피코초 레이저를 이용한 금속의 가공특성

Ablation of Metals using Picosecond Laser

한국기계연구원 : 신동식, 이제훈 , 서 정,
노지환, 정용운, 김재구

Ⅰ. 서론

1990년대 초 Kerr 렌즈 모드잠금방식이[1] 개발되면서 Ti:Sapphire를 매질로 사용하는 고체 펨토초 레이저 기술이 등장하였고 이후 SESAM(Semiconductor Saturable Absorber Mirror)[2], 및 CPA (Chirped-Pulse Amplification) 기술의[3] 개발로 출력 및 안정성이 크게 향상되었다. 이로 인하여 펨토초 레이저는 기존의 측정용 레이저가 아닌 미세가공공정용으로 사용되기 시작하였다. 그러나 Ti:Sapphire 펨토초 레이저는 구성 광학계의 특성상 평균출력이 기존의 레이저에 비해 낮은 단점을 보유하고 있다. 이러한 펨토초 레이저의 단점을 보완하기 위하여 Nd:YVO_4를 매질로 사용하는 피코초 레이저가 최근 개발되어 상용화 되었다. 이는 펨토초 레이저에 비하여 고출력 특성을 나타낼 뿐만 아니라 내부 구성 광학계가 펨토초 레이저에 비하여 간략하고 비선형 매질(SHG, THG 및 FHG)을 이용하여 고조파를 발생시키는 장점이 있다.

이와 같은 가공용 피코초 레이저는 상기 언급한 바와 같은 장점이 있는 반면 펨토초 레이저를 이용한 재료가공에 비해서 제시된 연구결과가 많지 않은 단점이 있다. 또한 피코초 레이저의 성능 평가를 위해 다른 레이저와 직접적으로 비교한 논문은 극히 드문 실정이다. 이에 따라, 본 논문에서는 펨토초 및 나노초 레이저와의 가공성 비교를 시행하였다. 또한, 피코초 레이저를 이용하여 다양한 금속 상에 가공실험을 수행하였는데 이는 피코초 레이저를 이용한 미세가공에서 중요한 기초자료로 활용될 것으로 판단된다.

Ⅱ. 실험방법

본 실험에서는 Nd:YVO_4 레이저를 사용하였으며, 펄스폭(pulse duration)은 12ps, 최대 반복율(repetition rate)은 640kHz이다. Fig. 1은 실험에서 사용한 피코초 레이저 미세가공 시스템을 나타내었다. 피코초 레이저를 이용한 금속가공의 기초 실험으로써 레이저 조사 속도, 펄스 반복율 변화에 따른 가공깊이를 측정하였다. 레이저 조사 속도는 0.1, 0.2, 0.5, 1, 2, 및 5mm/sec, 펄스 반복율은 100kHz로 설정하였으며, 주변 온도 변화의 영향을 배제하기 위해 항온(22℃) 분위기에서 가공하였다. 상기 피코초 레이저의 실험결과와의 비교를 위해 사용된 레이저는 펨토초 레이저(Coherent: 100fs), 및 나노초 레이저(Lee: 235ns)이며 가공재료는 경도가 뛰어나 미세 금형으로 많이 사용되고 있는 니켈을 비롯하여

알루미늄(Al), 구리(Cu), 스테인레스강(AISI 304) 및 티타늄(Ti)을 이용하였다. 사용한 광학렌즈는 객관적인 비교를 위해 동일한 N.A. 값(0.4)을 가지는 대물렌즈(mitutoyo)를 사용하였으며 레이저 빔의 출력은 렌즈를 통과한 후의 측정값을 기준으로 하였다. 측정법으로서 잔유물(debris)의 분포 및 성분은 전자현미경을 통하여 분석하였고 가공단면의 측면사진 및 깊이는 광학현미경을 이용하여 관찰 할 수 있었다.

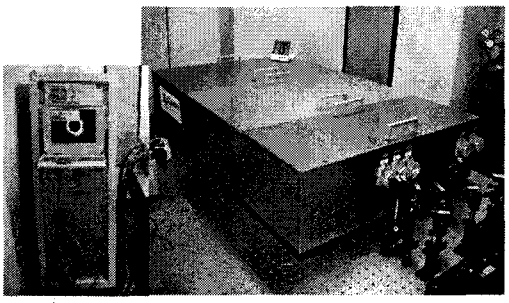
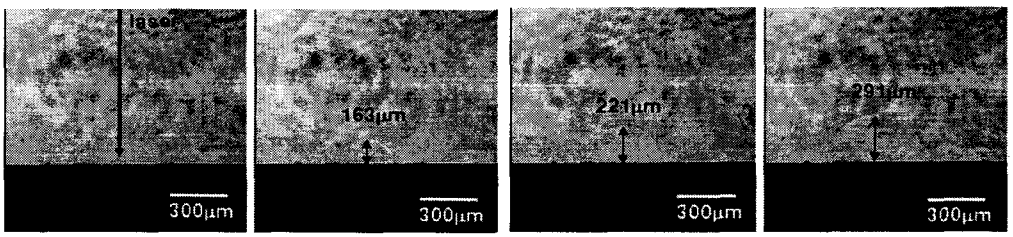


Fig. 1 picosecond laser system (LUMERA).

Ⅲ. 실험결과 및 고찰

1. 금속재료에 대한 피코초 레이저의 반응특성

극초단 펄스 레이저를 이용한 미세가공의 가장 큰 특징은 레이저 빔과 재료 간의 상호반응 시 발생하는 열이 전파되는 시간을 갖지 못하기 때문에 열적 손상이나 구조변화를 발생시키지 않는다는 것이다. 특히 금속재료의 경우 레이저의 에너지가 금속 내부로 전달될 때 준자유전자, 원자, 및 결정격자로 전이가 일어나는데 약 10피코초 가량의 시간이 소요되는 것으로 알려져 있다[4]. 전자온도와 격자온도를 이용하여 레이저 펄스의 열전달을 설명하는 Two-temperature모델[5]을 이용하여 1피코초 펄스와 1나노초 펄스가 알루미늄에 조사되었을 경우 열전달을 수치적으로 해석한 결과 1 피코초 펄스의 경우에는 레이저 펄스가 재료 표면에 조사되는 동안 전자의 온도가 격자(lattice)의 온도에 비해 급격히 상승하게 된다. 이에 반해 나노초 레이저를 조사한 경우는 전자와 격자간의 온도는 항상 동일하게 나타났다. 여기서 피코초 레이저의 경우 준자유전자에서 격자로 에너지가 전이 될 경우 항상 소요시간(relaxaion time)을 가지게 되며 이는 펨토초 레이저를 사용하였을 경우에도 동일하게 적용될 수 있다는 의미이다.



(a) (b) (c) (d)

Fig. 2 The shadowgraphy images after irradiating on copper using picosecond laser (532nm) : delay time (a) 20ns, (b) 80ns, (c) 130ns and (d) 200ns.

Fig. 2는 쉐도우그래피(Shadowgraphy)기법을 이용하여 피코초 레이저가 구리에 조사되었을 경우의 충격파를 측정한 사진이다. 이는 시간에 따라서 초음속 이상의 속도로 확장되었으며 180ns 의 시간이 지났을 경우 반경은 291㎛를 나타내었다. 이와 같은 실험은 추가적으로 구리(Cu), 니켈(Ni), 스테인레스강(AISI 304), 티타늄(Ti), 알루미늄(Al) 그리고 폴리머인 PMMA(polymethyl methacrylate)상에서 시행되어졌으며 시간에 따라서 충격파의 크기를 측정하였다.

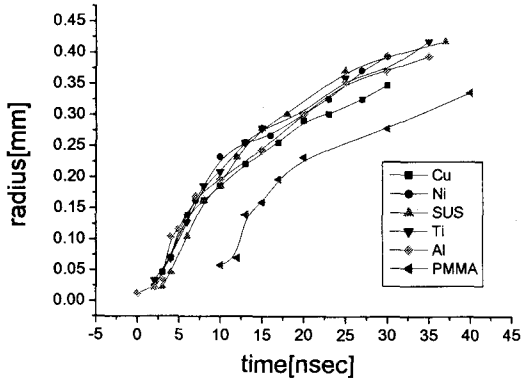


Fig. 3 The radius of shockwave on various metals according to delay time.

Fig. 3은 1064nm파장을 가지는 피코초 레이저빔을 각종재료에 조사를 하였을 경우의 충격파의 크기를 나타내는 그래프이다. 이때 사용된 레이저 빔의 펄스에너지는 87J/cm^{2}이다. 본 그래프는 재료별 가공성을 규명하기 위해 시행되어졌는데 에너지의 크게 흡수되어 폭발적인 반응이 일어난 재료일수록 상대적으로 큰 에너지를 가진 충격파를 방출하므로 재료의 반응성을 알 수 있는 자료이다. 실험결과 폴리머인 PMMA와 각종금속은 반응성에서 큰 차이를 보이고 있다. 즉 1064nm파장을 가진 피코초 레이저 빔을 금속재료에 조사한 경우가 폴리머의 경우보다 큰 에너지를 가진 충격파를 방출하는데 유리하였고 이는 금속과의 반응성이 더욱 뛰어나다는 것을 의미한다. 일반적으로 알루미늄과 구리는 레이저를 이용하여 가공하기 힘든 재료로 구분되어져 왔다. 재료내부에 존재하는 자유전자의 수가 일반금속에 비해 많아 전자기파인 레이저 빔이 미쳐 내부에 침투하기도 전에 소강되며 이의 반응으로 빔은 반사되기 때문이다. 그러나 피코초 레이저를 이용한 가공에서는 알루미늄 및 구리의 경우도 손쉽게 가공이 된다는 것을 알 수 있다. 이는 극초단 펄스레이저의 특징으로서 높은 첨두출력으로 인하여 국부적으로 폭발적인 반응을 일으켰기 때문이다.

2. 파장 및 출력에 따른 점 패턴

상기실험에서는 1064nm의 파장을 조사하는 단일 펄스를 이용하여 각종 재료에 따라 충격파의 크기를 측정하였다. 피코초 레이저 시스템의 내부에는 2차 및 3차 고조파를 생성할 수 있는 비선형 매질이 포함되어 있다. 본 실험에서는 이러한 고조파를 이용하여 다양한 파장에 대하여 점 패턴을 생성시켜 보았고 이를 비교 분석 하였다.

Fig. 4는 파장 및 출력에 따른 점 패턴의 분류로서 니켈의 표면에 단일 펄스를 조사하였다.

355nm의 레이저 빔인 경우 가장 깊으면서 주변부에 용융물이 가장 많이 분포되어 있다. 이는 파장이 짧아지면서 레이저 빔에 대한 재료의 반응성이 더욱 향상되었다는 의미가 된다. 500mW의 출력을 이용한 가공에서는 355nm파장의 빔을 이용한 경우가 가장 작게 가공되었다. 한편 상대적으로 저출력 영역인 5mW의 355nm의 레이저 빔인 경우 주변부에 용융물이 전혀 생기지 않은 2㎛ 직경의 홀이 가공 되었는데 이는 355nm 파장의 저출력영역은 정밀가공에 유리한 영역이라는 것을 의미한다.

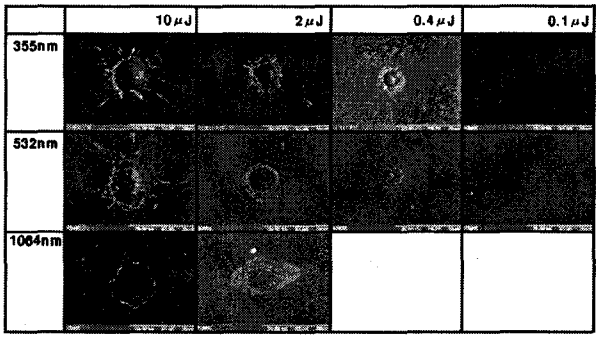


Fig. 4 SEM images of spot by one pulse according to wavelength and pulse energy of picosecond laser.

3. 파장 및 출력에 따른 가공깊이의 분석

상기 실험에서는 파장 및 출력에 따른 단일 펄스의 재료와의 반응특성에 대하여 고찰하여 보았다. 이는 재료가공에 있어 기초자료로서 유용하게 사용되지만 레이저 가공은 단일 펄스가 아니며 축에 따라 이동하면서 가공이 이루어진다. 이에 따라 본 실험에서는 파장, 출력, 가공속도 및 재료에 따른 가공성을 분석하고자 한다.

Fig. 5는 피코초 레이저의 532nm 파장을 이용하여 재료를 가공한 상부표면과 단면사진을 보여주고 있다. Fig. 5(a), (c)에서 상부 표면에 잔유물이 다량 산포되어 있는데 이의 성분은 EDS 분석 결과 산화니켈 및 산화동으로 판명되었다. 이는 피코초 레이저 가공시 격렬한 재료분해 반응과 동시에 분위기가스에 의해 산화반응이 이루어진다는 의미이다. Fig. 5(b), (d)는 상기 조건에서 가공된 니켈 및 구리의 가공단면 사진이다. 이때의 세장비는 각각 34와 38로서 기타 가공법에 비해 높은 세장비를 가지는 가공도 가능하다는 것을 알 수 있다.

Fig. 6은 금속재료의 반응 특성 및 깊이가공특성을 규명하기 위하여 나타낸 그래프로서 니켈을 가공속도, 파장 및 출력에 따라 가공후의 깊이를 보여주고 있다. 전체적으로 가공속도가 빨라지면서 깊이는 반비례곡선 분포를 나타내고 있으며 500mW 및 100mW의 평균출력을 재료에 조사한 경우 1mm/sec 이하의 가공속도의 경우 532nm의 레이저 빔을 사용하였을때 가장 깊게 가공되었으며 1mm/sec 이상의 속도에서는 355nm의 파장을 이용하여 가공한 경우가 상대적으로 깊게 가공되었다. 니켈의 흡수율은 파장이 짧아지면서 높아지는(355nm: 0.6, 532nm: 0.4, 1064nm: 0.3) 경향이 있어 짧은 파장의 경우 깊게 가공될 것으로 예상되었지만 100㎛ 이상의 깊이가공을 하는 경우 532nm파장을 이용한 경우가 가장 깊게 가공되었고 이는 레이저 빔의 내부반사도 중요한 메커니즘으로 작용한다는 것을 의미한다. 반면 저출력영역인 20mW에서 가공한 경우 355nm, 532nm, 그리고 1064nm의 파장 순으로 흡수율과 일치하였다.

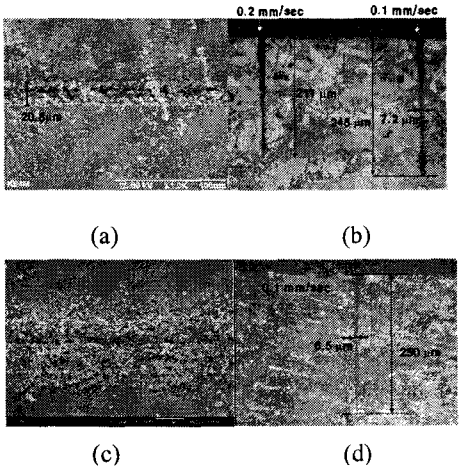


Fig. 5 (a), (c) SEM image (0.2mm/sec) of nickel and copper surface, (b), (d) cross-sectional view of line patterned nickel and copper by picosecond laser ablation; wavelength: 532nm, average power: 500mW, repetition rate: 100kHz.

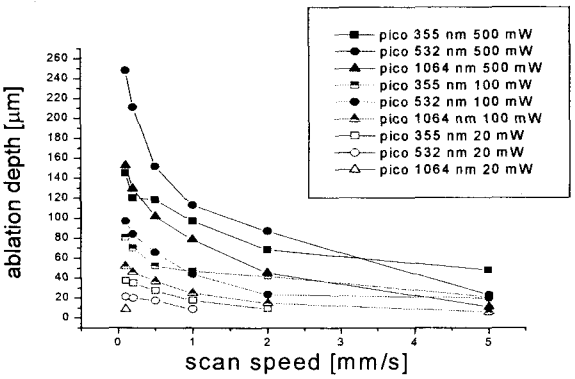


Fig. 6 The ablation depth according to scan speed, wavelength and average power.

4. 피코초, 나노초 및 펨토초 레이저의 가공성 비교

본 실험에서는 나노초, 피코초 그리고 펨토초레이저를 이용한 니켈의 가공특성을 분석하기 위해 표면상에 파장, 출력 및 가공속도에 따라 선가공을 하였으며 이를 비교 분석하였다. Fig. 7은 피코초 레이저와 나노초 레이저(Q-switched Nd:YAG Laser)를 이용한 니켈의 선 가공 후 형상의 비교로서 Fig. 7(a), (b)는 100mW의 출력 2mm/sec의 가공조건에서 가공부의 표면을 전자현미경 측정을 시행한 결과이며 Fig. 7(c), (d)는 500mW의 경우이다. 상기 실험에서 펄스폭은 각각 12ps 그리고 235ns로서 차이를 두었는데 피코초 레이저의 경우 나노초 레이저에 비하여 깊게 가공되었으며 주변에 금속의 분해된 입자인 잔유물(debris)이 산포되어 있다. 반면 나노초 레이저 가공의 경우 표면에서의 별도의 어블레이션

현상이 발견되지 않은 채 용융의 흔적이 발견되었다는 것을 알 수 있다.

Fig. 8은 피코초 및 펨토초 레이저에 의해 가공된 니켈의 가공깊이를 나타내는 그래프로서 800nm의 파장을 가지는 펨토초 레이저의 경우 100mW 영역에서 피코초 1064nm 파장의 경우보다는 깊게 가공되었으며 355, 532nm의 파장을 가지는 피코초레이저와 비슷한 가공경향을 띄었다. 그러나 비교적 열적 영향이 적은 355nm 피코초 레이저 빔은 저출력 영역인 20mW영역에서 펨토초 레이저의 가공성에 비해 다소 떨어난 장점을 보유한다.

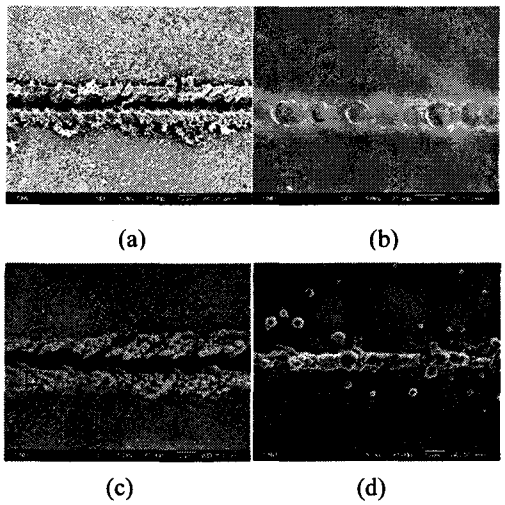


Fig. 7 SEM images of ablated line using (a), (c) picosecond laser(12ps) and (b), (d) nanosecond laser (235ns); wavelength: 1064nm, repetition rate: 20kHz, scanning speed 2mm/sec, average power: (a), (b) 100mW, (c), (d) 500mW.

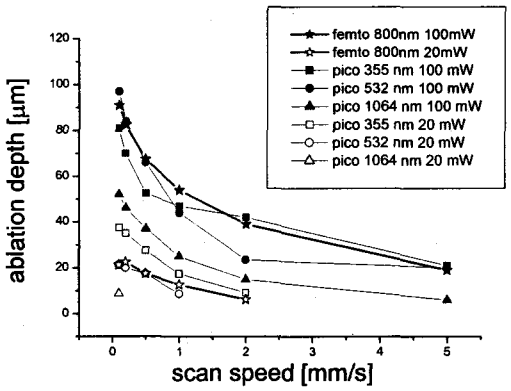


Fig. 8 The graphs of cross-sectional depth by picosecond laser and femtosecond laser ablation.

Ⅳ. 결론

본 논문에서는 최근 상용화되기 시작한 피코초 레이저와 기존의 펨토초 및 나노초 레이저와 가공성을 비교 분석하였다. 또한, 피코초레이저를 이용하여 다양한 금속에 가공실험을 시행하였고 이를 통해 반응성을 규명할 수 있었다.

이러한 과정에서 피코초레이저를 이용한 금속가공은 기존의 레이저에서 가공이 힘든 알루미늄, 구리와 같은 재질도 손쉽게 가공할 수 있다는 것을 알 수 있었다. 피코초레이저를 이용한 금속의 가공에서 다양한 금속재료임에도 불구하고 비슷한 전파속도를 가지는 충격파를 얻을수 있다는 것은 극초단 펄스의 높은 첨두 출력특성으로 인해 기존의 레이저가공특성과는 상이하다는 것을 알 수 있다. 피코초 레이저는 나노초 레이저에 비해서는 열적영향이 적으며 펨토초 레이저 가공과는 큰 차이를 보이지 않았다. 오히려 피코초 레이저의 355nm 파장은 고속 및 저출력영역에서는 가공특성이 뛰어나 금속의 마이크로 가공용으로 적합한 것으로 판단된다.

본 실험에서는 레이저 가공후 표면에 잔유물(Debris)들이 다량 산포되어 있었는데 각종 금속의 산화물로 판명이 났으며 이들을 제거하기 위한 공정이 필요한 실정이다. 또한 추후 개발 될 잔유물 제거공정을 통하여 적용분야로서 판단하고 있는 금속판재의 미세 패터닝, 마이크로 몰드 등의 적용분야에 효과적으로 접근할 예정이다.

후 기

본 연구는 산업자원부 지원사업인 핵심기술개발사업의 "첨단레이저 응용 미세가공기술개발" 과제의 지원으로 수행된 것입니다.

Ⅴ. 참고문헌

(1) Spence, D.E., Kean, P.N. and Sibbett, W., 1991, "60-fsec pulse generation from a self mode-locked Ti:Sapphire laser," Opt. Lett. Vol. 16, pp. 42

(2) Spectra-Physics Lasers, United States Patent 5,812,308: Mode locked laser and amplifier (1998).

(3) Strickland, D. and Mourou, G., 1985, "Compression of amplified chirped optical pulses," Opt. Commun. 56, pp. 219.

(4) F. Dausinger, H. H¨ugel, V. Konov, 2002, "Micromachining with ultrashort laser pulses, from basic understanding to technical application," Int. Conf. on Advanced Laser Technologies), pp. 15-20.

(5) D. Breitling, A. Ruf, F. Dausinger, 2004, "Fundamental aspects in machining of metals with short and ultrashort laser pulses", Proc. SPIE 5339, pp. 15-19.