

카오스 이론과 유체혼합

- 3차원 혼합의 적용예를 중심으로 -

- **황 옥 렬** | 포항공과대학교 기계공학과, 박사후 연구원 / e-mail : wrhwang@postech.ac.kr
- **권 태 현** | 포항공과대학교 기계공학과, 교수 / e-mail : thkwon@postech.ac.kr

이 글에서는 카오스의 이론적인 관점에서 성공적이라 할 수 있는 3차원 유동의 적용 예 중에서 산업적으로 관심의 대상이 될 수 있는 파이프 유동에서의 혼합증진, 혼합탱크 내의 혼합증진, 단축압출기에서의 혼합증진, 그리고 마이크로 채널 유동에서의 혼합증진 등 네 가지 유동에 대해 소개하도록 한다.

유체혼합의 목적은 두 가지 이상의 유체를 섞어 그 크기를 줄여가며, 공간적 또는 시간적으로 고르게 분포 시키는 데 있다고 할 수 있다. 유체혼합은 일반적으로 복잡한 유동장을 다루고, 때로는 액적의 변형과 파괴, 화학반응, 분산 등 복잡한 현상이 내재되어 있기 때문에 어려운 분야로 인식되어 왔다. 또 역사적으로 유체역학의 여러 분야 중 혼합의 문제만큼 과학적 또는 연역적인 방법보다 경험과 시행착오에 의해 발전된 분야도 없을 듯 하다.

그러나 '80년대 초부터 혼합의 문제를 일반적인 동역학계와 카오스 이론의 수학적 접근방식을 통해 해석하기 시작하였고 현재는 복잡한 3차원 유동에 대해서도 성공적으로 적용한 예들이 발표되고 있다. 이 글에서는 가장 간단한 유체의 혼합 문제-즉, 서

로 잘 섞이는 유체들간의, 분산과 화학반응을 무시한 혼합-를 풀기 위해 카오스 이론을 성공적으로 적용한 예제 가운데 산업현장에서 응용할 수 있을 만한 실질적인 3차원 유동장의 혼합문제를 중심으로 최근까지 연구자들의 연구 현황을 소개하도록 하겠다. 우선 독자들이 잊지 말아야 할 것은 카오스라는 개념은 없었지만, 이전부터 개발된 대부분의 혼합장치는 카오스 혼합을 일으킨다는 것이다. 카오스 혼합의 가장 기본적

인 아이디어는 시간주기 또는 공간주기적으로 서로 다른 유동이 생기도록 하여 유선면이 어긋나게 만드는 것인데, 이는 현존하는 대부분의 혼합기에 적용되어 있는 메커니즘이기도 하다. 카오스 이론의 중요성은 그러한 혼합기에서 각각 입자의 운동과 그로 인해 생기는 전체적인 입자의 운동 양태를 수학적으로 예측하고 해석할 수 있게 하여 더 효율적인 혼합장치를 설계하는 데 있다고 할 수 있다. 효율적인 혼합장치란

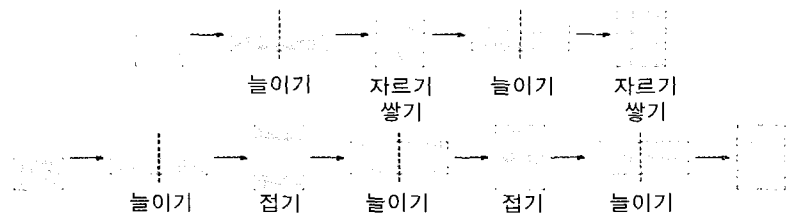


그림 1 두 가지 말굽사상의 예. 위의 그림은 늘이기, 자르기, 섞기 과정을 보여주며, 아래 그림은 연속적인 유체의 혼합 과정에서 가능한 늘이기, 접기의 과정을 보여준다.

그 구조가 단순하여 설치, 유지, 보수 등에서 쉬워야 하며, 적은 전단변형으로도 높은 혼합성을 보여야 한다. 일반적으로 카오스 이론으로부터 설계되는 혼합장치는 구조가 매우 간단하며, 효율적인 변형 메커니즘으로 인해 상대적으로 적은 에너지를 사용하며, 특히 생체물질의 경우 전단변형에 의한 손상을 피할 수 있다.

이 글에서는 카오스의 이론적인 관점에서 성공적이라 할 수 있는 3차원 유동의 적용 예 중에서 산업적으로 관심의 대상이 될 수 있는 (i) 파이프 유동에서의 혼합증진, (ii) 혼합탱크 내의 혼합증진, (iii) 단축압출기에서의 혼합증진, 그리고 (iv) 마이크로 채널 유동에서의 혼합증진 등 네 가지 유동에 대해 소개하도록 하겠다.

카오스 혼합의 기본적인 메커니즘

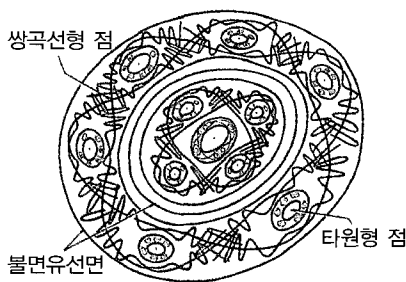


그림 2 공진에 의해 일반적으로 생성되는 동역학적 구조. KAM으로 표시된 구조가 불변유선면을 가르키며, 내부는 자기유사적인 수많은 주기적인 궤도들로 구성된다. 이러한 구조는 각 유선에서의 주파수비라는 유체입자의 회전특성에 밀접하게 관련되어 있다.

3차원 유동에서 카오스 혼합의 중요한 메커니즘은 각 유체입자의 궤도가 두 개의 회전에 표현되는 나선형 운동을 하게 하고 시간적 또는 공간적 교란을 통해서 나선형 운동을 공진(resonance)이나 유선면의 꼬임(homoclinic or heteroclinic tangling)을 통해 깨는 것이다. 이중 유선면의 꼬임은 이론적으로 가장 완벽한 혼합을 만들어내는 말굽사상(horseshoe map; baker's transformation)이라는 밀가루 반죽과 비슷한 과정을 만들 수 있다. 말굽사상은 그림 1에서처럼 한 방향으로 늘이고(stretching) 다시 접는(folding) 과정을 반복하는 과정으로 무한히 얇고 고르게 분포된 1차원적 배열(Cantor set)을 만들 수 있다.

공진을 통한 교란도 매우 느리고 부분적으로 작용하는 자기유사적인(fractal) 유선면의 꼬임을 만들어 낼 수 있으나, 전체적으로 그 혼합성능은 낮으며, 때로는 물질궤도의 회전의 특성에 따라 불변유선면(KAM tori)이 살아남을 수 있어 혼합성능이 현격히 감소하게 된다. 여기서 회전 특성이란 나선형 운동을 가능토록 하는 두 회전의 주파수비(frequency ratio)를 말하며, 이 비가 분모가 작은 유리수비로 구성될수록 더욱 강력한 공진이 일어나 불변유선면을 최소화시킬 수 있다. 그림 2는 공진에 의해 일반적으로 생성되는 동역학적 구조를 보여준다.

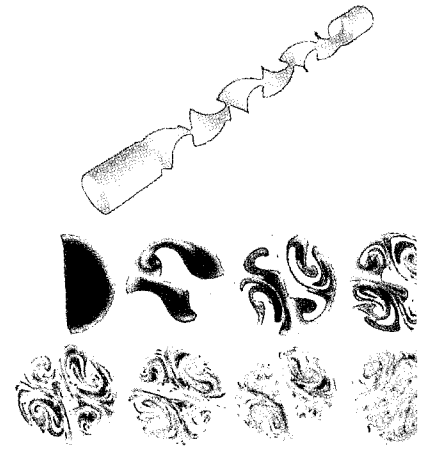


그림 3 케닉스 믹서의 내부와 단면의 혼합패턴 [Byrn Sawley, 1999]

고정된 파이프 유동에서의 혼합 증진

고정된 파이프 유동의 경우 압력차에 의한 입구에서 출구쪽으로 한 방향의 유동만 존재하여 앞서 기술한 유체입자의 나선형 운동이 없다. 이 경우 강제적으로 나선형 운동을 일으키도록 파이프 내에 나선형으로 판을 집어넣거나, 파이프를 일정각도로 휘게 하여 원심력에 의한 이차유동을 일으키는 등 여러 가지 방법으로 나선형 운동이 일어나게 할 수 있다. 이 글에서는 전자의 방법이 사용된 케닉스 믹서(Kenics mixer)에 대해 살펴해보도록 한다(후자의 방법을 사용한 예로는 굴곡파이프 믹서가 있다). 이 믹서는 식품이나 화학 공정에서 일반적으로 층류유동을 하는 유체의 혼합에 30년 이상 널리 쓰이고 있다.

나선형 운동을 일으키는 두 개

의 회전은 나선형 판에 의해 생성되는 파이프 단면에서의 회전과 압력구배에 의해 생성되는 입구에서 출구쪽으로의(이론적 상공간 상에서의) 회전운동이 된다. 일단 유체입자의 나선형 운동이 생성되면 이를 교란을 통해 깨어야 하는데 케닉스 믹서는 그림 3에서와 같이 내부에 장착되는 나선형 판을 서로 어긋나게 배열한다. 그 결과 나선형 판의 주위는 급격한 유선의 변화로 인해 늘이기와 자르기의 과정을 통해 혼합 성능이 급격히 증가하지만 내부의 운동은 공진에 의한 교란이 주된 혼합메커니즘이 되어 불변유선면이 존재할 수 있다. 따라서 입자궤도의 회전특성을 강력한 공진이 일어날 수 있도록 설계하는 것이 중요하다고 할 수 있다.

혼합탱크 내의 혼합중진

혼합탱크(stirring vessel)는 가장 보편적으로 쓰이는 혼합장치이고 일반적으로 원통형의 탱크 내부에 여러가지 타입의 회전하는 터빈(turbine) 블레이드를 넣어 혼합을 증진시키며, 터빈 믹서로 불리기도 한다. 어떠한 경우든 나선형 운동은 블레이드 회전방향으로의 직접적인 회전과 원심력에 의한 블레이드의 회전에 수직인 평면에서의 회전으로 형성되므로 전체적인 동역학적 구조는 비슷하다고 할 수 있으므로 이 글에서는 가장 간단한 형상의 혼합탱크를 살펴보고자 한다.

그림 4에서 보이듯 블레이드의 기울임각이 없을 경우 모두 도넛(torus) 모양의 불변유선면으로 이루어진 동역학적 구조를 가지며, 각 유체입자는 그 유선면 내에서 나선형 운동을 한다. 그러나 블레이드를 기울일수록 도넛 모양의 불변유선면이 깨어지게 되

는데 이는 공진의 결과라고 이해할 수 있다. 따라서 이 경우도 각 유선면 내의 나선형 운동을 하는 입자의 회전특성을 잘 조절함으로써 남아 있는 불변유선면을 최소화시키며, 공간적으로 고르게 분포된 혼합체를 얻을 수 있다. 그림 4(아래 왼쪽)에 보인 실험 결과는 4주기의 공진때와 그를 둘러싼 불변유선면을 보여준다.

단축압출기 내의 카오스 혼합

플라스틱 가공공정에서 재료를 녹이고 섞고 토출시키는 장치로 가장 널리 쓰이는 압출공정 중 단축압출 공정은 비교적 저렴하지만 혼합 성능이 떨어지는 단점이 있다. 단축압출 공정의 혼합중진은 오래도록 많은 연구의 대상이었고, 본 연구그룹에서는 카오스 이론을 이용한 카오스 스크류를 제안하고 연구해왔다.

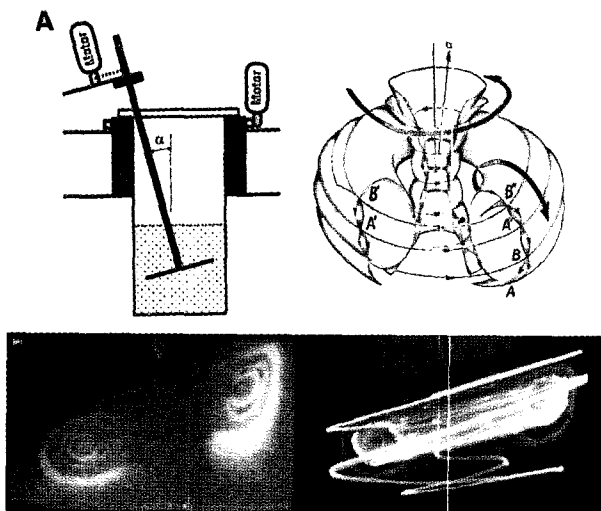


그림 4 혼합탱크의 구조와 대략적인 동역학적 구조 (위). 실제 혼합패턴은 공진에 의한 동역학적 구조(아래 왼쪽)와 불안정 유선면의 존재(아래 오른쪽)를 보여준다 [Fountain, et al, 2000].

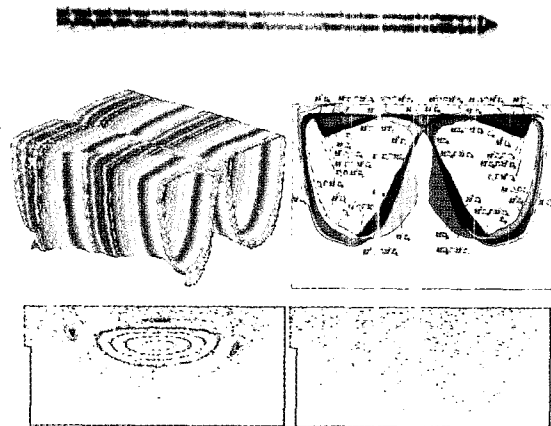


그림 5 카오스 스크류(위), 유선면의 꼬임(중간 왼쪽)과 유선면의 꼬임으로 유발되는 물질이동(중간 오른쪽). 유선면의 꼬임은 무한히 얇고 고르게 분포된 혼합패턴을 만들어낸다. 일반적인 단면에서의 동역학적 구조(아래 왼쪽)는 여전히 존재하는 불변유선면의 존재를 보여주며, 설계변수를 조절함으로써 전영역에서 카오스가 일어나는 것(아래 오른쪽)을 볼 수 있다.

그림 5와 같이 카오스 스크류는 일반적인 단축압출기 스크류에 주기적으로 배리어(barrier)를 장착한 간단한 형상이며, 배리어 있는 영역에서 생기는 동역학적 구조가 배리어가 없는 영역을 교란으로 하여 불변유선면의 꼬임에 의한 혼합증진과 공진에 의한 혼합증진이 같이 일어난다. 배리어가 없는 영역의 길이를 적절히 변화시킴으로써 높은 혼합성을 보이는 유선면의 꼬임에 영향을 받는 영역을 증가시킬 수 있고 공진에 의한 혼합성능도 증가시킬 수 있다. 배리어가 있는 영역과 없는 영역으로 구성된 한 주기의 길이를 바꾸면 각 유체입자의 회전특성을 조절할 수 있어 공진에 영향을 받는 영역에 존재할 수 있는 불변유선면을 없앨 수 있다. 그림 5(중간)은 불안정유선면(unstable manifold)의 꼬임과 그로 인해 유발되는 물질이동을 보여주며, 그림 5(아래 오른쪽)는 전 영역에서 카오스가 일어나는 것을 보여준다.

마이크로 유동에서의 카오스 혼합

수십 μm 의 얇은 관내의 유체의 흐름은 레이놀즈수가 작아 대개 층류(laminar) 유동의 영역에 포함되기 때문에 혼합을 증진시키는 방법은 카오스를 일으키는 것이 유일한 방법이다. 여기서는 마이크로 채널 내의 혼합장치 중 SHM(Staggered Herring-bone Mixer)라는 장치를 소개하도록 하겠다. SHM은 그림에서 보듯이 주기적으로 채널 표면에 홈을 내어 홈을 관 방향으로 유동저항이 적어져 전체적으로 흐름이 파진 방향을 따라 유동이 생기는 원리를 이용한다. 여러 번 기술했듯이 카오스를 일으키기 위해서는 두 개의 회전으로 구성된 나선형 운동이 필수적인데 SHM에서는 흐름 비스듬히 내어 그러한 운동을 얻는다. 그리고 공간주기적으로 서로 반대방향의 홈을 내어 유선면이 서로 어긋나도록 하여 카오스를 일으킨다.

기타 카오스를 일으켜 마이크로 채널의 혼합을 증진시키는 장

치로는 굴곡파이프 믹서와 같은 원리로 굴곡의 방향을 주기적으로 바꾸어 원심력에 의해 이차적으로 생성되는 단면유동의 방향이 교차되도록 만드는 서펜타인(Serpentine) 마이크로 믹서가 있다. 따라서 동역학적 구조와 혼합의 양태는 케닉스 믹서와 비슷하다.

참고문헌

이 글은 이미 발표된 여러 문헌을 참고하여 쓰여졌으며, 대부분의 사진과 결과를 문헌에서 발췌했음을 밝혀둔다. 이 글에 인용된 참고문헌은 아래와 같다.

케닉스 믹서 : Byrde O. & Sawley M.L., 1999, Optimization of a Kenics Static Mixer Using Numerical Flow Simulations, Chemical Engineering Journal 72, pp. 163~169.

굴곡파이프 믹서 : Jones, S.W., Thomas, O.M., and Aref, H., 1989, Chaotic Advections by Laminar Flow in a Twisted Pipe, J. Fluid Mech., 209, 335~357.

혼합탱크 : Fountain G.O., Khakhar D.V., Mezic, I. & Ottino, J.M., 2000, Chaotic Mixing in a Bounded Three-Dimensional Flow, J. Fluid Mech., 417, 365~301.

SHM 마이크로 믹서 : Stroock, A.D., Dertinger, K.W., Ajdari, A., Mezic, I., Stone, H.A. & Whitesides G.M., 2002, Chaotic Mixer for Microchannels, Science, 295, 647~651.

서펜타인 마이크로 믹서 : Aref, H. 2002, Development of Chaotic Advection, Physics of Fluids, in Print.

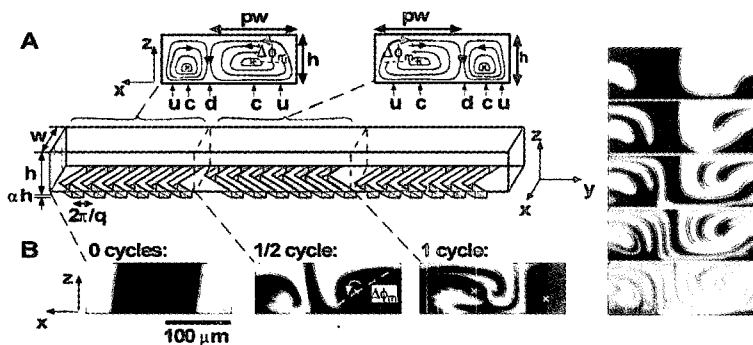


그림 6 SHM 마이크로 채널 믹서. 채널 한 면에 홈을 파서 유동저항의 차이에 의해 나선형 유동을 만들고 홈의 패턴을 공간주기적으로 배치함으로써 유선면이 어긋나도록 설계되었다. 오른쪽은 1주기부터 5주기까지의 단면에서의 혼합패턴이다. [Stroock, et al. 2002]