

과냉각상태 정지수의 동결특성에 관한 연구

박영하 · 류정인*

충남대학교 대학원 기계공학과, *충남대학교 기계공학과

Freezing Characteristics of Still Water Under a Subcooling Condition

Young-Ha Park and Jeong-In Ryu*

Chungnam National University Graduate School

*Chungnam National University

요 약

과냉각수 이용 아이스슬러리 제빙시스템은 기존 제빙방식에 비해 많은 장점이 있지만, 열교환기 내 빙 결정의 성장으로 인한 관내동결이 발생하기 쉽다. 이러한 관내동결 조건을 알아보기 위한 기본 실험으로, 정지상태 증류수와 수도수의 과냉각도를 알아보고 시험관 재질이 과냉각도에 미치는 영향 등에 대해 검토하였다. 또한, 첨가한 메탈알데히드 농도가 임계 과냉각도에 어떻게 작용하는지도 관찰하였다. 실험결과 증류수에 비해 수도수에서 과냉각 해소범위가 좁게 나타났으며, 과냉각 해소에 대한 시험관별 표준편차는 파이렉스 경우 1.8 스테인레스강 2.0을 보였다. 최소 과냉각도는 파이렉스 6.2°C, 스테인레스 5.5°C로서 파이렉스가 약 0.7°C 크게 나타났다. 메탈알데히드는 실험횟수가 증가하여도 그 성질을 유지하면서 빙 활성화 물질로써 작용하는 것으로 나타났다.

Abstract— This paper presents the results of experiments on subcooling degree characteristics which was analyzed in accordance with various test conditions. The test water was cooled below freezing point temperature, and its freezing temperature was measured. The results showed that using city water as the test water in pyrex tube indicated small standard deviation (SD) compared to using distilled water, and minimum subcooling degree was 6.9°C and 6.2°C, respectively. In addition, a critical subcooling degree in a pyrex tube was larger than that in a stainless steel tube about 0.7°C for the same test water. It was also observed that the standard deviation of data for the distilled water showed decreasing tendency as the increasing with cooling velocity. Then metaldehyde showed a considerable effect on the subcooling degree of distilled water as the ice nucleating substance with increase of test number.

1. 서 론

냉열을 얼음의 형태로 저장하고 그 용해열을 냉방용 열원으로 이용하는 빙축열 시스템은, 쾌적한 환경에 대한 욕구의 증가와 더불어 그 보급이 점차 확산되고 있다^{[1][2]}. 이러한 빙축열 방식 중 과냉각수 이용 아이스슬러리 제빙방식은, 물의 과냉각 상태를 해소시키면 그 일부가 얼음으로 상변화 하는 원리를 이용하는 것으로, 유동성이 좋은 얼음을 만들 수 있다^[3]. 그러나 제빙과정 중 관내동결로 인하여 제빙이 중단되기 쉬우므로, 이러한 시스템 불안정성을 해결하는 것이 중요한 기술적 문제이다.

박원훈 등^[4]은 빙활성화 물질이 증류수의 과냉각도에 미치는 영향을 검토하기 위하여, 수냉식 열교환으로 시험조와 축냉조를 개회로화하여 시험조를 -12°C로 유지시키면서 시험수의 임계과냉각도를 관찰하였다.

최영범 등^[5]도 수냉식 열교환에서 시험조를 -10°C, -15°C, -20°C로 일정하게 유지시키면서 포접화합물의 임계 과냉각도를 관찰하였다.

일본의 Inaba 등^[6]의 연구에서는 공냉식 열교환 방식으로 시험수의 종류와 체적, 실험횟수 및 시험관의 표면조도 변화에 따른 정지수의 임계과냉각도를 관찰하고 빙활성화 물질을 혼합한 후 이들이 과냉각 해소에 미치

는 영향을 규명하는 등 아이스슬러리 제빙 방식에 대한 불안정성 해소를 위한 방법을 다양하게 연구하고 있다.

지금까지 과냉각 현상에 관한 실험적 연구가 수행되어 왔으나^{[14][15]}, 유체의 동결은 여러 인지에 따라 영향을 받기 때문에 연구 결과에서 많은 편차가 발생하는 것을 알 수 있으며, 관내동결의 기초연구로써 정지수의 결빙에 대한 연구는 많지 않다.

본 실험에서는 수냉식 열교환 방식을 이용하여 축냉조 냉각라인을 시험조와 직접 연결하지 않고 폐회로화하여 시험조내의 유동상태를 균일하게 유지시키고, 시험관 내부에 열전대를 직접 삽입하지 않는 등 빙 활성화에 영향을 줄 수 있는 요인들을 최소화하였다.

연구의 목적은 유동 과냉각수를 이용한 아이스슬러리 제조 시스템의 가장 큰 문제점인 관내동결 조건을 알아보기 위한 기초 실험^{[10][11]}으로, 정지수에서 제반 인자들이 과냉각 현상에 미치는 영향을 검토하여 이후 아이스슬러리 제빙시스템 개발에 적용하고자 한다.

2. 실험

2-1. 실험장치

실험장치의 개략도는 Fig. 1과 같으며, 냉동기, 축냉조, 순환펌프, 시험조(test chamber) 및 측정장치로 구성되어 있다. 냉동기는 공냉식 냉동기이며, 축냉조는 에틸렌글리콜과 물을 60:40의 비율로 혼합한 수용액으로 시험조의 냉각에 이용되었다. 시험조는 스텐레스강으로 제작되었으며 앞쪽 중앙에 투시창을 설치하여 제빙과정을 관찰할 수 있도록 하였다. 시험조 외부는 보온재로써 외부로의 열손실을 차단하였다. 이들 장치들에 대한 주요 사양을 Table 1에 요약하였다.

Fig. 2는 시험관 형상이다. 시험관 내부에 센서를 직접 삽입하면 센서 자체가 얼음을 형성하는 활성화물질로 작용할 수 있으므로, (a)와 같이 시험관 외면에 열전대를 부착한 후 외벽온도(T_{wo})를 측정하였다. 이때 (a) 시

Table 1. Basic specifications of the used experimental apparatus.

Items	Specifications
Refrigerator	7.5HP
Cooling tank	400 l
Test chamber	340 mm×560 mm×340 mm (width×length×height)
Circulation pump	WILO RS25
Data acquisition	Datascan 7320
Heater	5 kW
Agitator	Hana SS-20, 1~1000 rpm
Calibration device	ERTCO-HART EH850 Accuracy: Better than $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$

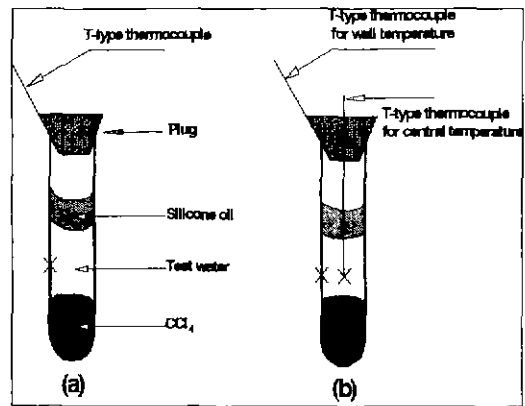


Fig. 2. Diagram of the test tube.

험관 중심과 외벽사이 온도차를 보정하기 위하여 (b)와 같이 이들 온도차를 비교할 수 있는 시험관을 함께 설치하였다. 사용된 열전대는 직경 0.127 mm이며, $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$ 의 정확도를 가지는 표준온도계로서 교정을 하였다.

동결온도, 시험조 온도, 축냉조 온도, 주위온도, 교반기 회전속도, 냉각속도 등의 각 자료들은 측정장치를 거쳐 컴퓨터에 저장되었다.

2-2. 실험방법 및 조건

시험관은 잔류하는 불순물이 시험수의 과냉각도에 영향을 줄 수 있으므로 충분히 세정하여 건조시킨 후, 먼저 일정량의 사염화탄소(CCl_4)(2~10 cm^3)를 투입하여 시험관 하부가 수평면이 되도록 하였다. 다음 시험수(3~10 cm^3)를 넣은 후 실리콘 오일(2 cm^3)으로써 밀봉하여 대기와 접촉을 차단하였다. 시험수가 삽입된 시험관은 교반기를 중심으로 일정한 간격으로 배치하였다.

시험조 초기온도는 10°C 로 설정하여 온도하강에 따라 시험수 냉각이 시작되고, 최종적으로 동결점(freezing point)에 도달하면 실험을 종료하였다. 실험은 시험수 중

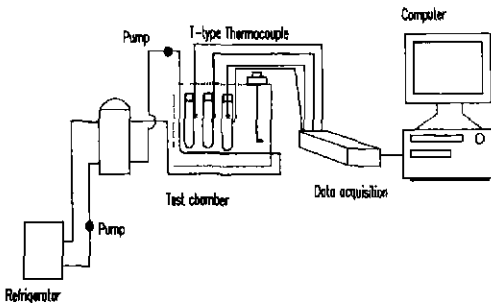


Fig. 1. Schematic diagram of the experimental apparatus.

Table 2. Experimental conditions.

Items		Specifications
Cooling fluid	Inlet temp. (°C)	-20±0.5
	Flow rate (kg/min)	12
Test chamber	Capacity (l)	40
Agitator	rpm	620
Kinds of test water		city water, distilled water
Components of test tube		pyrex, stainless steel (SUS)
Cooling velocity of test water		0.15, 0.20, 0.27
Concentration of Metaldehyde (mass %)		0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 0.7, 1.0

Table 3. Properties of test water, carbon tetrachloride, silicone oil and Metaldehyde.

Items		Properties
Distilled water	R (Ωcm)	0.4×10 ⁵
	C (μs)	25.5
Test water (at 0°C)	R (Ωcm)	0.7×10 ⁴
	C (μs)	135
	κ (W/mK)	0.558
	ρ (kg/m ³)	998.2
	v (m ³ /s)	1.788×10 ⁻⁹
	Pr	13.7
Carbon tetrachloride (CCl ₄)	ρ (kg/m ³)	1594
Silicone oil	ρ (kg/m ³)	964
Metaldehyde	Molecular formula	C ₈ H ₁₆ O ₄
	Molecular weight	176.2
	ρ (kg/m ³)	1500
	Solution	Refractory

류, 시험관 재질, 냉각속도 및 메타알데히드 수용액의 농도 변화에 따른 과냉각 특성을 관찰하였다. 시험수는 비저항 0.4×10⁵[Ωcm]의 증류수와 0.7×10⁴[Ωcm]의 수도수를 사용하였으며, 시험관 재질은 파이렉스와 스텔레스강을 이용하였다. 실험조건과 사용된 실험수의 물성치를 Table 2와 3에 요약하였다. 실험 중 교반기의 회전속도는 620 rpm을 유지하였다.

3. 시험수 온도의 계산

3-1. 시험관 벽면을 통한 열전달 방정식

Fig. 3은 시험관의 단면이다 시험관 주위로 열전달 계

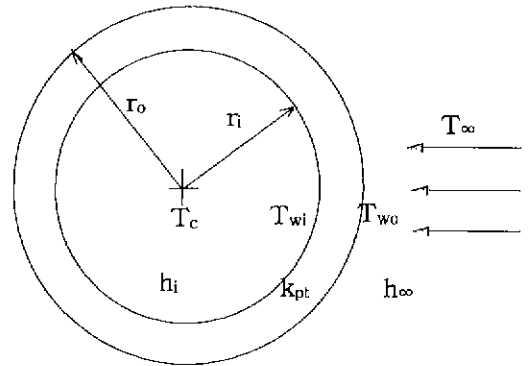


Fig. 3. Cross section of the test tube.

수 h_∞ 온도 T_∞의 유체유동이 있다. 이때 총 열전달량 Q는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q = h_{\infty}(2\pi r_o)(T_{w_o} - T_{\infty}) = \frac{2\pi k_{pt}(T_{w_i} - T_{w_o})}{\ln \frac{r_o}{r_i}} = h_i(2\pi r_i)(T_c - T_{w_i}) \quad (1)$$

3-2. 시험관 주위의 강제 열전달 계수(h_∞)

강제열전달계수(h_∞)는 다음과 같은 Churchill과 Bernstein의 상관식^[12]을 이용하였다.

$$h_w = \frac{k_w}{d} \times \left\{ 0.3 + \frac{0.62 Re^{1/2} Pr^{1/3}}{[1 + (0.4/Pr)^{2/3}]^{1/4}} \times \left[1 + \left(\frac{Re}{282,000} \right)^{5/8 + 5} \right] \right\} \quad (2)$$

여기서, 시험조 내에서 교반기가 작동할 때의 Re 수는 다음과 같이 정의한다^[11]

$$Re = \frac{\rho N d_i^2}{\mu} \quad (3)$$

3-3. 시험관 내벽의 온도(T_{wi})

시험관 내벽의 온도는 식(1)로부터 다음과 같다.

$$T_{w_i} = T_{w_o} + h_{\infty}(2\pi r_i)(T_{w_i} - T_{\infty}) \left(\frac{\ln \frac{r_o}{r_i}}{2\pi k_{pt}} \right) \quad (4)$$

3-4. 시험관 중심의 이론온도(T_c)

이론적인 시험관 중심온도 T_c는 다음과 같이 나타낼 수 있다^[11].

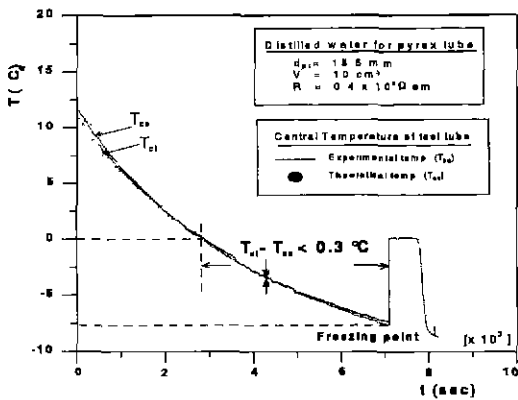


Fig. 4. Comparison of theoretical and experimental central-temperature of distilled water for test tube.

$$T_{ci} = T_{\infty} + \frac{Q}{2\pi} \left(\frac{1}{r_o h_{\infty}} + \frac{\ln \frac{r_o}{r_i}}{k_{pt}} + \frac{1}{r_i h_i} \right) \quad (5)$$

측정된 외벽온도(T_{wo})와 식(1), (4), (5)를 이용하여 시험관 중심온도(T_{ci})를 예측하였고, 이 이론 값을 실험을 통해 측정된 Fig. 2의 (b) 시험관 중심온도(T_{ci})와 비교하여 그 타당성을 검증하였다. 이 경우 온도편차는 Fig. 4와 같이 0.3°C 이내였다. 한편, 실험에 의한 중심온도(T_{ci})와 측정된 외벽온도(T_{wo})는 임계 과냉각 상태에서 0.1°C 이내의 온도편차를 보였다.

실험결과는 측정된 외벽온도(T_{wo})를 시험관 중심온도(T_{ci})로 보정 된 값을 나타내었다.

4. 결과 및 고찰

4-1. 과냉각 특성곡선

Fig. 5는 체적 10 cm³, 비저항 0.4×10⁵[Ωcm] 인 증류수

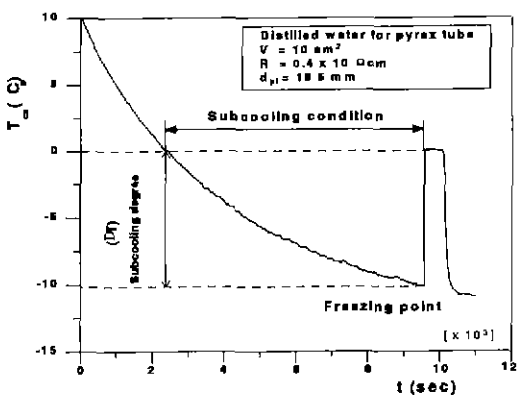


Fig. 5. Cooling curve of the distilled water.

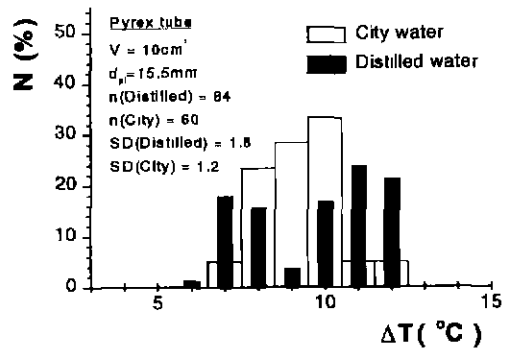


Fig. 6. Distribution frequency of subcooling degree for test waters, ($d_i=15.5$ mm, pyrex).

수에 대한 과냉각 특성을 보여주는 것으로 시간에 따른 시험관의 중심온도를 나타낸 것이다. 그림에서 과냉조건(subcooling condition)과 동결점(freezing point)을 알 수 있으며, 이때 0°C와 동결점과의 차이를 과냉각도(subcooling degree)로 정의하였다.

4-2. 시험수 종류에 따른 과냉각 특성

Fig. 6은 내경 15.5 mm 파이렉스 시험관에서 수도수와 증류수에 대한 과냉각도 분포빈도를 나타낸 것이다. 증류수에 비해 수도수에서 과냉각도 분포빈도는 정규분포에 가깝고, 표준편차는 1.2로서 1.8의 증류수에 비하여 작은 값을 보였다. 이것은 수도수가 증류수에 비해 상대적으로 과냉각 해소범위가 좁은 영역에서 발생함을 의미하며, 그 원인은 수도수에 존재하는 불순물이 상대적으로 많고 이들 불순물들이 빙활성화 물질로 작용하였기 때문으로 판단되었다.

Table 4는 시험수 종류에 따른 과냉각도를 이전의 연구결과¹⁰⁾와 비교하여 나타낸 것이다.

본 실험에서 수도수와 증류수의 최소 과냉각도는 각각 6.9°C와 6.2°C, 평균 과냉각도는 9.2°C와 9.7°C, 최대 과냉각도는 11.8°C와 12.3°C로써 최소과냉각도는 오히려

Table 4. Variation of subcooling degree for test waters.

Type	Test water		d_i (mm)	Subcooling degree (°C)		
	R (Ωcm)	V (cm ³)		Min.	Max.	Avg.
City	0.7×10 ¹	10.0	15.5	6.9	11.8	9.2
City (Ref. 6)	2.0×10 ¹	1.0	9.6	≈ 4.5	≈ 12.5	7.0
Distilled	0.4×10 ⁵	10.0	15.5	6.2	12.3	9.7
Distilled (Ref. 6)	0.8×10 ⁶	1.0	9.6	≈ 11.5	≈ 22.5	17.4

수도수가 큰 값을 보였다. 그러나 그 빈도는 매우 적었고 과냉각도가 11°C 이상이 되면서 과냉각 해소가 되지 않은 비율이 수도수에 비해 증류수에서 상대적으로 크게 증가되는 것을 확인하였다

Inaba의 실험¹⁶과 비교해 볼 때 전체적으로 과냉각도 해소범위가 작았으며, 특히 증류수에서 과냉각도는 상대적으로 낮게 나타났다. 그 원인은 시험수 비저항이 Inaba에 비해 적었기 때문에 빙형성이 촉진되었다고 판단되며, 그 외에 시험수의 체적에 의한 영향¹⁶과 실험방법 차이로 예측되었다.

4.3. 시험관 재질에 따른 과냉각 특성

파이렉스와 스텐레스강 시험관에서의 과냉각도 분포 빈도 측정을 위해, 체적 10cm³, 비저항 0.4×10⁵Ωcm의 증류수를 사용하였다. Fig. 7은 이 두 재질에서의 과냉각도 분포빈도를 나타낸 것이다. 파이렉스와 스텐레스강의 표준편차는 각각 1.8과 2.0으로서 비슷하게 나타났다

Table 5는 실험결과를 정리하여 나타낸 것으로, 스텐레스강의 경우 최소 과냉각도는 5.5°C이며 파이렉스는 6.2°C를 보였다. 또한 스텐레스강은 12°C 이하에서 과냉각이 모두 해소되고 그 이상은 파이렉스 재질에서만 발생되었다.

이것은 스텐레스강이 파이렉스에 비해 빙핵을 상대적으로 빨리 형성 시켰기 때문으로 판단되었다. 그 원인은

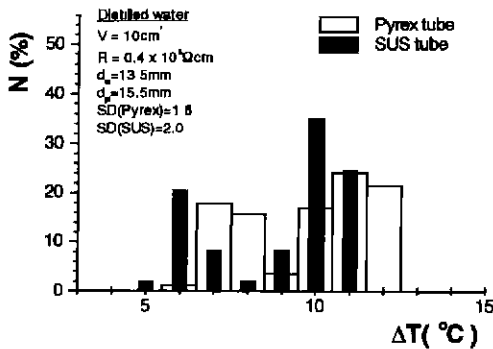


Fig. 7. Distribution frequency versus subcooling degree of distilled water for test tubes, (d_e=13.5 mm, d_o=15.5 mm).

Table 5. Variation of subcooling degree for test tubes.

Test tube	Distilled water		d _i (mm)	Subcooling degree (°C)		
	R (Ωcm)	V (cm ³)		Min.	Max.	Avg.
SUS	0.4×10 ⁵	10.0	13.5	5.5	11.2	8.9
Pyrex			15.5	6.2	12.3	9.7

은 스텐레스강이 파이렉스에 비해 재질의 열전도도가 높고, 표면 거칠기가 크기 때문에 냉각표면도 상대적으로 증가함에 따라 빙핵의 형성이 쉬웠다고 예측되었다. 스텐레스강의 표면 거칠기를 다르게 한 Inaba¹⁶의 실험에서 표면 거칠기가 증가할수록 임계 과냉각도가 작아지는 것으로 보아 이러한 예측이 타당함을 알 수 있었다.

4.4. 시험수의 냉각속도 변화에 따른 과냉각 특성

Fig. 8은 체적 10cm³, 비저항 0.4×10⁵Ωcm인 증류수에 대해 냉각속도 변화에 따른 과냉각도 특성을 나타낸 것이며, Table 6은 이들 과냉각 특성을 정리한 것이다. 냉각속도는 0.15, 0.20 및 0.27°C/min로 변화를 주었으며, 각 속도별로 40회 이상의 실험을 반복하였다. 냉각속도의 증가에 따라 평균값에 큰 차이를 보이지 않았지만, 냉각속도가 0.27°C/min로 높아지면서 표준편차가 크게 줄어드는 것을 알 수 있었다. 따라서 시험수의 과냉각 해소가 발생하는 최소 및 최대점의 편차를 줄이는데 냉각속도가 영향을 미치고 있음을 확인하였다. 이것은 냉각속도를 크게 함으로써 과냉각이 지연되는 시간을 단축시킬 수 있음을 의미하는 것으로 볼 수 있다.

4.5. 메타알데히드의 농도변화에 따른 과냉각 특성

Fig. 9는 첨가제로서 메타알데히드의 농도를 변화시킨

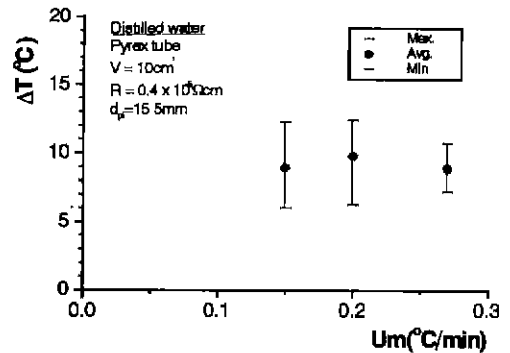


Fig. 8. Subcooling degree versus cooling velocity for distilled water, (d_e=15.5 mm, pyrex).

Table 6. Subcooling degree of distilled water for cooling velocity.

Cooling velocity (°C/min)	SD	Distilled water		d _i (mm)	Subcooling degree (°C)		
		R (Ωcm)	V (cm ³)		Min.	Max.	Avg.
0.15	1.7				6.0	12.2	8.9
0.20	1.8	0.4×10 ⁵	10.0	15.5	6.2	12.3	9.7
0.27	0.8				7.1	10.6	8.8

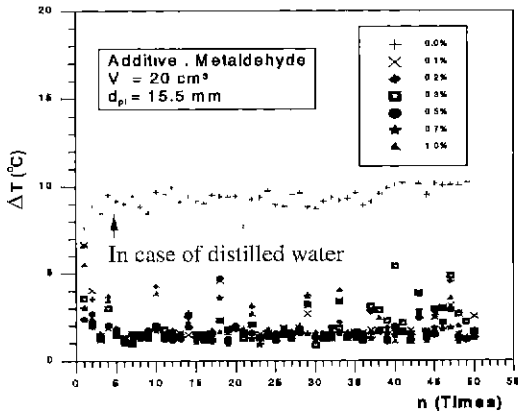


Fig. 9. Effect of Metaldehyde on subcooling degree with respect to test numbers.

경우, 실험횟수에 따른 과냉각 특성을 관찰한 것이다. 메타알데히드를 비저항 $0.4 \times 10^5 [\Omega \text{cm}]$ 의 증류수에 0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 0.7 및 1.0 mass%로 농도를 변화시켜 실험을 진행하였다. 그림에서 최초 실험시작 3회까지 과냉각도는 점차 낮아지는 경향을 보인 후 농도에 따라 간헐적인 증가현상이 나타났지만 거의 일정하게 메타알데히드가 빙 활성화 물질로 작용되고 있는 것을 알 수 있었다. 특히 50회 이상 실험횟수가 진행이 되어도 빙 활성화 역할을 지속하는 것으로 나타나, 메타알데히드가 빙 형성을 촉진시키는데 매우 유용하다는 것을 알 수 있었다. 그러나 농도 변화가 과냉각도 크기와 비례적 관계를 가지지는 않았다.

5. 결 론

과냉각 상태 정지수의 동결특성에 관한 실험을 수행하고 아래와 같은 결과를 얻었다.

시험수 종류에 따른 과냉각 특성에서 수도수의 과냉각도 분포빈도는 증류수에 비해 정규분포를 형성하였으며, 또한 과냉각 해소범위가 좁은 영역에서 발생함으로써 수도수의 빙형성이 증류수보다는 빠르게 형성됨을 알 수 있었다.

스텐레스강이 파이렉스에 비해 빙핵이 상대적으로 빨리 형성되는 것을 확인하였다. 그 원인은 스텐레스 재질이 파이렉스에 비해 열전도도가 높고, 표면 거칠기 크기 때문에 냉각표면도 상대적으로 증가함에 따라 파이렉스에 비해 빙핵의 형성이 쉬웠다고 예측된다.

시험수의 냉각속도는 과냉각 지연시간과 관계되며 냉각속도를 크게 할수록 과냉각 시간을 줄일 수가 있었다.

메타알데히드의 농도는 임계 과냉각도와 비례적 관계를 나타내지는 않았고, 실험횟수가 증가하여도 빙 활성화

역할이 지속되는 것으로 확인됨으로써 빙형성을 촉진시키는 첨가제로 매우 유용함을 알 수 있었다. 이들 정지수에서의 과냉각 특성들은 이후 유동 과냉각수를 이용한 아이스슬러리 제빙시스템 개발을 위한 관내동결의 기초자료로 활용될 것이다.

사용기호

- C : 전도도[μs]
- d : 시험관 직경[m]
- h : 대류 열전달계수[$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$]
- k : 열전도 계수[W/mK]
- N : 분포빈도[%], 교반기 회전수[rpm]
- n : 실험횟수[회]
- Pr : Prandtl 수
- Re : Reynolds 수
- R : 비저항[Ωcm]
- r : 반지름[m]
- SD : 표준편차
- T : 온도[$^{\circ}\text{C}$]
- t : 시간[sec]
- U : 냉각속도[$^{\circ}\text{C}/\text{min}$]
- V : 시험수 체적[m^3]
- ΔT : 과냉각도[$^{\circ}\text{C}$]
- ρ : 밀도[kg/m^3]
- v : 동점성 계수[m^2/s]

하첨자

- c : 중심
- ce : 실험적 중심(experimental center)
- ct : 이론적 중심(theoretical center)
- d : 직경
- i : 내부
- m : 평균
- o : 외부
- pi : 파이렉스 시험관 내면
- pt : 파이렉스 시험관
- si : 스텐레스강 시험관 내면
- w : 물
- wi : 관내벽면
- wo : 관외벽면
- ∞ : 시험관 외부

참고문헌

1. 에너지절약기술센터: "빙축열 시스템의 분류", 에너지

- 절약기술동향. 제13호, 한국동력자원연구소, pp. 1-9 (1991).
2. 김종덕: “절박한 에너지효율화 사회로의 전환”, 에너지관리, 2월호, 에너지관리공단, pp. 36-39 (1998).
 3. 유재호: “Slurry Ice를 이용한 빙축열기술 연구동향”, 빙축열 시스템 강연회, 한국냉동공조 기술협회, pp.5-19 (1997).
 4. 박원훈 등: “열저장 시스템의 개발에 관한연구(III)”, 한국과학기술연구원, pp. 167-302 (1989).
 5. 최영범, 한영옥, 김진홍: “저온축열용 TMA 포접화합물의 열물성에 관한 실험연구”, 공기조화·냉동공학회 '97하계학술발표회 논문집, pp. 354-359 (1996).
 6. Hideo Inaba, Kengo Takeya, Takaya asano: “氷核活性化物質による過冷却状態の解消に関する研究”, 일본냉동협회논문집, Vol. 11, No. 3, pp. 277-287 (1994).
 7. Hideo Inaba, Kengo Takeya, Shigeru Nozu: “静止状態におけるバブル状水および水溶液の過冷却現象に影響を及ぼす諸因子の効果”, 일본기계학회논문집, 제59권, 560호, No. 92-1074, pp. 1202-1209 (1993).
 8. Hideo Inaba, Kengo Takeya: “静止水の過冷却現象に及ぼす諸因子の影響”, 일본기계학회논문집, 제59권, 567호, No. 93-0592, pp. 3557-3564 (1993).
 9. 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).
 10. 박영하 이동원, 류정인, 양윤섭: “Slurry ice 제조 시스템 적용을 위한 정지수의 과냉각특성 연구” 공기조화·냉동공학회 '98하계학술발표회 논문집, pp. 990-996 (1998).
 11. 박영하, 류정인, 이동원: “정지수의 과냉각 현상에 미치는 제인자들의 영향에 관한 연구” 공기조화·냉동공학회 '98동계학술발표회 논문집, pp. 790-795 (1998).
 12. Churchill, S.W. and Bernstein, M.: “A correlating equation for forced convection from gases and liquids to a circular cylinder in crossflow”, J Heat Transfer. Vol. 99 pp. 300-306 (1977).
 13. Holland, F.A. and Champman, F.S.: Liquid mixing and processing in stirred tanks, reinhold publishing corporation, London (1996).
 14. Poulkagos, Conduction heat transfer