

역전 유동층 내의 유동해석 및 슬러리아이스 생성에 관한 연구 오철* · 최영규¹

(원고접수일 : 2011년 4월 14일, 원고수정일 : 2011년 5월 24일, 심사완료일 : 2011년 5월 25일)

Flow Analysis and an Experimental Study on Formation of Slurry Ice in the Reversing Flow Layer

Cheol Oh* · Young-Gyu Choi¹

요약 : 최근 지구 온난화와 더불어 급격한 기후 변화 등으로 여름철 주간 냉방 수요가 급격히 증가하여 이에 따른 전력 수요량이 증가하고 있다. 또한 주간 전력 피크로 인한 급격한 전력부하 상승은 전력 수급의 불균형을 가져 와 사회적 문제로 대두되고 있다. 이를 위해 개발된 축냉시스템은 전력사용량이 상대적으로 적은 심야시간에 냉열을 만들어 탱크에 저장해 두었다가 그것을 주간 냉방 전력 사용 피크시간에 이용함으로써, 냉동기의 용량이 작아지고 냉동기를 고효율로 운전할 수 있으며, 갑작스런 부하 증가에 적절히 대응할 수 있는 등 여러 가지 장점을 갖고 있다. 이로 인하여 주간전력 피크를 줄여주는 효과를 가진다. 축냉시스템 중 하나인 슬러리아이스형은 슬러리아이스가 과냉되지 않은 작은 입자형태를 갖고 있어 해빙 특성이 뛰어나므로 부하변동에 빠르게 반응할 수 있으며, 그 저장과 재생 및 수송 분야에서 그 장점과 기능이 입증되었다. 본 실험에서는 슬러리아이스 생성 효율을 높이기 위하여 역전유동층을 이용하였다. 이러한 역전유동층은 냉각관 표면에 얼음 부착이 심화되기 전에 얼음 입자를 분리시켜 수 내지 수십 마이크론 단위(0.1~0.001 mm)의 슬러리아이스를 생성하도록 하였다.

주제어 : 불충전율, 빙부착, 빙축열시스템, 역전유동층, 슬러리아이스

Abstract: Thermal energy storage(TES) cooling system using cheaper electricity of off-peak time has been applied to relieve a significant portion of the peak demand of electricity during the daytime in summer. Slurry ice type thermal energy storage cooling system is one kind of more efficient ice-thermal energy storage cooling system than Ice-on-Coil type or Encapsulated type TES cooling system, even though, which are more popular TES system. This experimental study was carried out to observe flow pattern and formation of slurry ice in reversing flow layer to improve efficiency of heat transfer between fluid and freezing tube and to disturb ice adhesion on tube surface. The reversing flow layer was made by using reversing materials in heat exchanger section(test section) to disturb ice adhesion. At this experiment, styrofoam balls and poly propylene balls were used as reversing materials, and a 20wt% solution of ethylene glycol was used as reversing flow layer. The experimental apparatus was constructed of the test section for making/storing slurry ice, the brine tank, pumps for circulating of a 20wt% solution of ethylene glycol and brine, a flow-meter, a data logger for measuring the temperature. The experiments were carried out under various conditions, with volumetric flow rate, ball filling rate and air filling rate.

Key words: Ball filling rate, Ice adhesion, Ice-thermal energy storage cooling system, Reversing flow layer, Slurry ice

* 교신저자(한국해양대학교 기관시스템공학부, E-mail: ohcheol@mail.hhu.ac.kr, Tel: 051-410-4268)

¹ 미국선급협회(ABS), ychoi@eagle.org

기호설명

IPF : Ice Packing Factor	(%)
AFR : Air Filling Rate	(%)
BFR : Ball Filling Rate	(%)

1. 서론

최근 지구 온난화와 더불어 급격한 기후 변화 등으로 여름철 주간 냉방 수요가 급격히 증가하여 이에 따른 전력 수요량이 증가하고 있다. 또한 주간 전력 피크로 인한 급격한 전력부하 상승은 전력 수급의 불균형을 가져 와 사회적 문제로 대두되고 있다. 이에 따라 에너지 이용 효율 향상에 대한 관심이 높아지고 있고, 최근 국내 및 국외의 축냉시스템을 이용한 주간 전력 피크치를 최소화 하는 연구 개발과 실제 적용 사례가 늘어나고 있으며 축냉시스템의 경제적 효과에 대한 관심이 높아지고 있는 추세이다[1-3].

축냉시스템은 전력사용량이 상대적으로 적은 심야시간에 냉열을 만들어 탱크에 저장해 두었다가 그것을 주간 냉방 전력 사용 피크시간에 이용함으로써, 냉동기의 용량이 작아지고 냉동기를 고효율로 운전할 수 있으며, 갑작스런 부하 증가에 적절히 대응할 수 있는 등 여러 가지 장점을 갖고 있다. 이로 인하여 주간전력 피크를 줄여주는 효과를 가진다.

축냉시스템은 냉열을 저장하는 방법에 따라 물을 이용하는 수축열, 물 이외의 상변화 물질을 이용하는 잠열축열, 얼음을 이용하는 빙축열로 나뉜다. 특히 축냉시스템의 하나인 빙축열시스템은 0℃에서 물이 얼음으로 상변화할 때 발생하는 잠열(80kcal/kg)을 저장함으로 저장탱크의 체적이 작아 도심지 빌딩에 적용 가능한 시스템이다.^[4] 빙축열은 제빙방법에 따라 관외착빙형(Ice-on-Coil), 캡슐형(Encapsulated Ice), 슬러리아이스형(Slurry Ice)등으로 나뉜다.^[1~5] 슬러리아이스형은 슬러리아이스가 과냉되지 않은 작은 입자형태를 갖고 있어 해빙특성이 뛰어나므로 부하변동에 빠르게 반응할 수 있으며, 그 저장과 재생 및 수송 분야에서 그 장점과 기능이 입증되어 공조 분야의 축냉시스템을 비롯하여, 지역 냉방용, 농·수산물의 보

관·판매용, 상업용, 의료용 등 광범위한 용도로 사용될 것으로 기대를 모으고 있다[6-9].

이러한 슬러리아이스형 빙축열 시스템의 보급 및 이용확대를 위해서는 신뢰성을 바탕으로 하여, 경제적이고 효율적으로 슬러리아이스를 만드는 것이 중요하다.

슬러리아이스를 만드는 방법에는 여러 가지가 있겠지만, 그 중 대표적인 것이 얼음을 만든 후 분쇄하는 방법과, 전열표면에서의 빙부착 제거를 위해 스크래퍼, 브러쉬, 로드, 스프링 등으로 연속적으로 스크래핑하는 방법 등이 있으며, 현재 가장 널리 보급된 방식이 바로 미국과 유럽 등에서 개발된 스크래퍼 방식이다[8-10]. 또한 국내에서는 동관 주위에 형성된 얼음을 떼어내기 위한 방법으로 유압이나 스프링 및 공기압을 이용하여 진동을 주어 제거하는 연구를 시도하였으나 슬러리아이스를 제조하는 공정의 개발에는 성공하지 못하였다.

본 실험적 연구는 역전유동층을 이용하여 냉각관에서의 빙부착을 억제하여 슬러리아이스 생성 효율 향상을 도모한 1차 실험[12]('2.1.1 단관 내에서의 슬러리아이스 생성'에서 실험방법 서술)의 결과를 기초하여, 가장 효율이 좋았던 실험조건 하에서 유동가시화를 통한 유동해석을 실시하였다. 또한, 추가적으로 실험부의 직경을 증가시켜 냉각관의 수를 늘려 관군을 형성하여 관군 내에서의 슬러리아이스 생성 실험(2차실험)을 실시하였다. 관군 내의 슬러리아이스 생성 실험에서는 역전유동층에 영향을 주는 기공률 - 동작유체의 유동이 정지하였을 경우 실험부 내부에 함유된 공기의 용적비를 백분율(%)로 표기 - 변화를 실험 조건으로 추가하여 실험을 실시하였다. 역전유동층은 동작유체의 흐름에 반대 방향의 유동을 만드는 유동물질이 만드는 유동층을 역전유동층이라 한다. 일반적으로 동작유체가 상부에서 하부로 유동할 때 동작유체보다 밀도가 낮은 플라스틱 볼을 동작유체 내에 넣으면 이 플라스틱 볼은 부력에 의하여 하부에서 상부로 흐르게 된다. 이와 동시에 상부의 플라스틱 볼은 동작유체의 유속에 의하여 다시 하부로 오게 된다. 이렇게 플라스틱 볼은 아래로 흐르는 동작유체 속에서 부력에 의한 상승운동과 동작유체의 유속에

의한 하강운동을 반복하게 되어 일정하지 않은 난류 유동을 하게 되는데, 이 플라스틱 볼을 역전유동물질이라 한다. 이 역전유동물질이 만드는 불규칙한 상승 및 하강운동에 의해 생성되는 유동층을 역전 유동층이라 한다. 이러한 역전유동층은 냉각관 표면에 얼음 부착이 심화되기 전에 얼음 입자를 분리시켜 수 내지 수십 마이크로 단위(0.1 ~ 0.001 mm)의 슬러리아이스를 생성하도록 한다.

본 실험에서는 슬러리아이스 생성에 사용되는 동작유체는 20wt% 에틸렌글리콜 수용액을 사용하였으며, 역전유동물질은 구형(sphere type) 플라스틱 볼(단관내 실험:스티로폼, 관군내 실험:폴리프로필렌)을 사용하였다. 실험부내의 볼을 충전한 양과 실험부 전체 용적의 비를 볼충전율(Ball Filling Rate)로 정의하고, 이를 백분율(%)로 표기하여, 볼충전율(%), 동작유체의 유속(%) 및 기공률을 달리하여 역전유동층의 흐름을 변화시켜 슬러리아이스 생성에 미치는 영향에 대하여 실험하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 실험장치 및 방법

2.1.1 단관 내에서의 슬러리아이스 생성[11]

Figure 1은 1차 실험으로 단관 내에서의 슬러리아이스생성을 위한 실험장치의 계통도이다. 실험장치부는 유체를 순환시키기 위한 유체 순환부와 실험부 내에서의 제빙 및 유체의 온도를 일정하게 유지시키기 위한 냉각부 및 온도 측정부로 구성된다.

온도측정을 위해 열전대(K type)를 실험부에 설치하였으며, 온도기록계(YOKOGAWA, DR-230)를 이용하여 측정하였다. 동작유체는 20wt% 에틸렌글리콜 수용액을 사용 실험부에서 간접냉각 방식을 통하여 냉각되었다. 동작유체와 냉각브라인은 원심펌프를 이용하여 순환시켰으며 유량은 디지털 유량계(SIERRA, 240-VTP-F5)를 이용하여 측정하였다.

실험부는 직경 100mm, 길이 560mm의 아크릴 관 내에 직경 15mm의 동관을 삽입하고, 동관 내에 냉각유체가 흐르도록 하였다. 역전유동물질은 물(비중 1)보다 밀도가 낮은 스티로폼(styrofoam)볼(비중 0.015 ~ 0.030)을 사용하였다. Table 1은

실험조건을 나타낸다.

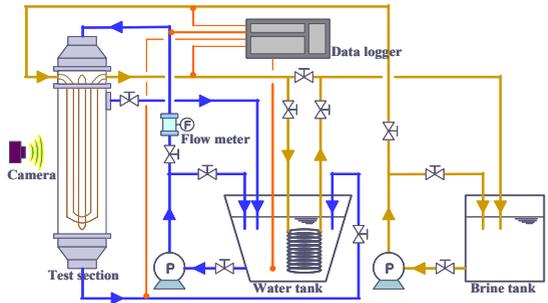


Figure 1: Schematic diagram of experimental apparatus

Table 1: An experimental condition

Condition		Range
Ball Diameter	[mm]	10, 15
Ball filling rate	[%]	0, 33, 50
Mean velocity	[m/s]	0.07, 0.10, 0.13

2.1.2 관군에서의 슬러리아이스 생성

Figure 2는 2차 실험으로 관군에서의 슬러리아이스 생성 실험을 위한 실험장치의 계통도이다. 실험장치부는 1차 실험과 달리 슬러리아이스 생성과 저장의 기능을 동시에 시행할 수 있도록 냉각 브라인 관군을 설치한 실험부를 구성하여 그곳에 역전유동물질을 넣어 역전 유동층을 형성하도록 하였다. 그 구성은 실험유체순환을 위한 유체순환부, 슬러리아이스 생성 및 저장을 위한 냉각부 및 온도 측정부로 크게 3부분으로 구성된다.

열전대, 온도기록계, 동작유체와 유량계는 1차 실험과 동일한 기기로 사용하였다. 역전유동물질은 1차 실험보다 넓어진 단면적의 실험부에서의 유속의 감소를 감안하여 스티로폼(styrofoam)보다 비중이 높은 폴리프로필렌(Poly propylene, 비중 0.82~0.92)을 사용하였다. Figure 3 (a), (b), (c)는 충전율 0%, 15%, 30%의 시험부 사진을 나열하였다. 직경 300mm, 길이 600mm의 아크릴 관 내에 M자 형태의 직경 15mm의 동관을 설치하여 냉각 Brine이 흐르도록 하였다. 또한 관과 관사이의 간격은 삽입된 볼의 유동이 원활하도록 충분한 간격을 유지하도록 하였다.

동작유체의 순환방법은 유체의 순환방향을 역전 유동물질 폴리프로필렌 볼이 충전된 실험부 상부에서 하부로 순환되도록 하였으며 실험부 내로 유입되는 냉각 브라인의 온도는 -20°C 로 일정하게 하였다.

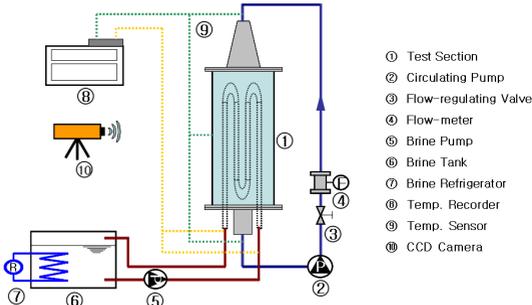


Figure 2: Schematic diagram of experimental apparatus

유체의 유속을 실험조건에 맞게 조정된 후 냉각 브라인을 시험부에 공급하기 시작하였으며 브라인의 순환과 함께 작동유체의 입·출구 온도가 하강하기 시작하여 상변화가 일어나기 시작하여 온도가 일정하게 안정화 되는 시점을 실험시작 시간으로 하였으며, 실험종료 시간은 실험시작 기준으로 하여 2시간 후로 하여 슬러리아이스의 생성과정을 관찰하였다. 불충전율은 0%, 15%, 30%일 때의 경우에 대하여 평가하였다. 유속에 따른 영향을 평가하기 위하여 동작유체의 체적유량 140 l/m, 180 l/m, 220 l/m(이하 평균유속 1.83m/s, 2.38m/s, 2.94m/s로 표기)로 변화시켜 평균유속에 따른 영향을 평가하였다. 또한 역전유동층 유동에 영향을 줄 수 있는 작동유체 내 공기 함유량을 실험 조건으로 하여 유체가 정지상태일 때 실험부내에 공기 함유량을 기공률(Air Filling Rate)이라 하여 0%, 10%, 20%일 경우의 영향을 평가하였다. Table 2는 본 연구의 실험조건을 나타낸다.

Table 2: An experimental condition

Condition		Range
Mean Velocity	[m/s]	1.83, 2.38, 2.94
Ball Filling Rate	[%]	0, 15, 30
Air Filling Rate	[%]	0, 10, 20

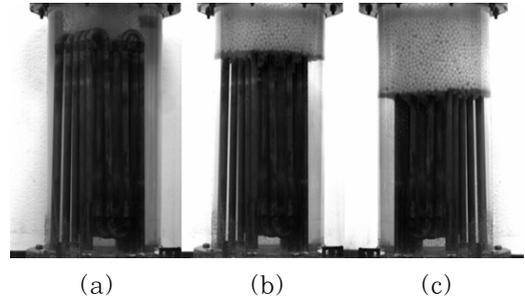


Figure 3: Test section

2.3 IPF 산출 방법

슬러리아이스의 생성량을 정량화하기 위하여 작동유체 중에서 슬러리아이스 입자가 생성된 양을 IPF(%)로 나타내었다. 실험 종료 시의 에틸렌글리콜의 농도를 측정하여 농도에 따른 부피 식을 구하고, 초기조건인 20wt% 에틸렌글리콜 수용액 일때의 부피 식과 연립방정식을 통하여 슬러리아이스의 생성량을 산출하였다.

수 내지 수십 미크론 단위의 슬러리아이스 입자라는 점을 고려했을 때, 슬러리아이스 입자 내에는 에틸렌글리콜은 함유되지 않는 것으로 가정하였으며, 유체의 농도 측정은 브라인 농도 측정용 굴절계를 이용하여 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 실험부의 유동 해석

단관 내에서의 슬러리아이스 생성 실험(1차 실험)에서 직경10mm 볼 사용, 불충전율 33%, 유속 0.13 m/s 실험 조건에서 가장 유동 상태가 좋았으며 [11], 이 경우 실험 종료 후 IPF 값이 가장 높은 것으로 나타났다. 상기 조건에서 유동가시화를 통한 유동해석을 실시하였다. 임의시간 동안의 유동을 가시화하여 속도에너지, 운동에너지 및 난류강도를 분석하였다.

Figure 4는 가시화 구간의 평균 속도 에너지를 나타낸 것이다. 이 유동의 경우 유속의 중심이 우측으로 조금 치우쳐져 있는 데 이것은 가시화한 순간의 경우 볼의 영향으로 유속의 중심이 이동된 것으로 생각된다.

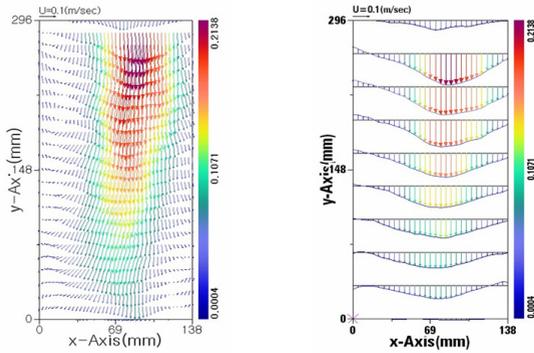


Figure 4: Velocity profile

특히, 주목해야 할 것은 우측으로 유속의 중심이 이동했을 경우 좌측 원관 벽면 쪽에서는 일반유동에서 볼 수 없는 역류가 일어나는 것을 알 수 있다. 이는 볼이 가장 유속이 낮은 곳에서 부력에 의해 상승하면서 생긴 현상으로 생각된다.

일반적으로 유속이 없는 유동의 경우 벽면의 속도를 0으로 하여 원관 중심으로 올수록 그 속도가 증가하게 되어 원관의 중심에서 가장 높은 것을 알 수 있다. 이런 흐름은 기타 장애요소가 발생하지 않으면 지속되게 된다. 하지만 역전유동층 내에서는 볼의 부력으로 인한 상승 작용이 유체의 유동에 영향을 주게 된다. 본 실험의 실험부에서처럼 일정 구간에서 역전유동층이 형성될 경우 유속과 볼의 부력으로 유속의 형태가 바뀌는 것을 알 수 있다. 볼은 유속이 높은 부분에서는 유속의 영향으로 하강하지만 유속의 영향이 줄어드는 순간 유속이 낮은 부분으로 상승하게 된다. 이 상승효과는 볼의 상승뿐만 아니라 볼과 인접한 유체의 상승효과도 가지고 오기 때문에 볼의 상승부분에서는 역류현상이 발생하게 되는 것이다. 이런 역류현상은 유속이 낮은 벽부에서 일어나게 된다. 유속이 빠른 중심부에서는 하강을 유속이 낮은 벽부에서는 상승을 이러한 운동을 반복적으로 함으로 볼은 유속에 영향을 주게 된다.

Figure 5은 상기 조건에서의 운동에너지를 나타낸 것으로 유속이 빠른 중심부에서 그 운동에너지 또한 높은 것을 알 수 있으며 벽 쪽으로 갈수록 낮아지는 것을 알 수 있다.

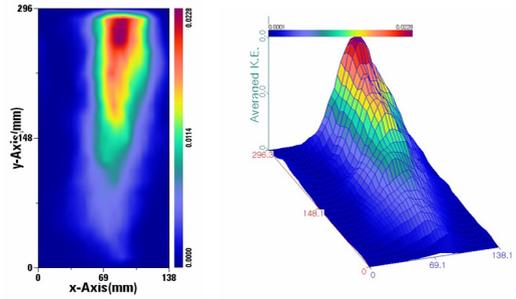


Figure 5: Kinetic energy profile

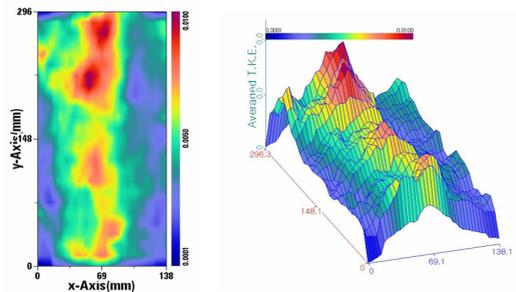


Figure 6: Turbulent intensity profile

난류 유동은 속도, 압력과 같은 물리적인 양들이 시간과 공간에 대해 진동하는 불규칙적인 유체 운동이며 일종의 에너지 교환과정으로 장시간 지속되는 와류 구조가 그 안에 존재한다. 난류강도는 속도 변동성분과 연관되어 유동장을 지배하는 중요한 유동특성으로 각 격자점에서 다음 식으로 구하여 나타내었다.

$$T.I = \frac{\sqrt{\frac{(u'^2 + v'^2)}{2}}}{\sqrt{u''^2 + v''^2}}$$

u'^2, v'^2 : 순간에 있어서의 속도 변동성분

u''^2, v''^2 : 시간평균 속도

일반적으로 장애물이 없는 원관 내에서의 층류 흐름에서는 난류가 일어나지 않아 난류강도가 나타나지 않으나 측정된 역전유동층에서는 Figure 6과 같은 난류강도가 나타났다. 난류강도는 유속이 빠른 중심부에서 높은 것을 알 수 있으나 상부 쪽에서는 벽면 쪽에서도 난류강도가 중심부보다는 낮지만 높게 일어나는 것을 알 수 있다. 특히, 속도 해석 곡선(Figure 4)에서 보았던 역류가 일어났던

구간에서는 하부와 비슷한 강도의 난류유동이 일어나는 것을 알 수 있다.

역류구간과 중심부 사이에서 난류강도가 높게 일어나며 유속 중심부에서 난류강도가 높은 것을 알 수 있다.

이것은 일반적으로 구의 후면에서 일어나는 난류현상이 불의 후면에서 일어나며 불의 유동 및 충돌로 인한 난류에 의한 것으로 생각되며 중심부의 냉각관과 불과의 충돌로 인하여 중심부에서 높은 난류강도가 일어나는 것으로 사료된다.

3.2 충전율, 평균유속 및 기공률에 따른 영향

단관 내에서의 슬러리아이스 생성 실험(1차실험)의 결과와 이를 기초로 한 추가 실험 관군 내에서의 슬러리아이스 생성 실험(2차실험)의 결과를 비교하여 보았다(이하 그래프에서 1차실험, 2차실험으로 표기).

Figure 7은 기공률 0%의 관군 내 실험 결과와 단관 내 실험결과를 비교, 충전율 및 평균유속에 따른 영향을 나타낸 것이다.

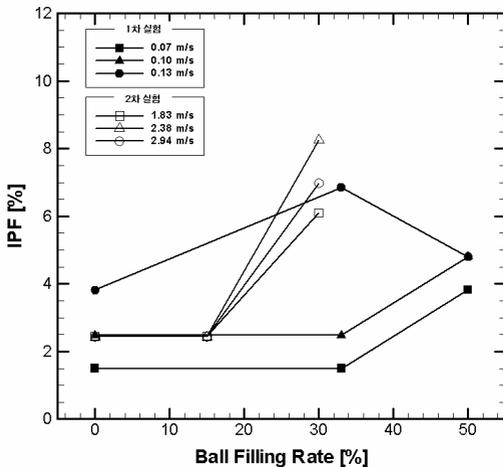


Figure 7: Effect of ball filling rate at AFR 0%

불충전율 30%에서 0%, 15%에 비하여 높은 IPF 값을 나타내고 있다. 이는 역전유동층이 냉각관에서의 빙부착 현상을 억제하고 또한 온도 경계층을 파괴하여 전열 효과를 증가시키기 때문이다. 관군 내 충전율 15% 경우는 낮은 불충전율로 인하

여 실험부 상부에서만 불의 유동이 있었으며 이 경우에도 불의 유동 운동이 미미하여 열전달 효과에는 영향을 주지 못하였다. 따라서 낮은 충전율에도 역전유동층을 활성화 시킬 수 있는 방법으로 실험부 내 기포류 생성을 고려하였으며 이를 위해 아래 실험(Figure 9, 10)과 같이 기공률을 높여 실험부내 기포류를 형성하여 역전유동층의 유동 강도를 높여 전열효과를 올릴 수 있다.

평균유속영향의 경우 평균유속의 증가와 더불어 IPF 값이 증가는 경향을 나타내었으나 1차실험에서 0.13m/s, 50%의 경우 평균유속 증가에 반하여 IPF 값이 감소하는데 이는 유속 증가로 인한 불의 주요 유동구간은 실험부 하부에서 생성되며, 이 경우 불이 실험부 하부(출구)로 집중되면서 불의 유동이 없는 불정체층이 형성되었다. Figure 8은 불정체층을 나타낸다. 관군내에서는 평균유속 2.94m/s에서 유속증가로 인한 하부 불정체층이 생성되었다. 불충전율 증가와 유속증가로 인한 역전유동층의 하부 불정체층은 역전유동층의 유동 운동량의 저하를 가져와 냉각관에서의 전열효과 감소를 초래하고, 또한 빙부착 억제효과도 저하시켜 냉각관에서 빙부착으로 인한 열전달량을 감소시켜 IPF 값의 저하를 가져온다.

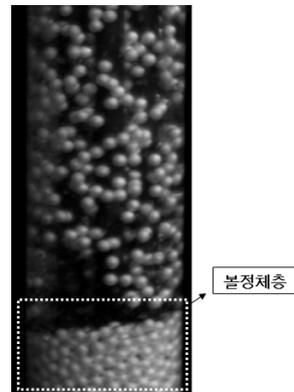


Figure 8: Non-moving part of balls

Figure 9는 기공률 10%의 관군 내 실험 결과와 단관 내 실험결과를 비교, 충전율 및 평균유속에 따른 영향을 나타낸 것이다. 불충전율의 경우 30%의 경우가 불충전율 0% 및 15%의 경우에 비

하여 높은 IPF 값을 나타내었으며 이는 역전유동층의 전열효과 향상 및 빙부착 억제 효과 때문이다. 또한, 전체적으로는 평균유속의 증가로 인한 IPF의 값의 증가하는 결과를 나타내고 있으며 이는 평균유속증가로 인한 역전유동층의 유동 활성화 및 냉각관 벽면의 열경계층의 두께가 얇아지게 되어 IPF 값의 증가를 가져온 것으로 보인다. 하지만 관군 내 15%의 경우는 불충전량 부족으로 인하여 실험부 상부에서만 역전유동이 형성되었으며 이 경우 실험부 상부는 냉각관이 지나가지 않는 부분으로 역전유동층이 빙부착 억제효과 보다는 실험부 내로 진입하는 유체의 유동의 유속 감소를 초래하는 속도저항으로 작용하여 실제 열교환이 일어나는 실험부 중간 및 하부의 냉각관에서의 유속감소로 인한 빙부착 증가의 원인으로 작용하여 IPF 값이 오히려 감소하는 결과를 초래하였다.

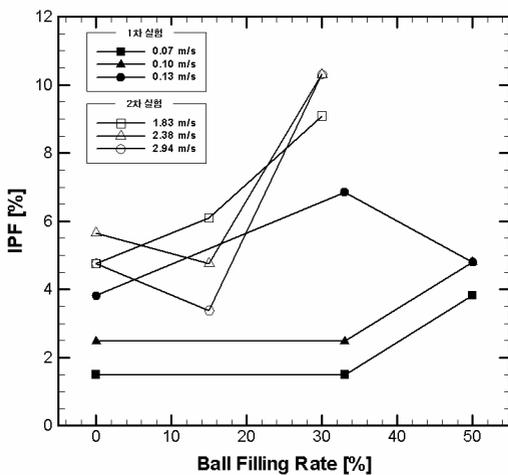


Figure 9: Effect of ball filling rate at AFR 10%

Figure 10은 기공률 20%의 관군 내 실험 결과와 단관 내 실험결과를 비교, 충전율 및 평균유속에 따른 영향을 나타낸 것이다. 불충전율 15%, 30%, 50%로 충전량 증가와 더불어 전체적으로 IPF 값의 증가하는 결과를 나타내고 있으며 이 또한 앞서 설명하였듯이 역전유동층의 전열효과 향상 및 빙부착 억제 효과 때문이다. 관군에서의 2.38 m/s, 2.94m/s의 경우 불충전율 30%에서 IPF 값이 정체하거나 저하하는 경우를 나타내는 이는 높은

기공률(20%)으로 나타나는 현상으로 유속의 증가로 역전유동층이 활성화 되었으나 높은 기공률로 인해 전체적인 유동층이 실험부 하부로 옮겨져 상부에 빈공간과 하부의 불정체층이 형성되어 전열효과를 떨어뜨리는데 이는 단관 내 0.13m/s, 충전율 50%의 불정체층으로 인한 IPF 값 저하와 같은 현상으로 볼 수 있다.

평균유속에서도 마찬가지로 전체적으로 평균유속 증가로 인하여 IPF 값도 증가하나 관군에서의 2.38m/s, 2.94m/s의 경우 불충전율 30%에서 낮은 유속 1.83m/s보다 낮은 IPF 값을 나타내는데 이는 앞서 말했듯이 평균유속 증가로 인한 전열효과 상승보다 불충전율에 비해 높은 기공률로 인하여 상부의 빈공간과 하부의 정체구간으로 인한 전열효과 저하에 따른 것이다.

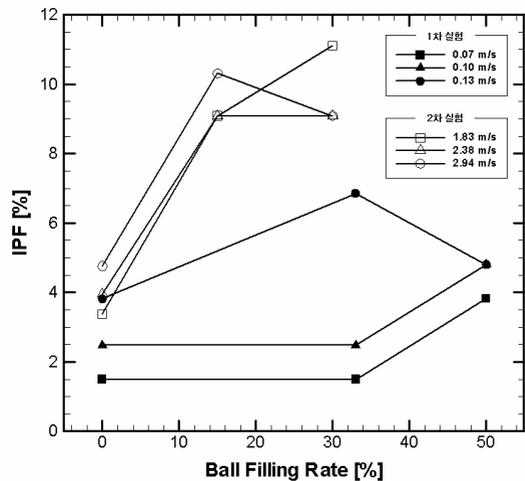


Figure 10: Effect of ball filling rate at AFR 20%

유동가시화를 통한 유동해석과 실험결과를 비교한 결과, 유동해석에서 보여준 난류강도에서처럼 유속이 빠른 중심부와 역류가 발생한 벽면에서까지 전구간에 걸쳐 높은 난류강도가 나타난 실험 조건에서 높은 IPF 값을 나타냈으며 낮은 유속이나 낮은 불충전율로 실험부 상부에서만 난류가 발생하거나 높은 유속이나 높은 불충전율로 인하여 하부에 불정체층이 발생 난류강도를 저하 시킬 경우는 낮은 IPF 값을 나타내었다.

4. 결 론

본 실험 범위 내에서는 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 역전유동층에서는 역전유동물질의 유동으로 인하여 일반유동층에서 볼 수 없는 역류현상이 일어난다.
2. 유동 해석 시 난류강도가 증가할 경우, IPF 값도 증가한다.
3. 역전유동층은 일반유동층에 비하여 IPF 값 증가를 가져온다.
4. 불충전을 증가로 인하여 역전유동층 하부에 불정체층이 생성되기 전까지, 불충전율이 증가함에 따라 IPF 값도 증가한다.
5. 평균유속 증가로 인하여 역전유동층 하부에 불정체층이 생성되기 전까지, 평균유속이 증가함에 따라 IPF 값도 증가한다.
6. 기공률은 IPF 값 증가에 향상에 영향을 주나 일정 값 이상으로 증가할 경우 전열효과 저하를 초래한다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 “해양에너지전문인력양성 사업”의 지원사업으로 수행된 연구결과물이며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- [1] 박승상 외 1인, “빙축열시스템의 이용기술”, 대한설비공학회지(설비저널) 제30권, pp. 6-15, 2001.
- [2] 송현아 외 2인, “신재생에너지를 활용한 축냉 시스템 설치사례 분석”, 대한전기학회 하계학술대회논문집, pp. 1076-1077, 2009.
- [3] 박창현 외 4인, “축냉시스템의 산업용 생산설비 적용에 대한 고찰”, 대한설비공학회 하계학술대회 논문집, pp. 1288-1293, 2009.
- [4] 한국전력공사, “<http://www.kepco.co.kr/>”
- [5] 이동원, “아이스슬러리형 빙축열시스템과 그 이용”, 대한설비공학회지(설비저널), 제30권, pp. 21-26, 2001.
- [6] 이동원, “아이스슬러리를 이용한 냉열수송”, 대

한설비공학회지(설비저널), pp. 8-14, 2001.

- [7] 이봉진 외 3인, “냉수 및 아이스슬러리 직접수송 지역냉방 시스템의 경제성 평가”, 대한설비공학회 동계학술발표대회 논문집, pp. 27-32, 2004.
- [8] 이윤표, “지역냉방용 아이스슬러리 시스템의 특성”, 대한설비공학회 하계학술발표대회 논문집, pp. 1223-1228, 2004.
- [9] 임효목 외 1인, “스크래퍼형 아이스슬러리 제빙기”, 대한설비공학회 하계학술발표대회 논문집, pp. 461-468, 2004.
- [10] 강채동 외 3인, “수용액의 교반/냉각을 동반한 슬러리 얼음의 빙부착”, 설비공학논문집, pp. 1071-1077, 2002.
- [11] 오철 외 3인, “역전 유동층에 의한 슬러리아이스 생성에 관한 연구”, 한국마린엔지니어링학회지, vol.30, no.3, pp. 376-381, 2006.

저 자 소 개



오 철(吳喆)

1958년생, 1983년 한국해양대학교 기관학과 졸업, 1985년 한국해양대학교 대학원 박용기관학과졸업(공학석사), 1998년 북해도대학 대학원 기계공학과 졸업(공학박사), 현재 한국해양대학교 해사대학 기관공학부 교수.



최영규(崔永圭)

1977년생, 2000년 한국해양대학교 기관시스템공학부 졸업, 2006년 한국해양대학교 대학원 졸업(공학석사), 2006년-2007년 한국조선기자재연구원 연구원, 현재 미국선급협회 검사관