

진공시스템 성능에 대한 설계인자 영향 전산모사

김형택¹ · 정광필¹

¹인천대학교 신소재안전공학부 신소재공학전공, 인천 402-749

(2007년 9월 9일 받음)

진공시스템 최적화 설계를 위한 시스템 성능에 대한 설계인자 영향이 전산모사로 연구되었다. 본 연구로 상업화 전산모사기인 VacSim^{Multi}에 의한 진공시스템 모델링기구가 제시되었으며 진공시스템의 진공생성기구인 펌프계 설계인자의 영향을 평가하여 향후 여러 설계인들의 전산모사 연구 가능성이 확인되었다. VacSim^{Multi}의 저진공펌프 모델 전산모사 결과와 펌프사양에 의한 배기거동이 오차범위로 일치하였으며 부스터펌프의 사용이 중진공영역 응용에 효과적인 것으로 확인되었다. 또한 자체 배기능력이 없는 유확산펌프와 터보분자펌프 배기계의 최적화 보조펌프 조합이 제시되었으며, 유확산 및 터보분자펌프 배기계의 시스템 공정응용 특성도 확인되었다.

주제어 : 진공시스템, 전산모사, 설계인자, 최적화설계

I. 서 론

최근 진공기술의 발전으로 진공환경에 대한 산업 응용분야가 다양화되고 있다. 진공기술은 우주공학, 생명공학, 재료공학 및 전자공학 분야에 핵심 기반기술이 되었고, 특히 신소재공학의 진공기술 응용은 매우 빠르게 발전되어 이를 위한 지속적인 연구개발이 요구되고 있다 [1].

진공생성기술의 진공도는 이미 초고진공에서 극고진공 영역으로 들어서고 있으며, 또한 기존의 진공환경보다 재현성과 신뢰성이 더 유지될 수 있는 진공기술에 대한 관심이 고조되고 있다. 즉 “진공의 질”이라는 측면에서 진공생성기술, 진공측정기술, 진공유지기술, 진공시스템 해석기술과 같은 진공기술의 유기적인 구현에 의한 고성능 진공시스템이 요구되고 있다. 이러한 진공구성기술의 종합적, 유기적 기반구축과 연구는 나노과학, 박막공학, 표면공학, 가속기공학과 같은 첨단기술의 국가경쟁력 제고에 크게 기여할 것으로 기대된다[2-4].

다양한 응용목적에 의한 진공시스템 설계와 운영은 진공에 대한 기초지식과 이해가 요구되며, 설계제작 및 운영은 많은 시간과 비용이 요구되기 때문에 응용목적에 적합한 진공시스템의 각 구성장비의 성능요구 범위를 확인하고, 이에 부합한 장비들을 선택하여 최소비용으로 시스템 활용 효율성을 극대화할 수 있도록 노력해야 한다. 따라서 진공시스템의 제작 이전에 구성장비에 따른 시스템 진공특성을

파악하는 것이 중요하다. 운영 시 진공생성특성은 어떻게 예상되는지, 시스템 특성에 중요한 설계인자는 무엇인지, 어떻게 영향을 주는지 등과 같이 진공시스템 진공특성에 대한 설계인자 영향 전산모사 연구는 응용효과가 매우 높을 것으로 판단된다. 따라서 본 연구는 상업화 진공시스템 전산모사기[VacSim^{Multi}][5]를 이용하여 모델링 고진공시스템의 진공특성에 대한 설계인자 영향을 전산모사 하였다.

먼저 일반적으로 상업화 범용되고 있는 유회전펌프(oil rotary pump)의 배기특성에 대한 전산모사로 VacSim^{Multi} 전산모사기의 정확성과 신뢰성을 입증하였다. 그리고 저진공·중진공영역에서 적합한 배기성능을 갖는 진공펌프 조합이 중진공 특성에 대한 보조펌프 영향 전산모사로 해석되었다. 마지막으로 모델링 고진공시스템의 자체배기 능력이 없는 유확산펌프(oil diffusion pump)와 터보분자펌프(turbo molecular pump)에 적합한 보조펌프에 대해 전산모사 하였다.

II. 저진공·중진공시스템 모델링

2.1. VacSim^{Multi} 정확성·신뢰성 전산모사

상용화 된 범용 저진공펌프의 공개 된 사양과 시스템 전산모사를 통해 얻어진 도달압력, 배기특성을 비교하여 전

* [전자우편] kim95118@incheon.ac.kr

산모사기의 정확성과 신뢰성을 확인하였다. 확인방법은 배기시간과 도달압력 차이가 분명한 EDWARDS사의 범용 유회전펌프 E1, E2 series 각 2중으로 시스템을 모델링하여 전산모사 결과와 해당 유회전펌프의 배기사양을 비교하였다. 전산모사 모델링의 도관은 길이와 직경이 각 0.3m, 25.4mm인 직선형으로, 진공밸브는 완전 개방 시 500mm² 개구면으로, 진공조의 체적은 10 ℓ 로 고정하였다. 이와 같이 시스템을 구성(그림 1)하고 전산모사 하였다.

그림 2는 전산모사로 얻어진 진공조 배기특성 곡선을 나타내고 있다. 이를 바탕으로, 도달압력과 시간이 측정되어 실제 펌프사양과 비교된 결과가 표 1로 정리되었다. 표 1에 나타낸 전산모사 결과 값의 도달압력은 그림 2에 나타낸 그래프에서 압력변화가 3초 이상 없는 시작점을 기준으로 하였고, 배기시간은 전산모사의 도달압력까지 소요된 시간을 나타낸다.

펌프배기사양은 EDWARDS사에서 제공하는 사양으로 나타내었다. 표에서도 알 수 있듯 전산모사로 얻어진 도달압력이 각 모델의 배기사양과 일치한다. 배기속도는 펌프의 성능을 평가하는 중요항목으로, 사양의 배기속도로 시스템을 구성하고 있는 진공조 체적(10 ℓ)에서의 배기시간을 계산해 보면, E1M18 유회전펌프의 경우, 계산된 배기시간은 21초이나 전산모사 결과는 32초로 전산모사의 배기시간이 사양에 의한 계산 값보다 더 길게 나타나고 있다.

이는 사양의 배기속도는 ISO 규정으로 측정 제시된 값이

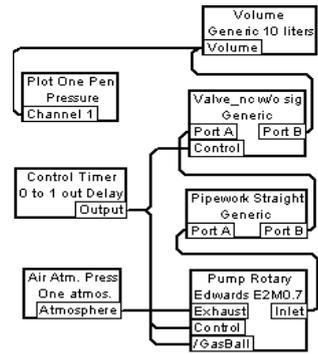


그림 1. 저진공펌프 전산모사 모식도

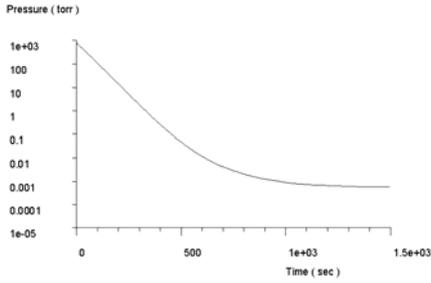
며, 실제 운영시의 배기속도는 운영환경과 시스템의 도관 컨덕턴스의 영향으로 일반적으로 사양배기속도보다 작다. 이를 고려하면, 전산모사의 결과는 실제 배기속도와 시스템 컨덕턴스가 반영됨을 알 수 있고, 또한 저진공펌프의 전산모사 결과와 공개 된 펌프사양에 의한 배기거동이 서로 근접하는 것을 알 수 있다.

2.2. 부스터펌프 성능 비교

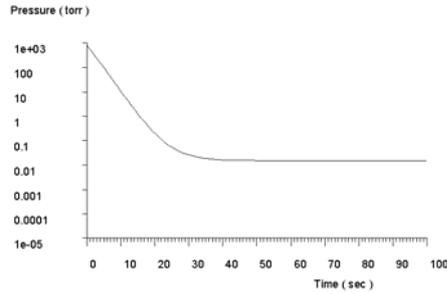
부스터펌프는 보조펌프로 저진공펌프의 기능이 떨어지고 고진공펌프가 제대로 작동되지 않는 중진공영역까지 압력을 떨어뜨리는 역할을 한다. 이를 위해 부스터펌프는 유회전펌프와 조합으로 사용된다.

표 1. 전산모사결과와 펌프 배기사양 비교

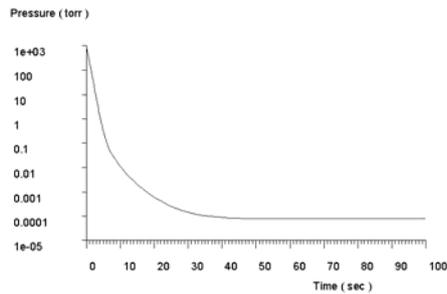
Rotary Pump Model	Simulation Data		Pump Technical Data	
	ultimate vacuum (torr, total pressure, without gas ballast)	exhaust time (sec)	ultimate vacuum (torr, total pressure, without gas ballast)	pumping speed (m ³ /h, Pneurop 6602, 50 Hz)
E2M0.7 Two Stage Rotary Pump	2.3 × 10 ⁻³	770	2.3 × 10 ⁻³	0.75
E1M18 One Stage Rotary Pump	2.2 × 10 ⁻²	32	2.2 × 10 ⁻²	17.0
E2M80 Rotary Pump	7.7 × 10 ⁻⁴	25	7.7 × 10 ⁻⁴	74
E1M275 Rotary Pump	6.9 × 10 ⁻²	4	6.9 × 10 ⁻²	255



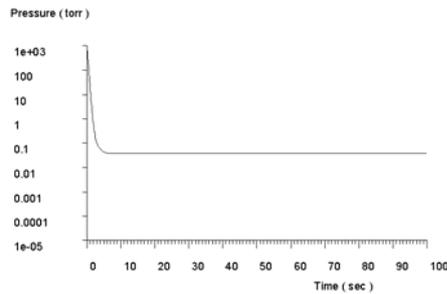
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 2. 저진공펌프 전산모사 결과 ((a)E2M0.7,(b)E1M18,(c)E2M80,(d)E1M275)

보조펌프로 부스터펌프의 영향을 평가하기에 앞서 최적화된 시스템을 구성하고자 2.1절과 동일한 시스템에 여러 유회전펌프를 구성하여 반복적인 전산모사를 통해 유회전펌프를 선별하였다. 선별된 모델은 도달압력이 가장 낮고, 동시에 배기속도도 가장 빠르게 나타난 E2 series의 E2M275 모델이다. 표 2에 E2M275 유회전펌프 사양을 나타내었다.

표 2. E2M275 유회전펌프 사양

Model Name	E2M275 Rotary Pump
pumping speed (Pneurop 6602, 50 Hz)	255 m ³ /h
number of stages	2
ultimate vacuum without gas ballast	7.7x10 ⁻⁴ torr
weight	225 kg
motor power	7.5 kW (10 hp)

2.1절 시스템과 동일한 진공시스템에 유회전펌프를 E2M275로 고정하고, EDWARDS사의 EH series 부스터펌프(EH250/EH500/EH1200/EH2400 /EH4200)만을 추가 구성함으로써 중진공영역에서 가장 우수한 성능을 나타내는 보조펌프를 알아보았다. 그림 3과 같이 모델링되었고, 전산모사 결과는 그림 4에 나타내었다.

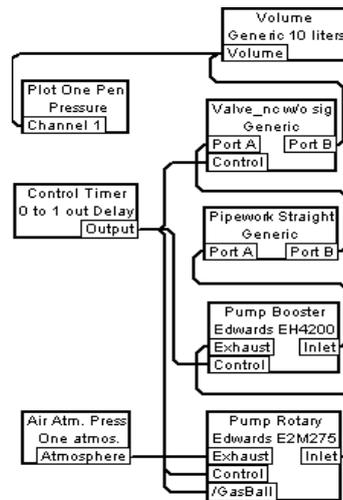
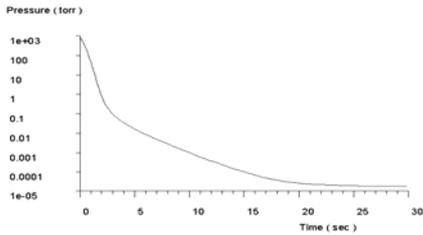


그림 3. 부스터펌프 전산모사 모식도

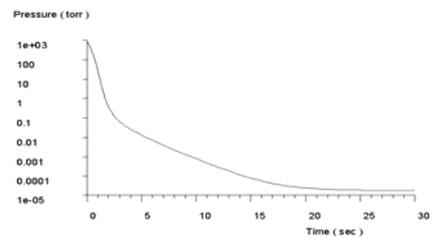
전산모사 결과로 표 3에 부스터펌프 종류에 따른 배기 시간과 도달압력을 나타내었다. 가장 배기시간이 짧고 도달압력이 낮은 모델은 EH4200이었다. 하지만, 모델별 배기 시간과 도달압력에는 큰 차이가 없는 것을 알 수 있다.

표 3. 부스터펌프 전산모사 결과

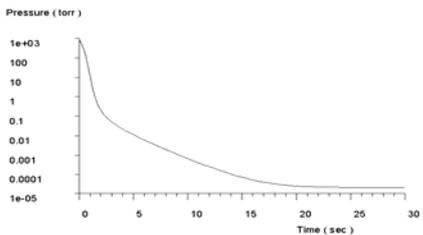
Booster Pump Model	Exhaust Time (sec)	Ultimate Vacuum (torr, total pressure, without gas ballast)
EH250	24	2.0×10^{-5}
EH500	23	2.0×10^{-5}
EH1200	21	2.3×10^{-5}
EH2600	21	1.8×10^{-5}
EH4200	20	1.7×10^{-5}



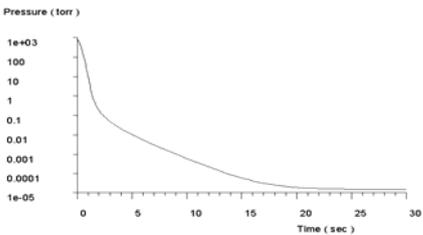
(a)



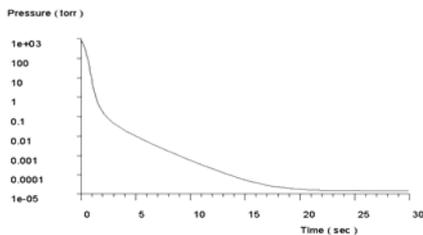
(b)



(c)



(d)



(e)

그림 4. 부스터펌프 전산모사 결과((a)EH250, (b)EH500, (c)EH1200, (d)EH2400, (e)EH4200)

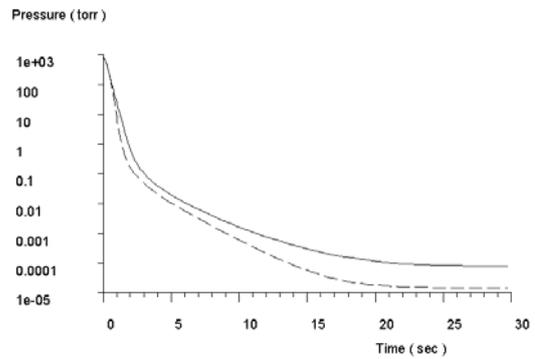


그림 5. 보조펌프 유무에 따른 전산모사 결과 (실선:E2M275, 점선 : E2M275+EH4200)

2.3. 부스터펌프 영향

E2M275 유회전펌프와 EH4200 부스터펌프를 선택하여, E2M275 유회전펌프에 EH4200 부스터펌프를 연결하지 않았을 때와 연결한 경우를 비교하여 시스템 진공특성에 대한 부스터펌프 영향을 알아보았다(그림 5).

전산모사 결과, 부스터펌프 없이 저진공펌프만을 통해 사양의 도달압력인 7.7×10^{-4} torr의 압력까지 도달하는데 소요된 시간이 12초인데 반해, EH4200 부스터펌프가 보조펌프로서 추가된 경우는 동일시간 동안 더 낮은 압력인 1.8×10^{-4} torr까지 도달하였고, 7.7×10^{-4} torr의 압력까지 도달하는데 소요된 시간은 5초로 짧았다. 이는 압력이 7.7×10^{-4} torr에서 1.8×10^{-4} torr로 낮아지는 동시에 배기시간이 절반이상 감소하였음을 나타낸다. 즉, 부스터 보조펌프 조합이 시스템 증진공도달 위해 효과적인 구성임을 전산모사를 통해 확인할 수 있었다.

III. 고진공시스템 모델링

3.1. 고진공 시스템 최적화 보조펌프

저진공·중진공영역은 하나의 펌프로도 도달할 수 있지만 고진공 이상은 저진공·중진공펌프와 고진공펌프 조합이 요구된다. 따라서 대표적인 고진공펌프인 유확산펌프와 터보분자펌프의 보조펌프로 요구되는 유회전펌프의 최적화 조합을 전산모사 하였다.

3.2. 유확산펌프 + 유회전펌프

(oil diffusion pump + oil rotary pump)

자체 배기능력이 없는 유확산펌프 고진공시스템에서 보조펌프(backing pump)로 사용되는 유회전펌프의 전산모사로 얻어진 최적 배기성능이 유확산펌프 조합에서도 유효

표 4. 모델링 유확산펌프 사양

Compression Ratio	10^7
Rate	60 ℓ/s
Warmup	600 sec
Stage	4
Backstream	5.8×10^{-5} gm/min

한지 전산모사로 평가되었다. 전산모사 고진공시스템 모델링은 2.1절의 시스템에 표 4 사양의 유확산펌프와 길이와 직경이 각 0.3m, 25.4mm인 직선형 도관과, 완전 개방 시 500mm^2 개구면의 진공밸브로 추가 구성되었다. 유확산 고진공시스템 모델링은 그림 6에 나타내었다.

그림 7은 동일 유확산펌프 고진공배기계에 EDWARDS사의 유회전펌프(SP2(Speedivac2)/ES 7500/E1M175/E2M275)를 보조펌프로 변수 모델링한 전산모사 결과이다. 앞서 VacSim^{Multi}의 신뢰성 확인 전산모사에 사용된 모델은 E1, E2 series 각 2종으로 이 모델들의 경우는 각각의 펌프만으로 구성된 진공시스템에서는 분명한 배기특성의 차이를 보였으나, 구성된 유확산 고진공시스템에서 E1, E2 series를 보조펌프로 변수 모델링한 예비 전산모사 결과 그 차이가 불분명하였다. 이에 유회전펌프를 SP2(Speedivac2),ES7500, E1M175,E2M275 모델로 변경하였다. 전산모사를 통한 보조펌프별로 고진공영역인 1.0×10^{-7} torr에 도달하는 배기시간을 비교해 보았다(표5).

표 5. 고진공영역(1.0×10^{-7} torr) 도달시간

Pump Model	Exhaust Time
SP2(Speedivac2)	3555 sec
ES7500	2276 sec
E1M175	3068 sec
E2M275	1412 sec

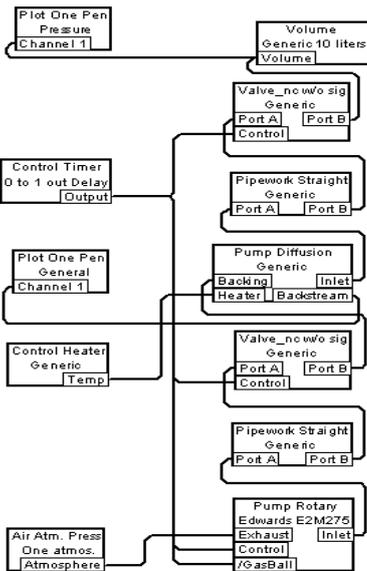


그림 6. 유확산 고진공시스템 전산모사 모식도

표 5로 알 수 있듯이 저진공배기계 전산모사에서 우수한 성능을 나타낸 E2M275 유회전펌프를 보조펌프로 사용한 경우가 SP2, ES7500, E1M275 유회전펌프에 비해 약 36분, 14분, 28분씩 배기시간이 단축되었음을 확인할 수 있다. 이는 저진공영역에서 우수한 배기계가 유확산펌프와 조합되어서도 동일하게 효과적인 배기기로 작동됨을 나타내고 있다. 또한 동일 유확산 고진공시스템에서 보조펌프 선택에 따라 시스템 공정시간이 약 23분(1412초)에서 59분(3555초)까지 변하는 것으로 나타나고 있다(그림7). 즉, 전산모사로 진공시스템의 진공특성에 대한 설계인자 영향이 예측되고 있다.

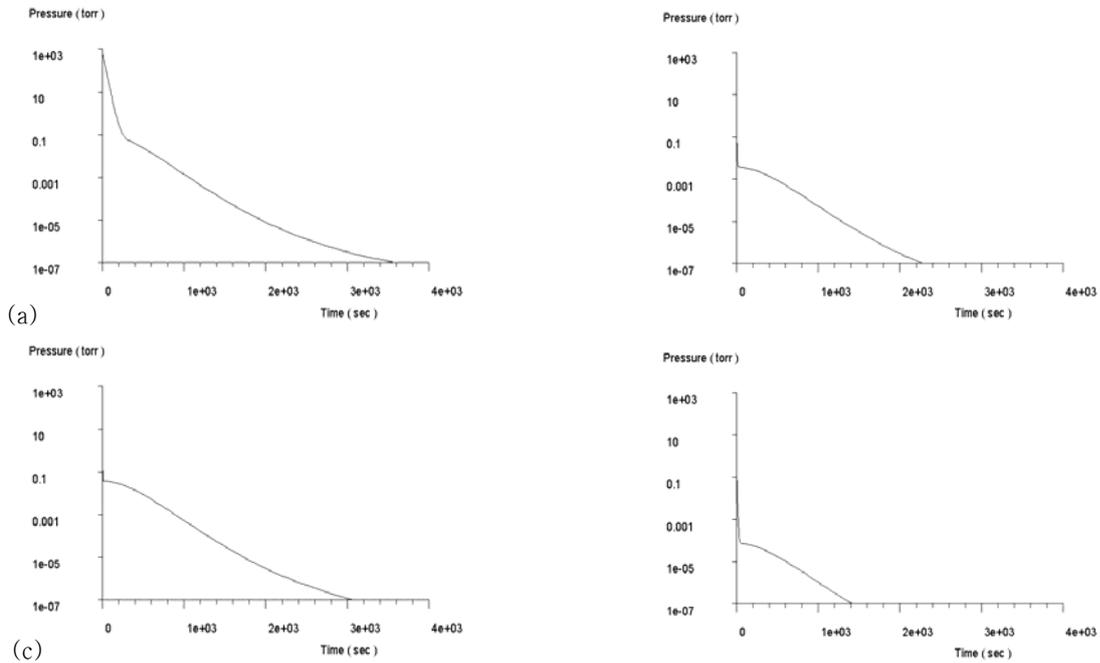


그림 7. 유확산 고진공시스템 전산모사 결과 ((a)SP2,(b)ES7500,(c)E1M175,(d)E2M275)

표 6. EXT70-DN63CF 터보분자펌프 사양

Model Name	EXT70-DN63CF
compression ratio	N ₂ > 1x10 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	< 3.8x10 ⁻¹⁰ torr
weight	3.4 kg

표 7. 고진공영역(1.0×10⁻⁷ torr) 도달시간

Pump Model	Exhaust Time
SP2(Speedivac2)	408 sec
ES7500	287 sec
E1M175	360 sec
E2M275	185 sec

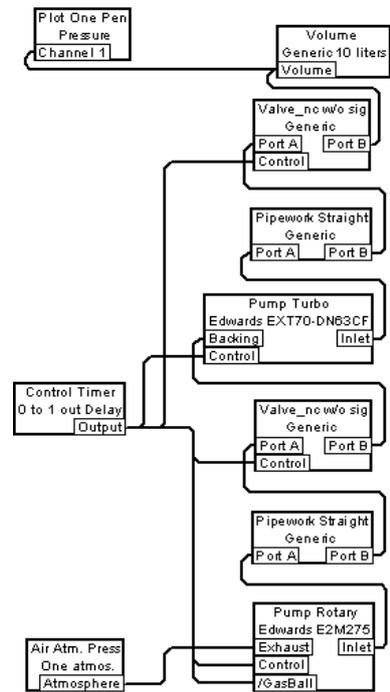


그림 8 터보분자펌프 전산모사 모식도

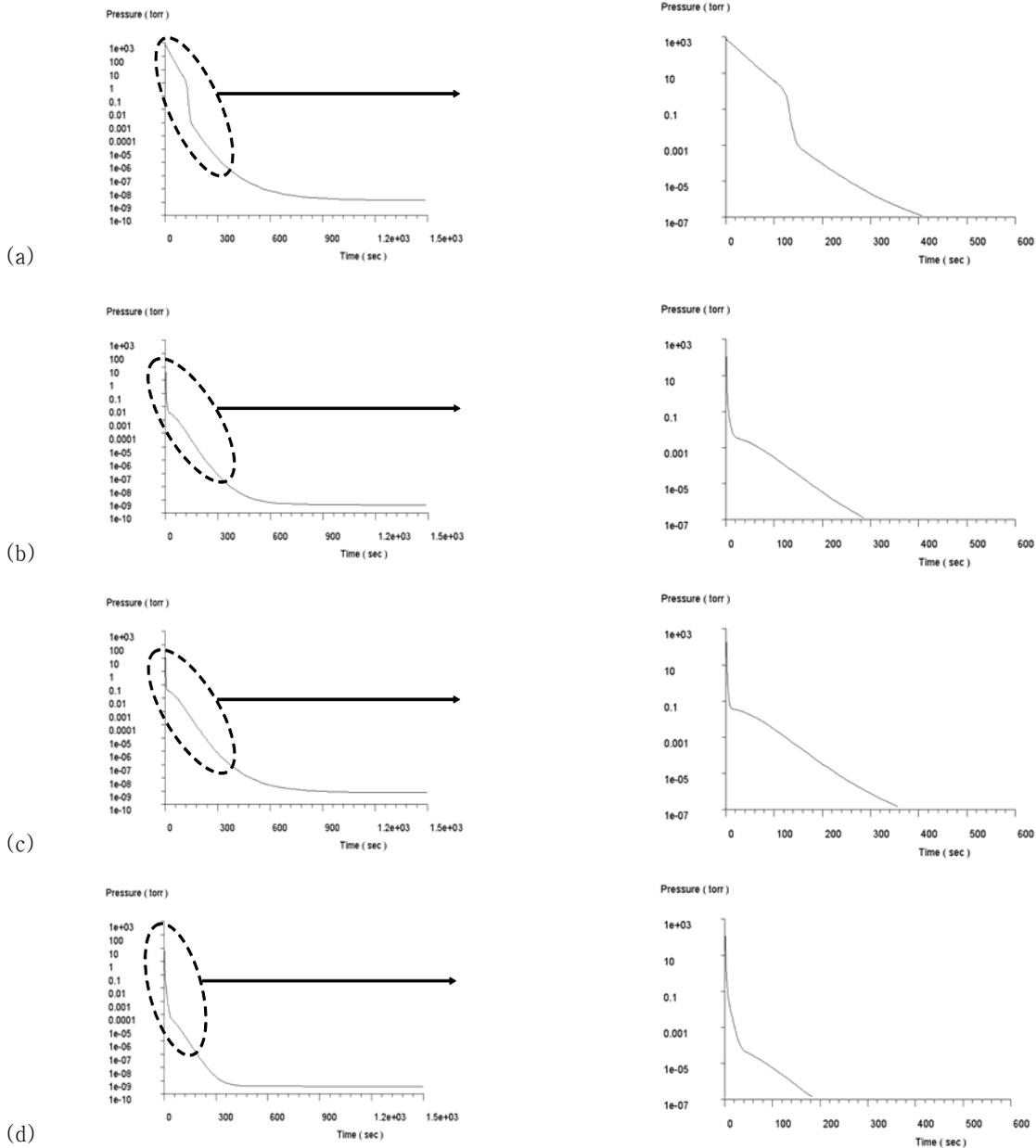


그림 9. 터보분자펌프 전산모사 결과 ((a)SP2,(b)ES7500,(c)E1M175,(d)E2M275)

3.3. 터보분자펌프 + 유회전펌프

(turbo molecular pump + oil rotary pump)

터보분자펌프 역시 유확산펌프와 동일하게 시스템을 구성하여 전산모사로 최적화 보조펌프를 평가하였다. 최적화 보조펌프 설계인자 도출에 앞서 VacSim^{Multi} 전산모사기 제공 터보분자펌프들의 전산모사로 EDWARDS사의 EXT70-DN63CF 모델을 도출하였다(표 6). 시스템 모델링은 그림 8과 같이 구성되어 전산모사 되었다(그림9).

유확산펌프와 동일하게 보조펌프인 유회전펌프의 종류에 따른 1.0×10^{-7} torr 도달시간을 표 7로 나타내었다. 유확산펌프와 마찬가지로 터보분자펌프에서도 E2M275를 보조펌프로 사용했을 때, 약 2~3분 이상 도달시간이 짧은 것을 확인할 수 있다. 또한 시스템 진공도도 E2M275 경우가 3.8×10^{-10} torr로 다른 모델보다 더 좋은 것을 알 수 있다. 터보분자펌프인 경우 유확산펌프에 비해 보조펌프 선택에 따른 공정시간 변이는 상대적으로 매우 적은 것으로 나타

나고 있다. 이는 펌프의 동작원리에 기인하는 것으로 연속 공정 진공시스템으로 터보분자펌프계가 선호됨을 보여주고 있다.

IV. 결 론

본 연구는 진공시스템 전산모사기인 VacSim^{Multi}를 이용하여 진공시스템 성능에 대한 설계인자 영향을 전산모사하였다. 진공시스템의 최적화 설계인자 도출을 위해서는 펌프조합 이외에도 진공조의 체적, 도관의 구조 직경 길이, 밸브의 종류 형태, 진공재료의 기체방출, 탈기체 등 여러 요소들을 고려해야 한다. 하지만 본 연구는 진공시스템 전산모사 기초연구로 진공펌프만을 변수로 하여 고진공시스템의 진공특성에 대한 펌프조합 영향을 비교하였다. 이는 진공시스템의 진공생성기구 중 주 기구인 펌핑계 설계인자의 영향을 평가하고자 했으며 또한 향후 여러 설계인자들의 전산모사 연구를 위한 가능성을 제시하고자 했다.

본 연구로 얻어진 결과는 첫째, 여러 배기특성을 갖는 EDWARDS사 저진공펌프의 전산모사 결과와 공개된 펌프 사양에 의한 배기거동이 근접하는 것을 통해 상업화 전산모사기인 VacSim^{Multi}의 응용성을 확인하였다. 둘째, 부스터펌프의 사용이 중진공영역 응용에 효과적인 것이 확인되었다. 셋째, 자체 배기능력이 없는 유확산펌프와 터보분

자펌프 배기계의 최적화 보조펌프 조합을 전산모사로 제시하였으며, 또한 유확산 및 터보분자펌프 배기계의 시스템 공정응용 특성도 확인되었다.

진공기술은 현재 넓은 산업분야에 응용되고 있으며 앞으로도 미세과학의 발전과 더불어 연구가 요구되고 있다. 향후에도 진공시스템 설계인자의 전산모사 연구는 관련 기술발전에 기여할 것으로 기대된다.

사 사

본 연구는 2006년도 인천대학교 교내 학술연구비지원에 의한 공모과제로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] 배석희 외 4인, 진공공학, (한국경제신문, 서울, 2000).
- [2] 김홍배 역, 진공의 기초, (전자자료사, 서울, 2004).
- [3] 황학인 역, 진공기술, (도서출판세화, 서울, 1995).
- [4] 주장현, 진공기술 실무, (홍릉과학출판사, 서울, 2001).
- [5] *User's Guide of VacSim^{Multi}*, (Technology Sources Ltd, 1999).

Simulation of Design Factor Effects on Performance of Vacuum System

Hyung-Taek Kim¹, Kwang-Pil Jeong¹

¹*Advanced Materials Major, Division of Advanced Materials and Safety Engineering,
College of Engineering, University of Incheon
177 Dowha-dong Nam-ku, Incheon 402-749*

(Received September 9 2007)

Effect of design factors on the performance of vacuum system was simulated for optimum design of system. In this investigation, the feasibility of modelling mechanism for VacSim^{Multi} simulator was proposed. Simulation results of pumping design factor showed the possibilities of simulation fore-study for the detailed design factors. Simulation of roughing pump presented the expected pumping behaviors based on the specifications of commercial pump. Application of booster pump exhibited the high pumping efficiency for middle vacuum range. Combinations of optimum backing pump for diffusion and turbo vacuum system were obtained. And, the characteristics of process application of both systems were also acquired.

Keywords : vacuum system, simulation, design factor, optimum design

* [E-mail] kim95118@incheon.ac.kr