

다단 원판형 드래그펌프의 배기 성능에 관한 실험적 연구

권명근 · 허중식 · 황영규†

성균관대학교 기계공학부
(논문접수일 : 2003년 6월 19일)

An Experimental Study on the Pumping Performance of the Multi-stage Disk-type Drag Pump

Myoung-Keun Kwon, Joong-Sik Heo† and Young-Kyu Hwang†

School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University
(Received June 19, 2003)

요 약

다단 원판형 드래그펌프의 배기특성을 출구측 압력변화에 따른 입구측의 압력을 측정함으로써 파악하였다. 압력측정범위는 유량이 없을 때 출구측에서 0.13~533 Pa로 하였다. 펌프 로터의 회전 속도는 24,000rpm이며, 질소 가스를 사용하여 유량에 대한 성능실험을 수행하였다. 본 연구에서는 원판의 단의 수에 따른 원판형 드래그 펌프의 성능을 측정하였다. 3단, 2단, 단단형으로 원판형 드래그펌프를 구성하여 성능 실험하였으며, 최대도달진공도, 최대압축비, 배기속도등을 각각 측정하여 상호 성능을 비교·고찰하였다.

주제어 : 최대도달 진공도, 압축비, 배기속도

Abstract

Experimental investigations are performed for the rarefied gas flows in a multi-stage disk-type drag pump. The pump considered in the present study consists of grooved rotors and stators. The flow-meter method is adopted to calculate the pumping speed. Compression ratios and pumping speeds for the nitrogen gas are measured under the outlet pressure range of 0.13~533 Pa. The present experimental data show the leak-limited value of the compression ratio in the molecular transition region. The rotational speed of the pump is 24,000rpm, and nitrogen is used as a test gas. The pumping characteristics of various drag pumps are performed. The inlet pressures are measured for various outlet pressures of the test pump. The ultimate pressures for zero throughput are measured for three-stage, two-stage and single-stage disk-type, respectively.

Key Words : Ultimate Pressure, Compression ratio, Pumping Speed

1. 서 론

과학기술의 고도화와 더불어 발전된 진공분야에 대한 연구는 항공우주산업과 반도체 산업의 급속한

성장으로 인하여 첨단 산업분야의 진공문제를 해결하는 과정에서 많이 발전을 하였다. 그 활용분야로는 반도체산업 및 제조업 분야등에서 터보형 드래그펌프(drag pump)의 활용이 매우 활발하게 사용되

† E-mail : ykhwang@yurim.skku.ac.kr

고 있는 실정이다.

최근에는 반도체산업 및 재료산업 분야에서 고 청정 및 대(大)유량이 요구되는 CVD(chemical vapor deposition), 이온 주입(ion implantation), 에칭(etching), 스퍼터링(sputtering)등의 작업공정에 터보형 드래그 펌프가 많이 이용되고 있다.

드래그펌프는 고속으로 회전하는 날개에 의하여 기체분자들이 매우 큰 운동량을 전달받아 연속적으로 진공공간으로부터 출구측으로 압축·배기되게 하는 펌프이다 [1]. 이러한 터보형 드래그펌프는 크게 Holweck 형태인 원통에 나선형 홈이 있는 헬리컬 드래그펌프와 Siegbahn 형태인 원판에 홈이 있는 원판형 드래그펌프로 구분된다 [2]. 터보형 드래그 펌프는 대유량에 적합할 뿐만 아니라 10^{-4} Pa(10^{-6} Torr) 정도의 고진공으로부터 대기압까지 한 대의 펌프로도 기체를 압축·배기 할 수 있다.

터보형 드래그펌프는 현재 세계적인 반도체 수요의 증가와 국내 반도체 제조업의 성장에 따라 엄청난 양의 수요 증가가 발생하고 있는 실정이다. 국내의 대용량 드래그펌프 시장의 경우 전량 수입에 의존하고 있으며 국산화는 전혀 이루어지지 않고 있다. 하지만 터보형 드래그펌프에 있어서는 아직은 세계 시장의 상황도 초기단계에 있으며, 현재 국내의 기술수준으로도 충분한 경쟁력이 있다고 판단되므로 그러한 의미에서 본 연구의 의의는 크다고 하겠다.

원판형 드래그펌프에 대하여 Shi등 [3]은 이론적 및 실험적으로 성능특성을 파악하였다. Heo와 Hwang [4]은 DSMC(direct simulation Monte Carlo)법을 이용하여 분자천이영역에서의 원판형 드래그펌프에 대한 성능해석을 수치해석적으로 수행하였다.

본 연구에서는 기존 연구에서 연구 되어진 윗면에만 채널이 있는 로터(one-side channel disk-type rotor; OSC)와 스테이터(stator)가 각각 단단(單段)으로 구성된 원판형 드래그펌프의 성능해석결과를 [5,6] 바탕으로 위아래 양쪽면에 채널이 형성되어 있는 로터(both-side channel disk-type rotor; BSC)와 평판형 스테이터를 단단 및 이단(二段)으로 구성된 드래그펌프와 BSC 로터 2단과 OSC 로터 1단이 결합된 3단 원판형 드래그펌프의 단의 수에 따른 성능을 실험적으로 비교·고찰하였다.

기존의 연구에서는 헬리컬 드래그펌프와 [7] 단단OSC 드래그펌프를 수치해석 및 실험적으로 배기 특성을 연구하였다. [6,8] 본 연구에서는 기존의 수행되어왔던 실험조건에 일정한 진공 공간을 갖는 챔버를 구성하여 실험을 수행하여 성능을 해석하였다.

본 연구에서는 2단 원판형(BSC+BSC), 단단 원판형(OSC [5], BSC) 두 가지 형태와 3단 원판형(BSC+BSC+OSC)등의 진공펌프의 성능을 비교하였다. 펌프의 성능으로 최대도달진공도, 최대압축비,유량 변화에 따른 입구압력변화, 배기속도(pumping speed) 등을 측정하여 다단 원판형 드래그펌프의 성능을 고찰하였다.

2. 실험 방법 및 실험 장치

2.1 실험 장치

본 연구에서 사용된 실험장치의 구성은 Fig. 1, 2에서 보이는 것과 같이 장치를 구성하였다. 장치 구성에는 원판형 드래그펌프와 진공압력 측정용 진공 게이지, 후단펌프, 가스(N₂)유량 측정을 위한 유량계(MFC), 펌프부에는 24,000rpm으로 회전하는 모터부분을 제어하기 위한 주파수 변환기를 두어 실험을 수행하였다. 그리고 원판형 드래그펌프 입구측과 출구측에 각각 피라니 게이지를 설치하였으며, 입구측(챔버)압력이 고진공인 경우에는 이온게이지를 이용하여 압력을 측정하였다.

후단펌프로는 2단 로터리펌프(rotary vane pump)를 사용하였다. 그리고, 출구압력의 조절을 위하여

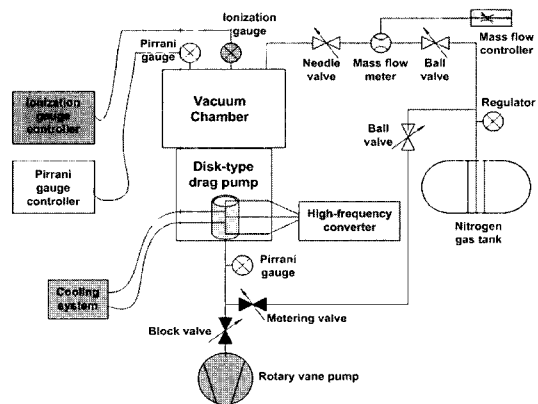


Fig. 1. Schematic diagram of the experimental apparatus.



Fig. 2. Photograph of experimental apparatus.

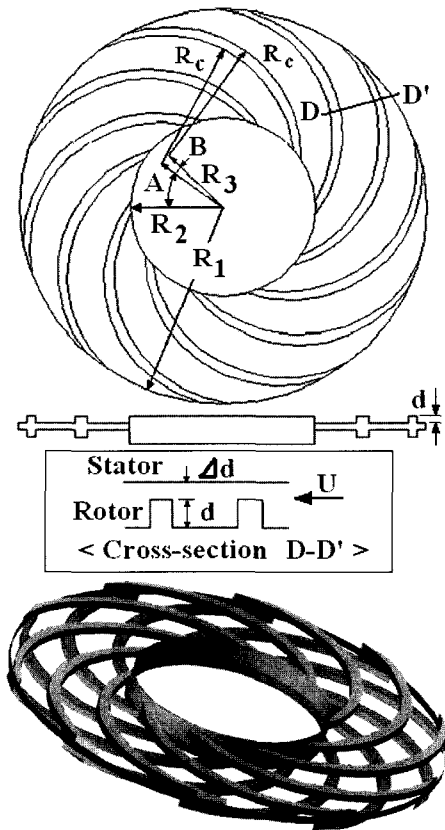


Fig. 3. Geometry of a BSC rotor.

드래그펌프의 출구측에 Fig. 1에서 보는 것과 같이 미터링 밸브를 설치하여 출구측의 압력조절이 용이하도록 하였다. 질소 가스탱크로부터 질소 가스를 미터링 밸브쪽으로 유입시켜 출구압력을 조절하도록 하였다. 그리고 실험용 드래그펌프는 로터리 펌

프의 안정적인 작동을 위해서 지나친 과열과 냉각을 막는 적절한 냉각 시스템이 필요하여 물을 이용한 수냉식 냉각방법을 채택하여 실험을 수행하였다.

원판형 드래그펌프 로터(BSC)의 기하학적인 형상을 Fig. 3에 나타내었다. 2단 원판형 드래그펌프의 경우 Fig. 4에서와 같이 양쪽 면에 채널이 형성된 BSC형 로터 2단만 사용하여 성능실험을 수행하였고, 3단 원판형 드래그 펌프의 경우는 Fig. 4에서 보는 것과 같이 아래 두 개의 단은 BSC형 로터를 나머지 한 단은 윗면에만 채널이 형성된 OSC형 로터를 사용하여 3단을 구성하여 실험을 수행하였다. 회전하는 로터의 상·하부에는 스테이터가 구성되어 있으며, 스테이터와 로터사이의 간극은 각각 0.5mm로 하였으며, 자세한 기하학적 치수는 Table I에 나타내었다. 스테이터는 펌프의 케이싱 내측의 스페이서링(spacer ring)에 의해 고정되게 하였으며, 이를 Fig. 4에 나타내었다.

2.2 실험 방법

드래그펌프는 출구압력이 1000Pa 가까이 되면 열발생이 매우 커지게 됨을 관찰하였으며, 본 연구에서는 압력범위를 0.13~533Pa로 제한하여 실험을 수행하였다.

실험은 먼저 후단 펌프(oil rotary pump)를 가동시켜 펌프내부의 압력이 드래그펌프가 작동할 수 있는 조건이 되도록 충분히 배기를 한다. 작동요구조건에 맞는 0.1Pa이하의 진공도가 유지되면 드래그 펌프 및 펌프에 부착된 냉각시스템을 구동시킨다.

Table I. Geometrical parameter of a disk-type rotor.

outer radius	R_1	86 mm
inner radius	R_2	39 mm
clearance	Δd	0.5 mm
depth of channel (BSC)	d	3 mm
depth of channel (OSC)		5 mm
angle of channel inlet	A	36°
angle of channel wall	B	8°
radius of channel	R_c	56mm
radius of channel center	R_3	32mm

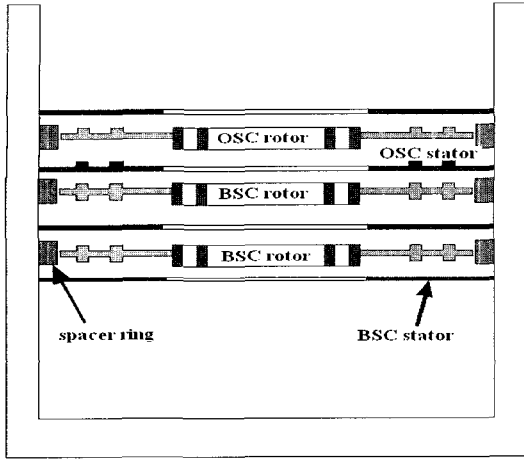


Fig. 4. Schematic diagram of the three-stage disk-type drag pump.

시스템이 정상적인 작동온도와 일정한 압력이 얻어지면 테스트용 가스(N₂)를 주입한다.

본 연구에서는 테스트 기체를 질소(N₂)사용하였으며, 유입기체의 유량조절은 유량계(MFC)와 리크 밸브(variable leak valve)을 이용하여 제어하였다. 출구압력은 미터링 밸브를 이용하여 조절하였으며, 요구하는 압력에 도달하였을 경우 출구압력변화에 따른 입구압력변화 등을 측정하여 원하는 실험결과를 얻을 수 있었고, 최종적으로 배기속도를 측정하여 원판형 드래그 펌프의 성능을 종합적으로 파악하여 보았다.

3. 성능실험 결과 및 고찰

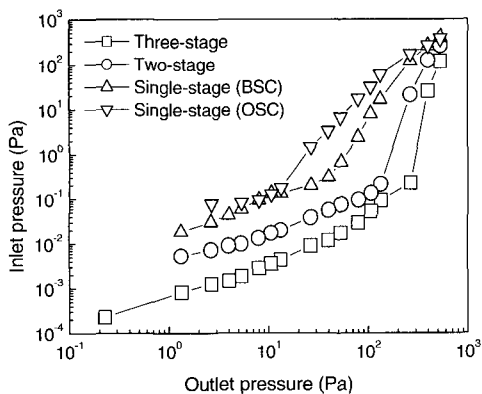


Fig. 5. Comparison of inlet pressure of the vacuum pumps at zero throughput.

본 연구에서는 원판형 드래그펌프의 단의 수에 따른 배기특성을 실험적으로 고찰해보았다. 로터와 스테이터를 직접제작하여 성능실험을 수행하였으며, 펌프의 최대압축비, 유량변화에 따른 입구압력 변화, 배기속도 등의 측정을 하여 기존의 연구결과와 비교·고찰함으로써 펌프의 성능을 실험적으로 해석하여 보았다.

3.1 유량이 없을 때의 성능고찰

유량이 없을 때(OSCCM) 단의 수가 많아질 수록 출구압력변화에 따른 입구압력이 전구간에서 낮음을 Fig. 5에 나타내고 있다. 출구압력이 533Pa에서 267Pa사이의 구간에서는 입구압력이 대부분 급격히 낮아지고 있으며, 출구압력이 267Pa이하의 구간에서는 3단, 2단 및 단단(BSC)로 구성된 원판형 드래그펌프의 입구압력이 선형적으로 낮아지고 있다. 특히, 3단원판형 드래그 펌프의 경우 출구측압력이 0.23Pa 일 때 입구측(즉, 챔버 내부)의 압력이 약 2.3×10^{-4} Pa의 최대도달진공도를 나타내고 있다. 이 최대도달진공도는 펌핑을 72시간정도 연속적으로 펌핑을 실시하였을때 나온 결과 값이다.

유량이 없을 때 출구압력변화에 따른 압축비를 Fig. 6에서 나타내고 있다. 출구압력이 40Pa 일 때 3400정도로 단의 수가 가장 많은 3단 원판형 드래그펌프의 압축비가 가장 높았다. 그리고 원판의 단의 수가 많아질수록 압축비가 일정해지는 경향을 확인 할 수가 있는데 2단과 3단으로 구성된 경우 출구압력이 5~53Pa에서는 일정한 압축비의 성능을 보이고 있다.

이는 앞서 로터의 기하학적인 치수를 설명한 Table. 1을 보면 알 수 있듯이 3단 원판형 드래그펌프의 경우 맨 위 상단의 OSC로터는 채널의 깊이를 5mm로 하여 유량을 잘 펌핑할 수 있도록 설계 하였으며, 아래 두 개의 BSC로터는 압축효과를 높이기 위하여 채널의 깊이를 상부의 단보다 2mm 낮게 하여 3mm로 구성하였다. 이는 각각의 원판형 로터의 역할을 효율적으로 분산시켜 높은 압축능력과 일정한 압축일을 할 수 있게 된다. 이는 단이 증가할 수록 대기압 근방에서부터 높은 압축일을 할 수 있다는 것을 입증하는 것이다. 즉, 단의 수가 3단 이상의 4단으로 구성되어져 있었다면 일정하고 더

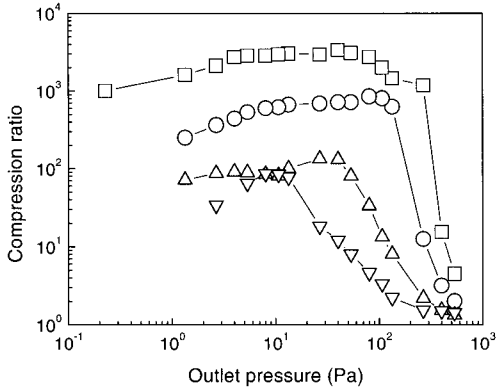


Fig. 6. Comparison of compression ratio of the vacuum pumps at zero throughput.

안정된 압축비를 나타내게 되었을 것이다.

3.2 유량변화에 따른 성능고찰

먼저, 유량이 66SCCM 일 때 출구압력변화에 따른 입구압력의 변화는 Fig. 7에 나타내고 있는데, 267~533Pa구간에서는 Fig. 5의 결과처럼 아주 급격하게 입구압력이 낮아지고 있지는 않지만, 단의 수가 증가할 수록 입구압력이 낮아지는 정도가 급격히 낮아지고 있음을 확인할 수 있다. 출구압력이 133Pa이하에서는 단의 수가 많아도 드래그펌프 자체의 성능한계 때문에 더 이상의 입구압력의 변화가 없음을 확인할 수 있다.

출구압력변화에 따른 압축비를 비교해보면 Fig. 8에서 보는 것과 같이 단의 수가 증가할수록 압축

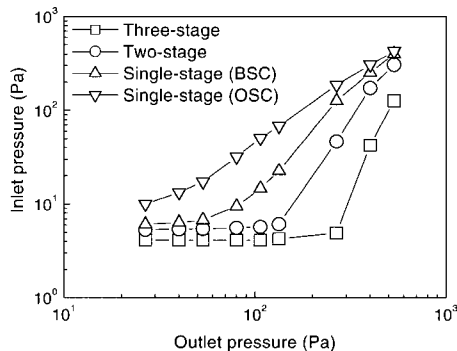


Fig. 7. Comparison of inlet pressure of the vacuum pumps at 66 SCCM.

비가 높게 증가하고 있다.

그리고 유량을 135SCCM으로 증가시켰을 때 출구압력에 변화에 따른 입구압력의 변화를 Fig. 9에 나타내었으며, 출구측압력이 133~533Pa에서는 Fig. 7에서 본 것과 같이 어느 정도의 급격한 기울기를 가지는 성능을 보이고 있다. 2단과 3단 역시 133Pa 이하에서는 더 이상 압력이 낮아지지 않고 있음을 확인할 수 있는데 그것은 펌프자체의 성능한계 때문인 것으로 판단 되어진다.

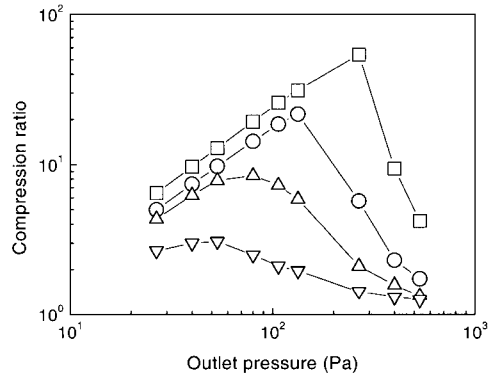


Fig. 8. Comparison of compression ratio of the vacuum pumps at 66 SCCM.

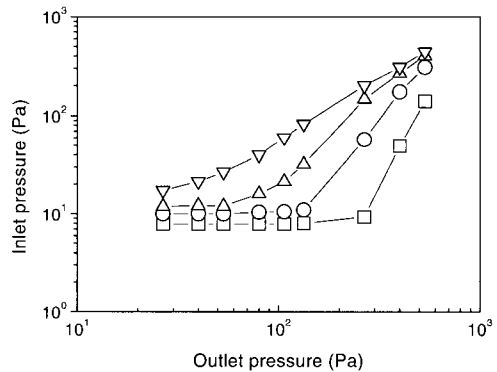


Fig. 9 Comparison of inlet pressure of the vacuum pumps at 135 SCCM.

유량이 135SCCM일때 출구압력변화에 따른 압축비를 Fig. 10에 나타내었으며, 유량이 66SCCM에서 135SCCM으로 약 두배 증가되면 압축비는 모든 영역에서 2분의 1로 감소함을 앞서 제시한 결과 그래

프 Fig. 8과 비교해보면 쉽게 이해할 수 있다. 역시 단이 한개로 되어 있는 단단 형의 경우는 유량이 증가함에 따라 가장 높은 압축비가 2~5정도 밖에 되지 않지만, 2, 3단의 다단형의 경우는 가장 높은 압축비가 10~30정도의 비교적 높은 압축비를 보이고 있다.

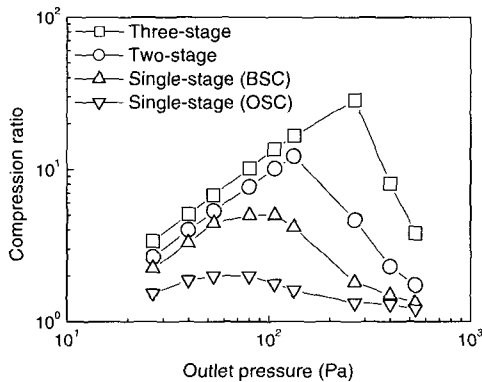


Fig. 10. Comparison of compression ratio of the vacuum pumps at 135 SCCM.

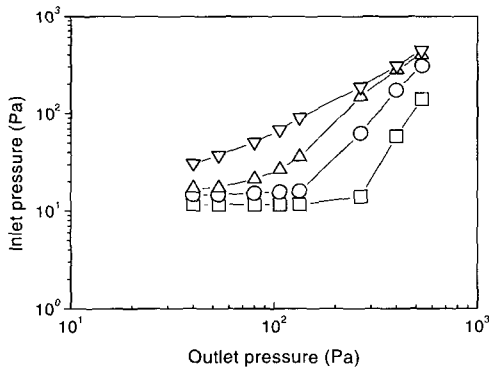


Fig. 11. Comparison of inlet pressure of the vacuum pumps at 200 SCCM.

유량을 200SCCM으로 하였을때는 Fig. 11에서 보는 것과 같이 단단형인 OSC는 거의 펌핑이 이루어지지 않고 있다(Fig. 12 참조). 그리고 BSC의 단단형과 2단형의 경우 OSC보다는 같은 출구압력에서 더높은 진공도를 보이고 있다. 3단의 경우는 출구압력이 267Pa이하에서는 다른 펌프들보다 가장 높은 진공도를 보이고 있다.

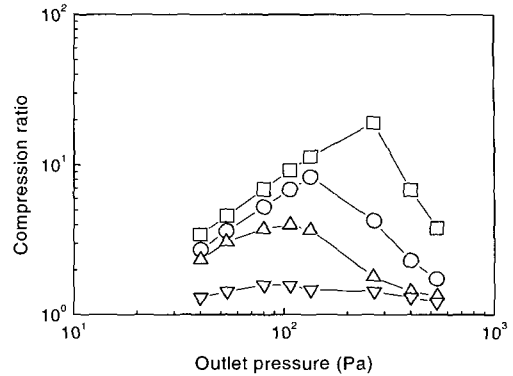


Fig. 12. Comparison of compression ratio of the vacuum pumps at 200 SCCM.

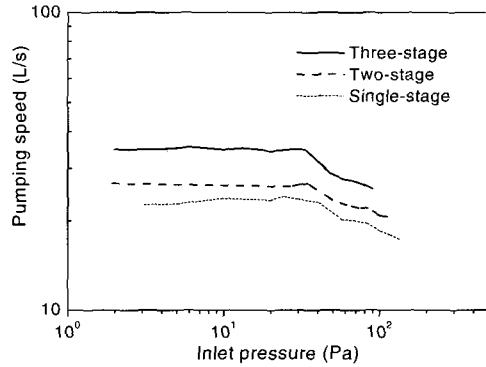


Fig. 13. Pumping speed vs inlet pressure.

다단(3단) 원판형 드래그펌프의 경우 단의 수가 적은 드래그펌프들과 비교할 때 가장 높았던 압축비는 2단 의 경우 보다는 2배, 두 가지 단단형인 BSC 보다는 5배, OSC 보다는 10배 많은 압축능력을 보이고 있다(Fig. 12 참조). 그리고 가장 높은 압축비가 나오는 범위가 단이 증가 할수록 출구압력 높은 범위에서 이루어지고 있다. 이것은 대기압 근방에서부터 높은 압축일을 하기 위해서는 단의 수의 증가해야 된다는 것을 나타내는 것이다.

3.3 배기속도 성능

배기속도는 Fig. 13에서 보는 것과 같이 3단 원판형 드래그 펌프의 경우 입구압력이 낮아질수록, 특히 입구압력이 40Pa이하에서는 약 35L/s의 일정하고 안정된 배기성능을 보이고 있다. 그리고 2단 원

판형 드래그 펌프의 배기속도를 살펴보면 약 25 L/s 배기속도를 갖고 있는데, 입구압력이 낮아짐에 따라 불안정한 배기속도를 갖는 곡선을 보이고 있다. 단단(BSC) 원판형 드래그펌프의 경우에는 약 20 L/s의 배기속도를 보이고 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 원판형 드래그펌프에 있어서 원판의 단의 수에 따른 다단 원판형 드래그펌프의 성능을 실험적으로 비교·고찰 할 수 있었다. 원판형 드래그펌프의 경우 단의 수가 증가함에 따라 드래그펌프의 성능이 향상되는 것과 안정된 배기성능이 나타나는 것을 실험 결과를 통하여 확인할 수가 있었다. 그리고 각각의 로터의 역할에 따라 펌프성능을 좌우하고 있음을 확인할 수 있었다.

최종적으로 펌프의 배기능력을 한 눈으로 볼 수 있는 펌프의 성능은 배기속도이다. 이 배기속도의 경우 3단으로 구성된 경우가 2단으로 구성된 경우보다는 성능면에서 상당히 안정된 배기성능을 보여 주었으며, 향후 3단을 모두 BSC형태의 원판형 로터를 사용하였을 때와 4단 이상으로 구성하였을 때 단의 수에 따른 원판형 드래그 펌프의 배기특성을 미리 파악할 수 있는 실험적 기초 자료를 얻을 수 있었다. 단이 많을수록 압축성능이 안정적으로 이루어지고 있으며, 고유량과 고배기성능을 갖는 원판형 드래그펌프가 되기 위해서는 단의 수가 많아 야 되며, 각각의 로터의 채널 깊이에 대한 더 많은 연구와 회전자(rotor)와 고정자(stator) 및 펌프내부의 케이싱과의 간극(clearance)도 펌핑 성능에 주요한 인자이며, 회전자의 회전속도에 따른 펌핑 성능영향에 대해서도 지속적인 연구가 이루어 져야 할 것이다.

향후 더 정확한 시험결과 값을 얻기 위하여 압력 측정기의 감도 보정이나, 기저압력에 대한 절대압력값 보정을 통하여 정확한 성능값에 대한 연구와 펌프성능에 영향을 미치는 여러 가지 인자들에 대해서도 구체적인 연구가 지속적으로 진행되어져야 한다고 사료된다.

후 기

이 논문은 2002년도 한국학술진흥재단 지원에 의하여 연구되었음 (KRF-200-041-D00098).

참 고 문 헌

- [1] M. H. Hablanian, In *Vacuum Science and Technology: Pioneers of 20th Century*, edited by P. A. Redhead (AIP, New York, 1994), pp.126-132.
- [2] M. H. Hablanian, *High Vacuum Technology, A Practice Guide* (Marcel Dekker, Inc, 1990).
- [3] L. Shi, X. Z. Wang, Y. Zhu, and S. J. Pang, *J. Vac. Sci. Technol. A* **11**, 426 (1993).
- [4] J. S. Heo and Y. K. Hwang, *J. Vac. Sci. Technol. A* **18**, 1025 (2000).
- [5] J. S. Heo and Y. K. Hwang, *J. Vac. Sci. Technol. A* **19**, 656 (2001).
- [6] 황영규, 허중식, 최욱진, 대한기계학회논문집 B **24**, 860 (2000).
- [7] 허중식, 우남섭, 황영규, 김윤제, 대한기계학회 논문집 B **23**, 1614 (1999).
- [8] 허중식, 황영규, 박종운, 한국진공학회지 **8**, 83 (1999).