

진공용 3자유도 얼라인먼트 스테이지 개발

한상진*, 박종호**, 박희재***

Development of Three D.O.F Alignment Stage for Vacuum Environment

Sang-Jin Han*, Jong-Ho Park** and Heui-Jae Pahk***

ABSTRACT

Alignment systems are frequently used under various semiconductor manufacturing environment. Particularly in PDP(Plasma Display Panel) manufacturing process, the alignment system is applied to the combining and sealing processes of the upper and lower glass panels of PDP, where these processes are performed in the vacuum chamber of high vacuum and high temperature. In this paper, the $XY\theta$ -alignment stage is developed to align PDP panels. Because of high vacuum and high temperature environment, the alignment chamber has been designed to isolate the inner part of the alignment chamber from the outer environment of high vacuum and high temperature, in which every part of the alignment stage is inserted. As it is difficult to attach feedback sensors to the alignment stage in the alignment chamber, the alignment stage is implemented with the open loop algorithm, where the parallel link structure has been designed using step-motors and ball-screws for structural simplicity. The kinematic analysis is performed to drive the parallel link structure, based on the experiments of actuation-compensation of the alignment stage. For the error compensation, the hyperpatch model has been used to model the errors. From the experiments, the positional accuracy of the alignment stage can be improved significantly.

Key Words : Alignment stage(얼라인먼트 스테이지), 3 D.O.F(3자유도), PDP panel(PDP 패널), Vacuum(진공), Parallel link structure(병렬 링크구조), Kinematic analysis(기구학적 해석), Accuracy(위치정밀도), Repeatability(반복정밀도), Positional error(위치오차), Angular error(각도오차), Hyperpatch(하이퍼패치)

기호설명

{f} = fixed coordinate system
{m} = moving coordinate system

fP_i = positional vector(1x3) of i th Lucas
pivot($P_1 \sim P_6$) w.r.t {f}

mP_i = positional vector(1x3) of i th Lucas

2001년 1월 19일 접수
* 서울대학교 대학원 기계항공공학부
** 서울대학교 대학원 기계항공공학부
*** 서울대학교 공과대학 기계항공공학부 교수

pivot($P_1 \sim P_6$) w.r.t {m}
 $x_c, y_c, \theta_z = X, Y, \theta$ Positional variables of
 center of stage respectively
 $a = A$ half of length between Axis₁ and Axis₂
 ($a=180\text{mm}$)
 $l =$ Length of Link i ($l=100\text{mm}, i=1,2,3$)
 $k_i =$ Moving distance of P_i on Axis i ($i=1,2,3$)

1. 서론

얼라인먼트 시스템(alignment system)은 다자유도 공간상에서 물체의 정확한 위치를 잡아주는 역할을 수행하며, 얼라인먼트가 적용되는 공정에 따라서 3자유도 내지는 6자유도의 다자유도 공간에서 동시에 위치 제어가 수행된다. 또한 얼라인먼트 시스템은 다양한 환경 하에서 사용되는데, 특히 PDP(Plasma Display Panel) 생산공정에서는 PDP의 상·하 유리 기판의 조립 및 봉착 과정에 얼라인먼트 시스템이 적용되게 된다¹¹. 현재 각 PDP 생산업체에서는 이 조립·봉착 과정을 배기 및 방전가스주입 공정과 연계시켜 생산하려는 노력이 이루어지고 있으며, 이를 이루기 위해서는 450℃ 정도의 고온과 10⁻⁷Torr 정도의 고진공 환경에서의 정밀 얼라인먼트 기술이 필수적이다. 따라서, 본 논문에서는 PDP 생산공정에 적용할 수 있는 진공용 얼라인먼트 시스템에 적용할 3자유도의 XYθ스테이지 개발에 관한 것이다.

정밀한 얼라인먼트를 수행하는 스테이지의 성능의 관점에서 볼 때, 높은 사양의 스테이지에 요구되는 성능은 큰 동작구간과 높은 정밀도이다. 이 두 가지 목표에 대한 해결책으로 현재는 수 백 mm의 큰 동작구간을 실현하기 위한 리니어 모터나 DC 서보 모터 등을 이용한 글로벌 서보(global servo)와 서브 마이크론의 높은 정밀도를 구현하기 위해 압전소자 구동기(piezo actuator) 등을 이용한 마이크로 서보(micro servo)를 동시에 이용하여 되먹임 제어(feedback control)를 하고 있다^{12,13}. 그러나, 본 연구의 대상이 되는 작업환경은 고진공 및 고온의 진공 챔버 내부이므로, 스테이지를 외부의 작업환경과 완전히 격리하기 위한 얼라인먼트 챔버(alignment chamber for vacuum environment)를 적용하여 그 안에 스테이지를 장착

해야하고, 얼라인먼트의 대상이 되는 유리기판 및 유리기판을 잡아주는 프레임(frame)이 스테이지에 외부의 하중으로 작용하게 되기 때문에, 가급적 스테이지의 구조를 간단하게 설계하여, 스테이지의 강성을 높여야 충분한 정밀도를 얻을 수 있다. 본 연구개발에서 목표로 하는 얼라인먼트 위치 분해능은 ± 5μm이며, 최대 구동량은 ± 5mm의 수준이므로 이를 구현하기 위해 스텝모터(step motor)와 볼스크류(ball screw)를 채택하여 병렬링크(parallel link)구조의 스테이지를 제작하였다^{14,15}. 병렬링크 구조를 구동하기 위해 정기구학 및 역기구학적 해석을 수행하였고^{16,17,18,19}, 최종적으로 제작된 스테이지를 이용해 구동실험 및 보정실험을 수행하였다. 보정실험을 위한 구동오차의 모델링은 3차원의 오차맵에 근거한 하이퍼패치(hyperpatch) 모델을 적용하였다¹⁰. 구동 및 보정실험을 시행한 결과 진공용 3자유도 얼라인먼트 스테이지의 위치정밀도를 크게 향상시킬 수 있었다^{11,12}.

2. 진공용 3자유도 얼라인먼트 스테이지 설계 및 제작

제작된 얼라인먼트 스테이지의 개념을 Fig. 1을 통해 간단히 나타내었다. 얼라인먼트 챔버를 구현하여, 배기 및 봉착 공정이 진행되는 진공체임버의 고진공·고온의 환경으로부터 얼라인먼트 스테이지 부분을 격리하여, 얼라인먼트 스테이지 기구부 메카니즘의 작업성을 확보하고, 또한 볼스크류, 모터, 베어링등 얼라인먼트 스테이지의 기구부 부속 등에서 나오는 오염원에 의해 진공 체임버 내부의 진공도가 떨어지는 것을 방지하고자 하는 개념이다.

2.1 구동부

얼라인먼트 챔버라는 제한된 공간 내에서 원하는 동작을 구현시키기 위해서 병렬형의 3자유도 링크구조를 구상하였고, 이를 위해서 한 평면상에서 3개의 축을 모두 배치하였다. 일반적인 X-YY 혹은 XX-Y형의 스테이지들은 X방향의 스테이지와 Y방향의 스테이지로 구성되는 2단 구조이므로, 스테이지 전체의 높이가 높아지고, 높은 높이 및 다단 구조 때문에 스테이지의 강성이 낮다는

단점이 있다. 이에 비해 본 연구에서 제작된 스테이지는 한 평면상에 3개의 축을 모두 배치하고, 예압을 가한 스러스트 베어링을 이용해 평면에서의 동작이외의 움직임을 엄격히 제한하여, 1단의 스테이지에 의해 $XY\theta$ 의 모든 운동이 구현되므로, 다단 구조의 스테이지에서 발생할 수 있는 오차요인(혹은 낮은 강성)들을 미연에 방지하려고 하였다.

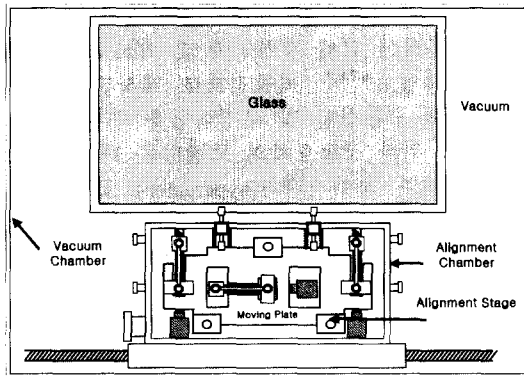


Fig. 1 The conceptual diagram of the 3 d.o.f alignment stage for vacuum environment

냉각수 및 공기에 의해서 얼라인먼트 체임버 내부의 온도상승을 낮추기는 하지만, 상온.상압의 환경과는 다소 차이가 있을 것으로 예상되기 때문에 얼라인먼트 체임버 내부에 들어가는 메카니즘을 최소화하면서도, 본 연구개발에서 목표로 하는 $\pm 5\mu\text{m}$ 의 분해능에, 최대 구동량은 $\pm 5\text{mm}$ 을 실현하기 위해서 볼스크류와 스텝모터 및 샤프트 가이드(*shaft guide*)를 이용하여 스테이지를 구동하도록 하고, 되먹임 센서없이 오픈루프(*open loop*) 구동과 마이크로 스텝핑(*micro stepping*)을 이용하였다. Table 1은 스테이지의 구동부의 사양(*specification*)이다.

2.2 기구부

Fig.2는 3자유도 얼라인먼트 스테이지 기구부의 간략도이다. 스텝모터-볼스크류에서 발생된 직선운동은 병렬형의 링크구조를 통하여 얼라인먼트 스테이지로 전달되며, Y 및 θ 방향의 운동을 구현하기 위한 링크기구인 링크1(Link₁), 링크2(Link₂)와 X방향의 운동을 구현하기 위한 링크기

구인 링크3(Link₃)을 통하여 3자유도의 평면운동을 얻을 수 있도록 하였다.

Table 1 The specifications of the actuating parts

Axis No.	1,2,3
Motor	Step motor(1.8 °/step), PK266-03A, VEXTA
Driver	Micro stepping driver, PANTHER LD (Revolution/1000 step, 1 μm resolution)
Controller	MMC-PV4, SAMSUNG
Control	Open loop
Ball-screw	MDK 0801-3(range : $\pm 5\text{mm}$), THK

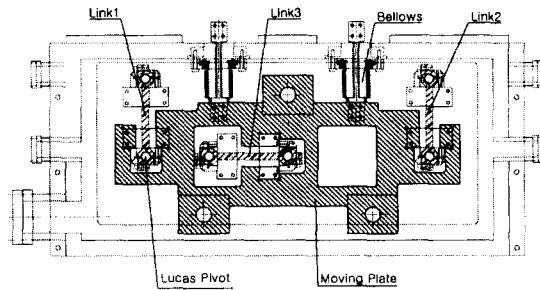


Fig. 2 The kinematic structure of the 3 d.o.f. stage

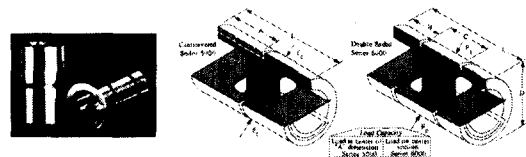


Fig. 3 Two kinds of the Lucas Free-Flex flexural pivot (출처 : Precision Engineering)

일반적으로 병렬구조에서는 수직형의 크로스 LM가이드(*cross LM guide*)를 이용하여 평면상의

3자유도 운동을 구현하지만, 본 연구에서 제작한 스테이지의 링크구조와 루카스 피벗(Lucas Free-Flex flexural pivot)을 이용하였다. 루카스 피벗은 Lucas Aerospace Power Transmission Corporation에서 생산하는 굽힘힌지(flexural hinge)의 일종으로, 부드럽고 연속적인 구동이 가능하며, 일정 하중 내에서는 수명이 영구적이다. 또한 탄성변형에 의하여 운동을 구현하므로 베어링을 사용할 경우와 비교하여 가공 및 조립공차에 의한 백래시(backlash) 등의 요인을 제거할 수 있을 뿐만 아니라 주변의 기계 요소들이 한 몸으로 구성되어 있어서 온도가 변할 경우 발생할 수 있는 기구 간섭 등을 방지할 수 있다(Fig. 3)⁴¹. 베어링과 비교할 경우 최대 허용 하중이 작은 단점은 있으나 본 연구에서 개발한 얼라인먼트 스테이지는 루카스 피벗에 큰 하중이 전달되지 않도록 하중의 방향과 스테이지의 구동방향이 분리되도록 설계하여 루카스 피벗의 장점을 살릴 수 있도록 하였다.

2.3 얼라인먼트 챔버(alignment chamber)

고진공 및 고온의 환경에서 얼라인먼트를 수행하는 정밀한 위치결정 기구를 제작하는 것은 매우 어려운 일이다. 일반적인 구동 메카니즘(mechanism)인 볼스크류와 스텝모터 그리고 샤프트 가이드에는 윤활이 필수적이므로, 고진공 및 고온의 환경에서는 윤활유의 증발에 의하여, 구동 메카니즘이 제 성능을 구현할 수 없고, 더욱이 고진공이 중요시되는 작업환경에서 이러한 구동 메카니즘들은 진공도를 떨어뜨리는 오염원으로서 작용한다. 따라서, 고진공 및 고온의 진공챔버 내부의 환경으로부터 얼라인먼트 스테이지의 구동 메카니즘을 격리하기 위해, 얼라인먼트 챔버를 제작하여 구동부를 모두 얼라인먼트 챔버 속에 위치하도록 하였다.

얼라인먼트 챔버 내부에서 발생하는 스테이지의 X, Y, θ 운동을 고진공 및 고온의 진공챔버 내부로 전달하기 위해 벨로즈(bellows)를 사용하였다.⁴⁵ 벨로즈는 Fig. 1~2에서 알 수 있듯이, 스테이지의 운동판(moving plate)에 용접이 되어 있으며, 챔버의 벽면과는 플랜지(flange)를 통해서 연결하도록 하여 진공 챔버 내부의 고진공을 유지할 수 있으며, 조립 및 분해가 가능하도록 하였다. 이와 같은 개념을 통해 진공 중에서의 조립,

봉착 및 배기 공정에 무리가 없도록 전체 진공 챔버의 진공도를 유지할 수 있도록 하였고, 전기용 피드스루(electrical-feedthrough)를 이용하여, 얼라인먼트 챔버 내·외부의 전기적 연결을 하였다.

진공챔버 내부는 최대온도가 450℃ 이상으로 상승하게 되어 복사열(radiation)이 얼라인먼트 챔버로 전달되며 또한, 얼라인먼트 챔버 내의 스텝모터 또한 열원으로 작용하게 된다. 이러한 얼라인먼트 챔버 내부의 열은 외부의 진공 환경으로 인하여 얼라인먼트 챔버 외부로의 유출이 극히 제한되므로, 스테이지의 구동 메카니즘의 정상동작을 보장하기 위해서는 강제적으로 얼라인먼트 챔버의 온도를 낮추어야 한다. 이를 위해서, 얼라인먼트 챔버에는 냉각수 및 냉각공기를 흘려넣을 수 있는 별도의 플랜지를 설치하였으며, 외부와는 호스(hose)를 통해 연결되도록 하였다.

Fig. 4는 제작된 진공용 3자유도 얼라인먼트 스테이지의 사진이다.



Fig. 4 A picture of the 3 d.o.f. stage

3. 스테이지의 기구학적 모델 작성 및 해석

3.1 좌표계의 작성

Fig. 5는 Fig. 1~2의 스테이지의 구조를 개념적으로 나타낸 것이다.

P_1, P_2, P_3 는 축1(Axis₁), 축2(Axis₂), 축3(Axis₃)위를 움직이는 스텝모터-볼스크류 위를 움직이는 루카스 피벗의 중심의 좌표이다. P_4, P_5, P_6 는 스테이지의 운동판에 고정된 루카스 피벗의 중심의 좌표이고, P_4, P_5, P_6 는 강체운동(rigid body motion)을 한다. P_6 는 P_4, P_5 의 중점이 되도록 설계하였다. 따라서, P_6 를 스테이지의 중심으로 정한다. 전체적인 스테이지의 형상과 루카스 피벗들

의 위치가 대칭적으로 배치되어 있으므로, 초기에 P_6 가 좌표계의 원점에 오도록 좌표계를 Fig. 6과 같이 설정한다. 여기서, $\{f\}$ 는 고정좌표계(fixed coordinate system)로서 스테이지의 운동을 기구학적으로 분석하는데 필요한 절대좌표계이고, $\{m\}$ 은 운동좌표계(moving coordinate system)로서 스테이지의 중심인 P_6 에 고정되어있다. 초기상태에서는 두 좌표계가 일치한다^{16,7)}.

3.2 3자유도 스테이지의 역기구학 해석

스테이지의 역기구학은 스테이지의 목표자세를 표현할 수 있는 변수가 주어졌을 때, 스테이지를 구동시키는 축1~3의 스텝모터에서 발생시켜야 하는 구동량을 계산하는 과정이다. 따라서 스테이지의 자세를 표현하는 변수인 스테이지 중심(P_6)의 위치벡터 $(x_c, y_c, 0)$ 와 각도 θ_z 가 주어졌을 때, 축1~3 위에서 움직이는 점 P_1, P_2, P_3 각각의 이동거리 k_1, k_2, k_3 의 값을 찾아야 한다. k_1, k_2, k_3 가 양(+)과 음(-)의 값을 갖는 것은 Fig. 6의 좌표계에서 각각 양의 방향, 음의 방향으로 이동하는 경우를 말한다. Fig. 7은 스테이지의 이동을 간략하게 표현한 것이고, 아랫첨자 o 는 초기상태의 점의 좌표임을 뜻한다.

완벽한 평면운동을 가정하면, Fig. 7으로부터 고정좌표계에 의한 위치벡터 ${}^fP_i(1 \times 3, i=1 \sim 6)$ 와 운동좌표계에 의한 위치벡터 ${}^mP_i(1 \times 3, i=1 \sim 6)$ 사이에는 식(1)의 관계가 성립한다. 윗첨자 f, m 은 각각 고정좌표계와 운동좌표계를 기준으로 하는 것을 의미한다.

$$\begin{bmatrix} {}^fP_i^T \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_z & -\sin \theta_z & 0 & x_c \\ \sin \theta_z & \cos \theta_z & 0 & y_c \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^mP_i^T \\ 1 \end{bmatrix} \quad (i=1 \sim 6) \quad (1)$$

따라서, Fig. 5와 Fig. 6에서의 축1~2 사이의 거리를 $2a$ 라고 하고, 링크1~3의 길이를 l 이라고 하면, 각 점의 좌표는 다음과 같이 구해진다.

$${}^fP_1 = (-a, l+k_1, 0) \quad (2)$$

$${}^fP_2 = (a, l+k_2, 0) \quad (3)$$

$${}^fP_3 = (-l+k_3, 0, 0) \quad (4)$$

$${}^fP_4 = (-a \cdot \cos \theta_z + x_c, -a \cdot \sin \theta_z + y_c, 0) \quad (5)$$

$${}^fP_5 = (a \cdot \cos \theta_z + x_c, a \cdot \sin \theta_z + y_c, 0) \quad (6)$$

$${}^fP_6 = (x_c, y_c, 0) \quad (7)$$

본 연구에서 제작한 3자유도 스테이지는 병렬 링크 구조이므로 식(2)~(7)로부터 식(8)~(10)의 구속조건이 성립한다. 여기에 볼스크류에서 구현할 수 있는 최대의 구동범위 및 스테이지의 설계치수를 고려하여 식(11)~(13)의 조건도 함께 고려하였다.

$$|{}^fP_4 - {}^fP_1|^2 = (x_c - a \cdot \cos \theta_z + a)^2 + (y_c - a \cdot \sin \theta_z - l - k_1)^2 = l^2 \quad (8)$$

$$|{}^fP_5 - {}^fP_2|^2 = (x_c + a \cdot \cos \theta_z - a)^2 + (y_c + a \cdot \sin \theta_z - l - k_2)^2 = l^2 \quad (9)$$

$$|{}^fP_6 - {}^fP_3|^2 = (x_c + l - k_3)^2 + y_c^2 = l^2 \quad (10)$$

$$-5\text{mm} \leq k_i \leq 5\text{mm} \quad (i=1,2,3) \quad (11)$$

$$l = 100\text{mm} \quad (12)$$

$$a = 180\text{mm} \quad (13)$$

식(2)~(10)으로부터 k_1, k_2, k_3 가 각각 2개씩 구해지게 된다. 여기에, 식(11)~(13)를 함께 고려하면 해는 식(14)~(16)처럼 유일하게 결정된다.

$$k_1 = y_c - a \cdot \sin \theta_z - l + (l^2 - (x_c - a \cdot \cos \theta_z + a)^2)^{1/2} \quad (14)$$

$$k_2 = y_c + a \cdot \sin \theta_z - l + (l^2 - (x_c + a \cdot \cos \theta_z - a)^2)^{1/2} \quad (15)$$

$$k_3 = x_c + l - (l^2 - y_c^2)^{1/2} \quad (16)$$

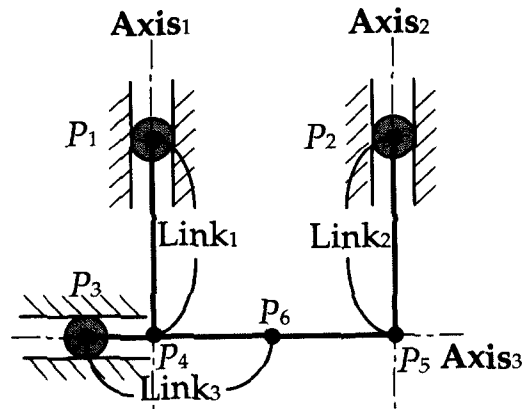


Fig. 5 The skeleton of the kinematic parts

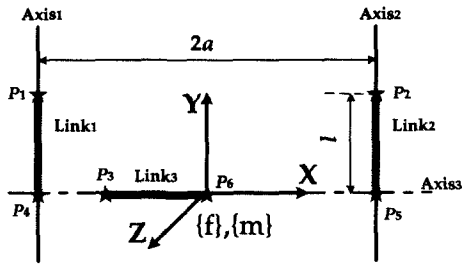


Fig. 6 The Coordinate systems of the 3 d.o.f. stage

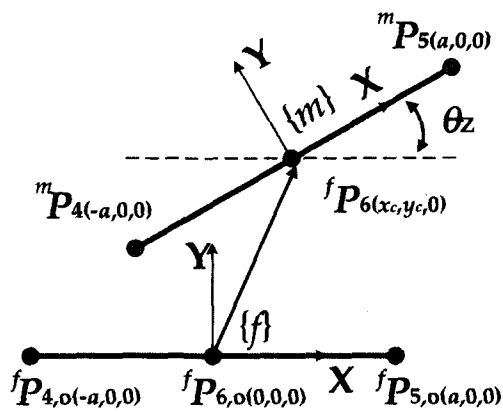


Fig. 7 A movement of the 3 d.o.f. stage

3.3 스테이지의 정기구학적 해석

3자유도 스테이지에서의 정기구학 문제는 현재의 스테이지의 자세와 축1~3 위를 움직이는 점 P1, P2, P3 의 이동거리 k1, k2, k3가 주어진 경우, 3자유도 스테이지의 최종자세인 얼라인먼트 스테이지의 중심의 X, Y좌표 xc, yc와 각도 theta_z를 계산하는 것이다. 정기구학 해석은 역기구학의 알고리즘을 검증하기 위해서 반드시 필요한 과정이다.

일반적인 기구학 문제와는 달리, 병렬 링크 구조의 경우 역기구학의 해를 구하는 것보다 정기구학의 해를 구하는 것이 어려운데, 이는 식(8)~(10)으로 주어지는 관계식이 비선형 연립방정식의 형태이기 때문이다. 이 비선형 연립방정식을 해석적으로 푸는 과정은 매우 복잡해서, 적절한 변수로의 치환 등에 의해 해를 구한다면, 결국

에는 8차의 고차방정식을 풀어야한다^[8]. 일반적으로 8차의 고차방정식을 해석적으로 구하는데는 많은 노력이 필요하기 때문에, 일반적으로는 수치적 접근을 많이 하며, 수치적으로 해석하는 경우라도 원하는 수치적 정밀도와 근의 초기 가정 값에 따라 해가 매우 민감하게 변하고 발산하기도 쉬우므로 이에 대한 각별한 주의와 철저한 검증이 요구된다.

3자유도 스테이지의 정기구학 문제를 풀기 위해서, 식(8)~(10)으로부터 식(17)~(19)의 함수들을 정의한다.

$$f_1(x_c, y_c, \theta_z) = (x_c - a \cdot \cos\theta_z + a)^2 + (y_c - a \cdot \sin\theta_z - l - k_1)^2 - l^2 = 0 \tag{17}$$

$$f_2(x_c, y_c, \theta_z) = (x_c + a \cdot \cos\theta_z - a)^2 + (y_c + a \cdot \sin\theta_z - l - k_2)^2 - l^2 = 0 \tag{18}$$

$$f_3(x_c, y_c, \theta_z) = (x_c + l - k_3)^2 + y_c^2 - l^2 = 0 \tag{19}$$

식(17)~(19)는 비선형 연립방정식이므로 축 1~3 위에서 움직이는 점 P1, P2, P3 각각의 이동거리 k1, k2, k3가 주어지면, 수치적 기법을 이용해서 스테이지의 중심의 X, Y좌표와 각도인 xc, yc, theta_z를 구한다. 본 연구에서는 Newton-Raphson Method를 이용하여 해를 구했다^[9]. Table 2는 3자유도 스테이지의 몇 가지 자세에 해당하는 역기구학의 해와 정기구학의 해를 정리해놓은 표이다. 역기구학과 정기구학의 해를 비교해보면 역기구학의 알고리즘이 유효하다는 것을 확인할 수 있다.

Table 2 Some results of Inverse & forward kinematics analysis

Case	Solutions of Inverse Kinematics	Solutions of Forward Kinematics
I	$x = 1.0000 \text{ mm}$ $y = 2.0000 \text{ mm}$ $\theta = 8.7266 \text{ mrad}$	$x = 0.9999 \text{ mm}$ $y = 2.0000 \text{ mm}$ $\theta = 8.7264 \text{ mrad}$
II	$x = 4.0000 \text{ mm}$ $y = 1.0000 \text{ mm}$ $\theta = 17.4532 \text{ mrad}$	$x = 4.0000 \text{ mm}$ $y = 0.9999 \text{ mm}$ $\theta = 17.4534 \text{ mrad}$

4. 구동 및 보정 실험

4.1 구동실험

4.1.1 측정영역

제작된 스테이지의 정밀도 측정을 위하여 Renishaw사의 레이저 간섭계(분해능:10nm)를 이용하여 성능평가를 수행하였다. 측정 실험은 X, Y 방향으로서는 $\pm 4\text{mm}$ 구간에서 1mm간격으로 실시하였으며, θ 방향으로서는 $\pm 22.222\text{mrad}$ 구간에서 5.555mrad 간격으로 실시하였다. Fig. 8은 레이저 간섭계를 장착한 스테이지의 모습이다.

X, Y, θ 방향의 구동범위에 대한 간섭을 고려하여, Fig. 9(a)-(b)와 같은 모양의 격자점에 대해서 측정을 실시하였다. Y와 θ 방향은 서로간의 구속이 심하여 Fig. 9(a)에서처럼 θ 방향의 목표위치가 결정되면, 이에 해당하는 Y방향의 구동범위가 결정된다. X와 Y방향은 서로간의 구속이 심하지 않아서, X, Y 방향의 $\pm 4\text{mm}$ 구간에서는 Fig. 9(b)에서처럼 X와 Y의 구동범위가 영향을 받지 않는다.

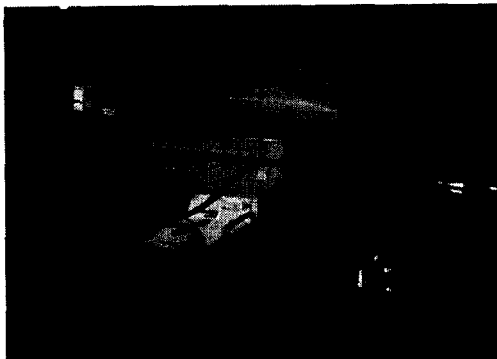


Fig. 8 The measurement experiment with the laser interferometer

4.1.2 측정방법

평면상에서 발생할 수 있는 운동오차들을 Fig. 10에 도시하였다. 평면에서의 스테이지의 운동오차를 측정하기 위해서, Fig. 10에 도시된 오차성분들 중에서 평행도(parallelism) 및 직각도(squareness)를 제외한 나머지 오차성분들을 측정하여 합성하였다. 오차의 엄격한 측정 및 보정을 위해서는 Fig. 9의 격자점인 이상적인 측정점에서

의 오차값을 측정해야 하지만, 스테이지 운동의 평행도 및 직각도와 상관되어 발생하는 측정점의 편차에 의한 오차(측정상의 오차)값은 무시하였다.

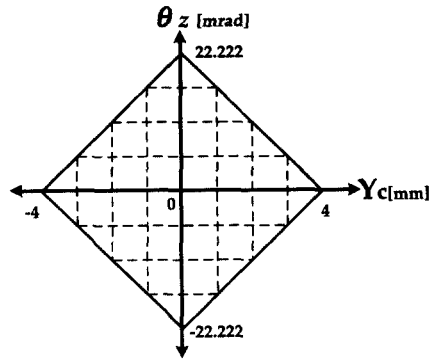


Fig. 9(a) The actuation range of the stage on the Y- θ plane

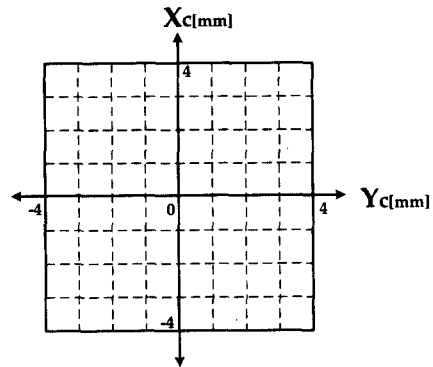


Fig. 9(b) The actuation range of the stage on the X-Y plane

스테이지 운동의 평행도 및 직각도에 의해 발생하는 측정점의 편차는 수십 μm 이내이고, 따라서, 이 때문에 발생하게 되는 측정상의 오차는 수십nm이내이므로, 평행도 및 직각도 오차 때문에 발생하는 측정상의 오차는 충분히 무시할 수 있다. 또한, 백래시 오차를 제거하기 위해 일방향 운동(unidirectional motion)으로 3회 반복하였다.

Table 3에 X, Y, θ 방향에 대한 최대 오차 및

반복정밀도(3σ)를 정리하였다. X방향의 최대오차는 $Y=-2\text{mm}$, $\theta=11.111\text{mrad}$ 일 때, 발생하였고, Y방향의 최대오차는 $X=0\text{mm}$, $\theta=0\text{mrad}$ 에서 발생하였으며, θ 방향의 최대오차는 $X=4\text{mm}$, $Y=0\text{mm}$ 인 지점에서 발생하였다. Fig. 11(a)~(c)에는 이 결과를 도시하였다.

정밀도의 측정결과 개발목표인 $\pm 5\mu\text{m}$ 범위를 넘어서나 반복정밀도(3σ)는 X, Y방향 운동은 각각 $2.654\mu\text{m}$, $2.430\mu\text{m}$ 이고, θ 방향의 경우는 0.0163mrad 이내였다. θ 방향의 반복정밀도(3σ)를 회전운동을 구현하는 축1~2에 대한 것으로 환산하면 $2.934\mu\text{m}(0.0163\text{mrad} \cdot 180\text{mm}=2.934\mu\text{m})$ 정도의 반복정밀도(3σ)에 해당하는 것으로 X, Y방향의 운동의 경우와 유사한 결과로 해석할 수 있다.

실험결과로 보면 반복정밀도가 우수하게 나오며, 이것은 지배적인 위치 오차가 계통오차임을 의미한다. 따라서 위치오차 보정 기술에 의거 계통오차 성분을 제거하여 반복정밀도 수준의 위치정밀도를 확보할 수 있다.

θ is fixed value (There is Angular Error of Origin about θ)

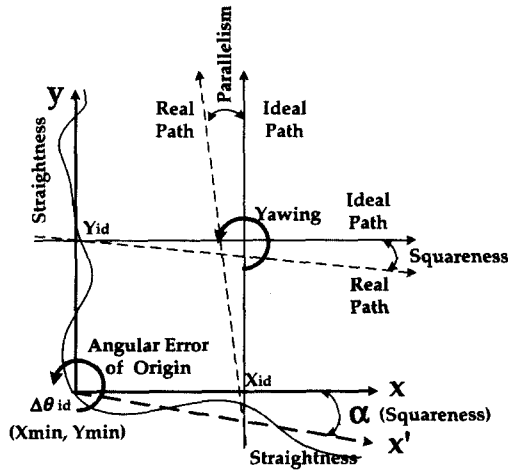


Fig. 10 The error sources which occurs in actuating experiment

4.2 오차보정 실험

4.2.1 보정점의 계산

계통오차 성분을 모델링하기 위해 측정값으로부터 얻어진 X, Y, θ 로 이루어지는 3차원의 오차맵을 이용하였다.



Fig. 11(a) The X directional error without compensation($Y=-2\text{mm}$, $\theta=11.111\text{mrad}$)

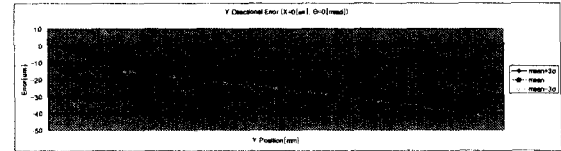


Fig. 11(b) The Y directional error without compensation($X=0\text{mm}$, $\theta=0\text{mrad}$)

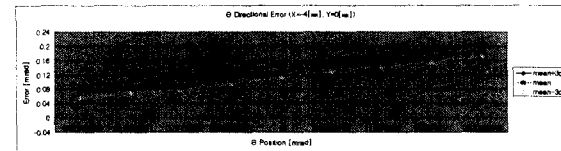


Fig. 11(c) The θ directional error without compensation($X=-4\text{mm}$, $Y=0\text{mm}$)

Table 3 A result of measurement experiment

	X-directional motion	Y-directional motion	θ -directional motion
Stroke	$\pm 4\text{mm}$	$\pm 4\text{mm}$	$\pm 22.222\text{mrad}$
Accuracy	$-24.086\mu\text{m}$	$-37.917\mu\text{m}$	0.1880mrad
Repeatability (3σ)	$2.654\mu\text{m}$	$2.430\mu\text{m}$	0.0163mrad

이상적인 측정좌표에 오차맵을 합성하여 오차에 의해 변형된 실제의 작업공간을 구성하였다. 따라서, 이상적인 측정점에서의 측정을 위해, 구동명령을 주어 스테이지를 운동시키면, 스테이지는 이상적인 측정점이 아닌, 오차에 의해 변형된 실제의 작업공간 속의 해당점에 위치하게 된다. 즉, 구동명령의 목표가 되는 점은 이상적인 작업

공간 속의 점이고, 스테이지가 실제로 위치하게 되는 점은 오차에 의해 변형된 실제의 작업공간 속의 점이 된다.

보정점을 계산하기 위해, 오차에 의해 변형된 작업공간과 이상적인 작업공간을 매개변수를 이용한 하이퍼패치 모델^[10]을 통해 사상(mapping)하였다.(Fig. 12) 오차에 의해 변형된 작업공간 상의 한 목표점에 대한 이상적인 작업공간 상의 대응점을 계산하여, 이 대응점에 해당하는 축1~3에서의 구동량을 기구학적 모델을 통해 구하였다. 작업공간 내부의 보간은 1차로 하였으며, 하이퍼패치는 각 점들의 좌표만을 경계조건으로 하였다.

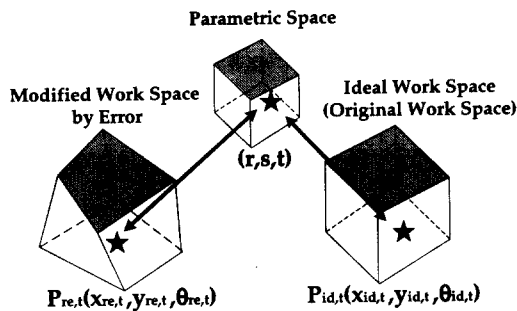


Fig. 12 A process of calculating compensated target point by hyperpatch model

4.2.2 보정실험 결과

오차보정 후의 측정결과를 Table 4에 정리하였다. 스테이지의 위치정밀도(accuracy)는 X, Y방향으로 각각 2.643 μ m, 2.450 μ m이하이고, θ 방향으로는 0.0184mrad이하로 측정되었으며, 이 때의 반복정밀도(3 σ)는 X, Y, θ 방향에 대하여 각각 2.881 μ m, 2.434 μ m, 0.0151mrad로 측정되었다. 회전운동의 위치정밀도와 반복정밀도(3 σ)를 구동축1~2에 대하여 환산하면 위치정밀도는 3.312 μ m가 되고, 반복정밀도(3 σ)는 2.718 μ m(0.0151mrad*180mm=2.718 μ m)가 되어 X, Y방향의 운동에 대한 결과와 유사한 수준이다. 이로부터, 오차보정에 의해 스테이지의 운동오차를 약 90%이상 줄여서, 위치오차를 반복정밀도(3 σ)의 수준으로 향상시켰음을 확인하였다^[11,12]. Fig. 13(a)~(c)에 X, Y, θ 방향의 운동에 대한 몇 가지의 보정 실험결과를 도시하였다.

Table 4 A result of measurement experiment with error compensation

	X directional motion	Y directional motion	θ directional motion
Stroke	± 4 mm	± 4 mm	± 22.222 mrad
Accuracy	2.643 μ m	2.450 μ m	0.0184mrad
Repeatability (3 σ)	2.881 μ m	2.434 μ m	0.0151mrad

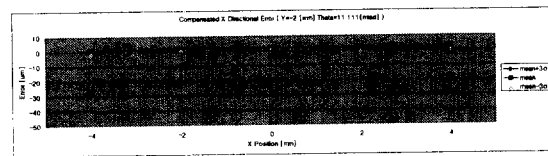


Fig. 13(a) The compensated X directional error (Y=-2mm, θ =11.111mrad)

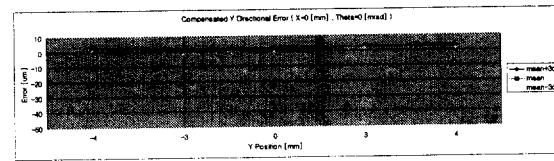


Fig. 13(b) The compensated Y directional error (X=0mm, θ =0mrad)

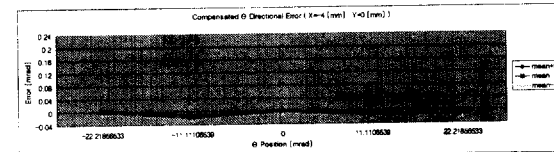


Fig. 13(c) The compensated θ directional error (X=-4mm, Y=0mm)

5. 결론

볼스크류와 스텝모터를 이용하여 3자유도 얼라인먼트 스테이지를 제작하였다. 스테이지의 구조가 간단해야 하고, 볼스크류의 직선운동으로부터 3자유도 운동이 가능하게 하기 위하여 루카스 피벗(Lucas Free-Flex flexural pivot)을 이용한 병렬 링크 구조를 적용하였다. 그리고 고진공, 고온의

환경에서 작동할 수 있도록 얼라인먼트 체임버를 구성하였다.

병렬형 링크 구조의 3자유도 스테이지를 구동하기 위해 정기구학 및 역기구학 해석을 수행하였다.

스테이지의 구동 및 보정실험을 하였으며, 하이퍼패치 모델로 모델링한 계통 오차 성분을 보정한 결과 X, Y방향은 각각 $2.643\mu\text{m}$, $2.450\mu\text{m}$ 의 위치정밀도를 얻었고, θ 방향은 0.0184mrad 의 위치정밀도를 얻어서, 반복정밀도(3σ)의 수준으로 위치정밀도가 향상되었음을 확인하였다^{[11],[12]}.

참고문헌

1. 이상윤, Plasma Display Panel 개발, 연구보고서, 과학기술처, pp. 86~89, 1986.
2. 오정석, 이창우, 이형석, 김승우 초정밀 위치결정을 위한 이중 서보 제어용 미세 구동 메카니즘, 한국정밀공학회 추계학술대회논문집, pp. 249~254, 1994.
3. 이동성, 박종호, 박희재, 이중서보제어루프를 통한 서보모터-압전구동기의 초정밀위치결정 시스템 개발, 한국정밀공학회 '97년도 추계학술대회논문집, pp. 437~441, 1997.
4. Alexander H. Slocum, Precision Machine Design, Prentice-Hall, Inc, pp. 397~400, pp. 521~538, 1992.
5. S.T. Smith and D.G. Chetwynd, Foundations of Ultraprecision Mechanism Design, Gordon and Breach Science Publishers, pp. 143~150, 1994.
6. 박종호, 박희재, 압전소자와 원형 굽힘 힌지를 이용한 초정밀 위치결정기구 개발, 대한기계학회 춘계학술대회논문집 A; 부산대학교, pp. 701~708, 1996.
7. K.M.Lee, D.K.Shah, "Kinematic Analysis of a Three Degree of Freedom In-Parallel Actuated Manipulator," IEEE Conference of Robotics and Automation, pp. 345-350, 1987.
8. 김경찬, 김수현, 광윤근, 초정밀 작업을 위한 6자유도 마이크로 스테이지의 개발, 대한기계학회논문집 A(Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A) Vol. 22, No. 2, pp. 372~379, 1998.
9. Shoichiro Nakamura, Applied Numerical Methods in C, Prentice Hall, pp. 76~80, 1995.
10. Jan, H.K., Chu, C. N. and Liu, Modeling Volumetric Errors Using Hyperpatch and Metrology Plate, International Journal of Robotics and Computer Integrated Manufacturing, Vol 9, No. 3, pp. 201-210, 1992.
11. 박희재, 구동 기술 개발, 연구보고서, 산업자원부, 과학기술부, 2000.
12. 한상진, 진공용 3자유도 얼라인먼트 스테이지의 정밀도 향상 기술 개발, 석사학위논문, 서울대학교, 2001.