

아이스슬러리 시간경과가 투과율에 미치는 영향

서재경, 백종현*, 홍희기**, †강채동***

전북대학교 기계공학부, *한국생산기술연구원 냉동공조연구팀,

경희대학교 기계산업시스템공학부, *전북대학교 기계항공시스템공학부

Permeability of Ice Slurry with Various Storage Time

Jae-Kyoung Suh, Jong-Hyun Peck*, Hiki Hong**, Chaedong Kang***

Department of Mechanical Engineering, Chonbuk National University, Jeonju 561-756, Korea

*HVAC/R Research Team, Korea Institute of Industrial Technology, Chonan 330-32, Korea

**School of Mechanical and Industrial system engineering, KyungHee University, Yongin 449-701, Korea

***Department of Mechanical Engineering, Chonbuk National University, Jeonju 561-756, Korea

ABSTRACT: Recently, the ice slurry contributes to power distribution and district cooling as cold storage material. In many of previous studies, the permeability and porosity of the flow in porous media has been researched with the representative relation of Kozeny-Carman equation. However, the effect on the permeability of several conditions such as initial concentration, and storing time after the formation of ice slurry and etc.

In this study, measuring permeability of ice slurry by time variation at keeping in storage bath in order to find out relationship of permeability with storing time. The permeability of these ice slurry packing in horizontal test part of an U-shaped tube was tested in constant temperature and humidity control bath. The Darcy's law and Darcy's equation is used to define the value of k, permeability.

Key words: Permeability(투과율), Ice cohesion(빙융착), Porous media(다공질 매체), Ice Slurry(아이스슬러리), Darcy's equation(Darcy 방정식)

기 호 설 명

A : 아크릴관 단면적 [cm²]
 D_i : 아크릴관 내경 [cm]
 g : 중력가속도 [m/s²]
 $h(t)$: 수직관 위치수두 [m]
 K : 매체의 투과율
 k : 투과계수 [m²]

L : 유동장 길이 [m]
 l : 테스트관 길이 [m]
 p : 압력 [Pa]
 Q : 유량 [m³/s]
 u : Darcy속도 [m/s]

그리스 문자

μ : 유체의 점성계수 [kg/m · s]
 ρ : 밀도 [kg/m³]

† Corresponding author

Tel.: +82-63-270-2318; fax: +82-63-270-2315

E-mail address: ckang@chonbuk.ac.kr

하첨자

- 1 : 관 입구
- 2 : 관 출구

1. 서론

축열조 내부에서의 축빙과정시 얼음층 형성에 따른 열저항 증대 및 얼음덩어리 간의 상호결합에 의한 빙괴형성은 축열조의 구조적 안정성 및 열전달 효율 저하에 직접적인 영향을 끼치고 있다. 이 같은 문제를 해결하고자 유동성이 좋은 아이스슬러리를 생성하려는 시도가 다각도로 이루어지고 있다.

선행연구로서 Murakami 등은 borneol-paraffin 을 이용하여 연직방향 수지상 결정구조에서의 투과율에 대한 실험값을 측정했다.⁽²⁾ 여기에서는 투과율이 유동방향과 수지상 측면구조 관계에 미치는 영향을 파악하고 투과성과 수지상 측면 공간, 액상 체적분율 사이의 상호관계성을 밝혔으며, 또한, mushy zone에서의 투과성이 수용액의 동결과정에서 바뀌는 유동방향의 기하학적 특성에 따라 결정됨을 밝히고 있다. Yoshioka 등은 succinorityl-acetone 용액을 사용하여 결정화 이후의 냉각속도가 수지상 결정 성장에 미치는 영향과 2차 아암(arm) 형성에 미치는 결정속도와 초기농도의 영향을 명확히 하였다. Okada 등은 염화나트륨 수용액을 수평관에 채우고 응고시켜 mushy zone의 투과율을 측정하였다.⁽³⁾

본 연구에서는 동적 아이스슬러리 시스템 설계에 있어서 중요한 고려요소인 유동성과 밀접한 관련이 있는 아이스슬러리의 투과율에 주목하여 생성 후 일정시간 경과에 따른 아이스슬러리의 형상변화 관찰을 통하여 저빙과정의 적정 조건을 검토하고자 한다. 세부적으로는 축열조 내에서의 아이스슬러리 생성 후 저장시간의 경과가 아이스슬러리의 입자경 및 공극에 어떠한 영향을 미치는지 알아보고자 투과율을 측정하는 것이 본 연구의 목적이다.

2. 이론 및 배경

2.1 Darcy 법칙과 투과율

기본 Darcy 방정식⁽⁶⁾에서,

$$Q = KA \frac{h_1 - h_2}{l} = KA \frac{\Delta h}{l} \quad (1)$$

압력구배, 낙차가 존재할 경우에는, 다음과 같다.

$$u = -\frac{k}{\mu} \left[-\frac{\rho g (h+L)}{L} + \rho g \right] = \frac{k \rho g h}{\mu L} \quad (2)$$

여기에서 u 는 Darcy속도이며, 각 공극 통로에서의 유동속도를 다공질 매체의 전체 단면적에 대한 평균화 개념이다. 단, 속도분포가 일정한 것으로 간주하므로 Bernoulli 방정식에서 운동에너지 항이 소멸된다. 또한, K 는 매체의 투과율(permeability of the medium), A 는 매체의 단면적(cross-section area of medium), k 는 투과율계수(coefficient of permeability), μ 는 유체의 점성계수(viscosity of fluid)이다.

2.2 과도측정법

투과율 측정실험에서 사용하는 테스트관은 U자관으로 실제 아이스슬러리가 충전되는 구간은 수평관이며, 수직관은 브라인을 투과시키기 위한 구간으로 액주의 높이를 가늠할 수 있도록 눈금을 표시한다. 투과시킬 수용액을 한 쪽의 수직관 내로 유입시켰을 때, 초기 위치수두차($h_1(0) - h_2(0)$)는 반대쪽 수직관을 닫아두어 생기도록 하며 실험개시 직후에는 일시적으로 개방한다.

Darcy 의 법칙 중 제한사항인 관내 유동속도는 압력구배에 비례하며, Darcy의 법칙에서 가정으로부터 다음의 사항을 고려하면,

- 1) 투과용액의 관성력 배제
- 2) 투과용액의 점성에 의한 열저항 발생 배제
- 3) 압력강하는 오직 아이스슬러리 내부에서만 발생

Darcy 방정식은 다음과 같다.

$$u = -\frac{k}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{k \rho g}{\mu L} [h_1(t) - h_2(t)] \quad (3)$$

$$u = -\frac{dh_1(t)}{dt} = \frac{dh_2(t)}{dt} \quad (4)$$

또한, 압력강하는 mushy zone의 길이 L 에 의해서만 좌우되므로, 관성력과 압력손실, 곡관 및

벽면손실은 무시할 수 있다. 따라서, 식은 다음으로 축약된다.

$$\ln \frac{h_1(t) - h_1(\infty)}{h_1(0) - h_1(\infty)} = -2Kt \quad (5)$$

$$K = \frac{k \rho g}{\mu L} \quad (6)$$

$h_1(\infty)$ 는 수두차 $h_1(\infty) - h_2(\infty)$ 이 사실상 0일 때의 위치수두 높이이다. 시간 t 에 대한 위치수두 $h_1(t)$ 의 높이를 측정하고, 최소제곱법(least square approximation)을 이용하여 식 (5)로부터 경사 K 를 구한다. 따라서, 투과율 k 는 위의 식 (6)으로부터 얻는다.

3. 실험장치 및 방법

3.1 실험장치

Fig. 1에 아이스슬러리 투과율 측정장치의 개략도를 나타내었다. 또한, Fig. 2은 본 연구에서 아이스슬러리의 투과율을 측정하고자 구성한 실험장치의 항온항습기 내 설치사진이다. 실험은 작동온도 범위 $-30^\circ\text{C} \sim 150^\circ\text{C} \pm 0.5^\circ\text{C}$ 를 갖는 항온항습기 내의 챔버에서 수행하였으며, 챔버의 크

기는 $W \times H \times D$ ($60 \text{ cm} \times 70 \text{ cm} \times 60 \text{ cm}$)이다. 투과율을 측정하기 위한 테스트관(충전부)은 내경 2.4 cm , 유효구간 길이 40 cm 의 투명 아크릴관(see-through acrylic tube)으로 만들어 졌다. 투과율을 검토하기 위하여 관의 양단에는 SUS mesh filter(선경 0.16 mm , opening 0.348 , open area 47%)를 부착하고, 투과과정의 온도변화를 확인하기 위하여 T-type 열전대를 필터부위에 설치하였다. 실험과정 동안의 충전부의 입출구 온도변화는 Agilent사의 DA-34970A를 통해 PC에서 처리하였다.

3.2 실험방법

투과시킬 대상인 아이스슬러리를 동결점(freezing point) -2.3°C , 성분조성-에틸렌글리콜(EG, ethylene glycol) 4 mass\% , 실란커플링제(SCA, silane coupling agent) 3 mass\% , 빙충전율(IPF, ice packing factor) 30% 의 조건으로 생성하였다. 이를 저온항온조에서 $-3.4 \pm 0.1^\circ\text{C}$ 의 온도에서 저장한 후 경과시간을 각각 생성 직후, 6시간, 12시간 후로 구분하여 실험하였다. 실제 빙축열시스템에서 아이스슬러리는 축열조 내의 부력(buoyancy)에 의해 하부로부터 큰 압력을 받게 되며, 커다란 다공질 매체로서 형성되기 쉽다.

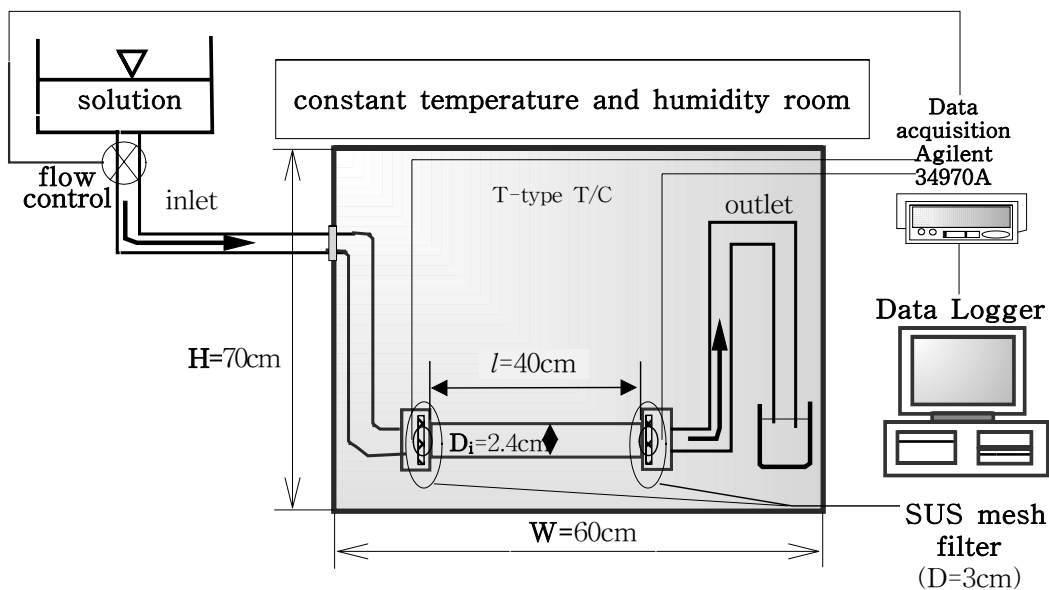


Fig. 1 Schematic diagram of apparatus for measuring permeability in ice slurry packed U-shaped tube flow

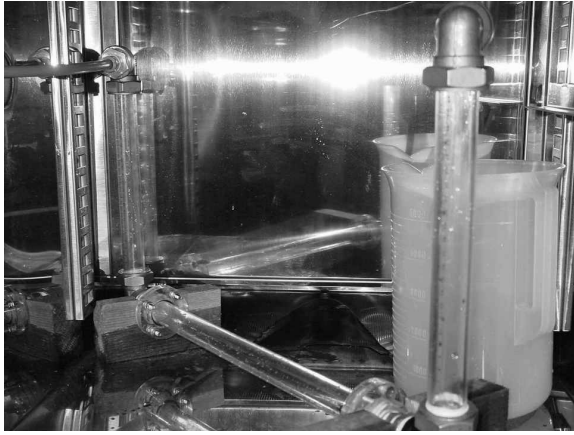


Fig. 2 Photo of apparatus setting for testing permeability.

실험에는 앞서 언급한 조건의 기능성 첨가제가 함유된 아이스슬러리를 충전시키고 항온·항습기에 설치하여 실험을 수행하였다. 투과율은 아이스슬러리 충전구간인 수평관과 수직관중 입구(inlet)쪽 관에 브라인을 유입시켜 U자관 내에서 평형에 도달하는 시점을 투과완료로 간주하여 측정하였다.

4. 실험결과 및 고찰

수용액 동결 직후 생성된 아이스슬러리, 생성 후 항온조에 6시간 저장한 아이스슬러리, 그리고 생성 후 12시간 저장한 아이스슬러리 등 3 조건에 따라 투과율 측정실험을 수행하였다. 각 실험에 따른 결과로서 투과시간에 대한 입출구 온도 변화를 Fig. 3, Fig. 4, Fig. 5에 나타내었다.

Fig. 3는 EG 4, SCA 3 mass%의 초기농도로 형성한 아이스슬러리를 투과율 장치에 옮긴 후 투과율 측정 동안의 충전부 입출구에서의 온도 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 입구측 수용액 온도가 동결점보다 약간 낮은 상태로 유입되어 충전부를 지나면서 아이스슬러리의 고액상혼합영역(mushy zone)과 투과용액(EG 수용액) 사이의 온도차에 의한 열교환에 의해 온도가 수용액의 초기농도에 대한 동결점 -2.3°C 에 거의 일치하여 배출되는 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 4는 앞에서와 같은 초기농도로 형성한 아이스슬러리를 저온항온조에서 6시간 동안 저장시

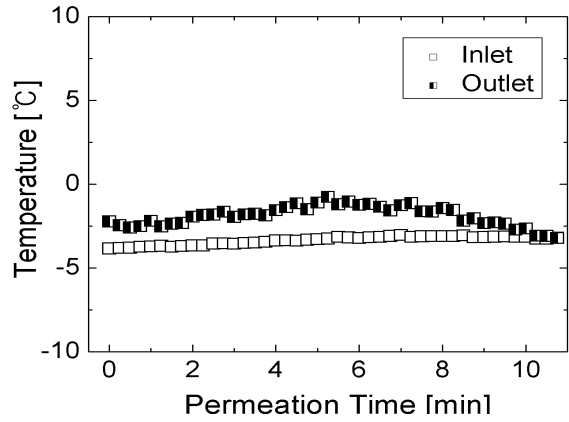


Fig. 3 Temperature variation in flow tube through permeation of ice slurry made immediately. (EG 4 mass%, SCA 3 mass%)

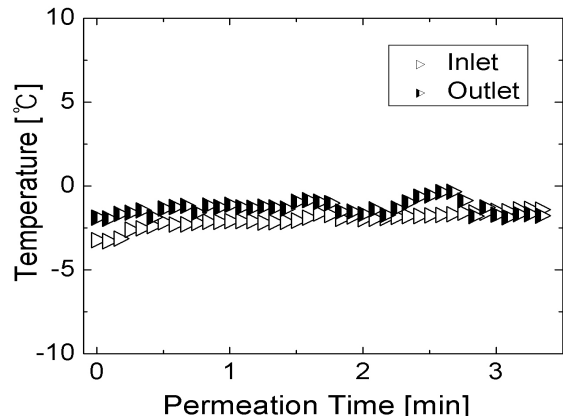


Fig. 4 Temperature variation in flow tube through permeation of stored ice slurry for 6 hours. (EG 4 mass%, SCA 3 mass%)

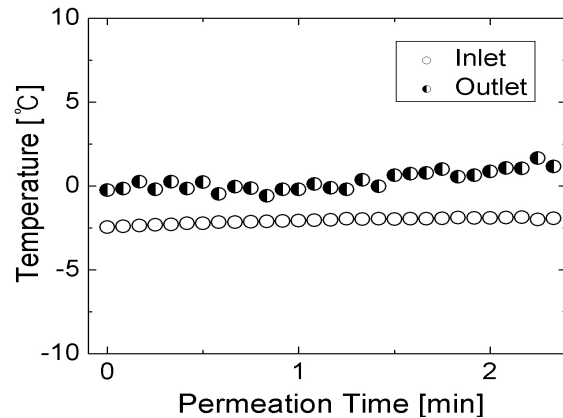


Fig. 5 Temperature variation in flow tube through permeation of stored ice slurry for 12 hours. (EG 4 mass%, SCA 3 mass%)

킨 후 투과율 측정 동안의 충전부 입출구에서의 온도변화를 나타낸 것이다. 아이스슬러리 생성 직후의 조건으로 실험했을 때와 마찬가지로 입구 측 수용액 온도가 동결점 온도보다 약간 낮은 상태로 유입되어 충전부를 지나면서 열교환에 의해 입출구의 온도가 근사화되는 것을 확인하였다. 생성 직후 조건 때보다 온도변화의 차가 더욱 작은 것은 투과시간이 짧게 소요되는 만큼 순간 투과량이 상대적으로 증대되어 열교환이 더욱 빨리 진행된 것으로 추측하였다.

Fig. 5는 동일한 초기농도로 형성한 아이스슬러리를 저온항온조에서 12시간 동안 저장시킨 후 투과율 측정 동안의 충전부 입출구에서의 온도변화를 나타낸 것이다. 투과개시 후 아이스슬러리의 얼음층이 충전부 내에서 층간 분리 후 부유하여 관 상부에 결집되는 현상을 관찰하였다. 이는 12시간 동안 저빙하는 과정에서 얼음 입자들이 재결정 및 융착하면서 얼음층을 이룬 것으로 추측하였으며, 투과용액은 얼음층 아래를 관통하여 앞의 두 실험 때와는 달리 열교환이 거의 이루어지지 않은 결과로 해석하였다.

Fig. 6은 축열조 내 아이스슬러리의 저장시간 경과에 따른 투과에 이르는 시간의 변화를 나타낸 것이다. 아이스슬러리 생성 직후에는 10분 51초, 6시간 경과 후에는 3분 45초, 12시간 경과 후에는 2분 14초의 결과를 확인하였다. 이로서 저장시간이 오래될수록 투과시간은 짧아짐을 알 수 있으며, 이는 아이스슬러리 축빙과정에서 시간경과가 재결정 및 융착 현상에 영향을 주어 얼음 입자들이 증대된 것으로 판단하였다.

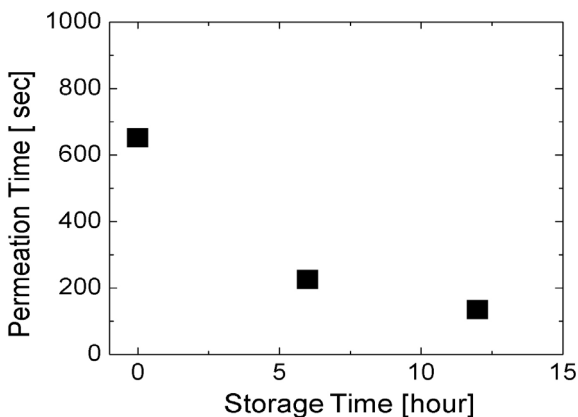


Fig. 6 Relationship of Permeation time in U-shaped tube flow with storage time of ice slurry.

Fig. 7, 8, 9는 각각 초기농도 EG 4 mass, SCA 3 mass% 로 형성한 아이스슬러리의 생성 직후, 6시간 저장 후, 12시간 저장 후 EG 수용액을 투과시켰을 때 얻은 투과시간에 따른 U자관 입구 쪽의 위치수두(전체수두에 대한 대수비 값)에 대한 시간변화를 나타내고 있다. Fig. 7은 생성 직후 아이스슬러리에 대한 투과시간 대비 위치수두의 변화로서 경사도가 직선에 가까운 것은 투과시 유동이 층류유동에 따라 서서히 일정유량이 투과되고 있음을 의미한다. Fig. 8에서의 곡선 기울기로부터 생성 직후 때보다 더욱 투과가 용이하게 되었음을 확인할 수 있으며, 이는 저장시간 경과에 따라 입자경이 성장하여 공극이 확대된 것으로 짐작된다. 또한, Fig. 9의 변곡선은 투과 개시 80초 경과시점부터 부분용해에 따른 얼음층 일부가 부유함에 따라 얼음층 아래로 투과용액이 관통하면서 순간 투과율이 증가하였음을 알 수 있다. 하지만 이는 국소부위에서 발생하는 현상으로 관 단면적 전체에 대한 투과율 증가를 의미하지는 않는다. 세 그림에서 산출되는 기울기(K)를 식 (5), 식 (6)의 Darcy방정식에 대입하였더니

$$\begin{aligned} &\text{아이스슬러리 생성 직후,} \\ &K = 0.954 \times 10^{-3} \\ &k = 1.436 \times 10^{-8} \text{ m}^2 \\ &\text{저장 6시간 경과 후,} \\ &K = 4.431 \times 10^{-3} \\ &k = 5.309 \times 10^{-8} \text{ m}^2 \\ &\text{저장 12시간 경과 후,} \\ &K = 15.311 \times 10^{-3} \\ &k = 18.344 \times 10^{-8} \text{ m}^2 \end{aligned}$$

이상과 같은 실험값을 얻었다.

5. 결론

이상으로 앞에서 언급한 실험장치 및 방법으로 투과율 측정실험을 하였다. 이 과정에서, 축열조 내에 저장해 놓은 아이스슬러리의 시간경과가 투과율에 미치는 영향을 검토하였으며, 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

(1) 아이스슬러리의 항온조 내 저장시간이 경과함에 따라 투과시간이 짧아진다.

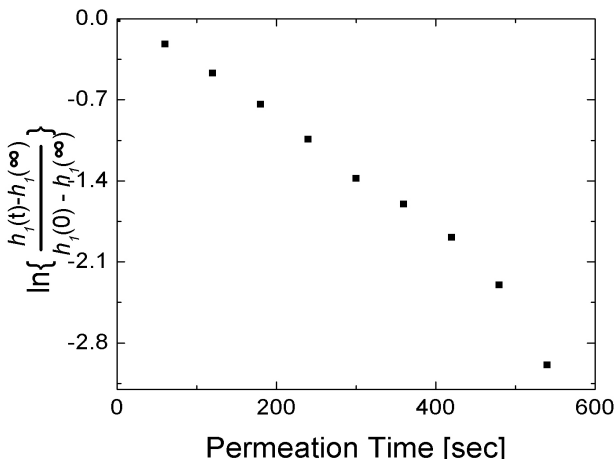


Fig. 7 Time variation of potential head displacement of ice slurry made immediately.

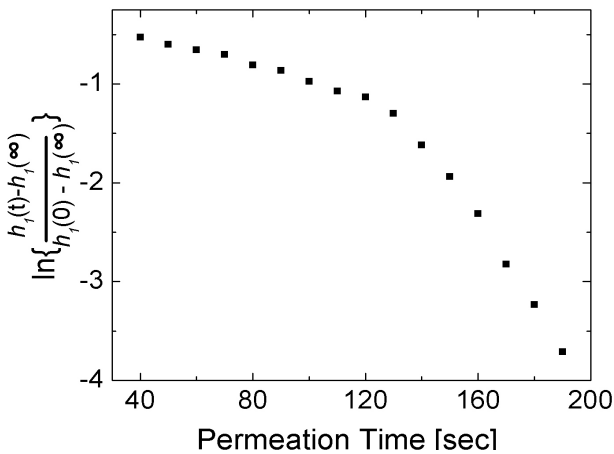


Fig. 8 Time variation of potential head displacement of ice slurry stored for 6 hours.

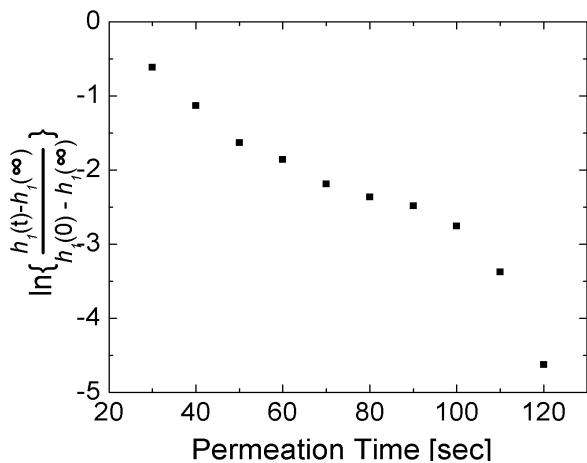


Fig. 9 Time variation of potential head displacement of ice slurry stored for 12 hours.

(2) 저장 후 12시간 경과한 아이스슬러리의 경우 충전부 내에서 투과과정동안 부분용해가 발생하였다.

(3) 저장 직후일 때 투과율은 $1.436 \times 10^{-8} \text{ m}^2$, 저장시간 6시간 후일 때 투과율은 $5.309 \times 10^{-8} \text{ m}^2$, 저장시간 12시간 후일 때 투과율은 $18.344 \times 10^{-8} \text{ m}^2$ 이었다.

(4) 아이스 슬러리의 장시간 저장 시에는 얼음층 형성이 일어날 수 있다.

후 기

본 연구는 산업자원부 에너지기술 학술진흥사업(과제번호 2002-E-BD03-P-01-0-000) 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Okada, M., Kang, C., Okiyama H., 1999, Permeability of an aqueous solution in a state of partial solidification, The 6th Int. S. ESCR, pp. 103-112
2. Okada, M, Matsumoto, K., Fukuzaki, M., 1996, Influence of initial concentration and super-cooling degree on the permeability of a porous medium saturated with partially solidified aqueous solution, Int. J. Heat mass transfer, Vol. 39, No. 18, pp. 3845-3853
3. Murakami, M., Shiraishi A et al., 1983, Inter-dendritic fluid flow normal to primary dendrite arms in cubic alloys, Acta. Metall., Vol. 31, pp. 1417-1424
4. Schoelkopf, J., Gane, P., Ridgway, C. J., 2004, Observed non-linearity of Darcy-permeability in compacted fine pigment structures, Physicochem. eng. pp. 111-120
5. Zhu, S. et al., Mechanistic modelling of fluid permeation through compressible fiber beds, 1995, Chemical engineering science, Vol. 50, No. 22, pp. 3557-3572
6. Dullien F.A.L., 1979, Porous media - Fluid transport and pore structure, Academic Press, New York, 159-16