한국에너지공학회지(2000), 제9권 제3호
Energy Engg. J(2000), Vol. 9, No. 3, pp. 178~183

학술논문

유동과냉각수 이용 제빙관의 동결조건에 관한 실험적 연구

박영하 · 현명택* · 이동원**
제주관광대학 메카트로닉스계열, *제주대학교 기계공학과
**한국에너지기술연구소

Experimental Study on the Freezing Conditions in a Ice-making Tube Using Flowing Subcooled Water

Young-Ha Park, Myung-Taek Hyun* and Dong-Won Lee**
Department of Mechatronics, Cheju tourism college
**Department of Mechanical Engineering, Cheju National University*
***Korea Institute of Energy Research*

요 약

본 연구에서는 유동과냉각수를 이용하는 아이스슬러리 제조과정을 관찰하고, 이 시스템의 가장 큰 문제점인 관내동결 특성을 파악하였다. 시험수로는 수도수(city water)를 이용하였다. 시스템을 순환하는 시험수가 제빙관내에서 0℃ 이하의 과냉각 조건이 형성되어 제빙관을 빠져 나오면서 축냉조에 설치된 충격판 상에서 과냉각 해소가 일어났다. 이때 유동과냉각수는 내부에너지를 방출하면서 그 일부가 얼음 입자로 상변화되었고, 나머지는 실험장치를 계속 순환하였다. 제빙관에서 시험수와 브라인의 열교환 방식을 대향류와 평행류 두 조건에서 시험수의 과냉각도는 Reynolds 수가 증가함에 따라 감소하는 경향을 보였고, 이들 결과 값으로부터 각각의 관계식을 유도하였다. 또한 브라인의 냉각속도가 0.29~0.53[℃/min] 범위에서 시험수의 과냉각도는 브라인 냉각속도에 종속되지 않았다.

Abstract — The object of this study was to identify the critical condition of ice blockage of flowing subcooled water for the design of ice slurry making system. Relating to the ice blockage of ice-making tube, the city water was used as the test sample. The experimental condition was controlled with respect to the flow rate of test water and cooling velocity of coolant. As a result, it could be observed continuously column of the ice slurry on the impact plate. In addition, the distribution curve of subcooling degree showed decreasing tendency with an increase in the Reynolds number in case of a counter-flow and parallel-flow heat exchanger, and the subcooling degree was independent of cooling velocity in the region of 0.29~0.53[℃/min].

1. 서 론

빙축열 시스템은 심야시간대 저렴한 잉여전력을 이용하여 얼음을 생산한 후 주간 냉방수요에 대응함으로써 에너지의 효율적 이용을 도모할 수 있다[1]. 본 연구에서 다루고 있는 아이스슬러리(ice slurry) 제빙방식은 유동과냉각수의 상변화 원리를 이용하여 유동성이 좋은 0℃ 얼음을 연속 제빙하는 방법으로, 시스템이 간단하고 경제적이며 부하변동에 따른 축열량 조절이 용이하다는 장점이 있다[2]. 이때 시스템의 실용적 이용을 위해 아이스슬러리를 안정적으로 얻어내는 것이 중요하다. 그러나 제빙과정 중 제빙관 내부에서 얼음이 생겨 이것이 제빙관을 밀폐시키는 관내동결로 인해 제빙이 중단되기 쉬우며, 이 문제점을 해결하는 것이 중요한 기술적 사항이다. 지금까지 과냉각 현상[3]-[9] 및 관내동결[10]-[11]에 관한 연구들이 보고되고 있으나, 아이스슬러리 제빙 시스템 적용을 위한 연구는 많지 않다.

본 연구에서는 유동과냉각수 이용 아이스슬러리 제빙

시스템에서 발생하는 관내동결과 관련하여 제반조건들이 미치는 영향을 실험적으로 알아보았다. 이 결과는 연속적으로 얼음을 제조할 수 있는 허용가능한 과냉각 조건을 규명함으로써 시스템 실용화에 적용될 수 있을 것이다.

2. 실험장치 및 방법

2-1. 실험장치

실험장치는 Fig. 1과 같이 냉동기, 1차 저장조, 2차 저장조, 순환펌프, 판형 열교환기, 아이스슬러리 축냉조 및 제빙관 등으로 구성되어 있으며, 이들 주요사양을 Table 1에 정리하였다.

1차 저장조내 브라인은 -30℃까지 온도조절이 가능한 공냉식 냉동기에 의해 항상 -20℃의 온도로 유지되고, 저장된 냉열은 판형 열교환기를 통하여 2차 저장조내 브라인의 온도를 균일하게 냉각하는데 이용되었다.

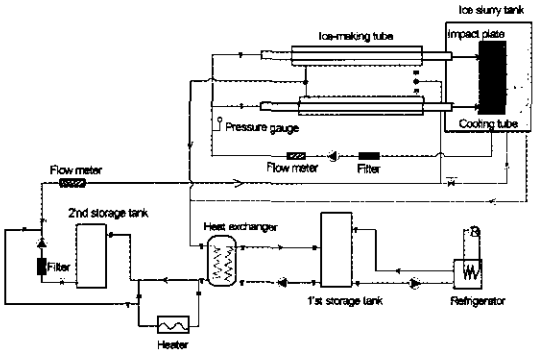

Fig. 1. Experimental apparatus of the ice slurry making system.

Table 1. Specifications of the used experimental apparatus.

Items	Specifications
Refrigerator	7.5HP
1'st storage tank	400 *l*
2'nd storage tank	23 *l*
Circulation pump of test water	0.4 kW, Scherzinger 8200M037/2800
Data acquisition	Datascan 7320
Ice slurry tank	1000 mm×700 mm×1300 mm (length×width×height)
Inner cooling tube	Length : 2.5 m I.D. : 11 mm, O.D. : 13 mm
Outer cooling tube	Length : 2.5 m I.D. : 43 mm, O.D. : 39 mm

제빙관은 아이스슬러리를 제조하는 장치로써 수평으로 설치된 동심 이중관형 열교환기이며, 관 외부는 두께 30 mm 보온재로써 외부와의 열교환을 차단하였다. 제빙관 재질은 스텐레스강이며 내부관으로는 시험수가 순환하고, 동시에 외부관으로 판형 열교환기를 통과한 브라인이 흐르도록 하였다.

아이스슬러리 생성과정에 대한 관찰이 용이하도록 아이스슬러리 축냉조의 재질은 아크릴로 제작하고 외면은 보온재로 단열 하였다. 축냉조 내부는 스텐레스강으로 제작된 충격판을 설치하여, 제빙관으로부터 배출된 시험수의 과냉각을 해소시킴으로써 유동과냉각수가 얼음으로 쉽게 상변화 되도록 하였다. 얼음으로 상변화 되지 않은 유동수는 하부로 떨어져 시스템을 계속 순환하였다. 각 지점의 온도측정은 T-type 열전대를 사용하였으며, 시험수 및 냉각수의 유량은 OVAL Flow PET 유량계를 이용하였다. 제빙관을 통과하는 시험수의 압력변화를 측정하기 위해 제빙관 입구에 Setra 280E 정밀 압력계를 장착하였다. 실험 중 측정 데이터는 시험수 및 브라인 입·출구 온도와 유량, 시험수 압력 등이었으며, 데이터는 측정장치를 거쳐 컴퓨터에 저장되었다.

2-2. 실험방법 및 조건

실험 전 아이스슬러리 축냉조 내부를 깨끗하게 한 후 시험수를 채우고, 축냉조 하부에 설치된 냉각관과 제빙관을 이용하여 축냉조의 시험수 온도를 1℃ 이내로 조절하였다. 시험수 및 브라인 유량은 조건에 따라 실험 전에 미리 주어진 값으로 설정하였다. 제빙관 입구의 브라인 온도는 시험수 온도를 고려하여 최초 -2℃로 설정하였으며, 실험 시작과 동시에 판형 열교환기를 통과하면서 온도가 점차 낮아지도록 하였다. 판형 열교환기를 통과한 브라인은 제빙관 외부를 유동하고 동시에 내부

Table 2. Experimental conditions.

Items		Conditions
Test sample (City water at 0℃)	R [Ωcm · 10^4]	0.7
	k [W/mK]	0.558
	ρ [kg/m^3]	998.2
Re. number of *test water*	Counter-flow	2,000~12,000
	Parallel-flow	
Flowrate range of test water		2.0~11.2
Cooling velocity of coolant [℃/min]		0.29~0.53
Flowrate of coolant [*l*/min]		about 20
Diameter ratio of ice-making tube (α)		0.28
Initial temp. [℃]	1'st storage tank	-20
	2'nd storage tank	-3
	Ice slurry tank	0.9±0.1

로는 시험수가 유동하면서, 시험수의 온도는 점차 낮아져 물의 이론적 동결점인 0℃ 이하로 강하하여 유동과냉각수가 되었다. 제빙관을 통과한 유동과냉각수는 충격판상에 연속적으로 아이스슬러리를 생성하였으며, 일정시간 경과 후 실제 동결점에 도달하게 되어 관내동결이 일어났다. 실험이 종료되면 히터를 이용하여 2차 저장조의 온도를 상승시켜 제빙관내 얼음을 완전히 제거한 후 다음 실험에 대비하였다.

실험은 제빙관에서 시험수와 브라인의 열교환 방식을 대향류와 평행류로 변화시키면서 각각의 조건에서 시험수의 유량을 변화시켰다. 또한 브라인의 냉각속도를 변화시켜가면서 이들 실험조건에 대한 유동 과냉각수의 동결조건을 파악하고 아이스슬러리 제빙과정을 관찰하였다. Table 2는 실험조건을 요약하여 나타낸 것이다.

3. 아이스슬러리의 제조

Fig. 2의 (a)는 충격판 상에 아이스슬러리가 처음으로 생성되는 형상이다. 제빙관내를 유동하는 시험수 출구온도가 물의 이론상 어는점인 0℃ 이하(과냉각상태)로 내려가기 시작하면 제빙관에서 배출되는 유동 과냉각수는 충격판과 충돌이 되면서 미세한 얼음 입자를 형성하였다. Fig. 2의 (b), (c)는 최초 얼음이 형성된 후 10초와 180초를 각각 경과한 상황이다. 일단 얼음 입자가 형성된 후에는 아이스슬러리가 얼음 기둥의 형태로 빠르게 성장하는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 2의 (d)는 600초가 경과된 후의 얼음 기둥으로서, 생성된 얼음이 충격판 상에서 자중에 의해 축냉조 하부로 떨어지고 이 후 그 자리에 계속적으로 얼음 기둥이 형성되었다. 이때 형성된 얼음은 아주 미세한 얼음 입자로서 해빙특성이 우수할 것으로 예상되었다.

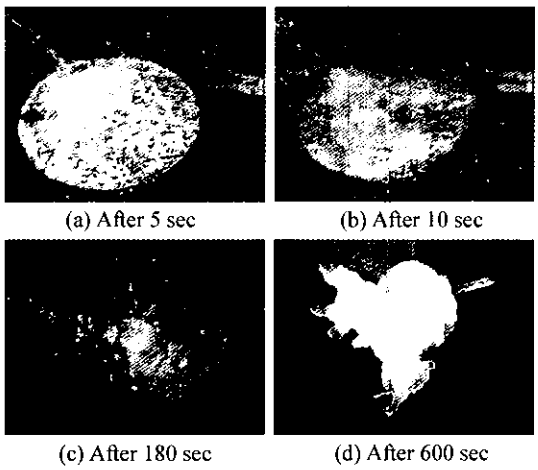

Fig. 2. Photograph of ice slurry.

4. 실험결과

4-1. 과냉각도와 임계과냉각도

제빙관에서 시험수와 브라인의 열교환이 시작되고 브라인의 온도가 내려감에 따라서 제빙관내를 유동하는 유체의 온도도 점점 내려가기 시작하여 0℃ 이하가 되면 유동과냉각 조건이 형성되었다. 이후, 어떤 시점에서 관내에서 생성된 빙핵에 의해 과냉각 상태가 해소되고 관내동결이 발생하여 시험수의 유동저항이 증가되고 마침내 시험수의 유동은 완전히 차단되어 관내압력은 급격히 상승하였다. 이 경우 과냉각도 ΔT는 다음과 같이 정의된다.

$$\Delta T = T_{tf} - T_{af} \quad (1)$$

여기서, T_{tf}: 시험수의 이론상 동결온도(0℃)
T_{af}: 시험수의 실제 동결온도

이때 제빙관내 과냉각 상태가 해소될 때 관내동결이 발생한 시점의 과냉각도 데이터들로부터 그 실험조건에서 한계과냉각 조건이 되는 임계과냉각도(ΔT_{cr}) 관계식을 유도하였다.

4-2. 시험수의 압력 및 온도변화

Fig. 3은 실험 시작부터 종료 시까지 시간경과에 대한 시험수의 압력(P_w) 및 유량($\dot{Q}_w$)의 변화를 나타내었다. 이때 시험수의 유량은 11.2[l/min], Reynolds 수는 12,000이었다. 실험 시작 후 약 45분이 지난 시점에서 급격한 압력상승과 함께 시험수 유량이 빠르게 줄어들어 결국 시험수 유동이 완전 차단됨으로써 제빙관내 동

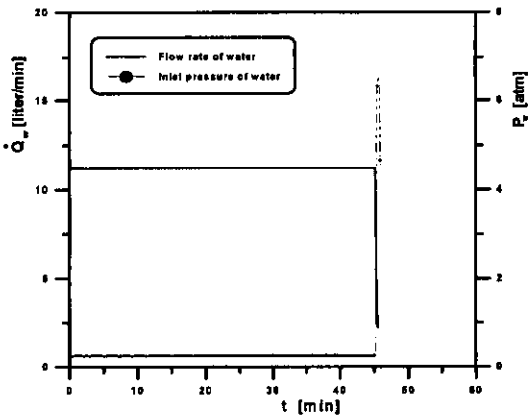

Fig. 3. Trend of flow rate and pressure of test water according to the test time.

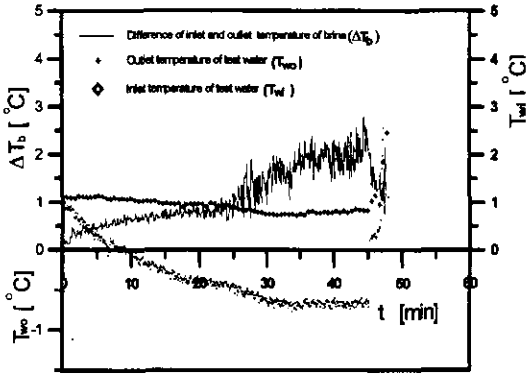

Fig. 4. Difference of inlet and outlet temperature of brine and trend of outlet temperature of test water according to the time.

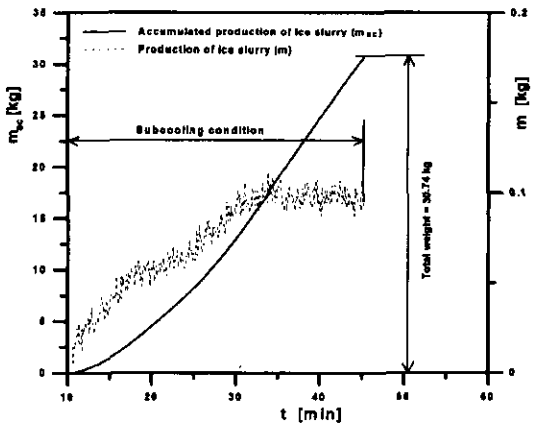

Fig. 5. Production curve of ice slurry according to the test time.

결을 확인할 수 있었다.

Fig. 4는 Fig. 3의 실험조건으로 제빙관에서 브라인 입·출구 온도차(ΔT_b), 제빙관으로 들어오는 시험수 입구온도(T_{wi}) 및 시험수 출구온도(T_{wo})의 변화를 시간경과에 따라 나타내었다. 브라인의 온도하강에 따라 시험수 출구온도는 점차 낮아지면서 약 20분 경과 후부터는 냉각속도가 완만해지고, 반면 브라인의 입·출구 온도차는 많은 변동을 보였다. 이것은 제빙관 내벽에서 형성된 미세한 빙핵들이 시험수 유동에 의해 함께 배출되면서 동시에 잠열의 방출이 진행되었다고 판단할 수 있었다.

이와 같은 현상은 불규칙적으로 반복되다가 마침내 관내동결이 발생하는 시점에서 시험수의 출구온도가 빠르게 상승하는 것을 볼 수 있었으며, 이 시점이 아이스슬러리를 제조할 수 있는 임계조건이 되었다.

4-3. 아이스슬러리의 제빙량

제빙관을 통과한 시험수의 과냉각도를 기준으로 시간당 생성되는 아이스슬러리의 질량을 예측 할 수 있으며, 관련된 열평형 방정식은 다음과 같다.

$$\dot{m}_w c_{pw}(T_{tf}-T_{wo})=\dot{m}_{ice}L_w+H_{loss} \quad (2)$$

여기서, $\dot{m}_w$는 제빙관을 통과하는 시험수의 시간당 질량, c_{pw}는 시험수의 비열, T_{tf}는 시험수의 이론상 동결온도(0°C), T_{wo}는 제빙관 출구에서 시험수온도, $\dot{m}_{ice}$는 시간당 생성된 아이스슬러리 질량, L_w는 시험수의 융고잠열이고 H_{loss}는 축냉조 내에서의 열손실이다.

식(2)로부터 시간당 생성되는 아이스슬러리의 질량을 표시하면 다음과 같다.

$$\dot{m}_{ice}=\frac{\dot{m}c_{pw}(T_f-T_{wo})}{L_w}-H_{loss} \quad (3)$$

Fig. 5는 식(3)을 적용하여 시간 경과에 따른 아이스슬러리 질량(m)과, 누적된 아이스슬러리 질량(m_{ac})을 나타낸 것이다. 축냉조 내에서의 열손실(H_{loss})을 무시할 때 시험수가 과냉각 조건이 된 이후 동결점에 도달 할 때까지 아이스슬러리는 시험수의 출구온도에 비례하여 계속적으로 제빙되었다.

과냉각 조건이 시작되어 아이스슬러리가 생성된 이후부터 실제 동결이 일어날 때까지 걸린 시간은 약 35분이었으며, 이때 총 30.74 kg의 아이스슬러리가 제조된 것으로 예상되었다.

4-4. 시험수의 Reynolds 수 변화에 따른 동결특성

Fig. 6은 제빙관내 유동이 대향류와 평행류인 경우 각각의 조건에서, 시험수의 Reynolds 수에 따른 관내동결

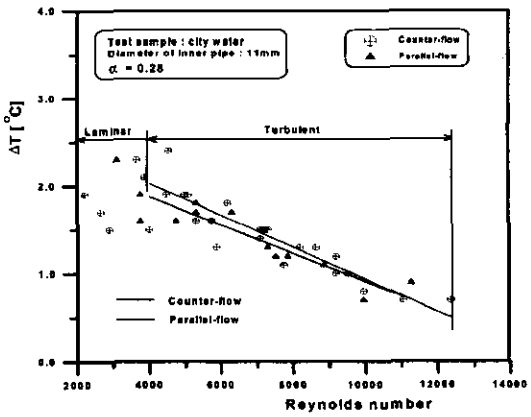

Fig. 6. Tendency of subcooling degree (ΔT) according to the Reynolds number.

발생 시점의 과냉각도를 나타낸 것이다. 각 경우에서 축냉조의 시험수 초기온도는 1.1±0.2℃, 브라인 냉각속도는 0.47[℃/min]로 동일한 조건을 유지하였다. 과냉각도는 Reynolds 수가 증가함에 따라 두 경우 모두 난류영역에서는 점진적으로 감소하는 경향을 보였으나 층류영역으로 오면서(Reynolds 수 4,000 이하) 과냉각도의 분포가 산만해지고 선형성을 벗어나는 것을 확인하였다. Reynolds 수가 증가함에 따라 과냉각도가 감소하는 현상은, 시험수 유동이 빨라짐에 따라 관내흐름 상태가 더욱 교란되어 관 벽으로부터 얼음 입자를 생성시킬 수 있는 전도 및 대류 열전달이 빠르게 형성되었기 때문으로 예측된다. 따라서 시험수 유동 속도가 증가함에 따라 관내동결이 발생하는 온도는 높아지고 과냉각도는 낮은 값을 나타내었다. 각 조건에서 Reynolds 수와 과냉각도와의 실험결과로부터 임계과냉각도 관계식을 유도하였다. 대향류의 경우

$$\Delta T_{cr}=2.758-1.826\times10^{-4}\ Re \quad (4{,}000<Re<12{,}000) \tag{4}$$

이고, 평행류의 경우

$$\Delta T_{cr}=2.518-1.612\times10^{-4}\ Re \quad (4{,}000<Re<11{,}200) \tag{5}$$

이다. 식(4)와 (5)로부터 대향류와 평행류의 실험결과 편차가 거의 없음을 알 수 있으며, 이 범위에서 임계 과냉각도 관계식은 실험 결과와 잘 일치하였다.

4-5. 브라인의 냉각속도[0.29~0.53℃/min]에 따른 동결특성

Fig. 7은 브라인의 냉각속도 변화에 따른 시험수의 과냉각도 변화를 나타낸 것이다. 이때 브라인의 냉각속도는 향후 개발하고자 하는 아이스슬러리 제빙장치의 냉각속도를 고려하여 0.29~0.53[℃/min]의 범위에서 진행하였으며, 시험수의 과냉각도는 냉각속도에 따라 큰 영향을 받지 않는 것을 알 수 있었다.

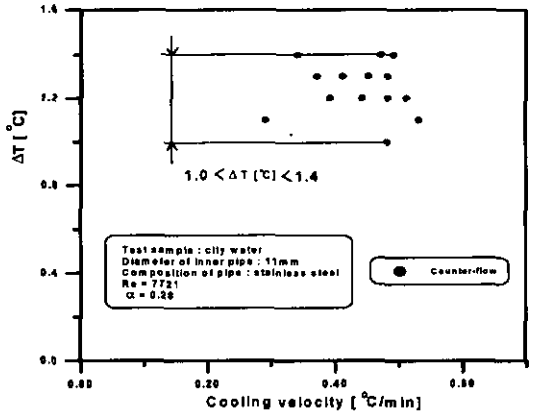

Fig. 7. Tendency of subcooling degree (ΔT) according to the cooling velocity.

최소 및 최대 과냉각도는 각각 1.0℃와 1.4℃, 표준편차는 0.12로써, 브라인의 냉각속도 변화에 따른 과냉각도의 편차에 큰 차이가 없었다.

5. 결 론

유동 과냉각수를 이용한 아이스슬러리 제조시스템에 대한 동결실험을 수행한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 제빙관내에서 과냉각조건이 형성될 때 시험 수는 유동 과냉각 상태로 제빙관을 빠져 나오면서 축냉조 충격판 상에 연속적으로 아이스슬러리를 생성하였다.

(2) 제빙관내 시험수 유동조건이 대향류 및 평행류 일 경우 두 조건 모두 Reynolds 수가 증가할수록 과냉각도(ΔT)는 점진적으로 감소하는 경향을 확인하였으며 실험데이터로부터 임계과냉각도(ΔT_{cr}) 관계식을 유도하였다.

(3) 브라인 냉각속도가 0.29~0.53[℃/min] 범위에서는 시험수의 과냉각도는 냉각속도에 종속되지 않았다.

실험 결과로부터 유도한 시험수와 Reynolds 수에 대한 임계 과냉각도의 관계식은 향후 아이스슬러리 제빙 시스템의 안정성을 예측할 수 있는 자료로 활용될 것이다.

기호설명

c : 비열[J/kg · K]
H : 열량[kcal/min]
k : 열전도도[W/m · K]
L : 응고잠열[kcal/kg]
m : 질량[kg]
$\dot{m}$: 단위시간당 질량[kg/min]
P : 압력[atm]
Q : 단위시간당 유량[l/min]
R : 비저항[Ωcm]
Re : Reynolds 수
T : 온도[℃]
ΔT : 과냉각도[℃]
ΔT_{cr} : 임계 과냉각도[℃]
t : 시간[min]

그리스 문자

α : 제빙관 직경비(내관 직경/외관 직경)
ρ : 밀도[kg/m³]

하첨자

af : 실제 동결점
b : 브라인
f : 동결
ice : 얼음
tf : 이론적 동결점
wi : 물 입구
wo : 물 출구

참고문헌

1. 에너지절약기술센터: 빙축열 시스템의 분류, 에너지절약기술동향, 제13호, 한국동력자원연구소, pp. 1-9 (1991).
2. 윤재호: Slurry ice를 이용한 빙축열기술 연구동향, 빙축열 시스템 강연회, pp. 5-20 (1997).
3. 최영범, 한영옥, 김진흥: 저온 축열용 TMA 포접화합물의 열물성에 관한 실험 연구, 공기조화·냉동공학회 '97하계학술발표회 논문집, pp. 354-359 (1996).
4. 박원훈 등: 열저장 시스템의 개발에 관한연구(III), 한국과학 기술연구원, pp. 167-302 (1989).
5. Yamada, M. 등: Thermal and solutal transport characteristics in production process of liquid ice as a new PCM, International conference of transport phenomena in processing, March 22-26, Honolulu, pp. 1569-1579 (1992).
6. 윤정인, 김재돌, 김성규: 과냉각을 동반한 동결과정의 수치해석, 공기조화·냉동공학논문집, 제8권, 제4호, pp. 451-462 (1996).
7. Hideo Inaba, Kengo Takeya and Takaya Asano: 氷核活性化物質による過冷却狀態の解消に關する硏究, 일본냉동협회논문집, Vol. 11, No. 3, pp. 277-287 (1994).
8. 박영하, 이동원, 류정인, 양윤섭: Slurry ice 제조 시스템 적용을 위한 정지수의 과냉각특성 연구, 공기조화·냉동공학회 '98하계학술발표회 논문집, pp. 990-996 (1998).
9. 박영하, 류정인, 이동원: "정지수의 과냉각 현상에 미치는 제인자들의 영향에 관한 연구", 공기조화·냉동공학회 '98동계학술발표회 논문집, pp. 790-795 (1998).
10. 서정세, 노승탁: 동심원관 환상공간내의 완전히 발달된 층류 유동에서 물의 결빙현상에 대한 해석, 대한기계학회논문집(B), 제21권, 제11호, pp. 1552-1561 (1997).
11. 윤정인 등: 수평 2열 원통관 주위의 동 결형상에 관한 연구, 공기조화·냉동공학회논문집, 제7권, 제1호, pp. 89-97 (1995).