

벌집형 셀 구조를 가지는 스퍼터 이온펌프의 성능 분석

하태균¹ · 안병남² · 이득진² · 김진곤² · 정석민^{1*}

¹포항공과대학교, 포항 790-784

²주식회사 브이엠티, 포항 790-320

(논문접수일 : 2006년 1월 11일)

벌집형 양극 셀 구조를 가지는 스퍼터 이온펌프를 제작하여 그 성능을 측정하고 기존의 원통형 구조와 비교하였다. 원통형 구조는 원통과 원통 사이에 기체의 이온화에 크게 기여하지 못하는 공간(dead space)이 전체의 10 % 정도 존재하는데, 벌집형 구조에서는 이러한 공간이 없으므로 이론적으로는 배기성능 또한 최대 10 % 정도 향상될 것으로 예측된다. 이러한 점에 착안하여 본 연구에서는 원통형 및 벌집형 셀 구조의 스퍼터 이온펌프를 제작하여 배기성능을 측정하여 서로 비교하였다. 그 결과 벌집형 구조가 원통형 구조에 비해 압력 구간에 따라서 5 % ~ 11 % 정도 배기속도가 높은 것으로 나타났다.

주제어 : 스퍼터 이온펌프, 배기속도, 페닝방전, 벌집형 구조.

1. 서 론

스퍼터 이온펌프는 1958년 Hall[1]에 의해 상업적으로 성공한 진공펌프로 개발되었다. 그 후에 다양한 측면에서 성능이 발전하여 최근에는 터보분자펌프 및 크라이오 펌프와 더불어 초고진공 영역에서의 대표적인 진공펌프로 널리 사용되고 있다. 스퍼터 이온펌프는 터보분자펌프와는 달리 외부와 완전하게 차단되는 진공 시스템을 구축할 수 있어서 안전하고, 기계적인 진동이 전혀 없으므로 원자현미경(STM)이나 분사선 에피택시(MBE) 등 정밀성을 요구하는 실험에도 적합하다. 또한 비교적 간단한 전자기적 원리에 의해 작동하므로 구동부나 복잡한 기계적 장치가 필요 없고 전력 소모량도 적다. 이러한 장점에도 불구하고 불활성 기체에 대한 배기능력이 현저히 떨어지고, 압력이 낮아질수록 배기성능이 함께 감소하여 최종도달진공도(ultimate pressure)에서는 결국 배기속도가 0에 가까워진다는 단점이 있다.

압력이 낮아짐에 따라서 배기속도가 감소하는 특성은 스퍼터 이온펌프 고유의 작동 원리에서 기인한다. 일반적으로 (2극형) 스퍼터 이온펌프는 두 개의 음극판 사이에 수십 개의 원통형 양극 셀들이 위치하고 있으며 축 방향으로 자기장이 형성되어 있다. 양극에 수천

볼트의 고전압을 인가하면 각각의 셀 내부에서는 전자 구름이 형성되면서 페닝방전이 일어나고 기체들은 이온화되어 고에너지로 음극판을 두드린다. 음극판은 주로 티타늄 등의 활성물질로 이루어져 있는데 이들 입자가 충돌로 인해 스퍼터링 되면 셀 내부의 벽면에 깨끗한 활성 증착막이 형성된다. 펌프 내부로 유입된 기체 분자들은 이 증착 막에 달라붙어 화학결합하거나, 전자와 충돌하여 이온화된 후 고에너지로 음극판에 파묻히며 공간으로부터 배기된다. 그런데 압력이 낮아질수록 기체의 이온화 과정과 이온의 음극 입사 시에 나오는 2차 방출 전자에 의해 형성 또는 유지되는 페닝방전의 세기가 약해지므로, 셀 내부로 유입된 기체 입자들이 이온화 될 확률이 낮아져 배기속도가 감소하는 것이다. 이러한 구조적인 특성에도 불구하고 이온펌프를 사용하여 보다 높은 진공도를 얻기 위해서는 낮은 압력에서 배기성능을 향상하기 위한 방법이 모색되어야 한다.

같은 압력에서 더 많은 기체 입자를 이온화하기 위해서는 인가하는 전압 및 자기장의 세기 뿐만 아니라 셀의 기하학적인 구조 또한 최적 조건으로 결정되어야 한다. 스퍼터 이온펌프의 제작에 있어서 전압과 자기장의 세기는 경제적 제약을 받으므로 가변적인 요소가 적다. 따라서 적당한 세기의 전자기장에 대해 셀의 길

* [전자우편] smc@postech.ac.kr

이나 지름 등 기하학적인 요소를 최적화하는 연구가 다수 수행되었으나[2-5], 양극 셀의 모양이 원통형에만 국한되고 다른 형태의 구체적인 배기 특성에 관한 연구는 없었다. 이에 본 연구에서는 벌집형 셀 구조를 가지는 스퍼터 이온펌프의 특성을 예측하고, 그 배기속도를 측정하여 기존의 원통형 셀 구조와 비교하였다.

II. 실험방법

배기속도는 기체의 유량을 펌프 입구에서의 압력으로 나눈 값으로 정의된다. 이를 측정하는 방법으로는 유량법과 오리피스법이 있는데[6], 여기서는 그림 1의 실험 장치와 같이 유량계(flowmeter) 없이 진공게이지만으로 배기속도의 측정이 가능한 오리피스 법을 선택하였다. 애벌배기를 위해 60 l/s 터보분자펌프와 다이어프램 펌프를 사용하였고, 지름이 8 mm인 오리피스를 기준으로 아래, 위쪽 진공 용기에 각각 Granville-Phillips 사의 B-A 게이지(275)를 설치하였다. 측정 기체로는 고순도 질소 가스를 사용하였고 측정 장치에 주입되었을 때의 순도를 측정하기 위해 Balzers 사의 RGA(QMS200)를 위쪽 진공 용기에 설치하였다. 스퍼터 이온펌프 컨트롤러는 출력 전압이 6100 V인 Physical Electronics의 DIGITEL 500 모델을 사용하였다. 또한 장착된 자석의 자기장은 최대 1500 G의 세기를 가진다. 실험에 사용된 셀 모듈은 그림 2와 같이 33개의 셀로 이루어진 원통형 및 벌집형 구조로 제작하였으며, 셀 하나 당 지름(또는 내접 원의

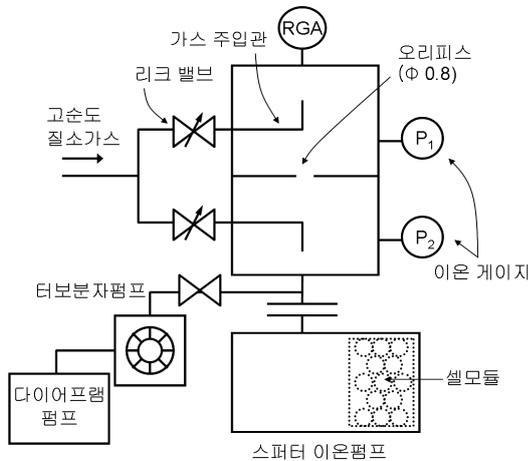


그림 1. 오리피스 방법에 의한 스퍼터 이온펌프의 배기속도 측정 장치 개요도.

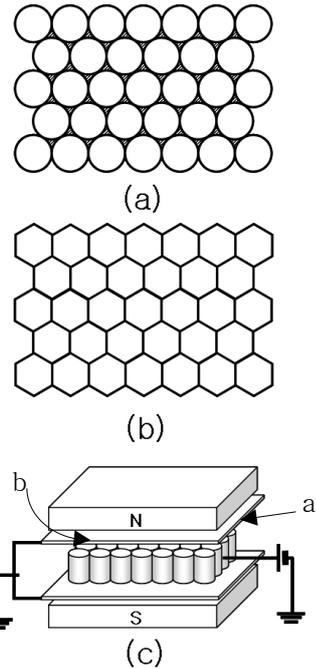


그림 2. 원통형 구조의 양극 셀 (a) 및 벌집형 구조의 양극 셀 (b)의 개요도와 셀모듈의 전체적인 구조도 (c). 원통형 구조에서는 전체의 10% 정도에 해당하는 dead space (빋금 친 영역)가 존재함.

지름)과 길이는 각각 18 mm 와 22 mm로 같게 하였다. 이렇게 제작된 셀 모듈은 배기속도 측정을 위해 그림 1처럼 입구 지름이 6 "인 스퍼터 이온펌프 용기 내부에 번갈아가며 장착되었다. 또한 그림 1에는 표시되지 않았지만 측정용기와 이온펌프에 각각 온도센서를 설치하였다.

배기속도의 측정과정은 기본적으로 AVS의 측정권고안[6]을 따랐으나, 배기성능의 상대비교라는 본 실험의 목적에 반하지 않는 범위 내에서 일부 변경된 방법을 사용하였다. 구체적인 실험과정은 다음과 같다. 먼저 벌집형 셀 모듈을 장착하고 난 후 전체 시스템을 150 °C에서 가열탈기체 처리를 하였다. 24시간 후 온도를 낮추면서 이온펌프를 작동시키고 터보분자펌프 쪽 밸브를 차단하여 이온펌프 단독으로 배기를 시작하였다. 아래쪽 리크밸브를 조절하여 질소 주입량을 늘리면서 P_1 과 P_2 를 측정하여 두 진공게이지를 미리 교정하였다. 이후 포화 과정을 거치는데, 이온펌프의 포화 조건은 최대배기속도 S_n 에 대해 $0.03 \cdot S_n$ Torr ℓ 로서[6], 실험에 적용 시에는 1×10^{-6} Torr에서 약 10 시간 정도 측정 기체를 배기하면 충분히 포화된다고 보지만[7], 벌집형 구조에 대해 이렇게 측정한 결과 각각의 측정

표 1. 최종도달진공도 측정값.

	P_{01} (Torr)	P_{02} (Torr)
원통형 구조	2.5×10^{-9}	1.7×10^{-9}
벌집형 구조	8.1×10^{-9}	6.9×10^{-9}

압력에서 배기속도가 시간에 따라 감소하는 경향을 보이므로 충분한 포화가 이루어지지 않았다고 판단하여, 다시 10^{-5} Torr ~ 10^{-4} Torr의 높은 압력에서 24시간 이상 포화 과정을 거쳤다. 이온펌프가 포화된 후 리크 밸브를 잠그고 압력을 낮추어 최종도달진공도(P_{01} , P_{02})를 측정하였다. 첫 번째 포화 이후 최종도달진공도(P_{02})는 1.2×10^{-9} Torr이었으나 두 번째 포화 후에는 6.9×10^{-9} Torr로 측정되었다. 이 상태에서 위쪽 리크밸브를 조절하여 압력을 변화시키면서 오리피스 양쪽의 압력인 P_1 과 P_2 를 각각 측정하였다.

측정이 완료된 후 원통형 셀 모듈로 교체하여 다시 같은 방법으로 측정하였다. 이때 벌집형 구조의 포화 시간이 과도하게 길었다고 보고, 원통형 셀에 대해서는 10^{-5} Torr에서 10^{-4} Torr의 압력에서 10 시간 정도로 포화시켰다. 최종 도달진공도는 1.7×10^{-9} Torr이다.

오리피스법에 의한 배기속도의 계산방법은 다음의 식 (1)과 같다.

$$S_i = C \left(\frac{K_i(P_1 - P_{01})}{P_2 - P_{02}} - 1 \right) \quad [l/s], \quad (1)$$

여기서 S_i 와 K_i 는 각각 압력 i 에서의 배기속도와 교정상수이고 C 는 오리피스의 컨덕턴스를 나타낸다. P_1 및 P_2 는 위쪽 리크밸브를 열면서 측정한 압력 값이다. 교정상수는 아래쪽 관으로 기체를 주입시켰을 때의 평형압력 P_{1i} 및 P_{2i} 에 대해서 $K_i = P_{2i} / P_{1i}$ 로 계산되고, C 는 오리피스의 면적 및 통과하는 기체의 질량과 온도에 의해 결정된다.

III. 결과 및 고찰

배기속도를 계산하기 위한 상수 값들은 다음과 같이 결정되었다. 게이지 교정을 위해 미리 평형 상태의 모든 측정 압력 범위에서 두 진공 게이지가 같은 값을 가

지도록 컨트롤러의 감도 값을 조정하였으므로 교정상수 K_i 는 압력에 상관없이 1이다. 실내 온도는 22 ± 1 °C로 유지되었으나 두 개의 이온게이지 필라멘트에서 발생하는 열에 의해 진공용기 전체의 온도가 상승하여 용기 온도는 30 °C로 측정되었다. 오리피스를 통과하는 기체들은 시스템에 주입된 이후 용기 내벽에 끊임 없이 충돌하면서 진공용기와 온도의 평형을 이루므로 그 온도를 30 °C로 정하였다. 질소 기체의 질량수가 28이고 오리피스의 면적이 0.5 cm^2 이므로 컨덕턴스 C 는 6.02 l/s 로 계산된다. 또한 두 셀 구조의 P_{01} , P_{02} 값은 각각 표 1에 나타나있다.

그림 3은 원통형 및 벌집형 구조의 배기속도 측정 결과이다. 여기서 '■'는 벌집형 구조이고 '○'는 원통형 구조이다. 이온펌프를 포화시킨 후 얻은 최종도달진공도가 10^{-9} Torr 대에 있으므로 10^{-7} Torr 이상의 결과만 표시하였다. 실험 결과에 의하면 1×10^{-5} Torr 이상에서는 약 5 ~ 11 % 정도로 벌집형 구조의 배기속도가 높게 나타났다. 그러나 1×10^{-6} Torr 이하의 압력에서는 원통형 구조의 배기속도가 약간 높게 측정되었다. 또한 원통형 구조에서는 최대배기속도 (nominal speed)가 1×10^{-6} Torr에 위치한 반면 벌집형 구조에서는 1×10^{-5} Torr에서 측정되었는데, 일반적으로 10^{-6} ~ 10^{-7} Torr에서 최대값을 보이는 것을 [7] 고려할 때 10^{-5} Torr 이하에서 벌집형 구조의 배기속도 변화 양상은 비정상적이다.

그림 4는 포화과정을 거친 이후 두 펌프의 전압 및 전류 특성을 측정한 그래프이다. 그림에서 '■'와 '○'는 각각 벌집형과 원통형 구조의 펌프에 대한 전압-압력 그래프이고, '+'와 '×'는 각각 벌집형과 원통형 펌프의 전류-압력 그래프를 나타낸다. 그림 4의 전류-압력 그래프에서 보듯이 원통형 구조는 압력이 감소함에 따라 전류도 정상적으로 감소하는 반면, 벌집형 구조는 압력이 낮아짐에 따라 방전 전류가 선형적으로 감소하지 않고 감소세가 둔화되는 경향을 보인다. 또한 그림의 전압특성에서 나타나듯이 낮은 압력 영역에서는 원통형 구조에 인가되는 전압이 최대 6100 V인데 반해 벌집형 구조는 최대 5900 V로 측정되었다. 전압 및 전류 특성에서도 10^{-5} Torr 이하에서 벌집형 구조의 변화 양상이 비정상적인 것을 확인할 수 있다.

이렇게 1×10^{-5} Torr 이하의 압력에서 벌집형 구조의 배기속도 또는 전압 및 전류 특성이 비정상적으로

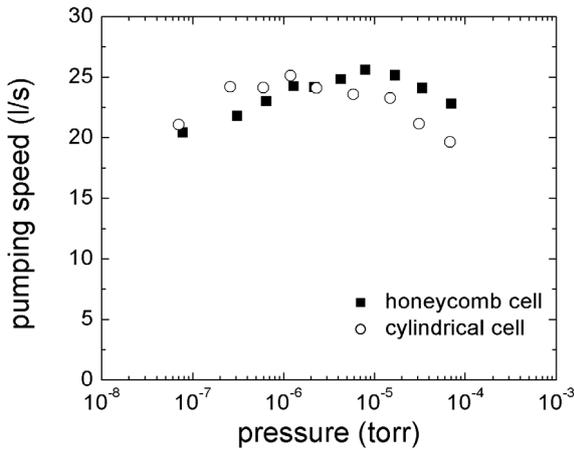


그림 3. 원통형 및 벌집형 셀 구조의 배기속도 측정 결과.

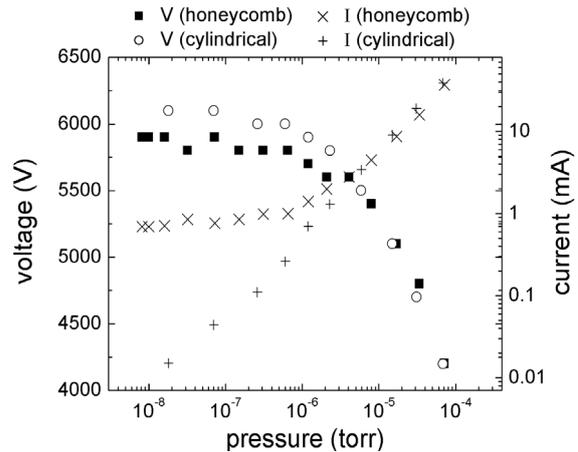


그림 4. 포화된 이후 원통형 및 벌집형 셀 구조의 압력에 따른 전압(V) 및 전류(I)의 변화.

나타난 원인은 벌집형 구조에 대한 ‘과도한 포화’에 의한 것으로 분석할 수 있다. 그림 5는 벌집형 구조에 대해 두 번의 포화과정을 거친 후 리크밸브를 단계적으로 잠그면서 압력의 변화 양상을 측정할 결과이다. 그림에서 마치 아르곤 불안정성이 나타나듯이 압력이 튀는 것을 볼 수 있다. 이러한 현상은 최종도달진공도 근처뿐만 아니라 삽입그림에서 보듯이 1×10^{-5} Torr 근처의 높은 압력에서도 심하게 나타나고 있다. 정상적인 포화 상태란 음극판에서 배기되는 기체와 스퍼터링에 의해 재 방출되는 기체의 양이 동적 평형상태를 이루고 양극에서만 순수한 배기가 일어나는 상태이다. 그런데 그림 5에서 나타난 현상은 높은 압력에서의 장시간 포화로 인하여 음극판에 파묻히거나 흡착된 기체가 스퍼터링에 의해 재 방출되는 양이 배기되는 양보다 더 많은 과도한 포화상태를 의미한다. 이런 상태에서 배기속도를 측정하면 외부로부터 주입되는 기체 외에 이 자체방출에 의한 기체 또한 폐닝방전에 기여하게 되므로 그림 4와 같이 방전 전류가 비정상적으로 높아지고 이에 따라 인가전압이 낮아지는 결과가 나타난다. 인가되는 전압이 낮아지면 배기속도가 감소하는 점[7]을 고려할 때, 그림 3에서 1×10^{-5} Torr 이하의 압력에서 벌집형 구조의 배기속도가 예상보다 작게 나온 한 원인이 된다. 한편 재 방출 기체에 의해 식 (1)의 P_{O_2} 가 용기의 자체방출에 의한 기준의 값(표 1)보다 높아지므로 배기속도 계산 값이 증가해야 하지만, 그림 3의 계산에 반영되지 않았기 때문에 배기속도가 실제보다 과소평가되었다.

앞에서 제시한 실험 결과 및 분석을 통해 벌집형 구조의 스퍼터 이온펌프가 같은 조건의 원통형 구조보다 기체 배기에 더 유리하다는 결론을 얻었다. 이에 대한 정량적이고 이론적인 분석은 어려우나 다음과 같은 긍정적인 해석이 가능하다. 원통형 셀 구조와 벌집형 셀 구조의 가장 큰 차이점은 그림 2에서 보듯이 빗금 친 부분과 같은 작은 공간의 유무이다. Suetsugu[2]의 실험결과에 의하면 같은 조건에서 양극 셀의 지름이 작을수록 배기속도가 급격하게 감소하는 것으로 나타나는데, 예를 들어 반지름 1.5 mm인 셀의 배기속도가 10 mm에 비해 10 % 이하로 감소하였다. 이는 양극 셀의 지름이 작아짐에 따라 전자가 생성되어 양극에 흡수될 때까지의 비행 궤적이 짧아지므로 그만큼 전자

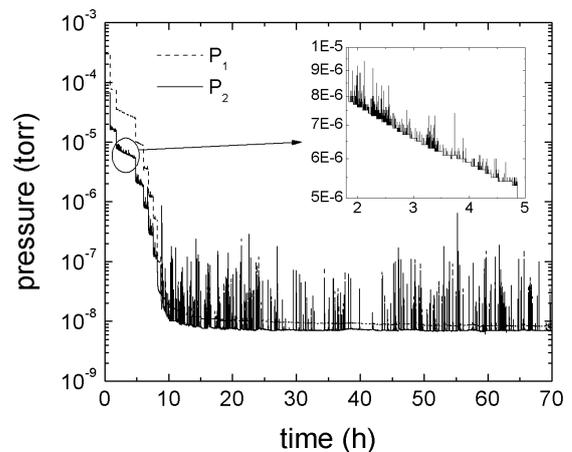


그림 5. 벌집형 셀 구조의 두 번째 포화 이후 단계적인 압력 변화. (삽입그림은 10^{-6} Torr 대의 P_2 측정 결과를 확대한 것임)

한 개 당 기체의 이온화 확률이 줄어들기 때문이다. 원통과 원통 사이의 좁은 공간(내접원의 반지름은 원통의 반지름의 0.154 배)은 같은 이유로 페닝방전이 충분히 일어나지 않고 압력이 낮아짐에 따라 공간이 넓은 양극 셀에 비해 먼저 방전이 사라지므로 기체의 이온화에 기여하지 못하는 dead space가 된다. 이 dead space에 진입한 기체 입자는 다른 벽면에 부딪혔다가 다시 원통 셀 내부로 진입해야만 이온화 확률이 생기지만 별집형 구조에서는 셀 구조의 어떤 위치로 진입한 기체에 대해서도 이온화 확률이 생긴다. 원통형 구조에서는 전체 면적의 10 %가 dead space로 이루어져 있으므로 기체 분자가 이온화가 가능한 공간으로 진입하기 위한 입구가 별집형 구조에 비해 10 % 작다. 즉, 같은 수의 기체 입자가 셀 모듈로 진입하였을 때 원통형 구조에서는 별집형 구조에 비해 90 %의 입자만 이온화되는 것이다. 별집형 구조에서의 기체 이온화율 증가는 스퍼터 율의 증가로 이어져 결국은 배기속도의 10 % 증가로 나타난다.

한편 n개의 양극 셀로 이루어진 셀 모듈의 배기속도는 양극과 음극 사이의 간격(δ)에 의한 컨덕턴스 때문에 양극 셀 1개의 배기속도 S_1 의 산술적인 합인 $S_n(=n \cdot S_1)$ 에 비해 S_{eff} 로 작아진다. Hartwig의 식[3]에 따르면 S_{eff} 는 다음과 같다.

$$S_{eff} = S_n \frac{\tanh D}{D}, \tag{2}$$

$$D = \frac{a}{7.85\delta} \sqrt{\frac{S_n}{ab}}.$$

여기서 $a=8$ cm, $b=12.6$ cm로서 각각 음극판의 세로 및 가로 길이를 나타내고(그림 2 (c) 참조) $\delta=0.6$ cm이다. 펌프 입구(6" 포트)에서의 실질 배기속도 S_b 는

$$1/S_p = 1/S_{eff} + 1/L \tag{3}$$

식으로 얻을 수 있으며, L 은 펌프 입구의 컨덕턴스이다. $n=33$ 이므로 원통형 셀 1 개의 배기속도가 1 l/s 이면 식 (2), (3)에 의해 펌프의 실질 배기속도는 25.16 l/s로 계산된다. 별집형 셀 1 개의 배기속도는 10 % 증가한 1.1 l/s이므로 같은 식에 의해 펌프의 실질 배기속도는 27.06 l/s이다. 따라서 별집형 구조의 펌프 입구에서의 실질 배기속도는 원통형에 비해 7.6

% 증가하는 것으로 나타났으며 이는 배기속도의 측정 결과(10^{-5} Torr 이상)에서 보인 증가율과 잘 맞는다.

IV. 요약

별집형 셀 구조의 스퍼터 이온펌프는 원통형 구조에 비해 기체의 이온화에 기여도가 낮은 약 10 % 정도 비율의 dead space가 없으므로 배기속도 또한 그만큼 증가할 것으로 예측되는데, 별집형 셀 구조의 스퍼터 이온펌프를 실제 제작하여 배기속도를 측정한 결과 기존의 원통형 셀 구조에 비해 압력 구간(10^{-5} Torr 이상)에 따라 5 ~ 11 % 정도 배기속도가 높다는 결과를 얻었다. 낮은 압력에서는 오히려 원통형 구조가 높게 나타났는데, 이는 별집형 구조의 펌프가 과도하게 포화되어 스퍼터링에 의해 재 방출 되는 기체의 양이 정상보다 많아진 것에 원인이 있다. 이로 인해 인가전압이 낮아져서 배기속도가 실질적으로 감소하였고, 또한 식 (1)의 배기속도 계산에 사용된 P_{O_2} (표 1) 값이 재 방출에 의한 증가분을 반영하지 못하여 배기속도 측정값이 과소평가되었기 때문으로 해석이 가능하다. 이러한 점을 고려할 때 별집형 셀 구조의 이온펌프가 기존의 원통형구조에 비해 기체 배기에 유리하다는 결론을 얻었다. 앞으로 셀의 지름이나 높이, 양극 셀과 음극판 사이의 간격 등 기하학적인 파라미터들을 최적화하고 여기에 별집형 셀구조를 적용한다면 특히 초고진공 이하의 낮은 압력에서 방전의 세기가 현저하게 약해지는 현상을 보완함으로써 배기효율의 향상을 기대할 수 있을 것이다.

끝으로, 본 실험에서는 시험 기체도 질소에 한정되었고 제작 여건상 적은 수의 셀을 사용하여 넓은 압력 범위에서의 배기속도 측정이 어려웠다. 따라서 종합적인 비교를 위해서는 배기 과정에서 질소와 상이한 반응을 보이는 수소에 대한 배기속도 측정이 필요하다. 또한 셀모듈의 수를 증가시켜 10^{-11} Torr 대로 최종도달압력을 낮춘 상태에서 다시 측정하여 초고진공 영역에서의 배기속도를 비교하는 것도 추가로 실험해야 할 과제이다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부의 지역혁신 인력양성사업의 연구결과로 수행되었음.

참 고 문 헌

- [1] L. D. Hall, Rev. Sci. Instrum. **29**, 367 (1958).
- [2] M. D. Malev and E. M. Trachtenberg, Vacuum **23**, 403 (1973).
- [3] H. Hartwig and J. S. Kouptsidis, J. Vac. Sci. Technol. **11**, 1154 (1974).
- [4] Y. Suetsugu and M. Nakagawa, Vacuum **42**, 761 (1991).
- [5] Y. Suetsugu, Vacuum **46**, 111 (1995).
- [6] M. H. Hablanian, J. Vac. Sci. Technol. A **5(4)**, 2552 (1987).
- [7] M. Audi, Vacuum **38**, 669 (1988).

Pumping speed of a sputter ion pump with a honeycomb anode cell structure

T. Ha¹, B. Ahn², D. Lee², J. Kim² and S. Chung^{1*}

¹*Department of Physics, Pohang university of science and technology, Pohang 790-784*

²*Vacuum measurement and technology, Pohang 790-320*

(Received January 11, 2006)

We measured pumping speed of a sputter ion pump with a honeycomb anode cell structure and compared the result with that of another sputter ion pump with a typical cylindrical anode cell structure. A cell module with a honeycomb structure has no dead space which is about 10 % of the entire horizontal area of the cell module with a cylindrical structure. This dead space makes a little contribution to the ionization of the gas, so the pumping performance of the pump with dead space is expected to be lowered by the amount. From the experimental data we concluded that the honeycomb cell structure is superior to the cylindrical structure by 5 ~ 10 % in performance.

Keywords : Sputter ion pump, Penning discharge, pumping speed, honeycomb structure.

* [E-mail] smc@postech.ac.kr