

펄초레이저를 이용한 알루미늄 성형다이의 미세가공에 관한 연구

Die Surface Texturing by Femtosecond Laser for Friction Reduction

최해운^{1,✉}, 신현명¹
Hae Woon Choi^{1,✉} and Hyun Myung Shin¹

¹ 계명대학교 기계자동차공학부 (Department of Mech. and Automotive Eng., Keimyung Univ.)
✉ Corresponding author: hwchoi@kmu.ac.kr, Tel: 053-580-5216

Manuscript received: 2008.11.17 / Accepted: 2009.2.10

Interface friction in blanking dies, cold forging and extrusion of aluminum alloys is a major cause of inefficient process. This paper describes an investigation of femtosecond laser texturing for reduction of interface friction on sliding surfaces in forming process. Femtosecond direct writing technology was used to fabricate a laser micro-machined die and to create microgroove patterns with varying size and density on metal forming dies. A systematic approach to find the optimum parameters and computer simulation comparison of friction coefficients are provided to study the relation of friction coefficients and die profiles. In metal forming tests, the effectiveness of various laser-machined patterns for enhancing interface lubrication is determined.

Key Words: Femtosecond Laser (펄초레이저), Micropattern (미세패턴), Surface Texturing (표면개질)

기호설명

p = pitch of two adjacent laser spots
S = scanning or traveling speed of laser
OL = Overlap of laser spots
F = pulse repetition rate
D = laser focus spot diameter
 F_0 = laser power intensity
 w_0 = laser beam radius (@ FWHM)

1. 서론

두 물체간의 상대적인 운동이 발생하는 부위에는 필연적으로 마찰이 발생이 하고, 이는 동력 손실 및 기구의 정밀도를 떨어뜨리는 원인이 된다. 고효율 기계를 위한 공학적 접근의 한 단계로는

상호운동이 있는 부품들의 마찰을 최소화 하여, 마찰로 인한 에너지손실을 줄이는 것이라고 할 수가 있다. 마찰손실에 대한 연구는 그 동안 많이 진행되어 왔고, 여러 분야에서 괄목할 만한 성과를 거두어 왔는데, 마찰부위의 소재를 통한 재료학적 접근과, 표면의 요철 등을 통한 기구운동학적 접근 및 다양한 윤활재의 선정을 통한 마찰계수 감소가 가장 일반적인 방법이라 할 수가 있다. 이 중에서 운동부위의 요철을 통한 기술이 비교적 간단하면서도 효과가 크지만, 기계강도의 저하 및 가공의 어려움들이 그 동안 문제가 되어왔다.

최근 미세가공기술이 발전하면서 기계강도의 저하 없이 마찰력 손실을 극소화 할 수 있는 방법이 다양하게 개발 되었는데, 이중 “엔지니어링 표면처리”는 이러한 요구에 부응하기 위해서 표면의 미세형상을 최적화 하여 슬딩면 위의 윤활재 흐름

이나 열적영향 등을 최소화 할 수 있도록 설계된 표면처리를 의미한다.¹ 이러한 엔지니어링 표면처리는 랜덤하게 표면을 가공하는 샌드블라스팅이나 화학적 에칭공정에 비해서 표면의 형상을 좀더 개발자의 요구에 맞게 최적화 할 수 있으며, 레이저 가공기술이 이러한 기회를 만들어 주는데 큰 기여를 하게 되었다.

레이저를 이용한 표면가공에 많이 사용하는 레이저로서는 자외선(UV, Ultra Violet)영역의 엑시머(Excimer) 레이저가 그 대표적 예인데, 실린더블록 또는 실린더라이너 내면의 표면처리를 통해 재료물성치 변화 없이 표면의 거칠기를 최적화 하여서 피스톤 링과의 마찰력을 줄이는 효과가 보고 되었다.^{2,3} 이러한 표면처리 방법은 회전하는 톨러와 판재 사이의 마찰을 줄이기 위한 압연공정에도 적용이 되었고, 마찰계수가 감소되었다는 연구 결과도 보고 되었다.⁴

본 연구에서는 알루미늄 냉간 성형공정에서 발생하는 성형다이와 알루미늄 소재간의 마찰력을 줄일 수 있는 방법으로 레이저 미세가공기술이 검토 및 적용 되었다.⁵ 우선 일반적인 알루미늄 압출인발공정 시의 윤활 방법을 살펴보면, 알루미늄 성형 사출 시 윤활 방법은 재료가 경질 알루미늄이나 연질 알루미늄 사출품인가에 따라서 달라지게 된다. 연질 알루미늄(4000 계열 이하)의 경우에는 성형다이와 알루미늄 사출품 사이에 미세량의 윤활재인 오일이나 그리스 또는 아연 스테아린산염 등을 사용하는 것이 일반적이지만, 경질 알루미늄(5000 및 7000 계열)의 경우는 컨버전 코팅을 통해서 윤활유의 표면 흡착으로 표면 미끄러짐과 압력과 팽창을 견딜 수 있도록 하는 것이 일반적인 방법이다.⁶

레이저 가공을 이용하여 표면의 거칠기를 바꾸어 마찰을 줄이는 여러 가지 장점에도 불구하고, 보편화의 어려움을 살펴 보면 첫째, 높은 초기 설비투자비용을 들 수가 있다. 표면요철을 위해서 샌드블라스팅이나 기계가공 또는 화학적 에칭에 비해서 레이저 시스템의 설비는 초기 투자비용이 상대적으로 비싸며, 샌드블라스팅이나 강구블라스팅에 비해서 생산성 저하를 내포하고 있다. 둘째, 레이저 가공 시에 발생하는 높은 온도로 인해 표면이 기화 하면서 발생하는 반발력에 의해, 표면요철 조정에 한계를 지니게 된다. 이러한 불균일한 요철은 자칫 기계적 강도를 저하 할 수가 있고, 내부 또는 표면의 마이크로 크랙으로 인하여 피로

파괴의 원인이 될 수도 있다.

지난 20 년간 레이저를 이용한 미세가공기술은 극초단 레이저(Ultrashort)의 상용화로 인해서 비약적인 발전을 이루어 왔다. 극초단 레이저라 함은 펨토초 또는 피코초 영역대의 펄스길이를 가지는 레이저를 말하며, 극초단 레이저 적용시의 가장 큰 장점은 레이저빔 조사부위 주변 물질로의 열전도(thermal diffusion)에 의한 열팽창과 수축 등으로 인한 열영향 문제점들을 해결 할 수 있는 것이다.⁷

일반적으로 펨토초 레이저의 경우, 금속격자 사이로 열이 전달되는 시간(통상 $\sim 10^{-11}$ 초)에 비해 레이저빔의 조사시간이 매우 짧으므로 열영향부(Heat affected zone)를 발생시키지 않고 정밀한 부품가공이 가능하게 된다. 또한 높은 순간 정점온도로 인해서 레이저가 집속되는 부위의 온도에서는 급격한 이온화 과정 발생으로 인한 자유전자 밀도가 높아지고 레이저빔의 흡수가 좋아지게 되어, 유전물질 가공에도 용이하게 사용이 된다. 결과적으로 기화온도가 낮은 플라스틱 및 바이오 물질에서부터 기화온도가 높은 텅스텐합금 및 일반 철강 소재에까지 그 소재선택의 폭이 넓어지게 되었다.⁸

나노초 레이저가 산업용으로 많이 보급이 되었고 극초단 레이저에 비해서 가공원가가 상대적으로 저렴하기는 하지만, 열영향부(Heat Affected Zone)나 미세크랙등의 부작용 등으로 인한 정밀가공의 한계를 지니고 있다. 나노초 레이저를 이용한 미세형상가공에 대한 결과는 참고문헌에서 찾아볼 수 있고,^{1,3} 본 논문은 비교의 목적으로 펨토초 레이저를 이용하여서 알루미늄 성형다이와 압출 및 인발 제품의 마찰을 줄이기 위한 방법의 하나로 다이 표면에 미세패턴(마이크로 패턴)을 형성, 윤활성 향상 및 마찰계수 감소에 대한 연구결과를 소개한다.

2. 실험의 방법

2.1 시스템 셋업

실험에 사용된 소재는 알루미늄 성형다이와 동일재질인 공구강에 질화열처리를 하였고, 표면경도는 H_{RC}70 으로 측정되었다. 소재는 XY 모션시스템 위에 장착이 되어서 중심점을 기준으로 일정간격으로 동심원이 되도록 G-code 프로그래밍을 하였다. 레이저 시스템은 크게 레이저를 발진시키는 시스템(CPA 2100, Clark-MXR), 빔제어장치(Beam delivery), 샘플 이송장치 그리고 동축비전시스템

(coaxial vision system)으로 구성이 되어 있으며, 시스템 모식도가 Fig. 1 에 나타나 있다. 사용된 레이저는 펄스시간폭(temporal pulse width)이 $150\text{fs}(=150 \times 10^{-15} \text{ 초})$ 이고 중앙파장(Central wavelength)이 775nm 를 가지며 펄스대역(Pulse width)은 $750\text{nm} \sim 800\text{nm}$ 의 Chirped Pulse 를 증폭하여 만든 것으로서 최고 2000Hz 의 펄스 반복률을 가지도록 최적화 되었다. 생성된 레이저의 에너지는 미세가공하기에는 너무 큰 에너지 이므로, 다단의 광학감쇄장치(optical attenuators)를 걸쳐서 감쇄를 하였다. 레이저빔은 발진장치에서부터 수평편광으로 발생이 되고, $\lambda/2$ waveplate 와의 상대적인 각도를 통해서 출력 레이저빔 편광방향이 2Δ ($1\Delta =$ 레이저빔의 입사각과 waveplate 의 정렬각도) 만큼 회전을 하게 되고, 편광 각도에 따라서 편광비나눔장치(polarizing beam splitter)를 통해서 투과광(transmission)과 반사광(reflection)량이 조절되도록 준비하였다. 감쇄된 레이저빔은 초점렌즈를 통해서 물질에 조사되도록 설계되었다. 또한 정확한 초점위치와 가공물의 실시간 검사(real time inspection)를 위해서 동축비전시스템(Coaxial vision system)을 설치하였다.

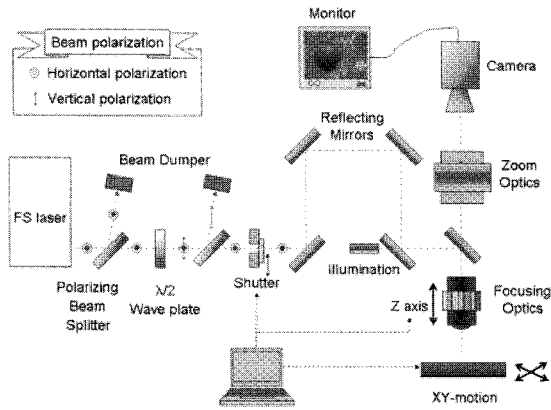
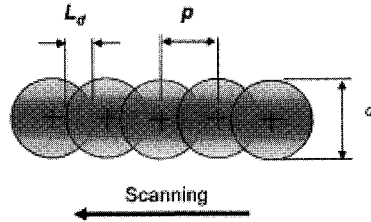


Fig. 1 System setup

2.2 최적실험조건 도출을 위한 파라미터 설정

가공의 최적 조건을 위해서 레이저 가공 시에 영향을 미치는 실험변수 들을 나열한 후, 이 중에서 펄스중첩(Pulse overlap), 펄스에너지(Pulse energy), 초점크기(Focusing spot diameter) 그리고 이송속도(Scanning speed)를 주 변환 파라미터로 선택하였다. 이들 파라미터들은 레이저가공에 큰 영향을 미치는 변수들로, 몇 차례의 선행실험을 통해서 좁은

영역으로 실험범위(Design of experiment)가 설정 되었다. 이 중에서 펄스중첩과 이송속도 및 초점크기는 서로 연관된 실험변수들이며, 이들 공정변수들의 상관관계는 선행연구 및 Fig. 2 와 식 (1), (2)에서와 같이 나타낼 수 있다.



p : pitch (μm)
 d : focus spot diameter (μm)
 L_d : length of intersection of adjacent focus spot locations

Fig. 2 Relationship of ablation parameters

$$p = \frac{S}{f}, OL = \frac{d-p}{d} \tag{1}$$

$$OL = 1 - \frac{S}{fd} \tag{2}$$

여기에서 피치(pitch)는 이웃하는 두 펄스의 중심거리를 말하며, 펄스반복률(pulse repetition rate)은 초당 조사되는 레이저빔의 펄스 개수를 의미한다. 또한 초점펄스크기(focus spot diameter)는 레이저빔이 조사되었을 때 가공되는 크레이터(crater)의 직경을 측정 한 것이다.

Fig. 2 와 식 (1), (2)에서 나타난 펄스중첩을 2차원 (X,Y) 영역으로 확장을 하여 분석하게 되면, 한 점 (x,y)에 조사되는 가우스 함수 분포 형태의 레이저는 그 강도가 약하더라도 가공면에 사용되는 모든 펄스로부터 영향을 받는다. 레이저빔의 중심점 위치가 특정 지점 (x_{ij}, y_{ij})에 조사된다고 했을 때, 관심점 x, y 점이 받는 총 에너지는 식 (3)과 같이 된다.

$$F(x, y) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} \sum_{j=-\infty}^{\infty} F_0 e^{-\frac{(-2(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2)}{w_0^2}} \tag{3}$$

식 (3)에 근거하여서, 특정지점에서 펄스중첩으로 인해서 발생하는 총 펄스에너지 증폭(pulse energy enhancement)을 계산하면 Fig. 3 에서와 같이 나타낼 수 있으며, 이론적으로 펄스중첩이 60%가 넘게 되면 최대펄스에너지와 최소펄스에너지의 차이는 거의 없어지게 된다.

본 연구에서는 펄스간에너지(Pulse to pulse energy)의 불안정성을 감안하여서 75%의 중첩을 하였고, 모든 실험은 펄스중첩 75%로 설정을 하였다. 펄스 중첩이 75%이하이면 관심 점에서의 펄스 에너지차이가 날 수가 있고, 75%보다 넘으면 지나친 펄스중첩으로 인해서 생산성 저하를 가져올 수 있을 것으로 판단된다.

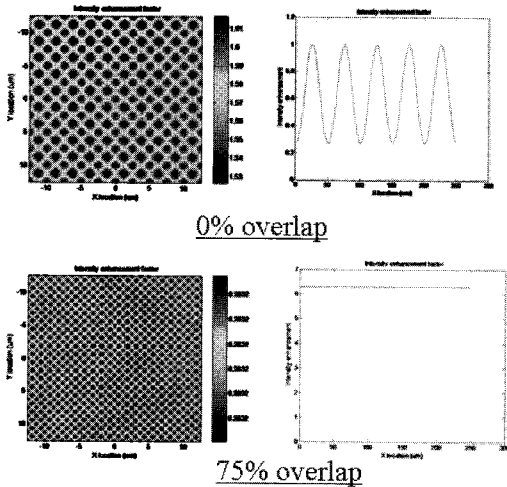


Fig. 3 Pulse energy enhancement by pulse overlap

Fig. 3 에서 보여진 바와 같이, 펄스의 중첩이 없을 때(Overlap 0%)에는, 각 지점에서의 에너지 차이가 많지만, 펄스가 75% 중첩일 경우는 지점별 에너지 차이가 거의 없음을 알 수 있다.

2.3 실험결과

지난 장에서 소개된 재료와 실험장치를 사용하여 알루미늄 성형다이에 미세패턴을 실시하였다. 가공표면은 크게 세가지로 나누어서 제작하였는데, 첫째는 가공표면에 특별한 패턴이나 그루부(groove)를 하지 않은 것과, 둘째, 그루부 사이의 간격을 0.5mm(지름 1mm 차이)로 한 거친그루부, 그리고 마지막으로 그루부 사이의 간격을 0.25mm(지름 0.5mm 차이)로 한 조밀그루부로 제작하였다. 통상적으로 금속의 경우는 평균레이저 파

위가 10mW(pulse energy 5 μJ/pulse @ 2000Hz)가 되더라도 일부 가공이 이루어 지지만, 선행실험 결과 그루부의 깊이가 수 μm 에 지나지 않아 몇 차례의 동일지점 가공(multi-pass)을 수행하여야 했다. 본 실험에서는 실제 생산성을 감안하여서 평균레이저 파워를 200mW(pulse energy 100 μJ/pulse @ 2000Hz)로 증폭하여서 가공을 하였고, 가공속도는 20mm/sec 로 진행 하였다.

Fig. 4 는 레이저가공을 한 조밀그루부의 예이며, 예시된 것과 같이 0.25mm 간격으로 가공된 미세 가공 동심원의 경우는 약 30 μm 폭과 5 μm-6 μm 깊이의 홈을 형성하였다. 레이저빔은 XY 형태로 움직이는 이송장치 위에서 회전을 하는 열처리된 공구강 다이 표면에 조사되었으며, 표면의 그루부 형상은 기계적 평면측정기(Mechanical stylus surface profiler)로 측정을 하였다(Fig. 5).

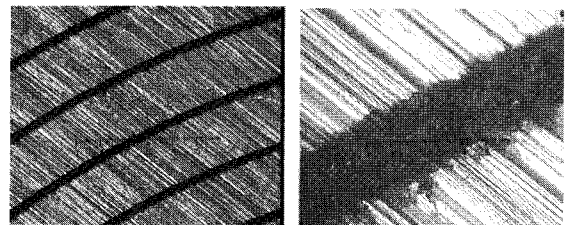


Fig. 4 Textured surfaces

Fig. 5 에서 보여지는 바와 같이 평균 그루부 깊이는 5 μm 정도로 측정이 되었고, 깊이는 그루에 따라서 다르게 나타났는데, 첫째 이유는 레이저 가공 시 발생하는 강력한 플라즈마와 기화물질(plume)로 인해서 레이저빔이 일부 산란된 것으로 추정되며, 둘째는 기화된(evaporated particles) 물질이 그루부 속에서 미처 밖으로 빠져 나오지 못하고 그루부 내부에서 다시 고착(redeposition)화 된 것으로 고찰된다.

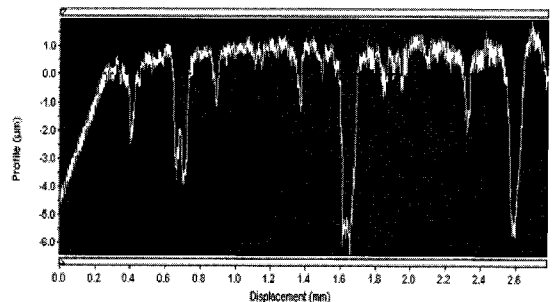


Fig. 5 Surface profile

동일한 실험조건으로 그루부 간격을 0.5mm 으로 조정하여 가공된 미세가공 동심원의 경우, 약 30 μm 폭과 5 μm -6 μm 깊이의 홈을 형성하였다. 조밀한 그루부와 거친 그루부를 가공할 때 그루부 상호간에 미치는 영향은 없었으며, 그루부 간격과 레이저가공의 함수관계는 거의 나타나지 않았다.

미세패턴이 윤활에 미치는 효과를 파악하기 위해서 가공된 세가지 다이를 350 톤 프레스에 장착한 후(Fig. 6) 다양한 윤활제와 함께 성형성(formability)을 시험하였다. 이때 원주방향의 팽창률(tangential strain)과 반지름방향 팽창률(radial strain)을 측정하여서 실험적인 값을 얻었고, 컴퓨터시뮬레이션(DEFORM)을 통하여 이론적으로 예측한 값과 비교하였다. 사용된 윤활유는 SAE 0W-20, 5W-30, 10W-30, 그리고 20W-50 @ 20°C 가 이용되었는데, 이중 많이 사용된 SAE 10W-30 오일은 절대점도계수 0.12 N-s/m²의 값을 가진다.

동일한 실험조건을 부여하기 위해서 실험 전 준비사항으로 레이저로 미세패턴이 새겨진 다이를 초음파세척기로 전체를 세척한 후, 다이표면을 브러시와 알콜을 사용하여서 가공 시 발생한 미세찌꺼기를 완전히 제거하였다. 미세패턴 가공이 된 다이를 홀더에 장착한 후, 해당 윤활유를 다이에 스프레이 한 후, 준비된 5150 계열 알루미늄시편을 350 톤 프레스로 가압하면서 시편의 내경과 높이의 변화를 측정하였다. 측정은 일정 압력으로 가압한 후, 성형된 알루미늄 쿠폰의 내경과 외경 그리고 높이를 측정하고 기록하는 방법으로 하였다.

동일한 방법으로 그루부가 없는 다이와 거친간격의 그루부를 가진 성형다이에 대해서 실험을 하였다. 이러한 방법으로 조밀그루부, 거친그루부 및 그루부가 없는 타입의 다이를 이용한 마찰계수가 측정결과가 Fig. 7, 8, 9에 나타나 있으며, 결과에서 보여지는 것과 같이 동일윤활조건에서는 다이의 그루부가 조밀 할수록 마찰계수는 좀 더 줄어들을 알 수 있다.

Fig. 7 에 예시된 바와 같이, 윤활제의 종류를 달리하면서 내경과 높이의 축소량을 관찰하였고, 이를 컴퓨터 시뮬레이션 데이터값과 비교를 하였다. 그래프에 표시된 점선 및 μ 값은 컴퓨터 시뮬레이션(DEFORM™)을 통해서 내경축소량(ID reduction) 및 높이축소량(Height reduction)의 변화량을 고려하여 예측한 이론마찰계수의 값이다. 여기에서 내경 축소량이란, 초기내경인 (d_0)와 순간내경 (d)값의 차($\Delta=d_0-d$)를 초기내경 값(d_0)으로 나눈 값을 말한

다. 간혹 값이 음의 값을 가지는 경우가 있는데, 이는 내경이 초기에 잠시 늘어남을 뜻한다. 마찬가지로 높이축소량도 동일 방법으로 정의된다.

Fig. 7 에서 보여지는 바와 같이 조밀 다이의 경우, 그리스 윤활제를 제외한 다른 윤활제의 경우 상호 마찰계수의 차이가 거의 없는 것으로 나타났으며, 마찰계수는 0.2~0.25 범위로 측정이 되었다.

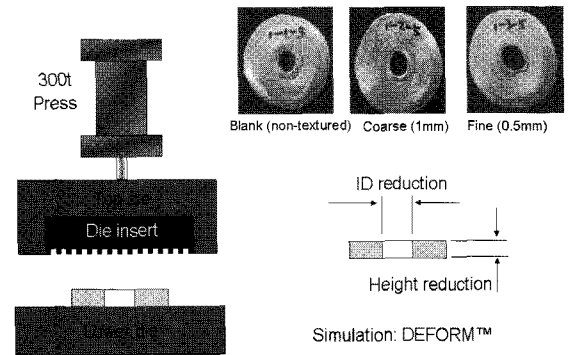


Fig. 6 Pressing experiment and pressed aluminum coupons

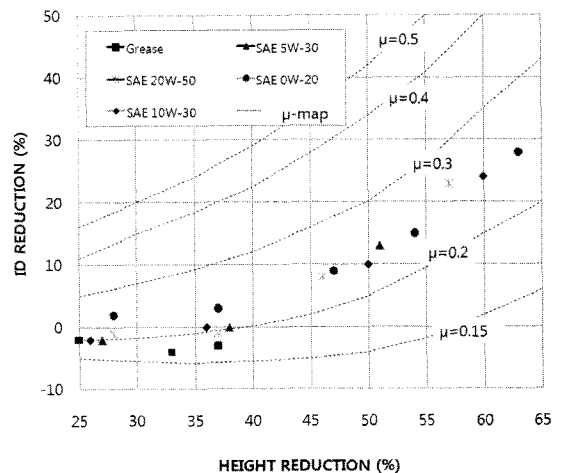


Fig. 7 ID/Height reduction for fine textured dies

Fig. 8 은 거친간격 그루부 성형다이를 이용한 실험으로서, 조밀그루부 다이에 비해서 상호 마찰계수의 차이가 조금 발견되었다. 이는 단위 면적당 윤활제를 함유하는 그루부의 숫자 또는 영역이 조밀그루부 보다 작기 때문에, 윤활제의 점성에 약간 영향을 받기 때문일 것으로 추정된다. 하지만, 본 실험에서도 그리스의 마찰계수는 다른 윤활제와는 다른 영역에 분포하는 것으로 조사가

되었다.

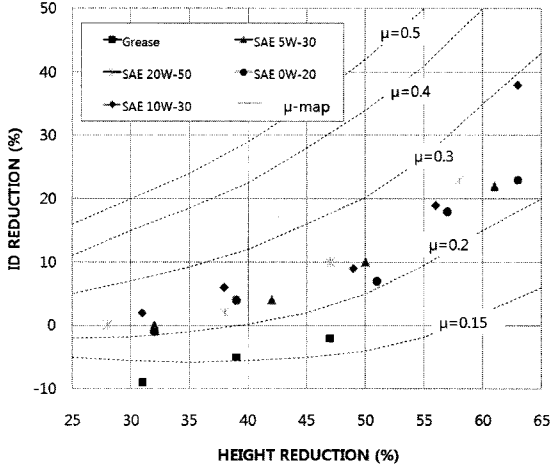


Fig. 8 ID/Height reduction for coarse textured dies

비교의 목적으로 표면에 그루부를 가공하지 않은 성형다이에 윤활제를 스프레이 한 후의 마찰계수 측정실험을 하였다. Fig. 9 에서 보여지는 바와 같이, 전반적인 마찰계수가 그루부를 가공한 성형다이보다 높게 나타났고, 그리스 윤활제를 사용한 마찰계수도 다른 성형다이에 비해 상대적으로 높게 나타났다.

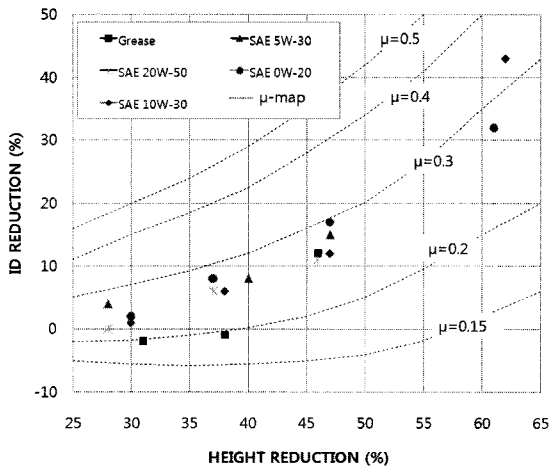


Fig. 9 ID/Height reduction for Non-textured dies

실험결과를 정리하면, Fig. 7-9 에서 보여지는 것과 같이 그리스 윤활제의 경우 레이저 가공된 패턴의 효과로 인하여 마찰계수가 다소 떨어짐을 볼 수 있는데, 이는 레이저 가공 홈 사이로 점성이

높은 그리스가 흡착이 되어서 오랫동안 유지가 되기 때문일 것으로 추론된다. 또한, Height reduction 55% 부근 영역에서의 결과를 고찰해보면, 레이저 가공이 되지 않은 다이의 경우 마찰계수가 0.35 정도에 머무는 반면, 레이저가공을 한 다이의 경우는 마찰계수가 0.25 정도로 현저히 감소하는 것을 알 수가 있다. 가공한 다이의 경우, 조밀그루부 가공을 한 다이의 경우가 거친그루부 가공을 한 다이에 비해서 윤활제에 다소 영향을 덜 받는 것으로 나타났고, 마찰계수의 산포도 훨씬 더 적게 나타남을 알 수가 있었다.

3. 결론

램도초 레이저로 표면을 미세가공한 다이의 마찰계수에 대해서 연구하였으며, 가공 면의 형상(그루부의 조밀도)이 유막 형성과 마찰계수에 어떠한 영향을 미치는 지를 연구하였다. 실험에서 비교적 높은 점성의 SAE 계 윤활유와 낮은 점성의 그리스를 가공된 다이 표면에 스프레이하고, 알루미늄 (5050)링을 사용하여 내경과 높이의 감소량을 조사하여서 컴퓨터 시뮬레이션 결과를 비교함으로써 마찰계수를 이론적으로 예측해 보았다. 실험치와 시뮬레이션결과를 분석해본 결과 다이의 표면의 조밀도가 높을수록 마찰계수가 작아지는 결과를 알 수 있었다. 이는 다이 표면의 미세패턴이 윤활유를 흡수하고 있는 오일포켓 역할을 하여서 마찰력을 줄이는데 효과가 있을 것으로 추론된다. 또한, 그리스와 같이 점성이 낮은 윤활제의 경우에 레이저 가공을 한 다이의 마찰계수 감소가 두드러지는 것으로 실험적으로 입증되었다.

본 실험은 성형속도를 별도의 실험변수로 고려하지 않았는데, 성형속도에 의한 윤활제의 점성(viscosity) 영향도 있을 것으로 판단이 된다. 실험에서 사용된 패턴의 모양은 동심원 형태인데, 이는 유동물질(알루미늄 링)의 유동방향과 직교하게 하기 위함이었다. 일반적으로 유동물질의 유동방향과 같은 방향으로 오일그루부를 형성할 경우 윤활유가 외부로 유출이 되어서 윤활수명이 짧아질 우려가 있는 반면, 직교의 경우 윤활유의 트랩핑(trapping) 할 수 있는 효과가 있을 것으로 기대된다. 성형그루부 모양이 반원형태나, 톱니 모양으로 가공을 하였을 때에도 마찰계수에 영향을 미칠 것으로 판단이 되며 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

성형다이의 표면거칠기나 가공패턴도 성형물질의 유동에 일정부분 영향을 미쳐서 가공형상물의 표면거칠기에 영향을 줄 것으로 판단이 된다. Fig. 6 에서 보여지는 바와 같이 표면의 패터닝이 되지 않은 경우에는 가공형상물의 표면이 매끈한 반면, 거친그루부 가공의 경우 조금의 표면거칠기가 보여지고 있다. 하지만, 이것은 윤활유의 종류에 따라서도 달라질 것으로 판단이 되고, 레이저그루부의 크기에도 영향을 미칠 것으로 고찰이 된다.

알루미늄 등의 연질재료 압출이나 인발 다이에 적용되거나 프레스나 블랭킹 다이에 응용이 될 경우 마찰계수 감소로 인한 구동부의 동력절감이 예상되며, 베어링과 같은 운동기계요소에 적용이 될 경우 마찰력 감소로 인한 에너지 절약의 효과도 있을 것으로 예상이 된다.

후 기

본 논문은 학술진흥재단 신진교수지원 자금으로 작성되었습니다. 또한, 실험데이터를 만들게 도와주신 오하이오 주립대학교 Shivpuri 교수 연구팀과 Farson 교수 연구팀에 감사를 드립니다.

참고문헌

1. Etsion, I., "State of the Art in Laser Surface Texturing," J. of Tribology, No. 127, Issue 1, pp. 248-253, 2005.
2. Richter, K. and Bart G., "Excimer laser treatment of engine bearing surfaces such as cylinders," General Motors, United States Patent, No. 5072092, 1991.
3. Herbst, L., Lindner, H. and Hoult, T., "An Important Novel Application for Excimer lasers in the Automotive industry," Proc. of ICALEO, 2004.
4. Barber, G., Gao, H. and Tung, S., "Experimental study on the friction characteristics of lasertex steel sheets during metal forming process," Tribology Trans., Vol. 48, No. 2, pp. 245-249, 2005.
5. Bay, N., "Cold forging of aluminium-state of art," J. Mater. Proc. Tech., Vol. 71, No. 1, p. 76, 1997.
6. Geiger, M., Popp, U. and Engel, U., "Excimer Laser Micro Texturing of Cold Forging Tool Surfaces-Influence on Tool Life," Annals of the CIRP-Manufacturing Technology, Vol. 51, No. 1, pp. 231-234, 2002.

7. Chichkov, B., Momma, C., Nolte, S., Alvensleben, F. and Tunnermann, A., "Femtosecond, picosecond and nanosecond laser ablation of solids," Applied Physics A: Materials Science & Processing, Vol. 63, No. 2, pp. 109-115, 1996.
8. Farson, D., Choi, H., Lu, C. and Lee, L., "Femtosecond laser bulk micromachining of microfluid channels in poly(methylmethacrylate)," Journal of Laser Applications, Vol. 18, No. 3, pp. 210-215, 2006.