

역전 유동층에 의한 슬러리아이스 생성에 관한 연구

오 철† · 문성배* · 최영규**

(원고접수일 : 2006년 3월 23일, 심사완료일 : 2006년 5월 16일)

A study on formation of slurry ice by the reversing flow

C. Oh† · S. B. Mun* · Y. G. Choi**

Abstract : This study is experimented to observe an influence of experimental conditions on production characteristics of slurry ice by putting ball into test section to disturb ice adhesion. And at this experiment it used ethylene glycol-water solution and the concentration is 20wt%. The experimental apparatus was constructed of ethylene glycol-water solution and slurry ice storage tank, brine tank, pumps for ethylene glycol-water solution and brine circulating, a mass flow-meter, data logger for fluid temperature measuring and a vertical circular tube with two copper tubes as test section. The experiments were carried out under various conditions, with mean velocity of fluid at the entry ranging from 0.07 to 0.13m/s and ball diameter is 10mm, 15mm. Also ball filling rate is 33%, 50%.

Key words : Ice adhesion(빙부착), Ball filling rate(충진율), Slurry ice(슬러리아이스)

기호설명

IPF : Ice packing factor [%]

∅ : diameter [mm]

1. 서 론

여름철 냉방에 따른 전력 수요량이 증가함에 따라 에너지 이용 효율 향상에 대한 관심이 높아지고, 최근 국내 및 국외의 슬러리아이스와 관련된 많은 연구개발과 실제 적용 사례가 알려지면서 슬

러리아이스 빙축열시스템에 대한 관심이 높아지고 있는 추세이다.^(1~5)

슬러리아이스는 냉열에너지의 저장과 재생 및 수송⁽¹⁾ 분야에서 그 장점과 기능이 입증되어 공조 분야의 축냉 시스템을 비롯하여, 지역 냉방용^{(2),(3)}, 농·수산물물의 보관·판매용, 상업용, 의료용 등 광범위한 용도로 사용될 것으로 기대를 모으고 있다.

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

슬러리아이스를 만드는 방법에는 여러 가지가 있

† 책임저자(한국해양대학교 기관시스템공학부), E-mail : ohcheol@mial.hhu.ac.kr, Tel : 051) 410-4268

* 한국해양대학교 항해시스템공학부

** 한국조선기자재 연구원

겠지만, 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.^[4] 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.

분쇄기를 사용하는 방식이나 스크래퍼 방식은 얼음을 슬러리 형태로 만들기 위해 추가적인 동력이 필요하기 때문에, 본 연구에서는 그에 따른 에너지 효율성에 주목하였다.

본 실험적 연구에서는 소요되는 추가 동력을 제거하기 위하여 시험부 내에 가벼운 플라스틱 볼을 삽입하여 역전 유동층을 형성하고, 유체의 흐름에 따른 볼의 유동에 의해 냉각튜브 표면에 얼음 부착이 심화되기 전에 얼음 입자를 분리시켜 수 내지 수십 마이크론 단위의 슬러리아이스를 생성하도록 하였다. 아울러 볼의 직경과 충전율 및 유속이 슬러리아이스 생성에 미치는 영향에 대하여 검토하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 실험장치

Fig. 1은 실험장치의 계통도이다. 실험장치부는 유체를 순환시키기 위한 유체 순환부와 시험부 내에서의 제빙 및 유체의 온도를 일정하게 유지시키기 위한 냉각부 및 온도 측정부로 구성된다.

온도측정을 위해 열전대(C-A type)를 각부에 5개를 설치하였으며, 온도기록계(DR-230)를 이용하여 측정하였다. 작동유체는 에틸렌글리콜(Ethylene glycol, 이하 EG) 20% 수용액 40ℓ, 시험부의 냉각방법은 간접냉각 방식으로 에틸렌글리콜 40% 수용액을 사용하였으며, 각각 원심펌프를 이용하여 순환시켰다. 유량은 디지털 유량계(240-VTP-F5, SIERRA)를 이용하여 소정의 유량으로 일정하게 유지하였다.

여기서 사용된 EG는 물에 혼합되기 쉽고 분자

구조적으로 비교적 물과 무기물 사이에 개입하기 쉬운 구조를 하고 있으며, 또한 물성이 상당 부분 알려져 있고 소량사용 시 환경에 큰 영향을 주지 않는 물질로 알려져 있다.^[5] 유체의 이송 시에 배관을 통한 외부로의 열손실을 최소화하기 위해 전체적으로 단열재를 이용하여 단열시켰다.

Fig. 2는 볼을 삽입하지 않은 경우의 시험부 사진이다. Ø100mm, 길이 560mm의 아크릴 관내에 Ø22mm의 동관을 삽입하고, 동관 내에 냉각유체가 흐르도록 하였다. 또한 관과 관사이의 간격은 삽입된 볼의 유동이 원활하도록 충분한 간격을 유지하도록 하였다.

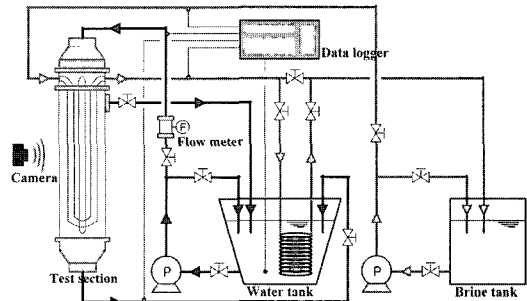


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

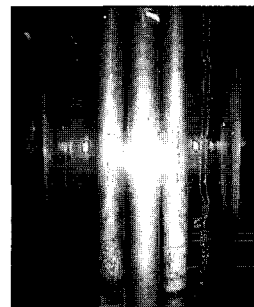


Fig. 2 Test section

2.2 실험방법

작동유체의 순환방법은 유체의 순환방향을 상부에서 하부로 순환되도록 하였으며(이하 역전 유동층이라 함), 시험부 내로 유입되는 냉각 브라인의 온도는 -20℃로 일정하게 하였으며, 실험 시작 전에 작동유체를 탱크 내에서 -7.5℃까지 냉각하여 각각의 온도를 일정하게 유지하였다.

유체의 유속을 실험조건에 맞게 조정 한 후, 냉각

브라인을 시험부에 공급하는 시점을 실험시작 시간으로 하였으며, 실험종료 시간은 실험시작 기준으로 하여 6시간으로 하여 슬러리아이스의 생성과정을 관찰하였다. 생성된 슬러리아이스는 시험부 상부 별도의 배관을 통하여 탱크 내로 이송되는 구조로 하였다.

볼의 직경(\varnothing)은 10mm, 15mm의 두 가지를 사용하였으며, 볼을 삽입한 양과 시험부 전체 용적의 비를 충전율(ball filling rate)로 정의하고, 이를 백분율(%)로 표기하였으며, 충전율이 33%, 50% 일 때의 경우와 볼의 유동이 없는 경우에 대하여 평가하였다. 또한 평균유속에 따른 영향을 평가하기 위하여 평균유속을 0.07m/s, 0.10m/s, 0.13m/s로 변화시켜 평균유속에 따른 영향을 평가하였다. Table 1은 본 연구의 실험조건을 나타낸다.

Table 1 An experimental condition

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

2.3. IPF 산출 방법

슬러리아이스의 생성량을 정량화하기 위하여 작동유체 중에서 슬러리아이스 입자가 생성된 양을 IPF(%)로 나타내었다.

작동유체의 전체량은 40ℓ이며, 초기조건인 에틸렌글리콜 20% 수용액 내에서 에틸렌글리콜의 함유량은 8ℓ이다. 실험 종료 시의 에틸렌글리콜의 농도를 측정하여 농도에 따른 부피 식을 구하고, 초기조건인 에틸렌글리콜 20% 수용액 일 때의 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 평균유속에 따른 영향

Fig. 3은 삽입한 볼의 직경이 10mm의 경우에 있어서, 평균유속이 0.07m/s, 0.10m/s, 0.13m/s로 변화할 때 평균유속의 변화가 슬러리아이스 생성에 미치는 영향을 나타낸다. 볼의 유동이 없는 경우, 평균유속이 증가함에 따라 IPF값도 증가함을 알 수 있으며, 이는 유속증가가 전열표면에서의 열전달효과의 증가에 따라 얼음 부착을 방해하려는 경향을 보여주기 때문이다.

또한 Fig. 3에서 충전율에 관계없이 평균유속이 증가함에 따라 IPF가 증가함을 알 수 있는데, 이는 평균유속이 증가함에 따라 관사이의 볼의 유동이 활발해져 관 표면에 얼음부착을 억제하는 효과가 커졌기 때문으로 생각된다. 그리고 충전율이 33%의 경우 평균유속이 0.13m/s의 경우가 충전율 50%의 경우보다 IPF의 값이 큰 것은 평균유속의 증가에 따른 볼의 유동이 충전율 33%의 경우가 더 활발하기 때문이며, 충전율 50%의 경우에는 볼의 과다 충전으로 인하여 시험의 하부에 일부의 볼이 정체되는 현상을 나타내고, 이것이 유동을 방해하기 때문에 IPF의 값이 작게 나타난다고 생각된다. 볼의 정체현상은 평균유속이 증가할수록 크게 나타났다.

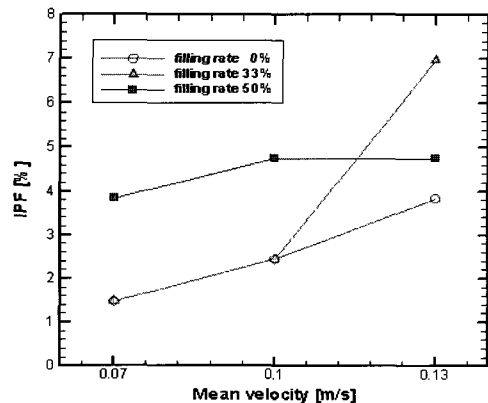


Fig. 3 Effect of mean velocity at ball diameter 10mm

Fig. 4는 삽입한 볼의 직경이 15mm의 경우에 있

어서, 평균유속이 0.07m/s, 0.10m/s, 0.13m/s로 변화할 때 평균유속의 변화가 슬러리아이스 생성에 미치는 영향을 나타낸다. 평균유속이 증가할수록, 충전율이 클수록 IPF의 값이 증가함을 알 수 있다. 이는 앞에서 설명한 바와 같이 평균유속이 증가함에 따라 관사이의 볼의 유동이 활발해져 관 표면에 얼음의 부착을 억제하는 효과가 커졌기 때문으로 생각된다. 그리고 충전율 50%, 평균유속 0.1m/s의 경우에 IPF의 값이 약간 감소하는 것은 다른 경우와 달리 볼의 원활한 유동에 의한 열전달의 증가로 인하여 관 표면에 빙이 형성되는 것을 지나치게 억제하기 때문으로 생각된다.

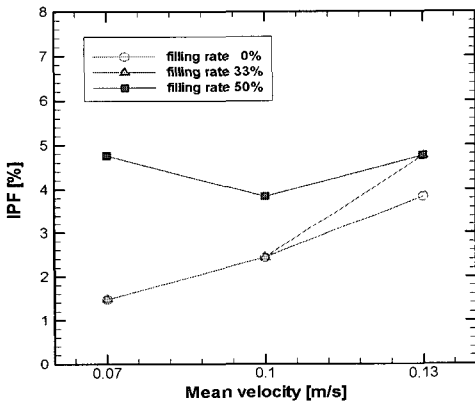


Fig. 4 Effect of mean velocity at ball diameter 15mm

Fig. 5는 충전율이 33%일 경우에 볼 크기에 따라 평균유속이 IPF에 미치는 영향에 대하여 나타낸 결과이다. 그림에서 알 수 있듯이 평균유속이 0.1m/s까지는 큰 차이를 나타내지 않으나 0.13m/s의 경우에는 볼을 충전하였을 경우가 볼을 충전하지 않았을 경우보다 큰 값을 나타낼을 알 수 있다. 이는 볼의 유동에 의하여 관 표면에 얼음이 부착되지 못하도록 하기 때문이다. 또한 0.13m/s의 경우 볼 크기 10mm의 경우가 15mm의 경우보다 IPF의 값이 크게 나타나는 것은 볼 크기가 클수록 볼의 체적에 따른 부력이 커서 유동에 의하여 볼이 시험부의 하부까지 도달하지 못하고 중간위치에서 상부 쪽으로 되돌아가 시험부 하부의 얼음을 떼어내지 못하기 때문으로 생각된다.

Fig. 6은 충전율이 50%일 경우에 볼 크기에 따

라 평균유속이 IPF에 미치는 영향에 대하여 나타낸 결과이다. 그림에서 알 수 있듯이 볼을 충전하였을 경우에 IPF의 값이 크게 나타나고 있다. 평균유속 0.1m/s의 조건에서 볼 크기 15mm의 경우가 10mm의 경우보다 작게 나타나는 것은 볼의 과다 충전으로 인하여 볼 크기가 증가함에 따라 볼 사이의 충돌에 따른 볼 사이의 간섭이 증가하여 유동이 원활하지 못한 결과이기 때문이다.

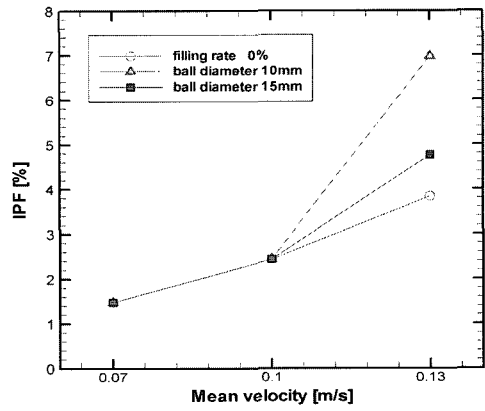


Fig. 5 Effect of mean velocity by ball size (at ball filling rate 33%)

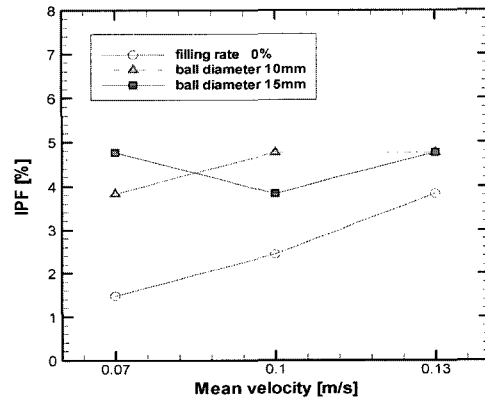


Fig. 6 Effect of mean velocity by ball size (at ball filling rate 50%)

3.2 충전율에 따른 영향

Fig. 7은 볼의 직경이 10mm의 경우에 충전율이 슬러리아이스 생성량에 미치는 영향을 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 볼을 충전하였을 경우와 평

균유속이 증가할수록 큰 값을 나타내는데 이는 앞에서 설명한 바와 같이 볼의 유동이 얼음의 부착을 방해하기 때문이다. 또한 0.13m/s의 경우 충전율이 50%의 경우에는 반대로 IPF의 값이 작게 나타나는데 이는 볼의 과다 충전으로 인하여 볼 사이의 충돌이 많아져 시험부 하부에서 볼의 정체영역이 발생하여 시험부 하부의 얼음의 부착을 억제하지 못하기 때문이다.

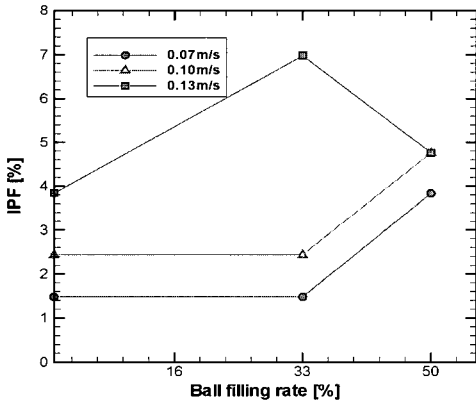


Fig. 7 Effect of ball filling rate at ball diameter 10mm

Fig. 8은 볼의 직경이 15mm의 경우에 충전율이 슬러리아이스 생성량에 미치는 영향을 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 충전율 및 평균유속이 증가함에 따라 IPF의 값이 증가하는데, 이는 앞에서 설명한 바와 같이 유동의 증가에 따른 얼음 부착의 억제효과 때문이다.

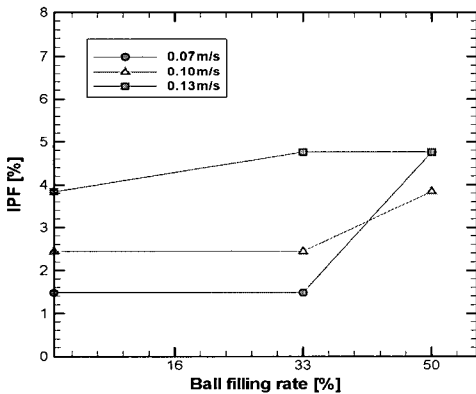


Fig. 8 Effect of ball filling rate at ball diameter 15mm

또한 충전율 50%의 경우에 평균유속 0.07m/s의 경우가 0.1m/s의 경우보다 큰 값을 나타내는데, 이는 평균유속이 클 경우에는 볼과 볼 사이의 충돌에 의한 간섭에 의하여 유동특성이 나빠지기 때문이다. 또한 시험부 하부에서는 정체영역이 발생하여 열전달효과가 저하되는데, 이 경우에 있어서 볼의 직경이 클 경우가 부력의 영향으로 열전달효과와 감소 폭이 적어진다.

3.3 볼의 직경에 따른 영향

Fig. 9는 충전율이 33%의 경우에 볼의 직경에 따른 슬러리아이스 생성량에 미치는 영향을 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 평균유속이 작을 경우에는 볼의 직경에 대한 영향이 작다. 그러나 평균유속이 0.13m/s의 경우에 볼의 직경 10mm의 경우에는 급격히 증가하다가 15mm의 경우에는 감소함을 알 수 있다. 평균유속이 작을 경우에는 볼의 부력과 유속의 관계가 적당하여 원활한 유동을 하지만 평균유속이 커지면 이와 같은 균형이 이루어지지 못하고 시험부 하부에서 볼의 정체영역이 발생하기 때문에 IPF의 값이 작아진다.

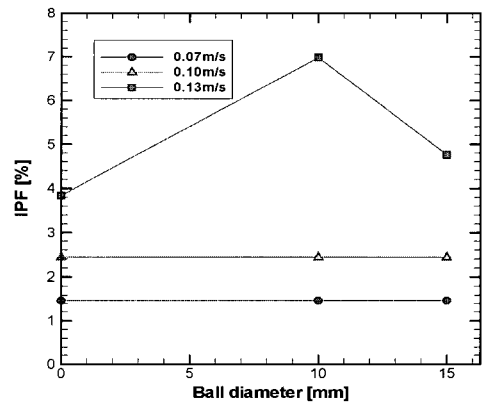


Fig. 9 Effect of ball diameter at ball filling rate 33%

Fig. 10은 충전율이 50%의 경우에 볼의 직경에 따른 슬러리아이스 생성량에 미치는 영향을 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 볼 직경이 증가함에 따라 IPF의 양은 증가하고 있으나 평균유속 0.1m/s의 경우에는 볼 직경이 15mm에서 IPF의 값이 적어

짐을 알 수 있다. 이는 평균유속에 의한 하부로의 유동특성과 불의 체적에 따른 부력과 평형관계에서 불이 하부까지 미치지 못하고 상승하는 불과의 충돌에 의해서 유동이 원활하지 못하기 때문이다. 반면에 0.07m/s의 경우에는 평균유속이 작아서 상기와 같은 충돌현상이 적어 상대적으로 IPF의 값이 증가하고 있다.

따라서 불의 직경이 슬러리아이스 생성에 미치는 영향은 대단히 크며, 냉각관 주위에서의 유동 특성 및 부력에 의한 영향을 고려하였을 때 본 실험에서는 불 크기가 10mm인 경우가 적합함을 알 수 있다.

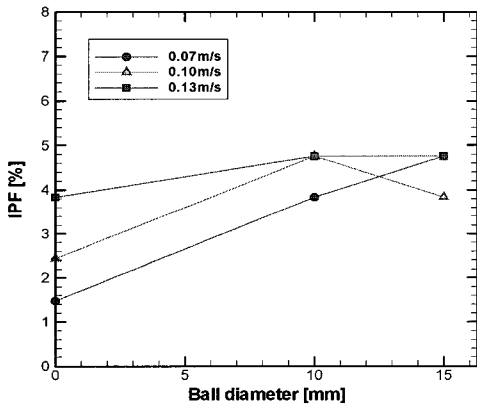


Fig. 10 Effect of ball diameter at ball filling rate 50%

4. 결 론

본 연구에서는 불의 직경과 충전율, 유속에 따른 실험적 연구를 통하여 본 실험 범위 내에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 유동체가 없는 경우, 평균유속이 증가함에 따라 IPF값이 증가한다.
2. 유동체가 없는 경우에 비해 유동체가 있는 경우가 IPF의 값이 크다.
3. 충전율 50%의 경우에 비해 33%의 경우가 유속의 증가에 따른 IPF값의 증가 폭이 더 크다.
4. 불의 크기가 15mm인 경우에는 불의 유속과 부력의 크기에 따라, 불의 유동특성 및 IPF값에 영향을 준다.

참고문헌

- [1] 이동원, "아이스슬러리를 이용한 냉열수송", 대한설비공학회지(설비저널), pp.8-14, 2001.
- [2] 이봉진 외 3인, "냉수 및 아이스슬러리 직접수송 지역냉방 시스템의 경제성 평가", 대한설비공학회 동계학술발표대회 논문집, pp.27-32, 2004.
- [3] 이윤표, "지역냉방용 아이스슬러리 시스템의 특성", 대한설비공학회 하계학술발표대회 논문집, pp.1223-1228, 2004.
- [4] 임효목 외 1인, "스크래퍼형 아이스슬러리 제빙기", 대한설비공학회 하계학술발표대회 논문집, pp.461-468, 2004.
- [5] 강채동 외 3인, "수용액의 교반/냉각을 동반한 슬러리 얼음의 빙부착", 설비공학논문집, pp.1071-1077, 2002.

저 자 소 개



오 철 (吳 喆)

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



문성배 (文聲培)

1968년생, 1991년 한국해양대학교 항해학과 졸업, 1998년 한국해양대학교 대학원 해사수송과학과 졸업(공학석사), 2002년 한국해양대학교 대학원 해사수송과학과 졸업(공학박사), 현재 한국해양대학교 항해시스템공학부 교수



최영규 (崔永圭)

1977년생, 2000년 한국해양대학교 기관시스템공학부 졸업, 2006년 한국해양대학교 대학원 기관시스템학과 수료, 현재 한국조선기자재연구원 연구원