



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

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

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 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](#)

2007 年 8 月
博士學位論文

非球面 Glass 렌즈 성형용 금형코어의
초정밀 研削加工에 관한 연구

朝鮮大學校 大學院

機械工學科

金炫煜

非球面 Glass렌즈 성형용 금형코어의
초정밀 研削加工에 관한 연구

*A Study on Ultra-Precision Grinding of Aspheric
Glass Lens Molding Core*

2007 年 8 月 日

朝鮮大學校 大學院

機械工學科

金炫煜

非球面 Glass 렌즈 성형용 금형코어의 초정밀 研削加工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.

2007 年 6 月 日

朝鮮大學校 大學院

機 械 工 學 科

金 炫 煜

金炫煜의 博士學位論文을 認准함

위원장 전남대학교 교수 조 규 종



위원 한국광기술원

책임연구원 김 정 호



위원 조선대학교 교수 이 규 태



위원 조선대학교 교수 장 완 식



위원 조선대학교 교수 정 상 화



2006 年 6 月 日

朝鮮大學校 大學院

2007 年 8 月

博士學位論文

非球面 Glass 렌즈 성형용 금형코어의
초정밀 研削加工에 관한 연구

朝鮮大學校 大學院

機械工學科

金炫煜

목 차

| | |
|--------------------------|------|
| List of figures | i |
| List of photograph | v |
| List of tables | vi |
| NOMENCLATURE | viii |
| ABSTRACT | ix |

제 1 장 서 론

| | |
|------------------|---|
| 제 1 절 연구배경 | 1 |
| 1. 연구필요성 | 1 |
| 2. 연구동향 | 3 |
| 제 2 절 연구내용 | 7 |

제 2 장 관련이론 및 실험장치

| | |
|-------------------------|----|
| 제 1 절 초정밀 연삭가공 개요 | 10 |
| 1. 연삭가공의 기하학적 분석 | 10 |
| 2. 연삭저항력 및 연삭비 | 13 |
| 3. 연삭가공방법 | 14 |

| | |
|-------------------------------|----|
| 제 2 절 비구면 이론 | 20 |
| 제 3 절 실험장치 | 27 |
| 1. 초정밀 가공장비 | 27 |
| 2. 초정밀 계측장비 | 32 |
| 3. 다이아몬드 휠 | 36 |
| 4. 초경합금 | 43 |
| 5. Silicon Carbide(SiC) | 44 |

제 3 장 비구면 Glass렌즈 성형용 초경합금 코어 제작

| | |
|---|----|
| 제 1 절 초경합금 코어의 최적연삭가공조건 연구 | 47 |
| 1. 다이아몬드 휠 #1500을 사용한 실험계획법 | 49 |
| 2. 다이아몬드 휠 #2000을 사용한 실험계획법 | 54 |
| 제 2 절 이송속도 제어기법을 통한 성형용 코어 표면조도 향상 연구 | 60 |
| 1. 초정밀 연삭 모델 개요 | 60 |
| 2. 이송속도 제어기법을 활용한 초정밀 가공 | 63 |
| 제 3 절 비구면 Glass렌즈 성형용 초경합금 코어 제작 | 67 |
| 1. 초정밀 연삭가공기술을 이용한 가공 | 67 |
| 2. 초정밀 폴리싱가공 | 75 |

| | |
|---|-----|
| 제 4 절 성형용 초경합금 코어의 코팅효과 연구 | 79 |
| 1. 다이아몬드 탄소상(DLC) 코팅효과 | 79 |
| 2. Rhenium-Iridium(Re-Ir) 코팅 효과 | 84 |
| | |
| 제 4 장 비구면 Glass렌즈 성형용 Silicon Carbide(SiC) 코어 초정밀 연삭가공 | |
| 제 1 절 SiC 최적연삭가공조건 연구 | 91 |
| 1. 이송속도가 표면조도에 미치는 영향 | 92 |
| 2. 연삭깊이가 표면조도에 미치는 영향 | 94 |
| 3. 다이아몬드 휠 메쉬가 표면조도에 미치는 영향 | 96 |
| 제 2 절 비구면 Glass렌즈 성형용 SiC 코어 초정밀 연삭가공 | 100 |
| | |
| 제 5 장 결 론 | 104 |
| | |
| 참 고 문 헌 | 108 |

List of figures

| | |
|---|----|
| Fig. 2.1 Grinding models of orthogonal diamond wheel | 12 |
| Fig. 2.2 Cross grinding method | 15 |
| Fig. 2.3 Ground surface by cross grinding method | 15 |
| Fig. 2.4 Slanted tool axis grinding method | 17 |
| Fig. 2.5 Ground surface by the slanted tool axis grinding method | 17 |
| Fig. 2.6 Parallel grinding method | 19 |
| Fig. 2.7 Ground surface by parallel grinding method | 19 |
| Fig. 2.8 Characteristics of aspheric and spherical lens | 21 |
| Fig. 2.9 Aspheric curve illustrating origin and axis | 23 |
| Fig. 2.10 Error of tool radius and center positions | 25 |
| Fig. 2.11 Measured profile due to different types of position error | 26 |
| Fig. 2.12 3-D modeling of ASP01 | 28 |
| Fig. 2.13 Precision slide stage of ASP01 | 29 |
| Fig. 2.14 Structure of diamond wheel | 37 |
| Fig. 2.15 Diagram of diamond wheel | 37 |
| Fig. 2.16 Characteristics of bond type | 40 |
| Fig. 2.17 Design of diamond wheel | 42 |
| Fig. 2.18 3-Dimensional shape of diamond wheel | 42 |
| Fig. 2.19 Comparison SiC with other materials | 46 |

| | |
|--|----|
| Fig. 3.1 Surface roughness according to grinding condition | 49 |
| Fig. 3.2 Pareto chart of the standardized effects | 50 |
| Fig. 3.3 ANOVA table for surface roughness | 51 |
| Fig. 3.4 Main effects plot for surface roughness | 52 |
| Fig. 3.5 Interaction plot for surface roughness | 53 |
| Fig. 3.6 Surface roughness according to grinding condition | 54 |
| Fig. 3.7 Pareto chart of the standardized effects | 55 |
| Fig. 3.8 ANOVA table for surface roughness | 56 |
| Fig. 3.9 Main effects plot for surface roughness | 57 |
| Fig. 3.10 Interaction plot for surface roughness | 58 |
| Fig. 3.11 Geometric modeling of parallel grinding | 61 |
| Fig. 3.12 Influence of x-direction feedrate on the surface roughness | 62 |
| Fig. 3.13 Surface roughness of molding core by grinding method | 66 |
| Fig. 3.14 Drawing of camera phone module and aspheric glass lens | 67 |
| Fig. 3.15 Drawing of molding core | 68 |
| Fig. 3.16 3-Dimensional shape of molding core | 68 |
| Fig. 3.17 Input of aspheric form parameter | 70 |
| Fig. 3.18 Flowchart of grinding process | 70 |
| Fig. 3.19 First grinding result of molding core | 72 |
| Fig. 3.20 Compensation grinding result of molding core | 72 |
| Fig. 3.21 Final grinding result of molding core | 73 |

| | |
|--|----|
| Fig. 3.22 Form accuracy and surface roughness of aspheric molding core · | 74 |
| Fig. 3.23 Grinding result of plane molding core | 75 |
| Fig. 3.24 Form accuracy and surface roughness of plane molding core | 76 |
| Fig. 3.25 Coating film structure and DLC coated molding core | 80 |
| Fig. 3.26 Form accuracy and surface roughness of DLC coated aspheric molding core | 81 |
| Fig. 3.27 Form accuracy and surface roughness of DLC coated plane molding core | 82 |
| Fig. 3.28 Form accuracy and surface roughness of aspheric molding core · | 85 |
| Fig. 3.29 Form accuracy and surface roughness of plane molding core | 86 |
| Fig. 3.30 Coating film structure and Re-Ir coated molding core | 87 |
| Fig. 3.31 Form accuracy and surface roughness of Re-Ir coated aspheric molding core | 88 |
| Fig. 3.32 Form accuracy and surface roughness of Re-Ir coated plane molding core | 89 |
| Fig. 4.1 Surface roughness variation according to feedrate | 92 |
| Fig. 4.2 Surface roughness according to feedrate | 93 |
| Fig. 4.3 Surface roughness variation according to depth of cut | 94 |
| Fig. 4.4 Surface roughness according to depth of cut | 95 |
| Fig. 4.5 Surface roughness variation according to diamond wheel mesh | 96 |
| Fig. 4.6 Surface roughness according to diamond wheel mesh | 97 |

Fig. 4.7 Final grinding result of molding SiC core 101

Fig. 4.8 Form accuracy and surface roughness of aspheric molding SiC
core 102

List of photograph

Photo 2.1 Microlens processing machine(ASP01, Nachi-Fujikoshi Co., Japan)
..... 27

Photo 2.2 Aspheric polishing machine(KRP-2200F, Kuroda Co., Japan) 30

Photo 2.3 Ultra high accurate 3-D profilometer(UA3P, Panasonic Co., Japan)
..... 32

Photo 2.4 3-D surface roughness measurement system(NewView5000, Zygo Co.,
USA) 34

Photo 2.5 High precision vision inspection system(STM6, Olympus Co., Japan)
..... 35

Photo 3.1 WC plane molding core 65

Photo 3.2 Surface of molding core for aspheric glass lens 77

Photo 3.3 Molding core for aspheric glass lens 78

Photo 4.1 Surface of SiC molding core 98

Photo 4.2 Silicon carbide molding core 103

List of table

| | |
|--|----|
| Table 1.1 Application fields of aspheric optical components | 5 |
| Table 2.1 Table of conic constant values | 24 |
| Table 2.2 Specification of ASP01 | 28 |
| Table 2.3 Specification of precision slide state | 29 |
| Table 2.4 Specification of aspheric polishing machine | 31 |
| Table 2.5 Specification of UA3P | 33 |
| Table 2.6 Characteristics of bond | 39 |
| Table 2.7 Characteristics of Tungsten Carbide(WC) | 43 |
| Table 2.8 Characteristics of Silicon Carbide(SiC) | 45 |
| Table 3.1 Factors and levels used in experiments | 47 |
| Table 3.2 Experimental point used in experiments | 48 |
| Table 3.3 Optimal grinding condition for Tungsten Carbide (WC) | 59 |
| Table 3.4 Grinding conditions of Tungsten Carbide(WC) | 63 |
| Table 3.5 Measurement results of surface roughness | 64 |
| Table 3.6 Grinding condition of molding core | 71 |
| Table 3.7 Measurement result of molding core | 78 |
| Table 3.8 Comparison results of bare molding core of DLC coated molding core | 83 |
| Table 3.9 Comparison results of bare molding core and Re-Ir coated molding core | 90 |

| | |
|--|-----|
| Table 4.1 Optimal grinding condition of Silicon Carbide(SiC) | 99 |
| Table 4.2 Grinding condition of Silicon Carbide(SiC) core | 100 |

NOMENCLATURE

| | |
|--------------------|----------------------------------|
| d_g | Dimension of diamond grit |
| M | Mesh number |
| $z(r)$ | Sag of lens |
| r^2 | Diameter of sphere |
| c | Curvature of center |
| k | Conic constant |
| A, B, C, D | Aspheric constant |
| D_s | Cutter diameter |
| z | Number of flute in cutting tool |
| N | RPM of cutting tool |
| V_s | Circumference velocity of cutter |
| V_w | Feedrate of workpiece |
| d | Cutting depth |
| S_z | Feedrate of cutter |
| F_t | Tangent vector of cutting force |
| F_n | Normal vector of cutting force |
| P | Power of grinding |
| V_{wheel} | Wear volume |
| Δr_s | Radius of wheel after wear |

ABSTRACT

A Study on Ultra-Precision Grinding of Aspheric Glass Lens Molding Core

By Hyun Uk Kim

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

Department of Mechanical Engineering

Graduate School of Chosun University

Recently, with increasing lightness and miniaturization of high resolution camera phones, the demand for aspheric glass lens has increased because plastic and spherical lenses are unable to satisfy the required performance. Since an aspheric glass lens is fabricated by high temperature and pressure molding using a tungsten carbide molding core, precision grinding and coating technology for the molding core surface is required.

Diamond Like Carbon(DLC) and Rhenium-Iridium(Re-Ir) coating are being researched in various fields because of its high hardness, high elasticity, high durability, and chemical stability and is used extensively in several industrial fields. Especially, the DLC and Re-Ir coating of the molding core surface in the molding core used in the fabrication of a glass lens is an important technical field, which affects the improvement of the demolding performance between the lens and molding core during the molding process and the molding core lifetime.

In this paper, the optimal grinding condition for tungsten carbide(WC) using DOE(Design of Experiment) for the glass lens molding core is proposed. In addition, feedrate control for influence of surface roughness(Ra) was developed. With the use of the feedrate control method, the surface roughness(Ra) of the molding core was improved by about 1.5 nm(@clear aperture; 3.0 mm).

For the 3 mega pixel and 2.5 magnifications optical zoom for camara phone module, tungsten carbide molding cores were fabricated under this optimal grinding condition using feedrate control method. The measurement results of the molding core for DLC coating were as follows: PV of 0.155 μm (apheric surface), PV of 0.100 μm (plane surface), and Ra of 3.4 nm(aspheric surface) and 1.9 nm(plane surface). The measurement results of the molding core for DLC coating were as follows: PV of 0.153 μm (apheric surface), PV of 0.105 μm (plane surface), and Ra of 3.5 nm(aspheric surface) and 2.0 nm(plane surface).

Molding cores were coated with the DLC and Re-Ir, respectively. Then form accuracy(PV) and surface roughness(Ra) of the cores were measured and evaluated. DLC and Re-Ir coating on the surface of the tungsten carbide molding core can be used not only to improve the demolding performance between the molding core and glass lens and to improve the molding core lifetime, but also to influence the form accuracy and surface roughness of the glass lens.

Because SiC is a material of high hardness and high brittleness, it can crack or chip during grinding. It is, however, widely used in many fields because of its superior mechanical properties. In particular, when aspheric glass lens molding core is used, the SiC coating process, which must be carried out before the DLC coating, can be eliminated and thus, manufacturing time and

cost can be reduced

In this paper, the optimal grinding condition for silicon carbide(SiC) was developed under the grinding condition of tungsten carbide. A silicon carbide molding core was fabricated under this optimal grinding condition using the feedrate control method. The measurement results of the molding core were as follows: PV of 0.260 μm (aspheric surface) and Ra of 5.3 nm(aspheric surface).

제 1 장 서 론

제 1 절. 연구배경

1. 연구필요성

오늘날 현대 산업사회의 첨단 제품의 발전을 주도하고 있는 반도체 및 정보통신을 포함한 첨단 산업은 하드웨어 면에서 초정밀이라는 기술적 특성을 공동 기반으로 하고 있다. 이것은 반도체의 고집적화, 광자기 메모리의 고용량화, 광섬유를 활용한 다채널 고속 통신망, 그리고 높은 분해능을 가진 레이저 프린터 등의 대표적인 활용 예를 통해 쉽게 짐작 할 수 있다. 또한, 현재 초정밀을 향한 핵심기술의 보유는 첨단산업의 국제적 경쟁력 확보를 위해 필수적인 공통 기반기술로써 자리매김을 하고 있다.^[1,2]

정밀공학에서의 정밀계측제어 기술은 1990년도에 들어 0.1 nm의 변위 분해능을 갖는 초정밀 위치 결정을 가능하게 하였다. 이는 광기전 복합기술의 발전에 근거하고 있으며, 최근 순수 과학 및 공학 분야에서 획기적인 파급효과를 창출하고 있다. 대표적인 예로 물리학 분야에서는 STM(Scanning Tunneling Microscopy)과 AFM(Atomic Force Microscopy)의 출현으로 원자 단위 수준의 초미세 측정과 조작성이 가능하게 되었다. 그리고 생명과학 분야에서는 유전자의 조작 및 관측을 가능하게 하고 있다. 공학 분야에서의 파급 효과는 초정밀 메카트로닉스 기술의 도약을 유도하여 반도체 제조 및 검사 장비, 광통신 부품, 광자기디스크 등의 기능고도화에 획기적인 진전을 이루고 있다.^[3,4]

초정밀 가공은 가공능률, 복잡한 형상을 가공하는데 있어서 다른 가공법을 능가하는 우수한 특징을 가지고 있으며, 기본적으로 창성 운동에 의해서 가공이 이루어지므로 가공기의 정밀도가 가공 면에 직접 옮겨져 간다. 따라서 공작기계의 정밀도 특히 운동정밀도가 가공품의 정밀도를 실현하는데 극히 중요한 함수가 된다.^[5]

공작기계의 정밀도가 10 μm 일 경우에는 베어링은 볼 또는 롤러 베어링으로 충분하고, 이송장치는 정밀 리드 스크류를 사용하면 충분하다. 그러나 정밀도가 1 μm 를

요구할 때는 유동압 베어링 또는 유정압 베어링을 사용해야 하며 예압을 준 볼 또는 롤러 베어링으로 가이드 웨이를 운전 시켜야한다. 초정밀에는 유압을 사용하는 동압과 정압 베어링이 있고 공기를 사용하는 공기 정압 베어링과 전자 베어링을 고려할 수 있다. 1 μm 까지의 범위를 마이크로 테크놀로지라고 부르며 1 nm의 정밀도를 창출할 수 있는 가공기술을 나노 테크놀로지라고 구별하고 있다.

초정밀가공에 관한 연구는 미국, 일본, 독일 등 선진국에서 활발한 연구가 이루어지고 있으며 역사적으로 볼 때, 1960년대에 기계의 주축에 공기 베어링을 사용하기 시작하였으며, 1970년대에는 복잡한 형상을 지닌 광학 렌즈를 제작하기 위한 실용 연구가 시작되었다. 1980년대와 1990년대에 들어서는 초고정밀 공작기계 개발과 함께 복잡하고 어려운 측정기술과 신뢰성이 있는 다이아몬드공구의 연구 및 비구면 가공을 위한 공작기계 개발이 주를 이루어왔다.

최근 고화질 카메라폰이 경박단소화 되는 경향에 따라 Plastic렌즈 또는 구면 Glass렌즈만으로는 요구되는 광학적 성능 구현이 힘들기 때문에 비구면 Glass렌즈에 대한 요구가 증가하고 있다. 이러한 비구면 Glass렌즈는 일반적으로 초경합금 성형용 코어를 이용한 고온압축 성형방식으로 제작되어지기 때문에 코어면의 초정밀 연삭가공 및 코어면 코팅기술 개발이 시급한 상황이다.^[6,7]

대표적인 난삭재 Silicon Carbide(SiC)는 광학적 특성 및 기계적 특성, 전기적 특성 등 우수한 특성을 가진 재료로써 우주망원경, 레이저 광 및 X선 반사용 미러 등 다종, 다양한 용도로 이용되고 있으며 전기, 전자, 정보, 정밀기기의 급격한 발전으로 SiC의 수요가 급격히 증가하고 있다. 비구면 Glass렌즈 성형용 코어를 SiC 소재로 제작할 경우 성형용 코어의 수명향상, 렌즈 생산원가의 절감 및 코팅 과정의 간소화 등의 다양한 장점을 가지므로 SiC를 이용한 성형용 코어의 나노 정밀도급 초정밀 연삭가공기술의 개발이 필요하다.^[8,9]

본 논문에서는 3 메가픽셀, 2.5배 광학 줌 카메라폰 모듈용 비구면 Glass렌즈 개발을 목적으로 실험계획법을 적용하여 초경합금 성형용 코어의 최적연삭조건을 규명하였다. 또한, 최적연삭조건 규명과 더불어 비구면 성형용 코어의 표면조도를 향상시키기 위하여 이송속도 제어기법을 개발하였고, 이를 활용하여 비구면 Glass

렌즈 성형용 코어를 초정밀 연삭가공하였다. 가공된 성형용 코어면에 Diamond Like Carbon(DLC) 코팅과 Rhenium-Iridium(Re-Ir) 코팅을 각각 수행하였고, 측정을 통하여 코팅이 성형용 코어에 미치는 영향을 각각 평가하였다. 또한, 초경합금 비구면 성형용 코어의 초정밀 연삭가공조건 및 결과를 바탕으로 난삭재인 Silicon Carbide(SiC)를 이용하여 비구면 Glass렌즈 성형용 코어를 초정밀 연삭가공하였다.

2. 연구 동향

초정밀 가공기 개발 및 초정밀 가공의 역사를 살펴보면, 1960년대의 첨단기술은 에너지, 컴퓨터, 전자, 그리고 군사공학의 요구에 따른 연구로부터 시작되었으며 미국에서 J. B. Bryan이 Livermore National Laboratory(LNL)에서 그 최초의 연구를 시작했다고 볼 수 있다. 1970년대에는 복잡한 형상을 지닌 광학 렌즈를 제작하기 위한 실용 연구가 시작되었고 1980년대에 들어서는 초고정밀 동작기계 개발과 함께 복잡하고 어려운 측정기술과 신뢰성이 있는 다이아몬드공구의 연구가 진행되었다.^[10]

마이크로닉스 시대가 새로이 도달함으로써 기계공업, 전기기계공업, 반도체 공업, 광학공업 등 각 분야에 초정밀가공 기술이 필요하게 되었으며 그 필요성은 더욱 커지게 된 것이다. 약 200년 전에 최초의 동작기계라고 말할 수 있는 1775년 Wilkinson의 Boring machine은 실현 가능한 치수 정밀도가 1 mm이었다. 그로부터 120년이 지난 1900년대에는 그 1000배의 정밀도인 1 μm 에 도달할 수 있었고 200년이 지난 최근에는 0.1 μm 까지 발전하고 있다. 가공표면 정밀도는 치수 정밀도의 10배에서 100배인 나노미터 단위가 된 것이다.^[11]

중요한 연구개발 사례로는 필립스사 중앙연구소에서 비구면 렌즈의 다이아몬드 절삭을 목적으로 하는 Colath를 개발하였으며, 1977년 Union Carbide사가 직경 800 mm의 비구면 광학부품을 0.1 μm 의 정밀도로 가공하였으며, 라우렌브 리브드모어 국립실험소(LLNL: Lawrence Livermore National Laboratory)의 대형광학 다이아몬드 터닝머시인(LODRM : Large Optics Diamond Turning Machine)에서는 1625 mm 직경의 레이저 반사경을 25 nm의 형상정도, 4.2 nm Rmax의 표면 거칠기를

달성한 것으로 보고되었다.^[12] 라우렌브 리브드모어 국립실험소(LNL)는 공공기관이었으므로 LLNL에서 개발된 LODTM, PERL(precision engineering research lath)등은 그 특성에 관한 여러 가지 자료들이 발표되어 각국의 초정밀가공기 개발에 많은 기초가 되었다. 최근에는 영국 Talyer Hopson사의 계열사인 미국 Precitec사에서 개발한 초정밀 비구면 가공기로 형상정밀도 0.1 μm , 표면 거칠기 0.01 μm Rmax를 실현한 것으로 보고되었다.^{[4][5]} 또한, 초정밀 연삭가공에서는 Toshiba사, Toyota사, 그리고, Nachi-Fujikoshi사 등에서 개발한 초정밀가공기를 이용하여 형상정밀도 0.1 μm , 표면 거칠기 0.01 μm Rmax를 실현한 것으로 보고되었다.^[13,14]

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 비구면 렌즈나 반사경이 일부 한정된 분야에만 사용되어 그 수요가 많지 않았고 요구되는 정밀도 또한 크게 높지 않았기 때문에 비구면 렌즈와 반사경은 주로 숙련된 작업자의 수작업에 의해 랩핑이나 폴리싱가공되었다. 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 광학부품의 적용 예를 나타낸 것이다.

Table 1.1 Application fields of aspheric optical components^[15,16]

| <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 정밀광학부품에 사용되는 초정밀 비구면 렌즈를 가공하기 위한 기술로서는 래핑 및 폴리싱기술, 사출성형기술, 유리성형기술, 연삭숫돌을 사용하는 연삭가공기술 등으로 나눌 수 있다. 이들 가공법은 렌즈의 소재, 요구정밀도, 사용 환경, 생산량 등에 따라서 결정되며. 이 중에서 사출성형기술과 유리성형기술은 성형금형의 성형부위를 단결정 다이아몬드 공구를 사용하는 절삭가공기술이나 초정밀 연삭가공 기술에 의해 가공한다.^[17,18,19]

래핑/폴리싱은 연삭입자와 가공액 혼합한 것을 가공물과 공구(랩 혹은 폴리셔)의 사이에 넣고 공구와 공작물사이에 압력을 가하면서 미끄럼 운동을 시켜 연마하는 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 폴리싱기술 간의 구분이 없어지게 되었다. 또한 래핑 및 폴리싱기술은 가공법의 특성상 주로 유리, 세라믹, 실리콘 단결정 등 경취 특성을 갖는 무기재료의 초정밀가공에 주로 사용되고 있다.

국내에서의 연구는 초정밀가공기의 개발을 선두로 초정밀 가공에 대한 관심이 증가되고 있으며, 현재에는 캠코더의 비구면 렌즈, CDP 픽업용 렌즈, 프로젝션 TV 렌즈, 액정 프로젝션 TV 프레즈넬 렌즈, 카메라 렌즈 등의 전자부품의 금형 가공 및 생산에 직접 이용되고 있다. 그러나 상대적으로 짧은 연구 역사로 인하여 세계적인 연구결과에 비하여 국내에서의 초정밀 가공의 연구는 초기단계라 할 수 있으며, 원하는 형상정밀도와 표면거칠기를 얻기 위한 초정밀 가공조건에 관한 기술은 반드시 필요한 연구이다.^[20]

비구면 Glass 렌즈는 고정밀 성형용 코어를 사용하면 성형만으로 렌즈가 만들어지기 때문에 제조시간이 많이 단축되며, 고도의 재현성을 갖고 비구면 생산이 가능한 장점을 가지고 있다. 비구면 Glass 렌즈에 요구되는 가공 조건으로는 금형표면과 용착 반응이 일어나지 않는 Glass 조성, 형상의 고정밀도(0.2 μm 이내)를 실

현하기 위한 점도특성(108~1013 Poise), 그리고 표면 거칠기(100 Å 이내)를 위한 점탄성을 가져야 한다.

제 2 절. 연구내용

1. 실험계획법을 적용한 최적연삭가공조건 규명

기존의 연구에서는 최적연삭가공조건을 규명하기 위하여 4가지 인자인 연삭깊이, 이송속도, 주축회전속도 그리고, 터빈회전속도에서 3가지 인자를 고정변수로 사용하고 한 개의 인자를 변화시키면서 연삭가공을 수행하여 최적연삭가공조건을 규명하는 연구가 수행되었다. 그러나, 이러한 방법은 연삭가공조건을 규명하기 위한 연삭가공 횟수의 증가로 인해 실험에 소요되는 시간이 증가하고 인자 상호간의 교호작용을 알 수 없다는 단점이 있다.

최근 다양한 연구분야에서 실험인자와 특성치의 상호관계를 효과적으로 분석하기 위하여 실험계획법(Design of Experiments; DOE)을 적용하고 있다. 실험계획법은 최소의 실험횟수에서 최대의 정보를 얻을 수 있다는 장점을 가진다.

본 논문에서는 초경합금 성형용 코어 형상정도 향상을 위한 선행연구로써 초경합금(WC, Co 0.5%)을 연삭가공 할 때 표면조도(Ra)에 영향을 미치는 4가지 인자인 연삭깊이, 이송속도, 주축회전속도 그리고, 터빈회전속도를 고정변수로 선택하였고 다이아몬드 휠 메쉬 #1500과 #2000을 고정변수로 2⁴ 요인배치법을 활용하여 실험계획법을 수행하였다. 실험결과를 실험계획법 상용프로그램인 MINITAB을 이용하여 분석함으로써 최적연삭가공조건을 규명하였다.

2. 이송속도 제어기법을 통한 표면조도 향상 연구

비구면 Glass렌즈 성형용 코어 초정밀 연삭가공에서 비구면 Glass렌즈의 광학적 성능향상을 위해서 가공면의 형상정밀도 향상뿐만 아니라 표면조도의 향상도 요구되고 있다. 이러한 요구를 만족시키기 위해서 기존의 연구에서는 표면조도 향상을 위해 연삭가공에 연삭깊이, 이송속도, 주축회전속도, 그리고, 터빈회전속도 등을 변

화시키면서 최적연삭가공조건을 찾는 연구가 진행되고 있다. 그러나, 연삭가공시에 4개의 인자가 변화하지 않고 고정되어 가공되어 지므로 성형용 코어의 중심부에서 멀어질수록 표면조도가 높아지는 현상이 발생한다.

본 논문에서는 성형용 코어의 표면조도 향상을 위해 가공 반경위치에 따라 이송 속도를 제어할 수 있는 NC program을 개발하여 초정밀 연삭가공을 수행하였다. 그리고, 이송속도 제어기법을 활용한 연삭가공 결과와 기존 방식으로 연삭가공을 수행한 결과를 비교하여 이송속도 제어기법에 따른 표면조도 향상을 비교, 평가하였다.

3. 비구면 Glass렌즈 성형용 초경합금 코어 제작

최근 고화질 카메라폰의 수요가 증가하면서 Plastic렌즈 또는 구면 Glass 렌즈만으로는 요구되는 광학적 성능 구현이 힘들기 때문에 비구면 Glass렌즈에 대한 요구가 증가하고 있다. 이러한 비구면 Glass 렌즈는 일반적으로 초경합금 성형용 코어를 이용한 고온 압축 성형방식으로 제작되어지기 때문에 코어면의 초정밀 연삭가공기술개발이 시급한 상황이다.

본 논문에서는 3 메가픽셀, 2.5배 광학 줌 카메라폰 모듈용 비구면 Glass렌즈 설계를 기초로 비구면 Glass렌즈 성형용 코어를 설계하였다. 성형용 코어의 연삭가공을 위하여 정밀 지그 및 공구를 설계·제작하였으며, 최적연삭가공조건과 이송속도 제어기법을 활용하여 연삭가공을 수행하였다. 비구면 Glass렌즈 성형용 코어는 1차가공, X center error 보정가공 및 R fit error 보정가공을 통하여 0.2 μm 이하의 형상정도로 초정밀 연삭가공을 수행하였다. 또한, 평면 성형용 코어의 형상정도와 표면조도의 향상을 위하여 초정밀 폴리싱가공을 수행하였다.

4. 성형용 코어 성능향상을 위한 코팅 효과 연구

Diamond Like Carbon(DLC) 코팅과 Rhenium-Iridium(Re-Ir) 코팅은 고경도, 고탄성, 내마모성, 그리고 화학적 안정성을 가지기 때문에 다양한 산업분야에서 광범위하게 사용되고 있다. 특히, 비구면 Glass렌즈 성형에서 성형용 코어와 Glass렌즈

와의 이형성, 성형용 코어의 내마모성, 내부식성 및 수명향상을 위해 코팅이 수행되고 있다.

본 연구에서는 DLC 코팅과 Re-Ir 코팅을 성형용 코어면에 각각 수행하여 코팅이 성형용 코어의 이형성과 수명향상 뿐만 아니라 형상정도 및 표면조도에 미치는 영향을 평가하였다.

5. Silicon Carbide(SiC) 성형용 코어 초정밀 연삭가공

SiC는 기계적 특성이 우수하기 때문에 다양한 분야에서 주목받고 있다. 특히, 비구면 Glass렌즈 성형용 코어를 SiC 소재로 제작할 경우 성형용 코어의 수명향상, 렌즈 생산원가의 절감 및 코팅 과정의 간소화 등의 다양한 장점을 가지므로 SiC를 이용한 성형용 코어의 나노 정밀도급 초정밀 연삭가공기술의 개발이 필요하다. 그러나, SiC가 고경도, 고취성의 재료로 연삭가공 시 크랙(crack)이나 칩핑(chipping)이 발생하고, 연삭가공에 사용되는 다이아몬드 휠의 마모가 초경합금 연삭가공을 수행할 때 보다 심하기 때문에 원하는 형상정도로 가공하기 어렵다. 이러한 이유로 카메라폰 모듈용 비구면 Glass렌즈 성형용 코어로 SiC가 사용된 경우는 없었다.

본 논문에서는 초경합금 성형용 코어의 연삭가공기술을 바탕으로 최초로 카메라폰 모듈용 비구면 Glass렌즈 성형용 SiC 코어를 초정밀 연삭가공을 수행 하였다.

제 2 장 관련이론 및 실험장비

제 1 절. 초정밀 연삭가공 개요

1. 연삭가공의 기하학적 분석

연삭가공은 종종 밀링커터의 절삭작용에 비교된다. 그것은 밀링커터의 원주면상의 날이 다이아몬드 휠의 연삭입자에 해당하며 공작물에 이송을 주는 동시에 밀링커터 또는 다이아몬드 휠을 비교적 고속으로 회전시켜 가공하는 방식이 유사하기 때문이다. 따라서 밀링커터에서 한 날 당 최대 절입 깊이를 연삭에서의 입자 당 최대 절입깊이라고 생각할 수 있다.

먼저 밀링커터에서 최대 절입깊이를 기하학적으로 계산해본다. Fig. 2.1은 다이아몬드 휠의 연삭가공 모델링을 나타낸 것이다. 밀링커터의 절삭가공 모델링을 표시하는 Fig. 2.1(a)에서 커터지름 D_s , 커터날 수 Z , 커터의 단위시간당 회전수 N , 커터의 원주 속도 V_s , 공작물 이송속도 V_w , 절입깊이 d , 날 당 이송량 S_z 라고 기호를 정한다.

Fig. 2.1(a)에서 해칭한 부분을 날 하나가 절삭한 부분이라고 하면 커터의 중심 O 와 절삭상의 한 점 A 의 연장선에 있는 \overline{AC} 길이가 날 당 최대 절입깊이 g 가 된다. 여기서 $\angle AOD = \theta$ 로 놓고, 절입깊이 d 는 커터지름 D_s 에 비해 작다고 하면 식 (2.1) ~ 식 (2.3)과 같다.

$$g = \overline{AC} = \overline{AB} \sin \theta \quad \dots \dots \dots (2.1)$$

$$\overline{AB} = S_z = \frac{V_w}{NZ} \quad \dots \dots \dots (2.2)$$

$$\overline{AE} = \sqrt{\left(\frac{D_s}{2}\right)^2 - \left(\frac{D_s}{2} - d\right)^2} = \sqrt{D_s d - d^2} \quad \dots \dots \dots (2.3)$$

$d \ll D_s$ 이므로 식 (2.4)와 식(2.5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\overline{AE} \doteq \sqrt{D_s d} \quad \dots\dots\dots (2.4)$$

$$\sin\theta = \frac{\overline{AE}}{OA} = \frac{\sqrt{dD_s}}{D_s/2} = 2\sqrt{\frac{d}{D_s}} \quad \dots\dots\dots (2.5)$$

따라서 최대 절입깊이(\overline{AC})는 식 (2.6)과 같다.

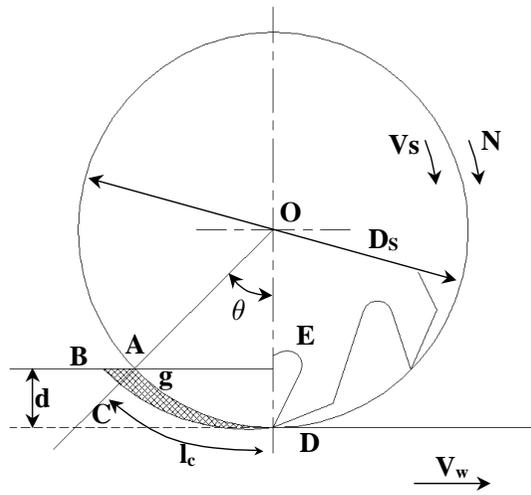
$$g = 2\frac{V_w}{NZ} \sqrt{\frac{d}{D_s}} \quad \dots\dots\dots (2.6)$$

연삭의 경우는 커터의 날수 Z 대신에 연삭날간격 μ 를 사용한다. 즉, $\mu Z = \pi D_s$ 로 놓고 이것을 식 (2.6)에 대입하면 연삭의 최대 절입깊이를 식 (2.7)과 같이 나타낼 수 있다.

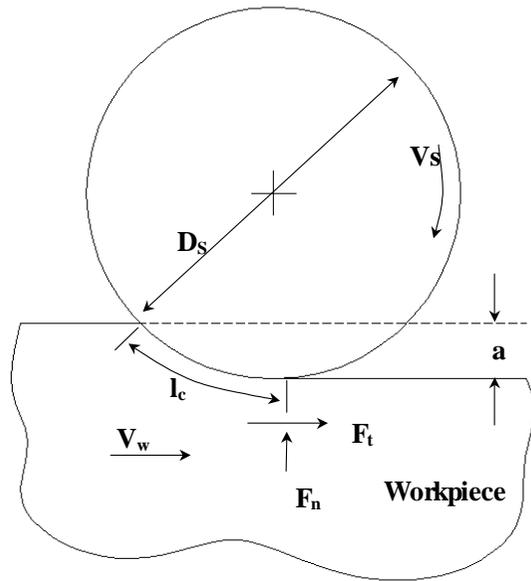
$$g = 2\mu \frac{V_w}{V_s} \sqrt{\frac{d}{D_s}} \quad \dots\dots\dots (2.7)$$

여기서 $V_s = \pi D N$ 이다. 그리고, 접촉호의 길이 l_c 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.^[21]

$$l_c = \frac{D_s}{2} \theta = \sqrt{dD_s} \quad \dots\dots\dots (2.8)$$



(a) Cutting model of milling cutter



(b) Modeling of grinding

Fig. 2.1 Grinding models of orthogonal diamond wheel

2. 연삭저항력 및 연삭비

연삭저항력은 연삭작용 때문에 휠과 공작물 사이에서 발생하는 저항력을 말한다. Fig. 2.1(b)는 평면 연삭가공 모델링을 나타낸 것으로, 플런지 연삭의 경우 휠의 연삭작용에 저항하는 공작물에 발생하는 전체 저항력벡터는 접선성분 F_t 와 법선성분 F_n 으로 나눌 수 있다. 트레이스 연삭에서는 연삭축에 평행하고 테이블 이송방향에 수직한 연삭저항력성분이 추가된다. Fig. 2.1(b)에서 연삭저항력 성분과 관계하는 연삭력 P 는 식 (2.9)과 같다.

$$P = F_t (V_s \pm V_w) \dots\dots\dots (2.9)$$

플러스 사인은 공작물과 휠의 방향이 반대인 상향연삭에 대한 것이고, 마이너스 사인은 공작물과 휠의 방향이 같은 방향인 하향연삭에 대한 것이다. 이송속도가 휠 주속에 비해 매우 느릴 경우는 전체 연삭력은 식 (2.10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$P = F_t V_s \dots\dots\dots (2.10)$$

재료의 연삭은 연삭 휠의 마모를 동반한다. 휠의 성능은 주로 마모에 대한 저항성으로 평가된다. 그러나 휠의 마모는 고려되어야 할 하나의 인자일 뿐이다. 연삭 휠의 마모는 재료의 마모된 체적으로 표현된다. 플런지 연삭에 대한 휠의 마모체적은 식 (2.11)과 같다.

$$V_{wheel} = \pi D_s \Delta r_s b \dots\dots\dots (2.11)$$

여기서 Δr_s 는 감소된 휠 반지름이고, D_s 는 마모 전후의 평균 휠 반지름이고, b 는 연삭폭이다.

3. 연삭가공방법

최근 광학기기의 소형화, 고화질화의 추세에 따라서 광학계의 중요한 부분인 비구면 렌즈의 정도 향상이 요구되고 있으며, 특히 현재 사용되어지고 있는 비구면 렌즈의 대다수는 플라스틱 성형품이어서, 정도향상의 관점에서 보면 비구면 글라스 렌즈로의 전환이 필요하다. 비구면 Glass 렌즈의 제조법은 Glass 몰드 프레스법과 연삭 연마에 의한 직접가공법 두 가지로 크게 분류된다. 플라스틱 성형에서는 일반적으로 Stavax에 무전해 Ni 도금한 금형소재가 사용되므로, 단결정 다이아몬드 바이트로 초정밀 절삭이 가능하다. 그러나 글라스 몰드 프레스법에서 초경합금 소재의 금형이 사용되므로 비구면 글라스 렌즈의 제조과정에서는 연삭이 가공의 승패를 좌우하는 가장 중요한 기술이 된다. 비구면 가공은 종래의 구면 가공과는 달리 공구의 운동궤적의 정밀한 전사에 의존할 수밖에 없다. 연삭가공은 운동궤적의 전사성이 나쁘므로 가능한 연마량을 적게 하며, 경면가공이 가능하다면 형상정도가 높은 비구면 가공이 가능해진다.

연삭가공은 크로스 연삭법, 경사축 연삭법, 그리고, 최근 소구경 렌즈 성형용 코어가공을 위한 페리렐 연삭법이 사용되고 있다.^[22,23]

크로스 연삭법은 Fig. 2.2에서 나타낸 것 처럼 휠 축과 공작물의 축이 직교하는 중형구성으로, X와 Z 축의 2축 동시제어에 의한 연삭 경로 \overline{AO} 에 따라 가공되어진다. 연삭점에 있어서 공작물의 회전방향과 휠의 주축 벡터가 직교하는 것이 이 방식의 특징이다. Fig. 2.3은 크로스(cross) 연삭 방법으로 초경합금 코어를 가공한 표면을 나타내며 공작물 반경방향 방사선이 형성되는 것을 볼 수 있다. 그러나 휠의 마모나 휠의 연삭비가 무디어지는 것이 한곳에 집중되는 결점이 있어, 드레싱을 적용함으로써 이러한 영향을 억제하는 방법이 제안되고 있다. 또한 공작물 중심에 있는 가공잔류를 피하기 위해서는 휠 상의 연삭점과 축의 높이를 정밀하게 맞추는 것이 필요하다.

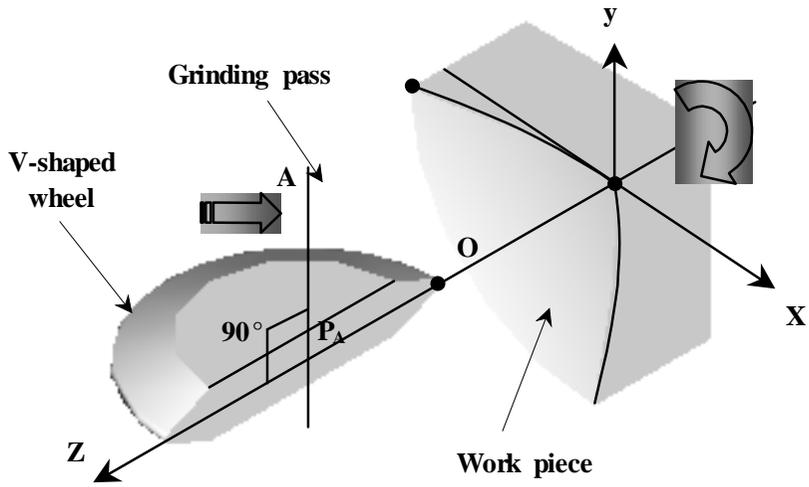


Fig. 2.2 Cross grinding method

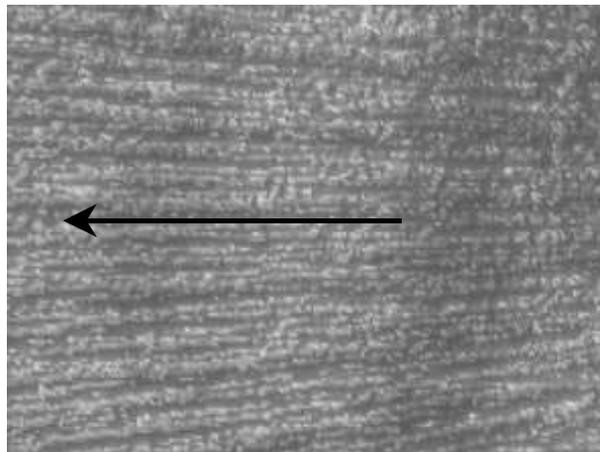


Fig. 2.3 Ground surface by cross grinding method

한편, Fig. 2.4는 경사축 연삭법을 나타내는 것으로 연삭점이 휠 단면의 한점에 집중되는 것을 피하기 위해 휠 축을 수직방향에서 30° 기울여 휠 외주를 원호단면으로 성형한 휠을 사용한 것이다. 이 연삭법도 기본적으로는 크로스 연삭이나, 연삭 경로는 Fig. 2.4에서 \overline{BD} 로 되어서 연삭작용점 P_B 가 휠 단면 위를 이동하여 휠의 유효 폭이 증대되므로 크로스 연삭법에 비해 휠의 수명이 향상된다.

또한, V형 휠에 비해 연삭점에서 휠과 공작물간의 상대속도가 작아지므로 마무리가공의 면조도가 좋아진다. Fig. 2.5는 사축 연삭 방법으로 초경합금을 가공한 표면을 나타내며 공작물 반경방향의 연삭조흔이 형성되는 것을 볼 수 있다. 한편, 휠 외주의 원호단면 위를 연삭점이 이동하기 때문에 휠 단면의 형상오차가 형상가공 정도에 영향을 미친다. 따라서 고정도의 트루잉(truing)이 필요하다.^[24]

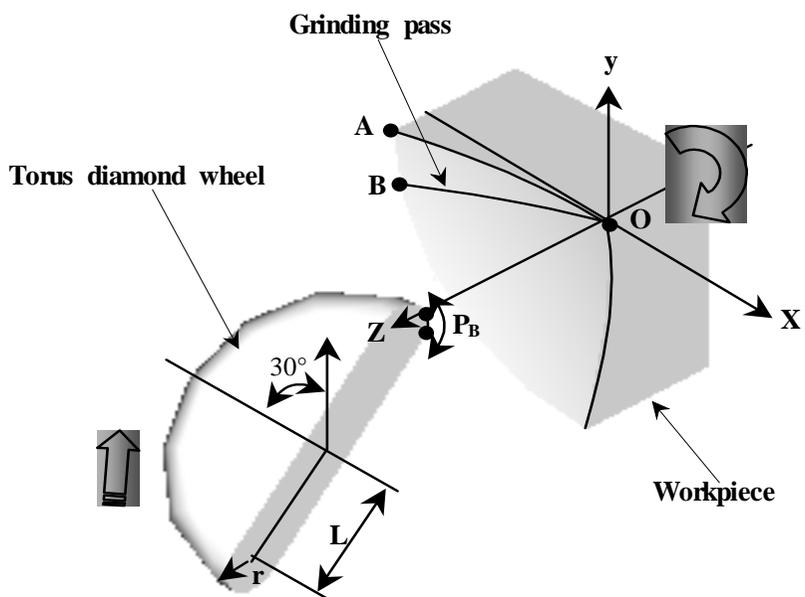


Fig. 2.4 Slanted tool axis grinding method

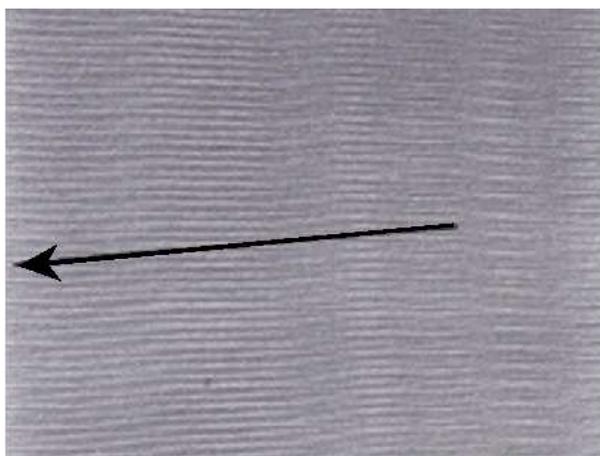


Fig. 2.5 Ground surface by the slanted tool axis grinding method

Fig. 2.6은 페러렐 연삭법을 Y축 방향에서 본 그림으로 페러렐 휠을 사용하여 공작물과의 간섭을 피하기 위해 휠 축을 X축 방향에 대해서 교차각 α 만큼 기울여 가공하는 방법이다. 이 방법은 종래 연삭법에 비해 다음과 같은 특징을 가진다.

1. 연삭점에 있어서 공작물의 회전방향과 휠의 주축 벡터방향이 평행이되므로 마무리가공 면조도가 좋다. Fig. 2.7은 페러렐 연삭법으로 가공후 표면에 나타나는 조흔으로 공작물 원주방향의 똑같은 연삭조흔이 형성된다.
2. 휠의 Y축 방향 연삭 유효폭을 매우 적게 할 수 있다.
3. 특히 오목면의 경우 휠, 공작물간의 상대곡률을 작게 할 수 있기 때문에 종래 연삭법과 비교하여 더 작은 마무리가공 표면 거칠기 값을 나타낸다.
4. Fig. 2.6에서 나타낸 바와 같이 XZ 단면 위를 휠과 공작물의 연삭점이 1대 1로 대응한다. 특히 네 번째는, 다음공정에서 가공면의 형상오차를 기상 계측하여 보정하고자 할 때 매우 유리하다.

페러렐 연삭법에서는 사축연삭방식에 비해 휠의 X축 방향 연삭 유효폭이 비약적으로 증대한다. 따라서 휠의 마모는 현저히 감소한다.^[25,26]

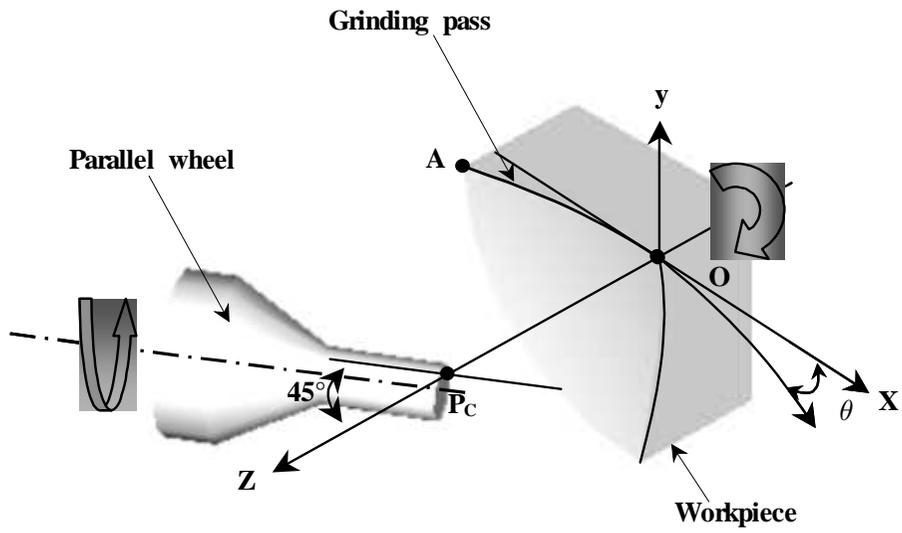


Fig. 2.6 Parallel grinding method

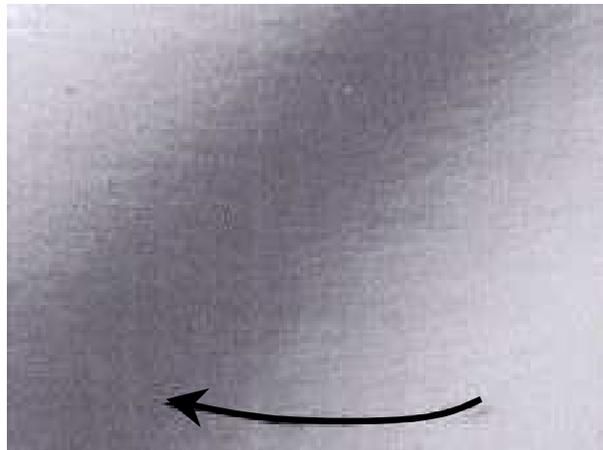


Fig. 2.7 Ground surface by parallel grinding method

제 2 절. 비구면 이론

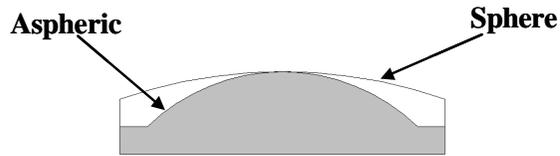
비구면 광학소자의 생산기술과 측정기술은 현대의 첨단기술로 부각되고 있다. 비구면으로 구성된 광학계는 넓은 시야와 고성능, 양질의 상을 얻을 수 있고, 또한 소형, 경량화 시킬 수 있는 등 많은 장점을 가지고 있다. 이러한 배경에 따라 초정밀 비구면 소자에 대한 필요성이 증대하고 있으며, 이러한 요구에 부응하기 위하여 비구면 초정밀 가공기술과 측정기술에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 초정밀 비구면에 대한 새로운 생산기술이 많이 소개되어 있으나 대부분의 핵심기술은 개발자의 비밀로 유지되고 있는 반면 측정기술은 업계에 널리 반영되어 있다.

비구면에 관한 연구는 Rene Decartes가 1638년에 구면 수차를 완전히 제거한 렌즈의 기하학적 조립 방법을 발표하였으며, 1663년에 James Gregory는 원추 곡면이 구면수차를 보정할 수 있다는 것을 발표하였다. 1671년에 Newton은 렌즈의 색수차 문제를 제거하기 위하여 반사경을 이용한 망원경을 제작 발표하였고, 1732년에 Short가 포물면 거울을 손으로 만들어 타원면 거울과 합하여 반사형 망원경을 제작하여 이 망원경의 이름을 상술한 Gregory의 이름을 따서 “Gregory Telescope”라 칭하였다. 1990년대를 전후하여 Carl Zeiss는 비구면 시스템에 대한 많은 발명을 하였고 생산 방법에 대한 연구도 많이 하였다. 정밀도가 높은 카메라 렌즈 제작이 가능한 기계는 1960년도에 가능하게 되었다.

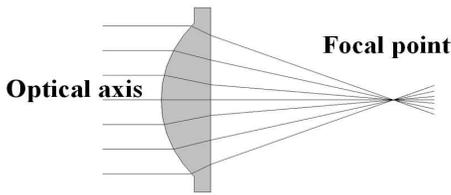
최근에는 새로운 광원으로 레이저가 개발되고 광학기술과 전자공학, 정밀기계공학과와의 결합이 이루어짐에 따라서 비구면 렌즈의 가공 기술도 크게 발전하고 있다. 또한, 컴퓨터의 개발과 더불어 복잡한 광학 시스템의 계산이 가능해 졌을 뿐 아니라 초정밀 가공 기술이나 초정밀 측정 기술 등의 핵심기술이 급속히 진보되어 고정밀 비구면 렌즈가 대량으로 생산되고 제품화되는 상황이 일어나고 있어 종래의 구면 렌즈만을 주로 사용하였던 많은 단점과 불편함이 점차 해소되어 가고 있다.

최근 코닥사는 1982년 디스크, 카메라에 비구면 사출 렌즈를 사용한 것을 기점으로 1984년에는 CD픽업용 렌즈가 비구면으로 사용하였다. 1985년 12월의 렌즈 생산량은 CD용 렌즈만 월 60만개에 이르게 되었는데, 비구면 렌즈의 단가가 구면

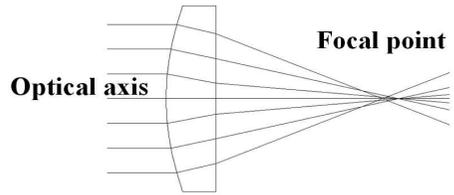
렌즈의 3~4배가 되는 시점에 가면 구면 렌즈의 광학계는 거의 비구면으로 대체될 것으로 예상된다. Fig. 2.8은 구면 렌즈와 비구면 렌즈의 특성들을 나타낸 것으로 (a)는 구면과 비구면의 도식화, (b)는 비구면 렌즈의 초점 위치, (c)는 구면 렌즈에서 초점 위치, (d)는 일정간격의 정사각형 격자용지를 비구면 렌즈를 통해 나타나는 이미지, 그리고, (e)는 구면 렌즈를 통해 본 이미지를 나타낸 것이다.



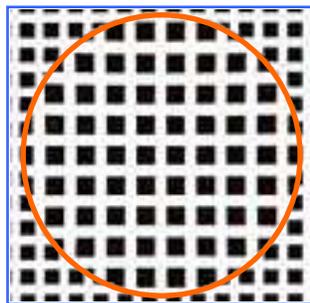
(a) Comparison of aspheric and spheric



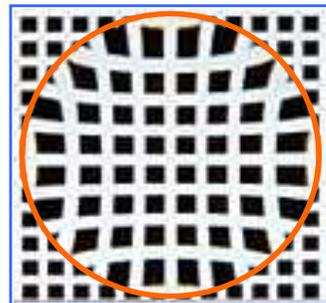
(b) Focal point of aspheric lens



(c) Focal point of spherical lens



(d) Image of aspheric lens



(e) Image of spherical lens

Fig. 2.8 Characteristics of aspheric and spherical lens

비구면 렌즈를 사용하면 구면 렌즈에 비하여 다음과 같은 많은 장점이 있다. 첫째 구면으로는 해결하기 어려운 상의 질을 저해하는 근본적인 구면수차, 비점수차, 왜곡수차등을 극소화 내지는 보다 쉽게 제거하여 선명하고 넓은 시야의 영상을 얻을 수 있다. 예를 들면, 상의 일그러짐을 완전히 제거한 대단히 넓은 시야의 대물렌즈, 대안렌즈, 고도수의 안경렌즈 등의 광학계 제작에 비구면을 사용할 수 있다. 둘째 광학계를 소형화, 경량화 시킬 수 있다. 즉, 구면 렌즈와 거의 동일한 수준의 성능을 유지한다면 비구면 1매를 사용할 경우 통상 구면렌즈 4~5매 정도의 효과를 가질 수 있다. 예를 들면, 미놀타사에서는 카메라용 교환렌즈에 비구면 1매를 사용함으로써 렌즈의 매수를 14매에서 12매로 줄이고, 길이를 87 mm에서 59.5 mm로, 무게를 495 g에서 290 g 등으로 대폭 감소시켰음을 보여주었다. 셋째 결과적으로 생산단가 인하에도 중요한 요인으로 부각되고 있다. 넷째 설계자유도의 증가로 광학계 설계를 위한 설계 변수가 많아져서 고성능을 실현할 수 있게 된다. 비구면을 수식으로 표현하면 다음과 같이 나타낸다.

$$z = \frac{C \cdot x^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + K) \cdot C^2 \cdot x^2}} + \sum_{i=1}^n A_i \cdot x^i \quad \dots\dots\dots (2.12)$$

여기서 z는 x축에 수직인 면의 새그(Sag) 값, K는 코닉 상수(conic constant), C는 1/R의 기본 곡률을 나타내며, R은 기본 반경, A₄에서 A₁₂는 비구면 계수이다.

Fig. 2.9는 가공축과 비구면 방향에 대한 개략도를 나타낸 것이다. 위 식은 1차원적인 면으로 정의되어 있지만 중심(0, 0)에서 회전 대칭의 단면이라고 가정한다.

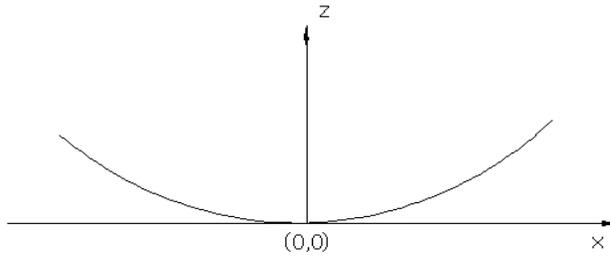


Fig. 2.9 Aspheric curve illustrating origin and axis

비구면의 면 기울기에 대한 식 또한 매우 유용한 식이다. 이것은 위의 비구면 식을 미분하면 얻을 수 있는데 다음과 같다.

$$Slope = \frac{Cx}{\sqrt{1 - (1 + K)C^2x^2}} + iA_i x^{i-1} \dots\dots\dots (2.13)$$

여기서, Slope = tan(surface angle)이다.

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

원추항은 다음과 같다.

$$z = \frac{Cx^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + K)C^2x^2}} \dots\dots\dots (2.14)$$

코닉상수 K의 값은 구면(sphere), 포물선(parabola), 타원(ellipse) 또는 쌍곡선(hyperbola)에 따라서 달라지는 값이다. Table 2.1은 K값에 따른 면의 형태를 나타낸다.

Table 2.1 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.

$$z = \frac{Cr^2}{2} \dots\dots\dots (2.14)$$

Fig. 2.10은 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.^[27,28,29]

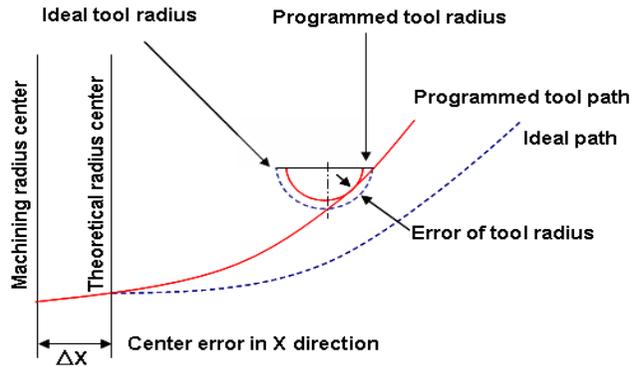
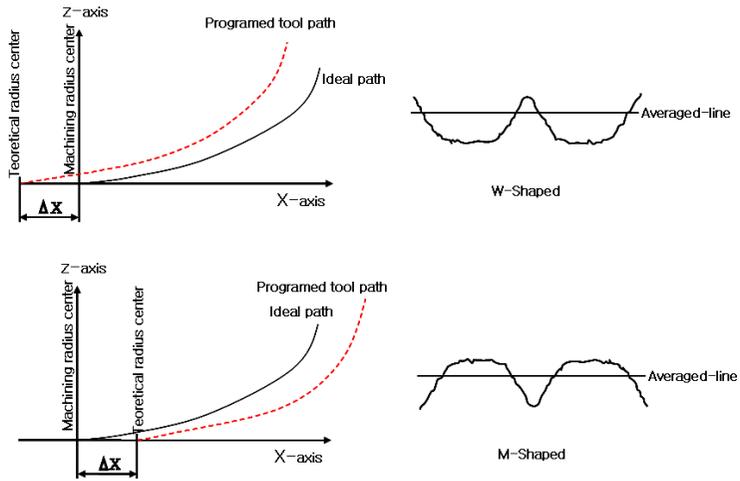


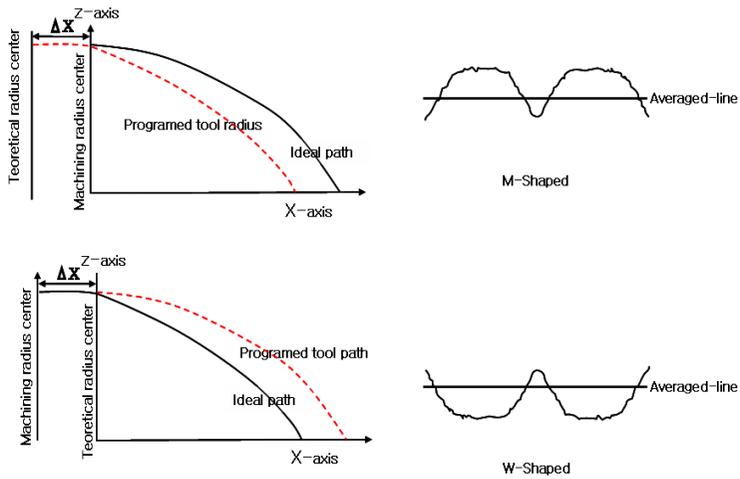
Fig. 2.10 Error of tool radius and center positions

공구위치결정 오차가 발생한 경우에는 이상적인 공구경로를 지나지 않고 오차발생량 만큼의 궤적을 그리게 된다. 이러한 이유로 실제 가공면의 형상은 오차가 그대로 전사되게 된다. 따라서, 위치결정에 의한 오차에 의한 형상은 공구의 중심에 따른 방향에 따라 형상오차가 생기며 이로 인한 형상은 측정프로파일 형태에 의해 구분할 수 있다.

Fig. 2.11에 나타낸 바와 같이 측정 프로파일 형상에 의한 공구 중심방향을 알 수 있으며 오차를 보정하여 설계 비구면과 가까운 형상을 가공할 수 있다.



(a) Measured profile due to different types of position error(Concave)



(b) Measured profile due to different types of position error(Convex)

Fig. 2.11 Measured profile due to different types of position error

제 3 절. 실험장치

1. 초정밀 가공장비

가. 초정밀가공기

본 논문에서는 초경합금(WC)을 연삭가공하기 위하여 초정밀가공기(ASP01, Nachi-Fujikoshi Co., Japan)를 사용하여 실험을 수행하였다. 초정밀가공기는 2개의 유정압 슬라이드(X, Z축)가 직교 형태를 이루며 구동하는 3축 가공기로서 유정압 베어링에 의해 구동되는 B축 Rotary Table에 공기 터빈 스피들이 장착되어 소구경 코어연삭이 가능한 초정밀 가공기이다. 안내면의 위치는 1 mm의 성능을 가지며, 최대 가공직경 150 mm까지의 공작물 가공이 가능하다. 안내면의 구동은 AC servo motor에 의해 구동된다. 초정밀가공기는 크린룸(Class 10,000)의 항온실 내에 설치되어서 환경온도를 $22\pm 1^{\circ}\text{C}$ 로 일정하게 유지하고 진동에 의한 영향을 피하기 위하여 특수 설계된 제진대 위에 설치하였다.

Photo 2.1과 Fig. 2.12은 초정밀가공기와 모형도를 각각 나타낸 것이고, Table 2.2는 초정밀가공기의 특성을 보여주고 있다. Fig. 2.13와 Table 2.3은 초정밀가공기의 슬라이드 구조와 특징을 보여주고 있다.



Photo 2.1 Microlens processing machine(ASP01, Nachi-Fujikoshi Co., Japan)

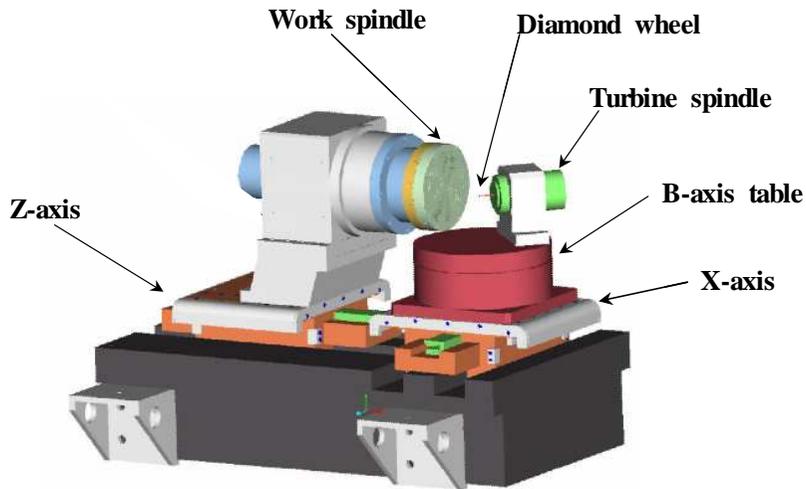


Fig. 2.12 3-D modeling of ASP01

Table 2.2 Specification of ASP01

| | | |
|-----------------------------|------------------------------|--------------------------|
| Slideway (X & Z axis) | Design | Hydrostatic oil bearings |
| | Travel (X-axis) | 200 mm |
| | Travel (Z-axis) | 200 mm |
| | Resolution | 1 nm |
| Work spindle | Design | Air bearing |
| | Speed range | Max 1500 rpm |
| | Load capacity | 5 kg |
| Wheel spindle | Swing capacity (diameter) | 150 mm |
| | Speed range | Max 50000 rpm |
| | Tool range | Max Ø20.0 mm |
| | Motor | AC servo motor |

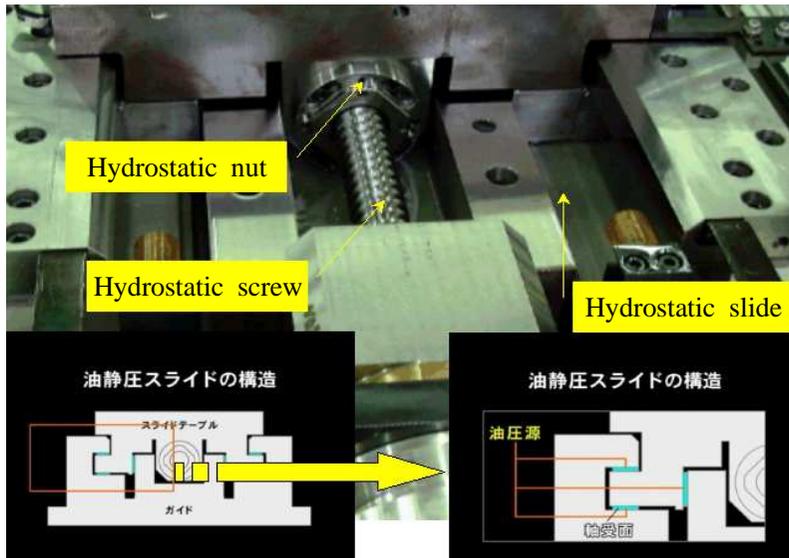


Fig. 2.13 Precision slide stage of ASP01

Table 2.3 Specification of precision slide state

| | X axis | Z axis |
|------------------------------|-------------|-------------|
| Max stroke (mm) | 250 | 200 |
| Resolution (μm) | 0.001 | 0.001 |
| Feedrate (mm/min) | 300 | 300 |
| Slide stage | Hydrostatic | Hydrostatic |
| Travel Screw | Hydrostatic | Hydrostatic |
| Motor | AC servo | AC servo |

나. 비구면 폴리싱가공기

본 연구에서는 평면 성형용 코어의 형상정도와 표면조도의 향상을 위하여 비구면 폴리싱가공기(KRP-2200F, Kuroda Co., Japan)를 사용하였다. Photo 2.2와 Table 2.4는 비구면 폴리싱가공기와 상세규격을 각각 나타낸다.



Photo 2.2 Aspheric polishing machine(KRP-2200F, Kuroda Co., Japan)

Table 2.4 Specification of aspheric polishing machine

| | | |
|---------------------------------------|--------|-----------------|
| Workpiece size | | D×H Φ200×200 mm |
| Table revolution speed | | 0.5~5 rpm |
| Polishing head speed | | 20~200 rpm |
| Cross feed of table [Y-axis] | Travel | 200 mm |
| | Speed | 0.1~3 m/min |
| Longitudinal feed of table[X-axis] | Travel | 200 mm |
| | Speed | 0.1~3 m/min |
| Polishing head vertical distance | | 50 mm |
| Polishing load | | 0.5~5 kgf |
| Tilting table | | Angle : 0~90° |

2. 초정밀 계측장비

가. 3차원 자유곡면 형상측정기

본 논문에서는 Glass렌즈 성형용 코어의 형상정도 및 표면조도 측정 및 평가를 위해 3차원 자유곡면 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.^[30] Photo 2.3과 Table 2.5는 고정도 3차원 형상측정기와 주요 규격을 각각 나타낸다.



Photo 2.3 Ultra high accurate 3-D profilometer(UA3P, Panasonic Co., Japan)

Table 2.5 Specification of UA3P

| | |
|--------------------------------|---|
| 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 - Pressure: 0.3 mN (30 mgf) |
| | Diamond - Tip curvature radius: 2 μm - Pressure: 0.3 mN (30 mgf) |
| Max. measurable angle | 60° |
| Probe measurement accuracy | Ruby : 0.01 to 0.05 μm |
| | Diamond : 0.1 μm |
| Measurement error | 0.05 μm / 100 mm |
| Measuring speed | 0.01 to 10 mm/sec |

나. 표면조도측정기

본 논문에서는 비구면 Glass렌즈 성형용 코어의 표면조도 측정을 위해서 3차원 표면조도측정기(NewView5000, Zygo Co., USA)를 사용하였다. 표면조도측정기는 초정밀 가공부품의 표면 형상을 비접촉식으로 광 간섭의 원리를 이용한 대물렌즈의 확대를 통하여 표면조도 및 미세한 현상을 측정하는 장비로써 국부 표면조도 측정에 활용된다. 광원은 백색광 할로겐램프이다. 수직분해능은 0.1 nm이고 수평분해능은 대물렌즈에 따라서 0.45 ~ 11.8 μm 사이가 된다. Photo 2.4는 3차원 표면조도측정기를 나타낸다.



Photo 2.4 3-D surface roughness measurement system
(NewView5000, Zygo Co., USA)

다. 공구현미경

본 논문에서는 비구면 Glass렌즈 성형용 코어의 가공면을 관찰하기 공구현미경 (STM6, Olympus Co., Japan)을 사용하였다. 공구현미경은 초정밀 가공부품의 표면의 미세한 현상을 측정하는 장비로써 성형용 코어와 Glass렌즈 표면검사에 활용된다. 광원은 백색광 할로젠 램프를 사용하며 40~1000배의 배율로 관찰할 수 있다. . Photo 2.5는 공구현미경을 나타낸다.



Photo 2.5 High precision vision inspection system(STM6, Olympus Co., Japan)

3. 다이아몬드 휠

초정밀 연삭가공시 형상정밀도에 크게 영향을 미치는 요인은 장비의 정밀도와 더불어 가공물을 가공하는 공구이다.

본 논문에서는 Glass렌즈 성형용 초경코어를 가공하기 위해 다이아몬드 휠을 사용하였다.

다이아몬드 휠의 성능은 다이아몬드 입자의 종류, 입자의 크기, 결합제의 종류, 그리고 가공에 따라 크게 달라지므로 이러한 인자들이 다이아몬드 휠의 성능에 미치는 영향을 이해하는 것은 매우 중요하다. Fig. 2.14는 다이아몬드 입자를 나타낸다.

다이아몬드 입자를 분류할 때 사용하는 체의 메시 크기를 나타내는 것으로써 1인치당 그물눈의 수를 나타낸다. 따라서 큰 숫자는 작은 입자크기를 의미한다. 다이아몬드 입자의 크기는 산포가 비교적 큰 편이지만 메시 크기에 따라 식 (2.15)로 나타낼 수 있다.

$$d_g [\text{mm}] = 68M^{-1.4} \dots\dots\dots (2.15)$$

여기서 d_g 는 다이아몬드 입자의 크기를, M 은 메시 번호를 나타낸다. 예를 들어, 메시 번호 60인 연마입자의 지름은 약 0.22 mm정도인 것이다. Fig. 2.15은 다이아몬드 휠의 표기방법을 나타낸다.

다이아몬드 휠의 표기에서 휠의 유지력을 나타내는 것을 결합도라고 부르며, 투입할 양을 나타내는 것을 집중도라고 한다. 여기서 결합도는 입자가 결합제로 유지되는 유지력의 대소를 표시하는 것으로써, 알파벳으로 나타내며, A에 가까울수록 연하고 Z에 가까울수록 단단하다. 또한 집중도는 입자층 중에 분포된 다이아몬드, CBN(cubic boron nitride)입자의 비율을 나타내며, 집중도 100 %라는 것은, 입자층 1 cm²당 4.4 carats의 비율로 들어있다.

다이아몬드 입자는 여러 종류의 결합제에 의하여 결합되어진다. 이러한 결합제는 연삭 저항력과 연삭온도에 견딜 수 있어야 하며, 연삭유로부터 화학적 영향을

받지 않아야 한다. 또한 결합제는 휠의 강성을 유지할 수 있어야 하며, 마모된 입자를 적기에 탈락시킬 수 있어야 한다. 주로 사용되는 결합제는 비트리파이드(vitrified bond), 레지노이드(resin bond), 금속결합제(metal bond) 등이 있다.

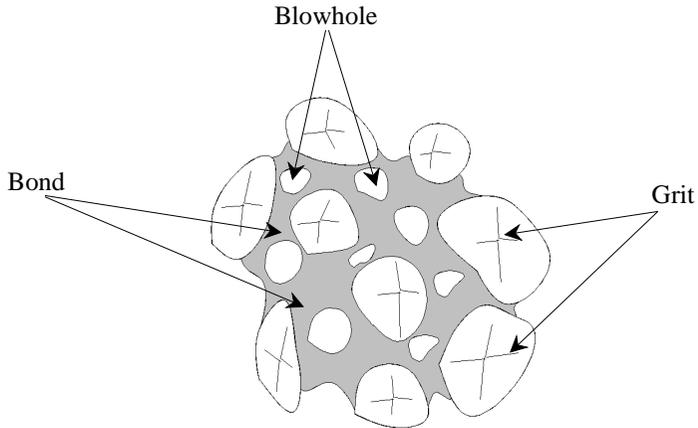


Fig. 2.14 Structure of diamond wheel

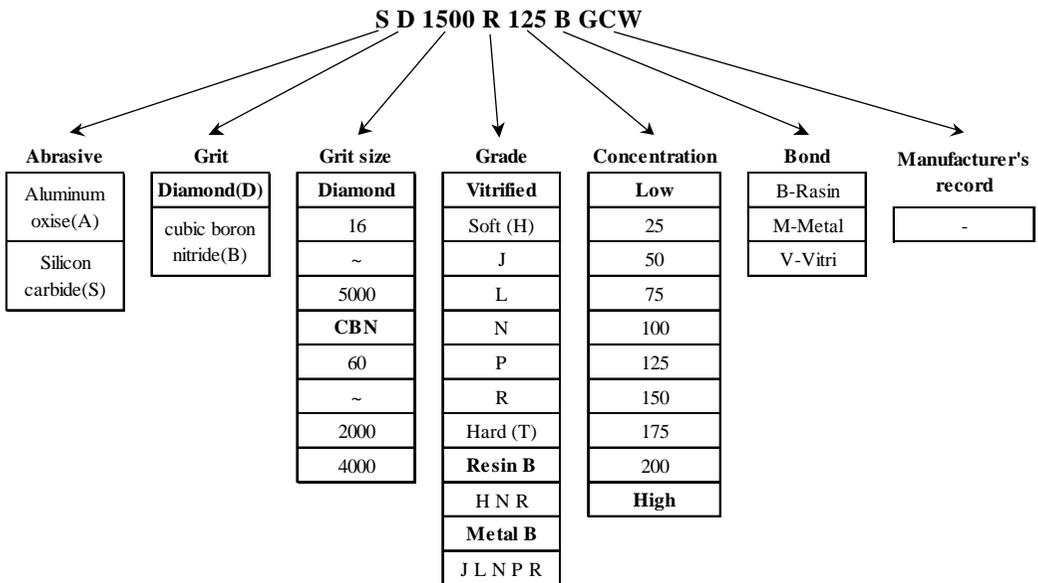


Fig. 2.15 Diagram of diamond wheel

연삭가공에 사용되는 다이아몬드 휠은 본드 종류에 따라 구분하면 레진 본드 휠, 비트리파이드 본드 휠 및 메탈 본드 휠이 있다. 전착 다이아몬드 휠은 일종의 메탈 본드 휠로 간주할 수 있다. Fig. 2.16과 Table 2.6은 본드의 특성을 보여주고 있다.

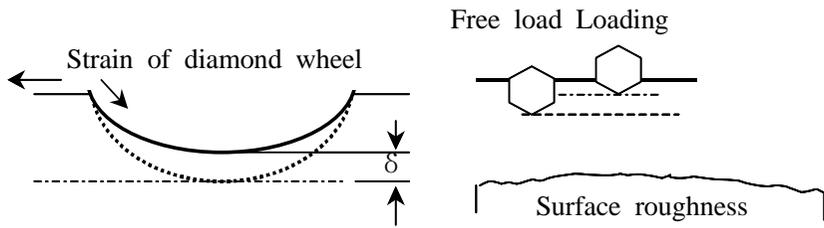
레진 본드 휠은 Table 2.6에 나타난 것처럼 탄성 계수가 작기 때문에 연삭 시에 휠과 가공물의 접촉부에 탄성 변형이 생긴다.^[18] 이 때문에 지립이 본드 안을 메우고 지립 연삭날 선단이 가지런해지기 쉬우며, 동시 연삭 절삭날수도 많아지기 때문에 표면 거칠기가 작아진다. 또 연삭면에 생성된 균열의 크기도 작아진다. 입자 유지력과 내마모성이 있어서 연삭미가 좋으며 본드에 인성이 있어, 마무리면의 칩핑등 가공물의 표면품질이 높다. 반면 휠의 탄성 변형 영향으로 가공물에 모서리 늘어짐이나 연삭 잔여물이 생기기 쉽다. 그리고 본드의 파괴 강도가 작기 때문에 이 휠은 일반적으로 정밀, 경면연삭에 이용된다.

비트리파이드 본드 휠은 지립층의 탄성 계수가 크고, 연삭 시에 휠의 탄성 변형이 작으며 연삭 잔여물이 적은 것은 물론 파괴 강도가 작기 때문에 치수·형상 정밀도를 필요로 하는 정밀, 경면연삭에 이용된다. 그리고 메탈 본드 휠은 탄성 계수 및 파괴 강도 모두 크기 때문에 고능률, 중연삭에 이용된다. 따라서 초경합금의 경면 연삭에는 일반적으로 레진 본드 휠을 사용한다.

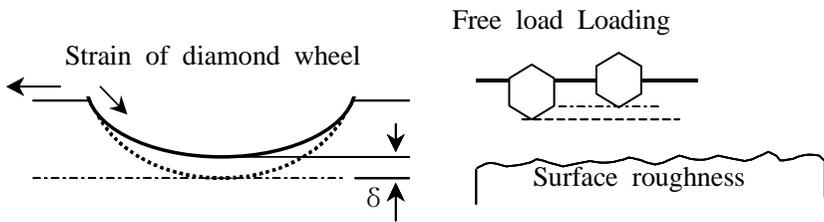
다음으로 중요한 것은 입도 선택이다. 일반적인 WA 나 GC 비트리파이드 지식의 경우에는 단석 다이아몬드 드레서 이송을 변경하여 연삭 시의 표면 거칠기를 조절할 수 있다. 그러나 다이아몬드 휠의 경우에는 드레싱으로 조절 가능한 표면 거칠기의 범위가 매우 작고, 입도에 따라 우선적으로 표면 거칠기 범위가 결정되어 버린다. 이 때문에 연삭 작업에서는 필요한 표면 거칠기 정도에 따라 사용하는 휠의 입도를 결정하면 된다.

Table 2.6 Characteristics of bond

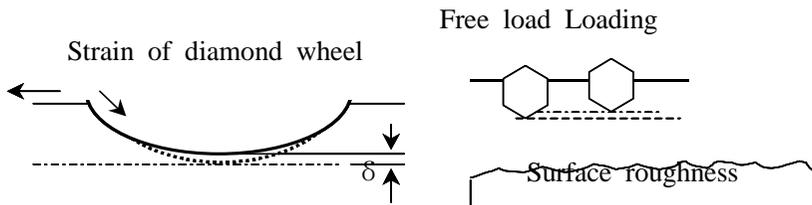
| | Resin | Vitrified | Metal |
|---|-------|-----------|-------|
| Density | 1.15 | 2.5 | 8.8 |
| Hardness (Hv kgf/mm ²) | 12 | 780 | 82 |
| Tensile strength (kgf/mm ²) | 5 | 6 | 38 |
| Young's Modules (kgf/mm ²) | 430 | 7.2 | 10.8 |
| Coefficient of Thermal Expansion (10 ⁻⁶ /°C) | 45 | 8 | 18.2 |



(a) Resin bond wheel



(b) Vitrified bond wheel



(c) Metal bond wheel

Fig. 2.16 Characteristics of bond type

입도를 낮게 하면 가공 능률은 향상되지만 표면 거칠기가 커지고 또 잔류 균열의 크기도 커지기 때문에 치수·형상 정밀도와 표면 거칠기가 조정하는 다듬질 공정에 걸리는 시간이 길어진다. 또 입도를 높이면 표면 거칠기가 작아지고 또 잔류 균열의 크기도 작아지기 때문에 다듬질 공정에 걸리는 시간은 줄어들지만 조연삭 공정에서의 가공 능률은 저하된다. 이 때문에 일반적으로는 이 요소들의 균형을 맞춰 입도가 결정된다.

또한, 입도와 함께 중요한 것이 집중도이다. 집중도는 휠 작업면 상의 연삭날 밀도와 칩 포켓 크기에 영향을 주고 집중도가 큰 휠일수록 연삭날 밀도가 높아지지만 칩 포켓의 크기는 작아진다. 이러한 이유로 연삭 시에 집중도가 너무 낮은 휠을 이용하면 절삭분은 잘 빠지지만 연삭날수가 적기 때문에 연삭날에 마모가 생기기 쉽고, 휠의 연삭 성능이 저하된다. 한편, 집중도가 너무 높은 휠을 이용하면 절삭날수가 많기 때문에 연삭날에 마모가 생기기 어렵지만 칩 포켓이 작아지기 때문에 막히기 쉽고 이 경우에도 휠의 연삭 성능이 저하된다. 따라서 휠의 입도와 가공물 재질과의 관계에 있어 집중도는 최적값이 존재하게 된다. 집중도가 너무 낮거나 높아도 연삭비가 작아지고 연삭비가 최대가 되는 집중도는 휠의 입도에 의존한다. 따라서 가공물의 재질이 막히기 쉬운지 아닌지에 따라 또는 사용하는 휠의 입도에 따라 집중도를 결정하면 된다. 보통 초경합금은 집중도가 120 정도인 다이아몬드 휠을 사용한다.

본 논문에 사용한 다이아몬드 휠은 #1500, #2000, #5000, #8000이며 결합제는 모두 레진본드를 사용하였고, 집중도는 120인 다이아몬드 휠을 사용하였다. Fig. 2.17과 Fig. 2.18은 본 논문에서 제작하고자 하는 Glass렌즈 성형용 초경코어 및 SiC 코어 연삭가공에 적합하도록 설계되어진 다이아몬드 휠의 도면과 3차원 형상을 각각 나타낸다.

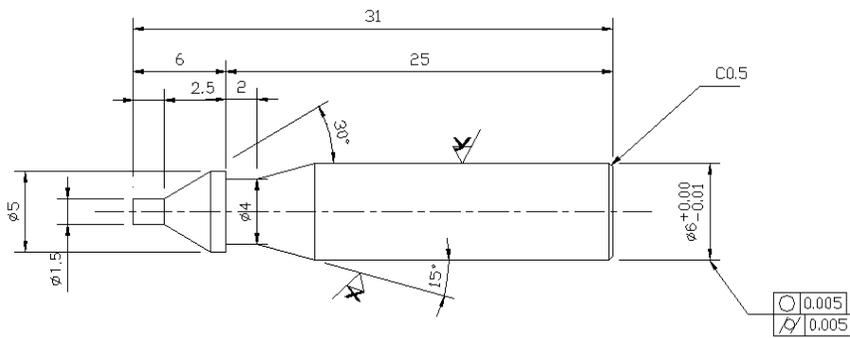


Fig. 2.17 Design of diamond wheel

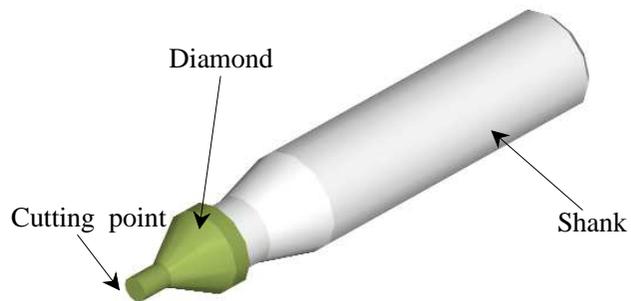


Fig. 2.18 3-Dimensional shape of diamond wheel

4. 초경합금

초경소재는 금속의 탄화물 분말을 소성해서 만든 경도가 대단히 높은 합금이다. 흔히 사용되는 것은 탄화텅스텐을 주체로 한 결합금속인 코발트와 소결합금으로, 코발트는 중량비율이 6 %정도이므로 탄화텅스텐 입자들 사이의 코발트에 탄소와 텅스텐을 녹인 것이다. 이런 조직의 합금은 대단히 굳고 내마모성이 우수하므로 금속제품을 자르거나 깎는 커터(절단기)·다이스 등에 사용된다.

본 논문에 사용된 시편의 재료는 DIJET사의 FB01 초경합금이며, 초경합금중에서 금속결합제인 연질재료(Co, Ni)를 최소화 시키고 종래의 초경합금보다 고정도, 뛰어난 내마모성을 가지고 있으며, 높은 경도를 갖는다. 때문에 미소한 절입량 저속 연삭에서 일반 초경, 고속도강 보다 확실하게 우수한 특성을 발휘한다. FB01 초경합금은 아르곤 가스등의 불활성 가스를 98 Mpa이상의 압력과 온도 1300 ℃의 상승효과를 이용해서 가압처리를 하는 것인데 내부의 미소 기포를 제거되는 효과에 의해서 항전력, 압축강도, 인장강도 등의 기계적 성질이 대폭으로 개선되고 보다 안정된 높은 품질을 얻을 수 있다. 이러한 FB01은 렌즈성형 금형 및 부품, 분말 성형다이, 각종 노즐에 사용된다. Table 2.7은 초경합금의 특성을 나타낸다.

Table 2.7 Characteristics of Tungsten Carbide(WC)

| | FB01 |
|---|------|
| WC (%) | 99.5 |
| Co (%) | 0.5 |
| Hardness (HRA Gpa) | 95 |
| Transverse rupture strength (Gpa) | 1.6 |
| Fracture Toughness (Mpa \sqrt{m}) | 5.0 |
| Density | 15.4 |
| Young's Modules (Gpa) | 660 |
| Coefficient of Thermal Expansion ($\times 10^{-6}/K$) | 4.5 |

5. Silicon Carbide(SiC)

Silicon Carbide(SiC)는 역학적으로 강도가 강하고 경도가 크며, 내용해성, 내용융성, 내산화성 외에 열전도도가 우수하고, 광학특성과 기계적 특성, 전기적 특성 등에서 뛰어난 특성을 보여주는 소재이다. 이러한 성질로 인해 SiC는 내화성 물질의 제조에 매우 유용하게 쓰이며, 저온에서는 전기절연체이지만 가열하면 전도도가 커지고 고온에서는 흑연과 같은 우수한 전도도를 갖게 되어 반도체로써 사용될 뿐만 아니라, 우주망원경, 레이저 광 및 X선 반사용 미러 등 다종, 다양한 용도로 이용되고 있으며 전기, 전자, 정보, 정밀기기의 급격한 발전으로 SiC의 수요가 급격히 증가하고 있다. 그러나, SiC는 우수한 기계적 특성을 가지고 있음에도 불구하고 고경도, 고취성 재료이기 때문에 대표적인 난삭재로써 연삭가공시 크랙이나 치핑이 발생하기 쉬우며 고능률, 고정도 가공이 어려워 후공정에 큰 부담을 줄 뿐만 아니라 불량률도 높아서 생산성도 낮다. 또한, 연삭작업은 고가인 다이아몬드 휠을 이용하는데 휠의 절인 마멸이 빨라서 연삭가공 단가가 높다는 문제점을 안고 있다. 경제성과 효율성을 고려한 연삭가공을 위해서는 조건에 따른 SiC의 연삭특성을 파악하고 최적연삭조건을 찾아 데이터 베이스화 하는 것이 필요하다.

Glass렌즈 성형에 사용되는 성형용 코어 다이아몬드 탄소상(DLC) 코팅에서 DLC 피막과 성형용 코어와의 밀착성을 높이기 위해 중간층을 형성시키기 위하여 성형용 초경코어면에 SiC 층을 형성시키면 피막과의 밀착성이 향상된다는 연구결과가 있다. Table 2.8은 실험에 사용된 SiC의 물성을 나타내며, Fig. 2.19은 SiC와 주요재질과의 물성비교를 나타낸다.

Table 2.8 Characteristics of Silicon Carbide(SiC)

| Physical properties | Units | Values |
|----------------------------------|--|--------|
| Appearance | | Dense |
| Color | | Black |
| Bulk density | g / cm ³ | 3.1 |
| Flexural strength | kg / mm ² | 53 |
| Hardness | HV | 2800.0 |
| Young's Modulus | (×10 ⁴)kg/mm ² | 4.2 |
| Coefficient of thermal expansion | (×10 ⁻⁶)/°C | 4 |
| Thermal Conductivity | w/m · °K | 125 |

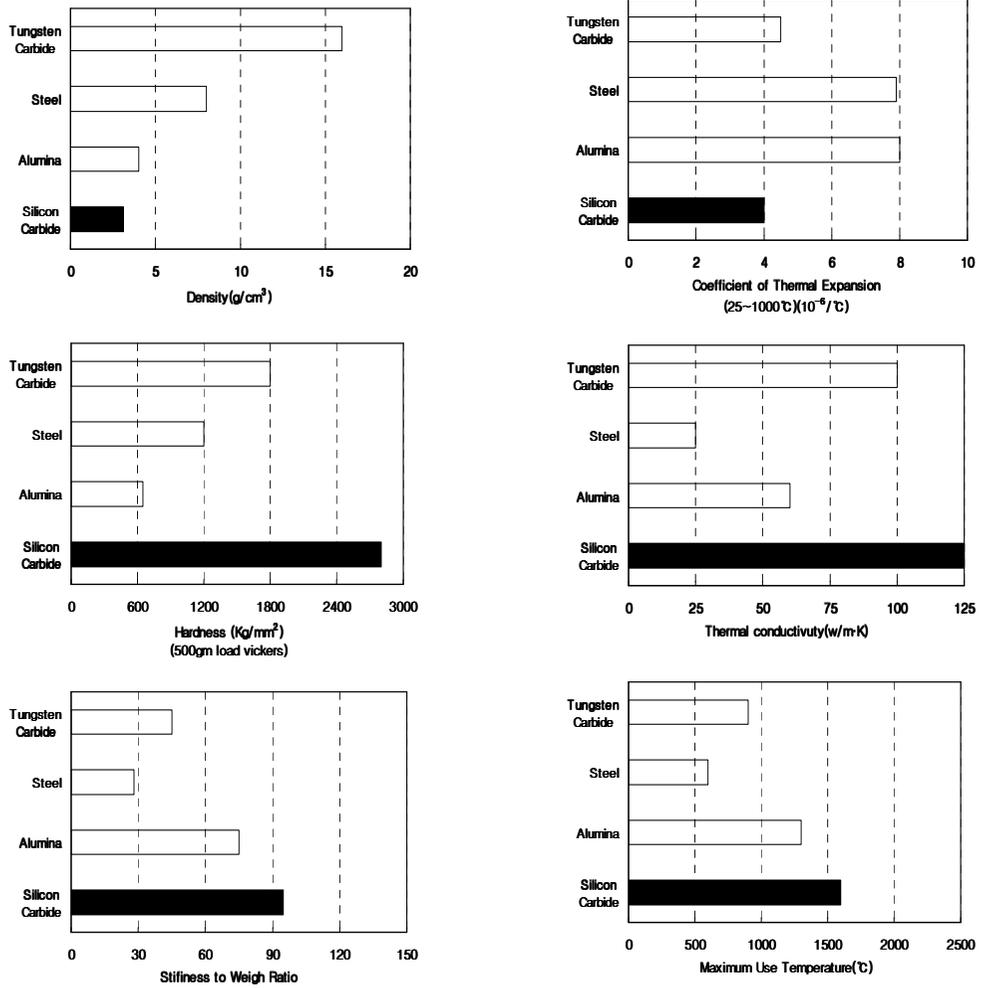


Fig. 2.19 Comparison SiC with other materials

제 3 장 비구면 Glass렌즈 성형용 초경합금 코어 제작

제 1 절. 초경합금 코어의 최적연삭가공조건 연구

기존의 연구에서는 최적연삭가공조건을 규명하기 위해 4가지 주요인자인 연삭깊이, 이송속도, 주축회전속도 및 터빈회전속도에서 3가지 인자를 고정변수로 사용하고 한 개의 인자를 변화시키면서 연삭가공을 수행하여 최적연삭가공조건을 규명하는 연구를 수행하였다. 그러나, 이러한 실험방법은 연삭가공 횟수의 증가로 인해 실험에 소요되는 시간이 증가하고 인자 상호간의 교호작용을 알 수 없다는 단점이 있다.^[31]

본 논문에서는 Glass렌즈 성형용 초경합금 코어 가공을 위한 최적연삭가공조건 규명을 위해 실험계획법(DOE; Design of Experiments)을 적용하였다. 이를 위해 초경합금(WC, Co 0.5%)을 연삭가공 할 경우 표면조도(Ra)에 영향을 미치는 4가지 주요인자인 연삭깊이, 이송속도, 주축회전속도 및 터빈회전속도를 공정변수로 선택하고, 2^4 요인배치법으로 실험계획법을 수행하여 표면조도(Ra)를 최대한 줄일 수 있는 연삭가공조건을 고찰하였다.

연삭가공의 특성치는 성형용 코어의 표면조도(Ra)로 결정하였으며, 연삭깊이, 이송속도, 주축회전속도 및 터빈회전속도를 인자로 선택한 후, 2^4 요인배치법을 적용하여 16회 실험을 수행하였다. Table 3.1과 Table 3.2는 2^4 요인배치법에 적용된 실험 인자와 실험점을 각각 나타낸다.

Table 3.1 Factors and levels used in experiments

| | Low level(-) | High level(+) |
|--------------------------------|------------------------------|---------------|
| Turbine spindle (rpm) | 30,000 | 40,000 |
| Work spindle (rpm) | 200 | 300 |
| Feedrate (mm/min) | 0.25 | 1.5 |
| Depth of cut (μm) | 0.1 | 1.0 |
| Diamond wheel | Resin bond type, #1500/#2000 | |

Table 3.2 Experimental point used in experiments

| Experimental point | Factor | | | |
|--------------------|--------------|----------|-----------------|--------------|
| | Depth of cut | Feedrate | Turbine spindle | Work spindle |
| 1 | - | - | - | - |
| 2 | - | - | - | + |
| 3 | - | - | + | - |
| 4 | - | - | + | + |
| 5 | - | + | - | - |
| 6 | - | + | - | + |
| 7 | - | + | + | - |
| 8 | - | + | + | + |
| 9 | + | - | - | - |
| 10 | + | - | - | + |
| 11 | + | - | + | - |
| 12 | + | - | + | + |
| 13 | + | + | - | - |
| 14 | + | + | - | + |
| 15 | + | + | + | - |
| 16 | + | + | + | + |

Glass 렌즈 성형용 초경합금 가공용 공구는 일반적으로 사용되는 입도가 #1500과 #2000인 다이아몬드 휠을 선택하였으며, 정확한 실험결과를 얻기 위해 가공 후 다이아몬드 휠을 드레싱하여 실험을 수행함으로써 다이아몬드 휠의 마모에 따른 영향을 최소화하였다. 초정밀 연삭가공 후 표면조도(Ra) 측정결과는 실험계획법 상용프로그램인 MINITAB을 이용하여 분석하였다.

1. 다이아몬드 휠 #1500을 사용한 실험계획법

Fig. 3.1은 Table 3.2를 기준으로 초정밀 연삭가공 실험결과를 나타낸다. Fig. 3.1에서 알 수 있듯이 초경합금의 초정밀 연삭가공시 연삭깊이 0.1 μm , 이송속도 0.25 mm/min, 주축회전속도 300 rpm, 터빈회전속도 50,000 rpm 에서 가장 낮은 값의 표면조도(Ra)를 얻었다.

| | C1 | C2 | C3 | C4 | C5 | C6 | C7 | C8 | C9 | C10 |
|----|----------|----------|----------|--------|--------------|----------------|----------|--------------|----------------|-----|
| | StdOrder | RunOrder | CenterPt | Blocks | Work Spindle | Turbin Spindle | Feedrate | Depth of Cut | Surface Ra(nm) | |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 200 | 30000 | 0.25 | 0.1 | 16.21 | |
| 2 | 2 | 6 | 1 | 1 | 300 | 30000 | 0.25 | 0.1 | 16.32 | |
| 3 | 3 | 2 | 1 | 1 | 200 | 50000 | 0.25 | 0.1 | 16.34 | |
| 4 | 4 | 12 | 1 | 1 | 300 | 50000 | 0.25 | 0.1 | 16.16 | |
| 5 | 5 | 3 | 1 | 1 | 200 | 30000 | 1.50 | 0.1 | 16.88 | |
| 6 | 6 | 16 | 1 | 1 | 300 | 30000 | 1.50 | 0.1 | 16.91 | |
| 7 | 7 | 4 | 1 | 1 | 200 | 50000 | 1.50 | 0.1 | 16.72 | |
| 8 | 8 | 9 | 1 | 1 | 300 | 50000 | 1.50 | 0.1 | 16.63 | |
| 9 | 9 | 10 | 1 | 1 | 200 | 30000 | 0.25 | 1.0 | 17.02 | |
| 10 | 10 | 7 | 1 | 1 | 300 | 30000 | 0.25 | 1.0 | 17.12 | |
| 11 | 11 | 13 | 1 | 1 | 200 | 50000 | 0.25 | 1.0 | 17.32 | |
| 12 | 12 | 11 | 1 | 1 | 300 | 50000 | 0.25 | 1.0 | 17.21 | |
| 13 | 13 | 5 | 1 | 1 | 200 | 30000 | 1.50 | 1.0 | 17.43 | |
| 14 | 14 | 15 | 1 | 1 | 300 | 30000 | 1.50 | 1.0 | 17.82 | |
| 15 | 15 | 8 | 1 | 1 | 200 | 50000 | 1.50 | 1.0 | 17.82 | |
| 16 | 16 | 14 | 1 | 1 | 300 | 50000 | 1.50 | 1.0 | 17.56 | |
| 17 | | | | | | | | | | |

Fig. 3.1 Surface roughness according to grinding condition

2인자 교호작용이 포함된 Pareto 분석 후 중요한 영향을 주는 인자에 대해 Pareto 분석결과 Fig. 3.2에서 나타난 것처럼 연삭깊이가 가장 유의한 영향을 주는 인자임을 알 수 있었다.

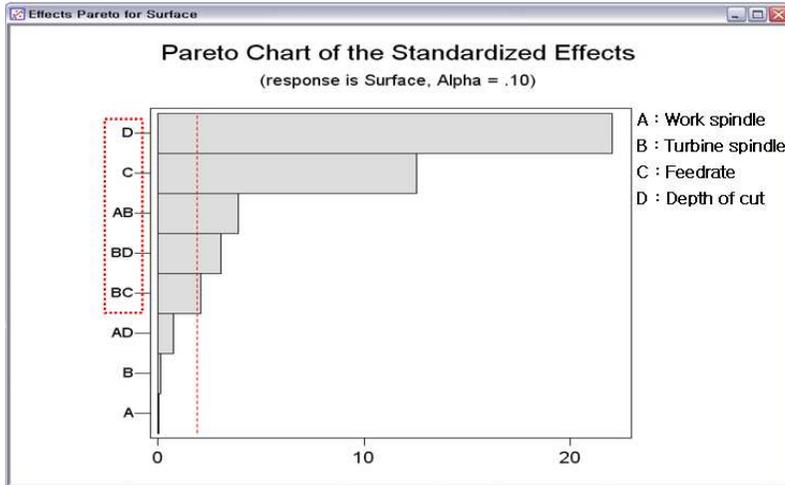


Fig. 3.2 Pareto chart of the standardized effects

유의수준 α 가 0.1일때 분산분석결과 목표치에 영향을 주는 유의한 인자가 연삭깊이와 이송속도임을 알 수 있었으며, Fig. 3.3에 나타낸 바와 같이 P-value를 통해 주효과와 2인자 교호작용이 유의함을 알았다. Fig. 3.3은 주효과와 2인자 교호작용에 대한 결과를 나타낸다.

Fractional Factorial Fit: Surface Ra(n versus Work Spindle, Turbin Spind, ...

Estimated Effects and Coefficients for Surface (coded units)

| Term | Effect | Coef | SE Coef | T | P |
|-------------------|---------|---------|---------|--------|-------|
| Constant | | 16.9669 | 0.02021 | 839.55 | 0.000 |
| Work Spi | -0.0012 | -0.0006 | 0.02021 | -0.03 | 0.976 |
| Turbin S | 0.0062 | 0.0031 | 0.02021 | 0.15 | 0.881 |
| Feedrate | 0.5087 | 0.2544 | 0.02021 | 12.59 | 0.000 |
| Depth of | 0.8913 | 0.4456 | 0.02021 | 22.05 | 0.000 |
| Work Spi*Turbin S | -0.1588 | -0.0794 | 0.02021 | -3.93 | 0.006 |
| Work Spi*Depth of | 0.0313 | 0.0156 | 0.02021 | 0.77 | 0.465 |
| Turbin S*Feedrate | -0.0838 | -0.0419 | 0.02021 | -2.07 | 0.077 |
| Turbin S*Depth of | 0.1238 | 0.0619 | 0.02021 | 3.06 | 0.018 |

Analysis of Variance for Surface (coded units)

| Source | DF | Seq SS | Adj SS | Adj MS | F | P |
|--------------------|----|---------|---------|---------|--------|-------|
| Main Effects | 4 | 4.21277 | 4.21277 | 1.05319 | 161.17 | 0.000 |
| 2-Way Interactions | 4 | 0.19403 | 0.19403 | 0.04851 | 7.42 | 0.012 |
| Residual Error | 7 | 0.04574 | 0.04574 | 0.00653 | | |
| Total | 15 | 4.45254 | | | | |

Fig. 3.3 ANOVA table for surface roughness

Fig. 3.4에서 알 수 있듯이 반응변수(Surface roughness, Ra)의 값은 작을수록 좋기 때문에 인자들의 낮은 수준을 선택해야하며, 주축회전속도와 터빈회전속도는 어떤 수준을 선택해도 그 효과가 동일하였다. Fig. 3.4는 표면조도에 대한 주효과 Plot을 나타낸다.

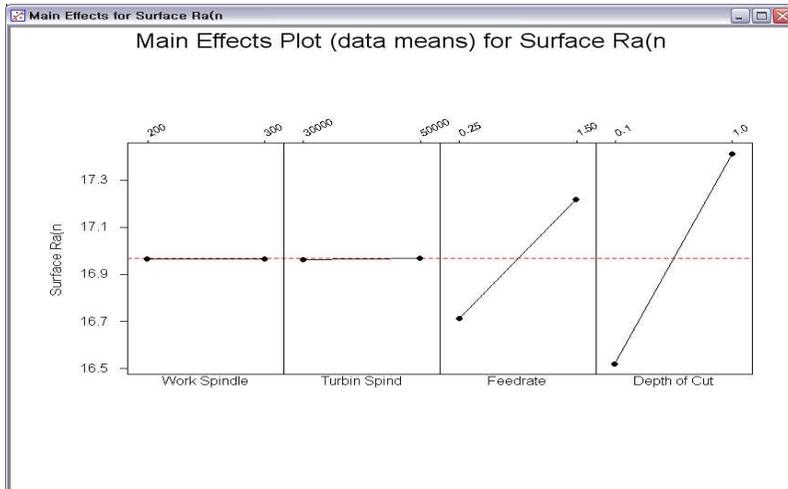


Fig. 3.4 Main effects plot for surface roughness

Fig. 3.5는 주축회전속도와 터빈회전속도, 터빈회전속도와 이송속도, 그리고 터빈회전속도와 연삭깊이 간의 교호작용이 유의함을 나타낸다.

초경합금의 초정밀 연삭가공시 표면조도에 기여하는 인자는 연삭깊이와 이송속도의 순으로 나타났으며, 연삭깊이가 표면조도에 가장 크게 영향을 미치는 것은 다이아몬드 휠과 공작물의 접촉면에 발생하는 연삭력이 표면조도에 가장 큰 영향을 미치기 때문으로 평가된다.

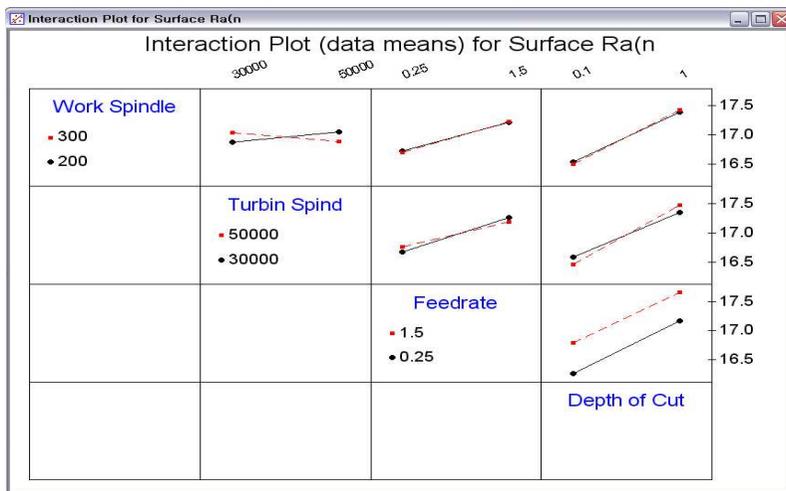


Fig. 3.5 Interaction plot for surface roughness

2. 다이아몬드 휠 #2000을 사용한 실험계획법

Fig. 3.6은 Table 3.2를 기준으로 초정밀 연삭가공 실험결과를 나타낸다. Fig. 3.6에서 알 수 있듯이 초경합금의 초정밀 연삭가공시 연삭깊이 0.1 μm , 이송속도 0.25 mm/min, 주축회전속도 200 rpm, 터빈회전속도 30,000 rpm 에서 가장 낮은 값의 표면조도를 얻었다.

| # | C1 | C2 | C3 | C4 | C5 | C6 | C7 | C8 | C9 | C10 |
|----|----------|----------|----------|--------|--------------|----------------|----------|--------------|----------------|-----|
| | StdOrder | RunOrder | CenterPt | Blocks | Work Spindle | Turbin Spindle | Feedrate | Depth of Cut | Surface Ra(mm) | |
| 1 | 1 | 15 | 1 | 1 | 200 | 30000 | 0.25 | 0.1 | 7.22 | |
| 2 | 2 | 9 | 1 | 1 | 300 | 30000 | 0.25 | 0.1 | 7.53 | |
| 3 | 3 | 3 | 1 | 1 | 200 | 50000 | 0.25 | 0.1 | 7.82 | |
| 4 | 4 | 5 | 1 | 1 | 300 | 50000 | 0.25 | 0.1 | 7.91 | |
| 5 | 5 | 7 | 1 | 1 | 200 | 30000 | 1.50 | 0.1 | 8.38 | |
| 6 | 6 | 4 | 1 | 1 | 300 | 30000 | 1.50 | 0.1 | 8.25 | |
| 7 | 7 | 6 | 1 | 1 | 200 | 50000 | 1.50 | 0.1 | 8.12 | |
| 8 | 8 | 16 | 1 | 1 | 300 | 50000 | 1.50 | 0.1 | 8.43 | |
| 9 | 9 | 8 | 1 | 1 | 200 | 30000 | 0.25 | 1.0 | 9.22 | |
| 10 | 10 | 11 | 1 | 1 | 300 | 30000 | 0.25 | 1.0 | 9.31 | |
| 11 | 11 | 14 | 1 | 1 | 200 | 50000 | 0.25 | 1.0 | 9.18 | |
| 12 | 12 | 10 | 1 | 1 | 300 | 50000 | 0.25 | 1.0 | 9.24 | |
| 13 | 13 | 13 | 1 | 1 | 200 | 30000 | 1.50 | 1.0 | 9.47 | |
| 14 | 14 | 2 | 1 | 1 | 300 | 30000 | 1.50 | 1.0 | 9.62 | |
| 15 | 15 | 12 | 1 | 1 | 200 | 50000 | 1.50 | 1.0 | 9.74 | |
| 16 | 16 | 1 | 1 | 1 | 300 | 50000 | 1.50 | 1.0 | 9.85 | |
| 17 | | | | | | | | | | |

Fig. 3.6 Surface roughness according to grinding condition

3인자 교호작용이 포함된 Pareto 분석 후 중요한 영향을 주는 인자에 대해 Pareto 분석결과 Fig. 3.7에서 나타난 것처럼 연삭깊이가 가장 유의한 영향을 주는 인자임을 알 수 있었다.

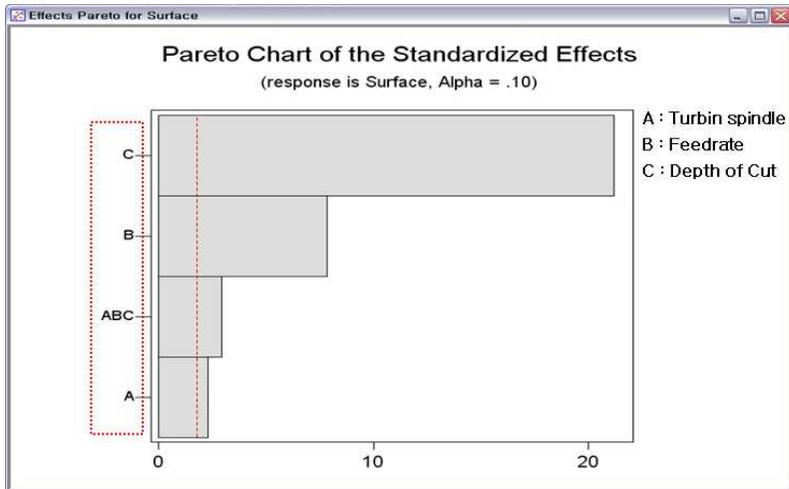


Fig. 3.7 Pareto chart of the standardized effects

유의수준 alpha가 0.1일때 분산분석결과 목표치에 영향을 주는 유의한 인자가 연삭깊이와 이송속도임을 알 수 있었으며, Fig. 3.8에 나타낸 바와 같이 P value를 통해 주효과와 3인자 교호작용이 유의함을 알았다. Fig. 3.8은 주효과와 3인자 교호작용에 대한 결과를 나타낸다.

| Fractional Factorial Fit: Surface Ra(n versus Turbin Spind, Feedrate, ... | | | | | | |
|---|---------|---------|---------|---------|--------|-------|
| Estimated Effects and Coefficients for Surface (coded units) | | | | | | |
| Term | Effect | Coef | SE Coef | T | P | |
| Constant | | 8.70563 | 0.03531 | 246.53 | 0.000 | |
| Turbin S | 0.16125 | 0.08062 | 0.03531 | 2.28 | 0.043 | |
| Feedrate | 0.55375 | 0.27687 | 0.03531 | 7.84 | 0.000 | |
| Depth of | 1.49625 | 0.74813 | 0.03531 | 21.19 | 0.000 | |
| Turbin S*Feedrate*Depth of | 0.20875 | 0.10438 | 0.03531 | 2.96 | 0.013 | |
| Analysis of Variance for Surface (coded units) | | | | | | |
| Source | DF | Seq SS | Adj SS | Adj MS | F | P |
| Main Effects | 3 | 10.2856 | 10.2856 | 3.42854 | 171.84 | 0.000 |
| 3-Way Interactions | 1 | 0.1743 | 0.1743 | 0.17431 | 8.74 | 0.013 |
| Residual Error | 11 | 0.2195 | 0.2195 | 0.01995 | | |
| Lack of Fit | 3 | 0.0877 | 0.0877 | 0.02924 | 1.78 | 0.229 |
| Pure Error | 8 | 0.1317 | 0.1317 | 0.01647 | | |
| Total | 15 | 10.6794 | | | | |

Fig. 3.8 ANOVA table for surface roughness

Fig. 3.9에서 알 수 있듯이 반응변수(Surface roughness, Ra)의 값은 작을수록 좋기 때문에 인자들의 낮은 수준을 선택해야하며, 연삭깊이와 이송속도에 비해서 주축 회전속도와 터빈회전속도는 어떤 수준을 선택해도 그 효과가 동일함을 알았다.

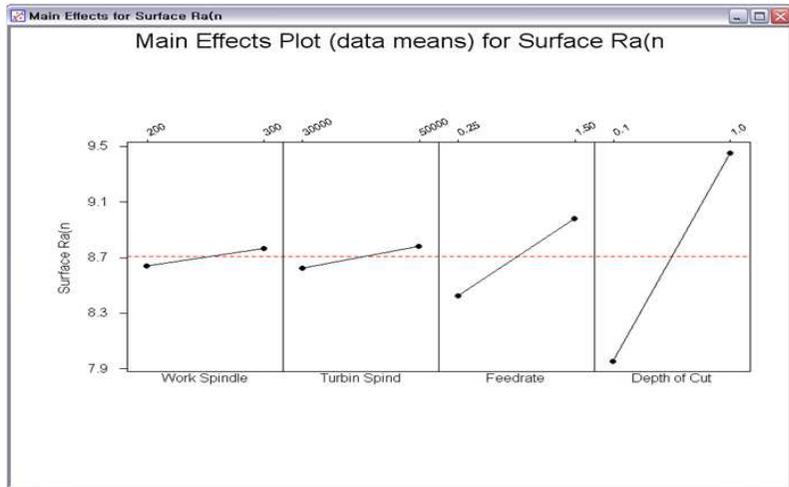


Fig. 3.9 Main effects plot for surface roughness

Fig. 3.10은 주축회전속도와 이송속도, 그리고 연삭깊이 간의 교호작용이 유의함을 나타낸다. 다이아몬드 휠 #1500을 이용한 실험결과와 유사하게 초경합금의 초정밀 연삭가공시 표면조도에 기여하는 인자는 연삭깊이와 이송속도의 순으로 나타났다으며, 연삭깊이가 표면조도에 가장 크게 영향을 미치는 것은 다이아몬드 휠과 공작물의 접촉면에 발생하는 연삭력이 표면조도에 가장 큰 영향을 미치기 때문으로 평가된다.

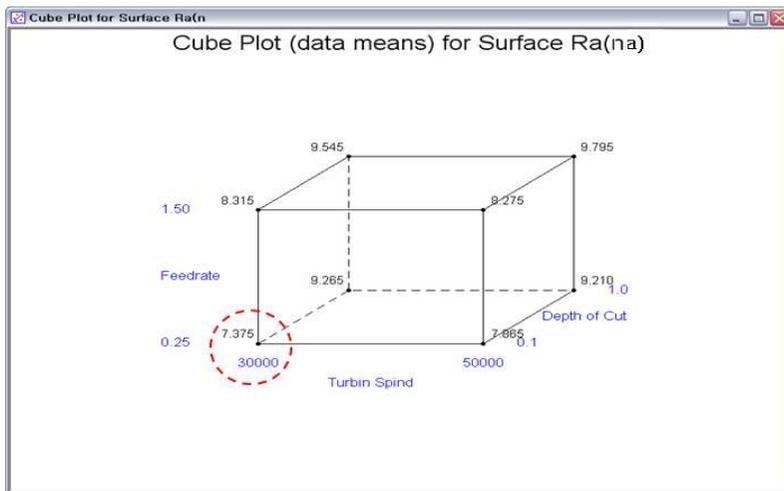


Fig. 3.10 Interaction plot for surface roughness

본 논문에서는 실험계획법을 이용하여 초경합금의 연삭가공 시 표면조도에 영향을 미치는 4가지 인자에 대하여 분석하였고, 표면조도를 최대한 줄일 수 있는 연삭가공조건을 고찰함으로써 각각의 다이아몬드 휠에 대해 Table 3.3에 나타난 바와 같은 최적연삭가공조건을 얻었다.

Table 3.3 Optimal grinding conditions for Tungsten Carbide(WC)

| Material | Tungsten Carbide(WC, Co 0.5%) | |
|--|---|--|
| diamond wheel | #1,500 | #2,000 |
| Turbine spindle (rpm) | 30,000 | 30,000 |
| Work spindle (rpm) | 300 | 300 |
| Feedrate (mm/min) | 0.25 | 0.25 |
| Depth of cut (μm) | 0.1 | 0.1 |
| Main effect factor for surface roughness | Depth of cut Feedrate | Depth of cut Feedrate Turbin spindle |
| Interaction effect factor | Feedrate and depth of cut Turbine speed and feedrate Spindle speed and feedrate | Turbine speed, feedrate and depth of cut |

제 2 절. 이송속도 제어기법을 통한 성형용 코어 표면조도 향상 연구

비구면 Glass렌즈 성형용 코어의 초정밀 연삭가공에서 비구면 Glass렌즈의 광학적 성능향상을 위해서 가공면의 형상정밀도 향상뿐만 아니라 표면조도의 향상도 요구되고 있다. 기존의 연구에서는 표면조도 향상을 위해 연삭가공에 연삭깊이, 이송속도, 주축회전속도, 그리고, 터빈회전속도 등의 4개의 인자를 변화시키면서 최적연삭가공조건을 찾는 연구가 진행되고 있다. 그러나, 연삭가공시에 주축회전속도와 터빈회전속도는 가공전에 스피들의 공기압에 의해서 결정된 회전수로 일정하게 가공하고, 이송속도와 연삭깊이는 NC 프로그램에서 일정하게 가공하므로 성형용 코어의 중심부에서 멀어질수록 성형용 코어의 표면조도가 높아지는 현상이 발생한다.

본 논문에서는 기존의 절삭가공에서 개발된 제어기법을 연삭가공에 적용하여 이송속도 제어기법을 개발함으로써 성형용 코어 표면조도를 향상시키기 위한 연구를 수행하였다.

1. 초정밀 연삭 모델 개요

초정밀연삭가공 모델링은 Fig. 3.11과 같이 나타낼 수 있다. 공작물의 반경방향 위치가 $r(mm)$ 이고, 공작물의 회전수와 다이아몬드 휠의 회전수가 각각 $\omega_1(rpm)$, $\omega_2(rpm)$ 라고 한다면 다이아몬드 휠 1회전당 공작물 원주방향 이송량 $V_c(mm/min)$ 는 다음과 같다.

$$V_c = \frac{\pi D \omega_1}{\omega_2} = \frac{2\pi r \omega_1}{\omega_2} \dots\dots\dots (3.1)$$

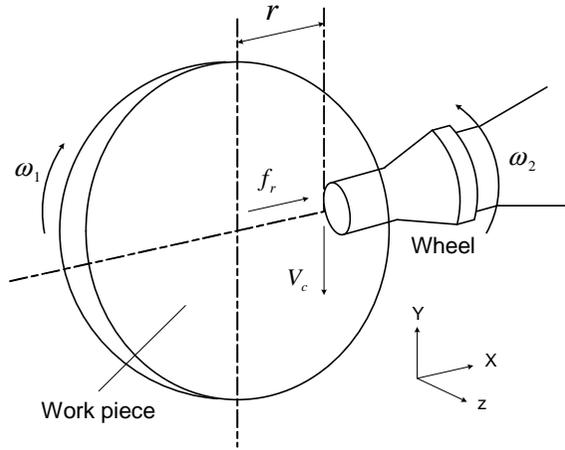


Fig. 3.11 Geometric modeling of parallel grinding

공작물의 1회전당 다이아몬드 휠이 공작물의 반경방향으로 이동하는 거리 $f_r(mm/rev)$ 은 다음과 같다.

$$f_r = \frac{f_x}{\omega_1} \dots\dots\dots (3.2)$$

여기에서 $f_x(mm/min)$ 는 1분당 다이아몬드 휠이 공작물의 반경방향으로 이동하는 거리이다.

다음으로 공작물과 접촉영역에 있는 다이아몬드 휠 입자수를 N_g , 한 개의 입자에 의한 평균 연삭마크의 길이를 L_{am} 라 하면, 공작물상의 원주방향에 미치는 연삭입자 (abrasive)의 피치 P 는 다음과 같다.

$$P = \frac{V_c f_r}{N_g L_{am}} \dots\dots\dots (3.3)$$

식 (3.1)과 식 (3.2), 그리고, 식 (3.3)으로 부터 연삭입자 피치 P 는 다음과 같다.

$$P = \frac{2\pi r f_x}{N_g L_{am} \omega_2} \dots\dots\dots (3.4)$$

연삭표면에 작용하는 연삭입자의 밀도를 δ_g 라 하고, 다이아몬드 휠과 공작물의 접촉면적을 $A(mm^2)$ 라고 하면 연삭과정에 작용하는 입자의 수 N_g 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$N_g = A\delta_g \dots\dots\dots (3.5)$$

식 (3.5)로부터 입자 집중도에 의해서 결정되는 δ_g 와 A 가 연삭과정에서 일정하다고 가정하면 N_g 는 일정함을 알 수 있다.

다이아몬드 휠 표면에 연삭입자의 날 끝 평균각도를 θ 라 하고 연삭입자의 형상이 공작물 표면에 그대로 전사된다고 가정하면 공작물의 표면거칠기는 식 (3.6)과 같다.

$$R_y = \frac{P}{2} \frac{1}{\tan(\theta/2)} = \frac{P}{2} \cot \frac{\theta}{2} \dots\dots\dots (3.6)$$

최종적으로 식 (3.4) 및 식 (3.6)로부터 표면거칠기(R_y) 값은 식 (3.7)과 같이 나타낼 수 있다.^[6,22,23]

$$R_y = \frac{\pi r f_x}{N_g l_{am} \omega_2} \cot \frac{\theta}{2} \dots\dots\dots (3.7)$$

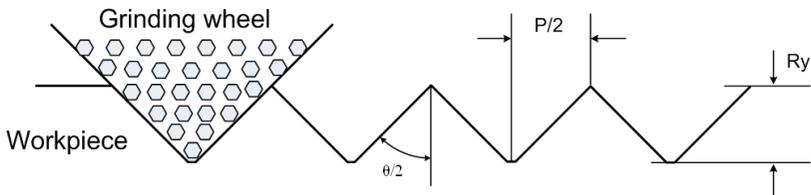


Fig. 3.12 Influence of x-direction feedrate on the surface roughness

식 (3.7)로 부터 연삭에 작용하는 연삭입자의 수, 주축회전속도(ω_2)와 이송속도(f_x)가 일정하다면 공작물의 표면조도는 공작물의 반경위치에 비례하여 영향을 받는다. 따라서, 표면조도는 성형용 코어의 중심부에서 멀어질수록 높아지는 현상이 발생한다.

따라서, 본 논문에서는 기존 방식으로 가공할 경우 표면조도가 높아지는 현상을 개선하기 위하여 반경위치에 따라 이송속도를 변화시키는 이송속도 제어기법을 개발함으로써 Glass렌즈 성형용 초경합금 코어의 표면조도를 향상시켰다.

2. 이송속도 제어기법을 활용한 초정밀 가공

본 논문에서는 성형용 코어의 표면조도 향상을 위해 가공 반경위치에 따라 이송속도를 제어할 수 있는 NC program을 개발하여 초정밀 연삭가공을 수행하였다. 또한, 기존 방식으로 연삭가공을 수행한 결과와 비교하여 이송속도 제어기법에 따른 가공정도 향상을 비교, 평가하였다. 성형용 코어의 재료는 초경합금(WC, Co 0.5%)이고, 다이아몬드 휠 #2,000을 이용하여 연삭가공을 수행하였다.

Table 3.4 Grinding conditions of Tungsten Carbide(WC)

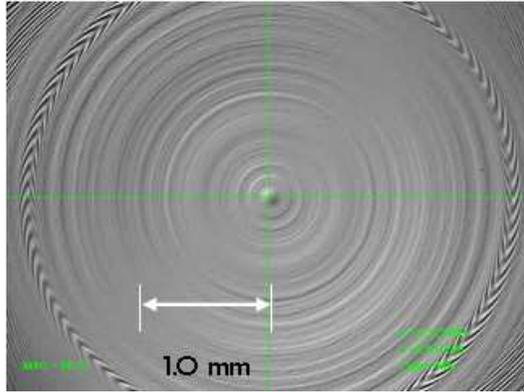
| | |
|-----------------------|-------------|
| Diamond wheel | #2,000 |
| Turbine spindle speed | 35,000 rpm |
| Work spindle speed | 350 rpm |
| Depth of cut | 0.3 μ m |
| Feedrate | 0.5 mm/min |

반경위치 변화에 따라 이송속도를 0.5 mm/min에서 0.1 mm/min까지 변화시키면서 가공하였으며 성형용 코어의 표면조도 측정은 중심에서부터 상하좌우로 0.5 mm 씩 이동하면서 0.2×0.2 mm의 크기로 측정하여 평균값을 이용하였다.

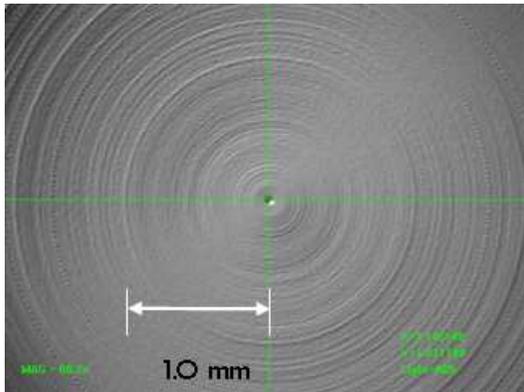
Photo 3.1(a)와 Table 3.5에서 알 수 있듯이 기존 연삭방식으로 가공한 결과, 성형용 코어의 중심에서 반경위치가 커질수록 Tool mark에 의해서 간섭무늬가 생기고 표면조도가 점점 높아지는 것을 확인하였다. 그러나, 이송속도 제어기법을 활용하여 초정밀 연삭가공을 수행한 결과 Photo 3.1(b)와 Table 3.5에서 나타낸 바와 같이 반경위치가 커져도 표면조도의 변화는 거의 없는 것을 확인하였다. 성형용 코어의 유효경(ϕ 1.5 mm)에서의 표면조도는 종래의 연삭가공방법으로 가공한 결과 6.0 nm에서 이송속도 제어기법을 활용하여 연삭가공을 수행한 결과 4.5 nm로 약 1.5 nm 향상됨을 확인하였다. Photo 3.1과 Fig 3.13은 성형용 코어의 공구현미경 사진과 표면조도 측정결과를 각각 나타낸다.

Table 3.5 Measurement results of surface roughness

| Measurement position(mm) | Surface roughness(nm) | |
|--------------------------|----------------------------------|--|
| | Conventional method (0.5 mm/min) | Feedrate control method (0.5~0.1 mm/min) |
| 0.5(0.4~0.6) | 5.3 | 4.2 |
| 1.0(0.9~1.1) | 5.1 | 3.7 |
| 1.5(1.4~1.6) | 7.7 | 3.6 |
| 2.0(1.9~2.1) | 8.9 | 4.2 |
| 2.3(2.2~2.4) | 20.9 | 5.1 |

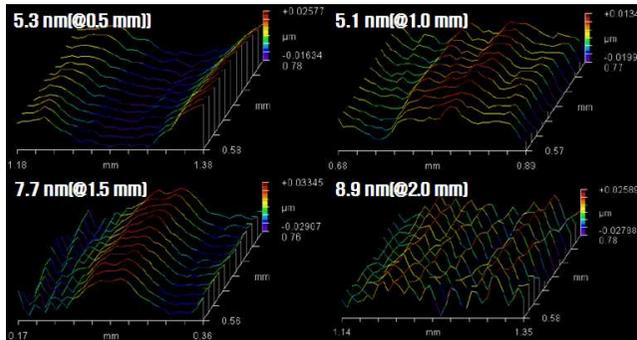


(a) Conventional method

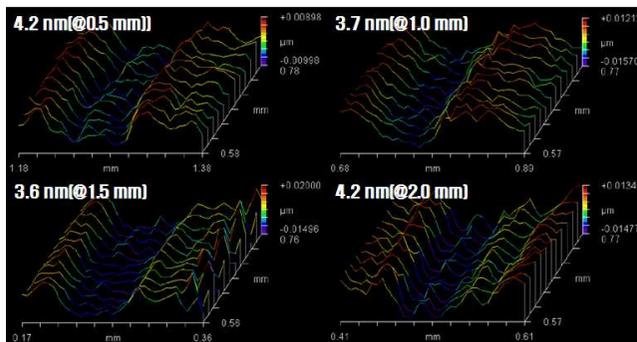


(b) Feedrate control method

Photo 3.1 WC plane molding core



(a) Surface roughness by conventional method



(b) Surface roughness by feedrate control method

Fig. 3.13 Surface roughness of molding core by grinding method

제 3 절. 비구면 Glass렌즈 성형용 초경합금 코어 제작

1. 초정밀 연삭가공기술을 이용한 가공

가. 실험방법 및 조건

본 논문에서는 3메가 픽셀, 2.5배 광학 줌 카메라폰 모듈용 비구면 Glass렌즈 설계를 기초로 비구면 Glass렌즈 성형용 코어를 설계하였으며, 비구면 렌즈에 요구되는 형상정도(PV) $0.3 \mu\text{m}$, 표면거칠기(RMS) 30 nm 이하의 정밀도를 갖는 Glass렌즈 성형용 초경코어를 제작하였다. 이를 위해 성형용 코어의 연삭가공을 위한 정밀 지그 및 공구를 설계·제작하였으며, 앞 절에서 규명한 초경합금 소재에 관한 최적연삭가공조건을 기초로 초정밀 연삭가공을 수행하였다.^[32,33,34,35]

Fig. 3.14는 카메라폰용 Lens Ass'y와 본 논문에서 제작하고자하는 비구면 Glass렌즈(2G)의 설계 개략도를 각각 나타낸다.

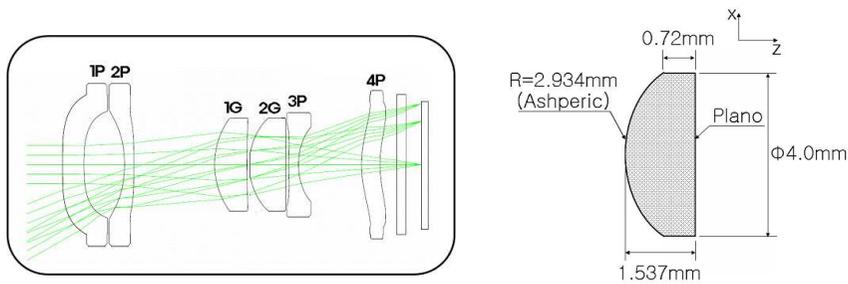
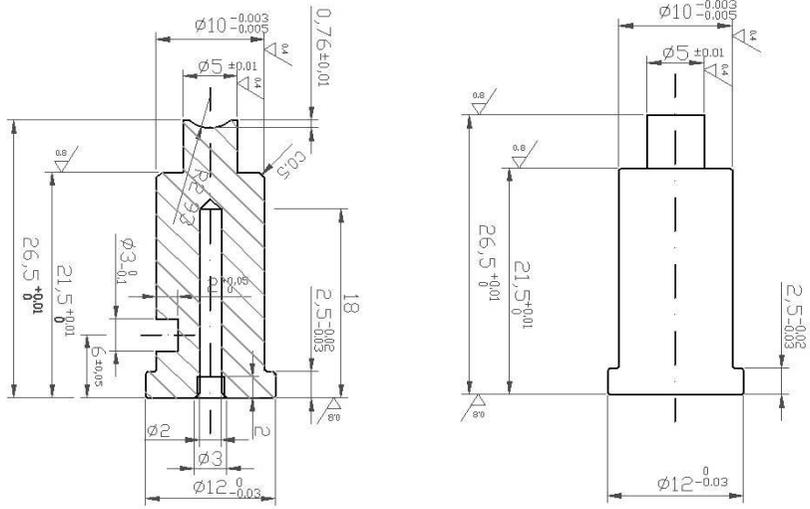


Fig. 3.14 Drawing of camera phone module and aspheric glass lens

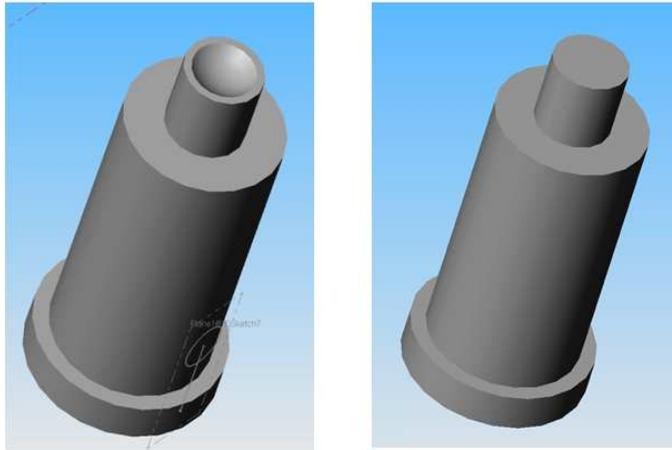
Fig. 3.15와 Fig 3.16은 비구면 Glass렌즈 설계를 기초로 본 논문에서 제작하고자하는 성형용 초경코어를 나타낸다.



(a) Aspheric molding core

(b) Plane molding core

Fig. 3.15 Drawing of molding core



(a) Aspheric molding core

(b) Plane molding core

Fig. 3.16 3-Dimensional shape of molding core

본 논문에서는 비구면 Glass렌즈 설계를 기초로 성형용 상·하코어는 1차 형상가공을 수행한 후 초정밀가공기(ASP01, Nachi-Fujikoshi Co., Japan)를 이용하여 초정밀 연삭가공을 수행하였다.

초정밀 연삭가공은 비구면 Glass렌즈 설계를 기초로 하여 NA-CAM 소프트웨어에 의한 NC 프로그램의 생성, 초정밀 비구면 연삭가공, 비구면 형상측정기를 활용한 측정 평가에 의한 보정으로 구성되어있다.

비구면 형상의 (X, Z)좌표는 렌즈설계를 기초로 하여 NA-CAM 소프트웨어에서 가공데이터를 입력하여 직선보간 및 원호보간을 통하여 공구의 곡률 반경에 따른 공구경로를 생성한다. 생성된 공구경로는 NC 프로그램화 되고 NC 프로그램을 네트워크화 되어있는 초정밀가공기 CNC 컨트롤러에 전송하고, 컴퓨터로부터 전송된 데이터를 NC의 메모리 내에 저장한다.

초정밀 가공기계는 CNC 제어로 가공을 실시한다. CNC에 의한 초정밀 연삭가공에서 공작물의 회전중심과 공구 인선의 중심이 정확하게 일치하지 않으면 공작물 중심에 이상 형상이나 조흔의 형상이 나타나게 된다. 이러한 형상들이 발생하면 공작물의 가공면의 형상정도는 매우 나쁜 양상을 보이므로 공작물의 회전중심에 일치하도록 오차 보정하여 미세조정을 하여야만 한다. 공작물의 회전중심과 다이아몬드 연삭 휠의 공구인선반경의 중심이 일치하지 않아 발생하는 오차는 기계상에서 Y좌표 값을 변경함으로써 보정이 가능하다. 가공된 비구면 코어는 고정밀도의 측정기에 의해 형상정도로 평가하여 발생한 오차를 NA-OMM 프로그램을 이용하여 X축 중심으로부터 생겨난 오차를 분석하여 X축 Center error의 보정가공을 수행한다. 측정기를 이용하여 형상을 측정하고 X축 Center error와 Radius fit error를 보정가공 함으로써, 0.2 μm 이내의 결과를 얻을 경우 성형용 코어로 만족한다. 그러나, 0.2 μm 이상의 결과일 경우 X축 Center error와 Radius fit error 보정가공을 통해 만족하는 형상정도를 얻을 때까지 반복하여 보정가공을 수행한다. Fig. 3.17과 Fig. 3.18은 NC 프로그램작성을 위한 비구면 계수 입력 화면과 비구면 Glass렌즈 성형용 초경코어를 제작하기 위한 초정밀 연삭가공 공정을 각각 나타낸다. Table 3.6은 본 논문에서 성형용 초경합금 코어가공을 위해 적용한 황삭, 중삭

및 정삭 가공조건을 나타낸다.

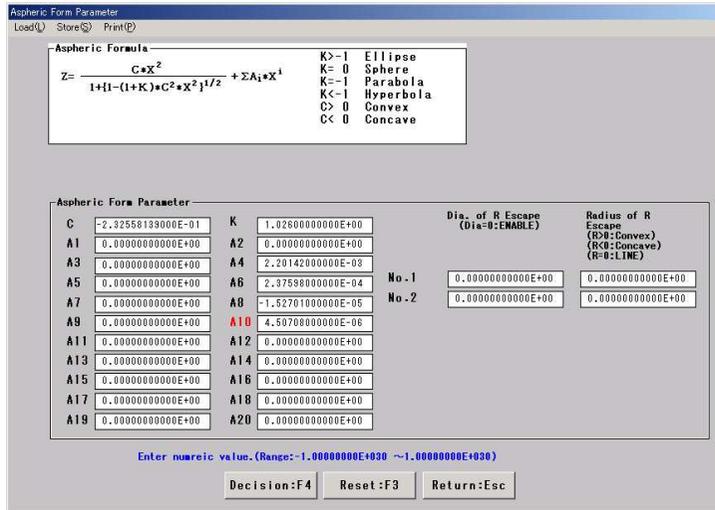


Fig. 3.17 Input of aspheric form parameter

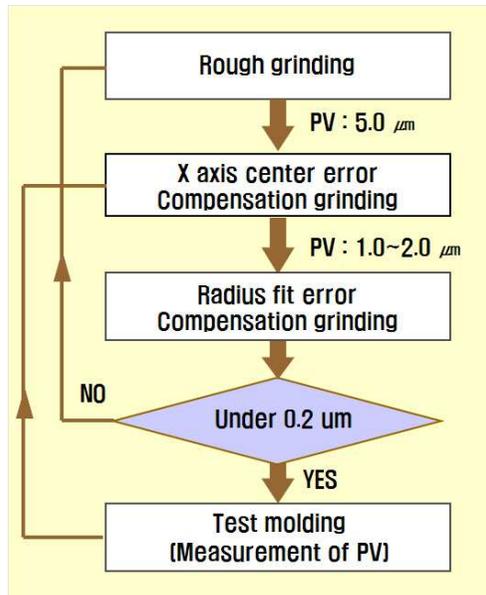


Fig. 3.18 Flow chart of grinding process

Table 3.6 Grinding conditions of molding core

| | | | | |
|-------------------|--------------------------------|--------------------|-------------------------------|-------------------|
| Material | Tungsten Carbide (WC, Co 0.5%) | | | |
| Diamond wheel | #2000, Diameter 1.5 mm | | | |
| Cutting condition | Turbine speed(rpm) | Spindle speed(rpm) | Depth of cut(μm) | Feedrate (mm/min) |
| Rough | 30,000 | 300 | 1 | 0.8 |
| Semi-finish | 30,000 | 300 | 0.5 | 0.5 |
| Finish | 30,000 | 300 | 0.1 | 0.25 |

나. 성형용 초경코어 연삭가공결과

본 논문에서는 비구면 Glass렌즈 성형을 위해 먼저 비구면 코어(하코어)의 초정밀 연삭가공을 수행하였다. 비구면 코어의 1차가공 후 측정된 결과값은 Fig. 3.19에 나타난 바와 같이 형상정도(PV) 0.625 μm 으로 나타났다.

보정가공을 수행하기 위해 중심값 보정과 공구의 반경을 NA-OMM 프로그램에서 Stylus 보정값을 적용한 시뮬레이션 결과를 토대로 공구반경 5 μm , 중심축 오차 +1.5 μm 를 보정하여 중삭가공을 수행하였다. Fig. 3.20은 보정가공을 수행한 결과로써 PV 0.240 μm 의 결과를 얻었다. 시뮬레이션 결과를 토대로 공구반경 2 μm , 중심축 오차 1 μm 을 보정하여 2차 보정가공을 수행하였다.

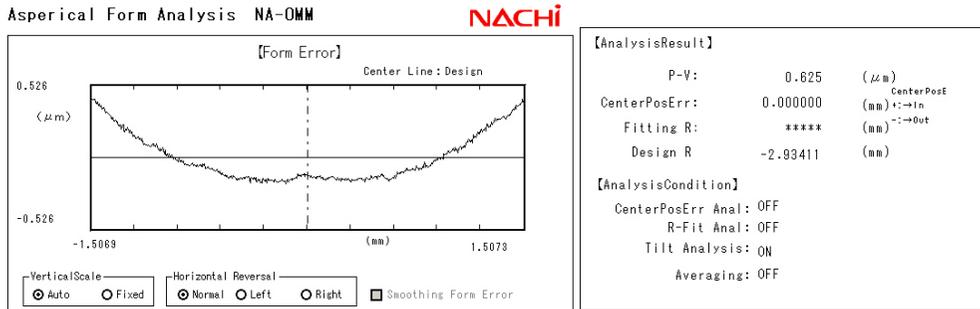


Fig. 3.19 First grinding result of molding core

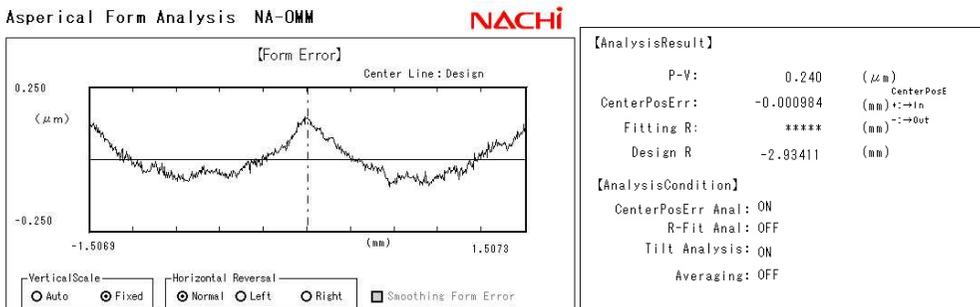


Fig. 3.20 Compensation grinding result of molding core

본 논문에서 최종적으로 가공된 비구면 성형용 코어의 형상정도 결과 최적곡률 반경 2.93025 mm에서 형상정도 PV 0.128 μm 이 나타났으며 이는 Glass렌즈 성형용 코어의 설계 규격에 만족한 값이다. Fig. 3.21은 최종 연삭가공된 비구면 Glass 렌즈 성형용 코어의 형상정도를 나타낸다.

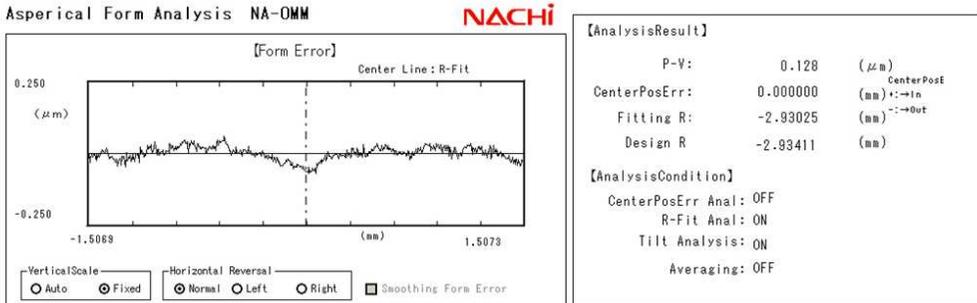
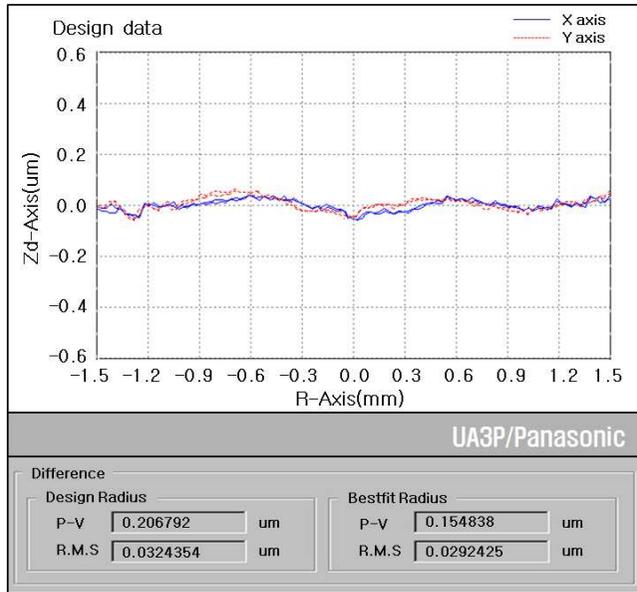
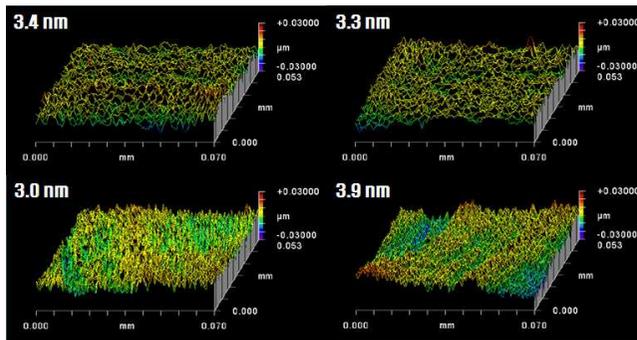


Fig. 3.21 Final grinding result of molding core

가공된 성형용 코어를 초정밀 자유곡면 3차원 형상측정기(UA3P, Panasonic Co., Japan)와 3차원 표면조도 측정기(NewView5000, Zygo Co., USA)를 이용하여 측정한 결과 형상정도 PV 0.155 μm , 표면조도 3.4 nm의 결과를 보였으며, Fig. 3.22에 나타내었다.



(a) Form accuracy of aspheric molding core



(b) Surface roughness of aspheric molding core

Fig. 3.22 Form accuracy and surface roghness of aspheric molding core

2. 초정밀 폴리싱가공

두 번째로 성형용 평면 코어(상코어)의 초정밀 연삭가공을 수행하였으며 정삭가공 결과는 Fig. 3.23에 나타낸 바와 같이 형상정도 PV 0.205 μm , 표면조도 8.5 nm의 결과를 얻었다.

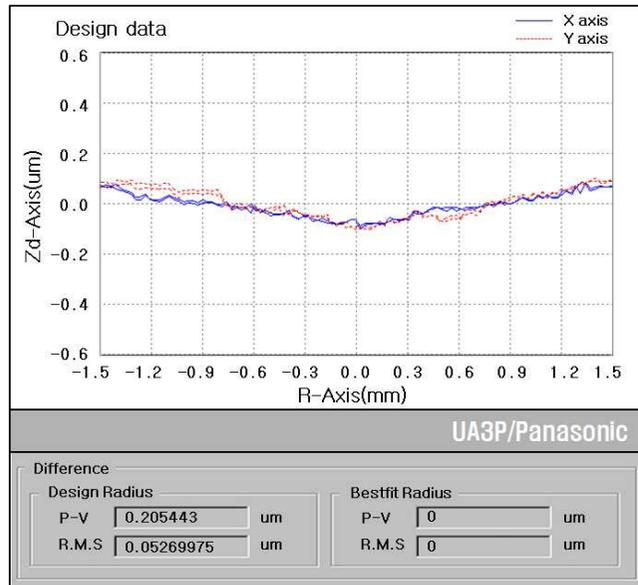
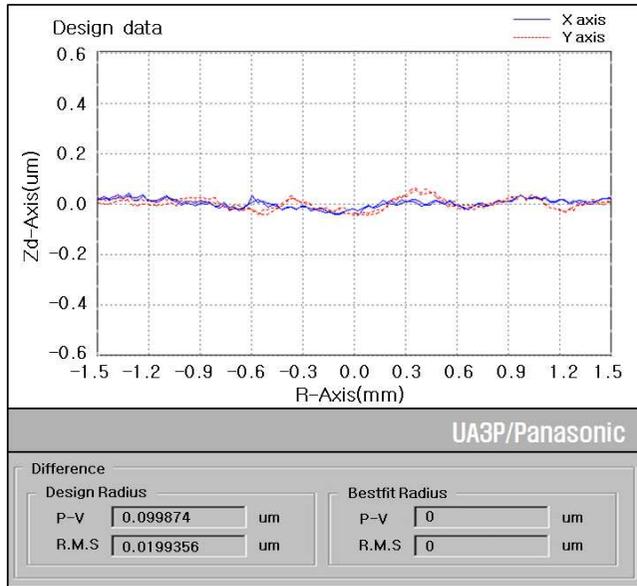


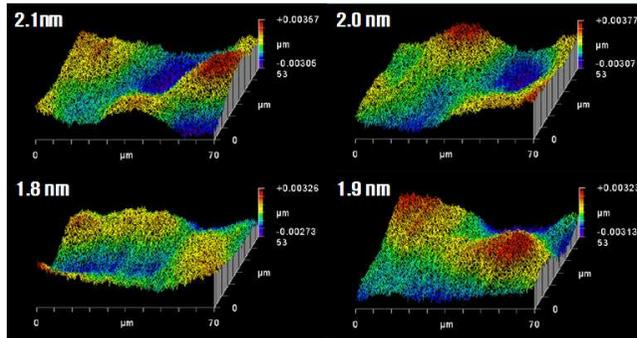
Fig. 3.23 Grinding result of plane molding core

일반적으로 초정밀 연삭가공에서 평면형상의 경우는 초정밀가공기를 활용한 연삭가공으로는 요구하는 형상정도를 얻기 힘들기 때문에 폴리싱가공을 통해 최종 정삭가공이 수행된다.

본 논문에서는 평면코어의 형상정도 및 표면조도의 향상을 위해 비구면 폴리싱가공기(KRP-2200F, Kuroda Co., Japan)를 사용하여 폴리싱가공을 수행하였다. 평면코어의 폴리싱 결과 형상정도 PV 0.100 μm , 표면조도 1.9 nm의 결과값을 얻었다. Fig. 3.24는 평면 성형용 코어의 가공결과를 나타낸다.



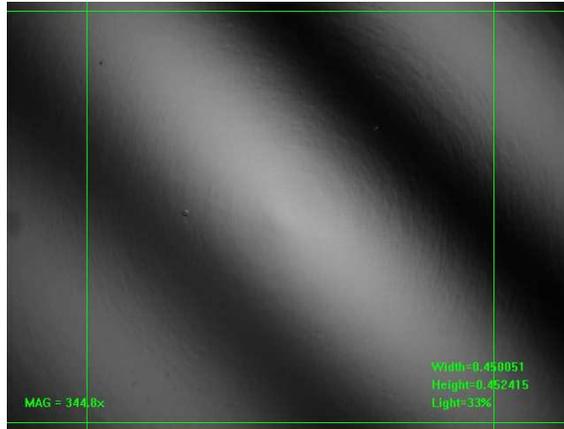
(a) Form accuracy of plane molding core



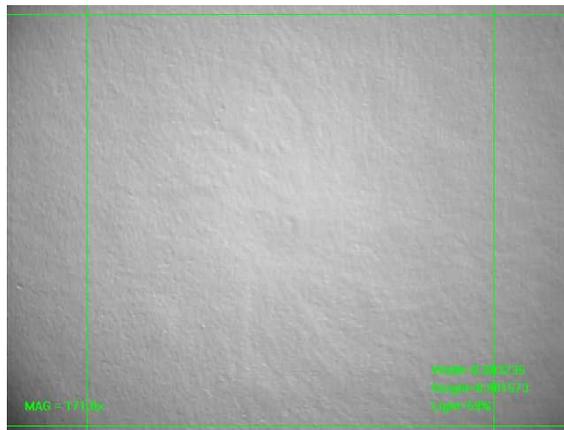
(b) Surface roughness of plane molding core

Fig. 3.24 Form accuracy and surface roughness of plane molding core

비구면 Glass렌즈 성형용 코어 가공결과 형상정도 $0.155 \mu\text{m}$ (비구면), $0.100 \mu\text{m}$ (평면)과 표면조도 3.4 nm (비구면), 1.9 nm (평면)를 얻을 수 있었다. 성형용 코어에 요구되는 형상정도와 표면조도에 만족한 결과를 얻었다. Photo 3.2와 3.3, 그리고, Table 3.7은 가공된 코어의 표면과 가공된 비구면 Glass렌즈 성형용 초경코어, 그리고 성형용 코어의 측정결과를 각각 나타낸다.



(a) Surface of aspheric molding core



(b) Surface of plane molding core

Photo 3.2 Surface of molding core for aspheric glass lens



Photo 3.3 Molding core for aspheric glass lens

Table 3.7 Measurement results of molding core

| | Form accuracy : PV(μm) | | Surface roughness : Ra(nm) | |
|--------------|-------------------------------------|-------|----------------------------|-------|
| | Aspheric | Plane | Aspheric | Plane |
| molding core | 0.155 | 0.100 | 3.4 | 1.9 |

제 4 절. 성형용 초경합금 코어의 코팅효과 연구

앞 절에서 비구면 Glass렌즈 성형용 코어를 연삭가공하기 위하여 최적연삭조건 규명과 더불어 이송속도 제어기법을 개발하여 성형용 초경코어를 초정밀 연삭가공하였다. 성형용 코어는 가공에 소요되는 시간과 비용의 문제를 해결하기 위한 하나의 방법으로 성형용 코어면에 코팅을 통하여 수명을 향상시키고 있다.

본 절에서는 DLC 코팅 및 Re-Ir 코팅을 통하여 성형용 코어의 수명향상 뿐만 아니라 형상정도와 표면조도에 미치는 영향에 대하여 측정, 평가하였다.

1. 다이아몬드상 탄소(DLC) 코팅효과

본 논문에서는 실험계획법을 적용하여 구한 최적연삭가공조건을 활용하여 비구면 Glass렌즈 성형용 코어의 초정밀 연삭가공을 수행하였다. 가공결과 형상정도(PV) 0.155 μm (비구면)와 0.100 μm (평면), 표면조도(Ra) 3.4 nm(비구면)와 2.2 nm(평면)의 만족한 결과를 얻었다.

일반적으로 Glass렌즈 성형에서 성형용 코어와 Glass렌즈와의 이형성과 성형용 코어의 수명향상, 내마모성 및 내부식성 등을 위해 다양한 코팅을 수행한다.

다이아몬드상 탄소(Diamond-Like Carbon, DLC) 코팅은 고경도, 고탄성, 내마모성, 화학적 안정성을 가지기 때문에 다양한 분야에서 많은 연구가 이루어지고 있으며, 산업분야에서 광범위하게 적용되고 있다. 특히, 최근 Glass렌즈 성형분야에서 성형용 초경코어면의 DLC 코팅은 성형공정 시 Glass렌즈와 성형용 코어와의 이형성 향상 및 성형용 코어 수명향상을 위해 주목받고 있으며 관련분야에서 선진 기술을 보유하고 있는 일본에서 주로 사용되고 있다.^[36,37,38]

따라서, 본 논문에서는 가공 완료된 성형용 초경코어의 가공면 위에 이온 증착법을 활용하여 SiC(20 nm), DLC(80 nm) 코팅을 순차적으로 각각 수행한 후 DLC 코팅 전후의 성형용 코어의 형상정도와 표면조도의 변화를 비교, 검토 하였다. 한편, SiC 코팅을 수행하는 이유는 DLC 피막과 성형용 코어와의 밀착성을 높이기 위해 중간층을 형성시키기 위해 수행한다. Fig. 3.25는 DLC 코팅막 구조와 DLC 코팅된 성형용 코어를 나타낸다.

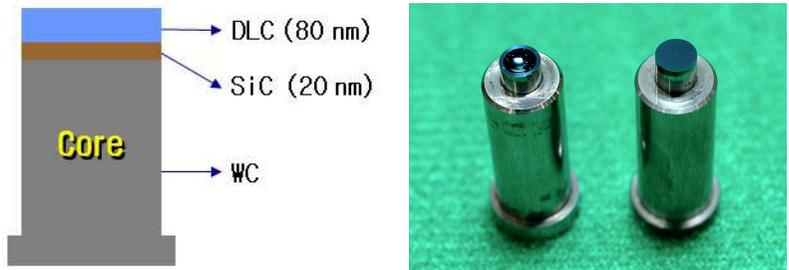
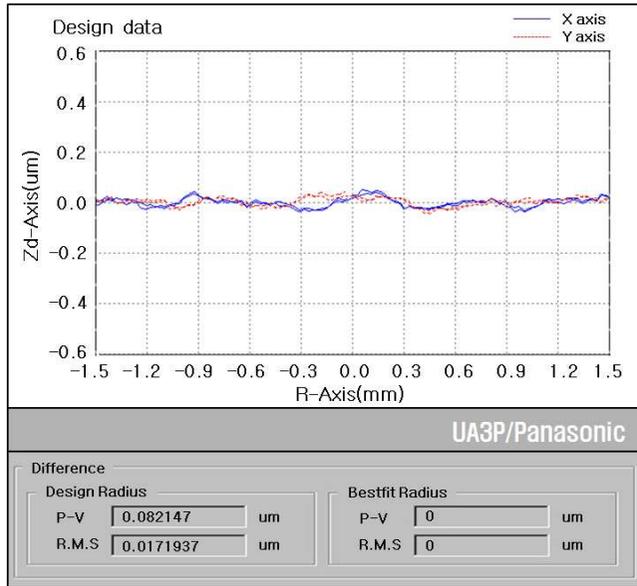
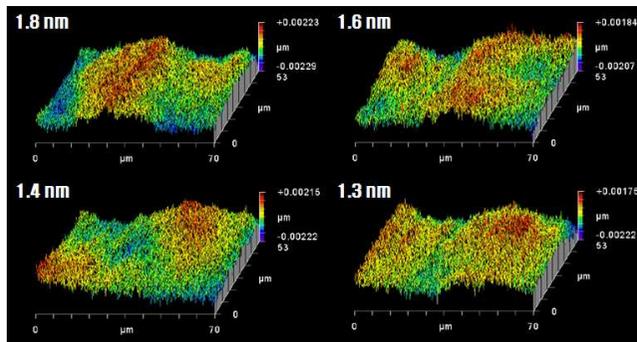


Fig. 3.25 Coating film structure and DLC coated molding core

DLC 코팅된 성형용 코어를 측정 한 결과 형상정도(PV) $0.137 \mu\text{m}$ (비구면)과 $0.082 \mu\text{m}$ (평면), 표면조도(Ra) 2.2 nm (비구면)와 1.5 nm (평면)의 결과를 얻었다. Fig. 3.26과 Fig. 3.27은 DLC 코팅 후 비구면 및 평면 성형용 코어의 형상정도 및 표면 조도에 대한 측정결과를 각각 나타낸다.



(a) Form accuracy of plane molding core



(b) Surface roughness of plane molding core

Fig. 3.27 Form accuracy and surface roughness of DLC coated plane molding core

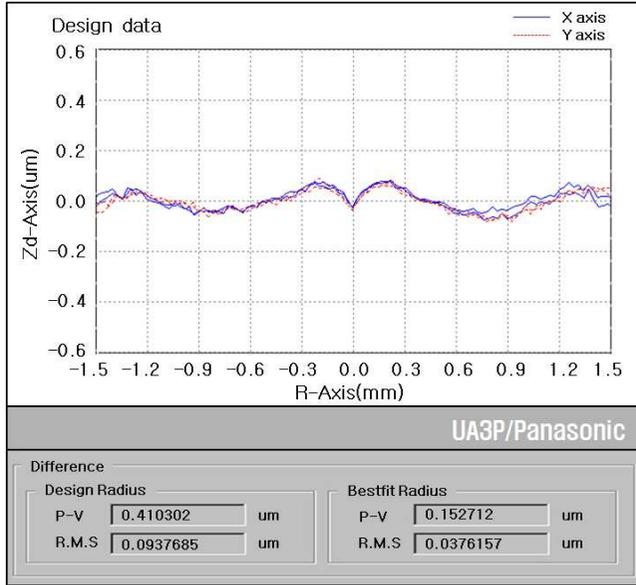
Fig. 3.26과 Fig. 3.27에서 알 수 있듯이 DLC 코팅 전후 측정결과 성형용 코어 비구면 형상정도는 0.155 μm 에서 0.137 μm , 표면조도는 3.4 nm에서 2.2 nm로 향상됨을 보였다. 또한, 성형용 코어 평면 형상정도는 0.100 μm 에서 0.082 μm , 표면조도는 1.9 nm에서 1.5 nm로 향상됨을 알 수 있었다. Table 3.8은 성형코어의 DLC 코팅 전후 측정결과를 나타낸다.

Table 3.8 Comparison results of bare molding core and DLC coated molding core

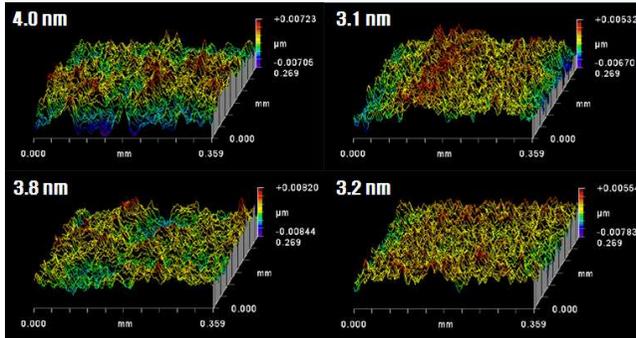
| | Form accuracy : PV(μm) | | Surface roughness : Ra(nm) | |
|--------------------------|-------------------------------------|-------|----------------------------|-------|
| | Aspheric | Plane | Aspheric | Plane |
| Non coating molding core | 0.155 | 0.100 | 3.4 | 1.9 |
| DLC coated molding core | 0.137 | 0.082 | 2.2 | 1.5 |

2. Rhenium-Iridium(Re-Ir) 코팅 효과

성형용 코어의 Rhenium-Iridium(Re-Ir) 코팅의 효과를 확인하기 위하여 비구면 Glass렌즈 성형용 초경코어의 초정밀 연삭가공을 수행하였다. 가공결과 형상정도 0.153 μm (비구면)과 0.105 μm (평면), 표면조도 3.5 nm(비구면)와 2.0 nm(평면)의 결과를 얻었다. Fig. 3.28과 Fig. 3.29는 가공 완료된 성형용 코어의 형상정도와 표면 조도를 각각 나타낸다.

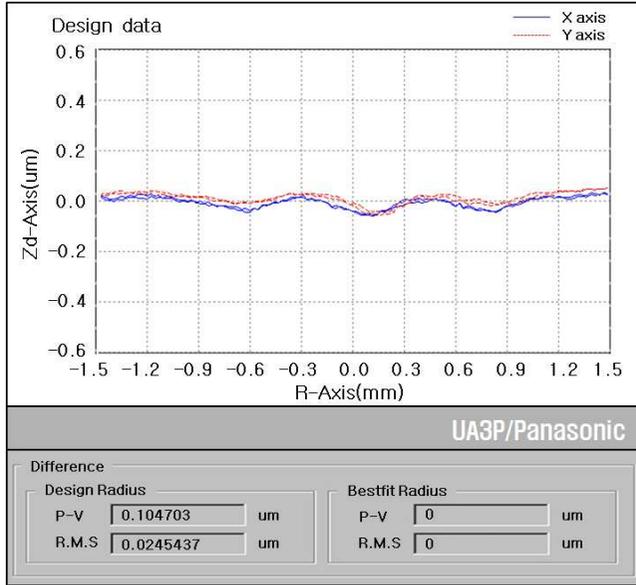


(a) Form accuracy of aspheric molding core

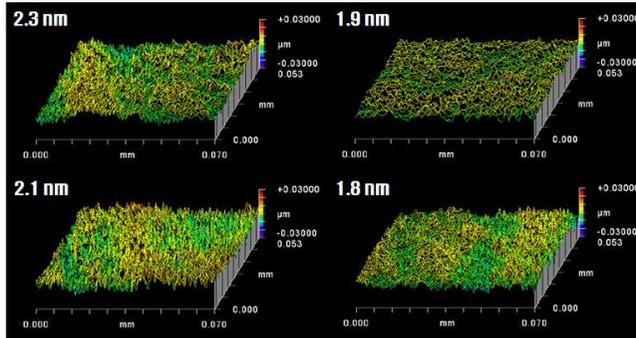


(b) Surface roughness of aspheric molding core

Fig. 3.28 Form accuracy and surface roughness of aspheric molding core



(a) Form accuracy of plane molding core



(b) Surface roughness of plane molding core

Fig. 3.29 Form accuracy and surface roughness of plane molding core

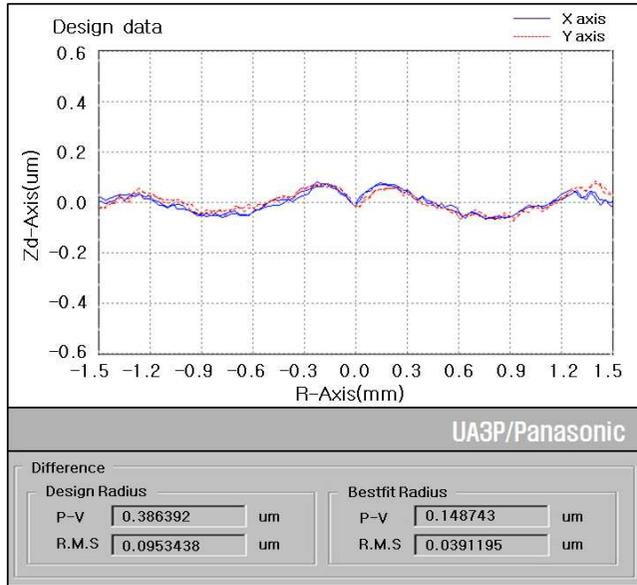
Rhenium-Iridium(Re-Ir) 코팅은 주로 국내 Glass렌즈 성형업체에서 고온에서의 내마모성, 내식성의 증대와 Glass렌즈와의 이형성의 증가를 목적으로 사용하고 있는 일반적 코팅 방법이다.

본 논문에서는 가공 완료된 성형용 초경코어의 가공면 위에 마그네틱 Sputter법을 활용하여 Re-Ir(240 nm) 코팅을 수행한 후 Re-Ir 코팅 전후의 성형용 코어의 형상정도와 표면조도의 변화를 비교, 검토 하였다. Fig. 3.30은 Re-Ir 코팅 성형용 초경코어의 코팅막 구조와 Re-Ir 코팅된 성형용 코어를 각각 나타낸다.

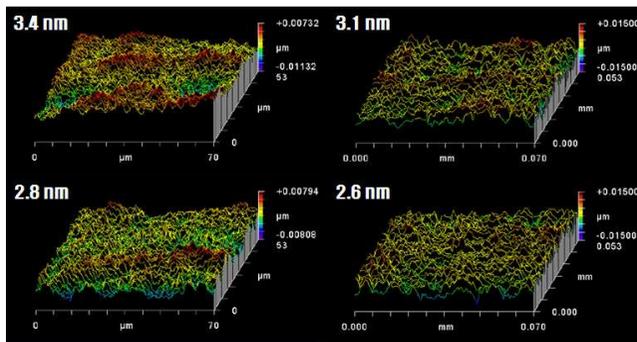


Fig. 3.30 Coating film structure and Re-Ir coated molding core

Re-Ir 코팅 후 성형용 코어를 측정 한 결과 형상정도(PV) $0.149 \mu\text{m}$ (비구면)와 $0.097 \mu\text{m}$ (평면), 표면조도(Ra) 3.0 nm (비구면)와 1.8 nm (평면)의 결과를 얻었다. Fig. 3.31과 Fig. 3.32는 Re-Ir 코팅 후 성형용 코어의 형상정도 및 표면조도에 대한 측정결과를 각각 나타낸다.

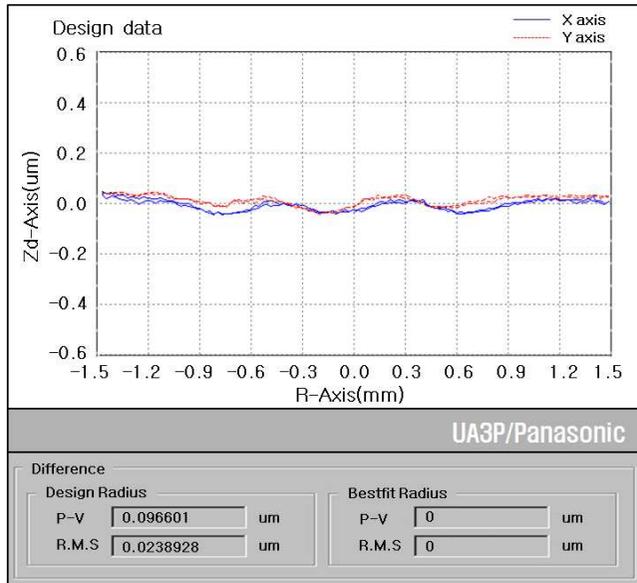


(a) Form accuracy of aspheric molding core

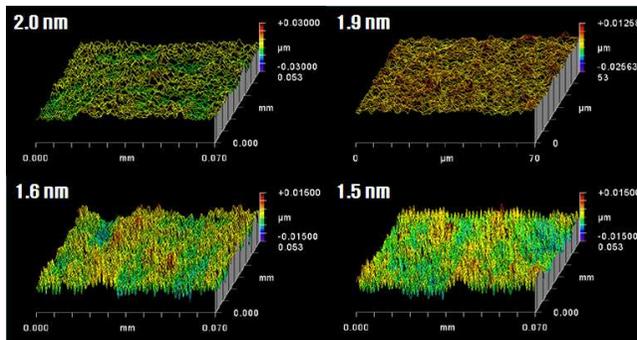


(b) Surface roughness of aspheric molding core

Fig. 3.31 Form accuracy and surface roughness of Re-Ir coated aspheric molding core



(a) Form accuracy of plane molding core



(b) Surface roughness of plane molding core

Fig. 3.32 Form accuracy and surface roughness of Re-Ir coated plane molding core

Re-Ir 코팅 전후 측정결과 성형용 코어 비구면 형상정도(PV)는 0.153 μm 에서 0.149 μm , 표면조도(Ra)는 3.5 nm에서 3.0 nm로 향상됨을 보였다. 또한, 성형용 코어 평면 형상정도(PV)는 0.105 μm 에서 0.097 μm , 표면조도(Ra)는 2.0 nm에서 1.8 nm로 향상됨을 알 수 있었다. Table 3.9는 성형용 코어의 Re-Ir 코팅 전후 측정결과를 비교하여 나타낸다.

Table 3.9 Comparison results of bare molding core and Re-Ir coated molding core

| | Form accuracy : PV(μm) | | Surface roughness : Ra(nm) | |
|---------------------------|-------------------------------------|-------|----------------------------|-------|
| | Aspheric | Plane | Aspheric | Plane |
| Non coating molding core | 0.153 | 0.105 | 3.5 | 2.0 |
| Re-Ir coated molding core | 0.149 | 0.097 | 3.0 | 1.8 |

제 4 장 비구면 Glass렌즈 성형용 Silicon Carbide(SiC) 코어 초정밀 연삭가공

Glass렌즈 성형에서 Silicon Carbide(SiC)를 이용하여 성형용 코어를 제작한다면, 성형용 코어와 렌즈의 이형성 향상 및 성형용 코어의 수명향상을 위해 사용되는 DLC 코팅을 성형용 코어면에 수행할 때 DLC 코팅과 성형용 초경코어와의 밀착성을 향상시키기 위해 SiC층을 형성 시키는 과정을 생략할 수 있다. 따라서, 제작공정의 간소화로 시간 및 비용을 감소시킬 수 있다. 그러나, SiC는 매우 우수한 기계적 특성을 가지고 있으나 고경도, 고취성 재료이기 때문에 연삭가공시 크랙이나 치핑이 발생하기 쉬워 고경도 가공이 어려운 단점이 있다.^[39,40,41,42]

본 논문에서는 SiC를 사용하여 성형용 코어를 제작하기 위하여 앞 장에서 규명한 초경합금 성형용 코어의 연삭가공조건을 바탕으로 성형용 SiC 코어의 최적연삭가공조건을 규명하였다. 또한, 규명된 최적연삭조건을 활용하여 성형용 SiC 코어를 가공하였다.

제 1 절. SiC 최적연삭가공조건 연구

제 3 장에서의 성형용 초경코어의 최적연삭조건 및 연삭가공 연구결과를 바탕으로 비구면 Glass렌즈 성형용 탄화규소(SiC) 코어 가공을 위한 최적가공조건을 규명하였다.

Silicon Carbide(SiC)의 초정밀 연삭특성을 파악하기 위하여 다이아몬드 휠 #2000, #5000 및 #8000을 사용하여 연삭가공을 수행하였다. 연삭조건은 초경합금 최적연삭가공에서 얻어진 최적가공조건을 규명하는 과정에서 이송속도와 연삭깊이가 표면조도에 크게 영향을 미치는 것을 알았다. 따라서, SiC의 최적가공조건 규명을 위하여 이송속도와 연삭깊이를 변화시키면서 연삭가공을 수행하여 이송속도와 연삭깊이가 표면조도에 미치는 영향을 평가하였다. 또한, 다이아몬드 휠 메쉬의 변화가 표면조도에 미치는 영향을 평가하였다.

1. 이송속도가 표면조도에 미치는 영향

이송속도가 표면조도에 미치는 영향을 파악하기 위하여 연삭주축의 회전수(35,000 rpm), 공작물의 회전수(350 rpm) 및 연삭깊이($0.3 \mu\text{m}$) 등을 고정하고 이송속도를 0.5 mm/min, 0.3 mm/min, 0.1 mm/min으로 변화시켜 초정밀 연삭가공 후 표면조도를 측정하였다.

표면조도 측정결과 Fig. 4.2에 나타낸 바와 같이 치핑현상에 의해 부분적으로 표면에 급격한 변화가 나타나는 것을 확인하였고, 이송속도가 감소할수록 치핑현상이 줄어들며 더불어 표면조도가 향상 되는 것을 알았다. 치핑 현상은 성형용 SiC 코어가 취성재료로써 난삭재임을 잘 보여주는 결과이다. Fig. 4.1과 Fig. 4.2는 이송속도에 따른 표면조도의 변화를 각각 나타낸다.

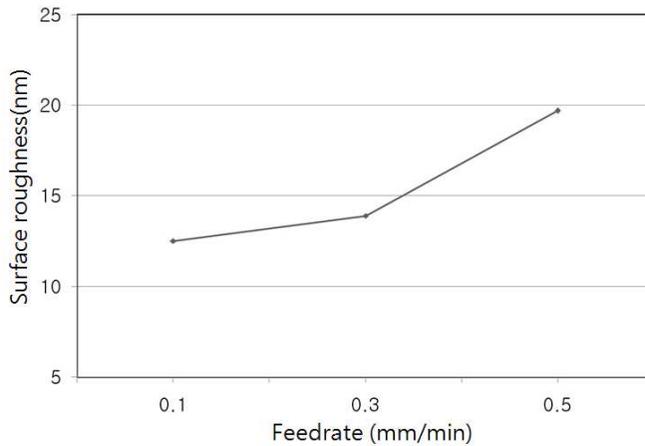
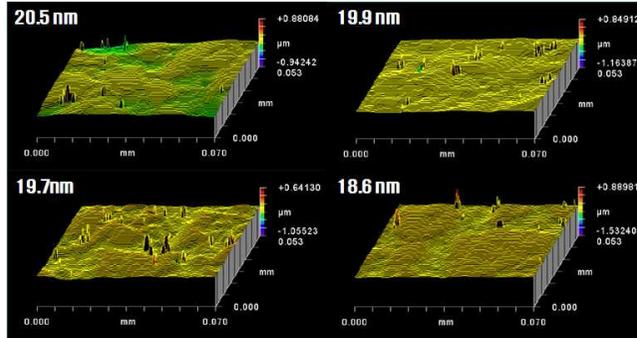
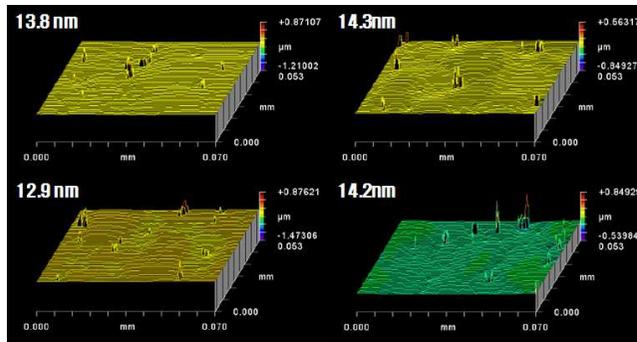


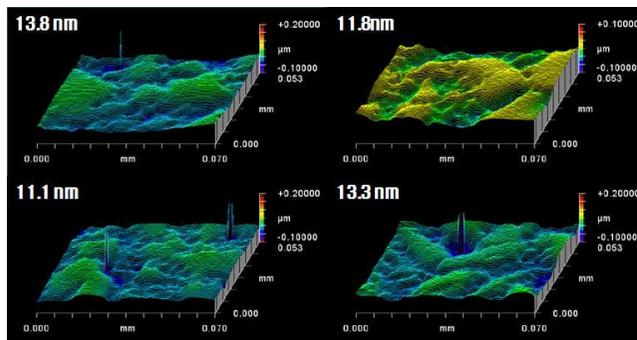
Fig. 4.1 Surface roughness variation according to feedrate



(a) Feedrate 0.5 mm/min(Ra 19.7 nm)



(b) Feedrate 0.3 mm/min(Ra 13.8 nm)



(c) Feedrate 0.1 mm/min(Ra 12.5 nm)

Fig. 4.2 Surface roughness according to feedrate

2. 연삭깊이가 표면조도에 미치는 영향

연삭깊이가 표면조도에 미치는 영향을 파악하기 위하여 연삭주축의 회전수(35,000 rpm), 공작물의 회전수(350 rpm) 및 이송속도(0.1 mm/min) 등을 고정하고 연삭깊이를 0.5 μm , 0.3 μm , 0.1 μm 으로 변화시켜 초정밀 연삭가공 후 표면조도를 측정하였다.

표면조도 측정결과 치핑현상에 의해 부분적으로 표면에 급격한 변화가 나타나는 것을 확인하였고, 연삭깊이가 감소할수록 치핑현상이 줄어들고 더불어 표면조도가 향상 되는 것을 알았다. Fig. 4.3과 Fig 4.4는 연삭깊이에 따른 표면조도의 변화를 각각 나타낸다.

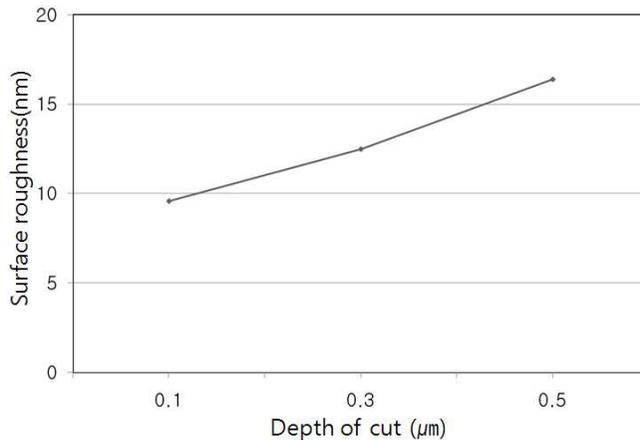
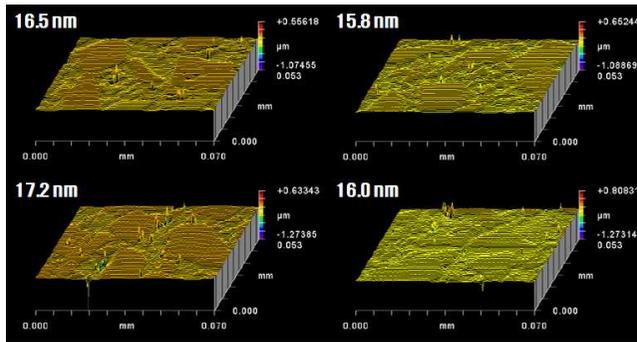
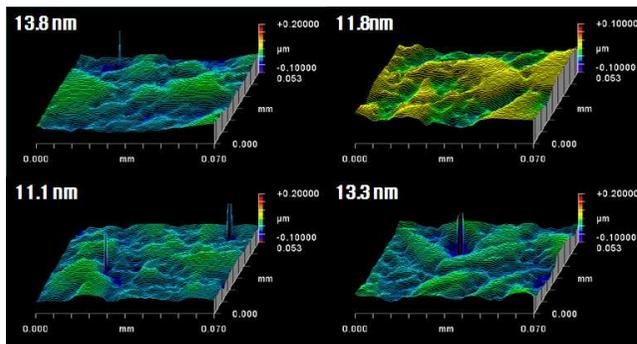


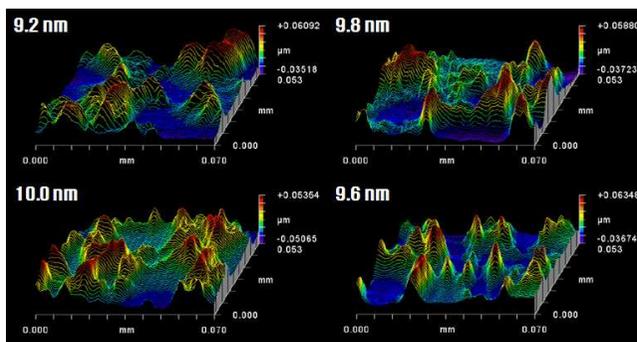
Fig. 4.3 Surface roughness variation according to depth of cut



(a) Depth of cut $0.5 \mu\text{m}$ (Ra 16.4 nm)



(b) Depth of cut $0.3 \mu\text{m}$ (Ra 12.5 nm)



(c) Depth of cut $0.1 \mu\text{m}$ (Ra 9.7 nm)

Fig. 4.4 Surface roughness according to depth of cut

3. 다이아몬드 휠 메쉬가 표면조도에 미치는 영향

다이아몬드 휠 메쉬가 표면조도에 미치는 영향을 파악하기 위하여 연삭주축의 회전수(35,000 rpm), 공작물의 회전수(350 rpm), 이송속도(0.1 mm/min), 그리고, 연삭 깊이(0.1 μm)를 고정시키고 다이아몬드 휠을 #2000, #5000, #8000으로 변화시켜 초정밀 연삭가공 후 표면조도를 측정하였다.

표면조도 측정결과 다이아몬드 휠 메쉬가 클수록 표면조도가 향상 되는 것을 알았다. Fig. 4.5, Fig 4.6, Photo 4.1은 다이아몬드 휠 메쉬에 따른 표면조도의 변화, 측정결과, 그리고, 가공면을 각각 나타낸다. Table 4.1은 이송속도, 연삭깊이 및 다이아몬드 휠 메쉬가 표면조도에 미치는 영향을 평가한 후 얻은 성형용 SiC 코어의 최적연삭가공조건을 나타낸다.

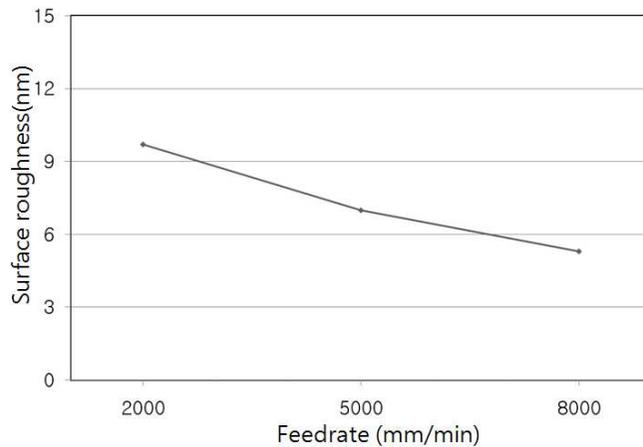
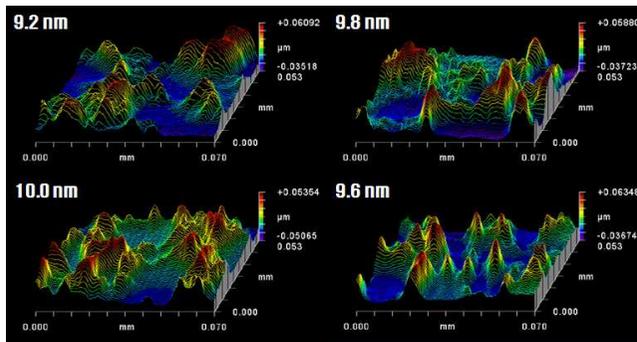
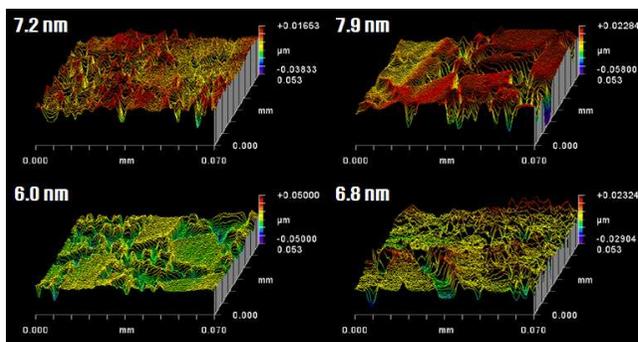


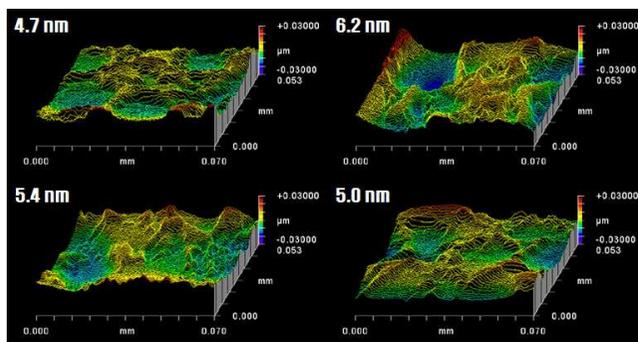
Fig. 4.5 Surface roughness variation according to diamond wheel mesh



(a) Diamond wheel #2000(Ra 9.7 nm)

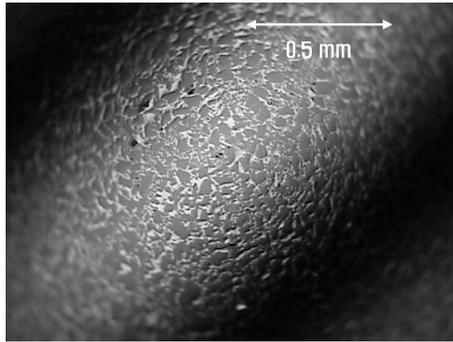


(b) Diamond wheel #5000(Ra 7.0 nm)

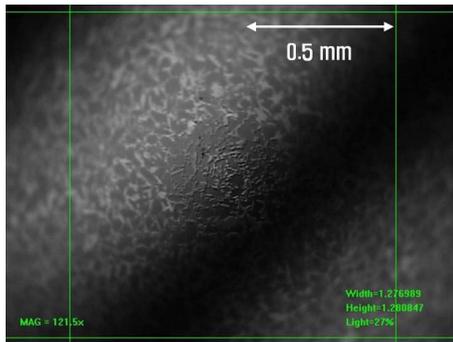


(c) Diamond wheel #8000(Ra 5.3 nm)

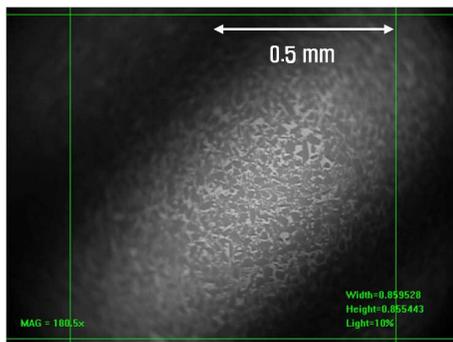
Fig. 4.6 Surface roughness according to diamond wheel mesh



(a) Diamond wheel #2000



(b) Diamond wheel #5000



(c) Diamond wheel #8000

Photo 4.1 Surface of SiC molding core

Table 4.1 Optimal grinding conditions of Silicon Carbide(SiC)

| Material | Silicon Carbide(SiC) |
|--------------------------------|----------------------|
| Diamond wheel | #8,000, D 2.0 mm |
| Turbine speed (rpm) | 35,000 |
| Spindle speed (rpm) | 350 |
| Feedrate (mm/min) | 0.1 |
| Depth of cut (μm) | 0.1 |

제 2 절. 비구면 Glass렌즈 성형용 SiC 코어 초정밀 연삭가공

본 논문에서는 3 메가픽셀, 2.5배 줌 카메라폰 모듈용 비구면 Glass렌즈 성형용 SiC 코어를 가공하기 위하여 초정밀가공기를 이용하여 코어 표면에 요구되는 형상정도 PV 0.3 μm , 표면거칠기 RMS 0.03 μm 이하의 가공정도를 위하여 초정밀 연삭가공을 수행하였다. Table 4.2는 본 연구에서 수행되어진 비구면 Glass렌즈 성형용 SiC 코어 가공조건을 나타낸다.

Table 4.2 Grinding conditions of Silicon Carbide(SiC) core

| Material | Silicon Carbide(SiC) | | | |
|-------------------|----------------------------|-------------------------|-------------------------------|-------------------|
| Diamond wheel | #8,000, D 2.0 mm | | | |
| Cutting condition | Turbine spindle speed(rpm) | Work spindle speed(rpm) | Depth of cut(μm) | Feedrate (mm/min) |
| Rough | 35,000 | 350 | 0.5 | 0.5 |
| Semi-finish | | | 0.3 | 0.3 |
| Finish | | | 0.1 | 0.1 |

본 논문에서는 비구면 Glass렌즈 설계를 기초로 NA-CAM 소프트웨어에 의한 NC 프로그램의 생성, 초정밀 비구면 연삭가공, 비구면 형상측정기를 활용한 측정 평가에 의한 보정가공으로 비구면 Glass렌즈 성형용 SiC 코어를 연삭가공 하였다.

최종적으로 가공된 비구면 성형용 SiC 코어의 형상정도는 정삭가공을 통해 최적곡률반경 2.93213 mm에서 형상정도 0.177 μm 의 결과를 얻었으며, 이는 Glass렌즈 성형용 코어의 설계 규격에 만족한 값이다. Fig. 4.7은 기상계측기로 측정한 정삭가공 결과를 나타낸다.

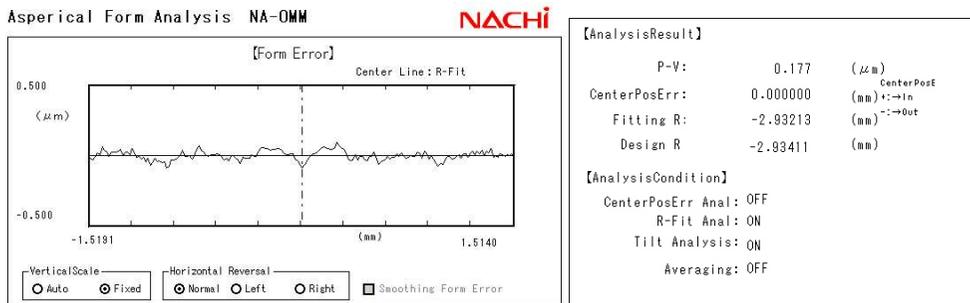
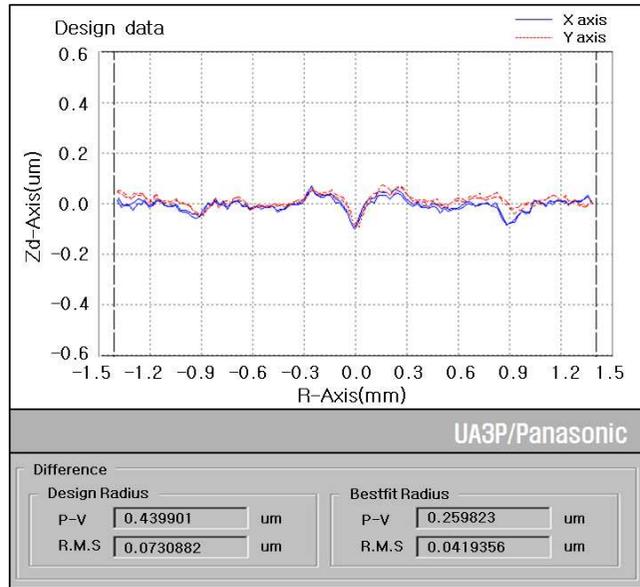
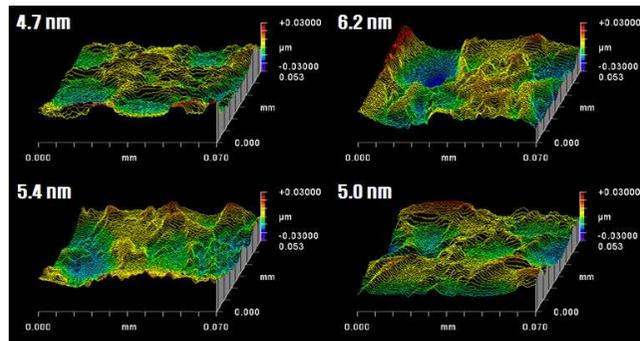


Fig. 4.7 Final grinding result of molding SiC core

Fig. 4.8은 본 논문에서 제작된 성형용 코어를 초정밀 자유곡면 3차원 형상 측정기와 3차원 표면조도 측정기를 이용하여 측정한 결과를 나타낸 것으로 형상정도 0.260 μm , 표면조도 5.3 nm의 결과를 보였다. Photo 4.2는 SiC 성형용 코어를 나타낸다.



(a) Form accuracy of aspheric molding core

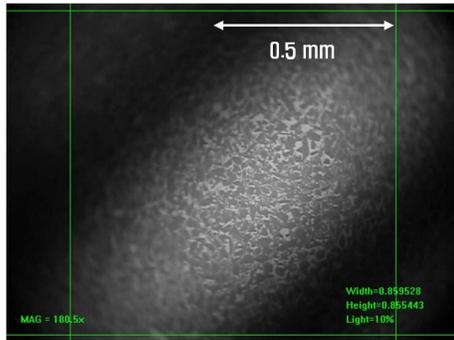


(b) Surface roughness of aspheric molding core

Fig. 4.8 Form accuracy and surface roughness of aspheric molding SiC core



(a) SiC molding core



(b) Surface of SiC molding core

Photo 4.2 Silicon Carbide molding core

제 5 장 결 론

본 논문에서는 초정밀 연삭가공에 의한 비구면 Glass렌즈 성형용 금형코어 초정밀 연삭가공에 대한 연구로써 3 메가픽셀, 2.5배 광학 줌 카메라폰 모듈용 비구면 Glass 렌즈 개발을 목적으로 실험계획법을 적용하여 성형용 초경코어의 최적 연삭가공조건을 연구하였다. 초정밀 연삭모델에서 이송속도 제어기법을 개발하여 표면조도 향상에 관한 연구를 수행하였다.

최적연삭가공조건과 이송속도 제어기법을 활용하여 비구면 Glass렌즈 성형용 코어를 초정밀 연삭가공하였다. 가공된 성형용 코어에 Diamond Like Carbon(DLC) 및 Rhenium-Iridium(Re-Ir) 코팅을 각각 수행하였고 각각의 성형용 코어의 형상정도 및 표면조도를 측정하여 DLC 및 Re-Ir 코팅이 성형용 코어의 형상정도 및 표면조도에 미치는 영향에 관한 연구를 수행하였다.

초경합금 성형용 코어 초정밀 연삭가공에 관한 연구를 바탕으로 Silicon Carbide(SiC)의 최적연삭가공조건에 관한 연구를 수행하고, 이를 활용하여 성형용 SiC 코어를 초정밀 연삭가공하였다. 본 논문의 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 비구면 Glass렌즈 성형용 초경합금 코어의 최적연삭가공조건 연구를 위하여 실험계획법을 활용하였고, 기존의 연삭가공조건 연구에 비해 적은 실험횟수로 다음과 같은 결론을 얻었다. 실험계획법을 적용하여 최적연삭가공조건에 대하여 연구한 결과 다이아몬드 휠 메쉬 #1500과 #2000에서 주축회전속도 300 rpm, 터빈회전속도 30,000 rpm, 이송속도 0.25 mm/min, 그리고, 연삭깊이 0.1 μm 의 최적연삭조건을 얻었다. 다이아몬드 휠 메쉬 #1500에서는 주축회전속도와 터빈회전속도, 터빈회전속도와 이송속도, 그리고 터빈회전속도와 연삭깊이 간의 교호작용이 유의함을 알 수 있었다. 다이아몬드 휠 메쉬 #2000에서 주축회전속도와 이송속도, 그리고 연삭깊이 간의 교호작용이 유의함을 알 수 있었다.
2. 기존의 연삭가공방법에서 다이아몬드 휠이 중심에서 멀어질수록 표면조도가 나빠지는 현상을 개선하여 성형용 초경합금 코어의 표면조도 향상을 위해 이송속

도 제어기법을 적용하여 연삭가공을 수행하였다. 성형용 코어의 유효경(ϕ 1.5 mm)에서 표면조도는 종래의 연삭가공방법으로 가공한 결과 6.0 nm에서 이송 속도 제어기법을 적용하여 연삭가공을 수행한 결과 4.5 nm로 약 1.5 nm 향상됨을 확인하였다. 이송속도 제어기법을 국내 최초로 초경합금 성형용 코어의 연삭가공에 적용하여 유효한 가공방법임을 확인하였다.

3. 최적연삭가공조건과 이송속도 제어기법을 활용하여 3 메가 픽셀, 2.5배 줌 카메라폰 모듈용 비구면 Glass렌즈 성형용 코어의 초정밀 연삭가공과 폴리싱가공을 수행하였다. 비구면 연삭가공, 오차 보정가공 및 폴리싱가공을 통하여 성형용 초경코어의 형상정도 0.155 μm (비구면)과 0.100 μm (평면), 표면조도 3.5 nm(비구면)과 1.9 nm(평면)의 결과를 얻었다. 결과값은 3 메가픽셀, 2.5배 광학 줌 카메라폰 모듈용 비구면 Glass렌즈 성형용 코어의 요구값에 만족하며 국내 최고수준의 가공정도를 나타낸다.
4. 성형용 코어면에 Re-Ir 및 DLC 코팅을 각각 수행하였다. 성형용 코어면의 Re-Ir 코팅을 통하여 형상정도 0.004 μm (비구면), 0.008 μm (평면)과 표면조도 0.5 nm(비구면), 0.2 nm(평면)가 향상됨을 알 수 있었다. 성형용 코어면의 DLC 코팅을 통하여 형상정도 0.018 μm (비구면, 평면)과 표면조도 1.2 nm(비구면), 0.4 nm(평면)가 향상됨을 알 수 있었다. Re-Ir 및 DLC 코팅이 성형용 코어와 Glass렌즈와의 이형성과 수명향상 만이 아니라 형상정도 및 표면조도에도 영향을 미친다는 것을 알 수 있었다. 형상정도와 표면조도에 미치는 영향은 Re-Ir 코팅과 비교하여 DLC 코팅이 우수함을 알 수 있었다.
5. 코팅공정의 간소화로 시간 및 비용의 감소를 위하여 성형용 코어로 Silicon Carbide(SiC)를 최초로 사용하였다. 성형용 초경코어 최적연삭조건을 바탕으로 SiC의 연삭가공에서 다이아몬드 휠 #2000, #5000, #8000을 사용하여 주축 회전속도 350 rpm, 터빈회전속도 35,000 rpm, 이송속도 0.1 mm/min, 그리고, 연삭깊이 0.1 μm 의 최적연삭조건을 얻었다. 비구면 Glass렌즈 성형용 SiC 코어를 다이아몬드 휠 #8000을 사용하여 최초로 3 메가픽셀 2.5배 줌 카메라폰

모듈용 비구면 Glass렌즈 성형용 코어를 초정밀 연삭가공하였고, 비구면 형상정도 0.26 μm , 표면조도 5.3 nm의 결과를 얻었다. 결과값은 3 메가픽셀, 2.5배 광학 줌 카메라폰 모듈용 비구면 Glass렌즈 성형용 코어의 요구값에 대한 만족함을 나타낸다.

향후 연구 계획

대표적인 난삭재 Silicon Carbide(SiC)는 광학적 특성 및 기계적 특성, 전기적 특성 등 우수한 특성을 가진 재료로써 우주망원경, 레이저 광 및 X선 반사용 미러 등 다종, 다양한 용도로 이용되고 있으며 전기, 전자, 정보, 정밀기기의 급격한 발전으로 SiC의 수요가 급격히 증가하고 있다.

본 논문에서는 비구면 Glass렌즈 성형용 코어를 SiC 소재로 제작할 경우 성형용 코어의 수명향상, 렌즈 생산원가의 절감 및 코팅 과정의 간소화 등의 다양한 장점을 가지므로 SiC를 이용하여 비구면 Glass렌즈 성형용 코어를 초정밀 연삭가공하였다. 실험과정에서 다음과 같은 문제점을 확인 할 수 있었고 이를 해결하기 위하여 다음과 같은 연구를 수행할 계획이다.

1. 이송속도 제어기법을 적용함으로써 초경합금 성형용 코어 가공에서 표면조도 향상과 더불어 연삭가공시간이 약 2배 이상 소요됨을 알았다. SiC 성형용 코어 연삭가공에 적절한 이송속도 제어기법을 적용하기위하여 연삭가공의 독립변수에 시간을 변수로 적용하여 최적이송속도 제어기법을 개발하고 이를 SiC 성형용 코어 초정밀 연삭가공에 적용함으로써 연삭가공시간을 단축할 수 있을 것으로 기대된다.
2. SiC 성형용 코어의 초정밀 연삭가공에서 사용된 #8000의 다이아몬드 휠 마모량은 초경합금 성형용 코어 연삭가공에 사용된 다이아몬드 휠 메쉬 #2000에 비해서 약 2배인 것을 알 수 있었다. 이는 SiC가 초경합금에 비해 고경도 재료이기 때문이다. 다이아몬드 휠 마모량의 증가는 요구되는 형상정도를 얻기 위한 보정가공에 어려움을 주기 때문에 연삭가공에서 보정가공에 소요되는

시간과 SiC 성형용 코어의 생산비용이 증가한다. 초경합금 및 SiC 성형용 코어의 가공에서 다이아몬드 휠의 마모량 데이터베이스를 구축하고, 이를 활용하여 연삭가공에서 다이아몬드 휠의 마모량을 예측할 수 있다. 이를 활용하여 다이아몬드 휠 마모량을 고려한 보정가공 방법을 개발하여 초정밀 연삭가공에 적용함으로써 초경합금 및 SiC 성형용 코어의 형상정도를 향상시키고, 연삭가공시간을 단축할 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

1. P. McKeown, "Manufacturing how small can we go? The challenge and opportunities of the nanometer age", The British Association Lecture, 1996.
2. N. Taniguchi, "Current status in the future trends of ultra precision machining and ultra fine materials processing", Annals of CIRP, Vol. 32, No. 2, pp. 573-582, 1983.
3. R. R. Donaldson and D. C. Thompson, "Design and Performance of Small Precision CNC Turning Machine", Annals of CIRP, Vol. 35, pp. 373-376, 1986
4. N. Ikawa and S. Shimada, "Recent trends in diamond tool technology", Proceedings of the international congress for ultra precision technology, Aachen, Frg, pp. 126-142, 1988
5. N. Ikawa, "Ultra precision Metal Cutting The Past, the Present and the Future", Annals of CIRP, Vol. 40, pp.587-594, 1991
6. Hirofumi SUZUKI, Sunao KODERA, Tomoaki NAKASUJI, Tsutomu OHTA, and Katsuo SYOJI, "Precision Grinding of Aspherical CVD-SiC Molding Die", Int. J. Japan Soc. Prec. Eng., Vol. 32, No. 1, pp. 25-30, 1998.
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. Chunhe Zhang, Hitoshi Ohmori, Teruko Kato and Noboru Morita, "Evaluation of surface characteristics of ground CVD-SiC using cast iron bond diamond wheels", Journal of the International Societies for Precision Engineering and Nanotechnology, Vol. 25, pp. 56-62, 2001.

9. Jiwang Yan, Katsuo Syoji and Junchi Tamaki, "Some observations on the wear of diamond tools in ultra-precision cutting of single-crystal silicon", *Wear*, Vol. 255, pp. 387-392, 2003.
10. Mckeown. PA., "The role of precision engineering in manufacturing of the future", *Annals of the CIRP*, Vol. 36, No. 2, pp. 496-501, 1987.
11. 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.
12. H. Suzuki, S. Kodera, S. Maekawa, N. Morita, E. Sakurai, K. Tanaka, H. Takada, T. Kuriyagawa and K. Syoji, "Study on precision grinding of micro aspherical surface", *J. Japan Soc, Prec. Engg.*, 1998, 62(4):619-623
13. T. Kuriyagawa, K. Syoji and L. Zhou, "Precision Form Truing and Dressing for Aspheric Ceramic Mirror Grinding Machining of Advanced Materials", *NIST Special Publication*, Vol. 847, No. 6, pp. 325-331, 1993.
14. T. Kuriyagawa, M. S. Sepasy and K. Syoji, A new grinding method for aspheric ceramic mirrors *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 62, pp. 387-392, 1996.
15. M. S. Sepasy, T. Kuriyagawa, K. Syoji and T. Tachibana, "Ultra Precision Arc Truing and Dressing of Diamond Wheels for Aspheric Mirror Grinding", *International Journal of Japan Society Precision Engineering*, Vol. 31, No. 4, pp. 263-268, 1997.
16. Langis Michaud, Jean-Pierre Tchang, Celine Baril, and Jacques Gresset, "New Perspectives in Monovision-A Study Comparing Aspheric With Disposable Lenses", *International Contact Lens Clinic*, Vol. 22, No. 90, pp. 203-207, 1995.
17. Tsunemoto Kuriyagawa, Mohammad Saeed, Sepasy Zahmaty and Katsuo

- Syoji, "A new grinding method for aspheric ceramic mirrors¹", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 62, No. 4, pp. 387-392, 1996.
18. Sang-Suk Kim, Hyun-Uk Kim, Sang-Hwa Jeong, Hye-Heong Kim and Jeong-Ho Kim, "Development of F-Theta Lens for Laser Beam Printer", The Korean Institute of Electrical and Electronic Material Engineers, Vol. 19, No 4, p. 386-390, 2006.
 19. Hyun-Uk Kim, Sang-Hwa Jeong, Yong-Pil Park, Sang-Suk Kim, Hye-Heong Kim, Jeong-Ho Kim, "DLC Coating Effect of WC Mold Surface for Glass Molding Lens ", The Korean Institute of Electrical and Electronic Material Engineers, Vol. 19, No 11, p. 1050-1053, 2006.
 20. H. Hanyu, S. Kamiya, Y. Murakami and Y. Kondoh, "The improvement of cutting performance in semi-dry condition by the combination of DLC coating and CVD smooth surface diamond coating", Surface and Coatings technology, Vol. 200, No. 14, p. 1137-1143, 2005.
 21. N. Alagumurthi, K. Palaniradja and V. Soundararajan, "Optimization of Grinding Process Through Design of Experiment(DOE)", Materials and Manufacturing Processes, Vol. 21, No. 1, pp. 19-26, 2006.
 22. E. S. Lee and S. Y. Back, "A Study on optimum grinding factors for aspheric convex surface micro-lens using design of experiments", International Journal of Machine tools & Manufacture, Vol. 47, pp. 509-520, 2007.
 23. Dong-Hun Hyun and Seung-Jun Lee, "A Study on Grinding Characteristics of Aspherical Glass Lens core of High-pixel Digital Camera in Diamond Grinding Process", Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers, Vol. 12, No. 2, pp. 31-36, 2003.
 24. M. J. CHen, D. Li and S. Dong, "Research on a large depth-to-diameter ratio ultra-precision aspheric grinding system", Journal of Materials Processing

- Technology, Vol. 129, pp. 91-95, 2002.
25. Yeon Hwang, T. Kuriyagawa and Sun-Kyu Lee, "Wheel curve generation error of aspheric microgrinding in parallel grinding method", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 46, pp. 1929-1933, 2006.
 26. J. S. Lee and K. Soyji, "A study on ultra precision machining for aspherical surface of optical parts", *Journal fo the Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 19, No. 10, pp. 195-201, 2002.
 27. 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.
 28. 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*, Vol. 127, No. 2, pp. 187-190, 2002.
 29. 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*, Vol. 25, No. 4, pp. 247-257, 2001.
 30. Hideki Tsutsumi, Keichi Yosizumi, and Hiroyuki Takeuchi, "Presentation of Ultrahigh Accurate 3-D Profilometer and Case Examples of Measurement", *Presentation of Matsushita Electronic Industrial Co. LTD*, 2002.
 31. Hyun-Uk Kim, Sang-Hwa Jeong, Jun-Hyung Ahn, Du-Hwan Cha, Dong-Gil Lee, Sang-Suk Kim, Hye-Jeong Kim and Jeong-Ho Kim, "Optimal Grinding Condition of Tungsten Carbide(WC) for Aspheric Glass Lens Using DOE", *The Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 5, No. 4, pp. 41-45, 2006.

32. J. S. Lee, M. Saeki, T. Kuriyagawa, and K. Syoji, "A study on the mirror grinding for mold of a small aspherical lens", *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 18, No. 12, pp. 82-87, 2001.
33. W. Saeki, "Study of precessing of axis symmetric aspheric by parallel grinding method", PhD Thesis, Depatrmnts of NanoMechanics Tohoku University, pp. 7, 2003.
34. T. Kuriyagawa, M. S. S. Zahmaty and K. Syoji, "A new grinding method for ashpheric ceramic mirrors", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 62, No. 4, pp. 387-392, 1996.
35. T. Kuriyagawa, N. Yoshihara, M. Saeki and K. Syoji, "Nano topography characteristic of asisymmetric aspherical grinding surface", *Key Engineering Materials*, Vol. 238-239, pp. 125-130, 2003.
36. Technical Report of Nanotech Co. LTD, "Introduce of Nanotech", Nanotech Co. LTD, 2005.
37. Hyun-Uk Kim, Sang-Hwa Jeong, Hye-Jeong Kim and Jeong-Ho Kim, "Optical Properties of Aspheric Glass Lens Using DLC Coating Mold", *Key Engineering Materials*, Vol. 345-346, pp. 1577-1580, 2007.
38. Du-Hwan CHA, Hye-Jeong KIM, Hyun-Uk KIM, Sang-Suk KIM, Yong-Pil PARK, and Jeong-Ho KIM, "Fabrication and Optical Evaluation of Aspheric Glass Lenses for 3 Mega pixel Zoom Camera Phone Module", *Optical Review*, Vol. 14, No. 3, pp. 145-150, 2007.
39. Z. Zhong and T. Nakagawa, "GRINDING OF ASPHERIC SiC MIRRORS", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 56, pp. 37-44, 1996.
40. C. F. Cheung, K. C. Chan and W. B Lee, "Surface characterization in ultra-precision machining of Al/SiC metal matrix composites using data

- dependent systems analysis", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 140, pp. 141-146, 2003.
41. Rolf Freimann, Bernd Dorband and Frank Holler, "Absolute measurement of non-comatic aspheric surface errors", *Optics Communications*, Vol. 161, pp. 106-114, 1999.
42. Y. Z. Liu, Y. C. Liang and F. H. Zhang, "Machining Characteristics Analysis of Nano Ceramics in Ultra Precision Grinding Machining", *Key Engineering Materials*, Vol. 304-305, pp. 210-213, 2006.

감사의 글

오늘 고마우신 분들의 도움으로 이 영광스러운 작은 결실을 맺게 되었습니다. 논문이 완성되기까지 도움을 주신 모든 분들에게 진심으로 고개 숙여 감사의 마음을 전합니다.

대학원의 오랜 연구 생활동안 부족함이 많았던 소생에게 전공분야의 연구 지도와 더불어 인생의 참된 길을 밝혀주신 정상화 교수님께 진심으로 감사드리며 앞으로의 삶 속에서도 교수님의 가르침을 마음속에 담고 열심히 살겠습니다.

논문 심사과정동안 부족한 저의 논문을 지적해주시며 더 나은 논문이 되도록 많은 관심과 조언을 아끼지 않으신 전남대학교 조규종 교수님, 한국광기술원 김정호 박사님 그리고 조선대학교 이규태 교수님, 장완식 교수님께도 깊은 감사의 마음을 전합니다. 언제 어디서나 교수님들께서 주신 은혜 잊지 않고 살아가겠습니다. 학부 시절부터 많은 애정과 관심으로 저를 지켜봐주시고 보살펴주신 기계공학과 모든 교수님들께 깊은 감사를 드립니다.

제 짧은 시절을 함께하며 동고동락했던 시스템 제어실험실의 선·후배님들께도 감사의 마음을 전합니다. 고창기능대학 신현성 교수님, 한국산업기술재단 오용훈 팀장님, 신유마이크로텍 류신호 사장님, 미국에 계시는 차경래 박사님, 한국광기술원 김상석 박사님, 신유마이크로텍 김종태 박사님께 깊은 감사를 드립니다. 대학원 선배이면서 친구인 삼호중공업 한용덕님, 별의 세계를 알게해준 남해철강 박용래님께 감사드립니다. 한국생산기술연구원 송석님, 도시개발공사 최석환님, 한국정신과학연구원 나운철님, 중외메디컬 신병수님, CAS 이경형님, 시험을 준비중인 박준호님께 앞으로 좋은 날이 계속되길 기원합니다. 실험실 대소사를 짊어 나가고 있는 김광호님의 파이팅을 기원하며, 석사 졸업할 신상문님, 시스템제어실험실의 기둥이 될 후배들 김주환, 이상희, 김태호, 서호진님께 좋은 결실이 이루어지길 기원하며, 교수님을 잘 보필해 드리길 부탁드립니다. 그리고, 다른 과지만 많은 도움을 준 이길성 학형과 김진우 학형께 감사드립니다.

한국광기술원 초정밀광학팀에서의 생활은 저에게 새로운 경험과 배움을 주었습

니다. 인자함으로 걱정해 주신 한택상 기술개발부장님께 감사의 마음을 전하고 싶습니다. 큰 형님처럼 아껴주시고 연구과정에서 많은 도움을 주신 김정호 박사님, 큰 누나처럼 힘이 되어 주신 김혜정 박사님, 실험실 선배로서 말 안듣는 후배 뒤처리하시느라 고생하신 김상석 박사님, 친구로서 많은 이야기를 나누어준 이동길 연구원님께 진심으로 감사드립니다. 함께 연구를 수행한 차두환 연구원, 안준형 연구원, 김민재 연구원, 이상인 연구원님께도 감사를 드리며, 초정밀광학팀에서 큰 열매를 맺으시길 기원합니다.

변치않는 우정으로 언제나 제 곁에 있어준 벗들에게 깊은 감사를 드립니다. 소리공간 창단기로 평생 케익을 자르실 양현석 선배님의 많은 선배님, 3기 최현준과 이상미 커플, 이성진, 이상준, 이재우, 이민웅외 동기들, 후배들에게 감사합니다. 취미생활을 함께한 서석, 월계, 백악축구회의 선후배 여러분께 감사드립니다. 백악에 3인방의 큰 형으로 힘들 때 도움을 준 김병대 선배, 후배지만 배울점이 많은 주동욱 후배에게 감사합니다. 그리고, 대학 선후배에게 감사드립니다.

가족이 있어 제겐 너무도 큰 힘이 되었습니다. 막내동생인 제가 형님, 형수님, 누나, 매형께 죄송하다는 말과 함께 감사의 마음을 전합니다.

마지막으로 제가 표현할 수 있는 모든 단어를 사용해도 부족한 사랑하는 부모님께 감사드립니다. 막내아들에 대한 두 분의 헤아릴 수 없는 깊은 사랑과 헌신, 인내가 있었기에 오늘의 결실이 있었습니다. 이 작은 결실을 두 분의 사랑 앞에 바칩니다. 두 분의 사랑을 가슴에 담고 열심히 최선을 다해 살아가겠습니다.

이 외에 제가 미처 언급하지 못한 고마운 분들이 너무도 많습니다. 그 분들의 이름을 하나 하나 되새기지 못함을 죄송스럽게 생각하며 고개숙여 감사의 마음을 전합니다.

2007 년 6 월

김 현 욱 拜上

저작물 이용 허락서

| | | | | | |
|------|--|--------|--------------------|-----|----|
| 학 과 | 기계공학과 | 학 번 | 20027495 | 과 정 | 박사 |
| 성 명 | 한글: 김 현 옥 한문: 金 炫 燾 영문: Kim Hyun Uk | | | | |
| 주 소 | 전남 여수시 광무동 373 2/5 | | | | |
| 연락처 | 010-2620-9008 | E-MAIL | cruise33@empal.com | | |
| 논문제목 | 한글 : 비구면 Glass렌즈 성형용 금형코어 초정밀 연삭가공에 관한 연구 | | | | |
| | 영어 : A Study on Ultra-Precision Grinding of Aspheric Glass Lens Molding Core | | | | |

본인이 저작한 위의 저작물에 대하여 다음과 같은 조건아래 조선대학교가 저작물을 이용할 수 있도록 허락하고 동의합니다.

- 다 음 -

1. 저작물의 DB구축 및 인터넷을 포함한 정보통신망에의 공개를 위한 저작물의 복제, 기억장치에의 저장, 전송 등을 허락함
2. 위의 목적을 위하여 필요한 범위 내에서의 편집·형식상의 변경을 허락함. 다만, 저작물의 내용변경은 금지함.
3. 배포·전송된 저작물의 영리적 목적을 위한 복제, 저장, 전송 등은 금지함.
4. 저작물에 대한 이용기간은 5년으로 하고, 기간종료 3개월 이내에 별도의 의사 표시가 없을 경우에는 저작물의 이용기간을 계속 연장함.
5. 해당 저작물의 저작권을 타인에게 양도하거나 또는 출판을 허락을 하였을 경우에는 1개월 이내에 대학에 이를 통보함.
6. 조선대학교는 저작물의 이용허락 이후 해당 저작물로 인하여 발생하는 타인에 의한 권리 침해에 대하여 일체의 법적 책임을 지지 않음
7. 소속대학의 협정기관에 저작물의 제공 및 인터넷 등 정보통신망을 이용한 저작물의 전송·출력을 허락함.

동의여부 : 동의() 반대()

2007 년 6 월 27 일

저작자: 김 현 옥



조선대학교 총장 귀하