

# 지역냉방용 아이스슬러리 수송시스템의 배관방식에 따른 특성

이 윤 표<sup>†</sup>, 정 재 동<sup>\*</sup>, 윤 석 만<sup>\*\*</sup>

한국과학기술연구원 열유동제어연구센터, <sup>\*</sup>세종대학교 기계공학부, <sup>\*\*</sup>한국지역난방공사 연구개발실

## Characteristics of the Ice Slurry Transportation System for District Cooling Depending on the Transportation Lines

Yoon Pyo Lee<sup>†</sup>, Jae Dong Chung<sup>\*</sup>, Seok-Mann Yoon<sup>\*\*</sup>

*Thermal/Flow Control Research Center, Korea Institute of Science and Technology, Seoul 136-791, Korea*

*<sup>\*</sup>Mechanical Engineering Department, Sejong University, Seoul 143-737, Korea*

*<sup>\*\*</sup>R&D Division, Korea District Heating Corp., Seoul 135-886, Korea*

*(Received February 28, 2006; revision received May 12, 2006)*

**ABSTRACT:** The characteristics of ice packing factor (IPF) at the ice slurry system using one line type are compared with the system using two lines type. The installation space for one transporting line is saved at the one line system. For the one line type, the ice packing factor is reduced along the downstream, but for the two lines type, the ice packing factor is fixed. For the one line system, mass flow rate in the main line is fixed along the downstream, but for two lines system, the mass flow rate in the main line is reduced along the downstream. For one line system, along the down stream after IPF=0, the temperature at the main steam is increased, and the extracted mass flow is increased.

The initial IPF, at which the IPF is not arrived at zero upto the final node, is proposed for the B area.

**Key words:** Ice slurry(아이스슬러리), District cooling(지역냉방), IPF(Ice Packing Factor), One line type(1배관방식), Two lines type(2배관방식)

### 기 호 설 명

$c_p$  : 정압비열 [kJ/(kg·°C)]

$h$  : 엔탈피 [kJ/kg]

$h_f$  : 융해, 응고잠열 [kJ/kg]

$M$  : 주배관에서의 수송 질량유량 [kg/s]

$m$  : 분기관에서의 분기되는 질량유량 [kg/s]

$Q$  : 주배관에서의 수송냉열 [W]

$q$  : 분기관에서의 분기되는 냉열 [W]

$T$  : 온도 [°C]

$x$  : 빙층전율, IPF

### 하첨자

$i$  : 분기지점

$r$  : 회수관

<sup>†</sup> Corresponding author

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

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

### 1. 서 론

최근에는 100층 가까이 되는 초고층 건물이 건

설되고 있으며 이와 같은 추세는 더욱 증가할 것이다. 동일한 열량을 수송할 때 냉방에 필요한 배관크기는 난방보다 커지므로 배관의 설치공간 및 설치비가 과다하다. 또한 냉수순환을 위한 파이프 및 순환냉수량의 무게 또한 무시할 수 없다. 초고층 빌딩의 경우 배관에 소요되는 공간이 최소화되어야 하며 배관 수 자체도 최소화되어야 한다.

행정수도 이전 등 최근 신도시 건설수요가 급증하고 있다. 신도시를 건설할 때 전시설, 백화점, 은행 등이 집중하여 건설되도록 계획하고 있다. 또한 최근에는 일정거리 떨어진 곳에서 냉수를 생산하여 수요처로 수송하는 지역냉방이 보급되고 있다. 그러나 지역냉방에서 전체 비용 중에서 배관의 설치비와 관련한 비용이 높은 비중을 차지할 뿐만 아니라 배관을 설치할 수 있는 공간 자체를 확보하기가 쉽지 않다.

따라서 배관의 단면적을 줄이는 것과 함께 배관 수 자체를 줄일 수 있는 공법은 매우 매력적이라 할 수 있다.

공급관과 회수관을 이용한 아이스슬러리 수송에 대하여서는 다양한 연구가 수행되었다.<sup>(1-4)</sup> 또한 단일배관을 이용한 아이스슬러리 수송시스템은 일본의 Capcom 빌딩에 적용된 예가 있으나<sup>(5)</sup> 지역냉방에 대하여 단일관을 이용한 아이스슬러리 적용설계는 수행된 바가 없다.

본 연구에서는 1배관방식과 2배관방식을 지역냉방에 적용하여 각 node당 일정한 냉열량이 필요로 할 때 주 배관의 유량, 주배관의 냉열 열용량, 주배관 단면적 등을 비교하였다. 특히 최종단까지 가기 전 중간 node에서 IPF가 0이 되는 지점이 발생하는 경우, 그 전후 node에서의 온도변화를 살펴보았다.

이로부터 1배관방식을 국내 한 지역에 적용하여 마지막 단까지 IPF 값이 양수가 되는 초기 IPF 값을 도출하였고, 이로부터 각 node에서의 IPF와 추출되는 질량유량을 도출하였다. 또한 1배관방식과 2배관방식의 주배관 면적에 대하여 비교하였다.

## 2. 아이스슬러리의 특징

냉방전달물질의 열용량을 상승시키는 방법은 물에 얼음을 섞은 아이스슬러리를 만들어 수송하는

것이다. 열용량은 다음 식(1)에 의하여 계산된다.

$$Q_i = M_i c_p (T_r - T_i) + M_i x_i h_f \quad (1)$$

3°C 공급 13°C 회수의 냉수공급의 경우 1,000 kJ/s의 냉열을 수송하는데 23.9 kg/s의 질량유량을 공급하여야 한다. 반면 프로필렌글리콜 7%를 첨가하여 제조된 아이스슬러리는 얼음이 녹으면서 IPF가 변화하여도 얼음의 잠열이 매우 크므로 공급온도는 -2°C로 유지된다.<sup>(5,6)</sup> 따라서 아이스슬러리 지역냉방시스템은 공급온도와 회수온도차이를 뿐만 아니라 수송얼음의 잠열을 이용할 수 있다. 따라서 10.4 kg/s의 질량유량만을 공급하여도 되므로 수송질량이 약 44%로 대폭 감소한다.

## 3. 아이스슬러리 수송 배관구성방법

Fig. 1은 2배관방식 및 1배관방식 아이스슬러리 수송시스템의 개념도를 나타낸다. 즉, 일반적인 배

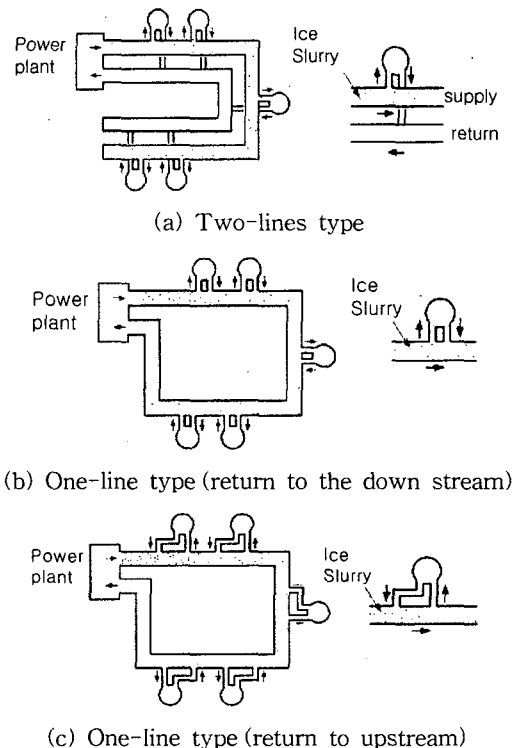
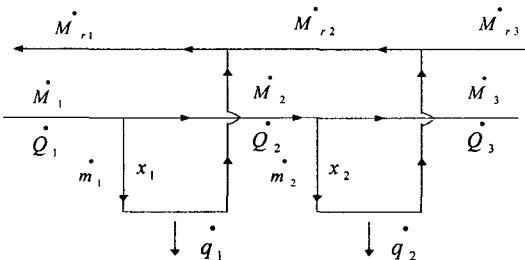


Fig. 1 Conceptual diagram depending on the ice slurry transporting lines.

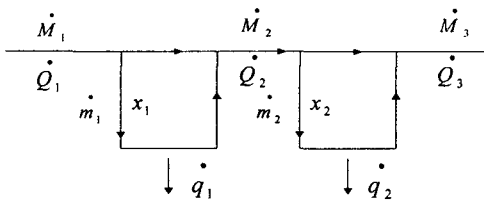
관방식인 2배관방식은 Fig. 1의 (a)에서와 같이 공급 및 회수 2개의 배관이 있으며 공급배관에서 분기된 아이스슬러리가 수요측에 냉열을 공급하면서 아이스슬러리 내의 얼음이 모두 녹은 후 냉수의 온도가 상승하여 회수측 배관으로 돌아오게 된다. 이에 반하여 1배관방식은 Fig. 1의 (b)와 같이 공급 및 회수를 구분하지 않고 1개의 관에서 아이스슬러리가 분기되면서 수송가에 공급되어 아이스슬러리 내의 얼음이 녹은 후 냉수의 온도가 상승하여 다시 공급관으로 돌아오게 된다. 이때 (b)와 같이 아이스슬러리를 공급하고 분기된 지점의 하류로 돌아오게 하는 방법과 (c)와 같이 아이스슬러리를 공급하고 분기된 지점의 상류로 회귀하는 방법 등이 있다.

**4. 배관방식에 따른 각 node에서 아이스슬러리 질량유량, IPF, 추출냉열량 산출**

각 배관방식에 따른 아이스슬러리 수송 특성을 비교하기 Fig. 2의 2배관방식 및 1배관방식에 대하여 추출열량 및 분기유량을 고정하고 IPF 및 분기관의 질량유량 등을 계산하였다.



(a) Branched mass flow rate, cooling rate at the each node (two-lines type)



(b) Branched mass flow rate, cooling rate at the each node (one-line type)

Fig. 2 Mass flow rate, cold heat rate depending on the transporting systems.

**4.1 2배관방식**

공급관과 회수관이 있는 2배관방식의 경우 공급관에서 일정량의 아이스슬러리가 추출되어 수송가에 냉열을 공급한 후 온도가 상승되어 돌아온 온수는 회수관으로 돌아온다. 계산은 질량유량 중 얼음질량이 차지하는 비율, 즉 IPF가 양인 경우와 얼음이 다 녹아 IPF=0인 두 경우로 나누고 다음과 같은 절차에 의해 산출된다.

- ① given  $M_i, x_i, T_i \rightarrow$  calculate  $Q_i$

$$Q_i = M_i c_p (T_r - T_i) + x_i M_i h_f$$

- ② given  $q_i \rightarrow$  calculate  $m_i$

$$q_i = \begin{cases} m_i c_p (T_r - T_i) + x_i m_i h_f & x_i > 0 \\ m_i c_p (T_r - T_i) & x_i = 0 \end{cases}$$

- ③ calculate  $Q_{i+1}(=Q_i - q_i)$  and  $M_{i+1}(=M_i - m_i)$

- ④ assume  $T_{i+1} = T_i$  and calculate  $x_{i+1}$

$$Q_{i+1} = M_{i+1} c_p (T_r - T_i) + x_{i+1} M_{i+1} h_f$$

- ⑤ if  $x_{i+1} < 0$ , let  $x_{i+1} = 0$  and calculate  $T_{i+1}$

$$Q_{i+1} = M_{i+1} c_p (T_r - T_i)$$

위 식에서  $Q_i$ 는 i node에서 주배관의 주유동에 함유된 열량을 말한다.  $q_i$ 는 i node에서 분기되는 열량을 말하며 또한  $M_i$ 는 i node에서 주배관에서의 질량유량을,  $m_i$ 는 i node에서 분기되는 질량을 말한다. 계산방법을 설명하면 다음과 같다.

- ① 공급관에서의 온도, 유량, IPF가 주어지면 공급냉열을 산출한다.
- ② 각 node당 일정하게  $q_i$ 의 열량이 추출되어 수송가에 공급된다. 초기 아이스슬러리의 공급 온도는  $-2^\circ\text{C}$ 이며 냉열을 사용하고 귀환하는 온도는  $13^\circ\text{C}$ 로 일정하게 고정된다.
- ③  $q_i$ 의 열량이 사용된 후 사용되고 온도가 상승한 유체가 회수관으로 복귀하므로 주 공급관의 열량 및 유량은 줄어든다.
- ④ 줄어든 열량으로부터 i+1 node의 IPF를 산출한다.
- ⑤ 만약 IPF가 0보다 적을 경우 주배관에서 얼음이 다 녹았다는 것을 의미하는데 이후부터는 현열전달만으로 주배관의 온도를 구한다.

4.2 1배관방식

1배관방식은 주배관에서 수용가에 필요한 열량이 추출되어 공급된 후 다시 주배관으로 돌아오는 형태이다. 그 계산방법은 다음과 같다.

주배관에서의 냉열량은 다음과 같이 산출된다.

- ① given  $M_i, x_i, T_i \rightarrow$  calculate  $Q_i$

$$Q_i = M_i c_p (T_r - T_i) + x_i M_i h_f$$

- ② given  $q_i \rightarrow$  calculate  $m_i$

$$q_i = \begin{cases} m_i c_p (T_r - T_i) + x_i m_i h_f & x_i > 0 \\ m_i c_p (T_r - T_i) & x_i = 0 \end{cases}$$

- ③ calculate  $Q_{i+1} (= Q_i - q_i)$  and  $M_{i+1} (= M_i)$

- ④ assume  $T_{i+1} = T_i$  and calculate  $x_{i+1}$

$$Q_{i+1} = M_{i+1} c_p (T_r - T_{i+1}) + x_{i+1} M_{i+1} h_f$$

- ⑤ if  $x_{i+1} < 0$ , let  $x_{i+1} = 0$  and calculate  $T_{i+1}$

$$Q_{i+1} = M_{i+1} c_p (T_r - T_{i+1})$$

계산방법을 설명하면 다음과 같다.

- ① 공급관에서의 온도, 유량, IPF가 주어지면 공급냉열을 산출한다.
- ② 각 node당 일정하게  $q_i$ 의 열량이 추출되어 수용가에 공급된다. 초기 아이스슬러리의 공급온도는  $-2^\circ\text{C}$ 이며 냉열을 사용하고 귀환하는 온

도는  $13^\circ\text{C}$ 로 일정하게 고정된다.

- ③  $q_i$ 의 열량이 사용된 후 다시 공급관으로 복귀하므로 공급관의 유량은 일정하지만 열량은 줄어든다.
- ④ 줄어든 열량으로부터  $i+1$  node의 IPF를 산출한다.
- ⑤ 만약 IPF가 0보다 적을 경우 이 경우는 주배관에서 얼음이 다 녹았다는 것을 의미하는데 이후부터는 주배관의 온도를 구하여야 한다. 위 식에서 IPF가 양수인 경우  $-2^\circ\text{C}$ 로 고정하였으며 초기의 IPF는 10%로 고정하였다.

4.3 비교 검토

Fig. 3은 2배관의 경우의 주배관에서 질량유량 및 수송냉열을 나타내고 있다. 일정량의 냉열이 수용가로 공급된 후 공급관이 아닌 별도의 회수관을 통하여 회수되므로 공급 주배관의 질량유량 및 수송냉열은 선형적으로 줄어들고 있음을 보여주고 있다.

이에 반하여 Fig. 4는 단일배관의 경우 주배관에서의 질량유량 및 수송냉열을 나타내고 있다. 일정량의 냉열이 수용가로 공급된 후 다시 주배관으로 회수되므로 공급 주배관의 질량유량은 그대로 있으나 수송냉열은 선형적으로 줄어들고 있음을 보여주고 있다.

Fig. 5는 1배관방식에서 주배관에서의 IPF와 온도를 나타내주고 있다. 1배관방식에서는 수용가에

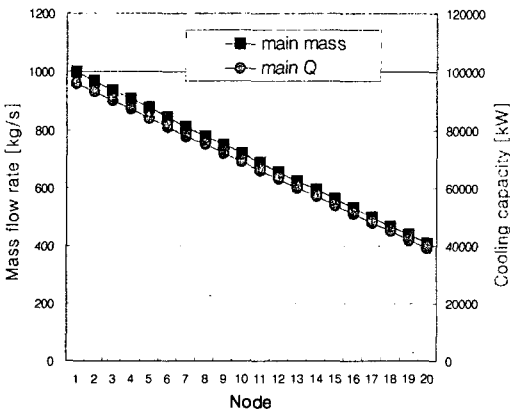


Fig. 3 Mass flow rate and cooling capacity in the main line (two lines type, constant cooling rate).

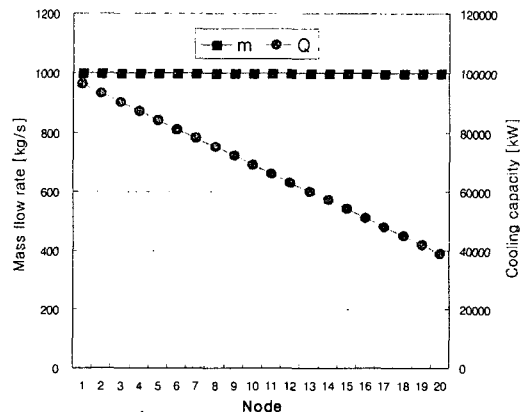


Fig. 4 Mass flow rate and cooling capacity in the main line (one line type, constant cooling rate).

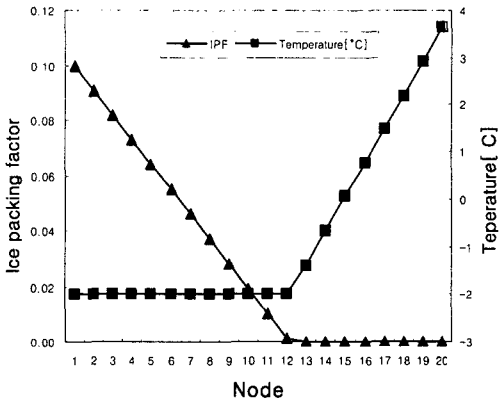


Fig. 5 Ice packing factor and temperature along the main line (one line type, constant extracted cooling load).

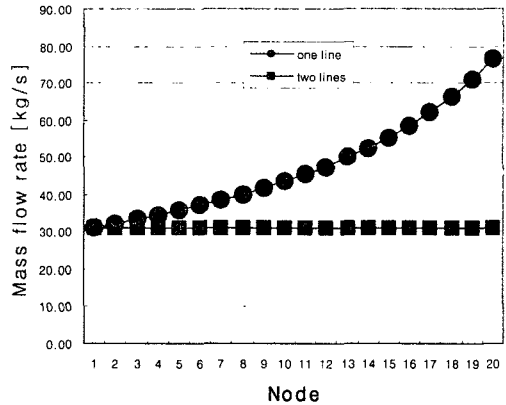


Fig. 6 Mass flow rate along the main line (one line type, two lines type).

서 냉열이 사용되고 온도가 상승된 후 다시 주배관에 투입되므로 하류로 진행되어 감에 따라 주배관의 IPF는 선형적으로 줄어들고 있음을 보여주고 있다. Node 12에서 IPF가 0이 됨을 보여주고 있는데 이는 초기에 유입된 아이스슬러리 중의 모든 얼음이 수용가를 거친 후 온도가 상승하여 돌아온 온수에 의하여 모두 녹아버렸음을 나타낸다. 따라서 12번 node 이후는 단순 냉수수송의 경우와 동일하게 되어 온도가 상승하게 되므로 1관 적용시 중간에서 IPF가 0이 되는 지점이 나타나지 않도록 초기 IPF를 사전에 산출하여야 한다.

Fig. 6은 각 지점에서 분기하여야 할 질량유량을 나타낸다. 2배관의 경우는 주배관에서의 IPF

가 일정하므로 분기하여야 하는 질량유량은 일정하다. 그러나 1배관의 경우 하류로 갈수록 IPF는 상변화에 의한 고농도 냉열량이 줄어들므로 동일한 냉열량을 추출하기 위해서는 더욱 많은 질량유량을 분기하여야 한다.

### 5. B지구를 대상으로 한 1배관방식 시스템의 적용설계

2배관의 경우는 공급관과 회수관이 같이 있으므로 냉열공급 대상지역을 관통하여 배관을 배치할 수 있으나 1배관방식의 경우 냉열공급 대상지역을 둘러싸면서 배치한다.

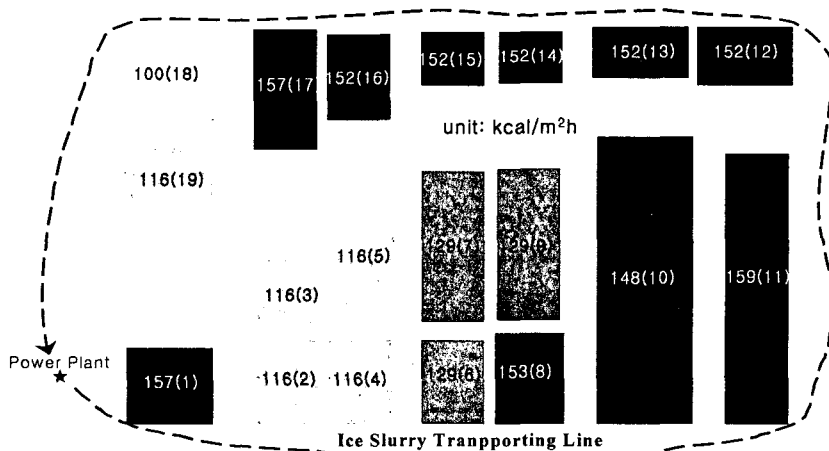


Fig. 7 Cooling load and ice slurry transporting line with one line type for B area.

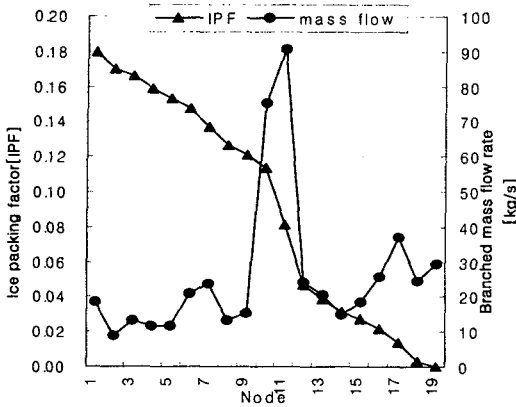


Fig. 8 Ice packing factor and branched, mass flow rate at each node (one line type, B area).

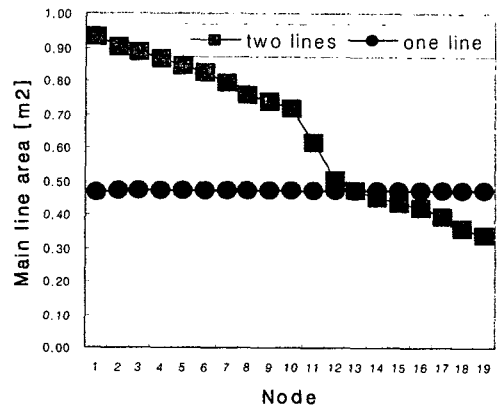


Fig. 9 Comparison of main line's areas between two-lines type and one line type.

Fig. 7은 B지구에 대하여 최대부하 자료로부터 각 지점의 동시부하율을 고려한 냉열부하를 나타내 주고 있다.<sup>(7)</sup> 즉, 최대냉열부하가 나타나는 시점은 약간씩 다르나 동시부하율이란 개념을 도입하여 각 건물이 동시에 Fig. 7과 같은 부하를 필요로 한다고 가정한다. 실제 공급 플랜트가 왼쪽 모서리에 위치하며 오른쪽 아래에 가장 높은 냉열부하 159 kcal/m<sup>2</sup>h를 필요로 하는 수족관이 위치하며 왼쪽 아래에 157 kcal/m<sup>2</sup>h의 냉열부하를 필요로 하는 공항터미널과 왼쪽 위쪽에 백화점이 위치한다.

이와 같이 공급대상지역이 일정 지역 안에 몰려 있으므로 아이스슬러리 공급에 유리하고 냉열 공급 대상지역을 둘러싸면서 공급하는 1배관방식을 적용하기 적절하다. 따라서 배관을 Fig. 7과 같이 냉열공급 대상지역을 둘러싸면서 배치하는 것으로 설계하였다.

즉, 공항터미널을 node 1번으로 배치하고 가장 높은 냉열부하를 필요로 하는 수족관을 node 11에 배치하며 node 17에 백화점을 배치하였다.

Fig. 8은 Fig. 7의 단위면적당 냉열부하에 각각의 단면적을 곱한 냉열부하에 대하여 1배관을 이용한 아이스슬러리 공급시스템의 각 node에서의 IPF 및 추출유량을 나타낸 것이다. 1배관방식의 경우 중간에서 IPF가 0이 되는 분기관에 발생하면 이후의 공급온도가 급격히 상승하므로 아이스슬러리의 장점인 균일한 공급온도를 유지할 수 없다. 따라서 설계시 최종분기관까지 IPF가 양수가 되는 초기 IPF를 사전에 산출하여야 한다. B

지구의 경우 최종분기관에서 IPF가 양수가 되는 최소한의 IPF를 산출하면 초기 IPF는 18%가 된다. Fig. 8에서 node 10과 node 11에서 추출되는 질량유량이 급격히 증가하고 있는데 이는 node 10과 node 11 냉열밀도도 크지만 단면적이 넓으므로 냉열밀도와 단면적의 곱인 총 냉열요구량이 급격히 증가하기 때문이다. Node 10과 node 11에서 많은 양의 질량유량이 분기되어 냉열을 공급하고 난 후 질량유량이 복귀하므로 IPF는 급격히 떨어지고 있음을 알 수 있다.

Fig. 9는 1배관 및 2배관에서의 공급 주배관의 단면적을 비교한 것이다. 1배관의 경우 주배관의 단면적은 일정한 반면, 2배관에서는 하류로 갈수록 주배관이 줄어들며 냉열부하가 집중된 지역을 거치면서 다량의 공급유량이 부하측을 통과하여 회수관으로 보내지므로 주배관의 크기가 급격히 줄어들게 된다. B지구에 대하여 1배관방식을 적용할 경우 주배관 단면적은 0.48 m<sup>2</sup>으로 일정한 데 반하여 2배관방식의 경우 초기에는 0.92 m<sup>2</sup>에서 10번 node와 11번 node에서 0.5 m<sup>2</sup>로 급격히 줄어들며 최종단에서 0.35 m<sup>2</sup>까지 감소함을 보여주고 있다.

## 6. 결 론

2배관방식 및 1배관방식에 대하여 아이스슬러리 수송시스템의 특징을 비교하였다. 또한 각 배관방식의 특징을 더 이해하기 위하여 국내 B지역의 실제 냉열부하 자료로부터 1배관방식을 적

용하여 배관경, IPF, 수송냉열량을 고찰하였다.

1배관방식은 2배관방식에 비해 1개의 관을 사용하고 주배관에서의 질량유량도 일정하다. 또한 하류로 갈수록 IPF가 줄어들고 중간에 다량의 냉방부하가 필요할 경우 이 냉방부하로부터 복귀한 온수에 의해 IPF가 급격히 하강하게 된다.

1배관방식의 경우 중간 node에서 IPF값 0이 나타나면 이후 요구 냉열부하를 만족시키기 위해서 추출되는 질량유량이 급격히 증가한다. 따라서 1배관방식을 지역냉방에 적용할 경우 전 배관에서의 IPF가 0이 되지 않는 초기 공급 IPF를 산출하여야 한다.

실제로 국내의 한 지역의 실제 냉방부하를 근거로 1배관방식을 적용하였다. B지구의 냉방부하의 경우 node 마지막 단까지 IPF가 양수가 되기 위한 최소한의 초기 IPF는 18%임을 알 수 있었다. 또한 1배관방식과 2배관방식의 배관경을 비교하였는데 1배관방식의 경우 주배관 단면적은  $0.48 \text{ m}^2$ 임에 반하여 2배관방식의 경우 초기  $0.92 \text{ m}^2$ 에서 10번 node와 11번 node에서  $0.5 \text{ m}^2$ 로 급격히 줄어들며 최종단에서  $0.35 \text{ m}^2$ 로 감소함을 알 수 있었다.

### 참고문헌

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 (1), J. of SAREK, Vol. 14, No. 5, pp. 385-390.
2. Sheer, T. J., McGarry, R., Chan, C. Y. and Butterworth, M., 2003, The transportation on ice through pipelines within cooling systems for deep mines, Int. Congress of Refrigeration, Washington, D. C., ICR0195.
3. Kim, K. M., Park, K. W. and Kwon, I. W., 2004, Effect on ice slurry flowing in the elbow of various angle, J. of SAREK, Vol. 16, pp. 142-149.
4. Paul, J. J., 2004, Short Course Lecture Note on Applications of Binary Ice.
5. Kuriyama, T. and Sawahata, Y., 2001, Slurry ice transportation and cold air distribution system, Technical Tour of the 4th IIR Ice Slurry Workshop in Osaka, November 13.
6. Kitanovski, A. and Poredos, A., 2002, Concentration distribution and viscosity of ice-slurry in heterogeneous flow, Int. J. of Refrigeration 25, pp. 827-835.
7. Korea District Heating Corp., 2003, Report of the Conceptual Design on Goyang CES, pp. 3-14.

1. Lee, D. W., Yoon, C. I. and Yoon, E. S., 2002,