

양성자 빔을 이용한 3 차원 마이크로 구조물 가공

이 성 규* · 권 원 태**

* 서울시립대학교 기계정보공학과

Manufacturing of Three-dimensional Micro Structure Using Proton Beam

Seonggyu Lee* and Won Tae Kwon**

* Dept. of Mechanical and Information Engineering, Univ. of Seoul

(Received July 16, 2014 ; Revised December 5, 2014 ; Accepted January 19, 2015)

Key Words: Proton Beam(양성자 빔), Extreme Aspect Ratio(극대 세장비), Micro Hole(마이크로 홀), Simulation(전산모사)

초록: MC-50 사이클로트론에서 방출되는 양성자 빔은 직경이 2-3 mm 의 가우시안 분포를 가진다. 이렇게 넓게 조사되는 양성자 빔은 작은 스팟과 정밀한 위치정밀도를 요구하는 반도체 식각, 마이크로 머시닝 등에는 사용될 수 없다. 본 연구에서는 좀 더 경제적인 대안으로 양성자 빔을 마이크로 홀에 통과시켜 수십 μm 의 직경을 가지도록 조형하는 방법을 제시하였다. 양성자 빔의 조형을 위하여 평균 직경 21 μm , 두께 9mm 의 세장비 428 의 마이크로 홀을 제작하였다. 마이크로 홀과 양성자 빔을 정밀하게 정렬하여 양성자 빔을 조형하였다. 이렇게 조형된 양성자 빔을 이용하여 수십 μm 크기의 마이크로 구조물의 가공성 확인 실험을 실시하였다. 또한 GEANT4 를 이용한 전산모사를 이용하여 해석한 후, 실험결과와 비교하고 분석하였다. 본 연구를 통하여 MC-50 사이클로트론이 조형 장치와 함께 20 마이크로 단위의 3 차원 구조물 제작을 위한 마이크로 공정기술에의 사용 가능성을 확인하였다.

Abstract: The diameter of a proton beam emanating from the MC-50 cyclotron is about 2–3 mm with Gaussian distribution. This widely irradiated proton beam is not suitable for semiconductor etching, precise positioning, and micromachining, which require a small spot. In this study, a beam cutting method using a microhole is proposed as an economical alternative. We produced a microhole with aspect ratio, average diameter, and thickness of 428, 21 μm , and 9 mm, respectively, for cutting the proton beam. By using this high-aspect-ratio microhole, we conducted machinability tests on microstructures with sizes of tens of μm . Additionally, the results of simulation using GEANT4 and those of the actual experiment were compared and analyzed. The outcome confirmed the possibility of implementing a micro process technology for the fabrication of three-dimensional microstructures of 20 micron units using the MC-50 cyclotron with the microhole.

1. 서 론

최근 산업 제품의 소형화와 경량화 추세로 인해 미세가공에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있는데, 초 미세가공기술의 한 방법으로 레이저 빔, 이온 빔, 전자 빔 등의 빔 가공의 연구 등이 진행되고 있다.⁽¹⁻³⁾ 이 중 양성자 빔을 이용한 공정은 양성자의 가속에너지에 따라 스퍼터링 현상을 이

용한 가공,⁽⁴⁾ 표면 개질,⁽⁵⁾ 방사선 치료⁽⁶⁾ 등에서 널리 이용될 수 있는 기술이다. 현재 MC-50 사이클로트론에서 방출되는 양성자 빔은 수 mm 의 직경을 가지며 빔 포트에서 멀어질 수록 퍼지기 때문에 작은 스팟과 정밀한 위치정밀도를 요구하는 반도체 식각, 마이크로 머시닝, 암치료 방사선 빔에 적용하기 어렵다. 그러므로 빔을 집속하거나 커팅하여 한 점으로 빔을 모으는 방법의 개발이 필요하다. 빔 집속 방법으로는 빔의 세기를 유지한 채 크기만 줄이는 쿼드러폴 방법이 있으나 기술면에서 복잡하고, 매우 고가의 방식이다.⁽⁷⁻⁹⁾ 강

† Corresponding Author, kwon@uos.ac.kr

© 2015 The Korean Society of Mechanical Engineers

한 선속이 필요 없는 경우이면 빔 동력학을 사용한 방법보다 훨씬 간단한 빔을 커팅하는 방법이 좋을 것으로 예상되어 빔을 커팅하는 방법이 제안된다. 양성자 빔이 마이크로 홀을 통과 할 때 홀의 직경이 작고 세장비가 높을수록 더 가늘고 높은 진직도를 가지는 펜슬빔을 조형할 수 있다. 따라서 더 높은 세장비의 마이크로 홀을 제작하기 위해 여러 개의 마이크로 홀 시편을 적층하여 세장비를 극대화할 수 있는 방법을 사용하였다. 또한 제작된 극대세장비 마이크로 홀을 이용하여 조형된 양성자 빔으로 미세구조물 가공성 확인 실험을 진행하였다. 이와 함께 전산 모사를 통한 해석 결과와 실제 실험 결과를 비교 분석하였다.

2. 극대 세장비 마이크로 홀의 제작

2.1 EDM 을 이용한 마이크로 홀 제작

미세 방전 가공으로 마이크로 홀을 가공하기 위해서는 작은 직경을 가지는 전극이 필요하다. 이런 전극을 가공하기 위해 WEDM 방법을 사용하였다. 와이어를 일정한 장력을 유지하면서, 일정 속도로 새로운 와이어를 계속 공급하여 와이어 마모로 인한 가공 전극 지름의 편차를 최소화하였다. 직경 300 μm 기본전극을 큰 단발 방전 에너지 (>18 μJ)를 이용하여 황삭 가공하여 직경 40~50 μm 의 전극으로 만든 후, 작은 단발 방전 에너지 (<4 μJ)로 정삭 가공하여 22~25 μm 의 직경을 가진 전극을 제작하였다. 홀 가공 시 발생하는 전극마모를 고려하여 1,200 μm 이상의 길이로 전극을 제작하였다. 제작한 마이크로 전극을 이용하여 15mm \times 15mm의 크기와 두께 300 μm 의 SUS304 시편에 마이크로 홀을 가공하였다. 마이크로 홀은 공작물인 플레이트 시편과 가공 틀인 전극이 장착된 스핀들에 전압을 걸어, 전극과 시편 사이의 방전 현상을 이용하여 가공한다. EDM 가공 공정에서 세장비 극대화를 위한 미세 구멍의 최적 가공 조건을 결정하기 위한 연구가 선행되었다.⁽¹⁰⁾ 전극마모, 출구 간극 및 입구 간극을 고려한 최적 미세구멍 가공조건을 구한 결과, 전극길이 1,200 μm , 축전용량 680pF, 입력전압 80V, 스핀들 회전속도 2,900rpm 이 최적조건으로 선정되었다. 이 조건과 비슷한 조건들로 미세 구멍을 가공한 결과, 평균 직경이 21 μm 이고, 평균 세장비가 14.38 인 미세구멍 다수를 가공하여 확보하였다. Fig. 1 은 실제 가공된 마이크로 구멍을 크기 순서로 정리하여 나타내었다. 전극가공은 공기 중에서, 마이크로 홀가공은 전해액 중에서 수행되었다.

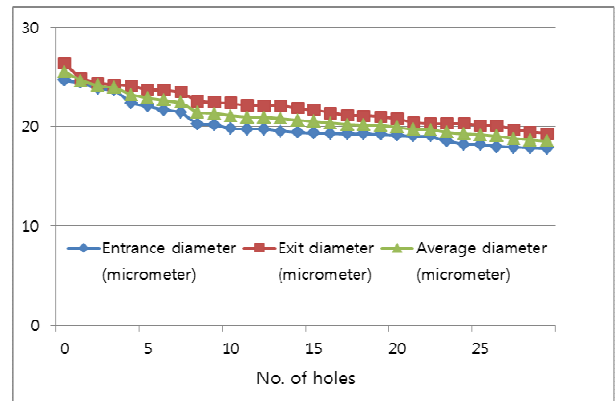


Fig. 1 Size of micro holes manufactured by micro EDM (μm)

2.2 마이크로 홀 조립을 통한 세장비의 극대화

단일 마이크로 홀의 세장비는 EDM 가공 조건의 최적화를 통해 극대화 되었다. 하지만 양성자 빔의 조형을 위해서는 더 높은 세장비를 가지는 마이크로 홀이 필요하다. 일반적으로 EDM 을 이용하여 세장비 10 이상을 가지는 미세 구멍 가공에 대한 연구는 많았으나 대부분 평균 직경이 80 μm 이상이었다.^(11~13) 본 논문에서는 평균 직경 20~25 μm 의 단일 마이크로 홀을 조립하여 420 이상의 극대세장비 마이크로 홀의 제작을 목적으로 하였다.

2.2.1 마이크로 홀의 정렬 메커니즘

세장비 400 이상의 마이크로 홀을 제작하기 위하여 평균 직경 20 μm 내외의 단일 마이크로 홀을 조립하는 방법을 사용하였다. 마이크로 홀의 직경이 매우 작기 때문에 정렬을 위하여 동심도와 수평 및 수직도를 맞추기 위한 정밀한 메커니즘이 필요하였다. 이 연구에서는 빛의 직진성을 이용하는 광학식 방법을 이용하여 정렬을 시도했다. 수직으로 정렬된 레이저 빔을 기준선으로 사용하여 작은 직경의 마이크로 홀을 광학식 디지털 현미경을 통해 직접 관측하면서 정렬 장치를 조작하여 정렬을 시도해야 하기 때문에, 기구부의 자유도 및 정밀도를 높이는 메커니즘의 설계가 중요하다. 정렬을 위한 기준선을 얻기 위하여 마이크로 홀의 정렬 메커니즘에서 아래 시편이 놓일 재물대 평면에 수직으로 레이저를 조사하였다. 위쪽에서 이 광원을 광학현미경으로 확인한 후 이 빛을 따라 마이크로 홀을 정렬하였다. 이렇게 빛의 직진성을 이용하여 동심을 잘 맞추어 정렬하면 높은 세장비의 마이크로 홀을 얻을 수 있다. 정렬을 위한 광원으로는 광학 레이저(Uniphase 155SL, 0.95mW)를

사용하였다. 홀을 통과하는 광량을 늘리기 위하여 초점거리 140mm 를 가지는 렌즈를 사용하여 레이저 빔을 포커싱 하였다.

2.2.2 정렬기구를 이용한 마이크로 홀의 조립

여러 개의 마이크로 홀의 수직 및 동심을 맞추기 위해서는 정밀하고 다양한 조작이 가능한 다자유도의 조립 기구부의 설계가 필요하다. 이 연구에서는 정밀도를 높이기 위하여 x-y-z-a 의 4 자유도를 갖는 그리퍼와 x-y 로 조절되는 재물대, 그리고 현미경으로 구성된 정렬시스템을 제작하였다. 재물대는 시편을 올려놓고 정렬하는 기초가 되며 2 자유도를 갖는다. 재물대 위에 놓인 시편의 홀에 맞추어 다음번 시편을 정렬하는 작업은 x-y-z-a 의 그리퍼를 이용하여 수동으로 이루어졌다. 이 작업을 반복하여 시편들을 적층하였다.

현미경은 마이크로 단위의 물체를 관측하기 위해 사용되었으며, 맨눈으로 레이저를 직접 보는 것은 위험하므로 현미경 영상을 이미지 데이터로 바꿔 출력해주는 영상캠을 사용한다. 이 현미경도 x-y-z-a-b 의 5 자유도로 제어하여 레이저에 정렬시켰다.

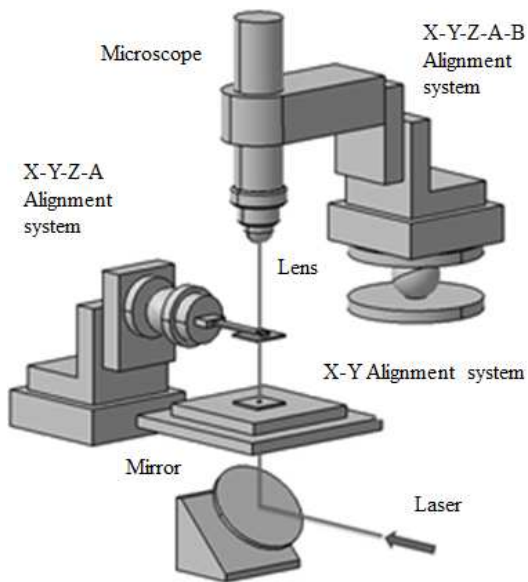


Fig. 2 Schematics of apparatus for micro hole alignment

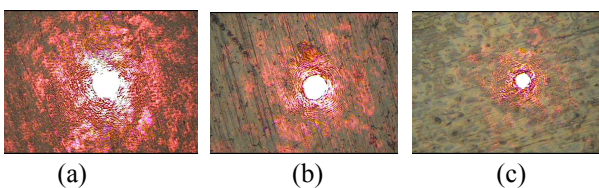


Fig. 3 Laser beam cut by micro holes (a) 10 micro holes (b) 20 micro holes (c) 30 micro holes

이 장치에서 광원과 재물대의 수직도는 매우 중요하다. 광원의 수직도는 레이저 빔을 이용한 휴대용 정렬기구를 이용하여 정렬하였다. 평평한 밑면과 그 밑면에 수직으로 발사되는 레이저로 이루어진 정렬기구를, 유리로 만들어진 현미경 재물대 위에 놓고 천정에 레이저 포착점을 잡은 후, 마이크로 조립기구에서 발사되는 레이저가 정렬기구의 중심점을 지나 천정의 레이저 포착점과 일치하도록 하여 수직도를 맞추었다. 이렇게 제작된 정렬시스템을 이용, 시편 30 장을 조립하여 세장비 428 의 마이크로 홀을 얻었다. 광원의 강도가 증가될 경우 더 높은 세장비의 마이크로 홀의 제작이 가능할 것으로 예상된다.

Fig. 2 는 마이크로 홀 정렬 장치의 구성도를 보인다. Fig. 3 의 (a)~(c)는 마이크로 홀을 각각 10 장, 20 장, 30 장 적층했을 때의 구멍을 통해 본 레이저의 사진이다. Fig. 3 에서 겹쳐지는 마이크로 홀의 개수가 늘수록 이를 통과한 레이저 빔의 직경이 작아짐을 알 수 있다. 10 장의 마이크로 홀을 겹쳤을 때, 레이저가 원이 아닌 것처럼 보이나 이것은 레이저의 산란효과 때문인 것으로 분석된다.

3. 양성자 빔 조사 실험 및 전산모사

3.1 양성자 빔의 조형 실험

Fig. 4 는 실험 개략도를 보여 준다. MC-50 사이클로트론에서 발생되는 양성자 빔은 알루미늄으로 이루어진 직경 25mm 의 홀을 가진 1 차 차폐막을 거치고, 직경 5mm 의 홀을 가진 2 차 차폐막을 거친다. 이후 양성자 빔은 Fig. 3 의 2 개의 회전축을 가진 마이크로 홀을 통과한 후, 2 개의 직선축을 가진 실험대에 설치된 GAF 필름에 도달한다. 양성자 빔은 10MeV-18.5MeV, 100nA-200nA 의 조건을 가지며 빔 포트와 마이크로홀의 거리는 150mm 로, 마이크로 홀과 GAF 필름의 거리는 1-3mm 로 조정되었다.

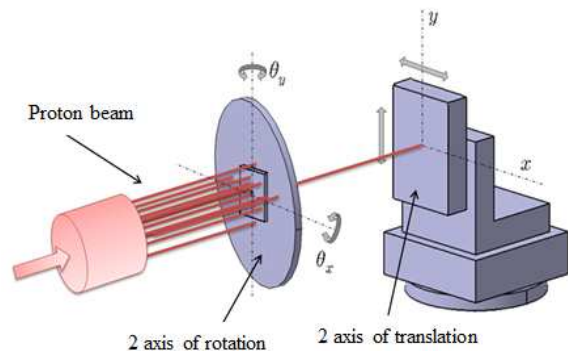


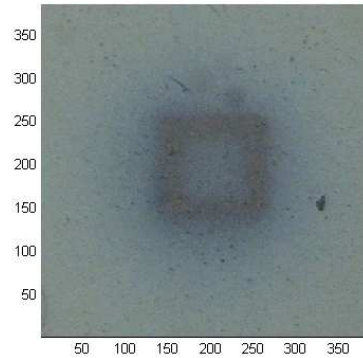
Fig. 4 Schematics of apparatus for micro hole alignment

실험에 사용된 마이크로 홀은 세장비가 높고 직경이 작기 때문에 이 마이크로 홀을 조사된 양성자빔과 평행하게 정렬하는 작업이 중요하다. 하지만, 양성자를 조사하는 중에는 방사능이 다량 발생하기 때문에 실험 부스 내에서의 마이크로 홀의 각도를 조정하는 것이 불가능하였다. 따라서 실험 부스 밖에서 마이크로 홀의 피치와 요의 각도를 조절할 수 있는 2 개의 회전 자유도를 가지는 원격 정렬 기구와 2 개의 직선운동을 하는 실험장치를 제작하였다. 이와 같은 실험의 자동화는 조사 실험을 하는 실험부스에서 발생하는 인체에 유해한 방사능에 대한 안전성을 확보해 주며 미세한 조절을 원격으로 조절 가능하게 함으로써 실험시간을 단축시켰다. 양성자 검출 필름은 3 축 자동스테이지에 의하여 2 축 방향으로 일정한 패턴을 그리며 미세 이동한다. 양성자 빔의 에너지에 따른 양성자 빔의 분포 및 필름의 거리에 따른 다층구조의 3 차원 분포를 측정하여 양성자 빔을 이용한 가공 가능성을 확인하였다.

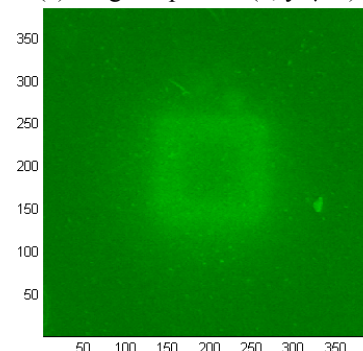
3.2 미세 구조물 가공 테스트

극대 세장비의 마이크로 홀을 통과하여 조형된 양성자 빔의 에너지에 따른 양성자 빔의 분포 및 필름의 거리에 따른 다층구조의 3 차원 분포를 측정하여 양성자 빔을 이용한 가공 가능성을 확인하기 위해 양성자 빔과 마이크로 홀이 정렬된 상태에서 미세구조물 가공 테스트를 실시하였다. 양성자 빔의 에너지와 마이크로 홀 시편과 양성자 빔 검출 필름 사이의 거리에 따른 형상을 파악하기 위해 양성자 빔의 전압과 거리를 변화시키며 실험을 진행하였다. 각각의 실험에서 양성자 검출 필름은 2 축 자동스테이지에 의하여 2 축 방향으로 일정한 한 변의 길이가 100 μm 인 사각형 패턴을 그리며 2 $\mu\text{m}/\text{sec}$ 의 이송속도로 미세 이동한다. 양성자 빔에 노출된 필름은 스캐너를 이용하여 RGB 픽셀 데이터를 확인하지만, 펜슬빔의 경우 그 노출된 부분이 너무 작아서 평면 스캐너의 해상도로는 확인이 불가능하다. 따라서 광학현미경을 이용하여 필름의 노출된 부분을 확인하고 영상 데이터로부터 RGB 픽셀 데이터를 추출하여 분석하였다.

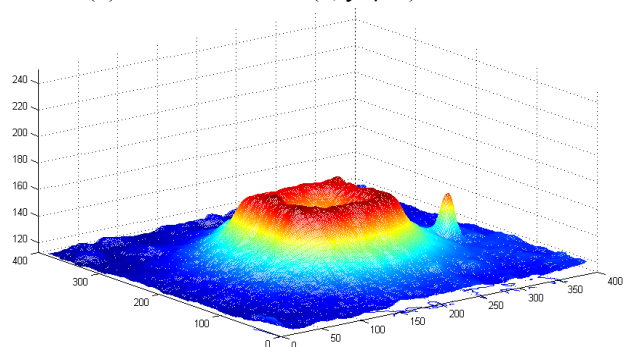
Fig. 5는 18.5MeV 에너지에 필름과 가공된 구멍과의 거리가 1mm 일 때의 결과이다. Fig. 5(a)는 양성자 빔이 조사된 필름의 원본이고, 그 원본에서 G data를 추출한 결과가 Fig. 5(b)이다. G data에서 3 차원 밀도함수와 2 차원 밀도함수를 구한 결과를 각각 Fig. 5(c)와 (d)에 나타내었다.



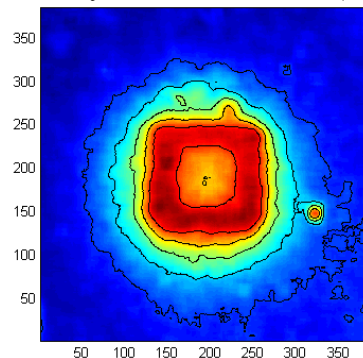
(a) Original picture (x, y: μm)



(b) Extracted G data (x, y: μm)



(c) 3D density distribution function (x, y: μm)



(d) 2D density distribution function (x, y: μm)

Fig. 5 Proton beam distribution with 18.5MeV and 1mm film distance

Fig. 6에서 여러 조건에서의 결과를 비교하였다. 현미경을 이용하여 확인된 영상을 통하여 측정된 결과 조형된 펜슬빔은 마이크로 홀의 출구에서

1mm 거리에서 약 25 μm 의 직경을 가지고, 3mm 거리에서 약 45 μm 의 직경을 가지는 것이 확인되었다. 또한 거리가 일정하면 양성자 빔의 전압과 관계없이 일정한 선폭을 지닌다. 결과적으로 양성

자 빔의 분포는 에너지 세기와는 무관하지만 거리가 변하면 달라지며, 거리가 고정되면 일정한 비율로 양성자 빔이 분포됨을 확인할 수 있었다. 양성자 빔 검출 필름은 각 지점에서의 노광량에 따라 변색이 일어나게 된다.

양성자 빔의 전압에 따른 양성자 검출 필름의 변색 정도를 확인해보면 양성자 빔의 에너지가 클수록 마이크로 홀을 통과하는 양성자의 개수도 증가하였다.

3.3 GEANT 4 를 이용한 양성자 빔 전산모사

양성자 빔이 마이크로 홀을 통과한 후 가운데 부분에 가장 많이 몰리기 때문에 공작물의 중심점은 가공이 가장 많이 되고 주변으로 갈수록 가공량이 적다. 하지만 여러 개의 마이크로 홀을 겹쳐서 제작한 구멍에 양성자 빔을 통과시켰을 때 가공형태를 직감적으로 알기 쉽지 않다. 이를 알기 위하여 전산모사(simulation)를 통하여 빔의 형태와 분포를 예측하였다. 동시에 원하는 가공형태가 있을 때, 그를 위하여 어떤 형태의 빔을 어떤 경로로 움직여야 하는 지 알아야 한다. 이를 위해서 프로그램을 이용한 시뮬레이션이 행하여 졌다. 사용한 프로그램은 리눅스 환경의 GEANT4 이며, 이를 이용하여 양성자 빔을 모사하고, 가상 검출기를 이용하여 마이크로 홀을 통과하는 양성자 빔의 분포를 확인하였다. 실제 양성자 빔 포트 내부의 양성자 빔부터 알루미늄 박판과 콜리메이터를 거치는 과정까지 기하학적인 모델링을 한 후, 양성자 총을 이용한 양성자 빔의 조사를 전산 모사하였다. 실제 양성자 빔 조사 실험을 했던 조건과 동일한 조건으로 조립된 마이크로 홀 시편을 모델링하며, 그 후면에 가상 검출기를 위치시켜 통과된 양성자 입자들이 검출될 수 있도록 하였다. 이로서 실제 양성자 빔의 조사를 전산모사하였다.

3.4 양성자 빔 실험과 전산모사의 비교

이 절에서는 양성자 빔 조사실험 결과인 필름 영상 데이터로부터 RGB 픽셀 데이터 중에서 G 채널에 대하여 분석을 실시하여 시뮬레이션의 결과 데이터와 비교 분석하였다. 비교의 편리를 위해서 연구실 자체적으로 비교 프로그램을 개발하였다.(Fig. 7, 8)

이 프로그램의 왼쪽에는, 양성자 빔으로 가공된 GAF 필름의 원본영상과 G 채널의 픽셀데이터, 그리고 그 데이터에서 얻어진 2 차원, 3 차원 밀도함수의 실험결과를 표시하였다. 오른쪽에는 같은 조건에서 실행된 시뮬레이션의 결과로, GEANT 4 를

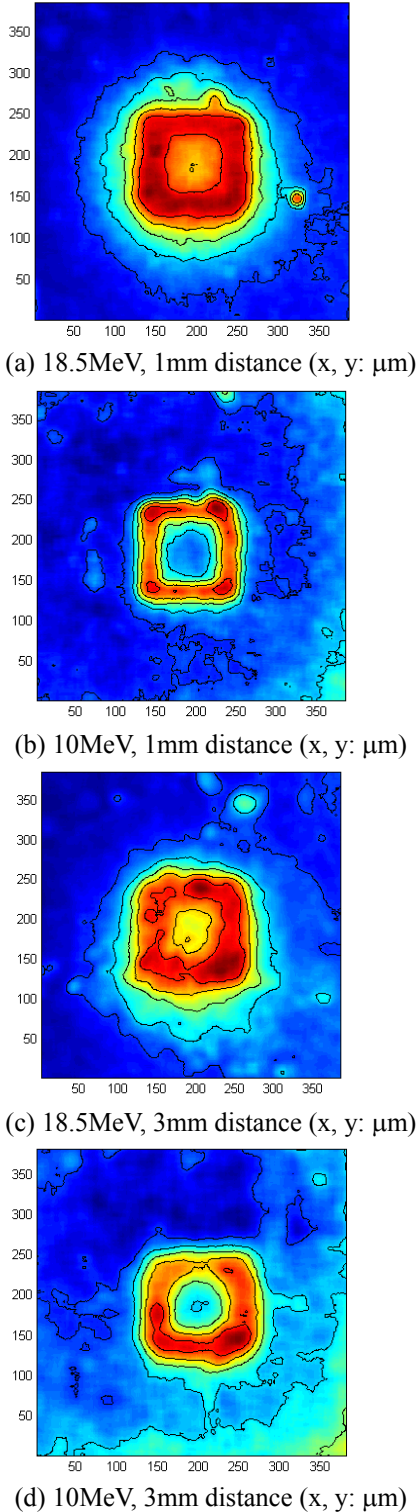


Fig. 6 Comparison of proton beam distribution under different conditions

Table 1 Test of normality using K-S Test

Experimental condition	p-value	95%(p>0.05)
10MeV, 1mm	0.7780	Satisfied
10MeV, 3mm	0.0502	Satisfied

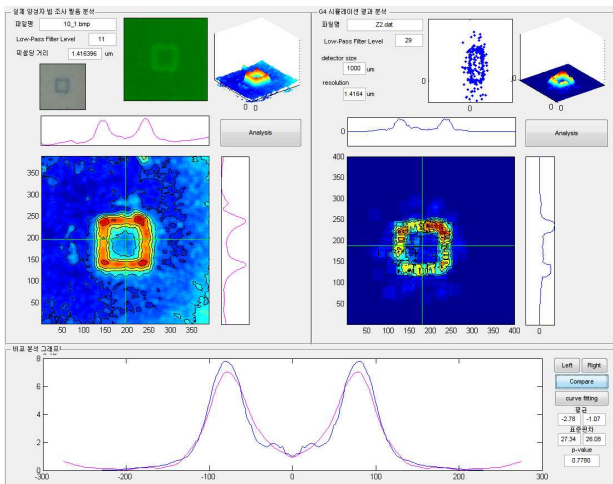


Fig. 7 Comparison of experiment and simulation of proton beam distribution under 10MeV energy and 1mm distance

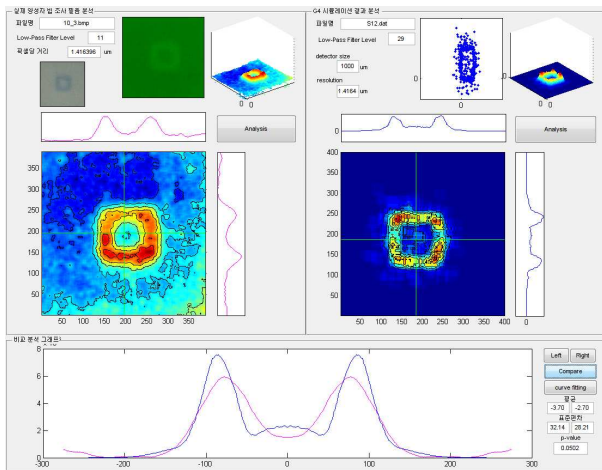
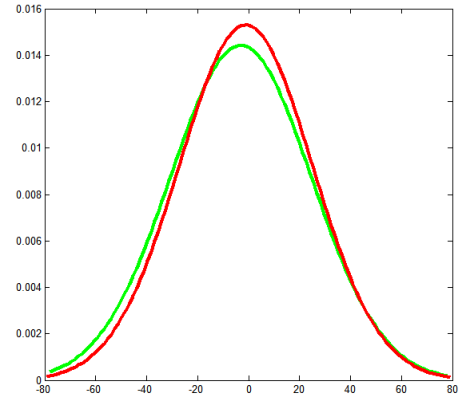
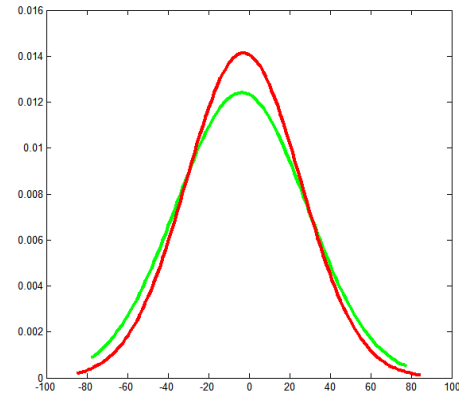


Fig. 8 Comparison of experiment and simulation of proton beam distribution under 10MeV energy and 3mm distance

이용하여 얻어진 밀도함수를 표현하였다. 아래 부분에는 실험과 전산모사의 밀도함수의 왼쪽에서 오른쪽으로 이동하면서 얻어진 밀도를 비교하였다. Fig. 7 은 10MeV 에너지에 1mm 거리, Fig. 8 은 10MeV 에너지에 3mm 거리에서의 실험결과와



(a) 10MeV, 1mm



(b) 10MeV, 3mm

Fig. 9 Comparison between experimental and simulation results under different condition

전산모사 결과를 비교한 결과이다. 실험과 시뮬레이션의 확률 밀도 함수를 구한 후 두 개의 분포가 얼마나 일치하는 지를 알아보기 위해 Kolmogorov-Smirnov Test 분석방법으로 비교하고, Table 1 에 결과를 제시하였다. 각 조건에서 p-value 가 0.05 이상인 것으로 나타났는데, 이는 95%의 신뢰도가 확보되었다는 의미이다. 10MeV, 1mm 의 p 값이 0.778 로 0.05 보다 훨씬 크다. 이는 두 개의 비교 값이 매우 유사하다는 의미이다. 하지만 10MeV, 3mm 의 p 값은 0.0502 로 거의 0.05 와 유사하다. 이는 95%의 신뢰도가 겨우 확보되었음을 의미한다. Fig. 9 는 각 실험 조건에서의 실험과 시뮬레이션의 양성자 빔 분포 비교 분석 결과이다. 분석 결과 실험과 시뮬레이션의 양성자 빔 분포가 거의 일치하는 경향을 보였다. 위의 결과를 종합하여 보면 실험의 결과와 시뮬레이션의 결과가 비슷하다는 결론을 얻었다. 이로써, 실험에 대한 시뮬레이션의 신뢰성을 확보하였다.

4. 결론

본 연구에서 세장비의 마이크로 홀을 이용하여 조

형된 양성자 빔으로 미세구조물 가공의 가능성 실험을 하고, GEANT4 를 이용하여 전산 모사한 후, 다음의 결과를 얻었다.

(1) 평균직경 21 μ m, 길이 9mm 의 428 의 세장비를 가지는 극대 세장비 마이크로 홀을 제작하였다.

(2) 양성자 빔의 에너지가 클수록 마이크로 홀을 통과하는 양성자의 수가 증가하며, 에너지 크기에 따른 커팅된 양성자 빔의 분포에는 차이가 없다.

(3) 마이크로 홀에 의해 조형된 펜슬 빔은 마이크로 홀의 출구에서 1mm 거리에서 약 25 μ m 의 직경을 가지고, 3mm 거리에서 약 45 μ m 의 직경을 가진다. 결과적으로 초기 수 mm 의 직경이 1/1000 정도로 줄어들었다.

(4) 양성자 빔 조사 실험과 전산모사 결과를 K-S test 를 통해 비교한 결과 각 조건에서 p-value 가 0.05 이상으로 유사한 분포를 가지는 것을 확인하였다. 이로서 시뮬레이션을 통하여 기하학적 모델이 바뀌었을 때 실험의 결과를 추정해 볼 수 있음이 확인되었다.

(5) MC-50 사이클로트론이 조형 장치와 함께 20 마이크로 대의 마이크로 공정기술로 사용될 수 있는 가능성을 확인하였다. 하지만 실제로 가공에 사용하려면 좀 더 심도 깊은 연구가 요구된다.

후 기

이 논문은 2013 년도 서울시립대학교 교내학술연구비에 의하여 연구되었음

참고문헌 (References)

- (1) Kim, H. B. and Hobler, G., 2007, "Ion Beam Induced Micro/Nano Fabrication: Shape Fabrication," *Jour. of the KSPE*, Vol. 24, No. 10, pp.109~116.
- (2) Kim, S., Chung, D. K., Kim, B. H., Oh, K. H., Jeong, S. and Chu, C. N., 2009, "Micromachining Using Hybrid of Laser Beam and Electrical Discharge Machining," *Jour. of the KSPE*, Vol. 26, No. 10, pp. 108~115.
- (3) Kim, J. G., Lee, J. J., Cho, S. H., Choi, D. S. and Lee, E. S., 2008, "Nano-machining Technology Using Electron Beam," *Jour. of the KSPE*, Vol. 25, No. 3, pp.7~14.
- (4) Uchiya, N., Harada, T., Murai, M., Nishikawa, H., Haga, J., Sato, T., Ishii, Y. and Kamiya, T., 2007, "Micro-machining of Resists on Silicon by Proton Beam Writing," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, Vol. 260, Issue 1, pp. 405~408.
- (5) Zhang, D., 2009, "Surface Modification for the Perfluorosulfonate Proton-conducting Electrolyte Membrane," *Applied Surface Science*, Vol. 255, Issue 7, pp. 4119~4122.
- (6) Meyer, J., Bluett, J., Amos, R., Levy, L., Choi, S., Nguyen, QN., Zhu, XR., Gillin, M. and Lee, A., 2010, "Spot Scanning Proton Beam Therapy for Prostate Cancer: Treatment Planning Technique and Analysis of Consequences of Rotational and Translational Alignment Errors," *Inter J Radiat Oncol Biol Phys*, Vol. 78, No. 2, pp. 428~434.
- (7) Roberts, A. and Bibra, M. L., 1996, "Fabrication of Buried Channel Waveguides in Fused Silica Using Focused MeV Proton Beam Irradiation," *Jour. of the Lightwave Tech.*, Vol. 14, No. 11, pp. 2554~2557.
- (8) Hofmann, D., 1988, "Quadrupole-doublet with Permanent Magnets for Proton Beam Focusing," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, Vol. 30, Issue 4, pp. 607~608.
- (9) Nishiuchi, M., Daito, I., Ikegami, M., Daido, H., Mori, M., Orimo, S., Ogura, K., Sagisaka, A., Yogo, A., Pirozhkov, A. S., Sugiyama, H., Kiriya, H., Okada, H., Kanazawa, S., Kondo, S., Shimomura, T., Tanoue, M., Nakai, Y., Sasao, H., Wakai, D., Sakaki, H., Bolton, P., Choi, I. W., Sung, J. H., Lee, J., Oishi, Y., Fujii, T., Nemoto, K., Souda, H., Noda, A., Iseki, Y. and Yoshiyuki, T., 2009, "Focusing and Spectral Enhancement of a Repetition-rated, Laser-driven, Divergent Multi-MeV Proton Beam Using Permanent Quadrupole Magnets," *Appl. Phys. Lett.*, Volume 94, Issue 6, 061107.
- (10) Jung, J. H., Lee, H. W. and Kwon, W. T., 2009, "Determination of the Optimal Machining Condition to Maximize the Aspect Ratio of the Micro Hole in EDM Process," *2009 Spring conference of the KSPE*, pp. 147~154.
- (11) Seo, D. W., Park, M. S., Yi, S. M. and Chu, C. N., 2007, "Machining Characteristics of micro-EDMed Holes According to Dielectric Fluid, Capacitance and Ultrasonic vibrations," *Jour. of the KSPE*, Vol. 24, No. 12, pp. 42~49.
- (12) Jahan, M. P., Wong, Y. S. and Rahman, M., 2009, "A Study on the Quality Micro-hole Machining of Tungsten Carbide by Micro-EDM Process Using Transistor and RC-type pulse Generator," *Jour. of Mater. Proc. Tech.*, Vol. 209, Issue 4, pp. 1706~1716.
- (13) Kim, G. M., Kim, B. H. and Chu, C. N., 1999, "Machining Rate and Electrode Wear Characteristics in Micro-EDM of Micro-hole," *Jour. of the KSPE*, Vol. 16, No. 10, pp. 94~100.