

회전원판형 CVD 장치의 유동 재순환을 억제하는 출구부 형상 설계를 위한 전산해석

박 장 진, 김 경 진, 곽 호 상*

금오공과대학교 기계시스템공학과

A COMPUTATIONAL ANALYSIS FOR OUTLET SHAPE DESIGN TO SUPPRESS FLOW RECIRCULATION IN A ROTATING-DISK CVD REACTOR

J.J. Park, K. Kim and H.S. Kwak*

Dept. of Mechanical System Engineering, Kumoh National Institute of Technology

A numerical design analysis is conducted to search for an optimal shape of outlet in a rotating-disk CVD reactor. The goal is to suppress flow recirculation that has been found in a reactor having a sudden expansion of flow passage outside of the rotating disk. In order to streamline gas flow, the sidewall at which the flow in the Ekman layer is impinged, is tilted. The axisymmetric laminar flow and heat transfer in the reactor are simulated using the incompressible ideal gas model. For the conventional vertical sidewall, the flow recirculation forming in the corner region could be expanded into the interior to distort the upstream flow. The numerical results show that this unfavorable phenomenon inducing back flow could be dramatically suppressed by tilting the sidewall at a certain range of angle. The assessment of deviation in deposition rate based on the characteristic isotherm illustrates that the sidewall tilting may expand the domain of stable plug-like flow regime toward higher pressure. A physical interpretation is attempted to explain the mechanism to suppress flow recirculation.

Key Words : 배기부 형상설계(Outlet Shape Design), 화학증착(CVD, Chemical Vapor Deposition), 회전원판(Rotating Disc), 유동 재순환(Flow Recirculation), 출구부 측벽경사각(Angle of Outlet Sidewall), 유동 안정성(Flow Stability)

1. 서 론

회발성 전구체(precursor)를 증기로 만들어 기판 위에 착상시키는 화학증착(CVD)은 고순도 박막을 생산하는 대표적인 반도체 공법[1]이다. 화학증착 장치는 기하학적 구조, 유동 구동 방법, 증착 기체의 특성 등에 따라 사용하는 종류가 다양한데 그 중 기판을 수평으로 놓인 원판에 장착하고 회전시키면서 공정을 수행하는 수직형 회전원판식 반응기(Vertical Rotating Disc Reactor, 이하 회전식 반응기)가 이 연구의 대상이다. 원판이 빠른 각속도로 회전하면 원판 위에 두께가 일정한 에크만(Ekman) 경계층이 형성되는데 이 경계층 안에서 점

성에 의해 회전운동량을 얻은 유체는 원심력을 받아 외곽 방향으로 흐르게 된다. 이 때 질량보존을 만족하기 위하여 상부에서 경계층으로 유체를 끌어당기는 현상을 에크만 흡입이라 하는데 이로 인해 회전원판 상부에는 균일한 하강류가 형성된다[2]. 회전식 반응기는 이러한 회전유동의 특성을 균일한 박막을 제조하는데 유리한 조건으로 활용한 것이다.

회전식 반응기에 대한 연구는 1970년대부터 오랜 역사를 가지고 있는데 최근 GaN (Galium Nitride)계열의 청색 및 녹색 LED를 만드는 MOVPE (Metalorganic Vapor Phase Epitaxy) 공정에 이 장치가 많이 이용되면서 다시 한 번 연구자들의 관심이 부활하고 있다[3-4]. GaN는 TMG (Trimethyl Galium) 증기와 암모니아를 고온에서 반응시켜 제조하는 것이 일반적이다[3-6]. 회전식 반응기에서 수송기체인 수소에 섞여 운반되는 TMG와 암모니아가 상부의 입구로 주입된다. 두 반응기체는 아래로 흐르면서 서로 혼합되고 1000℃ 정도로 유지되는 회전 원판 위에 형성된 에크만 경계층으로 흡인된 후 가열되

Received: November 18, 2013, Revised: December 11, 2013,
Accepted: December 12, 2013.

* Corresponding author, E-mail: hskwak@kumoh.ac.kr

DOI <http://dx.doi.org/10.6112/kscfe.2013.18.4.074>

© KSCFE 2013

어 일정 온도에 도달하면 화학반응이 일어나 GaN 증기로 변한다. 이 증기가 경계층을 따라 흐르면서 원판에 장착된 기관에 착상되는 것이 증착 원리이다.

회전식 반응기 내부 유동에는 작동기체의 유입에 따른 관성력, 원판의 회전에 의한 원심력, 불안정한 밀도 분포에 의한 부력, 점성력 등 여러 가지 역학적 요소가 상호작용하고 여기에 화학반응이 동반된다. 이러한 복잡한 현상을 분석하여 안정된 유동과 높은 증착률을 보장하는 형상과 유동조건을 찾기 위한 연구가 활발히 진행되었다. Evans and Greiff[7]의 초기연구는 회전식 반응기에서 그라쇼프(Grashof) 수와 회전 레이놀즈(Reynolds) 수에 따라 여러 가지 다양한 유동이 발생할 수 있음을 보임으로써 안정된 증착 조건을 탐구하는데 필요한 이론적 틀을 구축하였다. 후속연구에서는 발생 가능한 여러 가지 유동을 특성변수 공간에서 구분하는 유동형 지도(Flow regime diagram)를 만들어 증착에 유리한 유동조건을 탐색하였다[8-10].

한편 GaN 박막 제조를 목적으로 하는 회전식 반응기 유동에 대한 연구가 최근 다시 활기를 띠고 있다[10-13]. Mitrovic et al.[10]은 상용 회전식 반응기의 단순화 모형을 대상으로 동일한 질량유량 조건에서 작동압력과 원판 회전수를 변수로 하여 증착효율을 극대화할 수 있는 최적인 조건에 대하여 연구하였다. 이들은 변수공간에서 나타나는 유동을 특징 별로 정체유동, 부력지배적 유동, 회전지배적 유동, 플러그 유동으로 구분하고 유동형 간의 구분선을 표현하는 규모 상관식(scaling correlation)을 제시하였다. 또한 이 중 안정된 플러그 유동이 나타나는 영역을 기준으로 최고 효율을 얻을 수 있는 운전조건을 구하였다. 후속연구[11]에서는 증착물이 온도 경계층의 두께에 반비례한다는 논리에 기초하여 균일한 고효율 증착이 가능한 조건을 수치적으로 탐색하였다. Kwak[12]은 작동압력이 고정된 조건에서 안정된 플러그 유동이 형성되는 최적유량을 조사하였다. 이 연구는 회전유동과 자연대류 이론을 바탕으로 회전식 반응기의 유동안정화 조건을 제시하고 수치해석 결과 분석을 통하여 그 타당성을 검증하였다. Lee et al.[13]은 기존 연구[10,11]에서 다소 불분명하게 제시된 경계층 두께를 이용한 상대증착률 평가법을 체계적으로 재정립하여 동일한 질량유량 조건에의 최적인 조건을 재탐색하였다. 이 연구는 GaN 생성을 위한 화학반응의 시발점에 해당하는 암모니아의 해리온도인 600°C 등온선을 기준으로 한 경계층 두께를 평가하고 이를 이용하여 압력효과를 고려한 상대적 증착효율과 증착 균일도를 정량화하였다.

선행연구[10,12,13]에서 다른 회전식 반응기는 회전원판 위에서 형성되는 에크만 경계층 내부유동이 쉽게 배출될 수 있도록 회전원판이 위치한 부분의 지름이 유입부보다 커지는 급확대형 구조를 가지고 있다. 이 급확대부의 모서리에서 필연적으로 유동 박리가 일어나 국소적인 유동 재순환이 발생

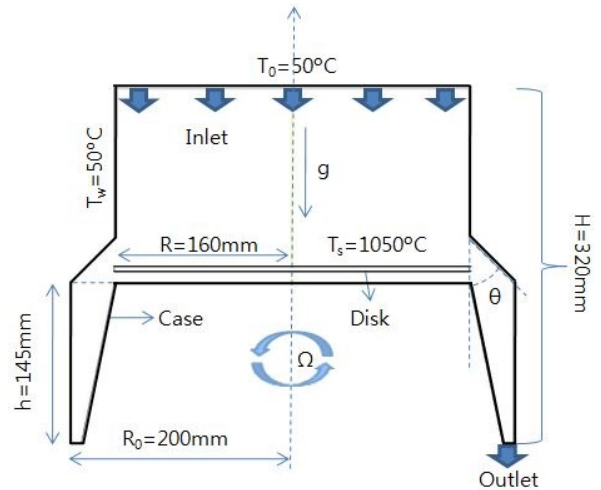


Fig. 1 Schematic view of flow configuration in a rotating disc CVD reactor of concern

한다. 그런데 운전조건에 따라서 이 유동 재순환 영역이 회전 원판 상부영역까지 침범하는 경우가 보고된 바 있다[12,13]. 이 경우 배기가 역류하여 흡기와 다시 섞이게 되므로 증착에 적합하지 않다. 회전의 영향이 지배적인 유동형에서 발견되는 이러한 유동구조는 동일한 회전수에서 압력이 일정 값 이상으로 커지면 나타난다. 증착률은 반응 기체의 농도 즉 압력에 비례하기 때문에 생산성 면에서 압력을 높일수록 유리하다. 문제는 유동 재순환 영역 확장이라는 바람직하지 않은 유동 현상의 발생 때문에 압력을 높이는 데 한계가 있다는 것이다. 따라서 유동 재순환의 억제에 공정압력 증대를 통한 생산성 향상을 추구하는데 있어서 반드시 풀어야 할 숙제이다.

최근 연구에서 Park et al.[14]은 배기부의 형상 조절을 통한 문제 해결의 가능성을 제시하였다. 회전 원판 외곽부에 위치한 측벽의 각도를 조절하여 에크만 경계층에서 배기구로 향하는 유동 흐름을 개선함으로써 재순환 유동 확대를 억제할 수 있음을 수치적으로 보여주었다. 이 연구에서는 선행연구의 성과를 이어 받아 측벽의 경사각이 유동장과 증착 특성에 미치는 영향을 체계적으로 조사하여 유동 재순환이 억제되는 메커니즘을 설명하고 안정된 유동장을 유지할 수 있는 최적 형상조건을 찾고자 한다.

2. 해석 모델 및 방법

2.1 회전식 반응기

Fig. 1은 연구대상을 보여주고 있다. 장치의 구조는 출구부의 각도를 제외하면 기존 연구[10,12,13]에서 다른 E300GaN Veeco Turbodisc® 반응기 모델을 단순화한 형상과 같다. 반지름 R , 높이 H 인 원통형의 회전식 반응기 입구로 온도가 T_0

인 반응원료인 기체가 일정한 질량유량으로 균일하게 유입되고 내부에서는 반지름 R 인 원판이 Ω 의 각속도로 회전한다. 원판의 온도 T_s 이고 그 이외의 모든 벽면의 온도는 T_w 로 동일하다. 원판의 바깥 부분에서 반응 후 기체가 빠져나가는 배기부가 시작되는데 기존 장치는 이 부분이 반지름이 R 에서 R_0 로 급확대되는 형상을 가지고 있다. 이 연구에서는 선행연구[14]와 같이 이 부분의 반지름이 θ 의 각도로 이루면서 R 에서 R_0 로 점진적으로 증가하는 형상을 고려하였다. 이 때 R_0 의 반지름이 시작되는 위치는 고정시켰다.

연구대상의 제원은 $R=160$ mm, $R_0=200$ mm, $H=320$ mm, $h=145$ mm, 원판의 두께는 5 mm이다. 작동 온도로 원판 표면의 온도가 $T_s=1050^\circ\text{C}$, 그 외의 온도는 $T_0=T_w=50^\circ\text{C}$ 이다. 공급되는 혼합기체의 유량은 60 slm (standard liter per minute)으로 고정하였다. 해석에 고려된 변수는 원판의 회전수와 작동압력 그리고 출구부의 측벽경사각 θ 이다.

2.2 전산해석 방법

수치해석 방법은 선행연구[13,14]과 동일하다. 회전식 반응기 내부에 흐르는 수송기체인 H_2 와 TMG , 암모니아가 완전히 혼합되었다고 가정하여 단일 기체로 모델링하였고 화학반응은 고려하지 않았다. 작동유체는 이상기체 방정식을 따르는 기체로 가정하였고, 물성치는 기체분자운동론으로 구하였다. 상용 CFD 패키지인 FLUENT 14.5를 사용하여 전산유동해석을 수행하였다.

반응기 내부 유동은 축대칭 2차원 회전 유동이며 자연대류 효과를 포함한 혼합 열대류를 고려하였고 기체 복사는 고려하지 않았다. 큰 온도 변화에 따른 밀도 변동을 반영하기 위하여 비압축성 이상기체 모델을 사용하였다. 유동은 정상상태의 층류로 가정하였다. 속도-압력 연계 알고리즘은 SIMPLE를 사용하였고 대류항 공간차분법으로 QUICK 기법을 사용하였다. 중앙차분법에 기반하여 점성항을 평가하는 FLUENT 계산 모형을 고려하면 수치모델은 공간적으로 2차 정확도를 가진다. Fig. 1에서와 같이 회전축을 기준으로 한 축대칭 2차원 계산영역을 표현하는데 29,700개의 계산체적을 사용하였다. 이는 선행 연구[13]보다 격자 분해능이 향상된 것이다.

3. 해석 결과 및 토론

이 연구에서는 회전식 반응기의 기존 형상에서 재순환 영역이 확대되어 증착에 부적합한 유동이 발생할 수 있는 운전 조건에 해당하는 원판의 회전수 1000~1400 rpm, 반응기 내 작동압력 100~190 torr의 범위에 대하여 장치의 출구부 측벽경

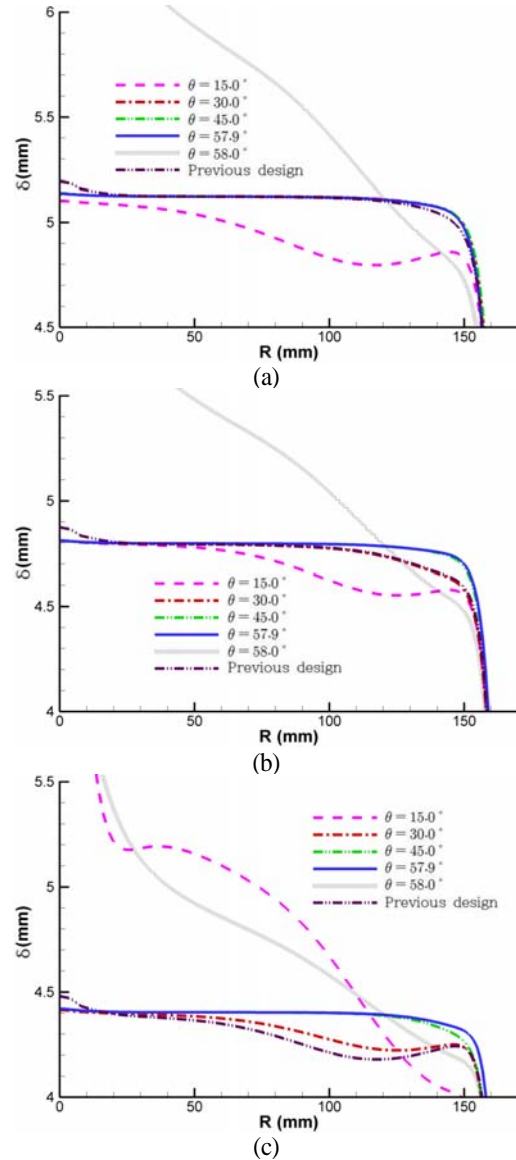


Fig. 2 Effects of outlet angle on boundary layer thickness evaluated by the 600°C isotherm. The operating pressure is (a) 140 torr; (b) 160 torr; and (c) 190 torr and the rotation rate is $\Omega = 1000$ rpm

사각 θ 를 $15\sim 58^\circ$ 의 범위에서 바꾸어가며 계산을 수행하였다.

먼저 출구부의 각도와 작동압력이 유동 안정화 및 증착률에 미치는 영향을 알아보기 위하여 Lee et al.의 연구[13]에서 GaN 증착률 평가 방안으로 제안된 원판 상부에서 형성되는 600°C 등온선의 구조를 살펴보았다. 600°C 는 암모니아가 화학반응 가능한 질소원자 또는 질소이온으로 해리되는 온도로 GaN 증착에서 반응의 시발점이다. Fig. 2는 원판에서 이 등온선까지의 수직거리를 그린 것이다. Mitrovic et al.[11]은 온도 경계층의 두께와 증착률이 반비례 관계를 가진다고 보고한 바 있는데, Lee et al.[13]은 물리적 의미가 불분명한 이

온도 경계층 두께를 화학적으로 의미있는 600°C 등온선의 위치로 대체하여 정량적 기준을 명확히 하였다. 이 연구에서도 동일한 방법으로 적용하여 실제 장치에서 원판 위에 다수의 LED 기판이 장착되는 위치에 해당하는 원판 중심으로부터 거리가 30~130 mm인 구간에서 600°C 등온선의 높이 δ 를 구하고 이로부터 상대적 증착편차 Φ 를 식 (1)과 같이 평가하여 그 결과를 Table 1에 정리하였다.

$$\Phi = \left(\frac{\delta_{\max} - \delta_{\min}}{\delta_{\max}} \right) \times 100\% \quad (1)$$

먼저 Fig. 2(a)에 나타난 작동압력이 140 torr인 경우의 결과를 살펴보도록 하자. 측벽경사가 없는 급확대형 구조의 기존 장치에서 600°C 등온선은 원판의 중앙부와 외곽부를 제외한 나머지 부분에서는 비교적 균일한 높이를 가지고 있다. 그런데 측벽경사가 약하게 존재하는 경우, 예를 들어 $\theta = 15^\circ$ 인 경우 의도와는 달리 오히려 등온선의 균일성이 악화되었다. 측벽경사각이 더 커지면 유동이 안정화되는데 $30^\circ \leq \theta \leq 57.9^\circ$ 의 구간에서는 등온선의 균일도가 향상되었다. 그러나 측벽경사가 더 심해지면 균일도는 다시 급격히 악화되는데 $\theta = 58^\circ$ 인 경우의 등온선이 이를 잘 보여주고 있다. 이러한 결과는 Table 1의 상대 증착편차에서 정량적으로 확인할 수 있는데 $30^\circ \leq \theta \leq 57.9^\circ$ 의 구간에서는 증착편차 1% 미만의 우수한 균일도를 얻을 수 있지만 측벽경사각이 작거나 큰 경우 증착편차가 크게 증가하는 것으로 나타났다.

원인을 규명하기 위하여 Fig. 3에 회전식 반응기의 내부 유동특성을 파악할 수 있는 유선과 온도분포를 도시하였다. 여기서 유선을 자세히 볼 수 있도록 350 K 이상의 온도분포만을 나타내었다.

Fig. 3(a)는 기존 연구[10,12,13]에서 다루었던 측벽경사각이 없는 급확대형 출구를 가진 장치에서 나타나는 유동을 보여주고 있다. 회전원판의 상부에 균일한 하강류가 흐르는 증착에 적절한 플러그 유동[10]이 형성되었다. 회전원판의 외곽부

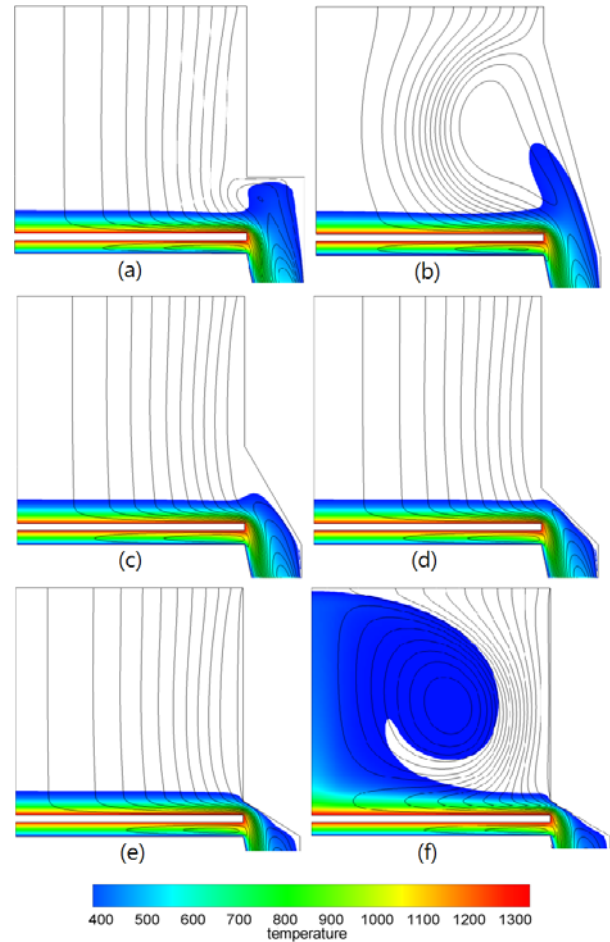


Fig. 3 Flow patterns found in the rotating-disc CVD reactor. (a) is for the reactor with a sudden expansion in radius [10,12,13]. The angle of outlet sidewall is (b) $\theta = 15.0^\circ$; (c) $\theta = 30.0^\circ$; (d) $\theta = 45.0^\circ$; (e) $\theta = 57.9^\circ$; (f) $\theta = 58.0^\circ$. The operating pressure is 140 torr and $\Omega = 1000$ rpm. Lines and colors represent streamlines and isotherms with temperature cut off below 350 K, respectively. temperature scale is given in unit of Kelvin

에는 부분적으로 재순환 유동이 존재한다. 이 재순환 영역이 외곽부의 구석에 머물러 있기 때문에 회전원판 상부에 형성되는 온도경계층에 큰 영향을 미치지 않아 600°C 등온선은 비교적 좋은 균일도를 보이고 있다.

반면에 Fig. 3(b)에 도시된 측벽경사각이 $\theta = 15^\circ$ 의 경우, 외곽부에서 발생한 재순환 유동 영역이 회전원판 상부로 확대되어 유입구로부터의 하강류를 심각하게 왜곡시키는 유동구조가 형성되었다. 이는 측벽의 급확대 부분의 기하학적 구조 때문에 상부로 진출하지 못하고 구석에 갇혀있던 재순환 유동이 측벽이 완만한 각도를 가지는 구조로 바뀌면서 쉽게 상부로 진출한 것으로 보인다. 이 경우 온도경계층의 균일도가 나빠지는 것은 물론 출구로 향하는 반응 후 배기가스가 역류하여 다시 증착 영역으로 유입되기 때문에 증착 관점에

Table 1 Relative deviation of deposition Φ estimated by 600°C isotherm at various outlet angle & operating conditions

Working pressure [torr]	Rotation rate [rpm]	Relative deposition uniformity Φ				
		$\theta=15.0^\circ$	$\theta=30.0^\circ$	$\theta=45.0^\circ$	$\theta=57.9^\circ$	$\theta=58.0^\circ$
140	1000	5.46	0.56	0.58	0.58	18.8
160	1000	4.97	2.01	0.52	0.50	17.8
190	1000	20.1	3.90	0.77	0.56	15.7
120	1200	3.07	0.55	0.60	0.60	48.3
130	1200	3.80	0.91	0.55	0.54	42.7
150	1200	3.96	2.66	0.55	0.51	19.8
100	1400	2.01	0.55	0.63	0.64	46.5
110	1400	2.87	0.73	0.57	0.56	40.0
130	1400	3.85	2.39	0.53	0.50	16.3

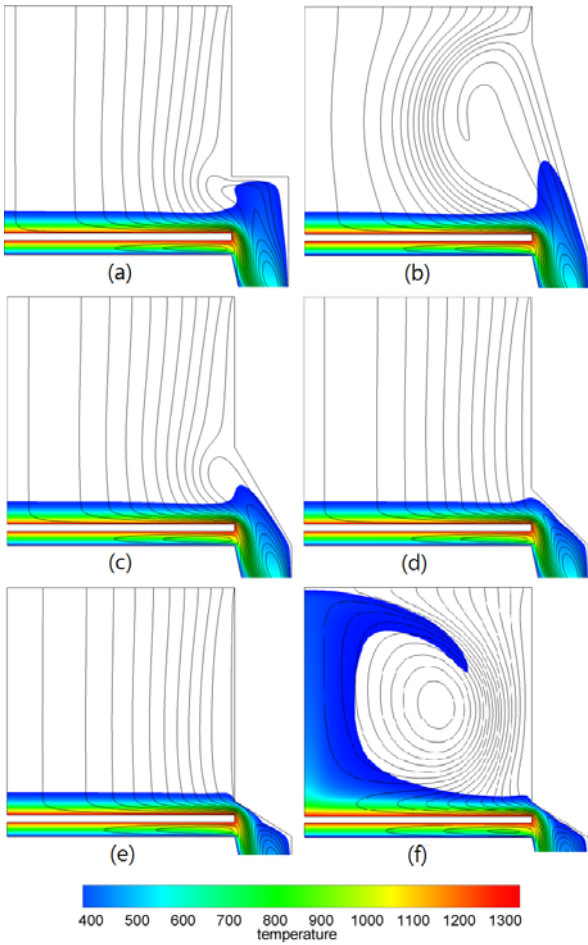


Fig. 4 Legends are the same as in Fig. 3 except for the operating pressure is 160 torr

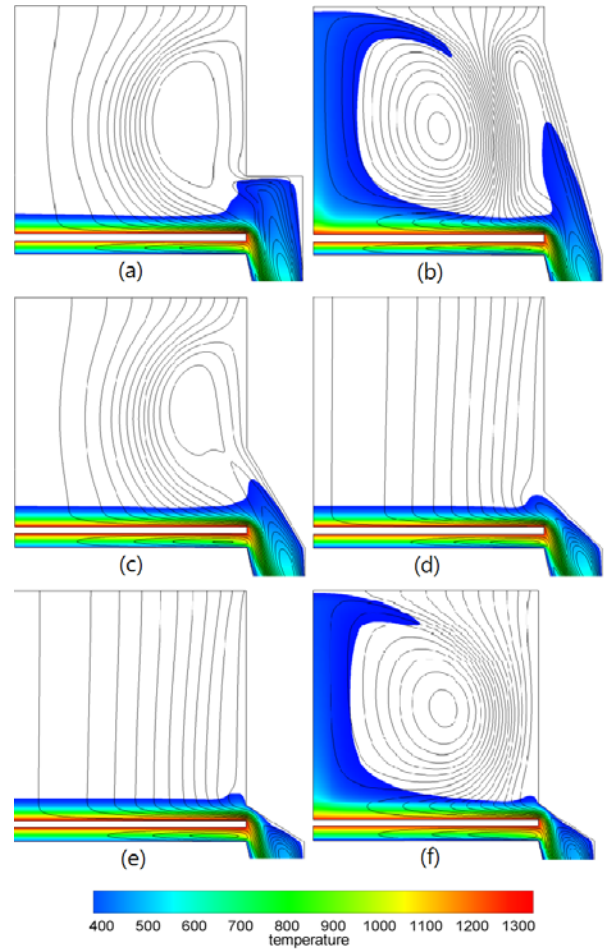


Fig. 5 Legends are the same as in Fig. 3 except for the operating pressure is 190 torr

서 피해야 한다. 그러나 Fig. 3(c)에서 볼 수 있는 것처럼 측벽경사각이 커져 $\theta = 30^\circ$ 가 되면, 회전원판 외곽부의 재순환 유동이 상부로 전파되는 것이 차단되어 재순환 유동은 출구부에 머무르고 반응로의 핵심부인 회전원판 상부는 안정된 플러그 유동이 형성된다. Fig. 3(d)와 Fig. 3(e)는 이보다 각도가 큰 $\theta = 45^\circ, 57.9^\circ$ 의 유동장을 보여주고 있는데 매우 안정된 플러그 유동이 유지되고 있다. 그러나 측벽경사각이 $\theta = 58^\circ$ 로 커지면 회전원판 상부에 재순환 영역이 크게 활성화되어 유동이 불안정해짐을 Fig. 3(f)에서 볼 수 있다. 결과를 정리하면 측벽경사각이 일정 범위 내에서는 유동이 안정화되고 경사각이 작거나 크면 유동은 오히려 불안정해진다. 이러한 결과는 Table 1에 제시된 상대적 증착편차 값에서도 확인할 수 있다.

Fig. 2(b)는 작동압력이 160 torr으로 상승한 경우의 600°C 등온선의 구조를 보여주고 있다. 측벽경사가 없는 기존 장치의 경우는 물론 $\theta = 15^\circ, 30^\circ$ 인 경우에도 등온선의 균일도가 악화되었음을 관찰할 수 있다. 이러한 결과는 유선과 온도분

포를 도시한 Fig. 4에서 보다 명확하게 확인된다. Fig. 4(a)와 Fig. 3(a)를 비교해보면 140 torr의 압력조건에서는 회전원판 외곽부에 국한되었던 재순환 영역이 압력이 160 torr로 상승하면 회전원판 상부의 내부영역으로 세력을 확장한 것을 볼 수 있다. 이러한 유동의 형태는 기존 연구에서 회전 지배적인 유동형에서 발생하는 전형적인 불안정 유동과 유사하다[12]. Fig. 4(b)와 Fig. 4(c)를 보면 압력이 140 torr인 경우와 마찬가지로 측벽경사각이 $\theta = 15^\circ$ 인 장치에서는 재순환 유동이 반응기 내부 전체적으로 크게 확대되었고 $\theta = 30^\circ$ 로 측벽경사각이 커진 경우에도 재순환 유동이 효과적으로 억제되지 않았다. 이 결과는 압력이 증가하면 회전 지배적 유동의 불안정성이 커진다는 기존 연구의 주장을 뒷받침하고 있다[10-13]. 그러나 측벽경사각이 더 커지면 다시 유동이 안정화되었다. Fig. 4(d)와 Fig. 4(e)는 $\theta = 45^\circ, 57.9^\circ$ 인 장치에서는 동일한 운전조건에서도 여전히 안정된 플러그 유동이 유지되고 있음을 보여주고 있다. Table 1에 정리한 상대 증착편차를 보더라도 이 두 경우의 편차는 1% 미만으로 우수한 증착균일도가 유지

되고 있다. 그러나 Fig. 4(f)에서 볼 수 있듯이 작동압력이 140 torr인 경우와 마찬가지로 $\theta = 58^\circ$ 가 되면 재순환 유동이 급격히 활성화되어 불안정한 유동장이 형성된다.

Fig. 2(c)는 작동압력이 더 상승하여 190 torr인 경우의 600°C 등온선의 구조를 보여주고 있다. 측벽경사각을 고려하지 않은 기존 장치는 물론 $\theta = 15^\circ, 30^\circ$ 인 장치에서 등온선은 수평으로 유지되지 않고 굴곡이 명확한 비균일 구조를 가지고 있다. $\theta = 45^\circ, 57.8^\circ$ 인 장치에서만 등온선의 균일성이 유지되고 있다. 장치 내부의 유선과 온도장을 그린 Fig. 5는 이러한 현상을 보다 명확히 보여준다. Fig. 5(a)에 나타난 기존 장치에서 발생하는 유동장을 보면, Fig. 4(a)에서 외곽부에 국한되었던 재순환 유동이 압력이 커지면 내부 영역으로 크게 침범하였다. 압력상승에 따라 유동의 불안정성이 더욱 커진 것이다. Fig. 5(b)-(c)의 유동장을 보면 압력이 160 torr인 경우와 마찬가지로 $\theta = 15^\circ, 30^\circ$ 인 장치에서는 이러한 재순환 유동이 제어되고 않고 있다. Fig. 5(d)-(e)에서 보는 바와 같이 측벽경사각이 $\theta = 45^\circ, 57.9^\circ$ 인 장치에서는 압력의 상승에도 불구하고 여전히 증착에 적절한 안정된 플러그 유동장이 유지되고 있다. 하지만 Fig. 5(f)가 보여주는 것처럼 측벽경사각이 $\theta = 58.0^\circ$ 이 되면 유동장은 다시 불안정해졌다. 정성적인 결과는 작동압력이 160 torr인 경우와 유사하지만 유동 불안정성의 강도가 다소 커졌는데 이는 Table 1에 제시된 증착편차에서도 확인할 수 있다.

그런데 이러한 결과는 이미 알려진 회전 유동의 유량균형 이론[10,12]으로 충분히 설명되지 않는다. 기존 연구가 설명하는 회전 지배적 유동형에서 유동 재순환 발생 기구는 회전하는 원판에 의해 구동되는 에크만 흡입유량 보다 유입유량이 적으면 모자라는 유량을 보충하기 위하여 출구로 향하던 유체 일부가 역류하여 발생한다는 것이다. 동일한 질량유량과 회전수 조건에서 작동압력이 높아지면 반응가스의 몰농도가 상승하여 증착물 향상에 유리하나 체적유량은 밀도의 증가에 반비례하여 감소한다[2]. 상대적으로 에크만 흡입 체적유량은 에크만 수의 제곱근에 비례하기 때문에 밀도의 제곱근에는 반비례하여 줄어든다. 압력이 증가하면 공급 유량의 감소가 에크만 흡입이 필요로 하는 유량보다 빠르게 감소하여 유량균형이 만족되지 않아 유량보충을 위한 역류가 필연적으로 발생한다. 이 논리는 여전히 유효하지만 유한한 크기를 가지는 이 장치에서 필요한 에크만 흡입유량을 정확히 예측할 수 없는 조건에서 유입유량이 필요유량보다 부족한 지에 대한 평가는 유보적이다. 실제 반응기 내부로 성장한 재순환 유동이 공급유량과 에크만 흡입유량 불균형 때문에 발현된 것이라면 출구 형상을 바꾸는 것으로 문제가 해결되지 않기 때문이다. $\theta = 45^\circ$ 정도의 측벽경사각이 있으면 안정된 플러그 유동이 형성된다는 것은 공급되는 체적유량은 여전히 에크만

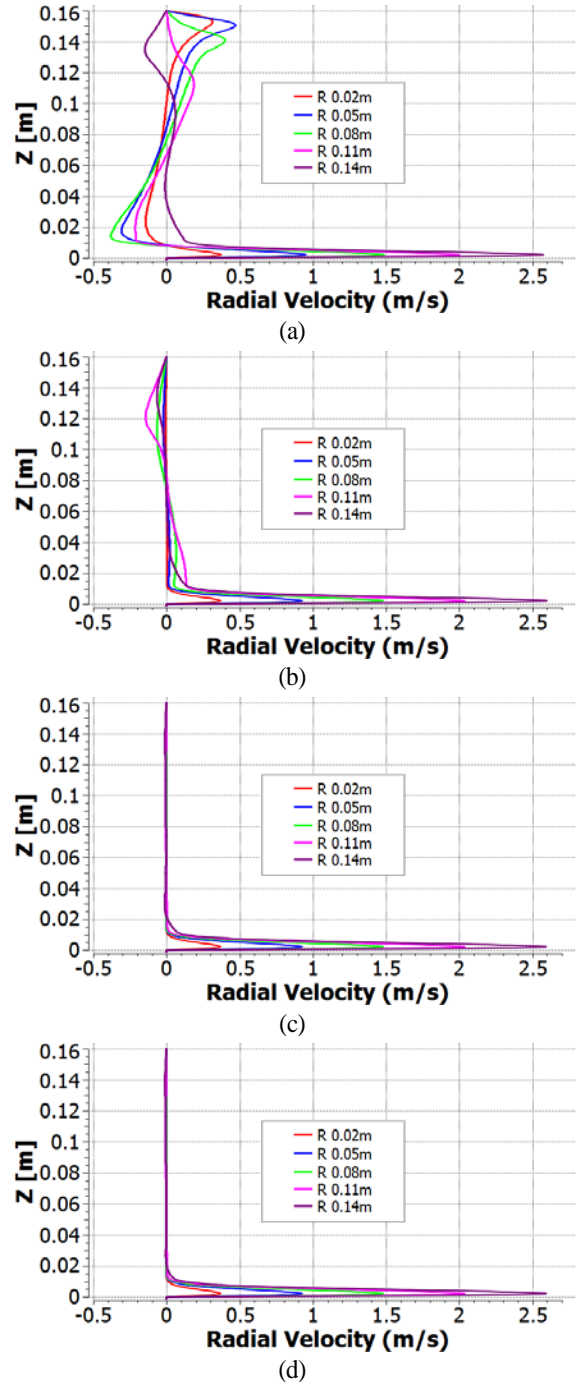


Fig. 6 Vertical profiles of radial velocity component at several radial positions; for operating pressure is 190 torr and the disk rotates at 1000 rpm. The outlet angle is (a) 15.0°; 30.0°; 45.0° and (d) 57.9°

흡입유량을 만족시키고 있다는 반증이다.

이를 확인하기 위하여 회전원판 상부의 반경 방향의 유동을 통하여 에크만 경계층의 구조를 살펴보았다. Fig. 6은 Fig. 5에 나타난 유동의 특성을 분석하기 위하여 원판의 중심

으로부터 반경 방향으로 0.02, 0.05, 0.08, 0.11, 0.14 m 떨어진 지점에서 높이에 따라 변하는 반경방향 속도 분포를 그린 것이다. Fig. 6(a)에 나타난 $\theta = 15^\circ$ 인 장치에서 반경방향 속도 분포를 보면 에크만 경계층은 물론 그 상부에서도 반경류가 존재한다. Fig. 6(b)에 도시된 $\theta = 30^\circ$ 인 장치의 속도 분포 역시 $\theta = 15^\circ$ 인 장치보다는 안정되었으나 여전히 경계층 상부에도 반경방향 흐름이 존재하는 구조를 가지고 있어 하강류만으로 이루어지는 플러그 유동과는 거리가 있다. 이에 비하여 Fig. 6(c)에 도시된 $\theta = 45^\circ$ 인 장치에서는 회전원판 바로 윗 부분의 에크만 경계층에서만 반경류가 형성되고 그 상부에는 반경방향 유동이 없는 전형적인 에크만 경계층 유동의 특징을 보이고 있다. Fig. 6(d)의 $\theta = 45^\circ$ 인 장치에서의 속도 분포도 동일한 경향을 보이고 있다. 이상의 결과는 경계층 상부에는 하강류만 존재하는 플러그 유동이 형성되고 에크만 경계층으로 흡입된 후 반경류에 의해 외곽으로 빠져나가고 있음을 시사한다. 유입유량이 에크만 흡입유량보다 부족하다면 이러한 유동이 형성될 수 없다. 하류의 기하학적 구조 즉 측벽경사각이 회전원판 위에 형성되는 에크만 유동 즉 에크만 흡입유량에 직접 영향을 주지 않으므로 에크만 흡입에 비해 유입유량이 작다는 가설이 성립하지 않는다.

이 연구에서는 순환 유동의 발생과 성장에 대한 새로운 설명을 시도하였다. 회전원판 상부로부터 유입되는 유체는 에크만 경계층에서 원심력에 의해 외곽으로 분출되는데 이것이 이 흐름과 수직으로 놓인 측벽과 충돌하여 정체압이 발생하면서 외곽부에 분출 속도의 동압만큼 압력이 상승한다. 이 때 에크만 경계층의 분출속도는 질량유량에 관계없이 회전원판의 반경과 회전속도에 비례한다[2,12]. 따라서 동일한 질량유량 조건에서 압력이 증가하면 이에 비례하여 밀도가 증가하고 정체압에 의한 압력은 밀도에 비례하여 증가한다. 그러나 동일한 질량유량 조건에서 압력 즉 밀도가 증가하면 회전원판 상부의 하강류의 속도는 밀도에 반비례하여 줄어든다. 따라서 밀도와 속도의 제곱에 비례하는 하강류의 관성력은 압력에 반비례하여 줄어들게 된다. 압력이 낮은 경우 하강류의 관성력이 외곽부 정체압에 의한 재순환 유동의 침입을 억제할 수 있지만 압력이 커질수록 외곽부 정체 압력은 비례하여 증가하고 하강류 관성력은 반비례하여 감소하기 때문에 외곽에 형성되는 재순환 유동에 대한 억제력을 잃게 되어 Fig. 5(a)와 같은 유동이 형성된다.

그런데 이 연구에서와 같이 에크만 경계층에서 분출되는 유체가 충돌하는 측벽에 경사각을 두면 수직으로 충돌하는 경우에 비하여 압력 상승을 줄일 수 있다. 측벽경사각이 작은 경우, 외곽부의 압력 상승을 줄이는 효과는 크지 않는데 반하여 급확대형의 기존 형상보다 상승한 압력이 상부에 영향을 주기 쉬운 기하학적 구조 때문에 재순환 유동의 확장이 쉬워져, Fig. 3(b)와 같이 유동이 오히려 불안정해진다. 측벽경사각

이 어느 정도 이상으로 커지면 분출 유동의 측벽 충돌에 의한 압력상승이 줄어들고 자연스럽게 배기 유동이 하부로 유도되므로 재순환 유동이 출구부에 국한된다. 이것이 회전원판 외곽부의 측벽경사각 조정이 재순환 유동을 억제한 물리적인 메카니즘이다.

남은 의문은 $\theta = 57.9^\circ$ 일 때 안정적이던 유동이 $\theta = 58.0^\circ$ 가 되면 왜 급격히 불안정해지는가 하는 것이다. 그 해답은 이 연구에서 다른 장치의 기하학적 구조에서 찾을 수 있다. 이 연구에서는 Fig. 1에 도시된 장치에서 반지름이 R_0 로 커지는 시작점의 위치를 고정한 상태에서 측벽경사각 θ 를 조정하였다. 따라서 θ 가 커지면 반지름이 R 인 유입구 부분의 길이가 길어져 회전 원판과 유입구의 최하단 사이의 간격이 줄어든다. 다시 말해 θ 가 커지면 출구부로 향하는 유로의 수력 직경이 줄어들게 되는데 이것이 에크만 경계층의 두께보다 작아지면 유로의 병목 현상 때문에 반응 후 기체가 제대로 출구로 빠져나가지 못하고 원판 상부로 되돌아오는 유동이 발생한다. 따라서 측벽경사각의 적정 영역에서만 유동이 안정화되므로 반응장치의 운전조건을 고려하여 적절한 측벽경사각을 채택하여야 한다.

여러 가지 운전 조건에서 증착 균일도를 평가한 Table 1의 결과는 원판의 회전수가 1000 ~ 1400 rpm의 범위에서는 $\theta = 45^\circ$ 와 57.9° 인 장치에서 높은 압력에서도 안정되고 균일한 증착을 수행할 수 있음을 지적하고 있다. 그러나 $\theta = 57.9^\circ$ 보다 각도가 커지면 유동은 급격히 불안정해지므로 측벽경사각은 $\theta = 45^\circ$ 정도에서 설계하는 것이 가장 좋을 것으로 판단된다.

4. 결 론

이 연구에서는 전산해석을 통하여 회전식 반응기에서 에크만 경계층에서 분출되는 유동과 만나는 측벽을 기울일 경우, 그 경사각이 내부 유동과 증착에 미치는 영향을 조사하였다. 측벽경사각이 작은 경우에는 회전식 반응기 내부로 재순환 유동이 크게 침투하여 결과적으로 측벽경사각이 없는 급확대형의 기존 장치 보다 더 불안한 유동이 형성되었다. 그러나 측벽경사각이 어느 정도 이상 커지면 유동 재순환이 억제되어 전체적으로 유동이 안정화되고 온도 경계층이 균일해져 증착 균일도가 향상되었다. 각도가 너무 더 커지면 출구로 향하는 유로의 높이가 감소하여 배기 불순형 재순환이 다시 발생하였다. 이러한 현상은 에크만 경계층에서 분출되는 유동이 측벽과 충돌하면서 발생하는 압력상승과 회전원판 상부의 하강류의 관성력의 상호작용으로 설명할 수 있다. 이 연구는 유동의 안정성과 증착 균일성을 보장하는 측벽경사각의 범위가 존재함을 보임으로써 반응기 형상의 최적설계의 필요성을 제기하였다.

후 기

이 연구는 금오공과대학교 교수연구제에 의하여 지원되었으며 이에 감사드립니다.

References

- [1] 2001, Creighton, J.R. and Ho, P., "Introduction to Chemical Vapor Deposition," in *Chemical Vapor Deposition* (ed. by Park, J.H. and Sudarshan, T.S.), ASM International, www.asminternational.org.
- [2] 1979, Schlichting, H., "Flow over a Rotating Disk," in *Boundary Layer Theory*, McGraw-Hill.
- [3] 1997, Nakamura, S., "III-V Nitride Based Light Emitting Devices," *Solid State Commun.*, Vol.102, No.2-3, pp.237-248.
- [4] 1999, Stringfellow, *Organic Vapor-Phase Epitaxy: Theory and Practice*, Academic Press, New York.
- [5] 2000, Theodoropoulos, C., Mountziaris, T.J., Moffat, H.K. and Han, J., "Design of Gas Inlets for the Growth of Gallium Nitride by Metalorganic Vapor Phase Epitaxy," *J. Crystal Growth*, Vol.217, pp.65-81.
- [6] 2005, Sengupta, D., Nazumder, S., Kuykendall, W. and Lowry, S.A., "Combined ab initio Quantum Chemistry and Computational Fluid Dynamics Calculations for Predictions of Gallium Nitride Growth," *J. Crystal Growth*, Vol.279, pp.369-382.
- [7] 1987, Evans, G. and Greif, R., "A Numerical Model of the Flow and Heat Transfer in a Rotating Disk Chemical Vapor Decomposition Reactor," *Trans. ASME J. Heat Transfer*, Vol.121, No.4, pp.774-788.
- [8] 1989, Patnaik, S., Brown, R.A. and Wang, C.A., "Hydrodynamic Dispersion in Rotating-Disk OMVPE Reactors: Numerical Simulation and Experimental Measurements," *J. Crystal Growth*, Vol.96, No.1, pp.153-174.
- [9] 1992, Biber, C.R., Wang, C.A. and Motakef, J., "Flow Regime Map and Deposition Rate Uniformity in Vertical Rotating-Disk OMVPE reactors," *J. Crystal Growth*, Vol.123, No.3-4, pp.545-554.
- [10] 2006, Mitrovic, B., Gurary, A. and Kadinski, L., "On the Flow Stability in Vertical Rotating Disc MOCVD Reactors under a Wide Range of Process Parameters," *J. Crystal Growth*, Vol.287, pp.656-663.
- [11] 2007, Mitrovic, B., Gurary, A. and Quinn, W., "Process Conditions Optimization for the Maximum Deposition Rate and Uniformity in Vertical Rotating Disc MOCVD Reactors Based on CFD Modeling," *J. Crystal Growth*, Vol.303, pp.323-329.
- [12] 2012, Kwak, H.S., "Computational Assessment of Optimal Flow Rate for Stable Flow in a Vertical Rotating Disk Chemical Vapor Deposition Reactor," *J. Comput. Fluids Eng.*, Vol.17, pp.86-93.
- [13] 2012, Lee, J.H., Kim, D. and Kwak, H.S., "Searching for Optimal Operating Condition in a Rotating Disc CVD Reactor Considering Uniformity of Deposition," *Proc. KSCFE 2012 Autumn Meeting*, pp.444-446.
- [14] 2013, Park, J.J., Kim, K. and Kwak, H.S., "Optimal Shape Design for High Deposition Rate in Rotating-Disk CVD Reactors Using CFD Analysis," *Proc. KSCFE 2013 Autumn Meeting*, pp.126-128.