



사각 기둥 실린더 내부 다공성 매질에서의 액화질소의 거동에 대한 연구

†최성웅 · 이우일

서울대학교 기계항공공학부

(2012년 11월 21일 접수, 2013년 2월 19일 수정, 2013년 2월 19일 채택)

Study on Flow behavior of Liquid Nitrogen for Porous Media in Square-section Cylinder

†Sung Woong Choi · Woo Il Lee

School of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul National University, Seoul, Korea
151-744

(Received November 21, 2012; Revised February 19, 2013; Accepted February 19, 2013)

요약

상 변화(phase change)를 수반한 다상 유동 연구(multiphase flow analysis)는 증발, 응축과 같은 많은 분야에 적용, 응용될 수 있고 현상의 복잡성 때문에 많은 연구의 관심을 받고 있는 분야이다. 본 연구에서는 극저온 유체인 액화 질소가 다양한 밀도의 글라스 울 내부 다공성 매질속으로 스며들면서 나타나는 거동을 살펴보았다. 유동에 영향을 미치는 투과성 계수에 대해서, 외부 압력의 영향성에 대한 실험을 진행하였고 논의하였다. 극저온 유체인 액화 질소를 실험유체로 사용하여 사각 기둥 실린더 내부의 유체의 유동에 대한 실험으로 유체의 유동을 살펴보았다. 그 결과 벌크 밀도가 커짐에 따라 투과성 계수가 작아지고, 거리에 따른 압력변화의 비선형성이 커짐을 보였다. 마지막으로 CFD 전산유동 프로그램으로 실험결과와 동일한 상황을 모사하였으며, 이를 실험결과와 비교 분석하였다. 이에 대한 검증결과, 시뮬레이션 결과가 실험결과와 유사한 경향과 결과를 보여주었다.

Abstract - The multiphase flow analysis related to phase change can be adapted to lots of areas such as evaporation and condensation has many interesting branches due to complicated phenomenon. In this study, the experimental investigation of cryogenic liquid in the porous media with various densities was shown how the cryogenic liquid behaves in the porous structure. For this study, permeability behaviors under different applying pressure of the glass wool with different bulk densities are discussed. Experimental investigation on the behavior of cryogenic liquefied nitrogen in the porous media is conducted. The result was that the non linearity of pressure gradient with location is increased and the permeability is decreased as the bulk density of glass wool increased. Lastly, simulation results with CFD commercial package program are used to realize the cryogenic liquid's flow in porous media to compare the finding with experimental results.

Key words : Liquefied nitrogen, Permeability, Porous media, Glass wool, Cryogenic liquid

1. 서론

다중물질(Heterogeneous materials)은 일반적으로 다중 상 혹은 다종의 구성 물질들로 정의되는데, 크게 폼(foam), 복합재(composite material), 모래, 흙,

콘크리트 같은 사람이 만든 재료나 자연물로 구성된다[1]. 조금 더 복잡한 구조로, 셀룰로오스 강화 폴리머, 금속 털실, 글라스 울 같은 것들이 있는데 이들은 내부적으로 다공성 구조(porous structure)를 가지고 있고 전체적으로 관통형 혹은 투과성 구조로 되어 있다. 이러한 다공성 매질을 통한 유동현상은 그 중요성 때문에 다양한 과학 및 공학 분야에서 커다란 관심을 가져왔고, 다공성 매질 내부의 유동 중,

†Corresponding author:younhulje@gmail.com

Copyright © 2013 by The Korean Institute of Gas

상변화와 관련된 유동현상은 중요성이 더욱 더 부각되어 왔다. 다상 유동 연구와 관련된 상변화를 수반한 유동의 흐름에 대한 연구와 분석은 성층류(stratified flow), 분산류(dispersed flow), 증발 및 응축과 같은 다양한 분야에 적용되어 왔다[2].

다공성 매질 내부에서 극저온 유체의 유동현상을 이해하기 위해서는 증발을 수반하는 극저온 유체의 상변화를 통한 열전달 현상과 유체가 통과하는 다공성 매체의 물성치에 대한 연구가 선행되어야 한다. 고려해야 될 중요 물성치 중 다공성 매질에 대한 유체유동에 결정적 영향을 미치는 변수로 투과성계수(permeability)가 있다. 또한 극저온 유체가 통과하는 매개체인 다공성 물질은 유체가 통과 시 외부 환경 온도에 많은 영향을 받기 때문에 다공성 물질의 열물성치 연구도 극저온 유체의 유동현상을 관찰하기 위한 중요 변수이다. 본 논문에서는, 극저온 유체의 다공성 매질을 통한 유동현상을 알아보기 위해, 다양한 벌크 밀도를 가지는 글라스 울에 대한 열 물성값을 다양한 온도에 대해서 측정하였고, 유동특성 분석을 위한 투과성 계수를 측정하였다. 그리고 실린더 내부 극저온 유체의 유동현상에 대한 실험결과를 분석하였고, 실험과 비교하기 위한 수치적 시뮬레이션을 수행하였다. 이를 토대로 수치해석결과와 실험결과에 대한 타당성에 대해 검토를 하였다.

II. 이 론

2.1. Darcy 법칙, 투과성계수

작은 다공성 매질내부에서의 유체 유동은 매우 복잡한 마이크로 단위의 경계를 통하여 일어나기 때문에 모세관 그물 구조에서 유동의 변화에 대한 방정식을 풀기는 매우 어렵다. 따라서 뉴토니안 유체(Newtonian fluid)에 대한 다공성의 유체유동을 기술하기 위해 가장 많이 사용되는 방정식이 Darcy법칙인데 이는 식 (1) 과 같다.

Table 1. The main characteristic of liquefied nitrogen

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

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

Darcy법칙은 다공성 매질을 통한 유체의 유입 방출 사이의 간단한 비례관계인데, 유체의 점도와 주어진 거리에서의 유체의 압력 변화 사이의 관계이다. Darcy법칙에서 물성치로 쓰이는 유체의 점도와 다공성 매질의 투과성 계수는 독립적인 매개변수이고 투과성계수는 다공성 구조에서 유체의 유동을 파악하는 중요한 변수 중 하나이다. 유량이 일정하게 유지된 상태에서 두 지점사이에서 압력차가 측정되면, 압력 구배와 유체의 점도, 유량의 상관관계에 의해 다음 식 (2)에서와 같이 투과성계수가 얻어진다.

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

III. 실험재료 및 실험방법

3.1. 실험재료

본 연구에서는 다공성 매질로 구성된 글라스 울 내부에서 극저온 유체의 거동을 알아보는 실험을 시행하였다. 극저온 유체로는 액화질소를 사용하였는데, 이는 액체 공기의 분별 증류에 의해 생산되고 무색, 무취의 액화 상태의 질소로, 끓는 점에서 0.807 g/ml의 밀도를 가지는 액체이다. 대기압에서 끓는 점이 -196 °C이고 12.53 kPa의 압력 하에서 -210 °C의 삼중점을 가지며, 임계점은 3.39 MPa의 압력 하에서 -146 °C의 값을 가진다. 기화될 때 증발 잠열은 200 KJ/Kg이고, 점도는 대기온도에서 $1.787 \times 10^{-5} Pa \cdot s$ 값을, -196 °C의 온도에서는 $2.920 \times 10^{-4} Pa \cdot s$ 의 값을 가진다. 이와 관련된 종합적인 특징은 Table 1에서 볼 수 있다. 세 종류의 벌크 밀도에 대한 글라스 울(KGM-24, KGM-48, KGM-96, KCC, Korea)이 실험 재료로 사용되었다. 울은 약 14 μ m의 두께를 가지는 E-타입의 유리 섬유로 이루어져 있으며, 각각의 길이는 수 밀리미터에서 수 센티미터까지 다양하다. 글라스 울에서 섬유의 배열을 정렬하기 위해 바인더가 이들을 묶어 주는데, 전체 구성비는 유리섬유 90%에 바인더 10%의 구성비로 존재한다 [3]. 본 연구에서는 24, 48, 96 kg/m³의 벌크 밀도를 가지는 글라스 울을 대상으로 하였다.

3.2. 열물성치 실험

글라스 울의 비열(specific heat)은 복합법칙(rule of the mixture)을 사용하여 상온에서 -190 °C까지의 온도범위에 대한 값을 구하였고 그 결과가 Table 2와

Table 2. Specific heat of glass wool

°C	specific heat		
	bulk density 24 kg/m ³	bulk density 48 kg/m ³	bulk density 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



Fig. 1. Fluid injection pump controlled by UTM (universal test machine).

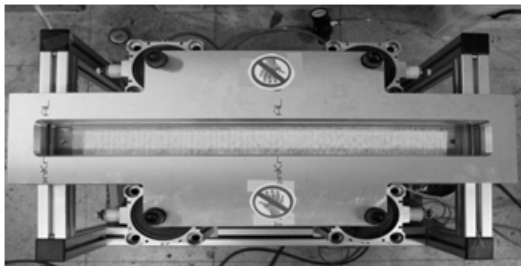


Fig. 2. Mold for the permeability test.

같다. 글라스 울의 열전도도는 Tci 열전도도 시험기 (C-therm Tci, C-therm technologies Ltd, Canada) 를 비정상면열원법(transient plane source technique, TPS)의 이론에 근거하여 측정하였다. 이 장비에서는 시편 내부의 삼차원 열유량을 고려해, 주어진 전류가 센서에 이르면 온도가 올라가고 이로 인한 센서의 전압 강하를 일으킨다. 전압 센서의 변화량이 샘플 물질의 열전도도 값을 결정하게 된다.

3.3. 투과성 계수 실험

연구실 범위의 투과성 계수 측정 기구를 가지고 투과성 계수를 측정하였다. 투과성 계수 측정을 위한 실험유체로 실리콘 오일(KF-96, Shin Etsu, Japan)이 사용되었으며, 실리콘 오일의 물성치는 Table 3과 같다. 실험유체인 실리콘 오일을 Fig. 1에서 보는 바와 같이 만능 재료 시험기(UTM, LR 50K form Lloyd instrument)로 조절된 유체 주입 펌프를 사용하여 일정한 유량 조건으로 실험을 진행하였다.

500 × 50 mm 사이즈로 제작된 몰드가 Fig. 2와 같이 투과성 계수 측정에 이용되었으며, 실험이 진행되는 동안 내부의 유동 관찰을 용이하게 하기 위해 상판 몰드는 25 mm두께의 강화유리를, 하판 몰드는 파란색으로 코팅된 SUS 403 스테인리스 스틸을 사용하였다. 레이스 트래킹 효과(race-tracking effects)를 막고 정확한 치수를 맞추기 위해서 몰드 사이에 실리콘 오링을 설치하였다. 0~1×10⁵Pa의 측정 압력 범위와 0.030%오차를 가지는 압력센서가 유동방향을 따라 주입구로부터 100, 160, 220, 280, 340, 400 mm 위치에 설치되어 유동의 압력을 감지하게 하였다. 모든 실험에서 일정한 개폐 조건을 부여하고자 상판 하판 몰드 사이 유압 프레스를 사용하였다. 실험에 사용된 30 × 4.8 × 3.5 mm 크기의 글라스 울 샘플이 주입 유동방향에 맞추어 아래 몰드에 놓여졌다. 공극 사이로 액체 주입 펌프에 의해 주입된 실리콘 오일이 이동하는 동안 압력 정보는 압력센서(Sensys, Korea)에 의해 측정된 압력과 Keithley 데이터 수집 장치(KE2700, Korea)에 의해 정리된다. 일정한 유량으로 주입된 실리콘 오일은 글라스 울에 주입된 액체가 충분히 포화상태로 스며들 때 까지 계속 주입된다.

Table 3. The main characteristic of silicon oil

Model No.	Specific gravity 25°C	Viscosity 25°C (Pa s)	Surface tension (mN/m)
KF-96 -100cs	0.965	0.097	20.900

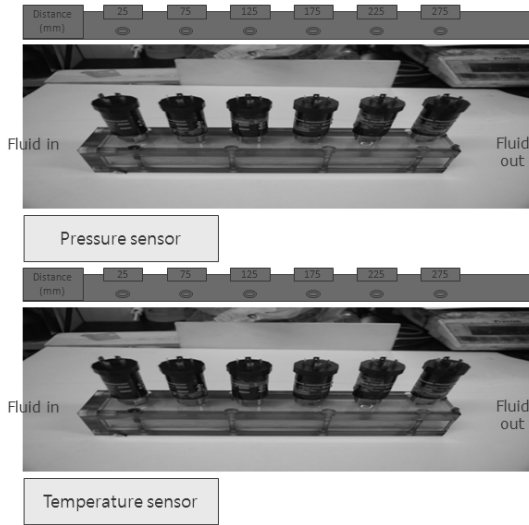


Fig. 3. The square section cylinder mold for cryogenic liquid experiment (pressure sensor, temperature sensor).

3.4. 사각 실린더를 통한 극저온액체 실험

사각 기둥 실린더를 통한 극저온 유체의 유동 실험에서는 액화질소가 극저온용 압력조절장치(Series CR, Generant, US)를 통해 일정한 압력으로 주입된다. 입구의 흡입 밸브를 통해 손으로 개폐기능을 부여하여 유체의 출입을 조절하였다. 실험에 사용된 몰드는 Fig. 3에서 보는 바와 같이 30 × 30 × 300 mm 사이즈를 가진다. 몰드는 15mm두께의 아크릴 재료로 제작되었으며, 몰드는 외부의 열을 차단하기 위해 폴리에틸렌 방열 재료로 밀봉하였다. 액체 질소는 압력조절장치를 사용하여 0.2 bar의 일정한 압력으로 각각의 벌크 밀도의 글라스 울 내부에 주입되었다. 유체의 압력을 측정하기 위해서 Fig. 3에서 보이는 것과 같이 여섯 개의 압력 센서가 주입구로부터 유동방향의 25, 75, 125, 175, 225, 275 mm의 위치에 설치되었고 여섯 개의 온도 센서인 K-타입 열전대가 유체의 상태를 알아보기 위해서 압력센서와 동일한 위치에 유동 방향으로 설치되었다.

IV. 실험결과에 대한 고찰

4.1. 열물성치 실험

다양한 벌크 밀도의 열전도도의 결과가 Table 4와 같다. 글라스 울의 열전도도는 벌크 밀도의 증가에 따라 증가한다. 24, 48, 96 kg/m³ 세 종류의 벌크 밀도의 글라스 울에 대해서 24 kg/m³밀도의 글

Table 4. Thermal conductivity of glass wool

thermal conductivity			
°C	bulk density 24 kg/m ³	bulk density 48 kg/m ³	bulk density 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

라스 울은 다른 글라스 울에 비해 가장 기공이 많은 구조이고 공기의 영향을 가장 많이 받게 된다. 따라서 벌크 밀도가 증가함에 따라 글라스 울 내부의 구조가 더욱 조밀하게 구성된다. 조밀한 글라스 울에서는 석근 글라스 울에 비해서 공기보다는 글라스 소재의 영향을 많이 받게 되고 열전도도 역시 벌크 밀도가 증가함에 따라 증가하는 경향을 보인다. 온도가 저온으로 내려감에 따라 공기의 구성이 많은 글라스 울은 공기의 평균 분자의 속도의 감소로 열전도도가 작아지게 된다.

4.2. 투과성 계수 실험

주입 압력에 비례하는 투과성 계수를 24, 48, 96 kg/m³ 세 종류의 벌크 밀도의 글라스 울에 대해서 수행하였다. 주입압력의 조절은 500cs점도의 실리콘 오일을 25, 50, 100, 200, 280 mm³/s의 유량으로 순차적으로 조절하였다. 이들 각각의 유량은 각 주입 압력에 비례하는 투과성 계수를 얻기 위해서 사용되었다.

Fig. 4는 투과성 계수 측정 실험에서 사용된 압력 센서 위치를 보여주고 Fig. 5는 전체적인 실험의 압력 거동에 대한 결과를 보여준다.

액적이 글라스 울에 충분히 포화되어 스며들기 전, 각 압력센서는 아무런 변화가 없다가, 액적이 주입되어 글라스 울에 스며들면서 유동선단이 나아가고 충분히 스며들어 일정한 시간이 지나면, 이 유동은 글라스 울에 완전히 포화되었다고 말할 수 있다. 이 상태에서 압력센서에 감지된 압력이 증가하다가 일정한 값에 도달하는 것을 볼 수 있고, 유량이 증가하여 또 다른 포화상태를 보이면 압력이 증가하여 또 다른 일정한 값에 도달하는 것을 볼 수 있다. 투과성 계수는 서로 다른 두 지점 사이에 나타나는 압력 구배를 식 (1)의 Darcy의 법칙에 대입하여 구할

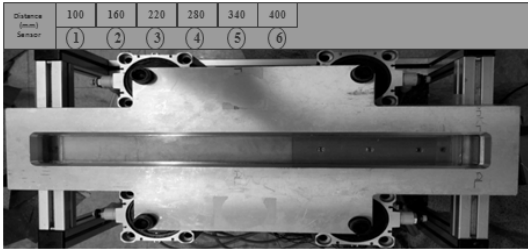


Fig. 4. The location of pressure sensor for the permeability experiment.

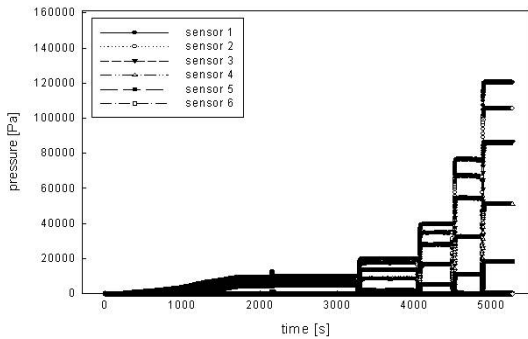


Fig. 5. Pressure distribution for the permeability experiment.

수 있다. Fig. 6은 각 24, 48, 96 kg/m³의 벌크 밀도를 가진 글라스 울의 투과성 계수 결과값을 보여준다. 투과성 계수는 이방적 재료의 구조에 기인한 이방적 특징을 보여준다. 유량이 증가함에 따른 주입 압력의 증가를 보여주고, 글라스 울의 벌크 밀도가 증가할수록 투과성 계수 역시 증가하였다. 이는 유량이 증가할수록, 벌크 밀도가 감소할수록 액적이 통과할 수 있는 유동의 흐름이 증가되기 때문에 투과성 계수가 증가됨을 볼 수 있다.

4.3. 사각 기둥 실린더를 통한 극저온액체의 거동

사각 기둥 실린더를 통한 극저온 유체의 거동을 알아보기 위해서 액체질소가 몰드 내부로 4000초의 시간 동안 주입되고 그 거동을 살펴보았다. 24, 48, 96 kg/m³의 벌크 밀도를 가지는 글라스 울에 0.2 bar의 일정한 압력조건으로 액체질소가 주입된다. 일정한 주입 압력 조건에서, 액체질소의 상태를 압력센서와 같은 위치에 있는 온도센서의 열전대에서의 온도의 값으로부터 파악할 수 있었다. 세 종류의 벌크 밀도에 대한 액체질소의 전체적인 압력값과 시간에 따른 온도분포의 결과는 Fig. 7에서 볼 수 있듯이

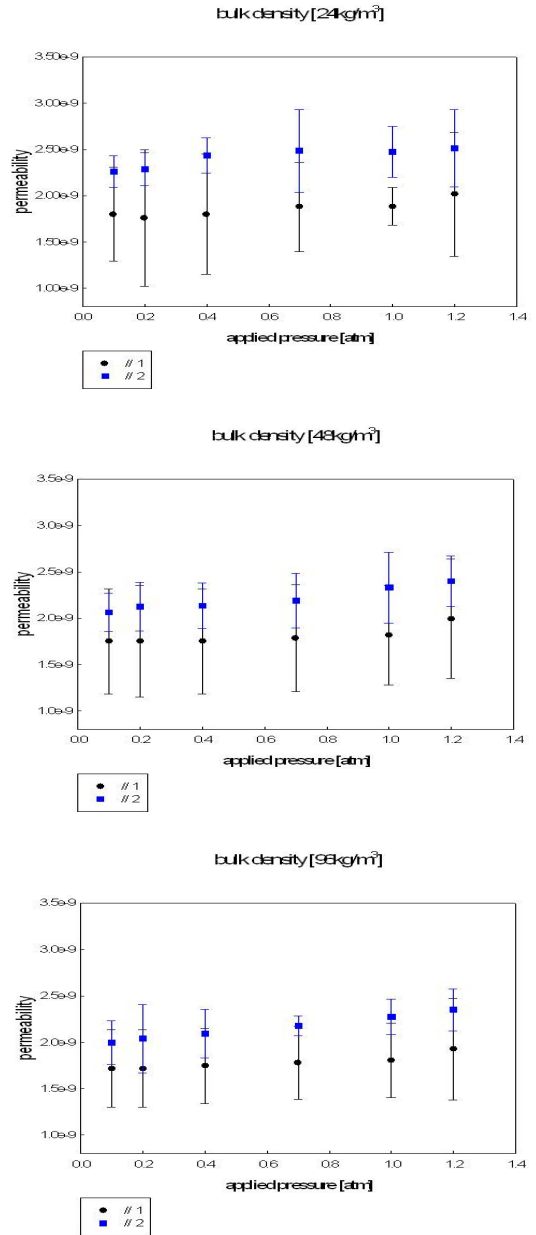


Fig. 6. Permeability with different bulk density of glass wool.

사각 기둥 실린더 내부 다공성 매질에서의 액화질소의 거동에 대한 연구

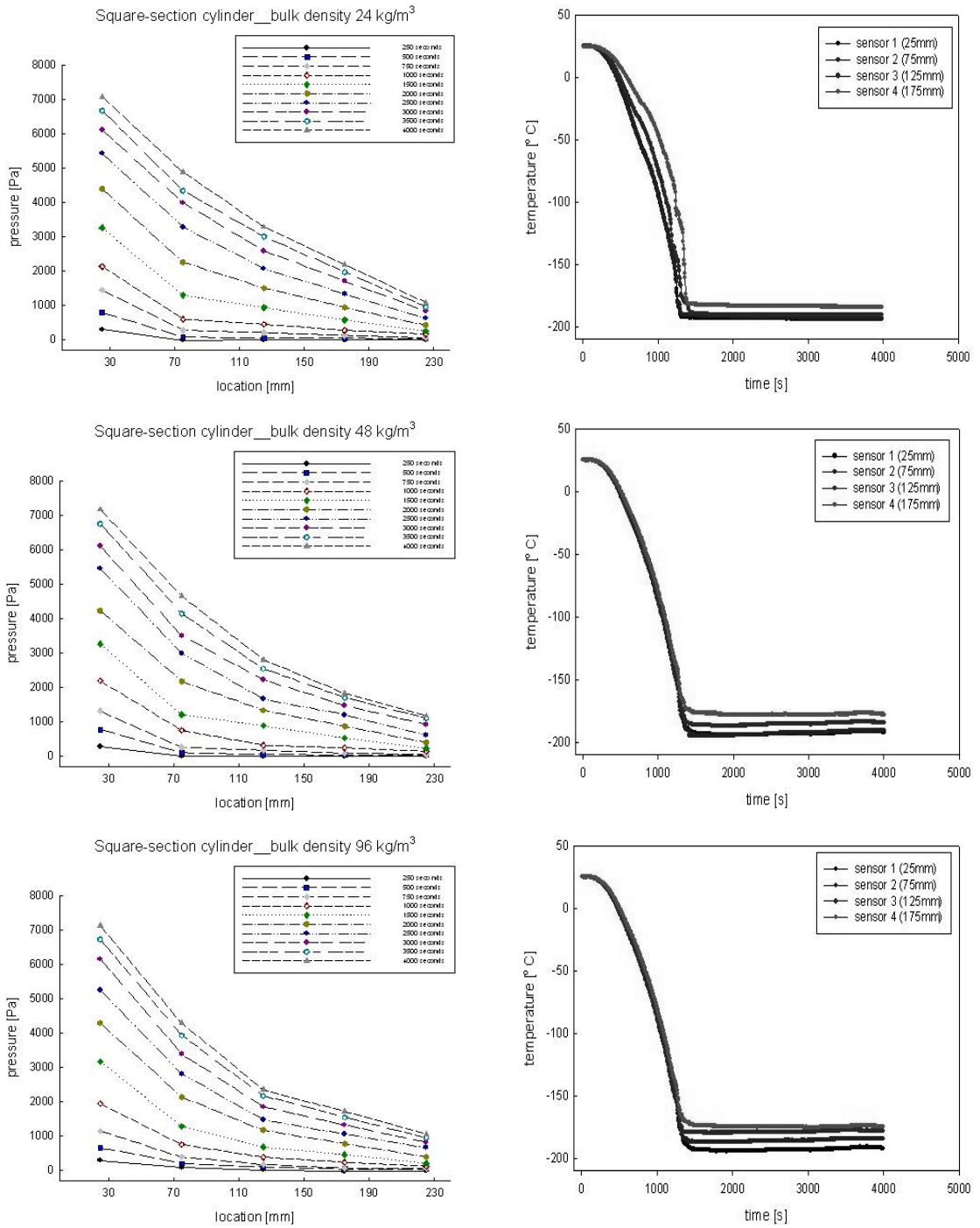


Fig. 7. Experimental result of pressure and temperature graph of 24, 48, 96 kg/m³ bulk density glass wool in the square section cylinder (in order).

Table 5. Thermal diffusivity of glass wool at -195°C

bulk density of glass wool (kg/m ³)	thermal diffusivity (m ² /s)
24	1.65E-06
48	9.27E-07
96	5.30E-07

주입 초부터 750초까지는 미미한 증가량을 보이다가 3000초까지 빠른 증가량을 보이고 3000초 이후부터는 다시 증가량이 둔화되는 것을 볼 수 있다. 이는 750초 초반까지는 액체질소에 의해 내부의 온도가 액화점 아래로 낮아질 때까지 기화되는 기체의 압력에 기인한 것이고 1000초 이상부터는 액화점까지 내려간 환경에서 액체의 압력이 감지되기 시작하면서 압력센서의 증가량이 커짐을 보여준다. 3000초 이상부터는 증가된 유체의 압력 양이 외부의 환경과 평형상태를 유지하기 시작하면서 증가량이 둔화되는 것을 볼 수 있다. 각각의 벌크밀도에 대한 글라스 울 내부의 거동에 대해서는 크게 두 가지 특징을 볼 수 있다. 첫째, 벌크 밀도가 커질수록 위치에 대한 압력 그래프의 비선형성이 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 크게 두 가지 이유로 기인한다. 첫째, 글라스 울 내부로 통과하는 유량의 차이 때문이다. 벌크 밀도가 커질수록 두 번째부터의 압력센서의 압력 강하량이 큰 것을 볼 수 있다. 주입된 액체가 기화되면서 압력 강하가 나타나는데, 압력강하가 클수록 기화량이 많아지는 것을 의미한다. 이는 일정한 압력 하에서 각 글라스 울로 유입되는 액체질소의 유량은 벌크 밀도가 커질수록 작아지기 때문이다. 유입되는 유량이 작을수록 온도가 액화점 아래로 도달하는 시간이 길어지고 주위환경과의 온도 차에 의해 액체질소가 기화량이 상대적으로 많은 상태로 통과하게 된다. 따라서 벌크 밀도가 커질수록 압력센서의 압력강하 정도가 커짐을 볼 수 있다. 비선형성이 증가되는 두 번째 이유로, 구조에 기인한 물성치 차이로 볼 수 있다. 벌크 밀도가 증가하면서 투과성 계수가 낮아진다. 낮아진 투과성 계수는 유동의 흐름이 낮아짐을 의미하고 이는 상대적으로 작은 양의 유량이 통과하는 것을 의미한다. 열 물성치적인 측면에서는 벌크 밀도가 증가할수록 열전도도가 커지게 되고 이는 외부와의 열전달이 상대적으로 많은 것을 의미한다. 외부와의 열 전달율이 큰 환경에서 주입된 액체질소는 기화량이 많아지게 되고, 이는 압력강화의 요인이 되는 것이다. 또한, 주입구에서 가장 가까운 1번

센서위치에서 액화점 이하로 도달하는 시간이 24, 48, 96 kg/m³의 벌크 밀도에 따라 각각 1305, 1365, 1405초로 벌크 밀도가 커질수록 늦어지는 것을 알 수 있다. 이는 액화점 온도 아래의 평형상태로 도달하는 시간이 길어짐을 의미하는데, 각 벌크 밀도에서 액화점에서의 열 확산도의 값을 Table 5에서 볼 수 있듯이 벌크 밀도가 증가함에 따라, 액화점의 열적 평형상태에 느리게 도달함을 보여준다. 이런 이유로 인해서 위치에 따른 압력의 값이 달라지고 그래프의 차이가 나타나는 것이다.

V. 전산해석

5.1. 수치모델링 방법과 수치해석 방법

수치 계산에 사용될 기화 모델은 사용자 정의 함수의 형식을 사용하여 CFD 코드에 적용하였다. 질소의 액체 상태 및 기체상태를 사용자 정의 함수로 정의하였으며 질소에 대한 Mollier 선도[4]를 이용하여 액체가 기화되는 메커니즘을 정의하였다. 기화하면서 나오는 잠열은 에너지 방정식의 생성 항으로 정의하였다. 다공성 매질에서 유체의 계산은 CFD 전산유동 프로그램(Fluent 13.0, Ansys)에 의해 계산되었다. 다공성 매질로 모델링 된 유체 영역에서 모멘텀 방정식에 생성 항이 더해진다. 생성 항은 점성에 의한 손실과 관성에 의한 손실 항으로 이루어져 있고 이 식은 다음과 같다.

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

식 (3)은 유체 영역에서 모멘텀 소멸항으로 작용되면서, 결과적으로 그에 해당하는 압력강하로 이어진다. 점성에 의한 손실과 관성에 의한 손실항 D_{ij} , C_{ij} 는 글라스 울에 대한 유량과 압력강하에 대한 실험데이터를 회기분석을 통해서 곡선 맞춤에 의해 구하였다. 계산모델은 실험 장치와 동일하게 하였으며, 열적 물성치, 투과성 계수등과 같은 실험적 물성치가 계산에 이용되었다. 계산 경계조건 역시 실험 경계조건과 동일하게 하였으며, 사각 기둥 실린더의 외벽 경계조건은 자연대류 경계조건으로 설정하였다.

5.2. 수치해석 결과

실험결과와 검증, 비교하기 위한 전산 해석 시뮬레이션을 실시하였고 사각 기둥 실린더에 대한 거리와 압력의 결과를 다음 Fig. 8에서 볼 수 있다. 벌크 밀도에 따른 첫 번째 위치에서의 압력 센서의 값이

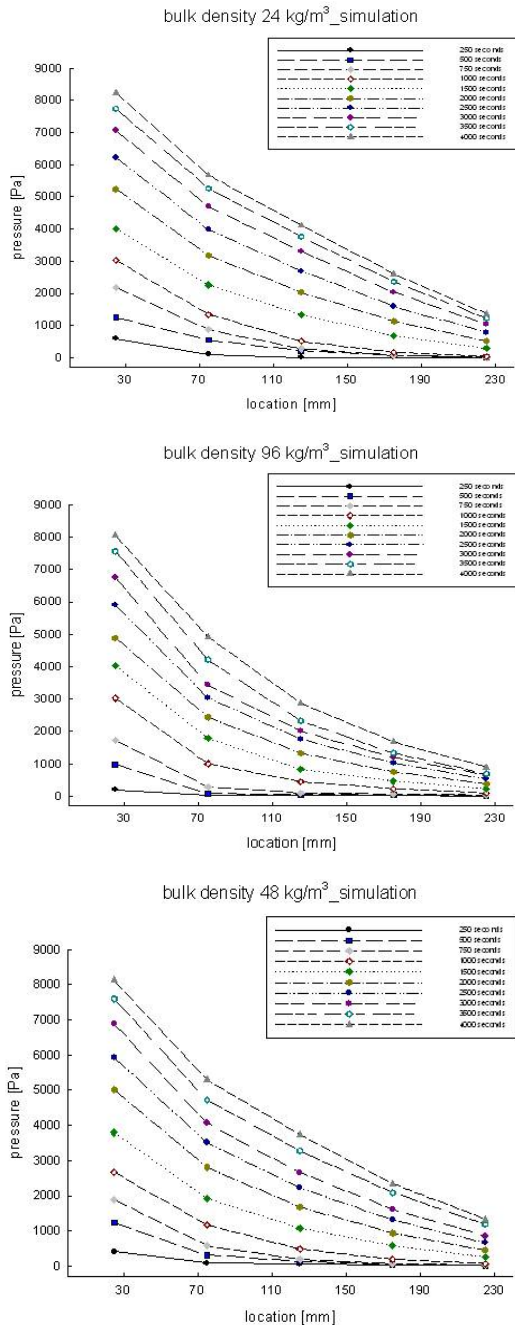


Fig. 8. Simulation result of pressure and temperature graph of 24, 48, 96 kg/m³ bulk density glass wool in the square section cylinder (in order).

Table 6. Experimental and simulation result of pressure gradient in pressure sensor 1 and 2

experiment	gradient (dp/dx)
bulk density 24kg/m ³	-43.95
bulk density 48kg/m ³	-50.29
bulk density 96kg/m ³	-56.77

simulation	gradient (dp/dx)
bulk density 24kg/m ³	-51.21
bulk density 48kg/m ³	-56.56
bulk density 96kg/m ³	-62.71

7000~7100 Pa 정도의 값을 가진 반면 시뮬레이션 값은 8000~8200 Pa의 값을 가진다.

주입압력부분에서의 압력손실과 기화로 인한 실제의 압력손실 부분이 더 커서 실제실험과 시뮬레이션의 차이가 나타난다고 볼 수 있다. 각 센서에서 압력 값의 차이에 따른 선형성의 정도를 알아보기 위해 첫 번째 센서와 두 번째 센서 사이의 압력 구배를 수치화하였고 이 결과가 **Table 6**에서 볼 수 있다. 결과에서 볼 수 있듯이 첫 번째 위치에서의 압력 센서와 두 번째 위치에서의 압력 센서 사이의 압력 구배 값은 시뮬레이션 결과에서 24, 48, 96 kg/m³ 세 종류의 벌크 밀도의 글라스 울에 대하여 각각 -51.21, -56.56, -62.71로 실험값 -43.95, -50.29, -56.77 값보다 절대 값이 다소 크게 나오나 벌크 밀도가 커질수록 구배 값이 증가하는 경향은 비슷하게 나온다. 압력 센서의 절대적 결과 값의 미소 차이를 제외하고 실험 치와 시뮬레이션 값에 대한 경향성은 비슷한 경향을 보여주었다.

VI. 결론

본 연구에서는 극저온 유체의 유동현상을 알아보기 위해서 일정 유량 압력 조건에서 다양한 벌크 밀도의 글라스 울 내부로 극저온 액체인 액체 질소를 주입하여 유체의 거동을 알아보았다. 이를 위해 다공성 매질에 대한 유체유동에 영향을 미치는 변수 중 투과성 계수와 열적 영향성에 의존하는 열물성치를 측정하였다. 그 결과 투과성 계수는 주입 유량이 증가할수록, 벌크 밀도가 감소할수록 액체가 통과할 수 있는 유효 유동 흐름이 증가되기 때문에 증가하였고, 벌크 밀도가 증가함에 따라 열전도도가 증가

하는 것을 알 수 있었다. 그리고 온도가 저온으로 내려감에 따라 공기 평균 분자의 속도의 감소로 열전도도가 작아졌다. 사각 기둥 실린더를 통한 극저온 유체의 거동에 대해 24, 48, 96 kg/m³의 벌크 밀도를 가지는 글라스 울에 0.2 기압의 일정한 주입 압력 조건으로 실험한 결과 벌크 밀도가 커질수록 위치에 대한 압력 그래프의 비선형성이 증가하는 것을 볼 수 있었는데 이는 통과하는 유체의 유량차와 구조에 기인한 물성치 차이 때문에 나타나는 현상이다. 실험결과를 검증 및 비교하기 위하여 전산 해석 시뮬레이션을 실시하였고, 그 결과 주입 압력 부분에서의 압력손실과 기화로 인한 실제의 압력손실 부분의 차이로 인해 약간의 수치차이가 존재하나 실험 치와 시뮬레이션 값에 대한 경향성은 비슷한 경향을 보여 주었다.

감사의 글

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

사용기호

Q : Flow rate [m³/s]

K : Permeability (saturated)
 A : Cross-sectional area of the plate [m²]
 μ : Viscosity [Kg/m³]
 ΔP : Pressure difference [N/m²]
 S_i : Source term for the i th momentum equation
 v : Velocity [m/s]
 ρ : Density of the material [kg/m³]
 D_{ij} : Viscous loss term
 C_{ij} : Inertial loss term

참고문헌

- [1] Bear, J. *Dynamics of fluids in porous media*, Dover publications (1988).
- [2] Incropera, F. P. and D. P. De Witt "Fundamentals of heat and mass transfer" John Wiley and Sons. Inc. fifth edition (1985).
- [3] Marmoret, L., M. Lewandowski, et al. "An Air Permeability Study of Anisotropic Glass Wool Fibrous Products." *Transport in Porous Media*: 1-19 (2012).
- [4] Humphrey, Richard L, Piper, Carolyn H. Moller diagram for nitrogen (1967).