

소형공작기계를 이용한 광커넥터용 V 홈 가공에 관한 연구

이재하*, 박성령*, 양승한#, 이영문**

A Study on Machining of A V-groove on the Optical Fiber Connector Using a Miniaturized Machine Tool

Jae-Ha Lee*, Seong-Ryeong Park*, Seung-Han Yang# and Young-Moon Lee**

ABSTRACT

As optical communication is being substituted for telecommunication, the demand of a large variety of fiber optic components is increasing. V-groove substrates, one of the module components, are used to connect optical fibers to optical planar circuits and to arrange fibers. Their applications are multi-channel optical connectors and optical waveguide fiber coupling, etc. Because these substrates are a critical part of the splitter in a multiplexer and a multi fiber connector, precise and reliable fabrication process is required. For precisely aligning core pitch between fibers, machined core pitch tolerance should be within sub-microns. Therefore, these are generally produced by state-of-the-art micro-fabrication like MEMS. However, most of the process equipment is very expensive. It is also difficult to change the process line for custom designs to meet specific requirements using various materials. For various design specifications such as different values of the V angle and low-priced process, the fabrication method should be flexible and low cost. To achieve this goal, we have suggested a miniaturized machine tool with high accuracy positioning system. Through this study, it is shown that this cutting process can be applied to produce V-groove substrates. We also show the possibility of using a miniaturized machining system for producing small parts.

Key Words : V-groove(V 홈), Miniaturized machine tool(소형공작기계), Diamond tip(다이아몬드 팁), Core pitch(코어피치)

1. 서론

1970 년 광섬유의 개발 이후 광통신 기술은 급격하게 발전해 왔다. 이러한 광통신은 정보기술의 발전에 있어서 아주 중요한 역할을 해왔다. 광섬유를 이용한 전송시스템에는 광커플러나 광커넥터

와 같은 수동 광소자가 사용된다. 고밀도파장분할 다중방식(DWDM)은 광통신시스템의 전송능력을 향상시켰다. 수동소자는 단일 광섬유뿐 아니라 광섬유 배열을 연결하는데도 사용된다. 단순접속(simple connection)에 있어서 서로의 배열이 정렬되지 않거나 광섬유간의 간격이 생기면 전송 손실이

접수일: 2003 년 6 월 21 일; 게재승인일: 2004 년 2 월 20 일

* 경북대학교 기계공학과 대학원

교신저자, 경북대학교 기계공학부

Email syang@knu.ac.kr Tel. (053) 950-6569

** 경북대학교 기계공학부

생긴다. 광섬유 사이의 접속에 의한 전송손실을 0.1dB 이하로 줄이기 위해서는 지름 50 μm의 광섬유 코어인 경우, 배열 정렬의 정도가 1 μm이내 이어야 한다. 게다가, 총손실은 각각의 합으로 얻어짐으로 정밀한 배열은 광섬유간의 단순접속에서 매우 중요하다.

일반적으로, 단일 광섬유가 아닌 광섬유 배열을 접속할 때 V 홈 기관이 사용된다. 따라서, 광섬유 배열을 연결할 때 발생하는 전송 손실을 줄이기 위해 V 홈의 허용오차는 서브미크론 이하이어야 한다.¹ 즉, 코어 간격의 정밀도는 전송 효율에 큰 영향을 미친다. 따라서, V 홈 사이의 위치 정밀도를 서브미크론 이하로 하기 위해, 대부분의 V 홈은 에칭 및 리소그라피 기술을 기반으로 하는 MEMS 공정에 의해 만들어진다.

일반적으로 (100)과 (110) 실리콘 웨이퍼의 다른 방향성과 (111)과 (100) 표면 사이에서 에칭 시간을 다르게 함으로 V 홈을 만들 수 있다. 현재, MEMS 기술을 이용하여 V 홈 사이의 공차가 ±0.5 μm인 제품이 생산되고 있다. 또한, 사출성형이나 다이아몬드 공구를 이용한 정밀연마 공정도 V 홈 가공에 이용되고 있다. MEMS 공정의 경우, 원하는 구조를 만들기 위해 포토마스크를 사용한다. 포토마스크를 제작한 후 습식 세정, 증착, 포토리소그라피, 건식 에칭, 박리, 습식 에칭의 순서로 공정이 이루어진다. V 형상은 실리콘 (111)평면에서 방향성에 의해 에칭 과정이 제한됨을 이용해 제작될 수 있지만 웨이퍼가 완전히 에칭 되기까지 시간을 정확히 조절해야 한다.² 사출성형의 경우에는 틀을 만든 후 주공정인 에폭시 열처리(epoxy curing) 공정을 거치게 된다. 그러나, MEMS 및 사출성형 방식은 사용되는 장비가 비싸고 실리콘, 알루미늄, 지르코니카 등 다양한 재료를 사용할 수 없으며, 소비자들이 원하는 다양한 종류의 제품을 만드는 것이 어렵다.

한편, 최근에 에너지 소비의 관점에서 소형공작기계에 관한 관심이 증대되고 있다. 크기가 작고 복잡하며 정밀한 부품에 대한 수요가 증대됨에 따라 소형공작기계에 대한 연구의 필요성이 커지고 있다. 특히, 절삭공정을 이용한 소형부품 가공 기술은 마이크로 공구의 발달에 따라 더 가속화되고 있다. 기계적인 힘에 의한 재료 제거 방법은 가격이 싸고 대량생산이 가능하며 대부분의 재료에 대해 적용할 수 있다. 또한, CNC 기술의 응용

과 절삭 공정의 노하우로 매크로 크기의 프로펠러나 임펠러의 NC 데이터를 작은 크기의 프로펠러나 임펠러를 만드는데 바로 사용할 수 있다. “작은 부품을 만들기 위해서 작은 공작기계를 사용하는 것”의 일환으로 소형공작기계는 다른 기술에 비해 낮은 비용으로 높은 정밀도와 에너지 효율을 얻을 수 있다.³

따라서, 본 연구에서는 고정밀 소형공작기계와 절삭가공을 위한 단결정 다이아몬드 팁을 이용하여 V 홈을 만들고자 하였다. 대부분의 광부품들은 작기 때문에 본 시스템은 아주 효과적이며 제작된 V 홈의 형상과 배열 정밀도는 절삭에 의한 홈 제작의 가능성을 보여준다.

2. V 홈 기관

본 연구에서 가공한 V 홈 형상은 광섬유 코어 지름이 125 μm인 경우로 Fig. 1에서와 같이 코어간의 간격은 250 μm이며 V 홈의 각도는 에칭공정에서와 같은 70.52°이다.

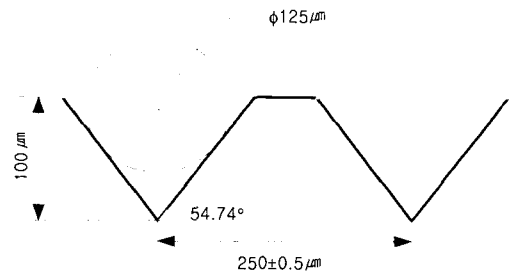


Fig. 1 Dimension of V grooves to be machined

V 홈간의 배열이 정렬되지 않음에 따라 생기는 손실은 다음과 같다. 광출력이 광섬유 코어에 균일하게 분포되어 있다고 가정할 경우, 다중 모드에서 배열이 정렬되지 않음에 따라 생기는 손실은 다음과 같다.⁴

$$L = -10 \log_{\pi} \left\{ \cos^2 \frac{d}{2a} - \frac{d}{2a} \sqrt{1 - \left(\frac{d}{2a} \right)^2} \right\} \quad (1)$$

여기서, d 는 코어중심간의 거리오차이며 a 는

코어 반지름이다. 결합효율은 코어면적에 대한 코어들의 결합에 의한 겹쳐진 면적의 비율이 되며 다중모드에서는 출력이 광섬유 코어에 균등분포(uniformly distribution)를 나타낸다고 가정할 수 있으므로 식(1)을 얻을 수 있다. 단일모드의 경우에는 가우시안 분포(Gaussian distribution)를 이용하게 되며 식(2)와 같다.

$$L = -10 \log \left\{ \exp \left[- \left(\frac{d}{w} \right)^2 \right] \right\} \quad (2)$$

여기서, w 는 스팟크기(spot size)로 정규화주파수(normalized frequency)로부터 얻어진다.

광섬유간의 정렬은 전송손실에 큰 영향을 준다. 즉, Fig. 2 에서 보는 것과 같이 접속되어야 할 광섬유의 코어 정렬에 오차가 발생하면 전송손실이 일어난다. 예를 들어, 코어정렬에 있어, 오차 dX 와 dY 가 $0.5 \mu\text{m}$ 이면 다중모드에서 전송손실은 0.002 dB 이 된다.

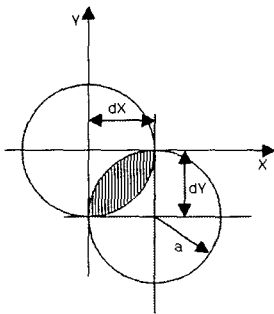


Fig. 2 Core offset by misalignment between transmitting and receiving fibers

3. 가공을 위한 소형공작기계

일반적인 공작기계는 금속 가공을 위해서 많은 동력이 필요하고 강성을 높이기 위해서 시스템의 크기도 크다. 그러나, V 홈 가공의 경우, 가공부품이 작으므로 소형공작기계를 개발하면 기존 시스템보다 자원, 공간, 에너지 소비를 줄일 수 있다.

전송 손실을 줄이기 위해 코어 간격의 오차는 서브미크론 이하가 되어야 한다. 게다가 홈의 길이가 밀리미터 수준이기 때문에 공작기계는 나

노 수준의 분해능으로 긴 이송거리를 가지는 정밀한 위치결정시스템으로 구성되어야 한다. PZT 액츄에이터는 나노 수준의 분해능을 가지고 있다. 분해능은 좋지만 긴 이송거리를 가지지 못한다는 단점이 있다. 이러한 단점을 보완하기 위해 인치웜 방식이 개발되었다.⁵ Fig. 3 은 선형모터의 구조를 보여준다. Fig. 3 에서 PZT 액츄에이터에 의해 발생하는 힘 F_a 는 중앙에 있는 블레이드를 마찰력 F_s 에 의해 오른쪽으로 밀게 된다.

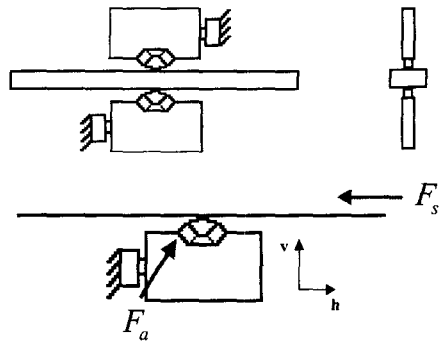


Fig. 3 Inchworm type driving mechanism for a miniaturized stage

본 연구에서 사용된 PZT 액츄에이터는 공진모드에서 작동한다. 액츄에이터에 전압이 가해지면 팽창하면서 접촉 부분에서 수직항력이 증가하며 이 때 생기는 마찰력으로 구동된다. Fig. 4 는 소형스테이지를 사용한 위치결정시스템과 공구 홀더를 가지고 있는 소형공작기계이다. 이 시스템의 크기는 $300 \times 150 \times 150 \text{ mm}$ 이고 형태는 수평형이다.

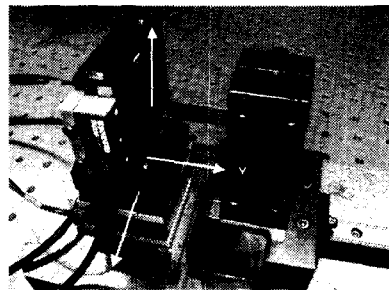


Fig. 4 3-axis positioning system using miniaturized stages and tool holder

Table 1 Some information for controller and PZT

Motion controller	Motion board	DS1104
	Company	dSPACE(Germany)
	Axis	3 PWM Channel
PZT actuator	Model	Navy II type PZT
	Piezoelectric Strain Coefficient	0.39[nm/Volt]
	Poisson's ratio	0.31

정밀한 위치결정을 위해 PZT 를 이용한 소형 스테이지는 PC 를 이용하여 위치제어기를 구성하였고 그 분해능은 100nm 이다. Fig. 5 는 전체 제어 시스템의 개략도를 보여준다. 되먹임 제어 센서는 50nm 분해능을 가지는 리니어 엔코드를 사용했고 디지털 PI 제어기를 구성 하였다. 게인값 튜닝에는 경험적 방법중에 하나인 계전기 조정법(Relay tuning)을 이용하였다.^{6,7}

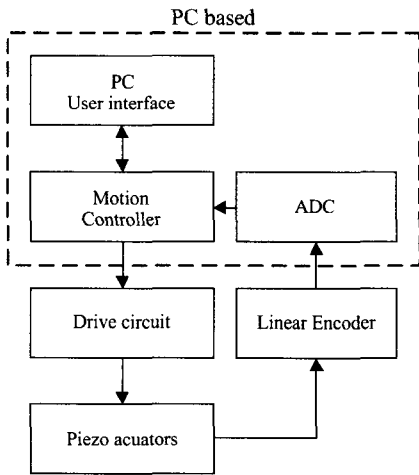


Fig. 5 Block diagram of overall control system

4. 실험 및 결과

4.1 실험조건

사용된 공구는 V 형상의 다이아몬드 팁이며 Fig. 6 은 가공 후 SEM 으로 찍은 다이아몬드팁 사진이다. 공구의 경사각은 0°이고 여유각은 3°이다.

절삭의 방향은 Z 축 방향이고 V 홈의 깊이 방향이 Y 축 방향이 되며, X 축 방향은 홈 배열 방향이다. 시작점을 결정하기 위해 1000 배 배율의 광학현미경을 이용하였다. 사용된 재료는 실리콘과 폴리카보네이트이며 각 재료의 물성치는 Table 2 와 같으며 크기는 20 mm×20 mm 이다. Table 3 은 사용된 절삭 조건을 보여준다.

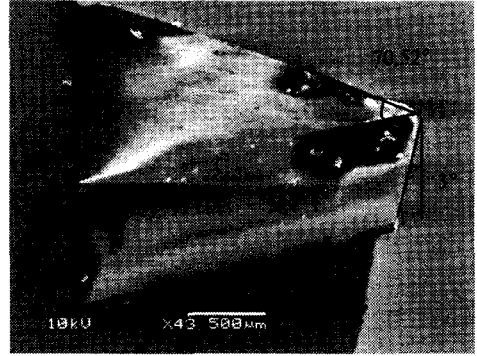


Fig. 6 SEM photo of diamond tip

Table 2 Properties of materials

	Poly-carbonate		Silicon
Young's Modulus	2.3 GPa	Young's Modulus	90.3 GPa
Tensile Yield Strength	60 MPa	Bending Strength	143 MPa
Rockwell Hardness	M58	Vickers Hardness	680 Hv

Table 3 Summary of cutting parameters

Materials	Polycarbonate, Silicon
Cutting speed[mm/s]	0.25 / 0.67 / 1.43
Depth of cut[μm]	2 / 6

4.2 폴리카보네이트 가공 실험

Fig. 7 은 250 μm의 간격으로 가공한 홈의 세척 전 모습이다. 총 가공깊이는 100 μm이고 길이는 10 mm이다. 절삭깊이는 2 μm이며 절삭속도는 0.67 mm /s 로 하였다. V 홈 중심선을 보면 배열의 정렬 정도를 알 수 있다.



Fig. 7 Front view of machined grooves on polycarbonate (0.67 mm/s, 2 μm)

Fig. 8 은 Fig. 7 을 확대한 사진이다. 흰색 선은 가공 중에 발생한 칩에 의해 피삭재 표면에 생긴 흔적이다. 즉, 칩 제거가 원활이 이루어지지 않으면 배출되지 못한 칩들이 구성인선(Built in edge) 형태로 공구에 남아 있게 된다.

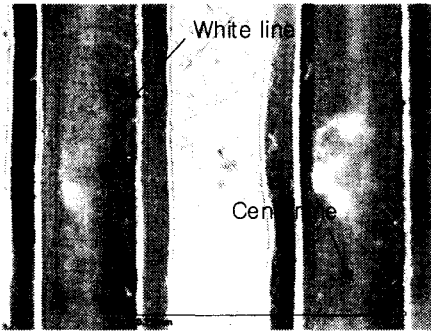


Fig. 8 Close-up view of groove shape

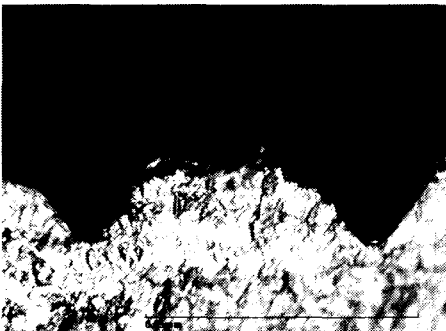


Fig. 9 Lateral view of machined V grooves on polycarbonate(0.67 mm/s, 2 μm)

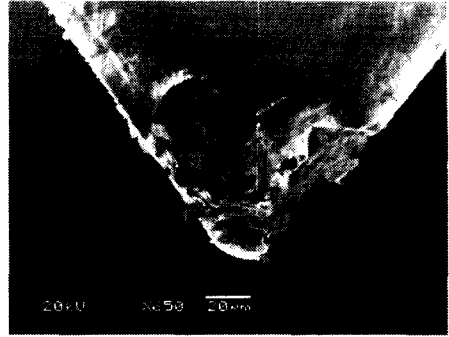


Fig. 10 SEM photo of the broken tool

칩이 쌓이게 되면 V 모양의 모서리로 칩이 모이게 되고 V 홈 형상이 제대로 나오지 않게 된다. 그러므로, 칩 배출을 쉽게 하기 위한 특별한 형상의 공구가 필요하다.

Fig. 9 는 V 홈을 측면에서 본 모양이다. 홈의 왼쪽을 보면 찢어졌는데 이는 공구의 왼쪽 부분이 파손되어 생긴 것이다. 파손된 공구의 형상은 Fig. 10 과 같다. 결국, 가공방향과 직각인 공구면의 양 모서리 부분은 가공 표면의 형태에 영향을 준다.

4.3 실리콘 가공 실험

폴리카보네이트의 가공 조건과 같은 조건으로 실리콘을 가공했다. Fig. 11(a)는 실리콘의 표면에 초점을 맞춘 것이며 표면에 보이는 네모난 형상은 폴리싱 되지 않은 실리콘 표면을 나타낸다. Fig. 11(b)는 홈의 중심선에 초점을 맞춘 것이다. 배열 정렬은 좋지만 모서리 부분에 찢어진 모습을 볼 수 있다.

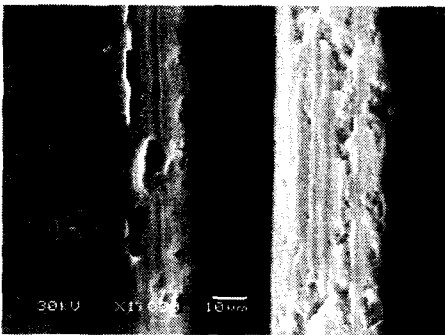


(a) Focusing on the surface

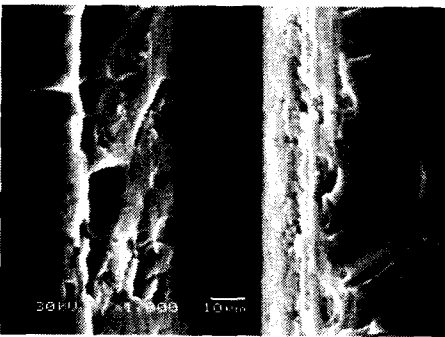


(b) Focusing on the center line

Fig. 11 Front view of machined grooves on silicon material (0.67 mm/s, 2 μm)



(a) At 0.25 mm/s cutting speed and 2 μm depth of cut



(b) At 1.43 mm/s cutting speed and 2 μm depth of cut

Fig. 12 SEM photo of a groove on silicon material

Fig. 12(a)와 (b)는 가공된 홈 모양을 SEM 을 이용해 찍은 사진이다. 가공 깊이는 2 μm이고 속도는 각각 0.25 mm/s 와 1.43 mm/s 으로 했다. 가공속도가 빠를수록 V 홈 모서리 부분의 표면 거칠기가 나쁨을 알 수 있다. 이는 절삭속도가 빠를수록 절삭현상 보다 경작현상(plowing)이 커진 것으로 볼 수 있다.

4.4 V 홈 배열 정렬

스핀들처럼 회전하는 공구대신 고정된 공구 팁을 사용했기 때문에 공구의 회전에 의한 진동은 없다. 따라서, 회전진동에 의한 V 홈의 측면변동은 없다고 볼 수 있으므로 배열 정렬을 더 정확히 측정하기 위해 실리콘을 사용한 가공실험의 X 축의 엔코더 신호를 받았다. Fig. 13 과 14 는 엔코더 신호를 나타낸다. 가공 시작부에서 가장 큰 측면방향의 위치 변동이 생긴다.

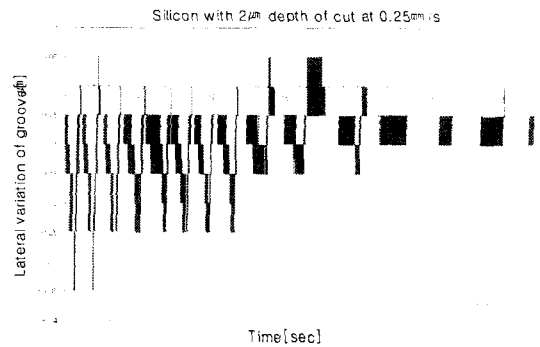


Fig. 13 Lateral variation of groove by linear encoder in case of silicon (at 0.25 mm/s, 2 μm)

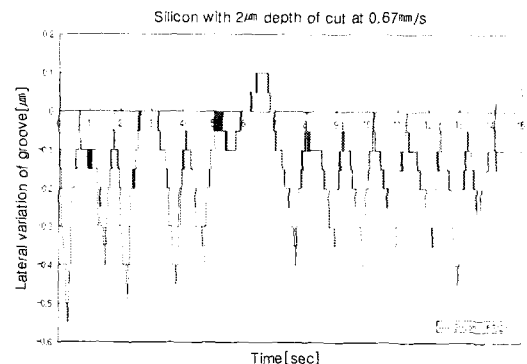


Fig. 14 Lateral variation of groove by linear encoder in case of silicon (at 0.67 mm/s, 2 μm)

가공 속도가 0.25 mm/s 일 때 +0.05~ -0.35 μm 의 범위에서 오차가 생긴다. 이론적으로 배열 정렬이 0.5 μm 이면 다중모드의 경우 0.002 dB의 손실이 생긴다. 따라서, 본 연구에서 가공된 V 홈의 경우, 배열정렬에 의한 전송손실은 0.002dB 이하임을 알 수 있다.

4.5 V 홈 가공 위한 절삭깊이의 가변

Fig. 15 에서 볼 수 있듯이 절삭 깊이가 같더라도 총절삭 깊이가 증가됨에 제거되는 재료의 부피는 증가하게 된다.

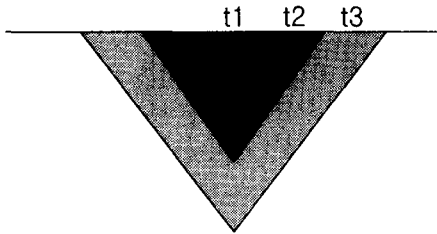


Fig. 15 Change of the volume of material removal

그러므로, 가공 깊이가 더해짐에 따라 더 많은 절삭력을 필요로 한다. 스테이지의 구동력은 0.25N 이며 절삭 방향을 중력 방향으로 하면 총 낼 수 있는 힘은 0.544N 이 된다. 폴리카보네이트는 절삭깊이가 2 μm 인 경우와 6 μm 인 경우 모두 100 μm 까지 절삭되었다. 하지만, 실리콘을 사용하여 6 μm 의 절삭깊이로 가공한 경우, 절삭속도가 0.25 mm/s, 0.67 mm/s 일때는 절삭된 깊이가 72 μm 이상에서, 절삭속도가 1.43 mm/s 에서는 82 μm 이상에서 더 이상 6 μm 의 절삭깊이를 적용할 수 없었다. 이는 1 회 선가공시 제거되는 면적이 증가하기 때문이다. 절삭된 깊이가 82 μm 일 때, 6 μm 절삭깊이를 지령하면 절삭에 의한 제거면적 증가량이 718 μm^2 가 된다. 주어진 속도에서, 0.544N 의 시스템 구동력으로 절삭 가능한 최대 제거면적 증가량이 278 μm^2 이었다. 따라서, 가공시 제거면적 증가량이 278 μm^2 이 넘지 않게 절삭 깊이를 변경해야 한다. 결국, 더 이상 가공이 되지 않으면 절삭깊이를 2 μm 로 변경하여 가공하였다. 이는 가공시간의 제한을 의미한다. 하지만, 시간뿐 아니라 모든 공정 의 과정을 생각해 볼 때 기존의 방식과 비교해서

공정 과정이 단순하고 작업 환경면에서 큰 장점을 가진다.

4.6 가공결과

Table 3 는 가공 결과를 보여준다. Table 4 에 있는 시간은 V 홈 한 개를 가공하는데 걸리는 시간이다. 본 연구에서 제안된 소형공작기계는 적절한 절삭조건을 통해 V 홈을 기계적인 방법으로 가공할 수 있음을 보였다. 필요한 공정이 다른 방식보다 간단하지만 한 대의 가공설비의 경우, 절삭가공하는 것에 비해 에칭공정은 동시에 많은 V 홈을 가공할 수 있으므로 에칭가공의 생산성이 높다. 그러나, 본 시스템의 크기가 소형이므로 단위면적당 생산성을 비교하면 큰 장점을 가지고 있다. 본 연구에서 개발된 소형공작기계의 구동전력은 3.6W 로 에너지 소비면에서도 다른 가공시스템보다 유리하다. 앞으로 고정밀도와 표면 거칠기를 유지하면서 가공 속도를 높일 수 있다면 큰 이득을 얻을 수 있다.

Table 4 Summary of results

Materials	Polycarbonate					
	0.25		0.67		1.43	
Cutting speed [mm/s]						
Depth of cut [μm]	2	6	2	6	2	6
Time [min]	67.5	23	25.8	8.8	12.5	4.3
Lateral variation [μm]	+0.05-0.20	+0.10-0.20	+0.10-0.25	+0.10-0.20	+0.65-0.85	+0.60-0.85
Surface integrity	Good	Good	Good	Good	Bad	Bad
Materials	Silicon					
	0.25		0.67		1.43	
Cutting speed [mm/s]						
Depth of cut [μm]	2	6	2	6	2	6
Time [min]	68	35.1	25.5	13.4	13.8	5.5
Lateral variation [μm]	+0.05-0.35	+0.05-0.35	+0.10-0.55	+0.15-0.6	+0.1-1.05	+0.1-1.10
Surface integrity	Good	Good	Bad	Bad	Bad	Bad

5. 결론

소형공작기계를 사용하여 광섬유 소자인 V 홈을 기계적인 가공 방법으로 제작했다. 본 연구에서는 서브미크론 수준 이하의 정밀도를 유지하면서 취성 재료인 실리콘과 연성 재료인 폴리카보네이트를 사용하여 V 홈을 제작하였다.

- 1) 소형공작기계를 구성하고 실리콘 및 폴리카보네이트를 사용한 V 홈 가공시험을 행하였으며 적당한 절삭속도와 절삭깊이를 선정하여 광통신용 V 홈의 요구되는 배열정렬을 만족함을 보였다.
- 2) 배열정렬의 정도는 절삭깊이보다 절삭속도에 더 큰 영향을 받은 것을 알 수 있다.
- 3) 가공시 발생하는 칩이 구성인선의 형태로 공구 표면에 머물러 가공표면의 변화가 생겼다. 칩의 신속한 제거가 필요하며 공구면의 수정에 대한 연구가 요구된다.
- 4) 절삭 공정은 다른 방식보다 더 효율적이고 비용이 저렴하다. 가공시스템이 가공 부품의 크기에 적합하면서 그 크기가 작기 때문에 에너지 소비나 초기 투자비용이 낮다. 향후, 높은 절삭속도에서도 공구 형상을 수정함으로 생산성이나 표면 거칠기를 높일 수 있는 연구가 수행될 수 있다.

참고문헌

1. De Labachellerie, M., Kaou, N., Armbruster, V., Jeannot, J. C., Mollier, P., Porte, H. and Devoldère, N., "A micro-machined connector for the coupling of optical waveguides and ribbon optical fibers," *Sensor and actuators A* Vol. 89, pp. 36-42, 1995.
2. Jubber, M. G., McLaughlin, A. J., Marsh, J. H., Aitchison, J. S., John, P., Troupe, C. E. and Wilson, J. I. B., "Micro-machined pattern transfer into CVD diamond," *Diamond Relat. Mater.* Vol. 7, pp. 1148-1154, 1998.
3. Zinan, L. and Takeshi, Y., "Micro cutting in the micro lathe turning system," *Int. J. Mach. Tools Manufact.* Vol. 39, pp. 1171-1183, 1999.
4. Palais, J.C., *Fiber Optic Communications*, Prentice - Hall International Editions, 1998.
5. Tan, K. K., Lee, T. H. and Zhou, H. X., "Micro-

Positioning of Linear-Piezoelectric Motors Based on a Learning Nonlinear PID Controller," *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*. Vol. 2, pp. 22-29, 1997.

6. Zigler, J.G. and Nichols, N.B., "Optimum settings for automatic controllers," *Transactions of the ASME*, pp. 759-768, 1984.
7. Hang, C. C., Astrom, K. J. and Wang, Q. G., "Relay feedback auto-tuning of process controllers — a tutorial review," *Journal of Process Control*, Vol. 12, Issue 1, pp. 143-162, 2002.