

工學碩士 學位論文

역전 유동층 내에서의 슬러리아이스
생성에 관한 실험적 연구

An experimental study on formation of slurry ice in
reversing flow

指導教授 吳 喆

2006年 8月

韓國海洋大學校 大學院

機關 시스템 工學科

崔 永 圭

本 論 文 을 崔 永 圭 의 工 學 碩 士 學 位 論 文 으 로 認 准 함

主 審 金 京 根 印

副 審 尹 錫 勳 印

副 審 吳 喆 印

2006年 6月 30日

韓 國 海 洋 大 學 校 大 學 院

機 關 시 스템 工 學 科 崔 永 圭

목 차

Abstract	v
사용기호	vii
제 1 장 서 론	1
1.1 연구의 배경	1
1.2 종래의 연구와 목적	5
제 2 장 실험방법 및 실험범위	9
2.1 실험장치	9
2.2 유동물체	15
2.3 실험방법	17
2.4 빙층진율(IPF) 산출 방법	19
제 3장 역전유동층의 유동현상 해석	23
3.1 유동의 일반 해석	23
3.2 실험부의 유동 해석	29

제 4 장 실험 결과 및 고찰	41
4.1 평균 유속에 따른 영향	41
4.2 층진율에 따른 영향	53
4.3 유동물질의 크기에 따른 영향	58
제 5 장 결 론	67
참 고 문 헌	68

An experimental study on formation of slurry ice in reversing flow

YOUNG-GYU, CHOI

Department of Marine Engineering System
Graduate School of Korea Maritime University

Abstract

These days, energy saving is very important issue because resource of energy is decreasing and their price rise. So many countries developed new resources and equipment for saving energy.

One of these system for saving energy is Ice storage system. It is popular because it can relieve a significant portion of the peak demand of electricity during the daytime of summer.

Specially, attention is being given to dynamic type ice making technology because it overcomes a decreasing of the melting performance and an increasing of the thermal resistance on th ice

layer in static type ice making technology.

One of things in ice making is making of slurry ice. Thermal storage system by slurry ice is a very efficient system. Slurry ice system can use both sensible heat and potential heat.

Slurry ice system have a problem. It is that ice freeze and grow ice layers on freezing tube and ice layer interrupt transfer of heat. So, recently, scraped-surface Ice slurry Generator is popular because it is very efficient for making slurry ice but scraped-surface Ice slurry Generator need extra energy for operation of scraper.

This study 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%.

사 용 기 호

Alphabet

A	:	관의 단면적	[m ²]
C	:	Concentration of ethyleneglycol	[%]
C_D	:	항력계수	
D	:	관의 지름	[mm]
IPF	:	Ice packing factor	[%]
Q	:	Total quantity	[m ³]
Q_{EG}	:	Quantity of ethyleneglycol	[m ³]
Q_w	:	Quantity of water	[m ³]
R	:	Reynolds수	
R_c	:	임계 Reynolds수	
V	:	관내의 평균유동	[m/s]
\varnothing	:	Diameter	[mm]
μ	:	유체의 점성계수	
ν	:	유체의 동점성계수	
ρ	:	유체의 밀도	[kg/m ³]

제 1 장 서 론

1.1 연구의 배경

우리나라는 일차 에너지 공급의 대부분을 수입에 의존해 오고 있어 수입 에너지량의 축소와 석유의존으로부터의 구조적 탈피는 지속적인 중요과제의 하나였다. 더욱이 최근에는 에너지 문제가 지구환경과 깊은 관계가 있으며, 이것이 단순히 한 나라의 일만이 아니고, 국제적 협조를 필요로 하는 사회적, 경제적, 정치적 문제라는 것으로 인식되어짐에 따라 이를 해결할 수 있는 신중하고 유효한 대처방안이 요구되고 있다.

반면, 빌딩이나 가정 등 민생부문에 있어서의 에너지 소비동향은 산업용을 대신하여 전력수요를 더욱 끌어올려 하계 피크치의 40%를 공조부하가 차지하는 지역도 있다. 최근의 기술진보는 지하철, 하천수, 하수 등의 열원 및 공장의 배열 등을 이용하여 열 수요에 대응할 수 있도록 하였으며, 이들을 활용한 열 공급 시스템의 도입은 에너지 절약 측면과 이산화탄소 발생량 억제 등의 측면에도 큰 효과를 거둘 것으로 기대된다. 이들 지역냉난방 시스템이나 건물 공조 설비 등의 열 병합 설비에 있어서는 부하평준화와 경제적 운용을 추구하고, 야간 전력을 이용하여 열의 형태로 저장하며, 혹은 미활용 에너지를 활용해서 주간수요의 일부로 사용하는 축열방식이 많이 채용되고 있다. 여기에 전기요금의 개정에 따른 업무용 축열계약의 유리함 등이 더해져 축열시스템의 보급은 에너지절약 측면에서 매우 효과적이므로 국가 프로젝트를 비롯하여 각

방면에서 관련 연구개발이 강력히 추진되고 있다. 얼음을 축열 재료로써 이용한 시스템은 앞의 여러 추진방향 중에서도 경제성 향상과 운용 등의 편의성 면에서 뛰어나며, 여러 가지 방식이 제안되고 설치되어 왔다.

빙축열시스템은 단지 축열조 안의 물을 얼음으로 변화시키는 정도의 대체시스템이나 보조시스템(sub-system)은 아니다. 얼음저장과 고액이 상류에 의한 얼음의 잠열직접반송과 그 저온냉수를 이용한 사용 끝단에서의 대 온도차공조를 일체화한, 즉 수축열 시스템과는 전혀 별개의 시스템이다.

다시 말해, 구체적인 빙축열시스템은 유동성 얼음제조 및 저장, 얼음 반송, 저온송풍저온급기로 구성되어 있다.

우선, 얼음을 물과 같이 고액2상 상태인 채로 흐르게 하면 얼음의 잠열을 직접 반송하는 것이 되는 동시에 더욱이 0℃라는 저온을 반송함에 따라서 사용 온도차가 커져 수송유량의 감소를 도모하는 것이 가능하게 되므로 현열만을 수송하는 냉수 단상방식에 비해서 열 반송능력(수송열량)이 비약적으로 증대되고, 운전동력의 대폭적인 절감이 가능하게 되는 동시에 열 수송설비, 단말설비가 소형화하며, 토목, 건축 공간의 축소를 피할 수 있는 등의 혜택이 크다. 또한, 기존의 설비에 있어서도 당초 계획보다도 부하 측의 열수요가 증가하여 공급량부족이 되어 버린 경우에는 그 수송배관설비를 크게 변경하지 않고 열 수송량을 증대하는 것이 유리하게 된다.

다음으로 송수, 송풍, 공조 코일 등 각 계통에 있어서 이용온도차의 확대는 축열조 용량을 축소하는 것과 동시에 동일 열반송량에 있어서 수송유량을 더욱 감소시키므로, 반송 동력을 한층 절감할 수 있음은 물론 브라인 평균온도 즉, 냉동기증발 온도의 상승에 기여하여 COP를 개선한다는 등의 여러 가지 효과가 있다. 또 지역 열 공급배관에서 얼음이 존재하는 한 냉동의 공급온도를 항상 0℃로 유지할 수 있으므로 장거리를 반송하여도 이용하기에 문제는 없다. 최근의 열수요의 확대는 사무용 건물 등 도심부를 중심으로 하는 경향이 있기 때문에 여기에 미활용 에너지를 도입하고자 한다면 열원에서 수요지까지의 거리가 멀어져 기존의 냉수수송관으로는 수송량과 수송거리에 한계가 있는 경우도 있다. 즉, 냉수 단상수송에서는 이용온도차가 5 ~ 7℃로 작기 때문에 15℃ 전후의 냉공기를 만드는데 제한이 있으며, 장거리 반송에서는 수송관에서의 열 흡수에 의해 수요끝단에서 이 상한온도를 유지할 수 없는 경우도 있을 수 있게 된다. 이러한 이유 때문에 지금까지는 간과되어 왔던 미이용에너지가 있다면 얼음 반송에 의해 그 활용이 가능하게 된다.

이처럼 얼음, 물 고액2상 상태로 냉열을 반송하면 열 수송 밀도의 증대, 열 수송거리의 장거리화, 미이용 에너지의 더 많은 활용을 실현할 수 있다. 더욱이 저온송풍저온급기, 대온도차 공조를 사용하면 수송배관 크기의 축소에 의한 점유공간의 감소와 부설비의 절감, 반송 동력의 대폭 감소 및 축열조 용량의 대폭 축소 등의 시스템적 효과를 기대할 수 있다. 또 장거리 수송에서는 배관 그 자체가 한층 큰 잠열축열 효과를

갖게 된다. 이와 같은 빙축열을 시스템으로서 완성시킴으로서 얼음 제조장치 단독으로의 에너지 차원의 불이익을 극복하고 전체적으로 큰 혜택을 주기 때문에 이러한 체계화를 서두르는 일은 아주 의미가 크다.⁽¹⁾

1.2 종래의 연구와 목적

빙축열 시스템은 장점이 크기 때문에 이를 활용하기 위한 많은 연구들이 진행되고 있으며, 특히 빙축열의 핵심부인 축열조 내의 제빙에 대한 많은 연구가 되고 있다. 제빙 기술의 따른 분류는 다음과 같다.

(1) 관외 착빙형(냉매 직접 팽창식)

이 방식은 축열조 내에 동관 또는 폴리에틸렌제 코일을 설치하고, 그 주위에 얼음을 생성하는 방법이다. 축열조 내에 물을 채우고 코일 내부에는 브라인 또는 냉매를 순환시켜 코일 주위에 착빙시키며, 방랭 시에는 탱크 내의 물을 순환시켜 얼음과 직접 접촉시켜 부하 측으로 냉수를 공급하는 구조이다.

(2) 관내착빙형

축열조 내에 열교환기를 설치하고 관외로 브라인이 통과할 수 있게 한 구조이다. 제빙 시 얼음이 관의 안쪽을 향해 성장함으로써 제빙량이 늘어날수록 열전달 표면적은 감소하나 관내에 남아있는 물의 양은 감소함으로써 관내에 남아 있는 물에 대한, 즉 단위수량당 전열면적은 증가한다.

(3) 완전동결형

축열조 내에 제빙용 열교환기를 설치하고, 제빙측 브라인 회로 및 부하 측 브라인 회로를 완전 밀폐한 구조이다. 축열조 내의 물은 단순히 열을 저장하는 용도에만 사용되면, 부하 측으로는 순환되지 않는다.

(4) 캡슐형

축열조 내에 물이 채워진 캡슐을 채우고 캡슐 주위로 브라인을 순환시켜 캡슐 내부의 물을 제빙 또는 해빙시키는 방식이다.

(5) Slurry Ice형

제빙코일 주위에 생성된 얼음을 박리시켜 별도의 조에 얼음만을 저장하는 방식이다.

이러한 빙축열 시스템 중에서 여름철 냉방에 따른 전력 수요량의 지속적인 증가로 인하여 에너지 이용 효율 향상에 대한 관심이 높아지고, 최근 국내 및 국외의 슬러리아이스와 관련된 많은 연구, 개발과 실제 적용 사례가 알려지면서 슬러리아이스형 빙축열시스템에 대한 관심이 높아지고 있는 추세이다.

슬러리아이스는 냉열에너지의 저장과 재생 및 수송⁽²⁾ 분야에서 그 장점과 기능이 입증되어 공조 분야의 축냉 시스템을 비롯하여, 지역 냉방용^{(3),(4)}, 농·수산물의 보관·판매용, 상업용, 의료용 등 광범위한 용도로 사용될 것으로 기대를 모으고 있다. 국내에서도 아이스슬러리와 관련된 많은 연구 개발과 실제 적용 사례가 알려지면서 아이스슬러리에 대한 관심이 높아지고 있다.

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

슬러리아이스를 만드는 방법으로는 얼음을 만든 후 분쇄하는 방법과, 전열표면에서의 빙 부착 제거를 위해 스크래퍼, 브러쉬, 로드, 스프링 등

으로 연속적으로 스크래핑하는 스크래퍼형 시스템, 유동상(fluidized bed)에서 고형 물질에 의한 얼음의 부착을 방지하여 얻는 방법, 과냉각수를 연속적으로 만들어 이를 해소하면서 얻는 방법, 전열면에 얼음이 붙지 못하도록 특수 코팅을 하거나 특수재질을 이용하여 얻는 방법, 1차 냉매와 물을 직접 접촉하여 얼음을 얻는 방법, 물을 직접 팽창시켜서 얻는 물 냉매 방식, 고압상태에서 열을 빼앗고 여기에 압력을 제거하여 얼음을 얻는 방법, 유속과 아이스슬러리의 빙 핵을 이용하여 얻는 방법, 물에 녹지 않는 불용성의 기름 등을 물속에 분사시켜 얼음을 얻는 방법 등이 알려져 있으며 이외에도 여러 가지 방법이 연구되고 있다.

이들 중에서 현재 가장 널리 보급된 방식이 바로 미국과 유럽 등에서 개발된 스크래퍼 방식(Scraped-surface)이다.⁽⁵⁾ 이 방식은 무엇보다도 제빙(Ice production) 및 빙 배출(Ice delivery)이 안정되어 있어서 운전의 신뢰성이 높고 사용온도 영역이 넓은 특징을 가지고 있다.

하지만 분쇄기를 사용하는 방식이나 스크래퍼 방식은 얼음을 슬러리 형태로 만들기 위해 추가적인 동력이 필요하다. 보급형인 스크래퍼 방식 제빙기의 경우 전열면에 얼음입자가 고착하여 성장하지 못하도록 주기적으로 연속적으로 이탈 시켜야 한다. 이를 위해서 전열면과 수용액 사이의 온도차에 의한 빙 핵의 부착력을 억제할 만한 속도가 필요하며 동시에 발생할 수 있는 이상 조건에 의하여 얼음입자의 고착이 이루어질 경우 이에 대응하기 위해서 스크래퍼를 위한 충분한 여유 동력을 가지고 있어야 한다.

이에 따라 본 실험은 에너지 효율성에 주목하게 되었으며 스크래퍼에 소요되는 추가 동력을 제거하기 위하여 시험부 내에 가벼운 유동체를 삽입하여 역전 유동층을 형성하고, 유체의 흐름에 따른 불의 유동에 의해 냉각튜브 표면에 빙 부착이 심화되기 전에 얼음 입자를 분리시켜 수 내지 수십 마이크로 단위의 슬러리아이스를 생성하도록 하였으며, 불의 직경과 충진율 및 유속이 슬러리아이스 생성에 미치는 영향에 대하여 실험적으로 고찰하였다.

제 2 장 실험방법 및 실험범위

2.1 실험장치

Fig. 2.1은 실험장치의 계통도이다. 실험장치부는 크게 유체를 순환시키기 위한 유체 순환부와 시험부 내에서의 제빙 및 유체의 온도를 일정하게 유지시키기 위한 시스템 냉각부와 온도 측정부, 유동을 관찰할 수 있는 유동 가시화부로 구성된다.

실험 조건에 맞는 유체 및 실험부의 온도를 일정하게 하기 위한 냉각부에는 온도의 측정을 위해 열전대(C-A Type)를 각 부에 5개를 설치하고 온도기록계(DR-230)를 이용하여 측정하였다. 유체로는 에틸렌글리콜(Ethylene glycol, 이하 EG) 20% 수용액 40ℓ, 냉매로는 에틸렌글리콜 40% 수용액을 사용하였고, 브라인 순환펌프로 순환시켰다. 유량은 디지털 유량계(240-VTP-f5, SIERRA)를 이용하여 일정하게 유지하였다.

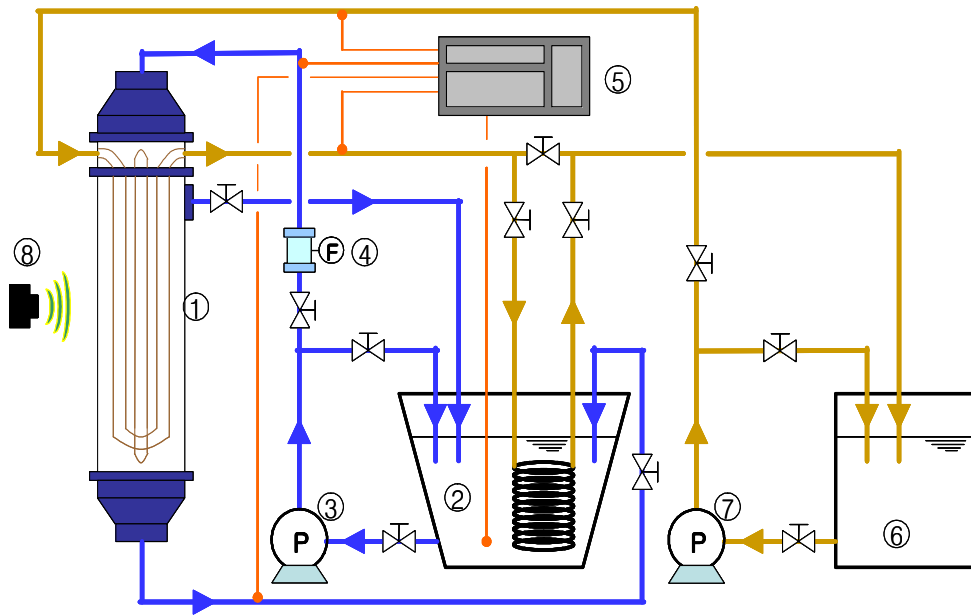
여기서 EG는 알코올계 브라인으로 널리 사용되고 있고 물에 혼합되기 쉽고 분자 구조적으로 비교적 물과 무기물 사이에 개입하기 쉬운 구조를 하고 있으며, 또한 물성이 상당 부분 알려져 있고 소량사용 시 환경에 큰 영향을 주지 않는 물질로 알려져 있다.^[5]

유체의 이송 시에 배관을 통한 외부로의 열손실을 최소화하기 위해 전체적으로 단열재로 단열 하였으며, 유체의 이송에 필요한 거리를 최소화시키기 위해 유체의 입·출구 배관에는 $\varnothing 30\text{mm}$ 비닐호스를 사용하였다.

유동현상을 관찰하기 위하여 CCD(Charge-Coupled Device) 카메라와 디지털(Digital Camera)로 실험 전반의 유동을 가시화 하였다.

Fig. 2.2는 시험부의 상세도이다. $\varnothing 100\text{mm}$, 길이 600mm의 아크릴 관으로 만들었으며, 이 원관 내에는 냉각관으로 $\varnothing 15\text{mm}$ U자형 동관을 90° 간격으로 2개를 삽입하고, 동관 내에 냉각유체가 흐르도록 하였다.

Fig. 2.3는 볼을 삽입하지 않은 경우의 시험부 사진이며, Fig. 2.4는 실험장치의 전경사진이다.



- | | |
|----------------------|---------------|
| ① Test section | ⑤ Data logger |
| ② Test solution tank | ⑥ Brine tank |
| ③ Circulation pump | ⑦ Brine pump |
| ④ Flow-meter | ⑧ CCD Camera |

Fig. 2.1 Schematic diagram of experimental apparatus

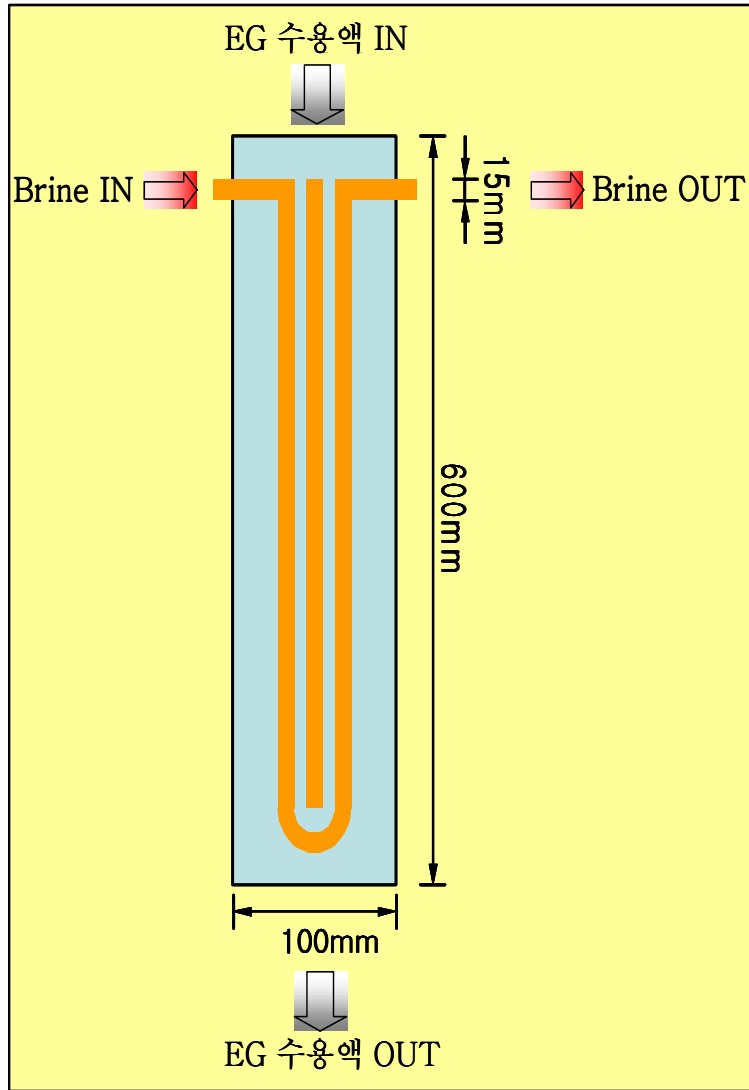


Fig. 2.2 Schematic diagram of test section



Fig. 2.3 Photograph of test section

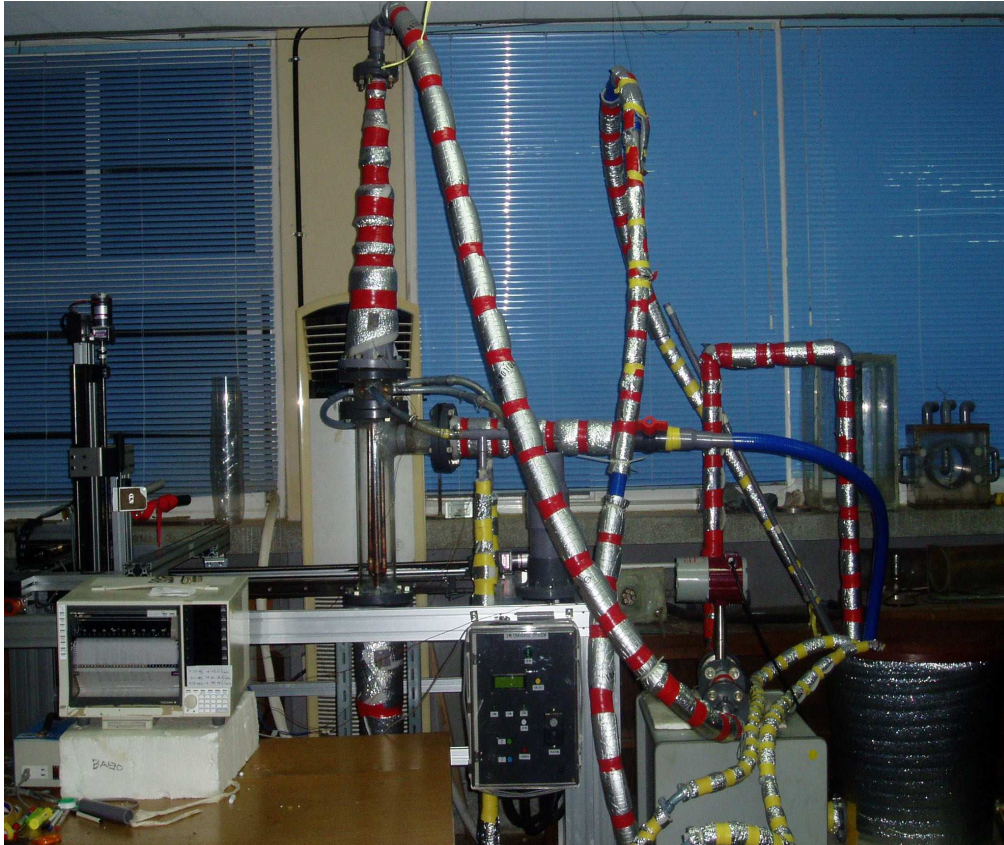


Fig. 2.4 Photograph of experimental apparatus

2.2 유동물체

슬러리아이스의 효율적이 생성을 위하여 본 실험에서는 냉각부에 작동유체보다 비중이 낮은 유동물체를 충전하여 작동유체의 흐름에 따라 유동물체가 움직이도록 하였다.

작동유체의 순환방법은 유체의 순환방향을 상부에서 하부로 순환되도록 하였으며(이하 역전 유동층이라 함), 유동물체는 발포폴리스티렌(스티로폼, 25 kg/m^3)을 사용하였다.

일반적으로 쉽게 구할 수 있는 스티로폼은 거품폴리스티렌, 스티로폼(styrofoam), 발포스티렌, 스티로폼 등 여러 이름으로 불리며, 영문 머리글자를 따서 EPS로 약칭하기도 한다. 스티로폼은 독일의 종합화학회사인 바스프(BASF AG)의 상표명이고, 미국 다우케미컬사(社)의 단열재 상표명으로, 한국에서는 스티로폼으로 널리 알려져 있다. 폴리스티렌은 널리 사용되는 플라스틱으로, 스티렌의 중합체(重合體)이다. 무색투명한 열가소성 물질로, 100°C 이상에서 부드러워지고 185°C 정도가 되면 점성의 액체가 되며, 산·알칼리·기름·알코올 등에 강한 성질을 가지고 있다. 발포폴리스티렌은 이 폴리스티렌 수지에 펜탄이나 부탄 등 탄화수소가스를 주입시킨 뒤 이를 증기로 부풀린 발포제품으로, 체적의 98%가 공기이고, 나머지 2%가 수지인 자원 절약형 소재이다.

제조 공정은 스티렌에 펜탄·부탄가스 등의 발포제를 주입해 물로 중합한 뒤, 소정의 분자량이 될 때까지 가열한다. 이어 얻어진 발포폴리스티렌의 구상 입자인 비드(bead)를 세척 건조시키고 폐수를 처리한 후

선별하면 완제품이 된다.

희고 가벼우며, 내수성(耐水性)·단열성·방음성·완충성 등이 우수하기 때문에 주로 컵이나 그릇, 접시, 조개 모양의 용기, 육류 포장용기, 달걀 포장용기, 전자제품이나 기타 부서지기 쉬운 물품의 운송용 포장재, 나뭇결무늬를 넣은 건축재료, 장식용 가구, 농수산물 상자 등으로 널리 사용된다. 이 밖에 식육 냉동창고의 벽재, 냉동 파이프의 외장(外裝), 조립식 주택의 벽이나 천장 재료, 텔레비전의 무대장치나 인공눈[人工雪] 등으로도 사용된다.

일반적으로 사용되는 스티로폼의 밀도는 $15\text{kg/m}^3 \sim 30\text{kg/m}^3$ (비중 0.015 ~ 0.030)이며 본 실험에서 사용한 스티로폼 볼의 밀도는 25kg/m^3 (비중 0.025, 오차 0.002)이다. 20% EG수용액의 비중은 $1.025(15^\circ\text{C})$ 이다.

2.3 실험방법

시험부 내로 유입되는 브라인의 온도는 -20°C 로 일정하게 하였으며, 실험 시작 전에 유체를 탱크 내에서 -7.5°C 까지 냉각하고 밸브를 조절하여 일정하게 유지하였다.

유체의 유속을 실험조건에 맞게 조정된 후, 유체의 순환과 함께 일부 상승한 유체의 온도가 다시 -7.5°C 가 되는 시점을 실험시작 기준으로 하여, 6시간 동안 슬러리아이스의 제빙 상태를 관찰하였다. 생성된 슬러리아이스는 시험부 상부 별도의 배관을 통하여 탱크 내로 이송되도록 하였다.

볼의 직경(\varnothing)은 10mm, 15mm의 두 가지를 사용하였으며, ‘볼을 삽입한 양과 시험부 전체 용적의 비’를 충전율(Ball filling rate)로 정의하고, 이를 백분율(%)로 표기하였으며. 충전율이 33%, 50%일 때의 경우와 볼의 유동이 없는 경우를 살펴보았다. 또한 유속에 따른 영향을 평가하기 위하여 0.07m/s, 0.10m/s, 0.13m/s의 세 가지 경우에 대하여 실험을 수행하였다. Table 2.1 에 본 실험의 실험조건을 나타내었다.

Table 2.1 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

2.4 빙충진율(IPF) 산출방법

빙충진율(IPF)의 측정은 빙축열 시스템의 성능평가 및 얼음의 체적팽창에 따른 축열조의 압력파괴방지 등을 방지하기 위해 반드시 필요하며, 측정방법으로는 빙축열조 내에서 정지한 상태에서의 빙충진율 측정법 및 아이스슬러리와 같이 유동상태에서의 빙충진율 측정법이 있다

(1) 얼음의 체적팽창에 의한 수위측정

냉각원관 등에 얼음을 성장시키는 경우에는 수위계에 의해 수위를 계측함으로써 빙충진율을 측정할 수 있다. 또한 아이스슬러리의 경우에는 얼음과 물의 밀도차로부터 혹은 수면 상에 뜬 얼음의 높이로부터 개략의 빙충진율을 측정할 수 있다. 그러나 낮은 IPF의 경우 이러한 평가 방법으로는 정밀하게 측정하기 어렵다.

(2) 얼음두께 검출에 의한 측정

얼음두께 검출 칩을 사용하여 기계적으로 얼음계면 위치를 측정하여 IPF를 산출한다. 혹은 제빙배관과 수중에 설치된 전극관의 전위차에 의해 얼음두께차를 측정하는 다이어프램 센서 내에서 물이 얼음으로 바뀌어 팽창하는 압력변화로부터 제빙량을 구한다.

(3) 온도차계측에 의한 IPF의 측정

빙축열조 내의 물 또는 수용액의 온도와 냉각관 내 냉매의 온도차로 IPF를 산정한다.

(4) 열량계에 의한 빙충진율의 측정

열량계에 의해 투입된 열량과 생성된 열량의 차로 IPF를 산정한다.

본 실험에서는 슬러리아이스의 제빙량을 정량화하기 위해, 전체 유량 중에서 슬러리아이스 입자가 생성된 양을 IPF(%)로 표시하였다. 실험에서 사용한 IPF 측정법은 실험 시작과 실험 종료 시의 유체의 에틸렌글리콜의 농도를 측정하여 농도차를 비교하여 IPF를 측정하였다.

전체 유량은 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 제빙량을 산출하였다.

수 내지 수십 미크론 단위의 슬러리아이스 입자라는 점을 고려했을 때, '슬러리아이스 입자 내에는 에틸렌글리콜은 함유되지 않는다.'라고 가정하였으며, 유체의 농도 측정은 브라인 농도 측정용 굴절계를 사용하였다.

다음은 위의 실험 조건을 이용하여 IPF를 산정한 식을 나타낸 것이다.

$$Q = 40 \tag{2.1}$$

식(2.1)에서는 20% EG수용액의 총용량 Q 를 정한다.

$$Q = q_{w0} + q_{EG0} = q_w + q_{EG} + X \quad (2.2)$$

식(2.2)에서 20% EG수용액 실험 초기 조건의 물과 EG용액의 부피의 합과 실험종료후의 물과 EG용액의 부피의 합에 생성된 슬러리아이스의 더한 것과 같은 것을 알 수 있다. 식(2.2)을 이용하여 X 를 구하여 실험 종료 후의 생성된 슬러리아이스의 부피를 알 수 있다.

$$q_{w0} = 40 \times (1 - C_0) = 40 \times 0.8 = 32 \quad (2.3)$$

$$q_{EG0} = 40 \times C_0 = 40 \times 0.2 = 8 \quad (2.4)$$

식(2.3)과 식(2.4)으로 20% EG수용액 실험 초기 조건에서의 물과 EG용액의 부피를 구할 수 있다.

$$q_w = 40 \times (1 - C) \quad (2.5)$$

$$q_{EG} = 40 \times C \quad (2.6)$$

식(2.5)와 식(2.6)에서는 실험 종료 후의 작동유체의 농도 C 를 구하여 실험종료 후의 물과 EG수용액의 부피를 구할 수 있다.

$$IPF = \frac{X}{Q} \quad (2.7)$$

식(2.7)은 실험 종료 후의 슬러리아이스 생성량 X 와 작동체의 양의 비인 IPF를 구하는 식이다.

- Q : 작동유체의 총용량 [ℓ]
- q_{w0} : 초기조건에서의 물의 용량 [ℓ]
- q_{EG0} : 초기조건에서의 EG의 용량 [ℓ]
- q_w : 실험 종료 후 물의 용량 [ℓ]
- q_{EG} : 실험 종료 후 EG의 용량 [ℓ]
- C : 실험 종료 후의 수용액의 농도

제 3 장 역전유동층의 유동현상 해석

3.1 유동의 일반 해석

모든 유체에는 어느 정도의 점성이 있다. 그렇기 때문에 흐름 속에 있는 두 근접한 유체의 미소분자 사이에 속도차가 있을 경우에는 서로 미끄러지려는 것을 마찰력이 작용하며, 운동에 대한 저항을 가져온다. 따라서 흐름이 일어나려면 일이 이 저항력에 이겨서 가해져야 한다.

속도차가 있는 두 근접한 유체의 미소입자에 있어서는 속도가 작은 쪽의 입자는 속도가 큰 쪽의 입자에 끌려 그 속도가 커지려고 하고, 큰 쪽의 입자는 작은 쪽의 입자에 끌려 그 속도가 작아지려고 한다. 이러한 마찰력은 속도차가 있는 흐름에 있어서는 근접한 입자에 차례로 전달되어간다. 이 단위 면적당의 마찰력을 마찰응력 또는 전단응력이라고 한다. 그 응력은 그 점에 있어서의 속도 차, 즉 속도분배에 비례하고, 이때의 비례상수를 점성계수라고 한다.

유체의 흐름에 있어서 점성의 영향으로 매우 상이한 두 상태인 층류(Laminar flow), 난류(turbulent flow)가 있다. 유체의 각 미소입자가 순서정렬하게 층을 이루고서 흐르는 상태의 흐름을 층류라고 말하며, 유체의 미소입자가 무순서한 운동을 하면서 주류방향으로 흐르는 상태의 흐름을 난류라고 말한다.

층류와 난류의 천이는 Reynolds수로 나타낼 수 있다.

$$Re = \frac{\rho VD}{\mu} = \frac{VD}{\nu} \quad (3.1)$$

V : 관내의 평균유속

D : 관의 지름

ν : 유체의 동점성계수,

ρ : 유체의 밀도

μ : 유체의 점성계수

천이가 일어나기 시작하는 Reynolds수를 임계 Reynolds수(Critical Reynolds Number, R_c)라고 부른다.

공학적으로 원관속에서의 유체의 흐름은 $R < 2,100$ 이면, 그 흐름은 층류일 것이고, $R > 4,000$ 이면 난류일 것이라고 예측할 수 있다.

점성유체의 흐름에 있어서 점성유체는 물체의 표면 또는 경계벽면을 따라 흐르게 된다. 벽면에서는 유체가 점착하고 속도는 0이 된다. 점성의 영향은 벽면에서 점차 멀리까지 미친다. 그러나 벽면에서 면에 수직방향으로 어떤 거리 떨어진 곳에 있어서는 유체는 일정한 속도 v_0 를 갖는다. 즉 벽면에 수직방향으로 속도가 0에서 v_0 까지 변화하는 영역이 있다 이와 같이 속도분배가 있는 영역을 경계층(boundary layer)라 한다.

본 실험에서 사용한 유체의 흐름은 층류로 이러한 층류에서의 유체의

흐름은 Fig. 3.1과 같다. 관의 입구에서의 속도분포는 균일에 가깝다 그러나 하류에 점성작용으로 감속되는 유체의 층인 경계층은 점차 두꺼워져 어느 위에 가면 중심선에서 합치게 된다. 관내를 흐르는 유체는 일정하므로 관 벽면 부근에서의 감속에 의한 유량감소를 보충하기 위하여 관 중심부근의 중심부의 유속은 점차 증가하게 된다. 그러므로 속도분포는 관 입구에서 경계층이 합치는 사이의 각 단면에서 변화하게 되며, 경계층이 합친 하류의 각 단면에서는 속도분포는 일정하게 된다. 전자의 흐름을 미확립흐름(unestablished flow), 후자의 흐름을 확립흐름(established flow)이라 한다.

유동체로 사용하게 될 볼에서의 유속현상을 알아보기 위해 구에서의 유체의 흐름에 대하여 알아보았다.

구는 단순한 형태를 하고 있기 때문에 구의 둘레를 흐르는 흐름은 예부터 많이 연구되어 왔다.

Stokes는 구에 대해서 Reynolds수가 0.6보다 적을 경우의 항력의 식을 점성유체의 운동방정식으로부터 다음과 같이 유도하고 있다.

$$D = 3\pi\mu VD \quad (3.2)$$

이 식을 항력계수(C_D)로 나타내면

$$C_D = \frac{D}{\frac{\rho}{2} A V^2} \quad (3.3)$$

에 대입하면

$$C_D = \frac{24}{R} \quad (3.4)$$

로 나타낼 수 있다.

Reynolds수가 증가하면 C_D 의 값은 차차 감소하였다가 일정하게 되고 더욱 증가하면 $R = 3 \times 10^5$ 근처에서 C_D 는 약 0.18정도로 급강하함을 알 수 있다. 이와 같은 현상이 일어나는 Reynolds수를 임계 Reynolds수라고 부르고 $C_D = 0.3$ 이 되는 Reynolds수를 구의 임계 Reynolds수라고 한다. Prandtl은 이 현상을 실험을 통하여 다음과 같이 설명하고 있다. 구의 Reynolds수가 임계치 이하에서는 구의 경계층은 층류를 형성하고 박리는 Fig. 3.2 에서와 같이 비교적 전방에 전방에서 일어난다. 임계치를 넘으면 경계층이 난류가 되고 유체입자의 혼합 작용으로 박리점이 Fig 3.3 에서와 같이 후방으로 이동하게 된다. 이 결과 후류의 영역이 축소하여 저항이 감소한다.

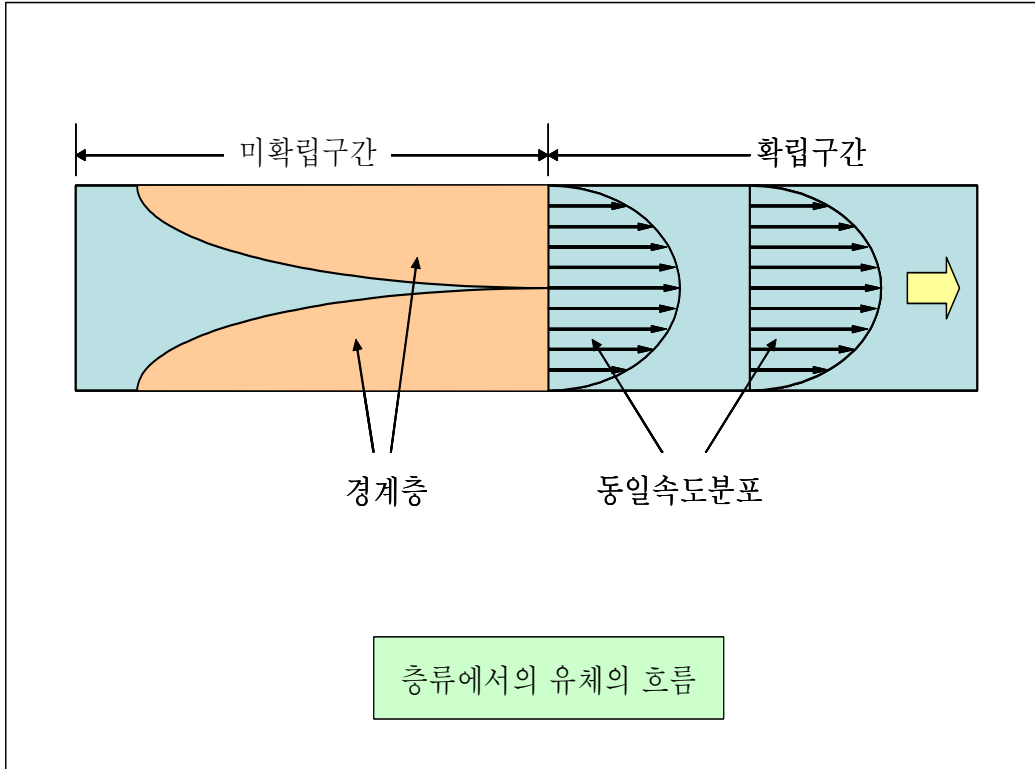


Fig. 3.1 Flow pattern in lamina flow

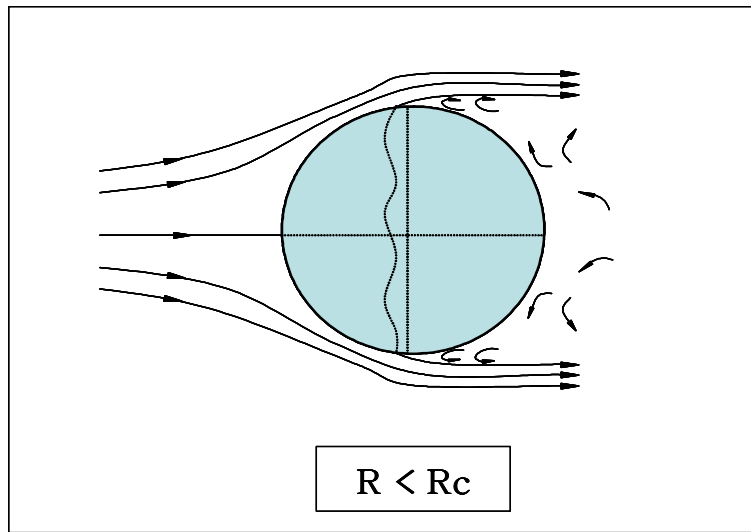


Fig. 3.2 Flow pattern in sphere

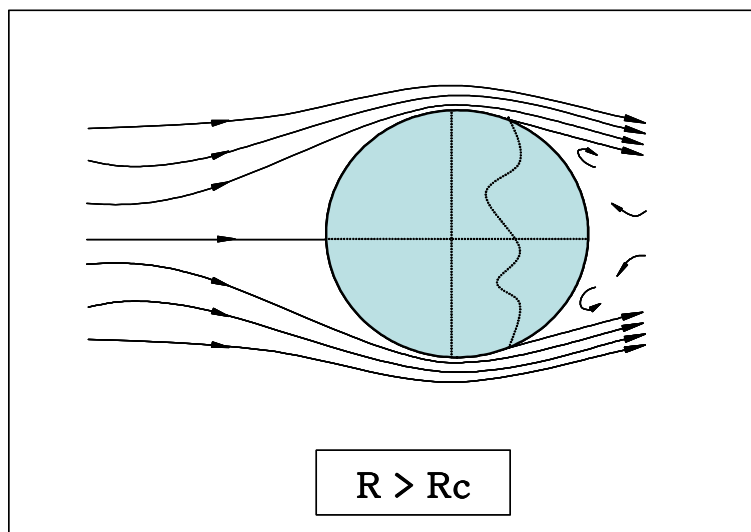


Fig. 3.3 Flow pattern in sphere

3.2 실험부의 유동 해석

본 실험에서는 역전유동층 내에서 유동체의 유동현상에 대하여 살펴 보았다. 충전율 33%, 유속 0.1m/s, 볼 크기 10mm에서의 실험 조건에서 실험 진행 시간의 임의시간의 유동을 가시화하여 속도에너지, 운동에너지 및 난류강도를 분석하였다.

Fig. 3.4와 Fig. 3.5는 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.

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 흐름이 기타 장애요소가 발생하지 않으면 지속 되게 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.

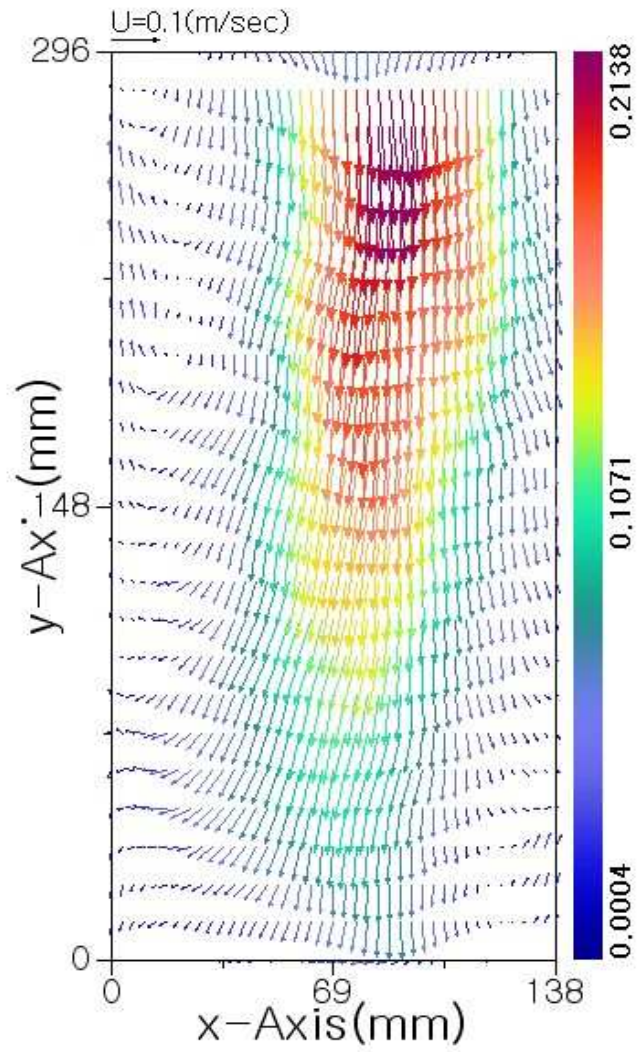


Fig. 3.4 Velocity profile at (10mm, 0.1m/s, 33%)

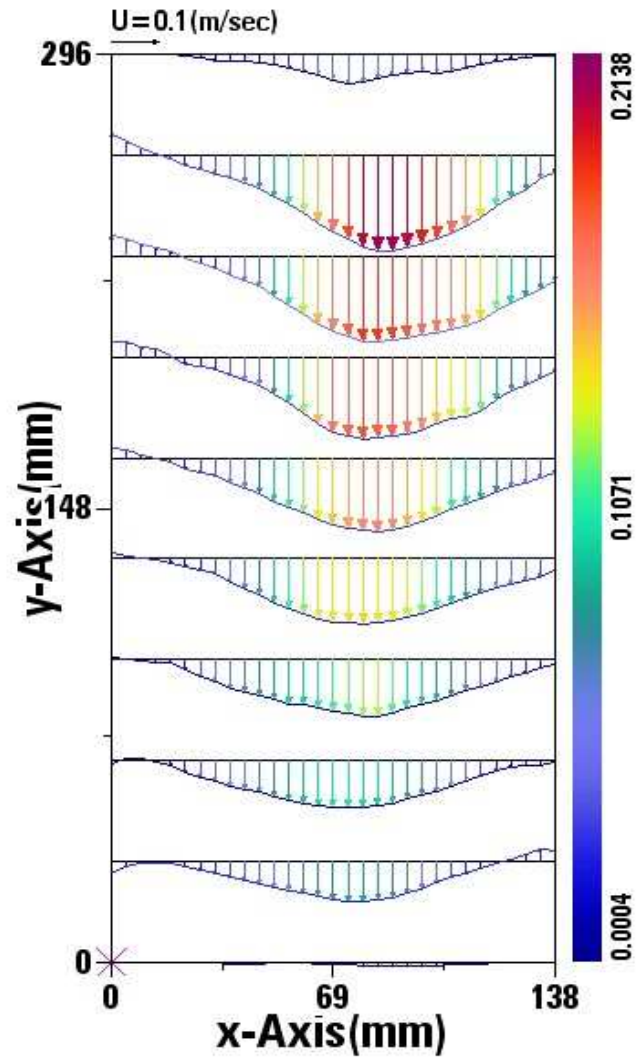


Fig. 3.5 Velocity profile at (10mm, 0.1m/s, 33%)

Fig. 3.6, Fig. 3.7은 상기 조건에서의 운동에너지를 나타낸 것으로 유속이 빠른 중심부에서 그 운동에너지 또한 높은 값을 알 수 있으며 벽 쪽으로 갈수록 낮아지는 것을 알 수 있다.

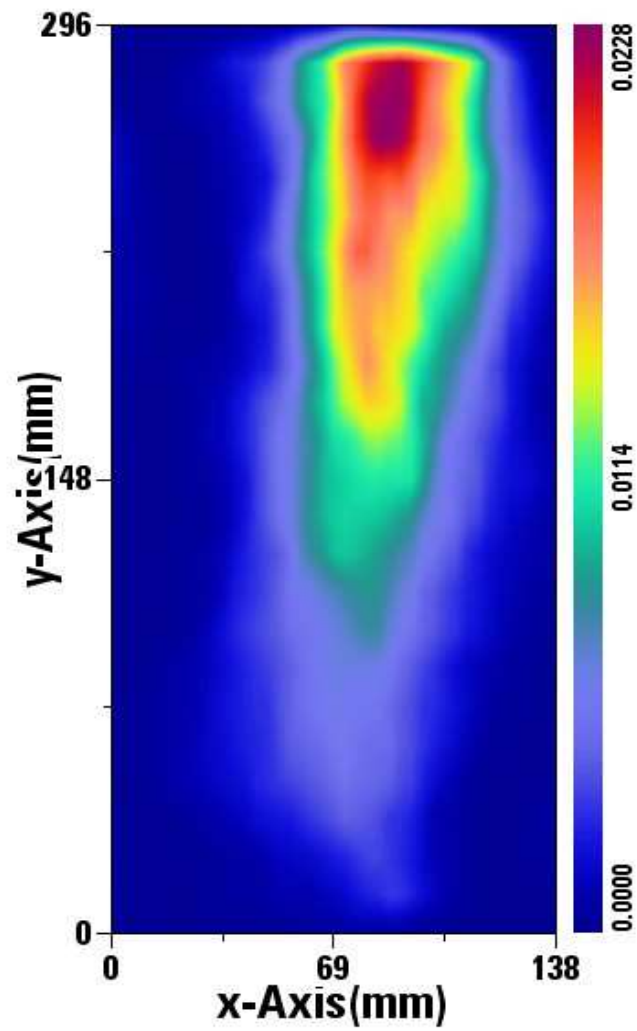


Fig. 3.6 Kinetic profile at (10mm, 0.1m/s, 33%)

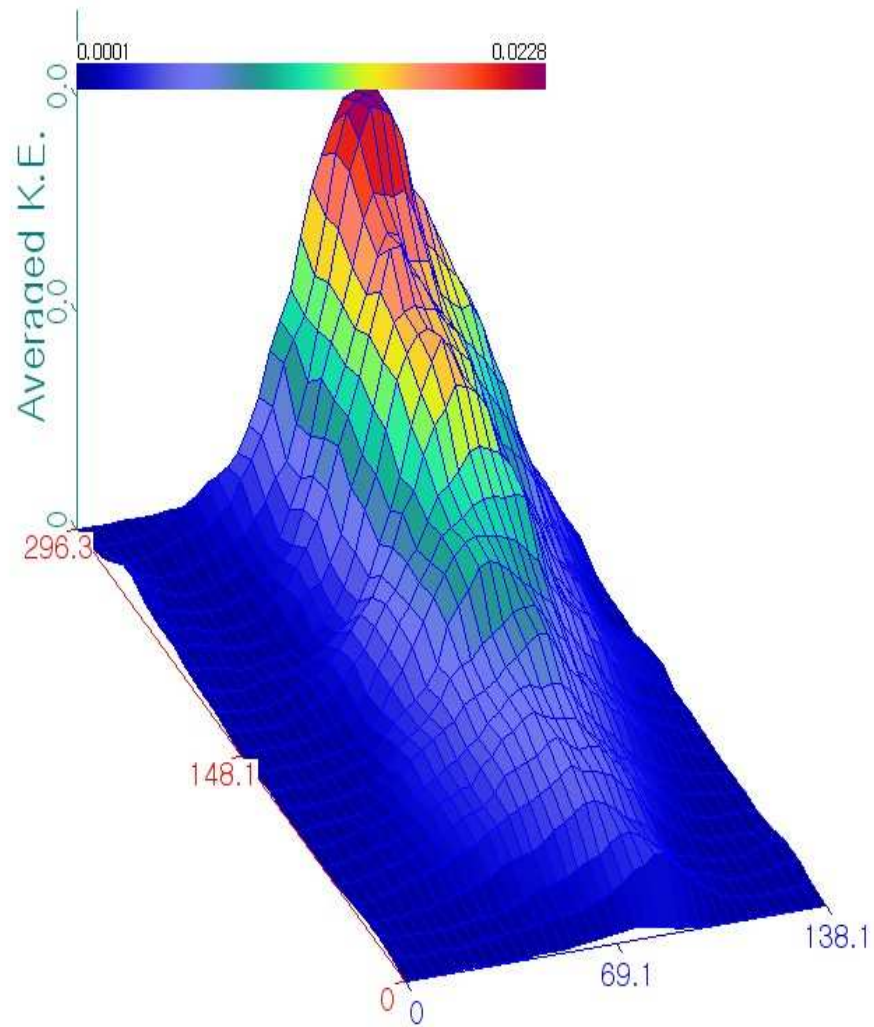


Fig. 3.7 Kinetic energy profile at (10mm, 0.1m/s, 33%)

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 식(3.5)으로 구하여 나타내었다.

$$T.I = \frac{\sqrt{\frac{(u'^2 + v'^2)}{2}}}{\sqrt{u''^2 + v''^2}} \quad (3.5)$$

u'^2, v'^2 : 순간에 있어서의 속도 변동성분

u''^2, v''^2 : 시간평균 속도

일반적으로 장애물이 없는 원관 내에서의 층류흐름에서는 난류일어나지 않아 Fig. 3.9와 같은 난류강도가 나타나게 된다.

Fig. 3.10, Fig. 3.11은 본 실험에서의 난류강도를 나타낸 것이다.

난류강도는 유속이 빠른 중심부에서 높은 것을 알 수 있으나 상부 쪽에서는 벽면 쪽에서도 난류강도가 중심부보다는 낮지만 높게 일어나는 것을 알 수 있다. 특히, 앞서 속도 프로파일에서 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 볼의 후면에서 일어나며 볼의 유동 및 충돌로 인한 난류에 의한 것으로 생각되며 중심부의 냉각관과 볼과의 충돌로 인하여 중심부에서 높은 난류강도가 일어나는 것으로 사료된다.

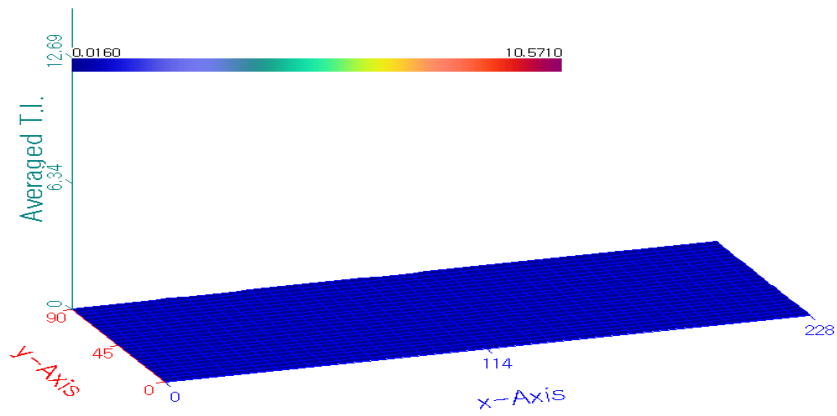


Fig. 3.8 General turbulent intensity characteristics at tube

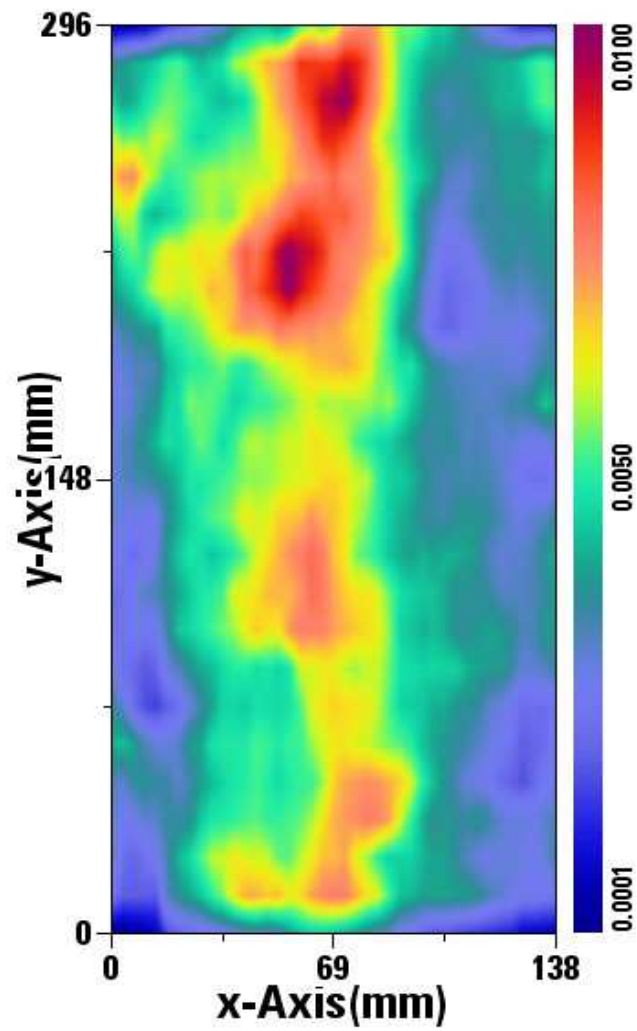


Fig. 3.9 Turbulent intensity profile

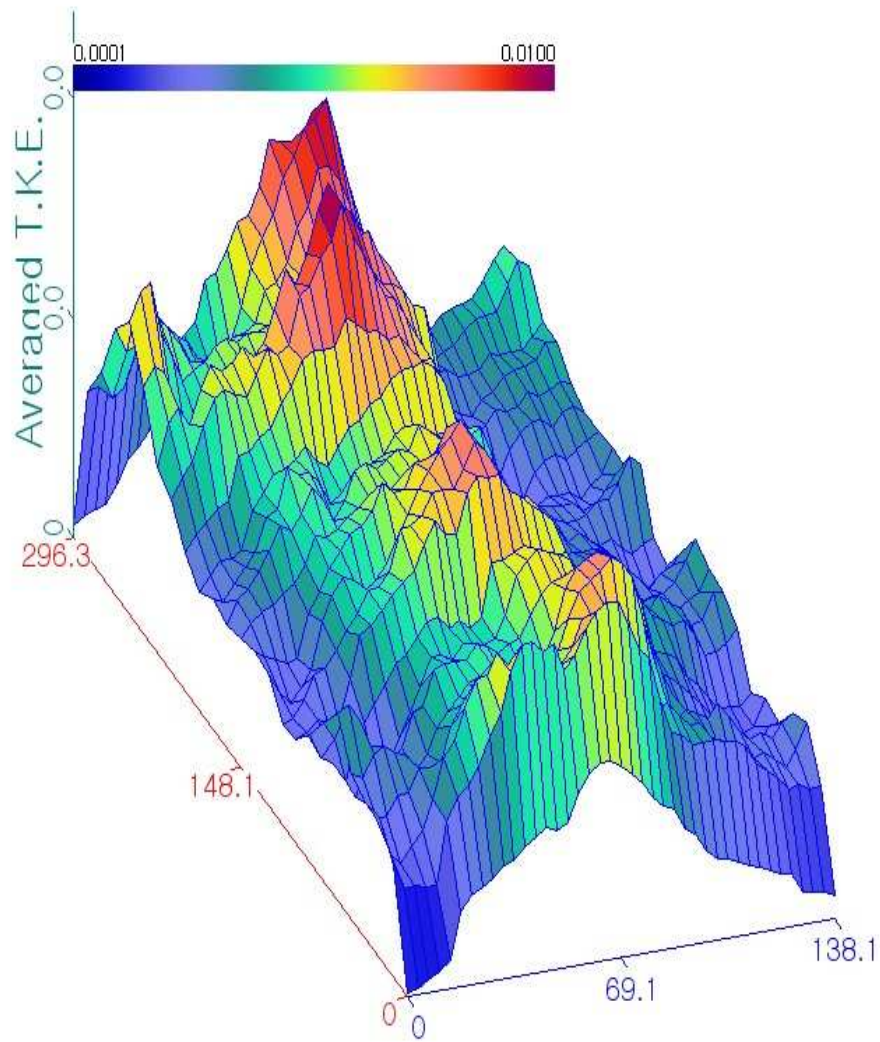


Fig. 3.10 Kinetic energy of turbulent intensity

제 4 장 실험 결과 및 고찰

4.1 평균 유속에 따른 영향

Fig. 4.1은 직경 10mm 볼이 충전율 33%일 경우 유속에 따른 유동상태를 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이 0.07m/s에서는 아래 부분에 볼의 유동이 미치지 못하는 부분이 생긴 반면 0.1m/s와 0.13m/s의 경우에는 시험부 전체적으로 볼의 유동이 일어남을 알 수 있다. 그러나 0.13m/s의 경우 0.1m/s보다 빠른 유속으로 인하여 더 활발한 볼의 유동이 일어났으며 이에 따라 볼의 유동이 전체적으로 퍼진 것은 비슷하나 0.13m/s에서 더 높은 IPF량이 나왔다.

실험부내에서의 유속과 볼의 부력의 영향, 충전율 영향으로 유동체와 유체의 유동현상이 달라지고 이에 따라 전열효과와 빙 부착 방지 효과 또한 다르게 된다. 일반적으로 유동체가 없을 경우에는 냉각관내에 동결층이 형성되게 된다. 하지만 유동체를 유동속에 넣게 되면 냉각관에 부착하려는 동결층은 유동체와의 충돌로 형성되지 않고 얼음입자로 떨어져지게 되어 동결층이 형성되지 않는다. 그러나 유속이 느리거나 볼의 부력이 커 시험부 하부에만 빙 부착이 생기거나 볼의 유동이 느리게 되어 빙과 같이 냉각부에 볼이 붙게 되는 현상도 생기게 된다.

Fig. 4.2는 유속 0.07m/s일 경우 볼을 넣지 않아 정상 유동이 일어났을 때의 사진으로 윗부분에서 아래 부분으로 가면서 동결층이 늘어나지만 그 증가 추이가 일정하게 나타나고 있다.

Fig. 4.3은 유속 0.1m/s, 충전율 33%, 볼 직경 10mm의 실험조건에서 형성된 빙막을 나타내고 있다. 앞서 말하였듯이 볼의 유동으로 인하여 생성된 얼음이 냉각관 부착되기 전에 냉각관으로부터 떨어져 나오게 되기 때문에 볼의 유동상태가 좋은 실험 조건하에서는 동결층이 없거나 생겨도 얇은 빙막으로 형성하게 된다. 본 실험에서도 유동상태가 좋아 IPF량이 높은 곳에서는 냉각관에 빙 부착이 없거나 얇은 빙 막이 형성되었다.

Fig. 4.4은 본 실험 중 가장 IPF가 낮았던 경우의 실험 종료 후 사진이다. 유속 0.07m/s, 충전율 33%, 볼 크기 15mm의 실험 조건에서의 나타난 빙 부착 현상이다. 사진에서 알 수 있듯이 볼의 부력에 비해 유속이 느릴 경우 시험부 하단에 비정상적으로 빙 부착이 일어나게 되어 결국 동결층이 커지면서 볼의 유동을 방해하여 볼까지 동결층에 부착되는 현상이 발견되었다.

Fig. 4.5는 삼입한 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. 4.5에서 충전율에 관계없이 평균유속이 증가함에 따라 IPF가 증가함을 알 수 있는데, 이는 평균유속이 증가함에 따라 관사이의 볼

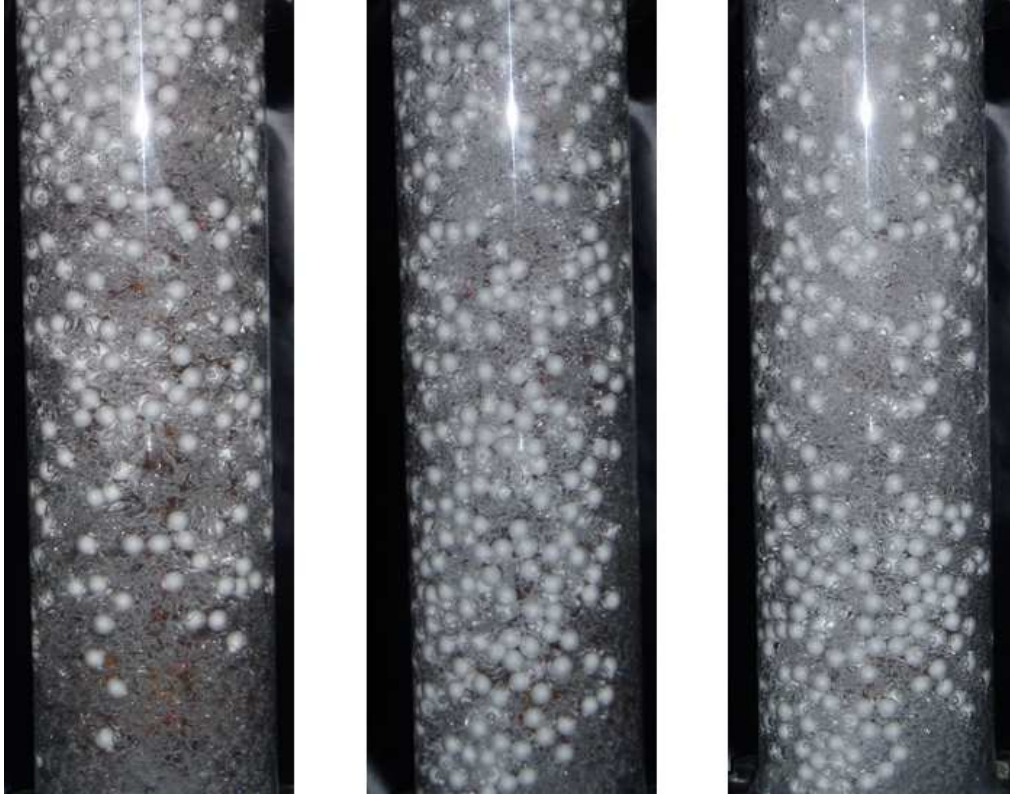
의 유동이 활발해져 관 표면에 얼음부착을 억제하는 효과가 커졌기 때문으로 생각된다. 그리고 충전율이 33%의 경우 평균유속이 0.13m/s의 경우가 충전율 50%의 경우보다 IPF의 값이 큰 것은 평균유속의 증가에 따른 볼의 유동이 충전율 33%의 경우가 더 활발하기 때문이며, 충전율 50%의 경우에는 볼의 과다 충전으로 인하여 시험부의 하부에 일부의 볼이 정체되는 현상을 나타내고, 이것이 유동을 방해하기 때문에 IPF의 값이 작게 나타난다고 생각된다. 볼의 정체현상은 평균유속이 증가할수록 크게 나타났다.

Fig. 4.6은 삽입한 볼의 직경이 15mm의 경우에 있어서, 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. 4.7은 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 나타냄

을 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. 4.8은 충전율이 50%일 경우에 볼 크기에 따라 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 못하기 때문이다.



0.07m/s

0.10m/s

0.13m/s

**Fig. 4.1 Photographs of fluids in the reversing flow
(Filling rate = 33%, Ball size = 10mm)**



Fig. 4.2 The photograph of the test section after the experiment ($U = 0.07\text{m/s}$, Filling rate 0%)



**Fig. 4.3 Photograph of the test section after the experiment
($U = 0.1\text{m/s}$, Filling rate = 33% and Ball size 10mm)**



Fig. 4.4 Photograph of the test section after the experiment
($U = 0.07\text{m/s}$, Filling rate = 33% and Ball size 15mm ball)

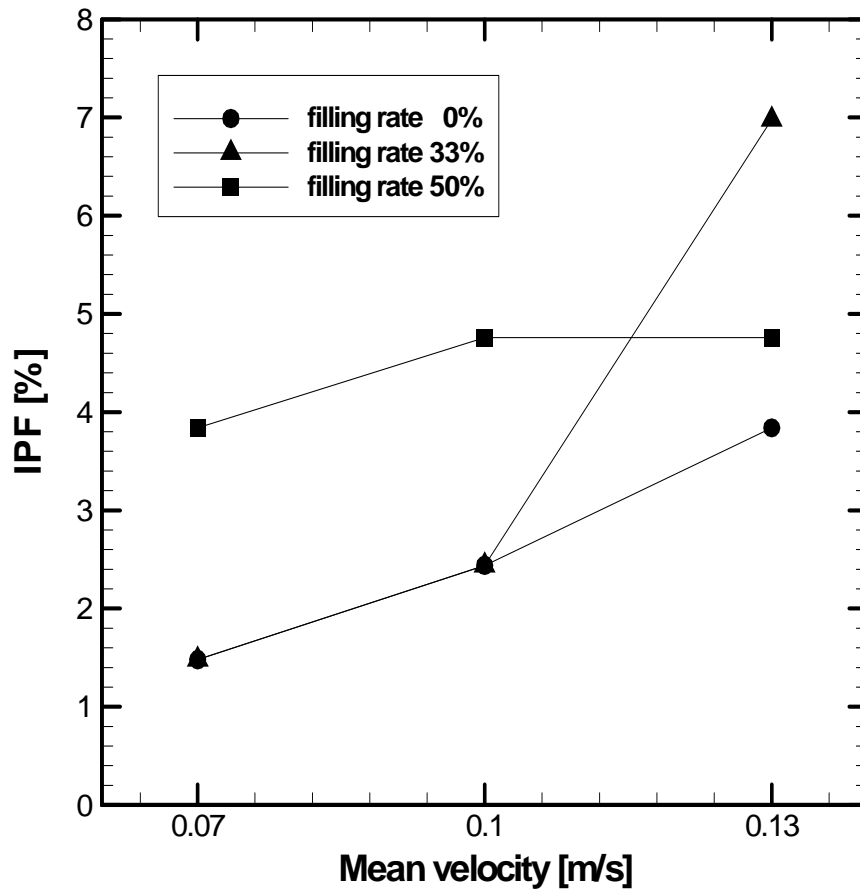


Fig. 4.5 Effect of mean velocity at ball diameter 10mm

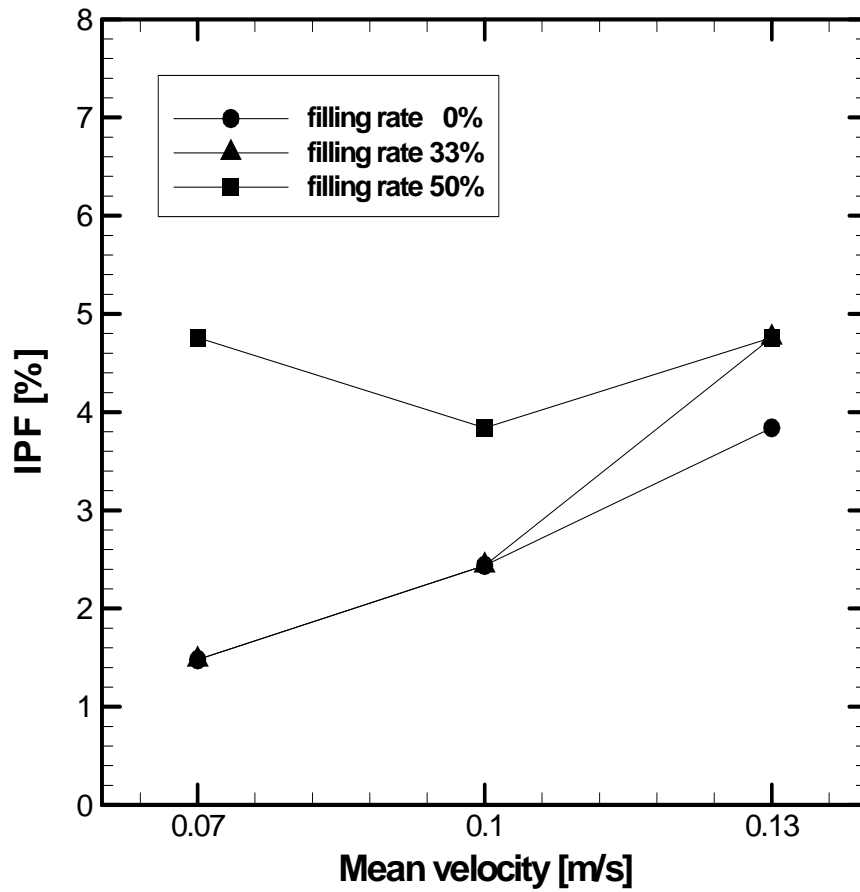


Fig. 4.6 Effect of mean velocity at ball diameter 15mm

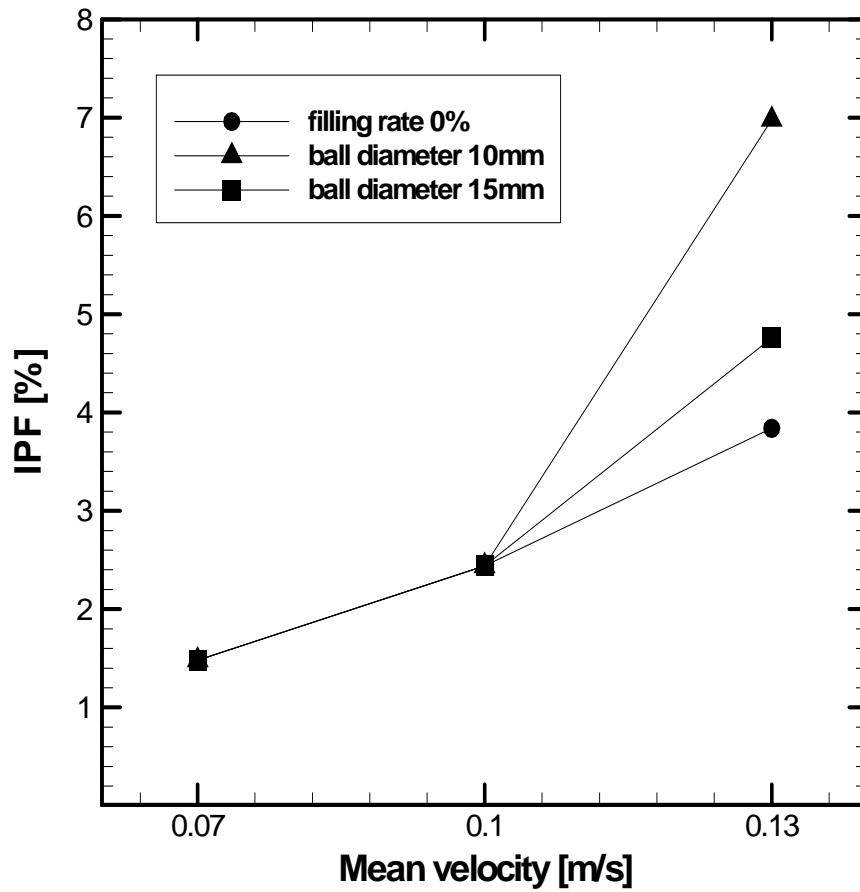


Fig. 4.7 Effect of mean velocity at ball filling rate 33%

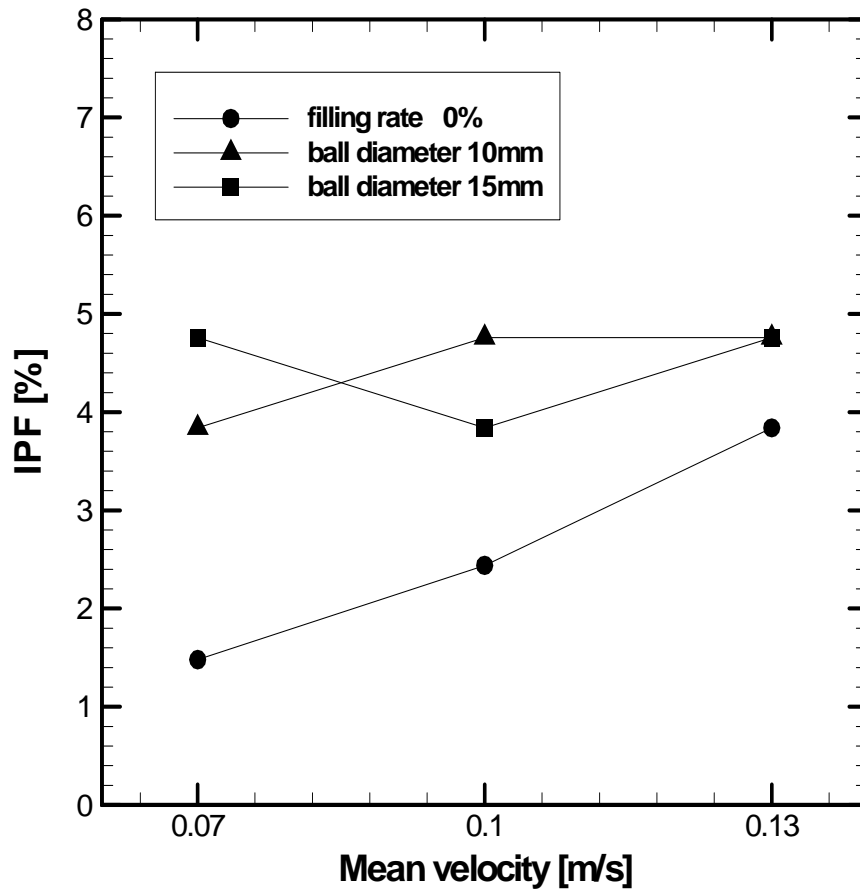


Fig. 4.8 Effect of mean velocity at ball filling rate 50%

4.2 충전율에 따른 영향

Fig 4.9는 볼의 직경이 10mm의 경우에 충전율이 슬러리아이스 생성량에 미치는 영향을 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 볼을 충전하였을 경우와 평균유속이 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 4.10은 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.

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

Fig. 4.11은 직경 10mm 볼이 충전율 50%일 경우 유속 증가에 따라

IPF량이 지속적으로 변하지 않은 이유가 과충전으로 인한 것을 알 수 있게 해주는 사진이다. Fig. 4.8에서 보듯이 50%의 충전율에서 10mm 볼은 유속 0.13m/s에서 하부 정체영역을 형성하는 것을 알 수 있다.

이는 유속에서 비하여 볼의 부력이 상대적으로 작고 또한 과충전으로 인하여 시험부 아래 부분에서는 볼의 정체부분이 생기는 것을 알 수 있다.

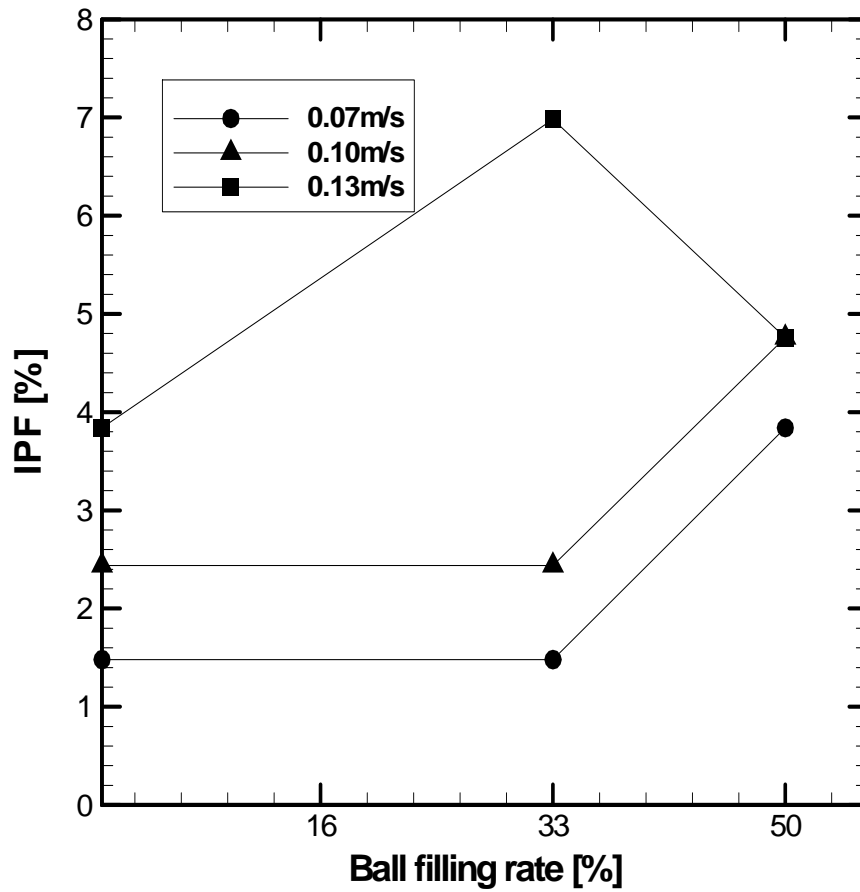


Fig. 4.9 Effect of ball filling rate at ball diameter 10mm

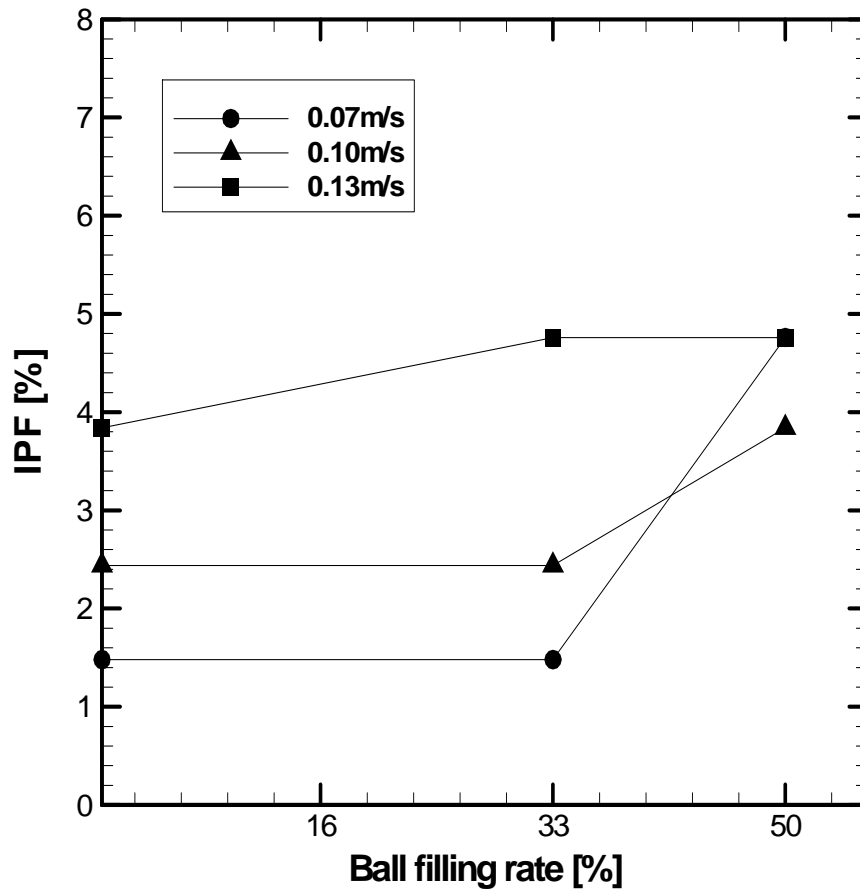


Fig. 4.10 Effect of ball filling rate at ball diameter 15mm

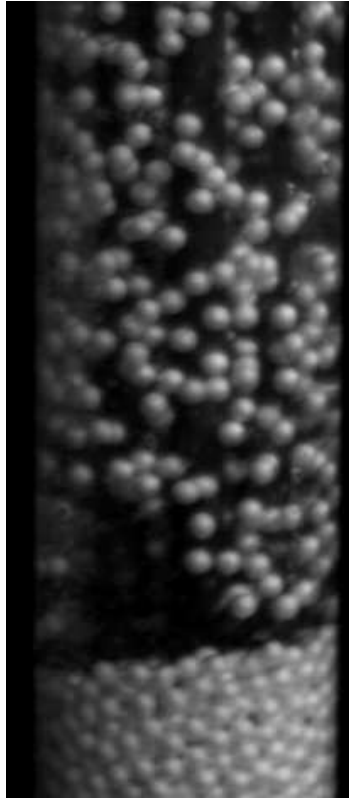


Fig. 4.11 Photograph of fluids in the reversing flow
(Filling rate = 50%, Ball size = 10mm, $U = 0.13\text{m/s}$)

4.3 유동물질의 크기에 따른 영향

Fig. 4.12은 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. 4.13은 충전율이 50%의 경우에 볼의 직경에 따른 슬러리아이스 생성량에 미치는 영향을 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 볼의 직경이 증가함에 따라 IPF의 양은 증가하고 있으나 평균유속 0.1m/s의 경우에는 볼 직경이 15mm에서 IPF의 값이 적어짐을 알 수 있다. 이는 평균유속에 의한 하부로의 유동특성과 볼의 체적에 따른 부력과의 평형관계에서 볼이 하부까지 미치지 못하고 상승하는 볼과의 충돌에 의해서 유동이 원활하지 못하기 때문이다.

반면에 0.07m/s의 경우에는 평균유속이 작아서 상기와 같은 충돌현상이 적어 상대적으로 IPF의 값이 증가하고 있다. 따라서 볼의 직경이 슬러리아이스 생성에 미치는 영향은 대단히 크며, 냉각관 주위에서의 유동특성 및 부력에 의한 영향을 고려하였을 때 본 실험에서는 볼 크기가 10mm인 경우가 적합함을 알 수 있다.

Fig. 4.14는 볼의 직경 15mm, 충전율 33%일 경우 유속에 비하여 부력이 상대적으로 크게 되어 시험부 전 부분으로 볼의 유동이 미치지 못하는 것을 나타내고 있다.

Fig. 4.15는 직경 15mm 볼이 충전율 50%일 경우 시험부 아래 부분에 정체층이 생기는 것을 알 수 있다.

Fig. 4.16 Fig. 4.17, Fig. 4.18은 유속이 각각 0.07m/s, 0.10m/s, 0.13m/s의 경우에서 볼의 직경이 변화할 때의 영향을 나타낸 것이다.

유속이 0.07m/s에서는 충전율 33%일 경우는 볼의 직경에 대하여 IPF가 영향을 받지 않으나 50%일 경우에는 볼의 직경 커질수록 IPF가 증가하는 것을 알 수 있다.

유속이 0.1m/s에서 충전율 33%일 경우는 유속 0.07m/s에서와 마찬가지로 볼의 직경이 IPF에 영향을 주지 않으나 50%일 경우는 볼의 직경 10mm가 15mm보다 IPF가 더 높은 것을 알 수 있다. 이는 앞서 말한 것과 같이 15mm의 볼의 부력이 커져 하부까지 유동을 못하기 때문으로 생각된다.

유속이 0.13m/s에서는 볼의 직경 10mm의 경우는 볼이 없는 경우에서 보다 IPF가 증가함을 알 수 있으나 볼의 직경이 15mm의 경우에는 33%의 경우는 IPF가 10mm에서와 같고 50%에서는 10mm에서 보다 IPF가 더 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 볼의 과 충전으로 인하여 실험부 하부에 정체영역이 생기거나 볼과 볼의 충돌로 인하여 유동상태를 더욱 나쁘게 만들기 때문이다.

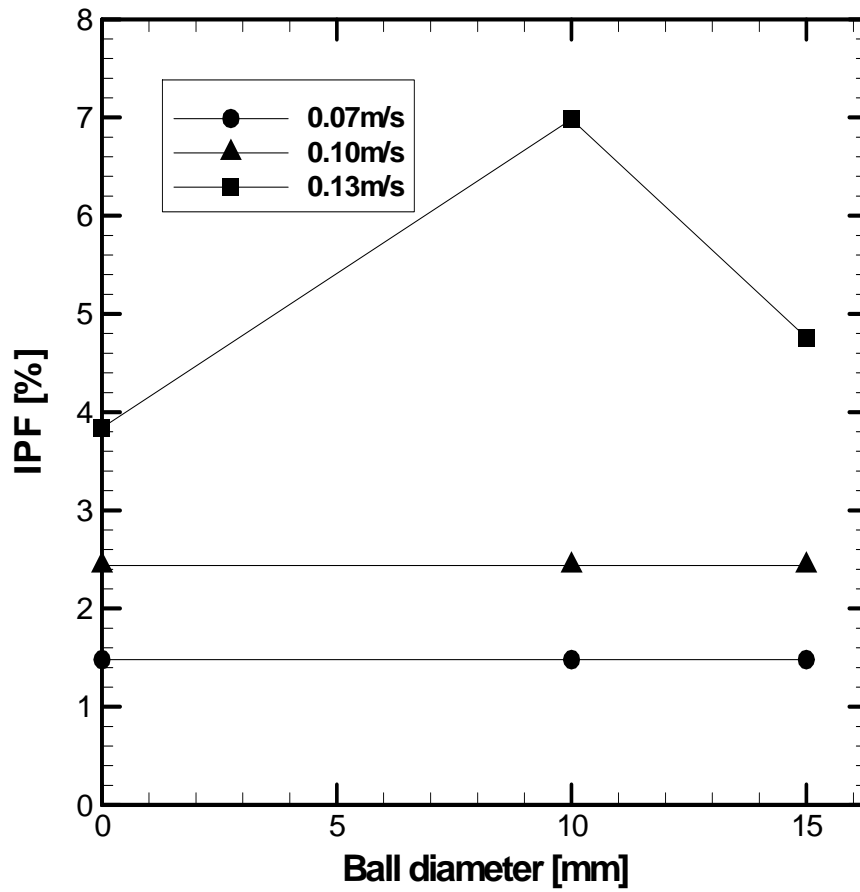


Fig. 4.12 Effect of ball diameter at ball filling rate 33%

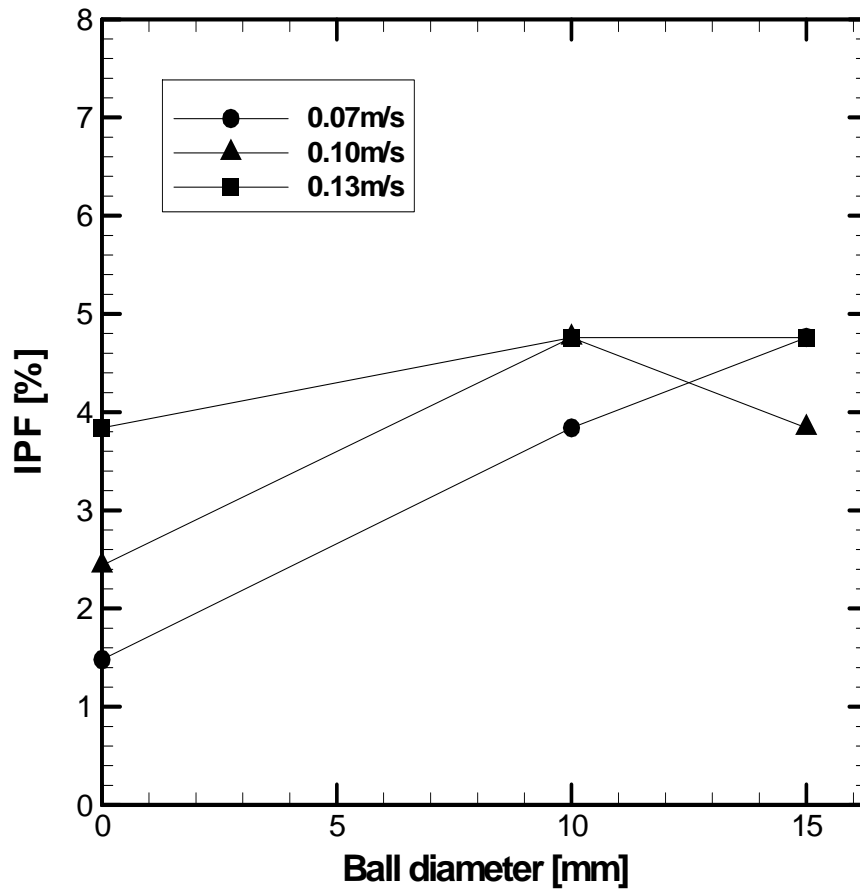


Fig. 4.13 Effect of ball diameter at ball filling rate 50%

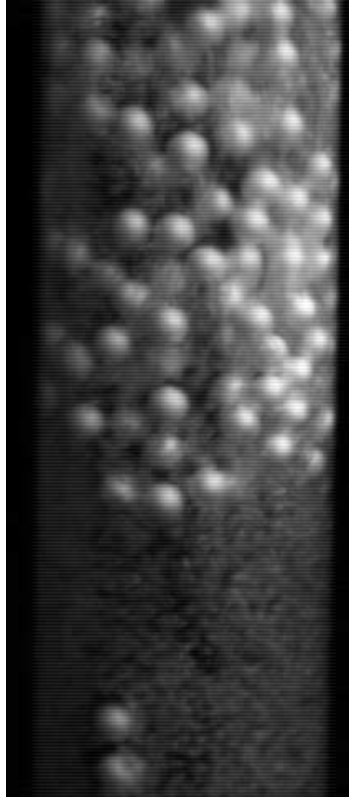


Fig. 4.14 The photograph of fluids in the reversing flow
(Filling rate = 33%, Ball size = 15mm, $U = 0.07\text{m/s}$)

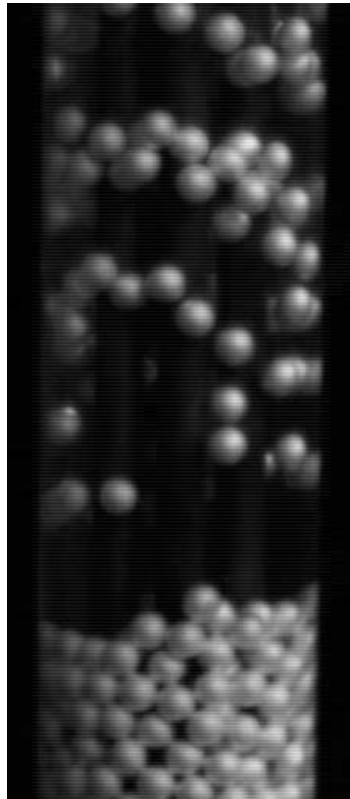


Fig. 4.15 The photograph of fluids in the reversing flow
(Filling rate = 50%, Ball size = 15mm, $U = 0.13\text{m/s}$)

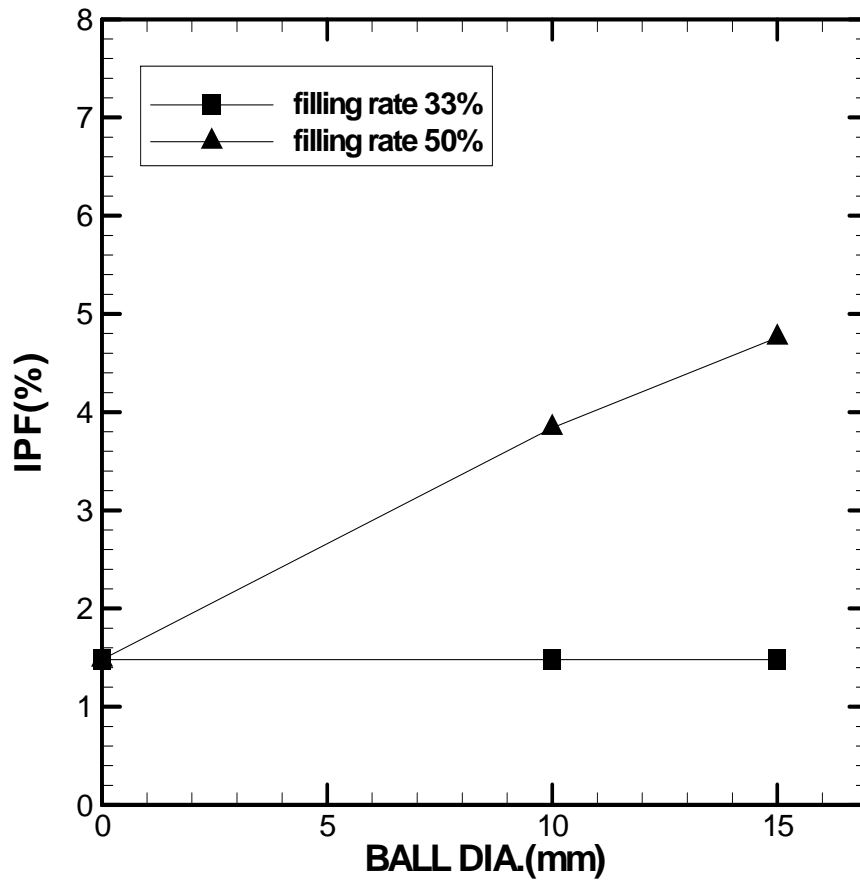


Fig. 4.16 Effect of ball diameter at 0.07m/s

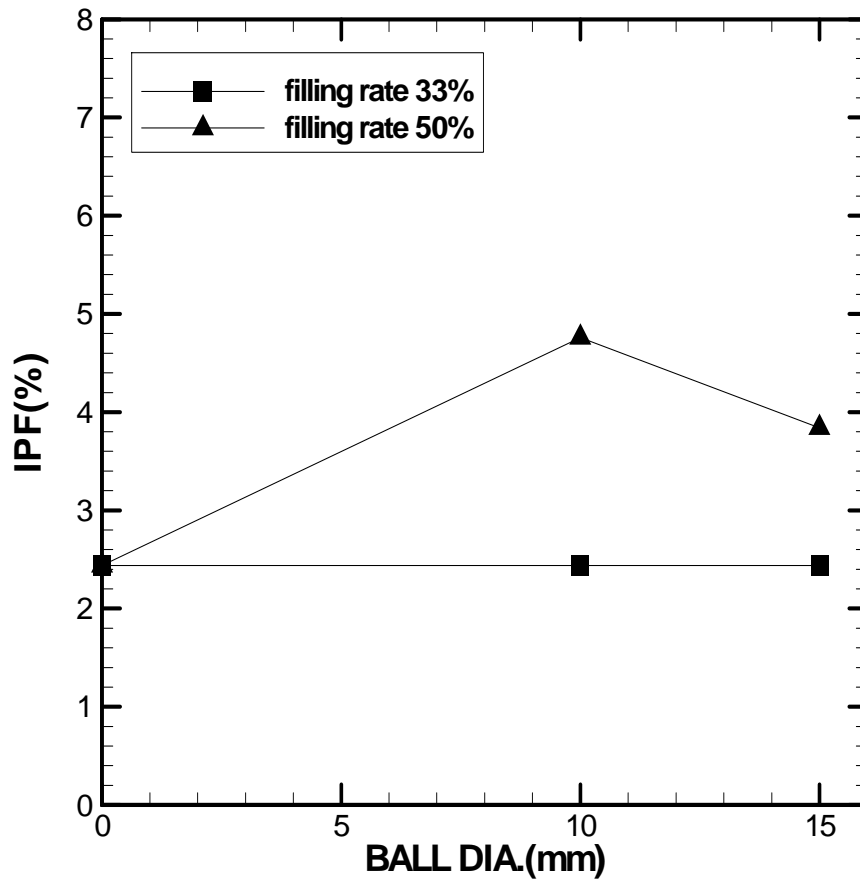


Fig. 4.17 Effect of ball diameter at 0.10m/s

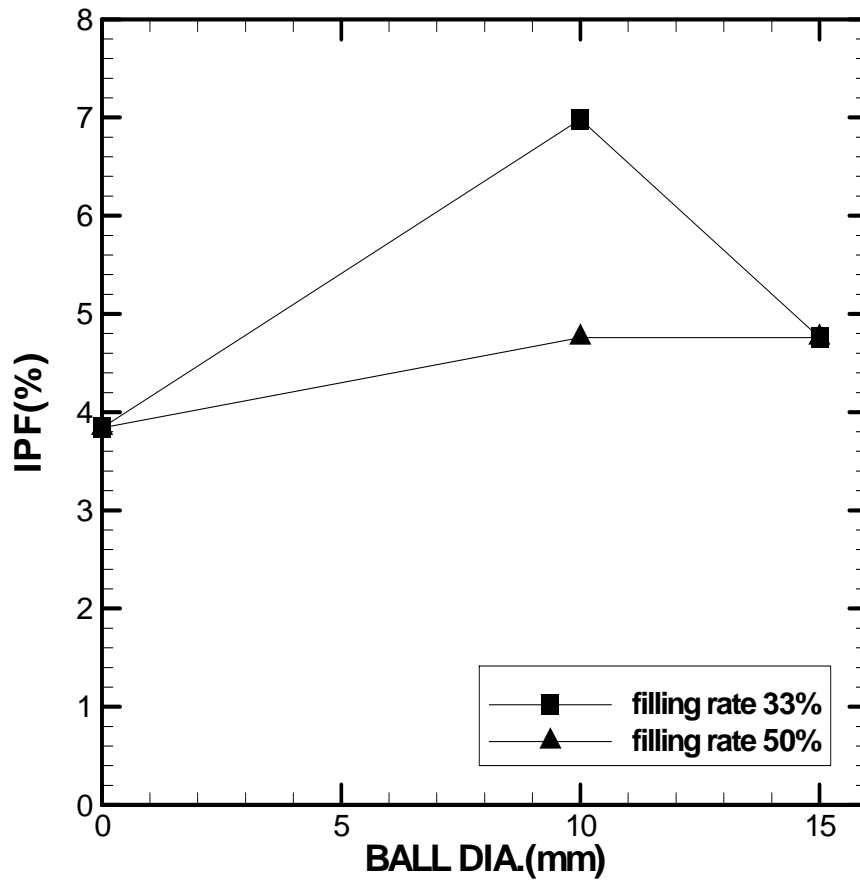


Fig. 4.18 Effect of ball diameter at 0.13m/s

제 5 장 결 론

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

1. 역전 유동층에서는 유동체의 영향으로 일반유동층에서 볼 수 없는 역류운동이 일어난다.
2. 유동체가 없는 경우, 유속이 증가함에 따라 IPF값도 증가한다.
3. 유동체가 없는 경우에 비해 유동체가 있는 경우가 IPF값이 크다
4. 충전율 50%의 경우에 비해 33%의 경우가 유속의 증가에 따른 IPF값의 증가 폭이 더 크다.
5. 볼의 유속과 부력의 크기에 따라, 볼의 유동특성 및 IPF값은 영향을 받는다.
6. 본 실험조건에서는 볼의 직경 10mm, 충전율 33%, 유속 0.13m/s의 경우에 IPF값이 6.98%로 가장 높게 나타났는데, 이는 각각의 경우에 있어서 최적의 상태를 선정할 필요가 있음을 나타낸다.

참 고 문 헌

- (1) 생산기술연구원 빙축열 연구팀, “빙축열의 시스템적 효과에 관한 고찰(Ⅰ)”, 공기조화 냉동공학 제23권 제2호, pp.143~146, 1994.
- (2) 이동원, “아이스슬러리를 이용한 냉열수송”, 대한설비공학회지(설비저널), pp.8~14, 2001.
- (3) 이봉진 외 3인, “냉수 및 아이스슬러리 직접수송 지역냉방 시스템의 경제성 평가”, 대한설비공학회 동계학술발표대회 논문집, pp.27~32, 2004.
- (4) 이윤표, “지역냉방용 아이스슬러리 시스템의 특성”, 대한설비공학회 하계학술발표대회 논문집, pp.1223~1228, 2004.
- (5) 임효목 외 1인, “스크래퍼형 아이스슬러리 제빙기”, 대한설비공학회 하계학술발표대회 논문집, pp.461~468, 2004.
- (6) 강채동 외 3인, “수용액의 교반/냉각을 동반한 슬러리 얼음의 빙부착”, 설비공학논문집, pp.1071~1077, 2002.
- (7) 윤정인 외 7인, “냉동공학”, 문운당, pp.244~260, 1998.
- (8) 손권 외 2명, “교반냉각에 의한 아이스슬러리의 생성 및 부착”, 산학연논문집, 2001.
- (9) 최상균 외 3명, “첨가제 함유 해수에 의한 아이스슬러리 제조”, 대한설비공학회 2004 하계학술발표대회 논문집 pp.424~429, 2004.