

플라즈마 식각장치내 노즐의 위치에 따른 희박기체유동 및 알루미늄 식각률의 변화에 관한 연구

황영규[†] · 허중식^{*}

(2002년 2월 27일 접수, 2002년 7월 10일 심사완료)

Effects of Nozzle Locations on the Rarefied Gas Flows and Al Etch Rate in a Plasma Etcher

Young-Kyu Hwang and Joong-Sik Heo

Key Words: Plasma Etching(플라즈마 식각), Rarefied Gas Flow(희박기체유동), Etch Rate(식각률), Direct Simulation Monte Carlo Method(직접모사법), Knudsen Number(누센수)

Abstract

The direct simulation Monte Carlo(DSMC) method is employed to calculate the etch rate on Al wafer. The etchant is assumed to be Cl₂. The etching process of an Al wafer in a helicon plasma etcher is examined by simulating molecular collisions of reactant and product. The flow field inside a plasma etch reactor is also simulated by the DSMC method for a chlorine feed gas flow. The surface reaction on the Al wafer is simply modelled by one-step reaction: 3Cl₂+2Al → 2AlCl₃. The gas flow inside the reactor is compared for six different nozzle locations. It is found that the flow field inside the reactor is affected by the nozzle locations. The Cl₂ number density on the wafer decreases as the nozzle location moves toward the side of the reactor. Also, the present numerical results show that the nozzle location 1, which is at the top of the reactor chamber, produces a higher etch rate.

기호설명	
c	속도
d	분자직경(molecular diameter)
ER	식각률(etch rate)
f	속도분포함수
Kn	Knudsen number
k	Boltzmann 상수
m	질량
N	분자 플럭스

n	:	수밀도(number density)
p	:	압력
Q	:	유량
T	:	온도
W	:	가중계수
그리스문자		
λ	:	평균자유경로(mean free path)
μ	:	점성계수
ρ	:	밀도
σ	:	충돌단면적

[†] 책임저자, 회원, 성균관대학교 기계공학부
E-mail : ykhwang@yurim.skku.ac.kr
TEL: (031)-290-7437 FAX: (031)-290-5849

^{*} 성균관대학교 기계공학부

1. 서론

플라즈마를 이용한 식각과정은 반도체 공정기술에서 매우 중요한 과정이다. 식각과정의 중요

한 특성은 방향성, 균일성, 그리고 높은 식각률(etch rate)에 있다.⁽¹⁾ 현재까지의 식각률에 관한 해석을 보면 대부분 연속체적 접근방법에 의존하고 있으나, 이 방법은 압력이 낮은 영역에서는 정확성이 떨어진다. 한 예로 플라즈마 식각장치의 특성길이 L 을 100 mm, 기체분자의 평균자유경로 λ 를 1 mm 보다 크다고 하면 기체유동은 연속체영역과 자유분자영역의 중간인 분자천이영역이 된다. 이러한 조건하에서는 일반적으로 Navier-Stokes 방정식은 그 의미를 상실하게 된다.

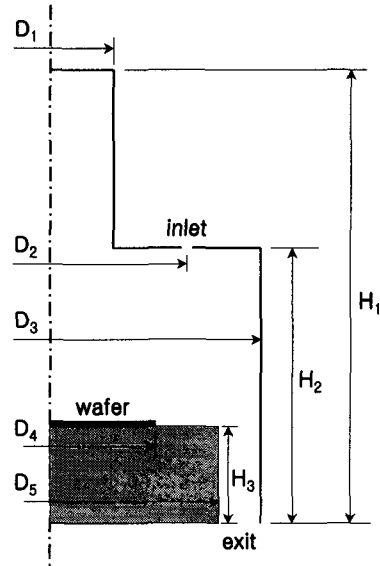
분자천이영역에서는 기체분자의 평균자유경로 λ 가 시스템의 특성길이 L 과 비슷할 정도로 커지게 된다. 이러한 희박기체유동에서는 무차원수인 Kn 수(Knudsen number, λ/L)가 비교적 크게 되며, 유동은 Kn 수가 작은 연속체 유동과는 매우 다르게 된다. 따라서 분자적인 관점의 해석이 요구된다.

최근 희박기체유동의 해석방법인 DSMC(direct simulation Monte Carlo)법을 이용하여 Nanbu,⁽²⁾ Nanbu 등⁽³⁾은 ICP(inductively coupled plasma) 반응로(reactor)내에서의 기체유동을 해석하였다. 그리고 Font와 Boyd,⁽⁴⁾ Font 등,⁽⁵⁾ Serikov 등⁽⁶⁾은 헬리콘(helicon) 플라즈마 반응로내의 기체유동을 해석하였다.

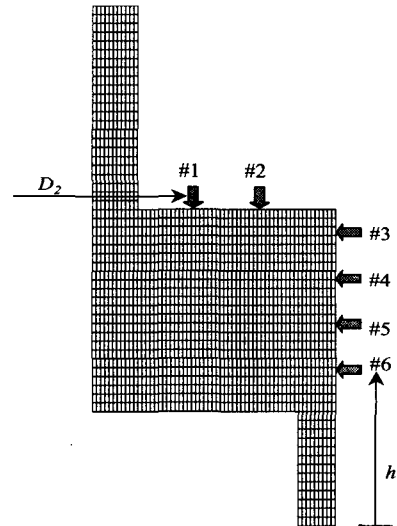
Font와 Boyd⁽⁴⁾는 실험을 통해 얻어진 전자에너지와 밀도분포를 이용하여 Cl_2 기체 및 이온(ion) 유동을 DSMC법으로 해석하였다. 또한 노즐의 위치를 3가지로 변화시키면서 반응로 내부에서 각 기체성분의 밀도분포를 구하였다. Font 등⁽⁵⁾은 반응로 내부벽 표면에서의 Cl 원자의 재결합 반응의 영향을 규명하였다. 이로 인해 결과적으로 반응로내의 Cl 원자가 부족하여 이온화율이 낮아지고, 웨이퍼로의 Cl^+ 이온의 도달이 줄어들게 됨을 확인하였다. 그러나 이들의 연구^(4,5)는 웨이퍼 표면에서의 화학반응을 고려하지는 않았다. 한편 Serikov 등⁽⁶⁾은 웨이퍼 표면에서 화학반응을 고려하여 헬리콘 플라즈마 반응로내의 기체유동을 DSMC법을 이용하여 해석하였다.

본 연구에서는 Serikov 등⁽⁶⁾이 연구한 헬리콘 플라즈마 반응로에 대하여 DSMC법을 이용하여 반응로내의 기체유동을 해석하였다. 효과적인 식각작업이 되기 위해서는 웨이퍼와 반응하여 생성된 기체들이 신속히 반응로 출구로 펌핑되어야만 한다. 본 연구에서는 기체도입용 노즐의 위치에

따른 식각장치내의 유동장의 변화를 고찰함으로써 효과적인 식각작업이 되기 위한 노즐의 적절한 위치를 파악하고자 한다. 또한 유입되는 Cl_2 기체의 유량변화에 따른 Al 웨이퍼 식각률의 변화를 고찰하였다.



(a)



(b)

Fig. 1 Computational model of a plasma etch reactor: (a) geometrical parameters; (b) computational grid and nozzle locations

2. 수치해석방법

2.1 지배방정식

모든 유체유동영역에서의 지배방정식은 분자적 개념의 Boltzmann 방정식이며, 연속체 개념의 Navier-Stokes 방정식은 Chapman-Enskog 전개에 의해 Boltzmann 방정식으로부터 유도된다. Kn 수가 0.01보다 커지게 되면 Navier-Stokes 방정식은 점차 그 타당성을 잃게 되고, 보다 고차의 항들이 추가된 Burnett 방정식으로 대체된다.

다음 식 (1)은 Boltzmann 방정식을 나타낸 것이다.

$$\frac{\partial(nf)}{\partial t} + c \cdot \frac{\partial(nf)}{\partial r} + \frac{F}{m} \cdot \frac{\partial(nf)}{\partial c} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{4\pi} n^2 (f^* f_1^* - ff_1) c_r \sigma d\Omega dc_1 \quad (1)$$

여기서 f 는 속도분포함수, n 은 수밀도(number density), c 는 속도, F 는 외력(external force), c_r 은 충돌분자간의 상대속도, m 은 분자의 질량, σ 는 충돌단면적(collision cross-section), $d\Omega$ 는 solid angle, 상첨자 *는 충돌후의 상태를 각각 나타낸다.

식 (1)의 Boltzmann 방정식은 비선형의 미적분 방정식으로서 해석적인 해는 극히 단순한 문제에만 존재하며, 식 (1) 우변항의 적분형으로 표현된 충돌항을 적절히 묘사하기가 어렵고, 독립 변수로서 속도 c 가 추가되기 때문에 직접적인 풀이가 아닌 분자들의 운동을 묘사하는 방법이 희박기체유동장 해석에 이용되기 시작하였다. 본 연구에서는 Bird⁽⁷⁾에 의해 개발된 DSMC법을 이용하여 해석하고자 한다.

DSMC법의 계산과정은 지면관계상 생략하였고, Ref. (8)에서 찾아볼 수 있다.

2.2 해석모델

Fig. 1(a)는 단순화된 헬리콘 플라즈마 식각장치를 나타낸 것이다. 원주상으로 24개의 노즐이 부착되어 있으며, 이곳으로부터 Cl₂와 BCl₃의 혼합기체가 유입된다. 반응기체는 펌프와 연결된 챔버 하단부로 유출된다. 본 연구에서는 축대칭 유동을 감안하여 Fig. 1과 같이 2차원 유동만을 고려하였다.

Table 1 Geometrical dimensions of the etcher

D_1		95 mm
D_2	#1	140 mm
	#2	220 mm
h	#3	235 mm
	#4	200 mm
	#5	160 mm
	#6	120 mm
D_3		360 mm
D_4		150 mm
D_5		290 mm
H_1		450 mm
H_2		270 mm
H_3		90 mm

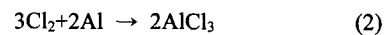
축대칭유동은 일반적인 2차원 유동과는 달리 원주방향으로의 분자움직임을 고려해야 하며, 분자의 움직임은 3차원적으로 다루어야 한다. 본 연구에서는 이를 위해 Bird⁽⁷⁾의 방법을 채택하였다. Fig. 1(b)는 계산격자를 나타낸 것이다. Fig. 1의 각 부분별 제원은 Table 1에 나타내었다.

노즐입구에서는 Cl₂와 BCl₃가 각각 293K의 온도로 유입되며, 식각장치내의 기준압력(반응로 출구압력)은 0.5Pa로 하였다. 본 연구에서는 다음과 같이 두 가지 유량에 대하여 각각 계산하였으며, 두 경우 모두 반응로 출구압력을 기준으로 한 Kn수는 0.022이다.

- 1) case 1: Cl₂(50 sccm), BCl₃(10 sccm)
- 2) case 2: Cl₂(100 sccm), BCl₃(20 sccm)

지름 D_1 을 갖는 상충부(top hat)에서는 플라즈마가 형성되며 본 연구에서는 전자기장의 해석은 고려하지 않았다. 전체적인 플라즈마 식각장치의 해석은 본 연구에서와 같은 입자해석과 동시에 전자기장의 해석이 반드시 병행되어야 하며, 이를 위해 PIC/MC 기법⁽⁹⁾이 이용된다.

지름 6 inch의 Al 웨이퍼 표면온도는 373K로 일정하다고 가정하였다. 한편 웨이퍼 표면에서의 화학반응은 다음 식과 같이 단순화하였다.



본 연구에서는 낮은 온도작동조건에 의해 이온

화와 열해리는 발생하지 않는다는 조건하에 Cl₂, BCl₃, 그리고 AlCl₃간의 분자충돌만을 고려하였다. 또한 각 벽면과 분자간 충돌은 완전난반사 (fully diffuse reflection)라고 가정하였다.

실제 식각장치에서 유입되는 기체는 보통 직경 1 mm 이하의 작은 노즐로부터 반응기로 유입된다. 따라서 이 때 기체유동은 초킹(choking)된다고 가정하여 유입분자속은 다음 식으로 계산하였다.

$$N_i = \frac{4.478 \times 10^{17} \cdot Q \cdot \Delta t}{W_1} \quad (3)$$

여기서 Q는 유입분자의 유량(mass flow rate)을 나타낸다.

최종적으로 얻게 되는 웨이퍼의 식각률(ER, etch rate)은 다음식으로 표현된다.⁽³⁾

$$ER = \frac{2}{3} \frac{(m \cdot W_2 \cdot N)}{\rho} \quad (\text{m/s}) \quad (4)$$

여기서 m, ρ는 각각 Al 분자의 질량과 Al 웨이퍼의 밀도를 나타내며, N은 웨이퍼위에 입사하는 Cl₂ 분자의 분자속을 나타낸다.

웨이퍼상에서 화학반응은 식 (2)에 의해 AlCl₃ 분자가 생성되며, 웨이퍼상에 입사하는 3개의 Cl₂ 분자들은 100% 화학반응하여 2개의 AlCl₃ 분자가 생성되는 것으로 모델링하였다.

2.3 분자모델

기체의 점성계수나 확산계수를 정확히 표현할 수 있는 분자모델에 대한 많은 연구들이 진행되었으며, 본 연구에서는 Bird에 의해 개발된 가변강구(VHS, variable hard sphere) 모델을 이용하여 해석하였다. VHS 모델인 경우 총 충돌단면적 σ_T는 πd² 이고, 여기서 d는 분자간 상대속도의 함수로서 다음과 같이 표현된다.

$$d = d_{ref} \left\{ \frac{(2kT_{ref}/m_r c_r^2)^{\omega-1/2}}{\Gamma(5/2-\omega)} \right\}^{1/2} \quad (5)$$

여기서 ω는 점성계수와 온도사이의 관계식에서 나타나는 지수(μ ∝ T^ω)이며, 본 연구에서는 작동기체로 질소(N₂)를 이용하였고 지수 ω는 0.74

로 하였다.

2.4 물리량의 계산

2.1절에서 언급한 바와 같이 DSMC 해석을 통해 얻게되는 유동장내의 최종적인 물리량들은 유동이 정상상태에 도달한 후 각 격자내에 있는 개개의 분자들의 속도값을 시간평균 함으로써 얻어지게 된다. Fig. 2는 반복계산에 따른 유동장내의 분자수의 변화를 나타낸 것이며, 본 연구에서는 분자수가 일정해지는 시점을 정상상태의 판단기준으로 하였다. Fig. 2인 경우 대략 10000번 정도 반복계산후 정상상태에 도달됨을 보여주고 있다.

분자 샘플링을 통해 얻어지는 격자내의 평균속도(stream velocity) c₀와 수밀도 n은 각각 다음과 같이 계산된다.

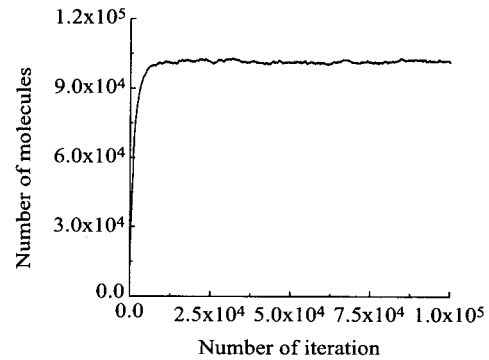


Fig. 2 Convergence history

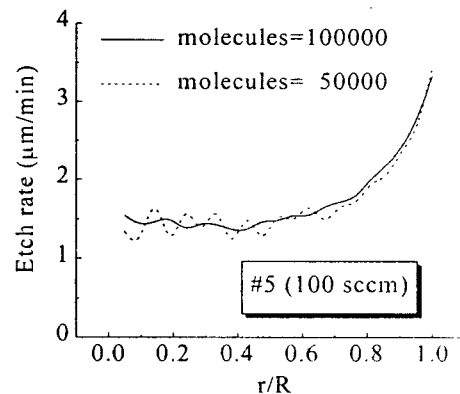


Fig. 3 Variations of etch rate along the wafer surface for two different number of molecules used in the computation

$$c_o = \bar{c} = \frac{\sum_{k=1}^{N_c} c_k}{N_c} \quad (6)$$

$$n = \frac{N_c}{V} \quad (7)$$

여기서 N_c 는 격자내의 총 분자수, V 는 격자의 체적을 각각 의미한다.

식 (6)에 의해 속도값을 얻게 되면 아래에 기술하는 바와 같이 온도값을 계산할 수 있으며, 상태방정식 $p = nkT$ (여기서 k 는 Boltzmann 상수)를 통하여 압력값을 얻게 된다.

격자내에서의 온도 T 는 격자내부에서의 각각의 기체분자들의 속도 c 와 평균속도 c_o 를 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\frac{3}{2} kT = \overline{mc^2} - mc_o^2 \quad (8)$$

한편 DSMC 수치해석결과는 사용하는 기체의 분자수가 많으면 많을수록 정확한 해를 갖지만, 실제적으로는 컴퓨터의 용량이나 계산시간, 해의 수렴정도등을 고려하여 결정하게 되며, 본 연구에서는 계산조건에 따라 약간의 차이는 있지만 대략 100,000개 정도의 분자를 이용하였다. 일반적으로 한 개의 계산격자내에 분자가 2개 이상만 존재하면 분자간 충돌과정을 DSMC법을 통하여 계산할 수 있다. 따라서 (계산격자×2) 만큼이 계산에 필요한 최소분자수가 되겠지만, 보다 정확한 계산결과를 얻기위해서는 분자수에 따른 계산 결과의 수렴성을 파악한 후 최적의 분자수를 결정해야 할 것이다. 본 연구에서는 분자수에 따른 웨이퍼 표면에서의 식각률의 변화를 살펴보았으며, 이를 Fig. 3에 나타내었다. 분자수가 50,000개에서 100,000개로 증가하게 되면 식각률의 분포가 보다 더 균일해 짐을 알 수 있다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 Fig. 1과 같은 헬리콘 플라즈마 식각장치에 대하여 노즐의 위치에 따른 유동장의 분포 및 식각률의 변화를 고찰하였다. 노즐의 위

치는 모두 6가지로 변화시켜가며 계산하였다. 또한 유량에 따른 유동장 및 식각률의 변화를 알아보기 위하여 노즐 입구부에서의 Cl_2 유량을 각각 50 sccm과 100 sccm으로 변화시키면서 수치해석하였다. 먼저 본 연구에서 사용한 DSMC법의 타당성을 검증하기 위하여 헬리콘 플라즈마 반응로에 대하여 Serikov 등⁽⁶⁾이 해석한 수치결과와 상호 비교하였으며, 이를 Fig. 4에 나타내었다. 기존의 수치결과와 잘 일치함을 확인할 수 있다.

3.1 유선분포

Fig. 5는 노즐위치 #1에 대한 Cl_2 , BCl_3 , $AlCl_3$ 의 유선의 분포를 각각 나타낸 것이다. 우선 Cl_2 의 유선분포를 보면 노즐의 양측 모서리 부분에서 큰 와류가 형성됨을 볼 수 있다. 그리고 유입된 Cl_2 기체중 일부는 웨이퍼 위로 입사함을 알 수 있으며, 이 중 일부는 웨이퍼 AI과 반응할 것이며, 일부는 반응하지 않고 그대로 반사하게 된다. 또한 유입된 Cl_2 기체의 나머지는 출구측으로 펌핑됨을 보여주고 있다. 한편 화학반응에는 참여하지 않는 BCl_3 기체는 모두 출구측으로 펌핑되고 있음을 볼 수 있다. 유입된 Cl_2 기체와 웨이퍼의 AI 분자와 반응하여 생성된 $AlCl_3$ 기체는 웨이퍼로부터 유출되고 있음을 알 수 있다. 따라서 웨이퍼는 $AlCl_3$ 기체의 발생지가 됨을 확인할 수 있다. 또한 웨이퍼로부터 먼 지역인 모서리부분에서 큰 와류가 형성됨을 볼 수 있다. 노즐입구부에서 발생하는 하류유동은 공급 기체인 Cl_2 에 의해 생성되는 유동이다.

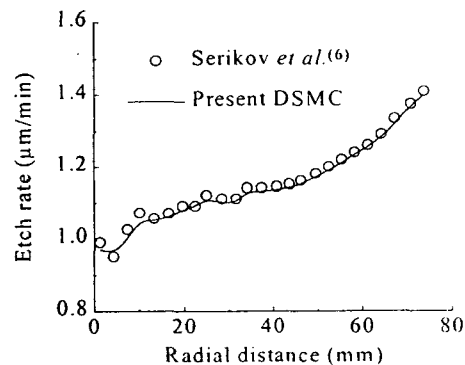


Fig. 4 Comparison of the present numerical results with the previous ones

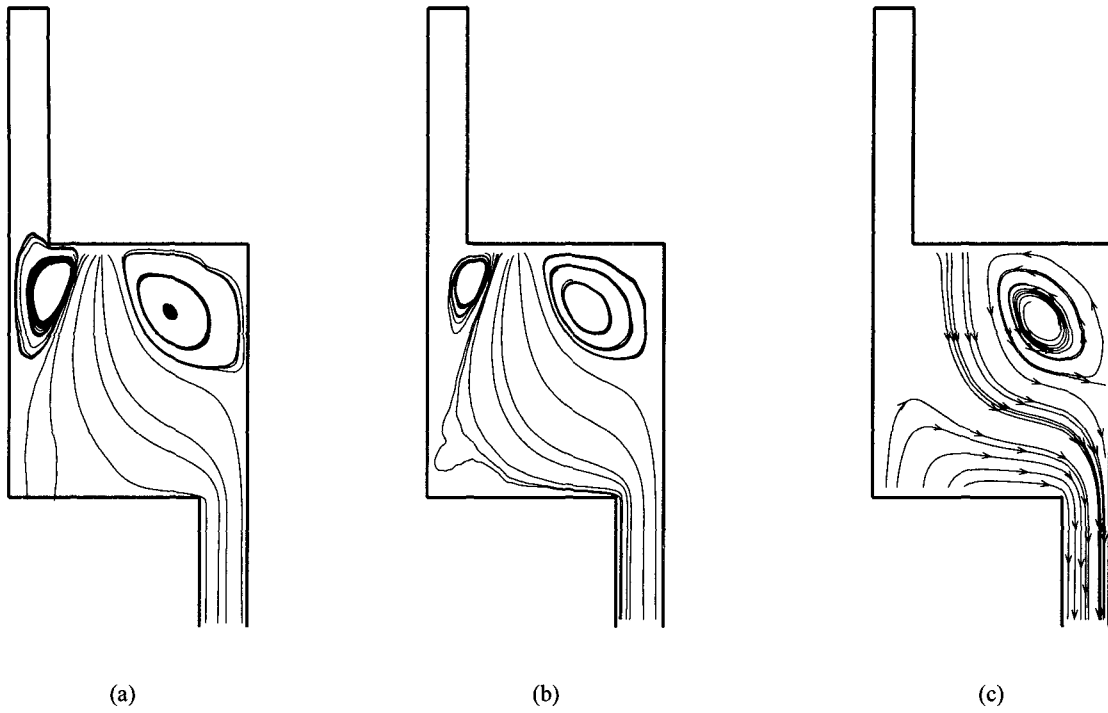


Fig. 5 Streamline distributions inside the reactor for nozzle location #1: (a) Cl_2 ; (b) BCl_3 ; (c) AlCl_3

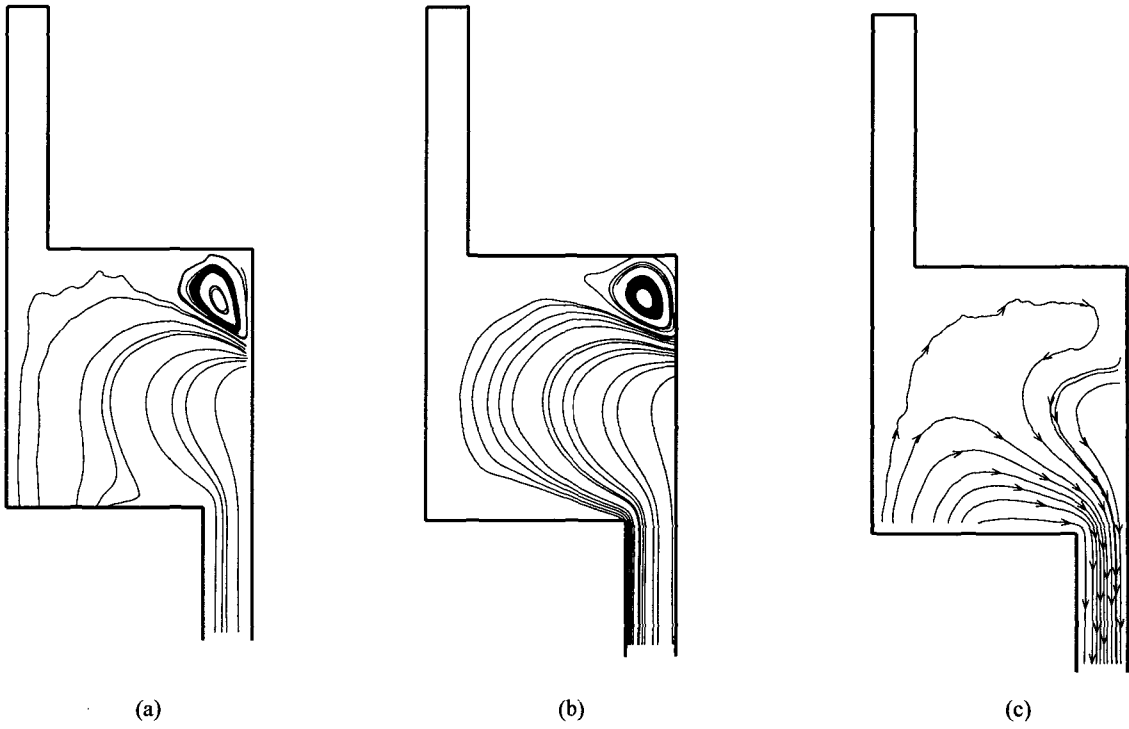


Fig. 6 Streamline distributions inside the reactor for nozzle location #4: (a) Cl_2 ; (b) BCl_3 ; (c) AlCl_3

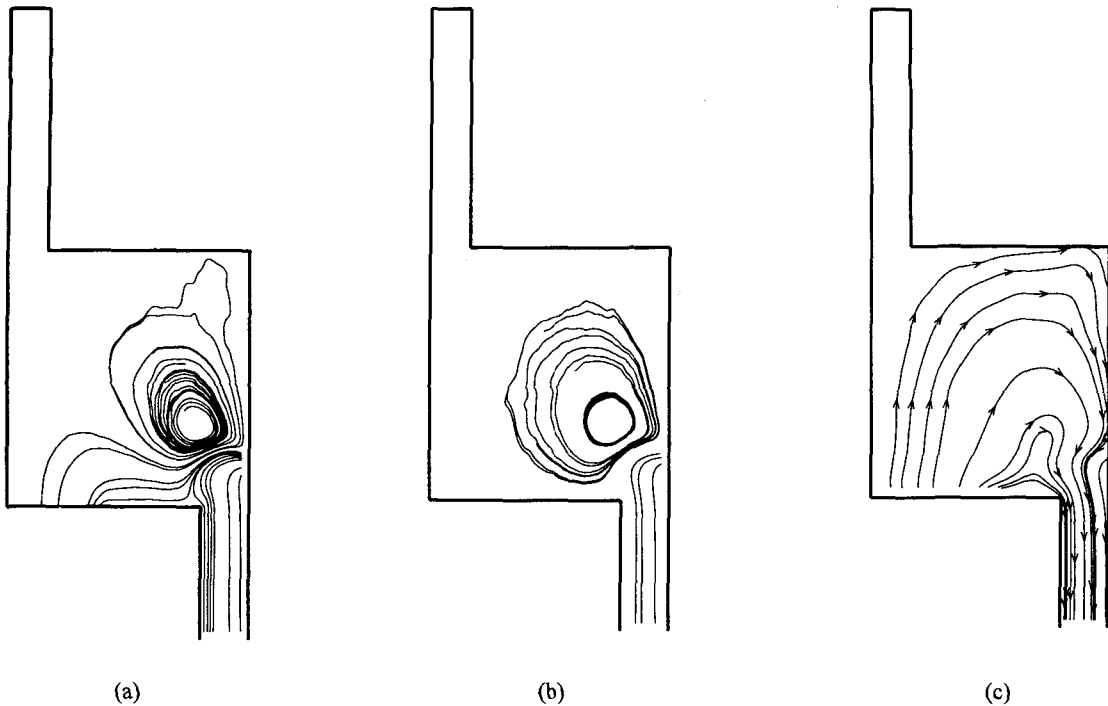


Fig. 7 Streamline distributions inside the reactor for nozzle location #6: (a) Cl_2 ; (b) BCl_3 ; (c) AlCl_3

Fig. 6은 노즐위치 #4에 대한 Cl_2 , BCl_3 , AlCl_3 의 유선의 분포를 각각 나타낸 것이다. Cl_2 의 유선분포를 보면 노즐의 위쪽(오른쪽) 모서리 부분에서 와류가 형성됨을 볼 수 있다. 노즐위치 #1과 비교할 때 상대적으로 작은 와류가 형성되고 있다. AlCl_3 의 유선분포를 보면 웨이퍼에서 나온 기체가 반응로의 상부벽까지 움직여 도달하고 있으며, 상대적으로 적은 분자샘플링으로 인해 유선이 매끈하지 못함을 보여준다. 또한 Figs. 8~11의 등밀도선도와 등온선도에서 나타나는 선들의 찌그러짐 현상은 분자수를 증가시키면 줄어들 것으로 판단되며, 특히 노즐의 위치에 따라서 분자들이 노즐분사에 의해 직접적으로 잘 도달되지 못하는 부분에서는 상대적으로 샘플링되는 분자수가 많지 않아 찌그러짐 현상은 다른 부분보다 더 심하게 나타남을 볼 수 있다.

Fig. 7은 노즐위치 #6에 대한 Cl_2 , BCl_3 , AlCl_3 의 유선의 분포를 각각 나타낸 것이다. 노즐위치 #1, #4와 비교해 보면, 노즐의 위쪽으로 상당히 큰 와류가 형성되어 상대적으로 Cl_2 기체가 웨이퍼 상에 도달하기가 매우 어려워 보인다.

효과적인 식각작업이 되기 위해서는 반응로내에서 생성되는 AlCl_3 와 같은 기체들은 신속히 출구로 펌핑되어야만 하며, 생성기체들에 의해 Cl_2 와 같은 공급 기체가 웨이퍼에 도달되는 것이 방해 받아서는 안된다. 따라서 위의 경우에서 보았듯이 노즐위치 #1, #4, #6를 비교해 보면, #1인 경우 AlCl_3 가 노즐로부터 분사되는 고속의 주흐름에 의해 효과적으로 배출되고 있음을 보여주는 반면에 #6인 경우에는 노즐에서 분사되는 공급 기체의 방향과 생성기체의 유출방향이 서로 반대 방향을 이루기 때문에 효과적인 펌핑이 이루어지지 않아 생성기체가 반응로 전체를 움직이며 돌아다니는 것을 볼 수 있다. 따라서 반응로내에서의 생성기체의 정체시간이 길어지게 되어 작업의 효율성은 감소하게 되고, 결국 식각률에서도 차이가 발생하게 됨을 볼 수 있다 (Fig. 12 참조). 결국 적절한 노즐의 위치를 결정하는 것은 반응로의 설계시 매우 중요하게 작용하게 된다. 헬리콘 내부(top hat 부분)에서의 유선은 상대적으로 적은 분자수로 인해 일정한 형태의 유선을 갖추지 못하게 되며, 무작위운동을 하게 된다. 따라서 그림상에는 나타내지 않았다.

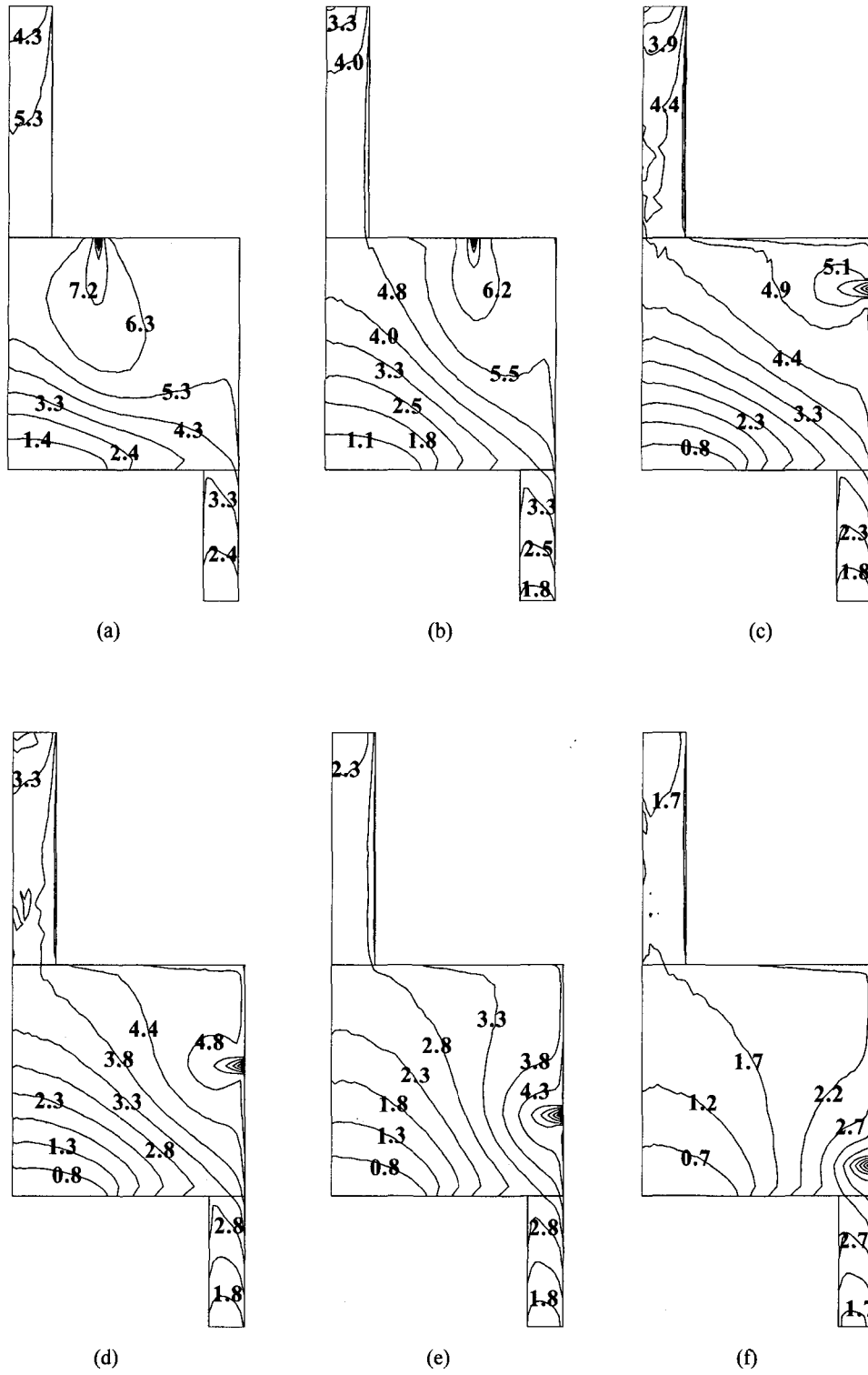


Fig. 8 Density contours for Cl_2 at nozzle location (a) #1, (b) #2, (c) #3, (d) #4, (e) #5, and (f) #6

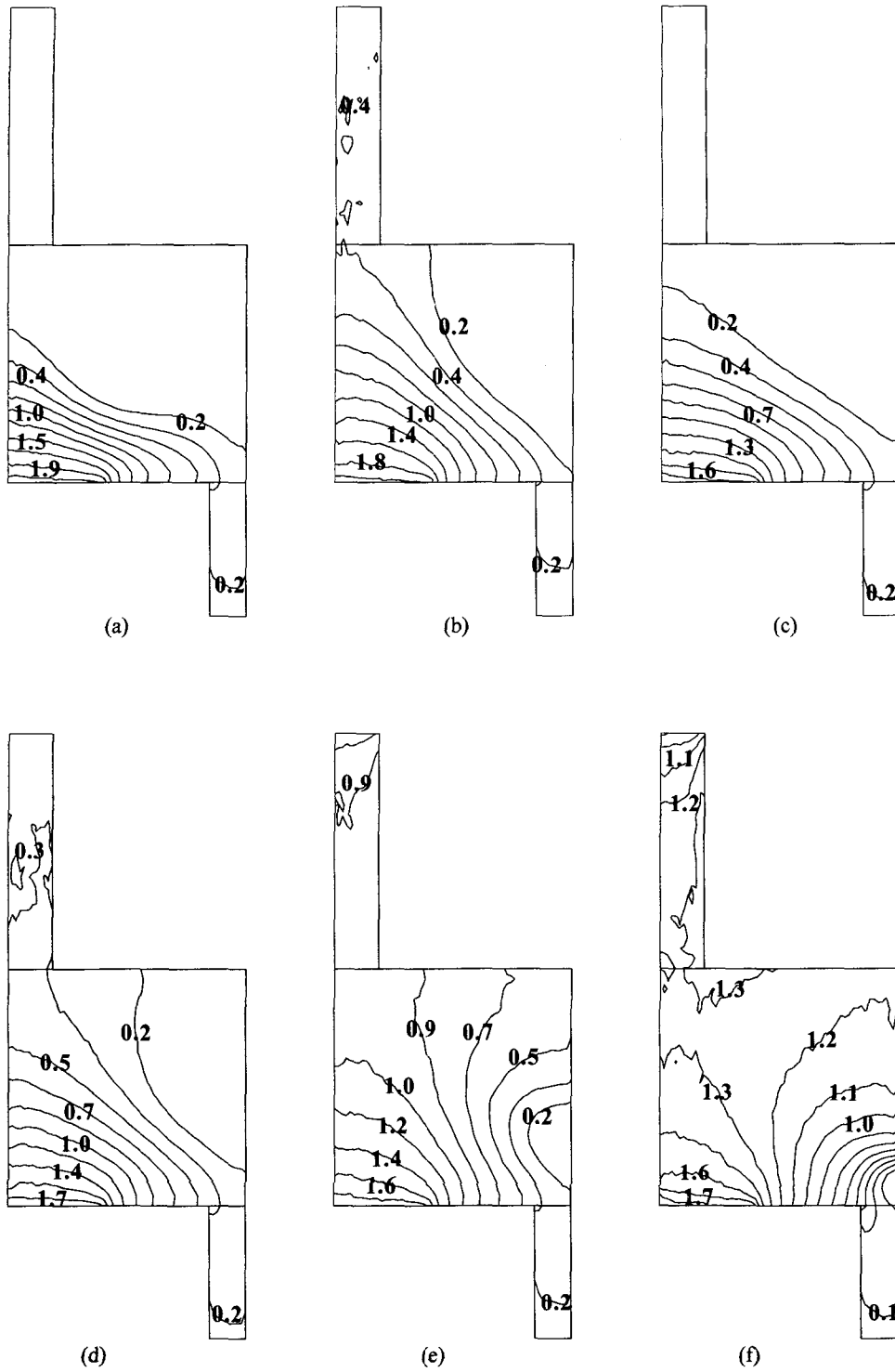


Fig. 9 Density contours for AlCl_3 at nozzle location (a) #1, (b) #2, (c) #3, (d) #4, (e) #5, and (f) #6

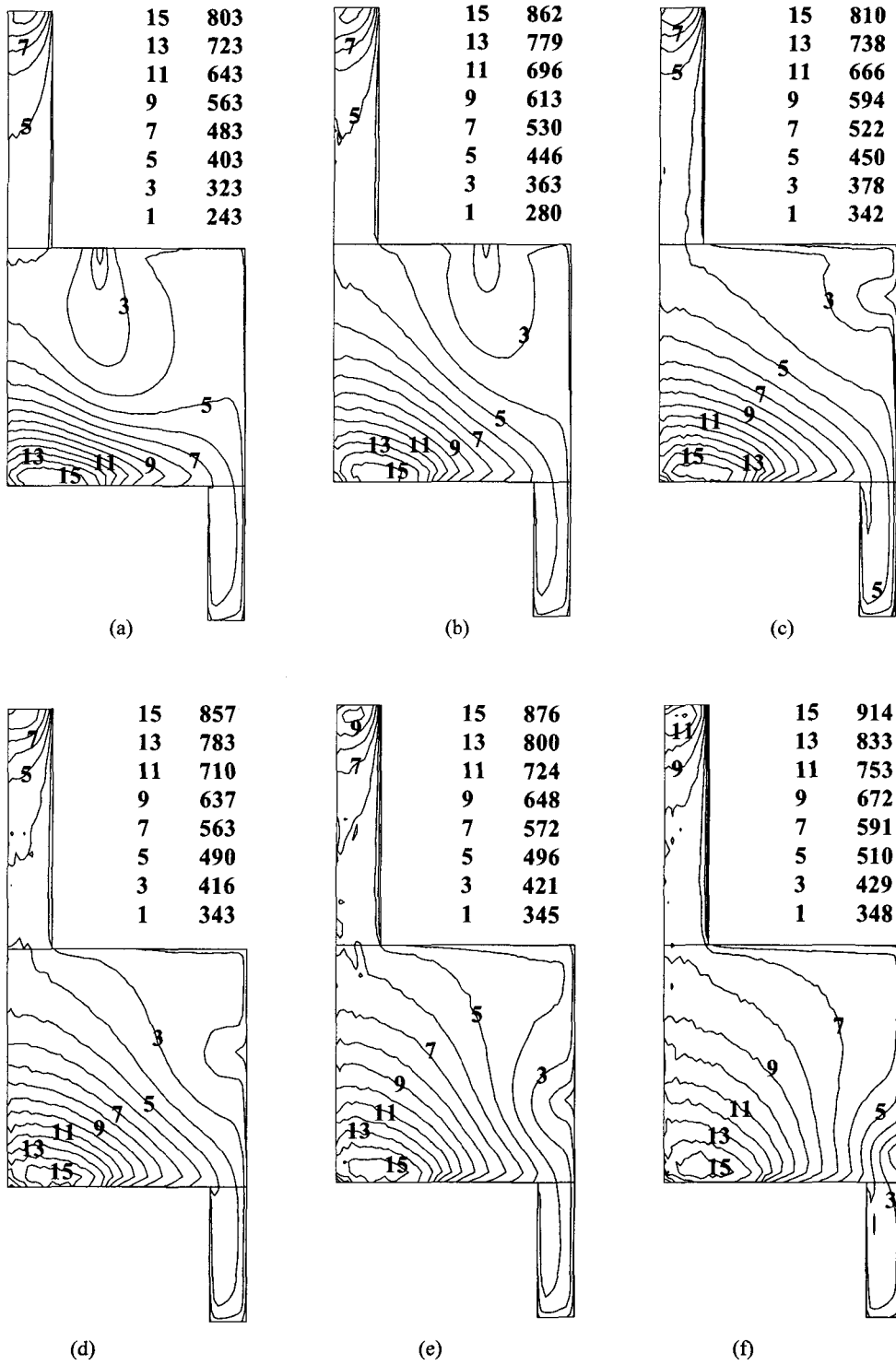


Fig. 10 Temperature contours for Cl_2 at nozzle location (a) #1, (b) #2, (c) #3, (d) #4, (e) #5, and (f) #6

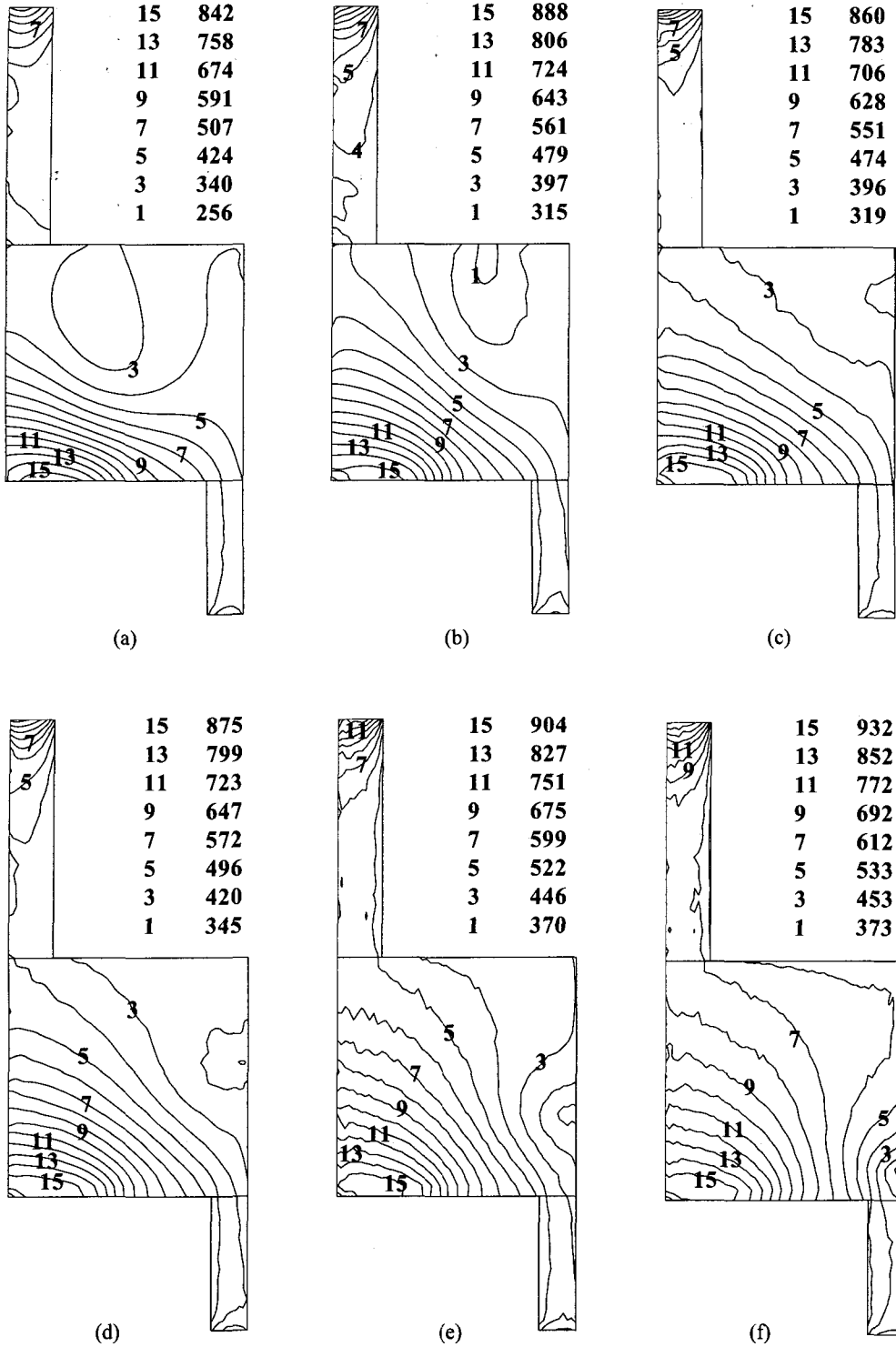


Fig. 11 Temperature contours for BCl_3 at nozzle location (a) #1, (b) #2, (c) #3, (d) #4, (e) #5, and (f) #6

3.2 밀도분포

Fig. 8과 9는 각각의 노즐위치에 대한 Cl_2 및 $AlCl_3$ 의 밀도분포를 나타낸 것이다. 본 연구에서는 펌프입구부, 즉 반응로 출구부분에서의 총압력(0.5Pa)을 기준압력 p_{ref} 로 고정시켰으며, 이 때의 수밀도 n_{ref} 를 기준으로 무차원화시킨 수밀도 값을 Fig. 8과 9에 각각 나타내었다. 이 때 $T_{ref}=293K$ 를 기준온도로 하였다. 즉,

$$n_{ref} = \frac{p_{ref}}{kT_{ref}} \quad (9)$$

우선 Fig. 8의 Cl_2 에 대한 밀도분포를 살펴보면, 노즐출구에서 밀도가 제일 높고 큰 구배가 형성됨을 알 수 있으며, 노즐에서 멀어질수록 밀도는 감소함을 보여주고 있다. 특히 노즐의 위치가 #1에서 #6으로 변함에 따라 웨이퍼상의 Cl_2 의 밀도가 감소함을 보여주고 있으며, 결국 웨이퍼 표면에서 Cl_2 와 웨이퍼의 Al 분자와의 반응확률이 감소하므로 식각률이 감소함을 예측할 수 있다.

그리고 Fig. 9의 $AlCl_3$ 에 대한 밀도분포를 살펴보면, 웨이퍼의 바로 윗 부분에서 밀도가 가장 크고, 웨이퍼에서 멀어질수록 감소함을 보여주고 있다. 노즐위치 #6인 경우에는 제대로 펌핑이 이루어지지 않아 $AlCl_3$ 가 헬리콘 내부에서도 상당히 존재하고 있음을 알 수 있다.

3.3 온도분포

Fig. 10과 11은 각 노즐위치에서의 Cl_2 와 $AlCl_3$ 의 온도분포를 각각 나타낸 것이다. 그림에서는 온도레벨을 표시하였고, 레벨에 따른 각각의 온도는 그림 윗 부분에 나타내었다.

각각의 노즐위치에서 Cl_2 와 $AlCl_3$ 의 온도분포를 살펴보면, $AlCl_3$ 의 온도가 Cl_2 의 온도보다는 높게 나타남을 볼 수 있으며, 이것은 웨이퍼표면에서의 화학반응에 의해 생성되는 $AlCl_3$ 가 웨이퍼의 표면온도를 갖고 방출되기 때문이다. 또한 각 벽면에서의 온도와 벽에 인접한 기체의 온도가 크게 차이가 남을 알 수 있으며, 이것은 희박기체의 특성으로서 온도도약(temperature jump) 현상이다. 특히 웨이퍼의 표면에서는 이러한 현상이 두드러지며, 기존의 Navier-Stokes 방정식을 이용한 연속체적인 해법은 이러한 이유로 타당하지 않게

된다. 한편 웨이퍼상에서 가장 큰 온도가 나타남을 알 수 있으며, 헬리콘 내부에서도 상부벽의 높은 온도로 인하여 비교적 높은 온도가 유지되고 있음을 볼 수 있다.

3.4 식각률(etch rate)

Fig. 12는 웨이퍼의 반경방향에 따른 식각률의 변화를 나타낸 것이다. 여기서 반경거리 r 은 웨이퍼의 반경 R 로 무차원화 하였다.

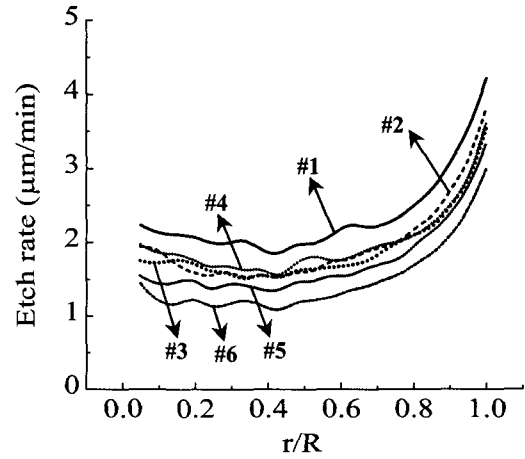


Fig. 12 Variations of etch rate along the wafer surface

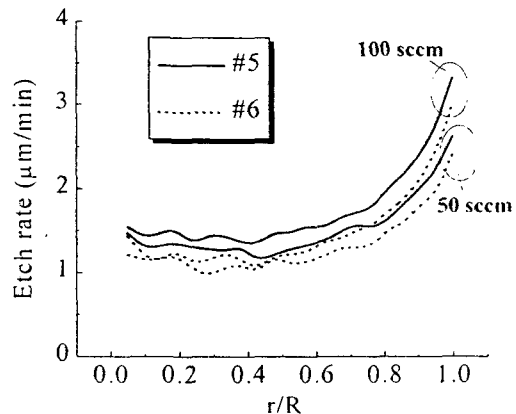


Fig. 13 Variations of etch rate along the wafer surface for two different flow rates

각각의 노즐위치에서 식각률은 웨이퍼의 주변에서($r/R=1.0$) 가장 크다는 것을 알 수 있다. 이와 같은 경향은 Nanbu 등,⁽³⁾ Economou 등⁽¹⁰⁾의 연구에서도 볼 수 있다. 식각률은 노즐위치 #1에서 가장 크고, #6에서 가장 작아짐을 알 수 있으며, 노즐위치 #2, #3, #4의 식각률은 전체적으로 비슷함을 보여주고 있다. 또한 다른 노즐위치와 비교할 때 노즐위치 #5에서 웨이퍼상에 비교적 균일한 식각이 이루어짐을 확인할 수 있다.

Fig. 13은 유량변화에 따른 식각률의 변화를 나타낸 것이다. Cl_2 의 유량이 100 sccm에서 50 sccm으로 감소하게 되면 이에 따라 식각률도 감소함을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 플라즈마 식각장치내의 희박기체유동을 DSMC(direct simulation Monte Carlo)법을 이용하여 해석하였으며, 노즐의 위치 및 유량변화에 따른 식각률의 변화를 고찰함으로써 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 노즐위치 #1인 경우 반응기체인 $AlCl_3$ 가 노즐로부터의 주흐름에 의해 효과적으로 배출되고 있음을 보여주는 반면에 #6인 경우에는 효과적인 펌핑이 이루어지지 않아 생성기체가 반응로 전체를 움직이며 돌아다니는 것을 볼 수 있었다.

(2) 각 벽면에서의 온도와 벽에 인접한 기체의 온도가 크게 차이가 발생하는 온도도약 현상을 볼 수 있었다.

(3) 식각률은 웨이퍼의 주변에서 가장 크다는 것을 알 수 있었으며, 유량이 감소하게 되면 이에 따라 식각률도 감소함을 알 수 있었다.

후 기

이 논문은 2000년도 한국과학재단 기초과학연구사업(지역대학 우수과학자 지원연구: R05-2000-000-00311-0) 연구비에 의하여 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

(1) Economou, D. J., 2000, "Modeling and Simulation of Plasma Etching Reactors for Micro-

electronics," *Thin Solid Films*, Vol. 365, pp. 348~367.

(2) Nanbu, K., 1996, "Stochastic Solution Method of the Boltzmann Equation II. Simple Gas, Gas Mixture, Diatomic Gas, Reactive Gas, and Plasma," *Rep. of the Institute of Fluid Science, Tohoku Univ., Sendai, Japan*, Vol. 8, pp. 77~125.

(3) Nanbu, K., Morimoto, T., and Suetani, M., 1999, "Direct Simulation Monte Carlo Analysis of Flows and Etch Rate in an Inductively Coupled Plasma Reactor," *IEEE Trans. Plasma Sci.*, Vol. 27, No. 5, pp. 1379~1388.

(4) Font, G. I. and Boyd, I. D., 1997, "Numerical Study of the Effects of Reactor Geometry on a Chlorine Plasma Helicon Etch Reactor," *J. Vac. Sci. Technol. A*, Vol. 15, No. 2, pp. 313~319.

(5) Font, G. I., Boyd, I. D., and Balakrishnan, J., 1998, "Effects of Wall Recombination on the Etch Rate and Plasma Composition of an Etch Reactor," *J. Vac. Sci. Technol. A*, Vol. 16, No. 4, pp. 2057~2064.

(6) Serikov, V. V., Kurisawa, S., and Nanbu, K., 1996, "Profile of Al Etch Rate Estimated from the Analysis of 3-D Rarefied Flow of Cl_2 , BCl_3 , and $AlCl_3$ in a Commercial Etcher," *Vacuum*, Vol. 47, No. 6~8, pp. 1027-1029.

(7) Bird, G. A., 1994, *Molecular Gas Dynamics and the Direct Simulation of Gas Flows*, Clarendon Press, Oxford.

(8) Hwang, Y. K. and Heo, J. S., 2002, "Performance Analysis of a Linear Micro-Actuator Operated by Radiometric Phenomena in Rarefied Gas Flow Field," *Trans. KSME B*, Vol. 26, No. 10, pp. 000~000.

(9) Birdsall, C. K., 1991, "Particle-in-Cell Charged-Particle Simulations, Plus Monte Carlo Collisions with Neutral Atoms, PIC-MCC," *IEEE Trans. Plasma Sci.*, Vol. 19, No. 2, pp. 65~85.

(10) Economou, D. J., Bartel, T. J., Wise, R. S., and Lymberopoulos, D. P., 1995, "Two-Dimensional Direct Simulation Monte Carlo (DSMC) of Reactive Neutral and Ion Flow in a High Density Plasma Reactor," *IEEE Trans. Plasma Sci.*, Vol. 23, No. 4, pp. 581~590.