



## 저작자표시-비영리 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

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

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.

- 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](#) 

2011년 2월

석사학위논문

이송정발도  
향상을  
위한  
나노제이  
스테이지의  
에리보상에  
관한  
연구

박  
대  
광

2011년 2월  
석사학위논문

이송정밀도 향상을 위한  
나노제어 스테이지의  
에러보상에 관한 연구

조선대학교 대학원

첨단부품소재공학과

박 대 광

이송정밀도 향상을 위한  
나노제어 스테이지의  
에러보상에 관한 연구

Research for transfer precision improvement  
about error compensation of nano control stage

2011년 2월 일

조선대학교 대학원

첨단부품소재공학과

박 대 광

이송정밀도 향상을 위한  
나노제어 스테이지의  
에러보상에 관한연구

지도교수 김 재 열

이 논문을 공학석사학위신청 논문으로 제출함.

2010년 10월

조선대학교 대학원

첨단부품소재공학과

박 대 광

# 박대광의 석사학위논문을 인준함.

위원장 조선대학교 교수 심재기 (인)

위원 조선대학교 교수 황석승 (인)

위원 조선대학교 교수 김재열 (인)

2010年 11月 日

조선대학교 대학원

# 목 차

|  |           |
|--|-----------|
| LIST OF FIGURES .....                        | iii       |
| LIST OF TABLES .....                         | v         |
| NOMENCLATURE .....                           | vi        |
| ABSTRACT .....                               | viii      |
| <br>   |           |
| <b>제 1 장 서 론 .....</b>                       | <b>1</b>  |
| 제 1 절 연구배경 .....                             | 1         |
| 제 2 절 연구목적 및 내용 .....                        | 3         |
| <b>제 2 장 이론적 배경 .....</b>                    | <b>6</b>  |
| 제 1 절 글로벌 스테이지(Globlal stage) .....          | 6         |
| 제 2 절 마이크로 스테이지(Micro stage) .....           | 10        |
| 1. 유한요소 모델링 .....                            | 12        |
| 2. 유한요소 해석결과 .....                           | 13        |
| 3. 탄성힌지 type의 spring 메카니즘 .....              | 15        |
| 제 3 절 압전액추에이터의 동특성실험 .....                   | 18        |
| 1. 압전소자 .....                                | 19        |
| 2. 마이크로스테이지 서보모델 .....                       | 20        |
| <b>제 3 장 레이저 엔코더 시스템 .....</b>               | <b>22</b> |
| 제 1 절 Laser Interferometer 계측원리 .....        | 22        |
| 1. Heterodyne 간섭계 .....                      | 22        |
| 2. Michelson 간섭계 .....                       | 24        |
| 제 2 절 Optical fiber Encoder System의 응용 ..... | 27        |
| 1. 시스템 구성 .....                              | 27        |
| 2. ECTS의 진직도 측정 방법 구상 .....                  | 28        |

|                               |           |
|-------------------------------|-----------|
| 3. 비선형성 보상 .....              | 29        |
| 4. 공기굴절 보상 .....              | 30        |
| <b>제 4 장 압전 구동기의 제어 .....</b> | <b>35</b> |
| 제 1 절 전달함수 알고리즘 .....         | 35        |
| 제 2 절 압전구동기의 히스테리시스 .....     | 39        |
| 제 3 절 압전구동기의 역 히스테리시스 .....   | 41        |
| 제 4 절 위상지연 보상 .....           | 44        |
| <b>제 5 장 진폭도 에러보상실험 .....</b> | <b>47</b> |
| 제 1 절 실험장치의 실시간제어 .....       | 47        |
| 1. 제어 시스템 구성 .....            | 47        |
| 2. 에러보상을 위한 제어프로그램 설계 .....   | 50        |
| 제 2 절 PID제어의 추종오차보상 실험 .....  | 53        |
| 제 3 절 초정밀 에러보상실험 결과 .....     | 55        |
| <b>제 6 장 결 론 .....</b>        | <b>59</b> |
| <b>참 고 문 헌 .....</b>          | <b>61</b> |
| <b>APPENDIX .....</b>         | <b>63</b> |



# LIST OF FIGURES

|          |  |    |
|----------|--|----|
| Fig.2-1  | Model of Ultra Precision Positioning Apparatus .....                                       | 6  |
| Fig.2-2  | Cutting force of the Ultra precision Cutting Unit .....                                    | 10 |
| Fig.2-3  | Modelling of Ultra Precision stage .....   | 11 |
| Fig.2-4  | Deformation of FEM model for micro stage .....   | 12 |
| Fig.2-5  | Displacement at maximum load of work 1800N .....   | 13 |
| Fig.2-6  | Von-Mises stress distribution of FEM model<br>for micro stage(Load at works) .....         | 13 |
| Fig.2-7  | Von-Mises stress distribution of FEM model<br>for micro stage (Displacement at work) ..... | 14 |
| Fig.2-8  | Single linear spring model .....   | 15 |
| Fig.2-9  | Truss bar type motion guide .....  | 15 |
| Fig.2-10 | A two-dimensinal structure with piezo electric actuator .....                              | 18 |
| Fig.3-1  | Schematic diagram of Heterodyne interferometer .....                                       | 22 |
| Fig.3-2  | Schematic diagram of Michelson interferometer .....  | 24 |
| Fig.3-3  | Generally Homodyne(single frequency) interferometer .....                                  | 25 |
| Fig.3-4  | Miniaturized Homodyne(single frequency) interferometer .....                               | 25 |
| Fig.3-5  | Linear Measurement of Laser interferometer .....   | 26 |
| Fig.3-6  | Angular Measurement of Laser interferometer .....  | 26 |
| Fig.3-7  | Composition of optical fiber laser and environment compensator .....                       | 27 |
| Fig.3-8  | The straightness measuring mean of ECTS .....  | 28 |
| Fig.3-9  | Beam components in the orthogonal reference system<br>of the interferometer .....          | 29 |
| Fig.3-10 | Frequency stability of Optical Fiber laser<br>(Environment compensation) .....             | 32 |

|          |  |    |
|----------|--|----|
| Fig.3-11 | The straightness measuring mean of ECTS .....  | 33 |
| Fig.4-1  | Block diagram of a piezo electric actuator .....   | 37 |
| Fig.4-2  | Block diagram of a piezo electric actuator .....   | 37 |
| Fig.4-3  | Hysteresis modeling of PZT .....   | 39 |
| Fig.4-4  | Model of inverse hysteresis .....  | 41 |
| Fig.4-5  | Inverse hysteresis modeling of PZT .....   | 43 |
| Fig.4-6  | Phase comparison of open loop, inverse and<br>inverse model+lead compensator .....                       | 44 |
| Fig.4-7  | Frequency Response of Lead Compensator(close loop) .....   | 45 |
| Fig.5-1  | experimental device of Error Compensation Tool-holder Stage .....  | 48 |
| Fig.5-2  | Block diagram of Piezoelectric Actuator Control .....  | 50 |
| Fig.5-3  | Block diagram of Micro-stage Control .....   | 51 |
| Fig.5-4  | Tracking error of inverse hysteresis model .....   | 53 |
| Fig.5-5  | Tracking error of using PID controller .....   | 54 |
| Fig.5-6  | Tracking error of inverse hysteresis model and PID controller .....                                      | 54 |
| Fig.5-7  | Step Response of Fine Apparatus .....  | 55 |
| Fig.5-8  | The resolution experiment of Ultra Precision Positioning System<br>by Closed Loop(not application) ..... | 56 |
| Fig.5-9  | The resolution experiment of Ultra Precision Positioning System<br>by Closed Loop .....                  | 56 |
| Fig.5-10 | Resolution experiment of X-axis positioning control .....  | 57 |
| Fig.5-11 | Resolution experiment of Y-axis positioning control .....  | 57 |
| Fig.5-12 | Resolution experiment of X-Y axis positioning control .....  | 58 |

## LIST OF TABLES

|           |  |    |
|-----------|--|----|
| Table 2-1 | Static characteristics of global servo .....           | 9  |
| Table 2-2 | Performance of PSt 150/7/40 VS12 PZT .....             | 11 |
| Table 2-3 | Material properties .....                              | 12 |
| Table 2-4 | Static characteristics of micro servo .....            | 21 |
| Table 3-1 | RCU10 performance .....                                | 33 |
| Table 3-2 | Air sensor performance .....                           | 33 |
| Table 3-3 | Material sensor performance .....                      | 34 |
| Table 4-1 | Control parameters of PID controller Micro servo ..... | 46 |
| Table 4-2 | Step response of Micro servo .....                     | 46 |
| Table 5-1 | Material properties of micro stage .....               | 49 |
| Table 5-2 | Composition of experimental equipment .....            | 49 |

## NOMENCLATURE

|          |  |
|----------|--|
| $K_1$    | : Play voltage constant of the motor                                       |
| $K_2$    | : Torque constant of the motor   |
| $x_C$    | : Position of the coarse positioning table                                 |
| $M$      | : Mass of the table (Coarse positioning table+Nut +Fine positioning table) |
| $\theta$ | : Rotational angle of the screw  |
| $T$      | : Frictional torque  |
| $N$      | : Resistivity (Between screw and nut)                                      |
| $v_m$    | : Input voltage of motor amplifier   |
| $J$      | : Moment of inertia  |
| $G_m$    | : Motor amplifier gain   |
| $C_s$    | : Damping of the screw   |
| $\phi$   | : Lead angle of the screw  |
| $L_m$    | : Motor inductance   |
| $R_m$    | : Motor resistance   |
| $\ell$   | : Lead of the screw  |
| $K$      | : Converted constant by table position for rotational angle of screw       |
| $m$      | : Mass of the Fine positioning table                                       |
| $x$      | : Position of the coarse positioning table                                 |
| $x_P$    | : Position of the PEA  |
| $k_P$    | : Spring Coeff. of the PEA Compo.  |
| $c_P$    | : Damping Coeff. of the PEA Compo.   |
| $C$      | : PEA Capacitance  |

$R$  : Load resistance (PEA)  
 $G_P$  : PEA amplifier gain  
 $v_P$  : Input voltage of amplifier  
 $v$  : Input voltage of PEA  
 $K_P$  : PEA gain  
 $\dot{x}$  : Velocity of the fine positioning table  
 $\dot{x}_C$  : Velocity of the coarse positioning table  
 $i_m$  : Driving electric current  
 $R(x)$  : The measured profile  
 $D(x)$  : Exercise tolerance  
 $E(x)$  : Straightness  
 $n$  : Refractive Index  
 $\lambda$  : Wavelength( $\mu m$ )  
 $T$  : Temperature(degree celsius)  
 $p$  : Pressure(pascals)  
 $f$  : Patial pressure of water vapor(in pascals)  
 $P, f$  : Unit in Torr  
 $RH$  : Relative Humidity(%)  
 $H^{-1}$  : Inverse function  
 $X_n$  : normalized displacement  
 $\beta$  : Proportional gain  
 $\gamma$  : Integral gain  
 $\alpha$  : Differential gain  
 $T$  : Sampling time

# ABSTRACT

## **Research for transfer precision improvement about error compensation of nano control stage**

Park, Dae-Kwang

Adviser : Prof. Kim Jae-yeol, Ph.D.

Department of Advanced Parts & Materials,

Graduate School of Chosun University

Active researches on the milli structure or the micro machining have been performed in the advanced countries, and the micro machining technology is the one of core items among them. Current technical backgrounds for the micro machining can be classified into a semiconductor-based such as lithography and etching, etc, and conventional mechanical machining such as cutting, grinding, and electric spark machining, etc.

The prior may be limited due to materials or their thickness, and the latter suffers from superior finishing surface except the good productivity. Therefore, cutting work might be reasonable in case of superior productivity and greater degree of freedom. Although the conventional ultra-precision cutting technology can achieve surface machining, but the actual application into ultra-fine component is not applied yet. Therefore, researches on preparation of an ultra-precision micro component in three dimensional space through milling using single crystal diamond bite are under study.

In this paper, the ultra precision positioning system is studied by combining micro stage and global stage to meet the demand from industries. In case of the

micro servo, a piezoelectric device is adopted, and an AC servo motor is utilized for a global servo. In order to detect the location, a laser interferometer is implemented, and an ultra precision positioning system with 10 nm resolution and 100 mm of stroke is achieved using the dual servo control method based on a modern control technique.

## 초 록

### 이송정밀도 향상을 위한 나노제어 스테이지의 에리보상에 관한 연구

박 대 광

지도교수 : 김 재 열

조선대학교 대학원 첨단부품소재공학과

최근 선진국들을 중심으로 Milli structure나 Micro machine의 개발을 위한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 그 중 미세 가공 기술(마이크로가공 기술)은 주요 핵심 기술로서 차지하는 중요성이 매우 크다. 현재 수행중인 마이크로 가공 기술은 리소그라피와 에칭 등의 반도체 제조 기술을 응용한 것과 절삭, 연삭, 방전 가공 등의 일반 기계 가공 기술을 응용한 것으로 크게 분류될 수 있다.

전자는 두꺼운 소재나 혹은 소재의 재질에 따라 제한될 수 있으며, 후자는 연삭이나 방전 가공의 경우에 있어서는 생산성은 양호하나 우수한 가공면을 얻기가 곤란하다. 따라서 생산성이 우수하고 가공 자유도가 높은 절삭 가공의 적용이 바람직한 경우가 있다. 그러나 종래의 초정밀 절삭 가공 기술로는 소재의 가공면을 달성할 수 있지만 선반을 이용한 실제적인 초미세 부품화로의 적용 예는 그다지 많지 않다. 따라서 초정밀 가공기 상에서 단결정 다이아몬드 바이트를 이용한 밀링 가공을 수행하여 3차원 형상의 초정밀 마이크로 부품을 생산하기 위한 관련 연구가 진행 중에 있다.

본 논문은 이러한 산업계의 요구를 충족시키기 위한 일환으로, 마이크로스테이지와 글로벌 스테이지를 결합하여 초정밀 위치결정을 수행하고자 하며, 마이크로 서보의 경우 압전소자를 사용하였고, 글로벌서보의 경우 AC서보 모터를 사용하였다. 위치를 검출하기 위한 센서로는 레이저 인터페로미터를 사용하였으며, 현대제어기법을 적용한 이중서보제어 방식을 이용하여 스트로크 100mm, 위치결정 분해능 10nm의 초정밀 위치결정 시스템을 구축하고자 한다.



# 제 1장 서론

## 제 1절 연구배경

나노미터대의 초정밀도를 목표로 한 가공기술은 21세기에는 상당히 현실적인 증가가 예상된다. 현재 앞으로의 각 산업계에 있어서 필요한 재료는 종래의 것과 다른 것이 많으며 그것을 사용한 부품류의 정밀도는 나노미터대나 옴스트롬대의 형상정밀도와 표면거칠기가 요구되고 있다. 절삭가공기술은 절삭기계 각 구성요소와 각 운동부의 고정밀도화, 고성능화와 제어장치 기능의 향상 및 컴퓨터에 의한 제어기술의 비약적인 발달 등이 있었다. 그리고 공구재질의 개발, 개선과 가공기술의 발달 등 최신 관련 기술을 과감하게 도입하여 기술혁신을 하면서 발전해 가고 있으며, 현재도 정밀도와 가공분해능의 향상을 위하여 끊임없이 연구·개발하고 있다. 나노절삭가공기술은 최첨단 고부가가치가 있는 제품을 생산가공할 수 있는 기술이므로 앞으로 발전 전망이 매우 넓은 분야이다.

단결정 다이아몬드 바이트를 이용한 초정밀 가공기에서는 스피들, 이송계 등의 주요 부품의 운동 특성이 가공정밀도에 미치는 영향이 매우 크므로 보다 높은 가공정밀도를 실현하기 위해서는 각각의 요소부품의 운동정밀도 향상과 더불어 운동오차의 실시간 보상이 절대적으로 요구되며 현재의 초정밀 가공기에서는 가공 가능한 공작물의 직경이 커지면서 가공정밀도가 높아지는 추세에 따라 각 슬라이드의 행정거리가 수백mm로 상대적으로 길어짐에도 불구하고 nm 수준의 높은 분해능과 전 운동구간에 걸쳐 높은 운동정밀도가 요구되고 있다<sup>(4)-(8)</sup>. 그러나 이 경우 이송부의 관성질량이 매우 크기 때문에 실시간으로 운동오차를 보상하기에는 응답속도가 절대적으로 늦어져 실시간 운동오차 보상이 매우 어렵게 된다. 이로 인하여 각 요소부품의 정밀도를 향상시킬 수밖에 없으므로 가공기의 제작비용이 크게 증가하게 되고, 수 m에 달하는 스피들의 축방향 운동오차, 이송계의 운동오차, 공작물의 변형 등에 의해 가공정밀도에 한계를 가질 수밖에 없다.<sup>(9)-(12)</sup>

이와 같은 문제점을 해결하기 위하여 이 논문은 이송계의 운동정밀도를 정밀하게 측정하면서 압전구동기(piezo electric actuator)를 이용하여 상대적으로 질량이 매우 적은 절삭공구와 톨홀더만을 미세하게 구동시켜 실시간으로 운동오차를 보정하면서 제어할

수 있는 미세절삭 유닛(Error Compensation Tool Servo, 이하 ECTS)의 성능실험을 수행하고자 한다.

## 제 2절 연구 목적 및 내용

본 논문에서는 시행착오를 줄이기 위해서 먼저 시뮬레이션을 행하였고 PID제어기의 성능을 평가하여 본 기구에 가장 적합한 제어기를 선정하고자 하였으며, 제어기의 성능 평가와 시뮬레이션 하여 실제 기구를 제작하기 전에 시행착오를 줄이기 위한 성능 평가를 실시하고 초정밀위치결정기구를 제작하여 여러 가지 제어 알고리즘을 비교 분석하고 최적 알고리즘을 선정하여 조동 및 미동기구의 초정밀위치결정기구에 대한 유효성을 확인하고 제어 성능을 평가하고자 하였으며, 종래의 제어 방식을 보면 조동위치결정과 미동위치결정을 순차적으로 반복하여 제어하는 분리방식과 조동과 미동을 동시에 연동제어방식으로 크게 나눌 수 있다. 전자의 경우는 분리방식은 조동기구로 미동기구에서 위치편차보상이 가능한 위치결정을 실시한 후, 나머지 편차를 보상하는 방식으로 조동과 미동위치 결정이 시간적으로 완전히 분리되어 있다. 연속제어 방식은 조동 동작이 실시되는 도중에 미동기구의 위치 결정동작을 실시하는 방법이다. 본 논문에서는 후자의 방법을 사용한다<sup>(13)</sup>.

일반적으로 많이 이용되는 조동 기구로는 이송 나사식, 마찰 구동식, 벨트식 등이 있다. 이들은 큰 가동 범위를 갖고, 고속으로 위치 결정이 가능하며 큰 부하에 대응할 수 있는 장점을 가지는 반면에 고정도 위치결정이 곤란한 단점이 있다. 미동기구는 고정도의 위치결정이 가능하지만 스트로크가 짧고 작은 부하에 적합하다. 따라서 압전 소자를 이용한 기구가 많이 사용된다. 이러한 서로의 장점을 살려 초정밀위치결정기구를 제작하게 된다.

보통 요소부품이 이상적이지 못하고 조립이 완벽하지 못하므로 오차가 발생하는데 오차에는 기계적 강성, 형상특성, Backlash, 열적 변형 등의 계통오차와 기계진동, 외란의 우연오차 성분이 있고, 종래에는 계통오차만을 오프라인으로 측정하여 소프트웨어로 보정하였으나, 제품이 고정밀화 하면서 서브마이크론의 위치정밀도를 요구됨에 따라서 우연오차 성분이 문제시된다.

우연오차 성분을 줄이는 방법에는 1차적으로 오차가 없는 요소부품을 만드는 것이고 2차적으로는 발생한 오차성분을 보상하는 방법이다. 1차적인 방법은 계속 연구가 진행

중이지만 서브마이크론의 정밀도를 가지는 부품을 제작하는 것은 매우 어려운 일이고 2차적 방법은 측정과 제어에 의해서 우연 오차 성분과 계통오차 성분 모두를 보정한다. 소프트웨어적인 보상은 요소부품의 가공정도와 조립정도에 의해서 도달할 수 있는 정밀도가 정해지지만 측정과 제어에 의한 실시간 오차보상은 측정기의 정밀도와 서보 능력에 의해서 도달 정밀도가 정해진다.<sup>(14)</sup>

현재 서브마이크론의 분해능과 정밀도를 가지는 위치검출 센서와 마이크로 서보가 많이 개발되어 있어 측정과 제어에 의한 실시간 운동오차 보상이 용이해졌다. 그러므로 서브마이크론의 위치 정밀도를 구현하기 위해서 초정밀 급의 요소부품을 가공, 조립하는 하드웨어에 의존하는 방법보다는 측정과 제어에 의한 실시간 운동오차보상이 더 용이하다.<sup>(14)</sup>

따라서 본 논문은 이러한 산업계의 요구를 충족하기 위한 일환으로, 마이크로 스테이지와 글로벌 스테이지를 결합하여 초정밀 위치결정을 수행하고자하며, 마이크로 서보의 경우 압전소자를, 글로벌서보의 경우 AC서보 모터를 사용하였다. 위치를 검출하기 위한 센서로는 레이저 인터페로미터를 사용하였으며, 현대제어기법을 적용한 이중서보제어 방식을 이용하여 스트로크 100mm, 위치결정 분해능 10nm의 초정밀 위치결정 시스템을 구축하고자 한다. 이러한 연구 수행 내용은 다음과 같다.

### 1. Global stage 설계

본 논문에서 사용된 글로벌 스테이지는 볼나사와 LM가이드를 이용한 델타스테이지를 설계하여, 서보모터와 볼나사를 이용하여 하중 변화에 Robust한 시스템을 구현하고자 한다.

### 2. Micro stage설계 및 유한요소 해석

탄성힌지구조의 ECTS는 와이어 커팅이 쉽도록 두랄루민을 사용하며,  $\pm 10\mu\text{m}$ 의 변위를 갖도록 하며 자중에 의한 처짐은 20nm이하가 되도록 힌지를 설계할 것이다. 미동 스테이지는 압전소자 구동기와 직접 체결되어 스테이지의 강성은 압전소자 강성에 지배적인 영향을 받게 된다. 따라서 힌지는 강성에 중점을 두지 않고 대칭적으로 설계

하여 기구학적으로 가이드 역할만 하도록 할 것이며 error보상 타당성을 입증하기 위한 구조물을 모델링과 구조해석 및 정적인 특성과 동적인 특성을 해석할 것이다.

### 3. 제어 성능향상을 위한 환경보상

X축 이송계의 직진도 오차를 10nm의 높은 분해능을 가지는 광섬유 레이저 엔코더 시스템을 이용하여 정밀하게 측정하여 검출된 위치정보를 DSP기술을 이용하여 미세절삭유닛에 보상하여 운동오차를 제거하고 운동정밀도를 향상시키며 RCU10(ReniShaw) 유닛을 통한 스피들의 열팽창 오차 보상 및 공기유동, 온도변화 등의 환경보상을 통하여 측정결과의 신뢰도 수준을 향상 시키고자 한다.

### 4. 초정밀 위치결정 시스템 구현 및 성능 시험분석

초정밀 위치결정기구에 사용 압전구동기의 비선형 특성 및, 동력전달 요소, 제어기법에 대하여 고찰을 압전구동기소자와 탄성힌지 방식을 이용한 마이크로 스테이지를 사용하여 초정밀위치결정 시스템의 nm급의 위치결정 정밀도를 구현하기 위하여 기계적인 강성에 의해서 운동정밀도를 유지하기 보다는 광섬유 레이저 엔코더와 미켈슨 간섭계를 사용한 인터페로미터를 변위측정 센서로 마이크로 스테이지의 실시간 제어를 통하여 위치결정분해능 실험을 하였다.

## 제 2장 이론적 배경

### 제 1절 글로벌 스테이지(Global stage)

글로벌 스테이지 제작은 조동동작에서 발생하는 모터의 서보온 상태나 구동할 때 발생하는 에러값을 한지구조의 마이크로 스테이지가 수 나노미터급 시간대에 얼마만큼 정밀하게 보상하는가를 실험하기 위한 1차적인 실험 장치로 연구에 사용된 글로벌 스테이지는 X축방향성을 갖는 스테이지로써, 그 구성방법은 여러 가지 방식이 있지만, 본 연구에서는 볼나사(lead Screw) 기구를 사용하였다. 볼나사기구는 볼스크류(Ball Screw)와 더블 너트(Double Nut)로 구성되어 있고, AC 서보모터(MITSUBISHI MFS-23)와 드라이브에 의해 구동된다. 모터의 회전 운동은 더블너트식 볼스크류(리드 2mm, 외경19mm)에 의해 직선운동으로 변환되어 글로벌 테이블을 이송하며, 최대출력 200W, 최대 이송거리는 100mm, 최대 이송속도는 100mm/s이다.

본 기구의 모델링은 Fig.2-1과 같으며, 이송나사 운동방정식, 테이블의 운동방정식, 모터의 회로방정식을 세우고 이를 상태방정식으로 유도하여 전달함수를 구하였다.

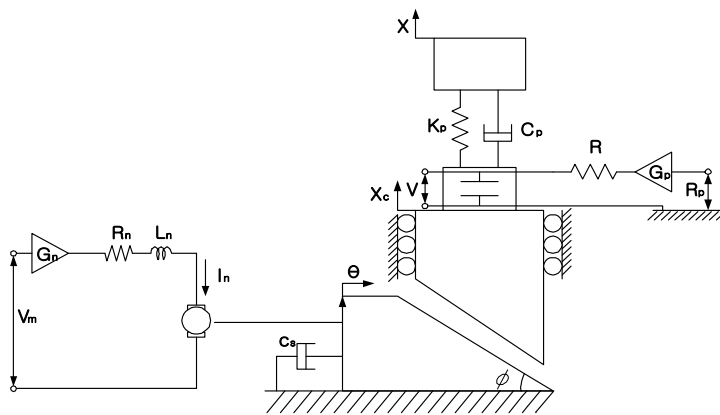


Fig.2-1 Model of Ultra Precision Positioning Apparatus

조동 기구는 제어대상을 고속으로 목표치 부근에 위치결정을 실시하는 것을 목적으로 한다.

여기서는 커플링과 볼 나사 및 너트사이의 스프링효과는 무시하고, 모터축 커플링과 이송나사축을 하나의 강체로 보고 모델을 간략화 했으며 마찰토크도 무시하였다. 먼저 이송 나사 축의 운동방정식을 세우면

$$J \ddot{\theta} + C_{sd} \dot{\theta} = K_2 i_m + K_x \{ K_n (x - K_x \theta) + C_n (\dot{x} - K_x \dot{\theta}) \} - \tau_f \quad (2-1)$$

조동 테이블의 운동방정식은

$$M \ddot{x} = -K_n (x - K_x \theta) + C_n (\dot{x} - K_x \dot{\theta}) \quad (2-2)$$

더블너트의 회전과 테이블의 변위는

$$K_x = \frac{\ell}{2\pi}, \quad x_c = \frac{\ell}{2\pi} \theta \equiv K\theta \quad (2-3)$$

모터에 흐르는 전류와 발생 토크는

$$T = K_2 i_m \quad \text{또는} \quad \tan \theta = \frac{l}{\pi d} \quad (2-4)$$

의 관계가 성립한다.

모터의 회로 방정식은

$$G_m v_m = R_m i_m + L_m \dot{i}_m + K_1 \theta \quad (2-5)$$

위 식에 의해  $x_c$ ,  $\dot{x}_c$   $i_m$ 을 상태변수로 하고, 입력은 모터 앰프의 입력전압으로 하는 상태방정식을 유도하면 식(2-6)이 되고 출력방정식은 아래 식(2-7)과 같이 된다.

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_m \\ \Theta \\ \Theta \\ x \\ \dot{x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_m}{L_m} & 0 & -\frac{K_1}{L_m} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{K_2}{J} & -\frac{K_n * K_x^2}{J} & -\frac{(C_{sd} + C_n * K_x^2)}{J} & \frac{K_x * K_n}{J} & \frac{K_x * C_n}{J} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & \frac{K_x * K_n}{M} & \frac{K_x * C_n}{M} & -\frac{K_n}{M} & -\frac{C_n}{M} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_m \\ \Theta \\ \Theta \\ x \\ \dot{x} \end{bmatrix} \quad (2-6)$$

$$+ \begin{bmatrix} \frac{G_m}{L_m} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} v_m \quad y = [0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0] \begin{bmatrix} \dot{i}_m \\ \Theta \\ \Theta \\ x \\ \dot{x} \end{bmatrix} + [0]u \quad (2-7)$$

조동기구의 파라미터는 Table 2-1과 같다.

M은 실제 측정에 의해 구했다. 또한 J는 나사축의 형상에 의해 구한 나사축의 관성에 모터축의 관성의 카탈로그 값을 더한 것이다. Rm, Lm, K1, K2는 카탈로그 값을 이용하고 있다. cs, T는 모터에 일정한 압력을 입력해서 조동 테이블을 등속연동 시킬 때의 모터입력 전압과 조동 테이블 속도의 관계가 식(2-8)로 나타낼 수 있는 것을 이용하여 구했다.

$$\dot{x}_c = \frac{l \cdot K_2}{2\pi(C_s + \frac{K_1 K_2}{R_m})R_m} V_m - \frac{l \cdot T_f(\theta)}{2\pi(C_a + \frac{K_1 K_2}{R_m})} \quad (2-8)$$

또한 이 모델의 타당성을 확인하기 위해 비례제어에 의한 100μm의 조동위치 결정 실험을 행한 결과를 Table 2-1로 나타냈다.



Table 2-1 Static characteristics of global servo

| Definition                       | Symbol              | Value  |   |
|----------------------------------|---------------------|--|---|
| Mass of the table                | M                   | 8.975 kg   |   |
| Moment of inertia                | J                   | $6.882 \times 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$       |   |
| Motor amplifier gain             | $G_m$               | 3  |   |
| Damping Coeff. between screw nut | $C_s$               | $1.876 \times 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{s}/\text{m}$ |   |
| Frictional torque                | $T_f(\dot{\theta})$ | $\dot{\theta} > 0$                                       | $3.963 \times 10^{-2} \text{ N} \cdot \text{m}$ |
|                                  |                     | $\dot{\theta} < 0$                                       | $4.231 \times 10^{-2} \text{ N} \cdot \text{m}$ |

## 제 2절 마이크로 스테이지(Micro stage)

본 논문에서는 글로벌 스테이지의 에러값을 추종 보상하기 위해 마이크로 스테이지를 제작하였으며 압전소자를 이용한 탄성힌지 구조로 설계 하고자, 제작에 앞서서 유한요소해석 기법을 이용하여 마이크로 스테이지의 안전성과 제어능력을 파악하였다. 이러한 유한요소해석법의 적용은 초정밀 위치결정시스템을 개발하는데 있어서 시행착오를 최소화하기 위한 방법으로 최근에 들어 활발한 연구가 행해지고 있다.

마이크로스테이지는 X, Y축 방향으로 최대 사용영역은  $50\mu\text{m}$ 의 변위를 갖도록 하며, 마이크로 스테이는 압전소자 구동기와 직접 체결되며 마이크로 스테이지의 강성은 압전소자의 강성에 지배적인 영향을 받게 된다. 따라서 탄성힌지는 강성에 중점을 두지 않고 대칭적으로 설계하였으며 힌지의 반력은 이후 개발될 초정밀 가공기 UP3에 0.5mm가공 시 발생하는 3분력의 힘을 고려한 설계를 하였다. 이는 Ultra Precision Cutting Unit에 툴홀더의 역할을 수행할 수 있도록 설계하기 위해서 이다. 다음 Fig.2-2에서 feed값은  $0.3\text{mm/rev}$ 이고, 주축의 스피드는  $150\text{m/min}$ 으로 가공모재 (SM45C)를 0.5mm가공반력을 고려하여 구조해석을 수행하였다.(see APPENDIX)

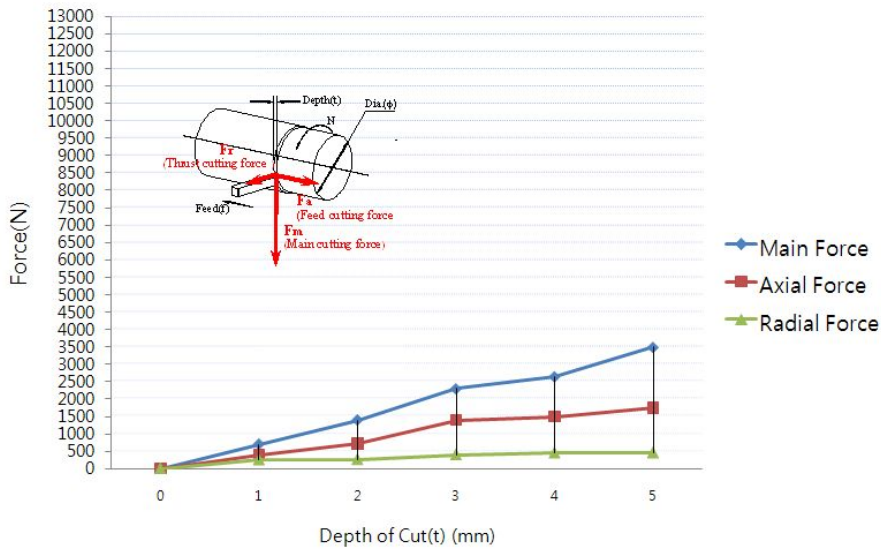


Fig.2-2 Cutting force of the Ultra precision Cutting Unit

그리고 Paros와 Weisbord에 의해 제안된 탄성힌지구조 중 가공편의성을 고려하여 노치유연힌지구조로 Fig.2-3과 같이 기초설계를 하였다.

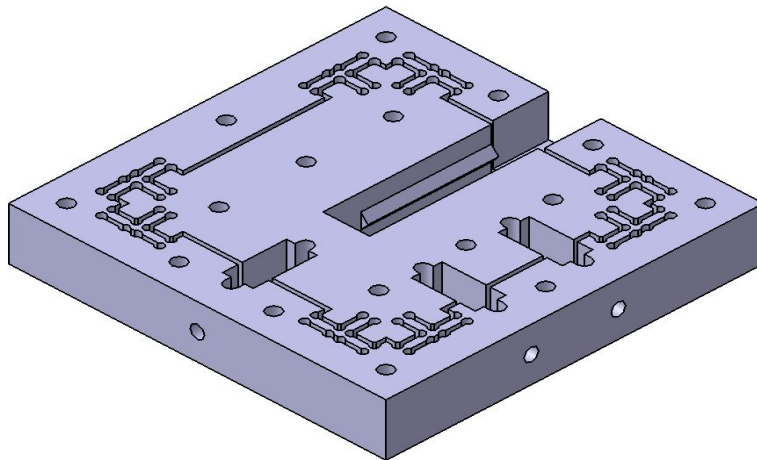


Fig.2-3 Modelling of Ultra Precision stage

압전소자는 Piezomechanik사의 PSt150/7/40 VS12 PZT 액추에이터를 활용하여 마이크로 스테이지의 변위 제어 시 최소 10nm의 분해능을 가지도록 설계하고자 하며, PZT의 특성은 Table2-2에 나타내었다.

Table 2-2 Performance of PSt 150/7/40 VS12 PZT

| Type                 | Max. stroke<br>$\mu m$ | length L<br>$mm$ | Resonance frequency<br>$KHz$ |
|----------------------|------------------------|------------------|------------------------------|
| PSt 150/7/40<br>VS12 | 55/40                  | 46               | 20                           |

유한요소 해석은 마이크로 스테이지에 압전소자의 최대힘과 변위를 작동시킬 때 마이크로 스테이지의 탄성힌지 부분에서 나타나는 응력분포를 분석함으로 마이크로 스테이지의 탄성힌지 부분의 안전성을 평가하고자 하였다. 또한 마이크로 스테이지에 장착된 압전소자에 전압을 가하여 변위를 발생시켰을 때 마이크로 스테이지의 탄성에 의하여 변위의 차가 발생됨에 따라 마이크로 스테이지의 변위특성을 파악하고자 하였다.

## 1. 유한요소 모델링

유한요소해석 모델링은 산업현장에 널리 적용되어지고 있는 상용 유한요소해석 프로그램인 Nastran FX2010를 활용하였다. 마이크로 스테이지의 경계조건은 스테이지의 외각을 고정하고 PZT가 놓여지는 부분에 하중을 주었다. Fig.2-4은 본 논문에 사용된 마이크로 스테이지의 3차원모델의 경계조건과 해석의 원활화를 위해 구조를 간략화 하였다. 또한 두랄루민과 스텐리스강의 해석을 통하여 두랄루민으로 결정을 하고 스테이지의 재료에 대한 물성치(Material properties)를 Table 2-3과 같이 결정하였다.

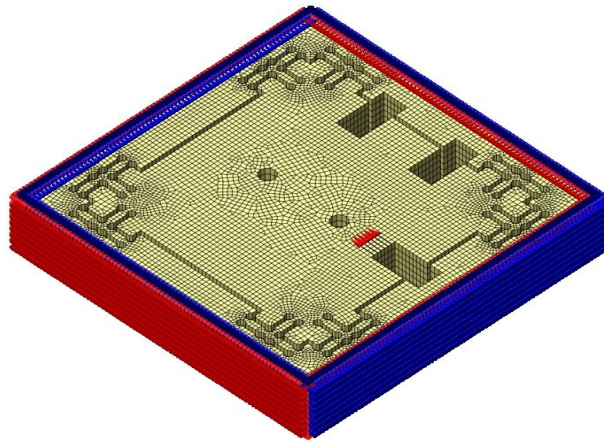


Fig.2-4 Deformation of FEM model for micro stage

Table 2-3 Material properties

| Material  | Young's modulus<br>( $N/mm^2$ ) | Poisson's ratio | Mass density<br>( $kg/mm^3$ ) | Limit stress<br>( $N/mm^2$ ) |             |
|-----------|---------------------------------|-----------------|-------------------------------|------------------------------|-------------|
|           |                                 |                 |                               | Tension                      | Compression |
| Duralumin | 7,1800                          | 0.336           | $2.86 \times 10^{-6}$         | 482.5                        | 403.5       |

## 2. 유한요소 해석결과

다음 Fig.2-5과 같이 압전소자에서 발생하는 최대힘에 대한 변위에 대한 마이크로스테이지의 전체적인 변형을 나타내고 있으며, X방향 PZT의 최대하중 1800N으로 1차 구조해석을 하였다. 그 결과 X방향 최대 변위량이 0.051mm이며, PZT의 최대 하중 작용 시 마이크로 스테이지의 힌지부분 Fig.2-6에서 Crack 발생여부를 판단하고자 해석을 수행한 결과 Von mises 최대응력이 141.5N/mm<sup>2</sup>이다. 따라서 안전율은 3.4임을 확인할 수 있다.

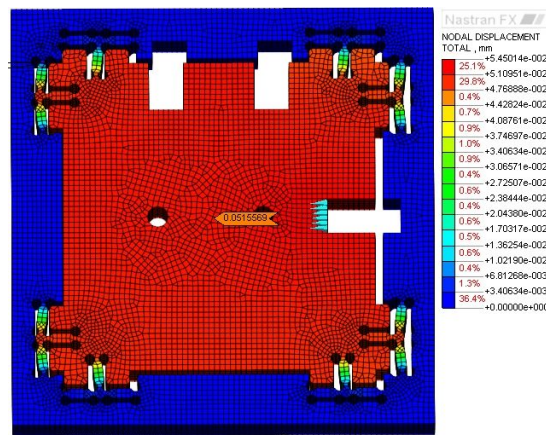


Fig.2-5 Displacement at maximum load of work 1800N

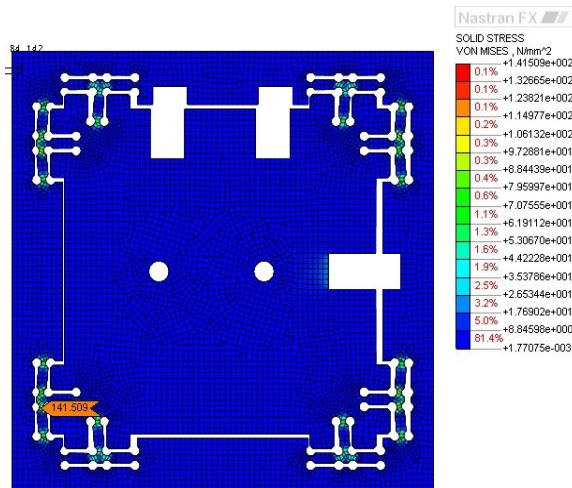


Fig.2-6 Von-Mises stress distribution of FEM model for micro stage (Load at works)

결과적으로 PZT의 최대변위량과 위치 실험에서 사용할 PZT의 최대변위량은 0.03mm로 고정하고 다시 해석한결과 Fig.2-7와 같이 Von mises 응력은  $79.5N/mm^2$ 이며 안전율은 6.06임을 확인할 때 실험에서 필요한 설계상 안전하다고 판단된다.

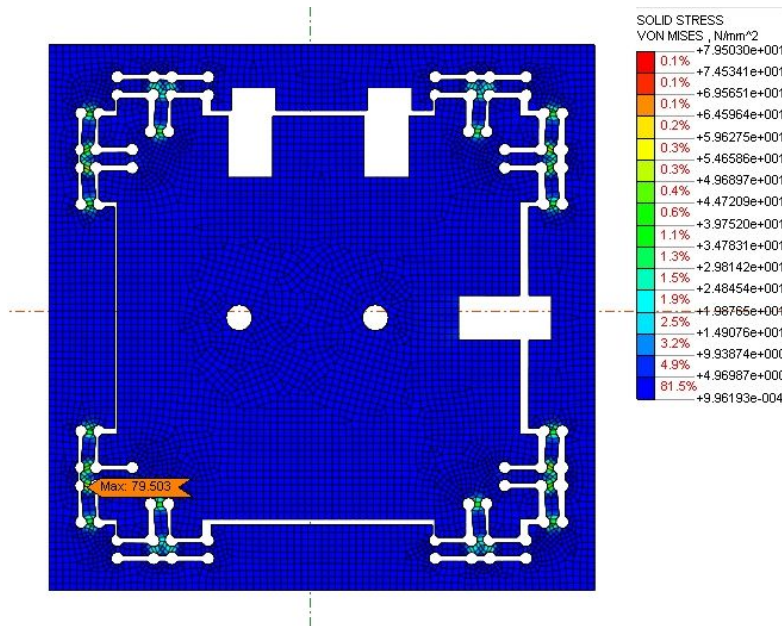


Fig.2-7 Von-Mises stress distribution of FEM model for micro stage  
(Displacement at work)

### 3. 탄성힌지 type의 spring 메카니즘

굽힘(bending)을 이용한 탄성변형은 형태가 간단하고 동작이 편리하며, 마찰이나 백래쉬가 없고, 응답속도가 비교적 빠르다는 장점이 있기 때문에 미세구동장치에 많이 응용되고 있다. 가장 일반적인 굽힘체는 어느 한방향의 입력에 대해서만 유연하고, 나머지 방향의 입력에 대해서는 견고한 성질을 가지고 있다. 따라서 원하는 방향의 운동만 발생시켜주고 나머지 방향에 대해서는 운동을 유발하지 않아 운동의 간섭을 줄일 수 있다.

본 논문에서는 탄성 가이드에 간단한 노치타입의 선형스프링을 이용하였다. 이러한 탄성 힌지 모델을 Fig.2-8에 나타내고 있으며, 운동오차를 확인하고자 한다. 탄성힌지 모델의 운동방정식 정립을 위해서 three-bar로 결합된 메카니즘의 운동에너지 및 위치 에너지를 Lagrange's equation을 사용하여 도출하였다. 이 방법은 가이드 메카니즘의 강성과 공명주파수를 평가하기 위한 유효한 방법으로써 유용하게 활용할 수 있다.

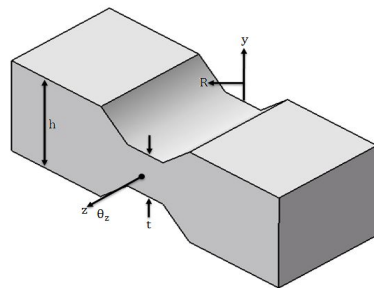


Fig.2-8 Single linear spring model

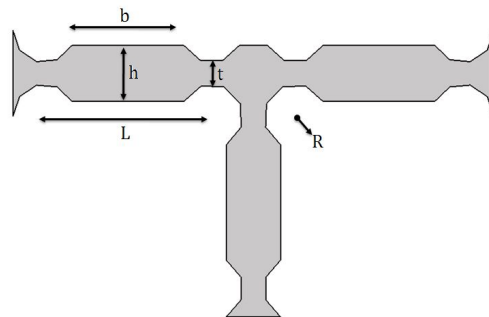


Fig.2-9 Truss bar type motion guide

Fig.2-9에서 트러스바(truss-bar)로 결합된 시스템의 운동에너지는 다음과 같다.

$$T = \frac{1}{2} M \dot{q}_1^2 + \left[ 2 \times \frac{1}{2} m_l \left( \frac{\dot{q}_1}{2} \right)^2 \right] + \left[ 2 \times \frac{1}{2} I \left( \frac{\dot{q}_1}{L} \right)^2 \right] \quad (2-9)$$

여기서  $M$ 는 구동체의 질량이며,  $m_l$ 은 결합의 질량(length :  $L$ ),  $I$ 는 결합(linkage)의 회전관성이다.

위치에너지는 다음과 같이 angular deflection 이용하여 구할 수 있다.

$$V = 4 \times \frac{1}{2} K_\theta \left( \frac{q_1}{L} \right)^2 \quad \text{여기서 } \theta_z \cong \frac{q_1}{L} \quad (2-10)$$

여기서  $K_\theta$ 는 linkage의 angular stiffness 이다.

Lagrange's equation을 이용하여 이 두식을 정리하면 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\frac{\delta}{\delta t} \left( \frac{\delta T}{\delta \dot{q}_1} \right) - \frac{\delta(T-V)}{\delta q_1} = F \quad (2-11)$$

그러므로

$$\left( M + \frac{1}{2} m_l + \frac{2}{L_2} I \right) \ddot{q}_1 + \frac{4}{L_2} K_\theta q_1 = F \quad (2-12)$$

식 (2-12)으로부터 유효질량과 유효강성을 다음과 같이 정의 할 수 있다.

$$M_{eff} = M + \frac{1}{2} m_l + \frac{2}{L_2} I, \quad (2-13)$$

$$K_{eff} = \frac{4}{L_2} K_\theta \quad (2-14)$$

탄성가이드의 고유공명진동수는 식(2-15)로부터 확인할 수 있다. Single-axis 탄성힌



지의 모멘트  $M_z$ 는 탄성가이드의 편향을 유발하고 z-axis에 대한 각  $\theta_z$ 는 다음과 같이 정의 할 수 있다.

$$\frac{1}{K_\theta} = \frac{M_z}{\theta_z} = \frac{3}{2EbR^2} \left[ \frac{1}{2\beta + \beta^2} \right] \cdot \left\{ \left[ \frac{1+\beta}{\gamma^2} + \frac{3+2\beta+\beta^2}{\gamma(2\beta+\beta^2)} \right] \cdot \left[ \sqrt{1-(1+\beta-\gamma)^2} \right] + \left[ \frac{6(1+\beta)}{(2\beta+\beta^2)^{3/2}} \right] \cdot \left[ \tan^{-1} \left( \sqrt{\frac{2+\beta}{\beta}} \times \frac{(\gamma-\beta)}{\sqrt{1-(1+\beta-\gamma)^2}} \right) \right] \right\} \quad (2-15)$$

여기서  $t$ 는 notch flexure type hinge's thickness 이며  $h$ 는 hinge's의 width,  $b$ 는 hinge's length, ( $\beta = t/2R$ ,  $\gamma = h/2R$ ) 이다.

이러한 경우,  $\beta \ll 1$  또는  $\beta \ll \gamma$  일 경우 식(2-15)을 간단히 정의하면

$$K_\theta = \frac{M_z}{\theta_z} = \frac{2E_{bt}^{5/2}}{9\pi R^{1/2}} \quad (2-16)$$

그러므로

$$K_{eff} = \frac{8E_{bt}^{5/2}}{9\pi L^2 R^{1/2}} \quad (2-17)$$

탄성 가이드의 고유 공명 주파수식 (2-18)와 같이 정의 할 수 있다.

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_{eff}}{M_{eff}}} \quad (2-18)$$

### 제 3절 압전액추에이터의 동특성실험

#### 1. 압전소자

압전성이란 결정질에 기계적 응력을 가하면 전기적 분극이 발생하고, 반대로 전기적 에너지를 가하면 물리적 변형, 즉 변위가 발생한다. 이 이론은 현대적 압전구동기의 기초가 되고 있다. 결정학적인 관점에서 보면 압전특성을 가지는 재료는 대칭 중심을 가지지 않는 결정들이다. 결정들은 32개의 결정족 또는 점군(point group)으로 구별할 수 있는데, 이 중 21개는 대칭중심을 가지지 않으며, 그 중 20개가 압전특성을 나타낸다. Fig.2-10과 같이 대칭중심을 가지지 않은 결정질들은 x축으로 잡아당기면 각 변위는 늘어나게 되고, 압축하면 줄어들게 되어 정(+), 부(-)의 전하는 역방향으로 변위가 발생하여 분극을 일으키게 된다. 즉 각 변위가 확장되면 y축의 정(+)방향으로, 각 변위가 감소하면 y축의 부(-)방향으로 분극이 생긴다<sup>(15)~(21)</sup>.

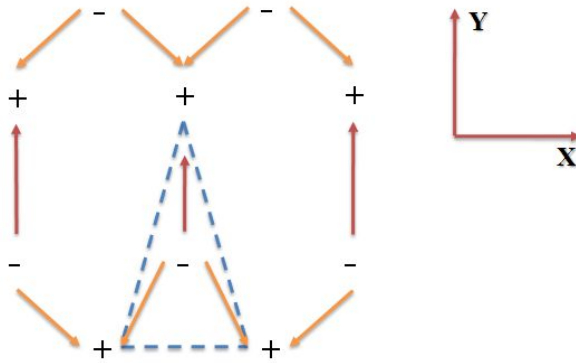


Fig.2-10 A two-dimensional structure with piezo electric actuator

정압전효과에서 압전전하상수( $d_{ijk}$ )는 전기분극( $P_i$ )과 인가된 기계적 응력에 관련이 있으며 식 (2-19)과 같이 정의된다.

$$P_i = d_{ijk} \cdot \sigma_{jk} \quad (2-19)$$

여기서,  $\sigma_{jk}$ 는 기계적 응력이며, 첨자 i, j, k는 1차원에서 3차원까지의 값을 가지며, 직각 좌표계에서는 3개의 축을 나타낸다. 또한 역압전효과에서 압전상수는 기계적 변형( $\delta_{ij}$ ;strain)과 인가된 전압( $E_k$ )의 관계에서 식 (2-19)에서 나타낸 것을 3개의 축성분을 이용하면 식 (2-20)로 나타낼 수 있다.

$$\delta_{ij} = d_{ijk} \cdot E_k \quad (2-20)$$

압전상수는 정압효과나 역압전 효과에서 모두 같은 상수를 가지며, 단위는 각각 [Coulomb/Newton]과 [Meter/Volt]로 주어진다.

$$\begin{aligned} D_1 &= K_{11}E_1 + d_{15}T_5 \\ D_2 &= K_{11}E_2 + d_{15}T_4 \\ D_3 &= K_{33}E_3 + d_{31}(T_1 + T_2) + d_{33}T_3 \\ \delta_1 &= s_{11}^E T_1 + s_{12}^E T_2 + s_{13}^E T_3 + d_{31}E_3 \\ \delta_2 &= s_{11}^E T_1 + s_{12}^E T_2 + s_{13}^E T_3 + d_{31}E_3 \\ \delta_3 &= s_{11}^E (T_1 + T_2) + s_{33}^E T_3 + d_{33}E_3 \\ \delta_4 &= s_{44}^E T_4 + d_{15}E_2 \\ \delta_5 &= s_{44}^E T_5 + d_{15}E_1 \\ \delta_6 &= s_{66}^E T_6 \end{aligned} \quad (2-21)$$

여기서 독립변수는 유전상수 2개( $K_{11}$ ,  $K_{33}$ ), 압전상수 3개( $d_{31}$ ,  $d_{15}$ ,  $d_{33}$ ) 및 탄성상수 5개( $s_{11}$ ,  $s_{12}$ ,  $s_{13}$ ,  $s_{33}$ ,  $s_{44}$ )로 모두 10개 이며, 이를 이용하여 압전상태방정식을 식 (2-21)와 같이 쓸 수 있다. 식(2-21)에서 처음 3개의 식은 정압전효과(piezo electric direct effect), 다음 6개의 식은 역압전효과(piezo electric converse effect)를 나타낸 식으로 변위특성을 이해하는데 중요한 식이다<sup>(22)</sup>.

## 2. 마이크로 스테이지 서보모델

마이크로 서보의 모델링은 아래와 같은 과정을 거쳐 유도하였다.

마이크로 스테이지의 변위와 압전 소자와의 변위 관계는 식 (2-22)과 같다.

$$m\ddot{x} + c_p(\dot{x} - \dot{x}_p) + K_p(x - x_p) = 0 \quad (2-22)$$

압전소자 양단의 전압과 압전소자 양단의 전압관계는 식 (2-23)과 같다.

$$G_p V_p = RC\dot{v} + v \quad (2-23)$$

식 (2-22) ~ (2-23)으로부터  $x, \dot{x}, v$  상태변수로 하는 상태방정식은 식(2-24)와 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \ddot{x} \\ \dot{v} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -\frac{k_p}{m} & -\frac{c_p}{m} & \frac{k_p K_p}{m} - \frac{c_p K_p}{RCm} \\ 0 & 0 & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ v \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{c_p G_p K_p}{RCm} \\ \frac{G_p}{RC} \end{bmatrix} v_p \quad (2-24)$$

출력방정식은 식 (2-25)와 같다.

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ v \end{bmatrix} \quad (2-25)$$

실험에 사용된 마이크로 서보의 정특성을 Table 2-4에 나타내었다.

Table 2-4 Static characteristics of micro servo

| Definition                       | Symbol | Value                                   |
|----------------------------------|--------|---|
| Mass of the table                | $m$    | $0.217 \text{ Kg}$                      |
| Damping coeff. of the PZT compo. | $c_p$  | $980 \text{ N} \cdot \text{s}/\text{m}$ |
| Spring coeff. of the PZT compo.  | $k_p$  | $1.37 \times 10^7 \text{ N}/\text{m}$   |
| PZT capacitance                  | $C$    | $6.5 \times 10^{-6} \text{ F}$          |
| Load resisitance of PZT          | $R$    | $10 \Omega$                             |
| PZT amplifier gain               | $G_p$  | 10                                      |
| PZT gain                         | $K_p$  | $0.78 \times 10^7 \text{ N}/\text{v}$   |

# 제 3장 레이저 엔코더 시스템

## 제 1절 Laser Interferometer 계측원리

### 1. Heterodyne 간섭계

레이저 간섭계는 레이저광의 간섭현상을 이용하여 길이측정, 연마면의 형상측정, 평면도 검사 등의 미세한 패턴 계측에 사용한다. 레이저의 특징으로는 평행성, 집속성, 단색성, 간섭성, 고 에너지밀도, 초단펄스 등이 있고 그 중에서 간섭성질을 이용한 헤테로다인과 마이켈슨간섭계의 원리를 이용하여 고 정도의 변위를 측정하는 것이다. Fig.3-1는 헤테로다인간섭계의 원리를 나타내었다.

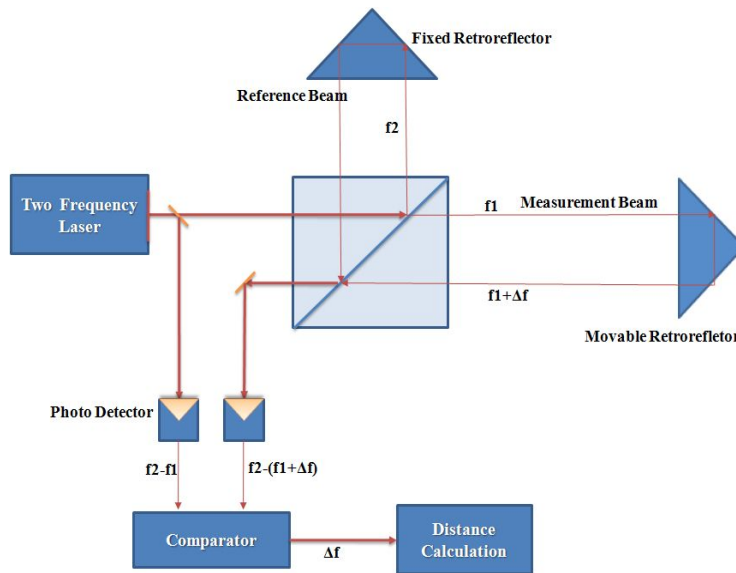


Fig.3-1 Schematic diagram of Heterodyne interferometer



## 2. Michelson 간섭계

본 논문에는 마이켈슨(Michelson)간섭계를 적용한 광섬유 레이저 엔코더(Renishaw RLE 10) 시스템을 이용한다. 단파장 레이저의 간섭효과를 이용해서 물체의 거리를 나노급 단위로 정밀하게 측정하도록 구성하였다. 반도체 레이저에서 발생한 단파장 레이저는 계측대상의 표면에서 산란되거나 반사되는데, 반사되는 레이저 광선중에서 입사각과 동일한 각도로 반사되는 레이저광을 특수하게 고안된 반도체 광도파로 내에서 원래의 광원과 간섭시켜 그 결과로 출력되는 레이저 광선의 강도를 전기 신호로 변환시켜 물체와 광원과의 거리를 알 수 있는 원리를 이용하여 초정밀 진동, 변위, 응력, 두께, 변위교정, 하드드라이브 진동 X-Y 위치 측정등을 비접촉으로 측정할 수 있다. Fig.3-2는 마이켈슨간섭계의 원리를 나타내고 있다. 다음의 식을 따른다.

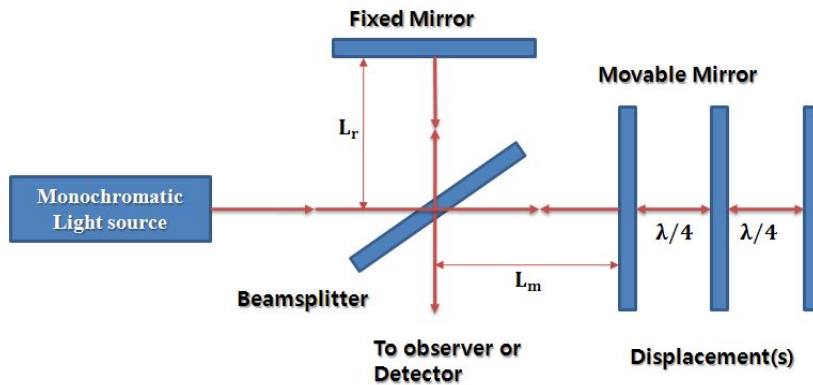


Fig.3-2 Schematic diagram of Michelson interferometer



$$\begin{aligned}
 I &= I_r + I_m 2\sqrt{I_r I_m} \cos(\alpha_m - \alpha_r) & (3-6) \\
 &= I_r + I_m 2\sqrt{I_r I_m} \cos(k \cdot PD) \\
 &= I_r + I_m 2\sqrt{I_r I_m} \cos\left(\frac{4\pi}{\lambda} \cdot s\right)
 \end{aligned}$$

Here,  $PD = (L_m - L_r) \times 2 = 2s$

$$\frac{4\pi}{\lambda} \cdot s = 2\pi, \quad s = \frac{\lambda}{2}$$

본 논문에서 사용한 마이켈슨간섭계의 일반적인 간섭계의 구성이 복잡하고 배열이 어려워 기계 시스템에서는 적합하지 않다.

일반적인 마이켈슨간섭계의 배열문제를 해결하기 위해서 Fig.3-3과 같은 광학계를 소형화된 레이저 디텍터 헤드를 사용하였다<sup>(23)</sup>.

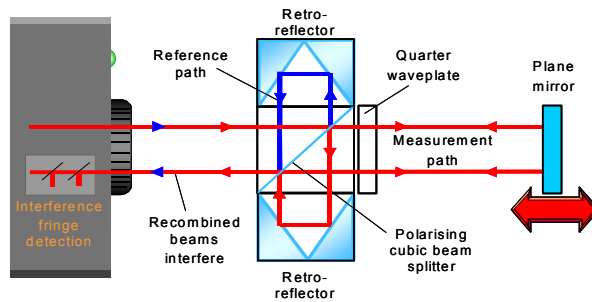


Fig.3-3 Generally Homodyne(single frequency) interferometer

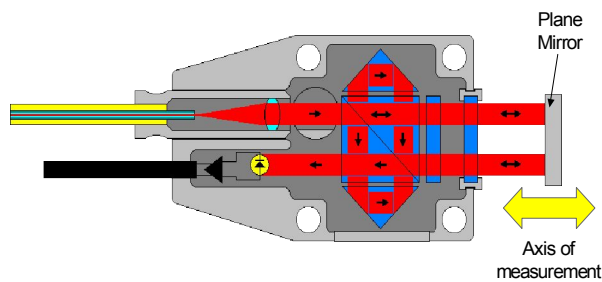


Fig.3-4 Miniaturized Homodyne(single frequency) interferometer

초정밀을 요하는 측정에서는 피 측정물의 진각도(Angular), 진직도(Straightness), 편평도(Squareness) 등을 충분히 고려해 주어야한다. 이러한 요소들이 모두 충족하였을 때 측정데이터의 신뢰성을 갖게 된다.

Fig.3-5와 Fig.3-6는 각각 Linear, Angular 등의 측정 방법과 미러의 배열에 대해 설명하고 있다.

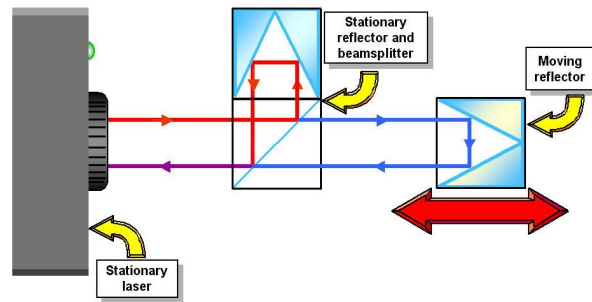


Fig.3-5 Linear Measurement of Laser interferometer

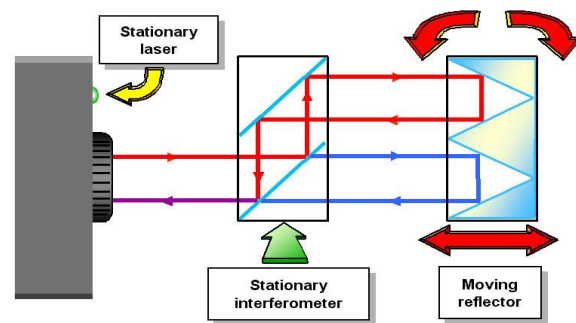


Fig.3-6 Angular Measurement of Laser interferometer

## 제 2절 Optical fiber Laser Encoder System의 응용

### 1. 시스템 구성

본 논문에서는 정확한 위치정보를 습득하기위해 광섬유 레이저엔코더시스템(Optical fiber laser encoder system)과 공기 굴절을 및 온도보상이 가능한 환경보상유닛을 이용하였다. 광섬유 레이저엔코더시스템은 광간섭을 이용하여 고정도의 변위 측정 및 위치제어가 가능하도록 구성되어있다. 구성은 Fig.3-7과 같이 광파이버 레이저엔코더유닛 과 광파이버 레이저디텍터 헤드(Optical fiber laser detector head)로 구성되어지며, 레이저엔코더에서는 두 개의 flexible Optical fiber으로 레이저광을 디텍터헤드로 송광하여 준다. 그리고 레이저 디텍터헤드는 평형 미러에서 반사되어지는 레이저광을 다시 엔코더유닛으로 리턴 시켜 위치제어에 필요한 귀환신호(Feedback signal)을 발생시켜 준다. 광섬유레이저 엔코더유닛의 외부 형상은 수직, 수평면상의 어떠한 곳에 설치하더라도 안정성 있게 지지되어야 하며, 설치될 표면의 평편도의 허용오차는 0.5mm를 초과해서는 안 된다. 광섬유레이저 엔코더유닛의 내부는 헬륨·네온레이저 소스(He-Ne)와 2축의 위치제어가 가능한 전자회로로 구성되어진다<sup>(23)</sup>.

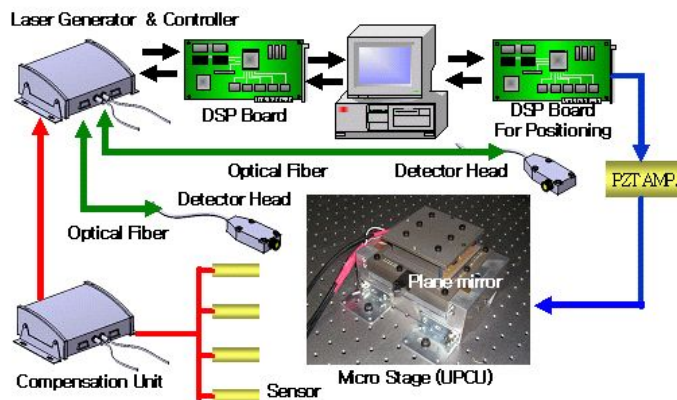


Fig.3-7 Composition of optical fiber laser and environment compensator

## 2. ECTS의 진직도 측정 방법 구상

진직도 측정원리는 피측정물(Plane Mirror)을 이송테이블의 측면에 고정하여 설치하고, 이송테이블 상면 중심부에 설치된 Probe(광섬유 디텍터헤드)가 이동하면서 피측정면을 측정하도록 하였다. 측정방향은 피측정면의 탄성변형에 의한 오차의 영향을 배제하고, 실제 측정된 프로파일  $R(x)$ 에는 측정하고자 하는 피측정면의 진직도  $E(x)$ 와 이송테이블의 수평방향 운동오차  $D(x)$ 가 중첩되어 나타나게 되며, 피측정물의 진직도  $E(x)$ 는 다음 식(3-7)과 같고 Fig.3-8은 진직도 측정 방법의 계략도이다.

$$E(x) = R(x) - D(x) \quad (3-7)$$

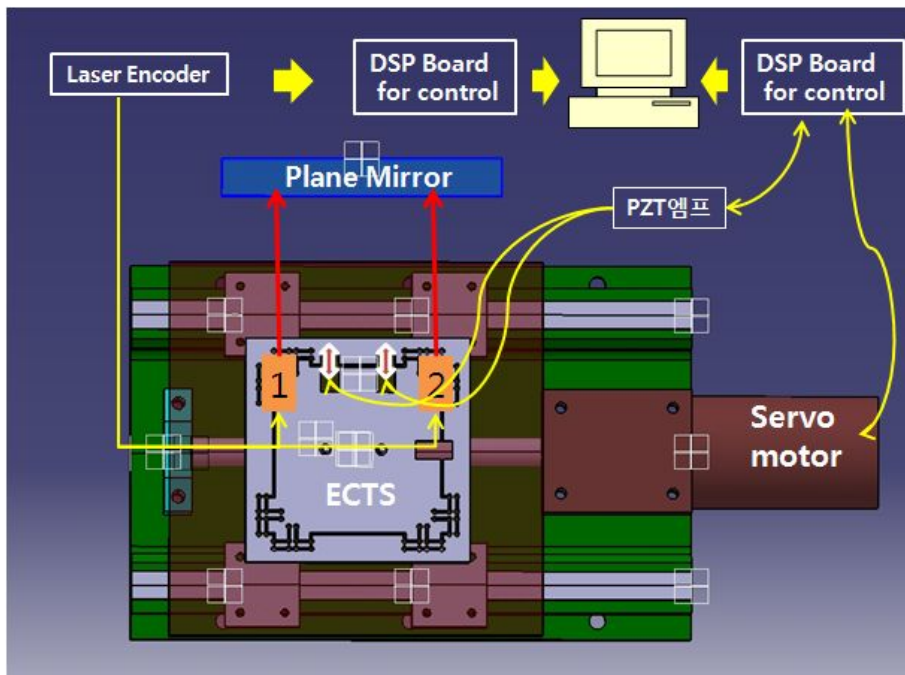


Fig.3-8 The straightness measuring mean of ECTS

### 3. 비선형성 보상

간섭계의 비선형성에 의한 오차는 수 nm 정도이므로 이를 고려하지 않을 수 없다. 이러한 비선형성은 레이저 편광의 비직교성, 레이저 편광의 타원도, 불완전한 편광광속 분리기에 의한 주파수 합성(frequency mixing) 때문에 발생한다. Fig.3-9처럼 두 편광이 수직이지 않고  $\alpha$  만큼 벗어났을 때 측정 신호는 다음과 같이 나타난다.

$$V_m = A^* \cos[2\pi(f_1 - f_2)t + \phi - \gamma] \quad (3-8)$$

$$A^* = A\sqrt{1 + \sin 2\alpha \cos \phi} \quad (3-9)$$

$$\gamma = \tan^{-1}\left(\frac{\sin \alpha \sin \phi}{\cos \alpha + \sin \alpha \cos \phi}\right)$$

(3-10)

비직교성에 의해 비선형성 오차  $\gamma$ 뿐만 아니라 진폭  $A$ 도  $\alpha$ 에 따라 달라짐을 알 수 있다. 식 (3-10)에 의하면 비선형성 오차  $\gamma$ 는 위상  $\phi$ 에 대하여 주기적임을 알 수 있다. 긴 거리를 측정할 때 비선형성 오차는 무시될 수 있다. 하지만 짧은 거리를 서브나노미터의 정확도로 측정하고자 할 때는 무시할 수 없는 양이다. 이러한 비선형 오차는 1주기 단위로 나타나는데 레이저 간섭계의 비선형 오차 성분보다 분해능과 정확도가 높은 간섭계를 이용하면 1주기내에 보정 간섭계의 분해능 단위로 보정할 수 있다.

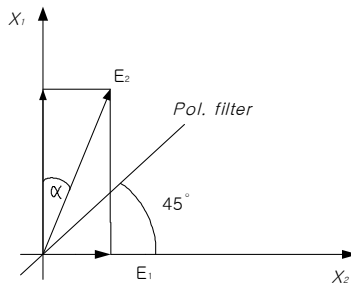


Fig.3-9 Beam components in the orthogonal reference system of the interferometer

#### 4. 공기굴절 보상

광섬유 레이저를 이용한 위치측정은 측정 환경의 영향에 따라 검출 결과에 큰 영향을 준다. 측정 환경으로는 진동과 공기 유동, 온도가 대표적이다. 측정 환경의 영향을 평가하기 위해 광학계를 이송하지 않고 정지한 상태에서 진동과 공기의 유동을 차폐한 조건에서 온도의 영향을 측정한 결과 광 간섭 신호의 변화경향성이 온도의 변화와 일치함을 알 수 있다. 따라서 온도변화에 따른 레이저의 공기굴절률 보상이 중요한 것이다. 광섬유 레이저 엔코더를 이용한 측정환경에서 신중히 고려해야 될 요소는 진동, 공기 유동, 그리고 온도의 변화에 따른 보정치를 실험과 시뮬레이션을 통하여 구한 다음 측정환경의 측정을 통해 각 측정환경의 조건에 따른 보정치를 적용하여 주어야 한다.

본 논문에서는 레이저빔이 공기를 통과할 때 공기의 압력과 온도를 측정하여 실시간으로 공기 굴절률을 보상하며, 재료의 열팽창 및 기계구조의 열팽창 보상이 가능한 환경보상 유닛을 사용하였다. 환경보상 유닛은 고성능의 DSP 기술을 기본으로 RS422 포맷의 Differential Digital Quadrature 신호를 입력받아 환경보상 하여 다양한 분해능의 디지털 신호와 아날로그 신호를 출력할 수 있다. 본 논문에서는 디지털 출력을 하도록 하였다.

광간섭을 이용한 미소변위 측정시 정밀도에 직결되는 것은 레이저 광의 파장에 대한 신뢰도이다. 실제로 측정을 수행하는 장소의 환경조건(온도, 습도, 기압)의 변화는 공기의 굴절률 변화를 일으키고, 식(3-11)에서 보는 것처럼 파장의 변화를 가져온다.

$$n\lambda = n_0\lambda_0$$
$$\lambda = \frac{\lambda_0}{n}$$

(3-11)

여기서,  $n_0$ : 진공 중의 굴절률(=1)

$\lambda_0$ : 진공 중의 파장 (632.991401 nm)

$n$  : 측정 매질의 굴절률

$\lambda$  : 측정 매질 중의 파장

다음과 같은 환경조건의 변수조건이 주어질 때 Edlen's Formulase는 다음과 같이 구할 수 있다.

· Edlen's Formulae(Updated by K.P. Birth)

$n$  : Refractive Index

$\lambda$  : Wavelength( $\mu\text{m}$ )

$T$  : Temperature(degree celsius)

$p$  : Pressure(pascals)

$f$  : Patial pressure of water vapor(in pascals)

$P, f$  : Unit in Torr

$RH$  : Relative Humidity(%)

$$n-1 = [K(\lambda)-1] \cdot F(T,p) - f \cdot C(\lambda)$$

(3-12)

$$[K(\lambda)-1] = \left[ 8343.05 + \frac{240694}{130 - 1/\lambda^2} + \frac{15999}{38.9 - 1/\lambda^2} \right] \times 10^{-8}$$

(3-13)

$$F(T,p) = \frac{9}{96095.43} \cdot \frac{1 + 10^{-8}(0.601 - 0.00972 \cdot T)p}{1 + 0.003661 \cdot T}$$

(3-14)

$$C(\lambda) = 3.7345 \times 10^{-10} - 0.0401 \times 10^{-10} / \lambda^2$$

(3-15)

따라서 He-Ne laser의 공기굴절률(Refractive Index of Air)를 고려하면 식 (3-16)을 따른다.

$$n - 1(3.8369 \times 10^{-7} \cdot p) \left[ \frac{1 + 10^{-6}(0.817 - 0.0133T) \cdot p}{1 + 0.003661 \cdot T} \right] - 5.607943 \times 10^{-8} \cdot f \quad (3-16)$$

$$f = \frac{RH}{100} \cdot [4.07859739 + 0.044301857 \cdot T + 0.00232093 \cdot T^2 + 0.00045785 \cdot T^3] \quad (3-17)$$

공기 굴절률 보상은 공기의 온도와 압력센서로부터 받아지는 정보 따라 보상되어진다. 이러한 보상이 없는 시스템은 다음과 같은 환경변화에 1ppm의 오차가 발생할 것이다.

$$1\text{ppm for every } \left\{ \begin{array}{l} 1^\circ\text{C} (\approx 1.8^\circ\text{F}) \\ 3.3\text{mb} (\approx 0.1\text{in}/\text{Hg}) \\ 30\% RH \end{array} \right\}$$

공기온도 센서는 측정 범의 전달경로의 온도를 모니터링 하며, 기계의 경계 내에서 내부온도변화의 영향을 줄여 줄 수 있으며, 습도는 상대적으로 끊임없도록 추정하며 고정된 값을 임의로 설정할 수도 있다. 이러한 센서들의 정보를 바탕으로 식(3-17)의 Edlen's 경험식을 여러번 수행하여 공기 굴절률 보상을 한다. Fig.3-10은 환경보상을 통한 레이저 주파수의 신뢰 수준을 나타낸 것이다. 환경보상의 유무에 따라 레이저 주파수의 신뢰수준이 다소 차이가 있음을 알 수 있다.

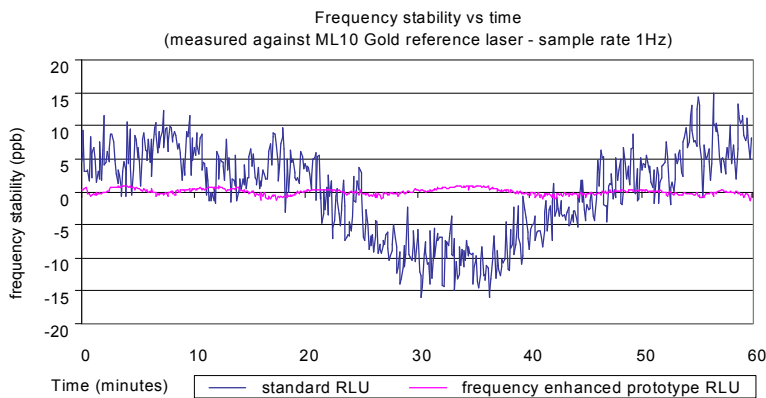




Fig.3-10 Frequency stability of Optical Fiber laser(Environment compensation)

또한 위치에러의 중요한 원인의 하나는 열팽창이다. 재료의 열팽창 보상은 재료 온도센서에 의해 얻어진 정보를 기본으로 재질에 따라 다르게 보상된다. 측정범위 위치가 20℃(68°F)의 기준온도를 기본으로 온도변화에 따라 재료의 팽창계수를 적용하여 보상한다. Fig. 3-11은 온도변화에 따른 열팽창계수를 보상하여 영점을 보정한 것이다. 열팽창 보상시 4nm/℃의 오차를 확인할 수 있었다. 재료온도센서는 동등한 열 특성의 부분에 장착된다.

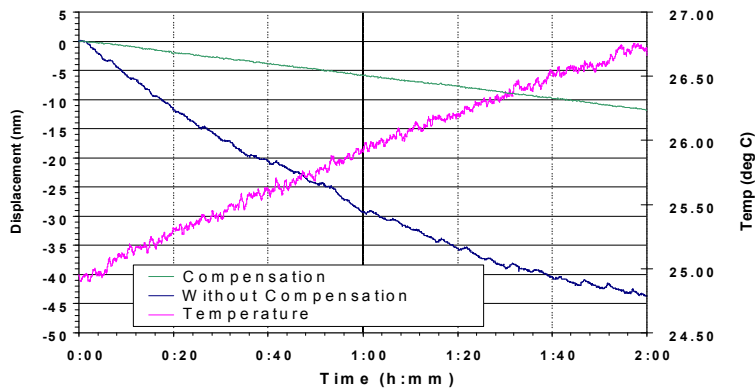


Fig.3-11 Zero point Drift and Temperature over time

Table 3-1 RCU10 performance

|   |  |
|---|--|
| Input resolutions                           | 10 nm to 5 um (digital input)  |
| Output resolutions                          | Digital 10 nm to 5 um<br>Analogue 20, 40 and 100 um  |
| Accuracy                                    | ±1 ppm (Refractive index compensation only)<br>±2 ppm (With 10ppm/deg C material compensation) |
| Maximum velocity                            | 5 m/s Resolutions >400 nm,<br>0.2 m/s at 10 nm resolution                                      |
| Compensation update rate                    | 100 us   |
| Delay through compensator                   | <2 us (digital input - digital output)   |
| Output update rate<br>(digital)(Selectable) | 20 MHz (50ns)(minimum edge-edge separation)<br>10 MHz (100ns), 5 MHz (200ns), 2.5 MHz (400ns)  |
| Output update rate (analogue)               | 10 MHz (100ns)   |
| Input bandwidth(Selectable)                 | 20 / 10 / 5 / 2.5 MHz  |

Table 3-2 Air sensor performance

|                   |   |
|-------------------|---|
| Accuracy          | ± 0.2 °C<br>(Within 13 months of calibration) |
| Measurement range | 0 °C – 50 °C                                  |
| Resolution        | 1/128 °C                                      |
| Update rate       | 1 Hz  |
| Voltage Range     | 4.5 to 5.5 Volts                              |
| Current           | 20 mA (max)                                   |

Table 3-3 Material sensor performance

|                   |   |
|-------------------|---|
| Accuracy          | ± 0.1 °C<br>(Within 13 months of calibration) |
| Measurement range | 0 °C – 50 °C                                  |
| Resolution        | 1/128 °C                                      |
| Update rate       | 1 Hz  |
| Voltage Range     | 4.5 to 5.5 Volts                              |
| Current           | 20 mA (max)                                   |

## 제 4장 압전구동기의 제어

### 제 1절 전달함수 알고리즘

압전구동기(piezo electric actuator)의 변위량을  $u$ 라고 할 때 전계  $E$ 에 대한 응답을 고려하면 이 경우 상당한 크기의 질량부하  $M$ 을 동반하기 때문에 압전소자의 응답정보보다는  $M$ 을 중심으로 한 운동방정식이 중요해진다.

질량  $M$ 이 면적  $A$ , 길이  $L$ 인 압전소자에 탄성( $c$  : stiffness) 모델이라고 하며, 강제진동의 힘은 압전소자에서 받아, 전계  $E$ 의 인가로  $Ac dE$ ( $d$  : 압전상수)라는 선형성을

가정해둔다.

따라서 운동방정식은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$M\frac{d^2}{dt^2} + \xi\frac{du}{dt} + \frac{Ac}{L}u = AcdE \quad (4-1)$$

으로 주어진다. 단  $\xi$ 은 damper항을 나타낸다. 여기서 라플라스 변환을 사용하여 풀면

$$Ms^2 + U + \xi sU + \frac{Ac}{L}U = Acd\tilde{E} \quad (4-2)$$

이 된다. 이 식을 정리하면

$$U = G_2(s)\tilde{E} \quad (4-3)$$

$$G_2(s) = \frac{Acd}{Ms^2 + \xi s + \frac{Ac}{L}} \quad (4-4)$$

이 된다. 식 (4-3)은, 입력  $\tilde{E}$ 에  $G_2$ 를 곱하면 출력  $U$ 가 되는 것을 나타낸다.  $G_2$ 는 입력  $\tilde{E}$ 이 출력  $U$ 의 전달함수이다.

또한 변위 센서의 경우, 입력변위  $u$ 에 대해서 비례한 전압  $e_0$ 가 출력되기 때문에, 전달함수는  $G_3$ 는 다음과 같다.

$$G_3(s) = K_2 \quad (4-5)$$

다음으로 차동적분 증폭기의 경우, 목표위치를 나타내는 전압  $e_i$ 를 입력하고 그때의 위치신호  $e_0$ 와 비교해서 차전압  $e_i - e_0$ 를 만든다. 목표전압  $e_i$ 가 실제의 전압  $e_0$ 보다

클 때 차전압의 값은 양이 되어 압전소자에의 인가전압  $E$ 가 상승할 수 있도록,  $e_i$ 가  $e_0$ 보다 작을때는  $E$ 가 낮아질 수 있도록, 적분 증폭기로 전압을 증폭한다.

$$E = K_1 \int (e_i - e_0) dt \quad (4-6)$$

따라서 다음 식을 얻는다.

$$\tilde{E} = G_1(s)(\tilde{e}_i - \tilde{e}_0) \quad (4-7)$$

$$G_1(s) = K_1/s \quad (4-8)$$

위에 정의한 전달함수를 사용하여 선도를 나타내면 Fig.4-1과 같다.

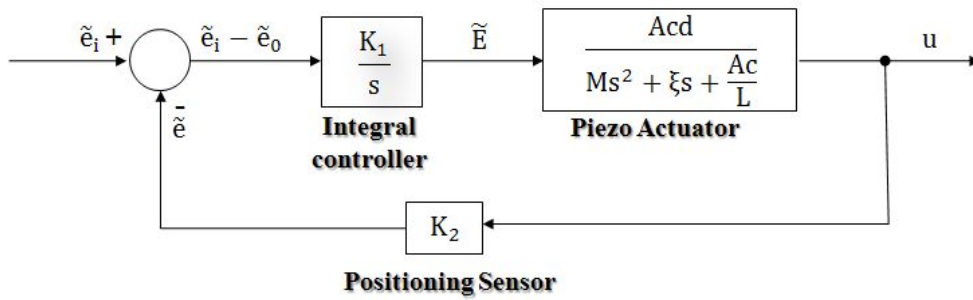


Fig.4-1 Block diagram of a piezo electric actuator

또한 피드백을 포함한 블록선도의 통합에는 두 종류 방법을 Fig.4-2를 통해 나타내고 있다.

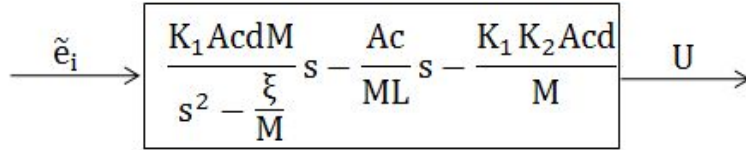


Fig.4-2 Block diagram of a piezo electric actuator

Open loop 일 때의 전달함수를  $W_0$ , Closed loop 일 때의 전달함수를  $W_c$ 라고 한다.

$$W_0 = G_1 G_2 G_3 = \frac{K_1}{s} \frac{Acd}{Ms^2 + \xi s + \frac{Ac}{L}} K^2 \quad (4-9)$$

$$W_c = G_1 G_2 - G_1 G_2 (G_1 G_2 G_3) + G_1 G_2 (G_1 G_2 G_3)^2 - G_1 G_2 (G_1 G_2 G_3)^3 + \dots G_1 G_2 (G_1 G_2 G_3)^n$$

$$= \frac{G_1 G_2}{1 + G_1 G_2 G_3}$$

$$= \frac{(K_1 Acd/M)}{s^3} + \frac{\xi}{M} s^2 + \frac{K_1 K_2 Acd}{M} \quad (4-10)$$

압전구동기(piezo electrics actuator)에 의한 위치결정으로 목표위치를 나타내는 전압  $e_i$ 가 단계적으로 변화했을 때에 변위  $u$ 도 단계적으로 변화하는 것이 바람직하나, 실제 시스템에서는 상태의 불안정, 즉 시간의 경과 후의 실제의 변화와 목표치와 차가 완전히 영이 되는 보장은 없으며 이를 정상편차라고 한다. 정상편차가 너무 작아도 과도진동의 감쇠가 늦어져 응답성이 떨어지기 때문에 어느 정도로 진동이 빨리 감쇠하는가도 중요한 인자가 되는 것이다<sup>(24)</sup>.

## 제 2절 압전구동기의 히스테리시스

압전구동기(piezo electric actuator) 히스테리시스(hysteresis)모델은 앞 절에서 언급한 히스테리시스의 루프궤적의 특성을 적용하여 수식화 될 수 있다. Fig.4-3 는 히스테리시스모델을 위한 전형적인 루프궤적에 적용하여 히스테리시스모델링을 나타내고 있으며, 수식화 하기 위하여 특징변수에 대한 값을 사용하였다. 특징 변수값은 다음과 같다.

$X$  : 변위량,

$V_f$  : 하강 시 상승전압,  $V_r$  : 상승 시 하강전압

$X_f$  : 하강 시 상승변위량 ,  $X_r$  : 상승 시 하강변위량

$X_{\max}$  : 하강곡선에서 최대변위량,  $V_{\max}$  : 하강곡선에서 최대전압

$H_f$  : major loop 상승 보간식 ,  $H_r$  : major loop 하강 보간식

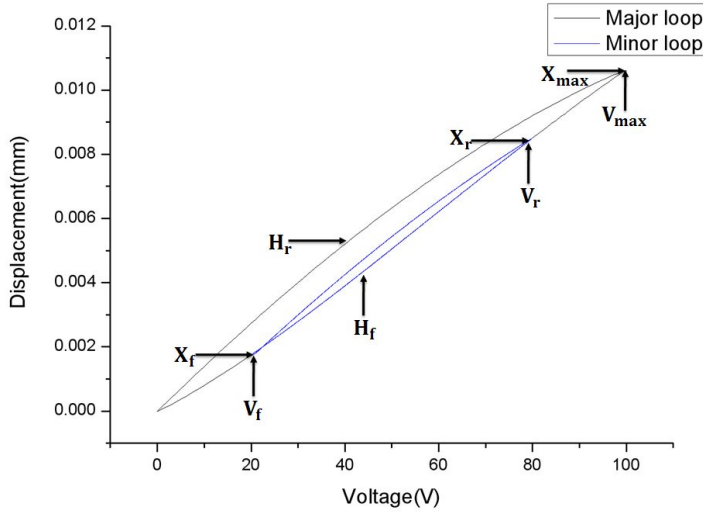


Fig.4-3 Hysteresis modeling of PZT

본 논문에서 Fig.4-3에서 큰 타원을 그리는 루프를 메이저루프(major loop)라 하고, 메이저루프 내부의 루프를 마이너루프(minor loop)라고 한다. 메이저루프의 모델은 실험데이터에서 상위변위 데이터를 나누어 각 다항식으로 보간 할 수 있으며, 보간한 식을 사용하여 메이저루프의 인가전압과 변위사이의 관계를 수학적으로 구한다, 그리고 마이너루프의 모델은 외부의 메이저루프의 수식을 반전점을 기준으로 하여 수평적으로 구동시킨 수식을 적용하여 히스테리시스 모델을 만든다. 아래의 식(4-11)은 상승할 때의 마이너루프 히스테리시스 수식을 정립하였으며, 식(4-12)는 하강 시의 마이너루프의 히스테리시스 수식을 나타내었다.

$$X = H_f(V - V_f) + X_f \quad (4-11)$$



$$X = H_r(V - V_r + V_{\max}) + X_r - X_{\max} \quad (4-12)$$

### 제 3절 압전구동기의 역 히스테리시스

역 히스테리시스 모델을 이용하여 압전구동기의 제어입력을 발생하는 과정을 Fig.4-4에 나타내었다. 원하는 궤적과 압전구동기의 히스테리시스 거동에 많은 영향을 미치고 반전점들이 입력으로 주어지면 역 히스테리시스 모델 전압이 출력되게 된다.

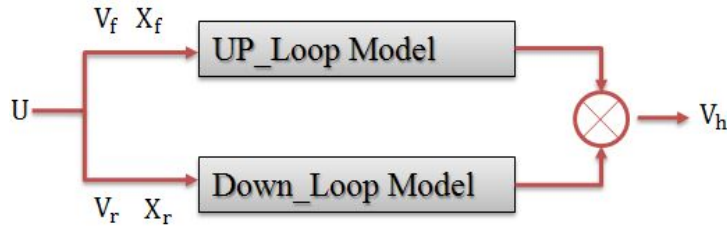


Fig.4-4 Model of inverse hysteresis

major loop는 상승과 하강식으로 나누어 모델링하였기 때문에 Fig. 4-4에서 나타난 것처럼 상승(하강)할때는 상승모델에 궤적과 상승(하강)반전점들이 모델에 입력이 되고 역 히스테리시스 모델에서는 그에 해당하는 전압을 출력하게 된다. 압전구동기(piezo electric actuator)의 물성으로 인한 히스테리시스 특성은 고속추정 제어 시 위상지연을 일으켜 추종오차를 증가시키는 요인이 된다. 따라서 추종오차를 감소시키기 위하여 히스테리시스 특성에 대한 피드포워드(feedforward)방식으로 적용할 필요가 있다. 물성으로 인한 히스테리시스 특성을 정확히 파악하기 위해서 1Hz미만 입력 시의 히스테리시스 데이터를 적용하였다. 1Hz 사인파로 변위신호를 제어기에 입력하여 메이저루프와 마이너루프에 대한 역이력 모델(Inverse hysteresis model)을 구하였다. 또한 역함수( $H^{-1}$ : Inverse function)를 다음과 같이 정의 하였다. 다음은 메이저루프에 대한 변위식을 나타내고 있다.  
메이저루프에 대해 3차 최소자승법으로 역함수를 아래와 같이 구하였다.

$$V_f = -6.2810 \times 10^{-2} X^3 - 2.3865 X^2 + 9.4902 \times 10^1 X - 8.9278 \times 10^1 \quad (4-13)$$

$$V_r = 6.299 \times 10^{-2} X^3 + 6.7222 \times 10^{-1} + 4.7817 \times 10^1 X - 6.4298 \times 10^1 \quad (4-14)$$

마이너루프에 대한 상승 시 변위식은 다음과 같다.

$$V_{mf} = V_f + \Delta V_r \cdot H_f \quad (4-15)$$

$$H^{-1_f} = -3.1902 \times 10^{-1} X_n^3 + 1.5552 X_n + 1.0376 \quad (4-16)$$

$$X_n = \frac{X - X_r}{X_{\max} - X_r} \quad (4-17)$$

( $X_n$  : normalized displacement)

마이너루프의 하강 시 변위식은 다음과 같다.

$$V_{mr} = V_r - \Delta V_r \cdot H^{-1_r} \quad (4-18)$$

$$H^{-1_r} = -1.1611 \times 10^{-1} X_n^3 + 1.1393 X_n^2 - 1.1911 X_n + 1.0196 \quad (4-19)$$

$$X_n = \frac{X_r - V}{X_r - X_{\max}} \quad (4-20)$$

( $X_n$  : normalized displacement)

압전구동기(piezo electric actuator)의 시스템을 구동하고 제어하기 위해서는 변위가 제어 목표가 되어야 하므로 major loop의 보간식을 역으로 좌표변환을 수행하여 역 히스테리시스(Inverse hysteresis model) 모델을 식 (4-21)과 (4-22) 과 같이

나타내었다. Fig.4-5는 역 히스테리시스 모델(Inverse hysteresis model)을 나타내고 있다.

$$V = V_f + H^{-1}_f(X - X_f) \quad (4-21)$$

$$V = V_r - V_{\max} + H^{-1}_r(X_{\max} - X_r + X) \quad (4-22)$$

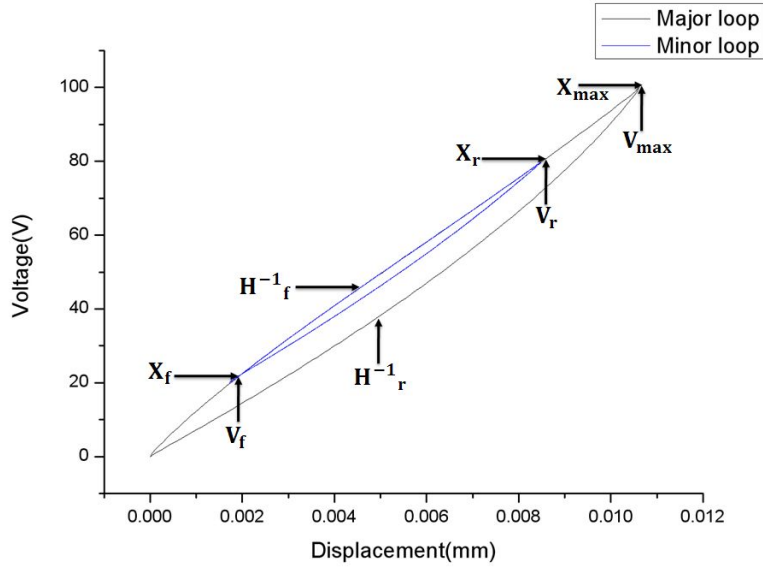


Fig.4-5 Inverse hysteresis modeling of PZT

## 제 4절 위상지연 보상

히스테리시스(hysteresis) 특성실험에서 설명된 바와 같이 입력주파수가 증가할수록 히스테리시스(hysteresis)현상보다는 제어시스템의 전기적/기계적 동특성에 의한 비선형성이 증가한다. 이 비선형성은 역이력 모델로 보정할 수 없으므로 별도의 보상기를 적용하여야 한다. 이를 위해 Fig.4-6에서 역이력 모델을 적용하여 제어시스템의 위치정밀도를 향상시키고자 한다.

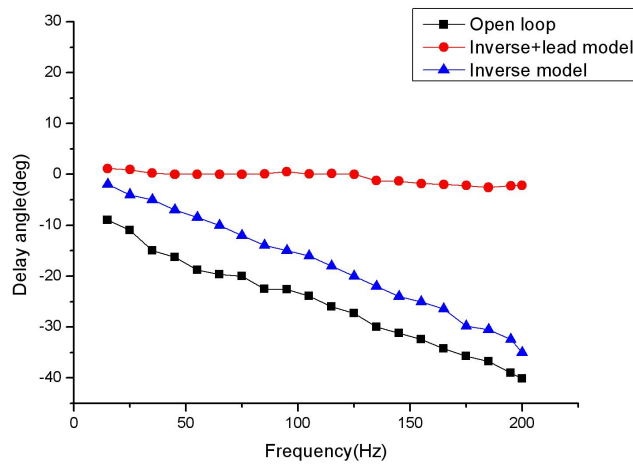


Fig.4-6 Phase comparison of open loop, inverse and inverse model+lead compensator

Fig. 4-6에서 100Hz까지도 위상차가 거의 선형으로 증가하므로 이 위상차를 제거하기 위한 위상보상기는 수백 Hz 까지는 선형의 lead 성분을 가져야 함을 알 수 있다. 제어시스템이 추종하고자 하는 최대 입력주파수가 100Hz이므로 100Hz까지 위상차를 보상할 수 있도록 다음과 같은 lead 보상기의 식을 구하였다.

$$L(s) = \frac{\frac{s}{2000} + 1}{\frac{s}{2000} + 1} \quad (4-23)$$

이 보상기를 0.1msec(10Hz)의 샘플링주기로 터스틴(Tustin)변환기법을 적용하여 z평면 전달함수를 얻어 주파수 응답특성을 Fig.4-7에 나타내었다.

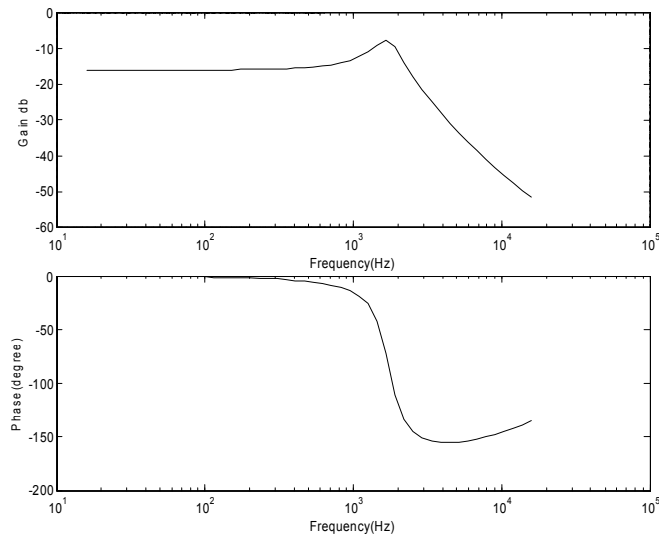


Fig.4-7 Frequency Response of Lead Compensator(close loop)

터스틴 변환기법을 적용하여 주파수영역의 보드선도와 시간영역의 스텝 응답을 분석한 결과 좋은 응답을 보여주었다.

위상지연 보상기를 역 히스테리시스 모델과 함께 제어시스템에 입력 시 피드포워드 방식으로 적용한 경우의 위상차는 Fig. 3-9에 나타난 바와 같으며 입력주파수 변화에 따른 위상지연을 매우 효과적으로 보정하는 것을 알 수 있다.

위상여유를 보다 작게 하는 제어기의 설계가 필요하므로 개루프 주파수 분석을 통하여 제어기의 파라미터를 설정하였으며, 설계한 PID제어기에 적용한 결과 폐루프(close loop) 주파수 영역은  $G_m=15.314\text{dB}$ ,  $P_m=54.704\text{ deg}$ 이며, 이득여유가 6dB 이상, 위상여유 30~60deg이다. Table 4-1은 PID 제어기의 시뮬레이션을 통하여

구한 각 계인값을 나타내고 있다. Table 4-2는 마이크로 스테이지의 스텝응답 특성을 분석한 값을 나타내고 있다.

Table 4-1 Control parameters of PID controller Micro servo

| Definition        | Symbol   | micro servo        |
|-------------------|----------|--------------------|
| Proportional gain | $\beta$  | 0.01               |
| Integral gain     | $\gamma$ | 800                |
| Differential gain | $\alpha$ | $5 \times 10^{-7}$ |
| Sampling time     | T        | 0.0002 s           |

Table 4-2 Step response of Micro servo

| Definition           | micro servo |
|----------------------|-------------|
| Steady-state error   | 0           |
| Maximum overshoot[%] | 0.1(10%)    |
| Rise Time[s]         | 0.005       |
| Setting Time[s]      | 0.0075      |

## 제 5 장 진직도 에러보상실험

### 제1절 실험장치의 실시간 제어

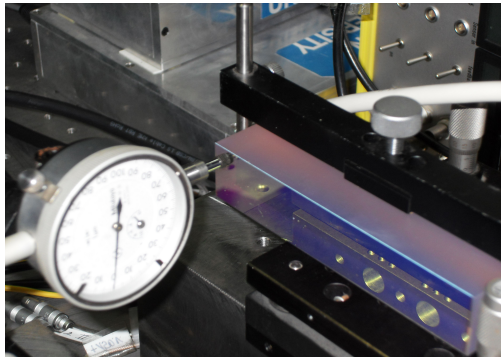
#### 1. 제어 시스템 구성

메인 컴퓨터의 제어에 필요한 A/D, D/A보드(UMAC-High Performance Controller)은 다양한 디지털 신호 및 아날로그 신호의 입출력을 연산하는 중추적인 기능을 하며, D/A 변환 시 컴퓨터 내의 제어 알고리즘을 통하여 보상된 디지털 제어신호를 아날로그 신호로 변환시킨 뒤 고전압 증폭기로 보낸다. 고전압 증폭기는 아날로그 신호를 증폭시켜서 압전구동기를 구동시키고, 압전구동기의 운동은 탄성힌지를 축방향으로 변위가 발생된다. 이때의 변화된 변위에 비례하여 광섬유 레이저 엔코더가 위치신호를 검출하고 그 위치 신호를 디지털로 변환시켜 컴퓨터에 입력시켜 피드백할 수 있는 제어신호를 발생하도록 구성되어 있다.

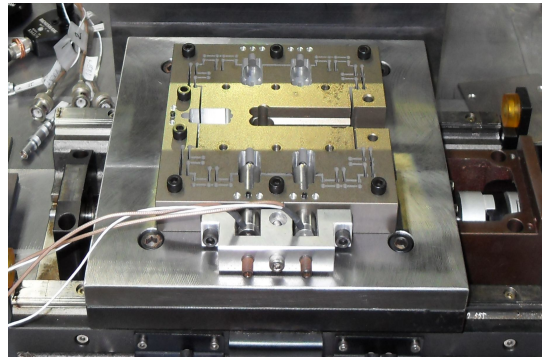
Table 5-1은 탄성힌지형의 마이크로 스테이지의 각 요소의 물성치를 나타내고 있으며, Fig.5-1은 본 논문에서 사용된 탄성 힌지형 마이크로 스테이지의 제어실험 방법에 대한 것이다.

- 1) 미세절삭툴홀더와 레이저 엔코더의 피측정물인 플렌미러와의 진직도를 다이얼게이지를 이용하여  $0\sim 3\mu m$ 로 고정하였다.
- 2) Fig.5-1의 (b)은 힌지와 Global스테이지의 결합사진이다.
- 3) PZT 앰프 및 Laser Encoder, DSP 컨트롤러(UMAC), 모터 서보앰프를 조합한 진직도 실험장치를 구성하였다.

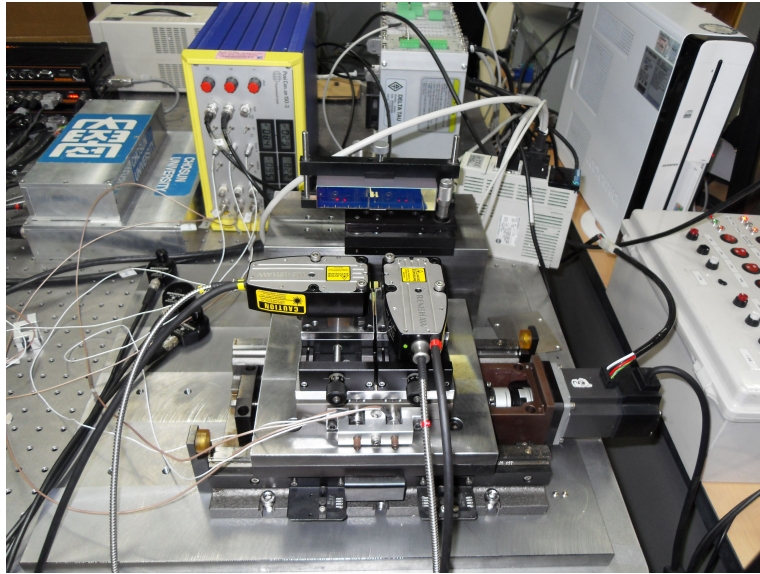




(a) Straightness control



(b) Micro stage



(c) Configuration of the experimental device

Fig.5-1 experimental device of Error Compensation Tool-holder Stage

Table 5-1 Material properties of micro stage

| Material                     |          | E<br>(kg/mm <sup>2</sup> ) | $\nu$ | $\rho$<br>(kg/mm <sup>3</sup> ) | Nodes<br>/Elements |
|------------------------------|----------|----------------------------|-------|---------------------------------|--------------------|
| Stage                        | Aluminum | 7,000                      | 0.32  | 2.70E-06                        | 3810 / 2724        |
|                              | Copper   | 9,800                      | 0.3   | 8.60E-06                        |                    |
|                              | Steel    | 19,000                     | 0.26  | 7.8 e-6                         |                    |
| AE0505D16(PZT)               |          | 4,400                      | 0.34  | 2.50E-06                        | 234 / 120          |
| Mild steel (Tool Holder zig) |          | 21,000                     | 0.26  | 7.80E-06                        | 1672 / 1740        |
| Tungsten (Tool Holder)       |          | 68,730                     | 0.22  | 1.48E-06                        | 606 / 436          |
| Diamond(Bite Tip)            |          | 114,550                    | 0.2   | 3.50E-06                        | 54 / 42            |

다음 Table 5-2은 본 논문에서 사용된 실험장치의 모델명과 사양을 나타내고 있다.

Table 5-2 Composition of experimental equipment

| ITEM                    | Model name                          | Reference column          |
|-------------------------|-------------------------------------|---------------------------|
| Piezoelectrics actuator | PI-300                              | Max. stroke 40~50 $\mu$ m |
| PZT controller          | PI-Posi 150-3-A                     | 3-Axis controller         |
| Displacement sensor     | Renishaw RLE10                      | Resolution : 10nm         |
| A/D, D/A Board          | UMAC-High<br>Performance Controller | D/A, A/D 32channel        |
| Environment compensator | Renishaw RCU10                      | Resolution : 10nm to 5nm  |

## 2 에러보상을 위한 제어프로그램 설계

압전액추에이터 처럼 아날로그 출력 값이 위치 지령의 형태가 되는 시스템이 있다. 이런 경우, 압전모터는 아날로그 위치 제어가 앰프의 내부에서 수행되도록 구성된다. 이러한 시스템들의 경우, 피드백이 없으므로 엔코더 위치는 항상 “0”으로 남아 있게 됩니다. 우선 여기서는 피드백을 사용하지 않고 제어하는 방법에 대해서 알아보도록 하겠다. fig.5-2 시스템 제어 블록에서 비례게인(Proportional Gain)만 사용 된다면, 아날로그 지령출력 값은 FE(Following Error)에 비례해서 나가게 된다. 왜냐하면, 실제 엔코더 위치 값이 항상 “0”이기 때문에 출력이 지령 위치에 비례한 아날로그 값이 되기 때문이다.<sup>(25~27)</sup>

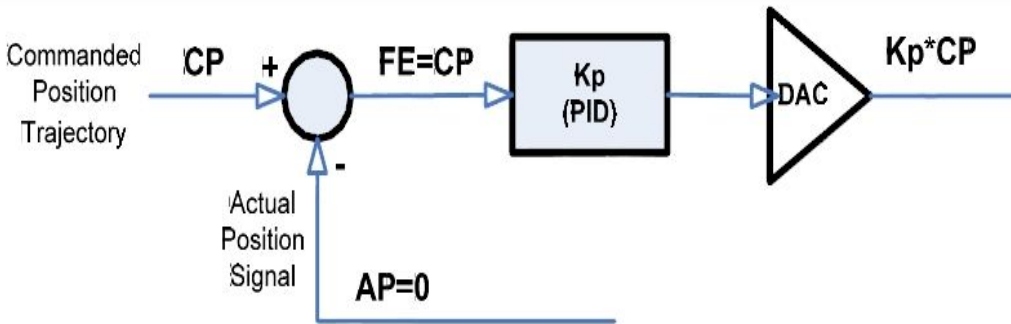


Fig.5-2 Block diagram of Piezoelectric Actuator Control

앞에서 압전모터를 제어하기 위한 설정을 살펴 보았다. 모터의 위치가 아날로그 출력 값에 비례해서 움직이므로 바로 DAC 출력 어드레스에 위치에 해당하는 아날로그 값을 써넣어도 위치 제어를 할 수 있다. 하지만, 위와 같은 방법을 사용한 이유는 모터가 움직일 때에 궤적(Trajectory)을 사용하기 위함이었다.

그러나, 이러한 방법을 사용함으로써, 위치 피드백을 받지 못하여 Closed-Loop제어를 할수 없게 되었다. 물론, 앰프 자체에서 위치 루프가 클로징(Closing)되는 경우도 있지만, 여기서는 컨트롤러에서 Full Closed-Loop를 가져가는 방법에 대해서 설명하겠다. 현재 구성할 시스템의 전체 제어 블록은 fig.5-3와 같다.

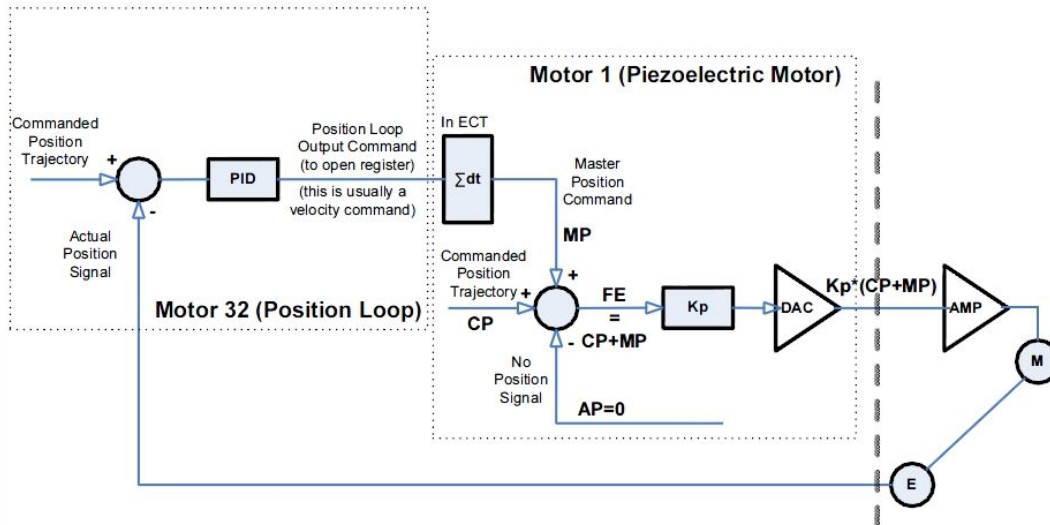


Fig.5-3 Block diagram of Micro-stage Control

위 fig.5-3에서 보는 바와 같이 실제 아날로그 출력이 나가는 모터 1번에는 피에조모터의

피드백이 들어오지 않는다. 따라서 이 위치를 제어하기 위한 방법으로 외부에 위치 루프를 다시 구성하게 되는 것이다. 이때 위치 피드백은 절대, 상대치 엔코더나 아날로그 값이어도 상관이 없어진다. 모터 1번이 구성하고 있는 루프를 인너루프(Inner Loop), 가상축 즉 레이저 디텍터 소스를 32번이 구성하고 있는 루프를 아웃터루프(Outer Loop)라고 하였을 때, 이 아웃터루프는 실제 지령을 출력할 하드웨어가 없으므로 컨트롤러의 열린루프를 사용하게 되며, 열린레지스터의 출력 값은 다시 엔코더 컨버전 테이블(Encoder Conversion Table)에서 변환되게 됩니다. 위의 절차에 따라서 실제 설정을 해 보도록 하겠다.<sup>(25~27)</sup>

### 1) Inner Loop 설정 ( Piezoelectric Motor )

i100 = 1 Motor Activate

i130 = 5465 이 비례계인 값 고정.( counts=DAC일 때, 변경불가)

i131..135 = 0

i103 = \$35C0 no position feedback  
i104 = \$35C0 no velocity feedback  
i111 = 0 fatal following error limit disable  
i124 = \$520001 Limits disable  
i169 = 32767 Maximum DAC setting ( 32767 => 10V )

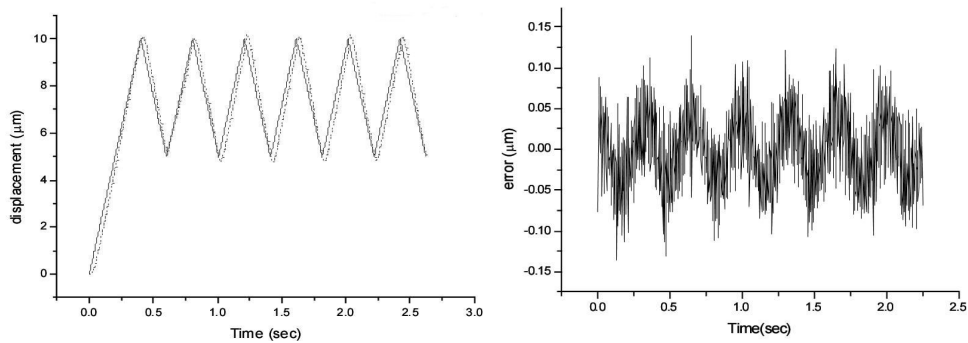
## 2) Outer Loop 설정 ( Position Loop 가상 모터 )

i3200 = 1 가상 모터 #32 Activate  
i3224 = \$520001 Limits disable ( 실제 Limit가 있을 경우에는 설정 안함)  
i3203 = \$3501 원래 1번 모터의 위치 feedback address  
i3204 = \$3501 원래 1번 모터의 속도 feedback address  
i3202 = \$10F0 DAC Output Address 설정 (Open Memory : \$10F0~\$10FF)  
i8004 = \$5010F0 Inner Loop 모터의 Master Position Address를 만들기 위해 ECT  
i8005 = \$0 Method \$5를 사용해서 “Integrated ACC-28 Style”로 변환  
i105=@i8005 Inner Loop 모터의 Master Position Address를 지정  
i3230 = 100 Outer Loop 모터의 비례게인을 설정함.(튜닝해서 적절한 값을 설정)  
i3231..3235=0 나머지 Filter값들은 모두 0으로 설정함

## 제 2절 PID제어의 추종오차보상 실험

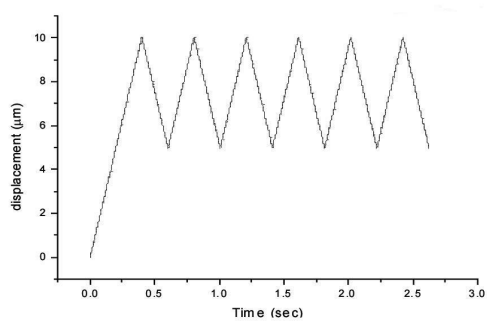
압전구동기를  $10\mu\text{m}$ ,  $5\mu\text{m}$  두 개의 동일한 반전점을 입력하고 직선적인 궤적을 추종하도록 하였다. Sampling time을 2sec로 설정한 후 실험을 수행하였다. Fig.5-4에서 보는 바와 같이 역 히스테리시스 모델을 이용한 추종오차 실험에서는 대략  $\pm 0.5\mu\text{m}$  정도의 오차를 가지고 구동하고 있음을 확인하였다.

Fig. 5-5에서는 PID 제어기를 이용한 추종오차 실험결과  $\pm 90\text{nm}$  정도의 오차를 가지고 궤적을 추종한다는 것을 알 수 있다. Fig.5-6는 역 히스테리시스 모델과 PID 제어기를 사용하였을 때 추종와 실험결과를 나타내고 있으며  $\pm 50\text{nm}$  이내에서 구동하고 있음을 확인하였으며 동일한 반전점을 가지고 궤적을 추종하였다. PID 제어에서는 궤적이 상승할 때와 하강할 때 값이 일정한 범위를 가지고 변화하였지만, 역 히스테리시스 모델을 이용한 제어기에는 오차의 변화가 없어지는 현상을 확인하였다. 또한 압전 구동기의 추종오차 폭을 감소시킬 수 있었다.

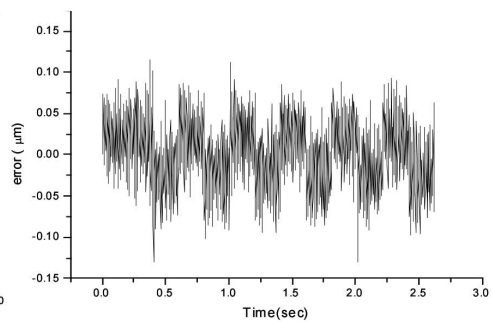


(a) Response of Inverse Hysteresis model      (b) Error of Inverse hysteresis model

Fig.5-4 Tracking error of inverse hysteresis model

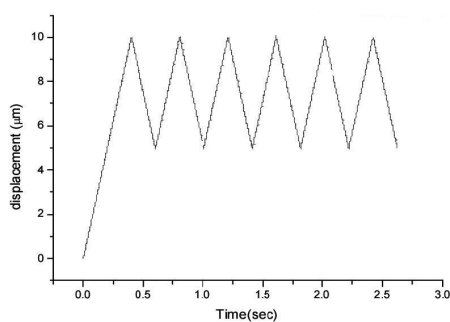


(a) Response of PID controller

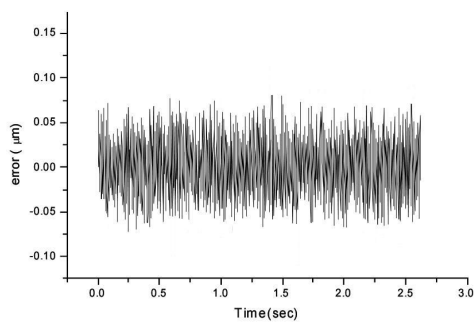


(b) Error of PID controller

Fig.5-5 Tracking error of using PID controller



(a) Response of Inverse hysteresis model&PID



(b) Error of Inverse hysteresis model&PID

Fig.5-6 Tracking error of inverse hysteresis model and PID controller

### 제 3절 초정밀 에리보상실험 결과

압전소자 구동시, 구동신호를 증폭하는 고전압 증폭기는 압전소자 구동에 직접적으로 영향을 주게 되므로, 이의 출력 특성은 중요하다. 따라서, 압전소자의 위치결정 실험에 앞서 고전압 증폭기의 출력특성을 선행연구를 통하여 확인하였다. 초정밀 위치결정실험은 먼저  $0.5\mu\text{m}$  스텝을 주어 Fig.5-7의 스텝응답을 확인하였다. 시스템 응답으로만 본다면 본 시스템의 분해능은  $\pm 10\text{nm}$ 의 반복 정밀도를 보여 주었다.

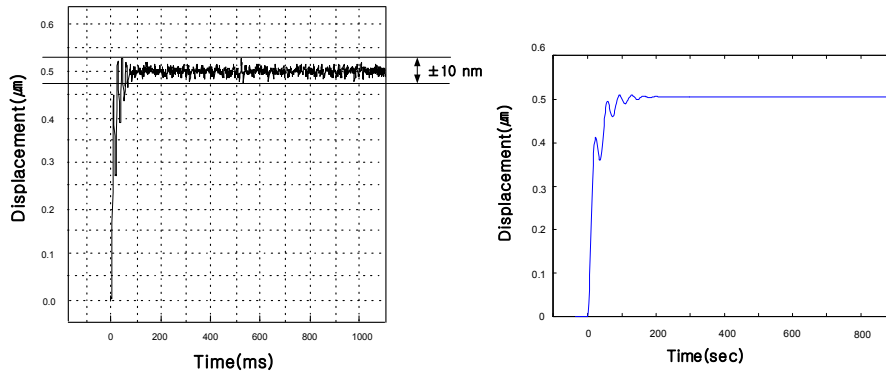


Fig.5-7 Step Response of Fine Apparatus

여기서, 더 확실한 분해능의 신뢰성을 위하여  $50\text{nm}$ 의 스텝을 1초간 유지시키며 스트로크 실험을 하였다. 그리고 PID 제어기와 역히스테리시스 제어기를 적용여부에 따른 페루프 제어의 차이점과 성능을 비교하기 위해  $1\mu\text{m}$ 의 스텝을 주어 페루프 분해능 실험을 해보았다.

그 결과 Fig.5-8과 Fig.5-9와 같이 성능이 확실하게 비교 할 수 있었다. 페루프 제어와 제어기를 적용하지 않았을 때는 압전소자의 히스테리시스와 오버슈트가 확실하게 나타남을 알 수 있었다.



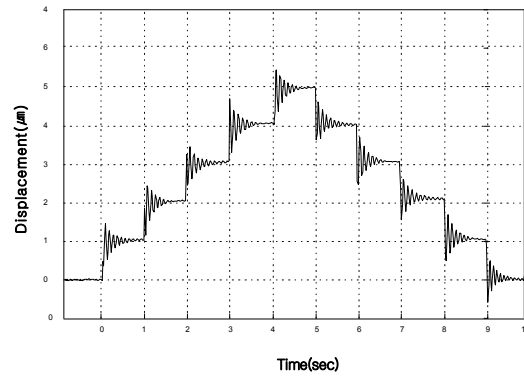


Fig.5-8 The resolution experiment of Ultra Precision Positioning System by Closed Loop(not application)

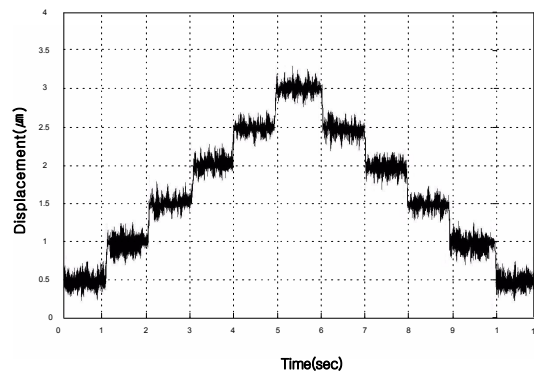


Fig.5-9 The resolution experiment of Ultra Precision Positioning System by Closed Loop

마이크로서보에 PID 제어를 적용하여 위치결정 실험을 한 결과 각각의 기구에서는 만족할만한 성능을 보여주었다. Fig.5-10과 Fig.5-11은 마이크로 서보의 분해능 실험을 한 것이다. 앞서 실험했던 Fig.5-6의 오차 실험과 비교한 결과 마이크로 서보가 에러를 약  $\pm 50\text{nm}$ 에서  $\pm 10\text{nm}$ 까지 보상하였음을 알 수 있다.

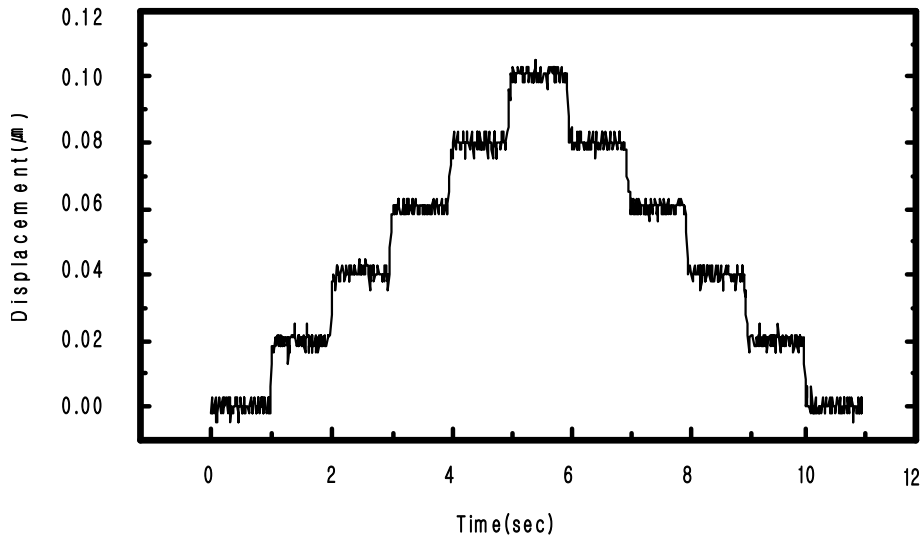


Fig.5-10 Resolution experiment of X-axis positioning control

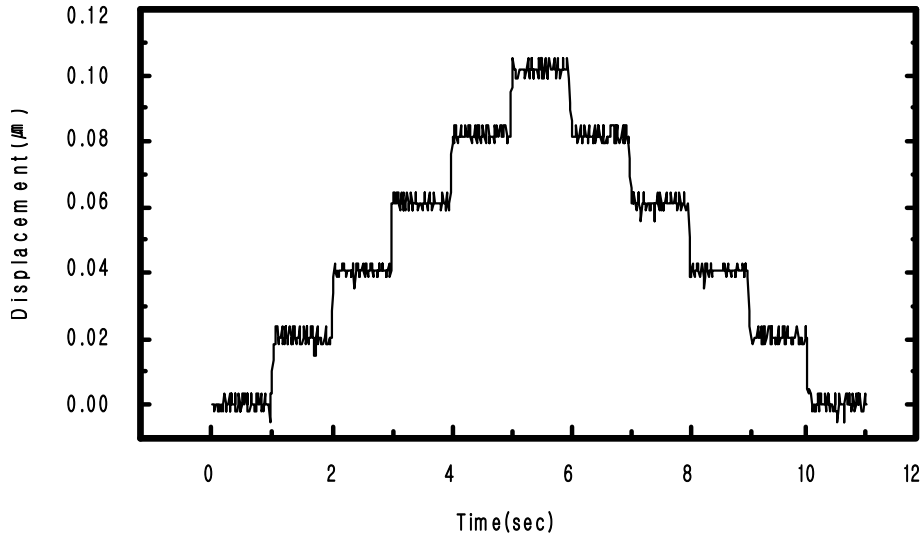


Fig.5-11 Resolution experiment of Y-axis positioning control

Fig.5-12는 X-Y 두 축의 2차원 궤적을 나타낸 것이다. 위와 같이 실험을 통하여 얻은 본 기구의 분해능을 확인한 결과  $\pm 10\text{nm}$  이하로 나타났다.

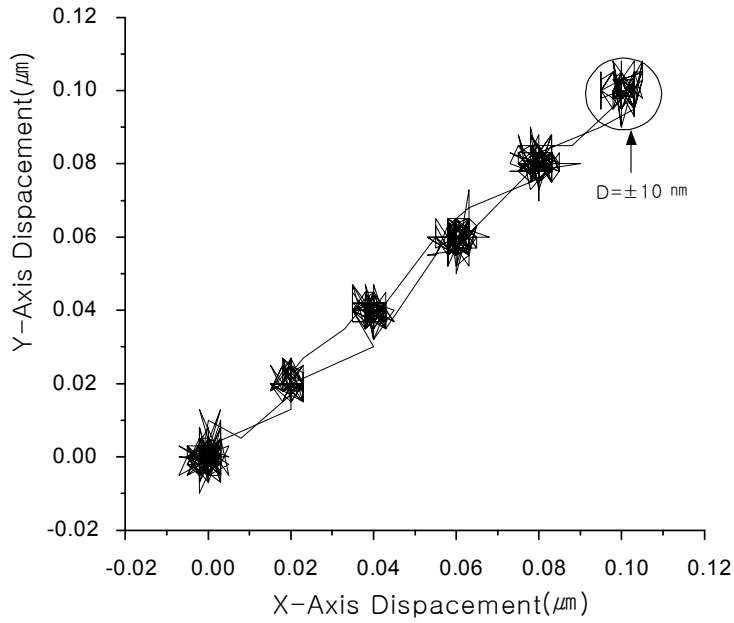


Fig.5-12 Resolution experiment of X-Y axis positioning control

위 실험에서 초정밀 위치결정기구에 사용한 압전구동기의 비선형 특성 및, 동력전달 요소, 제어기법에 대하여 고찰을 압전구동기소자와 탄성힌지 방식을 이용한 마이크로 스테이지 및 레이저 엔코더를 사용한 변위측정 센서로 마이크로 스테이지의 실시간 제어를 통하여 위치결정분해능  $\pm 10\text{nm}$ 를 구현하였다.<sup>(27)</sup>

## 제 6 장 결론

본 논문은 초정밀 위치제어의 기초를 두고 있으며 초정밀 가공을 위하여 미세절삭 툴홀더를 설계하였고 이 실험을 통해 레이저 엔코더의 10nm급 정밀도를 확인 할 수 있었으며 툴홀더 즉 마이크로 스테이지의 힌지구조 또한 SM45C를 가공할 때 발생하는 외력의 고려가 가능하다는 것을 알 수 있었으며 실시간 제어 실험을 베이스로 테이블의 이송오차 및 시스템에 외란을 미세절삭툴홀더의 스테이지의 서보모터의 이송 외란 변화값에 대응하여 에러 값을 소거 할 수 있었다. 추종오차 성분은 50nm이내에 존재하고 있음을 확인하였고, 초정밀위치결정실험을 통하여 확인한 초정밀위치결정기구의 분해능은 약  $\pm 10\text{nm}$ 임을 확인하였다. 또한 실험을 통하여 1차적인 진직도 실험의 결과의 문제점은 힌지구조의 X축과 Y축의 구조가 하나로 결합되어 서로 상관관계 및 제어를 방해하는 경향 때문에 이송 시 발생하는 롤링(Rolling)에러를 정확하게 보상하지 못하였다. 이는 X축과 Y축을 분리하여 서로 간섭하는 압축응력을 최대한 제거할 것이다.

실험을 통한 결과값은 제작되어 연구되어질 주축동기화 툴홀더의 제어의 기초 데이터로 활용되며, 시행착오를 줄이는 효과를 가져 올 것이며, 레이저 계측·제어기술 및 PZT와 결합된 힌지구조의 ECTS(Error Compensation Tool Servo)를 이용 초정밀급 스테이지를 이송 시 nm단위급 초정밀이송 및 나노가공기술을 개발하여 해외에 의존하고 있는 광산업의 핵심부품인 반사경, 비구면 렌즈, 기타 광통신매체의 정밀부품가공을 구현 할 수 있는 초정밀 가공기술을 연구개발 하는데 기초 데이터가 될 것이다.

차후 수행될 연구는 주축동기화 모듈과 시뮬레이션의 결과를 최대한 일치시켜 가공조건 및 재질의 변화에 따라 정보를 수집하여야 할 것이다. 이 실험에서 실험하지 못한 Z방향 힌지와 X, Y힌지구조를 결합한 툴홀더 즉 Error보상Tool홀더 ECTS를 개발해야 할 것이며, 그 개념은 조동스테이지 베이스부에 ECTS를 마운트 시키고 레이저 엔코더의 플랜미러를 ECTS스테이지위에 마운트 시킬 것이며 피측정물 (Plane Mirror)를 고정부로 축방향과 진직도가 되게 베드위에 고정 시킬 것이다. 이렇게 Probe가 장

착된 ECTS스테이지는 축 방향으로 긴 스트로크 이송 시 피측정물(Plane Mirror)을 계측하여 error값을 보상하여 초정밀 이송이 가능하게 될 것이다. 또한 주축과 동기화를 위하여 주축자체에서 발생하는 진동 및 열변형을 계측 할 수 있는 프루브(Probe)를 사용하여 주축의 에러값을 ECTS가 보정하는 실험을 말하며 간단하게 설명하면 x, y축 방향 에러보상 힌지구조물(ECTS)는 축이송 및 주축의 진동에러값을 레이저 엔코더를 통해 10nm급으로 보상 할 것이며 마찬가지로 z방향 에러보상 힌지구조물은 축 이송 시와 주축의 중력방향의 진동에서 발생하는 에러값을 nm급으로 보상하는 실험이 수행 될 것이다.

## 참 고 문 헌

1. Lee J. W, " 1 Nano Opened World, " 11th Science adventure, 2001.
2. Kim J. D, "A Study on the Waviness Compensation System of Ultra-precision Machining," KSMTE, Vol. 7. No. 6, pp. 132-140., 1998.
3. Kwac L. K., Kim J. Y., Cho Y. T., "FE Analysis According to Hinge Condition of Micro Stage for Micro Cutting Machine," Key Engineering Materials, Vols. 274-276, pp. 343-348., 2004.
4. Thomas J. R. Hughes, "The Finite Element Method," Prentice-Hall International Editions, pp. 90-91., 1987.
5. Shiraishi M., Uehara K., "In-Process Control of Workpiece Dimension in Turning," Annal of The CIRP, Vol. 28, pp. 333-337., 1979.
6. Lee E. S., Lee J. K., Suto T., "A Simulation System for the Establishment of Grinding Operation Standards," JSPE, Vol. 54 No. 12, pp. 81-86., 1988.
7. Park K. H., Kim J. Yl., Kwac L. K., "Simulation and Control Performance Evaluation of Ultra-precision Single Plane X-Y Stage," KSMTE, Vol. 11 No. 5, pp. 65-72., 2002.
8. Kim J. Y., Kwac L. K., Han J. H., Kim H. W., Shimokobe A., "A Study on the Optimal Design using FEM for Micro Stage," KSPE, Vol. 19 No.10, pp. 60-65., 2002.
9. Kim H. S., Kim E. J., "Feed-Forward Control of Fast Tool Servo for Real-Time Correction of Spindle Error in Diamond Turning of Flat Surfaces," International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 43 , pp. 1177-1183., 2003.
10. "Future and Emerging Technologies," European Commission, 1999.
11. Kohno T., Okazaki Y., Ozawa N., Mitui K. and Omoda M., "In-Process Measurement and a Work-piece Referenced Form Accuracy Control System(WORFAC):Concept of the Method and Preliminary Experiment," JSPE, Vol. 11 No.1, pp.9-11., 1989.
12. Peter J., "Diamond Turning of Non-rotationally Symmetric Surfaces," Ph. D Theses of North Carolina State University. 1990.
13. Simokohbe, "Control performance of Lead screw Positioning with Intelligent Control Methods", 日本 精密工學誌 vol. 64. No. 11, p.1627~1632, 1998.
14. 이창우, "이중서보를 이용한 초정밀 X-Y 테이블 평면 3자유도 위치제어" 박사학위 논문

문, 한국과학기술원, 1997, pp. 4~5.

15. Nicolae L., Jeffrey S.N. Paine, Edward O'Malley, Samuelson M., "Parabolic and Hyperbolic Flexure Hinges: Flexibility, Motion Precision And Stress Characterization Based on Compliance Closed-Form Equations," Precision Engineering Journal of the International Societies for Precision Engineering and Nanotechnology, Vol. 26, pp. 183-192., 2002.
16. Paros J. M, Weisbord L. "How to Design Flexure Hinges Machine Design," pp. 151-156., 1965.
17. Ragulskis K. M., Arutunian M. G., Kochikian A. V., Pogolian M. Z., "A Study of Fillet Type Flexure Hinges and Their Optimal Design," Vibr Eng Vol. 3, pp. 447-452., 1989.
18. Smith T. S., Badami V. G., Dale J. S., Xu Y. "Elliptical Flexure Hinges" Rev Sci Instrum, Vol. 68 No. 3, pp. 1474-1483., 1997.
19. Smith S. "Flexures: Elements of Elastic Mechanisms". New York: Gordon and Breach Science, 2000.
20. Xu W., King T. G., "Flexure Hinges for Piezo-Actuator Displacement Amplifiers: Flexibility, Accuracy and Stress Considerations," Precision Eng Vol. 19 No. 1, pp. 4-10., 1996.
21. Ryu J. W., Gweon D. G.. Error Analysis of a Flexure Hinge Mechanism Induced by Machining Imperfection," Precision Eng, Vol. 21, pp. 83-89., 1997.
22. Jung J. H "Low Temperature Sintering of PZT-Based Piezoelect Ceramics and Their Application to Multilayer Actuators"Theses of Ulsan University Ph.D, 2005
23. "RLE 10 Renishaw User Manual," 2002.
24. Jung J. H "Low Temperature Sintering of PZT-Based Piezoelectric Ceramics and Their Application to Multilayer Actuators"Theses of Ulsan University Ph.D, 2005
25. Kim. J. Y, Park. D. K, Lee. G "Research on error compensation of nano measure control Tool-holder" KSMTE Spring Conference , pp.129~130, 2010
26. Kim. J. Y, Park. D. K "The Error-compensation of Ultra Precision Stage for Improvement of degree of Transfer-accuracy" KSTLE Spring Conference, pp.185~186, 2010
27. Park. D. K, Kim. J. Y "RESEARCH ON NANO FAST SERVO STAGE ABOUT ROLLING AND TRANSFER ERROR COMPENSATION OF AXIS' '7<sup>Th</sup> International Workshop on Microfactories, pp.500~507, 2010

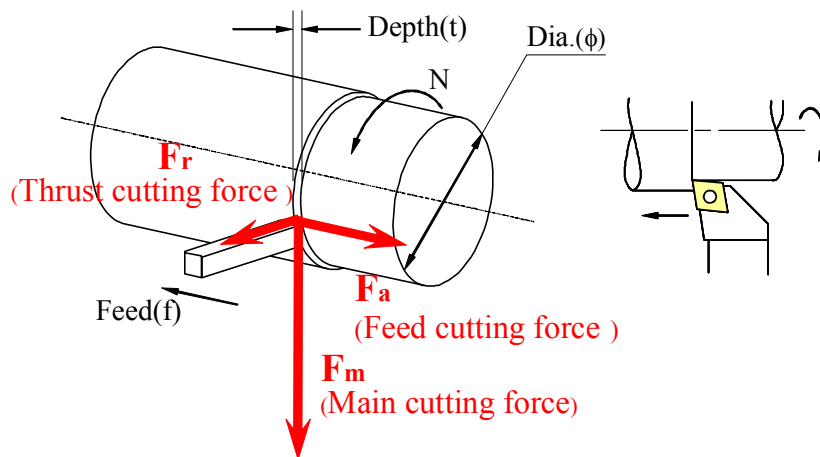
## **APPENDIX A: Cutting Force in Turning**



## Cutting Force in Turning

### ※ Effect element of Cutting Force in Turning

- Material of workpiece
- Material of cutting tool
- Geometrical shape of cutting tool
- Cutting oil



### ※ 3 Component Cutting Force

- Main Cutting Force Component ( $F_m$ )

$$F_m = K_s \times t \times F \text{ (kg)}$$

- Feed Cutting Force Component ( $F_a$ )

$$F_a = 0.2 \times F_m \text{ [kg]}$$

- Thrust Cutting Force Component ( $F_r$ )

$$F_r = 0.3 \times F_m \text{ [kg]}$$

$K_s$  : Specific cutting resistance,  $t$  : cutting depth(mm),

$f = F/N$  [mm/rev],  $F$  : feed (mm/min)

- Total Power Consumption

$$N = N_l + N_e + N_f$$

$N_l$  = Loss power,  $N_e$  = Effective cutting power,  $N_f$  = Feed power

Cutting Speed

$$V = (\pi \times D \times N) / 1,000 \quad [\text{m/min}]$$

V : cutting speed (m/min), D : Diameter of workpiece (mm), N : rpm

Feed per Revolution

$$f = \ell / N \quad [\text{mm/rev}]$$

f : feed (mm/rev),  $\ell$  : cutting depth per minute (mm/min)

. Cutting Time

$$T = L / \ell \quad [\text{min}]$$

T : Cutting time( min), L : Workpiece length (mm)

Cutting Power

$$N_e = (t \times f \times V \times K_s) / (6120 \times \eta) \quad [\text{kw}]$$

$$H_e = (N_e / 0.75) \quad [\text{Hp}]$$

t : Cutting depth (mm),  $N_e$  : Cutting power [kw],

$K_s$  : Specific cutting resistance(kg/mm<sup>2</sup>),  $H_e$  : Cutting power (Hp),

$\eta$  : Mechanical efficiency (0.7~0.8)

**※ Feed according to workpiece diameter**

| 80 rpm ( V = 150 M/min ) |       |     |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |
|--------------------------|-------|-----|---|------|---|------|---|------|---|------|---|------|
| D(Φ)                     | M/min | Ks  | t | f    | t | f    | t | f    | t | f    | t | f    |
| 600                      | 151   | 238 | 5 | 0.07 | 4 | 0.08 | 3 | 0.11 | 2 | 0.16 | 1 | 0.33 |
| 550                      | 138   | 238 | 5 | 0.07 | 4 | 0.09 | 3 | 0.12 | 2 | 0.18 | 1 | 0.35 |
| 500                      | 126   | 238 | 5 | 0.08 | 4 | 0.10 | 3 | 0.13 | 2 | 0.20 | 1 | 0.39 |
| 450                      | 113   | 238 | 5 | 0.09 | 4 | 0.11 | 3 | 0.14 | 2 | 0.22 | 1 | 0.43 |
| 400                      | 100   | 238 | 5 | 0.10 | 4 | 0.12 | 3 | 0.16 | 2 | 0.24 | 1 | 0.49 |
| 350                      | 88    | 238 | 5 | 0.11 | 4 | 0.14 | 3 | 0.19 | 2 | 0.28 | 1 | 0.56 |
| 300                      | 75    | 238 | 5 | 0.13 | 4 | 0.16 | 3 | 0.22 | 2 | 0.33 | 1 | 0.65 |
| 270                      | 68    | 238 | 5 | 0.14 | 4 | 0.18 | 3 | 0.24 | 2 | 0.36 | 1 | 0.72 |
| 240                      | 60    | 238 | 5 | 0.16 | 4 | 0.20 | 3 | 0.27 | 2 | 0.41 | 1 | 0.81 |
| 210                      | 53    | 238 | 5 | 0.19 | 4 | 0.23 | 3 | 0.31 | 2 | 0.46 | 1 | 0.93 |
| 180                      | 45    | 238 | 5 | 0.22 | 4 | 0.27 | 3 | 0.36 | 2 | 0.54 | 1 | 1.08 |
| 150                      | 38    | 238 | 5 | 0.26 | 4 | 0.33 | 3 | 0.43 | 2 | 0.65 | 1 | 1.30 |
| 120                      | 30    | 238 | 5 | 0.33 | 4 | 0.41 | 3 | 0.54 | 2 | 0.81 | 1 | 1.63 |
| 90                       | 23    | 238 | 5 | 0.43 | 4 | 0.54 | 3 | 0.72 | 2 | 1.08 | 1 | 2.17 |
| 60                       | 15    | 238 | 5 | 0.65 | 4 | 0.81 | 3 | 1.08 | 2 | 1.63 | 1 | 3.25 |
| 30                       | 8     | 238 | 5 | 1.30 | 4 | 1.63 | 3 | 2.17 | 2 | 3.25 | 1 | 6.50 |

| 160 - 600 rpm |       |     |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |
|---------------|-------|-----|---|------|---|------|---|------|---|------|---|------|
| D(Φ)          | M/min | Ks  | t | f    | t | f    | t | f    | t | f    | t | f    |
| 600           | 1130  | 238 | 5 | 0.10 | 4 | 0.13 | 3 | 0.17 | 2 | 0.25 | 1 | 0.50 |
| 550           | 1036  | 238 | 5 | 0.11 | 4 | 0.14 | 3 | 0.18 | 2 | 0.27 | 1 | 0.55 |
| 500           | 942   | 238 | 5 | 0.12 | 4 | 0.15 | 3 | 0.20 | 2 | 0.30 | 1 | 0.60 |
| 450           | 848   | 238 | 5 | 0.13 | 4 | 0.17 | 3 | 0.22 | 2 | 0.33 | 1 | 0.67 |
| 400           | 754   | 238 | 5 | 0.15 | 4 | 0.19 | 3 | 0.25 | 2 | 0.38 | 1 | 0.75 |
| 350           | 659   | 238 | 5 | 0.17 | 4 | 0.21 | 3 | 0.29 | 2 | 0.43 | 1 | 0.86 |
| 300           | 565   | 238 | 5 | 0.20 | 4 | 0.25 | 3 | 0.33 | 2 | 0.50 | 1 | 1.00 |
| 270           | 509   | 238 | 5 | 0.22 | 4 | 0.28 | 3 | 0.37 | 2 | 0.56 | 1 | 1.11 |
| 240           | 452   | 238 | 5 | 0.25 | 4 | 0.31 | 3 | 0.42 | 2 | 0.63 | 1 | 1.25 |
| 210           | 396   | 238 | 5 | 0.29 | 4 | 0.36 | 3 | 0.48 | 2 | 0.71 | 1 | 1.43 |
| 180           | 339   | 238 | 5 | 0.33 | 4 | 0.42 | 3 | 0.56 | 2 | 0.83 | 1 | 1.67 |
| 150           | 283   | 238 | 5 | 0.40 | 4 | 0.50 | 3 | 0.67 | 2 | 1.00 | 1 | 2.00 |
| 120           | 226   | 238 | 5 | 0.50 | 4 | 0.63 | 3 | 0.83 | 2 | 1.25 | 1 | 2.50 |
| 90            | 170   | 238 | 5 | 0.67 | 4 | 0.83 | 3 | 1.11 | 2 | 1.67 | 1 | 3.33 |
| 60            | 113   | 238 | 5 | 1.00 | 4 | 1.25 | 3 | 1.67 | 2 | 2.50 | 1 | 5.00 |
| 30            | 57    | 238 | 5 | 2.00 | 4 | 2.50 | 3 | 3.33 | 2 | 5.00 | 1 | 10.0 |

| 1500 rpm |       |     |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |
|----------|-------|-----|---|------|---|------|---|------|---|------|---|------|
| D(Φ)     | M/min | Ks  | t | f    | t | f    | t | f    | t | f    | t | f    |
| 600      | 2826  | 238 | 5 | 0.03 | 4 | 0.04 | 3 | 0.05 | 2 | 0.08 | 1 | 0.15 |
| 550      | 2591  | 238 | 5 | 0.03 | 4 | 0.04 | 3 | 0.05 | 2 | 0.08 | 1 | 0.16 |
| 500      | 2355  | 238 | 5 | 0.04 | 4 | 0.05 | 3 | 0.06 | 2 | 0.09 | 1 | 0.18 |
| 450      | 2120  | 238 | 5 | 0.04 | 4 | 0.05 | 3 | 0.07 | 2 | 0.10 | 1 | 0.20 |
| 400      | 1884  | 238 | 5 | 0.05 | 4 | 0.06 | 3 | 0.08 | 2 | 0.11 | 1 | 0.23 |
| 350      | 1649  | 238 | 5 | 0.05 | 4 | 0.06 | 3 | 0.09 | 2 | 0.13 | 1 | 0.26 |
| 300      | 1413  | 238 | 5 | 0.06 | 4 | 0.08 | 3 | 0.10 | 2 | 0.15 | 1 | 0.30 |
| 270      | 1272  | 238 | 5 | 0.07 | 4 | 0.08 | 3 | 0.11 | 2 | 0.17 | 1 | 0.33 |
| 240      | 1130  | 238 | 5 | 0.08 | 4 | 0.09 | 3 | 0.13 | 2 | 0.19 | 1 | 0.38 |
| 210      | 989   | 238 | 5 | 0.09 | 4 | 0.11 | 3 | 0.14 | 2 | 0.21 | 1 | 0.43 |
| 180      | 848   | 238 | 5 | 0.10 | 4 | 0.13 | 3 | 0.17 | 2 | 0.25 | 1 | 0.50 |
| 150      | 707   | 238 | 5 | 0.12 | 4 | 0.15 | 3 | 0.20 | 2 | 0.30 | 1 | 0.60 |
| 120      | 565   | 238 | 5 | 0.15 | 4 | 0.19 | 3 | 0.25 | 2 | 0.38 | 1 | 0.75 |
| 90       | 424   | 238 | 5 | 0.20 | 4 | 0.25 | 3 | 0.33 | 2 | 0.50 | 1 | 1.00 |
| 60       | 283   | 238 | 5 | 0.30 | 4 | 0.38 | 3 | 0.50 | 2 | 0.75 | 1 | 1.50 |
| 30       | 141   | 238 | 5 | 0.60 | 4 | 0.75 | 3 | 1.00 | 2 | 1.50 | 1 | 3.00 |

| 3000 rpm |       |     |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |
|----------|-------|-----|---|------|---|------|---|------|---|------|---|------|
| D(Φ)     | M/min | Ks  | t | f    | t | f    | t | f    | t | f    | t | f    |
| 600      | 5652  | 238 | 5 | 0.01 | 4 | 0.02 | 3 | 0.02 | 2 | 0.03 | 1 | 0.07 |
| 550      | 5181  | 238 | 5 | 0.01 | 4 | 0.02 | 3 | 0.02 | 2 | 0.04 | 1 | 0.07 |
| 500      | 4710  | 238 | 5 | 0.02 | 4 | 0.02 | 3 | 0.03 | 2 | 0.04 | 1 | 0.08 |
| 450      | 4239  | 238 | 5 | 0.02 | 4 | 0.02 | 3 | 0.03 | 2 | 0.05 | 1 | 0.09 |
| 400      | 3768  | 238 | 5 | 0.02 | 4 | 0.03 | 3 | 0.03 | 2 | 0.05 | 1 | 0.10 |
| 350      | 3297  | 238 | 5 | 0.02 | 4 | 0.03 | 3 | 0.04 | 2 | 0.06 | 1 | 0.12 |
| 300      | 2826  | 238 | 5 | 0.03 | 4 | 0.03 | 3 | 0.05 | 2 | 0.07 | 1 | 0.14 |
| 270      | 2543  | 238 | 5 | 0.03 | 4 | 0.04 | 3 | 0.05 | 2 | 0.08 | 1 | 0.15 |
| 240      | 2261  | 238 | 5 | 0.03 | 4 | 0.04 | 3 | 0.06 | 2 | 0.09 | 1 | 0.17 |
| 210      | 1978  | 238 | 5 | 0.04 | 4 | 0.05 | 3 | 0.06 | 2 | 0.10 | 1 | 0.19 |
| 180      | 1696  | 238 | 5 | 0.05 | 4 | 0.06 | 3 | 0.08 | 2 | 0.11 | 1 | 0.23 |
| 150      | 1413  | 238 | 5 | 0.05 | 4 | 0.07 | 3 | 0.09 | 2 | 0.14 | 1 | 0.27 |
| 120      | 1130  | 238 | 5 | 0.07 | 4 | 0.09 | 3 | 0.11 | 2 | 0.17 | 1 | 0.34 |
| 90       | 848   | 238 | 5 | 0.09 | 4 | 0.11 | 3 | 0.15 | 2 | 0.23 | 1 | 0.45 |
| 60       | 565   | 238 | 5 | 0.14 | 4 | 0.17 | 3 | 0.23 | 2 | 0.34 | 1 | 0.68 |
| 30       | 283   | 238 | 5 | 0.27 | 4 | 0.34 | 3 | 0.45 | 2 | 0.68 | 1 | 1.36 |

※ Cutting Torque (SM45C)

| No.  | D   | V   | N    | T ( Kg.m ) Depth = 1.0 mm |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|------|-----|-----|------|---------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|      |     |     |      | 7.1                       | 14.3 | 21.4 | 28.6 | 35.7 | 42.8 | 50.0 | 57.1 | 64.3 | 71.4 |
| 1    | 600 | 150 | 80   | 7.1                       | 14.3 | 21.4 | 28.6 | 35.7 | 42.8 | 50.0 | 57.1 | 64.3 | 71.4 |
| 2    | 550 | 150 | 87   | 6.5                       | 13.1 | 19.6 | 26.2 | 32.7 | 39.3 | 45.8 | 52.4 | 58.9 | 65.5 |
| 3    | 500 | 150 | 95   | 6.0                       | 11.9 | 17.9 | 23.8 | 29.8 | 35.7 | 41.7 | 47.6 | 53.6 | 59.5 |
| 4    | 450 | 150 | 106  | 5.4                       | 10.7 | 16.1 | 21.4 | 26.8 | 32.1 | 37.5 | 42.8 | 48.2 | 53.6 |
| 5    | 400 | 150 | 119  | 4.8                       | 9.5  | 14.3 | 19.0 | 23.8 | 28.6 | 33.3 | 38.1 | 42.8 | 47.6 |
| 6    | 350 | 150 | 136  | 4.2                       | 8.3  | 12.5 | 16.7 | 20.8 | 25.0 | 29.2 | 33.3 | 37.5 | 41.7 |
| 7    | 300 | 150 | 159  | 3.6                       | 7.1  | 10.7 | 14.3 | 17.9 | 21.4 | 25.0 | 28.6 | 32.1 | 35.7 |
| 8    | 250 | 150 | 191  | 3.0                       | 6.0  | 8.9  | 11.9 | 14.9 | 17.9 | 20.8 | 23.8 | 26.8 | 29.8 |
| 9    | 200 | 150 | 239  | 2.4                       | 4.8  | 7.1  | 9.5  | 11.9 | 14.3 | 16.7 | 19.0 | 21.4 | 23.8 |
| 10   | 150 | 150 | 318  | 1.8                       | 3.6  | 5.4  | 7.1  | 8.9  | 10.7 | 12.5 | 14.3 | 16.1 | 17.9 |
| 11   | 100 | 150 | 477  | 1.2                       | 2.4  | 3.6  | 4.8  | 6.0  | 7.1  | 8.3  | 9.5  | 10.7 | 11.9 |
| 12   | 50  | 150 | 955  | 0.6                       | 1.2  | 1.8  | 2.4  | 3.0  | 3.6  | 4.2  | 4.8  | 5.4  | 6.0  |
| 13   | 16  | 150 | 2984 | 0.2                       | 0.4  | 0.6  | 0.8  | 1.0  | 1.1  | 1.3  | 1.5  | 1.7  | 1.9  |
| Feed |     |     | 1.0  | 0.1                       | 0.2  | 0.3  | 0.4  | 0.5  | 0.6  | 0.7  | 0.8  | 0.9  | 1.0  |
| Area |     |     |      | 0.1                       | 0.2  | 0.3  | 0.4  | 0.5  | 0.6  | 0.7  | 0.8  | 0.9  | 1.0  |

| No.  | D   | V   | N    | T ( Kg.m ) Depth = 2.0 mm |      |      |      |      |      |       |       |       |       |
|------|-----|-----|------|---------------------------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|
|      |     |     |      | 14.3                      | 28.6 | 42.8 | 57.1 | 71.4 | 85.7 | 100.0 | 114.2 | 128.5 | 142.8 |
| 1    | 600 | 150 | 80   | 14.3                      | 28.6 | 42.8 | 57.1 | 71.4 | 85.7 | 100.0 | 114.2 | 128.5 | 142.8 |
| 2    | 550 | 150 | 87   | 13.1                      | 26.2 | 39.3 | 52.4 | 65.5 | 78.5 | 91.6  | 104.7 | 117.8 | 130.9 |
| 3    | 500 | 150 | 95   | 11.9                      | 23.8 | 35.7 | 47.6 | 59.5 | 71.4 | 83.3  | 95.2  | 107.1 | 119.0 |
| 4    | 450 | 150 | 106  | 10.7                      | 21.4 | 32.1 | 42.8 | 53.6 | 64.3 | 75.0  | 85.7  | 96.4  | 107.1 |
| 5    | 400 | 150 | 119  | 9.5                       | 19.0 | 28.6 | 38.1 | 47.6 | 57.1 | 66.6  | 76.2  | 85.7  | 95.2  |
| 6    | 350 | 150 | 136  | 8.3                       | 16.7 | 25.0 | 33.3 | 41.7 | 50.0 | 58.3  | 66.6  | 75.0  | 83.3  |
| 7    | 300 | 150 | 159  | 7.1                       | 14.3 | 21.4 | 28.6 | 35.7 | 42.8 | 50.0  | 57.1  | 64.3  | 71.4  |
| 8    | 250 | 150 | 191  | 6.0                       | 11.9 | 17.9 | 23.8 | 29.8 | 35.7 | 41.7  | 47.6  | 53.6  | 59.5  |
| 9    | 200 | 150 | 239  | 4.8                       | 9.5  | 14.3 | 19.0 | 23.8 | 28.6 | 33.3  | 38.1  | 42.8  | 47.6  |
| 10   | 150 | 150 | 318  | 3.6                       | 7.1  | 10.7 | 14.3 | 17.9 | 21.4 | 25.0  | 28.6  | 32.1  | 35.7  |
| 11   | 100 | 150 | 477  | 2.4                       | 4.8  | 7.1  | 9.5  | 11.9 | 14.3 | 16.7  | 19.0  | 21.4  | 23.8  |
| 12   | 50  | 150 | 955  | 1.2                       | 2.4  | 3.6  | 4.8  | 6.0  | 7.1  | 8.3   | 9.5   | 10.7  | 11.9  |
| 13   | 16  | 150 | 2984 | 0.4                       | 0.8  | 1.1  | 1.5  | 1.9  | 2.3  | 2.7   | 3.0   | 3.4   | 3.8   |
| Feed |     |     | 2.0  | 0.1                       | 0.2  | 0.3  | 0.4  | 0.5  | 0.6  | 0.7   | 0.8   | 0.9   | 1.0   |
| Area |     |     |      | 0.2                       | 0.4  | 0.6  | 0.8  | 1.0  | 1.2  | 1.4   | 1.6   | 1.8   | 2.0   |

## 감사의 글

석사 입학한지 벌써 2년이란 시간이 지난 지금 되돌아보면 조금 더 노력했더라면 하는 아쉬운 생각이 많습니다. 학위과정 동안 저 혼자서는 감당할 수 없던 많은 일들을 아낌없는 지도와 조언으로 해결 할 수 있도록 보살피 주신 존경하는 김제열 교수님께 가장 먼저 감사드리며, 이 논문을 쓸 수 있도록 도와주신 곽이구 교수님께도 감사드립니다. 그리고 논문심사 기간 동안 지도해주신 심제기 교수님, 황석승 교수님께 감사드리며, 언제나 따뜻한 마음으로 대해주신 김영석 교수님, 오윤권 교수님, 이동기 교수님, 유영태 교수님께 감사드립니다.

제가 이 자리에 서있게 해주신 우리 사랑하는 부모님 못난 아들 뒤에서 챙겨 주시고 아껴주시고 사랑해주신 마음깊이 간직 하며 앞으로 조금씩 보답해 드리도록 노력 하겠습니다.

또한 나노계측메카트로닉스실험실에서 대학원 생활을 하면서 어려운 일이 생기면 항상 도와주시고 리드해 주셨던 송경석 박사님과 최승현, 최진호, 양용하 선배님들과 이진, 나선영, 김성현 후배님들께도 이 글을 빌어 감사하다는 말씀전하고 싶습니다. 앞으로도 실험실 선후배님들의 앞길에 무궁한 영광이 있기를 기원하면서 이글을 마무리 하겠습니다.

## 저작물 이용 허락서

|          |  |     |          |     |    |
|----------|--|-----|----------|-----|----|
| 학 과      | 첨단부품소재공학과  | 학 번 | 20097302 | 과 정 | 석사 |
| 성 명      | 한글: 박 대 광    한문 : 朴 大 光    영문 : Park, Dae-Kwang  |     |          |     |    |
| 주 소      | 광주광역시 남구 칠석동 185-1번지   |     |          |     |    |
| 연락처      | E-MAIL : damecom@naver.com   |     |          |     |    |
| 논문제<br>목 | 이송정밀도 향상을 위한 나노제어스테이지의 에러보상에 관한 연구   |     |          |     |    |
|          | Research for transfer precision improvement about error compensation of nano control stage |     |          |     |    |

본인이 저작한 위의 저작물에 대하여 다음과 같은 조건 아래 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 편집과 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 출판을 허락을 하였을 경우에는 1개월 이내에 대학에 이를 통보함
6. 조선대학교는 저작물 이용의 허락 이후 해당 저작물로 인하여 발생하는 타인에 의한 권리 침해에 대하여 일체의 법적 책임을 지지 않음
7. 소속 대학의 협정기관에 저작물의 제공 및 인터넷 등 정보통신망을 이용한 저작물의 전송·출력을 허락함

동의여부 : 동의( ○ )    반대(       )

2011 년 2월

저작자 : 박 대 광    (인)

**조선대학교 총장 귀하**