

Helical Ribbon Impeller의 중심축과 스트럿이 혼합성능에 미치는 영향

고승태[†]

동양대학교 산학협력단
36040 경북 영주시 풍기읍 동양대로 145
(2022년 1월 19일 접수, 2022년 2월 21일 수정본 접수, 2022년 2월 23일 채택)

Effect of Helical Ribbon Impeller's Center Shaft & Lateral Supporting Struts on Mixing Performance

Seung-Tae Koh[†]

Industry-Academy Cooperation Foundation of Dongyang University, 145 Dongyangdae-ro, Punggi-eup, Yeongju-si, Gyungbuk, 36040, Korea

(Received 19 January 2022; Received in revised from 21 February 2022; Accepted 23 February 2022)

요 약

헬리컬 리본 임펠러 교반조의 중심축과 헬리컬 리본을 지지하는 스트럿의 영향을 실험과 가시화를 통하여 검토한 결과, 액위 변화에 따른 불안전 혼합부의 발생 등 혼합성능에 크게 악영향을 미치는 것은 종 방향의 중심축이 아니라 횡 방향의 스트럿임을 밝혔다.

Abstract – The influence of the central axis and the strut supporting the helical ribbon was investigated in a helical ribbon impeller mixing tank through experiments and visualization. As a result, the strut, which is in the transverse direction, turned out to have a significant adverse effect on the mixing performance such as the occurrence of incomplete mixing region from the change of the liquid level. In contrast, the central axis, which in the longitudinal direction, did not show much adverse effects.

Key words: Mixing, Agitation, Struts, Helical ribbon impeller, Liquid depth

1. 서 언

화학 및 식품 산업에서 취급되는 대부분의 고점도 액체는 비뉴턴 액체이며, 이러한 고점도 액체의 교반에 주로 사용되는 교반 날개가 헬리컬 리본 임펠러나 앵커 임펠러로, 앵커 임펠러는 교반조 벽 부근 교반에 효과가 높아 교반조 벽면의 전열성능의 개선에는 효율적이나 교반조 전체의 혼합성능은 헬리컬 리본 임펠러에 비교해 크게 낮으므로, 전반적으로는 헬리컬 리본 임펠러가 폭넓게 사용되고 있다. 일반적으로 헬리컬 리본 임펠러의 구조는 회전력을 주는 중심축과 헬리컬 리본 및 중심축으로부터 헬리컬 리본을 지지하는 스트럿으로 구성되며, 교반조 바닥이 디쉬형일 때 바닥 부근의 혼합성능을 높이기 위해 바닥교반자를 붙이기도 한다. 헬리컬 리본날개를 이용한 교반조에 대한 연구는 대부분이 혼합시간[1], 교반소요

동력[2], 전열 성능[3] 등 장치의 조작 특성에 관해 이루어져 왔다. 이러한 연구의 결과는 교반조의 설계에는 유용한 자료가 될 수 있으나, 새로운 형태의 임펠러를 개발하는 데는 도움이 되지 않는다.

근년에는 헬리컬 리본 임펠러의 구조적 형상에 대한 연구도 진행되었으며[4], 그 중에는 중심축 및 중심축과 헬리컬 리본을 연결하는 스트럿이 교반에 미치는 영향에 대한 연구가 보고되었다. Takata 등[4]은 중심축의 유무에 있어서의 유동 혼합특성에 관한 연구를 통해 중심축이 혼합성능에 악영향을 미친다고 발표하였다. Kato 등[5]은 액을 스트럿이 있는 높이까지 채운 경우, 도넛 링 모양의 혼합불량부가 형성되어 스트럿이 혼합성능에 악영향을 미친다는 것을 발표한 반면, Martin 등[6]은 수치 시뮬레이션을 통해 스트럿이 혼합 성능에 기여한다고 발표하였다. 본 연구에서는 교반조 내의 유동상태의 가시화를 통하여 중심축과 스트럿이 혼합성능에 미치는 영향을 명확히 하여, 새로운 형태의 임펠러를 개발하는데 가이드를 제공하고자 한다.

2. 실험 장치 및 실험방법

교반조는 내경이 150 mm인 아크릴 재질의 10% 접시바닥형 원

[†]To whom correspondence should be addressed.

E-mail: kohnet@dyu.ac.kr

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

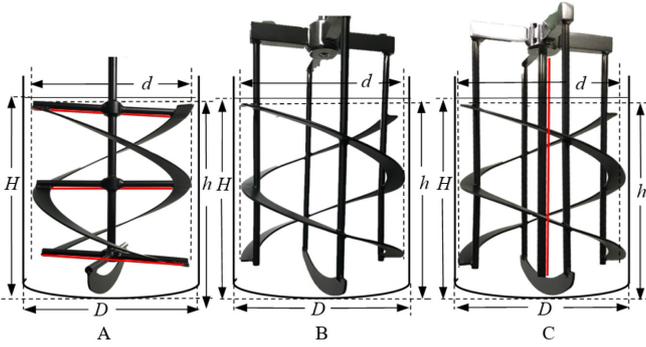


Fig. 1. Photograph of helical ribbon impeller type A, B and C.

Table 1. Experimental conditions

	Re [-]	μ [Pa·s]	N [s ⁻¹]
(a)	10	1.8	0.1617
(b)	5	3.8	0.65
(c)	1	9.1	0.3

통조에 지름이 145 mm, 높이는 165 mm인 헬리컬 리본 임펠러를 사용하였다. 실험에 사용한 3가지 형태의 헬리컬 리본 임펠러는 Fig. 1에 나타냈다. A type은 통상 사용하는 중심축에 서포팅 스트럿(supporting struts)으로 헬리컬 리본 임펠러를 고정시킨 형태이고, B type은 중심축과 스트럿을 없애고 외곽 프레임으로 헬리컬 리본 임펠러를 고정한 형태이며, C type은 B type에 중심축을 추가한 구조의 헬리컬 리본 임펠러이다. 액은 뉴턴 유체로 여러 가지 점도로 조절된 물엿 수용액을 사용하여, 액위를 액 높이와 교반조 지름 비인 H/D를 0.3~1.1까지 변동하였다. 물성 및 교반 레이놀즈수 등의 조건은 Table 1에 나타냈다.

교반 소요 동력은 토크 미터(SATAKE ST-3000)로 토크를 측정하였으며, 그 평균 토크를 이용하여 $P = 2\pi nT$ 로 구하였다. 혼합 시간의 측정 및 혼합 과정의 관찰에는 가장 일반적으로 사용하는 요오드(I₂)-요오드 칼륨(KI) 수용액과 싸이오황산나트륨 수용액을 이용한 탈색법을 사용하였다.

3. 실험 결과와 고찰

3-1. 교반 소요 동력

Fig. 2의 동력선도에 나타난 바와 같이, 중심축이나 스트럿의 유무에 따른 교반 소요 동력에는 거의 차이가 없었으며, Kamei 등[7]에 의해 보고된 Eq. (1)과 잘 일치하는 것으로부터 데이터는 타당하다고 보았다.

$$N_p Re = 8n_p + 75.9z(n_p/\sin\alpha)^{0.85}(h/d)[0.157 + \{(n_p/\sin\alpha) \ln(D/d)\}^{0.611}] \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{여기서, } z &= 0.759[(n_p/\sin\alpha) \ln\{d/(d-2w)\}]^{0.139} \{n_p \ln(D/d)\}^{0.182} n_p^{0.17} \\ \sin\alpha &= \{1 + (\pi d/s)^2\}^{-0.5} \end{aligned}$$

3-2. 혼합성능

Fig. 3에 액 깊이에 따른 층류역의 3가지 교반 레이놀즈수에 대한 무차원 혼합 시간의 비교 결과를 나타냈다. $N \cdot t_m$ 의 측정 결과를 x축에 H/D를 y축에 나타냈으며, A type인 경우의 스트럿 위치를 알 수

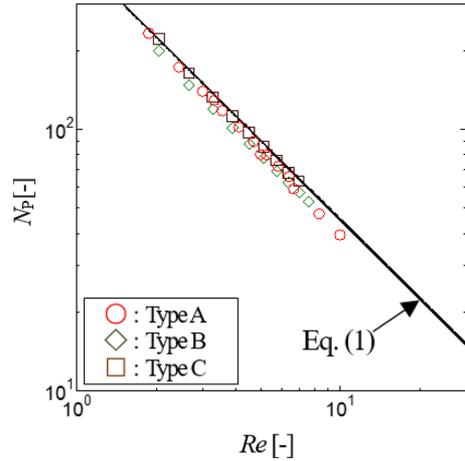


Fig. 2. Power diagram of helical ribbon.

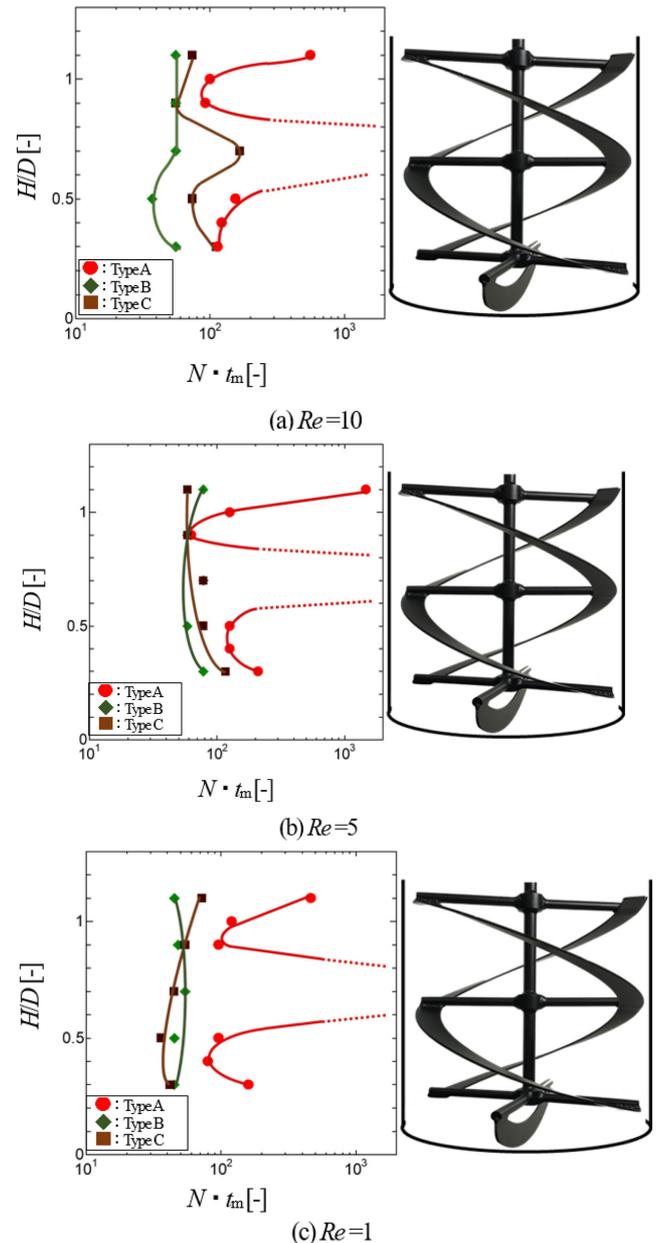


Fig. 3. Effect of non-dimensional mixing time on liquid depth.

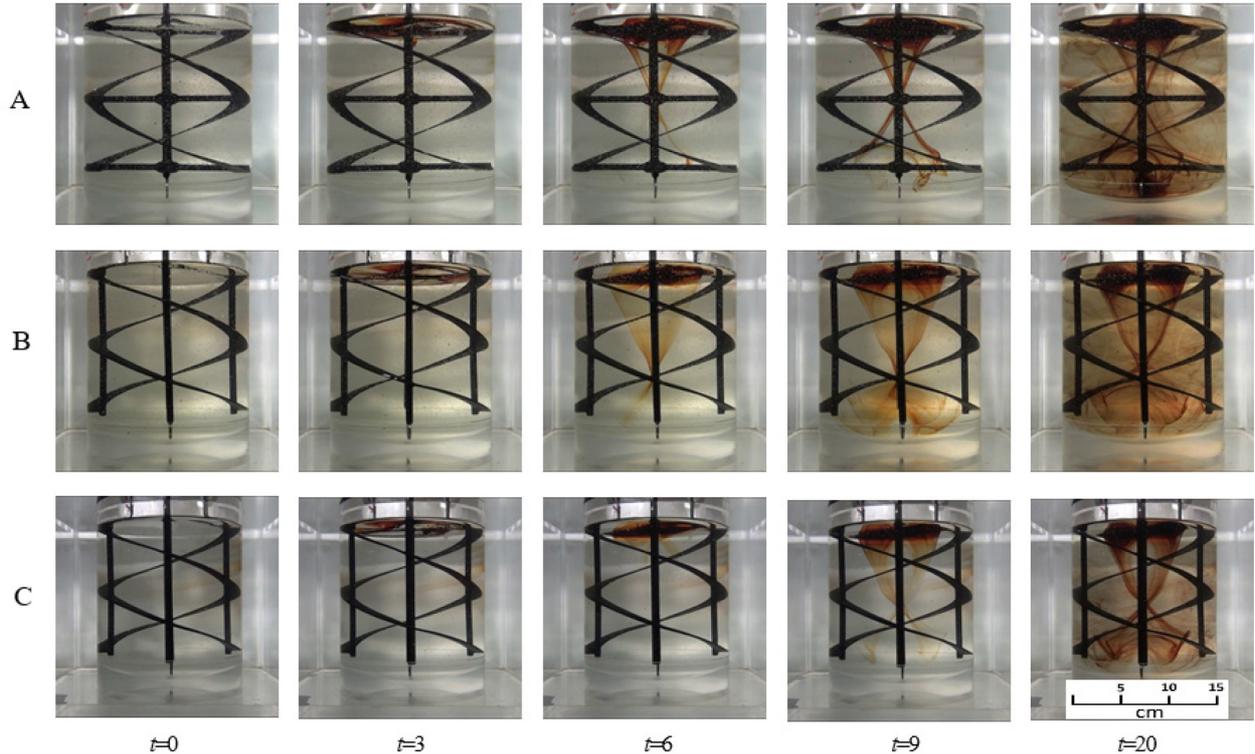


Fig. 4. Streak line of type A, B and C ($Re=5$, $H/D=1.1$).

있도록 교반조 단면 그림을 액 높이에 맞추어 나타냈다. Fig. 3(a)에 나타낸 바와 같이 $Re=10$ 일 때는 거의 모든 액 높이에서 type B, C, A의 순으로 무차원 혼합 시간이 긴 것으로 나타났으며, 특히 액 높이가 $H/D=0.7$ 일 때 그 차이가 컸다. 그러나, Fig. 3(b), (c)에 보이는 바와 같이 레이놀즈수가 5, 1로 작아짐에 따라 type B와 C사이의 차이는 거의 관찰되지 않아, 중심축이 무차원 혼합시간에 거의 영향을 미치지 않는 것을 보여준다. 반면, A type에 있어서는 스트럿의 부근인 $H/D=0.3, 0.7, 1.1$ 에서 무차원 혼합시간이 크게 길어져 스트럿이 헬리컬 리본 임펠러의 혼합성능에 크게 악영향을 미친다는 것을 보여준다.

Takata 등[6]은 중심축의 악영향이 크다는 것을 수치해석의 결과로 제시하였고, Martin 등[8]은 수치 시뮬레이션으로 헬리컬 리본을 지지하는 스트럿이 혼합 성능에 기여한다고 하였으나, 본 실험에서는 중심축의 유무가 혼합성능에 거의 영향을 주지 않았고, 스트럿은 크게 악영향을 미치는 것으로 나타났다. 그래서 종합적인 평가를 위해 혼합시간에 대한 실험 외에 수치해석과 마찬가지로 혼합 초기부터 교반조 내의 유동상태를 관찰하기 위해 유맥(流脈)의 가시화를 시도하였다.

Fig. 4에 헬리컬 리본 임펠러 type A, B, C의 유맥 패턴의 가시화 결과를 나타냈다. 혼합 초기에는 스트럿이 없는 type B에서 착색액이 빠르게 교반조 바닥에 도달하는 것으로부터 스트럿의 악영향을 확실히 알 수 있다. 그러나 그림 우측 사진에서 보이는 것처럼 임펠러 회전 주기가 $t=20$ 로 커지면, type B와 type C에서의 유맥 확장 패턴이 거의 유사하게 나타나는 것으로부터, 중심축의 유무가 혼합 시간에 별 영향을 미치지 않는 것으로 판단할 수 있다.

4. 결 론

헬리컬 리본 임펠러를 사용한 교반조의 혼합성능은 중심축의 유무보다는 헬리컬 리본을 중심축에 고정하는 스트럿이 더 큰 악영향을 미치는 것이 밝혀져, 헬리컬 리본 임펠러의 형상학적 개발은 스트럿을 없애는 구조가 바람직한 것으로 보인다.

Nomenclature

D	: vessel diameter [m]
d	: impeller diameter [m]
H	: liquid depth [m]
h	: height of impeller blade [m]
N	: impeller rotational speed [s^{-1}]
NP	: power number ($=P/\rho n^3 d^5$) [-]
np	: number of impeller blade [-]
P	: power consumption [W]
Re	: impeller Reynolds number ($nd^2\rho/\mu$) [-]
T	: shaft torque [$N\cdot m$]
t	: impeller rotational period [-]
tm	: mixing time [s]
μ	: liquid viscosity [$Pa\cdot s$]
ρ	: liquid density [$kg\cdot m^{-3}$]

감 사

이 논문은 2021년도 동양대학교 학술연구비의 지원으로 수행되었음.

References

1. Tsui, Y.-Y. and Hu, Y.-C., "Flow Characteristics in Mixers Agitated by Helical Ribbon Blade Impeller," *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, **5**(3), 416-429(2011).
2. Carreau, P. J., Chhabra, R. P. and Cheng, J., "Effect of Rheological Properties on Power Consumption with Helical Ribbon Agitators," *AIChE Journal*, **39**(9), 1421-1430(1993).
3. Shamlow, P. A. and Edwards, M. F., "Heat Transfer to Viscous Newtonian and Non-Newtonian Fluids for Helical Ribbon Mixers," *Chem. Eng. Sci.*, **41**, 1773-1781(1986).
4. Takata, K., Ito, H., Kikuchi, M. and Okamoto, Y., "Effects of Blade Width, Blade Pitch and Frame Dimensions on Flow and Mixing Characteristics in a Stirred Tank with Double Helical Ribbon Impeller," *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **25**, 887-892(1999).
5. Kato, Y., Nemoto, T., Ago, K., Arai, T., Furukawa, H. and Kato, Y., "Mixing Performance of LR500 Impeller for Highly Viscous Fluid," *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **44**(6), 346-349(2018).
6. Martin Robinson, Cleary, P. W., "Flow and Mixing Performance in Helical Ribbon Mixers," *Chemical Engineering Science*, **84**, 382-398(2012).
7. Kamei, N., Hiraoka, S., Kato, Y., Tada, Y., Kuwabara, S., Lee, Y. S., Yamaguchi, T. and Koh, S. T., "Development of Power Correlations for Various Impellers in an Agitated Vessel in Laminar Region Based on a Numerical Analysis of 2-D flow," *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **20**, 595-603(1994).

Authors

Seung-Tae Koh: Professor, Industry-Academy Cooperation Foundation, Dongyang University, Yeongju-si, Gyungbuk, 36040, Korea; kohnet@dyu.ac.kr