

양어장 수질관리를 위한 삼상유동층 반응기의 혼합 및 산소전달특성

이병헌 · 김정숙 · 강임석*

부산수산대학교 환경공학과 · *Iowa 대학교 토목공학과

Mixing and Oxygen Transfer Characteristics of Three Phase Fluidized Bed for Water Quality Management of Aquaculture

Byung-hun LEE, Jeong-sook KIM, and Im-suk KANG*

Department of Environmental Engineering, National Fisheries
University of Pusan, Nam-gu, Pusan 608-737, Korea

*Department of Civil Engineering, Iowa State
University, Ames, Iowa, USA

ABSTRACT

This study was conducted to elucidate mixing characteristics of the media to determine hydraulic model parameters of the three phase fluidized bed for the water quality management of aquaculture. The volume and H/D ratio of the reactor were 1.76 Liter and 10.9, respectively. The experimental results showed that variance (σ^2) and dispersion number ($D/\mu L$) were above 0.47 and 0.35~ ∞ , respectively. Therefore, the condition of the reactor was almost ideal complete mixing. The dependence of the overall oxygen-transfer coefficient (K_{La}) on each experimental variables through a multiple linear regression was given by the following equation ;

$$K_{La} = 44.9 (D_i/D_c)^{-0.4611} A_f^{0.8622} C_m^{-0.0746} d_p^{-0.4302}$$

서 론

양어장 순환수처리를 위한 처리공법으로는 침지여상법(Nijhof and Bovendeur 1990; Carmignani and Bennelt 1977), 회전원판공법(Antonie *et al.* 1974; 임 1993), 살수여상법(Rogers and Klemetson 1985) 및 수경법(Lewis *et al.* 1978)이 많이 이용되고 있다. 최근에는 처리공법의 효율증대를 위하

여 유동층공법(Jewell and Cummings 1990)에 의한 양어장 순환수의 처리에 대한 연구도 진행중이다.

유동층공법은 공기를 반응기에 직접 공급하여 매디아를 유동시키는 직접포기방식과 반응기 외부의 포기조에서 산소를 용존시켜 유체를 반응조로 유입하여 매디아를 유동시키는 간접포기방식이 있다. 직접포기방식은 반응기내에 기체-액체-고체가 공존하게 되므로 삼상유동층 반응기라 부르고, 간접포기방식은 액체-고체가 공존하여 이상유동층 반응기라 한다. 본 연구는 공기를 반응기에 직접 주입하는 삼상유동층 반응기를 양어장 순환수처리장치로 선정할 경우 삼상유동층 반응기의 총괄산소 전달계수(K_La)의 파악과 모델의 기초자료로서 혼합양상을 측정하는 것이 목적이다.

삼상유동층 반응기는 일반적으로 산소가 반응기에 주입되므로 인하여 반응기내에 산소결핍현상을 초래하지 않는 장점이 있어 여러 연구가 시도되고 있다(Sehic 1981). 삼상유동층의 운전시 동력학적 해석 및 수학적 모델의 적용을 위해서는 혼합특성에 대한 연구와 매디아 농도 및 공기주입량 등에 따른 산소전달특성에 대한 연구를 수행하여야 하는데 이것은 양어장 순환수처리에 소요되는 산소량과 포기의 용량을 선정하는데 중요하다.

재료 및 방법

1. 실험장치

본 연구의 실험장치는 Fig. 1과 같다. 생물학적 유동층 반응조는 3 mm 두께의 원통아크릴을 사용

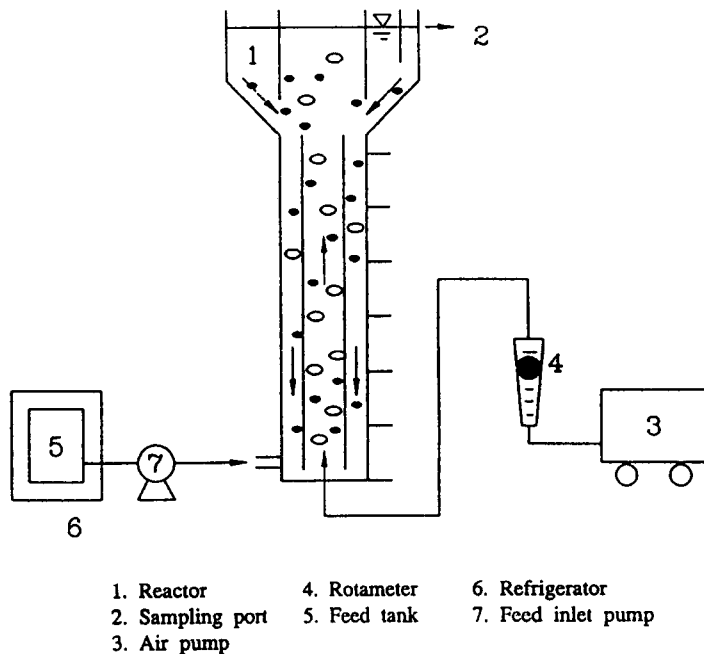


Fig. 1. Schematic diagram of the experimental apparatus.

하여 제작하고 총용적은 1.76 l이다. 내부에 각각 내경이 2.6 cm, 3.6 cm의 draft tube을 넣고 판의 중심에 공기를 주입하였다. 생물학적 유동층 반응기의 Height/ Diameter는 박(1992)과 홍(1987)등에 의해 설정된 값과 비슷한 10.9이며 반응조 직경과 draft tube 직경비를 2.46:1, 1.78:1로 하고 상향로와 하향로의 면적비가 1:5.55, 1:2.16로 설계하였다. 기질주입은 ISM 021-0030 (Cole-Parmer Instrument Company)과 호스를 사용하였으며 반응조의 내부에는 무수한 미세공으로 이루어진 활성탄을 사용하였다.

2. 반응기 혼합양상 실험(Dye Test)

직경 6.4 cm의 유동층 반응조 내부에 직경이 2.6 cm, 3.6 cm인 draft tube를 각각 설치하고, 산기석을 통하여 0.47-1.52 l/l/min의 공기를 주입하였다. 반응조 직경(6.4 cm)에 대한 draft tube 비를 2.46:1, 1.78:1로 실험을 행하였다. 계속 수돗물을 흘려보내다가 20% NaCl 10 ml를 유체의 하향류 지점에서 순간주입하고 유출수지점에서 전기전도도는 Cole-Parmer Instrument Company의 G-01486-00인 Conductivity meter에 응답되는 값을 레코드로 기록하였다. 혼합의 정도를 나타내는 방법으로는 분산(σ^2 , variance)과 분산수(D/ μ L, dispersion number)가 있다(Levenspiel 1967). 분산과 분산수를 구하기 위해서는 유체의 평균체류시간(\bar{t})을 구하여야 한다. 평균체류시간(\bar{t})이란 반응조를 통과하는 각 액체분자의 출구통과시간의 평균치로서 식(1)과 같이 구할 수 있다.

$$t = \frac{\sum C_i t_i}{\sum C_i} \quad (1)$$

여기서 t = 평균체류시간, T
 t_i = 출구통과시간, T
 C_i = 통과하는 비반응성 물질의 농도, ML⁻³

분산(σ^2)은 식(2)와 같이 표현된다.

$$\sigma^2 = \frac{\sum C_i t_i^2}{\sum C_i} - t^2 \quad (2)$$

분산도가 큰 경우에 밀폐된 용기에서의 분산은 식(3)과 같이 표현된다.

$$\sigma^2 = 2 D/\mu L - 2 (D/\mu L)^2 (1 - e^{-\mu L/D}) \quad (3)$$

여기서 D = 분산계수
 L = 반응조 길이
 μ = 반응조내의 액체의 속도

식(2)에서 분산(σ^2)을 구한다음 Trial and error method로 분산수(D/ μ L)를 구하였다.

3. 총괄산소전달계수(K_{La}) 측정

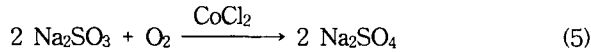
총괄산소전달계수(K_{La})는 포기장치가 설치된 반응조에 시간에 따른 용존산소의 농도변화를 식 (4)로 구할 수 있다. 수중의 용존산소는 식 (5)와 같이 환원제인 아황산나트륨(Na₂SO₃)과 촉매제인 코발트(CoCl₂)를 투입하여 탈산소화시키는데 양론적으로 용존산소 1 ppm 제거당 아황산나트륨 7.9 ppm이 필요하지만 10-20% 과잉투입하고 CoCl₂도 0.05 ppm을 초과하지 않도록 투입하였다. 무산소 상태로 만든 후에 포기를 시작하고 포기 시작 직후부터 시간에 따른 용존산소 농도변화를 반응기의 하향류 지점에서 Cole-Parmer Instrument Company의 D-05518-00인 YSI Dissolved oxygen meter를 사용하여 레코드로 기록하여 계산하였다. 반응기내의 입자하향유속의 측정은 반응조 하향로에 일정한 간격을 정하여 입자가 정해진 거리를 통과하는 시간으로 나누어 계산하였다.

$$K_{La} = \frac{1}{t} \ln \frac{C_s - C_o}{C_s - C_t} \quad (4)$$

여기서, C_s = 포화용존산소농도 (mg/l)

C_o = 시간 0 에서의 용존산소농도 (mg/l)

C_t = 시간 t 에서의 용존산소농도 (mg/l)



결 과

1. 분산, 분산수

실험의 평균체류시간(\bar{t}), 분산(σ^2), 분산수(D/ μL)를 Table 1에 나타냈다. 본 연구에서 구한

Table 1. Results of dye test

Tube (cm)	26									36								
	0.4682			0.6524			1.5856			0.6694			0.8678			1.5032		
Air (L/L/min)	0.4682			0.6524			1.5856			0.6694			0.8678			1.5032		
HRT (min)	2.35	4.42	9.16	2.53	4.50	9.71	2.40	4.31	9.89	2.22	4.48	10.15	2.36	4.49	9.76	2.36	3.91	8.87
\bar{t} (sec)	177.6	174.4	322.7	160.4	205.9	366.6	152.0	168.8	447.7	107.6	173.5	277.3	123.4	185.8	292.3	105.7	136.1	232.8
σ^2	0.470	0.643	0.657	0.601	0.618	1.077	0.607	0.811	1.574	0.800	0.817	1.400	0.631	0.964	1.539	0.641	0.897	2.220
D/ μL	0.351	0.667	0.706	0.566	0.605	∞	0.580	1.511	∞	1.408	1.564	∞	0.636	9.008	∞	0.662	2.963	∞
k	0.513	0.256	0.120	0.426	0.248	0.122	0.875	0.247	0.072	0.486	0.253	0.102	0.464	0.237	0.105	0.480	0.264	0.114
1/k (min)	1.95	3.91	8.30	2.35	4.03	8.18	1.14	4.05	13.89	2.06	3.95	9.82	2.16	4.22	9.53	2.08	3.79	8.74

1/k를 살펴보면 반응조직경 : draft tube 비가 1.78:1, 즉 draft tube가 3.6 cm일 경우가 비교적 일치함을 알수있다. 수리학적 체류시간(HRT:Hydraulic Retention Time)과 1/k의 차이는 5.7% 정도로 나타났다. 또한 HRT와 1/k의 차이는 공기주입율이 증가할수록 일치하지 않는 경향을 보이고 있다.

2. 총괄산소전달계수(K_{La})

유동층반응조에 주입되는 공기주입율을 0.28~1.42 $\ell/\ell/\text{min}$ 으로 변화시킬때 공기주입율에 따른 매디아의 하향순환유속을 측정하였다. Fig. 2는 draft tube 직경을 2.6 cm, 3.6 cm 두 종류에 대해 나타낸 것이다. Fig. 2에서 살펴보면 공기주입율이 커질수록 하향순환유속이 커짐을 알수 있으며 입자하향순환유속은 draft tube 직경이 큰 쪽인 3.6 cm가 공기주입율에 더 큰 영향을 받는다. Fig. 3, Fig. 4는 공기주입율에 따른 K_{La} 를 나타낸 것으로 공기주입율을 0.28~1.42 $\ell/\ell/\text{min}$ 으로 단계적으로 변화시켜 K_{La} 를 측정하였다. K_{La} 는 공기주입율이 증가할수록 커진다.

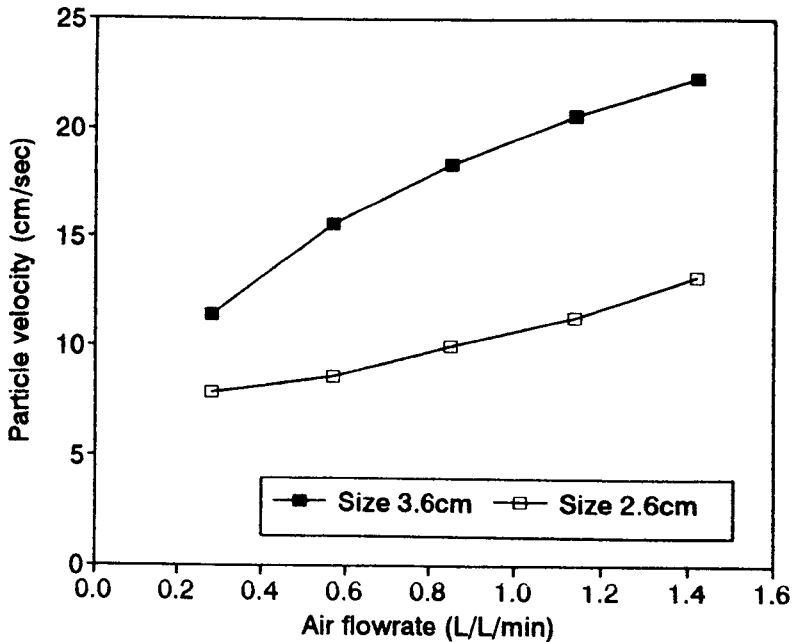


Fig. 2. Particle velocity versus air flow rate.

Fig. 5, Fig. 6은 공기주입율을 0.28~1.42 $\ell/\ell/\text{min}$ 로 변화시켜 활성탄 투입량에 따른 K_{La} 값을 나타낸 것으로 매디아 농도가 높을수록 K_{La} 가 낮아지는 현상을 볼 수 있는데 이 현상은 입자들끼리의 방해로 인해 생긴 것으로, draft tube의 직경이 2.6 cm, 3.6 cm 에서 같은 경향을 나타내고 있고 매디아 농도가 낮을수록 공기주입율에 따른 K_{La} 변화폭이 크게 나타나고 있다. 본 실험에서 매디아 입경크기를 0.50~0.71 mm, 0.71~0.84 mm, 0.84~1.20 mm인 활성탄을 사용하여 매디아 입경크기에 따른 K_{La} 를 평가하였다. Fig. 7에서 살펴보면 매디아 입경크기가 클수록 K_{La} 가 낮아지는 현상을 나타내고 있으며 매디아 입경 크기가 작을수록 공기주입율에 따른 K_{La} 변화폭이 크게 나타나고 있다.

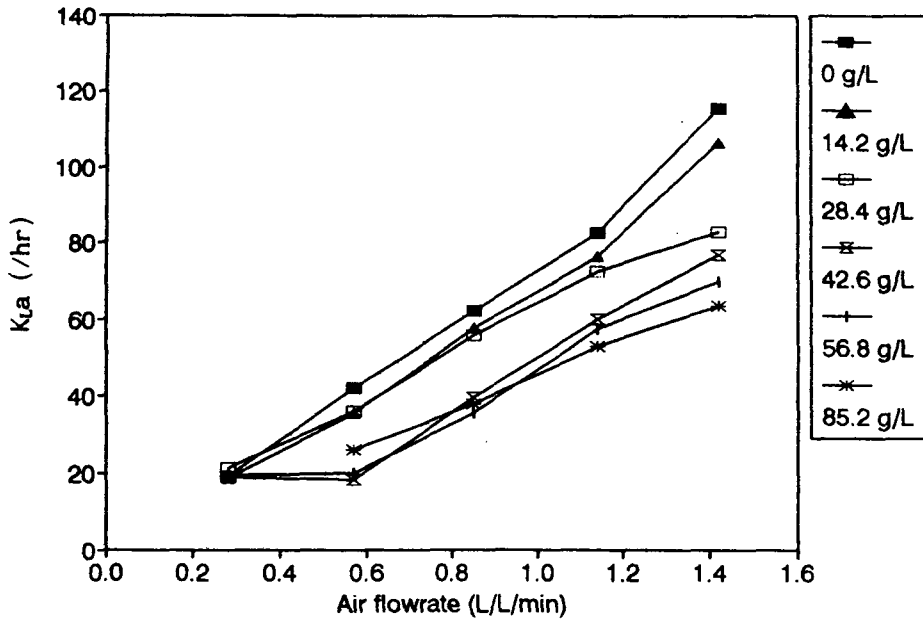


Fig. 3. Variation of K_{La} on Air flow rate with 2.6 cm in draft tube diameter.

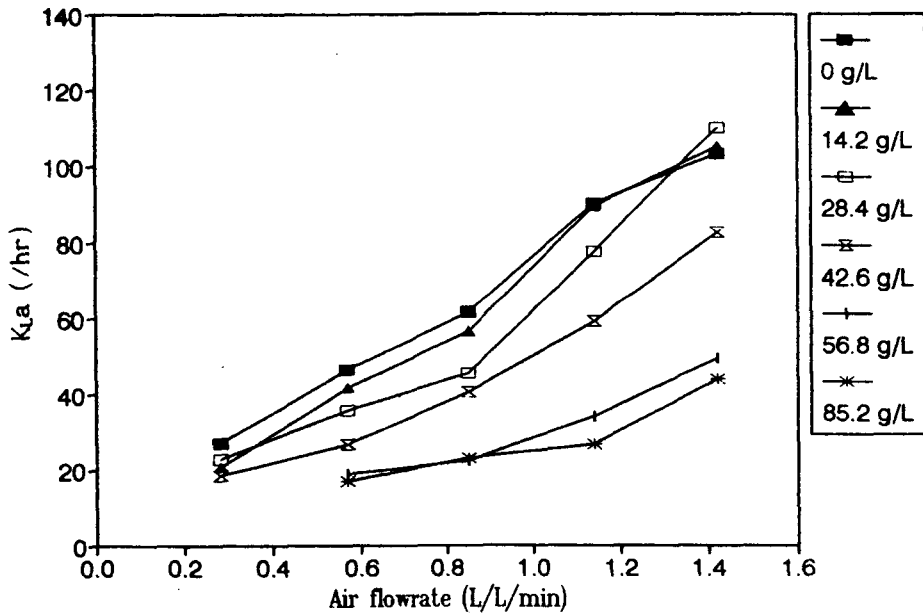


Fig. 4. Variation of K_{La} on Air flow rate with 3.6 cm in draft tube diameter.

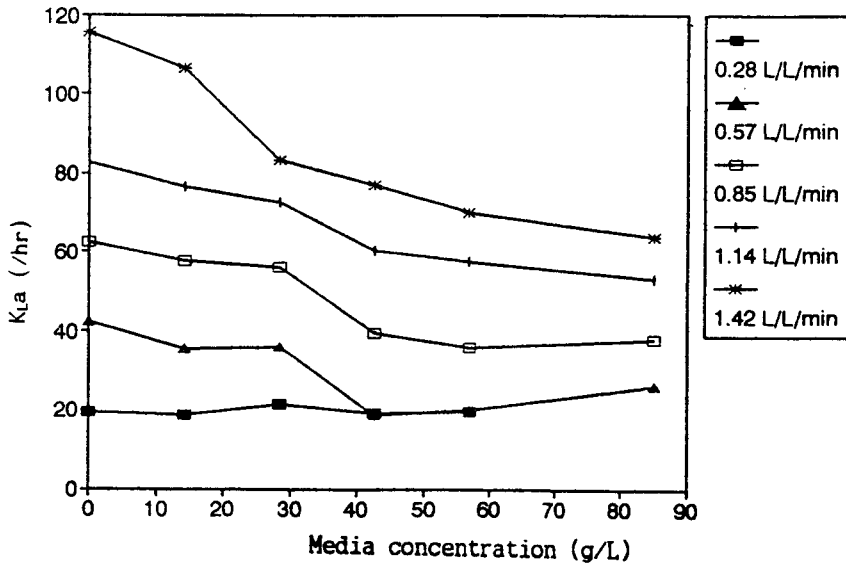


Fig. 5. Variation of K_{La} on media concentration with 2.6 cm in draft tube diameter.

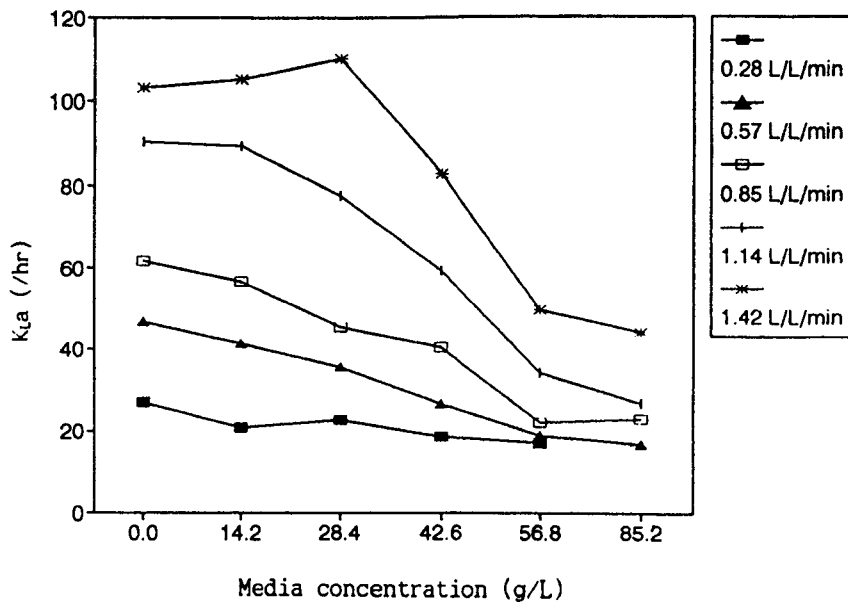


Fig. 6. Variation of K_{La} on media concentration with 3.6 cm in draft tube diameter.

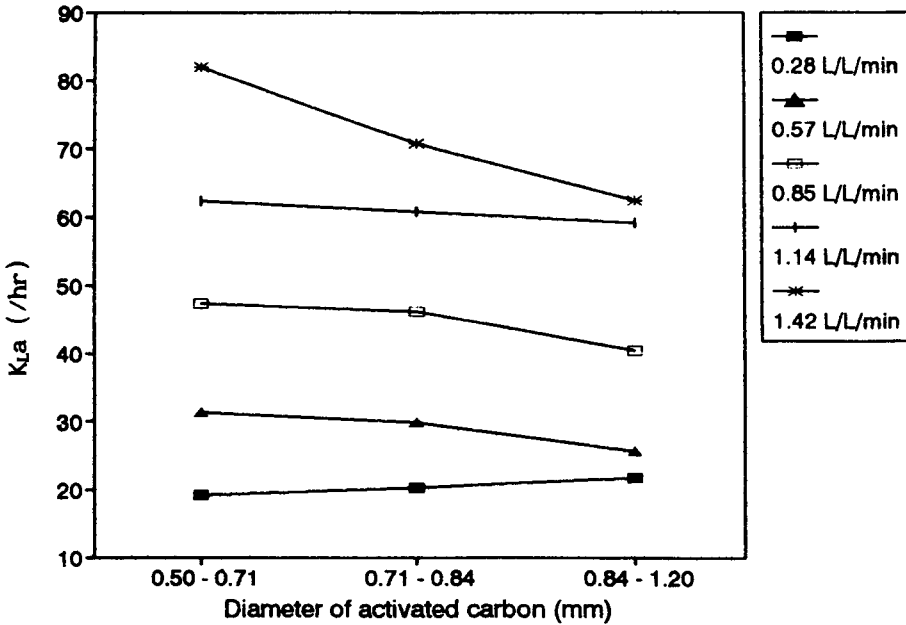


Fig. 7. Variation of K_{La} on activated carbon diameter.

고찰

Levenspiel (1967)은 분산수($D/\mu L$)가 무한대가 되면 이상적인 완전혼합상태, 0이 되면 이상적 plug flow, 0.02이면 분산이 적으며 0.025면 분산이 중간정도이고 0.2면 분산이 비교적 크다고 발표하였다. 또한 분산(σ^2)이 1 이면 이상적인 완전혼합상태이며 0 이면 이상적인 plug flow 상태라고 하였다. Metcalf and Eddy (1979)는 재래식 plug flow 활성슬러지조의 분산수($D/\mu L$)가 0~0.2이며 기계폭기장치를 한 완전 혼합형 슬러지는 4.0- ∞ 라고 하였다. 본 실험에서의 분산(σ^2) 값을 살펴보면 0.47 이상으로 반응조직경과 draft tube 직경비가 작은쪽이 큰 값을 보이는데 이것은 반응조직경과 draft tube 사이의 공간이 좁아 하향하는 유속이 빨라서 혼합이 많이 이루어진다고 생각된다. 따라서 완전혼합을 위해서는 반응조직경:draft tube 직경비가 작은쪽이 유리하다. 본 연구에서 t_i/t 와 $\log(C_i/C_o)$ 관계를 Fig. 8에 나타내었다. 이것은 Levenspiel (1967)이 제시한 완전혼합상태의 직선과 유사하다. 따라서 본 삼상유동층반응기가 이상적인 완전혼합상태에 가깝다고 판단된다. 완전혼합상태에 있어서 체류시간을 산출하는 방법은 식(6)과 같으며 그 값은 dye test에서 측정된 전기전도도를 반 log graph에 그렸을 때의 직선의 기울기와 같다(환경공학 1987). 식 (6)에서 k는 물질이 반응조로 씻겨 나오는 율로서 이론적인 완전혼합상태에서 $HRT = 1/k$ 이다. 식 (6)으로 계산한 k와 실측한 HRT의 차이는 5.7% 정도이다.

$$\frac{C_i}{C_o} = e^{-kt} \quad (6)$$

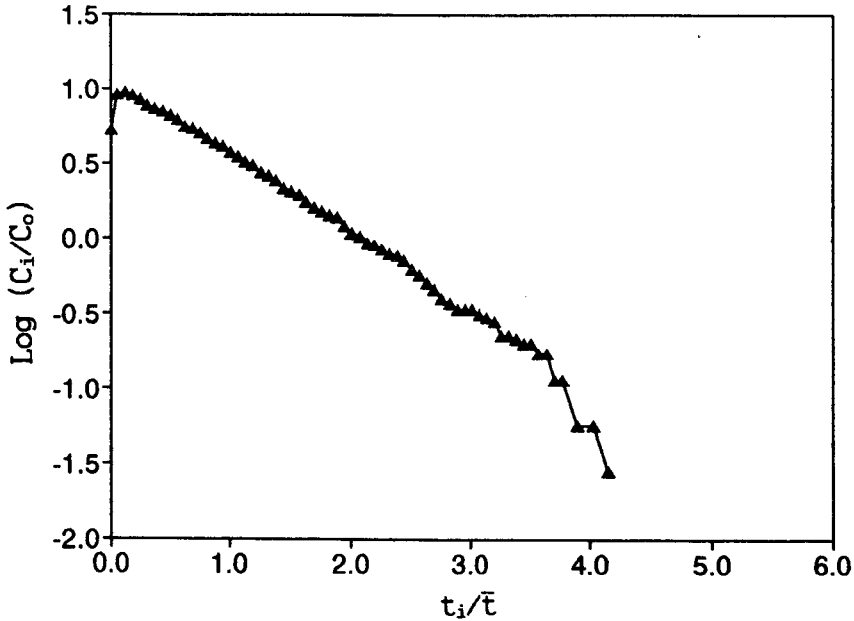


Fig. 8. t_i / \bar{t} versus $\log(C_i / C_0)$.

삼상유동층반응기에서 총괄산소전달계수(K_{La})를 측정한 결과 K_{La} 는 공기주입율이 클수록, 매디아 농도가 작을수록, 매디아 입경 크기가 작을수록 큰 값을 나타내었다. 공기주입율의 증가에 따라 gas와 liquid의 접촉면적이 증가되어 총괄산소전달계수가 커질 것으로 생각된다. 또한 매디아농도가 높을경우 입자끼리의 방해로 인해 K_{La} 가 저하되고 입자하향유속이 클 경우 이 현상은 증가되는 것으로 생각된다. 본 실험결과 K_{La} 가 반응조직경에 대한 draft tube 직경비, 공기주입율, 매디아 농도, 매디아 입경크기에 따른 의존성을 다중회귀분석(multiple linear regression)을 통해 파악하면 식 (7)과 같다.

$$K_{La} = 44.9 (D_i/D_c)^{-0.4611} A_r^{0.8622} C_m^{-0.0746} d_p^{-0.4302} \quad (7)$$

위에서 D_i/D_c 는 반응조직경에 대한 draft tube의 직경비(-), A_r 는 공기주입율($\ell/\ell/\text{min}$), C_m 은 매디아 농도(g/ℓ), d_p 는 매디아 입경크기(mm)이다. 실험에서 구한 K_{La} 와 식(7)로 구한 K_{La} 를 비교한 것이 Fig. 9로 93.5 %의 정확도를 나타내므로 비교적 실측치와 계산치가 일치함을 알 수 있다.

요 약

본 연구는 수질관리를 위한 양식장 순환수 처리를 위하여 유동층공법을 이용할 시, 수리학적 모델 인자를 결정하기 위하여 반응기의 혼합특성과 산소전달 특성을 파악하는 연구이다. 삼상유동층 반응기의 dye test에서 얻은 결과 분산(σ^2), 분산수($D/\mu\text{L}$)를 살펴보면 분산은 0.47이상이고 분산수는

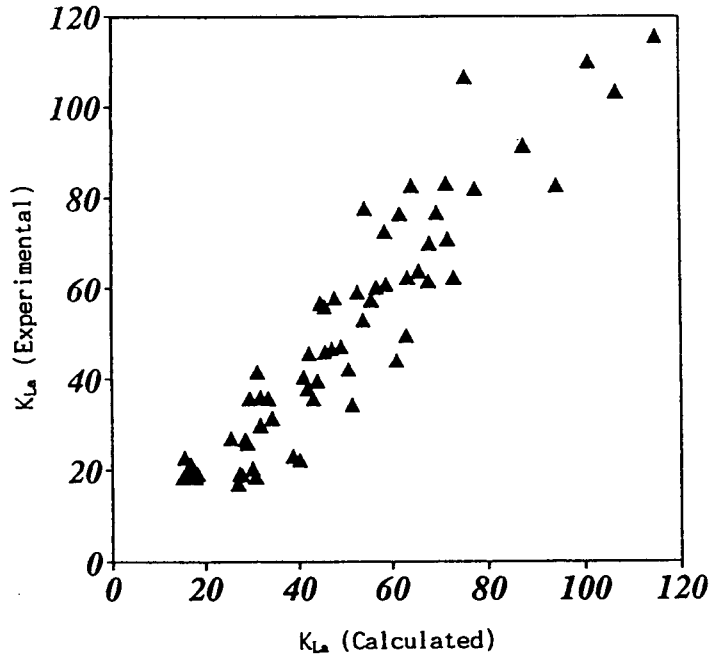


Fig. 9. Comparison between experimental and calculated values of K_{La} in three phase fluidized bed.

0.35 - ∞로 높은분산상태를 나타내는 이상적인 완전혼합반응기로 판단된다. 총괄산소전달계수 값을 측정할 결과 공기주입율이 클수록, 미디어농도가 작을수록, 미디어 입경크기가 작을수록 큰 값을 나타내었다. 총괄산소전달계수(K_{La})가 반응조 직경과 draft tube 직경비, 공기주입율, 미디어 농도, 미디어 입경크기에 따른 의존성을 파악하면 아래와 같이 표현된다.

$$K_{La} = 44.9 (D_v/D_c)^{-0.4611} A_r^{0.8622} C_m^{-0.0746} d_p^{-0.4302}$$

감 사

본 연구는 부산수산대학교 해양산업개발연구소 92년도 연구지원비로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

Antonie, R. L., D. L. Kluge and J. H. Mielke. 1974. Evaluation of a rotating disk wastewater treatment plant. J. WPCF. 46: 298-511.

- Carmignani, G. M. and J. P. Bennelt. 1977. Rapid start-up of a biological filter in a recirculating aquaculture system containing channel catfish. *Aquacult. Eng.* 3: 39~57.
- Jewell, W. J. and R. J. Cummings. 1990. Expanded bed treatment of complete recycle aquaculture system. *Wat. Sci. & Tech.* 22: 443~450.
- Lewis, W. H., J. H. Yopp, H. L. Schramm, Jr. and A. M. Brandenburg. 1978. Use of hydroponics to maintain quality of recirculated water in fish culture system. *Trans. Am. Fish. Soc.* 107: 92~99.
- Levenspiel. 1967. *Chemical Reaction Engineering*, John Wiley and Sons, Inc. 2nd Ed. 253~283
- Metcalf and Eddy, Inc. 1979. *Wastewater Engineering: Treatment, Disposal, Reuse*. McGraw-Hill Book Co., New York. 2nd Ed. 170~172.
- Nijhof, M. and J. Bovendeur. 1990. Fixed film nitrification characteristics in sea-water recirculating fish culture system. *J. Aquacult.* 87: 133~143.
- Rogers, G. L. and S. L. Klemetson. 1985. Ammonia removal in selected aquaculture water reuse biofilters. *Aquacult. Eng.* 4: 135~154.
- Sehic, O.A. 1981. Fluidized sand recycle reactor for aerobic biological treatment of sewage, WRC
- Lee, S. H., H. S. Choi, Y. T. Park and K. S. Doh. 1990. The characteristics of hydrodynamics and mass transfer in three phase fluidized column with draft tube. *Proceedings of the Second Asian Conference on Fluidized-Bed and Three-phase Reactor.*
- 박정임. 1992. 2상 유동층에서 비정상상태 생물막 특성 및 생물막 탈리속도에 관한 연구. 공학석사 학위논문. 부산대학교 대학원.
- 이병현. 1993. 생물학적 유동층공법과 살수여상공법을 이용한 고밀도 양어장 폐수처리. 부산수산대학교 해양산업개발연구센터(ERC) 보고서 88pp
- 임용승. 1993. 회전원판법을 이용한 저농도 암모니아 폐수의 질산화에 관한 연구. 공학석사 학위논문. 부산수산대학교 대학원. 44pp
- 홍기택. 1987. 호기성 생물학적 유동층을 이용한 폐수처리에 관한 연구. 공학석사 학위논문. 부산수산대학교 대학원. 67pp
- 최의소·조광명. 1987. *환경공학*. 청문각. 서울. 21~23.