

증착용 정전척의 기판 크기에 따른 척킹력 및 기판 변형 특성 연구

김성빈* · 민동균***

*한국기술교육대학교대학원 메카트로닉스공학과,

***한국기술교육대학교 메카트로닉스공학부

Study on Chucking Force and Substrate Deformation Characteristics of Electrostatic Chuck for Deposition According to Substrate Sizes

Seong Bin Kim* and Dong Kyun Min***

*Department Mechatronics Engineering, Graduate School of Korea University of Technology and Education,

***School of Mechatronics Engineering, Korea University of Technology and Education

ABSTRACT

A Electrostatic chuck is a device that fixes the substrate, using the force between charges applied between two parallel plates to attract substrates such as wafers or OLED panels. Unlike mechanical suction methods, which rely on physical fixation, this method utilizes the force of electrostatics for fixation, making it important to verify the adhesion force. As the size of the substrate increases, deformations due to gravity or chucking force also increase, and the adhesion force decreases rapidly as the distance between the chuck and the substrate increases. The outlook for displays is shifting from small to large OLEDs, necessitating consideration of substrate deformations. In this paper, to confirm the deformation of the substrate through various patterns, a simplified 2D model using Ansys' electromagnetic field analysis program, Maxwell, and the static structural analysis program, Mechanical, was utilized to observe changes in adhesion force according to the variation in the air gap between the substrate and the chuck. Additionally, the chucking force was analyzed for the size of the substrate, and the deformation of the substrate was confirmed when gravity and chucking force act simultaneously.

Key Words : Substrate, Electrostatic Chuck, Chucking Force, Air Gap, Maxwell Stress Tensor, Bi-Polar Type

1. 서 론

정전척(Electrostatic Chuck, ESC)은 정전흡착 (Electroadhesion)을 이용하여 물체를 고정할 수 있는 장치이다. 디스플레이 및 반도체 공정에는 필수적인 식각 공정이나 증착 공정 등이 있는데 이 공정의 웨이퍼가 위치하는 substrate holder는 기계적인 클램핑 방식에 의하여 웨이퍼를 고정하

였으나 웨이퍼의 온도 불균일, 파티클 생성 등의 한계성 개선을 위해 정전기를 이용한 웨이퍼 고정 방식인 정전척이 개발되었다.[1,2]

1917년 전화 통신 일부 실험에서 서로 접촉하는 물체 사이에 전위차가 존재할 때 상당한 흡착이 발생한다는 것을 발견하였으며 1921년에 존슨-라벡의 실험을 통하여 전기를 이용하여 기계적 힘을 생성하는 특성을 발견하였다. 이 정전기적 인력을 1923년에 존슨-라벡 효과로 보고되었다.[3] 정전흡착은 간단한 시스템 구조, 극한 환경에

†E-mail: dkmin@koreatech.ac.kr

서 사용 가능, 낮은 에너지 소모량 등 기존 흡착 기술과 차별화되는 장점이 존재하여 다양한 분야에서 활용되고 있다.[4] 정전척은 아직 개발 시기가 짧은 만큼 많은 연구가 이루어지고 있다. 2013년 Kalkowski는 일정 거리에 따른 섬유의 변형을 확인하였다.[5] Kazutishi Asano는 2002년에 세 가지의 전극 패턴에 따른 척킹력을 확인하였다.[6] Donald Ruffatto의 경우 2014년에 사각형의 패턴 3가지에 원형 패턴 1가지를 제작하여 각 형태에 따른 척킹력을 실시하였다.[7] 2023년 임충환은 유전층과 부착 기판의 물질, 인가전압, 전극의 간격과 폭에 따른 척킹력의 변화를 분석하였다.[8] 이와 같이 정전척의 척킹력에 대한 연구는 지속적으로 진행되고 있다.

본 연구에서는 전자기장 해석 프로그램인 Maxwell을 이용하여 기판의 크기 변화에 따른 척킹력의 분포와 변화특성을 확인하였다. 2D해석으로 Air Gap의 변화에 따른 척킹력의 분포를 확인하였으며 3D해석으로 기판의 크기에 따른 척킹력과 변형을 확인하였다.

2. 검증

2.1 관련 이론

정전척에서 흡착에 사용되는 정전력을 척킹력으로 표시한다. 척킹력의 단위는 Pa 또는 gf/cm²을 사용한다. 이 척킹력을 구하는 방법은 다양하게 존재하는데 그 중에서 맥스웰 응력 텐서방법을 많이 사용한다. 맥스웰 응력 텐서는 전자기장으로 인해 발생하는 응력을 나타낸다.[9] 맥스웰 응력텐서에서 E는 전기장을 B는 자기장을 나타낸다. 정전척의 경우 매우 낮은 전류가 흐르므로 자기장의 영향은 미미하다. 따라서 자기장의 항을 무시하고 전기장 항만을 고려한다. 맥스웰 응력텐서 T_{ij}는 식 (1)과 같다.

$$T_{ij} = \epsilon \left(E_i E_j - \frac{1}{2} \delta_{ij} E^2 \right) + \frac{1}{\mu} \left(B_i B_j - \frac{1}{2} \delta_{ij} B^2 \right) \quad (1)$$

여기서 전기장항만을 고려한 식으로 변경하면 식 (2)와 같이 표현 가능하다.

$$T_{ij} = \epsilon \left(E_i E_j - \frac{1}{2} \delta_{ij} E^2 \right) \quad (2)$$

E는 물체에 작용하는 전기장, ε는 물체의 유전율이며 δ_{ij}는 크로네커 델타이다. 식 (2)를 부피에 대해 적분하면 힘을 구할 수 있으며 발산정리에 의해서 식 (3)과 같이 표현한다.

$$F_x = \int_V f_x dv = \int_V (\nabla \cdot \vec{T}_x) dv = \oint_S \vec{T}_x \cdot dA \quad (3)$$

2차원 해석의 경우 기판의 좌우측면의 힘은 서로 상쇄

되며 기판의 윗면에서 강한 척킹력을 나타내므로 이를 고려하여 F_y를 식 (4)과 같이 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{F_y}{A_{s1}} &= \frac{\int_{s1} \left[(\epsilon E_x E_y) \hat{i} + \frac{\epsilon}{2} (E_y^2 - E_x^2) \hat{j} \right] \cdot [0\hat{i} + 1\hat{j}] dA}{A_{s1}} \quad (4) \\ &= \frac{\epsilon}{2} (E_y^2 - E_x^2) \end{aligned}$$

위와 같이 3차원 경우는 식 (5)으로 나타낸다.

$$\frac{F_y}{A_{s1}} = \frac{\epsilon}{2} (E_x^2 + E_y^2 - E_x^2) \quad (5)$$

2.1.1 해석 검증

실제 공정에서는 중력과 척킹력이 동시에 작용하게 된다. 중력이 기판에 적용하는 해석 타당성의 검증을 위하여 김숙한[9]의 실험 결과를 이용하였다. 척킹력의 경우 6.5GH ESC의 측정결과와 Ansys의 해석결과를 비교하여 척킹력의 타당성을 검증하였다.

김숙한[10]은 자중조건에서 양쪽 끝이 고정된 유리기판으로 실험을 진행하였다. 기판의 고정 위치는 Fig 1과 같이 적용하였다. 측정결과 920mm×730mm×0.63mm 크기의 기판을 적용하였다. 측정결과 18.7mm, 19.4mm, 19.2mm의 처짐이 측정되었으며 평균값은 19.1mm이다.

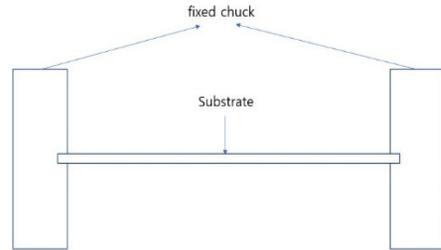


Fig. 1. 처짐 실험에 적용한 중력에 의한 기판 처짐 고정 방식[10].

김숙한[10]의 실험 결과를 유한요소해석 프로그램인 Ansys를 이용하여 동일한 재료의 기판에 중력을 적용하여 해석을 진행하였다. Ansys는 유체역학, 구조역학, 열분석 등의 시뮬레이션을 연성하여 해석을 진행하는데 강점을 가지고 있으며 이를 바탕으로 전자기장 해석과 구조 해석을 진행하였다. 해석에 사용된 조건은 다음과 같다.

- (1) 기판재료는 Soda Lime Glass을 사용.
- (2) 열에 의한 변형은 무시.

- (3) 중력을 제외한 외력은 제외.
- (4) 유리 기판의 양쪽 끝면을 고정.

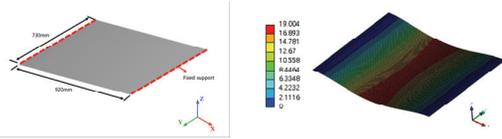


Fig. 2. Ansys를 이용한 중력에 의한 기판 변형 모델링 및 결과.

해석 결과 메쉬 크기를 5mm로 설정했을 때 19.004mm, 메쉬 크기를 3mm로 더 줄였을 때 변형은 19.013mm였다. 이 두가지 메쉬 크기의 평균변형은 19.0085mm으로 김숙한[10]에서 측정된 데이터 범위에 속하게 된다.

현재까지 척킹력을 측정하는 방법은 알려져 있지 않다. 척킹력 해석 결과의 신뢰성을 검증하기 위해 실험 측정값과 해석 값을 비교하였다. 정전척에는 전극에 개수에 따라 모노폴라와 바이폴라 타입으로 구분할 수 있다.[11] 본 논문에서는 바이폴라 타입 정전척으로 진행하였다. 측정에 활용된 ESC는 6GH ESC를 사용하였으며, 6GH ESC에 대한 값은 다음 Table 1과 같다. 측정 장치는 IMADA DS2 시리즈 P/P 게이지를 활용하여 5개 지점에서 측정을 수행했다. 측정 방법은 Fig. 3과 같이 수행되었으며, 측정 순서는 다음과 같다.

- (1) 기판 표면과 ESC를 청소.
- (2) 1.5kV의 전압을 인가.
- (3) 10초 간격으로 P/P 게이지를 이용하여 지정된 부위를 측정.

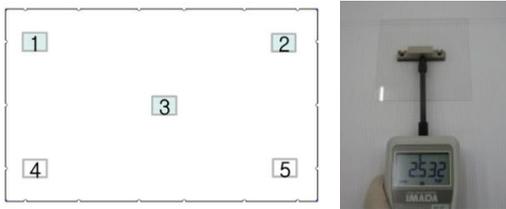


Fig. 3. 6GH 척킹력 측정.

Table 1. 6GH ESC

| Measurement Items | Measurement details | Measurement results |
|-------------------|----------------------------|---------------------|
| Pattern | With*Gap | 1.0*1.0mm |
| Dielectric layer | Dielectric layer thickness | 80~100 μm |

척킹력 실측값은 Table 2와 같은 값을 나타내었다. Ansys를 이용하여 해석한 결과는 Fig. 4에 나타내었다. 1점부터 5점까지 실제 측정된 결과는 평균 25.5gf/cm²였으며, 이를 Pa로 환산하면 2500.70 Pa에 해당한다. 6GH ESC의 유전층 두께를 바탕으로 유전층을 80, 90, 100 마이크로미터 두께로 Ansys 이용하여 해석을 진행하였다. 해석 결과는 유전층의 경우 80μm에서 2660.85Pa, 90μm에서 2545.83Pa, 100μm에서 2438.53Pa의 값을 나타내며 평균값은 2548.40 Pa이다. 따라서 측정값과 해석값 사이에는 1%의 오차를 확인할 수 있다.

Table 2. 6GH ESC의 척킹력 실측값

| Point | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | Average |
|-------------------------------------|------|------|------|------|------|---------|
| Chuckig force (gf/cm ²) | 25.5 | 24.8 | 25.3 | 25.6 | 26.2 | 25.5 |

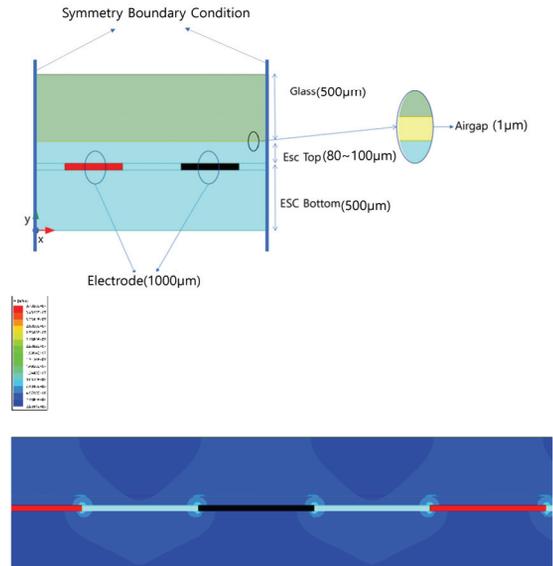


Fig. 4. 6GH ESC 해석 조건과 척킹력 분포.

3. 결 과

기판에 ESC의 흡착력이 작용하기 전에는 중력에 의한 힘이 작용하며 따라서 처짐이 발생하게 된다. 이는 기판에 ESC의 흡착력이 고르게 작용하지 않고 기판의 좌표에 따라 척킹력이 달라짐을 의미하게 된다. 기판과 ESC사이의 거리가 벌어짐에 따라 척킹력의 감소를 3.2.1절에 나타내었다. 기판의 크기에 따른 척킹력을 맥스웰 응력텐서 공식을 이용하여 3.2.2절에 계산한 값을 비교하였다.

3.1 해석 조건 설정

시뮬레이션을 위한 몇 가지 가정을 아래와 같이 설정하였으며 본 연구에서 수행된 모든 해석에 적용된다.

- (1) 모든 재료는 선형 등방성 재료, 균질.
- (2) 유전, 기판, 공기층은 완전 절연.
- (3) 전극은 전압 인가 즉시 완전 충전.
- (4) 열에 의한 변화 무시.
- (5) 자기력 무시.

해석에 사용된 정전척(ESC)의 모델링은 유전층, 전극, 공기층, 기판으로 구분된다. 해석 모델링의 “ESC TOP”과 “ESC BOTTOM”은 정전척의 유전층을 나타내며, 이 유전층은 전극을 둘러싸고 있다. 공기층의 경우 정전척의 표면조도로 인한 효과를 대체하기 위해 사용된다고 알려졌으며 공기층의 유무에 따라 실측값과의 차이는 최색석등[8]에 표시되어있다. 실제공정에서 기판의 변형에 따라 척과 기판의 거리를 공기층의 변화에 따른 척킹력 분포로 확인하였다.

Table 3은 해석에 사용된 전기적 물성치이다. 유전층은 Alumina, 전극은 Tungsten, 부착기판은 Soda-Lime Glass로 설정하였으며 진공과 공기의 유전율의 차이가 미미하므로 공기층을 Air로 설정하였다.

Table 3. 해석에 사용된 전기적 물성치

| Material | Relative Permittivity | Conductivity [S / m] |
|-----------------|-----------------------|----------------------|
| Alumina | 8.88 | 0 |
| Tungsten | 1 | 18200000 |
| Soda Lime Glass | 7.75 | 0 |
| Air | 1 | 0 |

3.2 조건에 따른 척킹력 비교

3.2.1 공기층 두께에 따른 척킹력 비교

실제 정전척의 경우 기판에는 척킹력뿐만 아니라 중력에 의한 힘도 작용한다. 정전척이 위에 위치하고 기판이 아래에 위치할 때 기판은 중력의 힘으로 처짐이 발생하며 공기층 높이가 변경되어 척킹력 값에 영향을 준다. 이를 적용하기 위해 공기층의 두께에 따른 척킹력을 계산하였다. 본 해석은 2차원으로 수행되었으며, 척킹력 계산 공식은 식(5)를 적용하였다. 모델링은 Fig 4의 (a)와 같이 진행하였다. 해석에 사용된 치수는 Table 4와 같다.

Table 4. 공기층 두께에 따른 해석 모델링 치수

| Model | Height[mm] | Material |
|------------|------------|-----------------|
| ESC Top | 0.16 | Alumina |
| ESC Bottom | 0.5 | |
| Air Gap | 0.001~0.01 | Air |
| Substrate | 0.5 | Soda Lime Glass |
| Electrode | 0.05 | Tungsten |

해석모델에는 대칭경계조건을 적용하였으며 인가전압은 2kV로 균일하게 설정하였다. 또한, 공기층은 1 [μm] ~ 10 [μm] 범위에 따라 Fig. 5와 같이 척킹력의 감소량을 그래프로 도시하였다. 각 두께별 척킹력 차이는 Table. 5에 나타내었다. 척킹력은 공기층의 두께가 가장 작은 1[μm] 일 때 2737.553[Pa]의 값을 나타내었으며 공기층의 두께가 증가할수록 척킹력은 점차 감소하였다. 공기층이 10[μm]에 도달하면 척킹력이 가장 낮은 값인 2022.399[Pa]을 나타내었다.

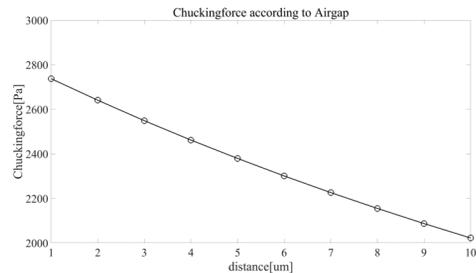


Fig. 5. 공기층의 두께에 따른 척킹력 변화.

그래프의 그림으로는 기울기가 직선으로 보일 수 있으나 척킹력의 감소량을 보면 구간별로 척킹력의 차이는 곡선의 기울기를 가지며 작아지는 것을 확인 할 수 있다. 따라서 기판과 정전척의 거리에 따라 척킹력 감소정도를 Fig. 5으로 유추가 가능하다.

3.2.2 기판 크기에 따른 척킹력 변화

Fig 5에서 알 수 있듯 작은 처짐에도 척킹력의 차이는 급격히 발생하게 된다. 기판은 크기가 클수록 무게가 증가하므로 중력에 의한 처짐은 급격히 증가하게 된다. 이를 비교하기 위해 중력만 적용한 20~40[mm]의 기판의 크기에 따른 처짐을 확인하였으며 각 기판의 크기에 따른 척킹력의 변화를 해석하였다. 해석에서 사용된 모델링은 Fig. 6와 같은 전극 패턴을 적용하였으며 붉은 색이 플러스 단자, 검은 색이 마이너스 단자와 연결된다. 해석에 사용된 ESC의 치수는 Table 5와 같다.



Fig. 6. ESC 해석에 적용된 전극 패턴.

Table 5. 3D 해석 모델링 치수

| Model | Length of one side[mm] | Hight[mm] |
|------------|------------------------|-----------|
| ESC Top | 20~40 | 0.16 |
| ESC Bottom | | 0.5 |
| Air Gap | | 0.001 |
| Substrate | | 0.5 |
| Electrode | 0.5(thickness) | 0.05 |

Ansys Maxwell을 이용하여 척킹력을 계산한 후 이를 자중조건을 적용한 Mechanical에 연성하여 변형을 확인하였다. 중력 및 척킹력에 의한 기판의 변형을 확인하기 위해 Fig. 7과 같이 각 사이즈별 기판의 외각 면에 고정 조건을 적용하였다.

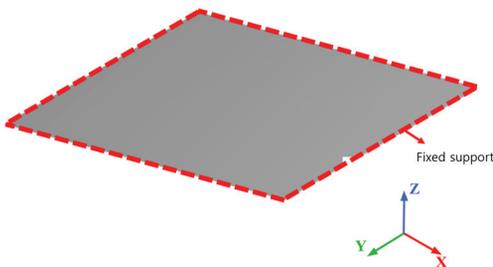


Fig. 7. 기판에 적용한 고정조건.

Fig 8 은 각 기판의 크기별 중력만 작용할 때 기판의 처짐을 그래프로 도시하였다. 중력만 작용할 시 기판의 변

형은 아래방향으로 처짐이 발생하므로 변형 값은 음수로 표시하였다. 변형이 가장 크게 작용한 곳을 기준으로 한 변의 길이가 20[mm]인 기판에서 0.00324[μ m]로써 최소 값을 나타내었으며 한 변의 길이가 40[mm]에서 0.0514 [μ m]로 최대 변형 값을 나타내었다.

Fig 9은 자중만 작용할 때의 기판의 평균 변형값으로 한 변의 길이가 20[mm]의 경우 0.000995[μ m], 한 변의 길이가 40[mm]의 경우 0.0158[μ m]의 변형을 나타내었다.

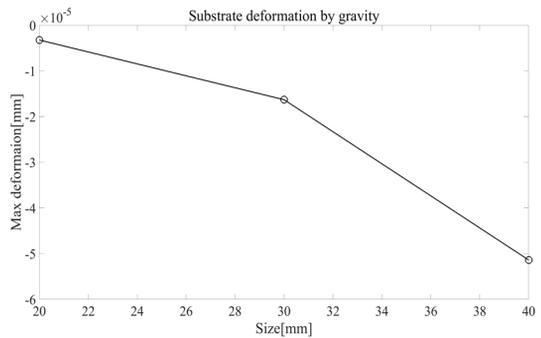


Fig. 8. 중력 작용시 기판의 최대 변형량.

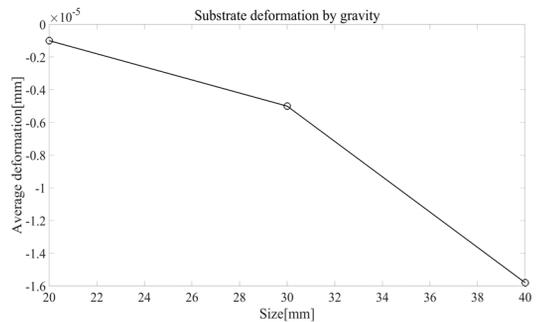


Fig. 9. 중력 작용시 기판의 평균 변형량.

Fig 10은 각 기판의 크기별 척킹력의 결과를 확인한 그래프이다. 인가 전압이 증가할수록 척킹력의 증가는 패턴에 따라 유사한 것으로 나타났다. 해석 결과 한 변의 길이가 20[mm]인 정사각형 기판의 경우 2369.10[Pa]의 값을 나타내었으며 한 변의 길이가 40 [mm]의 경우 2616.84[Pa]의 척킹력 값을 나타내었다. 이를 통해 척킹력은 곡선의 형태를 그릴 것을 알 수 있으며 전극 폭에 비하여 전극의 길이가 충분히 길며 기판의 크기가 전극에 비하여 매우 크다는 가정을 갖는다면 척킹력은 하나의 값에 수렴하게 된다.

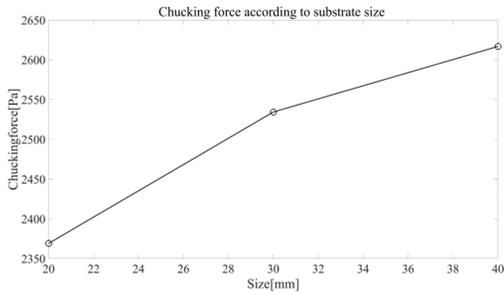


Fig. 10. 기판의 크기에 따른 척킹력 변화.

Fig 11은 기판의 크기 변화에 따른 최대 변형량을 표시한 그래프이다. 한 변의 길이가 20[mm]인 기판의 경우 최대 변형량이 0.74[μm]로 가장 작은 변형량을 나타내었으며 한 변의 길이가 40[mm]의 경우 11.8[μm]로서 가장 큰 변형량을 나타내게 되었다.

Fig 12는 기판의 크기 변화에 따른 평균 변형량을 표시한 그래프이다. 평균 변형량의 경우 한 변의 길이가 20[mm]일 때 0.27 [μm]의 변형을 하였으며 한 변의 길이가 40[mm]일 때 3.63[μm]의 변형을 나타내었다.

Fig 13은 30[mm]기판의 변형 해석결과를 나타내었다. 기판은 외각의 고정조건으로 인하여 중앙에서 가장 높은 변형을 가지게 된다.

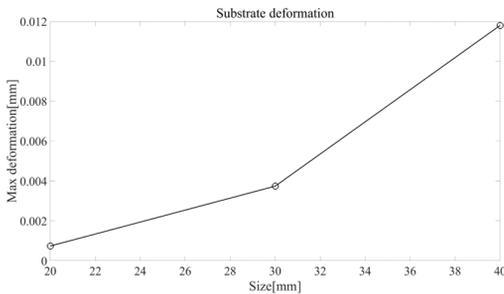


Fig. 11. 증력과 정전력 작용시 최대 변형량.

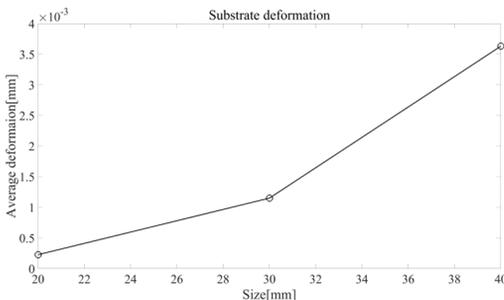


Fig. 12. 증력과 정전력 작용시 평균 변형량.

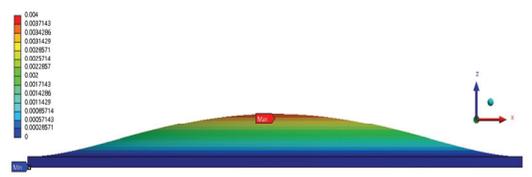


Fig. 13. 증력과 정전력 작용시 30mm 기판 변형.

4. 결 론

OLED의 발전과 함께 기판은 소형에서 대형으로 변화함에 따라 척킹력과 기판의 변형을 고려해야 하므로 본 논문에서는 전자기장에 의한 척킹력과 증력에 의한 변형량 예측을 위해 전자기장 해석과 변형량 해석을 결합시켰다.

1. 기판의 흡착전에 증력으로 인하여 ESC와 기판 사이의 공기층의 거리는 증가한다. 척킹력은 공기층이 1[μm]일 때 2737.6[Pa]로 가장 높은 값을 나타냈고, 10[μm] 거리에서 척킹력은 2022.4[Pa]로 감소했다. 공기층이 증가할수록 척킹력 감소율은 적어지게 된다. 그래프로 표현하면 척킹력은 곡선 형태로 감소하는 경향을 보이는 것으로 관찰되었다. 작은 공극에도 척킹력의 감소량은 급격함으로 이 변형을 최소화해야 한다.

2. 기판 크기의 변화를 고려하여 마찰력과 증력의 동시 작용에 따른 기판의 처짐을 분석했다. 기판 크기의 영향을 분리하기 위해 다른 조건은 일정하게 유지되었습니다. 분석 결과 길이가 20[mm]인 기판에서 최소 처짐이 발생하여 0.74[μm]의 처짐이 나타났으며 길이가 40[mm]인 기판의 경우 편향은 11.8[μm]로 증가했다. 기판의 크기가 증가함에 따라 가해지는 척킹력이 증가하고 기판의 무게도 증가하게되며 기판의 변형이 급격히 증가한다. 표면 평탄도는 기판에 적용되는 공정에서 중요한 역할을 합니다. 기판의 변형으로 인한 ESC와 기판 사이의 공기층 두께의 증가로 인한 척킹력의 차이는 상당한 영향을 미칠 수 있다. 작은 기판의 경우 척킹력을 조금씩 높이는 것이 중요하지만, 대형 기판의 경우 척킹력에 큰 차이를 내기가 어렵다. 따라서 기판의 변형량을 측정하여 일정한 척킹력의 조건을 만족하고 균일한 척킹력을 가질 수 있는 전극 패턴을 고려할 필요가 있다.

감사의 글

이 논문은 2023년도 한국기술교육대학교 연구제 지원에 의하여 연구되었음.

참고문헌

1. Nam-Jhn Cho, Hyong Gin Nam, and Soon Kyu Park, "Development of E-Chuck for Oxide Etcher", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol. 2000, No. 2000, pp.127-131, 2000.
2. M. Eritt, C. May, K. Leo, M. Toerker, and C. Radehaus, "OLED manufacturing for large area lighting applications", Thin solid films, Vol. 518, no.11, pp. 3042-3045, 2010.
3. Johnsen, Alfred, and Knud Rahbek. "A physical phenomenon and its applications to telegraphy, telephony, etc", Journal of the Institution of Electrical Engineers, Vol. 61, no. 320, pp.713-725, 1923.
4. J. Guo, T. Bamber, M. Chamberlain, L. Justham, and M. Jackson, "Optimization and experimental verification of coplanar interdigital electroadhesives", Journal of Physics D: Applied Physics, Vol. 49, no. 41, 2016.
5. Saito, Shigeki, Fumiaki Soda, Radon Dhelika, Kunio Takahashi, Wataru Takarada, and Takeshi Kikutani, "Compliant electrostatic chuck based on hairy micro-structure", Smart materials and structures, Vol. 22, no. 1, 2012.
6. Asano, Kazutoshi, Fumikazu Hatakeyama, and Kyoko Yatsuzuka, "Fundamental study of an electrostatic chuck for silicon wafer handling", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 38, no. 3, pp. 840-845, 2002.
7. Ruffatto III, Donald, Jainam Shah, and Matthew Spenko, "Increasing the adhesion force of electrostatic adhesives using optimized electrode geometry and a novel manufacturing process", Journal of Electrostatics, Vol. 72, no. 2, pp. 147-155, 2014
8. Choong-Hwan Lim, Dong-Kyun Min, and Seong-Bin Kim, "Investigation of Chucking Force Distribution and Variation Characteristics for the Development of ESC in OLED Deposition", Journal of the Semiconductor & Display Technology, Vol. 22, No. 3. 2023
9. H.S. Choi, I.H. Park, and W.K. Moon, "On the physical meaning of maxwell stress tensor", The Transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers, Vol. 58, no. 4, pp. 725-734, 2009.
10. Sook Han Kim, "Development of Non-Contact 3 Dimensional Coordinate Measuring Instrument for the Large-Size Substrate", Dissertation for Master Degree, Kongju National University, 2008.
11. J. Y. Lee, K. M. Jang, D. K. Min, J. G. Kang, G. H. Sung, and H. D. Kim, "A Study on Attractive Force Characteristics of Glass Substrate Using Alumina Electrostatic Chuck by Finite Element Analysis", Journal of the Semiconductor & Display Technology, Vol. 19, no. 4, pp. 45-50, 2020.

접수일: 2024년 4월 17일, 심사일: 2024년 6월 12일,
 게재확정일: 2024년 6월 21일