

Wafer 반송용 End-Effector의 FEM 해석 및 파지력 제어에 관한 연구

권오진* · 최성주[†] · 이우영** · 이강원* · 박원규***

*한국생산기술연구원 마이크로메카트로닉스팀

[†]**한국기술교육대학교 기계공학부, ***충남대학교 대학원

A Study on the FEM Analysis and Gripping Force Control of End-Effector for the Wafer Handling Robot System

Oh Jin Kwon*, Seong Joo Choi[†], Woo Young Lee**, Kang Won Lee*, and Won Kyoo Park***

*Korea Institute of Industrial Technology Micromechatronics Team

[†]**School of Mechanical Engineering, Korea University of Technology and Education, ***Chungnam National University

ABSTRACT

On this study, an E.E(End-Effector) for the 300 mm wafer transfer robot system is newly suggested. It is a mechanical type with 180° rotating ranges and is composed of 3-point arms, two plate springs and single-axis DC motor controlled by microchip. To design, relationship between the gripping force and the wafer deformation is analyzed by FEM. By analytic results, the gripping force for 300 mm wafer is confirmed as 255~274 gr. From experimental results on gripping force, repeatable position accuracy and gripping cycle times in a wafer cleaning system, we confirmed that the suggested E.E was well designed to satisfy on the required performance for 300 mm wafer transfer robot system.

Key Words : E.E(End-Effector), Wafer handling robot, Plate spring, DC motor, Wafer gripping stress and deformation, FEM Analysis

1. 서 론

최근 반도체 업계는 수익성 향상과 경쟁력 강화를 위하여 300 mm 웨이퍼 도입의 필요성이 강조되고 있다. 즉 200 mm 웨이퍼 공정으로는 생산성과 수율증대에 한계점을 나타내고 있다.

300 mm 웨이퍼가 200 mm 웨이퍼에 비해 면적비는 2.25배인 반면 생산칩수는 2.6배 정도가 되는데 이는 웨이퍼 가장 자리의 활용도가 증가 하기 때문이다. 그러나 300 mm 웨이퍼 도입 시 웨이퍼의 사이즈가 커짐과 동시에 양면을 모두 사용하는 특성으로 인하여 그동안 문제시 되지 않았던 수준의 공정관리가 요구된다. 따라서 취성에 약하고 자중에 의한 처짐이 발생하는 웨이퍼의 반송을 위해서는 파손을 방지하는 안정적인 파지와 정확한 위치에 웨이퍼를 안착할 수 있도록 정

밀한 위치 제어를 할 필요가 있다. 또한 공정의 단순화를 통한 고속화가 요구된다[3].

이러한 요구와 더불어 작업 환경적 측면에서 크린룸(clean room)내에서 동작이 이루어 지고 패턴이 미세화됨에 따라 그 동안 문제시 되지 않았던 수준의 파티클(particle)등도 제거되어야 한다. 이를 위하여 기존의 웨이퍼 반송방식과는 다른 새로운 반송방식을 국제 규약으로 정하게 되었다. 새로워진 반송방식은 외부 파티클의 크린룸내로의 유입을 방지하기 위하여 셔터(shutter)를 통해서 반송장비가 출입할 수 있는 구조가 보편적이며, 이러한 셔터방식에서는 기존의 E.E(End-Effector)보다 얇은 두께의 구조를 요구한다. E.E의 두께가 얇아짐에 따라 구동기(actuator) 또한 소형을 사용하여만 한다.

따라서 본 논문에서는 이러한 요구에 부응하는 새로운 파지방식의 E.E를 제안하였다. 제안된 E.E는 판스프링(plate spring)의 강성과 인장력에 의하여 3점을 지지하도록 구성하였으며, 1축 회전계 모터 하나로 동시

[†]sjchoi@kut.ac.kr

에 3점을 등속 파지하는 운동을 한다.

제안된 E.E의 안정적 구조 확보를 위하여 유한요소법(FEM)을 이용하여 파지력과 웨이퍼의 역학적 관계를 해석설계하고, 나아가 실험적인 결과로부터 안정된 파지력의 범위를 구하고자 한다. 또한 파지속도와 파지력 제어를 위하여 micro chip을 이용하여 동작제거기를 구현하여 제어성능을 검증하고자 한다.

2. End-Effector 설계

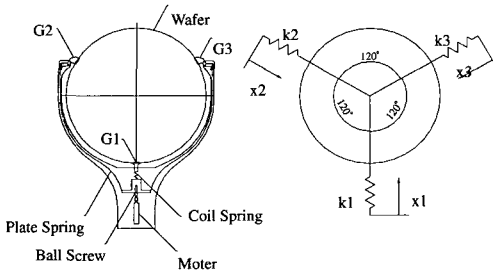


Fig. 1. Configuration on the suggested E.E.

Fig. 1은 제안된 3점 지지구조 E.E의 모델이다. Fig. 1의 (a)는 설계도이고 (b)는 스프링 변위에 의해 웨이퍼에 가해지는 힘의 역학적 관계를 나타낸다. 동작은 Fig. 1(a)에서와 같이 모터로 발생하는 회전운동을 나사축에 의해 직선운동계로 구성되며, 직선운동은 코일 스프링(coil spring)과 판스프링(plate spring)을 거쳐 그리퍼(gripper) G1, G2, G3에 전달되어 G2, G3는 다시 회전운동으로, G1는 직선운동으로 웨이퍼를 파지하게 된다. Fig. 2는 제작된 E.E의 실제 사진을 나타낸다.

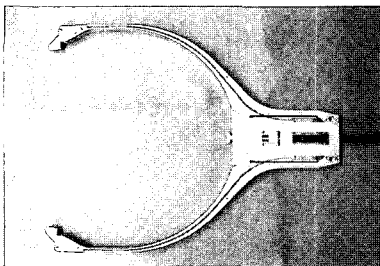


Fig. 2. Developed End-Effector.

3. 웨이퍼의 FEM 해석

웨이퍼의 파지력에 의한 영향을 알아보기 위하여 유한요소해석을 수행하였다. Table 1은 해석에 이용된 웨이퍼의 물성치이다. Fig. 3은 FEM 해석을 위한 웨이퍼의 모델을 나타낸다. 120° 간격으로 각각의 지지점에

Table 1. Mechanical Properties of a Silicon Wafer.

Young's Modulus	150 Gpa
Poisson's Ratio	0.17
Density	2330 kg/m ³
Diameter	300 mm
Thickness	0.8 mm
Contact Area	4.8 mm ²

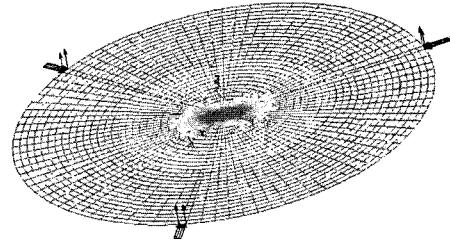


Fig. 3. Analytic model of the wafer for FEM Analysis.

대하여 Z축을 구속하여 자중과 측면상의 힘에 대한 처짐과 응력에 대해 알아보았다. 실리콘 웨이퍼는 단결정체로 깨지기 쉬운 성질을 갖고 있다. 실리콘의 성장방향에 따라 조금씩 차이는 있으나 일반적으로 실리콘의 파괴강도는 7000 Mpa로 알려져 있다. 그러나 가공된 형태에 따라 파괴강도는 낮아질 수 있고 이동 중 집중하중이 작용 시 작은 힘에 의해서도 파괴될 수 있으므로 웨이퍼를 다루는 데는 많은 주의가 요망된다. 따라서 E.E로 웨이퍼를 파지시 웨이퍼에 손상이 가지 않는 적절한 힘의 선택은 중요하다.

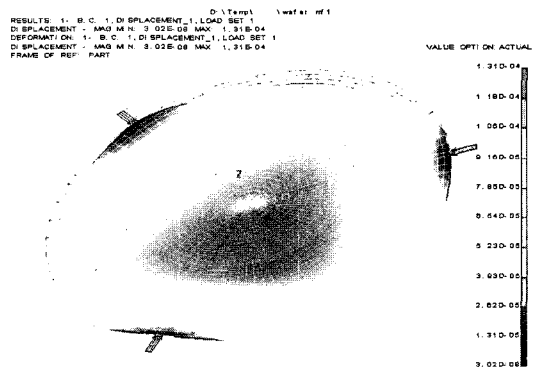


Fig. 4. Wafer deflection by 3-point gripping force.

Fig. 4는 파지력을 가할 때 웨이퍼의 처짐을, Fig. 5는 응력분포를 나타내고 있다. 웨이퍼를 지지하는 3점에서 처짐은 발생하지 않으며 웨이퍼의 중앙에서 최대 처짐을 나타내고, 응력은 지지하는 3점에서 가장 높았다.

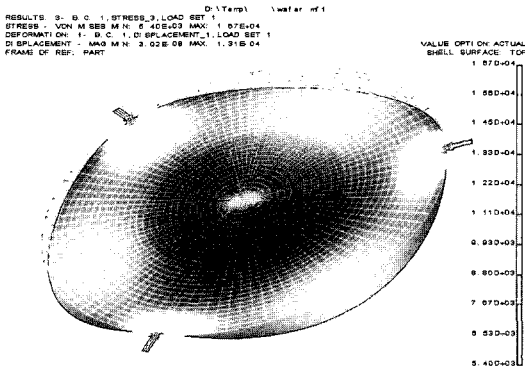


Fig. 5. Wafer stress by 3-point gripping force.

제조사마다 조금씩 차이가 있으나 웨이퍼의 질량을 130 g이라 하고 로봇암의 최대 가속도가 10 m/s^2 을 넘지 않는다고 보면 가속도에 의한 힘은 $F=ma$ 에서 1.3 N이 된다.

치짐량의 경향을 알아보기 위해 로봇암의 최대 가속도에 의한 힘의 3배까지 힘을 증가시키면서 유효요소 해석을 수행하였다.

Table 2는 해석조건에 따른 웨이퍼 중앙부 치짐량과 응력값을 나타낸다.

Table 2. Analytic deflection and stress by gripping force of wafer.

Force	Max. deflection (mm)	Max. stress (N/mm ²)
weight	0.093	1.39×10^2
1.3 N	0.097	1.70×10^2
2.6 N	0.121	1.88×10^2
3.9 N	0.131	2.02×10^2

4. End-Effector의 FEM 해석

Table 3은 해석에 이용된 E.E의 물성치를 나타내며 Fig. 6은 E.E의 FEM 해석모델이다. Fig. 7은 중력가속도가 웨이퍼와 E.E에 작용할 때 파지력에 의한 E.E의 변

Table 3. Properties of duralumin E.E.

Young's Modulus	72 Gpa
Poisson's Ratio	0.33
Density	2800 kg/m^3
Material	A7075

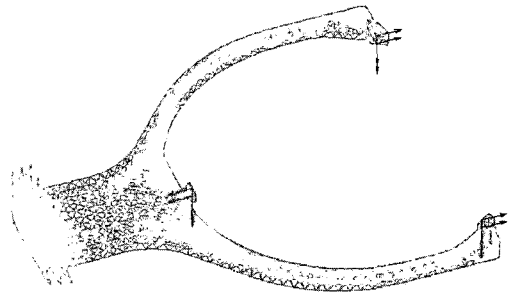


Fig. 6. Analytic model of E.E.

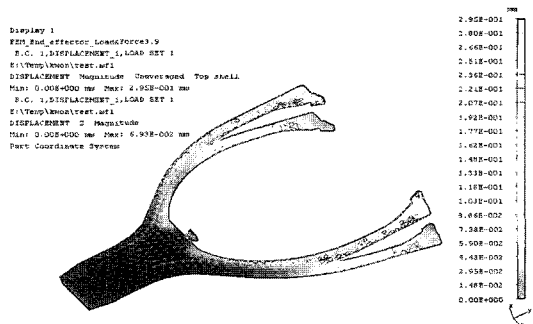


Fig. 7. E.E deflection by 3-point gripping force.

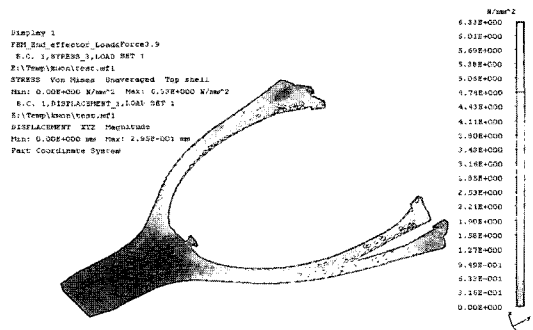


Fig. 8. E.E stress distribution of 3-point gripping force.

형을 나타내고 Fig. 8은 이때의 응력 분포를 나타낸다.

Table 4는 E.E에 대한 FEM 해석 결과를 나타낸다.

Table 4. Deflection and Stress of End-Effector.

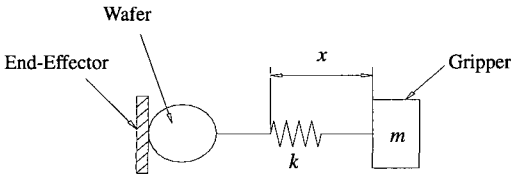
Force	Max. deflection (μm), XYZ축	Max. deflection (μm), Z축	Max. stress (N/mm ²)
weight	20.3	20.3	0.223
1.3 N	117	66.5	2.4
2.6 N	205	68.3	4.35
3.9 N	295	69.3	6.33

웨이퍼를 파지 시 힘은 증가시키면서 해석을 수행한 결과 변형량과 응력은 증가함을 알 수 있었다. E.E에 작용하는 응력은 듀랄루민(A7075)의 허용응력이 480 MPa에 비해 무시할 정도의 작은 값을 나타낸다.

5. End-Effector의 제어

5.1. 시스템 모델링

Fig. 9는 E.E가 웨이퍼를 잡을 시 단순화 시킨 스프링-질량계를 나타낸다. 이때 웨이퍼에 작용하는 파지력은 스프링 변위 x 에 의한 힘으로서, 스프링 변위에 따른 속도정보를 통하여 웨이퍼에 작용하는 파지력의 제어가 가능하다. 일반적인 스프링-질량계의 상태 방정식과 해는 다음과 같다.



$$F=kx$$

Fig. 9. Schematic of E.E.

$$m\ddot{x} + kx = 0 \tag{1}$$

$$x(t) = A \cos(\omega_n t - \phi) \tag{2}$$

$$\dot{x}(t) = -A\omega_n \sin(\omega_n t - \phi) \tag{3}$$

ω_n 은 계의 고유 진동수로

$$\omega_n = \sqrt{k/m} \tag{4}$$

여기서 $y = \dot{x}/\omega_n$ 이라면, 식 (2)와 (3)으로 부터 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\frac{x_2}{A_2} + \frac{y_2}{A_2} = 1 \tag{5}$$

Fig. 10의 (a)는 식(5)의 해를 x, y 평면에 나타낸 것

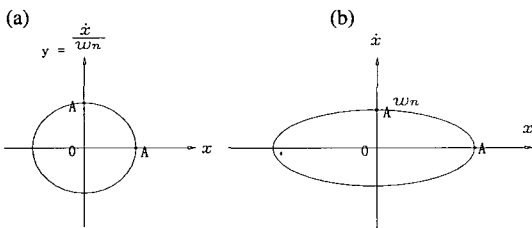


Fig. 10. Plot of x versus y .

이다. 여기서 진폭 A 는 스프링 변위의 진폭이고 시스템의 고유한 값으로서 최대 7 mm까지 가능하도록 설계하였다. Fig. 10의 (b)에서 보는 바와 같이 스프링 변위 x 에 따라 속도값이 타원형의 형태로 변화하는 것을 알 수 있다. 따라서 속도값을 통한 파지력의 제어가 가능하다.

5.2. 제어 블록 다이어그램

Fig. 11은 파지력 제어를 위한 블록 다이어그램이다. 원하는 파지력을 얻기 위해 마이크로칩(microchip)은 모터의 엔코더(encoder)로부터 속도 정보를 읽어온다.

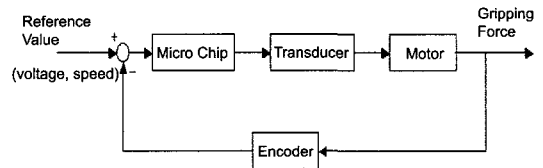


Fig. 11. Block diagram for control.

6. 실험 및 고찰

6.1. 장치 구성

본 E.E 시제품에 대한 실험장치는 Fig. 12와 같이 구성하였고, 제어프로그램의 작동 상태를 실험하는 장치를 나타내고 있다.

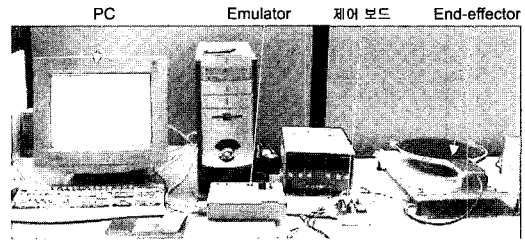


Fig. 12. Experimental setup for control the gripping force.

6.2. 실험 결과

Fig. 13은 파지력의 도수분포도(frequency distribution figure)를 나타낸다. 파지력의 설정은 웨이퍼가 밀리지 않는 최소힘 1.3 N에서 안전율을 2로 하여 2.6 N으로 설정하였다. 최대값은 2.69N이고 최소값은 2.50 N, 평균값은 2.61 N이었다. 파지력이 265 gr에 집중되어 나타나고 표준 편차는 ± 3.63 gr를 나타내었다.

Fig. 14는 E.E로 웨이퍼를 반복적으로 파지 시 웨이퍼 센터가 E.E 센터와 벗어남의 정도를 측정 한 값이다. 이때 X축 상에서는 평균적으로 0.293 mm 좌측으로 이

동된 값을 나타내었고 Y축 상으로는 0.301 mm 아래로 이동된 값을 나타내었다. 이 값은 기구적 요인으로 인한 구조적 오차이다. 웨이퍼 센터가 E.E의 센터에 대하여 반복적으로 일정한 좌표에 위치해야만 로봇은 E.E의 기구적 오차를 보상하여 웨이퍼 세정용 척의 중심에 정확히 안착시킬 수 있다. 웨이퍼 중심과 세정용 척의 중심을 일치시켜야 척의 회전 시 웨이퍼의 관성력을 줄일 수 있다. 세정용 척이 웨이퍼를 회전 시 웨이퍼 센터가 세정용 척의 센터와 떨어진 거리의 제곱에 비례해서 웨이퍼의 관성력은 증가한다. 척이 고속 회전 시 웨이퍼의 뒤튐림이나 척으로부터 이탈이 발생할 수 있으

므로 E.E가 웨이퍼를 파지 시 웨이퍼 중심을 일정한 좌표에 위치시키는 것은 중요하다.

Fig. 15는 E.E의 중심과 웨이퍼 중심의 X축에 대해서 벌어난 정도를 도수분포도로 나타낸 것이다. Fig. 16은 E.E의 중심과 웨이퍼 중심의 Y축에 대해서 벌어난 정도를 도수분포도로 나타낸 것이다. 실제 공정에서 요구되는 성능은 센터의 허용 이동값이 ± 0.05 mm이므로 제안된 E.E는 최대값이 0.048 mm로서 요구성능을 만족함을 알 수 있다.

Fig. 17은 로봇 제어기로부터 파지 명령을 받은 후 동

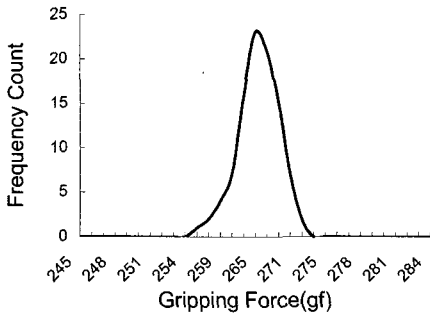


Fig. 13. Frequency distribution of gripping force.

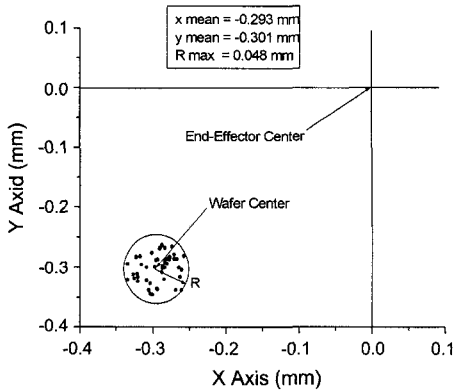


Fig. 14. Measuring wafer center versus E.E center.

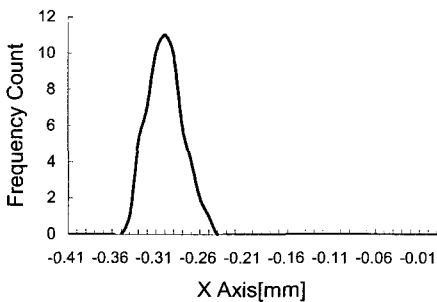


Fig. 15. Frequency distribution of wafer center versus X axis.

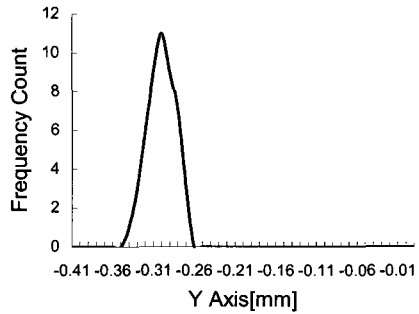


Fig. 16. Frequency distribution of wafer center versus Y axis.

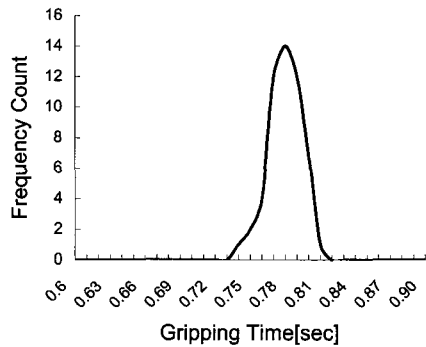


Fig.17. Frequency distribution of gripping time.

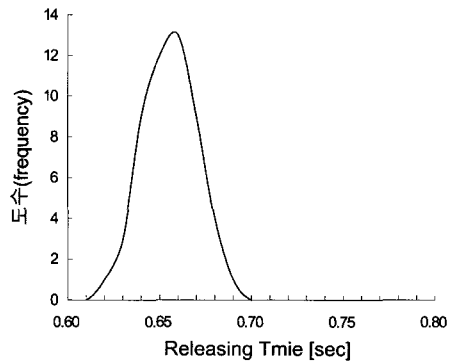


Fig. 18. Frequency distribution of releasing Time.

작을 완료하는데 걸린 시간을 측정 한 값을 나타낸다. 측정장비는 NI(National Instrument)사의 Labpc-1200과 LabVIEW를 이용하였다. Sampling Rate는 1000 samples/sec로 측정하였다. Fig. 18은 파지 시간에 대한 히스토그램을 나타낸다. 평균 파지 시간인 0.77 sec에 측정값이 집중됨을 알 수 있다. 파지 시간은 생산성과 밀접한 관련이 있는 요소이다.

7. 결 론

본 연구에서는 반전이 요구되는 300 mm 웨이퍼 공정(세정)을 위한 새로운 형식의 E.E를 제안하고자 하였다. 제안된 E.E는 판 스프링의 강성에 의하여 3점 지지점으로 구성된 Gripper의 파지력을 발생하는 특성을 갖고 있으며, 1축 회전계 모터 하나에 의하여 3점의 등속 파지가 가능하도록 구성하였다.

제안된 E.E의 안정적 구조 확보를 위하여 유한요소법(FEM)을 이용하여 파지력과 웨이퍼의 역학적 관계를 해석 설계하고, 나아가 실험적인 결과로부터 255~274 gr 일 때 가장 안정적인 특성을 갖는다는 것을 알 수 있었다. 또한, 파지속도와 파지력 제어를 위하여, 전술한 바와 같이 모터 전용 microchip을 이용하여 동작 제어기를 설계하였다.

동작의 안정성 확보를 위하여, 모터의 과도전류 제한은 프로그램으로 실현시켰고, 실험을 통하여 파지제한, 반복위치 정밀도 및 파지 사이클의 동작 시간 측정을 통하여 제안된 E.E가 기구적으로 안정된 동특성과 신뢰성이 보장됨을 알 수 있었다.

반도체 크린룸 환경의 실장 실험을 통하여 새로운 형식의 반전형 E.E가 웨이퍼 반송에 적용 가능함을 확인하였고, 반전이 가능한 특성을 이용하여 세정 공정이 아닌 다른 공정에서도 다양한 형태로 응용을 할 수 있을 것으로 예상된다.

참고문헌

1. Berg, M.C. Rathbun, D.B. and Buffinton, K.W. "Precise Control of the Position of the End-Effector of an Industrial Robot", Proceedings of the ISCIE/ASME Japan-U.S.A. Symposium on Flexible Automation, (2002).
2. 정종대, 이성준, 류길하, "반도체 제조장비용 로봇 제어 시스템의 성능 평가 및 개선", 반도체 장비기술 논문집 Vol. 2000 No.1 pp. 61-65.
3. 서화일, "300 mm 웨이퍼 관련 장비 기술", 반도체 장비 학술심포지엄 Vol. 1998 No.1 pp. 53-67.
4. Park, K.H. Lee, S.K. Yi, J.H. Kim, S.H. Kwak, Y.K. and Wang, I.A. "Contactless Magnetically Levitated Silicon Wafer Transport System", Mechatronics, Vol 6, No. 5, pp. 591-610, (1996).
5. 이재정, 홍동표, "PID Force Control of a Miniature Robot Gripper", 한국공작기계학회지, 제8권 제2호, (1999).
6. 김수희, 송은지, "실리콘 웨이퍼 형상 분류 시스템 개발", 반도체 장비기술 논문집, Vol. 2000 No. 1.
7. 김상희, 채창현, "지능형 로봇 E.E를 위한 신경회로망 제어기의 개발", 생산기술연구, Vol. 9 No. 1, (1993).
8. 강영구, "기계 설계 가공 기술", 반도체 장비 학술 심포지움, Vol. 1998 No. 1.
9. 이흥규, "유연한 조인트 매니플레이터의 제한된 운동(위치/힘) 제어에 관한 연구", 한국기술교육대학교 논문집, Vol. 1 No. 1.
10. Poduraev, J. Choi, S. J. and Ermolov, I. "An FCM Control Method for Microbots", LARP Workshop on Microbots, Micromachine and Microsystems, Moscow, Russia (2003. 4).
11. 권오진, 최성주, 이우영, 이강원, "Wafer용 End-Effector의 설계 및 파지력 제어에 관한 연구", 한국반도체장비학회 2003 춘계학술대회, pp. 80-87, (2003. 5).