

극대세장비 마이크로 홀을 이용한 양성자 빔 집적 응용

A Proton Beam Shaping using an Extreme Aspect Ratio Micro-hole

김진남¹, 권원태²✉, 이성규¹

Jin Nam Kim¹, Won Tae Kwon²✉, and Seong Gyu Lee¹

1 서울시립대학교 기계정보공학과 대학원 (Dept. Mech. Info. Eng., Univ. of Seoul)

2 서울시립대학교 기계정보공학과 (Dept. Mech. Info. Eng., Univ. of Seoul)

✉ Corresponding author: kwon@uos.ac.kr, Tel: 02-2210-2403

Manuscript received: 2011.12.12 / Revised: 2012.2.29 / Accepted: 2012.4.22

EDM is the manufacturing process that uses the thermal energy to machine electrically conductive part. Despite a lot of research has been conducted for decades, the best aspect ratio of the micro hole using micro-EDM has not been over 30, yet. In the present study, new fabrication scheme was introduced to increase the aspect ratio of micro hole dramatically. Micro holes with less than 10 aspect ratio were aligned and welded together to manufacture a micro hole with extreme aspect ratio. Alignment of the micro hole with over 380 aspect ratio was conducted by the home-made apparatus installed with microscope and laser beam. The micro hole with extreme aspect ratio was used to shape pencil beam from proton beam generated from MC-50 cyclotron. The pencil beam was utilized to machine test specimen whose result was compared with GEANT4 computer simulation. It was shown that the experimental and simulation result were closer as the aspect ratio of the micro hole was bigger.

Key Words: Extreme Aspect Ratio (극대세장비), Micro-hole (마이크로 홀), Laser Beam (레이저 빔), Alignment Mechanism (정렬 메커니즘), Proton Beam Shaping (양성자 빔 조형)

1. 서론

현재 작은 직경과 깊은 깊이를 가지는 마이크로 홀을 가공하기 위하여 많은 연구들이 이루어지고 있다. 이러한 기술에는 마이크로 드릴링, 레이저 가공 방법, 방전을 이용한 가공방법 등이 있다. 이 연구들에서는 가공 조건 및 형상 최적화와 신물질 개발 등의 노력으로 높은 세장비를 지니는 마이크로 홀의 제작을 목표로 수행되었다.¹⁻³

제작된 마이크로 홀의 정렬을 위하여, 이미지 장치나 센서를 이용하여 홀 또는 물체를 정렬을 하는 Peg on Hole에 관한 연구와 홀 정렬 공차에 관한 연구가 있었으나,^{4,6} 빛을 이용하여 홀을 정렬하는 연구는 아직 행하여지지 않았다.

본 연구에서는 높은 세장비의 마이크로 홀들을 조립하여 세장비를 더욱 극대화하는 것을 목표로 하였다. 우선 높은 세장비의 마이크로 홀을 가공할 수 있는 방법 및 조건을 이용하여 단일 마이크로 홀들을 확보한 후,⁷ 마이크로 홀을 통과하는 빛을 따라 구멍들이 정렬하고 빛을 이용한 정렬과 다자유도 및 고정밀도의 조립 장치를 이용하여 단일 가공으로는 불가능한 극대 세장비의 마이크로 홀을 제작하였다.

극대세장비의 마이크로 홀은 양성자 빔의 조형에 사용될 수 있다. MC-50 사이클로트론에서 방출되는 양성자 빔은 가우시안 분포로 퍼짐 현상을 나타낸다. 이러한 양성자 빔은 마이크로 단위의 좁은 범위 조사에 사용되기는 어렵다. 작은 빔 스

팻을 가질 수 있도록 양성자 빔을 조형하는 방법으로는 쿼드러폴(Quadrupole) 방법을 이용하여 빔을 집적하는 방법이 있으나, 이는 고가의 장비와 고도의 기술을 필요로 한다.^{8,9} 이와 다른 방법으로 양성자 커팅 방법이 경제적인 대안으로 제시가 된다. 양성자 빔 커팅을 통해 필요 부분에만 빔의 조사가 이루어질 수 있고, 높은 세장비의 마이크로 홀을 사용하여 가느다란 펜슬빔을 뽑아 낼 수 있다.

이번 연구에서는 제작된 극대세장비의 마이크로 홀을 이용하여 실제 양성자 빔 커팅실험을 수행하고, 커팅 후의 빔의 분포를 확인하였다. 이와 함께 전산 모사를 이용한 실험 결과와 비교 분석하였다.

2. 연구 내용 및 결과

2.1 EDM을 이용한 마이크로 홀 제작

와이어 커팅(WEDM)을 이용하여 직경 30 μm , 길이 1000 μm 의 전극을 제작하였다. 제작된 마이크로 전극으로 15mm×15mm의 크기와 두께 300 μm 의 SUS304 시편에 마이크로 홀을 가공한 후 제작된 전극과 마이크로 홀을 Fig. 1에 보였다. EDM 가공 공정에서 세장비 극대화를 위한 마이크로 홀의 최적 가공 조건을 결정하기 위한 연구가 선행되었다.⁴ 이 연구에서 전극 마모, 출구 간극 및 입구 간극을 고려한 미세 방전 가공 조건은 입력 전압 60V, 축전 용량 680pF, 충전부 저항 500 Ω , 이송속도 1.5um/s, 1500RPM 이 최적임이 밝혀졌다. 이 조건으로 마이크로 홀을 가공하여, 평균 직경이 42.72 μm 이고, 평균 세장비 7.12가 되는 마이크로 홀 다수를 확보하였다.

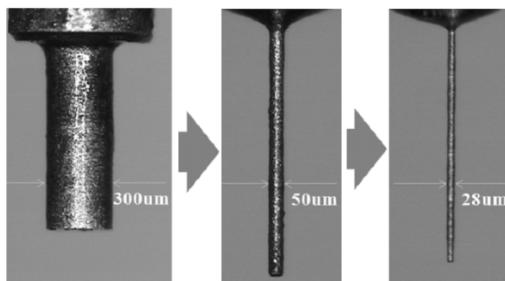


Fig. 1 Manufacturing of the electrode

2.2 마이크로 홀 조립을 통한 세장비 극대화

일반적으로 EDM을 이용하여 세장비 10 이상을 가지는 마이크로 홀 가공에 대한 연구는 많았으나

대부분 평균 직경이 80 μm 이상이었다.¹⁰⁻¹² 본 논문에서는 평균 직경 40~50 μm 의 단일 마이크로 홀을 조립하여 극대세장비 마이크로 홀을 제작하였다. 마이크로 홀의 정렬을 위하여 동심도와 수평 및 수직도에 대한 정밀한 메커니즘이 필요하다. 본 논문에서는 빛의 직진성을 이용하는 광학식 방법을 이용하여 정렬을 시도했다. 이는 매우 작은 내경의 마이크로 홀을 광학식 디지털 현미경을 통해 직접 관측하면서 정렬 장치를 조작하여 정렬을 시도하는 것으로써, 기구부의 자유도 및 정밀도가 높아야 하며 메커니즘의 설계가 중요하다. 정렬을 위한 기준선을 얻기 위하여 마이크로 홀의 정렬 메커니즘에서 아래 시편이 놓일 재물대 평면에 수직으로 광원을 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. Figure 2에 정렬 메커니즘의 개략도를 보였다.

정렬을 위한 광원으로는 광학 레이저(Uniphase 155SL, 0.95mW)를 사용하였다. 홀을 통과하는 광량을 늘리기 위하여 촛점거리 140mm를 가지는 렌즈를 사용하여 레이저 빔을 포커싱 하였다. Figure 3은 포커싱 된 레이저 광원을 이용하여 마이크로 홀을 조립한 결과이다.

포커싱을 한 레이저 빔의 경우, 총 10 장까지 시편을 정렬하여 약 60 정도의 세장비를 갖는 마이크로 홀을 얻어, 높은 세장비의 마이크로 홀의 가능성을 확인하였다. 세장비를 높이기 위하여 높은 정밀도의 메커니즘 설계 및 제작을 실시하였다.

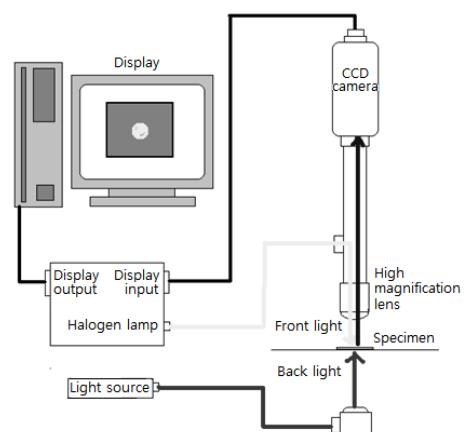


Fig. 2 Schematics of experimental setup for alignment of micro-hole using laser and microscope

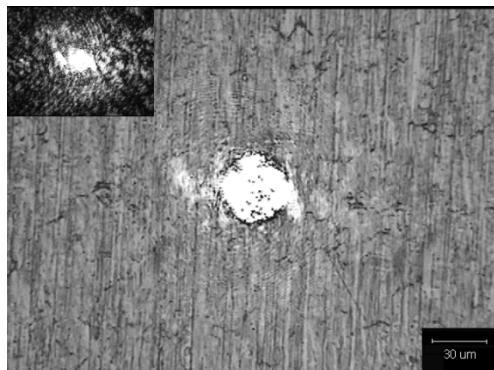


Fig. 3 Micro-hole with 60 aspect ratio aligned using laser beam

2.3 다자유도의 조립 기구부의 설계

여러 개의 마이크로 흘의 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 제작하였고 Fig. 4 에 보였다. 재물대는 시편을 올려놓고 정렬하는 기초가 되며 2 자유도를 갖는다. 재물대 위에 놓인 시편의 흘에 맞추어 다음 번 시편을 정렬하는 작업은 x-y-z-a 의 그리퍼를 이용하여 수동으로 이루어졌다. 이 작업을 반복하여 시편들을 적층하였다.

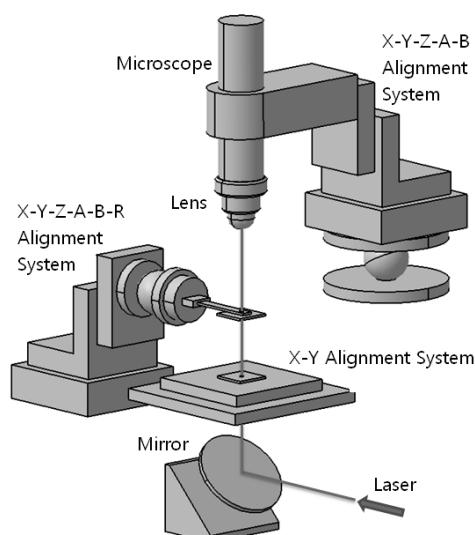
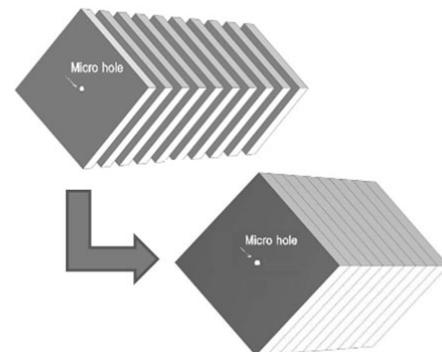


Fig. 4 Schematics of micro-hole alignment system using laser and microscope



(a) Schematics of welding micro-holes into one piece using welding

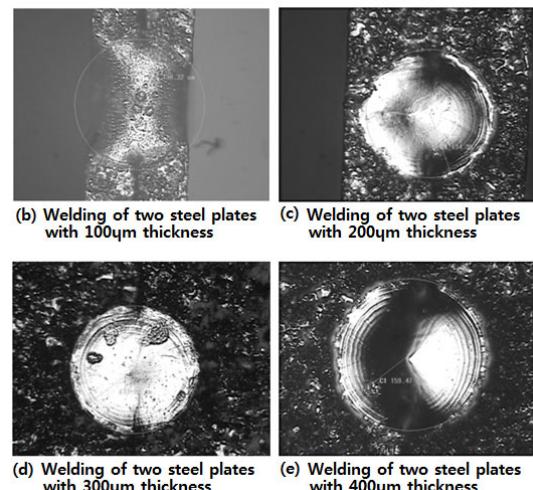


Fig. 5 Schematics of welded micro-hole and photos of welded side view of steel plates

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

이 장치에서 광원과 재물대의 수직도는 매우 중요하다. 광원의 수직도는 레이저 빔을 이용한 휴대용 정렬기구를 이용하여 정렬하였다. 평평한 밑면과 그 밑면에 수직으로 발사되는 레이저로 이루어진 휴대용 정렬기구를, 유리로 만들어진 현미경 재물대 위에 놓고 천정에 레이저 포착점을 잡은 후, 마이크로 조립기구에서 발사되는 레이저가 휴대용 정렬기구의 중심점을 지나 천정의 레이저 포착점과 일치하도록 하여 수직도를 맞추었다. 이

렇게 제작된 정렬시스템을 이용, 시편 48장을 조립하여 세장비 380의 마이크로 홀을 얻었다. 광원의 강도가 증가될 경우 더 높은 세장비의 마이크로 홀의 제작이 가능할 것으로 예상된다. 정렬 및 조립된 마이크로 홀은 단순 고정이 아닌 접합 과정을 통해 실제 응용 가능한 마이크로 홀 모듈로 만드는 것을 목표로 한다. 레이저 용접은 비접촉식으로 용접에 의해 판재의 뒤틀림 현상이 없고 용접시간이 짧으며 또한 용접 스팟 크기가 200~300 μm 로 300 μm 두께의 판재를 옆면에서 용접하기 용이하기 때문에 이 연구에서의 접합방법으로 사용되었다. 하지만, 정렬기구 상에서 직접 용접하기 어려우므로 임시로 접착제를 이용하여 접합한 후 용접기로 옮겨서 용접을 시행하였다. Figure 5에 마이크로 홀의 조립 개략도와 실제 시편의 옆면을 접합한 결과를 보였다.

2.4 양성자 빔 조형용 마이크로 홀의 응용

제작된 극대세장비 마이크로 홀은 양성자 빔 조형(cutting)에 사용되었다. 현재 MC-50 사이클로트론에서 방출되는 양성자 빔의 크기는 빔 포트에서부터의 측정거리에 따라 다르지만 대략 직경이 2~3mm이고 빔의 세기에 따라 빔의 크기와 형태도 가우시안 분포를 갖는다. 이런 양성자 빔의 직경을 축소하기 위하여 제작한 극대세장비 마이크로 홀을 이용하였다.

2.4.1 양성자 빔의 조형 실험

MC50 사이클로트론 내부의 빔 포트로부터 나온 양성자 빔은 알루미늄으로 이루어진 내경 25mm의 홀을 가진 1차 차폐막을 거친 후, 내경 5mm인 홀을 가진 2차 차폐막을 거쳐 외부로 방사된다. 이렇게 만들어진 양성자 빔은 10MeV-200mA로 Fig. 6에서 보듯이 사이클로트론에서 발사되어 250mm 떨어진 극대세장비 마이크로 홀에 의해 조형되어, 마이크로 홀에서 5mm 떨어진 테스트 필름(GFA 필름)에 도달하게 된다. 양성자 빔에 노출된 필름은 통상적으로 스캐너를 이용하여 RGB 픽셀데이터를 확인하지만, 펜슬빔의 경우 그 노출된 부분이 너무 작아서 평면 스캐너의 해상도로는 확인이 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 광학현미경을 이용하여 필름의 노출된 부분을 확인하고 영상 데이터로부터 RGB 픽셀 데이터를 추출하여 분석하는 소프트웨어를 개발하였으며 그 결과를 Fig. 7에 보였다. 새로 개발한 마이크로 홀

정렬기구로 제작할 수 있는 세장비가 380 이상이나 예비실험결과 200 이상의 세장비를 갖는 마이크로 홀은 양성자 빔을 거의 통과시키지 않음이 밝혀졌기 때문에, 실제 조사 실험에서는 30 장으로 이루어진 세장비 200의 마이크로 홀을 사용하였다. 빔 조사 시간은 10 초 내외로 하였으며, 마이크로 홀은 1장, 10장, 20장, 30장으로 세장비의 변화를 주어 실험을 진행하였다. 또한 정렬 보조장치의 각도 조절을 통하여 입사각의 변화에 따른 빔의 분포를 확인하였다.

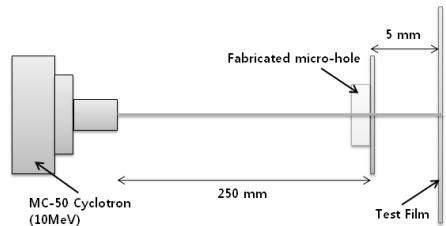


Fig. 6 Experimental setup for proton beam shaping

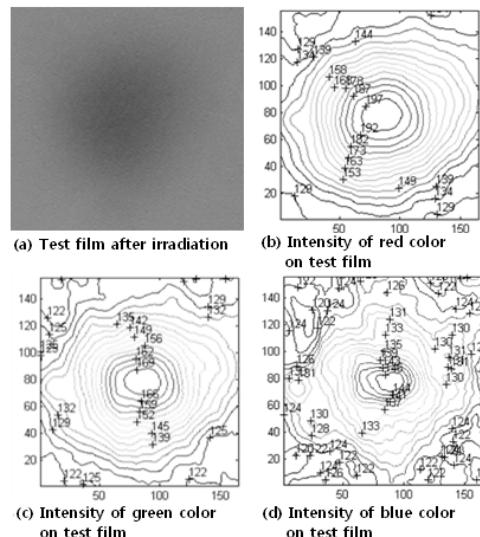


Fig. 7 Extraction of R, G, B signal from irradiated test specimen

2.4.2 GEANT4를 이용한 양성자 빔 전산모사

MC-50 사이클로트론에서 발생되는 양성자 빔은 일반적으로 가우시안 분포를 갖는다. 그러므로 양성자 빔이 마이크로 홀을 통과할 때 중심점은 가공이 가장 많이 되고 주변으로 갈수록 가공량이 적어진다. 실험에서 10개의 구멍을 겹쳐서 제작된

マイクロホール에 양성자빔을 통과시켰을 때 가공형태를 직감적으로 알기는 쉽지 않다.

이를 극복하기 위하여 전산모사를 통하여 빔의 형태와 분포를 예측하였다. 전산모사는 가공형상이 주어졌을 때 이를 가공하기 위한 홀의 형상을 예측하는데도 유용하다. 본 연구에서는 마이크로홀에 대한 모델링과 양성자빔의 모사를 통해 실제 빔의 분포와 비교, 분석하였다.

사용된 프로그램은 리눅스 환경의 GEANT4이며, 이를 사용하여 양성자빔의 개수와 경로를 모사하고, 가상 검출기를 이용하여 마이크로홀을 통과하는 양성자빔의 분포를 확인하였다. 실제 양성자빔 포트 내부의 양성자빔 발생 이후부터 알루미늄 박판과 차폐막을 거치는 과정까지 모두 전산모사하였다.

전산모사는 양성자빔 조사 실험을 했던 조건과 동일한 조건으로 조립된 마이크로홀 시편을 모델링하고, 그 후면에 가상 검출기를 위치시켜 통과된 실제 조사 실험을 실시한 1장, 10장, 20장, 30장의 시편으로 이루어진 마이크로홀에 대하여 수행하였다. Figure 8은 가상 검출기에 검출된 양성자빔의 좌표와 그 밀도를 그래프로 보였다.

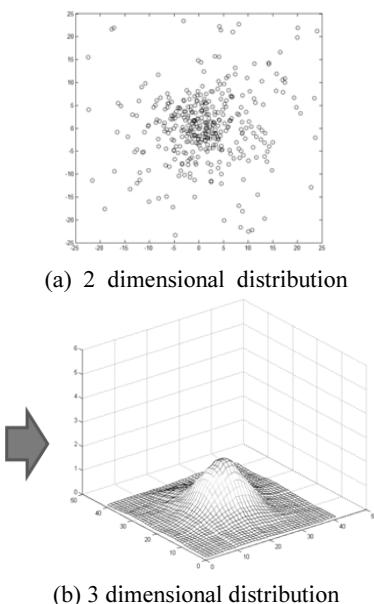


Fig. 8 Simulation result of proton beam distribution through micro-hole using GEANT4

2.4.3 양성자빔 실험과 전산모사의 비교 분석

양성자빔 조사실험 결과인 필름 영상 데이터로부터 RGB 픽셀 데이터 중에서 R 채널의 데이터는 실제 조사선량과 가장 비슷하게 나타나는 것으로 알려졌기 때문에¹³ 본 논문에서도 R 채널에서 얻어진 데이터와 전산모사 결과 데이터를 비교 분석하였다. 이를 위하여 양성자 조형실험결과에서 얻어진 필름을 광학현미경으로 촬영하여 영상을 얻은 후, R 채널의 데이터 밀도함수를 추출하였다. 밀도함수는 빔의 중심부터 반지름 방향으로의 밀도를 그래프로 나타내었다. 또한 전산모사의 결과로 검출된 양성자들의 밀도함수도 구하였다. 실험결과와 비교하기 위하여 밀도함수도 빔의 중심부터 반지름 방향으로의 밀도를 그래프로 나타내었다. 세장비의 변화에 따른 확률밀도함수의 변화를 실험과 전산모사로 구한 후 그 결과를 Fig. 9에 보였다. 비교 결과 1장일 때는 차이가 확인하지만, 10장 이상일 때는 유사한 것처럼 보인다. 실험과 전산모사의 결과를 좀 더 정량적으로 구하기 위하여 중심 점을 지나는 단면분포를 Fig. 10에 보였다.

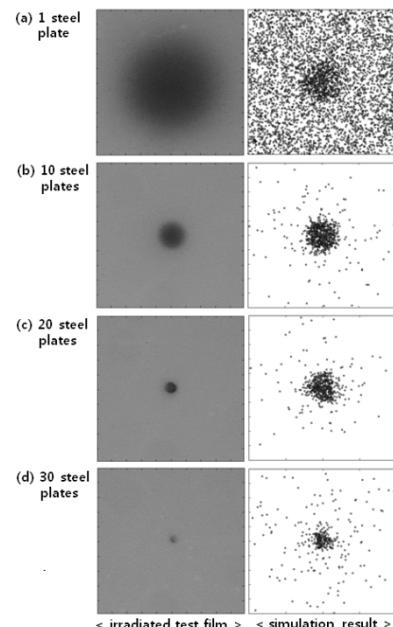


Fig. 9 Comparison of experimental (left) and simulated (right) result of irradiated specimen through various micro-holes

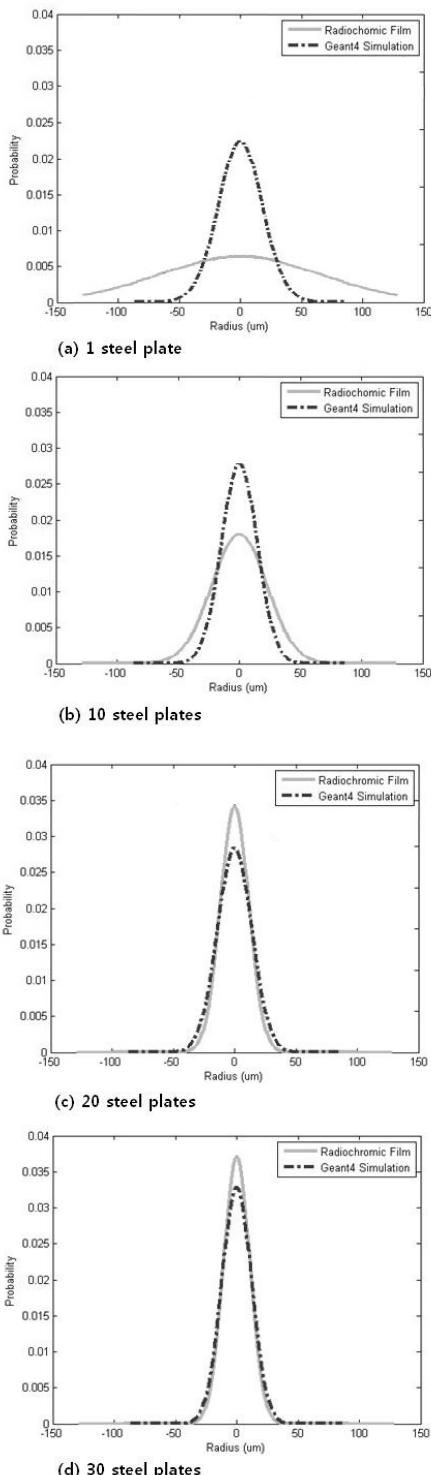


Fig. 10 Comparison of simulation and experimental result according to the number of plates

두 개의 분포가 얼마나 일치하는지를 알아보기 위해 Kolmogorov-Smirnov Test 분석방법을 통하여 비교하여, Table 1에 제시하였다. 1장과 10장의 경우 조사선량이 너무 많아서 필름과 조사선량의 선형관계의 범위를 넘어 95%의 신뢰도를 갖는 p 값 판정에서 실험값과 전산모사 값이 서로 다른 것으로 판정되었다. 하지만 20장과 30장의 경우 p 값이 0.05보다 큰, 0.2, 0.12가 도출되어 두 개의 그래프가 95%의 신뢰도에서 같다고 판정되었다. 결과를 종합하여 시편이 20장 이상일 때, 실험의 결과와 전산모사의 결과가 95%의 신뢰도로 유사하다는 결론을 얻었다. 10장 이하일 때 실험결과와 전산모사 결과가 다르게 나타난 이유는 전산모사의 조건과 실제 실험장비의 조건이 다르기 때문에 판단된다. 즉, 실험장비에서 처음에 양성자를 발생하는 장치가 전산모사에서 가정한 대로 완벽한 대칭으로 양성자를 발생시키지 못하기 때문에 극대세장비 시편에 도달하는 양성자들이 이론 값보다 큰 분산을 갖게 된다. 세장비가 낮은 구멍을 통과할 때는 분포의 분산 값이 작아지지 못하다가, 높은 마이크로 구멍을 통과할 때는 각도가 큰 양성자는

Table 1 Confidence level of simulated result to experimental result according to No. of plates

No. of plate	P value	95% Confidence ($p>0.05$)
1	0.0000	Different
10	0.0002	Different
20	0.2000	Identical
30	0.1224	Identical

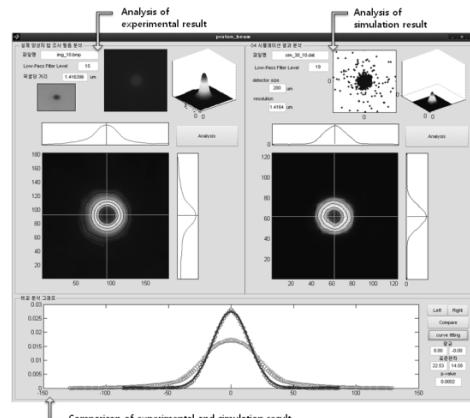


Fig. 11 User interface of home-made software for the comparison of simulation and experimental result

흡수되고 중심축과의 각도가 작은 양성자만 남아 분산이 작아져서 이론 값과 유사해지는 것으로 판단된다. 실험과 전산모사의 신속한 비교를 위하여 새로 소프트웨어를 개발하여 Fig. 11에 보였다. Figure 11의 왼쪽은 필름에서 얻어진 실험결과를, 오른쪽은 전산모사 결과를 나타내며 두 분포의 비교가 아래 그림에 주어졌다.

2.4.4 세장비와 입사각의 변화에 따른 빔의 분포

양성자 빔을 조형할 때 마이크로 홀의 세장비 만큼 중요한 것이 마이크로 홀의 정렬이다. 이를 위해 마이크로 홀과 양성자 빔의 정렬에 따른 효과가 전산모사로 연구되었다. 실제와 같은 조건에서 전산모사를 하는 것이 이상적이나, 실제의 경우 기계내부에서 양성자 빔이 알루미늄 판을 통과하는 등의 복잡한 과정을 거치므로 MC-50에서 발생되는 양성자 빔이 중앙점을 중심으로 가우시안 분포를 갖는다는 가정하에 전산모사를 실시하였다. 결과적으로 얻어진 세장비와 입사각의 변화에 따른 검출 양성자의 개수를 세어 그 결과를 Fig. 12에 보였다. 이 그림에서 세장비가 높아짐에 따라 검출된 양성자 개수가 작아져 빔의 반지름이 작아지며 입사각 변화에 민감하다는 것을 알 수 있다. 이 그래프에 의하면 세장비가 300이 넘을 때, 입사각이 0.2도 이상 틀어지면 안됨을 보여주었다.

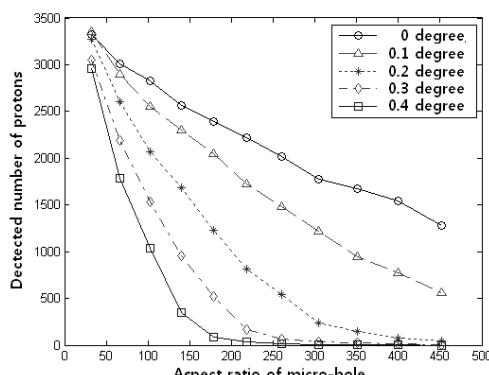


Fig. 12 Number of protons through micro-hole according to the variation of aspect ratio and inclined angle

3. 결론

본 연구에서는 마이크로 EDM을 이용하여 마이크로 홀을 제작한 후 정렬 및 조립장치를 사용하여 세장비 380 이상의 마이크로 홀을 제작하였다.

제작된 마이크로 홀을 양성자 빔 커팅 실험에 사용하였으며 실험결과와 전산모사 결과를 비교하여 미세 조사가 필요한 응용 분야에 적용 가능성 을 확인하였다.

1) 본 연구에서는 레이저와 현미경을 이용한 마이크로 홀 정렬 기구가 설계, 제작되었다. 레이저를 집광하기 위한 렌즈와 홀을 정렬하기 위한 3 차원 기구, 홀의 확대를 위한 현미경을 이용하여 높은 세장비를 갖는 마이크로 홀의 제작기구를 완성하였다.

2) 자체 제작된 기구를 이용하여 직경 40 μm , 길이 15.2mm로 세장비 380 이상을 갖는 극대세장비를 갖는 마이크로 홀을 제작하였다.

3) 극대세장비 마이크로 홀을 양성자 빔 커팅에 사용하였다. 200의 세장비를 갖는 마이크로 홀을 사용하여 10mm 이상의 직경을 갖는 양성자 빔을 100 μm 이하로 축소하였다.

4) 실험결과를 GEANT4를 사용한 전산모사 결과와 비교하여 20 장이상의 플레이트를 겹쳤을 때 전산모사와 실험이 유사하다는 것을 밝혔다.

5) GEANT4를 이용한 모사결과 마이크로 홀과 양성자 빔의 정렬도 빔의 조형에 큰 영향을 미친다는 것을 확인하였다.

후기

본 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(원자력 연구기반확충사업, 2011-0018824).

참고문헌

1. Kim, G., "Optimum Shape Design of Carbide Micro-drill in Consideration of Productivity," Journal of the Korean Society of Machine Tool Engineers, Vol. 13, No. 3, pp. 133-140, 2004.
2. Oh, K. H., Lee, M. K., and Jeong, S., "Laser micromachining of high-aspect-ratio metallic channels for the application to microthermal devices," Optical Society of Korea, Vol. 17, No. 5, pp. 437-446, 2006.
3. Yua, Z. Y., Rajurkara, K. P., and Shen, H., "High Aspect Ratio and Complex Shaped Blind Micro Holes by Micro EDM," CIRP Annals - Manufacturing Technology Vol. 51, No. 1, pp 359-

- 362, 2002.
- 4. Wang, J. and Cho, H., "Micropeg and Hole Alignment Using Image Moments Based Visual Servoing Method," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, Vol. 55, No. 3, pp. 1286-1294, 2008.
 - 5. Bruynincckx, H., Dutrd, S., and De Schutte, J., "Peg-on-Hole: A Model Based Solution to Peg and Hole Alignment," *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 2, pp. 1919-1924, 1995.
 - 6. Scholz, F., "Hole Alignment Tolerance Stacking Issues," 1999.
 - 7. Jung, J. H., Lee, H. W., and Kwon, W. T., "Determination of the optimal machining condition to maximize the aspect ratio of the micro hole in EDM process," *Proceedings of KSMTE Spring Meeting*, pp. 147-154, 2009.
 - 8. Hofmann, D., "Quadrupole-Doublet with Permanent Magnets for Proton Beam Focussing," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, Vol. 30, No. 4, pp. 607-608, 1988.
 - 9. Nishiuchi, M., Daito, I., Ikegami, M., Daido, H., Mori, M., Orimo, S., Ogura, K., Sagisaka, A., Yogo, A., Pirozhkov, A. S., Sugiyama, H., Kiriyama, 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., "Focusing and spectral enhancement of a repetition-rated, laser-driven, divergent multi-MeV proton beam using permanent quadrupole magnets," *Applied Physics Letters*, Vol. 94, No. 6, Paper No. 061107, 2009.
 - 10. Seo, D. W., Park, M. S., Yi, S. M., and Chu, C. N., "Machining Characteristics of micro-EDMed Holes According to Dielectric Fluid, Capacitance and Ultrasonic vibrations," *Journal of Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 24, No. 12, pp. 42-49, 2007.
 - 11. Jahan, M. P., Wong, Y. S., and Rahman, M., "A Study on the Quality Micro-hole Machining of Tungsten Carbide by Micro-EDM Process Using Transistor and RC-type pulse Generator," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 209, No. 4, pp. 1706-1716, 2009.
 - 12. Kim, G. M., Kim, B. H., and Chu, C. N., "Machining Rate and Electrode Wear Characteristics in Micro-EDM of Micro-hole," *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 16, No. 10, pp. 94-100, 1999.
 - 13. Gafchromic, "Gafchromic® HD-810 Radiochromic Dosimetry Film and D-200 Pre-Formatted Dosimeters for High-Energy Photons," Configuration, Specifications and Performance Data.