

## 진동자를 이용한 하이브리드 극초단 펄스 레이저 초정밀가공시스템 개발 및 Cu-Zn합금 응용

최원석<sup>a,b</sup> · 윤지욱<sup>a,b</sup> · 조성학<sup>a,b,\*</sup> · 강명창<sup>c,\*</sup>

<sup>a</sup>한국기계연구원 나노공정장비연구실, <sup>b</sup>과학기술연합대학원대학교(UST),

<sup>c</sup>부산대학교 하이브리드소재솔루션 국가핵심센터(NCRC)

## Development of Vibration Assisted Hybrid Femtosecond Laser Ultra-precision Machining System and Cu-Zn alloy Application

Won-Suk Choi<sup>a,b</sup>, Ji-Wook Yoon<sup>a,b</sup>, Sung-Hak Cho<sup>a,\*</sup> and Myung-Chang Kang<sup>c,\*</sup>

<sup>a</sup>Nano Machining Lab., KIMM (Korea Institute of Machinery & Materials), 171 Jang-dong,  
Yuseong-gu, Daejeon 305-343, Korea

<sup>b</sup>Department of Nano-Mechatronics, UST(University of Science and Technology), Daejeon 305-350, Korea

<sup>c</sup>National Core Research Center for Hybrid Materials Solution, Pusan National University, San 30,  
Jangjeon-Dong, Geumjeong-Gu, Busan 609-735, Korea

(Received August 20, 2013; Accepted August 26, 2013)

**Abstract** In this paper, we describe experiment results using a vibration assisted hybrid femtosecond laser ( $\lambda$ :795 nm) ultra-precision machining system. The hybrid system we have developed is possible that optical focal point of the femtosecond laser constantly and frequently within the range of PZT(piezoactuator) vibrator working distance. Using the hybrid system, We have experimented on brass and studied about differences of result of hole aspect ratio compare to general experiment setup of femtosecond laser system. Aspect ratio of a micro hole on brass is increased as 54% with 100 Hz vibration frequency and surface roughness of the side wall also improved compare to non-vibration.

**Keywords :** Hybrid machining system, Vibration, Femtosecond laser, Cu-Zn alloy, Aspect ratio

### 1. 서 론

최초로 레이저가 개발된 지 반세기가 넘는 세월이 지나면서, 레이저는 통신, 계측, 의료, 재료가공 등 매우 넓은 산업분야에 응용되어 과학기술 발전에 공헌을 해왔다. 레이저는 1970년대 초 처음으로 재료가공분야에 적용되었으며, 1980년대부터 미세가공분야에 응용되기 시작하였다. 레이저를 이용한 가공에서 직접 재료와 상호작용하는 것은 '빛'이기 때문에 다른 가공법에서는 볼 수 없는 고분해능, 비접촉 원거리가공, 드라이공정 등의 장점이 있다. 이러한 이유로 자동차, 조선, 항공우주, 전자, 반도체 등 다양한 산업분야에서 용접, 절단, 표면처리, 마킹 등의 분

야에 활용되어 왔다[1].

극초단 펄스 레이저를 이용한 미세가공은 열손상이 거의 없는 비열적(non-thermal) 가공이다. 즉, 펄스폭이 극단적으로 짧기 때문에 레이저빔에 의한 열영향부를 최소화할 수 있어 sub- $\mu\text{m}$ 급 가공이 가능하다. 또한, 극초단 펄스 레이저의 비선형(non-linear) 흡수현상으로 인한 재료 무의존성(independency)을 가지고 있기 때문에 어떠한 재료도 레이저 파장에 상관없이 가공할 수 있는 장점이 있다[1]. 또한 재료의 성질이 뛰어나나 기존의 방법으로는 가공하기 어려운 난삭재 일지라도 극초단 펄스 레이저의 높은 순간출력으로 인하여 가공이 용이하다[2-4].

미세가공에서 요구하는 것 중 하나가 고 종횡비(high

\*Corresponding Author : Sung-Hak Cho, Myung-Chang Kang, TEL: +82-42-868-7707, +82-51-510-2361, FAX: +82-42-868-7149, +82-51-510-7396, E-mail: shcho@kimm.re.kr, kangmc@pusan.ac.kr

aspect ratio)이다. mm 스케일 이상에서는 전통적인 방법으로 고종횡비 가공이 가능하나,  $\mu\text{m}$  스케일에서는 기존의 방법으로는 어려움이 있다. 그 이유는 공구크기가 가공크기보다 작아야하는데 기존의 방법으로는 수  $\mu\text{m}$ 급 공구를 제작하기 어렵고, 제작하더라도 가공중 공구가 부러지는 등 여러 어려움이 있기 때문이다. 이에 다양한 기술을 이용한  $\mu\text{m}$ 급 고종횡비 가공기술 연구가 활발히 진행 중이다.

본문에서는 진동자를 이용한 극초단 펄스 레이저 하이브리드 초정밀가공시스템과 이를 이용한 황동합금의 고종횡비 미세가공응용결과를 제시하고자 한다.

## 2. 하이브리드 극초단 펄스 레이저 미세가공

### 2.1. 극초단 펄스 레이저의 정의

레이저빔이 재료 표면에 조사되면 전자의 진동이 발생하고, 이 진동이 격자로 전달되어 재료에 열이 발생하게 된다. 이 현상을 열확산(thermal relaxation)이라고 한다. 재료에 따라 열확산 시간이 다르지만, 금속재료의 경우에는 수십-수 피코초(picosecond) 사이에서 열확산 현상이 일어나는 것으로 알려져 있다[3]. 극초단 펄스 레이저는 그 펄스폭이 재료의 열확산 시간보다 짧기 때문에 레이저빔이 조사되는 부분만 제거되어 초정밀 가공이 가능하다. 펄스폭이 재료의 열확산시간보다 짧은 레이저를 극초단 펄스 레이저라 한다. 그림 1에는 펄스폭의 차이별 가공결과와 개략도를 보여준다.

현재까지 개발된 극초단 펄스 레이저는 Nd:YVO<sub>4</sub> 매질을 사용하는 피코초 레이저와 Ti:Sapphire 매질을 사용하는 펨토초(femtosecond)레이저가 있다. 그 중에서도 펨토초 레이저는 극도의 높은 Intensity를 가지는데 펄스 당 수백 GW(Giga watt)~TW(Tera watt)/cm<sup>2</sup>의 첨두출력(peak power)의 방출이 가능하다[5, 6].

### 2.2. 극초단 펄스-재료 반응 매커니즘

극초단 펄스 레이저를 이용한 미세가공의 가장 큰 특징은 레이저펄스와 재료간의 상호반응 시간을 열이 전달되

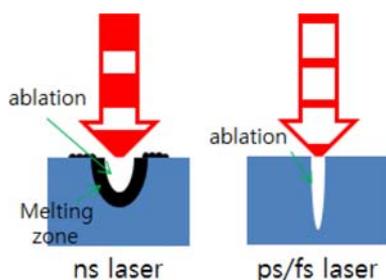


Fig. 1. Relationship between laser pulse duration and machining.

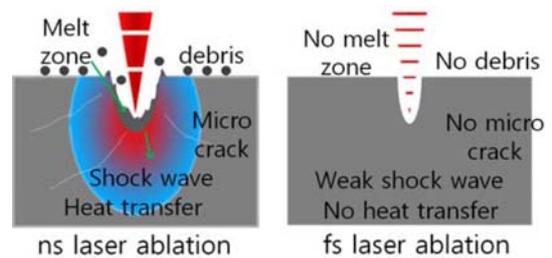


Fig. 2. Comparison between the process of ultrashort pulse laser and process of conventional pulse laser.

는데 필요한 시간보다 짧게 조사되기 때문에 레이저빔이 흡수된 부분 주위로 열이 전달되지 않아 재료의 열적손상이나 구조변화를 발생시키지 않는다는 것이다. 즉, 재료의 국부적인 부분이 극도의 짧은 시간 내에 제거되어 일반적인 레이저 가공에서 나타나는 열손상 현상이 거의 발생되지 않는다. 열확산은 취성이 높은 재질인 경우 국부적으로 미소크랙(micro-crack)을 유발하므로 열확산이 거의 발생하지 않는 극초단 펄스 레이저는 세라믹과 같은 취성재료 가공에도 유리하다고 할 수 있다. 극초단 펄스 레이저는 열확산을 방지하는 효과 외에 가공물의 주변에 형성되던 용융물(melt) 및 잔유물(debris)의 발생도 대부분 억제할 수 있고, 발생된다 하더라도 매우 미세한 분말 형태이므로 쉽게 제거할 수 있다. 그림 2에 극초단 펄스레이저와 나노초 레이저의 가공시 발생하는 현상에 대한 그림이 나타나 있다.

극초단 펄스 레이저는 가공 시스템 구성에 따라 sub- $\mu\text{m}$ 급 초정밀 가공이 가능하다는 특징이 있다. 레이저 미세가공공정에서 레이저빔의 스폿사이즈(spot size)는 가공정밀도에 큰 영향을 미치는 변수들 중 하나인데, 실제 가공에서 레이저빔이 광학계를 이용하여 재료 표면까지 이송되기 때문에 레이저빔의 스폿사이즈는 광학적인 한계에 의해 제한된다. 즉, 파장이 0.8  $\mu\text{m}$ 이라면 레이저빔을 이용하여 재료를 가공하는 경우에 스폿의 최소 크기를 파장크기 이하로 만들기 어렵다. 또한 레이저빔에 의한 열영향부를 고려하면 기존의 레이저를 이용하는 경우에는 sub- $\mu\text{m}$ 급 초정밀 가공은 어렵다고 할 수 있다. 그러나 극초단 펄스 레이저의 경우에는 임계치 가공(threshold process) 특성을 이용하면 이것이 가능하다[7-10]. 가우시안(Gaussian) 에너지 분포를 갖는 레이저빔은 빔의 중심 부분에 에너지 밀도가 상대적으로 매우 높다. 실제 재료 표면에 초점을 위치시켰을 때 가공이 일어나는 부분은 레이저빔의 에너지가 임계값 이상인 부분으로 국한된다. 경우에 따라서 초점 직경의 1/5이 될 수도 있다. 즉, 파장이 800 nm 인 펨토초 레이저를 이용하여 160 nm의 직경을 가지는 홀을 가공할 수 있다는 의미이다.

2.3. 진동자를 이용한 하이브리드 극초단 펄스 레이저 시스템 고종횡비 가공 매커니즘

일반적으로 수  $\mu\text{m}$  스케일로 가공을 하려면 높은 NA(Numerical Aperture)를 갖는 렌즈를 사용하여야 하지만 이 경우, 스폿사이즈에 비례하여 초점심도(depth of focus)가 짧아지게 된다. 여기서 초점심도란, 초점면으로부터 레이저 최소 스폿사이즈의  $\sqrt{2}$  배인 지점까지가 되는 조사방향으로의 길이를 뜻한다. 가공물의 두께가 초점심도보다 두꺼우면 한 점에 레이저를 계속 조사할 때, 초점심도의 바깥부분에서는 가공면적이 커지다가 어느 이상부터는 가공이 되지 않게 되는데, 이는 초점심도 부근에서 최소 스폿사이즈를 유지하다가 발산되어 스폿사이즈가 커지기 때문에 침투출력이 작아져 가공이 되지 않는 것이다. 이 때문에 레이저 조사방향과 같은 방향으로 렌즈를 이동하여 고종횡비의 가공을 수행하게 되지만 가공시간이 오래 걸리는 단점이 있다. 이와 같은 문제점을 개선하기 위해서 진동자를 집속렌즈에 장착하여 집속렌즈를 물리적으로 진동하여 초점면을 위아래로 진동시켜줌으로써, 초점

심도를 늘려주는 효과를 얻을 수 있다. 본 연구에서는 펨토초 레이저 시스템에 진동자를 적용하여 고종횡비 가공을 가능하게 하는 시스템을 구축하였으며 이 시스템을 이용한 실험을 진행하였다. 표 1에 진동자를 이용한 하이브리드 극초단 펄스 레이저 초정밀 가공 시스템에 사용된 진동자의 스펙이 나타나 있고, 그림 3에 진동자를 이용한 하이브리드 고종횡비 가공의 매커니즘 개략도를 보여주고 있다.

3. 하이브리드가공 장치 및 실험방법

펨토초 레이저 가공 시스템과 진동자 시스템의 하이브리드 시스템을 구축하기 위해 광학계(Objective lens)의 Z축에 대하여 주파수(1 Hz~500 Hz)에서 위치변위(500 nm~20  $\mu\text{m}$ )를 가지는 진동자 시스템을 장착하였다. 그림

Table 1. Specification of objective lens vibrator in hybrid femtosecond laser ultra-precision machining system

Property	Data
Motion and positioning	
Active axes	Z
Open-loop travel [ $\mu\text{m}$ ]	460
Close-loop travel [ $\mu\text{m}$ ]	400
Open-loop resolution [nm]	0.5
Close-loop resolution [nm]	1.25
Repeatability [nm]	$\pm 5$
Mechanical properties	
Stiffness in motion direction [ $\text{N}/\mu\text{m}$ ]	0.12
Resonant frequency @ 150 g [Hz]	120
Unloaded resonant frequency [Hz]	230
Push/pull force capacity [N]	100/20
Miscellaneous	
Material	Aluminum
Mass [kg]	0.23

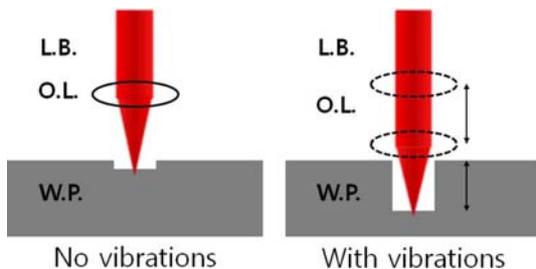


Fig. 3. Mechanism of high aspect ratio machining in hybrid femtosecond laser ultra-precision machining system. (L.B. : Laser Beam, O.L. : Objective Lens, W.P. : Work Piece)

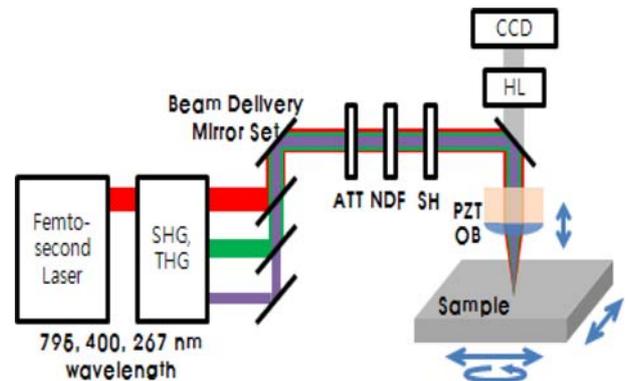


Fig. 4. Schematic of vibration assisted hybrid femtosecond laser ultra-precision machining system.

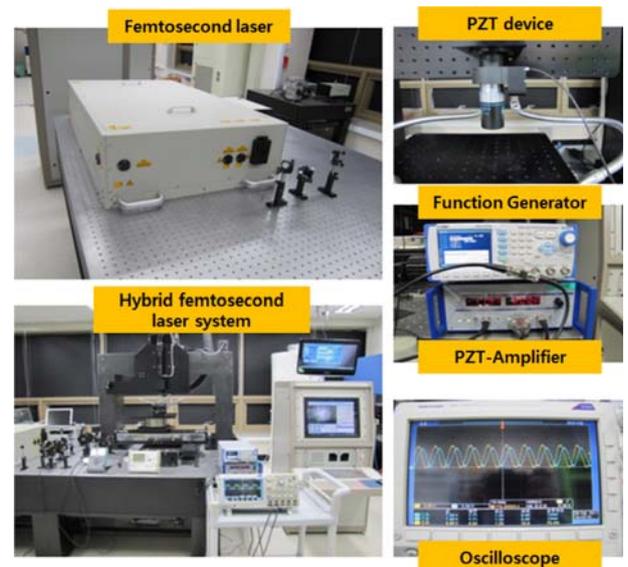


Fig. 5. Pictures of vibration assisted hybrid femtosecond laser ultra-precision machining system.

**Table 2. Mechanical property of brass**

Mechanical Properties	
Hardness, Rockwell F	70
Tensile Strength, Ultimate [MPa]	345
Tensile Strength, Yield [MPa]	135
Elongation at Break [%]	60
Modulus of Elasticity [GPa]	105
Poisson's Ratio	0.346
Machinability [%]	60
Shear Modulus [GPa]	39
Shear Strength [MPa]	235

4는 진동자를 이용한 하이브리드 극초단 펄스 레이저 초정밀가공시스템의 개략도를 나타내고 있다.

그림 5는 사용된 펄스 레이저와 전체적 가공 시스템 사진과 각각 설치된 Piezo Nanopositioning System 에서의 Nanopositioner와 Piezo Servo- controller & driver 사진과 Nanopositioner와 Piezo Servo-controller & driver의 구동과 motion scale과 입력 전압을 측정하기 위하여 펄스 레이저 가공 시스템을 기본으로 하여 NF corporation사 WF1973 모델의 Function generator와 Tektronix사 TDS3052B모델의 oscilloscope를 추가 구성하여 시스템과 연계한 사진이다.

진동 테스트 결과, 인가전압 10 V에 대한 광학계 렌즈 (Objective lens) 100배(NA: 0.70), 50배(NA: 0.55), 20배(NA: 0.42), 10배(NA: 0.28)의 입력 진동 변위는 각 20  $\mu\text{m}$  이고, 실제 진동변위는 표 2에 나타나 있다.

그림 5의 Oscilloscope 그래프로부터 알 수 있듯이 input 값과 output 값이 일치하지는 않는다. 여기서 input과 output은 각각 Function generator에 의하여 Nanopositioner에 입력되는 값과 Nanopositioner의 실제 진동 변위이다. 이에 따라서 vibration하는 진동수와 변위를 조절하면서 펄스 레이저 가공에 있어서 상관관계를 도출해 볼 수 있다.

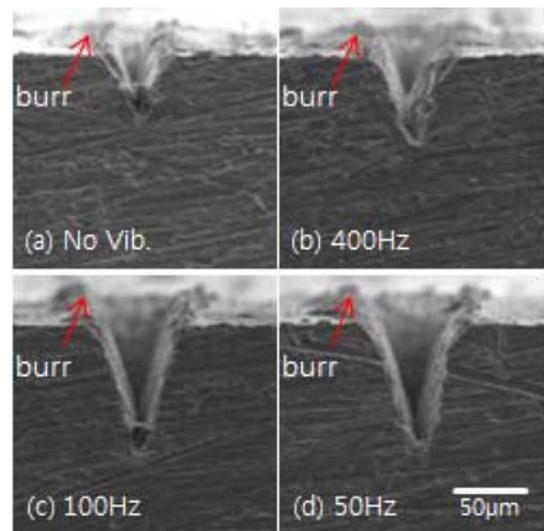
실험에 사용된 재료는 황동(Cu-Zn 합금)기판을 사용하였으며, 표 2에 기계적 특성을 나타내었다.

#### 4. 실험결과 및 고찰

진동자를 이용한 하이브리드 극초단 펄스 레이저 시스템을 이용해서 황동(Cu-Zn 합금)기판을 가공하는 실험을 진행하였다. 표 3은 PZT의 frequency변화에 따른 focal point의 진동변위(displacement)를 나타내고 있다. 진동이 없는 경우에는 진동 변위는 0이며, 진동이 400 Hz인 경우 진동 변위는 3.45  $\mu\text{m}$ , 100 Hz인 경우 15.75  $\mu\text{m}$ , 50 Hz인 경우 16.2  $\mu\text{m}$ 로 나타났다. 그림 6에서는 하이브리드 시스템을 이용해 홀(hole) 가공을 한 후 벽면을 polishing하여

**Table 3. Measurement result of 10X objective lens vibration in various frequency**

Frequency [Hz]	Displacement [ $\mu\text{m}$ ]
No Vib.	0
50	16.20
100	15.75
200	7.74
300	4.51
400	3.45

**Fig. 6. SEM images of comparison experiment in various frequency on brass.**

topcom사 SM-300모델의 전자현미경(SEM)을 이용하여 가공면을 비교하여 본 것이다.

본 시스템 그림 6에서 알 수 있듯이 진동변위(0~16.2  $\mu\text{m}$ )가 커질수록 가공된 홀 직경 및 종축(z-축)으로 가공된 깊이가 커짐을 확연히 알 수 있다. 광학계 진동이 없을 때는 표면에서의 가공 폭은 39.5  $\mu\text{m}$ 이고, 가공 깊이는 50  $\mu\text{m}$ 로, 종횡비(aspect ratio)는 1.26이다. 주파수가 달라짐에 따라 종횡비가 진동 변위가 커짐에 따라서 각 1.54(width :45  $\mu\text{m}$ , depth:69.5  $\mu\text{m}$ @ 400 Hz), 1.94(width:49  $\mu\text{m}$ , depth:95  $\mu\text{m}$ @100 Hz), 1.90(width:50  $\mu\text{m}$ , depth:95  $\mu\text{m}$ @50 Hz)으로 커짐을 알 수 있다. 같은 에너지의 레이저 빔을 조사하여도 PZT 진동자(Vibrator)의 진동 범위(Displacement)에 따라서 가공 깊이를 조절할 수 있었다. 또한 황동기판에 펄스 레이저를 이용하여 무진동과 진동상태로 홀가공 후 가공표면을 살펴보면, 무진동시, 가공부 표면에 약간의 burr가 나타남을 확인할 수 있었고, 가공된 홀 가공 입구 부분에서 표면에 nano droplet에 의하여 표면 거칠기가 큰 것을 알 수 있다. 이와 비교하여 50 Hz의 진동을 가하는

경우, 가공 입구 표면에 burr가 상대적으로 많이 줄어들었으며, 표면 부분에 vibration에 의하여 nano droplet이 사

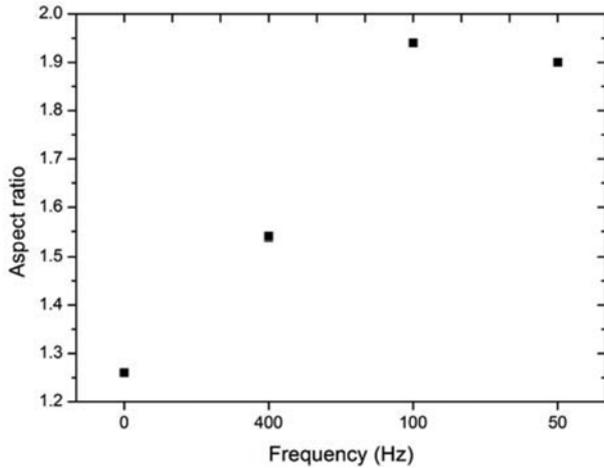


Fig. 7. Graph of aspect ratio respect to frequency of PZT vibrator.

라지고 표면조도 또한 좋아짐을 확인할 수 있다.

진동자를 이용한 하이브리드 극초단 펄스 레이저 가공 시스템을 활용하여 황동의 홀 가공을 수행하였다. 일반적인 레이저 가공시스템으로 가공한 경우 가공깊이는 50  $\mu\text{m}$  이었으며 진동자를 이용한 가공의 경우에는 최대 66.2  $\mu\text{m}$  깊이의 홀을 가공할 수 있었다. 그림 7에 진동자의 주파수 변화에 따른 종횡비에 대한 그래프를 나타내었다. 또한 가공된 홀 주변부의 표면 조도 또한 향상된 것을 확인하였다. 이는 진동자에 의해서 초점의 변화가 일어나면서 국소부에 펨토초 레이저의 짧은 펄스폭으로 인해 plasmon cloud가 형성이 되는데, 이렇게 생성된 plasmon과 황동사이의 interaction에 의해 nano droplet이 상대적으로 사라지게 되는 것으로 생각된다.

## 5. 결 론

진동자를 이용한 하이브리드 극초단 펄스 레이저빔과 재료간의 반응시간이 재료의 열확산시간보다 짧은 비열적

공정이면서, 고배율의 짧은 초점심도를 극복하여 작은 가공면적에서 종횡비를 증가시킬 수 있다. 그리고, 스테이지를 이용한 이동 없이도 진동자의 진폭을 바꿔줌으로써 손쉽게 종횡비를 증가시킬 수 있으며 고종횡비 가공시 가공속도를 향상시킬 수 있다. 실제로, Cu-Zn 합금소재의 가공에 적용한 결과 진동에 의해 가공부 주변에 burr가 줄어드는 것을 확인할 수 있었고, 가공부 표면에 nano droplet이 제거되어 이를 통해 표면조도의 향상을 가져온다. 또한 유리 및 폴리머 등의 투과물질 재료의 내부에 sub- $\mu\text{m}$ 급 크기의 패턴 가공시 손쉽게 종횡비 조절이 가능하기 때문에 광통신 분야, 전자, 반도체, 바이오 관련 산업 등의 광범위한 첨단산업분야에서 고부가가치 초정밀 핵심부품 제작에 폭넓게 응용될 것으로 전망된다.

## 참고문헌

- [1] J. M. Lee: Laser Techniques, **116** (2003) 28.
- [2] H. S. Tak, J. H. Kim, H. S. Lim, C. T. Lee, Y. K. Jeong and M. C. Kang: Journal of Korean Powder Metallurgy Institute, **17** (2010) 319.
- [3] A. Daskalova, S. Bashir and W. Husinsky: Applied Surface Science, **257** (2010) 1119.
- [4] X. C. Wang, G. C. Lim, H. Y. Zheng, F. L. Ng, W. Liu and S. J. Chua: Applied Surface Science, **228** (2004) 221.
- [5] H. G. Shon, J. H. Lee, J. G. Kim and D. S. Shin: Machining and Material, **17** (2005) 13.
- [6] A. Shamir and A. A. Ishaaya: Applied Surface Science, **270** (2013) 763.
- [7] S. H. Cho, W. S. Chang, K. R. Kim and J. W. Hong: Opt. Comm., **282** (2009) 1317.
- [8] S. H. Cho, W. S. Chang, J. G. Kim and K. H. Whang: Applied Physics Letter, **91** (2007) 121907.
- [9] H. Varel, M. Wahmer, A. Rosenfeld, D. Ashkenasi and E. E. B. Campbell: Applied Surface Science, **127** (1998) 128.
- [10] H. W. Choi, D. F. Farson, J. Bovatsek, A. Arai and D. Ashkenasi: APPLIED OPTICS, **46** (2007) 23.