

스태틱 믹서의 혼합특성

양희천[†] · 박상규* · 오승원**

Mixing Characteristics of Static Mixers

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

Key Words : Static Mixer(스태틱 믹서), Mixing Characteristics(혼합 특성), Mixing Element(혼합 엘리먼트), Visualization(가시화), OPTIMAS(옵티마스)

Abstract

Static mixers have found a large range of applications, including blending, reaction, dispersion, heat transfer and mass transfer. All static mixers have in common a straight pipe or transfer tube into which individual elements are inserted to cut, fold, twist and re-combine the mixing fluid. The operations virtually ensure uniformity in composition, concentration, viscosity and temperature. The objective of this study is to perform the experimental investigations of mixing characteristics for three mixing element types. The resulting mixing patterns were recorded with a digital camera. OPTIMAS was used to analysis the visualized images. The results clearly indicated that the mixing characteristics was highly influenced by the mixer types or mixing mode.

1. 서 론

스태틱 믹서는 시스템 구성요소 자체에 운동부가 없이 믹싱관 내에 고정된 일련의 믹싱 엘리먼트로 구성되며, 혼합될 유체가 관로를 통과할 때 연속적으로 유동분할, 방향전환, 재결합 등의 과정이 반복되며 혼합되는 장치로 유체의 연속 혼합 조작에 사용된다. 스태틱 믹서는 기계적 교반기(mechanical agitator)와 비교하여 운동부가 없기 때문에 샤프트나 베어링과 같은 회전요소나 밀봉장치 없이 파이프 라인에 설치가 가능하다. 또한 단위용적 당 전열면적이 크며 연속 프로세스 및 고점도 액체의 혼합에 적합하고, 혼합될 유체의 믹서 내 체류시간 분포를 균일화 할 수 있으며, 공정관리의 용이, 생산원가의 절감, 에너지 절약 등의 장점을 갖고 있다.

따라서 스태틱 믹서는 산업현장에서 매우 다양하게 응용되고 있다⁽¹⁾. 화학분야에서는 염소화 및 산화반응, 산과 염기의 희석, 급속한 반응이 요구되는 공정 등에 이용되며, 식품 제조공정에서는 기름제거, 방부제의 혼합, 녹말 반죽 등에 이용되고 있다. 미네랄 공정에서는 슬러리의 희석, 용매 추출에 의한 금속 성분의 회수 등에 응용되며, 페인트 및 수지 제조 공정에서는 착색, 용매 혼합, 색상 농도 희석 등에 응용된다. 폴리머 및 플라스틱 산업에서는 반응물과 촉매의 혼합, 열적 균질화 등에 이용되며, 제지 산업에서는 펄프의 희석 및 농도제어, 표백 공정 등에 이용되고 있으며, 상·하수 처리 공정에서는 살균 및 염소제거, 산소농도를 증가시키기 위한 에어레이션(aeration) 과정에 이용되고 있다.

최근에 들어서 에너지의 효율적인 이용 및 환경오염 문제에 전 세계적인 관심이 집중되고 있는 현실에 비추어 위에서 언급한 대부분의 응용분야는 관련 공정에서 에너지의 효율적인 이용과 환경오염 감소와 직결되는 것임을 알 수 있다. 특히 현재 국내외적으로 심각하게 대두되고 있는 수자원의 고갈 및 오염 문제를 해결하기 위한 방안들

[†] 여수대학교 응용공학부
E-mail : hcyang@yosu.ac.kr
TEL : (061)659-3223 FAX : (061)659-3220

* 여수대학교 응용공학부

** 여수대학교 대학원

이 강구되고 있는 현실에서 살균 및 염소제거 등의 상·하수 처리 공정에서 스테틱 믹서의 이용은 정화 효율을 높일 수 있고, 투여되는 화학 약품의 양을 줄일 수 있어서 처리 설비의 용량을 크게 줄일 수 있다. 따라서 관련 시설의 건설 및 운영 측면에서 경제적인 효과가 큰 것으로 알려지고 있다. 또한 스테틱 믹서의 엘리먼트를 열교환 튜브 내에 장착시킨 리액터겸용 셸-튜브 열교환기는 튜브 내 벽면 부근의 열손실이 많은 유체와 튜브 중심부의 열손실이 적은 유체가 혼합 엘리먼트로 인하여 신속히 교반 혼합됨으로써 튜브 벽면에서 열교환이 보다 더 효율적으로 이루어지게 되고, 유체의 튜브 횡단면 방향으로의 온도 구배를 줄일 수 있기 때문에 풀러머 생산라인의 최종 제품화 공정에 필수적인 설비로 인식되고 있다.

스테틱 믹서는 50년대부터 개발되기 시작하여 60년대 말 Kenics사에서 개발된 믹서가 상업적으로 이용되기 시작한 후⁽²⁾, 30여종 이상이 개발되었으나 산업현장에서 실제로 이용되고 있는 종류는 그다지 많지 않다. 스테틱 믹서에 대한 연구는 믹싱 엘리먼트의 기하학적 복잡성 때문에 제한적으로 수행되고 있는 실정이며, 기본적인 설계 변수들에 대한 측정결과와 무차원 변수간의 상관관계식을 도출하는 연구가 주류를 이루고 있다. 특히 스테틱 믹서의 성능을 평가할 수 있는 가장 중요한 변수 중의 하나인 혼합 특성에 대한 연구는 정성적인 경향에 대한 것이 대부분이고 정량적인 연구결과는 그다지 많지 않다.

Pahl과 Muschelknautz⁽³⁾는 비교적 단순한 구조인 비틀림관 형상의 Kenics 믹서에 대해 난류유동 조건에서 순수한 설탕시럽과 전도성(conductivity)이 양호한 NaOH를 혼합한 10%의 설탕시럽을 이용하여 전도성을 측정하여 혼합지수(mixing index)에 대한 상관관계식을 제시하였다. Kusch와 Ottino⁽⁴⁾는 PPM(partitioned-pipe mixer)과 EHAM(eccentric helical annular mixer)를 이용하여 시·공간적으로 주기적인 혼돈 유동의 혼합현상에 대해 유맥선 구조의 특성에 대한 실험결과를 발표하였다. Sir와 Lecjaks⁽¹⁾는 Kenics 믹서를 이용하여 뉴턴유체에 대해 유동의 유체역학적 조건변화가 혼합특성에 미치는 영향을 규명하기 위해 요오드 탈색반응을 이용하여 연구한 결과를 발표하였다. Avalosse와 Crochet⁽⁵⁾는 진흙을 이용하여 Kenics 믹서의 혼합과정을 가시화하여 수치해석 결과와 비교한 연구결과를 발표하였다. Jaffer와 Wood⁽⁶⁾는 레이저 응용기술과 디지털 이미지 분석기술을 이용하여 Kenics 믹서 내의 층류 유동장에 대한 연

구결과를 발표하였다. 국내에서는 양희천 등⁽⁷⁾이 새로운 형상의 혼합 엘리먼트를 고안하여 혼합특성에 대한 정성적, 정량적 연구를 수행하였다. 스테틱 믹서의 혼합특성에 대한 이전의 대부분의 연구들이 상대적으로 형상이 단순한 PPM형이나 Kenics형에 국한된 반면에, 양희천 등은 현재 산업계에서 가장 많이 이용되고 있는 Sulzer SMX형과 새로 고안한 2가지 모델에 대해 비교 연구하였다.

본 연구는 새로운 형태의 고점성 유체용 혼합 엘리먼트를 개발하여 혼합특성에 대한 정량적 가시화 연구를 통해 산업용 스테틱 믹서의 혼합 엘리먼트의 성능개선 및 최적설계에 기여할 수 있는 정량적 자료 제공을 목적으로 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

스테틱 믹서의 혼합 메카니즘이 엘리먼트의 설계조건에 따른 분할면 수와 분할된 유로의 형상에 의해 지배되는 점과 Sulzer SMX형의 단일 엘리먼트의 분할면 수가 32개인 점을 고려하여 이전의 연구⁽⁷⁻⁹⁾에서 고안한 SSC형은 타원형 단일 엘리먼트의 단면적중 약 30%에 해당하는 67개의 직경 3mm의 홀들을 가공하여 Sulzer SMX형의 분할면 수보다 많은 분할홀을 통해서 유동하며 혼합되도록 개발된 모델이다. 또한 유동 방향과 경사진 엘리먼트를 통과하는 유동의 시간차와 두 엘리먼트 사이의 공간차이에 의한 와류 발생으로 혼합율을 높이고자 의도했던 모델이다. YNU형은 SSC형의 단일 엘리먼트를 통과하는 유동의 편향과 낮은 혼합율 문제를 개선하고자 고안된 모델이다. 그러나 SSC형은 분할홀 수는 많지만 스테틱 믹서의 주요 혼합 메카니즘 중의 하나인 분할된 후의 방향전환이 거의 없고, 고점성인 유체의 유동에서는 엘리먼트를 통과한 후의 와류발생이 미약하기 때문에 혼합율이 낮게 나타났다. YNU형은 SSC형의 유동편향 문제와 낮은 혼합율 문제는 상당부분 개선되었지만 압력손실이 Sulzer SMX형보다 높게 나타났다. 이는 SSC형 엘리먼트 2개가 중심부에서 서로 직교되는 구조로 인해 유로를 차단하는 효과가 커지기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 Sulzer SMX형의 단일 엘리먼트를 구성하는 유동방향에 경사지게 교차하는 장방형의 바에 홀을 갖는 형상으로 변형된 엘리먼트를 고안하였다.

Fig.1 은 Sulzer SMX 형, Sulzer SMX 형을 변형한 YHC 형 그리고 YNU 형의 단일 엘리먼트 4 개의 설계 형상을 나타낸다. 가시화 실험에서는 각 엘리먼트 형에 대해 엘리먼트의 개수에 따른 혼합 특성의 영향을 조사하기 위하여 단일 엘리먼트로부터 8 개의 단일 엘리먼트 조합까지의 특성실험을 수행하였다. 3 가지 형의 연결 구조는 각 단일 엘리먼트들이 원주 방향으로 90 도 회전된 상태로 연결된다. 스테인레스 스틸로 제작된 단일 엘리먼트의 직경/길이의 종횡비는 1:1 이다. 여기서 엘리먼트의 직경은 믹서 튜브의 직경과 같은 40mm 이다. Sulzer SMX 형은 분할면의 수가 2ⁿ 개인 Kenics 형⁽²⁾과는 달리 분할면의 수가 32ⁿ 개로 분할면의 수가 상대적으로 많아서 믹싱 효율은 좋지만 믹서 출구에서의 압력손실이 커져서 펌핑 동력이 많아지는 단점이 있다. 여기서 분할면의 수 2ⁿ 이나 32ⁿ에서 2 나 32는 단일 엘리먼트를 통과할 때 유동이 분할되는 숫자를 나타내며, n 은 연결되는 단일 엘리먼트의 숫자를 나타낸다.

2.2 실험방법

Fig.2 는 가시화용 혼합 튜브에 엘리먼트, 추적 색소 주입기 그리고 일정한 압력으로 가압할 수 있도록 설계된 피스톤이 장착된 실험장치를 이용한 혼합특성 실험의 개념도를 나타낸다. 혼합 튜브의 내부 직경은 40mm 이며, 피스톤의 가압시 엘리먼트가 밀리지 않도록 하기 위하여 혼합 튜브의 출구에 지지탭을 설치하였다. 추적 색소 주입기의 길이는 약 500mm 이다. 개념도에서 보는 바와 같이 추적 색소는 주입기의 중심부에 있는 직경 10mm 의 동심원 튜브를 통해서 엘리먼트 내로 유입되도록 설계하였다. 혼합특성 실험은 추적 색소 주입기의 내부 튜브에 녹색의 헤어 스타일링 젤과 붉은색 물감을 체적비 10:1 로 혼합한 추적색소를 주입한 후, 주입기의 나머지 부분과 믹싱 튜브의 나머지 상류부에 녹색의 헤어 스타일링 젤을 주입하고 피스톤으로 가압하여 혼합 튜브의 측면과 출구 단면에서의 혼합상태를 디지털 카메라를 이용하여 촬영하는 과정으로 이루어진다. 한편 혼합특성의 가시화 실험에 유동성이 있는 일반적인 유체를 이용하는 경우 출구에서 유동이 계속되어 촬영이 곤란한 반면에 투명한 연녹색의 젤 (gel) 타입의 유체인 헤어 스타일링 젤((주)나노)은 유동방향의 혼합현상을 가시화 하기 용이할 뿐만 아니라 출구 단면의 혼합 상태를 촬영하기 용이하여 선택하였다.

디지털 카메라로 획득한 출구단면의 혼합상태

의 정량화는 OPTIMAS⁽¹⁰⁾를 이용하였다. 디지털 카메라, 스캐너, CCD 카메라 등을 이용하여 획득한 영상을 분석하는 소프트웨어인 OPTIMAS 는 획득한 영상의 점, 길이, 면적 분포 등을 측정할 수 있다. 본 실험을 통해서 획득한 혼합상태에 대한 색상 면적농도(concentration of color area)의 측정 과정을 간략하게 설명하면 다음과 같다. 먼저 색상 면적을 측정하려는 색상 샘플의 가지 수를 설정하고, 설정한 가지 수 각각에 대해 측정하려는 샘플을 지정한다. 지정이 완료되면 설정된 색상의 면적농도를 %값으로 얻을 수 있다.



Fig. 1 Mixing elements of Sulzer SMX, YNU and YHC type with 4 unit elements

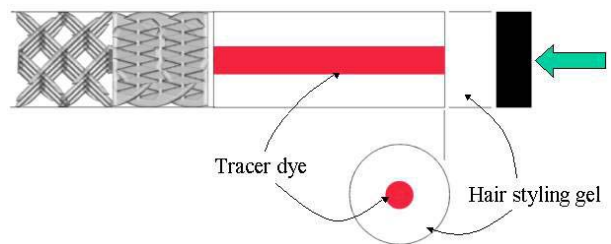


Fig. 2 Schematic diagram of visualization

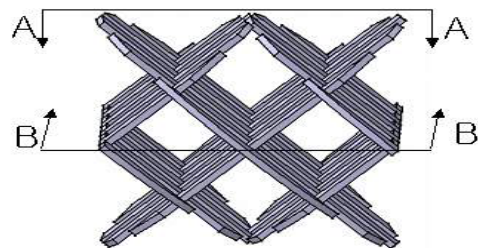


Fig. 3 View direction of Sulzer SMX element for visualization

3. 결과 및 고찰

혼합특성에 대한 본 연구의 목적은 서로 다른 형상의 믹서가 균일한 혼합에 미치는 영향을 규명하는데 있다. 믹서의 혼합성능을 평가하는 변수 중에서 체류시간 분포(residence time distribution)는 믹서 내에서 혼합되는 유체 요소들의 균질화 과정의 특성을 평가하는데 이용된다. 믹서의 입구에서 서로 분리된 유체 요소들이 혼합되는 과정에서 각각 분할되며 띠(striation) 형상으로 변형되는데, 이 분할 띠의 폭 및 두께가 감소하는 정도와 길이가 늘어나는 정도가 또 다른 평가변수로 적용된다. 분할 띠 형상의 발달 패턴은 믹서 내에서 혼합과정에 대한 정성적인 이해 수단을 제공하는 반면에 혼합물의 균질화 정도를 나타내는 혼합지수는 믹서의 성능을 정량화 할 수 있는 실질적인 수단이다. 혼합물의 균질성은 혼합물 샘플의 표준편차나 분산의 함수로 나타내는 믹싱지수에 의해 결정된다⁽³⁾. 본 연구에서는 혼합특성에 대한 정성적인 평가 방법과 디지털 이미지 분석기술을 이용하여 추적 색소의 색상농도를 정량화하는 방법을 이용하였다.

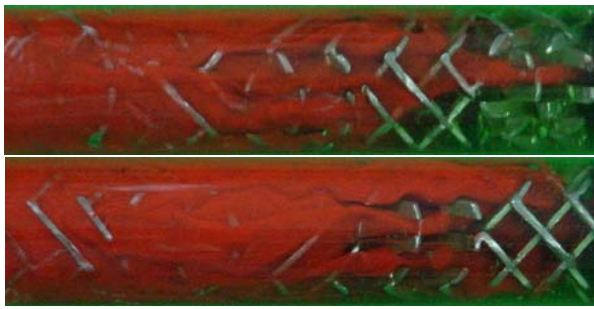
Fig.3 은 혼합 튜브 측면에서 디지털 카메라로 이미지를 촬영하는 방향을 나타낸다. Fig.4 는 5 개의 단일 엘리먼트들로 구성된 세가지 엘리먼트 형상에 대한 혼합 튜브 측면에서의 유동방향 혼합상태를 나타낸다. Fig.5 는 단일 엘리먼트인 경우와 3 개의 단일 엘리먼트로 구성된 세가지 모델의 혼합 튜브 출구단면에서의 혼합상태를 나타낸다. Fig.4 에 도시한 그림은 각각의 모델에 대해 혼합 튜브 측면의 두 방향에서 찍은 사진이다. Sulzer SMX 형과 YHC 형의 윗 그림은 Fig.3 의 A-A 방향을 찍은 것으로 유동방향에 경사지게 교차하는 장방향 바들의 넓은 표면이 보이는 각도에서 찍은 사진이며, 아래의 그림은 B-B 방향을 찍은 것으로 장방향 바들이 교차하는 선 방향에서 찍은 사진이다. YNU 형의 경우, 윗 그림은 교차하는 타원형 평판의 표면이 보이는 각도에서 찍은 사진이며, 아래의 그림은 경우는 Sulzer SMX 형과 YHC 형의 경우와 마찬가지로 타원형 평판들이 교차하는 선 방향에서 찍은 사진이다.

믹서 내에서의 혼합은 대류, 분할(distribution) 및 연신(stretching), 방향회전(directional recirculation) 및 비틀림(twist), 재결합(re-combination) 및 접힘(folding) 그리고 확산 메커니즘의 복합적인 작용에 의해 이루어 진다. Sulzer SMX 형과 YHC 형의 단일 엘리먼트를 통과하며 발생하는 혼합 메커니즘은 분할 및 연신 그리고 재결합 및 접힘에 의한 거의 2 차원적인 것임을 알 수 있다. 혼합 색소 주입기의 중심부에서 나온 혼합 색소는 첫 번째 엘리먼트를 통과하는 과정에서 A-A 방향으로 거의 대부분이 분할 및 연신 된 후 접히며

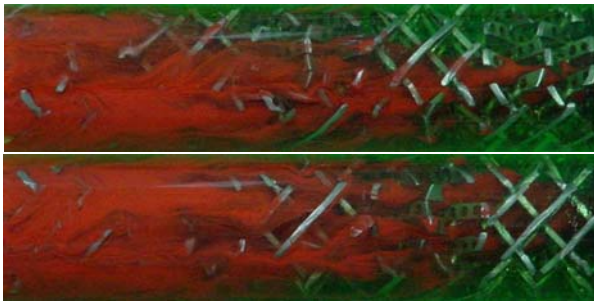
재결합되는 반면에, 장방향 바들이 교차하는 선 방향으로 거의 유동 분할이 없는 것을 알 수 있다. 단일 엘리먼트를 통과하는 과정의 2 차원적인 혼합 특성은 원주 방향으로 90 도 회전된 상태로 연결된 뒤쪽의 엘리먼트들을 통과하며 재분할, 방향회전 및 비틀림 등의 메커니즘이 복합적으로 작용하여 3 차원적인 혼합이 이루어 지게 된다. Sulzer SMX 형에 비해서 혼합율의 감소는 최소화 하고 압력손실을 줄이기 위해 고안된 모델인 YNU 형의 엘리먼트는 단일 엘리먼트를 통과하는 과정의 분할 효율은 Sulzer SMX 형의 분할면 수 보다는 많지만 Sulzer SMX 형과 YHC 형에서 발생하는 주요 혼합 메커니즘들의 복합적인 작용이 약하다. 따라서 중심부로 유입된 혼합 색소가 혼합 튜브의 반경방향으로 분할되는 유동이 약하게 나타나는 것을 두 그림에서 알 수 있다. 한편 YHC 형의 혼합 메커니즘은 Sulzer SMX 형과 거의 같지만 장방향의 바들에 형성된 홀을 통한 유동에 의한 혼합이 복합적으로 작용하기 때문에 입구쪽의 엘리먼트들을 통과하는 과정에서 반경방향의 유동 분할은 Sulzer SMX 형에 비해 약간 약하지만 중심부의 혼합상태는 보다 양호하다는 것을 Fig.5 의 단일 엘리먼트의 출구 단면의 혼합상태를 통해 알 수 있다.

Fig.6 은 OPTIMAS 를 이용하여 정량화 한 붉은 추적색소의 면적농도를 엘리먼트 수의 함수로 나타낸 그래프이다. Sulzer SMX 형과 YHC 형의 경우에는 단일 엘리먼트를 통과한 후의 붉은색 혼합 색소의 면적농도가 60%가 넘는 반면에 YNU 형의 경우에는 50% 이하임을 알 수 있다. 위에서 언급한 바와 같이 단일 엘리먼트나 두개의 엘리먼트를 통과한 상태의 혼합율은 YHC 형이 Sulzer SMX 형보다 높게 나타났다. 그러나 본 연구의 조건에서는 세 번째 엘리먼트를 통과한 이후에는 Sulzer SMX 형의 혼합율이 YHC 형보다 높게 나타나며, 다섯번째 엘리먼트를 통과한 후에는 100%의 혼합율에 도달하였다. Sulzer SMX 형과 비교하면, YHC 형의 경우에는 엘리먼트 1 개, YNU 형의 경우에는 엘리먼트 2 개를 더 통과하는 혼합과정을 거쳐야만 Sulzer SMX 형의 혼합율에 근접하는 결과를 얻을 수 있다.

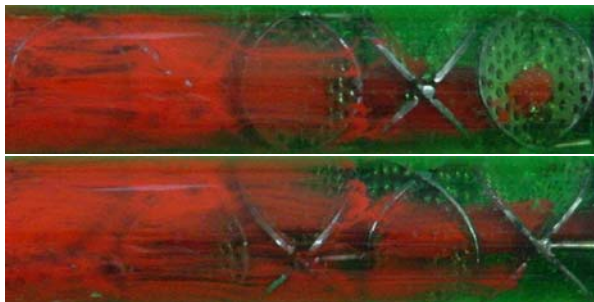
본 실험의 정성적 혹은 정량적인 결과로부터 YHC 형과 YNU 형에 비해서 Sulzer SMX 형의 유동 분할 특성 및 확산특성이 우수하여 혼합율이 좋은 것을 알 수 있다. 일반적으로 분할면이 많으면 혼합율은 좋아지지만 많은 분할면을 만들기 위해 엘리먼트가 점유하는 유로 단면적의 비가 커지면 압력 손실량은 증가하게 된다. 따라서 본 연구결과에서는 Sulzer SMX 형의 혼합특성이 우수하게 나타났다지만 성능 평가를 위해서는 압력 손실량에 대한 특성실험이 필요할 것으로 사료된다.



Sulzer SMX type



YHC type



YNU type

Fig. 4 Axial views for tracer mixing of Sulzer SMX, YHC and YNU types with 5 elements

4. 결론

3 종류의 믹싱 엘리먼트를 제작하여 혼합특성에 대한 실험적 연구를 수행한 결과를 요약하면 다음과 같다. Sulzer SMX 형과 YHC 형의 단일 엘리먼트를 통과하며 발생하는 혼합 메커니즘은 거의 2 차원적이며, 원주 방향으로 90 도 회전된 상태로 연결된 뒤쪽의 엘리먼트들을 통과하며 3 차원적인 혼합이 이루어 지게 된다. YNU 형의 엘리먼트는 단일 엘리먼트를 통과하는 과정의 분할효수는 Sulzer SMX 형의 분할효수 보다 많지만 스테틱 믹서의 중요한 혼합 메커니즘인 연신, 방향회전 및 비틀림 등의 작용이 약하기 때문에 혼합 튜브의 반경방향으로 분할되는 유동이 약하게 나타났다. Sulzer SMX 형은 다섯번째 엘리먼트를

통과한 후 100%의 혼합율에 도달하였으며, YHC 형의 경우에는 엘리먼트 1 개, YNU 형의 경우에는 엘리먼트 2 개를 더 통과하는 혼합과정을 거쳐야만 Sulzer SMX 형의 혼합율에 근접하는 결과를 얻을 수 있었다. 본 연구결과에서는 Sulzer SMX 형의 혼합특성이 우수하게 나타났지만 성능 평가를 위해서는 압력 손실량에 대한 특성실험이 필요할 것으로 사료된다.



Sulzer SMX type



YHC type



YNU type

Fig. 5 Exit cross-sectional views for tracer mixing of Sulzer SMX, YHC and YNU types with 1 and 3 elements

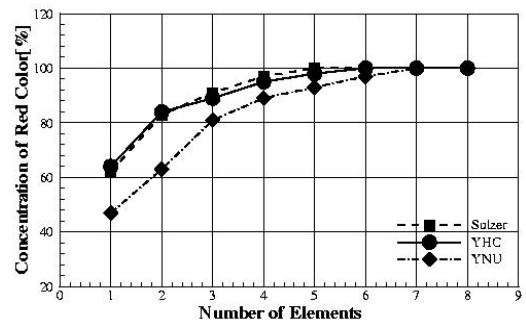


Fig. 6 Concentration of red color as a function of element number

참고문헌

- (1) S. S. 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) M. H. Pahl and E. Muschelknautz, 1982. "Static Mixers and Their Applications," Int. Chem. Eng., Vol. 22, No. 2, pp. 197-205.
- (4) H. A. Kusch and J.M. Ottino, 1992, "Experiments on Mixing in Continuous Chotic Flows," J. Fluid Mech., Vol. 236, pp. 319-348.
- (5) 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. 588-597
- (6) S. A. Jaffer and P. E. Wood, 1998, "Quantification of Laminar Mixing in the Kenics Static Mixer: An Experimental Study," The Canadian J. of Chem. Eng., Vol. 76, pp. 516-521.
- (7) H. C. Yang and S. W. Oh, 2002, "An Experimental Study of Mixing Efficiency in Static Mixers," Proceedings of the KOSME 2002 Autumn Conference, pp. 59-63.
- (8) H. C. Yang and S. K. Park, 2002, "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.
- (9) H. C. Yang, S. K. Park, Y. S. Eom and B. Y. Ra, 2001, "A Study of Flow and Mixing in a Static Mixer," Proceedings of the KSME 2001 Fall Annual Meeting B, pp. 557-562.
- (10) OPTIMAS User Guide, 1999, Media Cybernetics.