

다공성 매질에서 액화질소의 거동에 대한 연구

최성웅,^{*1} 이우일²

¹한국기계연구원 극한기계부품연구

²서울대학교 기계항공공학부

STUDY ON BEHAVIOR OF LIQUID NITROGEN IN POROUS MEDIA

S.W. Choi^{*1} and W.I. Lee²

¹Dept. of Extreme Energy Systems Korea Institute of Machinery and Materials

²School of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul Nat'l Univ.

The process of flow through porous media is of interest a wide range of engineering fields and areas, and the importance of fluid flow with a change in phase arises from the fact that many industrial processes rely on these phenomena for materials process, energy transfer. Especially, the flow phenomena of cryogenic liquid subjected to evaporation is of interest to investigate how the cryogenic liquid behaves in the porous structure. In this study, thermo physical properties, morphological properties of the glass wool with different bulk densities in terms of its temperature-dependence and permeability behaviors under different applying pressure are discussed. Using the experimentally determined properties, characteristics of two main experimental results are investigated. In addition, simulation results are used to realize the cryogenic liquid's flow in porous media, and are compared with experimental results. By using the experimentally determined properties, more reasonable results can be suggested in dealing with porous media flow.

Key Words : 다공성매질(Porous Media), 극저온유체(Cryogenic Liquid), 투과성계수(Permeability), 글라스 울(Glass Wool)

기호설명(Nomenclature)

Q	: flow rate [m ³ /s]
K	: permeability (saturated)
A	: Cross-sectional area of the plate [m ²]
μ	: Viscosity [Kg/m ³]
ΔP	: Pressure difference [N/m ²]
S _i	: source term for the i th momentum equation
v	: velocity [m/s]
ρ	: Density of the material [kg/m ³]

1. 서 론

재료 및 물질 흐름과 변환에 대한 공정은 많은 산업 분야에서 자주 이용되는 공정 중 하나이고, 그 응용분야중 하나로 다공성 매질 내부로의 유체 유동이 있다. 그 중 상변화를 수반한 다상 유동 연구(multiphase flow analysis)와 유동 흐름에 대한 연구는 중요성이 부각되는데 성층류(stratified flow), 분산류(dispersed flow), 증발, 응축과 같은 다양한 분야에 적용될 수 있다[1]. 본 연구에서는 다공성 매질인 글라스 울 내부로 극저온 액체가 스며들어가갈 때 유체의 거동을 알아보려고 하였다.

한편, 증발을 수반하는 극저온 유체의 유동과 관련된 연구는 온도와 같은 외부의 환경에 영향을 받기 때문에 열 물성치(material property)에 대한 연구가 필수적이다. 또한 다공성 매질에서의 유체의 거동적 측면에서는 투과성 계수(permeability)가 많은 영향을 끼치기 때문에 투과성 계수에 대한 연구는 유동 현상을 분석하기 위한 중요 변수 중 하나이다. 그 동안 상변화와 관련하여 많은 연구가 진행되었는데, 액체 헬륨의

Received: November 21, 2012, Revised: April 7, 2013, Accepted: April 8, 2013.

* Corresponding author, E-mail: younhulje@gmail.com

DOI <http://dx.doi.org/10.6112/ksfce.2013.18.2.017>

© KSCFE 2013

수치해석과 관련된 연구[2]와 극저온 액체의 실험과 해석에 대한 연구[3]는 극저온 유체의 유동과 열전달에 관련된 대표적인 연구 중 하나이다.

본 논문에서는, 극저온 유체가 다공성 매질을 통과하는 동안 나타내는 유동현상을 알아보기 위해, 다양한 벌크 밀도의 글라스 울에 대하여 상온에서부터 극저온 온도 범위까지의 열 물성값을 측정하였고, 유동특성 분석을 위한 투과성 계수를 다양한 주입 압력의 기준에서 측정하였다. 그리고 두 가지 실험에 대한 결과를 논의하였고 수치적 시뮬레이션을 통해 유체의 유동을 구현하여 이에 대한 시뮬레이션 결과 값을 실험치와 비교하여 타당성 검토를 하였다.

2. 이 론

2.1 Darcy의 법칙, 투과성계수

Darcy법칙은 다공성 매질 내부에서 뉴토니안 유체(Newtonian fluid)에 대한 유체유동을 기술하기 위해 가장 많이 사용되는 방정식인데 이는 식 (1)과 같다.

$$Q = -\frac{K}{\mu} A \frac{\Delta P}{\Delta L} \quad (1)$$

식 (1)에서 보는 바와 같이 Darcy법칙은 유체의 점도와 주어진 거리에서 유체의 압력 변화 사이의 관계이다. 유량이 일정하게 유지되고 압력차가 두 지점사이에서 측정되면, 압력 구배와 유체의 점도 유량의 상관관계에 의해 다음 식에서와 같이 투과성계수가 얻어진다[4].

$$K_{sat} = -\frac{Q}{A} \frac{\mu L}{\Delta P} \quad (2)$$

3. 실험재료 및 실험방법

3.1 실험재료

3.1.1 액화질소(Liquefied nitrogen) 및 글라스 울(Glass wool)

다공성 매질로 구성된 글라스 울 내부에서 극저온 유체의 유동현상을 알아보기 위한 실험을 진행하였다. 실험에 사용된 극저온 유체는 액화질소를 사용하였으며, 액화질소의 물성치

Table 1 The main characteristic of nitrogen

density	0.808 kg/m ³ at boiling point
boiling point	-195.79°C
critical point	-146.8°C at 3.39 MPa
triple point	-210.6°C at 12.53 kPa
latent heat	200 kJ/kg

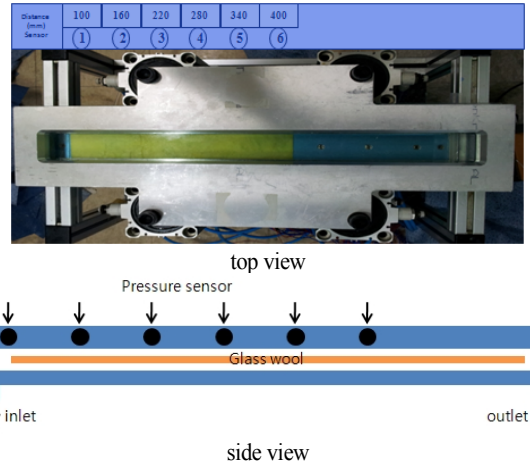


Fig. 1 Permeability measurement apparatus and schematic diagram

및 주요 특징은 Table 1에서 볼 수 있다. 24, 48, 96 kg/m³, 세 종류의 벌크 밀도의 글라스 울(KGM-24, KGM-48, KGM-96, KCC, Korea)을 실험재료로 사용하였다. 글라스 울은 약 14 μm의 두께를 가지는 E-타입의 유리 섬유로 이루어져 있으며 섬유 배열의 방향성을 주기 위해 사용된다. 전반적인 글라스 울의 구성요소는 90% 유리섬유에 10% 바인더로 이루어져 있다[5].

3.2 실험 방법

3.2.1 열전도도 측정

Tci 열전도도 시험기(C-therm TCI, C-therm technologies Ltd, Canada)를 이용하여 글라스 울의 열전도도를 측정하였다. 시편 내부의 삼차원 열유량을 고려해, 주어진 전류가 센서에 이르면 온도가 올라가고 이로 인한 센서의 전압 강하를 일으킨다. 전압 센서의 변화량으로 인해 샘플 물질의 열전도도 값을 결정하게 된다.

3.2.1 투과성 계수 측정

투과성 계수 측정 실험은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 만능 재료 시험기(UTM, LR50 K form Lloyd instrument)로 조절되는 유체 주입 펌프를 사용하여 연구실 범위의 투과성 계수 측정 기구를 이용해 투과성 계수를 측정하였다. 실험유체로는 다양한 점도 범위에서 사용의 용이성 때문에 실리콘 오일(KF-96, Shin Etsu, Japan)을 사용하였으며, 이에 대한 물성치는 Table 2

Table 2 Material properties of silicone oil

Model number	Specific gravity at 25°C	Viscosity at 25°C (Pa·s)	Surface tension (mN/m)
KF-96-100cs	0.965	0.097	20.9

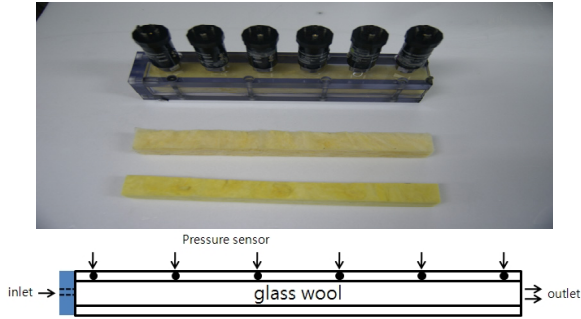


Fig. 2 Experimental apparatus for square section cylinder and schematic diagram

에서 보는 바와 같다. 500×50 mm 사이즈의 몰드(mold)를 이용하여 유체의 이동 중 나타나는 압력을 측정하였고, 압력 측정을 위해 0~1×10⁵ Pa 측정 압력범위와 0.030% 오차를 가지는 압력 센서(Sensys, Korea)를 Fig. 1에서 보는 바와 같이 유동방향을 따라 주입구로부터 100, 160, 220, 280, 340, 400 mm 위치에 설치하여 유체의 압력을 감지하게 하였다. 수지 주입 펌프에 의해 주입된 실리콘 오일이 글라스 울에 충분히 포화 상태로 스며들 때 까지 각각의 압력이 압력센서에 의해 기록된다.

3.2.2 사각 실린더 내부에서 극저온 액체의 유동 측정

사각실린더를 통한 극저온 유체의 유동 실험에서는 액화질소가 극저온용 유체 압력 레귤레이터(pressure regulation, Series CR, Generant, US)로 조절되어 0.2 bar의 일정한 압력 조건으로 24, 48, 96 kg/m³ 벌크 밀도의 글라스 울 내부에 주입되었다. Fig. 2에서 보는 바와 같이 15 mm 두께의 아크릴 재료로 제작된 30×30×300 mm 사이즈의 몰드로 실험이 진행되었고, 외부의 열을 차단하기 위해서 폴리에틸렌 방열 재료가 사용되었다. 유체의 압력은 주입구로부터 유동방향으로 25, 75, 125, 175, 225, 275 mm 위치의 여섯 개의 압력 센서를 통해 측정되었으며 유체의 상태 관별을 위해 동일한 위치에 온도 센서인 K 타입의 열전대가 설치되었다.

3.2.3 양쪽이 뚫린 사각 덕트에서 극저온 액체의 유동 측정

양쪽이 뚫린 사각 덕트 내부에서 극저온 유체의 유동을 살펴보기 위해 유체의 주입 압력을 사각실린더 실험과 동일하게 극저온용 유체 압력 레귤레이터(Series CR, Generant, US)를 사용하여 조절하였다. 실험에 사용된 사각 몰드는 Fig. 3에서 보는 바와 같이 300×300×30 mm 사이즈를 가지며, 15 mm 두께의 아크릴 재료로 제작되었다. 이 실험 역시 외부의 열을 차단하기 위해서 폴리에틸렌 방열 재료가 사용되었다. 0.2 bar에서 0.6 bar까지의 일정한 압력조건으로 24, 48, 96 kg/m³ 벌

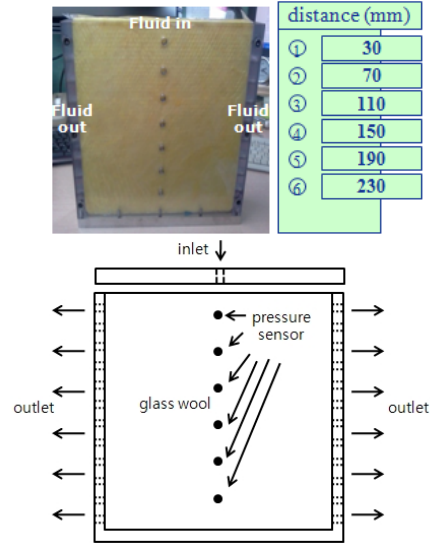


Fig. 3 Experimental apparatus for rectangular duct and schematic diagram

크 밀도를 가지는 글라스 울 내부에 액화질소가 주입되었다. 유체의 압력을 측정하기 위한 압력센서는 주입구로부터 유동방향으로 30, 70, 110, 150, 190, 230 mm의 위치에 설치되었고 동일한 위치에 온도 센서인 K 타입 열전대가 설치되었다.

4. 실험결과와 고찰

4.1 글라스 울의 물성치

4.1.1 형태학적 물성치, 기공도

글라스 울의 구조적 특징은 기공도(porosity)와 밀도 같은 형태학적인 변수에 의해 결정된다. 각각의 글라스 울의 전체 기공도는 전체 겉보기 벌크 부피에 대한 기공의 부피로 정의되며, wet and dry 방법에 따라 물을 이용해 참 벌크 밀도가 측정되었다. Table 3에서 보는 바와 같이 24, 48, 96 kg/m³ 벌크 밀도를 가지는 글라스 울은 각각 기공의 구성이 99%, 98%, 96%로 이루어져 있다.

4.1.2 Glass wool의 비열, 열전도도

열전달 문제에서 거론되는 물성치는 일반적으로 열물리적

Table 3 Morphological porosity for glass wool

bulk density	porosity
24 kg/m ³	99.04
48 kg/m ³	98.08
96 kg/m ³	96.16

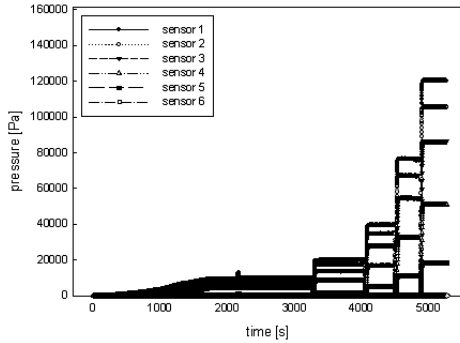


Fig. 4 Pressure distribution for permeability measurement

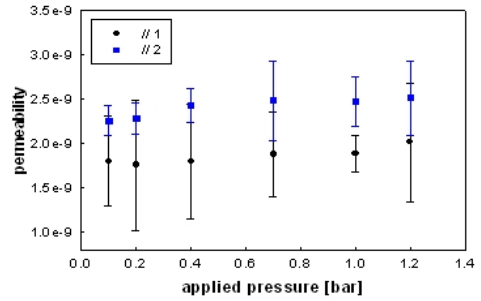
(thermophysical property) 물성값이라 하고, 전달 물성값 (transport property)과 열역학적 물성값(thermodynamic property) 라는 두 가지 별개의 범주를 포함한다. 전달 물성값은 열전도율과 동점성 계수와 같은 확산율 계수들을 포함한다. 한편 열역학적 물성값은 시스템의 평형상태를 정의한다. 밀도와 비열은 열역학적 해석에서 널리 사용되는 두 가지의 물성값이다 [1]. 세 가지 벌크 밀도의 글라스 울에 대해서 온도별로 복합 법칙(rule of the mixture)를 이용하여 상온에서부터 -190°C의 온도 범위까지 비열 값을 측정하였고, 이 결과가 Table 4에서 보는 바와 같다. 또한 다양한 벌크 밀도의 열전도도의 결과가 Table 5에 나타나 있다. 전체적으로 글라스 울의 열전도도는 벌크 밀도가 증가함에 따라 증가한다. 세 종류 벌크 밀도의 글라스 울에서 가장 작은 24 kg/m³ 밀도의 글라스 울은 다른 글라스 울에 비해 가장 기공이 많은 구조이고 공기의 영향을 가장 많이 받게 된다. 반대로 벌크 밀도가 증가하면 글라스 울 내부의 구조가 유리섬유로 더욱 밀하게 채워진다. 이렇게

Table 4 Specific heat of glass wool (Cp)

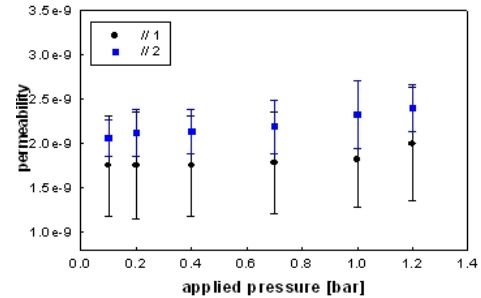
°C	Specific heat (J/kg·°C)		
	Bulk density of 24 kg/m ³	Bulk density of 48 kg/m ³	Bulk density of 96 kg/m ³
20	893.38	868.72	856.39
0	893.38	868.72	856.39
-50	893.39	868.72	856.39
-100	893.46	868.76	856.40
-170	893.90	868.97	856.51
-190	895.94	869.98	857.01

Table 5 Thermal conductivity of glass wool

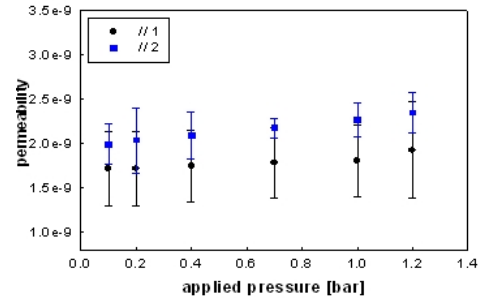
°C	Thermal conductivity (W/m·K)		
	Bulk density of 24 kg/m ³	Bulk density of 48 kg/m ³	Bulk density of 96 kg/m ³
20	0.0379	0.0402	0.0444
0	0.0377	0.0401	0.0444
-50	0.0374	0.0399	0.0443
-100	0.0371	0.0398	0.0442
-170	0.0363	0.0393	0.0439
-190	0.0355	0.0387	0.0436



(a)



(b)



(c)

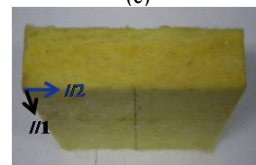


Fig. 5 The result of Permeability measurement:
(a) 24 kg/m³ bulk density of glass wool,
(b) 48 kg/m³ bulk density of glass wool and
(c) 96 kg/m³ bulk density of glass wool

밀한 글라스 울에서는 글라스 울의 구조가 성근 글라스 울에 비해서 공기보다는 유리섬유의 영향을 많이 받게 되고, 열전도도는 벌크 밀도가 증가함에 따라 증가하는 경향을 보인다.

4.2 글라스 울의 투과성계수

24, 48, 96 kg/m³ 세 종류의 벌크 밀도의 글라스 울에 대한 다양한 압력의 투과성 계수를 측정하였다. Fig. 4는 전체적인

압력 거동에 대한 결과를 보여준다. 실리콘 오일이 글라스 울에 스며들고, 유동선단이 나아가 일정한 시간이 지나면 액적은 글라스 울에 완전히 포화된다. 이 상태에서는 압력값이 증가하는 경향을 보이다가 일정한 값에 도달하여 변화가 없는 모습을 보여준다. 또한 유량이 변하여 또 다른 포화상태에 이르면, 또 다시 압력이 증가하여 일정한 값에 도달하는 것을 Fig. 4의 그래프 변화에서 볼 수 있다. 여기서 측정된 압력 구배의 값을 식 (1)의 Darcy의 법칙을 이용하여 투과성 계수를 얻을 수 있고 각 24, 48, 96 kg/m³의 벌크 밀도에 대한 투과성 계수 값은 Fig. 5에서 보는 바와 같이 재료의 구조에 기인한 이방적 특성을 보여준다. 유량이 증가할수록 주입 압력이 증가하고, 벌크 밀도가 감소할수록 액적이 통과할 수 있는 유효 유동 경로가 증가한다. 따라서, 유량이 증가하고 글라스 울의 벌크 밀도가 감소함에 따라 투과성 계수 값이 증가하는 것을 볼 수 있다.

4.3 사각 실린더 내부에서 극저온 액체의 유동

사각 실린더를 통한 실험에서는 액화질소가 몰드 내부의 24, 48, 96 kg/m³의 벌크 밀도를 가지는 글라스 울에 0.2 bar의 일정한 압력조건으로 4000초의 시간 동안 주입되고, 그에 대한 유체의 거동을 압력과 온도 그래프로 살펴보았다. Fig. 6에서 보는 바와 같이 측정된 압력은, 주입 초부터 750초까지는 미미한 증가량을 보이다가 3000초까지 빠른 증가량을 보이고 3000초 이후부터는 다시 증가율이 둔화되는 것을 볼 수 있다. 이는 750초 초반까지는 글라스 울 내부의 액화질소가 액화온도에 도달하지 않은 상태로 대부분이 기화되면서 기체의 압력이 측정되었기 때문이다. 1000초 이상에서 증가량이 커지는 것은 액화점까지 내려간 첫 번째 센서 위치에서부터 액체 분율이 높아지기 시작한 상태에서 측정된 증가되는 압력을 보여준다. 3000초 이상부터는 액화된 질소 상태가 외부의 환경과 평형상태를 유지하기 시작하면서 증가율이 둔화되는 것을 볼 수 있었다. 벌크 밀도별로 측정된 결과에서 볼 수 있는 특징은 벌크 밀도가 커질수록 위치에 대한 압력 그래프의 비선형성이 증가하는 점이다.

벌크 밀도가 커질수록 첫 번째 압력센서와 두 번째 압력센서 사이의 압력 강하량이 커지는 것을 볼 수 있는데, 이는 일정한 압력 하에서 각 글라스 울을 지나가는 액화질소의 유량이 벌크 밀도가 커질수록 작아지기 때문에 나타나는 현상이다. 작은 유량일수록 주위 글라스 울이 액화점 아래로 도달하는 시간이 길어지고 액화질소는 그 차이만큼 기화된 상태로 남아있게 되면서 압력강하의 정도가 커지게 되는 것이다. 그리고 투과성 계수가 낮은, 높은 벌크 밀도 상태의 글라스 울에서는 통과하는 유체의 유동 통로가 줄어들게 되고 열전도도도 상대적으로 큰 물성치를 가지게 된다. 따라서 외부와의 열전달이 활발한 환경에 놓이게 되고 이 상태에서 액화질

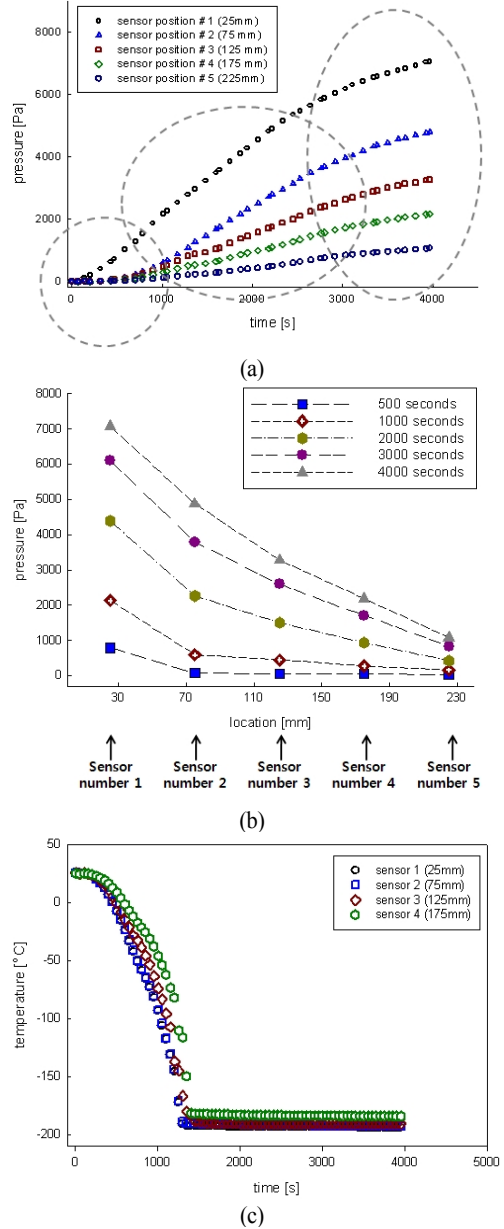


Fig. 6 Experimental result of pressure distributions of 24 kg/m³ bulk density glass wool for square-section cylinder and temperature profile in the same position with pressure sensor, respectively: (a) cryogenic liquid behavior (pressure-time graph), (b) cryogenic liquid behavior (pressure-location graph) and (c) temperature profile

소는 기화가 활발해져 이로 인해 압력 강하정도가 커지게 되고 따라서 위치에 대한 압력의 비선형성이 증가하게 되는 것이다.

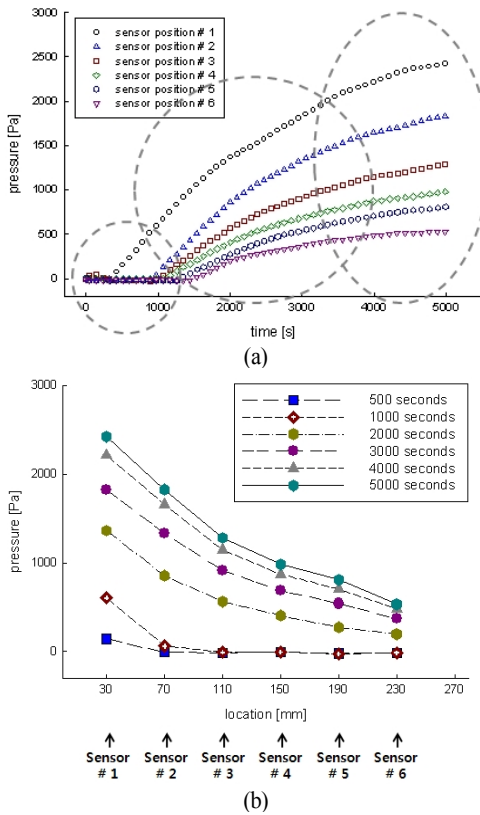


Fig. 7 Experimental result of pressure distributions of 24 kg/m³ bulk density glass wool with 0.2 bar pressure condition for the rectangular duct: (a) cryogenic liquid behavior (pressure-time graph) and (b) cryogenic liquid behavior (pressure-location graph)

4.4 양쪽이 뚫린 사각 덕트에서 극저온 액체의 유동

양 옆면이 뚫린 사각 덕트 내부에서 극저온 유체의 거동에 대한 두 번째 실험을 수행하였다. 이는 양쪽이 뚫린 구조에서 극저온 액체의 누수가 일어나는 현상에 대한 특수한 경우를 가정한 실험이다. 24, 48, 96 kg/m³의 벌크 밀도를 가지는 글라스 울에 일정압력조건으로 주입된 액화질소의 거동을 살펴 보았다. 0.2, 0.4, 0.6 bar의 각기 다른 주입압력으로 5000초의 동일한 시간동안 거동을 살펴보고 Fig. 7은 0.2 bar 압력 조건에서 24 kg/m³ 벌크 밀도의 글라스 울에 주입되는 대표적인 결과를 나타내었다. 사각 실린더의 실험과 마찬가지로 24, 48, 96 kg/m³ 세 종류의 벌크 밀도와 0.2, 0.4, 0.6 bar의 주입 압력에 대해서, 1000초까지는 기화된 기체의 압력에 기인한 미미한 압력 증가량, 3000초까지는 액화점 아래의 환경에서 액체 분율이 높아진 유체의 빠른 압력 증가량, 그리고 그 이후 주위의 온도와 평형을 이루면서 둔화된 증가량의 모습을 볼 수 있었다.

첫 번째 위치 센서에서 감지되는 압력은 0.2 bar 압력조건에서 2400~2500 Pa, 0.4 bar 압력조건에서 5000~5500 Pa, 0.6 bar 압력조건에서는 8000~8500 Pa 정도의 값을 보여 벌크 밀도 값에 따라 비슷한 값을 나타내었다. 하지만 첫 번째 센서와 두 번째 센서 사이, 액체와 기체의 양에 비율 정도에 의해서 두 번째 위치 센서에서의 압력 값은 벌크 밀도에 따라 달라지는 경향을 보였다. 두 번째 위치 센서부터 감지되는 압력 값은 벌크 밀도 값에 따라 달라지는데 이는 벌크 밀도가 달라지면 액체가 통과하는 내부의 유효 유동 통로가 달라지기 때문에 나타나는 현상이다. 또한 벌크 밀도가 커질수록 더욱 더 비선형성이 증가되는 경향을 보이는데, 이는 첫 번째 센서와 두 번째 센서 사이 액체와 기체 상태의 비율에 따라 나타나는 비선형성이고, 이러한 정도를 주어진 길이에 대한 압력 구배를 통해 살펴보았다. Table 6에서 보는 바와 같이 0.2 bar의 24, 48, 96 kg/m³의 벌크 밀도에서 각각 -14.96, -18.27, -22.07의 값을, 0.4 bar의 24, 48, 96 kg/m³의 벌크 밀도에서 각각 -34.60, -43.42, -53.24의 값을, 0.6 bar의 24, 48, 96 kg/m³의 벌크 밀도에서 각각 -46.65, -60.07, -76.07의 값을 가진다. 결과 값에서 볼 수 있듯이 벌크 밀도가 커질수록 구배 값이 작아지는 것을 볼 수 있는데, 이것은 벌크 밀도가 커지면 두 번째 위치의 센서에서 기화되는 기체의 상태가 많아지면서 나타나는 결과이다. 또한 사각 실린더 실험과는 다르게 여섯 번째 센서에서 압력 값이 0.2 bar 압력조건에서 450-550 Pa, 0.4 bar 압력조건에서 1300-1500 Pa, 0.6 bar 압력조건에서는 2300-2800 Pa 정도 값을 가진다. 사각 실린더 0.2 bar의 실험에서의 200 mm의 거리에 대한 압력 차는 5900-6100 Pa인 반면, 사각 덕트를 통한 같은 길이에서의 압력 차이는 1850~1950 Pa 정도이다. 출구 쪽만 외부에 뚫려있는 사각 기둥 실린더의 구조와는 달리 사각 덕트는 양쪽이 외부로 뚫려있는 구조이기 때문에 기화된 기체의 대부분이 첫 번째 센서에 닿기 전에 외부로 빠져나가게 되고 첫 번째 위치센서에서 작은 값이 감지되기 때문에 압력차는 작게 된다.

5. 전산 해석

5.1 수치모델링 방법과 수치해석 방법

다공성 매질에서 유체의 계산은 CFD 전산유체해석 프로그

Table 6 Pressure gradient between pressure sensor number 1 and number 2 for rectangular duct experimental result

bulk density	0.2 bar inlet pressure	0.4 bar inlet pressure	0.6 bar inlet pressure
	dp/dx	dp/dx	dp/dx
24 kg/m ³	-14.96	-34.60	-46.65
48 kg/m ³	-18.27	-43.42	-60.07
96 kg/m ³	-22.07	-53.24	-76.07

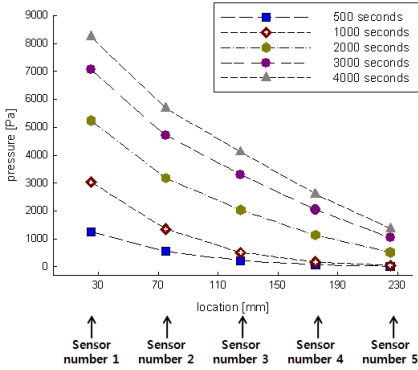


Fig. 8 Simulation result of pressure-location distribution and of 24 kg/m³ bulk density glass wool for square-section cylinder

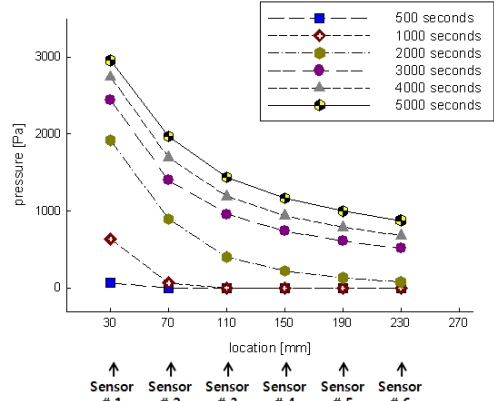


Fig. 10 Simulation result of pressure-location distribution of 24 kg/m³ bulk density glass wool with 0.2 bar pressure condition for rectangular duct

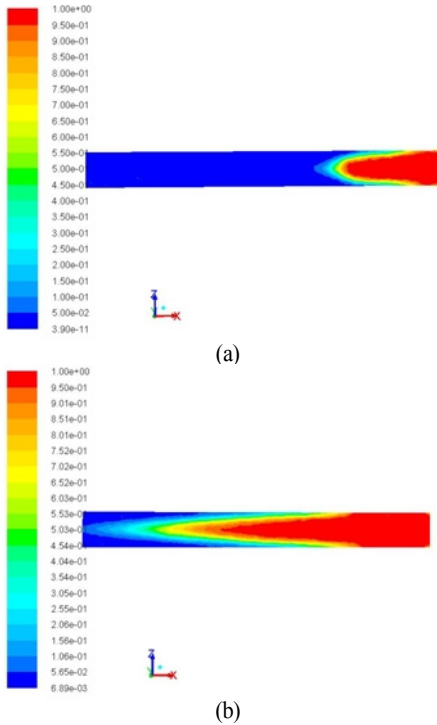


Fig. 9 Phase contour of 24kg/m³ bulk density glass wool with 0.2 bar pressure condition for square-section cylinder simulation: (a) 1000s and (b) 4000s

램(Fluent 13, Ansys)에 의해 계산되었다. 수치 계산에서는 기화모델이 사용되었는데 질소의 액체 및 기체 상태를 사용자 정의 물성치(user defined material)로 정의하여 사용자 정의 함수(user defined function)의 형식을 사용하여 구현하였다. 액체가 기화되는 메커니즘은 질소에 대한 Mollier 선도[6]를 이용하였고 기화하면서 나오는 잠열은 에너지 방정식의 생성 항

으로 정의하였는데 이는 다공성 매질로 모델링 된 유체 영역에서 모델링 방정식에 생성 항이 더해지는 방식으로 적용하였다. 생성 항은 점성에 의한 손실과 관성에 의한 손실 항으로 이루어져 있고 이 식은 다음과 같다.

$$S_i = - \left(\sum_{j=1}^3 D_{ij} \mu v_j + \sum_{j=1}^3 C_{ij} \frac{1}{2} \rho |v| v_j \right) \quad (3)$$

식 (3)은 유체 영역에서 모멘텀 소멸항으로 작용되면서, 결과적으로 그에 해당하는 압력강하로 이어진다. 글라스 울에 대한 유량과 압력강하에 대한 실험데이터를 통해 회귀분석(regression)을 통한 곡선 맞춤(curve fitting)으로 점성에 의한 손실과 관성에 의한 손실항 D_{ij} , C_{ij} 를 구하였다. 계산에 적용된 모델과 조건은 열적 물성치, 투과성 계수등과 같은 실험적 물성치가 계산에 이용되었으며, 실험 조건과 동일하게 적용되었다. 사각 기둥 실린더와 사각 덕트의 외벽 경계조건은 자연대류 경계조건으로 설정하였다.

5.2. 수치해석 결과

0.2 bar압력 조건에서 24, 48, 96 kg/m³ 벌크 밀도의 글라스 울에 액화질소가 주입되면서 나타나는 사각 실린더와 사각 덕트에 대한 시뮬레이션을 수행하였고, 0.2 bar 압력 조건에서 24 kg/m³ 벌크 밀도의 글라스 울에 주입되는 대표적인 사각 실린더의 압력-거리의 결과를 다음 Fig. 8에서 볼 수 있다. 또한 이에 대한 대표적인 phase contour를 Fig. 9에서 볼 수 있다. 한편, 사각 덕트의 시뮬레이션 수행 결과 0.2 bar 주입 압력 조건에서 각 벌크 밀도의 글라스 울에 주입되는 대표적인 거리와 압력의 시뮬레이션 결과를 다음 Fig. 10에서 볼 수 있

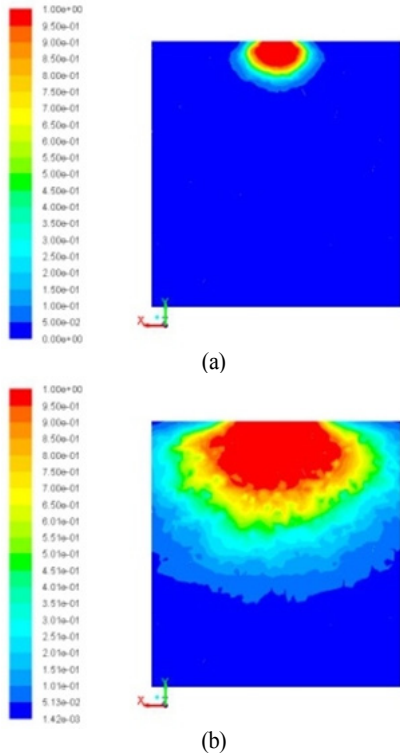


Fig. 11 Phase contour of 24 kg/m³ bulk density glass wool with 0.2 bar pressure condition for rectangular duct simulation: (a) 1000s and (b) 4000s

고, 이에 대한 대표적인 phase contour를 Fig. 11에 나타내었다.

사각 실린더의 경우 벌크 밀도에 따른 첫 번째 위치의 압력 센서의 실험값이 7000~7100 Pa 정도의 값을 가진 반면 시뮬레이션 값은 8000~8200 Pa의 값을 가진다. 사각 덕트의 경우 0.2 bar에서 벌크 밀도에 따른 첫 번째 위치에서의 압력 센서의 실험값이 2400~2500 Pa 정도의 값을 가진 반면 시뮬레이션 값은 2850~2950 Pa의 값을 가지고, 0.4 bar에서 실험값이 5350~5450 Pa을 가진 반면 시뮬레이션 값은 6120~6220 Pa의 값을 가지고, 0.6 bar에서 실험값이 8350~8450 Pa을 가진 반면 시뮬레이션 값은 9310~9470 Pa의 값을 가진다. 두 가지의 경우, 시뮬레이션 값이 실험값보다 약간 높게 나타나는데, 이는 주입압력부분에서의 압력손실과 기화로 인한 실제의 압력손실 부분이 더 커서 실제실험과 시뮬레이션의 차이가 나타난다고 볼 수 있다.

첫 번째 센서와 두 번째 센서 사이 액체와 기체 상태의 비율에 따라 압력과 거리 간의 그래프의 비선형성이 나타난다. 비선형성의 정도에 대한 정량적인 비교를 위해 실험값과 시뮬레이션 값 각각에 대한 사각 덕트의 첫 번째와 두 번째 압력 센서 위치 사이에서 압력 구배를 Fig. 12에서 보는 바와

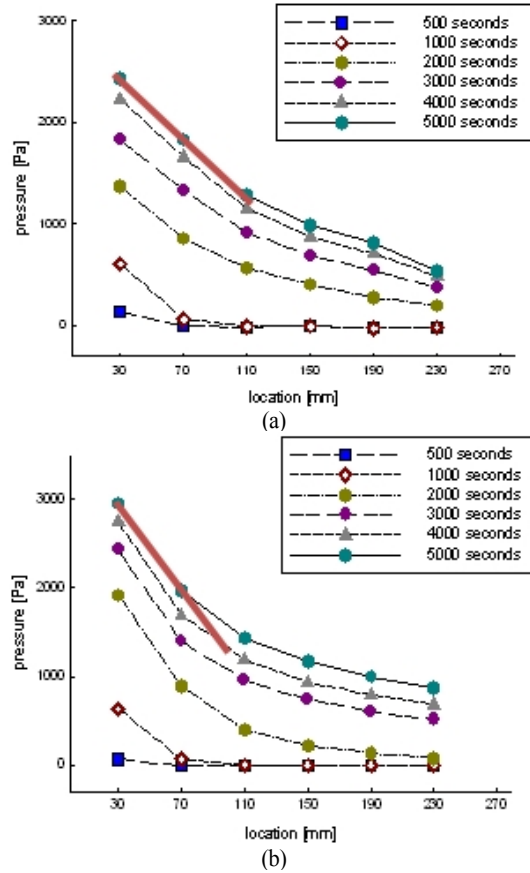


Fig. 12 Comparison of pressure gradient between experiment and simulation result in the sensor number 1 and number 2 for 24 kg/m³ bulk density glass wool with 0.2 bar pressure condition for rectangular duct: (a) experimental result and (b) simulation result

같이 서로 비교하였고, 이에 대한 값을 Table 7에 나타내었다. Table 6의 실험값과 Table 7의 시뮬레이션 값을 비교한 결과, 구배는 시뮬레이션 결과 값이 24, 48, 96 kg/m³ 세 종류의 벌크 밀도의 글라스 울에 대하여 0.2 bar에서 각각 -24.64, -27.85, -29.96으로, 0.4 bar에서 각각 -49.17, -56.87, -61.73으로, 0.6 bar에서 각각 -65.42, -75.90, -83.09로 실험값보다 절대 값이 다소 크게 나오나 벌크 밀도가 커질수록 구배 값이 증가

Table 7 Pressure gradient between pressure sensor number 1 and number 2 for rectangular duct simulation result

bulk density	0.2 bar inlet pressure	0.4 bar inlet pressure	0.6 bar inlet pressure
	dp/dx	dp/dx	dp/dx
24 kg/m ³	-24.64	-49.17	-65.42
48 kg/m ³	-27.85	-56.87	-75.90
96 kg/m ³	-29.96	-61.73	-83.09

하는 경향은 실험과 일치한다. 구배의 증가율 또한 실험값과 시뮬레이션 결과는 비슷한 경향을 보여주는 것을 확인할 수 있었다.

6. 결 론

본 논문에서는 일정 압력조건으로 극저온 유체가 다공성 매질인 글라스 울 내부로 지나갈 때 일어나는 거동을 두 가지 실험과 시뮬레이션으로 검토, 논의하였다. 다공성 매질 내부의 유동을 결정하는 변수인 투과성 계수에 대해서는 글라스 울의 벌크 밀도가 작을수록, 주입 유량이 증가할수록 유효 유동 통로가 증가하면서 증가하는 경향을 보였다. 또한 열 물성치인 열전도도 측정 실험에서는 벌크 밀도가 증가함에 따라 유리 섬유 영향성이 공기의 영향성보다 커져 열전도도가 증가하였다. 또한 저온으로 갈수록 열전도도는 감소하는 경향을 보였다. 이러한 물성치를 바탕으로 두 가지 극저온 유체의 거동에 대한 실험, 사각 실린더와 사각 덕트 실험을 수행하였다. 사각 기둥 실린더를 통한 극저온 유체의 거동에서는 벌크 밀도가 커질수록 위치에 대한 압력 그래프의 비선형성이 증가하는 것을 볼 수 있었는데 이는 통과하는 유체의 유량 차와 구조에 기인한 물성치 차이 때문이다. 사각 덕트를 통한 유체의 거동에 대한 실험에서는 두 번째 센서에 감지되는 압력 값의 차이와 주입 압력이 증가함에 따른 압력 구배의 절대 값의 증가율이 커지는 것은 센서 사이의 유체의 상태에 따른 현상이고 유효 유동 통로의 차이로 기인한 현상이었다. 전산 해석 시뮬레이션을 실험결과와 검증, 비교하기 위하여 수행하였고 주입 압력 부분에서의 압력손실과 기화로 인한 실제 압력손실에 따른 차이 값이 발생한 점을 제외하고는 비슷한 경향성을 보여주는 것을 알 수 있었고, 이 시뮬레이션 코드를 이용하여 다양한 종류의 극저온 유체의 모사를

할 수 있을 것으로 기대한다.

후 기

본 연구는 2012년도 국책과제인 LNG CC 설계적용 및 구조안전성 평가기술 개발의 연구비 지원으로 수행되었으며, 지원에 감사를 드립니다.

References

- [1] 1985, Incropera, F.P. and De Witt, D.P., "Fundamentals of heat and mass transfer," *John Wiley and Sons. Inc. fifth edition.*
- [2] 2004, Xua, J., Rouellea, A., Smitha, K.M., Celikb, D., Hussainia, M.Y. and Van Sciver, S.W., "Two-phase flow of solid hydrogen particles and liquid helium," *Cryogenics*, Vol.44, Issues6-8.
- [3] 2009, Van Sciver, S. and Hussaini, Y., "Experimental and Numerical Investigations of Cryogenic Multiphase Flow," *NASA Hydrogen Research at Florida Universities*, pp.166-167.
- [4] 1997, Wang, C. and Cheng, P., "Multiphase flow and heat transfer in porous media," *Advances in heat transfer* 30, pp.93-196.
- [5] 2012, Marmoret, L., Lewandowski, M. and Perwuelz, A., "An Air Permeability Study of Anisotropic Glass Wool Fibrous Products," *Transport in Porous Media*, pp.1-19.
- [6] 1967, Humphrey, Richard L., Piper, Carolyn, H., Moller diagram for nitrogen.