

드래프트관이 장착된 교반기 내의 유동 및 혼합특성 연구

항정훈* · 김윤제**

Flow and Mixing Characteristics in an Agitator with a Draught Tube

Jung-Hoon Hwang*, Youn-Jea Kim**

KeyWord : Mechanical Agitator(기계식 교반기), High Viscous Fluids(고점성 유체), Helical Screw(헬리컬 스크루), Draught Tube(드래프트관), CFD(전산유체역학)

ABSTRACT

Because the mixing efficiency is influenced remarkably by varying the geometrical configurations, the study of flow characteristics inside the mechanical agitator is very important to improve the performances. The draught tube in the agitator makes intermixing between the screw and tube by interrupting radial flow, and it makes circulation region in a mixing chamber. In general, the helical screw agitator with a draught tube (HSA) is proved more efficient to mix than the others. Consequently, such as the shapes of helical screw, number of pitches and the variation of angular velocity are the main parameters for improving the capacity of HSA. And also the suspension of the solid particles in the agitator can be determined these parameters. The rate of solids suspension in the mixing chamber was quantified with a statistical average value, α_2 . Numerical analyses were carried out, using a commercial CFD code, Fluent, to obtain the velocity, pressure and particle distributions under steady, laminar flow and no-slip conditions. Results are graphically depicted with various parameters.

1. 서론

현대 산업 전반에 걸쳐 유체 유동 현상과 관련된 많은 회전식 기계들이 사용되고 있으며, 그 내부에서 발생하는 여러 현상들이 연구되고 있다. 그 중에서도 기계식 교반장치는 현재까지 규명되지 않은 여러 가지 복잡한 유동 특성을 보이고 있다. 기계식 교반장치는 한 가지

혹은 그 이상의 반응물을 혼합하는데 사용되는 장치로 화학공업, 식품공업, 생화학공업, 제지공업, 금속공업, 수처리 및 환경공업 등에 널리 적용되며 그 응용분야가 매우 넓다. 지금까지 교반기 설계는 주로 과거의 경험에 의존하여 왔으나 최근의 컴퓨터 기술의 발달과 실험 기법의 유효성으로 인해 그 성능에 관한 해석이 보다 수월해지고 있다. 용기 내에서 전체를 균일하게 섞고 부유입자가 적절히 접촉하도록 하기 위한 교반작용은 매우 복잡한 메커니즘을 가지기 때문에 그에 대한 체계적인 연구가 필요하다⁽¹⁾.

* 성균관대학교 대학원

** 성균관대학교 기계공학부

책임저자 E-mail: yjkim@skku.edu

드래프트 관 내에서 스크루가 회전하는 드래프트 관 장착 헬리컬 스크루 교반장치 (이하 HSA로 표기)는 종종 높은 점도의 굳은 (pseudoplastic) 유체를 혼합하는 과정에 이용되며, 일반적으로 교반관 (baffle)이 있는 것이 보다 우수한 것으로 알려져 있다. 교반장치 내 스크루에 의해 발생하는 유체의 유동은 드래프트 관에 의해 적절한 방향을 지나게 되어 결과적으로 유체 체적의 대부분을 차지하며 순환영역이라 불리는 드래프트 관 외부에서 전체적으로 순환하는 특성을 보이게 된다⁽²⁾. 이러한 유동 특성은 교반장치 내 혼합 특성을 결정짓게 되며, 유체 유동에 영향을 미치는 많은 요소들 중 대표적인 변수로 스크루 임펠러 및 용기의 크기와 형상, 모터의 회전수 등을 들 수 있는데, 이들은 기계적 교반장치를 설계하거나 선택하는데 반드시 고려되어야 하는 변수이다. 이를 위해 교반기 내부 유동 가시화에 관련된 많은 실험 기법들이 제시되고 있지만 실험 모델의 제작 비용과 시간적인 측면에서 여러 가지 문제점을 안고 있는 것이 사실이다. 따라서 그러한 문제점들을 해결하고 여러 변수 변경에 의한 효과와 최적의 설계 변수들을 얻기 위해 진보된 CFD (Computational Fluid Dynamics) 기법이 적용될 수 있다⁽³⁾. 결론적으로, 상기한 많은 어려움과 문제점들을 극복하고 최적의 설계 변수들을 도출해 내는 것이 본 연구의 목표라 할 수 있다.

2. 수치해석

2.1. 이론적 배경

교반 장치의 혼합 성능을 평가하기 위해서는 몇 가지 변수의 변경에 따른 교반시의 입자 분포 특성을 파악하여야 한다. 일반적으로 액체 내에서의 입자 분포 정도는 기저면 부유 (on-bottom motion), 완전 기저면 이탈 부유 (complete off-bottom suspension), 그리고 균일 부유 (uniform suspension)의 세 가지 경우로 나누어 설명할 수 있다. 기저면 부유는 모든 고체 입자가 바닥 근처에 존재하는 상태로 입자 표면이 액상에 완전히 노출되어 있지 않는 상태이다. 완전 기저면 이탈 부유는 고체 입자가 바닥에 1~2초 이상 머물지 않는 상태로 1-s criterion 이라고 불리며 이 상태에서는 입자 표면이 최대한 액상에 노출되어 있다. 균일 부유 상태는 입자 농도가 전반적으로 균일하며 임펠러의 속도나 동력이 증가하여도 입자 분포가 더 이상 변하지 않는 상태를 뜻한다. 사실상 100% 균일한 상태는 어렵

기 때문에 일반적으로 고체 입자의 부유 높이가 용기 높이의 90% 이상까지 도달하면 균일 부유 상태라 할 수 있다. 기저면 부유에서 완전 기저면 이탈 부유 및 균일 부유 상태에 이르기 위해서는 추가적인 동력이 필요하다⁽⁴⁾.

2.2. 지배방정식

교반기 내부 유동은 저 레이놀즈수 ($Re = \rho ND^2/\mu < 20$, ρ : 유체 밀도, N : revolution per second, D : 용기 직경, μ : 유체 점성계수) 및 고점도의 creeping flow로서 유동 해석에 사용된 지배방정식은 3차원 정상상태 비압축성, 층류 유동의 Navier-Stokes 방정식⁽⁵⁾으로 다음과 같이 표현된다.

연속방정식 (continuity equation):

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

운동량방정식 (momentum equation):

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \rho(u_j \cdot \frac{\partial}{\partial x_j})u_i = -\frac{dp}{dx_i} + \mu \frac{\partial^2}{\partial x_i^2}u_i \quad (2)$$

여기서, u_i 는 유체의 i -방향 속도, p 는 압력, ρ 는 유체의 밀도이며 μ 는 점성계수이다.

교반기 내부 입자 분포를 해석하기 위해 Eulerian Multiphase Model⁽⁶⁾이 사용되었으며 그에 따른 지배방정식은 아래와 같다.

체적분율 (volume fraction):

$$V_s = \int_V \alpha_s dV, \quad \sum_{s=1}^n \alpha_s = 1 \quad (3)$$

연속방정식 (continuity equation):

$$\nabla \cdot (\alpha_s \rho_s \vec{v}_s) = \sum_{l=1}^n \dot{m}_{ls} \quad (4)$$

운동량방정식 (momentum equation):

$$\begin{aligned} \nabla \cdot (\alpha_s \rho_s \vec{v}_s \vec{v}_s) &= -\alpha_s \nabla p - \nabla p_s + \nabla \cdot \tau_s + \\ \alpha_s \rho_s \vec{g} + \alpha_s \rho_s (\vec{F}_s + \vec{F}_{lift,s}) &+ \sum_{l=1}^N (K_{ls} (\vec{v}_l - \vec{v}_s) + \\ \dot{m}_{ls} \vec{v}_{ls}) \end{aligned} \quad (5)$$

여기서, V_p , α_p , ρ_p , v_p 는 각 상 (phase)의 부피, 체적분율, 밀도 및 속도이며, 하첨자 p 가 l 인 경우는 액체 (liquid)를, s 인 경우는 고체입자 (solid particle)를 의미한다. 식 (4)에서 \dot{m}_{ls} 는 액체 (l)에서 고체입자 (s)로의 물질전달 (mass transfer)을 나타내며, 식 (5)에서 \vec{g} 는 중력가속도이며 τ_s 는 고체입자의 응력-변형을 텐서로서 다음과 같다.

$$\tau_s = \alpha_s \mu_s (\nabla \vec{v}_s + \nabla \vec{v}_s^T) + \alpha_s (\lambda_s - \frac{2}{3} \mu_s) \nabla \cdot \vec{v}_s \vec{I} \quad (6)$$

여기서, μ_s 와 λ_s 는 각각 고체입자의 shear and bulk viscosity를 나타낸다.

또한 식 (5)에서 K_{ls} 는 고체 (s)와 액체 (l)의 두 상에 대한 Fluid-Solid exchange coefficient 값이며, \vec{F}_s , $\vec{F}_{lift,s}$ 는 각각 고체입자의 external body force, lift force로 각각 아래와 같이 표현된다.

$$K_{ls} = \frac{\alpha_s \rho_s f}{\tau_s} \quad (7)$$

$$\vec{F}_{lift,s} = -0.5 \rho_l \alpha_s (\vec{v}_l - \vec{v}_s) \times (\nabla \times \vec{v}_l) \quad (8)$$

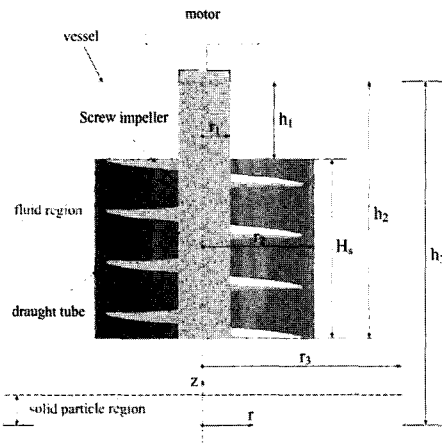


Fig. 1 Geometrical arrangement of an agitator

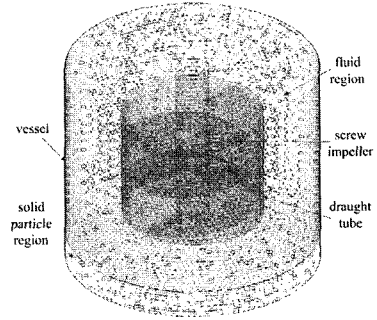


Fig. 2 Grid system of HSA

식 (7)에서 $\tau_s = \frac{\rho_s d_s^2}{18 \mu_l}$ 으로 표현된다.

2.3. 해석모델

해석모델은 3-D CAD 프로그램인 Inventor 10을 이용하여 모델링 하였으며, 본 연구에 사용된 주요 기하학적 변수들은 Fig. 1과 Table 1에 표시한 바와 같다. 해석 모델은 헬리컬 스크루, 드래프트 관 및 외부 용기로 나뉘며 각 변수들의 조합은 2차원 연구를 수행한 선행 연구에 기초하였다⁽⁷⁾. 먼저 스크루 감은 횡수에 따른 교반기 내부 유동 특성을 해석하기 위하여 $n=1.5, 2.5$ 및 3.5 (n : 스크루 감은 횡수)의 세 가지 경우를 구성하였으며, 교반기 크기에 따른 영향을 해석하기 위하여 형상비 (교반기 용기 높이에 대한 직경의 비, H/D)에 따라 두 가지 경우를 구성하였다.

해석에 사용된 격자계는 CFD 전처리 프로그램인 Gambit을 이용하여 구성되었으며, Fig. 2에 도시한 바와 같이 비교적 형상이 복잡한 튜브 내부 스크루 임펠러 특

Table 1 Specification of the modeled HSA

Arrangement (by definition, $R_2^* \equiv 1$)	Type 1	$R_1^* = 0.24, R_3^* = 1.8,$ $H_1^* = 0.7, H_2^* = 2.3, H_3^* = 3$
	Type 2	$R_1^* = 0.24, R_3^* = 1.8,$ $H_1^* = 0.8, H_2^* = 3.6, H_3^* = 5.4$
Notation	dimensionless parameters, $H_1^* = h_1/r_2, H_2^* = h_2/r_2, H_3^* = h_3/r_2,$ $R_1^* = r_1/r_2, R_2^* = r_2/r_2, R_3^* = r_3/r_2$	
Dimensions (when, $r_2=25$) [mm]	Type 1	$r_1 = 6, r_3 = 45,$ $h_1 = 17.5, h_2 = 57.5, h_3 = 75$
	Type 2	$r_1 = 6, r_3 = 45,$ $h_1 = 20, h_2 = 110, h_3 = 130$
Aspect ratio H/D ($H = h_3, D = 2r_3$)	Type 1	0.833
	Type 2	1.5

정상 비정렬 격자 생성 기법을 적용하였다. 또한 용기 내 액체 중의 고체 입자 혼합에 따른 다상 유동 (multi-phase flow) 특성을 해석하기 위하여 바닥으로부터 10 mm 높이의 분리된 고체 입자 영역에는 정렬 격자를 적용하여 전체적으로 hybrid grid system을 형성하였다.

2.4. 수치해석 방법

교반기 내부의 유동 특성에 영향을 미칠 수 있는 여러 변수들 가운데 첫째로 스크루 감은 횟수와 회전 속도의 영향에 대해 비교하기 위하여 $n = 1.5, 2.5$ 및 3.5 의 세 가지 경우에 대해 각각 30, 60, 90 rpm의 회전 속도를 적용하여 해석하였고, 다음으로 교반기 형상비에 따른 비교를 위해 두 가지의 형상비에 따라 해석을 수행하였다. 마지막으로 유동 특성을 분석하여 얻은 결과를 바탕으로 혼합 특성 고찰을 위하여 동일 형상의 교반기를 기준으로 $n = 2.5$ 와 3.5 의 두 가지 경우에 대해 각각 60, 90 rpm의 회전 속도를 적용하여 입자 분포 특성을 해석한 후 이를 정량적으로 분석하기 위해 대표적인 통계 수치인 분산 (variance, σ^2)을 이용하여 비교하였다.

용기 외부로부터 내부로의 유체 유입은 없으며, HSA 시스템 내 유동 현상은 단지 스크루 임펠러의 회전에 의해서만 발생하는 것으로 간주하였다. 따라서 모든 경계면에는 벽조건 (wall boundary condition)과 점착조건 (no-slip condition)을 적용하였다. 작동유체는 글리세린 (Glycerin, $\mu = 0.799 \text{ kg/m}\cdot\text{s}$, $\rho = 1259.9 \text{ kg/m}^3$)을 사용하였고, 고체 입자로 탄소 (Carbon, $\mu = 1.72 \times 10^{-5} \text{ kg/m}\cdot\text{s}$, $\rho = 2000 \text{ kg/m}^3$)를 사용하였으며 입자 크기는 $d_p = 100 \mu\text{m}$ 로 일정하다고 가정하였다.

상용 CFD code인 Fluent를 사용하였고, 지배방정식은 유한체적법 (FVM)과 SIMPLE 알고리즘으로 이산화하였다. 수렴도는 오차범위 10^{-4} 이하에서 결정하였고, 계산 시간은 Intel Pentium 4A CPU 2GHz, 1GB memory 환경에서 약 5~20시간 정도가 소요되었다.

4. 결과 및 고찰

4.1. 유동 특성 결과

4.1.1. 스크루 감은 횟수에 따른 영향

해석 결과는 압력 및 속도 분포와 유선 분포에 대해서로 다른 세 가지 회전 속도에 따라 각각 도시하였다.

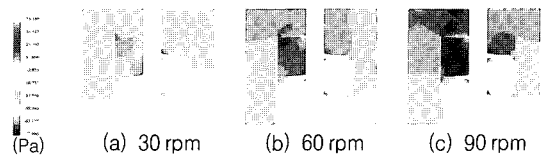


Fig. 3 Pressure distribution on the vertical cross-section of HSA with $n=1.5$

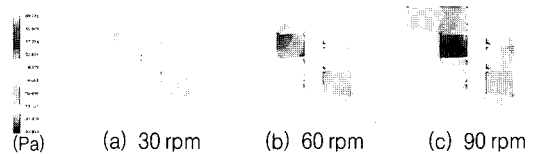


Fig. 4 Pressure distribution on the vertical cross-section of HSA with $n=2.5$

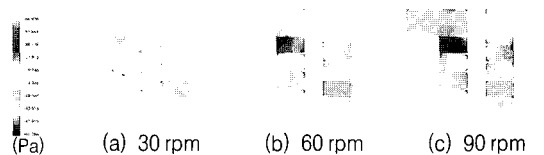


Fig. 5 Pressure distribution on the vertical cross-section of HSA with $n=3.5$

Figs. 3~5는 세 가지 다른 형태의 각기 다른 세 가지 회전 속도에 대한 HSA 종단면의 압력 분포를 나타낸 것이다. 전체적으로 드래프트 관의 하부에 비해 상부에서 높은 압력을 나타내는 것을 볼 수 있는데 이는 용기 내부에서 드래프트 관을 중심으로 순환 영역을 형성한다는 사실을 입증하는 결과로 판단된다.

같은 스크루 감은 횟수에서의 압력 분포 결과를 살펴 보면 회전 속도가 증가할수록 스크루 내부 압력이 증가함을 볼 수 있다. 이는 회전 속도의 증가에 따른 스크루 피치 사이에서의 활발한 내부 혼합 과정을 예상케 하며 더불어 드래프트 관을 중심으로 형성되는 순환 영역 내에서의 유동 또한 보다 활발할 것으로 보인다. 하지만 스크루와 드래프트 관 사이의 좁은 유로를 통과하는 유체의 흐름을 고려할 때 부분적인 높은 압력이 작용하여 고점도 유체와의 마찰에 의한 구조적인 문제점을 유발할 것이라 생각된다. 따라서 스크루 임펠러의 재료적인 특성을 고려한 구조 해석적 연구가 필요할 것으로 사료된다.

또한 같은 회전 속도에서 압력 분포 결과를 비교해 보면 스크루 감은 횟수가 증가함에 따라 전체적으로 높은 압력 분포를 보이는 것을 알 수 있다. 이 결과로부터 세 가지 경우 중 $n = 3.5$ 의 경우가 혼합시 유동 강도가

가장 높을 것으로 판단된다. 하지만 스크루 감은 횡수가 증가함에 따라 스크루 축을 기준으로 비대칭적인 압력 분포를 나타내는 것을 볼 수 있다. 이는 나선형 스크루의 기하학적 특성으로 인한 결과이며 ΔP 가 커질수록 비대칭성에 의한 모멘트의 발생으로 스크루 축에 작용되는 굽힘 응력이 증가할 것으로 보인다. 따라서 이러한 구조적 특성을 고려한 신뢰성 및 수명 평가에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

세 가지 형태의 서로 다른 세 가지 회전 속도에 따른 HSA 중단면의 속도 분포를 Figs. 6~9에 도시하였다. 결과를 살펴보면 같은 형상에서 회전 속도가 증가함에 따라 전체적인 속도 성분의 크기가 증가하는 것을 알 수 있는데 이는 드래프트 관을 중심으로 한 순환 영역에서 유체의 순환이 왕성해짐을 의미하는 결과이다. 또한 회전 속도가 증가할수록 순환 영역을 형성하는 속도 성분의 크기가 증가하며 세 가지 회전 속도 중 90 rpm에서 가장 완전한 순환 영역을 형성함을 알 수 있다. 이로써 세 가지의 회전 속도 중 90 rpm의 경우에 내부 유동이 가장 활발한 것으로 판단된다.

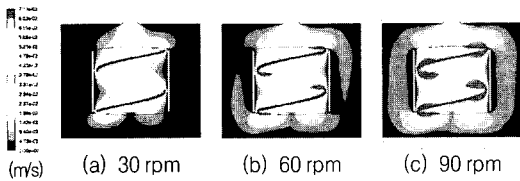


Fig. 6 Velocity distribution on the vertical cross-section of HSA with $n=1.5$

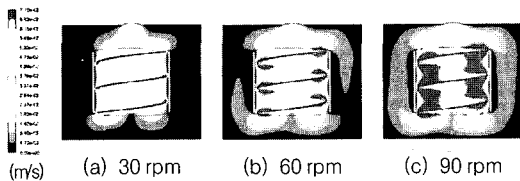


Fig. 7 Velocity distribution on the vertical cross-section of HSA with $n=2.5$

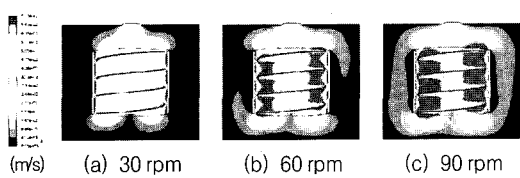


Fig. 8 Velocity distribution on the vertical cross-section of HSA with $n=3.5$

같은 회전 속도에서 스크루 감은 횡수의 변화에 따른 결과를 살펴보면 스크루 감은 횡수가 증가할수록 축, 피치 간격이 좁아질수록 드래프트 관 내부 스크루 피치 사이의 속도 분포가 크고 조밀함을 볼 수 있으며 이는 드래프트 관 내부에서의 혼합이 보다 활발해짐을 의미한다. 따라서 세 가지의 경우 중 $n=3.5$ 의 경우가 혼합시 유동 강도가 가장 강할 것으로 보인다.

4.1.2. 교반기 형상비에 따른 영향

HSA 형상비 (H/D)에 따른 서로 다른 두 가지 형상과 세 가지 회전속도 변화에 따른 압력 및 속도 분포 결과를 고찰하였다. Fig. 9는 두 가지 형태의 각기 다른 세 가지 회전 속도에 따라 HSA 횡단면의 압력 분포를 나타낸 것이다. 압력 분포 경향을 살펴보면 드래프트 관 상부와 하부의 압력차가 비교적 크게 나타나며 이는 드래프트 관을 중심으로 용기 내에서 강제 대류 형식의 순환 영역을 구성하는 것을 간접적으로 보여주는 결과이다.

같은 회전 속도에서 형상비에 따른 압력 분포 결과를 비교해 보면 Type 1의 경우가 Type 2의 경우에 비해 보다 높은 압력 값을 나타내는 것을 볼 수 있다. 또한 회전 속도가 증가함에 따라 전체적인 압력 값이 증가하는

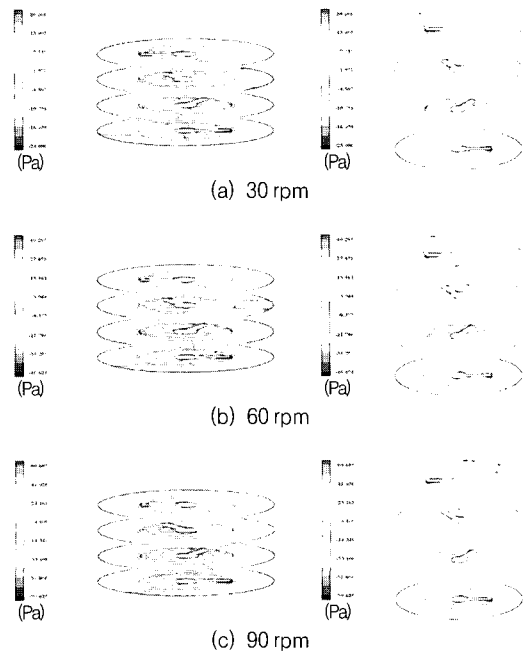


Fig. 9 Pressure distribution on the horizontal cross-section of HSA (left: Type 1, right: Type 2)

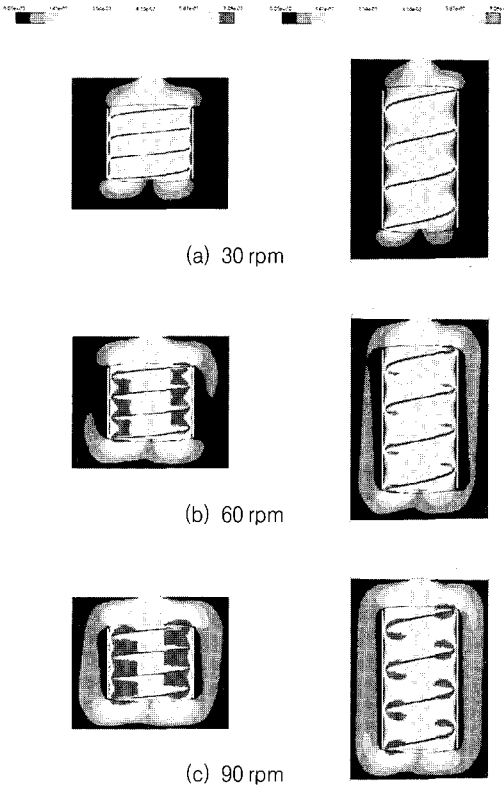


Fig. 10 Velocity distributions on the cross section of HSA (left: Type 1, right: Type 2)

것을 알 수 있다. 이를 종합해 볼 때 동일한 회전 속도에서 형상비의 증가에 따라 교반 효율이 감소할 것으로 예측되며, 같은 효율을 얻기 위해서는 회전속도를 증가시켜야 할 것으로 판단할 수 있다. 하지만 고점도의 유체를 작동 유체로 하는 헬리컬 형상의 교반기 특성상 회전 속도의 증가는 급격한 동력의 증가를 야기하게 되므로 교반 효율의 증가를 위해 회전 속도를 증가시키는 것은 한계가 있다. 따라서 교반기 형상비에 따른 회전 속도와 동력 손실과의 관계에 대한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

교반기 형상비와 서로 다른 세 가지 회전 속도에 따른 속도 분포를 Fig. 10에 도시하였다. 앞서 예측한 바와 같이 회전 속도가 증가함에 따라 용기 내에서 유체가 순환되는 속도가 증가하며 세 가지 회전 속도 중 90 rpm에서 가장 이상적인 순환영역이 형성되는 것을 볼 수 있다. 또한 같은 회전 속도에 대해 두 가지 형상을 비교하여 보면, Type 2에 비해 Type 1에서 스크루 피치 사이의 속도 분포가 높게 나타나는 것을 알 수 있으며 이는

Table 2 Variances (σ^2) for the solid particle distribution

case	n = 2.5		n = 3.5	
	60 rpm	90 rpm	60 rpm	90 rpm
σ^2	2.06×10^{-5}	1.61×10^{-6}	2.46×10^{-6}	7.35×10^{-6}

드래프트 관 내부 혼합이 Type 1에서 더 활발함을 말해주는 결과이다. 압력 분포 결과 분석에서와 같이 교반기 형상비가 증가함에 따라 같은 효율을 얻기 위해서는 회전 속도의 증가가 필요할 것으로 보인다. 하지만 소형 및 저용량의 유체 교반시에는 적은 동력으로 높은 효율을 기대할 수 있는 Type 1의 형상이 유리할 것으로 판단되며 교반기의 올바른 선택과 사용을 위해 동력 손실과 교반 효율과의 관계에 대한 정량적이고 체계화된 표준 정립이 필요할 것이다.

4.2. 혼합 특성 결과

스크루 감은 횟수 ($n = 2.5, 3.5$) 및 회전 속도의 변화 ($\Omega = 60, 90 \text{ rpm}$)에 따른 혼합 성능을 평가하기 위해 교반 용기의 높이에 따른 입자 분포를 고찰하였다. 입자 분포의 정량적인 분석을 위해 대표적인 통계 수치인 분산 (σ^2) 값을 각각의 케이스 별로 정리하여 Table 2에 나타내었다. σ^2 은 다음 식을 이용하여 구할 수 있다.

$$\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [(\phi_{vf,h} / \phi_{vf}) - 1]^2 \quad (9)$$

여기서, $\phi_{vf,h}$ 는 용기 바닥면으로부터의 높이 h 에서 고체 입자의 체적분율 (volume fraction)이며 ϕ_{vf} 는 전체 부피에 대한 고체 입자의 평균 체적분율이다. 결과를 살펴보면 두 가지 경우의 σ^2 값은 각각 60 rpm에서 $2.06 \times 10^{-5} / 2.46 \times 10^{-6}$, 90 rpm에서 $1.6 \times 10^{-6} / 7.53 \times 10^{-6}$ 으로 회전 속도의 변경에 따라 약 5~10배 정도의 스케일 차이를 보이는 것을 알 수 있다. 이는 전체적인 혼합 성능 면에서 90 rpm의 경우가 60 rpm의 경우에 비하여 보다 우수함을 나타내는 결과이다. 또한 분산 값이 매우 작은 수치이기 때문에 현저하게 큰 차이로 볼 수는 없지만 전체적으로 $n = 3.5$ 의 경우가 $n = 2.5$ 의 경우에 비하여 보다 균일한 입자 분포를 나타내는 것으로 판단된다.

혼합 성능에 대한 가시화를 위해 각각의 경우에 대한 입자 분포를 고체 입자의 체적분율로 나타내었으며 Fig. 11에 도시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 $n = 2.5$,

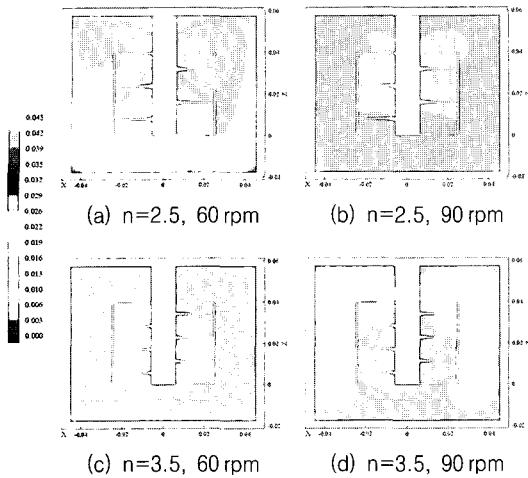


Fig. 11 Solid particle distribution on the vertical direction of HSA

90 rpm 및 $n=3.5, 60$ rpm의 경우 용기 내부 입자 분포가 가장 균일함을 알 수 있으며 $n=3.5, 60$ rpm의 경우가 90 rpm의 경우에 비해 전체적으로 입자의 물림 현상 없이 고른 분포를 보이는 것을 확인할 수 있다. 이는 회전 속도를 증가시키기 인한 동력 소모의 절약이라는 측면에서 고무적인 결과라 할 수 있다. 하지만 동력 소모량과 혼합 성능과의 관계에 대한 조사와 함께 혼합 시간에 따른 교반 성능 비교를 위하여 비정상 (transient) 해석을 통한 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다. 또한 그림에 나타난 바와 같이 용기 바닥의 모서리 부분에 부분적인 입자 물림 현상이 나타나는 것을 알 수 있다. 따라서 용기 바닥 모서리 부분의 귀접이 (fillet) 등 용기 형상의 변화를 통하여 이러한 사공간 (dead space)을 줄이기 위한 연구가 필요하다.

서로 다른 두 가지 형상 ($n=2.5$ 와 3.5)에 대하여 60, 90 rpm의 두 가지 회전 속도에 따른 혼합 특성을 고찰하기 위해 각 경우의 입자 분포 결과를 Fig. 12에 나타내었다. 그래프에서 x축은 무차원화 된 입자 체적분율로 각 높이에서의 입자의 체적분율을 평균 입자 체적분율로 나눈 값이며, y축은 무차원화 된 높이로 각 측정 높이 (H_s)를 교반용기의 전체 높이 (H_T)로 나눈 값이다. 그래프를 분석함에 있어 전체적으로 x축에 나타난 무차원 입자 체적분율이 1에 가깝게 분포할수록 입자 분포가 균일하며 그에 따라 혼합 성능 및 혼합 효율이 보다 우수함을 나타낸다. Fig. 12에서 변수 변경에 따른 총 4 가지 경우 중 $n=2.5, 90$ rpm과 $n=3.5, 60$ rpm의 경우가 가장 1에 가까운 분포를 보이며, 그 중 $n=2.5, 90$ rpm의

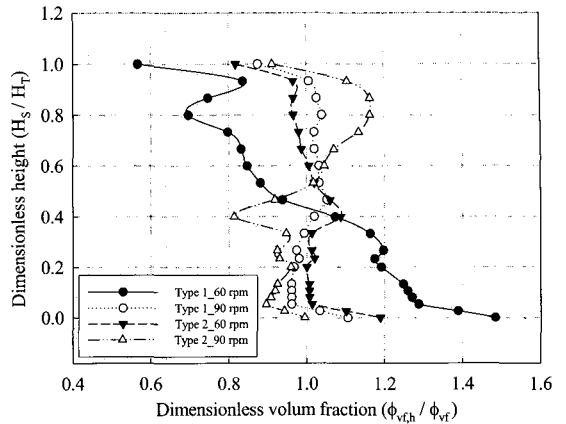


Fig. 12 Mixing performance for the effect of number of screw pitches and angular velocities

경우에 교반기 상부에서 1보다 큰 값을 나타냄을 알 수 있다. 이는 동일한 조건에서 위에 언급한 두 가지 경우가 우수한 교반 효율을 가지며, 특히 $n=2.5, 90$ rpm의 경우 활발한 입자 부유에 의해 혼합이 보다 용이할 것으로 예상된다. 하지만 Fig. 11의 입자 분포 결과에서 확인한 바와 같이 교반 용기 하부 모서리 쪽에서 부분적으로 입자 체적분율이 증가함을 볼 수 있으며, 또한 용기 상부 모서리에는 부분적인 입자 분포 부족 현상이 나타남을 알 수 있다. 따라서 향후 연구에서는 이러한 불필요한 정체 구역을 최소화 할 수 있도록 교반 용기의 형상 변화에 따른 해석적 접근이 필요할 것으로 판단된다.

5. 결론

여러 산업 전반에 걸쳐 널리 사용되는 기계식 교반장치 중 드래프트 관이 장착된 헬리컬 스크루 형상의 교반기에 대한 유동 및 혼합 특성을 평가하기 위하여 몇 가지 변수 변경을 통한 수치 해석을 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 유동 특성 해석을 통해 얻은 압력 분포 결과를 비교해 본 결과 전체적으로 드래프트 관 하부에 비해 상부에서 높은 압력을 나타내는 것을 통해 드래프트 관을 중심으로 한 순환 영역을 형성함을 확인하였으며 이는 드래프트 관의 주요 기능이라 할 수 있다.

- 2) 유동 해석 결과 중 속도 분포를 살펴보면 같은 형상에서 세 가지 회전 속도 중 90 rpm에서 가장 완전한 순환 영역을 형성하였으며, 스크루 감은 횟수에 따른 세 가지 형상 중 $n=3.5$ 의 경우에 혼합시 유동의 강도가 가장 높을 것으로 예측되었다.
- 3) 교반기 형상비 (H/D)에 따른 유동 특성 해석 결과 전체적으로 비슷한 경향을 보였으나 형상비가 작은 경우 (Type 1)에 같은 회전 속도에서 보다 높은 교반 효율을 얻을 수 있을 것으로 판단되며 동력 손실과 교반 효율과의 관계에 대한 연구가 필요하다.
- 4) 유체 내 입자 분포 결과를 정량적인 통계 수치인 분산 값과 함께 가시적으로 비교해 본 결과 $n=3.5$ 의 경우가 $n=2.5$ 의 경우에 비해 보다 균일한 입자 분포를 나타냄을 알 수 있다.
- 5) 유체 내 입자 분포 해석을 통한 혼합 특성의 경우, 4가지 케이스 중 $n=2.5$, 90 rpm 및 $n=3.5$, 60 rpm의 경우가 우수한 결과를 나타내었으며, 교반 용기 상/하부의 부분적인 정체 영역을 최소화 할 수 있는 형상 변경에 의한 추가적인 연구가 필요하다.

후 기

본 연구는 교육인적자원부 2단계 BK21 (Brain Korea 21) 사업의 지원 하에 수행하였으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Foucault, S., Ascanio, G. and Tanguy, P. A., 2005, "Power Characteristics in Coaxial Mixing: Newtonian and Non-Newtonian Fluids," *Ind. Eng. Chem. Res.*, Vol. 44, pp. 5036~5043.
- (2) Sek, J. and Kembrowski, Z., 1999, "Helical Screw Rheometer for Measurements in Batch Systems," In *Proceedings of the International Conference on Engineering Rheology*, Zielona Gora, 1999, *Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 4, special issue: ICER '99, pp. 57~62.
- (3) Chuichi Arakawa, 1994, *Computational Fluid Dynamics for Engineering*, University of Tokyo Press, Tokyo.
- (4) Einenkel W.-D., 1980, "Fluid Dynamics of the Suspension Process," *Ger. Chem. Eng.* 3, pp. 118~124.
- (5) Patankar, S. V., 1980, *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, Hemisphere, Washington, D. C.
- (6) *Fluent User's Guide*, 2003, Fluent Inc., Vol. 3, Chap. 22, pp. 20~30.
- (7) Lhota, E., Říha, P. and Mitschka, P., 1980, "Numerical Analysis of the Circulating Flow in a Mixing Vessel with a Draught Tube," in *Acta Technica CSAV*, No. 3, pp. 347~357.