

다공성 매질의 투과성 계수와 유체 거동에 대한 연구

최성웅¹ · 양정현² · 김범수³ · 권재성[†]

(Received November 6, 2018 ; Revised November 20, 2018 ; Accepted November 23, 2018)

Study on permeability coefficient and fluid behavior of porous materials

Sung-Woong Choi¹ · Jeong-Hyeon Yang² · Bum-Soo Kim³ · Jae-Sung Kwon[†]

요약: 항공우주분야, 자동차 제조 및 조선 해양 쪽에서는 복합재를 적용하기 위해 다양한 제조 공정을 활용하고 있다. 복합재료에서는 투과성 계수가 함침성을 평가하는 중요한 요소이나 다공성 매질의 구조의 복잡성으로 인해 투과성 계수를 단순 변수로 이끌어 내는 데는 어려움을 보이고 있다. 본 연구에서는 RTM 공법을 바탕으로 방향성이 없는 다공성 매질인 유리솜 (glass wool)을 프리폼 (preform)으로 하여 투과성 계수를 측정하였다. 투과성 계수 측정에서는 유체의 종류, 주입 압력, 프리폼 (preform) 매질의 밀도 변화 등 조건을 주어 관련 변수의 연관성을 분석하였다. 그 결과 주입 압력 값이 증가와 프리폼 (preform)의 밀도의 감소에 따라 투과성 계수는 증가하는 양상을 보였다. 이는 내부를 통과하는 유체의 유효 유동 (effective flow passage)의 변화와 관련성이 있었고 이는 프리폼 (preform) 내부 구조의 변화에 기인된다는 것을 알 수 있었다.

주제어: 복합재료, 투과성 계수, 다공성 매질

Abstract: In the aerospace, automotive and shipbuilding and offshore industries, a variety of manufacturing processes regarding composites are mainly used. The ability of impregnability is important to evaluate composite material because the composite manufacture is closely related with flow behavior in porous media. However, it is difficult to obtain the permeability with simple way due to complexity of the structure of the porous medium. In this study, permeability coefficient was measured by using glass wool, a non - oriented porous medium, as a preform by Resin transfer molding (RTM) method. In the measurement of the permeability coefficient, the relationship of the variables was analyzed under the conditions such as the kind of the fluid, the injection pressure, and the density of the preform. As a result, the permeability coefficient increases as the injection pressure increases and as the density of the preform decreases. This is due to the effective flow path change which is influenced with flow in porous media.

Keywords: Composite material, Permeability coefficient, Porous media

1. 서 론

항공우주분야, 자동차 제조 및 조선 해양 쪽에서 다방면으로 복합재를 이용한 제조 공정이 활용되고 있다. 복합재를 이용한 대면적 제조나 복잡한 구조물의 효율적인 활용을 위해 여러 공정이 이용되는데 resin transfer molding (RTM)이나 vacuum assisted resin transfer molding (VARTM) 공정 같은 액상성형공정 (LCM, liquid composite molding) 공정 등이 주로 사용된다. 상기 공법의 주요 원리는 유리섬유나 카본 섬유 같은 다공성 매질 사이로 점성을 지니는

유체가 함침을 통해 최종 구조물이 완성되는 방식이다. 그 중 제품의 품질과 직결되는 다공성 매질을 통한 유체의 함침성 평가가 공정에서 중요한 평가 요소 중 하나이다. 따라서 다공성 매질을 통한 유체의 투과성 계수를 평가하고 이를 통한 유체의 거동을 예측하는 것이 중요하다.

투과성계수는 함침성을 평가하는 요소 연구가 활발히 진행되고 있다. 일반적으로 투과성 계수는 사용 유체에 따라 혹은 측정 방법에 따라 독립적인 변수로 취급되어 주어진 다공성 매질에서는 일정한 값을 가져야 한다. 하지만

[†] Corresponding Author (ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2328-9826>): Assistant Professor, Department of Mechanical System Engineering, Institute of Marine Industry, Gyeongsang National University, 38, Cheondaegukchi-gil, Tongyeong, Gyeongnam, 53064, Korea, E-mail: jkwon@gnu.ac.kr, Tel: 055-772-9102

¹ Assistant Professor, Department of Mechanical System Engineering, Gyeongsang National University, E-mail: younhulje@gnu.ac.kr, Tel: 055-772-9103

² Assistant Professor, Department of Mechanical System Engineering, Gyeongsang National University, E-mail: jh.yagi@gnu.ac.kr, Tel: 055-772-9107

³ Associate Professor, Department of Mechanical System Engineering, Gyeongsang National University, E-mail: kimbs@gnu.ac.kr, Tel: 055-772-9101

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

유동의 특지에 따라 포화 투과성 계수와 불포화 투과성 계수는 같은 구조물에 다른 값을 가지는 연구 결과들이 제시되고 있다[1]-[6]. 투과성 계수는 유체 주입 압력과 유동 속도에 따라 다른 값을 나타내고 있고 이에 대한 대표적인 원인으로 air void 와 불포화 유동 조건에서 다공성 매질의 변형을 지목하고 있다. 관련 현상은 single, double scale 다공성 매질 모두에게 나타나는 다공성 매질 전체적인 현상이나 다공성 매질의 구조적 복잡성으로 인해 투과성 계수의 변화를 단순 변수로 이끌어 내는 데는 어려움을 보이고 있다.

본 연구에서는 RTM 공법을 바탕으로 방향성이 없는 다공성 매질인 유리솜 (glass wool)을 프리폼 (preform)으로 하여 투과성 계수를 측정하였다. 유체의 종류와 주입 조건을 달리하여 투과성 계수를 측정하였고 투과성 계수의 변화와 이에 대한 주요 원인을 고찰하였다.

2. 이론

2.1 Darcy's law

Newtonian 유체에서 다공성 매질에서 투과성 계수를 논의하는 가장 일반적인 식은 Darcy's law이고 이 식은 다음과 같다.

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

여기서 u_D , Q , A , K , μ , P 는 각각 유체의 area-averaged 속도, 유량, 유동이 통과하는 단면적, 투과성 계수, 점성 계수, 유체 압력을 나타낸다.

2.2 포화, 불포화 유동

다공성 매질에서는 유동 특성에 따라 각기 다른 유동 거동인 포화 유동과 불포화 유동으로 크게 나눌 수 있다. 유체가 다공성 매질을 충분히 침투하여 매질에서 정상 상태를 나타내는 포화 유동과 유체가 침투하는 동안의 유체 유동인 불포화 유동으로 나눌 수 있다. 각 유동에서 투과성 계수를 평가하는 방법은 다음 식을 통해 나타낼 수 있다[7].

$$K_{sat} = \mu \frac{Q}{A} / \left(-\frac{dP}{dx} \right) = \mu \frac{Q}{A} \frac{L}{(\Delta P)} \quad (2)$$

여기서 K_{sat} , L , ΔP 는 각각 포화 유동에서 투과성 계수, 측정 압력 사이의 거리, 압력 차를 나타낸다.

$$K_{unsat} = \frac{\mu(1 - V_f)}{2P_{inlet}} (L(t))^2 \quad (3)$$

여기서 K_{unsat} , V_f , $L(t)$ 는 각각 불포화 유동에서 투과성 계수, 다공성 매질의 체적분율 (volume fraction), 특정 시간

에서 주입지점과 유동 선단 사이의 거리를 나타낸다. 투과성 계수는 유체의 압력 거동을 측정하고 관련 거동을 통해 평가 할 수 있다.

3. 실험

3.1 실험 재료 및 조건

가장 단순한 다공성 매질을 대상으로 투과성 계수를 측정하고자 유리솜 (glass wool)을 프리폼 (preform)으로 선택하여 유체의 거동을 살펴보았다. 다공성 매질의 특성에 따른 변화를 관찰하기 위해 각기 다른 24 ~ 96 kg/m³의 밀도를 가진 유리솜 (glass wool)를 대상으로 투과성 계수 측정 시험을 진행하였다.

3.2 실험 조건

투과성 계수 실험은 500 mm × 50 mm 크기의 시험 몰드를 사용하여 unidirectional flow 유동을 이용하여 측정하였다. 유동이 지나가는 동안 몰드 내부 유동 선단의 가시화를 위해 25 mm 두께의 강화유리를 통해 유동 선단을 살펴보았다. 선단의 가시화 이외 특정 위치에서의 유체의 함침 유무를 판단하기 위해 압력 센서 (Sensys, Korea)를 이용하여 유체의 유동선단을 확인하였다. 유동에 따른 몰드 변형을 최소화하기 위해 측정 몰드는 주 재질을 스테인리스 스틸 (304L stainless steel)로 선택하여 제작하였다. 프리폼 (preform)으로 사용할 다공성 매질인 유리솜 (glass wool)은 30 mm × 4.8 mm × 3.5 mm 크기로 측정 위치에 두고 유동에 따른 특정 위치에서 압력 데이터를 측정하였다. 실험 기구 및 장치의 개략도는 Figure 1에서 보는 바와 같다.

유체의 점도 및 밀도를 조절하기 위해 시험 유체는 실리콘 오일 (KF-96, Shin Etsu, Japan)을 사용하였고 유체의 물성치는 Table 1에선 보인 바와 같다. 유체는 주입 펌프를 이용하여 일정 유량 조건으로 주입하였다. 압력을 측정하기 위해 0.1 MPa 내 범위의 압력 센서를 사용하였다. 특정 지점별 압력 추이를 살펴보기 위하여 Figure 1에서 보는 바와 같이 압력 센서를 유동 방향으로 주입구로부터 100, 160, 220, 280, 340, 400 mm 지점에 설치하여 유체의 압력을 측정하였다.

투과성 계수는 유체의 종류 및 주입 압력 등 다양한 변수에 의해 영향을 받는 것으로 알려져 있다[2]. 유체의 종류와 유체 주입 압력 등에 의한 영향성을 살펴보고자 실리콘 오일을 사용하여 시험한 결과를 증류수로 실험한 결과와 비교 대조하였다. 또한 주입 압력의 영향성을 살펴보기 위해 0.02 MPa ~ 0.12 MPa 범위의 주입 압력 조건을 부여하여 프리폼 (preform)의 위치별 압력변화를 살펴보았다. 마지막으로 프리폼 (preform) 밀도에 따른 투과성 계수의 상관성을 살펴보고자 측정용 프리폼 (preform)은 24 ~ 96 kg/m³ 범위의 매질의 유리솜 (glass wool)을 사용하였다.

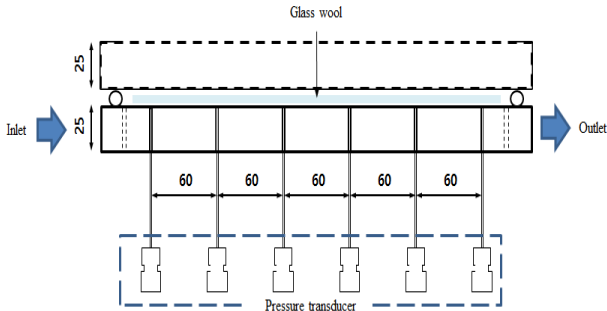


Figure 1: Permeability measurement apparatus (all dimensions are mm)

Table 1: Specifications of the experimental fluid

item	properties
Model number	KF-96-100cs
Specific gravity	0.975
viscosity	0.0975
surface tension	20.9

4. 결과 및 토의

4.1 주입 유량과 주입 압력의 상관성 데이터베이스

일반적으로 거리에 따른 압력 변화 값을 이용하여 투과성 계수를 측정한다. 유체 주입과 측정 조건에 따른 포화 투과성 계수 및 불포화 투과성 계수로 나눌 수 있고, 각 유동 조건에 따라 두 값의 차이가 존재한다. 이는 압력 값의 변화를 토대로 설명될 수 있다.

먼저 주입 유량에 따른 변화를 살펴보고자 25 ~ 280 mm³/s 범위의 유량을 순차적으로 변화시켜 주입하였다. 관련 유량에서 각 지점마다 측정된 압력을 토대로 유량에 대한 주입구에서 주입압력 값을 데이터베이스화 하여 관련 값을 주입 압력 값으로 지표화 하였다.

유체가 주입구에서 주입되어 프리폼 (preform)인 다공성 매질에 진행되는 동안 전체적인 압력 추이는 **Figure 2**에서 보는 바와 같다.

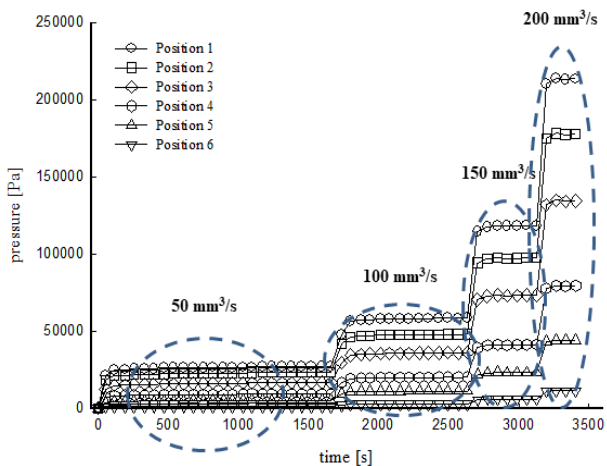


Figure 2: Pressure behavior with different flow rates

주입 유체가 다공성 매질인 유리솜 (glass wool)에 함침 되어 포화상태로 되기 전까지 각 위치에서의 압력의 측정값은 유체가 진행됨에 따라 증가하는 경향을 보였다. 그리고 유리솜 (glass wool)에 함침 되어 포화상태로 됨에 따라(일정 시간 후) 특정 압력 값이 유지되는 것을 보였다. 유리솜 (glass wool)에 대한 다공성 매질 속의 유체의 전반적인 흐름은 매질의 viscous flow와 내부 다공성 void 속으로 진행되는 capillary flow로 구성된다. Viscous flow 흐름이 진행되고 다공성 void 속으로 유체가 진행될 때까지 각 위치에서 pressure 값은 증가하는 모습을 보이게 된다. 그리고 capillary flow의 진행이 끝나고 일정한 pressure 값을 유지하게 된다.

주입 유량을 순차적으로 올려 position 별 압력 값이 일정한 압력 값을 유지하는 지점에서 각 압력 값을 데이터베이스화 하였다 이 값들을 토대로 glass wool 프리폼 (preform)에 대한 유량 별 주입 압력 조건을 설정할 수 있다.

4.2 주입 압력에 대한 투과성 계수

본질적으로 투과성 계수는 식 (2), 식 (3)에서 보인바와 같이 압력, 유체 종류에 상관없이 일정한 값을 보여야 한다. 하지만 hydrodynamic force 에 따른 매질의 구조적 변화 야기, 내부 기포의 존재, 다공성 매질의 구조적 복잡성 등 때문에 조건별 상이한 값을 보이게 된다. 따라서 실용적인 값을 알아보기 위해서는 각 조건에 따른 실제 투과성 계수 측정값을 토대로 하여야 한다.

주입 압력 별 투과성 계수 값을 얻기 위해 4.1에서 데이터베이스화 한 유량조건별 주입압력 값을 토대로 투과성 계수 측정 실험을 진행하였다.

Figure 3은 24 kg/m³ 밀도의 유리솜 (glass wool)에 대한 투과성 계수 값을 나타낸다. 주입 압력 값이 증가함에 따라 투과성 계수는 증가함을 볼 수 있다. 이는 주입 압력이 증가함에 따라 다공성 구조 체 사이 면적이 늘어나고 내부로 흐르는 유체의 유효 유동 (effective flow passage)이 증가하기 때문에 압력에 따른 투과성 계수 값의 증가 양상을 볼 수 있다.

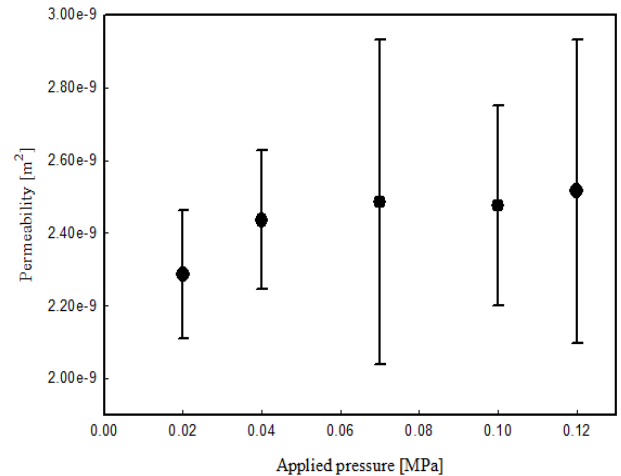


Figure 3: Permeability measurement with different applied pressure for 24 kg/m³ glass wool

4.3 밀도에 따른 주입 압력 별 투과성 계수

다공성 매질의 밀도에 따른 주입 압력 별 투과성 계수 값을 얻기 위해 24 ~ 96 kg/m³ 범위의 밀도 값을 가지는 유리솜 (glass wool)에 대한 투과성 계수 측정실험을 진행하였다. 주입 압력은 4.2의 조건과 동일하게 진행하였다. Figure 4, Figure 5는 각각 48, 96 kg/m³ 밀도 값에 대한 주입압력 별 유리솜 (glass wool)의 투과성 계수 값을 나타낸다.

두 경우 모두 주입 압력 값이 증가함에 따라 투과성 계수는 증가하는 경향을 볼 수 있었고 이는 4.2에 언급하였던 유체의 유효 유동 (effective flow passage)의 증가와 관련됨을 확인할 수 있었다.

밀도에 따른 전체적인 투과성 계수 값의 특징은 밀도가 증가함에 따라 투과성 계수는 작아지는 것을 볼 수 있다. 밀도가 증가함에 따라 다공성 매질의 기공도 (porosity)가 작아지게 되고 이는 기공 내부를 통과하는 유효 유동 (effective flow passage)이 작아지는 것을 나타낸다. 따라서 밀도가 커짐에 따라 전체적인 투과성 계수는 작아지는 경향을 보이게 된다. 각 밀도에서 주입 압력 별 (0.02 MPa / 0.12 MPa) 투과성 계수의 증가량을 Table 2에 나타내었다. 밀도가 증가함에 따라 주입압력의 상승에 따른 투과성 계수의 증가량이 늘어나는 것을 볼 수 있다. 높은 밀도의 유리솜 (glass wool)은 기공도 (porosity)가 작은 대신 glass fabric으로 구성된 다공성 매질의 멤브레인 (membrane)의 양은 많은 것을 의미한다. 즉 다공성 매질의 멤브레인 (membrane)의 변형도 주입 압력이 늘어남에 따라, 밀도가 커질수록 커지고 이로 인한 투과성 계수가 증가하는 것을 알 수 있다.

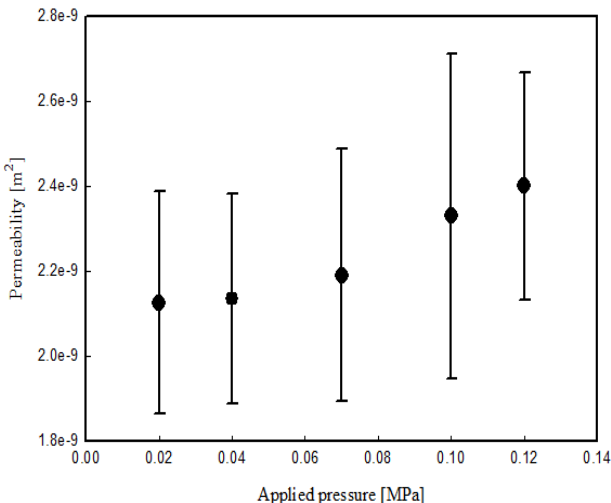


Figure 4: Permeability measurement with different applied pressure for 48 kg/m³ glass wool

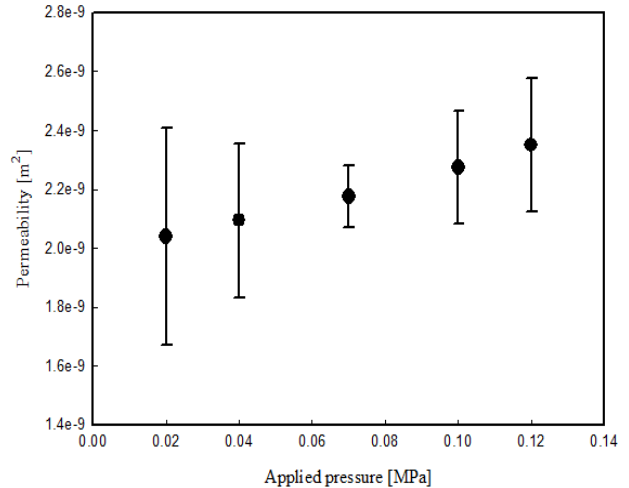


Figure 5: Permeability measurement with different applied pressure for 96 kg/m³ glass wool

Table 2: Increase rate of permeability with applied pressures

Density [kg/m ³]	Increase rate [%]
24	9.69
48	13.02
96	16.08

4.4 유체에 따른 주입 압력별 투과성 계수

유체 종류에 따른 투과성 계수의 경향성을 판단하기 위해 동일한 실험 조건으로 증류수 (distilled water)를 실험 유체로 사용하여 투과성 계수 값의 변화를 살펴보았다. Figure 6은 증류수를 실험 유체로 하여 주입 압력별 각각 48, 96 kg/m³ 밀도 값에 대한 주입압력 별 유리솜 (glass wool)의 투과성 계수 값을 나타낸다.

증류수를 사용한 투과성 계수 측정값은 실리콘 오일을 사용하여 측정한 값에 비해 11~15% 다소 작은 값을 보여 준다. 이는 유체의 종류에 따른 투과성 계수 값의 차이를 보여 주는 것으로 관련 원인에 대해서는 많은 설명과 논의가 있고 관련 연구들이 활발히 진행 중이다. 본 연구에서는 관련 원인에 대한 내용 보다는 결과의 경향성을 비교할 목적으로 수행한 바, 두 실험 유체를 사용하여 밀도에 따른 주입 압력별 투과성 계수의 경향성을 살펴보았다. 각 밀도에서 주입 압력 별 (0.02 MPa / 0.12 MPa) 투과성 계수의 증가량은 실리콘 오일을 이용하여 실험한 값과 비교하여 다소 높으나 큰 경향성의 차이는 볼 수 없었다.

하지만 밀도가 증가함에 따라 투과성 계수가 감소하고, 주입 압력이 증가함에 따라 투과성 계수가 증가하는 경향성은 동일함을 볼 수 있었다.

위 연구결과들에서는 유체 별 투과성 계수 값에서 다소 차이를 보여주나 비슷한 특징 (밀도가 증가함에 따라 투과성 계수가 감소하고, 주입 압력이 증가함에 따라 투과성 계수가 증가하는 경향성)을 가진다는 것을 알 수 있었다.

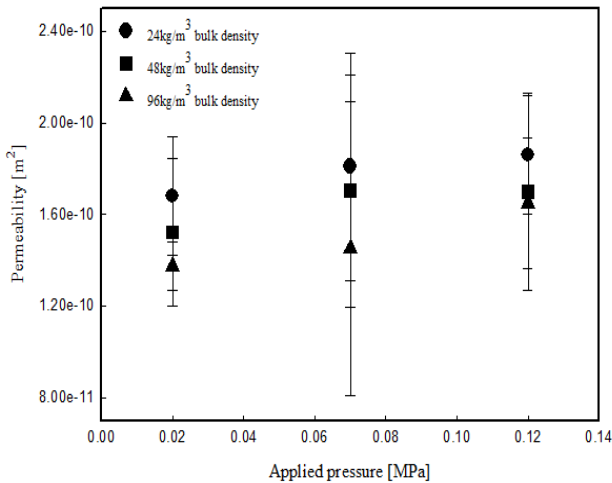


Figure 6: Permeability measurement of different densities of glass wool with different applied pressure using distilled water

5. 결 론

본 연구에서는 RTM 공법을 바탕으로 방향성이 없는 다공성 매질인 유리솜 (glass wool)을 프리폼 (preform)으로 사용하여 투과성 계수를 측정하였다. 유체의 종류와 주입 조건을 달리하여 투과성 계수를 측정하였고 그 결과, 주입 압력 값이 증가함에 따라 투과성 계수는 증가함을 볼 수 있었는데 이는 주입 압력이 증가함에 따라 다공성 구조 체 사이 면적이 늘어나고 내부로 흐르는 유체의 유효 유동 (effective flow passage)이 증가하기 때문에 압력에 따른 투과성 계수 값의 증가되는 것을 볼 수 있었다.

밀도에 따른 전체적인 투과성 계수 값의 특징은 밀도가 증가함에 따라 투과성 계수는 작아지는 것을 볼 수 있었는데 이는 밀도가 증가함에 따라 다공성 매질의 기공도 (porosity)가 작아지게 되고 이는 기공 내부를 통과하는 유효 유동 (effective flow passage)이 작아지기 때문에 나타나는 현상이었다.

증류수를 사용한 투과성 계수 측정값은 실리콘 오일을 사용하여 측정한 값에 비해 11~15% 다소 작은 값을 보여주나 밀도가 증가함에 따라 투과성 계수의 감소 및 주입 압력이 증가에 따른 투과성 계수의 증가 양상은 비슷한 경향성을 나타내는 것을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 2018년도 경상대학교 신입교원 연구기반 조성 연구비로 수행되었음.

References

- [1] F. D. Dungan and A. M. Sastry, "Saturated and unsaturated polymer flows: microphenomena and modeling," *Journal of Composite Materials*, vol. 36, no. 13, pp. 1581-1603, 2002.
- [2] K. M. Pillai, "Modeling the unsaturated flow in liquid composite molding processes: A review and some thoughts," *Journal of Composite Materials*, vol. 38, no. 23, pp. 2097-2118, 2004.
- [3] R. Arbter, J. M. Beraud, C. Binetruy, L. Bizet, J. Bréard, S. Comas-Cardona, and S. Hasanovic, "Experimental determination of the permeability of textiles: A benchmark exercise," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 42, no. 9, pp. 1157-1168, 2011.
- [4] N. K. Naik, M. Sirisha, and A. Inani, "Permeability characterization of polymer matrix composites by RTM/VARTM," *Progress in Aerospace Sciences*, vol. 65, pp. 22-40, 2014.
- [5] C. H. Park and P. Krawczak, "Unsaturated and saturated permeabilities of fiber reinforcement: critics and suggestions," *Frontiers in Materials*, vol. 2, no. 38, pp. 1-6, 2015.
- [6] C. H. Park and W. I. Lee, "Modeling void formation and unsaturated flow in liquid composite molding processes: A survey and review," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 30, no. 11, pp. 957-977, 2011.
- [7] S. W. Choi, W. I. Lee, and H. S. Kim, "Analysis of flow characteristics of cryogenic liquid in porous media," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 87, pp. 161-183, 2015.