

< 논문 >

난류 용탕 In-Situ 합성법을 위한 스테틱 믹서의 형상에 따른 혼합 효과

이대성* · 김효근* · 하만영† · 박용호** · 박익민**

(2005년 4월 28일 접수, 2005년 11월 22일 심사완료)

Mixing Effect by the Geometry of Static Mixer with Turbulent In-Situ Mixing Process

Dae Sung Lee, Hyo Geun Kim, Man Yeong Ha, Yong Ho Park and Ik Min Park

Key Words : In-Situ Mixing(In-Situ 혼합), Static Mixer(스테틱 믹서), COV(혼합지수), Mixing Characteristic(혼합 특성)

Abstract

Turbulent in-situ mixing process is a new material process technology to get dispersed phase in nanometer size by controlling reaction of liquid/liquid, liquid/solid and liquid/gas, flow and solidification speed simultaneously. In this study mixing, the key technology to this synthesis method will be studied by computational fluid dynamics. For the simulation of mixing of liquid metal, static mixers will be investigated. Two inlets for different liquid metal meet and merge like 'Y' shape tube. The tube has various shapes such as straight and curved. Also, the radius of curve will be varied. The performance of mixer will be evaluated with quantitative analysis with coefficient of variance of mass fraction. Also, detailed plots of intersection will be presented to understand effect of mixer shape on mixing.

1. 서론

나노 재료분야는 최근 주변 기술의 진보와 함께 재료 합성기술이 빠른 속도로 발전하여 다양한 방법으로 나노 재료(나노 구조재료)를 합성하는 것이 가능하게 되었으며, 몇몇 개발된 나노 재료들에서 기존의 마이크론 재료들과는 다른 여러 가지 특이한 현상들이 발견되면서 최근 90년대 이후 물리, 화학 및 재료 등 전 분야의 과학자들의 관심이 나노 재료의 합성 및 특성 연구에 집중되고 있다.

일반적으로 나노 복합재료를 제조하는 방법으로는 현재 나노 입자 크기를 가지는 구성상을 서로 혼합하는 방법이 가장 많이 사용되고 있으나, 나노미터 크기의 특성을 충분히 발현시킬 수 있는

청정 표면을 가지면서 열역학적으로 안정한 분산상을 기지상에 균일 분산시킬 수 있는, 즉 구성상을 충분히 혼합시킬 수 있는, in-situ 공정기술의 개발이 필요하다. 특히 난류 용탕 in-situ 합성법은 금속 용탕의 반응성을 제어하여 용탕/용탕, 용탕/고체, 용탕/기체 상호간의 반응 및 혼합을 제어함과 동시에 용탕의 흐름과 용탕의 응고속도를 조절하여 기지상에 나노미터 크기의 분산상을 in-situ로 합성시킬 수 있는 새로운 재료공정 기술이다. 용탕/용탕의 혼합은 분산상에 많은 영향을 미치기 때문에 원하는 나노 복합재료를 위해서는 균일한 분산상을 얻을 수 있도록 충분히 혼합이 되어야 하므로 혼합의 제어가 필수적이다.

믹서는 크게 교반이 있는 능동 믹서와 스테틱 믹서로 분류된다. 스테틱 믹서는 능동 믹서에 비해 혼합 성능은 떨어지지만 움직이는 부분이 없어 구조가 간단하고 밀봉이 잘되어 유지보수가 쉽다. 일반적으로, 스테틱 믹서내부에 헬리컬 같은 구조물을 사용하여 유동을 복잡하게 만들어 혼합을 촉진시킨다.

Ottino⁽¹⁾는 혼합 현상에 대해 이론적으로 연구를 하였다. Myers 등⁽¹³⁰⁷⁾은 여러 혼합 조건에 따라 스

† 책임저자, 회원, 부산대학교 기계공학부
E-mail : myha@pusan.ac.kr
TEL : (051)510-2440 FAX : (051)512-9835

* 회원, 부산대학교 대학원 기계공학과

** 부산대학교 재료공학과

태틱 믹서와 능동믹서를 선정하는 순서도를 소개하였고, 스테틱 믹서의 혼합 과정과 압력강하에 대해 연구하였다. 양희전 등^(3,4)은 수치해석과 실험을 통하여 스테틱 믹서의 유동특성과 혼합특성을 연구하였다.

본 연구에서는 나노 복합재료 제작을 위한 용탕의 혼합과정의 이해를 위하여 세 가지 형상의 스테틱 믹서를 선정하여 해석하였다.

2. 수치해석 방법

믹서내 유체에 대한 지배방정식은 질량보존 방정식, 운동량 보존 방정식을 수치 해석의 한 방법인 SIMPLE 법을 사용하여 해석하였다. 난류모델은 일반적으로 많이 쓰이는 표준 $k-\varepsilon$ 모델을 이용하였고, 농도장을 해석하기 위하여 농도 수송 방정식을 이용하였다. 본 연구에 사용한 질량보존 방정식과 운동량 보존 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial t} \mu \left[\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \left(\frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u_i u_j}) \quad (2)$$

$$-\rho \overline{u_i u_j} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left(\rho k + \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) \delta_{ij} \quad (3)$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (4)$$

여기서 μ_t 는 난류점성계수, k 는 난류운동 에너지, ε 는 소산율이다.

농도 수송 모델에 적용되는 일반적인 지배 방정식은 다음과 같이 표현된다.⁽⁵⁾

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} Y_i) = \nabla \cdot \mathbf{J}_i \quad (5)$$

여기서 Y_i 는 각상의 질량분율(mass fraction)을 나타내고 있으며 위의 방정식의 해로부터 구한다. 특히 여기서 \mathbf{J}_i 는 i 상에 관한 확산유량을 나타내는데, 이는 농도의 기울기에 의해 결정된다. 아래

와 같은 방정식으로 표현된다.

$$\mathbf{J}_i = - \left(\rho D_{i,m} + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \nabla Y_i \quad (6)$$

여기서 $D_{i,m}$ 는 혼합상에서 i 상에 관한 확산계수를 나타내며, Sc_t 는 난류 Schmidt 수를 나타낸다. Sc_t 는 아래와 같이 정의된다.

$$Sc_t = \frac{\mu_t}{\rho D_i} \quad (7)$$

여기서 μ_t 는 난류 점성계수이며 D_i 는 난류 확산계수를 나타낸다.

본 연구에서는 상용코드인 Fluent v6.1을 사용하였으며, 격자는 unstructured grid를 사용하여 대략 30만 개를 사용하였다.

경계조건은 입구에서 유체의 속도를 지정하는 입구조건을 사용하였고, 출구에서는 출구조건을 사용하였다. 벽면은 점착조건을 사용하였고, 벽면의 온도는 작동 유체인 구리가 혼합 반응 중에 응고 되는 것을 막기 위해 구리의 용융점보다 높은 1500K로 지정하였다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 형상이 혼합에 미치는 영향을 파악하고자 3가지 믹서를 선정하였다. 이번 연구에서는 믹서 내부에 구조물이 없이, 판 자체의 형상에 따른 혼합도를 알아보하고자 한 것이다. Fig. 1은 한 개의 직판과 서로 다른 곡률을 가진 두 개의 곡판을 나타낸다. 각 믹서는 직경이 11.5mm인 2개의 입구가 존재하며, 두 개의 입구가 만나 혼합이 이루어지는 부분(혼합관)의 직경은 4.5mm이다. 그리고 출구 부분은 판의 지름이 급격히 줄어들어 직경은 1mm이다.

혼합되는 유체는 1473K의 용융된 구리가 쓰인다. 본 해석에서 사용된 유체의 밀도는 8000kg/m^3 , 점도는 0.004489Ns/m 이며, 두 유체가 섞일 때 혼합물이 가지는 물성치는 혼합물에 포함된 한 종류의 유체가 차지하는 부피비 또는 질량비로써 계산하였고 두 유체간에 대한 질량 확산율은 $10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$ 로 하였다. 질량 확산율은 실험적으로 구할 수 있으며 일반적으로 두 액상간의 혼합인 경우에는 $10^{-6}\sim 10^{-7}\text{m}^2/\text{s}$ 로 알려져 있다.

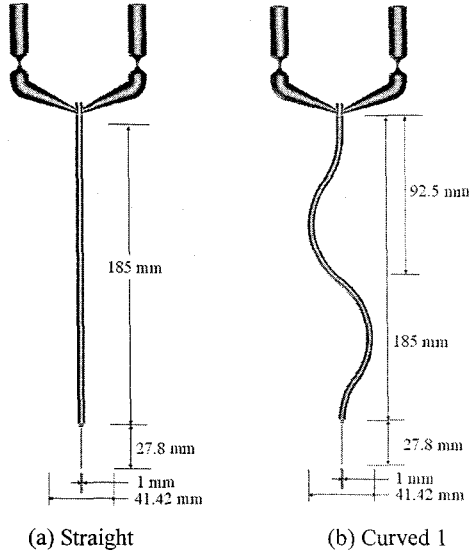


Fig. 1 Geometries of static mixers

3.1 유동의 특성

본 연구에서는 레이놀즈 수(Re)를 이용하여 믹서 출구의 속도를 나타내었다. Re의 정의는 다음과 같다

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} \quad (8)$$

여기서 ρ 는 유체의 밀도를, v 는 출구 평균 속도를, D 는 출구의 직경을, μ 는 유체의 동점성 계수를 나타낸다.

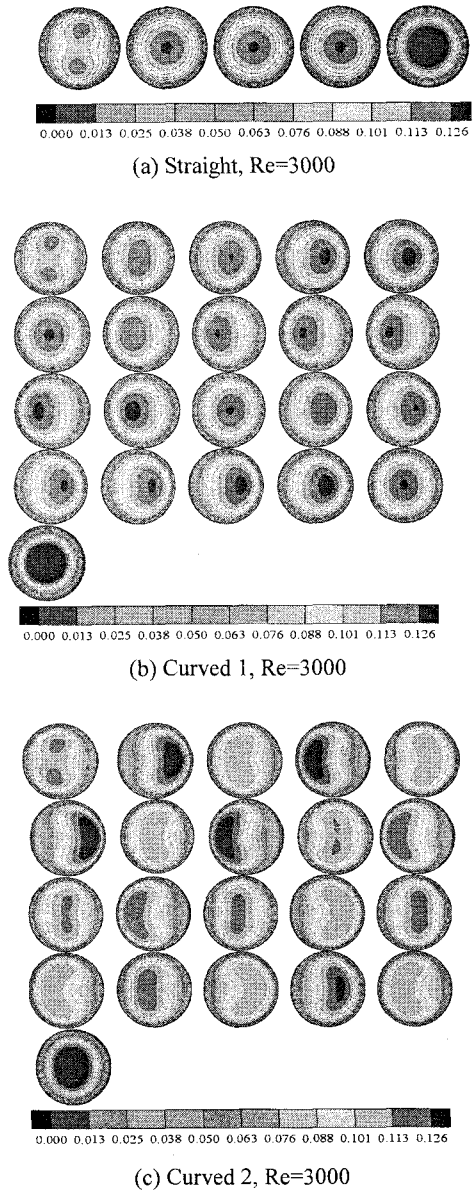


Fig. 2 Velocity contour at the cross section of the static mixer at Re=3000

Fig. 2는 Re가 3000일 때, 직관 또는 곡관의 단면의 속도 선도를 보여준다. 유체는 좌에서 우로, 위에서 아래의 순서로 흘러간다. 직관의 경우 동심원을 그리며, 그 모양이 유지된다. 곡관의 경우는 관의 형상에 의해 등속을 나타내는 선이 휘어지게 되는데 곡관 1보다 곡관 2가 더 많이 휘어진다. 운동량이 큰 부분이 관의 형상에 따라 좌우로 치우쳐 분포되는 것을 볼 수 있다.

3.2 혼합

최초 두 개의 입구로부터 유입된 유체는 두 개의 입구가 만나면서 혼합이 일어난다. Fig. 3은 세 가지 형상의 믹서의 혼합을 나타낸 것이다. Fig. 3에서 볼 수 있듯이, 두 유체가 만난 직후 대부분의 혼합이 일어나지만, 그 이후에는 혼합의 정도를 판별이 쉽지 않다. 혼합의 정도를 정량적으로 나타내기 위해 다음과 같이 COV (Covariance of Variation)를 정의 한다.⁽²⁾

$$COV = \frac{\sigma}{x_m} = \frac{\sqrt{\frac{\sum(x_i - x_m)^2}{N-1}}}{x_m} \quad (9)$$

여기서, σ 는 표준 편차, x_m 는 평균 그리고 N 은 sample 의 개수를 나타낸다. 여기서 sample 은 충분히 유동이 발달한 뒤에, 일정 길이의 단면에서의 농도값을 나타낸다. 일반적인 공업 용도로는 COV 가 0.05 정도이면 충분히 혼합되었다고 할 수 있고, 물감의 혼합에 대해서는 0.01 보다 작아야 충분히 혼합이 되었다고 할 수 있다.⁽²⁾

Fig. 4,5,6 에서는 각 형상에 대한 질량 분율 선도 (mass fraction contour)를 관의 단면에 나타내었다. 이 때 관의 단면은 직관 또는 곡관을 관이 모이는 부분에서 직경이 줄어드는 부분을 21 개로 등분하고 입구에서 가까운 순서대로 나열한 것인데 질량 비율이 일정하지 않은 부분을 나타내었다.

Fig. 4(a)는 Re 가 1000 일 때 직관의 각 단면을 잘라 혼합도를 나타내었다. 유체가 관을 흘러 내려가면서 혼합이 되는 과정을 볼 수 있다. 일반적인 파이프내 유동과 같이, 주 유동방향의 속도가 크고, 단면을 가로지르는 속도의 크기는 작기 때문에 분자확산에 의한 혼합이 지배적이다. 각 유체의 질량 분율 선도가 중심을 기준으로 거의 대칭이며 질량 분율이 0.5 를 나타내는 선은 직선으로 나타내고 이것은 Fig. 2(a)의 유동 모양이 관을 따라 흘러감에 따라 대칭인 모습을 보이는 것과 관계가 있다. (b)와 (c)는 각각 Re 가 3000, 5000 인 경우이다. (b), (c)모두 (a)와 유사한 모양을 가지며, 혼합되는 길이가 (a)보다 길다. 이것은 Re=1000, 3000, 5000 에서는 혼합이 분자 확산에 크게 의존하므로 인해, 속도가 빠른 Re=3000, 5000 의 경우에 잔류시간이 짧기 때문에 혼합이 잘 이루어지지 않는다. 그림에서 (c) 가 (b) 보다 혼합이 잘 되지 않았음을 확인할 수 있다.

Fig. 5 의 (a)의 경우는 곡관 1 에서, Re=1000 의 경우를 모사한 결과이다. 초기 모습은 직관과

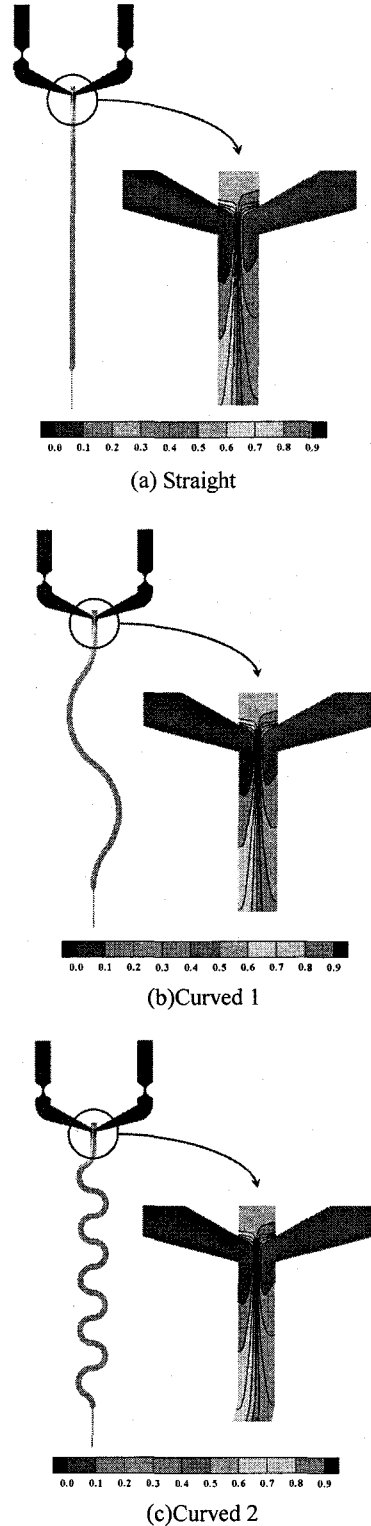


Fig. 3 Mixing results of each mixers

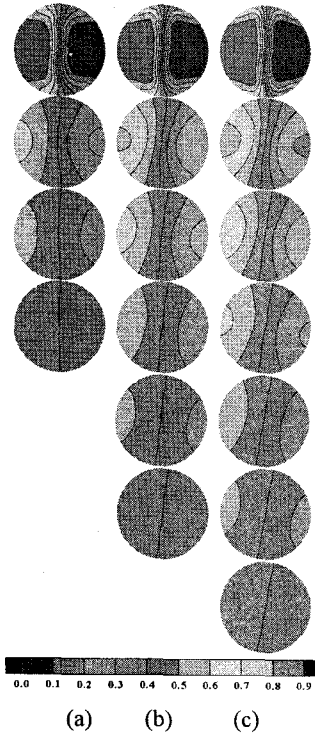


Fig. 4 Mass fraction contour at the cross section of straight static mixer at each Re number. (a) Re=1000, (b) Re=3000, (c) Re=5000

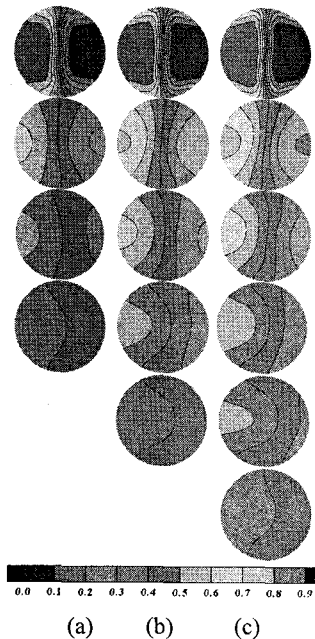


Fig. 5 Mass fraction contour at the cross section of curved static mixer 1 at each Re number. (a) Re=1000, (b) Re=3000, (c) Re=5000

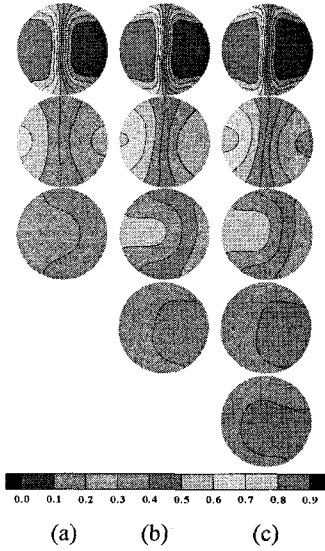


Fig. 6 Mass fraction contour at the cross section of curved static mixer 2 at each Re number. (a) Re=1000, (b) Re=3000, (c) Re=5000

유사하지만 더 내려 갈수록 직관과는 다른 모습을 볼 수 있다. Fig. 2(b)에서 유동이 믹서의 형상에 의해 좌우로 치우치는 것과 유사하게, 질량 분율이 0.5를 나타내는 선이 휘어져 있는 것을 확인할 수 있다. 직관과 비교할 때 중심에서 서로 다른 혼합도를 가진 유체가 직관보다는 더 넓은 부분은 공유하기 때문에, 이 부분을 통해 더 많은 확산이 일어난다는 것을 의미한다. 또한 관을 따라 흘러감에 따라, 단면을 가로지르는 속도의 크기와 방향의 변화가 직관보다 커서, 대류에 의한 혼합이 발생한다. 여기서 (b), (c)도 각각 Re가 3000, 5000의 경우이며, 직관과 비슷하게 Re=1000보다 더 늦게 혼합이 되고 있다.

Fig 6(a)는 곡관 1보다 더 작은 곡률을 가진 곡관 2에서 Re=1000을 계산한 결과이다. 곡관 2는 곡관 1보다 곡률이 작아서 더 많이 휘어지기 때문에 길이도 곡관 1보다 더 길다. (b)와 (c)도 각각 Re= 3000, 5000의 결과를 보여준다. 역시 직관과 곡관 1보다 훨씬 더 혼합도의 분포가 복잡함을 알 수 있다.

Fig. 7은 (a)는 Re=1000, (b)는 Re=3000, (c)는 Re=5000인 경우에 각각의 형상에 대해 혼합거리에 따른 COV를 그린 것이다. 'L'은 직관을 나타내고, 'LW'는 곡관 1 그리고 'SW'는 곡관 2를 나타낸다. 앞서 혼합도 분포에서 살펴 보았듯이, 곡관 2, 곡관 1 그리고 직관의 순서로 혼합이 더 잘됨을 알 수 있다. 즉, 분자 확산을 하는 면적이

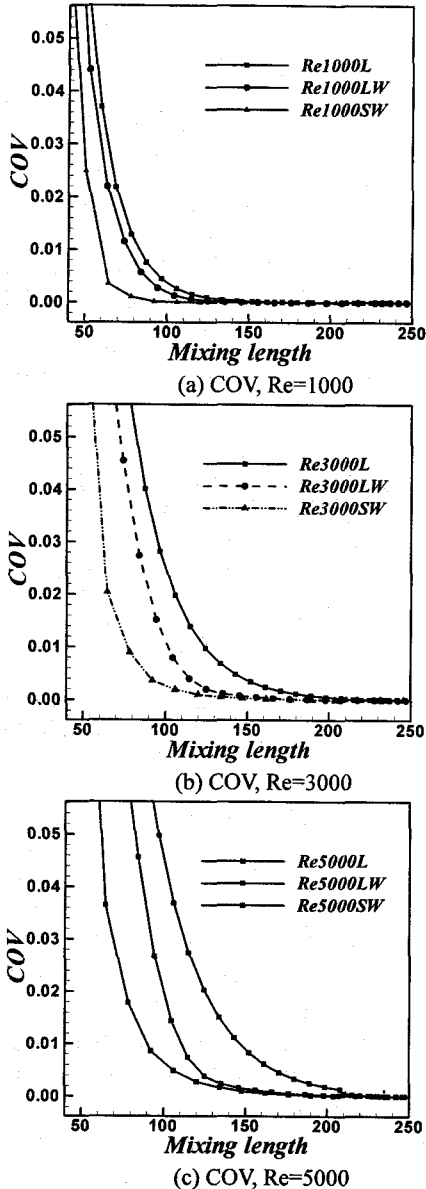


Fig. 7 COV of each static mixers at Re=1000, 3000, 5000

넓은 순서이고 단면을 가로지르는 속도의 변화가 큰 순서이다. 모든 경우에서 일반적인 공업 용도에서 요구하는 COV=0.05 를 만족할 뿐만 아니라 COV=0.01 까지 모두 만족한다. 그러나, 나노 복합재료의 합성을 위해서는 어느 정도의 혼합도를 만족시켜야 하는지 기준이 없기 때문에 향후 실험과 비교를 위해서는 COV 가 10^{-5} 정도까지 얻을 필요

가 있다고 판단한다. 이것은 향후 실험과 비교하여 COV 와 나노미터 크기의 분산상의 결과와 상호 연관성을 파악할 수 있을 것이다.

4. 결론

본 연구에서는 세 가지 형태의 스테틱 믹서의 혼합 특성을 분석하였다. 이번 연구는 스테틱 믹서의 관 내부에 구조물을 설치하는 하지 않은 빈 공간으로 되어 있으며, 관 자체의 형상으로 인한 혼합 특성을 파악하기 때문에 압력강화로 인한 손실을 상당히 낮출 수 있다. 그러므로, Re 에 따른 유체의 속도가 혼합에 중요한 인자이다. Re 수가 5000 이하인 경우에는 Re 수가 낮을수록 잔류시간이 길어져 혼합이 잘 되었다. 직관 보다는 곡관이 같은 혼합거리에서 더 혼합이 더 잘되어 COV 가 낮았다. 곡관에서도 파형이 하나인 곡관 보다 여러 개인 곡관이 더 혼합이 잘 되었다. 모든 관과 모든 Re 수에 대해 0.01 이하의 COV 를 얻어 일반적인 용도로는 충분한 혼합을 얻었지만, 나노 복합재료의 합성을 위한 COV 기준이 없기 때문에 향후 실험의 결과와 비교하여 새로운 기준을 마련할 필요가 있다고 사료된다.

후기

본 연구는 한국과학기술기획평가원에서 시행한 2004 년도 나노핵심기반기술개발사업의 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Ottino, J.M., 1989, "The Kinematics of Mixing: Stretching, Chaos, and Transport," Cambridge University Press.
- (2) Myers, K.J., Bakker, A. and Ryan, D., 1997, "Avoid Agitation by Selecting Static Mixers," *Chemical Engineering Progress*, Vol. 93, No. 6, pp. 28-38.
- (3) Hei-Cheon Yang, Sang-Kyoo Park and Seung-Won Oh, 2003 "Mixing Characteristics of Static Mixers," *Proceedings of the KSME 2003 Spring Annual Meeting*, pp. 1955-1960.
- (4) Hei-Cheon Yang, Sang-Kyoo Park and Seung-Won Oh, 2004 "Numerical Study of Flow Characteristics in Static Mixers," *Proceedings of the KSME 2004 Spring Annual Meeting*, pp. 1957-1962.
- (5) Fluent V6.1 Users Manual (2003) Users Guide.