

Wafer 반송용 End-Effector의 설계 및 파지력 제어에 관한 연구

권오진* , 최성주** , 이우영** , 이강원***

* 한국생산기술연구원

** 한국기술교육대학교 기계공학부

*** 한국생산기술연구원

Abstract

On this study, an End-Effector for the 300mm 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. It is controlled by microchip for the DC motor control. To design, relationships on the gripping force and the wafer deformation is analyzed by FEM analysis. Criterion on gripping force of a suggested End-Effector is confirmed as 255 ~ 274g from experimental results. From experimented results on repeatable position accuracy, gripping force and gripping cycle times in a wafer cleaning system, we confirmed that the suggested End-Effector is well satisfied on the required performance for 300mm wafer transfer robot system.

1. 서론

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

300mm 웨이퍼가 200mm 웨이퍼에 비해 면적비는 2.25배인 반면 생산칩수는 2.6배 정도가 되는데 이는 웨이퍼 가장 자리의 활용도가 증가 하기 때문이다. 그러나 300mm 웨이퍼 도입 시 웨이퍼의 사이즈가 커짐과 동시에 그 동안 문제시 되지 않았던 수준의 공정관리가 요구된다. 취성에 약하고 자중에 의한 처짐이 발생하는 웨이퍼의 반송을 위해서는 파손을 방지하는 안정적인 파지와 정확한 위치에 웨이퍼를 안착할 수 있도록 정밀한 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 미세화 됨에 따라 그동안 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 구조로 되어있다. 이러한 셔터방식은 기존의 End-Effector보다 얇은 두께의 구조를 요구한다. End-Effector의 두께가 얇아짐에 따라 액츄에이터(actuator) 또한 소형을 사용하여만 한다.

따라서 본 논문에서는 이러한 요구에 부응하는 새로운 파지방식의 End-Effector를 제안하였다.

제안된 End-Effector는 판스프링(plate spring)의 강성에 의하여 3점 지지점으로 구성된 그리퍼(gripper)가 파지력을 발생하는 특성을 갖고 있으며, 1축 회전계 모터 하나에 의하여 3점 등속 파지 운동을 한다.

제안된 End-Effector 의 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 micorchip 을 이용하여 동작제어기를 설계하고 제어성을 검증하고자 한다.

2. End-Effector 설계

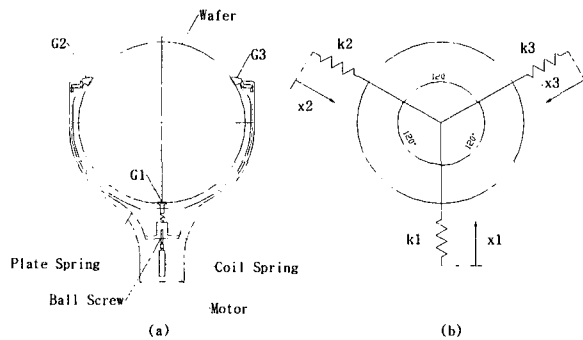


Fig.1 3점 지지구조 End Effector

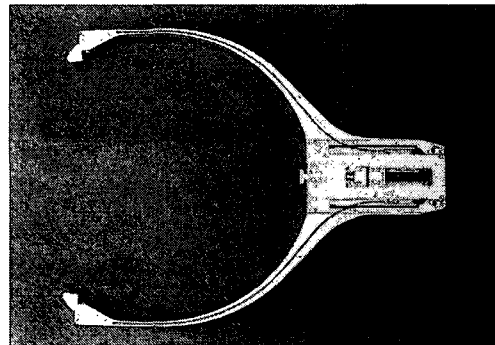


Fig.2 End-Effector의 실제 사진

Fig.1은 웨이퍼(wafer) 반송용 3점 지지구조 End-Effector의 모델이다. Fig.2의 (a)는 실제 모델을 나타내고 (b)는 스프링 변위에 의해 웨이퍼에 가해지는 힘을 나타낸다. Fig.1의 (a)에서 모터(motor)에 의해 발생하는 회전운동은 나사축에 의해 직선운동으로 변환된다. 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 End-Effector의 실제 사진을 나타낸다.

3. 웨이퍼의 FEM 해석

Table 1. Properties of 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

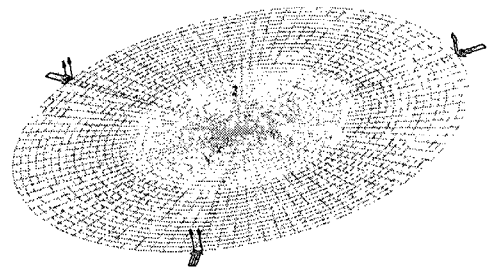


Fig.3 FEM 해석을 위한 Wafer 모델링

웨이퍼의 파괴력에 의한 영향을 알아보기 위하여 유한요소해석을 수행하였다. Table 1.은 해석에 이용된 웨이퍼의 물성치이다. Fig.3은 FEM 해석을 위한 웨이퍼의 모델을 나타낸다. 120°간격으로 각각의 지지점에 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 7000Mpa로 알려져 있다. 그러나 가공된 형태에 따라 파괴강도는 낮아질 수 있고 이동 중 집중하중이 작용시 작은 힘에 의해서도 파괴될 수 있으므로 웨이퍼를 다루는데는 주의가 요망된다. 따라서 End-Effector로 웨이퍼를 파지시 웨이퍼에 손상이 가지 않는 적절한 힘의 선택은 중요하다.

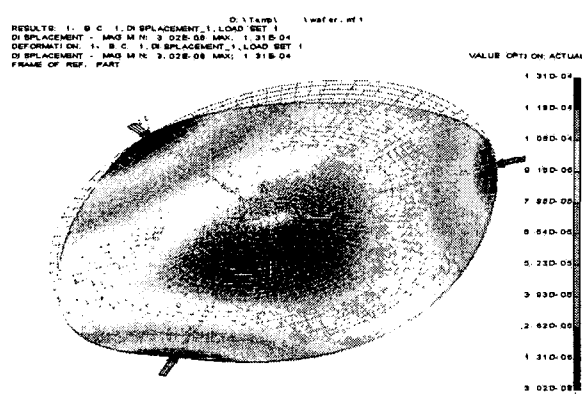


Fig.4 웨이퍼의 처짐

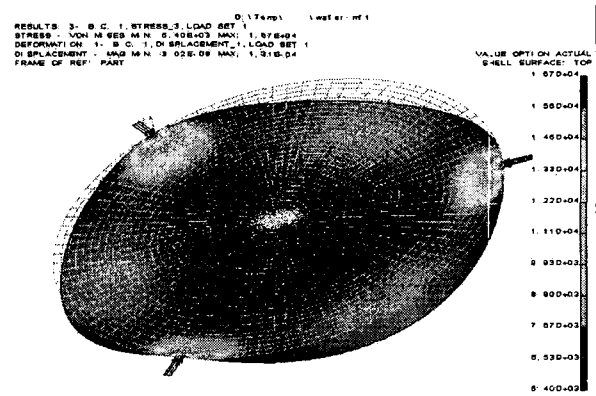


Fig.5 웨이퍼의 응력 분포

Table 2. 웨이퍼의 처짐량과 응력값

해석 조건	최대 처짐량(mm)	최대 응력(N/mm ²)
자중	0.093	1.39 x 10 ²
1.3 N	0.097	1.70 x 10 ²
2.6 N	0.121	1.88x 10 ²
3.9 N	0.131	2.02 x 10 ²

Fig.4는 파괴력을 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. Table 2.는 해석조건에 따른 처짐량과 응력을 나타낸다. 처짐량의 경향을 알아보기 위해 1.3N과 1.3N의 2배의 힘과 3배힘에 대한 유한요소해석 결과, 웨이퍼에 힘을 가했을 때 처짐량과 그리퍼와 접촉하는 면의 응력은 가하는 힘에 따라 증가함을 알 수 있다. 그러나 처짐량은 자중 조건과 비교할 때 증가폭이 크지 않음을 알 수 있다. 이러한 결과의 이유는 웨이퍼에 작용하는 힘이 웨이퍼 자체의 복원력보다 크지 않아서 웨이퍼 중앙까지 힘이 작용하지 못하고 그리퍼와 접촉하는 부위를 중심으로 가하는 힘에 따라 변형이 일어나는 것으로 볼 수 있다.

4. End-Effector의 FEM 해석

Table 3. Properties of End-Effector

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

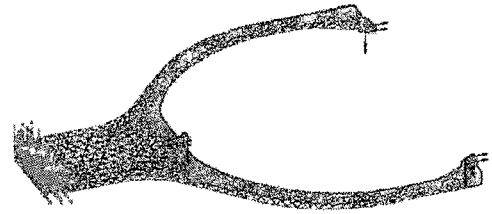


Fig.6 End-Effector의 FEM 해석 모델

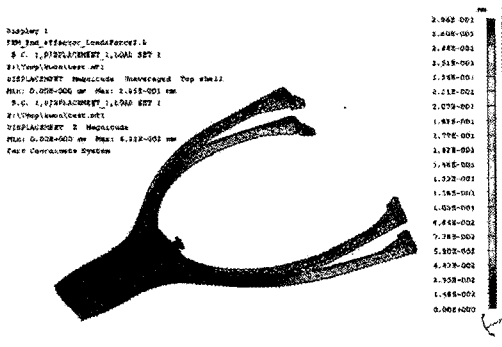


Fig.7 End-Effector의 처짐

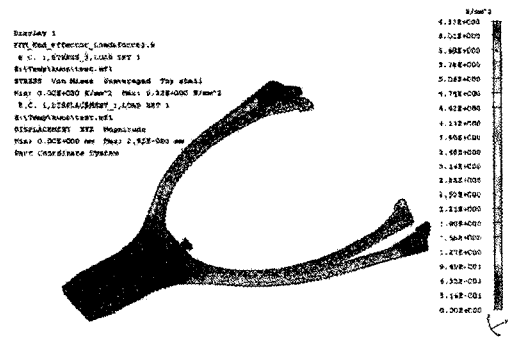


Fig.8 End-Effector의 응력분포

Table 3.은 해석에 이용된 End-Effector의 물성치를 나타내며 Fig.6은 End-Effector의 FEM 해석모델이다. Fig.7은 중력가속도가 웨이퍼와 End-Effector에 작용할 때 파지력에 의한 End-Effector의 변형을 나타내고 Fig.8은 이때의 응력 분포를 나타낸다.

Table 4. Properties of End-Effector

해석 조건	최대 변형량(μm)	최대 변형량(μm)	최대 응력(N/mm ²)
	XYZ 축	Z 축	
자중	20.3	20.3	0.223
1.3 N(자중포함)	117	66.5	2.4
2.6 N(자중포함)	205	68.3	4.35
3.9 N(자중포함)	295	69.3	6.33

Table 4.는 End-Effector에 대한 FEM 해석 결과를 나타낸다. 웨이퍼를 파지시 힘을 증가시키면서 해석을 수행한 결과 변형량과 응력은 증가함을 알 수 있었다. End-Effector에 작용하는 응력은 듀랄루민(A7075)의 허용응력이 480MPa에 비해 무시할 정도의 작은 값을 나타낸다.

5. End-Effector 의 제어

5.1 시스템 모델링

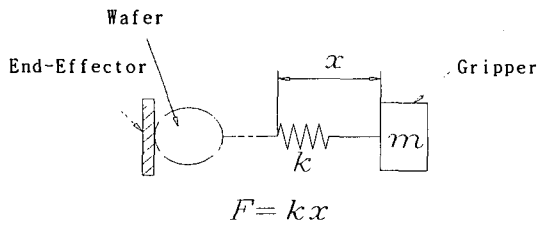


Fig.9 End-Effector의 시스템 모델

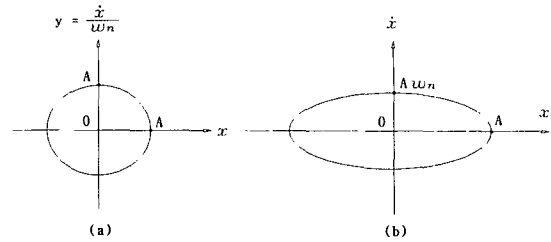


Fig.10 스프링-질량계의 해

Fig.9는 End-Effector가 웨이퍼를 잡을시 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.

$$m\ddot{x} + kx = 0 \quad (1)$$

$$x(t) = A\cos(\omega_n t - \phi) \quad (2)$$

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

$$\omega_n \text{ 은 계의 고유 진동수로 } \omega_n = \sqrt{k/m} \text{ 이다.} \quad (4)$$

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

$$\frac{x^2}{A^2} + \frac{y^2}{A^2} = 1 \quad (5)$$

Fig.10의 (a)는 식(5)의 해를 x, y 평면에 나타낸 것이다. 여기서 진폭 A 는 스프링 변위의 진폭이고 시스템의 고유한 값으로서 최대 7mm까지 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

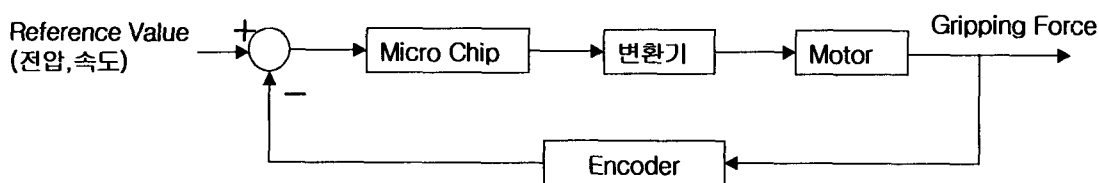


Fig.11 제어 블록 다이어그램

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

6. 실험 및 결과

6.1 장치 구성

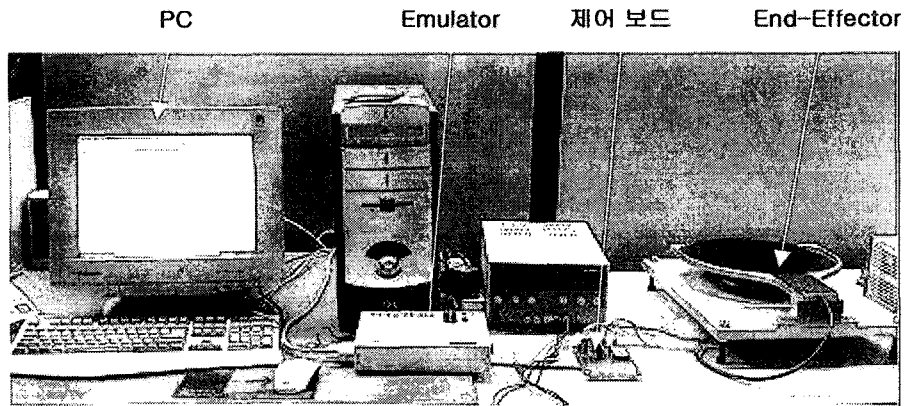


Fig.12 파지력 제어를 위한 실험 장치도

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

6.2 실험 결과

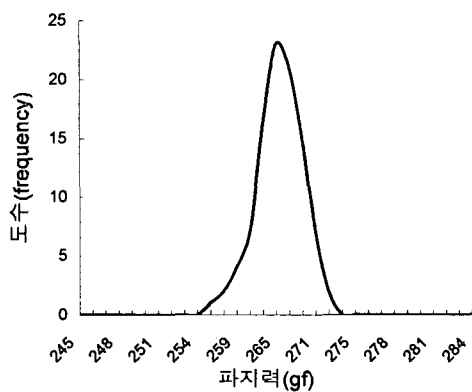


Fig.13 파지력의 도수분포도

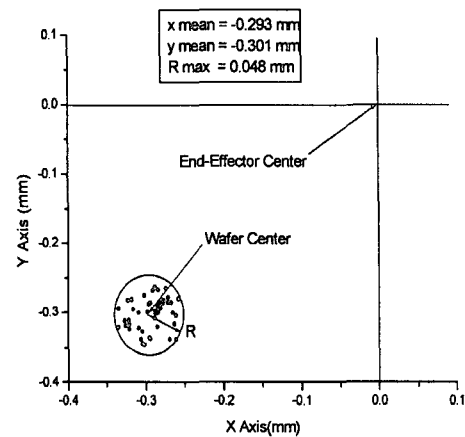


Fig.14 End-Effector 센터에 대한 웨이퍼 센터의 오차

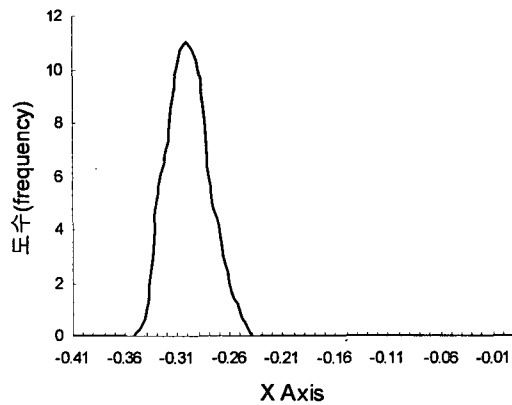


Fig.15 X축에 대한 웨이퍼 센터의 도수분포도

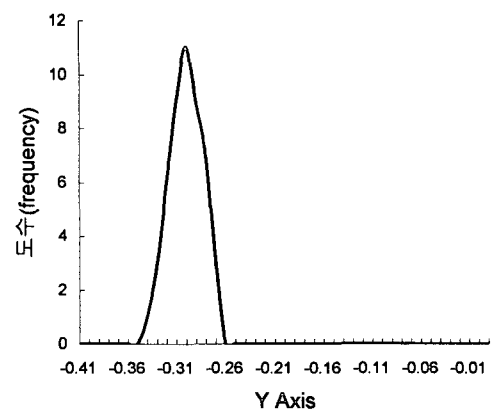


Fig.16 Y축에 대한 웨이퍼 센터의 도수분포도

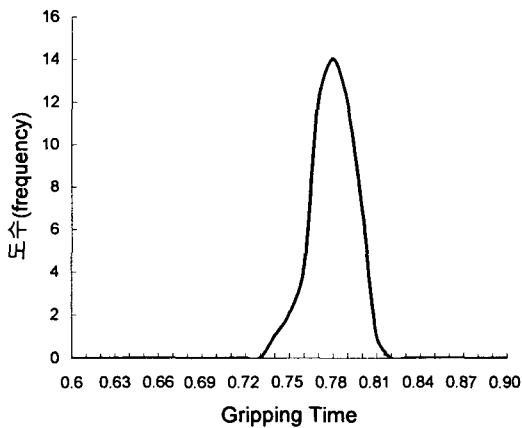


Fig.17 Gripping Time의 도수분포도

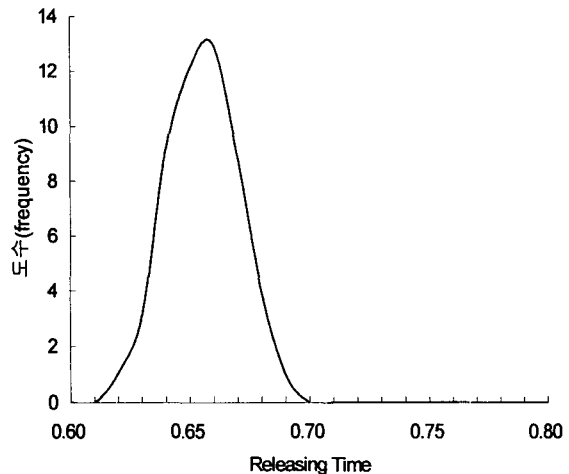


Fig.18 Releasing Time의 도수분포도

Fig.13은 파지력의 도수분포도(frequency distribution figure)를 나타낸다. 파지력의 설정은 웨이퍼가 밀리지 않는 최소힘 1.3N에서 안전율을 2로 하여 2.6N(264.7g_f)으로 설정하였다. 최대값은 274 c (2.69N)이고 최소값은 255 g_f (2.50N), 평균값은 265.36 g_f (2.61 N)이었다. 파지력이 265 g_f 에 집중되어 나타나고 표준 편차는 ±3.63을 나타내었다.

Fig.14는 End-Effector로 웨이퍼를 반복적으로 파지 시 웨이퍼 센터가 End-Effector 센터와 벗어남의 정도를 측정한 값이다. 이때 X축 상에서는 평균적으로 0.293mm 좌측으로 이동된 값을 나타내었고 Y축 상으로는 0.301mm 아래로 이동된 값을 나타내었다. 이 값은 기구적 요인으로 인한 구조적 오차이다. 웨이퍼 센터가 End-Effector의 센터에 대하여 반복적으로 일정한 좌표에 위치해야만 로봇은 End-Effector의 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 뒤튕림이나 척으로부터 이탈이 발생할 수 있으므로 End-Effector가 웨이퍼를 파지 시 웨이퍼 중심을 일정한 좌표에 위치시키는 것은 중요하다.

Fig.15는 End-Effector의 중심과 웨이퍼 중심의 X축에 대해서 벗어난 정도를 도수분포도로 나타낸 것이다. Fig.16은 End-Effector의 중심과 웨이퍼 중심의 Y축에 대해서 벗어난 정도를 도수분포도로 나타낸 것이다. 실제 공정에서 요구되는 성능은 센터의 허용 이동값이 ±0.05mm이므로 제안된 End-Effector는 최대값이 0.048mm로서 요구성능을 만족함을 알 수 있다.

Fig.17은 로봇 제어기로부터 파지 명령을 받은 후 동작을 완료하는데 걸린 시간을 측정한 값을 나타낸다. 측정장비는 NI(National Instrument)사의 Labpc-1200과 Labview를 이용하였다. Sampling Rate는 1000samples/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.

6. 결론

본 연구에서는 반전이 요구되는 300mm 웨이퍼 공정(세정)을 위한 새로운 형식의 End-Effector를 제안하고자 하였다. 제안된 End-Effector는 판 스프링의 강성에 의하여 3점 지지점으로 구성된 Gripper의 파괴력을 발생하는 특성을 갖고 있으며, 1축 회전계 모터 하나에 의하여 3점의 등속 파괴가 가능하도록 구성하였다.

제안된 End-Effector의 안정적 구조 확보를 위하여 유한요소법(FEM)을 이용하여 파괴력과 웨이퍼의 역학적 관계를 해석 설계하고, 나아가 실험적인 결과로부터 255~274gf 일 때 가장 안정적인 특성을 갖는다는 것을 알 수 있었다. 또한, 파괴속도와 파괴력 제어를 위하여, 전술한 바와 같이 모터 전용 microchip을 이용하여 동작 제어기를 설계하였다.

동작의 안정성 확보를 위하여, 모터의 과도전류 제한 프로그램으로 실현시켰고, 실험을 통하여 파괴재현, 반복위치 정밀도 및 파괴 사이클의 동작 시간 측정을 통하여 제안된 End-Effector가 기구적으로 안정된 동특성과 신뢰성이 보장됨을 알 수 있었다.

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

7. 참고문헌

- [1] 윤지호, 우동민, "파지제어를 이용한 매니플레이터의 파지기법에 관한 연구", 명지대학교 산업기술연구소 논문집 Vol. 14 No.1 pp : 153-160
- [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, "300mm웨이퍼 관련 장비 기술", 반도체 장비 학술심포지엄 Vol.1998 No.1 pp :53-67
- [4] 심귀보, " 학습 알고리즘을 이용한 로봇 매니플레이터의 위치/힘 제어", 중앙대학교 생산공학연구소 논문집 Vol .4 No.1 pp : 69-85
- [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 End-Effector를 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] 이홍규, "유연한 조인트 매니플레이터의 제한된 운동(위치/힘) 제어에 관한 연구", 한국기술교육대학교 논문집, Vol.1 No.1