

間接曝氣式 生物學的 流動層을 이용한 合成下水 處理

The Treatment of Synthetic Wastewater by Biological Fluidised Bed with Air Lift Aeration

金 煥 起*
Kim, Hwan Gi
李 基 完**
Lee, Ki Wan

Abstract

To improve the ability of oxygen transfer in Biological Fluidised Bed(BFB) processes, air lift aeration system was introduced, experimental investigations were performed for the oxygen transfer in reactor, the fluidisation as to Biomass Volatile Solids variation and the relationship between substrate removal rate and oxygen utilization.

The experiments for this purpose were executed for the synthetic wastewater by continuous type reactor at 20°C using reticulated polypropylene sheets as media.

The obtained results showed that the oxygen transfer by air lift aeration would be more effective than any other aeration systems used in BFB reactor. Also, it has observed that the critical biomass concentration in reactor took a range of 20 to 23g/l.

Applying cages to BFB reactor, biomass would be maintained uniformly in the bed and the fluidisation characteristics of media could be improved.

Varying F/M ratio from 0.36 to 0.73, BOD removals were 91% or more. Therefore, this process was suited to the treatment of which F/M ratios are variable and specific oxygen uptake rates (K_r) were 0.23 to 0.26g O_2 /g VSS·day at range of 15 to 20g BVS/l.

要 旨

本 研究에서는 生物學的 流動層에서의 酸素傳達 能力을 向上시키기 위하여 에어리프트를 利用한 間接曝氣方式을 採擇하고, 이에 따른 生物學的 流動層에서의 酸素傳達, BVS 變化와 메디아 流動特性, 基質除去와 酸素利用과의 關係 등을 檢討하였다. 實驗은, 生物學的 流動層의 메디아로서 合成纖維 不織布를 使用하였고 合成下水에 대하여 20°C를 維持한 連續式 反應槽로 修行되었다. 實驗 結果, 에어리프트를 利用한 間接曝氣는 酸素傳達面에서 流動層의 直接 曝氣에 의한 酸素供給 方式보다 効果的임을 알 수 있었고 메디아의 限界附着 微生物濃度는 20~23g/l의 범위로 나타났으며 生物學的 流動層 反應槽에 케이지를 適用하면, 流動層의 均等한 微生物 濃度

* 正會員·全北大學校 工科大學 教授, 土木工學科

** 正會員·全北大學校 工科大學 助教

維持는 물론 매디아의 流動特性도 向上시킬 수 있는 것으로 나타났다. 또한, F/M 比 0.36~0.73 까지의 負荷變動에도 91% 以上の BOD 除去率이 維持됨으로써 負荷變動에 따른 適應力이 良好함을 確認할 수 있었고 BVS 濃度 15~20g/l 에서의 酸素比攝取率(K₁)은 0.23~0.26 gO₂/g VSS·day 로 나타났다.

1. 序 論

廢水中의 有機物 除去方法中 主를 이루고 있는 標準活性 슬러지法은 그 處理技能의 補完을 위하여 여러 變法이 開發되고 있으나 處理工程上 曝氣槽內의 微生物濃度가 一般的으로 5g/l 以下로 制限되고 있어서^(1,2) 適用 可能한 流入水 水質범위의 幅이 좁다는 등의 問題點이 存在하며 또 運營方法도 비교적 까다로운 편에 속한다.

反面, 生物學的 流動層은 反應槽內의 微生物濃度가 8~40g/l 로 維持될 수 있으므로 一般 生物學的 處理方法으로 處理가 곤란한 高濃度廢水는 물론 低濃度の 有機性廢水인 경우에도 效果의 適用할 수 있음이 알려져 있다.⁽³⁻⁶⁾

그런데, 生物學的 流動層에서 考慮해야 할 主要 因子로는 廢水의 特性, 매디아의 材質과 形態, 酸素傳達 및 流動特性 등이 있으며⁽⁷⁻¹⁰⁾ 이 중 특히 酸素傳達과 流動은 微生物에 의한 有機物의 除去技能面에서 매우 重要한 바, 高濃度廢水를 짧은 滯留時間으로 處理하려면 酸素傳達 및 流動特性을 最大化할 수 있는 曝氣方式이 要求된다. 한편, 活性슬러지法에 있어서 曝氣槽 混合液中的 溶存酸素와 處理效率의 관계는 重要한 意義를 가진다. Bhatla⁽¹¹⁾는 曝氣槽의 溶存酸素濃度가 높을 때 슬러지膨化現象이 일어난을 實驗的으로 확인하여 溶存酸素濃도와 絲狀菌 發生간에 밀접한 關係가 있다고 主張하였으며 Smith⁽¹²⁾, Gaudy 등⁽¹³⁾은 曝氣槽內의 溶存酸素濃도를 1mg/l 까지 維持하여도 支障이 없었음을 報告하고 있다. 反面, 曝氣槽에서 維持해야 될 最小의 溶存酸素濃도는 有機物 負荷量, 微生物濃度, 溫度 등을 考慮하여 決定할 問題로서 Knudson 등⁽¹⁴⁾에 의하면 活性슬러지法에서 曝氣槽의 溶存酸素濃도가 增加함에 따라 最大 基質利用 速度가 增大되고 슬러지의 生産量 및 流出水의 基質濃도가 減少한다는 研究結果도 있다.

그런데, 高濃度로 附着된 微生物을 利用하는 生物膜工法에 있어서는 微生物膜의 두께가 酸素利用速度 및 有機物 除去率과 밀접한 關係에 있으며 生物學的 環境 및 力學的 因子들에 따라 달라진다.⁽¹⁵⁻¹⁷⁾ Jewell 에 따르면 純酸素를 利用한 生物膜法에서 溶存酸素濃度 15mg/l 以上이었을 때 두께 2~3cm 의 微生物膜 內部에까지 好氣性 狀態의 維持가 可能하였다 한다.⁽¹⁶⁾ 특히 生物學的 流動層에 있어서는 高濃度の 微生物이 密集되어 있는 狀態이므로 流動層을 好氣性으로 維持하기 위함은 물론 微生物膜 內部的 酸素移動 速度를 增加시키기 위하여 매디아 주변의 溶存酸素濃도를 높여주어야 한다. 즉, 生物學的 流動層의 경우 充分한 酸素供給이 先行되어야만 效果적인 有機物除去가 可能할 것으로 생각된다. 이러한 生物學的 流動層에 一般的으로 適用되는 曝氣方法은 反應槽內에서 直接 曝氣하는 方式과 純酸素 혹은 空氣를 反應槽 外部에서 間接 曝氣하는 方式으로 區分되는데 直接 曝氣方式은 매디아에 附着되어 있는 微生物의 脫離를 招來하기 쉽기 때문에 間接 曝氣方式을 택하는 편이 더 좋은 것으로 알려져 있다.⁽¹⁹⁻²¹⁾

本 研究에서 採擇한 에어리프트(air lift)는 開回路인 垂直管의 低部에 空氣를 보내어 液中氣泡의 上昇浮力으로 液體流速을 誘導하는 液體輸送方式^(18,22)으로서 空氣를 給送하는 작은 動力을 利用하여 循環流速 및 曝氣의 2重 效果를 期待하는 原理이다. 즉, 反應槽와 연결된 에어리프트管에서 氣-液 接觸후 循環流에 의해 反應槽로의 酸素傳達이 이루어지며 酸素傳達 效果外에 管內 發生氣泡의 體積으로 因한 水位의 上昇으로 反應槽와의 水頭差를 誘發시켜 液體 循環流速에도 寄與하므로 循環 動力費 面에서 經濟的이다. 또한 反應槽와 에어리프트管 간의 循環流速을 조절하면 流動層에서 必要로 하는 充分한 酸素供給이 可能할 뿐만 아니라 反應槽內의

메디아 流動狀態를 改善할 수 있으므로 酸素傳
達이 効果的으로 이루어진다.

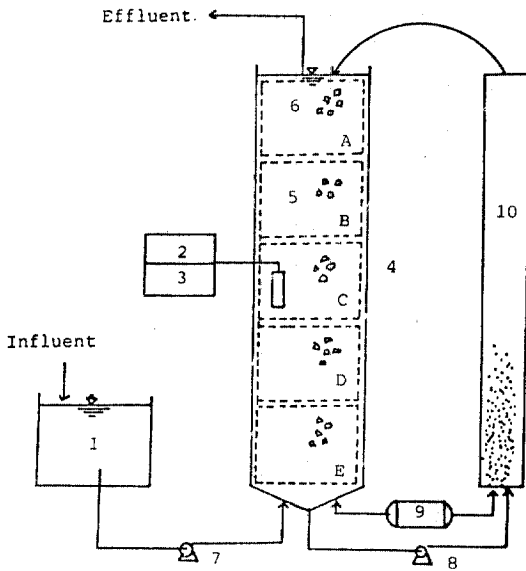
따라서, 本 研究에서는 生物學的 流動層에서
의 酸素傳達 能力을 向上시킬 目的으로 에어리
프트에 의한 間接曝氣方式을 採擇하여 이에 따
른 酸素傳達, 流動層에서의 BVS(biomass vola-
tile solids)變化와 메디아 流動特性, 負荷變動과
基質除去 및 有機物除去와 酸素利用과의 관계
등을 實驗的으로 研究 檢討하였다.

2. 實驗裝置 및 實驗方法

2-1. 實驗裝置

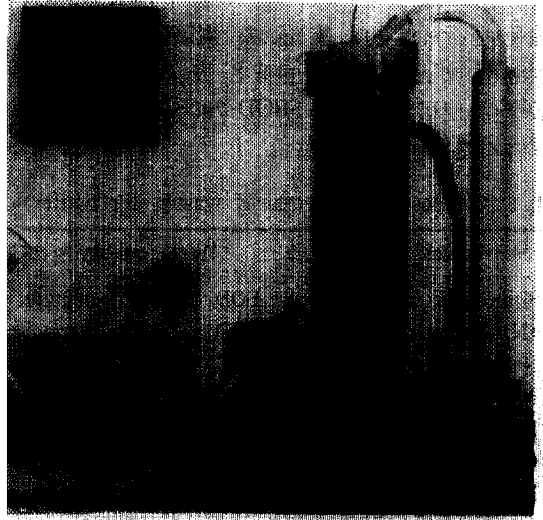
間接曝氣式 生物學的 流動層의 特性을 檢討하
기 위하여 本 研究에 使用된 實驗裝置는 그림 1
과 같다(사진 1 참고).

反應槽의 크기는 內徑 18.3cm, 有效높이 87.5
cm 인 아크릴 圓筒을 利用하여 有效容積 24l 가



- 1) Sample storage tank
- 2) DO meter
- 3) Temp. controller
- 4) Reactor
- 5) Stainless steel cage(A, B, C, D, E)
- 6) Matted reticulated polypropylene media
- 7) Pump for constant feeding
- 8) Recycle pump
- 9) Air pump
- 10) Air lift device

그림 1. Diagram of the experimental apparatus



寫眞 1. Experimental apparatus

되도록 하였고 上部에 웨어 및 處理水 流出口를,
下部에 原水 流入口, 循環水 流出口 및 散氣石
을 設置하고 바닥은 圓錐形이 되도록 하였다.

間接曝氣 裝置인 에어리프트管은 內徑 9.8cm,
有效높이 86cm 인 有效容積 6.5l 의 아크릴 圓筒
으로서 上部에 反應槽와 연결되는 內徑 3.7cm,
길이 45cm 인 연결管을, 下部에는 循環水 流
入口와 散氣石을 設置하였다. 또한 貯留槽로부터
의 原水 流入量은 定量注入 펌프(Model CX-500)
로 調整하였고 循環流量은 流量計를 附着한 循
環펌프로 調節토록 하였다.

微生物이 附着하여 成長할 수 있는 메디아로
는 폴리프로필렌系 不織布를 크기가 1.2cm×
1.2cm×0.7cm 정도가 되도록 잘라서 利用하였
다. 反應槽內의 메디아는 流動過程에서 한 方向
으로 偏重되기 쉬우므로 이 現象을 억제할 수
있도록 메디아의 有效 流動空間을 制限시킬 수
있는 內徑 17.0cm, 높이 14.5cm 의 케이지
(stainless steel cage)를 考案하여 反應槽 內部에
5 個를 直列로 設置하였다. 그리고, 反應槽에 內
部 加熱式 恒溫設備(20±0.5°C)와 溶存酸素計
(YSI, B-05896A)를 裝置하여 一定溫度 維持 및
溶存酸素의 連續測定이 可能토록 하였다.

2-2. 試料의 特性

本 實驗에 使用된 流動層 反應槽에 있어서 間

接曝氣方式이 生物學的 流動層에 미치는 影響을 檢討할 수 있도록 酸素傳達 實驗과 基質除去 實驗을 並行하였는데 基質除去 實驗을 위하여 調製한 合成下水 原液의 組成은 表 1 과 같으며 本裝置에 使用된 試料는 BOD 700~1,400mg/l로 稀釋시킨 것이다.

表 1. Composition of synthetic wastewater(1 Liter)

Substances	Wt.(g)	Water quality	
Skim milk	100.0	BOD ₅	112,200mg/l
(NH ₄) ₂ CO	10.0	COD _{cr}	132,000mg/l
NaCl	3.0	TOC	46,700mg/l
Na ₂ HPO ₄ ·12H ₂ O	10.0	BOD ₅	2.40
Kcl	1.4	TOC	
CaCl ₂ ·2H ₂ O	1.4	BOD ₅	0.85
MgSO ₄ ·7H ₂ O	1.0	COD _{cr}	

一般的으로 試料의 生物學的 分解特性은 脫酸素係數로 評價될 수 있다. 實驗을 통하여 計算된 脫酸素係數값은 0.181day⁻¹ 이었으며 이는 一般的으로 알려져 있는 家庭下水의 脫酸素係數값⁽²³⁾ 0.152~0.168 day⁻¹ 에 비하여 약간 큰 값으로서 本試料의 生物學的 分解가 그만큼 더 容易함을 豫測할 수 있다.

2-3. 實驗 方法

本實驗에 使用된 微生物은 全州市 衛生處理場의 返送슬러지를 殖種하여 合成下水試料로 充分히 馴養된 것으로서 實驗을 시작하여 定常狀態에 到達된 후부터 資料分析을 實施하였다.

SS 및 BVS 測定은 琉璃纖維 濾過紙(Gelman Type A)를 利用하였으며 BVS는 反應槽의 各 케이지別 메디아를 無作爲로 採取하여 그 體積을 測定하고 메디아에 附着된 微生物을 조심스럽게 짜내어 합하고 1l로 稀釋한 뒤 케이지 有效부피, 16.25l에 대한 濃度로 換算하여 나타내었으며 메디아의 引出로 因한 誤差를 最小化할 目的으로 試料採取후 곧 引出된 메디아 量만큼 새로운 메디아로 補充해 주었다⁽¹⁷⁾. 그 外의 모든 試料分析 項目은 標準方法⁽²⁴⁾에 準하였다.

流動層에서의 酸素傳達을 檢討하기 위하여 反應槽와 에어리프트管內의 曝氣量은 各各 0~0.36 m³/h, 0.1~0.6m³/h 범위로 供給하였으며 合成下水處理를 위한 連續運轉 期間 동안 4日 間隔

으로 剩餘슬러지를 除去해 주었다.

또한, 反應槽內의 流動方式은 下向流(down flow)로서 流速 및 重力의 影響을 받아 아래층 케이지일수록 微生物濃度가 높게 나타났으므로 流動層內의 上下 位置別 微生物濃度를 均等하게 維持할 수 있도록 每 剩餘슬러지 除去時마다 5個의 케이지中 最下層의 케이지를 上段으로 옮겨주는 케이지 交換을 實施하였다.

3. 實驗結果 및 考察

3-1. 酸素移動 特性

(1) 反應槽에서의 酸素傳達

一般的으로 清水中에서의 酸素傳達 速度는 다음 式으로 表現된다.⁽²⁵⁾

$$\frac{dC}{dt} = K_L a (C_S - C) \dots\dots\dots(1)$$

여기서, $\frac{dC}{dt}$: 酸素傳達 速度[mg/l/h]
 $K_L a$: 總括 酸素傳達 係數[h⁻¹]
 C_S : 飽和 溶存酸素濃度[mg/l]
 C : 溶存酸素濃度[mg/l]

(1)式을 變形하면,

$$\ln(C_S - C) = K_L a \cdot t$$

$$\text{또는, } \log(C_S - C) = \frac{K_L a}{2.303} t \dots\dots\dots(2)$$

0.12~0.36 m³/h의 反應槽內 空氣量 增加에

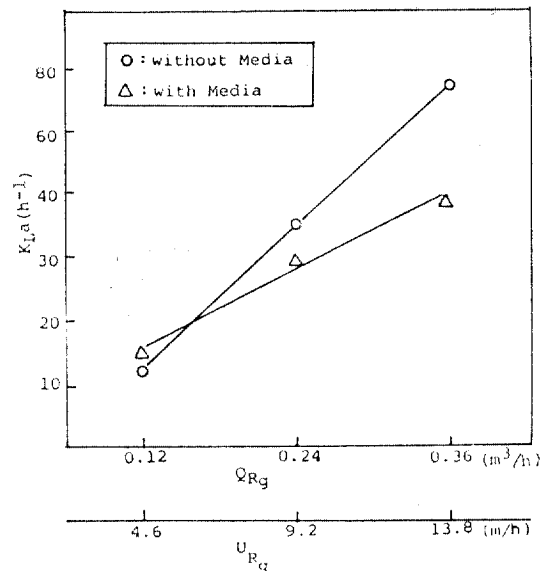


그림 2. K_La vs air flow rate in reactor (Tap water)

대하여 (2)식을 이용하여 求한 K_{La} 값의 變化를 메디아 있는 경우와 없는 경우에 대하여 그래프 로 나타내면 그림 2 와 같다.

그림 2에 나타난 바와 같이 K_{La} 값은 空氣量 增加에 따라 거의 線形的으로 增加하고 있으며 一般的으로 메디아 있는 경우가 메디아 없는 경우보다 K_{La} 값 增加率이 떨어지고 있다. 그런데, 約 $0.15\text{m}^3/\text{h}$ 미만의 空氣量에서는 메디아 있는 경우가 없는 경우보다 약간 큰 K_{La} 값을 보이고 있다. 이러한 結果를 보이고 있는 理由는 流入空氣量이 작을수록 비교적 작은 크기의 氣泡가 發生하는데, (8,26) 氣泡가 浮上하는中 메디아의 低部에서 止체되므로 滯留時間이 비교적 길어지는 反面, 流入空氣量의 增加될수록 氣泡의 量이 많아지므로 메디아에 대하여 비교적 큰 浮力을 作用할 뿐만 아니라 氣泡間의 接着으로 인한 脫氣(stripping)率이 높아져 結果적으로 氣泡의 滯留時間이 짧아지기 때문에 판단된다. 이는 流動層 反應槽에 관한 研究에서 비교적 큰 메디아는 空氣量이 작을수록 酸素傳達率이 높다고 한 Buckley 등(27)의 結果와 일치하고 있다.

따라서, 不織布를 메디아로 하는 本 流動層에 있어서의 曝氣는 反應槽內 空氣量이 約 $0.15\text{m}^3/\text{h}$

이상일 경우 $0.15\text{m}^3/\text{h}$ 미만일 때보다 供給空氣量에 비하여 酸素傳達率이 떨어지는 것으로 나타났기 때문에 $0.15\text{m}^3/\text{h}$ 以上の 所要空氣量에 대하여는 에어리프트를 利用한 間接曝氣方式으로 供給되도록 하였다.

(2) 에어리프트에 의한 酸素傳達 效果

그림 2에 나타난 바와 같이 메디아를 포함하는 流動層反應槽에서의 直接曝氣는 空氣量이 增加할수록 메디아 存在로 因한 酸素傳達 增大效果가 減少되기 때문에 에어리프트 曝氣에 의한 原水 循環方式으로 酸素傳達 效果를 增大시키고 저 하였으며 에어리프트管의 空氣量을 液體 循環速度別로 變化시키면서 K_{La} 값을 求한 結果는 表 2에 나타내었다.

表 2에 나타난 바와 같이 同一한 循環流速下에서 反應槽內의 K_{La} 값은 메디아 存在與否에 관계없이 에어리프트管의 空氣量에 비례하며 에어리프트管에서의 空氣量이 同一한 경우, 液體 循環流速이 클수록 K_{La} 값은 增加하고 메디아 存在로 因한 K_{La} 값 增加 寄與率은 에어리프트 空氣量 및 循環流量이 커질수록 純化되는 傾向이었다. 또한, 메디아 存在時의 反應槽와 에어리프트 空氣量, 循環流量과 K_{La} 값 增加率의 관

表 2. Values of $K_{La}(20^\circ\text{C})$ with superficial gas and liquid velocities

U_{Rg} (m/h)	U_{Lg} (m/h)	8.0			24.0			40.0		
	U_{Li} (m/h)	18	36	54	18	36	54	18	36	54
	U_{Rl} (m/h)	-5.2	-10.4	-15.6	-5.2	-10.4	-15.6	-5.2	-10.4	-15.6
0.0	with media	10.2	13.3	16.0	14.0	17.8	21.6	16.4	20.0	25.8
	without media	12.9	15.7	20.0	16.8	22.5	28.0	23.5	29.3	36.0
4.6	with media	20.7	22.8	26.9	25.5	29.5	35.5	28.5	35.1	42.2
	Increase(%)	61	45	35	54	31	27	21	20	11
	without media	39.5	47.6	53.6	44.0	51.1	56.9	46.8	52.9	59.6
9.2	with media	51.1	56.2	60.5	54.0	60.4	66.3	57.8	65.0	72.0
	Increase(%)	29	18	13	23	18	17	24	23	21
	without media	57.2	62.9	68.0	63.0	68.9	74.5	70.4	77.3	83.0
13.8	with media	63.5	67.0	73.0	76.8	82.4	91.5	85.6	94.5	112.0
	Increase(%)	11	7	7	22	20	23	22	22	35

U_{Rg}, U_{Lg} : Superficial gas velocity in reactor, air lift pipe.

U_{Rl}, U_{Li} : Superficial liquid velocity in reactor, air lift pipe.

계는 表 3 과 같다.

表 3. Rate of K_{La} increase to air flow rate and circulation velocity (reactor with media)

Air Lift Reactor	$K_{La}(h^{-1})$		
	$U_{L1}=18$ (m/h) $U_{L2}=8$ (m/h)	$U_{L1}=18$ (m/h) $U_{L2}=24$ (m/h)	$U_{L1}=54$ (m/h) $U_{L2}=8$ (m/h)
$U_{R2}=4.6$ (m/h)	20.7	25.5 (+23.2%)	26.9 (+30.0%)
9.2(m/h)	51.1	54.0 (+5.7%)	60.5 (+18.4%)

즉, 에어리프트관의 液體 循環流速(U_{L1})이 18 m/h 인 경우 反應槽內 空氣量 4.6m/h, 9.2m/h 에 대하여 에어리프트 空氣量을 3倍 增加시켰을 때의 K_{La} 값 增加率은 各各 23.2%, 5.7%로 서 에어리프트 空氣量(U_{L2})이 8.0m/h 인 경우 液體 循環流速을 3倍 增加시켰을 때의 反應槽內

空氣量(U_{R2}) 4.6m/h, 9.2m/h 에 대한 各各의 K_{La} 값 增加率 30.0%, 18.4%를 비교하면 K_{La} 값 增加率은 에어리프트 空氣量보다는 液體 循環流速이 더 크게 作用함을 알 수 있다. 이것은 에어리프트管內의 空氣量 增加가 에어리프트管을 통과하는 液體의 溶存酸素 濃度 增加에만 영향을 주는 反面, 循環流速 增加는 液體의 溶存酸素 濃度增加 外에 反應槽에서의 流動效果를 附隨的으로 期待할 수 있기 때문으로 생각된다. 또, 表 2에 의하면 同一條件下에서의 매디아 存在로 인한 K_{La} 增加率이 循環流速 增加에 따라 점점 낮아지는 경향을 나타내고 있는데 이러한 事實로 미루어 앞으로 經濟的인 循環流速과 관련된 매디아 流動特性에 대하여는 더 깊은 研究가 必要함을 알 수 있다.

3-2. BVS 變化와 매디아의 流動特性

合成下水 試料에 대하여 間接曝氣式 生物學的

表 4. Summary of operational condition and experimental results for synthetic wastewater treatment

Item.	Unit	RUN 1			RUN 2	RUN 3
		A'	B'	C'		
Q	l/h	4.1	4.1	4.1	9.3	9.3
Q_L	l/h	0	360	180	205	1,580
R		0	88	45	22	170
HRT	h	2.25	2.25	2.25	1.0	1.0
Air flow	m^3/h	0.36	0.32	0.42	0.42	0.42
F/M	day^{-1}	0.45~0.58 (0.52)	0.36~0.73 (0.54)	0.47~0.68 (0.58)	0.57~0.65 (0.62)	0.39~0.43 (0.41)
(DO)r	mg/l	1.0~2.4	0.8~1.4	1.2~2.0	1.2~1.6	1.7~3.0
(BVS)Av.	mg/l	16,785	17,471	15,190	15,542	23,310
K_{La}	h^{-1}	31.0	26.3	25.2	25.2	38.4
(BOD ₅)inf.	mg/l	1,400	1,400	1,400	700	700
(S-BOD ₅)eff.	mg/l	96~114 (105)	105~118 (112)	110~132 (121)	65~92 (78)	38~52 (45)
(BOD ₅)r	%	91.0~93.1 (92.5)	91.0~92.5 (92.0)	90.6~92.1 (91.3)	86.9~90.7 (88.9)	92.6~94.6 (93.6)
(VSS)eff	mg/l	38~46	36~89	52~55	38~63	102~122

Q : Flow rate (raw water)

Q_L : Flow rate (in air lift)

R : Recirculation ratio

(DO)r : remained DO in reactor (at mid depth)

(BVS)Av. : Average BVS concentration

inf. : influent

eff. : effluent

(BOD₅)r : BOD_5 removal = $\frac{(BOD_5)inf - (S-BOD_5)eff}{(BOD_5)inf} \times 100$

流動層으로 水理學的 滯留時間(HRT)과 循環流量比를 다르게 하여 連續處理 實驗한 結果를 表 4에 要約하였다.

表 4에서 Run 1은 流入 BOD₅ 1,400mg/l에 대하여 HRT 2.25時間으로 運營한 것이며 條件 A'는 原水 流入量 4.l/h로서 循環流量이 없는 경우이고 條件 B'는 循環流速 6l/min으로 原水에 대한 循環流量比 88, 條件 C'는 循環流速 3 l/min인 循環流量比 45의 경우로서 各各의 平均 BVS濃度는 16,800mg/l, 17,500mg/l, 15,200mg/l로 維持되었다. 또, Run 2와 Run 3는 原水 流入量 9.3l/h, 流入 BOD₅ 700mg/l, HRT 1時間인 運營條件으로서 原水에 대한 循環流量比는 各各 22, 170이었고 이때의 平均 BVS濃度는 各各 15,500mg/l, 23,300mg/l로 維持되었다. 表 4에 나타난 바와 같이 實驗裝置를 定常狀態로 運營하였음에도 F/M比가 0.36~0.73 day⁻¹로 變化되었던 것은 메디아에 附着된 微生物의 脫離過程에서 剩餘슬러지 除去量을 精確하게 調節하지 못하였던 관계로 BVS濃度가 약간의 變化幅을 가지고 있었기 때문이다. 一般的으로 BVS濃度는 그 값이 클수록 메디아

流動에 따른 反應槽로부터의 微生物 流出과 밀접하게 關聯되므로 重要한 意味를 갖는다. 本實驗에서 BVS濃度 變化에 따른 反應槽 流出水中의 VSS濃度를 나타내면 그림 3과 같다.

그림 3에 따르면 BVS濃度가 增加할수록 流出水中의 VSS濃度는 커지고 있으며 BVS濃度가 20~23g/l 범위에서 流出水中의 VSS濃度가 급격히 增加되는 경향을 보여주고 있다. 즉, 不織布를 메디아로 하는 生物學的 流動層에 있어서 메디아 流動으로 因한 液體와 메디아의 微生物膜 혹은 메디아 相互間의 마찰력이 메디아와 微生物의 附着力보다 크게 될 경우 脫離된 微生物이 流出水中의 VSS濃度로 나타나게 되어 流出水 水質이 低下되는 것이다. 이것은 Atkinson 등의 研究에서 使用 메디아의 材質에 따라 流動層의 微生物濃度를 25g/l 이상까지도 維持할 수 있다⁽⁶⁾고 한 바와 같이 流動層의 微生物濃度는 메디아의 種類, 液體 有効速度, 메디아間의 摩擦力 등 外刑的 條件의 制約을 받기 때문이다. 따라서 不織布 메디아를 使用한 本 研究에서는 脫離 微生物에 의한 流出水 水質低下를 방지하기 위하여 運營上 維持해야 될 메디아 附着微生物의 上限濃度가 存在함을 알 수 있다. 만일 流動層에 대하여 直接曝氣方式을 適用한다면 上昇氣泡과 메디아間의 강한 摩擦力으로 인하여 메디아 附着微生物의 上限濃度는 보다 낮아지게 되어 非效率的인 方法이 될 것으로 판단된다.

또한, 反應槽內 循環流入部에서의 에어리프트 管 流出水の 衝擊과 下向流 流動層內의 流速으로 인한 不均一한 微生物濃度 分布의 形成 때문에 流動層의 有機物 除去能力이 低下될 수 있다. 이러한 微生物濃度分布 경향에 대하여 微生物이 流動層內의 全體 空間에 均等하게 配分될 수 있도록 4日 간격으로 케이지를 交換 運營한 結果, 이에 따른 各 케이지別 BVS濃度 變化를 그림 4에 나타내었다.

그림 4의 BVS濃度 測定값은 케이지 交換 直前의 資料를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 各 케이지別 微生物濃度分布는 最下層에서 高濃度를 나타내며 上層케이지 일수록 BVS濃度가 減少되어 最上層 케이지에서 가장 작은 BVS濃度를 보이고 있다. 이것은 本 研究에서 採擇하

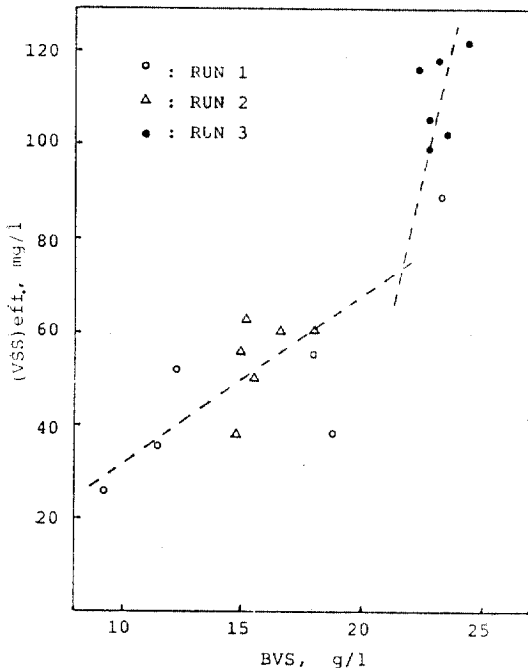


그림 3. BVS vs (VSS) eff. in reactor

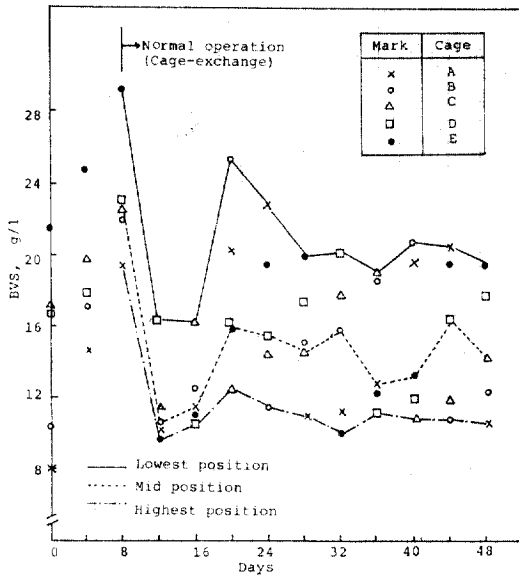


그림 4. Variations of BVS in cage for periodical cage-exchange

고 있는 下向流 流動方式의 영향을 받아 에어리프트管 流出水에 포함된 氣泡가 反應槽 上部로 순환되면서 上部層의 媒地에 附着 微生物에 부분적인 전달력을 발생하므로 上層에서 一部 脫離된 微生物이 重力에 의해 下層케이지에 옮겨

질 뿐만 아니라 또한 反應槽로의 基質流入部가 下層部에 있는 관계로 下層의 微生物이 上層部보다 높은 基質농도와 접하기 때문에 생각되며 反應槽內的 均一한 微生物濃度 維持를 위하여 케이지의 위치를 週期的으로 交換해 줄 必要가 있음을 보여주는 것이다. 따라서 케이지의 위치를 週期的으로 交換하고 交換時마다 一定量의 剩餘 微生物을 除去해 줄 경우, 下層케이지에 偏重되는 微生物濃度를 비교적 均等하게 分布시킬 수 있어 處理效果를 높게 維持할 수 있을 뿐만 아니라 媒地의 局部的인 高濃度 微生物 附着現象이 排除되므로 附着 微生物의 脫離現象이 어느 정도 豫防될 수 있을 것으로 판단된다.

한편, 連續運轉中인 反應槽로의 基質 流入을 멈추고 曝氣에 의한 時間 經過別 VSS 減少量을 測定⁽²⁵⁾하여 媒地에 附着되어 있는 微生物(BVS)中的 分解可能分率(degradable fraction)을 求한 結果는 그림 5와 같다.

그림 5에 따르면 反應槽로의 基質 流入을 中止했던 當時의 初期 BVS 濃度 24.4g/l로부터 約 3週日 후 6.3g/l의 거의 一定한 VSS 量이 維持되고 있었으며 이로 미루어 BVS 中的 分解可能分率은 約 74.2%로 推定된다.

3-3. 負荷變動과 基質除去

生物學的 流動層에 있어서 負荷變動과 관련되어 있는 因子로는 原水의 水質, 水理學的 滯留時間, BVS 濃度 등이 있다. 本 研究에서는 一般 活性슬러지法의 F/M 比 0.2~0.4 day⁻¹보다 큰 負荷量 범위가 되도록 相關因子를 調節하였으며 이에 따른 負荷變動과 BOD 除去率의 關係를 그림 6에 나타내었다.

그림 6에 의하면 實驗期間中 F/M 比가 0.36~0.73 day⁻¹의 범위로 變動하였음에도 BOD 除去率은 負荷變動에 큰 영향을 받지 않고 87~95%로서 비교적 良好하게 나타났다. 또, 1,400mg/l 이던 流入 BOD₅ 濃度를 700mg/l

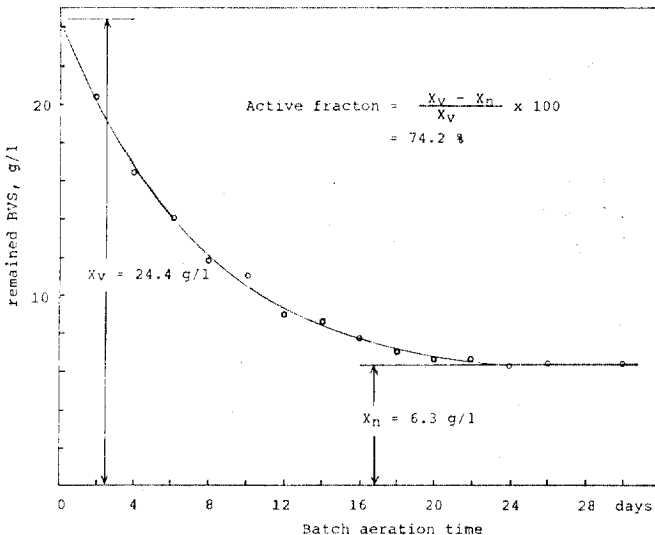


그림 5. Determination of active fraction of biomass

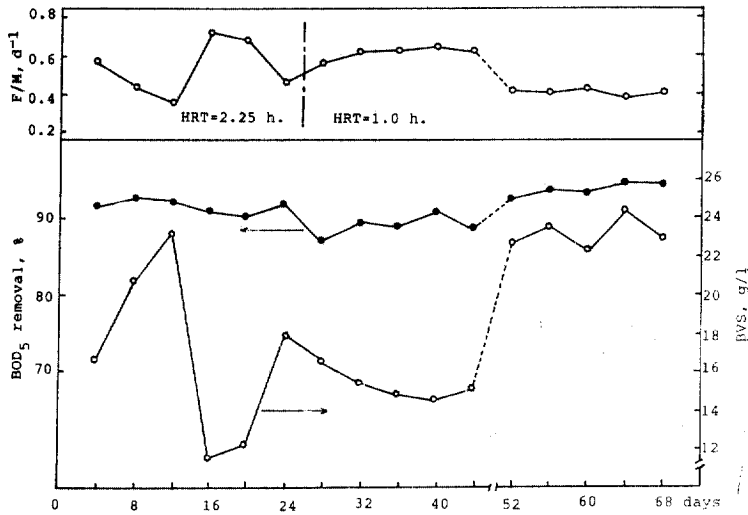


그림 6. BOD₅ removal vs. BVS and F/M ratio in BFB process

로 낮추고 水理學的 滯留時間을 2.5時間에서 1.0時間으로 減少시켰을 때, 92%이던 BOD₅ 除去率이 87%로 低下된 후 다시 時間經過에 따라서서히 向上되다가 BVS 濃度を 22~24g/l로 維持시켜 주면 95%까지 BOD₅ 除去가 可能하였다. 이는 生物學的 流動層에 있어서 水理學的 滯留時間을 減少시키기 위하여 BVS 濃度を 높여주는 運營方法이 効果的으로 使用될 수 있으며 또한 生物學的 流動層이 負荷變動에 柔軟하게 對處하고 있음을 보여주는 것이다.

Eckenfelder 등^(25,28)은 完全混合 反應槽에서 負荷變動이 큰 경우의 有機物 除去速度를 다음 式으로 提案하고 있다.

$$\frac{S_0(S_0 - S_e)}{X_v \cdot t} = K_e S_e \dots\dots\dots (3)$$

- 여기서, S₀: 流入 BOD₅[mg/l]
- S_e: 流出 BOD₅[mg/l]
- X_v: MLVSS[mg/l]
- t: 水理學的 滯留時間[day]
- K_e: 有機物 除去速度 常數[day⁻¹]

生物學的 流動層에 있어서 有機物 除去速度는 一次反應에 따르며 完全混合流로 認定할 수 있으므로^(28,29) (3)式을 適用하면 合成下水에 대한 基質除去速度를 求할 수 있다. 基質除去 實驗

結果로 얻어진 資料를 (3)式에 適用하여 그래프 로 나타내면 그림 7과 같은 直線이 얻어진다.

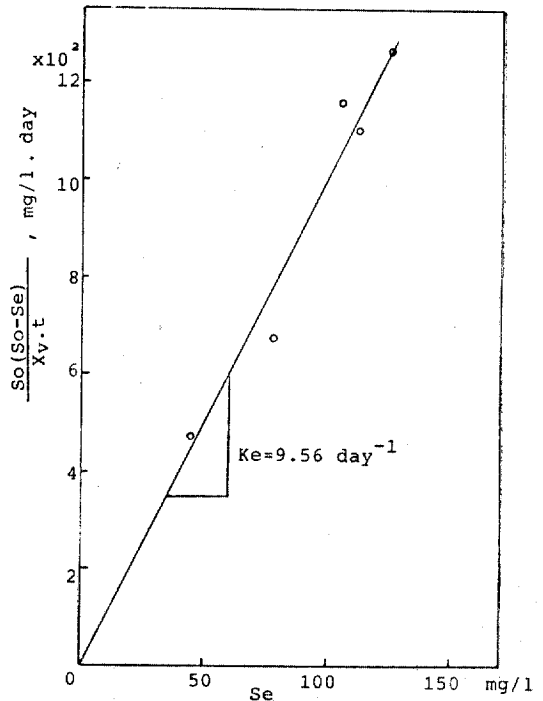


그림 7. Estimation of substrate removal rate, K_e, for Eckenfelder's equation

그래프에 나타난 直線의 기울기, K_e 값은 9.56 day^{-1} 로서 Eckenfelder 가 活性슬러지法으로 求한 溶解性 家庭下水 成分의 K_e 값, ⁽²⁸⁾ 8.0 day^{-1} 와 비교해 볼 때 本 流動層에서의 有機物 除去速度가 약간 빠름을 알 수 있으며 이러한 事實은 비교적 짧은 水理學的 滯留時間으로도 效果的인 有機物 除去가 可能함을 뒷받침해 주고 있다.

3-4. 流動層에서의 酸素利用

一般的으로 生物學的 廢水處理 過程에 必要한 總酸素量은 微生物의 細胞合成을 위하여 BOD 除去에 所要될 酸素量과 微生物의 內呼吸에 必要한 酸素量으로 區分되며 다음과 같이 表現된다⁽²⁵⁾.

$$R_r = a'S_r + b'xX_v + R_n + R_c \dots\dots\dots(4)$$

여기서, R_r : 總 酸素 所要量 $[\text{gO}_2/\text{day}]$

S_r : BOD₅ 除去量 $[\text{gBOD}_5/\text{day}]$

a' : 細胞合成을 위하여 BOD 除去에 必要한 酸素利用 係數 $[\text{gO}_2/\text{g 除去 BOD}_5]$

b' : 內生呼吸에 必要한 酸素利用 係數 $[\text{gO}_2/\text{gMLVSS} \cdot \text{day}]$

X_v : 曝氣槽內 平均 MLVSS 量 $[\text{g}]$

x : MLVSS 中の 生物學的 分解可能한 比率

R_n : $\text{NH}_3 \rightarrow \text{NO}_2^-$ 의 酸化에 利用되는 酸素量 $[\text{g/day}]$

R_c : 瞬間 酸素要求量 $[\text{gO}_2/\text{day}]$

(4)式에서 BOD₅ 除去에 利用되는 酸素量만을 考慮하면 (4)式은 다음 式으로 나타낼 수 있다.

$$R_r = a'S_r + b'xX_v \dots\dots\dots(5)$$

다시, (5)式의 양변을 xX_v 로 나누어 주면,

$$\frac{R_r}{xX_v} = a' \frac{S_r}{xX_v} + b' \dots\dots\dots(6)$$

즉, 酸素 比攝取率(specific oxygen uptake rate), $\frac{R_r}{xX_v}$ 와 BOD₅ 除去率, $\frac{S_r}{xX_v}$ 의 관계는 線型이 된다. (6)式을 利用하여 酸素 比攝取率과 BOD₅ 除去率의 關係를 그래프로 나타내면 그림 8과 같다.

그림 8로부터 微生物의 細胞合成을 위하여 BOD 除去에 必要한 酸素利用係數(a')는 0.373, 微生物의 內生呼吸에 必要한 酸素利用係數(b')

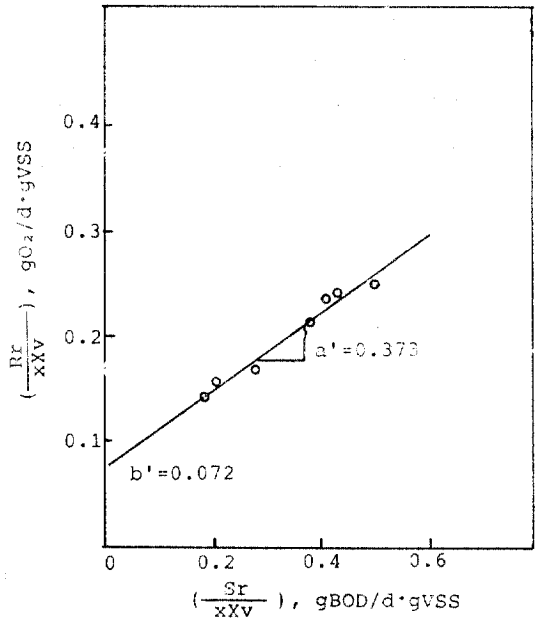


그림 8. Determination of oxygen utilization coefficients(a' , b')

는 0.072 day^{-1} 로 나타났다.

一般的으로 酸素比攝取率은 微生物 濃度の 크기에 따라 그 값이 달라지는 것으로 알려져 있다^(25,30). 따라서, 本 研究에 使用된 微生物 濃度別 酸素比攝取率의 計算이 가능하도록 BVS 濃도와 酸素比攝取率의 關係를 그림 9에 나타내었다.

그림 9에서와 같이 비교적 高濃度の BVS 임

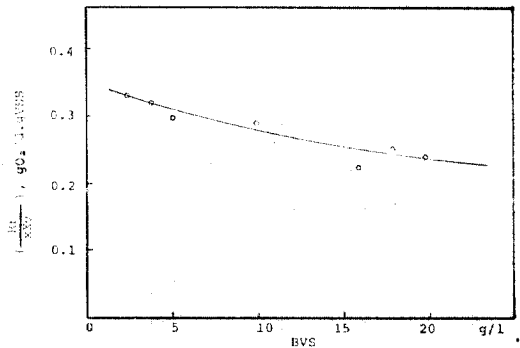


그림 9. BVS vs specific oxygen uptake rate

에도 酸素攝取率이 一般 活性슬러지法에 있어서의 酸素攝取率 범위로 알려진 $0.1 \sim 0.2 \text{gO}_2/\text{gVSS} \cdot \text{day}$ ⁽³⁰⁾보다 크게 나타난 점으로 미루어 微生物의 活性이 活性슬러지法の의 경우보다 良好함을 間接的으로 알 수 있다.

한편, 酸素攝取率은 廢水의 種類 및 微生物의 呼吸作用 단계에 따라 相異하며 특히 F/M比가 클수록 큰 값을 가지나 F/M比가 減少하면 그 값이 減少하는 性質을 갖는 것으로 알려져 있다.^(30,31) 이는 F/M比 $0.36 \sim 0.73 \text{day}^{-1}$ 로 비교적 F/M比가 컸던 本 研究에서 酸素攝取率이 높게 나타난 사실과 잘 일치하고 있다.

또, 一般 下水試料에 대하여 活性狀態 微生物과 內呼吸狀態 微生物의 代表的 酸素比攝取率의 값으로 알려진⁽³²⁾ $0.24 \sim 0.48 \text{gO}_2/\text{gVSS} \cdot \text{day}$, $0.04 \sim 0.23 \text{gO}_2/\text{gVSS} \cdot \text{day}$ 와 그림 9의 資料를 비교해 보면 活性도가 비교적 높은 生物學的 流動層인 경우에도 BVS濃도가 增加할수록 서서히 內呼吸 단계의 微生物이 出現하고 있음을 推定할 수 있다. 그리고 (5)式에서의 總酸素 所要量, R_r 은 酸素攝取率과 같은 意味이며 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$R_r = K_r \cdot X_v \dots \dots \dots (7)$$

여기서, K_r : 酸素比攝取率 [$\text{gO}_2/\text{gVSS} \cdot \text{day}$]
 X_v : 曝氣槽內 平均 MVLSS量 [gVSS]

즉, 酸素攝取率은 微生物 濃도와 酸素比攝取率의 곱으로 求할 수 있다.

4. 結 論

合成纖維 不織布를 媒材로 하는 下向流의 生物學的 流動量에 대하여 에어리프트를 利用한 間接曝氣方式으로 高濃度 合成下水를 連續處理 實驗한 結果는 다음과 같다.

1) 流動層 反應槽에 直接曝氣로 酸素供給할 경우, 空氣量이 $0.15 \text{m}^3/\text{h}$ 미만으로 작을 때는 媒材의 存在가 酸素傳達을 增加시켜주나 空氣量이 클 때에는 反對效果를 나타내었다.

2) 에어리프트管을 이용한 間接曝氣는 流動層內의 曝氣를 이용한 酸素供給方式보다 酸素傳達面에서 效果的이었다.

3) 下向流 循環에 의한 間接曝氣式 生物學的 流動層에 있어서 流出 微生物을 指標로 한 媒

아 附着微生物의 上限 濃度는 $20 \sim 23 \text{g/l}$ 범위로 나타났으며 이 때의 微生物 活性分率은 約 74% 이었다.

4) 流動層에 垂直形 5段 直列케이지(cage)를 適用하면 流動層의 均等한 微生物 濃度 維持는 물론 媒材의 流動特性을 向上시킬 수 있는 것으로 나타났다.

5) F/M比 0.36 에서 0.73 까지의 負荷變動에도 91% 以上の BOD 除去率이 維持됨으로서 負荷變動에 따른 適應力이 良好하였다.

6) 合成下水에 대한 有機物 除去速度 常數, K_d 값은 9.56day^{-1} 이고 BVS濃度 $15 \sim 20 \text{g/l}$ 에서의 酸素比攝取率, K_r , 은 $0.23 \sim 0.26 \text{gO}_2/\text{gVSS} \cdot \text{day}$ 로 나타났다.

參 考 文 獻

1. Metcalf & Eddy, *Wastewater Engineering: Treatment-Disposal-Reuse*, McGraw-Hill Book Company, pp. 474, 484~485, 1979.
2. 趙光明, 陸雲洙, 活性슬러지 廢水處理 施設의 設計에 관한 研究, 大韓土木學會誌, 第25卷, 第4號, 1977.
3. Shieh, W.K., Sutton, P.M., and Kos, P., Predicting Reactor Biomass Concentration in A Fluidised Bed System, *Journal WPCF*, Vol. 53, No. 9, Nov., 1981.
4. Mulcahy, L.T., *Mathematical Model of the Fluidised Bed Biofilm Reactor*, Univ. of Massachusetts, June, 1978.
5. Jerris, J.S., Owens, R.W., and Hickey, R., Biological Fluidised-bed Treatment for BOD and Nitrogen Removal, *Journal WPCF*, May, 1977.
6. Jerris, J.S., Secondary Treatment of Municipal Wastewater with Fluidised-bed Technology, *Biological Fluidised Bed Treatment of Water and Wastewater*, WRC, 1981.
7. 金煥起, 李永東, 流動性 媒材가 水中 酸素移動에 미치는 影響, 大韓環境工學會誌, 第5卷, 第2號, 1983.
8. 鄭遇喆, 金煥起, 李福烈, BFB의 流動論의 解析에 관한 考察, 大韓環境工學會誌, 第5卷, 第2號 1983.

9. Atkinson, B., Black, G.M., and Pinches, A., The Characteristics of Solid Supports and Biomass Support Particles when Used in Fluidised Beds,, *Biological Fluidised Bed Treatment of Water and Wastewater*, WRC, 1981.
10. Boyle, W.C., and Wallace, A.T., *Status of Porous Biomass Support Systems for Wastewater Treatment: An Innovative/Alternative Technology Assessment*, U.S. Environmental Protection Agency, Jan., 1986.
11. Bhatla, N., Relationship of Activated Sludge Bulking to Oxygen Tension, *Journal WPCF*, Vol. 39, No. 12, 1967.
12. Smith, D.B., Aerobic Biological Stabilization of Organic Substrates, *Sewage and Industrial Wastes*, Vol. 24, No. 9, 1952.
13. Gaudy, A.F., and Turner, B.G., Effect of Air Flow Rate on Response of Activated Sludge to Quantitative Shock Loading, *Journal WPCF*, Vol. 36, No. 6, 1964.
14. Knudson, M.K., Williamson, K.J., and Nelson, P.O., Influence of Dissolved Oxygen on Substrate Utilization Kinetics of Activated Sludge, *Journal WPCF*, Vol. 54, No. 1, 1982.
15. 洞澤 勇, 生物膜法, 思考社, 1982.
16. Jewell, W.J., Development of the Attached Microbial Film Expanded-bed Process for Aerobic and Anaerobic Waste Treatment, *Biological Fluidised Bed Treatment of Water and Wastewater*, WRC, 1981.
17. 金煥起, 李永東, BFB 에 의한 糞尿處理의 研究, 大韓土木學會誌, 第3卷, 第2號, 1983.
18. WPCF, *Municipal Wastewater Treatment Plant Design MOP 8*, WPCF and ASCE, 1978.
19. Pöpel, H.J., *Aeration and Gas Transfer*, Delft University of Technology, March, 1976.
20. Cooper, P.F., and Wheeldon, D.H.V., Complete Treatment of Sewage in a Two-fluidised Bed System, *Biological Fluidised Bed Treatment of Water and Wastewater*, WRC, 1981.
21. Sehic, O.A., Fluidised Sand Recycle Reactor for Aerobic Biological Treatment of Sewage, *Biological Fluidised Bed Treatment of Water and Wastewater*, WRC, 1981.
22. Metcalf & Eddy, *Wastewater Engineering: Collection and Pumping of Wastewater*, McGraw-Hill, Inc., 1981.
23. Benefield, L.D., and Randall, C.W., *Biological Process Design for Wastewater Treatment*, Prentice-Hall, Inc., 1980.
24. APHA·AWWA·WPCF, *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, APHA·AWWA·WPCF, 16th Ed., 1985.
25. Adams, C.E., Ford, D.L., and Eckenfelder, W. W., *Development of Design and Operational Criteria for Wastewater Treatment*, CBI, 1981.
26. 이태희, 수질관내에서의 기-액 2 상의 흐름, 화학공학, 제 13 권, 제 6 호, 1975.
27. Buckley, P.S., and Lee, J.C., Fluid Mechanics and Aeration Characteristics of Fluidised Beds, *Biological Fluidised Bed Treatment of Water and Wastewater*, WRC, 1981.
28. Eckenfelder, W.W., *Principles of Water Quality Management*, CBI, 1980.
29. 李福烈, 生物學的 流動層을 利用한 合成廢水의 窒酸化 反應, 全北大學校 大學院, 博士學位 論文, 1986.
30. Wuhrmann, K., Factors Affecting Efficiency and Solids Production in the Activated Sludge Process, *Biological Treatment of Sewage and Industrial Wastes*, Vol. 1, Reinhold, 1956.
31. 金煥起, 高濃度 活性슬러지에 依한 回分式 廢水處理工程의 開發에 關한 研究, 全南大學校 大學院, 博士學位 論文, 1981.
32. Eckenfelder, W.W., and O'connor, *Biological Waste Treatment*, Pergamon, 1961.

(接受 : 1987. 5. 8)