

이중 콘덕턴스법에 의한 실기체방출률 측정

인 상 렬

한국원자력연구소
(1996년 5월 15일 접수)

Measurement of Real Outgassing Rate using Double Conductance Method

Sang Ryul In

Korea Atomic Energy Research Institute
(Received May 15, 1996)

요 약 - 재료의 흡착능력에 상관없이 실기체방출률을 측정할 수 있는 효과적인 방법으로 이중 콘덕턴스법을 제시하고 이론적인 배경을 설명했다. 이 방법을 사용하여 핵융합 실험장치 방호판 재료로 널리 쓰이는 탄소섬유 복합재(carbon fiber composite)의 실기체방출률 및 흡착계수를 계산했다. 실험에 사용한 재료의 경우 40°C 에서 실기체방출률은 측정값의 5배 이상으로 $3.5 \times 10^{-4} \text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}\cdot\text{m}^2$ (질소등가치) 이었으며 흡착계수는 0.018(물과 수소가 주 잔류기체이다) 정도로 계산되었다.

Abstract - Double conductance method is proposed as an effective way to measure real outgassing rates of materials regardless of their adsorbing power. The real outgassing rate and the sticking coefficient of the CFC(carbon fiber composite) which is used widely as the material for armor plates in fusion experiment devices were obtained by adopting this method. At 40°C the real outgassing rate was $3.5 \times 10^{-4} \text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}\cdot\text{m}^2$ (in N_2 equivalent), which was higher than 5 times the measured one, and the sticking coefficient was about 0.018(H_2O and H_2 were the main residual gases).

1. 서 론

진공시스템의 도달압력에 영향을 주는 기체원으로는 결함을 통한 누설, 펌프의 역류 외에 내벽표면으로 부터의 기체방출이 있다. 기체누설은 통상적 방법에 의해 $10^{-11} \text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$ 내외의 값으로 낮추는 것이 어렵지 않다. 또 펌프 자체의 역류는 궁극적으로 도달압력을 제한하지만 실제 얻을 수 있는 진공도는 그보다 항상 나쁘기 마련이다. 넓은 진공도 범위에 걸쳐 결국 표면에서의 기체방출이 도달압력을 결정하는 요소가 되는데 이것은 다음과 같은 예를 통해 쉽게 알 수 있다. 진공용기의 내벽 표면적이 1 m^2 인 경우 기체방출량이 $5 \times 10^{-9} \text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}\cdot\text{m}^2$ (상당한 시간과 온도로 용기를 가열한 후) 이고 유효배기속도가 $0.1 \text{ m}^3/\text{s}$ 이면 $5 \times 10^{-8} \text{ Pa}$ 의 초고진공을 얻지만 이 값은 좋은 품질의 터보 분자펌프가 가지는 고

유도달진공도(10^{-9} Pa 대) 보다 낮다. 따라서 용기벽을 잘 처리하여 기체방출률을 줄이고 더 원천적으로는 기체방출률이 적은 재료를 개발하여 사용하는 것이 좋은 진공시스템을 만드는 데 있어서 필수적이다. 진공용기 또는 용기내 부품으로 사용하려는 재료의 기체방출률을 측정하는 것은 좋은 진공을 얻기 위한 노력의 첫 걸음이라고 할 수 있다.

기체방출률을 측정하는 방법으로는 측정대상 재료로 용기를 만들어서 표준용기와 연결하여 사용하는 것과 다른 재료로 만든 용기에 시료를 넣고 재는 방법이 있다. 후자의 경우 용기벽으로 부터의 기체방출률을 시료에 비해서 아주 낮아지도록 해야 한다. 한편 재료 표면에서 떨어져 나온 기체분자들을 빨리 배기시키지 않으면 일부는 다시 벽에 흡착되므로 측정되는 값이 재료의 고유한 기체방출률 즉 실기체방출률보다 적어진다. 물론 일반적인

재료의 경우 기체분자에 대한 흡착계수의 값이 작기 때문에 재흡착의 영향이 잘 나타나지 않도록 측정시스템을 구성하는 것이 어렵지 않다[1]. 그러나 때로는 재료의 흡착률이 매우 커서 기체방출률의 정확한 측정이 어렵게 되는 경우가 있는데 특별한 방법에 의해 흡착계수 및 실기체방출률을 같이 구할 수도 있다. 한편으로는 기체배기를 극단적으로 제한하여 흡착, 탈리, 재흡착의 과정을 거치며 평형이 이루어지도록 하면 주어진 온도에서 특정 재료의 특정 기체에 대한 평형압력을 구할 수 있고 이로부터 반응상수등을 계산할 수 있다[2].

본 논문에서는 오리피스 콘덕턴스(orifice conductance) 변화법[3, 4]에 의해 용기속에 들어있는 시료의 실기체방출률을 측정하는 이론적 배경을 설명하고 이를 토카막 장치와 같은 핵융합 실험장치에서 플라즈마 노심으로부터의 고열유속에 대한 용기보호 및 입자제어를 위해 설치되는 디버터판, 리미터등 플라즈마 대향부품의 표면재료로 개발된 탄소섬유 복합재(carbon fiber composite: CFC)의 기체방출률 측정에 적용시켜 보았다. 탄소는 다공성이며 수소흡착성이 강한 것으로 알려져 있다[5].

2. 기체방출률측정의 이론

그림 1과 같은 기체방출률 측정시스템에서 기체방출률이 q_i 인 시료를 기체방출률이 q_w 인 용기에 넣어 진공으로 배기하였을 때 압력이 일정하게 P_1 으로 유지되는 정상상태에서 다음과 같은 입자평형식을 얻는다. 단위는 특별한 언급이 없는 한 MKS 단위를 사용한다.

$$q_0 = q_i + q_w = CA_s P_1 + CA_w S_w P_1 + S_c P_1 \quad (1)$$

이 때 C 는 용기벽에 단위면적 단위시간당 부딪히는 기체의 체적으로 $\bar{v}/4 (=36.4 (T/M)^{1/2} [m/s]$ (T 는 온도[°K], M 은 분자량), \bar{v} 는 기체분자의 평균속도)로 주어진다. 또 A_s 와 A_w 는 각각 시료와 용기의 표면적, s_s 와 s_w 는 각각의 흡착계수이며 S_c 는 유효배기속도로써 펌프의 배기속도 S_p 와 오리피스 콘덕턴스 $C_0 (=CA_0$; A_0 는 오리피스의 면적)에 의해 $1/S_c = 1/S_p + 1/C_0$ 로 주어진다. (1) 식 오른쪽 마지막항은 시료의 기체방출률중 측정가능한 값(q_m)으로 실기체방출률(q_0)에서 시료 또는 용기벽에 흡착되어 버린 것을 제외한 것이다. (1) 식에서 P_1 을 소거하고 q_m 에 대해 정리하면 (2)식을 얻는다.

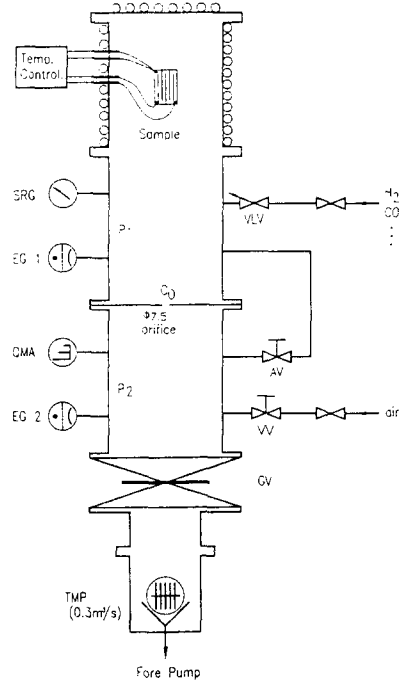


Fig. 1. Schematics of the outgassing rate measurement system. (SRG: spinning rotor gauge, EG: extractor gauge).

$$q_m = q_0 S_c / (S_c + S_a), S_a = C(A_s s_s + A_w s_w) \quad (2)$$

이때 S_a 는 흡착률이라고 정의될 수 있다. q_m 은 $C_0(P_1 - P_2)$ (그림 1참조)로 계산된다.

(1) 식과 (2) 식에서 q_i 에 가까운 q_m 값을 얻기위한 조건을 생각할 수 있다. 먼저 ① $q_i \gg q_w$ 가 만족되어야 한다. “총기체방출률 = 단위면적당 기체방출률 × 면적” 이라고 할 때 조건 ①을 만족하기 위해서는 결국 시료의 면적을 최대한 늘리는 한편 충분한 가열을 통해 용기의 기체방출률을 낮추어 주는 것이 필요하다. 일반적인 경우 시료의 면적을 늘리는데 한계가 있으므로, $q_i > q_w$ 는 가능하지만 조건 ①을 완벽하게 만족하기는 어렵다. 따라서 용기만의 기체방출률을 먼저 측정하여 시료를 포함한 기체방출률에서 빼주어야 한다. 둘째로 ② $S_c \gg S_a$ 가 성립해야 한다. 그림 2와 같이 q_m 을 S_c 의 변화에 따라 그려보면 이를 쉽게 알 수 있다. 일반적으로 $S_p \gg C_0$ 이므로 조건 ②는 $C_0 \gg S_a$ 와 동등하다. 이 조건을 만족시키도록 S_a 를 잘 조절하기 위해서는 $A_s s_s \gg A_w s_w$ 가 성립하면 좋다. 따라서 강한 흡착성을 갖는 재료로 용기를 제작하는 것은 피해야 한다. C_0 와 S_a 의 정의로부터 조건

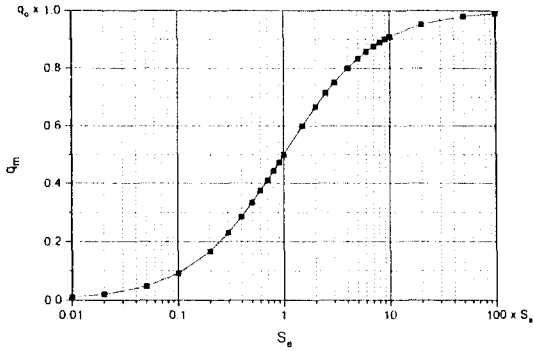


Fig. 2. Measured outgassing rate q_m as a function of the effective pumping speed S_e .

②는 결국 $A_0 \gg A_s s_i$ 와 같다. 입자가 한번 오리피스에 부딪히는 동안 시료에 대략 A/A_0 번 부딪힌다고 하면, 오리피스의 배기확률이 거의 1 이므로 이 조건은 오리피스에서의 배기속도가 시료자체의 흡착속도보다 커야함을 뜻한다. 한편 표준용기에서 측정값들의 정확도를 높이기위해서 오리피스의 상대적인 크기를 제한하고 있는데 [6] 이것을 받아들이면 ③ $A_0 \leq A_p/100$ (A_p 는 표준용기 원통의 단면적)가 된다. 조건 ②와 조건 ③을 합치면 $A_s s_i \ll A_0 \leq A_p/100$ 처럼 A_0 가 가질 수 있는 범위가 주어지는데 예를 들어 $A_i \approx A_p$ 인 경우 s_i 가 0.001 보다 작으면 이를 만족하는 적절한 A_0 값을 결정할 수 있다.

만일 합리적인 A_0 값을 얻기 힘들다면(시료의 크기가 너무 크거나 흡착성이 높은 경우) 오리피스가 없는 단일 표준용기에서 배기속도가 교정된 진공펌프를 사용하여 기체방출률을 측정하는 것이 가능하다. 이것은 윗식들에서 $C_0 = \infty$ 즉 $S_e = S_p$ 로 놓은 것과 같다. 조건 ②를 만족하기 쉬워짐을 알 수 있다.

한편 조건 ②가 만족되는 것에 상관없이 이중 콘덕턴스법을 사용하여 실기체방출률을 측정할 수 있다. 이 방법은 Terada 등 [4]이 CM(conductance modulation)법이라고 명명한 것과 유사한 방법이지만 그들은 펌프의 역류값을 측정하는 데 중점을 두고 흡착은 고려하고 있지 않는 반면 본 논문에서는 흡착의 영향에 관심을 두고 오히려 펌프의 역류는 무시하고 있다. 표준용기가 교대로 사용할 수 있는 두가지 크기의 오리피스를 가지고 있을 경우 $q_0 \approx q_m$, $s_w \approx 0$ 으로 가정하면 (3) 식이 성립한다.

$$q_0 = CA_s s_i P_1 + q_m = CA_s s_i P_1' + q_m' \quad (3)$$

이때 '은 두번째 오리피스로 측정된 값을 가리킨다.

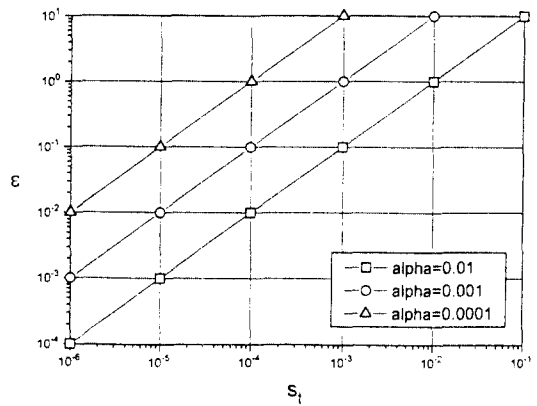


Fig. 3. Enhancement factor ϵ as a function of the sticking coefficient s_i for three values of α .

이제 (3) 식을 정리하면 (4) 식을 얻는다.

$$CA_s s_i = (q_m' - q_m)/(P_1 - P_1') \\ = \frac{C_0'(P_1' - P_2) - C_0(P_1 - P_2)}{P_1 - P_1'} \quad (4)$$

또 (4) 식을 정리하면 다음과 같이 된다.

$$s_i = \alpha \frac{\beta(P_1' - P_2) - (P_1 - P_2)}{P_1 - P_1'} \quad (5)$$

이때 $\alpha = A_w/A_i$, $\beta = C_0'/C_0$ 이다. C_0' 은 용기의 기체방출이 무시될 수 있는 압력영역까지 기체를 주입하면서 표준용기 상하단의 압력들을 측정하므로써 $C_0' = C_0 P_2'(P_1 - P_2)/P_2(P_1' - P_2')$ 식에 의해 구해진다.

(4) 식을 (3) 식에 대입하면 q_0 는 다음과 같이 표현된다.

$$q_0 = \frac{C_0'(P_1' - P_2)P_1 - C_0(P_1 - P_2)P_1'}{P_1 - P_1'} \quad (6)$$

(5) 식과 (6) 식의 우변은 항상 측정가능한 값으로 이루어져 있어서 좌변이 쉽게 계산되므로 (5) 식에서는 s_i 를, (6) 식으로 부터는 q_0 를 구할 수 있다.

이상의 관계식들은 원리적으로 오리피스 하류쪽의 영향을 받지 않고 성립하지만 정성적으로 쉽게 이해하기 위해 하류쪽 용기의 기체방출률도 무시가능하다고 가정하면 $q_0 = q_m(1 + \epsilon)$ ($\epsilon = (P_2'/P_2 - 1)/(1 - P_1'/P_1)$) 이 되고 또 $s_i = \epsilon \alpha(1 - P_2/P_1) = \epsilon \alpha(S_p/(C_0 + S_p)) \approx \epsilon \alpha$ 로 나타낼 수 있다. 그림 3 은 ϵ 의 변화를 몇가지 α 값에서 s_i 에 관해 그린 것이다. 예를 들어 $\alpha = 0.01$, $s_i = 0.0001$ 이라면 $\epsilon = 0.01$ 이 되며

이는 기체방출률 측정값에 1% 정도의 오차가 있음을 뜻한다. 또 극단적인 예로 저자가 실험했던 LNP(lumped non-evaporable getter pump; 집합형 비증발 흡착제 펌프)[3]의 NEG(non-evaporable getter)모듈들은 어느 기간이상 사용한 후에는 400°C 이상의 온도에서 가열하여 흡착된 수소를 방출시키는 활성화과정이 필요한데 이 경우 $\alpha \approx 0.00015$, $s=0.0035$ 로써 $\epsilon \approx 23$ 이 된다. 이것은 측정된 기체방출률이 실기체방출률의 24분의 1에 불과하다는 것을 나타낸다. 방출되었던 수소의 대부분이 다시 흡착되어 버리므로 긴 시간을 소비해야 원하는 총기체방출량에 도달하게 되므로 활성화가 매우 비효율적으로 진행되고 있음을 보여준다. 기하학적인 제약으로 인해 콘덕턴스를 크게 하는 데는 한계가 있으므로 NEG의 흡착속도보다 큰 배기속도를 만들어 내는 것은 현실적으로 불가능하다. 결국 LNP와 같은 구조에서는 NEG 처럼 흡착성이 큰 재료의 실기체방출률을 직접적으로 구하는 방법은 없으며 (6) 식과 같은 계산과정이 필수적이다.

3. 실험 및 결과

실험장치는 그림 1과 같이 시료실, 표준용기 및 진공 펌프로 구성되어 있다. 시료실에는 알루미늄아세틸의 가공성 세라믹으로 만들어진 시료받침에 구리로 만들어진 시료꽃이가 설치되어 있다. 시료꽃이는 진공전류단자를 통해 온도제어기 전원에 연결되어 있어 탄소 시료를 꽃으면 바로 통전이 가능하도록 만들어 졌다. 용기밖에는 냉각관이 부착되어 탄소가열중 용기의 온도상승을 억제하고 있다. 표준용기는 국제규격에 맞게 제작된 것으로 점성진공계(Leybold VISCOVAC VM212)로 교정한 두개의 Extractor 진공계(Leybold IONIVAC IM520/IE514)가 내경 150 mm의 상하용기에 각각 설치되어 있다. 하류쪽 용기에는 사중극형 진공분압계(Baltzers QMG421-1/QMA125)를 설치했다. 상하용기 사이에는 직경이 15 mm이고 질소에 대한 콘덕턴스가 $2.15 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s}$ (수소에 대해서는 $8.05 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s}$, 40°C 기준)인 오리피스가 있다. 상하용기는 전금속밸브를 통해 우회관로로 연결되어 있는데 이는 평소에는 또는 용기가열시 위쪽 용기의 배기를 원활하게 하기 위한 것이지만 때에 따라서는 제 2의 오리피스를 대신할 수도 있다. 이 밸브를 활짝 열면 콘덕턴스가 26% 증가한다(즉 $\beta=1.26$). 진공펌프로는 배기속도 $0.3 \text{ m}^3/\text{s}$ 의 자장제어형 터보 분자펌프(Shimadzu

300M)가 사용되었고 전단배기에는 국산 유회전펌프(Woosung D10A)가 사용되었다. 전체장치는 실험전에 충분히 가열하고 시료를 장전하였는데 시료실은 냉각관의 접합에 사용한 용접제의 용융온도 때문에 200°C에서, 표준용기는 220°C에서, 펌프 앞단의 밸브는 200°C에서, 또 펌프 흡기구 플렌지는 120°C로 가열하였다. 통상 24시간 가열후 40°C까지 냉각하고 10시간 배기후에는 상하용기 모두 10^{-8} Pa 대의 진공도를 가졌다. 실험중에는 용기외부에 감겨있는 리본형 전열선을 가동하여 실온의 영향을 받지않는 40°C에서 전체 용기온도가 항상 일정하게 유지되도록 했다. 용기 개방시에는 토카막 장치에서의 실제 작업상황을 상정하여 건조질소를 사용하지 않고 흡습휠터를 통과시킨 공기를 전금속밸브를 통해 용기에 집어넣었다.

시료는 일본 동양탄소(Toyo Tanso)사제 CX-2002U CFC를 75 mm×135 mm×3 mm로 건식가공한 후 특별한 조치를 취하지 않고 흡습제가 들어있는 용기안에서 그대로 3개월 정도 보관했던 것이다. 이 시료는 실험으로 교대로 갈라 저장값이 0.1Ω 정도 되도록 만든 후 직접 전류를 흘려 가열하며 온도는 CA(chromel-alumel) 열전대로 측정했다. 시료용기에는 시료 두개를 동시에 장착했다.

이 실험장치는 토카막 운전과 보수과정에서 일어날 수 있는 다양한 상황과 조건에서 탄소가 나타내는 진공 특성을 조사할 목적으로 범용의 진공 교정설비를 이용하여 구성된 장치로써 두번째 콘덕턴스로 오리피스 대신 밸브를 이용하고 있어서 정밀한 측정을 기대하기는 힘들다. 참고로 Monte Carlo 계산에 의하면 용기몸통 중앙부에 콘덕턴스를 놓는 것은 정상적 위치의 오리피스에 비해 1~9.5%(펌프 배기확률이 0.1에서 0.9까지 변할 때)만큼 하류쪽 용기의 압력 및 계산된 콘덕턴스 값을 낮게 평가하도록 만든다. 이 실험에서 콘덕턴스의 변화가 26% 이고 q_0 및 s_0 가 콘덕턴스의 일차함수 이므로 추가적 오차는 최대 2.5% 정도다. 이 논문에서는 탄소시료장착후 진공배기하는 도중 급격한 압력변화가 둔화된 시점(배기시작후 320분)에서의 압력 측정자료를 인용한다.

(3) 식은 이미 언급한 대로 용기자체의 기체방출이 무시될 수 있을 때 성립하지만 이 실험에 사용한 시료의 표면적이 충분히 크지 않아서 용기의 기체방출을 보정해 주어야 한다. 이를 위해 시료의 기체방출실험전에 빈 용기만으로 공기주입과 배기 및 가열의 과정을 10여회

Table 1. Calculation of the real outgassing rate and the sticking coefficient of the CFC sample.

P_{1b} 1.35×10^{-4}	P_{2b} 1.22×10^{-5}	P_{1b}' 1.29×10^{-4}	P_{2b}' 1.36×10^{-5}	P_{1a}' 1.57×10^{-5}	P_{2a}' 3.43×10^{-6}
$P_{1b}' - P_{1a}$ 1.13×10^{-4}			$P_{2b}' - P_{2a}'$ 1.02×10^{-5}		

$CA_s, \gamma = (C_o'(P_{1b}' - P_{2b}') - C_o(P_{1b} - P_{2b})) / (P_{1b} - P_{1b}') = 0.088$
 $s_t = \gamma / CA_s = \alpha(\beta(P_{1b}' - P_{2b}') - (P_{1b} - P_{2b})) / (P_{1b} - P_{1b}') = 0.018$
 $q_m' = C_o'((P_{1b}' - P_{1a}') - (P_{2b}' - P_{2a}')) = 2.79 \times 10^{-6}$
 $q_o = q_m' + \gamma P_{1b}' = 1.42 \times 10^{-5}$
 $q_m = q_o - \gamma P_{1b} = 2.3 \times 10^{-6}$

Unit: P[Pa], γ [m³/s], q[Pa.m³/s], a: without sample, b: with sample, ' : with orifice+second conductance, $C \approx 121.7$ m/s.

시행한 후 용기의 배기곡선을 기록했으며 시료장착후의 배기곡선을 구해 용기만의 것을 빼주었다. 용기에의 흡착은 여전히 무시했다. 관계식의 유도과정은 생략하고 표 1에 측정압력자료, 계산식 및 계산과정과 결과를 정리했다. 흡착계수의 계산식은 변함없이 없다. 압력은 진공계의 감도를 보정한 절대압력값이다. 이 시점에서 용기내 기체는 물과 수소로 이루어져 있는데 표 1은 모두 질소 등가치로 계산되어 있다. 정성적으로 보면 기체방출률 q_o 는 잔류기체 구성성분의 각 실기체방출률을 질소 등가치로 바꾼 후 대수적으로 합친 것에 해당하며 흡착계수 s_t 는 구성 기체의 흡착계수들로부터 계산된 압력가중 평균값에 해당한다. 이 실험에서 용기자체의 기체방출은 우회관로의 밸브를 열어놓은 상태에서만 측정되었다. 측정된 압력으로 부터 직접 계산된 기체방출률 q_m' 에 비해 실기체방출률은 5배 이상(간접적으로 계산되는 q_m 에 비해서는 6배 정도, 참고로 이 실험에서 $\alpha = A_o/A_s = 4.36 \times 10^3$ 이고 $s_t = 0.018$ 이므로 $1 + \epsilon \approx 5$) 큰 값으로 평가되고 있다. 시료의 총면적이 4.05×10^2 m² 이므로 단위면적당 실기체방출률은 3.5×10^{-4} Pa.m³/s.m²이다. 같은 시점에서 용기의 단위면적당 기체방출률은 1.95×10^{-6} Pa.m³/s.m²로 계산된다.

측정된 기체방출률로부터 추정할 때 어떤 계의 도달압력을 유효배기속도에 반비례할 것으로 예상하는 것이 일반적이지만(즉 $(P_{\infty})_{exp}$ [예상도달압력] $\sim q_m$ [어떤 시점의 기체방출률 측정값]/ S_o) 시료 또는 용기의 흡착성이 높고 면적이 넓은 경우는 유효배기속도를 증가시켜도 도달압력이 그만큼 낮아지지 않고 큰 값을 유지한다는($q_m/S_o < P_{\infty} \leq q_o/CA_s$) 것에 유의해야 한다. 이론 및 실험의 결과를 원언에서 건조하기로 계획했던 중형 토카막 KT-2 장치의[7] 플라즈마 밀폐용기 진공계산에 이용해 보자. KT-2 토러스 진공용기를 고열로 부터 보

호하기 위해 용기내벽을 덮고 있는 내열방호판의 전면적은 27 m²로 위치에 따라 몇가지 다른 탄소재료를 사용하는 것으로 설계하고 있지만 이 실험에서 구한 값을 모두 같이 적용하면 총기체방출률은 9.45×10^{-3} Pa.m³/s로서 진공배기계의 설계 유효배기속도가 4 m³/s라고 하면 용기조립후 초기배기시작 수시간후 일차적으로 예상되는 용기압력은 2.36×10^{-4} Pa이다. 이제 탄소의 흡착률(CA_s)을 계산하면 5.9 m³/s로 총유효배기속도가 9.9 m³/s 이므로 실제 용기압력은 9.54×10^{-5} Pa이 된다. 유효배기속도를 50% 증가시켜 6 m³/s가 되었다면 실제 용기압력은 7.94×10^{-5} Pa이 되어 약 16%의 압력감소가 기대될 뿐이다.

4. 결 론

재료의 흡착성이 강할 때는 기체방출률의 측정값이 재료의 고유한 실기체방출률과 많은 차이를 보인다. 본 논문에서는 이중 콘덕턴스법을 사용하여 미지수인 흡착계수를 구하므로써 실기체방출률을 간접적으로 계산할 수 있음을 이론적으로 설명했다. 이 방법을 CFC 시료의 흡착계수와 실기체방출률을 측정하는데 적용했다. 본 실험에서는 두번째 콘덕턴스로 비록 밸브를 사용하였지만 콘덕턴스 변화를 통해 실기체방출률의 간접측정이 가능함을 보여 주었다. 더 정밀한 측정을 위해서는, 특히 흡착성이 낮은 재료의 경우를 고려할 때(참고로 스텐레스 강으로 만들어진 표준용기의 흡착계수는 수소에 대해 0.00001 내외인 것으로 계산되었으며 이때 실기체방출률로부터의 측정편차는 1% 정도에 불과하므로 신뢰성있는 측정을 위해 정밀한 실험장치 구성이 요구된다), 콘덕턴스 변화가 가능하도록 특별히 제작된 오리피스를 설치하는 것이 필요하다.

참고문헌

1. K. Odaka, *J. Jpn. Vac. Soc.* **33**, 503(1990).
2. J.L. Cecchi and R.J. Knize, *J. Vac. Sci. Technol.* **A2**, 1214(1984).
3. S.R. In, T.Maruyama, S. Yokouchi, and S.H. Be, *J. Jpn. Vac. Soc.* **34**, 882(1991).
4. K. Terada, T. Okano, and Y. Tuzi, *J. Vac. Sci. Technol.* **A7**, 2397(1989).
5. T. Tanabe, *核融合研究* **61**, 367(1989).
6. 日本機械工業連合會, 眞空材料におけるガス放出量の試験評價法に關する調査研究報告書(II), *日機連* **62先端-20**(1988).
7. 인상렬, 황철규, 이광원, 김성규, 정승호, 윤병주, 홍봉근, 윤재성, 송우섭, 정문규, 핵융합로연구/토카막장치기술개발 제3차년도 연차보고서(과학기술처), **KAERI/RR-1536/94**(1995).