

**마이크로 금형 제작을 위한  
PET의 엑시머 레이저 어블레이션  
- 푸리에 광학을 이용한 가공 단면 형상의 제어 -**

신동식\* · 이제훈\* · 서 정\* · 김도훈\*\*

\*한국기계연구원 레이저응용시스템그룹

\*\*연세대학교 금속공학과

**The excimer laser ablation of PET for micro-mold insert  
- The control of cross sectional shape using Fourier optics -**

D. S. Shin\*, J. H. Lee\*, J. Suh\* and T. H. Kim\*\*

\*Laser Application Group, Korea Institute of Machinery & Materials

\*\*Dept. of Metallurgical System Engineering, Yonsei University

**Abstract**

The manufacturing process for the microfluidic device can include sequential steps such as master fabrication, electroforming, and injection molding. The laser ablation, using masks, has been applied to the fabrication of channels in microfluidic devices. In this research, an excimer laser was used to engrave microscopic channels on the surface of PET (polyethylene terephthalate), which shows a high absorption ratio for an excimer laser beam with a wavelength of 248 nm. When 50- $\mu\text{m}$ -wide rectangular microscopic channels are ablated with a  $500 \times 500 \mu\text{m}$  square mask at a magnification ratio of 1/10, ditch-shaped defects were found in both corners. The measurement of laser beam intensity showed that a coherent image in the PET target caused such defects. Analysis based on the Fourier diffraction theory enabled the prediction of the coherent shape at the

image surface as well as the diffraction beam shape between the mask and the image surface. It also showed that the diameter of the aperture had a dominant effect. The application of aperture with a diameter of less than 3 mm helped to eliminate such defects in the ablated rectangular microscopic channels on PET without such ditch-shaped defects.

**Key Words** : excimer laser(엑시머레이저), PET(polyethylene terephthalate), Fourier Transform(푸리에 변환), microfluidic device(마이크로 유체소자), mask projection (마스크 전사기법), electroforming(전주도금)

## 1. 서 론

LIGA<sup>1)</sup>공정의 X-선 리소그래피에 비해 3차원 가공이 유리하고, 또한 방사광 가속기와 같은 고가의 장비가 필요 없이 실험이 가능한 UV 레이저 마스크 프로젝션 기법에 대한 연구가 진행되어 왔다<sup>2-5)</sup>.

본 논문에서의 마이크로 유체소자<sup>6)</sup> 제작공정은 모형의 가공, 전주도금에 의한 니켈 금형제작 그리고 마이크로 인젝션 몰딩의 순서로 진행된다. 마이크로 채널은 미세 유체의 이동경로이며 사각형 단면을 가진다. 엑시머 레이저 빔은 사각 마스크를 통하여 모재 상에 마스크의 형상이 전사되어지며 빔 에너지의 분포에 따라 단면형상이 결정되어지므로 사각형단면의 채널을 만들 수 있다<sup>7)</sup>.

마이크로 영역의 가공에서 가공된 채널의 모서리에 움푹 파인 홈(ditch)이 발생될 수 있으며, 이러한 결함은 전주도금으로 제작된 금형의 모서리에 돌출부를 형성한다. 또한, 이 금형을 이용하여 인젝션 몰딩 하였을 경우에 그대로 전사되기 때문에 모형(模型)의 제작시 가공부의 모서리에 발생한 홈은 중대한 결함중 하나가 될 수 있다. 이를 해석하기 위해 이미지 프로세싱에 사용되는 푸리에 광학이론을 적용하였다.

이미지 프로세싱에 대한 연구는 1859년 Foucault가 knife-edge 실험에서 직접적인

영상광이 사라지고 산란된, 즉 회절된 광이 나타난다는 사실을 발견한 것이 시초이다. 뒤를 이어 1873년 Abbe는 Coherent 이미지의 형성과정에서 회절의 중요성을 인식하게 되었다. 그리고 1946년 Duffieux는 회절을 푸리에 적분을 적용하여 이론적으로 해석할 수 있었다<sup>8)</sup>.

이와 같은 이론은 영상신호처리 분야에서 널리 사용되고 있으나 레이저 빔을 이용한 가공에서는 아직 적용분야가 미진한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 푸리에 광학이론을 이용하여 금형에서 발생한 돌출부의 원인을 분석하고 이를 제거하기 위한 최적의 변수를 도출하는데 주안점을 두고 z축에 따른 빔의 강도분포를 실험값과 시뮬레이션 값을 비교 분석하였다.

## 2. 실험방법

레이저 어블레이션에 사용된 레이저는 248 nm 파장을 가지며 펄스폭(pulse duration)이 5~6 ns인 KrF 엑시머 레이저(독일ATL사)이다. 폴리머의 재료는 엑시머 레이저( $\lambda$ : 248 nm)에 대하여 광화학반응(photochemical process)을 주된 가공 메커니즘으로 하여 용융물(melt)이 없고 균열(crack)이 발생되지 않으며 표면 부스러기(surface debris)가 적게 발생하는

PET(polyethylene terephthalate)이다<sup>9)</sup>.

Fig. 1은 광학계를 나타내고 있으며 사각마스크, 원형조리개, 집속렌즈(focal length:86.9 mm), 그리고 이미지 영역의 가공시편이 광학계의 구성요소이다. 본 실험에서는 이들의 퓨리에 변환특성을 해석하여 가공시편인 PET상에 형성된 미소채널의 형상을 비교분석 하고자 한다<sup>9,10)</sup>. z축의 거리를 나타내는  $z_1$ 은 955.9 mm,  $z_2$ 는 95.59 mm 그리고  $f$ 는 86.9 mm 인 이미지 결상 조건<sup>11)</sup>하에서 1/10의 축소비로서 레이저 빔을 조사하였으며 회절의 영향을 분석하기 위해  $z_2$ 를 변화시키면서 단면형상을 관찰하였다.

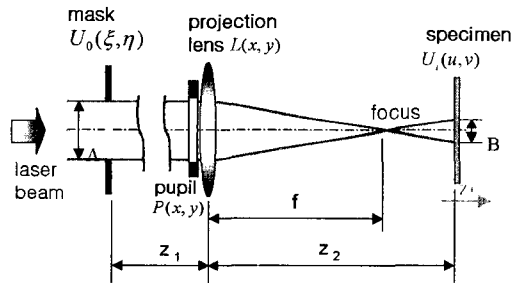


Fig. 1 Geometrical layout of mask projection.

퓨리에 광학이론<sup>10)</sup>에서 z축에 따른 이미지 프로세싱은 식 (1)과 식(2)로서 설명할 수 있다. 식(1)과 식(2)는 마스크를 통과한 빔의 강도분포를 말하는 입력함수  $U_0$ 에 대한 임펄스 응답함수를 표현하고 있으며 식 (2)의  $h(u, v, \xi, \eta)$ 는 빔이 마스크를 통과한 빔이 이미지영역에 도달하기까지의 과정에 포함되는 함수인 동함수(pupil function), 프레넬(Fresnel) 회절함수 그리고, 렌즈함수를 하나의 함수로 표현한 식이다.

더욱더 나아가 식 (2)는 Goodman<sup>10)</sup>에 의해 변수들이 소거되어 식 (3)으로 간략화 될 수 있었다. 즉 입력파의 임펄스응답 함수인  $h(u, v, \xi, \eta)$ 는  $P(x, y)$ 로서 표현되는 조리개의 함수로서 함축 시킬 수 있으며 조리개의 구경이 이미지형성에 큰 영향을 미친다는 것을 보여주고 있다.

이를 뒷받침하기 위하여 식 (4) 와 같이 표현되는 진폭전달함수(amplitude transfer function)<sup>10)</sup> 를 고려해하였다. 이는 입력부에서의 공간주파수와 이미지 영역에서의 공간주파수를 선형적으로 표시할 수 있는

$$U_i(u, v) = \int \int_{-\infty}^{\infty} h(u, v; \xi, \eta) U_0(\xi, \eta) d\xi d\eta \tag{1}$$

$$h(u, v; \xi, \eta) = \frac{1}{j\lambda z_1 z_2} \exp \left[ j \frac{k}{2z_2} (u^2 + v^2) \right] \exp \left[ j \frac{k}{2z_1} (\xi^2 + \eta^2) \right] \\ \times \int \int_{-\infty}^{\infty} P(x, y) \exp \left[ j \frac{k}{2} \left( \frac{1}{z_1} + \frac{1}{z_2} - \frac{1}{f} \right) (x^2 + y^2) \right] \\ \times \exp \left\{ -jk \left[ \left( \frac{\xi}{z_1} + \frac{u}{z_2} \right) x + \left( \frac{\eta}{z_1} + \frac{v}{z_2} \right) y \right] \right\} dx dy \tag{2}$$

$$h(u, v, \xi, \eta) = \frac{A}{\lambda z_2} \int \int_{-\infty}^{\infty} P(x, y) \exp \left[ -j2\pi \left( x \frac{u}{\lambda z_2} + y \frac{v}{\lambda z_2} \right) \right] dx dy \\ = \frac{A}{\lambda z_2} F_{xy} \{ P(x, y) \}_{k_x = \frac{u}{\lambda z_2}, k_y = \frac{v}{\lambda z_2}} \tag{3}$$

전달함수이며 식 (4)에서  $A\lambda_z$ 는 파장과 렌즈에서 이미지영역사이의 거리로서 구성되며 상수항으로서 소거할 수 있다. 이에 따라 식 (4)는 임펄스 응답함수와 마찬가지로 식 (5)의 형태로 간략화 할 수 있다. 결국 이미지 상의 공간주파수를 결정하는 함수는 조리개함수라는 것을 알 수 있다. 식(6)은 컷 오프(cut off) 공간 주파수로서  $w$ 는 조리개의 반지름이다. 즉 조리개의 구경이 커지면 고주파수영역의 파형을 통과시킬 수 있고 조리개의 구경이 작아지면서 높은 공간 주파수를 제거하는 Low Pass Filter 역할을 한다는 것을 알 수 있다.

$$H(f_x, f_y) = F \left\{ \frac{1}{\lambda_z} \int \int P(x, y) \exp \left[ -j \frac{2\pi}{\lambda_z} (ux + vy) \right] dx dy \right\} \\ = (\lambda_z) P(-\lambda_z f_x, -\lambda_z f_y) \quad (4)$$

$$H(f_x, f_y) = P(\lambda_z f_x, \lambda_z f_y) \quad (5)$$

$$f_{x,y} = \frac{w}{\lambda_z} \quad (6)$$

위와 같은 이론식을 뒷받침하기 위해 실험은 크게 3가지 주제로 구분하여 수행되었다.

첫째, 표면에서의 회절분포를 알기 위해 펄스 당 에너지 3.1 J/cm<sup>2</sup>의 조건으로 z축을 이미지 상하영역으로 바꾸어 가며 10번의 펄스를 조사한 후 표면의 구조변화를 관찰하였다.

둘째, 가공단면에서의 회절분포에 따른 형상특성을 알기 위해 펄스 반복을 200 Hz, 펄스 당 에너지 3.1 J/cm<sup>2</sup>인 조건으로 100 μm/sec의 주사속도로서 직선가공을 하였다. 광화학반응에서는 가공단면의 형상과 에너지 빔의 분포는 비례하기 때문에 가공단면과 퓨리에 광학에 의한 에너지분포의 유사성을 시뮬레이션 값과 가공형상을 비교분석하여 증명하였다.

셋째, 조리개의 구경에 따른 가공단면의

분포를 관찰하였다. 렌즈 앞에서의 동함수 (pupil function)<sup>10)</sup> 즉 조리개 함수는 식(3)에 따라 이미지 형성에 큰 영향을 미친다는 것을 알 수 있으므로 조리개의 크기가 모서리에서 발생한 흠에 미치는 영향을 분석하였다.

이상 3가지의 주제는 실험과 상용소프트웨어(Matlab 5.3)을 이용한 시뮬레이션<sup>12,13)</sup> 값과의 비교를 통하여 유사성을 분석하였으며 모서리에 생기는 흠의 원인을 분석함과 동시에 이를 제거하고자 하였다. 본 실험에서 가공된 PET의 단면, 전주도금 된 니켈금형의 단면 그리고 PET의 표면상에서 가공형상은 광학현미경을 통하여 분석하였다.

### 3 실험결과 및 고찰

#### 3.1 모서리에서의 돌출부의 형성

마스크 프로젝션기법은 빔이 집속되는 초점에서 가공하는 기존의 레이저 가공과는 달리 이미지 영역에서 가공이 이루어지므로 마스크의 형상에 따라 가공단면을 제어할 수 있는 장점이 있다. 특히 사각형의 빔은 초점에서 Fraunhofer회절의 영향<sup>10)</sup>으로 재현할 수 없는 반면 마스크 프로젝션기법에서는 이미지영역에서 마스크의 형상이 그대로 재현되기 때문에 작업이 용이하다. 그러나 PET의 마이크로 가공에 있어 모서리 부위에서 흠이 형성되는 치명적인 결함을 띄는 단점이 있다. 이러한 결함은 전주도금으로서 금형을 제작하였을 경우 모서리부에 돌출부를 형성한다.

Fig. 2는 다양한 조건에서 PET를 가공한 후 전주도금 처리하여 제작된 니켈금형의 전자현미경 사진이다. 주사속도가 느릴수록, 펄스 당 에너지가 많을수록 모서리부의 돌출부가 크게 형성되었다. Fig. 3은 사

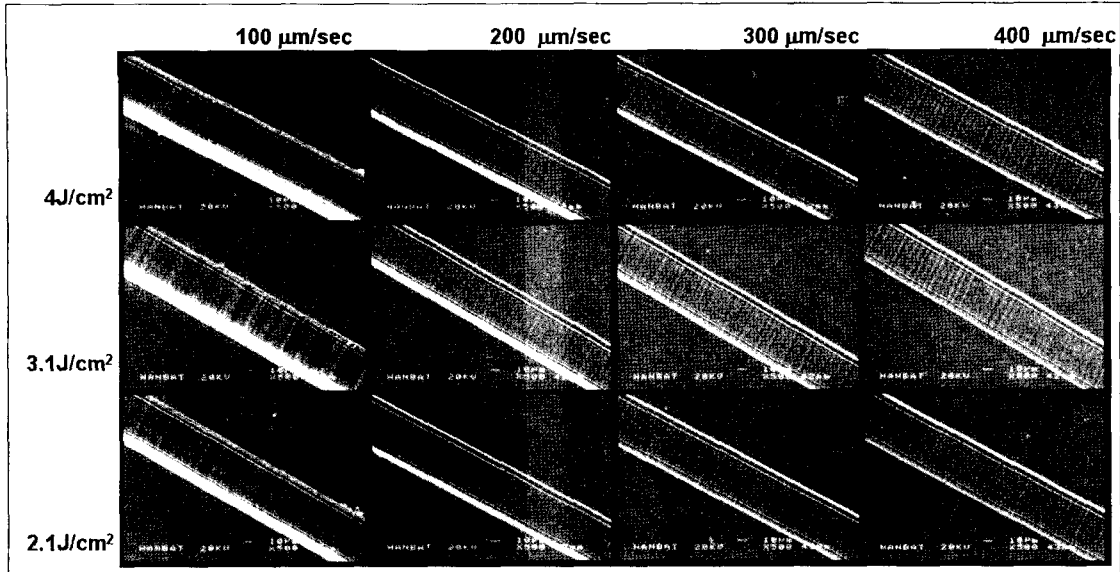


Fig. 2 Nickel mold insert in various ablation condition.

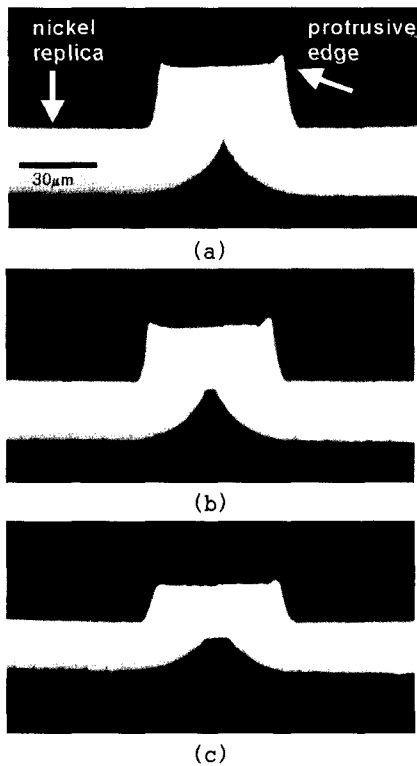


Fig. 3 Cross section of nickel replica after electroforming-energy density: (a) 4 J/cm<sup>2</sup>, (b) 3.1 J/cm<sup>2</sup>, (c) 2.1 J/cm<sup>2</sup> (scanning speed: 100 μm/sec, Rep:200 Hz)

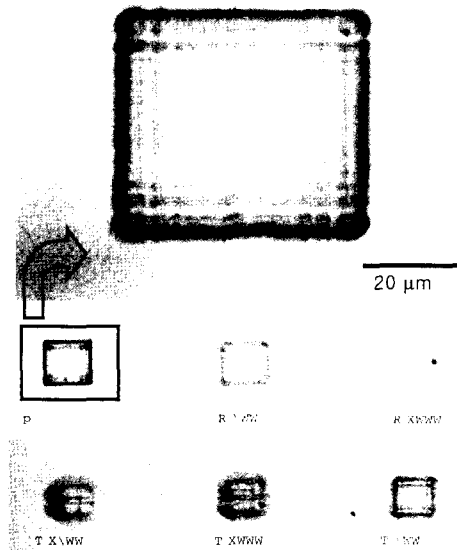


Fig. 4 Diffraction effect on the surface.

각형을 전사하여 어블레이션된 PET상에 니켈을 30 μm의 두께로 전주도금 처리한 다음 떼어내어 단면을 분석한 사진이다. 돌출부의 높이가 각각 (a) 4.7 μm, (b) 4.06 μm, (c) 1.87 μm 로서 펄스 당 에너지가 높을수록 증가함을 알 수 있었다.

이러한 돌출부의 형성 메커니즘을 알기 위해 펄스반복을 200 Hz, 펄스 당 에너지 3.1 J/cm<sup>2</sup>인 조건하에 10펄스를 조사하였을 경우 표면의 변화를 관찰하였다. Fig. 4는 표면에 형성된 패턴으로서 상단의 사진은 이미지 영역에서의 가공형상으로서 가장자리 부분에 Coherent 이미지가<sup>14,15</sup>형성되었다. 또한 z축을 +1000  $\mu\text{m}$ 부터 -1500  $\mu\text{m}$ 까지 이동시키면서 회절무늬가 더욱 눈에 띄게 나타났으며 Coherent 이미지는 회절형상의 연속선상에 있다는 것을 알 수 있었다.

이와 같은 회절의 영향을 수학적으로 분석하고자 푸리에광학이론<sup>10</sup>을 적용하였고 식(1)을 이용한 시뮬레이션을 통하여 실제 단면 형상과 비교분석하였다. Fig. 5는 PET를 z축의 이미지영역과 주변 영역에 두어 주사속도 100  $\mu\text{m}/\text{sec}$ 로서 가공한 단면과 식(1)에 따라 상용소프트웨어(Matlab 5.3)를 이용하여 예측한 빔의 강도분포 및 단면형상을 비교하고 있다. 또한 명확한 비교를 위하여 시뮬레이션 형상은 1,2,3차원으로 구성하였으며 형상이 근사적으로 일치하였다는 것을 알 수 있다. 이때 에너지의 값이 100이 나타난 이유는 집속되기 전의 에너지를 1로 보았을 때 1/10로 집속되면 2차원에서 100배가 되기 때문이다.

이미지영역에서 나타난 Coherent 이미지는 회절형상의 연속선상에 있으며 직접적으로 가공에 영향을 미쳐 모서리 상에 홈이 형성되었다. 이러한 회절무늬는 이미지영역을 벗어날수록 더욱 강해지며 Fig. 5(a), Fig. 5(e)영역에서 회절 피크는 3개로 늘어난다. 그리고 z축의 (-)방향으로 갈수록 Fig. 5(f)에서 회절피크가 2개로 되었다가 양쪽 피크가 합쳐진 형태로 Fig. 5(g)에서 형성되었다. 이와 같은 회절형상을 이용하면 더욱더 복잡한 모양의 마이크로 채널도 제작이 가능하다는 것을 보여주고 있다. Fig. 5(g)에서의 에너지는 이미지영역(z=0)

에서의 값보다 6.6배가 증가한 값이지만 가공깊이는 이미지에서의 값인 22  $\mu\text{m}$ 에 비해 30  $\mu\text{m}$ 로서 1.36배 증가하였다. 이와 같이 에너지의 증가량에 비해 가공깊이의 증가량이 상대적으로 적은 이유는 Beer's Lambert 법칙<sup>9</sup>으로 설명할 수 있는데 광화학 반응에서 레이저빔의 흡수에 의한 가공깊이는 입사된 에너지에 대하여 ln 함수에 비례하여 증가하기 때문이다. 즉 입사된 빔이 어블레이션에 의한 임계에너지 보다 훨씬 큰 경우 가공깊이의 비는  $\ln(664)/\ln(100)$ 로서 1.41의 결과값을 가진다. 이는 측정된 가공깊이의 비율인 1.36배에 근사적으로 일치한다는 것을 보여준다.

Fig. 5(h)는 초점 영역에서의 가공형상으로서 오히려 빔의 크기가 커졌다는 것을 알 수 있다. 푸리에 광학 이론에 의하면 초점에서의 상은 렌즈에 도달한 빔의 푸리에 변환 형태인 Fraunhofer 회절을 하기 때문이다<sup>10</sup>. 이는 초점영역에서 가공하는 일반적인 레이저가공에서는 마스크의 사용을 주의해야하는 이유가 되기도 한다.

### 3.2 조리개를 이용한 돌출부의 보정

이미지에서 사각마스크의 형상이 재현되었다고 해서 중간과정에서 사각형이 계속 유지 되지는 않는다는 사실은 앞 절에서 설명한 바와 같이 회절현상으로 증명된다. 이러한 회절현상은 마스크를 통과하면서 시작되는데 평면파는 마스크를 지나 렌즈에 이르기까지 근거리 회절인 프레넬 회절을 한다<sup>10</sup>.

Fig. 6은 마스크를 통과한 평행광이 프레넬 회절을 거쳐 렌즈에 도달하였을 경우 에너지 분포를 설명하고 있다. 이때 프레넬지수(Fresnel Number)<sup>16</sup>는 0.264로서 오히려 프라운호퍼(Fraunhofer) 회절에 가깝다. 이와 같은 빔 분포는 조리개로서 가장자리 빔을 제거하여 새로운 상을 만들어 낸다.

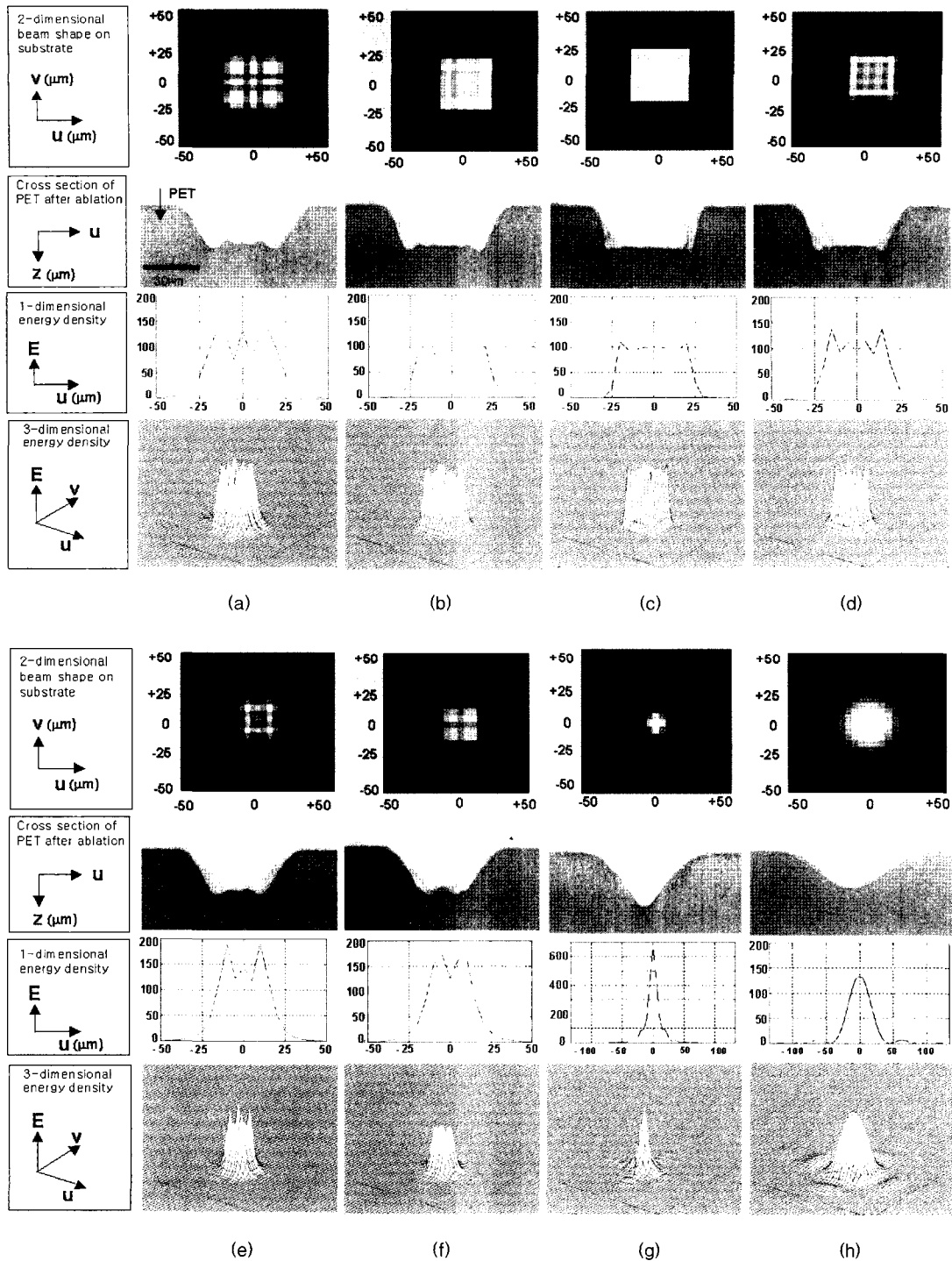


Fig. 5 Comparison between simulated energy density and cross section of ablated PET at various z position: (a) 1000  $\mu\text{m}$ , (b) 500  $\mu\text{m}$ , (c) 0-image, (d) -500  $\mu\text{m}$ , (e) -1000  $\mu\text{m}$ , (f) -1500  $\mu\text{m}$ , (g) -3000  $\mu\text{m}$ , (h) -8690  $\mu\text{m}$ -focal length

Fig. 7은 동합수(Pupil function)로서 표시되는 조리개의 직경을 조절하여 최종 이미지 영역에서의 빔의 강도 분포를 식(1)에 따라 시뮬레이션 한 결과로서 조리개가 작

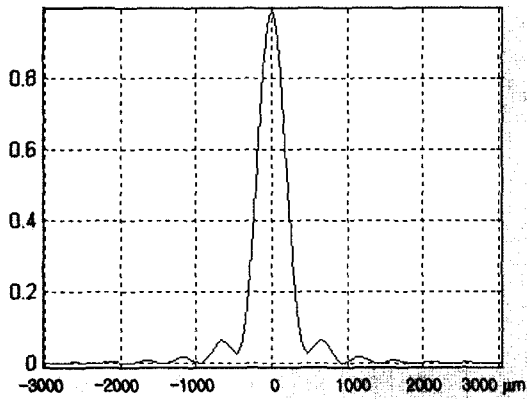


Fig. 6 The Fresnel diffraction of square aperture at distance- $z_1$ .

지로 변하며 모서리의 흠이 상쇄된다는 것을 보여준다<sup>14,15</sup>. 이는 식(3)에서 증명한 바와 같이 조리개의 직경이 이미지에서의 Coherent 영상에 영향을 준다는 것을 의미한다. 그리고 조리개는 높은 공간 주파수를 걸러 주는 역할을 하는데 식(6)에서 보여준 바와 같이 조리개의 직경이 3 mm 인 경우는 69.6 cycles/mm, 2 mm의 경우는 46.4 cycles/mm 그리고 1mm의 경우는 23.2 cycles/mm 이상의 공간주파수를 소거 시켜 Coherent 이미지는 사라진다.

이와 같이 시뮬레이션 값과 가공면의 단면은 전반적으로 일치하였으나 Fig. 7(b)에서는 실제의 가공단면은 3개의 피크를 보이는 시뮬레이션 값과 비교하여 차이를 보였다. 이는 시뮬레이션시 이미지 영역에서

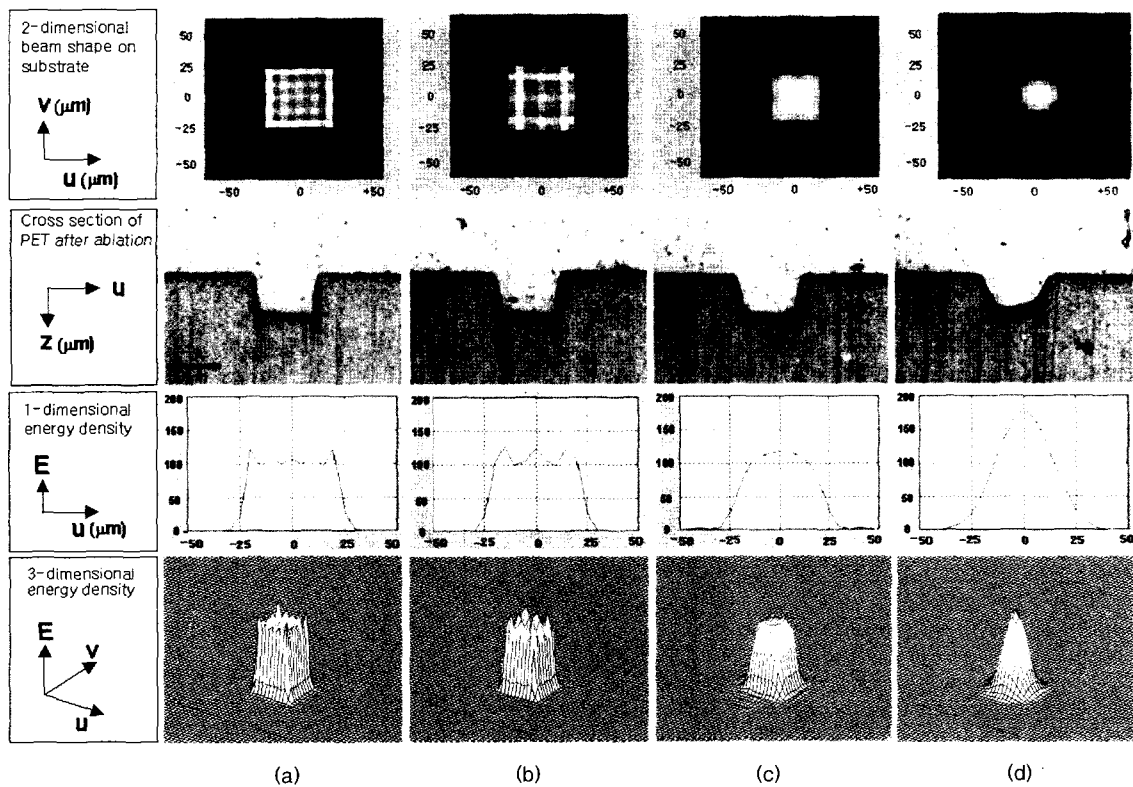
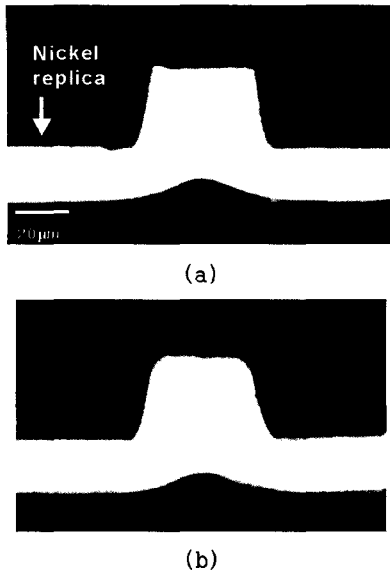


Fig. 7 Comparison between simulated energy density and cross section of ablated PET with various aperture diameter: (a) 5 mm, (b) 3 mm, (c) 2 mm, (d) 1 mm

아질수록 모서리의 형상이 Incoherent 이미





**Fig. 8 Cross section of nickel replica after electroforming: aperture diameter: (a) 3 mm, (b) 2 mm (energy density: 3.1 J/cm<sup>2</sup>, scanning speed: 100 μm/sec, Rep: 200 Hz)**

한축의 데이터의 수는 10개로서 정확한 표현을 하기 위해서는 한계를 보였고 추가적인 연구를 필요로 한다는 것을 보여 준다.

한편, Fig. 8은 Fig. 7(b), (c)와 같이 사각마스크를 통과한 빔에 의해 어블레이션 가공된 PET상에 스퍼터링을 통하여 표면에 시드를 형성하고 니켈 전주도금을 한 후 떼어낸 결과로서 조리개가 Fig. 3에 나타난 돌출부를 완전히 제거하였다는 것을 알 수 있었다.

### 5. 결 론

본 연구배경은 마이크로 유체소자용 니켈 금형을 제작하기 위한 모형(master)을 제작하는 공정을 다루고 있다. 모형은 PET상에 마스크전사기법으로 엑시머 레이저 빔을 조사하며 직선 그루브(groove)를 가공하였다. 이때 마이크로 유체소자의 채널은

사각형상으로서 모재 상에 사각마스크를 전사하여 제작된다. 그러나 가공부의 모서리에서 홈이 형성되는 결함이 나타났다. 이러한 결함이 형성되는 원리는 푸리에 광학이론으로서 해석할 수 있었고 시뮬레이션을 통하여 단면 형상을 예측하였으며 실험값과의 비교를 통하여 근사적으로 일치한다는 것을 알 수 있었다.

모서리의 홈은 이미지 프로세싱에 의한 집속 시 Coherent 이미지가 형성되어 만들어 졌으며 이는 회절의 연속선상에 있다는 것을 알 수 있었다. 또한 조리개가 이미지를 형성할 때 지배변수로 작용한다는 것을 이론적으로 알 수 있었으며 실험결과 조리개의 직경이 3 mm이하인 경우 Incoherent 이미지로 변하면서 금형 제작 시 돌출부가 사라진 결과를 얻을 수 있었다.

한편 z 축 상의 거리를 조절하여 가공하면 다양한 회절형상을 얻을 수 있었다. 이는 이론적으로 유도할 수 있으며 복잡한 단면을 가진 채널을 제작하기 위한 별도의 마스크를 제작하지 않고 사각형 마스크로서 다양한 형태의 단면을 가진 채널을 제작할 수 있다는 가능성을 제시하고 있다.

### 참고문헌

1. Marc Macdou, "Fundamentals of microfabrication", CRC Press, pp.275-323, 1997.
2. Dirk Basting, "Laser LIGA-Excimer laser microstructuring and replication", Lambda Highlights No.45, August 1994.
3. T. Erdogan, V Mizrahi, "Fiber phase gratings reflect advances in lightwave technology", Laser Focus World, pp.73-80, February 1994.
4. L. Dong, J.L. Archambault, "Single

- pulse Bragg gratings written during fiber drawing", *Electronics Letters* Vol.29(17), pp.1577, 1993.
5. Thomas Klotzbücher, et al., "Polymer Microsystems by Excimer Laser Ablation: From Rapid Prototyping to Large Number Fabrication", *Proc. SPIE* Vol. 4274, pp.307-315, 2001.
  6. Arnold Gillner et al., "Laser processing of components for polymer microfluidic and optoelectronic products", *Proc. SPIE* Vol. 4274, pp.411-419, 2001.
  7. Nadeem H. Rizvi, Phil T. Rumsby, Malcolm C. Gower, "New Developments and Applications in the Production of 3D Micro-structures by Laser Micro-machining", *Proc. SPIE* Vol.3898, pp.240-249, 1999.
  8. Bradley G. Boone, "Signal Processing Using Optics", Oxford, 2001.
  9. Duley, "UV Lasers: effects and applications in materials science", Cambridge, pp.148-199, 1996.
  10. Joseph W. Goodman "Introduction to Fourier Optics", McGraw-Hill, pp.83-138, 1996.
  11. BAHAA E. A. SALEH, Malvin Carl Teich, "Fundamentals of Photonics", A Wiley-Interscience Publication, pp.15, 1991.
  12. Ting-Chung Poon, Partha P. Banerjee, "Contemporary Optical Image Processing with MATLAB", Elsevier, pp.63-138, 2001.
  13. Raymond G. Wilson, "Fourier Series and Optical Transform Techniques in Contemporary Optics", A Wiley-Interscience Publication, pp.99-208, 1995.
  14. Joseph W. Goodman "Introduction to Fourier Optics", McGraw-Hill, pp.154~159, 1996.
  15. BAHAA E. A. SALEH, Malvin Carl Teich, "Fundamentals of Photonics", A Wiley-Interscience Publication, pp.135-143, 1991.
  16. BAHAA E. A. SALEH, Malvin Carl Teich, "Fundamentals of Photonics", A Wiley-Interscience Publication, pp.50, 1991.