

관내 유동 플라스틱 슬러리의 열전달 특성

김 명 준[†] · 김 명 환^{*}

(원고접수일 : 2003년 11월 20일, 심사완료일 : 2004년 1월 26일)

Heat Transfer Characteristics of Plastic Particle Slurry in a Circular tube Flow

Myoung-Jun Kim[†] · Myoung-Hwan Kim^{*}

Abstract : This present experimental study has dealt with the heat transfer characteristics of plastic particle slurry which flows in a circular tube. This type of slurry is suggested for heat transfer enhancement effect cause by random and vortex effect of plastic particle dispersed in water. As a result, the thermal boundary layer becomes thin so the heat transfer coefficient on the tube wall more increase compare to pure water flow.

This experimental test section was composed with stainless pipe which has the length of 2000mm, inner pipe diameter of 14mm and outer pipe diameter of 60mm. The most effective and important parameter of this experiment is plastic packing factor(PPF). The focuses of these results are pressure drop and heat transfer coefficient. As results, the friction factor of plastic particle slurry becomes higher at laminar flow region than pure water because of buoyancy effect of plastic particle but the local heat transfer coefficient becomes higher.

Key words : Buoyancy Effect(부력영향), Plastic Particle Slurry(플라스틱 입자 슬러리), Plastic Packing Factor(플라스틱 입자 충전율), Local Heat Transfer Coefficient (국소 열전달 계수)

기호설명		k	: 열전도계수[W/(mK)]
		l	: 길이[mm]
d	: 직경[mm]	P	: 압력[Pa]
f	: 관마찰계수[-]	PPF	: 플라스틱 입자 충전율[%]
h	: 열전달계수[W/(m ² K)]		

[†] 책임저자(군산대학교 동력기계시스템공학 전공), E-mail : mjkim@kunsan.ac.kr, T : 063)469-1849

^{*} 한국해양대학교 기관시스템 공학부

- q : 열유속[W/m²]
- Re : 레이놀즈 수 [-]
- r : 반경[mm]
- U : 속도[m/s]
- S : 표준편차[-]
- T : 온도[K]
- t : 두께[mm]
- x : 축방향 입의 거리[m]
- ρ : 밀도[kg/m³]

참 자

- ave : 평균
- e : 입구부
- f1 : 내관내를 흐르는 유체(플라스틱 슬러리)
- f2 : 외관내를 흐르는 유체(온수)
- p : 입자
- s : 스텐인레스 파이프
- slurry : 플라스틱 슬러리
- t : 시험부
- w : 물
- w1x : 내관 내벽면
- w2x : 내관 외벽면
- 1 : 내관
- 2 : 외관

1. 서 론

최근 전력부하의 평균화를 주목적으로 한 지역 냉난방 시스템의 도입이 활발하게 진행되고 있다⁽¹⁾. 특히 종래에 사용되어진 주된 열유체인 물에 비해 최근에 들어서 빙축열 시스템에 사용되기 시작하고 있는 빙수 슬러리⁽²⁾⁻⁽⁴⁾는 상변화를 이용하는 등의 장점과 아래와 같은 부수적인 열전달 향상에 기여하는 장점들이 있어 주목을 받고있다^{(5), (6)}.

- 얼음이 가지고 있는 큰 잠열량이 온도 경계층을 얇게 만든다.
- 부력의 영향으로 빙입자와 관벽이 접촉함에 따른 온도경계층이 얇게된다.

잠열량을 가지지 않는, 즉 상변화를 동반하지 않는 온도 영역에서의 고체물질 역시 전술한 밀도차에 의한 부력의 영향으로 온도 경계층이 고체 입자에 의해 교란되면 열전달이 물에 비해 상승할 것이다. 그래서 본 연구에서는 빙입자 대신에 플라스틱 입자를 이용해 입자에 의한 열전달 특성에 관해서 실험적으로 검토를 행했다.

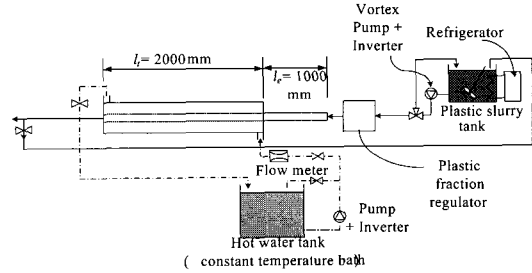


Fig. 1 Schematic of experimental apparatus

2. 실험장치 및 방법

Fig.1에는 실험장치의 개략도를 나타내었다. 실험장치는 이중관식 시험부, 플라스틱 슬러리 유로계 및 온수 순환계로 구성되어 있다. 이중관식 시험부는 전장 $l_t=2000$ mm, 내관내경 $d_1=14$ mm, 관두께 $t=1.2$ mm의 스텐인레스 파이프를 이용하여 제작했으며 내관에는 플라스틱 슬러리를, 외관에는 온도가 임의의 온도로 제어된 온수를 유입시켜 등온조건에서 플라스틱 슬러리를 가열하는 이중관식 구조로 되어 있다. 그리고 시험부 및 각 배관계에는 외부로의 열손실을 감소시키기 위해 우레탄제 단열재로 단열하였다. 시험부내 외관벽 온도를 측정하기 위해 시험부 길이 방향으로 7개소, 내관 원주상 상하좌우 4개소 합계 28개소에 K형 열전대(소선경 0.3mm)를 설치했다.

플라스틱 슬러리의 유로계는 플라스틱 슬러리를 저장하기 위한 저장탱크(스테인레스, $t=2.0$ mm, 500 mm \times 500 mm \times 500 mm), 볼텍스 펌프, 플라스틱 슬러리내 플라스틱의 체적 충전율 PPF(Plastic Packing Factor) 조정기로 구성되어 있고 펌프로부터 토출된 일부의 슬러리는 바이패스 라인을 통해 저장탱크로 되돌아가는 구

조로 되어있다. 이러한 과정은 유량제어의 보조기능 역할로, 플라스틱 슬러리내 플라스틱 입자의 균일한 분포를 형성하는데 큰 역할을 하고 있다. 한편 온수 순환계는 항온조, 마그네트 펌프, 유량조 절용 바이패스 및 부자식 유량계로 구성되어 있다.

교환열량은 측정된 온수 유량 및 온도차에 의해 산출하고, 온수의 흐름방향은 플라스틱 슬러리의 흐름방향과 동일한 평행류의 흐름으로 구성되어 있다. 이러한 평행류 이중관식 열교환기 모델을 주로 사용되는 열관류 모델을 Fig.2에 나타내었다. Fig.2에 나타낸 바와 같은 등온 벽면의 열유속 q_{w2x} 는 열이 반경방향으로 발생한다는 가정 하에서 다음의 식으로부터 구할 수 있다.

$$q_{w2x} = \frac{T_{w2x} - T_{f1}}{r_2 \left(\frac{1}{r_1 h_{w1x}} + \frac{1}{k_s} \ln(r_2/r_1) \right)} \quad (1)$$

여기서 k_s 는 스테인레스의 열전도율로서 13[W/(mK)]이다. 그리고 내관내벽면에 있어서의 열전달 계수 h_{w1x} 는 등온 벽면에 대해 슬러리를 열유체로 사용한 경우의 실험식인 Bird⁽⁷⁾의 식을 이용하여 계산한 값으로 했다. 따라서 외벽면에 있어서의 국소 열전달 계수 h_{w2x} 는 식(2)로부터 구할 수 있다.

$$h_{w2x} = \frac{q_{w2x}}{T_{f2} - T_{w2x}} \quad (2)$$

이상의 두 식으로부터 이중관의 내관내벽온도 T_{w1x} 및 열전달계수 h_{w1x} 는 다음 식들로부터 계산할 수 있다.

$$T_{w1x} = T_{w2x} - \left(\frac{r_2 \ln(r_2/r_1)}{k_s} \right) \cdot q_{w2x} \quad (3)$$

$$h_{w1x} = \frac{q_{w1x}}{T_{w1x} - T_{f1}} \quad (4)$$

또한 플라스틱 슬러리중의 플라스틱의 체적충진율 PPF 는 시험부 출구측에서 질량법을 이용해 측정했다.

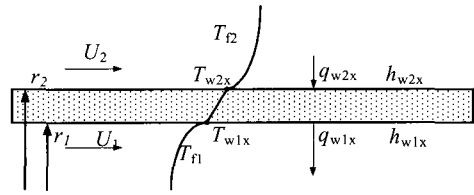


Fig. 2 Overall heat transfer model of double pipe

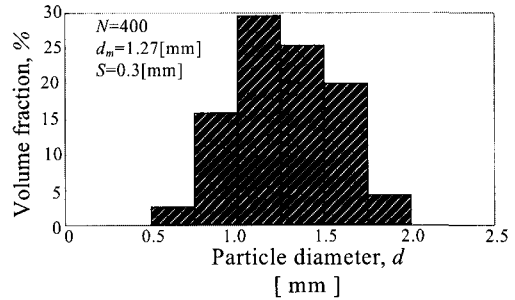


Fig. 3 Plastic particle diameter distribution

시험부내관의 입구-출구간의 압력손실은 시험부 입-출구에 직경 $d=1.8\text{mm}$ 의 압력탭을 설치해 마노메타를 이용해 측정했다.

Fig.3에는 본 실험에 사용한 플라스틱 입자의 직경분포를 나타내고 있다. 플라스틱 입자 (Polyethylene (high density), $\rho_p=960\text{kg/m}^3$)의 직경을 측정된 결과 평균직경 $d_{ave}=1.27\text{mm}$, 표준편차 $S_p=0.3\text{mm}$ 로 거의 균일한 입자경을 가지고 있음을 알 수 있다.

3. 결과 및 고찰

3.1 압력손실의 검토

Fig.4는 $PPF=3, 7, 15\%$ 에 대한 압력손실 P/h 과 플라스틱 슬러리의 유속 U_{f1} 의 관계를 나타낸 것이다. 저유속영역에서는 물의 층류영역에 대한 압력손실의 값보다 높은 값을 나타내고 있고 PPF 가 클수록 P/h 은 높은 값을 나타내고 있음을 알 수 있다. 이러한 이유는 PPF 의 증가와 함께 부력의 영향으로 부유하는 플라스틱 입자군과 관벽과의 접촉에 의한 영향이 크게 되기 때문으로 생각되어 진다. 그리고 U_{f1} 의 증가와 함께 플라스

틱 슬러리의 P/l_t 는 물의 난류영역에 대한 압력손실의 값에 가깝게 천이하고 결국 거의 같은 값을 나타내고 있음을 알 수 있다. 이러한 결과는 유속이 증가됨에 따라 증가되는 관성력이 플라스틱 슬러리에 미치는 부력의 영향보다 우세하게 되어 플라스틱 입자가 관중심 방향으로 이동하여 흐르게 되고, 이로 인해 벽면과 플라스틱 입자간의 접촉 가능성이 감소하게 된다. 또한 이 보다 증가된 유속에서의 플라스틱 입자는 관중심을 따라 흐르고, 물은 벽면을 따라 흐르는 유동양상으로 천이되어, 결국 벽면과 플라스틱 입자간의 접촉이 거의 사라지게 되기 때문이라고 생각되어 진다.

Fig.5는 $PPF=3, 7, 15\%$ 에서의 관마찰 계수 f 와 레이놀즈수 Re 와의 관계를 나타낸 것이다. 관마찰계수 f 의 정의는 식(5)와 같다.

$$f = \frac{(-dP/dx)(2r_1)}{(1/2)\rho_{slurry}U_{f1}^2} \quad (5)$$

여기서, ρ_{slurry} 는 플라스틱 슬러리의 밀도를 나타내고 있는데 그 값의 산출은 가성성식(8)을 이용하여 다음과 같이 구했다.

$$\rho_{slurry} = \frac{\rho_p \times PPF + \rho_w \times (100 - PPF)}{100} \quad (6)$$

ρ_p 의 값은 960kg/m^3 이다.

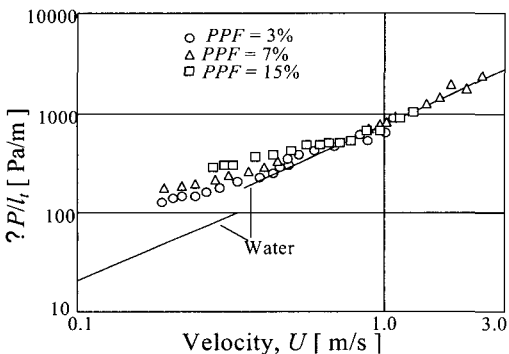


Fig. 4 Pressure drop of plastic particle slurry

Fig.5와 같이 저유속영역에서의 플라스틱 슬러리의 관마찰계수 f 는 물의 층류영역에 대한 관마

찰 계수보다 큰 값을 나타내고 있다. 그리고 Re 의 증가와 함께 플라스틱 슬러리의 f 는 물의 난류영역에 대한 관마찰계수와 근사한 값으로 천이하고 있음을 알 수 있다.

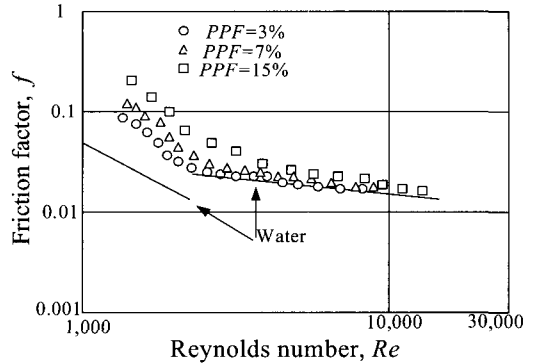


Fig. 5 Friction factor of plastic particle slurry

3.2 국소열전달의 검토

Fig.6은 $PPF=7\%$, $U_{f1}=0.3, 1.3\text{m/s}$ 의 조건에 있어서의 국소 열전달계수 h_{w1x} 의 시험부 길이 방향 x 에 대한 변화를 나타낸 그래프이다. $U_{f1}=0.3\text{m/s}$ 에 대한 내관 상부내벽면에서의 열전달 계수 $h_{w1xupper}$ 는 측면 $h_{w1xside}$ 및 하부면 $h_{w1xbottom}$ 에 비해 높은 값을 나타내고 있다. 이것은 부력의 영향으로 플라스틱 입자가 관벽상부를 따라 흘러 내관 상부벽면에서 발달하는 온도 경계층을 교란시키기 때문으로 생각되어 진다.

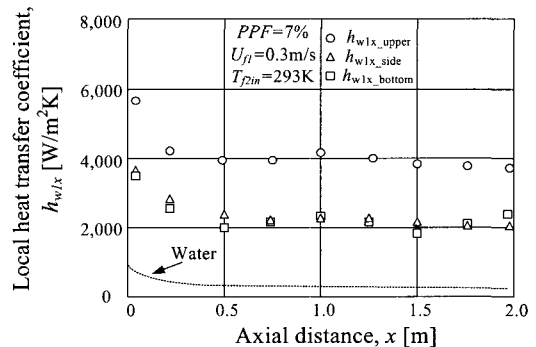


Fig. 6 (a) Local heat transfer coefficient of plastic particle slurry at low flow velocity region

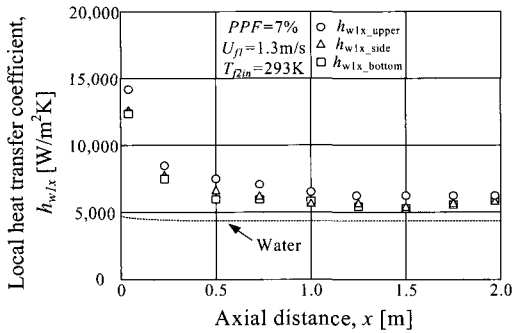


Fig. 6 (b) Local heat transfer coefficient of plastic particle slurry at high flow velocity region

$U_{f1}=1.3\text{m/s}$ 에 있어서는 $U_{f1}=0.3\text{m/s}$ 의 경우에 비해 상대적으로 속도가 증가함에 따라 플라스틱 입자가 관내에 균일하게 분포하게 되어 $h_{w1x\text{top}}$, $h_{w1x\text{side}}$ 및 $h_{w1x\text{bottom}}$ 과의 차이는 보이지 않는다.

3.3 빙수슬러리와 플라스틱 슬러리의 비교

Fig.7은 동일조건에 있어서의 빙수 슬러리와 플라스틱 슬러리와 국소열전달계수 h_{w1x} 의 값을 비교한 것이다. $U_{f1}=0.3, 1.3\text{m/s}$ 의 어느 경우에 있어서도 빙수 슬러리의 h_{w1x} 는 높은 값을 나타내고 있다. 이러한 이유는 빙수 슬러리의 경우, 본 실험의 온도범위에 있어서 상변화에 따른 높은 용해 잠열(333kJ/kg)을 가지고 있는 반면 플라스틱 슬러리의 경우는 잠열의 변화가 없기 때문이다. 즉, 빙수 슬러리의 고-액 상변화에 의한 관벽 근방에서의 온도경계층이 얇게 되어 관벽과 유체인 빙수 슬러리의 열전달이 향상되기 때문이다.

또한 유속이 증가할 수록(Fig.7(b)참조) 국소 열전달 계수의 차이가 작아짐을 알 수 있다. 이러한 결과는 유속의 증가에 따라 빙수 슬러리의 경우 관내에 정체하는 시간이 짧아져 얼음입자가 고-액 상변화 하는데 있어서의 열교환하는 시간이 짧아져 충분한 상변화에 의한 열량의 이동이 이루어지지 않기 때문이다.

Fig.7에서 보는 바와 같이 축방향의 거리 x 가 증가함에 따라 국소 열전달 계수 h_{w1x} 가 감소함을 알 수 있다. 이러한 현상은 전형적인 원관내의 열

전달 거동에 있어 나타나는 현상으로, x 의 증가에 따라 관내에서의 흐름이 발달하여 관벽에서부터 생성되는 온도 경계층 또한 발달하여 열전달이 감소하게 되는 것이다.

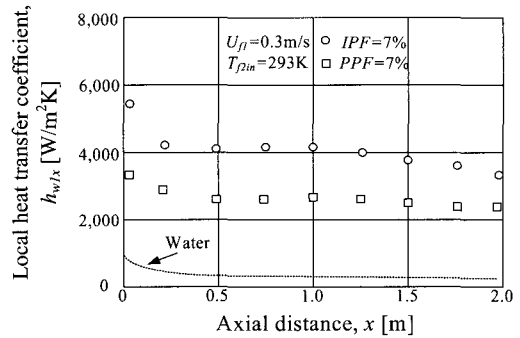


Fig. 7 (a) Local heat transfer coefficient of plastic particle slurry and ice particle slurry at low flow velocity region

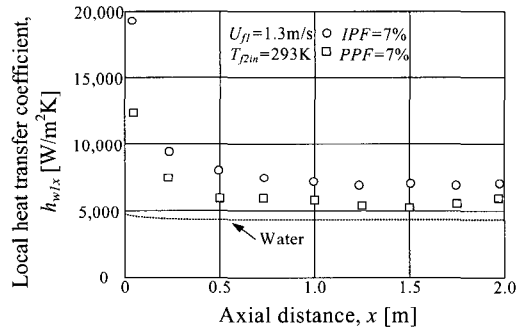


Fig. 7 (b) Local heat transfer coefficient of plastic particle slurry and ice particle slurry at high flow velocity region

4. 결 론

본 연구는 플라스틱 입자를 물에 분산시켜 얻은 플라스틱 슬러리를 이용하여 등온가열벽면의 조건을 유지하는 이중관내를 유동시켰을때의 유동 및 열전달 특성에 대하여 실험적으로 검토를 하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 플라스틱 슬러리에 분산되어 있는 입자와 물과의 비중차이에 의한 부력의 영향으로 국소 열전달 계수가 물을 이용한 경우에 비해 큰

폭으로 상승함을 알았다.

- (2) 빙수 슬러리와 플라스틱 슬러리와 의 국소 열전달 계수를 비교 검토한 결과 빙수 슬러리의 경우가 고-액 상변화에 의한 잠열의 이동에 따른 열전달 계수가 상승함을 알았다.

참고문헌

- [1] 稻葉英男, 機能性熱流體の現狀と將來性, 일본 기계학회지, 98-925(1995), pp. 999-1000
- [2] B.D.,Knodel의 1명, Pressure drop in ice-water slurries for thermal storage application, Experimental Heat Transfer, 1, (1988), pp.265-275
- [3] B.D.,Knodel의 1명, Ice-water slurry flow in a circular pipe, Heat Mass Transfer, 15, (1988), pp.239-245
- [4] C. Cleary의 8명, Hydraulic characteristics of ice slurry and chilled water flow, Advanced Energy Transmission Fluids-Final Report of Research, (1990)
- [5] P.J. Winters, Phase two laboratory testing of direct freeze ice slurry district cooling, Project final report, U.S. Department of Energy, (1991)
- [6] E.S. Choi의 2명, Forced convection heat transfer with phase-change-material slurries : turbulent flow in a circular tube, Int. J. Heat Mass Transfer, 73, 2, (1994), pp. 207-215
- [7] R.B., Bird의 2명, Dynamics of polymeric liquids, 1, Wiley, (1977)
- [8] 稻葉英男의 1명, 微細低溫潛熱物質混合水の熱物性評價, 일본 열물성 학회, 1, (1995), pp. 24-29

저 자 소 개



김명준 (金明俊)

1971년 3월 18일생, 1994년 한국해양대학교 해사대학, 기관공학과 졸업(공학사), 1998년 한국해양대학교 대학원 기관공학과 졸업(공학석사), 2002년 일본 오카야마대학 대학원, 자연과학연구과 졸업(공학박사), 2002년~2003년 일본 오카야마대학 기계공학부 외국인직원연구원, 2003년 9월~현재 군산대학교 해양과학대학, 동력기계 시스템공학부 전임강사. 관심분야 : 열 및 물질전달, 축열시스템, 환경에너지.



김명환 (金明煥)

1959년 1월 15일생. 1981년 한국해양대학교 기관공학과 졸업. 1994년 일본북해도대학 대학원 기계공학과 졸업(공학박사). 1981년~현재 한국 해양대학교 해사대학 기관시스템공학부 교수. 관심분야 : 열전달, 축열공학, 열설계.