

반도체공정 고진공시스템 진공특성에 대한 배기도관 컨덕턴스 영향 전산모사

Simulation of Conductance Effects on Vacuum Characteristics of High Vacuum System for Semiconductor Processing

김형택^{1,a}, 서만재¹
(Hyung-Taek Kim^{1,a} and Man-Jae Seo¹)

Abstract

Effect of conductance factors on performance of vacuum system was simulated for optimum design of vacuum system. In this investigation, the feasibility of modeling mechanism for VacSim^{Multi} simulator was proposed. Application specific design of vacuum system is required to meet the particular process conditions for various industrial implementations of vacuum equipments. Geometry and length, diameter of exhaust pipeline were modeled as simulation modeling variables for conductance effects. Series vacuum system was modeled and simulated with varied dimensions and structures of exhaust pipeline. Variation of pipeline diameter showed the more significant effects on vacuum characteristics than that of pipeline length variations. It was also observed that the aperture structure of pipeline had the superior vacuum characteristics among the modeled systems.

Key Words : Vacuum system, Vacuum characteristics, Conductance, Simulation

1. 서론

진공기술은 공학, 제약, 식품, 야금, 의학 등 광범위한 산업분야에 응용되고 있으며 특히 반도체 공정장비, 우주실험실, 입자가속기, 핵융합장치 등은 진공기술 없이는 제작을 생각조차 할 수 없다. 이러한 핵심 기반기술인 진공기술은 우주공학, 생명공학, 재료공학 및 전자공학 분야의 주요기술로 인식되고 있으며 특히 반도체공정의 진공기술 응용은 매우 빠르게 발전되어 이를 위한 지속적인 연구개발이 요구되고 있다[1].

반도체산업은 크게 반도체 재료분야, 반도체 공정기술분야, 공정장비 및 자동화 분야로 구분되며 모두 진공기술을 기반으로 발전하고 있다. 특히,

반도체 공정은 거의 모든 진공도가 응용되는데 저진공($\sim 10^{-3}$ torr)에서 중진공(10^{-3} torr $\sim 10^{-6}$ torr) 공정인 저압 및 플라즈마 화학기상증착, 식각공정을 비롯하여 고진공(10^{-6} torr $\sim 10^{-9}$ torr) 공정인 이온주입, 스퍼터링과 초고진공(10^{-9} torr $\sim 10^{-12}$ torr) 에피택시 성장에 이르기까지 반도체 공정장비 중 약 80%를 차지하는 전공정 장비의 65% 이상이 진공장비이다[2]. 또한, 반도체공정에서의 정밀계측 및 유량제어, 초순수 및 가스배관 불순물 저감 배출기술, 반응기체 처리 등에 대한 진공기술 응용수요는 점점 더 확대되고 있는 실정이다[3,4].

진공기술은 응용되는 공정과 장비에 따른 다양한 진공시스템의 진공 생성기술, 진공 유지기술, 진공 계측기술 및 시스템 (설계·운영·평가)기술로 구분될 수 있다[5]. 진공시스템은 진공조와 진공조의 기체를 제거하는 진공펌프가 가장 기본적인 구성요소이며, 펌프 및 배기계, 진공계측기, 가열 및 냉각장치, 관통공급관류로 구성된다. 이러한 각 구성요소들은 진공시스템의 성능특성과 응용용

1. 인천대학교 신소재공학전공
(인천 연수구 송도동 12-1)

a. Corresponding Author : kim95118@incheon.ac.kr
접수일자 : 2010. 2. 9
1차 심사 : 2010. 3. 11
심사완료 : 2010. 3. 22

정 진공환경을 결정하는 주요 설계인자이다. 따라서 다양한 공정장비 응용을 위해서는 각 공정 진공특성에 대한 진공시스템 설계인자 영향을 고려한 최적화 진공시스템 설계가 요구된다. 그러나, 진공시스템의 다양한 구성요소들의 실질적 상호영향 평가는 시스템 제작에 대한 많은 비용과 시간을 요구한다. 따라서 진공시스템 운전 진공특성에 대한 설계인자 영향 전산모사 예측평가 연구는 그 응용효과가 매우 높을 것으로 판단된다. 이러한 배경으로 상업화 진공시스템 전산모사기(VacSim^{Multi}) [6]를 이용하여 모델링 고진공시스템의 진공특성에 대한 설계인자 영향을 전산모사 하였다. 본 연구에서는 임의의 상업화 고진공시스템을 모델링하고 직렬 진공시스템에서 진공조와 펌프들 사이 배기계 설계인자 영향을 평가하였다. 즉, 배기계 설계인자인 배기도관의 구조, 길이 및 직경에 따른 모델링 진공시스템의 진공특성 영향을 배기밸브 변수 고정으로 평가하여 최적화 배기도관 컨덕턴스 설계인자 모델 도출로 전산모사 기구의 응용 가능성을 제시하였다.

2. 본 론

고진공시스템에서 보조펌프는 고진공펌프의 운전압력인 저진공 혹은 중진공 조성과 차체 배기능력이 없는 고진공펌프 응용 시 배기펌프 기능을 한다. 따라서, 보조펌프는 배기속도, 펌핑효율뿐만 아니라, 시스템 진공특성의 주요 영향인자인 컨덕턴스가 고려된 배기도관 연결이 요구된다. 컨덕턴스는 주어진 시간에 도관을 통과하는 기체 양으로 정의된다. 기체흐름의 용이성을 나타내는 컨덕턴스는 도관의 구조 및 직경, 길이로 결정되나, 배기계 내의 기체흐름은 동일한 구조, 직경, 길이의 도관에서도 진공도에 따라 다른 것으로 알려지고 있다 [7]. 낮은 진공도의 기체흐름은 집합적이며 확산 기여도가 작지만 높은 진공도에서의 기체흐름은 분자들의 확산에 지배된다. 이렇게 진공시스템에서 기체 분자운동은 진공도에 따라 크게 점성유동과 분자유동으로 구분된다[8].

보통 10^{-2} torr 보다 높은 압력의 기체분자들은 유체와 같이 움직인다. 즉, 기체분자의 일부가 배기되면 빈 공간으로 다른 분자들이 즉시 이동하여 채워주게 되는데 이러한 형태의 기체흐름을 점성유동이라 한다. 따라서 저진공의 배기는 배기구가 상대적으로 작아도 가능하다. 20°C 공기에 대한 점

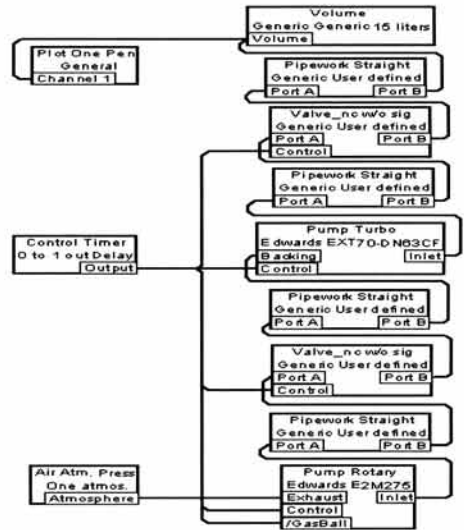


그림 1. 모델링 터보분자-유회전 직렬 고진공시스템 전산모사 모식도.

Fig. 1. Simulation schematic of modeling TMP-MP series high vacuum system.

성유동 범위의 긴 원형관 컨덕턴스는 일반적으로 다음 관계식으로 나타낸다[9].

$$C = 693.6 \times \frac{d^3 \bar{P}}{L} [m^3/s] \quad (1)$$

10^{-2} torr보다 낮은 압력의 기체분자 움직임은 불규칙적이며 서로 영향을 주지 못하는데 이를 분자유동이라 한다. 따라서 고진공영역의 배기구는 상대적으로 크며 20°C 공기에 대한 분자유동에서 긴 원형관 컨덕턴스 관계식은 다음과 같다[9].

$$C = 123.2 \times \frac{d^3}{L} [m^3/s] \quad (2)$$

여기서 d 는 배기도관의 직경이고, L 는 길이, \bar{P} 는 도관의 평균압력을 의미한다

3. 결과 및 고찰

3.1 고진공시스템 모델링

모델링 고진공시스템은 진공조와 터보-유회전펌프, 밸브 및 도관 배기계로 구성되었으며 전산모사 모식도는 그림 1에 나타내었다. 터보-유회전 펌프

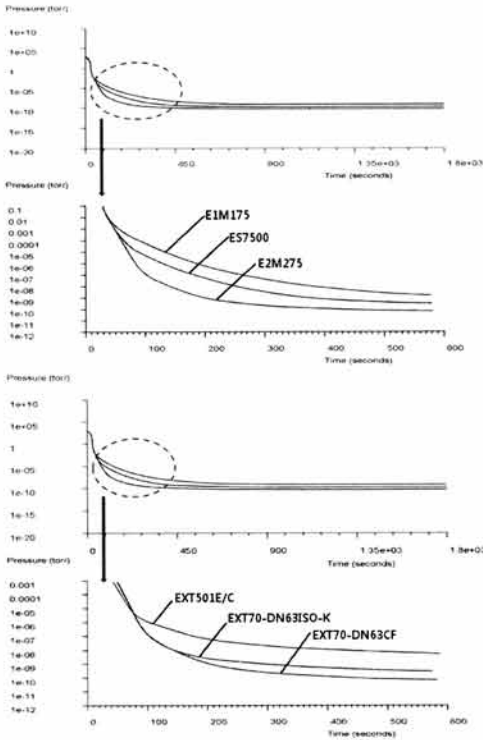


그림 2. 최적화 터보분자-유회전 펌프조합을 위한 펌프 모델별 전산모사 압력-시간 곡선.
 Fig. 2. Comparison of simulation results with varied pump models for optimum TMP-MP combination.

조합 선정의 신뢰성 제고를 위해 얻어진 펌프모델별 전산모사 운전특성(그림 2)과 비교된 모델펌프(성원에드워드(사))의 상업화 사양은 표 1, 2로 나타났다. 최적화 터보-유회전 펌프조합 모델링을 위해 먼저 유회전 보조펌프를 E2 series E2M275 로 변수 고정한 후 터보분자펌프의 모델변화로 최적화 고진공펌프가 모델링 되었으며, 최적화 유회전 보조펌프 또한 얻어진 최적화 터보분자펌프 고정 조건에서 보조펌프 모델 상호비교 전산모사로 선정되었다.

그 결과 최적화 펌프조합으로 터보분자펌프는 성원 에드워드(사)의 EXT70-DN63CF 모델이 응용되었고 유회전 보조펌프는 E2 series E2M275로 모델링 되었다(그림 2).

전산모사 모델링 시스템의 배기계 기본모델은 각 단위도관 직경과 길이가 각 25.4 mm, 300 mm 인 직선형(straight) 도관으로, 진공조 체적은 15 L

표 1. 모델링 터보분자펌프의 상업화 사양.
 Table 1. Commercial specifications of employed turbo-molecular pump(Edwards Ltd.).

model name	EXT70-DN63CF
compression ratio	N ₂ > 1×10 ⁸ He 6000 H ₂ 500
nominal rotational speed	90000 rpm
standby rotational speed	63000 rpm
cooling method	free convection or forced air or water
quiescent electrical power	10 W
pumping speed	N ₂ 65 l/s He 60 l/s H ₂ 50 l/s
ultimate pressure	< 3.8 × 10 ⁻¹⁰ torr
weight	3.4 kg

표 2. 모델링 유회전펌프의 상업화 사양.
 Table 2. Commercial specifications of employed rotary pump(Edwards Ltd.).

model name	E2M275
pumping speed (pneurop 6602, 50 Hz)	255 m ³ /h
number of stages	2
ultimate vacuum without gas ballast	7.7×10 ⁻⁴ torr
weight	225 kg
motor power	7.5 kW(10 hp)

로 고정되었다. 배기밸브는 2개로, 밸브 설계변수는 입력신호가 없는 정상조건에서 항상 닫혀있고 완전개방 시 500 mm² 개구면으로 고정되었다. 4개의 배기도관 컨덕턴스 변수로 각 단위도관 직경 및 길이가 모델링 되었으며 도관구조 또한 직선형(straight), 굽은형(elbow), 슬릿형(aperture)으로 각각 전산모사 되어 시스템 배기특성이 평가되었다. 시스템 진공특성에 대한 컨덕턴스 영향은 전산모사 결과로 도출된 모델별 실시간 진공조 압력변화와 배기시간 특성해석으로 평가되었다.

3.2 직렬 및 병렬 고진공시스템 모델링
 직렬 배기도관 시스템은 유량이 일정하고, 전체 압력차는 각 도관 압력차의 합이다. 따라서 전체 컨덕턴스의 역은 각 직렬도관 컨덕턴스 역의 합과

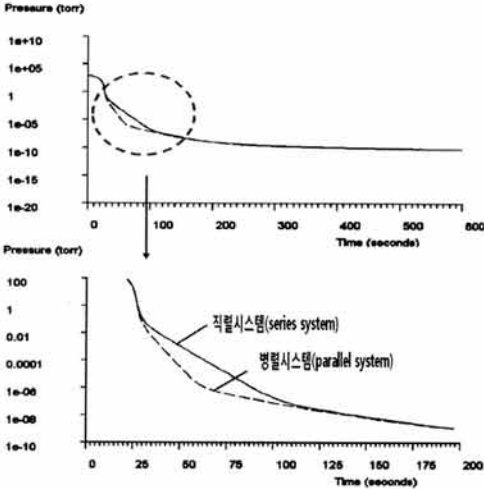


그림 3. 모델링 고진공시스템의 전산모사 압력-시간 곡선.

Fig. 3. Comparison of simulation results with parallel and series conductance of high vacuum system.

같다. 병렬시스템은 배기도관 입구와 출구 압력차가 모두 같고, 전체유량은 각 도관유량의 합이다. 따라서 병렬시스템의 컨덕턴스는 연결된 각 도관의 컨덕턴스 합이 된다. 직렬시스템은 컨덕턴스 손실이 있지만 시스템 단순화로 설계와 제작의 용이함과 재현성 장점이 있으며 병렬시스템은 복잡함으로 기체누설과 운전 재현성의 어려움이 있지만 직렬에 비해 좋은 컨덕턴스로 진공특성이 우수하다. 반도체 공정장비의 진공시스템은 공정의 재현성과 설계, 제작 및 운영이 상대적으로 우수한 직렬시스템이 대부분 응용되고 있다[10].

그림 3은 직렬 및 병렬구조에 따른 진공시스템 전산모사 결과로 실시간 압력-시간 곡선을 보여주고 있다. 직렬시스템의 10^{-6} torr 도달시간은 88.55초, 병렬은 57.12초로 전체적으로 병렬시스템의 우수한 배기시간 운전특성이 전산모사로 확인되었다. 배기시간 차이는 저진공보다는 고진공영역에서 더 크게 나타났으며 이는 거의 동일한 최종 도달진공도를 고려할 때 상대적으로 높은 컨덕턴스에 기인된 이론특성과 부합되는 결과로 응용 전산모사 모델링의 신뢰성을 보여주고 있다.

3.3 배기도관 직경변화에 대한 진공특성

전술한 바와 같이 반도체공정 응용 직렬시스템의 진공특성에 대한 배기도관 직경 영향을 전산모사

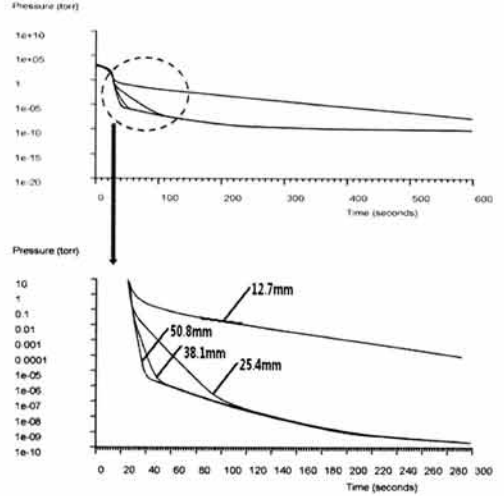


그림 4. 배기도관 직경변화 모델에 대한 전산모사 압력-시간 곡선.

Fig. 4. Comparison of simulation results with varied diameter of exhaust pipeline.

표 3. 배기도관 직경에 따른 배기시간 변화.

Table 3. Exhaust time of varied diameter of exhaust pipeline.

배기도관 직경 [mm]	배기시간 [sec] (1×10^{-3} torr)	배기시간 [sec] (1×10^{-6} torr)
12.7	194.12	456.34
25.4	48.64	84.95
38.1	34.92	57.94
50.8	33.12	56.47

하였다. 단위 배기도관의 구조 및 길이는 직선형 300 mm로 고정되었고 직경은 12.7 mm, 25.4 mm, 38.1 mm 및 50.8 mm로 각 전산모사 되었다. 직경 50.8 mm 이상의 배기도관은 실질 응용성이 낮고 반도체공정 단위실험 진공장비의 기본 설계변수로 전산모사 되었다. 배기도관 직경에 따른 실시간 시간-압력 곡선 전산모사 결과는 그림 4로 나타내었다.

이론적으로 컨덕턴스(C)는 분자유동에서는 D^3 에 비례하고, 점성유동은 D^4 에 비례하며 점성유동의 경우 압력이 높을수록 컨덕턴스가 증가한다[9]. 따라서 직경을 1/2배 축소하면 점성유동 영역은 1/16, 분자유동은 1/8의 컨덕턴스 감소로 이어진다.

직경 확대에 따른 점성유동과 분자유동 영역에

서 컨덕턴스 증가로 진공특성 향상이 예상되었으나, 50.8 mm 와 38.1 mm 경우는 배기시간 및 도달진공도 차이가 미비하여 직경에 따른 컨덕턴스 변화가 적은 것으로 나타났다, 그러나, 12.7 mm 경우는 배기시간이 크게 증가되어 시스템 운전특성이 현저하게 저하됨을 알 수 있었다(표 3). 전산모사 결과 25.4 mm 이하의 직경은 저진공(10^{-3} torr) 및 고진공(10^{-7} torr) 도달 배기시간 차이가 각각 최대 약 161초, 약 400초로 고진공영역으로 갈수록 배기시간과 도달진공도에 대한 현격한 시스템 성능저하가 나타났다. 25.4 mm 이상의 배기도관 직경은 시스템성능 변화가 크지 않아 시스템 성능에 대한 배기도관 임계직경으로 25.4 mm 이상이 요구되는 것으로 관찰되었다. 또한 25.4 mm 이상의 배기도관 경우 초고진공($>10^{-9}$ torr) 영역에 도달할수록 컨덕턴스 증대효과가 나타났다. 본 전산모사로 얻어진 직경이 작을수록 저진공 보다 고진공 도달시간 증가특성은 저진공 점성유동은 압력영향으로 직경에 대한 컨덕턴스 변화가 적게 나타나고 분자유동은 압력영향 보다는 직경영향이 크다는 이론과도 일치되는 것으로 확인되었다[10].

3.4 배기도관 길이변화에 대한 진공특성

그림 5는 단위 배기도관 길이를 각 100 mm, 200 mm, 300 mm, 400 mm로 변화시킨 모델별 전산모사 진공특성 곡선을 보여주고 있다. 단위실험진공장비로 응용될 수 있는 배기도관 길이차원으로 변수 선정되었다. 전산모사 결과 배기도관 길이에 따른 저진공(10^{-3} torr) 및 고진공(10^{-6} torr) 도달 시간은 저진공은 100 mm 경우 약 36.54초, 400 mm 는 약 54.54초로 18초 차이였지만 고진공에서는 약 56.27 초에서 100.32초로 거의 2배 정도 지연되었다. 배관길이에 따른 컨덕턴스 변화 영향 역시 직경변수와 마찬가지로 저진공 보다는 고진공 영역에서 크게 나타났다. 저진공 및 고진공 영역에서 배관길이 4배 증가에 대한 배기시간 지연은 각각 약 1.5배, 약 2배로 길이증가에 비해 지연 폭은 상대적으로 적었으나 고진공 영역에서는 배관길이에 대한 배기시간의 선형증가가 나타나고 있다. 이는 분자유동 영역의 컨덕턴스 이론식 특성과 일치하는 것으로 보여진다. 또한, 고진공영역 도달시간 (85.25초)에 대한 모델별 도달압력은 약 10^1 torr ~ 10^3 torr차이로 나타나고 있으며, 100 mm 와 200 mm 는 2×10^{-7} torr로 거의 동일압력으로 보여지나 400 mm 는 9.7×10^{-6} torr로 길이변화에 따른 진공도 변화도 나타나고 있다. 배기시간과 마찬가지로

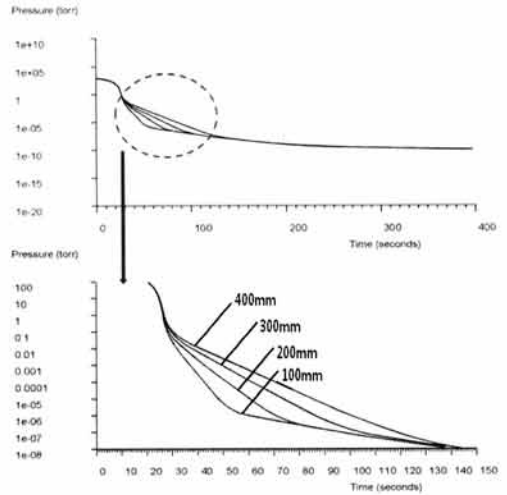


그림 5. 배기도관 길이변화 모델에 대한 전산모사.

Fig. 5. Comparison of simulation results with varied length of exhaust pipeline.

표 4. 배기도관 길이에 따른 배기시간 변화(@ 1×10^{-6} torr).

Table 4. Exhaust time of varied length of exhaust pipeline(@ 1×10^{-6} torr).

배기도관 길이 [mm]	배기시간 [sec] (1×10^{-6} torr)
100	56.27
200	69.95
300	85.25
400	100.32

표 5. 배기도관 길이에 따른 도달압력 변화(@ 85.25 sec).

Table 5. Pressure of varied length of exhaust pipeline(@ 85.25 sec).

배기도관 길이 [mm]	도달압력 [torr] (85.25 sec)
100	1.7×10^{-7}
200	2.0×10^{-7}
300	1.0×10^{-6}
400	9.7×10^{-6}

지로 도달압력 또한 길이에 따라 거의 같은 경향으로 변화되는 것으로 관찰되었다(표 4, 5).

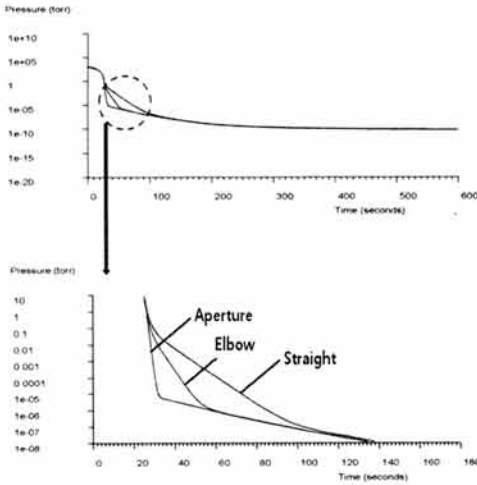


그림 6. 배기관 구조 모델별 전산모사 압력-시간 곡선.
 Fig. 6. Comparison of simulation results with structure of exhaust pipeline.

3.5 배기도관 구조에 따른 진공특성

모델링 직렬시스템의 배기도관 구조를 직선형 (straight), 굽은형(elbow), 슬릿형(aperture) 변수로 직공특성 영향을 전산모사 하였다. 그림 6은 배기도관 구조 모델별 전산모사 특성곡선을 나타내고 있다. 전산모사 결과 굽은형과 슬릿형 배기도관은 고진공 영역으로 갈수록 거의 유사한 컨덕턴스 특성이 관찰되었다. 그러나, 직선형은 저진공에서 고진공 영역 전반으로 상대적인 배기시간 특성저하가 확인되었다. 특히 동일 배기시간에 대한 도달진공도 특성 저하는 큰 것으로 나타나고 있다. 슬릿형 배기도관은 전체적 시스템 성능특성이 우수한 것으로 평가되고 있으며, 특히 급격한 배기특성은 공정생산성 장점을 제시하고 있다. 그러나 슬릿형 배기도관의 실질 진공시스템 응용은 특수형태 보조도관 장착 및 운영의 고비용이 요구됨으로 전체적 응용특성에 대한 평가는 어려운 것으로 판단된다.

4. 결 론

VacSim^{Multi} 전산모사기로 직렬 고진공시스템의 배기도관 직경, 길이 및 구조 변수로 시스템 진공특성에 대한 컨덕턴스 영향을 전산모사 비교함으로써 진공시스템 설계인자의 시스템 성능특성 영향이 평가되었으며, 이를 통해 진공시스템의 최적 컨덕턴스 설계인자 도출에 대한 전산모사 가능성을 제시하였다.

컨덕턴스에 대한 도관의 직경변수 영향은 직경이 25.4 mm 이하일 경우 고진공 영역의 현저한 시스템 성능저하로 나타났으며 특히 동일 배기시간에 대한 도달압력 차이는 매우 큰 것으로 관찰되었다. 배관길이에 따른 컨덕턴스 변화 영향 역시 직경변수와 마찬가지로 저진공 보다는 고진공영역에서 크게 나타났다. 또한 배관길이가 증가함에 따라 배기시간 및 도달압력 모두 저하 폭이 거의 선형 증가되는 것으로 나타났으며, 얻어진 전산모사 결과는 이론특성과 비교적 일치되어 전산모사 연구의 신뢰성이 제시되었다. 배기도관의 구조영향은 슬릿형이 가장 우수한 것으로 나타났으나 실질 응용은 시스템 운용측면에 대한 종합적 고려가 요구되는 것으로 판단되었다. 현재도 진공기술의 응용 분야는 다양하지만, 앞으로도 미세기술의 발전과 더불어 많은 연구가 요구되는 분야이다. 향후에도 진공시스템의 성능 및 운영에 대한 설계인자 영향 전산모사 연구는 그 응용 가능성이 높을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2008년도 인천대학교 자체연구비 지원에 의한 공모과제로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

- [1] 정석민, "진공과학입문", 청문각, p. 54, 2001.
- [2] 배석희, "진공공학", 한국경제, p. 127, 2000.
- [3] 주장현, "진공기술실무", 홍릉과학, p. 75, 2001.
- [4] 김길동, "차세대 반도체재료", 반도체및디스플레이장비학회지, 99권, p. 145, 2004.
- [5] 김홍배, "진공의 기초", 전자자료사, p. 73, 2004.
- [6] "User's Guide of VacSim^{Multi}", Technology Sources Ltd, 1999.
- [7] Web source of VacSim^{Multi}Simulation(<http://www.softsim.com/vacsim.php>).
- [8] 김선규, "표면공학", 두양사, p. 38, 2005.
- [9] Varian Associates, Inc, "Basic Vacuum Practice 2ndEd.", p. 69, 2001.
- [10] James M. Lafferty, "Foundations of Vacuum Science and Technology", John Wiley & Sons, p. 103, 1999.