

# 배관내 아이스슬러리의 실시간 연속 얼음분율 측정

정 해 원, 백 중 현<sup>†</sup>, 박 승 상\*, 김 용 찬\*\*, 강 채 동\*\*\*, 홍 희 기\*\*\*\*

고려대학교 기계공학과 대학원, \*한국생산기술연구원, \*\*고려대학교 기계공학과,  
전북대학교 기계공시스템공학부, 경희대학교 기계산업시스템공학부

## A Measurement of Ice Concentration of Ice Slurry in Pipe with Refractive Index

Hae-Won Jung, Jong-Hyeon Peck<sup>†</sup>, Shung Sang Park\*,  
Yongchan Kim\*\*, Chaedon Kang\*\*\*, Hiki Hong\*\*\*\*

Graduate School of Mechanical Engineering, Korea University, Seoul 136-701, Korea

\*Korea Institute of Industrial Technology, Chonan 330-825, Korea

\*\*Department of Mechanical Engineering, Korea University, Seoul 136-719, Korea

\*\*\*Dept. of Mechanical Engineering, Chonbuk National University, Jeonju 561-756, Korea

\*\*\*\*School of Mechanical and Industrial System Engineering, KyungHee University, Yongin 449-701, Korea

**ABSTRACT:** In the present paper, three different methods(freezing point, density and refractive index) are experimentally investigated for measurement of the real time ice concentration of ice slurry flowing in circular pipe. The freezing point method has a poor precision (2.3% minimum graduation) and decreasing below 20% of the ice concentration, it shows more 20% maximum error comparing to other two methods. Although the density method has good precision, it shows over  $\pm 10\%$  error compared to the calibrated ice concentration considering the real time density change of aqueous solution. The refractive index method has a good accuracy(within  $\pm 5\%$  error) and relatively a good precision(1.5% minimum graduation).

**Key words:** Refractive index(굴절률), Ice slurry(아이스슬러리), Freezing point(동결점), Concentration(농도), Density(밀도), IPF(빙층전율), Ice concentration(얼음분율)

### 기 호 설 명

### 그 리 스 문 자

$m$  : 질량, 총질량 [g]  
 $T$  : 온도(temperature) [°C]  
 $C$  : 질량분율 [mass%]  
 $x$  : 농도(concentration) [mass%]  
 $IPF$  : 얼음 체적분율(IPF) [%]

$\rho$  : 밀도 [kg/m<sup>3</sup>]

### 하첨자

$EG$  : 에틸렌글리콜(ethylene glycol)  
 $ice$  : 얼음  
 $i$  : 초기상태(initial state)  
 $f$  : 최종상태(final state)  
 $fp$  : 동결점(freezing point)

<sup>†</sup> Corresponding author

Tel.: +82-41-589-8343; fax: +82-41-589-8330

E-mail address: pjh6240@kitech.re.kr

l : 액체  
s : 아이스슬러리

## 1. 서론

빙축열시스템 중 동적형 빙축열 방식은 제빙기를 이용하여 물 또는 브라인 수용액에 수십  $\mu\text{m}$ 에서 수 mm 정도의 작은 얼음 입자가 섞인 아이스슬러리를 연속적으로 제빙하고, 이를 축열조에 저장하여 이용하는 방식이다. 이러한 방식은 정적형 빙축열 방식에 비해 제빙효율이 높고, 부하추종능력이 우수하다는 장점과 더불어 아이스슬러리를 배관으로 직접 수송시 고밀도의 냉열원을 공급할 수 있어 최근 들어 지역냉방과 같은 대규모 시스템에 적용될 가능성이 한층 높아지고 있다. 지역냉방이나 구역형 집단에너지 시스템(Community Energy System, CES)에 아이스슬러리형 빙축열 시스템을 적용하여 각 수용가로 냉열원을 공급하는 경우, 시스템제어 및 소비량계측을 위해 실시간 기반의 냉열량 계량은 필수적이다. 현장에 설치된 아이스슬러리형 빙축열방식에서는 제빙기 입구 측의 수용액 온도, 즉 축열량에 대응하는 설정온도에 도달했을 때 운전을 멈추게 함으로써 제빙운전을 제어하고 있으며, 배관에 흐르는 아이스슬러리에 대한 얼음분율(ice concentration) 측정은 현재까지도 많은 연구가 지속적으로 진행 중에 있다.

지금까지 연구된 수용액 동결에 있어서의 얼음분율 측정방법은 아이스슬러리의 밀도<sup>(1)</sup>, 저항 및 전기전도도 등을 이용하거나 동결점과 농도관계를 이용<sup>(2)</sup>한 간접 측정법과 열량계를 이용한 직접 측정법으로 대별할 수 있다. 간접 측정법의 하나인 동결점을 이용한 방식은 제빙시 수용액의 농도와 동결점이 변화하는 원리를 이용하여 생성된 얼음의 양을 산출하는 것이다. 한편 밀도를 이용한 방법은 아이스슬러리 내 얼음의 양에 따라 전체 밀도가 변화하는 특성을 이용하여 배관에 흐르는 아이스슬러리의 얼음분율을 산출하는 방법이다.

본 연구에서는 이전 논문에서 제안한 굴절률을 이용하여 정지상태에서의 얼음분율 측정방법을<sup>(3)</sup> 적용하여 배관에 흐르는 아이스슬러리의 얼음분율을 실시간으로 측정하였으며, 이를 동결점 및 밀도를 이용하여 측정한 결과와 비교하고 각 측

정방법의 정밀도와 정확도를 분석, 비교하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험 및 측정장치

배관내 수용액의 얼음분율을 측정하기 위한 실험장치는 Fig. 1과 같이 아이스슬러리 제빙기, 축열조, 그리고 얼음분율을 측정하기 위한 측정부로 구성하였다.

제빙기는 0.7 RT급의 스크류-스크레이퍼형이며, 실험시 측정된 수용액 초기농도는 Ethylene Glycol(이하 EG) 6.64 mass%이었다. 축열조는 FRP 재질에 우레탄으로 단열처리 되어 있으며 약 600 kg의 수용액을 저장할 수 있도록 제작되었다. 균일한 얼음입자 비율을 가진 아이스슬러리를 측정부로 이송하기 위해서 상하부에 두 개의 교반익이 장착된 교반기(agitator)를 설치하였다.

측정부에는 질량유량계, 굴절계 및 RTD 온도센서가 설치되었으며, 측정부의 배관은 내경 20 mm, 두께 2 mm인 PB(polybutylene)관으로 구성하였다. 또한 굴절률을 통한 얼음분율측정의 정확도 향상을 위해 사이클론을 이용, 아이스슬러리의 수용액과 얼음입자를 분리하였다.

측정부에서 계측된 값들은 데이터로거(Yokogawa사, DA-100, 34 channels)로 5초 간격으로 수집하여 PC에 저장하였다.

### 2.2 실험 및 측정방법

축열조 내에 EG 6.64 mass% 수용액 약 600

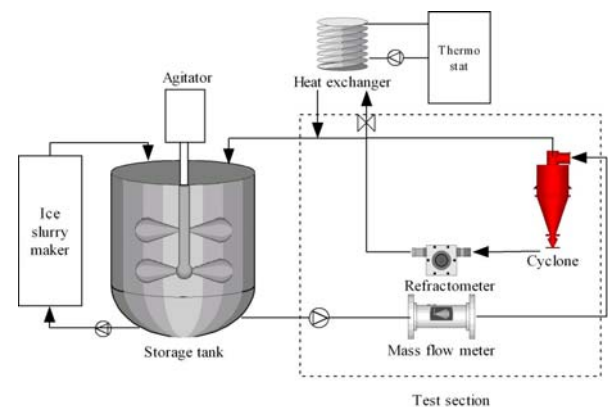


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus with ice-slurry maker

kg을 채우고 스크레이퍼형 제빙기를 이용하여 아이스슬러리를 제조, 축열조 상단으로 유입하고 교반기로 교반함으로써 얼음 입자간의 응집현상을 방지하였다. 축열조내 축열량이 30% 이상이 되면 제빙기 운전을 정지한 후, 균일한 아이스슬러리를 일정 유량으로 축정부에 유입시키면서 해빙실험을 수행하였다. 이 실험 동안 얼음분을 변화에 따른 밀도, 동결점 및 굴절률을 측정하였다.

### 2.2.1 동결점을 이용한 얼음분율 측정

수용액을 제빙 또는 아이스슬러리를 해빙할 때, 혼합물인 아이스슬러리의 얼음과 수용액 2상이 상변화를 수반하여도 순수 EG의 총량은 변하지 않는 질량보존법칙(mass conservation)에 의해서 아이스슬러리 내 수용액의 농도가 결정된다.<sup>(4)</sup> 얼음의 질량분율  $C_{ice}$ 는 초기 수용액의 동결점 시작점에서의 농도  $x_i$ 와 최종상태에서 수용액의 농도  $x_f$ 를 이용하여 다음과 같이 정의된다.

$$C_{ice} = 1 - \frac{x_i}{x_f} \quad (1)$$

농도에 따른 동결점의 변화를 이용하여 얼음분율을 측정하기 위해서는 먼저 해당되는 상변화상태도를 확보해야 한다. 이를 위해 실험의 영역에 포함되는 농도별 수용액 샘플을 조성한 후 각각의 동결점을 측정하였다. 일정 조성비를 갖는 시료를 서서히 냉각시켜 과냉각이 해소된 직후의 온도로부터 동결점을 결정하였으며, 초기 농도가 EG 6.64 mass%일 때를 전제로 각 아이스슬러리 수용액의 농도에 따라 식(1)을 적용하여 구한 얼음분율을 함께 Fig. 2에 도시하였다. 그림에서 EG 5-13 mass% 사이의 각 수용액의 농도변화에 대한 동결점 측정결과이며, 비교적 직선으로 나타난다. 따라서 동결점과 수용액 농도의 관계를 1차 함수로 식(2)과 같이 구하였다. 이 식과 측정된 동결점은  $\pm 0.1^\circ\text{C}$ (신뢰도 99%)의 범위에서 일치한다.

$$T_{fp} = -0.4704x + 1.238 \quad (2)$$

RTD 온도센서로 측정한 온도를 식(2)에 대입하여 농도를 산출하고 이를 식(1)에 적용하여 얼

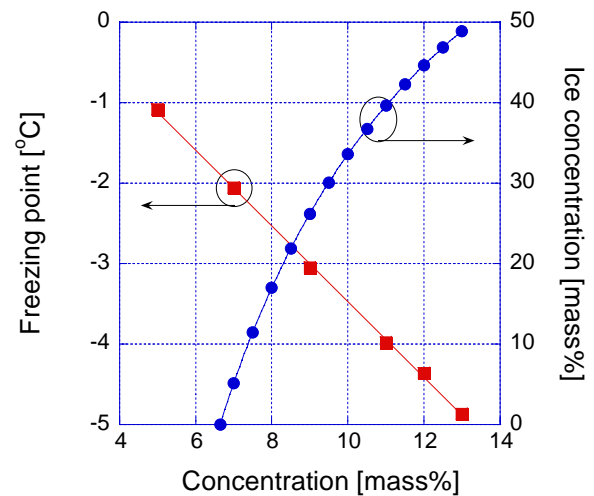


Fig. 2 Relations of concentration to freezing temperature and ice concentration

음분율을 구하였다.

### 2.2.2 밀도를 이용한 얼음분율 측정

축정부 내를 유동하는 아이스슬러리의 유량과 밀도는 OVAL사의 Coriolis식 질량유량계를 이용하여 측정하였으며, 아이스슬러리의 질량보존식은 다음과 같이 정의된다.

$$\rho_{ice} \cdot IPF \cdot V_s + \rho_l (1 - IPF) V_s = \rho_s V_s \quad (3)$$

여기서 IPF(Ice Packing Factor)는 아이스슬러리 내 얼음의 체적분율이며<sup>(1)</sup>, 얼음의 질량분율인  $C_{ice}$ 는 식(3)으로부터 다음과 같이 산정된다.

$$C_{ice} = \frac{\rho_{ice}}{\rho_s} \cdot IPF = \frac{\rho_{ice}}{\rho_s} \cdot \frac{\rho_s - \rho_l}{\rho_{ice} - \rho_l} \quad (4)$$

여기서,  $\rho_{ice}$ 는 얼음의 밀도로서  $917 \text{ kg/m}^3$ ,  $\rho_s$ 는 질량유량계로 측정된 아이스슬러리의 밀도이다.

현재까지의 기존 연구에서는,  $\rho_l$ 은 초기 EG 수용액 기준으로 동결점에서의 고정된 밀도를 사용하였다.<sup>(1)</sup> 그러나 식(3)으로부터  $\rho_l$ 은 아이스슬러리 내 수용액의 실시간 밀도임을 알 수 있다. 이로 인해, 식(4)에  $\rho_l$ 값으로 초기 수용액의 동결점에서의 밀도를 적용할 경우 배관내 실시간 얼음분율 변화에 따른 실시간 수용액의 밀도와 차이가 생기며 그 만큼 얼음분율이 실제값 보다 작게

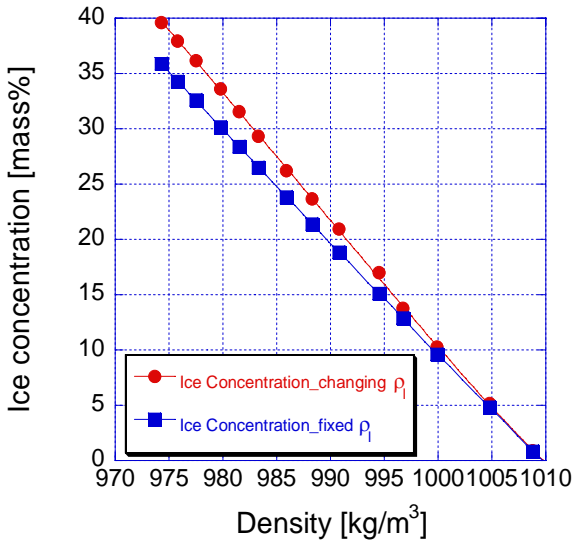


Fig. 3 Relations between density and ice concentration

나타날 것으로 예상된다.

본 실험에서는 실시간 수용액의 밀도를 적용하기 위해 농도에 따른 수용액의 밀도를 질량유량계로 측정하였으며, 온라인 굴절계를 통하여 실시간으로 산출한 농도를 기준으로 실시간 수용액의 밀도를 구하였다. Fig. 3은 초기 수용액 농도가 EG 6.64 mass%인 수용액으로 제빙하였을 때의  $\rho_i$ 값으로 초기 수용액 밀도를 적용하여 계산한 얼음의 질량분율과 실시간 수용액의 밀도를 적용한 질량분율을 문헌<sup>(5)</sup>에 의한 계산결과와 비교하여 나타내었다.

### 2.2.3 굴절률을 이용한 얼음분율 측정

빛이 통과하는 매질의 농도에 따라 굴절률이 달라지는 현상을 이용하여 수용액의 농도별 굴절률을 측정할 수 있으며, 측정된 농도를 식(1)에 적용해 얼음의 질량분율  $C_{ice}$ 를 구할 수 있다. 기존에는 얼음입자보다 작은 수  $\mu\text{m}$  단위의 메쉬(mesh)를 사용하여 얼음입자가 제거된 수용액만을 채취하여 측정하였는데, 이러한 방법은 비연속적이고 시간평균적인 계측특성 때문에 배관내에서 실시간으로 유동중인 수용액의 농도를 측정하기에는 적합하지 않다.

이에 본 연구에서는 배관 내에 흐르는 아이스 슬러리를 hydro-cyclone에 통과시켜 얼음이 배제

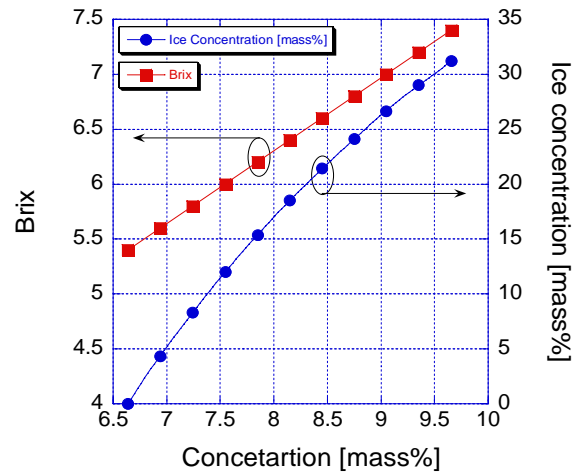


Fig. 4 Relations of concentration to brix and ice concentration

된 수용액을 분리하고 배관 내에 설치된 온라인 굴절계(ATAGO사, CM-780, 3-11 Brix)를 통하여 Brix단위로 측정하였다.

본 실험에 앞서 EG 6-11 mass%수용액을 수용액의 농도 및 온도 변화에 따라 온라인 굴절계를 통하여 측정한 Brix를 Fig. 4에 나타내었다.

그림에서 EG 수용액 각 농도별 Brix에 대응하는 얼음분율을 나타내는 그래프이다.  $C_{ice}$ 가 0에서 30%로 변화할 때 농도 변화는 6.64 mass%에서 9.66 mass%, Brix는 5.4에서 7.4까지 변화하는 것을 알 수 있으므로, 굴절률을 통한  $C_{ice}$  계산은 측정된 굴절률을 농도로 환산하여 농도와  $C_{ice}$ 의 상관관계로 구할 수 있다.

### 3. 실험결과 및 고찰

Fig. 5은 얼음분율이 약 30% 될 때까지 제빙한 후 해빙과정을 거치면서 질량유량계, 굴절계 및 RTD센서로부터 산출된 얼음분율을 모두 함께 도시하였다. 그림에서 보듯이 질량유량계로 측정된 얼음분율은 굴절계로 측정된 값에 비하여 전반적으로 낮게 나타나며, 온도로 측정된 얼음분율은 12시간 이후의 구간에서 굴절계로 측정된 값으로부터 상당히 벗어남을 알 수 있다. 이러한 현상은 반복실험에서 지속적으로 관찰되었으며, 특히 온도에 의한 측정값은 얼음분율이 20% 이하인 영역에서 높게 나타나는 경향을 보였다.

Egolf et al.은<sup>(6)</sup> 배관에 흐르는 아이스슬러리의 유동특성에 의해 유동축에 대해 비대칭 온도장 (temperature profile)이 존재하며, 아이스슬러리 유동단면의 중앙에서 측정된 값이 정확한 평균 온도와 다를 수 있음을 보고한 바 있다.

Fig. 6은 온도, 밀도 및 굴절률에 의해 산출한 얼음분율을 아이스슬러리의 밀도를 기준으로 하여 다시 나타낸 것이다. 그림에서 서로 다른 수용액 밀도를 적용한 두 가지 밀도 측정법은 얼음분율이 증가할수록 서로 10% 이상의 오차를 보이며, 이러한 결과는 문헌<sup>(5)</sup>을 통하여 얻어진 Fig. 3과 유사한 경향을 보인다. 따라서 밀도를 이용하여 정확한 얼음분율을 측정하기 위해서는 아이스슬러리의 밀도와 아이스슬러리내 수용액의 밀도를 동시에 측정해야 함을 알 수 있다. 또한 그림에서 굴절률 측정법으로 산출된 얼음분율은 수용액의 밀도변화를 실시간 적용하여 산출된 얼음분율과 오차범위 5% 이내에서 일치함을 보였다.

Table 1은 온도, 굴절률 및 밀도에 대한 측정 장치의 분해능과 정확도를 나타낸 것이다.

계측기기의 정밀도는 일반적으로 분해능, 즉 최소눈금단위로 판단할 수 있으며 최소눈금단위가 작을수록 측정값의 변화를 더욱 민감하게 반영한다. 얼음분율이 0에서 30%로 변화할 때 온도 계측기, 온라인굴절계, 질량유량계의 최소눈금당

얼음분율 차이는 각각 2.3%, 1.5%, 0.12% 이다.

계측기기의 정확도는 측정값의 오차범위로 판단하며 그 값이 작을수록 좋다. RTD 온도센서는  $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ , 굴절계는  $\pm 0.1$  Brix 그리고 질량유량계는  $\pm 2 \text{ kg/m}^3$ 의 정확도를 가진다. 그러므로 온도, 굴절률과 밀도에 대한 각 측정기기의 얼음분율 측정 오차범위는 각각 4.6%, 3.0%, 4.6%이다.

이상과 같이 정밀도에서는 가장 좋은 분해능을 가지고 있는 밀도측정기가 우수하지만 정확도에서는 가장 적은 오차범위를 가지고 있는 굴절률 측정기가 가장 우수하다.

온도 측정법은 가장 단순하면서도 측정이 용이하나 전기노이즈의 영향과 배관을 흐르는 아이스슬러리의 평균온도를 측정함에 어려움이 있고 분해능과 오차값이 상대적으로 떨어져 정확한 얼음분율 측정에 어려움이 수반된다. 또한 밀도 측정법의 경우 분해능은 우수하나 정확도가 굴절률 측정법에 비해 큰 오차범위를 가지며, 실제 정확한 측정을 위해서는 아이스슬러리의 밀도와 아이스슬러리내 수용액의 밀도를 동시에 측정해야 하므로 측정의 용이함과 정확성이 다소 떨어진다고 볼 수 있다.

반면에 굴절률 측정법의 경우 분해능은 질량유량계와 비교해 다소 떨어지나 가장 작은 얼음분율 오차를 보이므로 얼음분율 측정의 정확도가 세 가지 측정방법 중 가장 우수하다. 또한 온도 측정법처럼 전기노이즈의 직접적인 영향을 받지

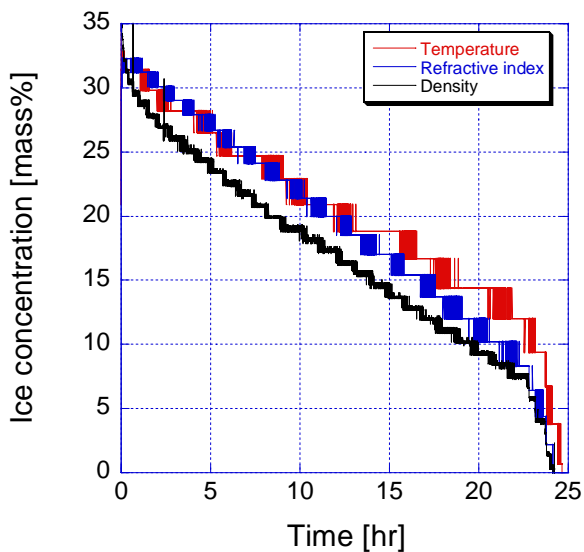


Fig. 5 Time history of ice concentration by method with freezing point, density and refractive index

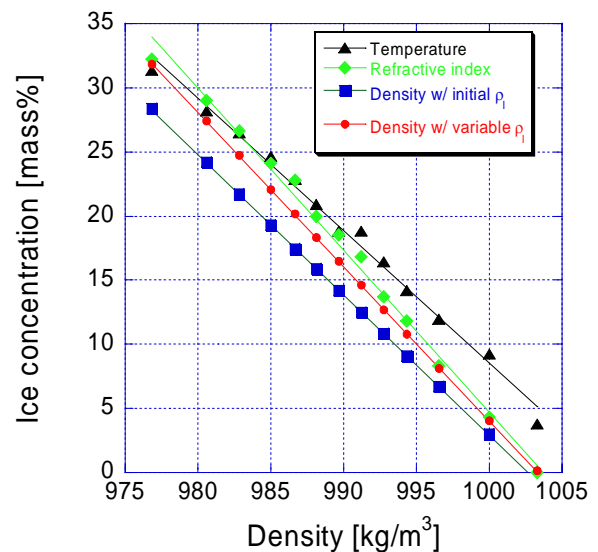


Fig. 6 Relations between the density of ice slurry and the ice concentration

Table 1 Comparison of resolution and accuracy to freezing temperature, brix and density

	Initial state	Final state	Resolution	Ice concentration/ graduation	Accuracy	Error range of ice concentration
Ice concentration [mass%]	0	30	-	-	-	-
Concentration [mass%]	7	10	-	-	-	-
Temperature [°C]	-2.1	-3.4	0.1	2.3%	±0.1	4.6%
Brix	5.6	7.6	0.1	1.5%	±0.1	3.0%
Density [kg/m <sup>3</sup> ]	1004.0	977.9	0.1	0.115%	±2.0	4.6%

않으며, hydro-cyclone을 이용하여 수용액의 굴절률만으로 농도를 산출하므로 밀도 측정법에 비해 배관에 흐르는 아이스슬러리의 얼음분율 측정이 용이하다. 이상과 같이 본 연구에서 적용된 굴절률을 이용한 얼음분율 산출 방법은 측정의 안정성, 용이성 및 정확도에 대해서 하나의 대안이 될 수 있을 것으로 기대된다.

#### 4. 결론

EG 6.64 mass% 수용액의 얼음분율을 동결점, 밀도와 굴절률을 이용하여 산출하였으며 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 동결점을 이용한 측정된 얼음분율은 다른 두 가지 방법과 비교하여 가장 낮은 분해능과 4.6%의 얼음분율 오차범위를 가지고 있어 가장 낮은 정밀도와 정확도를 보였다.

(2) 밀도를 이용한 측정법은 우수한 분해능을 가지고 있으나 초기 수용액의 밀도를 적용한 값이 실시간 수용액의 밀도를 적용한 값에 비하여 ±10% 이상 오차를 보이며, 얼음분율의 오차범위가 굴절률에 비해 1.5배 정도 큰 값을 보여 상대적으로 낮은 정확도를 보였다.

(3) 굴절률을 이용하여 산출한 얼음분율은 밀도를 이용한 측정법에 실시간 수용액의 밀도를 적용한 얼음분율 값과 ±5% 이내에서 일치 하였다.

본 연구에서 배관에 흐르는 아이스슬러리의 얼음분율을 측정하기 위해 제안한 굴절률 측정법은 안정성, 용이성 및 정확성에서 수용액 밀도에 의한 측정법보다 종합적으로 우수하다고 판단된다.

#### 참고 문헌

1. Lee, D. W., Yoon, C., I. and Yoon, E., S., 2002, Experimental study on flow patterns and pressure drop characteristics of ice slurry in small size pipe, Korean Journal of Air Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 14, No. 5, pp. 385-390.
2. Ayel, V., Lottin, O., Popa, E. and Peerhossaini, H., 2005, Using undercooling to measure the freezing points of aqueous solutions, IJR, Vol. 28, pp. 11-20.
3. Peck, J. H., Chung, D. Y., Kang, C. D. and Hong, H., 2005, Measurement of the Ice Packing Factor of an Aqueous Solution using the Index of Refraction, Korean Journal of Air Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 17, No. 11, pp. 1088-1094.
4. Melinder, A. and Granryd, E., 2005, Using property values of aqueous solutions and ice to estimate ice concentrations and enthalpies of ice slurries, IJR, Vol. 28, pp. 13-19.
5. Melinder, A., 1997, Thermophysical properties of liquid secondary refrigerants, IIR, Paris, 1997.
6. Kitanovski, A., Sarlah, A., Poredos, A., Egolf, P. W., Sari, O., Vuarnoz D. and Sletta, J. P., Thermodynamics and fluid dynamics of phase change slurries in rectangular channels, International Congress of Refrigeration 2003, ICR0307