 수 있었다.

실험분석과 설계조건을 찾기 위해 실험계획법을 사용하였다. 딤플의 크기가 깊이와 밀도보다 발열량 저감에 큰 영향을 주며, 딤플의 형상에서는 사다리꼴 단면의 딤플이 가장 효과적임을 볼 수 있었다.

본 논문에서는 탄성중합체의 윤활면에서 마이크로 딤플의 유효성을 평가하는 방법을 제시하였으며, 이와 같은 방법을 활용하여 추후 가장 안정적인 사다리꼴 단면 형상의 설계인자에 따른 연구가 요구된다.

후 기

본 연구는 지식경제부 2010년 ATC사업으로 수행되었습니다. 연구를 지원해 주신 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참고문헌

1. Etsion, I., Kligerman, Y., and Halperin, G., “Analysis and Experimental Investigation of Laser-Textured Mechanical Seal face,” Tribology Transactions, Vol. 42, No. 3, pp. 511-516, 1999.
2. Brizmer, V., Kligerman, Y., and Etsion, I., “A Laser Surface Textured Parallel Thrust Bearing,” Tribology Transactions, Vol. 46, No. 3, pp. 397-403, 2003.
3. Olver, A. V., Fowell, M. T., Spikes, H. A., and Pegg, I. G., “Inlet Suction’, a Load Support Mechanism in Non-convergent, Pocketed, Hydrodynamic Bearings,” Proc. IMechE, J. of Eng. Tribology, Vol. 220, No. 2, pp. 105-108, 2006.
4. Fowell, M. T., Olver, A. V., Gosman, A. D., Spikes, H. A., and Pegg, I. G., “Entrainment and Inlet Suction: Two Mechanisms of Hydrodynamic Lubrication in Textured Bearings,” ASME J. of Tribology, Vol. 129, No. 2, pp. 336-347, 2007.
5. Park, T. J. and Hwang, Y. G., “Lubrication Analysis of Hydraulic Spool Valve with Groove Cross Sectional Shapes,” J. of the KSTLE, Vol. 25, No. 1, pp. 13-19, 2009.
6. Park, T. J., Hwang, Y. G., Sohn, J. D., and Chung, H. G., “CFD Analysis of an Infinitely Long Slider Bearing with Two-Dimensional Micro-Pockets,” J. of the KSTLE, Vol. 25, No. 1, pp. 43-48, 2009.
7. Kim, S. G., Song, K. C., Kim, S. B., and Chae, Y. H., “Effects of Surface Texturing under Grease Lubrication,” J. of the KSTLE, Vol. 24, No. 5, pp. 234-240, 2008.
8. Chae, Y. H. and Kim, S. S., “Friction Characteristics for Density of Micro Dimples Using Photolithography,” Transactions of the KSME A, Vol. 29, No. 3, pp. 411-417, 2005.
9. Lee, J. B. and Cho, M. H., “The Effect of Surface Micro Texturing on Friction and Wear of Polyoxymethylene,” J. of the KSTLE, Vol. 25, No. 3, pp. 141-149, 2009.