대한기계학회 2001년도 추계학술대회논문집 B pp. 557~562 KSME 01F238

스태틱 믹서의 유동 및 혼합에 대한 연구

양희천* · 박상규* · 엄용석** · 라병열***

A Study of Flow and Mixing in a Static Mixer

Hei-Cheon Yang, Sang-kyoo Park, Yong-Suk Eom and Byeong-Yeol Ra

Key Words: Static Mixer(정적 믹서), Fluid Mixing(유체 혼합), Mixing Element(믹싱 엘리먼트), Pressure Drop(압력 강하), Mixing Performance(믹싱 효율)

Abstract

Fluid mixing is ubiquitous and essential in many natural and industrial systems. Understanding the mixing processes that occur in these diverse system is essential for predicting many aspects of practical importance. The objective of this study is to perform the experimental and numerical investigation of the flow and mixing in a static mixer. Three different types of mixing elements, Sulzer, SSM and PPM were used. Glycerin and hydraulic oil were used as mixing fluids. Pressure drop was measured using a manometer.

1. 서 론

혼합장치란 일반적으로 2종류 이상의 물질에 외력을 가해 교반하고 균질의 혼합물을 얻거나 반응을 촉진하는 장치이다. 이러한 혼합장치는 교반축이 수직인 수직형과 수평인 가로형 혼합장치로 크게 나눌 수 있다. 수직형의 주류인 agitator는 교반익, 방해판, 구동부, 축봉부 및 저장용기로 구성되며, 모터로 구동되는 교반익(impeller)의 에너지 공급으로 혼합이 이루어진다. 수직형 혼합장치의 가장 중요한 구성요소인 교반익은 그 목적에 따라서 여러 가지 형식이 사용되는데, 프로펠러, 패들 및 리본익 3종이 가장 일반적으로 사용된다. 가로형 혼합장치의 일반적인 특징은 수직형에 비해서 단위용적당 전열면적이 크며, 연속프로세스 및 고점도액의 교반에 적합하고, 체류시간 분포를 균일화 할 수 있다. 따라서 가로형 혼합장치의 장점을 이용해서 고점도 수지의 증축합, 증발 및 조성균질화, 더 나아가 수지펠릿의 건조에 사용된다. 특히 인-라인(in-line) 믹싱장치인 스태틱 믹서는 혼합을 위한 별도의 용기를 설치하지 않고 유체 이송용의 관로 통과시에 연속적으로 면분할(flow division), 방향전환(rotational circulation), 뒤섞임(radial mixing)의 작용에 의해 2가지 이상의 액체, 기체, 분체 등을 혼합시키는 장치로 유체의 연속 혼합조작에 사용된다. 스태틱 믹서는 시스템 구성요소 자체에 운동부가 없고, 원형관내에 일련의 고정된 믹싱 엘리먼트로 구성된 것이 특징이다[1].

그러나 다양한 용도의 사용에도 불구하고 믹싱 엘리먼트의 기하학적 복잡성 때문에 혼합율 및 유동특성에 대한 연구는 실험적으로나 수치해석적으로 그다지 활발하지 못하지만, 믹서 출구에서의 혼합율과 압력 강하량은 믹싱 엘리먼트의 설계조건에 따라 변하므로 혼합에 이용되는 에너

* 여수대학교 기계자동차공학부
** 여수대학교 대학원
*** (주) 신성플랜트

지의 이용효율과 혼합율의 향상 측면에서 믹싱 엘리먼트의 설계조건에 따른 믹서 출구에서의 유체역학적 특성에 대한 이해가 필요하다[2].

스태틱 믹서에 대한 실험적 연구 동향은 크게 두 부류로 나눌 수 있다. 첫째 부류는 기본적인 설계변수들을 측정하고 측정결과와 무차원 변수간의 상관관계식을 도출하는 연구이다. 이러한 연구들 중에는 압력손실과 레이놀드수[3-4], 열전달과 레이놀드수나 프란틀수[5-6], 질량유량과 슈미트수[7-8] 등에 대한 연구가 있다. 두 번째 부류는 믹싱효율을 측정하고 상관관계식을 유도하는 연구이다. 이러한 연구에는 믹싱효율과 잔류시간의 상관관계[5-6], 믹싱지수[9] 등에 대한 연구결과들이 있다.

최근에 들어서 고도로 발달된 수치적 방법을 이용하여 유동특성 및 믹싱효율에 대한 정량적, 정성적 자료를 제공할 수 있는 수치계산이 가능하다. 스태틱 믹서의 특성에 대한 수치해석적 연구는 컴퓨터의 성능발달과 보급확산 그리고 수치해석 방법의 발달로 1980년대 중반이후 본격화되었다. Avalosse와 Crochet[10], Arimond와 Erwin[11], Dackson과 Nauman[12], Ling과 Zhang[13]에 의해서 Kenics 믹서의 믹싱효율을 해석하기 위한 수치적 연구가 수행되었다. Khakhar등[14], Kusch와 Ottino[15], Ling[16]은 분할평판 믹서(partioned-pipe-mixer ; 이하 PPM)의 유동과 믹싱 거동을 수치적으로 해석하였다. Nauman[17]은 Kenics 믹서와 PPM의 속도장에 대한 이전의 해석에서 이용된 가정은 믹싱 엘리먼트들 사이의 천이 영역에서 국소 질량보존을 만족시키지 못한다고 지적하였다. 한편 Lang등[18]은 상용 CFD S/W를 이용하여 난류 유동조건하의 Sulzer SMV 믹서의 유동을 해석하는 연구를 수행하였다. Mickaily-Huber[19] 등은 층류 유동 조건에서 Sulzer 믹서의 믹싱과정을 해석하였다. 최근에 Hobbs[2]는 이전의 Kenics 믹서에 대한 대부분의 연구가 믹싱 엘리먼트들 사이의 발달유동(developing flow)을 무시하여 속도장에 대해 2차원 근사해를 이용한 것과는 달리 층류 유동조건에서 Kenics 믹서 내의 3차원 속도장을 해석하였다.

본 연구의 목적은 스태틱 믹서의 혼합 및 압력 손실량에 대한 실험적 연구를 수행하고, 2개의 단위 엘리먼트로 구성된 PPM 모델을 설정하여 수치적 연구를 수행하여 산업용 스태틱 믹서의 성능개선 및 최적설계에 기여하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

본 연구에서는 Fig.1에 나타낸 것과 같은 Sulzer형, SSM(Sin Sung mixer)형 그리고 PPM형 엘리먼트를 제작하고, 이러한 엘리먼트들을 장착할 수 있는 스태틱 믹서를 제작하여 압력 강하량을 측정하였으며, 디지털 카메라를 이용하여 믹싱효율을 촬영하는 실험적 연구를 수행하였다. 제작된 엘리먼트 중에서 SSM형은 본 연구과정을 통해서 새롭게 개발된 모델이다. Fig.1의 엘리먼트들은 각각 8개의 단위 엘리먼트의 조합으로 하나의 믹싱 엘리먼트를 구성한다. 스테인레스 스틸로 제작된 단위 엘리먼트의 직경/길이의 종횡비는 1:1이다. 엘리먼트의 직경은 믹서 튜브의 직경과 같은 40mm이다. Sulzer형은 분할면의 수가 2^n(n은 엘리먼트수)개인 Kenics형[2]과는 달리 분할면의 수가 32^n개로 분할면의 수가 상대적으로 많아서 믹싱효율은 좋지만 믹서 출구에서의 압력손실이 커져서 펌핑 동력이 많아지는 단점이 있다. 본 연구를 통해서 개발된 모델은 Sulzer형과는 완전히 다른 방식이지만 믹싱효율의 감소는 최소화하고 압력손실량을 줄여 에너지의 이용효율을 향상시키고자 하는 의도에서 고안된 모델이다.

Fig.2는 제작된 스태틱 믹서의 개략도를 나타낸다. 제작된 믹서의 믹싱 튜브는 40mm 직경의 투명 아크릴관으로 제작하였다. 측정용 유체는 점도가 서로 다른 글리세린과 유압유를 사용하였다. Table 1에는 믹싱 유체의 물성치를 나타낸다. 믹싱 유체의 저장 탱크는 2개로 구성하였으며, 펌프를 이용하여 하단의 탱크로부터 아크릴관으로 제작된 상부 탱크로 유체를 공급한다. 믹싱 튜브에는 상부 탱크에 연결된 기어 펌프(Viking Spur Gear Single Pump SG-0570)에 의해서 유체가 펌핑된다. 기어 펌프와 믹싱 튜브 사이에는 압력게이지를 설치하여 믹싱 튜브에 공급되는 압력을 측정하였다. 기어 펌프는 3상 유도 전동기에 의

해서 구동된다. 유량은 상부 탱크 출구쪽에 설치된 유량 조절밸브와 유량계를 이용하여 조절하였다. 측정 유체는 원래의 저장용기로부터 탱크에 주입하는 과정에서 포함될 수 있는 기포방울이 액면 위로 제거되도록 하기 위해 24시간 이상 저장하였으며, 저장한 글리세린을 상부탱크에 주입할 때 공기를 배출시킬 수 있도록 느린 속도로 펌핑하였다.

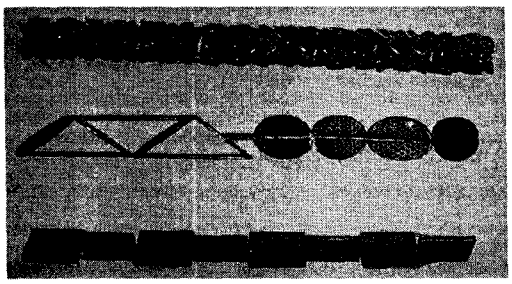

Fig. 1 Mixing elements (from top to bottom ; Sulzer type, SSM type and PPM type).

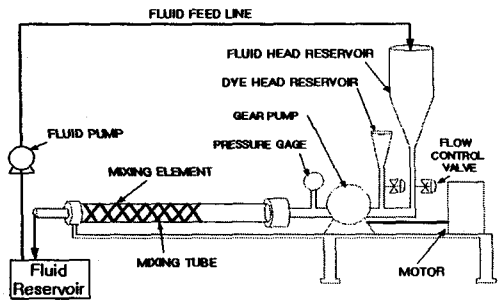

Fig. 2 Schematic diagram of static mixer system.

Table 1 Mixing fluid properties

Glycerin	density(kg/m^3)	1257.6
	viscosity(N • s/m^2)	1.4915
Hydraulic oil	density(kg/m^3)	870
	viscosity(N • s/m^2)	0.03828

3. 수치해석

수치해석에는 상용 CFD 코드인 Algor[20]를 이용하였다. Algor는 유한요소법(Finite Element Method)을 바탕으로 한 상용S/W이다. 이 S/W에서는 Navier-Strokes 방정식을 풀기 위해 Penalty 방법을 이용한다. direct 방법에 비해서 Penalty 방법은 훨씬 작은 matrix를 풀게 되므로 다양한 Re 수 범위에 대해 해석이 가능하다. 난류모델은 grid adaptive subgrid scale 난류모델을 이용한다. 수치해석 결과의 정확도에 대한 영향 요소중에서 계산 영역의 격자구조가 가장 기본적인데, 해석 대상의 기하학적 구조가 복잡해질수록 격자 생성에 어려움이 따르게 된다. 또한 복잡한 구조에 따른 격자수의 증가는 계산시간의 증가를 초래하여 경제성의 문제를 야기시키게 된다. 따라서 본 연구에서는 기하학적으로 대단히 복잡한 구조인 믹싱 엘리먼트부에 대해 최적의 격자를 생성시킬 수 있도록 하기 위해 별도의 CAD 패키지인 Soildedge를 이용하여 PPM 엘리먼트부를 모델링한 후 Algor의 preprocessor를 이용하여 격자를 생성시키는 방법을 이용하였다. 본 연구의 수치해석 모델인 분할 파이프 믹서의 믹싱 엘리먼트는 Fig. 3에서 보는바와 같이 140mm 길이의 40mm 원형관 내부에 두께 2mm의 평판이 직교되어 있다. 수평인 평판은 입구영역으로부터 20mm 떨어져있고 수직인 평판은 출구영역으로부터 40mm 안쪽에 설치되어 있다. 평판의 너비와 길이는 관의 직경과 같은 40mm이다. Fig. 4는 분할 파이프 믹서 모델의 격자계를 나타낸다. 계산 격자는 약 10,000개 정도로 구성하였다.

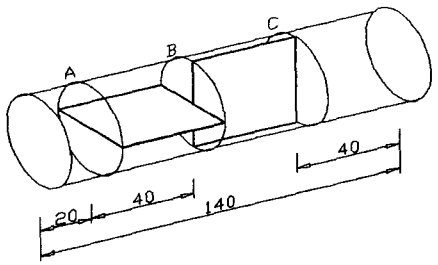

Fig. 3 Schematic diagram of PPM element model.

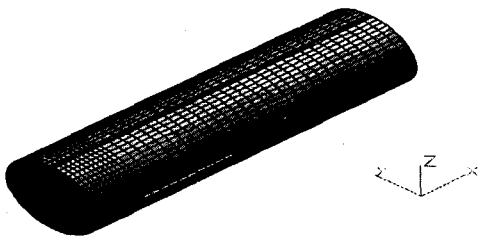

Fig. 4 Finite element mesh of PPM element model.

4. 결과 및 고찰

일반적으로 스태틱 믹서를 개발하게 되면 Z-factor[2]로 알려진 압력 손실량과 믹싱효율 등에 대한 이론적 근거와 관련 자료가 제공될 때 장치의 신뢰성을 확보할 수 있다. 특히 믹서 출구에서의 압력손실량에 대한 자료는 믹서 입구에 동력을 공급할 펌프의 용량이나 믹싱 엘리먼트의 설계조건을 결정하기 위해 반드시 필요하다. 여기서 Z-factor는 믹싱 엘리먼트가 없는 중공관의 압력손실과 엘리먼트가 장착된 스태틱 믹서의 압력 손실량의 비로써 정의된다. Table 2에는 측정된 압력강하량과 계산된 Z factor를 나타낸다. 상대적 고 점도인 글리세린의 경우, 유압유보다 점성 마찰손실에 기인한 압력손실이 대략 10배 정도 증가하는 것을 알 수 있다. Sulzer형이나 SSM형이 PPM형에 비해서 2.5배 이상 압력손실이 커지는 것은 PPM형에 비해서 상대적으로 복잡한 엘리먼트 형상에 기인한 형상 압력 손실량의 증가 때문인 것으로 생각된다. 한편 Sulzer형과 SSM형의 경우, 글리세린의 Z-factor에 비해서 유압유의 Z-factor가 커지는 것은 점성계수가 작은 경우에는 점성마찰에 기인한 압력손실보다 형상 압력손실의 비가 증가하기 때문인 것으로 생각된다. 한편 본 연구과정에서 개발한 SSM형의 압력손실이 Sulzer형에 비해 약 10%정도 감소하였다.

Table 2 Measured pressure drops and calculated Z-factor

Mixing Fluid	Element type	⊿P(Pa)	Z-factor
Glycerin	Sulzer	4786	3.52
	SSM	4391	3.23
	PPM	1838	1.35
Hydraulic oil	Sulzer	478	4.67
	SSM	427	4.17
	PPM	137	1.33

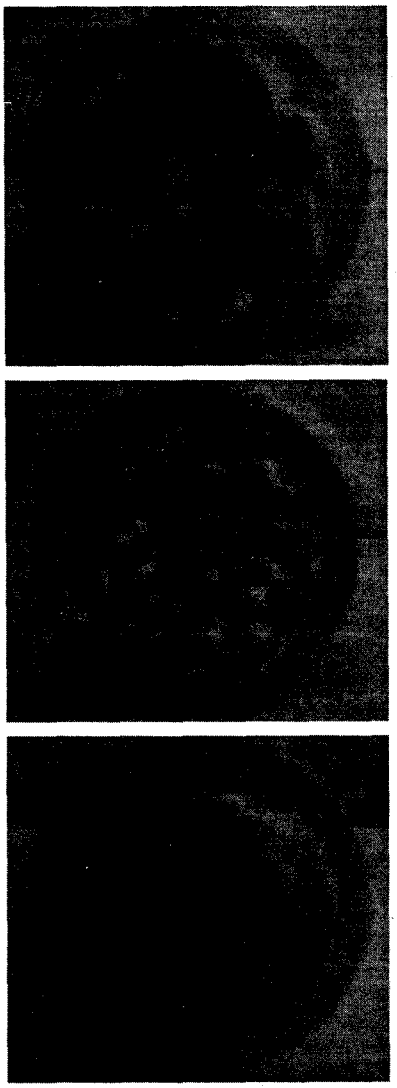

Fig. 5 Tracer mixing in the exit cross section (from top to bottom ; Sulzer, SSM, PPM)

Fig. 5는 믹싱 튜브 출구의 혼합상태를 촬영한 결과이다. 혼합 상태를 촬영하기 위한 실험은 믹서에서 믹싱 튜브를 분리하여 각각의 엘리먼트를 장착시키고 적당하게 반죽한 진흙의 중심부에 직경 10mm 정도로 붉은색 추적 색소를 넣고 가압하여 믹싱되게 한 후 출구에서 디지털 카메라를 이용하여 촬영하였다. 본 실험결과로부터 정량적인 혼합율을 산출할 수는 없지만, PPM형의 경우에는 믹서 중심부에만 추적 색소가 분포한 반면에 Sulzer형과 SSM형은 거의 전 평면에 추적 색소가 분포하는 것을 알 수 있다. Sulzer형과 SSM형을 비교하면 Sulzer형이 보다 고르게 확산된 결과를 보여주고 있다. 따라서 압력 손실량은 SSM형이 약 10% 정도 적지만 혼합상태를 고려하면 어떤 엘리먼트 형상이 우수하다고 단정적으로 설명하기는 곤란하고 보다 다양한 성능 실험이 필요한 것으로 사료된다. 또한 엘리먼트의 가공 및 제작 비용과 내구성 등에 대한 종합적인 고려가 필요할 것으로 생각된다.

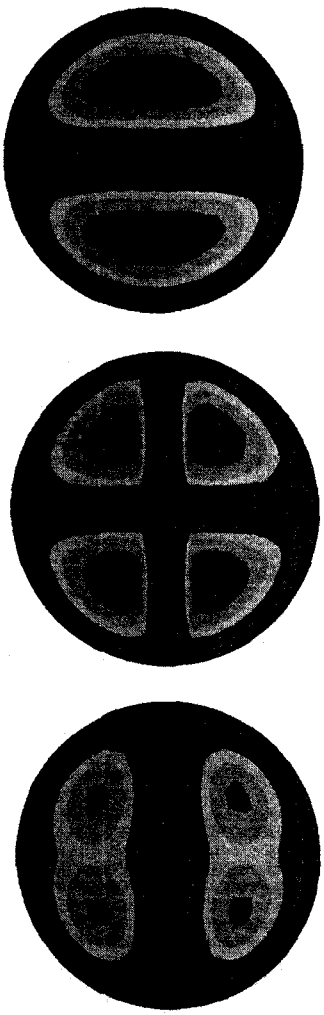

Fig. 6 Evolution of the axial velocity contour in the element cross section

Fig. 6은 수치 계산한 축방향 속도의 크기를 나타낸 결과이다. 윗쪽 그림은 Fig.3의 A와 B사이의 중간 평면, 중간 그림은 B평면 그리고 아래쪽 그림은 B와 C사이의 평면에서 축방향 속도장을 나타낸 것이다. 믹서의 출구쪽으로 진행되면서 분할평판의 영향으로 속도장이 변하는 것을 알 수 있다.

5. 결론

고효율 스태틱 믹서 개발과제의 일부로, 스태틱 믹서의 혼합 및 압력 손실량에 대한 실험적 연구와 2개의 단위 엘리먼트로 구성된 PPM 모델을 설정하여 수치적 연구를 수행한 결과를 요약하면 다음과 같다.

고 점도인 글리세린에서 점성 마찰손실에 기인하여 유압유보다 압력손실이 대략 10배정도 크게 나타났다. 상대적으로 복잡한 엘리먼트 형상에 기인한 형상 압력손실의 증가로 Sulzer형이나 SSM형이 PPM형에 비해서 2.5배 이상 압력손실이 크게 나타났다. 본 연구과정에서 개발한 SSM형의 압력손실이 Sulzer형에 비해 약 10%정도 감소하였다. PPM형의 경우에는 믹서 중심부에만 추적 색소가 분포한 반면에 Sulzer형과 SSM형은 거의 전 평면에 추적 색소가 분포하였다. 믹서의 출구쪽으로 진행되면서 분할평판의 영향으로 속도장이 변하는 것을 알 수 있다.

후기

본 연구는 여수대학교 중소기업기술개발지원센타의 지원으로 진행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

(1) 기계공학사전편찬위원회, 1995, 기계공학편람 사전 II, 엔지니어링편(C), 한국사전연구사, pp. C1-42-pp. C1-45.

(2) D. M. Hobbs, 1997, "Characterization of a Kenics Static Mixer Under Laminar Flow Conditions", Ph.D Paper The State University of NewJersey.

(3) N. F. Shah and D. D. Kale, 1991, "Pressure drop for laminar flow of non-Newtonian fluids in static mixers," Chem. Eng. Sci., Vol. 46, No. 8, pp. 2159-2161.

(4) K. G. Chandra and D. D. Kale, 1992, "Pressure drop for laminar flow of viscoelastic fluids in static mixers," Chem. Eng. Sci., Vol. 47, No. 8, pp.. 2097-2100.

(5) S. J. Chen and A. R. MacDonald, 1973, "Motionless Mixers for Viscous Polymers," Chem. Eng., pp. 105.

(6) C. D. Grace, 1971, "Static Mixing and Heat Transfer," Chem. Proc. Eng., pp. 57.

(7) W. D. Morris and R. Proctor, 1977, "The Effect of Twist Ratio on Forced Convection in the Kenics Static Mixer," Ind. Eng. Chem., Process Des. Dev., Vol. 16, pp. 406.

(8) W. D. Morris and P. Misson, 1974, "An Experimental Investigation of Mass Transfer and Flow Resistance in the Kenics Static Mixer," Ind. Eng. Chem., Process Des. Develop., Vol. 13, pp. 78.

(9) M. H. Pahl and E. Muschelknautz, 1982, "Static Mixers and Their Applications," Int. Chem. Eng., Vol. 22, No. 2, pp. 197-pp. 205.

(10) T. Avalosse and M.J. Crochet, 1997, "Finite-Element Simulation of Mixing: 2. Three-Dimensional Flow Through a Kenics Mixer," AIChE J. Vol. 43, No. 3, pp. 588-pp. 597.

(11) J. Arimond and L. Erwin, 1985, "A Simulation of a Motionless Mixer," Chem. Eng. Commun., Vol. 37, pp. 105--126.

(12) K. Dackson and E. B. Nauman, 1987, "Fully Developed Flow in Twisted Tapes : A Model for Motionless Mixing," Chem. Eng. Comm., Vol. 54, pp. 381-395.

(13) F. H. Ling and X. Zhang, 1995, "A Numerical Study on Mixing in the Kenics Static Mixer," Chem. Eng. Comm., Vol. 136, pp. 119-141.

(14) D. V. Khakhar, J. G. Franjione and J. M. Ottino, 1987, "A Case Study of Chaotic Mixing in Deterministic Flows : The Partitioned-Pipe Mixer," Chem. Eng. Sci., Vol. 42, No. 12, pp. 2909-pp. 2926.

(15) H. A. Kusch and J.M. Ottino, 1992, "Experiments on Mixing in Contimuous Chotic Flows," J. Fluid Mech., Vol. 236, pp. 319-pp. 348.

(16) F. H. Ling, 1993, "Chaotic Mixing in a Spatially Periodic Continuous Mixer," Phys. Fluids A, Vol. 5, No. 9, pp. 2147-2160.

(17) E.B. Nauman, 1991, "On Residence Time and Trajectory Calculations in Motionless Mixers," Chem. Eng. J., Vol. 47, pp. 141.

(18) E. Lang, P. Drtina, F. Streiff and M. Fleishli, 1995, "Numerical Simulation of the Fluid Flow and the Mixing Process in a Static Mixer," Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 38, No. 12, pp. 2239-2250.

(19) E. S. Mickaily-Huber, F. Bertrand, P. Tanguy, T. Meyer, A. Renken. F. S. Rys and M. Wehrli, 1996, "Numerical Simulation of Mixing in an SMRX Static Mixer," Chem. Eng. J., Vol. 63, pp. 117-126.

(20) ALGOR, 1999, Finite Element Analysis Using Algor, Course 915 Manual.