



### 저작자표시-비영리-동일조건변경허락 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



동일조건변경허락. 귀하가 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공했을 경우에는, 이 저작물과 동일한 이용허락조건하에서만 배포할 수 있습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

2006 年 2 月

博士學位論文

非球面 光學素子の 초정밀가공  
形狀精度 向上에 관한 연구

朝鮮大學校 大學院

機械工學科

金相錫

非球面 光學素子の 초정밀가공  
形狀精度 向上에 관한 연구

*A Study on the Form Accuracy Improvement of  
Aspheric Optical Elements for Ultra-Precision Process*

2006 年 2 月 日

朝鮮大學校 大學院

機械工學科

金 相 錫

非球面 光學素子の 초정밀가공  
形狀精度 向上에 관한 연구

指導教授 鄭 相 和

이 論文을 工學博士學位 論文으로 提出함.

2005 年 10 月 日

朝鮮大學校 大學院

機 械 工 學 科

金 相 錫

# 金相錫의 博士學位論文을 認准함

위원장 전남대학교 교수 기창두 印

위원 전남대학교 교수 윤희석 印

위원 조선대학교 교수 이규태 印

위원 조선대학교 교수 장완식 印

위원 조선대학교 교수 정상화 印

2005 年 12 月 日

朝鮮大學校 大學院

# 목 차

LIST OF TABLE .....	III
LIST OF FIGURES .....	V
ABSTRACT .....	IX

## 제 1 장 서 론

제 1 절 연구배경 .....	1
제 2 절 연구내용 .....	8

## 제 2 장 다이아몬드 터닝가공에서의 가공조건

제 1 절 이론적 배경 .....	10
제 2 절 실험장비 및 방법 .....	33
1. 초정밀 가공장비 .....	33
2. 초정밀 계측장비 .....	39
3. 미세절삭력 측정용 공구지지대 설계 및 제작 .....	44
제 3 절 다이아몬드 터닝 미세절삭력 측정 .....	60
1. 실험방법 및 조건 .....	60
2. 실험결과 및 고찰 .....	64

### 제 3 장 열영상광학계용 광학미러 가공

제 1 절 열영상 광학계 .....	73
제 2 절 열영상광학계용 광학미러 가공 .....	76
1. 가공방법 및 조건 .....	76
2. 가공결과 및 고찰 .....	85

### 제 4 장 레이저 주사광학계용 *F-Theta* 렌즈 금형코어 가공

제 1 절 레이저 주사광학계 .....	95
제 2 절 <i>F-Theta</i> 렌즈 금형코어 제작 .....	98
1. 가공방법 및 조건 .....	98
2. 가공결과 및 고찰 .....	103

### 제 5 장 결 론 ..... 110 |

### 참 고 문 헌 ..... 116 |

## *LIST OF TABLES*

Table 1-1	Application Fields of Aspherical Optical Components	5
Table 2-1	Common Diamond Turning Parameters	13
Table 2-2	Parameters and Values for Typical Diamond Tool	18
Table 2-3	Table of Materials and Tool Rake Angles	19
Table 2-4	Table of Conic Constant Values	22
Table 2-5	Equations for Conic Sections	23
Table 2-6	Specification of Diamond Turning Machine(Nanoform200)	36
Table 2-7	Specification of Non-Axisymmetric Aspheric Generator(ASP30)	39
Table 2-8	Specification of Precision Stage	39
Table 2-9	Specification of 3-D Profilometer(UA3P)	40
Table 2-10	Load/BCs for Mode and Frequency Analysis	54
Table 2-11	Basic Set of Cutting Conditions	64
Table 2-12	Results of Surface Roughness according to Cutting Conditions	72
Table 3-1	Cutting Conditions of Al Flat Mirror	83
Table 3-2	Cutting Conditions of Ge Aspheric Lens	85

Table 3-3	Measurement Data of Al Flat Mirror Form Accuracy	87
Table 3-4	Measurement Data of Al Flat Mirror Roughness $R_a$	89
Table 3-5	Comparison Results with Precitech Inc., USA of Al Flat Mirror	90
Table 3-6	Comparison Results at the same size with P****, U.K. of Ge Aspheric Lens	93
Table 3-7	Measurement Data of Ge Aspheric Lens Roughness $R_a$	94
Table 4-1	Cutting Conditions of F-Theta Lens Core	103

## *LIST OF FIGURES*

Fig. 2-1	Top View of Schematic Drawing of Diamond Turning Machine .....	10
Fig. 2-2	Illustration of Diamond Turning Process .....	14
Fig. 2-3	General Type of Diamond Turning Bite .....	16
Fig. 2-4	Waviness of Diamond Turning Bite .....	17
Fig. 2-5	Diagram of a Diamond Turning Bite .....	18
Fig. 2-6	Terminology of General Diamond Turning Bite .....	19
Fig. 2-7	Aspheric Curve Illustrating Origin and Axes .....	21
Fig. 2-8	Error of Tool Radius and Center Positions .....	24
Fig. 2-9	Effect of Tool Position "passed center" and "not to center" .....	26
Fig. 2-10	Expected Pip of High and Low Tool Position .....	27
Fig. 2-11	Interferometer Set Up for Surface Form .....	29
Fig. 2-12	Interferometer Set Up for Conic Sections .....	29
Fig. 2-13	Interferometry of Aspheric Surface .....	30
Fig. 2-14	Air Bearing Type LVDT Probe for Measuring Surface Form .....	31
Fig. 2-15	Definition of Surface Roughness Parameters .....	32
Fig. 2-16	Diamond Turning Machine .....	33

Fig. 2-17	Structure of Diamond Turning Machine .....	34
Fig. 2-18	Cutting of Sample Materials .....	35
Fig. 2-19	Ultra-precision Non-Axisymmetric Aspheric Generator	37
Fig. 2-20	3D Assemble Modeling of ASP30 .....	37
Fig. 2-21	Ultra-High Accurate 3-D Profilometer .....	39
Fig. 2-22	Surface Form Error Measuring System .....	41
Fig. 2-23	Surface Roughness Measuring System .....	42
Fig. 2-24	LVDT probe .....	43
Fig. 2-25	Piezo-electric, Quartz Crystal to Measure Tool Forces	45
Fig. 2-26	Diagram of Apparatus for the Sensor Calibration .....	46
Fig. 2-27	Z-axis Calibration Chart of Force Transducer .....	47
Fig. 2-28	Possible Orientations for the Transducer .....	49
Fig. 2-29	Schematic Drawing of Assembled Tool Holder System ..	51
Fig. 2-30	Tool Holder Modeling for Dynamic Analysis .....	53
Fig. 2-31	Mode Shapes of Tool Holder at Each Mode .....	57
Fig. 2-32	Simulation Result of 1st Mode of Z-axis and Frequency Analysis at Z-axis .....	58
Fig. 2-33	Frequency Spectrum for Tool Holder on DTM in the Z-direction .....	59
Fig. 2-34	Experimental Set up for Measuring Cutting Force .....	60
Fig. 2-35	Tool Holder for Measuring Cutting Force .....	61

Fig. 2-36 Procedure for Acquiring Cutting Force Data .....	62
Fig. 2-37 Experimental Data of Cutting Forces according to Depth of Cut .....	66
Fig. 2-38 Experimental Data of Cutting Forces according to Feedrate .....	69
Fig. 2-39 Experimental y_force Curves for R 0.5 Tool showing Effect Cutting Depths and Feedrates .....	70
Fig. 2-40 Experimental z_force Curves for R 0.5 Tool showing Effect Cutting Depths and Feedrates .....	71
Fig. 3-1 Scanning Type-Serial Scanning .....	75
Fig. 3-2 General Diamond Turning Process .....	77
Fig. 3-3 Procedure of Diamond Turning Machining .....	78
Fig. 3-4 Results of Al Flat Mirror by Precitech Inc. USA .....	79
Fig. 3-5 Results of Ge Aspheric Lens by P****, U.K. ....	80
Fig. 3-6 Schematic Drawing of Al Flat Mirror .....	81
Fig. 3-7 Jig for Diamond Turning of Al Flat Mirror .....	82
Fig. 3-8 Schematic Drawing of Ge Aspheric Lens .....	83
Fig. 3-9 Jig for Diamond Turning of Ge Aspheric Lens .....	84
Fig. 3-10 Diamond Turning Process of Al Flat Mirror .....	86
Fig. 3-11 Al Flat Mirror after Diamond Turning .....	87
Fig. 3-12 Surface Form Accuracy of Al Flat Mirror .....	88

Fig. 3-13 Surface Roughness of Al Flat Mirror .....	89
Fig. 3-14 Ge Aspheric Lens .....	91
Fig. 3-15 Raw Data Graph of Ideal Aspheric Surface .....	92
Fig. 3-16 Form Error for Probing Position .....	92
Fig. 3-17 Surface Roughness of Ge Aspheric Surface .....	94
Fig. 4-1 Laser Scanning Unit of Laser Printer .....	96
Fig. 4-2 Laser Scanning Unit Technology of Laser Printer .....	97
Fig. 4-3 Fly Cutting and Measuring Apparatus .....	99
Fig. 4-4 NC Program Process of Axisymmetric Aspheric Surface	102
Fig. 4-5 P-V Value of F-Theta Lens Core Rough Cutting .....	104
Fig. 4-6 P-V Value of F-Theta Lens Core Semi-Finish Cutting	105
Fig. 4-7 P-V Value of F-Theta Lens Core Finish Cutting .....	107
Fig. 4-8 Surface Form Accuracy of F-Theta Lens .....	108
Fig. 4-9 F-Theta Lens and Mold Core .....	109
Fig. 5-1 Fast Tool Servo .....	115

# **ABSTRACT**

## **A Study on the Form Accuracy Improvement of Aspheric Optical Elements for Ultra-Precision Process**

By Sang Suk Kim

Advisor : Prof. Jeong, Sang Hwa, Ph.D.

Department of Mechanical Engineering

Graduate School of Chosun University

Because a diamond turning process includes many fields of research, the complete understanding of the diamond turning process is very difficult. The experimental measurement of tool force is one of the important technology of diamond turning process. There are numerous parameters of the process which affect cutting forces. The effect of those parameters and materials have been studied to enhanced the surface roughness after cutting. It is the major purpose of the measurement of the cutting force to understand the effects of the cutting variables such as the cutting force, the machinability of the workpiece, the process of chip formation, chatter and tool wear as well as materials.

In general, the cutting force of diamond turning of soft metals, such as aluminum and copper in an diamond turning machine with the depth of cut of several  $\mu\text{m}$ , is smaller than that of conventional machining.

Diamond turning machines have been used for the processing of surface like a mirror with the control scheme of minimizing shape error. Diamond turning is applied to produce highly precision optical components required not only a high machining accuracy but also a good surface roughness.

Thermal image system is a device which can visualize the difference of infrared energy naturally emitted by the imaging object. Aluminum and germanium have been widely used as optical parts such as laser reflector's mirror of thermal image system.

The global application of aspheric surfaces will expand rapidly on the electronics, optical components, communications, aerospace, defense, and medical optics devices etc. Especially, F-theta lens is one of the important parts in LSU(Laser scanning unit) because it affects dominantly on the optical performance of LSU. The mold core is the most important device to produce plastic F-theta lens by injection molding method. The results obtained in this thesis are as follows ;

First, tool holder system is designed and fabricated to measure cutting forces in diamond turning. This system design includes a 3-component piezo-electric transducer. Initial experiments with tool holder system are accomplished to predicted dynamic characteristics as well as a detailed study of cutting parameters.

Tool holder system is modeled by considering the element dividing, materials properties, and boundary conditions using MSC/PATRAN. Mode and frequency analysis of structure are simulated by MSC/NASTRAN, for the purpose of developing the effective design.

Many cutting experiments conducted for 6061-T651 aluminum and copper. Test involves investigation of velocity effects, the effects of depth of cut, and feedrate on tool force. Cutting forces generally are increased as increasing the depth of cut of the diamond turning process.

Second, thermal-imaged Al flat mirror and Ge aspheric lens are fabricated using diamond turning technology. The particular jigs are designed and fabricated to hold axisymmetric Al flat mirror and Ge aspheric lens. The jigs for Al flat mirror and Ge aspheric lens are machined using diamond turning to improve machining accuracy. Using those jigs, thermal-imaged Al flat mirror and Ge aspheric lens are fabricated.

Form accuracy and irregularity of Al flat mirror after machining are 0.835 fringe(at 632.8 nm) and 0.370 fringe(at 632.8 nm), respectively. Surface roughness of Al flat mirror is  $0.025 \mu\text{m}$  Ra. Moreover, form accuracy of Ge aspheric lens after machining is  $0.24 \mu\text{m}$  P-V and surface roughness is  $0.0038 \mu\text{m}$  Ra.

Third, mold core for F-theta lens machined to produce plastic F-theta lens. Because F-theta lens is non-axisymmetric surface, the mold core for F-theta lens is machined by fly cutting method using non-axisymmetric aspheric generator. To improve the form accuracy, the mold core for F-theta lens is machined by compensating the center error and the tool radius error. Plastic F-theta lens is produced by injection molding method using the mold core for F-theta lens.

Form accuracy of mold core after machining is  $0.179 \mu\text{m}$  P-V(x-axis) and  $0.184 \mu\text{m}$  P-V(y-axis), respectively. In the plastic F-theta lens fabricated by injection molding, form accuracy is  $0.2269 \mu\text{m}$  P-V(x-axis) and  $0.165 \mu\text{m}$  P-V(y-axis).

It shows that F-theta lens injected by the fabricated mold core is satisfied to apply for the actual specification.

# 제 1 장 서 론

## 제 1 절. 연구배경

### 1. 연구 필요성

다이아몬드 터닝머시인은 단결정 다이아몬드 공구를 사용하여 초정밀 부품을 가공하는 공작기계이다. 다이아몬드 터닝머시인은 주로 초정밀 광학렌즈 가공이나 초정밀 방위산업 관련부품을 가공하는데 이용된다. 또한 컴퓨터 디스크용 알루미늄이나 레이저 장비용 구리와 같은 가벼운 금속을 가공하는데 이용된다. 다이아몬드 터닝머시인은 게르마늄 렌즈와 같은 적외선 응용을 위하여 투명한 표면뿐만 아니라, 니켈, 구리, 알루미늄 등과 같은 재질의 반사경을 만드는데 사용된다.<sup>[1][2][3]</sup> 70년대 중반이후에 다이아몬드 터닝은 중요한 가공기술로 등장했다. 특히 광학장치의 가공에 있어서, 이 기술은 많은 생산비용의 절감과 가공부분의 정밀도를 향상시켜 왔다. 다이아몬드 터닝의 중요한 연구과제는 가공 면의 표면 거칠기와 원하는 치수형상의 정밀도를 향상시키고 가공물의 새로운 재질에 응용하는 기술을 개발하는 것이다. 현재 다이아몬드 터닝은 20  $\mu m$  의 형상정밀도를 가지고 있지만, 대부분의 절삭가공은 요구되는 설계명세에 맞추기 위해 랩핑(lapping)이나 폴리싱(polishing)등이 필요하다. 이 추가적인 공정은 시간이 많이 소요되고 기술자들의 높은 숙련기술이 요구된다. 이상적으로 다이아몬드 터닝의 가공만으로 설계 명세의 정밀도를 맞출 수 있다면, 많은 시간과 비용을 절감할 수 있다.<sup>[4][5]</sup>

최근에 반도체, 영상정보, 전자 광학 분야 등의 첨단 산업분야의 확대 발전과 더불어 광학계에 대한 경량화 요구가 높아짐으로써 비구면 렌즈 등에 대한 수요가 급속히 증가하고 있다. 비구면으로 구성된 광학계는 넓은 시야와 고성능의 제품을 얻을 수 있고, 또한 광학계를 소형, 경량화 시킬 수 있는 많은 장점을 가지고 있

다. 비구면광학계를 채용함으로써 종래의 구면렌즈를 주로 사용하는 광학계가 가진 많은 단점이 제거되었다.<sup>[6]</sup> 예를 들어, 픽업 대물렌즈의 경우 구면으로는 3장으로 성능이 구현되나 비구면 1장을 사용해서 무게를 대폭 축소하여 포커싱, 트래킹을 위한 액추에이터의 용량을 축소할 수 있게 되고 CD-ROM 등의 두께를 얇게 할 수 있다.

이러한 비구면 광학계는 1600년대에 구면수차를 제거한 원추곡면, 1700년대에 포물면과 타원면이 결합된 망원경이 개발된 이후 1900년대 Carl Zeiss를 주축으로 비구면 생산에 대한 실험이 본격적으로 시작되었다. 1960년대에 들어서는 초정밀 가공이 가능한 단계에 이르렀으며 1980년대에 이르러 고정밀 비구면렌즈를 대량으로 생산하여 제품화하는 단계에 이르렀다. 1990년대에 들어서는 비구면 광학계 및 회절 광학소자의 이용이 일반화되면서 이들을 열상 광학계에 이용하고자 하는 노력이 활발히 진행되었다. 특히, 열영상 광학장비 등에 소요되는 열상광학부품은 재질면에서 매우 비싸고 목적의 특수함 때문에 장비에 따라 무게가 나가는 경우들이 아주 많다. 비구면 광학소자를 사용함으로써 부품을 줄여 무게 경량화, 성능개량 및 원가 절감의 효과가 기대된다. 그러나 국내에서는 안경 비구면 렌즈나 소형 비구면렌즈 성형용 금형코어 가공 위주로만 연구개발 및 양산이 이뤄지고 있다.

현재 전 세계적으로는 일부 회사만이 비구면 생산의 생산 기술 및 노하우를 독점하고 있으며 특히 군수산업이 발달한 선진국들은 비구면, 회절구면 및 금속 평면 반사경등의 열상 광학 부품을 1980년대 초부터 개발하여 생산하고 있으며 품질, 양산 능력, 가격 경쟁력은 전반에 걸쳐 국내 기술과 상당한 차이가 있다.

열영상광학계에 사용되는 비구면렌즈는 광 파장이 짧아짐에 따라 정밀도가 점차 높아지는 추세로서 일부 광정밀부품에서 요구되는 정밀도는 현재 최고 10 nm에 이르고 있으며, 초정밀 렌즈의 경우는 형상정밀도가 수십 나노미터 이하의 것을 의미한다. 이러한 광학렌즈는 사용목적에 따라서 요구되는 정밀도가 다르며, 이러한 초정밀 렌즈의 적용범위는 아직은 제한적이다. 그러나 전자 산업의 발달에 따라 카메라 촬영렌즈, 파인더 렌즈, CD용 픽업렌즈, 프로젝션 TV용 렌즈 등 민간용 전자제품에 정밀렌즈의 사용이 급증하고 있고, 전자제품의 경량화, 소형화 요구에 맞춰 비구면 렌즈의 적용이 시급히 요구되었으며, 플라스틱 사출성형기술의 발달로 대량생산이 가능하게 되어 그 적용이 급속하게 확산되고 있는 실정이다.

또한 열영상 광학부품은 거의 대부분을 수입에 의존하고 있어서 군수산업부문의 외 민간산업부문에서도 수요가 증가하는 추세에 비추어 볼 때 열영상광학계용 비구면 광학부품 가공 및 양산 기술개발이 시급히 요구된다.

대표적인 OA 기기의 하나인 레이저 빔 프린터(Laser Beam Printer; LBP)는 컴퓨터 출력기기로서 널리 보급되어 왔다. 레이저 빔 프린터에 대한 소형화, 저가격화의 요구가 한층 심해져 가고 있고, 핵심부품인 광학계의 형태도 발전이 요구되고 있다. 광학계의 형태는 소형, 경량화 추세와 더불어 광학계의 취부조정이 용이할 뿐만 아니라 상의 뒤틀림이 작아진다는 장점을 활용한 비축대칭 비구면 광학계의 채용이 점점 증가하고 있는 추세이다.

특히 레이저 프린터의 핵심부품 중 하나인 레이저 주사광학계(Laser Scanning Unit ; LSU)는 LD 모듈, 실린더 렌즈, 회전다면경, 주사광학계로 구성되어 있으며, 이중 특히 F-theta 렌즈는 주사광학계의 핵심 광 부품으로 레이저 프린트의 성능을 좌우하는 중요한 역할을 하는 광학렌즈로서 광학계의 소형, 경량화를 위해서 렌즈의 매수가 점점 삭감하는 추세이며, 2~3매의 F-Theta 렌즈에서 1매 구성의 렌즈로 바뀌고 있는 실정이다.

본 논문에서는 다이아몬드 터닝가공을 위한 가공조건을 찾기 위해 정교한 힘 센서를 내장한 공구지지대를 제작하여 다이아몬드 터닝 시 발생하는 미세 절삭력 측정을 측정하여 각 가공변수에 미치는 영향을 고찰하였다.

또한 다이아몬드 터닝가공기술을 이용하여 열영상광학계에 적용되는 AI 평면 반사경과 게르마늄 비구면 렌즈를 제작·측정하였고, 주사광학계의 중요 구성요소인 F-theta 렌즈 성형사출용 금형코어를 제작하여 가공 완료된 금형을 이용하여 실제 사출한 플라스틱 F-theta 렌즈에 대해 평가하였다.

## 2. 연구 동향

비구면 형상을 필요로 하는 렌즈나 반사경의 경우 일부 선진국에서는 측정설비, 노광설비, 위성용 관측시스템, 항공기용 관측시스템, 국방관련 무기시스템 등의 광학계에 일부 적용되어 왔다. 이와 같이 초정밀 비구면렌즈나 반사경이 일부 한정된 분야에만 사용되어 그 수요가 많지 않았고 요구되는 정밀도 또한 크게 높지 않았기 때문에 비구면 렌즈와 반사경은 주로 숙련된 작업자의 수작업에 의해 래핑이나 폴리싱으로 가공되었다. 그러나 최근 들어 반도체, 영상정보, 전자광학분야 등의 첨단산업분야의 확대발전과 더불어 광학계에 대한 경량화 요구에 따라 비구면 렌즈에 대한 수요가 급속히 증가하고 있으며, 사용되는 광 파장이 짧아짐에 따라 비구면 렌즈의 정밀도가 점차 높아지는 추세이다. Table 1-1은 비구면 형상 광학 부품의 적용 예를 나타낸 것이다.

Table 1-1 Application Fields of Aspherical Optical Components<sup>[7]</sup>

<i>Components</i>	<i>Material</i>	<i>Method</i>	<i>Use</i>
Aspheric lens	Glass, Plastic	Mold Injection, Turning, Grinding Lapping/Polishing	Camera, CD, DVD lens, Projection TV
Mold for Aspheric lens	Tungsten carbide(WC) Electroless Ni	Grinding, Lapping/Polishing	Injection mold
F-theta lens	Electroless Ni, Ceramic, Plastics	Turning, Grinding Lapping/Polishing	Laser printer
Sphere, Aspheric, Parabola Mirror	Aluminum Alloy, Copper, Electroless Ni	Turning	Laser cutting Machine
Glasses lens	Glass	Grinding, Lapping/Polishing	Glasses
Infrared aspheric lens	Ge, Si	Turning, Grinding	Scope

현재 사용되는 초정밀 비구면렌즈를 가공하기 위한 기술로서는 래핑 및 폴리싱 기술, 사출성형기술, 유리성형기술, 연삭 슷들을 사용하는 연삭가공기술 등으로 나눌 수 있다. 이들 가공법은 렌즈의 소재, 요구정밀도, 사용환경, 생산량 등에 따라서 결정되며. 이 중에서 사출성형기술과 유리성형기술은 성형금형의 성형부위를 단결정 다이아몬드 공구를 사용하는 절삭가공기술이나 초정밀 연삭가공 기술에 의해 가공한다.<sup>[8][9]</sup>

래핑/폴리싱은 연삭입자와 가공액 혼합한 것을 가공물과 공구(랩 혹은 폴리셔)의 사이에 넣고 공구와 공작물사이에 압력을 가하면서 미끄럼 운동을 시켜 연마하

는 가공법이다. 이 가공법은 가공단위를 매우 작게 할 수 있어 초정밀 가공에 가장 널리 사용되고 있다. 전통적으로 래핑은 비교적 거친 연삭입자와 강성이 높은 공구를 이용하여 형상결정 및 치수결정을 주목적으로 하고, 폴리싱은 미립의 연삭입자와 연질의 공구를 사용하여 가공면의 조도향상을 주목적으로 한다. 그러나 최근에 와서는 컴퓨터를 활용하여 폴리싱 공정 중에 가공물의 형상정밀도를 높이는 기술이 개발되어 래핑과 폴리싱 기술 간의 구분이 없어지게 되었다. 또한 래핑 및 폴리싱 기술은 가공법의 특성상 주로 유리, 세라믹, 실리콘 단결정 등 경취 특성을 갖는 무기재료의 초정밀가공에 주로 사용되고 있다.

사출성형기술은 최근 제품에 응용되어 렌즈의 매수감소에 의한 저가격화와 소형화 경량화에 기여하고 있다. 플라스틱은 가볍고, 충격에 강하며 정밀금형에 의해 자유로운 형상을 저가격으로 양산이 가능한 장점이 있는 반면에 열과 온도에 의해 광학특성이 변하는 등 유리렌즈에 비하여 신뢰성이 떨어지는 단점이 있다. 이런 단점의 극복을 위해서 새로운 광학용 플라스틱이 개발되고 있어 이용의 확대가 예상된다.

유리성형 렌즈의 경우 고압, 고온의 성형공정으로 인하여 사용금형의 수명이 문제가 되고 있으며 플라스틱 사출렌즈에 비하여 일부 광학특성이 우수하고 안정적이거나 고가이기 때문에 점차 플라스틱 사출렌즈로 대체되는 실정이다.

초정밀 절삭가공의 경우 대부분 비금속 경취성 재료로 이루어진 광학부품의 직접가공에는 적용하기 어렵기 때문에 주로 알루미늄이나 순동을 비롯한 특수한 연질금속의 가공과 렌즈 성형에 사용되는 금형의 렌즈성형부위의 초정밀가공 및 콘택트렌즈와 같은 플라스틱 소재의 렌즈가공에 제한적으로 사용되고 있다. 또한 절삭과 연삭가공의 경우 가공물의 정밀도는 기본적으로 가공기 자체의 정밀도에 의해 결정되므로 초정밀 부품을 가공하기 위해서는 가공기 자체의 정밀도가 매우 높아져야 하는 어려움이 있다.

이러한 초정밀 가공기술은 관련 산업에 미치는 파급효과가 매우 커서 제품경쟁력으로 곧바로 나타나기 때문에 기술보유국에서는 기술이전에 부정적이며, 일부 업체 및 연구소가 자체 생산기술로 보유하고 있어 기술의 공개 및 이전이 매우 어려운 실정이다. 국내 대부분의 광학부품 가공업체가 중소기업체로서 비구면 광학부품 가공의 자동화가 거의 이루어지지 않고 여전히 숙련된 작업자의 수작업에 의존하고 있기 때문에 정밀한 비구면 광학부품의 생산에는 경쟁력이 매우 뒤떨어져 있다. 이로 인하여 국내 산업계에서 정밀 비구면 광학부품을 사용하는 제품개발에 어려움이 많으며, 높은 제조원가로 인하여 관련 제품의 가격경쟁력을 확보하기가 어려운 실정이다. 따라서 본 연구에서는 다이아몬드 터닝 가공기술을 적용하기 위한 가공조건을 고찰하고, 이러한 가공조건을 기초로 하여 실제 광학소자가 적용되는 시스템의 광학부품을 제작하고자 한다.

본 논문은 전체가 5장으로 구성되어 있으며 각 장에서는 다음의 내용에 대해 정리하였다. 제 1장은 서론 부분으로 본 연구의 배경 및 연구내용을 기술하였으며, 제 2장에서는 다이아몬드 터닝기술의 기본적인 이론과 함께 본 연구를 수행하기 위해 사용된 초정밀 가공장비 및 계측장비에 대해 기술하였다. 또한 다이아몬드 터닝가공조건 고찰을 위한 공구지지대 설계, 제작 그리고 미세절삭력 측정실험에 관하여 기술하였다. 제 3장은 제 2장에서 고찰된 다이아몬드 터닝 가공조건을 기초로 하여 열영상광학계용 AI 평면미러 및 Ge 비구면렌즈 제작에 대하여 연구 고찰하였다. 제 4장은 다이아몬드 터닝기술을 적용하여 주사광학계용 F-theta 렌즈 금형코어 제작에 대하여 연구 고찰하였다. 제 5장은 본 연구에서 얻은 결과의 중요부분을 종합 정리하였으며, 향후 연구방향에 대해 제시하였다.

## 제 2 절. 연구내용

### 1. 다이아몬드 터닝가공에서의 가공조건

본 논문에서는 다이아몬드 터닝시 발생하는 공구 미세 절삭력을 측정하기 위해 정교한 힘 센서를 내장한 공구지지대를 설계하였다. 또한 공구지지대를 제작하기에 앞서 동적해석 시뮬레이션 소프트웨어 MSC/PATRAN, MSC/NASTRAN을 이용하여 동적 해석을 수행하였다. 제작된 시스템은 진동 실험을 수행함으로써 시뮬레이션을 통하여 예측된 시스템을 검증하였다. 또한 제작된 공구지지대를 이용하여 AI 6061-T651을 가공할 때 다이아몬드 터닝시 공구 선단부에 발생하는 미세절삭력을 미세가공공정에 가장 중요한 영향을 미치는 변수인 절삭깊이와 이송속도를 변화시키면서 측정하였으며, 미세 절삭력에 미치는 각 변수의 영향을 평가하였다.

### 2. 열영상광학계용 광학미러가공

기존의 비구면 제작 방법은 구면 연마 후 열과 압력을 주어 변형하거나 물질을 증착 시키는 방법 또는 비구면을 직접 연마하는 등의 방법이 있지만 본 논문에서는 열영상 광학부품 가공에 매우 적합한 방법으로 알려진 다이아몬드 터닝 기술을 이용하여 알루미늄 평면 반사경과 게르마늄 비구면 렌즈를 제작함으로써 가공 형상정밀도를 한층 향상시켰으며, 비구면 가공면의 형상오차를 측정하기 위하여 접촉식 방법인 기상계측 방법으로 비구면의 형상오차를 측정하였다.

### 3. 레이저주사광학계용 *F-theta* 렌즈 금형코어 가공

본 논문에서는 초정밀 가공 기술을 이용하여 레이저 빔 프린터(LBP)와 디지털 복사기에 채택되고 있는 레이저 주사광학계 *F-theta* 렌즈 사출성형용 코어를 제작하여 형상정도와 표면조도를 측정 평가하였으며, 가공 완료된 금형을 이용하여 실제 사출한 플라스틱 *F-theta* 렌즈에 대해 평가하였다.

## 제 2 장 다이아몬드 터닝가공에서의 가공조건

### 제 1 절 이론적 배경

#### 1. 다이아몬드 터닝 가공

##### 가. 다이아몬드 터닝머시인(Diamond Turning Machine)

다이아몬드 터닝머시인(Diamond Turning Machine, DTM)에는 종류가 많지만, 대부분의 다이아몬드 터닝머시인은 한쪽의 슬라이드와 다른 한쪽의 슬라이드가 서로 수직하게 작동되어 공작물을 가공한다. 스펀들 축에 평행하게 진행되는 슬라이드를 z축 슬라이드라고 표시하고, 슬라이드가 스펀들 축에 수직하게 진행되는 슬라이드를 x축 슬라이드라고 한다. Fig. 2-1 에 일반적인 다이아몬드 터닝머시인의 개략도를 나타내었다.

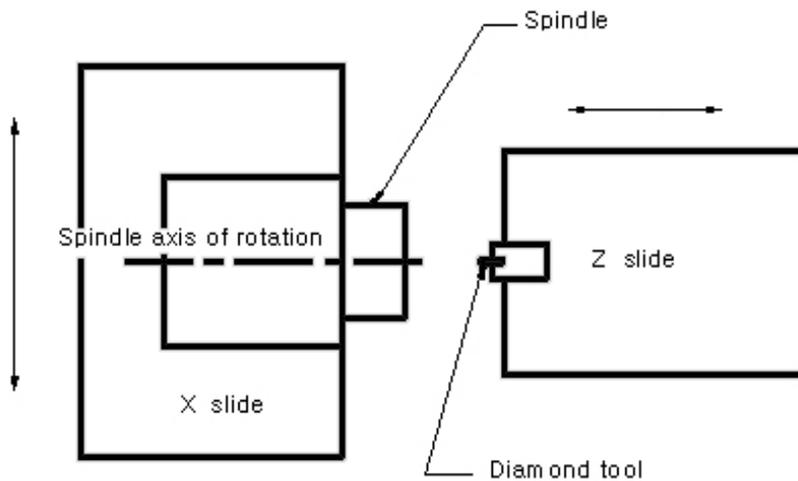


Fig. 2-1 Top View of Schematic Drawing of Diamond Turning Machine

현대의 초정밀가공기들은 강성도 증진과 저마찰을 위한 유체정역학 오일 베어링과 슬라이드의 위치를 측정하기 위한 위치 제어의 형태로 구성되어 있다. 보통 이 위치 제어장치는 그래스 스케일 리니어 엔코더(glass scale linear encoder)이거나 레이저 위치 측정 간섭계(laser displacement measuring interferometer)이다. 이 두 가지 방법 모두 보통 10 nm 이하로 슬라이드의 위치 제어를 측정할 수 있는 아주 높은 분해능을 가지고 있다. 슬라이드는 직류 전동기와 리드 스크류 또는 리니어 모터로 움직인다. 슬라이드의 위치를 제어하기 위해 서보 컨트롤러를 사용해 엔코더로부터 위치 정보를 읽고 모터로 신호를 보내서 생길 수 있는 에러들을 보정하게 된다. 결과적으로 생기는 에러들을 보통 팔로잉 에러(following error)라고 부른다. 팔로잉 에러는 실제 슬라이드의 위치와 컨트롤러가 기대하는 위치 사이의 차이를 나타내는 것이다. 팔로잉 에러의 결과는 초정밀가공기의 상태를 결정하거나 머신닝 셋업을 진단하는 문제에 아주 유용한 수단이 된다.

스핀들의 형태와 크기, 스핀들 속도 그리고 회전 구조는 매우 다양하다. 대부분의 스핀들이 공기 베어링이고 직접 구동 하지만 어떤 유체정역학 스핀들은 벨트 구동 구조로 되어 있다. 최대 스핀들 속도는 5000 rpm 까지 변한다. 어떤 스핀들은 열 조절을 위해 물 또는 에어 쿨링 구조를 쓰기도 한다. 대부분의 스핀들은 소자를 마운트 하는 구조를 갖고 있는데 절삭유 척이나 좀 더 일반적으로는 진공 척이 달려 있다.

컨트롤러는 독립적으로 두 슬라이드를 움직이게 하고 따라서 공구의 위치는 어떤 주어진 호 또는 함수로 스핀들에 장착되는 부분에 따라 달라진다. 호와 곡선은 연속적인 선형적 스텝에 따라 형성된다. 이론적인 최소 스텝은 엔코더의 분해능과 같아야 한다. 그러나 이 스텝 크기는 컨트롤러 속에 있는 소프트웨어에 따라 그 한계가 정해진다.

다이아몬드 공구는 일반적으로 공구지지대에 장착되는데 높이를 조절할 수 있다. 수직인 방향으로 스핀들 축에 정확하게 다이아몬드 공구 선단부를 정렬하도록 해준다. 공구가 정확하게 정렬되지 않으면 가공하는 표면의 중심에 “뾰(pip)”이 생기게 된다. 공구를 다양한 각도로 둘 수 있을 뿐 아니라 진동이 최소가 되도록 공구지지대에 공구를 장착해야 한다. 다이아몬드 터닝에서 가장 중요하게 고려해야 할 부분은 공구 높이 셋팅과 x축 방향에서 공구가 중심에 와야 한다는 것이다. 일반적으로 하고 있는 방법은 시험구면을 가공해서 시험구면의 형상오차와 중심에 뾰 크기를 확인하는 것으로 공구가 제대로 세팅되었는지를 확인한다.

공구 셋팅은 분리되어 있는 공구 세팅 기구로 하는데 x축 방향과 y축 방향에 스핀들로 부터 알고 있는 거리를 이용하여 정확하게 정렬한다. 이런 두 가지 기구들은 그것만의 장점과 단점이 있지만 대부분의 경우에는 20  $\mu\text{m}$ 보다 낮은 정확도로 다이아몬드 공구를 셋팅한다.

다이아몬드 터닝의 또 다른 면은 절삭유로 절대 무시할 수 없는 부분이다. 다이아몬드 터닝의 거의 모든 상황에서 공구 또는 가공되는 면 위에 절삭유가 필요하게 된다. 절삭 과정의 쿨링 뿐만 아니라 가공에서 나오는 칩을 제거하는데도 필요하다. 대부분의 경우에서 유연한 파이프에 미네랄 오일과 공기를 섞어서 공구 팁 부위에 분사하도록 되어 있다. 절삭유의 정확한 정렬과 흐름은 가공하고자 하는 공작물 표면 형상이 향상되는데 중요한 영향을 미친다. 다이아몬드 터닝머시인을 작동하기 위해 약 80 kW 전력공급과 100 psi (5.5 ~ 6.7 bar) 정도의 공기압이 필요하다.

나. 다이아몬드 터닝 가공변수

다이아몬드 터닝가공은 스피들이 일정한 속도로 회전하고 공구는 정확한 깊이로 가공물을 절삭한다. 보통 절삭 방향은 소자의 바깥쪽에서 중심으로 가게 된다. 공구에 관련된 스피들의 방향은 스피들이 회전하는 아래로 공구가 위치하게 된다. 공구가 만약 오른쪽에서 왼쪽으로 가게 되어 있다면 스피들은 시계방향으로 회전한다.

공통된 다이아몬드 터닝 변수들은 스피들 속도, 이송속도, 그리고 절삭깊이로 Table 2-1에 간략하게 기술하였다.

Fig. 2-2는 원형의 공구가 표면을 절삭하는 개략도를 나타낸 것이다. 스피들이 한번 회전하는데 공구는 거리 p 만큼을 움직이게 되고 제거되는 물질의 양을 빗금친 영역으로 표시했다.

Table 2-1 Common Diamond Turning Parameters<sup>[10][11]</sup>

<i>Parameter</i>	<i>Description</i>	<i>Units</i>	<i>Variation</i>
Spindle speed	Number of revolutions of the spindle in one minute	rpm	1000 rpm ~ 10000 rpm
Feedrate	Speed of travel of the tool	mm/min	1 mm/min ~ 50 mm/min
Depth of cut	Depth of the tool cut in the Z direction	$\mu\text{m}$	1 $\mu\text{m}$ ~ 30 $\mu\text{m}$

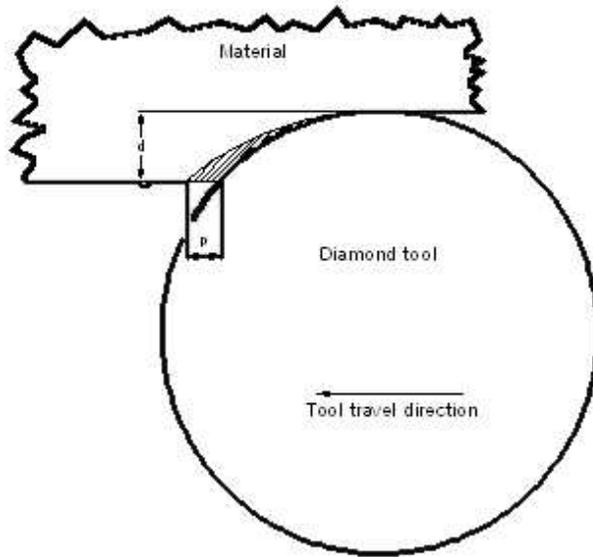


Fig. 2-2 Illustration of Diamond Turning Process

표면의 절삭 속도는 공구의 이송거리에 따라서 달라진다. 면의 어떤 점에서 일정한 절삭 속도를 얻기 위해 스피indel속도를 변화 시키는 것은 아주 민감한 일이다. 그러나 비록 몇 종류의 다이아몬드 터닝머시인이 이런 방식을 따른다 할지라도 이런 과정을 실제적으로 고려하지 않는다고 해도 절삭 과정에서는 큰 영향이 없다.

#### 다. 다이아몬드 터닝 가능 공작물

다이아몬드 터닝이 가능한 공작물들은 대부분의 비철 금속, 폴리머 그리고 몇 가지 결정체 등이다. 그리고 광학적 유리, 수정과 세라믹 등도 제외된다. 가공 변수들은 앞에서 살펴봤던 것처럼 공구 이송 속도, 스핀들속도, 절삭 깊이, 공구 레이크 각, 그리고 절삭유 등으로 각각의 광학소자에 따라 최적화 되어야 한다.<sup>[6][12][13]</sup>

모든 알루미늄 합금은 다이아몬드 터닝 가공이 가능하다 할지라도 열처리가 된 합금 2000, 6000 과 7000 시리즈를 많이 사용한다. 2024와 7075같은 아주 높은 항복강도의 물질은 스캐너에서 사용하는 아주 높은 회전 비의 폴리곤의 재료로 사용된다. 가장 적당한 합금은 Al 6061이다.<sup>[14]</sup>

다이아몬드 터닝가공에서 사용하는 3가지의 대표적인 폴리머는 아크릴(acrylic), 폴리카보네이트(polycarbonate), 그리고 폴리스틸렌(polystyrene)이 있다.

게르마늄은 열영상광학계에서 사용하는 가장 대표적인 물질로 다이아몬드 터닝이 가능하다. 게르마늄으로 가공된 최종 표면은 금속과 폴리머를 포함해 다른 물질들보다 더 좋다.

라. 다이아몬드 공구(Natural Crystal Diamond Bite)

다이아몬드 공구에는 아주 다양한 종류의 형태가 있다. 하지만 본 논문에서는 광학 소자를 가공하는데 대부분 응용될 수 있는 공구를 고려하였다. 일반적으로 다이아몬드 공구에 사용되는 다이아몬드는 천연 단결정의 근사적으로 반 캐럿 정도이다. 아주 정밀하게 가공되어 있고 강도와 마모에 대한 저항이 최대가 되도록 결정성이 지정되어 있다. Fig. 2-3은 전형적인 다이아몬드 공구의 개략도를 나타내며, Fig. 2-4는 다이아몬드 공구 선단부의 기복(Waviness)을 나타낸다.<sup>[15][16]</sup>

다이아몬드 공구 선단부의 기복 정도는 가공물의 면 정도에 바로 영향을 주는 매우 중요한 인자에게 때문에 가공하고자 하는 가공물에 따라 선택하여야 한다.

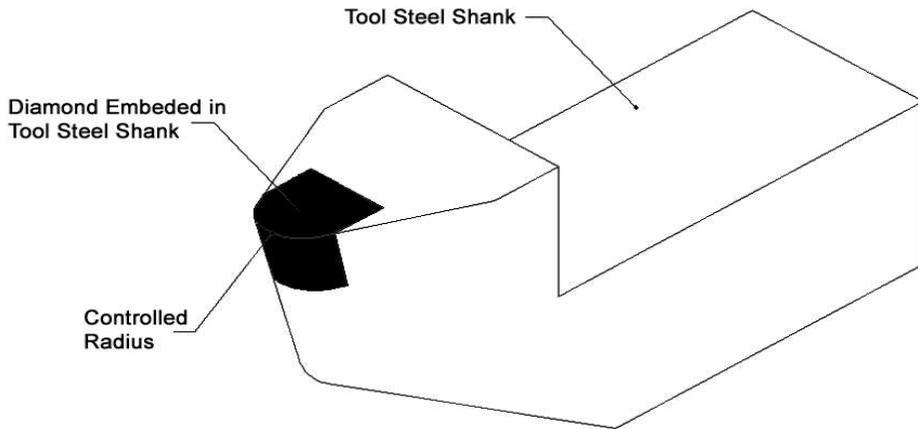


Fig. 2-3 General Type of Diamond Turning Bite

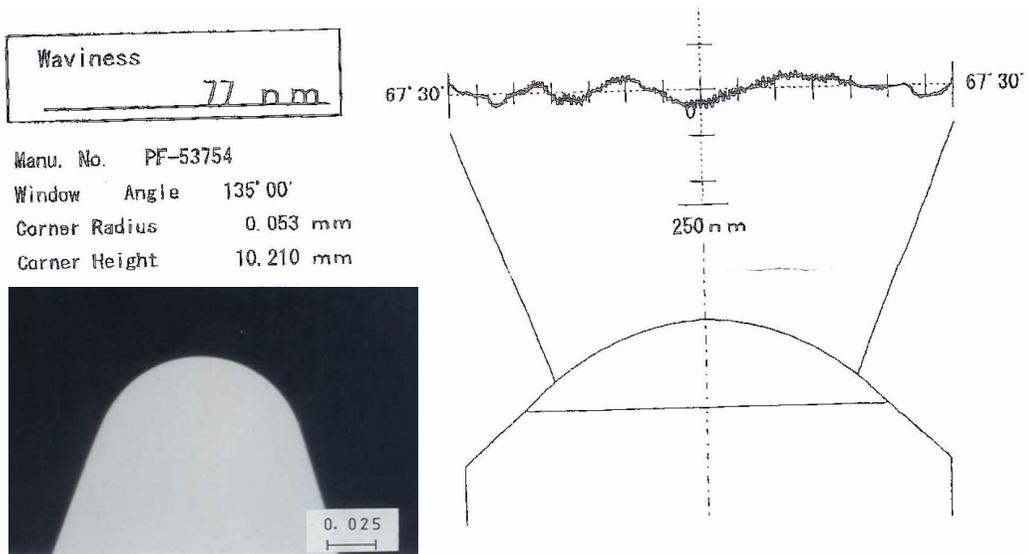


Fig. 2-4 Waviness of Diamond Turning Bite

다이아몬드 공구를 설명하는데 사용하는 변수와 전형적인 값들을 Table 2-2에 나타내었다. Fig. 2-5는 다이아몬드 공구의 다양한 변수들을 나타낸다. Fig. 2-5에 나타나듯이 보통 다이아몬드 공구는 절삭 가장자리(edge)가 원형이다. 그림 Fig. 2-6은 각 부분의 명칭을 도식화 한 것이다. 그림에 나타낸 바와 같이 Fig. 2-5의  $\theta$ 가 Fig. 2-6의 호(arc)이고, Fig. 2-5의  $r$ 이 Fig. 2-6의 반경이다, 그리고 Fig. 2-5의  $\alpha$ 는 Fig. 2-6에 레이크 각이고, Fig. 2-5의  $\beta$ 는 Fig. 2-6의 클리어런스 각을 나타낸다. 원형 구경의 다이아몬드 공구는 두 가지 형태가 있으며 이 두 가지의 차이를 이해하는 것이 매우 중요하다. 다이아몬드 공구의 제조에서 클리어런스 각을 얻는 데는 두 가지 방법이 있다. 그 중 하나는 일정한 각으로 다이아몬드를 부착하는 방법이고, 다른 하나는 일정한 각으로 다이아몬드를 연삭하는 방법이다. 전자의 방법으로 만들어진 공구는 기울어진 실린더 같이 되어 있고 후자는 원추 모양으로 되어있다. Table 2-3은 광학소자 특성에 따라 적용되는 공구 변수의 값이다.

Table 2-2 Parameters and Values for Typical Diamond Tool

<i>Tool parameter</i>	<i>Symbol</i>	<i>Typical values</i>
Radius	r	0.025 mm ~ 1.5 mm
Rake angle	$\alpha$	+5° ~ -25°
Clearance angle	$\beta$	2.5° ~ 15°
Included angle	$\theta$	100°

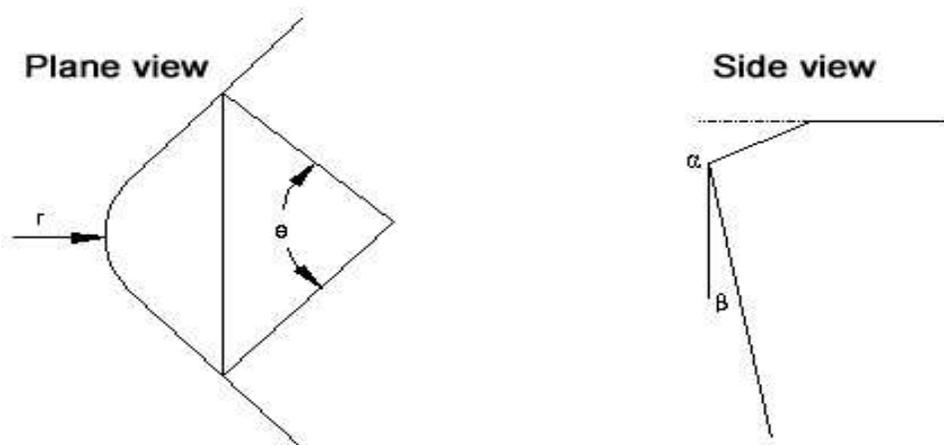


Fig. 2-5 Diagram of a Diamond Turning Bite

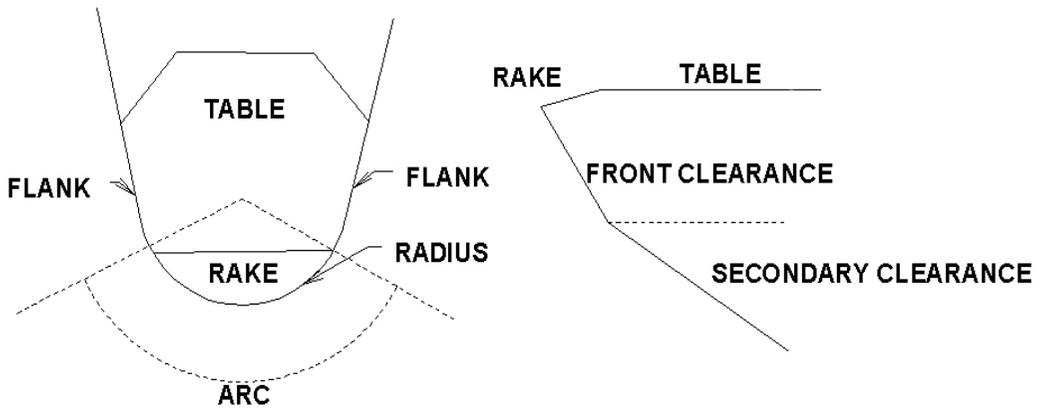


Fig. 2-6 Terminology of General Diamond Turning Bite

Table 2-3 Table of Materials and Tool Rake Angles

<i>Top rake</i>	+2 1/2°	0°	-2 1/2°	-5°	-10°	-15°	-25°
Materials with suggested rake angle	Plastics					Zinc Sulphide	Zinc Selenide
		Aluminium/Copper				Germanium	
		Electroless Nickel				Silicon	
		Beryllium Copper/Brass				Gallium Arsenide	

## 2. 다이아몬드 터닝 가능한 면의 형태

다이아몬드 터닝 가공에서는 다양한 면들을 요구되는 구 대칭의 형상으로 가공할 수 있다.<sup>[17][18]</sup> 가공할 수 있는 면들은 구면, 타원면과 포물면 같은 원추 곡면, 비구면(aspherics), 회절구면(diffractives), 그리고 실린더 등이 포함된다. 이론적으로 이런 각각의 면들은 경면 또는 렌즈 면으로 축 또는 비축으로 가공할 수 있다. 다이아몬드 터닝 가공면의 기하학적인 측면에 대해 간략히 기술하였다.

### 가. 비구면(Aspherics)

다이아몬드 터닝 가공은 연마 가공과 비교해 볼 때 구가 아닌 면들을(non-spherical surfaces) 쉽게 가공할 수 있는 장점이 있다. 광학계에서는 비구면은 보통 비구면 식에 의해서 표현된다. 따라서 이 식을 이해하는 것은 매우 중요하다. 일반적으로 비구면 식은 다음과 같이 나타낸다.<sup>[19]</sup>

$$z = \frac{Cx^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + K)C^2x^2}} + A_4x^4 + A_6x^6 + A_8x^8 + A_{10}x^{10} + A_{12}x^{12} + \dots A_ix^i \quad (2-1)$$

여기서  $z$ 는  $x$ 축에 수직인 면의 새그(sag) 값,  $K$ 는 코닉 상수(conic constant),  $C$ 는  $1/R$ 의 기본 곡률을 나타내며,  $R$ 은 기본 반경,  $A_4$ 에서  $A_{12}$ 는 비구면 계수이다.

Fig. 2-7은 가공축과 비구면 방향에 대한 개략도를 나타낸 것이다. 위 식은 1차원적인 면으로 정의되어 있지만 중심(0, 0)에서 회전 대칭의 단면이라고 가정한다.

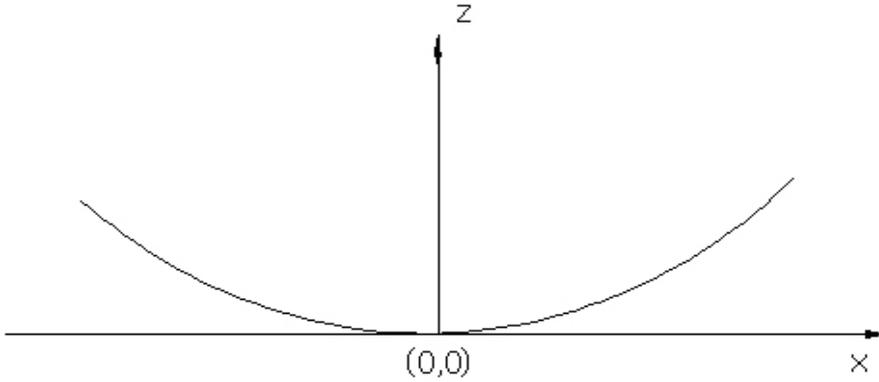


Fig. 2-7 Aspheric Curve Illustrating Origin and Axes

비구면 식은 원추(conic)항과 비구면(aspheric)항 두 부분으로 나눌 수 있다. 원추항은 다음과 같다.

$$z = \frac{Cx^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + K)C^2x^2}} \quad (2-2)$$

코닉상수 K의 값은 구면(sphere), 포물선(parabola), 타원(ellipse) 또는 쌍곡선(hyperbola)에 따라서 달라지는 값이다. Table 2-4는 K값에 따른 면의 형태를 나타낸다.

Table 2-4 Table of Conic Constant Values

<i>Conic constant</i>	<i>Surface type</i>
K = 0	Sphere
K = -1	Parabola
-1 < K < 0	Prolate ellipse
K > 0	Oblate ellipse(Not strictly a conic section)
K < -1	Hyperbola

예를 들어 포물면 경우 K = -1 이다. K값을 원추항 식에 넣으면 포물면 식을 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$z = -\frac{Cx^2}{2} \quad (2-3)$$

나. 원추곡면(Conic sections surface)

비구면 식의 원추항으로 표현되는 원추 곡면은 광학 산업에서 매우 폭넓게 이용되고 있다. 포물면은 특히 평행 광 또는 방사의 초점을 모으는 비축 광학계로 사용되어 진다. 따라서 원추 식을 이해하고 어떻게 설명되어지는 지를 이해하는 것은 매우 중요하다고 할 수 있다. 원추 곡면은 구면, 포물면, 타원, 그리고 쌍곡면등은 포함한다. 대부분의 광학 설계와 다이아몬드 터닝 가공프로그램 작성 시 일반적인 비구면 식의 면 변수들이 필요하게 된다. Table 2-5는 원추 식과 비구면 식에서의 원추 항의 변수들과 원추 식의 변수들과의 관계를 나타내었다. 이 표를 사

용할 때 원추 식의 일반적인 형태를 비구면의 형태에서 다이아몬드 터닝과 광학 설계 소프트웨어에 맞도록 변환 할 수 있다.

Table 2-5 Equations for Conic Sections

<i>Conic Section</i>	<i>Equation</i>	<i>Definitions</i>	<i>Conversion to K and R</i>
Sphere	$R^2 = z^2 + x^2$		
Parabola	$z = \frac{x^2}{4F}$	F is focal length	$R = 2F$
Ellipse	$\frac{x^2}{a^2} + \frac{z^2}{b^2} = 1$	a is the semi major axis b is the semi minor axis	$R = \frac{b^2}{a}$ $K = \frac{b^2}{a^2} - 1$
Hyperbola	$\frac{x^2}{a^2} - \frac{z^2}{b^2} = 1$	a is the semi major axis b is the semi minor axis	$R = \frac{b^2}{a}$ $K = -\frac{b^2}{a^2} - 1$

### 3. 다이아몬드 터닝가공기술

본 논문에서 사용된 다이아몬드 터닝머시인은 x축과 z축의 2축 동시제어 방식을 채용하고 있다. 비구면을 가공하는 것은 비구면식에 대해 반경방향으로 등분할하고 그 구간을 직선으로 근사시켜 가공을 수행한다. 실제 다이아몬드 터닝머시인의 동작은 절삭점과 절삭점 사이에서 비구면 곡선이기 때문에 약간의 차이가 나는 궤적을 지나게 된다. 이러한 이유 때문에 이송방향의 분해능에 기인하는 형상오차는 표면조도와 거의 같은 정도로 나타난다. x축과 z축의 2축 동시제어방식이나 x축, z축, 그리고 y축의 3축 동시제어 방식 중 어떤 방식이라 할지라도 원하는 형상정

도를 얻기 위해서는 공구의 위치결정과 공구인선의 형상이 대단히 중요하다. 다이아몬드 터닝을 하기 위해서는 공구를 장착한 공구대는 고강성을 가져야 하고 공구의 위치결정이 미세하게 조절 가능한 기구이어야 하며, 사용한 공구의 인선은 진원에 가까운 형상을 가져야만 한다. Fig. 2-8은 공구 인선의 형상과 공구의 위치결정에 따른 오차발생 모델을 도식화한 것이다. 초정밀 가공에서는 공구 인선 형상이 그대로 공작물에 전사되는 원리를 이용하여 가공하는데, 공구 인선의 형상이 완벽한 곡률반경을 갖지 않았을 경우에는 가공 접촉점이 일치하지 않아 실제 가공면은 가공형상오차가 발생한다. 공구 위치결정 오차가 발생한 경우에는 이상적인 공구 경로를 지나지 않고 오차발생량 만큼의 궤적을 그리게 된다. 이러한 이유로 실제 가공면의 형상은 오차가 그대로 전사되게 된다.<sup>[20]</sup>

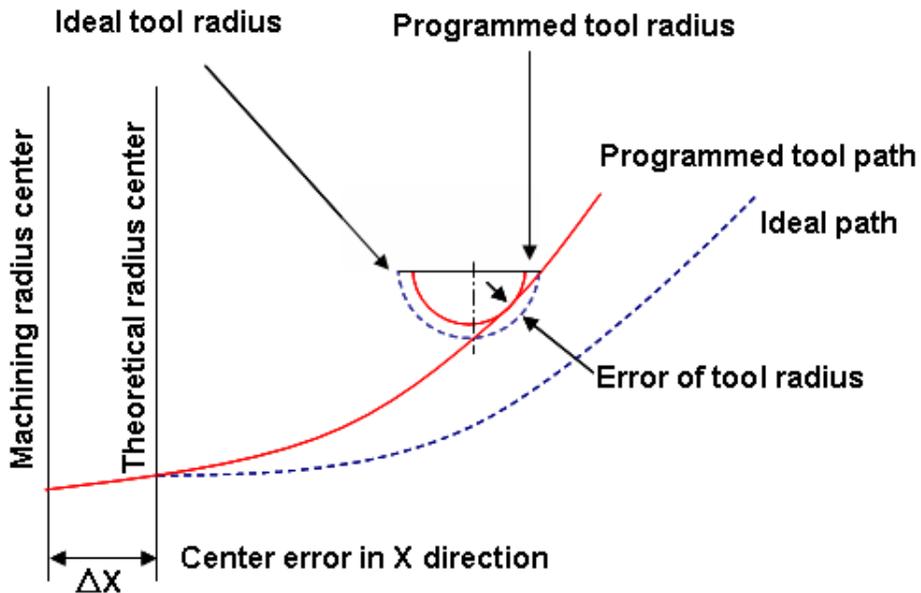


Fig. 2-8 Error of Tool Radius and Center Positions

#### 가. 공구 인선 반경오차 보정

연질금속과 게르마늄, 실리콘 등의 경질취성재료에서는 단결정 다이아몬드 공구를 이용한 다이아몬드 터닝가공에 의해 경면을 얻을 수 있다.<sup>[21][22]</sup> 비구면 형상의 초정밀 절삭가공에 있어서는 통상적으로 공구 인선이 원호형상인 공구가 이용되고 있다. 공구 인선이 원호형상의 단결정 다이아몬드를 이용하여 오목한 형태의 가공면을 가공하는 경우 공구 인선반경은 공작물의 최소 곡률반경보다 작게 설정되어야만 한다. 근래에는 단결정 다이아몬드 공구의 연마기술의 진보에 따라 인선반경이 대단히 작고, 예리한 절인 가공이 가능하게 되었다. 최근에는 공구 인선의 진원의 오차가 0.1  $\mu\text{m}$ 이하로 대단히 우수한 공구 가공이 가능하게 되어 공구 인선의 원호에 닿는 절삭점을 이동시키면서 목표의 비구면형상을 창성하는 방법이 개발되었다. 그 결과, 원호상의 공구인선을 회전시키지 않고도 정밀가공이 가능하게 되어, 공구인선위치의 조정이 비교적 간단하게 되었다.

#### 나. 공구 위치오차 보정

다이아몬드 터닝시 원하는 형상정도를 얻기 위해서는 공구의 위치결정이 대단히 중요하다. 초기 공구의 위치 오차가 발생하면 최적의 절삭조건으로 가공하더라도 나노오더의 경면을 얻을 수 없으므로 초기 공구의 위치오차를 최소화하여 가공하여야만 고정도의 공작물을 얻는 것이 가능하다. 나노오더의 비구면 형상정도를 얻기 위해서는 공구의 위치결정이 대단히 중요하며 NC프로그램상의 비구면 광축 및 공구높이와 공작물 회전중심을 일치시켜야만 한다. 비구면 가공에서는 공구선단의 위치오차가 형상정도에 크게 영향을 미치므로 공구를 공작물의 회전중심과 일치시킬 필요가 있다. Fig. 2-9는 공구의 X축 방향에 대한 위치에 따른 보정치를 판단할 수 있는 형상을 나타낸 것이다. 그림에 나타낸 바와 같이 공구 중심이 가공물의 중심에서 지나거나 혹은 미치지 못한 경우 가공물의 형상에 대한 오차를 발생시키게 된다. Fig. 2-10은 공구의 높이 오차에 의해 발생한 형상을 도식화한 것이

다. 공구의 높이 오차에 의해 공작물의 중심에 이상 형상이 발생한 경우, 비접촉식 측정장치를 이용하여 공작물 중심의 이상 형상을 측정하여, 모니터에 나타난 형상이 원주 또는 원추형상인지를 판단하고 그것에 대응하여 가공된 이상 형상의 반경만큼 공구를 상하로 이동시켜 보정한다. 초정밀 비구면을 얻기 위해서는 공구 위치 결정을 서브 마이크로 오더로 수행해야 한다.

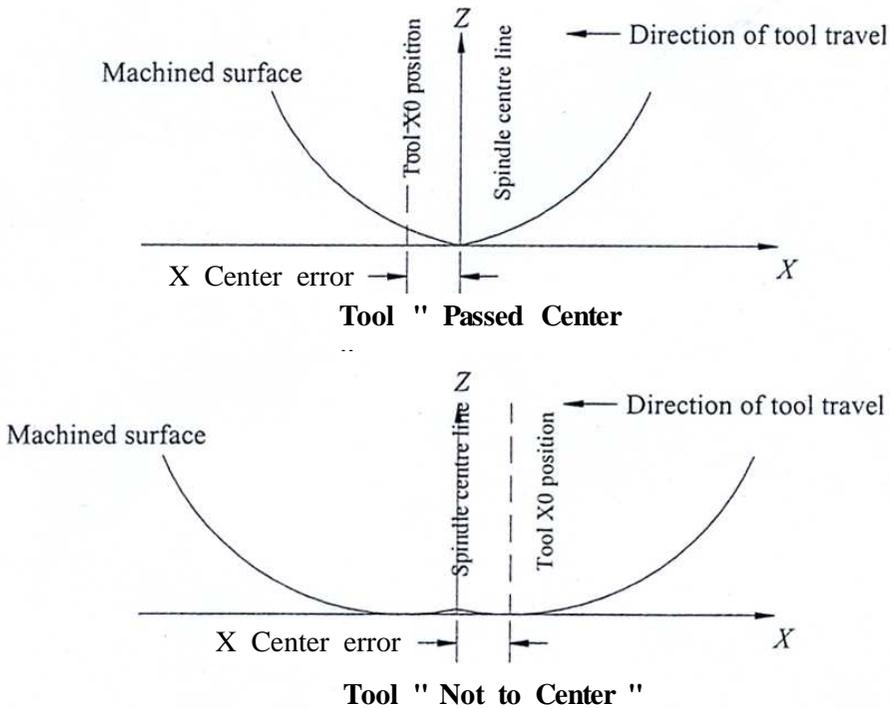


Fig. 2-9 Effect of Tool Position "passed center" and "not to center"

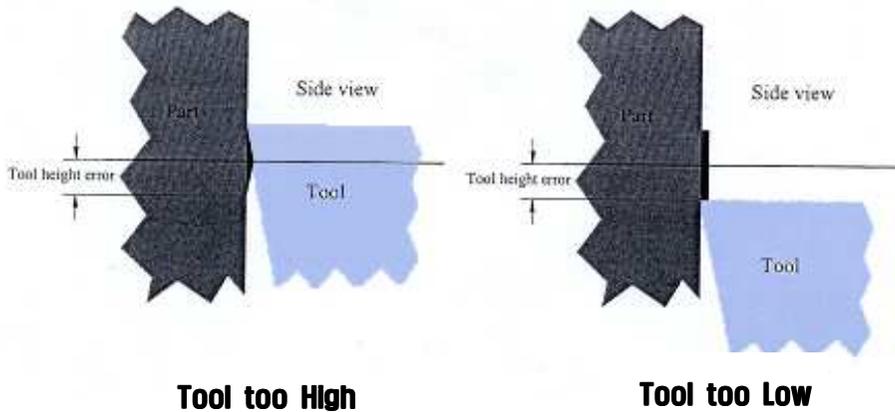


Fig. 2-10 Expected Pip of High and Low Tool Position

#### 4. 가공형상정도 측정기술

다이아몬드 터닝에서 중요한 부분 중의 하나는 최종 가공면이 구성요소가 요구하는 스펙에 맞는지 맞지 않는지를 판단 할 수 있어야 한다. 비구면의 측정 방법은 크게 간섭계를 이용한 비접촉식 방법과 프로파일러를 이용한 접촉식 방법이 있다. 다음은 다이아몬드 터닝가공을 통해 얻어진 형상을 측정·평가하는 방법을 기술한다.<sup>[23][24][25]</sup>

##### 가. 간섭계-비접촉식 방법

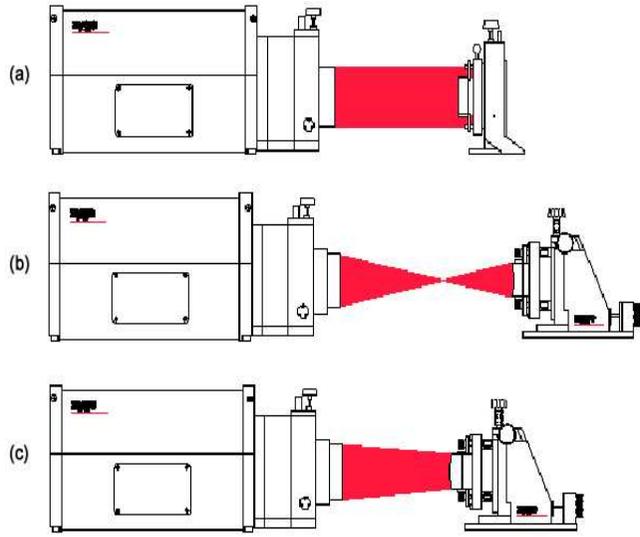
간섭계는 아주 오랜 시간동안 광학면을 측정하는데 아주 유용하게 사용되어져 왔다. 그러나 평면, 구면, 원추면 외에 비구면과 같은 특별한 면을 측정하는 데는 한계가 있다. 이런 특별한 비구면은 널 렌즈(null lenses) 또는 CGH(computer generated holograms)로 시험할 수 있지만 많은 양을 대량생산을 한다 하더라도 이것의 제작하는데 비용이 크다.

Fig. 2-11은 일반적인 피에조 간섭계로 일반적인 (a)평면, (b)오목, (c)볼록면의

간접계 셋업을 보여주고, Fig. 2-12는 널 렌즈와 CGH없이 피에조 간접계로 원추면을 측정하는 모습을 보이고 있다. 순서대로 (a)포물면(parabola), (b)쌍곡면(hyperbola), (c)타원면(ellipse)의 간접계 셋업과 왼쪽에 이것의 좌표축에서의 기하학적인 형상을 나타내었다.

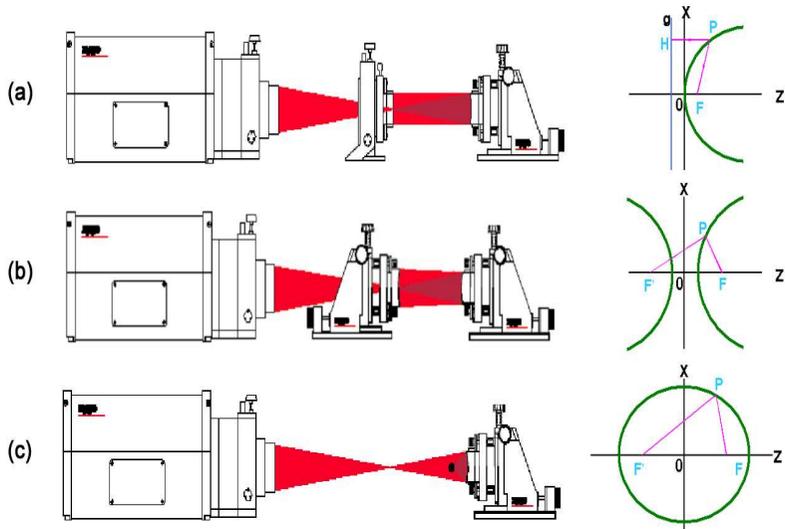
간접계를 이용한 측정은 Fig. 2-11과 Fig. 2-12의 예처럼 가공 소자를 다이아몬드 터닝머시인에서 분리하여 측정 할 수도 있고 간접계를 다이아몬드 터닝머시인 슬라이드에 장착하여 형상오차를 측정 할 수도 있다. 비축의 대부분 원추는 축상오차에 매우 민감하기 때문에 원추면의 시험에 간접계를 사용하는 것은 매우 어렵다. 비축 원추는 특히 중심이 없기 때문에 더욱 많은 문제가 생길 수 있다. 따라서 원추를 측정하는 최상의 장치는 다이아몬드 터닝머시인 자체가 된다. 슬라이드가 매우 정밀하기 때문에 광학요소를 측정하는데 이상적이다. 다시 말해 가공물을 가공할 때, 스핀들 축에 중심이 매우 잘 맞춰져 있을 뿐 아니라 다이아몬드 터닝머시인의 x축, y축, 그리고 z축 방향으로 매우 정밀하게 정렬되어 있다. 따라서 다이아몬드 터닝머시인 장비 위에 측정 장비를 장착하여 가공 축에 정렬하게 되면 비축 원추를 매우 정확하고 쉽게 측정 할 수 있게 된다.

비축 원추면 외에 비구면의 정도가 매우 심해서 Fig. 2-12의 원추면 측정이 불가능한 경우 앞에서 언급했던 널 렌즈 또는 CGH를 사용하게 되는데 널 렌즈는 2매 이상으로 구성되어 있는 광학계로 정도를 맞추기 매우 힘들기 때문에 CGH를 좀 더 보편적으로 사용하게 된다. Fig. 2-13은 비구면(포물면)의 예로 CGH를 사용했을 때와 사용하지 않았을 때의 간섭무늬를 나타낸 것이다. 이 예에서 알 수 있듯이 CGH를 사용하지 않을 경우 이 간섭무늬를 분석하는 것은 불가능 한 일이라 하겠다.



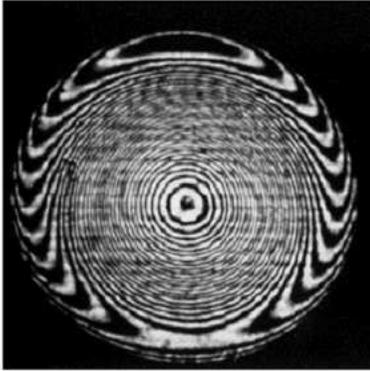
(a) flat (b) concave surface (c) convex surface

Fig. 2-11 Interferometer Set Up for Surface Form

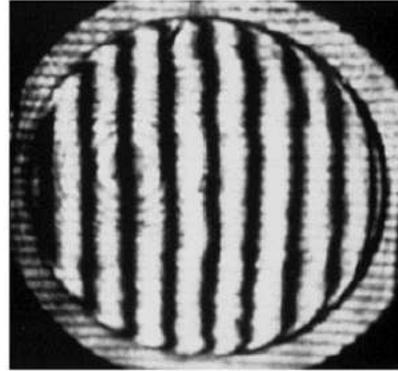


(a) parabola (b) hyperbola (c) ellipse

Fig. 2-12 Interferometer Set Up for Conic Sections



**No CGH**



**CGH**

Fig. 2-13 Interferometry of Aspheric Surface

나. 기상 계측기-접촉식 방법

다이아몬드 터닝머시인은 자체에 가공면 형상을 측정할 수 있는 기상계측기라고 하는 시스템이 내제되어 있다. 위 시스템은 공기 베어링 직선형 가변 차동변압기 (Linear Variable Differential Transformer, LVDT) 프로브를 사용하여 프로브의 위치를 전기적 신호로 정확하게 측정 할 수 있다. Fig. 2-14는 직선형 가변 차동변압기 프로브 측정 장치를 개략적으로 나타낸 것이다.

프로브 작동은 면의 가장자리에서 접촉해서 전체 면을 측정한다. 이상적인 면의 궤도에 x축과 z축 방향으로 프로브를 작동시킨다. 동시에 다이아몬드 터닝머시인은 프로브로부터 전기적 오차 신호를 기록하게 된다. 오차 신호는 위치 오차로 변환되고 다이아몬드 터닝머시인 모니터에 표시되게 된다. 프로브 팁은 루비 볼로 아주 높은 정확도로 측정되어 진다.

Fig. 2-14에서 볼 수 있는 것처럼 측정하는 면의 기울기에 따라 프로브 팁 구경의 다른 부분에 면이 접촉하게 된다. 따라서 프로브 팁의 반경이 고려된 보상된

값을 써야 한다. 프로브 팁이 아주 정밀하게 만들어 졌다고 해도 알고 있는 보정된 마스터 볼에 대응해서 프로브 팁을 보정해야 한다. 프로브 팁 반경을 측정하고 x축과 y축 방향에 스피들 축에 프로브 중심을 맞추고  $\pm 60^\circ$ 각에 프로브 팁 오차를 조사한다. 이것으로 역시 프로브 팁의 상태를 확인 할 수 있다.

프로브의 손상을 막기 위해서 가공 동안에는 분리 시켜 놓게 되는데 따라서 그것을 제자리에 다시 위치하게 하는 것이 매우 중요하게 된다. 이것을 확실하기 위해 키네매틱 마운트를 사용하게 된다. 이런 방법을 쓴다 할지라도 남아 있는 센터링 오차가 있을 수 있는데 이것은 소프트웨어를 이용하여 작은 오차를 제거할 수 있다.

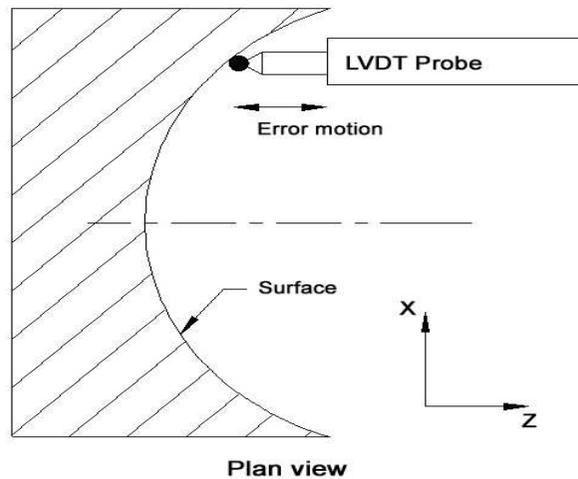


Fig. 2-14 Air Bearing Type LVDT Probe for Measuring Surface Form

#### 다. 기계와 분리된 접촉식 방법

접촉식 프로파일링 장비는 표면 형상 측정에 아주 오랜 세월 동안 사용해 왔다. 접촉식 프로파일링 장비는 스타일러스가 있는 수직인 방향으로 움직인다. 이것이

표면을 가로지르면서 지나고 스타일러스의 수직 이동을 측정하게 된다. 형상 측정  
 은 스타일러스 기하학과 측면 분해능에 따라 달라진다. 가장 대표적인 접촉식 비  
 구면 측정기로서 일본 Panasonic Co.의 자유곡면형상측정기인 UA3P와 미국  
 Taylor-Hobson Ltd.의 FormTalysurf Series가 있다.

일반적으로 비구면 측정기는 2  $\mu\text{m}$  팁 반경의 스타일러스로 표면 거칠기 및 형상  
 정도를 측정한다. 이것은 표면 거칠기를 근사적으로 약 8 nm Ra 이하로 측정 할  
 수 있다. 이상적인 표면으로부터 어긋난 양을 측정하는 대신에 전체 측정 범위에  
 걸쳐서 센서를 이동시킨다는 것을 제외하고는 이런 장치들은 기상계측기와 아주  
 유사하다. 이 시스템은 측정 할 수 있는 최대 기울기각과 최대 새그 값에 따라 한  
 계가 있는 경향이 있다.

다음은 표면 거칠기에 대한 간단한 설명으로 표면의 거칠기는 다양한 인자들을  
 이용하여 설명할 수 있다. Fig. 2-15는 이론적으로 일차원적인 표면 거칠기를 나타  
 내었다. 대부분의 공통된 거칠기 변수는 Fig. 2-15에 나타난 바와 같이  $R_a$ , RMS,  
 $R_q$ , PV(Peak to Valley),  $R_{\text{max}}$  등이 있다.

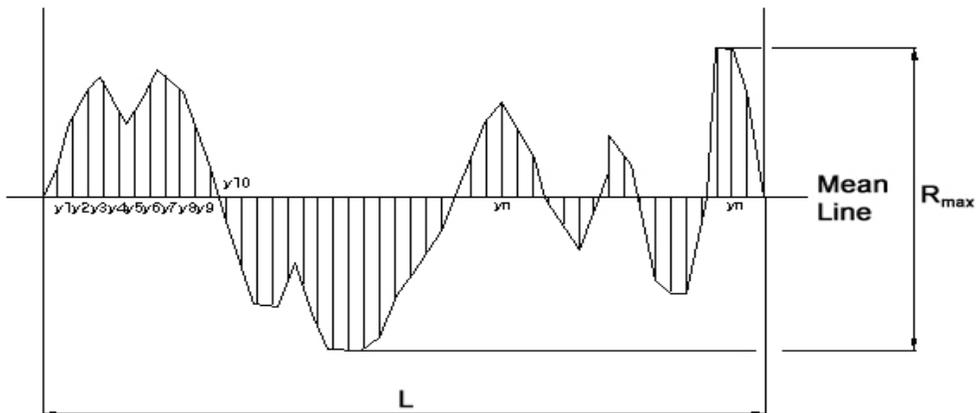


Fig. 2-15 Definition of Surface Roughness Parameters

## 제 2 절. 실험장비 및 방법

본 절에서는 다이아몬드 터닝가공을 위한 가공조건을 구하고 열영상장비용 광학 부품 및 주사공학기용 F-theta 렌즈 사출용 코어가공을 위해 사용된 초정밀가공장비 및 계측장비, 그리고 실험방법에 대해 기술한다.

### 1. 초정밀가공장비

가. 다이아몬드터닝머신(Nanoform200, Precitech Inc. USA)

본 논문에서는 열영상광학기용 알루미늄 평면미러 및 게르마늄 비구면 렌즈 제작을 위해 비구면 가공이 가능한 초정밀 비구면가공기를 사용하여 경면 가공을 수행하였다. Fig. 2-16에 초정밀 비구면가공기인 다이아몬드 터닝머신(Nanoform200, Precitech Inc. USA)을 나타내었다.



Fig. 2-16 Diamond Turning Machine  
(Nanoform200, Precitech Inc. USA)

다이아몬드 터닝머시인은 초정밀 가공을 위해 유체 정역학적인 슬라이드와 기체 정역학적인 슬라이드를 사용한다.

기본적으로 Nanoform200은 다이아몬드 터닝머시인(single-point diamond machining, SPDM)이지만 필요에 따라 옵션을 이용하여 연마가공이 가능하며, 특히 일반 상용 공구를 사용하여 많은 종류의 물질들을 직접 가공 할 수 있다.

기본적인 Nanoform200은 가공물 회전 지름이 200 mm, 최대 가공 가공물 지름이 180 mm이고, SP150 스핀들로 장착 가능한 가공물의 무게는 57 kg, SP75 스핀들은 18 kg이다. 위 연구에 사용한 장비에는 SP150 스핀들이 장착되어 있다. Nanoform200은 최상의 정밀도와 열적 안정성을 위해서 천연 화강암 베이스를 사용한다. Fig. 2-17은 다이아몬드 터닝머시인의 구조를 나타내며, Fig. 2-18은 다이아몬드 터닝 모습을 나타낸다.

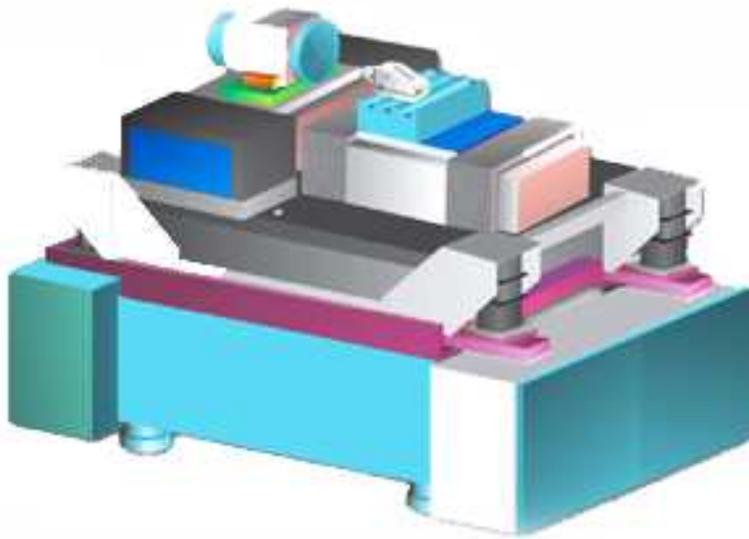


Fig. 2-17 Structure of Diamond Turning Machine

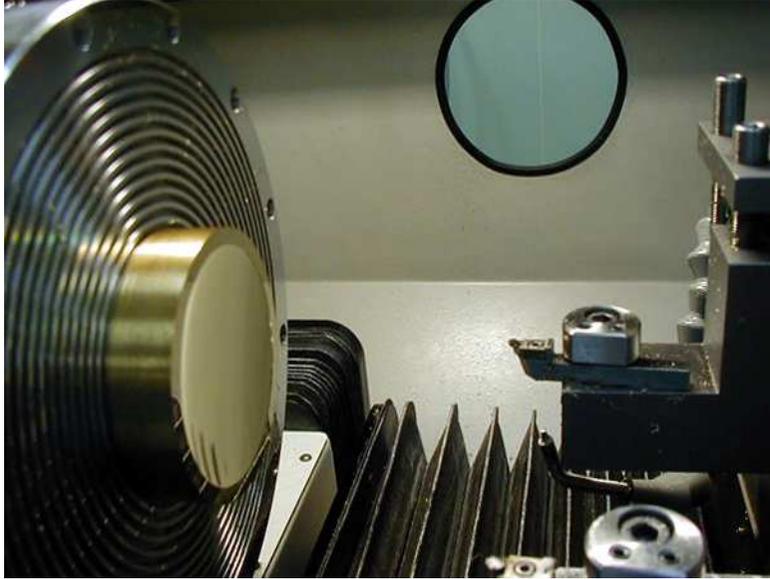


Fig. 2-18 Cutting of Sample Materials

베이스의 외각 크기는 610 mm×1016 mm×150 mm이다. 스테인리스 스틸 절삭유 트레이는 베이스 아래에 있다. 베이스 주위를 스틸 프레임이 둘러싸고 있고 베이스 위에 기계를 올리게 된다. Nanoform200은 두개의 수평 슬라이드가 T자 형태로 되어 있으며 두 슬라이드는 베이스 위에 있다. 기본적인 선반 형태는 x축 슬라이드에 가공물을 고정하게 된다. x축 슬라이드는 가공물을 고정하는 스피ن들의 회전축에 수직하게 이송한다. z축 슬라이드는 공구를 지지하고 x축 슬라이드에 수직하게 이송하고 가공물 마운트 스피ン들에는 평행하며 x축과 z축의 직각도는 2.0 arc second 이내가 된다. Table 2-6은 다이아몬드 터닝머시인의 주요 스펙을 나타낸다.

Table 2-6 Specification of Diamond Turning Machine(Nanoform200)

<i>Diamond Turning Machine(Nanoform200)</i>	
Workpiece size	φ200 mm
X and Z axis slide table (hydrostatic oil bearing)	Travel : 180 mm
	Feedrate : 0~150 mm/min
	Scale resolution : 8.62 nm
X and Z-axis slide accuracy	Straightness
	Vertical : 0.2 μm/100 mm Lateral : 0.1 μm/100 mm
Workholding spindle	Speed range : 10-5000 RPM
	Load capacity : 57 Kg at spindle nose
Tool spindle rotation accuracy	Radial direction : 0.3 μm
	Thrust direction : 0.3 μm

나. 초정밀 자유곡면가공기(ASP30, Nachi-Hujikoshi Co., Japan)

본 논문에서는 주사광학계용 F-Theta Lens 사출용 금형코어제작을 위해 초정밀 비대칭 자유곡면 가공이 가능한 초정밀 자유곡면가공기(ASP30, Nachi-Hujikoshi Co., Japan)를 사용하였다. 초정밀 가공기 및 각종 측정 장비가 배치된 초정밀가공실의 온도는 23±1℃, 습도 50±5%인 항온 항습의 클린룸(5,000 class)이며, 장비의 진동 방지를 위하여 독립 기반구조로서 장비의 하부는 진동에 의한 영향을 피하기 위하여 특수 설계된 제진대로 지지된다. 본 연구에서 사용된 자유곡면가공기(ASP30)는 x축, y축, 그리고 z축인 세 개의 유정압 슬라이드가 직교 형태를 이루며 구동하는 3축 가공기로서 주축의 회전 범위는 0~1500 rpm이며, 피드백 시스템의 분해능은 1 nm로 레이저 홀로그램 스케일(laser hologram scale)를 사용하고 있다. Fig. 2-19는 초정밀 자유곡면가공기(ASP30)를 나타내고 있으며, Fig. 2-20은 자유곡면 초정밀가공기의 구조를 나타낸다. Table 2-7은 초정밀가공기의 특성을 보여주고 있다. Table 2-8은 초정밀 가공기의 슬라이드 특징을 보여주고 있다.



Fig. 2-19 Ultra-precision Non-Axisymmetric Aspheric Generator  
(ASP30, Nachi-Hujikoshi Co., Japan)

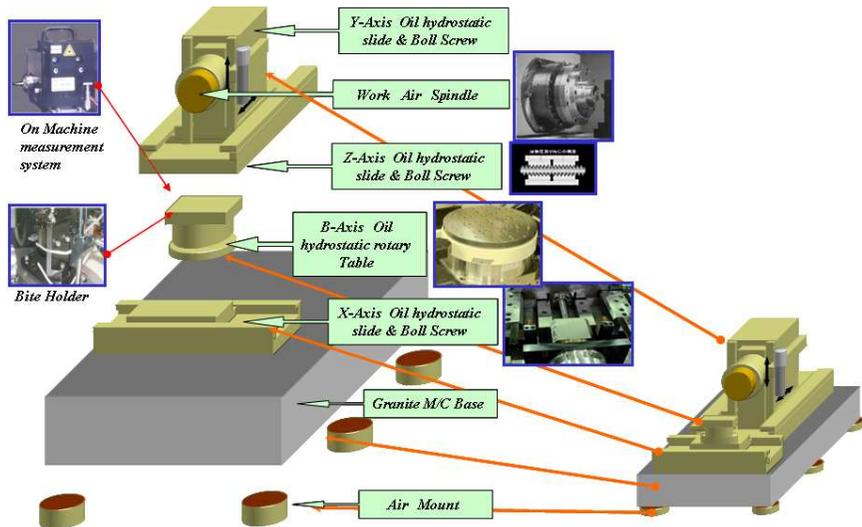


Fig. 2-20 3D Assemble Modeling of ASP30

Table 2-7 Specification of Non-Axisymmetric Aspheric Generator(ASP30)

<i>Ultra-precision Non-Axisymmetric Aspheric Generator(ASP30)</i>		
Workpiece size	300 W×50 H(Non-axisymmetrical workpiece)	
	φ200 mm(Axisymmetrical workpiece)	
X-axis slide table (all hydrostatic bearing)	Travel : 400 mm	
	Feedrate : ~300 mm/min	
	Scale resolution : 8.62 nm	
Y-axis slide table (all hydrostatic bearing)	Travel : 100 mm	
	Feedrate : ~300 mm/min	
	Scale resolution : 8.62 nm	
X and Z-axis slide accuracy	Straightness	vertical : 0.2 μm/100 mm
		Lateral : 0.1 μm/100 mm
Tool spindle rotation accuracy	Radial direction : 0.3 μm	
	Thrust direction : 0.3 μm	

Table 2-8 Specification of Precision Stage

	<i>X axis</i>	<i>Z axis</i>	<i>Y axis</i>
Max stroke(mm)	250	200	70
Resolution(μm)	0.001	0.001	0.001
Feedrate(mm/min)	300	300	180
Slide stage	Hydrostatic	Hydrostatic	Hydrostatic
Travel screw	Hydrostatic	Hydrostatic	Hydrostatic
Motor	AC servo	AC servo	AC servo

## 2. 초정밀 비구면 계측장비

### 가. 고정도 3차원 형상측정기(UA3P, Panasonic Co., Japan)

본 연구에서는 비축 비대칭 자유곡면의 형상측정을 수행하기 위해 최근 개발 완료되어 시판된 3차원 고정도 형상측정기(UA3P, Panasonic Co., Japan)를 사용하였다. 본 장비는 AFP(Atomic Force Probe)에서의 측정면에 대하여 프로브를 원자간력이 작용하는 영역까지 근접시켜서 이 원자간력을 항상 일정하게 유지하면서 최대 60°까지의 경사면을 측정할 수 있는 형상측정기로서 원자간력은 극도로 미소하게 작용하여 측정면에 손상을 주지 않는다. 또한 각 종의 비구면(회전대칭면, Toric 렌즈, 실린더렌즈 등)이나 평면의 형상측정이 가능한 장비이다. Fig. 2-21은 고정도 3차원 형상측정기(UA3P)를 나타낸 것이고, Table 2-9는 고정도 3차원 형상측정기의 주요 스펙을 나타낸다.



Fig. 2-21 Ultra-High Accurate 3-D Profilometer  
(UA3P, Panasonic Co., Japan)

Table 2-9 Specification of 3-D Profilometer(UA3P)

<i>Ultra-High Accurate 3-D Profilometer(UA3P)</i>	
Measurable range	200 mm×200 mm×45 mm
Scale	He-Ne Oscillation frequency stabilized laser
Sensor : Atomic force probe	Ruby - Tip curvature radius: 0.5 mm - Measuring pressure: 0.3 mN (30 mgf)
	Diamond - Tip curvature radius: 2 $\mu\text{m}$ - Measuring pressure: 0.3 mN (30 mgf)
Max. measurable angle	60°
Probe measurement accuracy	Ruby : 0.01 to 0.05 $\mu\text{m}$
	Diamond : 0.1 $\mu\text{m}$
Measurement error	0.05 $\mu\text{m}$ / 100 mm
Measuring speed	0.01 to 10 mm/sec

나. 표면형상측정기(GPI-XP 6" Interferometer, Zygo Co., USA)

구면의 형상오차를 측정을 위해 위상변위간섭계(GPI-XP, Zygo Co., USA)를 사용하였고, Fig. 2-22에 나타내었다. 이런 간섭계를 이용한 렌즈의 광학적 특성평가는 렌즈 생성 시 표면의 형상뿐만 아니라 렌즈 내에 존재하는 결함 등 총체적인 평가가 가능하다. 측정방식은 비접촉식이고 3차원으로 측정결과를 보여준다. 광원은 헬륨-네온 레이저로 파장은 632.8 nm 이다. 위상 변위 간섭계로 더블 패스(double pass)를 기준으로 분해능이  $\lambda/8000$ 이다.



Fig. 2-22 Surface Form Error Measuring System  
(GPI-XP 6" Interferometer, Zygo Co., USA)

다. 표면조도측정기(NewView5000, Zygo Co.. USA)

본 연구에서는 열영상 광학미러의 표면조도 측정을 위해서 표면조도측정기(NewView5000, Zygo Co.. USA)를 사용하였으며, Fig. 2-23에 나타내었다.

표면조도측정기는 좁은 영역을 정밀하게 여러 장 측정한 다음 이를 접합시킴으로써 구면 전체 영역을 측정 할 수 있다. 표면형상측정기(GPI-XP) 장비처럼 비접촉식이며, 3차원으로 측정값을 나타낸다. 광원은 백색광 할로겐램프이다. 수직분해능은 0.1 nm이고 수평분해능은 대물렌즈에 따라서 0.45 ~ 11.8  $\mu\text{m}$  사이가 된다.



Fig. 2-23 Surface Roughness Measuring System  
(NewView5000, Zygo Co., USA)

라. 접촉식 비구면측정기 (UltraComp, Precitech Inc., USA)

비구면의 형상오차와 반경을 측정하기 위해서 초정밀가공기의 기상계측기를 사용하였다. 가공에서 사용한 기상계측기는 UltraPath CNC 제어장치에 내제되어 있는 UltraComp를 사용한다. UltraComp는 하드웨어와 소프트웨어로 구성되어 있다. 하드웨어는 직선형 가변 차동변압기 프로브, 직선형 가변 차동변압증폭기와 아날로그 디지털 변환기로 구성되어 있다. 가공중에는 프로브 마운트를 제거 했다가 프로빙 하는 동안에는 정렬이 호트리지거나 하는 것 없이 다시 제자리로 올 수 있도록 해준다. 프로브는 작동 범위가  $\pm 40 \mu\text{m}$ 이다.

증폭기는 프로브의 이동한 거리를  $\pm 10.0 \text{ volt}$  신호로 바꾸고 아날로그 디지털 변환기를 제어 장치와 인터페이스하며 사용한다. 프로브 시스템의 전체 분해능은  $10 \text{ nm}$ 이다. 프로빙 힘(probing force)은 조절이 가능하고 기본적으로 근사치  $1.5 \text{ g}$  정도로 셋팅되어 있다. 소프트웨어는 정보를 받고 평가하고 저장하는 제어장치가 UltraPath 제어기에 탑재되어 있고 소프트 키를 사용할 수 있도록 되어 있다. 가시적인 평가가 되도록 하기 위해 모니터에 결과를 디스플레이하게 된다. Fig. 2-24는 직선형 가변 차동변압기 프로브를 이용하여 반사경을 측정하는 모습을 나타낸 것이다.



Fig. 2-24 LVDT Probe

### 3. 미세절삭력 측정용 공구지지대 설계 및 제작

본 연구에서는 다이아몬드 터닝시 공구 선단부에 발생하는 미세절삭력 측정을 위한 공구지지대를 새롭게 설계, 제작하여 열영상 광학미러에 많이 사용되는 Al 6061-T651과 무산소동을 이용하여 절삭력 측정 실험을 하였다.<sup>[47]-[52]</sup>

공구지지대는 다이아몬드 터닝시 발생하는 공구 미세 절삭력을 측정하기 위해 정교한 힘 센서 Kistler 9251A, 3축 힘 센서를 내장하여 설계하였다. 또한 공구지지대를 제작하기에 앞서 동적해석 시뮬레이션 소프트웨어 MSC/PATRAN, MSC/NASTRAN을 이용하여 동적 해석을 수행하였다. 제작된 시스템은 진동 실험을 수행함으로써 시뮬레이션을 통하여 예측된 시스템을 검증하였다. 마지막으로 제작된 공구지지대를 이용하여 다이아몬드 터닝시 초정밀가공에 중요한 영향을 미치는 변수인 절삭 깊이와 이송속도를 변화시키면서 미세절삭력을 측정하였으며, 미세 절삭력에 미치는 각 변수의 영향을 고찰하였다.

#### 가. 미세절삭력 측정용 공구지지대 설계

본 연구에서는 다이아몬드 터닝시 발생하는 공구선단부의 미세절삭력을 측정하기 위해 정교한 힘 센서를 내장한 공구지지대를 설계, 제작하였다. 이상적인 설계는 공구지지대가 다이아몬드 터닝시 어떠한 영향도 받지 않도록 설계하고, 제작하는 것이다. 그러나 현실적으로 이러한 제작은 어렵기 때문에 본 연구에서는 절삭 공정에서 발생하는 영향을 최소화 하는데 그 목적이 있다. 제작된 공구지지대는 Precitech Inc.의 Nanoform200에 장착되어 다이아몬드 터닝시 발생하는 절삭력 3축 직교성분인 주분력, 배분력, 그리고 이송분력을 측정, 해석하여 광학소자에 대한 다이아몬드 터닝 가공조건을 구하는 데 이용된다. 이러한 공구지지대는 초정밀 가공기와 터닝공정시 발생하는 동적 상호작용을 최소화하기 위해 매우 견고하게

설계되는 게 필요하다. 또한 공구지지대의 민감도 역시 설계하는데 매우 중요한 요소이다.

고강성과 고민감도 두 요구조건에 만족할 수 있는 힘 센서는 압전 크리스탈이 이상적이다. 따라서 본 연구에서는 기존에 동일한 연구목적으로 많이 사용되어진 Kistler 9251A, 3축 힘 센서를 이용하여 공구지지대를 설계하였다. Kistler 9251A 힘 센서는 z축 강성이  $1000 \text{ N}/\mu\text{m}$ 이고 최소측정가능범위(threshold)는  $0.01 \text{ N}$ 이다. Fig. 2-25는 미세절삭력 측정을 위해 사용된 Kistler 9251A, 압전 힘 센서의 개략도를 나타낸 것이다.

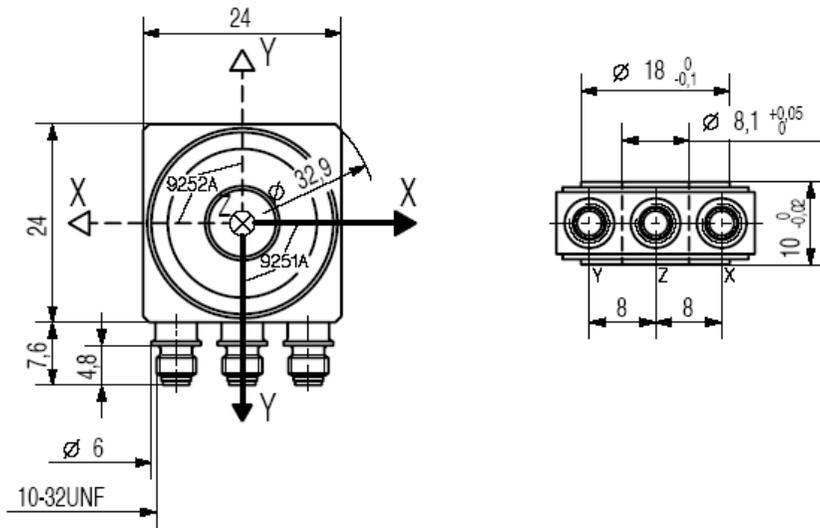


Fig. 2-25 Piezo-electric, Quartz Crystal to Measure Tool Forces

(1) Sensor Calibration

앞 절에서 설명했듯이 본 연구에서는 다이아몬드 터닝시 발생하는 절삭력을 측정하기 위해 Kistler 9251A를 사용하였다.

공구지지대 설계에 들어가기에 앞서 센서 보정 작업을 행하였다. 센서 보정은 표준과학연구소에서 제작된 무게 1 g - 100 g까지의 분동을 이용하여 실험하였다. 실험방법은 Fig. 2-26에 나타내었다. Fig. 2-27은 z축 센서 보정치를 나타낸 그림이다.

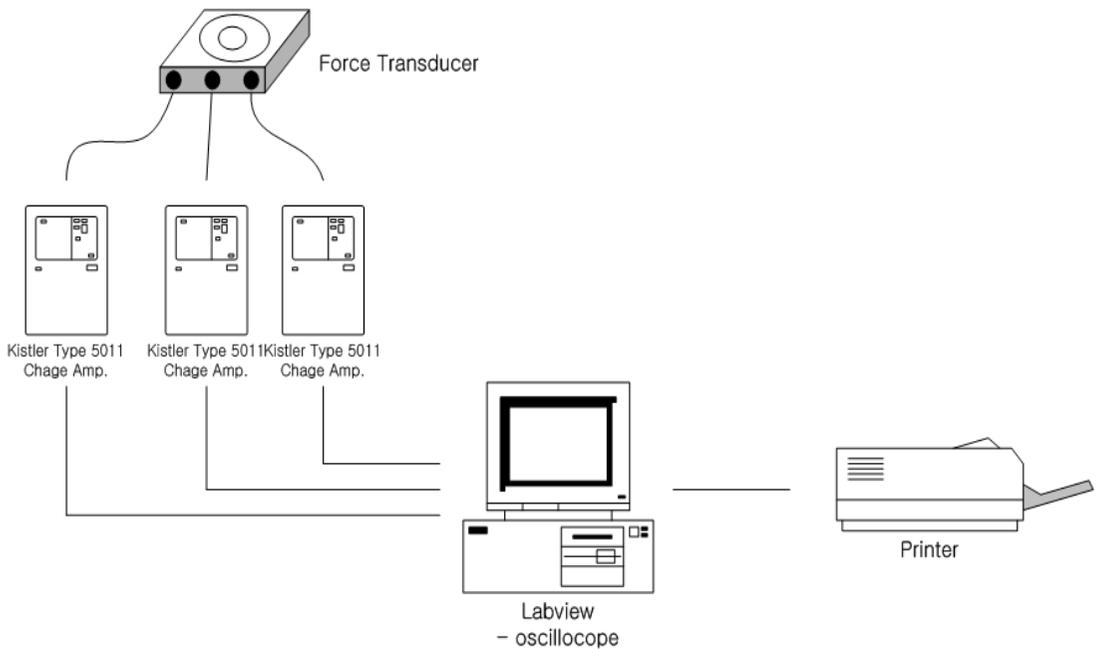
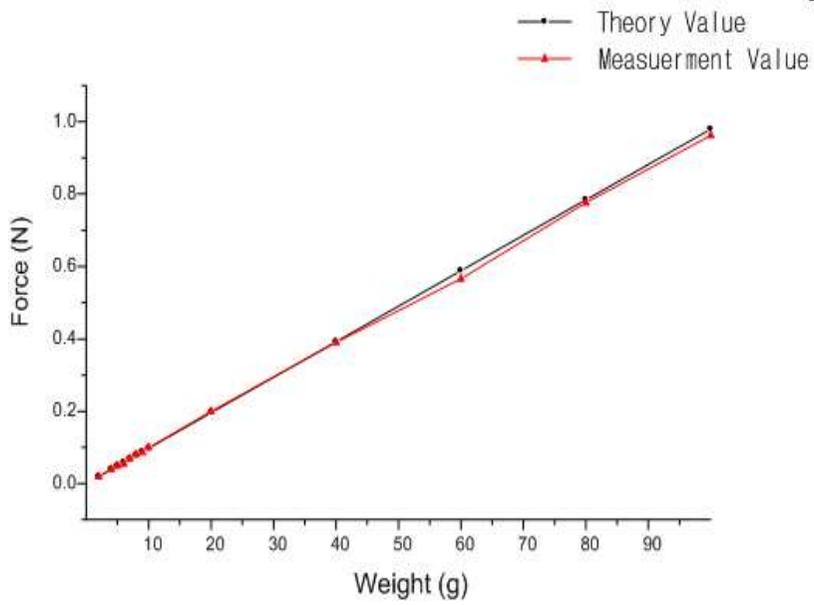
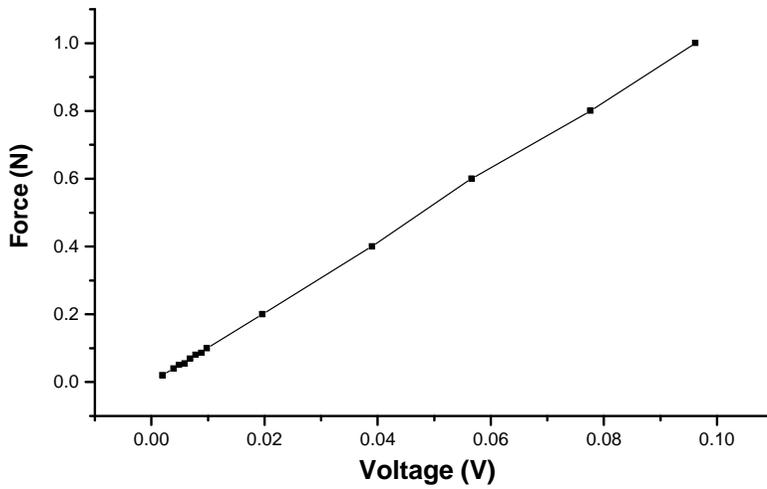


Fig. 2-26 Diagram of Apparatus for the Sensor Calibration



(a) Z-Axis Weight Calibration Chart



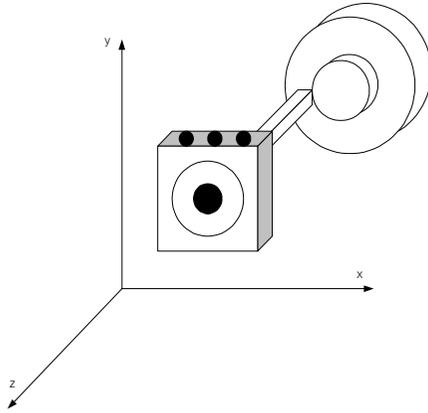
(b) Z-Axis Voltage Calibration Chart

Fig. 2-27 Z-axis Calibration Chart of Force Transducer

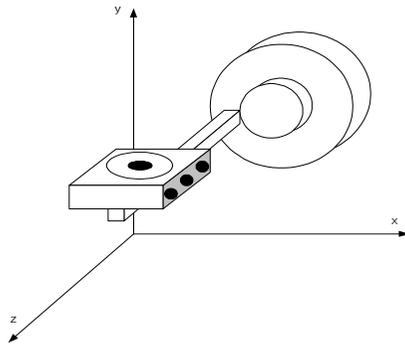
Fig. 2-27에서 나타낸 (a)는 각각의 하중에 대한 힘의 이론값과 측정값을 비교해서 나타낸 그림이다. 그리고 (b)는 전압에 대한 힘의 양을 나타낸 보정치이다. Fig. 2-27에서 나타낸 바와 같이 하중에 대해 작용하는 힘의 양이 비교적 선형한 결과를 보여줌으로서 센서의 보정이 만족스러움을 알 수 있다.

## (2) 공구지지대 설계

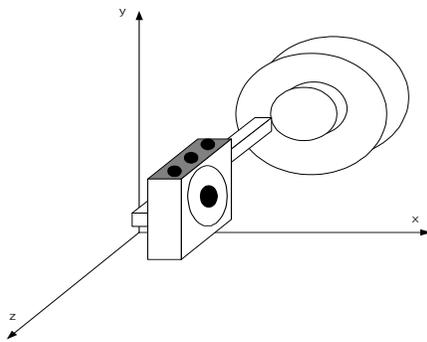
공구지지대 설계에 먼저 선행되어야 할 것은 절삭력 측정용 센서의 위치 결정이다. Fig. 2-28은 3축 힘 센서를 이용한 공구지지대 제작시 가능한 설계를 나타낸 것이다. Fig. 2-28(a)은 공작물에 연직방향인 z축 성분을 고려한 설계를 나타낸 것이다. Fig. 2-28(b)은 공작물 면과 평행을 이루는 z축을 나타내고, Fig. 2-28(c)은 z축이 공작물 면과 평행이고 이송 방향과 일치하는 방향을 나타낸다. 힘 센서의 강성은 힘 센서의 중앙 홀과 평행한 방향이 가장 크다. Fig. 2-28에서 보면 z축 방향으로 설계된 (a) 경우가 이에 해당한다. 절삭공정시 손상없이 절삭력을 측정하고자 하는 목적에 부합하도록 가장 중요하게 고려되는 절삭력 성분을 z축 방향에 평행하도록 설계되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 Fig. 2-28(a)과 같은 형상으로 힘 센서를 배치하여 공구지지대를 설계하였다. 이러한 결정에 대한 또 다른 이유는 공구절삭력에 의해 힘 센서에 전달되는 모멘트에 대한 고려 때문이다. Fig. 2-28(a) 방법을 제외한 다른 두 가지 방향에 대해서는 모든 성분에 대해 모멘트가 작용한다. 그러나 Fig. 2-28(a)과 같이 이루어질 경우 트러스트 힘에 의해 작용되는 모멘트는 공구의 선단부와 힘 센서의 축을 일치시킴으로서 제거된다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 2-28 Possible Orientations for Transducer

힘 센서의 기구학적 배치를 결정했다면, 다음에는 구조물의 형상을 고려해야 한다. 힘 센서를 내장한 공구지지대는 약 100 kg의 질량을 가지는 다이아몬드 터닝머시인 (Precitech Inc. Nanoform200)의 슬라이드에 장착된다. 그리고 힘 센서는 공구지지대 본체와 공구 홀더 사이에 내장된다. 이러한 방식으로 결합되어질 경우, 힘 센서와 다이아몬드 터닝 머시인의 슬라이드는 직렬 강성 요소로 작용한다. 조합되어진 강성은 슬라이드가 가지는 최소 강성 요소의 강성보다 클 수는 없다. Precitech Inc.에서 측정되어진 슬라이드 강성 값은 수평방향과 연직방향이 각각  $27 \text{ N}/\mu\text{m}$ ,  $101 \text{ N}/\mu\text{m}$ 이다. 공구지지대의 중량은 슬라이드 중량에 비해 작기 때문에 다이내모미터의 중량은 무시될 수 있다. 공구지지대 설계시 효과적인 절삭력 측정을 위해 압전 힘 센서에 예압을 고려해야 한다. 압축에 의한 예압은 Fig. 2-28(a)에 나타난 교차하는 힘 즉, x축 방향과 y축 방향으로 작용하는 힘의 마찰을 유도하는 것이 필요하다. 예압을 주는 기법은 공구지지대 구조 설계 및 강성 측정 전에 고려해야한다. 일반적으로 하나의 볼트로 효과적인 예압을 주기 위해 압전 힘 센서의 중심을 통하도록 설계하였다. 볼트 헤드의 접근성, 다이아몬드 터닝머시인의 장비 치수 그리고 강성 요구조건등 모든 것이 공구지지대를 설계하는데 중요한 요소이다. Fig. 2-29는 앞에서 말한 내용을 고려해서 설계한 공구지지대의 개략도이다. 그림에서 가장 중요한 부분은 예압 볼트가 수평방향 홀과 압전 힘 센서를 통과하여 홀더의 링 너트와 연결되는 부분이다. 따라서 본 연구에서는 안정성을 고려해 Kistler Co.에서 제공하는 예압볼트를 이용하여 설계하였다.

이 시스템에 대한 강성은 슬라이드의 강성과 공구지지대의 강성의 조합으로 3축 직교 방향에 대해 각각 다음과 같은 식을 통해 계산될 수 있다.

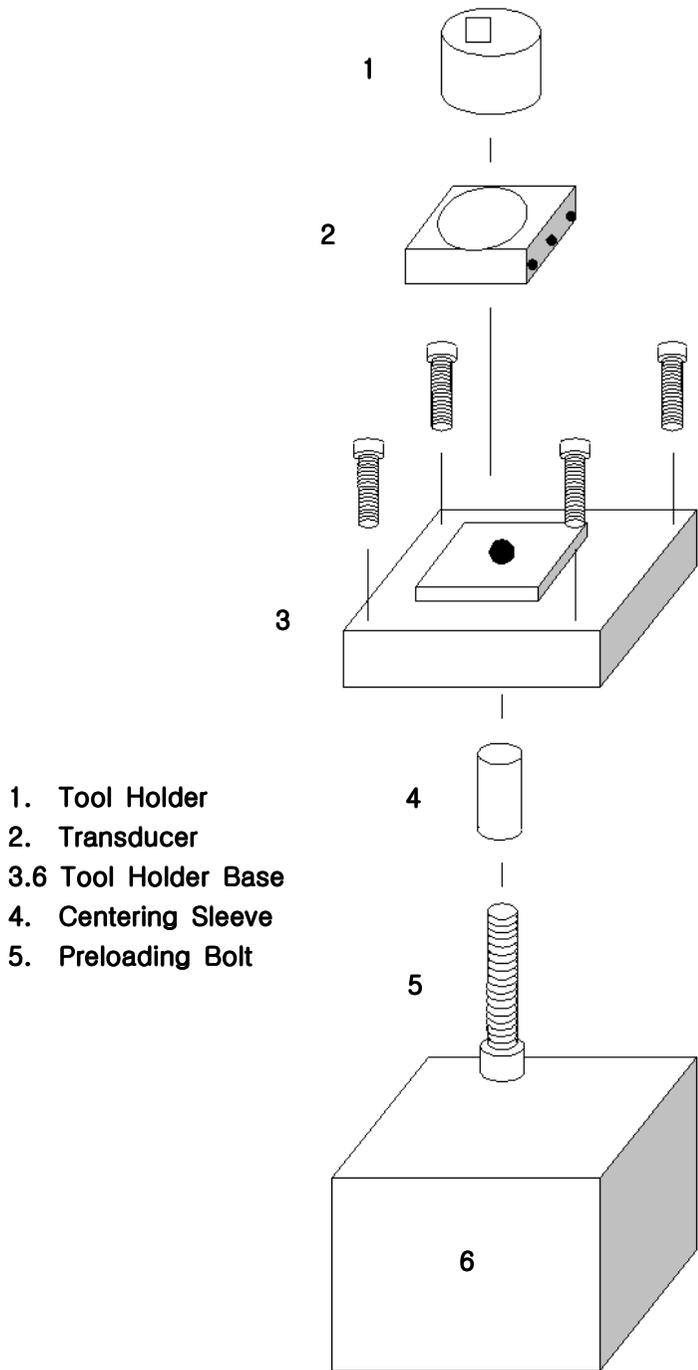


Fig. 2-29 Schematic Drawing of Assembled Tool Holder System

$$K_{x,y,z} = \left[ \frac{1}{K_s} + \frac{1}{K_d} \right]_{x,y,z}^{-1} \quad (2-4)$$

여기서,

K = Combined stiffness

K<sub>d</sub> = Dynamometer stiffness

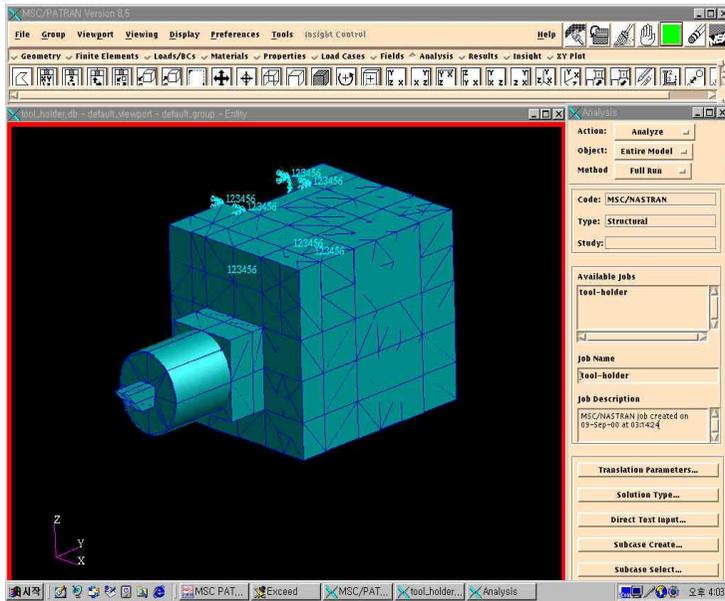
K<sub>s</sub> = Slide stiffness

위 식에서 첨자 x, y, z는 각각 이송분력, 주분력, 배분력 방향을 나타낸다. 슬라이드의 강성은 Precitech Inc.에서 측정되어졌으며, 공구지지대의 강성은 MSC/NASTRAN 구조해석 프로그램을 이용하여 측정되었다. 여기서 공구지지대의 베이스는 완전하게 강체에 고정되었다는 가정하였다. 가공기의 슬라이드 강성은 공구지지대의 강성보다 훨씬 큰 강성을 지니고 있기 때문에 세 방향에 대한 조합강성은 공구지지대를 제외한 강성과 거의 일치한다.

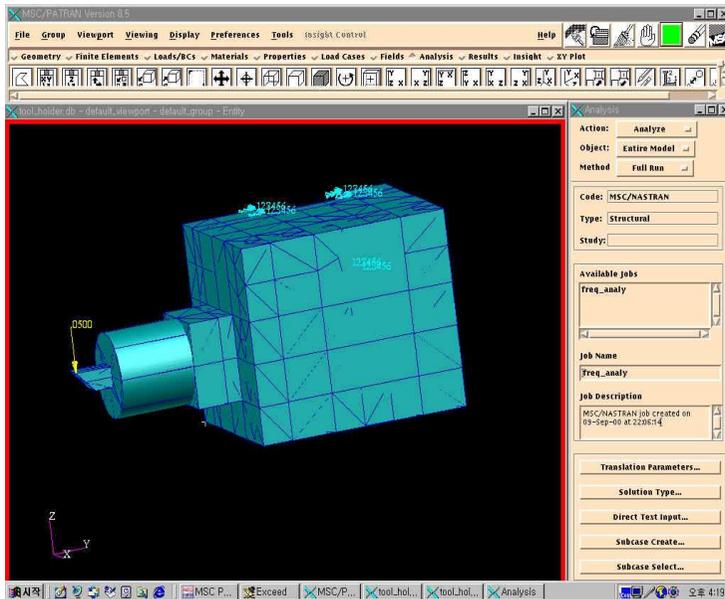
### (3) 동적해석

본 연구에서는 Fig. 2-29와 같은 구조물을 제작하기에 앞서 다이아몬드 터닝시 측정되는 동적 절삭력이 구조물에 얼마나 영향을 미치는가를 결정하기 위해 시뮬레이션을 통한 동적 해석을 하였다. 공구지지대는 동적해석 전용프로그램인 MSC/PATRAN을 이용하여 모델링을 하였으며, MSC/NASTRAN 구조해석 프로그램을 이용하여 시뮬레이션을 하였다. Fig. 2-30은 MSC/PATRAN을 이용하여 모델링된 공구지지대를 나타낸 것이다.

Fig. 2-30(a)은 정규 모드해석을 수행하기 위해 모델링된 그림이고, Fig. 2-30(b)은 주파수 해석을 수행하기 위한 그림이다.



(a) Mode analysis



(b) Frequency analysis

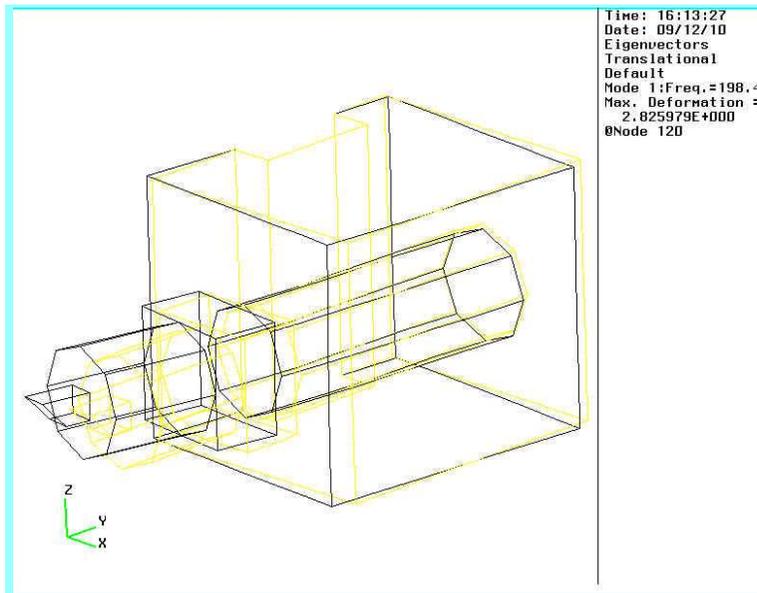
Fig. 2-30 Tool Holder Modeling for Dynamic Analysis

Table 2-10은 모드 해석 및 주파수 해석을 수행하기 위한 구속조건과 하중조건, 그리고 물성치를 나타낸 것이다. 공구지지대의 베이스는 완전하게 강체로 고정되었다는 가정 하에 모델링을 수행하였다.

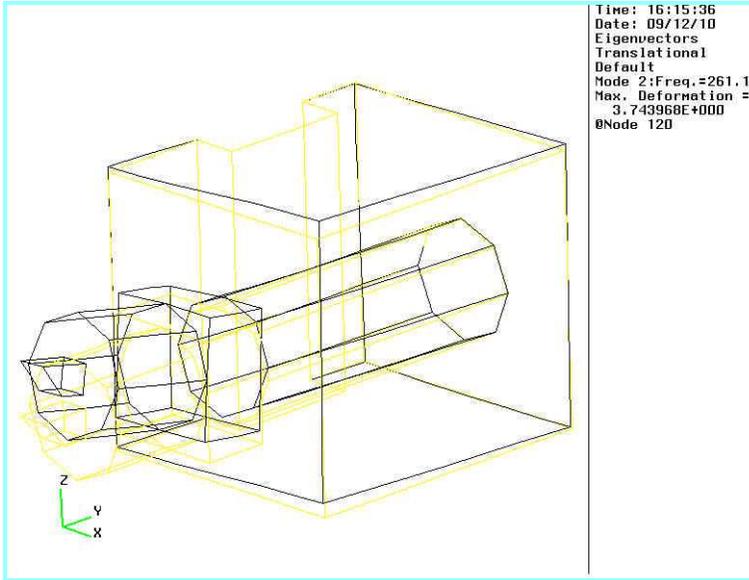
Table 2-10 Load/BCs for Mode and Frequency Analysis

<i>Finite element</i>	Node ID : 1083
	Element ID : 4224
	Element topology : Tet 4
<i>Load/BCs</i>	Displacement fixed
	0.5 N Weigh fixed Range 20~1000 Hz : 20Hz exciting interval at node 120
	Damping Ratio : 3 %
<i>Material property : Steel alloy</i>	Elastic modulus : 200,000 N/mm <sup>2</sup>
	Poisson ratio : 0.32
	Density : 7.84e-6 kg/mm <sup>3</sup>
<i>Solution type</i>	Normal modes analysis
	: Number of desired roots : 5
	Frequency response analysis

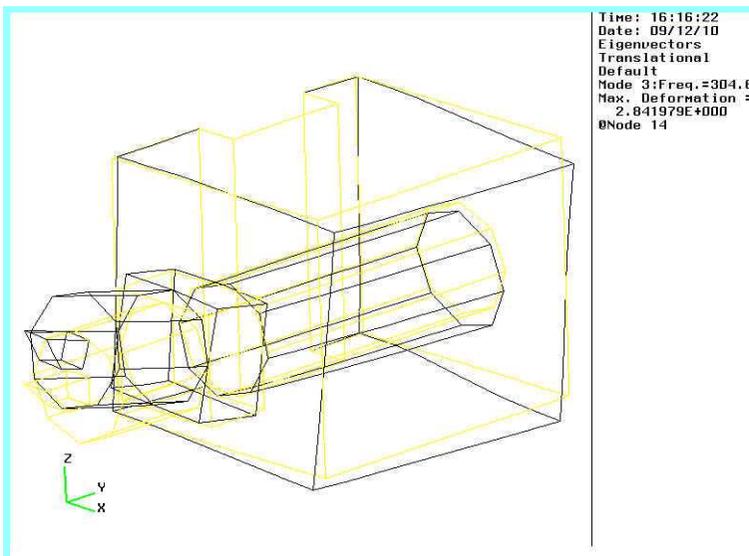
Fig. 2-31은 시뮬레이션 결과에 대한 1-4차 모우드의 변형을 가시화 한 것이다. 해석 결과로 부터 1차 모드 주파수가 약 200 Hz 임을 알 수 있다. 다시 말해 앞서 설계한 시스템은 일반적으로 가공시 2000 rpm의 스핀들 속도로 가공한다고 볼 때 33.3 Hz에서 공진으로 인한 진동이 일어난다고 예측 할 수 있다. 그러나 시뮬레이션 결과로 볼 때 200 Hz 이하에서는 공진의 영향 없이 정확한 절삭력 값을 측정 할 수 있다. 따라서 위 시뮬레이션 결과로 볼 때 공구지지대 설계는 만족됨을 알 수 있다.



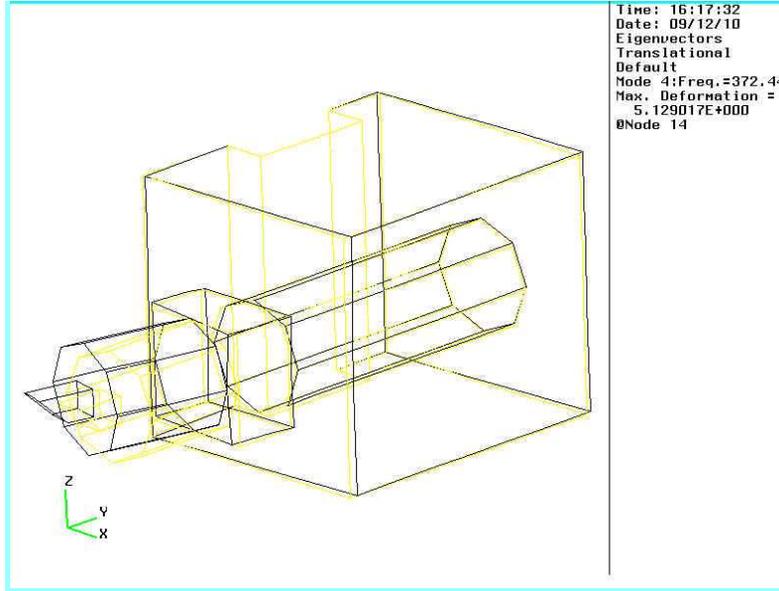
*1st mode: 198 Hz*



*2nd mode : 260 Hz*



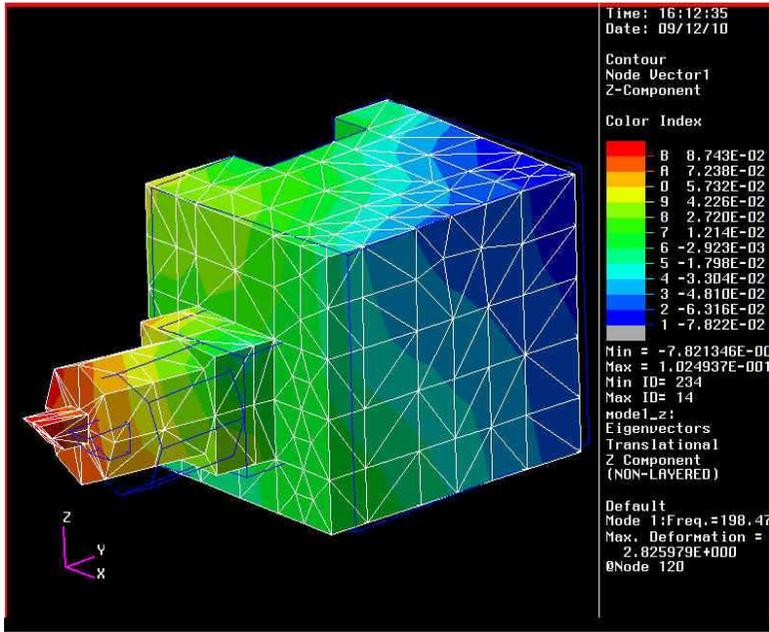
*3rd mode : 304 Hz*



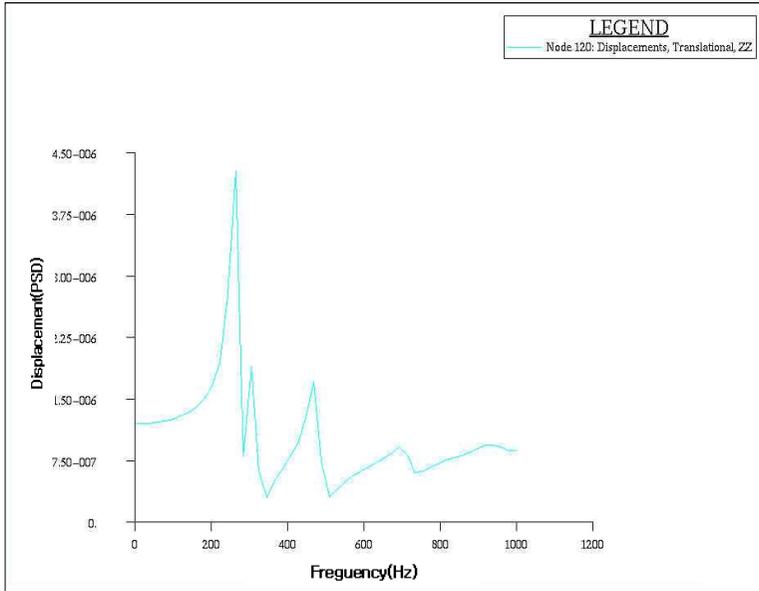
*4th mode : 372 Hz*

Fig. 2-31 Mode Shapes of Tool Holder at Each Mode

Fig. 2-32는 시뮬레이션 결과 가장 변형율이 심한 z축에 대한 값을 나타낸 것이다. Fig. 2-32(a)는 z축에 대한 1차 모드 해석 결과를 나타낸 것이고, Fig. 2-32(b)는 변형이 가장 큰 노드점 @120 지점에 0.5 N 하중을 20~1000 Hz까지 20 Hz 간격으로 가진을 주어 z축에 대해 주파수 분석을 한 것이다. 그래프에서 나타난 것과 같이 1차 모드 고유주파수인 200 Hz에서 큰 진폭이 일어난다.



(a) 1st mode analysis



(b) Frequency analysis

Fig. 2-32 Simulation Result of 1st Mode of Z-axis and Frequency Analysis at Z-axis

#### (4) 동특성평가

본 연구에서는 앞 절에서 예견된 동적 시뮬레이션 결과를 증명하기 위해 실제 진동 실험을 수행하였다. 진동 실험은 가능한 한 절삭이 이루어지는 지점에서 공구지지대의 동적해석을 수행하기 위해 공구 생크부를 16 mm 정도를 깎아내고 가속도계를 공구지지대에 부착하였다. 그리고 공구 지지대를 실제 절삭할 때와 동일한 방법으로 다이아몬드 터닝머시인의 슬라이드에 고정시켰다. Fig. 2-33은 앞에서 제시한 실험 방법에 따라 진동 실험을 한 결과이다. Fig. 2-33에 나타난 바와 같이 임팩트 해머로 몇 차례 가진 한 결과 신호가 급격히 튀는 곳은 545 Hz 이었으며, 이는 공구지지대의 고유진동수임을 알 수 있다. 앞 절에서 수행한 시뮬레이션 결과에서 예측된 200 Hz에서 공진으로 고려할 만한 피크값이 관찰되지 않았다. 이는 다이아몬드 터닝머시인에 부착된 공구지지대의 강성이 아주 높음을 의미한다.

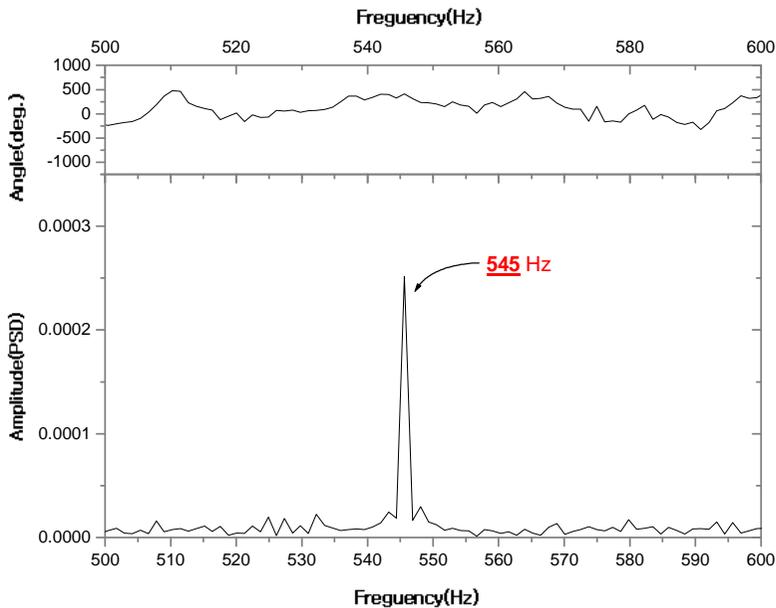


Fig. 2-33 Frequency Spectrum for Tool Holder on DTM in the Z-direction

### 제 3 절. 다이아몬드 터닝 미세절삭력 측정

앞 절에서 공구지지대를 설계, 제작하고 초기 실험을 수행하였다. 본 절에서는 제작되어진 공구지지대를 이용하여 Al 6061-T651 가공물을 가공함으로써 다이아몬드 터닝시 발생하는 미세 절삭력을 측정하였다. 이러한 절삭력 측정 실험을 통해 절삭 매개변수와 터닝공정의 관계를 고찰하였다.

#### 1. 실험방법 및 조건

압전소자 힘 센서의 출력값은 힘에 비례한다. 센서로부터 나오는 신호는 증폭기에 의해 증폭되고 전압으로 변환된다. 그리고 나서 로우패스 필터를 거쳐 출력장치에 의해 얻어낼 수 있다. Fig. 2-34는 절삭력 측정을 위한 실험 장치 구성도를 나타낸 것이다.

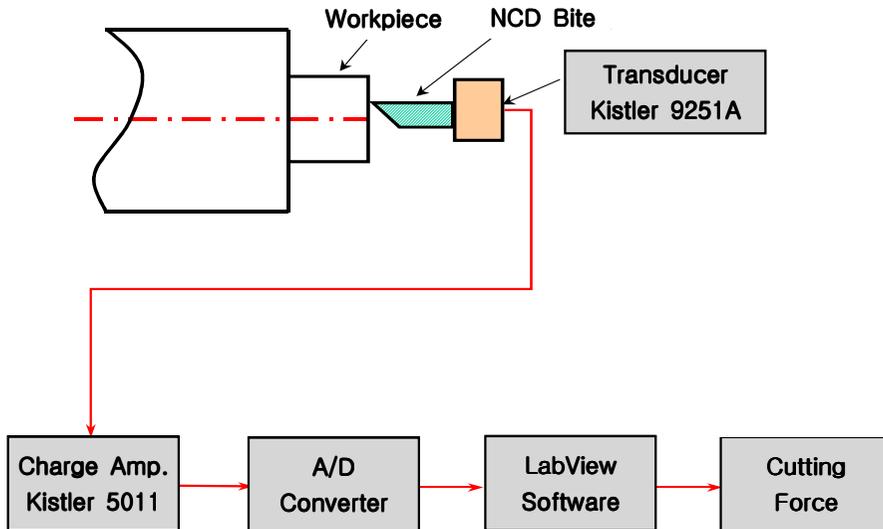


Fig. 2-34 Experimental Set up for Measuring Cutting Force

Fig. 2-34에서 나타난 바와 같이 절삭력 측정을 위한 공구지지대는 압전 힘 센서 (Kistler 9251A)를 내재한 공구지지대, 전류증폭기(Kistler 5011), 그리고 연결 케이블(Kistler 1687B5)로 구성되어있다. 공구가 공작물을 절삭할 때 발생하는 압력은 공구 홀더에 작용한다. 공구지지대에 내재된 압전 힘 센서는 팽창될 것이고, 발생한 전류는 증폭기를 통해 증폭된다. 본질적으로 증폭기로부터 구해지는 전압값은 증폭기에서 셋팅된 변수들에 의해 특정한 절삭력 값을 나타낸다. 출력장치는 Analog Signal Conditioning Module (NI 5B41)과 16채널 A/D 인터페이스 보드로 구성되어 있다. A/D 보드에서 아날로그 신호는 LabVIEW 프로그램이 데이터를 읽고 받아들일 수 있도록 하기 위해 디지털 신호로 변환된다. 그리고 나서 전압은 3축 성분에 대한 힘으로 전환된다. 또한 얻어진 데이터는 분석 프로그램인 오리진 (Origin) 프로그램을 이용하여 절삭력 값을 나타내었다. Fig. 2-35는 미세절삭력 측정을 위한 공구지지대를 나타낸다.

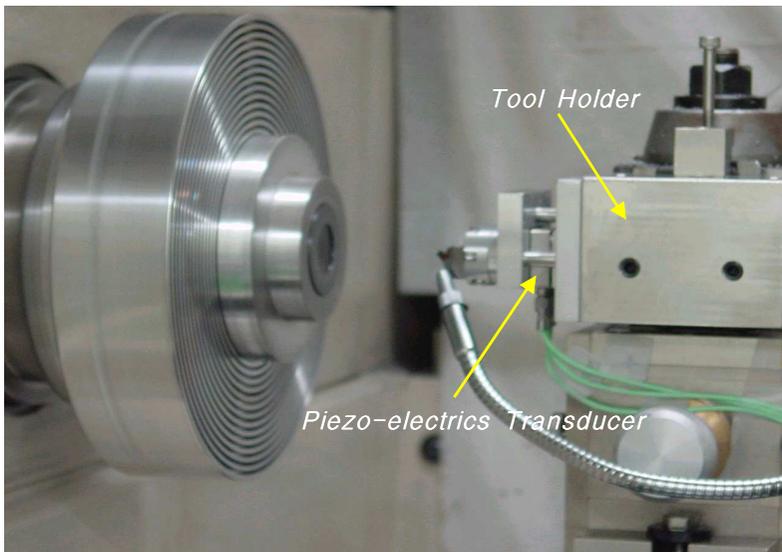


Fig. 2-35 Tool Holder for Measuring Cutting Force

Fig. 2-36은 앞 절에서 제시한 절삭력 측정 실험으로부터 절삭력 데이터를 얻기 위한 공정을 나타낸 것이다.

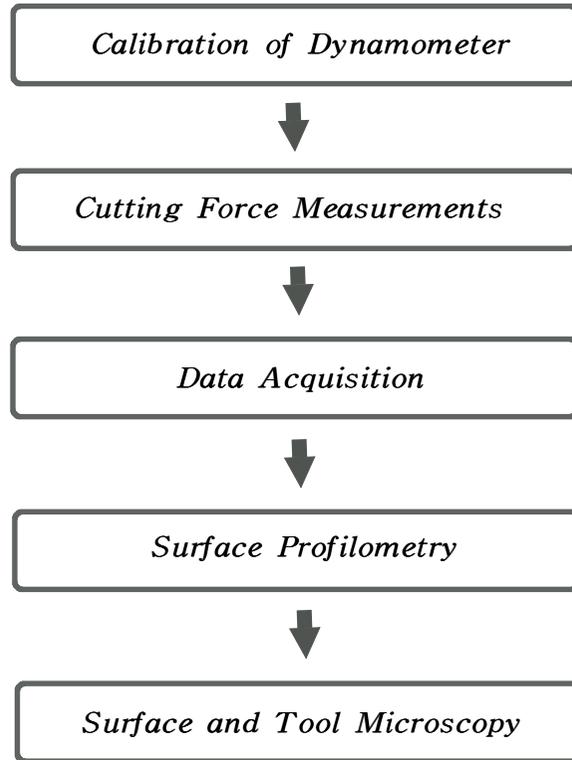


Fig. 2-36 Procedure for Acquiring Cutting Force Data

Fig. 2-36에 나타낸 내용을 간략하게 정리하면 다음과 같다.

1. Calibration of Dynamometer/Amplifier : 비록 트랜스듀서가 자체 보정이 되어 있지만 입력값 절삭력에 대한 출력값 전하량의 비가 예압의 변화와 구조물에 대한 조건으로 인해 변화하기 때문에 자체 보정이 필요하다.

2. Cutting Force Measurement : 다이아몬드 터닝머시인에 내재되어 있는 가공 소프트웨어를 이용하여 프로그램 작성시 다른 매개변수들을 일정하게 유지한 채 관심있는 특정한 조건을 변화시키는 방법으로 다양한 절삭실험을 수행한다.
3. Data Acquisition : 절삭력 데이터는 로우패스필터를 거쳐 오실로스코프에 저장된다. 절삭력은 직접적으로 스크린 상에서 모니터링 되거나 또는 해석 소프트웨어를 이용하여 절삭력을 나타낸다.
4. Surface Profilometry : 가공 후 절삭면에 대한 평가는 Zygo Co. GPI-XP 6" 표면형상측정기를 이용한다. 표면형상 결과 값은 가공면의 형상정도를 평가하는데 이용된다.
5. Surface and Tool Microscope : 절삭영역에 대한 측정은 이송속도를 검증하거나 공구의 상태나 절삭력으로 인한 표면 특성평가를 하는데 이용된다. 사용되어진 공구에 대한 마모나 절삭력의 영향으로 인한 균열 등은 Zygo Co. NewView 5000 표면조도 측정기를 이용하여 측정한다.

다이아몬드 터닝시 절삭깊이와 이송속도의 영향을 고찰하기 위해 Al 6061-T651과 무산소동을 이용하여 미세절삭력 측정실험을 수행하였으며, 초정밀가공에서의 이송속도를 각각 1.5  $\mu\text{m}/\text{rev}$ , 3  $\mu\text{m}/\text{rev}$ , 6  $\mu\text{m}/\text{rev}$ , 12  $\mu\text{m}/\text{rev}$ 로 일정하게 유지하고 절삭 깊이를 2~10  $\mu\text{m}$ 까지 변화시키면서 절삭력을 측정하였다. 다이아몬드 터닝가공을 위한 공구는 공구 반경이 0.5 mm, 1.0 mm, 1.5 mm 인 단결정 천연 다이아몬드 공구를 사용하였다. 스피들 속도는 1600 rpm으로 일정하게 하였다. Table 2-11은 위에서 제시한 절삭조건을 나타낸 것이다.

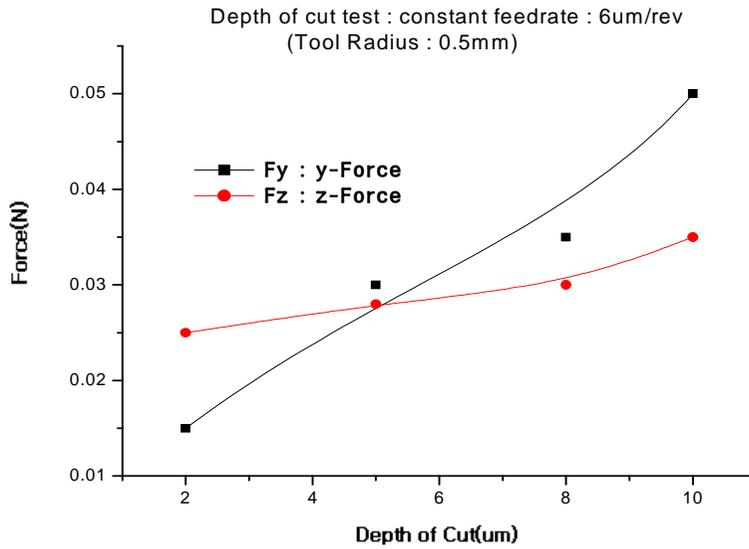
Table 2-11 Basic Set of Cutting Conditions

<i>Material</i>	<i>6061-T651 Aluminum, Copper</i>
Spindle speed	1600 rpm
Cutting depth	2, 5, 8, 10 $\mu\text{m}$
Feedrate	1.5, 3, 6, 12 $\mu\text{m}/\text{rev}$
NCD bite tool radius	0.5 mm, 1.0 mm, 1.5 mm
Radius of workpiece	20 mm

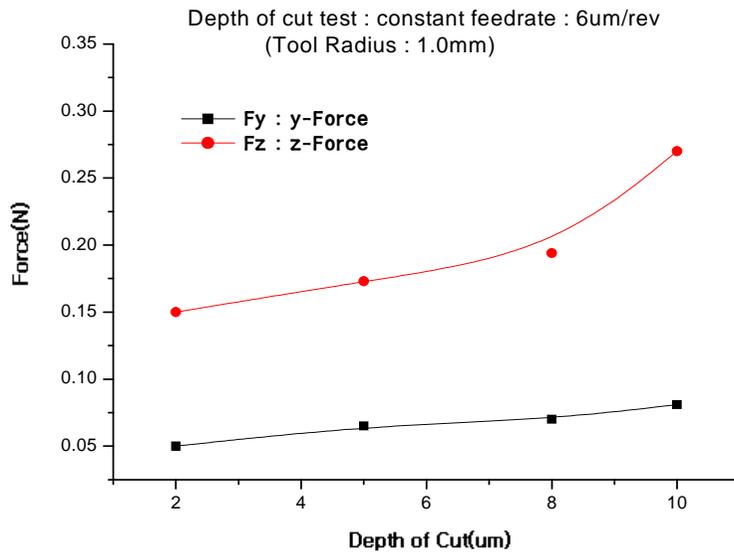
## 2. 실험결과 및 고찰

### 가. 절삭깊이 변화에 따른 영향

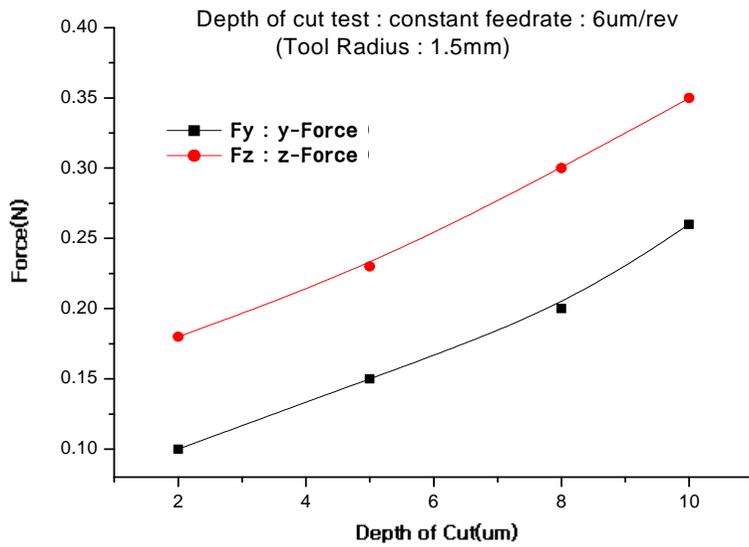
본 연구에서는 절삭깊이에 대한 영향을 고찰하기 위해 스피들속도와 이송속도를 일정하게 유지하고, 절삭깊이를 변화시키면서 절삭 가공을 수행하였다. 스피들속도는 1600 rpm, 이송속도는 6  $\mu\text{m}/\text{rev}$ 로 일정하게 유지하였으며, 절삭깊이는 2~10  $\mu\text{m}$ 으로 변화시키면서 실험하였다. 또한 다이아몬드 공구에 따른 영향을 보기 위해 공구 반경이 각각 0.5 mm, 1.0 mm, 1.5 mm인 천연다이아몬드 공구를 사용하였다. Fig. 2-37은 절삭깊이 변화에 따른 주분력과 배분력의 측정결과를 나타낸 것이다. Fig. 2-39(a)~Fig. 2-39(c)는 동일한 조건에서 공구반경이 0.5 mm, 1.0 mm, 1.5 mm인 각각의 천연다이아몬드 공구를 사용하여 실험하여 얻어진 결과값이다.



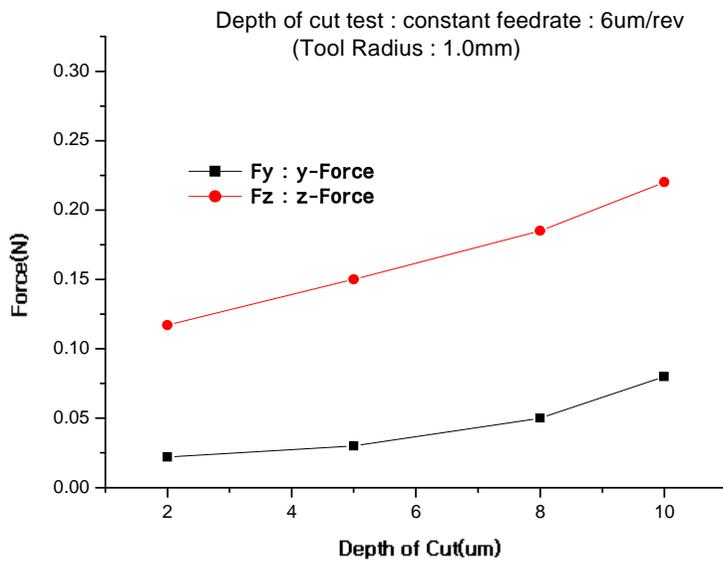
(a) Tool Radius = 0.5 mm, Aluminum



(b) Tool Radius = 1.0 mm, Aluminum



(c) Tool Radius = 1.5 mm, Aluminum



(d) Tool Radius = 1.0 mm, Copper

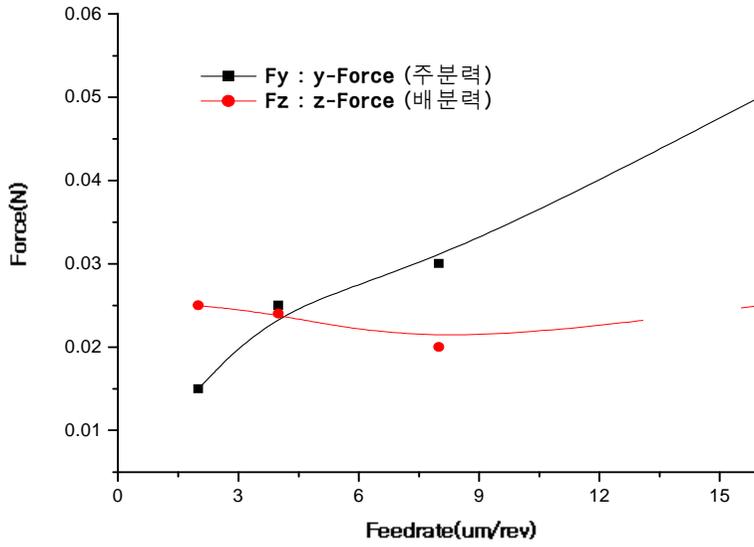
Fig. 2-37 Experimental Data of Cutting Forces according to Depth of Cut

Fig. 2-37(a)은 반경(R)이 0.5 mm인 공구에 대한 절삭 깊이의 함수로서 측정된 주분력과 배분력 값을 나타낸 것이다. Fig. 2-37에서 나타낸 바와 같이 모든 절삭 깊이에 대해 측정된 값은 절삭 깊이가 낮은 경우는 두 절삭력중 배분력 방향에 대한 절삭력이 주분력에 대한 절삭력보다 크게 나타났으며, 절삭 깊이가 깊어질수록 주분력 방향의 절삭력이 크게 나타났다.

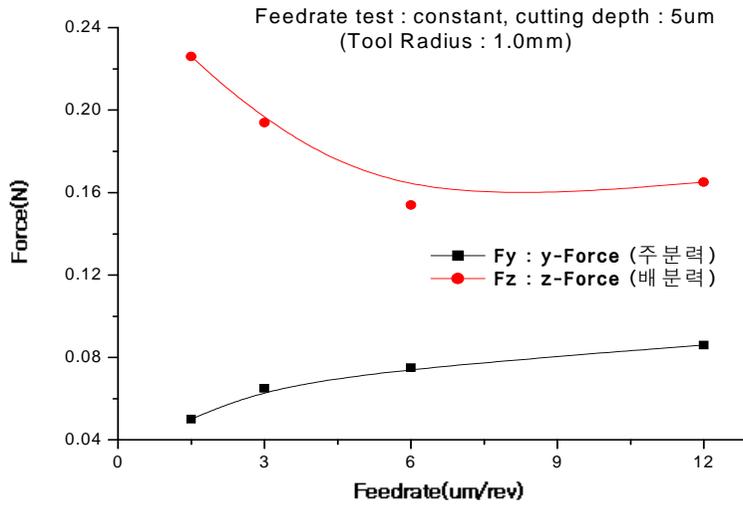
또한 알루미늄은 다이아몬드 공구의 인선 반경이 커질수록 공구에 작용하는 미세절삭력은 증가하였으며, 배분력이 주분력보다 미세절삭력이 커지게 됨을 알 수 있다. Fig. 2-37(d)에 나타낸 바와 같이 무산소동에서도 주분력보다는 배분력이 크게 나타났으며, 또한 절삭 깊이가 증가할수록 선형적으로 절삭력이 증가함을 알 수 있다.

#### 나. 이송속도 변화에 따른 영향

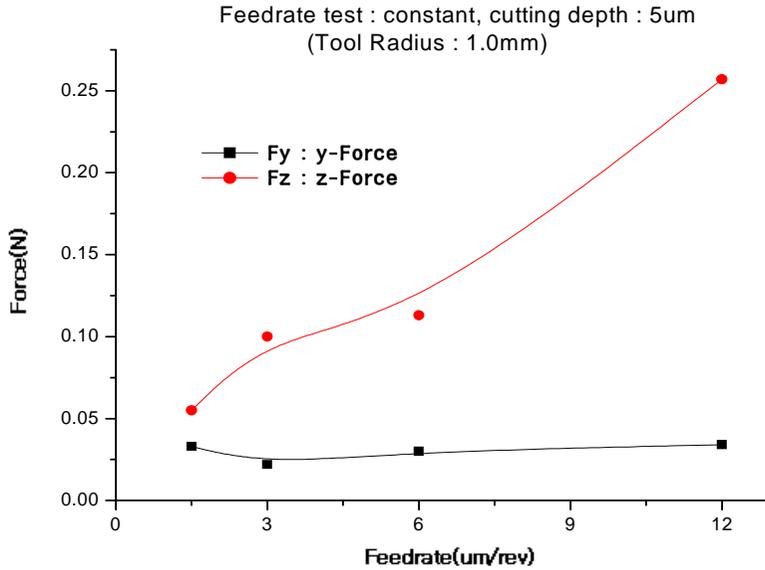
두 번째 실험으로 이송속도에 대한 영향을 조사하였다. 이송속도는 1.5, 3, 6, 12 $\mu$ m/rev까지 고려하였으며, 절삭깊이는 5  $\mu$ m, 주축회전수는 1600 rpm으로 일정하게 유지하여 절삭실험을 수행하였다. 이송속도 변화에 대한 절삭력 실험값은 Fig. 2-38에 나타내었다.



(a) Tool Radius = 0.5 mm, Aluminum



(b) Tool Radius = 1.0 mm, Aluminum



(c) Tool Radius = 1.0 mm, Copper

Fig. 2-38 Experimental Data of Cutting Forces according to Feedrate

Fig. 2-38에 나타난 바와 같이 이송속도가 증가함에 따라 y축 절삭방향인 주분력은 매우 선형적으로 증가됨을 알 수 있다. z축 방향인 배분력은 이송속도가 초기에 약 10  $\mu\text{m}/\text{rev}$  까지는 절삭력이 감소하고, 그 이후로 완만하게 증가하는 경향이 나타났다. Fig. 2-38에 나타난 바와 같이 알루미늄에서는 이송속도가 다이아몬드 터닝시 미치는 영향은 이송속도가 증가할수록 주분력은 선형적으로 증가했지만 공구 인선 반경에 따른 변화는 거의 없었고, 배분력은 8  $\mu\text{m}/\text{rev}$  까지 감소 후 증가하였고 공구 인선 반경이 증가함에 따라 주분력에 비해 크게 증가하였다. 무산소동에서는 주분력보다 배분력이 선형적인 증가가 나타났으며, 주분력은 이송속도의 증가에 일정하게 유지하였다. Fig. 2-39와 Fig. 2-40은 Al 6061-T651 합금에 대해 공구반경 R이 0.5 mm인 천연 다이아몬드 공구를 사용하여 절삭 실험을 수행 한 결과 절삭 깊이와 이

송속도에 대한 영향을 나타낸 것이다. Fig. 2-39는 절삭깊이와 이송속도에 대한 y축 방향에 대한 절삭력 값을 나타낸 것으로 그림에 나타난 바와 같이 절삭깊이가 커짐에 따라 절삭력이 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 또한 이송속도에 대해서는 1.5  $\mu\text{m}/\text{rev}$ 을 제외한 이송속도 3  $\mu\text{m}/\text{rev}$ , 6  $\mu\text{m}/\text{rev}$ , 그리고 12  $\mu\text{m}/\text{rev}$ 은 이송속도가 증가할수록 절삭력도 선형적으로 증가하였다. 1.5  $\mu\text{m}/\text{rev}$ 에서는 절삭깊이의 증가에 상대적으로 적게 반응하였다. Fig. 2-40은 절삭깊이와 이송속도에 대한 z축 방향에 대한 절삭력 값을 나타낸 것으로 z축 방향에 대한 절삭력 값은 주분력에서 나타난 결과와 같이 절삭깊이가 증가함에 따라 선형적으로 증가하였지만, 이송속도에 대한 결과는 이송속도가 증가할수록 절삭력 값은 감소하였다.

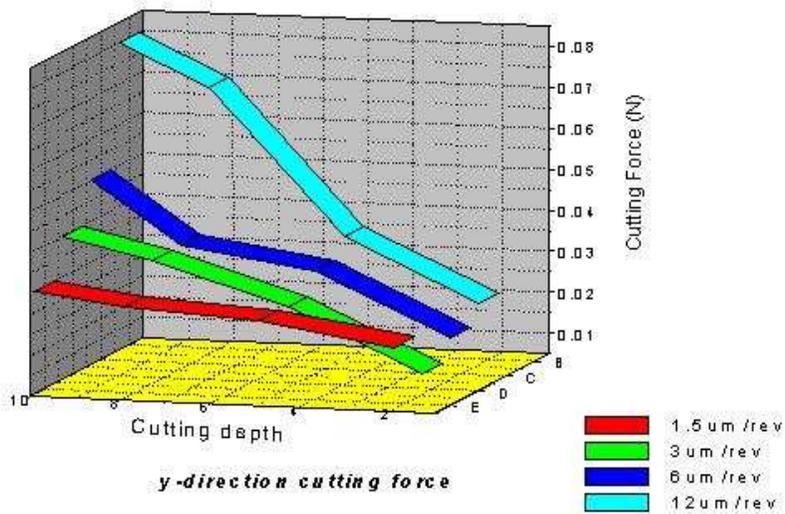


Fig. 2-39 Experimental y\_force Curves for R=0.5 Tool Showing Effect Cutting Depths and Feedrates

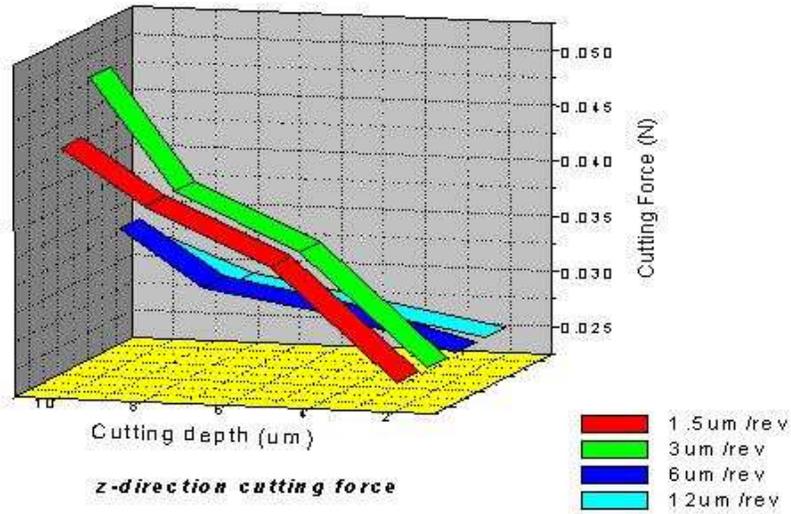


Fig. 2-40 Experimental z\_force Curves for R=0.5 Tool Showing Effect

Cutting Depths and Feedrates

다. 표면조도 측정결과

Al 6061-T6과 무산소동에 대한 좋은 표면조도를 얻기 위한 절삭조건을 구하기 위해 공구 인선 반경 R1.0 mm인 천연 다이아몬드 공구를 이용하여 실험을 수행하였다. 실험 방법은 Table 2-13과 동일하게 수행되었으며, Table 2-12는 가공 후 Zygo Co. NewView 5000을 이용하여 표면조도를 측정한 후 가장 좋은 값을 선별하여 일정하게 4부분을 측정한 후 평균값을 낸 값이다.

Table 2-12 Results of Surface Roughness according to Cutting Conditions

Al6061-T6		
Cutting condition		Surface roughness(Ra)
Feedrate : 10 mm/min	Depth of cut : 2 $\mu\text{m}$	6.430 nm
	Depth of cut : 5 $\mu\text{m}$	6.478 nm
	Depth of cut : 8 $\mu\text{m}$	6.053 nm
	Depth of cut : 10 $\mu\text{m}$	6.258 nm
Free-oxygen copper		
Feedrate : 5 mm/min	Depth of cut : 8 $\mu\text{m}$	5.613 nm
	Depth of cut : 10 $\mu\text{m}$	5.458 nm
Feedrate : 10 mm/min	Depth of cut : 1 $\mu\text{m}$	5.460 nm
	Depth of cut : 2 $\mu\text{m}$	5.413 nm

위 결과로부터 Al 6061-T651은 절삭깊이가 8~10  $\mu\text{m}$  사이에서 이송속도가 10 mm/min 인 경우, 무산소동은 절삭깊이 1~2  $\mu\text{m}$  사이에서 이송속도가 10 mm/min과 절삭깊이 8~10  $\mu\text{m}$  사이에서, 이송속도가 5 mm/min 일 경우 좋은 표면을 얻어낼 수 있었다.

## 제 3 장 열영상광학계용 광학미러 가공

### 제 1 절. 열영상광학계

다이아몬드 터닝 기술은 광응용부품의 다양한 분야에 응용되고 있는데, 특히 군수분야 열영상장비의 광응용부품 가공에 널리 이용되고 있다. 열영상장비는 외부로부터 빛의 공급이 전혀 없는 야간에도 표적 자체가 발하는 빛을 보아 눈으로 볼 수 있는 영상으로 변환시켜주는 장치로서 빛의 유무나 반사되는 빛의 세기 차이가 아닌 물체의 단위면적 및 시간당 방출되는 복사에너지의 차이를 영상화하므로 건물의 열손실 탐지, 탱크 내부의 저장량 측정, 전송선로의 감시 및 침입자 탐지 등에 많이 이용되고 있다. 최근에는 인쇄회로 기판의 검사와 분석, 위성에 의한 기상 관측, 의료기기 등에 적용되고 있으며 점차 그 응용범위가 확대되고 있다.

기존의 비구면 제작 방법은 구면 연마 후 열과 압력을 주어 변형하거나 물질을 증착 시키는 방법 또는 비구면을 직접 연마하는 등의 방법이 있지만 본 논문에서는 열영상 광학부품 가공에 매우 적합한 방법으로 알려진 다이아몬드 터닝 기술을 이용하여 AI 평면 반사경과 게르마늄 비구면 렌즈를 제작함으로써 생산비용의 절감과 가공부분의 정밀도를 향상시켰다. 또한 AI 평면 반사경과 게르마늄 비구면 렌즈 형상을 평가하기 위해 간섭계를 이용한 비접촉식 방법과 프로파일링 시스템을 이용한 접촉식 방법인 기상계측 방법으로 형상오차 및 표면조도를 측정하였다.

## 1. 적외선 광학소자

열영상장비의 적외선 광학계는 파장 대역이 적외선 영역이므로 일반적으로 가시광에서 많이 쓰는 유리는 사용할 수 없고 중적외선과 원적외선에서 효과적으로 사용할 수 있는 소자에는 한계가 있다. 열영상장비의 광학 소자의 이상적인 재질의 특징은 먼저 굴절률이 크면 클수록 같은 굴절능을 갖기 위한 렌즈면의 곡률 반경이 커도 되므로 수차가 적어진다. 다음으로 넓은 범위의 사용온도 조건에서 사용하려면 온도에 따른 굴절율의 변화 즉, 열분산이 작아야 온도에 따른 수차의 불균형 및 초점거리 변화가 적어 광학계 성능에 영향을 미치지 않는다. 또한 사용하는 파장 범위가 넓으므로 색수차 보정을 위해서는 분산이 적을수록 좋으며, 그 파장대역에서의 흡수 또한 적어야 한다. 그 밖에도 굽힘이나 마모에 견디기 위해서는 표면의 경도가 높아야 하며, 기계적인 강도가 클수록 진동 충격에 견디면서도 렌즈를 얇게 만들 수 있다. 적외선 광학계 설계 및 제작 기술분야에서 선진국은 각종 열영상장비용 적외선 광학계의 설계 경험은 물론, 지속적으로 광학소자 재질의 성장, 부품 가공, 광학부품의 고투과 저반사 코팅과 초경화 표면처리 기술, 비열화 보상기술들을 연구하고 있다. 아울러 적외선 줌 광학계 연구가 꾸준히 진행되어 부분적으로 실용화되고 있으면 특히 1990년대에 들어서는 비구면광학계 및 회절광학 소자의 이용이 일반화되면서 이들의 적외선 줌 광학계에 이용하고자 하는 노력이 활발히 진행되고 있다.

## 2. 열 영상광학계

열영상장비는 외부로부터 빛의 공급이 전혀 없는 야간에도 표적 자체가 발하는 에너지를 모아 눈으로 볼 수 있는 영상으로 변환시켜 주는 장비로서 빛의 유무나 반사되는 빛의 세기 차이가 아닌 물체의 단위면적 및 시간당 방출되는 복사에너지의 차이를 영상화하므로 건물의 열손실 탐지, 탱크내부의 저장량 측정, 전송선로의 감시 및 침입자 탐지등에 많이 이용되고 있다. 최근에는 인쇄회로기판의 검사와 분석, 위성에 의한 기상관측, 의료기기등에도 적용되고 있으며 점차 그 응용범위가 확대되고 있다. 열상장비의 세부적인 구성은 시스템마다 다르고 주사방식 및 영상 재현장치에 따라 다르지만 기본적인 구성도는 Fig. 3-1과 같다.

일반적으로 열영상장비는  $8\ \mu\text{m} \sim 12\ \mu\text{m}$ 의 원적외선 파장대역을 이용하여 전방관측이 이루어짐에 따라 적외선 광을 모아주는 역할을 하는 렌즈는 Ge, Si 등이 사용되고, 집속된 광을 스캐닝하는 미러는 장비 내구성을 고려하여 Al 반사경이 주로 사용된다.

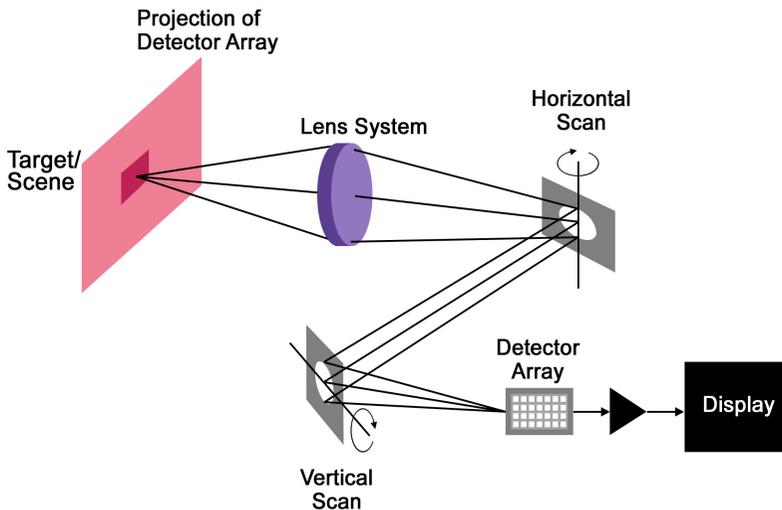


Fig. 3-1 Scanning Type-Serial Scanning

## 제 2 절. 열영상광학계 광학미러 가공

### 1. 가공방법 및 조건

본 연구에서는 열영상광학계에 적용되는 광학미러 제작을 위해 평면 반사경의 경우는 광학기기 등에 광범위하게 사용되는 Al 6061 중 T651 열처리 공정을 통과한 Al 6061-T651을 적용했다. 비구면 렌즈의 경우는 단결정 게르마늄을 사용하여 다이아몬드 터닝가공을 수행하였다.

Fig. 3-2는 열영상광학계용 Al 반사경 및 Ge 비구면렌즈를 제작하기 위한 다이아몬드 터닝가공 공정을 나타낸다. 그림에 나타낸 바와 같이 다이아몬드 터닝가공 공정은 공구의 위치결정과 공구인선의 형상 보정을 통해 가공물의 원하는 형상정도를 얻을 수 있다. 공구인선의 형상이 완벽한 곡률반경을 갖지 않았을 경우에는 가공 접촉점이 일치하지 않아 실제 가공면은 가공형상오차가 발생한다. 공구위치결정 오차가 발생한 경우에는 이상적인 공구경로를 지나지 않고 오차발생량 만큼의 궤적을 그리게 된다. 따라서 공구의 위치결정과 공구인선의 형상 보정 단계는 만족하는 형상정도를 얻을 때까지 계속 진행된다.

Fig. 3-3은 다이아몬드 터닝공정 단계를 통한 실제 가공모습을 나타낸 것이다. Fig. 3-3에서 (2)는 공구의 위치결정단계이고 (6)은 다이아몬드 터닝 가공단계, 그리고 (7)은 가상계측기를 통한 형상정도를 평가하는 모습이다. 원하는 형상정도는 (6)과 (7)의 반복과정을 통해 얻어질 수 있다.

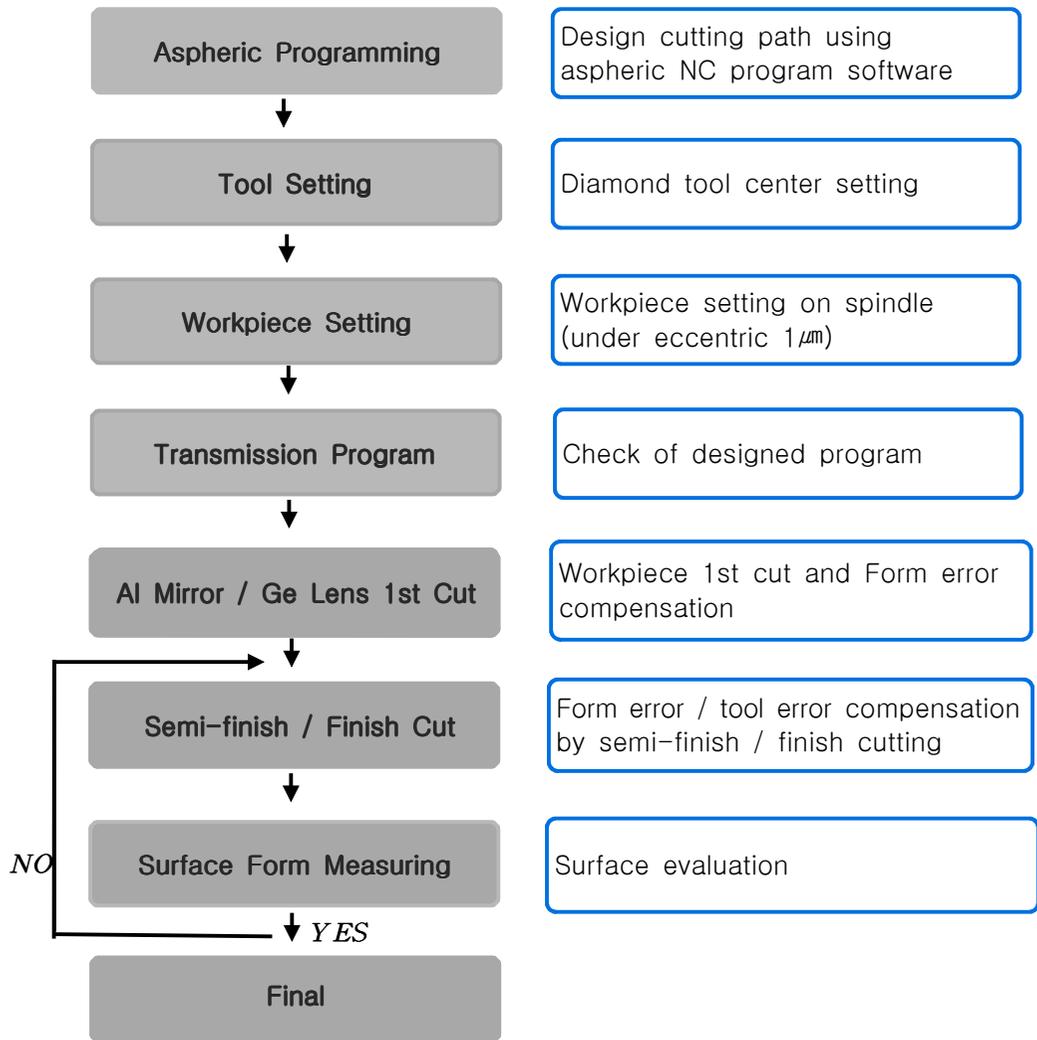


Fig. 3-2 General Diamond Turning Process

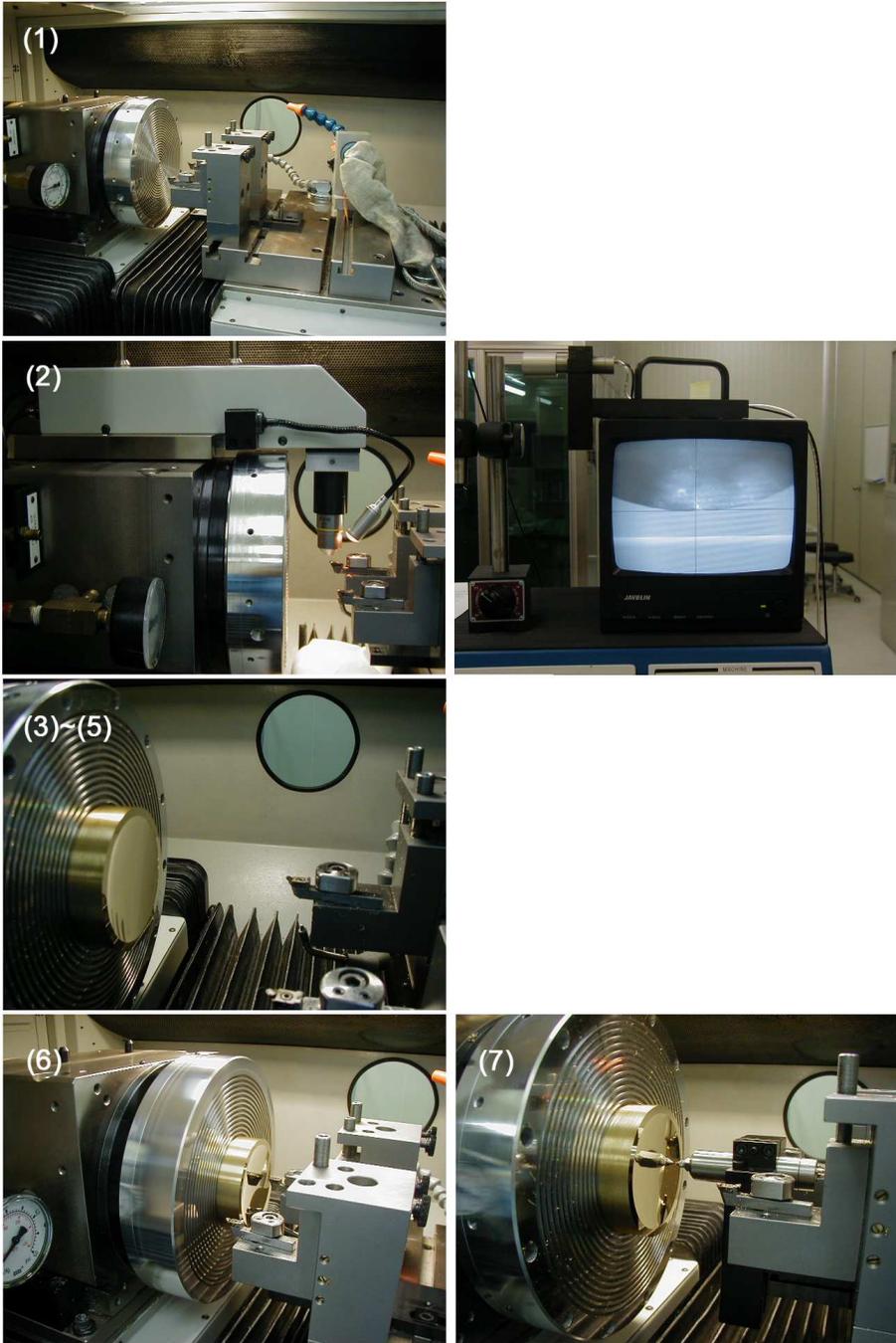
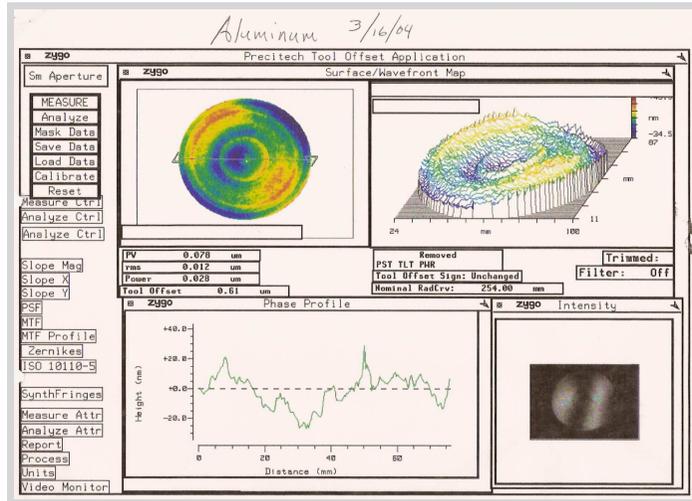
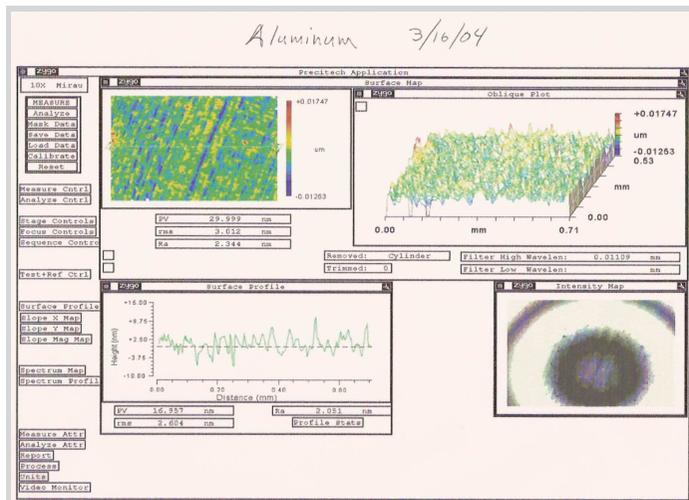


Fig. 3-3 Procedure of Diamond Turning Machining

Fig. 3-4와 Fig. 3-5는 본 연구에서 제작하고자 하는 Al 평면반사경과 Ge 비구면렌즈에 대한 다이아몬드 터닝가공의 세계적 수준을 나타낸 것이다. Fig. 3-4에 나타낸 결과 값은 미국 Precitech Inc.에서 제작된 것으로 직경이 약  $\phi 70$  mm인 평면 반사경의 형상정도와 표면조도를 나타낸다.



(a) Surface Form Accuracy of Al Flat Mirror



(b) Surface Roughness of Al Flat Mirror

Fig. 3-4 Results of Al Flat Mirror by Precitech Inc. USA

Fig. 3-4에서 알 수 있듯이  $\phi 70$  mm인 Al 평면 반사경에 대한 세계적 수준의 형상정도는  $0.078 \mu\text{m}$  정도의 형상을 갖는다. 그리고 표면 조도 Ra 값은  $2.34 \text{ nm}$  정도 값을 갖는다.

Fig. 3-5에 나타낸 결과 값은 본 연구에서 제작하고자 하는 동일한 Ge 비구면렌즈를 영국 전문제조업체인 P\*\*\*\*에서 제작한 결과 값이다.

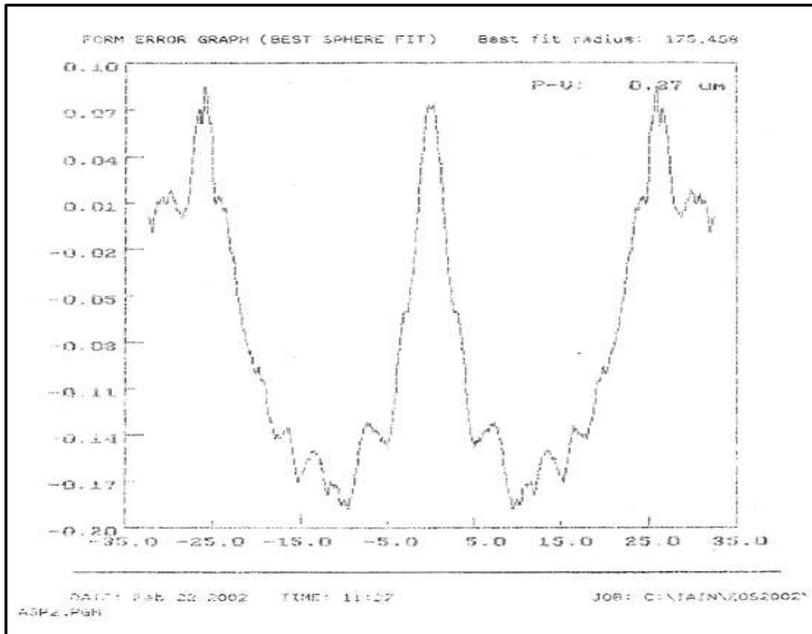


Fig. 3-5. Results of Ge Aspheric Lens by P\*\*\*\*, U.K.

Fig. 3-5에 나타난 바와 같이 측정결과 P-V값은  $0.27 \mu\text{m}$ 이고 곡률반경 R값은  $175.408 \text{ mm}$  로 얻어졌다. 본 연구에서는 위에 나타낸 세계적 수준에 견줄만한 결과를 얻고자 다음과 같은 과정을 통해 Al 평면 반사경미러와 Ge 비구면렌즈를 제작하였다.

가. Al 평면 반사경 가공

본 연구에서 제작하고자 하는 열영상광학계용 Al 평면 반사경 형상 및 크기는 Fig. 3-6과 같다.

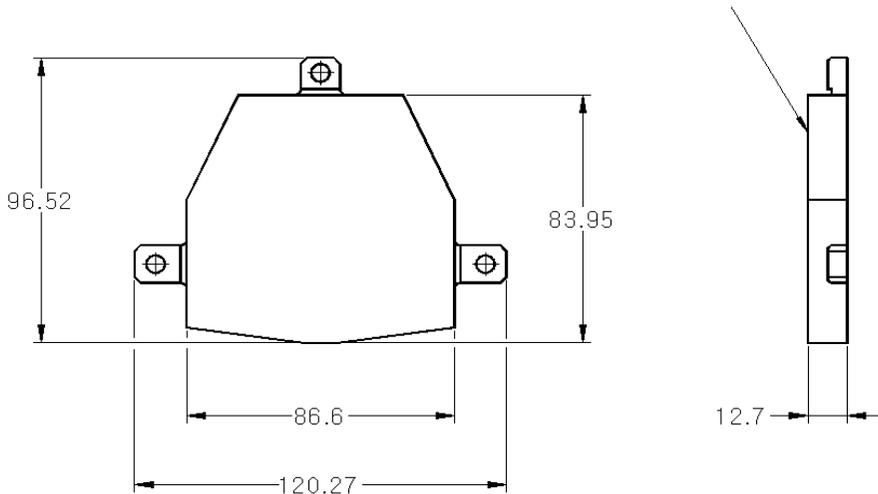


Fig. 3-6 Schematic Drawing of Al Flat Mirror

또한 본 연구에서는 다이아몬드 터닝 머시인을 이용하여 Al 평면 반사경을 제작하기 위해 Al 평면 반사경 고정용 지그를 제작하였다. 제작된 지그는 알루미늄 진공척에 고정할 수 있도록 하였고, Al 평면반사경이 지그에 잘 부착할 수 있도록 다이아몬드 터닝한 면에 부착한 후 최종적으로 볼트로 고정할 수 있도록 제작하였다. Fig. 3-7은 Al 평면 반사경 고정용 지그를 나타낸 것이다.

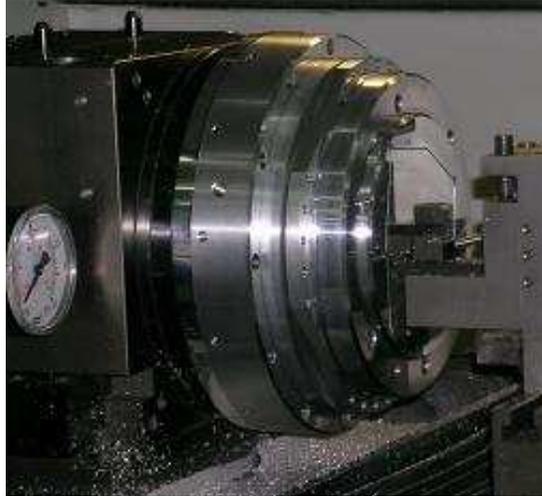


Fig. 3-7 Jig for Diamond Turning of Al Flat Mirror

보통 다이아몬드 터닝 하기 전에 전 가공과정이 있다. 초기의 1차 가공 시에는 평면 반사경의 외형을 가공하게 된다. 일반 공작기계를 사용하여 외형을 가공하게 되는데 이때 다이아몬드 터닝 여유를 0.1 mm 정도 주게 된다. 이렇게 1차 가공이 끝난 반사경은 열처리를 하게 된다. 열처리 이유는 1차 가공 중 어쩔 수 없이 생기는 반사경 내부 응력을 제거해야 하기 때문이다. 이런 내부응력은 반사경의 외형의 변형을 가져올 수 있다. 또한 열처리를 함으로써 치수정도 보증, 가공변형, 열변형 및 경년변형을 방지하게 된다. 다음이 2차 가공으로 미리 가공면 및 기준면의 최종 정삭가공 과정이다. 열처리 공정 후 가공면을 성형 연삭하게 된다. 최종적으로 다이아몬드 터닝을 진행하게 된다. 마지막으로 Zygo Co.의 표면형상측정기 (GPI-XP)와 표면조도측정기인 NewView 5000을 이용하여 형상 정도와 표면조도를 측정하게 된다. 평면 반사경의 규격 형상정도는 형상오차가 2 프린취인 1  $\lambda$ 이고 불균일도가 1 프린취인 0.5  $\lambda$ 이다. 표면조도는 Ra 25 nm 이하이다.

다이아몬드 터닝을 하기 위해서는 천연 다이아몬드 공구와 가공변수들을 정해야 한다. Table 3-1에 Al 미리의 다이아몬드 터닝가공조건을 나타내었다. 절삭 깊이와 이송속도의 조건에 따라 황삭, 중삭, 그리고 정삭 가공으로 나타내었다.

Table 3-1 Cutting Conditions of Al Flat Mirror

	<i>Rough Cutting</i>	<i>Semi-finish Cutting</i>	<i>Finish Cutting</i>
Spindle speed	1500 rpm		
Depth of cut	10 $\mu\text{m}$	5 $\mu\text{m}$	2 $\mu\text{m}$
NCD bite	Radius : 0.505 mm, Rake Angle : 0°		
Feedrate	30 mm/min	10 mm/min	5 mm/min

나. 게르마늄 비구면 렌즈 가공

게르마늄은 열영상장비에 가장 많이 사용되는 소자 중의 하나로 높은 정도의 소자를 얻기 위해서는 반드시 단결정 소자를 사용해야 한다. 제작하고자 하는 게르마늄 비구면 렌즈 형상 및 크기는 Fig. 3-8과 같다.

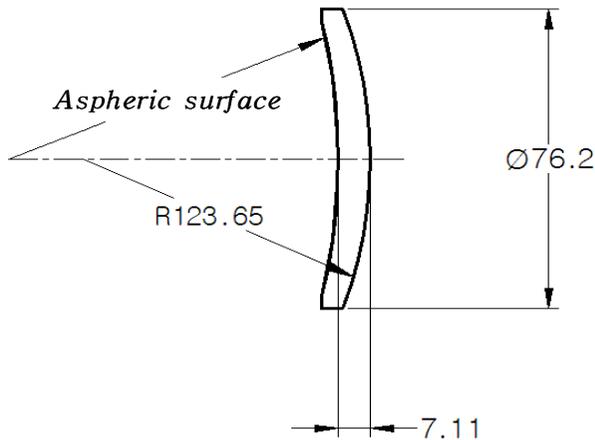


Fig. 3-8 Schematic Drawing of Ge Aspheric Lens

또한 본 연구에서는 Ge 비구면렌즈를 제작하기 위해 평면 반사경 고정용 지그를 제작하였다. 제작된 지그는 알루미늄 진공척에 고정할 수 있도록 하였고, 렌즈의 볼록면이 지그에 잘 고정되도록 곡률반경을 R 123.65 mm으로 다이아몬드 터닝을 하였다. Fig. 3-9는 본 연구에서 제작한 Ge 비구면렌즈 고정용 지그를 나타낸 것이다.

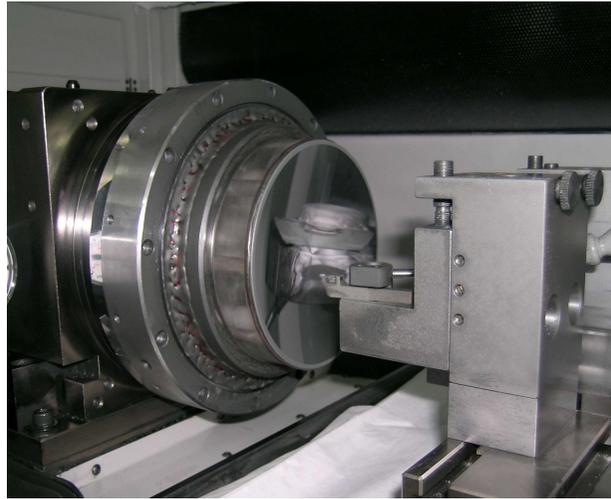


Fig. 3-9 Jig for Diamond Turning of Ge Aspheric Lens

게르마늄의 1차 가공은 구면 및 외경 가공으로 비구면 이라고 되어 있는 부분 외에 뒷면의 볼록한 면을 일반적인 광학 가공방식인 연마 가공을 통해 제작하였다. 비구면 가공부는 1차 가공을 하게 되는데 다이아몬드 터닝 여유를 0.2 mm 정도로 준다. 이런 전 과정은 다이아몬드 터닝을 해야 하는 경우는 꼭 필요한 과정이다. 게르마늄은 재질의 특성상 Al과 다르기 때문에 별다른 열처리 없이 다이아몬드 터닝을 진행하게 된다. 최종적으로 가공물을 평가하게 되는데 이 경우 게르마늄이 비구면이기 때문에 표면형상측정기, GPI-XP를 사용하여 전체적인 비구면 형상을 확인하는 것이 어렵기 때문에 UltraComp 기상계측기를 이용하여 결과물을

평가하였다.

이 비구면 게르마늄 렌즈의 요구 형상 정도는 P-V값이  $0.33 \mu\text{m}$  이하이고 표면 조도 Ra는  $0.025 \mu\text{m}$  이하 반경 R은  $175.383 \pm 0.08 \text{ mm}$ 이다. Table 3-2는 비구면 게르마늄 렌즈를 제작하기 위한 가공조건을 나타낸 것이다.

Table 3-2 Cutting Conditions of Ge Aspheric Lens

	<i>Rough Cutting</i>	<i>Semi-finish Cutting</i>	<i>Finish Cutting</i>
Tool	Radius : 0.505 mm, Rake Angle : $-25^\circ$		
Spindle Speed	2000 rpm		
Depth of Cut	20 $\mu\text{m}$	6 $\mu\text{m}$	2 $\mu\text{m}$
Feedrate	9 mm/min	9 mm/min	3 mm/min

## 2. 가공결과 및 고찰

가. Al 평면 반사경 가공결과

(1) 형상오차 측정 결과

본 연구에서는 Al 평면 반사경을 레이크 각  $0^\circ$ , 공구 반경이 0.505 mm 인 공구로 황삭, 중삭, 그리고 정삭 가공을 한 후 Zygo Co.의 GPI-XP 6" 표면형상측정기로 Al 평면 반사경 전체 표면의 형상뿐만 아니라 렌즈 내에 존재하는 결함평가를 하였다. Fig. 3-10은 다이아몬드 터닝머시인을 이용하여 Al 평면반사경을 가공하는 모습이고, Fig. 3-11은 다이아몬드 터닝가공 후의 Al 평면 반사경을 나타낸다. 간

설계로 얻은 파면의 정보는 Zygo 간섭계 상용 분석 프로그램인 MetroPro를 이용하여 분석해서 그래프와 값으로 나타내었다. 측정의 정확도를 위해 3회 정도 측정하고 그 평균값을 사용하였으며 그 결과를 Table 3-3에 나타내었다. 일반적으로 형상오차는 측정값에서 굴절능을 제거하지 않은 값이고 표면의 불균일도는 굴절능을 제거한 값을 사용하는데 Table 3-3은 3회 측정값과 평균값을 나타낸다. 측정 평균값은 형상오차가 0.835 프린쥐로 규격 2 프린쥐를 만족하고 불균일도는 0.370 프린쥐로 규격 1 프린쥐를 만족하는 결과를 구할 수 있었다. Al 평면 반사경의 형상측정 결과를 Fig. 3-12에 나타내었다. 간섭무늬 결과를 여러 가지 그래프로 나타냈는데 왼쪽 맨 위의 그래프는 측정 형상의 표면을 색으로 높낮이를 표시했고 이 1차원적인 면을 3차원의 비스듬한 표면을 오른쪽 맨 위쪽에 나타내었다. 오른쪽 그래프로 표면의 휘어진 정도와 곡률 등을 볼 수 있다. 왼쪽 그래프의 형상 표면에 선을 그으면 표면 프로빙한 것과 같은 프로파일을 볼 수 있다.

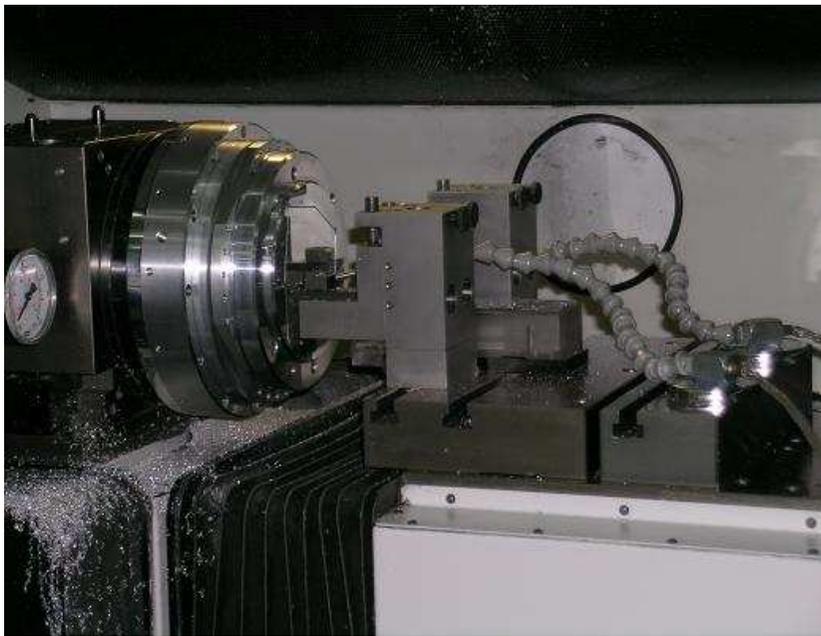


Fig. 3-10 Diamond Turning Process of Al Flat Mirror

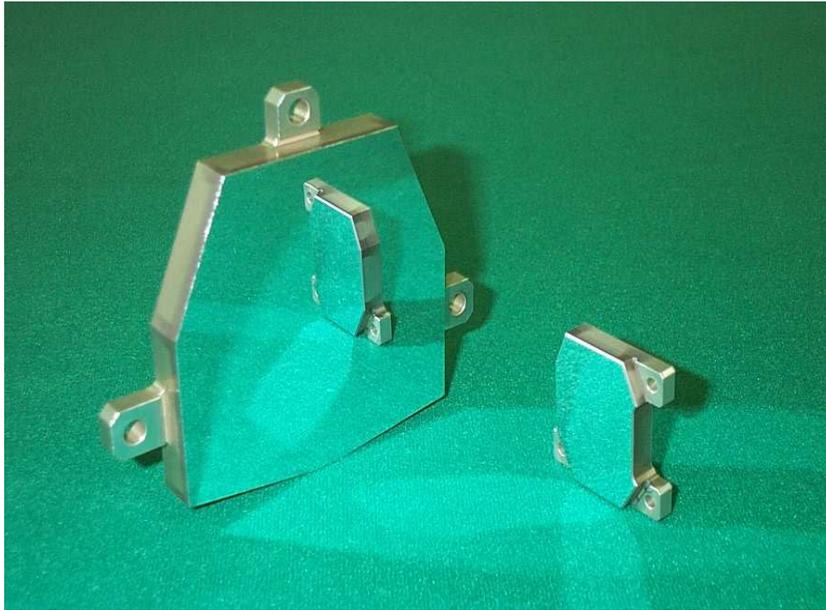


Fig. 3-11 Al Flat Mirror after Diamond Turning

Table 3-3 Measurement Data of Al Flat Mirror Form Accuracy

	<i>1 st</i>	<i>2 nd</i>	<i>3 rd</i>	<i>Average</i>
Power(fringe)	0.835	0.765	0.905	<i>0.835</i>
Irregularity(fringe)	0.382	0.326	0.401	<i>0.370</i>

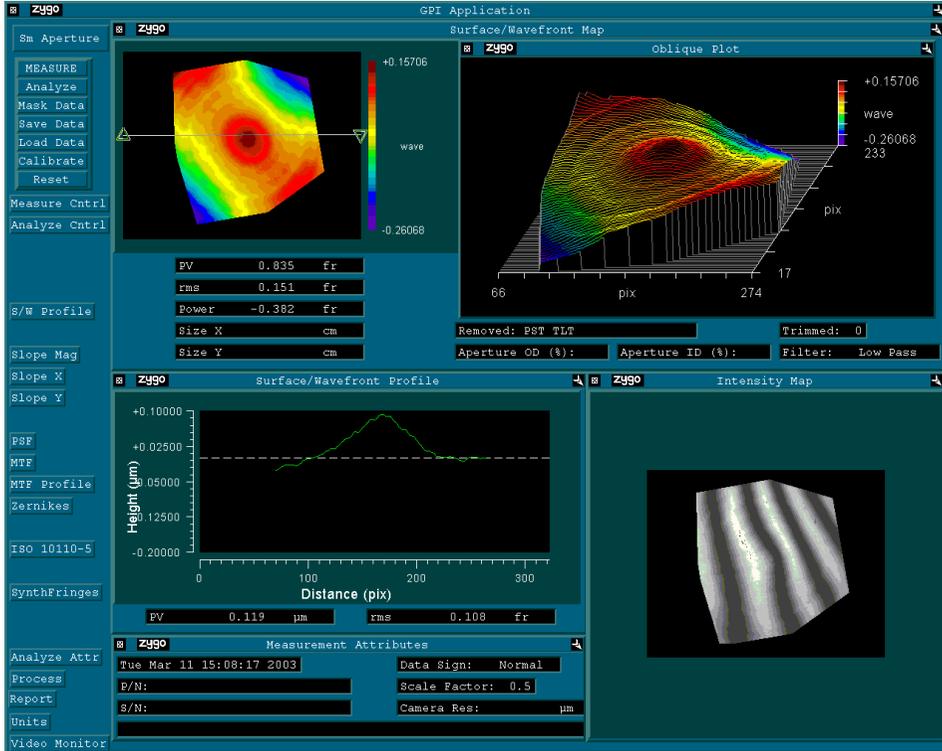


Fig. 3-12 Surface Form Accuracy of Al Flat Mirror

(2) 표면조도 측정결과

표면조도는 Zygo Co.의 NewView5000으로 측정하였다. 일반적으로 표면조도 측정은 표면 전체를 스캔하기보다는 국소적인 부분을 측정하므로 형상오차나 불균일도 보다 더 자세히 표면을 분석할 수 있는 방법이다. 본 연구에서는 공구 마크, 핑, 스크래치 등으로 인해 측정치가 크게 변할 수 있기 때문에 가공물의 다른 부위를 3회에 걸쳐 측정하였다. 다른 부위를 각 3회씩 측정한 표면조도 Ra의 측정결과는 Table 3-4와 Fig. 3-13에 나타내었다. 그림과 표에서 각각 나타난 바와 같이 표면조도 값은 요구되어진 규격 Ra 25 nm 값 이하인 3.590 nm로 만족하는 결과를 얻을 수 있었다.

Table 3-4 Measurement Data of Al Flat Mirror Roughness  $R_a$

<i>1 st</i>	<i>2 nd</i>	<i>3 rd</i>	<i>Average</i>
3.472 nm	3.558 nm	3.601 nm	3.544 nm
3.522 nm	3.423 nm	3.612 nm	3.519 nm
3.852 nm	3.753 nm	3.513 nm	3.706 nm
<b>Total Average</b>			<b>3.590 nm</b>

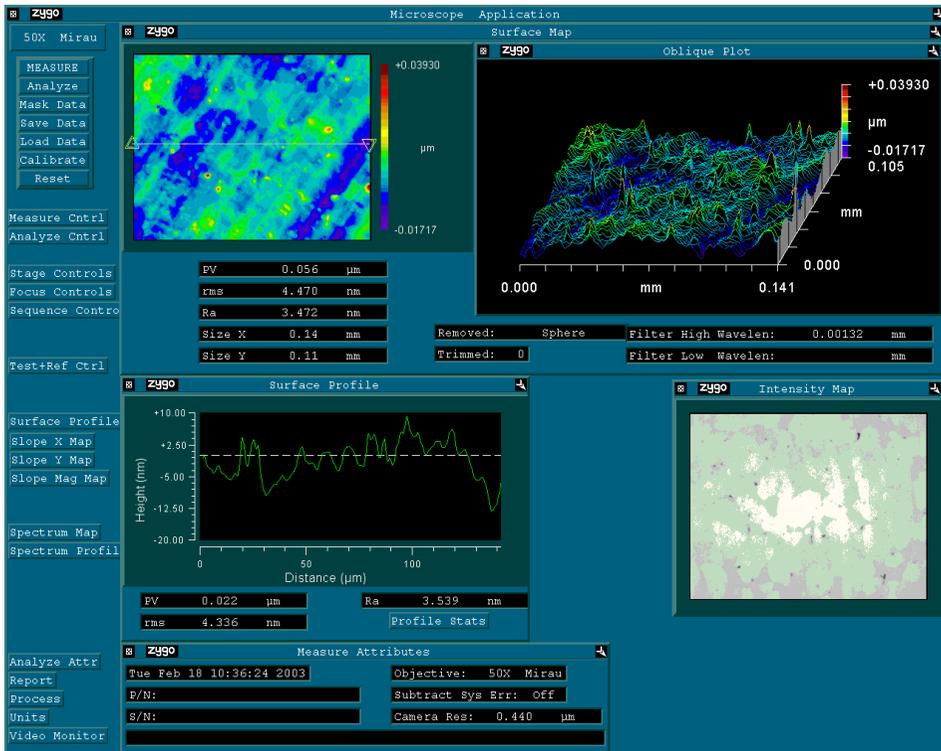


Fig. 3-13 Surface Roughness of Al Flat Mirror

Table 3-5에 본 연구에서 제작되어진 Al 평면반사경 제작 결과와 미국 Precitech Inc.에서 제작된 Al 평면반사경 결과 값을 비교하여 나타내었다. Table 3-5에 나타낸 바와 같이 본 연구에서 제작되어진 Al 평면반사경 제작 결과는 Fig. 3-4에 나타낸 미국 Precitech Inc.에서 제작된 Al 평면반사경 결과 값과 비교해 볼 때 정도 면에서 큰 차이가 없었다.

Table 3-5 Comparison Results with Precitech Inc., USA of Al Flat Mirror

	<i>Results (Polygon, Flat type)</i>	Precitech Inc. USA ( $\phi$ 70 mm circular, Flat type)
Surface Form Accuracy	<i>P-V 0.119 <math>\mu</math>m</i>	P-V 0.078 $\mu$ m
Surface Roughness	<i>Ra 3.590 nm</i>	Ra 2.34 nm

#### 나. 게르마늄 비구면렌즈

##### (1) 형상오차 측정 결과

본 연구에서 제작한 게르마늄 비구면렌즈는 비구면 렌즈이기 때문에 Zygo Co.의 GPI-XP 간섭계만으로는 형상오차를 측정 할 수 없고 부가적인 널 시스템이 필요하게 된다. 따라서 다른 부가적인 시스템 없이 비구면 렌즈를 평가할 수 있는 또 다른 방법인 기상계측기를 이용하였다. Nanoform200의 기상계측기를 이용한 계측 방법은 앞서 설명한 것처럼 직선형 가변 차동변압기 프로브를 장착하고 프로빙 프로그램에 의하여 비구면을 측정한다. 비구면렌즈 전체를 프로파일링하고 나면 얻을 수 있는 데이터가 로우데이터로서 이 값은 이상적인 비구면과 측정된 비구면 값 사이에 차이를 나타낸다. 로우데이터를 연산, 분석하여 그래프 P-V값과

반경값을 측정하였다. 본 연구에서 가공한 최종 게르마늄 비구면렌즈를 Fig. 3-14에 나타내었다. 기상계측기를 이용한 게르마늄 비구면렌즈의 형상오차 측정 로우데이터 그래프와 최종결과 그래프를 Fig. 3-15과 Fig. 3-16에 나타내었다. Fig. 3-15에 나타낸 등근 선은 이상적인 비구면의 형상이고 로우데이터는 구불구불한 기울어진 그래프이다. 여기서 X축은 렌즈를 프로빙한 위치를 중심을 기준으로 +와 -로 표시한 것이고 Y1은 이상적인 비구면 새그 값이고 Y2는 로우데이터 값이다. Fig. 3-16의 X축은 렌즈를 프로빙한 위치이고 Y1은 오차값이다. 측정결과 P-V값은  $0.24 \mu\text{m}$ 이고 반경 R값은  $175.379 \text{ mm}$ 로서 모두 요구되어진 규격을 만족하였다.

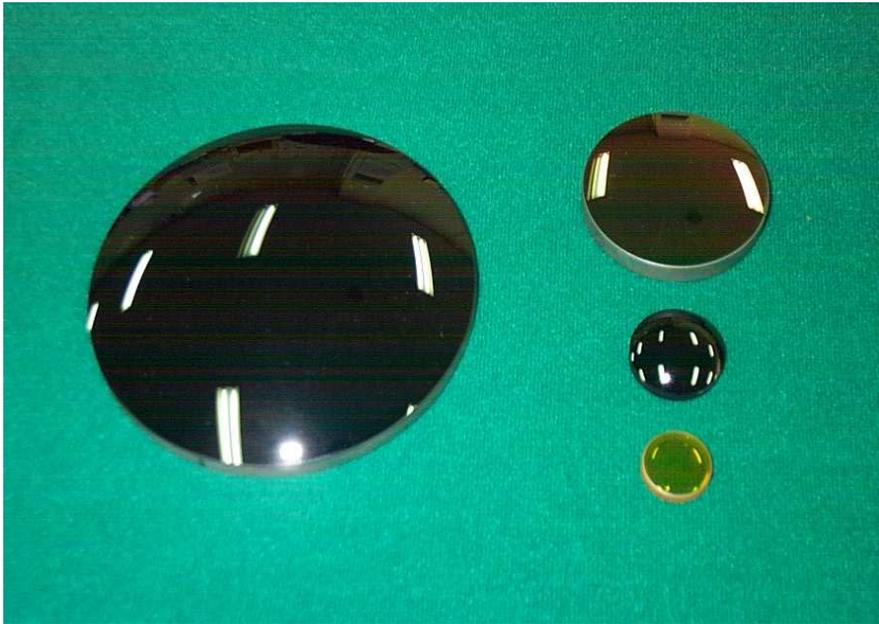


Fig. 3-14 Ge Aspheric Lens

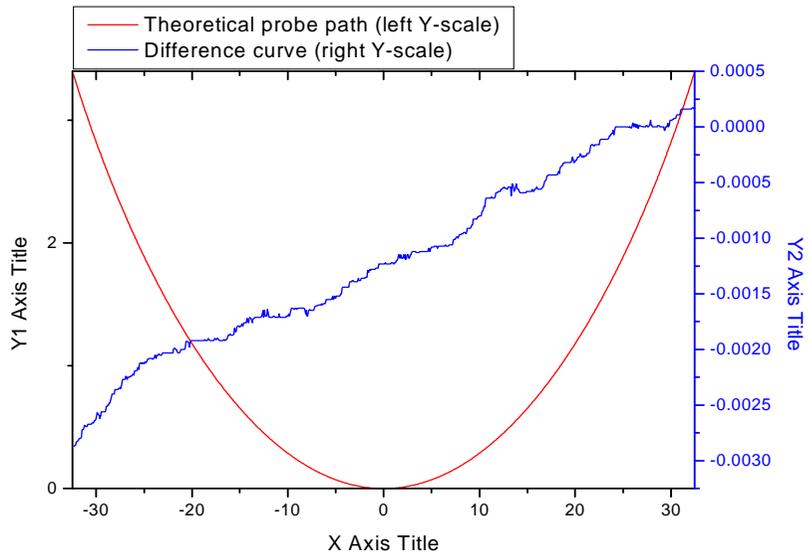


Fig. 3-15 Raw Data Graph of Ideal Aspheric Surface

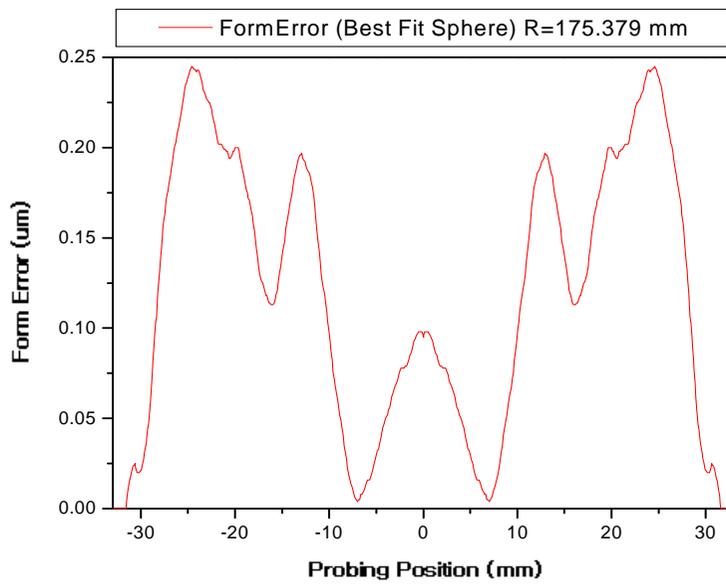


Fig. 3-16 Form Error for Probing Position

Table 3-6에 본 연구에서 제작되어진 Ge 비구면렌즈의 결과와 영국 P\*\*\*\*에서 제작된 결과 값을 비교하여 나타내었다. Table 3-6에 나타낸 바와 같이 본 연구에서 제작되어진 Ge 비구면렌즈 제작 결과는 Fig. 3-5에 나타낸 영국 P\*\*\*\*에서 제작된 결과 값과 비교해 볼 때 더 나은 형상정도를 얻어낼 수 있었다.

Table 3-6 Comparison Results at the same size with P\*\*\*\*, U.K. of Ge Aspheric Lens

	<i>Results</i> ( $\phi 76$ mm, circular type)	P****, U.K. ( $\phi 76$ mm, circular type)
Surface Form Accuracy	<i>P-V 0.24 <math>\mu</math>m</i>	P-V 0.27 $\mu$ m
Surface Radius	<i>R 175.379 / R 175.383</i>	R 175.458 / R 175.383

(2) 표면조도 측정결과

게르마늄 비구면 렌즈의 표면조도는 Zygo Co.의 NewView 5000 표면조도측정기를 이용하여 Al 평면 반사경과 동일한 방법으로 측정하였다. 다른 부위를 각 3회씩 측정한 표면조도 Ra의 측정결과는 Table 3-7과 Fig. 3-17에 각각 나타내었다. 그림과 표에서 알 수 있듯이 요구되는 표면조도 규격 Ra 0.025  $\mu$ m보다 이하 값인 0.0038  $\mu$ m으로서 만족하는 결과를 얻었다.

Table 3-7 Measurement Data of Ge Lens Roughness  $R_a$

<i>1 st</i>	<i>2 nd</i>	<i>3 rd</i>	<i>Average</i>
0.004 $\mu\text{m}$	0.004 $\mu\text{m}$	0.003 $\mu\text{m}$	0.0037 $\mu\text{m}$
0.003 $\mu\text{m}$		0.003 $\mu\text{m}$	0.0033 $\mu\text{m}$
0.005 $\mu\text{m}$		0.004 $\mu\text{m}$	0.0043 $\mu\text{m}$
<i>Total Average</i>			<i>0.0038 <math>\mu\text{m}</math></i>

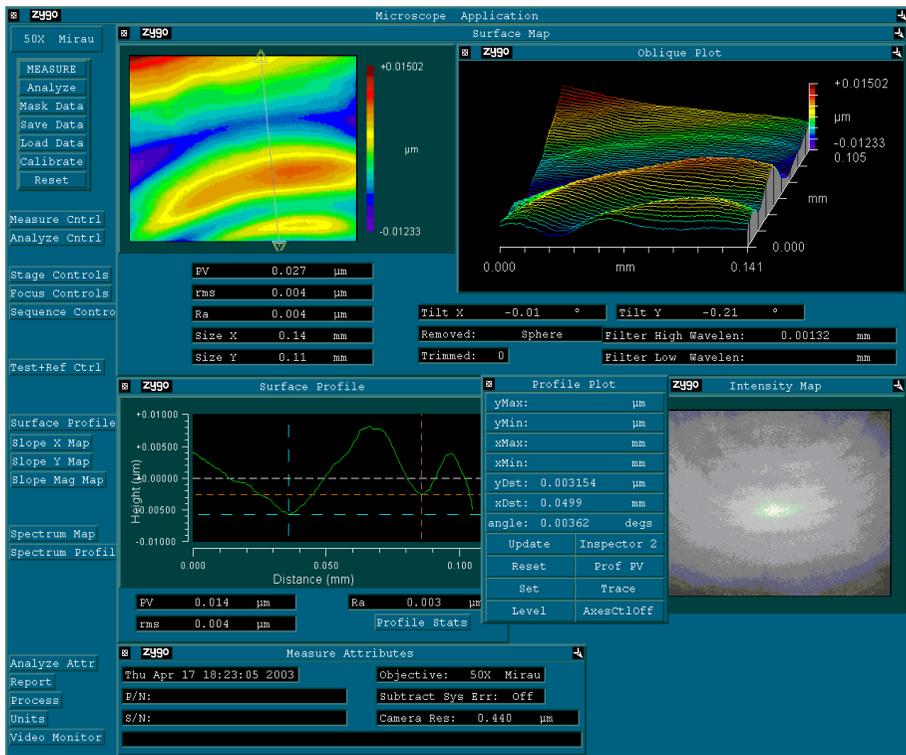


Fig. 3-17 Surface Roughness of Ge Aspheric Surface

## 제 4 장 레이저주사광학계용 *F*-*theta* 렌즈 금형코어 가공

### 제 1 절. 레이저주사광학계

레이저 주사광학계(LSU; Laser Scanning Unit)는 레이저프린트에서 화상신호를 입력으로 받아서 광전도성 드럼상에 집속된 광을 주사하는 장치로서 자동차의 엔진과 같이 레이저 프린터의 핵심부품 중의 하나이다. 일반적으로 레이저 주사광학계는 입력된 화상신호(전기적인 ON/OFF신호)를 콜리메이트된 광신호로 변환하는 LD(Laser Diode) 모듈, LD 모듈로부터 출사되는 콜리메이트 빔을 편향시키는 회전다면경(Polygon Mirror, PM), 고속 회전하는 회전다면경의 동적인 기울어짐에 의해 발생하는 주사선 휨 및 주사간격 불균일성을 보정하기 위하여 레이저 다이오드 모듈과 회전다면경 사이에 설치한 실린더 렌즈, 회전다면경으로 부터 편향된 빔을 광전도성 드럼상에 결정시키는 F-*theta*렌즈로 구성되어있다. Fig. 4-1은 레이저 주사광학계(LSU; Laser Scanning Unit)의 구성도를 나타낸다.

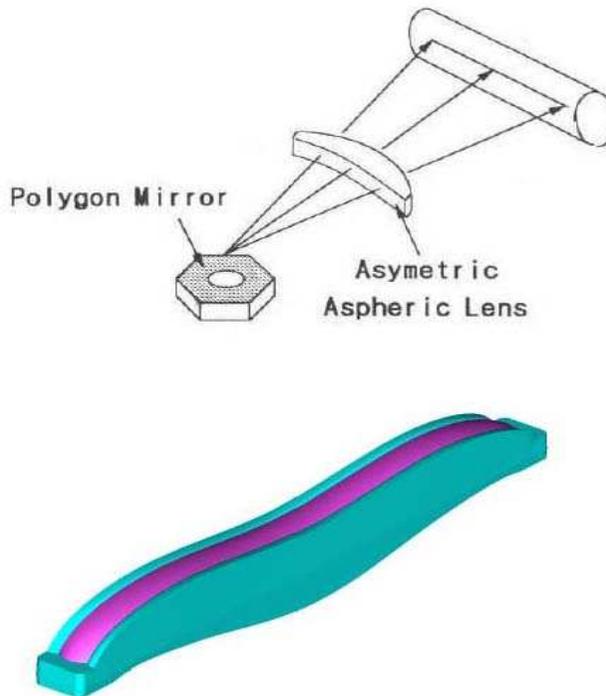
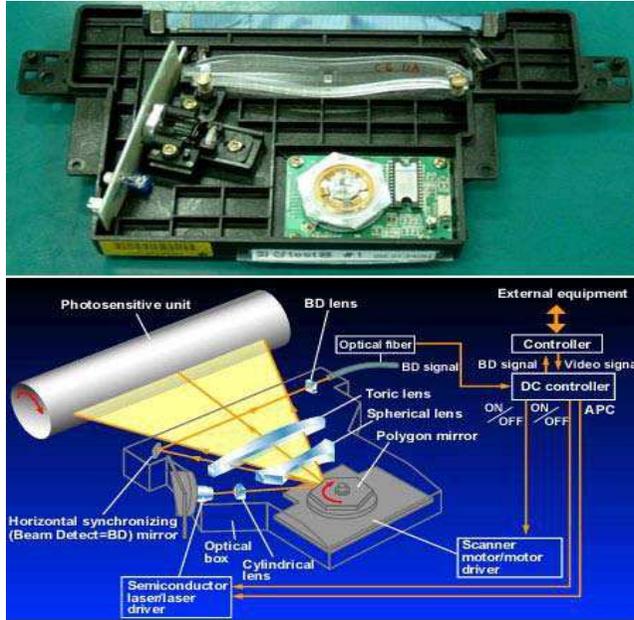


Fig. 4-1 Laser Scanning Unit of Laser Printer

이러한 레이저 주사광학계의 구성 요소 중 특히 F-theta 렌즈는 주사광학계의 핵심 부품이며, 레이저 프린트의 성능을 좌우하는 중요한 역할을 하는 광학렌즈이다. Fig. 4-2에 나타냈듯이 현재 F-theta 렌즈를 이용한 주사광학계는 소형, 경량화를 위해 렌즈의 개수가 점점 삭감하는 추세이며, 2~3개의 F-theta 렌즈에서 1개 구성의 렌즈로 바뀌고 있는 실정이다. 그러나 광학설계에 있어서 비구면의 사용은 광학계의 성능향상 및 개수감소의 효과를 가져왔지만 실제 비구면의 제조에 있어서는 구면렌즈보다 제작이 어렵고 높은 비용이 들기 때문에 제한적으로 사용되어져 온 것이 현실이었다.

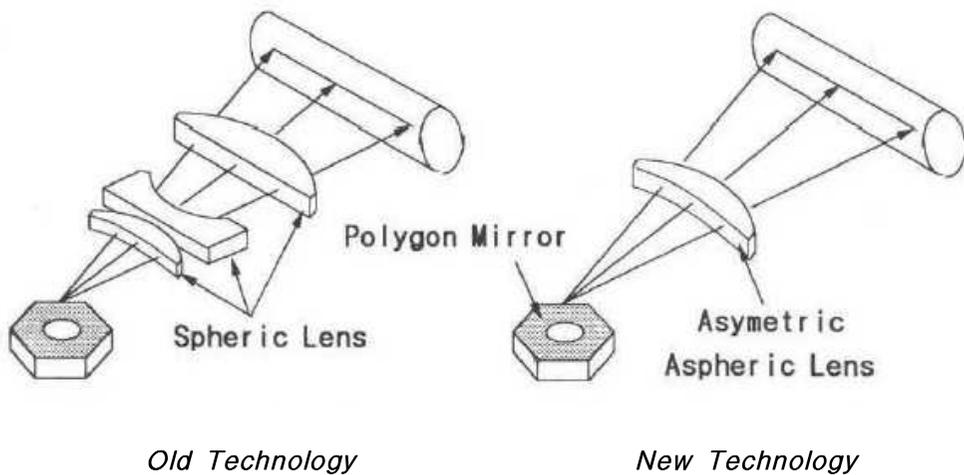


Fig. 4-2 Laser Scanning Unit Technology of Laser Printer

본 연구에서는 주사광학계 F-theta 렌즈의 금형을 가공하기 위하여 초정밀 자유곡면가공기(일본, Nachi사 ASP-30)를 이용하였다.

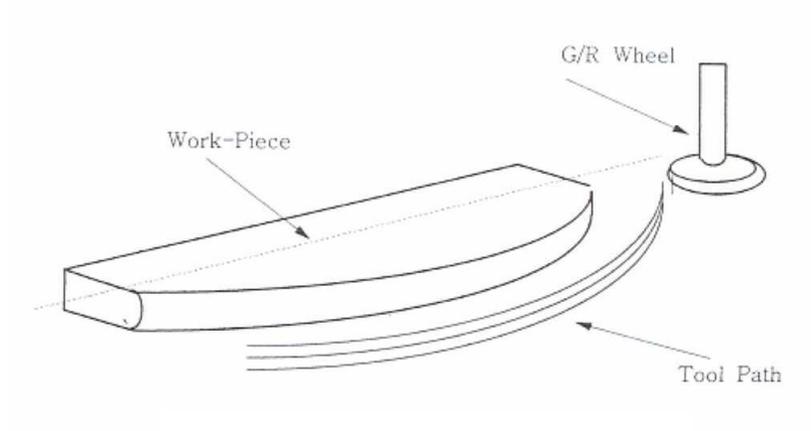
## 제 2 절. *F-theta* 렌즈 금형코어 제작

### 1. 가공방법 및 조건

일반적으로 *F-theta* 렌즈와 같은 자유곡면(비축 비대칭 비구면) 가공 방법은 공작물 형상이 축회전 대칭이 아니므로 공작물을 회전시켜서 가공하는 것이 곤란하다. 따라서 공작물은 구동시키지 않고 회전공구를 3차원 곡면에 따라서 이동시키는 것에 의해 요구하는 형상을 만든다. 즉, 좌우 방향의 이동되는 x축과 공구의 절입 방향의 이동을 하는 z축에 의해 가공된다. 임의 한 단면을 가공한 후 y축을 일정량만큼 이동시켜 새로운 x, z축의 동시 2축 제어에 의해 다음의 단면을 가공하는 것을 반복한다.

이것을 전면에서 반복함으로써 가공 정밀도 향상을 높이게 되며 희망하는 표면 거칠기를 얻을 수 있다. Fig. 4-3은 자유곡면(비축 비대칭 비구면) 가공 방법과 가공 사진을 나타낸다.

가공 방법에서는 y축 방향의 분할 수에 따른 x, y의 2차원 가공 데이터를 필요로 하여 이들의 데이터는 컴퓨터를 기초로 한 자동 프로그램 소프트웨어를 이용하여 3차원 형상을 나타내는 다항식으로 연산한다. 초정밀 가공에서는 분해능이 높기 때문에 데이터량은 많아지게 된다. 가공면의 위치 데이터인 x, y, z의 좌표를 나타낸 점군을 컴퓨터에서 NC장치로 전송하면서 가공하는 방식을 채용하고 있다.



(a) Fly Cutting Method



(b) Fly Cutting and Measuring

Fig. 4-3 Fly Cutting and Measuring Apparatus

주사광학계 F-theta 렌즈용 금형코어 제작은 일반적으로 비구면설계 → 1차 가공(Stavax) → 초정밀 Fly Cutting 가공 → 비구면 형상 측정 → 금형조립 → 사출성형 → 완제품의 공정으로 이루어진다.

본 논문에서는 F-theta 렌즈 사출용 코어를 제작하기 위해 비구면 설계, 금형조립, 사출성형의 공정은 외주가공을 통해 제작되었으며, 1차 가공 및 초정밀 자유곡면 가공 그리고 자유곡면 형상측정 공정을 수행하였다.

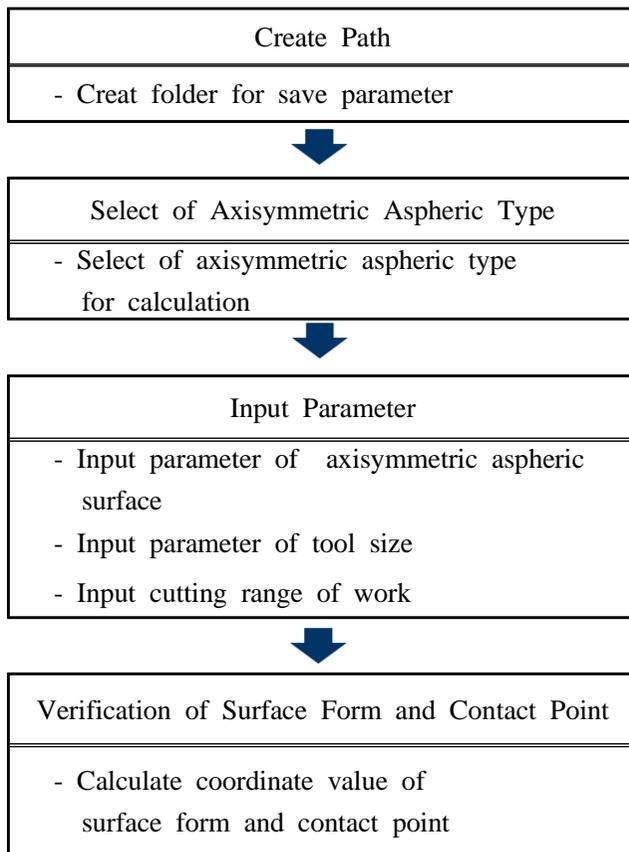
비구면이나 자유곡면렌즈의 측정에 관하여서는 일반적으로 알려진 방법은 없고 각각의 목적별로 필요에 따라 측정기 및 측정방법을 개발해 사용한다. 비구면의 경우 Taylor-Hopson Ltd.의 비구면 형상측정기인 FormTalySurf 라는 장비를 사용하여 비구면의 형상을 측정하는 것이 가장 일반적인 경우이다. 그러나 주사광학계의 F-theta 렌즈와 같은 비축 비대칭 비구면의 형상 측정은 Form TalySurf 장비로는 측정 보조기구물이 필요로 하는 등의 측정에 어려움이 따른다.

즉, F-theta 렌즈는 레이저 주사광학계의 회전다면경에서 나오는 빛을 편향각에 따라 주사속도가 일정하도록 하는 기능을 가진 렌즈로서 주사속도가 일정하여야만이 노광시 감광드럼 상에서 시간당 광량이 일정하게 된다. 그리고 부주사 방향으로의 초점 위치를 감광드럼의 직선에 놓이도록 하는 기능도 동시에 가진다.

이와 같은 이유로 F-theta 렌즈는 복잡한 비구면 형상을 지니게 된다. 기존의 2매 렌즈의 경우 축대칭 비구면 또는 토릭 비구면 형상을 지니데 반해 본 연구에서 수행된 F-theta 렌즈의 경우는 1매로 설계됨으로 인해 더욱 더 복잡한 비축대칭 비구면(자유곡면) 형상을 지니게 되었다. F-theta 렌즈의 금형코어가공은 자유곡면가공기(ASP30)에서 지원해주는 자유곡면 가공 NC 프로그램에 비구면계수를 입력하여 얻어진 자유곡면 가공경로를 통해 이루어진다. 자유곡면 가공프로그램은 상하축(Y축)을 일정한 분할로 고정하고 좌우축(X축), 전후축(Z축)을 같이 이동시켜서 자유곡면 전체를 가공하도록 작성된다. 본 소프트웨어는 가공물의 형상과 공구의 형상으로부터 공구와 공작물의 접촉점 및 공구중심의 좌표 값을 계산으로 구해 G 코드, M코드를 부가한 NC 프로그램을 자동 생성하도록 되어있다. Fig. 4-4는 F-theta 렌즈 금형가공을 위한 자유곡면 가공프로그램 작성순서도를 나타낸 것이다.

일반적으로 자유곡면가공시의 작업은 주로 아래 다섯 가지 항목에 준하여 수행된다.

- ① 공구형태의 측정
- ② 가공 전 워크의 측정
- ③ 가공프로그램의 작성
- ④ 가공물형태 측정 + 보정가공1 (공구의 직경, R의 보정)
- ⑤ 가공물형태 측정 + 보정가공2 (형태오차의 보정)



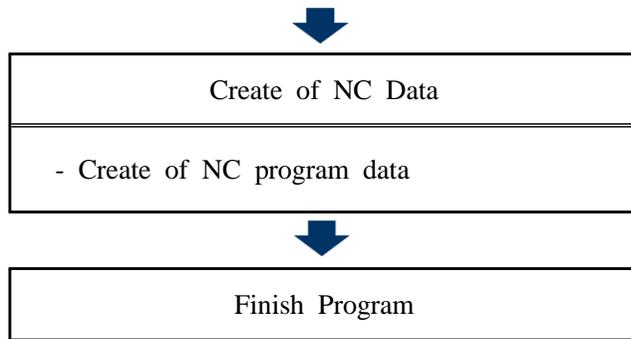


Fig. 4-4 NC Program Process of Axisymmetric Aspheric Surface

자유곡면 가공공정 중 제품에 직접적인 영향을 미치는 공정은 황삭가공 후 형상 측정을 통해 형상오차 및 공구 반경의 영향으로 인한 오차값을 평가하고 보정가공 프로그램에 적용하여 가공하는 기술이다. 본 연구에서는 황삭 및 중삭가공을 통해 형상오차 평가 및 보정가공 공정을 수행한 후 최종 정삭가공 및 평가를 수행하였다.

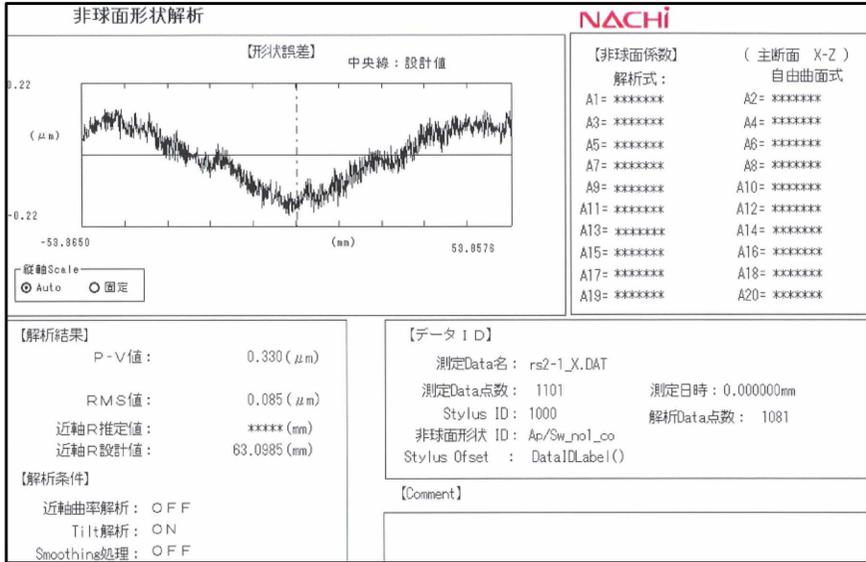
본 연구에서 수행되어진 F-theta 렌즈 금형코어 가공조건을 Table 4-1에 나타내었다.

Table 4-1 Cutting Conditions of F-Theta Lens Core

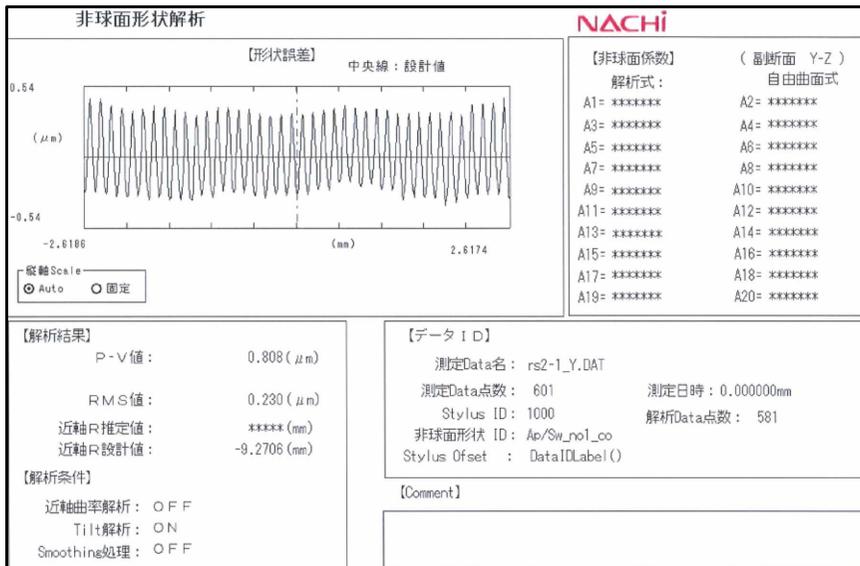
Material	STAVAX(Electroless Ni-Coated 100 $\mu\text{m}$ )		
NCD bite	R 4.95 mm , D 52.5288 mm		
Cutting condition	Tool spindle speed	Depth of cut	Pitch
Rough	6000 rpm	10 $\mu\text{m}$	0.2 mm
Semi-finish		5 $\mu\text{m}$	0.2 mm
Finish		5 $\mu\text{m}$	0.03 mm

## 2. 가공결과 및 고찰

본 연구에서는 Table 4-1에 나타난 바와 같이 100  $\mu\text{m}$ 으로 무전해 니켈 도금된 STAVAX를 외주로부터 1차 형상가공을 수행한 후 자유곡면가공기(ASP30)를 이용하여 황삭가공 및 중삭가공을 수행하였다. Fig. 4-5는 1차 황삭가공 후 측정된 결과 값으로 형상정도는 x축 방향으로 P-V 0.330  $\mu\text{m}$ , y축 방향으로 P-V 0.808  $\mu\text{m}$ 으로 나타났다. Table 4-1에 나타난 가공조건으로 중삭가공을 수행하기 앞서 X축 중심값 보정과 공구의 반경을 보정함으로써 가공 형상의 반경 R 값에 대한 오차를 보정하여 보정프로그램을 작성하였다. Fig. 4-6은 중삭가공을 수행한 결과로써 x축 방향으로 P-V 0.266  $\mu\text{m}$ , y축 방향으로 P-V 0.980  $\mu\text{m}$ 인 결과를 얻었다. 그림에 나타난 바와 같이 x축 방향으로 형상정도가 많이 향상됨을 알 수 있었다. y축에 대한 형상정도 결과는 피치에 대한 가공조건이 0.2 mm로 일정하기 때문에 y축 정도에 대한 변화는 없다.

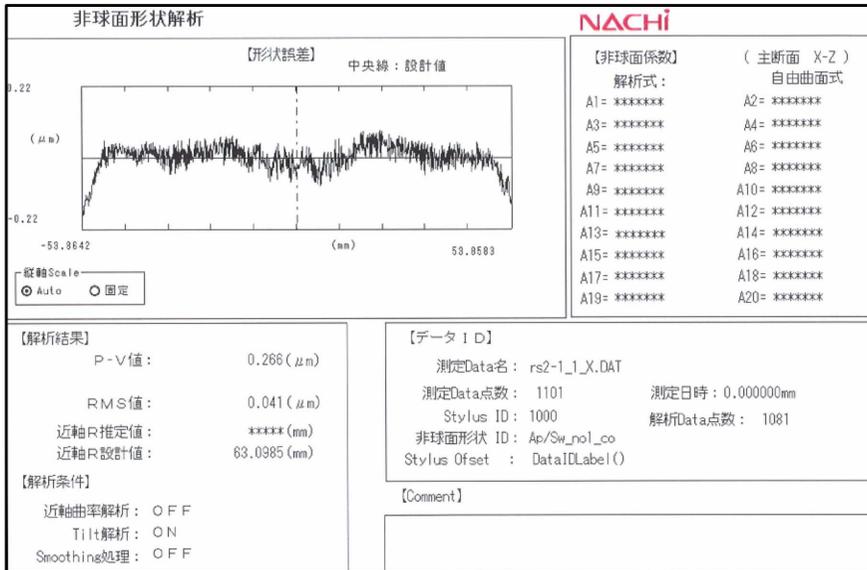


(a) F-Theta Lens Core Form Accuracy at X-Axis

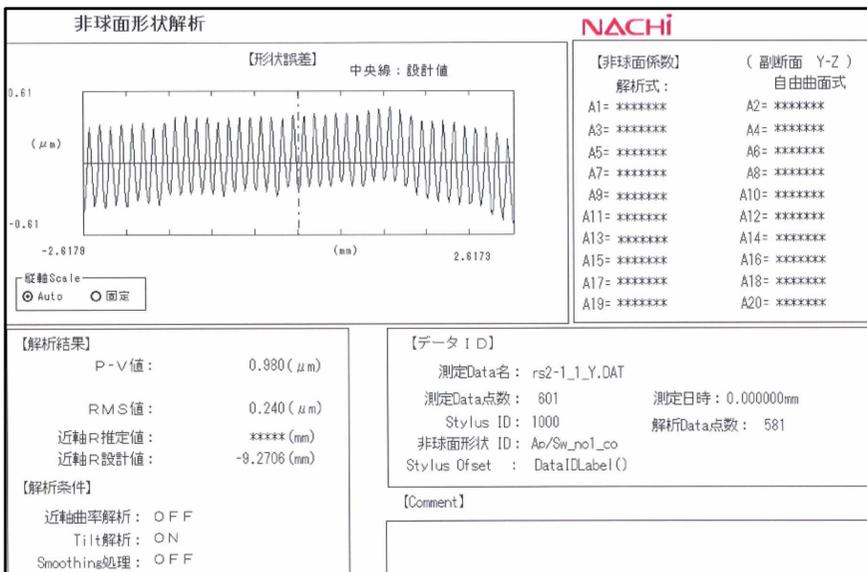


(b) F-Theta Lens Core Form Accuracy at Y-Axis

Fig. 4-5 P-V Value of F-Theta Lens Core Rough Cutting



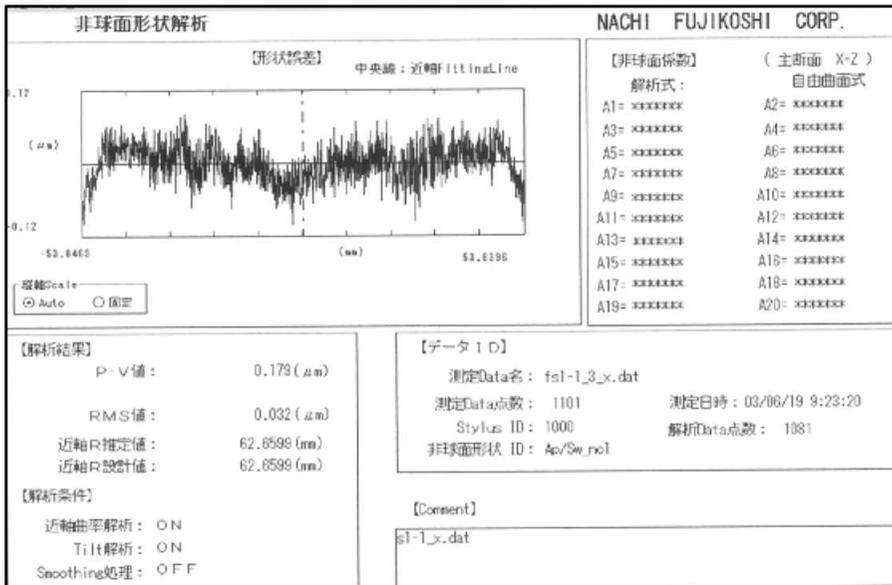
(a) F-Theta Lens Core Form Accuracy at X-Axis



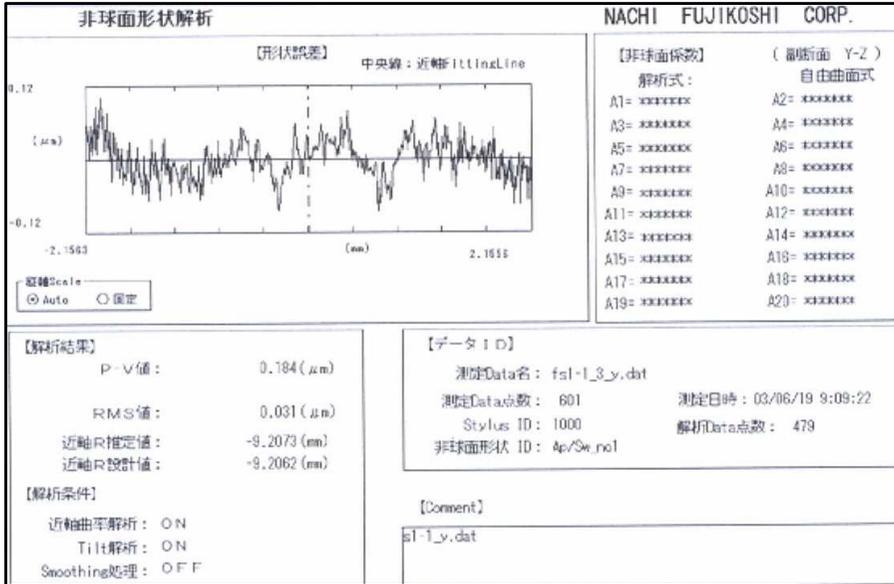
(b) F-Theta Lens Core Form Accuracy at Y-Axis

Fig. 4-6 P-V Value of F-Theta Lens Core Semi-Finish Cutting

본 연구에서는 최종적으로 x축에 대한 보정뿐만 아니라 y축의 피치를 0.03 mm로 보정한 후 Table 4-1에 나타난 가공조건으로 정삭가공을 수행하였으며 Fig. 4-7에 그 결과를 나타내었다. Fig. 4-7에 나타난 바와 같이 최종 정삭가공을 통해 형상정도 P-V 값이 x축 방향 0.179  $\mu\text{m}$ 과 y축 방향 0.184  $\mu\text{m}$ 로 현저히 향상되었으며, 이는 F-theta 렌즈의 양산용 금형코어 규격에 만족한 값이다.



(a) F-Theta Lens Core Form Accuracy at X-Axis

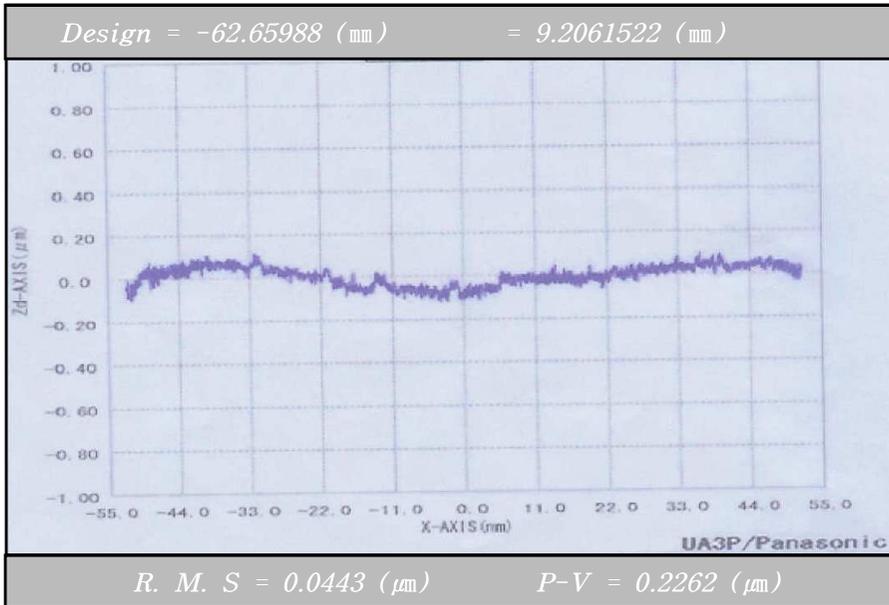


(b) F-Theta Lens Core Form Accuracy at Y-Axis

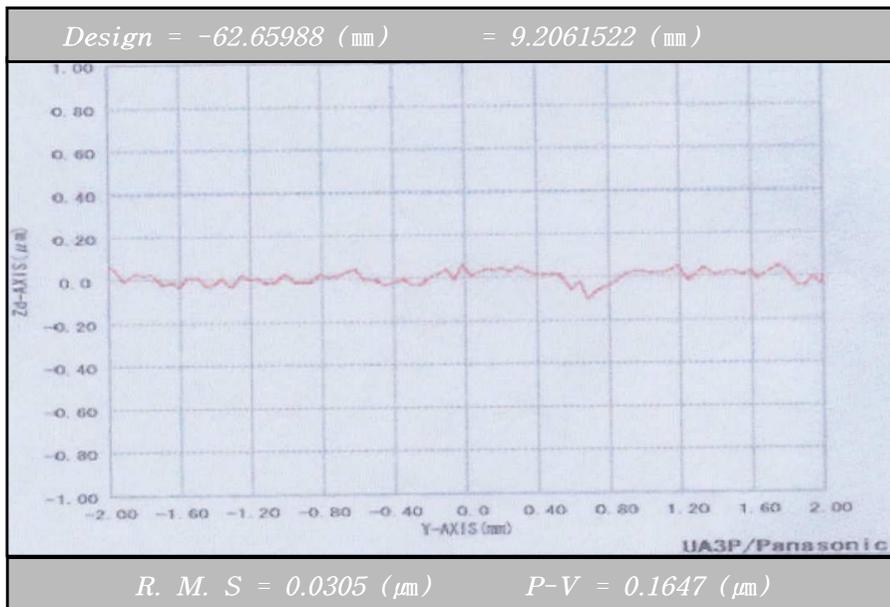
Fig. 4-7 P-V Value of F-Theta Lens Core Finish Cutting

Fig. 4-8은 본 연구에서 개발된 초정밀 금형코어를 활용하여 사출성형된 플라스틱 자유곡면 F-Theta 렌즈를 초정밀 자유곡면 3-D 형상 측정기(Panasonic Co., UA3P)를 이용하여 측정한 결과를 나타낸 것으로 그림에 나타난 바와 같이 P-V값이 x축은  $0.2262 \mu\text{m}$ , y축은  $0.1647 \mu\text{m}$ 의 결과값이 나타났다.

특히 이러한 F-theta 렌즈 금형의 가공결과 및 사출 성형한 F-theta 렌즈의 측정결과 형상오차는 약  $0.2 \mu\text{m}$ 를 만족하고 있으며 설계 허용한도는 현재의 가공 및 사출성형 기술로서 충분히 달성 할 수 있는 수준임을 본 연구를 통하여 알 수 있었다.



(a) F-Theta Lens at X-Axis



(b) F-Theta Lens at Y-Axis

Fig. 4-8 Surface Form Accuracy of F-Theta Lens

Fig. 4-9는 본연구에서 제작된 제작되어진 주사광학계 F-theta 렌즈 사출용 금형 코어 및 사출성형한 F-theta 렌즈 완성품을 나타낸 것이다.



Fig. 4-9 F-Theta Lens and Mold Core

## 제 5 장 결론

본 논문에서는 다이아몬드 터닝시 발생하는 절삭력을 측정하기 위하여 공구 지지대 시스템을 설계하고 제작하였다. 또한 Al 6061-T651과 무산소동을 이용하여 절삭실험을 수행함으로써 절삭깊이와 이송속도에 대한 영향을 고찰하였다

또한 다이아몬드 터닝가공 기술을 이용하여 열영상광학계에 적용되는 Al 평면 반사경과 게르마늄 비구면렌즈를 제작하였고, 주사광학계의 중요 구성요소인 F-theta 렌즈 금형코어를 제작하여 F-theta 렌즈를 사출 성형하였다.

### 다이아몬드 터닝가공에서의 가공조건

본 연구에서는 다이아몬드 터닝시 발생하는 미세절삭력을 측정하기 위하여 공구 지지대를 설계하여 제작하였다. 또한 Al 6061-T651, 무산소동을 이용하여 절삭실험을 수행함으로써 절삭깊이와 이송속도에 대한 영향을 고찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- MSC/PATRAN, MSC/NASTRAN을 이용하여 시뮬레이션을 수행한 결과 1차 고유진동수가 198 Hz임을 알 수 있었다.
- 알루미늄은 공구의 인선 반경이 커질수록 공구에 작용하는 미세절삭력은 증가하였으며, 배분력이 주분력보다 크게 나타남을 알 수 있었다. 무산소동에서도 주분력보다 배분력이 크게 나타났다. 또한 절삭깊이가 증가할수록 절삭력이 증가하였다.
- 알루미늄에 대해서는 피이드율이 증가할수록 주분력이 증가하였지만, 공구반경이 커질수록 배분력이 주분력보다 크게 나타났다. 무산소동에서는 주분력보다는 배분력이 크게 나타났으며, 주분력은 피이드율 증가에 크게 영향을 받지 않았다.

- 표면조도 향상을 위한 연구결과 Al 6061-T651은 절삭깊이가 8~10  $\mu\text{m}$  사이에서 이송속도가 10 mm/min 인 경우, 무산소동은 절삭깊이 1~2  $\mu\text{m}$  사이에서 이송속도가 10mm/min 인 경우와 절삭깊이 8~10  $\mu\text{m}$  사이에서 이송속도가 5 mm/min 일 경우 좋은 표면을 얻어 낼 수 있었다.

### 열영상광학계용 광학미러 가공

본 연구에서는 비구면 렌즈의 제작의 생산비용 절감은 물론 가공부분의 정밀도를 혁신적으로 향상시킬 수 있는 다이아몬드 터닝 기술을 이용하여 Al 평면 반사경과 Ge 비구면렌즈를 제작하였고, 가공면의 형상정도와 표면조도를 측정하였다.

가공결과 Al 평면 반사경은 형상오차가 0.835 프린취로 규격 2 프린취를 만족하였고 불균일도는 0.370 프린취로 규격 1 프린취를 만족하였으며, 표면조도는 요구되어진 규격 Ra 25 nm 값 이하인 3.590 nm로 만족하는 결과를 얻을 수 있었다. Ge 비구면렌즈 측정결과 P-V값은 0.24  $\mu\text{m}$ 이고 R은 175.379 mm로서 모두 요구되어진 규격을 만족하였고, 표면조도는 규격 Ra 0.025  $\mu\text{m}$ 보다 이하 값인 0.0038  $\mu\text{m}$ 으로서 만족하는 결과를 얻을 수 있었다. 위 결과는 국외 전문제작업체와 비교해 볼 때 성능 면에서 거의 차이가 없음을 알 수 있었다.

열영상장비의 광학부품의 대부분을 수입에 의존하고 있는 국내기술의 현실을 감안하여 볼 때, 본 연구 결과는 국내 기술향상 및 수입대체 효과의 기틀을 마련하였다고 할 수 있다.

## 레이저 주사광학계용 *F-theta* 렌즈 금형코어 가공

본 연구에서는 초정밀 가공을 이용하여 LBP와 디지털 복사기에 채택되고 있는 레이저 주사광학계(LSU)의 핵심 부품인 *F-theta* 렌즈를 제작하기 위하여 사출 성형용 금형코어의 1차 가공 및 보정가공을 수행하였고, 제작된 금형코어의 자유곡면 형상을 측정하였다.

가공된 금형코어는 정삭가공 후 P-V값은 x축 방향으로  $0.179\ \mu\text{m}$ 이고 y축 방향으로  $0.184\ \mu\text{m}$  값을 나타내었다. 또한 완성된 금형코어를 이용하여 플라스틱 *F-theta* 렌즈를 사출성형하였다.

사출성형렌즈의 측정결과 형상정도 P-V값은 x축 방향으로  $0.226\ \mu\text{m}$ , y축 방향으로  $0.165\ \mu\text{m}$ 의 결과값을 나타내었다. 이를 통해 코어의 형상정도가 플라스틱 렌즈에 전사되고 있음을 알 수 있었다. 코어 및 사출성형 렌즈 형상정도는 실제 양산제품의 세계 규격을 만족하는 것으로 본 연구결과 *F-theta* 렌즈의 국내 양산기술의 발전에 큰 기여를 할 것으로 기대된다.

## 향후 연구 방향

최근의 초정밀가공에서는 가공 가능한 가공물의 직경이 커지면서 가공정밀도가 높아지는 추세에 따라 각 슬라이드의 행정거리가 수백 mm 로 상대적으로 길어짐에도 불구하고 mm 수준의 높은 분해능과 전 운동구간에 걸쳐 높은 정밀도가 요구되고 있다. 그러나 이 경우 이송부의 관성 질량이 매우 크기 때문에 실시간으로 운동오차를 보상하기에는 응답속도가 절대적으로 늦어져 실시간 운동오차 보상이 어렵게 된다. 이로 인하여 각 요소부품의 정밀도를 향상시킬 수밖에 없으므로 가공기의 제작비용이 지수 함수적으로 증가하게 되고, 수  $\mu\text{m}$  에 달하는 스피ن들의 축방향 운동오차, 이송계의 운동오차, 공작물의 변형 등에 의해 가공정밀도에 한계를 가질 수밖에 없다. 이와 같은 문제점을 극복하기 위하여 스피ن들과 이송계의 운동정밀도를 정밀하게 측정하면서 압전 액츄에이터를 이용하여 상대적으로 질량이 매우 작은 절삭공구와 공구지지대만을 미세하게 구동시켜 실시간으로 운동오차를 보정하면서 가공할 수 있는 급속공구서보(Fast Tool Servo, 이하 FTS)에 대한 연구가 필요하다. 급속공구서보(FTS)의 기본적인 아이디어는 질량이 큰 슬라이드 대신 상대적으로 질량이 매우 작은 공구와 이를 지지하는 공구지지대 만으로 구성된 가동부를 미소하게 구동함으로써 응답성과 분해능을 대폭 향상시키는 것이다. 따라서 급속공구서보의 구동부로는 분해능이 매우 높고 응답속도가 빠른 직선 액츄에이터가 요구된다. 또한 가동부를 요구하는 방향으로 정밀하게 이송 할 수 있으면서 나머지 방향으로의 운동이 전혀 없도록 가동부를 지지할 필요가 있다. 이와 같은 요구를 만족시키기 위해 현재까지 개발된 미소 이송공구대에는 구동요소로서 주로 압전 액츄에이터를 사용하고 있다.

또한 가동부를 지지하는 안내요소로는 다이어프램과 굽힘힌지(flexure hinge)가 많이 사용되고 있다. 다이어프램의 경우에는 설계와 제작이 비교적 쉽고 원주 방향으로 동일한 측면 강성을 가지므로 현재까지 개발된 대부분의 미소 이송공구대

에서 안내요소로 채택하고 있다. 한편 굽힘 힌지는 전통적인 힌지와 비교하여 백래쉬와 스틱 슬립 마찰이 없으며, 윤활유가 필요 없고, 높은 정밀도의 원활한 운동을 얻을 수 있으므로 정밀게이지나 미소 조정기구등에 널리 사용되고 있다. 또한 굽힘 힌지는 자체의 회전축에 대해 탄성 변형 한계 내에서만 각 운동이 가능하므로 스트로크가 제한되어 있고 상대적으로 큰 하중을 지지할 수 없는 단점이 있으나, 급속이송공구의 경우 요구되는 가동부의 스트로크가 수  $\mu\text{m}$ 에서 수십  $\mu\text{m}$ 에 불과하고 다이아몬드 공구를 이용한 초정밀 절삭가공에서는 절삭력이 수 N으로 일반적인 선삭가공에 비해 매우 작기 때문에 가동부의 안내요소로서 적합하다.

따라서 향후 연구방향은 스핀들과 이송계의 운동 정밀도를 정밀하게 측정하면서 압전 액츄에이터를 이용하여 상대적으로 질량이 매우 작은 절삭공구와 공구지지대만을 미세하게 구동시켜 실시간으로 운동오차를 보정하면서 가공할 수 있는 급속공구서보를 개발하는 것이다. 이러한 급속공구서보는 기존의 다이아몬드 터닝가공에 비해 다이아몬드 터닝가공 후 가공정밀도를 획기적으로 향상시킬 것으로 기대된다.

Fig. 5-1은 본 논문에서 설계한 급속공구서보(FTS)의 개략도를 나타낸 것이다.

# FAST TOOL SERVO

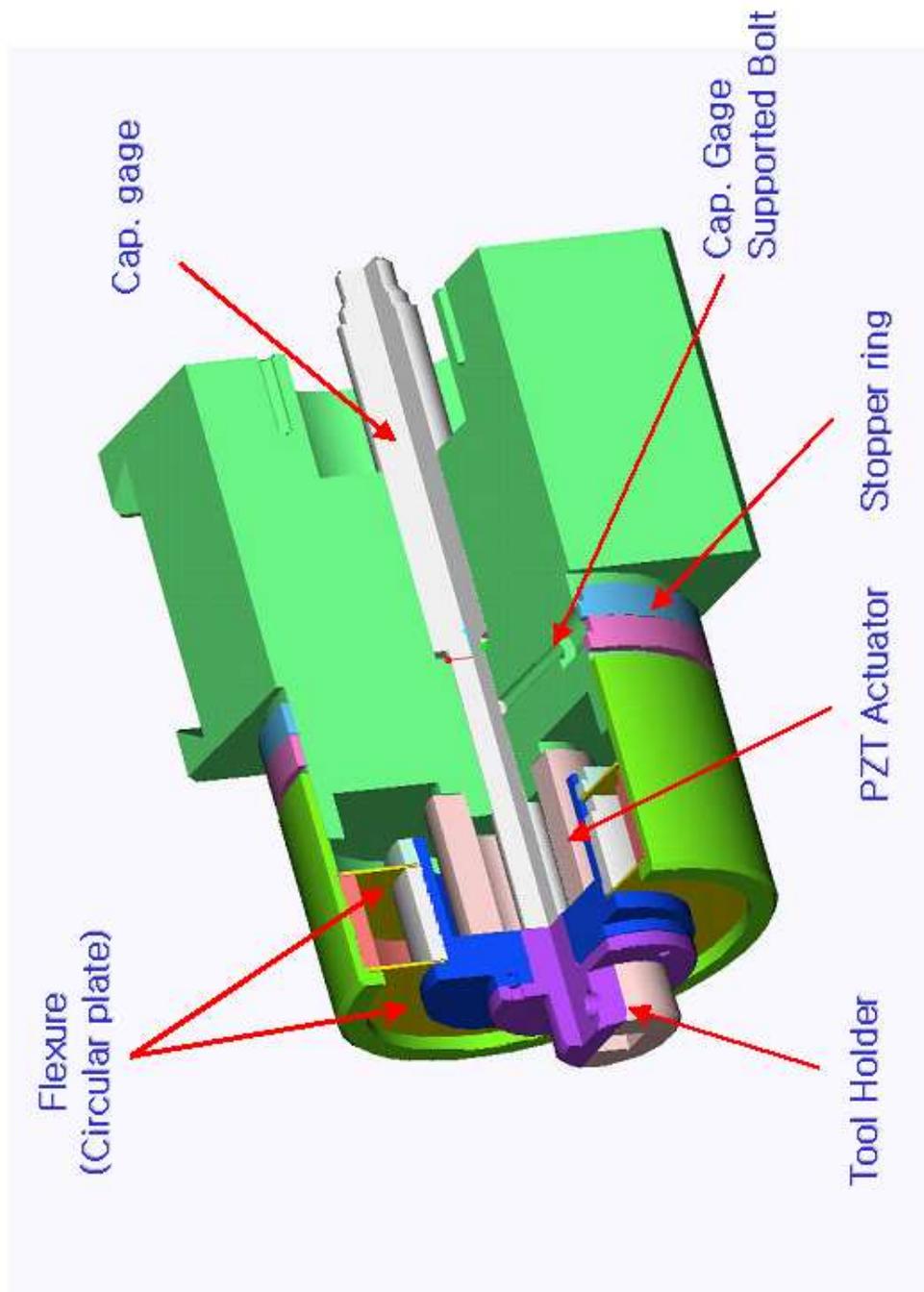


Fig. 5-1 Fast Tool Servo

## 참 고 문 헌

1. T. Moriwaki, and E. shamoto, "Ultra precision Diamond Turning of stainless steel by applying Ultrasonic vibration", annals of the CIRP, Vol. 40 pp.559-562, 1991.
2. T. Moriwaki, "Effect of Cutting Heat on Machining Accuracy in Ultraprecision Diamond Turning", Annals of the CIRP, Vol.39, No. 1, pp.81-84, 1990.
3. D. A. Grigg, P. E. Russel, and T. A. Dow, "Observations of Machined Surface using the Scanning Tunneling Microscope", Journal of ASPE
4. T. Moriwaki, and K.Iwata, "In-process Analysis of Machine Tool Structure Dynamics and Prediction of Machining Chatter" Jour. of Eng. for Industry, pp.301-305, 1976.
5. R.J.P. Schrama, J. Franse., "The precision cutting process as a non-linear closed loop system" PE, Vol 10, pp.199-207, 1988.
6. M. Masuda et al., "A Study on Diamond Turning of Al-Mg Alloy-Generation Mechanism of surface Machined with Worn Tool", Annals of the CIRP, vol. 38, No. 1, pp. 111, 1989.
7. Shyunji Itoh, "study on measurement of axisymmetrical form generated by ultra precision machining comparison of three methods to measure aspherical form", JSPE Vol 61 No.3, 1995.
8. Mckeown. PA., "The role of precision engineering in manufacturing of the future", Annals of the CIRP, Vol. 36, No. 2, pp. 496-501, 1987.

9. W. B. Lee, J. G. Li and C. F. Cheung, "Development of virtual training workshop in ultra-precision machining", *Int. J. Engng Ed.* Vol. 18, No. 5, pp. 584-596, 2002.
10. T. A. Dow, Joe Drescher, "Measurement of Tool Force in diamond Turning", Society of Manfg. Engineers, 1987.
11. Iwata, Moriwaki, Pkuda, "A Study of Cutting Temperature in Ultra-High precision Diamond Cutting of Copper", *SME North American Manufacturing Research Conference Proceeding*, 1987.
12. T. Moriwaki and K. Okuda, "Machinability of Copper in Ultra-Precision Micro Diamond Cutting", *ibid.*10, pp. 115, 1989.
13. T. Nakasuji et al., "Diamond Turning of Brittle Material for Optical Components", *Annals of the CIRP*, vol. 39, No. 1, pp. 89, 1990.
14. Furukawa, Moriwaki, "Effect of Material Properties on Ultra-precision Cutting processes" *CIRP vol 37*, pp.113, 1988.
15. Lucca, D.A., and Seo, Y.W., "Effect of Tool Edge Geometry on Energy Dissipation in Ultra-precision Machining", *Annals of the CIRP*, Vol. 42, pp. 83-86, 1993.
16. Yuan, Zhou., M. and Dong, S., "Effect of Diamond Tool Sharpness on Minimum Cutting Thickness and Cutting Surface Integrity in Ultra-Precision Machining", *Journal of Materials processing Technology*, Vol. 62, pp. 327-330, 1996.
17. M. Zhou and B. K. A. Ngoi, "Factors affecting form accuracy in diamond turning of optical components", *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 138, Issues 1-3, 586-589, 2003.

18. W. B. Lee, C. F. Cheung, W. M. Chiu and T. P. Leung, "An investigation of residual form error compensation in the ultra-precision machining of aspheric surfaces", *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 99, Issues 1-3, 129-134, 2000.
19. D. Visser., T. G .Grjsbers., R. A. M. Jorna., "Molds and Measurements for Replicated Aspheric Lenses for Optical Recoding", *Apphed Optics*, Vol. 24, pp. 1848-1852, 1985.
20. Sugano. T., Takeuchi K., "Diamond Turning of an Aluminium Alloy for Mirror", *Annals of the CIRP*, Vol. 36, No. 1, pp. 17-20, 1987.
21. T. Sugano., K.Takeuchi and Y.Yoshda, "Diamond Turning of Oxygen-Free Copper for Mirror", *JSME International Journal Series C*, Vol. 36, No.4, pp.549-555, 1993.
22. T. Sugano., Y. Ihara., Y. Nakatsu., A. Shinohara., "Diamond Turning of an Aluminum Alloy for Mirror", *Annals of the CIRP*, Vol. 36, No. 1, pp. 17-20, 1987.
21. C. L. Chao, K. J. Ma, D. S. Liu, C. Y. Bai and T. L. Shy, "Ductile behaviour in single-point diamond-turning of single-crystal silicon", *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 127, Issue 2, 187-190, 2002.
22. T. Moriwaki and K. Okuda., "Machinability of Copper in Ultra-Precision Micro Diamond Cutting", *Annals of the CIRP*, Vol. 38, No. 1, 1989.
23. C. F. Cheung, W. B. Lee, "A multi-spectrum analysis of surface roughness formation in ultra-precision machining", *Precision Engineering* 24, pp. 77-87, 2000.

24. Chun Hong Park, Eung Sook Lee, Husang Lee, "A review on research in ultra precision engineering at KIMM", International Journal of Machine Tools & Manufacture 39, pp1793-1805, 1999.
25. C. F. Cheung, K. C. Chan, W. B. Lee, M. V. Ramesh and S. To, "A theoretical and experimental investigation of surface generation in diamond turning of an Al6061/SiCp metal matrix composite", International Journal of Mechanical Sciences 43, pp. 2047-2068, 2001.
26. D. Krulewich Born and W. A. Goodman, "An empirical survey on the influence of machining parameters on tool wear in diamond turning of large single-crystal silicon optics", Precision Engineering, Volume 25, Issue 4, 247-257, 2001.
27. T. Moriwaki., K. Okuda., "Machinability of Copper in Ultra-precision Micro Diamond Cutting", Annals of the CIRP, Vol. 38, No. 1, pp. 115-118, 1989.
28. Nakayama. K., and Tamura. K., Eng. J., Trans. Ind., "Size Effect in Metal-Cutting Force," ASME, pp. 119-126, 1968.
29. syn. CK., Talor. JS., Donaldson. RR., Shimada. S., "Ductile-Brittle Transition of Cutting Behaviour in Diamond Turning of Single Crystal Si", Preprint, Japan Society of Precision Engineering, pp.73, 1988.
30. Nakasuji. T., Kodera. S., Hara. S., Matsunaga. H., "Diamond Turning of Brittle Materials for Optical Components", Annals of the CIRP, Vol. 39, No.1, pp.89-92, 1990.
31. Yuan. ZJ., Lee. WB., Yao. YX., Zhou. M., "Effect of Crystallographic Orientation on Cutting Forces and Surface Quality in Diamond Cutting of Single Crystal", Annals of the CIRP, Vol. 43, No.1, pp.39-42, 1994.

32. T. Nishiguchi., Y. Maeda., M. Masuda., M. Sawa., "Mechanism of Micro Chip Formation in Diamond Turning of Al-Mg Alloy", Annals of the CIRP, Vol. 37, No. 1, pp. 117-120, 1988.
33. K. E. Puttick., "Single-Point Diamond Machining of Glasses", Proc. R, sOC. lond., pp. 19-30, 1989.
34. E. Brinksmeirer., O. Riemer., "Tools and Setting for Improved Surface Finish in Diamond Turning", proc. of Int. Precision Engineering, pp. 125-133, 1993.
35. W. B. Lee, C. F. Cheung, "A dynamic surface topography model for the prediction of nano-surface generation in ultra-precision machining", International Journal of Mechanical Sciences 43, pp. 961-991, 2001.
36. C. F. Cheung, K. C. Chan, W. B. Lee, M. V. Ramesh and S. To, "A investigation of surface Roughness Formation in Ultra-Precision Machining of Al6061/sicp metal Matrix Composites", Key Engineering Materials Vol. 177-180, pp. 375-380, 2000.
37. C. F. Cheung, W. B. Lee, "A theoretical and experimental investigation of surface roughness formation in ultra-precision diamond turning", International Journal of Machines Tools & Manufacture 40, pp. 979-1002, 2000.
38. W. B. Lee, C. F. Cheung, W. M. Chiu, T. P. Leung, "An investigation of residual form error compensation in the ultra-precision machining of aspheric surfaces", Journal of Materials Processing Technology 99, pp. 129-134, 2000.

39. Jeong-Du Kim, Soo-Ryong Nam, "Development of a micro-depth control system for an ultra-precision lathe using a piezo-electric actuator", International Journal of Machines Tools & Manufacture 37, Vol. 37, No. 4, pp. 495-509, 1997.
40. Ichiro OGURA, Yuichi OKAZAKI, "Ductile-regime machining of optical glasses by means of single point diamond turning", Japan Precision Engineering, Vol. 65, No. 9, pp. 1431-1435, 2000.
41. Morihiko SAEKI, Heiji YASUI, Sumihisa KONDO, Masaki KAWADA, Akira HOSOKAWA, "Experimental Investigation of Surface Roughness in Ultra-Precision cutting of Plastics", Japan Precision Engineering, Vol. 67, No. 2, pp. 311-315, 2001.
42. Masayuki TAKABASHI, Shuji UEDA, Toshiji KUROBE, "Ultra high speed grinding with a single point diamond", Int. J. Japan Soc. Prec. Eng., Vol. 27, No. 2, pp. 140-141, 1993.
43. Tomohiko Kawai, Kiyoshi Sawada, Yoshimi Takeuchi, "Ultra-Precision Micro Structuring by means of Mechanical Machining", IEEE, pp. 22-25, 2001.
44. Yoshito Aoki, Yoshihiro Kawase, Shigeo Fukada, Jiro Otsuka, "Ultra-Precision positioning using lead screw drive", JSPE, pp. 81-86, 1990.
45. 김창우, "Al 6061-T651의 열처리 조건에 따른 초정밀 경면의 조직 특성 연구", 인하대학교, 2003.
46. 원종호, "적외선용 광학소자의 초정밀 절삭 특성", 한국기계공학회, Vol. 2, pp.57, 2003.

47. 정상화, 김상석, “다이아몬드 터닝 가공의 미세절삭력 측정을 위한 tool holder 설계” 정밀공학회 추계 학술대회 논문집, pp.68-71, 2001.
48. 정상화, 김상석, 도철진, 홍권희, 김건희, “다이아몬드 터닝 가공의 미세절삭력 측정을 위한 Tool Holder 설계”, 한국정밀공학회 추계학술대회 논문집, pp. 68-71, 2000.
49. 정상화, 김상석, 도철진, 홍권희, 김건희, “다이아몬드 터닝의 절삭력 측정용 Tool Holder를 이용한 미세절삭력 특성 연구”, 한국정밀공학회 춘계학술대회 논문집, pp. 938-941, 2001.
50. 정상화, 김상석, 도철진, 홍권희, 김건희, 유병주, “다이아몬드 터닝의 미세절삭력 특정을 위한 Tool Holder 설계 및 절삭력 측정”, 대한기계학회 춘계학술대회 논문집, pp. 507-512, 2001.
51. 정상화, 차경래, 김현욱, 나운철, 김상석, 홍권희, 김건희, 김효식, “다이아몬드 터닝공정에서의 비철금속에 대한 미세절삭력 특성연구”, 한국 공작기계학회 추계학술대회 논문집, pp. 38-42, 2001.
52. 정상화, 차경래, 김상석, 김건희, 김근홍, 박순섭, “다이아몬드 터닝 가공공정에서의 미세절삭력 특성연구”, 한국정밀공학회 추계학술대회 논문집, pp. 957-960, 한국정밀공학회, 2001.
53. 정상화, 김상석, “초정밀가공기를 이용한 알루미늄반사경의 절삭특성”, 한국정밀공학회 추계 학술대회 논문집 pp. 1125-1128, 2001.
54. 김건희, 홍권희, 김상석, 원종호, “초정밀가공시스템을 이용한 나노가공기술”, 한국정밀공학회 논문집, Vol. 19, No. 1, pp. 18-24, 2002.