

정전척 표면의 온도 균일도 향상을 위한 냉매 유로 형상에 관한 연구

김대현* · 김광선†

*한국기술교육대학교 대학원 메카트로닉스 공학부,

†한국기술교육대학교 메카트로닉스 공학부

Study on Coolant Passage for Improving Temperature Uniformity of the Electrostatic Chuck Surface

Dae-Hyeon Kim* and Kwang-Sun Kim†

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

†Department of Mechatronics Engineering, Korea University of Technology and Education

ABSTRACT

As the semiconductor production technology has gradually developed and intra-market competition has grown fiercer, the caliber of Si Wafer for semiconductor production has increased as well. And semiconductors have become integrated with higher density. Presently the Si Wafer caliber has reached up to 450 mm and relevant production technology has been advanced together. Electrostatic chuck is an important device utilized not only for the Wafer transport and fixation but also for the heat treatment process based on plasma. To effectively control the high calories generated by plasma, it employs a refrigerant-based cooling method. Amid the enlarging Si Wafers and semiconductor device integration, effective temperature control is essential. Therefore, uniformed temperature distribution in the electrostatic chuck is a key factor determining its performance. In this study, the form of refrigerant flow channel will be investigated for uniformed temperature distribution in electrostatic chuck.

Key Words : Coolant, electrostatic chuck, CFD, Temperature Uniformity, Heat transfer

1. 서 론

세계 반도체 시장에서 경쟁이 심화되어가면서 반도체 생산을 위한 실리콘 웨이퍼의 대구경화와 반도체 소자의 고집적화가 진행되고 있다. 동시에 이러한 수요를 충족하기 위한 반도체 공정 기술 또한 빠르게 발전하고 있다.

반도체 공정 중 반도체의 이송 및 고정을 위해 척(Chuck)을 사용한다. 척에는 일반적으로 진공 흡착을 이용한 진공척, 정전력을 사용하는 정전척, 베르누이 원리를 이용한 비접촉 방식의 웨이퍼 척 방식을 사용한다. 척

의 사용은 웨이퍼를 밀착시켜 균일한 공정 처리가 가능하게 하고 파티클 발생을 최소화 할 수 있다는 장점을 가지고 있다[1]. 일반적으로 폴리이미드를 사용하는 저가형 폴리머 정전척과 알루미늄 등의 재료를 사용하는 고가의 세라믹 정전척을 병행하여 사용하고 있으나 점차 세라믹 정전척의 사용이 증가하고 있는 추세이다[2][3].

반도체 공정에는 다양한 공정이 있지만 이중에 핵심 공정 중 하나는 플라즈마를 이용한 식각(Etching)공정이다. 플라즈마를 이용한 식각 공정 진행 시 웨이퍼에 인가되는 플라즈마로 인해 많은 열이 발생하고 이 열을 효과적으로 제어하기 위해 헬륨(He) 등의 냉각 가스를 웨이퍼

†E-mail: kskim@koreatech.ac.kr

배면에 흘러 냉각하며, 냉각의 효과를 높이기 위하여 정전척 내부에 전도를 통한 열 방출을 돕기 위하여 냉매를 순환시킨다[4]. 반도체 공정의 효율을 높이기 위해서는 플라즈마에 의해 발생한 열을 얼마나 빠르고 균일하게 냉각시킬 수 있는지가 중요한 인자가 된다[5]. 정전척의 온도 균일도는 웨이퍼의 수율과 밀접한 관계를 갖게 된다. 따라서 본 연구에서는 CFD를 통해 냉매를 이용한 직접 냉각에 있어서 냉매가 흐르는 유로의 형태에 따라 정전척의 온도 균일도에 미치는 영향에 대해서 확인하고자 한다. CFD를 통해 다양한 유로 형태에 따라 정전척의 온도 균일도와 냉각 효과를 확인하고 가장 효과적인 냉매 유로 형태를 제안한다.

2. 본 론

2.1 지배방정식

일반적인 지배방정식의 표현은 다음과 같다[6].

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\Phi) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \Phi) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\Gamma_{\Phi} \frac{\partial \Phi}{\partial x_i} \right] + S_{\Phi} \quad (1)$$

여기서 t 는 시간 ρ 은 밀도, Φ 는 공정가스의 상태량에 대한 종속 함수, Γ_{Φ} 는 상태량 종속 함수에 대한 확산계수 S_{Φ} 는 Φ 에 대한 생성항이다.

식 (1)은 종속함수 Φ 에 따라 다양한 형태로 표현할 수 있다. $\Phi=1$ 인 경우에는 이 지배 방정식은 연속방정식으로 표현할 수 있다. Φ 가 속도의 성분인 경우에는 모멘텀 방정식을 표현할 수 있고 Φ 가 엔탈피의 형태로 표현되면 에너지 방정식이 된다.

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = s_m \quad (2)$$

식(2)는 유동에 대한 질량 보존 방정식이다. 본 연구에서 s_m 은 0으로 가정하였다.

직교 좌표계를 사용하는 관성 기준계에서 운동량 방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (3)$$

$$\tau_{ij} = \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \quad (4)$$

점성 소산을 무시한 정상상태 유동에서의 에너지 방정식은 다음과 같다.

$$\text{div}(\rho u h) = \text{div}(k \nabla T) + S_h \quad (5)$$

식 (5)는 정상 저속 유동에 관한 에너지 방정식이다. h 는 엔탈피, k 는 열 전도율, T 는 온도, S_h 는 생성항으로 단위체 적당 열 발생률을 나타낸다.

2.2 정전척 내부의 냉매 유로 형상

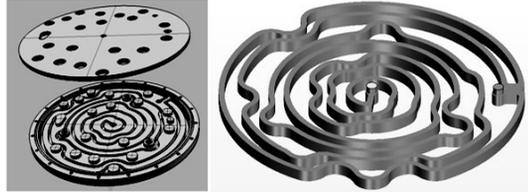


Fig. 1(a). Geometry model of original model.



Fig. 1(b). Geometry model of revised model 1.



Fig. 1(c). Geometry model of revised model 2.

본 연구에서 CFD를 통하여 냉매의 유로 형상에 따른 냉각효과를 확인하고자 하는 형상은 총 3가지이다. 전체적으로 냉매 유로의 형상은 원형 구조를 가지고 있으며 Fig. 1(a)는 기존의 정전척에서 사용하고 있는 냉매의 유로의 형상이다. Fig. 1(b)는 정전척 내부의 냉매 유로 형상을 조밀한 원형 방열판 구조를 가진 형상이며 Fig. 1(c)의 형상 역시 원형 방열판 구조의 냉매 유로이지만 Fig. 1(c)의 형상보다는 냉매 유로의 폭과 이 큰 형상이다.

2.3 격자 생성

수치해석을 진행하기 앞서 냉매가 유로를 따라 흐르게 되는 영역인 유동장을 생성하였다. 정전척의 형상과 생성한 유동장 형상을 바탕으로 계산을 위한 격자를 생성하였



Fig. 2. Generated grid.

한 유동장 형상을 바탕으로 계산을 위한 격자를 생성하였다. 격자 생성은 STAR-CCM+ ver.11.02을 통해 생성하였으며 복잡한 유로의 형상을 고려하여 비정렬 격자계와 다면체격자를 사용하여 생성하였다[7]. 생성된 격자의 형상은 Fig. 2과 같으며 격자의 개수는 약 500만개이다.

2.4 경계조건



Fig. 3(a) Location of Heat.

Fig. 3(b) Inlet and Outlet.

수치해석을 위해 설정한 경계 조건은 다음과 같다. 냉매 유로의 형상에 따른 냉각효과를 확인하기 위해 Si 웨이퍼가 위치하는 영역에 일정한 온도의 열원 조건을 부과하고 다양한 냉매의 유속에 따라 그 효과를 확인하였다. 외부로부터의 열이 가해지는 위치는 Fig. 3(a)의 위치와 같다. 또한 열 부가되는 상부 이외의 면은 단열 조건으로 가정하고 수치 해석을 진행하였다. 열원의 온도와 정전척 내부에서 흐르는 냉매의 유속 조건은 Table 1과 같다. 정전척 하부 면에 냉매의 공급을 위한 Inlet과 냉각과정을 거친 냉매의 배출을 위한 Outlet이 위치하며 그 형상과 위치는 Fig. 3(b)의 그림과 같다. 해석에 사용한 냉매의 물성치는 실제 사용하는 냉매인 R501a의 온도별 데이터 시트를 기반으로 사용하였으며 그 20°C기준의 물성치는 Table 2에 나타내었다. 유로 내에서의 냉매는 Re수 1 내외의 저 Re 유동으로서 층류의 영역에서 유동하므로 층류 유동으로 해석을 진행하였다.

Table 1. Boundary conditions of simulation

열원 조건	300 (°C)
냉매 유속	0.1 (kg/s)
	0.5 (kg/s)
	1 (kg/s)

Table 2. Properties of R501a

Density	1067.63(kg/m ³)
Dynamic Viscosity	0.15(Pa·s)
Specific Heat	1504.32(J/kg·K)
Thermal Conductivity	0.72(W/m·K)

3. 해석결과

Table 3의 결과는 기존의 정전척에서 사용하는 냉매 유로 형상에서 각 유량 별로 최대온도, 최소온도, 표준편차, 균일도의 수치 해석결과를 나타낸 결과이다. Table 4의 결과는 조밀한 원형 방열판 구조의 냉매 유로 형상에서의 수치해석 결과이며 Table 5의 결과는 조밀한 원형 방열판 형상의 냉매 유로를 가지는 정전척의 해석결과이다. 각 형상에 대한 해석결과를 살펴보면 기존의 냉매 형상보다는 냉매 유로와 웨이퍼가 위치하는 정전척 상부 면과의 접촉 면적을 증가시킨 원형 방열판 구조가 냉각 성능이 더 우수함을 확인 할 수 있다. 또한 냉매 유로의 면적과 간격에 따른 영향은 냉매 유로의 면적과 간격을 조밀하게 형성한 냉매의 유로가 냉각 효과가 더 뛰어남을 확인할 수 있다.

Table 3. Results of numerical analysis (Original model)

유량	조건	최대 온도	293 °C
		0.1 kg/s	최소 온도
0.1 kg/s		표준편차	3.64e-01
		균일도	9.991e-01
		0.5 kg/s	최대 온도
0.5 kg/s		최소 온도	283 °C
		표준편차	5.57e-01
		균일도	9.991e-01
1 kg/s		최대 온도	286.69 °C
		최소 온도	283 °C
		표준편차	1.04e+00
1 kg/s		균일도	9.984e-01

Table 4. Results of numerical analysis(Revised model 1)

조밀형상	0.1 kg/s	최대 온도	294.55℃
		최소 온도	283℃
		표준편차	5.12e-02
		균일도	9.992e-01
	0.5 kg/s	최대 온도	285.49℃
		최소 온도	283℃
		표준편차	3.94e-02
		균일도	9.991e-01
	1 kg/s	최대 온도	284.22℃
최소 온도		283℃	
표준편차		2.86e-02	
균일도		9.991e-01	

Table 5. Results of numerical analysis(Original model 2)

비조밀형상	0.1 kg/s	최대 온도	283℃
		최소 온도	283℃
		표준편차	2.21e-02
		균일도	9.995e-01
	0.5 kg/s	최대 온도	300℃
		최소 온도	283℃
		표준편차	4.71e-02
		균일도	9.999e-01
	1 kg/s	최대 온도	300.96℃
최소 온도		283℃	
표준편차		6.43e-02	
균일도		9.991e-01	

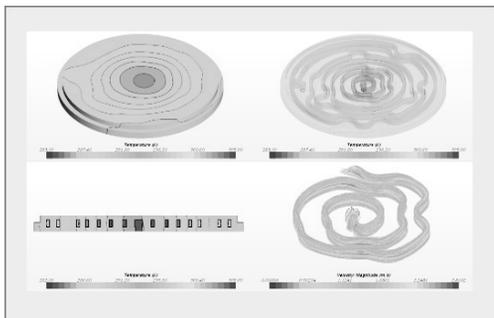


Fig. 4. Simulation results of original Model(0.1Kg/s).

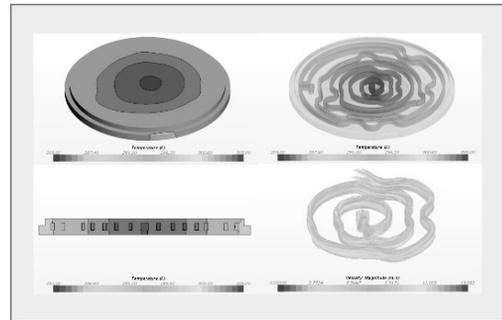


Fig. 5. Simulation results of original Model(0.5Kg/s).



Fig. 6. Simulation results of original Model(1Kg/s).

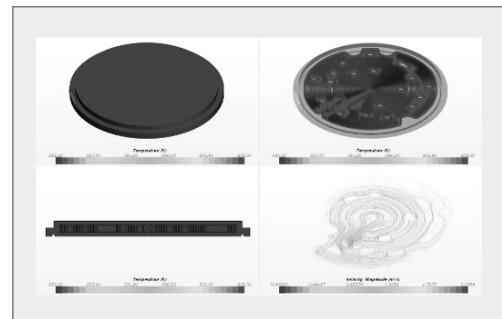


Fig. 7. Simulation results of revised Model 1(0.1Kg/s).

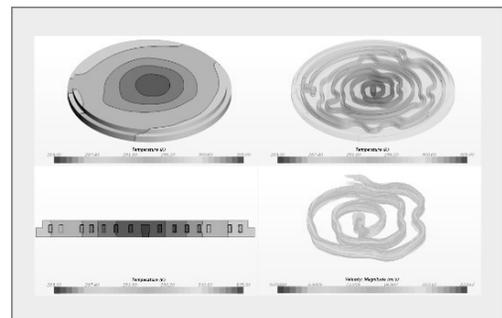


Fig. 8. Simulation results of revised Model 1(0.5Kg/s).

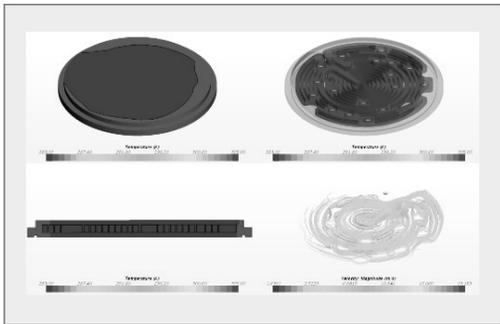


Fig. 9. Simulation results of revised Model 1(1Kg/s).

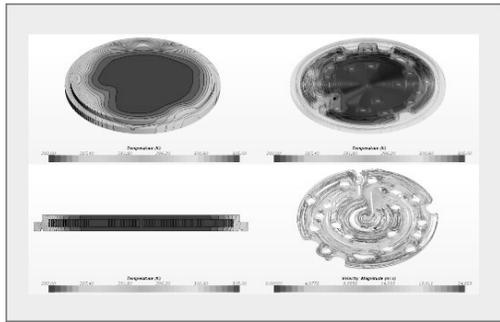


Fig. 10. Simulation results of revised Model 2(0.1Kg/s).

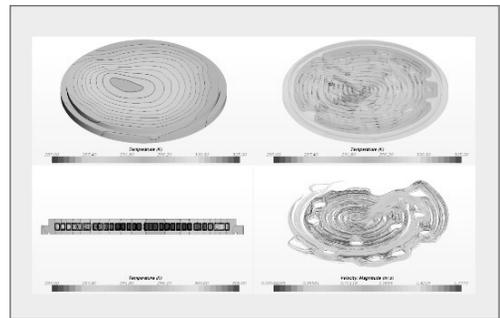


Fig. 11. Simulation results of revised Model 1(0.5Kg/s).

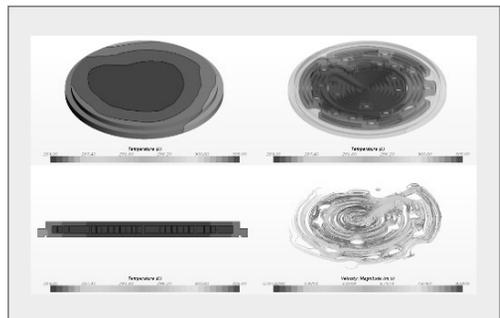


Fig. 12. Simulation results of revised Model 1(1Kg/s).

Fig. 4부터 Fig. 12는 3 가지의 해석형상에 대해서 유량 별로 해석결과를 나타낸 그림이다. 각 해석 형상에서 냉매의 유량 별로 정전척에서의 전체적인 온도 분포와 냉매 유로 내에서 냉매의 유동 형태를 파악할 수 있다.

4. 신뢰성 검증

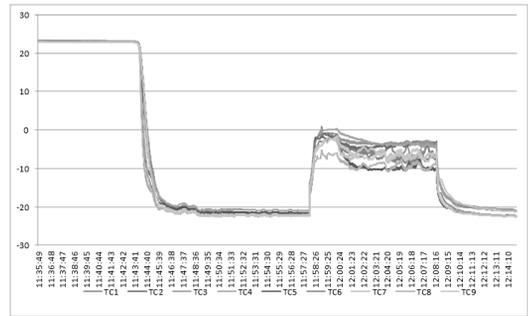


Fig. 13. Experimental data for validation.

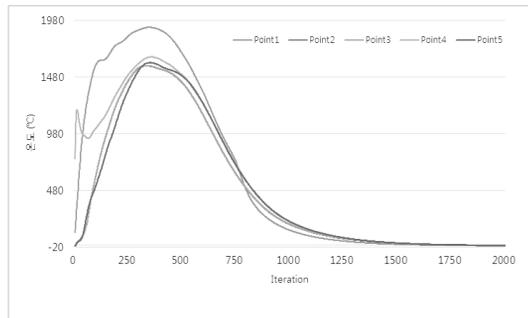


Fig. 14. Results of simulation for validation.

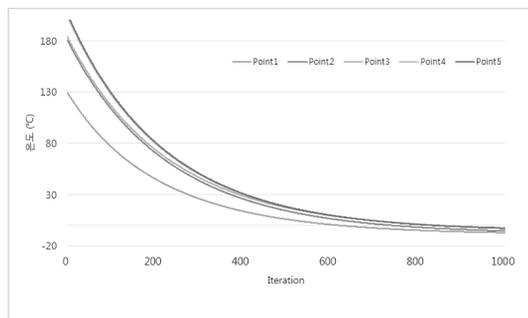


Fig. 15. Results of simulation for validation(enlarge).

정전척 내부 유로 형상에 따른 정전척의 열균일도와 냉각효과에 대한 수치해석 결과를 통해 비교적 조밀한 원형 방열판 구조의 냉매 유로 형상이 가장 효과적임을 확인하였다. 수치 해석의 결과를 확인하기 위해 정전척을

제작하여 실제 냉각시스템에 연결하여 온도 균일도를 확인하였다. Fig. 13은 정전척을 실제 냉각시스템에 연결하고 실험한 결과이다. 실험은 정전척 상부에 할로겐 램프를 이용하여 5kw의 열 부하를 가하고 냉각 시스템을 통해 냉매를 -20℃의 R501a 냉매를 순환시켰을 때 정전척 상부에 위치한 Thermal Couple을 통해 온도 데이터를 획득하였다. Fig. 14와 Fig. 15는 실험과 동일한 조건으로 수치 해석을 진행한 결과이다. 실험결과와 해석결과를 비교해보면 약 3% 내외의 오차가 발생하며 이 오차는 실험조건과 해석조건의 차이를 감안하면 신뢰할 수 있는 결과라고 판단할 수 있다. 이를 통해 이번 연구에서 수행한 전체적인 수치해석의 신뢰도를 확인할 수 있다.

5. 결 론

이번 연구에서는 기존의 정전척에서 사용하는 냉매 유로 형상과 조밀한 원형 방열판 형상의 유로 형상, 그리고 비교적 조밀하지 않은 원형 방열판의 유로 형상 간에 CFD를 이용한 수치해석을 통해 냉각 후 온도 균일도와 냉각효과를 확인하였다. 수치해석 결과 기존의 유로 형상보다 원형 방열판 구조를 가진 형상에서 높은 온도 균일도와 냉각 효과를 가지고 있음을 알 수 있었다. 또한 냉매 유로를 조밀하게 설정하여 열 교환 면적을 넓게 설계하였을 때 더 높은 효율을 보임을 수치 해석을 통해 확인하였다. 또한 전체적으로 유량이 증가할수록 정전척 상부면에서의 최대 온도는 하강하는 경향을 보였지만 온도간의 표준 편차는 증가하는 증가하면서 온도 균일도 면에서는 낮은 성능을 보였다. 추가적인 연구를 통해 냉각의 효과를 높이기 위해 사용하는 He가스의 조건을 추가한 상태에서 보다 정확하고 실제 가동조건과 유사한 상태하에 수치 해석을 진행하여 정확한 냉각 효과 및 조건을 확인할 필요성이 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 산업기술혁신사업의 재원으로 한국산업기술평가원의 지원을 받아 수행된 신 성장동력 장비경쟁력 강화사업(10059126)입니다.

참고문헌

1. K. Asano, F. Hatakeyama, K. Yatsuzuka, "Fundamental Study of an electrostatic chuck for silicon wafer handling", IEEE TRANSACTION ON INDUSTRY APPLICATION, Vol. 38, No. 3, 2002.
2. L.D. Hartsough, "Electrostatic Wafer Holding", Solid state tech. 35, No. 1, pp. 87-90, 1993.
3. S. A. Khomyakov, "Attraction and Accuracy Characteristic of Electrostatic Chucks", Machines and Tooling 50, No. 3, pp.24-24, 1979.
4. Tretheway, D. and Aydil, E.S., "Modeling of Heat Transport and Wafer Heating Effects during Plasma Etching", J. Electrochem. Soc., Vol. 143, pp.3674-3680, 1996.
5. Daviet. J., Peccoud L., "Heat Transfer in a Micro Electronics Plasma Reactor", J. Appl. Phys, Vol. 73, pp.1471-1479, 1993.
6. Suhas V. Patankar(1980), Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, McGraw-Hill Book Company.
7. CD-adapco(2016), STAR-CCM+ UserGuide ver. 11.02.

접수일: 2016년 9월 11일, 심사일: 2016년 9월 19일,
게재확정일: 2016년 9월 23일