

# 반도체 메모리 제작장비에 있어서의 공기압 구동장치의 응용



장 지 성

(부경대학교 제어기계공학과)

- '90. 2 부경대학교 제어기계공학과(학사)
- '94. 2 부경대학교 제어기계공학과(석사)
- '98. 3 동경공업대학 제어공학과(박사)
- '98. 4 - '99. 2(일) KYOCERA(株)
- '99. 3 - 현재 부경대학교 전임강사



강 보 식

(KIMM 산업기술연구부)

- '88. 2 부경대학교 제어기계공학과(학사)
- '90. 2 부경대학교 제어기계공학과(석사)
- '99. 3 한양대학교 정밀기계공학과(박사과정)
- '90. 4 - 현재 한국기계연구원 선임연구원



조 정 대

(KIMM 산업기술연구부)

- '94. 2 부경대학교 제어계측공학과(학사)
- '96. 2 해양대학교 제어계측공학과(석사)
- '96. 3 - 현재 한국기계연구원 연구원

## 1. 서 론

공기압 구동장치의 특징중의 하나인 압축성은 위치 및 속도를 제어하는 경우에 불리하게 작용하고, 위치 및 속도의 제어성능을 향상시키기 위해서는 공기의 압축성에 의한 압력응답의 지연과 마찰력 및 외란의 영향을 보상하는 것이 중요한 과제이다.

그 중에서도 마찰력은 공기압 구동장치의 제어성능에 영향을 끼치는 중요한 요소이고, 마찰력에 의한 저속구동시의 스틱슬립(stick-slip) 때문에 정밀한 위치제어 및 저속도의 속도제어가 용이하지 않다는 것이 알려져 있다.<sup>[1][2]</sup>

그러므로, 위치제어의 정밀성을 향상시키기 위해서는 공기압 액츄에이터(actuator) 구동부의 마찰력을 억제하는 것이 유효한 방법의 하나이다.

본 연구에서는 공기압 베어링 기구를 이용하여 구동부의 마찰력을 억제할 수 있는 액츄에이터와 위치제어장치의 기본성능을 검토하였다.

제작되어진 액츄에이터는 실린더내부의 실(seal)을 없애고 외부가압식의 베어링기구를 사용하여 구동피스톤이 액츄에이터의 본체로부터 부상되어진다. 부상한 피스톤은 비접촉의 상태로 구동되어지므로, 고체접촉이 없는 구동방식이 실현되어 피스톤이 구동될 때의 마찰력의 영향을 억제할 수 있다. 위치를 제어하는 경우에는 고속 공기압 서보 밸브로 피스톤의 위치를 제어하여 공기압 기구를 이용한 고속·고정밀도의 위치제어를 수행하였다.

또한 본 연구에서 개발한 공기압 위치제어장치를 응용하여 반도체 메모리 제작장치중의 레티클(reticle)스테이지의 구동장치를 개발하고, 기본성능을 검토하였다. 반도체 메모리는 256MDRAM의 메모리가 실용화 단계에 들어갔고 2000년대 초반에는 1GDRAM의 메모리가 실용화될 전망이다, 메모리의 고집적화에 의하여 웨이퍼(wafer)도 300mm 사이즈가 채택될 가능성이 있다. 이러한 메모리의 고집적화 및 웨이퍼의 대형화에 의하여 기존의 스텝퍼(stepper)를 이용하는 경우에는 투영렌즈를 대형화 해야하고 위치제어 시간을 단축해야하는 문제점이 있으므로, 최근에는 스텝-스캔(step & scan)방식의 메모리 제조장치<sup>[3]</sup>에 관한 연구·개발이 활발히 이루어지고 있다.

스텝-스캔(step & scan)방식의 메모리 제조장치의 개략도를 그림 1에 나타낸다. 기존의 스텝퍼와 비교하여 스텝-스캔(step & scan)방식에서는 레티클 스테이지와 웨이퍼 스테이지를 반대방향으로 동기주사하여 레티클의 패턴을 웨이퍼 상에 露光하는 것이 가장 큰 차이점이다. 스텝&스캔 방식을 채택함으로써 투영렌즈의 문제는 해결이 가능하지만, 제조단가를 절감하기 위해서는 레티클 및 웨이퍼 스테이지의 구동속도를 증가시켜야 하기 때문에 고속 구동을 위한 연구가

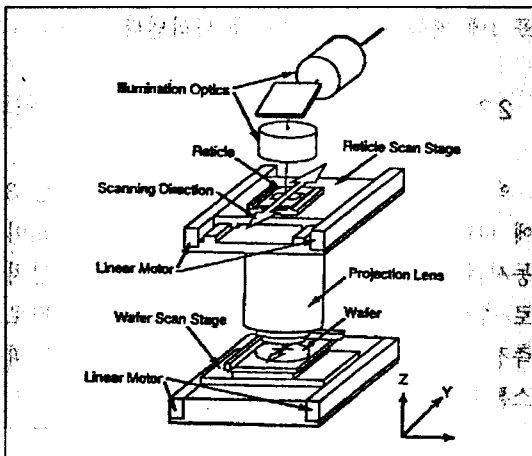


그림 1. 스텝-스캔(step&scan)방식 메모리 제조장치

활발히 수행되어지고 있다. 스테이지의 구동방식으로는 리니아 모터(Linear Motor)를 사용하는 것이 일반적이지만, 40kg정도의 부하를 3G이상으로 구동하는 경우에는 리니아 모터도 대형화해야 하므로 구동 부하의 무게가 증가하고, 특수한 냉각 장치를 사용하지 않는 경우에는 리니아 모터의 표면온도가 20~30°C 이상 상승하므로 발열에 의하여 레티클이 손상될 우려가 있다. 공기압 구동기구를 이용하는 경우에는 고속구동시에도 공기압 실린더의 표면온도가 상승하지 않으므로, 제조장치의 구조를 간단하게 하고, 레티클의 손상을 방지할 수 있다.

## 2. 액츄에이터의 구조 및 특성

### 2.1 액츄에이터의 구조

제작한 액츄에이터의 구조를 그림 2에 나타낸다. (a)는 실물의 사진을 나타내고 (b)~(d)는 (a)의 화살표 방향으로 절단한 단면도를 나타낸다. 구동피스톤은 상하의 뚜껑이 없는 상자형의 구조로 되어있고, 위로부터 보면 "II"의 형태를 하고 있다. 피스톤은 상부의 일부분이 개방되어 있는 상자형의 본체에 수납되어지고, (d)에 표시되어 있는 것처럼 본체의 개방된 부분을 통해서 부하를 적재하는 구조로 되어있다. 피스톤과 본체의 사이에는  $V_1$ ,  $V_2$ ,  $V_3$ ,  $V_4$ 의 4개의 공간이 형성되어 있고, 피스톤이 어느 위치로 이동하여도 4개의 공간과 본체의 개방된 부분이 연결되지 않도록 설계되어 있다. 또한,  $V_2$ 와  $V_4$ 는 튜브로 연결되어있기 때문에 배어링작용을 하는 공기가 자유롭게 왕래할 수 있다. 구동 피스톤의 좌우측면의 각 단면 및 상하의 각 단면에는 좁고 긴 홈이 4개씩 설치되어져 외부 가압식의 공기압 배어링기구의 구조를 취하고 있다.

본체의 중앙부로부터 배어링기구용 압력  $P_b$ 를 공급하면 공기가  $V_2$ 와  $V_4$ 로부터 피스톤의 단면에 설치되어 있는 홈으로 흘러 들어가고, 압력이

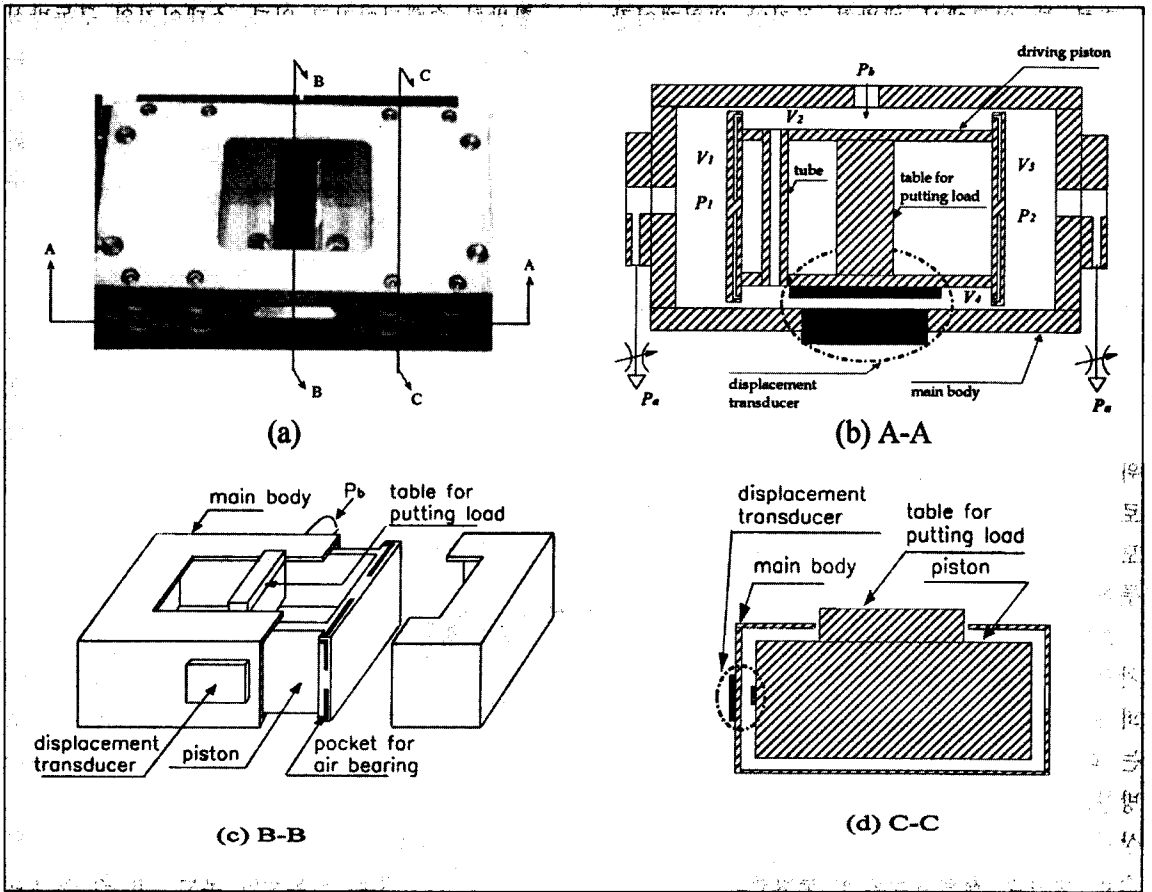


그림 2. 액츄에이터의 구조

낮은  $V_1$ ,  $V_3$ 로 흘러가면서 본체의 벽면을 미는 힘이 발생하여 피스톤이 본체의 벽면에서 분리되어서 부상한다. 이러한 베어링기구의 작용에 의하여 피스톤이 비접촉의 상태로 구동되어지고, 목표위치 부근에서 마찰력의 영향을 받지 않기 때문에 고정밀도의 위치제어가 가능하게 된다. 본체와 구동 피스톤의 측면의 간극 및 피스

톤에 설치되어 있는 홈의 깊이는  $10\mu\text{m}$ 이고, 액츄에이터의 표면가공 정밀도는  $R_{\text{max}}$ 로  $0.5\mu\text{m}$ 이다. 표 1에 액츄에이터의 치수를 나타낸다.

표 1. 액츄에이터의 치수

길 이	200 [mm]
폭	100 [mm]
높 이	50 [mm]
스트로크	50 [mm]
피스톤의 수압면적	$2.7 \times 10^3$ [mm <sup>2</sup> ]
피스톤의 질량	0.48 [kg]

## 2.2 액츄에이터의 특성

액츄에이터의 직선성을 측정된 결과를 그림 3에 나타낸다. 그림 3의 결과는 피스톤을 50mm이동시켜 가면서 분해능  $0.01\mu\text{m}$ 의 레이저 측정장치로 측정된 위치와 액츄에이터에 설치한 카운터로 측정된 위치와의 상대오차를 나타내고 횡축은 피스톤의 위치, 종축은 상대오차를 나타낸다.

그림 4는 오토콜리메터를 사용하여 피스톤의 상하방향 위치와 각도자세 변화를 측정된 결과

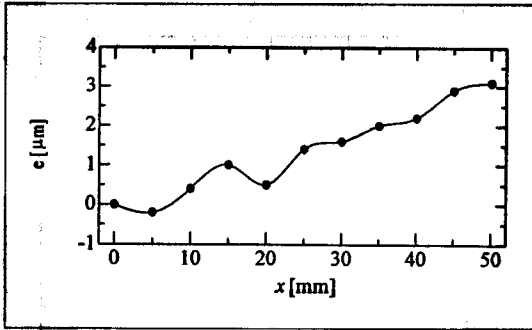


그림 3. 액츄에이터의 직선성

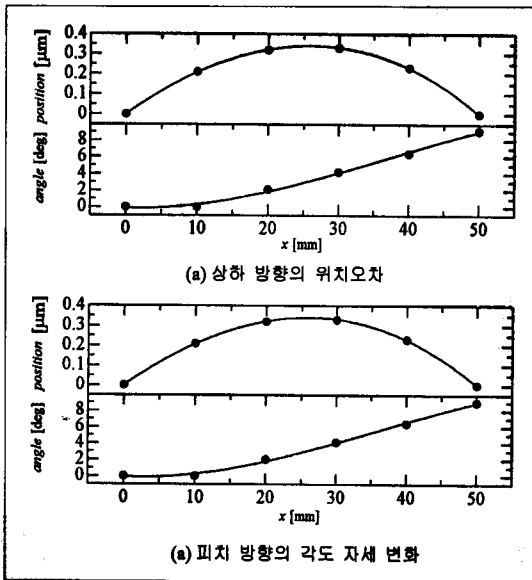


그림 4. 액츄에이터의 직선운동 오차

표 2. 피스톤의 강성

방 향	강성[N/μm]
상하 방향	11.8
좌우 방향	2.0
전후 방향	6.9

표 3. 기존의 공기압 실린더와의 비교

장 점	단 점
<ul style="list-style-type: none"> <li>• 마찰력이 없다.</li> <li>• 수명이 반영구적이다.</li> <li>• 윤활유가 불필요하므로 청결하다.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 고도의 가공기술이 필요하다.</li> <li>• 정밀한 방진장치가 필요하다.</li> </ul>

를 나타낸다. 상하방향의 위치변화는  $0.3\mu\text{m}$ 이내 이고, 피치방향의 각도자세의 변화는  $8^\circ$  이내의 결과가 얻어졌다.

표 2는 피스톤의 구동압  $P_s$ 를  $160\text{kPa}$ , 베어링 기구용 공급압  $P_b$ 를  $200\text{kPa}$ , 피스톤실내의 평형 압  $P_o$ 를  $140\text{kPa}$ 로 설정하여 피스톤의 강성을 측정 한 결과를 나타내고, 표 3은 제작한 액츄에이터와 일반적인 공기압 실린더와의 특징을 비교한 결과를 나타낸다.

### 3. 위치제어계의 구성 및 위치제어 성능

#### 3.1 위치제어계의 구성

그림 5에 위치제어 장치의 사진을 나타낸다. 배관에 의한 영향을 피하기 위하여 3포트형 서보밸브(korben-bach, EWS3/6)와 반도체식 압력 센서(toyoda, SD200)를 액츄에이터의 양측에 직접 연결하였다. 실험에 이용한 서보밸브는 50%의 스트로크에서  $80\text{Hz}$ , 100%의 스트로크에서  $60\text{Hz}$ 까지 추종하는 고속구동형의 밸브이다. 서보밸브의 주파수 특성을 그림 6에 나타낸다. 또한, 밸브의 최대 유효 단면적은  $14\text{mm}^2$ 이고, 입력전압에 대하여 스펙변위의 히스테리시스는 3%이다.

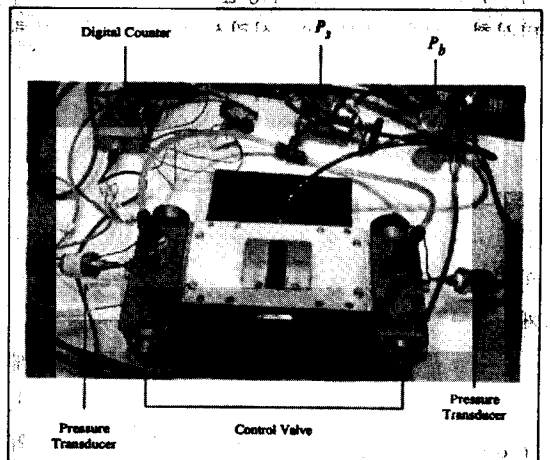


그림 5. 위치 제어 장치

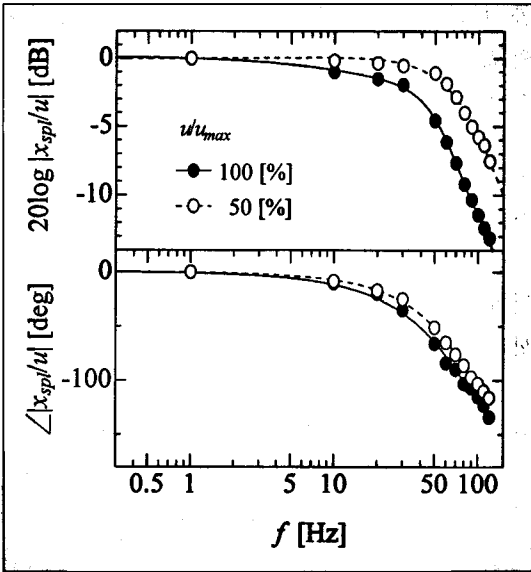


그림 6. 서보밸브의 주파수 특성

### 3.2 위치제어 성능

개발한 위치제어계는 공기압 베어링기구의 영향에 의하여 감쇄특성이 나쁘기 때문에 제어계 전체의 감쇄특성을 개선하지 않으면 고속의 위치제어를 실현하는 것은 용이하지 않다. 이러한 경우에는 구동피스톤의 속도 및 가속도 정보를 마이너 피드백하여 위치 제어를 수행하면 고속의 위치 제어가 가능하다.<sup>[4][5]</sup> 또한, 구동피스톤의 위치 변화에 의한 특성변화 및 서보 밸브의 비선형특성을 보상하여 신뢰성이 높은 제어계를 구성하기 위하여, 앞에서 기술한 스텝응답 상태 피드백 컨트롤러를 포함한 위치 제어 장치를 내부 루프에 포함시킨 외란 보상을 이용하여 컨트롤러를 구성하였다.<sup>[6]</sup> 그림 7은 스텝응답의 실험결과이고, 목표 스텝의 폭을 2mm, 구동피스톤의 초기위치를 25mm로 설정하여 반복해서 위치 제어를 수행한 결과의 일부를 나타낸다. 위의 그림은 구동피스톤 전체의 동작을 나타내고, 아래의 그림은 목표위치 부근의 확대도를 나타낸다. 구동피스톤의 최대 가속도는 50m/s<sup>2</sup>이고, 6 $\mu$ m의 오차범위 내에 수속하는 시간은 25ms이다. 목표

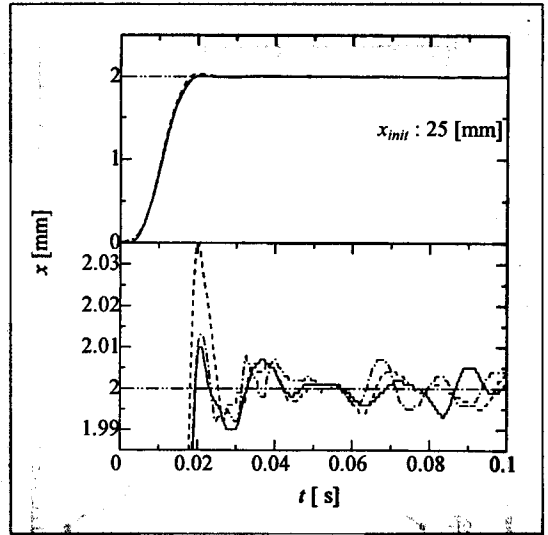


그림 7. 스텝응답

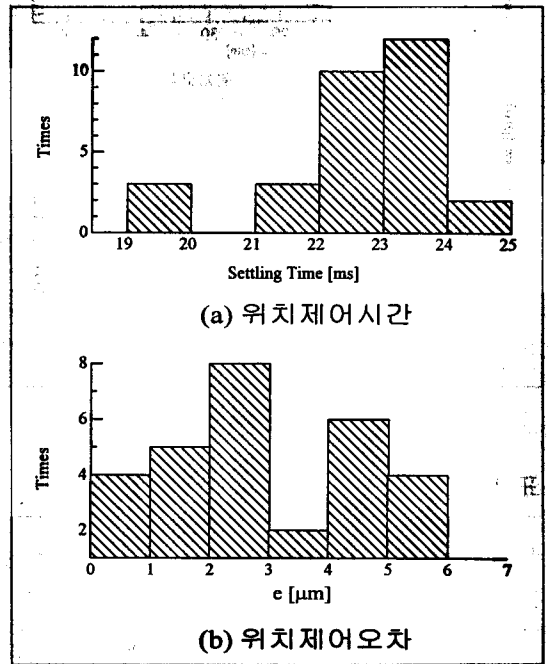


그림 8. 위치제어 결과

위치 부근의 확대도를 살펴보면 구동피스톤이 목표위치 부근에서 미묘하게 진동을 하면서 움직이고 있다. 이 진동은 피드백의 효과가 없고 위치제어계의 고유진동수에 가까운 진동주기를 가지고 있으며, 그 원인은 0V부근에서의 콘트롤

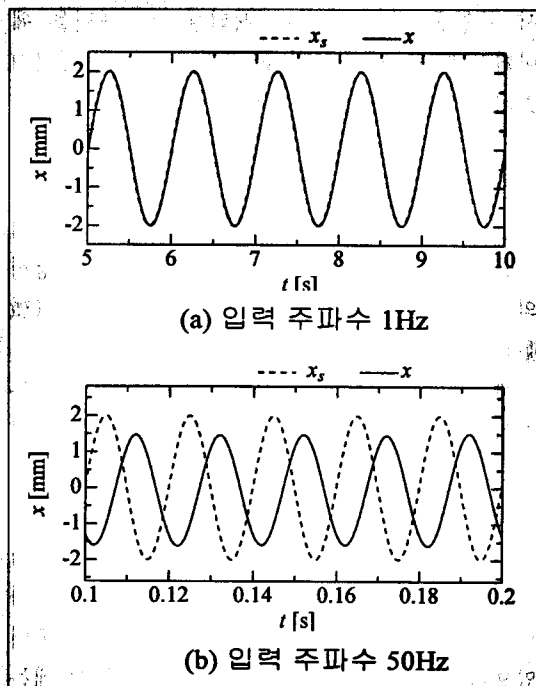


그림 9. 위치제어계의 주파수 응답 I.

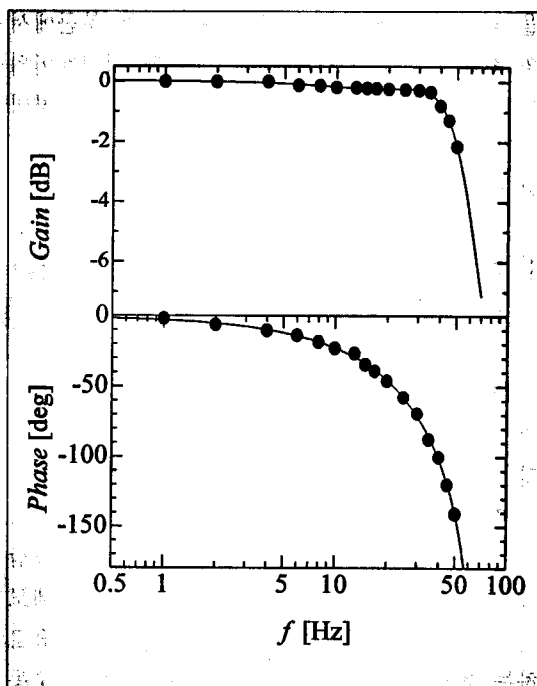


그림 10. 위치제어계의 주파수 응답 II.

러의 출력이 압력센서의 노이즈에 의한 출력에 영향을 받고, 또한, 서보밸브로의 입력이 히스테리시스범위에 가깝기 때문이다. 반복해서 30번 위치제어를 수행한 결과를 그림8에 나타낸다. 그림8의 위의 그림은 수축시간을 나타내고, 아래의 그림은 위치제어의 오차를 나타낸다. 또한, 결과로써 나타내지는 않았지만 피스톤의 초기위치를 변화시킨 경우에도 같은 결과가 얻어졌다.

그림 9 및 그림 10은 위치제어계의 페루프 주파수응답을 나타낸다.

그림 9의 (a)는 입력 주파수를 1Hz로 설정한 경우, (b)는 50Hz로 설정한 경우의 구동피스톤의 변위를 나타낸다. 공기압 베어링기구의 작용에 의하여 마찰력이 저감되어서 고주파수의 경우뿐만 아니라 저주파수의 경우에도 구동피스톤이 목표치에 잘 추종하고 있음을 알 수 있다.

그림 10은 50Hz까지의 주파수응답을 정리한 결과이다. 위의 그림은 계인을 나타내고 아래의 그림은 위상을 나타내며, 제어계의 대역폭이 약

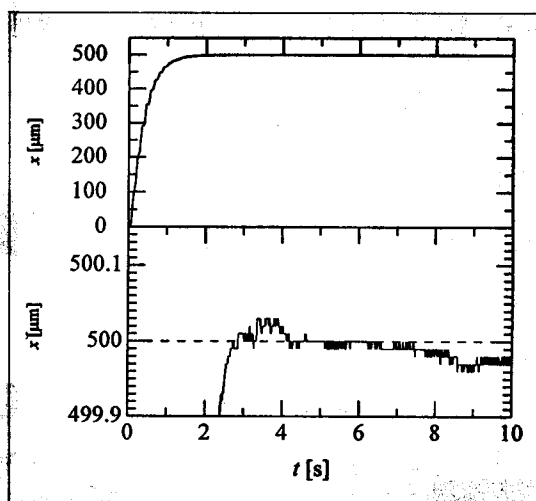


그림 11. 정밀위치제어

50Hz정도이고 종래의 공기압 위치 제어계와 비교해서 고주파수의 영역까지 추종하고 있음을 알 수 있다.

그림 11은 정밀위치제어를 수행한 결과를 나타낸다. 위의 그림은 구동피스톤 전체의 움직임

을 나타내고, 아래의 그림은 목표위치 부근에서의 확대도를 나타낸다. 확대도로부터 위치제어의 오차가 50nm 정도이고, 마찰력의 억제에 의하여 공기압 기구를 이용한 정밀위치제어가 가능함을 알 수 있다.

#### 4. 레티클(reticle) 스테이지 구동장치의 구성

3장까지의 결과에 의하여 공기압 액츄에이터의 구동부에 작용하는 마찰력을 억제하면 공기압 구동장치를 이용한 정밀한 위치제어가 가능하고, 특히,  $50m/s^2$ 의 고속으로 구동하는 경우에도 위치제어 오차를  $\mu m$ 로 억제하는 것이 가능함을 확인하였다. 이러한 결과를 토대로하여 메모리 제작장치 중에서도 고속 구동 성능을 필요로 하는 레티클 스테이지의 구동부를 공기압 구동장치를 사용하여 구성하였다.

스텝&스캔 방식의 제조장치는 웨이퍼스테이지와 레티클 스테이지를 반대방향으로 구동하면

서 투영렌즈를 이용하여 레티클상의 패턴을 웨이퍼상에 로광(露光)한다. 로광동작중의 웨이퍼스테이지와 레티클스테이지의 속도비는 1:4로써 레티클 스테이지에는 웨이퍼스테이지의 4배의 속도가 요구된다. 현재 세계에서 가장빠른 장치는 네델란드 ASML(주)의 PAS5500이고, 레티클 스테이지의 최대 가속도는  $24m/s^2$ , 로광시의 구동속도는 1000mm/s, 동기오차는 미동(微動) 스테이지를 포함하여  $\pm 5nm$ 이다.

제작된 장치를 그림 12에 나타낸다. 그림 12는 장치전체를 나타내고 가동부의 중량을 줄이기 위하여 알루미늄계의 세라믹을 이용하여 구동스테이지를 제작하였다. 그림에서 사각형의 구멍이 뚫여있는 상부의 흰 판이 레티클을 적재하여 구동하는 구동스테이지이고, 구동스테이지의 아랫부분에는 가이드를 장착한 베이스가 설치되어 있으며, 구동스테이지와 베이스의 가이드부에는 마찰 저항을 억제하기 위하여 공기압 베어링기구를 설치하였다. 구동 스테이지의 약 측면에는 공기압 액츄에이터가 설치되어 있고, 배관부의

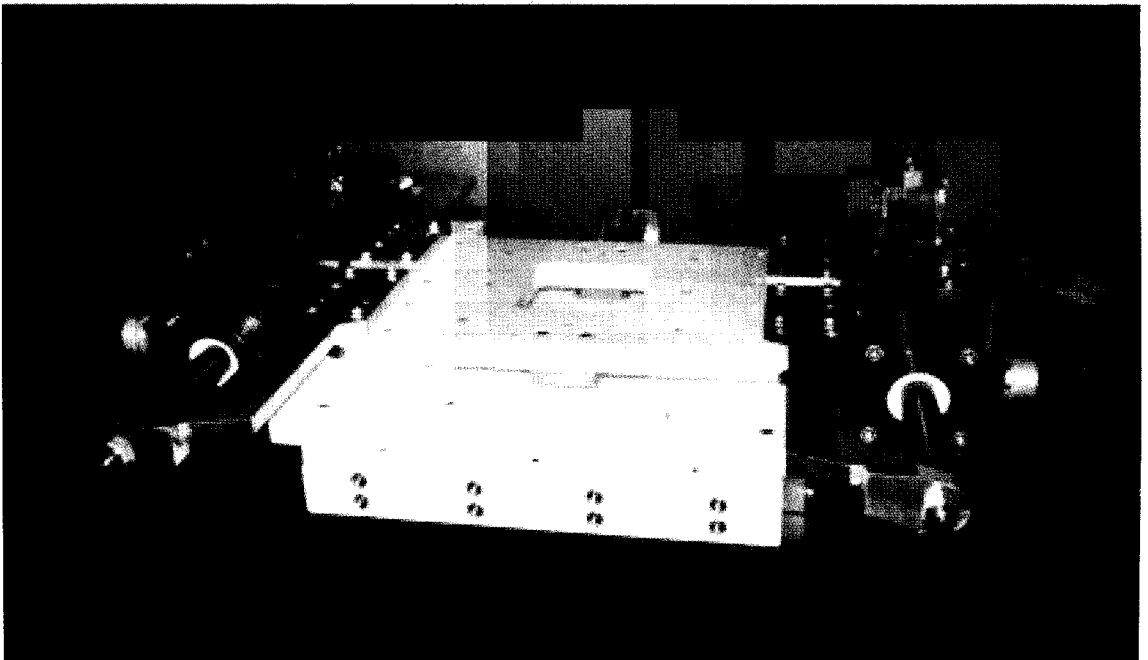


그림 12. 레티클 스테이지 구동 장치

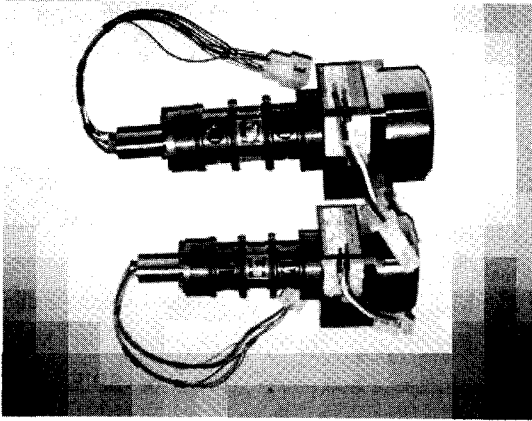


그림 13. 공기압 유량제어 서보밸브

응답지연을 억제하기 위하여 그림 13에 나타난 서보밸브를 액츄에이터에 직접 연결하였다.

실제 장치에 있어서는 웨이퍼스테이지와 레티클스테이지의 동기오차를 억제하기 위하여 레티클스테이지상에 설치한 미동스테이지의 위에 레티클을 적재하여 mm오차의 동기제어를 수행하였다.

그림 12의 장치를 이용하여 속도제어를 수행한 결과를 그림 14에 나타낸다. 그림14의 결과는 목표속도를 1300mm/s로 설정한 경우의 결과로서, 첫 번째 그림은 스테이지의 가속도, 두 번째

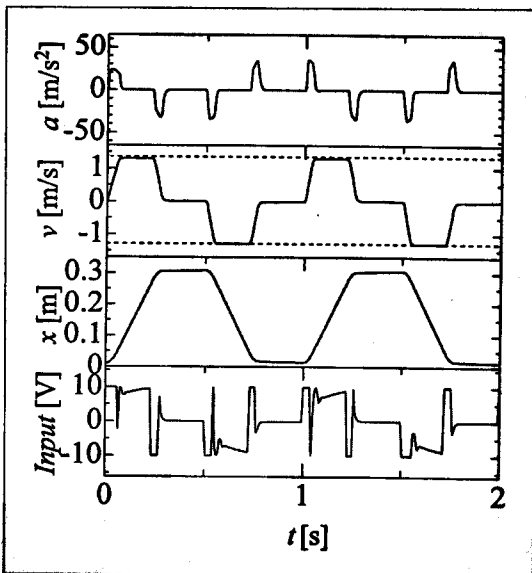


그림 14. 속도제어 결과

그림은 속도, 세 번째 그림은 위치, 4번째 그림은 컨트롤러의 출력을 각각 나타낸다. 결과로부터 최대 가속도는 35m/s<sup>2</sup>이고, 목표속도에 잘 추종하고 있음을 알 수 있다.

그림 15는 스테이지 구동장치를 2시간동안 연속해서 구동한 경우의 액츄에이터 표면의 온도변화를 나타낸다. 온도변화의 측정은 크린룸에서 수행하였고 측정위치에 관계없이 표면의 온도변화는 0.2°C 이내임을 알 수 있다.

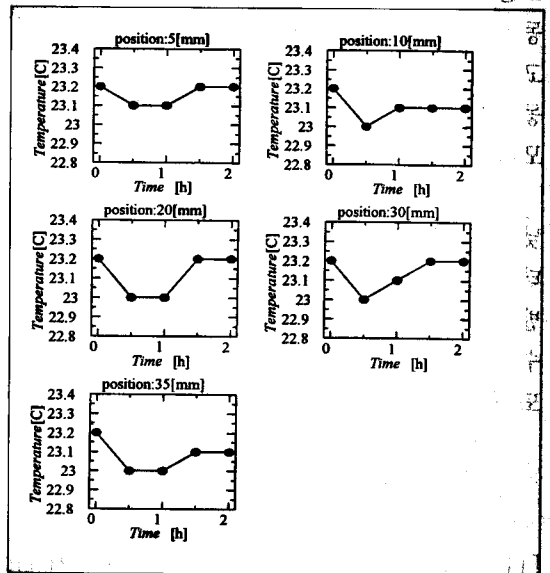


그림 15. 액츄에이터 표면의 온도변화

## 5. 결론

반도체 제조 분야에서는 제조 단가의 절감을 위하여 고속 구동이 가능한 구동장치의 개발이 활발히 수행되고 있고, 종래의 구동방식인 리니어모터를 이용하는 방식은 모터의 출력증대에 수반되는 가동부하의 증가 및 모터의 발열이 문제점으로 지적되고 있다.

공기압 구동방식은 압축성을 이용한 고속 구동이 용이하고, 가압 공기의 압력을 증가시킴에 의하여 같은 크기의 액츄에이터를 이용하여도 액츄에이터의 출력을 증가시킬수 있는 장점이



있으나, 정밀한 위치 및 속도의 제어가 용이하지 않다. 본 연구에서는 공기압 기구의 위치제어 성능을 악화시키는 중요한 요인의 하나인 마찰력의 영향을 억제하기 위하여 외부 가압식의 공기압 베어링 기구를 이용한 액츄에이터와 공기압 서보 밸브를 이용한 위치제어장치를 이용, 공기압 구동방식에 의한 위치제어 오차가  $\mu\text{m}$  또는  $\text{nm}$  단위의 정밀·고속 위치제어가 가능함을 확인하였다. 기초실험에 사용한 액츄에이터 및 서보밸브의 원리를 이용한 레티클 스테이지의 구동장치를 제작하여 공기압 구동기구를 이용한 고속 및 고가속 구동이 가능하고, 특히, 고속 구동시에도 액츄에이터 표면의 온도변화가 리니어 모터와 비교하여 현저하게 낮음을 확인하였다.

기존의 공기압 구동장치는 단순하고 정밀도가 낮은 반복작업에 사용되어지고 있으나, 액츄에이터와 제어용 밸브의 성능개선 및 컨트롤러의 개발에 의하여 동작의 정밀도 및 신뢰성을 확보할 수 있고, 고성능·고품질이 요구되는 분야에서도 응용할 수 있다.

### 참 고 문 헌

- [1] SKAWAI et al. : "Some consideration on the position control of pneumatic cylinders", Proceedings of the 2nd JHPS International Symposium on Fluid Power, pp. 563, 1993.
- [2] さい藤 : "空氣壓シリンタの低速度制御にかんする研究", 油壓と空氣壓, 26-6, pp. 804, 1995.
- [3] M.Hibbs and R.Kunz : "The 193-nm Full-Field Step-and-scan Prototype at MIT Lincoln Laboratory", Proc. of SPIE, Vol. 2440, pp. 40, 1995.
- [4] P.R.Moore : Compensation in pneumatically actuated servomechanisms, Trans. Inst. M. C., Vol. 7, No. 5, pp. 238, 1985.
- [5] 張 志城, 香川 利春 : "靜壓軸受け機構を利用した高速・精密位置決め用エアサーボ機構の開發", 油壓と空氣壓, 28-4, pp.85, 1997.
- [6] 張 志城, 香川 利春 : "靜壓支持構造を用いた高速・高精度エアサーボ機構", 計測自動制御學會流體制御部會シンポジウム, pp. 101, 1996.
- [1] SKAWAI et al. : "Some consideration on