

ISO 규격에서 규정한 표준용기 기체도입 도관의 직경에 대한 고찰

인상렬*

한국원자력연구원 핵융합공학기술개발부, 대전 305-353

(2010년 2월 2일 받음, 2010년 4월 27일 수정, 2010년 4월 30일 확정)

진공펌프의 배기성능 지표들을 정량적으로 측정하기 위해서 사용하는 표준용기에 관한 ISO 규격은 기체도입 도관의 굵기를 용기 내경의 10분의 1로 규정하고 있다. 표준용기 내경은 검사 대상 펌프의 흡기구 직경보다 작아서는 안 되므로 만일 대용량 펌프에 맞춘다면 그에 따라 도관의 굵기가 100 mm라는 수치도 나올 수 있다. 전체 시스템의 크기가 커지는 만큼 이런 굵기의 도관도 수용이 가능하기는 하지만 과연 이렇게 굵은 도관이 정밀한 측정을 위해 꼭 필요한지 또는 오히려 방해가 되는 것은 아닌지 검토해 볼 필요성이 있다. 본 논문에서는 도관 굵기에 따라, 도관출구를 빠져나오는 입자들과 오리피스 및 펌프 흡기구에 입사하는 입자들의 등방성에 대해 살펴봄으로써 적절한 도관 굵기가 존재하는지에 대해 논의한다.

주제어 : 표준 용기, 기체 도입, 도관 굵기, 등방성, 평균 방향여현

I. 서 론

진공펌프의 성능을 평가하기 위해서는 표준용기가 필요하다. 표준용기의 기능은 기본적으로 펌프 흡기구의 압력과 흡기량을 측정하는데 있다. 이 측정값들을 근거로, 펌프 종류에 따라 조금씩 다르지만 배기속도, 배기용량, 최대유량, 압축비, 임계배압 등을 구할 수 있다. 표준용기는 측정이 이루어지는 압력범위(또는 유량범위)에 따라 단일 용기(single dome) 형과 이중 용기(double dome) 형이 사용되는데 저진공 펌프는 단일 용기 형 한가지만으로 가능하지만 고진공펌프의 경우는 두 가지가 모두 필요하다. 표준용기의 제원에 대해서는 각종 펌프들의 성능평가에 관한 모든 규격들에 언급되어 있고, 특별히 펌프 종류에 상관없이 공통적으로 적용 가능한 ISO 규격이 제정되어 있다 [1-6]. 표준용기를 필요로 하는 경우 이를 특별히 다시 설계하기보다는 이미 규격에 정해져 있는 형태와 구조를 따르면서 펌프 제원에 맞추어서 원하는 크기로 비례화하여 제원을 정하면 된다.

표준용기의 필수요소는 유량계, 압력계 및 기체 도입구다. 단일 용기 형에서는 유량계가 용기 외부에 따로 달리고 압력측정만 이루어지지만 이중 용기 형에서는 상하부 용기 사이에 컨덕턴스를 아는 오리피스가 유량계를 대신하고 상

하부 용기 양쪽에서 모두 압력을 측정해야 한다. 어느 용기 이거나 압력계는 오리피스 또는 펌프가 달리는 하부 플랜지에서 용기의 반경만큼 상류 쪽에 단다. 기체 도입 도관은 하부에서 반경만큼 떨어진 곳에서부터 용기에 삽입하여 용기 상부 면을 향하도록 구부리고 용기 원통 중심을 따라 올라가 상부에서 역시 반경만큼 떨어진 곳에 끝단이 놓이도록 설치한다. 보통 규격에는 표준용기 상부가 약간의 곡률을 가지도록 그려져 있지만 권고하는 한 형태에 불과할 뿐 평평해도 상관이 없다.

이렇게 측정 시스템이 준비되면 모든 측정의 기본이 되는 배기속도는 유량을 압력(기저압력을 뺀 값)으로 나누어 주면 되므로 잘 아는 대로 다음과 같은 식을 통해 구해진다.

$$\text{single dome: } S_{pump} = \frac{q_{flow-meter}}{P_{chamber}}$$

$$\text{double dome: } S_{pump} = \frac{C_{orifice}(P_{upper} - P_{lower})}{P_{lower}}$$

이 식에서 바로 알 수 있는 것처럼 배기속도의 정확성은 유량과 압력 측정에 달려 있다. 정확한 유량계나 오리피스 컨덕턴스 값을 사용하는 경우라도 압력 측정이 부정확하면

* [전자우편] srin@kaeri.re.kr

끈란하다. 특별히 이중 용기 형을 사용할 때는 상하 용기 압력이 모두 정확하게 측정되어야 한다. 정확한 압력이란 오리피스 면과 펌프 흡기구 면에서 정의되는 압력 값으로 기체 분자 운동의 등방성이 확립된 상황에서 측정된 것을 말한다. 무한대 용기를 사용하면 이런 조건은 바로 만족이 되지만 현실적으로 적용이 불가능하므로, 실용적인 대안으로서 표준용기를 사용하게 된 것인데 이 때 압력계의 위치를 적절히 선택하여 정확한 압력에 가까운 값을 제공하도록 하는 것이 요건이다. 무한대의 용기와 달리 표준용기는 유한한 직경을 가지고 있으므로 흐름방향과 역방향 압력이 다르고 흡기구가 바라보는 압력은 그 면에서 반경만큼 상류의 벽면 압력과 같다는 원리에 기초해서 압력계 위치가 정해져 있다 [7].

규격에서 또 한 가지 고려되어 있는 것이 앞서 언급한 대로 기체 도입 도관의 출구 위치와 도관 굵기에 관한 것으로 도관 출구에서 나온 기체 분자들의 대부분이 일단 용기 천장에 가능하면 균일하게 부딪힌 후 분산적(등방적)으로 반사되어 용기를 지나 오리피스나 펌프 흡기구로 향하도록 설계되어 있다. ISO 규격에서는 도관의 굵기를 용기 내경의 1/10으로 규정하고 있는데 도관이 너무 가늘면 소위 빔효과(beaming effect)때문에 입자의 반사 위치가 천장 중심 부근에 집중되고 이는 압력 측정의 정확성에 나쁜 영향을 미치지 않을까 하는 우려 때문에 도관을 어느 정도 굵은 것으로 한정하는 것으로 이해된다.

그런데 표준용기 도관 굵기를 용기 내경의 10%라고 정하면 예를 들어 흡기구 직경이 1,000 mm인 펌프를 위해서 만든 표준용기에서 도관의 굵기가 100 mm에 이른다는 이야기가 되고 기체도입부를 탈착식으로 만들려면 최소한 NW250 포트가 필요하다. 이는 압력계나 미세유량 조절 밸브가 통상 NW40 포트를 이용하는 것과 비교하면 지나친다. 규격 중에는 도관의 굵기를 용기 내경의 10% 이하라고 하는

것도 있고 다른 식으로 범위를 정하는 것들도 있다. 이런 경우는 오히려 도관이 너무 굵으면 실용적이지 못하거나 오히려 측정에 나쁜 영향을 미칠 수도 있다는 점이 깔려 있는 것으로 보인다. Table 1은 여러 규격에서 어떻게 다른 방식들로 도관 굵기를 표현하고 있는지 정리한 것이다.

이런 상반된 견해를 구체적으로 검토해 보기 위해 본 논문에서는 도관 굵기에 따라 도관출구를 빠져나오는 입자들과 오리피스에 입사하는 입자들의 등방성에 대해 상관관계를 살펴봄으로써 특정 표준용기에서 적절한 도관 굵기가 존재하는 지에 대해 논의한다.

II. 표준용기 모델 및 몬테카를로 계산

Fig. 1과 같은 간단한 표준용기 모델을 만들고 기체 도입 도관의 굵기가 측정 시스템에 미치는 영향을 몬테카를로 계산을 통해 조사했다. 도관의 영향을 판단하는 요소로 가장 적합하다고 생각할 수 있는 것이 오리피스로 들어가는 기체분자들이 등방성을 가지느냐 하는 것이다. 만일 이 점만 보장이 된다면 사실 도관의 형태, 굵기, 위치, 용기 상부 뚜껑의 모양 등 상세한 부분은 크게 문제될 것이 없다. 물론 원리적으로는 검증되어 있는 조건들에 잘 맞출수록 좋은 결과를 얻기 때문에 이미 정립되어 있는 규칙을 따르는 것은 매우 중요하다. 그러나 도관의 굵기가 굵을수록 과연 등방적인 기체분자 운동을 더 잘 만들어 내는가가 의문이고 또 반대로 기체흐름을 방해하고 왜곡할 수도 있지 않을까

Table 1. Criteria for gas dosing tube.

규격	도관 굵기
ISO/DIS 21460 [1]	0.1 $D_{chamber}$
PNEUROP 5608 [2]	
PNEUROP 5607 [3]	$\leq 0.1 D_{chamber}$
JVIS 005 [4]	
AVS 4.1 [5]	10 mm for $D_{chamber} < 305$ mm 25 mm for $D_{chamber} > 305$ mm
AVS 5.2 [6]	10 mm

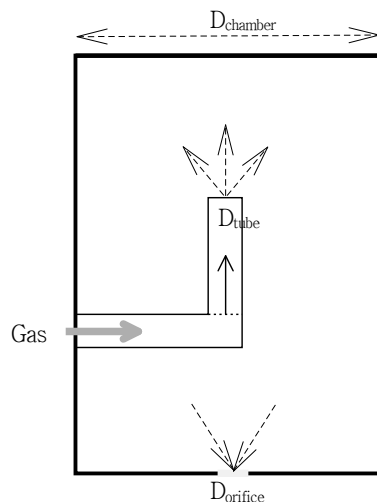


Figure 1. Monte Carlo simulation model.

까 하는 점을 검토하는 것이 본 몬테카를로 계산의 초점이라고 할 수 있다.

몬테카를로 계산은 기본적으로 오리피스 직경(D_{orifice})이 용기 내경(D_{chamber})의 1/30일 때와 1/10일 때 및 1/1일 때 각각에 대해 (마지막 경우는 결국 펌프 흡기구를 모사하는 것이다) 기체 도입 도관의 굵기(D_{tube})를 용기 내경의 1/100에서 1/10까지 변화시키면서 도관 출구에서의 평균 방향여현(directional cosine, 기체 분자가 나오거나 들어가는 면의 법선과 이루는 각도에 대한 여현값)과 오리피스에 입사하는 입자들의 평균 방향여현을 구해서 비교했다. 몬테카를로 계산에서 평균 방향여현 값은 각 면에서 계수되는 모든 입자들의 방향여현을 단순히 합친 후 입자수로 나눈 것이다. 만일 입자들이 완전히 등방적이라면(즉 여현법칙을 따른다면) 이런 방식으로 계산한 평균 방향여현 값은 2/3가 나온다. 이 계산 과정을 수식으로 표현하면 다음과 같다 (Fig. 2 참조).

$$\overline{\cos\theta} = \frac{\int_0^{\pi/2} \cos\theta (\cos\theta 2\pi \sin\theta) d\theta}{\int_0^{\pi/2} \cos\theta 2\pi \sin\theta d\theta} = \frac{2}{3} \approx 0.667$$

식에서 분자 괄호 안 및 분모의 $\cos\theta$ 는 여현법칙을 나타내는 것으로 각도에 대한 여현값에 기체분자 수가 비례하는 것을 나타내고 $2\pi \sin\theta$ 는 방위각 방향으로 원주길이를 대표한다. 면에 수직한 방향 성분이 강하면 몬테카를로로 계산한 평균 방향여현 값이 이보다 커지고 수평운동 성분이 강하면 값이 이보다 작아진다. 몬테카를로 계산 시 입자수는 1,000,000개를 기본으로 사용했다.

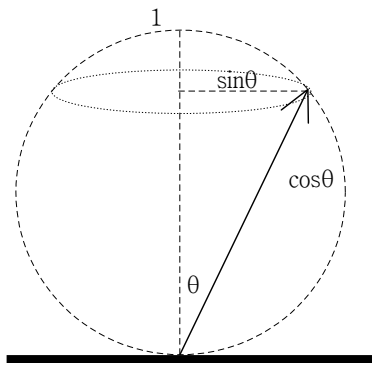


Figure 2. Distribution of the directional cosine of particles released isotopically from a surface.

III. 계산결과 및 논의

우선 Fig. 3은 도관 굵기가 용기 내경의 1/100에서 1/10일 때 입자가 기체 도입 도관에서 나와 용기 천장에 부딪히는 비율을 계산한 것으로 도관의 굵기가 10배 증가하는 동안 그 비율은 68~66% 정도로 크게 변하지 않고 또 생각보다 낮다. 입자 중 나머지 1/3 정도는 천장을 벗

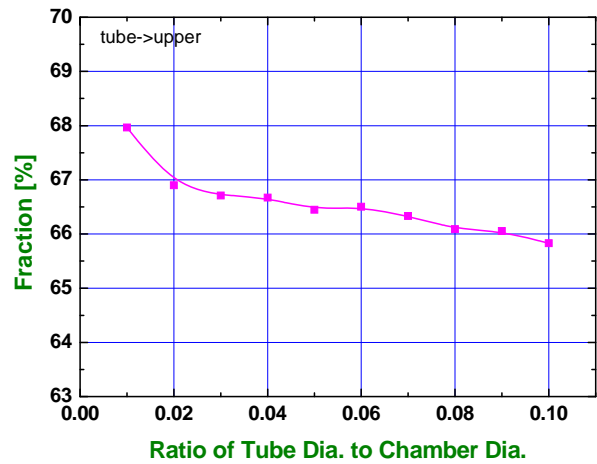


Figure 3. Variation in the fraction of particles hitting the ceiling of the test dome after escaping from the gas tube.

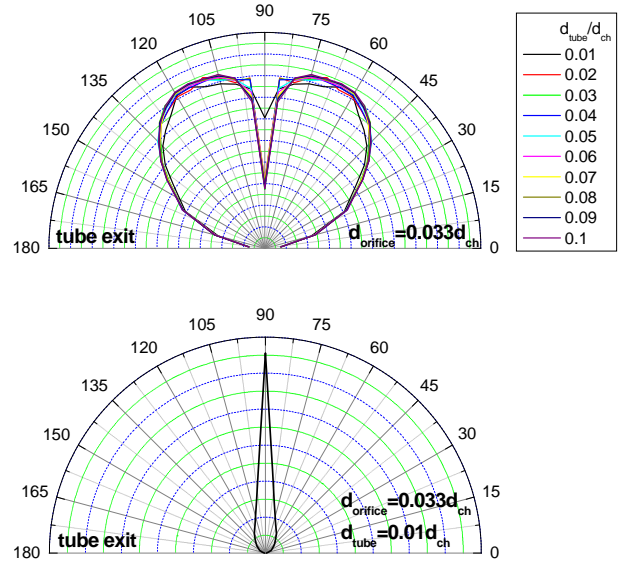


Figure 4. Angular distribution of particles escaping from gas tubes. The distance from the origin is proportional to the relative number of particles in the upper graph, and to the probability in the lower graph obtained by normalizing with the azimuthal circumference.

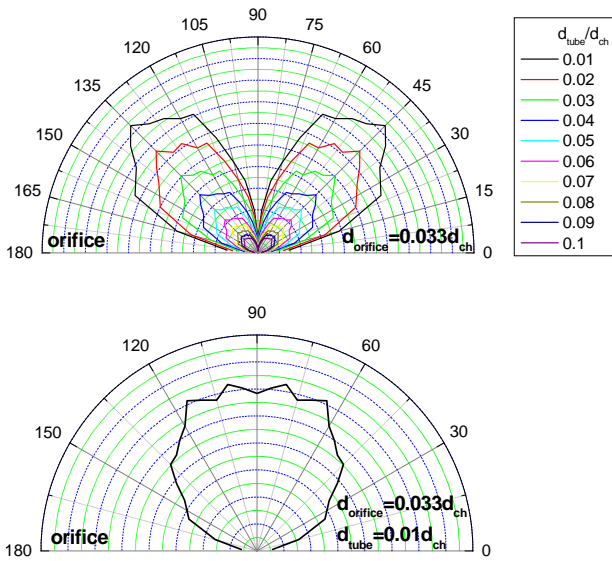


Figure 5. Angular distribution of particles impinging on the orifice.

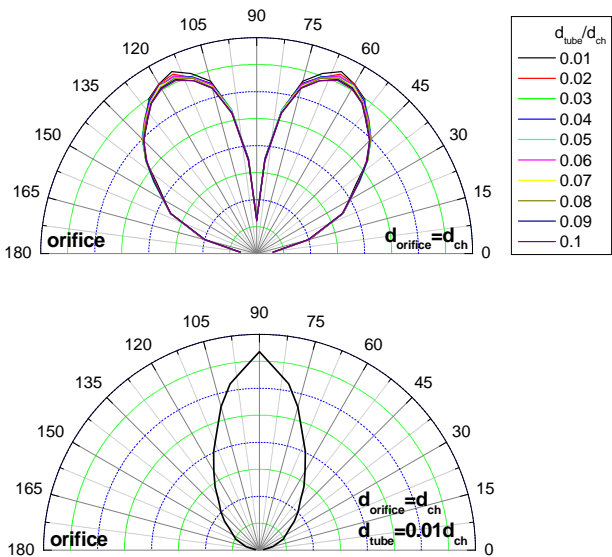


Figure 6. Angular distribution of particles entering the pump intake.

어나 용기 원통 상부에 부딪힌다. 이 수치들은 가는 도관이 굵은 도관에 비해 입자들의 입사점이 천정 가운데 부분으로 현저하게 더 집중되지는 않는다는 것을 말해준다.

Fig. 4와 Fig. 5는 $D_{chamber}=300$ mm이고 $D_{orifice}=10$ mm일 때 도관 굵기를 3 mm에서 30 mm까지 변화시키면서 각각 도관 출구 및 오리피스 입구에서 입자의 운동 방향을 구하여 도식화한 것이다. 또 Fig. 6은 직경 300 mm인 펌프 흡기구에 대해 위와 동일한 방법으로 만들어진 것이다. 각 그림에서 위쪽 그래프는 방위각과 상관없

이 입자 운동방향이 면 법선과 이루는 각도에 따라 분포하는 실제 입자의 수를 그대로 반영하는 몬테카를로 1차 계산결과를 보여 주고 있으며, 아래 그래프는 방위각 원주길이 당 입자수를 구하기 위해 도관이 가장 가는 경우에 대해서만 데이터를 $\sin\theta$ 에 대해 표준화해 준 것이다. 두 그림의 차이는 표면에서 수직방향으로 떠나는 입자들의 확률은 높아도 면적이 작아서 실제 입자수는 적어진다는 데 있다.

일단 Fig. 4에서 보면 도관 출구에서 나오는 입자들은 헬썬 수직방향에 가까운 쪽으로 움직이고, 반면에 Fig. 5에서 보면 오리피스에 들어가는 입자들은 용기 벽에 부딪히면서 수평방향 성분이 상대적으로 늘어나 등방적인 움직임에 가까워졌다는 것을 알 수 있다. Fig. 6은 펌프 흡기구에 입사하는 입자들의 운동방향 성분으로 도관출구에서 나오는 입자에 비해서는 수평방향 성분이 많이 늘어났지만 여전히 수직방향으로 편향되어 있다. 이는 형상비가 2 : 3인 표준용기 원통을 지나면서 자연스럽게 생기는 빔효과에 기인한다. 어느 그림에서도 도관의 굵기를 변화시킬 때 입자들의 운동방향 패턴에는 큰 변화를 발견할 수 없다.

이런 사실은 Fig. 7을 통해 더욱 명확히 알 수 있다. 이 그림의 그래프들은 각 면에 입사하는 입자들이 가지는 방향여현의 평균값을 세 가지 오리피스 크기에 대해 도관 굵기의 함수로 그린 것이다. 예상할 수 있는 대로 도관 출구에서의 값은 0.667에 비해 아주 크다. 도관의 굵기가 커질수록 그 값은 약간씩 줄어들어 0.77에서 0.76까지 변하지만 여전히 큰 값을 유지한다. 도관 굵기를 규정 값까지 최대한 늘려도 여전히 상대적으로 좁고 긴 도관을 입자들이 통과한 후 빔효과가 크게 나타난다는 것을 말하고 있다. 반면에 오리피스에 입사하는 입자들의 평균 방향여현은 도관의 굵기에 상관없이 0.667 근처에서 거의 일정한 값을 유지하므로 오리피스가 규격에 있는 대로 용기 내경의 10% 이내라면 입사하는 입자들이 항상 등방성을 유지한다고 볼 수 있다.

한편 펌프 흡기구를 모사한 세 번째 그래프에서는 입자들의 평균 방향여현이 0.745 정도로 편향성이 강하게 남아 있다는 것을 나타내지만 역시 도관 굵기와는 무관하다. 결국 용기 하부에 입사되는 입자들의 운동방향 분포는 기체 도입 도관의 굵기에 영향을 받기보다 용기 자체의 형태에만 좌우된다는 결론을 얻을 수 있다. 이것은 도관에서 일단 나와 용기 벽들과 수많은 충돌을 계속한 후 오리피스에 입사하는 입자들은 도관을 떠날 때 가졌던 운동방향 분포는

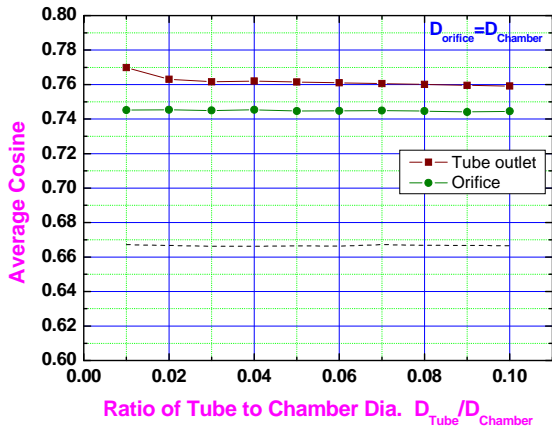
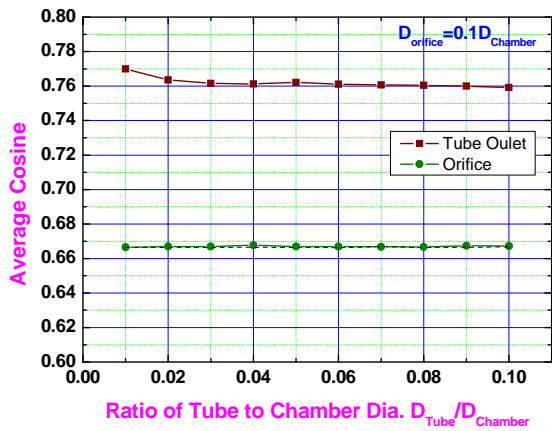
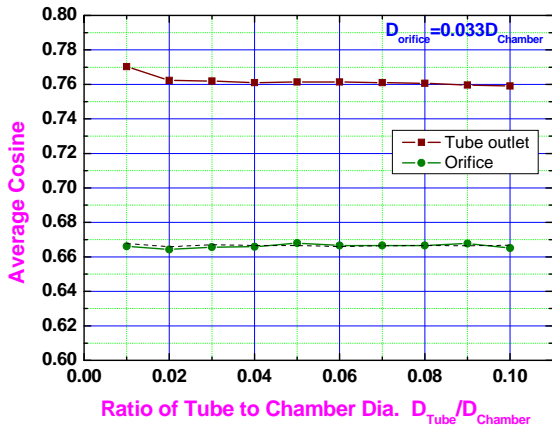


Figure 7. Influence of the tube diameter on the average directional cosine of particles for three different orifices.

완전히 잊어버리기 때문이다. 따라서 오리피스에서 등방성을 보장한다는 측면에서는 도관의 굵기를 더 크게 하는 이 점을 전혀 발견할 수 없다.

이번에는 방위각에 따라 운동방향 분포를 구하여 도관의 굵기가 오리피스로 입사되는 입자들의 운동을 방해하여 측

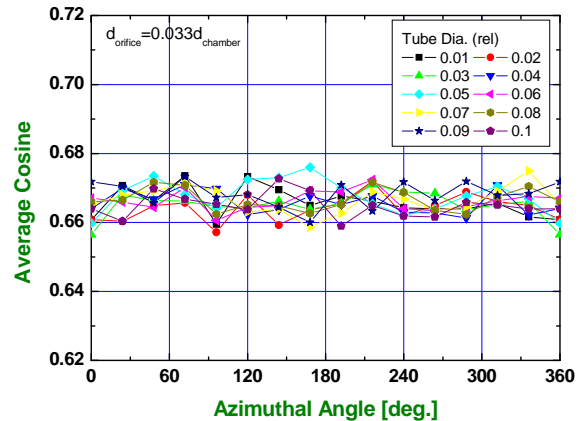
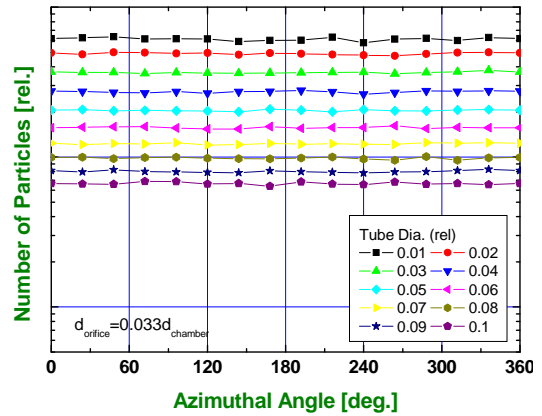


Figure 8. Variation in the number of incident particles and the average directional cosine on the small orifice as a function of the azimuthal angle for several sizes of the gas tube.

정의 정확성을 해칠 여지는 없는지 하는 측면에서 조사해 보려고 한다. Fig. 8과 Fig. 9는 수직성분의 크기와 상관없이 수평 운동성분이 방위각에 대해 어떻게 분포하고 있는지 각각 오리피스와 펌프 흡기구 면에서 도관의 굵기를 변화시키면서 방위각을 24도씩 나눠서 구한 입자수와 평균 방향여현 값을 그린 것이다. 우선 전반적으로 심각한 왜곡을 발견할 수 없다. 특별히 오리피스처럼 빠져나가는 단면이 작아서 많은 충돌을 거쳐야 하는 경우 입자수나 평균 방향여현이 통계적인 불규칙성을 제외하고 방위각에 대해 어떤 상관관계도 발견할 수 없다. 단지 Fig. 9에서 펌프 흡기구와 같이 입자 배출이 원활한 단면이 있어서 충돌회수가 적은 경우 근소하지만 독특한 경향을 나타낸다. 즉 180도 방향(도관이 용기에 설치되어 있는 곳이 $-x$ 방향이므로 기체 도입구 반대쪽에서 출발한 입자들이 가지는 운동방향이다)에서 입자수가 가장 많고 방향여현은 가장 낮은 값을 나타낸다. 이것은 흡기구 단면 가까운 용기 벽에서 출발한 입

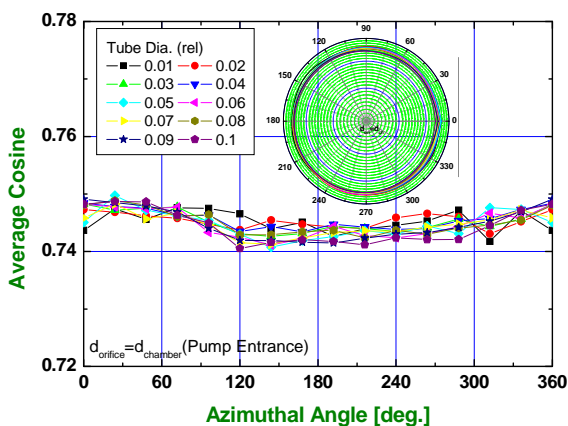
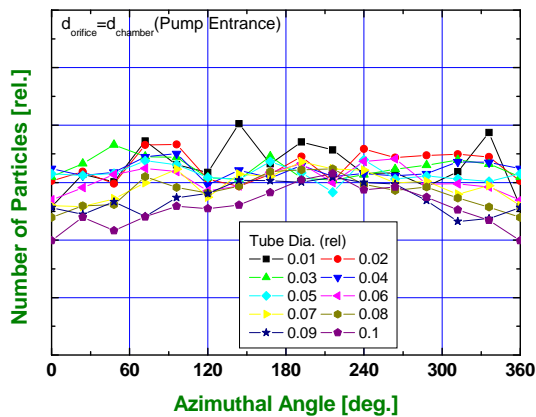


Figure 9. Variation in the number of incident particles and the average directional cosine on the pump entrance as a function of the azimuthal angle for several sizes of the gas tube. The same data is expressed as a polar graph in the inside figure.

자들이 도관 반대쪽 부분에서 상대적으로 많다는 반증이다. 그러나 이런 현상도 도관의 굵기에 따라서는 경중이 없고 값의 높낮이 차이도 2% 미만이다. 또 국부적으로 약간의 변화가 있다고 해도 전체적으로 일정한 평균 방향여현 값을 유지하는 한 거시적인 파라미터에 미치는 영향은 거의 없다고 할 수 있고 따라서 이 정도의 왜곡현상은 측정에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 생각한다.

이상의 계산들을 통해 도관의 굵기를 반드시 어떤 값 정도는 유지해야 한다는 기준은 별로 의미가 없고, 반대로 규정치를 넘지 않는 한 도관을 굵게 하는 것도 해로운 영향이 나타내지 않는다고 결론지을 수 있다. 도관을 가늘게 하거나 적절한 범위 내에서 굵게 해도 전체적으로 표준용기를 사용하여 측정하는 파라미터들의 정확성에 영향을 미칠 가능성은 없다고 판단되지만 도관이 너무 길고 가늘면 형태

를 유지하기 힘들고 너무 굵으면 포트 설계에 애로가 있다는 점을 고려하여 기계적으로 문제가 없는 한도 내에서 가늘게 하는 것이 차라리 좋다고 생각한다. 표준 용기 내부를 지나는 도관을 모델처럼 직각으로 꺾지 않고 큰 곡률을 주어 휘는 것은 실제 영향은 크지 않겠지만 도관의 방해요소를 더욱 없애준다는 의미에서 권장할 만하다.

IV. 결 론

진공펌프의 배기성능 지표들을 정량적으로 측정하기 위해서 사용하는 표준용기에 관한 규격들은 대체로 일치하는 사양들을 제시하지만 유독 기체도입 도관의 굵기에 대해서는 다양한 방식으로 규정하고 있어서 혼란스럽다. 현재 사용 중인 ISO 규격에서는 도관 굵기를 용기 내경의 10분의 1로 규정하고 있는데 대형 펌프 용 표준용기에 맞춘다면 도관의 굵기가 지나치게 커질 수 있다. 과연 이렇게 굵은 도관이 정밀한 측정을 위해 꼭 필요한지 또는 오히려 방해가 되는 것은 아닌지 검토해 보기 위해 도관 굵기에 따라 도관 출구를 빠져나오는 입자들과 오리피스 및 펌프 흡기구에 입사하는 입자들의 등방성에 대해 살펴보았다

계산 결과에 의하면 도관의 굵기는 오리피스 및 펌프 흡기구에 입사하는 입자들의 평균 방향여현 값에 전혀 영향을 미치지 않는 것으로 나타났으며 반면에 도관이 오리피스나 흡기구 면에 국부적으로 그림자를 드리우거나 입자 분포와 평균 방향여현 분포를 왜곡시키지도 않았다. 즉 기체 도입 도관을 가늘게 해도 빔효과가 계속 전파되어서 측정에 악영향을 미치지 않으므로 별 문제가 안 되고, 도관이 규정되어 있는 범위 안에서 어느 정도 굵어져도 입자의 흐름을 방해한다는 증거는 없다는 뜻이다. 그렇다면 도관의 굵기를 한 값으로 못 박기보다 넓은 범위를 주어 가공 능력에 따라 적절히 크기를 선택할 수 있도록 하는 것이 합리적이라고 판단된다.

감사의 글

본 논문은 한국표준과학연구원에서 수행하는 전략기술 개발사업 고진공 펌프 종합특성평가시스템 설계, 진단 기술 개발과제에서 지원을 받아 이루어졌음을 밝힙니다.

참고문헌

- [1] Vacuum Technology-Standard Methods for Measuring Vacuum-pump Performance-General Description, ISO 21360 (2007)
- [2] Vacuum Pumps Acceptance Specifications Part II (DP), PNEUROP 5607 (1972)
- [3] Vacuum Pumps Acceptance Specifications Part III (TMP), PNEUROP 5608 (1973)
- [4] 터보分子펌프性能試驗方法, JVIS 005 (1991)
- [5] M. H. Hablanian, J. Vac. Sci. Technol. **A5**, 2552 (1987) or AVS 4.1.
- [6] B. R. F. Kendall, J. Vac. Sci. Technol. **A7**, 2043 (1989) or AVS 5.2.
- [7] 인상렬, 진공학회지 **4**, 1 (1995).

Consideration on the Thickness of the Gas Introducing Tube of the Test Dome Specified in the ISO Standard

S. R. In*

Fusion Engineering Technology Development Dept., KAERI, Daejeon 305-353

(Received February 2, 2010, Revised April 27, 2010, Accepted April 30, 2010)

The ISO standard specifies the diameter of the gas introducing tube to be definitely 1/10 of the chamber inner diameter of the standard test dome which is used for evaluating the performance of vacuum pumps. Because the inner diameter of the test chamber should not be less than the intake diameter of the vacuum pump, the tube diameter would be even 100 mm if fitting to a very large vacuum pump. Though such a thick tube can be accommodated in a large test dome, it is worthwhile to investigate whether a thicker tube is helpful or adverse for making more accurate measurements. In this paper it is discussed if there is an optimum tube diameter by comparing the isotropicity of particles emanating from the tube and that of particles entering the orifice.

Keywords : Standard dome, Gas introduction, Tube diameter, Isotropicity, Average directional cosine

* [E-mail] srin@kaeri.re.kr