

Heat Transfer Characteristics of Tubular Thermal Reactor

Hei-Cheon Yang, Sang-Kyoo Park and Beong-Yeol Ra

Key Words : Heat Transfer(열전달), Heat Exchanger(열교환기), Tubular Thermal Reactor(관형 열반응기), Static Mixing Technology(정적 혼합기술)

Abstract

Heat transfer augmentation based on the process intensification concept in heat exchangers and thermal reactors has received much attention in recent years, mainly due to energy efficiency and environmental considerations. The concept consists of the development of novel apparatuses and techniques that, compared to those commonly used today, are expected to bring dramatic improvements in manufacturing and processing, substantially decreasing equipment size, energy consumption, and ultimately resulting in cheaper, sustainable technologies. The objective of this paper was to investigate the heat transfer characteristics of tubular thermal reactor using static mixing technology. Glycerin and water were used as the test fluids and water was used as the heating source. The results for heat transfer rate were strongly influenced by tube geometry and flow conditions.

Q : 열전달율(W)

\dot{m} : 질량유량(kg/s)

c_p : 정압비열(J/kgK)

ΔT : 온도차(K)

1.

석유화학공정 시스템은 원료를 여러 단계의 물리적 화학적 처리를 위한 설비 요소로 이루어져 있으며, 성분 강화제나 촉매 등을 원료에 혼합하기 위한 믹서, 반응 및 혼합에 적합한 온도 조건을 맞추기 위한 열교환기, 적합한 혼합, 온도 및 체류시간을 제공하는 반응기 등의 기계설비가 중요한 역할을 한다. 이러한 기계설비는 각 공정에

맞게 최적화되어야 하기 때문에 이들 설비 내부의 유동장과 열전달, 혼합, 체류 및 혼합시간 등의 현상에 대한 규명이 매우 중요하다.

대부분의 석유화학설비에서 열반응기(thermal reactor)는 가장 중요한 장치 요소 중의 하나이다. 반응기는 공급된 반응원료에 열 및 화학반응을 일으키기 위한 기구로, 반응을 최적조건으로 최대 효율이 발생되도록 하기 위한 기구이다. 열 및 화학 반응은 반응 물질의 농도, 온도, 압력, 시간, 촉매 등에 영향을 받고, 반응장치에 있어서는 물질 이동 및 열이동에 큰 영향을 받기 때문에 이들을 만족시킬 수 있는 구조의 반응기를 설계하는 것이 매우 중요하다. 관형 반응기는 가늘고 긴 직관, 코일 모양 또는 U 자형 곡관의 한쪽 끝에서 반응원료를 공급하고, 다른 끝으로 반응생성물을 유출시키는 형식의 반응장치이다. 관형 반응기에 필요한 열을 공급하거나 냉각시키기 위한 가열 또는 냉각은 관의 외부에 장치한 자켓 또는 외관에 의하거나, 또는 관을 가열로 속에 장치한다.

일반적으로 반응기의 형태나 크기는 아주 다양한데, 크게 회분식(batch type)과 연속식(continuous type)으로 분류할 수 있으며, PFR(plug-flow reactor)과 CSRT(continuous-stirred tank reactor)는 연속식 반

† 회원, 전남대학교(여수) 기계자동차공학부

E-mail : hcyang@chonnam.ac.kr

TEL : (061)659-3223 FAX : (061)659-3229

* 회원, 전남대학교(여수) 기계자동차공학부

** 주)신성플랜트

응기의 가장 일반적인 형태이다. 반응기 선택 기준은 반응이 일회에서 그치는지, 지속적으로 반응하는지에 따라 달라진다. 종종 1 회 반응은 촉매제를 이용하여 지속적 작업으로 전환된다. 지속반응은 일반적으로 효과적이고 견고한 제품을 생산하지만 아직까지는 1 회 반응기가 더 많이 쓰이는 추세이다. 열 및 화학 반응은 반응 물질의 농도, 온도, 압력, 시간, 촉매 등에 영향을 받고, 반응장치에 있어서는 물질이동 및 열이동에 큰 영향을 받기 때문에 설계자는 안전성과 생산량을 염두에 두고 반응기를 선택하는 것이 중요하다. 특히 회분식 반응기와 연속식 반응기는 공통적으로 고 점도 영역에서 반응열의 효율적인 제거와 균일한 혼합에 문제가 있지만, 연속식 반응기가 시스템의 집적화(compact)에 유리한 것으로 알려지고 있기 때문에, 최근에 들어서 이러한 특성을 고려하여 균일 혼합과 반응열의 효율적 제거를 목적으로 연속식 반응기내에 정적 믹서의 엘리먼트를 장착하는 것이 시도되고 있다. 이러한 시도는 실험실 규모의 연구를 통해 적절한 엘리먼트의 선택여부에 따라 소기의 목적을 달성할 수 있다는 결과가 보고되고 있지만, 실제 설비에서 scale up 시에 생산량의 증가에 맞추어 반응기의 직경을 크게 할 때 전열부의 전열면적이 반응기의 용량증가에 비례하지 않아서 유효 온도차가 커지는 문제점이 지적되고 있다. 따라서 반응열의 효율적 제거, 고 점성액의 혼합 및 scale up 상의 문제를 동시에 해결할 수 있는 정적 혼합 기술을 응용한 연속식 반응기에 대한 연구가 요구된다⁽¹⁻³⁾.

본 연구는 반응기의 한 방향에서 연속적으로 반응원료를 공급시키고 다른 방향으로부터 연속적으로 반응생성물을 배출시키는 구조로 반응기내의 농도, 온도, 압력 등이 시간적으로 변화가 거의 없는 관형 열교환기와 유사한 구조의 연속식 관형 반응기의 열전달 특성 규명을 목적으로 한다.

2.

2.1

관형 반응기의 제작과정은 튜브 번들의 설계 및 제작, 플랜지형 헤드의 설계 및 제작, 튜브 번들과 연결될 열전달 유체의 집합 및 공급부의 설계 및 제작, 그리고 각 구성 요소의 조립 단계로 구성된다. 이러한 설계조건을 갖는 열반응기에서 열매체는 정적 엘리먼트를 응용한 튜브 내부를 통해 유동하고, 주 반응물은 일반적인 쉘-튜브형 열교환기에서와 마찬가지로 쉘부의 튜브 번들의 설계조건에 따라 형성되는 유로를 유동하며 반응이 이루어지게 된다. 특히 중공 실린더형 관형 반응기에서는 반응열을 공급하는 반응기 외벽 부근의 열전달율이 높은 유체와 튜브 중심부의 열전달율

이 낮은 유체 사이의 온도 구배가 커져서 균일한 반응이 어려운 반면에, 정적 엘리먼트를 응용한 튜브 번들을 갖는 반응기에서는 튜브 번들의 구조형상으로 인하여 신속히 교반되며, 동시에 반응이 이루어짐으로써 반응기의 벽면에서 열교환이 보다 더 효율적으로 이루어지게 되고, 반응물의 반응기 횡단면 방향으로의 온도 구배를 줄일 수 있는 특징이 있다.

Fig. 1 은 반응기 모듈에 장착되는 튜브 번들의 3 차원 설계형상을 나타낸다. 유체의 분할, 뒤틀림 및 방향전환 등의 메커니즘이 복합적으로 작용할 수 있는 구조로 서로 엉킨 형상의 원형튜브로 제작하였다. 튜브 번들은 임의의 직경을 갖는 중공 파이프의 한쪽 끝에서 시작하여 일정한 곡률과 일정한 길이로 규칙적으로 180 도 밴딩하고, 파이프의 중앙부를 기준으로 180 도 회전시켜 다시 동일한 곡률과 동일한 길이로 180 도 밴딩하여 서로 엉킨 구조의 설계형상을 나타낸다. 이와 같은 구조는 튜브 번들을 구성하는 파이프의 가장 높은 온도의 가열 액체가 유입되는 한쪽 끝단의 위치와 가장 낮은 온도로 유출되는 다른 쪽 끝단의 위치가 같게 되어 반응기의 입출구에서의 반응물의 온도 편차를 최소화할 수 있는 특징이 있다. 새로운 형상의 튜브 번들은 임의의 직경을 갖는 중공 파이프를 일정한 길이로 규칙적으로 밴딩하여 서로 엉킨 형상으로 제작하게 되는데, 중공 파이프의 밴딩 공정에서 밴딩부의 직경 변화를 최소화해야 하고, 반경 방향으로 반응기 외형에 맞게 밴딩 작업을 수행해야 하는 어려움이 있다.

Fig. 2 는 본 연구에 개발한 육면체형 관형 반응기 모듈의 단면 설계형상을 나타낸다. Fig. 3 과 Fig. 4 는 측정시스템의 설계형상과 실물사진을 나타낸다. 시스템은 반응물 공급용 기어펌프 및 구동 전동기, 반응물 저장조 그리고 압력 및 온도를 측정할 수 있는 측정부로 구성된다. 측정 시스템에 장착되는 육면체형 반응기 모듈은 $61 \times 61 \times 460 \text{mm}^3$ 용량으로 반응기 하우징을 스테인레스 재질로 제작하여 온도를 측정할 수 있도록 설계하였다.

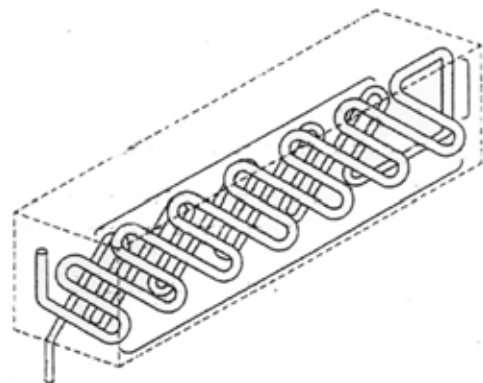


Fig. 1 Design of tube bundle

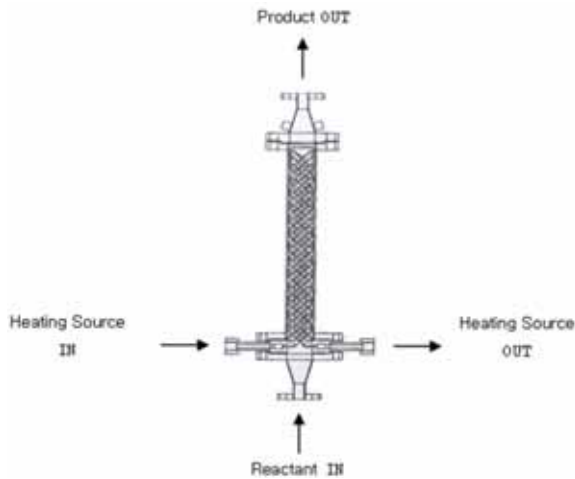
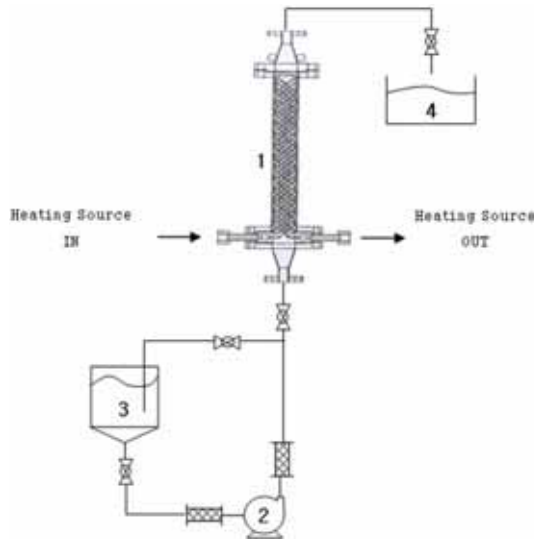


Fig. 2 Design of tube thermal reactor module



- 1. Cubic reactor module
- 2. Gear pump
- 3. Source tank
- 4. Receiver tank

Fig. 3 Schematic diagram of tubular reactor system



Fig. 4 Photograph of tubular reactor system

2.2

반응물은 플랜지 형상의 하단 헤드를 통해 유입되고 상단 헤드를 통해 유출되며, 반응물의 유량조절을 위해 상·하단에 밸브를 설치하였다. 그리고 기어펌프를 이용하여 펌핑되는 반응물의 overflow 는 다시 저장탱크로 되돌릴 수 있는 구조로 설계하였다. 일반적으로 회분식인 경우는 반응기 표면을 열 재킷으로 둘러싸서 반응기 벽면으로부터 중심부로 반경 방향으로의 열전달에 의해 반응열이 공급되는 구조이다. 따라서 반응기내에는 반경 방향으로의 온도구배가 존재하여 균일한 열공급에 제약을 받게 된다. 그러나 본 연구에서 개발한 열반응기는 입구 플랜지부에 열매체를 공급하고 회수하는 열매체 입·출구를 서로 대칭되는 위치에 구비하고 있기 때문에, Fig. 5의 그래프에서 볼 수 있는 바와 같이 반응기 길이 방향의 온도구배를 최소화할 수 있는 구조이다.

$61 \times 61 \times 460 \text{mm}^3$ 용량의 육면체형 반응기 모듈이 장착된 측정 시스템의 측정부에는 반응물 입구부에 1개, 반응물 출구부의 4단면에 4개의 열전대를 설치하였으며, 항온 온수 순환조에 의해서 일정한 온도로 유입되는 열전달 유체의 출구부에 1개의 열전대를 설치하였다. 전열특성 실험은 항온 온수 순환조의 온도를 $50, 60, 70^\circ\text{C}$ 로 설정하고 온수의 유량을 17.4 l/min 로 일정하게 유지시킨 후 시험유체인 글리세린과 물의 입구 유량을 변화시키며 실험을 수행하였다. 시험유체 유량은 글리세린인 경우에는 $6.6 \text{ l/min}(\text{Re}=11.4)$, $9.0 \text{ l/min}(\text{Re}=15.5)$, $9.6 \text{ l/min}(\text{Re}=16.5)$, $10.2 \text{ l/min}(\text{Re}=17.6)$, $10.8 \text{ l/min}(\text{Re}=18.6)$, 물인 경우에는 $6.0 \text{ l/min}(\text{Re}=5,665)$, $8.4 \text{ l/min}(\text{Re}=7,932)$, $9.6 \text{ l/min}(\text{Re}=9,065)$, $10.2 \text{ l/min}(\text{Re}=9,631)$, $10.8 \text{ l/min}(\text{Re}=10,198)$ 의 5단계로 나누고 시험부 입구와 출구의 4단면에서 온도를 측정하였다. 반응기 출구의 온도는 4단면의 온도에 대한 산술 평균값으로 처리하였다. 각각의 경우는 5회 반복 실험하여 평균적인 온도를 산출하였다. Re 수를 계산하기 위한 특성길이는 육면체형 반응기 모듈 하단 플랜지부의 반응물 유입부 직경으로 설정하였다.

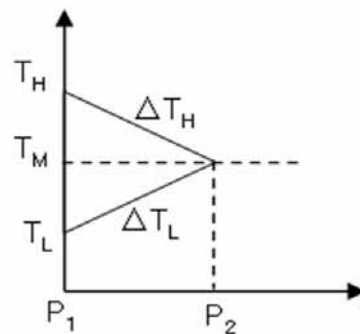


Fig. 5 Temperature gradient with longitudinal direction

3.

Fig. 6 과 Fig. 7 은 반응물과 열전달 유체의 입·출구의 온도차를 비교한 그래프이다. 각 그래프에서 위쪽의 점선으로 연결된 기호들은 열전달 유체의 입·출구 온도차, 아래쪽의 실선으로 연결된 기호들은 반응물의 입·출구 온도차를 나타낸다. Fig. 6 은 시험유체가 글리세린이고, 열전달 유체인 물의 온도를 50°C, 60°C, 70°C로 변화시킨 경우의 온도차를 나타낸다. 열전달 유체인 물의 온도가 50°C 인 경우, 반응물의 온도는 약 10.1°C 정도 상승하였으며, 열전달 유체의 온도는 약 6.2°C 정도 하강하였다. 열전달 유체의 온도가 60°C 와 70°C 인 경우, 반응물의 온도는 약 16.6°C와 22°C 정도 상승하였으며, 열전달 유체의 온도는 약 6.5°C와 7.4°C 정도 하강하였다. Fig. 7 은 시험유체가 물이고, 열전달 유체인 물의 온도를 50°C, 60°C, 70°C로 변화시킨 경우의 온도차를 나타낸다. 열전달 유체인 물의 온도가 50°C 인 경우, 반응물의 온도는 약 9.8°C 정도 상승하였으며, 열전달 유체의 온도는 약 6.9°C 정도 하강하였다. 열전달 유체의 온도가 60°C 와 70°C 인 경우, 반응물의 온도는 약 12.6°C 와 18.5°C 정도 상승하였으며, 열전달 유체의 온도는 약 7.0°C와 7.6°C 정도 하강하였다. 전체적으로 고찰하면 반응물이 글리세린인 경우, 평균적으로 반응물의 온도는 약 16.2°C 정도 상승하고 열전달 유체의 온도는 약 6.7°C 정도 하강하였으며, 반응물이 물인 경우, 평균적으로 반응물의 온도는 약 13.6°C 정도 상승하고 열전달 유체의 온도는 약 7.2°C 정도 하강하는 것을 알 수 있다.

Fig. 8 과 Fig. 9 는 시험유체가 글리세린인 경우와 물인 경우의 열전달 유체의 온도에 따른 열전달율을 나타낸다. 열전달율은 튜브내를 통과하는 시험유체의 입·출구에서의 온도차를 이용하여 다음과 같이 계산하였다.

$$Q = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T$$

여기서 \dot{m} 은 질량유량, c_p 는 정압비열, ΔT 는 시험부 입·출구의 온도차를 나타낸다.

본 연구의 Re 수 범위에서 시험유체가 글리세린인 경우와 물인 경우의 열전달율은 열전달 유체의 온도에 따라 평균적으로 4,230~10,430W 와 5,935~10,655W 정도의 범위인 것을 알 수 있다. 한편 시험유체가 글리세린일 때, 열전달 유체의 온도가 50°C 인 경우에 비해 60°C, 70°C 인 경우의 열전달율은 약 78%, 147% 정도 증가한 반면에, 시험유체가 물인 경우에는 열전달 유체의 온도가 50°C 인 경우에 비해 60°C, 70°C 인 경우 약 37%, 79% 정도 열전달율이 증가하였다. 시험 유체의

종류에 상관없이 열전달 유체의 온도가 높아지면 열전달율의 증·감 폭이 커지는 것을 알 수 있으며, 특정 Re 수를 기준으로 Re 수에 따라 증가하던 열전달율이 감소하는 경향을 나타내는 것을 알 수 있다. 전체적으로 고찰하면, 상대적으로 점성계수가 큰 글리세린의 경우에는 반응기내에 체류하는 시간이 길어지기 때문에 열전달율을 높이는 요인이 되며, 상대적으로 점성계수가 작은 물의 경우에는 Re 수가 증가함에 따라 커지는 난류도가 열전달율을 높이는 요인이 되는 것으로 사료된다.

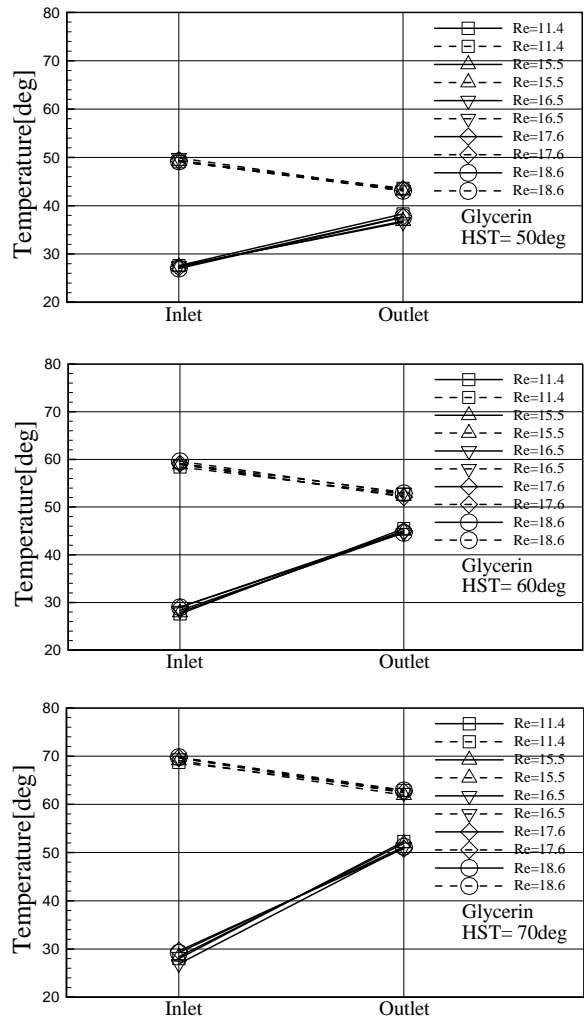


Fig. 6 Temperature difference between inlet and outlet of test fluid(glycerin) and heating water

4.

반응기의 한 방향에서 연속적으로 반응원료를 공급시키고 다른 방향으로부터 연속적으로 반응생성물을 배출시키는 구조의 연속식 관형 반응기의 열전달 특성에 대한 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

관형 반응기에서 반응물이 글리세린인 경우, 평균적으로 반응물의 온도는 약 16.2°C 정도 상승하고 열전달 유체의 온도는 약 6.7°C 정도 하강하였으며, 반응물이 물인 경우, 반응물의 온도는 약 13.6°C 정도 상승하고 열전달 유체의 온도는 약 7.2°C 정도 하강하였다.

관형 반응기에서 시험유체가 글리세린일 때, 열전달 유체의 온도가 50°C 인 경우에 비해 60°C, 70°C 인 경우의 열전달율은 약 78%, 147% 정도 증가하였으며, 시험유체가 물인 경우에는 열전달 유체의 온도가 50°C 인 경우에 비해 60°C, 70°C 인 경우 약 37%, 79% 정도 열전달율이 증가하였다.

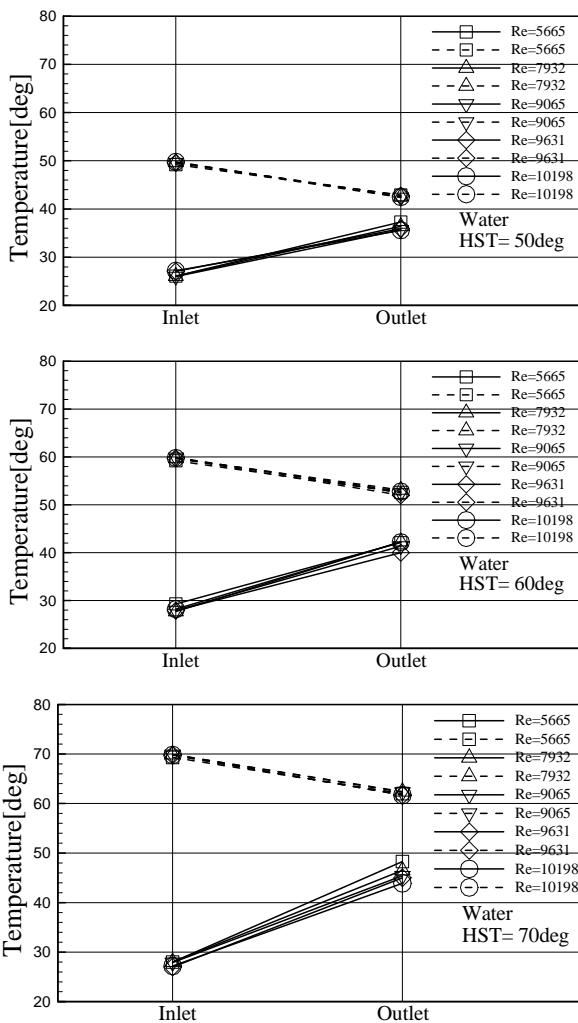


Fig. 7 Temperature difference between inlet and outlet of test fluid(water) and heating water

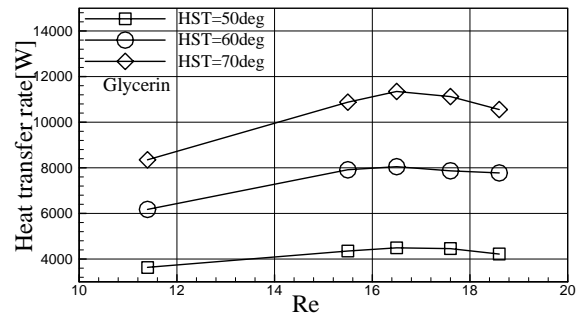


Fig. 8 Heat transfer rate with Re for glycerin

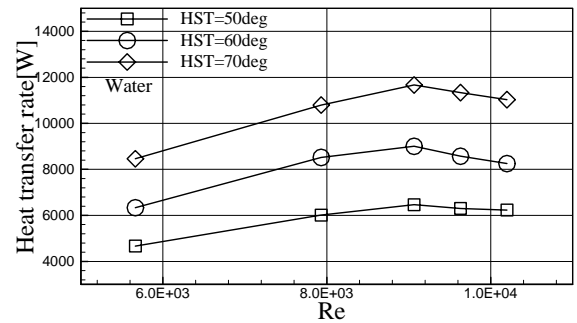


Fig. 9 Heat transfer rate with Re for water

- (1) Manglik, R. M., 1991, "Heat Transfer Enhancement of Intube Flow in Process Heat Exchangers by Means of Twisted-Tapes Inserts," Ph.D. thesis, Department of Mechanical Engineering, Aeronautical Engineering and Mechanics, Rensselaer Polytechnic Institute.
- (2) Baldyga, J., Bourne, J. R. and Hearn, S. J., 1997, "Interaction Between Chemical Reactions and Mixing on Various Scales," *Chem. Eng. Sci.*, Vol. 52, No. 4, pp. 457~466.
- (3) Baldyga, J. and Bourne, J. R., 1992, "Interaction Between Mixing on Various Scales in Stirred Tank Reactor," *Chem. Eng. Sci.*, Vol. 47, No. 10, pp. 1837~1848.