

진공표준용기에서 진공계위치에 대한 고찰

인 상 렬

한국원자력연구소
(1995년 3월 9일 접수)

Consideration on the Position of the Vacuum Gauge in a Test Dome

Sang Ryul In

Korea Atomic Energy Research Institute
(Received March 9, 1995)

요 약 - 진공표준용기에서 압력을 측정하는 진공계의 위치는 측정압력으로 부터 계산된 진공펌프의 배기속도가 진실한 값에 얼마나 가까운가를 결정하는 중요한 요소이다. 본 논문에서는 압력을 유효배기확률에 반비례하는 양으로 보아 해석적 방법으로 적절한 진공계위치를 계산하고 있다. 또 진공계가 차지하는 폭과 펌프의 고유배기확률이 압력(또는 배기속도) 측정값의 정확도에 미치는 영향에 대해 논의한다.

Abstract - The position of a vacuum gauge in a test dome is an important factor determining the accuracy of the pressure measured by the gauge and consequently that of the calculated pumping speed of a vacuum pump. In this paper proper gauge positions are calculated using a simple analytical method based on the fact that the pressure is reversely proportional to the effective pumping probability. The influence of the gauge size and the intrinsic pumping probability of the vacuum pump on the measuring accuracy of the pressure(or pumping speed) is also discussed.

1. 서 론

진공펌프의 고유배기확률 또는 배기속도를 실험적으로 구하기 위해서는 배기량과 압력을 측정하면 된다. 특히 오리피스법을 사용하는 경우에는 압력측정만으로 필요한 값들을 모두 계산해낼 수 있다. 물리적으로 진공펌프의 배기속도는 펌프의 흡입구에 단위시간당 입사되는 기체의 체적에 펌프의 고유배기확률을 곱한것이다. 고유배기확률은 어떤 진공펌프가 가지고 있는 특정 배기기관의 고유성능으로서 다른 방법으로 유추하는 것도 가능하지만 이를 공인된 실험적 방법으로 구하는 것이 필요하다.

진공펌프의 배기속도를 측정할 때 펌프가 무한대의 용기에 달려 있다고 가정하면 배기구 바로 근처를 제외하고는 압력이 용기내의 어디에서나 같다고 할

수 있어서 진공계의 위치가 전혀 문제되지 않는다. 그러나 현실적으로 무한대의 용기를 만드는 것은 불가능하므로 유한한 크기의 용기를 사용할 수 밖에 없는데 이 경우 기체의 흐름이 있는 방향으로 압력변화가 필연적으로 수반되므로 진공계를 어디에 설치하는가가 중요해 진다. 물론 쉽게 상상할 수 있는 대로 진공계를 펌프의 흡기구면에 윗쪽만을 바라보도록 설치한다면 문제가 해결될 것으로 보이지만 이는 펌프의 배기속도 자체에 영향을 주므로 곤란하다.

배기속도 측정을 위해 진공규격(예를들면 ISO 1607, JVIS 005 등)으로 정해 사용하고 있는 표준용기는 직원통형으로서 크기가 정해져 있지 않은 대신 직경과 길이의 비가 1.5이고 진공계를 흡입구로 부터 용기의 반경만큼 떨어진 벽에 수직으로 달도록 되어있다. 만일 진공계를 흡기구면에 가능한 한 가까운 용기벽에

설치한다면 어떻게 될까 하는 의문을 가질 수 있는데 그렇게 하면 매우 낮은 압력을 측정하게 되어 배기 속도를 과대평가하는 결과가 된다는 것이 문제의 핵심이다. 그 이유는 바로 기체가 용기의 입구에서 출구(펌프의 흡기구)쪽으로 흐르고 있어서 펌프쪽으로 향하는 입자수에 비해 펌프쪽에서 나오는 입자의 수가 적기 때문에 압력이 모든 방향에 대한 평균적인 값이라고 할 때 실제 측정압력은 기체가 흘러가는 한쪽 방향만을 고려하는 것에 비해 적어지는 것이다. 표준 용기에서 정해진 진공계의 위치가 실제로 진실된 압력(무한대의 용기에서 측정되는)값을 주는 곳이라고 보기는 어렵고 다양한 펌프 및 진공압력계의 성능을 상대적으로 평가하기 위해 타협적으로 결정된 위치라고 할 수 있다. 왜냐하면 진공계가 차지하는 폭과 심지어 측정대상인 펌프의 배기확률 자체가 측정압력의 정확도에 영향을 줄 수 있으며 더나가서 유한한 용기에서 생길 수밖에 없는 입자운동의 비등방화(원통용기의 직경이 작아질 수록 원통축방향으로의 방향여현성분이 커진다)가 압력측정값을 낮추는 작용을 하기 때문이다. 그런데 이 비등방성이 펌프의 배기확률에도 직접적인 영향을 미칠 수 있어서 전체적 효과를 해석적으로 다룬다는 것은 어렵다. 이런 문제는 특수한 상황에 따라 Monte Carlo 계산으로 해결할 수 있다.

본 논문에서는 먼저 배기속도를 정확하게 구하기 위한 진공계의 위치를 배기확률의 측면에서 해석적으로 계산하고 여러 요인들에 의한 측정압력의 오차에 대해 논의한다.

2. 원통용기에서의 압력분포

그림 1과 같은 계에서 흡기구로부터 x 만큼 떨어진 곳에 한 가상단면을 가정할 때 이 면에서의 유효배기확률을 구하면 이로 부터 압력에 관한 정보를 얻을 수 있다.

펌프의 고유배기확률을 α , x 면에서 흡기구까지 통과확률을 $t(x)$ 라고 하면 x 면에서 유효배기확률 $\alpha_c(x)$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{1}{\alpha_c(x)} = \frac{1}{t(x)} + \frac{A}{A_p} \frac{1}{\alpha} - 1 \quad (1)$$

용기의 어떤 단면에 상류로 부터 부딪히는 입자의

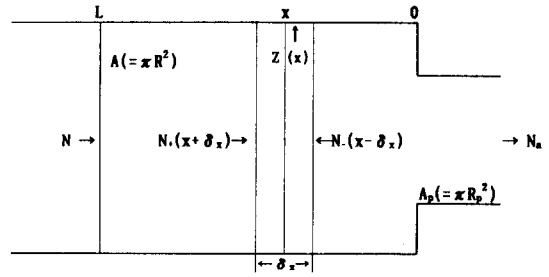


Fig. 1. Schematics of the test chamber. ($A(=\pi R^2)$; cross-sectional area of the chamber, $A_p(=\pi R_p^2)$; area of the pumping port)

수는 그 면에서의 실패기량(상류로 부터 입사되는 입자수 - 하류로 부터 입사하는 입자수)을 그 면에서의 유효배기확률로 나눈 것이다. 용기내로 단위시간당 N 개의 입자가 주입되고 펌프가 단위시간당 N_a 개의 입자를 배기한다면 정상상태에서 $N=N_a$ 가 되고 단위시간, 단위면적당 x 면에 상류로 부터 입사되는 입자의 수 $N_+(x)$, 하류로 부터 입사되는 입자의 수 $N_-(x)$, 펌프흡기구에 입사되는 입자의 수 N_0 는 각각 다음과 같이 주어진다.

$$N_+(x) = \frac{N_a}{A\alpha_c(x)} = \left(\frac{1}{t(x)} + \frac{A}{A_p\alpha} - 1 \right) \frac{N_a}{A} \quad (2)$$

$$N_-(x) = \frac{1}{A} \left(\frac{N_a}{\alpha_c(x)} - N_a \right) = \left(\frac{1}{t(x)} + \frac{A}{A_p\alpha} - 2 \right) \frac{N_a}{A} \quad (3)$$

$$N_0 = \frac{N_a}{A_p\alpha} \quad (4)$$

x 면에 단위시간 단위면적당 부딪히는 입자수 $N(x)$ 는 $N_+(x)$ 와 $N_-(x)$ 의 평균값으로 주어진다. 따라서 (2) 식과 (3)식으로 부터 (5)식이 얻어진다.

$$N(x) = \frac{N_+(x) + N_-(x)}{2} = \left(\frac{1}{t(x)} + \frac{A}{A_p\alpha} - \frac{3}{2} \right) \frac{N_a}{A} \quad (5)$$

같은 온도, 같은 속도분포 및 같은 기체를 생각할 때 어떤 두지점의 압력이 같아진다는 것은 단위시간 단위면적당 부딪히는 입자수가 같다는 것을 뜻한다. 만일 무한대의 용기를 사용하고 있다면 용기벽 어디에나 단위시간 단위면적당 N_0 개의 입자가 부딪힐 것이다. 따라서 이제 (4)식과 (5)식을 같다고 놓으면 $N(x) = N_0$ 우리가 찾으려고 하는 지점은 결국 $t(x) = 2/3$ 을

만족하는 곳이다.

$t(x)$ 즉 직경 $2R$, 길이 x 인 원통을 통과할 확률을 구하는 것은 상당한 주의를 요한다. 왜냐하면 임의의 원통에 대한 통과확률은 입자의 입사방향이 완전히 불규칙하다는 전제아래 구해진 것이므로(이는 직경이 훨씬 큰 다른 용기에 연결된 원통의 입구에서부터 통과확률을 산출할 때는 대개 성립한다) 원통의 중간 어느면으로 부터의 통과확률은 이미 그 면 위쪽의 원통부분을 입자가 지나오면서 받은 영향 즉 전진방향성분의 증가에 의해 같은 길이의 원통에 대해 주어지는 값에 비해 좀 더 큰 값을 나타내기 때문이다. 따라서 x 면 위의 원통의 길이($L-x$)에 따른 x 면에서의 방향여현분포의 변화를 고려해야 정확한 통과확률을 구할 수 있는 것이다. Steckelmacher[1]는 원통입구에서 출발한 입자가 어느 벽면에 도달할 확률을 직접 계산한 Clausing의 식을 이용하여 이를 해결하고 있는데 남아 있는 문제는 오리피스스의 유무와 크기가 측정용기에 입사되는 입자의 초기 방향여현에 결정적인 영향을 주며 펌프의 배기확률도 펌프에 흡입되는 입자들이 가지는 방향여현의 분포에 민감할 수 있다는 것이다. 이들을 전반적으로 포함하는 방법은 Monte Carlo 계산이 유일하다고 할 수 있다. 본 논문의 목적은 진공계 위치의 상대적 변화와 기타 요인들이 압력측정에 미치는 영향을 분석하려는 것이다. 가능하면 해석적으로 접근이 가능하고 분석이 용이한 간단한 식을 사용하고 있으며 방향여현의 분포는 일정하다고 가정한다.

원통의 통과확률에 관한 Clausing의 근사식은 다음과 같이 써진다[2].

$$t(x) = \frac{20 + 8(x/R)}{20 + 19(x/R) + 3(x/R)^2} \quad (6)$$

원통의 통과확률에 관한 많은 표현식들이 있는데 DeMarcus[3], Berman[4] 등의 정확한 식들은 고차항을 포함하고 있어서 함수꼴이 복잡하고, 반면 지나치게 단순화된 근사식들[2]은 넓은 범위에 걸쳐 보편적으로 적용기 어려운 것들이다. 그림 2는 (6)식과 여러 다른 표현식들을 비교하고 있다.

(6) 식에서 $t(x) = 2/3$ 이라고 놓고 이차방정식을 풀면 $x=R$ 이라는 해를 쉽게 얻을 수 있다. 참고로 Berman의 식을 사용하여 계산하면 $x=1.025R$ 이 되어 근사식에 의한 결과가 2.5% 정도의 오차범위 내에서

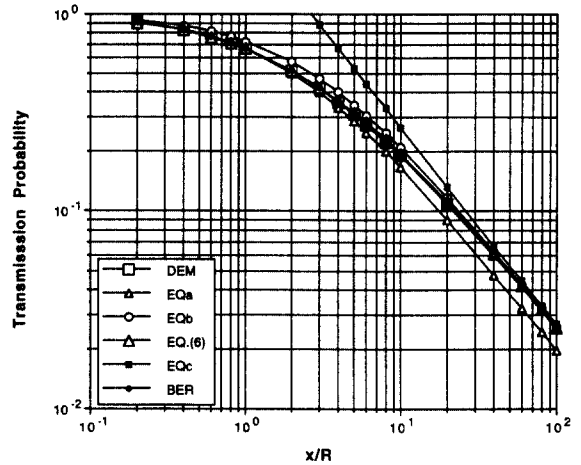


Fig. 2. Comparison of eq.(6) and other expressions for the transmission probability through a cylinder. (Eq.a; $P_t = 1/(1+x/2R)$, Eq.b; $P_t = 1/(1+3x/8R)$, Eq.c; $P_t = 8R/3x$)

정확함을 알 수 있다.

압력을 측정하는 면의 위치가 $x=R$ 지점에서 움직였을 때 측정압력이 어떻게 변하는지를 알아보기 위해 (5) 식을 (4)식으로 나누어 이를 $f(x) (=N(x)/N_0)$ 라고하면 (7)식을 얻게된다.

$$f(x) = \frac{\alpha A_p}{A} \left(\frac{1}{t(x)} - \frac{3}{2} \right) + 1 \quad (7)$$

(7)식은 $t(x) < 2/3$ 인 곳 즉 $x > R$ 인 곳에서는 측정압력값이 증가하고 특히 α 와 A_p/A 값이 커질수록 측정압력이 상대적으로 더 높아지리라는 것을 보여준다. 마찬가지로 $x < R$ 일 때는 측정압력의 감소를 나타낸다. 따라서 $x > R$ 인 곳에서는 펌프의 배기속도가 과소평가되고 $x < R$ 인 곳에서는 반대로 과대평가됨을 예상할 수 있다.

그림 3은 (6)식을 사용하여 (7)식을 α (또는 A_p/A)의 몇가지 값($\alpha A_p/A = 0.1 \sim 0.9$)에 대해 x/R 의 함수로 나타낸 것이다. α 가 커지면 그만큼 절대적인 기체의 흐름이 커지고 이는 큰 압력구배를 만들며 또 A_p/A 가 커지면 같은 펌프배기속도에 대해 용기가 느끼는 흐름이 상대적으로 커져서 역시 같은 결과를 낳는다. (7) 식에서 A_p/A 가 매우 작아지는 경우(무한히 큰 표준용기)는 언제나 $f(x) \sim 1$ 이 성립한다. 이 경우에는 (2)식과 (3)식이 모두 (4)식과 같아진다. 따라서 가능한 한 직경이 큰 표준용기를 사용하는 것이 배기속도

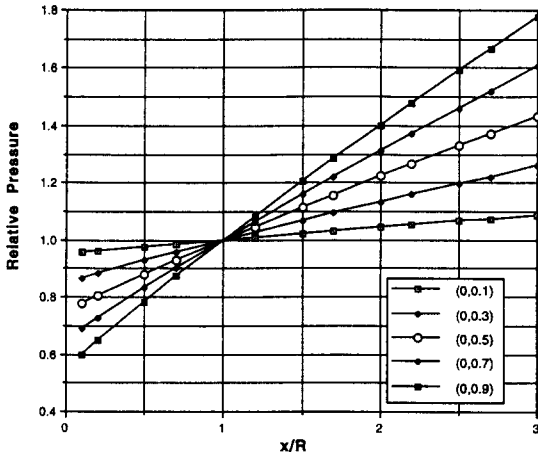


Fig. 3. Variation of the relative pressure($f(x)$) on the virtual plane in a test dome. ($\alpha A_p/A=0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9$)

측정의 오차를 줄일 수 있다. 이를 좀더 정량적으로 살펴보기 위해 (7)식을 x 에 관해 미분하면 (8)식을 얻게된다.

$$f'(x) = \frac{A_p}{A} \alpha \frac{d}{dx} \left(\frac{1}{t(x)} \right) \quad (8)$$

(8)식과 (6)식으로 부터 $x=R$ 근처에서 $f(x)$ 의 변화율을 구할 수 있다.

$$f'(x) \Big|_{x=R} = \frac{13 \alpha A_p}{28 R A} \quad (9)$$

(9)식에는 (7)식과 달리 R 이 더 들어가는데 그것은 이 식이 단위길이당 변화량을 계산하고 있기 때문이다. 예를 들어 $R=10$ cm, $A_p/A=1$, $\alpha=7/13$ 이라고 하면 (9)식의 값은 0.025가 되어 위치가 1 cm 틀려질 때(반경의 10% 만큼 움직일 때) 약 2.5%의 오차가 발생함을 말해준다. R 이 7.5 cm가 되면 오차는 1 cm 당 3.3% 썩으로 커진다. 흡기구에 비해 용기의 직경을 상대적으로 크게 하는 것(A_p/A 를 줄인다)과 함께 절대적인 크기도 증가시키는 것이 오차를 줄이는 데 중요함을 알 수 있다. 또 α 가 2배 큰 펌프에 대해서 같은 정확도로 배기속도를 측정하기 위해서는 R 이 $\sqrt{2}$ 배 늘어나야 한다. 물론 항상 $f(x)=1$ 이 되는 곳에 진공계를 정확하게 위치시키면 표준용기의 크기에 따른 영향을 안받는다 생각할 수 있겠지만 실제로는 진공계가 유한한 폭을 가지고 있어서 오차의 발생을

피할 수 없다. 이에 관해서는 다음 절에서 다루고 있다.

3. 벽면에서 측정되는 압력에 대한 고찰

그림 1에서 x 지점을 중심으로 폭 δ_x 인 띠를 가정 하면 이곳에 입사되는 입자들은 $x-\delta_x/2$ 및 $x+\delta_x/2$ 의 두 가상면을 반드시 통과해야 한다. 이때 임의의 용기단면을 지나간 입자가 그 면의 위치로부터 δ_x 의 범위안에 있는 용기벽에 부딪힐 확률을 β , 띠에서 방출된 입자가 벽에 다시 부딪히지 않고 양쪽 가상면을 직접 지나갈 확률을 σ 라고 하면 폭이 δ_x 이고 면적이 $A_x(=2\pi R\delta_x)$ 인 용기벽에 단위면적 단위시간당 부딪히는 입자의 수 $Z(x)$ 는 다음과 같은 관계식으로 주어진다.

$$A_x Z(x) = \beta A N_+(x + \delta_x/2) + \beta A N_-(x - \delta_x/2) + A_x Z(x)(1 - \sigma) \quad (10)$$

β 와 σ 는 각각 (11)[5] 및 (12)식으로 표현된다. 이때 σ 는 Monte Carlo 계산으로 구한 결과를 함수꼴로 바꾼 것이다.

$$\beta = y((y^2 + 1)^{1/2} - y), \quad y = \delta_x/R \quad (11)$$

$$\sigma = 1 - 0.5y + (18/125)y^2 \quad (12)$$

(10) 식을 정리하면 (13)식을 얻는다.

$$\begin{aligned} Z(x) &= (A/A_x)(\beta/\sigma)((N_+(x + \delta_x/2) + N_-(x - \delta_x/2))) \\ &= \frac{\beta}{y\sigma} \frac{(N_+(x + \delta_x/2) + N_-(x - \delta_x/2))}{2} \\ &= \frac{\beta}{y\sigma} N(x) \left(1 + \frac{N''(x)}{N(x)} \frac{y^2}{4} \right) \end{aligned} \quad (13)$$

이때 (13)식의 마지막항은 입자평형식 $N_+(x + \delta_x/2) - N_-(x + \delta_x/2) = N_+(x - \delta_x/2) - N_-(x - \delta_x/2) = N_a$ 로부터 $N_+'(x) = N_-'(x) = N'(x)$ 와 $N_+''(x) = N_-''(x) = N''(x)$ 라는 관계가 성립하므로 (5)식을 이용하여 구해진다. 이제 벽면에서 측정되는 압력이 실제압력을 가리키는 지점은 2장에서와 유사하게 $g(x) = Z(x)/N_0 = (\beta/y\sigma)(f(x) + f''(x)y^2/4) = 1$ 을 만족하는 x 값을 구하므로써 찾아낼 수 있다. $y=0$ 일 때는 2장에서 구한 것과 완전히 같은 결과를 얻는다.

그림 4는 $y=0.4$ 일 때 $1/g(x)$ 의 변화 즉 배기속도의 상대적 변화를 몇개의 α 값(0.1~0.9 A_p/A 로 가정)에

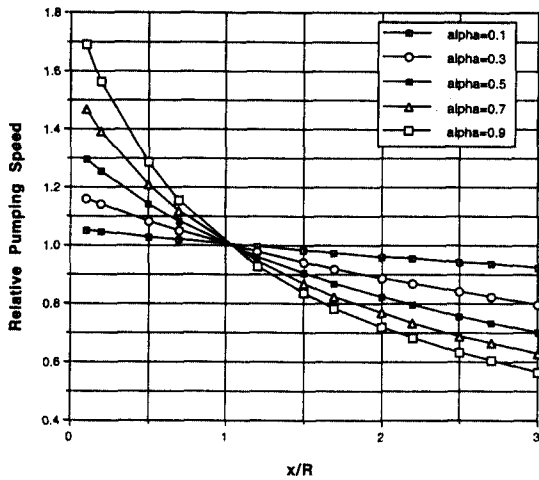


Fig. 4. Variation of the relative pumping speed($1/g(x)$) at the entrance of the gauge port in a test dome. ($y=0.4$, $\alpha=0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9$)

Table 1. x_c values(= x/R), satisfying the relation $Z(x) = N_0$, for several α 's and y 's

α	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9
0.1			1.002		
0.2			1.005		
0.3			1.012		
0.4	1.09	1.033	1.022	1.017	1.014
0.5			1.036		

대해 비교한 것이다. 이 그림은 그림 3과 원리적으로 동일하므로 그림 3에서 얻어진 결론이 그대로 적용된다. 또 표 1은 몇가지 y 및 α 값에 대해 $g(x)=1$ 이 되는 x/R 값(x_c)을 정리한 것이다. 이 표에 의하면 y (진공계가 차지하는 폭)가 커질수록 또 α (펌프의 배기확률)가 작아질수록(이것은 Monte Carlo 계산결과와 일치한다[6]) x_c 가 1 이상($x > R$)으로 계속 커지는 것을 알 수 있다. α 가 작아질수록 x_c 의 값이 증가하는 반면 그림 4에서 알 수 있는 바와 같이 압력변화의 기울기가 줄어들기 때문에 실제 측정압력의 오차는 α 가 커질수록 증가한다.

그림 3 또는 4에서 보면 진공계의 위치가 10% 움

직이는 것에 따른 압력의 변화가 0.5%($\alpha=0.1$)~4% ($\alpha=0.9$)이고 표 1에서 $x_c=1$ 위치로 부터의 편차가 1.4%($\alpha=0.9$)~9%($\alpha=0.1$) 이므로 진공계를 $x=R(x_c=1)$ 위치에 놓으므로써 발생하는 오차는 일반적인 경우 1%를 넘지 않는다.

참고로 용기의 빔효과를 고려하는 경우 Monte Carlo 계산결과에 의하면 용기의 직경대 길이의 비 ($L/2R$)가 예를 들어 1.5일 때 적절한 진공계의 위치는 대략 $1.1R < x < 1.2R$ 의 범위내에 있고 용기가 길어지면 진공계의 위치는 더 먼 곳으로 이동한다. 이에 관해서는 다음 기획에 보고하기로 한다.

4. 결 론

표준용기에서 진공계의 위치와 측정압력의 정확도에 영향을 미치는 인자들에 관해 살펴 보았다. 지금까지의 논의를 종합해 보면 무한대 용기에서 측정될 수 있는 것과 동일한 압력을 나타내는 표준용기에서의 위치는 여러가지 요인에 의해 $x > R$ (펌프흡입구에서 용기의 반경 이상으로 떨어진 곳)인 지점이다. 만일 방향여현의 전진방향성분의 증가(빔 효과)를 고려하지 않을 때는 일반적인 경우($0.1 < y < 0.5$, $0.1 < \alpha < 0.9$) $x=R$ 인 위치로 부터의 편차는 반경의 9%를 넘지 않고 예상되는 압력변화는 1% 보다 작다. 원통 통과확률 $t(x)$ 를 선택하는 데 따른 오차를 포함하는 경우에도 측정압력의 오차는 최대 2% 내외이다.

참고문헌

1. W. Steckelmacher, D. Turner, *J. Sci. Instrum.* **43**, 893 (1966).
2. E. H. Kemmard, *Kinetic Theory of Gases*(McGraw-Hill Book Co., N. Y., 1938) Chap. VIII.
3. W. C. DeMarcus, E. H. Hopper, *J. Chemical Phys.* **23**, 1344 (1955).
4. A. S. Berman, *J. Appl. Phys.* **36**, 3356 (1965).
5. C. G. Smith, G. Lewin, *J. Vac. Sci. & Tech.* **3**, 92 (1966).
6. E. Fischer, H. Mommsen, *Vacuum* **17**, 309 (1967).