

전산유동해석을 활용한 헬리컬 리본형 교반기 임펠러 설계

윤정의[†]

Design of Helical Ribbon Type Impeller for Agitation Using CFD Analysis

Jeong-Eui Yun

Key Words: Agitation(교반), Helical Ribbon Type Impeller(헬리컬 리본형 임펠러), Optimization(최적화)

Abstract

The agitator is an important industrial instrument widely used for mixing various solutions in the industrial field. In this study, the optimized design of the helical ribbon type impeller, which is mainly used for the stirring of the high viscosity solution, is carried out by CFD analysis. For this purpose, an index for evaluating the agitation performance is newly defined and an optimization design process is performed through a multiphase computational fluid dynamic analysis. From these results, it is understood that the stirring performance is maximized in the case of the helical ribbon impeller under given operating conditions when the width is 7.5 mm, the height is 160 mm and the turn is 1.

1. 서 론

산업현장에서 각종 용액들의 배합, 혼합 등을 위해 폭 넓게 사용되어지고 있는 교반기는 용액의 점도에 따라 다양한 형태의 교반용 임펠러를 사용하고 있다. 이중 헬리컬 리본 형태의 임펠러는 일반적으로 100,000 cP 이상의 고점도 용액의 교반에 사용되는 것으로 지금까지는 주로 경험식에 의존하여 설계를 수행하여왔다⁽¹⁻²⁾. 그러나 최근에는 컴퓨터 기술의 발달로 전산유동해석을 통한 혼합물의 교반 해석을 활용하여 여러 형태의 임펠러 설계에 대한 연구가 진행되어지고 있다⁽³⁻⁶⁾.

고점도 용액의 교반용 임펠러는 주로 저속에서 고 축력으로 회전하면서 용액을 섞어주는 기능을 수행하는 것으로 교반용액의 고점도 특성으로 인해 교반과정 중 표면공기 중 일부가 교반용액 속으로 섞여 들어가는 현

상이 발생하게 된다. 그러므로 전산 유동해석을 통해 임펠러의 교반특성을 규명하기 위해서는 교반과정 중 공기가 유입되는 현상까지를 고려한 다상 유동해석을 수행할 필요가 있다.

본 연구에서는 고점도 용액의 교반에 사용되는 헬리컬 리본 임펠러의 교반성능 최적화 설계를 위해 먼저 교반성능을 평가할 수 있는 지수를 새롭게 정의하고 다상(Multi phase) 전산유동해석을 통해 최적화 설계과정을 수행하였다.

2. 임펠러 교반성능 지수 정의

교반기 임펠러의 교반능력은 교반용액 토출에 기반을 두기 때문에 교반성능 평가를 위해서는 임펠러의 토출 유량을 정의하는 것이 필요하다. 이러한 이유로 지금까지 다양한 형태의 평가 지수가 사용되어지고 있다⁽³⁻⁶⁾. 본 연구에서 개발하고자하는 헬리컬 리본 임펠러는 교반 시 유량을 위쪽으로 밀어내는 역할을 주로 수행한다. 그러나 헬리컬 리본 임펠러의 피치문제로 인해 Z축 방

(Received: 12 Feb 2019, Received in revised form: 13 Mar 2019, Accepted: 14 Mar 2019)

[†]강원대학교 공학대학 기계설계공학과
E-mail : jeyun@kangwon.ac.kr
TEL : (033)570-6368 FAX : (033)570-6399

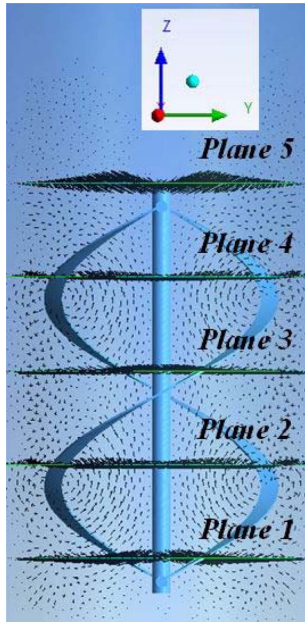


Fig. 1 Definition of planes for calculating Q_f in Eq. (1)

향으로 발생하게 되는 토출유량이 위치에 따라 달라질 수 있다. 이러한 이유로 임펠러의 토출유량(Q_f)은 Fig. 1에서 보여주고 있는 것처럼 비커의 바닥면으로부터 30, 70, 110, 150, 190 mm 떨어진 곳에 위치한 평면에서 위쪽으로 토출되는 속도(\vec{V}_z)를 사용하여 구한 유량을 평균한 값으로 Eq. (1)과 같이 새롭게 정의하였다. 그리고 임펠러의 토출능력은 임펠러 지름(D)과 회전속도(N)에 따라 달라지므로 무차원 유동계수 (Flow Coefficient) N_f 는 아래 Eq. (2)와 같이 정의하여 일반화 할 수 있다. 본 연구에서는 임펠러의 지름(D)과 회전속도(N)를 각각 0.1 m, 0.5 rps로 고정하여 무차원 유동계수를 계산을 수행하였다.

$$Q_f = \frac{1}{5} \sum_{plan1}^{plan5} [\max[V_z, 0] \cdot dA] \quad [m^3/s] \quad (1)$$

$$N_f = \frac{Q_f}{ND^3} \quad [-] \quad (2)$$

교반 중 회전하는 임펠러는 작동유체와의 접촉에 의한 저항을 받게 되므로 일정한 회전을 유지하기 위해 동력을 공급해야한다. 이러한 소비동력은 임펠러의 지름(D)과 회전속도(N) 및 작동유체의 물성 값에 따라 달라지며 이들 값을 적절하게 사용하여 아래 Eq. (3)과 같은 무차원 동력계수(Power Coefficient) N_p 로 표현할

수 있다⁽⁶⁾.

$$N_p = \frac{P}{\rho N^3 D^5} \quad [-] \quad (3)$$

여기서,

P : power, $P = T\omega[W]$

T : torque $[Nm]$

ω : angular velocity $[rad/s]$

ρ : density of fluid $[kg/m^3]$

일반적으로 임펠러의 직경과 회전수를 증가시키면 토출량이 증가하여 교반능력이 향상되지만 이와 함께 소비동력 또한 증가하게 된다. 그러므로 적은 소비동력으로 많은 토출을 할 수 있는 효율적인 임펠러를 선정하기 위해 위의 Eq. (2), (3)에서 표현되는 무차원 계수를 사용하여 임펠러의 교반성능 지수 (Pumping Effectiveness)를 아래와 같이 정의하였으며 이를 사용하여 임펠러 교반성능 최적화 설계를 수행하였다.

$$\eta_p = \frac{N_f}{N_p} \quad [-] \quad (4)$$

3. 임펠러 교반성능 최대화를 위한 최적화 설계변수

Figure 2는 본 연구를 통해 개발하고자 하는 교반용

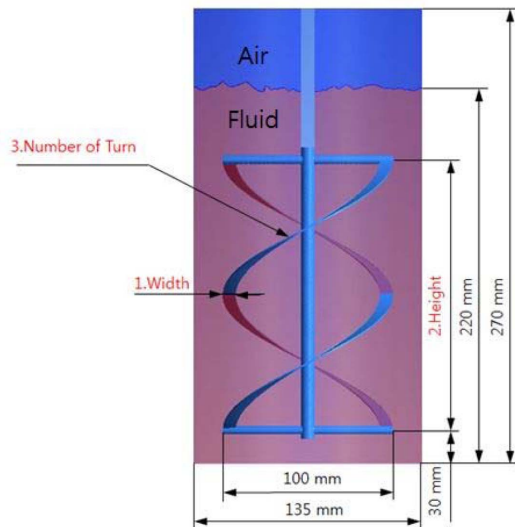


Fig. 2 Definition of optimal design variables in helical ribbon impeller

임펠러 성능 최적화 해석을 위한 주요 설계변수를 나타낸 그림이다. 먼저 교반용액을 담는 비커의 경우는 표준형 톨 비커 ($\phi 135 \text{ mm} \times h280 \text{ mm}$)로 선정하였으며, 이를 기준으로 교반 탱크의 직경은 $\phi 135 \text{ mm}$ 로, 교반용액의 수위는 270 mm 결정하였다. 이로부터 개발하고자 하는 임펠러의 직경과 바닥면으로부터 떨어진 거리는 탱크 벽면과 부딪힘을 고려하여 100 mm 와 30 mm 로 고정하였다.

그리고 교반 성능과 직접적으로 관계하는 주요 변수로 임펠러 날개의 폭(Width), 날개의 길이(Height) 날개의 감긴 수(Number of turn)를 최적화 설계변수로 선정하여 전산유동해석을 통해 교반성능(η_p) 최대를 목적함수로 하는 최적화 설계를 수행하였다. 각각의 최적화 설계 변수들에 대한 해석 범위는 물리적인 측면을 고려하여 아래와 같이 설정하였다.

$$\eta_p = f(P_1, P_2, Turn) \quad (5)$$

- Width [P_1] : $5 \text{ mm} \leq P_1 \leq 25 \text{ mm}$
- Height [P_2] : $100 \text{ mm} \leq P_1 \leq 180 \text{ mm}$
- Turn [$Turn$] : 1, 1.5, 2

최적화 해석은 ANSYS사에서 제공하는 최적화 프로그램인 Design Exploration을 사용하였다⁽⁷⁾. Design Exploration은 실험계획법(DOE : Design of Experiment)에 의해 추출된 해석 점을 바탕으로 최적화 목적함수(Objective Function)를 구성하는 반응 표면(Response Function)을 만들어 목적함수의 최대 및 최소 점을 구하는 방법을 기본으로 하는 최적화 방법이다. 최적화를 위한 첫 번째 단계는 반응표면을 구성하는 최적의 실험계획(해석조건 : 75개 선정)을 수립한 후 각각의 해석조건에 따른 임펠러의 교반성능(η_p)을 전산해석을 통해 구하는 것이다. 그리고 최종적으로는 실험계획에 따라 전산유동해석을 통해 구한 각각의 교반성능 값을 토대로 반응표면을 구성한 후 최대 교반성능을 가지는 임펠러를 최적화 프로그램인 Design Exploration 사용하여 결정하게 된다.

4. 임펠러 교반성능 평가를 위한 전산유동해석 및 고찰

실험계획에 따른 각각의 해석조건에서 임펠러의 교반성능(η_p)을 구하기 위해 Ansys사의 CFX를 사용하여 전

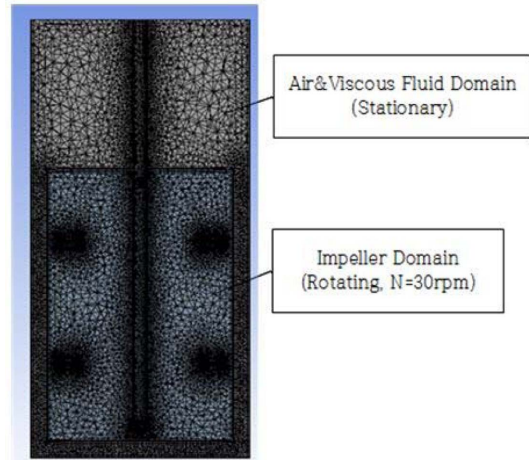


Fig. 3 Computational grid and domains for 3-D simulation

산유동해석을 수행하였다. Fig. 3은 본 해석에 사용된 격자 구조를 보여주고 있다. 대부분의 해석영역은 사면체 격자로 만들었으며, 임펠러 주변으로 구성된 회전영역(Rotating region)과 이를 제외한 고정영역(Stationary region)의 경계면 및 교반기 탱크 벽면에서는 3점의 프리즘 격자를 삽입하여 전체적으로 621만개의 격자로 해석영역을 구성하였다. 대상 교반 액이 200,000 cP의 고점도 용액이므로 $Re=0.056$ 으로 층류상태의 유동현상을 가지게 되므로 층류로 해석을 수행하였으며, 표면의 공기가 회전 시 고점도 용액 속으로 빨려 들어가는 현상

Table 1 Grid information and boundary conditions for 3-D simulation of impeller and vessel

Items	conditions
Total grid cells	6,210,000
Multiphase model	Homogeneous Free Surface Model (Surface tension between air and viscous fluid=0.03[N/m])
Domain	Air&Viscous Fluid (Stationary) Impeller (Rotating, N=30 rpm)
Fluid morphology	Air (continuous fluid) Viscous Fluid (continuous fluid, density=900 kg/m ³ , viscosity=200,000 cP)
Interface model	Frozen rotor
Fluid buoyancy model	Density difference
Turbulence Model	Laminar flow

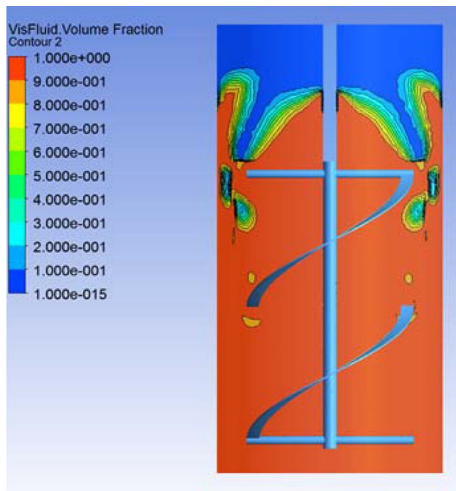


Fig. 4 Distribution of viscous fluid volume fraction

을 고려하기 위해 다상유동(공기+고점도 용액) 모델 중 자유표면을 해석할 수 있는 Homogeneous Free Surface Model을 해석에 적용하였다⁽⁸⁾. 그리고 기타 해석에 사용한 주요 모델과 해석조건은 Table 1에 표기하였다.

Figure 4는 전산유동해석을 통해 계산한 고점도 용액의 체적분율(Volume fraction) 모습으로, 헬리컬 리본 임펠러를 사용하여 30 rpm으로 교반할 때 표면의 공기 일부가 용액 속으로 섞여 들어가 휘저어지고 있는 현상을 확인할 수 있다.

Figure 5는 헬리컬 리본 임펠러의 설계변수인 날개폭과 길이를 제한조건인 $5\text{ mm} \leq P_1 \leq 25\text{ mm}$, $100\text{ mm} \leq P_2 \leq 180\text{ mm}$ 범위에서 바꾸었을 때 임펠러의 토출 능력을 나타내는 무차원 유동계수 (N_f)의 변화를 Eq. (2)를 사용하여 계산한 반응표면이다. 그림을 살펴보면 먼저 임펠러의 날개의 폭 경우 가장 토출량이 큰 값을 가지는 점이 주어진 해석범위의 중간 부분에 존재한다는 것을 확인할 수 있다. 그리고 날개의 길이 경우 토출유량과의 관계는 날개의 폭과는 달리 두 개의 정점을 갖는 형태를 보이고 있다. 그리고 이러한 경향은 임펠러의 감긴 수에 상관없이 모두 동일한 형태를 보이고 있음을 확인할 수 있다. 이러한 성질과 더불어 임펠러의 토출 능력측면에서는 임펠러의 높이(Height)가 폭(Width)보다 더 큰 민감도를 가지고 있음을 확인할 수 있으며, 날개의 감긴 수가 증가할 경우 오히려 토출능력이 감소한다는 것을 보여주고 있다. 특히 날개의 감긴 수가 증가할수록 토출능력이 감소하는 현상은 일정회전수로 회전하는 임펠러의 날개 감긴 수가 증가할 경우 Z방향으로

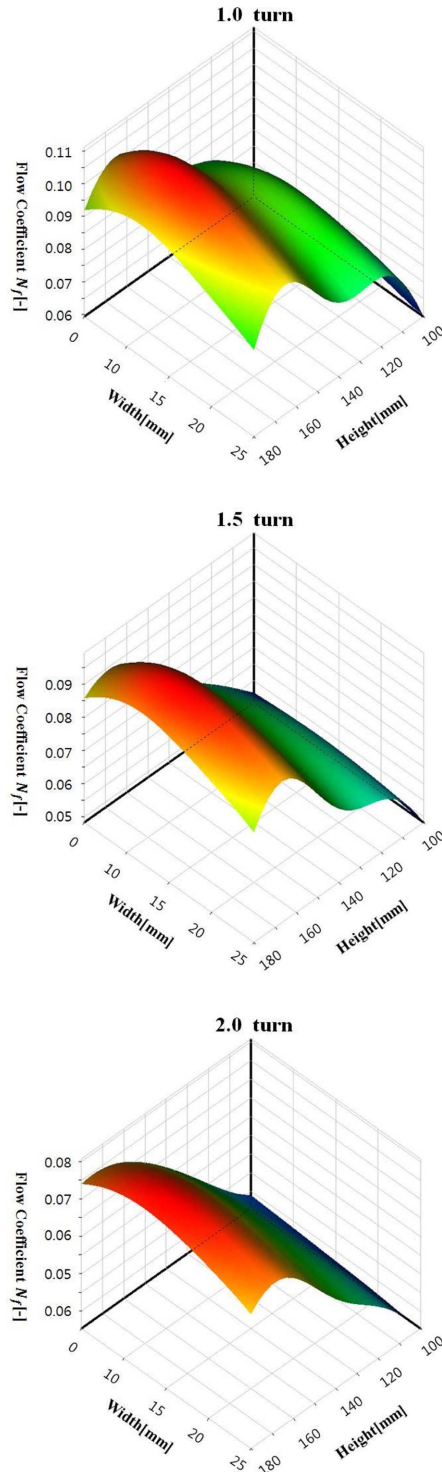


Fig. 5 Response surface of flow coefficient N_f as function of width and height of impeller for each turn (Rotational speed=30 rpm, Fluid viscosity=200,000 cP).

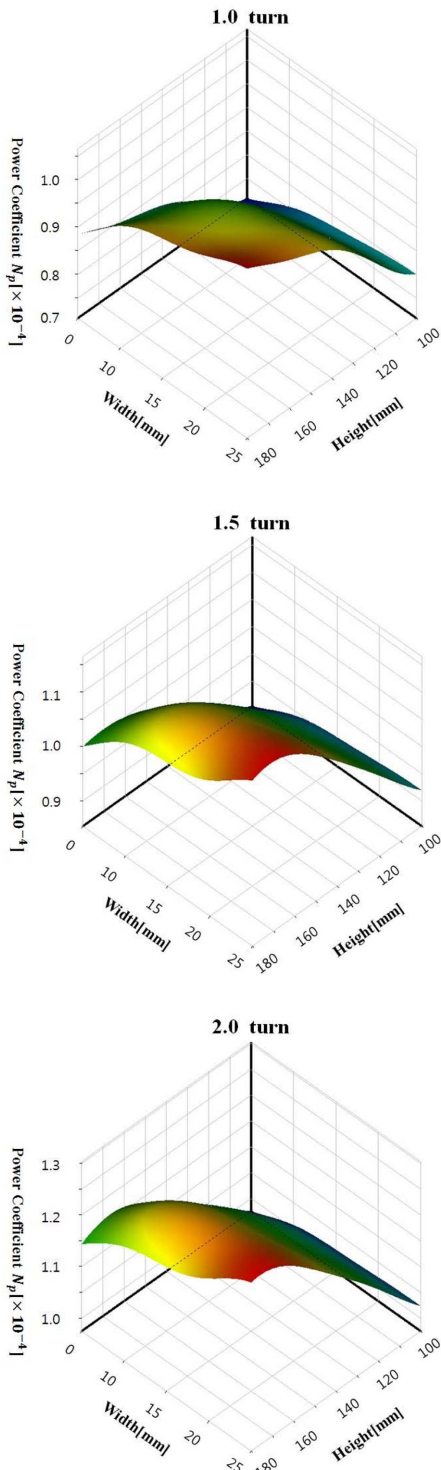


Fig. 6 Response surface of power coefficient N_p as function of width and height of impeller for each turn (Rotational speed=30 rpm, Fluid viscosity=200,000 cP)

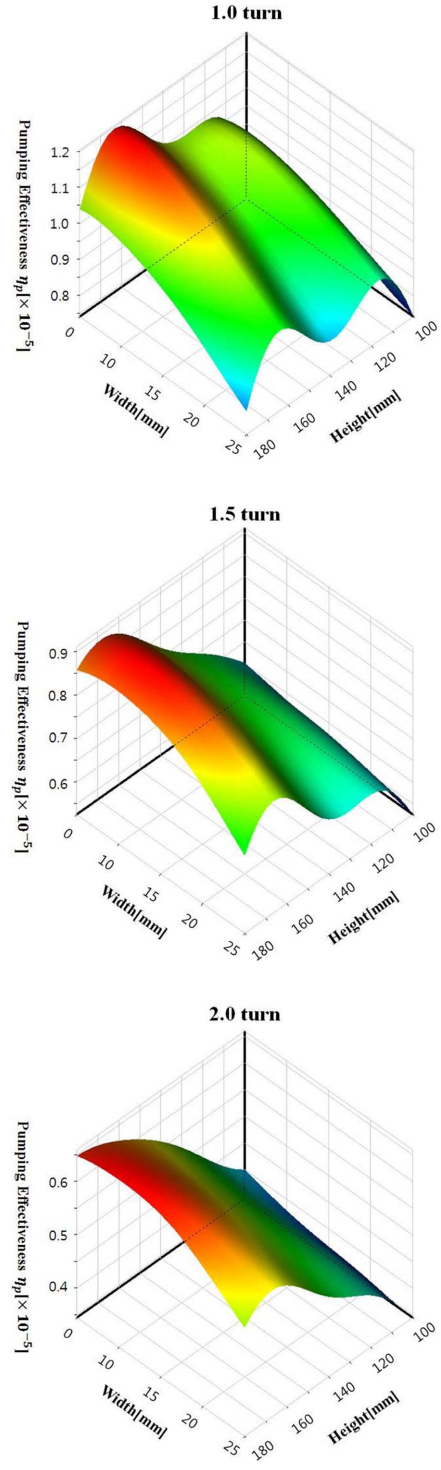


Fig. 7 Response surface of pumping effectiveness η_p as function of width and height of impeller for each turn (Rotational speed=30 rpm, Fluid viscosity=200,000 cP).

피치가 감소하기 때문이라 여겨진다.

Figure 6은 임펠러의 날개폭, 길이 및 감긴 수를 변화시켰을 때 임펠러 축 토크의 변화를 표현하는 무차원 동력계수(N_p)를 Eq. (3)을 사용하여 계산한 반응표면 결과이다. 계산 결과를 살펴보면 임펠러의 날개폭, 길이 및 감긴 수가 커지거나 증가하면 이와 더불어 동력계수 또한 증가하는 경향을 확인할 수 있다. 이러한 이유는 날개폭과 길이가 증가할 경우 교반 용액과의 접촉 면적이 증가하므로 점도 저항 또한 증가하기 때문이다.

Figure 7은 (4)식을 사용하여 최적화 설계변수 값들의 변화에 따른 교반성능(η_p)을 계산한 반응표면 결과이다. 교반성능은 얼마나 적은 에너지를 사용하여 효율적으로 교반기의 용액을 토출하는가를 나타내는 일종의 교반기용 임펠러 효율과 같은 값으로 최적화 목적함수로 사용하였다. 교반성능 측면에서 계산 결과를 살펴보면 날개의 폭은 다소 작은 경우가, 그리고 길이의 경우는 다소 긴 영역에서 최고의 값을 가지고 있음을 확인할 수 있다. 그리고 날개의 감긴 수 경우 작은 값을 가지는 것이 오히려 유리하다는 것을 보여주고 있다.

최종적으로 Fig. 7에서 보여주는 반응표면을 바탕으로 ANSYS사에서 제공하는 최적화 프로그램인 Design Exploration을 사용하여 교반성능(Pumping effectiveness) 최대화를 목적함수로 하는 최적화 계산을 수행하였으며, 이로부터 주어진 운전조건에서 고점도 용액 교반용으로 사용되는 헬리컬 리본 임펠러의 경우, 폭(Width)=7.5 mm, 높이(Height)=160 mm 그리고 감긴 수(Turn)=1일 때 교반성능이 최대화가 됨을 확인하였다.

5. 결 론

본 연구는 고점도 용액의 교반에 사용되는 헬리컬 리본 임펠러의 교반성능 최적화 설계를 위해 수행한 연구이다. 본 연구를 수행함에 있어 교반성능을 평가할 수 있는 지수를 새롭게 정의하고 다상(Multi phase) 전산유동해석을 통해 이들 값을 계산하여 구성된 반응표면을 사용하여 최적화 설계과정을 수행하였다. 이러한 일련의 연구 과정을 통하여 아래의 결론을 얻었다.

1. 임펠러 설계 변수들 중 폭(Width)과 높이(Height)는 임펠러의 교반성능에 매우 민감한 설계변수임을 확인하였다.

2. 날개의 감긴 수는 증가할수록 교반성능이 감소하는 현상을 보이는데, 이는 일정회전수로 회전하는 임펠러의 날개 감긴 수가 증가할 경우 Z방향으로 피치가 감소하여 토출유량이 감소하기 때문이다.

후 기

본 연구과제는 2017년도 강원대학교 대학회계 학술연구비로 연구하였음(No.620170020).

참고문헌

- (1) K. Takahashi, M. Sasaki, K. Arai and S. Saito, "Effects of Geometrical Variables of helical Ribbon Impellers on Mixing of Highly Viscous Newtonian Liquids", *J. of Chemical Engineering of Japan*, Vol. 15, No. 3, 1982, pp. 218~224.
- (2) L. S. Perse and M. Zumer, "Mixing and Viscosity Determinations with Helical Ribbon Impeller", *Chem. Biochem. Eng.* Vol. 14, No. 4, 2004, pp. 363~371.
- (3) D. Garcia-Cortes, E. Ferrer, and E. Barbera, "Hydrodynamic Characterization of the Flow induced by a Four-Bladed Disk-Style Turbine", *Chemical Engineering Research and Design*, Vol. 79, Part A, 2001, pp. 269~273.
- (4) Y. Choi, J. Choi, D. Kim and N. Hur, "A Numerical Analysis on Mixing Performance for Various Types of Turbine Impeller in a Stirred Vessel", *Korean Society Computational Fluids Engineering*, Vol. 16, No. 1, 2013, pp. 47~55.
- (5) H. Ameer, Y. Kamla and D. Sahel, "Performance of Helical Ribbon and Screw Impellers for Mixing Viscous Fluids in Cylindrical Reactors", *ChemEngineering*, 2018.
- (6) A. A. Rashed, Y. S. Fangary and N. A. Mahmoud, "Apparent Viscosity Mixing Index Using CFD Computations for Non-Newtonian Fluids Using Helical Ribbon Impeller", *Journal of Engineering Sciences*, Vol. 39, No. 4, pp. 827~838, 2011.
- (7) ANSYS Workbench DesignXplorer User's Guide, Release 18.2.
- (8) ANSYS CFX-Solver Modeling Guide, Chapter 12, Release 18.2.