

## 소구경 배관내 아이스슬러리의 유동형상 및 압력강하 특성에 관한 실험적 연구(2)

이 동 원<sup>†</sup>, 윤 찬 일, 주 문 창  
한국에너지기술연구원

### Experimental Study on Flow Patterns and Pressure Drop Characteristics of Ice Slurry in Small Size Pipe (2)

Dong Won Lee<sup>†</sup>, Chan Il Yoon, Moon Chang Joo

*New & Renewable Energy Research Department, Korea Institute of Energy Research, Daejeon 305-340, Korea*

*(Received January 25, 2002; revision received April 18, 2002)*

**ABSTRACT:** Pressure drop were experimentally investigated for ice slurry flowing in the acrylic pipes with inner diameter of 24 mm. Ice slurry was made from 6.5% ethylene glycol-water solution, and the pipes is consisted of horizontal, vertical (upward and downward) and 90° elbow pipe. The ice packing factor (IPF) and the flow rate of the experiments were varied from 0 to 30% and from 5 to 70 kg/min respectively. The measured pressure drop in various pipe positions were compared with those for the solution flow (IPF=0). The pressure drop was larger than that for solution flows as the IPF increased when the flow rate was low or very high. Sharp increases in pressure drop were observed for the cases when IPF is more than 20% in horizontal and vertical pipes, whereas the pressure drop increased with the IPF simultaneously in an elbow pipe.

**Key words:** Ice slurry(액빙), Direct transportation(직접수송), Pressure drop(압력강하), IPF(얼음의 체적분율), Flow rate(유량)

#### 기 호 설 명

$D$  : 배관의 내경 [m]  
 $f$  : 관마찰계수  
 IPF : 얼음의 체적분율(Ice Packing Factor) [%]  
 $L$  : 배관의 길이 [m]  
 $\Delta P$  : 압력강하(차압) [ $N/m^2$ ]  
 $Re$  : Reynolds 수,  $\frac{\rho VD}{\mu}$

#### 그 리 스 문 자

$\epsilon$  : 압력강하 비율,  $\frac{\Delta P_s}{\Delta P_L}$ , 식(5)  
 $\mu$  : 점성계수 [ $N \cdot s/m^2$ ]  
 $\rho$  : 밀도 [ $kg/m^3$ ]

#### 하첨자

$i$  : 얼음  
 $L$  : 수용액  
 $s$  : 아이스슬러리

<sup>†</sup> Corresponding author  
 Tel.: +82-42-860-3533; fax: +82-42-860-3538  
 E-mail address: dwlee@kier.re.kr

## 1. 서 론

물 또는 수용액에 미세한 얼음입자가 섞인 아이스슬러리는 해빙속도가 빠르기 때문에 부하추중성이 우수하며, 특히 배관을 통해 직접 수송할 경우 단위유량당 냉열수송량이 커서 각종 냉방·냉각 시스템에 효과적으로 활용할 수 있는 우수한 2차냉매로 알려져 있다.<sup>(1)</sup> 아이스슬러리를 일관배관을 통해 직접 수송할 경우에는 얼음입자가 응집하여 배관을 밀폐시키는 현상이 발생하지 않도록 하는 것이 중요하며, 이외에 배관내 압력강하 등 유동특성과 열전달특성에 관한 실험적 연구가 더욱 필요한 것으로 알려져 있다.<sup>(2)</sup>

아이스슬러리의 유동형태와 배관내 압력강하를 포함하는 유동특성에 대해서는 국내외에서 많은 연구가 수행되고 있다. 특히 아이스슬러리의 수송속도나 펌프용량 등을 결정하는 배관내 압력강하특성에 대해서는, 관련된 연구가 지속적으로 이루어지고 있다. Shirakashi et al.<sup>(3,4)</sup>은 수평관 및 수직관에서 설수(雪水) 2상류와 아이스슬러리의 유동특성을 실험적으로 살펴보았으며, Takahashi et al.<sup>(5)</sup>은 수평관에서 아이스슬러리의 압력강하특성과 속도분포를 조사하였다. 이외 유사한 연구를 통해 알려져 있는 내용은, 수평관에서는 유량이 적은 경우 IPF가 클수록 단상유동인 경우보다 큰 압력강하가 나타나지만, 유량이 증가할수록 압력강하와 같아지거나<sup>(3)</sup> 또는 약간 작아진다<sup>(5)</sup>는 것이다. 또한 상향수직관의 경우는 IPF에 비례해서 단상유동의 경우보다 큰 압력강하를, 그리고 하향수직관에서는 IPF에 비례해서 작은 압력강하를 나타낸다는 것도 알려져 있다.

그러나 이와는 달리 IPF가 증가하면 아이스슬러리에 의한 압력강하가 단상유동인 경우보다 크게 감소한다는 연구결과<sup>(6)</sup>도 있으며, IPF에 무관하게 압력손실이 약 3% 증가한다는 국내 연구결과<sup>(7)</sup>도 발표된 바 있다. 이러한 연구결과의 차이는 2상유동의 특성상 실험에 이용된 얼음입자의 크기와 질 그리고 실험조건에 차이가 있었기 때문으로 판단된다. 즉, 아이스슬러리는 제빙방법이나 첨가제의 종류 및 농도에 따라 얼음입자의 크기와 부착성이 달라지기 때문에 유동특성을 일반화시키는 것이 어려운 것으로 판단된다. 따라서 최근에도 축열조 내 아이스슬러리의 유동형태를 조사하는 연구가<sup>(8)</sup> 수행되고 있는 실정이다.

본 연구는 상용화된 제빙기를 이용하여 제빙된 아이스슬러리를, 소구경 배관을 통해 직접수송하여 냉각 시스템에 활용하기 위한 기초적인 연구이다. 상용화된 제빙기는 6.5% 에틸렌글리콜(EG) 수용액을 이용하여 수백  $\mu\text{m}$ 의 미세한 얼음입자가 섞인 아이스슬러리를 제빙하기 때문에, 물만으로 제빙된 수~수십 mm의 얼음입자가 섞인 아이스슬러리를 이용했던 이전의 연구결과와는 다소 다른 결과가 나타날 것으로 짐작된다.

본 고에서는 소구경 배관내 아이스슬러리의 유동형태 등을 살펴본 제1보에 이어서, 각 배관자세에 있어서 아이스슬러리의 유량과 IPF에 따른 압력강하특성을 실험적으로 살펴보았다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험 및 측정장치

아이스슬러리 유동특성실험을 위한 실험장치는, 제1보에서 이미 서술한 바와 같이 제빙기와 축열조, 그리고 다양한 배관이 연결된 실험회로로 구성하였다. Fig. 1은 내경 24 mm인 아크릴 배관을 이용하여 제작한 실험회로의 상세도인데, 수직상향관, 수평관, 수직하향관, 수평엘보우의 기본적인 배관자세 외에 수평부와 수직부 사이의 엘보우로 구성된 것을 알 수 있다. 각 엘보우는 일반 배관의 엘보우와 그 내부구조가 같도록 주의하여 제작함으로써, 수평관 및 수직관 외에 엘보우에서의 압력강하특성도 알아보고자 하였다. 압력측정을 위한 압력탭 사이의 길이는 수평관과 수직관 각각 1.8 m와 0.8 m이며, 상·하류 각각에 20 D 이상의 유동발달부를 두었다. 엘보우의 경우는 양단 각각 0.3 m 위치에 압력탭을 설치하였다.

실험회로에 유입되는 아이스슬러리의 유량과 밀도는 측정오차가 0.2% 이내인 Oval사의 질량유량계를 이용하여 실시간으로 측정하였으며, 측정된 밀도  $\rho_s$ 는 다음 식에 의하여 IPF로 변환되었다.

$$IPF = \frac{\rho_L - \rho_s}{\rho_L - \rho_i} \quad (1)$$

여기서 수용액의 밀도  $\rho_L$ 은  $1,008 \text{ kg/m}^3$ , 얼음의 밀도  $\rho_i$ 는  $917 \text{ kg/m}^3$ 이다. 각 배관의 압력강하(차

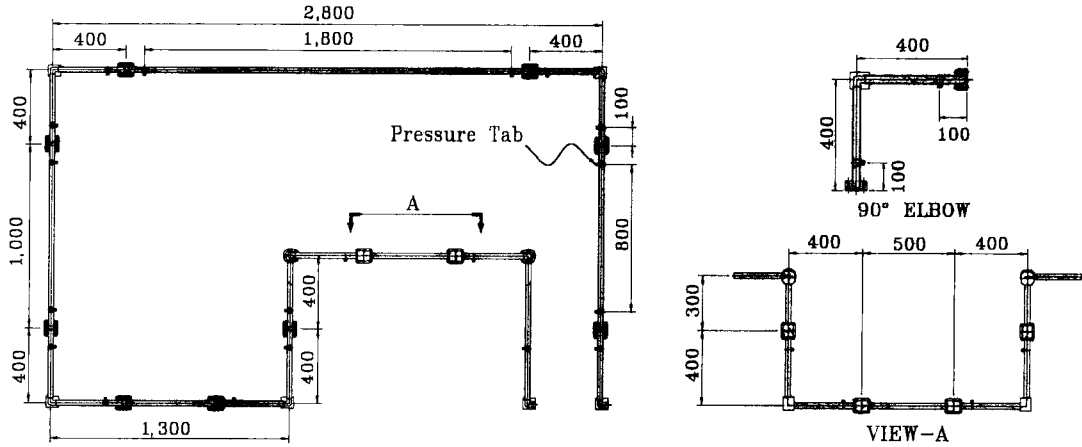


Fig. 1 Test section diagram.

압) 측정은 Rosemount사의 가변차압계 두 대를 이용하였고, 차압의 크기에 따라 측정범위를 적절히 조정함으로써 측정의 정확도를 높일 수 있도록 하였다. 컴퓨터와 연결된 HP75000 데이터 처리장치를 통해 4초 간격으로 각 데이터를 측정하고 저장하였다.

2.2 실험방법

축열조 내에 6.5% EG 수용액 약 1.4 m<sup>3</sup>을 채우고 제빙펌프와 제빙기, 그리고 냉동기를 동작시켜 아이스슬러리를 제빙하였다. 축열조 내에 아이스슬러리가 어느 정도 제빙되었다고 판단되면, 축열조 측면의 배관을 통해 실험회로로 아이스슬러리를 순환시키면서 정확한 IPF를 측정하였다.

회로 내 아이스슬러리가 미리 정한 IPF에 도달하면, 냉동기를 정지시키고 아이스슬러리의 유량을 원하는 값으로 맞춘 후 각 배관의 차압을 순차적으로 측정하였다. 일단 정해진 유량에 대해 각 배관의 차압측정이 끝나면 by-pass 밸브를 조절해 유량을 변화시키고 다시 차압측정을 하는 방법으로 실험을 진행하였다. 실험 중 외부로의 열손실에 의해 아이스슬러리의 IPF는 점차 감소하였는데, 이때는 냉동기를 수동조작하여 실험회로 내 IPF가 ±0.5% 이내로 유지되도록 하였다.

차압측정실험은 아이스슬러리의 질량유량을 5 kg/min에서 70 kg/min(IPF가 큰 경우 60 kg/min)까지 5 kg/min씩 증가시키면서, IPF는 0%에서 30%까지 5%씩 변화시키면서 진행하였다. 배관의

차압측정은 정해진 질량유량과 IPF에 대해서 10분 내외로 계속하였는데, 추후 데이터를 점검하면서 IPF와 차압이 안정된 2분 이상(30개 이상)의 데이터를 평균하여 하나의 측정 데이터로 간주하였다. 만약 안정된 영역이 존재하지 않았다고 판단되면, 추후 같은 조건하에서 반복실험을 수행하였다.

이러한 실험과 동시에 제1보에서와 같이 축열조 내에 IPF 30% 이상의 아이스슬러리를 제빙한 후, 유량을 일정하게 유지시킨 상태에서 실험회로로 순환시키는 방법의 실험도 수행하였다. 이 경우 외부와의 열전달에 의해 IPF가 점차 감소하였으므로, 유량이 일정한 경우 IPF 변화에 따른 차압의 변화를 측정할 수 있었다.

3. 실험결과 및 고찰

실험회로 내 차압측정의 정확성을 확인하기 위하여, 얼음입자가 섞이지 않은, 즉 IPF가 0인 경우의 차압을 측정하고 그 측정결과를 이미 알려져 있는 다음과 같은 실험식과 비교하여 Fig. 2에 나타내었다.

$$\frac{\Delta P}{L} = f \cdot \frac{\rho_L V_L^2}{2Dg} \quad [\text{mmAq/m}] \quad (2)$$

$$f = 0.184\text{Re}^{-0.2} \quad (3)$$

여기서 레이놀즈수를 산정할 때의 점성계수는 EG

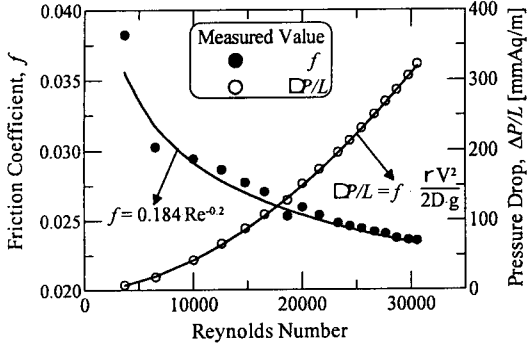


Fig. 2 Comparison between results.

6.5% 수용액의 어는점인  $-2.7^{\circ}\text{C}$ 에서의 점성계수로서,

$$\mu \approx 2cP = 0.002 \text{ N} \cdot \text{s}/\text{m}^2 \quad (4)$$

을 사용하였고, 그밖에 밀도와 유속은 질량유량계를 이용하여 측정된 값을 이용하였다.

그림에서 알 수 있듯이 본 실험에서의 측정결과와는 기존 실험식과 비교적 잘 일치하였으며, 이 결과로부터 각 배관에서의 차압측정이 정확하게 이루어지고 있다고 판단하였다.

### 3.1 유량에 따른 압력강하특성

아이슬슬러리의 IPF를 일정하게 유지한 상태에서, 유량에 따른 각 배관에서의 단위길이당 압력강하를 측정하여 Fig. 3에 나타내었다. IPF가 0인 경우는 얼음입자가 섞이지 않은 EG 수용액만을 이용하여 압력강하를 측정한 결과이며, 이론적인 결과는 식(2)와 (3)에 의해 계산된 결과이다. 여기서 수평엘보우의 상대길이  $L_{eq}$ 는, IPF가 0인 경우와 이론적인 결과를 비교하여 가장 근사한 값을 선정하였다.

전체적인 실험결과를 보았을 때, IPF가 증가할수록 단상유동인 경우보다 압력강하가 증가하는 것을 알 수 있었다. 이와 같은 압력강하 증가는, 수평관 및 수직관에서는 유량이 적은 범위에서 더욱 두드러졌는데, 유량이 많아지면서 단상유동인 경우에 근접하다가 유량이 더욱 많아지면 압력강하가 다시 증가하였다. 적은 유량범위에서 압력강하의 증가경향은 이전의 연구결과<sup>(4, 6)</sup>와 대체로 같은 것으로, 유량이 적고 IPF가 증가할수

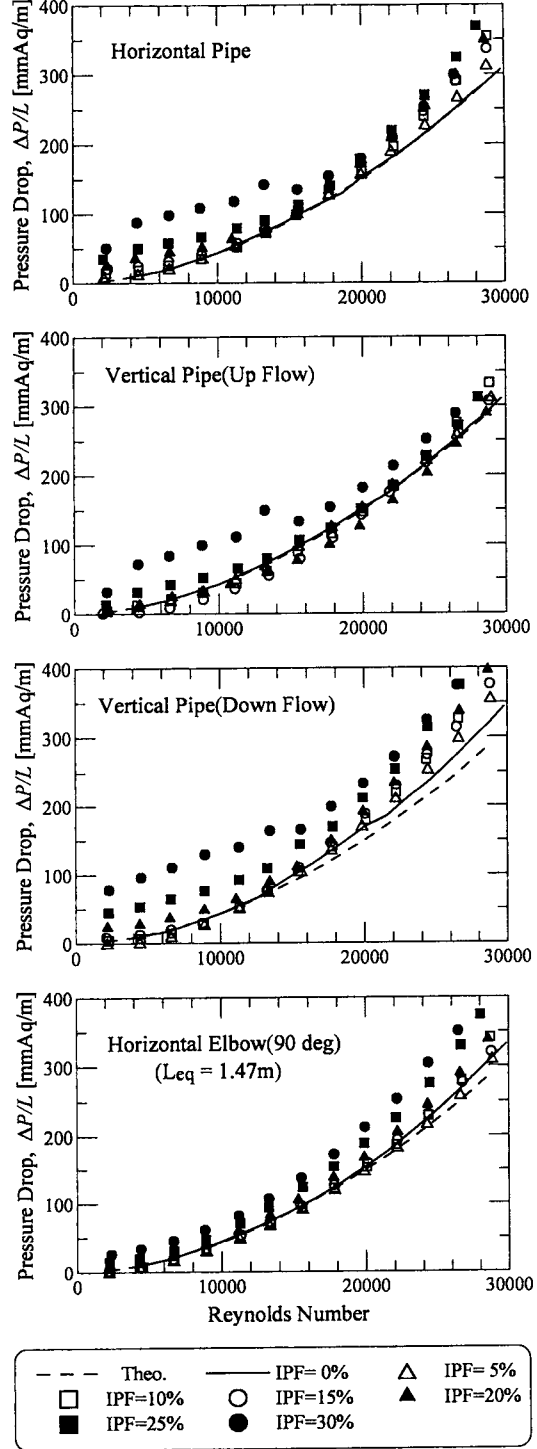


Fig. 3 Pressure drop variation with Reynolds number for various IPF.

록 얼음입자가 조밀하게 모인 빙주가 형성되어 배관내를 이동하기 때문인 것으로 판단된다. 유량이 큰 범위에서 압력강하가 다시 증가하는 것은 배관 전단면에 걸쳐 얼음입자가 유동하면서 마찰력이 증가하기 때문으로 짐작할 수 있으나, 다른 연구결과를 통해서도 알려지지 않았던 특이한 현상이어서 주목된다.

한편 하향수직관에서의 난위길이당 압력강하 증가가 가장 컸으며, IPF가 아주 큰 경우를 제외하고는 상향수직관에서의 압력강하 증가가 가장 작았다. 특히 상향수직관에서는 일정한 유량범위에서 단상유동인 경우보다 낮은 압력강하가 측정되었는데, 이는 제1보에서 설명한 바와 같이 얼음입자에 의한 부력 때문이다. 그러나 IPF가 아주 크거나 유량이 많은 경우에는 이러한 부력효과가 상쇄되어 단상유동인 경우보다 큰 압력강하를 나타내었다.

엘보우에서는, 수평관이나 수직관에서와는 달리 적은 유량범위에서 IPF가 큰 경우에도 압력강하가 크게 증가하지 않는 특성을 보여주었다. 이것은 엘보우에서의 압력강하가 얼음입자와 배관벽면 사이의 마찰에 의한 것이 아니라 배관 내부의 저항에 의한 것이기 때문으로 판단된다. 따라서 배관길이에 의한 저항과 배관 내부의 저항이, 아이스슬러리의 유동에 따른 압력강하에 다른 형태로 영향을 미치는 것을 알 수 있었다.

유량에 따른 압력강하의 증가 정도를 정확히 파악하기 위하여 수평관에 있어서 압력강하의 비율을 산정하여 Fig. 4에 나타내었다. 여기서 압력강하 비율  $\epsilon$ 은 측정된 아이스슬러리의 압력강하와 IPF가 0일 때(수용액) 측정된 압력강하와의 비율을 나타낸 것으로써,

$$\epsilon = \frac{\Delta P_s}{\Delta P_L} = \frac{f_s}{f_L} \quad (5)$$

이다. 유량이 적은 경우 IPF에 비례하여 압력강하가 크게 증가하는 것을 볼 수 있으며, 유량이 증가하게 되면 감소하다가 다시 IPF에 비례하여 압력강하가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 그러나 유량이 큰 경우의 IPF에 대한 의존성은 유량이 적은 경우보다 크지 않음을 알 수 있다.

### 3.2 IPF에 따른 압력강하특성

IPF에 따른 아이스슬러리의 압력강하특성을 보다 정확히 파악하기 위하여, 유량이 고정된 상태에서 IPF를 변화시키면서 압력강하를 측정하였다. Fig. 5는 아이스슬러리의 유량이 30 kg/min인 경우, IPF 변화에 따른 각 배관에서의 압력강하 변화를 나타낸 것이다. 여기서 압력강하 비율  $\epsilon$ 은 식(5)와 같이 정의된 값이다.

수평관에서는 IPF가 증가하더라도 압력강하가 거의 변하지 않다가, IPF가 약 20%를 넘으면서 급격히 증가하는 것이 확인되었다. 반면 수직하향관과 수평엘보우에서는 IPF가 증가함에 따라 압력강하가 점차 증가하며, 특히 수평엘보우에서는 IPF 변화에 따른 압력강하의 급격한 증가는 발견되지 않았다. 한편 수직하향관에서는 일정 IPF 범위에서 압력강하가 단상유동인 경우보다 작게 나타났다.

수평관에서는, 유량이 적은 경우를 제외하고, IPF가 증가하더라도 압력강하가 크게 변하지 않는다는 것은 물론 제빙한 얼음입자를 이용한 이전의 연구결과들에서 이미 알려진 바 있다. 그러

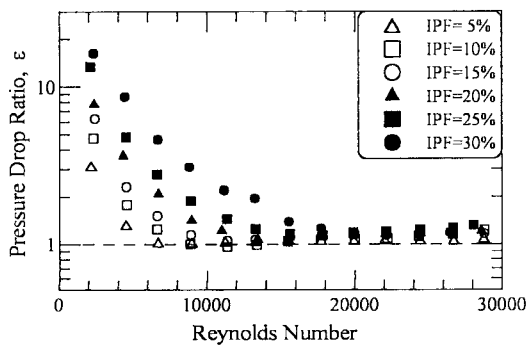


Fig. 4 Pressure drop ratio (horizontal pipe).

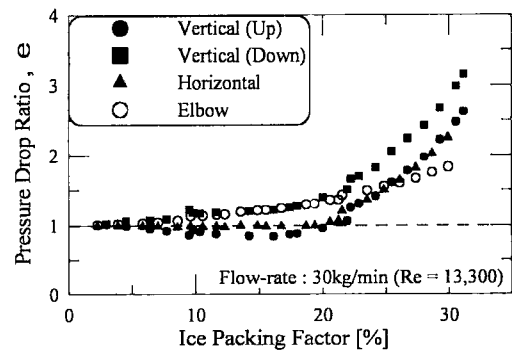


Fig. 5 Pressure drop ratio with IPF.

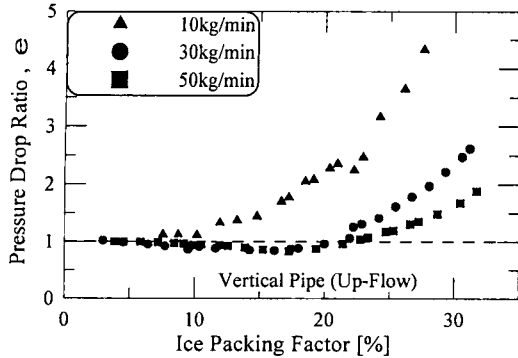


Fig. 6 Pressure drop ratio with flow rate in upward vertical pipe.

나 본 실험결과에서와 같이 IPF가 일정값(본 실험에서는 약 20%) 이상인 경우 압력강하가 급격히 증가하는 것은 의외의 결과로서, 추후 자세한 검토가 필요하다고 판단된다. 실험 중 이 조건에서 유동형태의 특이한 변화가 관찰되지 않았으며, IPF가 증가하면 유동형태가 플러그류로 천이하여 압력강하가 감소할 수 있다는 연구결과와도 배치되는 현상이기 때문이다.

상향수직관에서 압력강하가 단상유동인 경우보다 감소하는 영역을 확인하기 위하여, IPF에 따른 압력강하 비율을 Fig. 6에 나타내었다. 유량이 적은 경우는 IPF에 관계없이 압력강하의 감소가 나타나지 않았으며, 유량이 비교적 큰 경우에도 IPF 20% 이내에서만 압력강하가 약간 감소하는 것을 알 수 있었다. 이러한 결과는 모든 실험조건에서 상향수직관의 압력강하 감소가 비교적 크게 나타난다는 이전의 연구결과<sup>(3)</sup>와는 차이가 있는 것이다.

#### 4. 결 론

EG 6.5% 수용액을 이용하여 만들어진 아이스 슬러리의 배관내 압력강하특성을 실험적으로 살펴보았다. 압력강하 측정이 이루어진 배관은 수평관, 수직상향관, 수직하향관, 수평엘보우이며, 각 배관에 대해서 IPF 및 유량에 따른 압력강하를 측정하고 단상유동인 경우와 비교하였다.

실험조건을 변화시키면서 실험을 수행하여 압력강하에 대한 많은 데이터를 얻었으나, 매우 다양한 결과가 나타나 이를 하나의 실험식으로 단순화시키는 것은 어려웠다. 따라서 본 고에서는

이전의 연구에서와 마찬가지로 실험결과에 대한 정성적인 분석을 수행하였고, 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 아이스슬러리의 IPF가 증가할수록, 수직상향관을 제외하고는, 압력강하가 증가하였다. 유량이 적고 IPF가 큰 경우 압력강하가 비교적 크게 증가하였으나, 수평엘보우에서는 이러한 현상이 나타나지 않았다.

(2) 수평관과 수직관에서는 IPF가 어느 정도 이상에서(본 실험의 경우 IPF 20% 이상) 압력강하의 급격한 증가가 확인되었다.

(3) 얼음입자의 부력 때문에 수직상향관에서의 압력강하는 단상유동인 경우보다 약간 감소하였지만, IPF가 큰 경우나 유량이 적은 경우는 이러한 현상이 나타나지 않았다.

(4) 길이저항이 아닌 배관 내부 저항을 갖는 수평엘보우에서는 IPF의 증가에 따라 압력강하가 증가하였으나, 타 배관에서와 같은 급격한 증가는 발견할 수 없었다.

#### 후 기

본 연구는 산업자원부에서 시행한 산업기반기술개발사업의 일환으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. Lee, D. W., 2001, Cold heat transportation using ice slurry, The Magazine of the SAREK, Vol. 30, No. 12, pp. 8-14.
2. Fukusako, S., Kozawa, Y., Yamada, M. and Tanino, M., 2000, Fundamental researches and developments on fine crystalline ice slurries in Japan, Trans. of the JSRAE, Vol. 17, No. 4, pp. 413-437.
3. Shirakashi, M., Sato, S., Koshio, A., Umemura, T. and Wakiya, S., 1984, Hydraulic conveying of snow (V. The influence of several factors on the pressure drop of a snow/water mixture flowing in straight pipe), Japanese Journal of Snow and Ice, Vol. 46, No. 4, pp. 171-178.
4. Shirakashi, M., Kawada, Y. and Takahashi,

- T., 1997, Characteristics of ice/water mixture in horizontal circular pipes, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineering (B), Vol. 61, No. 585, pp. 44-51.
5. Takahashi, H., Masuyama, T. and Kawashima, T., 1992, Experimental study on flow characteristics of ice-water slurries in horizontal pipe, Japanese Journal of Resources · Material, Vol. 108, No. 5, pp. 357-363.
  6. Knodel, B. D., France, D. M., Choi, U. S. and Wambsganss, M. W., 2000, Heat transfer and pressure drop in ice-water slurries, Applied Thermal Engineering, Vol. 20, pp. 671-685.
  7. Gil, B. I., Lee, Y. P., Jung, D. J., Cho, B. H. and Choi, E. S., 2001, A study on transport and heat utilization of ice slurries, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 13, No. 11, pp. 1065-1071.
  8. Tanino, M. and Kozawa, Y., 2001, Ice-water two-phase flow behavior in ice heat storage systems, Int. J. of Refrigeration, Vol. 24, pp. 639-651.
  9. Lee, D. W., Yoon, C. I., Im, H. M. and Song, W. Y., 2001, Experimental study on pressure drop in ice slurry direct transportation loop, Proceeding of the SAREK Winter Annual Conference, pp. 600-605.