

대용량 액체 수소 저장탱크를 위한 다층단열재의 단열성능 분석

김경호¹ · 신동환² · 김용찬³ · 강상우^{2†}

¹고려대학교 기계공학과 대학원, ²한국과학기술연구원 도시에너지연구단, ³고려대학교 기계공학과

Adiabatic Performance of Layered Insulating Materials for Bulk LH₂ Storage Tanks

KYEONGHO KIM¹, DONGHWAN SHIN², YONGCHAN KIM³, SARNG WOO KARNG^{2†}

¹Graduate school of Mechanical Engineering, Korea University, Anam-dong, Seongbuk-gu,
Seoul 136-701, Republic of Korea

²Center for Urban Energy Research, Korea Institute of Science and Technology, 5,
Hwarang-ro, 14-gil, Seoungbuk-gu, Seoul, 02792, Republic of Korea

³Department of Mechanical Engineering, Korea University, Anam-dong, Seongbuk-gu,
Seoul 136-701, Republic of Korea

Abstract >> One of the most feasible solution for reducing the excessive energy consumption and carbon dioxide emission is usage of more efficient fuel such as hydrogen. As is well known, there are three viable technologies for storing hydrogen fuel: compressed gas, metal hydride absorption, and cryogenic liquid. In these technologies, the storage for liquid hydrogen has better energy density by weight than other storage methods. However, the cryogenic liquid storage has a significant disadvantage of boiling losses. That is, high performance of thermal insulation systems must be studied for reducing the boiling losses. This paper presents an experimental study on the effective thermal conductivities of the composite layered insulation with aerogel blankets(Cryogel[®] Z and Pyrogel[®] XT-E) and Multi-layer insulation(MLI). The aerogel blankets are known as high porous materials and the good insulators within a soft vacuum range($10^{-3} \sim 1$ Torr). Also, MLI is known as the best insulator within a high vacuum range($<10^{-6} \sim 10^{-3}$ Torr). A vertical axial cryogenic experimental apparatus was designed to investigate the thermal performance of the composite layered insulators under cryogenic conditions as well as consist of a cold mass tank, a heat absorber, annular vacuum space, and an insulators space. The composite insulators were laminated in the insulator space that height was 50 mm. In this study, the effective thermal conductivities of the materials were evaluated by measuring boil-off rate of liquid nitrogen and liquid argon in the cold mass tank.

Key words : Cryogenic bulk storage tanks(극저온 대용량 저장탱크), Boil-off rate(증발율), Soft vacuum(중진공), Aerogel blanket(에어로젤 블랭킷), Multi-layer insulation(MLI)

Nomenclature

Q : Heat transfer rate, W

k : Apparent thermal conductivity, mW/m·K

k_e : Effective thermal conductivity, mW/m·K

[†]Corresponding author : libra@kist.re.kr

Received: 2016.11.4 in revised form: 2016.11.25 Accepted: 2016.12.30

Copyright © 2016 KHNES

V_{STP}	: Volumetric flow rate at STP, m^3/s
ρ_{STP}	: Density of gas at STP, kg/m^3
\dot{m}	: Mass flow rate of gas extracted, kg/s
h_{fg}	: Heat of vaporization, kJ/kg
L	: Vertical axial length of insulators, m
A	: Heat transfer area, m^2
P	: Pressure, Torr
T	: Temperature, K
U	: Total uncertainty
B	: Bias error
S	: Standard deviation
N	: The number of measurements

Subscripts

CVP	: Cold vacuum pressure
STP	: Standard temperature and pressure
sc	: Solid conduction
gc	: Gas conduction
cv	: Convection
r	: Radiation

1. 서 론

세계는 석유와 석탄 등 화석 에너지의 기반의 경제 구조에서 살고 있다. 그러나 세계 인구가 증가하고 각 나라의 경제가 성장함에 따라 화석 에너지 사용이 급증하여 환경오염 및 지구온난화에 대한 문제점이 야기되고 있다. 특히, 현재 에너지원으로 가장 많이 사용되고 있는 석유 자원에 대한 공급 불안정성을 대비하여야 한다. 즉, 화석 에너지 사용에 따른 환경오염과 자원 무기화를 대비함과 동시에 지속적인 경제성장을 모색할 필요가 있다. 그러나 효율적인 에너지 사용과 환경보존 문제는 서로 유기적으로 연결되어 있으므로 기존의 화석 에너지를 효율적으로 사용하여야 하며, 동시에 청정 에너지를 적절히 사용

하여 에너지의 공급 문제를 해결하여야 한다¹⁾.

이를 위해 최근 화석 연료가 아닌 청정 에너지원으로서 수소를 사용하는 연구가 부각되고 있다. 수소는 연료전지의 전기화학 반응에 의해 열과 전기를 생산할 수 있으며, 연소하여도 공해를 야기하지 않는 장점이 있다. 또한, 지구 표면의 약 70%를 차지하는 물을 전기분해하여 수소를 생산할 수 있으며, 에너지 공급 후 부산물이 물로서 재순환이 가능한 청정 에너지원이다. 따라서 수소를 연료로서 사용하기 위한 핵심 기술 중 하나가 바로 저장 기술이다.

일반적으로 수소는 액체 수소 저장, 압축 기체 수소 저장, 수소저장 합금으로 저장할 수 있다. 첫째, 대기압 상태의 기체 수소를 액화시켜 극저온용 특수 단열 저장용기 내 액체 수소(약 20.3K)로 저장이 가능하다. 따라서 특수 단열 저장용기의 설계 및 단열 성능 연구가 선행되어야 한다. 둘째, 압축 기체 수소 저장은 현재 수소연료전지 자동차에 가장 많이 사용되는 방식으로 350 bar 혹은 700 bar의 내압을 견딜 수 있는 특수 내압 저장탱크에 압축된 기체 수소를 저장한다. 마지막으로 수소저장 합금은 금속 수화물(metal hydride)을 이용하여 수소 분자를 금속 분자 사이에 넣고 저장하는 방식이다. 주로 Mg_2NiH_4 혹은 $NaAlH_4$ 등의 합금을 사용하며 무게 당 저장효율은 약 3.7 wt.%이다²⁾.

현재 대한민국은 정부 주도 하에 수소경제 인프라 구축을 위한 수소 충전소 확대 보급을 추진 중에 있다. 특히, 2015년 관계부처합동 “수소차 보급 및 시장 활성화 계획”에 따르면, 수소연료전지 자동차의 경우 2020년까지 9,000대, 2030년까지 63만 대의 보급을 목표로 설정하였으며, 수소 충전소의 경우 2020년까지 80개소, 2030년까지 520개소 설치를 목표로 하고 있다³⁾. 따라서 수소 저장에 있어서 안전하고 저장효율이 좋으며 운영비가 저렴한 저장방식에 대한 연구가 필요하다.

미국의 DOE(Department of Energy) 산하 NREL(National

Renewable Energy Laboratory)에서 작성된 수소 충전소 경제성 분석 자료에 의하면, LH₂(액체 수소), GH₂(기체 수소), SMR(수증기 개질), Electrolysis(물 전기분해)의 방식으로 운영하는 수소 충전소에 대한 운영비를 검토한 결과, 대용량 액체 수소 저장방식이 가장 경제적이라고 보고하고 있다⁴⁾.

일반적으로 액체 수소 저장을 위한 특수 단열 저장용기는 진공단열, MLI(Multi-layer insulation) 그리고 증기냉각 복사차단막(vapor-cooled radiation shield)을 사용하여 단열효과를 극대화 시킨다. 특히, MLI는 진공단열과 함께 사용할 때 단열성능이 가장 우수한 단열재로 알려져 있다. 그러나 MLI는 고진공(<10⁻⁶ ~ 10⁻³ Torr) 환경이 아닌 중진공 이하(> 10⁻³ Torr)의 환경에서 단열성능이 저하된다고 보고되고 있다⁵⁾. 반면, 에어로젤 블랑켓(Aerogel blanket)은 다공성 물질로 구성되어 있어서, 진공도가 낮은 환경에서도 좋은 단열성능을 나타내는 것으로 알려져 있다⁶⁾. 즉, 대용량 액체 수소 저장탱크의 중진공 이하 진공단열 환경에서 에어로젤 블랑켓이 MLI보다 적합한 단열재이다. 따라서 본 연구는 대용량 액체 수소 저장탱크에 적용할 단열재로서 에어로젤 블랑켓을 선정하였으며, 중진공 이하(> 10⁻³ Torr)의 환경에서 단열성능을 실험적으로 분석하였다. 또한, 에어로젤 블랑켓을 MLI와 적층하여 복합 다층단열재로서 단열성능을 비교 및 분석하였다.

2. 단열재


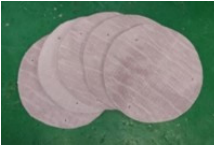
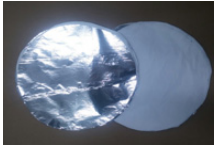
본 실험에서 사용한 단열재는 에어로젤 블랑켓(Cryogel[®] Z & Pyrogel[®] XT-E, Aspen Aerogels, Inc.)과 MLI(Lydall, Inc.)로서 물질 특성은 Table 1에 나타내었다.

다공성 물질인 에어로젤로 구성된 에어로젤 블랑켓은 단열성능이 우수할 뿐만 아니라, 강한 발수성과 내부식성의 특성을 가지고 있다⁷⁾. 본 실험에서 사용한 Cryogel[®] Z와 Pyrogel[®] XT-E는 Silica(SiO₂)와 polyester/fiber glass로 구성되며, 각각의 혼합비에 따라 사용 가능한 온도 범위가 구분된다^{8,9)}.

MLI는 고진공(<10⁻⁶ ~ 10⁻³ Torr)환경에서 매우 우수한 단열성능을 보이기 때문에 우주 환경과 같이 주로 극한 환경에 적용된다. 그러나 MLI는 과 0.079 mm의 섬유막과 0.007 mm의 얇은 알루미늄 막으로 구성되어 있어서 공기 중 수분에 취약한 특성을 갖고 있다. 즉, 진공도가 낮은 환경이나 공기 중 수분 함량이 높은 환경에서 MLI의 단열성능은 저하된다¹⁰⁾.

따라서 본 실험은 중진공 이하의 환경에서 Cryogel[®] Z와 Pyrogel[®] XT-E로 구성된 다층단열재 및 소량의 MLI를 Pyrogel[®] XT-E에 적층하여 구성한 복합 다층 단열재에 대하여 유효 열전도도 및 온도 분포도를 비교 및 분석하였다.

Table 1 Specification of test insulating materials

Type	Cryogel [®] Z ⁸⁾	Pyrogel [®] XT-E ⁹⁾	MLI ¹⁰⁾
Appearance			
The number of layers	5	5	50
Density, kg/m ³	160	180	180
Thickness of a layer, mm	10	10	0.086
Apparent thermal conductivity _{@STP} , mW/m·K	17	21	37

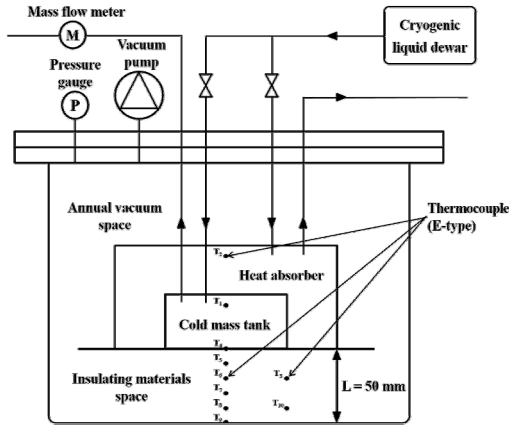


Fig. 1 A schematic diagram of the vertical axial cryogenic experimental apparatus

3. 실험 장치 및 방법

3.1 실험 장치

Fig. 1은 단열재의 수직 축방향에 대한 열전도도를 측정할 수 있는 실험 장치의 개요를 나타낸다. 실험 장치는 극저온 액체 저장탱크(cold mass tank), 열 흡수부(heat absorber), 단열재 설치부(insulating materials space), 그리고 단열재 설치부와 연결된 환형 진공부(annual vacuum space)로 구성된다. 극저온 액체 저장탱크와 열 흡수부에 각각 동일한 극저온 액체를 채우며, 극저온 액체 저장탱크에서 기화되어 배출되는 기체 유량을 실험 장치 상부에 설치된 질량 유량계를 이용하여 측정하였다. 또한, 진공 압력계를 상부에 설치하여 단열재를 포함한 환형 진공부의 진공 압력을 측정하였다. 각각의 측정된 신호는 데이터 수집 장치(midi-LOGGER GL820, GRAPHTEC Co.)를 이용하여 기록하였다. 실험 장치의 구성요소와 온도, 진공압력, 질량 유량을 측정하는 센서의 세부사항은 Table 2와 3에 정리하였다.

3.2 실험 방법

Fig. 2 (a)와 같이 에어로젤 블랑켓은 극저온 액체

Table 2 Dimension of the experimental apparatus

Type	Outside diameter (mm)	Height (mm)	Volume (L)
Cold mass tank	120	50	0.57
Heat absorber	200	110	2.9
Insulating materials space	400	50	6.3
Annular vacuum space	400	610	77

저장탱크 및 열 흡수부 하단에 고정하였으며, 각각의 단열재 사이에 온도센서(E-type thermocouple)를 설치하였다. 단, 실험에 사용된 MLI의 경우, 두께가 얇으므로 50 layers를 하나의 세트르 구성하여 에어로젤 블랑켓과 같이 하나의 단열재 층으로 간주하였다.

Fig. 2 (b)는 단열재가 완전히 극저온 액체 저장탱크 및 열 흡수부 하단면에 고정되어, 최종적으로 외통과 조립하는 과정이다. 조립 이후, 단열재 설치부 및 환형 진공부에 남아 있는 수분 및 잔류 기체를 제거하기 위하여 퍼징(purging) 작업을 3회 실시하였다. 이 때, 사용한 기체는 질소(GN₂)이며, 사용된 진공 펌프는 Table 4에 정리하였다.

본 실험의 목적은 중진공 이하($> 10^3$ Torr)의 환경에 대한 단열재의 단열성능을 분석하기 위함이다. 따라서 단열재 설치부 및 환형 진공부의 초기 진공압

Table 3 Specification of sensors

Type	Location	Sensor	Accuracy
Temp.	Cold mass tank	Thermocouple (E-type)	$\pm 1.5\%$ of temp.
	Heat absorber		
	Insulating materials		
Press.	Insulating materials & Annular vacuum space	Kurt J. Lesker Co. 275i series	1.0×10^{-3} to 400 Torr: $\pm 10\%$ of reading
			400 to 1000 Torr: $\pm 2.5\%$ of reading
Mass flow	Cold mass tank	Omega® FMA-1620A-I	$\pm 0.8\%$ of reading

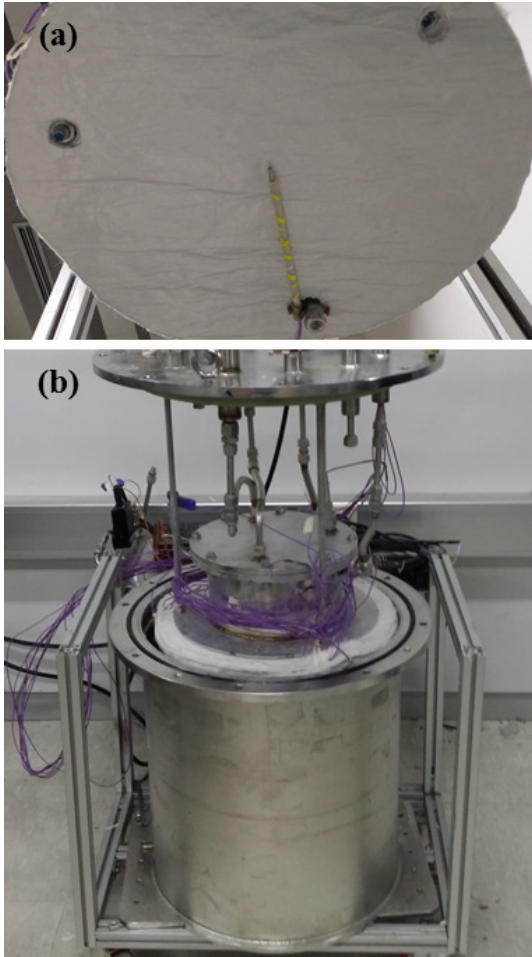


Fig. 2 Installation of (a) 6 E-type thermocouples beneath the materials and (b) the vertical axial cryogenic experimental apparatus

력을 10^{-2} Torr로 도달시켜 실험을 진행하였으며, 이후 진공도를 낮추기 위한 기체 질소(residual gas)를 단열재 설치부 및 환형 진공부에 주입하여 10^{-2} Torr를 포함한 10^{-1} , 10^0 , 10^1 , 10^2 , 7.6×10^2 Torr의 경우에 대하여 실험을 진행하였다.

실험에 주로 사용한 작동 유체는 안전성을 위하여 비가연성 물질인 액체 질소(LN₂)이다. 그러나 작동 유체의 온도에 따른 단열재의 유효 열전도도 변화를 분석하기 위하여 액체 아르곤(LAr, 87K)도 본 실험에 사용하였다. 단, 동일한 조건을 위하여 Pyrogel® XT-E에 대해서만 액체 질소 및 액체 아르곤을 적용

Table 4 Specification of used vacuum pumps

Pump type	Manufacturer	Description	
Rotary vane "W2V40"	WOOSUNG AUTOMA CO., LTD	Speed	400 L/min
		Ultimate pressure	5.0×10^{-4} Torr
Turbo molecular "nEXT 400D"	EDWARDS	Speed	780 L/min
		Ultimate pressure	7.5×10^{-9} Torr

하여 유효 열전도도를 비교하였다. 각각의 극저온 액체는 실험 장치의 극저온 액체 저장탱크 및 열 흡수부에 대한 예냉 과정에서 약 20 ~ 25 L가 소모되었으며, 소요 시간은 5시간 이상이다.

정상 상태에서 극저온 액체 저장탱크 및 열 흡수부 내의 극저온 액체는 약 1시간 이상 유지되었으며, 극저온 액체 저장탱크에서 기화된 기체 질소의 질량 유량은 데이터 수집 장치에 각각의 실험 경우마다 2초 간격으로 40분간 기록하였다.

4. 유효 열전도도 및 불확실도

4.1 유효 열전도도

에어로젤 블랑켓은 다공성 물질로서 식 (1)과 같이 유효 열전도도의 개념을 사용한다¹¹⁾.

$$k_e(P, T) = k_{sc} + k_{gc} + k_{cv} + k_r \quad (1)$$

여기서, k_e 는 유효 열전도도이며 P 는 압력, T 는 온도이다. 또한, 다공성 물질 내에서 k_{sc} 은 고체 열전도도, k_{gc} 은 기체 열전도도, k_{cv} 은 대류에 대한 열전도도, k_r 은 복사에너지에 대한 열전도도를 나타낸다.

유효 열전도도는 식 (2)의 Fourier's law에 직접 적용할 수 있으며, 본 실험에서 사용한 유효 열전도도는 식 (3)과 같다.

$$Q = -k_e(P, T)A \frac{dT}{dx} \quad (2)$$

Table 5 Estimated uncertainties for parameters

Parameter	Location	Uncertainty (%)	
Mass flow rate, \dot{m}	Cold mass tank	0.316	
Cross section area, A	Insulating materials	0.061	
Thickness of materials, L		0.014	
Temperature, T_1	Cold mass tank	0.325	
Temperature, T_2	Heat absorber	0.164	
Temperature, T_3	Upper radial side	0.032	
Temperature, T_4	Upper side of each layer	1 st	0.219
Temperature, T_5		2 nd	0.099
Temperature, T_6		3 rd	0.052
Temperature, T_7		4 th	0.039
Temperature, T_8		5 th	0.043
Temperature, T_9	Bottom of layers	0.061	
Temperature, T_{10}	Lower radial side	0.028	
Vacuum pressure, P	Annular vacuum space	3.601	
	Insulating materials		

$$k_e(P, T) = \frac{\dot{m} h_{fg} L}{A \Delta T} \quad (3)$$

여기서, Q 는 단열재를 통해 극저온 액체 저장탱크로 침투하는 열량이며 \dot{m} 은 극저온 액체가 기화한 질량 유량, h_{fg} 은 극저온 액체의 잠열, L 은 다층단열재의 총 두께, A 는 극저온 액체 저장탱크의 단면적, 그리고 ΔT 는 다층단열재의 상하부의 온도차를 나타낸다.

4.2 불확실도 해석

ASME PTC 19.1-2005를 이용하여 실험에 대한 불확실도를 해석하였다¹²⁾. 전체 불확실도는 정밀 오차(precision error)와 편향 오차(bias error)로 구성되며 식 (4)와 같다.

$$U = 2 \sqrt{\left(\frac{B}{2}\right)^2 + \left(\frac{S}{\sqrt{N}}\right)^2} \quad (4)$$

여기서, U 는 전체 불확실도, B 는 편향 오차, S 는 표준 편차, N 은 측정 횟수이다. 본 실험의 측정 횟수는 총 3회이며, 각 요소에 대한 불확실도 결과는 Table 5에 정리하였다.

5. 결과 및 고찰

5.1 다층단열재에 대한 유효 열전도도

Fig. 3은 진공압력에 따른 다층단열재의 유효 열전도도 결과를 나타낸다. Cryogel[®] Z과 Pyrogel[®] XT-E로 구성된 각각의 다층단열재들은 진공도가 상승할수록 유효 열전도도 값이 감소하는 경향을 보였으며, Pyrogel[®] XT-E가 Cryogel[®] Z에 비해 단열성능이 우수하게 나타났다. 그러나 Cryogel[®] Z는 10² mTorr 이하에서 Pyrogel[®] XT-E의 유효 열전도도 값과 역전되는 경향을 나타냈다.

MLI를 Pyrogel[®] XT-E에 적층하여 구성한 복합 다층단열재는 중진공 영역에서 우수한 단열성능을 보여주었으나, 저진공 영역에서 유효 열전도도 값이 급격히 상승하였다. 따라서 중진공 이하의 환경에서 복합 다층단열재의 사용은 적합하지 않다.

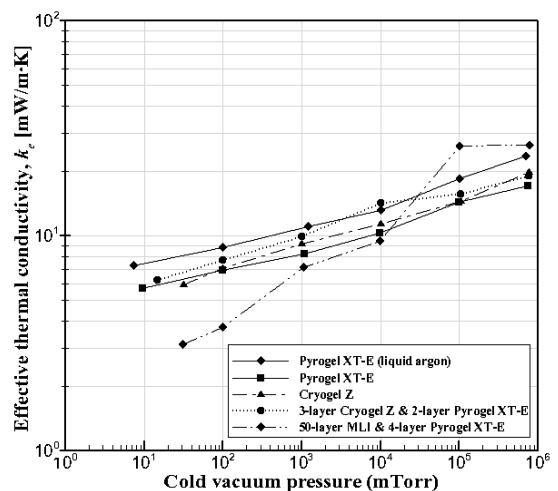


Fig. 3 Variations of the effective thermal conductivities for insulating materials; residual gas is nitrogen

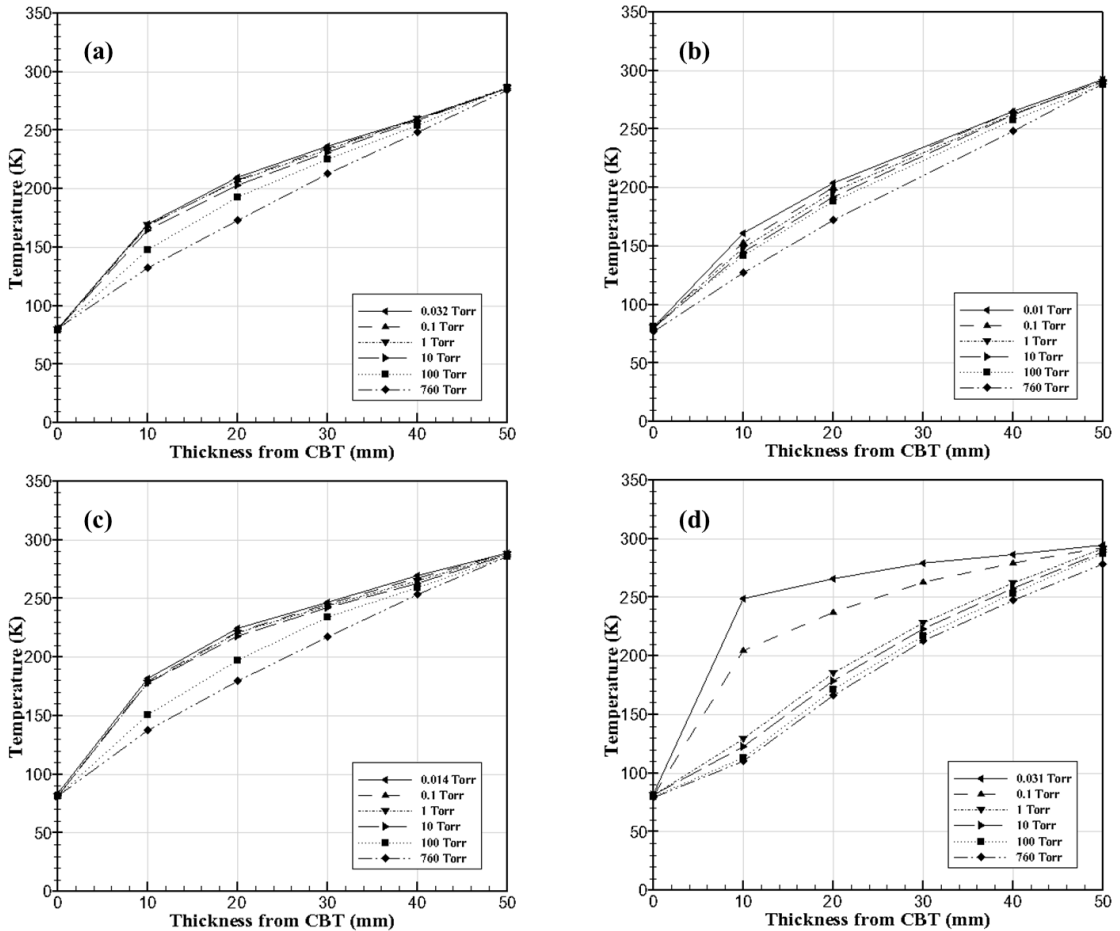


Fig. 4 Temperature-thickness profiles of the insulating materials, (a) Cryogel[®] Z, (b) Pyrogel[®] XT-E, (c) 3 layers Cryogel[®] Z & 2 layers Pyrogel[®] XT-E, and (d) 50 layers MLI & 2 layers Pyrogel[®] XT-E, with liquid nitrogen; residual gas is nitrogen

또한, 액체 질소(77K) 및 액체 아르곤(87K)을 이용한 Pyrogel[®] XT-E의 유효 열전도도 산출 값은 액체 아르곤의 경우가 높게 나타났다. 즉, 유효 열전도도는 극저온 액체의 표준 끓는점(Normal Boiling Point, NBP)에 따라 다른 값을 산출하게 된다.

5.2 진공압력에 따른 다층단열재의 온도 분포도

Fig. 4~5는 총 두께가 50 mm로 구성된 다층단열재들의 온도 분포도를 진공압력 변화에 따라 나타낸 결과이다. Fig. 4는 액체 질소를 이용하여 실험한 결과이며, Fig. 5는 액체 아르곤을 이용하여 실험한

Pyrogel[®] XT-E의 온도 분포도이다.

온도 분포도에서 두께가 0 mm인 부분이 다층단열재가 증발량 흡수부와 인접하는 부분이며, 50 mm인 부분이 다층단열재의 하단부이다. 온도는 극저온 액체 저장탱크로부터 10 mm마다 온도센서를 설치하여 측정하였다.

진공도가 상승할수록 극저온 액체 저장탱크와 인접한 부분에서 온도 분포도의 기울기가 급격하게 나타났다으며, 반대로 다층단열재의 하단부에 도달할수록 온도 분포도의 기울기가 완만하게 나타났다. 특히, 중진공 환경에서 MLI를 Pyrogel[®] XT-E에 적용하여 구성된 복합 다층단열재가 극저온 액체 저장탱

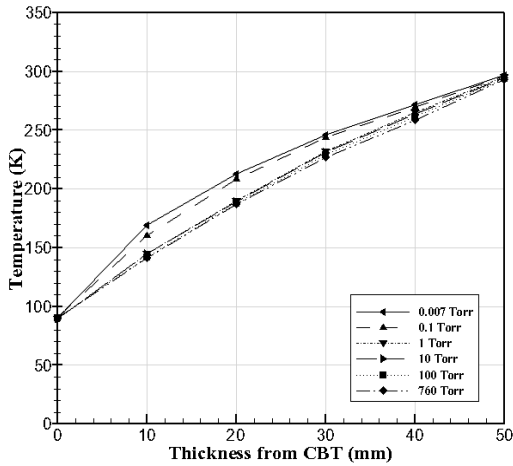


Fig. 5 Temperature-thickness profiles of Pyrogel® XT-E with liquid argon; residual gas is nitrogen

크와 인접하는 부분에서 급격한 온도 변화를 보여주고 있다. 이는 MLI가 극저온 액체 저장탱크와 인접하여 나타난 결과로서 MLI가 중진공 환경에서 단열재로서 우수하다는 점을 시사한다. Fig. 5는 액체 아르곤을 이용한 Pyrogel® XT-E의 온도 분포도의 결과이며, Fig. 4 (b)의 액체 질소를 이용한 Pyrogel® XT-E의 온도 분포도보다 완만한 기울기를 나타내었다.

6. 결 론

본 연구는 극저온 환경 및 진공압력의 변화에 따른 다층단열재의 유효 열전도도와 온도 분포 특성을 고찰하였다. 극저온 액체는 액체 질소와 액체 아르곤이며, 다층단열재를 통해 외부로부터 침투되는 열량만을 이용하여 다층단열재들의 단열성능을 분석하였다.

1) Cryogel® Z와 Pyrogel® XT-E는 진공도가 상승할수록 유효 열전도도 값이 감소하였으며, 전반적으로 Pyrogel® XT-E가 Cryogel® Z보다 우수한 단열성능을 나타내었다. 하지만 Cryogel® Z의 유효 열전도도가 10^2 mTorr 이하의 중진공 환경에서 Pyrogel® XT-E의 유효 열전도도와 역전되는 경향을 나타냈다. 따라서 고진공 환경에서 Cryogel® Z

이 Pyrogel® XT-E보다 우수한 단열재로 활용이 가능하다.

- 유효 열전도도는 기체에 대한 전도도를 내포하고 있다. 따라서 다공성 단열제인 에어로젤 블랑켓은 진공도에 따라 잠입되어 있던 기체분자의 비율이 감소하여 유효 열전도도 값이 감소하게 된다.
- MLI와 Pyrogel® XT-E로 구성된 복합 다층단열재는 중진공 환경에서 일반 에어로젤 블랑켓만을 이용한 다층단열재보다 단열성능이 우수하였다. 하지만 진공도가 낮은 환경에서 단열성능은 우수하지 못하였다. 이는 알루미늄 막으로 구성된 MLI가 진공층의 수분을 포함한 공기에 영향을 많이 받아 발생된 결과이다.
- 표준 끓는점(Normal Boiling Point, NBP)이 약 10K 정도 차이가 나는 액체 질소 및 액체 아르곤을 이용하여 유효 열전도도가 온도에 크게 영향 받는다는 것을 분석하였다.
- 본 논문에서 실험한 영역에 대한 유효 열전도도는 압력 및 온도에 비례하는 것을 확인하였다. 특히, 에어로젤 블랑켓과 같은 다공성 단열재의 단열성능을 판단하기 위해서는 유효 열전도도의 개념을 도입하는 것이 적합함을 확인하였다.

후 기

이 논문은 2014년도 미래창조과학부재원으로 신기술융합형성장동력사업의 지원을 받아 수행된 연구임(2014M3C1A8048823).

References

- D. R. Shin, "Importance of technical development for hydrogen fuel cell", ETIS analysis, Korea Institute of Energy Research, No. 23, 2003, pp. 1-5.
- J. O. Jensen, A. P. Vestbo, Q. Li and N. J. Bjerrum, "The energy efficiency of onboard hydrogen storage",

- Journal of Alloys and Compounds, Vol. 446-447, 2007, pp. 723-728.
3. Ministry of Environment, "Supply and market plan of fuel cell electric vehicle", 15th December, 2015, p. 5.
 4. M. Melaina and M. Penev, "Hydrogen station cost estimates: Comparison hydrogen station cost calculator results with other recent estimates (Tech Rep. No. NREL/TP-5400-56412)", National Renewable Energy Laboratory, September, 2013, pp. 21-24.
 5. S. D. Augustynowicz and J. E. Fesmire, "Cryogenic insulation system for soft vacuum", *Advances in Cryogenic Engineering*, Vol. 45, 2000, pp. 1691-1698.
 6. J. E. Fesmire, "Layered composite thermal insulation system for nonvacuum cryogenic applications", *Cryogenics*, Vol. 74, 2016, pp. 154-165.
 7. J. E. Fesmire, "Aerogel insulation systems for space launch applications", *Cryogenics*, Vol. 46, 2015, pp. 111-117.
 8. Aspen Aerogels, Inc., "Cryogel[®] Z: Product data sheet", Retrieved August 3, 2016, from http://www.aerogel.com/_resources/common/userfiles/file/Data%20Sheets/Cryogel_Z_DS.pdf
 9. Aspen Aerogels, Inc., "Pyrogel[®] XT-E: Product data sheet", Retrieved August 3, 2016, from http://www.aerogel.com/_resources/common/userfiles/file/Data%20Sheets/Pyrogel_XT-E_DS.pdf
 10. Lydall, Inc., "CRS WRAP[®]: Product sheet", Retrieved October 31, 2016, from <http://www.lydallpm.com/products/low-temperature-insulation/crs-wrap-super-insulating-media/product-sheets/>
 11. L. J. Gibson and M. F. Ashby, "Cellular solids: Structure and properties 2nd edition", Cambridge University Press, 1997, p. 285.
 12. ASME, "ASME PTC 19.1-2005: Test uncertainty", ASME, New York.