

# IPF 조절기를 이용한 배관내 아이스 슬러리의 빙충전을 제어 권재성, 이윤표<sup>†</sup>, 윤석만<sup>\*</sup>

한국 과학 기술 연구원 에너지 메카닉스 연구센터, <sup>\*</sup>한국 지역 난방공사 지역난방기술연구소

## A Control of Ice Packing Factor of Ice Slurry in a Pipe using IPF Controller

Jae-Sung Kwon, Yoon Pyo Lee<sup>†</sup>, Seok-Mann Yoon<sup>\*</sup>

Energy Mechanics Research Center, Korea Institute of Science and Technology, Seoul, 136-791, Korea

<sup>\*</sup>District Heating Technology Research Institute, Korea District Heating Corp, Seoul, 135-886, Korea

**ABSTRACT:** An experimental study was performed to control Ice Packing Factor (IPF) of ice slurry in a pipe in a real time. This paper presented the concept that IPF can be adjusted by the amount of the solution contained to ice slurry. Based on this concept, we designed IPF controller consisting of the outlet tube providing ice slurry and the upper tube discharging only a solution through holes, and investigated the technical validity and efficiency of the controller experimentally. As a result, the original proposed IPF controller could not control IPF of ice slurry in a pipe. This is because an ice of ice slurry was drained out into not only the outlet but also the upper of the controller due to the size of the holes relatively large compared to the ice particle. Therefore, we changed the hole size of IPF controller surface using fine meshes and then, observed that IPF in a pipe was increased by 4~7 percent when the hole size was 80 $\mu$ m and less.

**Key words:** IPF(빙충전율), Concentration(농도), Ice slurry(아이스 슬러리), IPF controller(빙충전율 조절기), Ice concentration(얼음분율)

### 기 호 설 명

- $A$  : 배관의 단면적 [m<sup>2</sup>]
- $C$  : 수용액 및 얼음의 퍼센트 농도 [%]
- $IPF$  : Ice Packing Factor [-]
- $m$  : 수용액 및 얼음의 질량 [kg]
- $\dot{m}$  : 수용액 및 얼음의 질량 유량 [kg/s]
- $T$  : 온도 [°C]
- $V$  : 수용액 및 얼음의 부피 [m<sup>3</sup>]
- $v$  : 배관 내 수용액 및 얼음의 유속 [m/s]

### 그리스 문자

- $\rho$  : 수용액 및 얼음의 밀도 [kg/m<sup>3</sup>]

### 하첨자

- brine : 브라인 용액
- f : 최종 상태
- i : 초기 상태
- ice : 얼음
- oi : IPF 조절기 출구 측 얼음
- os : IPF 조절기 출구 측 수용액
- slurry : 아이스 슬러리
- sol : 수용액
- ui : IPF 조절기 상부 측 얼음
- us : IPF 조절기 상부 측 얼음

<sup>†</sup> Corresponding author

Tel.: +82-2-958-5672; fax: +82-2-958-5689

E-mail address: yplee@kist.re.kr

- 1 : IPF 조절기 입구와 연결된 배관
- 2 : IPF 조절기 출구와 연결된 배관
- 3 : IPF 조절기 상부와 연결된 배관

### 1. 서론

동적형 빙축열 시스템 중 아이스 슬러리형 빙축열 방식은 제빙기를 이용하여 물 또는 브라인 수용액에 수십  $\mu\text{m}$ 에서 수 mm 정도의 작은 얼음 입자가 섞인 아이스 슬러리를 연속적으로 제빙하고, 이를 축열조에 저장하여 이용하는 방식이다.<sup>(1)</sup> 이러한 방식은 정적형 빙축열 방식에 비해 두꺼운 얼음층이 형성되지 않아 제빙 효율이 높을 뿐만 아니라 용해 속도가 빨라 방냉 효율이 우수하다는 기본적인 장점을 가지고 있다. 또한 제빙 방법이나 첨가제의 종류 및 농도의 조절을 통하여 얼음 입자 크기나 제빙 온도 등을 조절할 수 있으며, 유동성이 있어 필요한 경우 아이스 슬러리를 배관으로 직접 수송할 수 있기 때문에 냉열 수송 및 펌프 동력을 줄일 수 있다는 큰 장점도 가지고 있다.<sup>(2)</sup> 특히 아이스 슬러리 직접 수송 방식은 기존 시스템의 냉방 또는 냉각 용량 확대가 요구될 때 기존의 배관 등을 그대로 사용할 수 있으므로 지역 냉방 시스템에 매우 유용하다.<sup>(3)</sup>

하지만 아이스 슬러리형 빙축열 시스템을 지역 냉방이나 구역형 집단 에너지 시스템(Community Energy System, CES)에 적용하기 위해서는 먼저 몇 가지 문제점들이 해결되어야 한다. 기본적

으로 배관 내 밀폐 없이 아이스 슬러리를 안정적으로 수송할 수 있어야 하며, 시스템 제어 및 냉열 소비량 계측을 위해 실시간 기반의 빙층전율(Ice Packing Factor, 이하 IPF)이 측정되어야 한다. 또한 미래 냉방 수요를 정확히 예측하여 빙축열 시스템을 설계함으로써, 시스템의 냉방 추종성을 보장할 수 있어야 한다.<sup>(4,5)</sup> 이러한 문제점들 중 아이스 슬러리형 빙축열 시스템이 지역 난방에 적용되었을 때 가장 중요하게 고려되어야 할 것은 바로 냉방 수요에 대한 정확한 예측을 기반으로 시스템을 설계하는 일이다. 그러나 계절 및 유동 인구를 포함하여 냉방 수요를 좌우하는 요소들이 많이 있기 때문에, 가변적인 냉방 수요량에 적극적으로 대처할 수 있는 아이스 슬러리형 빙축열 시스템을 설계하는 일은 그리 간단하지 않다. 더욱이 현장에 적용되고 있는 아이스 슬러리형 빙축열 방식에서는 제빙기 입구 측의 수용액 온도, 즉 축열량에 대응하는 설정온도에 도달했을 때 운전을 중지하여 축열조 내 냉열량을 제어하고 있는데<sup>(1)</sup>, 이 냉열 공급 제어 방식은 냉열을 저장하여 이를 수용가까지 공급하는데 많은 시간이 소모될 뿐만 아니라 수반되는 열손실로 인해 실시간으로 변화하는 냉방 수요를 충족시키지 못한다. 따라서 아이스 슬러리형 빙축열 시스템을 이용하여 냉방 부하에 충분한 냉열을 공급하기 위해서는 축열조에서의 IPF를 제어하는 것보다 배관 내 IPF를 제어하는 것이 시스템의 냉방 부하 추종성을 높이는데 유용하다.

본 연구에서는 가변적인 냉방 수요에 탄력적으

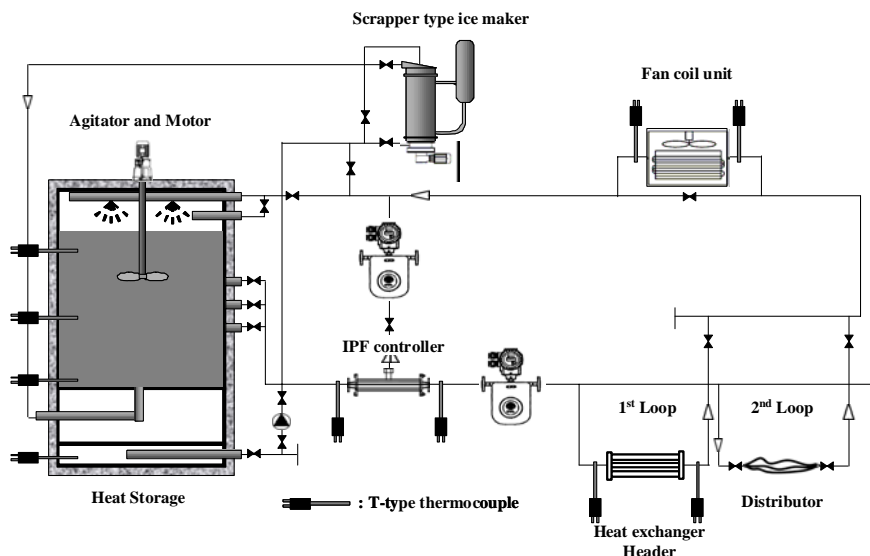


Fig. 1 Schematics of ice slurry experiment system.

로 대처할 수 있는 IPF 제어 개념을 새로이 제안하였으며, 실험을 통해 그것의 기술적인 타당성을 검증하였다. 실험 간 질량 유량계를 이용하여 배관 내 아이스 슬러리 밀도의 변화를 관찰하였고, 그 결과를 기반으로 IPF 조절기에 의해 제어된 배관 내 IPF값을 계산하였다. 그리고 IPF 조절기를 통해 아이스 슬러리가 공급되는 배관과 수용액만 배출되는 배관에서의 IPF를 비교함으로써 IPF 조절기 운용의 효율성을 분석하였다. 또한 IPF 조절기 표면 위의 홀(hole) 크기를 변화시켜 배관 내 IPF를 제어하는 데 적합한 IPF 조절기의 형상을 예측하였다.

## 2. 실험 장치 및 IPF 측정 방법

### 2.1 실험장치

배관 내 아이스 슬러리의 얼음 분율, 즉 IPF(Ice Packing Factor)를 측정하기 위한 실험 장치는 아이스 슬러리를 제조하기 위한 제빙부, 냉열을 저장하기 위한 축열조, 그리고 배관 내 아이스 슬러리의 IPF를 측정하기 위한 측정부로 구성되며, 이를 Fig. 1에 나타내었다.

제빙기는 0.6 RT급의 스크류-스크래퍼형으로 제작되었으며, 제빙시 사용된 수용액은 7%농도의 Propylene Glycol(이하 PG)이다. 약 400kg의 수용량을 가진 축열조는 아크릴 재질로 제작되었고, 냉열 손실을 방지하기 위해 축열조 겉면에 우레탄을 부착하였다. 또한 축열조에 균일한 얼음 입자 분포를 가진 아이스 슬러리를 저장하고, 이를 배관에 공급하기 위해 축열조 상부에 하나의 교반익이 장착된 교반기가 설치되었다.



Fig. 2 IPF controller for adjusting IPF of ice slurry in a pipe: the controller consists of the outlet tube providing ice slurry and the upper tube discharging only a solution through holes).

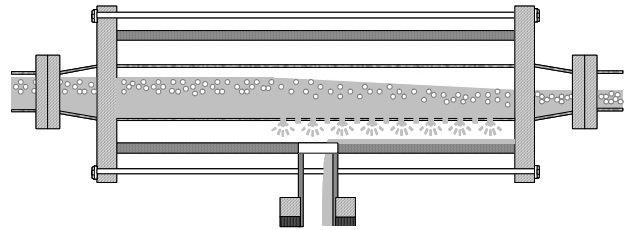


Fig. 3 Conceptual diagram of IPF controller.

측정부에는 IPF 조절기, 질량 유량계, 그리고 온도센서를 설치하였으며, 내경 23mm, 두께 3mm인 폴리에틸렌(Polyethylene)관으로 측정부의 각 부분을 연결하였다. IPF 조절기는 Fig. 2와 같이 아이스 슬러리를 공급하는 관과 수용액을 배출하기 위한 관으로 구성되어 있으며, 수용액을 배출하기 위한 내부관 표면에는 수용액이 유출될 수 있는 직경 6mm크기의 홀이 가공되었다. 이 IPF 조절기의 운용 원리는 Fig. 3과 같으며, IPF 조절기 내부로 아이스 슬러리가 유입되었을 때 얼음을 제외한 수용액만 홀을 통해 배출됨으로써 아이스 슬러리 내 얼음 분율을 상대적으로 높일 수 있다는 개념에 근거한다. 유량 및 밀도를 측정하기 위한 질량 유량계는 OVAL사의 고정도형 Coriolis식 유량계가 사용되었고, IPF 조절기의 출구와 상부에 각각 장착되었다. 실험 간 사용된 온도센서는 -350~200℃의 온도 측정 범위를 가지는 T형 열전대(thermocouple)이며, 측정부에서 계측된 값들은 데이터 수집 장비(Yokogawa사, DA-100) 및 LabView 프로그램을 통해 PC에 저장되었다.

### 2.2 축열조 내 IPF 측정

축열조 내 IPF에 대한 관계식을 얻기 위해서는 먼저 얼음의 질량 분율과 아이스 슬러리의 밀도가 정의되어야 한다. 수용액을 제빙할 때 혼합물인 아이스 슬러리의 얼음과 수용액 2상이 상변화를 수반하여도 순수 PG의 총량은 변하지 않는다는 질량 보존 법칙(mass conservation law)에 근거하여, 얼음 생성 전후의 수용액 농도  $C_i$ 와  $C_f$ 는 각각 식(1)와 (2)로 정의된다.<sup>(1,6)</sup>

$$C_i = \frac{m_{brine}}{m} \quad (1)$$

$$C_f = \frac{m_{brine}}{m - m_{ice}} \quad (2)$$

위 관계식들로부터 얼음의 질량 분율은 다음과 같이 정리된다.

$$C_{ice} = \frac{m_{ice}}{m} = 1 - \frac{C_i}{C_f} \quad (3)$$

한편 축열조 내 아이스 슬러리가 평형상태 (equilibrium condition)에 있고 얼음 입자가 강체 입자(rigid particle)라고 가정하면, 아이스 슬러리의 부피는 수용액의 부피와 얼음 부피의 일차 결합으로 정의되며, 그로부터 아이스 슬러리의 밀도는 식(4)와 같이 표현된다.<sup>(6)</sup>

$$\rho_{slurry} = \frac{1}{\frac{C_{ice}}{\rho_{ice}} + \frac{(1 - C_{ice})}{\rho_{sol}}} \quad (4)$$

따라서 축열조 내 IPF는 식(5)와 같이 얼음의 질량 분율과 얼음 및 수용액의 밀도에 관해 최종적으로 정의된다.

$$IPF = \frac{C_{ice}}{C_{ice} + (1 - C_{ice}) \cdot \frac{\rho_{ice}}{\rho_{sol}}} \quad (5)$$

관계식 내 얼음의 밀도( $\rho_{ice}$ )는  $917 \text{ kg/m}^3$ 이며,

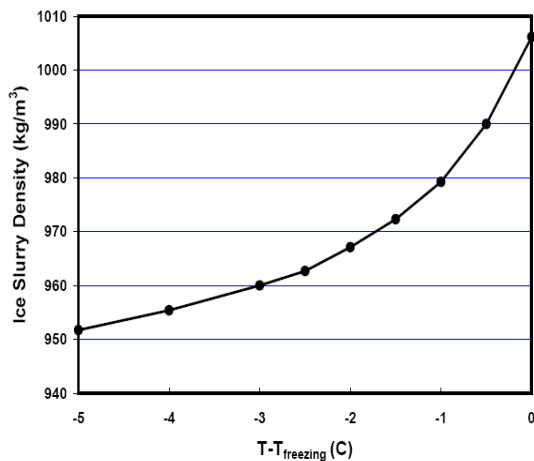


Fig. 4 Ice slurry density with a temperature for propylene glycol(PG) of 7% concentration.

얼음의 질량 분율( $C_{ice}$ )은 Master-BR 부동액 농도계에 의해 측정된  $C_i$ 와  $C_f$ 로부터 얻어진다. 또한  $\rho_{sol}$ 는 아이스 슬러리 내 얼음을 제외한 수용액의 밀도로서, Fig. 3와 식(4)로부터 계산된다.

### 2.3 배관 내 IPF 측정

배관 내 IPF는 관을 흐르는 아이스 슬러리의 유동에 질량 보존 법칙을 적용함으로써 유도될 수 있으며, 그 관계식은 식(6)과 같다.<sup>(1)</sup>

$$IPF = \frac{\rho_{slurry} - \rho_{sol}}{\rho_{ice} - \rho_{sol}} \quad (6)$$

관계식에서  $\rho_{sol}$ 은 수용액의 밀도이며,  $\rho_{slurry}$ 는 아이스 슬러리의 밀도이다. 실험 간 사용된  $\rho_{sol}$ 은 초기 PG 수용액 농도를 기준으로 결정된 동결점에서의 밀도이며,  $\rho_{slurry}$ 는 Coriolis식 질량 유량계로 측정된 아이스 슬러리의 밀도이다.

본 연구에서 IPF 조절기의 출구와 상부에 연결된 관내 IPF는 식(6)으로부터 계산되어 각각  $IPF_2$ ,  $IPF_3$ 로 정의되었던 반면에, IPF 조절기의 입구와 연결된 배관 내  $IPF_1$ 는 출구와 상부에서 측정된 얼음 및 수용액의 질량 유량으로부터 계산되었다.  $IPF_1$ 에 대한 관계식을 유도하기 위해 조절기 입구로 유입되는 아이스 슬러리에 질량 보존 법칙을 적용하면, 그 때의 질량 유량은 식(7)과 같이 조절기의 상부와 출구로 유출되는 얼음 및 수용액의 질량 유량과 동일하다.

$$\begin{aligned} \dot{m}_{slurry} &= (\dot{m}_{oi} + \dot{m}_{os}) + (\dot{m}_{ui} + \dot{m}_{us}) \\ &= \rho_{sol} \cdot (1 - IPF) \cdot v_{sol} \cdot A + \rho_{ice} \cdot IPF \cdot v_{ice} \cdot A \quad (7) \end{aligned}$$

이 때 얼음과 수용액의 유동 속도가 동일하다고 가정하면, 조절기 입구와 연결된 배관에서의 IPF가 아래와 같이 정의된다.

$$IPF = \frac{\rho_{sol}(\dot{m}_{oi} + \dot{m}_{ui})}{\rho_{ice}(\dot{m}_{os} + \dot{m}_{us}) + \rho_{sol}(\dot{m}_{oi} + \dot{m}_{ui})} \quad (8)$$

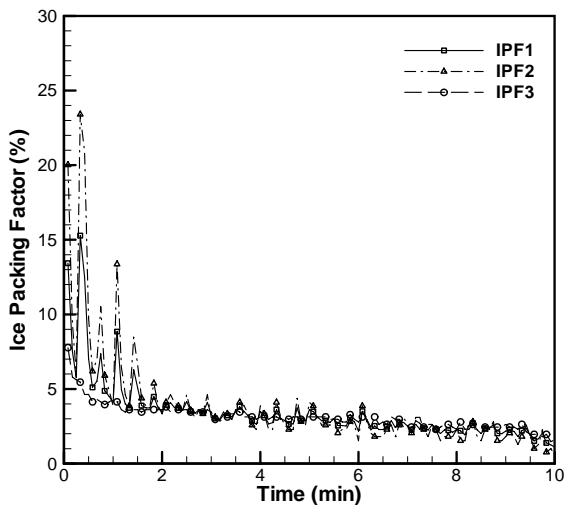
### 3. 실험결과 및 고찰

본 연구에서는 배관 내 아이스 슬러리의 IPF를

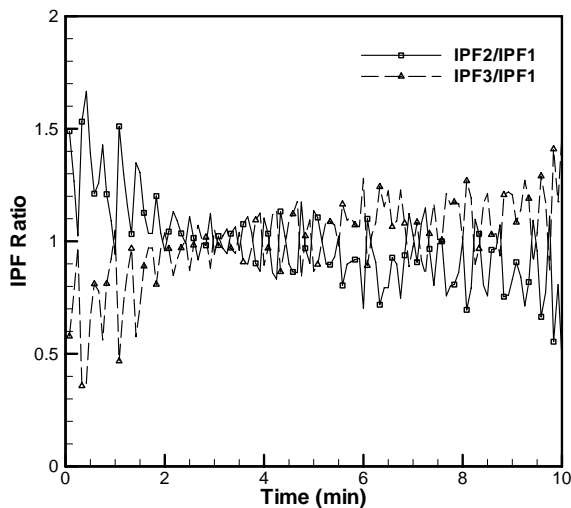
실시간으로 조절하기 위해 IPF 조절기를 제작하였고, 실험을 통해 그것의 기술적인 타당성을 검증하였다.

### 3.1 IPF 조절기에 의한 배관 내 IPF 변화

Figure 5는 IPF 조절기를 통해 제어된 배관 내 IPF의 값을 시간에 따라 나타낸 그림이다. Fig. 5(a)에서 알 수 있듯이 조절기 입구에서 유입되



(a) Ice Packing Factor (%)



(b) IPF ratio (IPF<sub>2</sub>/IPF<sub>1</sub> and IPF<sub>3</sub>/IPF<sub>1</sub>)

Fig. 5 Variation of IPF in a pipe by the original proposed IPF controller without a mesh (IPF<sub>1</sub>, IPF<sub>2</sub>, and IPF<sub>3</sub> are ice packing factors in the pipes linked to inlet, outlet, and of IPF controller, respectively).

는 아이스 슬러리의 IPF와 출구 및 상부로 배출되는 아이스 슬러리의 IPF의 차이는 거의 관찰되지 않는다. 이는 최초 IPF 제어 개념에 근거하여, 조절기 입구에서 유입되는 아이스 슬러리 중 수용액만 조절기 상부관을 통해 배출되어야 하지만, 아이스 슬러리의 입자에 비해 상대적으로 큰 조절기 홀의 크기로 인해 조절기 출구뿐만 아니라 상부로도 많은 얼음이 빠져 나간다는 것을 의미한다. 이러한 사실은 Fig. 5(b)에서 명확히 증명된다. Figure. 5(b)는 조절기 입구 IPF에 대한 조절기 출구 및 상부 IPF의 비율을 시간에 따라 나타낸 그림인데, IPF 조절기 입구에서 유입된 얼음의 양만큼, 상부 배관을 통해서도 그 얼음이 빠져나가고 있음을 보여준다.

### 3.2 IPF 조절기의 홀 크기에 따른 IPF 변화

앞선 실험 결과들은 IPF 조절기 표면에 가공된 홀 크기의 조절을 요구한다. 따라서 본 연구에서는 홀 크기를 조절하기 위해 메쉬(mesh)를 부착하였으며, 그것의 크기는 455 $\mu$ m, 80 $\mu$ m, 그리고 30 $\mu$ m이다. Figure 6은 관 표면의 홀(hole)크기에 따른 배관 내 IPF의 변화를 나타낸 그림이다. 455 $\mu$ m 크기의 메쉬를 사용하였을 경우 메쉬를 부착하지 않았을 때와 거의 차이가 없으며, IPF 조절기에 의해 배관 내 IPF가 조절되지 않는다(Fig. 6(a)). 하지만 80 $\mu$ m의 메쉬를 사용하였을 때에는 조절기 입구, 출구, 그리고 상부 측 IPF가 확연하게 구분되었으며, 상부 배관을 통해 거의 수용액만 배출됨을 확인할 수 있었다(Fig. 6(b)). 마지막으로 Fig. 6(c)와 같이 메쉬의 크기를 줄여 30 $\mu$ m로 하였을 경우에는 Fig. 6(b)와 마찬가지로 IPF의 값들이 구분되었으나, 시간이 지남에 따라 메쉬 표면에 버블(bubble)이 형성되었다. 이것은 메쉬의 크기가 작아짐에 따라 관 표면의 홀에 발생하는 압력이 높아지기 때문이다.

## 4. 결론

본 연구에서는 배관 내 IPF를 실시간으로 제어하기 위해 IPF 조절기를 새롭게 고안하였고, 이것의 기술적인 타당성과 효율성을 실험적으로 알아보았다. 실험으로부터 도출된 결론은 다음과 같다.

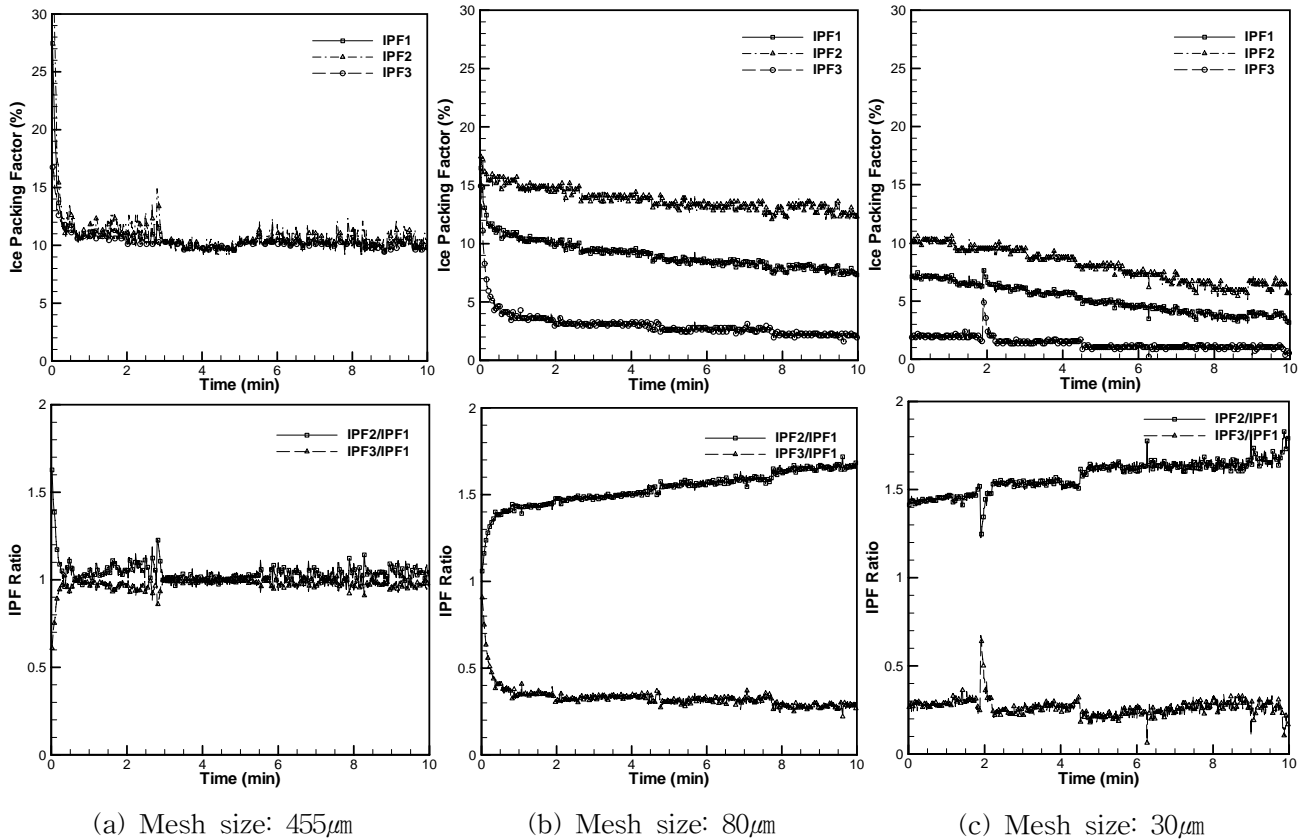


Fig. 6 Relative ratio of IPF in the outlet and upper pipe with respect to the that of the inlet pipe.

(1) 축열조에 IPF 30%의 아이스 슬러리를 저장하고, 조절기에 메쉬를 부착하여 IPF를 제어해 본 결과, 배관 내 아이스 슬러리의 IPF를 4~7% 증가시킬 수 있었다. 따라서 IPF 조절기는 배관 내 IPF를 실시간 제어하는데 유용하다.

(2) 관 표면에 가공된 홀의 크기를 포함하여 IPF 조절기 형상에 대한 추가적인 연구가 이루어진다면 IPF 조절기의 운용 효율성이 향상될 것이다.

(3) IPF 조절기에 대한 연구와 더불어 아이스 슬러리형 빙축열 시스템에서 대표적으로 지적되고 있는 아이스 슬러리 유동 간 관 폐색 현상 및 분기관 내 불균일한 아이스 슬러리 분포 등의 문제점들이 보완된다면 아이스 슬러리형 빙축열 시스템은 지역 냉방 확대 보급에 기여할 수 있다.

## 후 기

본 연구는 한국 지역 난방 공사 지역 난방 기술 연구소의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. Jung, H. W., Peck, J. H., Park, S. S., Kim, Y., Kang, C., and Hong H., 2007, A real time measurement of ice concentration of ice slurry in pipe, Korean Journal of Air Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 19, No. 8, pp. 599-606.
2. Lee, D. W., 2001, Ice slurry type storage system and utilization, The magazine of the SAREK, Vol. 30, No. 6, pp. 21-26.
3. Lee, D. W., 2001, Cold heat transportation using ice slurry, The magazine of the SAREK, Vol. 30, No. 12, pp. 8-14.
4. Fukusako, S., Kozawa, U., Yamada, M. and Tanino, M., 2000, Fundamaental researchs and developments on fine crystalline ice slurries in Japan, Transaction of the JSRAE, Vol 17, Mo. 4, pp. 413-437.
5. Choi, H. W., Kim, K. M., and Park, K. W., 2002, Experimental study on ice-slurry flowing in straight and branch tube, Proceeding of the SAREK, pp. 364-370.
6. Melinder, A, 1997, Thermophysical properties of liquid secondary refrigerants, International Institute of Refrigeration, Paris.