

비비등 수직 하향 유동의 대류 열전달 특성

이동상* · 김재근** · 양희준*** · 오을권**** · 차경옥*****

The Characteristics of Convective Heat Transfer in Non Boiling Vertical Downward Flow

D.S. Lee, J.G. Kim, H.J. Yang, Y.K. Oh, K.O. Cha

Key Words: Vertical Downward flow(수직 하향 유동), Polymer Concentration(고분자 농도), Convective Heat Transfer(대류 열전달), Turbulent Flow(난류 유동)

Abstract

This experimental study was conducted to figure out the characteristics of convective heat transfer in non boiling vertical downward flow with polymer additives. This experiment was studied in 26mm diameter, 800mm heating length and $1 \times 10^5 W/m^2$ heat flux. The polymer concentration ranged from 0PPM to 500PPM with corresponding Reynolds number 3.3×10^4 to 6.8×10^4 in non boiling vertical downward flow. Experimental results show that the characteristics of convective heat transfer was a strong function of polymer concentration and it has decreased with increasing the polymer concentration in non boiling vertical downward flow.

1. 서론

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.⁽¹⁻²⁾ 한편 난류 유동에 대한 열전달의 이론적 해석은 층류 유동에 비하여 매우 복잡하고 다양하여 순수 이론적인 방법으로 난류 열전달의 해석은 불가능하다. 그래서 많은 연구자는 난류 유동의 대류 열전달에 관한 연구를 실험적인 측면으로 수행하였다.

유동장내에서 마찰저항감소 현상과 대류 열전달 향상은 상반되므로 그 동안 대다수의 연구는 유동장내 마찰저항 감소현상과 대류열전달에 관한 사항을 별도로 분리하여 연구하였으므로 이를 현실적으로 적용시키는데는 한계점을 갖고 있었다. 따라서 본 연구에서는 대류열전달과 마찰저항감소를 동시에 고려 할 수 있는 연구를 수행하여 적합한 적용범위를 설정한다면 효율적인 열관리를 할 수 있을 것으로 사료되어, 고분자수용액을 유동시킬 때 대류 열전달에 관한 실험적 연구를 수행하였다.

2. 기초 이론

* 명지대학교 대학원 기계공학과
 ** 신성대학 기계·자동차 계열
 *** 충청대학 기계설계과
 **** 조선대학교 정밀기계공학과
 ***** 명지대학교 기계공학과

2.1 고분자에 의한 난류 억제에의 가설

고분자에 의한 난류억제의 상세한 메커니즘은 아직 확실하지는 않지만 몇 가지 연구 사실을 정을 정리하면 다음과 같다.

① 난류억제는 벽면에서 일어난다. 주사기로 관벽부에 고분자를 주입하면, 즉시 저항감소가 나타나지만 관의 중축부에 주입할 경우는 고분자 수용액이 분산되어 관벽부에 도달할 때까지 난류는 없어지지 않는다. 즉 마찰저항 감소제는 경계층 또는 점성저층 내에서 효과를 발휘한다고 예측할 수 있기 때문이다.

② 선형구조의 고분자물질의 분자수가 10만 이상을 필요로 한다. 이것은 고분자의 큰 퍼짐성 및 랜덤코일상의 용해상태가 유효하다고 생각할 수 있다.

③ 전체적으로 고분자첨가시 유동에 억제제가 작용하여 난류가 대폭적으로 없어질 때도 여전히 점성저층내의 흐름은 완전한 층류가 아니고, 속도구배의 위치 및 시간적인 변동이 크다. 고분자 수용액은 벽면에 대한 흐트러짐의 발생까지도 억제하는 것이 아니고 그 발달을 억제하는 것일 것이다.

고분자물질의 변형에 의한 에너지흡수는 전단속도가 가장 큰 위치, 즉 벽면에서 실시된다. 결국 고분자수용액은 벽에서 최고로 유효하게 난류의 성장을 억제할 수 있다. 변형분자는 다른 위치로부터 형을 회복하고 벽면으로 와서 또 돕는다. 난류억제제의 문제는 난류발생의 상세한 가설 및 학설을 전제로 한다고도 말할 수 있고, 난류억제 문제의 추구는 반대로 난류 발생의 메커니즘을 푸는 전망을 주는 것이라고 말할 수 있다.

2.2 대류열전달 상관식

Dittus, Boelter⁽³⁾는 매끄러운 관 내부를 유동하는 완전히 발달된 난류 유동의 열전달 계수를 식(1)과 같이 제시하였으며, 유체가 가열될 때, 즉 $T_w > T_b$ 인 경우에 지수 $n = 0.4$ 이며, 유체가 냉각될 때, 즉 $T_w < T_b$ 인 경우에 지수 $n = 0.3$ 이며, 식(1)의 적용 범위는 $0.7 < Pr < 160$, $Re > 10^4$, $L/D > 60$ 이다.

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^n \quad (1)$$

Corburn⁽⁴⁾는 매끄러운 관 내부를 유동하는 완전히 발달된 난류 유동의 열전달 계수를 식(2)와 같이 제시하였으며, 적용 범위는 Dittus, Boelter식과 동일하다.

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{1/3} \quad (2)$$

Sieder-Tate⁽⁵⁾는 점도가 온도에 따라 예민하게 변화하는 유체의 매끄러운 관에 대한 난류 유동의 열전달 계수를 식(3)과 같이 제시하였으며, 식의 적용 범위는 $0.7 < Pr < 167 \times 10^2$, $Re > 10^4$, $L/D > 60$ 이다.

$$Nu = 0.027 Re^{0.8} Pr^{1/3} \left(\frac{\mu_b}{\mu_w} \right)^{0.14} \quad (3)$$

Petukhov⁽⁶⁾는 매끄러운 관 및 거친 관에 대한 난류 유동의 열전달 계수를 식(4), 식(5)와 같이 제시하였으며, 유체가 가열될 때, 즉 $T_w > T_b$ 인 경우에 지수 $n = 0.11$ 이며, 유체가 냉각될 때, 즉 $T_w < T_b$ 인 경우에 지수 $n = 0.25$ 이며, 균일한 열유속 혹은 기체의 경우에 $n = 0$ 이며, 적용범위는 $0.5 < Pr < 2 \times 10^3$, $10^4 < Re < 5 \times 10^6$, $0.08 < \mu_w / \mu_b < 40$ 이다.

$$Nu = \frac{Re Pr}{X} \left(\frac{f}{8} \right) \left(\frac{\mu_b}{\mu_w} \right)^n \quad (4)$$

$$X = 1.07 + 12.7 (Pr^{2/3} - 1) \left(\frac{f}{8} \right)^{1/2} \quad (5)$$

Nusselt⁽⁷⁾는 매끄러운 관 내부를 유동하는 난류 유동의 열전달 계수를 식(6)과 같이 제시하였으며, 적용 범위는 $10 < L/D < 400$ 으로 좀더 광범위하다.

$$Nu = 0.036 Re^{0.8} Pr^{1/3} \left(\frac{L}{D} \right)^{0.055} \quad (6)$$

Notter, Sleicher⁽⁸⁾는 매끄러운 관 내부를 유동하는 완전히 발달된 난류 유동의 열전달 계수를 식(7), 식(8)과 같이 제시하였으며, 적용 범위는 $0.1 < Pr < 10^4$, $10^4 < Re < 10^6$, $L/D > 25$ 이다.

$$Nu = 5 + 0.016 Re^a Pr^b \quad (7)$$

$$a = 0.88 - \frac{0.24}{4 + Pr} \quad (8)$$

$$b = 0.33 + 0.5 e^{-0.6 Pr} \quad (9)$$

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

Zaidi, Sims(7)는 수직 상향 2성분 2상 유동장 내에 계면 활성제(surfactant)를 첨가하여 걸보기 물속도와 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 상 변화 물질로 혼합하여 층류 영역에서 열전달 특성에 관하여 연구를 수행한 결과, 층류 영역에서도 마찰 계수가 Re 의 증가에 따라 감소하며, 이때 무차원 열전달 계수 Nu 는 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 비비등 수직 하향 유동에서 고분자 수용액의 농도에 따르는 대류 열전달 특성을 분석하였다.

3. 실험

3.1 실험 장치

본 연구에서는 비비등 수직 하향 유동에서 고분자 수용액의 농도 변화에 따르는 대류 열전달에 관한 연구를 수행하기 위한 실험 장치를 수직 하향 시험부 내를 작동 유체가 유동하도록 설계되었다. 실험장치는 순환 펌프, 물속도 조절부, 물속도 계측부, 가열 시험부, 압력 계측부, 온도 계측부, 순환수 저장 탱크 등으로 구성되었다.

Fig.1은 시험부를 나타낸 것으로 시험부는 내경 26 mm, 두께 4 mm, 길이 1200 mm의 스테인레스 강 관이며, 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 관의 중앙에 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 mm이다. 가열 장치는 무단 가변 전력 조

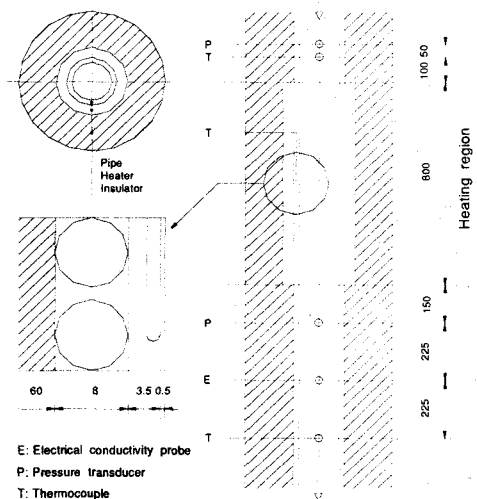


Fig. 1 Test section

절기(TPR)를 사용하여 시험부에 공급되는 전력을 조절하였다. 가열부 외부는 단열재를 사용하여 외부와 단열을 하였다. 단열재의 재료는 세라믹이며 성상은 백색 섬유상 조직이며, 열전도율은 $0.038 W/m \cdot ^\circ C$ 이고, 단열재의 내열 온도는 $1600 ^\circ C$ 이다.

3.2 실험 방법

비비등 수직 하향유동에서 고분자 수용액의 농도변화에 따르는 대류 열전달 특성에 관한 연구를 수행하기 위한 실험 방법은 작동 유체의 Re 는 $3.3 \times 10^4 \sim 6.8 \times 10^4$ 으로 변화 시켰다. 그리고 고분자 수용액의 농도는 고분자 물질을 첨가하지 않은 경우와 0 PPM ~ 500 PPM 으로 변화시켰다. 이때 0 PPM은 고분자물질을 첨가하지 않았을 경우이다. 시험부에 가열한 열유속은 $1 \times 10^5 W/m^2$ 인 가열 유동 조건에서 실험을 수행하였다. 실험에 사용된 고분자 물질은 폴리 아크릴 아마이드로 수용성이고, 분자량은 1.5×10^7 이며, 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 결정한 후 실험을 수행하였다. 시험부 입, 출구의 차압은 시험부 입, 출구에 스트레인 게이지 형식의 차압 측정용 압력 변환기를 연결하여 측정하였다. 압력 변환기의 사용 압력 범위는 $\pm 25 kPa$ 이며, 사용 온도 범위는 $0 ^\circ C - 50 ^\circ C$ 이다. 압력 변환기의 사용 범위 내의 측정 오차 한도는 $\pm 0.1 \%$ 이다. 압력 변환기에 의하여 검출된 신호는 A/D 변환기에서 아날로그 신호가 디지털 신호로 변환되며, 디지털 신호를 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. 비비등 수직 하향 유동에서 고분자 수용액의 농도에 대류 열전달 특성을 분석하기 위하여 가열 유동 조건에서 실험 조건의 변화에 따르는 시험부 내의 유체의 평균 온도, 관벽의 온도를 측정하여 관벽으로부터 유체로의 대류 열전달 효과를 계산하였다. 시험부 내의 유체의 평균 온도를 계산하기 위한 시험부 입, 출구 온도 및 시험부 관벽의 온도는 열전대를 사용하여 측정하였다. 이때 사용한 열전대는 K형이다. 열전대에 의

해 검출된 신호는 A/D 변환기에서 아날로그 신호가 디지털 신호로 변환시켜 컴퓨터에 입력시켰다. 이때 시험부 입, 출구의 온도 및 관벽의 온도를 측정하였으며, 측정 시간은 1/10초이다.

4. 실험 결과 및 고찰

Fig. 2 는 수직 하향 유동장에서 가열 장치에 의한 관 외벽으로의 가열 열유속이 $1 \times 10^5 W/m^2$ 인 가열 유동 조건에서 고분자 물질을 첨가하지 않았을 경우에 Re 를 $3.3 \times 10^4 \sim 6.8 \times 10^4$ 으로 변화시키며 대류 열전달계수를 산출하고 Sieder-tate 상관식과 비교하였다. 실험에 의한 대류 열전달 계수와 Sieder-Tate 상관식을 이용하여 산출한 대류 열전달 계수가 잘 일치함을 알 수 있다.

Fig. 3은 열유속이 $1 \times 10^5 W/m^2$ 으로 일정하게 유지될 때 고분자 수용액의 농도가 0 PPM ~ 500 PPM으로 변화시키며 대류열전달 계수를 도시한 그림이다. 이때 Re 를 $3.3 \times 10^4 \sim 6.8 \times 10^4$ 으로 변화시켰다. 그림을 종합적으로 살펴보면 Re 를 증가시킬수록 대류열전달 계수는 증가함을 볼 수 있었으나, 고분자 수용액의 농도가 증가함에 따라 대류 열전달 계수가 감소함을 알 수 있다. 고분자 수용액을 유동장내로 유동시키면 마찰저항을 효과적으로 감소시킬 수 있다는 기준

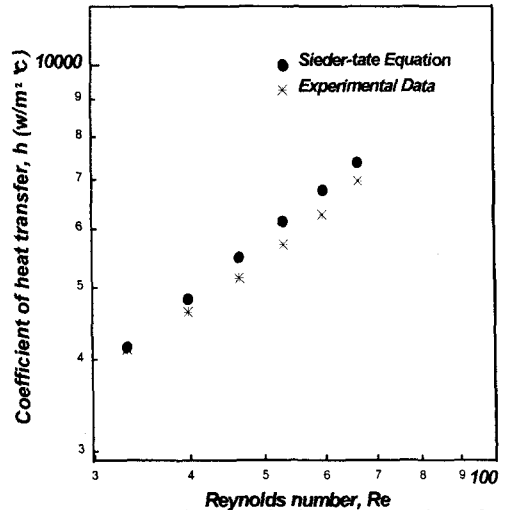


Fig. 2 Comparison of heat transfer for Sieder-Tate and experiment

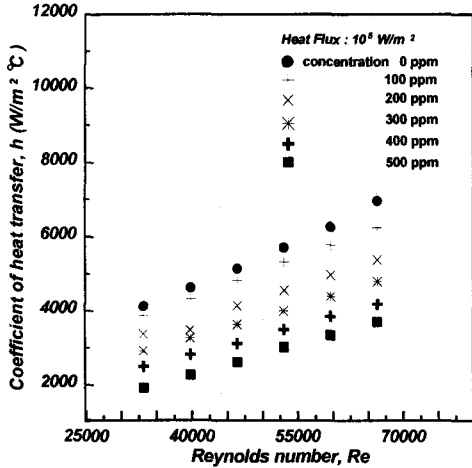


Fig. 3 Variation of heat transfer with polymer concentration

연구가있으나, 대류열전달에 저해 시킴을 알 수 있다. 이와 같은 현상을 지역난방수 등과 같은 곳에 적용시킨다면 마찰저항감소에 따른 에너지 절감과 효율적인 열관리를 할 수 있을 것으로 예측된다.

Fig. 4는 수직 하향 유동장에서 고분자 수용액의 농도가 0 PPM~500 PPM 으로 변화 시켰을 때 Re 를 변화에 따른 누셀트 수(Nusselt Number, Nu)를 나타낸 것이다. Re 를 증가시킬수록 Nu 는 증가하며, 고분자 수용액의 농도가 증가함에 따라 Nu 가 감소함을 알 수 있다.

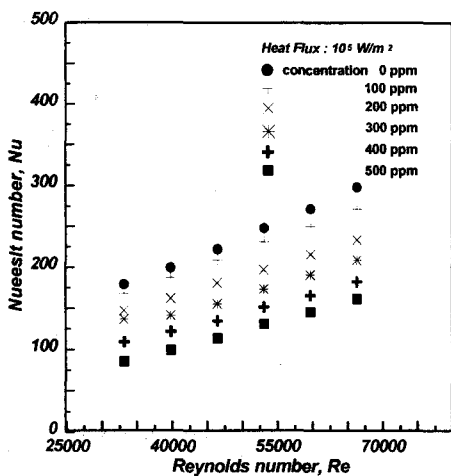


Fig. 4 Variation of Nusselt number with polymer concentration

Fig. 5는 고분자를 첨가하지 않은 경우(0 PPM)와 고분자 수용액의 농도가 100 PPM, 200 PPM, 300 PPM, 400 PPM, 500 PPM 일 때 Re 를 변화시키며 누셀트수의 비(Nu_{AP} / Nu_{NP})를 비교 도식한 그림이다. 여기서 Nu_{AP} 와 Nu_{NP} 는 고분자 물질을 첨가했을 경우와 첨가하지 않았을 경우 누셀트 수이다. 이 그림을 종합적으로 살펴보면 고분자 수용액의 농도가 증가함에 따라 Nu 가 감소함을 알 수 있다. 특히 고분자 수용액의 농도가 500 PPM 일 경우 고분자물질을 첨가하지 않았을 경우 보다 약 53% 열전달 효과가 감소됨을 볼 수 있었다. 따라서 고분자 수용액이 대류 열전달을 저하 시킨다는 것을 알 수 있으며 이러한 현상은 열병합 발전소의 난방수 수송 배관망 등과 같이 수송 단계에서의 효율적 열관리에 적용될 수 있을 것으로 사료된다.

Fig. 6은 대류 열전달에 밀접한 변수는 Re 수이므로 고분자를 첨가하지 않은 경우와 고분자 수용액의 농도가 200 PPM 일 경우에 Re 의 함수로 상관식을 Sieder-Tate 상관식과 비교 제시한 그림이다. Sieder-Tate 상관식은 식(10)을 변형시킨 식(11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Y = Nu(Pr)^{-0.33} (\mu_b / \mu_w)^{-0.14} \quad (10)$$

$$Y = 0.023(Re)^{0.8} \quad (11)$$

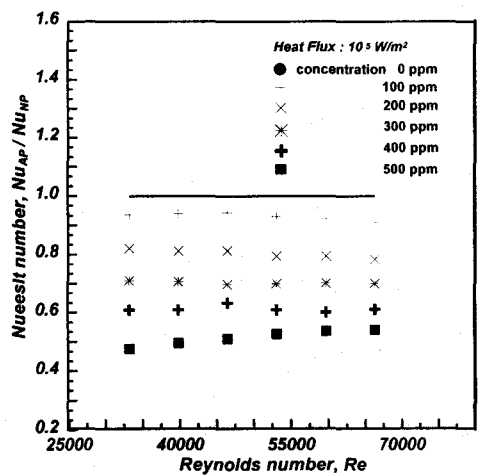


Fig. 5 Variation of Relative Nusselt number Nu_{AP}/Nu_{NP} with polymer concentration

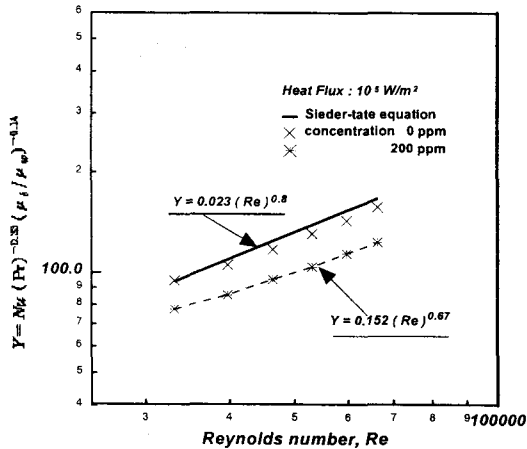


Fig.6 Correlation of heat transfer with polymer concentration

본 실험에서 농도가 200PPM일 경우 개발한 상관식은 식(12)와 같이 $0.152(Re)^{0.67}$ 에 비례하여 대류열전달이 증가함을 규명하였다.

$$Y = 0.152(Re)^{0.67} \quad (12)$$

4. 결론

본 연구는 비비등 수직 하향 유동에서 고분자 수용액의 농도 변화에 따르는 대류 열전달 특성에 관한 연구를 실험적으로 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 유동장의 대류 열전달 계수와 누셀트 수는 Re 의 증가에 따라 증가하며, 고분자 수용액의 농도 증가에 따라 감소한다.
- (2) 순수 수용액에 비해 고분자 수용액의 농도가 500PPM 일 경우 대류열전달은 약 53%가 감소됨을 확인하였다.
- (3) 200PPM의 고분자 수용액 경우 대류 열전달 계수는 $0.152(Re)^{0.67}$ 에 비례하여 증가함을 규명하였다.

참고 문헌

(1) Chermisinoff, N. P., 1989, "Handbook of Polymer Science and Technology", Marcel Dekker Inc.

(2) Fortuna, G., 1967, "Effect of Drag-Reducing Polymers on Flow Near a Wall", Ph. D. Thesis, Urbana Illinois.

(3) Dittus, F. W. and L. M. K. Boelter, 1930, Univ. Calif., Berkeley, Publ. Eng., Vol. 2, pp. 443.

(4) Colburn, A. P., 1933, "A Method of Correlating Forced Convection Heat Transfer Data and a Comparison with Liquid Frictions", Trans. AIChE, Vol. 29, pp. 174-210.

(5) Sieder, E. N. and G. E. Tate, 1936, "Heat Transfer and Pressure Drop of Liquids in Tubes", Ind. Eng. Chem., Vol. 28, pp. 1429-1435.

(6) Petukhov, B. S., 1970, "Heat Transfer and Friction in Turbulent Pipe Flow with Variable Physical Properties," in J. P. Hartnett and T. F. Irvine(eds.), Advances in Heat Transfer, Academic, New York, pp. 504-564.

(7) Nusselt, W., 1931, "Der Wärmeaustausch Zwischen Wand und Wasser im Rohr", Forsch. Geb. Ingenieurwes, Vol. 2, p. 309.

(8) Notter, R. H. and C. A. Sleicher, 1972, "A Solution to the Turbulent Graetz Problem. III. Fully Developed and Entry Heat Transfer Rates", Chem. Eng. Sci., Vol. 27, pp. 2073-2093.

(9) Paul, D. D., 1983, "Nucleate Boiling in Drag Reduction Polymer Solution", J. Rheol, Vol. 27, pp. 59-76.

(10) 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.

(11) 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.

(12) 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.