

充填床 好氣性 生物膜工法の 反應速度論에 관한 研究

A Study on the Kinetics of a Packed Bed Aerobic Biofilm Process

趙 光 明*
Cho, Kwang Myeung
鄭 在 基**
Jeong, Jae Kee
孫 宗 植***
Son, Jong Sik

Abstract

The purpose of this research was to study the kinetics of a packed bed aerobic biofilm process. Experiments were carried out by feeding an aerated packed bed reactor with a synthetic wastewater. The reactor packed with glass beads as media had a nominal hydraulic detention time of 5 hours. The flow pattern in the reactor was determined by a tracer test using a NaCl solution to be a completely-mixed type.

The results of the research showed that the F/M ratio in the reactor was almost constant since the biomass increased due to the growth of biofilm as the volumetric organic loading increased. It was also proved theoretically and experimentally that packed bed aerobic biofilm process could be analyzed by the kinetics of completely-mixed activated sludge process with sludge recycle.

要 旨

本 研究의 目的은 充填床 好氣性 生物膜工法の 反應速度論을 究明하는 것으로서, 曝氣되는 充填床 反應槽에 合成廢水를 注入함으로써 實驗이 遂行되었다. 유리구슬을 媒質로 채운 反應槽의 公稱滯留時間은 5時間이었으며, 反應槽內에서의 흐름형태는 소금용액을 사용한 追跡子 實驗 結果 完全混合形이었음이 알려졌다.

研究結果에 따르면 有機物 容積負荷가 증가함에 따라 微生物膜의 成長에 의하여 反應槽內에서의 微生物量이 증가하므로 F/M는 거의 一定한 값으로 維持되었다. 또한 充填床 好氣性 生物膜工法이 슬러지返送이 있는 完全混合 活性슬러지工法の 反應速度論에 의하여 해석될 수 있음이 究明되었다.

* 正會員·仁荷大學校 工科大學 教授, 環境工學科

** 仁荷大學校 工科大學 教授, 環境工學科

*** 仁荷大學校 大學院 碩士課程

1. 結 論

家庭汚水나 대부분 工場廢水의 主汚染物은 biodegradable 한 有機物이므로 이의 除去를 위하여 生物學的 廢水處理工法이 많이 채택되는데 生物學的 工法은 微生物이 廢水내에 浮遊하는 공법과 媒質에 附着成長하는 固定微生物膜工法으로 대별되며, 溶存酸素의 供給과 관련시켜 好氣性 工法과 嫌氣性 工法으로 분류할 수도 있다.

固定微生物膜工法(fixed film process)은 生物膜工法(biofilm process)이라고도 불리우는데 反應槽내 媒質의 表面에 微生物이 附着成長함으로 많은 量의 微生物體를 維持할 수 있어 높은 有機物負荷에서도 좋은 除去効率을 얻을 수 있으며 微生物滯留期間을 길게 維持할 수 있을 뿐만 아니라 有機物이나 毒性物質의 衝擊負荷에도 잘 견디고 廢물저지 發生量도 적다는 長點이 있다⁽¹⁾. 또한 유기물농도가 낮은 경우에도 높은 유기물 제거효율을 나타내므로 폐수의 高次處理나 原水의 유기물 제거에 알맞는 방법이다. 예로서 오염된 얇은 하천에서의 有機性 炭素除去를 위하여 浮遊微生物보다는 生物膜이 더 효율적임이 보고되었으⁽²⁾, Stratton 등^(3,4)은 물속에 微量으로 존재하는 유기물을 제거하는데 생물막공법을 적용시키면 효율적이라고 주장하였다.

生物膜工法을 이용하는 廢水處理施設은 크게 充填床과 遊動床으로 나눌 수 있는데 유기물농도가 높은 폐수를 혐기성으로 처리하기 위하여 많이 이용되어 왔으며 호기성공법으로도 연구 및 이용되고 있기 때문에 생물막공법의 반응속도론에 관한 연구도 많이 실시되었다.

有機物濃도가 높은 廢水를 好氣性으로 처리하기 위하여는 인위적으로 공기를 공급해 주어야 하는데 浮遊微生物工法에 비하여 生物膜工法에서는 酸素傳達率이 2.5 배나 높을 수도 있다고 한다.⁽⁵⁾ Huang 등⁽⁶⁾은 生物膜工法에서 溶存酸素濃도가 높을수록 微生物成長係數가 증가하나 그 영향이 적으며 반면 膜의 두께는 두꺼워지지만 密度는 감소한다고 하였다.

Williamson 과 McCarty^(7,8)는 生物膜에서의 基質利用을 동시에 일어나는 生化學的 反應의 分子擴散過程으로 설명할 수 있는 수학적 모델

을 Monod⁽²³⁾의 最大基質利用率과 半速度係數에 근거하여 제안하고 이를 窒酸化反應에 적용시킨 모델은 두꺼운 生物膜은 물론 얇은 生物膜에서도 基質利用率의 豫測을 위하여 이용될 수 있다고 주장하였다. 또 Rittmann 과 McCarty^(9,10)는 安定狀態의 生物膜을 위한 모델을 개발하여 安定狀態 生物막의 존재가 불가능한 가장 낮은 基質濃도가 존재한다는 주장을 하고, 실제 실험실 규모의 생물막 반응조를 사용하여 이 주장을 증명한 다음 따라서 물속에서는 유기물이 尙存한다는 결론을 내렸다. 또한 Trulear 와 Charaklis⁽¹¹⁾는 基質負荷와 流體의 速度가 生物막의 蓄積에 미치는 영향을 究明하는 등 생물막공법의 動力學에 관하여 연구하였다.

한편 Rittmann 과 Brunner⁽¹²⁾는 unsteady-state에서의 生物막의 舉動을 연구한 결과 유기물농도가 대단히 낮은 경우에도 Oligotrophs들이 있어 生物막은 천천히 분해하지만 基質除去率은 1년간 85% 수준으로 유지되었다고 한다.

Kissel 등⁽¹³⁾은 완전혼합반응조내의 혼합생물막에서 기질과 미생물량에 관한 물질평형을 설명하는 微分方程式을 제안하였다. 또한 Suidan 과 Wang⁽¹⁴⁾은 Monod⁽²³⁾의 반응속도론과 物質擴散에 기초를 둔 모델을 개발하여 생물막표면에서의 기질농도와 생물막 두께를 기질이이용율에 相關시켰으며, Suidan⁽¹⁵⁾은 完全混合 및 押出形 生物막 반응조내의 두꺼운 생물막에서 액체내의 기질농도와 최대기질이이용율간의 관계를 수학적 모델로 표현하고 이를 사용하는 설계 nomogram을 제시하였다. 또한 Annachatre 와 Khanna⁽¹⁶⁾는 unsteady-state에서의 生物막 두께와 生物막의 두께가 安定狀態의 값에 도달하는데 소요되는 시간을 추정하기 위하여 한 종류의 기질을 사용하는 모델을 개발하였다. 우리나라에서도 외국에서의 연구와 마찬가지로 Monod 방정식⁽²³⁾과 物質擴散에 근거한 모델의 개발⁽¹⁷⁾과 이를 回轉圓板法에 적용한 연구⁽¹⁸⁾가 있었다.

그러나 위에서 설명된 과거의 연구는 실제 폐수와는 다르게 대단히 낮은 基質濃度 또는 하나의 基質을 사용하였으며 모델로 제시된 식이 대단히 복잡할 뿐만 아니라 처리시설 전체보다는 미생물막에서의 基質擴散 또는 미생물막의 두께

등에 관한 微視的인 연구였으므로 생물막공법의 원리를 이해하는데는 도움이 되겠지만 생물막공법을 이용하는 폐수처리시설의 설계 또는 해석에 적용시키기는 곤란한 경우가 대부분이다.

반면 Butts⁽¹⁹⁾는 充填床 아닌 遊動床을 사용하여 溶解性 COD를 제거하는 연구에서 Monod 방정식을 사용하여 미생물 成長係數와 內呼吸率을 계산하는 방법을 제안하였으며, Kennedy 등⁽²⁰⁾은 완전혼합 반응조에 잘 적용되는 Monod의 반응속도론이 嫌氣性의 DSF(downflow stationary film) 반응조에도 잘 응용될 수 있음을 증명하였다. 이들이 이용한 反應速度論은 Monod 方程式과 McCarty⁽²¹⁾의 연구결과를 活性슬러지에 적용시킨 Sherrad와 Lawrence⁽²²⁾의 모델로서 理解와 適用이 쉬워 널리 이용되고 있으므로 본 研究에서도 이를 응용하여 曝氣되는 充填床 生物膜工法의 反應速度論을 究明하고자 한다.

2. 理論

曝氣되는 好氣性 充填床 微生物膜工法을 flow diagram으로 나타내면 그림 1과 같다. 즉 流量이 Q 이고 基質濃度가 S_0 인 廢水가 부피가 V 인 反應槽로 유입하면 X 의 농도로 존재하는 호기성 미생물에 의하여 섭취분해됨으로써 基質의 농도는 S_e 로 감소하며 媒質 表面에서 脫離되는 미생물체는 流出水내에 X_e 의 농도로 존재하게 된다. 단, 流入水는 미생물을 함유하지 않는 것으로 하며, 슬러지의 返送이 없는 점이 특징이다. 이러한 flow diagram은 두가지 假定下에 성립하게 되는데 하나는 반응조내의 흐름이 完全混合形이어야 한다는 점이고 또 하나는 반응조내의 미생물이 流體내에 等分布한다는 것으로서, 이들 假定이 성립하거나 타당함이 實驗으로 證明되어야 한다.

1) 微生物의 物質收支

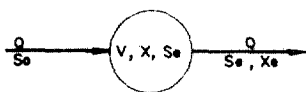


그림 1. Flow diagram of packed bed aerobic biofilm process

安定狀態에서 미생물의 物質收支는 다음과 같이 표현될 수 있다.

反應槽내의 微生物量의 變化=成長으로 인한 增加-內呼吸으로 인한 減少-流出로 인한 減少

이를 式으로 표현하면 다음과 같다.

$$VdX = V\mu X dt - VK_d X dt - QX_e dt \quad (1)$$

위의 式에서 :

$$Q = \text{流量}(L^3 T^{-1})$$

$$V = \text{반응조의 부피}(L^3)$$

$$\mu = \text{미생물의 比成長係數}(T^{-1})$$

$$X = \text{반응조내의 미생물농도}(ML^{-3})$$

$$X_e = \text{처리수내의 미생물농도}(ML^{-3})$$

$$K_d = \text{미생물의 內呼吸係數}(T^{-1})$$

$$t = \text{시간}(T)$$

式 1의 兩邊을 XV 로 나눈다음 정리하면 다음 式이 된다.

$$\frac{1}{X} \frac{dX}{dt} = \mu - K_d - \frac{Q}{V} \frac{X_e}{X} \quad (2)$$

安定狀態(steady-state)에서 $dX/dt=0$ 이고 微生物 滯留시간 $\theta_c = VX/QX_e$ 이므로 이를 式 2에 代入시키면 다음 式이 성립된다.

$$\mu = K_d + \frac{1}{\theta_c} \quad (3)$$

2) 基質의 物質收支

안정상태에서 基質에 대한 物質收支는 다음과 같이 표현할 수 있다.

反應槽內의 基質의 變化量=流入으로 인한 增加-流出로 인한 減少-微生物의 成長으로 인한 減少

이를 式으로 표시하면 다음과 같이 된다.

$$V\left(\frac{dS_e}{dt}\right) = QS_0 - QS_e - V\left(\frac{dS_e}{dt}\right) \quad (4)$$

위의 式에서 :

$$S_0 = \text{流入水內의 基質濃度}(ML^{-3})$$

$$S_e = \text{處理水內의 基質濃度}(ML^{-3})$$

Monod⁽²³⁾는 미생물의 成長率을 다음과 같은 1次反應式으로 표현하였다.

$$\frac{dX}{dt} = \mu X = Y \frac{dS_e}{dt} \quad (5)$$

위의 式에서 :

$$Y = \text{微生物 生成係數}$$

式 5를 정리하면 다음과 같이 된다.

$$\frac{dS_e}{dt} = \frac{\mu X}{Y} \quad (6)$$

式 6을 式 4에 대입하여 정리하면 다음 式이 성립한다.

$$\frac{dS_e}{dt} = \frac{Q}{V} S_0 - \frac{Q}{V} S_e - \frac{\mu}{Y} X \quad (7)$$

安定狀態에서 $dS_e/dt=0$ 이고 水理學的 滯留時間 $\theta_i = V/Q$ 이므로 이를 式 7에 代入시켜 정리하면 다음 式이 된다.

$$\mu = \frac{Y}{\theta_i X} (S_0 - S_e) \quad (8)$$

式 3과 式 8을 等式으로 놓고 整理하면 다음 式이 된다:

$$X = \frac{\theta_i Y (S_0 - S_e)}{\theta_i (1 + K_d \theta_i)} \quad (9)$$

Monod⁽²³⁾는 또한 微生物의 比成長速度를 다음의 式으로 표현하였다.

$$\mu = \mu_{\max} \frac{S_e}{K_s + S_e} \quad (10)$$

위의 式에서:

μ_{\max} = 미생물의 最大比成長係數 (T^{-1})

K_s = 미생물의 成長係數가 最大成長係數의 半이 될 때의 基質의 濃度 (ML^{-3})

式 3과 式 10을 等式으로 놓고 整理하면 다음 式이 된다.

$$\frac{1}{\theta_c} = \mu_{\max} \frac{S_e}{K_s + S_e} - K_d \quad (11)$$

式 11을 S_e 에 대하여 정리하면 다음 式이 된다.

$$S_e = \frac{K_s (1 + K_d \theta_c)}{\theta_c (\mu_{\max} - K_d) - 1} \quad (12)$$

表 1은 참고문헌⁽²²⁾에 주어진 完全混合 活性슬러지工法에서 슬러지返送이 있는 경우와 없는 경우의 反應速度論에 관한 式들과 위에서 誘導된 充填床 好氣性 生物膜工法の 反應速度論 式들을 比較한 것으로, 充填床 好氣性 生物膜工法の 反應速度論 式들이 슬러지 返送이 있는 完全混合 活性슬러지工法の 反應速度論 式들과 一致함을 알 수 있다.

3. 實驗

3-1. 裝置

本 研究에 사용된 實驗裝置는 그림 2에 圖解된 바와 같이 크게 原水槽, 原水定量供給裝置, 反應槽, 恒溫槽 그리고 處理水貯留槽로 구성된다. 反應槽는 內徑이 7cm 이고 높이가 86cm 인 아크릴管에다 直徑이 2.1cm 인 유리구슬 290 개를 媒質로 채운 것으로 바닥으로부터 대략 20cm 높이 간격으로 4개의 段으로 分離 및 給合이 가능하도록 製作하였다. 反應槽를 4개의 段으로

表 1. Comparison of the kinetic equations for three processes

| completely mixed system without cell recycle | completely mixed system with cell recycle | packed bed biofilm process |
|--|--|--|
| | | |
| $\mu = \frac{1}{\theta_i} + K_d$ | $\mu = \frac{1}{\theta_c} + K_d$ | $\mu = \frac{1}{\theta_c} + K_d$ |
| $\mu = \frac{Y}{\theta_i X} (S_0 - S_e)$ | $\mu = \frac{Y}{\theta_i X} (S_0 - S_e)$ | $\mu = \frac{Y}{\theta_i X} (S_0 - S_e)$ |
| $X = \frac{Y(S_0 - S_e)}{1 + K_d \theta_i}$ | $X = \frac{\theta_c Y (S_0 - S_e)}{\theta_i (1 + K_d \theta_c)}$ | $X = \frac{\theta_c Y (S_0 - S_e)}{\theta_i (1 + K_d \theta_c)}$ |
| $\frac{1}{\theta_c} = \mu_{\max} \left(\frac{S_e}{K_s + S_e} \right) - K_d$ | $\frac{1}{\theta_c} = \mu_{\max} \left(\frac{S_e}{K_s + S_e} \right) - K_d$ | $\frac{1}{\theta_c} = \mu_{\max} \left(\frac{S_e}{K_s + S_e} \right) - K_d$ |
| $S_e = \frac{K_s (1 + K_d \theta_c)}{\theta_c (\mu_{\max} - K_d)} - 1$ | $S_e = \frac{K_s (1 + K_d \theta_c)}{\theta_c (\mu_{\max} - K_d)} - 1$ | $S_e = \frac{K_s (1 + K_d \theta_c)}{\theta_c (\mu_{\max} - K_d)} - 1$ |

로 分離할 때 유리구슬이 흘러내리지 않도록 各段의 바닥에다 그물을 부착하였으며, 反應槽의 公稱容積이 2.924 리터 되도록 流出口의 水位를 維持하였다. 또한 반응조의 바닥에는 曝氣를 위하여 散氣球를 설치하였다.

내경이 13cm 인 아크릴管을 反應槽 外部에 설치한 다음 恒溫槽의 물을 펌프로 순환시킴으로서 반응조내의 水溫을 一定하게 유지할 수 있도록 하였는데, 동일한 규격의 반응조를 2개 제작하여 20°C 및 35°C 에서 실험을 실시하였다.

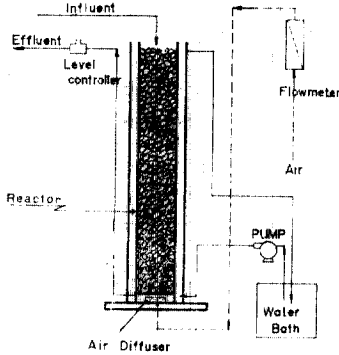


그림 2. Schematic diagram of the experimental apparatus

3-2. 方法

本 實驗을 시작하기 전에 媒質로 채워진 反應槽에다 NaCl 溶液을 pulse input 로 注入한 다음 流出水의 NaCl 濃度를 측정함으로써 반응조내에서의 흐름樣相을 究明하였다.

實驗은 表 2 에 주어진 組成을 가진 A, B 두 溶液을 만든 다음 요구되는 基質濃度가 되도록 適當量을 2:1 의 비율로 혼합하고 수도물로 희석시켜 反應槽에 注入함으로써 시작되었다. 먼저 基質濃度가 가장 낮은 廢水를 계속 주입하여 媒質表面에 微生物이 自然的으로 植種되도록 하면서 처리수의 TOC 濃度를 측정하여 安定狀態 (steady-state)에 도달하였다고 판단이 되면 一定期間동안 계속 필요한 分析을 실시하고 마지막으로 반응조내의 微生物량을 측정한 다음 주입 배수의 基質濃度를 증가시켜 동일한 실험을 반복하였다.

반응조내의 微生物량은 반응조를 4개의 段으로 분리하여 각 段에서 4개씩의 구슬을 채취하

여 乾燥시켜 무게를 단 다음 구슬표면의 微生物膜을 씻어내고 다시 무게를 달아 前後의 무게차로부터 媒質에 附着成長하는 微生物의 全體量을 算出하였으며 이때 반응조 内部表面도 고려하였다. 이렇게 측정된 微生物의 量은 反應槽내에 浮遊하는 微生物의 양을 포함하지 않게 되는데 이렇게 하더라도 表 3 에 주어진 실험결과에서 보는 바와같이 부유상태의 微生物농도, 즉 처리수의 SS 농도가 낮아서 고정 微生物의 양에 비하여 부유 微生物의 양이 매우 적기 때문에 큰 誤差를 誘發하지 않게 된다.

全 實驗을 통하여 公稱滯留時間을 5時間(實滯留時間 2.5時間)으로 고정하였으며 반응조내에 溶存酸素濃度를 충분히 유지할 수 있도록 空氣供給率을 1,500ml/min 로 하였다.

表 2. Composition of the synthetic wastewater

| Stock sol. | Constituents | Concentration(g/L) |
|------------|--------------------------------------|--------------------|
| A | glucose | 50.0 |
| | monosodium glutamate | 50.0 |
| | NaCl | 5.0 |
| | CaCl ₂ | 2.5 |
| | MgSO ₄ ·7H ₂ O | 1.7 |
| B | KH ₂ PO ₄ | 14.3 |
| | K ₂ HPO ₄ | 90.15 |

3-3. 分析

反應槽內의 흐름樣相을 究明하기 위한 NaCl 의 측정은 記錄計가 부착된 Conductimeter(YSI Model 321)를 사용하여 실시되었으며, 總有機炭素量(TOC)은 試料를 glass fiber filter paper (Toyo GS-25, pore size 0.6μm)로 濾過시킨 다음 Yanaco TOC Analyzer(Model TOC-ILW)를 사용하여 측정하였으므로 溶存有機炭素量을 측정할 셈이 된다.

그의 COD, BOD, SS등은 Standard Methods⁽²⁴⁾에 주어진 절차에 준하여 측정하였다.

4. 結論 및 考察

表 3 은 實驗結果를 要約한 것으로 注入廢水의 基質濃度를 增加시킨 다음 處理水의 溶解性 TOC 를 측정하여 安定狀態에 도달한 것으로 판

表 3. Summary of the experimental results

| Exp. period(day) | | 23 | 26 | 23 | 23 | 23 |
|--------------------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Inf. (mg/L) | BOD | 18.2 | 35.5 | 72.8 | 98.6 | 142.5 |
| | COD | 33.1 | 55.1 | 98.9 | 136.3 | 181.2 |
| | TOC | 13.2 | 24.6 | 43.4 | 59.9 | 82.4 |
| Eff. 20°C (mg/L) | TBOD | 4.6 | 5.5 | 8.1 | 11.5 | 14.1 |
| | SBOD | 1.0 | 1.2 | 1.8 | 2.5 | 3.1 |
| | SCOD | 7.7 | 8.7 | 10.1 | 11.1 | 13.0 |
| | TOC | 4.2 | 4.9 | 6.3 | 7.3 | 8.9 |
| | SS | 3.8 | 8.4 | 17.1 | 24.0 | 31.9 |
| Eff. 35°C (mg/L) | TBOD | 4.0 | 5.0 | 7.1 | 9.1 | 11.7 |
| | SBOD | 0.9 | 1.1 | 1.6 | 2.0 | 2.6 |
| | SCOD | 6.3 | 7.1 | 8.8 | 9.7 | 11.7 |
| | TOC | 3.6 | 4.6 | 5.7 | 6.4 | 8.1 |
| | SS | 3.1 | 7.0 | 14.6 | 20.5 | 27.3 |
| Biomass in reactor(g) | 20°C | 0.892 | 1.498 | 3.745 | 4.860 | 5.212 |
| | 35°C | 1.027 | 1.886 | 4.333 | 5.622 | 6.225 |

단기 되면 필요한 분석을 表에 명시된 기간동안 실시하여 平均値를 계산하여 表에 收錄하였다. 表에 주어진 資料들을 살펴보면 注入廢水の 基質濃度가 증가할수록 처리수의 基質濃度 및 微生物量도 증가하지만 基質除去效率이 良好함을 알 수 있으며 20°C의 경우보다 35°C의 경우에 처리효율이 더 좋음을 알 수 있다.

4-1. 反應槽內的 濃度様相

實驗에 사용된 反應槽의 公稱 水理學的 滯留時間은 5時間이었으나 媒質이 차지하는 부피를 제외한 實際 水理學的 滯留時間은 2.5시간이었다. 3-2節에서 언급한 바와같이 NaCl 追跡子 實驗을 실시한 결과 完全混合 흐름상태에서 나타나는 전형적인 형태인 그림 2의 滯留時間分布(residence time distribution)曲線을 얻었으므로 本 연구에서 사용된 曝氣되는 充填床 反應槽內的 흐름様相을 完全混合으로 斷定할 수 있으며 따라서 2節에서 언급된 반응조내의 흐름에 관한 假定이 성립됨이 證明되었다.

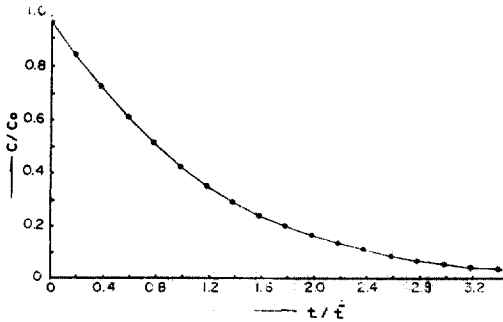


그림 3. Residence time distribution curve for the aerated packed bed biofilm reactor

4-2. 基質負荷와 微生物膜의 두께

表 3에 주어진 바와 같이 各 注入濃度の 實驗期間末마다 反應槽內的 微生物 무게를 測定하여 反應槽內的 表面積으로 나눔으로써 微生物膜의 두께를 구하고 이를 基質負荷별로 표시한 것이 表 4이며, 表 4의 資料를 圖式化한 것이 그림 4이다. 微生物膜 두께는 미생물의 含水率과 比重을 각각 80%⁽²⁵⁾ 및 1, 그리고 微生物膜의 含水율을 90%로 假定하여 계산하였다. 따라서 微生物膜의 總含水率은 98%로 假定된 셈이다. 반면 Rittmann 과 McCarty⁽¹⁰⁾는 微生物膜의 總

含水率을 99%로 假定하였는데 그 이유는 설명하지 않았다.

表 4와 그림 4에 주어진 資料를 보면 基質의 容積負荷는 注入濃度에 따라 변하지만 F/M比는 거의 一定한 값을 나타냄을 알 수 있다. 이는 反應槽의 水理學的 滯留時間이 거의 一定하게 유지되었으므로 基質의 注入濃度에 따라 容積負荷가 증가하고 그에 따라 微生物膜이 두꺼워지면서 微生物量이 증가하였기 때문이다.

한편 그림 4에 주어진 曲線을 살펴보면 基質의 容積負荷가 낮은 경우에는 微生物膜의 두께가 얇고 容積負荷의 증가에 따른 微生物膜두께의 成長率도 느리지만 容積負荷가 어느 정도 증가하면 미생물막 두께의 성장율도 증가하여 最高値에 도달하면 容積負荷가 過大하게 되면 미생물막 두께의 성장율도 鈍化됨을 알 수 있다. 本 연구에서 微生物膜의 成長率을 가장 좋게 하는 基質의 容積負荷는 그림 4에 圖示된 바와 같이 대략 0.2~0.4kg BOD/m³-day 로서 이는 在來式 活性슬러지工法에서 채택되는 容積負荷와 일치함을 알 수 있다. 이러한 容積負荷에서 微生物膜의 두께는 대략 200~400μm 로 계산되었는데 Harris 와 Hansford⁽²⁶⁾에 의하면 基質의 濃도가 COD로 따져서 300mg/L 이하이면 微

表 4. Organic loading and biofilm thickness in the reactor

| Inf. BOD Conc. (mg/L) | 18.2 | 35.5 | 72.8 | 98.6 | 142.5 |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|
| Vol. loading(kg BOD/m ³ -day) | 0.087 | 0.170 | 0.349 | 0.473 | 0.684 |
| 20°C F/M ratio(g BOD/g SS-day) | 0.27 | 0.31 | 0.26 | 0.26 | 0.35 |
| Biofilm thickness (μm) | 74 | 129 | 311 | 403 | 432 |
| 35°C F/M ratio (g BOD/g SS-day) | 0.24 | 0.26 | 0.23 | 0.23 | 0.30 |
| Biofilm thickness (μm) | 85 | 151 | 359 | 466 | 502 |

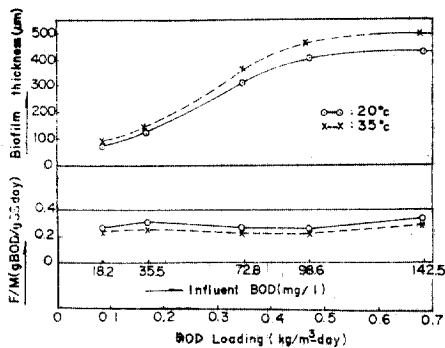


그림 4. Biofilm thickness vs. organic loading

生物膜의 成長은 基質에 의해서 制約을 받게 되고 이때 活性이 있는 微生物膜의 두께는 基質의 濃도에 比例하여 增加한다고 보고되었다. 따라서 表 3과 그림 4에 주어진 資料를 살펴보면 本 研究에서 주어진 條件이 그러한 상태에 있을 을 알 수 있다.

4-3. 反應速度論 解析

式 9를 再整理하면 式 13이 되는데 이 式은 $y=ax+b$ 의 형태이므로 그림 5와 같이 x 軸에 $1/\theta_c$, 그리고 y 軸에 $(S_0 - S_e)/(X\theta_i)$ 의 값을 나타내면 생기는 直線의 기울기는 $1/Y$ 의 값을, 그리고 절편은 K_d/Y 의 값을 가지게 되고 이들 값으로부터 微生物成長係數 Y 와 內呼吸係數 K 를 計算할 수 있다.

$$\frac{S_0 - S_e}{X\theta_i} = \frac{K_d}{Y} + \frac{1}{Y\theta_c} \quad (13)$$

式 13에다 S_0 및 S_e 값으로 각각 表 3의 流入水의 BOD 濃도와 處理水의 溶解性 BOD濃도를,

θ_c 값으로 公稱滯留時間 5時間을, 表 3의 微生物 무게를 反應槽의 公稱容積 2.924 리터로 나눈 값을 X 값으로, 그리고 反應槽內의 微生物 무게를 處理水의 SS 濃도로 나눈 값을 θ_c 값으로 代入시켜 計算한 결과를 圖式化하면 그림 5가 되며 이 그림으로부터 微生物 生長係數 Y 는 0.4g SS/g BOD, 그리고 微生物 內呼吸係數 K_d 는 0.05/day가 구하여진다.

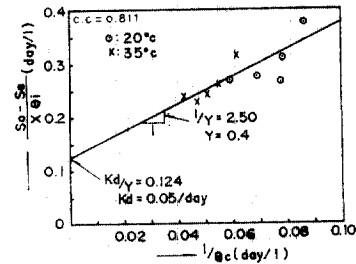


그림 5. Graphical determination of the cell yield coefficient and endogenous respiration coefficient

한편 式 12를 再整理하면 式 14가 되며 이 式도 $y=ax+b$ 의 형태이므로 x 軸을 $\theta_c/(1 + K_d\theta_c)$, y 軸을 S_e 의 값으로 할 때 생기는 直線의 기울기는 微生物의 最大比成長係數 μ_{max} 을, 그리고 절편은 半成長基質濃度 K_s 를 나타낸다.

$$S_e = \mu_{max} \left(\frac{\theta_c}{1 + K_d\theta_c} \right) S_e - K_s \quad (14)$$

따라서 앞에서 구한 K_d 값과 θ_c 값, 그리고 表 3의 處理水의 溶解性 BOD 값을 S_e 값으로 式 14에 代入시켜 最小自乘法으로 直線을 구하면 그림 6과 같이 되며, 그림 6으로부터 微生物의 最大比成長係數 μ_{max} 은 0.14/day, 그리고 半成

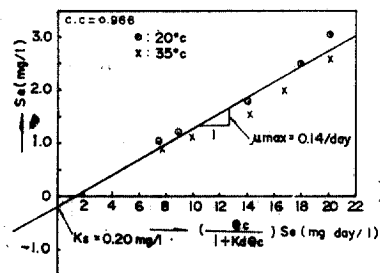


그림 6. Graphical determination of the maximum growth coefficient and half growth substrate concentration

長基質濃度 K_s 는 0.20mg/L 가 됨을 알 수 있다.

따라서 反應槽內의 媒質에 附着成長하는 微生物이 反應槽內에 等分布하는 것으로 가정하면 好氣性 充填床 微生物膜工法の 反應速度論이 슬러지返送이 있는 完全混合 活性슬러지工法の 反應速度論과 일치함을 알 수 있으며, 그림 5 및 그림 6에 주어진 바와 같이 相關關係가 아주 좋은 直線을 얻을 수 있었으므로 그러한 假定이 妥當하다고 할 수 있겠다.

여기서 附言해 두어야 할 점은 위에서 증명된 바와 같이 비록 曝氣되는 充填床 微生物膜工法이 슬러지返送이 있는 完全混合 活性슬러지工法の 反應速度論에 符合된다 하더라도 充填床에서는 微生物量의 測定이 容易하지 않다는 것이다. 물론 本 實驗에서 行한 바와 같이 反應槽內의 媒質을 꺼내어 附着成長하는 微生物의 量을 측정하는 방법도 있겠지만 媒質의 表面積을 모르는 경우에는 이 방법을 채택할 수도 없게 된다. 또한 基質負荷가 너무 높아서 微生物膜의 成長이 過度하게 되면 孔隙이 閉鎖되는 등의 문제가 발생하면서 微生物量의 精確한 측정이 어렵게 된다.

5. 結 論

有機性 廢水의 處理를 위하여 최근에 많이 利用되는 경향을 보이는 生物膜工法 중에서 好氣性 充填床의 反應速度論을 연구하고자 媒質로 유리구슬을 채운 曝氣되는 充填床에다 合成廢水를 公稱滯留時間이 5 시간 되도록 注入處理한 實驗의 結果로부터 다음의 結論을 얻을 수 있었다.

1) NaCl 을 追跡子로 사용하여 실시한 실험의 결과에 의하면 曝氣되는 充填床內에서 廢水의 흐름은 完全混合形을 나타내었다.

2) 反應槽의 水理學的 滯留時間을 一定하게 維持하고 注入廢水의 基質濃度を 증가시켜 基質의 容積負荷를 증가시켜도 F/M 比는 거의 일정한 값을 維持하였으며, 이는 容積負荷가 增加함에 따라 微生物의 量이 증가하기 때문이다.

3) 슬러지返送이 있는 完全混合 活性슬러지工法の 反應速度論이 曝氣되는 充填床 微生物膜工法에도 適用될 수 있음이 理論적으로, 그리고

實驗에 의하여 究明되었다.

謝 辭

本 研究는 韓國科學財團의 1986 年度 後半期 研究支 援費로 遂行되었으므로 이와같은 研究가 可能하도록 도와주신 同 財團에 深甚한 謝意를 表하는 바입니다.

參 考 文 獻

1. Grady, C.P.L., Jr., and H.C. Lim, *Biological Wastewater Treatment*, Marcel Dekker, Inc. (1980).
2. Srinanthakumar, S., and A. Amirtharajah, "Organic carbon decay in stream with biofilm kinetics," *JEE, ASCE*, 109, 1, pp.102~119 (1983).
3. Stratton, R.G., et al., "Secondary utilization of trace organics by biofilms on porous media," *JAWWA*, 75, 9, pp.463~469(1983).
4. Namkung, E., et al., "Predicting removal of trace organic compounds by biofilms," *JWPCF*, 55, 11, pp.1366~1372(1983).
5. Reiber, S., and D. Stensel, "Biologically enhanced oxygen transfer in a fixed-film system," *JWP-CF*, 57, 2, pp.135~142(1985).
6. Huang, J.C., et al., "Biofilm growths with sucrose as substrate," *JEE, ASCE*, 113, 3, pp.353~363(1985).
7. Williamson K., and P.L. McCarty, "A model of substrate utilization by bacterial films," *JWP-CF*, 48, 1, pp.9~24(1976).
8. Williamson, K., and P.L. McCarty, "Verification studies of the biofilm model for bacterial substrate utilization," *JWPCF*, 48, 2, pp.281~296(1976).
9. Rittmann, B.E., and P.C. McCarty, "Model of steady-state-biofilm kinetics," *Biotechnology and Bioengineering*, XXII, pp.2343~2357(1980).
10. Rittmann, B.E., and P.L. McCarty, "Evaluation of steady-state-biofilm kinetics," *Biotechnology and Bioengineering*, XXII, pp.2359~2373 (1980).
11. Truelar, M.G., and W.G. Characklis, "Dynamics of biofilm processes," *JWPCF*, 54, 9, pp.1288

- ~1301(1982).
12. Rittmann, B.E., and C.W. Brunner, "The non-steady-state-biofilm process for advanced organic removal," *JWPCF*, 56, 7, pp. 874~880(1984).
 13. Kissel, J.C., *et al.*, "Numerical simulation of mixed-culture biofilm," *JEE, ASEC*, 110, 2, pp. 393~411(1984).
 14. Suidan, M.T., and Y.T. Wang, "Unified analysis of biofilm kinetics," *JEE, ASCE*, 111, 5, pp. 634~646(1985).
 15. Suidan, M.T., "Performance of deep biofilm reactors," *JEE, ASCE*, 112, 1, pp. 78~93(1986).
 16. Annachatre, A.P., and P. Khanna, "Unsteady-state biofilm kinetics," *JEE, ASCE*, 113, 2, pp. 429~433(1987).
 17. 정태학, "미생물막을 이용한 폐수처리의 수학적 모델에 관한 연구", 대한토목학회논문집, 1, 1, pp. 43~51(1981).
 18. 정태학, 박중현, "회전원판접촉법에 의한 폐수처리의 모형에 관한 연구", 대한토목학회논문집, 2, pp. 39~46(1982).
 19. Butts, J.E., "Soluble COD removal in a fluidized-bed biological reactor," *Proc. of the 32nd Ind. Waste Conf.*, Purdue University, pp. 454~466(1977).
 20. Kennedy, K.J., *et al.*, "Kinetics of downflow anaerobic attached growth reactors," *JWPCF*, 59, 4, pp. 212~221(1987).
 21. McCarty, P.L., "Kinetics of waste assimilation in anaerobic treatment," *Development in Industrial Microbiology, Vol. 7*, American Institute of Biological Sciences, Washington, D.C. (1966).
 22. Sherrad, J.H., and Lawrence, A.W., "Design and operation model of activated sludge," *JEE, ASCE*, 99, EE6, p. 773(1973).
 23. Mondo, J., "The growth of bacterial cultures," *Annual Review of Microbiology*, 3, p. 371 (1949).
 24. APHA, AWWA, and WPCF, *Standards Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 15th ed. American Public Health Association(1981).
 25. McKinney, R.E., *Microbiology for Sanitary Engineers*, McGraw-Hill, New York(1962).
 26. Harris, N.P., and G.S. Hansford, "A Study of substrate removal in a microbial film reactor," *Water Res.*, 10, pp. 936~943(1976).

(接受 : 1987. 7. 21)