

지역냉방을 위한 아이스슬러리의 연속제조 및 배관내 빙층전을 조절

권재성, 이윤표[†], 이상훈, 유호선*, 윤석만**

한국과학기술연구원, *숭실대학교 기계공학과, **한국지역난방공사 지역난방기술연구소

Continuous Ice Slurry Production and Control of Ice Packing Factor in a Pipe for the District Cooling

Jae-Sung Kwon, Yoon Pyo Lee[†], Sang Hoon Lee, Hoseon Yoo*, Seok-Mann Yoon**

Korea Institute of Science and Technology, Seoul 136-791, Korea

**Department of Mechanical Engineering, Soongsil University, Seoul 156-743, Korea*

***District Heating Technology Research Institute, Korea District Heating Corp, Seoul 135-886, Korea*

(Received October 14, 2008; revision received November 7, 2008)

ABSTRACT: The ice slurry maker which can produce the ice slurry well for the ice particle in-flowing condition was revised. We removed the stagnant region at the top of the ice slurry maker, and IPF 40% could be realized. The IPF controller with 6 mm diameter holes at the bottom was designed. But the IPF controller with only 6 mm diameter holes could not control IPF in a pipe. This is because the ice particles at ice slurry flow exist homogeneously not only at the upper part but also at the bottom part. We changed the hole size of IPF controller surface using fine meshes and then, IPF in a pipe was increased by 70% when the hole size was 80 μ m and less.

Key words: Ice slurry maker(아이스슬러리 제빙기), IPF(빙층전율), Concentration(질량농도), Ice slurry(아이스슬러리), IPF controller(빙층전율 조절기), Ice concentration(얼음 질량분율)

기 호 설 명

A : 배관의 단면적 [m^2]
 C : 브라인 및 얼음의 질량분율
 IPF : Ice Packing Factor, 빙층전율
 m : 브라인 및 얼음의 질량 [kg]
 \dot{m} : 브라인 및 얼음의 질량 유량 [kg/s]
 T : 온도 [$^{\circ}C$]
 V : 브라인 및 얼음의 부피 [m^3]
 v : 배관 내 브라인 및 얼음의 유속 [m/s]

그리스 문자

ρ : 브라인 및 얼음의 밀도 [kg/m^3]

하첨자

i : 초기 상태
 f : 최종 상태
 ice : 얼음
 $slurry$: 아이스슬러리
 sol : 브라인
 1 : IPF 조절기 입구
 2 : IPF 조절기 출구
 3 : IPF 조절기 중간 배출부

[†] Corresponding author

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

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

1. 서 론

동적형 빙축열 시스템 중 아이스슬러리형 빙축열 방식은 정적 빙축열 시스템에 비하여 응답성이 좋다는 점 때문에 대형 전시장 등에 보급되고 있다. 또한 아이스슬러리 자체의 높은 냉열 밀도로 인하여 수송배관이 작아지고 수송동력이 줄어드는 장점 때문에 고밀도 지역냉방의 유력한 후보로 검토되고 있다. 그러나 실제 아이스슬러리를 냉열 수송의 용도로 이용하기 위해서는 얼음 입자가 부유되어 있는 형태로 있어야 하므로 축열조 내 아이스슬러리를 지속적으로 교반함으로써 입자들끼리 부착되는 것을 막아야 한다. 따라서 제빙과정 내내 축열조로부터 상당량의 얼음입자가 제빙기로 유입되는 상황에서도 안정되게 제빙이 가능한 제빙기가 필요하게 된다.

Lee⁽¹⁾는 부하에 대응하여 수송되는 아이스슬러리 내의 얼음의 빙충전율(Ice Packing Factor, 이하 IPF)을 변화시킴으로써 변화하는 부하에 탄력적으로 대응할 수 있는 아이스슬러리 공급시스템을 고안하였다. 방열이 수행됨에 따라 축열조에서의 얼음분율이 지속적으로 감소함에도 불구하고 수요측 부하에 대응하여 가변적인 IPF를 공급하기 위해서는 IPF를 상승시킬 수 있는 조절기가 필요하다. 공급되는 IPF를 조절하는 방법으로 아이스 슬러리를 저장한 축열조의 상, 하부에서 슬러리를 구별하여 방출하는 방법이 시도되었다.⁽²⁾ 그러나 이와 같은 IPF 조절방법은 교반을 통하여 축열조 내의 아이스슬러리의 분포가 상하가 비교적 균일할 때는 별 효과가 없다.

본 연구에서는 제빙기로 얼음입자가 유입되는 상황하에서도 높은 얼음 질량분율을 제조해 낼 수 있는 제빙기와 수송 배관 내 IPF 상승방안에 관하여 연구하였다.

2. 실험 장치

아이스슬러리를 제조하기 위한 장치는 Fig. 1과 같다. 즉 아이스슬러리 제빙부, 냉열을 저장하기 위한 축열조, 그리고 배관 내 아이스 슬러리를 조절하기 위한 IPF 조절기, IPF 측정기로 구성된다.

제빙기는 0.6 RT급의 스크류-스크래퍼형으로 제작되었으며, 제빙 시 사용된 브라인은 7% 농도의 Propylene Glycol(이하 PG)이다. 약 400리터의 수

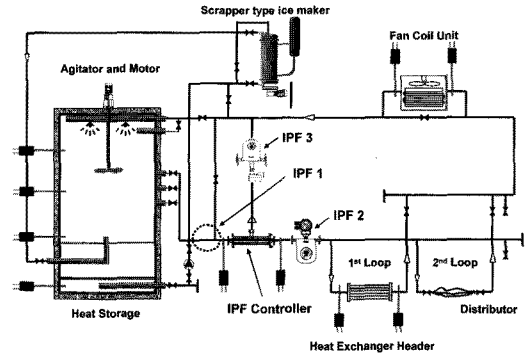


Fig. 1 Schematics of ice slurry experiment system.

용량을 가진 축열조는 아크릴 재질로 제작되었고, 냉열 손실을 방지하기 위해 축열조 겉면에 우레탄을 부착하였다. 또한 축열조에 균일한 얼음 입자 분포를 가진 아이스슬러리를 유지시키기 위하여 축열조 상부에 하나의 교반익이 장착된 교반기가 설치되었다.

3. IPF 측정 방법

축열조 내의 얼음의 질량분율 C_{ice} 는 다음과 같은 방법으로 측정하였다. 얼음 자체는 순수 물로 이루어지므로 얼음이 형성됨에 따라 브라인의 농도는 더욱 진하여 진다는 사실에 근거하여 얼음 생성 전후의 브라인 농도 C_i 와 C_f 는 각각 식(1)와 식(2)로 정의된다.^(3, 4) 이 때, C_i 와 C_f 는 Master-BR 부동액 농도계에 의해 측정한다.

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

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

식(1), 식(2)로부터 축열조의 얼음의 질량분율 C_{ice} 는 다음과 같은 식으로 산출된다.⁽⁵⁾

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

한편, 축열조 내 아이스슬러리가 평형상태(equilibrium condition)에 있다고 가정하면, 아이스 슬

러리의 부피는 브라인의 부피와 얼음부피의 일차 결합으로 식(4)와 같이 정의된다. 식(4)에 식(5)와 식(6)을 대입하여 정리하면, 식(7)과 같이 아이스슬러리의 밀도를 표현할 수 있다.⁽⁴⁾

$$\frac{V_{slurry}}{m_{slurry}} = \frac{1}{m_{slurry}} [V_{ice} + V_{sol}] \quad (4)$$

$$\frac{m_{ice}}{V_{ice}} = \rho_{ice}, \quad \frac{m_{sol}}{V_{sol}} = \rho_{sol} \quad (5)$$

$$m_{slurry} = m_{total}, \quad C_{sol} = 1 - C_{ice} \quad (6)$$

$$\rho_{slurry} = \frac{1}{\frac{C_{ice}}{\rho_{ice}} + \frac{(1 - C_{ice})}{\rho_{sol}}} \quad (7)$$

IPF는 얼음의 체적분율 이므로 식(8)과 같이 정의 할 수 있고, 식(8)의 분자, 분모에 $m_{ice} m_{sol}$ 을 곱하여 정리하면, 축열조 내부의 IPF는 식(9), 와 같이 얼음의 질량분율과 얼음 및 브라인의 밀도로 나타낼 수 있다.

$$IPF = \frac{V_{ice}}{V_{ice} + V_{sol}} = \frac{1}{V_{sol}} / \left(\frac{1}{V_{sol}} + \frac{1}{V_{ice}} \right) \quad (8)$$

$$IPF = \frac{C_{ice}}{C_{ice} + (1 - C_{ice}) \frac{\rho_{ice}}{\rho_{sol}}} \quad (9)$$

배관 내 IPF는 관을 흐르는 아이스슬러리에 대하여 실시간으로 측정하여야 하므로 축열조에서와 같이 농도계로 측정하기 쉽지 않다. 배관내의 유동 중 IPF는 보존 법칙을 적용함으로써 유도될 수 있으며, 그 관계식은 식(10)과 같다.⁽³⁾

$$IPF = \frac{\rho_{slurry} - \rho_{sol}}{\rho_{ice} - \rho_{sol}} \quad (10)$$

식(10)에서 ρ_{slurry} 는 Coriolis식 질량 유량계로 측정된 아이스슬러리의 밀도이며 얼음의 밀도, ρ_{ice} 는 917 kg/m³를 대입하였다. 한편 ρ_{sol} 은 각 PG 브라인 농도에 따른 동결점에서의 브라인의

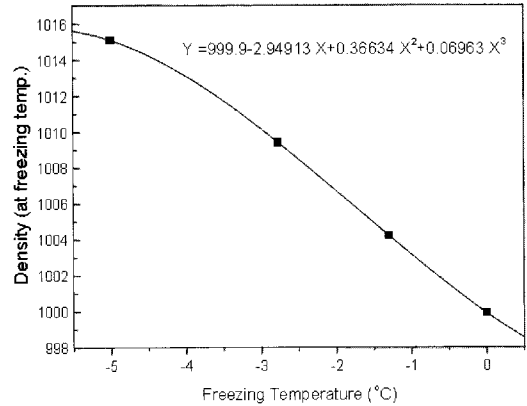


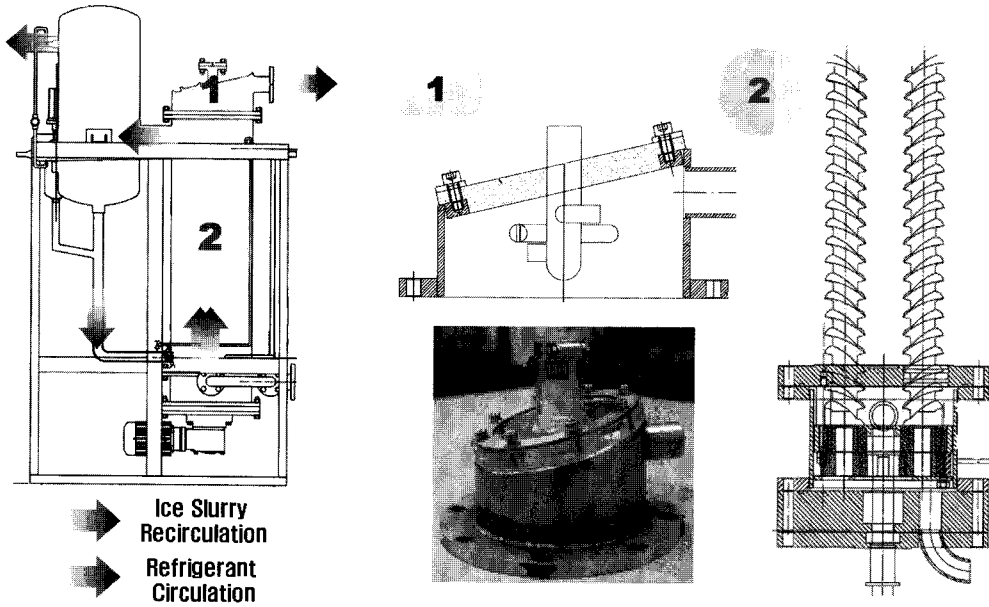
Fig. 2 Solution density at freezing temperature.

밀도인데 유동의 온도를 측정 한 후 그 온도에서 얼음과 브라인이 공존하므로 이 온도를 동결점으로 하는 PG 브라인 농도에 해당하는 브라인 밀도 Fig. 2를 대입하였다.

4. 제빙기의 개량

축열 만을 목적으로 하는 아이스슬러리 제빙기는 축열조에서 얼음입자를 균일하게 유지시킬 필요가 없으므로 축열조에서 쉽게 얼음입자가 배제된 브라인만을 제빙기로 보내어 아이스슬러리를 제조할 수 있다. 그러나 아이스슬러리를 이용한 지역냉방에서는 아이스슬러리가 그대로 수송되어야 하므로 축열조에서 얼음입자가 브라인에 가급적 균일하게 분포되고 있어야 한다. 따라서 제빙과정에서도 제빙기 내로 상당량의 얼음입자가 연속적으로 유입되고 있는 상태에서 더 높은 얼음의 IPF를 생성해낼 수 있는 제빙기가 필요하게 된다.

Fig. 3은 실험에 사용된 제빙기의 세부 도면 및 상부 수실을 보여준다. 냉매(R-22)는 셸(shell)-튜브(Tube)형태의 증발기 내에서 셸을 통과하고, 만액식 충전기를 통해 일정한 수위를 가지며 순환을 한다. 7% 농도의 PG 브라인은 제빙기 하부를 통해 증발기 내 튜브로 공급되며, 냉매와의 열교환 후 상부 수실을 지나 축열조로 유출된다. 이러한 과정이 반복 되면서 브라인의 온도가 어느 점 이하로 내려가면 튜브 벽면에 얼음이 생성되며, 설치된 스크류 형상의 스크래퍼(Scraper)에 의해 아이스슬러리 형태로 바뀌어져 상부 수실을



(a) Flow chart of refrigerant and ice slurry circulation

(b) Top chamber and screw of ice slurry maker

Fig. 3 Schematic Diagram of the Ice slurry maker.

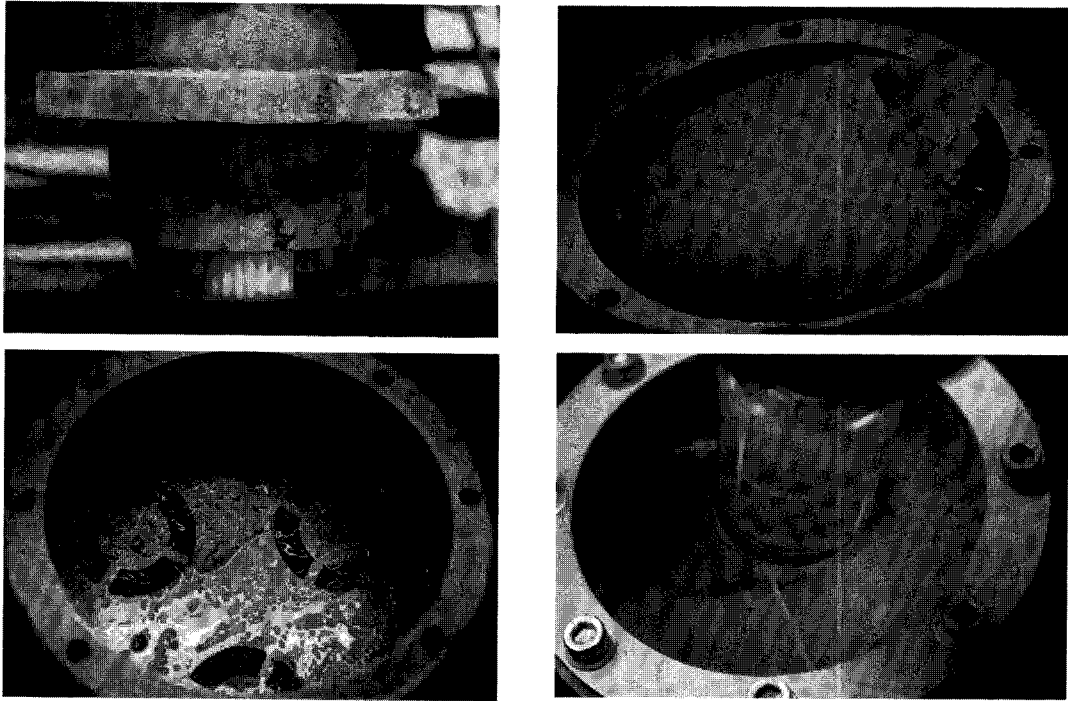


Fig. 4 Occurrence of the overload at the motor due to the freezing phenomena at the top chamber.

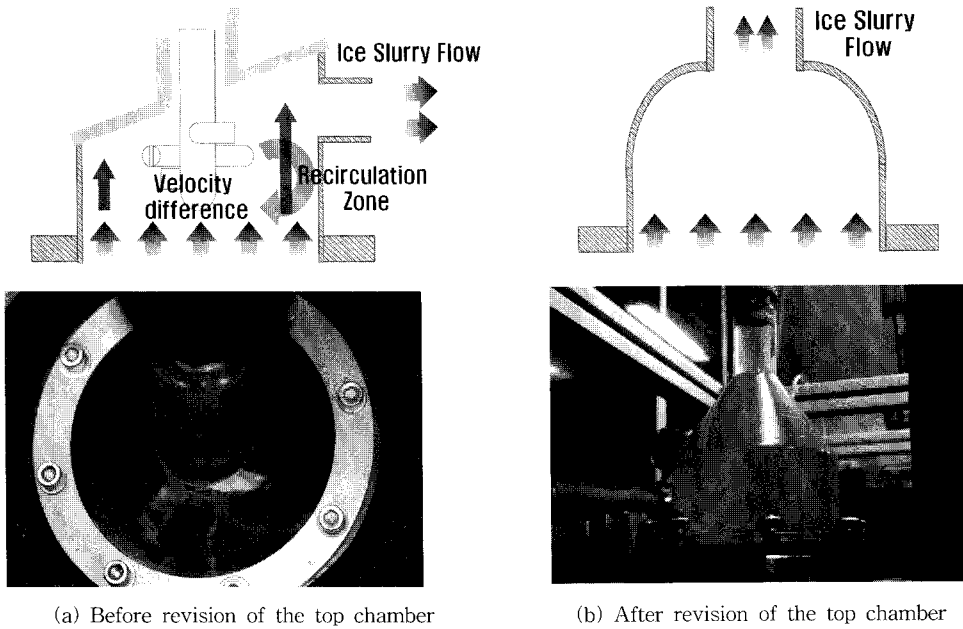


Fig. 5 Before and After revision of the top chamber in the ice slurry maker.

지나 축열조로 밀려나가게 된다. 그런데 축열조 내 얼음의 함량이 낮은 상태에서는 제빙기가 계속적인 냉매와의 열교환을 통해 일정한 아이스슬러리를 생성할 수 있었다. 그러나 축열조 내 얼음의 질량분율이 25%에 도달한 이후부터는 제빙기 상부 수실 내 아이스슬러리의 결빙 현상으로 인해 제빙 모터에 과부하가 발생하게 되어 더 이상 아이스슬러리를 제조할 수 없었다(Fig. 4 참조). 이 문제는 최초에 설계된 Fig. 3(b)의 상부 수실의 구조에 기인한 것으로서, 냉매와의 열교환 및 스크래퍼에 의해 제빙된 아이스슬러리가 상부 수실을 통해 빠져 나가야 함에도 불구하고, 수실 출구에서의 정체구간(Stagnation region)으로 인해 그 유동이 정체된다. 이 정체 구간은 제빙 초기에 IPF가 높지 않을 때는 별 문제없이 아이스슬러리가 토출되나 어느 정도 IPF가 증가하면 아이스슬러리의 점성증가로 정체가 심해지고 흐름이 늦어지게 되면 이로 인해 공급되는 브라인 용액이 적어져서 냉매에서 빼앗아 가는 열량이 유입되는 용액에 필요한 양보다 많아지는 순간이 발생하게 된다.

이 현상이 일단 발생하면 IPF 함량이 더욱 증가되고 아이스슬러리의 유동이 더욱 느려져 공급되는 유량은 더욱 적어지고 이후, 더욱 빠르게

얼음의 함량이 높아져 결국은 전체 튜브가 결빙됨으로써 모터에 과부하가 걸리는 현상을 발견할 수 있었다. 이와 같은 모터 과부하를 방지하기 위해서는 (1) 흐름의 정체를 피하거나 (2) 점성증가에도 불구하고 유입유량이 급격히 줄어드는 순간을 피하기 위해 축열조에서 제빙기 튜브 내부로의 용액 순환에 필요한 펌프의 동력을 충분하게 설정하여 주어야 한다.

본 연구에서는 상부 수실의 형상을 개선함으로써(Fig. 5 참조), 별도의 펌프동력 증가없이 축열조 내부의 IPF가 40%에 도달할 때까지 연속적으로 제빙을 이룰 수 있었다.

5. IPF 조절방법

IPF 조절기는 아이스슬러리를 공급하는 관과 얼음입자가 비중 차에 의하여 브라인 상단에 분포할 것으로 예상하여 하부에 얼음이외의 브라인을 배출함으로써 IPF를 증가시킬 수 있도록 Fig. 6과 같이 하부에 직경 6 mm 크기의 홀(hole)을 가공하였다. 유량 및 밀도를 측정하기 위한 질량유량계는 OVAL사의 고정도형 Coriolis식 질량유량계가 사용되었고, 질량유량계는 IPF 조절기의 하류 단(IPF 2)과 직경 6 mm의 홀로 빠져나가는

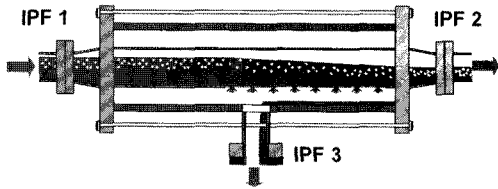


Fig. 6 Conceptual diagram of IPF controller.

브라인에 혹시 함유되었을 수도 있는 얼음입자 함량을 측정하기 위해 브라인이 빠져나가는 경로(IPF 3)에 설치하였다. 반면, IPF 조절기의 입구와 연결된 배관 내의 IPF는 출구와 중간에서 측정된 얼음 및 브라인의 질량 유량으로부터 계산하였다(IPF 1).

실험에서 사용된 온도센서는 T형 열전대(thermocouple)이며, 측정부에서 계측된 값들은 데이터 수집 장비(Yokogawa사, DA-100) 및 LabView 프로그램을 통해 PC에 저장되었다.

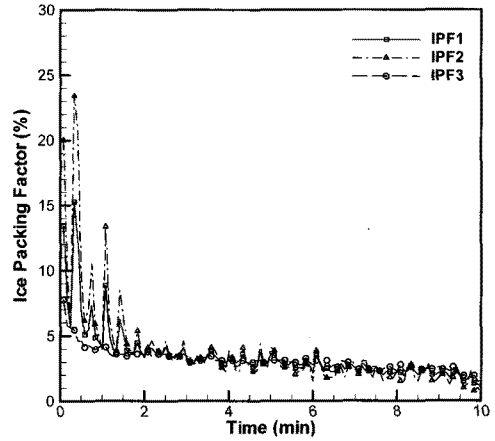
6. 실험결과 및 고찰

6.1 IPF 조절기에 의한 배관 내 IPF 변화

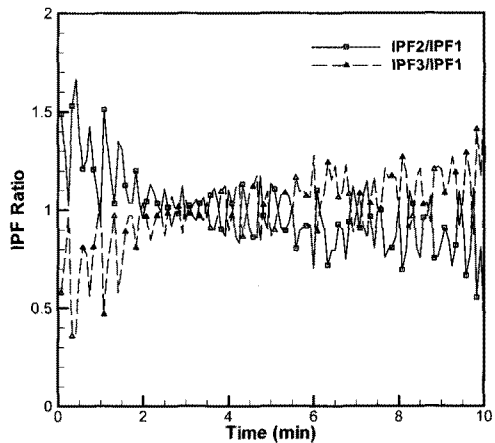
Fig. 7은 IPF 조절기를 통해 조절된 배관 내 IPF의 값을 시간에 따라 나타낸 그림이다. Fig. 7(a)에서 알 수 있듯이 조절기 입구로 유입되는 아이스 슬러리의 IPF 1과 하류 IPF 2 및 중간에서 배출되는 아이스 슬러리의 IPF 3의 차이는 거의 관찰되지 않는다. Fig. 7(b)는 조절기 입구 IPF 1에 대한 조절기 하류의 IPF 2 및 중간의 IPF 3의 비율을 시간에 따라 나타낸 그림이다. IPF 조절기 입구에서 유입된 얼음의 양만큼, 중간배관을 통해서도 얼음이 빠져나가고 있음을 보여준다. 이는 PG 7% 브라인으로 본 연구의 제빙기로 제조된 아이스 슬러리의 입자가 유동의 상부에 치우치지 않고 배관 하부에도 상당부분 존재하기 때문에 하부에 뚫어놓은 직경 6mm 배관으로도 많은 얼음입자가 빠져 나가기 때문이다.

6.2 IPF 조절기의 홀 크기에 따른 IPF 변화

아이스슬러리 컨트롤러의 홀 크기를 조절하기 위해 메쉬(mesh) 크기 455 μm , 80 μm , 그리고 30 μm 의 스크린 메쉬를 홀 밖에 밀착시켜 설치하였다.



(a) Ice Packing Factor(%)



(b) IPF ratio(IPF 2/IPF 1 and IPF 3/IPF 1)

Fig. 7 Variation of IPF in a pipe by the original proposed IPF controller without a mesh (IPF1, IPF2 and IPF3 are ice packing factors in the pipes linked to inlet, outlet and of IPF controller, respectively).

Fig. 8은 관 표면의 홀 크기에 따른 배관 내 IPF의 변화를 나타낸 그림이다. 455 μm 크기의 메쉬를 사용하였을 경우 메쉬를 부착하지 않았을 때와 거의 차이가 없으며, IPF 조절기에 의해 배관 내 IPF가 조절되지 않는다(Fig. 8(a) 참조). 하지만 80 μm 의 메쉬를 사용하였을 때에는 조절기 입구, 출구, 그리고 상부 측 IPF가 확연하게 구분되었으며, 상부 배관을 통해 거의 브라인만 배출됨을 확인할 수 있었다(Fig. 8(b) 참조). 마지막으로

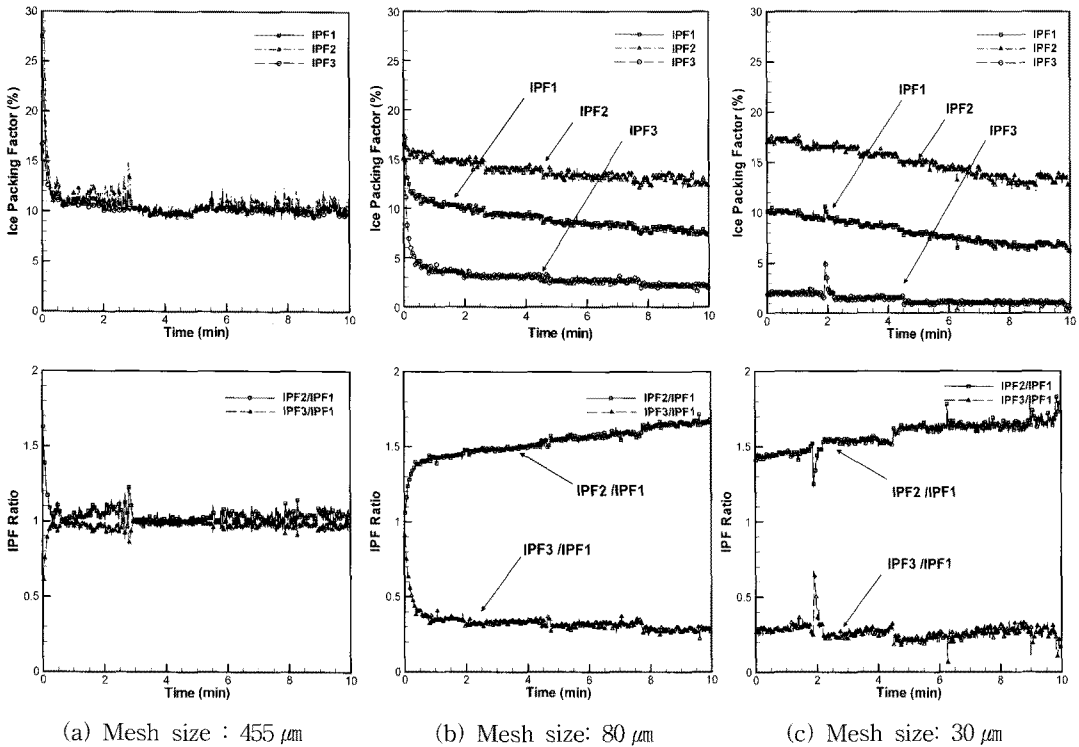


Fig. 8 Relative ratio of IPF in the outlet and upper pipe with respect to the that of the inlet pipe.

Fig. 8(c)와 같이 메쉬의 크기를 줄여 $30\ \mu\text{m}$ 로 하였을 경우에는 Fig. 8(b)와 마찬가지로 IPF의 값들이 구분되었으나, 시간이 지남에 따라 메쉬 표면에 기포(bubble)가 형성되었다. 이것은 메쉬의 크기가 작아짐에 따라 관 표면의 홀에 발생하는 압력이 높아지기 때문으로 나타나는 현상으로 사료된다. 이와 같이, $80\ \mu\text{m}$ 이하의 메쉬에 의해 IPF를 증가시킬 수 있었는데 이는 본 연구와 같은 스크레퍼형 제빙기에서 제조된 얼음입자의 크기가 $80\ \mu\text{m}$ 이상이라는 선행연구⁽¹⁰⁾의 결과로부터 예상할 수 있는 결과로써 $80\ \mu\text{m}$ 이상의 대부분의 얼음입자가 $80\ \mu\text{m}$ 이하의 스크린 메쉬에서 걸러지기 때문이다. 축열조 얼음의 질량분율 30%의 경우 IPF 조절기로 유입되는 IPF가 10%인 경우 조절기를 거친 후의 최대 IPF를 17%까지 증가시킬 수 있었다.

7. 결 론

본 연구에서는 아이스 슬러리 수송을 위해 제빙

기를 개조 하였으며, 배관 내 아이스 슬러리의 IPF를 실시간으로 조절하기 위해 IPF 조절기를 제작하였고, 실험을 통해 그것의 타당성을 검증하였다. 본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 지역냉방에 아이스슬러리를 적용하기 위해선 축열조 내 아이스슬러리가 축열조 내 고르게 얼음입자의 상태로 존재하고 있어야 하는데, 제빙기 출구의 정체구간을 없앴으로써 제빙기로 얼음입자가 유입되는 상황에서 IPF 40%까지 제빙이 가능하였다.

(2) IPF 조절기에 메쉬를 부착하여 IPF를 조절해 본 결과, IPF 조절기로 유입되는 아이스 슬러리의 IPF가 10%일 때 조절기를 거친 후 최대 17%까지 IPF를 70% 향상시킬 수 있었다.

후 기

본 연구는 한국지역난방공사의 연구용역으로 수행된 연구결과와 일부이며 관계자에게 감사드립니다.

참고문헌

1. Lee, Y.P., 2007, A wide area energy network by a flexible trigeration, Proceeding of the SAREK 2007 Summer Annual Conference, pp.1055-1060.
2. Tomiyama, Y., 2007, Dynamic Ice storage and transportation system, Refrigeration magazine, Vol. 82, No. 955. pp. 379-383.
3. 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.
4. Melinder, A., 1997, Thermophysical properties of liquid secondary refrigerants, International Institute of Refrigeration, Paris.
5. Peck, J., Chung, D., Kang, C. 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.
6. Lee, D.W., 2001, Ice slurry type storage system and utilization, The magazine of the SAREK, Vol. 30, No. 6, pp. 21-26.
7. Lee, D.W., 2001, Cold heat transportation using ice slurry, The magazine of the SAREK, Vol. 30, No. 12, pp. 8-14.
8. 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.
9. 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.
10. Lee, D.W., Yoon, C.I. and Yoon, E. S., 2002, Experimetal Study on Flow Patterns and Pressure Drop Characteristics of Ice Slurry in Small Size Pipe(1), Korean Journal of Air Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 14, No. 5, pp. 385-390.