한국박용기관학회지 제27권, 제2호, pp. 299~304, 2003 (ISSN 1226~9549)
Journal of the Korean Society of Marine Engineers

스태틱 믹서의 압력손실에 대한 연구

양 희 천† · 박 상 규*

(원고접수일 : 2003년 1월 9일, 심사완료일 : 2003년 2월 11일)

A Study for the Pressure Drop of Static Mixers

Hei-Cheon Yang† · Sang-Kyoo Park*

Key words : Static Mixer(스태틱 믹서), Mixing Element(믹싱 엘리먼트), Pressure Drop(압력손실), Z-factor(Z-인자), Laminar Region(층류 영역)

Abstract

Static mixer consists of a straight pipe of circular cross section into which individual elements are inserted to cut, fold, twist and re-combine the mixing fluid. The number of elements and their shape required in any application depend on the complexity of the mixing process. The objectives of this study are to develop a new static mixer and to perform the experimental investigation of pressure drop in order to evaluate the performance of the new one. The mixing fluid used is Glycerin. The pressure drop is measured using a hydraulic manometer and the correlation of Z-factor is suggested as a function of Re. The Z-factors of SSC and YNU mixer are about 40% lower than and 4% higher than that of the Sulzer one.

1. 서 론

유체의 믹싱(mixing)은 자연계 및 산업 현장에서 다양하게 발생하는 현상중의 하나이다. 특히 화학공업 분야에서 믹싱 과정은 단순한 혼합으로부터 반응의 결과가 믹싱의 성능에 크게 의존하는 복잡한 화학 반응에 이르기까지 매우 다양하다. 믹싱 효율의 저하는 요구치 이하로 반응속도를 떨어뜨려 반응이 완결되기 전에 반응을 종료시킬 수 있으며, 불필요한 반응을 야기시킬 수도 있다. 혼합을 위한 장치는 패들(paddle), 프로펠러, 터빈 등에 의해 특정한 방향으로 유체의 유동을 유도하는 기계적 교반기(agitator)로부터 구동부가 필요없이 파이프나 덕트 내부에 장착되는 스태틱 믹서에 이르기까지 다양하다.

스태틱 믹서는 50년대 말부터 개발되기 시작하였으며, 60년대 말 Kenics 사에서 개발된 믹서가 상업적으로 이용되기 시작한 후[1], 현재까지 30여종 이상이 개발되었으나 산업현장에서 실제로 이용되고 있는 종류는 그다지 많지 않다. 스태틱 믹

† 책임저자(여수대학교 응용공학부), E-mail:hcyang@yosu.ac.kr, T:061)659-3223
* 여수대학교 응용공학부, E-mail:PSK@yosu.ac.kr

서는 교반기(agitator)에 비해 구동부(moving part)가 없어 파이프라인에 설치가 가능하며, 샤프트와 베어링과 같은 회전요소나 밀봉장치가 필요 없을 뿐만 아니라 광범위한 온도 조건과 높은 압력에서도 사용 가능하다. 또한 교반 공정의 단축, 단순화, 연속화 등이 가능하며 공정관리의 용이, 생산원가의 절감, 에너지의 절약 등이 가능하다. 스태틱 믹서는 산업현장에서 매우 다양하게 응용되고 있다[2].

화학분야에서는 염소화 및 산화반응, 산과 염기의 희석, 급속 반응이 요구되는 공정 등에 이용되며, 식품 제조공정에서는 지방 및 기름제거, 방부제의 혼합, 녹말 반죽 등에 이용되고 있다. 미네랄 공정에서는 슬러리의 희석, 용매 추출에 의한 금속성분의 회수 등에 응용되며, 페인트 및 수지 제조공정에서는 착색, 용매 혼합, 색상 농도 희석 등에 응용된다. 폴리머 및 플라스틱 산업에서는 반응물과 촉매의 혼합, 열적 균질화 등에 이용되며, 제지산업에서는 펄프의 희석 및 농도제어, 표백 공정 등에 이용되고 있으며, 상·하수 처리 공정에서는 살균 및 염소제거, 산소농도를 증가시키기 위한 에어레이션(aeration)과정에 이용되고 있다.

스태틱 믹서 출구에서의 압력 손실량에 대한 예측은 믹서 입구에 동력을 공급할 펌프나 압출기(extruder)의 용량을 결정하기 위해 반드시 필요하다. 따라서 이에 대한 상관관계식들이 Z-인자(Z-factor) 방법을 이용하여 제시되고 있다[3]. Pahl과 Muschelknautz[4]는 층류 및 난류 조건에 대해 뉴턴 유체의 믹싱 과정에서 발생하는 압력 손실량에 대한 상관관계식을 제시하였다. 또한 스태틱 믹서의 믹싱효과는 홀과 같은 혼합 유도장치, 나선형 구조(helix)에 의한 유동분할과 방향전환, 교차채널(crossing channel)에 의한 변위 및 변형, 경사판(oblique strip)에 의한 유동분할과 확산(spreading)에 의해 얻을 수 있다고 보고하였다. Sir와 Lecjaks[1]는 Re수에 따른 항력계수의 변화와 층류 영역과 난류 영역의 결정, 그리고 항력계수에 미치는 엘리먼트 수 및 믹서 직경의 영향을 조사하기 위해 압력 손실량을 측정하고 상관관계식을 제시하였다. Wilkinson과 Cliff[5]는 글리세린 수용액과 1%의 폴리아크릴아미드 수용액에 대해 압력손실 상관관계식을 제시하였으며, 뉴턴 유체와 점탄성 유체는 마찰계수에 대한 차이가 거의 없다는 연구결과를 발표하였다. Shah와 Kale[6]는 단일 스태틱 믹서와 뉴턴 유체로 한정된 연구를 보완하기 위해 비뉴턴 유체와 크기가 서로 다른 스태틱 믹서에 대해 압력손실 상관관계식을 제시하는 연구를 수행하였다. Manglik[7]은 층류의 균일 열유속 조건에서 누셀수(Nusselt)와 압력 손실량에 대한 이론 및 실험적 연구와 수치 해석적 연구를 수행한 바 있다. Hong과 Bergles[8]는 매질이 물과 에틸렌 글리콜인 층류 유동에 대해 전기 저항법을 이용하여 균일 열유속 조건에서 실험하여 압력손실은 고 레이놀즈수 일 때만 영향을 받는다는 결과를 발표하였다.

고찰한 바와 같이 대부분의 스태틱 믹서의 압력손실 특성에 대한 연구는 스태틱 믹서의 개발 및 제작시 응용할 수 있는 설계 상관관계식(design correlation)을 제시하고자 하는 연구가 주류를 이루고 있으나, 국내에서의 관련 연구는 거의 없는 실정이다. 따라서 본 연구는 새로운 형태의 스태틱 믹서를 고안하여 압력손실 특성의 규명을 위한 실험관계식의 제시를 목적으로 한다. 실험적 연구를 위하여 3종류의 믹싱 엘리먼트를 제작하였으며, 믹싱 엘리먼트를 장착하여 압력 손실량을 측정할 수 있는 스태틱 믹서 시스템을 제작하였다. 압력손실량은 액주 마노미터를 이용하여 측정하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 실험장치

본 연구에서는 압력손실(pressure drop)을 측정하기 위하여 Fig. 1에 나타낸 것과 같은 SSC형, YNU형 그리고 Sulzer형 엘리먼트를 제작하였다. Fig. 1의 엘리먼트들은 8개의 단위 엘리먼트의 조합을 나타낸 것이다. Fig. 2에는 각각의 엘리먼트에 대해 단위 엘리먼트 2개의 설계 구조를 나타낸다. SSC형은 4개의 단위 엘리먼트가 그림에 나타낸 구조로 한 세트가 되며, Fig. 1에서 보는바와 같이 동일한 구조를 갖는 다른 한 세트

가 원주 방향으로 90도 회전된 상태로 연결된다. YNU형은 SSC형의 단의 엘리먼트 2개가 중심부에서 서로 직교되는 구조로 하나의 단위 엘리먼트를 구성하며 인접하는 엘리먼트들은 원주 방향으로 90도 회전된 상태로 연결된다. Sulzer형은 각 단위 엘리먼트들이 원주 방향으로 90도 회전된 상태로 연결된다. 스테인레스 스틸로 제작된 단위 엘리먼트의 직경/길이의 종횡비는 1:1이다. 여기서 단위 엘리먼트의 직경은 믹서 튜브의 직경과 같은 40mm이다. 본 저자들의 이전의 연구[9-10]에서 개발한 SSC형은 Sulzer형과는 완전히 다른 구조로 Sulzer형에 비해 압력 손실량을 줄여 에너지의 이용효율을 향상시키고, 돌발적인 운전정지 시의 클리닝 문제를 개선할 목적으로 고안된 모델이다. 이 모델은 단위 엘리먼트의 전체 단면적중 약 27%에 해당하는 직경 3mm의 홀들을 통해 유체가 유동하며 믹싱 되도록 고안하였다. 그러나 이 모델은 단위 엘리먼트를 통과한 유동이 한쪽으로 치우치는 구조적인 문제를 야기하여 균일한 혼합을 얻는데 어려움이 있었다. 따라서 본 연구과정을 통하여 SSC형의 문제점을 해결할 수 있는 YNU형 엘리먼트를 제안하였다.

Fig. 3은 압력손실을 측정하기 위한 스태틱 믹서 시스템의 개략도를 나타낸다. 전체의 구성은 믹싱 엘리먼트 모델을 교체할 수 있도록 탈착식으로 제작된 믹싱부, 믹싱 유체에 에너지를 공급하는 동력 공급부, 믹싱 유체 저장부 그리고 측정부로 구성하였다. 믹싱부의 믹싱 튜브는 40mm 직경, 700mm 길이의 투명 아크릴관으로 제작하여 믹싱 과정을 가시화 할 수 있도록 하였으며, 믹싱 엘리먼트의 교체를 위한 탈착 후의 누설방지를 위해 튜브 양단을 플랜지 형상으로 가공하였다. 믹싱 튜브에는 액주마노미터를 이용하여 압력손실 수두를 측정할 수 있도록 입구의 90mm, 130mm, 170mm 하류와 출구의 50mm 상류에 압력탭을 제작하였다. 동력공급부는 기어펌프(Viking Spur Gear Single Pump : SG-0570)와 3상 유도전동기로 구성하였다. 믹싱 유체 저장부는 아크릴로 제작된 상하 2개의 저장용기와 1개의 추적색소 저장용기로 구성된다.

2.2 실험방법

압력 손실량의 측정 실험을 시작하기 전에 측정 유체는 원래의 저장용기로부터 하단의 믹싱유체 공급부에 주입하는 과정에서 포함될 수 있는 기포 방울이 액면 위로 제거되도록 하기 위해 약 2시간 정도 하단의 저장용기에 저장하였다. 실험이 시작되면 하단의 저장용기로부터 펌프를 이용하여 상부탱크로 믹싱 유체를 공급하게 되는데, 상부탱크에 주입될 때 기포가 발생되지 않도록 하기 위해

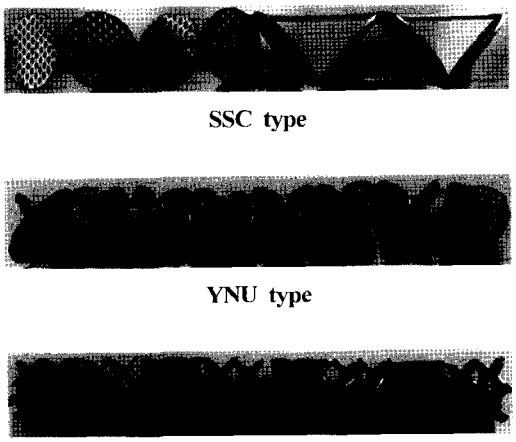


Fig. 1 Mixing elements of SSC, YNU and Sulzer type.

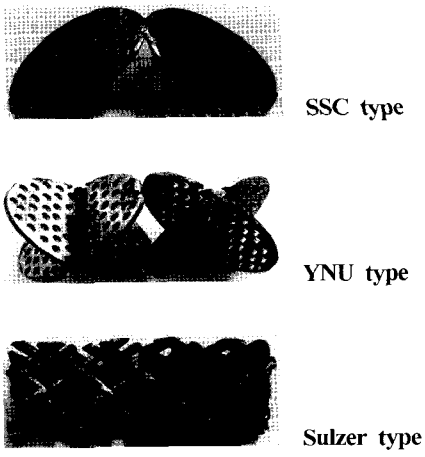


Fig. 2 Structure of 2 elements of SSC, YNU and Sulzer type.

느린 속도로 펌핑하였다. 믹싱 튜브에는 상부탱크에 연결된 기어 펌프에 의해서 유체가 펌핑 된다. 측정은 믹싱 튜브의 상하류에 설치한 압력 탭에 설치된 액주마노미터를 이용하여 측정하였다. 기어 펌프는 3상 유도 전동기에 의해서 구동된다. 유량은 전동기와 기어 측의 풀리 변환을 통해 조절하였다. 측정용 유체는 글리세린을 사용하였으며, 글리세린의 밀도와 점도는 1250 kg/m^3, 0.62 p a · s이다.

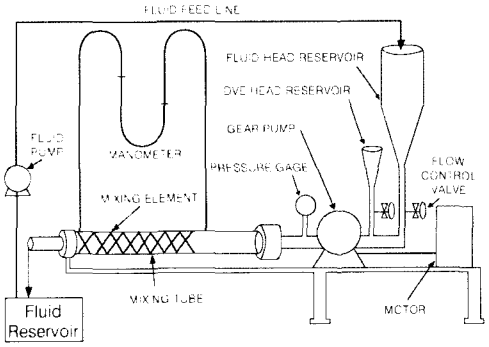


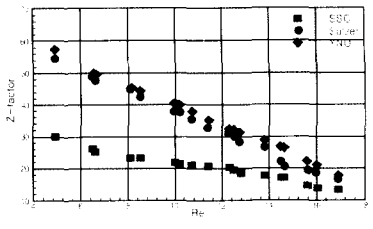
Fig. 3 Schematic diagram of static mixer system.

3. 결과 및 고찰

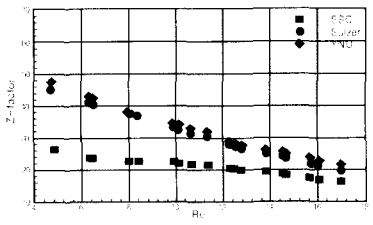
스태틱 믹서의 성능은 여러 가지 성능변수들에 대한 이론적 근거와 정량적 자료를 바탕으로 평가할 수 있으며, 이를 근거로 믹서의 신뢰성을 확보할 수 있다. 특히 믹서 출구에서의 압력 손실량에 대한 자료는 믹서 입구에 동력을 공급할 펌프의 용량이나 믹싱 엘리먼트의 설계조건을 결정하기 위해 반드시 필요하다. 스태틱 믹서의 압력손실은 엘리먼트의 기하학적 형상에 따라 크게 변하게 되는데, 압력손실에 대한 상관관계식을 얻기 위해 스태틱 믹서의 압력손실에 대한 중공관의 압력손실의 비로 정의되는 Z-인자 방법을 이용하고 있다. Z-인자는 다음의 식 (1)과 같이 정의된다.

$$Z=\frac{\triangle P_{sm}}{\triangle P_{et}} \qquad (1)$$

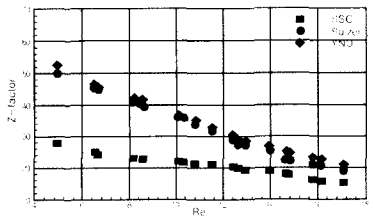
여기서 P_{et}는 믹싱 엘리먼트가 없는 중공관의 압력손실, P_{sm}은 엘리먼트가 장착된 스태틱 믹서의 압력 손실을 나타낸다.



(a) 4 elelments



(b) 8 elements

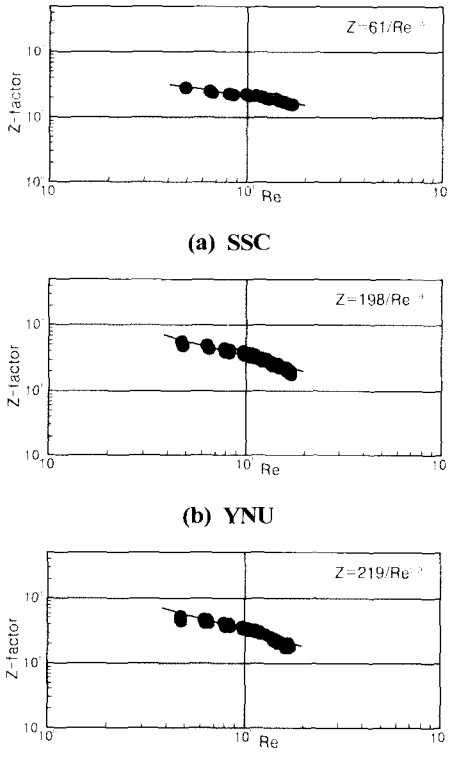


(c) 12 elements

Fig. 4 Z-factors of SSC, Sulzer and YNU type as a function of Re.

Fig. 4는 단위 엘리먼트 수가 4개, 8개 그리고 12개 일 때, 각각의 믹서에 대한 Z-인자를 레이놀즈수의 함수로 나타낸 결과이다. Z-인자는 레이놀즈수에 반비례하는 경향을 나타낸다. 이러한 특성은 유속의 증가에 따른 중공관의 압력손실 증가비가 엘리먼트가 장착된 스태틱 믹서의 압력손실 증가비보다 커지는 것에 기인하는 것으로 생각된다. 일반적으로 믹싱 유체의 점성이 작은 경우나 유속이 커지게 되면 믹서내에서의 대류 메카니즘의 활성으로 주 유동에 수직한 평면에 발생하는 2차유동에 의해 형상항력이 증가하여 압력손실이 커지게 된다. 그러나 물이나 일반 오일 등과 같은 유체

에 비해 상대적으로 점도가 큰 글리세린의 경우, 본 연구의 레이놀즈수 범위에서는 유속의 증가에도 불구하고 대류 메카니즘이 활성화되지 못하는 데 기인하는 경향으로 사료된다. 각각의 믹서를 비교하면, 상대적으로 단순한 형상의 SSC형은 Sulzer형에 비해 약 40%정도 낮게 나타났으며 YNU형은 Sulzer형 보다 약 5%정도 높게 나타났다. 유로 내 단면적을 점유하는 구조물이 많아지거나 유로의 변화가 큰 경우 부차적 손실에 기인하여 압력손실은 증가하게 된다. Sulzer형이 SSC형에 비해 Z-인자가 높게 나타나는 것은 이와 같은 부차적 손실에 기인한 것으로 생각되며, SSC형의 구조적인 문제점을 개선하기 위해 SSC형을 변형한 YNU형은 부차적 손실이 Sulzer형 보다 커지는 것으로 판단된다.



(a) SSC

(b) YNU

(c) Sulzer

Fig. 5 Z-factor correlations as a function of Re.

전체적으로 엘리먼트 수가 적은 경우, 레이놀즈수에 따른 Z-인자의 변동율이 크게 나타나며, 압력손실이 상대적으로 적은 SSC형의 레이놀즈수에 따른 Z-인자 변동율이 작게 나타나는 것을 알 수 있다.

Pahl과 Muschelknautz[4]가 Re〈50의 층류 영역에서 여러 종류의 스태틱 믹서에 대해 Z-인자를 측정한 결과에 의하면, Sulzer 믹서의 경우에 10-100 범위의 Z-인자를 갖는 것으로 발표하였다. 따라서 본 연구의 Z-인자에 대한 결과는 그들의 연구결과와 정량적으로 일치하는 경향임을 알 수 있다. 여기서 Re는 $\rho uD/\mu$로 정의되는데, D는 믹서 튜브의 직경을 나타내며, u는 엘리먼트가 없는 중공관에서의 체적유량 Q를 이용하여 $4Q/\pi D^2$으로 계산된다.

Fig. 5는 3가지 믹서에 대해 엘리먼트 수가 4, 8 그리고 12개 일 때, Z-인자의 변화에 대한 실험 상관관계식을 레이놀즈수의 함수로 나타낸 결과이다. 각각의 믹서에 대한 Z-인자 상관관계식은 다음과 같다.

SSC type : $Z=61/\ Re^{0.46}$

YNU type : $Z=198/\ Re^{0.76}$

Sulzer type : $Z=219/\ Re^{0.83}$

4. 결 론

스태틱 믹서의 압력손실 특성을 규명하기 위해 3종류의 믹싱 엘리먼트와 스태틱 믹서를 제작하여 실험적 연구를 수행한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 세가지 형태의 믹서에 대한 Z-인자 상관관계식은 다음과 같다.

SSC type : $Z=61/\ Re^{0.46}$

YNU type : $Z=198/\ Re^{0.76}$

Sulzer type : $Z=219/\ Re^{0.83}$

2) 엘리먼트 수에 관계없이 세가지 형태의 믹서에서 Z-인자는 레이놀즈수가 증가함에 따라 반비례하는 경향을 나타내며, Sulzer형에 비해 SSC형의 Z-인자는 약 40%정도 감소하였다.

3) Sulzer형에 비해 압력손실은 낮지만 혼합율이 좋지 못한 SSC형의 단점을 개선하기 위해 변형한 YNU형은 Sulzer형에 비해 약간 5%정도 Z-인자가 증가하였다. 그러나 어떤 엘리먼트 형상이 우수하다고 단정하기는 곤란하고, 난류를 포함한 다양한 유동조건, 점도가 다른 여러 종류의 믹싱 유체 그리고 혼합율 등에 대한 성능 실험이 더 필요하며, 가공 및 제작비용과 클리닝 문제 등에 대한 고려가 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

[1] J. Sir and Z. Lecjaks, "Pressure Drop and Homogenization Efficiency of a Motionless Mixer", Chem. Eng. Commun., Vol. 16, pp. 325-334, 1982.

[2] S. S. Jones, "Static Mixers for Water Treatment-A Computational Fluid Dynamics Model", Ph. D Thesis, Georgia Institute of Technology, 1999.

[3] D. M. Hobbs, "Characterization of a Kenics Static Mixer Under Larminar Flow Condition", Ph.D Thesis, The State University of Newjersy, 1997.

[4] M. H. Pahl and E. Muschelknautz, "Static Mixers and Their Applications", Int. Chem. Eng., Vol. 22, pp. 197-205, 1982.

[5] W. L. Wilkinson and M. J. Cliff, "An Investigation into the Performance of a Static In-line Mixer", Proc. Second European Conf. On Mixing, Cambridge, A-2-15-A2-29, 1977.

[6] N. F. Shah and D. D. Kale, "Pressure Drop for Laminar Flow of Viscoelastic Fluids in Static Mixers", Chem. Eng. Sci., Vol. 47, pp. 2159-2161, 1991.

[7] R. M. Manglik, "Heat Transfer Enhanement 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.

[8] 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 Japanses Research, Vol. 12, No. 3, pp. 1-31, 1976.

[9] 양희천, 박상규, 엄용석, 라병렬, "스태틱 믹서의 유동 및 혼합에 대한 연구", 대한기계학회 2001년도 추계학술대회 논문집, pp. 557-562, 2001.

[10] 양희천, 박상규 "스태틱 믹서 개발에 대한 연구", 한국박용기관학회지, Vol. 26, No. 5, pp. 589-595, 2002.

저 자 소 개

양희천 (楊熙千)

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

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 종신회원