

아이스슬러리의 분기관내 압력손실과 IPF 변화에 관한 실험적 연구

박기원[†] · 최현웅^{*} · 노건상^{**} · 정재천^{***}

(원고접수일 : 2002년 10월 29일, 심사완료일 : 2003년 1월 21일)

Experimental Study on Transformation of IPF and Pressure Drop in Branches with Ice Slurry

Ki-Won Park[†] · Hyun-Woong Choi^{*} · Gun-Sang Roh^{**} · Jae-Cheon Jeong^{***}

Key words : Ice Slurry(아이스슬러리), Branch(분기관), Pressure Drop(압력손실), IPF(빙충전율)

Abstract

This study aimed to understand the effects of transporting ice slurry particles through pipes with branches. The experimental apparatus was constructed as ice slurry mixing tank, vortex pump, manometers for differential pressure measuring, IPF(ice packing factor) measuring instruments and branches as test sections. The experiments were carried out under various conditions, with concentration of water solution ranging between 0~20wt% and velocity of water solution at the entry ranging between 1.5~2.5m/s. The differential pressure and IPF between the pipe entry and exit were measured, and flowing form was checked throughout the experiment.

The pressure loss in 3d branches appeared compared with 6d branches so that it was very high. In the pressure loss of the inside and outside of branches, 6d branches was showed the difference, but was agreed in 3d branches. The pressure loss according to concentration of water solution, low value appeared at 10wt% in 6d branches, at 20wt% in 3d branches. The pressure loss according to velocity, did not show large difference. The change of IPF at outlet, appeared +15~-25% in 6d branches and 0~-20% in 3d branches. The difference of IPF at the inside and outside of branches, appeared 10~15% in 6d branches and maximum 5% in 3d branches.

[†] 책임저자(여수대학교 냉동공학과) E-mail : pkw@yosu.ac.kr, T : 061)659-3274

^{*} 여수대학교 대학원 냉동공학과

^{**} 동명대학 가스냉동과(E-mail : rohgs@mail.tmc.ac.kr)

^{***} 주한서엔지니어링 한서기술연구소(E-mail : jcjung@hansoe.co.kr)

기 호 설 명

- d : 시험관의 내경 [mm]
- IPF_{in} : 입구 IPF [%]
- IPF_{out} : 출구 IPF [%]
- L : 분기관의 간격 [mm]
- r_{mix} : 혼합물의 전기전도도 [Ωm]
- r_w : 물의 전기전도도 [Ωm]
- V_{in} : 입구 유속 [m/s]
- ΔP : 관내 압력손실 [Pa]

1. 서 론

지구 온난화문제나 여름철에 주야간의 전력수요 격차가 커지는 문제 등이 대두되면서 환경보존에 효과적이면서 에너지를 효율적으로 이용할 수 있는 기술개발이 이루어지고 있다. 그 중 하나로서 소비전력부하의 평균화가 가능한 병축열 시스템의 도입이 추진되고 있는 실정이다⁽¹⁾. 특히 최근에는 정적형 제빙에서의 문제점을 해소하면서 미세한 슬러리모양의 얼음을 생성시켜 축열매체인 얼음입자를 쉽게 수송할 수 있는 동적형 제빙이 주목받고 있다⁽²⁾.

아이스슬러리를 수송매체로 이용한 냉열시스템에서는 냉수의 경우에 비해 높은 열수송능력을 가지고 있다. 즉, 얼음에서 물로의 상변화시 발생하는 단위질량당 80kcal라는 큰 용해잠열을 이용할 수 있으며, 얼음의 용해 후에도 물의 단위질량당 1kcal라는 현열도 이용할 수 있기 때문에 시스템의 냉열 수송밀도를 높일 수 있다. 따라서 배관구경을 대폭 축소시킬 수 있고, 설비의 소형화, 설비비의 절감이 가능하며, 유량이나 구경을 감소시킴으로써 열 손실과 수송동력의 절감이 가능하다^(3,4).

이와 같이 아이스슬러리를 효율적으로 수송하기 위해서는 아이스슬러리를 생산내지 저장하는 곳에서부터 실내의 열교환기까지 관내에서 동결하지 않고 유동하는데 필요한 조건을 찾아내어 적절한 배관시스템설계가 이루어지지 않으면 안된다. 즉, 직관을 비롯하여 분기부나 확대, 축소부 등에서 마찰저항이 급증하여 아이스슬러리가 정체하거나 빙

핵으로 작용하여 얼음을 성장시키게 된다면 아이스슬러리를 공급하는 효과를 얻기 힘들 것이다.

그리고 아이스슬러리 수송시스템은 유체 속에 작은 알갱이의 얼음입자를 같이 수송하는 것이기 때문에 고-액 물질의 수송에 대한 기술개발의 기초적인 발판이 될 것이다.

그러나 지금까지의 연구들을 살펴보면 淺野 등⁽⁵⁾, 村井 등⁽⁶⁾이 수평관에서 연구한 결과나 高橋 등⁽⁷⁾, 百田 등⁽⁸⁾이 수직관에서 연구한 결과, 이 등^(9,10)이 수평관과 수직관 등을 연결한 루프를 형성하여 연구한 결과 등 직관부에서의 연구결과가 대부분이다.

따라서 본 연구에서는 관내에서 유동하는 아이스슬러리를 필요로 하는 열교환기까지 효과적으로 수송할 수 있는 조건을 찾기 위한 연구의 일환으로 분기부를 대상으로 하여 수행하였다. 즉, 관내에서의 근본적인 문제를 해결하기 위하여 얼음입자와 분기부 마찰에 의한 압력손실 및 IPF(Ice Packing Factor)의 변화와 관계쇄가 일어나는 조건 등을 찾아 아이스슬러리의 유동에 미치는 영향을 파악하고자 하였다. 이처럼 관내에서 아이스슬러리의 유동특성을 파악하기 위하여 본 연구에서는 입자직경이 약 2mm 정도인 얼음입자와 수용액을 혼합하여 분기관에서의 유동시 발생하는 현상을 실험적으로 살펴보고자 한다. 즉, 분기관의 간격 및 유속, IPF, 수용액의 농도 등을 변화시킴에 따른 분기관 입출구에서의 압력손실과 IPF를 측정하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

본 실험에 이용된 실험장치의 개략도는 Fig. 1과 같다. 실험장치는 아이스슬러리 혼합탱크, 볼텍스펌프, IPF 측정기, 차압측정용 마노메타, 유속조정부, 유동안정화 조정부 그리고 분기시험부로 구성하였다.

분기시험부(관경 25mm)는 6d 분기부(분기관격 150mm인 분기부, 관경의 6배)와 3d 분기부(분기관격 75mm인 분기부, 관경의 3배)를 사용하였다. 또 분기부에는 입구측 1개소와 출구측 4

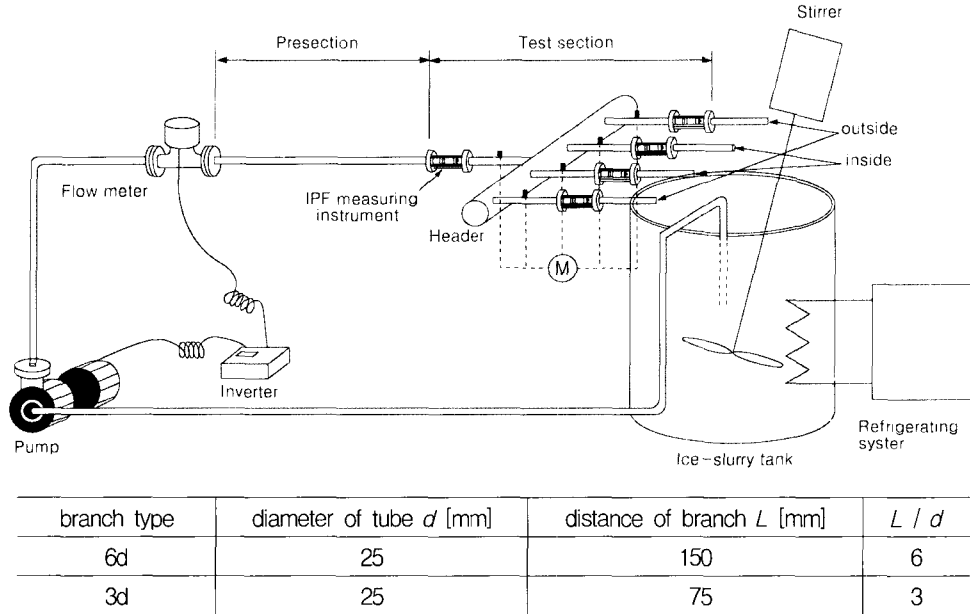


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus.

개소에 각각 차압측정용 마노메타(내경 4mm)와 IPF 측정기를 설치하였다.

또 아이스슬러리가 일정유속으로 공급되도록 인버터(1.5kW)를 사용하여 펌프의 회전수를 조정하였으며, 시험부의 입구측으로 유입되는 아이스슬러리가 안정한 상태를 유지할 수 있도록 충분한 유동안정화 조정부(길이 700mm)를 설치하였다.

아이스슬러리 혼합탱크로는 스테인레스제 탱크를 사용하고, 내부온도가 0℃로 유지되도록 냉동장치를 부착하였다. 또, 혼합탱크 내에 날개를 3개 가진 교반기(최대 0.4kW, 3000rpm)을 설치하여 투입된 얼음입자와 물이 안정되고 균일한 상태로 유지되도록 하였다. 혼합탱크에서 혼합된 아이스슬러리는 공기가 혼입되지 않도록 하여 수송용 볼텍스펌프(최대 1.5kW, 0.2m³/min)로 송출되도록 하였다.

그리고 본 실험에서는 수용액의 농도를 0~20wt%까지 조정하였는데, 수용액으로는 고순도의 프로필렌글리콜(CH₃CH(OH)CH₂OH, 분자량 76.10)⁽¹¹⁾과 수도수를 이용하여 일정농도가 되도록 하였다.

본 실험에서 사용한 얼음입자는 일정용기 내에 일정농도로 조절된 프로필렌글리콜수용액을 채우고 이를 약 -20℃인 냉동고 속에서 약 24시간에 걸쳐 얼린 것을 쇠팅기로 절삭한 것이다. 그러나 이 얼음입자는 표면에 수분이 부착되어 있고 입자도 비교적 매끄럽지 못한 상태이기 때문에, 그대로 사용하면 장치 내에서 관폐쇄를 일으키는 요인으로 작용하기 쉬울 것이다. 따라서 이 얼음입자를 다시 -20℃에서 약 24시간 이상을 저장한 뒤에 사용하였다. 본 실험에서 사용한 얼음입자는 200개를 샘플로 채집하여 입자직경을 측정하였고, 그 평균입자경은 1.943mm인 것을 확인하였다.

본 실험에서 IPF는 혼합조와 수송관내의 수온이 0℃로 안정된 것을 확인한 후에 일정유속에서 수송전극 사이의 전기 저항값을 측정하여 구하였다. 이는 전기전도도가 다른 2종류의 물질이 혼합되어 있을 때 그 혼합물질의 전기전도도가 구성물질의 혼합비에 의존하므로 혼합물질의 평균 전기전도도로부터 그 혼합비를 구할 수 있다는 전기전도도법에 의한 측정방법⁽¹²⁾을 이용한 것이다. IPF 측정장치의 개략도는 Fig. 2와 같고, 본 실험에서 IPF값은 다음 식으로부터 산출하고 검정하였다⁽¹³⁾.

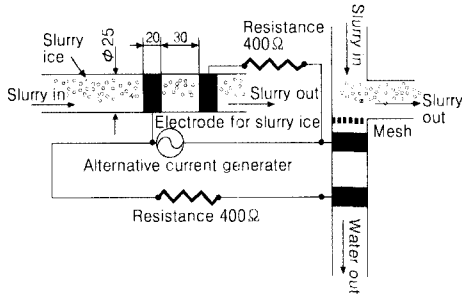


Fig. 2 Schematic diagram of IPF measuring instrument.

$$IPF = \left\{ 1 - \left(\frac{r_{mix}}{r_w} \right)^{-\frac{2}{3}} \right\} \times 100$$

3. 실험결과 및 고찰

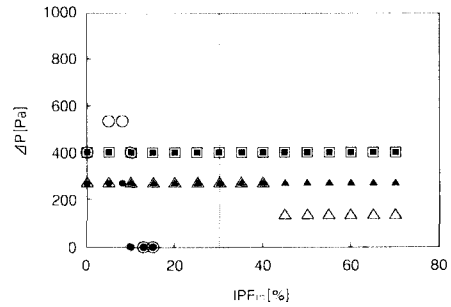
3-1. 6d 분기관에서의 압력손실

Fig. 3은 6d 분기관에서 수용액의 농도 및 유속을 변화시켰을 때의 압력손실을 입구 IPF에 따라 정리한 것이다.

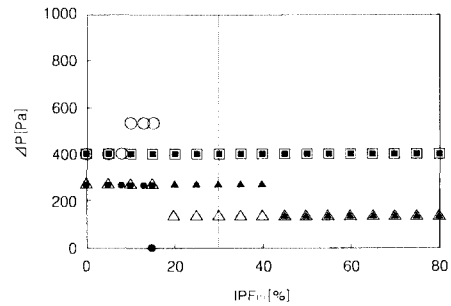
그림에서 알 수 있듯이 유속이 증가하여도 전체적으로 압력손실의 변화는 그다지 나타나지 않았다. 그러나 수용액의 농도가 0wt%일 때는 저속일수록 낮은 IPF에서도 압력손실이 크게 나타나고 있으며, 관 폐쇄현상도 빨리 나타나는 것을 관찰할 수 있었다. 그러나 수용액의 농도 10wt%일 때는 유속이 증가함에 따라 압력손실이 적어지는 경향이 나타났다. 이는 수용액의 첨가에 따라 얼음입자끼리의 결합이 줄어들어 유동저항을 감소시키는 결과라고 해석된다.

수용액의 농도에 따라서는 10wt%일 때가 압력손실이 가장 작게 나타남을 알 수 있다. 이는 수용액의 농도가 지나치게 높으면 얼음입자에 의한 영향 외에 분기헤더내에서 정체됨으로 인해 얼음입자에 미치는 수용액의 영향이 작음하기 때문으로 생각된다. 그리고 농도에 따라 분기부의 내측과 외측에서의 압력손실이 다르게 나타나는 경향을 볼 수 있다. 즉, 0wt%에서는 내측, 10wt%에서는 외측의 압력손실이 다소 높게 나타나지만, 20wt%에

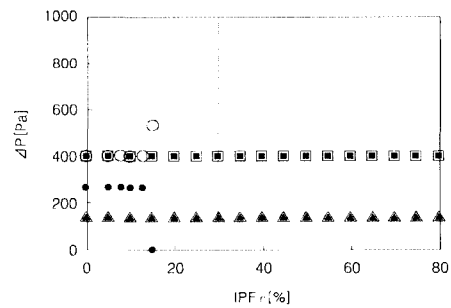
서는 차이를 보이지 않는다. 이런 결과로부터 분기관 설계시에는 사용 수용액의 농도에도 관심을 가져야함을 나타내어 주는 결과라 할 수 있다.



(a) $V_{in}=1.5\text{m/s}$



(b) $V_{in}=2.0\text{m/s}$



(c) $V_{in}=2.5\text{m/s}$

Concentration	0wt%	10wt%	20wt%
Branch (inside)	○	△	□
Branch (outside)	●	▲	■

Fig. 3 Variation of pressure drop in 6d branch for various velocity of the water solution.

그림 중 점선이 그어져 있는 IPF 30% 정도에서 일시적인 관 폐쇄현상이 나타나는 것을 보였으나, 약간의 조정으로 IPF가 다시 증가하였다. 즉, IPF 30% 정도까지는 비교적 안정적으로 유동이 유지됨을 나타낸다. 또 압력손실이 0으로 나타나는 상태는 이미 관 폐쇄가 일어나 유동이 정지된 상태를 의미한다. 이는 뒤의 결과에서도 마찬가지이다.

3-2. 6d 분기관에서의 IPF 변화

Fig. 4는 6d 분기관에서 수용액의 농도 및 유속의 변화에 따른 입구 IPF와 출구 IPF 변화를 대비한 것이다. 그림에서 실선은 입구 IPF와 출구 IPF가 동일한 상태를 나타내는 것으로, 이 선에 가까울수록 입구와 출구의 IPF 변화가 적은 것을 나타낸다.

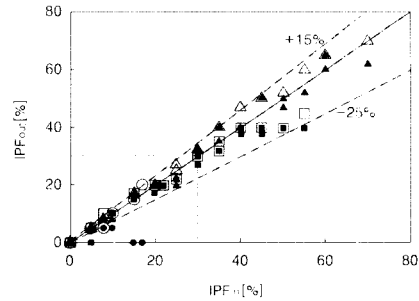
그림에서 출구측 IPF 변화는 대개 +15~ -25%의 범위에서 변화하고 있음을 알 수 있다. 그러나 유속이 증가할수록 그 폭이 다소 증가하고 있으며, 입구측 IPF가 높을수록 출구측 IPF가 낮아지고 있는데, 이는 유속의 증가에 따라 분기부에서의 유동의 충돌 및 마찰손실에 의한 압력강하 현상이 뚜렷하게 나타나지만, 공급 IPF가 높아지면 분기헤더내에 공급된 얼음입자가 일부 저장되어 유출되지 못하기 때문으로 생각된다.

농도에 따라 살펴보면, 수용액을 첨가하지 않은 0wt%에서는 관내 얼음의 성장 등으로 인해 분기부 통과 IPF를 높일 수 없고, 20wt%일 때보다 10wt%일 때가 안정된 출구 IPF를 나타냄을 볼 수 있다.

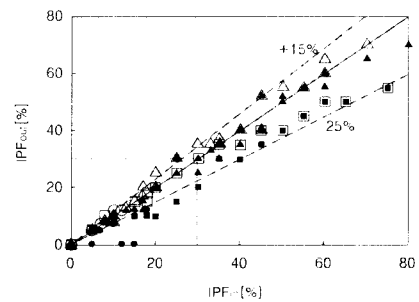
분기부의 내측과 외측을 비교하면, 분기부 내측이 외측보다 10~15% 정도 높은 IPF로 배출되고 있음을 알 수 있다. 이는 분기관 내에서의 유량분배 특성과 얼음입자의 유입으로 인해 공급관에 가까운 내측에서의 유출이 먼저 이루어지기 때문으로 생각된다. 따라서 아이스슬러리를 수송하는 분기관의 설계시에는 분기관격을 조정하는 등 일반 유체의 분기부와는 달리 고려하여야 할 것이다.

또 입구측 IPF값은 있지만, 출구측 IPF가 0으로

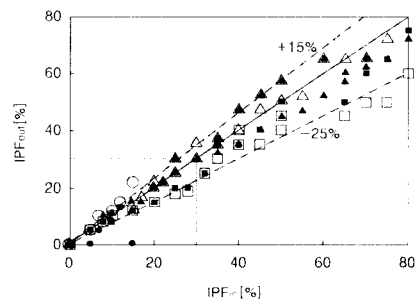
로 나타나는 것은 분기부에서 관이 폐쇄되었음을 의미한다.



(a) Vin=1.5m/s



(b) Vin=2.0m/s

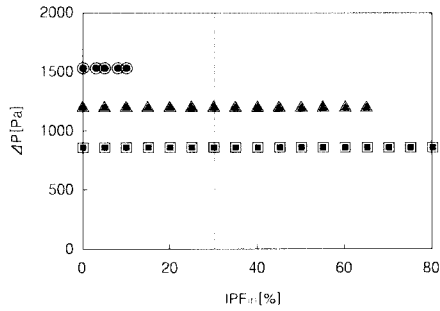


(c) Vin=2.5m/s

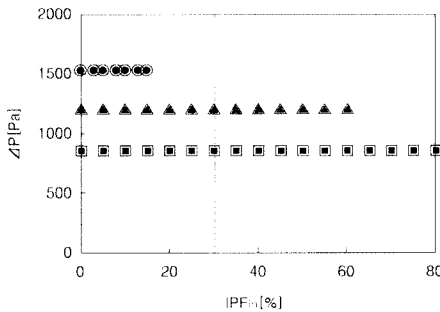
Concentration	0wt%	10wt%	20wt%
Branch(inside)	○	△	□
Branch(outside)	●	▲	■

Fig. 4 IPF in 6d branch outlet for various velocity of the water solution.

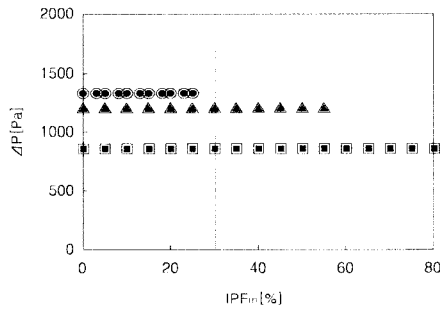
3-3. 3d 분기관에서의 압력손실



(a) $V_{in}=1.5\text{m/s}$



(b) $V_{in}=2.0\text{m/s}$



(c) $V_{in}=2.5\text{m/s}$

Concentration	0wt%	10wt%	20wt%
Branch(inside)	○	△	□
Branch(outside)	●	▲	■

Fig. 5 Variation of pressure drop in 3d branch for various velocity of the water solution.

Fig. 5는 3d 분기관에서 수용액의 농도 및 유속을 변화할 때의 압력손실을 입구 IPF에 따라 정리한 것이다.

그림에서 알 수 있듯이 유속이 증가하여도 압력손실은 거의 변하지 않고 있는데, 이는 분기간격이 좁아 공급과 송출이 거의 동시에 이루어지기 때문이라고 생각된다. 그러나 0wt%인 경우에는 고유속(2.5m/s)에서 압력손실이 다소 낮아지고 있으며, 전체적으로 6d 분기관인 경우(Fig. 3)에 비해서는 압력손실이 크게 증가한다는 것을 알 수 있다.

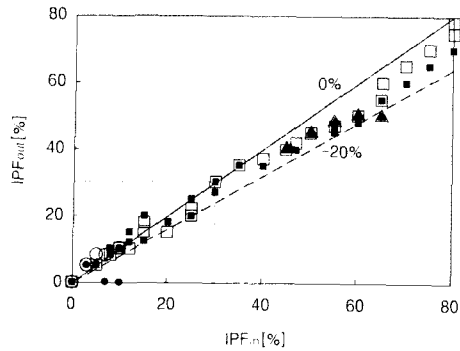
수용액의 농도에 따라서는 6d 분기관인 경우와는 달리 20wt%일 때가 가장 낮은 압력손실을 나타내고 있다. 이는 분기간격이 좁아짐으로 인해 분기헤더내에서 정체하는 시간이 짧아져 아이스슬러리가 분기헤더를 미끄러지듯이 빠져나가 얼음입자가 수용액으로부터 영향을 적게 받기 때문으로 생각된다. 이는 분기부의 내측과 외측에서의 결과가 동일하게 나타나는 것을 보아도 예상할 수 있다.

3-4. 3d 분기관에서의 IPF 변화

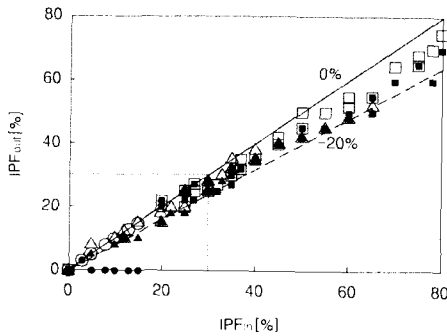
Fig. 6은 3d 분기관에서 수용액의 농도 및 유속의 변화에 따른 입구 IPF와 출구 IPF 변화를 대비한 것이다.

그림에서 실선은 6d 분기관인 경우(Fig. 4)와 같은 것이고, 출구측 IPF 변화는 0~-20% 범위에 있음을 알 수 있다. 즉, 전체적으로는 6d 분기관에 비해 출구 IPF가 안정하게 유지되고 있고, 분기부 내측과 외측에서의 IPF 차이도 최대 5% 정도로 그다지 크지 않음을 알 수 있다. 그리고 농도에 따른 변화에서도 6d 분기관인 경우보다 크게 영향을 받지 않음을 알 수 있다. 이는 분기간격의 차이로 인해 3d 분기관에서는 분기헤더에서의 정체없이 안정하게 유출되기 때문으로 생각된다.

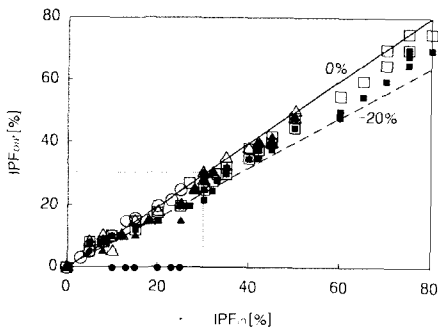
이런 현상은 유속이 증가할수록 보다 명확하게 나타나고 있으며, 수용액의 농도 10wt%일 때가 가장 안정적이라는 것을 알 수 있다.



(a) $V_{in}=1.5\text{m/s}$



(b) $V_{in}=2.0\text{m/s}$



(c) $V_{in}=2.5\text{m/s}$

Concentration 0wt% 10wt% 20wt%
 Branch(inside) ○ △ □
 Branch(outside) ● ▲ ■

Fig. 6 IPF in 3d branch outlet for various velocity of the water solution.

4. 결 론

(1) 분기부 내측과 외측의 압력손실에 있어서 6d 분기관에서는 다소의 차이를 보이는 경우도 있지만, 3d 분기관에서는 거의 일치하고 있다.

(2) 수용액의 농도에 따른 압력손실은 6d 분기관에서는 10wt%일 때, 3d 분기관에서는 20wt% 일 때 압력손실이 낮게 나타났다.

(3) 유속에 따른 압력손실은 6d 분기관이나 3d 분기관 모두 큰 차이를 보이지 않았지만, 전체적으로는 6d 분기관에 비해 3d 분기관에서의 압력손실이 매우 높게 나타났다.

(4) 출구 IPF의 변화는 6d 분기관에서 +15~-25%, 3d 분기관에서 0~-20%로 나타나 3d 분기관에서 비교적 안정된 결과를 나타내었다.

(5) 분기부 내측과 외측의 출구 IPF는 6d 분기관에서는 10~15% 정도의 차이를 보이고 있으나, 3d 분기관에서는 최대 5% 정도의 차이를 보인다.

(6) 유속에 따른 출구 IPF 변화는 6d 분기관이나 3d 분기관 모두 유속이 빠를수록 IPF 변화폭이 다소 커지는 경향을 보였지만, 그다지 큰 변화는 나타나지 않았다.

후 기

이 논문은 2001년도 에너지관리공단의 학술진흥사업에 의한 지원으로 연구된 결과의 일부이며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

[1] 박승상, 백종현, 2000, "빙축열과 에너지절약 및 환경문제", 기계저널, Vol.40, No.4, pp.40~44.
 [2] 박기원, 1998, "빙축열 시스템의 현재와 전망", 냉동공조기술, Vol.15, No.4, pp.119~131.
 [3] 柳原隆司, 1998, "氷蓄熱システムの評價", 冷凍, Vol.73, No.844, pp.58~63.
 [4] 박기원, 1998, "빙축열에서의 전열 및 유동현

상에 대하여”, 공기조화·냉동공학, Vol.27, No.3, pp.284~296.

[5] 淺野等, 鳥越邦和, 仲澤優司, 1992, “水-水 2 相流の管内流動特性”, 第26回空氣調和・冷凍聯合講演論文集, pp.185~188.

[6] 村井正夫, 須藤博昭, 服部賢, 青木和夫, 小川康夫, 1993, “水-水混相流の水平管内對流熱伝達”, 第30回日本伝熱シンポジウム講演論文集, pp.430~432.

[7] 高橋弘, 加藤美好, 石黒邦道, 渡辺健一郎, 1996, “水水搬送による地域冷房システムの研究-搬送システム水平管における壓力損失”, 空氣調和・衛生工學會學術講演會講演論文集, pp.713~716.

[8] 百田眞史, 今井智將, 射場本忠彦, 村上浩, 岩宮正治, 山田博, 1997, “水水搬送システムに関する基本的研究(第4報)各種配管形状による角水の搬送特性について”, 空氣調和・衛生工學會學術講演會講演論文集, pp.1121~1124.

[9] 이동원, 윤찬일, 윤응상, 2002, “소구경 배관내 아이스슬러리의 유동형상 및 압력강하 특성에 관한 실험적 연구(1)”, 설비공학논문집, Vol.14, No.5, pp.385~390.

[10] 이동원, 윤찬일, 주문창, 2002, “소구경 배관내 아이스슬러리의 유동형상 및 압력강하 특성에 관한 실험적 연구(2)”, 설비공학논문집, Vol.14, No.5, pp.391~397.

[11] 稻葉英男, 1996, “最近の蓄熱材料とその用途”, 冷凍, Vol.71, No.823, pp.3~11.

[12] 勝屋訓, 森岡宏次, 1997, “水水輸送における管内IPF計測装置に関する研究”, 空氣調和・衛生工學會學術講演會講演論文集, pp.1125~1128.

[13] 박기원, 三浦秀俊, 堀部明彦, 稻葉英男, 2000, “유기수용액에 의한 냉각관내 연속제빙시의 제빙량”, 한국에너지공학회지, Vol.9, No.3, pp.221~227.

저 자 소 개



박기원 (朴基元)

1960년 1월생, 1983년 부산수산대학교 냉동공학과 졸업, 1985년 동대학원 졸업(석사), 1993년 동대학원 졸업(박사), 현재 여수대학교 냉동공학과 부교수 재직중

최현웅 (崔賢雄)

1974년 10월생, 2000년 여수대학교 냉동공학과 졸업, 2002년 동대학원 졸업(석사)



노건상 (盧建尙)

1966년 6월생, 1990년 부산수산대학교 냉동공학과 졸업, 1992년 동대학원 졸업(석사), 1997년 부경대학교 냉동공학과 졸업(박사), 현재 동명대학교 가스냉동과 조교수 재직중



정재천 (丁載千)

1959년 8월생, 1983년 부산수산대학교 냉동공학과 졸업, 1990년 동대학원 졸업(석사), 1998년 부경대학교 대학원 냉동공학과 졸업(박사), 현재 (주)한서엔지니어링 한서기술연구소장 재직중