

◆ 특집 ◆ 초음파 응용 제조공정 기술

FTS 를 이용한 표면처리 방법에 따른 공정특성 연구

A study on Process Characteristics Using Fast Tool Servo based Surface Texturing

이승준¹, 이득우^{2,✉}, 김종만², 이상민³, 김미루³, 장남수³, Li Liang³
Seung Jun Lee¹, Deug Woo Lee^{2,✉}, Jong-Man Kim², Sang Min Lee³, Mi Ru Kim³,
Nam-Su Jang³, and Liang Li³

1 부산대학교 첨단정밀공학협동과정 (Interdisciplinary Department for Innovative Manufacturing Engineering, Pusan National University)

2 부산대학교 나노메카트로닉스공학과 (Department of Nanomechatronics Engineering, Pusan National University)

3 부산대학교 나노융합기술학과 (Department of Nano Fusion Technology, Pusan National University)

✉ Corresponding author: dwoolee@pusan.ac.kr, Tel: +82-51-510-3129

Manuscript received: 2014.10.20 / Revised: 2014.11.12 / Accepted: 2014.11.12

Fast tool servo (FTS) is an enabling technology to fabricate various shapes of functional surface geometries in a precise and controllable manner. FTS can be also employed as a straightforward and efficient surface treatment way of making such products more durable. In this work, process characteristics using high-precision FTS-based surface texturing were qualitatively and quantitatively investigated to provide a class of surface design rule. The morphologies of surfaces processed with different conditions were first examined by observing the resultant 2D/3D surface profiles. In addition, the effects of the surface treatment using FTS on hardness and wear properties were characterized and compared to those without treatment.

Key Words: Surface Treatment Technology (표면 처리 기술), Manufacturing Process (제조 공정), Green Technology (친환경 기술), Fast Tool Servo (고속 도구 서보)

기호설명

R_p = Pitch of surface reformation process

R_d = Distance of surface reformation process

R_{pd} = Area of surface reformation

N_d = Contact count per unit distance of surface reformation

N_a = Contact count per unit area of surface reformation

A = Amplitude of Fast tool servo

f = Frequency of Fast tool servo

f_p = pitch per unit frequency of fast tool servo

V = machining speed(feedrate)

1. 서론

제품의 수명은 기계부품의 내구성에 따라 좌우되므로 내피로성 및 내마모성 향상은 산업 전반에 걸쳐 매우 중요한 기술 개발 목표로써 연구되고 있다. 특히, 제품과 부품의 수명이 동일하게 유지되어야 하는 압축기류, 밸브류, 엔진부품 등은 내

구성 확보가 매우 중요하다.¹ 부품의 내구성 향상을 위한 표면경화는 주로 침탄경화법(gas solid carburizing), 질화법(nitriding), 청화법(cyaniding), 열처리(tempering) 등의 공정을 통해 이루어진다. 하지만, 이러한 공정들은 생산비용이 높은 편이며 열적, 화학적 처리로 인한 환경오염 문제가 대두되고 있다. 특히, 현재 전세계적으로 에너지 효율 향상 및 친환경 산업에 대한 필요성이 강조되고 있는 추세를 볼 때 친환경적인 경화법의 개발은 필수적이라고 할 수 있다.

열적, 화학적 처리 없이 물리적 힘을 이용해 표면조직을 나노구조로 개질하는 친환경적 공정기술은 오랫동안 항공, 철도, 발전설비 등에 투자해 온 선진국에서 Shot peening 기술로 연구가 진행되고 있다. 압축잔류응력을 부가하여 표면층을 미세화하는 기술은 독일의 Deep Rolling, 미국의 Laser Shot Peening과 Low Plasticity Burnishing, 프랑스의 Ultrasonic Shot Peening, 일본의 Micro Shot Peening 등으로 이미 10여년 전부터 연구가 시작되었으며, 국내에서는 Ultrasonic Nanocrystal Surface Modification (UNSM) 기술로 응용 연구가 진행되고 있다. 이렇듯 최근 기계부품들의 표면에 압축잔류응력부가, 피로강도, 표면경도 향상 및 마찰계수 저감 등 표면의 물성을 향상시키기 위해 표면조직을 나노크기로 미세화시키는 초음파 진동에너지 기반 표면처리 공정 기술개발이 다각도로 이루어지고 있다.²⁻⁴

초음파 진동모듈은 표면층의 물성변화를 위한 표면처리뿐만 아니라 표면 상에 기능성 패턴을 형성하기 위한 기술로도 널리 활용되고 있다. 표면에 패턴을 형성하는 Surface Texturing 기술은 균일한 패턴을 정밀하게 구현하기 위해 사용되고 있으며, 기술개발이 활발하게 진행되고 있다. 최근 베어링 표면에 미세딴플(micro dimple)이나 미세 포켓(micro pocket) 등을 가공할 경우 마찰이 크게 감소할 뿐만 아니라 큰 하중지지도 가능하다는 연구결과가 지속적으로 발표되고 있다. 또한, 대면적 광학필름을 구현하기 위한 Roll-to-Roll 공정에 사용되는 롤 금형(Roll mold)에 미세 웨이브 패턴(micro wave pattern)을 가공하는 Master Roll 제작 및 다양한 기능성 표면 형성을 위해 초음파 진동 메커니즘이 활용되고 있다.⁵⁻⁷ 일정한 미세 패턴을 정밀하게 제작하기 위해서는 툴의 정밀제어가 필수적이다. 현재, 상용화되어 있는 Fast Tool Servo(FTS)의 경우 정밀한 미세 패턴 가공용으로서 최대주파수 20kHz, 최대변위 10 μ m (10%이하)이다. piezo actuator

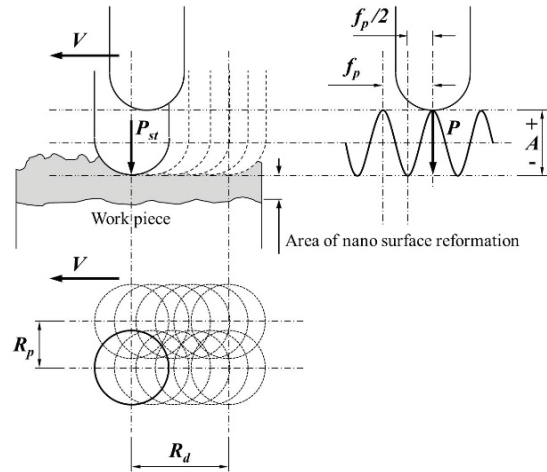


Fig. 1 Mechanism of reformation process on flat surface

의 진동에 따라 구동하며 2점 지지방식의 판스프링(2point supported leaf-spring)에 의해 복원되는 구동원리이다. 변위는 인가 전압(input voltage)에 따라 조정되지만 고주파수(High frequency)에 따른 정밀제어를 위한 컨트롤러의 기술로 매우 고가이다. 따라서 상용제품을 벤치마킹(benchmarking)하여 3점 지지방식의 판스프링(3point supported leaf-spring)을 설계하고 정밀 제어가 가능한 amplifier 및 function generator를 구성하여 자체 FTS를 완성하였다. 자체 개발한 FTS는 상용제품과 구동원리가 동일하지만 amplifier 와 piezo actuator의 상관 성능에 따라 안정 주파수 4kHz, 최대변위는 10 μ m(10%이하)의 성능을 가진다. 본 연구에서는 자체 개발된 FTS를 이용하여 실험하였으며, 가공 조건에 따른 표면 개질층의 형성 결과를 분석하였다.

2. 실험방법

2.1 평면가공 메커니즘

국내의UNSM기술은 하중이 부가된 볼에 초음파 진동에너지를 주어 1초에 20,000번 이상 금속 표면을 타격하여 탄성 및 강소성을 발생시킴으로써 표층부를 나노결정조직으로 개질하고 마이크로 딴플을 생성시켜 수명을 연장 시키는 기술이다. 초음파 진동모듈을 이용한 표면처리기술은 일반적으로 원통형소재의 가공에 적용되며, 주파수, 원통의 회전수, 가공속도에 따라 타격수가 결정된다.⁸ 이를 평면 가공에 적용시키면 Fig. 1과 같이 나타낼 수 있으며 식(1)과 같이 타격면적(T_d)이 정의 된다.

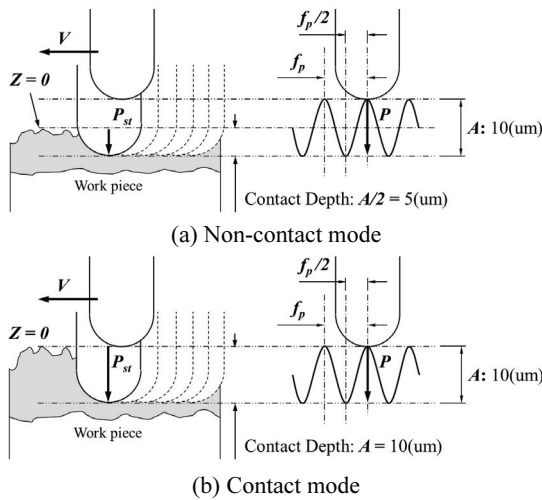


Fig. 2 Experimental approaches according to contact modes

$$T_a = R_d \times R_a \tag{1}$$

가공 거리에 따른 타격수(N_d)는 가공속도(V)와 초음파진동 모듈의 주파수(f)의 함수로 식(2)와 같이 정의되며, 가공 면적에 따른 타격수(N_a)는 가공피치에 따른 타격수(N_p)의 곱으로 식(3)과 같이 정의된다.

$$N_d = \frac{60 \cdot f}{V} \tag{2}$$

$$N_a = N_d \cdot N_p \tag{3}$$

2.2 타격 깊이에 따른 실험

타격 깊이가 변화에 따른 표면형상 변화를 알아보기 위해 비접촉 방식(non-contact mode)과 접촉 방식(contact mode)으로 나누어 실험을 진행하였다. Fig. 2(a)는 FTS의 변위를 타격 깊이의 한계점으로 설정하고 그에 1/2를 타격 깊이로 설정한 비접촉식 가공 방법, Fig. 2(b)는 표면과 가공 팁(machining tip)의 영점을 동일 선상에 두고 초음파 진동 가공하는 접촉식 방식의 개념을 보여준다.

이는 타격 깊이에 따른 모재 표면의(surface of workpiece) 소성 및 탄소성 변형의 양상을 관찰하기 위하여 진행하였다.

2.3 가공 경로에 따른 실험

일반적으로 기계적 가공 공정에는 물리적 요인

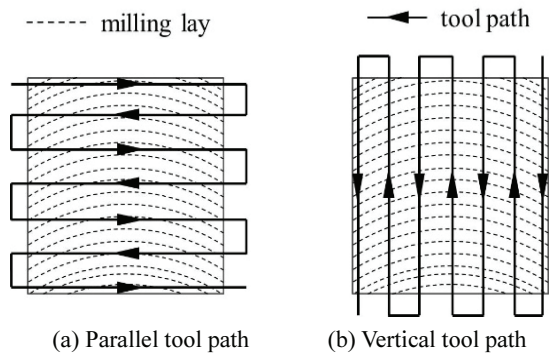


Fig. 3 Experimental approaches according to tool path

에 따른 가공 결(layer)이 남게 된다. 평면입체 금속 부품의 1차 가공은 밀링머신(milling machine) 또는 머시닝센터(MCT)에서 절삭가공을 거치게 되며, 이후 정밀도가 요구되는 제품은 연삭(Grinding)공정으로 이어진다. 초음파 진동을 이용한 표면처리 기술은 연삭과 표면경화 효과를 복합적으로 얻을 수 있는 장점이 있다. 이러한 복합적 공정효과를 확인하기 위해 밀링을 통한 형상가공으로 시편을 구성하였다. Fig. 3의 모식도에서 볼 수 있는 바와 같이 밀링 가공 시 스핀들의 회전으로 인해 공구의 날이 지나간 흔적은 산(peak)과 골(valley)의 형상을 갖는 패턴으로 남게 된다. 본 연구에서는 접촉식 모드로 밀링 가공 결(layer)과 같은 방향과 수직 방향 두 가지로 나누어 가공경로(tool path)를 설정하였으며, 이에 따른 결과를 분석하였다.

3. 실험결과

3.1 실험장치 구성

실험을 위해 육면체로 밀링 가공된 $12 \times 12 \times 3\text{mm}^3$ 크기의 STS304 시편을 준비하였다. 본 실험에 사용된 초음파 진동모듈은 자체 개발한 초정밀 FTS로써 4kHz의 최대 허용 주파수, $10\mu\text{m}$ 의 최대 변위 및 10% 이하의 변위 오차를 갖는다.⁹ 실험에 사용된 가공 팁은 열처리된 SKD11로 선단부 반경 2.9mm인 반구형으로 제작되었으며, 체결부(shank)와 선단부가 일체형인 구조를 갖는다.

시편 가공은 100nm의 분해능을 갖는 ㈜테크맥社의 UPL-200가공기를 이용하였으며, Tilt stage를 이용하여 $1\mu\text{m}$ 평행도를 유지한 상태에서 진행하였다. 구체적인 가공조건은 Table 1에 정리하였다.

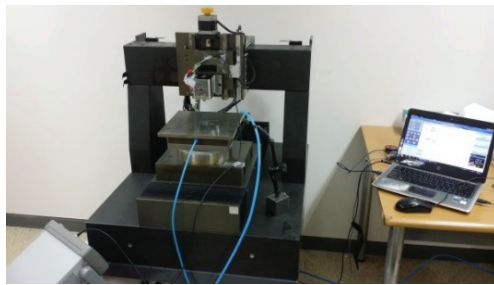


Fig. 4 Experimental setup (FTS module and precision machine)

Table 1 Experimental conditions

FTS frequency	4kHz		
FTS amplitude	10 μ m		
Machining pitch	50 μ m		
Contact depth	5 μ m	10 μ m	
Tool path	parallel	parallel	vertical
Machining speed	3mm/s		
Contact count per 1mm ²	26,600		

3.2 가공 표면형상 측정결과

Fig. 5는 가공된 시편의 광학현미경 사진을 보여주며, 가공방법에 따라 형성된 표면이 확연히 구분되는 것을 확인할 수 있다. Fig. 5(a)의 밀링 가공만 수행한 시편(S_M)의 경우 그 표면에 엔드밀(end-mill)의 가공 결이 거칠게 형성되어 있으며, 가공 시 발생하는 열에 의해 국부적으로 융착되어 있는 형상을 보여준다. Fig. 5(b)에서 볼 수 있듯이 밀링 결 방향에 따라 비접촉식 모드로 가공한 시편(S_{PN})의 경우는 표면의 일정 부분만 타격 하중에 의해 압입되어 평평한 고원을 형성하고, 낮은 부분은 골을 형성하는 모습을 보여준다. Fig. 5(c)와 같이 밀링 결 방향에 따라 접촉식 모드로 가공된 시편(S_{PC})의 경우 결 방향에 따라 균일하게 압입된 표면을 예측할 수 있다. Fig. 5(d)의 밀링결 방향에 수직으로 가공된 시편(S_{VC})의 경우 압입된 표면을 보여주지만 밀링 결을 이루는 산들이 찌그러지면서 서로 뒤엉켜 압입된 흔적을 볼 수 있다.

보다 정량적인 형상 관찰 및 표면 거칠기 평가를 위해 3D profiler를 이용하여 각 시편을 동일면적(230×230(μ m)) 대비 측정하였다. Fig. 6과 같이 가공 경로에 따라 산과 골이 형성되어 있음을 알 수 있으며 수치적 결과는 Table 2에 정리하였다. S_M 과 S_{PN}은 각 부분별 결과값에 변화가 없으며 산의 모양만 바뀌었다. 이는 비접촉식 공정으로 인해 타

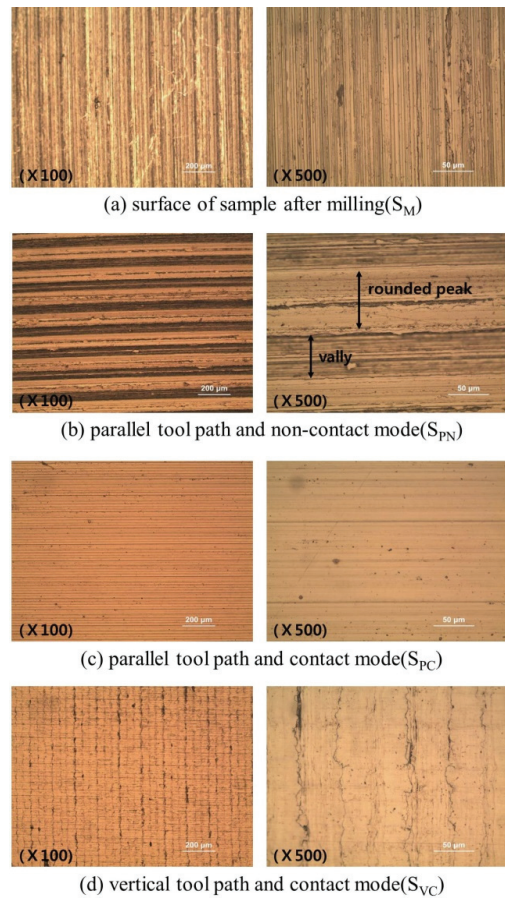


Fig. 5 2D surface morphologies of samples prepared with different process conditions

격시 초음파 진동의 동적 하중의 일부만 전달되어 산이 높은 부분만 탄소성 변형되고 골은 탄성 복원되기 때문인 것으로 사료된다.¹ 표면 거칠기의 향상은 S_{PC} 와 S_{VC}에서 크게 나타나는데, 이는 접촉식 공정으로 인해 타격시 동적 하중이 충분히 전달된 결과이다.

S_{VC}가 모든 항목에서 가장 향상된 결과값을 보여주는데, 이는 밀링 결의 수직방향 가공경로로 인해 산이 모두 압착되어 중첩된 결과이다. 하지만 이는 표면처리 공정에서 Fig. 5(d)와 같이 이미 microcrack을 형성시켜 마찰이 요구되는 제품에는 부적합할 것으로 판단된다.¹⁰

3.3 경도 및 마모량 측정결과

비커스 경도와 마모율 측정은 비교되는 두 개의 시편을 이용하여 진행하였다. 밀링 가공만으로

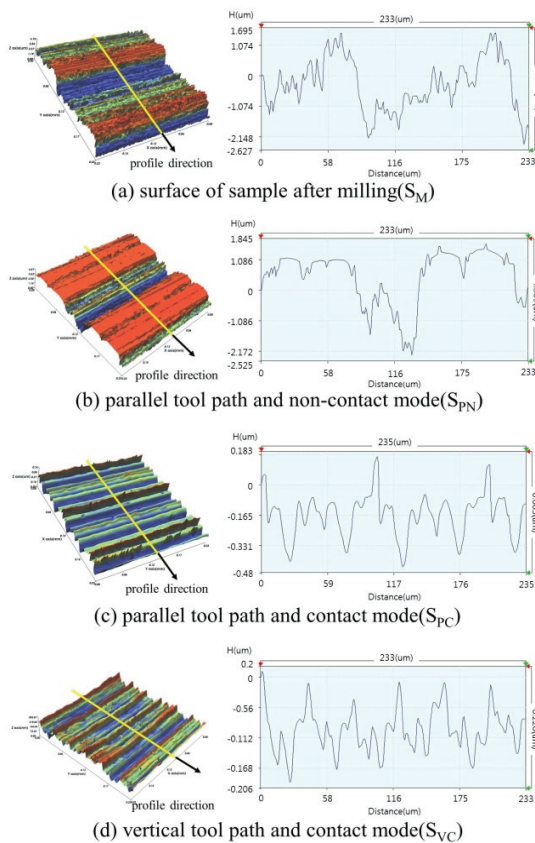


Fig. 6 3D surface morphologies of samples prepared with different process conditions

Table 2 Surface roughness measured on each sample

	S _M	S _{PN}	S _{PC}	S _{VC}
Ra	0.75	0.76	0.09	0.03
Rq	0.9	0.95	0.12	0.04
Rt	4.75	4.58	0.73	0.29
Rz	4.54	4.24	0.65	0.27

(μm)

이루어진 시편(S_M)을 표면처리 전(before)으로 나타냈으며, 밀링 결 방향으로 접촉식 표면처리된 시편(S_{PC})을 표면처리 후(after)로 나타내었다. 경도는 나노인덴테이션(Nano indentation)를 이용하여 측정하였으며, 마모 시험은 산화알루미늄(Al₂O₃) 볼(ball)로 구성된 트라이보미터(Tribometer)를 이용하여 진행하고 마모량 측정기를 이용하여 측정하였다.

공정에 사용된 FTS의 주파수와 변위를 고려해 볼 때 표면 변질층의 깊이는 극소적으로 이루어진 것으로 판단된다. 따라서 표면 개질층의 물성변화

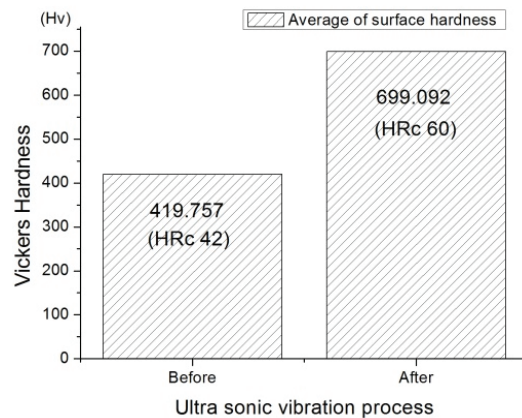


Fig. 7 Vickers hardness before and after surface treatment

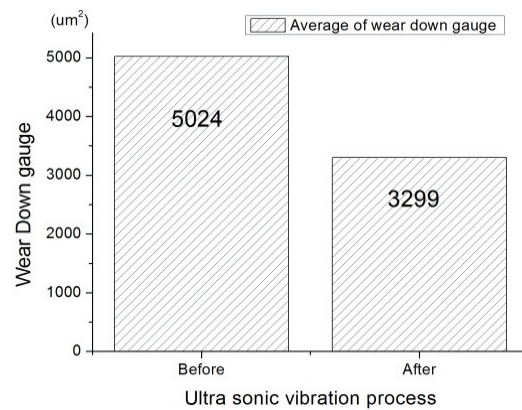


Fig. 8 Wear down gauge before and after surface treatment

를 확인하기 위해 100mN 압입하중으로 경도를 측정하였고, 전체면적에서 6군데를 임의로 선정하여 평균값을 산출하였다. Fig. 7의 측정 결과에서 볼 수 있는 바와 같이 표면처리 후 경도는 처리 전에 비해 1.4 배 높아짐을 확인하였다.

마모량 시험은 2N의 압입하중 상태에서 반경 3mm, 속도 60rpm으로 90분간 회전시켜 총 100,000 mm를 마모시킴으로써 수행하였다. 마모된 면적을 동서남북 4군데 측정하고 평균값을 산출하였다. Fig. 8의 측정 결과에서 볼 수 있는 바와 같이 표면처리 후가 전보다 1.5배 향상되었다. 경도 및 마모량 시험 결과로부터 표면의 변질층 형성에 있어 초음파 진동을 이용한 표면개질 공정이 효과가 있음을 입증하였으며, 공정의 최적화를 통해 가공물

의 표면 성능 개선의 가능성을 확보할 수 있을 것으로 기대된다.

4. 결론

표면 개질층 형성을 위하여 친환경적 공정으로 초음파 진동을 이용한 표면처리 기술을 사용한 결과, 공정 변수에 따라 표면의 형상과 물성치가 변화되는 것을 확인하였다. 본 연구결과를 토대로 다음과 같은 결론을 유추할 수 있다.

- 1) 초음파 진동을 이용한 표면 처리 시 초음파파들의 변위를 감안한 접촉식 공정이 비접촉식 공정보다 표면 개질층 형성에 효과적이다.
- 2) 전 과정에서 형성된 가공 결 방향으로 초음파 진동을 이용한 가공 경로를 설정 할 경우 표면 거칠기가 향상되고 일정한 패턴의 가공도 가능하다.
- 3) 전 과정에서 형성된 가공 결 방향에 수직 가공 경로를 설정 할 경우 표면 거칠기 향상에는 유리하지만 마찰에 대한 내구성을 요하는 제품에는 부적합하다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부 신성장동력장비경쟁력강화 사업인 “초음파 진동을 이용한 나노표면개질 공정기술 및 장비 개발”사업[Grant No. 10047618]과 산업원천기술개발 사업인 “Eco/Bio 산업의 기능성 부품 생산용 차세대 융복합 가공시스템 개발”사업[Grant No. 10039982]의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

1. Park, J. H., Park, B. S., Cho, I. H., and Pyoun, Y. S., “Development of A Process Simulator for the Nanocrystallization Surface Modification Technology,” Proc. of Society of CAD/CAM Engineers Conference, pp. 201-206, 2005.
2. Nachman, G., “Shot Peening-Past, Present, and Future,” Proc. of 7th Int. Conf. on Shot Peening,” pp. 1-4, 1999.
3. Suh, C. M., Pyoun, Y. S., Cho, I. H., and Baek, U. B., “UNSM Surface Technology for Manufacturing and Remanufacturing Torsion Bars for Crawler Vehicles,” Journal of Ocean Eng. and Tech., Vol. 25, No. 6, pp. 80-85, 2011.
4. Kim, M. R., Lee, S. J., Lee, S. M., and Lee, D. W., “Effect of Hardness and Wear Characteristics of AL6061 using 4kHz Nanocrystal Surface Modification Vibration Module,” Proc. of KSPE Spring conference, pp. 1097-1098, 2014.
5. Seo, M. N., Lee, D. W., Ha, Y. H., Lee, S. M., and Kim, Y. W., “A Study on the Lubrication Characteristics of the Hydro-Static Journal Bearing for a Crank Shaft Pin Turner by Applying Dimple,” J. of Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 31, No. 8, pp. 715-720, 2014.
6. Lu, H., Lee, D. W., and Lee, S. J., “Analysis of Microstructure Produced by Fast Tool Servo Machining,” Proc. of KSPE Autumn conference, pp. 417-418, 2013.
7. Lu, H., Lee, S. J., Lee, S. M., Ha, Y. H., Park, C. H., and Lee, D. W., “High Frequency Fast Tool Servo Developed for Large Area Micro Feature Machining,” Proc. of KSPE Spring conference, pp. 587-588, 2012.
8. Lee, S. C., Pyun, Y. S., Kim, J. H., Tominaga, Y., and Kim, H. D., “Changes in Mechanical Properties of Sintered Tungsten Carbide using Ultrasonic Nanocrystal Surface Modification Techniques,” Proc. of KSME spring conference, pp. 131-132, 2013.
9. Lee, S. J., Lee, D. W., Lu, H., Lee, S. M., and Kim, M. R., “A Study on Leaf-Spring Design for FTS,” Proc. of KSPE Autumn conference, pp. 835-836, 2012.
10. Cao, X. J., Pyoun, Y. S., and Murakami, R., “Fatigue Properties of a S45C Steel Subjected to Ultrasonic Nanocrystal Surface Modification,” J. of Applied Surface Science, Vol. 256, pp. 6297-6303, 2010.