

정적혼합기술 응용 열교환기의 압력손실 및 열전달 특성

박상규† · 양희천* · 진준철**

(원고접수일 : 2005년 8월 16일, 심사완료일 : 2006년 1월 9일)

Pressure Loss and Heat Transfer Characteristics of Heat Exchanger Using Static Mixing Technology

Sang-Kyoo Park†, Hei-Cheon Yang* and Jun-Chul Jeon**

Abstract : Heat transfer augmentation in heat exchangers has received much attention in recent years, mainly due to energy efficiency and environmental considerations. Many active and passive techniques are currently being employed in heat exchangers, with some inserts providing a cost-effective and efficient means of augmenting heat transfer. The purpose of this paper is to determine the pressure loss and heat transfer characteristics of a heat exchanger using static mixing technology. Experimental measurements were taken on two set-ups: a single tube heat exchanger and a shell-tube heat exchanger with two static mixing inserts. It was concluded that the static mixing inserts resulted in an increase in the pressure loss and heat transfer characteristics as can be expected.

Key words : Heat exchanger(열교환기), Static mixing technology(정적혼합기술), Heat transfer(열전달), Pressure loss(압력손실)

1. 서 론

모든 산업 분야에서 일고 있는 기술혁신과 신기술에 의한 경쟁력 강화, 고효율 친환경기술의 적용은 석유화학산업도 예외가 될 수 없는 큰 흐름이다. 석유화학산업의 경쟁력 강화를 위해서 국외의 선진업체는 PI(Process Intensification) 개념⁽¹⁾ 즉, 프로세스 설비의 고성능화, 소형화, 저 가격, 고 신뢰성 등을 실현하기 위한 방향으로 집중적인

연구가 진행되고 있다. PI 개념의 유체기계설비로서 대표적인 것은 인-라인(in-line) 구조의 정적믹서(static mixer)이다. 이는 관로 내에 고정된 일련의 엘리먼트(mixing element)로 구성되며, 혼합될 유체가 관로를 통과할 때 연속적으로 유동분할, 방향전환, 재결합 등의 과정이 반복되며 혼합되는 장치로 유체의 연속 혼합 조작에 사용된다. 그리고 이러한 유체의 유동이 열전달을 촉진할 수 있기 때문에 정적 믹서의 엘리먼트에 냉각(혹은 가

† 책임저자(여수대학교 기계·냉동·자동차공학부), E-mail:psk@yosu.ac.kr, Tel:(061)659-3282

* 양희천(여수대학교 기계·냉동·자동차공학부)

** 진준철(여수대학교 대학원 기계공학과)

열) 유체가 흐를 수 있도록 관으로 만들어 열교환기 및 반응기 등으로 이용하는 방법이 개발되어 효과적으로 이용되어 가는 추세이다.

정적혼합기술을 응용한 열교환기의 설계 및 제작과 관련된 동향으로는 스위스의 Sulzer사에서 개발된 열교환기에 대한 개략적인 정보만을 Sulzer사의 제품 소개서를 통해서 접할 수 있을 뿐이며, 세부적인 개발 현황에 대한 정보는 공개된 것이 거의 없는 실정이다. 국내에서의 관련 연구로는 1995년에 정기운⁽²⁾이 Kenics형⁽³⁾ 믹서를 이용한 열전달 촉진 방안에 대한 기초적인 연구를 수행한 바 있다. 한편 아니코 산업에서는 2002년에 정적믹서의 엘리먼트를 이용한 다중관 열교환기의 개발과 관련된 특허(공개번호 특2002-0032262)를 출원한 바 있다. 이 기술은 튜브의 내부와 외부의 셸부에 Kenics형 정적 믹서 엘리먼트를 설치하여 튜브 내부 유체뿐만 아니라 외부의 셸층의 유체도 교반함으로써 열전달 효율을 높이고자 의도한 기술이다. 그러나 이 경우에는 비틀린 평판 구조의 Kenics형 엘리먼트를 그대로 모방한 것이며, 열전달 효율향상에 제한이 있기 때문에 에너지의 이용 효율 향상 및 설비의 소형화에 한계가 있다.

석유화학산업의 폴리머 생산공정 등에서는 제품의 질의 저하를 초래하지 않기 위하여 일정한 온도 혹은 특정 온도를 유지하는 것은 매우 중요하다. 열전달과 관련한 연구는 와류유동에 의한 혼합, 유속 및 유동길이 증가와 편 효과를 발생시켜 관내의 열전달을 촉진시키는 메커니즘에 관한 것이 대부분이다. Manglik⁽⁴⁾은 층류의 균일 열유속 조건에서 뉴셀수와 압력손실에 대한 이론적, 실험 및 수치해석적 연구를 수행한 바 있다. 또 Date와 Singham⁽⁵⁾, Date⁽⁶⁾는 나선형 인라인 믹서의 비틀림과 편효과를 고려하여 열전달 촉진 특성에 대해 수치적 연구를 수행하였다. 그리고 Hong과 Bergles⁽⁷⁾는 매질이 물과 에틸렌 글리콜인 층류 유동에 대해 전기 저항을 이용하여 균일 열유속 조건에서 실험하였다. 이 실험을 통해 얻은 데이터를 이용하여 완전 발달된 와류유동에서 뉴셀수를 예측하는 상관관계식을 제시하였으며, 압력손실은 레이놀드 수가 높을 때만 영향을 받는 것으로 보고하였다.

정적혼합기술을 응용한 열교환기는 기존의 셸-튜브형 열교환기의 튜브 내에 정적 믹서의 엘리먼트가 장착된 구조를 갖는다. 이러한 구조의 열교환기는 튜브 내에 장착되는 엘리먼트의 설계형상뿐만 아니라 유체 입출구의 위치 및 형상, 헤드형식, 배플의 형상과 위치 등 고려해야 할 인자들이 다양하며, 셸 내부의 유동 및 열전달 현상이 복잡하기 때문에 고도의 기술과 경험이 요구된다.

본 연구는 장방형 바에 홀을 갖는 설계조건인 엘리먼트를 개발하고, 이 엘리먼트를 장착한 셸-튜브형 열교환기 모듈 개발을 위한 자료제공을 목표로 한다. 이와 같은 목표달성을 위해 새로 개발된 엘리먼트와 기존 엘리먼트의 압력손실특성 비교실험과 단일 튜브 열전달특성 비교실험을 수행하였으며, 새로 개발된 엘리먼트의 셸-튜브 열전달특성 실험을 수행하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 실험장치

2.1.1 엘리먼트

본 연구에서는 Fig. 1에 도시한 장방형의 바에 홀을 갖는 구조의 new-SMXL 엘리먼트를 개발하였으며, 비교실험을 위해 Fig. 2의 Sulzer SMXL 엘리먼트를 제작하였다. Sulzer사의 정적 믹서용인 SMX형(Fig. 3)이나 열교환기용인 SMXL형은 기본적으로 소정의 폭과 두께를 갖는 소재를 길이가 다른 다수의 바들로 절단하여 일정한 각도로 교차하도록 제작한다.

본 연구를 통해서 개발한 new-SMXL 엘리먼트는 장방형의 바에 홀을 갖는 구조로 SMXL형에 비해 혼합율의 감소는 최소화하고 압력손실을 줄이기 위해 고안한 모델이다. 스테인레스 스틸로 제작된 하나의 엘리먼트의 직경/길이의 중횡비는 1:2이다. 정적 믹서용이거나 열교환기용도 Sulzer형은 기본적으로 분할면의 수가 2^n 개인 Kenics형과는 달리 분할면의 수가 $(2+a)^n$ 개로 상대적으로 많아서 혼합율은 좋지만 엘리먼트 전후단간의 압력손실이 커져서 펌핑 동력이 많아지는 단점이 있다. 여기서 분할면의 수 2^n 이나 $(2+a)^n$ 에서 2나 $2+a$ 는 하나의

엘리먼트를 통과할 때 유동이 분할되는 숫자를 나타내며, n 은 엘리먼트의 숫자를 나타낸다.

2.1.2 셀-튜브형 열교환기 모듈

고효율의 열교환기를 개발하기 위한 수동적 열전달 촉진법은 관 내면을 가공하는 방법과 관내에 전열 촉진체를 삽입하는 방법으로 크게 나눌 수 있는데, 전열 촉진체를 삽입하는 방법은 와류발생기나 정적 믹서 엘리먼트를 관내에 삽입하는 방법이다. 이러한 장치들은 관내 유동을 와류유동으로 만들어서 열전달을 촉진시키게 된다.

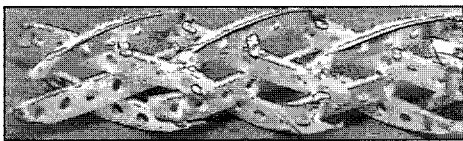


Fig. 1 New-SMXL type element



Fig. 2 Sulzer SMXL type element



Fig. 3 Sulzer SMX type element

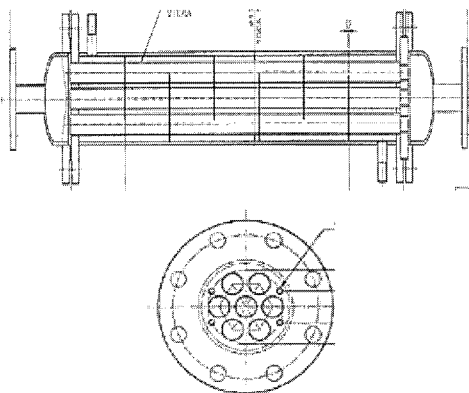


Fig. 4 Design structure of shell-tube heat exchanger module and 7-tube arrangement

본 연구를 통해서 개발된 정적혼합기술 응용 셀-튜브 열교환기 모듈의 설계도는 Fig. 4와 같다. 개발과정은 7개로 구성된 튜브 번들의 설계 및 제작, 내경 20mm의 튜브내에 삽입할 엘리먼트의 설계 및 제작, 6개의 배플(baffle)의 설계 및 제작, 튜브와 셸부를 연결하며 열전달 유체의 집합 및 공급부를 구성할 플랜지의 설계 및 제작, 그리고 각 구성 요소의 조립 단계로 이루어진다.

2.1.3 열교환기 측정 시스템

정적혼합기술 응용 열교환기의 전열특성을 측정하기 위한 열교환기 측정시스템의 개략도는 Fig. 5와 같다. 시험부는 Fig. 6과 같은 단일 튜브 시스템인 동심 2중관 열교환기(concentric double pipe heat exchanger)와 Fig. 7과 같은 셀-튜브형 열교환기를 교체하여 실험할 수 있도록 설계하였다. 동심 2중관 단일 튜브 시스템에서 믹싱 튜브는 엘리먼트가 장착되는 시험부의 내부 튜브(Fig. 5의 시험부의 검은색 부분)이며, 셀-튜브형 열교환기의 믹싱 튜브는 Fig. 4의 설계도에 나타난 7개의 튜브 번들로 각각의 튜브내에 엘리먼트가 장착된다.

또한 Fig. 6에 나타난 바와 같이 단일 튜브 시스템의 경우에는 시험부에 4개, 시험부 입출구부에 2개의 열전대를 관벽면에 설치하여 온도 측정부를 구성하였으며, 셀-튜브 시스템의 경우에는 Fig. 7과 같이 시험부 입출구부에 2개의 열전대를 관벽면에 설치하여 온도 측정부를 구성하였다. 한편 동심 2중관 단일 튜브 시스템의 경우 엘리먼트가 장착된

Table 1 Specifications of single tube and shell-tube heat exchanger system

Single tube heat exchanger system	
Diameter of mixing element	40mm
Diameter of inner tube	40mm
Diameter of outer tube	87mm
Length of test section	830mm
Shell-tube heat exchanger system	
Diameter of mixing element	20mm
Diameter of tube bundle	20mm
Diameter of shell	100mm
Length of test section	800mm

내부 튜브로는 작동 유체가 흐르고, 외부 튜브로는 온수가 평행류로 흐르게 장치를 구성하였다. 셀-튜브 시스템의 경우 엘리먼트가 삽입된 7개의 튜브내로 작동 유체가 흐르고, 온수는 7개의 배플이 장착된 셀내를 직교류로 흐르게 장치를 구성하였다. 작동유체는 기어펌프를 통해 개방 또는 폐쇄회로를 순환하도록 설계하였으며, 온수는 Fig. 8의 항온 온수 순환조를 이용하여 시험부를 순환하도록 폐쇄 회로로 설계하였다.

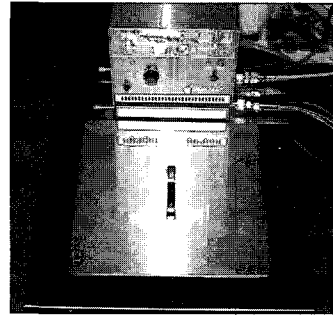


Fig. 8 Photograph of heating water circulator

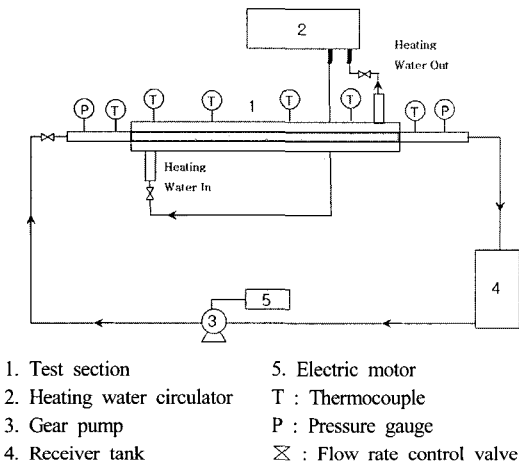


Fig. 5 Schematic diagram of single tube and shell-tube experimental system

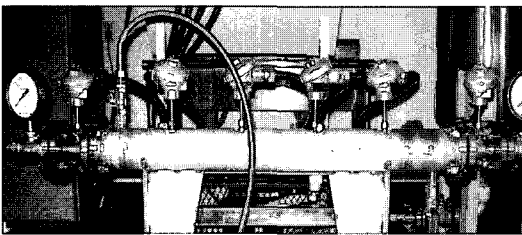


Fig. 6 Photograph of single tube test section

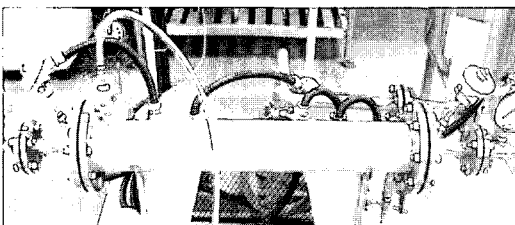


Fig. 7 Photograph of shell-tube test section

2.2 실험방법

압력손실 측정실험은 본 저자들의 기존의 연구에서 이용되었던 측정시스템을 이용하였다. 압력손실 측정 시스템 및 측정 방법은 기존 연구의 참고문헌(8)-(11)에 상세하게 기술되어 있다.

열전달특성 실험에서 튜브내를 흐르는 작동유체는 글리세린이며, 열전달 매체는 70℃의 온수를 사용하였다. 작동유체인 글리세린의 온도는 시험부 입출구 및 시험부에 설치된 열전대를 이용하여 측정한다. 열전대에서 감지한 신호는 control panel에 설치된 data logger를 통해서 digital 값으로 얻게 된다. 한편 두 시스템 모두 입출구부에 각각 압력계를 부착하였다. 작동유체인 글리세린의 유량은 측정부 상단의 유량조절밸브를 이용하여 조절한다. 온수의 온도는 Fig. 8에 나타낸 항온 온수 순환조에 의해 조절가능한데, 본 연구에서는 70℃ 설정하였다. 실험변수중의 하나인 Reynolds수는 엘리먼트가 삽입되지 않은 조건에서 유량조절밸브를 조절하여 단위 시간당의 작동유체인 글리세린의 유량을 측정하여 계산하였다. 실험은 항온 온수 순환조에 의해 온수의 유량을 24ℓ/min로 고정시킨 후 작동유체인 글리세린의 입구 유량을 변화시켜 가면서 수행하였다. 실험 변수는 작동유체인 글리세린 유량에 대한 Reynolds수, 시험부 입출구 온도, 엘리먼트의 형상이다.

단일 튜브 측정시스템의 경우, 시험부 입구 작동유체 유량을 0.39ℓ/min(Re=24.95), 0.411ℓ/min(Re=26.31), 0.457ℓ/min(Re=29.25), 0.47ℓ/min(Re=30.53)의 4단계로 나누고 각 구간(T1~T6)의 온도를 측정하였다. 셀-튜브 열교

환기 측정시스템의 경우에는 시험부 입구 작동유체 유량을 0.31 l/min(Re=8.84), 0.407 l/min(Re=11.61), 0.449 l/min(Re=12.81), 0.476 l/min(Re=13.57)의 4단계로 나누고 시험부 입구 및 출구의 온도를 측정하였다. 각각의 경우는 5회 반복 실험하여 평균적인 온도를 산출하였다. Re수를 계산하기 위한 특성길이는 2중관 단일 튜브 측정시스템인 경우에는 2중관의 내부튜브 직경인 40mm로, 셸-튜브 열교환기 측정시스템인 경우에는 7개 튜브군의 직경인 90mm로 설정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 압력손실

튜브내 삽입용 엘리먼트의 압력손실은 엘리먼트의 기하학적 형상에 따라 크게 변하게 되는데, 압력손실에 대한 상관관계식을 얻기 위해 두 가지 방법이 주로 이용되고 있다. 첫 번째는 엘리먼트의 압력손실에 대한 중공관의 압력손실의 비로 정의되는 Z-인자 방법이며, 두 번째는 마찰계수 $f/2$ 또는 $4f$ 를 이용하는 방법이다. Cybulski와 Wener^[12] 그리고 Rauline 등^[13]은 Kenics형 믹서에 대해서는 Z-인자 방법, Sulzer형 믹서에 대해서는 마찰계수를 이용하는 방법이 주로 이용되고 있다고 보고한 바 있다.

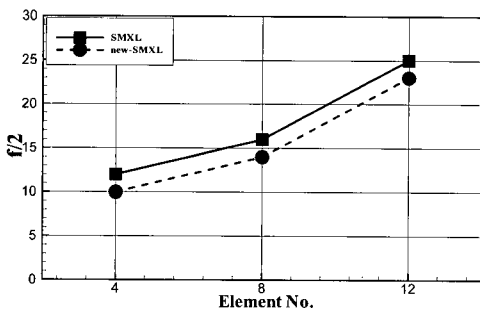


Fig. 9 Comparison of the friction factors with element number

본 연구에서는 기본적으로 밀도와 점도를 측정하고 엘리먼트를 장착한 측정시스템에서 체적유량과 압력손실 수두를 측정하여 마찰계수를 계산하

는 과정으로 수행하였다. 세부적인 내용은 기존 연구의 참고문헌^[8)-(11)]에 상세하게 기술되어 있다. Fig. 9는 엘리먼트 수에 따른 마찰계수를 비교한 것이다. 평균적으로 Sulzer SMXL형에 비해서 new-SMXL형은 약 12% 낮게 나타났다. 이는 new-SMXL형이나 Sulzer SMXL형의 상호 교차하는 바들의 구조는 동일하지만 장방형의 바에 홀을 갖는 구조로 인해 new-SMXL형의 유로 내 단면적의 점유율이 적어 부차적 손실에 기인하는 압력손실이 Sulzer SMXL형보다 적기 때문이다. 또한 예상한 바와 같이 엘리먼트 수가 증가하면 마찰계수는 증가하는 것을 알 수 있다.

3.2 열전달 특성

Fig. 10은 2중관 단일 튜브 측정시스템의 시험부 입구의 온도센서와 하류의 온도 센서들 간의 온도차를 나타낸다. Fig. 11은 각각의 Re수에 대해 3가지 경우의 온도차를 평균적으로 계산하여 도시한 그래프이다. Re수 24.95, 26.31, 29.25, 30.53에 대해 엘리먼트가 삽입되지 않은 경우에 비해 new-SMXL형 엘리먼트가 삽입된 경우는 평균적으로 약 32%, 37%, 48%, 61% 온도차가 증가하였으며, Sulzer SMXL형 엘리먼트가 삽입된 경우는 평균적으로 약 43%, 50%, 64%, 84% 정도 온도차가 증가하는 것을 알 수 있다.

또한 Sulzer SMXL형 엘리먼트가 삽입된 경우에는 new-SMXL형 엘리먼트가 삽입된 경우에 비해 평균적으로 약 15% 정도 온도차가 높게 나타났다. 한편 본 연구의 조건에서는 Sulzer SMXL형 엘리먼트를 기준으로 Re수 24.95일 때에 비해 Re수가 증가하면 약 9%, 21%, 33% 정도 온도차가 감소하는 것을 Fig. 11의 결과를 통해 알 수 있다. 이는 온수의 온도 및 유량이 일정하고 작동유체의 유량이 증가하면 작동유체가 튜브내를 통과하는 시간이 짧아져서 열전달율이 감소하기 때문이다.

Fig. 12는 엘리먼트가 삽입되지 않은 경우, new-SMXL형 엘리먼트가 삽입된 경우 그리고 Sulzer SMXL형 엘리먼트가 삽입된 경우에 대해 Re수에 따른 셸-튜브 열교환기 측정시스템의 시험부 입구와 출구의 온도차를 나타낸다. 엘리먼트가

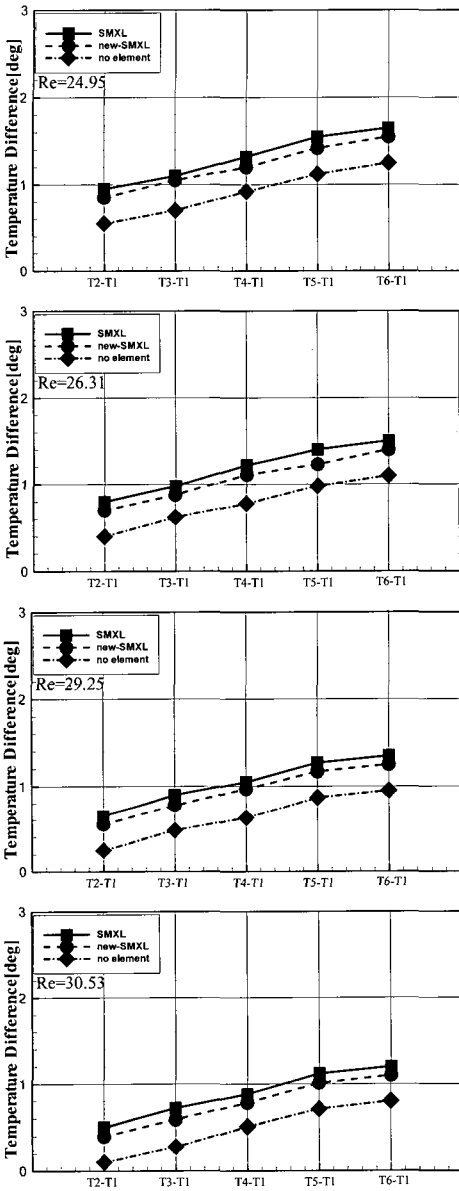


Fig. 10 Temperature difference between T1 sensor and other sensors of single tube system for Re=24.95, 26.31, 29.25 and 30.53

삽입되지 않은 경우에 비해 new-SMXL형 엘리먼트가 삽입된 경우는 평균적으로 약 19% 온도차가 증가하였으며, Sulzer SMXL형 엘리먼트가 삽입된 경우는 평균적으로 약 25% 정도 온도차가 증가하였다.

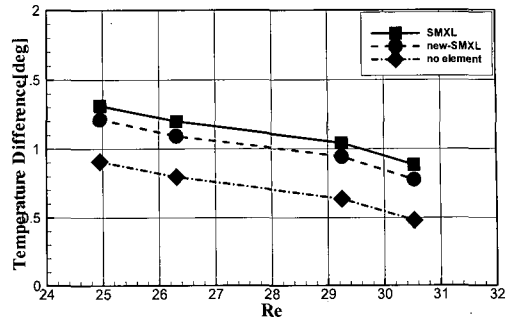


Fig. 11 Average temperature difference with Re of single tube system

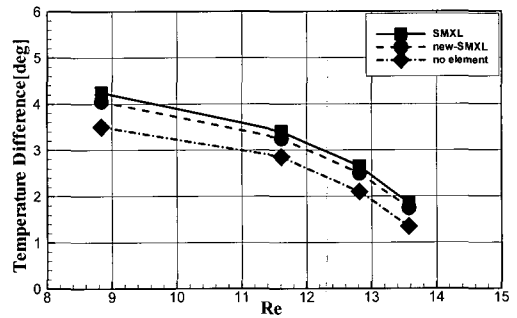


Fig. 12 Average temperature difference with Re of shell-tube system

4. 결 론

장방형 바에 홀을 갖는 설계조건인 엘리먼트를 개발하고 이 엘리먼트를 장착한 셸-튜브형 열교환기 모듈 개발을 목표로 2중관 단일 튜브 및 셸-튜브 열교환기 측정시스템을 제작하여 성능실험 한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 엘리먼트 수에 따른 마찰계수는 평균적으로 Sulzer SMXL형에 비해서 new-SMXL형이 약 12% 낮게 나타났다.
2. 2중관 단일 튜브 측정시스템의 시험부 입구와 하류의 측정점들 간의 온도차는 Sulzer SMXL형 엘리먼트가 삽입된 경우에 new-SMXL형 엘리먼트가 삽입된 경우에 비해 평균적으로 약 15% 정도 온도차가 높게 나타났다.
3. 셸-튜브 열교환기 측정시스템의 시험부 입구와 출구의 온도차는 엘리먼트가 삽입되지 않은 경우에 비해 new-SMXL형 엘리먼트가 삽입된

경우는 평균적으로 약 19% 온도차가 증가하였으며, Sulzer SMXL형 엘리먼트가 삽입된 경우는 평균적으로 약 25% 정도 온도차가 증가하였다.

4. 본 연구의 조건에서는 압력손실 측면에서는 new-SMXL형 엘리먼트, 열전달 측면에서는 Sulzer SMXL형 엘리먼트의 성능이 우수하게 나타났지만, 추후에 보다 다양한 변수를 고려한 성능실험을 통해 개발된 엘리먼트와 열교환기의 적용성 및 타당성 검증을 수행할 것이다.

후 기

본 연구는 2004지역혁신인력양성사업 "석유화학 설비 첨단기계요소 개발" 과제에 의해 지원되었으며, 이에 감사 드립니다.

참고문헌

- [1] A. I. Stankiewicz and J. A. Moulijn, "Process Intensification Transforming Chemical Engineering", *Chem. Eng. Progress*, Vol. 96, No. 1, pp. 22-34, 2000.
- [2] 정기윤, "스태틱 믹서를 이용한 열전달 촉진 방안에 관한 연구", 영남대학교 산업기술대학원 기계공학과 석사학위논문, 1995.
- [3] J. Sir and Z. Lecjaks, "Pressure Drop and Homogenization Efficiency of a Motionless Mixer", *Chem. Eng. Commun.*, 16, pp. 325-334, 1982.
- [4] R. M. Manglik, "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, 1991.
- [5] A. W. Date and J. R. Singham, "Numerical Prediction of Friction and Heat Transfer Characteristics of Fully-Developed Laminar Flow in Tubes Containing Twisted Tapes", ASME Paper No. 72-HT-17, 1972.
- [6] A. W. Date, "Prediction of Fully-Developed Flow in a Tube Containing a Twisted-Tape", *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, Vol. 17, pp. 845-859, 1974.
- [7] S. W. Hong and A. E. Bergles, "Augmentation of Laminar Flow Heat Transfer Augmentation in Tubular Flow by Twisted Tapes at High Temperature and Optimum Performance", *Heat Transfer Japanese Research*, Vol. 12, No. 3, pp. 1-31, 1976.
- [8] H. C. Yang and S. K. Park, "Pressure Drop in Motionless Mixers", *KSME Int. J.*, Vol. 18, No. 3, pp. 526-532, 2004.
- [9] H. C. Yang, S. K. Park and S. W. Oh, "Mixing Characteristics of Static Mixers," *Proceedings of the KSME 2003 Spring Annual Meeting*, pp. 1955-1960, 2003.
- [10] H. C. Yang and S. K. Park, "A Study for the Development of a Static Mixer," *Proceedings of the 4th International Conference on Pumps and Fans*, Beijing, China, August 26-29, pp. 445-449, 2002.
- [11] H. C. Yang, S. K. Park, Y. S. Eom and B. Y. Ra, "A Study of Flow and Mixing in a Static Mixer," *Proceedings of the KSME 2001 Fall Annual Meeting B*, pp. 557-562, 2001.
- [12] A. Cybulski and K. Werner, "Static Mixers Criteria for Applications and Selection," *Int. Chem. Eng.*, Vol. 26, pp. 171-180, 1996.

- [13] D. Rauline, P. A. Tanguy, J. L. Belvec and J. Bousquet, "Numerical Investigation of the Performance of Several Static Mixers," The Canadian J. of Chem. Eng., Vol. 76, pp. 527-535, 1998.

저 자 소 개



박상규(朴相圭)

1960년 5월생, 1981년 조선대학교 공과대학 정밀기계공학과 졸업, 1983년 인하대학교 기계공학과 졸업(석사), 1989년 인하대학교 대학원 기계공학과 졸업(박사), 1991년~ 여수대학교 기계공학과 부교수, 당학회 증진회원



양희천(楊熙千)

1960년 2월생, 1985년 중앙대학교 기계공학과 졸업. 1994년 중앙대학교 대학원 기계공학과 졸업(공학박사). 1997년~ 여수대학교 기계자동차공학부 조교수



전준철(전준철)

1978년생, 2004년 여수대학교 기계공학과 졸업, 2006년 여수대학교 대학원 기계공학과 졸업예정.