

레이저에 의해 패터닝 된 바늘과 탄성중합체와의 마찰 효과

김재구^{✉*}, 노승국^{**}, 박종권^{**}, 조성학^{*}, 황경현^{*}^{*}한국기계연구원 나노융합기계연구본부, ^{**}한국기계연구원 첨단생산장비연구본부

Investigation of friction effects between needles patterned using laser and elastomer

Jaegu Kim^{*}, Seungkook Ro^{**}, Jongkweon Park^{**}, Sunghak Cho^{*}, Kyunghyun Whang^{*}^{*}Nano-Convergence Mechanical Systems Research Division^{**}Advanced Manufacturing Systems Research Division

Abstract

The friction force of patterned needle in elastomer have been investigated to verify the application for bio and plastic industry. The micro pattern on the needle surface were prepared by 266 nm, 20 ns laser and 800 nm, 220 fs laser, which were able to generate the different surface roughness. The friction force was measured by the load cell of 10 N capacity. As the results, the friction force of no patterned needle is almost constant during the needle penetrates the silicone rubber sample. However, the needle having asperities shows the variation of the friction force. The higher the surface roughness is, the smaller the friction force is until the surface roughness is very high. In our experiment conditions, the reduction of the friction force by 20 % compared to no pattern needle was achieved with straight and 50 μm discrete line generated by 266 nm, 20 ns laser.

Keywords: Needle patterning(바늘 패터닝), Elastomer(탄성중합체), Laser surface texturing(레이저 표면 텍스처링), Laser processing(UV 레이저 가공), Friction force(마찰력)

1. 서론

레이저의 미세 패터닝은 미세한 기하학적 형상에 의해 산업의 여러 분야에 사용되고 있다. 예를 들면, 회전 기계 요소 부품에 미세 패터닝을 부여하면 패터닝에 의해 윤활유를 저장할 수 있거나, 마찰 마모에 의해 탈락된 미세 파티클을 저장할 수 있어 효율 및 수명을 연장시킬 수 있다. 고속회전체의 경우는 뉴토니안 층류 흐름에서 동수압을 생성하여 부하를 증가시켜 피스톤 링, 베어링 및 유압실링에 응용된다.¹⁻⁵

바늘의 경우 생체 내에 삽입되어 약물 투여나 생체조직을 떼어 내는 데에 활용 되는 부품으로 가능한 한 원하는 목적지에 정확히 도달하면서 진단 및 치료하는 것이 중요하다. 하지만 바늘이 생체조직 내로 진행되면서 발생하는 삽입력에 의

해 피부의 변형 및 바늘의 휨이 나타나며, 이에 의해 목적지와 위치 오차가 발생하며 이를 최소화하여야 한다. 이 힘은 바늘 끝 형상에 의한 초기 관통력과 바늘이 진행하면서 나타나는 마찰력에 의해 결정되며 이를 최소화 할수록 피부의 손상을 적게 할 수 있고 목적하는 곳에 휘어짐 없이 도달 가능하다.⁶⁻⁷

본 실험에서는 바늘 표면에 레이저를 사용하여 미세 패터닝을 부여하고 바늘이 재료에 삽입되어 진행될 때 나타나는 마찰력의 효과를 실험적으로 수행하고 분석 하였다. 실제 생체에서의 응용을 위해서는 마찰력 효과 분석시 생체재료를 사용하여야 하지만 본 실험에서는 실리콘 고무에 우선 적용하여 효과를 살펴보았다. 금속 표면의 거칠기와 실리콘 고무와 같은 탄성중합체의 동적 마찰력 분석은 고무실링, 타이어, 고무패드 성형 등에도 응용 분야가 있으므로 유의성이 있다.^{1,8,9}

투고일 : 2012년 7월 09일 심사완료일 : 2012년 9월 19일

계재승인일 : 2012년 9월 21일

교신저자 : 김재구 ✉ gugu99@kimm.re.kr

2. 실험 장치 및 방법

2.1 패터닝 실험

본 실험에 사용된 바늘의 크기는 사용된 바늘의 크기는 18 Gauge(Outer diameter 1.27 mm)이며 소재는 STS 304이다. 이의 겉 표면에 UV 266 nm, 20 ns의 레이저와 IR 800 nm, 220 fs 레이저를 사용하여 20 μm 근방의 선폭으로 대기중에서 패터닝을 수행하였다. 패터닝 된 형상은 Fig. 1과 같이 원주를 16 등분하고 바늘 끝에서 10 mm 정도 떨어진 곳에서 시작하여 길이 10 mm를 회전 없이 또는 2회전하여 직선 형태 및 점선 형태로 가공한 형상이다.

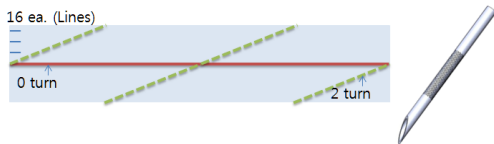


Fig. 1 Pattern geometry of schematic illustration of patterned needle.

바늘의 가공시 직선과 회전 운동이 동시에 일어나므로 레이저 초점위치와 가공면의 위치를 항상 일정하게 유지하는 것이 중요하며, 이를 위해 Fig. 2와 같이 회전 축에 고정되는 바늘부분과 베어링에 의해 회전방향으로 구속되지 않은 반대편의 양쪽 부분에 XY 축으로 미세 조절할 수 있는 스테이지를 추가하여 초점위치 오차를 최소화 하였다.

사용된 레이저의 조건으로는 266 nm의 경우 30,000 Hz, 20 ns, 64 μJ/pulse, 0.5 mm/s의 선속도로 바늘을 회전과 이송을 동시에 구동하여 가공하였고, 800 nm의 펄스 레이저로는 220 fs, 100 kHz, 5 μJ/pulse, 0.5 mm/s를 적용하였다.

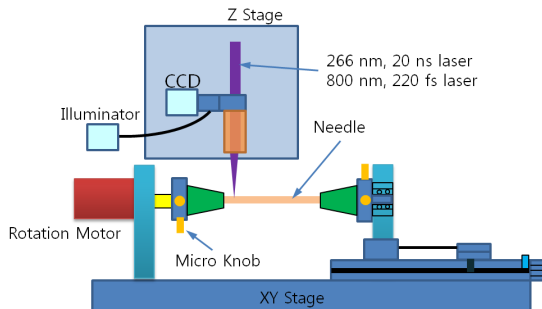


Fig. 2 Schematic of the patterning setup.

가공 후에는 가공부 주위에 비산되는 파티클을 없애기 위해 1 μm 다이아몬드 서스펜션 용액을 이용하여 300 rpm, 5회전 왕복을 총 100번을 수행하였다.

패터닝된 부위는 광학현미경 및 전자주사현미경(SEM)을 통하여 표면을 관찰 하였다.

2.2 바늘의 마찰력 실험

마찰력 측정 대상 재료로 공업용 연질의 실리 콘 고무를 사용하였다. 정확한 물성치를 알 수는 없지만, 본 연구의 목표가 패턴 유무에 따른 힘의 상대적 비교이므로 분석에는 큰 무리가 없으리라 판단된다.

Fig. 3은 힘 측정 장치 및 측정 방식을 보여준다. 힘 측정 장치는 최대 10 N을 측정할 수 있는 로드셀이 부착된 것으로, 500 mm/min의 속도로 35 mm를 수직으로 하강하면서 패턴이 있는 부분까지 완전히 관통한 후 1 초의 휴지 시간을 가진 후 다시 상승 하는 방식을 취하였다.

샘플의 고정은 두께 5 mm의 샘플을 직경 3 mm, 피치 5 mm 간격으로 3 × 3개 구멍 나 있는 상하판 사이에 삽입하고, 상하판 사이의 간격을 5 mm 간격보다 작게 함으로써, 샘플에 일정 압력을 가하도록 하였다.

측정은 한 구멍에 두 번 측정하였으며, 이후 구멍 위치를 바꿔가면서 이를 3회 연속 수행하였다. 따라서 한 구멍의 두 번째 측정은 첫 번째에 의해 관통된 샘플의 위치를 다시 한 번 관통하는 것이다. 첫 회에서의 실험은 바늘을 홀더에 삽입하는 과정에서 측정 센서가 다소 흔들려서 측정 신호가 이상한 형태로 출력 되었으며, 이후 2회 및 3회의 실험은 절대 값의 미세한 차이가 있으나 경향은 일치함을 보였다.

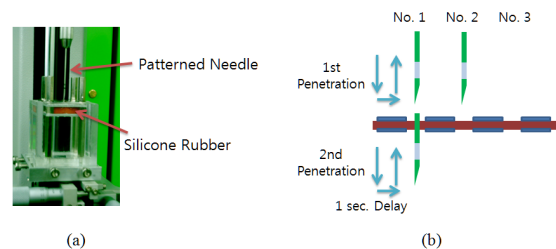


Fig. 3 Actual friction testing setup (a) and schematic of the experimental method (b).

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 UV 레이저에 의한 패터닝

Fig. 4는 266 nm의 레이저로 패터닝 된 바늘 표면의 확대 사진으로 선폭은 약 20 μm 이다. Fig. 4 (a)는 바늘을 회전과 직선 운동 하면서 가공한 패턴의 SEM 사진으로 폴리싱 전의 표면 상태이고, Fig. 4 (b)는 Fig. 4 (a)에 대해 폴리싱 한 후의 상태이다. 폴리싱 한 후 주변의 파티클들은 모두 없어졌지만, 가공 중에 나타난 반충 압력에 의한 용융물의 분출과 이의 재응고로 형성된 용기 형상은 남아 있다. 50 μm 의 단속 형상의 패턴 Fig. 4 (c)는 Fig. 4 (b)와 유사한 양상을 갖고 있지만 Fig. 4 (d)의 경우 재료가 완전히 어블레이션 되지 못하고 용기된 형상만을 보이고 있다. 이는 충분한 열원이 표면에 조사 되지 못하여 증발온도 및 압력까지 도달 하지 못하였기 때문이라 생각 된다.

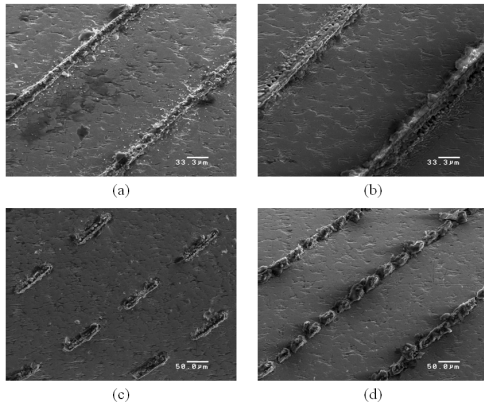


Fig. 4 SEM images of different patterns created on the needle by 266 nm nanosecond laser. Oblique pattern before polishing (a), after polishing (b), 50 μm discrete pattern after polishing (c) and 25 μm after polishing (d).

상기 패터닝 된 형상에 따른 마찰력의 변화를 파악하기 위해 먼저 패터닝이 되지 않은 바늘에 대해 마찰력 측정을 수행 하였다. Fig. 5와 같이 바늘이 샘플의 표면에 도달하고 침투하기 시작하면서부터 밀면에 돌출할 때까지는 힘의 증가가 계속 일어나며 완전히 관통된 후는 약간의 힘의 감소를 보이면서 이후 멈춰질 때까지 일정한 마찰력을 보이고 있다. 1초 정지 후 반대방향으로 이송할 때도 힘의 변화는 그다지 크지 않음을 볼 수 있다.

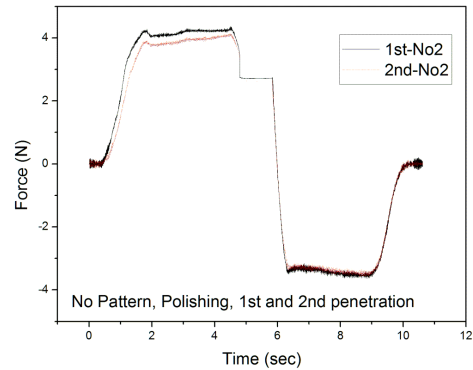


Fig. 5 The friction force against time at number of test times in case of no pattern needle.

일반적으로 실리콘 고무와 같은 탄성중합체와 금속과의 마찰은 다음과 같이 두 가지 성분의 합으로 나타난다.

$$F = F_1 + F_2 \quad (1)$$

F_1 은 접착의 성분이며 깨끗하고 평탄한 표면에서 지배적이며, F_2 는 탄성중합체가 거친 금속 표면을 지나갈 때 탄성 중합체 내부에서 일어나는 내부마찰에 의한 항목이며 점탄성계수에 의해 결정되는 히스테리시스 마찰 성분이다.

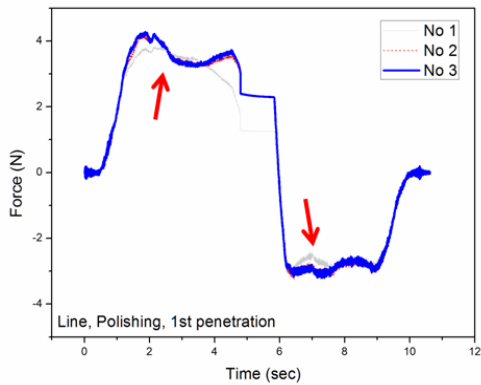
매끈한 표면에 낮은 이송 속도로 움직이는 경우 이는 높은 탄성영역에 있다고 할 수 있으며, 이 경우 마찰력은 F_1 이 큰 영향을 미치며 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.¹⁰⁻¹¹

$$F_1 = cS \quad (2)$$

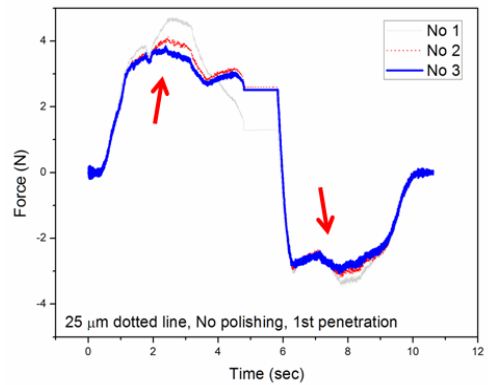
여기서 c 는 이송속도, 온도 및 체인과 금속표면과의 미소요소면적의 함수이며 실제 접촉 면적 S 는 이송방향에 법선으로 작용하는 응력, 고무의 탄성계수, 거칠기의 함수로 표현된다.

Fig. 5의 결과는 매끈한 표면의 낮은 속도에서의 마찰이므로 S 에 해당하는 응력의 변화, 거칠기 변화가 일정하여 마찰력의 변화가 없다고 설명할 수 있다. 두 번째 관통에서의 실험은 첫 번째의 관통에서 이미 구멍이 형성되어 있으므로 전반적인 힘의 크기가 첫 번째의 것에 비해 다소 작지만 경향은 거의 일치함을 알 수 있다.

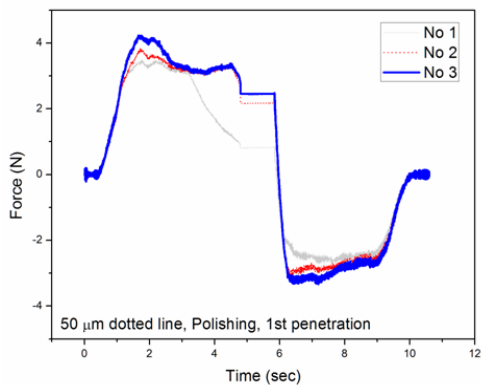
Fig. 6은 Fig. 4의 (b) 및 (c)의 형상으로 마찰력을 측정된 결과이다. 앞서 기술한 대로 첫 회의 측정결과는 측정센서의 오동작으로 인한 무의미한



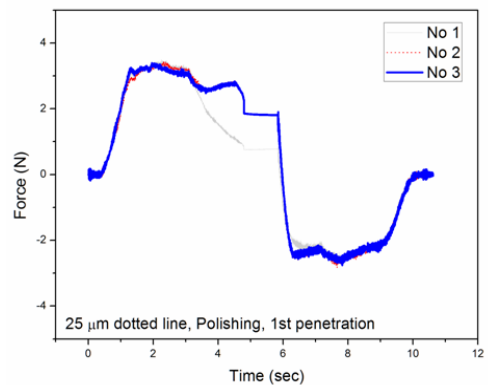
(a)



(a)



(b)



(b)

Fig. 6 The friction force against time at number of test times in case of the pattern of Fig. 4 (b)-(a) and Fig. 4 (c)-(b). Arrows indicate the onset of the force decrease.

Fig. 7 The friction force against time at number of test times in case of the pattern of Fig. 4 (d) before polishing (a) and after polishing (b). Arrows indicate the onset of the force increase.

결과로 희미하게 표시하였다. 2회 및 3회에서의 첫 번째 관통 실험에 의한 측정 결과는 패턴이 없는 것에 비해 바늘이 샘플 관통 후 진행하면서 약 20% 정도의 마찰력 감소를 보이고 있다. 이는 바늘 표면에 형성된 미세한 용기와 어블레이션 된 그루브의 영향으로 힘을 결정짓는 인자, 즉 F_1 의 c와 S에 동시에 영향을 줌과 동시에 바늘이 진행하면서 용기된 부분이 고무에 압축을 주고 용기가 지나간 뒷부분에서 복원력이 형성되어 바늘이 진행하는데 도움을 주는 히스테리시스 마찰 F_2 의 마찰력 증감이 복합적으로 작용하여 마찰력의 감소로 이어진다고 분석할 수 있다. 이러한 양상은 직선 형상이나 50 μm 의 단속 패턴 형상에서도 유사한 양상을 보였다.

하지만, Fig. 4 (d)의 형상으로 측정한 마찰력 실험결과에서는 Fig. 7 (a)에서와 같이 폴리싱을 하지 않은 거칠기가 매우 큰 경우 바늘이 샘플 관통 후 진행하면서 마찰력이 증가함을 보였다. 또한, Fig. 7 (b)과 같이 폴리싱을 한 후의 마찰력

에서도 감소의 경향을 보이지 않았다. 거칠기가 큰 경우는 F_2 에서 바늘이 진행하면서 용기에 의해 고무에 가하는 압축력이 크게 작용하고 고무 내부에서의 점탄성적 에너지 손실이 상대적으로 커 복원력이 작게 나타나 결과적으로 마찰력을 증가시키는 원인으로 분석된다.

이러한 실험 결과로 매끈한 표면 또는 과도한 거칠기를 가진 표면에 비해 어느 정도 이상의 표면 거칠기가 있는 바늘이 마찰력의 감소에 유리함을 알 수 있다.

3.2 펄스 레이저에 의한 패터닝

펄스 레이저에 의한 패터닝은 펄스 레이저의 특징, 즉 매우 짧은 시간동안에 광자 에너지와 금속 표면과의 반응이 일어남으로 인해 표면의 거칠기가 나노초 레이저에 비해 상당히 낮다. Fig. 8 (a)는 펄스 레이저에 의해 가공된 표면의 전자현미경 사진이며 확대한 사진을 Fig. 8 (b)에 나타내었다.

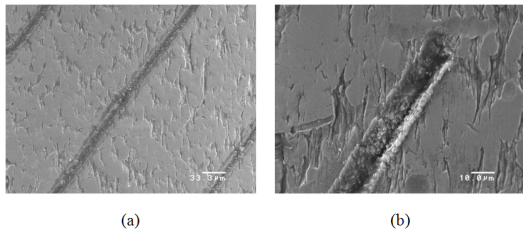


Fig. 8 SEM images of straight line created on the needle by 800 nm femtosecond laser (a) and enlarged image of line (b).

패터닝은 바늘을 x 축으로 이송만 하고 회전시키지 않은 직선 및 100 μm 단속선과 2회전 하면서 가공한 직선 및 100 μm 단속선으로 하였고 이에 대한 마찰력 실험 결과를 Fig. 9에 나타내었다.

실험 결과를 보면 직선의 패턴이 바늘의 진행 방향과 일치 하는 경우 연속선 또는 단속선 모두 유의미할 정도의 마찰력 감소를 보이지 않았다. 패턴 길이에 대해 2회전 회전하면서 가공된 연속선 및 단속선은 회전하지 않은 선에 비해 마찰력 감소의 정도가 더 크긴 하였지만 용기 및 그르부가 형성되어 있는 266 nm 레이저에 비해 그 크기가 적었다.

이러한 현상에 대한 추측은 펄초 레이저에 의해 가공된 표면이 나노초 레이저에 의해 가공된 표면에 비해 매끈하며 이 영향으로 인해 바늘이

진행하면서 고무와의 접촉이 상대적으로 적어서 결국은 패턴이 없는 Fig. 5와 같은 유사한 양상을 보인다고 할 수 있다. 마찬가지로 사선의 연속 및 단속선은 거칠기가 다소 형성이 되어 있어 이로 인해 마찰력의 감소를 가져온다고 할 수 있다.

마찰력 감소 효과를 가져 오는 요인을 좀 더 규명하기 위해서는 패턴 형태, 패턴 크기 및 깊이 또는 그 비율, 패턴의 밀도 등과 더불어 속도 및 탄성중합체의 탄성 정도를 고려한 많은 실험과 이론적 고찰이 동시에 수행 되어져야 할 것으로 판단된다.

4. 결론

바늘의 표면에 미세한 패턴을 UV 나노초와 IR 펄초를 사용하여 형성하고 윤활성분이 없는 산업용 실리콘 고무 재료에 대해 마찰력 실험을 수행하였다. 마찰이론을 고려한 실험 결과를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 패턴이 없는 바늘의 경우 매끈한 표면의 낮은 속도에서의 마찰이며, 이에 따른 응력의 변화, 거칠기 변화가 바늘이 진행하면서 일정하여

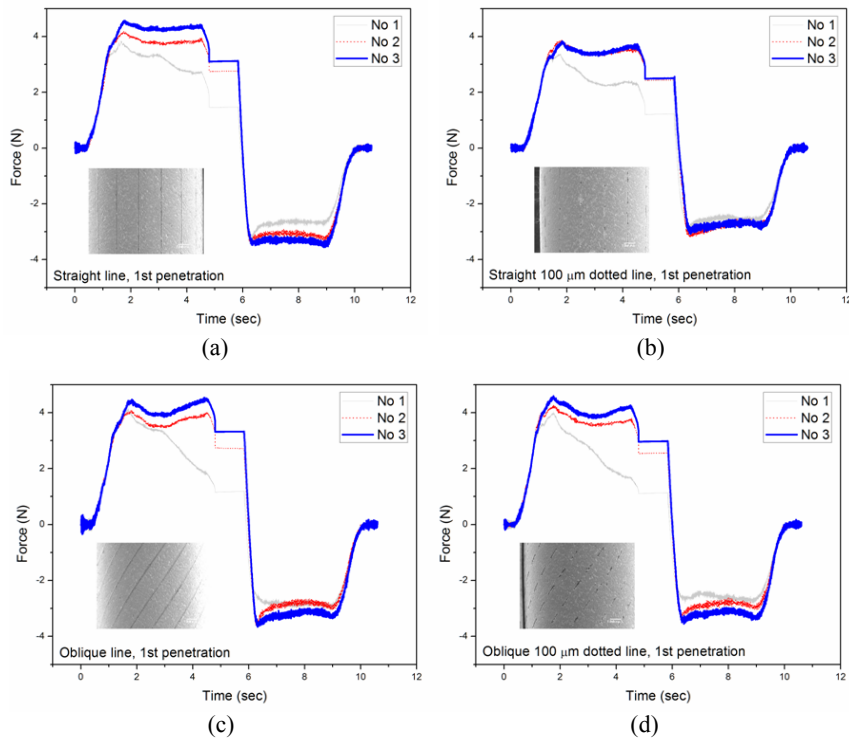


Fig. 9 The friction force against time at number of test times in case of the pattern shown at the bottom left SEM image (a)-(d).

마찰력의 변화가 적었다.

- 2) 거친 표면을 가진 바늘의 경우 거칠기 크기에 따라 마찰력의 감소, 증대를 보였으며, 이는 거칠기가 변함에 따라 나타나는 접촉 성분에서의 실제 접촉면적 및 마찰 상수 변화와 히스테리시스 마찰 성분에서의 고무 내부의 점탄성적 에너지 손실 정도에 따른 복원력의 차이에 의해 나타나는 것이라 분석된다.
- 3) 위와 같은 이유로 적정한 영역의 거칠기는 마찰의 감소를 가져올 수 있으며 본 실험의 경우 약 20 %의 마찰 감소 효과를 보였다. 또한 거칠기를 상대적으로 크게 하면 마찰력을 증가시킬 수 있어 미세 패턴 형상이 마찰력 조절에 응용 될 수 있을 것이라 생각된다.

References

- 1) Y. Kligerman, A. Shinkarenko, "The effect of tapered edges on lubrication regimes in surface-textured elastomer seals," *Tribology International*, Vol. 44, pp. 2059-2066, 2011.
- 2) G. Ryk, Y. Kligerman, I. Etsion, A. Shinkarenko, "Experimental investigation of partial laser surface texturing for piston-ring friction reduction," *Tribology Transactions*, Vol. 48, pp. 583-588, 2005.
- 3) V. Brizmer, Y. Kligerman, I. Etsion, "Laser surface textured parallel thrust bearing," *Tribology Transactions*, Vol. 46, Issue 3, pp. 397-403, 2003.
- 4) M. Nakano, A. Korenaga, A. Korenaga, K. Miyake, T. Murakami, Y. Ando, H. Usami, S. Sasaki, "Applying micro-texture to cast iron surfaces to reduce the friction coefficient under lubricated conditions," *Tribol Lett.*, Vol. 28, pp. 131-137, 2007.
- 5) I. Etsion, "State of the art in laser surface texturing," *Transactions of the ASME*, Vol. 127, pp. 248-253, 2005.
- 6) N. Abolhassani, R. Patel, M. Moallem, "Needle insertion into soft tissue: A survey," *Medical Engineering & Physics*, Vol. 29, pp. 413-431, 2007.
- 7) A. Okamura, C. Simone, M. O'Leary, "force modeling for needle insertion into soft tissue," *IEEE Transactions on biomedical engineering*, Vol. 51, pp. 1707-1716, 2004.
- 8) E. Deladi, M. Rooij, D. Schipper, "Modelling of static friction in rubber-metal contact," *Tribology International*, Vol. 40, pp. 588-594, 2007.
- 9) A. Muhr, A. Roberts, "Rubber abrasion and wear," *Wear*, Vol. 158, pp. 213-228, 1992.
- 10) A. Elrkin, A. Moskovkin, E. Veksel'man, M. Polimerov, "Maximum force of friction in rubber-metal friction pairs under conditions of constant compressive deformation of the rubber," Vol. 3, pp. 533-538, 1967.
- 11) B. Persson, "Theory of rubber friction and contact mechanics," *Journal of chemical physics*, Vol. 115, pp. 3840-3861, 2001.