

# 루츠식 진공 펌프의 유동 및 부산물 입자 궤적에 대한 해석

이찬\*†, 김현권\* · 노명근\*\*

## Analysis on the Flow and the Byproduct Particle Trajectory of Roots Type Vacuum Pump

Chan Lee\*†, Hyun Gwon Kil\*, Myung-Keun Noh\*\*

Key Words : Vacuum pump(진공 펌프), Dynamic mesh(동적 격자), Housing(하우징), Rotor(회전차), Clearance(간극), Back flow(역류), Particle Trajectory(입자 궤적), CFD(전산유체역학)

### ABSTRACT

A CFD analysis method is developed and applied for investigating the gas flow and the byproduct particle trajectory in Roots type vacuum pump. The internal fluid flow and thermal fields between the rotors and the housing of vacuum pump are analyzed by using the dynamic mesh, the numerical methods for unsteady 2-D Navier-Stokes equation and the standard k-ε turbulence model of the Fluent code. Coupled with the flow simulation results, the particle trajectory of the byproduct flowing into the pump with gas stream is analyzed by using discrete phase modeling technique. The CFD analysis results show the pressure, the velocity and the temperature distributions in pump change abruptly due to the rotation of rotors, and back flows are produced due to the strong reverse pressure gradients at rotor/rotor and rotor/housing clearances. The predicted byproduct particle trajectory results also show the particles impinge on the clearance surfaces between the housing and the rotor of pump and then may form the deposit layer causing the failure of pump.

### 1. 서론

최근 들어 진공기술은 다양한 산업분야에서 활용되고 있으며, 진공을 만들기 위해서는 기체분자의 제거방식에 따라 기체 이송식(gas transfer type) 또는 기체 흡착식(gas entrainment type) 진공펌프들이 사용되고 있다. 또한 국내의 기간산업으로 성장하고 있는 반도체 산업에서 주로 사용하고 있는 화학적 증착 공정(CVD)은 0.01 Torr 정도의 저·중진공 상태를 요구하므로, 이러한 진공상태의 유지를 위해서는 피스톤식, 회전식, 루츠식 펌프들과 같은 다양한 형태의 기체 이송식 진공 펌프들이 사용되고 있다.<sup>(1)</sup>

그러나 이러한 펌프들에 유입되는 반도체 공정 가스는 가스이외의 CVD 공정의 부산물을 포함하고 있으며, 실제로 일부 반도체 산업의 배기공정에서는 공정 부산물이 펌프 내부에 축적되고 펌프의 하우징/회전차 간의 충돌에 대한 주요

요인이 되어 공정 중 펌프고장의 원인이 되곤 한다.<sup>(2,3)</sup>

그러므로 본 연구는 반도체 공정용 루츠식 진공펌프 내부 기체유동에 대해 전산유체역학 해석을 수행하였고, 이를 통해 진공펌프의 작동 시 펌프 내부에서의 압력, 온도 및 속도 분포에 대한 유동특성을 규명하였다. 더 나아가, 계산된 유동장 결과를 바탕으로 공정 부산물의 펌프 내부에서의 입자 거동 및 점착에 따른 퇴적-축적 특성을 분석하였다.

### 2. 대상 진공 펌프 및 해석 방법

#### 2.1 진공 펌프의 설계 및 작동 조건

본 연구에서 고려한 진공 펌프는, Fig. 1에서 보여지듯이, 2개의 서로 다른 방향으로 회전하는 회전차를 하우징이 감싸고 있는 루츠식 진공 펌프로서, 펌프의 회전수는 3,600 rpm 이고, 회전차/하우징 및 회전차/회전차의 간극은 약 400 μm 로 설계되었다.<sup>(4)</sup> 또한 본 진공 펌프는 펌프 외부에 방열판을 설치하여, 펌프내부의 기체 압축 시 발생하는 열을 외부로 방출하도록 설계하였다.

\* 수원대학교 기계공학과

\*\* 엘오티베컴 기술연구소

† 교신저자, E-mail : clee@suwon.ac.kr

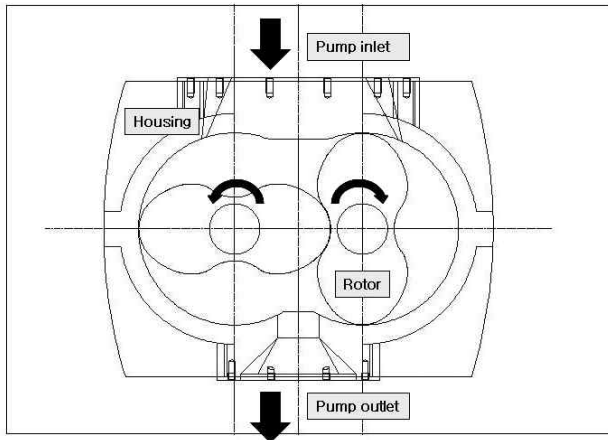


Fig. 1 Design geometry of vacuum pump

Table 1 Operation conditions of vacuum pump

Pressure ratio (Outlet/inlet)	4.4
Gas	Nitrogen
Byproduct	TEMAZ droplet particles
	Molecular weight: 323.6
	Density: 1.049 g/cc

본 진공 펌프는, 반도체 CVD 공정의 배기계통 적용 시, 다른 진공, 보조(backing) 펌프들 및 스크러버(scrubber), 배관망과 연결되어 작동하며, 이러한 배기계통상에서 본 진공펌프의 입, 출구 작동조건, 가스 및 부산물 유입조건은 Table 1 과 같다. 또한 펌프로 유입되는 가스에 포함된 부산물은 CVD 공정에서 사용되는 TEMAZ(Tetrakis Ethylmethylamido Zirconium;  $C_{12}H_{32}N_4Zr$ )입자로서, 본 연구에서 고려한 TEMAZ 입자에 대한 특성도 Table 1에 정리되어 있다.<sup>(4,5,6)</sup>

### 2.2 진산유체역학 방법

펌프 내부의 유동 해석 방법 선정을 위해서는, 펌프 내부 가스의 흐름이 점성 유동(viscous flow) 영역 인지, 분자 유동(molecular flow) 영역인지에 대한 검토가 우선되어야 한다. 본 연구의 대상인 펌프의 작동 조건(Table 1 참조)에 따르면, 펌프 내부 압력조건이 저·중 진공상태(0.01-760 Torr)이므로, 펌프 내부 가스 유동이 일반적으로 점성 유동 영역으로 분류될 수 있다.<sup>(2)</sup> 그러나 본 연구에서는, 좀 더 엄밀한 판단을 위해서, 식 (1)과 같은 크누센 수(Knudsen number, Kn)에 대한 분석을 수행하였다.<sup>(1)</sup>

$$\frac{1}{Kn} = \frac{D}{\lambda} > 110 \text{ for viscous flow}$$

$$\lambda = \frac{5 \times 10^{-3}}{p} \quad (1)$$

이때 D는 펌프 특성길이[cm], λ는 기체 분자의 평균자유행로[cm]를 의미하며, p는 펌프 평균압력[Torr]를 나타낸다. 식(1)을 이용한 분석결과 본 펌프의 D/λ(펌프 입구직경 기준)는 1,351로서, 펌프 내부 가스 유동이 충분히 점성 유동 영역 범위 내에 있음을 알 수 있었다.

그러므로 본 연구에서는, 2.1절에서 언급한 루츠식 진공펌프의 해석을 위해 점성 유동에 대한 범용 CFD 소프트웨어인 Fluent code<sup>(7)</sup>를 사용하였다. 회전하는 회전차와 고정된하우징 사이의 가스 유동장 해석을 위해서는 동적 격자계(dynamic mesh)를 사용하였다. 본 연구의 동적 격자기법은 시간 간격  $1 \times 10^{-5}$  sec(회전각도: 0.21 deg)를 가지고, 회전차의 360도 회전에 대한 0.0167 sec까지 각 시간에 대해 격자재생성(remeshing)기능을 이용하여 격자계를 생성하였다.<sup>(8,9)</sup> 본 연구에서 동적 격자기법을 통해 생성된 회전차의 회전각도에 따른 격자계가 Figs. 2와 3에 나타나 있으며, 본 연구에 사용된 격자의 수는 약 36,000개이다.

펌프 내부의 가스 열·유동장 해석을 위해서는, 비정상, 2차원 Navier-Stokes 방정식을 이용하여 유동 및 온도분포에 대한 계산하였고, 또한 펌프 내부의 난류 유동은 표준 k-ε 모형을 이용하여 해석하였다. 또한 하우징 및 회전차의 벽면 열손실에 대한 경계조건으로는, 펌프 외부 방열판의 설계조건을 고려하여, 총괄 대류열전달 계수를  $50 \text{ W/m}^2\text{-K}$ 로 설정하였다.

본 연구의 TEMAZ 입자는  $1 \mu\text{m}$  크기의 구형 액적입자로 간주 하였고, TEMAZ 유입량/가스유입량의 비율은 0.03이므로 본 연구의 TEMAZ/가스 혼합물은 충분한 유동성을 가지는 분립체로 고려될 수 있다.<sup>(7)</sup> 그러므로 본 연구에서는

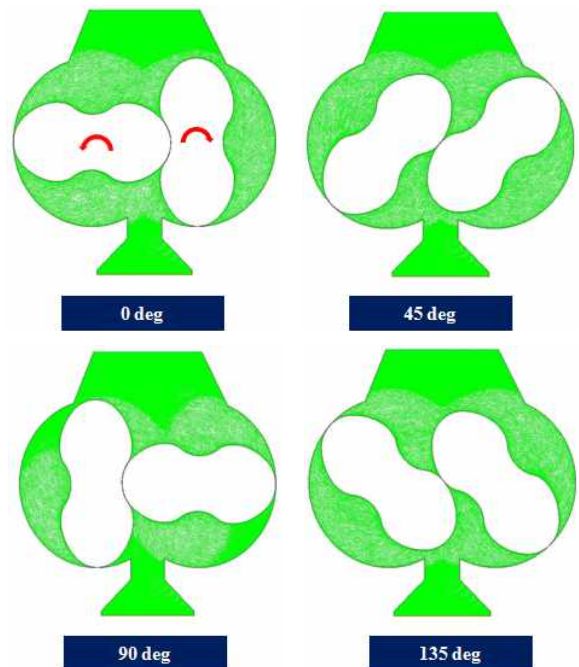
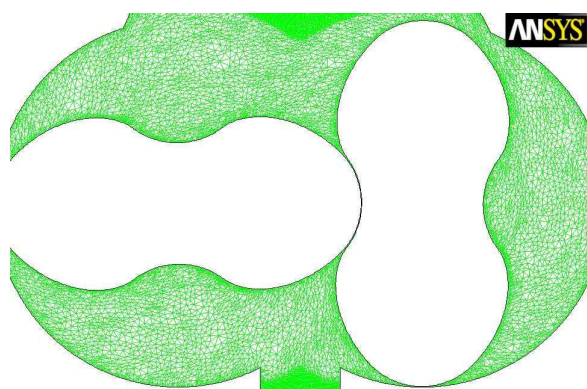
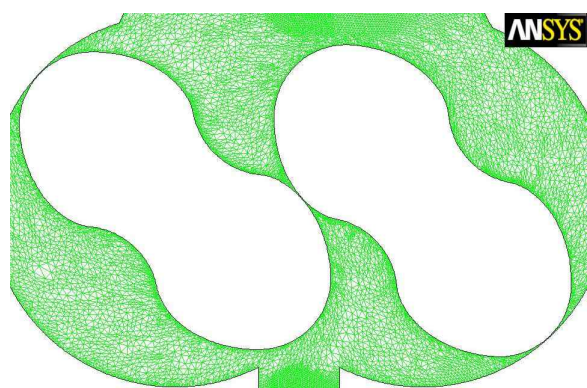


Fig. 2 Dynamic mesh system of vacuum pump



(a) rotation angle = 0 deg ( $\Delta t = 0$  sec)



(b) rotation angle = 135 deg ( $\Delta t = 0.0063$  sec)

Fig. 3 Detailed mesh generations on the inside regions of vacuum pump

펌프 내부 TEMAZ 입자의 궤적 해석을 위해서 분립체 해석에 흔히 사용되는 DPM(Discrete Phase Model)기법을 사용하였고, 이때 입자 거동 및 궤적 계산 시 가스 유동의 난류 확산(turbulent dispersion)효과도 고려하였다.

### 3. 해석 결과 및 검토

앞서 언급한 전산유체역학적 해석방법을 이용하여, 펌프 내부의 압력, 속도 및 온도분포의 시간(또는 회전각도)에 따른 변화를 예측하였다. Fig. 4는 펌프 내부 기체의 압력 변화를 보여주고 있다. 그림에서 보여지듯이, 회전차의 회전각도에 따라 급격한 압력변화가 관찰되며, 회전차의 회전으로 인해 기체가 이동되며 압력이 상승되는 현상을 볼 수 있다. 또한 회전차를 경계로 기체의 고압 및 저압 영역이 확연히 구분됨을 알 수 있으며, 이로 인해 회전차-하우징 및 회전차-회전차 사이 간극을 통한 역류(back-flow)의 발생이 예견된다.<sup>(10)</sup> 더 나아가 펌프 출구 부위에서는 펌프 내부에 비해 상대적으로 저압의 영역이 형성됨을 관찰할 수 있으며, 이러한 현상은 회전차에 의해 가압된 기체가 출구의 확대판을 통해 나아가면서 겪게 되는 압력강하와 유동박리(flow

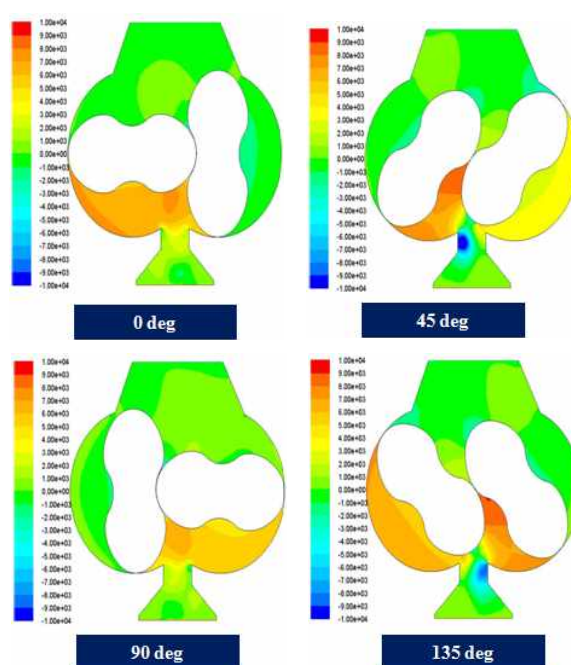


Fig. 4 Pressure variation of vacuum pump  
(Unit: Pa, Inlet pressure: 66 Pa, Max. pressure: 10,000 Pa)

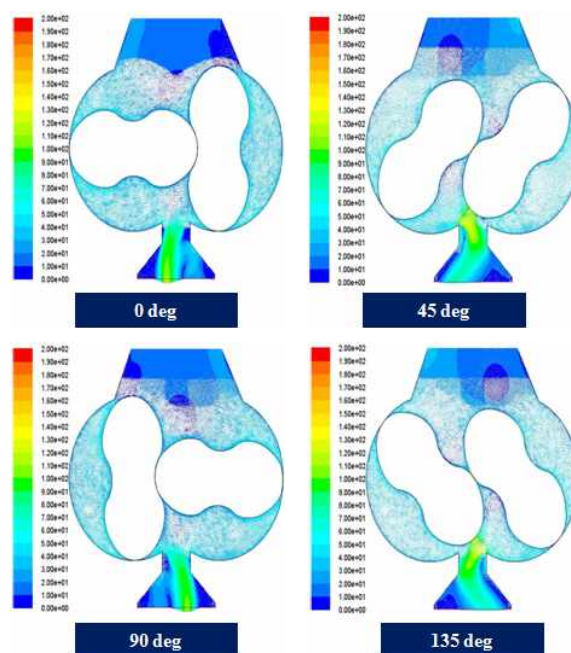


Fig. 5 Velocity variation of vacuum pump  
(Unit: m/s, Inlet velocity: 17.3 m/s, Max. velocity: 200 m/s)

separation) 현상들에 의한 것으로 추정된다(상세한 계산결과는 Figs. 6과 7 참조).

Fig. 5는 펌프 내부 기체의 속도분포에 대한 변화를 보여주고 있다. 펌프 내부로 유입된 기체는 회전차의 운동에 의해 가속되며, 특히 회전차 주위에서는 상대적으로 고속의 기체 유동장이 형성됨을 알 수 있다. Fig. 5의 펌프 출구에서의

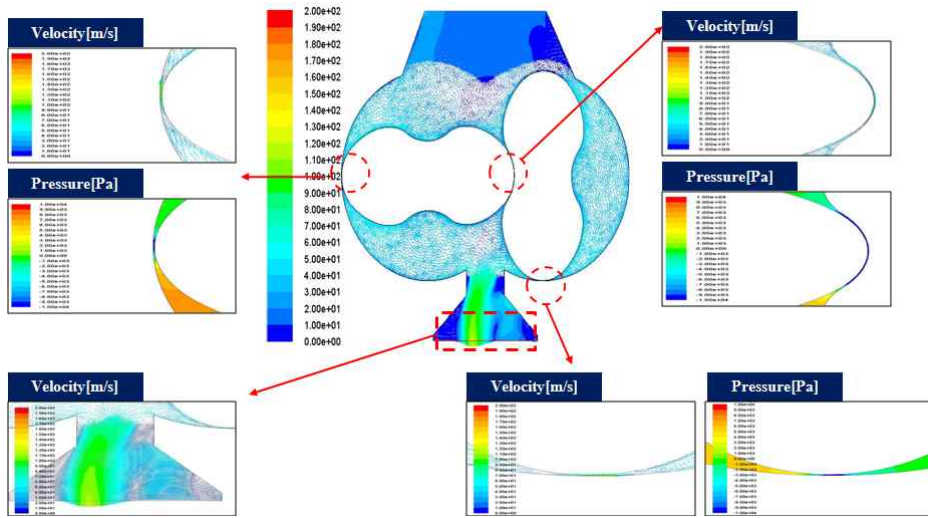


Fig. 6 Detailed velocity and pressure distributions for the clearance and the exit flows at 0 deg

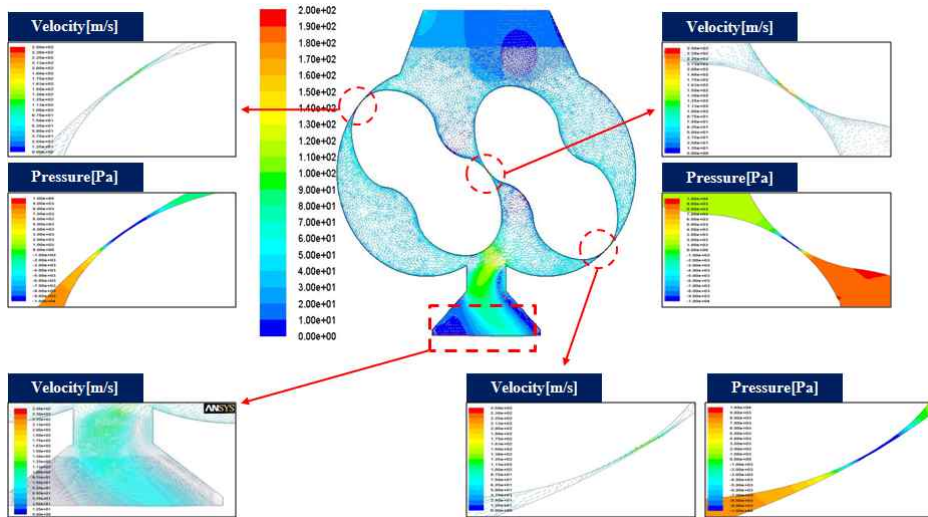


Fig. 7 Detailed velocity and pressure distributions for the clearance and the exit flows at 135 deg

유동 특성을 고찰해 보면, 어떠한 회전차의 회전각도에 대해서도 펌프출구 벽면에서 유동박리 현상이 관찰되며, 이로 인해 기체의 펌프 출구에서의 유효 토출면적이 현저하게 줄어드는 것을 볼 수 있다. 또한 회전차가 0, 90도의 회전 위치에 있는 경우가 45, 135도인 경우에 비해 유효 토출면적이 더 많이 줄어들어, 펌프 출구의 기체 배출 속도가 상대적으로 더 높게 유지됨을 알 수 있다.

Figs. 6, 7은 회전각도 0, 135도 인경우의 펌프 내부 간극을 통한 기체의 속도 및 압력 분포들을 보여주고 있다. 그림에서 알 수 있듯이, 회전차-하우징 및 회전차-회전차 간극을 통한 압력 변화가 매우 급격하며, 이러한 압력차에 의해 간극을 통한 강한 역류가 발생함을 알 수 있다. 이러한 역류의 발생은 펌프의 토출유량에도 부정적인 효과를 가져올 것으로 판단된다.

Fig. 8은 회전각도에 따른 펌프 출구와 입구의 속도 비율

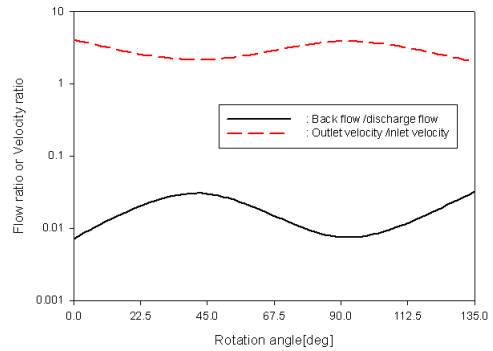


Fig. 8 Back-flow and outlet velocity variation of vacuum pump

과 회전차-회전차 간극사이의 역류량의 토출 유량과의 비율을 보여주고 있다. 그림에서 보여 지는 바와 같이, 입구 속도를 기준한 출구 속도의 비율이 회전차 각도가 0, 90도인 경

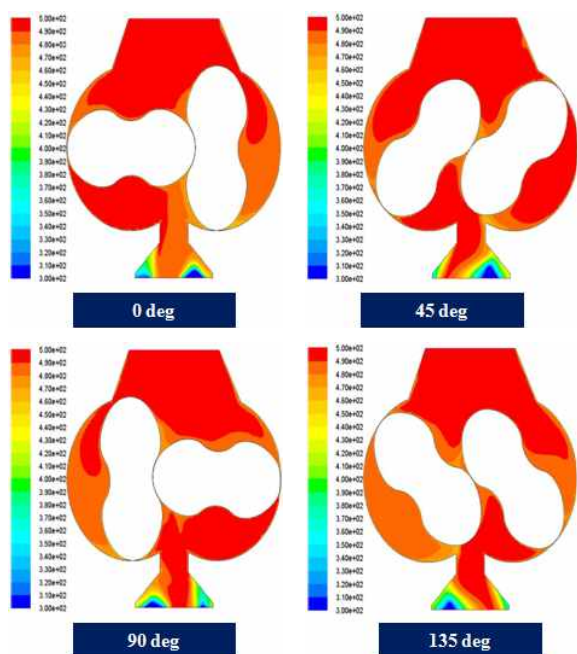


Fig. 9 Temperature variation of vacuum pump  
(Unit: K, Inlet temperature: 493.15 K, Max. temperature: 500 K)

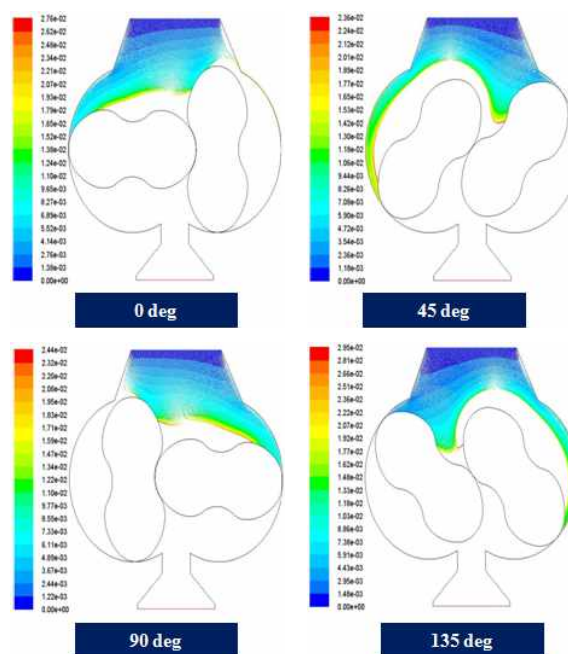


Fig. 10 TEMAZ particle trajectory variation of vacuum pump

우가 45, 135도인 경우에 비해 크게 나타남을 알 수 있으며, 이러한 결과는 Fig. 5에서 보여지는 바와 같이 출구의 유동 박리로 인한 토출 유효면적이 0, 90도인 경우가 45, 135도인 경우에 비해 현저히 줄어드는 현상에 기인하는 것으로 판단된다. 또한 Fig. 8에서 보여 지듯이 간극사이의 역류는 회전차의 각도가 0, 90도인 경우(회전차가 수직-수평하게 배열된 경우)가 45, 135도인 경우에 비해 더 크게 나타남을 알 수 있었고, 이러한 결과는 Figs. 5, 6 및 7의 간극 사이의 압력 구배에 따른 역류 발생에 의한 것으로 판단된다.

Fig. 9는 펌프 내부의 온도 변화를 보여주고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이, 회전차의 회전에 따라 펌프 내부 기체의 온도분포가 급격히 변화됨을 알 수 있고, 기체가 압축되는 부위에서는 온도의 상승이 야기되거나 기체가 팽창되는 부위에서는 온도의 저하가 야기됨을 알 수 있다. 또한 회전차와 하우징 사이의 간극을 따라 기체의 온도가 현저하게 변화됨을 알 수 있으며, 펌프 출구의 유동박리 현상으로 인해 형성되는 저압 영역으로 펌프 외부의 찬 기체가 역류되는 현상도 관찰할 수 있다.

Fig. 10은 펌프로 기체와 같이 유입되는 TEMAZ 액적 입자의 궤적에 대한 시간에 따른 변화를 보여주고 있다. 일반적으로 CVD 공정에서 배출되는 TEMAZ 입자는 증기 상태로 펌프 입구에 유입되어야 하나, CVD 공정 챔버와 진공 펌프를 연결해 주는 배관 계통의 열손실로 인해, TEMAZ 입자가 응축되어 액적상태로 펌프로 유입되는 경우 간극사이에 퇴적되어 펌프 작동 및 성능에 문제를 야기할 수 있다. 이러한 이유로, 본 연구에서는 펌프로 유입되는 TEMAZ 입자를 액

적상태로 가정하여, TEMAZ 입자들의 펌프 내부에서의 궤적 및 그에 따른 회전차 및 하우징 표면의 퇴적현상을 Fig. 8과 같이 관찰하였다. 또한 해석의 편의상, TEMAZ 입자들은 펌프 내부에서 증발되지 않고, TEMAZ 입자가 고체 표면에 도달하는 즉시 표면에 퇴적되는 것(trap-condition)으로 가정하였다.

Fig. 10에서 보여 지듯이, TEMAZ 입자들이 하우징, 회전차 벽면 및 회전차-하우징 간극 쪽으로 이동 후 고체 표면에 점착하여 퇴적층을 형성 할 수 있는 가능성이 있음을 알 수 있다. Fig. 8에서 보여진 바와 같이, 회전차 및 하우징의 표면은 높은 온도로 유지되므로, 이러한 높은 온도의 금속 표면에 TEMAZ 입자들이 닿게 되면, 금속 표면이 TEMAZ 입자의 점착 반응에 대한 촉매 역할을 하게 되고, 이로 인해 TEMAZ 입자의 금속표면에 대한 점착현상이 활성화되는 것으로 알려져 있다.<sup>(2)</sup> 그리고 이러한 TEMAZ 입자의 점착을 통한 지속적인 퇴적층의 성장은 회전차의 운동을 방해하고 회전차-하우징 사이의 간극을 줄여주는 요인으로 작용하여, 궁극적으로는 회전차-하우징의 충돌 및 펌프의 고장을 유발할 수 있다. 그러므로 Fig. 9와 같은 TEMAZ 입자궤적의 예측결과를 바탕으로, TEMAZ 입자 퇴적 부위에 대한 금속 표면의 온도 관리를 위한 방열설계 최적화 및 파우더 트랩(powder trap) 설치 같은 방안들이 고려될 수 있다.

#### 4. 결 론

루츠식 진공펌프에 대한 전산유체역학적 해석을 수행하여, 펌프 내부의 유동장 및 공정 부산물 입자 궤적 특성을 검

토하였다. 진공 펌프 내 회전차의 회전에 따라 기체의 압력, 속도 및 온도 분포가 급격히 변화되었고, 회전차-하우징 및 회전차-회전차 사이의 간극을 통한 큰 역압력 구배는 강한 역류를 발생시켰다. 또한 진공펌프 출구에서의 기체의 유동 박리 및 이로 인한 유효 토출면적의 감소가 관찰되었다. 더 나아가, 본 연구의 계산결과로부터, 펌프로 유입되는 공정 부산물은 회전차-하우징 사이의 간극 부위에 점착되어 퇴적층을 형성할 수 있음을 알 수 있었다.

## 후 기

본 연구는 (주)엘오티베컴의 연구비 지원에 의해 이루어졌음을 밝힙니다.

## 참고문헌

- (1) 황태성, 2008, "기초진공기술," 보문당.
- (2) 노명근, 황태경, 박제우, 2008, "스크류형 건식 진공펌프 기술 현황 및 응용," 한국진공학회지, 제17권 제4호, pp. 291~301.
- (3) 이상윤, 노명근, 김병욱, 이안성, 2010, "반도체/디스플레이

- 공정급 건식진공펌프 개발 개요," 한국진공학회지, 제19권 제4호, pp. 265~274.
- (4) 이찬, 2010, "반도체 공정용 진공펌프계통해석 및 WH4400의 유동/구조 해석," 엘오티베컴 최종보고서.
- (5) TEMAZ, www.fmclithium.com.
- (6) Monnier, D., Nuta, I., Chatillon, C., Gros-Jean, M. and Blanquet, E., 2009, "Gaseous Phase Study of the Zr-Organometallic ALD Precursor TEMAZ by Mass Spectrometry," Journal of Electrochemical Society, Vol. 156, no.1, pp. 71~75.
- (7) Fluent User's Guide, 1998.
- (8) 최봉수, 2009, "FLUENT Dynamic Mesh Method를 이용한 유압식 쇼크 업소버 해석," 유체기계저널, 제12권 제3호, pp. 75~78.
- (9) Kapil, S. and Jayesh, M., "Remeshing Strategy for the Dynamic Mesh model in FLUENT," Fluent Inc.
- (10) Ashish, M. J., David I. B., James, D. F., John, A. L. and Joseph, C. M., 2006, "Clearance Analysis and Leakage Flow CFD Model of a Two-Lobe Multi-Recompression Heater," International Journal of Rotating Machinery, Vol. 2006, Article ID 79084, pp. 1~10.