

<http://dx.doi.org/10.7236/JIWIT.2012.12.2.77>

JIWIT 2012-2-10

디스플레이공정 진공시스템 밸브응용에 따른 진공특성 전산모사

Simulation of Vacuum Characteristics by Applications of Vacuum Valves in Display Processing

김형택*

Hyung-Taek Kim

요약 진공 시스템의 성능에 대한 밸브 컨덕턴스의 영향은 진공시스템의 설계 최적화를 위해 전산모사 되었다. 본 연구에서는, 전산모사기인 VacSimMulti에 의한 모델링기구가 제시되었다. 진공 시스템의 설계는 진공 장비의 다양한 산업적 구현을 위해 특정한 프로세스 조건을 충족해야 한다. 진공 밸브의 구조, 길이, 직경 등은 컨덕턴스 영향의 전산모사 변수로서 모델링 되었으며, 직렬 진공 시스템의 배기 밸브 또한, 다양한 크기와 구조로 모델링하여 전산모사 되었다. 밸브 직경의 변화는 도관의 길이의 변화보다 진공특성에 있어 더 유의미한 효과를 보여주었으며 슬릿형의 밸브도관 시스템은 모델링된 밸브구조 중 가장 뛰어난 진공특성을 가지는 것으로 관찰 되었다.

Abstract Effect of valve conductance on performance of vacuum system was simulated for optimum design of vacuum system. In this investigation, the feasibility of modeling mechanism for VacSimMulti 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 vacuum valve were modeled as simulation modeling variables for conductance effects. Series vacuum system was modeled and simulated with varied dimensions and structures of exhaust valves. Variation of valve diameter showed the more significant effects on vacuum characteristics than that of pipeline length variations. It was also observed that the aperture structure of valve had the superior vacuum characteristics among the modeled systems.

Key Words : vacuum valve, vacuum characteristics, vacuum system, simulation

1. 서 론

진공기술은 공학, 제약, 식품, 야금, 의학 등 광범위한 산업분야에 응용되고 있으며 특히 반도체공정장비, 우주 실험실, 입자가속기, 핵융합장치 등은 진공기술 없이는 제작을 생각조차 할 수 없다. 이러한 핵심 기반기술인 진

공기술은 우주공학, 생명공학, 재료공학 및 전자공학 분야의 주요기술로 인식되고 있으며 특히 디스플레이 및 반도체공정의 진공기술 응용은 매우 빠르게 발전되어 이를 위한 지속적인 연구개발이 요구되고 있다^[1].

디스플레이산업은 크게 디스플레이 재료분야, 공정분야, 장비제어 및 자동화 분야로 구분되며 모두 진공기술

*정회원, 인천대학교 신소재공학과
접수일자 2012년 3월 20일, 수정완료 2012년 4월 10일
게재확정일자 2012년 4월 13일

Received: 20 March 2012 / Revised: 10 April 2012 /

Accepted: 13 April 2012

**Corresponding Author: kim95118@incheon.ac.kr

Dept. of Advanced Materials Engineering, University of Incheon, Korea

을 기반으로 발전하고 있다. 특히, 디스플레이 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 디스플레이 및 반도체 생산 장비 중 약 70%를 차지하는 진공정 장비의 65% 이상이 진공장비이다^[2].

또한, 디스플레이공정에서의 정밀계측 및 유량 제어, 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 기술(설계·운영·평가)로 구분될 수 있다^[5]. 진공시스템은 진공조와 진공조의 기체를 제거하는 진공 펌프가 가장 기본적인 구성요소이며, 진공조, 펌프 및 밸브계, 진공계측기, 가열 및 냉각장치, 관통공급관류로 구성된다. 이러한 각 구성요소들은 진공시스템의 성능특성과 응용공정 진공환경을 결정하는 주요 설계인자들이다. 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})^[8]를 이용하여 모델링 고진공시스템의 진공특성에 대한 설계인자 영향을 전산모사 하였다. 본 연구에서는 임의의 상업화 고진공 시스템을 모델링하고 직렬 진공시스템에서 진공조와 펌프들 사이 밸브계 설계인자 영향을 평가 하였다. 즉, 밸브계 설계인자인 도관의 구조, 길이 및 직경에 따른 모델링 진공시스템의 진공특성 영향을 배기 차원변수 고정으로 평가하여 최적화 밸브계 컨덕턴스 설계인자 모델을 제시하였다.

II. 고진공시스템의 기체유동과 컨덕턴스

고진공시스템에서 보조펌프는 고진공 펌프의 운전압

력인 저진공 혹은 중진공 조성과 차체 배기능력이 없는 고진공 펌프 응용 시 배기펌프 기능을 한다. 따라서, 보조 펌프는 배기속도, 효율뿐만 아니라, 시스템 진공특성에 주요 영향인자인 컨덕턴스가 고려된 밸브계 연결이 요구된다. 컨덕턴스는 주어진 시간에 도관을 통과하는 기체량으로 정의된다. 기체흐름의 용이성을 나타내는 컨덕턴스는 밸브의 구조 및 직경, 길이로 결정되나, 배기계 내의 기체흐름은 동일한 구조, 직경, 길이의 밸브에서도 진공도에 따라 다른 것으로 알려지고 있다^[6]. 낮은 진공도의 기체흐름은 집합적이며 확산 기여도가 작지만 높은 진공도에서의 기체흐름은 분자들의 확산에 지배된다. 이렇게 진공시스템에서 기체 분자운동은 진공도에 따라 크게 점성유동과 분자유동으로 구분된다^[7].

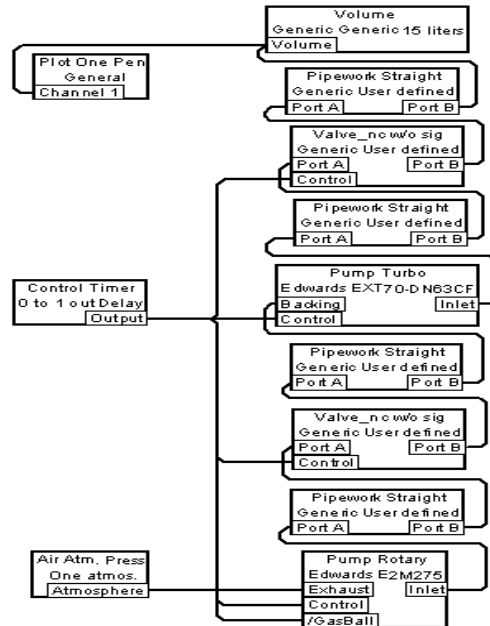


그림 1. 직렬 TMP-MP 시스템 모델링의 전산모사 도식도
Fig. 1. Simulation schematic of modeling series TMP-MP system

보통 10^{-2} torr 보다 낮은 진공도의 기체분자들은 유체와 같이 움직인다. 즉, 기체분자의 일부가 배기되면 빈 공간으로 다른 분자들이 즉시 이동하여 채워지게 되는데 이러한 형태의 분자흐름을 점성유동이라 한다. 따라서 저진공의 배기는 배기구가 상대적으로 작아도 가능하다. 20℃ 공기에 대한 점성유동 범위의 긴 원형관 컨덕턴스는 일반적으로 다음 관계식으로 나타낸다^[2].

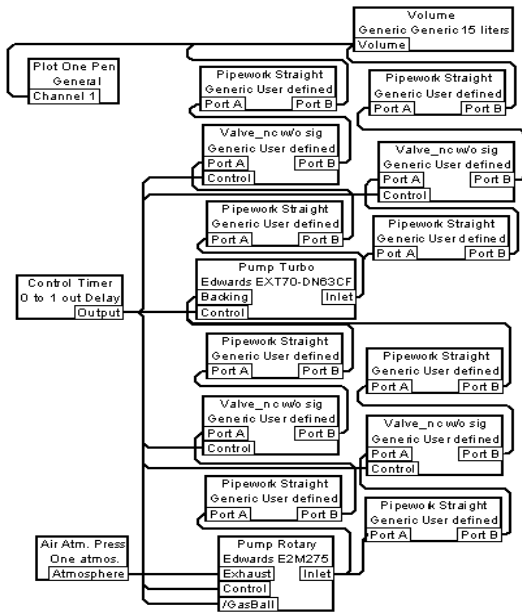


그림 2. 병렬 TMP-MP 시스템 모델링의 전산모사 도식도
Fig. 2. Simulation schematic of modeling parallel TMP-MP system

$$C = 693.6 \times \frac{d^4 P}{L} \text{ [m}^3/\text{s]} \quad (1)$$

10^{-2} torr 보다 높은 진공도의 분자움직임은 불규칙적이며 서로 영향을 주지 못하는데 이를 분자유동이라 한다. 따라서 고진공영역의 배기구는 상대적으로 크며 20°C 질소에 대한 분자유동에서 긴 원형관 컨덕턴스 관계식은 다음과 같다^[2].

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

여기서 d 는 밸브도관의 직경이고, L은 길이, P는 도관의 평균압력을 의미한다.

III. 전산모사

1. 고진공시스템 모델링

모델링 고진공시스템은 진공조와 터보-유회전펌프, 밸브 및 도관 배기계로 구성되었으며 전산모사 모식도는

Fig. 1로 나타내었다. 일반적 상업화 고진공시스템인 터보분자펌프 시스템의 밸브도관 컨덕턴스 변화에 대한 운전특성이 전산모사 되었다. 터보분자펌프는 성원에드워드(사)의 EXT70-DN63CF 모델이 응용되었고, 유회전 보조펌프는 E2 series E2M275 모델로 구성되었다. 펌프 조합은 응용 전산모사가 제공하는 각 펌프모델의 조합별 전산모사 운전특성 결과와 펌프제조사인 성원에드워드(사)의 공개사양에 의한 신뢰성 비교로 모델링 되었으며 응용펌프의 사양은 Table. 1, 2 로 나타내었다. 전산모사 모델링 시스템의 밸브계 기본모델은 길이와 직경이 각 0.3m, 0.0254m인 직선형(straight) 도관으로, 진공조 체적은 15L로 고정되었다. 배기밸브는 직렬시스템은 2개, 병렬시스템 4개로 구성 되었으며, 밸브차원은 입력 신호가 없는 정상조건에서는 항상 닫혀있고 완전개방 시 500mm^2 개구면으로 고정되었다. 배기도관 컨덕턴스 변수로 밸브 직경 및 길이가 모델링 되었으며 밸브구조 또한 직선형(straight), 굽은형(elbow), 슬릿형(aperture)으로 각 전산모사 되어 시스템 배기특성이 평가되었다. 시스템 진공특성에 대한 컨덕턴스 영향은 전산모사 결과로 도출 된 모델별 실시간 진공조 압력변화와 배기시간 특성해석으로 평가되었다.

표 1. 적용된 터보분자펌프의 상용사양

Table 1. Commercial specifications of employed turbomolecular 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 /s
ultimate pressure	< 3.8 ×10 ⁻¹⁰ torr
Weight	3.4 kg

표 2. 적용된 유회전펌프의 상용사양

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	7.5kW(10 hp)

2. 직렬 및 병렬 고진공시스템 모델링

직렬 배기도관 시스템의 경우(Fig. 1) 유량은 일정하고, 전체 압력 차는 각 도관 압력 차의 합이다. 따라서 전체 컨덕턴스의 역은 각 직렬도관 컨덕턴스 역의 합과 같다. 병렬시스템(Fig. 2)은 배기도관 입구와 출구 압력 차가 모두 같고, 전체유량은 각 도관유량의 합이다. 따라서 병렬시스템의 컨덕턴스는 연결된 각 도관의 컨덕턴스 합이 된다. 직렬시스템은 컨덕턴스 손실이 있지만 시스템 단순화로 설계와 제작 용이함과 재현성의 장점이 있으며 병렬시스템은 복잡함으로 기체누설과 운전 재현성의 어려움이 있지만 직렬에 비해 좋은 컨덕턴스로 진공특성이 우수하다.

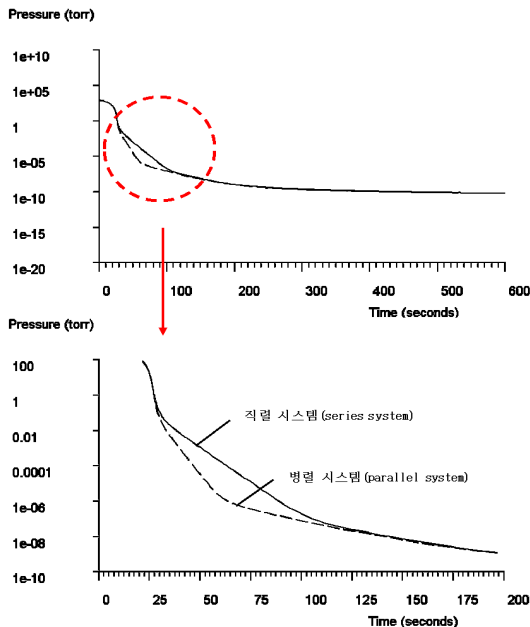


그림 3. 진공 시스템의 구조에 따른 전산모사 결과 비교
Fig. 3. Comparison of simulation results based on geometry of vacuum system

Fig. 3은 시스템 구조에 따른 전산모사 결과인 실시간 압력-시간 곡선을 보여주고 있다. 직렬시스템의 10⁻⁶ torr 도달시간(exhaust time)은 88.55초, 병렬은 63.30초로 병렬시스템의 우수한 운전특성이 전산모사로 확인되었다. 도달 진공도보다는 배기시간 운전특성의 공정응용 장점이 평가되었다.

3. 밸브 직경에 따른 진공특성

밸브도관 직경변화에 의한 진공특성 영향을 고찰하기 위해 모델링 직렬시스템을 전산모사 하였다. 배기계 기본모델인 0.3m 밸브길이에 직경은 0.0127m(0.5inch), 0.0254m(1inch), 0.0381m(1.5inch) 변수로 전산모사 되었다. 직경 0.0381m 이상의 배기도관은 실질 응용성은 낮기 때문에 0.0381m 이하의 변수로 전산모사 되었다. 밸브도관 직경에 따른 실시간 시간-압력 곡선 전산모사 결과는 Fig. 4로 나타내었다.

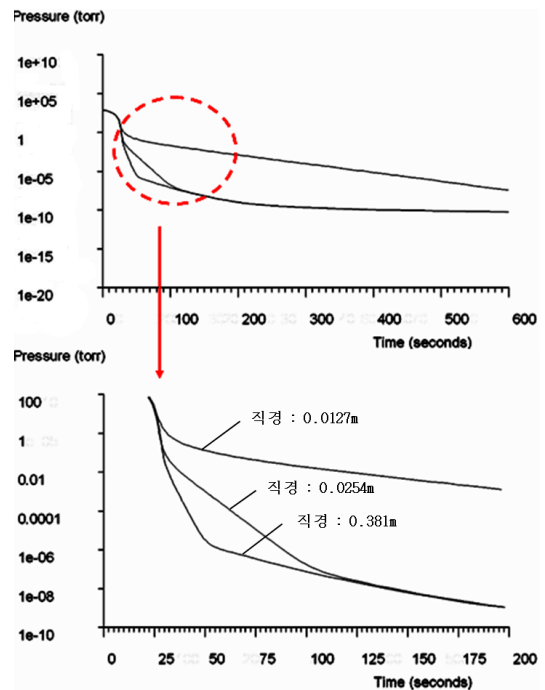


그림 4. 진공 밸브 직경에 따른 전산모사 결과 비교
Fig. 4. Comparison of simulation results with varied diameter of vacuum valve

컨덕턴스(C)는 분자유동에서는 D³에 비례하고, 점성 유동은 D⁴에 비례하므로^[2] 직경을 1/2 배 축소하면 점성 유동 영역은 1/16, 분자유동은 1/8 의 컨덕턴스 감소로 고

진공영역(10^{-6} torr)에 도달되는 배기시간이 약88초 (1inch)에서 472 (0.5inch)초로 384초 증가되어 시스템 운전특성이 저하됨을 볼 수 있었다. 또한 직경이 1/2 배 확대됨으로써 점성유동과 분자유동 영역에서 컨덕턴스 증가로 진공특성 향상이 예상되었으나, 10^{-6} torr도달시간이 58초(1.5inch)로 30 초 정도만 향상되었다. 이것은 점성유동 영역에서는 밸브직경이 작은 것이 기체흐름에 유리하나 분자유동에서는 밸브직경 확대에 의한 컨덕턴스 증대효과와 상반되는 영향에 기인된 것으로 판단된다.

또한 기본 배기시스템 모델이 88초에 1×10^{-6} torr에 도달했을 때 직경이 각 0.5inch, 1.5inch 인 시스템 압력은 3.13×10^{-2} torr, 1.39×10^{-7} torr로 평가되었다. 이는 배기도관 직경이 1inch 이상인 경우에는 도달 진공도에 큰 차이가 없으나 이하인 경우는 배기시간과 도달압력의 운전특성이 크게 저하됨을 알 수 있었다.

4. 밸브 길이에 따른 진공특성

Fig. 5는 밸브도관 길이를 각 0.1m, 0.2m, 0.3m, 0.4m로 변화시킨 모델별 전산모사 진공특성 곡선을 보여주고 있다. 단위실험 진공장비로 실질 응용되는 밸브 길이차원으로 변수가 선정되었다. 전산모사 결과 밸브도관 길이에 따른 고진공영역(10^{-6} torr) 도달시간은 59.93 초에서 104.71 초로 최대 2배 차이가 평가되었다. 즉, 밸브길이는 4배로 길어졌으나 배기시간은 약 2배 지연으로 나타났으며, 길이가 2배, 3배 증가될 때까지 시간 지연은 약 13.03 초 및 28.62 초로 길이증가에 비해 지연 폭은 상대적으로 적었으며 밸브길이와 배기시간의 선형증가는 나타나지 않았다. 그러나, 전체적으로 밸브길이가 길어짐에 따라 배기시간 지연 폭은 커지는 것으로 평가되었으며 이는 컨덕턴스 관계식과도 일치되는 것으로 보여진다. 또한, 고진공영역 도달시간(88.55 초)에 대한 모델별 도달압력은 약 10^1 torr 정도 차이로 평가되고 있으며, 0.1 m 와 0.2m 모델의 경우는 1.65×10^{-7} torr로 동일한 압력이 나타나고 있으나 0.4m 는 1.02×10^{-5} torr로 도달압력도 배기시간과 같이 길이 증가에 따라 변화폭이 큰 것으로 나타나고 있다(Table. 3, 4)

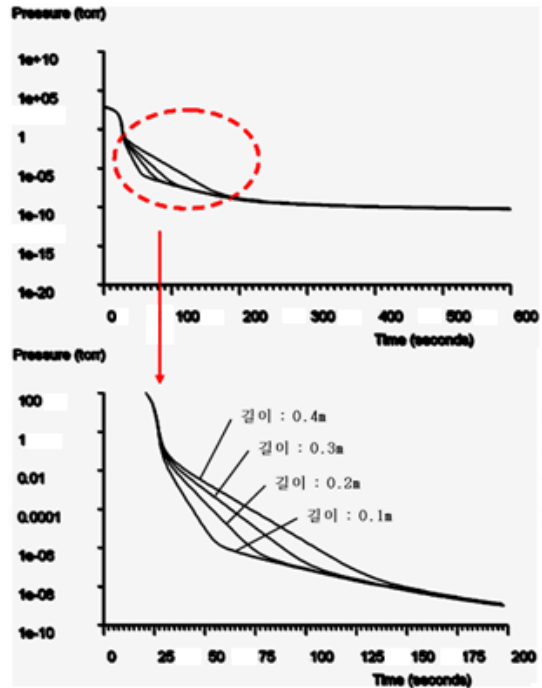


그림 5. 진공 밸브 길이에 따른 전산모사 결과 비교
Fig. 5. Comparison of simulation results with varied length of vacuum valve

표 3. 진공 밸브 길이에 따른 도달시간 (at 1×10^{-6} torr)
Table 3. Exhaust time of varied length of vacuum valve (at 1×10^{-6} torr)

length of valve	exhaust time(at 1×10^{-6} torr)
0.1 m	59.93 sec
0.2 m	72.95 sec
0.3 m	88.55 sec
0.4 m	104.71 sec

표 4 진공 밸브 길이에 따른 압력 (at 88.55 sec)
Table 4. Pressure of varied length of vacuum valve (at 88.55 sec)

length of valve	pressure (at 88.55 sec)
0.1 m	1.65×10^{-7} torr
0.2 m	1.65×10^{-7} torr
0.3 m	1.00×10^{-6} torr
0.4 m	1.02×10^{-5} torr

5. 밸브 구조에 따른 진공특성

모델링 기본 배기계 직렬시스템의 밸브도관 구조를 직선형(straight), 굽은형(elbow), 슬릿형(aperture) 변수

로 진공특성 영향을 비교하였다. Fig. 6는 밸브도관 구조 모델별 전산모사 특성곡선을 나타내고 있다. 전산모사 결과 직선형과 굽은형 밸브도관은 비슷한 고진공영역 도달시간으로 (각 88.55sec, 88.72sec) 거의 유사한 컨덕턴스 특성이 관찰되었다. 그러나, 슬릿형의 경우는 56.56 초로 22초가량 배기시간 감소가 확인하였다.

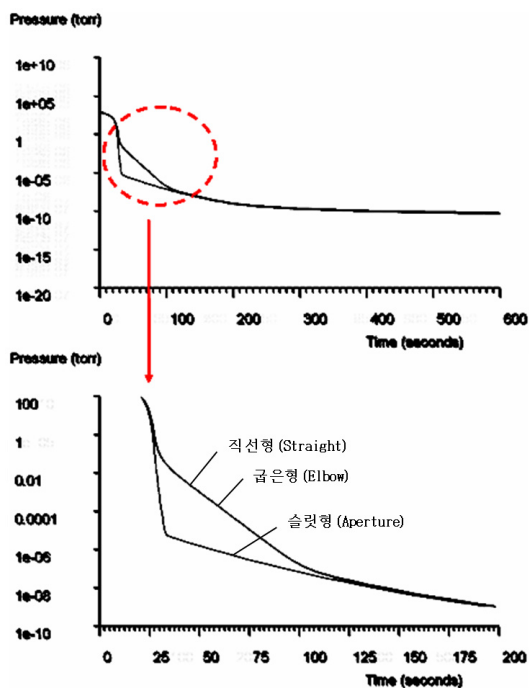


그림 6. 진공 밸브 모양에 따른 전산모사 결과 비교
Fig. 6. Comparison of simulation results with shape of vacuum valve

전산모사 결과 슬릿형 밸브도관 시스템은 전체적 성능특성이 우수한 것으로 나타나고 있으며, 특히 시스템 배기시간 특성은 공정생산성 향상의 응용가능성을 제시하고 있다. 그러나 슬릿형 밸브도관의 실질 진공시스템 응용은 특수형태 보조도관 장착에 따른 제작과 운전의 상대적 고비용이 요구됨으로 전체적 응용특성에 대한 평가는 어려운 것으로 판단된다.

IV. 결론

VacSim^{Multi} 전산모사기로 직렬 고진공시스템의 밸브 직경, 길이 및 구조 변수로 컨덕턴스에 대한 진공특성의

실시간 전산모사 결과를 비교함으로써 진공시스템 설계 인자의 시스템 성능특성 영향이 평가되었으며, 이를 통해서 진공시스템의 최적 밸브 컨덕턴스 설계인자 도출에 대한 전산모사 응용 가능성을 제시하였다

평가된 병렬컨덕턴스 시스템 진공특성의 직렬시스템에 대한 상대적 우수함은 이론적 컨덕턴스 관계식과 부합되고 있으며 또한 응용 전산모사기의 신뢰성을 제시하였다. 컨덕턴스에 대한 밸브의 직경변수 영향은 직경이 작아질수록 큰 폭의 성능저하로 나타났으며 특히 초기배기에 대한 도달압력 차이는 매우 큰 것으로 관찰되었다. 그러나, 밸브 길이변화에 의한 시스템 성능특성 영향은 직경변수에 비해 적은 것으로 평가되었으며 길이가 길어짐에 따라 배기시간 및 도달압력 모두 저하 폭이 커지는 것으로 나타났다. 밸브도관의 구조영향은 슬릿형이 가장 우수한 것으로 나타났으나 실질 응용은 시스템 운용측면에 대한 종합적 고려가 요구되는 것으로 판단되었다. 현재도 진공기술의 응용분야는 다양하지만, 앞으로도 미세기술의 발전과 더불어 많은 연구가 요구되는 분야이다. 향후에도 진공시스템의 성능·운전특성에 대한 설계인자 영향 전산모사 연구는 그 응용가능성이 높을 것으로 판단된다.

참고문헌

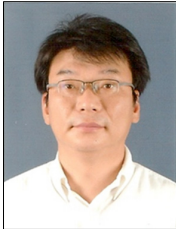
- [1] Seokmin Chung, Jinwon Lee, "Introductory Vacuum Science & Technology", Chungmookgak, 2001.
- [2] Sekhee Pae, Kwanghwa Chung, Youngbak Lee, etc., "Vacuum Engineering", Korean Economy Daily, 2000.
- [3] User's Guide of VacSim Multi, Technology Sources Ltd, 1999.
- [4] Jangheun Ju, "Practical Vacuum Techniques" Hong-Reung Scientific Publish, 2001.
- [5] Varian Associates, Inc., "Basic Vacuum Practice (2nd Ed.)", 1996.
- [6] Kildong Kim, "Semiconducting Materials for Next Generation", Journal of Semiconductor and Display Equipments Society, Vol. 9, No, 5, pp. 149-150, 2004.

- [7] Hongbae Kim, "Fundamentals of Vacuum, "
Electronic Documents Associates, Inc., 2004.
[8] Web source of VacSim^{Multi} Simulation
(<http://www.softsim.com/vacsim.php>)

※ 본 연구는 2010년도 인천대학교 자체연구비지원에 의한 공모과제로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

저자 소개

김 형 택(정회원)



- 1983 건국대학교 전자공학사
- 1985년 5월 미국 Univ. of Notre Dame 전자공학석사(MSEE)
- 1990년 5월 미국 South Dakota School of Mines & Tech. Ph. D. (전자재료)
- 1985년 5월 ~ 1986년 6월 현대 마북리

중앙연구소 연구원

- 1990년 7월 ~ 1992년 3월 삼성반도체 기흥연구소 선임연구원
 - 2002년 3월 ~ 2003년 2월 미국 Auburn Univ. 교환교수
 - 1992년 3월 ~ 현재 인천대학교 신소재공학과 교수
- <주관심분야 : 디스플레이공정, 플라즈마공정, 진공응용>