

◆특집◆Micro Machining

레이저 빔 응용 기술

윤경구\*, 이성국\*, 김재구\*, 신보성\*, 최두선\*, 황경현\*, 박진용\*\*

Laser Beam Application and Technology in Micro Machining

Kyung Ku Yoon\*, Sung Kuk Lee\*, Jae Gu Kim\*, Bo Sung Shin\*, Doo Sun Choi\*, Kyung Hyun Whang\* and Jin Yong Park\*\*

Key Words : Laser Micromachining(레이저 미세가공), Eximer Laser(엑사이머 레이저), Laser Ablation(레이저 어블레이션), Micro Patterning(미소 패터닝)

1. 서론

1.1 개요

재료가공분야에의 레이저의 적용은 1960년대 후반부터 시작되었으며, 고출력 CO<sub>2</sub>와 Nd:YAG 레이저가 많은 산업분야에서 보편화될 정도로 발전하여 왔다. 재료가공에서의 레이저의 적용분야는 금속의 절단, 용접 및 드릴링, 세라믹의 스크라이빙, 플라스틱과 복합재의 절단 및 여러 가지 재료의 마킹 등을 포함한다. 이와 같은 모든 응용에서 공통적인 것이 레이저 조사에 의해 재료를 용융, 증발시키는 열적 메카니즘이다. 즉, 레이저빔의 세기와 파장에 의해서 정해지는 적외선 영역 레이저의 광자들은 조사된 시편에 분자 및 격자진동을 여기시켜 시편을 가공한다. 이와 같은 열적 메카니즘은 궁극적으로 여러 가지 가공 응용분야에서 이들 레이저의 적용을 제한하게 된다. 예를 들어 폴리머와 플라스틱의 절단에서 용융물의 원치 않는 흐름은 가공면의 정밀도를 떨어뜨리거나 가공 가능한 최소 두께를 제한하게 된다. 비록 산업적으로 유용하지만 이러한 장파장의 레이저들은 고

가의 복잡한 광학계의 도움이 없이는 고해상도 패턴(1 $\mu$ m이하)을 가공할 수는 없다. 그리고 이들은 반응을 개시할 수도 없다<sup>[1,2]</sup>. 1975년 희귀가스 할 재료가공에서 바람직한 특징인 효율적인 광화학적 라이드 엑사이머 레이저의 발견은 급속히 이와 같은 상황을 변화시켰다. 엑사이머 레이저는 자외선 영역의 조사와 높은 빔 세기에 의해 다른 종류의 에너지 전달 메카니즘이 가능하다. 그러나 레이저 조사과정에서 일어나는 반응은 가공되는 재료에 강력히 의존한다. 폴리머와 같은 유기재료의 가공시 재료의 해리 에너지에 근접하는 광자 에너지에 의해 제거과정은 직접적인 열적 영향이 없고 광화학적 어블레이션, 이라고 불리는 과정에 의해서 이루어진다. 금속이나 세라믹의 경우에는 유기 재료에서와 같은 이상적인 비열적 재료가공은 일어나지 않으며 열적가공에 의해서만 제거가 일어난다. 그럼에도 불구하고 CO<sub>2</sub>나 Nd:YAG 레이저에 비해서 이점을 갖는 것은 다음의 세 가지 특성에 기인한다고 할 수 있다. 첫째, 모든 금속이 적외선 영역의 레이저에 대해서 높은 반사율을 보이는 것과는 달리 UV 영역의 엑사이머 레이저에 대해서는 높은 흡수율을 갖는다. 따라서 레이저빔은 재료의 내부로 효율적으로 흡수 되고, 레이저 에너지는 가공 에너지로 효율적으로 변환된다. 얇은 표면층에서 완전히 흡수되므로 재료의 고정밀 가공을 가능하게 한다(제거, 드릴링, 마킹 등). 둘

\*한국기계연구원구원 자동화연구부 정밀가공그룹.

Tel. 042-868-7137, Fax. 042-868-7149

E-mail kkyoon@kimm.re.kr

\*\*한국과학재단, 인턴연구원

재, 짧은 펄스지속시간동안 1J 범위의 펄스 에너지를 가지기 때문에 높은 에너지밀도( $10^{10} \text{w/cm}^2$ )의 실현이 가능하므로 레이저 조사동안 재료는 주로 증발에 의해서 제거가 일어나며, 극도로 짧은 펄스 지속시간에 기인하여 열에너지의 전도는 매우 적으므로 열적으로 민감한 재료의 경우에도 크랙이나 구조 변형과 같은 열적 손상이 없는 가공이 가능하다. 셋째, 엑사이머 레이저는 파장이 짧기 때문에 파장에 비례하는 결상한계가 미크론오더이므로 미세한 고정도 가공이 가능하다<sup>13-6)</sup>.

### 1.2 레이저 어블레이션 메카니즘

엑사이머 레이저에 의한 재료의 제거, 즉 어블레이션은 고출력 레이저 펄스와 재료의 단순한 상호작용의 결과이며, 주로 증발, 파쇄(Spallation), 벗겨짐(Exfoliation) 또는 충격 효과와 같은 물리적 메카니즘의 견지에서 기술된다. 일반적으로 어블레이션 메카니즘은 열적, 전자적(비열적) 메카니즘으로 나누어진다. 열적 메카니즘은  $10^{10} \text{K/sec}$  오더로 표면을 급속히 가열시키는 높은 출력밀도의 레이저 펄스에 의존하며, 고체의 용융영역으로부터 팽창과 증발을 일으킬 수 있다<sup>17-9)</sup>. 전자적(비열적) 메카니즘은 원칙적으로 가열에 의존하지 않으며 두 가지의 메카니즘이 광범위하게 논의된다. 첫째는 단 광자 또는 다 광자 흡수에 의해 레이저 광자가 고체의 결합을 여기시키고 그 결과로 결합을 끊어 재료의 제거를 일으킨다. 둘째는 광 여기가 전자-홀 쌍을 생성한다. 일단 전자-홀 쌍이 생성되면 쌍의 포텐셜 에너지가 원자의 운동에너지와 결합되며 그 결과로 활성화된 원자는 표면 결합 에너지를 극복하고 재료는 제거된다<sup>110-111)</sup>. 재료의 레이저 어블레이션은 열적 및 전자적 메카니즘 양자를 모두 포함할 수도 있다. 예를 들어 고체와 레이저 펄스 전반부의 상호작용동안에는 가열이 아직 일어나지 않으므로 비 열적과정이 지배적이지만 펄스의 나머지가 흡수됨에 따라 재료의 온도는 상승되고 열적으로 활성화된 메카니즘이 개시된다. 강력하게 레이저를 흡수하는 고체는 어블레이션 메카니즘과는 무관하게 항상 가열을 동반하게 되므로 비록 비 열적과정이 일어나더라도 열적과정을 중지시킬 방법은 없다. 어느 메카니즘이 지배적인가 하는 것은 고체의 물리적, 화학적 성질에 의해 결정된다. 일반적으로 어블레이션 개시의 용이함은 고체의 열적, 광학적 및 기계적 성질에

의존하며 이들 중에서 가장 중요한 성질은 흡수율과 열확산도이다. 예를 들어 구리는 매우 흡수율이 높지만 두꺼운 시편의 어블레이션 개시를 위해서  $1 \sim 2 \text{J/cm}^2$ 의 높은 에너지밀도를 필요로 한다. 이것은 레이저에 의해 공급된 열적 에너지가 구리의 높은 열확산도에 의해 조사영역으로부터 급속히 제거되기 때문이다. 이와 반대로 유전체 기판 위에 증착된 얇은 구리박막은  $0.1 \text{J/cm}^2$ 의 낮은 에너지밀도에서 쉽게 어블레이션이 개시된다. 여기서는 열적 에너지가 유전체에 의해 급속박막 내에 제한되고 따라서 어블레이션이 쉽게 일어난다.

## 2. 레이저 미세가공 기술의 활용

엑사이머 레이저의 기술적 중요성에 대한 실현은 레이저가 개발된 다음해에 바로 이루어지기 시작하였고 계속해서 응용범위가 확대되어 왔다. 오늘날 엑사이머 레이저 어블레이션기술은 반도체공정의 레지스트 노광에서부터 인간의 시력교정에 이르기까지 많은 분야에 적용되고 있다. 또한 엑사이머 레이저의 산업적 응용의 확대에 따라 초장기 엑사이머 레이저가 갖고 있던 단점들이 보완된 레이저(긴 가스수명, 신뢰성 있는 동작, 출력 안정성, 균일한 공간적 세기분포를 갖는)들이 상업적으로 제공되고 있으므로 더욱 확대될 전망이다<sup>11, 4)</sup>.

Table 1 Contents of excimer laser application in Japanese Industries(1993)

Material	Processing						Total
	Removing	Drilling	Cutting	Slotting	Marking	Others	
Polyimide	1	5	1	2			10
Polymers	3	10	2	4			19
Polyimide/ Cu etc.	18	1		1			20
Polymers/ Cu	5	1	2				8
Other lamination	5	3	2	2			12
Silicon		1		4			5
Metal		3	3	5	2	1	14
Ceramics, Glass		6		11	3	1	21
Total	32	31	10	29	5	2	109

Table 1은 1993년 일본에서의 엑사이머 레이저의 산업적 적용분야를 정리한 것으로 전체 응용의 약 53% 정도가 엑사이머 레이저의 비열적 가공특성을 이용한 PCB 산업에서의 폴리머의 제거가공이

며, 금속가공은 약 13%정도를 차지하고 있으나 대부분의 응용이 드릴링이나 슬로팅과 같은 후판의 가공이며 박막의 가공에 적용된 경우는 없는 것으로 보고되고 있다<sup>15)</sup>.

Table 2 Excimer Laser applications in various industrial fields

Fields	Application	Material
Microelectronics packing	BGA via hole drilling	Plastics
	Flexible circuit via hole drilling, skiving	Plastics
	MCM, TAB window and interconnect drilling	Plastics, ceramics, silicon
Semiconductor	UV Lithography tools for DRAM and Logic production	Resist
	IC repair	Plastics, metal
	Thin film removal	Metals, oxides
	Semiconductor diagnostic equipment	Metals, ceramics plastics
	Wafer cleaning	Silicon
Data Storage Device	Wire stripping	Plastics, glass
	Air bearings for heads	Silicon, ceramics inorganics
	Micro via drilling of slider assys	Plastics
Medical Devices/ Medical Diagnostics	Micro-drilling angioplasty, cardiovascular, neurological catheters	Plastics
	Micro-drilling balloon angioplasty devices	Plastics
	Insulation removal of electro-physiology	Plastics
	Patterning of electrodes for electrophysiology	Metals
	Orifice drilling of IV drips	Metals, ceramics plastics
	Oral spray nozzles	Plastics, metals
	Calibration leak detection	Plastics
	Microfluidics for DNA analysis	Plastics, Inorganics
	Micro-injection for DNA analysis	Plastics, metals ceramics
	Blood cell slides	Inorganics
	Communication	Cellular phones via interconnections
Fiber optic grating fabrication		Inorganics
Optical circuits		Glass
Fiber cable stripping		Inorganics
Computer Peripherals	Flat panel display annealing	Silicon
	Ink Jet printer heads	Plastics
	AMLCD patterning	Metal

Table 2에서 엑사이머 레이저의 열적, 비 열적가공 특성을 이용한 응용 예를 산업분야별로 나누어 정리하면 다음과 같다.

### 2.1 마이크로 가공

벌크재료를 드릴링, 절단 및 용접하는 레이저의 능력에 대해서 친숙하다. 이와 같은 응용에는 고출력 CO<sub>2</sub>와 YAG 레이저가 주로 사용된다. 한편 엑사이머 레이저의 어블레이션 특성이 가공공정에 이상적인 응용분야들이 증가하고 있다. 특히 1~100 $\mu$ m 범위의 표면형상이 요구되는 응용에서 가능하다. 짧은 펄스지속시간을 갖는 자외선출력은 최소의 열영향부를 가져오고, 이에 따라 높은 정밀도와 우수한 엣지 명확성을 갖는 가공이 이루어진다. 구멍, 선 및 곡면의 복잡한 패턴이 엑사이머 레이저 가공에 의해 얻어질 수 있다. 폴리머 미세가공의 예로는 광파이버 정렬 스톱의 가공, 광학적 웨이브가이드에서의 전반사거울의 패터닝 및 웨이브가이드 디바이스의 가공을 들 수 있다<sup>11,22)</sup>.

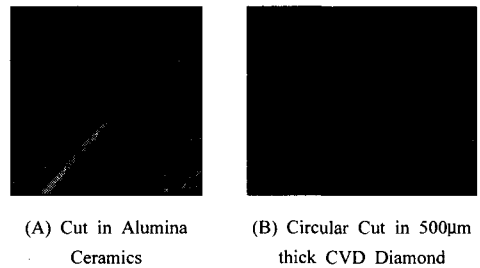


Fig. 1 Laser Micro Cutting

### 2.2 패터닝

가공을 위해 직접 빔을 사용하는 큰 장점중의 하나는 빔이 패턴화될 수 있다는 것이다. 좋은 품질로 제거될 수 있는 재료의 경우 표면의 직접적 패터닝은 매우 큰 장점이다. 이와 같은 Resistless, 가공은 습식 화학적 또는 포토 리소그래피 공정을 요구하는 플라즈마 에칭과 같은 표준 패터닝기술들에 비해서 상당한 비용과 시간의 절약을 가능하게 한다. IC 포토마스크의 제작과 수정, 엔코더 슬리트 패턴의 제작과 수정, 각종 회로 패턴 등이 적용 가능한 분야이다<sup>13-15)</sup>.

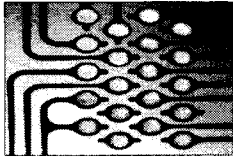


Fig. 2 Skiving Flexible Circuits

### 2.3 미소전자분야

미소전자분야에서의 엑사이머 레이저의 응용은 다양하다. 그 중에서 가장 대표적인 것은 유전체 양쪽의 금속박막끼리의 전기적 연결을 위하여 유전체 재료에 작은 구멍(1~100 $\mu$ m)을 가공하는 작업이다. 퀴즈, 폴리머 및 실리콘 나이트라이드가 유전체 재료로서 많이 사용되고 있다. 엑사이머 레이저는 깨끗하고 선명한 구멍의 가공을 가능하게 하며, 축소투영기법은 한번의 노출 사이클로 전체 표면에 구멍의 패턴을 가공할 수 있다<sup>16)</sup>.

엑사이머 레이저를 이용한 마이크로머시닝 기술은 두가지의 방법으로 회로의 집적도의 증가를 가능하게 한다. 마이크로 프로세스와 컨트롤 칩의 핀 수가 208 핀을 넘어감에 따라 BGA와 플립 칩과 같은 새로운 기술들이 플라스틱 캐리어의 마이크로 비아 홀(Micro via hole)의 드릴링에 의해 이들 IC들이 PWB에 연결되는 것을 가능하게 한다. 둘째로 MCM(Multi-Chip Module)과 같은 기술이 복잡한 IC들이 더욱 조밀하게 장착되는 것을 가능하게 한다. 따라서 이와 같은 마이크로 비아 홀 가공기술은 점점 미소전자 패키징 산업에서 중요성을 더해 가고 있다. 하드 디스크 드라이브의 경우, FPC(Flexible Printed Circuits)가 4핀 헤드와 드라이브 회로 사이의 전기적 결선을 위해 사용되던 미세 와이어를 대체하고 있다<sup>17, 19)</sup>.

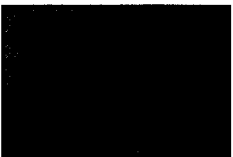


Fig. 3 Laser Micro Drilling  
(25 $\mu$ m Dia. Hole array in Polyimide)

### 2.4 반도체분야

엑사이머 레이저를 이용하는 리소그래피 노광장비는 90년대에 이르러 이루어진 발전의 하나로서, 이와 같은 deep UV 장비들은 굴절 및 반사 이미징 시스템을 이용하여 0.18 $\mu$ m의 선폭의 가공과 DRAM의 생산을 가능하게 하고 있다. 엑사이머 레이저를 이용한 웨이퍼의 건식 크리닝은 단지 레이저를 웨이퍼의 표면에 조사함으로써 용스트롬(A) 깊이의 원치 않는 오염물을 제거하는 기술로서 물, 이산화탄소, 증기, 초음파, 플라즈마를 이용하는 기술들과 나란히 경쟁을 하면서 시장에서의 점유율을 높여 가고 있다. 실리콘의 표면 및 체적 가공은 MEMS의 제조에는 여러 종류의 레이저가 기존의 리소그래피 기술을 대체하여 실리콘을 직접 가공하기 위하여 이용되고 있다.

### 2.5 데이터 저장 디바이스

디스크 드라이브의 코어 기술이 발전함에 따라 다양한 레이저 마이크로머시닝 응용기술들이 함께 개발되고 있다. 헤드를 드라이브에 연결하는 미세 와이어(~50 $\mu$ m)의 스트리핑에 레이저가 사용되고 있을 뿐만 아니라 FPC(Flexible Printed Circuits)의 미세 비아 홀의 가공에도 적용되고 있다. 특히 저장 용량이 증가함에 따라 헤드를 최적 가이드 높이로 이동할 수 있도록 하는 에어 베어링의 가공에 레이저를 적용하는 것을 연구하고 있다.



Fig. 4 Wire Stripping by Laser Micromachining  
(48 Gage Stripped Wire)

### 2.6 의료용 디바이스

F1-F4 카테타 또는 Cardiovascular를 위한 스텐트(stent)와 같은 의료용 디바이스의 레이저 마이크로 드릴링 또는 슬로팅은 이제 일반화된 기술이다. 치료 및 진단을 위해 미세한 전기장이 사용되는 생리학의 분야에서 레이저는 전극으로부터 절연물질을 제거하기 위하여 사용되거나 직접 금속 패턴을 제공하기 위하여 사용되고 있다. 기체와 액체 오리피스의 마이크로 드릴링의 분야에서 레

이저는 정맥 적하(Intravenous Drips), Oral Spray 및 Gas Delivery의 가공을 위해 사용되고 있다.

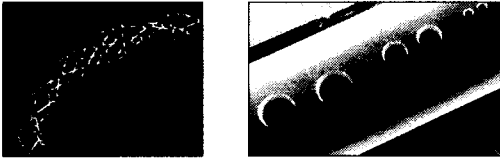


Fig. 5 Stent and Skived Holes of Medical Device

## 2.7 통신

주파수 대역이 넓어짐에 따라서 마이크로머시닝 기술이 Bragg Fiber Grating을 비롯하여 WDM (Wavelength Deviding Module)을 위한 여러 가지 광학 회로 제조를 위해 사용되고 있으며, 이와 같은 추세는 디지털 TV가 실현되면서 광 파이버가 일반 가정으로까지 연결되면서 더욱 발전을 계속할 것으로 예상된다. 무선 전화기 시장의 폭발적인 확대는 무선 전화기를 더욱 가볍고 작게 만들 수 있는 마이크로 비아(Micro via) 드릴링 기술의 출현을 가져왔다.

## 2.8 컴퓨터 주변기기

집적회로의 제조나 컴퓨터 자체의 패키징 기술과는 별도로 컴퓨터 주변기기는 레이저 마이크로머시닝 기술의 주요 응용분야의 하나가 되고 있다. 디스플레이 기술이 CRT로부터 LCD 또는 PDP와 같은 평판 디스플레이 기술로 급속히 변하고 있으며, 이 200억 달러 규모의 시장은 픽셀의 휘도를 제어하기 위하여 비정질 실리콘의 결정화를 위해 엑사이머 레이저를 사용하고 있으며, ITO와 같은 금속박막의 직접 패터닝은 기존의 다단계 공정보다 훨씬 제조 경비가 낮은 공정이 되고 있다. 잉크젯 프린터와 레이저 프린터가 사무실은 물론 가정에까지 보급됨에 따라 프린트 기술은 레이저 마이크로머시닝 기술은 프린트 헤드의 제조에 중요한 역할을 담당할 뿐만 아니라 조립공정에 까지 확대되고 있다<sup>[17-19]</sup>.

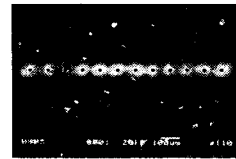


Fig. 6 Ink jet nozzle (Dia.: 17 $\mu$ m)

## 2.9 펄스 레이저 증착(Pulse Laser Deposition)

펄스 레이저 증착은 매우 간단하다. 엑사이머 레이저빔이 타겟에 집속되고 그 결과로 고밀도의 제거된 재료는 인접한 기관 위에 증착된다. 조건에 따라 다르지만 고품위의 박막이 분당 0.5 $\mu$ m의 성장속도로 얻어질 수 있다. 펄스 레이저 증착은 30년전 고출력 레이저의 발전이후 연구되어 온 오래된 기술이지만 최근 이 기술이 관심을 끄는 것은 고품위의 YBCO 고온 초전도체 박막을 성공적으로 증착한데 기인한다. 엑사이머 레이저는 타겟을 구성원자와 분자들로 쪼개는 능력과 어블레이션 동안 생성되는 플라즈마를 뚫고 들어가는 능력을 제공하므로 펄스 레이저 증착을 위한 유일한 레이저이다. 또다른 중요한 특성은 제거물들의 분출이 증착기관을 향해 좁은 각도분포를 갖고 이루어진다는 사실이다. 따라서 정확한 화학적 조성을 갖는 박막의 증착이 가능하며 상당히 효과적인 증착속도가 가능하게 된다. 고온 초전도 재료의 펄스 레이저 증착의 성공은 여러 가지 다른 재료의 박막증착에 대한 관심을 불러 일으키고 있으며 PZT, BaTiO<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>, BN, ZrO, MgO Zn<sub>x</sub>Fe<sub>3-x</sub>O<sub>4</sub> 및 비정질 다이아몬드 등이 대표적인 재료들이다<sup>[20,21]</sup>.

## 2.10 그 밖의 활용분야

레이저 마이크로 머시닝 기술은 그 밖의 많은 분야에서 이용되어지고 있다. 항공우주 분야에서 레이저는 항공기를 위한 정밀한 페인트 스트리퍼 (Stripper)로 사용되거나 터빈 블레이드 트리밍을 하는데 사용된다. 자동차 공업에서는 래피드 프로토타이핑 단계에서 가속도계나 타이어 압력센서를 제작하는데 마이크로 머시닝 기술이 사용된다. 또한 레이저는 실린더 벽을 따라서 일어나는 마찰을 줄여서 보다 높은 효율을 내기 위한 실린더를 제작하는데도 이용된다. 그 밖에도 레이저는 우라늄 복구와 같은 대체 에너지 원료 분야나 분석 도구

를 만드는 분야에서도 중심적인 역할을 하고 있다.

### 3. 레이저 어블레이션의 연구사례

높은 출력밀도의 레이저 펄스에 의한 금속박막의 제거과정에 관한 최초의 연구는 Peak<sup>[23]</sup>에 의해 행해졌으며, 가우시안 분포를 갖는 Q-스위치 레이저 빔이 박막에 조사될 때의 박막의 온도 분포와 증발에 필요한 임계 에너지밀도의 예측을 위한 해석해를 유도하고, 비스무트-Mylar, 금-유리의 박막/기판 조합에 대해서 이론해석 결과를 실험결과와 비교하였으며, 박막의 제거가 증발 메카니즘에 의해서 이루어지는 것으로 기술하였다.

엑사이머 레이저를 이용한 재료의 제거에 관한 연구는 80년대 들어서면서 엑사이머 레이저가 갖는 재료가공상의 특성이 인식되면서 활발하게 이루어졌다. 초창기의 연구는 기판 상에 증착된 박막의 제거 메카니즘을 규명하기 위한 연구가 대부분으로 Zaleckas<sup>[24]</sup>는 에폭시 위에 증착된 구리박막이 순수 증발에 기초한 이론적 예측값 보다 낮은 에너지밀도에서 제거된다는 것을 바탕으로 기판의 증발에 의해서 계면에 형성되는 압력에 의해 박막이 제거된다는 폭발 제거 메카니즘을 제시하였다. Andrew<sup>[25]</sup>도 XeCl 엑사이머 레이저를 이용하여 알루미늄/유리, 알루미늄/Mylar 및 Au/Mylar 시편의 제거 임계 에너지밀도를 결정하고, 열 평형방정식을 이용하여 계산된 용융과 증발에 필요한 에너지 밀도와 비교하였으며, 그 결과를 바탕으로 폭발 제거 메카니즘을 제시하였다.

레이저 조사시의 박막의 온도를 예측하기 위한 연구로는 Paek 이후에 Allen이 가우시안 분포를 갖는 레이저 빔이 박막에 조사될 때의 온도를 열전도 이론에 기초하여 유한 차분법을 이용하여 예측하였으며, Jain은 엑사이머 레이저 펄스 세기의 시간적 변화와 용융과 증발과 같은 상 변화를 고려하고 열 전도이론에 기초하여 유한 차분법을 이용하여 박막과 기판의 온도변화를 예측하였다.

박막의 제거 개시시간을 측정하기 위한 연구로는 Basemen이 쿼츠 위에 증착된 금박막을 532nm의 레이저 펄스로 제거시 프로브 빔을 조사하여 투과율을 측정하는 방법을 시도하였으며, Toth도 유리 위에 코팅된 텅스텐과 크롬박막을 ArF 레이저 펄스 제거 시 제거개시시간을 고속카메라와 프로브

빔을 이용하여 측정하였다.

체적(bulk) 재료의 어블레이션에 관한 연구는 주로 이를 이용한 표면개질, 박막의 증착 및 미세가공의 목적으로 행하여 졌는데 Folkes는 티타늄과 강단주철에 레이저를 조사시의 표면조도의 변화에 대해서 연구하였, Lumppe는 알루미늄 나이트 라이드의 레이저 어블레이션 시 에너지밀도와 주위 압력이 제거율에 미치는 영향을 연구하였다. Arnold는 여러 가지 금속을 기체 압력과 레이저변수(에너지밀도, 형상, 펄스수)의 함수로서 제거율과 표면형상을 연구하였으며, 마스크 투영의 결과로서 생기는 프레넬 회절의 영향을 계산하고 실험결과와 비교하였다. 또한 프라즈마를 광대역 pin diode를 이용하여 측정하고 제거과정이 펄스 지속시간 보다는 프라즈마 지속시간과 관계된다고 해석하였다. 미세가공의 목적으로는 유기 폴리머, 생체조직, 세라믹, 유리 및 복합재료 등과 같은 다양한 재료에 대해서 연구가 진행되었다.

크롬박막에 대한 연구 사례를 살펴보면 1981년에 Jain은 알루미늄 위에 증착된 크롬박막의 Nd:glass 레이저에 의한 제거실험을 통해 낮은 에너지밀도에서 peel off(固相 除去) 현상이 일어나는 것과 이론적 계산에서 증발에 의해 크롬층의 완전제거가 일어나는 높은 에너지밀도 조건에서도 확산 또는 용융상태의 알루미늄과의 혼합에 의해 크롬층이 완전히 제거되지 않는 것을 관찰하였다.

1990년 Schmatjko는 쿼츠 위에 코팅된 크롬박막에 XeCl 엑사이머 레이저의 펄스를 100회 조사한 후 표면형상 관찰을 통해 0.1J/cm<sup>2</sup> 조건에서 크랙킹과 Peel Off 현상이 일어나고, 0.3J/cm<sup>2</sup> 조건에서 용융에 의해 크랙이 넓어지면서 박막이 축소되는 것을 관찰하였는데 작은 접촉각과 불규칙한 형상을 기판과의 산소교환에 의한 산화의 결과로, 그리고 0.5J/cm<sup>2</sup> 조건에서 크롬의 드롭렛이 기판 내로 잠입되는 현상이 드롭렛의 표면산화의 결과로 해석하였다. 그리고 阿部池好<sup>[15]</sup>는 YAG 레이저의 제2高周波(532nm)를 이용하여 유리 위에 증착된 크롬의 제거특성과 제거정밀도 및 유리의 손상에 대해서 연구하였다.

1993년 Toth는 유리 위에 코팅된 크롬박막의 ArF 레이저에 의한 제거 메카니즘과 제거개시시간을 규명하기 위하여 고속카메라를 사용하여 관찰하였는데 낮은 에너지밀도에서의 박막의 제거를 열팽창에 의한 bulging의 결과로 해석하였고, 박막의

제거는 거의 펄스지속시간 내에 이루어지는 것으로 보고하였다.

1997년 Siegel은 쿼츠 위에 증착된 크롬의 KrF 레이저 펄스에 의한 손상을 박막두께의 함수로 조사하였으며, 손상과 증발 임계값을 열확산 모델에 의한 예측값과 비교하였으며, 낮은 에너지밀도에서의 크롬박막의 크랙킹을 과도한 열팽창의 결과로 해석하였다. 이와 같이 대부분의 연구가 크롬박막의 제거 메카니즘, 에너지밀도와 제거율의 관계를 규명하기 위한 목적으로 시도되었으며, 박막의 제거에 의한 미세 패턴의 형성에 있어서 기본적인 자료로서 이용될 가공변수와 가공품질의 관계에 대한 연구는 이루어지지 않고 있다.

다음은 한국기계연구원에서 진행한 실험인 크롬박막제거 특성에 관한 연구내용을 간략히 소개하고자 한다. Fig. 7은 본 연구에 적용한 포토 에칭과 엑사이머 레이저 패턴닝의 공정을 도식화하여 비교한 것이다.

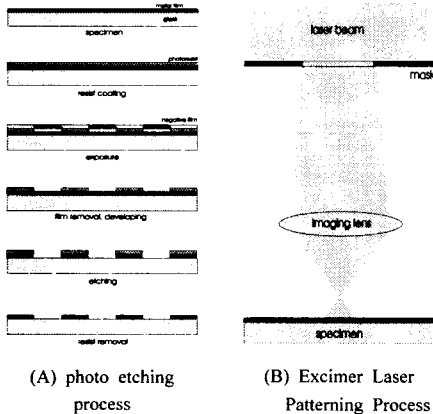


Fig. 7 The Process Comparison of Photo Etching and Excimer Laser Patterning

본 연구에서는 가공변수들이 제거 품질에 미치는 영향을 평가하여 이를 기초로 최적의 가공조건을 설정하고, 실제 패턴의 제작과 수정에 적용하기 위하여 다음과 같이 연구를 진행하고자 하였다.

- 1) KrF(248nm) 엑사이머 레이저를 기본으로 하고 축소투영광학계를 채택한 가공 시스템을 구성하고,
- 2) 엑사이머 레이저 빔의 에너지밀도의 공간적 분포(Spatial Distribution), 펄스 지속시간 및 시간적 변화(Temporal Profile)를 측정하고, 크롬박막의 반

사율을 거울표면 반사능 측정법을 사용하여 실험적으로 결정하였으며,

- 3) 열전도 이론에 기초한 1차원 열전달 모델에 대해서 유한차분법을 이용하여 크롬층과 유리기판의 온도, 용융지속시간 및 용융, 증발에 필요한 에너지밀도를 예측하였으며,

- 3) 세가지 크롬 증착두께(0.1, 0.2, 0.3 $\mu$ m)의 시편에 대해서 에너지밀도의 함수로 싱글 펄스 조사에 의한 박막의 형상변화를 전자현미경으로 관찰하고 이를 바탕으로 제거 메카니즘을 정확히 규명하고, 싱글 펄스에 의해서 완전제거가 일어나는 임계 에너지밀도를 실험적으로 결정하고, 이론적 예측값과 비교하여 이론적 모델의 유효성을 검증하였으며,

- 4) 크롬층 제거과정에 동반되는 크랙킹 및 벗겨짐 (Peel Off)의 발생 메카니즘에 대해서 급속가열과 열팽창에 따른 열 응력의 견지에서 해석하기 위하여 3차원 열전달 모델에 대한 유한요소해석을 시도하였으며,

- 5) 패턴의 크기를 변화시키면서 실험을 수행하여 박막제거시의 기하학적 효과를 분석하고, 패턴의 품질과 정밀도를 결정하는 여러 가지 요소(크랙, 치수 精度, 제거경계 精度, 재용고 경계층의 형상, 線狀流出, 드롭릿, 유리의 손상)들을 고려하여 최적 가공조건을 결정하였다.

자세한 연구내용은 다음 기회에 설명하고자 한다.

#### 4. 결론

본 논고에서는 레이저 미세가공의 적용분야를 간단히 살펴보았으며, 금속박막제거 관한 연구에 대해서 소개하였다. 레이저 미세가공의 적용분야는 매우 폭 넓다고 할 수 있으며, 앞으로도 레이저 미세가공의 중요성은 점점 증대될 것이다. 따라서 레이저 마이크로 머시닝의 미래는 기존의 가공기술로 실현 할 수 없는 미래의 응용분야에 레이저 미세가공 기술을 접목시키는데 있다. 현재 국내 레이저 산업은 아직까지 미숙한 상태이고, 앞에서 언급한 바와 같이 레이저 응용 기술 분야는 타 분야에 기술적 파급효과가 큰 만큼 국내의 레이저와 레이저 미세가공기술의 개발이 시급하다. 이를 위해서 먼저 레이저 발전기술, 레이저 시스템 개발 기술 및 레이저 가공기술이 발전 할 수는 토대가 마련되어야 할 것이다.

현재 한국기계연구원에서는 금속박막제거와, 풀

리머 미세가공, 레이저 유도화학 에칭, 레이저 크리닝 기술에 관한 연구를 통해 레이저 미세가공의 기본 특성을 파악하였다. 이러한 연구를 바탕으로 하여, 앞으로는 미소구조물의 3차원형상을 가공하는 요소기술과 시스템기술을 개발해 나갈 것이며, 실제 산업계에서 실현가능한 기술로 발전시켜 나갈 계획이다.

### 참고문헌

1. J. Brannon, Circuit & Devices, March pp. 11-18, 1997.
2. G.D. Poulin, P.A. Eisele, T.A. Znotins, SPIE Vol. 1023, Excimer Lasers and Applications, pp. 202-207, 1988.
3. T.A. Znotins, D. Poulin, J. Reid, Laser Focus /Electro-optics, May, pp. 54-70, 1987.
4. V. Pfeufer, Glastechn. Ber. Glass Sci. Technol. 70, No. 4, 1997.
5. T. Kadoya, ICALEO, pp. 339-347, 1992.
6. H.K. Tonshoff, R. Butje, Annals of the CIRP Vol. 37, No. 2, pp. 681-684, 1988.
7. D. Abergali, L.T. Perelman, G.S. Janes, C. von Rosenberg, I. Itzkan, M. Feld, Lasers in the Life Sciences, 6(1), 55, 1994.
8. R. Kelly et al, Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B, 9, 329, 1985.
9. E. Andrew, P.E. Dyer, R.D. Greenough, P.H. Key, Appl. Phys. Letts. 43, 1076, 1983.
10. J.C. Miller, Laser Ablation: Principles and Applications, Springer-Verlag, pp. 108-131
11. R. Shrinivasan, B. Braren, Chem. Rev. 89, 1303, 1989.
12. M. Rothchild, D. Erlich, J. Vac. Sci. Technol. B, 6, 1, 1988.
13. H. Hayashi, I. Miyamoto, Rev. of Laser Eng., 23, 12, pp. 1081-1089, 1995.
14. X. Zhang, S.S. Chu, J.R. Ho, C.P. Grigoropoulos, Appl. Phys. A, 64, pp. 545-552, 1997.
15. 阿部知好, "レ-ザによる 金屬薄膜除去加工," 레-ザ加工, pp. 135-142
16. J.R. Lankard, G. Wolbold, Appl. Phys. A, 54, 355, 1992.
17. R. M. Osgood, Jr., Circuits and Devices, Sep. pp. 25-31, 1990.
18. R. F. Miracky, Laser Focus World, May, pp. 85-98, 1991.
19. H. Endert, Advanced Applications of Lasers in Materials and Processing LEOS Summer topical Meeting 1996. IEEE, Piscataway, NJ, USA
20. K. Upadhyya, "Plasma and Laser Processing of Materials," A Publication of The Minerals, Metals & Materials Society, pp. 109-112
21. R. Reitano, P. Baeri, Nuclear Instruments & Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, Vol. 116, n1-4, 199, pp. 369-372
22. X. Zhang, C.P. Grogoropoulos, D.J. Krajnovich, A.C. Tam, Transport. Phenomena in Materials Processing and Manufacturing American Society of Mechanical Engineers, Heat Transfer Division, Vol. 336, pp. 45-54, 1996.
23. U.C. Peak, A. Kestenbaum, J. Appl. Phys. Vol. 44, N. 5, 1973.
24. V.J. Zaleckas, J.C. Koo, Appl. Phys. Letts. v31, N9, 1977.
25. J.E. Andrew, P.E. Dyer, R.D. Greenough, P.H.Key, Appl. Phys. Letts. Vol. 43, N11, 1983.
26. U. Sowada, H.J. Kahler, D. Basting, SPIE vol. 801, High Power Lasers, pp. 163-167, 1987.
27. V.P. Veiko, S.M. Metev, A.I.Kaidanov, M.N. Libenson, E.B. Jakolev, J. Phys. D: Appl. Phys. 13, 1565, 1980.
28. M.K. Chun, K. Rose, J. Appl. Phys. 41, 614, 1979.
29. Z. Toth, B. Hopp, Z. Kantor, F. Ignacz, T. Szorenyi, Z. Bor, Appl. Phys. A60, 431, 1995.
30. H. Hayashi, I. Miyamoto, Proc. Laser Materials Processing, ICALEO, pp. 391-400, 1995.
31. I. Miyamoto, T. Ogawa, H. Maruo, D. Konno, Proc. Laser Materials Processing, ICALEO, pp. 240-248, 1994.