

〈논 문〉

## 증착공정에서의 회전원판 정체점유동에 대한 상사해석

송 창 곁\* · 황 정 호\*\*

(1996년 1월 8일 접수)

### Similarity Analysis of a Forced Uniform Flow Impinging on a Rotating Disk in a Vapor Deposition Process

Chang-Gull Song and Jung-Ho Hwang

**Key Words:** Chemical Vapor Deposition(CVD), Vapor-Phase Axial Deposition(VAD), Similarity Analysis(상사해석), Stagnation Point Flow(정체점유동), Flow Near a Rotating Disk(회전원판 유동)

#### Abstract

A theoretical study for a forced uniform flow impinging on a rotating disk, typically involved in Chemical Vapor Deposition(CVD) and Vapor-phase Axial Deposition(VAD) processes, has been carried out. A set of exact solutions for flow and temperature fields are developed by employing a similarity variable obtained from force balance on a control volume near the disk. The solutions depend on the rotating speed of the disk,  $\omega$ , and the forced flow speed toward the disk,  $a$ . For constant forced flow speed, the overall boundary layer thickness decreases when the rotating speed increases. Approximately 5%, 15%, and 30% decreases of the thickness are obtained for  $\omega/a=2, 5$ , and 10, respectively, compared to the case of  $\omega/a=0$ (axisymmetric stagnation point flow). For constant rotating disk speed the boundary layer thickness immediately decreases as the forced flow speed increases, compared to the case of  $\omega/a \rightarrow \infty$ (induced flow near a rotating disk). Effects of  $\omega$  and  $a$  on heat transfer coefficient are studied and explained with the boundary layer characteristics.

#### 기 호 설 명

$a$  : 속도구배 상수  
 $A_r, A_\theta, A_z, A_p, A_s, A_T$  : 무차원 변수  
 $A_{T,\infty}$  : 무차원 상수  
 $h$  : 열전달계수  
 $k$  : 열전도도  
 $m$  : 질량  
 $n$  : 상수  
 $P$  : 압력  
 $Pr$  : 프란틀수

$q$  :  $\frac{\omega^2 + a^2}{\omega + a}$  or  $\sqrt{a^2 + \omega^2}$   
 $r$  : 반경좌표  
 $T$  : 온도  
 $T_w$  : 원판온도  
 $U$  : 속도  
 $U_\infty$  : 자유유선 속도  
 $v_r, v_\theta, v_z$  :  $r^-$ ,  $\theta^-$ ,  $z^-$  방향 속도  
 $z$  : 축방향 좌표  
 $z_\infty$  : 자유유선 거리  
 $\alpha$  : 열확산도  
 $\delta$  : 경계층 두께

\*연세대학교 대학원 기계공학과

\*\*회원, 연세대학교 기계공학과

$\eta$	: 상사 변수
$\mu$	: 점성계수
$\nu$	: 동점성계수
$\rho$	: 밀도
$\tau$	: 전단응력
$\phi$	: 무차원인자(= $a/\omega$ )
$\omega$	: 각속도
첨자	
$\infty$	: 자유유선 조건
w	: 벽 조건

## 1. 서 론

정지된 원판에 수직방향으로 외부에서 주입되는 강제유동이 있을 때 원판근처의 열 및 유체 유동장에 대한 이해는 여러 공정에서 그 필요성이 대두되어 왔다. 반도체 웨이퍼 제조공정 등에 사용되는 화학증착공정(chemical vapor deposition)<sup>(1)</sup> 방식 중 단일 웨이퍼형 반응로(single-wafer reactor) 방식은 일반적인 다중 웨이퍼형 반응로(multiple-wafer reactor)에 비하여 웨이퍼에 부착된 필름두께의 균일함으로 인하여 최근 관심을 끌고 있다.<sup>(2)</sup> 이 방식에서는 반응로 내에 놓인 가열된 웨이퍼로 수직하게 반응기체가 주입되며 이때 유동장 규명을 위해서 충돌제트 계산<sup>(3,4)</sup> 등이 사용되고 있다. 또한 클린룸 내에서 클린룸 공기, 공정가스, 또는 CVD 반응로 내에서 물리적 화학적으로 생성되는 먼지입자의 웨이퍼 표면으로의 부착 메커니즘을 규명하기 위해서 정체점유동(stagnation point flow) 해석이 사용되어 왔다.<sup>(5-9)</sup> 외부에서 주입되는 강제유동이 없는 경우 원판의 회전으로 야기되는 원판근처의 유동장에 대한 이해 역시 여러 분야에서 그 필요성이 인식되어 왔으며 그 예로는 회전원판 CVD 공정이 있다.<sup>(10,11)</sup> 두 가지 유동이 같이 존재하는 경우, 즉 강제유동이 회전하는 원판에 수직방향으로 존재하는 경우, 그 실례를 반도체 공정중 감광물질의 spin coating이나 spin drying 공정,<sup>(12)</sup> 회전 원판 CVD 공정<sup>(13)</sup>에서의 입자상 물질의 거동에서 찾을 수 있다. 또한 광섬유 모재(optical fiber preform) 제조공정 중 하나인 Vapor-phase Axial Deposition(VAD) 방식<sup>(14)</sup>에서는 공정 초기에는 회전하는 원판형 타겟으로 실리카 입자 등의 부착이 이루어진다.

Fig. 1은 VAD 공정에서의 입자부착에 대한 개요

를 보여준다. 연소과정을 통해 생성된 에어로졸 입자는 유합(coalescence)과 응집(coagulation)을 통해 크기가 증가하며 열영동(thermophoresis)과 브라운 확산으로 인해 타겟에 부착된다. 처음에는 회전하는 원판형 타겟에 입자 부착이 이루어지지만 일정 시간이 지나면 축 방향의 성장이 일어나 부착 타겟은 원봉 형상이 되고 계속적인 입자부착이 이루어진다. 실제 공정에서는 버너로부터 분출된 유동장이 부착 목표물과 일정 각도를 이루고 있는데 이렇게 되면 3차원문제가 되어 해석이 복잡하므로 그동안 각도를 고려하지 않는 대칭형상 가정하에 몇몇 연구가 진행되어 온 바 있다. 회전하지 않는 원판형 부착 목표물로의 입자부착을 Hwang과 Daily<sup>(15)</sup>는 축대칭 정체점유동으로, Tsai와 Greiff<sup>(16)</sup>는 부력효과를 고려한 제트유동으로 가정하여 이론적 연구를 수행하였다.

CVD와 VAD 공정에서와 같이, 산업체의 여러 분야에서 사용되는 원판으로의 물질(particle/molecule) 부착에 대한 완전한 이해를 위해서는 유동장 계산 이외에도 물질전달, 기상 및 표면 화학반응등의 복잡한 기작을 규명해야 함은 물론이며 이를 위해서는 복잡한 수치계산이 불가피하다. 그러나 만약 연구의 초점이 공정 물질전달, 에어로졸 거동, 화학 반응, 열응력으로 인한 재료의 변형 등과 같은 측면에 맞추어진다면 단순화된 유동장 계산으로도 많은 물리 화학적인 현상들을 규명할 수 있을 것이다. 회전원판에 수직방향으로 강제유동이 존재하는 경우의 가장 간단한 유동장 계산은 원판으로의 정체점유동과 회전하는 원판으로 인해 야기

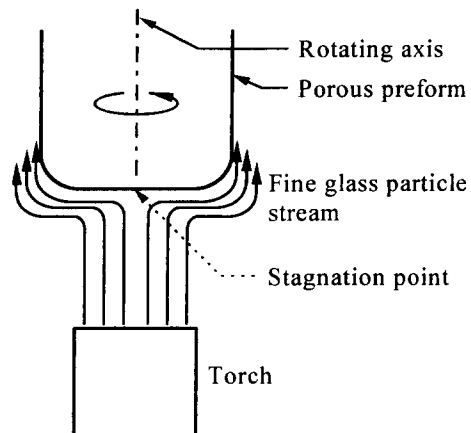


Fig. 1 Schematic of particle deposition in a VAD process

되는 유동이 혼합된 경우 일반화된 해석해를 구하는 것이다. 정체점유동과 회전원판유동은 각각 완전해가 존재하는 고전적인 문제인 반면, (17,18) 두 가지 유동이 함께 그러나 독립적으로 조절되는 경우는 약 40~50년 전에 수행된 Hannah, (19) Tifford와 Chu(20)의 상사해석 연구 외에는 다른 연구결과를 찾기가 힘들었다. Tifford와 Chu(20)의 연구에서는 자세한 내용이 포함되어 있지 않은 반면에 Hannah(19)의 연구는 비점성이론과 경계층이론을 조합하여 자세한 사항을 수록하였으나 그 내용이 수학적으로 다소 복잡하며 온도장에 대한 해석 결과가 포함되어 있지 않다. Evans와 Greif(21)도 회전원판 CVD 문제에서 유사한 연구를 수행하였으나 경계조건이 다르고 부력이 고려된 몇 가지 특수한 경우에 대해서만 다루고 있다.

본 논문에서는 원판형 타겟으로의 물질 부착률의 증가, 균일 부착, 또 경우에 따라서 부착 방지를 위한 연구에 수반된, 회전원판 정체점유동에 대한 상사해석 결과를 요약하였고, Hannah(19)와는 다른 새로운 상사변수를 소개하였다. 상사변수를 구함에 있어서 유체의 동점성계수, 강제유동속도와 원판의 회전속도에 관한 항으로 나타낸 경계층 두께를 이용하였으며 이는 Schlichting(22)의 방법과 유사하게, 경계층 면과 원판의 면을 각각 윗면과 아랫면으로 하는 미소 부피에 대한 힘의 평형식으로부터 유도하였다. 선정된 상사변수에 대하여 원판에 수직되게 유입되는 유동 속도와 원판의 회전속도의 비에 대하여 유동장 및 온도장에 대한 상사해를 구하였으며, 유동 속도가 일정할 때 회전속도의 첨가에 따라 경계층 두께가 어떻게 변화하는가, 그리고 원판의 회전속도가 일정할 때 유동속도의 변화에 따라 경계층 두께가 어떻게 변화하는가를 상사해로부터 고찰하였다. 본 논문에서는 또한 원판의 회전속도와 유동속도가 열전달계수에 미치는 영향을 고찰하였다. 이와같은 경계층해석은 Cho 등(23)과 Bai와 Biswas(24)에서와 같이 타겟으로의 물질부착 매커니즘을 해석함에 있어서 매우 중요하다.

## 2. 상사해석

von Karman의 회전원판 유동해석(18)에서는, 정지된 유체 안에서 무한 원판이 회전하면 원판 근처의 점성에 의해 유체가 회전하게 되고 원심력에 의해 Fig. 2에서 표시된 r-방향으로 유체가 밀려나게

된다. 비압축성 연속조건에 의해 밀려나는 만큼의 유체가 z-방향으로부터 유입된다. 축대칭 정체점 유동에서는 경계층 바깥의 유동이 점성과 무관한 포텐셜 유동이고, 그 속도분포는  $v_r = ar$ ,  $v_z = -2az$ 와 같이 표현된다. 이 두 경우에 대하여 원판의 회전 각속도  $\omega$ (rad/sec)와, 정체점유동에 대한 속도크기  $a$ (1/sec)에 의해 유동의 특성이 결정되며 상사해가 각각 존재한다. 두 유동을 합한 경우 본 연구에서 수행한 바에 의하면 상사해가  $a$ 와  $\omega$ 의 비에 좌우되며 그 비를  $\phi = a/\omega$ 와 같이 정의하면,  $\phi = 0$ 일 때에는 von Karman의 회전원판 유동에 대한 상사해와 동일한 결과의 해를 가지게 되고,  $\phi \rightarrow \infty$ 에 대해서는 축대칭 정체점유동에서의 상사해와 동일한 결과를 얻는다. 따라서 두 유동의 경계조건을 합하여 회전원판 정체점유동에 대하여 Fig. 2와 같이 각 경계조건을 정할 수 있다. 이때 z방향 유입 속도에서 회전의 영향으로 끌려 오는 속도성분인  $v_z$ , rotating effect는 미지수이므로 경계층 밖의  $v_z$ 에 관한 식은 경계조건에 포함되지 않는다.

White(17)은  $\phi = 0$ 인 경우, 동점성계수  $\nu$ 와 회전 각속도  $\omega$ 로 선정된 길이차원  $\sqrt{\frac{\nu}{\omega}}$ 로 z를 무차원화하여 상사변수를 구하였다.  $\phi \rightarrow \infty$ 인 경우에도 White(17)은 z를 두 개의 상수  $\nu$ ,  $a$ 로 선정된  $\sqrt{\frac{\nu}{a}}$ 로 무차원화하여 상사변수를 구하였다. 이와 반면 Schlichting(22)은  $\phi = 0$ 인 경우에 경계층 면과 원판의 면을 각각 윗면과 아랫면으로 하는 미소 부피에 대한 힘의 평형식으로부터, 경계층 두께  $\delta \sim \sqrt{\frac{\nu}{a}}$

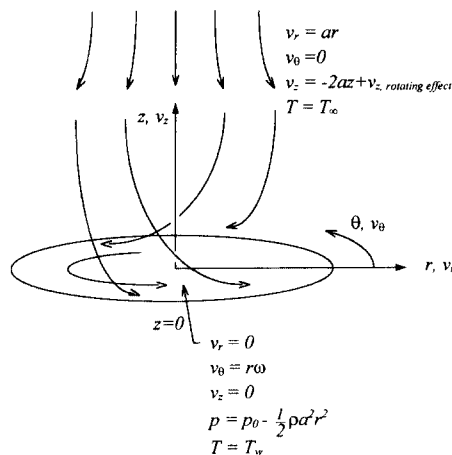


Fig. 2 Schematic diagram of the flow field

를 유도하여  $z$ 를 무차원하였다. 임의의  $\phi$ 에 대하여 본 연구에서는 Schlichting<sup>(22)</sup>에서와 같이 경계층 두께를 포함하는 미소 검사체적을 잡고 힘의 평형식을 적용하였다 (Fig. 3 참조). 이 검사체적에 대해  $r$  방향의 힘의 평형식을 점성력, 관성력, 압력을 고려하여 표현하면

$$-\tau_r dr ds + \Delta m r \omega^2 + \Delta p \delta ds = 0 \quad (1)$$

와 같고 전단력  $\tau_r$ 는 정의에 의해 아래와 같이 표현된다.

$$\tau_r = \mu \frac{\partial v_r}{\partial z} \sim \mu \frac{v_r|_{z=\delta}}{\delta} \quad (2)$$

여기에서  $\mu$ 는 점성계수이고  $v_r|_{z=\delta}$ 는 회전에 의한 속도  $\omega r$ 과 정체점 유동의 경계층 외부 유동 속도  $ar$ 을 합한 크기를 가진다고 생각할 수 있으므로  $v_r|_{z=\delta} \sim ar + \omega r$ 이 되며 따라서 식 (2)는 다음과 같이 표현된다.

$$\tau_r \sim \mu \frac{(\omega + a)r}{\delta} \quad (3)$$

식 (1)의 압력항  $\Delta p$ 는 두 지점  $r$ 과  $r + dr$  사이의 압력차이며 다음의 베르누이 식에 포텐셜 유동 속도  $v_r = ar$ 을 대입하여 구해진다.

$$\Delta p = p_r - p_{r+ar} = \frac{1}{2} \rho v_r^2 + ar - \frac{1}{2} \rho v_r^2 - \rho a^2 r dr \quad (4)$$

또한 유체의 밀도를  $\rho$ 라 할 때 미소질량  $\Delta m$ 이 표시된다.

$$\Delta m = \rho \delta dr ds \quad (5)$$

식 (1)에 식 (3)~(5)를 대입하고 정리하면 아래와 같은 결과를 얻을 수 있다.

$$\delta \sim \sqrt{\frac{\nu}{q}} \quad (6)$$

이때  $q$ 는 다음과 같다.

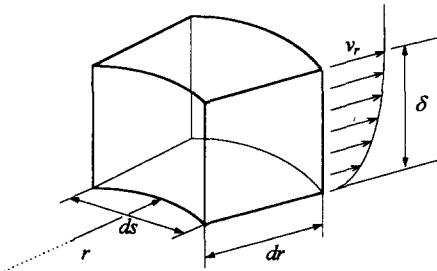


Fig. 3 Finite control volume on a disk

$$q = \frac{\omega^2 + a^2}{\omega + a} \quad (7)$$

이와 반면 Hannah<sup>(19)</sup>는 다음의  $q$ 를 사용하였다.

$$q = \sqrt{a^2 + \omega^2} \quad (8)$$

이와 같이 경계층 두께가 얻어지면  $z$ 에 대한 무차원변수로서,  $z$ 를 경계층두께  $\delta$ 로 나누어 아래와 같이 상사변수  $\eta$ 를 도입한다.

$$\eta = z \sqrt{\frac{q}{\nu}} \quad (9)$$

회전원판 정체점유동 해석을 위한 지배방정식들은, 원통좌표계에서 외력(중력, 전기력 등)을 무시하고, 물성치(밀도, 점성계수 등)들을 상수라고 가정하고, 축대칭, 비압축성, 정상상태 조건에서 연속방정식, ( $r, \theta, z$ ) 운동량방정식, 에너지방정식을 사용하였다.

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r v_r) + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad (10)$$

$$v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} - \frac{1}{r} v_\theta^2 = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + \nu \left( \frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{\partial^2 v_r}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2} - \frac{v_r}{r^2} \right) \quad (11)$$

$$v_r \frac{\partial v_\theta}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_\theta}{\partial z} + \frac{v_r v_\theta}{r} = \nu \left( \frac{1}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial r} + \frac{\partial^2 v_\theta}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 v_\theta}{\partial z^2} - \frac{v_\theta}{r^2} \right) \quad (12)$$

$$v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left( \frac{1}{r} \frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right) \quad (13)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r v_r T) + \frac{\partial}{\partial z} (v_z T) = \alpha \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] \quad (14)$$

여기서  $\alpha$ 는 열확산계수이다. 위의 방정식들에 적용되는 경계조건은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} z=0; & v_r=0, v_\theta=r\omega, v_z=0, \\ p &= p_0 - \frac{1}{2} \rho a^2 r^2, T = T_w \\ z \rightarrow \infty; & v_r \equiv ar, v_\theta=0, T = T_\infty \end{aligned} \quad (15)$$

여기서  $T_w$ 는 원판의 온도이고  $T_\infty$ 는 경계층 밖 자유유동에서의 유체온도이며  $p_0$ 는 전압이다. 그리고  $r, \theta, z$  방향 유속, 압력, 온도  $v_r, v_\theta, v_z,$

$p$ ,  $T$ 에 대하여  $A_r(\eta)$ ,  $A_\theta(\eta)$ ,  $A_z(\eta)$ ,  $A_p(\eta)$ ,  $A_T(\eta)$ 를 아래와 같이 정의한다.

$$v_r = r q A_r \quad (16)$$

$$v_\theta = r \omega A_\theta \quad (17)$$

$$v_z = \sqrt{q\nu} A_z \quad (18)$$

$$p = p_0 - \frac{1}{2} \rho a^2 r^2 + \rho q \nu A_p \quad (19)$$

$$A_T = \frac{T - T_\infty}{T_w - T_\infty} \quad (20)$$

$A_r$ ,  $A_\theta$ ,  $A_z$ ,  $A_p$ ,  $A_T$ 를 지배방정식 (10) ~ (14)에 적용하여 상사변수  $\eta$ 에 관한 상미분방정식으로 표현하면 다음과 같다.

$$2A_r + A_z'' = 0 \quad (21)$$

$$A_z'' - \left(\frac{\omega}{q}\right)^2 A_z^2 + A_z A_z' = \left(\frac{a}{q}\right)^2 + A_z'' \quad (22)$$

$$2A_r A_\theta + A_z A_\theta' = A_\theta'' \quad (23)$$

$$A_p' = 2A_r A_z - 2A_z' \quad (24)$$

$$A_T' - \text{Pr} A_z A_T' = 0 \quad (25)$$

Pr은 프란틀수이며 식 (15)의 경계조건은 다음과 같이 표현된다.

$$\eta = 0 : A_r = 0, A_\theta = 1, A_z = 0, A_p = 0,$$

$$A_T = 1$$

$$\eta \rightarrow \infty : A_r = \frac{a}{q}, A_\theta = 0, A_T = 0 \quad (26)$$

### 3. 결과 및 토의

식 (21)에서 (25)까지의 방정식은 비선형 연립미분방정식이므로 수치적으로 해를 구하기 위해 IMSL의 DVCPR 루틴<sup>(25)</sup>을 사용하였다.  $\phi = a/\omega$  값이 0, 0.1, 0.2, 0.5, 1, 2, 5, 10,  $\infty$ 일 때의 경우에 대하여 계산을 수행하였으며 유동유체가 공기라고 가정하고 Pr=0.7을 사용하였다. Figs. 4, 5, 6은 각각  $A_r$ ,  $A_\theta$ ,  $A_z$ 와 상사변수  $\eta$ 의 관계를 보여주는데  $\phi=0$ (회전원판유동)와  $\phi \rightarrow \infty$ (정체점유동)의 두 극한 경우에 대해서 계산결과가 기존의 문헌들에 수록된 결과<sup>(17, 22)</sup>와 잘 일치함을 알 수 있다. Fig. 7은 여러  $\phi$ 에 대해서  $A_T$ 를  $\eta$ 의 함수로 보여주는데  $\phi \rightarrow \infty$ 인 경우 약  $\eta=3$ 에 해당되는  $z$  값이 온도 경계층 두께이며,<sup>(17)</sup>  $\phi=0$ 인 경우는 온도 경계층 두께가  $\phi \rightarrow \infty$ 의 경우보다 큼을 알 수 있다.

이번에는  $\phi$ 값에 따른 유동속도와 온도의 경계층

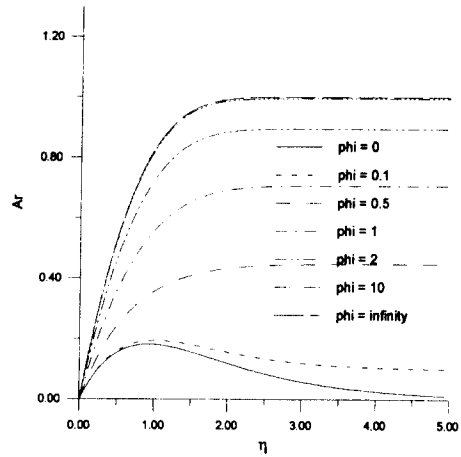


Fig. 4 Variation of  $A_r$  with respect to  $\eta$

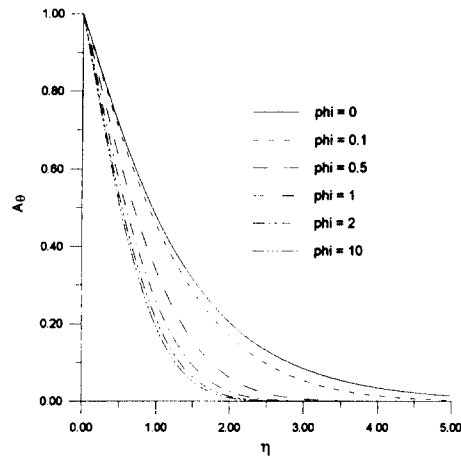


Fig. 5 Variation of  $A_\theta$  with respect to  $\eta$

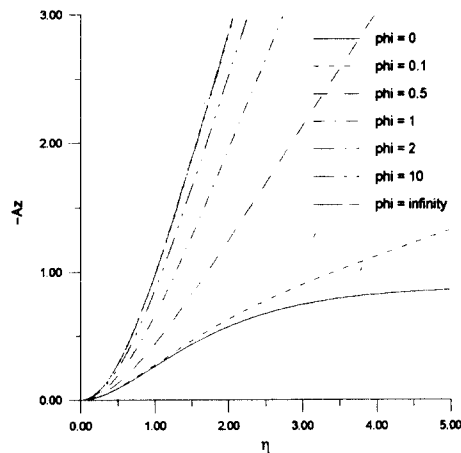


Fig. 6 Variation of  $A_z$  with respect to  $\eta$

두께의 변화를 알아보았다. 원판표면에서의 온도 경계층이 Fig. 7의  $A_T$ 값으로 구해지는데 비하여 속도 경계층 두께를 구할 때는  $r$ 방향과  $\theta$  방향의 속도 성분을 합한 속도에 대하여 구하여야 한다. 이때 정지 좌표계에 대해 속도를 구하면 회전이 없는 경우와 외부유동이 없는 경우에 대해서는 경계층 두께를 정의하기가 쉽지만 회전과 외부유동이 동시에 존재하는 경우에 대해서는 경계층 두께의 정의가 어렵게 된다. 따라서 회전하고 있는 원판의 표면에 대한 상대 속도로서  $v_s$ 를 아래와 같이 정의하고 여기에 대하여 경계층 두께를 구하였다.

$$v_s = \sqrt{v_r^2 + (v_\theta - r\omega)^2} = r q A_s \quad (27)$$

이때  $A_s$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$A_s = \sqrt{A_r^2 + \frac{\omega^2}{q^2} (A_\theta - 1)^2} \quad (28)$$

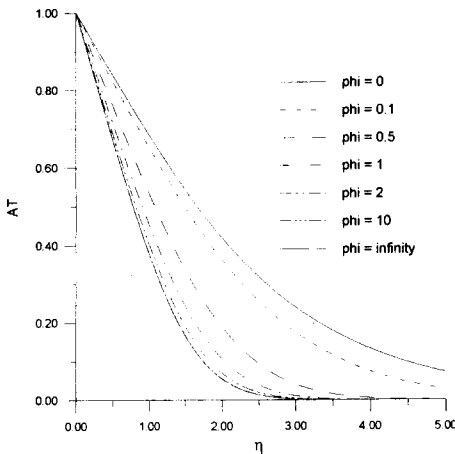


Fig. 7 Variation of  $A_T$  with respect to  $\eta$

Table 1 Boundary layer thickness with  $\phi$

$\phi$	$\tan^{-1}(\phi)$ (degree)	$\eta_{\delta, A_s}$	$\eta_{\delta, A_r}$
0.0	0.0	5.41	8.16
0.1	5.7	4.23	5.92
0.2	11.3	3.63	4.97
0.5	26.5	2.77	3.71
1.0	45.0	2.29	3.04
2.0	63.4	2.05	2.74
5.0	78.7	1.96	2.62
10	84.2	1.95	2.60
$\infty$	90.0	1.94	2.60

Table 1은  $\phi$ 값에 따른 경계층 두께의 변화를 보여준다. 경계층 두께  $\delta$ 는 식 (9)로부터 다음과 같이 정의된다.

$$\delta = \eta_\delta \sqrt{\frac{\nu}{q}} \quad (29)$$

$\eta_\delta$ 는 Table 1에 나타난  $\eta_{\delta, A_s}$ 와  $\eta_{\delta, A_r}$ 의 일반적인 표시로서, 전자는 속도 경계층 두께에 해당되는 상사변수  $\eta$ 의 값을, 후자는 온도 경계층 두께에 해당되는 상사변수  $\eta$ 의 값을 의미한다;

$$A_s(\eta_{\delta, A_s}) = 0.99, A_r(\eta_{\delta, A_r}) = 0.001.$$

이번에는 경계층 두께에 대해  $a$ 와  $\omega$ 의 독립적인 영향을 살펴보기 위하여  $a$ 가 상수인 경우와  $\omega$ 가 상수인 경우에 대하여 각각 살펴보았다. Fig. 8은  $a$ 가 상수인 경우,  $\eta_{\delta, A_s}$ 와  $\eta_{\delta, A_r}$  값에 대하여 구해지는 경계층 두께를  $\omega/a$ 의 변화에 대하여 나타낸 것이다. 이때 경계층 두께는  $a$ 를 어떤 값으로 정하는가에 따라 다르게 되므로  $\omega=0$ 인 경우의 경계층 두께에 대하여 정규화 하였다. 즉 순수한 정체점 유동만 있을 때의 경계층 두께를 1이라고 했을 때 회전 각속도  $\omega$ 를 첨가함에 따라 경계층 두께의 변화를 살펴보았으며  $\omega/a=2, 5, 10$ 에서 대략 5%, 15%, 30% 정도의 열 및 유동 경계층 두께의 감소를 볼 수 있었다. 마찬가지로 Fig. 9는 일정한 회전 각속도  $\omega$ 에 대하여 외부유동을 첨가함에 따라 경계층의 변화를 나타내는데  $a/\omega=0.1, 0.5, 1$ 에서 약 25%, 55%, 67% 정도의 경계층 두께의 감소를 보였다. Fig. 8에서 일정한 외부 강제유동에 대해 회전이 첨가됨에 따라 경계층 두께가 완만

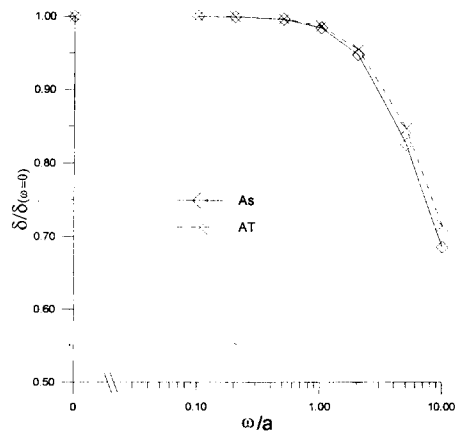


Fig. 8 Boundary layer thickness with respect to  $\omega$  for constant  $a$

하게 감소하는 것을 볼 수 있는데 이것은 회전 속도가 유체의 점성을 통하여 외부유동에 영향을 주므로 상대적으로 큰 회전속도에 의해서만 경계층이 영향을 받기 때문이라고 생각할 수 있다. 이와 반대로 Fig. 9에서는 매우 작은 외부유동의 첨가에 대해서도 경계층 두께가 크게 줄어드는 것을 볼 수 있다. 이로부터 경계층 두께는 원판의 회전보다는 외부유동 속도에 영향을 더 받을 수 있다.

이번에는 열전달계수에 대한  $a$ 와  $\omega$ 의 독립적인 영향을 살펴보았다. 먼저 식 (25)와 (26)으로부터 임의의  $A_2$ 에 대하여  $A_T$ 의 해가 다음과 같음을 알 수 있다.

$$A_T = 1 - \frac{\int_0^\eta \exp[\text{Pr} \int_0^\eta A_2 d\eta] d\eta}{\int_0^\infty \exp[\text{Pr} \int_0^\eta A_2 d\eta] d\eta} \quad (30)$$

원판표면에서 에너지평형식을 적용하면 열전달 계수  $h$ 와 열전도계수  $k$ 의 비는 다음과 같이 표시된다.

$$\frac{h}{k} = -\left(\frac{q}{\nu}\right)^{\frac{1}{2}} A_T(0) \quad (31)$$

$\phi \rightarrow \infty$  경우 즉  $\omega=0$ 일때 식 (31)은  $\frac{h}{k} = 0.74 \left(\frac{a}{\nu}\right)^{\frac{1}{2}} \text{Pr}^n$ 이 되는데 Stratmann 등<sup>(7)</sup>은  $n = 0.377$ , Kanury<sup>(26)</sup>는  $n=0.4$ 라 하였다.  $\phi=0$  즉  $a=0$ 인 경우 수치계산에 의하면 식 (31)은  $\frac{h}{k} = 0.39 \left(\frac{\omega}{\nu}\right)^{\frac{1}{2}} \text{Pr}^{0.466}$ 으로 표시된다. 이와 같이  $\omega=0$ 와

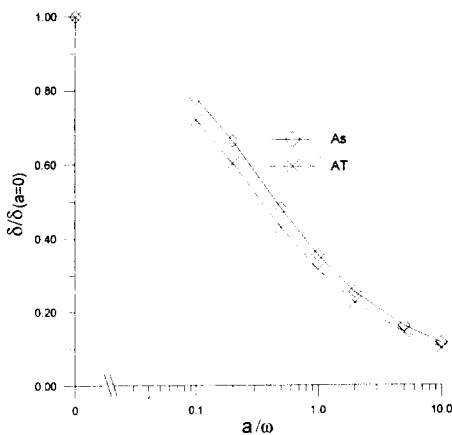


Fig. 9 Boundary layer thickness with respect to  $a$  for constant  $\omega$

$a=0$ 의 두 경우에 대해서  $\frac{h}{k}$ 의 값을 구한 후 이번에는 임의의  $\phi$ 에 대해서  $h/k$ 의 변화를 알아보았다. 먼저 주어진 속도 크기  $a$ 에 대하여 회전 각속도  $\omega$ 의 변화가  $h/k$ 에 미치는 영향을 보았다. Fig. 10은  $h/k$  값이  $\omega/a=0$ 의 경우에 비하여  $\omega/a=2$ , 10에서 대략 10%, 70% 정도 증가함을 보여준다. 다음은 주어진 회전 각속도  $\omega$ 에 대하여 속도 크기  $a$ 의 변화가  $h/k$ 에 미치는 영향을 보았으며 그 결과가 Fig. 11에 나타나 있다. Fig. 10과 11을 보면  $h/k$  값이  $\omega$ 의 증가보다는  $a$ 의 증가에 민감함을 보여주는데 이와 같은 현상 역시 Figs. 8과 9에서 설명한 바와 같이  $\omega$ 와  $a$ 에 대한 경계층 두께의 변

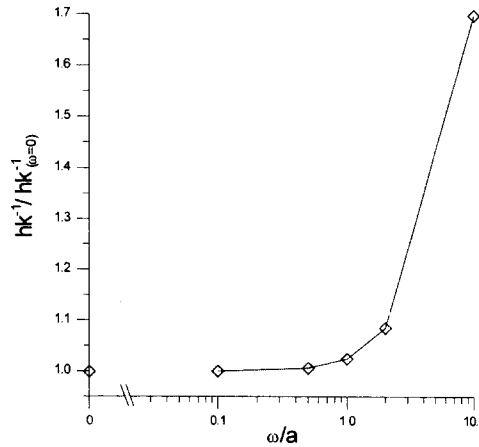


Fig. 10 Heat transfer coefficient with respect to  $\omega$  for constant  $a$

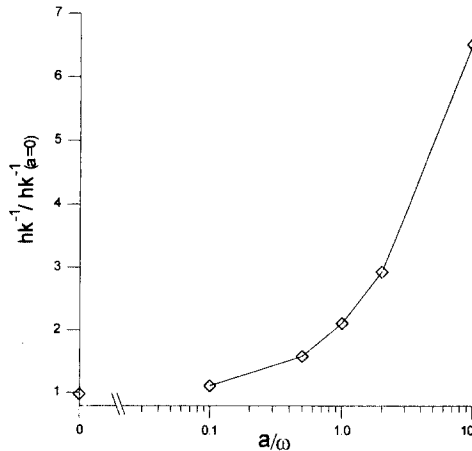


Fig. 11 Heat transfer coefficient with respect to  $a$  for constant  $\omega$

화로 설명이 가능하다. 즉 경계층 두께가 작아짐에 따라 원판에서의 온도구배값이 커짐에 따라 열전달 계수가 커지게 된다. (식 (31) 참조)

#### 4. 결 론

본 연구에서는 축대칭 정체점유동과 회전원판유동이 독립적으로 존재하는 유동에 대한 속도장 및 온도장의 상사해를 구하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 일정한 축방향 강제유동 속도가 있는 축대칭 정체점 유동에서 원판이 회전할 경우 회전속도가 빨라짐에 따라  $\omega/a=2, 5, 10$ 에서 약 5%, 15%, 30%, 정도의 경계층 두께의 감소를 볼 수 있었다.
- (2) 일정한 회전속도로 원판이 회전하는 회전원판 유동에서 축방향 외부유동속도가 첨가됨에 따라  $a/\omega=0.1, 0.5, 1$ 에서 약 25%, 55%, 67% 정도의 경계층 두께의 감소를 보였다. 이로부터 경계층 두께는 원판회전보다 외부유동속도에 많이 좌우됨을 알 수 있었다.
- (3) 원판의 회전과 축방향 강제유동속도가 열전달 계수에 미치는 영향을 살펴본 결과 열전달계수 역시 원판회전보다 외부유동속도에 많이 좌우됨을 알 수 있었고 이는 앞에서 논한 경계층 두께의 변화로 설명이 가능했다.

#### 참고문헌

- (1) Jensen, K. F., 1989, *Chemical vapor deposition, Chapter 5 of Microelectronics Processing*, Advances in Chemistry series Vol. 221, edited by D. W. Hess and K. F. Jensen, American Chemical Society, Washington, DC, pp. 199~263.
- (2) Park, J. H., 1996, "Deposition Uniformities on a Wafer and in a Trench for Tungsten Silicide LPCVD in a Single-Wafer Reactor," *Korean J. Chem. Eng.*, Vol. 13(2), pp. 105~114.
- (3) Kleijn, C. R., van der Meer, Th. H. and Hoogendoorn, C. J., 1989, "A Mathematical Model for LPCVD in a Single Wafer Reactor," *J. Electrochem. Soc.*, Vol. 136, pp. 3423~3433.
- (4) Kleijn, C. R., 1991, "A Mathematical Model of the Hydrodynamics and Gas-phase Reactions in Silicon LPCVD in a Single-Wafer Reactor," *J. Electrochem. Soc.*, Vol. 138, pp. 2190~2200.
- (5) Friedlander, S. K., Fernandez de la Mora, J. and Gokoglu, S. A., 1988, "Diffusive Leakage of Small Particles across the Dust-Free Layer near a Hot Wall," *J. Colloid Interface Sci.*, Vol. 125, pp. 351~355.
- (6) Peterson, T. W., Sannes, K. M., Stratmann, F. and Fissan, H., 1988, "Particle Deposition of Wafers: a Comparison between Modeling Approaches," *J. Aerosol Sci.*, Vol. 19, pp. 1409~1412.
- (7) Stratmann, F., Fissan, H. J., Papperger, A. and Friedlander, S., 1988, "Suppression of Particle Deposition to Surfaces by the Thermophoretic Force," *Aerosol Sci. Technol.* Vol. 9, pp. 115~121.
- (8) Turner, J. R., Liguras, D. K. and Fissan, H. J., 1989, "Clean Room Application of Particle Deposition From Stagnation Flow: Electrostatic Effects," *J. Aerosol Sci.*, Vol. 20, No. 4, pp. 403~417.
- (9) Lee, J. H., Moon, W. S. and Park, S. B., 1996, "Numerical Simulation of Thermophoretic Particle Decontamination in Clean Rooms," *Korean J. Chemical Eng.*, Vol. 13(1), pp. 7~14.
- (10) Evans, G. and Greif, R., 1987, "A Numerical Model of the Flow and Heat Transfer in a Rotating Disk Chemical Vapor Deposition Reactor," *ASME J. Heat Transfer*, Vol. 109, pp. 928~935.
- (11) Breiland, W. G. and Evans, G. H., 1991, "Design and Verification of Nearly Ideal Flow and Heat Transfer in a Rotating Disk Chemical Vapor Deposition Reactor," *J. Electrochem. Soc.*, Vol. 138, pp. 1806~1816.
- (12) 배귀남, 안강호, 1995, "회전 웨이퍼상의 입자침착속도의 예측 및 측정," 한국에어로졸 연구회 학술강연회논문집, pp. 13~17.
- (13) Davis, R. W., Moore, E. F., and Zachariah, M. R., 1993, "Numerical Modeling of Particle Dynamics in a Rotating Disk Chemical Vapor Deposition Reactor," *J. Crystal Growth*, Vol. 132, pp. 513~522.



- (14) Li, T., 1985, *Optical Fiber Communication*, Academic Press.
- (15) Hwang, J. and Daily, J. W., 1995, "Electric Field Enhanced Deposition in Flame-synthesized Materials Manufacturing," *J. Aerosol Sci.*, Vol. 26, pp. 5~18.
- (16) Tsai, H. C. and Greif, R., 1994, "Thermophoretic Transport with Application to External Chemical Vapor Deposition Processes," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 37, pp. 257~268.
- (17) White, F. M., 1991, *Viscous Fluid Flow, 2nd Ed.*, McGraw-Hill.
- (18) von Karman, Th., 1946, National Advisory Committee for Aeronautics (NACA) Technical Memorandum No. 1092 on Laminar and Turbulent Friction, pp. 1~39.
- (19) Hannah, D. M., 1947, "Forced Flow against a Rotating Disk," ARC Reports and Memoranda No. 2772, pp. 1~17.
- (20) Tifford, A. N. and Chu, S. T., 1952, "On the Flow around a Rotating Disk in a Uniform Stream," *J. Aeronautical Sci.* Vol. 19, pp. 284~285.
- (21) Evans, G. H. and Grief, R., 1988, "Forced Flow near a Heated Rotating Disk: A Similarity Solution," *Numerical Heat Transfer*, Vol. 14, pp. 373~387.
- (22) Schlichting, H., 1979, *Boundary Layer Theory*, McGraw-Hill.
- (23) Cho, C., Hwang, J. and Choi, M., 1996, "Deposition of Polydisperse Particles in a Falkner-Skan Wedge Flow," *J. Aerosol Science*, Vol. 27(2), pp. 249~261.
- (24) Bai, H. and Biswas, P., 1990, "Deposition of Lognormally Distributed Aerosols Accounting for Simultaneous Diffusion, Thermophoresis, and Coagulation," *J. Aerosol Science*, Vol. 21(5), pp. 629~640.
- (25) IMSL., 1987, "Problem-Solving Software Systems," International Mathematical and Statistical Libraries, User's Manual.
- (26) Kanury, A. M., 1977, *Introduction to Combustion Phenomena*, Gordon and Breach, p. 63.