

## 10<sup>-9</sup> Pa대 용기를 위한 NEG 펌프 제작 및 진공성능 조사

박미영\* · 인상렬

한국원자력연구소  
(논문접수일 : 2001년 6월 18일)

### Fabrication and Vacuum Performance Test of the NEG Pump for 10<sup>-9</sup> Pa Chamber

M. Y. Park and S. R. In

Korea Atomic Energy Research Institute  
(Received June 18, 2001)

#### 요 약

10<sup>-9</sup> Pa 대의 진공을 얻기 위한 주 배기 펌프로서 Zr-V-Fe 합금계의 비증발성 게터 펌프를 제작하고, 실온에서 수소, 중수소 및 일산화탄소에 대한 NEG 펌프의 배기 속도를 측정하였으며 450℃로 활성화하면서 수소 방출 특성을 조사하였다. 그리고 터보 분자펌프, 스퍼터 이온펌프 및 크라이오 펌프 등 다른 초고진공 펌프들로 배기하면서 용기 내의 잔류기체를 분석함으로써 이들 펌프 및 NEG 펌프의 배기 성능을 비교하였다.

#### Abstract

A Non-Evaporable Getter(NEG) pump was fabricated using Zr-V-Fe alloy modules to obtain 10<sup>-9</sup> Pa range pressures. Pumping performances and activation characteristics were investigated and the pumping speeds for hydrogen, deuterium and carbon monoxide gases of the NEG pump were measured. And hydrogen desorption characteristics were examined during activation at 450°C. Furthermore the vacuum performance was compared with those of other high vacuum pumps as turbo-molecular pump, sputter-ion pump, and cryo pump by analyzing the residual gases of the system.

#### 1. 서 론

비증발성 게터(NEG)는 증발시키지 않고 불활성 기체나 탄화수소를 제외한 모든 기체를 배기할 수 있는 게터재로서 설치와 작동이 간편하면서 청정한 진공과 큰 배기 속도를 얻을 수 있다. 따라서 초고진공이 요구되는 가속기 장치에서 주로 수소(H<sub>2</sub>), 일산화탄소(CO), 이산화탄소(CO<sub>2</sub>)와 같은 기체를 배기하기 위하여 사용되고 있으며, 핵융합 실험 장치에서 사용되는 수소동위원소(D<sub>2</sub>, T<sub>2</sub>)의 처리에 응용되고 있다. [1-4, 10-11] 반면 NEG 펌프는 흡착할 수

있는 기체의 양(pumping capacity)이 한정되어 있어 주기적인 재활성화(reactivation) 과정이 필요하며, 불활성기체와 메탄의 축적을 막기 위해 SIP(sputter-ion pump)나 터보분자펌프(turbo-molecular pump, TMP) 등과 같은 보조펌프와 병행해서 사용하여야만 한다.

St707(WP1250 : Saes Getters사, Italy)은 Zr(70%)-V(24.6%)-Fe(5.4%) 합금 게터재로서 400~500℃의 비교적 저온에서 활성화가 가능하여 냉각을 별도로 하지 않아도 용기 온도가 지나치게 올라가지 않고 오히려 시스템의 가열 탈기체 처리(baking)를 동시에 수행할 수 있는 장점이 있다. 본 실험실에서는

10<sup>-9</sup> Pa 대의 초고진공을 위한 시스템의 주 배기 펌프로서 St707 모듈 3개를 사용하여 NEG 펌프를 제작하고 이의 성능을 검증하기 위하여 H<sub>2</sub>, D<sub>2</sub> 및 CO의 배기 속도를 측정하였다. 그리고 해석적인 방법(distributed pump model)과 몬테카를로 계산(Monte Carlo simulation)에 의해 구한 배기 속도와 비교하여 흡착계수(sticking coefficient)를 추정하였다. 그리고 450°C에서 활성화 도중 방출되는 수소의 평형압력을 측정하여 NEG와 수소의 결합에 관련되는 반응상수들을 구하였다.

시스템에는 NEG 펌프 이외에 SIP, TMP 및 크라이오 펌프(cryo pump, CP) 등을 설치하였다. 이 시스템의 주목적은 NEG 펌프의 성능을 시험하는 한편 각 고진공 펌프들의 진공성능을 비교하고, 여러 펌프들을 조합하였을 경우의 특성을 조사하기 위한 것으로 본 논문에서는 NEG 펌프와 관련된 부분을 중점적으로 기술하였다.

## 2. 실험

### 2.1 NEG 펌프 제작

St707 모듈의 규격은 30 mm(D)×50 mm(W)×250 mm(H)이고 NEG의 총 면적은 0.45 m<sup>2</sup>, 총 질량은 174 g이다. 게터 모듈은 얇은 기판 위에 게터재가 코팅된 띠를 접어서 구조물에 설치하기 쉽도록 만들어진 것으로 큰 배기 속도가 요구되는 지점에 집중적으로 설치 가능하다. 그림 1은 제작한 NEG 펌프의 사진이다. 3개의 모듈은 플랜지 중앙을 중심으로 하여 정삼각형을 이루도록 설치하였다. 모듈을 고정시키기 위하여 스테인리스 스틸 앵글을 만들어, 하부는 플랜지에 볼트로 고정시키고 상부는 긴 모듈이 휘어 서로 닿지 않도록 스테인리스 스틸 링에 세 모듈이 등간격이 되도록 고정시켰다. 그리고 모듈과 지지부품의 나사 체결 부위에는 NEG를 플랜지 및 구조물들로부터 전기적으로 절연시키기 위하여 HIP(hot isotropic pressing) 방법으로 소결된 알루미늄 세라믹을 삽입하였다.

NEG를 450°C로 활성화시키기 위하여 콘스탄탄 기판에 직접 전류를 흘려 저항 가열하였으며, 전류는 100 A급 온도조절기에서 전류도입장치를 지나 1 mm

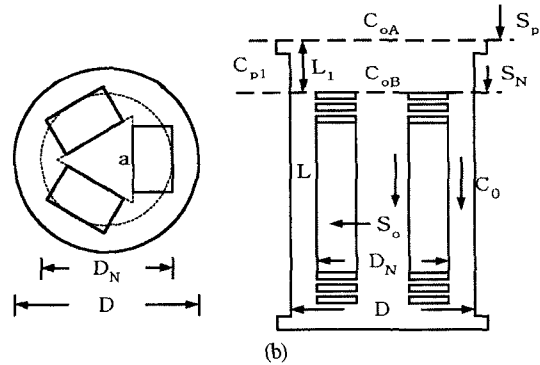
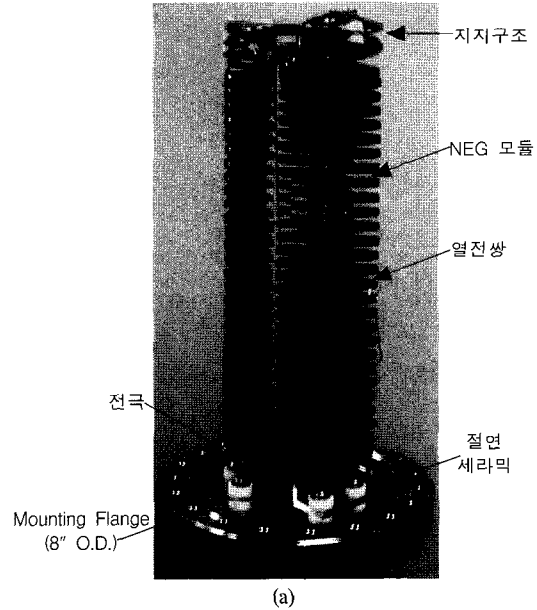


그림 1 (a)제작된 NEG 펌프의 구조 및 (b) 상세 구조도 ( $L$ : NEG 모듈의 길이,  $L_1$ : NEG 채널과 용기 입구까지의 길이,  $D_N$ : NEG 채널의 외경,  $D$ : 펌프 용기의 내경)

두께의 구리 연결선을 통해 공급되었다. 활성화 시 NEG 띠가 450°C로 유지될 때 흐르는 전류는 약 20~22 A였다. St707 모듈을 따로 사용할 때는 450°C까지 가열하는데 약 33 A의 전류가 필요하지만, 제작된 펌프와 같이 모듈이 밀집되어 있는 경우 이보다 작은 전류로 온도를 올릴 수 있음을 알 수 있다. NEG의 온도는 크로멜-알루멜(K-type) 열전쌍을 게터재가 도포되어 있지 않은 모듈 가장자리의 0.2 mm 두께의 기판에 구멍을 내어 부착시켜 측정하였다. 완성된 펌프는 NEG 용기와 같은 직경의 스테인리스

스틸 표준 시험용기(test dome)에 설치하였다.

## 2.2 실험 절차

상·하 시험용기에는 점성식 회전진공계(spinning rotor gauge)로 각 기체에 대해서 교정한 인출형 이온화진공계(extractor gauge)를 설치하여 압력을 측정하였고, 하부 용기에는 질량수(M/Z) 200까지 측정이 가능한 사중극 질량분석기(quadrupole mass analyser)를 설치하여 주로 질량수 50까지의 분압을 측정하였다.

NEG 펌프의 성능을 조사하기 위한 시스템의 구성은 그림 2와 같다. 150 mm 내경의 시험용기 하부에 같은 직경의 십자 형태의 용기를 설치하여 TMP (Shimadzu 사, TMP-300), CP(Leybold 사, RPK 900) 및 제작된 NEG 펌프를, 그리고 상부 용기에 SIP (VMT 사, VIP-60)를 각각 설치하였다. 각 펌프에는 밸브를 달아 필요한 경우에 펌프의 차단이 가능하게끔 하였다.

시스템을 완성한 이후 TMP만을 가동시켜 위치에 따라 250~150℃로 용기를 가열 탈기체 처리하였다. 탈기체 처리 마지막 부분에서 NEG를 450℃

로 활성화하였다. 이때 NEG 용기는 달리 냉각하지 않아 약 270~280℃까지 온도가 상승하였다. 탈기체 처리를 마치고 CP와 NEG 펌프를 가동시켰을 때 하부 시험 용기의 압력  $P_2$ 는  $6.3 \times 10^{-9}$  Pa이었다.

NEG 펌프의 배기 속도는 SIP를 제외한 모든 펌프들의 게이트 밸브를 잠근 다음 유량조절밸브(VLV)를 열어 기체를 주입시키면서 측정하였다. SIP는 배기 속도 측정 중 시스템 내에 메탄(CH<sub>4</sub>)이 축적되는 것을 막기 위한 것이다. 이때 용기의 온도는 30℃로 유지하였고, 기체를 주입시키기 전  $P_2$ 는 평균  $1 \times 10^{-6}$  Pa이었다. 배기 속도 측정 순서는 기체별로 H<sub>2</sub>, D<sub>2</sub> 그리고 CO이었으며 각 측정 사이에 용기를 100~50℃의 저온으로 가열 탈기체 처리하였다.

배기 속도를 측정하고 보수를 위해 NEG 펌프를 대기에 개방하였다. 이후 다시 가열 탈기체 처리와 더불어 두 번에 걸쳐 NEG를 450℃에서 활성화하였으며, 시스템을 기저압력까지 내린 이후 하부 용기 내 잔류기체의 분압을 측정하였다. 분압은 조사하고자 하는 펌프의 조합에 따라 각 펌프에 설치되어 있는 밸브를 열거나 혹은 잠그고 평형압력이 되었을 때 측정하였다.

## 3. 실험 결과 및 논의

### 3.1 NEG 펌프의 배기 속도

초고진공 시스템에서 주요 잔류 기체는 H<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O 그리고 CH<sub>4</sub> 등으로, 본 실험에서는 NEG가 배기하는 주요 대상인 H<sub>2</sub>와 CO의 배기 속도를 측정하고 두 기체에 대한 배기 성능의 차이를 알아보았다. 또한 수소동위원소에 대한 배기 성능을 비교하기 위하여 D<sub>2</sub>의 배기 속도를 측정하였다.

#### 3.1.1 실험 결과

용기에 기체를 흘렸을 때 압력 측정 지점에서 NEG의 배기 속도  $S_p$ 는

$$S_p = q/P_2, \quad q = C \cdot (P_1 - P_2) \quad (1)$$

로 주어진다. 여기에서  $P_1$ ,  $P_2$ 는 각 기체 도입 시 시험 용기 상·하의 압력(mbar), C는 시험용기에 부착

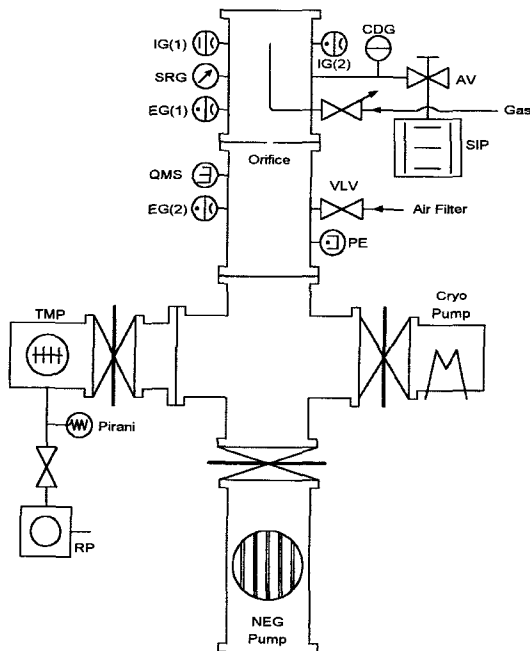


그림 2 NEG 배기 성능 실험 장치 구성.

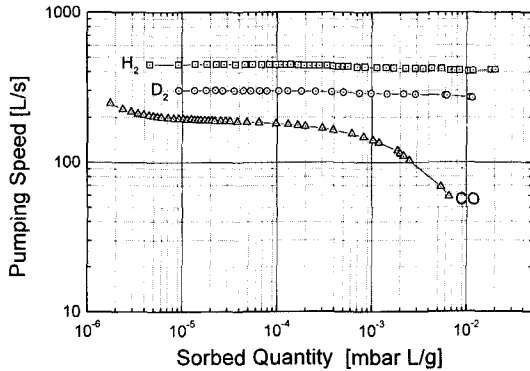


그림 3 단위 게터 질량 당 기체 흡착량에 따른 NEG 펌프의 배기 속도 측정 곡선.

된 15 mm 직경의 오리피스 콘덕턴스로 실온(303 K)에서 H<sub>2</sub>, D<sub>2</sub>, 그리고 CO에 대해 각각 80.5, 56.9 그리고 21.5 L/s이다.  $q$ 는 기체 유량(mbar · L/s)이며, 기체도입에 의한 총 기체 흡착량  $Q$ (mbar · L)는  $q$ 의 시간적분으로 주어진다. 배기 속도 측정 전의 초기 H<sub>2</sub> 흡착량  $Q_0$ 는 0.134 mbar · L/g ( $5.19 \times 10^3$  mbar · L/cm<sup>2</sup>)이었으며, H<sub>2</sub>, D<sub>2</sub> 그리고 CO 기체 도입 시 유량  $q$ 는 각각  $7.91 \times 10^5$ ,  $8.02 \times 10^5$  그리고  $7.61 \times 10^6$  mbar · L/s 이었다.

그림 3은 배기 속도 측정결과이다. H<sub>2</sub> 및 D<sub>2</sub>의 초기 배기 속도는 약 450 및 300 L/s로 흡착량  $Q$ 가 10<sup>-5</sup> ~ 10<sup>-2</sup> 대로 3차수가 변화도록 배기 속도는 약 9~9.3%정도 감소하였다. D<sub>2</sub>는 H<sub>2</sub>의 질량에 반비례하여 배기 속도가 감소하지만, 게터에서의 배기 특성은 H<sub>2</sub>와 거의 유사하다. 반면 CO의 배기 속도는 기체 흡착 초기 240 L/s 에서부터 점차 줄어들다가 포화되는 지점에서부터 급격하게 감소하여, 흡착량이  $5 \times 10^6 \sim 5 \times 10^3$ 로 증가하였을 때 배기 속도는 약 1/3만큼 감소하였다. 이는 CO 기체의 경우, 기체 분자가 NEG 속으로 확산되는 속도보다 표면에 부착되는 속도가 크기 때문에 일단 표면이 기체로 덮인 이후로는 활성표면이 사라져 더 이상 배기할 능력이 없기 때문이다. [2-4]

### 3.1.2 계산에 의한 NEG 펌프의 배기 속도

NEG 펌프의 배기 속도는 게터 표면에서의 기체 흡착계수와 NEG 모듈이 세워진 채널에서 기체 콘덕턴스의 복합적인 조건에 의해 결정된다. 이와 같

이 배기 채널의 콘덕턴스를 알면 흡착계수에 따른 펌프의 배기 속도를 해석적인 방법과 몬테 카를로 시뮬레이션으로 구할 수 있다. [2-3]

만약 NEG 모듈 전체에 걸쳐 기체 분자의 흡착이 균일하게 일어난다고 가정하면, 펌프 입구에서의 배기 속도  $S_p$ 는 NEG 모듈 1개의 배기 속도  $S_m$ 의 합수로 다음과 같이 나타낼 수 있다. 그림 1(b)에 수식과 관련되는 기호를 자세히 나타내었다.

$$S_p = \frac{S_N C_p}{S_N + C_p} \quad (2)$$

$$\frac{1}{C_p} = \frac{1}{C_{pl}} + \frac{1}{C_{oB}} - \frac{1}{C_{oA}}$$

$$S_N = (S_o/k) \tanh k$$

$$S_o = NS_m, \quad S_m = CsA, \quad k = \sqrt{S_o/C_0}$$

$S_N$ : NEG 채널 입구에서의 배기 속도

$S_o$ : 전체 NEG 모듈의 배기 속도

$C_0$ : 채널 내에서의 콘덕턴스

$C_p$ : 용기 입구와 채널 윗면 사이의 콘덕턴스

$C_{oA}, C_{oB}$ :  $S_N$ 과  $S_p$  측정 지점의 오리피스 콘덕턴스

$C$ : 단위 오리피스 콘덕턴스 ( $=v/4$ ,  $v$ 는 기체의 평균 속도)

또한  $N$ 은 모듈의 개수,  $s$ 는 NEG의 흡착계수, 그리고  $A$ 는 NEG의 표면적이다. 식 (2)로부터 NEG의 흡착계수  $s$ 에 따른 용기 입구에서의 배기 속도  $S_p$ 를 계산하였으며, 그 결과를 그림 4에 나타내었다. 동일한 흡착계수일 때 CO보다 H<sub>2</sub>의 배기 속도가 더 크며, 이는 NEG에서 뿐만 아니라 포트에서도 마찬가지이다. 이 계산 결과와 실험에 의해 구해진 배기 속도를 비교하면 NEG의 흡착계수를 구할 수 있으며, H<sub>2</sub>, D<sub>2</sub> 및 CO의 초기 배기 속도가 450, 300 그리고 240 L/s일 때 0.0029, 0.0027 그리고 0.0076로 구하여졌다.

그림 5는 몬테 카를로 방법으로 흡착계수에 따른  $S_p$ 의 변화를 계산한 결과를 나타낸 것이다. 몬테 카를로 계산에서 배기 속도는 기체의 배기 확률 (pumping probability), 즉 기체가 어떤 흡착계수에서 얼마만큼 NEG에 배기될 것인가 하는 것과 펌프 용기의 오리피스 콘덕턴스의 곱으로 주어진다. 그러

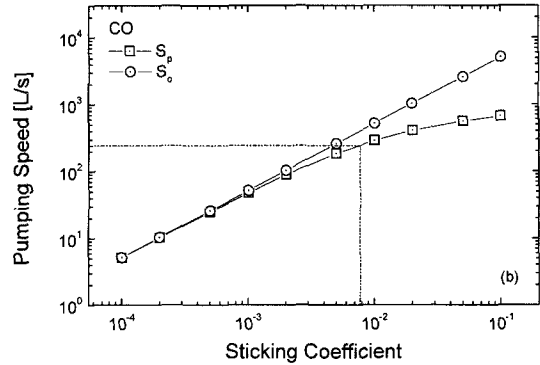
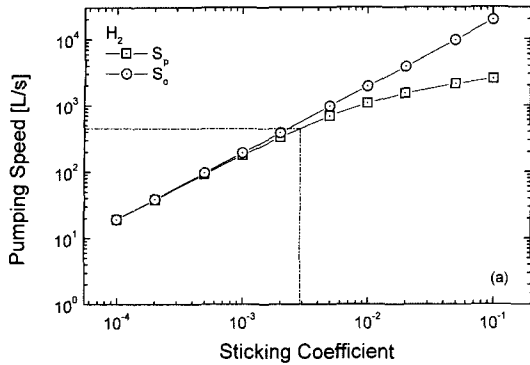


그림 4 해석적 방법에 의해 계산된 (a) H<sub>2</sub> 그리고 (b) CO의 흡착계수에 따른 배기 속도 곡선 및 측정된 초기 배기 속도의 비교.

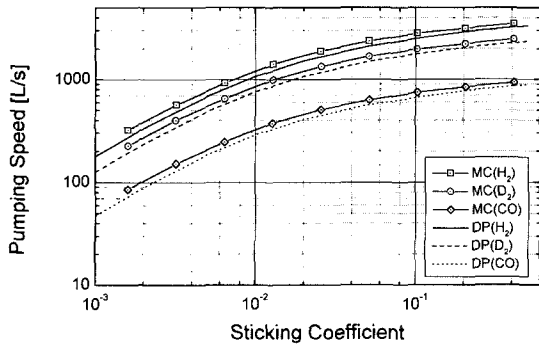


그림 5 몬테카를로 방법에 의해 계산된 NEG 펌프의 배기 속도 곡선.(DP : distributed pump model and MC : Monte Carlo simulation)

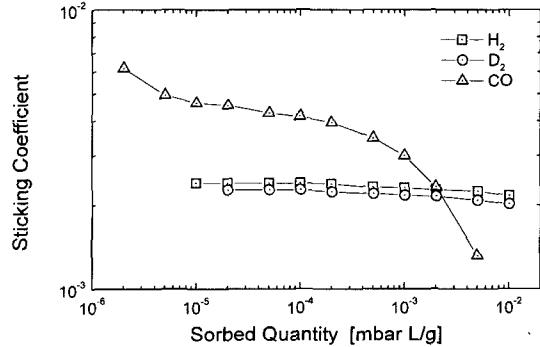


그림 6 H<sub>2</sub>, D<sub>2</sub> 및 CO의 흡착량 증가에 따른 NEG 흡착계수의 변화.

므로 흡착계수가 같을 때 각 기체가 배기될 확률은 동일하지만 NEG 펌프의 배기 속도는 기체마다 다르다. 프로그램에서 배기 확률은 사용된 전체 입사 입자와 NEG에 흡착된 입자와의 비로 주어진다. 계산 결과에 의하면 흡착계수가 0.0016일 때 배기 확률은 0.04153으로 약 4%에 해당되는 입자만이 NEG에 흡착되는 반면, 흡착계수가 0.0256일 때 배기 확률은 0.25로 입사된 입자의 25%가 NEG 표면에 흡착된다. 앞의 해석적 방법과 마찬가지로 몬테 카를로 계산 결과와 측정된 배기 속도를 비교하여 구해진 기체의 흡착계수는 H<sub>2</sub>, D<sub>2</sub>, 그리고 CO에 대해 각각 0.0024, 0.0023과 0.0062이었다.

두 모델에서 구해진 결과는 약 20% 정도의 오차가 난다. 이것은 해석적 모델에서 조밀한 간격으로 좁혀져 있는 모듈 상에서의 기체 콘덕턴스를 고려하지 않은 것과, 그리고 NEG 채널에서의 콘덕턴스를

그림 1(b)에서 길이  $a$ 의 정삼각형 통로와 직경  $D_N$ 과  $D$  사이 통로의 콘덕턴스만을 고려한 이유 때문이다. 몬테카를로 계산에 의한 흡착계수 대 배기 속도 곡선을 이용하여 NEG 펌프의 기체별 흡착량 증가에 따른 흡착계수를 그림 6에 나타내었다. H<sub>2</sub>와 D<sub>2</sub>는 게터 내부로 쉽게 확산되어 원래의 깨끗한 표면을 유지하므로 흡착량이 증가하여도 흡착계수는 초기와 비슷한 값을 유지한다. 반면 CO는 초기의 깨끗한 표면일 때 흡착률은 수소에 비해 약 2.6 배정도 큰 값이지만, CO의 확산속도는 크지 않아 흡착량이 증가할수록 표면이 포화되어 흡착계수가 급격히 감소한다.

한편 본 실험실에서 제작된 NEG 펌프의 경우, 앞에서 설명한 두 가지 모델에 의해 계산된 흡착계수는 St707에 대해서 보고된 바 있는 H<sub>2</sub>와 CO의 흡착계수 0.004~0.005 및 0.02~0.03의 약 1/2~1/5에

해당하였다. [2] 사용된 NEG 모듈은 1995년에 제작된 것으로 장기간 질소 분위기에서 밀봉된 채 보관되었던 것이다. 따라서 상온이었지만 시간이 오래 지남에 따라 게터 표면의 질소화가 진행되어 흡착 자리의 감소에 따른 성능 저하가 있었을 것이다. 이러한 성능 저하는 H<sub>2</sub>보다는 확산이 더딘 CO에 대해 더 큰 영향을 미치기 때문에 CO의 흡착계수가 더 큰 쪽으로 작아진 것으로 생각된다.

### 3.2 NEG의 활성화 특성

#### 3.2.1 NEG 활성화 기간동안 수소 평형압력

NEG에 흡착된 수소는 다른 활성 기체와는 달리 영구적으로 게터와 결합하는 것이 아니기 때문에 적절한 시기마다 활성화를 통해 원래의 배기 성능을 회복할 수 있다. 이러한 NEG의 활성화는 활성기체의 확산을 촉진하고 흡수되어 있는 수소를 방출하는 데 목적이 있다. NEG를 450℃로 두 번에 걸쳐 활성화하면서 수소의 평형압력을 측정하여 NEG에서의 수소 방출 특성을 조사하였다. 활성화에는 TMP만을 보조펌프로 사용하였고, 활성화 시간은 각각 11.5시간과 100시간이었다.

활성화 시 NEG의 수소 방출 특성은 흡수되어 있는 수소의 평형압력(혹은 흡수량)  $P_{eq}$ 와 용기 내 압력  $P$ 와의 차이에 의해 좌우된다. 따라서 두 압력간의 차이가 클수록 방출률이 커진다. 방출률  $q(\text{mbar} \cdot \text{L/s})$ 는  $C(P_{eq} - P) = S_e P$ 로 주어지며  $C = Av/4(\text{L/s})$ 이다. 따라서  $P$ 는  $(C/(S_e + C))P_{eq}$ 로 주어지고, 만약  $S_e \ll C$ 의 조건이 성립되면  $P \sim P_{eq}$ 로 볼 수 있다. 이 실험에서  $C$ 는 200,490 L/s이며,  $S_e$ 는 150 L/s이므로 NEG를 가열하는 동안 용기 내의 압력은 수소 평형압력과 거의 같다고 볼 수 있다. 또한 NEG 용기와 압력 측정지점 사이의 컨덕턴스가 충분히 크다고 한다면  $P$ 는 측정지점에서의 압력  $P_m$ 과 거의 같으므로 수소 평형압력  $P_{eq}$ 은 하부 시험용기에서 측정된 압력  $P_m$ 으로부터 얻을 수 있다. 그림 7에 두 번째 활성화 시(II) 300℃에서 450℃까지 온도를 올리면서 측정된 용기의 압력을 NEG 온도의 역함수로 나타내었다. 이와 같은 그래프는 식 (3)의 시버트의 법칙(Sivert's law)으로 설명할 수 있다. [2, 5]

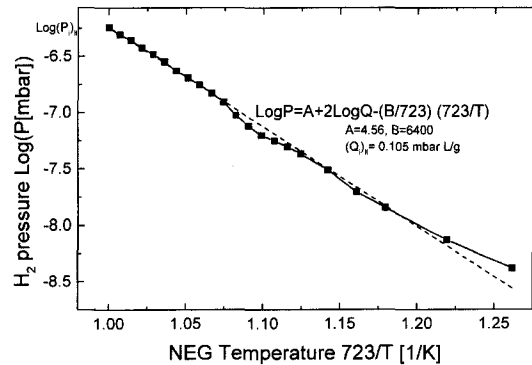


그림 7 450℃ 활성화 시 NEG 온도에 따른 수소 평형 압력변화.

$$P_{eq} = KQ^2$$

$$\text{Log}P_{eq} = A + 2\text{Log}Q - B/T \quad (3)$$

여기에서  $K = 10^{A-B/T} (\text{mbar} \cdot (\text{mbar} \cdot \text{L/g})^{-2})$ 이고,  $Q(\text{mbar} \cdot \text{L/g})$ 는 NEG에 흡수되어 있는 수소의 농도,  $T(\text{K})$ 는 온도이다. 또한  $A, B$ 는 반응 상수로 St707에 대해 제조회사에서 제공하는 값은 각각 4.68과 6116이다. 식 (3)으로부터  $\text{Log}P$ 대  $1/T$ 의 그래프를 그리면  $-B$ 를 기울기로 하는 직선을 얻을 수 있다. 그림에서 기호로 된 것은 활성화를 통해 얻어진  $P_{eq}$ 이며, 점선은 두 번째 활성화 시 수소의 농도 0.105 mbar · L/g와 적절한  $A, B$  값을 식 (3)에 대입해서 얻은 것이다. 이로부터 구해진  $A$ 와  $B$ 는 각각 4.56 및 6400으로 이들은 게터의 상태에 따라 변하므로 제조회사에서 제공되는 값과는 차이가 난다.

#### 3.2.2 NEG 활성화 시간에 따른 용기 압력

활성화 동안 NEG의 수소 평형압력  $P_{eq}$ 은 수소를 방출함에 따라 점차적으로 감소한다. 이때 NEG 용기 내의 압력  $P$ 는 활성화 시간  $t$ 에 대해 다음과 같이 주어진다. [2]

$$P = P_{eq}(i) \left(1 + \frac{t}{a}\right)^{-2} = (M^2 / KS_e^2)(t+a)^{-2}$$

$$P^{-1/2} = b(t+a) \quad (4)$$

여기에서 기울기  $b$ 는  $S_e\sqrt{K}/M$ ,  $a$ 는  $MQ_i/S_eP_{eq}(i)$ 로 주어진다.  $P_{eq}(i)$ 는 활성화 시작 초기의 수소

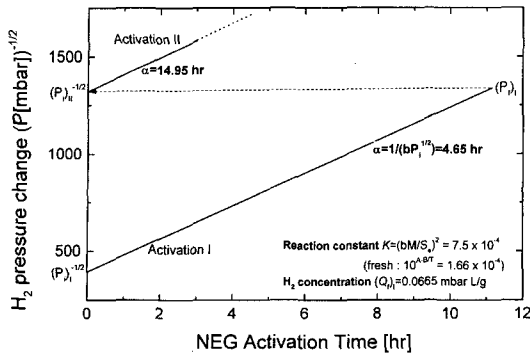


그림 8 활성화 시간에 따른 수소 평형 압력 변화.

평형압력,  $S_e$ 는 압력 측정 위치에서 외부 펌프로 인한 수소의 유효 배기 속도(수소에 대해 약 150 L/s),  $M$ 은 게터재의 질량(174 g), 그리고  $Q_i$ 는 활성화 초기 수소농도이다. 그림 8은 두 번의 활성화 동안 시간에 따른 수소 평형압력을 나타낸 것이다. 그래프에서  $i, f$ 는 각각 활성화 시작 및 종료 지점을 나타내며, I, II는 활성화 순서를 나타낸 것이다.  $\alpha$ 는  $1/(b(P_{eq}(i))^{1/2})$ 로 주어지므로 기울기  $b$ 와 활성화 초기의 평형 압력을 알면 구할 수 있다. 식 (4)에서  $\alpha$ 는 활성화 시작 후 초기 값에서 수소농도는 1/2로, 평형 압력은 1/4로 줄어드는 시간으로  $\alpha$ 를 활성화 초기에 구하면 활성화 종료 시점을 예측할 수 있다. 두 번의 활성화 과정에서도  $\alpha$ 는 4.65와 14.95시간으로 구하여졌다. 두 번째 활성화에서  $\alpha$ 가 첫 번째 보다 큰 이유는 첫 번째 활성화는 시스템의 가열 탈기체 중에 행하여진 것으로, 이미 NEG의 가열로 인해 수소의 농도가 낮아졌기 때문인 것으로 생각된다.

또한 직선의 기울기  $b$ 는  $S_e\sqrt{K}/M$ 로 주어지므로  $b$ 를 알면 이로부터 평형상수  $K(=k_o/k_i)$ 를 구할 수 있다.  $k_o, k_i$ 는 각각 NEG에 대한 수소의 탈리율(desorption rate) 및 흡착율(adsorption rate)이다. 활성화 결과  $K$ 는  $7.5 \times 10^4$ 로 구해졌는데, 이것은 청정한 게터 표면에 대해 제조회사에서 제시하는  $K(=10^{A-B/T})$  값인  $1.66 \times 10^4$ 보다 약 4.5배 가량 큰 값이다.  $K$ 가 큰 것은 동일한 흡착 농도에서 평형압력이 크다는 뜻으로, 이는 배기 속도 측정 결과와 마찬가지로 NEG 모듈의 성능 저하를 말해주고 있다.

### 3.3 다른 초고진공 펌프와의 비교

제작된 NEG 펌프의 성능 평가가 끝난 이후 NEG, SIP, TMP 및 CP의 게이트 밸브를 모두 열어 외부의 기체 주입 없이 시스템을 배기하였을 때 압력은 실온에서 평균  $5.0 \times 10^9$  Pa이었다. 펌프들의 성능 비교를 위해 조사하고자 하는 펌프를 제외한 모든 펌프의 게이트밸브를 닫은 다음 압력이 평형에 도달할 때까지 기다린 이후 시험용기의 하부에서 잔류기체 스펙트럼(질량 대 이온전류)을 측정하였다.

#### 3.3.1 잔류기체 분석

TMP, NEG 및 CP는 독자적으로  $10^8 \sim 10^9$  Pa대의 도달압력이 가능한 초고진공 펌프로 그림 9는 이 펌프들을 독립적으로 가동하였을 때 실온에서 측정된 잔류기체 스펙트럼이다. 스펙트럼 측정 시 용기의 압력은 TMP, NEG 및 CP의 경우에 각각  $2.9 \times 10^8, 3.9 \times 10^8$  그리고  $7.2 \times 10^9$  Pa이었다.

NEG 펌프로만 배기하였을 경우 대부분의 활성화 기체의 배기 성능은 우수한 반면, 질량 피크 12~16 번에 걸쳐 나타나고 있는  $CH_4$ 의 비율이 상당히 높아 압력은  $3.9 \times 10^8$  Pa 대의 높은 값을 나타낸다. 이는 탄화수소 분자가 낮은 온도의 NEG 표면에서 분해가 잘 되지 않아 배기가 쉽지 않기 때문이다. 배기 속도 실험 시 흡착되었던  $D_2$ 의 방출은 없어지지 않고 계속해서 나타나며, NEG 펌프에서만 보이고 있는 40번 피크는  $CH_4$ 와 마찬가지로 NEG가 배기하지 못하여 용기 내에 축적되는 아르곤(Ar)에 의한 것이다.

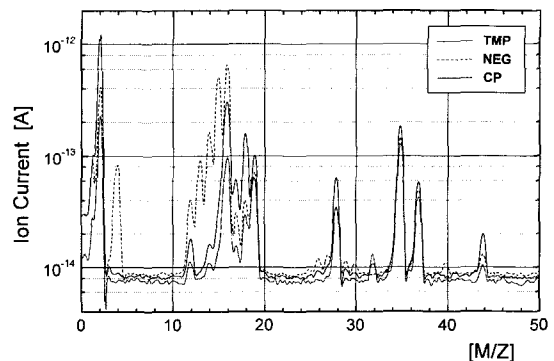


그림 9 상온에서 각 초고진공 펌프로 배기할 때의 용기 내 잔류기체 스펙트럼 비교.

TMP는 구조가 복잡하며, 기체 방출률이 높은 비금속재료가 많은 반면 고온으로 가열 할 수 없기 때문에 펌프 자체로부터 역류되는 기체가 많아 도달압력이 높다. 스펙트럼에서 보이는 바와 같이 대부분의 초고진공에서의 잔류기체인 H<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, CO 그리고 CO<sub>2</sub>의 피크가 뚜렷이 보인다. 따라서 회전자 몸체 표면에 특별한 처리를 하거나 다른 펌프와의 조합 없이 TMP만으로 10<sup>-9</sup> Pa 대의 압력을 얻기는 어렵다.

CP는 헬륨(He)을 제외한 대다수의 기체에 대해 배기 성능이 우수하여 H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O 그리고 CO<sub>2</sub> 등의 분압은 NEG 펌프나 TMP에 비해 크게 낮아졌으며 D<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> 및 Ar은 거의 존재하지 않는다. CP도 TMP와 마찬가지로 70℃ 이상의 고온에서 가열할 수 없기 때문에 펌프 자체의 기체방출이 많지만 TMP에 비해 내부 발생 기체에 대한 배기 효율이 크기 때문에 도달압력이 낮은 것으로 보인다. 한편 CP를 가동하였을 때 용기 내의 압력이 3~4시간의 주기로 약 10% 정도 증감하는 경향이 보였는데, 이때 주로 질량수 28번이 압력에 따라 증감하였다. 이는 배플 또는 CP 내부 저온 표면의 온도가 주기적으로 변화함에 따라 표면의 기체가 탈리되기 때문인 것으로 생각된다.

한편 각 그래프에서 질량수 19(F), 35(<sup>35</sup>Cl)와 37(<sup>37</sup>Cl) 등은 거의 같은 양으로 감소하지 않고 펌프의 종류에 상관없이 압력에 따라 비슷한 수준으로 나타나고 있다. 이들은 프레온 용제에 의한 C<sup>35</sup>ClF<sub>2</sub>(85), C<sup>37</sup>ClF<sub>2</sub>(87), C<sup>35</sup>Cl<sub>2</sub>F(101), C<sup>37</sup>Cl<sub>2</sub>F(103) 등의 이온이 검출되지 않은 것으로 보아 프레온의 잔류물에 기인하는 것은 아닌 것으로 판단되며, 이온화 진공계(ion gauge)에서 나타나고 있는 오류 중 하나인 ESD(electron stimulated desorption)에 의한 것으로 추정된다. [8-9]

### 3.3.2 NEG 펌프와 초고진공 펌프의 조합

그림 10은 각각 실온에서 NEG 펌프로만 배기하였을 때와 NEG+TMP, NEG+SIP 그리고 NEG+CP의 조합으로 배기 하였을 때의 잔류기체 스펙트럼이다. 스펙트럼을 측정할 때 각 경우의 기저압력은 9.5×10<sup>-9</sup>, 9.1×10<sup>-9</sup> 그리고 5.4×10<sup>-9</sup> Pa이었다. 표 1은 펌프를 조합한 경우와 NEG 펌프만 가동시켰을 경우의 피크 차를 나타낸 것이다. - 부호는 NEG 펌프에 다른 펌프를 조합함으로써 오히려 분압이 높

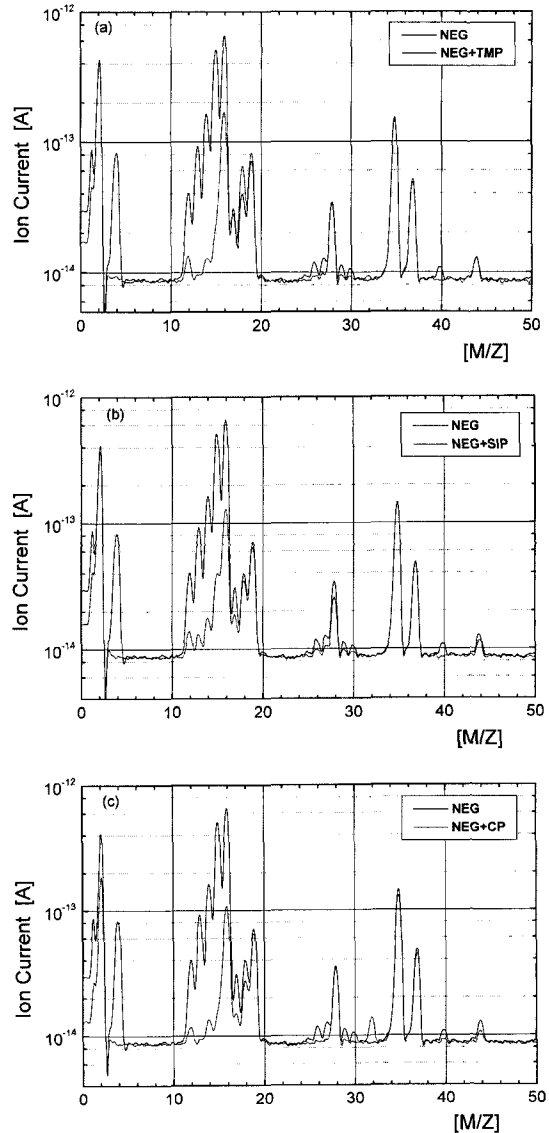


그림 10 상온에서 NEG 펌프와 (a)NEG+TMP, (b)NEG+SIP, 그리고 (c)NEG+CP를 조합하여 배기할 때 용기 내 잔류기체 스펙트럼 비교.

아진 것이다.

그림과 표에서 보는 바와 같이 TMP, SIP 그리고 CP 등을 조합함으로써 NEG 펌프에서 문제가 되던 CH<sub>4</sub>의 분압이 거의 없어졌음을 알 수 있다. NEG 펌프와 TMP를 조합하였을 경우에는 불활성기체와 탄화수소의 분압은 거의 사라진 반면, 수소는 더 이상 줄어들지 않았으며 물은 오히려 더 증가하였다.



표 1 각 펌프 조합에 따른 주요 잔류 기체 스펙트럼의 비교

System	Mass									
	2	12	15	16	18	19	28	29	35	44
(NEG)-(NEG+SIP)	4.15e-14	2.75e-14	4.85e-13	5.47e-13	4.35e-15	7.19e-15	9.06e-15	1.56e-15	6.03e-15	1.25e-15
(NEG)-(NEG+TMP)	-1.75e-14	2.78e-14	5.03e-13	5.08e-13	-2.57e-14	-1.06e-14	1.25e-15	1.87e-15	-7.8e-15	0.0e+0.0
(NEG)-(NEG+CP)	2.51e-13	2.97e-14	5.08e-13	5.69e-13	1.28e-14	6.25e-15	-1.56e-15	2.19e-15	1.5e-14	2.18e-15
Gas Species	H <sub>2</sub>	CO/CH <sub>4</sub>	CH <sub>4</sub>	CH <sub>4</sub> /O <sub>2</sub> /CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	F	CO	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	Cl	CO <sub>2</sub> /C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>
other peaks : 4-D <sub>2</sub> , 13/14-CH <sub>4</sub> , 17-H <sub>2</sub> O, 20-CD <sub>4</sub> , 27-C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> , 32-O <sub>2</sub> , 37-Cl, 40-Ar										

그러므로 TMP를 주 펌프로 사용하는 시스템에서는 NEG를 TMP 흡기구와 용기 사이에 설치함으로써 시스템의 배기 성능을 향상시키는 한편 수소와 물의 트랩 역할로 사용할 수 있다. [7]

SIP는 NEG 배기 속도 측정 시 시스템 내에서 발생하는 CH<sub>4</sub>를 제거하기 위한 보조펌프로 사용할 목적으로 설치된 것으로 직경 40 mm 관을 통해 상부 용기에 연결되어 있으므로 펌프의 유효 배기 속도는 약 10 L/s에 불과하다. 그러므로 NEG 펌프에 SIP를 병행하였을 때 SIP의 배기 속도가 낮아 활성기체의 배기 성능이 더 나아진 것은 없으며, TMP나 CP를 조합하였을 때 CH<sub>4</sub>가 거의 없어진 데 비해 SIP에서는 여전히 소량 존재하고 있다. 한편 H<sub>2</sub>의 분압은 SIP를 병행하여도 거의 비슷한 수준을 유지하는 반면 D<sub>2</sub>는 거의 없어졌다. CP를 보조로 사용하였을 때는 D<sub>2</sub>와 CH<sub>4</sub>는 거의 없어지고 H<sub>2</sub>와 H<sub>2</sub>O의 분압도 낮아졌다. 그러나 CO와 CO<sub>2</sub>의 경우에는 분압의 큰 변화가 없으며 O<sub>2</sub>의 경우 오히려 NEG 펌프와 병행함으로써 줄어들었다. 한편 NEG 펌프와 CP, SIP를 동시에 가동시켰을 때 시험 용기내의 압력은  $5.2 \times 10^{-9}$  Pa이었다.

#### 4. 결 론

3개의 St707 NEG 모듈로 구성된 NEG 펌프를 제작하여 이를 주 펌프로 하는 초고진공 시스템을 제작하였다. H<sub>2</sub>, D<sub>2</sub> 그리고 CO에 대한 NEG 펌프의 초기 배기 속도는 각각 450, 300 그리고 240 L/s로 측정되었으며 몬테카를로 계산에 의해 이때의 흡착 계수는 각각 0.0024, 0.0023 그리고 0.0062로 구하여졌다. 또한 450℃ 활성화 중 평형압력 측정을 통해 NEG의 수소 방출 특성을 나타내는 상수들인 B, K

및  $\alpha$ 를 실험적으로 구하였다.

한편 NEG 펌프, TMP 및 CP의 초고진공 영역에서의 진공성능을 조사하였다. NEG 펌프만으로는 CH<sub>4</sub>의 축적 때문에  $10^9$  Pa 대의 진공도를 달성하지 못하였지만 10 L/s정도의 보조펌프만으로도  $10^9$  Pa 대를 얻을 수 있었으며, CP와 병행하여 사용하면  $5.4 \times 10^9$  Pa의 진공을 얻을 수 있었다.

#### 참 고 문 헌

- [1] T. Maruyama, S. R. In, Y. P. Lee, S. Yokouchi and S. H. Be, Jpn. J. Vac. Soc. **34**(6), 556 (1991).
- [2] S. R. In, T. Maruyama, S. Yokouchi and S. H. Be, Jpn. J. Vac. Soc. **34**(12), 882 (1991).
- [3] H. A. Sakaue, Y. Hirano, S. R. In, K. Watanabe and S. H. Be, Vacuum **44**(5-7), 523 (1993).
- [4] C. Benvenuti and F. Francia, J. Vac. Sci. Technol. A **6**, 2528 (1988).
- [5] R. J. Knize and J. L. Cecchi, J. Appl. Phys. **54**(6), 3183 (1983).
- [6] R. Giannantonio and M. Bovisio, A. Conte, Vacuum **55**, 27 (1999).
- [7] P. Redhead, J. Vac. Sci. Technol. A **10**(4), 2665 (1992).
- [8] P. Redhead, J. P. Hobson and E. V. Kornelson, "The Physical Basis of Ultrahigh Vacuum", (American Institute of Physics, 1993), p.290.
- [9] J. R. Young, J. Appl. Phys. **31**(5), 921 (1960).
- [10] K. Ichimura, M. Matsuyama, and K. Watanabe, J. Vac. Sci. Technol. A **5**(2), 220 (1987).
- [11] N. Venkataramani, F. Ghezzi, G. Bonizzoni, and W. Shmayda, Fusion Technology **29**, 91 (1996).