

금망임펠러를 이용한 교반조에서의 기-액 물질이동 Mass Transfer of Gas-Liquid in Agitated Vessel Using Wire Gauge Impeller

이영세*
Young-Sei Lee*

<Abstract>

The gas-liquid mass transfer volumetric coefficients in gas-liquid agitated vessels with wire gauge impellers were measured to be compared with those in vessels with disk turbine and paddle impellers. Also mass transfer volumetric coefficients for disk turbine, paddle impeller and wire gauge impeller in cylindrical agitated vessel was measured over a wide range of Reynolds number from turbulent flow to transition regions. The effect of geometries on k_{La} is clarified experimentally. Mass transfer volumetric coefficients k_{La} depends only on the power consumption ($P_{gv} + P_{av}$) per unit volume.

Keywords : Mass Transfer, Turbulent flow region, Wire gauge impeller, Gas-Liquid Agitation

1. 서론

발효 등의 생물화학반응에서도 미생물을 배양하기 위해서 산소의 공급이 필요하고 바이오리액터로서의 기-액교반조가 이용되고 있다. 또한 대부분 공업적으로 이용되고 있는 화학반응 중에서 약 1/4은 산화반응, 염소반응 등의 기체와 액체 사이에서 일어나는 것이고 이들의 반응은 교반조형 반응기에서 조작된다. 이와 같은 이상계 교반은 균상계에 비해서 교반조내의 상태가 복잡하고 설계에 필요한 인자도 복잡하다. 기-액접촉형 교반조는 가스의 공급방법에 따라 표면교반식, 침지교반식 및 자기흡인교반식의 3가지로 크게 나눌 수 있다. 표면교반식은 교반 임펠러를 액표면 가까이 설치하여 액 표면에

가스를 날개에 끌어들여 액중에 분산시키기도 하고 역으로 액을 날개로써 액표면으로 비산시켜 액적의 형태로 기-액을 접촉시키는 형식이다. 침지교반식은 교반조 바닥 가까이에 설치한 교반날개로써 날개의 바로 밑으로부터 노즐이나 링 스파자를 통하여 공급되는 가스를 미세화, 분산시키는 형식이다. 또 자기흡인교반식은 교반에 의한 흡인작용을 이용하여 액표면의 가스를 교반축을 따라서 날개까지 흡인하고 기포를 액중에 분산시키는 형식이고 가스의 흡인하기 위해서는 교반축을 관상으로서 그대로 흡인관으로서 이용하는 것이 많다.

교반장치의 물질이동특성은 동력특성과^{1~5)} 마찬가지로 장치설계의 기초로 매우 중요하며 가스흡수특성을 규정하는 인자로서도 매우 중요

* 교신저자, 정회원, 상주대학교 응용화학공학부 교수, 工博 * Corresponding Author, School of Applied Chem, Eng., Sangju National University
E-mail : yslee@sangju.ac.kr

하다. 기-액교반의 물질이동특성에 관한 연구는 거의 난류영역에서의 연구가 대부분이고 전이 영역이나 층류영역에 대한 연구는 거의 없다⁶⁾. 따라서 본 연구에서는 금망 임펠터를 이용한 기-액교반조에서 교반액의 점도를 변화시켜 기-액물질이동용량계수를 측정하고 여러 가지 금망 임펠러에 대한 물질이동특성에 대해 연구하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

실험 장치의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 가스 분산장치로는 링 스파자르 이용하였으며 교반액중의 산소농도를 측정하기 위해서 용존 산소계를 이용하였으며 격막에 기포가 부착하기 어렵도록 경사지게 설치하였다. 교반조는 내경 185mm의 원통조를 이용하였으며 폭 18mm인 방해판을 4매 설치하였다.

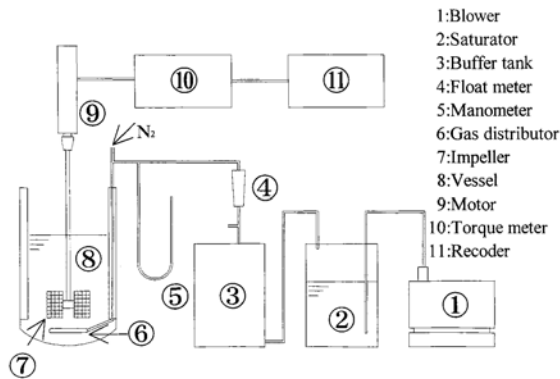


Fig. 1. Experimental apparatus for gas-liquid agitation.

교반조의 상세한 그림을 Fig. 2에 나타내었다. 교반액은 CMC 수용액 및 이온교환수를 이용하였으며 액의 높이는 190mm로 했다. 가스는 공기를 사용하였으며 교반 임펠러는 임펠러 직경(d), 날폭(b) 및 날매수(n_p)가 같고 금망의 매쉬가 서로 다른 금망 임펠러와 디스크 터빈 임펠러 및 패들 임펠러를 이용하였으며 이들 임펠러의 형상을 Fig. 3에 나타내었다. 교반임펠러의 위치는 임펠러 하단과 방해판의 하단이 일치하도록 설치하였다.

작은 매쉬 금망 임펠러를 MS, 표준 매쉬 금망 임펠러를 W4, 큰 매쉬 금망 임펠러를 ML, 금망

임펠러와 같은 날폭의 paddle 임펠러를 P4 Disk turbine 임펠러를 DT라 표기하였다. 교반 임펠러의 상세한 사양을 Table 1에 나타내었다.

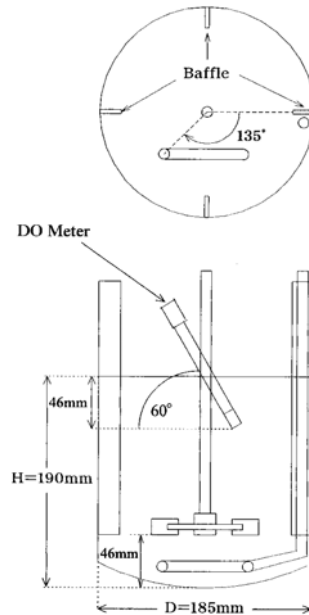


Fig. 2. Details of vessel with dissolved oxygen meter.

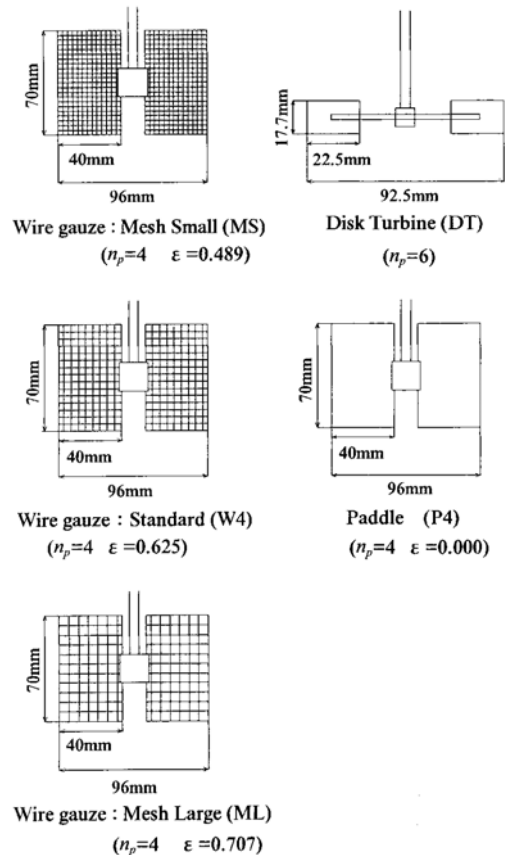


Fig. 3. Wire gauge and standard impellers.

Table 1. Details of impeller sizes

| Impeller | d [mm] | b [mm] | n_p | b/d | d/D | Mesh | ϵ |
|----------|--------|--------|-------|-------|-------|------|------------|
| DT | 92.5 | 17.7 | 6 | 0.191 | 0.500 | - | - |
| P4 | 96 | 70 | 4 | 0.729 | 0.519 | - | - |
| MS | 96 | 70 | 4 | 0.729 | 0.519 | 16 | 0.489 |
| W4 | 96 | 70 | 4 | 0.729 | 0.519 | 9 | 0.625 |
| ML | 96 | 70 | 4 | 0.729 | 0.519 | 4 | 0.707 |

2.2 실험방법

먼저 교반조에 190mm의 액높이 까지 교반액을 넣고 질소가스로 산소를 제거시키고 항온조 내에서 30℃로 일정하게 유지시킨다. 그리고 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_{gv} 를 측정한다. 이때 통기량은 로타메타, 마노메타 및 실내온도, 통기가스온도로부터 측정한다. 동시에 Fig. 2에 나타낸 용존산소계로 통기교반에 의한 산소농도 변화를 측정하여 디지털 멀티메타와 GP-IB 보드를 갖춘 컴퓨터로 해석하여 물질이동용량계수 k_La 를 구한다. 1회 측정이 끝나면 질소가스를 불어넣어 교반액 중의 용존산소를 제거하여 몇 회를 측정한다.

3. 결과 및 고찰

3.1 기-액 물질이동용량계수

물질이동용량계수 k_La 은 여러 가지 조건에서 많은 연구가 보고 되고 있으나 그 대부분은 난류영역에서만 이루어져왔고 디스크터빈 임펠러나 패들 임펠러에 관한 연구뿐이다. 따라서 본 연구에서는 패들 임펠러의 날 부분을 금망으로 바꾸어 금망 임펠러에 대하여 여러 가지 교반액 점도에 대해서 k_La 을 측정하였다. k_La 의 변화는 교반조내에서 기포의 분산상태와 밀접한 관계를 나타낸다. Nishikawa 등⁷⁾은 교반이 상대적으로 약하며 기포의 상승이 분산상태

를 지배하고, 반경방향으로의 기포의 퍼짐이 작은 상태를 통기지배, 교반이 강하고 임펠러로부터의 토출류가 기포의 분산에 유효하게 작용하고, 기포가 교반조내 전역에 퍼진 상태를 교반지배로 분류하였다. 실제 사용하는 장치에서는 교반지배와 통기지배의 중간상태에서 조작되는 경우가 많기 때문에 통기지배의 상태에서 교반지배의 상태까지 넓은 조작범위의 결과가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 flooding 상태에서 loading 상태사이의 넓은 범위에서 측정하였다. 이것을 디스크터빈 임펠러와 비교하여 금망 임펠러의 물질이동 성능에 대하여 평가하였다.

3.2 난류영역에서의 기-액 물질이동 특성

Fig. 4에 이온교환수에 대하여 측정한 DT 임펠러의 결과를 횡축에 단위액 체적당 통기시 교반동력 P_{gv} 와 단위 액 체적당 통기동력 P_{av} 의 합($P_{gv} + P_{av}$)을 종축에 기-액 물질이동용량계수 k_La 을 취해 나타내었다. 이 그림으로부터 통기량 Q에 따라 $P_{gv} + P_{av}$ 에 대한 k_La 의 차이가 조금 있지만 $P_{gv} + P_{av}$ 에 대한 k_La 의 의존성은 Q에 관계없이 거의 같다는 것을 알았다. 이것은 물과 같은 기포의 합일성이 큰 액체에서는 임펠러의 전단 효과가 나타나기 어렵기 때문이라 생각된다.

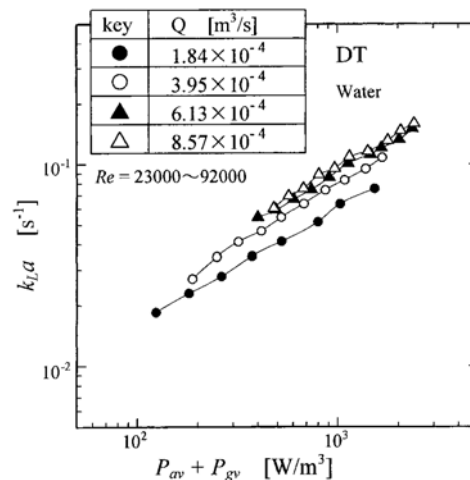


Fig. 4. k_La for DT impeller in water.

또한 k_La 의 Q에 대한 영향은 통기량이 높으면 거의 없다는 것을 알았다. 이것은 Q가 작을

때는 통기량이 증가함에 따라서 교반액내의 가스 범람도 증가하기 때문에 k_{LA} 의 값은 증가하지만 Q가 너무 많으면 가스 범람에 한계가 있기 때문에 k_{LA} 의 값은 변화하지 않는다고 생각된다.

Fig. 5에 일반적인 패들 임펠러 형태인 금망 임펠러(W4)에 대한 결과를 나타내었다. 이 그림으로부터 W4 임펠러는 DT 임펠러와 거의 같은 경향을 나타냄을 알았다. 다른 점은 W4 완만하다는 것이다. 이것은 W4 임펠러는 DT

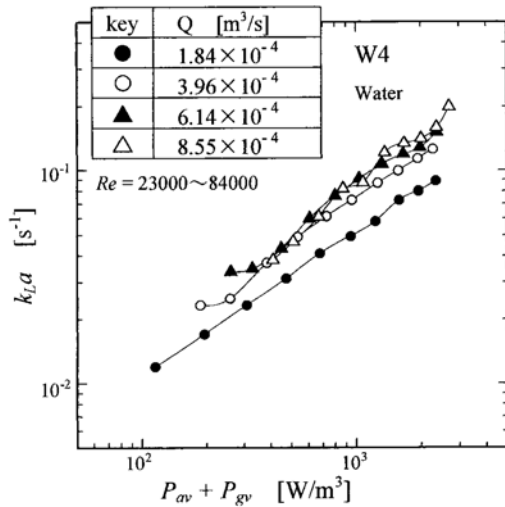


Fig. 5. k_{LA} for W4 impeller in water.

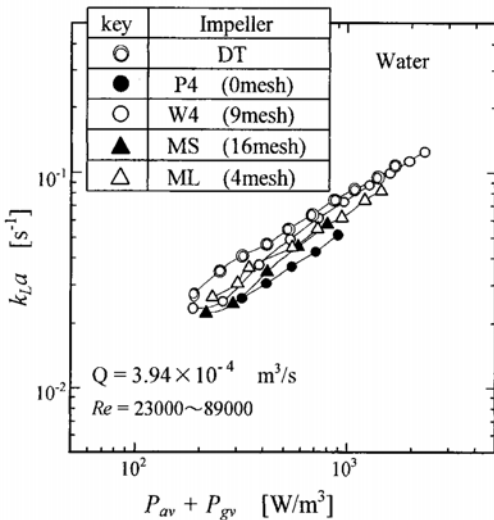


Fig. 6. Comparison of various impellers on k_{LA} in water.

임펠러와는 다르게 기포를 디스크 부분에서 받

아들이는 것이 아니므로 저 동력부분에서는 통기 지배가 되기 때문에 동력에 대한 의존성은 약하게 된다고 사료된다.

일정한 통기량으로 모든 임펠러에 대해 측정 한 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 이 그림으로부터 같은 소요동력을 주는 경우 DT 임펠러가 가장 큰 k_{LA} 를 P4 임펠러가 가장 작은 k_{LA} 를 나타냄을 알았다. 또한 난류영역에서는 망눈의 크기에 관계없이 거의 같은 k_{LA} 을 나타남을 알았다.

3.3 천이영역에서의 기-액 물질이동 특성

DT 임펠러와 W4 임펠러의 CMC 1.5wt% 수용액에 대한 k_{LA} 측정 결과를 Fig. 5와 같은 방법으로 정리하여 나타낸 그림을 Fig. 7 및 8에 나타내었다.

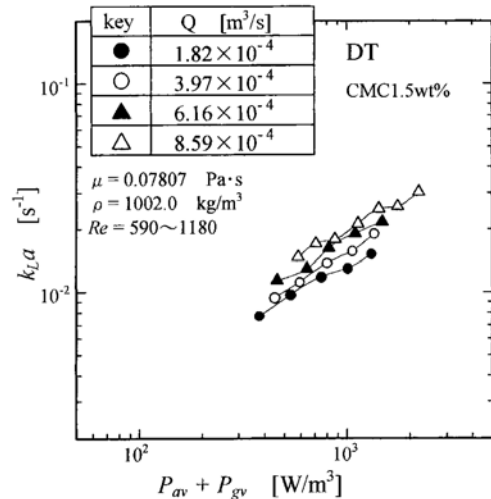


Fig. 7. k_{LA} for DT impeller in CMC 1.5wt% solution.

이들 2개의 그림을 Fig. 5 및 6과 비교해보면 k_{LA} 값 그 자체는 작아지는데 교반소요 동력에 대한 영향은 액 점도가 높아도 거의 변하지 않음을 알았다.

W4 임펠러의 액 점도에 대한 k_{LA} 의 영향을 Fig. 9에 나타내었다. 이 그림으로부터 레이놀즈수가 낮아짐에 따라, 즉 액 점도가 높아짐에 따라 k_{LA} 가 작아짐을 알 수 있었다. 이것은 액 점도가 높으면 확산계수가 작아지고 또한 조 작 회전수의 저하에 따르는 전단응력의 감소 및

기포의 합일성의 증가에 따라 기포 직경이 커지게 되는 2개의 원인에 의한 것이라 사료된다.

수록 k_{La} 은 상대적으로 작아짐을 알 수 있다.

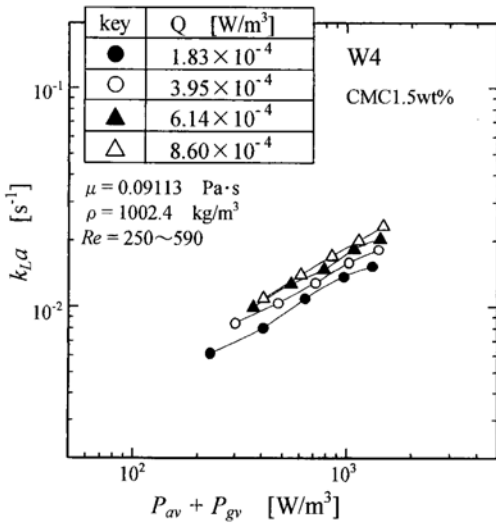


Fig. 8. k_{La} for W4 impeller in CMC 1.5wt% solution.

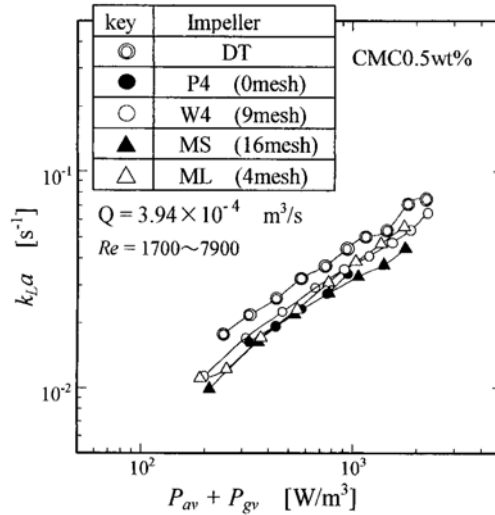


Fig. 10. Comparison of various impellers on k_{La} in CMC 0.5wt% solution.

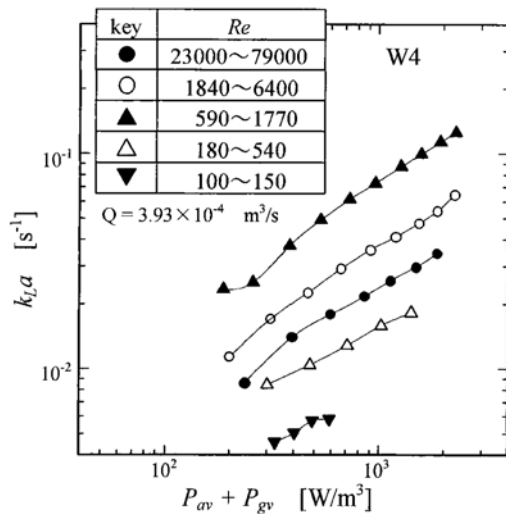


Fig. 9. Effect of viscosity on k_{La} for W4 impeller.

측정한 5 종류의 교반 임펠러의 액 점도에 대한 k_{La} 의 영향을 Fig. 10-13에 나타내었다. Fig. 10은 CMC 0.5wt%, Fig. 11은 CMC 1.0wt%, Fig. 12는 CMC 1.5wt%, Fig. 13은 CMC 2.0wt% 수용액에 대해서 실험한 것이다.

Fig. 6과 이들 그림을 비교해보면 액 점도가 높아짐에 따라서 즉 CMC 수용액 농도가 높아짐에 따라서 망눈이 작은 금망 패들 임펠러일

결국 CMC 1.0wt% 수용액까지는 측정된 5종류 모두 교반 임펠러의 k_{La} 의 값 각각의 상대적인 관계는 변하지 않는데 CMC 1.5wt% 수용액이 되면 MS 임펠러의 k_{La} 값은 작아지고, P4 임펠러와 같은 값이 되었다. 게다가 액 점도가 CMC 2.0wt% 수용액에서는 W4 임펠러까지도 작게 되었다.

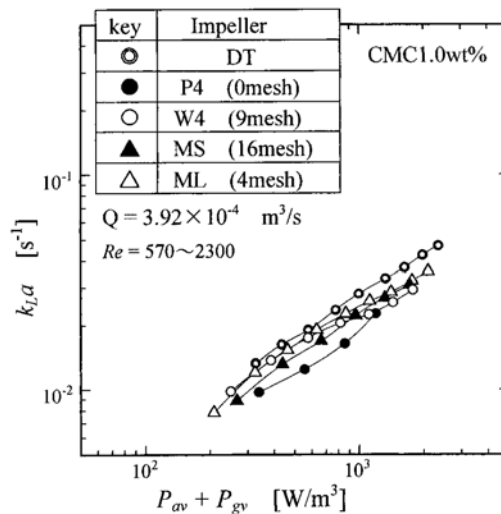


Fig. 11. Comparison of various impellers on k_{La} in CMC 1.0wt% solution.

이것은 액 점도가 높아지면 금망의 망눈을 통과하는 흐름이 일어나기 어렵고 망눈이 작은

임펠러 일수록 빠르게 $k_L a$ 의 값은 작아진다고 생각된다.

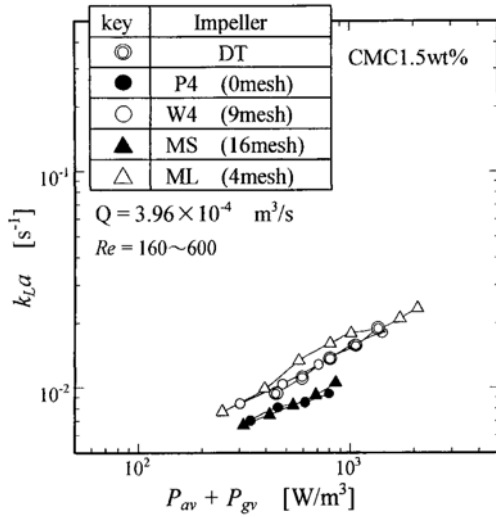


Fig. 12. Comparison of various impellers on $k_L a$ in CMC 1.5wt% solution.

또한 액 점도가 작을 때는 DT 임펠러의 경우가 $k_L a$ 의 값은 높아지지만 액 점도가 높아질수록 상대적으로 저하된다.

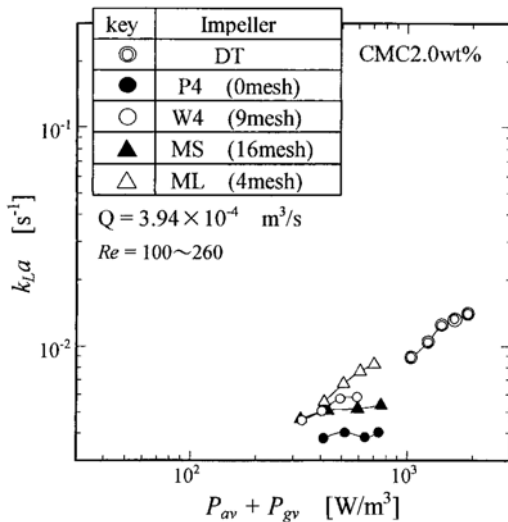


Fig. 13. Comparison of various impellers on $k_L a$ in CMC 2.0wt% solution.

CMC 2.0wt% 수용액에서는 ML 임펠러의 경우가 높다. 이것은 액 점도가 클 경우에는 교

반 임펠러의 토출능력이 떨어지기 때문에 기-액교반에 적용하고 있는 DT 임펠러에서도 기포의 분산이 일어나기 어렵지만, ML 임펠러는 금망의 망눈을 통과하는 흐름이 아직 존재하기 때문에 기포의 세분화가 다른 교반 임펠러보다도 많고, $k_L a$ 의 값은 높아진다고 생각할 수 있다.

3.4 넓은 레이놀즈수 영역에서의 물질이동용량계수의 상관

교반조내 기-액간 물질이동용량계수 $k_L a$ 의 상관식은 다수 보고 되고 있다⁷⁻⁹⁾. 이들은 전 교반소요동력($P_{gv} + P_{av}$)을 이용하여 상관하는 방법과 임펠러의 교반소요동력 P_{gv} 와 기포 흡입 시 동력 P_{av} 을 각각 변수로서 이용하는 상관법으로 나눌 수 있다. 본 연구에서는 교반 지배에서 통기 지배까지 넓은 조작조건에서의 $k_L a$ 의 상관을 생각한 Nishikawa 등^{6,7)}의 상관법을 이용하였다. 금망 임펠러와 패들 임펠러의 $k_L a$ 를 난류영역에서 천이영역의 넓은 레이놀즈수 범위에서 통일적으로 정리한 상관식을 식(1)에 나타내었고 그 상관결과를 Fig. 14에 나타내었다. 상관방법은 중회귀분석을 이용하였다.

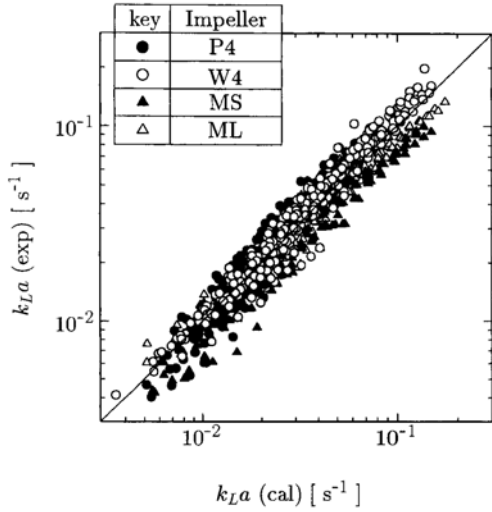
$$(k_L a) = (k_L a)_a + (k_L a)_g \quad (1)$$

단 $Re_d > 270$ 의 범위에서 $k_L a$ 이다.

$$(k_L a)_a = 0.03885 \mu^{-1/3} \sigma^{-2/3} D_L^{0.5} P_{av}$$

$$(k_L a)_g = 1.19 \times 10^{-3} P_{av}^{0.12} (1 - \varepsilon)^{-0.26} \times \mu^{-0.25} \sigma^{-0.6} D_L^{0.5}$$

여기서 $(k_L a)_g$ (교반지배의 $k_L a$)에 영향을 주는 물성값의 지수는 다수 보고 되어 있다⁷⁻⁹⁾. 비교를 위해 지금까지의 연구자들이 이용한 지수와 식 (1)에서 이용한 지수를 Table 2에 나타내었다. 또한 $(k_L a)_a$ 는 Nishikawa 등⁷⁾의 상관식을 이용하였다.



$$k_{La} = (k_{La})_a + 1.19 \times 10^{-3} P_{av}^{0.12} P_{gv}^{0.70} (1 - \epsilon)^{-0.26} \mu^{-0.25} \sigma^{-0.60} D_L^{0.5}$$

Fig. 14. Comparison of correlation of k_{La} for various impellers.

Table 2. Comparison of physical properties of liquid on k_{La}

| 연구자 | P_{av} | P_{gv} | μ | σ | D_L |
|------------------|----------|----------|-------------------------|----------|-------|
| Nishikawa | 1/3 | 0.8 | -0.5 | -0.5 | 0.5 |
| Kawase&Moo-Young | 0.5 | 0.65 | $-1/\{2(1+n)\}$ -0.5 | -0.6 | 0.5 |
| Yagi&Yoshida | 0.28 | 0.74 | -0.4 | -0.6 | 0.5 |
| This work | 0.12 | 0.70 | -0.25 | -0.6 | 0.5 |

여기서 n은 유동지수이다.

4. 결론

디스크 터어빈(DT) 임펠러와 망눈의 크기가 서로 다른 금망 패들 임펠러에 대해서 기-액 교반에서의 물질이동용량계수 k_{La} 의 측정을 하여 물질이동특성을 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

물질이동용량계수 k_{La} 을 측정할 때 आयु산나트륨 등의 이온성 물질이 교반액에 함유되어 있으면 k_{La} 의 값은 2-3배 정도 높아진다.

난류영역에서는 교반 임펠러의 형상이 다를

지라도 단위 액체적당 전 동력 $P_v (= P_{gv} + P_{av})$ 이 같다면 거의 같은 k_{La} 값을 얻는다. 또한 금망 임펠러의 망눈을 변화시켜도 P_v 가 같다면 거의 같은 k_{La} 값을 얻는다. 단 저회전수 영역의 경우 금망 임펠러에서는 범람을 일으키기 때문에 k_{La} 은 P_v 에 비례하지 않는다.

천이영역에서는 교반액의 점도에 따라서 금망의 망눈의 크기가 다르다면 금망 패들 임펠러의 종류에 따라서 k_{La} 값이 달라진다. 또한 작은 금망에서는 기포의 세분화가 일어나지 않지만 망눈이 큰 금망 임펠러에서는 망눈을 통과하는 액 흐름이 존재하여 기포의 세분화가 일어나기 때문에 높은 k_{La} 값을 얻을 수 있다.

난류영역에서 천이영역까지의 넓은 레이놀즈수 영역에서의 물질이동용량계수 k_{La} 의 상관식으로서 아래와 같은 식을 얻었다.

$$(k_{La}) = (k_{La})_a + (k_{La})_g$$

단 $Re_d > 270$ 의 범위에서 k_{La} 이다.

$$(k_{La})_a = 0.03885 \mu^{-1/3} \sigma^{-2/3} D_L^{0.5} P_{av}$$

$$(k_{La})_g = 1.19 \times 10^{-3} P_{av}^{0.12} (1 - \epsilon)^{-0.26} \times \mu^{-0.25} \sigma^{-0.6} D_L^{0.5}$$

사 사

이 논문은 상주대학교 학술연구지원금에 의해 연구되었음.

참 고 문 헌

- 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., 60, (1975)
 - 6) Nishigawa, M., Nakamura, M. and Hashimoto, K., *J. Chem. Eng., Japan*, **14**, 227, (1981)
 - 7) Nishigawa, M., Nakamura, M., Yagi, H. and Hashimoto, K., *J. Chem. Eng., Japan*, **14**, 219, (1981)
 - 8) Kawase, Y. and Moo-Young, M., *Chem. Eng. Res. Des.*, **66**, 284, (1988)
 - 9) Yagi, H. and Yoshida, F., *Ind. Eng. Chem. Process Des. Develop.*, **14**, 4, (1975)
-
- (2007년 12월 10일 접수, 2008년 2월 22일 채택)