

고분자 물질 첨가에 의한 2상 유동의 마찰 항력 감소와 대류 열전달 특성

이동상* · 김재근** · 차경옥***

The Drag Reduction and Convective Heat Transfer Characteristics of Two-Phase Flow with Polymer Additives

Dong Sang Lee, Jae Guen Kim, Kyong Ok Cha

Key Words: Two-Phase Flow(2 상 유동), Polymer(고분자 물질), Drag Reduction(마찰 항력 감소), Convective Heat Transfer(대류 열전달)

Abstract

This experimental study was conducted to figure out the drag reduction and convective heat transfer in vertical downward two-phase flow with polymer additives. The drag reduction effect were analyzed by using the difference of the pressure drop between the flow with polymer additives and without it. Experimental results show that the pressure drop with polymer additives is less than the pressure drop without polymer in vertical downward two-phase flow. And the convective heat transfer has decreased with increasing the polymer concentration in vertical downward two-phase flow.

1. 서 론

다상 유동 중에서도 2개의 다른 상이 서로 혼합되어 동시에 유동하는 현상을 2상 유동(two-phase flow)이라고 하며, 2상 유동은 CWM, COM 등과 같은 고체-액체 2상 유동, 물과 기름이 서로 혼합되어 동시에 유동하는 액체-액체 2상 유동, 내연 기관의 배기 가스, 먼지 바람, 황사 현상 등과 같은 고체-기체 2상 유동, 비바람 등과 같이 물과 공기가 서로 혼합되어 동시에 유동하는 기체-액체 2상 유동 등이 있다.⁽¹⁻²⁾

기체-액체 2상 유동은 상변화 열전달 현상과 매우 밀접한 관련이 있으며, 각종 보일러, 증발기, 응축기, 건조기, 열 파이프, 증기 터빈 등 단위 기기를 비롯하여 공기 조화 설비, 냉동 설비,

담수화 설비, 석유 화학 플랜트 설비, 제철 플랜트 설비 그리고 원자력 발전소의 다양한 열 교환기 등 대형 설비에 이르기까지 여러 분야에서 적용된다. 따라서 2상 유동 현상의 이해와 해석은 열 공학적 관점에서 매우 중요한 분야이다.

냉, 난방 순환 관로, 화학 공정 관로, 원유의 수송 관로 등 여러 분야에서 중요한 관심사는 유체 수송에 대한 에너지의 절감이며, 유동장 내에 유체가 유동할 때, 유체와 관벽 사이의 마찰 저항에 의해서 압력 강하가 발생하므로 압력 강하 감소를 통하여 수송 에너지를 절감시킬 수 있는 다양한 연구가 수행되었다.

유동장의 압력 강하를 감소시킬 수 있는 방법으로는 고분자 물질, 미세 고체 입자, 섬유 부유물, 계면 활성제 등을 유동장에 첨가하는 방법 등이 있다. 따라서 유동장에 미량의 고분자 물질을 첨가하여 작동 유체의 물성치 변화를 거의 유발시키지 않으면서도 괄목할 만한 정도의 압력 강하 특성 변화에 기인한 마찰 항력 감소 효과를 얻을 수 있음을 밝힌 연구 결과가 에너지 절감의 측면에서 주목을 받고 있다.

* 명지대학교 대학원 기계공학과
** 신성대학 자동차 계열
*** 명지대학교 기계공학과

마찰 항력 감소에 영향을 미치는 대표적인 인자는 고분자 물질의 농도, 고분자 물질의 분자량, 용매의 화학적 성분, 유동 속도 등이다. 일반적으로 마찰 항력 감소 효과가 발생하는 유동 조건은 고분자 물질의 종류와 유동장의 가하학적 형상에 따라 다르다.⁽³⁻⁴⁾

Paul⁽⁵⁾은 Galactosol-211, Separan, MGL, AP-30, PEO, Natrosol-250MR, 등의 다양한 종류의 고분자 물질을 각각 첨가한 고분자 수용액을 사용하여 전기적으로 가열되는 열선을 사용하여 고분자 수용액의 핵비등 선도를 측정하고, 순수 물질 경우에 비하여 고분자 수용액의 열전달 계수가 감소한다고 밝혔다.

Robert⁽⁶⁾은 PAA, HEC 등의 고분자 물질을 첨가한 고분자 수용액을 사용하여 핵비등 선도를 측정하고, 일부 고분자 수용액에서는 순수 물질 경우에 비해 고분자 수용액의 열전달 계수는 증가하였으며, 일부 고분자 수용액에서는 열전달 계수가 감소한다고 밝혔다.

Zaidi, Sims⁽⁷⁾은 수직 상향 2상 유동장 내에 계면 활성제(surfactant)를 첨가하여 걸보기 물 속도와 걸보기 공기 속도의 변화에 따르는 압력 강하 특성과 열전달 특성에 관하여 연구를 수행한 결과, 기상 유량 증가, 액상 유량의 증가에 따라 대류 열전달 계수가 증가, 혹은 감소로 일정치 않음을 밝혔다.

Choi, Jeong⁽⁸⁾은 PEO 1000 PPM을 첨가한 고분자 수용액과 고분자 수용액에 Paraffin slurry를 상변화 물질로 혼합하여 층류 영역에서 열전달 특성에 관하여 연구를 수행한 결과, 층류 영역에서도 마찰 계수가 Reynolds 수의 증가에 따라 감소하며, 이때 무차원 열전달 계수 Nusselt 수는 증가함을 밝혔다.

이와 같이 고분자 물질을 첨가한 수용액의 열전달 특성은 아직 명확하지 않은 실정이며, 경향성 또한 열전달의 증가, 혹은 감소로 매우 극단적인 결과를 보이고 있다. 따라서 본 연구에서는 고분자 물질 첨가에 의한 수직 하향 2상 유동에서 실험 조건의 변화에 따르는 마찰 항력 감소의 특성에 대해 고찰 하였으며, 유동장에서 걸보기 공기 속도, 걸보기 물속도 그리고 고분자 물질의 첨가 농도 등에 따른 각각 실험 조건을 변화시키면서 가열 유동 조건에서 대류 열전달 특성을 분석하였다.

2. 실험

2.1 실험 장치

Fig. 1은 고분자 물질 첨가에 의한 수직 하향 2상 유동의 마찰 항력 감소와 대류 열전달에 관한 연구를 수행하기 위한 실험 장치를 나타낸 것으로서, 수직 하향 2상 유동 시험부 내를 공기-물 2상류가 유동하도록 설계되었다. 실험 장치는 공기 압축기, 걸보기 공기 속도 조절부, 걸보기 공기 속도 계측부, 공기 분사기, 공기-물 혼합부, 순환 펌프, 걸보기 물속도 조절부, 걸보기 물속도 계측부, 가열 시험부, 압력 계측부, 온도 계측부, 보이드 울 계측부, 공기-분리 탱크, 순환수 저장 탱크 등으로 구성되었다.

공기는 5 HP 용량의 왕복형 공기 압축기에 의하여 공급된다. 공기는 공기 분사기가 설치된 공기-물 혼합부를 통과하여 시험부에 공급된다. 시험부에 공급되는 공기의 걸보기 속도는 면적식 유량계를 관로에 설치하여 측정하였으며, 시험부에 공급되는 공기의 걸보기 속도는 관로에 설치된 게이트 밸브, 소형 니들 밸브, 드레인 밸브를 동시에 사용하여 실험 조건에 알맞게 조절하였다. 물은 3 HP 용량의 터보형 원심 펌프에 의하여 공급된다. 물은 공기 분사기가 설치된 공기-물 혼합부를 통과하여 시험부에 공급된다. 시험부에 공급되는 물의 걸보기 속도는 면적식 유량계를 실험 장치의 관로에 설치하여 측정을 하였으며,

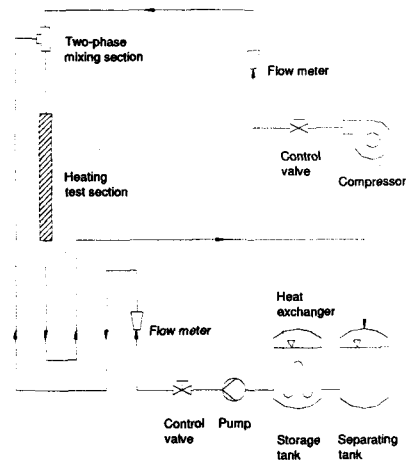


Fig. 1 Schematic diagram of the two phase flow facility

시험부에 공급되는 물의 겉보기 속도는 실험 장치의 관로에 설치된 게이트 밸브를 사용하여 실험 조건에 알맞게 조절하였다.

공기-물 혼합부에서 혼합된 기-액 2상류는 기-액 2상류의 완전 발달 거리를 고려하여 공기-물 혼합부로부터 1500 mm되는 위치에 설치된 수직 하향 시험부를 통과한 기-액 2상류는 공기-물 분리 탱크에서 공기와 물로 각각 분리된 후 순환수 저장 탱크 내에 유입되어 일련의 순환 회로가 완료된다. 순환수 저장 탱크의 용량은 300ℓ 이며, 순환수 저장 탱크 내에는 밀집도가 1000m²/m³ 인 자동차용 관-휠 형식의 열 교환기를 설치하여 냉각수를 통과시켜 순환수의 온도가 항상 일정한 온도를 유지하도록 하였으며, 실험 과정 중에 순환수의 온도는 21 °C ± 1 °C 이다.

시험부는 내경 26 mm, 두께 4 mm, 길이 1200 mm 의 스테인레스 강관이며, 작동 유체의 유동에 영향을 주지 않게 하기 위하여 이음매가 없는 관을 사용하였다. 시험부 입, 출구의 압력을 측정하기 위하여 시험부 입, 출구 1100 mm 사이에 직경 5 mm의 구멍을 가공하여 차압 측정용 압력 변환기를 설치하였다. 시험부 내의 유체의 평균 온도를 측정하기 위하여 가열부 전 100 mm 위치에, 가열부 후 600 mm 위치에 직경 1.5 mm의 구멍을 가공하여 관중양에 열전대를 설치하였다. 시험부의 관벽 온도를 측정하기 위하여 가열부의 입, 출구 중앙 지점에 폭 1.5 mm 깊이 3.5 mm, 길이 200 mm의 홈을 관의 외부에 축방향으로 가공하여 이 홈에 열전대를 설치하였다. 가열부의 축방향 길이는 800 mm이며, 가열 장치는 열선 봉입 산화 마그네슘 절연 나선상 히터를 사용하였으며 최대 발열량은 15 kW이다. 발열체인 열선의 지름은 0.8 mm이고, 히터의 지름은 8 mm이며, 나선상으로 가공된 가열 장치의 내경은 시험부 관의 외경과 동일한 34 mm이다. 가열 장치는 무단 가변 전력 조절기를 사용하여 시험부에 공급되는 전력을 조절하였다. 가열부 외부는 단열재를 사용하여 외부와 단열을 하였다. 단열재의 재료는 세라믹이며 성상은 백색의 섬유상 조직이며, 열전도율은 0.038 W/m·°C이고, 단열재의 내열 온도는 1600 °C이다.

2.2 실험 방법

고분자 물질 첨가에 의한 수직 하향 2상 유동

의 마찰 항력 감소와 대류 열전달에 관한 연구를 수행하기 위한 실험 방법은 겉보기 공기 속도는 물만 유동시킨 경우와 0.1 m/s, 0.2 m/s, 0.3 m/s, 0.4 m/s, 0.5 m/s 등으로 실험 조건을 변화 시켰으며, 겉보기 물속도는 1.25 m/s, 1.50 m/s, 1.75 m/s, 2.00 m/s, 2.25 m/s, 2.50 m/s 등으로 실험 조건을 변화 시켰다. 그리고 고분자 물질의 첨가 농도는 고분자 물질을 첨가하지 않은 경우와 100 PPM, 200 PPM, 300 PPM, 400 PPM, 500 PPM 등으로 실험 조건을 변화시키면서 가열 장치에 의한 관 외벽으로의 가열 열유속이 1 × 10⁵ W/m²인 가열 유동 조건에서 실험을 수행하였으며, 각각의 실험 조건에서 마찰 항력 감소 효과와 대류 열전달 특성 등을 비교 분석하였다. 고분자 물질 첨가에 의한 수직 하향 2상 유동의 마찰 항력 감소 효과를 연구하기 위하여, 겉보기 공기 속도, 겉보기 물속도, 고분자 물질의 첨가 농도 등의 실험 조건을 각각 변화시키면서 각각의 실험 조건에서 시험부 입, 출구의 차압을 측정하여 마찰 항력 감소 효과를 다음과 같은 식에 의하여 계산하였다.

$$DR(\%) = \frac{\Delta P_{NP} - \Delta P_{AP}}{\Delta P_{NP}} \times 100 \quad (1)$$

실험에 사용된 고분자 물질은 폴리아크릴 아마이드로 수용성이고, 분자량은 1.5 × 10⁷이며, 성상은 백색 분말이다. 고분자 물질은 유동 시간에 따르는 퇴화에 의한 불확실성을 배제하기 위하여 각각의 농도로 용해하여 시험부에 유동시켜 퇴화가 더 이상 진행되지 않는 안정화된 시간을 결정 한 후 실험을 수행하였다.

시험부 입, 출구의 차압은 시험부 입, 출구에 스트레인 게이지 형식의 차압 측정용 압력 변환기를 연결하여 측정하였다. 압력 변환기의 사용 압력 범위는 ± 25 kPa이며, 사용 온도 범위는 0 °C - 50 °C 이다. 압력 변환기의 사용 범위 내의 측정 오차 한도는 ± 0.1 % 이다. 압력 변환기에 의하여 검출된 신호는 A/D 변환기에서 아날로그 신호가 디지털 신호로 변환되며, 디지털 신호를 IBM 컴퓨터에 입력시켜 시험부 입, 출구의 차압을 측정하였다. 시험부 입, 출구의 차압 측정 시간 간격은 1/500초이고, 측정 시간은 5초이며, 측정 횟수는 3회 반복하여 평균값을 구하였다.

고분자 물질 첨가에 의한 수직 하향 2상 유동의 대류 열전달 효과를 연구하기 위하여, 겉보기

공기 속도, 겔보기 물속도, 고분자 물질의 첨가 농도 등의 실험 조건을 각각 변화시키면서 가열 유동 조건에서 실험 조건의 변화에 따르는 시험부 내의 유체의 평균 온도, 관벽의 온도를 측정하여 관벽으로부터 유체로의 대류 열전달 효과를 계산하였으며 대류 열전달 계수는 식(2),(3)과 같다.

$$h(x) = \frac{q(x)}{(T_w - T_b)} \quad (2)$$

$$Nu_x = \frac{h(x)D}{k} \quad (3)$$

시험부 내의 유체의 평균 온도를 계산하기 위한 시험부 입, 출구 온도 및 시험부 관벽의 온도는 열전대를 사용하여 측정하였다. 열전대의 종류는 K형이다. 열전대에서 검출된 신호는 디지털 온도 지시계에 의하여 표시된다. 열전대에 의하여 검출된 신호는 A/D 변환기에서 아날로그 신호가 디지털 신호로 변환되며, 디지털 신호를 IBM 컴퓨터에 입력시켜 시험부 입, 출구의 온도 및 관벽의 온도를 측정하였다. 온도 측정 시간 간격은 1/10초이며, 측정 시간은 3초이며, 측정 횟수는 3회 반복하여 평균값을 구하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 고분자 물질의 퇴화

Fig. 2는 수직 하향 유동장내에 고분자 물질을 100 PPM을 첨가했을 때 유동 시간의 경과에 따르는 퇴화 특성을 나타낸것으로 유동 초기에 급격한 퇴화를 보이다가 약 2시간 이후에는 더 이상의 퇴화를 보이지 않는 비교적 안정된 상태를 유지함을 알 수 있으며, 유동장의 유속이 클수록 마찰 항력 감소 효과가 큰 것을 알 수 있다.

3.2 마찰 항력 감소

Fig. 3은 수직 하향 유동장내의 물속도가 1.5 m/s - 2.5 m/s로 증가할 때, 마찰 항력 감소 효과를 나타낸 것이다. 마찰 항력 감소 효과는 고분자 물질의 첨가 농도에 비례함을 알 수 있다.

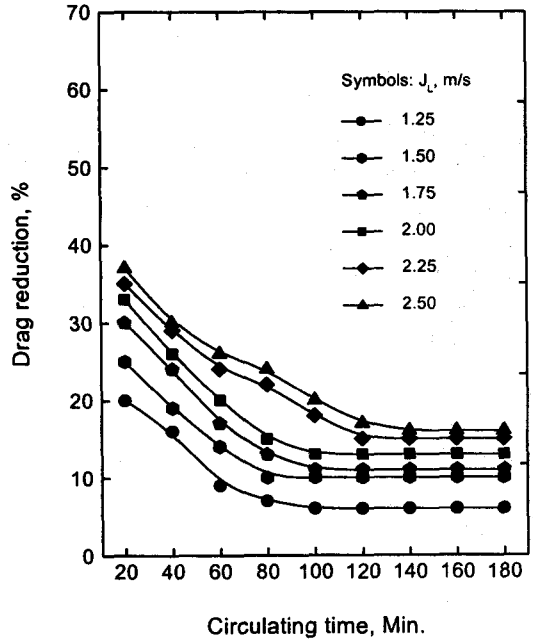


Fig. 2 Variation of drag reduction % with circulation time Min. for 100 PPM polymer solution

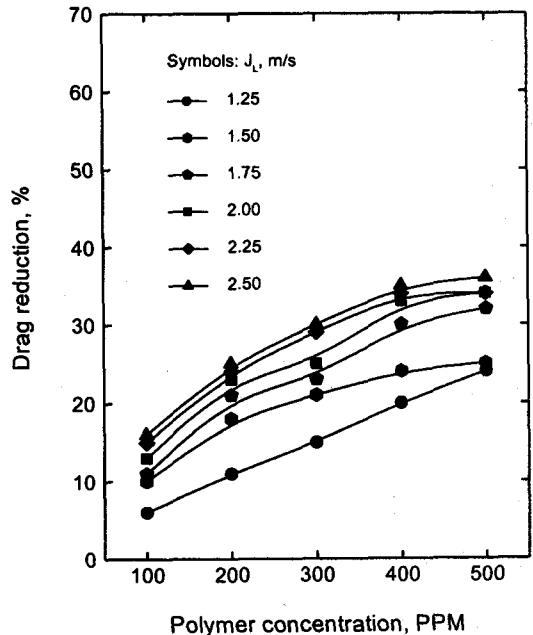


Fig. 3 Variation of drag reduction % with polymer concentration for single phase

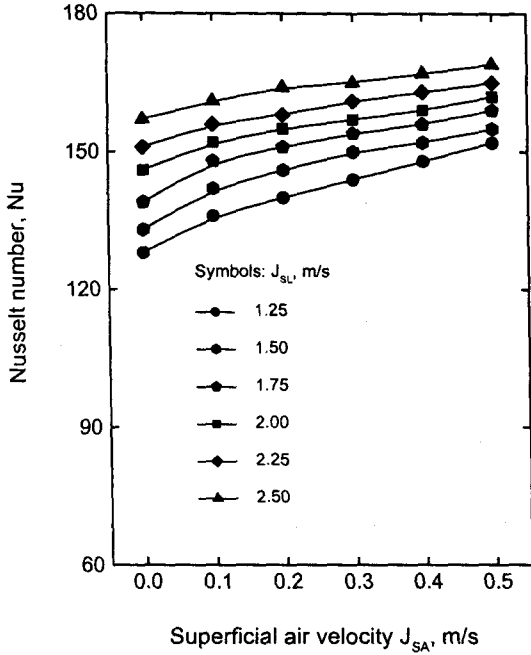


Fig. 4 Variation of Nusselt number Nu with superficial air velocity J_{SA} for pure water

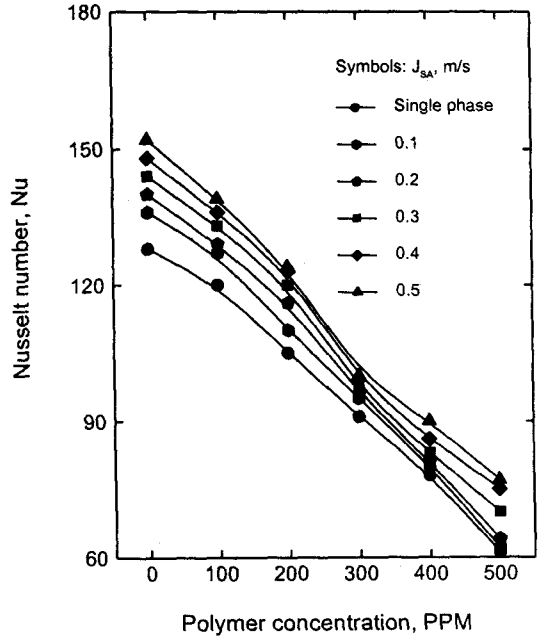


Fig. 6 Variation of Nusselt number Nu with Polymer concentration for superficial liquid velocity $J_{SL} = 1.25$ m/s

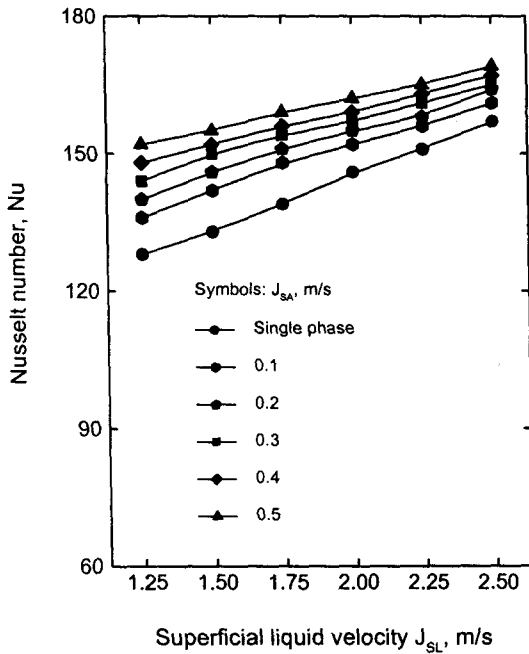


Fig. 5 Variation of Nusselt number Nu with superficial liquid velocity J_{SL} for pure water

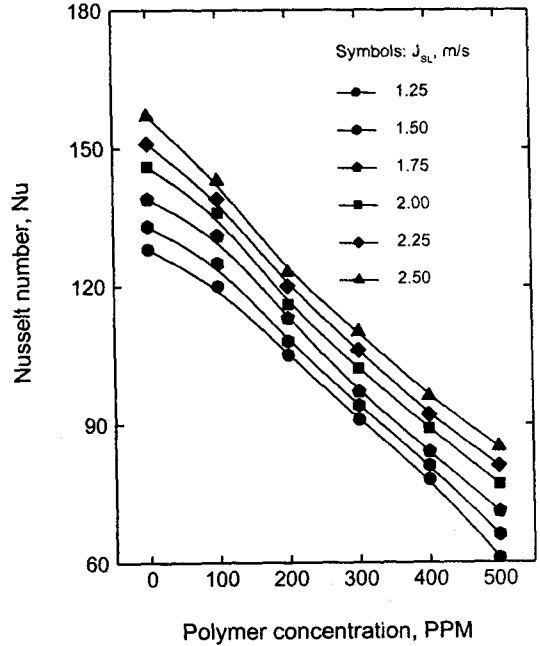


Fig. 7 Variation of Nusselt number Nu with Polymer concentration for single phase

3.3 열전달 계수

Fig. 4는 수직 하향 2상 유동장 내에서 시험부의 가열 장치에 의한 관 외벽으로의 가열 열유속이 $1 \times 10^5 \text{ W/m}^2$ 인 가열 유동 조건일 때에 겉보기 공기 속도의 증가에 따르는 열전달 계수를 나타낸 것이다. 겉보기 공기 속도의 증가에 따라 열전달 계수가 증가함을 알 수 있다. Fig. 5는 수직 하향 2상 유동장 내에서 시험부에 가열 장치에 의한 관 외벽으로의 가열 열유속이 $1 \times 10^5 \text{ W/m}^2$ 인 가열 유동 조건일 때에 겉보기 물속도의 증가에 따르는 열전달 계수를 나타낸 것이다. 겉보기 물속도의 증가에 따라 열전달 계수가 증가함을 알 수 있다. Fig. 6은 수직 하향 2상 유동장 내에서 시험부에 가열 장치에 의한 관 외벽으로의 가열 열유속이 $1 \times 10^5 \text{ W/m}^2$ 인 가열 유동 조건일 때에 겉보기 공기 속도와 고분자 물질의 첨가 농도 증가에 따르는 열전달 계수의 변화를 나타낸 것이다. 고분자 물질의 첨가 농도가 증가함에 따라 열전달 계수가 감소함을 알 수 있다. Fig. 7은 수직 하향 2상 유동장 내에서 시험부에 가열 장치에 의한 관 외벽으로의 가열 열유속이 $1 \times 10^5 \text{ W/m}^2$ 인 가열 유동 조건일 때에 겉보기 물 속도와 고분자 물질의 첨가 농도 증가에 따르는 열전달 계수의 변화를 나타낸 것이다. 고분자 물질의 첨가 농도가 증가함에 따라 열전달 계수가 감소함을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구는 수직 하향 2상 유동장에서 겉보기 공기 속도는 물만 유동시킨 경우와 0.1 m/s, 0.2 m/s, 0.3 m/s, 0.4 m/s, 0.5 m/s 등으로 실험 조건을 변화시켰으며, 겉보기 물속도는 1.25 m/s, 1.50 m/s, 1.75 m/s, 2.00 m/s, 2.25 m/s, 2.50 m/s 등으로 실험 조건을 변화시켰으며, 그리고 고분자 물질의 첨가 농도는 고분자 물질을 첨가하지 않은 경우와 100 PPM, 200 PPM, 300 PPM, 400 PPM, 500 PPM 등으로 실험 조건을 변화시키면서 가열 유동 조건에서 마찰 항력 감소와 대류 열전달 특성을 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 고분자 물질을 첨가한 수용액의 퇴화 특성은 유동 초기에 급격한 퇴화 특성을 나타내나 시간 경과에 따라 완만한 퇴화 특성을 나타내며,

일정 시간이 경과한 이후에는 더 이상의 퇴화를 보이지 않는 안정된 형태를 유지하며, 마찰 항력 감소 효과는 유동장의 유속에 비례하여 증가한다.

(2) 고분자 물질을 첨가한 수용액의 마찰 항력 감소 효과는 고분자 물질의 첨가 농도에 비례하여 증가한다.

(3) 순수 수용액만 유동시킨 단상 유동 조건에 비하여 공기를 공급한 2상 유동 조건에서 대류 열전달 계수는 증가하며, 대류 열전달 계수는 겉보기 물속도나 겉보기 공기 속도가 증가함에 따라 증가한다.

(4) 유동장에 고분자 물질을 첨가한 수용액의 경우의 대류 열전달 계수는 고분자 물질의 첨가 농도가 증가할수록 감소한다.

참고 문헌

- (1) Wallis, G. B., 1969, "One-Dimensional Two-Phase Flow", McGraw-Hill Co.
- (2) Hetsroni, G., 1982, "Handbook of Multiphase Flow", McGraw-Hill Co.
- (3) Cheremisinoff, N. P., 1989, "Handbook of Polymer Science and Technology", Marcel Dekker Inc.
- (4) Fortuna, G., 1967, "Effect of Drag-Reducing Polymers on Flow Near a Wall", Ph. D. Thesis, Urbana Illinois.
- (5) Paul, D. D., 1983, "Nucleate Boiling in Drag Reduction Polymer Solution", J. Rheology, Vol. 27, pp. 59-76.
- (6) Robert, Y. Z. and Hartnett, I. P., 1988, "Nucleate Pool Boiling to Viscoelastic Fluid", Pro. JSME-KSME Thermal Eng. Conf., Vol. 1, pp. 45-50.
- (7) Zaidi, A. J., Sims, G. E., 1986, "The Effect of Surfactant on Flow Patterns, Pressure Drop and Heat Transfer in Two-Phase Two-Component Vertical Flow", Heat Transfer 1986, Vol. 5, pp. 2283-2288.
- (8) Choi, E. S. and Jeong, D. J., 1999, "Convective Heat Transfer of a Paraffin Slurry in a Shear Thinning Carried Fluid", Proceedings of the KSME 1999 Spring Annual B, pp. 612-617.