

반도체 생산설비 루츠형 진공펌프 계통에 대한 유동-구조 연성해석

이찬** · 길현권* · 김강천* · 김준곤* · 심재업** · 윤일중**

Coupled flow-structure Analyses on the Roots Type Vacuum Pumps in Semiconductor Fabrication Facility

Chan Lee*, Hyun Gwon Kil*, Gang Chun Kim*, Jun Gon Kim*,
Jae Up Sim**, Il Joong Yoon**

Key Words : Vacuum pump(진공 펌프), Dynamic mesh(동적 격자), Housing(하우징), Rotor(회전차), Clearance(간극), CFD(전산유체역학), FEM(유한요소해석)

ABSTRACT

The present study conducts CFD analyses on the internal flow fields of roots type vacuum pumps of semiconductor fabrication facility, and the computed CFD results for internal pressure and temperature distributions are applied to structural analyses of the pumps. The coupled analysis results between flow and structure show that the deformation of pump structure is mainly resulted from the thermal expansion of gas in pump, and the deformed impeller and housing produce their severe contact and impact phenomena causing mechanical damage and fracture.

1. 서 론

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 저중진공 상태를 요구하므로, 이러한 진공상태의 유지를 위해서 피스톤식, 회전식, 루츠식 펌프들과 같은 다양한 형태의 기체 이송식 진공펌프들이 사용되고 있다.⁽¹⁾

이러한 형태의 진공펌프들에 유입되는 반도체 공정 가스는 가스 이외의 공정 부산물을 포함하고 있으며, 이러한 공정 부산물이 펌프 내부에 퇴적되고 펌프의 하우징/회전차, 회전차/회전차 간의 충돌에 대한 주요 요인이 되어 공정 중 펌프고장의 원인이 되곤 한다. 또한 이러한 공정 부산물을 제거 하기 위해 scrubber를 사용하게 되는데 Resin type 스크러버의 경우 packed-bed구조를 가지므로 큰 압력손실을

갖게 된다. 그러면서 펌프의 성능이 떨어지게 되고 압력과 고온으로 인한 열팽창으로 하우징/회전차, 회전차/회전차 간의 충돌을 야기할 수 있다.^{(2),(3)}

그러므로 본 연구는 반도체 공정용 루츠식 진공펌프 내부 기체유동에 대한 수치해석을 통해 전산유체역학 해석을 수행하였고, 이를 통해 진공펌프의 작동 시 펌프 내부에서의 압력, 온도 분포에 대한 유동특성을 규명하였고, 유동해석을 통해 얻어진 온도 및 압력 데이터를 바탕으로 구조해석을 수행하였다.

2. 진공 펌프 모델 및 해석 방법

2.1 진공펌프 펌핑 계통 수치해석

본 연구는 3개의 진공펌프가 상류의 반도체 진공 챔버와 하류의 스크러버와 직렬로 연결된 진공펌프 계통(Fig. 1)에 대한 해석을 수행하였으며, 이때 앞의 2개의 진공펌프는 루츠식 진공펌프이고, 그 뒤에 설치된 진공펌프는 스크류식 펌프로 백킹펌프(backing pump)로 작동한다. 각 펌프들의 작동조건은 다음과 같은 펌핑계통 압력균형(pressure balance)에 대한 해석모형을 통해 구해진다.

* 수원대학교

** ㈜엘오티베콤

† 교신저자, E-mail : cleee@suwon.ac.kr

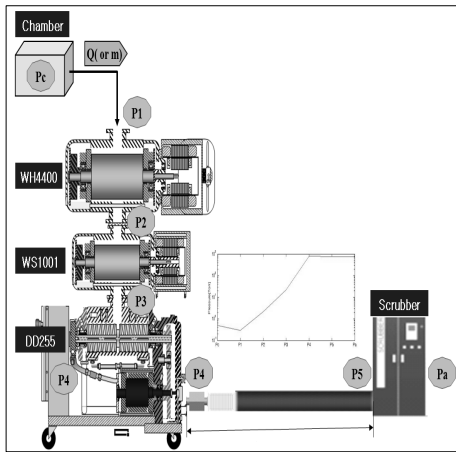


Fig. 1 Vacuum pumping line of semiconductor fabrication facility

$$P_c - K_{c1}m^2 - P_1 + P_4 - K_{45}m^2 - K_{scr}m^2 = P \quad (1)$$

$$m = F(P_1) \quad (2)$$

$$m = G(P_2) \quad (3)$$

$$m = H(P_3) \quad (4)$$

$$P_4 = P_3 + \alpha (m_{des} - m)^2 \quad (5)$$

$$P_5 = P_4 - K_{45}m^2 \quad (6)$$

여기서 변수로 작용하는 p1, p2, p3, p4, p5 는 계통상의 기체압력을 및 m은 펌핑 계통을 흐르는 기체의 유량(또는 펌핑 스피드)을 나타낸다.

변수들에 대한 식(1) - (6)은 비선형 연립방정식으로서 주어진 조건 Pc, Pa 및 압력강하 계수(K)가 주어지면 계산이 가능하다. 이러한 수치해석을 통해 Fig. 2 와 같은 펌핑계통의 압력 변화와 펌핑 스피드 변화가 구해지며, 이러한 압력변화 곡선 중 스크러버에 압력손실이 증가되어 유량이 급격히 감소되는 비정상적 조건을 루츠형 펌프의 구하여 전산유체역학해석의 경계조건에 대한 입력 데이터로 사용한다. (4), (5), (6)

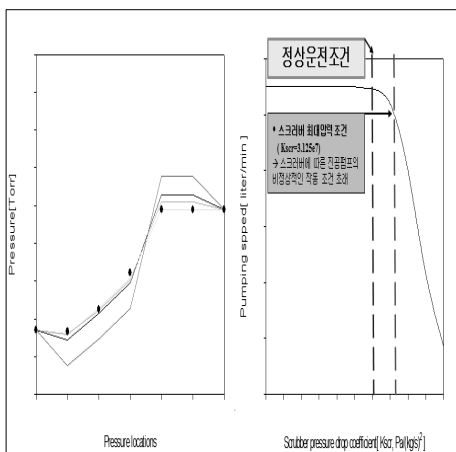


Fig. 2 Pressure and pumping speed variations of vacuum pumping line

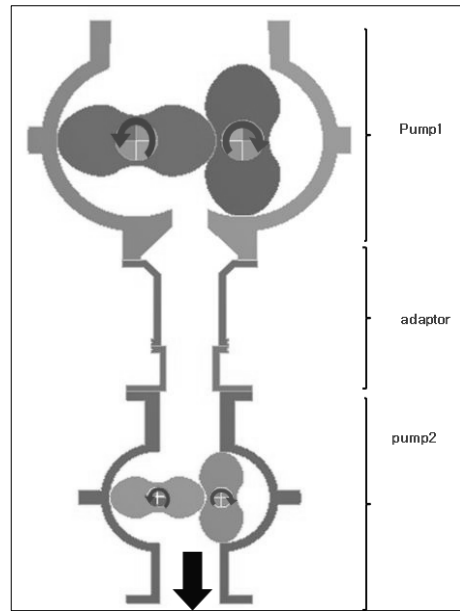


Fig. 3 Vacuum pump model

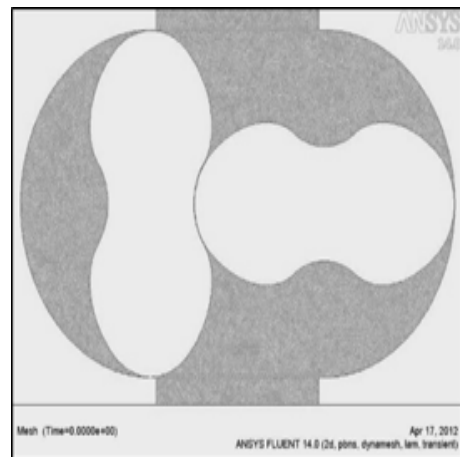


Fig. 4 Dynamic mesh of vacuum pump

2.2 진공 펌프의 설계 및 작동조건

본 연구에서 고려한 루츠형 진공 펌프는, Fig. 3 에서 보여 지듯이, 2개의 펌프가 연결되어 있는 모델이며 회전차가 서로 다른 방향으로 회전하는 루츠식 진공 펌프이다. 펌프의 회전수는 펌프1이 3600 rpm 펌프2는 5400 rpm으로 회전한다. 또한 진공펌프는 Fig. 2의 비정상 조건에서 작동하며, 이때 2개 펌프의 입구, 출구 조건들은 2.1 절의 계통해석 결과를 사용한다.

2.3 전산유체역학 방법

본 연구에서는 펌프 내부의 점성 유동에 대해 범용 CFD 소프트웨어인 Fluent code를 사용하였다. (7) 회전차의 위치 변화에 대한 비정상 효과를 고려하기 위해 Fig. 4와 같은 동적격자계(dynamic mesh)를 사용하였다. 0.2 deg회전을 기

준으로, $\Delta t=6.2 \times 10^{-6}$ sec간격으로 격자 재 생성(remeshing) 하였다. pump1과 pump2의 각각 회전수가 3600 rpm, 5400 rpm이므로 회전주기는 각각 0.0167 sec, 0.0111 sec가 된다.

펌프 내부의 가스 열·유동장 해석을 위해서는, 비정상, 2차원 Navier-Stokes 방정식을 이용하여 유동 및 온도분포에 대한 계산하였고, 또한 펌프 내부의 난류 유동은 표준 $k-\epsilon$ 모형을 이용하여 해석하였다. 또한 하우징 및 회전차의 벽면 열손실에 대한 경계조건으로는, 펌프 외부 방열판의 설계조건을 고려하여, 대류열전달 계수를 $50 \text{ W/m}^2\text{-K}$ 로 설정하였다. (8),(9),(10)

2.4 구조해석 방법

구조해석은 유한요소법을 사용하였다. 모델은 Fig. 3 과 같으며, 유동해석(fluent)결과를 구조해석에서 받아들여 시뮬레이션 하는 유체구조연성해석(FSI)을 수행하였다.

유한요소모델의 node수는 약 53,000개 이며 유동해석결과인 온도와 압력분포가 input이 된다. 또한 경계조건으로는 2단펌프의 가장 아래를 고정시키고 펌프와 펌프 사이의 어댑터(adaptor)는 수평방향으로는 고정 수직방향으로는 움직임이 가능하게 하였다. 펌프의 입구는 자유조건을 주었다. 펌프의 외부환경은 대기압과 외부온도는 $22 \text{ }^\circ\text{C}$ 로 설정하였다. 또한 하우징과 외부공기와의 방열 조건은 pump1은 열전달계수 $50 \text{ W/m}^2\text{-K}$ 으로 pump2는 열전달계수 $100 \text{ W/m}^2\text{-K}$ 로 설정하였다. Fig. 5 는 meshing된 유한요소 모델을 보여준다. (11)

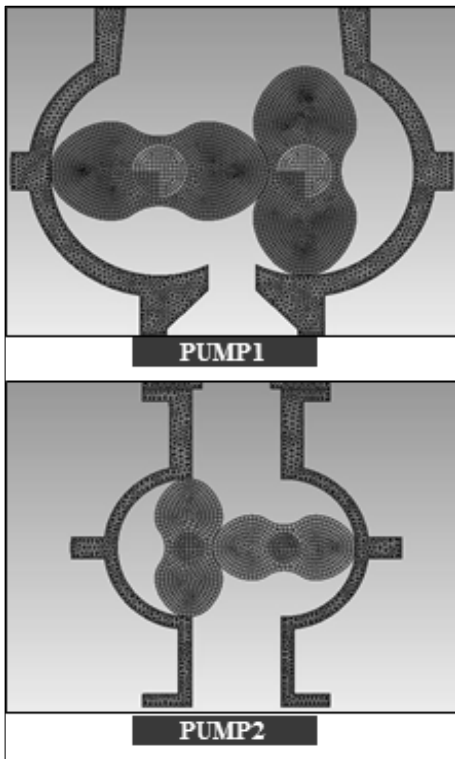


Fig. 5 Finite element models of vacuum pumps

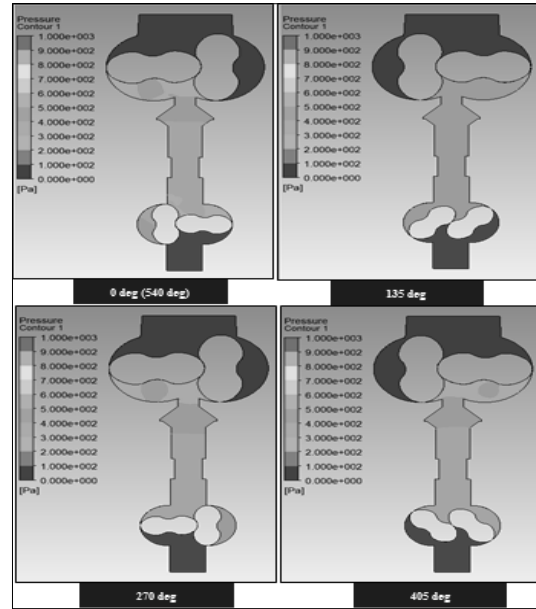


Fig. 6 Pressure distribution of vacuum pump1

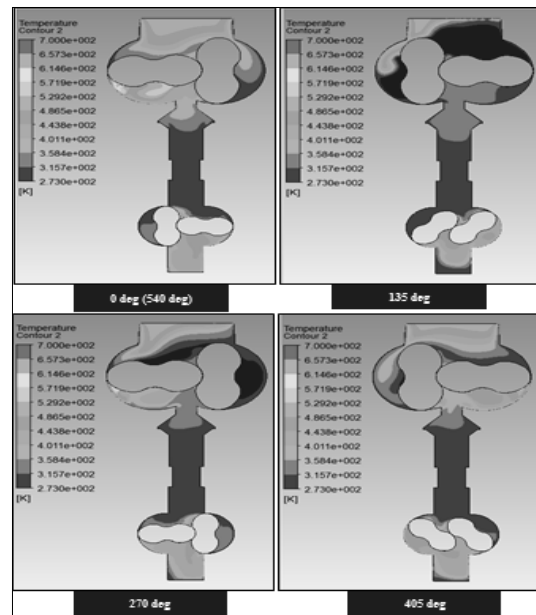


Fig. 7 Temperature distribution of vacuum pump1

3. 해석 결과

본 과제는 회전수가 빠른 pump2가 540°회전할 때 pump1은 360° 회전하므로 Pump1을 기준으로 135° 간격으로 계산 결과를 검토하였다.

Fig. 6은 유동해석결과 중 압력분포를 나타내고 Fig. 7은 온도분포를 나타낸다. 압력분포결과 펌프 내 회전차의 운동으로 인해 기체가 이송되며 압력 상승이 나타남을 볼 수 있다. 또한 온도분포 결과 펌프 내 회전차의 운동으로 인한 압축으로 인해 기체 온도가 상승하고 펌프 사이의 연결 부위는

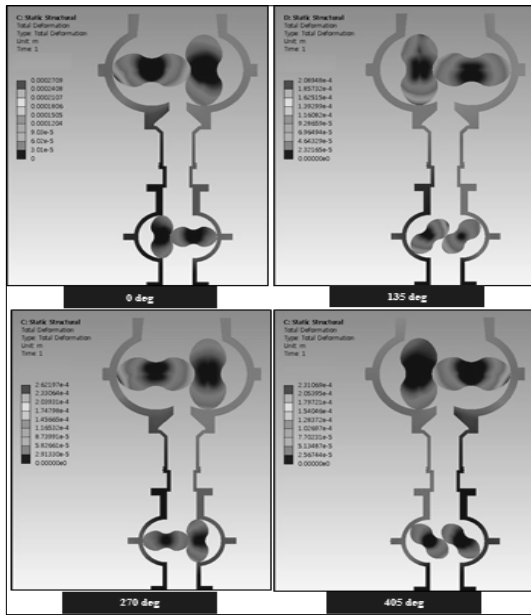


Fig. 8 Deformation distribution of vacuum pump1

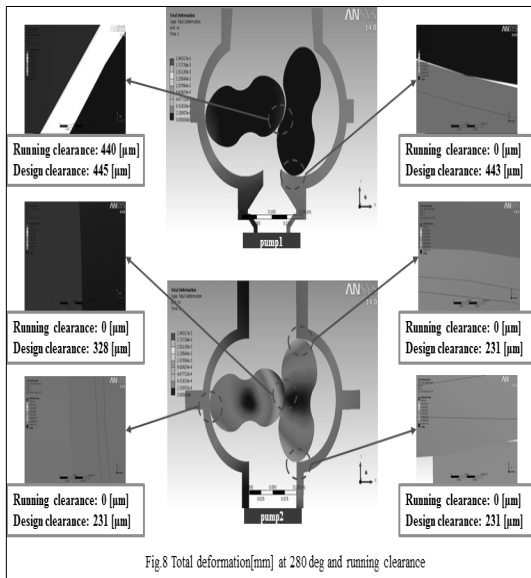


Fig. 9 Deformation distribution of vacuum pump1 at rotation angle of 280°

벽면 열손실로 인해 낮은 온도가 유지된다. 회전차 주위의 고온은 회전차 및 하우징의 열팽창을 초래할 수 있다.

Fig. 8은 온도와 압력을 input으로 주었을 때 구조해석의 변형값을 나타낸다. 주로 압력에 의한 변형보다 온도, 즉 열 팽창 의한 변형이 주로 일어난다. 0 deg, 135 deg, 270 deg, 405 deg에서 모두 열팽창으로 인해 하우징-회전체, 회전체-회전체간의 running clearance는 줄어드나 접촉은 일어나지 않음을 확인하였다.

위에서 언급한 바와 같이 변형은 주로 열팽창에 의해 야기됨으로 온도차이가 심한 몇 가지 case를 골라 해석한 결과

280 deg에서 Fig. 9와 회전차와 하우징간의 접촉함을 확인할 수 있었다. Fig. 9에서 보이는 것과 같이 pump1과 pump2의 여러 부분에서 접촉하여 running clearance가 0이 되는 곳을 볼 수 있다. pump1과 pump2가 동시에 접촉하지만 pump1이 파단 되는 이유는 pump1이 pump2에 비하여 약 3배의 회전운동에너지하우징과 충돌하여 파단 될 가능성이 높다. 이러한 접촉 현상은 실제 현장에서도 시뮬레이션과 같은 각도에서 파단되는 것을 확일 할 수 있었다.

4. 결론

본 연구는 반도체 공정용 루츠식 진공펌프 내부 기체유동에 대한 수치해석을 통해 전산유체역학 해석을 수행하였고, 이를 통해 진공펌프의 작동 시 펌프 내부에서의 압력, 온도 분포에 대한 유동특성을 규명하였다. 이러한 온도 및 압력 데이터를 바탕으로 구조해석을 수행하였다.

펌프 내부의 변형발생은 주로 가스에 의한 열팽창에 의해 야기된다. 특히 스크리버에서 압력손실이 일어나는 비정상 조건인 경우 회전차 - 회전차 및 회전차 - 하우징 간의 심각한 접촉 및 충돌 가능성이 예측된다. 이로 인해 구조적 파손은 펌프의 수직 방향으로 진행될 가능성이 높다.

후 기

본 연구는 ㈜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) 이상운, 노명근, 김병욱, 이안성, 2010, “반도체/디스플레이 공정급 건식진공펌프 개발 개요,” 한국진공학회지, 제19권 제4호, pp. 265~274.
- (4) 이찬, 2012, “반도체 공정용 진공펌프계통해석 및 WH4400, WS1001의 유동/구조 해석,” 엘오티베컴 최종보고서.
- (5) TEMAZ, www.fmclithium.com.
- (6) Monnier, d.m. Nuta, I., chatillon, C., Gros-Jean, M. and Blanquet, E., 2009, “Gaseous Phase Study of the Zrorgano-Metallic 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 Strategie 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," Internationl Journal of Rotating Machinert, Vol. 2006, Article ID 79084, pp. 1~10.
- (11) 이찬, 길현권, 노명근 2011, "루츠식 진공 펌프의 유동 및 부산물 입자 궤적에 대한 해석," 유체기계저널, 제14권 제 5호, pp. 18~23.