

물질전달계수를 이용한 생물 반응기 운전 최적화 Optimization of Bioreactor Operation by Mass Transfer Coefficient

김형순*
Hyung-Soon Kim*

<Abstract>

The effects of various operating parameters (agitation speed, impeller type, antiform agents, impeller spacing etc.) on air-liquid mass transfer was characterized by volumetric mass transfer coefficient (k_{LA}). Also, the dual-impeller agitated systems are compared with single-impeller agitated systems with a special focus on its applications for bioreactors. k_{LA} was taken over a range of 200~450 rpm of agitation speed, and 0.5~2.5 vvm of air flow rates, for four single impeller and impeller combinations consisting of four impeller types, namely rushton, pitched blade, scaba, intermig were tested. The rushton impeller showed the best k_{LA} as compared with other single impellers. The dual impeller system are found to be superior as compared to single impeller in all aspects. The best combination of the dual impeller was a intermig of axial flow type as an upper impeller and a rushton of radial flow type as a lower part. Also, the control of the DO level with the variation of agitation speed was more efficient than that with an increase in air flow rate. The addition of antiform dropped the k_{LA} very large up to 1g/L regardless the type. PPG was less effect on k_{LA} than other antiforms. The impeller spacing and presence of solute are found very effective on k_{LA} . When the NaNO_3 is presented as solute, the k_{LA} increased approximately 50% then control.

Key words : volumetric mass transfer coefficient(k_{LA}), antiform, dual impeller system, axial flow, radial flow

1. 서론

오늘날 상업적으로 중요한 항생제나 폴리사카라이드(polysaccharide)의 발효에서 가장 중요한 것 중의 하나는 생물반응기의 설계이다.

일반적으로 종의 선택과 유전공학이 이러한 공정에서 생산성을 향상시키기 위하여 연구되어 왔지만 이러한 연구가 성공적으로 이루어지기 위해서는 생물반응기 내에서 전체적으로 균일하고 효과적인 혼합과 물질전달이 이루어져야

* 정회원, 서남대학교 환경화학공학부 조교수
590-711 전북 남원시 광치동 720

* Assistant Prof., School of Environmental & Chemical
Eng., Seonam Univ.
hskim@tiger.seonam.ac.kr

한다. 즉, 미생물 배양에서 생산성 향상은 영양소의 적당한 공급시기와 미생물과 생물반응기 내 발효조건의 최적화가 이루어져야 한다¹⁾. 생물반응기내 최적조건으로는 영양소들의 농도, 용존산소, 점도, 임펠러 모양과 교반 속도, pH 및 온도 등이 있다²⁾. 이러한 생물반응기의 혼합과 물질전달에 영향을 미치는 요인들 중에 가장 중요한 것은 임펠러의 모양과 교반속도, 통기량이다. 모양이 다른 임펠러들은 다른 유체 흐름 형태를 유발하며, 두 개 이상의 임펠러들의 조합 또한 유체의 흐름을 변화시키는 요인이 된다. 특히 호기성 미생물 발효에서는 배지 내에서의 산소전달 능력이 무엇보다도 중요하다^{3,4)}.

대규모 방선균의 고농도 배양시, 독특한 3차원적인 균사구조로 인한 발효 배양액의 심각한 점도 증가 현상은 생물반응기 내의 산소전달 능력을 급격히 감소시켜 생산세균의 이차대사산물 생합성 능력에 심각한 변화를 초래한다⁵⁾. 그러므로 생물반응기 내의 산소전달 속도를 유지하기 위하여 통기량을 증가시키거나 교반속도를 증가시킨다. 그러나 이 경우 거품이 형성되며, 이러한 거품형성을 억제하기 위하여 소포제를 사용하지만 사용된 소포제들이 배지에서 미생물로의 산소전달을 방해하여 결국, 생산성을 떨어뜨리는 원인이 되기도 한다. 또한 이차대사산물을 생산하는 대다수 방선균의 경우 균사모양 세포의 shear sensitivity 현상으로 인해 배양액 내에 산소전달계수를 증가시킬 목적으로 교반속도와 통기량을 무원칙적으로 증가시키는 경우 일반적으로 세포 성장속도와 이차대사산물의 생산력이 상당히 저해를 받는다. 따라서 배양액 내의 용존산소를 최적의 조건으로 유지시키기 위한 정밀한 산소공급전략이 필요하다^{3,6,7)}. 즉 교반속도와 통기량을 정밀 조절함으로써 방선균의 shear damage를 최소한으로 줄임과 동시에 생산세균의 specific oxygen uptake rate (q_o)도 영향을 받지 않도록 용존산소의 농도를 critical dissolved oxygen level (C_{cr}) 근처에 유지시킬 수 있는 산소전달 전략의 개발이 필요하다. 최근에는 단일 임펠러에 비하여 낮은 교반속도에서 효과적인 유체 혼합으로 높은 산소 전달속도와 낮은 전력소비를 나타내는 다중 임펠러 시스템들이 shear sensitivity 미생물 발효에서

연구되고 있으며⁵⁾, 생물반응기에서 산소의 부피 전달속도인 산소전달계수(k_{La})를 이용하여 산소 전달 효과를 구명하고 있다^{2,8)}.

본 연구에서는 이차대사산물 발효공정을 최적화하기 위한 회분식 생물반응기에서 여러 가지 조건에 따른 산소전달계수를 측정하여 발효조 배양 운전조건을 확립하고자 하였다. 즉, 여러 가지 impeller들과 소포제들이 산소전달계수 및 산소전달속도에 미치는 영향을 알아보기 위하여 dynamic method 방법으로 부피전달계수(k_{La})를 측정하였으며, 산소전달속도를 측정하여 이들에 영향을 미치는 통기, 교반, impeller 종류와의 관계를 고찰하였다.

2. 실험방법

2.1 부피전달계수 측정

부피전달계수 측정에 사용한 발효조는 2.5L 발효조(KBT Co.)로 기본적으로는 rushton 임펠러와 3개의 baffle, DO 센서와 온도계로 이루어져 있으며, 증류수를 사용하여 조업부피는 1.5 L를 기준으로 운전하였다. 교반속도는 300 rpm, 통기량은 1 vvm을 기준으로 조절하였으며, 온도는 28℃로 조절하였다. k_{La} 와 O.T.R.에 영향을 미치는 통기량 실험은 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 vvm 통기 조건에서 수행하였으며, 교반실험은 200, 250, 300, 350, 400, 450 rpm에서 수행하였다. 실험 중 증발로 인한 broth의 감소를 막기 위하여 습윤기(humidifier)를 공기 공급라인에 설치하였고 발효조 바닥의 sparger를 통하여 공기가 공급된다. 실험에서 사용한 임펠러는 Rushton(Rus), Scaba, Pitched blade(Pit), Intermig(Int) impeller 이었으며, 임펠러 조합은 Rus-Pit, Rus-Int, Pit-Rus, Int-Rus 이었다. 여기에서 앞에 언급한 임펠러가 아랫쪽 임펠러이며 뒤에 언급한 임펠러는 윗쪽에 위치하는 임펠러를 가리킨다. 산소전달계수의 측정실험은 W.A. Al-Masry와 A. R.Dukkan 등이 사용한 방법과 같은 Dynamic 방법을 이용하였는데 발효기내에 질소를 공급하여 DO를 20%이하로 떨어뜨린 후에 air를 공급함으로써 여러 종류의 임펠러에 대하여 air-water계와 air-medium계에서 수행하였다⁹⁾. 임펠러의 종류와 크기는 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Impeller characteristics used in 2.5 liter vessel

Impeller	Flow	Impeller diameter/tank diameter ratio (D/T)	No. blades (n)	Angle of blades (α [°])
Rushton turbine	Radial	0.59	6	90
Scaba	Radial	0.61	4	90
Pitched blade	Axial	0.58	3	45
Intermig	Axial	0.59	2	90

또한 소포제의 종류 및 농도에 따른 실험은 polypropylen glycol(PPG), polyethylen glycol(PEG), silicon(CA)을 사용하였으며, 그때 농도는 0.1~4.0 g/L 범위에서 실험하였다.

또한 air-medium계에서의 k_{La} 측정을 위한 배지는 soluble starch 45 g/L, sugar cane molasses 15 g/L, peptone water 13.33 g/L, NaNO_3 6.67 g/L, CaCO_3 4 g/L, PPG 0.5 g/L 이었다.

2.2 부피전달계수(k_{La}) 측정방법 Dynamic method

Dynamic method는 기체산소에서 용존산소로의 산소전달률(O.T.R = oxygen transfer rate)을 나타내는 부피산소전달계수(volumetric oxygen transfer coefficient, k_{La})와 미생물의 산소흡수율(O.U.R. = oxygen uptake rate)을 계산하는 방법이다⁹⁾. k_{La} 값의 측정은 용존산소에 대한 다음의 물질수지식에 기초한 것이다.

$$\frac{dC_{AL}}{dt} = k_{La}(C^*_{AL} - C_{AL}) - q_{O_2}X \quad (1)$$

C^*_{AL} ; 기체상과 평형을 이룬 용존산소농도 (g O_2 /L)

C_{AL} ; 발효배양액 내의 용존산소농도 (g O_2 /L)

q_{O_2} ; 세포당의 산소흡수율 (specific oxygen uptake rate, g O_2 /L cell · h)

X ; 배양액 내의 세포농도 (g cell/L)

배양도중 어느 한 시점에서 공기의 공급을 멈추면

$$\frac{dC_{AL}}{dt} = q_{O_2}X \quad (2)$$

그러므로 t에 대한 C_{AL} 선의 기울기를 측정함으로써 세포의 산소흡수율(O.U.R.)인 $q_{O_2}X$ 를

측정할 수 있다. 일정 시점이 지난 후 공기를 다시 발효조로 공급하면, 배양액 내의 용존산소는 물질수지식 (1)을 만족하면서 증가할 것이다. (1)식을 직선관계식으로 재배열하면

$$C_{AL} = C^*_{AL} - \frac{1}{k_{La}} \left(\frac{dC_{AL}}{dt} + q_{O_2}X \right) \quad (3)$$

(3)식으로부터 $\left(\frac{dC_{AL}}{dt} + q_{O_2}X \right)$ 에 대한 C_{AL} 의 플롯은 기울기가 $-1/(k_{La})$ 이며 y축의 절편이 C^*_{AL} 인 직선이므로 이로부터 기울기를 계산함으로써 산소전달 계수인 k_{La} 를 측정할 수 있다. 여기서 $C_{AL} = \bar{C}_{AL}$ (final steady dissolved-oxygen concentration)일 때,

$$q_{O_2}X = k_{La}(C^*_{AL} - \bar{C}_{AL}) \quad \text{이므로 (1)식은}$$

$$\frac{dC_{AL}}{dt} = k_{La}(\bar{C}_{AL} - C_{AL}) \quad (4)$$

(4)식을 t_2 와 t_1 사이에서 적분하여 정리하면

$$\ln\left(\frac{\bar{C}_{AL} - C_{AL1}}{\bar{C}_{AL} - C_{AL2}}\right) = k_{La}(t_2 - t_1) \quad (5)$$

(5)식과 같이 되므로 좌변을 Y 좌표로 우변의 $(t_2 - t_1)$ 을 X 좌표로 나타내면 그 기울기로부터 k_{La} 를 구할 수 있다.

3. 결과 및 고찰

3.1 통기, 교반, impeller 종류가 부피산소전달계수와 산소전달 속도에 미치는 영향

임펠러는 용기 내에서 액체-기체간의 혼합, 공기분산, 산소전달, 열전달, 고체 입자의 현탁과 용기 내 물질들의 고른 분산을 위해 필요하다¹⁰⁾. 여러 가지 impeller가 산소전달 속도에 미치는 영향을 알아 보고자 질소 분위기하에서 Rushton(Rus), Scaba, Pitched blade(Pit), Intermig(Int) impeller들을 이용하여 실험하였으며, 그 결과를 Fig.1-Fig.4에 나타내었다.

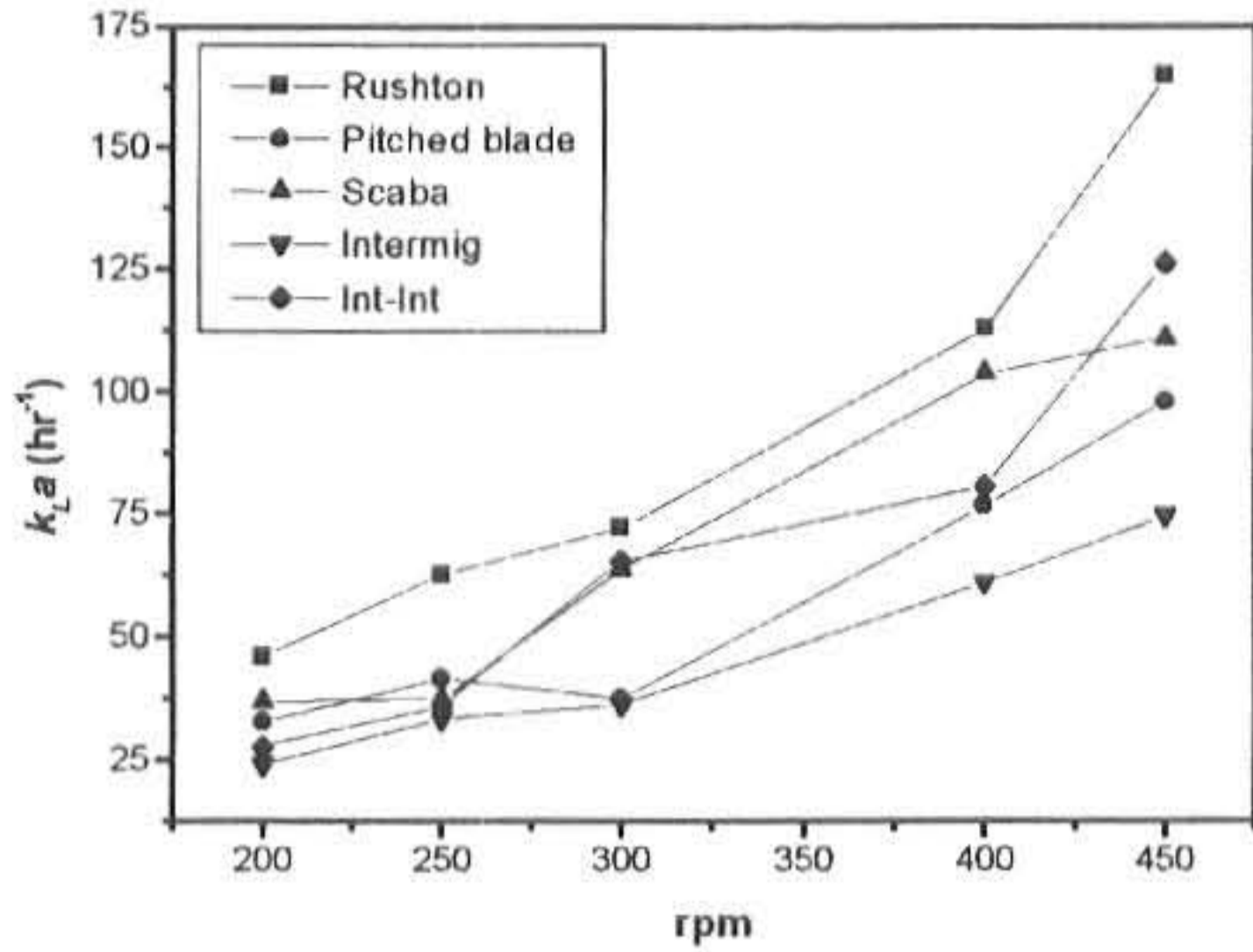


Fig.1 Effect of various impellers and impeller speed on k_{La} in water by dynamic method (air flow rate 1vvm).

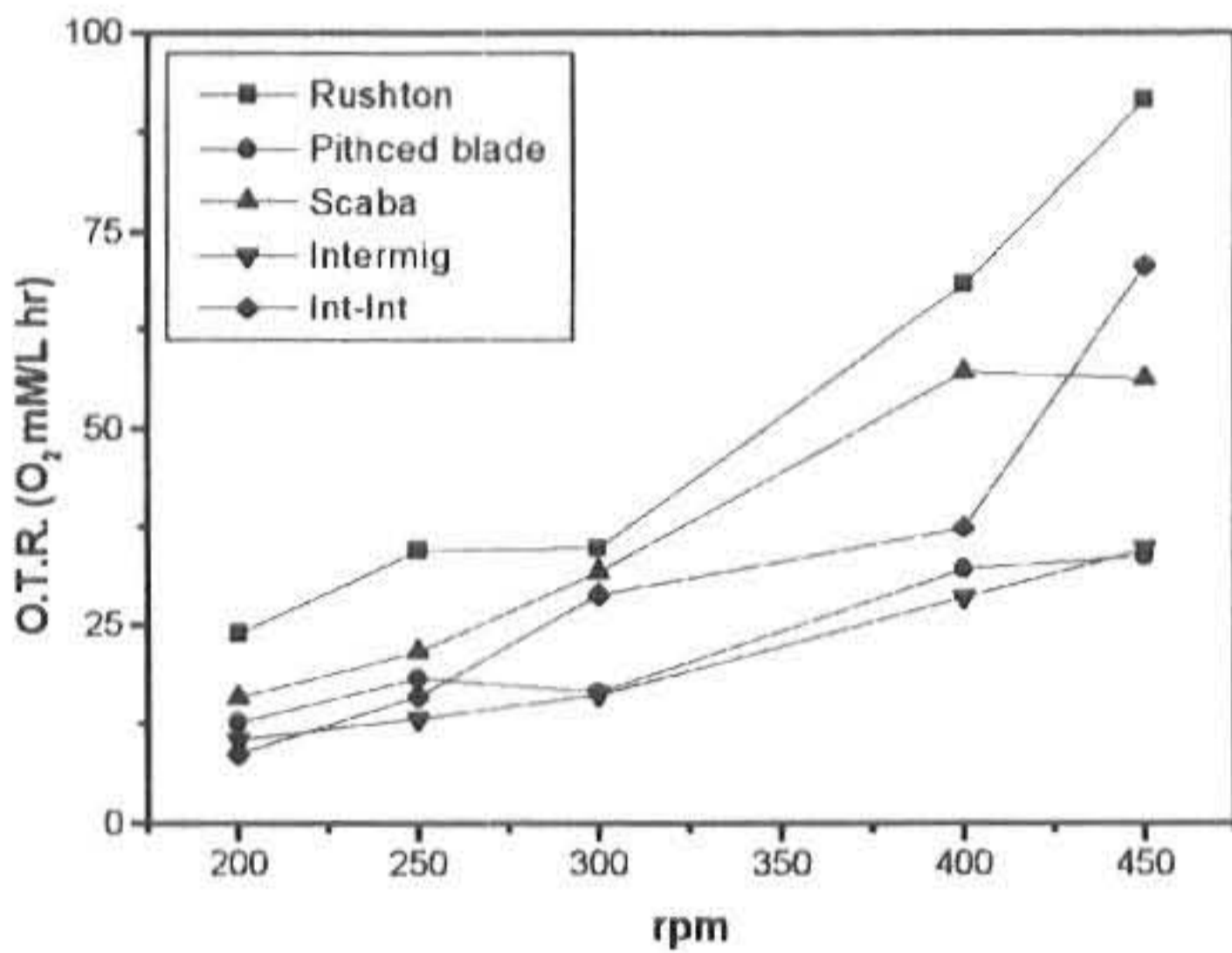


Fig.2 Effect of various impellers and impeller speed on oxygen transfer rate in water by dynamic method (impeller speed 300rpm).

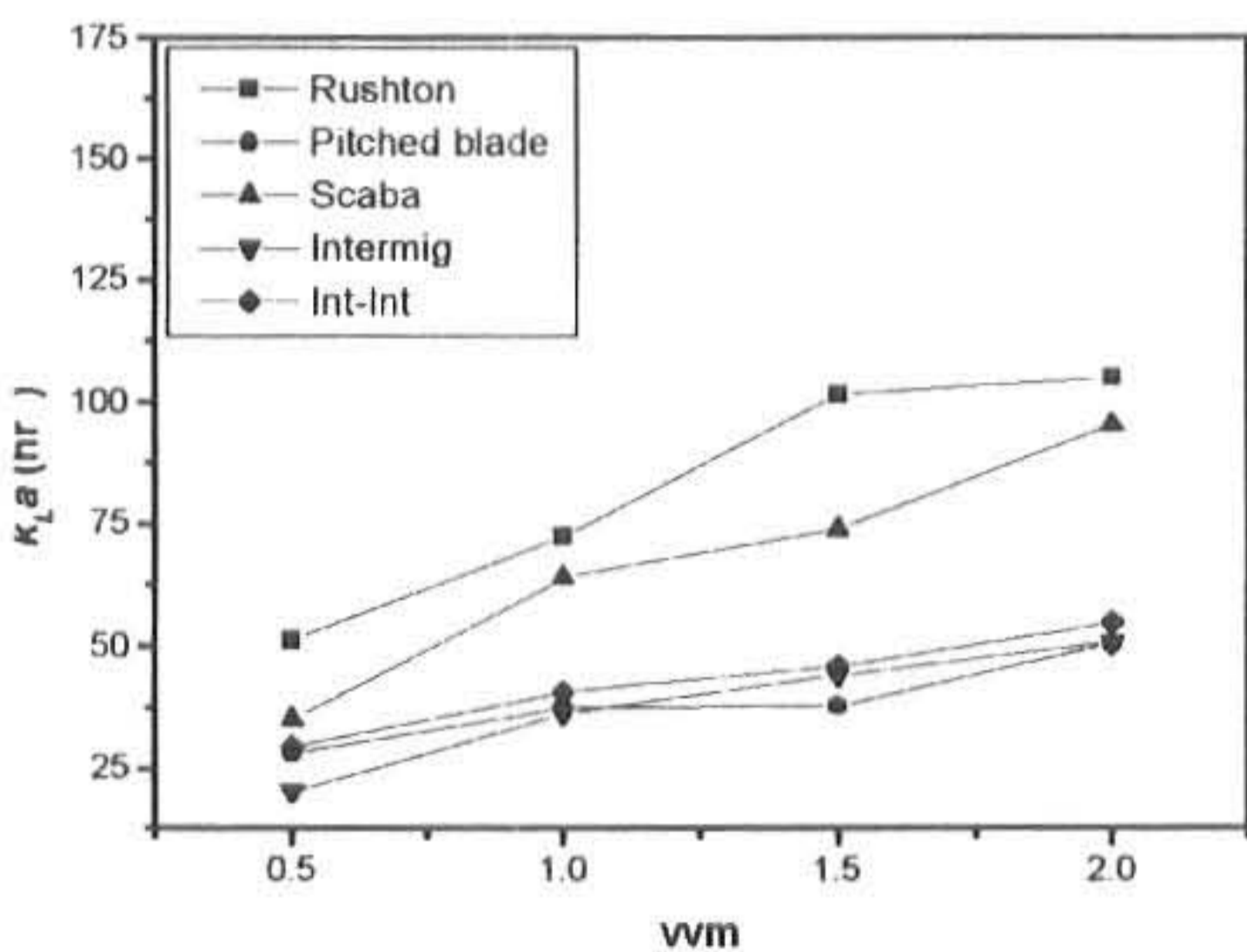


Fig.3 Effect of various impellers and vvm on k_{La} in water by dynamic method (impeller speed 300rpm).

k_{La} 와 O.T.R.은 교반속도나 통기량이 증가함에 따라 impeller종류에 관계없이 증가하는 경향을 나타내었다. k_{La} 와 O.T.R.은 rushton impeller의 경우 실험한 rpm과 vvm 전체 범위에서 가장 높은 값을 나타내었으며. scaba, int-int, pitched blade, intermig 순으로 감소하였다. 일반적으로 Scaba 임펠러는 rushton turbine보다 전체 혼합에 유리하나, 큰 교반기에서는 상단과 하단간의 혼합을 잘 시키지 못하여 교반기로부터 멀리 떨어진 곳은 산소농도가 낮으며, 원료 투입구 부근에 영양분, 산, 알칼리, 소포제의 농도가 높은 경향을 보인다. 따라서 Scaba의 경우가 교반이 더 잘 이루어진다는 것을 알 수 있었다. Rushton turbine 임펠러는 문헌에서 확인된 것처럼 공기가 빠른 속도로 흐를지라도 그대로 유출되지 않고 분산되기 때문에 산소를 필요로 하는 발효조 배양에서 사용하기에 가장 적절하다고 알려지고 있다¹¹⁾.

Rushton turbine의 경우 교반날개가 6개로 가장 많았고, 날개의 각이 90°로 상하 좌우 교반이 다른 임펠러에 비해 좋았다. Rushton turbine이 공기분산과 배지, 균체간의 혼합을 좋게하여 lincomycin 생산농도가 높은 것으로 판단된다.

모든 경우 교반속도의 변화가 통기량의 변화보다 더 큰 변화량을 나타내었으므로 통기량보다는 교반속도의 변화가 산소전달에 더 효과적이라고 생각된다.

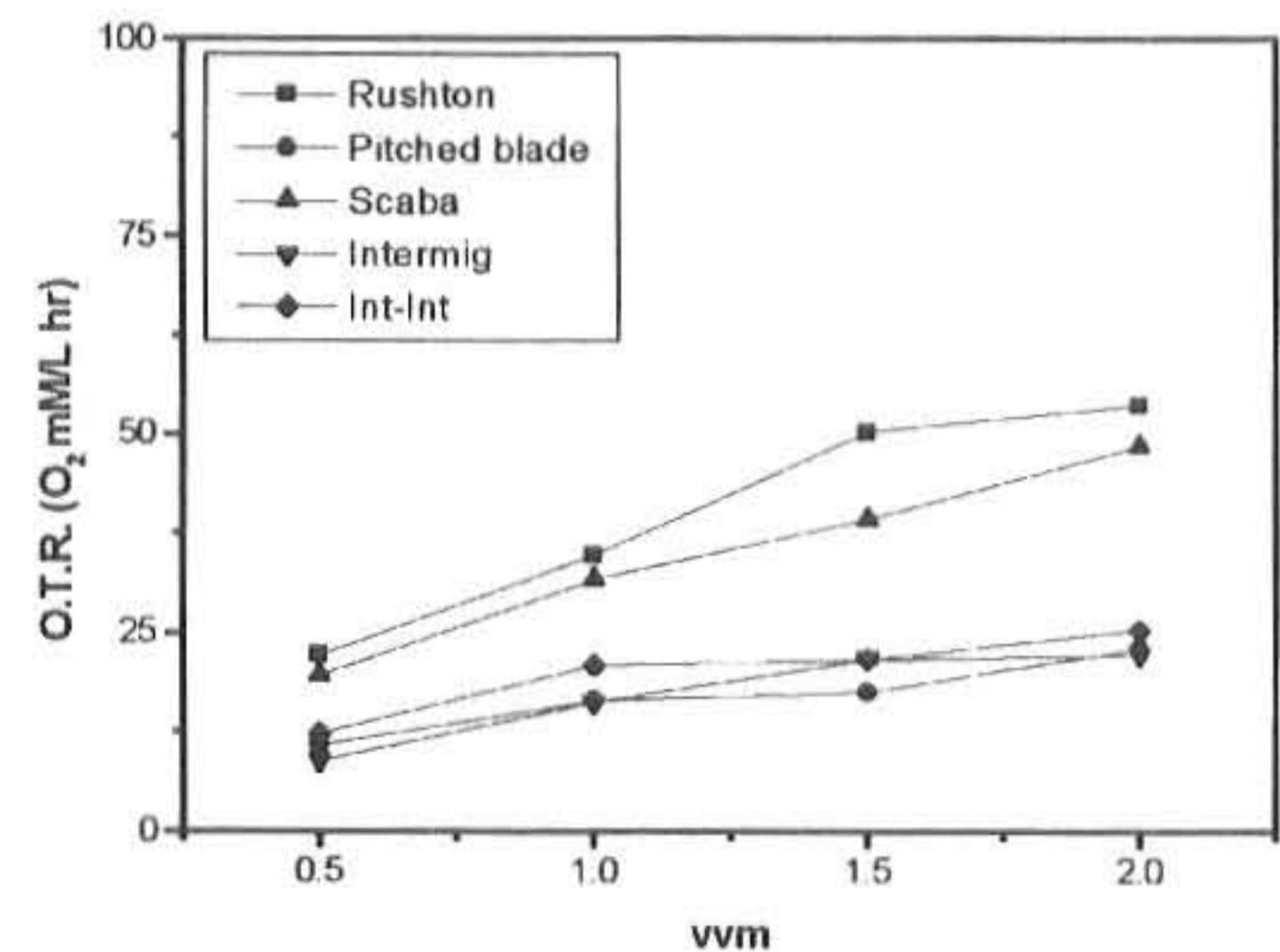


Fig.4 Effect of various impellers and vvm on oxygen transfer rate in water by dynamic method (impeller speed 300rpm).

3.2 Twin impeller들이 산소전달계수(k_{LA})에 미치는 영향

Twin impeller에 대한 실험 결과를 Fig.5-Fig.8에 나타내었다. 모든 twin impeller가 single impeller에서 가장 좋은 k_{LA} 와 O.T.R을 나타낸 rushton에 비하여 높은 k_{LA} 와 O.T.R을 나타내었다. 이러한 실험 결과로부터 single impeller의 경우 높은 교반속도에서 얻을 수 있는 좋은 효과를 twin impeller를 이용한다면 낮은 교반속도에서도 single impeller와 같은 효과를 얻을 수 있을 것으로 사료된다. 따라서, 교반속도를 낮추어줌으로써 높은 교반속도에서의 문제점으로 대두되는 전단력이 균체에 미치는 영향을 줄일 수 있을 것으로 생각되며 shear sensitivity 미생물 발효에 유용하리라고 생각된다.

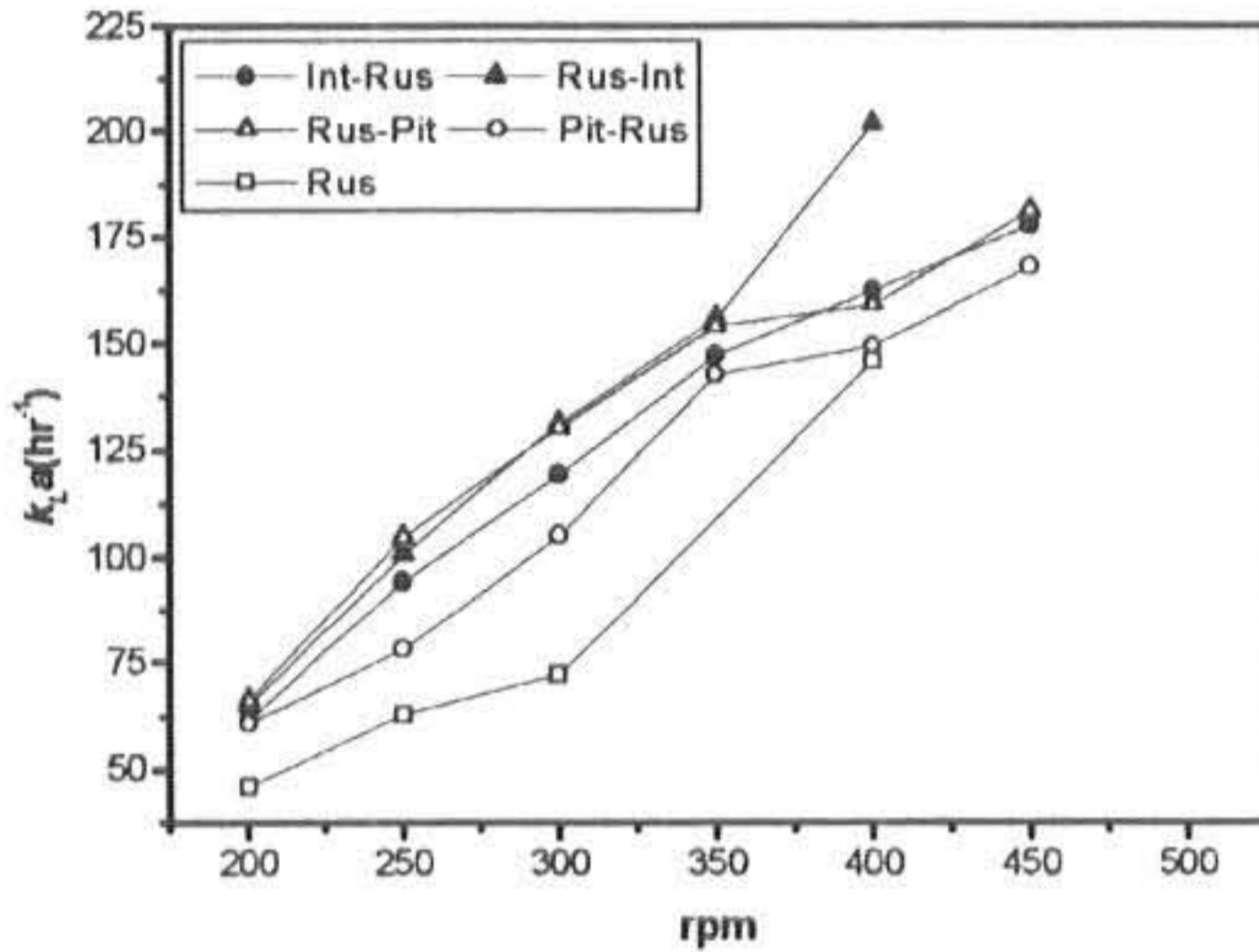


Fig.5 Effect of various twin impellers and impeller speed on k_{LA} in water by dynamic method(impeller speed 1vvm, first mentioned is the lower impeller).

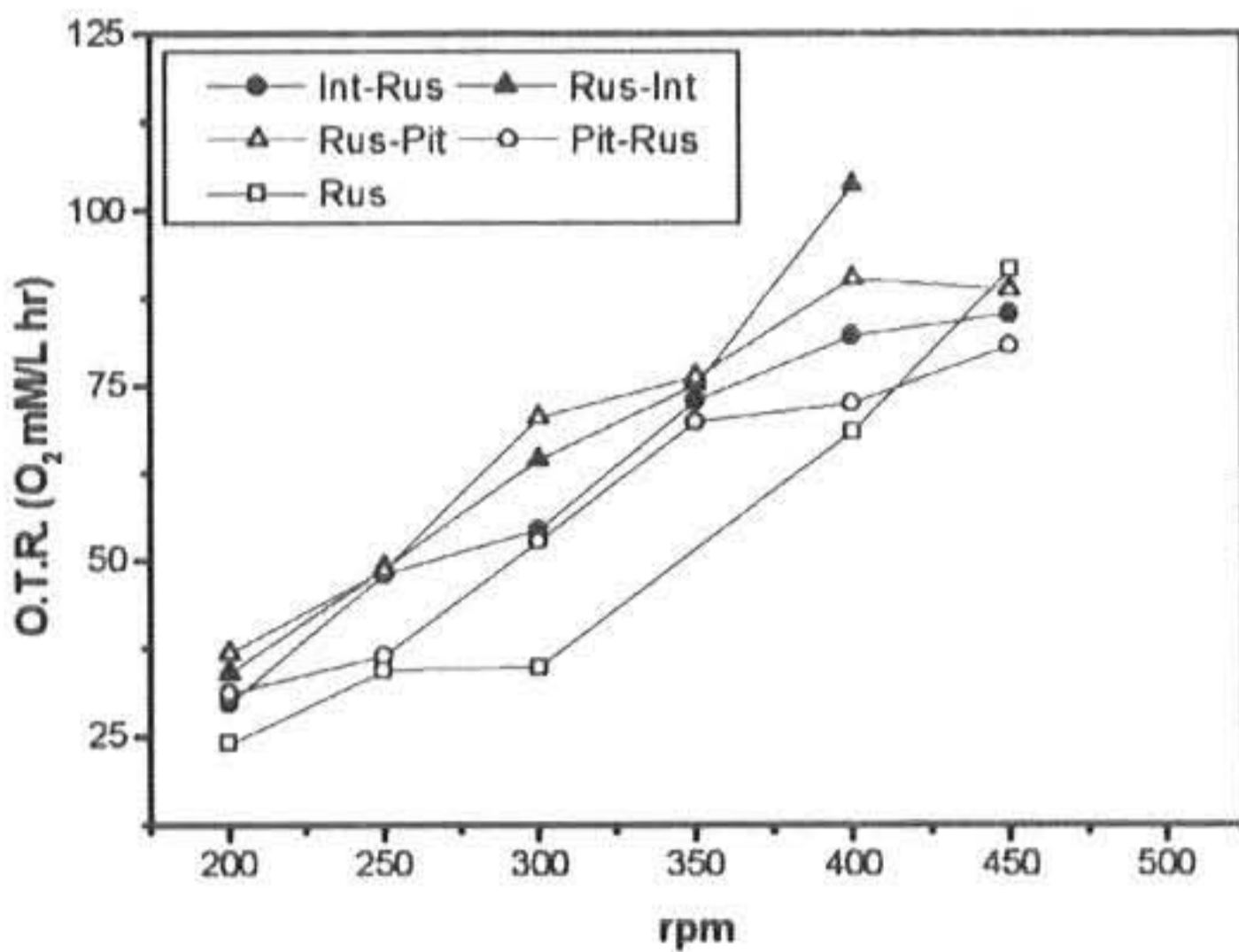


Fig.6 Effect of various twin impellers and impeller speed on oxygen transfer rate in water by dynamic method(impeller speed 1vvm, first mentioned is the lower impeller).

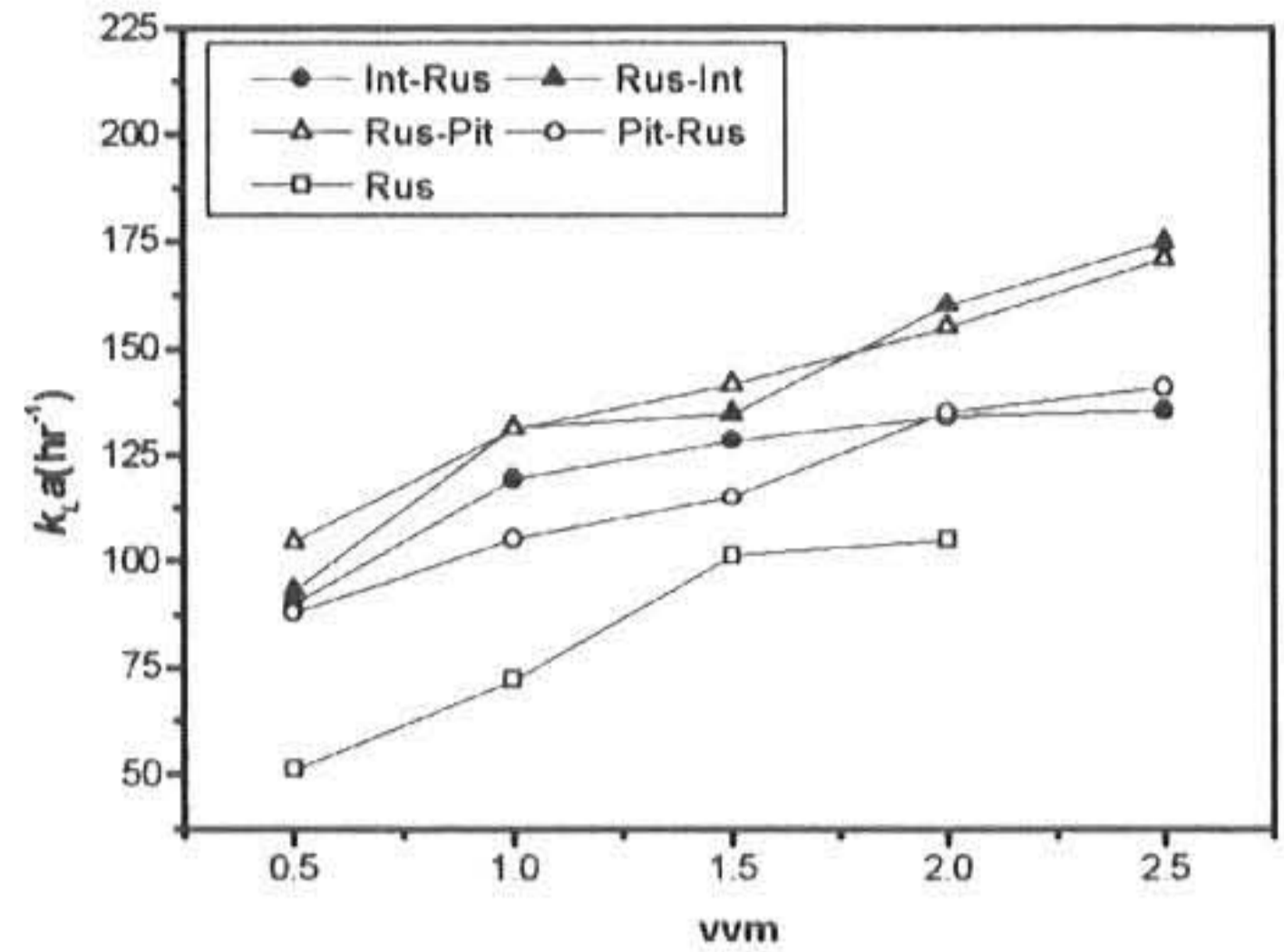


Fig.7 Effect of various twin impellers and vvm on k_{LA} in water by dynamic method(impeller speed 1vvm, first mentioned is the lower impeller).

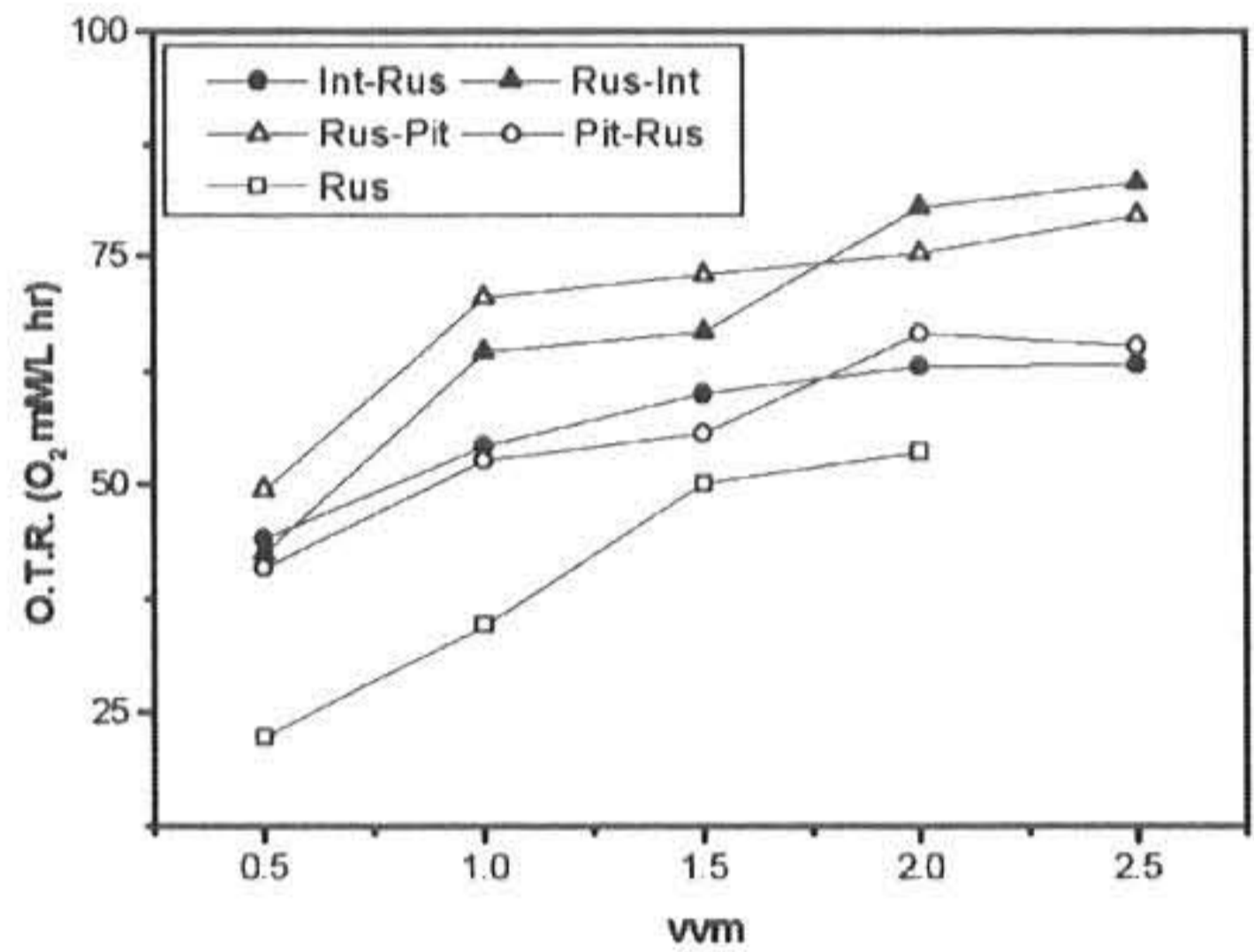


Fig.8 Effect of various twin impellers and vvm on oxygen transfer rate in water by dynamic method(impeller speed 1vvm, first mentioned is the lower impeller).

또한 twin impeller의 조합에서는 아래에 radial flow형을 위에는 axial flow형을 조합하였을 경우에 실험한 rpm과 vvm 전체범위에서 더 좋은 k_{LA} 와 O.T.R을 나타내었다⁴⁾. 즉, 아래에 rushton을 위에 intermig나 pitched blade를 조합한 경우가 비교적 높은 k_{LA} 와 O.T.R을 나타내었으며 Rus-Pit와 Rus-Int는 비슷한 값을 나타내었다. rushton 임펠러와 같이 radial flow를 형성하는 경우에는 공기를 잘 분산시킬 수 있지만 디스크를 중심으로 상단과 하단의 전체적인 혼합이 어려운 반면 intermig와 같은 axial flow를 형성하는 경우에는 공기 분산은 좋지 않더라도 상단과 하단의 혼합이 용이하게 이루어진다. 그러므로 본 실험의 결과에서와 같이 임펠러의 아랫쪽에는 radial flow형 임펠러

를 윗쪽에는 axial flow 형 임펠러를 조합하는 경우가 아랫쪽 임펠러는 공기의 분산을 잘 일으키고 분산된 공기들이 axial flow형 임펠러에 의하여 전체적으로 잘 혼합될 수 있는 최적 조건을 형성할 수 있을 것으로 생각되며 낮은 전단에서 효과적인 산소전달을 얻기 위해 Rush-Int가 최적일 것으로 생각된다.

3.3 점도가 산소전달계수(k_{La})에 미치는 영향

점도가 산소전달 속도에 미치는 영향을 알아보기 위하여 점도가 있는 배지와 물에서 rushton과 Rus-int impeller를 이용하여 k_{La} 와 O.T.R의 변화를 알아보았으며 그 결과를 Fig.9-Fig.12에 나타내었다. 앞의 실험에서와 마찬가지로 rushton impeller 단독보다는 twin impeller가 배지와 물에서 더 좋은 k_{La} 와 O.T.R을 나타내었다.

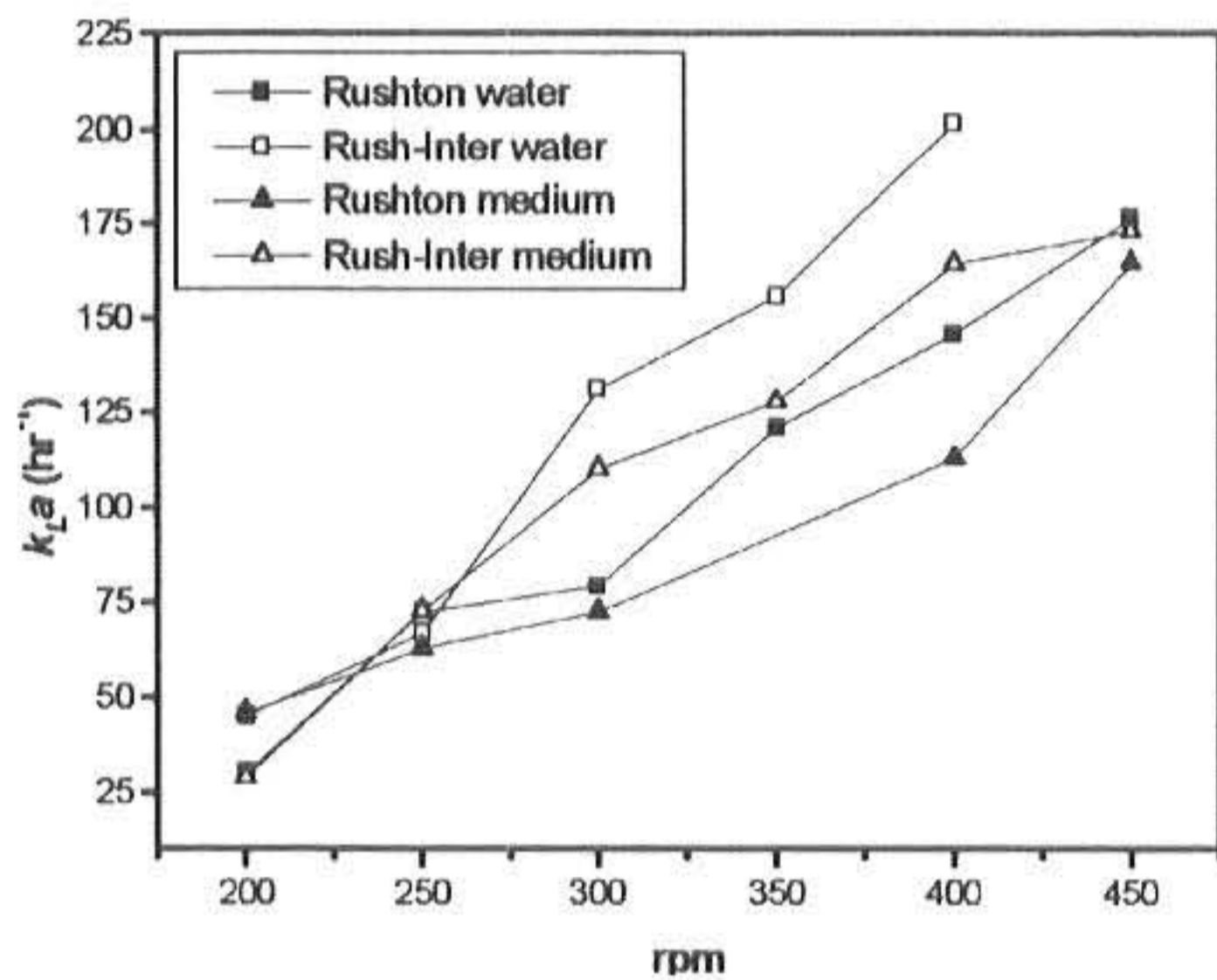


Fig.9 Effect of impeller type and impeller speed on k_{La} in water and broth by dynamic method (first mentioned is the lower impeller).

일반적으로 발효시 배지와 유사한 non-Newtonian 흐름을 형성하기 위하여 사용되는 CMC와 같은 용액의 경우 기포의 엉킴으로 인하여 평균 기포직경이 증가하게 된다⁴⁾. 기포의 크기가 증가될 경우 기포의 체류시간과 표면적이 감소하기 때문에 작은 기포에 비하여 전체적인 물질전달 속도(산소전달 속도)를 감소시킨다. 반면에 기포들이 작을수록 전체적인 접촉면적은 증가하여 빠른 산소전달이 이루어지므로 k_{La} 와 O.T.R는 증가하게 된다. 본 실험에서도 물에서보다는 점도가 있는 배지에서 더 큰 기포를 형성함으로써 물에서보다는 k_{La} 와 O.T.R이 전체 rpm과 vvm에서 감소하는 경향을 나타내었다.

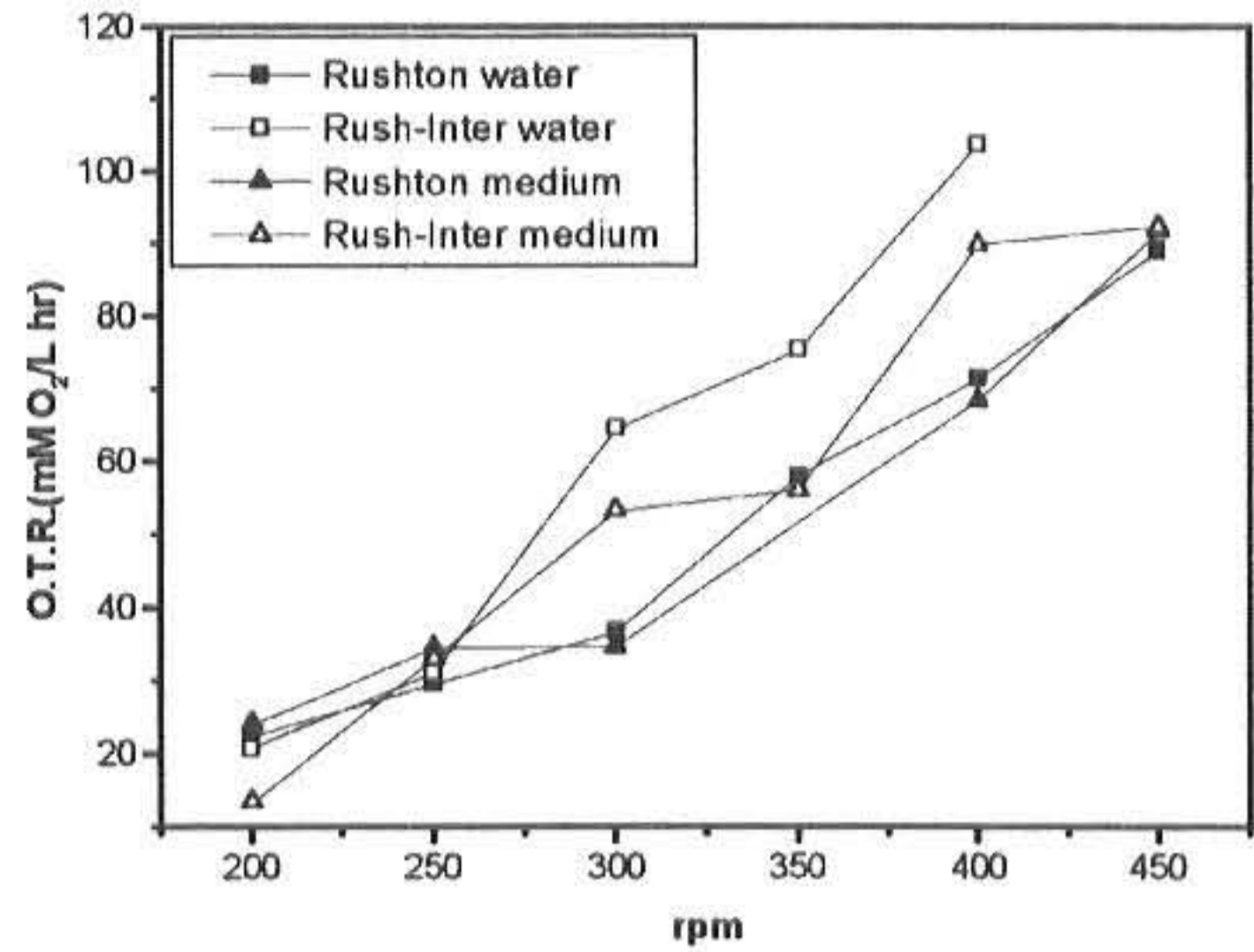


Fig.10 Effect of impeller type and impeller speed on oxygen transfer rate in water and broth by dynamic method (first mentioned is the lower impeller).

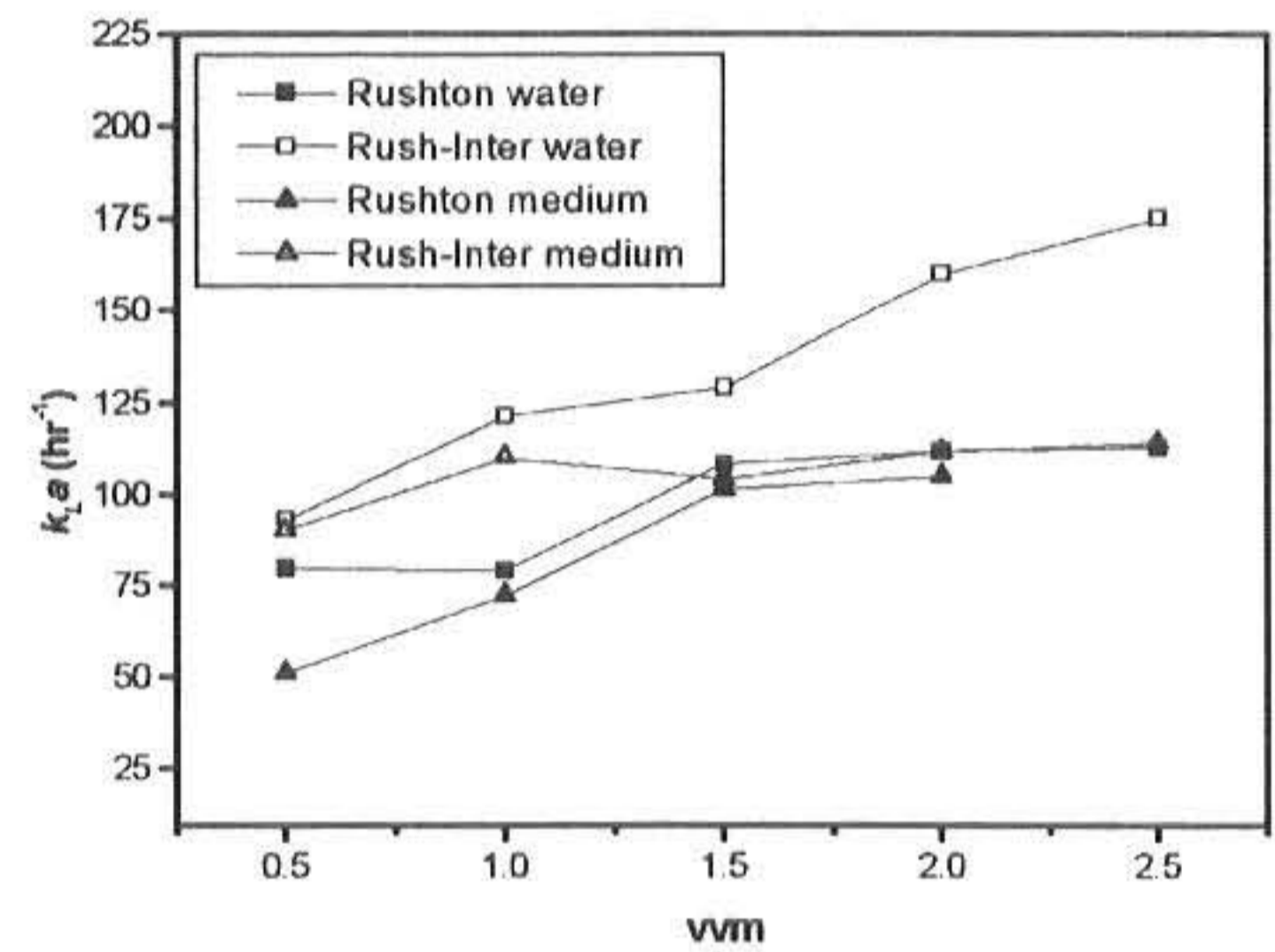


Fig.11 Effect of impeller type and vvm on k_{La} in water and broth by dynamic method (first mentioned is the lower impeller).

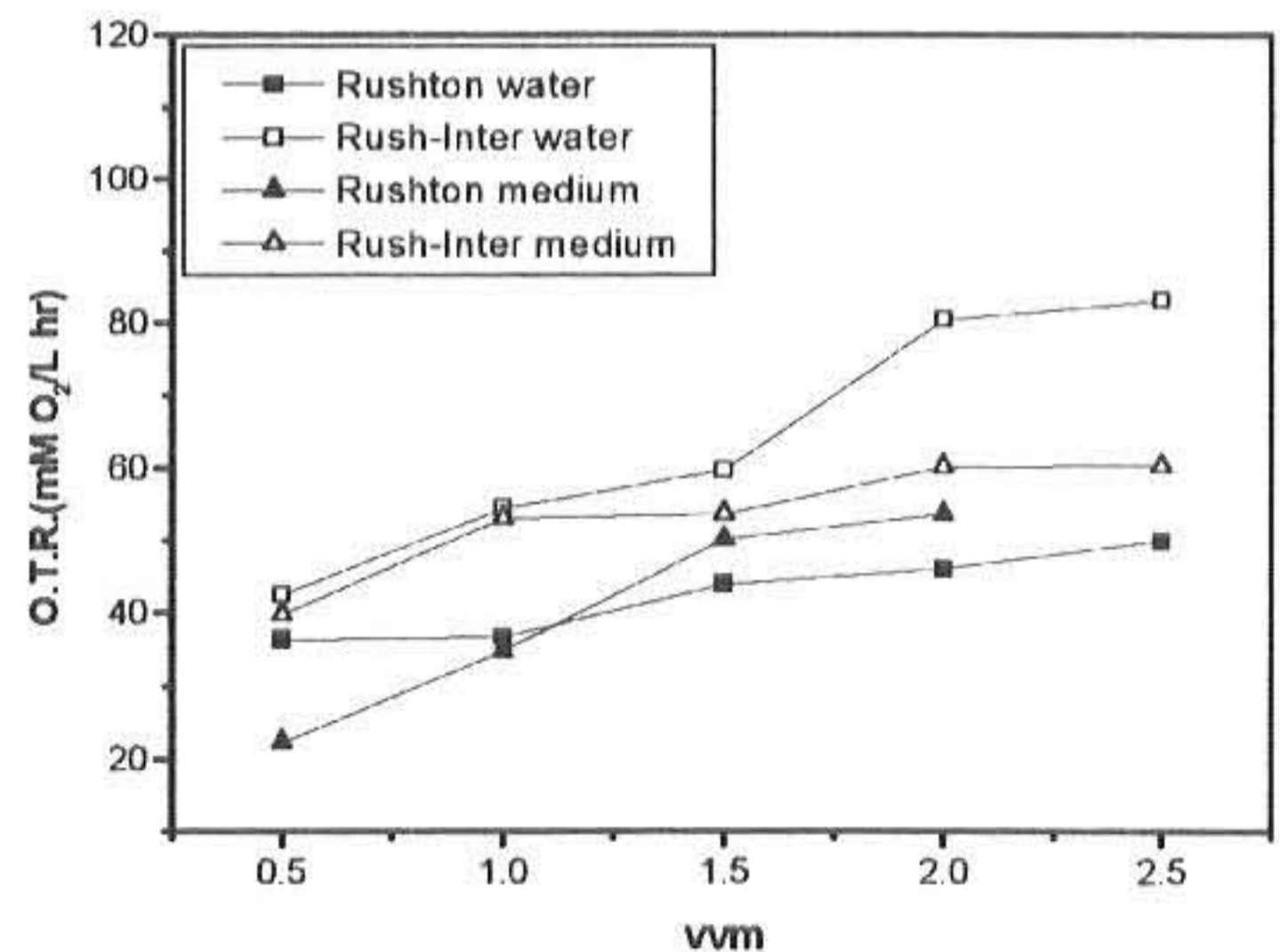


Fig.12 Effect of impeller type and vvm on oxygen transfer rate in water and broth by dynamic method (first mentioned is the lower impeller).

3.4 여러 가지 소포제가 산소전달계수(k_{La})에 미치는 영향

발효공정에서 거품의 형성은 아주 일반적인 것으로 이를 제어하기 위하여 소포제를 사용한다. 실리콘 소포제가 보통 많이 이용되고 있으며 이러한 소포제들은 거품을 제어할 수 있지만 이들은 또한 물질전달에 영향을 미친다^{10,12)}.

그러므로 본 실험에서는 이러한 소포제의 종류와 농도가 산소전달에 미치는 영향을 알아보기 위하여 실리콘소포제인 CA와 PPG, PEG의 농도에 따른 k_{La} 를 실험하였다. Fig. 13은 소포제의 종류와 농도가 산소전달속도에 미치는 영향을 나타낸 것이다.

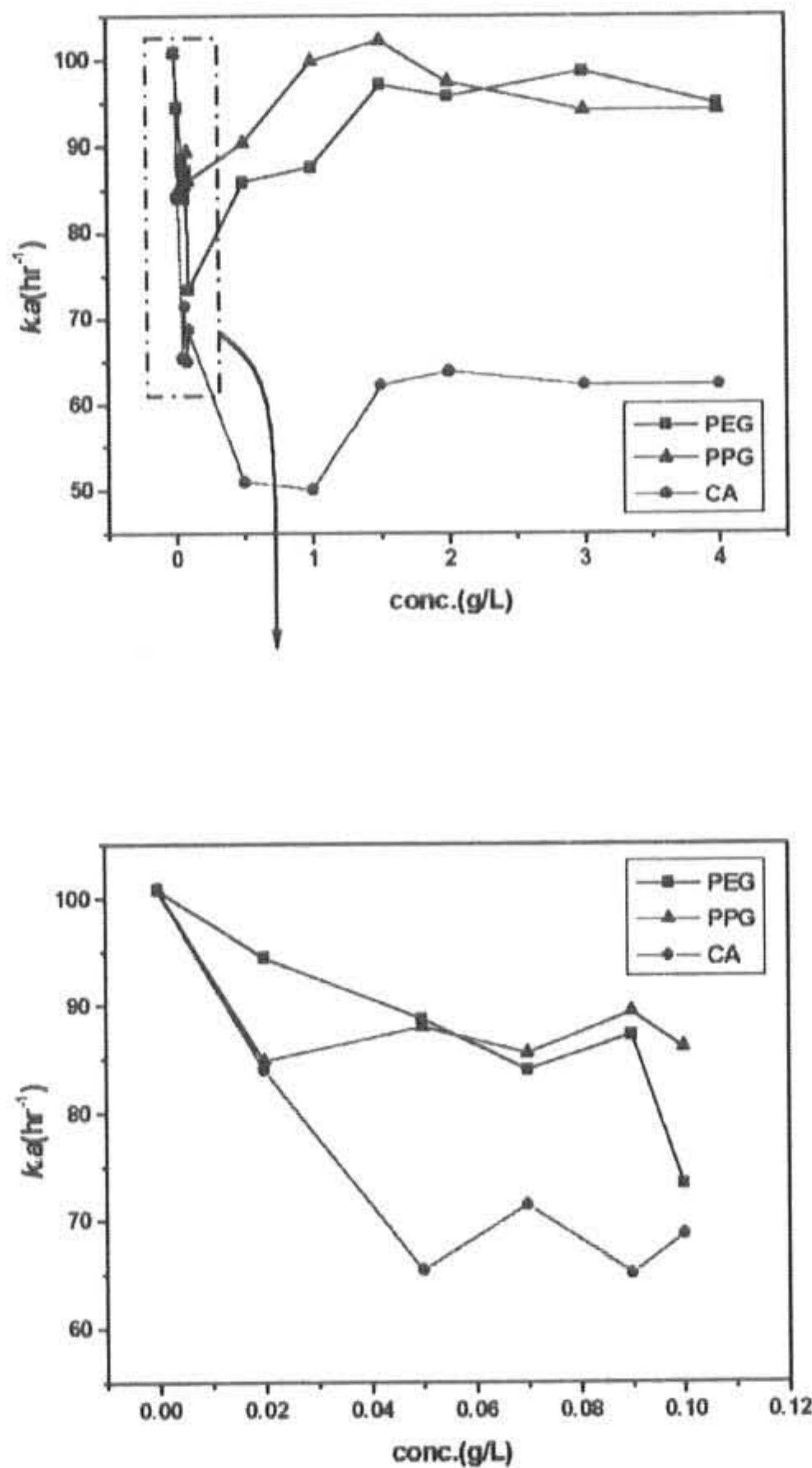


Fig. 13 Effect of various antifoams and concentration on k_{La} in water at 300 rpm and 1 vvm.

소포제의 농도가 증가함에 따라 PPG나 PEG의 경우 약 0.1 g/L까지는 k_{La} 가 감소하였지만

그 이상에서는 다시 증가하여 일정한 값을 나타내었다. CA의 경우에는 이미 보고된 바와 같이 농도가 증가함에 따라 k_{La} 는 급격하게 감소하였으며 1 g/L 이상에서는 약간 증가하다가 일정한 값을 나타내었다. 이는 약 1 g/L 이상에서는 CA가 더 이상 물에 섞이지 않고 우유 빛 유적들로 물에 떠 다니는 것을 볼 수 있었는데 이러한 CA의 상분리에 따른 영향으로 생각된다. 소포제의 첨가는 일반적으로 기포의 표면장력을 감소시켜 기포를 영기게 하여 기포의 크기를 증가시키게 된다. 결국, 기포의 부피에 대한 표면적을 작게하여 산소 이동속도는 감소한다. 또한 기포가 작은 경우 기액 계면의 표면적은 증가되지만 기포의 전체 부피가 작고 기포 체류시간이 길어져 산소가 고갈된 기포를 발생시키므로 k_{La} 는 감소한다. 본 실험 결과에서도 소포제의 종류와 농도에 관계없이 소포제를 넣지 않은 경우보다 k_{La} 는 감소하는 경향을 나타내었다. 따라서 소포제를 사용하지 않는 것이 좋겠지만 그럴 경우 형성된 거품으로 인하여 액이 발효조 밖으로 넘친다거나 외부로부터의 오염원인이 되기 때문에 거품 제어는 발효에 있어서 필수적이다. 그러므로 되도록 최소량으로 좋은 거품제어 효과를 나타내는 소포제를 선택하는 것이 중요하다. 본 실험 결과 CA보다는 PPG나 PEG의 경우가 k_{La} 에 비교적 영향을 덜 미치는 것으로 나타났으며 PPG의 경우가 비교적 안정된 경향을 나타냄으로써 CA와 PEG에 비하여 사용이 용이할 것으로 사료된다.

3.5 Solute가 산소전달계수(k_{La})에 미치는 영향

Solute가 액상에 존재하면 액체의 성질을 변화시킴으로서 기포의 크기에 영향을 미친다고 알려져 있다^{3,7)}. 즉, 평균 기포직경을 결정하는 coalescence현상에 영향을 미친다. Coalescence-promoting liquid에서는 주로 기포들 사이에 충돌로 실제 가스의 단위부피당 표면적을 감소시키는 크기가 큰 기포들을 형성한다. 반면에 전해질 물질들이 녹아있는 coalescence-inhibiting liquid에서는 충돌이 큰 기포를 형성하지 않는다. 이는 일단 임펠러에 의하여 부수된 기포들이 그 상태 그대로 남아있음을 의미한다. 이러한 성질을 갖는 액체들은 큰 기-액 접촉면적을

갖는다. DCW는 coalescing liquid이며 salt의 첨가는 이를 non-coalescing liquid로 만들어줌으로써 물질전달 속도를 증가시키며, 이러한 전해질 물질이 영향을 미치는 한계 농도가 존재한다고 보고되어 있다. Lee와 Metrick 등은 이러한 전해질 물질들의 non-coalescing은 알맞은 전해질 물질 농도가 두 개의 인접한 기포 사이에 형성된 필름의 성질을 변화시킴으로써 기포들의 coalescence 방해 효과로부터 기인한다고 보고하였다¹³⁾.

본 실험에서는 배지에서 주로 사용되는 NaNO_3 의 농도가 산소전달계수(k_{La})에 미치는 영향을 알아보았으며, 그 결과를 Fig.14에 나타내었다. NaNO_3 의 농도가 증가함에 따라 15g/L까지는 큰 영향을 나타내지 않았지만 그 이상에서는 급격한 증가를 나타내어 20 g/L를 첨가하였을 경우에는 air-water계에서보다 약 50% 정도 k_{La} 가 증가하였다.

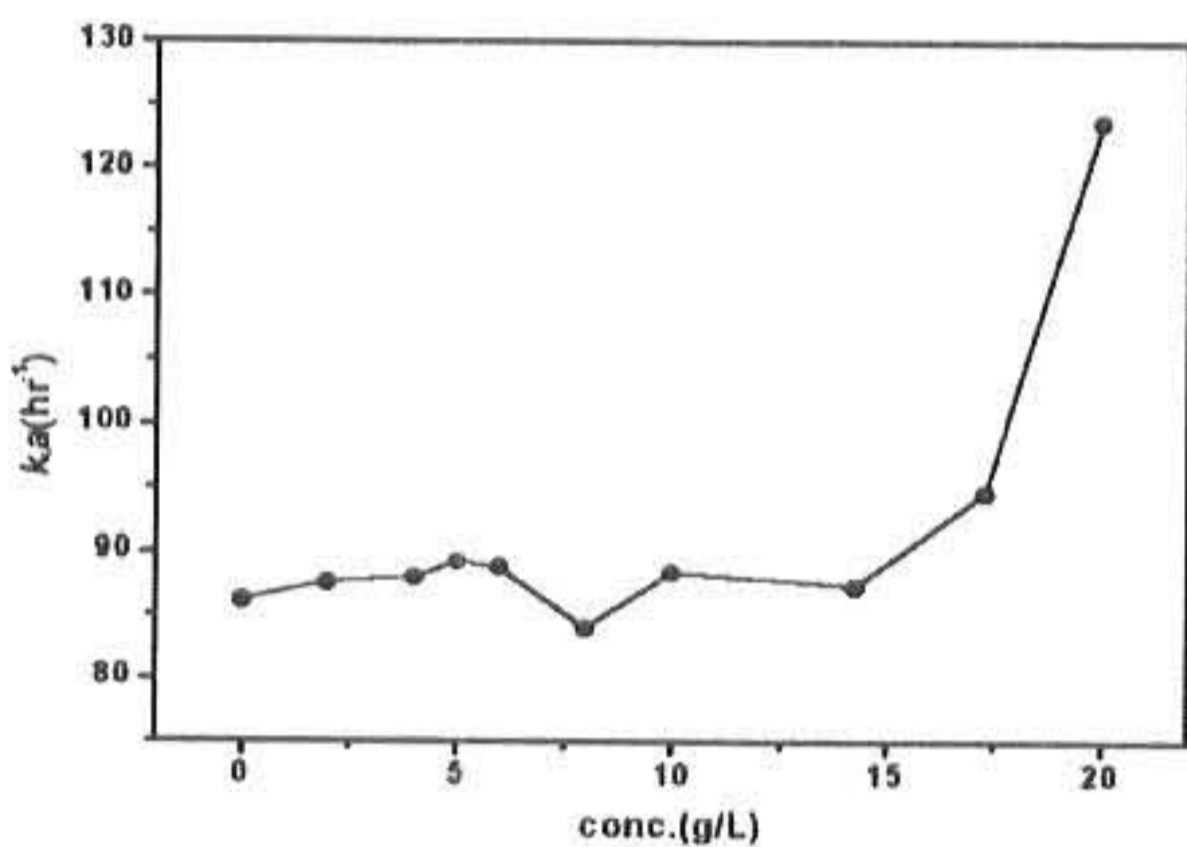


Fig.14 Effect of NaNO_3 concentration on k_{La} in water 300 rpm and 1 vvm.

3.6 Twin impeller의 위치가 산소전달계수(k_{La})에 미치는 영향

Rush-Int와 Rush-Pit dual impeller 조합의 경우 각 임펠러의 위치가 k_{La} 에 미치는 영향을 고찰하였다. 표기는 처음에 언급한 임펠러가 발효조 바닥에서 가까운 즉, 교반봉에서 낮은 부분에 위치한 임펠러를 나타낸 것이다. 이 임펠러의 높이를 3 cm로 고정시키고, 위쪽에 위치한 임펠러를 발효조 바닥으로부터 6, 6.5, 7, 7.5, 8, 8.5, 9 cm로 변화시켜 두 가지 임펠러의 높이를 조합하여 실험하였다. 그 결과를 Fig.15에 나타내었다.

Rush-Int twin impeller와 Rush-Pit twin impeller의 경우 모두 특정 높이의 조합에서 최대 k_{La} 값을 나타내었다. 특히, Rush-Int dual impeller의 경우에는 높은 임펠러가 7.5 cm인 경우(ratio 2.5) 가장 높은 k_{La} 를 나타내었다. Rush-pit dual impeller의 경우에는 높은 임펠러가 6.5 cm인 경우(ratio 2.17) 최대 k_{La} 값을 나타내는 등 임펠러의 위치에 따라서 k_{La} 값이 크게 변화함을 알 수 있었다. 이와 같은 실험결과 발효조에서 임펠러의 위치가 k_{La} 변화에 영향을 미치는 중요한 요인이 되며, Rush-Rush dual impeller보다 Rush-Int dual impeller의 경우 비교적 높은 k_{La} 를 나타냄으로써 교반 효과가 더 좋을 수 있었다.

4. 결론

회분식 발효조 배양에서 교반속도, 소포제, 임펠러가 산소전달계수(k_{La})에 미치는 영향을 조

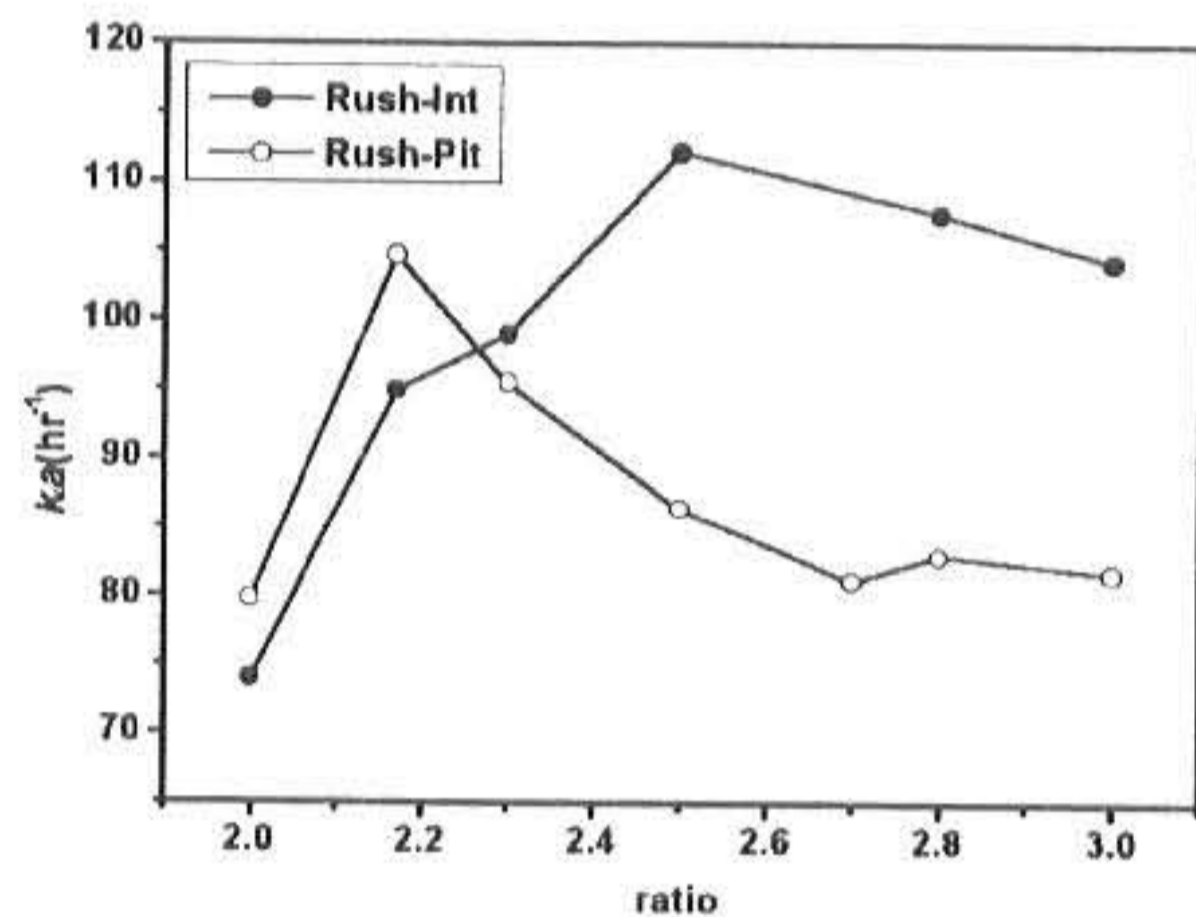


Fig.15 Effect of impeller stage on k_{La} in water. (Ratio means that the second mentioned impeller clearance from the base of the vessel over the first mentioned impeller clearance from the base of the vessel).

사한 결과 rushton 임펠러의 경우 실험한 교반속도와 통기량 전체범위에서 가장 높은 값을 나타내었으며, scaba, intermig-intermig (int-int), pitched blade(Pit), intermig(Int)순으로 감소하였다. dual impeller의 k_{La} 는 아래쪽에 radial flow인 rushton을 위쪽은 axial flow인 intermig나 pitched blade를 조합한 경우가 비교적 높은 값을 나타내었

를 조합한 경우가 비교적 높은 값을 나타내었다. 점도가 산소전달계수(k_{La})에 미치는 영향을 조사한 결과 점도가 있는 air-medium계에서 산소전달계수(k_{La})는 air-water계에서보다 감소하였다. 또한 소포제의 경우에는 PPG의 경우가 비교적 안정된 값의 변이로 가장 적당한 소포제로 생각되었으며, solute의 첨가에 대한 경우 NaNO_3 를 약 20 g/L 첨가하였을 경우 첨가하지 않은 경우에 비하여 50%정도 k_{La} 가 증가함으로써 전해질 물질의 존재가 산소전달속도에 중요한 영향을 미침을 알 수 있었다.

Rush-Int dual impeller와 Rush-Pit dual impeller의 경우 모두 특정 높이의 조합에서 최대 k_{La} 값을 나타내었다. 즉, Rush-Int dual impeller의 경우에는 높은 임펠러가 7.5 cm인 경우(ratio 2.5) 가장 높은 k_{La} 를 나타내었다. Rush-pit dual impeller의 경우에는 높은 임펠러가 6.5 cm인 경우(ratio 2.17) 최대 k_{La} 값을 나타내었다. 이와 같은 실험결과 발효조에서 임펠러의 위치가 k_{La} 변화에 영향을 미치는 중요한 요인이 됨을 알 수 있었다.

참고문헌

- 1) Amanullah, A., L.S. Carreon, B. Castro, E. Galindo, and A.W. Nienow : The influence of impeller type in pilot scale xanthan fermentations. *Biotechnol. and Bioeng.* Vol.57, pp.95-108, (1998)
- 2) Milner, J. A., D. J. Martin, and A. Smith: Oxygen transfer conditions in the production of alpha - amylase by *Bacillus amyloliquefaciens*. *Enzyme Micro. Technol.* Vol.18, pp.507-512, 1996
- 3) Arjunwadkar, S. J., K. Saravanan, A. B. Pandit, and P. R. Kulkarni : Optimizing the impeller combination for maximum hold-up with minimum power consumption. *Biochem. Eng. J.* Vol.1, pp.25-30. (1998)
- 4) Arjunwadkar, S. J., K. Saravanan, P. R. Kulkarni, and A. B. Pandit: Gas-liquid mass transfer in dual impeller bioreactor. *Biochem. Eng. J.*, Vol.1, pp.99-106, (1998)
- 5) Stanbury P.F., Allan Whitaker, and Stephen J. H. : *Principles of Fermentation Technology*. 2ed.,

PERGAMON, pp.99-304, (1995)

- 6) Wongsamuth, R., and P. M. Doran : Foaming and cell flotation in suspended plant cell cultures and the effect of chemical antifoams. *Biotech. and Bioeng.*, Vol.44, pp.481-488, (1985)
- 7) Parag R. Gogate, Anthony A.C.M. Beenackers, Aniruddha B. Pandit: Multiple-impeller systems with a special emphasis on bioreactors. *Bio. Eng. J.*, Vol.6, pp.109-144, (2000)
- 8) Young, M. D., and L. L. Kempe : Effects of phosphate, glucose, and ammonium on cell growth and lincomycin production by *Streptomyces lincolnensis* in chemically defined media. *Biotechnol. and Bioeng.*, Vol. 27, pp.327-333, (1985)
- 9) Al-Masry, W.A., and A.R. Dukkan, *Ind. Eng. Chem. Res.*, Vol.37, pp.41-48, (1998)
- 10) Wang, S. J., and J. J. Zhong : Comparison of O_2 transfer characteristics between a new centrifugal impeller and a flat-bladed turbine impeller. *Biotechnol. Techniq.* Vol.11, pp.763-767, (1997)
- 11) Koch V., H. M. Ruffer, K. Schugerl, E. Intersbernst, H. Menzel, and J. Weis, *Process Biochem.*, Vol.30, pp.435-446, (1995)
- 12) Jin-Woo K., Seok-Woo K., Gyu-Wha L. Sang-Youn L. Sang-Mock K., and Dong-II K. : Antifoam Agents for Plant Cell Suspension Cultures. *Kor. J. Biotech. Bioeng.*, Vol.12, pp.323-327, (1997)
- 13) J.C. Lee, D.L. Meyrick, *Trans. Inst. Chem. Eng.* Vol.48, T37, (1970)

(2001년 5월 2일 접수, 2001년 8월 22일 채택)