

## 소구경 배관내 아이스슬러리의 유동형상 및 압력강하 특성에 관한 실험적 연구(1)

이 동 원<sup>†</sup>, 윤 찬 일, 윤 응 상  
한국에너지기술연구원

### Experimental Study on Flow Patterns and Pressure Drop Characteristics of Ice Slurry in Small Size Pipe (1)

Dong Won Lee<sup>†</sup>, Chan Il Yoon, Eung Sang Yoon

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

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

**ABSTRACT:** To clarify the hydraulic characteristics of ice slurry which made from 6.5% ethylene glycol-water solution flowing through circular pipes of small diameter, experimental studies were performed. The flow pattern was observed and the pressure drop was measured in acrylic pipes with inner diameter of 24 mm. The results of flow visualization revealed that ice particles flowed along the top of pipes in the ranges of small ice fraction and low flow rate, while ice particles diffused into the whole region of pipes flowed like a homogeneous flow for high flow rate and high ice fraction. An increase in frictional pressure drop was measured as the ice fraction increased in all pipes and unstable flow was observed for upward vertical pipe.

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

#### 기 호 설 명

#### 하첨자

IPF : 얼음의 체적분율 [%]

$\Delta P$  : 압력강하 [mmAq]

$i$  : 얼음

$L$  : 수용액

$s$  : 아이스슬러리

#### 그리스 문자

$\rho$  : 밀도 [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

#### 1. 서 론

최근 관심을 모으고 있는 아이스슬러리형 빙축열 시스템은, 제빙기를 이용하여 물 또는 수용액에 수십  $\mu\text{m}$ 에서 수 mm 정도의 작은 얼음입자가 섞인 아이스슬러리를 연속적으로 제빙하고, 이를 축열조에 저장하였다가 이용하는 방식의 빙축열 시스템이다. 이 방식은 제빙과정에서 두꺼운 얼

<sup>†</sup> Corresponding author

Tel.: +82-42-860-3533; fax: +82-42-860-3538

E-mail address: dwlee@kier.re.kr

음층이 형성되지 않아 제빙효율이 높으며, 얼음 입자가 작아 부하대응력이 우수하다는 장점을 가지고 있다.<sup>(1, 2)</sup> 또한 필요한 경우 아이스슬러리를 일반배관을 통하여 직접수송할 수 있는데, 이 경우 단위유량당 냉열수송량이 커서 건물의 냉방은 물론 지역냉방 시스템, 그리고 각종 산업용 냉각 시스템에 효과적으로 활용될 수 있다.<sup>(3)</sup>

이와 같이 아이스슬러리를 배관을 통해서 직접 수송하고자 할 때는 해결해야 할 문제점이 많이 있으나, 그중 가장 기본적인 것은 관내밀폐 없이 아이스슬러리를 안정적으로 수송하는 문제라고 할 수 있다.<sup>(4)</sup> 또한 아이스슬러리는 물 또는 수용액에 작은 얼음입자가 섞인 고액 2상류이므로, 배관내 압력강하 등 아이스슬러리의 유동특성을 조사하는 것이 필요하다. 고액 2상류에 대한 연구는 주로 액상보다 무거운 고상의 입자가 섞인 CWM(coal-water mixture)과 같은 슬러리에 대해 이루어져 왔으며, 아이스슬러리에 대한 연구는 상대적으로 부족한 실정이다.

아이스슬러리의 유동특성에 대한 연구는 유동 형태의 관찰과 함께 배관내 압력강하특성을 분석하는 것으로, 1980년대 중반부터 관련된 연구가 본격적으로 수행되어 왔다. Shirakashi et al.<sup>(5, 6)</sup>은 눈의 이송을 위한 실용적인 연구를 통해 설수 (snow-water) 2상류의 유동형태와 압력강하특성을 조사한 바 있으며, Takahashi et al.<sup>(7)</sup>은 수평관에서 아이스슬러리의 유동 및 압력강하특성과 속도분포를 실험적으로 알아보았다. 이외 다양한 실험적 연구가 발표되었는데, 그 결과를 살펴보면 얼음입자의 비율이 작은 경우 피상유동(cluster flow) 또는 부유유동이 관찰되고 얼음입자의 비율이 많거나 유량이 큰 경우 균질유동 또는 주상유동으로 변환된다는 것이 알려져 있다. 그러나 실험조건에 따라 이러한 유동형태의 일부가 나타나지 않는 경우도 있으며, 그 차이조건도 다른 것으로 발표되고 있다.

이러한 연구결과의 차이는 2상유동의 특성상 실험조건과 방법에 따라 서로 다른 결과가 얻어지기 때문인 것으로 판단된다. 즉, 연구에 이용한 얼음입자의 크기와 질 그리고 배관의 직경이 서로 다르며, 실험조건도 다소 차이가 있기 때문인 것으로 생각된다. 따라서 아이스슬러리의 유동특성을 정확히 파악하기 위해서는, 실제 적용하려는 상황과 유사한 조건하에서 실험하고 그 결과

를 이용하는 것이 가장 바람직할 것이다.

상용화된 아이스슬러리 제빙기는 6~8%의 에틸렌글리콜(EG) 수용액을 이용하여 수십~수백  $\mu\text{m}$ 의 얼음입자가 섞인 아이스슬러리를 만드는 것이 일반적이다. 그러나 지금까지 발표된 대부분의 연구에서는, 물을 이용해서 각빙을 만들고 이를 분쇄하여 수~수십 mm의 얼음입자가 섞인 아이스슬러리를 만들어 실험에 이용하였기 때문에, 상용화된 아이스슬러리에서는 이전의 연구와 다른 결과가 나타날 것으로 짐작된다.

본 연구에서는, 국내에서 개발된 제빙기<sup>(8)</sup>를 이용하여, EG 6.5% 수용액으로 제빙된 아이스슬러리의 소구경 배관내 유동 및 압력강하특성을 파악하고자 하였다. 이를 위하여 우선 유량과 얼음입자 비율에 따른 아이스슬러리의 유동특성을 실험적으로 살펴보았다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험 및 측정장치

아이스슬러리의 유동특성을 파악하기 위한 실험장치는 Fig. 1과 같이 실외기와 연결된 제빙기, 축열조, 그리고 유동형태를 관찰하고 압력강하(차압) 등을 측정하기 위한 실험회로로 구성하였다. 제빙기로는 디와이(주)에서 제작한 5RT급 스크래퍼형 아이스슬러리 제빙기를 이용하였는데, 이 제빙기는 같은 방식의 상용화된 타 제빙기와 같이 EG 6.5% 수용액을 이용하여 아이스슬러리를 제빙하는 방식을 취하고 있다. 축열조는 SUS 재질로 약  $2\text{m}^3$ 의 용량을 갖도록 제작되었으며, 그 상단부에는 축열조 내 아이스슬러리를 교반시킬 교반기를 설치하였다. 아이스슬러리는 밀도차에 의해 얼음입자가 수용액과 분리되어 축열조 상단부에 부유하기 때문에, 균일한 얼음입자 비율을 갖는 아이스슬러리를 실험회로로 수송하기 위해서는 이러한 교반기가 필요하였다.

실험회로는 본 연구의 최종목적에 맞고 가시화가 가능하도록 내경 24 mm, 두께 3 mm인 아크릴관을 이용하여 제작하였으며, 추후 다양한 실험이 가능하도록 수직관과 수평관 그리고 여러 개의 90° 엘보우 등으로 구성하였다. 각 엘보우는 일반 배관의 엘보우와 그 내부구조가 같도록 주의하여 제작하였다. 전체적인 실험회로의 크기는

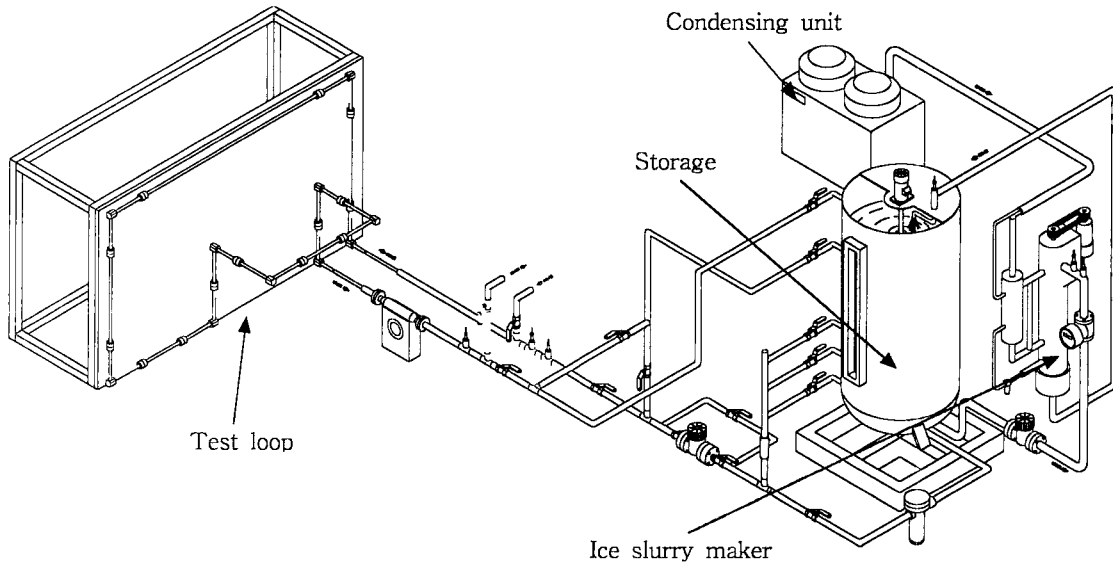


Fig. 1 Schematic diagram of the experiment apparatus (include Ice-slurry maker & Storage).

가로 2.8 m, 세로 1.8 m이지만, 본 연구에서 다물 수평관과 수직관의 차압측정을 위한 압력탭 사이는 각각 1.8 m와 0.8 m이며 상·하류측 각각에 0.5 m(=21 D)의 유동발달부를 두었다. 또한 수평 엘보우인 경우 양단 각각 0.3 m 위치에 압력탭을 설치하였다.

실험회로 내를 유동하는 아이스슬러리의 유량과 밀도는 Oval사의 질량유량계를 이용하여 측정하였는데, 아이스슬러리의 밀도는 그 안에 포함된 얼음입자의 비율을 알기 위해서 필요하였다. 질량유량계는 유체가 흐르는 유량계 내부 튜브의 상변위와 진동주파수를 이용하여 정확한 질량유량 및 밀도를 측정할 수 있다. 아이스슬러리 내 얼음입자의 비율은 일반적으로 얼음의 체적분율인 IPF(Ice Packing Factor)로 표시되며 다음과 같이 산정할 수 있다.

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

여기서  $\rho_L$ 은 6.5% EG 수용액의 어는점(-2.7°C)에서의 밀도로서 1,008 kg/min이고,  $\rho_i$ 는 얼음의 밀도인 917 kg/m<sup>3</sup>, 그리고  $\rho_s$ 는 질량유량계로 측정된 아이스슬러리의 밀도이다.

각 배관의 차압측정은 Rosemount사의 가변차압계 두 대를 이용하였으며, 차압의 크기에 따라

측정범위를 적절히 조정함으로써 측정의 정확도를 높일 수 있도록 하였다. 질량유량계 및 차압계의 오차는 각각 0.2%와 0.5% 이내이고, 실험 전에 교정하였다. 측정은 컴퓨터와 연결된 HP75000 데이터 처리장치를 통해 4초 간격으로 이루어졌다.

## 2.2 실험 및 측정방법

축열조 내에 6.5% EG 수용액 약 1.4 m<sup>3</sup>을 채우고 제빙기와 실외기를 동작시켜 아이스슬러리를 제빙하였다. 수용액은 축열조 하단부에서 제빙기로 이송되며, 제빙된 아이스슬러리는 축열조 상단부로 유입되고 교반기로 교반되어 축열조 내에 비교적 고르게 분포하였다. 아이스슬러리가 어느 정도 제빙되면 축열조 측면의 배관을 통해 실험회로에 아이스슬러리를 순환시키면서 질량유량계를 이용하여 IPF를 측정하였고, 아이스슬러리의 IPF가 30% 이상이 되면 실외기를 정지하여 제빙을 중단하고 실험을 수행하였다.

실험에서는 정해진 유량으로 아이스슬러리를 실험회로에 유입시키면서 유동상태를 관찰하고 각 배관에서의 차압을 측정하였다. 실험과정을 통해 외기와 열교환이 이루어지면서 아이스슬러리의 IPF가 점차 낮아졌으므로, 자연스럽게 IPF 변화에 대한 유동특성을 알아볼 수 있었다. 이 과정에서 IPF 감소에 따라 유량이 점차 증가하였으므로, 밸브조절을 통해 일정유량이 유지되도록 하였다.

이러한 차압측정 실험과 함께 아이스슬러리의 유량과 IPF 변화에 따른 유동형태를, 투명배관을 통해 가시적으로 관찰하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 유동형태

실험에 이용된 아이스슬러리는 Fig. 2에서 볼 수 있듯이 불규칙한 크기의 얼음입자 주위를 수용액이 둘러싸고 있는 형태를 취하고 있다. 이와 같이 수용액으로부터 제빙된 아이스슬러리는, 물

과 얼음입자로된 아이스슬러리에 비해, 제빙시 또는 상호간의 결합에 의해 입자크기가 커지는 것이 억제되며 유동성도 향상되는 것으로 알려져 있다.<sup>(1)</sup>

아이스슬러리의 유동특성은 얼음입자의 크기와 관련이 있다고 믿어지므로, 실험 중 촬영한 총 300여개의 얼음입자 크기를 40배율 실체현미경을 이용해 측정하였으며 그 분포도를 Fig. 3에 제시하였다. 그 결과 실험에 이용된 아이스슬러리는 평균 0.27mm 크기의 얼음입자를 포함하고 있는 것으로 확인되었다.

Fig. 4는 IPF와 유량에 따른 아이스슬러리의

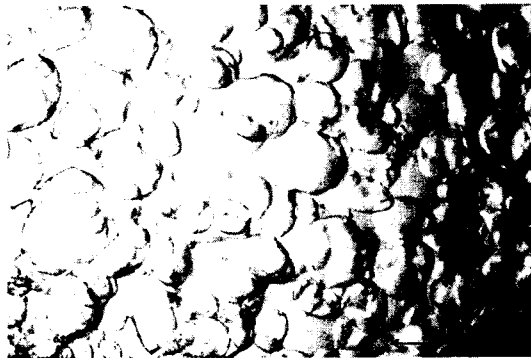


Fig. 2 Ice particles used in this study.

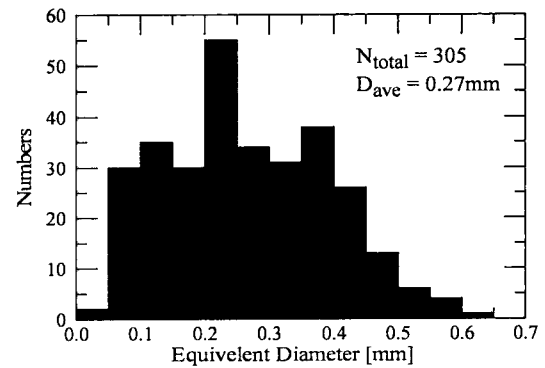


Fig. 3 Diameter of ice particles.

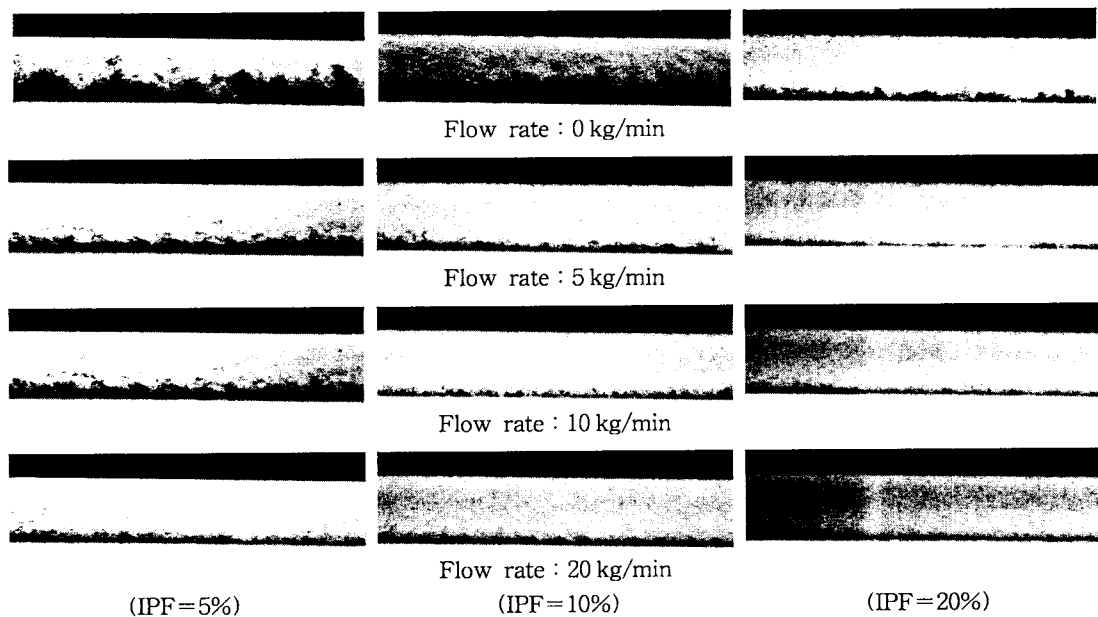


Fig. 4 Ice slurry flow pattern with various IPF and flow rate.

유동형태를 찍은 사진인데, 정지한 아이스슬러리는 얼음입자가 배관 상단부에 모여 구름과 같은 피(cluster)를 형성하면서 부유되어 있는 상태를 볼 수 있다. 그러나 일단 유동이 발생하면 얼음입자에 흐름방향의 점성 전단력이 가해져 얼음입자는 수류측으로 점차 분산되었다.

IPF가 작고 유량이 작은 경우 이 cluster는 배관 상부에 부유하여 수류의 유속보다 약간 작은 속도로 이동하는 것을 확인할 수 있었고, 이때 배관내 상부의 얼음 cluster는 하부의 수류측과 확실하게 분리되어 이동함으로써 고액이상류의 한 유동형태인 부유유동형태를 명확히 보여주었다. 이때 얼음입자는 수류측에 충분히 분산되지 못한 상태이기 때문에, cluster 하단부에서 얼음입자의 진행방향 회전운동이 확인되었다. 그러나 IPF가 큰 경우에는 배관내 대부분을 얼음입자가 차지하므로 작은 유속에서도 위와 같은 현상이 점차 사라지고, 대신 얼음입자가 조밀하게 모인 원주 모양의 cluster(빙주)가 배관내를 유동하는 형태가 관찰되었다. 이 빙주의 반경방향 크기는 IPF가 증가함에 따라 점차 커지며, 빙주는 배관 사이를 마치 미끄러지듯이 유동하였다.

아이스슬러리의 유량이 증가하면 배관 상단부에 부유되어 있던 cluster로부터 얼음입자가 점차 수류측으로 분산되고, 결국 얼음입자가 배관내를 가득 채우는 균질유동형태를 보여주었다. 이때 얼음입자는 배관 전단면에 걸쳐 거의 균일한 분포를 갖고 있었으며, 유량이 아주 적은 경우를 제외하고는 얼음입자가 수용액 내에 고르게 분포하여 마치 하나의 유체처럼 유동(단상유동)하는 것을 확인할 수 있었다. 고유량에서의 이러한 균질유동은 IPF에 관계없이 거의 같은 것으로 보였는데, IPF가 작은 경우에는 확실히 균질유동이었

으며, 유량이 크고 IPF도 큰 경우에는 이 유동형태가 균질유동인지 플러그유동인지 정확히 구별되지 않았다.

### 3.2 IPF 및 유량변화에 따른 압력강하의 변동

각 배관에서의 압력강하를 측정하고 그 변화를 관찰함으로써 아이스슬러리가 안정적으로 유동하는지 여부를 살펴보았다. Fig. 5는 배관자세와 유량에 따른 압력강하의 변화를 시간에 대해 나타낸 것인데, 실험기간중 시간이 경과함에 따라 아이스슬러리의 IPF가 감소하였으므로 횡축은 IPF의 감소방향이라고 할 수 있다. 전체적으로 IPF가 감소하면 압력강하가 감소하며, 길이가 같은 수직관의 경우 하향수직관의 압력강하가 상향수직관의 경우보다 다소 큰 것을 알 수 있다.

Fig. 5(a)는 아이스슬러리의 유량이 30 kg/min인 경우 수평관과 상향 및 하향수직관에서의 압력강하 변동을 나타낸 것으로, 하향수직관에서의 변동이 상대적으로 가장 작다는 것을 알 수 있다. 이것은 하향수직관에서의 아이스슬러리 유동이 가장 안정적이라는 것을 의미하는 것으로, 하향수직관에서는 밀도차에 의한 얼음입자의 부유가 전반적인 흐름을 안정화시키는 데 기여하기 때문인 것으로 판단된다. 한편 상향수직관에서의 아이스슬러리 유동이 가장 불안정하였는데, 이것은 상승하는 관성력과 얼음입자에 의한 부력의 상호작용에 의한 것으로 짐작된다. 상향수직관에서의 이러한 유동 불안정은 Fig. 5(b)에서 볼 수 있듯이 유량이 작을수록 더욱 심해지는 것이 확인되었다. 수평엘보우에서의 압력강하 변동은 수평관에서의 그것과 유사하였다.

배관자세, 유량, 그리고 IPF에 따른 아이스슬러

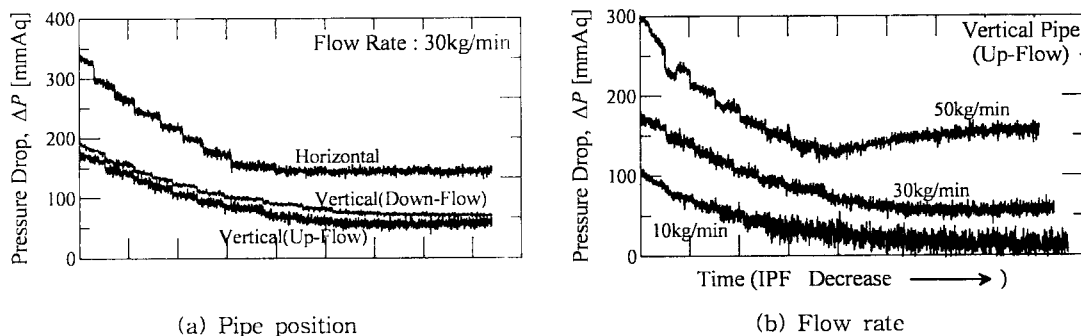


Fig. 5 Pressure drop fluctuation with IPF.

리 유동의 불안정성이 육안으로 관찰되지는 않았으나, IPF가 작고 유량이 적은 경우 배관내 얼음 입자의 분포가 균일하지 않은 것이 유동 불안정의 한 원인이라고 짐작된다.

#### 4. 결 론

EG 6.5% 수용액을 이용하여 만들어진 아이스 슬러리를 내경 24mm인 아크릴 배관으로 직접 수송하면서 유동형태와 압력강하 변동을 살펴보았다. 여러 개의 엘보우를 포함한 다양한 배관으로 구성된 회로에 아이스슬러리를 수송하였으나, 실험조건(유량 : ~70 kg/min, IPF : ~30%) 내에서 관내밀폐는 발생하지 않았다.

아이스슬러리의 유량과 IPF가 작은 경우에는 얼음입자가 배관 상단부에 모여 유동하는 부유유동이 확인되었으며, IPF와 유량이 증가할수록 얼음입자가 배관 전단면에 고르게 분포하여 유동하는 균질유동 형태임을 알 수 있었다. 단속적인 cluster가 유동하는 피상유동 형태는 관찰되지 않았다.

아이스슬러리의 유동은 하향수직관에서 가장 안정적이었으며 상향수직관에서 가장 불안정하였다. 또한 유량이 적고 IPF가 작은 경우에 유동이 불안정하였는데, 이것은 배관내 얼음입자의 분포가 균일하지 않기 때문으로 판단되었다.

#### 후 기

본 연구는 산업자원부에서 시행한 산업기반기술개발사업의 일환으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

- Inaba, H. and Lee, D.W., 1996, Study on the critical conditions of ice formation for continuous ice making system in a cooling pipe, 3rd KSME-JSME Thermal Engineering Conference, pp. I233-I238.
- Lee, D.W., 2001, Ice slurry type storage system and utilization, The Magazine of the SAREK, Vol. 30, No. 6, pp. 21-26.
- Lee, D.W., 2001, Cold heat transportation using ice slurry, The Magazine of the SAREK, Vol. 30, No. 12, pp. 8-14.
- 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.
- Shirakashi, M., Kawakami, I., Sato, S. and Wakiya, S., 1983, On hydraulic conveying of snow (I. Pressure losses in straight circular pipes), Japanese Journal of Snow and Ice, Vol. 45, No. 1, pp. 33-39.
- Shirakashi, M., Sato, K., Sato, S., Koshio, A., Umemura, T. and Wakiya, S., 1984, Hydraulic conveying of snow (IV. Flow pattern of snow/water mixture in straight pipes), Japanese Journal of Snow and Ice, Vol. 46, No. 4, pp. 163-170.
- 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.
- Im, H.M., Kim, M.R. and Yoon, J.G., 2001, Ice storage system using ice slurry, Proceeding of the SAREK Summer Annual Conference (II), pp. 17-24.
- 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.