

## PIV에 의한 원관내 Ice Slurry의 유동계측

황태규† · 도덕희\* · 김동혁\* · 오 철\*\* · 홍성대\*\*\* · 박성룡\*\*\*\*  
(원고접수일 : 2004년 12월 20일, 심사완료일 : 2005년 1월 7일)

### PIV Measurement on Ice Slurry Pipe Flow

Tae-Gyu Hwang† · Deog-Hee Doh\* · Dong-Hyuk Kim\* · Cheol Oh\*\* ·  
Seong-Dae Hong\*\*\* · Seong-Ryong Park\*\*\*\*

**Abstract** : Experimental studies on the characteristics of ice slurry flows in a circular pipe is rare due to the deficiency of conventional measurement techniques. In this report, the flow characteristics are quantitatively investigated by the use of PIV technique concerning the Ice Packing Factor(IPF) and the power changes of pump motor. It was experimentally verified that the power loss does not increase any more at a certain IPF value.

**Key words** : Particle imaging velocimetry(입자영상유속계), Ice packing factor(얼음충진율), Circular pipe(원관)

#### 기호설명

$\Upsilon$  : 중량 [kg]  
 $f$  : 제 1 시각 영상밝기정보  
 $g$  : 제 2 시각 영상밝기정보  
IPF : 얼음충진율 [%]  
 $U_D$  : 관직경에 대한 대표속도  
 $U_{max}$  : 원형관 중심에서의 최대속도

#### 하첨자

$ice$  : 얼음  
 $w$  : 물

#### 1. 서 론

21세기의 환경문제와 에너지 절약 문제가 산업 전 분야에 걸쳐 주요 연구과제로 대두되고 있다. 이에 따라 대체냉매의 개발이 절실히 요구되고 있다. 최근, 빙축열을 이용한 냉방시스템의 실용화를 위한 연구가 보고 되고 있다. 빙축열시스템은 심야의 값싼 전력을 이용하여 야간동안 얼음을 가공한 뒤 이를 주간에 슬러리형태로 냉방시스템에 직접 공급하기 때문에 환경 및 인체에 영향이 전혀 없으며, 매우 경제적인 냉방시스템이다. 빙축

† 책임저자(한국해양대 대학원 기계공학과), E-mail : andrew@bada.hhu.ac.kr, Tel : 051)410-4364  
\* 한국해양대(기계정보공학부)  
\*\* 한국해양대(기관시스템공학부)  
\*\*\* 한빛파워서비스(주)  
\*\*\*\* 한국에너지기술연구원(미활용에너지연구센터)

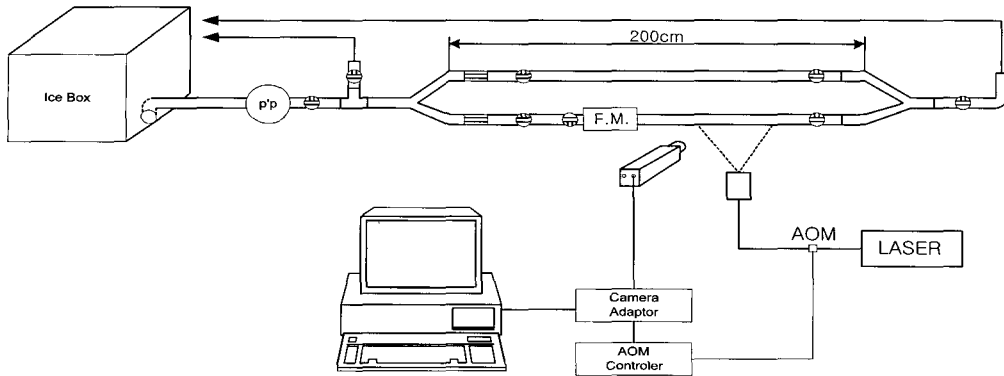


Fig. 1 Overall PIV system for ice slurry flows

열시스템의 설계에 있어서 중요하게 고려되는 것으로서 얼음 충전율(IPF)에 따른 펌핑구동력의 변화 및 시스템 내부의 유동특성이나 이에 대한 연구보고는 적절한 계측법의 부재로 인하여 거의 보고 된 바가 없다고 할 수 있다. 최근, 유동가시화를 위한 입자를 유동장에 직접 투입하여 유동장의 속도분포를 얻어 낼 수 있는 PIV<sup>(1)</sup>계측법은 유동장 전체에 걸쳐서 속도분포를 얻어 낼 수 있다는 점, 시간변화에 따른 속도분포를 얻어 낼 수 있다는 점으로부터 공학의 다양한 분야에 적용이 되고 있다.

Inaba 등<sup>(2)</sup>은 전기전도도법에 의한 IPF측정기를 도입하여 관내에 흐르는 얼음의 양을 계측함으로써 빙축열시스템의 설계자료로 활용하고 있다. 이 방법은 관내 IPF에 따른 관내 유동특성을 조사 할 수 없다는 점이 단점으로 지적된다. 즉, IPF에 따른 관내 압력강하특성과 유동구조의 조사에는 적절치 못하다는 단점을 가지고 있다. Durand<sup>(3)</sup>는 플러그 유동조건에서 층류의 슬러리 유동의 마찰항력은 단일유체만 흐를 때보다 감소함을 밝혔다. 그러나, 슬러리유동의 마찰항력이 감소하는 유동의 구조에 관한 연구는 지금까지 없었다. 물-얼음 슬러리류에 대한 유동구조에 관한 연구도 마찬가지로 같은 맥락에서 없다고 하겠다. 본 연구에서는 PIV계측기법을 이용하여 IPF의 변화에 따른 관내유동특성을 조사함으로써 물-얼음슬러리 유동에서의 마찰항력감소와 관련된 연구를 수행하고자 한다.

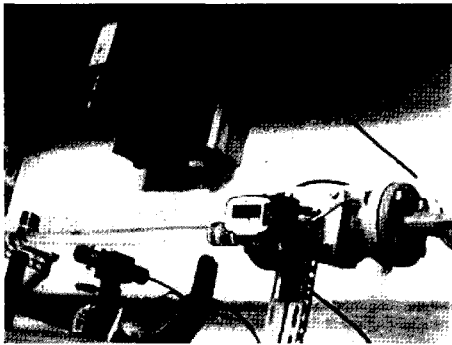
## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

실험에 사용된 펌프의 정격사양은 Table 1과 같으며, 실험장치는 Fig. 1과 같이 물-얼음 슬러리 순환펌프(PM-250PM, 윌로펌프(주)), 질량유량계(LS5377-23), 물-얼음 슬러리 탱크, PIV계측시스템 등으로 구성되어 있다. 원심펌프는 물-얼음을 슬러리 상태로 순환시키며, 질량유량계에서 이를 측정한다. 온도의 계측을 위해서는 디지털 감온센서(KM330)를 사용하였다. PIV계측시스템부는 광원(아르곤레이저) 및 AOM<sup>(4), (5)</sup>시스템, 카메라부 및 영상처리부로 구성된다. 이 때 카메라와 레이저 광원의 설치는 Fig. 2와 같으며, 측정영역은 외경이 35mm( $t=2\text{mm}$ ) ( $D=31\text{mm}$ )인 아크릴원관의 입구로부터 20D의 위치로 설정하였으며 크기는 가로 및 세로를 각각 1.5D와 1.0D로 하였다. 관내 얼음-물의 온도는 탱크내부의 온도로 정의하였다. Ice Slurry를 제조하기 위하여 전기 빙삭기(SIS-8)를 사용하였다. 빙삭기로 약 1~2mm 직경의 얼음덩이로 만든 뒤 이들을 수온 약 11°C의 물에 투입하여 0°C가 될 때까지 기다린 다음, (이때, IPF = 0%로 정의) 이후 추가로 투입되는 얼음의 양을  $\gamma_{ice}$ , 초기 물의 양을  $\gamma_w$ 로 하여 식 (1)과 같이 IPF에 대한 경험적 계산식<sup>(2)</sup>을 적용하였다.

**Table 1 Specification of motor pump.**

Model	PM-250PM
Voltage [V]	220
Power [W]	410
Total Head [m]	8



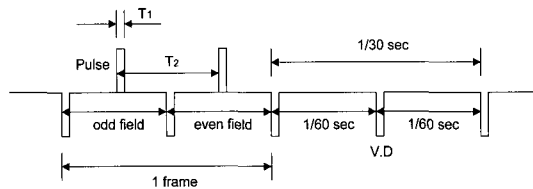
**Fig. 2 Picture of test section for PIV measurement.**

$$IPF = \frac{\gamma_{ice}}{1.5 \gamma_w + \gamma_{ice}} \times 100 \quad (1)$$

2.2 데이터 처리

2차원의 속도계측을 위해 Probe(원통형렌즈, 10W용)를 이용하여 두께 1-3mm전후의 Laser sheet light를 형성시켰다. 실험 영상은 NTSC 방식의 CCD카메라(SSC-M370)와 이미지 그라버(DT 64)를 사용하여 저장하였으며, 비교적 빠른 유속을 계측하기 위하여 AOM을 사용하여 광원의 펄스를 제어하였다. Fig. 3은 카메라와 레이저광원을 제어하기 위한 AOM 신호와의 상관관계를 나타낸다. 한 장(1 frame)의 이미지는 두 개의 필드(field)이미지로 나누어지며, T<sub>1</sub>은 필드에서의 광원에 대한 노출시간이며, T<sub>2</sub>는 필드 이미지 사이의 시간간격으로 이것에 의해서 실제 유속을 구할 수 있다. 본 실험에서는 T<sub>2</sub>를 0.007sec로 설정하였다. 속도계측에는 상용소프트<sup>[5]</sup> (Thinker's EYES)를 사용하였으며 이는 근본적으로 계조치상호상관법<sup>[6]</sup>을 적용하고 있다. 이 방법은 미소시간동안 유동장의 화상의 계조패턴은 크게 변화하지 않는다고 가정하여 제1프레임(1st

image frame)에서의 상관영역내의 계조치 분포와 미소시간 후의 제2프레임(2nd image frame)에서의 계조치 분포는 유사한 특성을 나타내므로 두 프레임간의 정해진 범위 내에서 임의의 위치를 중심으로 같은 크기를 갖는 영역과의 계조치에 대하여 상호상관 계수 값을 구한 뒤 그 중 가장 큰 값을 동일입자군의 이동위치로 간주함으로써 속도 벡터를 얻어내는 방법이다. 식 (2)는 두 프레임간의 상호상관계수를 구하는 식을 나타낸다.



**Fig. 3 NTSC(CCD camera signal) signal and AOM signal.**

$$c_{fg} = \frac{\sum_{i=1}^{n^2} (f_i - \bar{f}_i) (g_i - \bar{g}_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n^2} (f_i - \bar{f}_i)^2 \sum_{i=1}^{n^2} (g_i - \bar{g}_i)^2}} \quad (2)$$

여기서  $f_i, g_i$  는 상관영역내의 각 픽셀의 계조치를 의미하며 -는 연속화상에 대한 시간평균을 의미한다. 일반적으로 화상의 데이터를 취급할 때 벡터의 중점을 결정함에 있어서 픽셀해상도에 의존하는 경우에는 상하좌우방향으로 최대 ±1픽셀의 불확실성분이 발생하게 된다. 따라서 본 연구에서는 측정 픽셀의 좌우상하 픽셀의 밝기정보를 이용하여 2차곡선에 fitting함으로써 1픽셀 이내까지 중점을 결정할 수 있는 서브픽셀보간법<sup>[7]</sup>을 도입하였다. 또한 얻어진 속도벡터는 상관영역의 크기나 탐색영역의 크기에 따라서 에러벡터를 측정할 수도 있는데 본 연구에서는 유동의 연속방정식에 의거한 에러벡터법<sup>[8]</sup>을 도입하여 오류벡터를 최대한 줄였다.

3. 실험결과 및 고찰

Table 2는 실험조건을 나타내며, Table 중의 A는 펌프의 모터에 부가된 전력을 알기 위하여

Table 과 같은 조건에서 실제로 계측한 전류의 크기를 나타낸다. Fig. 4는 식 (1)로 정의한 IPF가 0%일 때의 실제 이미지로써 슬러리의 유동을 보여주고 있다. Fig. 5는 IPF 0%에서 유속이 0.1m/s일 때 PIV계측법에 의하여 얻어진 순간속도분포 및 프로파일을 나타낸 것이며, Fig. 6은 약 6.5초에 해당하는 196 시각분의 순간속도분포들의 평균속도프로파일을 나타내고 있다. 이들 평균속도장으로부터 압력강하손실 등을 계산하였다.

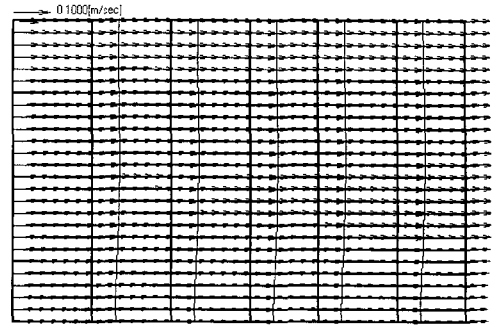


Fig. 6 Mean velocity profile.

Table 2 Experimental conditions.

유속 [m/sec]Re		IPF			
		0%	10%	15%	20%
0.10	motor's Amper[A]	1.6	1.62	1.68	1.7
1744					
0.20	motor's Amper[A]	1.6	1.62	1.68	1.7
3488					
0.30	motor's Amper[A]	1.6	1.62	1.68	1.7
5232					

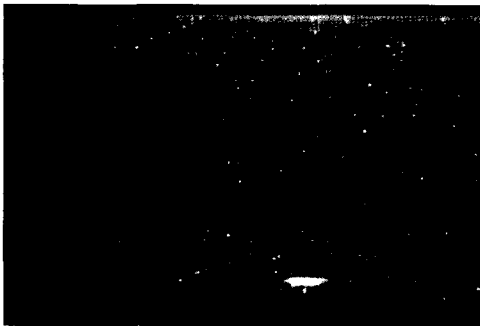


Fig. 4 Raw image of ice slurry flow at t=t0.

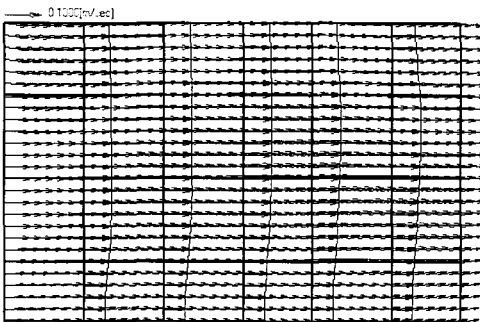


Fig. 5 Instantaneous velocity profile at t=t0.

Fig. 7은 IPF의 증가에 따른 펌프모터의 소비전력을 나타내고 있다. IPF가 10~15%구간에서 모터의 구동동력이 급격하게 증가함을 알 수 있으며, 20%이상에서는 10%~15%사이의 동력 증가량보다 더 이상의 증가가 없음을 추정할 수 있다. 동력의 급격한 증가는 IPF가 일정량 이상이 되면 슬러리가 서로 엉기어 덩어리로 뭉쳐서 점성의 영향이 커짐에 기인하는 것으로 실제 눈으로 확인한 바로는 급격히 엉키는 현상이 목격되었다. Fig. 8은 얼음슬러리유동이 0°C에서의 유동이므로 레이놀즈수를 단일 액상으로 간주하여 정의하였을 때, IPF에 대한 레이놀즈수의 증가에 따른 모터의 동력변화를 나타낸다. Table 2 및 Fig. 7과 Fig. 8에서 알 수 있듯이 유속(유량)의 제어는 펌프와 연결된 바이패스 밸브에 의해서 조절하였으므로, Re수 증가에 따라 펌프의 소비전력변화는 변화가 없고 다만 IPF의 증가에 따라 소비전력증가가 있음을 알 수 있다. 이는 IPF를 증가시키면 관내 유속이 저하되는데, 이를 초기유속(IPF 0%의 유속)과 동일하게 유지시키기 위해서 펌프구동동력을 증가시킨 결과와 같다고 볼 수 있다. 즉, Fig. 8의 IPF의 변화에 따른 펌프동력의 변화특성 고려가 공학적 의의를 지닌다고 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 PIV계측결과를 이용하여 IPF 변화에 따른 분지관(내경:31mm)내 얼음슬러리유동의 특성조사 및 압력강하에 대한 정성적 평가를 수행하였다. 펌프를 이용한 관내유동에 있어서 압력강하는 내부유동유지 및 펌프소비동력을 결정하는 중요한 파라미터이다. 이를 위해서 마찰인자(Friction factor)를 구하여야 한다. 본 연구

에서의 Re 수가 층류역 및 천이역에 속하지만 미소얼음덩이의 존재에 따른 유동의 불안정성을 고려하여 마찰인자는 Colebrook에 의해서 제시된 상관식<sup>(9)</sup> (3)을 사용하였다. 초기 마찰계수( $f_{old}$ )를 구하기 위하여  $\epsilon/D$ 가 충분히 작다는 전제조건 하에서 Blasius에 의한 상관식 (4)를 사용하였다. 사용된 아크릴관의 평균조도( $\epsilon$ )는 0.0015mm이며, 관직경(D)은 31mm이다. 식 (3)을 반복계산함으로써  $f_{new}$ 를 구할 수 있으며, 그 결과는 Fig. 9와 같다. 즉 레이놀즈수( $U_D$ )의 증가에 따른 마찰인자의 감소현상은 원형관 벽면에서의 마찰에 의한 손실동력의 감소를 의미한다.

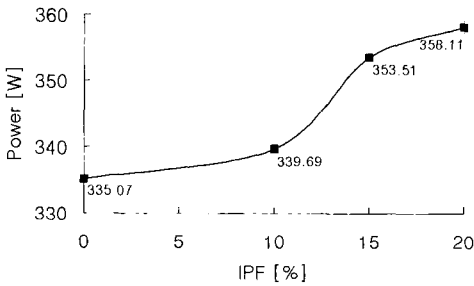


Fig. 7 Pump power vs IPF.

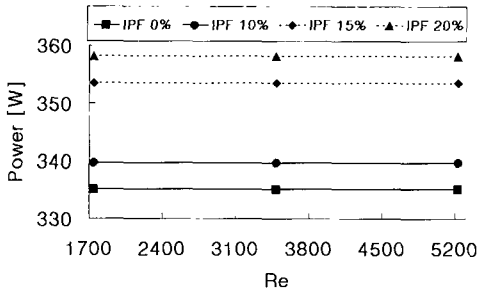


Fig. 8 Power vs Re number for various IPF.

$$f_{*w} = \frac{0.25}{\log \left[ \left( \frac{\epsilon}{D} \right) / 3.7 + \frac{2.51}{Re \cdot \sqrt{f_{old}}} \right]^2} \quad (3)$$

$$f_{old} \approx \frac{0.3164}{Re^{0.25}} \quad (4)$$

식(3)의 결과를 식(5)와 식(6)에 각각 대입함으로써 관내 에너지 손실( $gh_L$ )과 압력손실( $\Delta P_L$ )을 구할 수 있다. 이 때 물성치로는 0°C 물의 밀도 ( $\rho=1000\text{kg/m}^3$ )와 측정영역에 해당하는 관길이

( $L=1\text{m}$ )를 사용하였다. Fig. 10은 레이놀즈수와 관내 압력손실(에너지 손실)을 나타내고 있으며, 레이놀즈수가 증가함에 따라 압력 손실이 증가하는 경향으로 보아 이론적으로 타당한 결과임을 알 수 있으며 에너지 손실은 이와 동일한 비율기로 발생됨이 예측 된다 하겠다. 한편, IPF변화에 따른 관벽 근처의 운동량감소 특성을 조사하기 위하여 배제두께를 평가하였다. 경계층 방해와 유선의 배제효과는 관벽면 상에서의 속도분포형상에서 배제두께( $\delta^*$ )를 계산함으로써 얻어지는데, 배제두께( $\delta^*$ ), 운동량두께( $\theta$ )와 형상계수(H)는 아래와 같은 식(8), (9), (10)을 사용하였으며, n은 일반적으로 알려져 있는 식(7)과 같은 먹승법칙에 의하여 구할 수 있게 되는데 변수에 해당되는 f는 전술의 식(3)에 의거하여 구하였다.

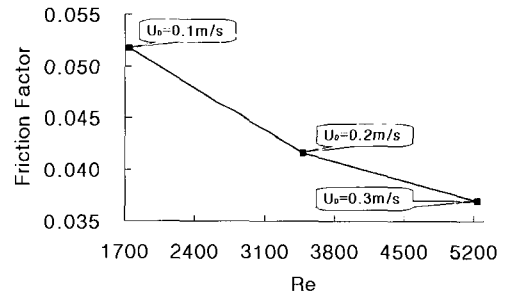


Fig. 9 Friction factor vs Re

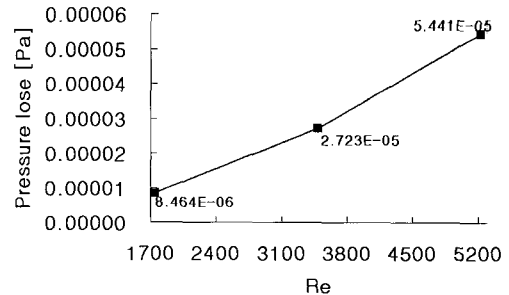


Fig. 10 Pressure loss( $\Delta P_L$ ) vs Re

$$gh_L = f * \left( \frac{L}{D} \right) * \left( \frac{V^2}{2} \right) \quad (5)$$

$$\Delta P = f * \left( \frac{L}{D} \right) * \left( \frac{\rho V^2}{2} \right) \quad (6)$$

$$\frac{U_r}{U_{max}} = \left(\frac{y}{R}\right)^{\frac{1}{n}} = \left(\frac{R-r}{R}\right)^{\frac{1}{n}} \quad (7)$$

$$n \approx \frac{1}{f}$$

$$\delta^* = \int_0^R \left(1 - \frac{U_r}{U_{max}}\right) dy = \int_0^R \left(1 - \frac{y}{R}\right)^{\frac{1}{n}} dy$$

$$= \frac{R}{n+1} \quad (8)$$

$$\Theta = \int_0^R \frac{U_r}{U_{max}} \left(1 - \frac{U_r}{U_{max}}\right) dy$$

$$= \int_0^R \left[\left(\frac{y}{R}\right)^{\frac{1}{n}} - \left(\frac{y}{R}\right)^{\frac{2}{n}}\right] dy \quad (9)$$

$$= \left[\frac{n}{(n+1)*(n+2)}\right] * R$$

$$H = \frac{\delta^*}{\Theta} \quad (10)$$

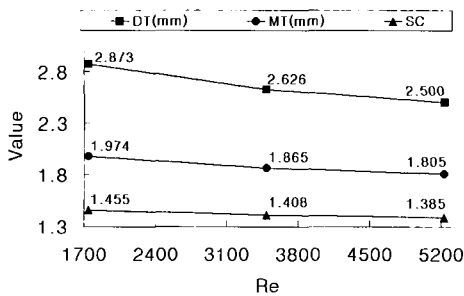


Fig. 11 Relation of Re and  $\delta^*$ ,  $\Theta$ , H.

Fig. 11은 Re의 증가에 따른 배제두께( $\delta^*$ , DT), 운동량두께( $\Theta$ , MT)와 형상계수(H, SC)변화를 나타낸다. Re증가(혹은  $U_d$ )할수록 배제두께가 감소하는 것을 확인할 수 있으며, 배제두께가 감소하는 만큼 벽면에서의 마찰항력의 감소로 이루어진다고 볼 수 있다.

Fig. 12는 동일한 대표속도( $U_d$ )에서의 IPF에 따른 관내 중심속도( $U_{max}$ )를 나타낸 것으로 IPF 0%에서 10%구간에서는  $U_d$ 와 관계없이  $U_{max}$ 가 급격히 감소하며, 이후 IPF의 변화에 관계없이 일정한  $U_{max}$ 를 이루는 것을 확인할 수 있다. 아울러  $U_d$ 가 클수록 IPF 0%에서 10%를 증가할수록 급격한  $U_{max}$ 의 감소를 보이고 있다. 한편, IPF 0%에서의  $U_d$ (=유량/단면)에 따른  $U_{max}$ 의 변화를 살펴보면,  $U_d$ 가 증가할수록  $U_{max}$ 와  $U_d$ 와의 차

이가 커짐을 확인할 수 있다. 이는  $U_d$ 가 증가함에 따라 관 벽면근처에서의 마찰항력(전단력)은 감소하나, 관내 얼음슬러리간의 충돌운동량이 증가하여 오히려 원활한 유동을 저해하는 현상을 일으키고 있음을 시사한다고 볼 수 있다. 또한, 얼음충진량이 특정 한도(IPF 10%)에 도달하게 되면,  $U_d$ 에 관계없이  $U_{max}$ 가 일정하게 유지됨을 확인되었다. 이는 아이스 슬러리 유동에 있어 펌프에 대한 최적의 IPF가 있음을 의미한다. 즉 필요이상의 얼음량 증가는 이를 관내로 이송하는데 필요한 펌프구동 전력만 증가시킬 뿐 슬러리 잠열에 의한 냉방효율의 증가와는 무관함을 시사한다고 볼 수 있다.

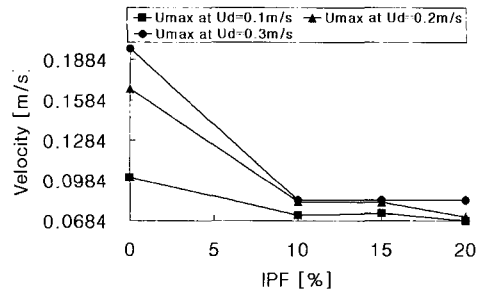


Fig. 12 Relation between  $U_{max}$  and IPF.

Fig. 13 (a)~(c)는  $U_d$ 가 각각 0.1, 0.2, 0.3m/sec일 때 IPF에 따른 속도프로파일의 비교를 나타낸 것으로, R은 원관의 반경,  $U_{max}$ 는 원관의 중심에서의 streamwise방향(x방향) 속도크기를,  $U_r$ 은 중심으로부터 반경 r인 위치에서의 streamwise방향속도크기를 나타낸다. IPF 변화에 의한 관벽면에서의 속도변화는  $U_d$ 가 증가할수록  $U_{max}$ 에 근접함을 확인할 수 있다. 이는 Fig. 12에 의해서 알 수 있듯이 얼음 충전량이 특정량 이상이 되면  $U_{max}$  속도가  $U_d$ 와 관계없이 낮게 유지되며, 관벽면에서는 마찰항력의 감소로 벽면유속이 증가함으로 상대적으로 벽면유속과  $U_{max}$ 유속간의 차가 줄어든 것이다. 따라서 얼음 잠열에 의한 냉각효율의 향상은 대표속도  $U_d$ 와 얼음충진량 IPF에 영향을 받으며, 본 실험 결과  $U_d=0.3m/s$  일 때 IPF 10%일 때가 얼음 잠열을 최대한 사용할 수 있는 조건으로 사료된다. 동일유속에 대해서 필요이상의 IPF의 증가는 펌프구동

동력의 증가를 초래하므로 오히려 비효율적이다.

나지 않은 것으로 사료된다. 그러나 관직경이 비교적 작은 분지관에서는 본 연구의 결과가 적용될 수 있을 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 BK21사업의 일환으로 수행되었음.

4. 결 론

PIV계측기술을 이용하여 Ice Slurry의 IPF에 따른 원관내부의 유동특성을 조사할 수 있었으며 그 과정에서 다음과 같은 내용을 정리할 수 있었다.

IPF가 10%정도에서 Motor의 구동동력이 급격히 증가했다가 15%이후에서는 그다지 뚜렷한 증가를 보이지 않았다. 이는 아이스 슬러리 유동에 있어 펌프에 대한 최적의 IPF가 있음을 의미한다고 볼 수 있다.

IPF를 일정히 유지하고 유량을 증가시켰을 때 레이놀즈수의 증가에 따른 모터의 구동동력의 변화는 그다지 나타나지 않았다.

관직경이 작은 관계로 분지관내 아이스슬러리의 유동의 경우 부력에 의한 영향보다는 유속의 영향이 지배적이어서 유속의 분포는 관축을 중심으로 대칭적이었다.

PIV 계측 기술에 의해서 얼음 잠열을 최대한으로 이용할 수 있는 최적의 조건인 IPF 10%와  $U_d=0.3m/s$ 를 확인할 수 있었으며 추후 냉방부하에 따른 최적속도를 구할 필요가 있을 것으로 사료된다.

PIV로부터 구한 속도로부터 실험상관식에 의하여 구한 압력강하특성은 물리적으로 합당한 결과를 보였다. 압력강하특성은 얼음슬러리 유동에 있어서 중요한 인자로서 추후 압력에 대한 동시측정을 수행하고자 한다.

본 연구에서는 수평관의 경우에 한하고 있지만 추후 연구에서는 수직관의 경우에 대해서도 조사하고자 한다.

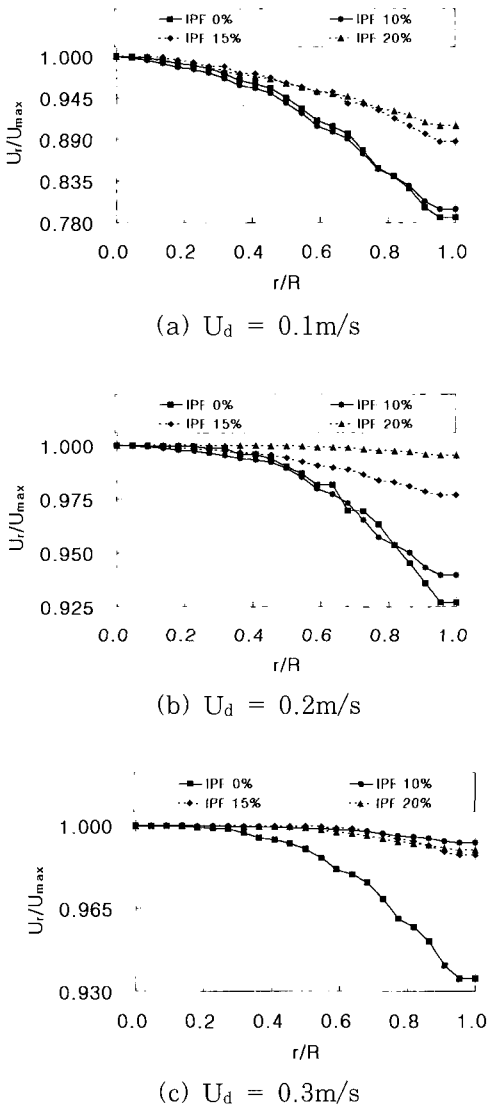


Fig. 13 Comparison of velocity profiles for various IPF.

한편 실용화되어 있는 아이스슬러리의 관 유동의 경우 부력에 의한 관 상부에 얼음슬러리층이 존재함으로 인하여 관직경이 증가함에 따른 얼음슬러리층과 물사이의 전단유동특성에 따른 유동의 특성이 다를 것으로 알려져 있는데 본 연구에서는 관의 반경방향으로 고른 분포를 보였다. 이는 관 직경이 상대적으로 작은 관계로 부력영향이 나타

## 참고문헌

- [1] Adrian, R.J., "Particle-Imaging Techniques for Experimental Fluid Mechanics", Annu. Rev. Fluid Mech., Vol.23, pp. 261-304, 1991.
- [2] Inaba, H., Horibe, A., Ozaki, K. and Yokota M., "Study of cold heat energy release characteristics of flowing ice water slurry in a pipe", Trans. of the JSRAE, Vol.14, No.3, pp. 265-276, 1997.
- [3] Durand, R., "Basic relationships of the transportation of solids in pipes", Proc. Minn. Hydraulics Conv., pp. 89-99, 1953.
- [4] Kobayashi, T., Saga, T., Haeno, T. and Tsuda, N., "Development of a Real-Time Velocimetry Measurement System for High Reynolds Fluid Flow Using a Digital Image Processing Design", ASME FED-Vol.128, pp.1220-1227, 1991.
- [5] TNTech Co. Ltd, Thinker's EYES Ver. 1.2.
- [6] 木村, 高森, 井上, "相關を利用した流れの画像計測", 流れの可視化, Vol.6, No.22, pp.105-108, 1986.
- [7] Utami, T., Blackwelder, R., "A cross correlation technique for velocity field extraction from particulate visualization", Exp. in Fluids, Vol.10, pp.213-223, 1991.
- [8] 北條, 高島, "PIVにおける異常ベクトルの検出, 可視化情報", Vol.15, Suppl. No.2, pp.177-180, 1995.
- [9] Colebrook, C.F., "Turbulent flow in pipes with particular reference to the transition between the smooth and rough pipe laws", J. Inst. Civ. Eng. Long., Vol. 11, 1939.

## 저 자 소 개

**황태규 (黃太奎)**

1974년 4월생, 2001년 한국해양대학교 기계공학과 학사, 2003년 동 대학원 기계공학과 석사, 2003년 3월~현재 동 대학원 기계공학과 박사과정, 한국박용기관학회 학생회원.

**도덕희 (都德熙)**

1962년 10월생, 1985년 한국해양대학교 기관학과 학사, 1989년 동 대학원 기관학과 석사, 1995년 일본 동경대학교 대학원 기계공학과 박사, 1995년 3월~9월 포항공대 첨단유체공학연구소 연구원, 현재 한국해양대학교 기계정보공학부 부교수, Journal of Visualization Managing Editor, 한국박용기관학회 연구이사, 대한기계학회 유체공학부 이사, 한국가시화정보학회 학술이사.

**김동혁 (金東赫)**

1953년 9월생, 1976년 서울대학교 공과대학 기계공학과 학사, 1984년 New Jersey Institute of Technology 기계공학과 석사, 1988년 The Johns Hopkins University 기계공학과 박사, 1976년 3월 - 1982년 8월 국방과학연구소 연구원, 1988년 9월 - 1992년 8월 한국표준과학연구원 책임연구원, 현재 한국해양대학교 기계정보공학부 교수.

**오 철 (吳 喆)**

1958년 6월생, 1983년 한국해양대학교 기관학과 학사, 1985년 동 대학원 기관학과 석사, 1998년 일본 북해도대학교 대학원 기계공학과 박사, 현재 한국해양대학교 해사대학교 기관시스템공학부 교수, 한국박용기관학회 증진회원.

**홍성대 (洪性大)**

1969년 7월생, 1992년 한국해양대학교 기관학과 학사, 1992년~1997년 거양해운(현, 한진해운)소속 선박기관사(등기관사)로 재직, 2000년 한국해양대학교 대학원 기계공학과 석사, 2003년 일본 동경대학교 대학원에서 화학반응을 수반하는 제트유동의 가시화연구로 양자시스템공학과 졸업(박사), 2004년 1월~현재 한빛파워서비스 AOV연구팀에서 공기구동밸브의 유동패턴 및 성능평가 프로그램 개발 연구 수행중, 한국박용기관학회 회원.

**박성룡 (朴成龍)**

1958년생, 1984년 인하대학교 공과대학 기계공학과 학사, 1986년 동 대학원 석사, 1992년 University of Maryland 기계공학과 박사, 1993년~1994년 일본 동경대학교 방문연구원, 1995 - 현재 한국에너지기술연구원, 미활용 에너지연구소, 책임연구원.