

微生物膜을 이용한 廢水處理의 數學的 모델에 관한 研究

Mathematical Models of Substrate Utilization within Bacterial Films

鄭 泰 鶴*
Chung, Tai Hak

Abstract

A model of substrate utilization within bacterial films has been developed and simulated for a better understanding of fixed film treatment processes. The model consists of two parts, a deep biofilm and a thin biofilm, which are classified based on substrate penetration into the biofilm. Substrate concentration and flux within a biofilm can be computed from the model.

Three dimensionless parameters, ϕ_1 , ϕ_2 , and \bar{S}_b , were obtained during model construction, and the substrate concentration and flux can be expressed in terms of these parameters. It has been found that an increase of ϕ_1 or a decrease of ϕ_2 results in an increase of treatment efficiencies. It has also been found that systems maintaining high efficiencies belong to a deep biofilm. Among the constants involved, the mass transfer coefficient is the only controllable term and it depends largely on fluid velocity near the biofilm surface. Substrate removal efficiency may be increased with an increase of fluid velocity for a biofilm of fixed depth. However, film depth is decreased due to sloughing with increasing velocity, and the system reaches a new steady state. Because changes in film depth are not well defined quantitatively yet, the efficiency can not be clearly described at a new steady state.

要 旨

微生物의 附着式 成長을 利用한 廢水處理의 理解를 돕기 위해 微生物膜模型을 定立하고 이의 simulation을 통하여 處理效率과 各種 parameter 사이의 關係를 살펴보았다. 微生物膜模型은 基質의 浸透程度에 따라 두꺼운 膜과 얇은 膜으로 區分하고 各 境遇에 대하여 微生物膜內部에서의 基質濃度와 flux를 算定할 수 있게 構成되어 있다.

模型의 定立過程에서 얻어진 無次元常數인 ϕ_1 , ϕ_2 , 그리고 \bar{S}_b 에 의해 基質濃度와 flux가 決定될 수 있음을 알았으며, ϕ_1 의 增加나 ϕ_2 의 減少에 의해 處理效率이 增加함을 알 수 있다. 또한 높은 處理效率을 維持하는 system은 모두 두꺼운 膜에 속하는 것을 알 수 있다. 微生物膜表面 근처에서의 流速을 增加시킴으로써 두께가 一定한 膜에 있어서 處理效率을 增加시킬 수 있다. 하지만 流速의 增加로 인해 sloughing이 많아져서 膜의 두께가 減少하여 새로운 定常狀態로 바뀌게 된다. 現在까지 流速과 微生物膜두께사이의 關係가 定量的으로 糾明되지 못하고 있으므로 새로운 定常狀態에서의 效率은 명백히 규정지을 수 없다.

* 正會員 · 서울大學校 工科大學 助教授

1. 序 論

微生物膜(biological film, biofilm)은 微生物의 集團으로 構成된 粘液質의 얇은 膜으로서 微生物에 表面을 提供하는 物質(surface media)이 있을 때 形成되며 大部分의 경우 박테리아群으로 이루어지므로 박테리아膜(bacterial film)이라 부르기도 한다. 撒水濾床이나 回轉圓板接觸法 等の 廢水處理過程에서 濾材나 圓板의 表面에 附着되어 成長하는 微生物은 微生物膜의 좋은 例라 할 수 있으며 微生物膜을 利用한 廢水處理方法은 微生物의 浮遊式成長을 利用한 活性슬러지法과 함께 生物學的 廢水處理方法의 根幹을 이루고 있다. 또한 微生物膜은 河川이나 湖水의 河床이나 水草 等の 表面에서도 볼 수 있으며 汚染物質의 分解에 一翼을 擔當하고 있다.

微生物에 表面을 提供할 수 있는 物質이 基質(substrate)의 溶液과 접하게 되면 溶液에서 成長하는 微生物이 media의 表面으로 吸着되며 表面에 附着된 微生物은 근처의 基質을 分解하며 성장하게 된다. 微生物의 分解作用에 의해 微生物膜表面 근처에서의 基質濃度는 溶液狀態에서의 基質濃도에 비해 낮게 되며 이에 따라 基質의 flux가 微生物膜表面方向으로 發生하게 된다. 基質의 flux는 溶液狀態와 微生物膜表面에서의 濃度差뿐만 아니라 表面에서의 水理學的 狀態와 基質의 擴散性質에 따라 定해지는 物質傳達係數(mass transfer coefficient)에 좌우된다. 一般적으로 物質傳達係數는 Reynolds數(N_{Re})와 Schmidt數(N_{Sc})의 函數로 表示되며 주로 微生物膜表面 근처에서의 hydraulic regime에 따라 크게 影響을 받는다.

微生物膜의 두께는 주위의 流體의 흐름에 의해 생기는 剪斷力이 自體의 凝集能力(adhesion)보다 커질 때까지 增加하게 되고 剪斷力이 凝集力보다 커지면 微生物膜의 一部가 떨어져나가는 現象(sloughing)이 發生하며 定常狀態(steady state)에 도달한 system에서는 剪斷力과 凝集力이 平衡을 이루게 되고 微生物膜의 두께는 一定하게 維持된다고 생각할 수 있다. 하지만 실제로는 끊임없이 sloughing과 成長이 反復되며 sloughing에 의해 떨어져나가는 biomass의 量이 一定하지 않음

므로 微生物膜의 表面은 매끈하지 않고 굴곡을 나타낸다. Atkinson等⁽¹⁾은 微生物膜을 비교적 매끈하여 두께를 定義할 수 있는 heterogeneous biofilm과 굴곡이 크고 不規則하며 두께를 定義하기 어려운 pseudo-homogeneous biofilm으로 區分했다. 微生物膜이 pseudo-homogeneous biofilm 쪽으로 가까워지면 表面積이 不分明해지고 微生物膜表面으로서의 物質傳達가 定義되기 어려우므로 현재까지의 모든 研究는 heterogeneous biofilm에 한하여 수행되어 오고 있다. 本 研究에서도 heterogeneous biofilm의 경우에 대해서만 다루고자 한다.

現在까지 微生物膜을 利用한 廢水處理의 效率을 나타내기 위해 많은 研究가 進行되어 왔으며 크게 經驗的인 研究와 理論的인 研究로 大別할 수 있다. 經驗的인 研究는 實際의 運轉結果를 土臺로 效率에 直接的으로 影響을 미치는 變數와 여러가지 parameter에 따른 效率의 變化를 數式的 혹은 圖式化하는 方法으로 주어진 條件 안에서는 事實과 잘 符合되나 條件이 달라지면 適用이 어렵다는 短點이 있다. 반면에 模型(model)을 통한 理論的인 研究는 넓은 範圍에 걸쳐 適用될 수 있으나 模型에 導入된 parameter의 값이 미리 正確하게 얻어져야 한다.

理論적으로 考察할 때 微生物膜에 의한 基質의 分解는 다음과 같이 몇 段階로 이루어진다 할 수 있다. 첫째로 溶液中の 基質과 營養分이 微生物膜表面으로 傳達되고, 둘째로 表面에 도달한 反應物質이 擴散(diffusion)에 의해 微生物膜 內부로 浸透되며, 셋째로 微生物의 生化學的 反應에 의해 基質의 分解가 이루어진다 할 수 있다. 基質과 함께 微生物膜 內부로 傳達된 營養分은 새로운 細胞의 合成에 利用되며 反應生成物은 擴散에 의해 內로부터 表面으로 傳達된 후 溶液에 섞이게 된다.

本 研究에서는 위와 같은 一連의 過程을 數式으로 表現하여 模型을 定立한 후 이의 simulation을 통하여 微生物膜 內부에서의 基質의 濃度와 flux를 決定함으로써 微生物의 附着式 成長을 利用한 廢水處理過程의 理解를 돕고 既存處理方式의 改善策을 提示하고자 한다. 또한 微生物膜 模型을 撒水濾床이나 回轉圓板과 같은 特定한 處

理方式와 연계시켜 사용할 경우에는 流量, 流入水濃度, 反應槽體積 등 各種 變數의 變化에 따른 處理效率를 算定할 수 있으므로 設計에 應用될 수 있다.

2. 微生物膜模型

Williamson과 McCarty⁽²⁾는 微生物膜內部에서의 基質濃도에 따라 微生物膜을 두꺼운 膜(deep biofilm)과 얇은 膜(thin biofilm)으로 區分하였다. 그림 1에 나타낸 바와 같이 基質濃도가 微生物膜의 全體깊이에 걸쳐 零보다 큰 意味있는 값을 가지는 경우엔 얇은 膜이라 하고 基質濃도가 一定깊이 以後에는 事實상 零으로 되는 경우엔 두꺼운 膜이라 한다. 두꺼운 膜은 溶液狀態의 基質濃도가 낮을 때, 微生物膜의 全體깊이(L)가 클 때, 微生物의 活性도가 높을 때에 볼 수 있으며 두꺼운 膜에서는 擴散에 의한 物質傳達이 相對的으로 生化學的 反應에 의해 消耗되는 量에 비해 적게 된다. 基質의 濃도가 零으로 될 때의 깊이(L_e)를 有效두께(effective depth) 혹은 限界두께(limiting depth)라 하며, 有效두께가 微生物膜의 實際두께보다 작은 경우를 두꺼운 膜이라 할 수 있다.

現在까지 알려진 微生物膜의 模型에 관한 研究는 주로 두꺼운 膜의 경우에 限定되고 있다. Williamson과 McCarty⁽²⁾는 微生物膜과 溶液 사이에 停滯狀態의 薄膜이 存在한다고 假定하고

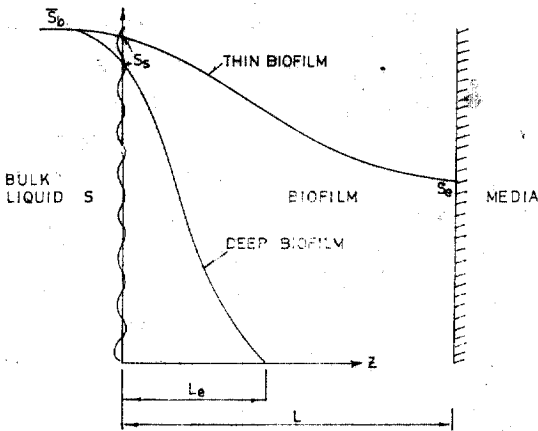


그림 1. 微生物膜內部와 周圍에서의 基質의 濃度

薄膜理論(thin film theory)에 의하여 物質傳達係數를 算定하고 基質의 分解는 Monod 公式을 따른다고 假定하고 여러가지 경우에 대한 simulation 結果를 土臺로 試行錯誤法에 의해 表面에서의 基質의 濃도와 flux 를 구하는 方法을 提示했다. Rittmann과 McCarty⁽³⁾는 類似한 模型을 통해서 表面에서의 基質의 flux 를 溶液狀態의 濃도의 指數函數로 表示하고 指數가 0.5에서 1 사이의 값을 갖는다고 發表했다. Harremoes⁽⁴⁾는 微生物膜을 無限히 많은 圓形斷面의 곧바른 pore 로 構成되어 있고 pore 內에서는 基質의 擴散作用이 일어나고 pore 周圍에서는 生化學的 反應이 일어난다고 假定하여 濾過床(filter)의 模型을 提示했다. 이밖에도 두꺼운 膜에서의 基質除去效率에 관한 研究가 Atkinson 等에^{(1), (5), (6), (7)}의 해 發表되었으나 얇은 膜의 경우에 대해서는 研究가 거의 없는 狀態이다.

(1) 두꺼운 膜의 模型(Deep biofilm model)

溶液內에 基質과 其他 營養분이 충분히 있어 계속적인 基質分解에 아무런 影響을 끼치지 않는다면 微生物膜表面 근처에서의 基質濃도는 溶液狀態에서보다 낮아지며 濃度差로 인하여 表面 flux가 생기며 다음과 같이 表示될 수 있다.

$$J_0 = M_0(S_0 - S_s) \quad (1)$$

위의 式에서

J_0 = 溶液으로부터 微生物膜表面으로의 flux

M_0 = 溶液과 微生物膜表面사이의 物質傳達係數

S_0 = 溶液中 基質濃度

S_s = 微生物膜表面에서의 基質濃度

微生物膜表面으로 傳達된 基質은 擴散에 의해 微生物膜內部로 移動되며 周圍의 微生物에 의해 分解된다. 微生物에 의한 基質의 分解가 微生物의 成長率에 比例하고 또한 微生物의 成長은 Monod 公式을 따른다고 하면 微生物에 의한 基質分解速度는 다음 式으로 表現된다.

$$-\frac{dS}{dt} = \frac{kXS}{K_s + S} \quad (2)$$

위의 式에서

t = 時間

S = 基質의 濃度

k = 最大基質分解常數

X = 微生物濃度

K_s = 基質分解率이 最大値의 半일 때의 基質濃度

微生物膜內部에서의 基質의 擴散은 Fick의 法則을 따른다고 하고 生化學的 反應을 考慮하여 物質收支式(mass balance equation)을 세우면 다음 式을 얻게 된다.

$$\frac{\partial S}{\partial t} = D_s \frac{\partial^2 S}{\partial z^2} - \frac{kXS}{K_s + S} \quad (3)$$

위의 式에서

z = 微生物膜表面으로부터의 깊이

D_s = 基質의 擴散係數

定常狀態에서 위의 式은 다음과 같이 表示된다.

$$\frac{d^2 S}{dz^2} = \frac{kX}{D_s} \frac{S}{K_s + S} \quad (4)$$

두꺼운 膜에 있어서 boundary condition은 다음과 같이 주어진다.

$$z=L_s \text{ 일 때 } S=0 \quad (5)$$

$$z=L_s \text{ 일 때 } \frac{dS}{dz}=0 \quad (6)$$

(4)式을 풀기 前에 편의상 S 가 0이 되는 지점을 基準點으로 삼고 새로운 變數 \bar{x} 와 \bar{S} 를 導入하면 다음과 같은 關係式이 얻어진다.

$$x=L_s - z \quad (7)$$

$$\bar{x} = \frac{x}{L_s} \quad (8)$$

$$\bar{S} = \frac{S}{K_s} \quad (9)$$

$$\frac{d^2 \bar{S}}{d\bar{x}^2} = \phi_1 \frac{\bar{S}}{1+\bar{S}} \quad (10)$$

위의 式에서

$$\phi_1 = \frac{kXL_s^2}{D_s K_s} \text{ (無次元常數)} \quad (11)$$

또한 boundary condition (5)와 (6)은 다음과 같이 變形된다.

$$\bar{x}=0 \text{ 일 때 } \bar{S}=0 \quad (12)$$

$$\bar{x}=0 \text{ 일 때 } \frac{d\bar{S}}{d\bar{x}}=0 \quad (13)$$

微生物膜內部에서의 flux는 $-D_s \frac{dS}{dz}$ 로 表示되고 表面에서의 flux는 (1)式과 같이 表現되므로 이로부터 다음 式이 얻어진다.

$$\bar{S}_0 - \bar{S}_1 = \phi_2 \left(\frac{d\bar{S}}{d\bar{x}} \right)_{\bar{x}=\frac{L_s}{L}} \quad (14)$$

위의 式에서

$$\phi_2 = \frac{D_s}{M_s L} \text{ (無次元常數)} \quad (15)$$

(10)式은 1차로 積分하여 다음과 같은 式을 얻을 수 있다.

$$\frac{d\bar{S}}{d\bar{x}} = \sqrt{2\phi_1} \sqrt{\bar{S} - \ln(1+\bar{S})} \quad (16)$$

위의 式은 다시 積分이 不可能하지만 \bar{S}_1 는 (14)式과 (16)式을 사용하여 다음과 같이 \bar{S}_1 의 函數로 表示할 수 있다.

$$\bar{S}_1 + \phi_2 \sqrt{2\phi_1} \sqrt{\bar{S}_1 - \ln(1+\bar{S}_1)} = \bar{S}_0 \quad (17)$$

(2) 얇은 膜의 模型(Thin biofilm model)

얇은 膜의 경우엔 微生物膜의 全體깊이에 걸쳐 基質의 濃도가 零보다 큰 값을 나타낸다. 微生物膜表面에서의 flux는 (1)式과 같이 表現될 수 있으며, 微生物膜內部에서는 動的狀態에서 (3)式, 定常狀態에서는 (4)式과 같이 表現된다.

(4)式의 boundary condition은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$z=L \text{ 일 때 } S=S_0 \quad (18)$$

$$z=L \text{ 일 때 } \frac{dS}{dz}=0 \quad (19)$$

위의 式에서 S_0 는 微生物膜끝에서의 基質의 濃도를 나타낸다. 새로운 變數 \bar{x} 와 \bar{S} 를 導入하면 위의 boundary condition은 다음과 같이 變形된다.

$$\bar{x}=0 \text{ 일 때 } \bar{S}=\bar{S}_0 \quad (20)$$

$$\bar{x}=0 \text{ 일 때 } \frac{d\bar{S}}{d\bar{x}}=0 \quad (21)$$

따라서 얇은 膜의 模型에서는 두꺼운 膜模型에서 쓰인 모든 公式가 適用되고 boundary condition만 위와 같이 달라진다.

3. 模型의 解析

두꺼운 膜의 경우 表面에서의 基質濃도와 flux는 式(17)과 式(16)에 의해 구해질 수 있다. 그러나 微生物膜內部에서의 基質濃도(\bar{S})와 有效 두께(L_s)는 式(16) 혹은 式(10)을 數值解析法에 의해 풀어야 한다. 模型의 解析을 위해 微生物膜의 全體깊이를 여러 개의 작은 區間으로 나누어 후 式(10)을 4次的 Runge-kutta法을 사용하여 풀었다. 式(12)와 式(13)에서 주어진 初期值가 모두 零이어서 Runge-kutta法의 適用이 어려워 $\bar{x}=0$ 에서의 \bar{S} 는 零에 매우 가까운 陽의 實數 $\left(\frac{\epsilon}{K_s}\right)$ 를 사용했다. 每 區間에서 S 를 구한 후 $\phi_2 \frac{d\bar{S}}{d\bar{x}}$ 를 計算하여 $\bar{S}_0 - \bar{S}_1$ 와 比較했다. 즉 \bar{x} 가

L_c/L 보다 작을 때는 $\phi_2 \frac{d\bar{S}}{d\bar{x}}$ 가 $\bar{S}_b - \bar{S}$ 보다 작으나, L_c/L 에서 두 값이 같게 되고, L_c/L 보다 클 경우엔 $\phi_2 \frac{d\bar{S}}{d\bar{x}}$ 가 $\bar{S}_b - \bar{S}$ 보다 커진다. 따라서 $\phi_2 \frac{d\bar{S}}{d\bar{x}}$ 를 각 지점에서 계산하여 $\bar{S}_b - \bar{S}$ 와比較하여 有效두께를 구했다. 두꺼운 막의 모델을解析하기 위한 computer program 의 flow chart가 그림 2에 나와 있다. 그림 2에서 ①로 표시된 routine 은 얇은 막으로 넘어가는 과정을 나타낸다.

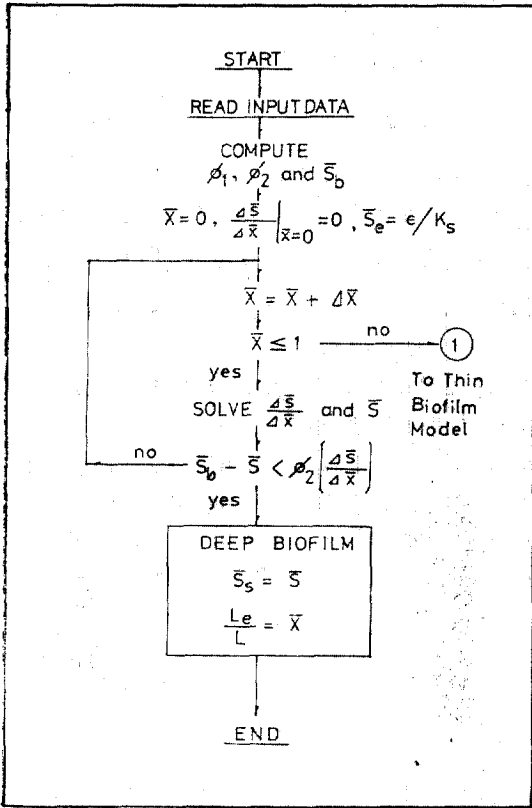


그림 2. 두꺼운 막의 解析을 위한 flow chart

주어진 微生物膜을 두꺼운 막으로 解析할 때 x 가 1 이 될 때까지 式(14)가 成立되지 않으면 이 微生物膜은 얇은 막이라 할 수 있다. 얇은 막의 경우에는 두꺼운 막模型에서 사용된 모든 式이 適用되나 初期值로 사용되는 \bar{S}_b 가 모르는 값이므로 매우 작은 \bar{S}_b 와 \bar{S}_e 에 가까운 \bar{S}_b 를 사용하여 各各의 경우에 \bar{S}_b 를 計算한 후 새로운 \bar{S}_b 를 比例配分法에 의해 假定한 후 反復하

여 計算하는 方法을 採擇했다. 얇은 微生物膜의 解析을 위해 사용된 數值解析法의 flow chart가 그림 3에 나타나 있다. 이 그림에서 ①로 표시된 routine 은 두꺼운 막으로부터 넘어오는 과정을 表示한다. 一般적으로 어느 微生物膜이 두꺼운 막인지 혹은 얇은 막인지 알 수 없으므로 그림 2와 그림 3을 結合시켜 사용하게 된다. 즉 두꺼운 막模型을 먼저 適用시켜 본 후 얇은 막으로 判明되면 ①로 表示된 routine 으로 넘어가서 얇은 막의 模型을 適用하게 된다.

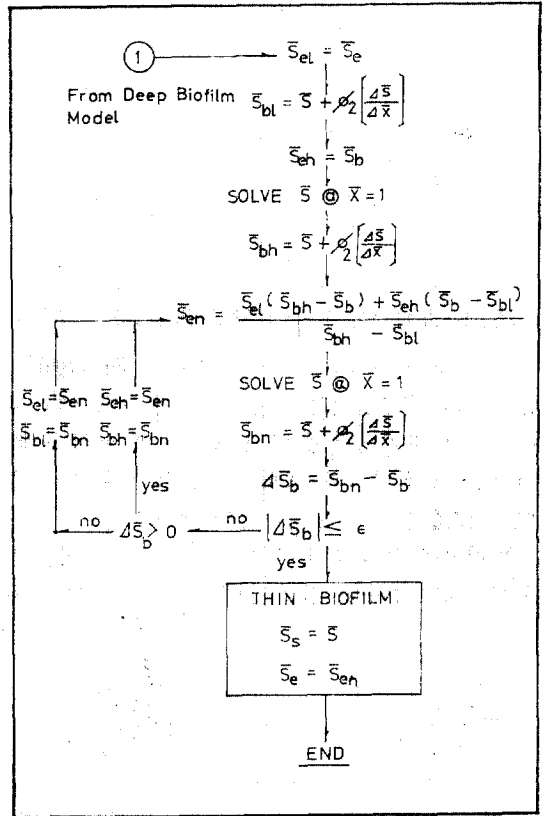


그림 3. 얇은 막의 解析을 위한 flow chart

4. 結果 및 討論

그림 4는 \bar{S}_b 가 2 일 때의 Simulation 結果로서 ϕ_2 는 0.01 로 一定하고 ϕ_1 이 10 일 경우와 1,000 일 경우에 있어서 微生物膜内部에서의 基質濃度의 變化를 보여준다. ϕ_1 이 1,000 일 경우엔 微生物에 의한 生化學的 反應이 基質의 擴散에 비

해 相對的으로 活潑한 경우로서 이때의 有效 두께는 全體 두께의 20% 정도이다. 반면에 ϕ_1 이 10 인 경우에는 生化學的 反應이 相對的으로 저조해서 \bar{S} 의 變化는 완만하며 微生物膜 끝에서 基質의 濃度は 溶液狀態濃度の 約 15% 程度의 값을 나타낸다.

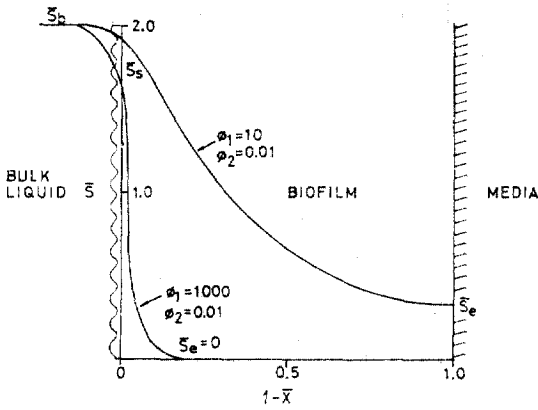


그림 4. \bar{S}_b 가 2일 때 微生物膜 内部에서의 基質 분포

그림 5에서는 \bar{S}_b 가 100일 경우에 微生物膜 内部에서의 基質濃度の 變化를 보여준다. 그림 4에서와 마찬가지로 ϕ_1 이 1,000일 때 두꺼운 膜이 되며 外部에서의 基質濃도가 높기 때문에 基質의 浸透가 보다 깊숙히 進行되고 有效깊이는 全體깊이의 50% 정도이다. 이와는 대조적으로 ϕ_1 이 10인 경우엔 얇은 膜으로서 微生物의 活

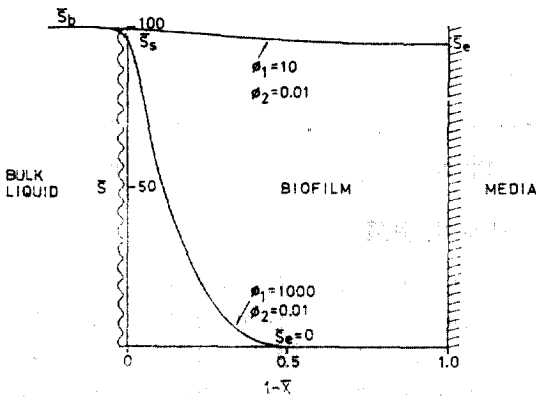


그림 5. \bar{S}_b 가 100일 때 微生物膜 内部에서의 基質 분포

動이 저조해서 基質의 擴散이 두드러지게 나타나므로 \bar{S} 의 變化가 거의 없게 된다. 撒水濾床이나 回轉圓板處理過程에 있어서 濾床의 頂부분이나 回轉圓板初期 stage에서의 微生物膜內的 基質濃度は 그림 5와 類似하고 濾床의 아래부분이나 回轉圓板의 後期 stage에서는 그림 4와 비슷한 分布를 나타낼 것으로 豫想된다.

定常狀態에서 微生物膜表面에서의 基質의 flux는 system의 單位面積當 基質除去率이 되며 다음과 같이 表示될 수 있다.

$$\begin{aligned} J_s &= -D_s \left(\frac{dS}{dz} \right)_{z=0} \\ &= \frac{D_s K_s}{L} \left(\frac{d\bar{S}}{d\bar{x}} \right)_{\bar{x}=\frac{L_e}{L}} \\ &= \frac{D_s K_s}{L} \bar{J}_0 \end{aligned} \quad (22)$$

위의 式에서 \bar{J}_0 는 \bar{S} 를 \bar{x} 로 表示할 때 $\bar{x} = \frac{L_e}{L}$ 에서의 기울기로서 表面에서의 基質의 flux,

J_0 를 flux의 次元을 갖는 常數인 $\frac{D_s K_s}{L}$ 로 나누어준 값이다. 그림 6과 그림 7은 \bar{S}_b 가 2와 100인 경우에 있어서 ϕ_1 과 ϕ_2 의 變化에 따른 \bar{J}_0 의 變化를 보여주고 있다. \bar{J}_0 는 J_0 와 比例關係에 있고 또 \bar{J}_0 는 基質除去率을 나타내기 때문에 위의 그림은 결국 ϕ_1 과 ϕ_2 의 基質除去率에 미치는 影響을 나타낸다. ϕ_1 의 增加 혹은 ϕ_2 의 減少에 따라 \bar{J}_0 가 增加함을 볼 수 있다. 즉 生化學的 反應率이 높을수록 그리고 物質傳達係數가 커질수

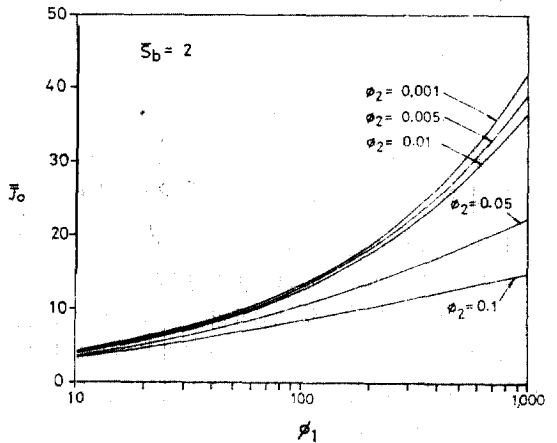


그림 6. \bar{S}_b 가 2일 때 ϕ_1 과 ϕ_2 의 變化에 따른 flux의 變化

특히 除去率(removal rate)이 增加함을 알 수 있다. 그리고 \bar{S}_b 가 增加함에 따라 微生物膜(生物膜) 내부로의 基質浸透量(substrate penetration)이 많아지고 基質濃度(substrate concentration)가 높아짐에 따라 基質除去率(substrate removal rate)이 增加하게 된다. 또한 \bar{J}_0 의 變化는 ϕ_2 보다 ϕ_1 의 變化에 더욱 敏感하므로 높은 除去率을 얻기 위해서는 높은 微生物濃度(microbial concentration)와 微生物膜의 厚度를 깊게 維持하는 것이 무엇보다 重要하다.

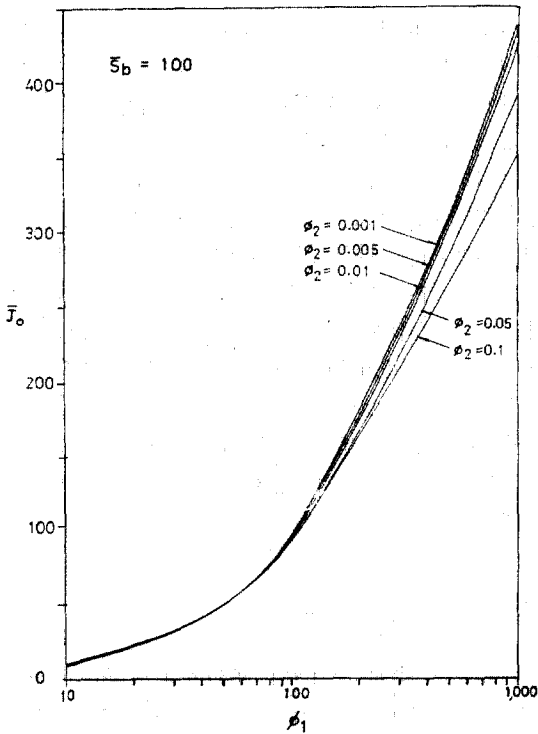


그림 7. \bar{S}_b 가 100일 때 ϕ_1 과 ϕ_2 의 變化에 따른 flux의 變化

그림 8과 그림 9는 \bar{S}_b 가 2와 100일 때의 ϕ_1 과 ϕ_2 의 變化에 따른 有效厚度(effective thickness)의 變化를 보여준다. 溶液狀態의 濃度가 낮을 때에는 (그림 8) ϕ_1 이 15~20 가까이로 減少해야 얇은 膜으로 되나 溶液狀態의 濃度가 높을 경우엔 (그림 9) ϕ_1 이 200~300 근처에 이르러 얇은 膜으로 轉移됨을 알 수 있다. 또한 有效厚度는 ϕ_1 엔 매우 敏感하지만 ϕ_2 의 變化에는 약간의 變化만 나타낼 뿐이다. 그림 6과 그림 7에 나타냈듯이 ϕ_1 의 增加는 基質除去率을 높이게 되며 그림 8과 그림 9에서 보면 이는 두꺼운 膜의 경우에 해당된다. 즉 두

꺼운 膜의 경우에 表面에서의 $\frac{dS}{dx}$ 가 커짐으로 基質分解率(substrate decomposition rate)이 얇은 膜에서보다 높게 됨을 알 수 있다.

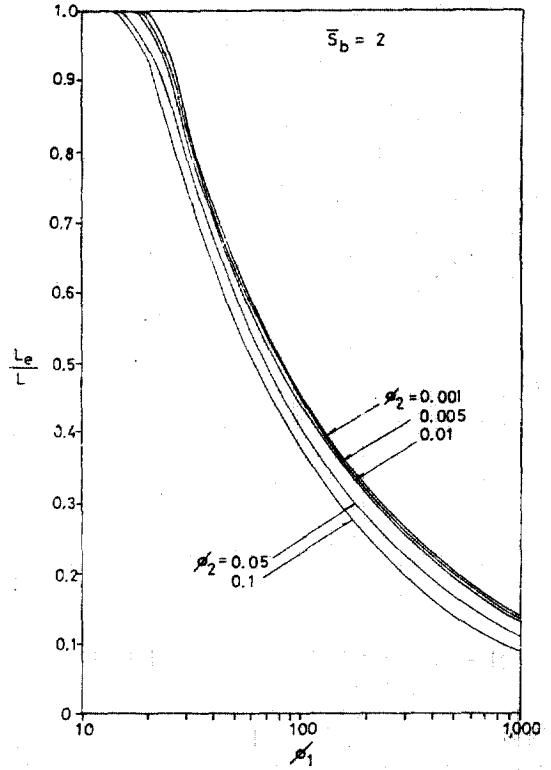


그림 8. \bar{S}_b 가 2일 때 ϕ_1 과 ϕ_2 의 變化에 따른 有效厚度의 變化

지금까지의 simulation 結果를 綜合해 보면 處理率(removal rate)을 높이기 위해서는 ϕ_1 을 크게하거나 ϕ_2 를 작게 維持해야 한다. ϕ_1 과 ϕ_2 는 system을 이루는 微生物膜, 基質, 그리고 溶液의 諸常數의 組合으로서 대부분이 調整不可能한 常數이고 단지 物質傳達係數만이 變化可能한 項이 된다.

物質傳達係數는 實驗에 의해 구해질 수 있으며 일반적으로 N_{R_s} 와 N_{S_s} 의 函數로 表示된다. N_{S_s} 는 基質과 溶液의 物理的 性質에 의해 정해지기 때문에 調整이 不可能하므로 處理效率는 N_{R_s} 에 따라 변화한다 할 수 있다. N_{R_s} 의 構成因子中 流速만이 調整可能한 項이며 處理效率는 一定한 厚度의 微生物膜에서 流速의 增加와 함께

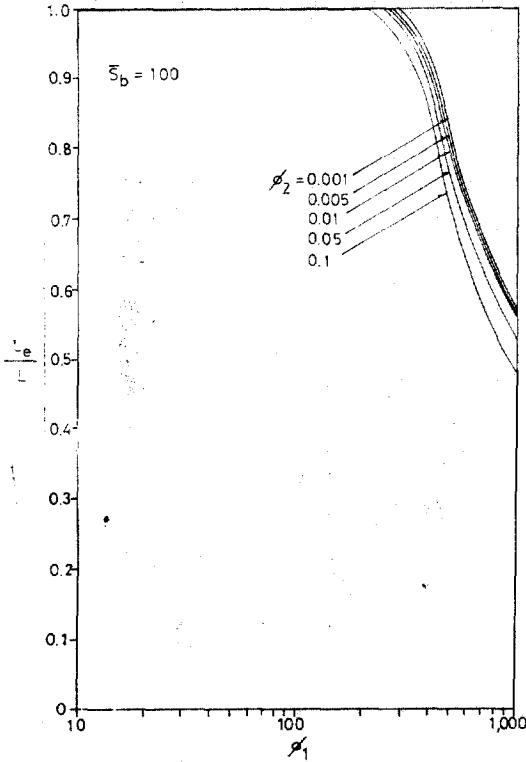


그림 9. S_b 가 100일 때 ϕ_1 과 ϕ_2 의 변화에 따른 유효두께의 변화

증가한다 할 수 있다. 하지만 이는 일시적인 현상이고 실제로는流速增加에 의해剪斷力이 커져서微生物膜의 두께가減少하며 새로운定常狀態로 들어가게 된다. 불행히도 아직까지流速의 변화에 따른微生物膜의 두께의 변화에 대해서定量的으로糾明하지 못하고 있는 실정이므로 새로운定常狀態에서의處理效率를明確히 규정할 수는 없다.處理效率를 정확히表現하려면 먼저流速과微生物膜두께사이의關係를定量的으로表示할 수 있는研究가先行되어야 한다.

5. 結 論

微生物膜을利用한基質分解現象을表面에서의物質傳達,微生物膜內部的擴散,그리고生化學的反應의3段階로 이루어진다고假定하여模型을定立했다.模型의定立過程에서3개의無次元常數 ϕ_1 , ϕ_2 , S_b 를 얻었으며微生物膜內部

에서의基質濃도와flux는3개의無次元常數의函數로表示될수있음을알았다.또한微生物膜內部에서基質濃도의分布狀態에따라두꺼운膜과얇은膜으로나누고각각의경우에대해模型의解析方法을提示했다.一般的으로어느微生物膜이두꺼운膜인지얇은膜인지알수없으므로먼저두꺼운膜에適用시켜본후에얇은膜으로判斷될경우에한하여얇은膜의模型을適用시키는方法을採擇하였다.

模型의simulation結果두꺼운膜과얇은膜의區分은 ϕ_1 , ϕ_2 , 그리고 S_b 에의해정해지고表面에서의flux(J_0)역시세가지常數에의해決定된다.基質의除去率을높이기위해서는 ϕ_1 의增加혹은 ϕ_2 의減少가必要하다.

處理效率는 ϕ_2 보다도 ϕ_1 에더욱敏感하고處理效率가높게維持되는system은두꺼운膜에속한다고할수있다.流速을增加시킴으로써일시적으로效率의增大를피할수있으나流速의增加에따라sloughing에의해微生物膜두께가減少하므로새로운定常狀態로바뀌어진다.流速에따른微生物膜의두께變化를定量的으로表示하는方法이알려져있지않으므로새로운定常狀態에서의處理效率는明確히규정지을수없다.

謝 辭

本研究는韓國科學財團의1980年度定着研究獎勵金の研究費支援으로이루어졌으므로同財團에謝意를表한다.

參 考 文 獻

1. Atkinson, B., Swilley, E.L., Busch, A.W., and Williams, D.A., "Kinetics, Mass Transfer, and Organism Growth in a Biological Film Reactor" *Trans. Inst. Chem. Eng.*, 45, T 257(1967)
2. Williamson, K., and McCarty, P.L., "A Model of Substrate Utilization by Bacterial Films." *Jour. Water. Poll. Control. Fed.*, 48, 9(1976)
3. Rittmann, B.E., and McCarty, P.L., "Variable Order Model of Bacterial-Film Kinetics." *Jour. of the Env. Eng. Div., ASCE*, 104, EE5, 889(1978)
4. Harremoes, P., "The Significance of Pore Diff-

usion to Filter Denitrification." *Jour. Water Poll. Control. Fed.*, 48, 377 (1976)

5. Atkinson, B., and Daoud, I.S., "The Analogy between Microbiological Reactions and Heterogeneous Catalysis." *Trans. Inst. Chem. Eng.*, 46, T 19 (1968)
6. Atkinson, B., Daoud, I.S., and Williams, D.A.,

"A Theory for the Biological Film Reactor." *Trans. Inst. Chem. Eng.*, 46, T 245 (1968)

7. Atkinson, B., and Howell, J.A., "Slime Hold-up, Influent BOD, and Mass Transfer in Trickling Filters." *Jour. of the Env. Eng. Div., ASCE*, 101, EE4, 585 (1975)

(接受: 1981. 11. 6)