

Teflon seal을 이용한 bayonet형 진공단열배관

이현철, 강형석
대성초저온연구소, 경기도 안산

Bayonet type vacuum insulated pipes with Teflon seal

H.C. Lee and H.S. Kang
Daesung Cryogenic Research Institute

hclee@gastopia.co.kr

Abstract - Vacuum insulated pipes (VIP) are one of the important equipments for cryogenic fluids' transfer. Flange type of VIP, which can easily be installed at the site, uses a set of male and female bayonet with very small gap between them. In order to prevent leakage of liquid from inner pipe to bayonet, Teflon or Kel-F is located outside both the inner pipe of male and the guide of female. Even though liquid may leak at room temperature, it cannot leak at cryogenic temperature since Teflon shrinks much more than pipes and adheres closely to the inner pipe and guide. Teflon seal method has the advantage of easy fabrication, low cost and effective sealing compared to the conventional method.

1. 서 론

초저온 상태의 액화가스는 물체를 냉각하거나, 많은 양의 가스를 저장 및 수송을 할 경우에 매우 유용하며, 기초연구, 반도체, 우주항공, 초전도, 통신, 화학합성, 유전공학, 의학 등을 포함한 많은 첨단과학 분야에서 사용되고 있다. 특히, 수소, 헬륨 등의 가스를 반도체 산업에서 요구하는 초고순도 가스로 정제하는 장치에 초저온은 유용하게 사용되고 있다.

초저온 액화가스를 액체 상태로 장시간 유지하거나 한 장소에서 다른 장소로 이송하기 위해서는 상온으로부터 열침입을 최대한 차단해야 한다. 초저온 단열기술은 초저온 액화가스의 저장 및 수송 그리고 저온장비를 운전하는 모든 기반시설에서는 필수적인 기술로써, 단열 효율은 곧 장비의 운전 비용과 직결되어 있으며, 장비의 수명, 관리 등에도 커다란 영향을 미친다.

본 논문에서는 초저온 단열의 기본적인 개념을

바탕으로 초저온 유체 이송시 사용되는 플랜지형 진공단열배관의 bayonet에 Teflon 혹은 Kel-F를 장착하여 기존 방법보다 제조가 간편하고, 적은 비용으로 효과적으로 누설을 방지하는 방법에 대하여 논의하였다.

2. 열전달 이론

온도가 다른 물체들 사이에 열전달이 발생하는 경로는 전도, 대류, 분자운동, 복사가 있으며, 단열재 혹은 단열 공간을 통한 열전달은 복합적으로 이루어 진다. 거시적인 면에서 열전달은 실험적으로 측정하여 결정된다.

$$\dot{Q} = KA \frac{T_2 - T_1}{L} \quad (1)$$

여기에서 K = 열전도도, A = 열전도 단면적, \dot{Q} = 단위시간당 전달된 열량, L = 단열재의 두께, T_1, T_2 = 저온측과 고온측의 온도를 나타낸다. 기체에 의한 열전도는 압력이 충분히 높아서 대류가 발생하는 경우에는 압력에 비례한다. 대류가 없는 경우에 이상기체에 의한 열전도는

$$K = \frac{1}{3} m \lambda n \bar{v} C_v \quad (2)$$

이며, 여기에서 m 분자량, λ 평균자유행로, n 단위체적당 분자수, \bar{v} 분자의 평균속도, C_v 정적비열을 나타낸다. (2)식은 $\lambda \propto 1/n$ 이므로 $K \propto m \bar{v} C_v$ 로 나타낼 수 있으므로 평균자유행로가 단열 공간보다 작은 경우에는 K 가 압력과 독립적인 관계를 가짐을 보여준다. 그러나, 압력이 낮아서 평균자유행로가 단열공간 보다 커지게 되거나 혹은 온도가 상온에 비하여 높거나, 낮으면 분자운동론을 적용할 수 없기 때문에 실험값에서 많이 벗어난다.

낮은 압력과 온도에서 적용할 수 있는 이론은 Knudsen[1]와 Corruccini[2]에 의하여 유도 및 정리되었다. 동심구, 동축실린더, 평행판에서 열전도양 \dot{Q} 는

$$\dot{Q} = \alpha \frac{\gamma+1}{\gamma-1} \sqrt{\frac{R}{8\pi MT}} P(T_2 - T_1) \quad (3)$$

$$\alpha = \frac{a_1 a_2}{a_2 + a_1(1 - a_2)(A_1/A_2)}$$

a_1, a_2 : 에너지 전달 계수

A_1, A_2 : 내, 외조의 면적

$\gamma = C_p/C_v$: 정압, 정적비열의 비

R : 가스상수, M : 가스의 분자량

P : 압력

T : P 를 측정하는 지점에서의 절대온도

이다. Fig.1은 void로 단열된 구형 2중 탱크에서 5 liter의 내용기에 액체산소를 넣어 실험한 결과를 나타낸 것이다. 대기압에서는 대류에 의한 열전달이 지배적이므로 압력이 하강함에 따라 열전달 매개체가 감소하게 되어 열전달이 비례적으로 감소한다. 대류의 정도가 작고 평균자유행로가 단열공간과 비슷한 영역에서는 (2)식에서와 같이 열전도는 압력의 변화에 무관한 열전도를 보인다. 평균자유행로가 단열공간 보다 커지는 저압에서는 (3)식에서와 같이 열전도가 급격히 감소한다. Fig.1에서와 같이 보통 10^{-4} torr 이하이면, 열전도면에서 우수하며, 2×10^{-3} torr까지는 양호한 편이다.

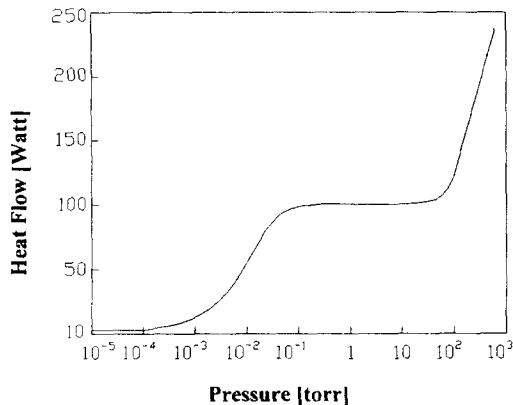


Fig.1. Heat transfer rate in void with LO₂

초저온 단열에서 가장 중요하다고 할 수 있는 열전달은 복사이다. 복사열이 다른 두 개의 판을 고려하면, 고온측의 복사열은 저온측에 비하여 월등히 크므로 복사열에 의한 열전도량은 근사적으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{Q} = A_1 \sigma F_A F_E (T_2^4 - T_1^4), \quad (4)$$

σ : Stefan-Boltzman 상수

여기에서 F_A 는 양면의 동심구조를 나타내는 계수로써 동심일 경우에는 $F_A = 1$ 이다. 또한, F_E 는 양면의 복사율에 관련된 계수로써 다음과 같다.

$$F_E = \frac{1}{\frac{1}{e_1} + \frac{A_1}{A_2} \left(\frac{1}{e_2} - 1 \right)} \quad (5)$$

여기에서 e_1, e_2 은 저온측과 고온측의 복사율을 나타낸다. 복사율은 재료의 재질과 표면의 거칠기, 그리고 온도에 따라 다르다. 복사열이 작을수록 단열이 우수하므로 저온용기의 단열에는 복사율이 작은 구리(Cu), 금(Au), 은(Ag), 알루미늄(Al) 등을 많이 사용한다[4].

복사열과 분자에 의한 열전달을 차단하기 위하여 초창기에 개발된 방법이 고진공단열 (1892년, James Dewar)이다. 단열용기는 내용기와 외용기의 2중 구조로 되어 있으며, 내용기와 외용기의 접촉면적을 최소화하고, 내용기의 외벽과 외용기의 내벽을 거울같이 연마하여 고체와 복사에 의한 열전도를 줄이고, 내용기와 외용기 사이를 고진공 상태로 유지하여 분자운동에 의한 열전도를 제거한다. 이러한 단열방법은 상온에서의 강한 복사열을 감당하기에는 부족한 면이 있으나 제작상의 간편함 때문에 초창기에 액체질소용 소형 용기에 많이 이용된 바 있다.

고진공단열 방법의 장점은 진공배기 시간이 짧으며, 고체에 의한 열전도를 고려할 필요가 없고, 제작이 비교적 간편하며, 유지관리가 용이하다. 단점은 복사열을 줄이기 위해서 내용기 외부와 외용기 내부를 연마하게 되는데, 저온의 액체를 저장 시 단열공간에 있던 잔여 분자들이 내조표면에 붙어서, 복사율이 0.02 ~ 0.1이던 것을 0.8까지 높힘으로써 복사열이 커진다. 따라서, 잦은 진공배기가 필요하며, 효과적으로 열침입을 차단하기 어려워 최근에는 다층단열(multilayer insulation) 혹은 superinsulation을 주로 사용한다.

superinsulation이라 불리기도 하는 이 방법은 P. Peterson[3]에 의하여 처음으로 고안된 당시에는 perlite를 이용한 단열이 많이 사용되고 있었기 때문에 그다지 호응을 얻지 못했다. 우주항공산업과 저온기술의 발전과 더불어 액체헬륨과 액체수소를 많이 사용하게 됨에 따라 고도의 액체 저장기술을 요구하게 되었고, Linde(USA)와 A.D.L사에 의하여 multilayer단열에 의한 저장용기가 처음으로 상품화되었다.

multilayer 단열은 고진공단열과 진공분말단열의 장점을 취한 방법으로 지금까지 알려진 방법 중에서 가장 성능이 좋다. 저온의 내용기 외부에 여러층의 반사판과 spacer를 감고, 내부 압력을 5×10^{-5} torr 이하로 유지시켜서 복사와 잔류분자들에 의한 열전도를 최소화한다. 반사판으로써는 알루미늄 박막과 구리 박막이 주로 사용되고 있으며, 복사율 ϵ 는 각각 0.02 ~ 0.05, 0.015 ~ 0.05이며, 복사율을 최소화 하기 위해서는 electro-polish를 해야 한다. 표면이 크게 산화된

경우에는 각각 0.31과 0.6으로 반사판으로써 역할을 할 수 없다. 박막의 두께가 약 $0.2 \mu m$ 이면, 광선의 투과가 거의 생기지 않기 때문에 단열 반사판으로 사용이 가능하다. 많이 사용되는 알루미늄과 구리 박막의 두께는 $0.01 \sim 0.1 mm$ 정도이다. spacer는 fiber-glass net, 다공성 종이, glass fabric, nylon net, Mylar 등이 사용되며, 다공성 종이 (Dexter paper, Aspaper paper)는 $0.1 \sim 1 mm$, 그리고 알루미늄과 구리를 증착하는 Mylar의 두께는 $0.005 \sim 1.0 mm$ 정도이며, 주로 $0.03 mm$ 를 사용한다. glass paper는 열전도율이 작아서 유용하지만 가격이 비싸다. superinsulation과 더불어 glass wool도 함께 사용되는 경우가 있는데 섬유 두께가 보통 $1 \sim 100 \mu m$ 정도이며, $10 \mu m$ 가 많이 사용되고 있다.

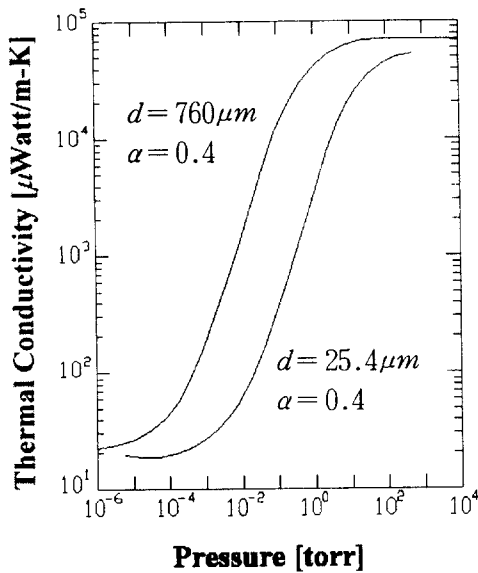


Fig.2. Theoretical thermal conductivity in multilayer insulation
(d: distance between confining surfaces, α: accomodation coefficient)

multilayer 단열 시스템에서 열전달은 잔류분자 Q_g , 단열재 자체 Q_s 그리고 복사 Q_r 에 의하여 발생한다. 진공도가 충분히 낮아서 Q_g 를 무시할 수 있는 경우에 열전도는 spacer와 복사에 의한 열전도만 고려하면 된다. (4)식과 (5)식에서 근사적으로 $F_A = 1$, $e_1 = e_2 = e$, $F_e = e/2 - e$ 를 대입하고, 반사판과 spacer를 1매로 하여 점화관 계식을 이용하면, 열전도율은

$$K = \frac{1}{N/\Delta x} \left\{ h_c + \frac{\sigma e T_2^3}{2 - e} \left[1 + \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^2 \right] \left(1 + \frac{T_1}{T_2} \right) \right\} \quad (6)$$

가 되며, 여기에서 $N/\Delta x$ 는 단위 길이당 단열재 (반사판과 spacer) 수, h_c 는 spacer에 의한 고

체 열전도율을 나타낸다. 열전달량은 단열재를 감은 밀도를 높여서 어느 한도까지 줄일 수 있으나 너무 많이 감으면 단열재가 뻑뻑하게 감김으로써 spacer의 고체에 의한 열전도가 $N/\Delta x$ 보다 빨리 증가함에 따라 열전달량이 커지게 된다. Fig.2는 전형적인 multilayer 단열성능을 단열재 밀도에 따라 나타낸 것이다. 실제 상황은 이론적으로 유도된 (6)을 적용할 경우 어느정도 차이가 날 수 있다. 예를 들면, (1) spacer의 온도는 층층마다 온도가 다르기 때문에 재질에 따라 열전도율이 달라질 수 있으며, (2) spacer와 반사판간의 접촉정도가 같지 않고, (3) 잔여가스의 종류, (4) 저온 액체의 충전에 따른 cryopumping 효과에 의한 압력의 변화 등에 의하여 계산에 사용되는 파라미터들의 값을 정확하게 산정하기가 어렵다.

multilayer 단열은 단열성능이 뛰어나고, 진공분말단열에 비하여 매우 가볍고, 내부압력이 안정한 장점이 있어서 초저온 저장용기, 진공단열배관 등에 많이 사용되고 있다. 그러나, 같은 단열 성능을 나타내는 다른 단열방법과 비교하여 비용이 높고, 복잡한 구조물에 사용하기가 어려우며, 단열공간의 진공도에 훨씬 민감한 단점이 있다.

3. 진공단열배관의 bayonet

진공단열배관은 내관과 외관으로 구성되어 있으며, 내관에 복사열을 차단하기 위한 알루미늄 박막과 같은 단열재를 감고, 내관과 외관 사이를 고진공 상태(1×10^{-5} torr 이하)로 유지하는 superinsulation 방법을 사용하여 열전달을 차단하여 초저온 유체가 증발하지 않고 원활하게 흐르도록 고안된 것이다. 배관의 길이는 상온과 저온 사이의 열응력을 고려하여 설계되는데, 내관의 재질에 따라 다르지만 일반적으로 최대 약 $4 \sim 6 m$ 정도이다. 설치되는 배관라인에 따라 직관, 곡관, tee관등의 외형상 구조를 가지게 된다.

진공단열배관은 구조상 배관과 배관을 연결하는 것이 일반 배관에 비하여 훨씬 까다롭다. 진공단열배관의 연결 방법에 따라 보통형과 플랜지형으로 크게 구분하는데, 보통형은 배관과 배관을 서로 용접한 후 용접 부위에 perlite를 사용한 진공분말단열 방법을 사용하고, 플랜지형은 구조가 복잡한 bayonet을 사용한다. 보통형은 비교적 구조가 간단하여 제작이 용이하나 배관을 설치하는 현장에서 perlite 주입과 진공배기를 해야하는 번거로움이 있다. 반면에 플랜지형은 제작이 어려우나 현장에서 볼트나 클램프를 사용하여 연결하고 별도의 단열작업이 필요하지 않기 때문에 연결이 매우 간편하고, 배관라인 변경이나 수리시 분해와 조립이 용이하다.

플랜지형 진공배관은 male bayonet과 female bayonet으로 구성되어 있으며, bayonet은 자체적으로 외부와 열적으로 단열을 하도록 설계된다. bayonet은 메이커에 따라 약간의 구조상의 차이는 있으나 기본적인 구조와 원리는 같다. Fig.3은 대성산소(주)에서 제조하여 시판하고 있

는 진공단열배관의 bayonet을 나타낸 것이다. 초저온 유체가 접촉하는 내관의 말단과 플랜지 사이의 열적 경로는 크게 고체에 의한 열전도와 기체에 의한 전도를 고려할 수 있다. 고체에 의한 열전도는 근본적으로 차단이 불가능하기 때문에 내관의 설계 압력을 고려하여 열전도를 최소화해야 한다. 예를 들면, bayonet의 두께를 최소화하고 ($< 0.8 \text{ mm}$), 초저온 상태의 내관 끝단과 상온의 플랜지 사이에 충분한 거리를 둬으로써 열전도를 최소화할 수 있다.

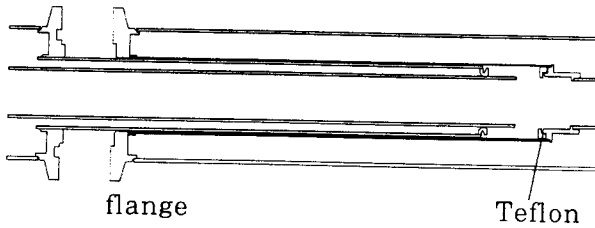


Fig. 3. flange type vacuum insulated pipe

bayonet의 열전달에서 가장 중요한 고려 대상은 기체에 의한 열전도이다. Fig. 1에서와 같이 male bayonet과 female bayonet 사이의 공간에 기체가 차게 되면 대류가 발생하게 되므로 많은 열전달이 발생하게 된다. 대류에 의한 열전달은 압력에 비례하여 증가하므로 압력이 상승하면 한랭이 플랜지에 전달되어 결국 초저온의 액체가 누설되게 된다. 따라서 플랜지형 진공배관은 bayonet에서 대류가 일어나지 않도록 하는 것이 매우 중요하다. 대류는 한랭한 기체와 상온의 기체가 순환하면서 열을 전달하므로 기체가 bayonet 안에서 순환하지 못하도록 male과 female 사이의 간격을 최대한 줄여야 한다. 그러나 간격이 너무 작으면 제작이 어렵고 생산성이 떨어져 단가가 상승하게 되며, 간격이 너무 크면 Fig. 1에서와 같이 압력이 낮은 경우에는 대류가 발생하지 않지만 압력이 어느 정도 이상으로 상승하면 다시 대류가 발생하여 열전도량이 커지게 된다. 따라서 설계 압력을 고려하여 간격을 조절해야 한다.

플랜지형 진공배관은 bayonet 공간에 있는 가스가 외부로 누설되는 것을 방지하기 위하여 플랜지에 o-ring을 장착하게 되는데 만약 한랭한 기체가 액체가 o-ring에 접촉하게 되면 o-ring에서 가스가 누설되게 된다. 일단 누설이 시작되면 누설을 멈추게 하는 것이 매우 어려우므로 bayonet 설계시 male과 female을 최대한 부착시키거나 액체가 bayonet 안으로 유입되는 것을 방지해야 한다. 액체의 유입을 방지하기 위하여 수축률이 다른 재질을 사용하여 상온에서는 액체가 쉽게 통과할 수 있으나 일단 초저온으로 온도가 내려가면 수축률이 큰 외관이 수축률이 작은 내관에 밀착됨으로써 액체가 누설되는 것을 방지한다. 예를 들면, 내관은 수축률이 적은 INVAR를 사용하고, 외관은 수축률이 큰 STS316 혹은 STS304를 사용하면 상온에서 간격이 0.4 mm (40A 파이프)라

할 경우 액체질소 온도에서는 0.1 mm 이하로 밀착되게 된다.

액체의 누설을 방지하기 위하여 사용하는 INVAR는 가격이 비싸고, 수분에 산화되는 단점이 있다. 본 연구에서는 INVAR 대신에 상온과 초저온 사이에 수축률이 큰 Teflon (혹은 Kel-F)을 사용하였다. Fig. 3에서와 같이 male bayonet의 내관과 female bayonet의 guide 외부에 0.4 mm 이내로 밀착되게 Teflon 링을 끼우면 상온에서는 헐겁게 끼워지기 때문에 액체가 누설될지라도 100K 이하에서는 Teflon이 내관에 0.05 mm 이내로 완전히 밀착되므로 액체가 누설되지 않는다. 또한, 초저온에서 Teflon의 stress가 상온에 비하여 매우 크므로 설계압력 10 bar 에서 늘어나거나 파손될 염려가 없다.

Teflon의 수축 성질을 이용한 방법을 사용하게 되면 INVAR를 사용하는 경우 보다 저렴한 비용으로 제작이 가능하고, 초저온액체의 누설을 효과적으로 방지할 수 있으며, male과 female을 완전히 밀착시키는 경우에 비하여 제작이 훨씬 용이하다. 따라서 Teflon을 사용하는 경우 대량 생산이 용이하고, 불량률을 현저히 낮출 수 있는 장점이 있다.

4. 결론

초저온 단열은 상온과 초저온 사이에서 분자의 운동, 고체에 의한 전도 및 복사 등에 의한 열전달 경로를 차단하여 열침입을 최소화하는 것으로 초저온 유체를 이송하기 위한 플랜지형 진공배관은 대류와 고체 열전도를 최소화한 bayonet을 사용한다.

male bayonet과 female bayonet 사이의 간격을 작게하여 상온과 초저온 사이의 대류를 방지하고, bayonet의 두께를 0.8 mm 이하로 얇게 하고 길이를 충분히 길게 하여 고체에 의한 열전도를 줄인다. male의 내관과 female의 guide에 Teflon 혹은 Kel-F를 끼워서 상온에서는 액체가 누설될 수 있어도 초저온에서는 Teflon이 수축하여 밀착되므로 액체가 누설될 수 없다. 이방법은 기존의 방법에 비하여 효과적으로 누설을 방지할 수 있으며, 제조가 간편하고 비용이 저렴하다.

참고문헌

- [1] M. Knudsen, "Radiometer Pressure and Coefficient of Accomodation", A.F. Hast and Son, Copenhagen, Denmark, 1930
- [2] R.J. Corruccini, Chem. Engr. Prog. 53, 262 & 342, 1957
- [3] P. Peterson, Swedish technical research council report, no. 706, 151, 1958
- [4] T.M. Flynn, "Cryogenic Engineering", Marcel Dekker, Inc., 1997
- [5] Randall Barron, "Cryogenic Systems", McGraw-Hill, Inc, 1966