

# 대형 진공용기의 헬륨 누설검사 방법에 대한 고찰

인상렬

한국원자력연구원 핵융합공학기술개발센터, 대전 305-353

(2007년 5월 22일 받음)

지금 국내에서는 토카막 핵융합실험장치, 대전류 중성입자빔 실험장치 및 우주 모의실험실 같은 거대시설의 건설과 운용이 활발하다. 이런 시설의 핵심설비인 대형 진공용기는 중소형 용기에 비해 누설 가능성은 높은 반면 기체누설을 검사하는 것은 까다롭다. 중소형 용기에서 널리 사용되는 헬륨누설검사 방법을 어떻게 효율적으로 이런 대형 용기에 적용할 수 있는가 알아보기 위해, 다양한 가상적인 누설검사 시스템을 구성하고 압력분포 및 헬륨 분압을 계산하여 주어진 장치조건에서 적절한 검사 시스템을 찾는 방법에 대해 논한다.

주제어 : 대형 진공용기, 헬륨 누설검출, 헬륨 분압

## I. 서 론

요즈음 국내에서는 토카막 핵융합 실험장치, 대전류 중성입자빔 실험장치 및 우주 모의실험실 같이 대형 시설들이 지어지면서 기존의 진공용기와는 차원이 다른 100~1000 m<sup>3</sup>에 달하는 엄청난 규모의 진공용기들이 제작되어 운용되고 있다 [1-3]. 진공 시스템에서 좋은 진공을 얻기 위해서는 무엇보다 시스템의 기체누설을 줄이는 것이 중요하고 이는 대형 진공설비에서도 마찬가지다. 만일 대형 진공용기의 전체적인 누설률만을 압력상승법으로 구한다면 압력변화가 급격한 작은 용기에 비해 비교적 수월하게 정확한 값을 구할 수 있다 [4,5]. 하지만 진공용기가 크면 누설 검출기를 사용하여 누설부위를 찾고 정량화하는 데는 여러 가지 면에서 제약이 있다. 또 잔류기체 분석기를 누설 검출에 사용할 수도 있지만 헬륨에 대한 감도가 상대적으로 낮고 사용압력에도 제한이 있는 것이 보통이다.

접합부나 연결부의 결합율을 특별히 더 낮추지 못한다면 시스템이 클수록 누설 가능한 부위가 많아지고 전체적인 누설량이 높은 대신 검사할 부위마다의 상대적인 누설량은 낮아서 누설여부와 위치를 정확하게 판별하는 것이 쉽지 않다. 표면방출에 의존하는 기체부하도 용기의 규모에 비례하므로 이 또한 미세한 누설 검출을 어렵게 만든다. 또 펌프의 크기는 용기의 부피보다 표면 가용면적에 비례한다고 볼 수 있으므로 대형 진공용기는 큰 배기 시간상수를 가지게 되고 ( $\tau \sim V/S \sim \ell$ ,  $V \sim \ell^3$ ,  $S \sim \ell^2$ ,  $\ell$ 은 용기의 특성 길이) 누설검사의 반응시간도 길어져서 실제 누설인지 아

닌지 판단을 모호하게 만들 수 있다 [5].

일반적인 진공 시스템에서와 마찬가지로 대형 진공용기에서도 누설검사에는 높은 감도와 안전성을 가지고 있으며 사용에 편리한 장비와 소프트웨어 개발이 잘되어 있는 헬륨 누설검출기가 널리 사용된다 [5-7]. 그러나 위에서 언급한 이유 때문에 대형 진공 시스템에서 헬륨 누설검출기를 사용할 때는 검출 시스템 구성에 주의를 기울이지 않으면 만족할 만한 결과를 얻을 수 없다. 자세한 설명은 뒤에 나오겠지만 헬륨누설검사를 수행하기 위해서 반드시 필요한 조건을 세 가지로 간단히 요약하면 첫째 검출기 센서의 안전을 위해 검출부의 압력이 10<sup>-5</sup> mbar 대에는 있어야 한다. 다음으로 검출부에 들어오는 헬륨량이 검출기 센서의 검출한도 이상이어야 한다. 끝으로 규격들에 명시되어 있지는 않지만 헬륨이 검출되는 반응시간이 수십 초 이내인 것이 실용적이다. 아주 간단해 보이는 조건이지만 자체 배기펌프의 용량은 작은 반면 대상 용기의 부피와 기체부하는 매우 높은 극한 상황에서는 이것들을 동시에 만족시킨다는 것이 쉽지 않다.

헬륨누설검출기의 자체 배기 시스템은 일차적으로 검출기의 작동압력을 일정 한도 이하로 낮게 유지하는 데 목적이 있고, 때로는 독립적인 배기장치가 없는 작은 용기를 검사가 가능한 압력으로 배기하는 데도 이용된다. 용량이 작은 이 배기펌프만으로 대형 용기를 배기하는 것은 거의 불가능하고, 반면에 압력을 낮추고 시정수를 짧게 하려고 용량이 큰 용기의 주 펌프를 같이 가동하면 검출기로 들어오는 헬륨량이 크게 줄어들 수 있다. 물론 용기의 주 펌프와

\* [전자우편] srin@kaeri.re.kr

검출기를 직렬로 연결하는 것이 일반적인 해결책이지만 검출기가 느끼는 기체부하가 여전히 과도할 수 있다. 검사하려고 하는 용기 자체의 배기 시스템과 검출기의 배기 시스템을 어떻게 연결하는가에 따라 여러 가지 압력 값과 시정수를 나타낼 수 있으므로 모든 상황에 맞는 보편적인 검출 시스템 구성은 힘들지만 특정한 상황에 맞는 적절한 구성은 반드시 존재한다고 말할 수 있다.

본 논문에서는 가상적인 제원을 가진 대형용기를 가정하여 물리적으로 생각할 수 있는 여러 가지 누설검사 시스템 구성에 대해 식들을 세우고 주요 지점의 압력 및 헬륨 검출 분압을 계산하여, 각각의 구성을 주어진 장치조건에서 실제로 사용할 수 있는지 타당성을 분석하는 방법론에 대해 논의하려고 한다.

## II. 헬륨 누설검사 시스템 구성 및 계산조건

헬륨 누설검출 시스템은 검출기를 어디에 달 것인가, 누설기체를 어떤 유로를 통해 검출기로 보내는가에 따라 그림 1과 같이 A~F까지 6 가지 정도의 기본구성을 생각할 수 있다. 크게는 용기의 주 배기펌프를 사용하는가 아닌가와 사용한다면 검출기와 직렬로 연결하는지 아니면 병렬로 연결하는지로 나눌 수 있다. 필요에 따라 헬륨에 대한 감도를 높이기 위해 선별적인 배기작용을 하는 펌프를 검출기 앞에 보조적으로 사용하는 특수한 구성도 있지만 이곳에서는 생략했다. 대형진공용기를 가정하고 있으므로 구성 A 및 B는 대상이 안 될 가능성이 크지만 비교를 위해서 포함했다. 그림에서 f)는 구성 F 및 F' (F+내장형 펌프)을 같이 나타내고 있다고 보면 된다. F외에는 따로 그리지 않았지만 B를 제외한 모든 경우에 대해 용기 안에 내장형 펌프가 (예를 들어 대형 진공용기 내에 많이 장착되는 대형 크라이오 펌프) 설치되어 있는 경우를 포함하므로 총 11가지 구성을 다루는 셈이다.

표 1은 각 구성에 대해 용기 압력(P), 펌프 배압( $P_f$ ), 검출부에서의 압력( $P_s$ ) 및 헬륨분압( $P_{He}$ )이 어떻게 변하는지를 식으로 표현한 것이다. 식에서  $\Sigma Q_L$ 은 헬륨을 뿌려 검사하는 한 곳을 빼고 나머지 공기누설을 따로 합친다는 뜻이다. 물리적 의미를 잃지 않으면서 계산의 편리를 위해 헬륨(첨자 He) 이외의 기체는(첨자 g) 공기나 물이 아닌 질소 압력이 대표하는 것으로 가정했다. 식에서  $f_a = S_{a2}/C_a$  및

$f_b = S_{b2}/C_b$ 이고 ( $C_{a,b}$ 는 연결도관의 컨덕턴스[L/s]), K는 헬륨 누설검출기 주 펌프(터보분자펌프로 가정)의 압축비다. 표에서 부등식으로 표현되어 있는 것처럼 검출기 압력이 검출기 작동 가능 압력을 넘어서든지 아니면 검출기체의 분압이 검출 가능 한계 이하라면 헬륨누설 검사는 실패할 수밖에 없다. 식에 나타내지는 않았지만 실제 계산되는 검출부의 압력에는 검출부 자체의 기체부하에 따라 정해지는 기저압력을, 예를 들면  $5 \times 10^{-5}$  mbar, 더해야 한다.

정량적인 계산을 통해 주어진 조건에서 목적에 부합하는 구성을 합리적으로 선택하는 것이 실제로 가능한지 계산의 타당성을 알아보기 위해 가상의 대형용기 및 주 배기펌프 사양을 표 2와 같이 가정했다. 표에는 계산에 사용한 헬륨 누설검출기의 사양도 같이 포함했다.

계산은 시스템 구성과 동작 조건과의 관련성을 알아보기 위해 1) 누설과 기체부하가 보통일 때, 2) 누설과 기체부하가 매우 클 때, 3) 기체부하가 보통이면서 누설이 매우 작을 때, 4) 기체부하 및 누설이 매우 작을 때 4 가지 경우를 가상해서 조건을 만들었다. 각 조건 마다 용기의 주 배기펌프 용량이 10배 차이가 나는 두 가지 경우를 가정했다. 배기용량이 작을 때는 내장펌프가 있는 경우도 추가했다.

표 3은 위에서 설명한 계산조건과 함께 타당성을 판단하는 네 가지 판별기준을 정리한 것이다. 네 가지 중 하나라도 만족하지 못하면 주어진 시스템 조건에서 누설검사 방법으로 부적당하다고 할 수 있다. 표에 나오는 검출한도는 검출기 센서의 검출능력에도 관계되지만 사실은 헬륨이외의 다른 기체 분압이 높을 때 이중 일부를 검출기가 헬륨으로 감지하는 잡음신호 크기와 더 밀접한 관련이 있다. 이를 감응계수라고 하는데  $10^{-5} \sim 10^{-6}$  정도다 [8]. 만일 검출부의 기저압력이  $5 \times 10^{-5}$  mbar라면 마치 헬륨분압이  $10^{-10} \sim 10^{-11}$  mbar에 이르는 것으로 항상 감지하므로 진짜 헬륨신호가 이보다 아주 낮다면 변화를 구분하기 힘들 수 있다. 물론 기기를 검사 전 어떤 기저 레벨에서 영점 조정하는 것이 일반적인 수순이지만 잡음은 수시로 불안정하게 변하기 마련이다. 따라서 잡음의 변화 폭이 헬륨 신호보다도 높다면 검사가 불가능해 진다고 볼 때 단적으로 말하기는 힘들지만 잡음이 검출기의 검출한도보다 10배 정도로 크다면 정량적인 측정은 힘들고 100배 정도라면 누설의 판별이 유보적이라고 할 수 있다.

누설검출 반응시간은 누설의 양이나 기체부하의 크기와 상관없이 용기 및 도관의 부피와 배기속도에 달려 있다.

표 1. 누설검사를 위한 11 가지 구성에 대한 압력계산 관련 식들.

A	$P = \frac{q_{He}(1+f_{aHe})+(\Sigma q_L+q_W)(1+f_{ag})}{S_{a2}}, P_S = \frac{q_{He}+\Sigma q_L+q_W}{S_{a2}} < P_{Smax}, P_L = \frac{q_{He}}{S_{a2}} > P_{Lmin}, \tau = \frac{V}{S_{a2}}(1+f_{aHe})$
B	$P = \frac{q_{He}(1+f_{bHe})+(\Sigma q_L+q_W)(1+f_{bg})}{S_{b2}}, P_{r2} = \frac{q_{He}+\Sigma q_L+q_W}{S_{b2}}, P_L = \frac{q_{He}}{K_{He}S_{b2}} > P_{Lmin}, P_S = P_L + \frac{(P_{r2})_g}{K_g} < P_{Smax}, \tau = \frac{V}{S_{b2}}(1+f_{bHe})$
C	$P = \frac{q_{He}}{S_{a1}+S_{a2}/(1+f_{aHe})} + \frac{\Sigma q_L+q_W}{S_{a1}+S_{a2}/(1+f_{ag})}, P_S = \frac{q_{He}}{S_{a1}(1+f_{aHe})+S_{a2}} + \frac{\Sigma q_L+q_W}{S_{a1}(1+f_{ag})+S_{a2}} < P_{Smax},$ $P_L = \frac{q_{He}}{S_{a1}(1+f_{aHe})+S_{a2}} > P_{Lmin}, \tau = \frac{V}{S_{a1}+S_{a2}/(1+f_{aHe})}$
D	$P = \frac{q_{He}+\Sigma q_L+q_W}{S_{a1}}, P_{r1} = \frac{q_{He}}{S_{b1}+S_{b2}/(1+f_{bHe})} + \frac{\Sigma q_L+q_W}{S_{b1}+S_{b2}/(1+f_{bg})}, P_{r2} = \frac{q_{He}}{S_{b1}(1+f_{bHe})+S_{b2}} + \frac{\Sigma q_L+q_W}{S_{b1}(1+f_{bg})+S_{b2}},$ $P_L = \frac{q_{He}}{K_{He}(S_{b1}(1+f_{bHe})+S_{b2})} > P_{Lmin}, P_S = P_L + \frac{(P_{r2})_g}{K_g} < P_{Smax}, \tau = \frac{V}{S_{a1}}$
E	$P = \frac{q_{He}+\Sigma q_L+q_W}{S_{a1}}, P_{r1} = \frac{q_{He}(1+f_{aHe})+(\Sigma q_L+q_W)(1+f_{ag})}{S_{a2}}, P_S = \frac{q_{He}+\Sigma q_L+q_W}{S_{a2}} < P_{Smax}, P_L = \frac{q_{He}}{S_{a2}} > P_{Lmin}, \tau = \frac{V}{S_{a1}}$
F	$P = \frac{q_{He}+\Sigma q_L+q_W}{S_{a1}}, P_{r1} = \frac{q_{He}(1+f_{bHe})+(\Sigma q_L+q_W)(1+f_{bg})}{S_{b2}}, P_{r2} = \frac{q_{He}+\Sigma q_L+q_W}{S_{b2}} < P_{Smax}, P_L = \frac{q_{He}}{K_{He}S_{b2}} > P_{Lmin},$ $P_S = P_L + \frac{(P_{r2})_g}{K_g} < P_{Smax}, \tau = \frac{V}{S_{a1}}$
A-1	$P = \frac{q_{He}}{S_{iHe}+S_{a2}/(1+f_{aHe})} + \frac{\Sigma q_L+q_W}{S_{ig}+S_{a2}/(1+f_{ag})}, P_S = \frac{q_{He}}{S_{iHe}(1+f_{aHe})+S_{a2}} + \frac{\Sigma q_L+q_W}{S_{ig}(1+f_{ag})+S_{a2}} < P_{Smax},$ $P_L = \frac{q_{He}}{S_{iHe}(1+f_{aHe})+S_{a2}} > P_{Lmin}, \tau = \frac{V}{S_{iHe}+S_{a2}/(1+f_{aHe})}$
C-1	$P = \frac{q_{He}}{S_{a1}+S_{iHe}+S_{a2}/(1+f_{aHe})} + \frac{\Sigma q_L+q_W}{S_{a1}+S_{ig}+S_{a2}/(1+f_{ag})}, P_S = \frac{q_{He}}{(S_{a1}+S_{iHe})(1+f_{aHe})+S_{a2}} + \frac{\Sigma q_L+q_W}{(S_{a1}+S_{ig})(1+f_{ag})+S_{a2}} < P_{Smax},$ $P_L = \frac{q_{He}}{(S_{a1}+S_{iHe})(1+f_{aHe})+S_{a2}} > P_{Lmin}, \tau = \frac{V}{S_{a1}+S_{iHe}+S_{a2}/(1+f_{aHe})}$
D-1	$P = \frac{q_{He}}{S_{a1}+S_{iHe}} + \frac{\Sigma q_L+q_W}{S_{a1}+S_{ig}}, P_{r1} = \frac{q_{He}}{S_{b1}+S_{b2}/(1+f_{bHe})} \left( \frac{S_{a1}}{S_{a1}+S_{iHe}} \right) + \frac{\Sigma q_L+q_W}{S_{b1}+S_{b2}/(1+f_{bg})} \left( \frac{S_{a1}}{S_{a1}+S_{ig}} \right),$ $P_{r2} = \frac{q_{He}}{S_{b1}(1+f_{bHe})+S_{b2}} \left( \frac{S_{a1}}{S_{a1}+S_{iHe}} \right) + \frac{\Sigma q_L+q_W}{S_{b1}(1+f_{bg})+S_{b2}} \left( \frac{S_{a1}}{S_{a1}+S_{ig}} \right), P_L = \frac{q_{He}}{K_{He}(S_{b1}(1+f_{bHe})+S_{b2})} \left( \frac{S_{a1}}{S_{a1}+S_{iHe}} \right) > P_{Lmin},$ $P_S = P_L + \frac{(P_{r2})_g}{K_g} < P_{Smax}, \tau = \frac{V}{S_{a1}+S_{iHe}}$
E-1	$P = \frac{q_{He}}{S_{a1}+S_{iHe}} + \frac{\Sigma q_L+q_W}{S_{a1}+S_{ig}}, P_{r1} = \frac{q_{He}(1+f_{aHe})}{S_{a2}} \left( \frac{S_{a1}}{S_{a1}+S_{iHe}} \right) + \frac{(\Sigma q_L+q_W)(1+f_{ag})}{S_{a2}} \left( \frac{S_{a1}}{S_{a1}+S_{ig}} \right),$ $P_S = \frac{q_{He}}{S_{a2}} \left( \frac{S_{a1}}{S_{a1}+S_{iHe}} \right) + \frac{\Sigma q_L+q_W}{S_{a2}} \left( \frac{S_{a1}}{S_{a1}+S_{ig}} \right) < P_{Smax},$ $P_L = \frac{q_{He}}{S_{a2}} \left( \frac{S_{a1}}{S_{a1}+S_{iHe}} \right) > P_{Lmin}, \tau = \frac{V}{S_{a1}+S_{iHe}}$
F-1	$P = \frac{q_{He}}{S_{a1}+S_{iHe}} + \frac{\Sigma q_L+q_W}{S_{a1}+S_{ig}}, P_{r1} = \frac{q_{He}(1+f_{aHe})}{S_{b2}} \left( \frac{S_{a1}}{S_{a1}+S_{iHe}} \right) + \frac{(\Sigma q_L+q_W)(1+f_{ag})}{S_{b2}} \left( \frac{S_{a1}}{S_{a1}+S_{ig}} \right),$ $P_{r2} = \frac{q_{He}}{S_{b2}} \left( \frac{S_{a1}}{S_{a1}+S_{iHe}} \right) + \frac{\Sigma q_L+q_W}{S_{b2}} \left( \frac{S_{a1}}{S_{a1}+S_{ig}} \right),$ $P_L = \frac{q_{He}}{K_{He}S_{b2}} \left( \frac{S_{a1}}{S_{a1}+S_{iHe}} \right) > P_{Lmin}, P_S = P_L + \frac{(P_{r2})_g}{K_g} < P_{Smax}, \tau = \frac{V}{S_{a1}+S_{iHe}}$

검출레벨이 포화되는 데 수분 단위의 시간이 걸리면 우회해서 들어오는 것과 혼동할 가능성이 높다. 또 한 번 용기 안으로 들어간 헬륨의 배기가 늦어져 다음 검사 때까지 오래 기다려야 한다. 따라서 실용적인 면에서도 반응시간을 최대한 낮춰서 검사시간을 적절히 짧게 하는 것이 필요하다.

표 2. 계산을 위한 가상 진공용기 및 누설검출기 (LD) 제원.

용기 체적 (V)	100 m <sup>3</sup> (=10 <sup>5</sup> L)
용기 표면적	1000 m <sup>2</sup>
개수 × 누설률(q <sub>L</sub> )	10×10 <sup>-4</sup> mbarL/s (×2.65 for He)
표면방출률 (q <sub>w</sub> )	10 <sup>-2</sup> mbarL/s
용기 주펌프 배기속도 (S <sub>a1</sub> )	10 <sup>5</sup> L/s, 10 <sup>4</sup> L/s
용기 보조펌프 배기속도 (S <sub>b1</sub> )	1000 L/s (=3600 m <sup>3</sup> /h)
용기 내장펌프 배기속도 (S <sub>iHe</sub> , S <sub>iG</sub> )	3×10 <sup>4</sup> L/s, 10 <sup>5</sup> L/s
LD 주펌프 배기속도 (S <sub>a2</sub> )	100 L/s
LD 보조펌프 배기속도 (S <sub>b2</sub> )	2 L/s (=120 L/min)
LD 주펌프 압축비 (K <sub>He</sub> , K <sub>G</sub> )	100, 10 <sup>5</sup>
연결배관 컨덕턴스 (C <sub>a</sub> , C <sub>b</sub> )	10 L/s, 100 L/s (×2.65 for He)
LD센서 허용압력 (P <sub>Smax</sub> )	5×10 <sup>-5</sup> mbar
LD 최저 검출분압 (P <sub>Lmin</sub> )	10 <sup>-13</sup> mbar

표 3. 상세한 계산조건과 판별기준.

계산 조건	q <sub>L</sub> [mbarL/s]	q <sub>w</sub> [mbarL/s]	S <sub>a1</sub> [L/s]	S <sub>iG</sub> [L/s]
I	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>5</sup>	0
			10 <sup>4</sup>	0
			10 <sup>4</sup>	10 <sup>5</sup>
II	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-1</sup>	10 <sup>5</sup>	0
			10 <sup>4</sup>	0
			10 <sup>4</sup>	10 <sup>5</sup>
III	10 <sup>-10</sup>	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>5</sup>	0
			10 <sup>4</sup>	0
			10 <sup>4</sup>	10 <sup>5</sup>
IV	10 <sup>-10</sup>	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>5</sup>	0
			10 <sup>4</sup>	0
			10 <sup>4</sup>	10 <sup>5</sup>

판별기준	
P <sub>r1</sub> , P <sub>r2</sub>	<5×10 <sup>-1</sup> mbar
P <sub>S</sub>	<10 <sup>-4</sup> mbar
P <sub>L</sub>	>10 <sup>-13</sup> mbar
τ	<30 s

### III. 계산결과 및 논의

그림 1의 각 구성에 대해 표 2의 각 조건아래에서 표 1의 식들을 이용해 압력들을 계산한 결과를 정리하면 표 4~7과 같다. 표에서 P<sub>S-eff</sub>는 앞서 언급한 대로 P<sub>S</sub>에 검출부기 저압력 가정치 5×10<sup>-5</sup> mbar를 더한 것이고 P<sub>L-error</sub>(≈β P<sub>S-eff</sub>, β는 헬륨검출기 센서의 감응계수)는 잡음신호를 가리킨다. 누설검사 방법으로서 타당성을 판단하는 기준에 비추어 문제가 있는 것을 지워나가면 (표에서 회색으로 칠한 칸들) 전혀 문제가 없는 행들을 고를 수 있고, 조건 I, II, III, IV에 대해 가능한 구성을 표 8과 같이 정리할 수

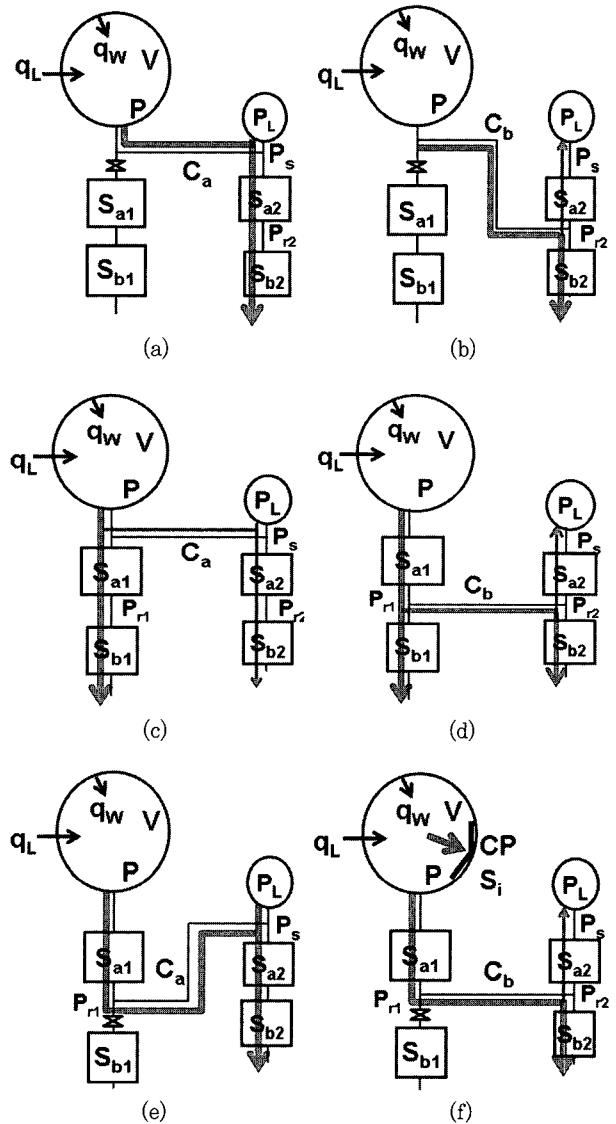


그림 1. 헬륨누설검사를 위한 여러 가지 시스템 구성 예. a) A, b) B, c) C, d) D, e) E, f) F/F'. f) 이외의 다른 그림에서는 내장펌프 CP가 생략되어 있다.

표 4. 조건 I(-1,2,3)에 대한 계산결과.

I-1	P[mbar]	P <sub>r1</sub>	P <sub>r2</sub>	P <sub>s</sub>	P <sub>s-eff</sub>	P <sub>L</sub>	P <sub>L-error</sub>	t[s]
A	1.21E-03			1.13E-04	1.63E-04	2.65E-06	1.60E-10	4.78E+03
B	5.69E-03		5.58E-03	1.38E-06	5.14E-05	1.32E-06	5.01E-11	5.04E+04
C	1.12E-07			1.05E-08	5.00E-05	5.53E-10	5.00E-11	1.00E+00
D	1.12E-07	1.11E-05	1.09E-05	2.73E-09	5.00E-05	2.62E-09	5.00E-11	1.00E+00
E	1.12E-07	1.21E-06		1.12E-04	1.62E-04	2.65E-06	1.59E-10	1.00E+00
F	1.12E-07	5.69E-03	5.58E-03	1.38E-06	5.14E-05	1.32E-06	5.01E-11	1.00E+00
I-2								
A	1.21E-03			1.13E-04	1.63E-04	2.65E-06	1.60E-10	4.78E+03
B	5.69E-03		5.58E-03	1.38E-06	5.14E-05	1.32E-06	5.01E-11	5.04E+04
C	1.12E-06			1.05E-07	5.01E-05	5.52E-09	5.01E-11	9.98E+00
D	1.12E-06	1.11E-05	1.09E-05	2.73E-09	5.00E-05	2.62E-09	5.00E-11	1.00E+01
E	1.12E-06	1.21E-05		1.12E-04	1.62E-04	2.65E-06	1.59E-10	1.00E+01
F	1.12E-06	5.69E-03	5.58E-03	1.38E-06	5.14E-05	1.32E-06	5.01E-11	1.00E+01
I-3								
A'	1.18E-07			1.18E-08	5.00E-05	1.84E-09	5.00E-11	9.89E-01
C'	1.06E-07			1.04E-08	5.00E-05	1.38E-09	5.00E-11	2.50E+00
D'	1.06E-07	1.05E-06	1.04E-06	6.65E-10	5.00E-05	6.55E-10	5.00E-11	2.50E+00
E'	1.06E-07	1.12E-06		1.06E-05	6.06E-05	6.61E-07	5.99E-11	2.50E+00
F'	1.06E-07	5.39E-04	5.29E-04	3.36E-07	5.03E-05	3.31E-07	5.00E-11	2.50E+00

표 5. 조건 II(-1,2,3)에 대한 계산결과.

II-1	P[mbar]	P <sub>r1</sub>	P <sub>r2</sub>	P <sub>s</sub>	P <sub>s-eff</sub>	P <sub>L</sub>	P <sub>L-error</sub>	t[s]
A	2.22E-02			2.26E-03	2.31E-03	2.65E-04	2.05E-09	4.78E+03
B	1.10E-01		1.08E-01	1.33E-04	1.83E-04	1.32E-04	5.10E-11	5.04E+04
C	2.16E-06			2.28E-07	5.02E-05	5.53E-08	5.02E-11	1.00E+00
D	2.16E-06	2.16E-04	2.12E-04	2.64E-07	5.03E-05	2.62E-07	5.00E-11	1.00E+00
E	2.16E-06	2.22E-05		2.16E-03	2.21E-03	2.65E-04	1.95E-09	1.00E+00
F	2.16E-06	1.10E-01	1.08E-01	1.33E-04	1.83E-04	1.32E-04	5.10E-11	1.00E+00
II-2								
A	2.22E-02			2.26E-03	2.31E-03	2.65E-04	2.05E-09	4.78E+03
B	1.10E-01		1.08E-01	1.33E-04	1.83E-04	1.32E-04	5.10E-11	5.04E+04
C	2.16E-05			2.28E-06	5.23E-05	5.52E-07	5.17E-11	9.98E+00
D	2.16E-05	2.16E-04	2.12E-04	2.64E-07	5.03E-05	2.62E-07	5.00E-11	1.00E+01
E	2.16E-05	2.22E-04		2.16E-03	2.21E-03	2.65E-04	1.95E-09	1.00E+01
F	2.16E-05	1.10E-01	1.08E-01	1.33E-04	1.83E-04	1.32E-04	5.10E-11	1.00E+01
II-3								
A'	2.78E-06			3.57E-07	5.04E-05	1.84E-07	5.02E-11	9.89E-01
C'	2.39E-06			2.95E-07	5.03E-05	1.38E-07	5.02E-11	2.50E+00
D'	2.39E-06	2.38E-05	2.35E-05	6.57E-08	5.01E-05	6.55E-08	5.00E-11	2.50E+00
E'	2.39E-06	2.22E-05		2.39E-04	2.89E-04	6.61E-05	2.23E-10	2.50E+00
F'	2.39E-06	1.21E-02	1.19E-02	3.32E-05	8.32E-05	3.31E-05	5.01E-11	2.50E+00

표 6. 조건 III(-1,2,3)에 대한 계산결과.

III-1	P[mbar]	P <sub>r1</sub>	P <sub>r2</sub>	P <sub>s</sub>	P <sub>S-eff</sub>	P <sub>L</sub>	P <sub>L-error</sub>	t[s]
A	1.10E-03			1.00E-04	1.50E-04	2.65E-12	1.50E-10	4.78E+03
B	5.10E-03		5.00E-03	5.00E-08	5.01E-05	1.32E-12	5.01E-11	5.04E+04
C	1.00E-07			9.09E-09	5.00E-05	5.53E-16	5.00E-11	1.00E+00
D	1.00E-07	9.98E-06	9.78E-06	9.78E-11	5.00E-05	2.62E-15	5.00E-11	1.00E+00
E	1.00E-07	1.10E-06		1.00E-04	1.50E-04	2.65E-12	1.50E-10	1.00E+00
F	1.00E-07	5.10E-03	5.00E-03	5.00E-08	5.01E-05	1.32E-12	5.01E-11	1.00E+00
III-2								
A	1.10E-03			1.00E-04	1.50E-04	2.65E-12	1.50E-10	4.78E+03
B	5.10E-03		5.00E-03	5.00E-08	5.01E-05	1.32E-12	5.01E-11	5.04E+04
C	9.99E-07			9.08E-08	5.01E-05	5.52E-15	5.01E-11	9.98E+00
D	1.00E-06	9.98E-06	9.78E-06	9.78E-11	5.00E-05	2.62E-15	5.00E-11	1.00E+01
E	1.00E-06	1.10E-05		1.00E-04	1.50E-04	2.65E-12	1.50E-10	1.00E+01
F	1.00E-06	5.10E-03	5.00E-03	5.00E-08	5.01E-05	1.32E-12	5.01E-11	1.00E+01
III-3								
A'	1.00E-07			9.09E-09	5.00E-05	1.84E-15	5.00E-11	9.89E-01
C'	9.09E-08			8.26E-09	5.00E-05	1.38E-15	5.00E-11	2.50E+00
D'	9.09E-08	9.07E-07	8.90E-07	8.90E-12	5.00E-05	6.55E-16	5.00E-11	2.50E+00
E'	9.09E-08	1.00E-06		9.09E-06	5.91E-05	6.61E-13	5.91E-11	2.50E+00
F'	9.09E-08	4.64E-04	4.55E-04	4.55E-09	5.00E-05	3.31E-13	5.00E-11	2.50E+00

표 7. 조건 IV(-1,2,3)에 대한 계산결과.

IV-1	P[mbar]	P <sub>r1</sub>	P <sub>r2</sub>	P <sub>s</sub>	P <sub>S-eff</sub>	P <sub>L</sub>	P <sub>L-error</sub>	t[s]
A	1.10E-06			1.00E-07	5.01E-05	2.65E-12	5.01E-11	4.78E+03
B	5.10E-06		5.00E-06	5.13E-11	5.00E-05	1.32E-12	5.00E-11	5.04E+04
C	1.00E-10			9.09E-12	5.00E-05	5.53E-16	5.00E-11	1.00E+00
D	1.00E-10	9.98E-09	9.79E-09	1.00E-13	5.00E-05	2.62E-15	5.00E-11	1.00E+00
E	1.00E-10	1.10E-09		1.00E-07	5.01E-05	2.65E-12	5.01E-11	1.00E+00
F	1.00E-10	5.10E-06	5.00E-06	5.13E-11	5.00E-05	1.32E-12	5.00E-11	1.00E+00
IV-2								
A	1.10E-06			1.00E-07	5.01E-05	2.65E-12	5.01E-11	4.78E+03
B	5.10E-06		5.00E-06	5.13E-11	5.00E-05	1.32E-12	5.00E-11	5.04E+04
C	9.99E-10			9.08E-11	5.00E-05	5.52E-15	5.00E-11	9.98E+00
D	1.00E-09	9.98E-09	9.79E-09	1.00E-13	5.00E-05	2.62E-15	5.00E-11	1.00E+01
E	1.00E-09	1.10E-08		1.00E-07	5.01E-05	2.65E-12	5.01E-11	1.00E+01
F	1.00E-09	5.10E-06	5.00E-06	5.13E-11	5.00E-05	1.32E-12	5.00E-11	1.00E+01
IV-3								
A'	1.00E-10			9.09E-12	5.00E-05	1.84E-15	5.00E-11	9.89E-01
C'	9.09E-11			8.27E-12	5.00E-05	1.38E-15	5.00E-11	2.50E+00
D'	9.09E-11	9.07E-10	8.90E-10	9.55E-15	5.00E-05	6.55E-16	5.00E-11	2.50E+00
E'	9.09E-11	1.00E-09		9.09E-09	5.00E-05	6.61E-13	5.00E-11	2.50E+00
F'	9.09E-11	4.64E-07	4.55E-07	4.88E-12	5.00E-05	3.31E-13	5.00E-11	2.50E+00

표 8. 가상 장치조건에 따라 적용 가능한 구성 예. 1과 2는 각각 주 펌프 용량이 클 때와 작을 때를 가리킨다.

Case	1	2	3 (내장펌프)
I	C, D, F	C, D, F	A', C', D', E', F'
II	C, D	C, D	A', C', D', F'
III	F	F	(E', F')
IV	E, F	E, F	(E', F')

있다. 표 6과 7에서 연한 회색으로 칠한 칸과 표 8에서 괄호는 기준은 통과하지만 정량적인 검사는 힘들다고 생각되는 구성들이다.

예상한 대로 모든 결과에서 검출기의 진공펌프만으로 대형 진공용기를 배기하는 것으로는 올바른 누설검사를 할 수가 없다는 것을 공통적으로 알 수 있다. 통상적인 기체부하에 대해 검출부 압력이 기준치 이상으로 높아질 뿐만 아니라 더욱 심각한 것은 반응시간이 상상을 초월할 정도로 길어진다. 따라서 배기속도를 어느 정도 유지하기 위해 검출기를 용기의 주 펌프와 직렬 또는 병렬로 연결하여 사용하는 것이 필수적이다. 특히 내장펌프가 있을 때 이를 가동하면 기체부하가 매우 클 때는 물론이고 대부분의 경우에 선택의 폭이 아주 넓어지며 누설이 아주 작을 때도 여전히 유용하다.

표 5에서와 같이 용기의 기체부하가 커지면 용기의 주 펌프와 검출기를 직렬로 연결해서 검출부의 압력을 적정수준으로 유지하는 것이 힘들어지고 더 심하면 고진공 펌프의 배압이 높아져서 문제가 될 수 있다. 이럴 때는 C나 D와 같이 어떤 형태로든 큰 용량의 펌프와 병렬로 연결되는 것이 필요하다. 물론 병렬연결과 내장형 펌프의 사용 시 어려운 점은 검출기에서 헬륨분압이 매우 낮아진다는 것이다. 따라서 표 6과 7에서 알 수 있는 바와 같이 아주 적은 양의 누설을 검출하려고 할 때는 C나 D보다는 F와 같은 전통적 방식이 오히려 잘 맞는다. 적어도 모든 누설기체가 검출기를 통과하지 않으면 최소 검출기준을 넘어서 수 없기 때문이다. 용기의 기체부하가 적다면 E도 가능하다.

만일 용기 주 펌프의 용량이 작아지면, 누설과 기체부하가 많고 병렬연결일 때는 검출부의 압력이 약간 높아지지만 결정적이지는 않고 더구나 직렬일 때는 영향이 없다. 그러나 압력이 전혀 문제가 아닌 경우라도 시정수가 길어지는 것이 제약이 될 수 있다. 이 계산에서는 누설과 기체부하에 상관없이 10초로 나와 다행히 기준을 밀돌고 있지만

용기 규모에 비해 너무 작은 용량의 펌프는 곤란하다는 것을 나타낸다.

이상의 계산결과는 특정 조건에서 구한 것으로 모든 경우에 적용되는 절대적인 것이 아니라 구체적인 설정 조건에 따라 달라질 수 있다. 그러나 전반적인 경향은 충분히 파악할 수 있으며 더 중요한 것은 대형 용기라도 일정 크기 이상의 누설이 있다면 적절한 구성을 통해 신뢰성 있는 헬륨누설검사를 할 수 있는 여지가 언제나 충분히 있다는 점이다.

끝으로 한 가지 주의할 점은 정량적인 누설검사는 반드시 검출기의 보정이 필요하다. 대형용기의 누설검사 시에는 헬륨 표준 누설기를 용기에 직접 달고 검출기를 보정하는 것이 좋고 만일 여의치 않은 경우라면 자체 보정 프로그램을 사용하되 특별히 병렬연결에 대해서는 표 1에 있는 식에서와 같이 실제 검출기로 들어오는 분율을 고려해서 측정 누설률로부터 최종 누설률을 계산해야 한다.

#### IV. 결 론

헬륨누설검출은 일반적인 진공 시스템에서 널리 이용되는 대표적인 편리한 누설검사방법이지만 기체부하가 높고 시정수가 긴 대형 진공용기에 적용하려면 상당한 주의가 필요하다.

본 논문에서는 가상적인 제원을 가진 대형 진공용기를 가정하여 물리적으로 생각할 수 있는 다양한 누설검사 시스템 구성들에 대해 식을 세우고 압력분포 및 헬륨검출 분압을 계산하여 타당성을 비교분석하는 방법론을 제시했다.

기체부하가 클 때는 검출기를 주 펌프와 병렬로 연결하거나, 가능하다면 내장펌프를 가동하는 것이 좋고 누설이 매우 작은 경우는 주 펌프와 검출기를 직렬로 연결하는 것이 필수적이다. 하지만 누설이 작을 때는 내장펌프 가동이 정량적인 누설검사를 어렵게 만들 수도 있다.

계산결과는 구체적인 설정 조건에 따라 달라질 수 있지만 중요한 것은 대형 용기를 사용하는 진공 시스템에 대해 특정 환경에 적합한 헬륨 누설검사 방법을 합리적으로 찾을 수 있다는 점이다.

본 논문에서는 물론 거대 진공용기를 염두에 두고 논의를 전개했지만 누설검사 시스템 구성 및 성능예측에 관한 방법론은 어느 진공시스템이나 적용할 수 있다.

### 참고문헌

- [1] 김학근 외, 31회 진공학회 학술발표회, E-P06 (2006).
- [2] 인상렬 외, 31회 진공학회 학술발표회, E-P07 (2006).
- [3] 이상훈 외, 31회 진공학회 학술발표회, V-P01 (2006).
- [4] H. E. Nuss and I. Streuff, *Vacuum* **46**, 845 (1995).
- [5] Y. Murakami, *핵융합연구(일어)* **55**, 135 (1986).
- [6] A. Kaminaga et al., *J. Jpn. Vac. Soc.* **41**, 846 (1998).
- [7] S. Bryan, J. L. Hemmerich, and T. Winkel, *Vacuum* **53**, 215 (1999).
- [8] G. Horikoshi and K. Kakihara, *J. Jpn. Vac. Soc.* **38**, 195 (1995).



## Consideration on the helium leak detection in a large vacuum chamber

S. R. IN

*Nuclear Fusion Research Center, KAERI, Daejeon 305-353*

(Received May 22, 2007)

Nowadays, in our country, large vacuum chambers for huge experimental facilities such as the tokamak fusion device, high power neural beam test stand, and space simulator have been constructed. In such a vacuum chamber of very large size, it is quite complicate to check on leakage quantitatively, while the probability of a leak is relatively high. To investigate the feasibility of applying reliably a helium leak detection to the huge vacuum chambers, and to find a reasonable methodology of choosing an optimum set-up for leak detection, several virtual constructions of the leak detection system have been analyzed by calculating the pressure distribution in the system and the helium level in the sensor part.

Keywords : large vacuum chamber, helium leak detection, helium partial pressure

\* [E-mail] [srin@kaeri.re.kr](mailto:srin@kaeri.re.kr)