

◆특집◆ 첨단레이저 응용 미세가공기술

펨토초 레이저 초미세 공정응용 나노바이오 기술개발

정세채*, 양지상**, 전병혁**, 이흥순**, 이대수**

Nanobio Technology Based on Femtosecond Laser Precision Processing

Sae Chae Jeoung*, Ji Sang Yahng**, Byong Hyuk Chon**, Heung Soon Lee**, Dae Su Yee**

Key Words : Femtosecond Laser (펨토초레이저), Micromachining (미세공정), Ge nanostructure (게르마늄 나노구조체), Microfluidics (미세유체), Single Cell Surgery (단일세포 공정)

1. 서론

최근 수많은 다양한 분야에서의 나노 사이즈의 측정 및 물질의 제조에 관한 다양한 기술에 대한 수요는 날로 증가하고 있는 추세이다. 특히 산업 전반에 걸친 나노테크놀로지 기술의 실용화에 대한 많은 논의는 21 세기 초 전 산업분야에서 산업응용이 급격히 진행될 것으로 예측되고 있다. 한편 펨토초 레이저 기반 초미세 공정 기술은 타 레이저 응용 분야에 비하여 그 역사는 길지 않다. 그러나 본 공정 기술은 기계적-열적 유발 손상을 최소화 할 수 있으며, 공정 정밀도를 획기적으로 향상 할 수 있다는 장점으로 인하여 IT, NT 및 BT 등 다양한 형태의 첨단 산업 분야에서 그 응용성 및 적용성이 검토되고 있는 분야이다. 이상의 응용 분야 중 현재 연구실에서 진행되고 있는 나노-바이오 기술에서 펨토초 레이저 초미세 공정 기술의 적용 과정과 현재 수행되고 있는 분야들 중 게르마늄 나노 구조체 형성 및 크기 제어 연구, 펨토초 레이저 초미세 공정 기술의

세포 성장 제어 및 단세포 기반 미세수술과 마이크로 유체 디바이스 제작 및 관련 측정 기술들을 소개하고자 한다.

본 기고문에서는 나노테크놀로지 전반에 걸친 논의는 지양하고, 최근의 펨토초 레이저를 기반으로 한 나노 및 마이크로 머신닝 기술이 어떻게 나노테크놀로지와 연관되어 있고 어떠한 연구가 이루어지고 있는지에 대한 내용으로 제한하고자 한다. 이미 지난 20-30 년간 펨토초(10^{-15} sec) 레이저 발전 및 증폭과 제어기술의 획기적 발전은 전자전이 한계를 뛰어 넘는 시간대에서, 물질-빛의 상호작용을 이해하고 그의 동력학적인 측면을 제어하는 분야에서 발전의 큰 원동력이었다. 최근 펨토초 레이저는 동작 및 출력 면에서 신뢰성을 갖추게 됨에 따라, 기초적인 측정 및 계측 분야에 국한되지 않고 나노공정 및 제어 등 실질적인 경제-산업분야에서 활용할 수 있는 첨단 기술로써 응용가능성이 한층 높아졌다. 특히 나노 및 마이크로미터 수준의 첨단 물리화학적 공정 및 기계적 가공 기술은 나노, 바이오, 정보전자 및 환경 산업 등 21 세기 신산업의 혁신적인 발전을 위한 핵심전략 기술이다.

2. 본론

2.1 펨토초레이저 기반 공정 기술

* 한국표준과학연구원 광기술표준부 나노광계측그룹

Tel. 042-868-5211, Fax. 042-868-5188

Email scjeoung@kriss.re.kr

펨토초레이저 등 첨단레이저를 기반한 초미세 공정 원천 기술을 개발하고 이를 생상공정 및 바이오-메디칼 분야에 관심을 두고 연구활동을 하고 있다.

** 한국표준과학연구원 광기술표준부 나노광계측그룹

지난 미국, EU 및 일본 등 기술 선진국들에서 매우 많은 투자를 하고 있는 첨단 레이저기반 미세가공 기술은, 타 미세가공에 비해 에너지 투여가 매우 짧은 시간 동안만 이루어지므로 열 및 고에너지 이온 물질에 의한 물리적·전기적·광학적인 변형 및 손상을 최소화할 수 있고, 가공 공차의 최소화가 가능하며, 청정환경이 필요 없고, 다양한 재료에서 가공이 가능한 이점이 있다. 일반적으로 나노 공정을 위하여 사용되는 진공 및 특정한 공정 환경이 필요하지 않으므로 물질의 상태 변형 및 고가의 부대장치를 최소화 할 수 있는 특징을 갖는다. 특히 펨토초 레이저는 Fig. 1 에서 보여주는 바와 같이 기존의 비교적, 연속적 레이저 및 나노초 등 긴 펄스 타입의 레이저에 비하여 특이적인 장점을 갖는다고 할 수 있다. 비유적으로 설명하자면, 어떤 정교한 철제 조각상을 만든다고 가정하여 보자. 조각가는 먼저 큰 철 조각들을 적절한 위치에 붙이는 용접작업을 하여야 할 것이며, 동시에 적당한 모양으로 구조물을 부분적으로 잘라내고 녹여 내어야 할 것이다.

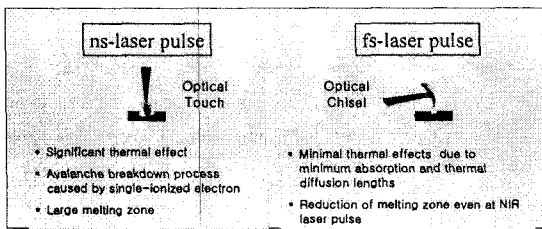


Fig.1 Comparison between the traditional long-pulse laser processing and ultrafast laser one

이때는 주로 산소 용접기와 같은 대량의 열적 에너지를 조각 대상물에 투여함으로써 성공적으로 큰 구조물 제작을 할 수 있을 것이다. 그러나 조각가는 이상의 큰 구조물에 아주 섬세한 부분의 조각을 함으로써 조각물의 완성도를 더욱 높이길 원할 것이다. 이때에 끝나 정과 같은 매우 날카로운 모양을 갖춘 새로운 도구를 갖고 있어야만 한다. 현재 및 미래의 공정 기술에서도 이상의 측면과 유사하게 매우 뾰족한 도구를 필요로 한다. 나노탐침이 이에 적당한 도구라 할 것이다. 나노탐침을 응용하여 다양한 형태의 모양을 많은 재료에 적용하는 나노 패터닝 기술

개발이 활발하게 진행 되고 있다. 이러한 기술은 직접적인 접촉에 의한 기계적 가공의 극단적인 측면이라고 할 수 있다. 본 논문에서 다루는 기술은 이러한 직접적이고 기계적인 접촉에 의한 가공과는 다르게 레이저 빛을 가장 뾰족하게 함으로써 비접촉적인 가공을 가능하게 할 수 있음과 동시에 기계적이고 열적인 변형을 최소화 할 수 있는 새로운 나노 공정 기술 개발에 그 목적이 있다. 이러한 새로운 펨토초 레이저를 이용한 나노공정 기술 개발은 다양한 첨단 소재의 직접적인 공정뿐만 아니라 살아있는, 장기 조직이나 생체 조직에 대한 손상을 최소화함으로써 단일세포의 하부 구조까지 정밀한 공정과 제어 및 조작이 가능하다. 따라서 향후 다양한 형태의 첨단 바이오 및 의학적인 측면에서의 응용 범위가 확장 될 것으로 기대되고 있다.

2.2 Ge 표면 공정을 통한 상온 광발성 나노 구조체 형성 및 그 크기 조절

게르마늄은 실리콘에 비해 전자이동도가 높은 장점에도 불구하고 안정된 산화막 형성의 어려움 및 접합에서의 높은 누설전류 등의 단점으로 인해 현재까지는 적외선 렌즈 등 광학 소자로 그 응용이 제한되어 왔다. 이로 인해 게르마늄은 실리콘처럼 공정 기술이 체계화되어 있지 않을뿐더러 그에 대한 기초 연구가 부족한 실정이다. 한편 금, 은 등의 금속 물질들에 비해 게르마늄의 레이저 직접 가공에 따른 구조 분석에 대한 연구가 전무한 상태이다. 본 연구에서 펨토초 레이저를 이용한 게르마늄을 가공하는 기술과 이 과정에서 레이저에 의한 게르마늄 결정성과 topography 및 광학적 특성의 변화를 관찰하였다. 이를 바탕으로 전자, 광학, 바이오 등의 다양한 분야에서의 게르마늄을 이용한 여러 소자 개발에 있어서 초고속 레이저의 응용 가능성을 연구 하였다. 실험에 사용한 게르마늄 시편은 Eagle-Picher사에서 구매한 것으로 (100) 방향, 350 μm 의 두께를 가지며 2" 웨이퍼를 조각 내어 사용하였다. 본 연구에서 사용한 레이저는 증폭된 펨토초 레이저로써 1 kHz의 반복률 및 최대 1 mJ/pulse 레이저 출력, 800 nm의 파장 및 150 fs 레이저 펄스 폭을 갖고 있다. 발생된 레이저 빔은 가변형 필터를 이용해 조절하였다.

이렇게 출력이 조절된 빔은 컴퓨터에 의해 제어되는 갈바노 스캐너를 거쳐 z-translation stage 위에 놓여 있는 시편을 가공하게 된다. 이때 레이저 빔의 spot size 는 대략 40 μm 로 측정되었다.

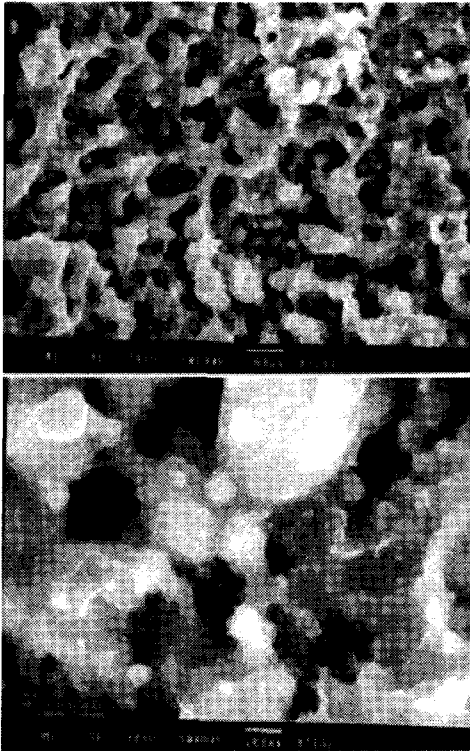


Fig. 2 Scanning Electron Microscope images of Ge surface processed with femtosecond laser at the laser fluence of J/cm^2

펨토초 레이저가 조사된 게르마늄 웨이퍼의 가공된 표면을 주사전자현미경 (SEM)을 이용하여 관찰하였다. Fig. 2 는 레이저 출력이 $45.3 \text{ J}/\text{cm}^2$, 레이저 주사 속도 2 mm/s, 주사 횟수 3 회 일 때 가공된 게르마늄 표면에 대한 SEM 사진으로서 각각 10,000 배와 50,000 배로 확대한 사진이다. 위 사진을 살펴보면 레이저에 의해 게르마늄 원자들이 균일하게 어블레이션 (ablation) 이 되지 못하고 군데군데 남아 있는 게르마늄 덩어리들이 관찰된다. 비록 스캔 속도가 느리기 때문에 한 지점당 10 여 개의 펄스가 조사되지만, SEM 사진

크기가 $11.5 \times 8 \mu\text{m}^2$ 이므로 레이저 빔 직경($\sim 40 \mu\text{m}$) 보다 작다는 것을 알 수 있다. 따라서 게르마늄 원자들의 에너지 준위에 따라 우선 ablation 되는 영역과 그렇지 못한 영역이 존재한다고 할 수 있다. 즉 레이저가 조사되는 시점에서 원자들의 준위가 어블레이션 threshold 보다 낮은 지점에서만 어블레이션이 일어나서 원자들이 공기 중으로 스퍼터링 (sputtering) 되는 것으로 생각된다.

아래 사진에서는 스퍼터링 되지 않고 남아 있는 게르마늄 구조들 사이사이에 수 nm 에서 100 nm 크기의 입자들이 관찰된다. 특히 그것들은 거의 모두가 원형이다. 초음파 세척을 한 이후에 관찰한 시편이므로 재증착에 의한 것들은 아닌 것으로 판단된다. 이것들의 생성 원인에 대해서는 아직까지 밝혀진 것이 없다. 이런 나노-입자들 때문에 레이저 처리된 게르마늄은 이전과 달리 특이한 특성을 갖게 되리라 예상된다.

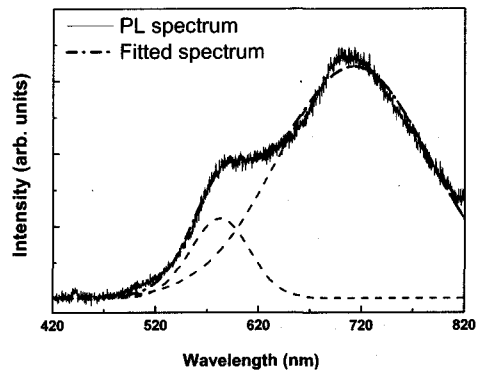


Fig. 3 Photoluminescence spectrum observed from Ge wafers processed with femtosecond laser

Fig. 3 은 초고속 레이저로 가공한 게르마늄에 대하여 연속파 HeCd 레이저를 여기광으로 하여 상온에서 관찰된 광여기 발광 스펙트럼을 보여주고 있다. 가시광선 영역에서 비교적 강한 orange-red 광발광이 관찰되었으며, 이들의 광발광은 나안상태의 눈으로도 감지할 수 있다. 일반적으로 단결정 상태의 게르마늄은 충만대와

전도대 사이의 에너지 폭이 0.67 eV 이며 간접천이성 반도체이므로 가시광선 영역에서는 발광할 수 없다. 그렇지만 bulk 한 상태에서 비발광성 물질인 게르마늄이라도 매우 작은 크기의 나노 입자로부터는 양자구속현상에 의하여 가시광선 영역에서 발광이 일어날 수 있다. Fig. 4 의 (a)와 (b) 펨토초 레이저를 single crystalline Ge 표면을 조사한 후에 표면의 변화를 AFM 및 HRTEM 으로 관찰한 결과이다. 약 10 nm 정도의 반구 모양의 나노구조체가 Ge 표면 위에 매우 규칙적으로 생성되는 것을 확인 할 수 있다.

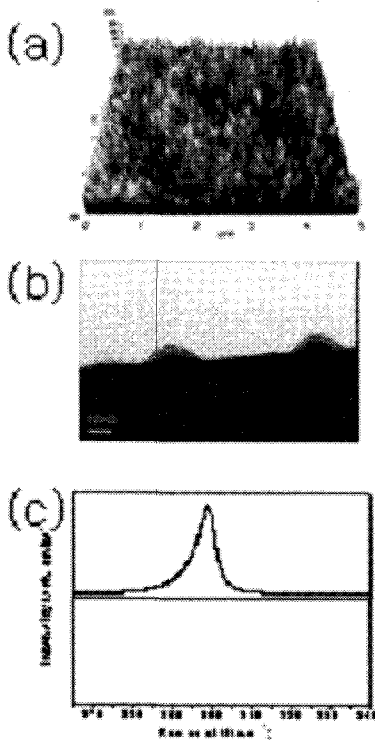


Fig. 4 AFM (a), HRTEM (b) images and its Raman scattering of processed Ge wafers

이러한 펨토초 레이저로 처리된 표면을 325 nm 의 레이저 빛을 상온에서 조사하였을 경우 400-800 nm 정도의 모든 가시광선 영역에서의 광발광 현상을 확인할 수 있었다. 이러한 현상은 Ge 의 band gap energy 를 고려하였을 경우 일반적으로 해석할 수 없는 현상이며 나노구조체 형성에 따른

양자 구속 효과에 의한 것으로 해석될 수 있다. 이러한 양자 구속현상은 Fig. 4 의 (b)에서 볼 수 있는 나노구조체 위에 자발적으로 형성된 수 나노미터의 GeOx 층에 의한 capped layer 와 Fig. 4(c)에서 보여주는 라만 변이 스펙트럼으로도 알 수 있다. 또한 크리스탈의 축과 레이저의 polarization 을 Fig. 5 와 같이 변화 시키는 경우 나노구조체의 크기를 약 7 에서 5nm 로 정교하게 변화시킬 수 있는 전혀 새로운 나노구조체 크기 제어 기술을 개발하여 보고한 바 있다. 이러한 layer 로 capping 된 게르마늄 나노구조체는 현재 광디스플레이 소자 개발 및 생체 분자의 선택적인 측정을 위한 다양한 응용 연구를 현재 수행 중에 있다.

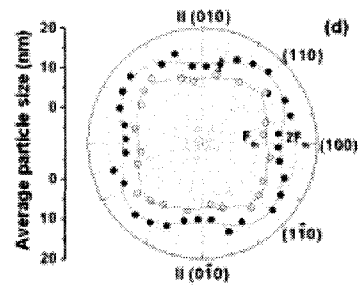


Fig. 5 Size dependence on the angle between crystal axis and laser polarization axis

2.3 펨토초 레이저 초미세 공정 기술의 세포 성장 제어 및 단세포 기반 미세수술 기술 개발

재활 의학분야에서 조직 공학적인 측면뿐만 아니라, 세포기반 칩을 응용한 신약 스크리닝 및 다양한 분야에서 세포의 성장인자 조절에 의한 다양한 형태의 세포 성장 기술을 필요로 한다. 본 연구에서는 이제까지 이루어져왔던 세포의 adhesion 바이오 고분자의 micro-patterning 에 의한 세포 성장 기술 개발 측면과는 다른 나노구조를 기반으로 물리적인 구조를 변수로 한 새로운 세포 성장 인자를 구하고 이를 응용하고자 하는 연구를 시도하고 있다.

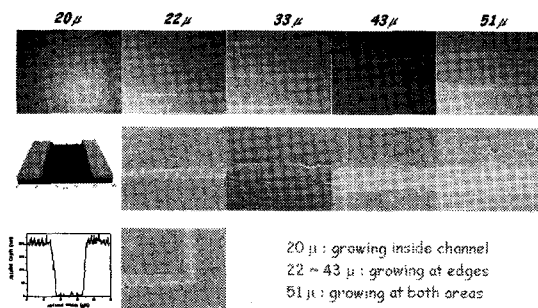


Fig. 6 Optical Images of cellines cultured on the micromachined ITO glass substrate

Fig. 6 은 전도성 세라믹 소재인 ITO (indium Tin Oxide)의 나노박막을 펄스 레이저 초미세 공정을 시도하고 이를 기반으로 N2a 세포 주를 성장시키는 연구를 수행하고 있다. 그림에서 보여주는 바와 같이 제거된 ITO 박막의 공정 면적에 대한 세포 성장과정이 매우 특이적으로 이루어지고 있음을 알 수 있다. 현재 본 연구에서는 이러한 특이적 세포 성장 조건의 생물 화학적인 측면에서의 원인 규명을 위한 PMMA 와 같은 유기고분자 박막에 대한 연구를 활발하게 시도하고 있다.

1960 년대 레이저가 최초로 발명된 후, 응용된 분야가 안전 사진을 찍는 광원으로 사용되었다는 점을 고려하여 보아도 레이저의 의학적-생물학적인 응용의 역사는 매우 길다. 그 후 라식이나 라섹과 같은 안과학적 시력 교정과 같은 외과학적 수술뿐만 아니라, 미용학적인 측면, 가장 최근에는 광역학 치료의 광원으로 레이저의 응용 분야는 더욱 확대되어 가고 있다. 펄스 레이저의 경우에도 의학 분야에서의 응용 가능성을 타진하고 있는데, 펄스 레이저를 이용하였을 경우 정밀도 및 안전성 분야에서 기존의 엑시머 레이저를 이용하였을 경우보다 대등하거나 더욱 더 나은 어블레이션 결과를 얻을 수 있다.

그 활용방안으로 단일세포 레벨에 생리적인 손상으로부터 완전하게 자유로운 nanobiosurgery 시스템을 개발하였고, 그 도식을 Fig. 7 에 나타내었다.

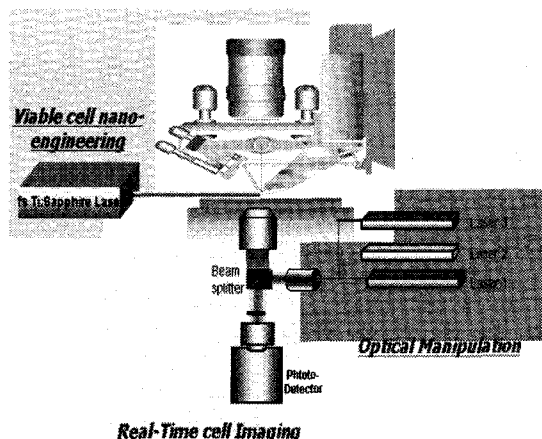


Fig. 7 NanoBio Surgery system based on femtosecond laser for single cell manipulation

이때 펄스 레이저를 일종의 수술용 칼로써 사용할 수 있게 함으로써 세포에 손상을 최소화 할 수 있게 하였으며, 동시에 대상 세포를 진공과 같이 살아있는 세포에게 치명적인 환경이나 급속 냉동 같은 인위적인 조작 없이 가장 생리학적으로 적합한 환경에서 관련 연구 및 분석을 가능하게 하였다.

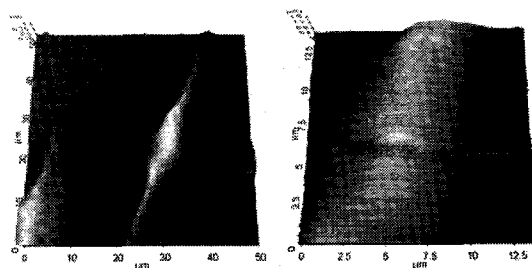


Fig. 8 AFM images before (left) and after (right) plasma membrane dissection of single cell

Fig. 8 에는 본 연구에서 개발된 시스템을 이용하여 펄스 레이저로 dissection 을 하기 전과 후의 mouse brain 에서 채취된 신경세포에 대한 AFM image 를 보여주고 있다. 이때 세포 막에 dissection 한 영역의 선포는 230 nm 이하로써 사용된 레이저의 파장 (800 nm)의 회절한계보다 매우 좋은 가공 정밀도를 얻을 수 있었다. 또한 이러한 dissection 뿐만 아니라 세포막에 깊이 150 nm 이하의 hole 을 drilling 할 수 있었다. 한편 이론적으로 펄스 레이저 공정 정밀도의 한계는 없으므로, 향후 레이저 플루언스 및 광학적인

접속 방법과 같은 공정 변수를 최적화함으로써 더욱더 진보된 세포막 수술기술이 개발될 것이다. 이상 기술된 펨토초 레이저 기반 nanobiosurgery 시스템은 특히 세포막의 존재유무에 구애 받지 않고 3 차원적인 초미세 공정이 가능하다는 특징이 있다.

레이저가 투과하는 세포막 영역에서는 레이저 유발 손상이 없으면서도, 목표 영역에서는 물질 변화를 야기시킬 수 있다면 세포 내 각종 세포 소기관에 대한 조작이 가능할 것이다. 이러한 방법은 비교적 잘 알려진 레이저의 선형 및 다중광자 여기와 같은 비선형 광학현상을 적용하여 레이저 초점허리의 거리를 획기적으로 단축하고 레이저 출력을 정밀하게 제어함으로써 해결할 수 있다. 또한 본 논문에서 제안하고, 이용한 방법은 형광현미경법 및 공초점 현미경을 포함한 초미세 나노광학 기술을 접목함으로써, operation 과정에서 일어나는 세포의 생물리적인 변화를 손쉽게 실시간 monitoring 함으로써 더욱더 많은 정보를 획득할 수 있도록 하는 것이다. 현재 본 연구에서 세포의 크기 및 대상은 단백질 및 DNA 및 RNA 와 같은 정보전달자와 같은 크기이다. 따라서 가공 정밀도가 나노미터 영역으로 되게 하기 위하여 나노팁을 응용한 펨토초 레이저 조사방법도 동시에 가능하도록 고안하였다. 이러한 기술은 현재 매우 많은 노력 및 자금이 소요되고 있는 분석화적인 방법과 비교하여 비교적 빠르고 저렴한 방법으로, 생물학적-의학적인 측면에서 세포 기능에 대한 궁극적인 해답을 할 수 있는 가장 직접적인 연구법으로 발전되기를 기대한다. 이러한 nanobiosurgery 기술은 향후 광학집게 (Optical tweezers)법을 접목함으로써 동종 혹은 이종의 세포간 혹은 세포와 인공적으로 만들어진 각종 마이크로 알갱이와의 동시 미세공정 기술을 개발 함으로, 현재 활발하게 진행되고 있는 생물학적-의학적인 연구개발에 있어서 반드시 필요할 것으로 기대되며, 초미세 공정 혹은 수술 법에 대한 원천적인 기술로써 펨토초 레이저 가공 및 공정 기술을 개발하고자 한다.

2.4 마이크로 fluidics 소자 제작과 마이크로 입자 영상 유속계

단체급식이나 학교급식 시설에서의 식품 안정성 검사에 대한 요구와 규제는 더욱 강화되고 있는 시점에 현재 많은 급식시설 보유기관이나

업체에서는 검사방법이나 그에 필요한 장치의 한계로 인한 사전검사가 이루어지지 않고 있는 실정이다. 전형적으로, 농장에서 사용하고 있는 물은 전체적인 수질과 분변에의 오염 정도를 알려주는 총 미생물 수에 대한 평가가 있어야만 한다. 하지만, 기존의 중앙 집중화된 수질 환경위생 유기물검출에 있어서는 5 일 이상 장시간의 반응시간과 연구실 형태에서의 측정시스템으로 이루어져 실시간 측정 및 원격 모니터링이 불가능하다. 본 연구에서는 아파트 등 집단거주시설 및 단체 급식이나 학교급식 시설 등의 상수원 수질 오염사고의 예방을 위한 음용수의 실시간 예비 실험 검사 및 감시를 통한 안정성 확보와 오수, 분뇨 및 축산 폐수의 처리에 관한 오수시설 설치에 관한 법률적 기준에 준하는 수준을 측정하는 적은 비용의 예비시험 분석 방법을 제시하였다.

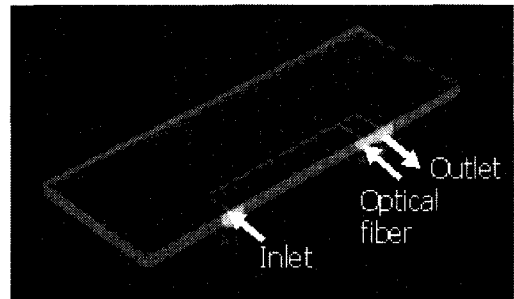


Fig. 9 Photography of microfluidic device for counting the biological particles

Fig. 9 은 펨토초 레이저를 이용하여 상용 유리기관에 미세 가공하고 시료의 세균 수 검출 측정이 실시간으로 가능한 디바이스이다. 컴퓨터상에서 Auto-CAD 로 그려진 도면은 갈바노미터 시스템을 통해 상용유리기관 위에 가공되는데, 이때 만들어지는 가공부분이 채널, 시료 및 광원의 주입구이다. 상용 유리기관 채널의 폭과 깊이는 반복횟수를 증가시켜 ~70 um 와 ~100 um 수준으로 결정할 수 있다. 이렇게 만들어진 디바이스를 표면의 친수성기 도입의 개질 과정을 거쳐 또 다른 상용유리와 맞대어 접합시킨 후 시료의 주입구와 출구가 막힘 현상 없이 용이 하도록 capillary 를 접합시킨다. 또한, 시료의 형광 및 산란현상을 이용한 측정을 위하여

532 nm 의 다이오드 레이저를 전송시키기 위한 단일모드형 광파이버를 삽입시켜 프로토타입의 디바이스를 만든다. Fig. 10 은 실험 장치 개략도이다. 마이크로 펌프를 이용하여

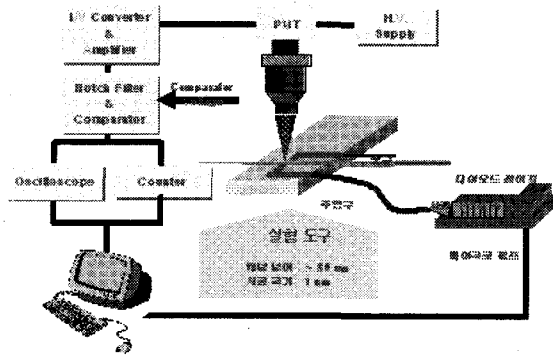


Fig. 10 Schematic diagram for counting of particles based on the microfluidic device

주입구로 시료를 흘려주고, 광파이버로는 다이오드 레이저를 입사시킨다. 디바이스에서 형성된 채널과 광파이버가 만나는 교점의 T 자형 부분은 검출기가 시료를 여기 시키는 방향의 90 도로 놓이게 된다. 이때, 흘러가는 시료에 레이저 광원은 자체 형광물질을 지닌 균물질에 대해서 형광을 발하거나 그렇지 못한 입자성분에 대해서는 산란광이 나오게 되는데 이 빛을 PMT 로 측정함으로써 시료 속에 들어있는 균의 수를 정량적으로 측정이 가능하게 제작되었다.

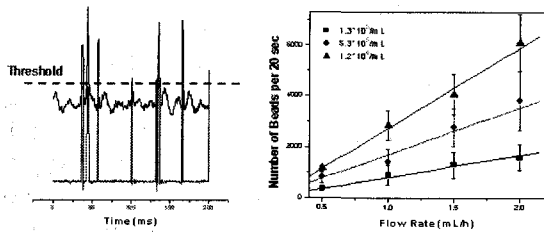


Fig. 11 Digitizing of the optical signal for counting (left) and its dependence on the particle densities in fluids

Fig. 11 의 왼쪽 그래프는 PMT 로 측정된 빛의 세기를 시간에 따라 나타낸 것으로 threshold 이상 되는 개수를 counter 를 통해 측정하게 된다.

오른쪽 그림은 1,000,000 개/mL (sub ppm)의 세 가지 농도를 가진 표준시료에 대해 시료를 흘려주는 속도 함수가 선형적임을 보여준다. 즉 정량적 측정의 신뢰성 및 측정 가능한 농도범위를 보여주고 있다. 본 연구를 통해 음용수에서의 대장균, سالم넬라균이나 양식 및 가축 사육 등 관련 유사 산업에서의 수질 위해 요소 관리를 위해 필수적으로 필요한 실시간 검사 및 감시를 할 수 있게 된다. 상용 유리 기판에 펨토초 레이저를 이용한 미세 가공의 또 다른 응용 분야로 마이크로 입자 영상 유속계를 들 수 있다. 이것은 유리판에 마이크로 급의 채널을 가공하여 입자의 속도 벡터장을 구하는 것으로 디바이스 제작은 위에서 언급한 방법과 동일하다.

Fig. 12 은 micro PIV 실험에 필요한 개략적 set-up 을 나타낸 그림이다. 실험에 사용하는 레이저는 New Wave Research 사의 두 쌍의 Nd:YAG 펄스형 레이저이며 2 차 조화파 광의 최대 세기는 펄스당 100 mJ 이며 반복률은 5-15 Hz 로 변화할 수 있고, 컴퓨터와 FlowMap 프로세서와 인터페이스로 컴퓨터에서 반복률을 조절할 수 있다. CCD 카메라는 HAMAMATSU 사의 모델명 C8484-05CP 이며, 픽셀 수는 1324 × 1024 이며 셀 크기는 6.45 μm × 6.45 μm이다. 주사기 펌프를 사용하여 microfluidic device 에 유체를 흘려주는데, 여기서 유체는 증류수를 사용하고 매질인 입자는 지름이 200 nm 인 폴리스티렌에 색소를 착색하여 사용한다. 펄스형 레이저광이 현미경 렌즈로

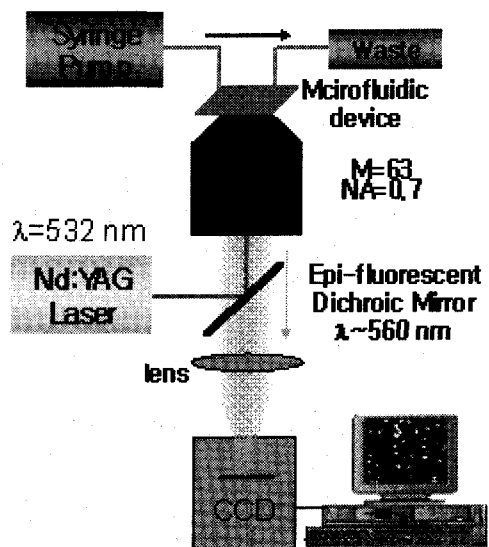


Fig. 12 Experimental set-up for micro-PIV

입사하여 디바이스 채널 속 유체 내에 있는 입자에 집속되며 중심 파장이 약 570 nm 인 강한 형광신호가 비간섭적으로 산란되어 나온다. 신호광은 다시 현미경 렌즈로 통하여 수집되며 Dichroic mirror 를 사용하여 신호광 만을 분리하여 CCD 카메라로 측정한다. Fig. 13 의 왼쪽 그림은 이렇게 측정한 그림이며, 오른쪽 그림은 CCD 영상을 cross-correlation 기법을 이용하여 속도 벡터로 표시한 것이다. 여기서 cross-correlation 기법이란 동일한 위치에서 시간차를 둔 레이저 펄스광으로 영상을 기록하여 입자의 위치 변화를 계산함으로써 속도 벡터를 구하는 방식이다. 본 연구에서는 3 차원 미세유속측정 기술을 개발하기 위하여 밑변이 80 μm 이고, 윗변이 150 μm , 높이가 60 μm 인 사다리꼴 형태의 채널을 가공하여 깊이에 따른 속도 분포를 구하였다. Fig. 14 의 왼쪽은 채널 중앙에서의 속도를 깊이 별로 측정한 값으로, 오른쪽의 simulation 결과와 비교적 일치함을 알 수가 있다. 이 마이크로 입자 영상 유속계를 통하여 미소 유체 고유의 물리량을 정밀하게 측정하고 해석이 가능하며, 나아가서는 BT, ET 등 미래 신산업의 다양한 미소 유동체에 응용할 수 있다.

3. 결론

이상에서 보는 바와 같이 펨토초 레이저를 이용한 가공은 기존 가공법이 할 수 없는 다양한 미세 가공을 할 수 있고 그 응용 범위도 매우 다양하다. 고출력 특성에 의한 고차 광학 비선형적 물질-광 상호작용은 더 이상 레이저 파장에 의한 한계로 지워지지 않는 공간 분해능을 가능하게 하며, 이러한 기술개발은 차세대 디스플레이용 광전 소재 및 전기전자 소재뿐만 아니라 생체조직 등 다양한 형태의 물질에 대한 미세 가공 기술로 응용할 수 있다. 또한 차세대 디스플레이 개발 및 생산에 필수적인 ITO 와 같은 기능성 나노박막에 대한 초미세 공정 기술의 확보 및 기존의 습식각공정에서 야기되는 환경문제를 근본적으로 극복하기 위한 친환경적 미세가공 공정 확보는 국가간 기술무역장벽 극복에 도움이 되리라 기대된다. 최근 근적외선 영역에서의 고출력 레이저를 갖는 펨토초 레이저의 비약적인 발전에 따라, 펨토초 레이저광원을 실험실 내 순수 연구 분야에 국한하지 않고 실제 응용성을 갖춘 장비로 개발된다면 파급 효과는 실로 막대하다고 할 수 있다. 또한, BT, IT, NT 등의 융합 기반 기술 확보를 통한 타 기술 분야로의 펨토초 레이저 초미세 공정 기술의 이전이 가능하다고 여겨진다.

후기

본 연구는 부분적으로 산업자원부 및 식품의약품안전청 용역연구개발사업 지원에 의하여 수행된 연구 결과임.

참고문헌

1. Park, M.I., Park, C.O., Kim C.S. and Jeoung, S.C., "Characterization of Femtosecond-Laser-Ablated a Germanium Single Crystal in Air by Using X-ray Diffraction," Journal of The Korean Physical Society, Vol 46, 2, pp.531-535, 2005.
2. Park, M.I., Park, C.O., Kim C.S. and Jeoung, S.C., "XRD studies on the femtosecond laser ablated single-crystal germanium in air," Optics and Lasers in Engineering 43, pp.1322-1329, 2005.
3. Jeoung, S.C., Kim H.S., Park, M.I., Lee, J. and Kim, C.S., Park, C.O., "Preparation of Room-

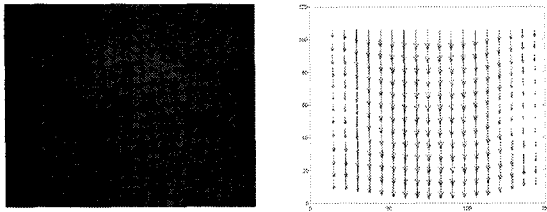


Fig. 13 CCD images of emissive particles in fluids (left) and its cross correlation for velocity field

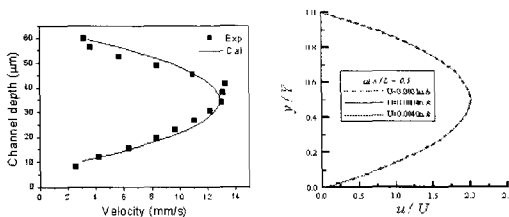


Fig. 14 Measured (left) and theoretical (right) velocity dependence on the depth in trapezoidal microfluidic device

Temperature Photoluminescent Nanoparticles by Ultrafast Laser Processing of Single-Crystalline Ge,” The Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 44-7A, pp.5278-5281, 2005.

4. Park, M., Chon, B.H., Kim, H.S., Jeung, S.C., Kim, D., Lee, J.-I., Chu, H. Y., Kim, H.R., “ Ultrafast laser ablation of indium tin oxide thin films for organic light-emitting diode application,” Optics and Lasers in Engineering 44 pp.138-146, 2006.
5. Yahng, J. S., jeung, S.C., Choi, D. S., Cho, D., Choi, M.H., “Fabrication of microfluidic devices by using a femtosecond laser micromachining techniques and micro-PIV studies on its fluid dynamics,” JKPS Vol. 47, 2005 in press
6. 정세채, 최준례, 박명일, “기계적 연마에 공정을 통한 유리기관의 직접접합방법,” 2003 년 (특허출원번호: 2003-0043968, 특허 등록번호: 0523940)
7. 정세채, 전병혁, 박미라, “세균수 검출이 가능한 수질 측정시스템 및 이를 위한 디바이스 형성,” (특허출원번호 : 10-2004-0074608)
8. 정세채, 박명일, 최재혁, “반도체 나노구체 및 그 형성방법,” (특허출원번호 : 10-2004-0030174)
9. 정세채, 김택겸, 이홍순, “과장 선포 확대 기술을 채택한 초고속레이저 초미세 가공장치 및 가공방법,” (특허출원번호: 2005-86697)