

드래프트 관 장착 나선형 교반장치의 작동 특성 연구

황 정 훈, 김 윤 제*

성균관대학교 기계공학부 대학원, *성균관대학교 기계공학부

A Study on the Operating Characteristics in a Helical Screw Agitator with a Draught Tube

Jung-Hoon Hwang, Youn J. Kim*†

ABSTRACT: Because the mixing efficiency is influenced remarkably by varying the geometrical configurations, the study of flow characteristics inside the agitator is very important. The draught tube in the agitator makes intermixing between the screw and tube by interrupting radial flow, and the helical screw agitator with a draught tube (HSA) is proved more efficient to mix than the others. Consequently, the shapes of helical screw and number of pitches are the main parameters for improving the performance of HSA. In this study, numerical analyses were carried out, using a commercial CFD code, Fluent, to obtain the velocity and pressure distributions under steady, laminar flow and no-slip condition. Results are graphically depicted with various parameters.

Key words: Mechanical Agitator(기계식 교반장치), High Viscosity Fluid(고점성 유체), Helical Screw(나선형 스크루), Draught Tube(드래프트 관)

기 호 설 명	그 리 스 문 자
H_n^* : 무차원 형상 변수 ($n=1, 2, 3$, Fig. 2 참조), $H_1=h_1/r_2$, $H_2=h_2/r_2$, $H_3=h_3/r_2$	ρ : 유체 밀도 [kg/m^3] μ : 유체 점성계수 [N/m-s]
R_n^* : 무차원 형상 변수 ($n=1, 2, 3$, Fig. 2 참조), $R_1=r_1/r_2$, $R_2=r_2/r_2$, $R_3=r_3/r_2$	상첨자
P : 정상상태 압력 [Pa]	$*$: 무차원 변수
r_2 : 특성 형상 변수 (Fig. 2 참조), 드래프트 관 반경	하첨자
t_h : 드래프트 관 ↔ 스크루 간격 [mm]	n : 형상 변화 변수 ($n=1, 2, \dots$)
x_i : 직교좌표계 (Cartesian coordinate) 성분	i : 텐서 표기 (tensor notation)
u_i : x_i 방향 속도 성분 [m/s]	j : 텐서 표기 (tensor notation)

†성균관대학교 기계공학부

Tel.: +82-31-290-7448; fax: +82-31-290-5889

E-mail address: yjkim@skku.edu

1. 서론

우리 주위에서 사용되고 있는 수많은 회전 기계들 중에서 기계식 교반장치는 여러 가지 복잡한 유동 특성을 보이고 있다. 기계식 교반장치는 열 및 물질 전달과 혼합을 위해 산업현장에서 일반적으로 사용되는 장치 중의 하나로 교반 형식에 따라 탱크 교반기와 유동식 교반기로 나뉘는데, 현재는 대부분 탱크 교반기가 사용되고 있다. 탱크 교반기의 구조는 탱크 속에 교반하기 위한 장치를 넣은 것으로서 교반용 날개의 형식에 따라 프로펠러형, 오어형, 터빈형, 나선형 등으로 분류된다. 프로펠러형은 점도가 낮은 액체 또는 고체입자를 함유하고 있는 액체에도 사용되며 오어형은 낮은 점도용에서 제일 간단한 것이다. 터빈형은 원심력을 이용하는 것으로 상당히 효율적이며 나선형은 점도가 높은 대상물의 교반에 사용된다. 교반기 내 유체의 유동도 교반효과에 큰 영향이 있는데, 이는 용기의 모양, 교반기의 모양과 위치, 교반판 (baffle)의 유무 등에 따라 여러 영향을 받게 되며, 일반적으로 교반판이 있는 것이 효과가 좋은 것으로 알려져 있다. 지금까지 교반기 설계는 주로 과거의 경험에 의존하여 왔으나 최근에는 컴퓨터 기술의 발달과 실험 기법의 유효성으로 인해 그 성능에 관한 해석이 보다 수월해지고 있다. 용기 내에서 전체를 균일하게 섞고 부유입자가 적절히 침착하도록 하기 위한 교반작용은 매우 복잡한 메커니즘을 가지기 때문에 그에 대한 체계적인 연구가 필요하다⁽¹⁾.

드래프트 관 내부에서 나선형 임펠러가 회전하는 드래프트 관 장착 교반장치 (이하 Helical Screw Agitator, HSA로 표기)는 종종 고점도의 유체를 혼합하는 과정에 이용된다. Fig. 1은 본 연구에 사용된 3차원 HSA 모델의 개략도를 나타낸 것이다. 교반장치 내 유체 유동은 스크루의 회전에 의해 발생되며 이 중 반경방향 유동 성분이 드래프트 관에 의해 방해받게 되어 순환영역으로 표현되는 드래프트 관 외부 공간에서 전체적으로 순환하는 특성을 가지게 된다⁽²⁾. 이러한 유동 특성은 교반장치 내 혼합 특성을 결정짓게 되며, 유체 유동에 영향을 미치는 많은 요소들 중 대표적인 변수로 스크루 임펠러, 드래프트 관 및 교반 용기의 크기와 형상, 모터 회전수, 그리고 스크루와 드래프트 관 사이 간격 등을 들 수

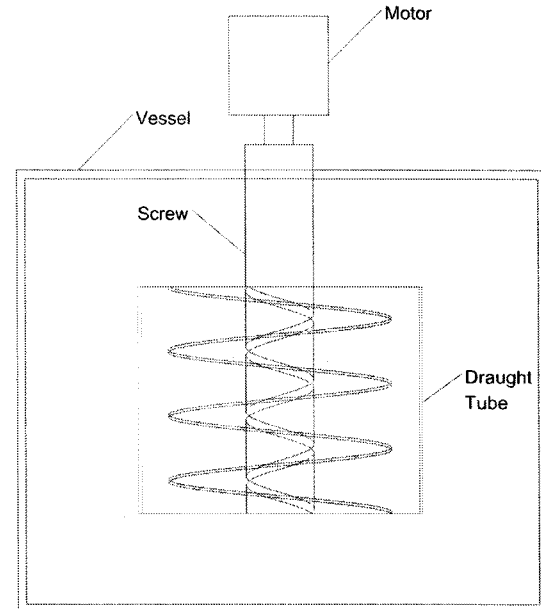


Fig. 1 Schematic diagram of HSA model

있는데, 이들은 기계적 교반장치를 설계하거나 선택하는데 반드시 고려되어야 할 변수라 할 수 있다. 이를 위해 교반기 내부 유동 특성 가시화에 관련된 많은 실험 기법들이 제시되고 있지만 실험 모델의 제작비용과 시간적인 측면에서 여러 가지 제약 조건이 뒤따르는 것이 사실이다. 따라서 이러한 문제점들을 해결하고 변수 변화에 의한 여러 효과와 그에 따른 최적의 설계 변수를 얻기 위해 최근의 진보된 CFD (Computational Fluid Dynamics) 기법이 적용될 수 있다⁽³⁾. 결론적으로, 상기한 여러 어려움과 문제점들을 극복하고 최적의 설계 변수들을 도출해 내는 것이 본 연구의 목표라 할 수 있다.

2. 수치해석

2.1 지배방정식

수치해석에 사용된 지배방정식은 원통형 교반 용기의 순환영역 내 정상상태 유동장의 Navier-Stokes 방정식⁽⁴⁾으로서 다음과 같이 표현된다.

연속방정식 (continuity equation):

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

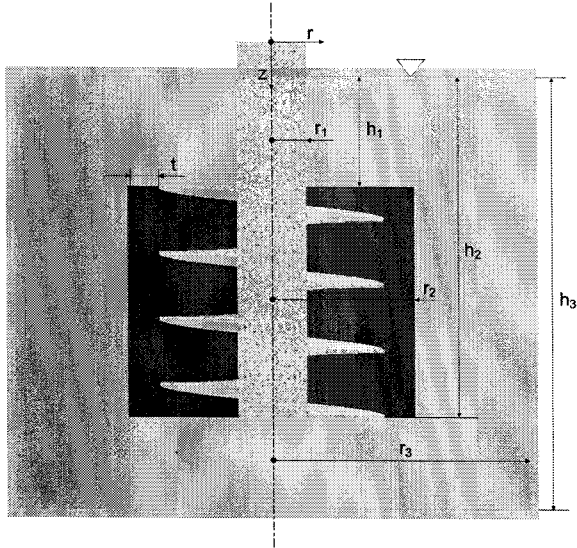


Fig. 2 Geometrical arrangement of an agitator with a draught tube

운동량방정식 (momentum equation):

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

여기서, x_i 는 직교 좌표계 ($i=1, 2, 3$) 성분이고, u_i 는 x_i 방향의 속도이다. p 는 압력, ρ 는 밀도이며 μ 는 점성계수이다.

2.2 모델 및 격자계

해석 모델은 3-D CAD 프로그램인 Inventor를 이용하여 모델링 하였으며, 본 연구에 사용된 주요 기하학적 변수들을 각각 Fig. 2와 Table 1에 나타내었다. 해석 모델은 나선형 스크루 임펠러, 드래프트 관, 외부 용기로 나뉘며 각 변수들의 조합은 2차원 해석을 수행한 선행연구⁽⁵⁾를 바탕으로 이루어졌다. 수치해석에 사용된 3차원 모델은 반경(r_3) 0.09 m인 외부 용기와 반경(r_2) 0.05 m인 원통형 튜브, 그리고 피치 수가 3.5 pitches로 고정된 나선형 스크루 임펠러로 구성되었다.

해석에 사용된 격자계는 본 연구에 사용된 CFD 코드 Fluent의 전처리 프로그램인 Gambit을 이용하여 구성하였으며, Fig. 3에 도시한 바와 같이 비교적 형상이 복잡한 튜브 내부 스크루 임펠러 특성상 비정렬 격자 생성 기법을 적용하였다. 전체적인 격자계를 살펴보면 유동 특성과 계

Table 1 Specification of the HSA model

Arrangement (by definition, $R_2^* \equiv 1$)	$R_1^* = 0.24$, $R_3^* = 1.8$, $H_1^* = 0.7$, $H_2^* = 2.3$, $H_3^* = 3$
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, $r_2=50$) [mm]	$r_1=12$, $r_3=90$, $h_1=35$, $h_2=115$, $h_3=150$ $t_1=1$, $t_2=2$, $t_3=5$

료의 물성에 따라 크게 스크루와 유체의 경계면, 스크루와 튜브의 고체 부분을 제외한 용기 내의 유체 영역으로 구성되었다.

2.3 수치해석 내용

선행 연구⁽⁶⁾에서 얻어진 결과에 의해 본 연구에서는 교반장치의 성능에 영향을 미칠 수 있는 여러 가지 변수들 가운데 스크루의 피치 수는 3.5 pitches로, 회전 속도는 90 rpm으로 하였다. 일반적으로 나선형 리본식 교반장치의 적용 회전수는 점도 50000 cP (50 kg/m-s) 이하에서 10 ~ 60 rpm 정도로 알려져 있으나 본 연구에 사용된 모델의 경우 나선형 임펠러 주위를 둘러싸고 있

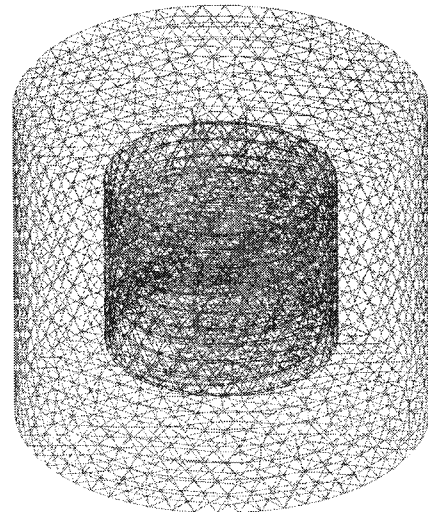


Fig. 3 Grid system of HSA

는 얇은 리본 모양의 띠가 없어 강도 면에서 리본 구조에 비해 우수한 구조이므로 비교적 높은 회전 속도인 90 rpm을 적용하였다.

특히 본 연구에서는 유동 특성 비교를 위한 주요 변수로서 나선형 스크루와 드래프트 관 사이 간격 t_n ($n=1, 2, 3$)을 적용하였으며, 각각 Type 1의 t_1 은 1 mm, Type 2의 t_2 는 2 mm, 그리고 Type 3의 t_3 의 경우는 5 mm로 하였다. 용기 외부로부터 내부로의 유체 유입은 없으며, HSA 시스템 내 유동현상은 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, 점도 = 0.799 kg/m-s, 밀도 = 1259.9 kg/m³)을 사용하였으며, 그 유동 특성에 대해서는 상온으로 가정하여 계산하였다.

수치해석에 사용된 상용 CFD 코드는 Fluent로서, 지배방정식은 유한체적법 (Finite Volume Method)으로 이산화 하였고 모든 해는 SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations) 알고리즘⁽⁷⁾에 의해 계산하였다. 스크루 회전에 의한 유체 유동 특성을 해석하기 위해 MRF (Moving Reference Frame) 기법을 적용하였고 수렴도는 오차 범위 10^{-4} 이하에서 결정되었으며 계산수 약 800 ~ 1000 iterations 범위에서 수렴되었다. 계산시간은 Intel Pentium 4A CPU 2GHz, 1GB memory 환경에서 약 4 ~ 5시간 정도가 소요되었다.

3. 결과 및 고찰

드래프트 관이 장착된 나선형 교반장치의 3차원 해석 모델에 대하여 드래프트 관과 스크루 사이 간격 (t_n)의 변화에 따른 속도, 압력 및 유선 분포에 대한 결과를 고찰하였다. Fig. 4는 교반장치 내 스크루 축을 기준으로 종방향 단면에서의 반경 방향 및 축 방향 속도 성분에 대해 각각 나타낸 그림이다. 속도 성분 분포의 경우 스크루와 드래프트 관 사이 간격의 변화에 의한 영향은 거의 없이 동일한 패턴을 보이는 것을 알 수 있었다. Fig. 4(a)는 교반장치 내 속도 성분 중 반경 방향 (radial) 성분을, Fig. 4(b)는 축 방향 (axial) 성분을 각각 표시한 것인데 그림에서 보는 바와 같이 드래프트 관이 위치한 높이에서는 반경 방향 속도 성분이 거의 나타나지 않음을 알 수 있다. 이는 기존의 선행 연구들에서 예측된 것처럼 교반장치 내부에 드래프트 관이 장착됨으로써 스크루 회전에 의한 유체 유동 중 반경 방향 속도 성분을 방해하여 드래프트 관을 중심으로 전체적인 순환영역을 구성하는 기능을 수행한다는 사실을 입증하는 결과이다.

스크루와 드래프트 관 사이 간격 t_n 에 따른 스크루 축 기준 종방향 단면의 압력 분포를 Fig. 5에 도시하였다. 결과를 살펴보면 t_n 이 증가할수록 전체적인 압력값이 작아지는 것을 알 수 있다. 특히 Type 3 ($t_3=5$ mm)의 경우 Type 1 ($t_1=1$ mm)에 비해 절반 정도의 압력 분포 범위를 나타내는 것을 볼 수 있는데 이는 스크루의 회전에 의해 발생한 유동이 스크루와 드래프트 관 사이

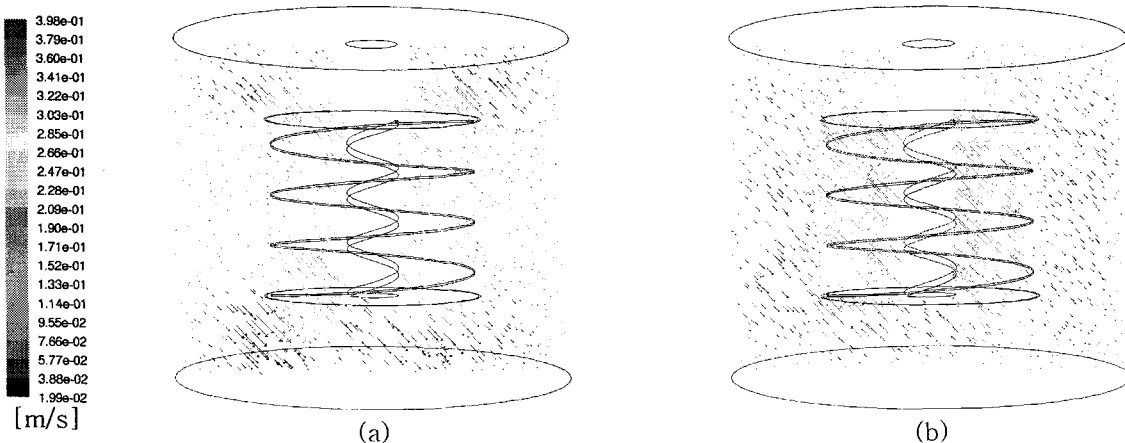


Fig. 4 The function of draught tube : (a) radial velocity component, (b) axial velocity component

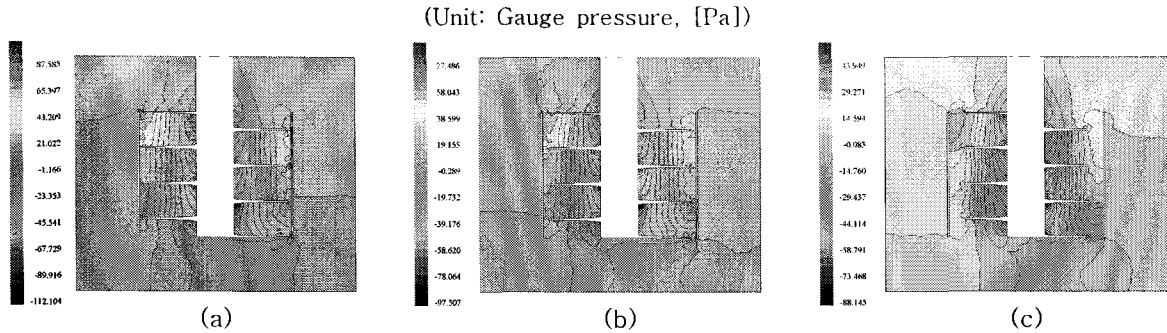


Fig. 5 Effect of gap on the vertical direction of cross-sectional pressure distributions of HSA (a) Type 1 ($t_1=1$ mm), (b) Type 2 ($t_2=2$ mm), (c) Type 3 ($t_3=5$ mm)

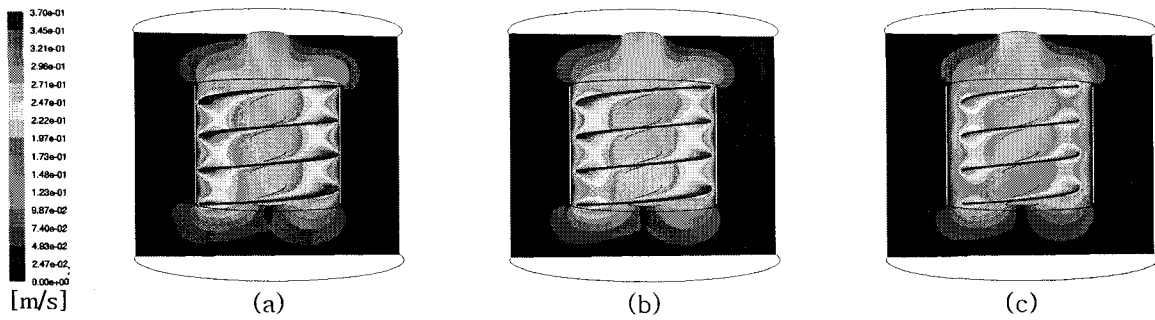


Fig. 6 Effect of gap on the vertical direction of cross-sectional velocity distributions of HSA (a) Type 1 ($t_1=1$ mm), (b) Type 2 ($t_2=2$ mm), (c) Type 3 ($t_3=5$ mm)

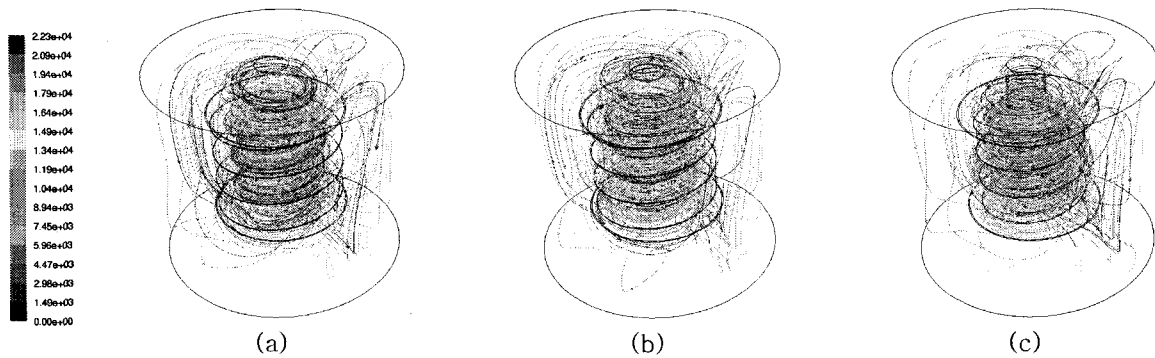


Fig. 7 Streamlines of HSA (a) Type 1 ($t_1=1$ mm), (b) Type 2 ($t_2=2$ mm), (c) Type 3 ($t_3=5$ mm)

를 통과할 때 유동 통로의 크기 차이 때문에 발생한 결과이다. 다시 말해 t_n 이 작은 경우, 즉 유동 통로의 크기가 작을 경우 유체가 통과하는 부분에 부분적으로 비교적 높은 압력이 작용하며 이로써 Fig. 6에 도시된 속도 분포 결과에서 알 수 있듯이 드래프트 관과 스크루 사이를 통과하는 유체의 속도는 증가하게 된다. 따라서 t_n 이 작을수록 순환영역 내 유체의 순환이 보다 활발히 이루어지며 혼합효과가 우수할 것으로 판단된다. 하지만 부분적으로 고압이 작용하기 때문에 고점

도의 유체에 의한 마찰 손실 및 재료 특성에 따른 한계 강도 등을 고려하여 교반 효율을 극대화할 수 있는 최적의 형상 도출을 위한 실험 및 해석적 연구가 필요할 것으로 사료된다.

Figure 7은 t_n 의 변화에 따른 유선 분포를 나타낸 그림이다. 압력 및 속도 분포 결과를 통해 예측한 대로 t_n 이 작을수록 전체적으로 드래프트 관을 중심으로 한 순환영역이 비교적 활발하게 나타나는 것을 알 수 있다. 교반효과를 평가하는 기준이 교반장치 내 전 영역에 걸쳐 정체 구간

없이 고른 혼합 특성을 보이는 것이라 할 때 세 가지 형상 중 Type 1 ($t_1=1\text{ mm}$)의 경우가 가장 우수함을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 고점성 유체의 혼합에 가장 적절하다고 알려져 있는 나선형 교반장치 내부의 유동 특성에 대한 CFD 해석을 수행하여 드래프트 관과 스크루 사이 간격의 변화에 따른 속도, 압력 및 유선 분포에 대한 결과를 구한 후, 이를 통해 드래프트 관 장착 나선형 교반장치의 성능 및 작동 특성을 분석하였으며, 이로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 해석에 사용된 3-D 모델 단면의 반경 방향 및 축 방향 속도 성분 분포 결과를 통해 드래프트 관의 기능을 고찰하였다. 이로부터 드래프트 관에 의해 반경 방향 속도 성분이 가로막혀 전체적으로 관을 중심으로 순환영역을 형성하는 것을 알 수 있었다.

(2) 스크루와 드래프트 관 사이 간격의 변화에 따른 압력 및 속도 분포를 비교한 결과 간격이 작을수록 전체적으로 높은 압력과 속도 범위를 나타내며 이를 통해 순환영역 내 유체의 순환이 더욱 활발할 것으로 판단하였다.

(3) 속도, 압력 및 유선 분포를 종합한 결과 간격이 좁을수록 교반 효과가 우수할 것으로 보이나 부분적으로 높은 압력이 작용되기 때문에 고점도 유체에 의한 마찰 및 재료의 구조적 특성을 고려하여 본 연구에 적용된 나선형 교반장치의 신뢰성 검증 및 교반 효율 극대화를 위한 실험 및 해석적 연구가 필요할 것으로 사료된다.

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, 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, ICER '99, 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. Patankar, S. V., 1980, *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, Hemisphere, Washington, D. C.
5. Lhota, E., Riha, 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.
6. Kim, Y.-J. and Hwang, J.-H., 2006, A Numerical Analysis on the Flow Characteristics in a Helical Screw Agitator with a Draught Tube, in *Proceedings of FEDSM2006-98400*, ASME, Miami, Florida.
7. Versteeg, H. K. and Malalasekera, M., 1995, *An Introduction to Computational Fluid Dynamics the Finite Volume Method*, John Wiley & Sons, New York.