

# 2상류의 장거리 수송시 효율적인 열관리에 관한 실험적 연구

김재호\*, 김재근\*\*, 오을권\*\*\*, 차경옥\*\*\*\*

## Experimental Study on the Efficient Control of Heat of Long Distance Transport for Two-Phase Fluid

J.H. Kim, J.G. Kim, Y.K. Oh, K.O. Cha

**Key Words:** Vertical Downward flow(수직 하향 유동), Polymer Concentration(고분자 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 100mm diameter, 800mm heating length and  $1 \times 10^5 W/m^2$  heat flux. The polymer concentration ranged 0ppm to 500ppm with corresponding from superficial liquid velocity 1.25m/s to 2.5m/s in non boiling vertical up and 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 polymer concentration in non boiling up and vertical downward flow.

### 1. 서론

우리나라는 1980년대 초에 아랍지역에서 원유 생산량 감소에 따른 석유파동을 겪으며 대체에너지 개발과 에너지 절약에 관한 심각성을 인식하고 이에 관한 연구를 지속적으로 심도 있게 실시하고 있다. 이중에 기존 화력발전소는 전력을 생산하기 위한 작동유체중 터빈에서 유출된 고온의 유체를 응축기에서 냉각시킨 폐열을 인근 바다로 방출하였다. 이를 효율적으로 사용하기 위한 일환으로 1990년대 초반부터 주거밀집지역인 분당, 일산지역에 열병합발전소를 건설하여 발전소에서 전기를 발생하고 남은 폐열을 지역난방수로 활용하고 있다. 이와 같은 열병합발전소는 1990년대 말부터 대전공업단지를 비롯하여 각 지역 공업단

지내에 건설 중에 있다.<sup>(1)</sup> 그러나 1개의 열병합 발전소에서 약 30Km 범위의 인근 주거지역에 난방수로 공급함에 따른 수송비용이 연간 수억원이 소요되고 있다. 또한 열병합발전소에서 난방수로 공급할 때의 온도가 약 120℃이나 이를 가정예 공급하기전 열교환기에서 재 가열하여 약100℃ 범위에서 열을 공급한다. 이때 발전소로부터 공급된 난방수를 가정까지 공급하는 과정에 효율적으로 열관리를 하는 것이 매우 중요한 과제로 대두되고 있다. 이때 지역난방수를 수송시 작동유체의 온도가 약 120~50℃ 범위로 유동함으로 유동장내 작동유체의 상태는 2상류이다. 따라서 지역난방수의 수송비용 절감 및 효율적인 열관리에 관한 연구를 수행하기 위해서는 2상류동장에 관한 연구의 고찰이 선행되어야 하는 것이 필수적이다. 기체와 액체가 함께 공존하여 흐르는 기체-액체 2상 유동은 유동장의 기하학적 형상, 기상

\* 명지대학교 대학원 기계공학과  
\*\* 신성대학 기계·자동차 계열  
\*\*\* 조선대학교 정밀기계공학과  
\*\*\*\* 명지대학교 기계공학과

과 액상의 속도 및 분포 비율, 가열 열유속 등의 변화에 따라 다양한 유동 형태를 나타내며, 기체-액체 2상 유동의 해석을 위하여 다양한 모델들이 개발되었다. 한편 유동장의 압력 강하를 감소시킬 수 있는 방법으로는 고분자 물질, 미세 고체 입자, 섬유 부유물, 계면 활성제 등을 유동장에 첨가하는 방법 등이 있다. 이중 유동장에 미량의 고분자 물질을 첨가하여 작동 유체의 물성치 변화를 거의 유발시키지 않으면서도 팽목할 만한 정도의 압력 강하 특성 변화에 기인한 마찰 항력 감소 효과를 얻을 수 있음을 밝힌 연구 결과<sup>(2,3)</sup>가 에너지 절감의 측면에서 주목을 받고 있다. 유동장에 미량의 고분자 물질을 첨가하여 유동을 시킬 때 유체와 관벽 사이 마찰 저항으로 인한 압력 강하는 고분자 물질을 첨가하지 않았을 때에 비해서 감소하며, 이와 같은 압력 강하 감소 현상을 마찰 항력 감소(drag reduction)라 한다. 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.<sup>(4,5)</sup> 2상유동장에서 압력강하 감소와 대류 열전달은 대립관계이므로 이를 동시에 고려한 연구는 거의 없는 실정이다. 또한 난방수를 수송시킬 때 유동장내 마찰 항력 감소에 따른 수송경비 절감과 열손실을 방지하기 위한 연구는 극소수에 불과하다. 열병합발전소에서는 지역난방수의 공급을 인구 밀집지역 즉 고층건물에 공급한다. 이때 난방수가 유동하는 경로는 수평, 수직상향, 수직하향으로 유동하나 대다수의 연구는 수평유동 및 수직상향 유동장에서 대류열전달 및 저항감소에 대한 연구가 이루어 졌으며, 수직하향 유동장에서 대류열전달과 저항감소를 동시에 고려한 연구는 찾아 볼 수 없었다. 따라서 본 연구에서는 지역난방수를 모사할 수 있는 실험장치를 설계 제작하여 실험을 통하여 대류열전달에 관해 연구를 수행하여 난방수의 수송경비 절감과 열에너지의 효율적인 관리에 기여 하고자 한다.

## 2. 실험

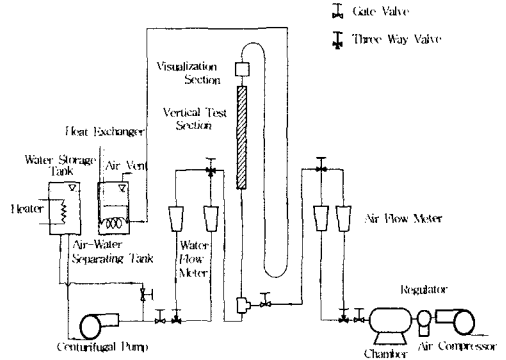


Fig. 1 Schematic diagram of the two phase flow Facility

### 2.1 실험 장치

Fig. 1은 본 실험에서 사용한 실험장치를 도시한 그림으로서 순환회로는 수직관 시험부 내부에 기-액 2상류가 유동할 수 있도록 설계, 제작하였다. 실험장치는 공기압축기, 압력조절탱크, 압력조절기, 기-액 혼합부, 공기 및 물속도 계측부, 원심펌프, 기-액 분리탱크, 순환수 저장탱크, 시험부로 구성하였다. 액상의 순환회로는 순환수 저장탱크 내의 물을 용량이 3마력인 부식방지용 내산스테인레스 원심펌프에 의해서 순간유량계를 통과한 후 시험부로 유입시켰으며, 공기압축기에서 분사된 공기는 압력조절기에 의하여 일정한 압력으로 조절된 후 순간유량계를 통과하고 기-액 혼합부를 거쳐 시험부로 유입시켰다. 시험부를 통과한 2상류는 기-액 분리탱크로부터 분리된 공기는 대기로 방출시킨 후 순환수를 저장탱크에 저장시키므로 일련의 순환회로를 완료시킨다. 이때 원심펌프와 순간유량계 사이에는 배수관을 순환수 저장탱크와 연결하였으며, 공기분사기와 압력조절기 사이에 공기저장탱크를 설치하여 각상의 압력과등을 안정화시키도록 하였다. 공기와 순환수 유량은 시험부의 입구부에서 소정의 유동양식이 형성되도록 관로에 장치한 게이트밸브로 각상의 유량을 조절하였다. 각 상의 길보기 속도계측용 순간유량계는 원심펌프와 공기압축기에서 각 상의 최대길보기속도를 계산하므로써 그 범위에 맞는 유량계를 선정하고, 유량계의 보정은

단위시간당 관내에 흐르는 체적유량으로 검증하였다. 본 실험에서 사용한 액상의 작동유체는 순수수용액과 고분자수용액으로서 용량이 300ℓ 용량인 순환수저장탱크에 저장하였다. 그 동안 선행된 연구에 의하면 마찰저항을 감소시키기 위해 주로 많이 첨가된 수용성 고분자 물질은 PAA와 PEO이지만 밀폐계 시스템에서는 기계적퇴화로 인하여 그 효과가 매우 낮았다. 그러나 최근에는 밀폐계로부터 저항감소에 보다 효과적인 첨가제 A611P로 규명된 결과<sup>(6)</sup>가 있었기에 본 연구에서는 분자량의 수가 1,400만~1,600만개로 구성되어 있는 A611P 고분자물질을 고려 선택하였다.

Fig. 2는 시험부를 나타낸 것으로 시험부는 내경 26 mm, 두께 4 mm, 길이 1200 mm의 스테인레스강관이며, 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 조절기(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 내열온도는 1600  $^\circ C$ 이다.

## 2.2 실험 방법

비비등 수직 및 하향 유동장에서 고분자 수용액의 농도변화에 따르는 대류 열전달 특성에 관

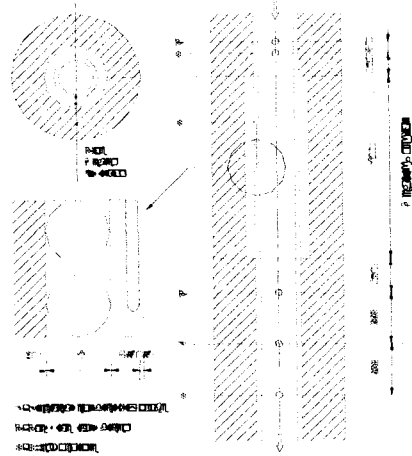


Fig. 2 Test section

한 연구를 수행하기 위한 실험 방법은 작동 유체의 겉보기 물속도( $J_{SM}$ )을 1.25~2.5m/s, 겉보기 공기속도( $J_{SM}$ )를 0.1~0.5m/s 변화 시켰다. 그리고 고분자 수용액의 농도는 고분자 물질을 첨가하지 않은 경우와 0 ppm~500 ppm으로 변화시켰다. 이때 0 PPM은 고분자물질을 첨가하지 않았을 경우이다. 시험부에 가열한 열유속은  $1 \times 10^5 W/m^2$  인 가열 유동 조건에서 실험을 수행하였다. 시험부 입·출구의 압력강하는 시험부 입·출구에 스트레인 게이지 형식의 차압 측정용 압력 변환기를 연결하여 측정하였다. 압력 변환기의 사용 압력 범위는  $\pm 25 kPa$  이며, 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 입력시켜다. 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. 이

때 사용한 열전대는 K형이다. 열전대에 의해 검출된 신호는 A/D 변환기에서 아날로그 신호가 디지털 신호로 변환시켜 컴퓨터에 입력시켰다. 이때 시험부 입, 출구의 온도 및 관벽의 온도를 측정하였으며, 측정 시간은 1/100초이다.

### 3. 실험 결과 및 고찰

Fig. 3 은 수직 하향 유동장에서 가열 장치에 의한 관 외벽으로의 가열 열유속이  $1 \times 10^5 \text{ W/m}^2$  인 가열 유동 조건에서 고분자 물질을 첨가하지 않았을 경우에  $Re$ 를  $3.3 \times 10^4 \sim 6.8 \times 10^4$  으로 변화시키며 대류열전달계수를 산출하고, Sieder-tate 상관식<sup>(7)</sup>과 비교하였다. 실험에 의한 대류열전달 계수와 Sieder-Tate 상관식을 이용하여 산출한 대류 열전달계수가 근사하게 일치함을 알 수 있다.

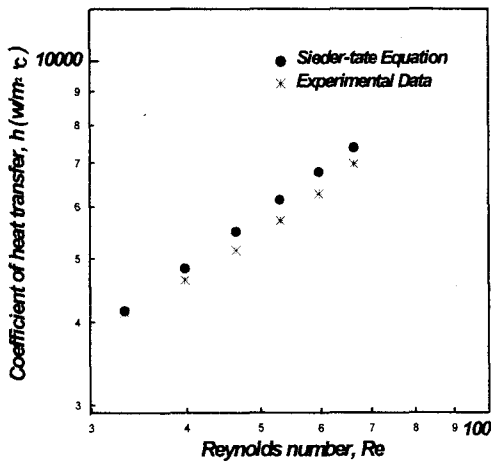


Fig. 3 Comparison of heat transfer for Sieder-Tate and experiment

Fig. 4는 열유속이  $1 \times 10^5 \text{ W/m}^2$  으로 일정하게 유지시키며  $J_{SL}=2.5 \text{ m/s}$ ,  $J_{SA} = 0.2\text{m/s}$ 로 유지하며 수직 상향 유동장에서 고분자 수용액의 농도가 0 ppm~300 ppm으로 변화시키며 저항감소율을 도기한 그림이다. 실험시간 경과에 따른 저항 감소율은 초기시간에 다소 급격히 감소되나 실험을 시작하여 30분이 경과한 후에는 30분 이전에 비

해 미소한 감소현상을 볼 수 있다. 이는 밀폐계로부터 펌프 및 유동장의 형상 등에 의한 기계적 퇴화가 실험초기 시간에 다소 급속히 발생하지만 최대 약 75%의 저항 감소효과가 있음을 볼 수 있다. 또한 농도가 증가할수록 저항 감소효과는 더

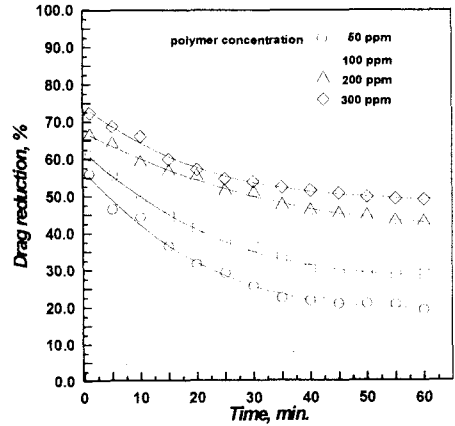


Fig. 4 Drag reduction versus time for polymer concentration at  $J_{SL}=2.5\text{m/s}$ ,  $J_{SA}=0.2\text{m/s}$

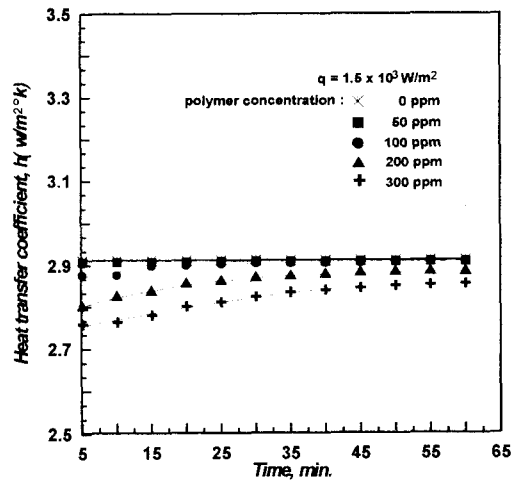


Fig. 5 Comparison of heat transfer coefficient with polymer concentration at  $J_{SL}=2.5 \text{ m/s}$ ,  $J_{SA}=0.1 \text{ m/s}$

욱 증가할 뿐만 아니라 기계적퇴화의 크기가 적음을 볼 수 있다. 이와 같은 유동장에 가격이 저

렵하고 작동유체에 물성치 변화를 거의 주지 않는 고분자물질을 첨가한다면 유체수송에 있어 커다란 펌프동력을 절감할 수 있게 된다.

Fig. 5는 열유속이  $1 \times 10^5 \text{ W/m}^2$ 으로 일정하게 유지시키며  $J_{SL}=2.5 \text{ m/s}$ ,  $J_{SA}=0.2 \text{ m/s}$ 로 유지하며 수직 상향 유동장에서 열유속이 일정할 때 고분자 수용액의 농도를 변화시켜 유동시간에 따른 대류 열전달계수를 비교 도시한 그림이다. 고분자 수용액이 0 ppm은 순수수용액으로서 고분자 수용액의 농도가 높을수록 대류 열전달계수는 차츰 차츰 감소하고 있음을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 고분자 수용액이 유체의 난류발생을 저지시켜 관의 벽근처 열경계층에 영향을 미치고 있다고 판단된다. 그러나 고분자수용액의 경우 유동시간이 경과할수록 대류 열전달계수가 커지는 것을 볼 수 있다. 이는 유동초기부터 고분자 수용액이 퇴화가 발생하여 저항감소효과는 감소시키지만 대류열전달은 증가시킨다는 사실을 알 수 있다. 이와 같은 현상을 열병합발전소의 지역 난방수에 적용한다면 매우 효율적일 것으로 예상된다. 즉 열병합발전소에서 인근주거지역으로 난방수로 수송할 때 난방수가 발전소에서 주거지역까지 도달하는데는 일정한 시간이 요구된다. 이때 난방수가 열병합발전소에서 주거지역까지 도달하는 시간을 고려하여 고분자물질의 적합한 농도를 만들어 수송시키면 펌프의 동력을 감소시킬 뿐만 아니라 주거지역까지 도착하는 시간 동안 수송관로에서 열의 손실을 막을 수 있으므로 더욱 효율적이라 판단된다.

Fig. 6은 수직 하향 유동장에서 고분자 수용액의 농도가 0 ppm~500 ppm으로 변화 시켰을 때  $J_{SA}$ 를 0.1m/s로 유지하고,  $J_{SL}$ 을 변화에 따른 누셀트 수(Nusselt Number,  $Nu$ )를 나타낸 것이다.  $J_{SL}$ 를 증가시킬수록  $Nu$ 는 증가하며, 고분자 수용액의 농도가 증가함에 따라  $Nu$ 가 감소함을 알 수 있다.

Fig. 7는 수직하향 유동장에서 고분자 수용액의  $J_{SL}=2.5 \text{ m/s}$ ,  $J_{SA}=0.1 \text{ m/s}$ 로 유동할때 고분자를 첨가하지 않은 경우(0 ppm)와 고분자 수용액의 농도가 100 ppm, 200ppm, 300 ppm, 400 ppm, 500 ppm 일 때 누셀트수의 비( $Nu_{AP} / Nu_{NP}$ )를

비교 도시한 그림이다. 여기서  $Nu_{AP}$ 와  $Nu_{NP}$ 는 고분자 물질을 첨가했을 경우와 첨가하지 않았을 경우 누셀트 수이다. 이때 작동유체가 실험장치를 유동한지 10분이 경과했을 때의 자료이다. 고분자 수용액의 농도가 증가함에 따라  $Nu$ 가 감소함을 알 수 있다. 특히 고분자 수용액의 농도

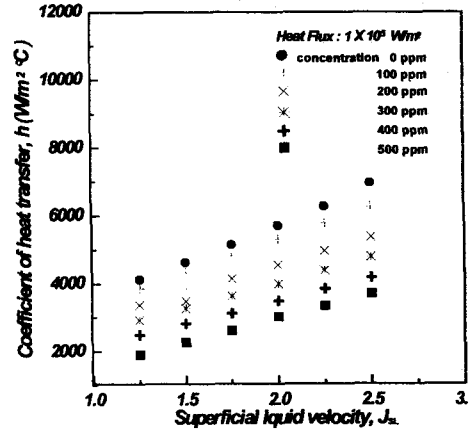


Fig. 6 Variation of Nusselt number with polymer concentration at  $J_{SA} = 0.1\text{m/s}$

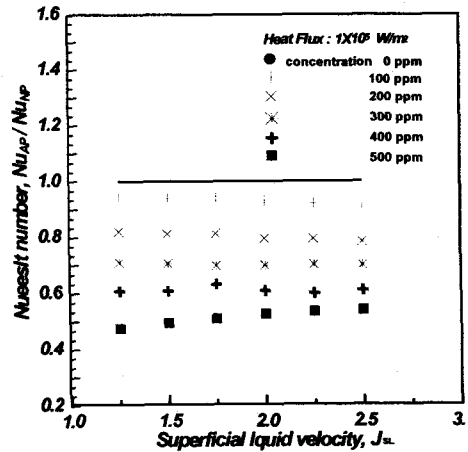


Fig. 7 Variation of Relative Nusselt number  $Nu_{AP}/Nu_{NP}$  with polymer concentration at  $J_{SL} = 2.0\text{m/s}$ ,  $J_{SA} = 0.1\text{m/s}$

가 500 ppm 일 경우 고분자물질을 첨가하지 않았을 경우 보다 약 53% 열전달 효과가 감소됨을 볼

수 있었다. 따라서 고분자 수용액이 대류 열전달을 저하시킨다는 것을 알 수 있으며 이러한 현상은 열병합 발전소의 난방수 수송 배관망 등과 같이 수송 단계에서의 효율적 열관리에 적용될 수 있을 것으로 사료된다.

Fig. 8은 대류 열전달에 밀접한 변수는  $Re$  수이므로 고분자를 첨가하지 않은 경우와 고분자 수용액의 농도가 200PPM일 경우에  $Re$ 의 함수로 상관식을 Sieder-Tate 상관식과 비교 제시한 그림이다. Sieder-Tate 상관식은 식(1)을 변형시키면 식(2)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Y = Nu(Pr)^{-0.33} (\mu_b/\mu_w)^{-0.14} \quad (1)$$

$$Y = 0.023(Re)^{0.8} \quad (2)$$

본 실험에서 농도가 200PPM일 경우 개발한 상관식은 식(3)과 같이  $0.152(Re)^{0.67}$ 에 비례하여 대류열전달이 증가함을 규명하였다.

$$Y = 0.152(Re)^{0.67} \quad (3)$$

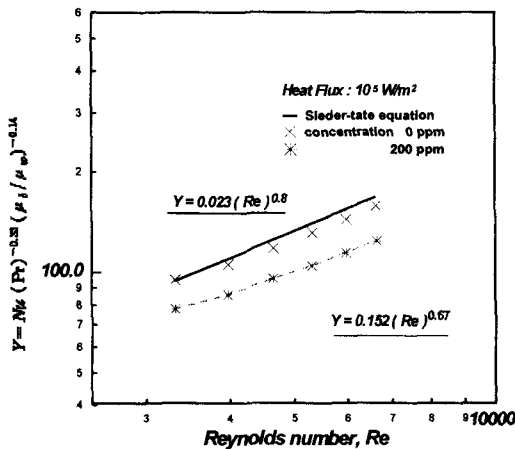


Fig. 8 Correlation of heat transfer with polymer concentration

#### 4. 결론

본 연구는 비비등 수직 상향 및 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 의 증가에 따라 증가하며, 고분자 수용액의 농도 증가에 따라 감소한다.

(2) 유동장에 고분자 물질을 첨가한 수용액의 경우의 대류 열전달은 고분자 물질의 첨가 농도가 증가할수록 감소한다. 그러나 유동시간이 경과할수록 대류 열전달은 향상됨을 규명하였다. 이와 같은 현상을 적용범위를 달리한다면 효율적인 열 관리를 할 수 있을 것으로 판단된다.

(3) 200 ppm의 고분자 수용액 경우 대류 열전달 계수는  $0.152(Re)^{0.67}$ 에 비례하여 증가함을 규명하였다.

#### 참고 문헌

- (1) 김상훈; "한국형 열병합발전시설 '97년 완공 순조", 에너지관리공단, Vol.236, pp.74-81, 1996.
- (2) Chermisinoff, N. P., 1989, "Handbook of Polymer Science and Technology", Marcel Dekker Inc.
- (3) Sellin, R. H. J. Hoyt, J. W. and Scrivener, O. 1982, "The Effect of Drag Reduction Additives on fluid flows and Their Industrial Applications. Part 1: Basic Aspects.", J. Hydraulic Res. Vol.20, No. 29, pp.235-292.
- (4) Virk, P. S., 1971, "An Elastic Sublayer Model for Drag Reduction by Dilute Solution of Linear Macromolecules", JFM 45, pp. 417- 440.
- (5) 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.
- (6) Cha, K. O. and Kim, J. G. 1996, "A Study on the Drag Reduction with Polymer Additives." SAREK, Vol.8, No.2, PP.198-207.
- (7) 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.