

다양한 각도로 기울어진 직관내에서 아이스슬러리 유동시 압력손실과 IPF 변화

김 규 목, 박 기 원*
여수대학교 대학원, *여수대학교 냉동공학과

Variation of Pressure Loss and IPF Flowing Ice Slurry in Straight Tube Inclined to Various Angle

Kyu-Mok Kim, Ki-Won Park**

Graduate School, Yosu National University, Yeosu 550-749, Korea

*Department of Refrigeration Engineering, Yosu National University, Yeosu 550-749, Korea

(Received February 9, 2004; revision received September 6, 2004)

ABSTRACT: Recently, the ice storage system using ice slurry has been used increasingly since it has been introduced where the rapid cooling load change is required. Because it overcomes a decrease of the melting performance and an increase of the thermal resistance on the ice layer in static ice thermal storage system.

This study is performed to understand the effects of transporting ice slurry through horizontal, vertical and inclined tubes (30°, 45°). It used propylene glycol-water solution and ice particles (diameter of about 2 mm) in this experiment. The experiments were carried out under various conditions, with concentration of water solution ranging from 0 to 20 wt%, and velocity of water solution at the entry ranging from 1.5 to 2.5 m/s.

The results were as follows: Regarding the angle of inclined tube, the highest pressure loss was measured for vertical tube and the pressure loss for 45°, 30°, horizontal straight tubes were lower successively. The lowest pressure loss in these tubes was measured at velocity of 2.0~2.5 m/s and concentration of 10 wt%. The outlet IPF was likewise stable in these ranges.

Key words: Ice slurry(아이스슬러리), Straight tube(직관), Inclined tube(경사관), Pressure loss (압력손실), IPF(빙층전율)

기 호 설 명

C_{sol} : 수용액의 농도 [wt%]
IPF_{in} : 입구 빙층전율(Ice Packing Factor) [%]
IPF_{out} : 출구 빙층전율(Ice Packing Factor) [%]

V : 유속 [m/s]
 ΔP : 압력손실 [Pa]

1. 서 론

현재까지의 냉열공급시스템은 최저공급온도 5~7°C 정도의 냉수를 공급하여 왔으나, 아이스슬러리를 사용하면 공급온도를 2~3°C까지 낮출 수 있으므로 저온공조가 가능하며 에너지절약에 큰

† Corresponding author

Tel.: +82-61-659-3274; fax: +82-61-659-3274

E-mail address: pkw@yosu.ac.kr

도움이 될 것이다. 또한 작은 체적으로도 효율적으로 냉열을 수송할 수 있으므로 농·수·축산물의 저장에 사용되는 저온창고나 지역냉방 등에 이용하려는 관심이 집중되고 있다.⁽¹⁻⁴⁾

큰 축열밀도와 우수한 유동성을 지니고 있어 냉열수송매체로 주목받고 있는 아이스슬러리는 냉열수송밀도를 높일 수 있어 배관경의 축소, 설비의 소형화, 설비비의 절감을 도모할 수 있다. 그러나 관내에서 아이스슬러리가 미치는 영향에 대해 완전히 파악하지 못하고 있기 때문에, 관내 유동 아이스슬러리의 IPF를 높일 수 없는 등 제한적인 많은 문제를 안고 있는 실정이다.

지금까지 주로 연구되고 있는 내용으로는 수평 관내에서의 유동특성으로써 Takahashi et al.⁽⁵⁾이 저유속과 고유속인 조건에서 아이스슬러리의 유동상태를 관찰하였고, Lee et al.⁽⁶⁾이 수직 상승관과 하향관에서의 아이스슬러리 유동상태를 관찰하였다. 이외에 Masashi et al.,⁽⁷⁾ Park et al.^(8,9)에 의한 분기관 및 곡관부의 연구 등이 있지만, 아직까지 다양한 각도의 배관내 유동에 대한 연구는 미흡할 뿐 아니라 명확하게 밝혀져 있지 않은 실정이다.

따라서 본 연구에서는 유동 아이스슬러리를 필요로 하는 열교환기까지 효율적으로 수송할 수 있도록 하기 위한 배관시스템 중에서 다양한 각도를 가지는 직관부(수평관, 수직관, 경사관)를 그 대상으로 하여 관내에서의 압력손실과 IPF 변화에 대해 정리하였다.

2. 실험장치 및 방법

Fig. 1에는 본 연구에 이용된 실험장치의 개략도를 나타내었으며, 실험장치는 주로 아이스슬러리 혼합탱크, 볼텍스펌프, IPF 측정기, 차압측정용 마노미터, 유속측정부와 시험부로 구성하였다.

시험부로는 굽힘각도에 따라 수평관, 수직상승관과 30°, 45° 상향 경사관의 4종을 그 대상으로 하였으며, 일반 수도용 PVC관으로, 내경은 25 mm, 길이는 1000 mm로 하였고, 시험부의 입구측과 출구측 각 1개소씩 차압측정용 마노미터와 IPF 측정기^(10,11)를 설치하였다.

또 아이스슬러리 혼합탱크에는 냉동장치를 설치하여 내부온도가 일정온도(0~-2℃)로 유지되도록 하였으며, 혼합탱크 내에는 교반기를 설치하여, 혼합탱크 내에 투입되는 얼음입자와 물이 안정적이며 균질한 상태를 유지할 수 있도록 하였다. 또한 아이스슬러리가 일정유속으로 공급되도록 공급유속에 따라 인버터를 사용하여 펌프의 회전수를 조정하였으며, 혼합탱크 내의 아이스슬러리를 수송용 볼텍스펌프로 유입되도록 하였다.

본 실험에서는 수용액의 농도를 0, 10, 20 wt%로 조정하였는데, 수용액으로는 고순도의 프로필렌글리콜(CH₃CH(OH)CH₂OH, 분자량 76.10)과 수돗물을 이용하여 제조하면서 일정농도가 유지되도록 하였다.

본 실험에서 사용한 얼음입자는 약 -20℃인 냉동고 속에서 약 24시간에 걸쳐 얼린 수용액을

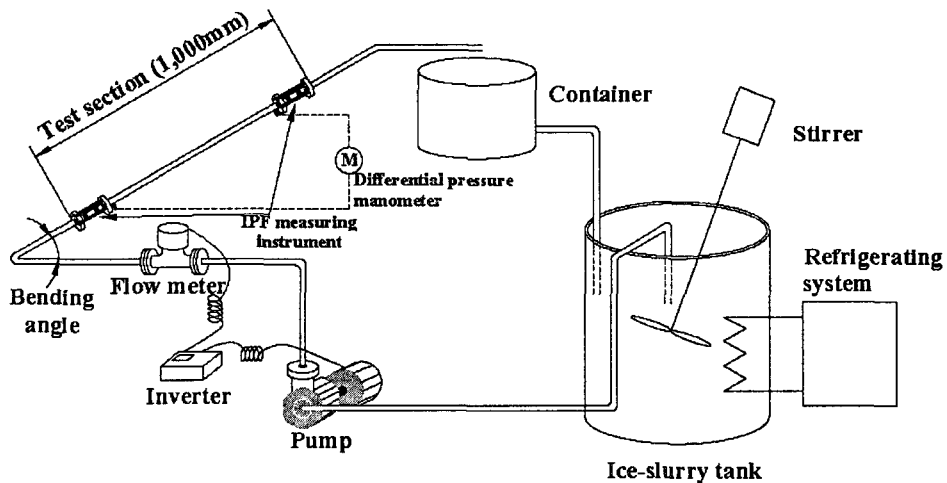


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental apparatus.

쇄빙기로 절삭한 것으로, 약 200개의 샘플을 채집하여 입자직경을 확인한 결과, 대부분이 1.7~2.2mm의 범위에 속하며, 평균 입자경은 약 1.943mm인 것을 확인하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 압력강하

3.1.1 수평관

Fig. 2는 수평관에서 여러 속도와 농도상태로 유동하는 아이스슬러리의 압력손실을 나타낸 것이다. 그림에서 수용액의 농도에 따라서는 그다지 큰 차이를 살펴볼 수 없다. 따라서 수용액의 농도는 직관부에서의 압력손실에 그다지 큰 영향을 미치지 못한다는 것을 알 수 있다. 공급 IPF_{in}에 따라서도 그다지 큰 변화는 없지만, 수용액의 농도가 짙어질수록 공급 가능한 IPF는 높아지고 있음(최대 IPF≃36%)을 알 수 있다. 이는 유속이 빠를수록 관내에서 응결하지 않고 유출되기 쉽기 때문인 것으로 생각된다.

유속에 따라서는 전체적으로 유속이 느릴수록

압력손실이 줄어들고 있음을 보여주고 있다. 이는 다른 경사관에서의 결과와는 다른 결과라 할 수 있다. 이는 직관부이기 때문에 유속이 빠를수록 관내에서의 압력손실이 증가하는 것이며, 압력손실이 낮아지는 극소점은 1.5m/s 이전의 유속일 때 나타날 것으로 예상된다.

이런 결과로부터 수평관에서는 수용액의 농도에 큰 관계없이 유속을 1.5m/s 정도로 유지하는 것이 압력손실을 가장 줄일 수 있을 것으로 생각된다. 또한 저유속에서 얼음입자가 관벽을 따라 부상함으로써 인해 압력손실이 증가하지만, 고유속에서 균질류의 흐름을 나타내어 압력손실이 감소한다는 기존의 연구결과⁽⁵⁾와도 유사한 경향이다.

3.1.2 수직상승관

Fig. 3은 수직관에서 여러 속도와 농도상태로 상승유동하는 아이스슬러리의 압력손실을 나타낸 것이다. 그림에서 수용액의 농도에 따라 살펴보면, 수용액을 첨가하지 않은 경우(0 wt%)보다 수용액을 첨가한 경우의 압력손실이 다소 적게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이는 수용액을 첨가하지 않고 물만 유동시키는 경우보다 수용액을 첨가하

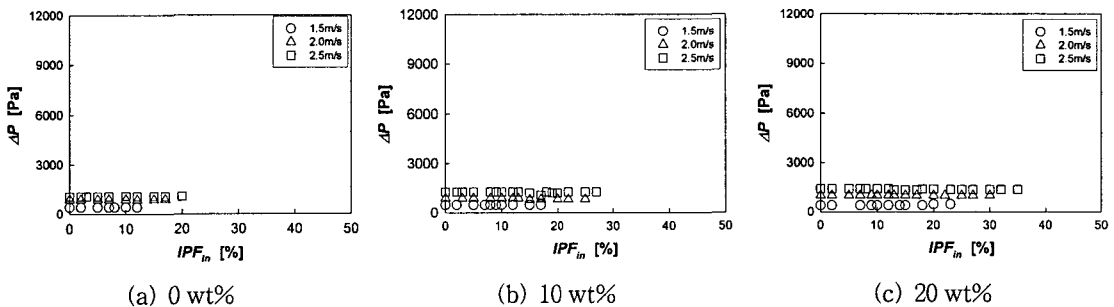


Fig. 2 Variation of pressure loss at horizontal flowing ice-slurries.

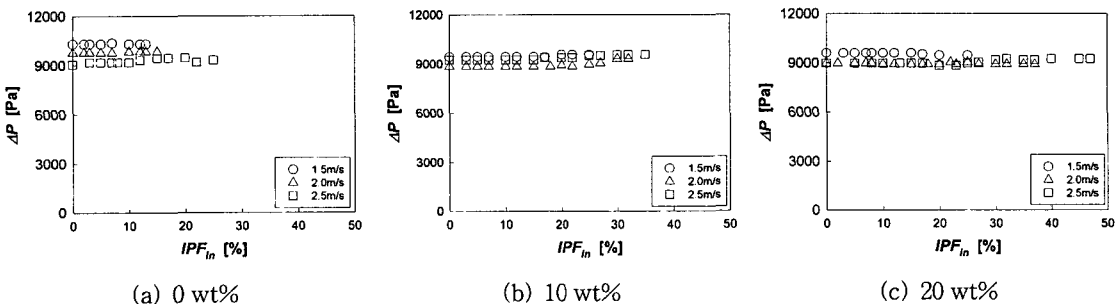


Fig. 3 Variation of pressure loss at vertical upper stream flowing ice-slurries.

였을 경우에 수용액으로 인한 유동저항이 적어지기 때문으로 생각된다. 슬러리의 공급 가능성에 있어서는 20 wt%일 때가 가장 높게(최대 IPF=48%) 나타나고 있다.

유속에 따라서는 수용액의 농도 0 wt%일 때에는 전체적으로 유속이 빠를수록 압력손실이 줄어들고 있음을 보여주고 있으며, 수용액의 농도 10 wt%일 때에는 2.0 m/s에서보다 2.5 m/s에서의 유동저항이 적어지고, 20 wt%일 때에는 유속 2.0 m/s인 경우와 2.5 m/s인 경우의 압력손실이 크게 다르지 않음을 알 수 있다. 이는 유속이 느린 상태에서는 수용액에 함유된 얼음입자가 수용액의 유동에 앞서가면서 얼음입자로 인한 관벽마찰 때문에 압력손실이 커지지만, 유속이 빨라지면 얼음입자가 수용액 유동과 함께 진행하면서 관벽과의 마찰이 감소하기 때문으로 생각된다.

이런 경향으로부터 수직상승관에서는 수용액의 농도 10 wt%일 때에는 한계유속이 2.0 m/s 정도이며, 수용액의 농도 20 wt%일 때에는 한계유속이 2.0~2.5 m/s 사이에 존재할 것으로 생각된다. 또, 수직상승관내 아이스슬러리 유동은 유속이 증가할수록 압력손실이 감소하였으나, 불안정하다는

기존의 연구결과⁽⁶⁾와도 유사한 경향이다.

3.1.3 경사관

Fig. 4와 Fig. 5는 각각 30°와 45° 경사관에서 여러 속도와 농도상태로 유동하는 아이스슬러리의 압력손실을 나타낸 것이다.

Fig. 4에서 수용액의 농도에 따라 살펴보면, 수용액을 첨가하지 않은 경우(0 wt%)에 비해 수용액을 첨가한 경우(10 wt%, 20 wt%)의 압력손실이 다소 낮게 나타나고 있음을 알 수 있고, 농도 10 wt%와 20 wt%인 경우에는 큰 차이를 보이지 않고 있다. 단지 농도 20 wt%일 때가 10 wt%일 때보다 높은 IPF까지 공급할 수 있음(최대 IPF=38%)을 볼 때 얼음입자의 공급 가능성에 있어 다소 우수한 면을 보이고 있다.

유속에 따라서는 전체적으로 그다지 큰 차이를 나타내고 있지는 않으나 유속이 빠를수록 압력손실이 적게나마 줄어들고 있음을 알 수 있다. 이는 유속이 느린 상태에서는 수용액에 함유된 얼음입자가 관벽을 따라 부상함으로써 인해 압력손실이 커지지만, 유속이 빨라지면 얼음입자가 관 중심부로 몰려 관벽 주위에는 액막이 형성되어 관

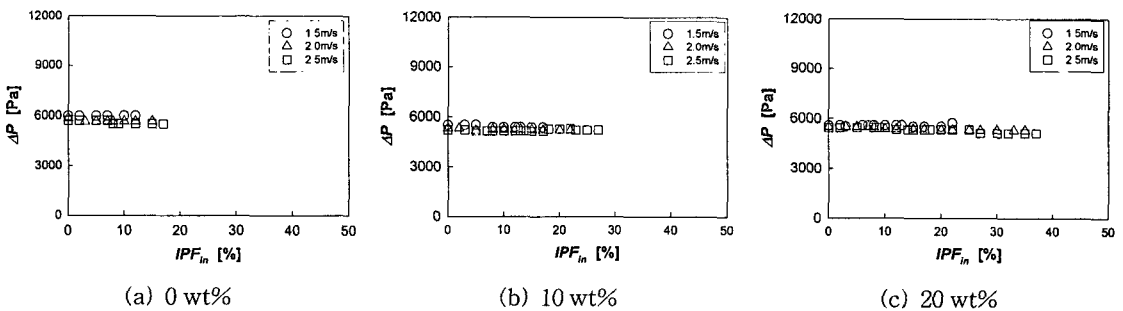


Fig. 4 Variation of pressure loss at 30° inclined flowing ice-slurries.

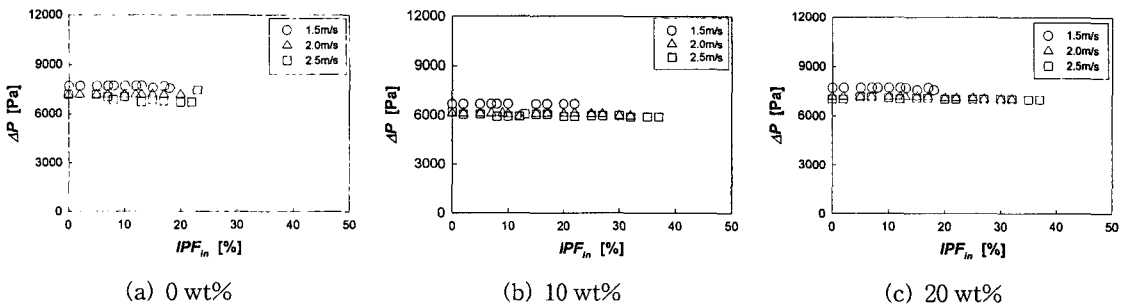


Fig. 5 Variation of pressure loss at 45° inclined flowing ice-slurries.

벽과의 마찰이 감소하기 때문으로 생각된다.

이런 경향으로 볼 때 30° 경사관에서는 수용액의 농도 10~20 wt%, 유속 2.5 m/s 정도에서 압력손실이 가장 낮을 것으로 생각된다.

Fig. 5에서 수용액의 농도에 따라 살펴보면, 수용액의 농도 10 wt%인 경우의 압력손실이 상대적으로 낮게 나타나고 있으며, 농도 0 wt%와 20 wt%인 경우에는 큰 차이를 보이지 않고 있다. 단지 농도 10~20 wt%일 때가 0 wt%일 때보다 높은 IPF까지 공급할 수 있음(최대 IPF=38%)을 볼 때 얼음입자의 공급 가능성에 있어 다소 우수한 면을 보이고 있다. 이는 수용액을 첨가하지 않고 물만 유동시키는 경우나 지나치게 많은 수용액을 첨가한 경우는 얼음입자의 공급 및 압력손실에 있어서 그다지 좋지 않음을 제시한다고 할 수 있다.

유속에 따라서는 전체적으로 유속이 빠를수록 압력손실이 줄어들고 있음을 보여주고 있으며 수용액의 농도 10 wt%와 20 wt%일 때에는 유속 2.0 m/s인 경우와 2.5 m/s인 경우의 압력손실이 크게 다르지 않음을 알 수 있다.

이런 경향으로 볼 때, 45° 경사관에서는 수용액의 농도 10 wt%, 유속 2.0~2.5 m/s일 때 압력손

실이 가장 낮아지는 것으로 생각된다.

3.2 IPF 변화

3.2.1 수평관

Fig. 6은 수평관에서 여러 속도와 농도상태로 유동하는 아이스슬러리의 IPF 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 전반적으로 수용액의 농도에 관계없이 출구의 IPF_{out}이 ±10%로 비교적 안정하게 나타남을 알 수 있다. 그러나 수용액을 첨가하지 않은 0 wt%인 경우나 수용액이 많이 함유된 20 wt%인 경우보다 농도 10 wt%인 경우에 더욱 안정된 IPF 변화를 나타내 보이고 있다. 이는 첨가된 수용액이 얼음입자를 둘러싸게 되어 유동마찰에 의한 열의 영향을 적게 받기 때문으로 판단된다. 또한 직관부 입구에는 180° 곡관이 위치하고 있어 직관부 입구에서의 IPF가 낮을 때에는 곡관부에서 일시 정체하는 영향을 민감하게 받아 유출되기 때문에 출구 IPF가 다소 높아지는 것으로 생각된다.

유속에 따라서도 다소의 차이를 나타내 보이고 있는데, 전체적으로는 2.0 m/s, 2.5 m/s일 때가 안정적이라고 할 수 있다.

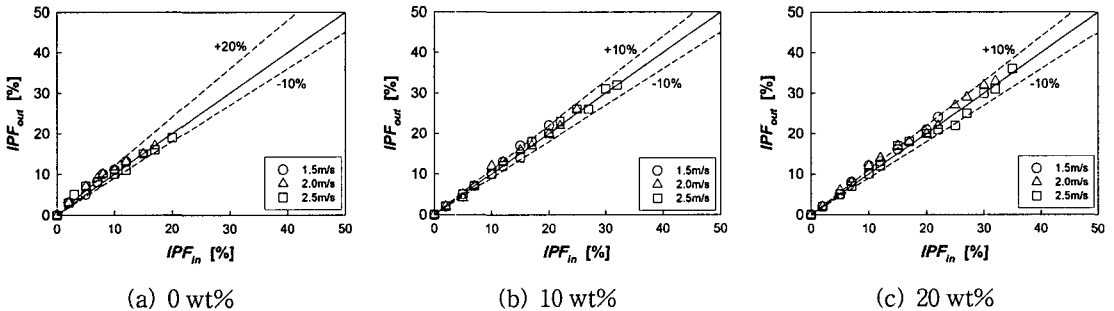


Fig. 6 Variation of IPF at horizontal flowing ice-slurries.

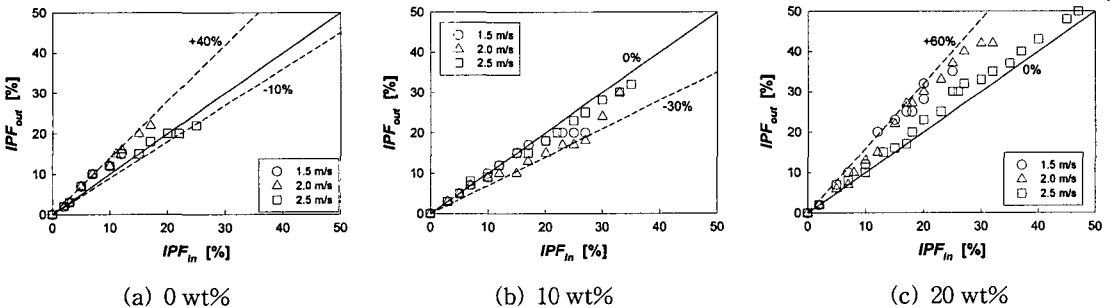


Fig. 7 Variation of IPF at vertical upper stream flowing ice-slurries.

3.2.2 수직상승관

Fig. 7은 수직관에서 여러 속도와 농도상태로 상송유동하는 아이스슬러리의 IPF 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 전반적으로 수용액의 농도에 따라 출구의 IPF_{out}가 낮게 또는 높게 나타남을 알 수 있다. 그러나 수용액을 첨가하지 않은 0 wt% 인 경우나 수용액이 많이 함유된 20 wt%인 경우보다 농도 10 wt%인 경우에 비교적 안정된 IPF 변화를 나타내 보이고 있다. 그러나 농도 10 wt%에서도 공급 IPF_{in}이 20%를 넘으면서부터는 출구의 IPF_{out}이 다소 낮게 나타나고 있으며, 전체적으로 매우 불안정한 IPF 변화를 보이고 있다.

유속에 따라서도 다소의 차이를 나타내 보이고 있는데, 전체적으로는 2.5m/s일 때가 가장 안정적이라고 할 수 있다. 즉, 유속이 느릴수록 불안정한 출구 IPF를 나타내고 있는 것은 수직으로 상승하는 유동으로 인해 얼음입자가 함께 유동하지 못하고 하부에서 일시 정체하기 때문이지만, 20 wt%인 경우에는 수용액의 점도가 증가되어 미세한 얼음입자가 수용액과 함께 일시에 유출하기 때문일 것으로 생각된다. 그러나 본 연구에서는 ice slurry의 순간적인 공급에 따른 영향을 살펴

보았기 때문에 공급이 동일한 상태로 지속된다면 본 실험의 결과와 반대의 경향이 나타날 수도 있을 것이다.

3.2.3 경사관

Fig. 8과 Fig. 9는 각각 30°와 45° 경사관에서 여러 속도와 농도상태로 유동하는 아이스슬러리의 IPF 변화를 나타낸 것이다.

Fig. 8에서 전반적으로 수용액의 농도에 관계없이 IPF_{out}이 다소 높게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이는 다소 급격한 굽힘으로 인해 공급되는 얼음입자가 일시 정체하였다가 유출되는 현상이 반복되기 때문으로 생각된다.

유속에 따라서는 그다지 큰 차이를 보이지는 않고 있지만, 비교적 유속 2.5m/s일 때 안정적인 IPF 수송특성을 나타내고 있다.

Fig. 9에서 전반적으로 수용액의 농도에 관계없이 출구의 IPF_{out}이 +30~ -40% 정도의 범위에 있음을 알 수 있다. 그러나 수용액의 농도 10 wt%에서 가장 안정된 IPF 수송특성을 지니고 있음을 알 수 있으나, 농도 10 wt%에서도 공급 IPF_{in}이 25%를 넘으면서부터는 출구의 IPF_{out}이 다소 높

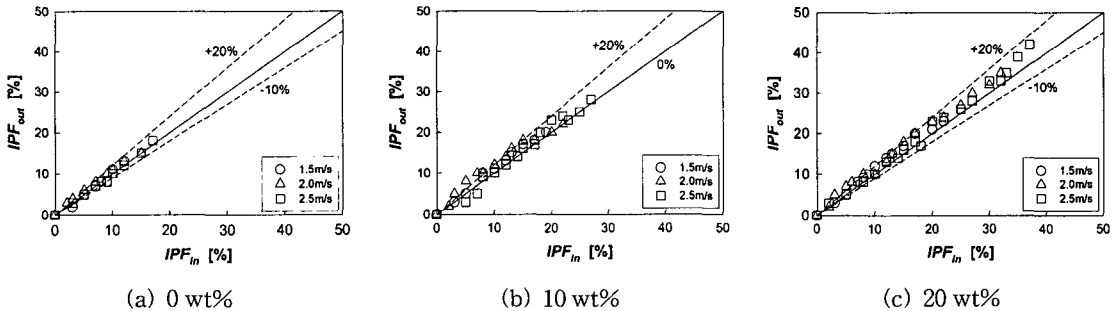


Fig. 8 Variation of IPF at 30° inclined flowing ice-slurries.

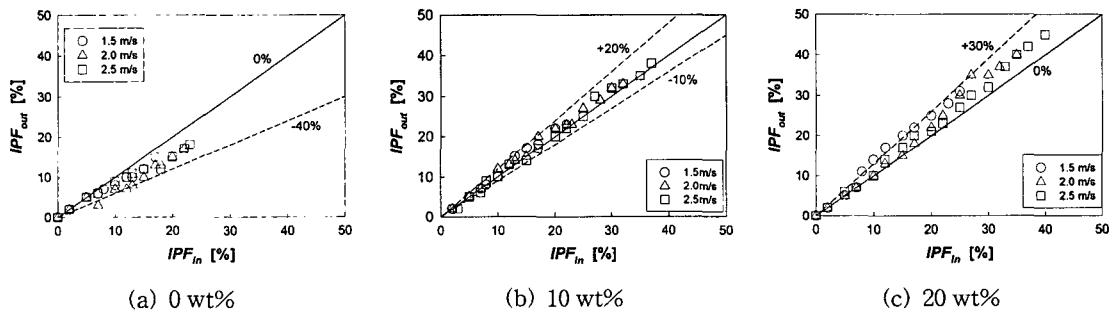


Fig. 9 Variation of IPF at 45° inclined flowing ice-slurries.

게 나타나고 있다.

유속에 따라서는 그다지 큰 차이를 보이지는 않고 있지만, 수용액의 농도 0 wt%일 때에는 1.5 m/s, 10 wt%일 때에는 2.5 m/s, 20 wt%일 때에는 입구 IPF_{in} 이 증가할수록 2.0 m/s에서 2.5 m/s로 달라지면서 안정적인 IPF 수송특성을 나타내고 있다. 그러나 전체적으로는 농도 10 wt%, 유속 2.0 m/s일 때가 가장 안정적인 IPF로 슬러리를 수송하는 것으로 판단된다.

4. 결 론

(1) 경사각도에 따라서는 수직상승관에서 압력 손실이 가장 높으며, 45°와 30° 경사관, 수평관의 순으로 압력손실이 낮아졌다.

(2) 수용액의 농도에 따라서는 30° 경사관에서 10~20 wt%, 45° 경사관과 수직상승관에서 10 wt% 일 때 압력손실이 가장 낮게 나타났으며, 수평관에서는 농도에 큰 영향을 받지 않았다. 그러나 전체적으로는 10 wt%일 때의 압력손실이 비교적 낮았다.

(3) 유속에 따라서는 30° 경사관과 수직상승관에서 2.5 m/s, 45° 경사관에서 2.0~2.5 m/s, 수평관에서 1.5 m/s일 때의 압력손실이 낮았으며, 전체적으로 2.0 m/s일 때의 압력손실이 가장 낮은 것으로 파악된다.

(4) 입구로 공급되는 얼음입자의 IPF는 경사각도에 따라 다소 다른 경향을 보였으나, 전체적으로 수용액의 농도 10 wt%, 유속 2.0~2.5 m/s일 때 비교적 안정하게 유출되는 것을 알 수 있다. 그러나 수직상승관에서는 매우 불안정한 IPF 변화를 나타내고 있다.

참고문헌

- Lee, D. W., 2001, Cold heat transportation using ice slurry, Mag., SAREK, Vol. 30, No. 12, pp. 8-14.
- Yanagihara, R., 1998, Evaluation of ice storage systems, Japan Asso. Refrig., Vol. 73, No. 844, pp. 58-63.
- Kim, B. S., Lee, Y. P., Yoon, S. Y. and Lee, J. H., 1997, A study on ice-slurry production by water spray, Korean J. Air-Cond. Refrig. Eng., Vol. 9, No. 2, pp. 134-143.
- Park, Y. H., Hyun, M. T. and Lee, D. W., 2000, Experimental study on the freezing conditions in a ice-making tube using flowing sub-cooled water, Korea Soc. Energy Eng., Vol. 9, No. 3, pp. 178-183.
- Takahashi, H., Masuyama, T. and Kawashima, T., 1992, Experimental study on flow characteristics of ice-water slurries in a horizontal pipe, Japanese J. Resource · Material, Vol. 108, No. 5, pp. 357-363.
- Lee, D. W., Yoon, C. I. and Yoon, E. S., 2002, Experimental study on flow patterns and pressure drop characteristics of ice slurry in small size pipe(1, 2), Korean J. Air-Cond. Refrig. Eng., Vol. 14, No. 5, pp. 385-397.
- Momota, M., Imai, T., Ibamoto, T., Murakami, H., Iwamiya, M. and Yamada, H., 1997, Fundamental study on transportation system using ice/water (Part 4), SHASE annual conference, pp. 1121-1124.
- Park, K. W., Choi, H. W., Roh, G. S. and Jeong, J. C., 2003, Experimental study on transformation of IPF and pressure drop in branches with ice slurry, J. Korean Soc. Marine Eng., Vol. 27, No. 2, pp. 272-279.
- Park, K. W., Kim, K. M., Roh, G. S. and Jeong, J. C., 2003, Flowing characteristics of ice-slurry in elbows with various angle, summer annual conference, SAREK, p. 224.
- Kitahara, T. and Shirakashi, M., 1993, Hydraulic conveying of snow and ice, Setpyo, Vol. 55, No. 4, pp. 307-315.
- Park, K. W., Oh, H. K., Inaba, H., Horibe, A., Haruki, N. and Miura, H., 2001, Influence of control pressure and concentration of water solution at continuous ice making in a tube, Korean J. Air-Cond. Refrig. Eng., Vol. 13, No. 2, pp. 1236-1244.