

[논문] 태양에너지

Solar Energy

Vol. 19, No. 2, 1999

고분자 첨가제에 의한 OTEC용 판형 열교환기의 마찰저항감소 효과 연구

김능수*, 윤석만*, 서태범**, 김종보**

* 인하대학교 대학원

** 인하대학교 기계공학과

Effect of Polymer Additives on Drag Reduction for a Plate Type Heat Exchanger in OTEC Applications

N. S. Kim^{*}, S. M. Yoon^{*}, T. B. Seo^{**}, C. B. Kim^{**}

* *Graduate School, In-ha University*

** *Department of Mechanical Engineering, In-ha University*

ABSTRACT

Experimental investigation has been carried out to determine drag reducing effects of polymer additives for a plate type heat exchanger(evaporator or condenser) in OTEC power plant applications, where the pressure drop in the heat exchangers takes up 70~80% of the total pumping power in the existing system. The rate of drag reduction was investigated with various polymer concentrations and mass flow rates. Experiments were undertaken for a test section in Alfa-Laval plate heat exchanger utilizing Poly Ethylene Oxide(Mw 5×10^6) as polymer additives. Concentrations of polymer additives were 5, 10, 20, 30, 40, 50, 100, 200, 400 wppm at 25°C and mass flow rates were 0.6kg/s, 0.7kg/s, 0.8kg/s and 0.9kg/s in normal operating ranges for a 15kW Alfa-Laval plate heat exchanger. The maximum effects of drag reductions were found at

approximately 0.7kg/s of mass flow rate. The results show that there exists the optimum mass flow rate for the plate heat exchanger to obtain maximum drag reductions. Drag reduction of 20% means considerable savings in pumping power for a large size of OTEC plant

1. 서 론

1.1 연구배경

해양은 지구표면의 3/4을 차지하고 있으며 공해가 없고 고갈되지 않는 무한대의 에너지를 가지고 있기 때문에 이 에너지를 활용할 수 있다면 화석연료의 연소로 인한 지구 온난화 현상 및 대기오염과 원자력 에너지로 인한 방사선 관련 문제를 줄일 수 있다.¹⁾ 또한 현재 사용되고 있는 화석연료나 우라늄은 전세계적으로 그 부존량이 제한되어 있어 멀지않은 장래에 심각한 에너지 자원난이 예견되고 있는 실정이므로 대체 에너지 원 및 환경보전 차원에서 해양에너지는 청정 에너지로 크게 기대되는 21세기형 에너지 자원이다.^{2, 3)}

해양 에너지는 조력, 파력, 해양온도차 및 해조류력이 있으나 해양온도차를 이용한 에너지 전환 기술을 제외한 다른 전환 기술 등은 시시각각 변화하는 대기 변화에 상당히 민감하므로 연중 일정하게 에너지를 얻어내기 힘들다. 그러나 해양온도차를 이용하게 되면 해수의 비열이 크기 때문에 태양열의 단점인 주야 온도차 뿐 아니라 연중 온도차에 구애받지 않고 고른 에너지를 얻어낼 수 있다. 따라서 전 세계적으로 차세대 에너지 수요를 충족시켜 줄 엄청난 가능성을 가지고 있다.

해양에너지를 활용하는 기술로써는 현재 해양 온도차 발전(Ocean Thermal Energy Conservation, 혹은 OTEC)이 가장 유망한 기술이다. OTEC은 태양 복사열에 의해 가열된 표면해수(22~26°C)와 심해수(4~7°C)간의 온도차를 이용하여 전력⁴⁾ 및 부산물⁵⁾을 생산하는 기술로써 그

온도차가 15°C~20°C가 넘으면 전력생산에 적합한 것으로 보고 있다. 그러나 전력 생산을 위해서는 상당히 많은 양의 해수를 플랜트로 펴 올려야 하기 때문에 단위질량당 해수에서 가능한 최대의 에너지를 뽑아내기 위해 해수량을 최소화하는 것이 가장 중요하고, 따라서 해수의 펌핑량 및 이와 관련된 배관시설이 플랜트의 크기를 결정짓는 주요 요소가 된다.⁶⁾

OTEC은 펌프나 터빈 등 부차적 설비의 비가역성으로 인한 손실 외에도 해수를 사용할 때 배관 내에서 마찰손실을 동반하게 된다. 다량의 해수를 짧은 시간에 열교환기로 수송할 때 해수는 난류상태로 유동하게 되는데 이는 층류인 경우보다 더 큰 마찰저항으로 인한 손실을 얻게 되어 수송시 펌핑동력의 증가를 가져오게 된다. 만일 해수를 수송할 때 배관 내에서 발생하는 압력 손실을 줄이게 되면, 수송에 필요한 펌핑동력의 감소와 배관 직경의 소형화에 따른 플랜트의 설비 축소를 통해 플랜트 초기 투자 비용을 줄일 수 있으며 OTEC에 상당한 효율 증대를 가져올 수 있다.

따라서 본 연구 목적은 초기 마찰저항감소 효과가 높은 수용성 고분자를 뉴턴유체인 물에 첨가하여 이를 판형 열교환기⁷⁾로 구성된 폐회로에서 순환시키면서 난류 마찰저항감소 현상이 고분자의 농도, 유량에 따라 어떻게 변화하는가를 비교, 분석하고 이를 해양온도차 발전에 적용시켜 펌핑동력을 줄이는데 필요한 기초자료로 사용하고자 한다. 특히, 판형열교환기는 다른 열교환기와 비교할 때 설치면적이 작으면서도 열효율이 큰 장점을 가지고 있어, 첨가제에 의한 열전달감소 현상을 보완하기 위하여 선정하였다.

1.2 마찰저항 감소

고분자에 의한 마찰저항감소 현상이란 유체가 난류상태로 매끈한 원형관을 흐를 때 분자량이 매우 높은(약 $10^5 \sim 10^7$) 고분자 첨가제를 극소량 유체에 첨가시켜 줌으로써 유동 중의 난류를 억제시켜 마찰저항을 감소시키는 것이다. 따라서 수송에 필요한 펌프의 용량을 줄일 수 있으며, 단위 시간당 유량의 증가 효과를 관 직경의 감소효과로도 활용할 수 있다. 고분자 첨가제에 의한 마찰저항감소 현상은 용매로 물을 사용하였을 경우 최대 80% 까지 마찰저항감소 효과를 주는 것이 보고되고 있다.⁸⁾

고분자의 마찰저항감소의 기구(mechanism)를 설명하는 여러 이론들이 제안되어 왔으나, 광범위하고 보편적으로 받아들일 수 있는 모델(model)은 나타나지 않았다. 일반적으로 마찰저항감소의 개시점(onset)은 고분자 시료와 실험의 기하학적 조건의 차이에 따라 변하는데, 대개 마찰저항감소의 개시점은 고분자의 분자량이 높을수록 혹은 관의 직경이 작을수록, 더 낮은 레이놀드수에서

발생한다. 어떤 경우에는 마찰저항감소의 개시점이 층류에서 난류로의 천이과정에서 발생하며, 구조가 다른 랜덤 코일(random coil)형과 강체 막대(rigid rod)형 고분자용액에서는 개시점이 서로 다르다.

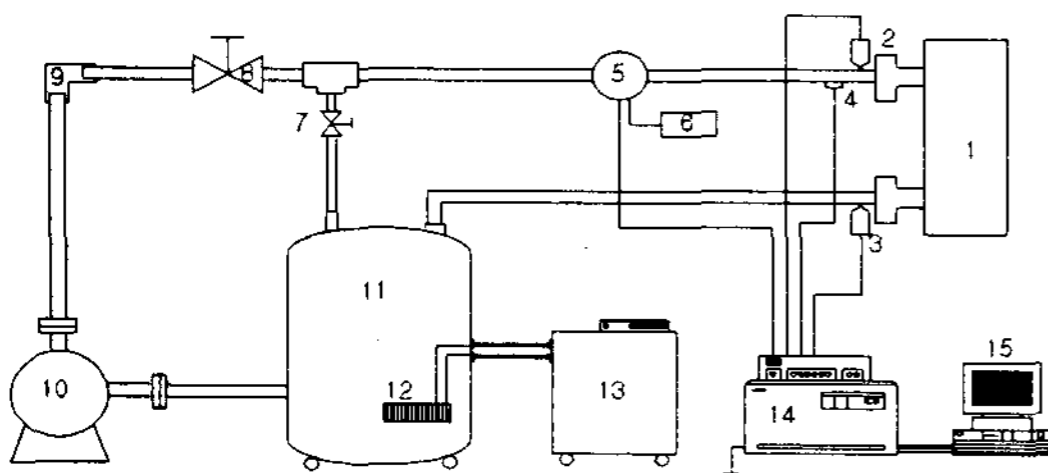
또한 최대저항감소 현상은 주어진 고분자와 용매에 대한 흐름의 조건, 고분자량과 농도의 특별한 조합에 의해 더 이상 증가할 수 없는 최대저항감소(최소마찰저항)의 경계점을 갖는다.⁹⁾ 그러나 이와같이 실험적으로 설명된 최대저항감소 현상은 절대적인 것이 아니다. 따라서 마찰저항감소 현상을 정확하게 설명하는 기구는 쉽게 얻어질 수 없으며 예측가능한 모델은 거시적 유체역학에서 관찰된 변화들과 분자적 관점에서의 변수들을 하나로 묶을 수 있어야 한다.

2. 실험

2.1 실험 장치 및 재료

Fig. 1은 본 연구를 위하여 제작된 실험 장치의 개략도이다. 본 실험 장치는 해양온도차 발전의 증발기 및 응축기로 사용될 수 있는 판형 열교환기를 이용하여 난류 마찰저항감소 현상과 고분자의 퇴화 실험을 위한 장치로서 15kW급 Alfa-Laval 판형 열교환기(모델명 CB26-24)를 시험부로 구성하였으며, 충분한 난류를 얻기 위해 펌프를 지나 밸브로부터 시험부까지 유입되는 길이를 2000mm으로 하였고, 퇴화 현상을 보기 위해 순환회로를 구성하였으며 미세 유량조절을 위해 by-pass밸브를 주(main)밸브가 위치한 곳에 함께 설치하였다.

펌프는 유로부 손실이 적은 마그네트 펌프를 사용하였고 펌프를 구동할 때 발생하는 진동을 줄여 시스템에 미치는 영향을 최소화하기 위해 열교환기와 연결된 동관(3/4 inch)과 펌프 토출관은 플렉서블 호스를 사용하여 연결하였다. 한편,



- 1. Plate Heat Exchanger
- 2. 3 Pressure Transducer
- 4. Thermocouple
- 5. Flowmeter
- 6. Displayer
- 7. By-pass Valve
- 8. Main Valve
- 9. Flexible Hose
- 10. Pump
- 11. Storage Tank
- 12. Fin-Tube Heat Exchanger
- 13. Chiller
- 14. Data Logger
- 15. PC

Fig. 1. The Schematic Diagram of Drag Reduction Test Loop

판형 열교환기로 유입되는 온도를 일정하게 하기 위해 핀-튜브 열교환기를 탱크에 설치하고 온도 조절기를 사용하여 입구 온도를 일정하게 유지하였다.

시스템의 상태를 파악하는데 필요한 온도 및 압력을 측정하기 위해서 열전대와 압력계를 부착하였다(Fig. 1참조). T-type 열전대를 열교환기 입구의 내부에 설치하여 유동유체와 직접 접촉하도록 하여 측정값의 신뢰도를 높였다. 압력을 측정하기 위해서 압력 변환기(pressure transducer)를 사용하였다. 측정 위치는 판형 열교환기의 입구 및 출구이며, 이 곳에서 미리 보정된 과정을 거친 압력계로 측정하였다.

또한 유량을 측정하기 위해 터빈 미터를 사용하였는데 터빈 미터는 유체의 체적을 측정하는 체적유량계이므로 정확한 질량유량을 얻기 위해서 실제 실험 데이터를 취하기 전에 질량유량계로 보정하여 사용하였다.

이상과 같은 장치를 통하여 얻은 결과들을 처리하기 위해 DATA ACQUISITION/CONTROL UNIT를 이용하였고, 프로그램을 이용하여 온도, 압력, 유량 등 각종 수치들을 가지고 실험에서 얻고자 하는 변수의 함수로 나타내어 접속된 PC의 하드 디스크에 저장하였다.

마찰저항감소를 위해 사용된 고분자는 초기마찰저항감소특성이 우수한 대표적인 고분자로서 그 동안 많은 연구가 진행되었던¹⁰⁾, Poly Ethylene Oxide로 분자량 5×10^6 의 수용성 고분자를 사용하였고 계면활성제, Hexadecyltrimethyl - Ammonium Chloride($C_{19}H_{42}ClN$)이 사용되었다.

2.2 실험조건 및 방법

해양온도차 발전 시스템의 증발기로 유입되는 가장 대표적인 온도¹¹⁾를 $25^\circ C$ 라 가정하고, 이를 모사하기 위해 열교환기 입구에서의 작동 유체의 온도를 $25^\circ C$ 로 하였다. 고분자 농도에 대한 마찰저항감소와 퇴화 현상을 측정하기 위하여 5, 10,

20, 30, 40, 50, 100, 200, 400wppm으로 고분자의 농도를 변화시켰다.

실험에 필요한 고분자 첨가용액을 상온에서 자석식 교반기(magnetic stirrer)를 사용하여 고분자 분말이 용매에 완전히 용해될 수 있도록 장시간 섞어 0.5wt의 고농도 용액(stock solution)을 제조한 후 실험에 사용하기 전에 5, 10, 20, 30, 40, 50, 100, 200, 400wppm으로 물로 희석하여 2일간 안정화하여 실험에 사용하였다. 물만을 순환 회로에 넣고 실험조건의 온도와 유속에서 순환시키며 이때의 압력손실과 유량을 측정하여 마찰저항감소실험의 기준이 되도록 한 후 안정화된 각 농도의 고분자 용액을 탱크에 넣고 다시 순환시키며 압력손실과 유량을 측정하였다.

열교환기 입구와 출구에 설치된 압력계로부터 차압을 측정하였고, 이 때의 차압은 판형 열교환기 각 plate에서의 압력손실이 아니라 열교환기 1차측의 전체 압력차가 된다.

실험에 사용된 밸브는 볼밸브를 사용하여 펌프에서 나온 유체가 시험부에 들어가기 전까지의 압력 손실을 최소화 하도록 하였으며 by-pass밸브로 미세유량을 조절하여 각 실험마다 유량 오차를 최소화하였다. 각 실험이 끝난 후 다음 실험의 농도에 영향을 미치지 않도록 탱크를 깨끗이 청소하고 물을 여러 번 순환시켜 측정치의 정확도를 높이고자 하였다.

실험 시간에서 펌프 구동 초기의 불규칙한 수치를 제외하기 위하여 펌프를 구동시킨 후 10초 후부터 데이터를 받기 시작했으며 실험은 각각의 조건에 대하여 10분간 측정하였는데 이는 해양온도차 발전 시스템에서 증발기로 들어가기 전의 온해수 파이프(warm water pipe)로부터 증발기를 통과해 나갈 때까지 유체 유동이 배관 내에서 머무는데 충분한 시간이라고 판단된다. 실험중 폐회로를 흐르는 유체는 관 마찰열과 펌프의 모터에서 발생하는 열로 인해 온도 상승이 생기게 되는데 이를 방지하기 위해 핀-튜브 열교환기를 탱

크에 설치하여 작동유체의 온도가 25°C로 유지되도록 하였다. 물만을 순환시킬 때의 압력강하를 ΔP_w 라 하고 고분자와 계면활성제를 투입한 경우의 압력 강하를 ΔP_p 라 할 때 마찰저항 감소를 DR(%)은 다음과 같이 표시된다.

$$DR(\%) = \left(1 - \frac{\Delta P_p}{\Delta P_w}\right) \times 100 \quad (1)$$

3. 실험결과 및 고찰

본 연구에서는 뉴턴유체인 물과 비뉴턴유체인 고분자 용액을 혼합한 후 판형 열교환기를 통과시켰을 때, 고분자의 종류 및 농도가 마찰저항감소와 고분자의 퇴화에 미치는 영향을 실험적으로 조사하였다.

3.1 동일 농도에서 유량에 따른 마찰저항 감소 효과 비교

Fig. 2는 유량 0.6kg/s, 0.7kg/s, 0.8kg/s, 0.9kg/s 일 때 고분자의 농도를 각각 5, 10, 20wppm으로 변화시키면서 초기 마찰저항감소율을 비교한 것이다. 실험결과는 유량 0.7kg/s ($V=4.0\text{m/s}$, $Re_D=66300$, D =열교환기 입구 pipe 직경)에서 각각 20.8%, 23.5%, 24.5%의 마찰저항 감소효과를 보이다가 다시 유량이 증가함에 따라 감소하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 3은 유량 0.6kg/s, 0.7kg/s, 0.8kg/s, 0.9kg/s 에서 고분자의 농도를 각각 30, 40, 50wppm으로 하였을 때의 초기 마찰저항감소율을 비교한 것인데 유량 0.7kg/s에서 각각 22.1%, 22.4%, 21.0%의 마찰저항감소율을 보이고 있다.

Fig. 4는 유량 0.6kg/s, 0.7kg/s, 0.8kg/s, 0.9kg/s 일 때 비교적 고농도 용액인 100, 200, 400wppm으로 실험한 결과를 보여주며 유량 0.7kg/s에서 각각 20.4%, 20.8%, 19.8%의 마찰저

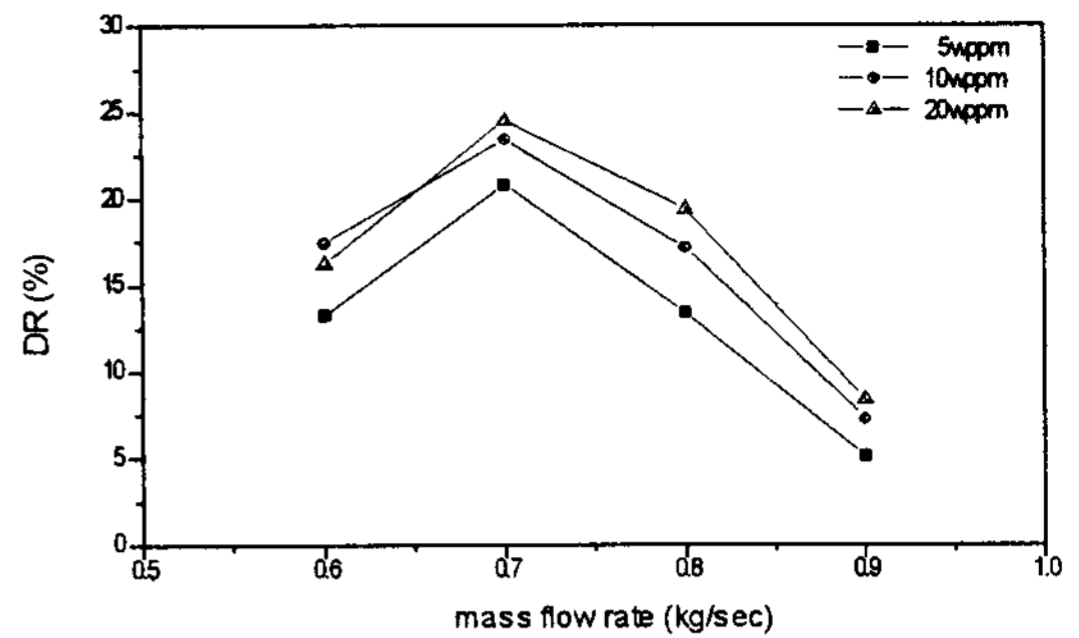


Fig. 2. Drag reduction at various mass flow rates with PEO ($M_w 5 \times 10^6$)

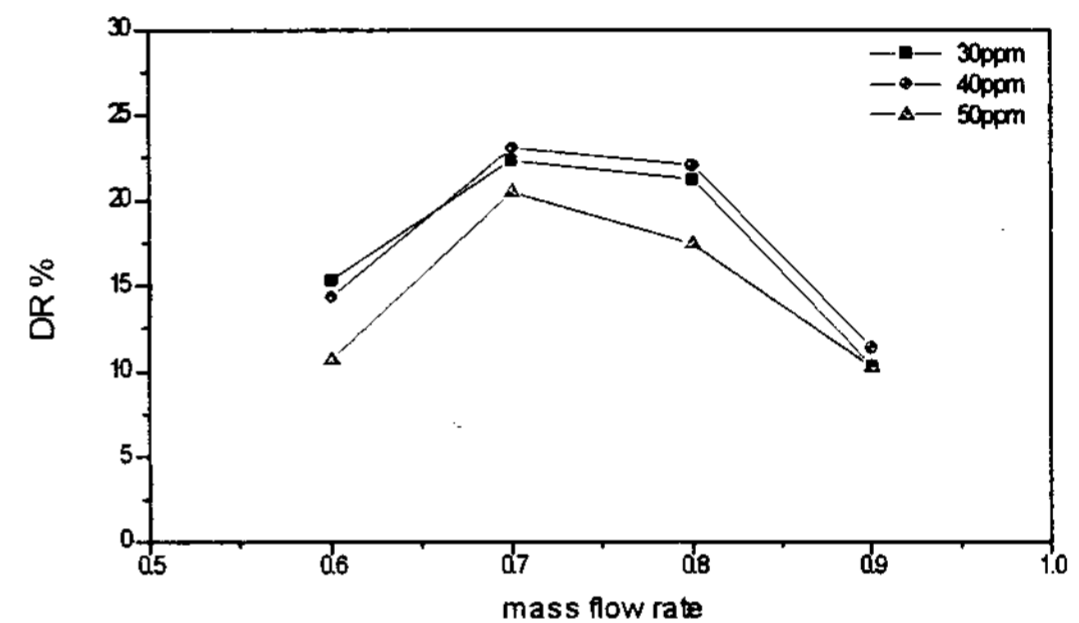


Fig. 3. Drag reduction at various mass flow rates with PEO ($M_w 5 \times 10^6$)

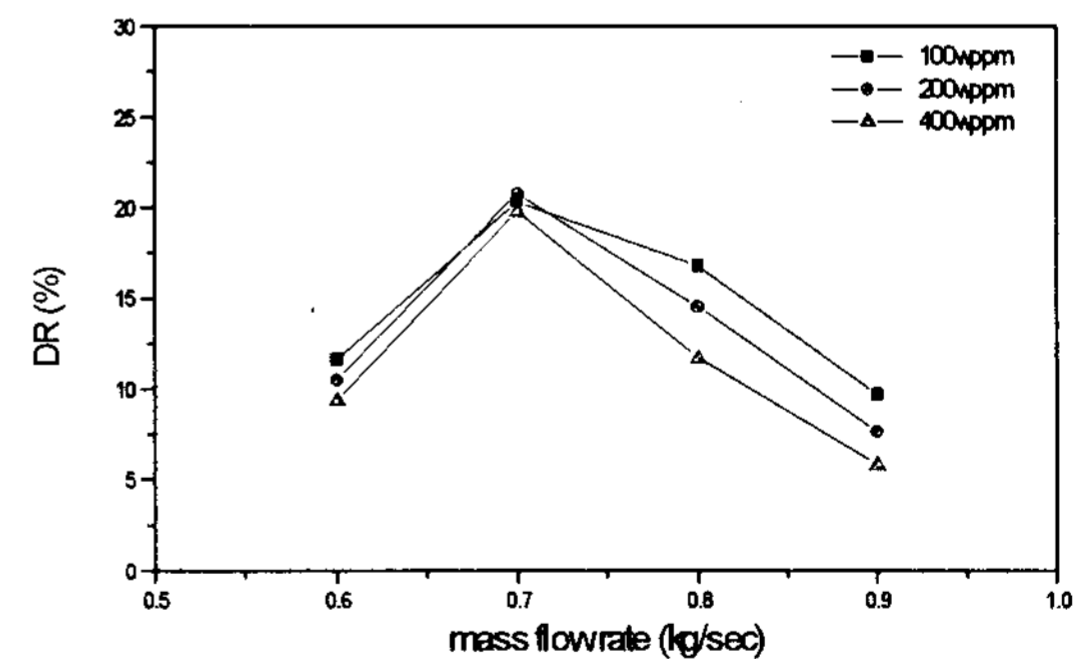


Fig. 4. Drag reduction at various mass flow rates with PEO ($M_w 5 \times 10^6$)

항감소율을 보이고 있다.

이 실험 결과들은 직관을 사용한 실험에서 유량 증가에 따라 감소하던 마찰계수와 달리 0.7kg/s에서 최대값을 보이다가 다시 감소하는

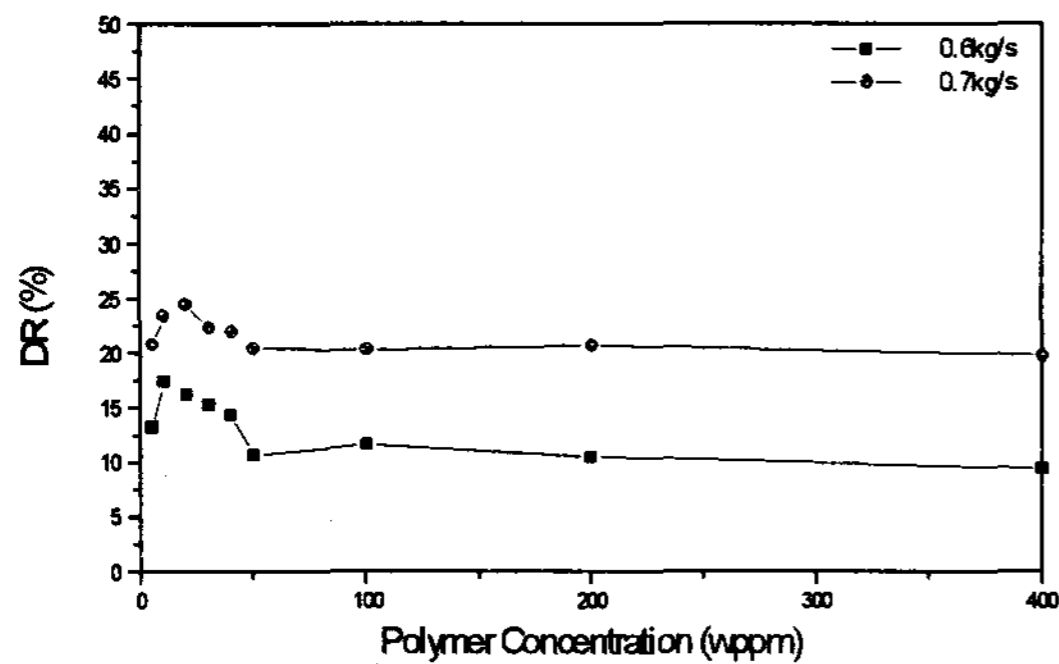


Fig. 5. Drag reduction with different polymer concentrations with PEO ($M_w 5 \times 10^6$)

경향을 보였고 각 농도에서 유량에 따라 정성적으로 일치함을 보였다. 이는 높은 레이놀드수에서는 직관과는 달리 판형열교환기의 포트 부분에서 고분자의 마찰저항감소 기구(mechanism)가 더 이상 발달하기 않기 때문인 것으로 보인다.

3.2 동일유량에서 농도에 대한 마찰저항 감소효과 비교

Fig. 5는 유량 0.6kg/s, 0.7kg/s에 대하여 농도 5, 10, 20, 30, 40, 50, 100, 200, 400wppm에 대한 초기 마찰저항감소 효과를 나타낸다. 유량이 0.6kg/s일때 고분자 농도 10wppm에서 최고 값을 나타냈고 유량 0.7kg/s 일 때 고분자 농도 20wppm에서 최고 값을 나타낸다. Fig. 6은 유량 0.8kg/s, 0.9kg/s에 대한 농도 5, 10, 20, 30, 40, 50, 100, 200, 400wppm 으로 변화시킨 초기 마찰저항감소 효과를 나타내는데 0.8kg/s 일 때는 40wppm에서 0.9kg/s 일 때는 40wppm에서 최고 마찰저항감소 효과를 나타내었다.

유량이 늘어남에 따라 고분자 농도가 높아짐에 따라 마찰저항 감소 효과가 더 크게 나타났다. 그러나 고분자용액이 고농도인 경우 오히려 효과가 적게 나타났는데, 이것은 고분자 용액의 농도가 높아짐에 따라 유체의 점도가 높아지므로 오히려 마찰저항감소 효과를 줄이는 경우가 있는 것으로 판단된다.

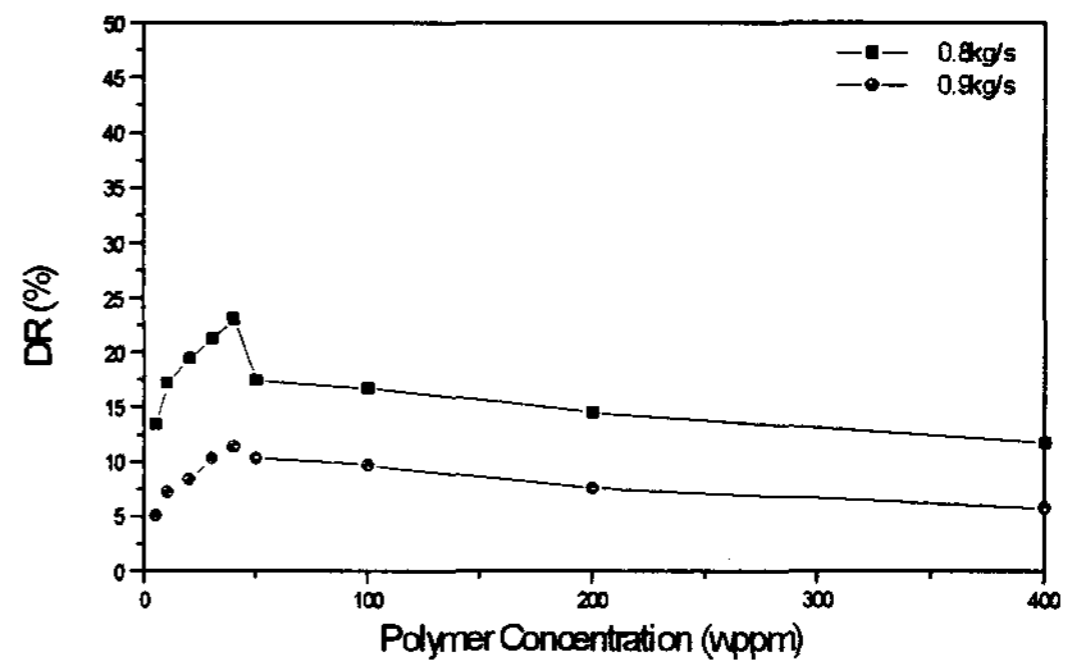


Fig. 6. Drag reduction with different polymer concentrations with PEO ($M_w 5 \times 10^6$)

3.3 퇴화 경향

전 실험을 통하여 약 10분간 수용성 고분자 순환 실험을 하는 전체 실험시간동안 고분자의 마찰저항감소 퇴화현상은 거의 나타나지 않았다. 따라서 고분자의 기계적 퇴화가 열교환기 내에서의 마찰저항감소 현상에 영향을 주지는 않는다고 할 수 있다.

3.4 계면활성제를 부가한 경우의 비교

고분자 첨가제와 비교하기 위하여 또 하나의 마찰저항감소제인 계면활성제를 사용하여 실험을 수행하였으며 마찰저항 실험온도는 수용성 고분자와 같이 25°C에서 수행되었다. 고분자의 경우와 달리 저농도에서는 마찰저항 감소 효과가 없었으며 100wppm 이상 일 때 5%정도의 마찰저항감소 현상을 볼 수 있었고 퇴화 경향은 실험시간 10분 동안 전혀 나타나지 않았다. 계면활성제 첨가효과가 고분자와 달리 고농도에서 나타나는 이유는 고분자와 다른 마찰저항감소 기구를 가지고 있기 때문인 것으로 보인다.

4. 결 론

본 연구에서는 마찰저항감소용 첨가제로써 초기 효과가 높으며 해양온도차 발전용으로 사용가

능한 수용성 고분자(Poly Ethylene Oxide, 분자량 5×10^6)와 계면활성제(Hexadecyltrimethyl - Ammonium Chloride, $C_{19}H_{42}ClN$)를 사용하여 난류 마찰저항감소 현상과 고분자의 기계적 퇴화에 영향을 미치는 요소인 고분자의 농도, 유속, 온도 등에 대하여 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 실험에 사용된 15kW 판형 열교환기의 사용 범위인 유량 0.6kg/s~0.9kg/s에 대하여 유량을 변화시켜가며 마찰저항감소 효과를 비교한 결과, 실험에 사용된 모든 고분자 첨가제 농도에서 0.7kg/s ($V=4.0m/s$, $Re=66300$) 일 때 20% 이상의 마찰저항감소 효과를 얻었으며 농도 20wppm 일 때는 24.5%를 얻을 수 있었다.
- (2) 농도에 따른 마찰저항감소는 유속에 따라 저농도의 용액에서 일어났으며 상대적으로 고농도의 용액에서는 마찰저항감소가 오히려 줄어들었다. 따라서 해양 온도차 발전같이 다량의 고분자 용액을 필요로 하는 분야에서는 저농도의 용액을 사용하여 마찰저항감소 효과를 볼 수 있으므로 기술적, 경제적으로 큰 이점을 가지고 있다고 할 수 있다.
- (3) 실험범위안에서 전체적으로 평균 20%정도의 마찰저항감소 효과를 나타내고 있으며, 해양 온도차 발전과 같은 대형 시스템에 응용될 때에는 펌핑동력의 절약에 실제적으로 크게 기여할것으로 기대된다.
- (4) 계면활성제 첨가 용액으로 실험하여 고분자와 비교한 결과 고분자와 달리 고농도에서 마찰저항감소 효과가 나타나고 있다.
- (5) 실험 초기 10분간 고분자의 퇴화는 거의 나타나지 않고 있으므로 OTEC 시스템내에서 해수가 판형 열교환기를 1회적으로 지나가는 경우 고분자의 기계적 퇴화는 마찰저항감소에 거의 영향을 미치지 않는다고 할 수 있다.

후 기

본 연구는 1997년도 과학기술처 특정과제인 해양과학기술개발 연구비 지원에 의하여 수행되었으며 과학기술처 모든 관계자들에게 깊은 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. P. Takahasi and A. Trenka, 1996, "Ocean Thermal Energy Conversion", John Wiley & Sons, New York, pp. 2~4.
2. 한국전력공사 기술연구원, 1989, "해양에너지 이용 복합시스템 개발에 관한연구(I)", 한국전력공사, pp. 194~197.
3. P. Takahasi, 1989, "Status of Ocean Thermal Energy Conversion Technology in 1989", Clean and Safe Energy Forever, Vol. 2, pp. 1571~1577.
4. L. A. Vega, and G. C. Nihaus, 1985, "OTEC cold water pipe at-sea test program data analysis project comparisons between measured and predicted barge and pipe response: Evaluation of the NOAA/ROTECF and NOAA/TRW computer models", Vega and Associates, Hinolulu, HI
5. P. Takahashi, and A. Trenka, 1992, "Ocean Thermal Energy Conversion: its promise as a total resource system", Energy, Vol.17, No.7, pp. 657~668.
6. J. Hilbert Anderson, "Ocean Thermal Power Comes of Age", Sea Solar Power, Inc., New York, pp. 3~4.
7. H. Uehara and T. Nakaoka, 1984, "Shell and Plate Type Heat Exchangers for

- OTEC Plants”, *Journal of Solar Energy Engineering*, Vol.106, pp. 286~290.
8. U. S. Choi, Y. I. Cho, and K. E. Kasza, 1987, “Screening and degradation tests of linear polymer additives for district heating applications”, Report of Argon National Laboratory, ANL-87-49.
 9. P. S. Virk, H. S. Mickley, and K. A. Smith, 1970, “The Ultimate Asymptote and Mean Flow Structure in Tom’s Phenomenon”, *Trans. ASME, J. Applied Mechanics*, Vol. 37, pp. 448~493.
 10. J. Pollert, and R. H. J. Sellin, 1989, “Mechanical degradation of drag reducing polymer and surfactant additives : A Review”, the 4th Int. Conference on Drag Reduction, Davos, Swizeland.
 11. W. H. Avery, and C. Wu, 1994, “Renewable Energy from the Ocean, A Guide to OTEC”, Oxford University Press, New York, pp. 7~8.