

深層曝氣 活性슬러지法을 利用한 製紙廢水의 生物學的 處理에 관한 研究

Treatment of Paper Mill Wastewater by the Deep Shaft Activated Sludge Process

金煥起* · 梁奉龍** · 李福烈***

Kim, Hwan Gi · Yang, Bong Yong · Lee, Bok Yul

Abstract

A generated problem in treated highly concentrated organic wastewater by activated sludge process is the limitation of biomass concentration and oxygen transfer capability in aeration tank. To overcome the limitation, the deep shaft activated sludge process which has high oxygen transfer capability was applied to the wastewater treatment process.

This paper investigated the characteristics of liquid circulation, oxygen transfer and biological treatment of paper mill wastewater by the deep shaft activated sludge process.

From the obtained results, it was found that the oxygen transfer capability in the deep shaft system was much greater than those in the conventional aeration systems and almost tantamount to the pure oxygen system. The deep shaft system could treat highly concentrated organic wastewater by higher biomass concentration and organic loading rate.

요 지

活性슬러지法에 의하여 高濃度 有機性 廢水를 處理할 경우에 發生되는 問題點은 曝氣槽內의 微生物濃度와 酸素傳達能力이 制限받고 있는 점이다. 이러한 問題點을 克服하기 위하여 높은 酸素傳達能力을 나타내는 深層曝氣 活性슬러지法이 廢水處理現場에 適用되고 있다.

따라서 本 研究는 深層曝氣 活性슬러지法의 液體循環特性和 酸素傳達特性 및 製紙廢水의 有機物 除去特性에 대하여 研究하게 되었다. 研究結果, 深層曝氣裝置는 一般 散氣式 曝氣裝置에 비하여 酸素傳達能力이 매우 높고 純酸素 曝氣法과 거의 같은 酸素傳達特性을 나타낸다. 또 曝氣槽內 微生物濃도와 有機物負荷를 높게 유지할 수 있어 高濃度 有機性 廢水를 處理할 수 있었다.

* 정희원 · 全北大學校 工科學科 土木工學科 教授

** 정희원 · 全北大學校 大學院 土木工學科 博士過程

*** 정희원 · 全北產業大學 工業化學科 副教授

1. 序 論

1970年代에 紹介된 深層曝氣裝置는 英國의 ICI社에서 메탄올의 好氣性 醱酵에 의한 單細胞 蛋白質의 生産技術을 研究하는 過程에서 着眼해 낸 酸素傳達裝置이다.⁽¹⁾ 蛋白質 生産工程에서 酸素傳達裝置로 活用된 深層曝氣裝置는 높은 酸素傳達能力과 處理場所 所要面積의 減少化를 實行할 수 있다.⁽²⁾ 이에 따라 1974년 英國의 Billingham에서 生活下水를 處理하기 위한 活性슬러지法의 變法으로 深層曝氣 活性슬러지法(Deep Shaft Activated Sludge Process)의 pilot plant가 最初로 設置되었으며 실제로 下·廢水處理現場에 適用된 것은 1975년 獨逸의 Emlichheim에서 澱粉工場의 澱粉廢水處理를 目的으로 建設된 것이 처음이다.⁽³⁾

이와 같이 深層曝氣 活性슬러지法이 最初로 現場에 適用된지 약 15년이 지난 현재에 전세계적으로 여러지역에서 運營되고 있으며 建設되고 있는 施設의 수도 繼續적으로 증가하고 있다.

製紙廢水는 生物學的 難分解性 物質인 리그닌과 化學物質이 包含되어 있고, 高濃度 有機性 廢水이므로 生物學的 廢水處理에 많은 어려움이 있다. 대개 製紙廢水の 生物學的 處理方式으로는 標準 活性슬러지法을 適用하고 있지만, 이 경우 返送 슬러지量이 많고 處理效率이 낮으며, 廢水의 水理學的 滯留時間이 길어 曝氣槽의 容積이 크게 要求된다. 또 製紙廢水는 木材에서 溶解된 纖維素에 의해 曝氣液의 슬러지 부피가 높기 때문에 沈澱槽의 水面積과 容積을 증가시킨다.

製紙工場에서는 效率적이고 經濟적인 製紙廢水の 生物學的 處理와 曝氣槽 및 沈澱槽의 容積을 감소시켜 土地利用을 높일 수 있는 새로운 處理工程의 開發이 絶실히 必要하게 된다. 따라서 電力消費面에서 經濟적이고 높은 酸素傳達效率을 얻을 수 있는 深層曝氣 活性슬러지法을 製紙廢水の 生物學的 處理工程에 適用하려는 方案이 考慮되고 있다.

그러나 國內에는 深層曝氣 活性슬러지法에 대한 充分한 實驗資料와 正確한 特性分析資料가 거의 없으므로 이를 現場에 適用하기 위해서는 이에 대한 基礎資料가 必要하다. 또 深層曝氣 活性슬러지法을 製紙廢水の 生物學的 廢水處理工程으로 利用하기

위해서는 먼저 深層曝氣裝置의 液體循環 및 酸素傳達特性과 深層曝氣 活性슬러지法을 利用한 製紙廢水の 生物學的 分解特性에 관한 研究가 先行되어야 하므로 本 研究를 修行하게 되었다.

2. 實驗裝置 및 實驗方法

2.1 實驗裝置

本 研究를 修行하기 위한 同心二重管型 深層曝氣 活性슬러지法의 pilot plant 模式圖는 그림 1과 같다.

本 實驗裝置는 深層曝氣裝置, 脫氣裝置, 沈澱槽로 構成되어 있다. 深層曝氣裝置는 同心二重管型으로 外管의 內徑이 100 mm, 內管의 內徑이 50 mm, 水深이 105 m이다. 深層曝氣裝置의 head tank는 높이 50 cm, 폭 35 cm, 길이 60 cm이며, 上向管의 空氣注入位置는 地表로부터 33 m地點, 下向管의 空氣注入位置는 50 m地點을 택하였다.

上向管의 空氣注入管은 內徑 6 mm의 銅管이며 空氣分散裝置는 一般 分散機를 사용하였다. 下向管의 空氣注入管은 6 氣壓에 견딜 수 있는 라텍스 管으로 空氣分散裝置는 直徑 0.06 cm의 單一 오리

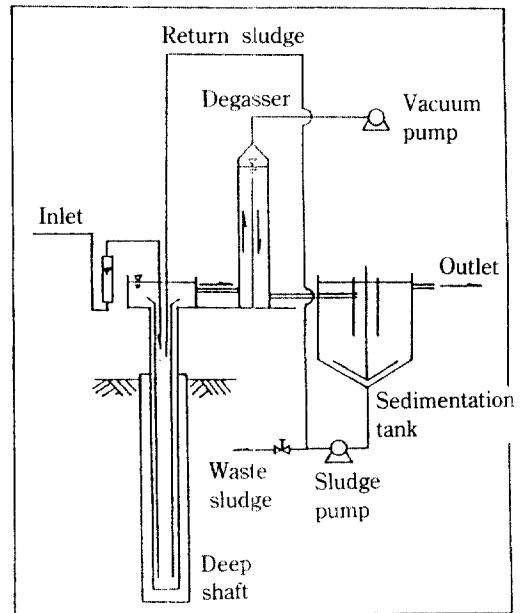


그림 1. Schematic diagram of deep shaft activated sludge process

피스로 되어 있다. 深層曝氣裝置의 注入空氣는 電動機의 出力이 3kW인 空氣壓縮機에 의해 6.5氣壓으로 壓縮된 空氣를 注入하였다.

脫氣裝置는 直徑 15 cm, 높이 180 cm의 圓形 아크릴管으로 製作하고 脫氣裝置에 眞空을 形成시키기 위해 1/4 Hp의 眞空펌프를 사용하였다. 또 沈澱槽는 直徑 1.14 m, 높이 1.5 m인 圓形 沈澱槽이다.

2.2 實驗方法

本 研究에서는 上向管에 20, 30, 40, 50 l/min의 空氣를 注入한 狀態에서 下向管에 0, 1.7, 3.3, 5, 6, 7, 8.3 l/min의 空氣를 注入하여 液體循環을 誘導한 후, 液體循環이 可能한 上,下向管 空氣量에 대하여 液體循環特性和 酸素傳達特性에 基礎資料가 되는 實驗을 實施하였다.

深層曝氣裝置內的 液體循環이 一定한 狀態에 到達되었을 때, 下向管 上端에 追跡物質로서 飽和 KCl溶液 30 ml를 순간 注入하고 上向管 上端에서 記錄計가 附着된 電氣傳導度計(DKK, Model AD-6)로서 電氣傳導度を 測定하였다. 時間變化에 따라 追跡物質의 電氣傳導도로 나타난 應踏曲線으로부터 循環時間은 應踏曲線의 각 Cycle의 頂點과 頂點사이의 時間을 平均하여 測定하였다. 循環流速은 測定된 循環時間을 深層曝氣裝置의 上,下向管 斷面積 및 管의 길이로부터 計算하였다. 分散數는 記錄計에 나타난 應踏曲線으로부터 時間變化에 따른 濃度變化를 推定하고 分散을 計算함으로써 구하였다. 氣泡滯留量은 manometer의 水頭差를 이용하여 測定하였다.

酸素傳達特性은 一定 注入空氣에서 液體의 循環 狀態가 一定하다고 判斷되었을 때, 溶存酸素計(YSI, Model-57)로서 位置別 溶存酸素濃度を 測定하여 分析하고 分散모델을 이용하여 解析하였다.

本 實驗裝置에 流入되는 廢水는 1차 處理된 製紙廢水로서 HRT에 따른 製紙廢水의 處理效率은 曝氣槽內 微生物濃度を 일정하게 維持하고 HRT를 0.5-4.6 hr로 變化시켜 實驗하였으며, 曝氣槽內 微生物濃도에 따른 製紙廢水의 處理效率은 曝氣槽內 流入流量을 일정하게 維持하고 曝氣槽內 微生物濃도를 3,500-9,000 mg/l로 變化시켜 實驗하였다.

3. 研究結果 및 考察

3-1. 循環特性

COX 등⁽⁴⁾에 따르면, 同心二重管型 深層曝氣裝置에서 液體循環을 誘導하기 위하여 開始空氣를 供給하였을 때 下向管의 下降流速은 1 m/sec 이상되어야 하며, 開始空氣를 遮斷하고 下向管 空氣量에 의해서 液體循環이 이루질 때 下向管의 流速은 最低 0.7 m/sec 이상이어야 한다고 하였다. Pöpel⁽⁵⁾은 停止液中의 氣泡上昇速度를 相殺하고 深層曝氣裝置에서 下向管 滯留氣泡가 上昇하지 않고 下降할 수 있는 循環流速의 下限값은 0.5 m/sec 이상이어야 하며, 供給에너지와 酸素傳達 效率面 등을 고려할 때 液體循環流速의 上限값은 1.5 m/sec로 정함이 바람직하다고 하였다. 金 등^(6,7)은 U型管 深層曝氣裝置에서 液體循環流速이 0.5 m/sec 이상되어야 下向管에 注入된 空氣가 逆流하지 않고 연속적인 液體循環이 가능하다고 하였다. 또 液體循環流速이 0.5-0.7 m/sec범위에서 下向管의 氣泡下降速度는 0.3-0.5 m/sec로서 液體循環流速보다 0.2 m/sec 정도 작고, 上向管에서의 氣泡上昇速度는 液體循環流速과 거의 같거나 약간 높게 나타난다고 하였다.

따라서 同心二重管型 深層曝氣裝置의 循環特性을 把握하기 위하여 循環時間과 流速, 氣泡滯留量, 分散數를 測定하여 表 1에 나타내었다.

表 1에서 水深 105 m인 同心二重管 深層曝氣裝置의 循環時間은 下向管에 空氣를 注入하지 않을 경우에 324-381 sec이며, 下向管에 空氣를 注入할 경우에 405-765 sec로서 下向管에 空氣를 注入하면 下向管에서 氣泡浮上力의 증가에 起因하여 감소되었다. 또 氣-液 接觸時間은 353-663 sec로서 一般散氣式 曝氣裝置의 氣-液 接觸時間 15 sec보다 약 24-44배 정도 큼을 알 수 있다. 또 下向管의 循環流速은 52-119 cm/sec, 上向管의 循環流速은 19-43 cm/sec로서 Pöpel의 研究結果와 같이 下向管의 循環流速이 0.5 m/sec 이상이 되어야만 液體循環이 가능하였다.

한편, 水深 32 m인 U型管 深層曝氣裝置^(6,7)와 同心二重管型 本 實驗裝置에서의 循環流速을 비교하면, U型管 深層曝氣裝置에서 循環流速은 50-70 cm/sec로서 上·下向管의 流速이 거의 동일하나 下向

表 1. Liquid circulation characteristics in the deep shaft system

Air flow rate (l/min)		Circulation time(sec)	Circulation velocity (cm/sec)		Gas hold-up (l)		Dispersion number ($\times 10^{-4}$)	
downcomer	riser		downcomer	riser	downcomer	riser	downcomer	riser
0	20	381	83	83	0.05	10.5	7.7	10.4
	30	363	101	37	0.11	13.4	8.5	13.1
	40	338	129	47	0.16	17.7	9.3	14.3
	50	324	154	56	0.21	23.8	12.1	16.8
1.7	20	454	64	23	4.4	15.7	7.0	10.1
	30	440	73	27	3.8	17.9	7.9	12.4
	40	427	95	35	2.8	20.6	8.4	13.6
	50	405	119	43	2.3	24.1	9.8	15.9
3.3	20	542	52	19	5.7	18.4	6.4	9.8
	30	523	68	25	5.0	20.2	6.9	11.4
	40	519	85	31	4.4	22.1	7.6	12.7
	50	471	102	37	4.0	25.3	8.5	14.3
5.0	30	726	56	20	6.9	22.2	6.1	10.3
	40	635	74	27	5.9	23.4	6.5	11.3
	50	541	90	33	5.0	26.6	6.9	13.2
6.7	40	733	55	20	7.7	24.5	6.2	10.2
	50	637	73	27	6.8	28.2	6.9	12.1
8.3	50	765	57	21	9.3	28.8	5.5	11.2

管 空氣注入時, 本 實驗裝置에서 下向管 循環流速은 52-95 cm/sec, 上向管 循環流速은 20-35 cm/sec로서 流速의 차이가 있다. 따라서 同心二重管型 深層曝氣裝置의 上向管에서의 液體循環流速은 氣泡의 浮上速度보다 작거나 거의 같으며 下向管에서의 循環流速은 氣泡의 下降速度보다 빠르므로 U型管보다 液體循環과 酸素傳達을 위한 消費電力面에서 유리할 것이라 判斷된다.

또한, 氣泡塔內的 氣泡滯留量(gas hold-up)은 氣-液 混相界中에 滯留하는 氣泡量이다. 一般的으로 氣泡滯留量을 測定하는 方法은 가장 보편적으로 manometer利用法을 택하고 있다. manometer利用法은 液體가 管内를 따라 흐를 때 管의 側壁에 연결된 manometer의 水頭勾配를 測定하여 구한다.^(6,7)

表 1에서와 같이 manometer의 水位差와 深層曝氣裝置의 水位差에 의하여 測定된 上·下向管의 氣泡滯留量은 下向管에서 0.65-9.31이고 上向管에서 10.5-28.81이었다. 또 實驗範圍에서 上向管과 下向

管의 氣泡滯留量 百分比는 3.1-10.5 이었으며 上·下向管의 氣泡滯留量에 기인한 水頭差는 51.1-441.7 cm로 測定되었다. 따라서 本 實驗裝置에서 液體의 循環이 가능하려면 上·下向管의 氣泡滯留量比가 3.1, 氣泡滯留量에 기인한 水頭差가 51 cm 이상이 되어야만 한다.

本 實驗裝置에서 下向管 注入空氣量이 증가하면 下向管에서의 氣泡滯留量은 증가하는 現象을 나타낸다. 이는 Hemming의 研究結果⁽⁸⁾와 一致하는 것으로서 下向管 注入空氣量이 증가하면 下向管에서의 氣泡 發生量이 많아지고 氣泡의 密度가 높아 氣泡 合體現象에 의한 氣泡의 浮上力이 증가되기 때문이다.

一般的으로 循環式 氣泡塔의 液體흐름에 있어서 分散特性은 Peclet number (Pe)의 逆數인 分散數 (Dispersion number)로 나타난다.

Levenspiel⁽⁹⁾에 의하면, 分散數에 따라 液體의 흐름形態를 프러그흐름 (Plug flow)과 完全混合流 (Co-

mplete mixing flow)로 구분하고 있다. 本 實驗裝置에서의 分散數는 應踏曲線으로 부터 分散 (Variance, σ^2)을 解析하여 測定하였다. 表 1에서와 같이 下向管 上部에서 上向管 上部까지의 分散數는 $(16.2 - 28.9) \times 10^{-4}$ 이었다. 이 중 下向管에서의 分散數는 $(6.1 - 12.1) \times 10^{-4}$, 上向管에서의 分散數는 $(9.8 - 16.8) \times 10^{-4}$ 로서 液體의 흐름은 프러그 흐름에 가까운 分散흐름임을 알 수 있다.

3.2 酸素傳達

3.2.1 溶存酸素濃度

本 研究에서는 深層曝氣裝置에서의 酸素傳達特性和 酸素供給量을 把握하기 위하여 水深別 溶存酸素濃度を 測定한 結果, 最大 溶存酸素濃度は 下向管 注入空氣量이 8.3 l/min, 上向管 注入空氣量이 50 l/min 인 경우에 水深 105 m에서 28.9 mg/l 이었으며 最大 水深에서 最小 溶存酸素濃度は 下向管 注入空氣量이 1.7 l/min, 上向管 注入空氣量이 50 l/min 인 경우에 18.9 mg/l 이었다. 또 水深이 10 m씩 증가할 경우에 溶存酸素濃度は 0.3-3.3 mg/l 정도 증가하고 下向管 注入空氣量이 2배씩 증가하면 氣-液 接觸面積의 증가에 起因하여 最大 溶存酸素濃度は 2.1-3.2 mg/l 정도씩 증가하는 것으로 나타났다. 반면, 最小 溶存酸素濃度は 深層曝氣裝置의 最上部에서 13.0 mg/l로 측정되었다.

그러나 深層曝氣裝置는 曝氣液이 連續循環되는 工程이므로 注入空氣量, 氣-液 接觸時間, 循環時의 壓力變化에 의한 酸素의 溶解과 脫氣 등의 影響을 받기 때문에 平衡狀態의 溶存酸素濃도까지 到達할 수 없었다.

水深 105 m인 本 實驗裝置와 水深 32 m인 U型管 深層曝氣裝置에서의 最大 溶存酸素濃도를 비교하면, 本 實驗裝置는 29.8 mg/l, U型管 深層曝氣裝置는 20.2 mg/l로서 最大 溶存酸素濃度は 水深에 比例하여 증가하지 않는다. 이는 循環流速의 差에 기인한 氣-液 接觸時間의 變化에 의한 것으로 U型管보다 同心二重管 深層曝氣裝置가 循環流速이 빠르고 한 斷面에서의 氣-液 接觸時間이 작아 溶存酸素濃도가 낮다. 그렇지만 同心二重管型은 循環流量이 많으므로 供給되는 溶存酸素量은 더 클 것으로 判斷된다.

3.2.2 酸素傳達特性

本 深層曝氣裝置의 酸素傳達特性을 把握하기 위하여 總括酸素傳達係數, 酸素傳達速度, 酸素溶解效率, 酸素傳達效率 등을 表 2에 나타내었다.

酸素傳達의 速度係數를 나타내는 總括酸素傳達係數는 完全混合 反應槽인 경우에 아황산나트륨(Na_2SO_3) 實驗法에 의하여 구할 수 있으나 프러그흐름인 경우에는 앞 區間에서 曝氣된 溶液이 測定區間에 影響을 미치므로 實驗에 의하여 測定하기 어렵다.

따라서 本 研究에서는 測定된 溶存酸素濃度, 循環流速, 分散數 등의 資料와 分散모델로부터 總括酸素傳達係數를 算出した 結果, 表 2에서와 같이 總括酸素傳達係數(K_{La})는 306-633 hr^{-1} 로서 一定 下向管 空氣量에서 上向管 注入空氣量이 많아질수록 증가하는 傾向을 보이며 一定 上向管 空氣量에서 下向管 注入空氣量이 많을수록 증가한다.

한편, 32 m의 U型管 深層曝氣裝置⁽¹⁰⁾에서 下向管 注入空氣量이 1-4 l/min인 경우에 總括酸素傳達係數는 59.0-174.7 hr^{-1} 이라 하였다. 本 同心二重管型 深層曝氣裝置에서의 總括酸素傳達係數를 비교하면 本 實驗裝置가 매우 우수하다. 이는 下向管의 流速差에 의한 表面再生率과 氣-液 接觸面에서의 分散係數差에 의한 것으로서 同心二重管型은 下向管 流速이 빨라 表面再生率과 分散係數가 U型管보다 크기 때문이라 思料된다.

深層曝氣裝置는 水中의 飽和溶存酸素濃도를 높여 酸素傳達 推進力을 증가시키고 下向管에서는 氣泡과 液體가 下降하는 형태의 흐름을 택하므로 氣-液 接觸時間을 증가시켜 높은 酸素傳達效率을 얻는 曝氣裝置이다. 따라서 本 實驗裝置에서 空氣量에 따른 酸素傳達速度를 計算한 結果, 酸素傳達速度는 最小 1.96 $\text{kg-O}_2/\text{m}^3 \cdot \text{hr}$, 最大 8.78 $\text{kg-O}_2/\text{m}^3 \cdot \text{hr}$, 平均 4.97 $\text{kg-O}_2/\text{m}^3 \cdot \text{hr}$ 로서 一般 散氣式 曝氣裝置의 0.1-0.2 $\text{kg-O}_2/\text{m}^3 \cdot \text{hr}$ 보다 10배 정도 높다.

注入空氣量에 따른 酸素傳達速度는 氣-液 接觸時間과 面積에 起因하여 下向管 空氣量이 증가할수록 증가한다. 또 대체적으로 上向管 空氣量이 증가할수록 酸素傳達速度는 증가하는 것으로 되어 있다.

Robinson 등⁽¹¹⁾은 水深 60 m의 U型管 深層曝氣裝置에서 酸素傳達速度가 1.5 $\text{kg-O}_2/\text{m}^3 \cdot \text{hr}$ 이었다고 報告하였으며, 金 등⁽¹⁰⁾은 水深 32 m의 U型管 深層曝氣裝置에서 酸素傳達速度는 1.5 $\text{kg-O}_2/\text{m}^3 \cdot \text{hr}$ 라고

表 2. Oxygen transfer Characteristics in deep shaft system

Air flow rate (l/min)		Overall oxygen transfer	Oxygen transfer rate	Oxygen dissolution efficiency (%)	Oxygen transfer efficiency (kg-O ₂ /kWh)
downcomer	riser	coefficient (hr ⁻¹)	(kg-O ₂ /m ³ ·hr)		
1.7	20	323	2.49	47.1	4.18
	30	306	1.95	44.6	3.96
	40	361	2.10	52.7	4.67
	50	398	2.03	58.0	5.15
3.3	20	379	4.21	28.5	2.45
	30	433	4.21	32.5	2.80
	40	508	4.62	38.1	2.80
	50	535	4.29	40.2	3.46
5.0	30	456	5.66	22.6	1.96
	40	574	6.77	28.0	2.47
	50	632	6.77	31.3	2.73
6.7	40	517	7.40	19.0	1.67
	50	629	8.24	23.2	2.03
8.3	50	573	8.78	17.1	1.48
average		—	4.97	34.5	3.02

하였다. 그러나 本 深層曝氣裝置에 있어서 酸素傳達速度는 4.97 kg-O₂/m³·hr로서 Robinson이나 水深 32 m의 U型管 深層曝氣裝置에 비하여 매우 높게 나타났다. 이는 總括酸素傳達係數에서 考察한 바와 같이 同心二重管 深層曝氣裝置가 U型管 深層曝氣裝置에 비하여 水深이 깊어 酸素傳達을 위한 推進力과 表面再生率의 증가에 의해 總括酸素傳達係數가 높기 때문이다.

한편, 水中의 酸素溶解는 總括酸素傳達係數와 溶液中的 飽和濃도에 따라 變化되며 酸素溶解效率는 總括酸素傳達係數와 飽和溶存酸素濃도에 關係되므로 水深이나 空氣量에 따라 다르다.

本 深層曝氣裝置의 酸素溶解效率를 注入空氣量에 따라 구한 結果, 表 2에서와 같이 酸素溶解效率는 最大 58.0%, 最小 17.1%, 平均 34.5%이었다. Ishimaru 등⁽¹²⁾이 水深 15.9 m, 管徑 10 mm의 二重管型 深層曝氣裝置에서 注入 空氣量 10 l/min 일 경우에 最大 酸素溶解效率가 6.6% 정도 되었다고 하였으며, 水深 32 m인 U型管 深層曝氣裝置⁽¹⁰⁾에서의 酸素溶解效率는 17.3-6.1%로서 本 實驗裝置에 비하여 水深에 의한 氣-液 接觸時間이 짧기 때문에 낮게 나

타났다.

注入空氣量에 따른 酸素溶解效率를 살펴보면, 下向管 空氣量이 증가할수록 酸素溶解效率는 감소되는 傾向을 나타내고 있다. 이는 下向管 空氣量이 증가할수록 酸素溶解效率에 影響을 주는 酸素傳達速度和 氣-液 接觸面積도 空氣量에 比例하여 증가되지 않기 때문이라 判斷된다.

酸素傳達效率는 空氣 壓縮機의 電力消費量에 대한 酸素傳達量으로서 酸素供給을 위한 動力을 구하면 酸素傳達速度로 부터 구할 수 있다.

酸素供給을 위한 動力과 酸素傳達速度를 이용하여 酸素傳達效率를 計算한 結果, 表 2에서와 같이 酸素傳達效率는 最小 1.48 kg-O₂/kW·hr, 最大 5.15 kg-O₂/kW·hr이며 平均 酸素傳達效率는 3.02 kg-O₂/kW·hr로서 下向管 空氣 注入量이 적을수록 높게 나타났다.

반면, 一般 散氣式 曝氣裝置에서 酸素傳達效率는 1.8 kg-O₂/kW·hr 정도이나 Robinson의 研究⁽¹¹⁾에 의하면 水深 60 m의 深層曝氣裝置에서 酸素傳達效率는 2.4 kg-O₂/kW·hr이었으며 水深 32 m인 U型管 深層曝氣裝置⁽¹⁰⁾에서 酸素傳達效率는 2.24 kg-O₂/

kW·hr 정도라고 하였다. 本 實驗裝置에 있어서 酸素傳達效率은 3.02 kg-O₂/kW·hr로서 水深 60 m와 水深 32 m 인 U型管 深層曝氣裝置에 비하여 매우 높다. 이는 同心二重管型 深層曝氣裝置가 U型管에 비하여 總括酸素傳達係數 및 酸素溶解效率이 높기 때문이라 判斷된다.

3.3 有機物 除去特性

3.3.1 製紙廢水의 水質特性

本 研究에서 深層曝氣 活性슬러지法으로 處理하고자 하는 廢水는 現在 標準 活性슬러지法으로 處理하고 있는 製紙廢水의 1차 處理水로서 水質을 分析한 結果는 表 3과 같다.

表 3. Influent water quality of deep shaft activated sludge process

	Total	Soluble
BOD ₅ (mg/l)	441	414
BOD _U (mg/l)	814	762
COD _{Cr} (mg/l)	781	751
COD _{Mn} (mg/l)	272	256
TOC (mg/l)	270	231
Temperature (°C)	35	35

表 3에서 T-BOD₅는 441 mg/l, T-COD_{Cr}은 781 mg/l, T-COD_{Mn}은 272 mg/l 정도로서 本 製紙廢水는 대부분 溶解性 有機物로 존재하며 流入廢水의 水溫이 높고 營養閏類가 적게 포함되어 있다.

한편, 微生物에 의하여 廢水中的 有機物이 除去되는 速度를 相對評價하기 위해 常數로 표현되는 脫酸素係數를 測定한 結果, T-BOD와 S-BOD 모두 0.05 d⁻¹ 정도 이었다. 生活下水의 脫酸素係數는 대개 0.3-0.5 d⁻¹ 정도인데 本 研究對象 試料는 生活下水보다 10배 정도 적게 나타난다. 이는 生物學的으로 쉽게 分解되지 않는 物質, 즉 리그닌과 脫墨劑 및 界面活性劑와 같은 化學物質이 포함되어 있기 때문이라 判斷된다. 따라서 높은 有機物 除去效率을 얻기 위해서는 生物學的 難分解性 物質인 리그닌과 化學物質을 먼저 除去하거나 微生物과의 接觸時間을 길게하여야 할것이라 思料된다. 그러므로 本 製紙廢水의 生物學的 處理에 있어서 BOD物質은 除去되지만 化學物質은 分解가 어려워 COD의 除去效

率은 낮을 것으로 豫測된다.

3.3.2 曝氣槽내 微生物濃度에 따른 有機物 除去效率

深層曝氣 活性슬러지法은 酸素供給을 원활하게 하여 曝氣槽內的 微生物濃度를 높게 유지시킬 수 있는 生物學的 處理工程이다. 本 研究에서는 深層曝氣 活性슬러지法을 이용하여 下·廢水를 處理하는데 있어서 設計와 運轉의 基礎資料로 활용하고자 實驗條件에서 最低의 空氣注入量인 下向管 注入空氣量이 1.7 l/min, 上向管 注入空氣量이 20 l/min, 流入流量이 6.0 l/min 범위내에서 曝氣槽內 微生物濃度에 따른 BOD除去效率을 그림 2에 나타내었다.

그림 2에서 보는 바와 같이 深層曝氣 活性슬러지法에서 曝氣槽內 MLSS濃度가 약 6,000 mg/l까지는 曝氣槽內 微生物이 酸素에 의하여 制限을 받지 않고 增殖할 수 있으므로 MLSS濃度增加에 따라 BOD除去效率이 증가되며 MLSS濃度가 6,000 mg/l 이상에서는 曝氣槽內 微生物이 酸素에 의하여 制限 成長되므로 MLSS濃度가 증가할수록 BOD除去效率은 감소된다.

따라서 實驗範圍內에서 本 實驗裝置의 最適 曝氣

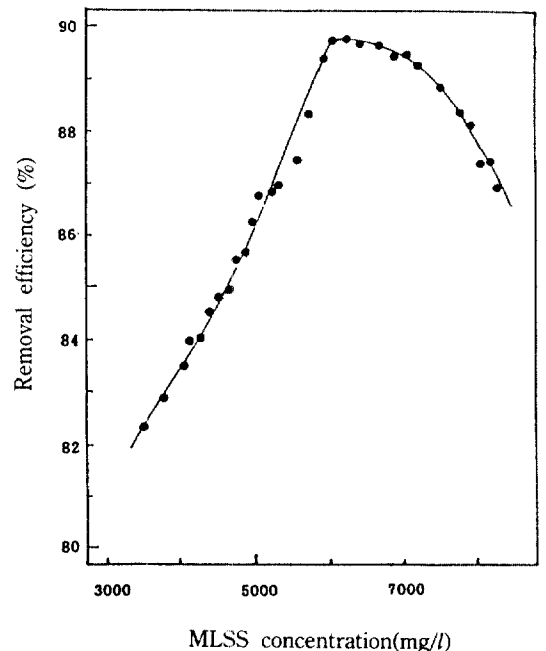


그림 2. BOD removal rate according to MLSS concentration in aeration tank

槽內 MLSS濃도는 6,000 mg/l 정도로서 다른 曝氣方法보다 2-3배 높게 維持할 수 있다. 그러므로 深層曝氣 活性슬러지法은 曝氣槽內 微生物 濃도가 높아 高濃度 有機性 廢水의 處理가 가능하고 많은 量의 廢水를 處理할 수 있으므로 經濟的인 下.廢水의 生物學的 處理工程이라 判斷된다.

3.3.3 水理學的 滯留時間에 따른 除去效率

本 研究에서는 深層曝氣 活性슬러지 曝氣槽內 微生物 濃도를 6,000 mg/l 정도 維持한 狀態에서 廢水의 水理學的 滯留時間을 變化하여 實驗하였는데 BOD와 COD의 除去效率를 그림 3에 圖示하였다.

그림 3에서 보는 바와 같이 反應槽內 廢水의 水理學的 滯留時間이 4.6時間인 경우에 BOD除去效率는 90.8%, COD除去效率는 70%이었다. 水理學的 滯留時間이 2時間인 경우에 BOD除去效率는 88%, COD除去效率는 50%이었으며 廢水의 水理學的 滯留時間이 1時間인 경우에는 BOB가 56%, COD가 13% 除去되었다. 한편, 滯留時間 7.5時間, MLSS濃度 2,500mg/l인 標準 活性슬러지法으로 本 製紙廢水를 處理할 경우에 BOD除去效率는 80-90%, COD除去效率는 50-60%을 얻을 수 있다, 반면 本 研究對象인 製紙廢水를 深層曝氣 活性슬러지法에 의하여 處理할 경우, 90% 정도의 BOD의 除去效率를 얻으려면 反應槽內 廢水의 滯留時間을 2時間 이상 維持하면

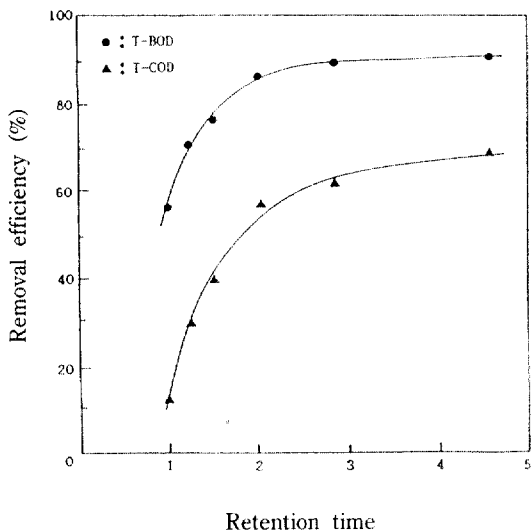


그림 3. Removal efficiency for paper mill wastewater according to hydraulic retention time

가능하다. 따라서 深層曝氣 活性슬러지法은 標準 活性슬러지法보다 짧은 滯留時間에서 높은 有機物 除去能力을 나타낸다.

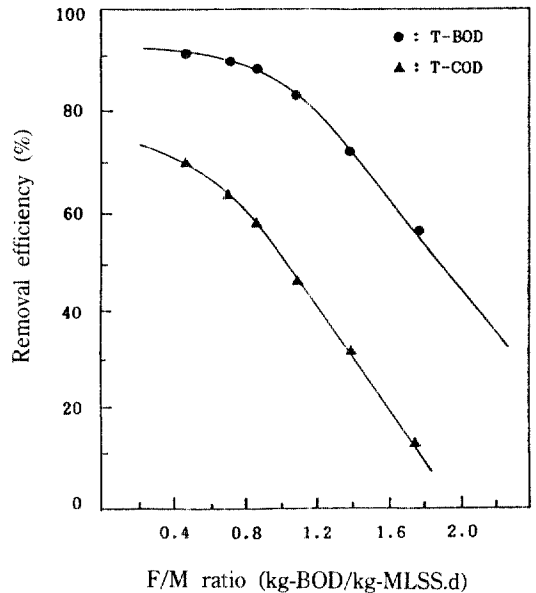


그림 4. Removal efficiency of paper mill wastewater according to F/M ratio

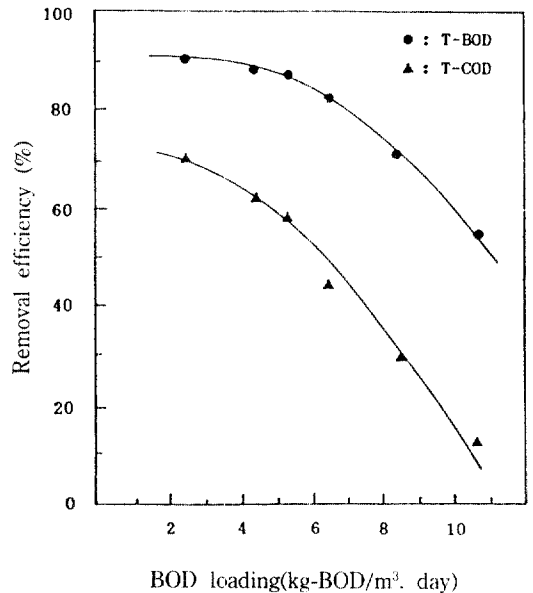


그림 5. Removal efficiency of paper mill wastewater according to BOD loading rate

3.3.4 有機物 負荷에 따른 除去效率

深層曝氣 活性슬러지法을 이용하여 製紙廢水를 處理할 경우에 有機物 負荷에 따른 製紙廢水의 有機物 除去特性을 把握하고 深層曝氣 活性슬러지法의 設計와 運轉條件을 提示하기 위하여 F/M比에 따른 BOD와 COD除去效率를 그림 4에, BOD容積負荷에 따른 BOD와 COD除去效率를 그림 5에 표시하였다.

그림 4에서 F/M比(kg-BOD/kg-MLSS·day)가 0.5 일 경우에 BOD除去效率는 90%, COD除去效率는 70% 정도이며, F/M比가 0.9일 경우에 BOD除去效率는 88%, COD除去效率는 58% 정도이다. 또 F/M比가 1.4일 경우에는 BOD除去效率가 71%, COD除去效率가 30% 정도로서 급격히 低下된다.

그림 5에서 보는 바와 같이 BOD容積負荷(kg-BOD/m³·day)가 5.5 이하인 경우에 BOD除去效率는 88%, COD除去效率는 58% 이상을 얻을 수 있다. 또 BOD容積負荷가 10으로 증가하면, BOD除去效率는 56%, COD除去效率는 13.2%로 製紙廢水中의 難分解性 物質의 蓄積과 未分解 有機物量의 증가에 의해 處理效率가 급격히 낮아진다. 따라서 BOD除去效率를 85% 이상 얻으려면, F/M比는 1.0 kg-BOD/kg-MLSS·day, BOD容積負荷는 6.0 kg-BOD/m³·day 이하가 되어야 한다.

深層曝氣 活性슬러지法과 標準 活性슬러지法에서 BOD除去效率가 85% 이상일 경우의 有機物 負荷를 비교하면, 本 實驗裝置의 F/M比는 標準 活性슬러지法에 비하여 약 3배, BOD容積負荷는 약 8배 이상으로 運轉可能하다. 이와 같이 曝氣槽內 有機物 負荷를 높게 유지할 수 있으므로 高濃度 有機性 廢水의 處理가 가능하며 單位容積當 有機物 除去量이 많아 曝氣槽 所要容積을 줄일 수 있다.

4. 結 論

效率적이고 經濟적인 製紙廢水의 生物學的 處理 方法과 曝氣槽의 容積을 減少시켜 土地利用率을 높일 수 있는 새로운 生物學的 處理工程의 開發이 必要하게 되어 外徑 100 mm, 內徑 50 mm, 水深 105 m인 同心二重管型 深層曝氣 活性슬러지法의 Pilot plant를 建設하여 연구한 結果는 다음과 같은 結論을 얻었다.

1) 下向管의 液體下降速度는 52-119 cm/sec, 上向管의 液體上昇速度는 19-43 cm/sec로서 下向管의 液體循環流速이 50 cm/sec 이상이 되어야 液體循環이 可能하였다.

2) 上向管의 氣泡滯留量은 10.5-28.8 l, 下向管의 氣泡滯留量은 0.65-9.3 l로서 氣泡滯留量比가 3.1, 氣泡滯留量에 의한 水頭差가 51 cm 이상이 되어야 液體循環이 可能하였다. 또 液體흐름은 프러그흐름에 가까운 分散흐름이다.

3) 深層曝氣裝置에서 最大 溶存酸素濃度는 28.9 mg/l, 酸素傳達速度는 平均 4.97 kg-O₂/m³·hr, 酸素溶解效率는 平均 34.5%, 酸素傳達效率는 平均 3.02 kg-O₂/m³·hr로서 一般 散氣式 曝氣裝置보다 매우 높게 나타났다.

4) 深層曝氣 活性슬러지法에서 最適의 曝氣槽內 微生物 濃度는 6000 mg/l 정도이며, 2時間 정도의 水理學的 滯留時間에서 製紙廢水 BOD는 90%, COD는 60% 정도 除去된다. 이때 F/M比는 1.0 kg-BOD/kg-MLSS·day, BOD 容積負荷는 6.0 kg-BOD/m³·day이었다.

감사의 말

본 연구는 1990년도 한국학술진흥재단의 연구비 지원에 의해 수행하였던 연구의 일부이며, 동 재단에 감사를 표한다.

參 考 文 獻

1. Hemming, M. L., "General Biological Aspects of Wastewater Treatment Including the Deep-Shaft Process", *Wat. Pollut. Control*, 1987, PP.312-325.
2. Hashimoto, S., Fujimoto, T., Kawasugi, T. and Toriyama, A., "深層曝氣法의 研究와 歷史的 展望", *環境技術*, VOL.15, NO.11, 1988, PP.837-839.
3. Bolton, D. H., Hines, D. A. and Bouchard, J. P., "The Application of the ICI Deep Shaft Process to Industrial Effluent", *31th Industrial Waste Conference, Purdue University Lafayette*, 1976, PP. 344-351.
4. Cox, G. C., Lewin, V. H., and Brignal, W. J., "Use of the Deep-Shaft Process in Uprating and Extending Existing Sewage-Treatment Works", *Wat.*

- Pollut. Control*, 80, 1980, PP.70-86.
5. Pöpel H.J., "Aeration and Gas Transfer", 1976, PP.120-121.
 6. 金煥起, 安松燁, 鄭泰燮, "生物學的流動層을 이용한 廢水處理에 있어서의 深層曝氣裝置에 의한 酸素傳達 시스템", *大韓土木學會論文集*, VOL.8, NO.1, 1988.4, PP.13-24.
 7. 金煥起, 梁奉龍, "深層曝氣裝置에 있어서 氣包의 形態와 舉動", *大韓土木學會論文集*, Vol. 9, No. 4, 1989.12, PP.135-143.
 8. Hemming, M. L., Ousby, J. C., Ploweright, D. R. and Walker, J., "Deep Shaft"-Lastest Position, *Wat. Pollut. Control*, 1977, PP.441-451.
 9. Levenspiel, O., "*Chemical Reactor Engineering*", 2nd, Wny, 1972.
 10. 金煥起, 梁奉龍, "深層曝氣 活性슬러지法の 酸素傳達特性에 관한 研究", *韓國水質保全學會誌*, 第7卷, 第2號, 1991.5, PP.119-128.
 11. Ishimaru, K., Frenk, M., "The Pilot Plant Treatment of Swine Wastes by the Deep Shaft Method", *38th Industrial Waste Conference, Purdue University Lafayette*, 1983, PP.163-172.
 12. Robinson, A. S., Cowen, R., "Design and Construction Features of the Second Generation Tilbury Deep-Shaft Plant", *Wat. Pollut. Control*, 1985, PP. 515-522.

(接受: 1992. 1. 31)