〈학술논문〉 DOI:10.3795/KSME-B.2008.32.6.479

SMX 형 정적 믹서의 압력손실 특성

양 희 천† · 박 정 일*

(2008년 2월 20일 접수, 2008년 5월 21일 심사완료)

Characteristics of Pressure Drop in SMX Type Motionless Mixers

Hei-Cheon Yang and Jeong-Il Park

Key Words : Mechanical Agitator(기계식 교반기), Motionless Mixer(정적 믹서), Pressure Drop(압력손실), Friction Factor(마찰 인자), Z-Factor(Z-인자), Water Treatment(수처리)

Abstract

The objective of this study is to investigate experimentally the characteristics of pressure drop in SMX type motionless mixers. The motionless mixers used are SMX-O, SMX-H, SMXL-O and SMXL-H ones. The SMX-H and SMXL-H mixer elements have been designed to reduce the pressure drop as compared with the SMX-O and SMXL-O ones. The Reynolds number based on the bulk average properties of the water is in a range of 5000 to 13000. The pressure drops across the motionless mixers are measured and the friction factors are calculated using the pressure drop data. On the average, the friction factors of the SMX-H and SMXL-H mixers are about 8% and 15% lower than those of the SMX-O and SMXL-O ones. In addition, the proposed correlations from the experimental data for the friction factor are presented and compared with those obtained from the literature.

1. 서 론

기계식 교반기(mechanical agitator)는 외부에서 공급되는 동력에 의해 임펠러를 구동시켜 혼합공정을 수행하는데 비해서, 정적 믹서에서는 별도의 동력공급 없이 관로내에 설치된 다양한 형상의 구조물(엘리먼트)에 의한 유동변화에 의해 혼합이 이루어 진다. 따라서 정적 믹서는 기계식 교반기와는 달리 구동부가 없어 축이나 베어링과 같은 회전요소나 밀봉장치가 필요 없고, 적용 온도범위가 광범위하며 높은 압력조건에서도 이용 가능하다. 또한 혼합공정의 단축, 단순화 및 연속화가 가능하고 공정관리의 용이, 생산원가의 절감, 에너지 절약 등의 장점이 있다. 이러한 정적 믹서는 관련 산업의 경쟁력 강화를 위한 PI(process intensification)[1] 개념, 즉 고 성능화, 소형화, 저 가격 그리고 고 신뢰성을 실현하기 위한 방향으로 진행되고 있는 연구개발의 주요 대상중의 하나이다.

관련 설비에서 이용되고 있는 대표적인 정적 믹서인 Sulzer SMX형[2]은 Fig. 1 의 개념도에 도시한 것과 같이 분할 및 연신(stretching), 방향전환 및 와류형성 그리고 접힘(folding) 및 접촉면적 확대 등의 메커니즘에 의해 혼합이 촉진된다. 이러한 메커니즘 중에서 가장 중요한 유동의 분할은 엘리먼트의 기하학적 구조에 의해서 형성되는 분할면에 따라 결정된다. 그러나 정적 믹서에서 분할면이 증가하면 혼합율은 높아지지만, 유로를 차단하는 구조물이 많아지게 되어 압력손실을 높이게 된다. 따라서 최근에 들어서 강조되고 있는 에너지 이용효율 향상과 환경 친화적인 공정개발의 측면을 고려할 때, 별도의 동력공급 없이 짧은 체류시간에도 불구하고 균일한 혼합이 가능하고 압력손실을

† 책임저자, 회원, 전남대학교(여수) 기계자동차공학부
E-mail : hcyang@chonnam.ac.kr
TEL : (061)659-3223 FAX : (061)659-3229
* (주)유한기술

최소화할 수 있는 정적 믹서에 대한 연구개발이 요구된다.

정적 믹서에 대한 연구는 직사각형 평판을 180º 비튼 형상으로 비교적 단순한 구조인 Kenics 믹서의 압력손실, 혼합율, 열 및 물질전달 등과 관련된 실험적,[3~7] 수치적 연구[8~13]가 다양하게 수행되고 있다. 반면에 Kenics믹서에 비해서 상대적으로 믹서 엘리먼트의 구조가 복잡한 Sulzer SMX형 믹서에 대해서는 제한적인 연구만이 수행되고 있는 실정이다. Couvert 등[14]은 기· 액 2 상 유체의 유량이SMX형 믹서의 압력손실 및 물질전달 특성에 미치는 영향에 대한 실험적 연구, Ventresca 등[15]은 층류조건에서 SMX 믹서의 혼합율에 미치는 유체의 점성의 영향에 대해 LIF(laser induced fluorescence) 이미지 기법을 이용한 실험적 연구를 수행하였다. Li 등[16]은 층류조건에서 뉴톤 및 비뉴톤 유체를 이용하여 SMX 믹서의 압력손실, 열전달 및 혼합율 특성에 대한 실험적 연구, Cybulski와 Werner[17]는 Re<10 의 조건에서 SMX 믹서의 압력손실 특성에 대한 실험적 연구를 수행한바 있다. 일반적으로 혼합특성에 대한 실험적 연구는 크게 혼합 메커니즘에 대한 가시화 연구,[3,4,15] 추적입자의 표본추출을 통한 통계적 처리방법에 의한 연구[7,15,16]로 대별할 수 있다.

한편 Heniche 등,[18] Zalc 등,[19] Rauline 등,[20] Mickaily-Huber 등[21]은 SMX 믹서의 유동특성과 입자추적기법을 이용하여 혼합특성에 대한 수치적 연구를 수행하였다. 압력손실 특성과 혼합특성의 규명을 위해 각각 별도의 실험장치를 이용해야 하는 실험적 연구와는 달리 위의 수치해석적 연구들에서는 오일러리안(Eulerian) 방법으로 속도장과 압력장 등의 유동변수들에 대한 수치계산과 라그란지안(Lagrangian) 방법으로 추적입자들의 푸앵카레 절단면(Poincare section), 궤적의 연신(stretching of trajectory), 체류시간 분포(residence time distribution) 등을 이용한 혼합특성에 대한 계산을 동시에 수행할 수 있다. 따라서 수치해석적 연구에서는 압력손실 특성과 혼합특성의 상관관계에 대한 분석이 가능하다.

국내에서의 관련 연구로는 Lee등[22]에 의한 관내 구조물 없이 관의 곡률만을 변화시킨 3 가지 형상의 정적 믹서의 혼합현상에 대한 실험적 연구, Kim 등[23]의 Kenics 믹서를 이용한 촉매 연소기내의 유동 및 혼합특성에 대한 수치적 연구, Chung[24]의 Kenics 믹서를 이용한 열전달 촉진 방안에 대한 실험적 연구가 있다. 또한 Yang 등[25~28]은 새로운 형상의 정적 믹서를 개발하고 유동특성 및 혼합특성에 대해 여러 가지 변수를 고려하여 성능검증 연구를 수행한 바 있다.

기술혁신과 신기술에 의한 경쟁력 강화, 고효율

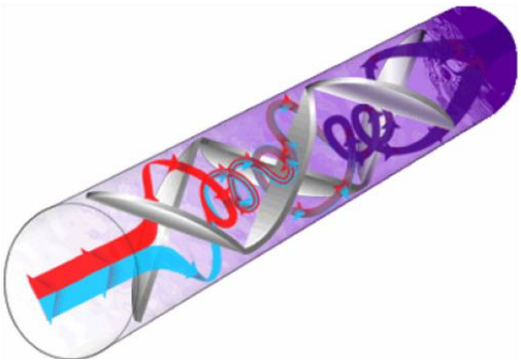


Fig. 1 Schematic mixing mechanism of SMX type mixer

친환경기술의 적용은 모든 산업분야에서 강조되고 있는 현상중의 하나이다. 이러한 기술진보에 편승하여 고점성 유체의 혼합설비에 주로 이용되는 정적 믹서를 기계식 혼합설비에 의존하던 수처리 공정의 응집제 혼합과정에 적용하려는 연구[29,30]가 시도되고 있다. 정적 믹서를 이용한 고점성 유체의 혼합공정에 대한 실험적 연구는 거의 대부분 Re<100 의 조건에서 수행되고 있다. 그러나 정적 믹서를 수처리 공정의 응집제 혼합과정에 적용하는 경우에는 저 Re수 조건에 국한될 수 없음에도 불구하고 상대적으로 고 Re수 조건에서의 실험적 연구는 매우 미흡한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 $5\times10^3<Re<1.4\times10^4$ 의 조건에서 4 종류의 SMX형 정적 믹서의 압력손실 특성에 대해 실험적으로 규명하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 정적 믹서

정적 믹서는 구성요소 자체에 운동부 없이 관내에 고정된 일련의 엘리먼트들로 이루어 지며, 혼합될 유체가 관로를 통과할 때 엘리먼트로 인해 복합적인 유동변화 과정이 반복되며 혼합되는 장치로 유체의 연속적인 혼합공정에 이용된다. SMX형 정적 믹서 엘리먼트는 소정의 폭과 두께를 갖는 길이가 다른 다수의 장방형 바들이 혼합될 유체의 유동방향과 일정한 각도를 유지하며 서로 교차되는 구조를 갖는다. 따라서 SMX 형 믹서는 각각의 엘리먼트를 구성하는 바의 유동방향과의 경사도, 폭과 숫자에 의해 압력손실과 혼합율에 영향을 미치게 된다. 본 연구의 대상이 되는 정적 믹서는 석유화학산업의 고분자 생산공정의 고 점성유체 혼합설비에 주로 이용되는 Sulzer SMX(이

Table 1 Geometrical characteristics for unit element of Kenics and SMX type mixer

	Number of bar or plate	Structure of bar or plate	Length to diameter ratio
Kenics	1	twisted through 180º	1.5
SMX-O	24	no hole area	1
SMX-H	24	25% hole area	1
SMXL-O	4	no hole area	1.42
SMXL-H	4	22% hole area	1.42

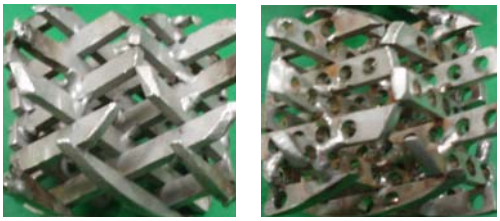


Fig. 2 Geometrical structure of unit element of SMX-O and SMX-H mixer

Fig. 3 Geometrical structure of unit element of SMXL-O and SMXL-H mixer

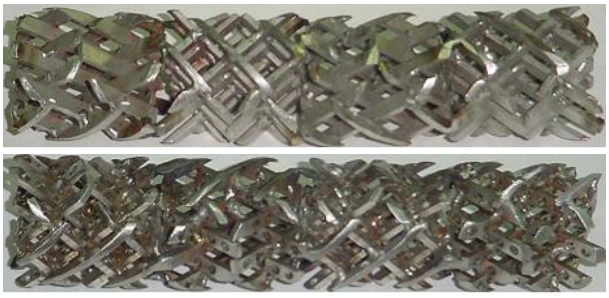


Fig. 4 4-element SMX-O and SMX-H mixer

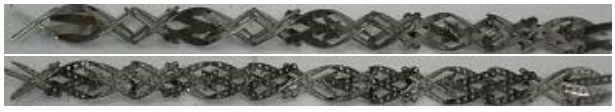


Fig. 5 15-element SMXL-O and SMXL-H mixer

하 SMX-O 믹서라 함) 믹서와 최근에 들어 PI 개념을 적용하여 설계되는 쉘-튜브 열교환기의 튜브 내에 설치되는 Sulzer SMXL(이하 SMXL-O 믹서라 함) 믹서, 그리고 SMX-O 와 SMXL-O 믹서에 비해 압력손실을 줄일 수 있도록 장방형의 바에 홀을 갖는 구조로 고안된 SMX-H 와 SMXL-H 믹서이다.

Fig. 2 는 SMX-O 와 SMX-H 믹서, Fig. 3 은 SMXL-O 와 SMXL-H 믹서의 단일 엘리먼트 구조를 나타낸다. SMX-O 믹서의 단일 엘리먼트는 폭 4.8mm, 길이 18mm～60mm 인 장방형 바 24 개로 구성되며, SMXL-O 믹서는 폭 10mm, 길이 63mm ～70mm 인 4 개의 바로 구성된다. 압력손실을 줄이기 위해 고안한 SMX-H 믹서의 엘리먼트를 구성하는 장방형 바에는 직경 3mm 의 홀, SMXL-H 믹서의 경우에는 직경 5mm 의 홀을 가공하였다. SMX-O 믹서 엘리먼트의 길이 60mm 인 바에 10 개의 홀, SMXL-O 믹서 엘리먼트의 길이 70mm 인 바에는 8 개의 홀을 갖는 비율로 각각의 바에 홀을 가공한 결과, SMX-O 믹서는 단일 엘리먼트 전체 바의 표면적에 비해 가공된 홀 면적이 약 25%, SMXL-O 믹서의 경우에는 약 22% 정도의 홀 면적을 갖는 구조이다. Table 1 은 Kenics 와 SMX 형 믹서 엘리먼트의 기하학적 특성을 비교한 표이다.

Fig. 4 는 4 개의 엘리먼트로 구성된 SMX-O 와 SMX-H 믹서, Fig. 5 는 15 개의 엘리먼트로 구성된 SMXL-O 와 SMXL-H 믹서의 실물사진을 나타낸다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 각각의 엘리먼트 후단에 연결되는 엘리먼트는 원주방향으로 90º 회전된 구조이다. 스테인레스 스틸로 제작된 모든 믹서 엘리먼트의 직경은 40mm 이며, SMX-O 와 SMX-H 믹서의 단일 엘리먼트의 길이는 40mm 이고 SMXL-O 와 SMXL-H 믹서의 단일 엘리먼트의 길이는 56.7mm 이다.

Sulzer SMX형 믹서는 분할면의 수가 2 의 배수인 Kenics믹서[3~13]와는 달리 분할면의 수가 (2+α) 의 배수로 상대적으로 많아서 혼합율은 좋지만 엘리먼트 전후단 간의 압력손실이 커지게 된다. 여기서 2 와 2+α 는 단일 엘리먼트를 통과할 때 유동이 분할되는 숫자를 나타낸다. 직사각형 평판을 180º 비튼 구조의 Kenics 믹서의 단일 엘리먼트를 통과할 때 유동은 2 분할되며, 단일 엘리먼트가 24 개의 바로 구성된 SMX 믹서에서는 유동이 48 분할되고 4 개의 바로 구성된 SMXL 믹서에서는 유동이 8 분할된다. 따라서 엘리먼트 수가 증가할수록 Kenics믹서의 분할면은 2 의 배수로 증가하는 반면에, SMX 믹서와 SMXL 믹서의 분할면 수는

48 과 8 의 배수로 상대적으로 크게 증가하게 된다.

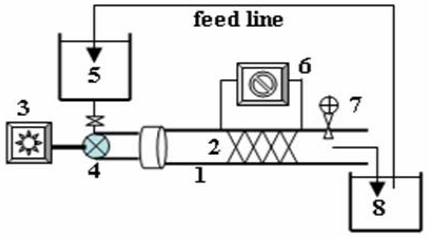
2.2 실험장치 및 방법

Fig. 6 은 Yang등[26~28]의 연구를 통해 제작한 압력손실 측정시스템의 개략도를 나타낸다. 측정시스템은 유체 혼합부, 동력 공급부, 혼합 유체 저장부 그리고 측정부로 구성된다. 측정시스템의 혼합 튜브는 내경 40mm, 길이 1000mm의 투명 아크릴관으로 제작하여 혼합과정을 가시화 할 수 있도록 하였다. 동력 공급부는 기어펌프, 3 상 유도전동기 그리고 인버터 시스템으로 구성하였다. 압력 손실량은 혼합 튜브에 일정한 간격으로 가공된 압력탭에 압력 트렌듀서를 장착하여 측정하며, 유량은 전동기에 연결된 인버터로 전동기의 회전수를 변화시켜 조절하였다. 실험용 유체는 3 상 유도전동기로 구동되는 기어 펌프에 의해 혼합 튜브 내로 펌핑된다.

단일 엘리먼트의 길이가 40mm 인 SMX-O 와 SMX-H 믹서의 측정위치는 Table 2 에 나타낸 것과 같이 엘리먼트 4 개일 때는 엘리먼트 선단으로부터 160mm 지점이고, 엘리먼트 8 개일 때는 320mm 지점이며, 엘리먼트의 전체 길이가 850.5mm 인 SMXL-O 와 SMXL-H 믹서의 경우는 약 340mm 거리의 엘리먼트 6 개로부터 850.5mm 거리의 엘리먼트 15 개를 통과한 지점이다.

Table 2 Experimental parameters

Mixer Type	SMX-O, SMX-H, SMXL-O, SMXL-H	
Range of Re	5,040≤Re≤13,025	
Element Number	SMX type	4, 5, 6, 7, 8
	SMXL type	6, 9, 12, 15
Measuring Position[mm]	SMX type	160, 200, 240, 280, 320
	SMXL type	340, 510, 680, 850.5



1. Mixing tube 2. Mixer element
3. Electric motor 4. Gear pump
5. Fluid tank 6. Pressure transducer
7. Flow meter 8. Reservoir tank

Fig. 6 Schematic diagram of measuring system

본 연구의 실험변수는 Table 2 에 나타낸 것과 같이 믹서의 종류 및 엘리먼트 개수, 그리고 혼합될 유체의 유량으로 설정하였다. 측정실험에서는 기본적으로 밀도와 점도를 측정하고, 믹서 엘리먼트를 장착한 측정시스템에서 체적유량과 압력손실 수두를 측정하여 마찰인자(friction factor)를 계산하는 과정으로 수행하였다. 압력 손실량은 각 실험조건에서 5 회 반복 측정하여 평균치를 산출하였다. 유체의 물성치와 유량변수는 Re수와 마찰인자의 산출에 이용하였다. 실험용 유체로는 물을 사용하였으며, 물의 밀도와 점도는 각각 997.1 kg/m^3, 0.894×10^{-3} pa· s의 측정치를 이용하였다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 $5\times10^3<Re<1.4\times10^4$ 의 조건에서 4 종류의 SMX형 정적 믹서의 압력 손실량을 측정하여 마찰인자에 대한 관계식을 도출하고, 관련 문헌의 자료와 비교· 평가 하였다.

정적 믹서 출구에서의 압력 손실량에 대한 자료는 믹서 입구에 동력을 공급할 펌프의 용량이나 엘리먼트의 설계조건을 결정하는데 있어서 매우 중요하다. 일반적으로 압력 손실량에 대한 실험관계식을 얻기 위해 크게 두 가지 방법이 이용되고 있다. 첫 번째는 정적 믹서의 압력손실에 대한 중공관의 압력손실의 비로 정의되는 Z-인자 방법[12]이다. 두 번째는 마찰인자 f 를 이용하는 방법이 있다. 마찰인자 f 는 다음과 같이 정의된다.

$$f = \frac{2\Delta P_{sm} D}{\rho u_m{}^2 L} \tag{1}$$

여기서 P_{sm}은 정적 믹서의 압력손실, u_m은 믹서내의 평균속도, L 은 믹서 엘리먼트의 전체 길이, D 는 믹서 엘리먼트의 직경을 나타낸다. 일반적으로 Kenics믹서에 대해서는 Z-인자 방법, Sulzer SMX형 믹서에 대해서는 마찰인자 방법이 이용되고 있는 것으로 보고되고 있다.[17, 20]

본 연구에서 이용된 실험장치 및 실험방법 그리고 실험결과의 타당성 검증은 Yang과 Park[28]의 연구를 통해 SMX-O믹서에 대해 고점성의 글리세린을 이용하여 Re<20 의 조건에서 수행한바 있다. 비록 믹서의 종횡비, 믹서 엘리먼트를 구성하는 바의 폭 및 두께 등의 변수로 인해 기존에 발표된 연구 결과들의 오차 범위가 상당히 크게 나타나는 것으로 보고되고 있지만,[20] 마찰인자에 대한 Yang과 Park의 연구결과는 참고문헌[5,16,17]의 결과들과

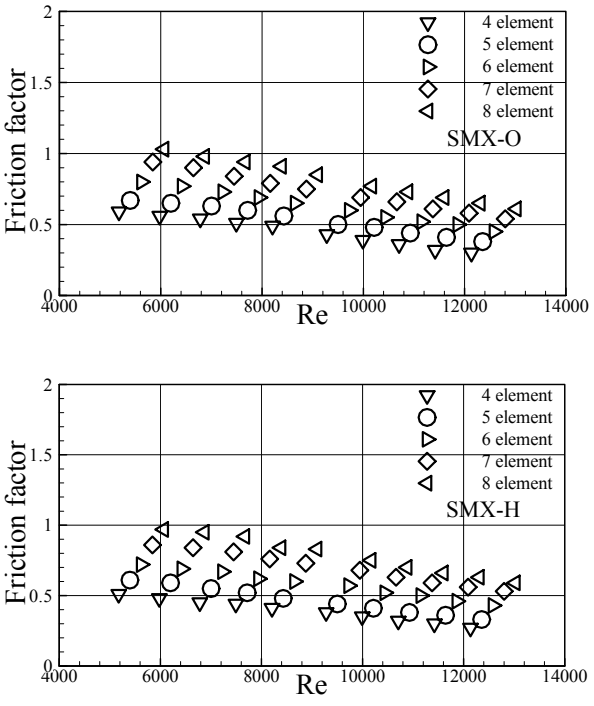


Fig. 7 Friction factors of SMX-O and SMX-H mixer

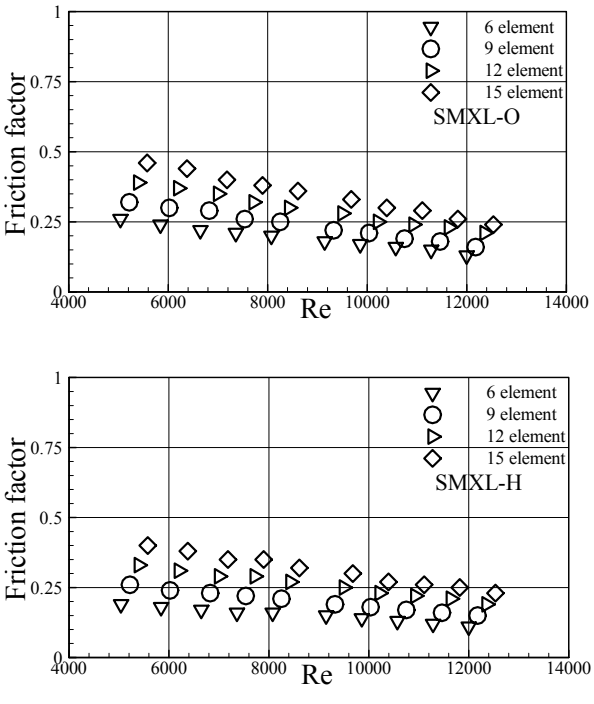


Fig. 8 Friction factors of SMXL-O and SMXL-H mixer

일치하는 경향을 확인할 수 있었다. 그러나 본 연구의 Re 수 영역을 포함하는 조건에서 수행된 실험적 연구결과는 거의 전무한 실정으로 정량적인 비교 연구가 쉽지 않다.

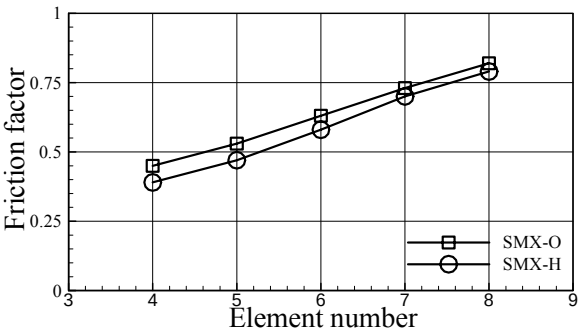


Fig. 9 Average friction factors of SMX-O and SMX-H mixer

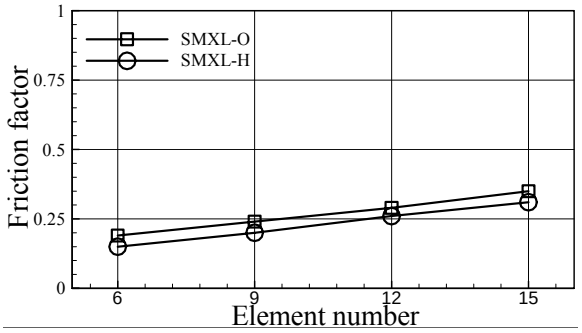


Fig. 10 Average friction factors of SMXL-O and SMXL-H mixer

Fig. 7 은 SMX-O 와 SMX-H 믹서, Fig. 8 은 SMXL-O 와 SMXL-H 믹서의 엘리먼트 수를 증가시킬 때, Re 수에 따른 마찰인자를 비교한 그래프이다. 엘리먼트 수가 많아지면 압력손실이 증가하며, Re 수가 커지면 압력손실이 증가하고 마찰인자가 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 유로가 좁아지거나 엘리먼트가 점유하는 단면적의 비가 커지게 되면 마찰손실이 커지며, Re 수가 증가하면 와류생성에 따른 난류손실이 더 커지기 때문인 것으로 판단된다. SMX-O 와 SMX-H 믹서의 마찰인자는 엘리먼트 수와 Re 수에 따라 0.3～1.03 과 0.27～0.97 의 범위, SMXL-O 와 SMXL-H 믹서의 마찰인자는 0.13～0.46 과 0.11～0.4 의 범위임을 알 수 있다.

Fig. 9 는 SMX-O 와 SMX-H 믹서, Fig. 10 은 SMXL-O 와 SMXL-H 믹서의 엘리먼트 수에 따른 평균 마찰인자를 비교한 그래프이다. 평균 마찰인자는 특정 엘리먼트 수에서 전체 Re 수 범위내의 마찰인자를 평균한 값이다. 엘리먼트 수가 1 개 증가하면 평균적으로 SMX-O 믹서는 약 16.2%, SMX-H 믹서는 약 19.4%, SMXL-O 믹서는 약 7.5%, SMXL-H 믹서는 약 9.2% 정도 마찰인자가 커지는 것을 알 수 있다. 본 연구의 조건에서 평균적으로 SMX-O 믹서의 마찰인자는 약 0.63, SMX-H 믹서는

약 0.58 정도이며, SMXL-O 믹서의 마찰인자는 약 0.27, SMXL-H 믹서는 약 0.23 정도임을 알 수 있다. 따라서 압력손실을 줄이기 위해 고안한 SMX-H 믹서와 SMXL-H 믹서는 SMX-O 믹서와 SMXL-O 믹서에 비해 압력손실이 평균적으로 8%와 15% 정도 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 SMX-O 믹서와 SMX-H 믹서, SMXL-O 믹서와 SMXL-H 믹서의 상호 교차하는 바들의 구조는 동일하지만 장방형의 바에 홀을 갖는 구조로 인해 SMX-H 믹서와 SMXL-H 믹서의 유로 내 단면적의 점유율이 적어 부차적 손실에 기인하는 압력손실이 SMX-O 형과 SMXL-O 형보다 작아지기 때문이다.

그러나 엘리먼트를 구성하는 각각의 바에 뚫린 홀에 의해 SMX-H 믹서는 25%, SMXL-H 믹서는 22%의 유로 확장에도 불구하고 SMX-H 믹서는 SMX-O 믹서에 비해서 8%, SMXL-H 믹서는 SMXL-O 믹서에 비해서 15%의 정도의 압력손실 감소효과만이 나타났다. 이는 유동방향의 엘리먼트 바 표면에 충돌한 후 바의 측면을 통해 후면으로 분할되며 형성되는 와류와 홀을 통과하는 유동의 상호간섭 작용에 의해 발생하는 압력손실로 인해 유로확장 효과가 줄어들기 때문인 것으로 판단된다. 또한 유로확장 면적에 대한 압력손실 감소효과를 비교하면, SMX-H 믹서는 25%의 유로 확장에 대해 32%의 압력손실 감소, SMXL-H 믹서는 22%의 유로 확장에 대해 68%의 압력손실 감소효과가 작다는 것을 알 수 있다. 이는 SMXL-H 믹서에 비해 단위 엘리먼트 당 바와 홀수가 많은 SMX-H 믹서의 와류와 홀을 통과하는 유동의 상호간섭 효과가 더 크기 때문으로 판단된다.

Fig. 11 은 SMX-O와 SMX-H믹서의 엘리먼트 수 4, 6, 8 개 일 때, Fig. 12 는 SMXL-O와 SMXL-H믹서의 엘리먼트 수 9, 15 개 일 때 마찰인자에 대한 실험관계식을 얻기 위한 그래프로, Li등[16]의 식 (2)와 Blasius[31]의 식 (3)의 결과를 비교하여 도시하였다. 도출된 마찰인자와 Re수의 관계식은 Table 3 에 나타내었다. 도출된 관계식들과 실험결과의 오차범위는 SMX-O믹서와 SMX-H믹서의 경우에는 ±10%이며, SMXL-O믹서와 SMXL-H믹서는 ±8% 정도이다. 본 연구의 실험결과는 Blasius와 Li 등의 결과들과 유사한 경향을 갖는 것을 알 수 있다.

$$f = 0.8 + 220\,\mathrm{Re}^{-0.8} \qquad \mathrm{Re}\geq 15 \qquad (2)$$

$$f = 0.316\,\mathrm{Re}^{-0.25} \qquad \mathrm{Re}\leq 2\times 10^{4} \qquad (3)$$

Fig. 13 은 식 (3)의 Blasius 의 결과를 이용하여 SMX-O 와 SMX-H 믹서의 경우에는 5 가지 엘리먼트 그리고 SMXL-O 와 SMXL-H 믹서는 4 가지 엘리먼트에 대한 관계식과 식 (2)의 Li 등의 실험결과를 정규화($f / f_{Blasius}$)한 그래프를 나타낸다. 본 연구의 Re 수 범위에서 SMX-O 와 SMX-H 믹서의 마찰인자는 Blasius 의 결과 보다는 평균적으로 약 23～15 배 정도 높게, Li 등의 실험결과 보다는 1.2～2.0 배 정도 낮게 나타났으며, SMXL-O 와 SMXL-H 믹서의 경우에는 Blasius 의 결과 보다는 약 11～7 배 정도 높게, Li 등의 실험결과 보다는 2.6～4.5 배 낮은 결과가 나타나는 것을 알 수 있다. Li 등의 실험에서는 직경 16mm 인 엘리먼트 6, 12, 18 개에 대해 실험유체를 가열하는 조건에서 수행한 결과이지만 상대적으로 점성이 큰 글리세롤 수용액을 이용했기 때문에 본 연구결과 보다 마찰계수가 높게 나타나는 것으로 판단된다.

그러나 Moody선도[31]를 통해서 알 수 있는 바와 같이 층류 영역에서는 마찰인자의 감소 기울기가 상대적으로 크고, 천이 영역을 거쳐 난류 영역에 이르면 감소 기울기가 작아지게 되는데, Li등의 결과는 Re≥15 의 층류 영역을 포함하는 결과임에도 불구하고 본 연구와 동일한 Re수 영역에서의 마찰인자의 감소 기울기가 상대적으로 작다는 것을 알 수 있다.

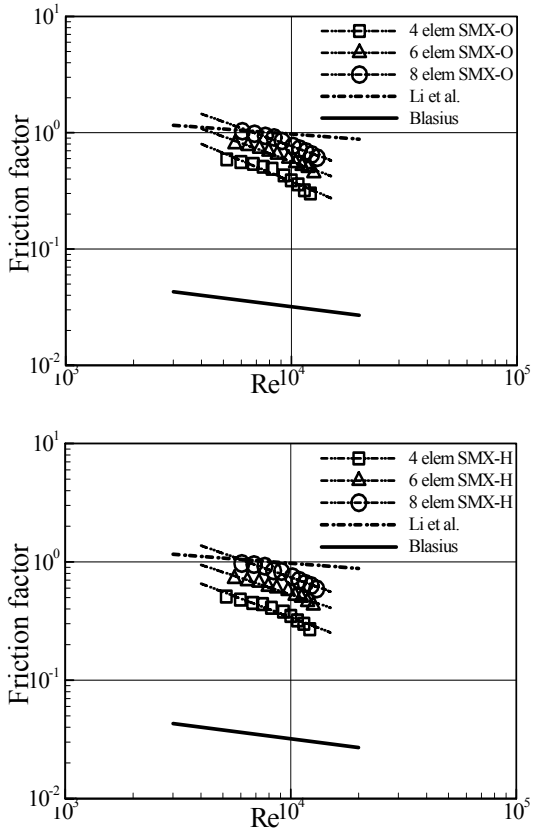


Fig. 11 Correlations of the friction factor of SMX-O and

SMX-H mixer

Table 3 Equations of correlated friction factor

Mixer Type	Element Number	f
SMX-O	4	$658\,Re^{-0.81}$
	6	$391\,Re^{-0.71}$
	8	$468\,Re^{-0.70}$
SMX-H	4	$254\,Re^{-0.72}$
	6	$177\,Re^{-0.63}$
	8	$380\,Re^{-0.68}$
SMXL-O	9	$337\,Re^{-0.81}$
	15	$455\,Re^{-0.79}$
SMXL-H	9	$63\,Re^{-0.64}$
	15	$148\,Re^{-0.68}$

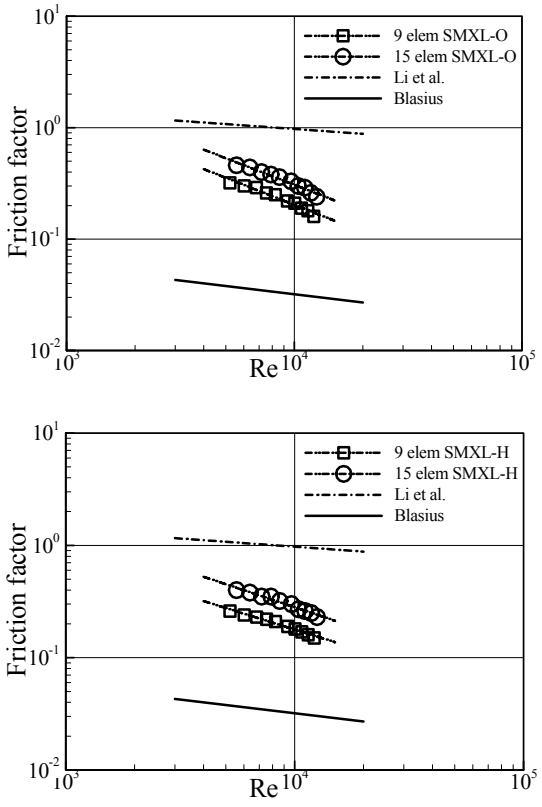


Fig. 12 Correlations of the friction factor of SMXL-O and SMXL-H mixer

전체적인 경향성이나 결과의 정량적인 범위 등을 고려할 때, 본 연구의 결과는 석유화학산업의 혼합설비 및 열교환기 뿐만 아니라 상대적으로 고 Re 수 조건에서 운전되는 수처리 공정의 응집제 혼합설비의 설계자료로 이용될 수 있을 것으로 사료된다.

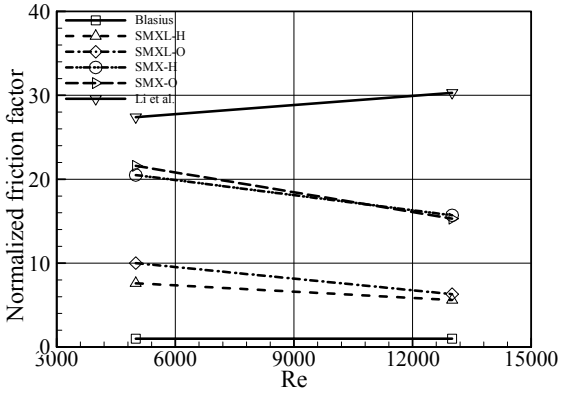


Fig. 13 Normalized friction factors

4. 결 론

SMX-O 와 SMXL-O 믹서 그리고 이들 믹서에 비해서 압력손실을 줄이기 위해 고안한 SMX-H 와 SMXL-H 믹서의 압력 손실량을 측정하고 마찰인자에 대한 관계식을 도출하는 실험적인 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) SMX-O 믹서의 마찰인자는 0.3～1.03, SMX-H 믹서는 0.27～0.97, SMXL-O 믹서의 마찰인자는 0.13～0.46, SMXL-O 믹서는 0.11～0.4 범위임을 알 수 있다.

(2) SMX-H 믹서와 SMXL-H 믹서의 압력손실은 SMX-O 믹서와 SMXL-O 믹서에 비해서 약 8%와 15% 정도 감소하였다.

(3) 마찰인자에 대한 계산결과는 Blasius 의 매끈한 원관에 대한 결과보다 SMX-O 와 SMX-H 믹서는 평균적으로 약 19 배 정도, SMXL-O 와 SMXL-H 믹서는 약 9 배 정도 높게 나타났지만 유사한 특성을 확인하였다.

(4) 관련 산업분야에서의 적용성을 위해서 SMX-H 믹서와 SMXL-H 믹서 엘리먼트의 유로확장 면적의 최적화, Re 수 범위의 확대 등을 고려한 성능실험과 제안된 새로운 믹서의 혼합율 특성에 대한 검증실험이 추후의 연구를 통해서 수행될 필요가 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

(1) Stankiewicz, A.I. and Moulijn, J.A., 2000, "Process Intensification: Transforming Chemical Engineering," *Chemical Eng. Progress*, Vol. 96, No. 1, pp. 22～34.
(2) Gyenis, J., 2002, "Motionless Mixers in Bulk Solids

Treatments," *KONA*, Vol. 20, pp. 9～23.
(3) Jaffer, S.A. and Wood, P.E., 1998, "Quantification of Laminar Mixing in the Kenics Static Mixer: An Experimental Study," *The Canadian J. Chemical Eng.*, Vol. 76, pp. 516～521.
(4) Kusch, H.A. and Ottino, J.M., 1992, "Experiments on Mixing in Continuous Chaotic Flows," *J. Fluid Mech.*, Vol. 236, pp. 319～348.
(5) Shah, N.F. and Kale, D.D., 1991, "Pressure Drop for Laminar Flow of Viscoelastic Fluids in Static Mixers," *Chemical Eng. Science*, Vol. 46, pp. 2159～2161.
(6) Pahl, M.H. and Muschelknautz, E., 1982, "Static Mixers and Their Applications," *Int. Chemical Eng.*, Vol. 22, pp. 197～205.
(7) Sir, J. and Lecjaks, Z., 1982, "Pressure Drop and Homogenization Efficiency of a Motionless Mixer," *Chemical Eng. Communication*, Vol. 16, pp. 325～334.
(8) Van Wageningen, W.F.C., Kandhai, R.F., Mudde, H.E. and Van Den Akker, H.E.A., 2004, "Dynamic Flow in a Kenics Static Mixer: An Assessment of Various CFD Methods," *AIChE J.*, Vol. 50, No. 8, pp. 1684～1696.
(9) Szalai, E.S. and Muzzio, F.J., 2003, "Fundamental Approach to the Design and Optimization of Static Mixers," *AIChE J.*, Vol. 49, No. 11, pp. 2687～2699.
(10) Hobbs, D.M. and Muzzo, F.J., 1998, "Reynolds Number Effects on Laminar Mixing in the Kenics Static Mixer," *Chemical Eng. J.*, Vol. 70, pp. 93～104.
(11) Avalosse, T. and Crochet, M.J., 1997, "Finite-Element Simulation of Mixing: 2. Three-Dimensional Flow through a Kenics Mixer", *AIChE J.*, Vol. 43, No. 3, pp. 588～597.
(12) Hobbs, D.M., 1997, "Characterization of a Kenics Static Mixer under Larminar Flow Condition," *Ph.D Thesis*, The State University of Newjersy.
(13) Ling, F.H. and Zhang, X., 1995, "A Numerical Study on Mixing in the Kenics Static Mixer," *Chemical Eng. Communication*, Vol. 136, pp. 119～141.
(14) Couvert, A., Peculier, M.-F. And Laplanche, A., 2002, "Pressure Drop and Mass Transfer Study in Static Mixers with Gas Continuous Phase," *The Canadian J. Chemical Eng.*, Vol. 80, pp. 727～733.
(15) Ventresca, A.L., Cao, Q. and Prasad, A.K., 2002, "The Influence of Viscosity Ratio on Mixing Effectiveness in a Two-Fluid Laminar Motionless Mixer," *The Canadian J. Chemical Eng.*, Vol. 80, pp. 614～621.
(16) Li, H.Z., Fasol, C. and Choplin, L., 1996, "Hydrodynamics and Heat Transfer of Rheologically Complex Fluids in a Sulzer SMX Static Mixer," *Chemical Eng. Science*, Vol. 51, No. 10, pp. 1947~1955.
(17) Cybulski, A. and Werner, K., 1986, "Static Mixers Criteria for Applications and Selection," *Int. Chemical Eng.*, Vol. 26, pp. 171~180.
(18) Heniche, M., Tanguy, P.A., Reeder, M.F. and Fasano, T.B., 2005, "Numerical Investigation of Blade Shape in Static Mixing," *AIChE, J.*, Vol. 51, No. 1, pp. 44~58.
(19) Zalc, J.M., Szalai, E.S., Muzzio, F.J. and Jaffer, S.A., 2002, "Characterization of Flow and Mixing in an SMX Static Mixer," *AIChE, J.*, Vol. 48, No. 3, pp. 427~436.
(20) Rauline, D., Tanguy, P.A., Belvec, J.L. and Bousquet, J., 1998, "Numerical Investigation of the Performance of Several Static Mixers," *The Canadian J. Chemical Eng.*, Vol. 76, pp. 527~535.
(21) Mickaily-Huber, E.S., Bertrand, F., Tanguy, P., Meyer, T., Renken, A., Rys, F.S. and Wehrli, M., 1996, "Numerical Simulation of Mixing in an SMRX Static Mixer," *Chemical Eng. J.*, Vol. 63, pp.117～126.
(22) Lee, D.S., Kim, H.G., Ha, M.Y., Park, Y.H. and Park, I.M., 2005, "Mixing Effect by the Geometry of Static Mixer with Turbulent In-Situ Mixing Process," *Trans. of the KSME(B)*, Vol. 29, No. 12, pp.1307～1312.
(23) Kim, C.M., Hong, D.J., Kim, M.Y., Lee, S.M., Ahn, K.Y. and Park, Y.B., 2006, "A Numerical Simulation of the Internal Fluid Flow and Mixing Characteristics in a Static Mixer for the Catalytic Combustor," *Proceedings of the KSME 2006 Fall Annual Meeting*, pp. 2250～2255.
(24) Chung, K.Y., 1995, "Heat Transfer Enhancement by Means of Static Mixer in Horizontal Tube," *M.S. Thesis*, Yeungnam University.
(25) Yang, H.C., 2007, "Mixing Characteristics of Motionless Mixers," *J. Visualization*, Vol. 10, No. 1, pp. 83～89.
(26) Yang, H.C., 2007, "Development and Application of Static Mixer," *J. Korean Society of Marine Engineering*, Vol. 31, No. 5, pp. 506～513.
(27) Yang, H.C., Park, S.K. and Jeon, J.C., 2005, "Development of Static Mixer for High Viscosity Fluid," *Proceedings of the KSME 2005 Spring Annual Meeting*, pp. 3079～3083.
(28) Yang, H.C. and Park, S.K., 2004, "Pressure Drop in Motionless Mixers," *KSME Int. J.*, Vol. 18, No. 3, pp. 526～532.
(29) Jones, S.C., 1999, "Static Mixers for Water Treatment: A Computational Fluid Dynamics Model", *Ph.D Thesis*, Georgia Institute of Technology.
(30) Kawamura, S., 2004, *Integrated Design and Operation of Water Treatment Facilities*, John Wiley and Sons, New York.
(31) Incropera, F.P. and Dewitt, D.P., 1990, *Introduction to Heat Transfer*, John Wiley and Sons, New York.