

連載

빙축열의 시스템적 효과에 관한 고찰 (Ⅱ)

Systematic Effects of Ice Storage System (Ⅱ)

생산기술연구원 빙축열 연구팀  
Ice Storage Research Group  
KA ITECH

전력 부하의 평준화를 도모하여 발전설비를 효율적으로 이용하고 쾌적한 냉방환경을 조성하기 위하여 우리나라에서도 빙축열을 이용한 냉방시스템의 활발한 보급이 이루어지기 시작했습니다. 이와 때를 같이하여 최근 일본 東電建設(株)의 中本泰發씨가 省에너지誌에 게재한 “빙축열의 시스템적 효과에 관한 고찰”이 우리나라 빙축열 관련 종사자 제위에게도 많은 참고가 되리라 사료되어 생산기술연구원 빙축열 연구팀에서 번역하여 금번 '94년 4월 호부터 7회에 걸쳐 연재할 예정입니다. 참고로 원문의 내용 및 분위기를 살리기 위하여 직역하였음을 밝힙니다.

5. 수송특성

지난 호에서는, 효과적인 빙축열시스템의 적용을 위한 도입으로서 시스템 전체의 평가에 대해서 기술하였다.

우선, 빙축열시스템은 수축열보다 경제성 향상과 운용의 편이성등의 기대하에서 등장했으며서도 평가가 제대로 되어있지 않다는 사실, 그 요인으로서 에너지 소비와 초기투자가 커진다는 점을 기술하였다. 그리고 빙축열시스템은 축열조 속의 물을 단순히 얼음으로 치환시킨 대체시스템이나 sub-system이 아니고 얼음에 의한 고밀도 에너지저장과 얼음의 잠열직접수송과 그 저온수를 이용한 사용말단에 있어서의 대온도차 공조와 병행한다는 측면에서 수축열시스템과는 별개의 독립시스템이라는 관계자의 강한 인식이 빙축열시스템의 향후의 발전을 위하여 반드시 필요하다는 사실을 제기하였다.

그러면 그 핵심이 되는 얼음의 수송은 기술적으로 문제가 없는 것일까? 만일 운전의 안정성, 신뢰성, 안전성 등에 지장을 초래할 우

려가 있다면 그것이 실제 운용에 미치는 영향의 정도를 확인하여 관련된 기술을 통하여 해결해두지 않으면 안된다. 무엇보다도 관로에 있어서 얼음의 폐색(閉塞)에 따른 운전의 정지와 보수·관리에 대한 걱정은 얼음수송의 실용화를 저해하는 가장 중요한 과제이다.

그래서 이번 호에서는 이들 얼음을 포함한 고체액체 이상(二相)유동의 거동과 압력손실에 대해서 기술하고자 한다.

또한, 고체와 액체의 혼상류 유동에서 고체의 비율을 나타내는 경우, 슬어로서의 「농도」는 다소 개념적이며, 「밀도」도 반드시 엄밀하다고는 말할 수 없다. 그래서 본문에서는 공학적 표현으로서 「고상분율(固相分率)」(고체상태가 얼음인 경우는 「빙분율(氷分率)」)을 사용하도록 하며, 「수송로내에 존재하는, 또는 관단면을 통과하는 고체(또는 얼음) 질량의 전체 이상유동 질량에 대한 평균적 비율」로 정의한다. 또한 축열조내의 얼음의 양에 대해서도 본문에서는 JIS B 8624-1993 「빙축열시스템 용어」에 기초하여 「빙충전율」 혹은 「빙량」을 사용하나 특히 공학적인 엄밀함이

요구되는 경우에는 역시 「빙분율」을 사용할 것이며, 일반적으로 관용되는 「I.P.F.(Ice Packing Factor)」는 정의가 애매하므로 사용하지 않는 것으로 한다.

### 5.1 얼음의 조건

얼음을 수송할 때 그 효과를 최대한 발휘하기 위한 얼음의 성질로서는

- ① 유동성이 좋고 높은 빙분율에서 수송이나 저장이 가능할 것
- ② 빙입자끼리 재웅집하지 않고 또 배관장치 등에 부착성이 작을 것
- ③ 얼음이 용해하기 쉽고 부하변동 등에 응답성이 좋을 것
- ④ 얼음의 온도가 높을 것
- ⑤ 기포나 brine등을 포함하지 않을 것

등을 들 수 있다. 이 경우 자주 거론되는 「얼음의 입자가 작을 것」은 해빙을 위해서는 좋을지 모르나 수송을 위해서 적합한지 어떤지는 지금의 단계에서는 확실하게 말할 수 없다. 이 점에 대해서는 후술하는 5.4항 「유동의 폐색」에서 다루어질 것이다.

빙축열시스템을 논하고자 할 때 그 얼음을 어떻게 해서 만드는가는 그것이 에너지 소비나 건설비등 시스템의 경제성 평가에 큰 영향을 미치는 요인의 하나이므로 간과할 수 없다. 특히 얼음을 수송하고자 한다면, 필연적으로 유동식(dynamic 방식)으로 만든 액체상태의 얼음(liquid ice)를 사용하게 된다. Liquid ice는 결정성의 샤베트 상태로 위의 모든 조건을 거의 만족시킬 수 있다. 물론 샤베트 상태가 아니어도 harvest ice등과 같이 고체상태의 얼음을 부수어서 유동성을 얻을 수가 있다면 그것도 사용할 수 있다.

Sejima<sup>1)</sup>등에 의하면 프로펠렌글리콜 5% 용액으로 만들어진 샤베트상태의 얼음은 얼음의 온도는 낮으나 부착성이 낮아 유동성이 좋다는 사실을 확인하였으며, 맑은 물로 만든 얼음은 굵은 설탕같은 형태로 부착성이 강해 유동성이 뒤떨어지므로, 얼음의 수송을 위해

서는 brine으로 만든 얼음이 적합하다고는 하나 실제로 정확히 규명되지는 않았다. 확실히 석탄이나 모래와 같이 고체와 액체와의 밀도차가 크고 또한 고체입자끼리 서로 응축·고착하여 합해져서 입자크기를 성장시키는 일이 거의 없는 일반적인 고액(固液)혼상류와는 달리, 얼음과 물의 이상(二相)류에서는 밀도차가 아주 작고, 또한 장시간의 저장이나 유동을 통하여 얼음입자가 서로 부착하여 얼음 덩어리로 성장하는 특유한 거동을 나타낸다. Shiragashi<sup>2)</sup>등은 눈의 수력수송에 대하여 신설(新雪)쪽이 싸라기눈 보다도 눈입자간의 결합력이 강하고, 유동상태에 차이가 보이는 점을 지적하고 있다. 따라서 이들의 보고는 얼음의 제조방법이나 얼음의 온도, 제조후의 경과시간, 저장의 조건, 얼음입자의 크기, brine의 종류등이 관여하며, 얼음·물이상(二相)유동 형태에 차이를 발생시킬 가능성을 시사하고 있다고도 생각된다.

본고에서 얼음제조방식을 상세히 기술하는 것은 장황하게 되기 때문에 생략한다.

### 5.2 유동의 관찰

얼음의 수송에 관한 연구는 (주)Ohbashira-kumi가 선행적으로 착수한 몇년전까지, 국내의 계통을 세운 공학적인연구라고 할 수 있는 Nagaoka 기술과학대학에서의 눈의 수력수송에 관한 것 뿐이며, 이것이 얼음·물이상(二相)흐름의 연구로서 귀중한 지침을 부여한다고 말할 수 있는 유일한 자료였다. 최근, 1~2년 사이 몇몇 새로운 연구 group의 보고가 발표되어 얼음수송의 연구로 확대되고 새로운 지식도 추가되어지는 것은 바람직한 일이다.

이들의 성과로부터 일반적인 유동의 형태를 종합하면 빙분률, 유속과 모두 작은 경우에는 얼음은 관로의 상부에 편재하며, 물에 관벽을 스치며 흐르는 마찰 유동형태로 되나 유속의 증가와 더불어 얼음입자는 관성력과 점성전단력을 받게되어, 부유유동을 형성했던 얼음과 물의 경계층이 무너지기 시작하여 비균질 유

동으로 천이하고 균질유동형태로 변화해 간다.

또한, 빙분률의 증가와 함께

① 관내의 얼음이 구름 형태가 되어 관의 상부를 부유하는 부유유동

② 얼음이 관단면 전체에 거의 일정하게 분산하고 있는 균질 유동

③ 관내의 얼음이 기둥처럼 하나로 합체해서 이동하는 주상(柱狀)유동

으로 flow patten이 변화하는 모양이 관찰되고 있으며, 이와같은 유동상태의 변화는 뒤에 언급할 압력손실에 큰 영향을 미친다. 이 경우 관경이 클수록 유속에 의한 얼음과 물의 혼합작용은 상대적으로 작아진다고 생각되므로 소구경관을 이용한 실험에서는 주상유동으로의 천이는 비교적 작은 빙분율에서 일어나게 된다.

얼음과 물의 이상유동의 분기에서는 모관의 유속이 클 경우, 얼음을 분기하기 어려워진다. Harvest ice인 경우,<sup>3)</sup> 수평이나 하향으로의 분기관에서 분기한 물의 양에 비해서 분기한 얼음의 양이 적고, 수평 분기인 경우에 약 10%, 하향분기인 경우에는 약 20%나 적다. 한편, 상향으로 분기한 경우는 분기한 물의 양에 비해서 분기한 얼음의 양이 10% 정도 많아진다. 입경이나 분기의 각도의 영향은 분기하는 방향에 비교하면 작다고 말할 수 있다. 이것은 얼음이 관의 상방으로 편재해서 유동한다고 하는 전술한 수평관의 관찰결과와 일치하며, 얼음입자가 분명히 중력(부력)의 영향을 받고 있다는 것을 나타내고 있다.

이처럼 물로 수송되는 얼음입자에는 압송력, 부력, 관성력, 항력(형상저항), 점성저항, 마찰력등이 작용하며 이들이 얼음입자의 유속을 결정하지만, 유동 형태에 영향을 미치는 요인으로는 유속이나 빙분률 외에 배관의 형상(관의 자세, 관경, 굽음, 분기, 합류 등)이나 얼음의 성질, 얼음입자 크기와 관경의 비가 있다. 얼음의 성질에 대해서는 전향에서 언급한 것처럼 얼음의 제조방법이나 brine의

종류등에 의해서 이상유동의 형태에 차이가 있을 가능성이 있다.

### 5.3 수송관에 있어서 압력손실

얼음의 수력수송에서의 관로의 압력손실에 지배적 요인으로서의 우선, 관내의 평균유속(또는 대표유속) $U$ 와 빙분률  $C$ 가 있으며, 다음으로 배관경  $D$ 를 생각할 수 있다. 물 단상(單相)일 때의 수력구배(관의 단위길이마다의 압력손실)  $\Delta P_w$ 에 대하여, 이것에 얼음을 혼입하여서 얼음의 빙분률이  $C$ 가 되는 이상유동의 수력구배의  $\Delta P_c$ 의 변화를 부가압력손실계수  $\phi$  를,

$$\phi = (\Delta P_c - \Delta P_w) / (C \cdot \Delta P_w)$$

이라고 정의하면, 그 일반적 경향은 빙분률에 거의 비례하며 유속이 작을수록 크고 유속의 증가와 함께 상대적으로 작아지며, 어떤 유속 이상에서는 거의 빙분률에 의존하지 않고 0에 근접한다. 이것은 유속의 증가에 따라서 얼음이 잘 교반되어 균질유동이 된다는 전향에서와 유동의 관찰과 일치한다.

유속이 작은 수평관에서 부가압력손실계수가 빙분률과 함께 커지는 것은 부유유동에 의한 관의 벽면전단력이 현저히 증가하기 때문으로 이 경향은 수직관의 경우에도 볼 수 있으나 수평관에 비하여 그 증가는 작고 빙분률에 대한 의존성도 명료하지 않다.

부가압력손실계수  $\phi$  는, 얼음의 비중을  $\rho$  (0.917), 중력가속도를  $g(9.80m/s^2)$ 이라고 하면 일반적으로 Froude 수  $Fr$ 만의 함수,

$$Fr = u^2 / \{(1 - \rho) \cdot g \cdot D\}$$

로써 표현되며 Takemoto등에 따르면 수평관에서는 빙분률이 20%를 넘는 경우에도

$$\phi = 20Fr^{-0.8}$$

의 형태로 정리할 수 있을 것이다.

그림 5-1에 수평관의 압력손실의 실험 data의 예를 나타낸다.

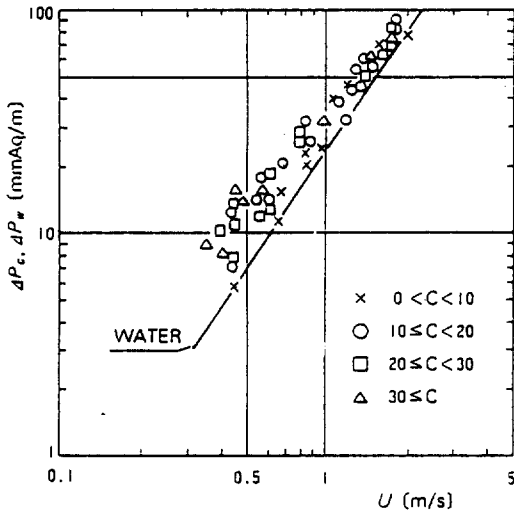


그림 5-1 수평관의 압력손실(관경 50mm)<sup>4)</sup>

수직관에서의 압력손실은 관벽에서의 점성 마찰에 의해서 발생하는 것 이외에 중력의 작용에 의해 생기는 압력차 및 혼상류에 포함되어 있는 밀도가 작은 얼음입자에 위치 energy 를 주기 위해서 발생하는 압력차가 포함된다. 따라서 상향유동에서의 압력손실은 물단상(單相)의 그것보다도 작고 반대로 하향유동에서는 얼음의 혼입은 항상 수력구배를 증가시키는 방향으로 작용한다. 또 빙분류의 영향에 대해서는 하향유동에 대한 압력손실 증가율이 빙분류와 함께 증대하는 경향을 보이며, 그 경향은 유속이 작은 쪽이 현저하게 나타나고 있다.<sup>5)</sup> 이것은 유체 전체에 작용하는 힘 중에서 부력이 차지하는 비율이 상대적으로 크기 때문이라고 생각할 수 있다. 그러나 유속이 커지면 수력구배에 관한 빙분류의 영향은 상대적으로 작아지며 물단상(單相)에 있어서의 수치로 근접하며 유동 방향에 관계하지 않는다.

그런데 고액이상류(固液二相流)와 같은 혼상류에 있어서 어떤 조건하에서의 부가압력손실계수가 음이 되는 현상이 보이는 것은 이미 알려져 있다. Wakamoto등<sup>6)</sup>은 얼음과 물의 이상동에서의 압력손실이 물단상의 경우보다

도 작고, 특히 유속이 2.6m/s 이상에서는 빙분류가 클수록 빙수(氷水)의 압력손실의 폭이 작아지는 현상을 관찰하였다고 보고하였다. 이점에 대해서 Inaba<sup>7)</sup>는 이론적으로 명확하지는 않지만 고분자에서의 toms 효과나 고액 현탁액슬라리에서 관찰되는 sigma효과와 같은 현상이 빙수이상유동에서도 생기며, 어떤 유속이상이 되면 물보다도 빙수쪽 유동 저항이 적게되는 영역도 있을 수 있다고 보고되었다. 만약 이같은 현상이 재현되는 조건이 해명된다면 얼음의 이상수송은 한층 energy 절약설계의 가능성이 기대되는데, 이런 종류의 관찰은 필자가 아는 한 국내에서 유일한 것으로 다소 당황되는 바이다.

Takemoto등은 분기·집합배관이나 elbow 등의 자세변화에 따른 손실에 대해서 상세한 실험을 하였다. 그것에 의하면 이와같은 장소에서 발생하는 와류(渦流)에 의한 유동의 혼란과 얼음의 혼입에 따른 관벽과의 마찰저항이 증가한 결과, 손실수도의 증가율은 같은 유속의 물단상(單相)에 비해 커지며 또 빙분류와 같이 증가하지만 수평곡관의 압력손실에 대해서는 수평직관일수록 얼음의 영향이 명확하게 나타나지 않는다고 밝히고 있다. 수평축류부(縮流部)에 있어서 축류부의 압력손실은 본래 크기 때문에 얼음 혼입의 영향은 명확하게 나타나지 않는다. 수평에서 하향으로 흐름이 변하는 elbow에서는 유속이 작은 범위에서 물단상(單相)보다도 곡관손실이 감소하는 경향이 보인다. 이것은 얼음의 존재가 elbow에 의한 유동의 혼란도를 억제하는 효과를 나타내며 결과적으로 곡관손실을 감소시킨 결과로 생각된다.

이처럼 압력손실에 관해서는 물단상에서의 일반적 경향과 크게 다른 점은 없고, 얼음의 혼입은 분기부나 합류부의 유동형태에 기본적인 차이를 주지는 않는다. 그러나 빙분류이나 유속의 조건 여하에 따라 물단상인 경우의 압력손실보다도 극단으로 큰 값이 되는 것이 예상되므로 그 임계값이나 적절한 조건을 정할

필요가 있을 것이다.

또한, 고상분률(固相分率)이 클 때, 새눈 쪽이 싸라기눈 보다 큰 수력구배를 주는 경향이 보이며 특히, 관직경이 커지면 수평관의 경우, 유속이 1.0m/s 이상에서 눈의 질에 의한 수력구배로의 영향이 한층 명확하게 나타난다는 Shir agashi<sup>9)</sup> 등의 보고는 대구경관을 고려하는 경우에 참고가 된다. 이러한 눈의 질에 의한 수력구배의 차이는 싸라기 눈인 경우, 눈 입자와 물의 혼합체 가운데 눈덩어리가 떠 유동인 것에 비해 새눈은 주상(柱狀)유동 혹은 그것에 가까운 괴상(塊狀)유동이 되는 흐름의 형태를 반영하고 있는 것이라고 생각된다. 얼음에 대해서도 똑같이 얼음의 제법이나 성질에 따라서 또한 특히, 관구경에 의해서 차이가 나타난다고 필자는 추론하고 있다.

#### 5.4 흐름의 정체와 폐색

폐색은 일반적으로 유속이 작은 경우, 혹은 관로중의 저유속부 같은 흐름하에서 얼음등이 정체하기 쉬운 형상을 갖는 부분에 있어서, 빙괴(冰塊)의 존재때문에 발생한다. 얼음의 분률이 큰 것도 폐색의 조건이라고 생각된다.

Brine에서부터 가열발리방식으로 만들어진 얼음을 이용한 실험<sup>9)</sup>에서는 관로의 분기부, 합류부, 연속곡관부, 맹관곡관부의 어느쪽에 있어서 폐색은 발생하지 않았다. 축류부(縮流部)에 있어서 관경 150A에서는 발생하지 않으나 50A에서는 폐색하였다. 또 밸브에서는 종류에 상관없이 같은 정도의 개구높이(Opening height : 약 13mm)이하에서 폐색하였다. 그러나 150A는 50A에서 비해서 폐색에 이르는 개구 높이에 변동이 많고 50A에서 폐색한 개구높이에서도 폐색하지 않는 것도 있었다. 또한 globe 밸브에 비해 butterfly 밸브는 안정적으로 흐른다는 것도 알았다. 유속의 변화나 빙분률은 폐색과 직접적인 관련성이 인정되지 않으며 10~20mm인 빙괴의 존재가 원인이었다. 이것은, 얼음위출구에 hatching metal을 이용한 빙괴유출방지판을 설치함으

로써 축류부나 밸브에서 폐색의 발생이 없어짐으로써 입증되었다고 한다.

이 결과는, 빙수이상류에 있어서 일정 크기 이상의 빙괴가 존재하지 않는다는 조건부 결과이나 통상의 밸브에 유량제어가 가능하다는 것을 시사해주는 귀중한 자료이다. 또한 본 실험에서는 눈의 수력수송에 대하여 관찰한 압밀형(壓密型)의 폐색<sup>10)</sup>에 대한 언급은 없다. 설수혼합류(雪水混合流)에서 압밀형의 폐색은 예를들면 유로에 단차가 있는 부분에서의 설괴의 정체 등을 원인으로 해서 시작하며, 눈이 서로 부착하여 점차로 성장해 감에 따라 쉽게 단단한 덩어리가 되는 눈의 성질때문에 수류에 의한 동압으로 늘려서 굳어지며 결국에는 관로전체를 폐색하게 되는 것이다.

이처럼 압밀형폐색은 고체입자간에 서로 부착하는 성질이 있는 고체수송인 경우에 특징적인 것으로, 석탄이나 모래의 슬라리 수송 등에 있어서 퇴적층의 형성에 따라 생기는 폐색과는 성질이 다르다. 필자의 다른 목적의 연구에서 ABC 수지제 beads(평균직경 3.5mm, 밀도 1.04g/cm<sup>3</sup>)는 관로를 net등으로 막아서 물만을 통과시키는 상태로 만들어서 관로내의 모든 beads을 한장소로 정체시켜도 net을 제거해 버리면 즉시 흐름은 회복되고 압밀형의 폐색을 만들지 않는다.

해빙은 어찌되었든, 수송의 면에서 보면, 결정성의 얼음입자경이 작은 것이 반드시 유리하다고 말할 수 없는 것이다. Inaba는 얼음직경이 클수록 접촉면적이 작으므로 유동저항이 작고 박리되어 흐르는 경향이 있는 것이라고 밝히고 있다. 그러한 의미에서 harvest 얼음처럼 형상이 크고(5×10~25mm) 또한 일정하지 않은 얼음은 폐색에 대하여 유리한 방향으로 운동할 지도 모른다. 그러나 앞에서 기술한 것처럼 결정성의 brine 얼음은 잘 굳어지지 않는다. 이것들은 얼음의 수송에 극히 중요한 지식이므로 충분한 검증이 있어야만 한다.

어떻든 눈이나 얼음의 수력수송에서는 관경

에 따라서 정체나 폐색의 발생 형태가 다르다는 것이 보고되고 있으므로 1m을 넘는 실용 규모 DHC(District Heating and Cooling)용 대구경배관에서는 지금까지 연구되어 온 것 같은 소규모의 배관과는 유동특성이 다를 것이라고 생각된다.

설계상의 지침으로서의 우선, 폐색의 원인이 될 가능성이 있는 것을 유로중에 놓지 않는 것이 기본이다. orifice형의 교축장치, 유로 단면적이 급격히 작아지는 장소, globe 밸브 등은 폐색이 발생할 위험이 있다. 불가피하게 필요한 곡관이나 제어밸브, check 밸브 등의 사용도 최소로 하면 좋겠다. 유량계(열량계)에 있어서도, 관로중에 sensor 부분 등이 노출되지 않는 비접촉으로 하는 것이 이상적이다. 앞서 말한 빙괴유출방지판이나 빙분률조정기 등 얼음을 여과하는 것과 같은 것을 사용하는 것은 좋지 않다.

빙괴의 발생은, 저장조에서 저장시간의 경과에 따라 발생하는 것과 관로에서 흐르는 도중에 발생하는 것이 있으며, 그 원인으로는

- ① 공기와의 접에 의한 얼음표면으로의 공기중의 수증기의 응결
- ② 얼음표면의 융해·재동결에 의한 얼음끼리 고착 등이 있으나 이들의 발생 mechanism의 해명도 필요할 것이다.

이상, 얼음의 물에 의한 수송특성에 대해서 기술하였다. 즉, 수송시스템내에 얼음의 정체를 만들지 않는 적절한 설계와 요소·기구의 사용이 중요하며 그것이 충분히 가능할 것, 물단상(單相)과 같은 기준에서 설계할 수 있는 것, 관로에 있어서 곡관이나 분기의 부분은 어느쪽의 자세에 있어서도 장애의 요인으로는 안된다는 점 등이 판명되었다.

다음호에서는, 저장이나 관로에 있어서 빙분률의 한계와 경제성에 대해서 기술한다.

## 참 고 문 헌

1. Sejima등 : Dynamic ice의 지역냉방에의 응용연구(제1보), 전체목표와 연구개요, 공기조화·위생공학회 Kinki지부학술연구회발표논문집(91-3-19)
2. Shiragashi등 : 눈의 수력반송에 관한 연구(제4보), 설수이상류(雪水二相流)의 관내류의 관찰, 「설빙」 46권 4호(1984-12)
3. Takemoto등 : 얼음의 수력반송에 관한 연구, 빙수의 분기특성, 공기조화·위생공학회 학술강연회 강연논문집(90-10-24 Sapporo)
4. Takemoto등 : 얼음의 수력반송에 관한 연구(제2보), 수평직관 및 elbow에 관한 압력손실, 공기조화·위생공학회학술강연회강연논문집(1989-10-4 nagoya)
5. Kobori등 : 얼음의 수력반송에 관한 연구(제6보), 수직직관에서의 압력손실, 일본건축학회대회학술강연논문집(1991-9 Tohaku)
6. Wakamoto등 : 빙수의 유동특성에 관한 연구, 제26회 공기조화·냉동연합강연회강연논문집(1992-4-21, 22 동경)
7. Inaba등 : 「빙축열기술의 기초」 제9회 혼상류 lecture series, 일본혼상류학회(1992-12-2, 3 Osaka)
8. Shragashi등 : 눈의 수력수송에 관한 연구(제5보), 직관에 있어서 압력손실에 대한 제인자의 영향, 「설빙」 46권 4호(1984-12)
9. Miwaki등 : Dynamic ice의 지역냉방에의 응용연구(제3보) 폐색현상의 검토, 공기조화·위생공학회학술강연회강연논문집(1992-10-7~9 Koriyama)
10. Umemura : 눈의 수력수송에 관한 연구(제8보), 설빙이상류의 폐색현상과 교축에서의 정체의 발생 한계, 「설빙」 48권 4호(1986-12)