

초음파 진동을 이용한 빙축열 시스템의 아이스 슬러리 생성 연구

변성광¹, 공춘수², 김남웅^{1*}

¹동양미래대학교 기계공학부, ²(주)선우이엔지

Ice-slurry Generation of Ice Thermal Energy Storage System using Ultrasonic Vibration

Sung-Kwang Byon¹, Chun-Su Gong² and Nam Woong Kim^{1*}

¹School of Mechanical Engineering, Dongyang Mirae University

²Sunwooeng Co., LTD.

요 약 아이스 슬러리는 유동성이 좋고 증발잠열이 커서 빙축열 시스템의 전열 유체로 선호되고 있다. 일반적으로 아이스 슬러리는 과냉각된 유체로부터 생성되는데, 동결이 과할 경우 배관을 막히게 하는 단점이 있다. 더욱이 아이스 슬러리 생성을 쉽게 하기 위해 과냉각온도를 낮출 경우 빙축열 시스템의 효율을 떨어뜨리기도 한다. 따라서 아이스 슬러리 생성을 효율적으로 제어할 수 있는 방법이 요구되고 있다. 본 논문에서는 초음파 진동에 의해 과냉각수에 캐비테이션 충격을 가하여 아이스 슬러리를 생성하는 새로운 방식의 빙축열 시스템에 관한 실험연구를 수행하여, 초음파 진동과 아이스 슬러리 생성과의 상관관계를 규명하고, 초음파 진동이 아이스 슬러리 생성을 성공적으로 촉진할 수 있음을 확인하였다.

Abstract Ice slurry that is a mixture of fine ice crystals and liquid water is a widely used working fluid in the ice thermal energy storage system due to its flowability and large latent heat of fusion. Generally ice slurry is made from supercooled water. But the excessive supercooling causes the water to freeze even worse to block the pipe. Additionally large degree of supercooling of water degrades the efficiency of the ice thermal energy storage system. Therefore the effective method to control the phase change from supercooled water to ice slurry is needed. In this paper we experimentally studied a novel method to generate the ice slurry from the supercooled water using the ultrasonic vibration. It was found that the cavitation impact of supercooled water by ultrasonic vibration can help the generation of ice slurry.

Key Words : Ice slurry, Ice thermal energy storage system, Supercooling, Ultrasonic vibration, Cavitation

1. 서론

최근의 냉난방 소비 추세를 살펴보면 산업발전과 국민의 소득 증대에 따라 하절기에는 급격하게 냉방 전력수요가 증가하고, 동절기에는 보다 많은 화석연료 투입이 요구되는 추세다. 전기에너지는 저장이 어려운 특성상 생산된 즉시 소비가 동시에 이루어져야 하나, 계절간 또는 주야간의 전력소비가 상변하기 때문에 수요를 맞추기 어

렵다. 특히 하절기의 피크전력부하 증가 추세는 사회적인 큰 문제인데, 이를 해결하기 위해서는 발전설비의 증설과 대량의 화석연료의 투입이 필요하나 건설 및 운영비용, CO₂ 배출규제 등이 걸림돌로 작용하고 있다. 이에 따라 냉난방 관련 공조산업계에서도 다양한 기술개발과 연구를 통해 정부 정책과 함께 많은 방안을 수립 실행하고 있다. 특히 정부에서는 중앙집중식 냉방시스템을 사용하는 건축물에 대하여 하절기 피크전력부하 변동을 감소시키

이 논문은 동양미래대학교의 2010년 학술연구비 지원에 의하여 연구되었음

*Corresponding Author : Nam Woong Kim(Dongyang Mirae University)

Tel: +82-2-2610-5194 email: freedesign@dongyang.ac.kr

Received November 6, 2012

Revised (1st December 4, 2012, 2nd January 15, 2013)

Accepted February 6, 2013

는 방안으로, 빙축열 시스템을 이미 90년대 초부터 보급 시행하고 있는데 향후에도 지속적인 고유가 추세에 맞추어 확산될 것으로 예상된다.

빙축열 시스템(Ice Thermal Energy Storage System)은 심야의 값싼 잉여전력으로 냉동기를 가동하여 축열조에 냉열을 저장하고, 주간에 축열조가 냉방부하의 일정 부분을 담당하는 시스템이다. 빙축열 시스템은 크게 정적(Static) 방식과 동적(Dynamic) 방식으로 구분되는데, 전자에는 관외착빙형(Ice-on-coil Type)과 캡슐형(Capsule Type)이 있으며 후자에는 아이스 하베스트형(Ice Harvest Type)과 아이스 슬러리형(Ice Slurry Type) 시스템 등이 있다.

빙축열 시스템은 국제적인 에너지 절감 시책과 관련하여 비교적 활발한 연구가 진행되어왔다. 관련된 연구를 살펴보면 다음과 같다. 관외착빙형 빙축열 시스템에 대해서는 수치해석연구[1-2], 성능시험 및 최적화[3-4] 등의 연구가 있었으며, 캡슐형 빙축열 시스템에 대해서는 캡슐의 축열과 방열에 관한 연구[5], 성능시험[6], 캡슐의 적층방법과 형상설계[7]에 관련한 연구가 수행되어 왔다. 아이스 슬러리형 빙축열 시스템에 대해서는 운전특성과 경제분석[8], 실험적/해석적 연구[9] 등이 있었다.

본 연구에서는 아이스 슬러리형 빙축열 시스템에 주목하고 있는데, 여기서 아이스 슬러리(Ice slurry)란 물 또는 저농도 수용액에 미세한 얼음입자가 섞여 있는 고액 2상 유체를 말한다. 아이스 슬러리는 빙충전율(Ice Packing Factor: IPF)에 따라서 냉열량이 일반 냉수보다 크고, 유동성을 가지고 있어 배관을 통해 직접 수송할 수 있다는 장점이 있다. 배관 수송을 통해 단위유량당 냉열 수송 능력을 증가시킬 수 있어 지역냉방 시스템의 전열유체로 선호되고 있다. 아이스 슬러리는 일반적으로 과냉각수(Supercooled Water)로부터 만들어지는데 아이스 슬러리를 넘어 제빙이 발생할 경우, 과냉각수 수송배관을 막히게 하는 단점이 있고, 과냉각수의 과냉각 정도가 과도할 경우 냉동기의 성능을 떨어뜨리는 문제가 있다. 따라서 과냉각수로부터 아이스슬러리의 상변화를 효과적으로 제어할 수 있는 방법이 요구된다.

본 연구에서는 초음파 진동에 의한 과냉각수의 가진(Ultrasonic Excitation)이 과냉각수 내의 얼음핵형성을 촉진시킨다는 일단의 연구 결과[10-11]를 바탕으로, 초음파 진동 모듈을 갖춘 아이스 슬러리형 빙축열 시스템 실험장치를 제작하여 초음파 진동에 의한 캐비테이션 충격과 아이스 슬러리 생성의 상관관계를 규명하는 연구를 수행하였다.

초음파 진동에 의한 아이스 슬러리 생성의 상관관계를 보다 자세히 살펴보면 다음과 같다. 과냉각수가 아이스슬

러리로 결정화되기 위해서는 과냉각 조건만으로는 결정화의 충분조건이 될 수 없으며 여기에 더하여 과냉각수 내에 수많은 미세 입자(또는 핵)를 포함하고 있어야 한다. 두 조건이 만족되었을 때 비로소 자연적인 혹은 인위적인 자극으로 빙정작용(Nucleation)이 유도될 수 있는 것이다. 일반적으로 빙정작용은 과냉각 수용액 내의 교반(Agitation), 기계적 충격, 마찰, 매우 큰 압력에 의해 유도될 수 있다고 알려져 있다. 또한 외부에서 전기장/자기장, 스파크 방전, 자외선, X-선, 감마선, 초음파의 방사에 의해서도 유도될 수 있다고 알려져 있다. 특히 과냉각수에 캐비테이션이 발생할 경우 빙정작용을 촉진하는 것으로 보고되고 있는데, 이는 캐비테이션에 의해 발생한 공극(Cavitation) 붕괴에 의해 매우 높은 압력(약 10^5 bar)이 발생될 수 있고, 이 압력변화가 용액의 결정화 온도를 낮추기 때문이다. 따라서 초음파 진동에 의해 캐비테이션이 유도될 경우 과냉각수의 빙정작용에 의해 아이스 슬러리가 생성되는 것이다.

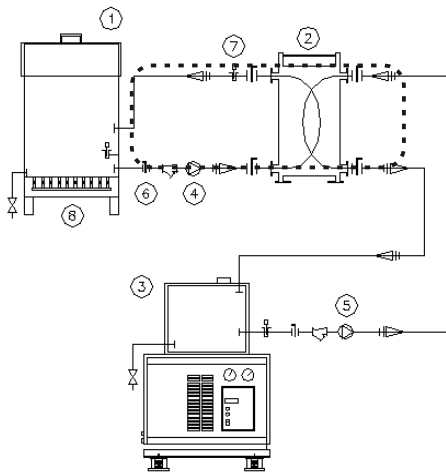
본 연구에서는 또한 일반적으로 사용되는 에틸렌글리콜 7% 수용액이 아닌 5% 수용액 및 에틸렌글리콜이 일체 섞이지 않은 시수(City Water)만을 사용한 실험을 통해 아이스 슬러리형 빙축열 시스템의 경제성 및 친환경성을 제고시키는 가능성에 대해서도 확인하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

초음파 캐비테이션을 통해 과냉각수로부터 아이스 슬러리가 생성되는 관계를 규명하기 위하여 Fig. 1과 같은 아이스 슬러리형 빙축열 실험장치를 구성하였다. 전체 시스템은 축열조(Storage Tank), 아이스 슬러리 생성용 초음파 모듈장치, 저온냉동기(Chiller), 판형 열교환기, 과냉각수 및 브라인(Brine) 순환펌프 그리고 배관 등으로 구성된다.

전체적인 작동은 다음과 같이 설명할 수 있다. 먼저 과냉각수 제조용 냉매로 사용되는 브라인(Brine)이 저온냉동기에서 냉각되어 펌프 및 배관을 통해 판형 열교환기로 공급된다. 이에 따라 판형 열교환기에서는 브라인과 에틸렌글리콜 5% 수용액(또는 시수) 간에 서로 열교환이 발생하여 에틸렌글리콜 5% 수용액(또는 시수)을 과냉각 상태로 만든다. 이 과냉각수는 일정한 온도를 유지하며 축열조로 공급되어 축열조 하부에 설치된 초음파 모듈장치의 작동에 의한 캐비테이션 충격으로 아이스 슬러리로 상변화 하는 것이다.



No.	Description	Specification	Remark
1	Storage Tank	300×300×900	Acrylic
2	Plate-type Heat Exchanger	4.9kW	STS 304
3	Chiller	2RT	Air Cooled Type
4	Cooling Pump	35LPM/3mAq	Inline
5	Ethylene Glycol Pump	75LPM/7mAq	Inline
6	Valve	15A	Ball Type
7	Thermocouple	CC	
8	Ultrasonic Vibrator	40kHz/3,800pF/70W	10 Module

[Fig. 1] Schematic of the experimental set-up for ice slurry generation

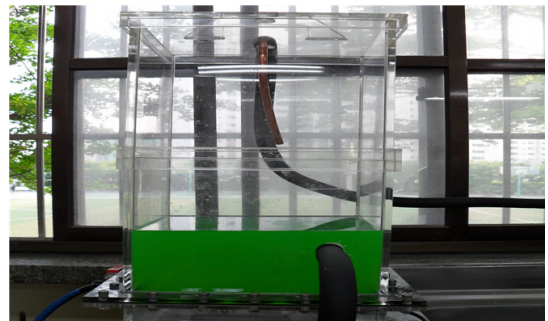
상기 작동을 구현하기 위하여 먼저 저온냉동기는 2RT(ZETICE 350) 용량의 공냉식 냉동기를 선정하였다. 과냉각수는 그 자체의 불안정한 상태로 인해 배관 내에서의 충격 등으로 인해 간혹 관내에서 동결되어 유로를 막기도 한다. 이를 극복하기 위하여 과냉각수 순환펌프는 브라인 순환펌프보다 유량과 양정을 더 크게 선정하였다. 판형 열교환기의 전열판은 난류를 형성시켜 열교환 성능을 높이는 제품을 선택하여 실험장치에서의 온도편차를 최대한 경감시키고자 하였다. 축열조의 크기는 300×300×900의 아크릴 수조로 제작하여 아이스 슬러리 생성을 관찰할 수 있도록 하였으며 수조의 하부는 스테레스 재질로 제작된 금속판을 설치하고 초음파 진동자 10개를 1개의 모듈로 설치하였다.

배관은 폴리우레탄 재질의 단열재를 사용하여 두께 25mm로 단열하였다. 또한 펌프의 원활한 운전과 과냉각 순환수의 관내 동결현상 발생을 방지할 수 있도록 펌프 흡입측에 유량조절밸브를 설치하여 유량의 조절이 가능

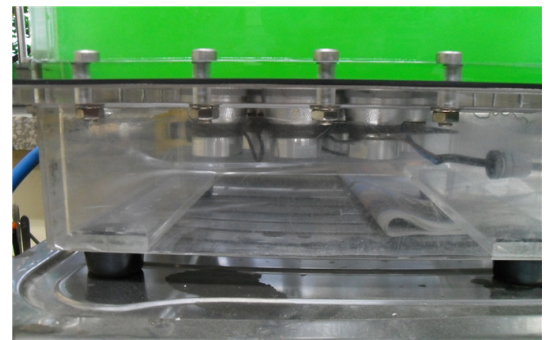
하도록 구성하였다. 각 지점의 온도측정을 위하여 열전대 (Thermocouple)를 설치하였다. 한편 축열조 하부의 초음파 진동자와 초음파 발생장치를 PC 기반의 제어기 (Controller)에 연결하여 과냉각수를 상변화 시켜 아이스 슬러리를 생성하는 실험 제반의 데이터를 측정하고 저장할 수 있게 구성하였다. Fig. 2 (a)~(c)는 실제 제작/설치된 실험장치를 나타낸다.



(a)



(b)



(c)

[Fig. 2] Experimental set-up for ice slurry generation; (a) from left side, ultrasonic generator, controller, PC, chiller (b) storage tank, (c) ultrasonic vibrator module(dashed line)

2.2 실험방법 및 조건

2.2.1 과냉각수 유체의 종류에 따른 영향

실험에서 사용되는 과냉각수 유체는 2종류로서, 에틸렌글리콜 5% 수용액과 에틸렌글리콜이 전혀 섞이지 않는 시수를 선정하였다. 이를 보다 자세히 설명하면 다음과 같다. 첫째, 상용화되어 있는 아이스 슬러리형 빙축열 시스템의 기존 방식 중에는 증발판형 아이스 슬러리 시스템이 있는데, 이 방식에서는 보통 에틸렌글리콜 7% 수용액을 사용하여 아이스 슬러리를 제조한다. 본 연구에서는 보다 경제성을 높이고 환경오염을 저감하기 위하여 에틸렌글리콜 5% 수용액을 사용하여 초음파 캐비테이션에 의한 아이스 슬러리 제조 가능 여부를 파악하고자 한다. 둘째, 기존의 또다른 아이스 슬러리형 빙축열 시스템의 한 종류인 빙막리형 시스템에서는 에틸렌글리콜 첨가제가 일체 섞이지 않은 시수만을 이용하므로 본 연구에서는 과냉각된 시수를 기반으로 초음파 캐비테이션과 아이스 슬러리 생성의 상관관계를 살펴보았다.

2.2.2 과냉각 정도에 따른 영향

실험 전 축열조 내부를 세척한 후, 순환수 펌프 전단의 유량조절밸브로 유량과 양정을 조절하면서 순환펌프와 함께 저온냉동기를 가동시킨다. 이때 저온냉동기는 브라인의 판형 열교환기 입구온도를 최대 -3.0°C 정도로 하기 위해 최대 -4.0°C 가 되면 운전이 자동으로 정지되도록 세팅하였다. 또한 축열조로 공급되는 과냉각수 온도가 매우 중요하기 때문에 판형 열교환기의 출구온도가 에틸렌글리콜 5% 수용액의 경우는 최대 -1.0°C , 시수의 경우는 최대 -0.5°C 의 온도로 각각 제한시켰다. 이는 열교환기 내부 혹은 축열조 입구 배관에서 과냉각수의 관내 동결 현상이 발생하지 않도록 하기 위함이다.

축열조 내부 온도는 축열조 측면에 구멍을 뚫어 4개소에 열전대(Thermocouple)을 설치하여 PC 인터페이스를 통하여 측정되며, 4개소 온도의 양상별 평균값을 축열조의 온도로 정의하였다.

과냉각수의 온도와 초음파 캐비테이션 충격에 의한 아이스 슬러리의 관계를 규명하고 아이스 슬러리 제조에서의 가장 경제적인 온도를 얻기 위한 목적으로 축열조 내부의 과냉각수 온도를 0.1°C 간격으로 변화를 주면서 실험을 수행하였다. 즉, 에틸렌글리콜 5% 수용액 기반의 과냉각수의 경우에는 $-0.5 \sim -1.0^{\circ}\text{C}$ 사이에서, 시수의 경우에는 최대 $-0.1 \sim -0.5^{\circ}\text{C}$ 범위에서 각각 0.1°C 간격으로 변화를 주면서 실험을 수행한다.

2.2.3 초음파 진동자 출력에 따른 영향

초음파 진동자 모듈의 출력치는 최대 출력치 700 W

대비 백분율(%)로 30 ~ 70% 사이에서 10%의 간격으로 실험을 수행하여 아이스 슬러리 생성의 경향을 살펴보고자 한다.

실험에서 측정되는 데이터는 열교환기에서 축열조로의 과냉각수 공급온도, 축열조 내의 과냉각수 온도, 저온 냉동기에서 브라인의 출구온도, 초음파 진동 출력치다. 이들 자료는 측정장치를 거쳐 PC에 저장되도록 하였다.

2.2.4 빙충전을 측정 방법

빙충전율(IPF)이란 전체 작동유체 중 빙정작용에 의해 생성된 아이스 슬러리의 비율을 나타내는 것이다. 본 논문에서는 빙충전율을 구하기 위하여 먼저 에틸렌 글리콜 수용액의 경우, 실험 종료 시점에서 에틸렌 글리콜의 농도를 측정하여 실험 전후의 농도차에 따른 부피 식을 통하여 아이스 슬러리의 생성량을 계산하였다. 한편 시수의 경우 실험 전후의 부피 차에 의해 아이스 슬러리 생성량을 계산하였다.

3. 실험결과 및 고찰

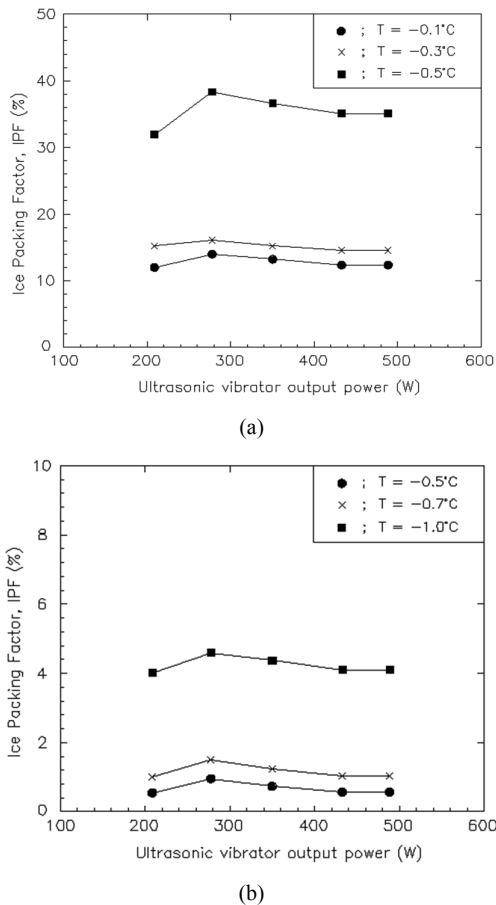
3.1 초음파 진동자 출력 변화에 따른 아이스 슬러리 생성의 상관관계

Fig. 3 (a), (b)는 각각 과냉각된 시수와 에틸렌글리콜 5% 수용액의 초음파 진동자 출력변화에 따른 아이스 슬러리 생성 실험결과이다.

먼저 Fig. 3 (a)의 시수의 경우를 살펴보면, 초음파 발생장치의 출력을 서서히 높여 과냉각 상태의 시수 및 수용액에 캐비테이션 충격을 가하였을 때, 출력이 작을 경우에는 아이스 슬러리의 생성이 거의 관찰되지 않다가 출력이 30%(210W)에 도달했을 때, 비로소 아이스 슬러리가 생성되기 시작하였다. 그러나 주목할 점은 출력치를 30% 이상 70%까지 증가시켜도 아이스 슬러리의 생성은 크게 증가하지 않아 빙충전율에는 큰 변화가 없다는 것이다. 이러한 경향은 시수의 과냉각 온도를 $-0.1 \sim -0.5^{\circ}\text{C}$ 범위에서 변화시켜도 마찬가지였다. 단, 과냉각 온도가 -0.5°C 가 되면 -0.1°C , -0.3°C 에 비해 월등히 높은 빙충전율이 발생하는데, 이는 높은 빙충전율을 얻기 위해서는 일정치 이상의 과냉각이 필요함을 의미한다. Fig. 3 (b)에 나타난 에틸렌 글리콜 5% 수용액의 실험결과도 시수의 경우와 마찬가지로 초음파 진동자의 출력이 일정 값 이상이 되어야 아이스 슬러리가 생성되며, 일단 아이스 슬러리가 생성되면 초음파 진동자의 출력이 지속적으로 증가해도 빙충전율에는 큰 변화를 가져오지 않았다. 이러한

실험결과는 Inada 등[12]의 연구결과와 정성적으로 유사한 경향인 것으로 판단된다. Inada 등의 연구결과에 의하면, 이온교환(Ion Exchange) 공정 및 0.2 μm 이상의 입자를 필터링 공정을 통해 걸러낸 정제수(Pure Water)의 경우는, 과냉각 상태에서 초음파 발생장치의 출력을 변화 시킴에 따라 얼음으로의 상변화 가능성이 민감하게 변화하는 것으로 나타났다. 한편, 본 연구에서도 사용되고 있는 필터링 공정을 거치지 않은 시수의 경우에는, 과냉각 정도가 일정치 이상이 되면, 초음파 발생장치의 출력변화에 따라 상변화 가능성의 변화가 상대적으로 작은 것으로 보고되었다.

두 번째로 Fig. 3 (b)에 나타난 에틸렌 글리콜 5% 수용액의 실험결과를 살펴보면, 전반적으로 아이스 슬러리의 상변화에 따르는 빙층전율이 시수의 결과에 비해 현저히 낮은 것으로 나타났다.



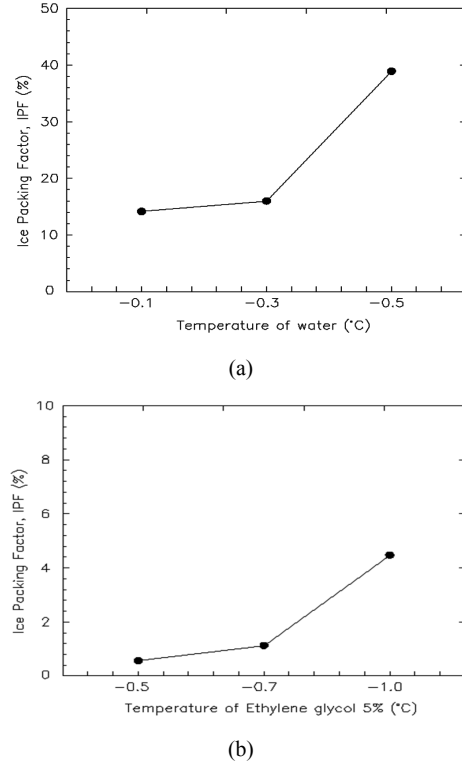
[Fig. 3] IPF as a function of output power of ultrasonic vibrator; (a) city water (b) 5% ethylene glycol aqueous solution

에틸렌 글리콜은 부동액의 역할을 하므로, 에틸렌 글리콜 수용액이 시수에 비해 빙층전율이 떨어지는 것은 자연스러운 결과로 판단된다. 한편 초음파 진동자 출력에 따른 빙층전율의 변화 경향은 Fig. 3 (a)의 시수의 결과와 크게 다르지 않은 것으로 나타났다. 이는 에틸렌 글리콜 5% 수용액도 시수기반이기 때문인 것으로 파악된다.

3.2 과냉각 정도에 따른 아이스 슬러리 생성의 상관관계

Fig. 4 (a), (b)는 초음파 진동자의 출력을 280W로 일정하게 고정하였을 때, 과냉각수(시수와 에틸렌글리콜 5% 수용액)의 과냉각 정도에 따른 아이스 슬러리 생성 경향 실험결과를 나타낸다.

첫 번째로 Fig. 4 (a)의 시수의 결과를 살펴보면, 과냉각 정도에 따라 과냉각수에서 아이스 슬러리의 상변화가 많아져 빙층전율이 증가하는 경향을 보였다. 특히 과냉각 온도가 -0.3°C에서 -0.5°C가 되면서 아이스 슬러리의 생성이 크게 늘어나는데, 이는 아이스 슬러리를 효과적으로 생성하기 위해서는 과냉각 정도가 기준치 이상이 되어야 함을 의미한다.



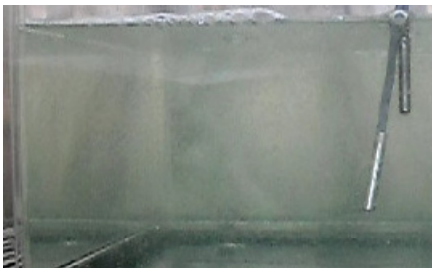
[Fig. 4] IPF as a function of supercooling temperature; (a) city water (b) 5% ethylene glycol aqueous solution

두 번째로 Fig. 4 (b)의 에틸렌글리콜 5% 수용액의 결과를 살펴보면 과냉각 정도에 따라 아이스 슬러리 생성이 증가하는 경향은 시수의 경우와 동일하게 나타나나 과냉각 온도가 -1.0°C 가 되어도 아이스 슬러리의 절대적 생성량은 그리 많지 않는 것으로 나타났다. 기존 증발판형 아이스 슬러리 방식의 빙축열 시스템에서는 -2.0°C 정도의 에틸렌 글리콜 7% 수용액 기반 과냉각수를 사용하여 운전하고 있는데 이를 초음파 진동자의 캐비테이션 충격을 통해 보다 효율적으로 운영하기 위해서는 향후 보다 폭 넓은 연구가 필요할 것으로 사료된다.

Fig. 5 (a), (b)는 각각 과냉각상태의 시수와 에틸렌글리콜 5% 수용액로부터 생성된 아이스 슬러리를 나타낸다.



(a)



(b)

[Fig. 5] Ice slurry generated from the supercooled solutions using the cavitation impact by ultrasonic vibration; (a) city water (b) 5% ethylene glycol aqueous solution

4. 결론

본 연구에서는 빙축열시스템에서 초음파 진동을 이용한 캐비테이션 충격으로 과냉각수를 아이스 슬러리로 상변화시켜 시키는 새로운 개념의 시스템에 대해 실험 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 초음파 진동을 이용한 캐비테이션 충격으로 과냉각수를 아이스 슬러리로 성공적으로 생성시킬 수 있음을 시수와 에틸렌 글리콜 5% 수용액 양자에 걸쳐 모두 확인하였다. 이 방법은 향후 아이스 슬

러리형 빙축열 시스템에서 아이스 슬러리를 보다 효과적이고, 경제적으로 생성하는데 사용될 수 있을 것으로 사료된다.

- (2) 아이스 슬러리 생성은 본 연구에서 채택된 초음파 진동자의 출력이 최대치 대비 30%(210W) 이상이 되어야 뚜렷해졌다. 한편 이 이상 출력을 증가시켜도 아이스 슬러리의 생성량은 증가하지 않았다.
- (3) 초음파 진동자 출력을 최대치 대비 40%(280W)로 고정시킨 채, 과냉각 정도에 따른 아이스 슬러리 생성과의 관계를 살펴본 결과, 양자 간의 민감도는 높게 나타났으며 특히 과냉각 온도가 낮을수록 아이스 슬러리 생성량이 많아지는 것으로 나타났다. 한편 시수의 경우 과냉각 온도 -0.5°C 에서 빙충전율이 약 40%에 달해서 초음파 진동에 의한 캐비테이션 충격 방법의 실용성을 확인하였으나 에틸렌 글리콜 5% 수용액의 경우, 과냉각 온도가 -1.0°C 가 되어도 빙충전율이 5% 정도로 낮게 나타나 실용성을 담보하기 위해서는 향후 보다 폭 넓은 연구가 필요한 것으로 사료된다.

References

- [1] C. Chaichana "An ice thermal storage computer model", Applied Thermal Engineering, Vol. 21, pp. 1769-1778, 2001.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S1359-4311\(01\)00046-1](http://dx.doi.org/10.1016/S1359-4311(01)00046-1)
- [2] B. K. Soltan, M. M. Ardehali. "Numerical simulation of water solidification phenomenon for ice-on-coil thermal energy storage application", Energy Conversion and Management, Vol. 44, pp. 85-92, 2003.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0196-8904\(02\)00041-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0196-8904(02)00041-9)
- [3] M. Yamada, S. Fukusako, T. Kawanami, "Performance analysis on the liquid-ice thermal storage system for optimum operation", Int. J. of Refrigeration, Vol. 25, pp. 267-277, 2002.
- [4] L. Schibuola, "Experimental study of ice storage performance in a office building", Int. J. of Energy Research, Vol. 22, pp.751-759. 1998.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-114X\(19980625\)22:8<751::AID-ER401>3.3.CO;2-Y](http://dx.doi.org/10.1002/(SICI)1099-114X(19980625)22:8<751::AID-ER401>3.3.CO;2-Y)
- [5] K. T. Adref, I. W. Eames, "Experiments on charging and discharging of spherical thermal (ice) storage elements", Int. J. of Energy Research, Vol. 26, pp. 949-964, 2002.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/er.816>

- [6] Y. G. Shin, H. C. Yang, C. S. Tae, S. Cho, Y. I. Kim, "In-site measurement of chiller performance and thermal storage density of an ice thermal storage system", Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 17, pp. 1204-1209, 2005.
- [7] M.-S. Kim, N. H.-G. Choi, S.-K. Byon, "Heat Transfer Analysis of a Thermal Storage System using the Ice Capsule of Bar and Ring Module", J. of the Korean Society of Marine Engineering, Vol. 31, pp. 268-275, 2008.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5916/jkosme.2008.32.2.268>
- [8] K. H. Yang, T. C. Yeh, "Renovation of an ice storage AC system in an aquarium for energy conservation", Building and Environment, Vol. 42, pp. 1851-1861, 2006.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.02.009>
- [9] Y. Kozawa, N. Aizawa, M. Tanino, "Study on ice storing characteristics in dynamic-type ice storage system by using supercooled water. effects of the supplying conditions of ice-slurry at deployment to district heating and cooling system", Int. J. of Refrigeration, Vol. 28, pp. 73-82, 2005.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2004.07.017>
- [10] K. Ohsaka, E.H. Trinh, "Dynamic Nucleation of Ice Induced by a Single Stable Cavitation Bubble", Applied Physic Letter, Vol. 73, pp. 129-131, 1998.,
DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.121706>
- [11] J. D. Hunt, K. A. Jackson, "Nucleation of Solid in an Undercooled Liquid By Cavitation", J. of Applied Physics, Vol. 37, pp. 254-257, 1966.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.1707821>
- [12] T. Inada, X. Zhang, A. Yabe, Y. Kozawa, "Active Control of Phase Change from Supercooled Water to Ice by Ultrasonic Vibration I. Control of Freezing Temperature", Int. J. of Heat and Mass Transfer, Vol. 44, pp. 4523-4531, 2001.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0017-9310\(01\)00057-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0017-9310(01)00057-6)

변 성 광(Sung-Kwang Byon)

[정회원]



- 1994년 2월 : KAIST 기계공학과(박사)
- 1992년 1월 ~ 1998년 1월 : (주) 대우전자 근무
- 1997년 8월 ~ 현재 : 동양미래대학교 교수

<관심분야>
생산공학, 금형

공 춘 수(Chun-Su Gong)

[정회원]



- 2011년 8월 : 서울과학기술대학교 산업대학원 기계공학과 (석사)
- 1993년 4월 ~ 2009년 3월 : (주) 신성엔지니어링 근무
- 2009년 4월 ~ 현재 : (주)선우이엔지 대표이사
- 냉동공조기계기술사

<관심분야>
축열, 냉동공조

김 남 응(Nam Woong Kim)

[정회원]



- 1993년 2월 : 중앙대학교 기계설계학과 (공학사)
- 1995년 2월 : 포항공과대학교 기계공학과 (공학석사)
- 1995년 2월 ~ 2003년 8월 : LG 전자 디지털미디어연구소 선임연구원
- 2008년 8월 : 서울대학교 기계항공공학부 (공학박사)
- 2009년 3월 ~ 현재 : 동양미래대학교 기계공학부 조교수

<관심분야>
전산역학, 나노생산공정, 진동학