

## 고율 조류 안정화지에서 교반속도가 영양염류 제거에 미치는 영향에 관한 유체동역학적 연구

공 석 기  
중부대학교 환경공학과  
(2000년 5월 3일 접수)

### A Study on Fluid Dynamics for Effect of Agitation Velocity on Nutrients Removal in High Rate Algae Stabilization Pond

Surk-Key Kong

Department of Environmental Engineering Joongbu University  
(Manuscript received 3 May, 2000)

HRP(high rate pond) which had kept the manufactured clay of 3cm-thickness as benthic clay in reactor and the 6 flat-blade turbine as impeller for agitation was named HRASP(high rate algae stabilization pond). And the experiment for treatment of artificial synthesis wastewater containing COD : 300mg/ℓ, NH<sub>3</sub>-N : 30mg/ℓ, T-P : 9mg/ℓ as nutrients was been performed successfully. This reactor was been operated under conditions : 24 hrs.-irradiation and water temperature, 25°C and pH 7 and agitation velocity, 15, 30, 45rpm and the effect of agitation velocity on algal bioaccumulation of nutrients was been studied with view point of fluid dynamics.

The next followings could be obtained as results.

1. The agitation with a turbine impeller blade in HRASP makes clay particle indicate superior suspension effect by means of forming of excellent curl/shear flow in reactor.
2. The excessive suspension of clay particle which is created at 45rpm as rotation velocity of impeller blade of turbine disturbs the light penetration and algal photosynthesis reaction.
3. Efficiencies for removal of nutrients come out as COD : 93.9%~94.3%, (NH<sub>3</sub>-N + NO<sub>3</sub>-N) : 81.9%~99.0%, T-P : 46.8%~53.6%.
4. Kuo values of K<sub>1</sub> for algal growth come out seperately as 15rpm :  $1.876 \times 10^{-2}$ , 30rpm :  $4.618 \times 10^{-3}$ .
5. Kuo values of K<sub>2</sub> for removal of N, P come out seperately as 15rpm :  $8.403 \times 10^{-1}$  and  $1.397 \times 10^{-1}$ , 30rpm :  $4.823 \times 10^{-1}$  and  $2.052 \times 10^{-1}$ .
6. It can be guessed easily that the excessive agitation can inhibit the algal and bacterial symbiotic reaction if it is considered that micro organism' sense to preservation of life is relied on natural function of metabolism. Therefore the studies for this matter should be followed continuously.

Key words : HRASP, 6 flat-blade turbine, excellent curl/shear flow, Kuo values of K<sub>1</sub>, Kuo values of K<sub>2</sub>

#### 1. 서 론

고율 안정화지(HRP, high rate pond)의 운전이 N, P 등의 제거와 Cu, Pb, Zn, Hg, Cd, Ni, Co, As, Cr, Ca 등의 removal/recovery와 radioactive metals의 removal에 이용되어 온 것<sup>1)</sup>은 널리 알려져 있는 사실이다. 그리고 중급속 생흡착의 실험적 연구에 대하여 Boya Volesky<sup>2)</sup> 역시 터빈 임펠라가 부착된 회분식 교반 반응기 운전 시스템의 CFSTR을 소개하고 있듯이 터빈 임펠라는 다른 교반기 보다 더욱 우수한 shear force를 생성시킬 뿐만 아니라 생흡착에 대한 교반의 효과를 학술적으로 확실하게 설명을 가능하게 하는 효과적인 기계식 교반기이다.

그리고 이러한 터빈 임펠라의 교반으로 이루어 지는 HRP에서의 perfect mixing을 Juanico<sup>3)</sup>는 plug flow의 것과 비교하여 설명하였는데 그는 세균과 BOD제거의 실험적 근거를 제시하면서 BOD제거에 있어서는 perfect-mixing 이 plug flow 형태보다 더 효과적으로 나타나고 세균 제거에 있어서는 plug flow가 더 효과적으로 나타난다고 하였다. 그러면서 BOD 제거의 목적으로 운전되는 perfect mixing에서는 무엇보다도 반응기내에서 빈 공간이나 short circuiting이 형성되므로서 혼합의 효과가 감소되는 것을 방지하여야 한다고 하였다.

이러한 교반 형태로 나타나는 HRP에서의 반응액의

흐름을 유체역학적으로 분석하는 데에는 McGabe<sup>4)</sup>의 설명이 크게 참고되는 바 그는 교반(agitation)과 혼합(mixing)에 대하여 다음과 같이 설명하였다. 즉, 교반이란 반응기 내부에서 일정한 순환 양식으로 나타나는 시료의 유도된 운동을 의미하며 혼합은 시료의 random한 분산을 의미하므로 반응기 내부에서 교반 속도에 따르는 반응액의 운동을 유체역학적으로 규명하기 위해서는 교반의 감각으로 접근하여야지 혼합의 감각으로 접근하여서는 안된다고 하였다.

본 연구에서는 MetCalf 등<sup>5)</sup>이 이미 규정하여 놓은 고율 안정화지(high rate pond)의 설계 원칙에 따라 직육면체의 반응기를 만들어 이 반응기에 6 flat-blade의 터빈을 설치하고 반응기 내부 바닥위에 powder로 제조된 clay를 3cm두께로 깔아놓는 것을 핵심 구성 성분으로 한 반응기를 고율 조류 안정화지(HRASP, High Rate Algae Stabilization Pond)라 명명하고 이를 실험적으로 운전하여 교반 속도에 따르는 조류 성장 특성과 영양염류 제거 특성을 유체 동역학적으로 규명하여 보았다.

2. 이론적 고찰

본 반응기에서 clay를 이용한 교반은 (1)반응기 내부에 빈 공간이 형성되지 않도록 하고 (2)난류상태로 된 반응액은 영양물질, 세균세포, 조류세포를 공간적으로 균일하게 분산시키며 (3)분산되어 있는 clay는 영양물질, 조류세포 사이의 접촉 및 충돌을 증대시켜서 (4)세균과 조류의 상호 공생작용을 강화시키는 효과를 나타낸다. clay는 소수성(hydrophobic) 콜로이드 물질로서 미립자 격자 내부의 이온의 부족으로 인해 정전기적 전하를 갖고 있고 그 구조 내에는 금속원자보다 비금속원자를 더 많이 함유하고 있어서 항상 음전하를 띠고 있는데 교반을 가하지 않을 경우에는 분자구조상 음전하를 띠고 있는 영양물질과 전기적 척력으로 서로 반발하여 분산하게 된다. 그러나 연속적인 교반을 통하여 반응액에 입자간의 전기적 척력을 상회하는 힘을 가하면 (1)반응액 내의 입자들이 서로 고르게 접촉, 충돌하는 기회를 많이 갖게 되고 (2) 조류와 세균의 대사작용이 더욱 가속화되는 효과가 나타난다.

이러한 효과를 위하여 clay가 바닥위로 3cm의 두께로 bedding된 HRASP에서 교반을 통하여 나타나는 유체흐름의 특성이 다음과 같이 나타난다.

2.1. 임펠라 blade에서 최초로 나타나는 유선과 volumetric flow rate

본 반응기에서 임펠라가 회전하면 다음 Fig. 1과 같이 유선이 blade 폭의 중심선으로부터 하향류(downward flow)와 상향류(upward flow)의 두 개의 선으로 나뉘고 반응액이 임펠라와의 경계 면에서 접선형 흐름(tangential flow)과 방사형 흐름(radial flow)으로 유도된다.<sup>6)</sup> 여기서  $u_2$ 를 blade tip의 회전 속도,  $V'_{u2}$  and  $V'_{r2}$ 를 blade tip을 이탈하는 반응액의 접선형 유속과 방사형 유속,  $V'_2$ 를 동일한 지점에서의 반응액의 전체 유속이라고 하고 접선형 유속이 blade tip 회전 속도의 k분율이라 하면 다음 식이

성립한다.

$$V'_{u2} = ku_2 = k\pi D_a n \tag{1}$$

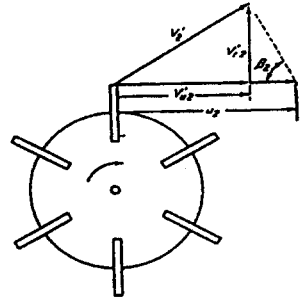


Fig. 1. Velocity vectors at tip of turbine impeller blade.

Holmes D. B. 등<sup>7)</sup>은 위의 식을 전개한 끝에 6-blade flat 터빈에 의한 flow number를 1.3으로 한 실험을 통하여 다음과 같은 식을 발표하였다.

$$q \equiv N_Q n D_a^3 \tag{2}$$

2.2. 벽면 난류에 기인하는 Eulerean 좌표에서의 유선

본 반응기에서 교반을 통하여 생성되는 반응액의 흐름은 전단류(shear flow)이자 회전류(rotational flow)이며 반응기 벽면 근처에서 형성되는 벽면 난류(wall turbulence)로서 점성류(viscid flow)이다.

반응액(clay particle)이 impeller blade의 회전 원심력으로 유도되어 하향류로 흐르다가 곧 상향류로 합쳐지게 된다. 이 흐름은 반응액 흐름장의 Eulerean 좌표에서의 확산 방정식을 통하여 나타나는 유체 shear deformation과 rotation에 동반되는 것으로 설명될 수 있다. 그러므로 Euler 방정식의 unit mass force에 대한 벡터항을 viscous force에 대한 벡터항으로 바꾸어 써서 다음과 같은 Navier-Stokes 방정식으로 바꾸어 쓸 수 있다.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \nabla^2 u$$

**Shear Deformation** : 만약 반응액 수체에 작용하는 전단응력(shear force)을 Shear Force =  $\tau_{ij}$  라 하면 본 반응기에서의 반응액 수체에 작용하는 전단응력(shear force)을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sum \tau_{ij} = \begin{bmatrix} \tau_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \tau_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \tau_{zz} \end{bmatrix}$$

x, y, z축으로 구성된 수체 운동의 공간을 가정하면 x 방향으로의 수체의 shear deformation을 x 방향으로의 표준 stress,  $\sigma_x$ 를 지닌 다음의 방정식으로 나타낼 수 있다.

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial (\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial (\tau_{zx})}{\partial z}$$

그리고 y, z 방향으로의 shear deformation도 동일한

방법으로 나타낼 수 있다. 이러한 대표적 shear deformation 을 지니고 있는 fluid flow에 반응액이 동반되어 흐르고 분산된다.

**Rotation** : 본 반응기에서의 수체의 회전이 다음 식으로 설명된다.

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \nabla^2 u$$

여기서,  $\mu$  : viscous coefficient  
 위 식을 x, y, z 방향으로의 운동으로 적분하면,

$$\rho \left[ \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{2} (u^2 + v^2 + w^2) \right) + v \left( \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial x} \right) + w \left( \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right] = - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \nabla^2 u$$

이 성립하는데 여기서  $\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{2} (u^2 + v^2 + w^2) \right)$ 는 x 방향으로의 수체 운동에 기인하는 운동에너지의 미분 값이 된다.

그리고 본 반응기에서의 교반을 통하여 나타나는 수체의 회전이 다음의 벡터 함수로 나타낼 수 있다. 여기서  $\mathbf{v}$ 는 공간좌표에서의 벡터 운동으로서  $u\mathbf{i} + v\mathbf{j} + w\mathbf{k}$ 라 하면  $\text{curl } \mathbf{v}$ 가 다음의 형태로 나타난다..

$$\text{curl } \mathbf{v} = \nabla \times \mathbf{v} = \begin{vmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ \partial/\partial x & \partial/\partial y & \partial/\partial z \\ u & v & w \end{vmatrix} = \left( \frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \right) \mathbf{i} + \left( \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} \right) \mathbf{j} + \left( \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) \mathbf{k}$$

이 식은 다음과 같이 간단히 나타낼 수 있다.

$$\rho \left[ \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \frac{1}{2} (u^2 + v^2 + w^2) \right\} + 2(w\eta - v\xi) \right] = - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \nabla^2 u$$

여기서

$$\frac{1}{2} \left( \frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \right) : \xi, \quad \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} \right) : \eta, \quad \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) : \zeta \text{이다.}$$

만약 y, z방향으로의 운동이 계산되고 합산이 된다면 위 식은 수체의 회전을 나타내는 다음의 식으로 변화될 수 있다.

$$\rho \left[ \partial \mathbf{v} / \partial t + \nabla \left( \frac{1}{2} v^2 \right) + \text{curl } \mathbf{v} \times \mathbf{v} \right] = -\nabla(p + \rho g z) + \mu \nabla^2 \mathbf{v}$$

반응액이 이러한 수체 흐름의 특성에 동반되며 선회한다.

2.3. Clay 입자와 반응액사이에서 생성되는 drag force  
 benthic clay의 구형 입자가 반응액내에서 운동하면 입자의 미세 표면에 작용되는 drag force는 다음의 Fig. 2.와 같이 나타난다.

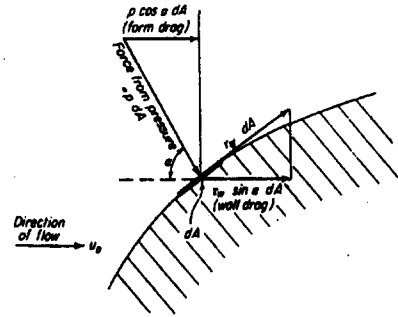


Fig. 2. Wall drag and form drag on clay particle body.

여기서 wall drag는 clay 입자가 반응액 흐름과 조우하여 생성되는 shear force의 분율로서  $\tau_w \sin \alpha dA$ 의 값을 지닌다. 그리고 form drag가 중력과 동수압(hydraulic pressure)에 기인하는 분율로서  $p \cos \alpha dA$ 의 값을 지닌다. clay 입자가 반응기내에서 갖는 drag는 clay 입자가 반응기 내의 모든 순간과 모든 위치에서 지나는 위 두 drag의 합으로 설명되어질 수 있다.

임펠러 blade의 회전으로 유도되는 유체의 흐름을 통하여 이동하는 clay입자가 반응액과 조우하면 clay 입자의 미세 표면으로부터 나타나는 유선이 back side의 wake를 지니지 않는 potential flow로 간주되고 여기서 투영 면적을  $A_p (= D_p^2 \pi / 4)$  그리고 total drag force를  $F_D$ 라 하면 투영 단위면적에 대한 drag force가  $A_p / F_D$ 로 나타내어질 수 있는데 이  $A_p / F_D$ 가 반응액 밀도,  $\rho$ 와 clay 입자에 접근하는 유체 속도,  $u_0$ 로 다음과 같이 나타내어질 수 있다.

The drag force for projected unit area = drag coefficient  $\times$  the force which fluid acts on projected unit area

$$F_D / A_p = C_D \times (\rho u_0^2 / 2g_c) \quad (3)$$

여기서  $g_c$ 는 중력 가속도이고  $C_D$ 는 drag coefficient이다.

(1) clay 입자의 일차원 운동 방정식

clay입자를 운동하게 하는 힘은 external force,  $F_c$ 와 clay입자의 부력,  $F_b$  그리고 clay입자와 유체사이에서 나타나는 drag force,  $F_D$ 의 차이인 바 이 차이가 다음 식으로 나타난다.

$$(m/g_c) \cdot (du/dt) = F_c - F_b - F_D \quad (4)$$

여기서, m : mass of clay particle, kg

u : clay particle velocity, m/sec t : time, sec

여기서,  $F_c = ma_c/g_c$  (5)

여기서,  $a_c$  : acceleration of the clay particle,  $m/sec^2$   
 $F_b = m \rho_a / \rho_p g_c + f_c$  (6)

여기서,  $\rho$  : density of fluid,  $kg/m^3$

$\rho_p$  : density of clay particle,  $kg/m^3$

$f_c$  : electrophoresis force of clay particle

의 식들이 성립한다.

③ 식으로부터 clay 입자와 반응액사이에서 나타나는 마찰력,  $F_D$ 가

$$F_D = C_{Du}^2 \rho A_p / 2g_c \quad (7)$$

로 성립되는 바 ⑤, ⑥, ⑦식을 ④ 식에 대입하면 다음의 일차원 운동 방정식이 나타난다.

$$du/dt = a_c - \rho a_c / \rho_p - g_c f_c / m - C_{Du}^2 \rho A_p / 2m = a_c (1 - a_c / \rho_p) - C_{Du}^2 \rho A_p / 2m - g_c f_c / m \quad (8)$$

반응기내에서 clay 입자의 운동이 터빈 임펠라의 회전 원심력에 의하여 생성되는 유선을 통하여 이루어 지므로

$$a_c = r\omega^2 \quad (9)$$

여기서,  $r$  : radius of path of particle

$\omega$  : angular velocity of particle rotation, rad/sec

이고 ⑨ 식을 ⑧ 식에 대입하면 다음과 같은 clay 입자의 일차원 운동 방정식이 나타난다.

$$du/dt = r\omega^2 (1 - a_c / \rho_p) - C_{Du}^2 \rho A_p / 2m - g_c f_c / m$$

#### 2.4. clay 입자의 확산 운동

본 반응기내에서 clay 입자의 운동량이 시간,  $t$ 의 함수이므로 다음의 control volume concept의 식으로 나타낼 수 있다.

$$D \left( \int_{\alpha_0} \alpha(t) dv \right) / Dt = \lim_{\delta t \rightarrow 0} \left\{ \left[ \int_{\alpha(t+\delta t)} \alpha(t+\delta t) dv - \int_{\alpha_0} \alpha(t) dv \right] / \delta t \right\}$$

그리고  $V(t)$ 는 clay 입자성분의 운동량을 지니고 있는 체적으로서 교반의 진행에 의해 형상이나 크기가 변화하는 것이므로  $V(t)$  구간에서 적분되는  $\alpha(t+\delta t)$ 항을 빼주는 조건에서 위의 식을 정리하면

$$D \left( \int_{\alpha_0} \alpha(t) dv \right) / Dt = \lim_{\delta t \rightarrow 0} \left\{ \left[ \int_{\alpha(t+\delta t)} \alpha(t+\delta t) dv - \int_{\alpha_0} \alpha(t+\delta t) dv \right] / \delta t \right\} + \left[ \int_{\alpha_0} \alpha(t+\delta t) dv - \int_{\alpha_0} \alpha(t) dv \right] / \delta t$$

이 된다. 이 식을 다시 정리하면

$$D \left( \int_{\alpha_0} \alpha(t) dv \right) / Dt = \lim_{\delta t \rightarrow 0} \left\{ \left[ \int_{\alpha(t+\delta t)} \alpha(t+\delta t) dv \right] / \delta t \right\} + \int_{\alpha_0} (\partial \alpha / \partial t) dv$$

가 되는데 이 식을 nomenclature에서 설명한 부호로 다시 나타내면

$$D \left( \int_{\alpha_0} \alpha(t) dv \right) / Dt = \lim_{\delta t \rightarrow 0} \left\{ \left[ \int_{\alpha_0} \alpha(t+\delta t) u \cdot n ds \right] \right\} + \int_{\alpha_0} (\partial \alpha / \partial t) dv = \int_{\alpha_0} \alpha(t) u \cdot n ds + \int_{\alpha_0} (\partial \alpha / \partial t) dv$$

의 식이 된다. 따라서 반응액 입자의 확산에는  $u$ 와  $n$ 의 항목이 중요한데 이는 교반을 통한 난류생성을 크게하므로서 효과적으로 유도된다.

### 3. 재료 및 방법

#### 3.1. 실험 장치

본 연구에 사용된 실험장치는 acryl 판으로 된 저류조 및 반응조로 구성하였으며 저류조는 125ℓ 용량으로 제작하였고 반응조는 64ℓ 용량으로 2조 제작하였다. 반응조에는 온도 조절장치, 교반장치, 광 조사 장치, 수위 조절 장치를 부착하였다. 온도 조절 장치는 온수 제조기, 침지 heater 및 확인 봉상 온도계 및 thermostat를 이용 조합하였으며 교반장치는 0.2M × 0.02M의 사양으로 된 6 flat-blade의 터빈 임펠라 및 속도 가변 모타로 구성하였고 광 조사 장치는 전원 개폐 장치, 40W, 3과장 형광 램프 12개, 20W. 램프는 반응조의 23cm 상부 양 측면에 2개씩 설치하였다. 또한 수위 조절 장치로 floating valve를 사용하였다.

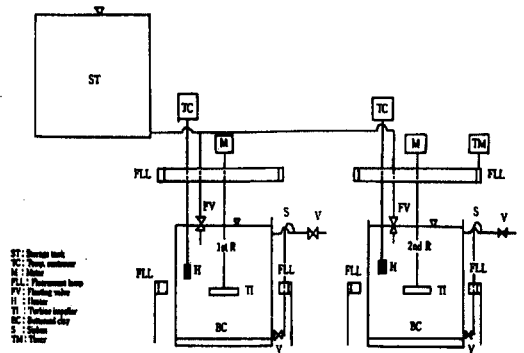


Fig. 3. Schematic diagram of pilot scale experimental apparatus.

#### 3.2. 운전 및 실험 방법

우선, 반응기 구성조건으로서 반응조 내부 바닥위에 powder로 제조된 clay를 3cm두께로 깔았고 Table 1에 종합한 인공 실험 영양염류를 제조하여 64ℓ씩 투입한 후 여기에 배양된 조류 용액을 Chlorophyll-a 농도가 0.47 mg/m<sup>3</sup>되도록 희석하여 가하였다. 이 조류 혼합액을 pH 7.0, 수온 25℃, 수표면 조도 3000Lux, 24시간의 조사(irradiation) 조건에서 회분식으로 운전하였으며 가변 속도 조절기를 작동하여 15, 30, 45rpm의 속도로 임펠라 blade를 회전시켜 이때 clay 입자의 흐름이 정밀하게 관찰되었다. 그러나 15, 30rpm의 교반 속도에서 clay 입자의 흐름이 관찰되지 않았으나 45rpm의 교반속도에서는 clay 입자의 흐름이 관찰되었는데 이러한 흐름은 곧, 반응기 전 공간에 걸쳐 반응액의 탁도를 현저히 증가시켰으므로 15, 30rpm의 교반속도로 실험을 수행하였다. 시료가 매일, 일정한 시간에 sampling되었으며 sampling water는 U.S. standard method의 Spectrophotometric method, pH meter method와 DO meter method(Azide modification)에 의해 Chlorophyll-a, pH, DO 항목으로 분석, 측정되었는데 이러한 시험이 8개월 동안 10번에 걸쳐 수행되었다.

Table 1. Nutrient composition used in experiment

Component	Concentration(mg/ℓ)
starch	300 (300mg COD/ℓ)
(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	102.9 (30mg NH <sub>3</sub> -N/ℓ)
Na <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>	41.4 (9mg T-P/ℓ)
MgSO <sub>4</sub> · 7H <sub>2</sub> O	250
CaCl <sub>2</sub> · 2H <sub>2</sub> O	15.47
Fe <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	4.06
NaHCO <sub>3</sub>	167.97
Na <sub>2</sub> EDTA	4.88
MnSO <sub>4</sub> · 5H <sub>2</sub> O	1.41 × 10 <sup>-3</sup>
ZnSO <sub>4</sub> · 7H <sub>2</sub> O	0.2
CuSO <sub>4</sub> · 5H <sub>2</sub> O	0.08
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	3.13 × 10 <sup>-3</sup>
(NH <sub>4</sub> ) <sub>6</sub> Mo <sub>7</sub> O <sub>4</sub> · 4H <sub>2</sub> O	0.13
CoCl <sub>2</sub> · 6H <sub>2</sub> O	0.04

4. 결과 및 고찰

4.1. 임펠라 Blade의 회전속도와 Volumetric Flow Rate

임펠라 blade의 회전속도가 증가함에 따라서 blade tip에서 이탈되는 반응액의 유속도 증가한다. 그러므로 Fig. 1의 tanθ와 k값도 역시 증가한다. 식 (2)로부터 15, 30, 45rpm에서의 volumetric flow rate가 다음 Table 2와 같이 나타난다.

Table 3. Volumetric flow rate for each rotation velocity

Classification	NQ	n	D <sub>a</sub> <sup>3</sup>	q(m <sup>3</sup> /sec)
15rpm	1.3	0.25	8 × 10 <sup>-3</sup>	2.6 × 10 <sup>-3</sup>
30rpm	1.3	0.5	8 × 10 <sup>-3</sup>	5.2 × 10 <sup>-3</sup>
45rpm	1.3	0.75	8 × 10 <sup>-3</sup>	7.8 × 10 <sup>-3</sup>

4.2. 교반 효과를 더욱 높이는 Clay의 분산

본 반응기에서 clay 입자에 의한 분산효과를 다음과 같이 설명할 수 있다. 즉 증가된 임펠라 blade의 회전속도가 반응액 입자사이의 shear force를 증가시키고 이러한 특성의 반응액 흐름이 반응기 벽면과 조우하여 wall drag의 증가현상을 나타내게 하는데 이 현상이 반응기 내부의 전체 공간에서 반응액의 drag force가 점차적으로 증가하는 특성을 나타내게 한다. 그럼에도 불구하고 증가된 회전속도를 갖고있는 임펠라 blade로부터 나타나는 external force는 부력과 그러한 drag force를 지배하고 이 힘이 clay 입자를 활동적으로 분산하게 하는데 15, 30, 45rpm에서 clay 입자의 일차원 운동에 따르는 항력 계수, C<sub>D15</sub>, C<sub>D30</sub>, C<sub>D45</sub> 가 C<sub>D15</sub> < C<sub>D30</sub> < C<sub>D45</sub>의 관계를 유지하고 식 (2)로부터 a<sub>c15</sub>, a<sub>c30</sub>, a<sub>c45</sub>를 15, 30, 45rpm에서의 가속도, r<sub>15</sub>, r<sub>30</sub>, r<sub>45</sub>를 동 회전속도에서의 clay 입자 행로 반경, ω<sub>15</sub>, ω<sub>30</sub>, ω<sub>45</sub>를 동 회전속도에서의 각속도, u<sub>15</sub>, u<sub>30</sub>, u<sub>45</sub>를 동 회전속도에서의 유속이라 하면 a<sub>c15</sub> < a<sub>c30</sub> < a<sub>c45</sub>, r<sub>15</sub> < r<sub>30</sub> < r<sub>45</sub>, ω<sub>15</sub> < ω<sub>30</sub> < ω<sub>45</sub>, u<sub>15</sub> < u<sub>30</sub> < u<sub>45</sub>의 관계를 나타내게 되는 바 여기에서 본 반응기에서의 교반속도에 따르는 clay 입자의 회전 가속도가 교반 효과를 더욱 더 높이고 있다는 것이 증명되고 있다. 아울러

본 반응기에서 벽면 난류(wall turbulence)가 반응기 벽면과 반응액 흐름사이에서 생성되고 그때 반응기 벽면 근처에서 형성된 전단 흐름(shear flow)이 점차적으로 vorticity로 변화하는데 그러한 흐름이 반응기 전 공간에서 연속적으로 생성된다. clay 입자 운동 역시 이 흐름에 동반되며 반응액의 확산 운동(diffusion motion)에 동참하게 된다.

4.3. 교반속도에 따르는 조류성장과 영양염류 제거 특성  
15rpm과 30rpm반응기를 실험적으로 운전한 결과, COD 제거 효율을 93.9%에서 94.3%, (NH<sub>3</sub>-N + NO<sub>3</sub>-N)의 제거 효율을 81.9%에서 99.0%, T-P 제거효율을 46.8%에서 53.6%로 얻을 수 있었다.

반응기에서 교반속도에 따르는 조류 성장과 COD, NH<sub>3</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N, PO<sub>4</sub>-P의 제거 특성이 다음의 Fig. 4와 같이 나타났다.

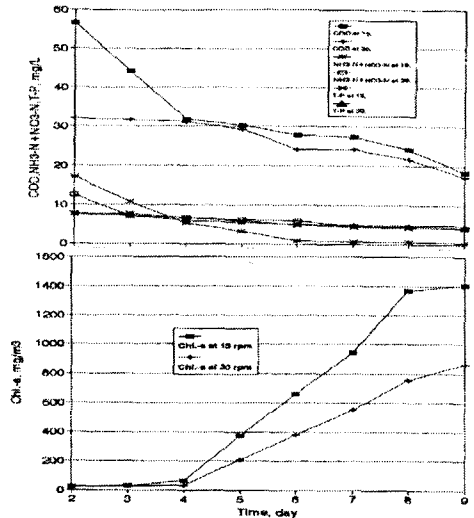


Fig. 4. Trend of algal growth and of nutrients (COD, NH<sub>3</sub>-N + NO<sub>3</sub>-N, T-P) removal at agitation velocity.

4.4. 조류 성장 동력

배양조에서 발색현상이 강하게 나타났는데 두 반응기에서의 발색이 배양 3일(순용기) 후부터 나타났고 연녹색으로부터 점차 진녹색으로 변화하였다. 두 반응기 모두 pH는 배양내내 중성을 유지하였고 15rpm의 반응기에서 반응 9일째에 1403.97 Chl.-a μg/ℓ를 나타내었는 바 15rpm의 것이 30rpm의 것보다 약 1.6배의 algal biomass 생산력을 나타내었다.

순용기 이후의 조류 수확(algal harvesting) 개념으로 볼 경우 두 반응기에서의 조류 성장 동력을 다음의 Kuo 식<sup>8)</sup>으로 나타낼 수 있다.

$$r = \frac{1}{t} \cdot \sum \{2(S_{ac} - S_{a0}) / (S_{ac} + S_{a0})\}$$

$\Gamma$  : N 혹은 P의 제거율,  $\text{day}^{-1}$

윗 식으로부터  $\Gamma$  값이 각각, 15rpm의 교반 :  $0.44 \text{ day}^{-1}$ , 30rpm의 교반 :  $0.51 \text{ day}^{-1}$ 의 값을 나타낸다. 이는 30rpm의 것이 15rpm의 것보다 약 1.16배의 조류 성장률을 갖고 있음을 나타낸다.

4.5. 질소, 인 제거 동력

순용기 이후 두 반응조에서의 N, P의 농도가 꾸준히 감소하였다. 15rpm의 것이 반응 9일째 되는 날까지 감소하였고 30rpm의 것은 반응 8일째 되는 날까지 감소하였다. 순용기 이후의 N, P의 제거 동력(kinetic for N/P removal)이 조류성장 동력과 마찬가지로 다음의 Kuo 식<sup>9)</sup>으로 나타낼 수 있다.

$$\psi = \frac{1}{t} \cdot \sum \{2(C_0 - C_c) / (S_{ac} + S_{a0}) / 1000\}$$

$\psi$  : N 혹은 P의 제거율,  $\text{day}^{-1}$

$C_0$  : 오후 2시를 기점으로 측정된 N 혹은 P의 농도,  $\text{mg}/\ell$

$C_c$  : 1일 지난 후 오후 2시를 기점으로 측정된 N 혹은 P의 농도,  $\text{mg}/\ell$

t : 반응시간, day

$S_{ac}$  : 1일 지난 후 오후 2시를 기점으로 측정된 Chl.-a 농도,  $\mu\text{g}/\ell$

$S_{a0}$  : 오후 2시를 기점으로 측정된 Chl.-a 농도,  $\mu\text{g}/\ell$

t : 반응시간, day

위의 식에 의하여  $\psi$  값이 각각, 15rpm의 교반에서 N, P 제거속도가 각각  $5.6307 \times 10^{-5} \text{ day}^{-1}$ ,  $3.9813 \times 10^{-6} \text{ day}^{-1}$ 로 나타나고 30rpm의 것에서 N, P 제거속도가 각각  $8.0172 \times 10^{-5} \text{ day}^{-1}$ ,  $1.0597 \times 10^{-5} \text{ day}^{-1}$ 로 나타나는데 이는 30rpm의 것에서의 N 제거속도가 15rpm의 것보다 약 1.43배 그리고 P 제거속도에 있어서 약 2.63배 임을 의미한다.

5. 결 론

내부 바닥위에 powder로 제조된 clay를 3cm두께로 bedding한 HRABSP를 실험적으로 운전하여 교반 속도에 따르는 조류 성장 특성과 영양염류 제거 특성을 실험적으로 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 터빈 임펠라 blade의 회전을 통한 교반이 반응액의 curl과 전단흐름을 효과적으로 형성 시키며 clay입자의 분산효과를 효과적으로 나타내게 한다.

2. 바닥 clay 입자의 분산이 반응기내에서 단회로와 빈 공간을 형성시키지 아니함을 효과적으로 달성하게 한다.

3. clay입자의 회전 가속도가 교반효과를 가일층 높인다.

4. 터빈 임펠라 blade회전속도, 45rpm에서 창출되는 clay입자의 과도한 분산은 반응기에서 빛의 투과를 방해하여 조류의 광합성 작용을 억제한다.

5. 그러므로 고율 안정화지가 더욱 효과적이고 경제적인 공법이 되기 위해서는 반응기의 여러 가지 dimension

으로서 ①, ② 식의 N, Q, n,  $D_a$ , q의 관계가 더욱 연구되어야 할 것이다.

6. 조류 성장에 대한 Kuo의  $K_1$  값이 15rpm의 교반 :  $1.876 \times 10^{-2}$ 과 30rpm의 교반 :  $4.618 \times 10^{-3}$ 로 나타난다.

7. N, P 제거에 대한 Kuo의  $K_2$  값이 15rpm에서 각각  $8.403 \times 10^{-1}$ ,  $1.397 \times 10^{-1}$ 로 나타나고 30rpm에서 각각  $4.823 \times 10^{-1}$ ,  $2.052 \times 10^{-1}$ 로 나타난다.

8. 미생물체의 생명유지의 본질이 그들이 갖고있는 자연적인 기능에 의존하고 있음을 감안하면 반응기에서의 너무 과도한 교반은 조류와 세균사이의 공생작용을 억제할 수도 있음을 짐작할 수 있다. 그러므로 이 문제에 대한 연구가 계속 뒤따라야 할 것이다.

사용부호

$\pi$	periphery rate
$D_a$	impeller diameter, m
n	rotational velocity of impeller blade, r/sec
q	volumetric flow rate, $\text{m}^3/\text{sec}$
$N_Q$	flow number, 1.3
u, v, w	unit fluid velocity at x, y, z direction, $\text{m}/\text{sec}$
t	time, sec
$\rho$	fluid density, $\text{kg}/\text{m}^3$
p	vertical pressure to area of infinitesimal hexahedron of fluid, $\text{N}/\text{m}^2$
$\nu$	kinetic viscous coefficient
i, j, k	unit vector at x, y, z direction
$\nabla$	Laplacian operator, $i \frac{\partial}{\partial x} + j \frac{\partial}{\partial y} + k \frac{\partial}{\partial z}$
g	gravitational acceleration velocity, $\text{m}/\text{sec}^2$
$u_{15}, u_{30}, u_{45}$	flow velocities at 15, 30, 45 rpm, $\text{m}/\text{sec}$
$a_{e15}, a_{e30}, a_{e45}$	rotation accelerations of fluid at 15, 30, 45rpm, $\text{m}/\text{sec}^2$
$r_{15}, r_{30}, r_{45}$	radiuses of clay particle path at 15, 30, 45rpm, m
$\omega_{15}, \omega_{30}, \omega_{45}$	angular velocities of fluid at impeller tip at 15, 30, 45 rpm, $\text{rad}/\text{sec}$
$C_{D15}, C_{D30}, C_{D45}$	drag coefficients at 15, 30, 45rpm

참 고 문 헌

- 1) Picot, P. and Bahlaouni, A., et al., 1992, Comparison of the purifying efficiency of high rate algal pond with stabilization pond, J. Wat. Sci. Tech., 25(12), 197~206.
- 2) Bohumil, V., 1993, Bioadsorption of Heavy Metals, Montreal, CRC Press, 27~40.
- 3) Marcelo, J., 1991, Should waste stabilization ponds be designed for perfect-mixing or plug flow ?, J. Wat. Sci. & Tech., 23, 1495~1502.
- 4) Warren, L. M. et al., 1985, Unit Operation of Chemical Engineering, Seoul, Yon Hap Press, 208.
- 5) Ko, K. B. et al., 1995, Metcalf and Eddy wastewater

- treatment engineering, Seoul, Donghwa Co. 631.
- 6) Hassaan, I. T. M., et al., 1977, Content of velocity patterns and velocity gradients, AIChE J., 23, 48~49.
- 7) Warren, L. M. et al., 1985, Unit Operation of Chemical Engineering, Seoul, Yon Hap Press, 208.
- 8) Kuo-Feng Tseng et al., 1991, Species control of microalgae in an aquaculture pond, J Wat. Sci. & Tech., 25(11), 1431~1437
- 9) Kuo-Feng Tseng et al., 1991, Species control of microalgae in an aquaculture pond, J Wat. Sci. & Tech., 25(11), 1431~1437