정적믹서의 유동특성에 대한 수치적 연구

양희천† · 박상규* · 오승원**

Numerical Study of Flow Characteristics in Static Mixers

Hei-Cheon Yang, Sang-Kyoo Park and Seung-Won Oh

Key Words : Static Mixer(정적믹서), Flow Characteristics(유동특성), Finite Volume Method(유한체적법), Pressure Drop(압력손실), Transverse Vortex(횡와류)

Abstract

The objective of this study is to perform the numerical investigation of flow characteristics in static mixers. Simulations are carried out for mixers consisting of up to six Kenics and PPM elements placed end-to-end at an angle of 90 ° and for a range of Reynolds number(1≤ Re ≤100). The pressure drop across a six-element Kenics mixer is computed and compared with the previous experimental correlations. The results are in good agreement with the previous correlations. The simulated flow field of Kenics mixer is extremely complex and contains regions of transverse flow that is dominated by the interaction of vortices produced by the mixer elements.

1. 서 론

혼합장치란 일반적으로 2 종류 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 agitator 는 모터로 구동되는 교반익(impeller)의 에너지 공급으로 혼합이 이루어진다. 가로형 혼합장치의 일반적인 특징은 연속프로세스 및 고 점도액의 교반에 적합하고 체류시간 분포를 균일화 할 수 있다는 것이다. 따라서 가로형 혼합장치의 장점을 이용해서 고점도 수지의 중축합, 증발 및 조성균질화, 더 나아가 수지 펠릿의 건조 등에 사용된다. 특히 인-라인(In-line) 혼합 장치인 정적믹서(static mixer)는 혼합을 위한 별도의 용기를 설치하지 않고 유체 이송용의 관로 통과 시에 혼합되는 장치로 유체의 연속 혼합조작에 사용된다. 정적믹서는 시스템 구성요소 자체에 운동부가 없고, 원형관 내에 일련의 고정된 혼합 엘리먼트로 구성된 것이 특징이다[1].

정적믹서는 50 년대부터 개발되기 시작하여 60 년대 말 Kenics 사에서 개발된 믹서가 상업적으로 이용되기 시작한 후[2], 30 여종 이상이 개발되었으며 산업현장에서 매우 다양하게 이용되고 있다. 이러한 다양한 용도에도 불구하고 혼합 엘리먼트의 기하학적 복합성 때문에 혼합 및 유동특성에 대한 연구가 활발하지 못하며, 정적믹서에 대한 성능평가 자료의 부족으로 구매자들은 경험에 의해 정적믹서를 선택하고 있는 실정이다. 그러나 압력 손실량과 혼합율은 혼합 엘리먼트의 설계조건에 따라 변하므로 혼합에 이용되는 에너지의 이용효율과 혼합율의 향상측면에서 혼합 엘리먼트의 설계조건에 따른 믹서 출구에서의 유체역학적 특성에 대한 이해가 요구된다[3].

한편 최근에 들어서 고도로 발달된 수치적 방법을 이용하여 유동특성 및 혼합율에 대한 정량적, 정성적 자료를 제공할 수 있는 수치계산이 가능하게 되었다. 3 차원 CFD 에 의한 방법은 결과를 실제 설계에 이용하기에는 문제점이 있지만 상대적으로 시간과 비용 측면에서 실험적인 방법보다는

† 여수대학교 기계·냉동·자동차공학부
E-mail : hcyang@yosu.ac.kr
TEL : (061)659-3223 FAX : (061)659-3220
* 여수대학교 기계·냉동·자동차공학부
** 여수대학교 대학원

유리하므로 실험적인 방법과 병용하여 설계 도구화 되고 있는 추세이다. 따라서 컴퓨터 및 수치해석 기법의 비약적인 발전은 지금까지 실험과 경험에 의존함으로써 발생하는 시간적, 경제적 손실 등을 줄이고 설계 시 정성적인 자료를 제공하는 중요한 도구로 자리잡고 있다[4].

정적믹서의 특성에 대한 수치적 연구는 컴퓨터의 성능발달과 보급확산 그리고 수치해석 방법의 발달로 1980 년대 중반 이후 본격화 되었다. Avalosse 와 Crochet[5], Arimond 와 Erwin[6], Dackson 과 Nauman[7], Ling 과 Zhang[8]에 의해서 Kenics 믹서의 혼합효율을 해석하기 위한 수치적 연구가 수행되었다. Khakhar 등[9], Kusch 와 Ottino[10], Ling[11]은 분할평판 믹서(partioned-pipe-mixer ; 이하 PPM)의 유동과 혼합특성을 수치적으로 해석하였다. Nauman[12]은 Kenics 및 PPM 믹서의 속도장에 대한 이전의 해석에서 이용된 가정은 혼합 엘리먼트들 사이의 천이 영역에서 국소 질량보존을 만족시키지 못한다고 지적하였다. 한편 Lang[13] 등은 상용 CFD S/W 를 이용하여 난류 유동조건하의 Sulzer SMV 믹서의 유동을 해석하는 연구를 수행하였다. Mickaily-Huber[14] 등은 층류 유동 조건에서 Sulzer 믹서의 혼합과정을 해석하였다. 최근에 Hobbs[3]는 이전의 Kenics 믹서에 대한 대부분의 연구가 혼합 엘리먼트들 사이의 발달유동(developing flow)을 무시하여 속도장에 대해 2 차원 근사해를 이용한 것과는 달리 층류 유동조건에서 Kenics 믹서내의 3 차원 속도장을 해석하였다.

본 연구의 목적은 6 개의 단위 엘리먼트로 구성된 PPM 모델과 Kenics 모델을 설정하여 믹서내의 유동특성에 대한 대한 수치적 연구를 수행하여 산업용 정적믹서의 최적설계에 기여하고자 하는데 있다. 6 개의 단위 엘리먼트로 구성된 Kenics 및 PPM 엘리먼트 모델은 상용 S/W CATIA 를 이용하여 모델링하고, ICEM CFD 를 이용하여 격자를 생성하였다. 그리고 상용 해석 코드인 FLUENT 를 이용하여 해석하였다.

2. 이론적 모델 및 해석방법

2.1 지배방정식 및 해석방법

해석에 이용된 프로그램은 검사체적에 기초한 유한체적법을 이용하는 상용코드인 FLUENT 이다. 격자와 격자 사이 경계면에서의 대류항 변수의 profile 가정을 위해 상류차분법을 사용하였으며, 압력과 속도의 연계 문제는 SIMPLE 알고리즘을 이용하여 처리하였다.

Kenics 및 PPM 믹서 모델내의 정상 층류 유동장을 FLUENT 를 이용하여 해석하기 위해 적용한 경계조건은 다음과 같다. 입구에서는 균일한 속도분포를 축방향의 속도 성분으로 하였고, 각각의 레이놀즈 수에서 미리 계산한 속도성분을 사용하였다. 그리고 반지름 방향과 원주 방향의 속도성분은 0 으로 처리하였다. 유동장의 출구에서는 곡관으로부터 충분한 거리를 유지한다고 가정하여 Neumann 조건을 적용하여 축방향으로 속도성분의 변화가 없는 것으로 처리하였다. 믹서의 벽면과 엘리먼트의 표면에서는 미끄러짐이 없는 조건을 적용하여 모든 속도성분이 0 이 되도록 처리하였다.

2.2 해석모델

수치해석 결과의 정확도에 대한 영향 요소중에서 계산 영역의 격자구조가 가장 중요하며, 해석 대상의 기하학적 구조가 복잡해질수록 격자 생성에 어려움이 따르게 된다. 또한 복잡한 구조에 따른 격자수의 증가는 계산시간의 증가를 초래하여 경제성의 문제를 야기시키게 된다. 본 연구에서는 CATIA 로 믹서 엘리먼트를 모델링한 후 격자생성 프로그램인 ICEM CFD 에서 격자를 생성하여 격자수의 적절한 배치와 계산시간을 줄일 수 있도록 격자를 최적화 하였다.

믹서 엘리먼트는 Fig. 1 에 나타낸 것과 같이 Kenics 형과 PPM 형 2 가지를 모델링하였으며, 각각 6 개의 단위 엘리먼트로 구성하였다. 엘리먼트의 높이는 믹서의 내경과 같은 40mm 이고 각 단위 엘리먼트의 길이는 60mm(L)이다. Fig. 2 는 엘리먼트를 포함한 계산영역의 사양을 나타낸 것으로 6 개의 단위 엘리먼트로 구성된 부분의 길이는 360mm(6L)이고, 입구부분의 길이를 360mm(6L), 출구부분의 길이를 1800mm (30L)로 설정 하였다. 엘리먼트의 두께는 2mm 이며, 각 단위 엘리먼트들은 인접한 엘리먼트와 90 ° 로 교차한다.

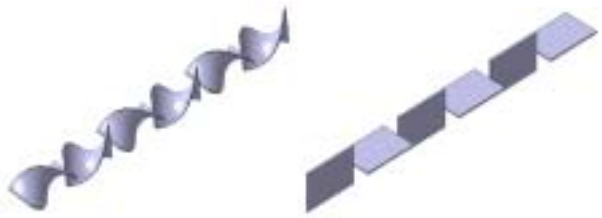

Fig. 1 Schematic diagram of Kenics and PPM elements

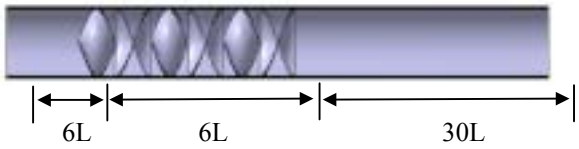

Fig. 2 Dimension of solution model

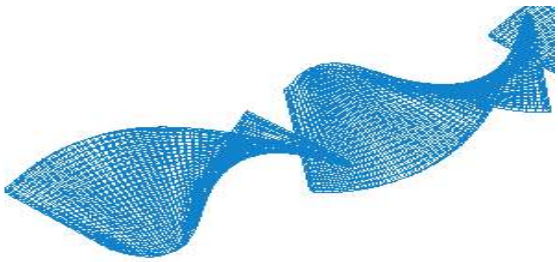

Fig. 3 Surface grids of 2 Kenics elements

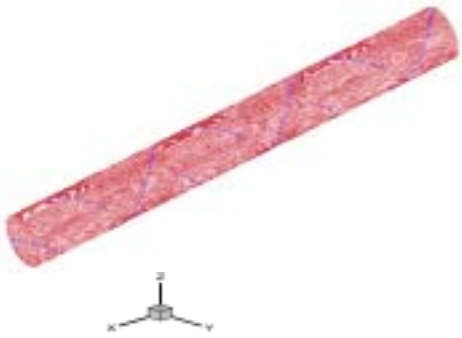

Fig. 4 Computational grid of Kenics element model

격자생성은 수치해석 시 많은 시간과 노력이 요구되는 부분으로 격자생성이 부적절하게 되었을 경우에는 수치확산 등을 발생시킴으로써 해의 부정확성을 유발시키고 어떤 경우에는 수렴해를 얻지 못하는 경우도 발생시키기 때문에 많은 주의를 요하게 된다. 본 연구에서는 상용 격자생성 프로그램인 ICEM CFD 를 이용하여 격자를 생성하였다. 생성된 격자 수는 Kenics 모델의 경우는 441,875 개이고 PPM 모델의 경우는 431,184 개이다. Fig. 3 은 Kenics 엘리먼트 두개의 표면 격자구조를 나타내며, Fig. 4 는 Kenics 모델의 계산영역 중 엘리먼트가 포함된 부분의 계산격자 구조를 나타낸다.

3. 결과 및 고찰

본 수치계산에 이용된 혼합유체는 글리세린이며, 계산 변수는 Re 수로 1, 10, 100 의 3 가지 경우에 대해 해석하였다. 후처리 과정에서는 FLUENT 와 Tecplot 을 이용하여 믹서내의 압력 손실량을 정량화하였으며, 각 단위 엘리먼트 입구 및 마지막 엘리먼트의 출구 단면에서 유동방향 속도분포 및 단면 방향의 속도벡터를 가시화 하였다.

3.1 압력손실

수치해석 결과의 타당성을 검증하기 위해서 압력 손실량에 대한 해석 결과를 인용 문헌들의 실험 상관관계식의 결과들과 비교하였다. 인용 문헌들의 조건들이 Re=0.15, 엘리먼트의 길이/직경 (L/D) 비는 1.5 이므로 본 연구에서도 동일한 조건을 설정하여 계산을 수행하였다. 그러나 엘리먼트의 길이/직경의 비는 동일하게 설정하였지만, 본 연구에서 모델링 한 엘리먼트의 직경, 즉 믹서튜브 직경은 40mm 로 인용 문헌들의 조건과 동일하지 않다.

Fig. 5 는 Re=0.15 의 조건에서 Kenics 믹서에 대해 계산한 압력 손실량을 인용 문헌의 결과들과 비교한 그래프이다. 본 연구의 계산결과에서 알 수 있는 바와 같이 압력 손실량은 엘리먼트 수에 비례하여 증가한다. Shah 와 Kale[15], Wilkinson 과 Cliff[16], Heywood, et al.[17], 그리고 Pahl 과 Muschelknautz[18] 등에 의해 제안된 상관관계식들에 의하면 압력 손실량이 약 13Pa 에서 약 45Pa 까지 다양하게 나타났다. 본 연구결과는 6 개의 엘리먼트를 통과하였을 때 약 46Pa 로 인용문헌의 최고치에 근접하는 결과를 얻었다.

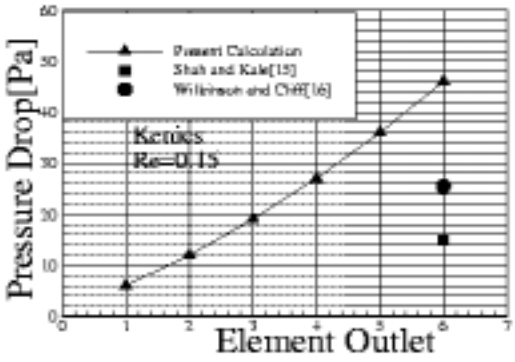

Fig. 5 Comparison of pressure drop with literature data

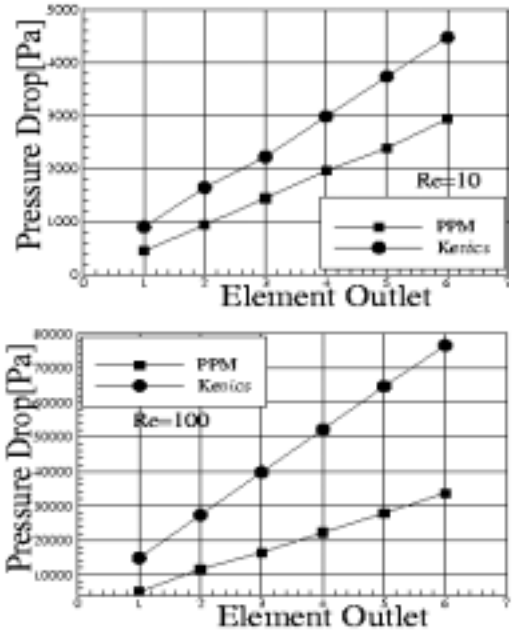

Fig. 6 Comparison of pressure drop

Fig. 6 은 Re=10 과 Re=100 의 조건에서 PPM 믹서와 Kenics 믹서내의 압력 손실량을 나타낸다. 앞의 결과에서 설명한 바와 같이 엘리먼트 수가 증가하면 압력 손실량이 증가한다. 이는 유로 내 단면적을 점유하는 구조물이 많아지거나 유로의 변화가 큰 경우 부차적 손실에 기인하는 압력손실이 커지기 때문이다. 한편 동일한 Re 수 조건에서 Kenics 믹서의 압력 손실량이 PPM 믹서의 압력 손실량에 비해서 약 1.5 배 이상 커지는 것을 알수 있다. 이는 PPM 믹서는 Fig. 1 에서 보는 바와 같이 인접한 두 엘리먼트가 서로 90° 로 단순히 수직과 수평으로 교차하는 형상인 반면에, Kenics 믹서의 엘리먼트는 인접하는 두 엘리먼트의 후단과 선단이 90° 로 교차한 후 시계방향과 반시계 방향으로 교대로 뒤틀린 형상이기 때문에 Kenics 형의 부차적 손실이 PPM 형의 부차적 손실보다 커지기 때문이다. 또한 Kenics 형의 경우에는 시계방향과 반시계 방향으로 교대로 뒤틀린 유로를 형성하여 주 유동에 수직한 평면내에 발생하는 2 차유동에 의한 손실이 증가하기 때문인 것으로 사료된다.

3.2 속도분포

Fig. 7 은 Re=100 일 때 Kenics 믹서의 첫 번째 엘리먼트 입구부터 여섯 번째 엘리먼트 출구까지의 주 유동에 수직한 단면에서의 유동방향 속도분포를 나타낸다. 첫 번째 엘리먼트는 Fig. 1 에서 보는 바와 같이 선단부가 수평방향으로 위치하여 시계방향으로 180° 뒤틀린 형상이다. 계산영역의 입구에서 균일하게 유입된 유동은 첫 번째 엘리먼트에 접근하면서 두 영역으로 분할되는 것을 X=0L 위치에서 볼 수 있다. 그런데 두 영역으로 분할되는 유동방향 속도분포의 고 운동량 영역, 즉 높은 유동방향 속도 영역이 중심부가 아니라 상단부는 우측으로, 하단부는 좌측으로 이동된 것을 알 수 있다. 이는 선단부가 수평이었던 엘리먼트가 시계방향으로 뒤틀려 있기 때문에 유체가 엘리먼트에 유입되어 분할되면서 시계방향으로 회전하며 유동하는 것에 기인하기 때문이다. 첫 번째 엘리먼트의 후단부와 두 번째 엘리먼트의 선단부가 만나는 X=L 의 단면에서는 높은 유동 방향 속도분포가 나타나는 영역이 4 분할되는 것을 알 수 있다. 이는 첫 번째 엘리먼트에서 2 분할 됐던 고 운동량 영역이 첫 번째 엘리먼트의 후단부와 90° 로 교차하는 두 번째 엘리먼트의 선단부에 의해 각각 2 분할 되기 때문이다. 이후의 엘리먼트들이 만나는 X= 2L 그리고 5L 에서는 엘리먼트의 뒤틀리는 방향에 따라 고 운동량 영역이 상하좌우로 약간씩 이동할뿐 X=L 에서와 거의 유사한 분포를 나타낸다. 여섯 번째 엘리먼트의 출구인 X=6L 에서는 6 번째 엘리먼트의 뒤틀린 형상에 의해 4 분할됐던 고 운동량 영역이 다시 2 분할 분포로 발달하는 것을 알 수 있다.

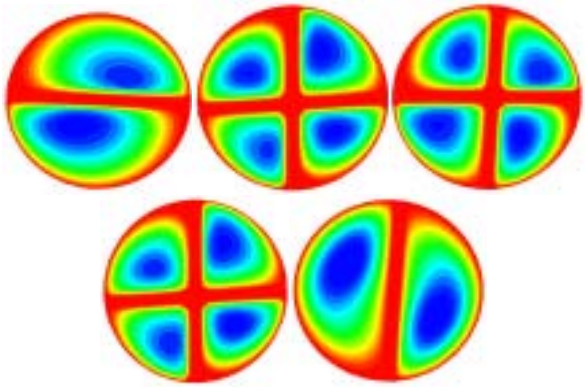

Fig. 7 Longitudinal velocity contour at cross sections of X=0L, 1L, 2L, 5L and 6L of Kenics element (Re=100)

Fig. 8 과 Fig. 9 는 Re=10 과 Re=100 일 때 Kenics 믹서의 첫 번째 엘리먼트 입구부터 여섯 번째 엘리먼트 출구까지의 주 유동에 수직한 단면에서의 반경 및 원주방향의 속도벡터를 나타낸다. 계산영역의 입구에서 반경 및 원주방향의 속도는 각각 0 의 조건으로 주어지지만 엘리먼트를 만나면서 엘리먼트의 뒤틀린 형상에 의해 원심력 및 구심력이 작용하여 반경 및 원주방향의 유동이 발생하게 된다. Fig. 8 의 X=0L, 즉 첫 번째 엘리먼트의 선단에서는 수평에서 시계방향으로 뒤틀린 엘리먼트의 구조에 의해 시계방향으로 회전하는 유동이 발생하는 것을 알 수 있다. X=L 의 위치, 즉 첫 번째 엘리먼트와 두 번째 엘리먼트가 교차하는 위치에서는 첫 번째 엘리먼트의 후단과 90° 로 교차하여 수직으로 놓인 두 번째 엘리먼트 선단의 영향으로 상단 좌측 영역과 하단 우측영역은 시계방향으로 회전하는 유체가 수직으로 놓인 벽에 막혀 유동방향이 반대로 역전되는 반면에 상단 우측영역과 하단 좌측영역의 유체는 첫 번째 엘리먼트의 영향이 그대로 존속하여 시계방향으로 회전하는 것을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 이후의 X=2L 과 5L 에서도 유사하게 나타난다. 그리고 여섯 번째 엘리먼트의 출구에서는 유동방향 속도분포에서와 마찬가지로 엘리먼트의 뒤틀린 형상에 지배되는 속도벡터가 나타나는 것을 알 수 있다. Fig. 9 에서는 Fig. 8 에서와 거의 유사한 속도벡터가 나타나지만 Re 수의 증가에 따른 반경 및 원주 방향 유동속도의 증가로 상단 좌측 및 하단 우측의 유동이 역전되는 영역에서 와류가 발생하는 것을 알 수 있다. 주 유동방향에 수직한 단면에서 발생하는 이와 같은 와류는 혼합율을 높이는 영향인자가 된다. 반면에 이러한 와류는 압력 손실량을 증가시키게 되고 주 유동방향의 속도를 감소시키는 원인이 된다.

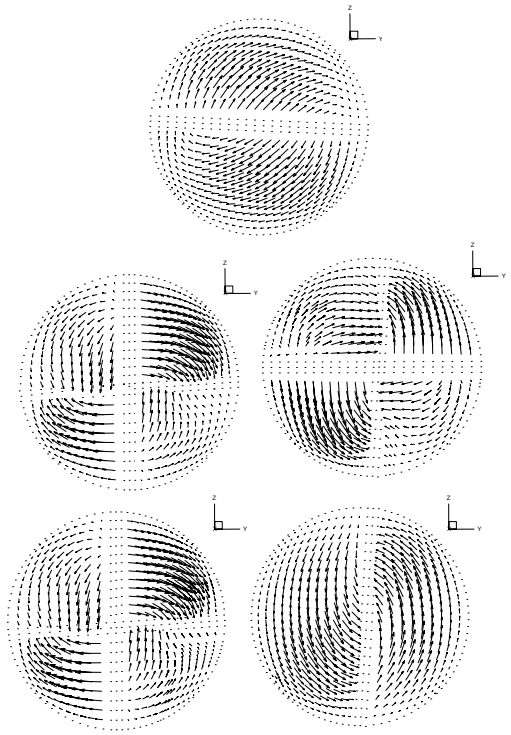

Fig. 8 Cross sectional velocity vectors at X=0L, 1L, 2L, 5L and 6L of Kenics element (Re=10)

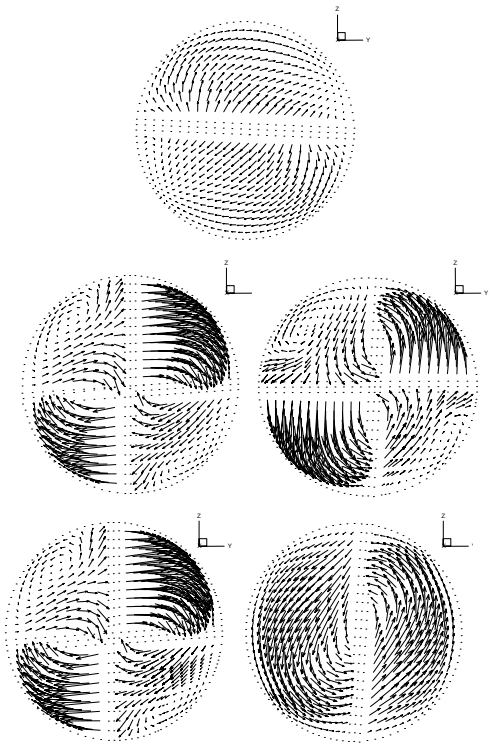

Fig. 9 Cross sectional velocity vectors at X=0, 1L, 2L, 5L and 6L of Kenics element (Re=100)

Fig. 10 은 Re=100 일 때 PPM 믹서의 첫 번째 엘리먼트 입구부터 여섯 번째 엘리먼트 출구까지의 주 유동에 수직한 단면에서의 유동방향 속도분포를 나타낸다. X=0L 인 위치에서는 유체가 믹서 엘리먼트를 만나면서 믹서 엘리먼트 형상에 따라 2 분할되고 X=L 인 위치에서는 믹서 엘리먼트가 서로 90 ° 교차하면서 4 분할되는 것을 볼 수 있다. 그러나 Kenics 믹서에서와 같이 고운동량 영역이 한쪽으로 치우치지 않고 믹서 엘리먼트와 튜브의 중앙부분에 계속 위치하는 것을 알 수 있다. 이는 PPM 믹서의 단위 엘리먼트가 선단부에서 후단부까지 엘리먼트 형상의 변화가 없고 일정한 길이의 평판이므로 Kenics 믹서에서와 같은 와류생성이 어렵기 때문이다.

Fig. 11 은 Re=100 일 때 PPM 믹서의 첫번째 엘리먼트와 두번째 엘리먼트 입구에서의 단면방향 속도벡터를 나타낸다. X=0L 인 경우에는 유체가 엘리먼트를 만나면서 엘리먼트에서 튜브 벽쪽으로 유체가 분할되는 것을 알 수 있다. PPM 믹서의 경우에는 엘리먼트 형상이 단순하여 와류의 발생이 없고 엘리먼트에 의해 분할된 유체가 튜브벽을 만나면서 방향전환이 이루어지는 유동특성을 나타내는 것을 알 수 있다.

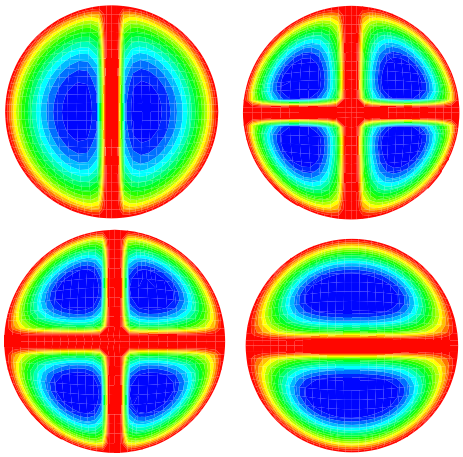

Fig. 10 Longitudinal velocity contour at cross sections of X=0L, 1L, 2L and 6L of PPM element (Re=100)

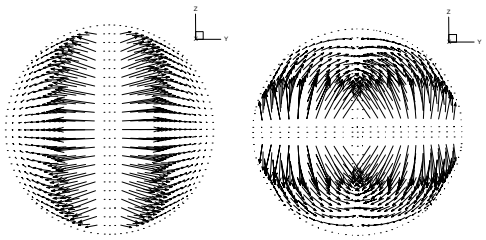

Fig. 11 Cross sectional velocity vectors at X=0 and 1L of PPM element (Re=100)

4. 결 론

6 개의 단위 엘리먼트로 구성된 PPM 및 Kenics 믹서 모델을 설정하여 Re 수 변화에 따른 믹서 내의 유동특성에 대해 수치적 연구를 수행한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 부차적 손실 및 2 차유동 발생에 기인하여 동일한 Re 수 조건에서 Kenics 믹서의 압력손실이 PPM 믹서의 압력손실보다 약 1.5 배 이상 크게 나타났다.

2) Kenics 믹서는 교대로 시계방향과 반 시계방향으로 뒤틀린 엘리먼트 구조로 인해 엘리먼트에 유입되어 분할되는 유동방향 속도분포의 고 운동량 영역, 즉 높은 유동방향 속도 영역이 중심부가 아니라 상하좌우로 이동하는 반면에, PPM 믹서는 90 ° 교차하는 수평 및 수직평판 구조의 엘리먼트로 인해 4 분할되는 고 운동량 영역이 한쪽으로 치우치지 않고 믹서 벽면과 엘리먼트의 중앙부에 나타나는 것을 알 수 있다.

3) Kenics 믹서에서는 계산영역의 입구에서 선회하는 속도 성분 없이 유입됐던 유동이 엘리먼트를 만나면서 엘리먼트의 뒤틀린 형상에 의해 원심력 및 구심력이 작용하여 반경 및 원주방향의 유동이 발생하게 된다. 반면에 PPM 믹서에서는 유체가 엘리먼트를 만나면서 엘리먼트에서 튜브 벽쪽으로 유체가 분할되지만 엘리먼트 형상이 단순하여 와류의 발생이 없고 엘리먼트에 의해 분할된 유동은 튜브벽을 만나면서 방향전환이 이루어지는 특성을 나타낸다.

4) Kenics 믹서에서 주 유동방향에 수직한 단면에서 발생하는 와류는 혼합율을 높이는 영향인자가 되는 반면에, 압력 손실량을 증가시키게 되고 주 유동방향의 속도를 감소시키는 원인이 된다.

후 기

본 연구는 2003 지역혁신인력양성사업 “석유화학설비 첨단기계요소 개발” 과제에 의해 지원되었으며, 이에 감사 드립니다.

참고문헌

(1) S. C. Jones, 1999, "Static Mixers for Water Treatment-A Computational Fluid Dynamics Model," Ph.D Thesis, Georgia Institute of Technology.

(2) J. Sir and Z. Lecjaks, 1982, "Pressure Drop and Homogenization Efficiency of a Motionless Mixer," *Chem. Eng. Commun.*, vol. 16, pp. 325-334.

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

(4) S. C. Jones, F. Sotiropoulos and A. Amirtharajah, 2002, "Numerical Modeling of Helical Mixers for Water Treatment," *J. of Environmental Eng.*, May 2002, pp. 431-440.

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

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

(7) 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.

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

(9) 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. 2909-2926

(10) H. A. Kusch and J.M. Ottino, 1992, "Experiments on Mixing in Continuous Chaotic Flows," *J. Fluid Mech.*, Vol. 236, pp. 319-348.

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

(12) E.B. Nauman, 1991, "On Residence Time and Trajectory Calculations in Motionless Mixers," *Chem. Eng. J.*, Vol. 47, pp. 141-149.

(13) 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.

(14) 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.

(15) N. F. Shah and D. D. Kale, 1991, 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.

(16) W. L. Wilkinson and M. J. Cliff, 1997, "An Investigation into the Performance of a Static In-line Mixer," *Proc. Second European Conf. On Mixing*, Cambridge, A-2-15-A2-29.

(17) N. I. Heywood, L. J. Viney and I. W. Stewart, 1984, "Mixing Efficiencies and Energy Requirements of Various Motionless Mixer Designs for Laminar Mixing Applications," *Institution of Chemical Engineers Symposium* Series No. 89, pp. 147-151.

(18) M. H. Pahl and E. Muschelknautz, 1982, "Static mixers and their applications," *Int. Chem. Eng.*, Vol. 22, pp. 197-205.