

금망임펠러를 이용한 교반조에서의 교반소요동력 특성 Characteristic of Power Consumption in Agitated Vessel Using Wire Gauge Impeller

김문갑¹, 이영세^{1*}
Moon-Gab Kim¹, Young-Sei Lee^{1*}

<Abstract>

Power consumption for wire gauge impeller in cylindrical agitated vessel was measured over a wide range of Reynolds number from laminar to turbulent flow regions. The power correlation were obtained agitation power input of WM4 at gassing condition in turbulent region, at gassing condition in transient region and at gassing condition in laminar region. Also the compared with effect of impeller diameter and blade width on agitation power input at gassing condition in turbulent region, at gassing condition in transient region and at gassing condition in laminar region.

Keywords : Mass transfer, Turbulent flow region, Wire gauge impeller, Gas-liquid agitation

1. 서 론

통기교반소요동력은 교반기의 구동부를 설계할 때 기초가 되고 또한 가스 분산상태나 물질 이동특성에 영향을 미치는 인자로서 매우 중요하다. 또한 공업적으로 이용되고 있는 화학반응 중에서 많은 부분에서 기체와 액체 사이에서 일어나는 산화반응, 염소화반응 등이고 이들의 반응은 교반조형 반응기에서 조작된다. 또한 발효 등의 생물화학반응에서도 바이오리액트로 미생물을 배양하기위해 산소의 공급이필요하여 기액교반조가 이용되고 있다. 균상계 교반에 비해서 이상계 교반은 교반조내의 상태가 복잡하고 설계에 필요한 인자도 복잡하다. 기액접촉형 교반조는 가스의 공급방법에 따라 나눌 수 있는데 본 연구에서는 일반적인 침지교반식 기액

교반조에서 교반소요동력을 측정했다. 이 연구에 관해서 많은 연구자의 연구보고가^{1~7)} 있지만 어느 연구도 난류영역에서의 연구결과이다.

최근 기액교반에서 취급되는 유체는 고점도 유체나 비뉴턴유체의 증가하고 있어 난류영역에서 층류영역에 이르는 넓은 레이놀즈수 범위에서의 연구가 필요하게 되었다. 보통 기액교반에서 잘 이용되고 있는 6매날 디스크터빈 임펠러는 임펠러 날 뒷면에 감압부분이 형성되어 공동에 기포가 포착되어 유체에 충분한 동력을 전달할 수 없게 된다. 따라서 통기조건하에서 동력저하가 적고 공동이 형성 되지 않는 방법이 설계상 바람직하다.

따라서 본 연구에서는 일반적으로 많이 이용되고 있는 표준적인 임펠러의 경우 유체에 충분한 동력을 전달할 수 없게 되는 문제점을 해

¹정회원, 경북대학교 나노소재공학부, 교수, 工博
^{1*} 교신저자, E-mail: ysl@knu.ac.kr

¹School of Nano & Material Science and Eng., Kyungpook National University, Prof., Ph.D.
^{1*} Corresponding Author

결하기 위해 금망 임펠러를 이용하여 난류영역에서 층류영역에 이르는 넓은 레이놀즈수 범위에서의 통기교반 소요동력의 특성을 여러 가지 통기조건에서 실험적으로 측정하여 검토하였다.

또한 천이영역에서의 통기소요동력을 확인하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

실험 장치의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다.

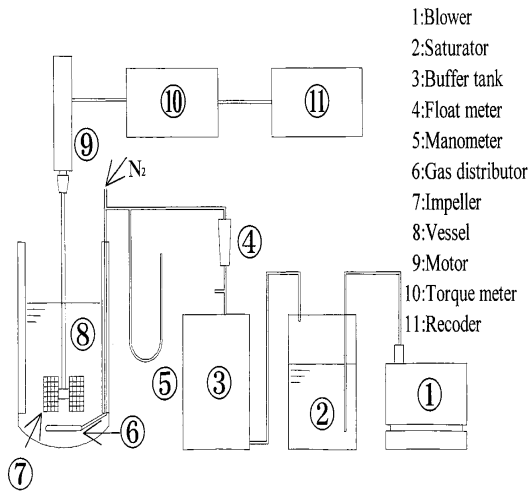


Fig. 1. Experimental apparatus for gas-liquid agitation.

실험장치와 임펠러는 사전에 연구한 금망임펠러를 이용한 교반조에서의 기액물질이동⁷에서와 같은 장치를 이용하였다. 교반조는 내경 185mm의 원통조를 이용하였으며 교반조내에 교반조 직경의 1/10의 폭을 가진 방해판을 4매 설치하였다. 사용한 가스는 공기이며 가스는 송풍기에 의해 포화장치를 통과하여 수증기로 포화시킨 후 링 스파자에 의해 교반조내에 불어넣었다.

교반액은 CMC 수용액 및 이온교환수를 이용하였으며 액의 높이는 190mm로 했다.

교반 임펠러는 임펠러 직경(d), 날폭(b) 및 날매수(n_p)가 같고 금망의 매쉬가 서로 다른 금망 임펠러와 디스크터빈 임펠러 및 패들 임펠러를 이용하였으며 이들 임펠러의 형상을 Fig. 2에 나타내었다.

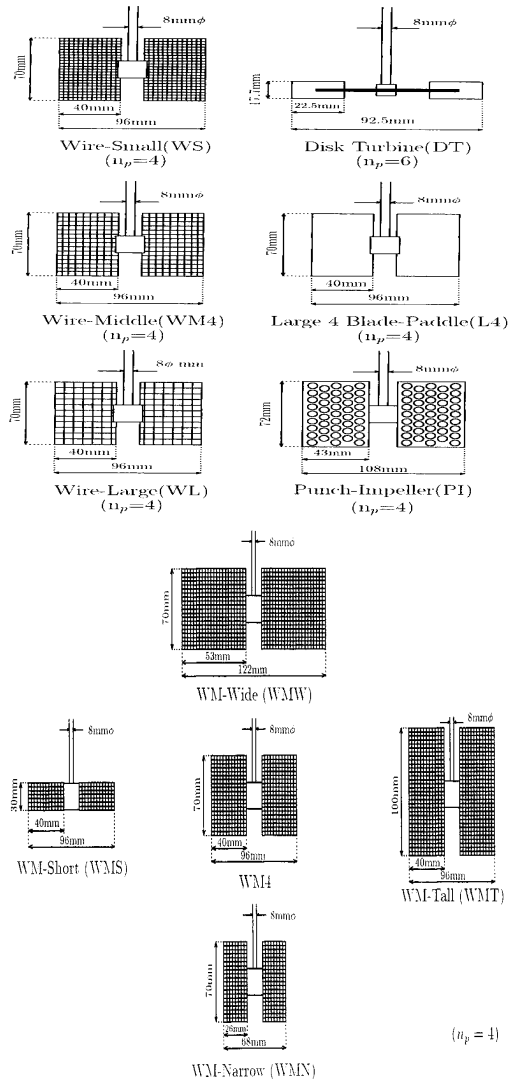


Fig. 2. Wire gauge and standard impellers.

교반 임펠러의 상세한 사양을 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Detail of impeller sizes.

Impeller	d mm	b mm	n_p	b/d	d/D	me sh	ϵ_{AV}
DT	93	17	6	0.191	0.500	-	-
L4	96	70	4	0.729	0.519	-	-
WM4	96	70	4	0.729	0.519	9	0.625
WMW	122	70	4	0.574	0.659	9	0.625
WMN	68	70	4	1.029	0.368	9	0.625
WMT	96	100	4	1.042	0.519	9	0.625
WMS	96	30	4	0.313	0.519	9	0.625

2.2 실험방법

먼저 교반조에 190mm의 액높이 까지 교반액을 넣고 질소가스로 산소를 제거시키고 항온조 내에서 30℃로 일정하게 유지시킨다. 그리고 무통기조건하에서의 교반속도를 변화시켜서 교반소요동력 P_0 를 측정한다. 다음에 송풍기로 소정유량의 공기를 주입하여 포화기에서 포화수증기로 만들어 다시 완충탱크에서 일정압력이 되게 한 후 링 스파자로부터 토출시켜나가면서 교반속도를 순차적으로 변화시키면서 그때마다 축토크를 토크메타로 측정하여 레코드에 기록하여 단위체적당 통기교반동력 P_g 를 측정한다. 이때 통기량은 로타메타, 마노메타 및 실내온도, 통기가스온도로부터 계산한다.

3. 결과 및 고찰

3.1 난류영역에서의 통기교반소요동력 특성

난류영역에서 금망임펠러 WM4를 이용한 통기소요동력의 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 패들임펠러를 이용한 경우에는 임펠러 날 뒤쪽에 공동이 형성되어 동력비는 큰 폭으로 저하하지만 금망임펠러의 통기동력은 무통기동력의 70% 이상을 유지하는 것을 알았다. 금망임펠러는 망눈을 통과하는 흐름이 존재하고 망눈으로 유체가 공급되기 때문에 임펠러 날 뒤면에 감압부분은 존재하지 않아 공동이 생기지 않는 것으로 사료된다.

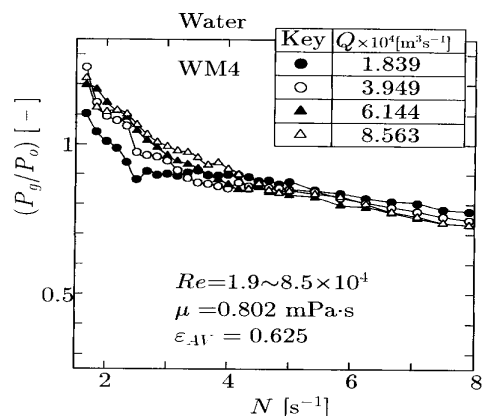


Fig. 3. Agitation power input of WM4 at gassing condition in turbulent region.

또한 저회전 영역에서의 동력비가 1을 넘는 것은 스파자로부터 불어나와 형성한 축류가 임

펠러의 토출류와 서로 충돌하기 때문이다. 통기량이 많을수록 축류에 의한 저항은 커지기 때문에 동력비가 크게 된다. 그러나 고회전 영역에서는 스파자로부터의 가스 흐름의 상호작용은 무시할 수 있어 동력비는 1이 된다. Fig. 4에 임펠러 날폭이 일정하고 임펠러 직경이 다른 3개의 임펠러(WMN, WM4, WMW)를 비교한 결과를 나타내었다.

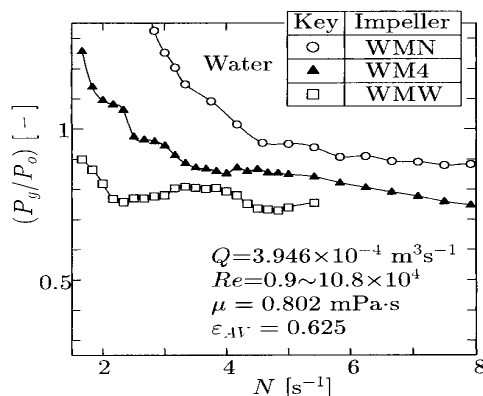


Fig. 4. Effect of impeller diameter on agitation power input at gassing condition in turbulent region.

이 그림으로부터 저회전 영역에서 임펠러 직경이 작은 임펠러 일수록 동력비가 1을 크게 넘어서고 있음을 알 수 있다. 이것은 임펠러의 토출류와 스파자로부터 가스흐름을 형성하는 축류가 임펠러의 토출류와 서로 충돌하기 때문이다. 또한 직경이 작은 임펠러 일수록 동력의 절대값이 작아지기 때문에 가스 흐름의 영향을 받기 쉽기 때문이다.

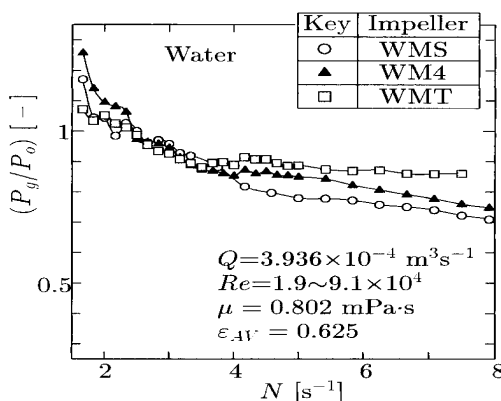


Fig. 5. Effect of blade width on agitation power input at gassing condition turbulent region.

임펠러 직경이 일정하고 임펠러 날폭이 다른 3개의 임펠러(WMN, WM4, WMW)를 비교한 그림을 Fig. 5에 나타내었다. 저회전 영역에서 임펠러 날폭이 작은 임펠러일수록 동력비가 저하하는 것으로 나타났다. 여기서 임펠러 날폭이 작은 임펠러는 임펠러 전체가 기체를 많이 포함한 유체로 덮혀 있고 이에 반해 임펠러 날폭이 큰 임펠러는 임펠러 하부로 기체가 분산되어 버리고 임펠러 상부는 거의 기체가 없는 상태가 되기 때문에 통기동력의 저하에 차이가 일어나는 것이다.

3.2 천이영역에서의 통기교반소요동력 특성

WM4 금망임펠러를 이용하여 통기량을 4단계로 변화시켜 나타낸 그림을 Fig. 6에 나타내었다. 이 그림으로부터 천이영역에서의 금망임펠러의 동력비는 저회전 영역에서 현저하게 저하하였고 어떤 회전수에 달하면 급격히 상승하는 것을 알았다. 일반적으로 패들임펠러는 저회전 영역에서 임펠러 뒷측에 공동이 형성되기 때문에 flooding 상태가 되어 큰폭의 동력저하가 일어난다. 이에 반해 금망임펠러는 망눈을 통과하는 흐름에 의해 동력이 저하한다. 즉, 스프라자로부터 공급된 기체가 임펠러의 토출류에 의해 분산되는 것과 망눈을 통과하여 임펠러 체적내를 선회하여 머무르는 것으로 나눌 수 있다. 이중 망눈을 통과하여 임펠러 체적내를 선회하여 머무르는 양이 많게 되면 임펠러 체적 주위의 기상체적율이 크게 되어 동력비는 크게 저하한다.

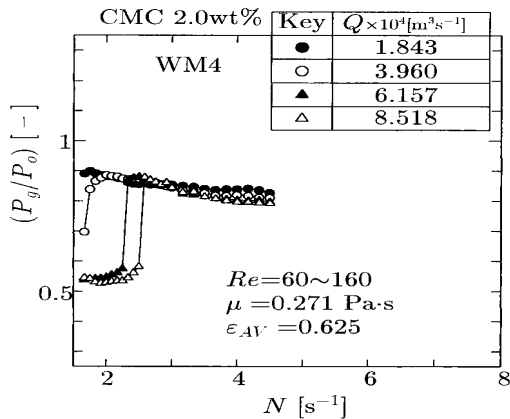
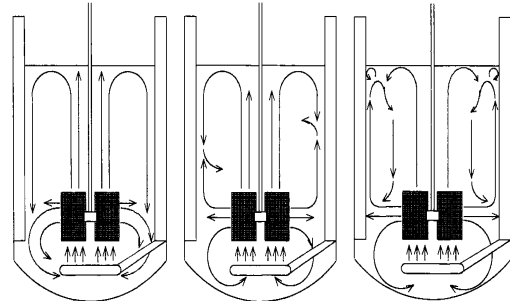


Fig. 6. Agitation power input of WM4 at gasing condition in transient region.

또한 Fig. 6으로부터 통기량이 많을수록 flooding 상태로부터 loading 상태로 천이하는 회전수가 크게 나타남을 알았다. 이것은 임펠러의 토출류로부터 분산된 기체의 양과 스프라자로부터 공급된 기체의 양과의 발란스에 의한 것이고 천이할 때 교반조내의 유동상태의 변화는 패들임펠러의 경우와 같았다. 천이영역에서의 유동상태를 Fig. 7에 나타내었다.



Flooding condition Transient condition Loading condition

Fig. 7. Flow patterns in transient region.

Fig. 8에 임펠러 날폭이 같고 임펠러 직경이 다른 3가지 금망임펠러(WMn, WM4, WMW)의 결과를 나타내었다. 이 그림으로부터 임펠러 직경이 큰 임펠러일수록 보다 저회전에서 flooding 상태로부터 loading 상태로 천이하고 있는 것을 알았다. 이 경향은 패들임펠러를 이용한 경우도 같았다^{8,9)}.

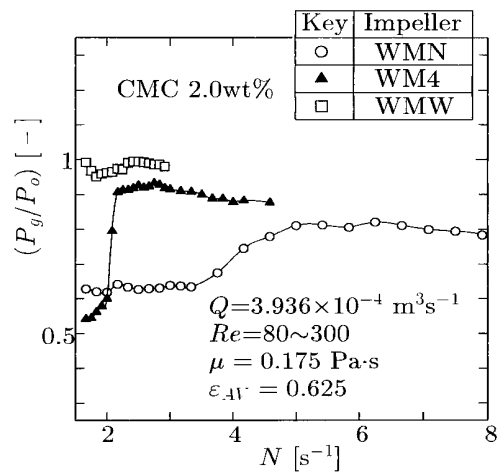


Fig. 8. Effect of impeller diameter agitation power input at gasing condition in transient region.

이것은 임펠러 직경이 큰 임펠러일수록 토출 흐름이 크고, 보다 저회전에서 교반조 중앙에 형성된 기포탑을 파괴하여 기체를 분산시키는 것이 가능하기 때문이다. 또한 천이한 후 임펠러 직경이 작은 임펠러일수록 통기동력이 저하하는 것은 기체를 많이 함유한 유체부분이 많기 때문이다. WMN 금망임펠러의 경우 flooding 상태와 loading 상태에서의 동력비 변화의 비율의 경사가 완만한 것은 임펠러 전체가 상당히 기체를 많이 함유한 유체 중에 있어 flooding 상태에서 loading 상태로 천이하여도 임펠러 주위의 기상 체적율이 그다지 변화하지 않는 것이라 사료된다.

Fig. 9에 임펠러 직경이 일정하고 임펠러 날폭이 다른 3가지의 금망임펠러(WMS, WM4, WMT)의 통기소요동력 특성을 나타내었다. 이 그림으로부터 flooding 상태에서 loading 상태로 천이하는 회전수에 임펠러 날폭은 영향을 미치지 않는다는 것을 알았다. 이것은 flooding 상태에서 loading 상태로 천이하는 조건이 임펠러 날폭의 단위 길이당 토출유량에 의존하기 때문이라 사료된다.

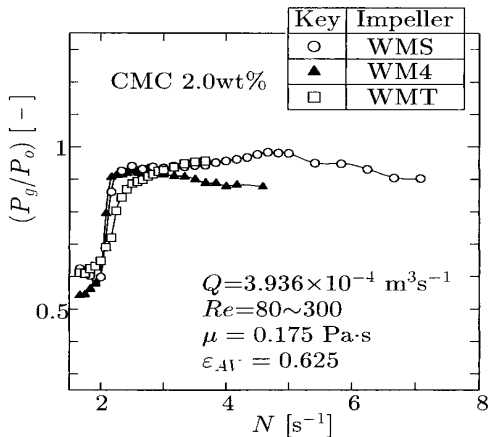


Fig. 9. Effect of blade width on agitation power input at gassing condition at transient region.

또한 임펠러 날폭이 작은 임펠러가 flooding 상태에서 loading 상태로 급격하게 천이하고 있는 것에 반하여 WMT 금망임펠러는 비교적 완만하게 천이하고 있었다. 이 임펠러의 경우 스파자로부터 상승한 기체는 먼저 임펠러 하부에서 분산되고 분산되지 않은 기체는 임펠러

상부에서 분산된다. 따라서 임펠러 하부에서 기체를 거의 분산시켜 버리면 임펠러 상부에 도달하는 기체는 적게 되어 임펠러 상부로부터 순차적으로 flooding 상태에서 loading 상태로 천이하기 때문에 동력비는 비교적 완만하게 크게 되는 것을 알 수 있다.

3.3 층류영역에서의 통기교반소요동력 특성

층류영역에서의 WM4 금망임펠러를 이용한 통기교반소요동력 특성을 Fig. 10에 나타내었다. 이 그림으로부터 통기량의 다름에 의한 동력비의 차이는 확인할 수 없었다.

고점도유체중에서는 스파자로부터 불어나온 기포는 모아져 커다란 기포가 되어 상승한다. 그 이유는 임펠러 부근의 유동상태는 통기량의 변화에 영향을 받지 않기 때문이라 사료된다. 또한 천이영역에서 나타난 것처럼 저회전영역에서 큰폭의 동력비 저하(flooding 상태)도 볼 수 없었다. 이것은 합쳐진 커다란 기포는 교반 임펠러에 의해 세분화되지 않고 액면에 도달하기 때문이라 생각된다. 고점도유체중에서는 망눈을 통과하는 흐름이 상당히 적고 임펠러 제적 주위에 머무르는 기체가 상당히 적기 때문이라 사료된다.

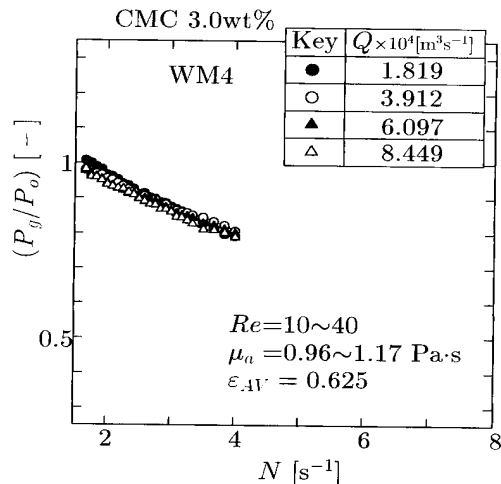


Fig. 10. Agitation power input of WM4 at gassing condition in laminar region.

Fig. 11 및 12에 임펠러 직경 및 임펠러 날폭을 변화시킨 경우 통기교반소요동력 특성을 나타내었다.

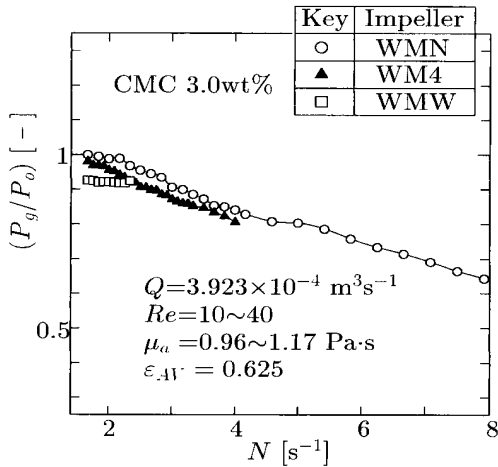


Fig. 11. Effect of impeller diameter on agitation power input at gassing condition in laminar region.

이들 그림과 앞에서 언급한바와 같이 층류영역에서 기포는 합쳐져 상승하기 때문에 임펠러 부근에 유동상태에 영향을 미치지 않는다. 즉 금망임펠러 기하형상의 차이가 동력비에 영향을 주지 않는다는 것을 알았다.

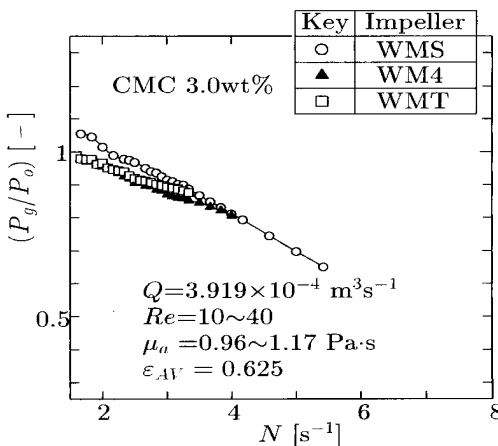


Fig. 12.. Effect of blade width on agitation power input at gassing condition in laminar region.

4. 결론

통기조건하에서 여러 가지 금망임펠러의 교반소요동력에 대해 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 금망임펠러에서는 망눈을 통과하는 흐름이 존재하여 임펠러 뒷측에 감압부분이 없어

공동이 형성되지 않아 패들임펠러에 비해 동력비의 저하를 막을 수 있었다.

- 천이영역에서는 flooding 상태와 loading 상태라 부르는 2개의 분산상태가 존재하고 통기동력에 크게 영향을 미치는 것을 알았다.
- Flooding 상태에서부터 loading 상태로 천이하는 회전수는 통기량과 임펠러의 기하형상에 미치는 것을 알았다.
- 층류영역에서는 스파자로부터 불어나온 기포가 합쳐져 커다란 기포가 되어 상승하기 때문에 저회전영역에서 큰폭의 동력저하는 없고 통기량이나 임펠러의 기하형상이 통기동력에 영향을 미치지 않음을 알았다.

사 사

“이 논문은 경북대학교(2010년도) 학술연구지원금에 의해 연구되었음”

참고 문헌

- 1) Calderbank, P. H., *Trans. Instn. Chem. Engrs.*, 36, 443 (1958)
- 2) Hughmark, G., *Ind. Eng. Chem. Process Des. Develop.*, 19, 638 (1980)
- 3) Loung, H. T. and Volesky, B., *AIChE J.*, 25, 894 (1979)
- 4) Michael, B. J. and Miller, S. A., *AIChE J.*, 8, 262 (1962)
- 5) Nagata, S., *Mixing; Principles and Applications*, Kodansha Ltd., pp. 60 (1975)
- 6) 이영세, 전석일, 김응민, 현상연 : *한국화학공학회 2008년도 가을 학술대회 P공정금-32*, 128 (2008)
- 7) Lee Y.S., *Bulletin of the Institute for Industrial Science, Sangju University*, 13, 241 (2006)
- 8) Rewatkar, V. B. and Joshi, J. B., *Chem. Eng. Technol.*, 14, 333 (1991)
- 9) Rewatkar, V. B. and Joshi, J. B., *Chem. Eng. Technol.*, 14, 386 (1991)

(접수:2011.03.16, 수정:2011.04.28, 게재 확정:2011.05.24)