

교반조 바닥의 방해판이 유동특성 및 입자부유에 미치는 특성

이영세*

¹경북대학교 나노소재공학부

Characteristic of flow pattern and Particle Suspension in a Bottom Baffled Agitated Vessel

Young-Sei Lee^{1*}

¹School of Nano & Materials Science and Engineering, Kyungpook National University

요약 교반조 바닥에 방해판이 부착된 경우 유동특성 및 입자부유특성을 실험적으로 연구하였다. 입자의 유동상태는 교반조 바닥 중심으로부터 상승류가 증가하였다. 입자부유 실험으로부터 에크만 경계층의 발달에 의해 입자부유가 촉진됨을 알았다. 본 실험범위 내에서의 임펠러 및 교반조 바닥 방해판의 최적조건을 다음과 같이 나타내었다.

교반임펠러 최적조건 : $n_p = 6$, $d/D = 0.5$, $b/d = 0.3$, 교반조 바닥 방해판 최적조건 ; $n_b = 6$, $d_b/D = 0.5$, $b_w/D = 0.05$

Abstract This study examined experimentally the characteristics of the flow pattern and particle suspension in an agitated vessel with a bottom baffle. A flow pattern of the particles was shown to increase the upward flow from the center of the agitated vessel bottom. The suspended particles from the experiment found that the particle suspension was promoted by the development of an Ekman boundary layer. The optimal conditions of the impeller, and the agitated vessel bottom baffle within the experimental range were as follows: Impeller, $n_p = 6$, $d/D = 0.5$ and $b/d = 0.3$; and bottom baffle, $n_b = 6$, $d_b/D = 0.5$ and $b_w/D = 0.05$

Key Words : Agitated vesel, Bioreactor, Bottom baffle, Flow pattern, Particle suspension

1. 서론

최근 바이오기술의 발전에 따라 세포의 손상이 없는 정도의 저 전단에서 양호한 혼합과 충분한 산소공급을 가지는 상반된 조건을 만족하는 반응기가 요구되고 있다. 특히 의약품, 식품 등의 제조현장에서 교반조형 반응기는 교반임펠러 부근에서 고 전단이 발생할 가능성 때문에 지금까지 일반적으로 임펠러를 이용한 교반조형 반응기를 이용하기는 쉽지 않다.

여러 가지 종류의 임펠러 및 교반용기를 이용한 교반조작에 관한 연구는 지금까지 많이 이루어져 왔고[1-7] 또한 임펠러를 이용하지 않는 교반조작에 대해서는

static mixer, jet식 혼합용기[8-12]에 대한 정량적 보고가 일부 있으나 공기 주입에 의해 기포의 과열로 국소적 고 전단 영역이 발생하여 동, 식물 세포에 큰 테미지를 주어 생산성이 떨어지는 문제점이 있다. 이러한 문제를 해소하기 위하여 진동교반의 특성을 살리면서 대형화도 가능한 생물반응기를 개발하기 위한 기초자료로 제공하기 위해 실험적으로 여러 특성을 규명할 필요가 있다. 이를 규명하기 위하여 교반용기 바닥에 방해판을 설치하여 임펠러를 저 회전으로 조작하여 혼합특성을 이미 규명한[13] 결과 교반용기 바닥에 방해판을 부착함으로써 혼합시간이 감소하였고 이것은 교반용기 바닥의 방해판이 일반적인 방해판과 마찬가지로 교반용기 중심에 형성된 고체부

본 논문은 경북대학교 2013년도 연구과제로 수행되었음.

*Corresponding Author : Young-Sei Lee(Kyungpook National Univ.)

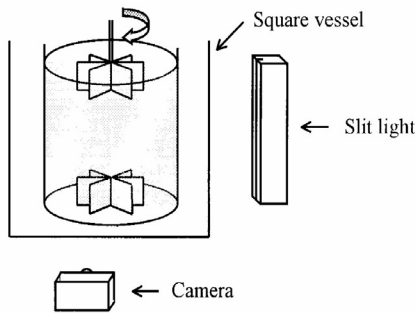
Tel: +82-54-530-1334 email: ysl@knu.ac.kr

Received September 4, 2014 Revised (1st September 23, 2014, 2nd October 7, 2014) Accepted February 12, 2015

피 회전부를 감소시키는 역할을 하였음을 알 수 있었다. 또한 혼합성능의 측면으로부터 보아도 교반용기 바닥의 방해판이 유효성이 증명되었다. 따라서 본 연구에서는 저 전단 교반조형 반응기로서 교반용기 바닥에 방해판을 설치하여 교반 임펠러를 저 회전으로 조작하는 경우 여러 가지 특성 즉, 유동특성 및 입자부유특성에 대하여 실험적으로 검토하여 생물반응기로서의 가능성에 대해 평가하였다.

2. 실험 장치 및 방법

유동특성에 대한 실험 장치를 Fig. 1에 나타내었다. 실험 장치는 혼합특성에서 연구한 실험장치와 같은 장치를 이용하였다[13]. 교반 임펠러는 패들 임펠러를 이용하였고 교반용기 바닥의 방해판도 패들 형상의 방해판을 이용하였다. 패들형상의 방해판을 사용한 것은 예전부터 가장 많이 사용한 전통적인 임펠러이고 또한 일반적인 교반용기에서 방해판의 형태가 직사각형 형태를 가지고 있어 이와 유사한 형태를 고려하였다.



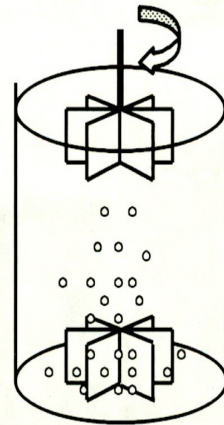
[Fig. 1] Schematic diagram of flow pattern experimental apparatus.

교반 임펠러는 액 자유표면 부근에 설치하고 방해판은 교반용기 바닥에 완전 밀착하여 설치하였다. 먼저 유동특성에 대한 실험방법은 교반조의 흐름에 대해 일반적으로 잘 이용하고 있는 알루미늄 입자 추적자 주입법[2, 11, 14-16]을 이용하여 사진촬영을 하였다. 촬영은 슬릿 빛의 굴절을 막기 위해 교반용기를 각조에 넣어 촬영하였다. Table 1에 유동특성에 대한 실험조건을 나타내었다. 실험에 사용한 교반 액으로는 수돗물을 사용하였다.

[Table 1] Experimental conditions of flow pattern

Vessel	$D=17cm$
Impeller	$n_p=6, d/D=0.4, b/d=0.3$
Bottom baffle	$n_b=6, d_b/D=0.4, b_w/D=0.55$
Shutter speed	1s
Diaphragm	2.8, 4.0

여기서 D , d 및 b 는 각각 교반용기 직경, 임펠러 직경 및 임펠러 날 폭을 나타낸 것이다. 또한 n_b , d_b , b_w 는 각각 교반용기 바닥 방해판의 날 매수, 방해판 직경, 방해판 날 폭을 나타낸 것이다.



[Fig. 2] Schematic diagram of particle suspension experimental apparatus.

입자부유특성에 관한 실험은 교반용기 바닥의 방해판이 입자부유에 미치는 영향을 명확히 하기 위해 추적자로서 이온교환수지($d_p=780\mu m, \rho=1500kg/m^3$)를 교반용기 내에 투입하여 입자의 부유과정을 관찰, 촬영하였다. 입자부유특성에 관한 실험장치도를 Fig. 2에 나타내었다.

교반조 바닥에 설치된 방해판의 영향으로부터 교반용기 바닥 중심에 그대로 모여 버리는 입자가 존재하기 때문에 입자부유특성의 보고에 일반적으로 이용되는 Zweitering의 정의[17]에 기인한 “부유화한계회전수”는 측정할 수 없었다.

그래서 본 실험에서는 부유한 입자가 임펠러까지 도달하는데 필요한 회전수로서 “부유화회전수 N_c ”로 정의하여 임펠러조건, 교반용기 바닥의 방해판 조건을 여러 가지로 변화시켜 측정하였다. 부유화회전수는 Baldi등[18]의 모델을 이용 하여 측정하였다.

입자의 크기가 일정하면 거의 비례하나 오차가 생겨 보정을 위해 입자의 중량분을 항을 고려해 넣고 입자밀도와 입자직경에 관한 지수와 비례정수를 중회귀 분석으로 구하여 보정된 상관식을 얻어야 보다 정확한 부유화회전수를 나타낼 수 있으나 본 연구에서는 입자 크기가 일정하여 보정을 하지 않고 부유화회전수를 나타내었다. 실험에는 수돗물을 이용하였다. Table 2에 임펠러 및 방해판의 조건을 나타내었다.

[Table 2] Experimental conditions of particle suspension experimental

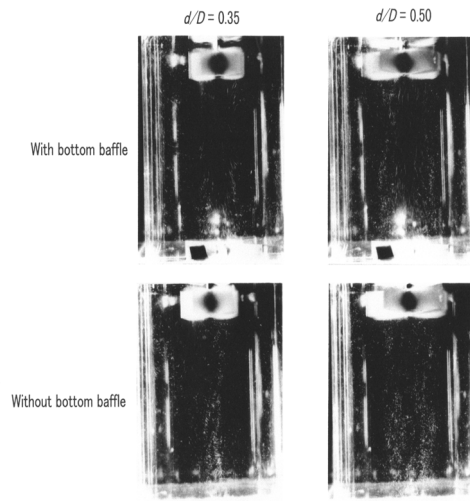
D	20cm
n_p	2, 4, 6, 8
d/D	0.25 ~ 0.87
b/d	0.07 ~ 1.0
n_b	2, 4, 6, 8
d_b/D	0.25 ~ 0.75
b_w/D	0.035 ~ 0.3

여기서 D , d 및 b 는 각각 교반용기 직경, 임펠러 직경 및 임펠러 날 폭을 나타낸 것이다. 또한 n_b , d_b , b_w 는 각각 교반용기 바닥 방해판의 날 매수, 방해판 직경, 방해판 날 폭을 나타낸 것이다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 유동특성에 대한 결과 및 고찰

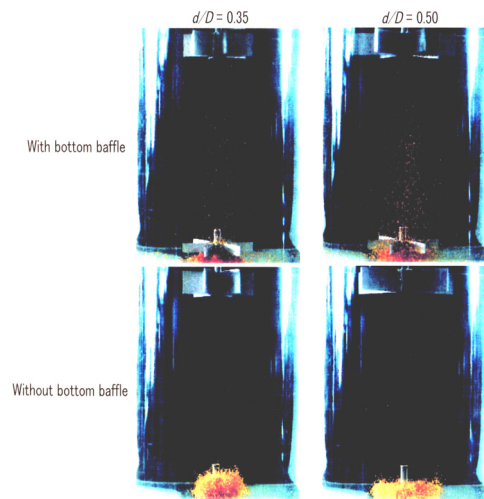
알루미늄 입자의 궤적을 관찰한 사진을 Fig. 3에 나타내었다. 교반용기 바닥에 방해판이 없는 경우는 작은 선회운동을 하면서 상승해가는 반면에 교반용기 바닥에 방해판이 있는 경우는 축방향의 흐름이 강하고 교반용기 바닥 중심으로부터 상승류가 강하게 일어나는 것을 확인되었다. 이 사실로부터 교반용기 바닥의 방해판은 보통의 방해판과 마찬가지로 2차 순환류를 촉진시키는 것을 알았다. 또한 이 순환류 촉진 작용은 자유표면의 소용돌이의 깊이가 감소하는 것으로 부터도 확인되었다.



[Fig. 3] Comparison of flow patterns with and with-out bottom baffle.

3.2 입자부유특성에 대한 결과 및 고찰

교반용기 바닥에 방해판을 설치한 경우와 설치하지 않은 경우의 입자부유를 사진 촬영한 그림을 Fig. 4에 나타내었다.



[Fig. 4] Photograph of particle suspension(at 50rpm).

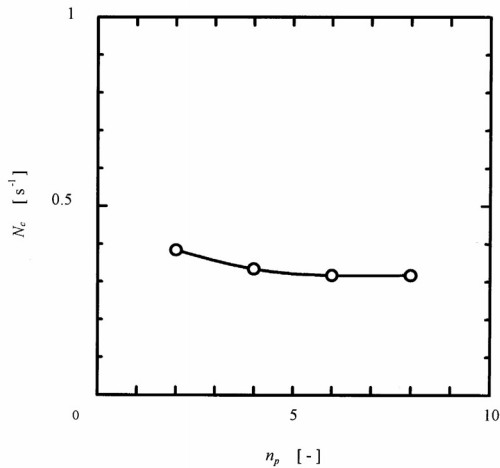
교반조 바닥에 방해판을 설치한 경우 입자부유가 각 단에서 양호하게 잘 일어나는 것을 알았다. 이것은 방해판에 의해서 촉진된 2차 순환류 때문이라 사료된다. 또한 앞 절의 유동특성에서 보고한 방해판의 유무에 의한 교

반용기 바닥 중심으로부터 상승류가 다르게 나타나는 것이 입자부유 상태의 관찰로부터도 확인되었다. 방해판이 있는 경우 입자는 교반용기 위로 직진으로 상승하는 반면에 방해판이 없는 경우 선회운동을 동반하면서 상승하여가는 모양이 확인되었다.

게다가 교반용기 내에 투입한 입자가 교반용기 바닥 중심으로 쉽게 모이는 것을 확인하였다. 이로부터 원통용기 내의 선회류 영역에 발생하는 에크만 경계층이 발달했다고 생각할 수 있다. 결국 본 실험 장치로부터 얻은 입자부유 촉진효과는 교반용기 바닥의 방해판에 의해 나타난 2개의 특징으로부터 일어난 것이고 이것은 2차 순환류의 촉진과 에크만 경계층의 발달이라고 할 수 있다.

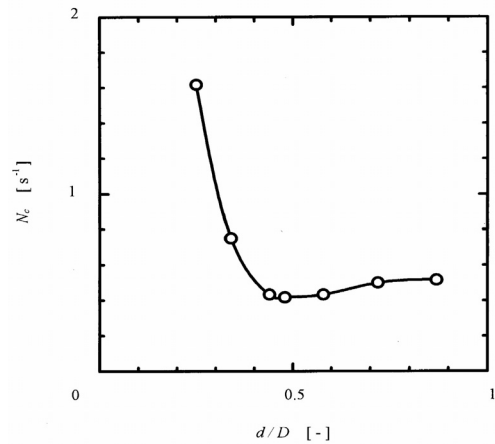
다음으로 임펠러 및 교반용기 바닥의 방해판을 여러 가지 조건으로 변화시켜 부유화 회전수를 측정된 결과를 나타내었다.

임펠러 날 매수, 교반용기 직경, 임펠러 직경 및 임펠러 날 폭에 대한 영향을 Fig. 5~7에 나타내었다.



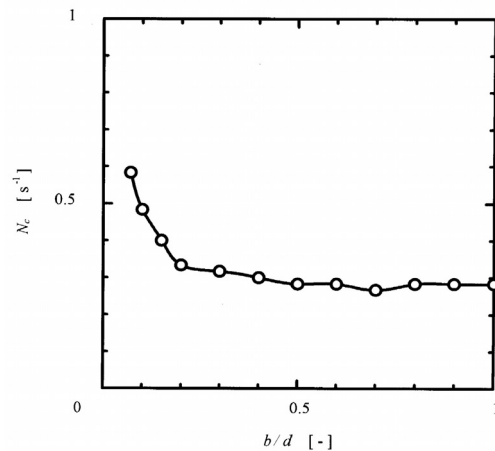
[Fig. 5] Effect of number of impeller blade(n_p) on circulating frequency for suspension(N_c).

Fig. 5에 교반 임펠러 날 매수의 영향을 나타내었다. 이 그림으로부터 임펠러 날 매수의 영향은 은 적게 나타났다. 2매날 임펠러에서는 안정한 입자부유를 얻을 수 없는 경우가 있었다.



[Fig. 6] Effect of d/D on N_c .

Fig. 6에 교반용기 직경에 대한 임펠러직경의 영향을 나타내었는데 임펠러 직경의 영향은 매우 크게 나타났다. 교반용기 직경과 임펠러 직경의 비가 0.5 이상인 경우에는 직경의 비에 대한 영향은 비교적 적게 나타났다.

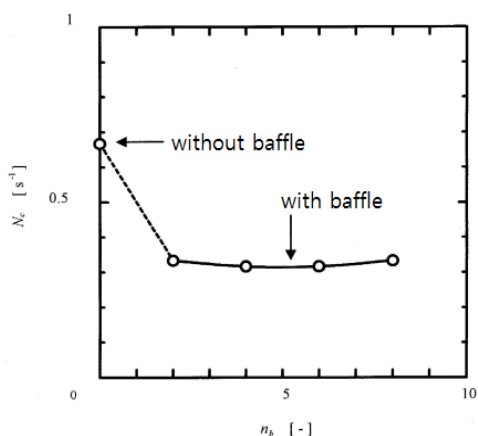


[Fig. 7] Effect of b/d on N_c .

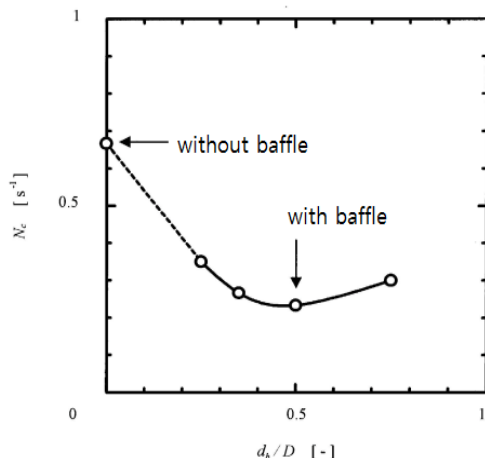
Fig. 7에 임펠러 직경에 대한 임펠러 날 폭의 비에 대한 영향을 나타내었다. 날 폭이 직경의 20% 이상이 되면 부유화회전수에 영향은 거의 미치지 않았다.

이상의 여러 조건에서 실험을 한 결과 교반 임펠러의 최적조건을 n_p , d/D 및 b/d 는 각각 6, 0.5 및 0.3으로 나타내었다.

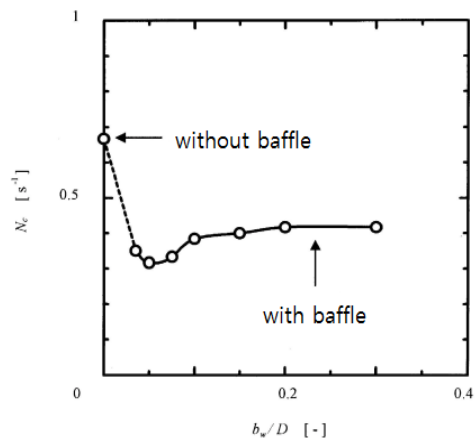
한편 교반용기 바닥의 방해판의 날 매수, 방해판 직경, 방해판 높이의 영향을 Fig. 8~10에 각각 나타내었다.



[Fig. 8] Effect of number of baffle blade(n_b) on circulating frequency for suspension(N_c).



[Fig. 9] Effect of d_b/D on N_c .



[Fig. 10] Effect of b_w/D on N_c .

Fig. 8에 교반용기 바닥의 방해판의 날 매수의 영향을 나타내었다. 교반 임펠러 날 매수의 영향은 적게 나타났다. 또한 교반용기 바닥의 방해판의 날 매수가 많으면 오히려 입자부유에 악영향을 미치는 것을 알았다. 즉, 방해판의 중심의 혼합 불량부에 입자가 모여 부유에 방해가 됨을 알았다. 따라서 최적 방해판 날 매수는 그림에서 나타난바와 같이 부유화회전수가 가장 적은 6매 날로 선택하였다.

Fig. 9에 교반용기 직경에 대한 방해판 직경의 비에 대한 영향을 나타내었다. 교반용기 직경에 대한 방해판 직경의 비가 적거나 많으면 오히려 입자부유에 방해가 되었다. 교반용기 직경에 대한 방해판 직경의 비가 0.5인 경우가 본 실험의 범위에서는 최적의 비로 나타났다.

Fig. 10에 교반용기 직경에 대한 방해판 날 폭의 비에 대한 영향을 나타내었다. 이 비가 0.05일 때 최적의 부유화회전수를 나타내었다.

이상의 교반용기 바닥의 방해판의 날 매수, 방해판 직경, 방해판 높이의 영향을 여러 조건에서 실험을 한 결과 교반 임펠러의 최적조건을 n_b , d_b/D 및 b_w/D 는 각각 6, 0.5 및 0.05로 나타내었다.

4. 결론

교반용기 바닥에 방해판이 부착된 교반조의 경우 유동특성 및 입자부유특성에 대한 연구 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

알루미늄 입자 추적법을 이용한 유동상태의 가시화 실험으로부터 교반용기 바닥에 방해판을 부착하면 교반용기 바닥 중심으로부터 상승류가 증대하여 교반이 촉진됨을 알았다.

입자부유 실험으로부터 예크만 경계층의 발달에 의해 입자부유가 촉진됨을 알았다.

본 연구 실험범위 내에서는 교반임펠러의 최적조건은 $n_p=6$, $d/D=0.5$, $b/d=0.3$ 이고 교반용기 바닥의 방해판의 최적조건은 $n_b=6$, $d_b/D=0.5$, $b_w/D=0.05$ 로 나타났다.

이상 결론으로부터 교반용기 바닥에 방해판이 부착된 교반용기는 생물반응기로서의 적용을 고려하면 저 회전에서도 입자가 부유하는데 충분한 유동상태를 얻었고 적절한 설계조건하에서는 혼합불량부도 존재하지 않는 점에서 우수한 생물반응기라 사료된다.

References

- [1] R. D. Biggs, "Mixing rates in stirred tanks", *AIChE J.*, **9**, 636-640, 1963.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/aic.690090513>
- [2] A. B. Metzner, J. S. Taylor, "Flow patterns in agitated vessels", *AIChE J.*, **6**, 109-114, 1960.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/aic.690060121>
- [3] J. Gardner, G. Tatterson, "Characterization of mixing in shaker table containers", *Biotech. Bioeng.*, **39**, 794-797, 1992.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/bit.260390713>
- [4] R. P. Rhodes, R. P. Garden Jr., "Characterization of agitation effects in shaken flasks", *Ind. Eng. Chem.*, **49**, 1233-1236, 1957.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1021/ie50572a023>
- [5] M. Kamiwano, K. Yamamoto, S. Nagata, "Mixing performance of various agitators", *Kagaku Kogaku*, **31**, 365-372, 1967.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1252/kakoronbunshu1953.31.365>
- [6] Y. Sano, H. Usui, "Interrelations among mixing time, power number and discharge flow rate number in baffled mixing vessels", *J. Chem. Eng. Japan*, **18**, 47-52, 1985.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1252/jcej.18.47>
- [7] S. Hiraoka, Y. Tada, H. Suzuki, H. Mori, T. Aragaki, I. Yamada, "Correlation of Mass Transfer Volumetric Coefficient with Power Input in Stirred Liquid-Liquid Dispersions", *J. Chem. Eng. Japan*, **23**, 468-474, 1990.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1252/jcej.23.468>
- [8] S. T. Koh, S. Hiraoka, Y. Tada, T. Aragaki, T. Hijikata, T. Yamaguchi, "Visualization of Jet Flow in a Mixing Vessel with a Nozzle Rotating Around the Vessel Axis", *J. Chem. Eng. Japan*, **24**, 760-766, 1991.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1252/jcej.24.760>
- [9] S. T. Koh, S. Hiraoka, Y. Tada, T. Aragaki, T. Yamaguchi, "Heat Transfer Coefficient and Mixing Time in a Cylindrical Mixing Vessel with Axial Jet Nozzles", *J. Chem. Eng. Japan*, **24**, 506-511, 1991.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1252/jcej.24.506>
- [10] S. T. Koh, S. Hiraoka, I. Yamada, Y. Tada, T. Aragaki, T. Takahashi, "Jet Mixing of Liquid in a Rotating Cylindrical Vessel", *J. Chem. Eng. Japan*, **22**, 611-615, 1989.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1252/jcej.22.611>
- [11] T. Maruyama, N. Kamishima, T. Mizushima, "An investigation of bubble plume mixing by comparison with liquid jet mixing", *J. Chem. Eng. Japan*, **17**, 120-126, 1982.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1252/jcej.17.120>
- [12] T. Maruyama, T. Ban, T. Mizushima, "Jet mixing of fluid in tanks", *J. Chem. Eng. Japan*, **15**, 342-348, 1980.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1252/jcej.15.342>
- [13] Y. S. Lee, "Characteristic of experimentally in a baffle agitated vessel", *Bulletin of the Institute for Industrial Science Technology, Kyungpook national University*, **19**, 2012.
- [14] D. H. Bae, H. J. Ryu, D. W. Shun, G. T. Jin, D. K. Lee, J. H. Choi, "Effects of agitation speed and temperature on minimum fluidization velocity of cohesive particles in a mechanically agitated fluidized bed", *HWAHAK KONGHAK*, **40**, 2, 237-245, 2002.
- [15] J. H. Ruston, W. E. Costich, H. J. Everret, "Power Characteristics of mixing impellers part 1, *Chem. Eng. Prog.*, **46**, 395-404, 1950.
- [16] K. Takahashi, M. Sasaki, K. Arai, S. Saito, "Effects of geometrical variables of helical ribbon impellers on mixing of highly viscous newtonian liquids", *J. Chem. Eng. Japan*, **15**, 217-224, 1982.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1252/jcej.15.217>
- [17] T. N. Zwitering, "Suspending of solid particles in liquid by agitators", *Chem. Eng. Sci.*, **8**, 244-253, 1958.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0009-2509\(58\)85031-9](http://dx.doi.org/10.1016/0009-2509(58)85031-9)
- [18] G. Baldi, R. Conti, E. Alaria, "Complete suspension of particles in mechanically agitated vessels", *Chem. Eng. Sci.*, **33**, 21-25, 1978.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0009-2509\(78\)85063-5](http://dx.doi.org/10.1016/0009-2509(78)85063-5)

이 영 세(Young-Sei Lee)

[정회원]



- 1986년 2월 : 계명대학교 대학원 화학공학과 (공학석사)
- 1993년 2월 : 계명대학교 대학원 화학공학과 (공학박사)
- 1993년 3월 ~ 1995년 2월 : 일본 나고야공업대학 초빙연구원
- 1999년 3월 ~ 2000년 2월 : 일본 학술진흥재단 특별연구원
- 1996년 3월 ~ 현재 : 경북대학교 나노소재공학부교수

<관심분야>
화학공정, 에너지저장