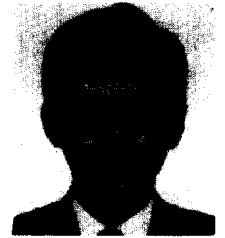


미생물을 이용한 폐수처리



環境處 國立環境研究所 水質研究部 宋 準 相

1. 緒 論

一般的으로 産業廢水 및 生活下水의 生物學的 處理에 關係하는 微生物의 種類는 約 1,000~2,000種에 이르는 것으로 推定된다. 이와 같은 微生物의 範圍는 매우 넓어서 細菌, 菌類는 勿論이고, 藻類, 原生動物, 後生動物까지 包含한다(1-7).

19世紀 以前에 微生物을 利用한 廢下水 處理는 生活下水와 같이 쉽게 分解하는 物質로만 構成되어 있기 때문에 簡單한 處理 工程으로도 充分히 運營되었으나(1), 産業革命 以後 새로운 化學物質이 合成되어 廢下水로 排出되므로 處理效率를 達成하는데 더욱 어렵게 되므로 微生物을 專攻한 專門人力의 役割이 가일층이 높아지게 되었다. 특히 1970年代 以後에는 生物工學 技法을 利用하여 毒性 有害物質을 無害化(Detoxification)하고, 鑛物化(Mineralization)할 수 있는 微生物 菌類를 研究 開發하여 廢水나 廢棄物을 處理하는데 活用코자하는 努力이 活潑히 進行되고 있으며 一部는 큰 結實을 맺은 것도 있지만 아직도 研究가 進行 중인 분야가 더 많은 편이다(6).

그러므로 本 稿에서는 지금까지 研究 報告된 結果와 앞으로 微生物을 專攻한 우리들이 나아갈 方向을 제시코자 한다.

2. 微生物을 利用한 廢下水 處理

가. 處理 機轉

微生物에 의한 處理 機轉은 微生物의 異化作用(Catabolism)과 同化作用에 의하여 이루어 진다. 異化作用이란 汚染物質인 有機物質을 슬러지 微生物이 分解하면서 에너지를 얻어 生存하는 것을 말하며, 同化作用은 슬러지 微生物이 有機物質을 吸

收하여 自己細布로 增殖하는 作用을 말한다. 그러므로 異化作用에 의하여 汚染物質은 好氣性 分解時에는 CO_2 와 H_2O , NH_3 등이 生成되며, 嫌氣性 分解時에는 CH_4 , CO_2 , 有機酸, 알코올 등이 生成된다. 同化作用에 의하여 슬러지 微生物의 量은 增加하므로 生物學的 處理시 剩餘 슬러지는 除去하여야 한다.

◦ 好氣性 處理 時

廢下水 有機物質 + O_2 $\xrightarrow{\text{好氣性 微生物}}$ $CO_2 + N_2O$
+ NH_3 + Energy + 細胞

◦ 嫌氣性 處理 時

廢下水 有機物質 $\xrightarrow{\text{嫌氣性 微生物}}$ $CH_4 + CO_2$ +
有機酸 + 알코올 + 에너지 + 細胞

微生物을 利用한 廢水處理에는 純粹 培養된 微生物을 利用하지 않고 自然 發生的으로 增殖된 微生物群을 利用하는 것이 普通이다. 好氣性 處理에서는 處理槽에 공기 즉 酸素를 供給하는 方法에 따라 活性슬러지法, 微生物法, 및 酸化池 등의 3종류로 大別할 수 있다.

活性슬러지法の 瀑氣槽나 生物膜法の 反應槽에 增殖하는 微生物의 種類는 20~30種 以上으로 混合培養系를 이루고 있으며 하나의 작은 微生物 生態系를 構成하여 微生物 群集으로 生態系를 이룬 處理槽에서는 良好한 處理 效率를 나타내며, 不安定한 生態系를 이룬 微生物로 構成된 處理槽에서는 處理效率가 不良한 것이 普通이다.

그러므로 最近에는 自然 發生的인 微生物만을 利用하여 廢水處理를 依存하지 않고, 剩餘 슬러지의 生成을 最少化하면서, 毒性 有機物質을 分解하며, 단단히 flocc을 形成할 수 있는 微生物 菌株나 混合된 微生物 群集을 利用하여 廢水處理場의 運轉 管理도 簡便하게 하고자 하는 研究가 進行되고 있다. 즉

原廢水에 毒性物質이 들어 있어도 이를 쉽게 無毒化, 鑛物化하며 약간의 不適切한 運轉管理에서도 안정된 廢水處理 生態系를 維持할 수 있는 微生物에 대한 研究가 활발히 進行되고 있으며 一部는 實用化되어 市販되고 있다(26-28).

자의 研究院에서도 特定研究開發費의 支援을 받아 廢水處理 效率를 약 10~20% 증진시키며, 안정적인 生態系를 유지하는 微生物 菌株를 研究開發하여 현재 實用化시킨 바도 있다(26-28).

活性 슬러지법의 濕氣槽에서는 廢下水와 슬러지 微生物이 混合되어 曝氣(Aeration)하므로 廢下水中에서 含有되어 있는 汚染物質 주로 有機物質을 酸化하여 處理되고 微生物은 廢下水와 같이 흐르게 되므로 微生物 懸濁法이라고 한다. 活性 슬러지법은 200~1,000 micron 不定形의 微生物 덩어리(Floc)가 슬러지를 形成하며 이들 Floc은 주로 細菌이 凝集되어 있으며 이 周圍에 작고 微細한 原生動物이 固着되어 있다. 活性 슬러지법에서는 微生物과 廢下水가 같이 流動하므로 增殖速度가 느린 微生物 즉 世代 時間(Generation Time : 微生物의 個體數가 2 倍로 增殖하는데 걸리는 時間(td))이 2~5일 以上 所要되는 曝氣槽에 滯留하지 못하므로 씻겨 흘러나가게 되므로 增殖하지 못하나 이와 反對로 生物膜法에서는 微生物이 接觸材의 表面에 固着되어 增殖하므로 微生物의 滯留時間에 關係 없으므로 增殖速度가 느린 微生物인 藻類나 後生動物 등이 生物膜法에 增殖할 수 있으므로 一名 微生物 固定法이라고 한다.

나. 微生物을 利用한 廢下水 處理에 나타나는 微生物의 種類

表 1은 各種 微生物을 利用한 廢水處理에 出現하는 微生物을 比較하여 나타낸 것이다.

一般的으로 活性슬러지의 微生物이 生物膜보다 많은 種類가 나타나며 活性슬러지에는 주로 細菌과 纖毛蟲類(綠毛類, 下毛類 等)가 優占種으로 出現하며 微小 後生動物의 出現頻도는 적으나 生物膜에서는 이들 出現이 많다.

1) 細菌

細菌은 生態系의 構成要素 중 分解者로서, 自然系 物質 循環에서 清掃員으로 役割을 충실히 수행하고 있으며 특히 廢下水 處理에서는 細菌의 役割이 매우 重要하며 다음의 중요한 4가지 特徵을 가지고 있다.

表 1. 各種 微生物을 利用한 廢水處理에 出現하는 微生物의 比較

微生物의 種類	活性슬러지	生物膜	酸化池	嫌氣性消化
細菌	++++	++++	++++	++++
菌類	-	+++	+	-
藻類	+	++	++++	-
鞭毛蟲類	+++	+++	++	+
肉質蟲類	+++	+++	+	-
纖毛蟲類				
綠毛類	++++	++++	+	-
下毛類	+++	++	++	-
吸管蟲類	++	++	-	-
그밖의 纖毛蟲類	+++	+++	++	-
微小 後生動物				
輪蟲類	+	+++	+	-
線蟲類	++	++	+	-
貧毛類	+	++	-	-
그밖의 後生動物	+	++	++	-

++++ : 매우 많이 출현
 +++ : 많이 출현
 ++ : 보통 출현
 + : 드물게 출현
 - : 매우 드물게 출현
 : 출현하지 않음

첫째, 細菌은 代謝速度(Metabolic rate)가 빠르므로 各種 汚染物質을 쉽게 分解할 수 있다. 細菌은 高等物質에 비하여 크기가 작으므로 細胞 表面積이 매우 크므로 쉽게 營養分(汚染物質)을 吸收하고 排泄할 수 있으므로 代謝速度가 매우 빠르다.

둘째, 細菌은 增殖速度(Growth rate)가 매우 빠르다. 細菌은 世代時間(Generation time)이 짧아서 短時間에 많은 數로 增殖된다. 大腸菌은 世代時間이 약 15분 程度이므로 한 마리의 大腸菌은 24時間 後에는 약 10億마리로 增殖한다.

셋째, 代謝活性(Metabolic diversity)이 多樣하다. 즉 細菌은 炭水化物, 蛋白質, 脂肪과 같은 良質의 營養物質 뿐만 아니라 農藥, 플라스틱, 合成洗劑와 같은 毒性 有機物質 등도 分解하는 多樣的 食性을 가지고 있다.

네째, 細菌은 自然界에 널리 分布되어 있다. 미생물은 地球上의 어느 곳에도 存在하므로 汚染物質이 있는 곳에서는 充實한 清掃員으로의 役割을 隨

行할 수 있다.

이와 같은 細菌의 特性을 이용하여 廢下水 處理에서는 廢下水 중에 들어있는 汚染物質인 有機物質을 分解하고 無毒化하게 된다.

2) 菌類(Fungi)

通商의 生物學的 廢下水處理에는 菌類가 먼저 나타나지 않으며, 細菌의 增殖을 阻害하는 環境에는 細菌에 影響을 주어 代身 菌類의 增殖이 이루어진다. 따라서 産業廢水 또는 産業廢水가 多量으로 들어있는 都市下水의 微生物學的 處理 時에는 菌類의 增殖이 이루어지는 경우가 많은데 이 때에는 絲狀菌이 顯著하게 增殖하는 活性 슬러지의 沈降性이 나빠져서 슬러지 膨化現像이 일어나 廢水處理場의 運轉에 支障을 초래할 뿐 아니라 슬러지 處理費用도 많아지게 된다.

3) 藻類(Algae)

藻類는 光合成作用을 하므로 햇빛을 받는 부분에서 成長하게 된다. 藻類는 酸化池(Oxidation pond)에서는 酸素를 공급하고, 일부 有機物質을 分解하므로 매우 중요한 役割을 담당한다. 그러나, 活性 슬러지법에서는 거의 發生하지 않으며, 撒水濾床, 回轉圓板法과 같은 生物膜法(Biofilm process)에서는 슬러지의 滯留時間이 길기 때문에 햇빛을 받으면 藻類가 出現한다. 藻類는 營養鹽類를 攝取하고, 酸素를 供給하지만 汚染物質을 처리하는 側面에서는 별 效果가 없는 것으로 알려져 있다. 生物膜法에 出現하는 藻類는 圓板에 붙어서 成長하는데 특히 回轉圓板法에서는 햇빛을 받게되면 많은 量의 着生 藻類가 成長하여 圓板이나 回轉軸에 過負荷를 주어 處理場 運轉에 被害를 준다.

4) 原生運動(Protozoa)

原生動物은 細菌과 함께 廢下水 및 廢水處理에 중요한 役割을 擔當하는 微生物로서, 그 役割을 要約하면 다음과 같다.

첫째, 細菌의 Floc 形成을 促進하여 沈澱性을 높여 주어 處理水의 浮游物質의 濃度를 감소시킨다.

둘째, 原生動物은 細菌을 잡아먹어 슬러지 量을 減少시키고, 分散된 細菌을 除去한다.

세째, 原生動物은 주변의 細菌을 分泌物로 부착시켜 沈降性을 높여 沈澱速度를 높여준다.

네째, 原生動物은 飽食作用에 의하여 細菌의 數를 減少시키므로 새로운 細菌이 增殖하도록 領域을 넓

혀주고 細菌의 活性를 증식시킨다.

다섯째, 原生動物은 스스로 汚染物質을 吸收하여 處理한다.

여섯째, 原生動物은 運動性을 가지고 있으므로 Floc의 사이로 汚染物質이 쉽게 移動하도록 하여 處理되도록 한다.

일곱째, 原生動物은 細菌보다 커서 顯微鏡으로 쉽게 分類할 수 있으며, 處理 狀態에 따라 나타나는 優占種이 각기 다르므로 處理場의 運轉管理에 주요 指標가 된다.

原生動物은 鞭毛蟲類, 肉質蟲類, 纖毛蟲類로 나누며, 廢水나 廢下水의 生物學的 處理 時 주로 나타나는 原生動物은 纖毛蟲類이다. 纖毛蟲類는 다시 綠毛類, 下毛類, 吸管蟲類 등으로 區分된다.

5) 廢下水의 生物學的 處理와 슬러지 生成

그림 1은 有機性 廢水를 生物學的 處理 時 增殖되는 슬러지 微生物의 成長曲線(Growth curve)를 要約하여 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 廢水 中の 有機物質을 分解하며 成長하는 細菌이 增殖하게 된다. 이와 같은 細菌의 對數增殖期(1~2일)에서는 細菌의 個體가 分散되어 있고 Floc을 형성하지 않고 分散되어 있으므로 運動性이 강한 鞭毛蟲類(*Bodo*, *Oikomonas*, *Monas*)와 肉質蟲類가 增殖(3~4일)하게 된다. 이 때를 슬러지 生成 初期라 한다.

그 후 細菌의 增殖速度는 減少되고 增殖이 停止됨에 따라 작은 細菌의 Floc가 생기고, 單獨으로 움직이는 纖毛蟲類(*Colpodium*, *Paramecium*, *Litotus*)가 增殖하게 되어 슬러지 生成 中期(5~8일)

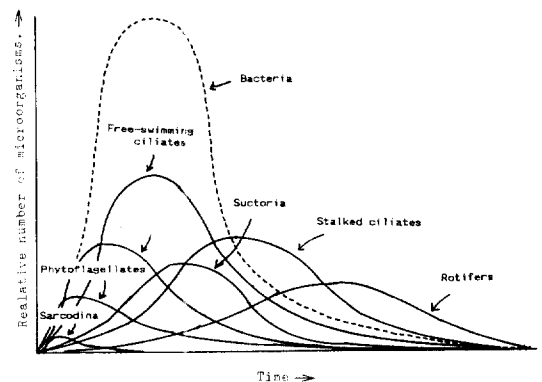


그림 1. 슬러지 微生物의 增殖曲線

에 이루게 된다.

그 후 細菌은 死滅期에 들어오면서 좀 더 단단하게 커다란 Floc이 생기게 되고 이 Floc에 붙어서 增殖하는 有柄固着性 纖毛蟲類인 *Vorticella*, *Carchesium*, *Opercularia*, *Epistylis* 등이 增殖하여 슬러지 生成이 끝나게 된다. 이 때에 맞추어 슬러지 日斷을 調節하여야 하며, 슬러지 滯留時間이 길게 되면 後生動物인 Rotifer, Nematoda 등이 자라게 된다. 그러므로 슬러지 滯留時間이 훨씬 길은 生物膜에서 後生動物을 쉽게 발견할 수 있다.

다. 廢下水 處理의 새로운 研究 開發 分野

1) 嫌氣性 處理와 메탄 成長

메탄 生成할 수 있는 細菌은 嫌氣性 狀態에서만 생존할 수 있는 *Methanobacterium*, *Methanosarcina*, *Methanococcus*, *Methanospirillum* 등(11-15)으로 다음의 3가지 制限要因이 있다.

① 鹽素에 대하여 毒性 反應을 나타냄으로 連續的으로 嫌氣性 處理가 어려우며, ② 窒素源으로 CO₂, 간단한 有機酸이나 알코올만 利用하고 炭水化合物, 脂肪, 纖維素, 糖 등은 이용하지 못하는 등 많은 制限要因이 있다.

그러므로, methane 生成에 관련된 遺傳子를 分離하여 生物工學的 技法을 利用하여 通性 嫌氣性 菌인 *E. coli*, *B. subtilis*에 移轉함으로 앞에서 기술한 制限要因을 없앴으로 연속적으로 効果적인 메탄을 生成할 수 있는 技術을 開發하는 分野이며, 미국에서는 이 분야에 막대한 研究費를 투자하고 있다.

2) 生物學的 脫窒, 脫磷 處理

脫窒 處理에 關여하는 細菌은 窒酸化菌인 *Nitrosomonas*, *Nitrobacter* 등과 脫窒菌인 *Pseudomonas*, *Achromobacter*, *Bacillus*, *Micrococcus* 등이 있으며, 窒酸化菌은 廢下水에 들어있는 有機窒素, 암모니아를 窒酸鹽으로 酸化시키며, 다음에 脫窒菌의 作用으로 窒酸鹽을 窒素가스로 轉換시키는 處理工程으로 이들 細菌의 活性을 증진시키므로 보다 높은 處理效率를 얻고자 하는 분야이다.

또한, 脫磷 處理는 廢下水에 들어 있는 각종 形態로 결합되어 있는 總磷을 嫌氣性 狀態에서 反應性 磷인 磷酸鹽 형태로 轉換시킨 후에 好氣性 狀態에서 磷을 잘 흡수하는 細菌인 *Acinetobacter* spp.의 作用으로 1970년대 이후 개발된 처리공법이며, 湖水의 富營養化 防止를 위하여 매우 중요한 處理技術이다.

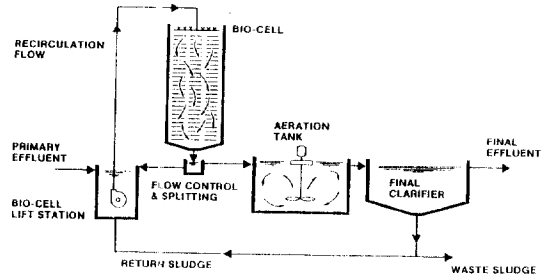


그림 2. Scheme of activated bio-filter system(Bio-cell 반응조가 추가된 공법)

3. 微生物을 이용한 環境汚染 防止 技術

가. 大氣汚染 防止와 微生物

1) 化石磷科 中の 脫黃 處理에 微生物의 利用
化石磷科에 약 7%의 硫黃 成分 含有되어 있으며, 硫黃 成分의 形態는 다음의 세 종류가 있다. ① 有機硫黃(R-S-S-R', R-S-R', R-O-SO₃) ② Pyritic sulfur(FeS)

③ 無機黃酸(SO₄²⁻)

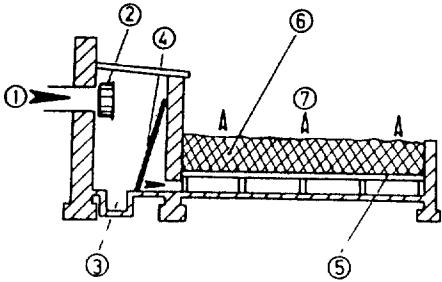
Thiobacillus ferrooxidans, *Thiobacillus thiooxidans*, *Desulfurivibrio sulfuricans*, *Thiospirillum* spp, *Thiodendron* spp, *Thiovolum* spp 등과 같이 黃을 利用할 수 있는 細菌을 利用하여 處理하는 方法으로 아직까지 實用化된 사례는 드물지만 微生物을 利用한 大氣汚染 防止技術의 開發 分野에서는 가장 중요한 位置를 차지하고 있다.

2) 微生物을 이용한 惡臭物質의 除去 技術의 開發

惡臭誘發物質은 揮發性인 aldehydes, mercaptans, aromatic compounds 등과 같은 有機化合物이므로 微生物의 mineralization할 수 있는 能力을 利用하여 처리하는 方法으로 다음의 두 種類가 있다.

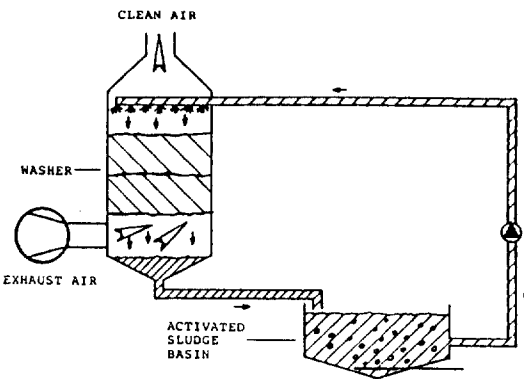
① Biofiltration method : 그림 3에서 보는 바와 같이 惡臭物質이 들어있는 排氣가스를 濾過塔에 통과시킴으로 濾材에서 增殖한 微生物에 의하여 제거하는 技術로서 지금까지 實用化된 技術인 Scrubbing, 活性炭 吸着法, 燒却法보다 2~10배 낮은 實用으로 처리할 수 있다.

② Bioscrubber method : 그림 3에서 보는 바와 같이 활성슬러지법을 惡臭物質제거에 활용하는 技術로서 다음의 3단계를 거쳐 處理된다.



① raw gas, ② blower, ③ pump sump, ④ dust filter, ⑤ boardwalk, ⑥ filter material, ⑦ clean gas

Design of Biofilter



Bioscrubber unit.

그림 3. 미생물을 이용한 惡臭除去

제 1단계는 氣體로 된 惡臭物質을 液體로 전환하는 工程(Washer : transportation process)이며, 제 2 단계는 惡臭物質을 微生物의 作用에 의하여 제거하는 工程(Activated sludge basin : degradation process)이다.

나. 生物工學 技法 利用한 難分解性 汚染物質의 微生物 菌株의 開發 分野

1) 油分解菌(Oil degrading bacteria)

海洋의 油類汚染에 의한 被害는 海洋 生態系의 變化와 더불어 養殖場의 水産物을 廢死시키는 등 막대한 피해가 발생한다. 그러므로 이와 같은 油類 汚染을 효과적으로 처리하기 위한 微生物을 利用한 新기술 개발이 1970년대부터 시작되었다. 이 방면의 효시는 單一微生物이 여러 種類 炭火水素를 유일한 탄소원으로 分解하는 能力을 가진 *Pseudomonas* strain을 연구하여 super-bug라고 명명한 A.M. Chakrabarty를 들 수 있다. 그러나, 이 菌株의 실용화를 위하여는 다음과 같은 制限點에 직면하게 되었다.

다량의 原油가 유출되는 오염사고가 발생하면 海洋 全域에 擴散되며, 原油에는 많은 炭素化合物로 構成되어 있으므로 微生物이 성장하는데 충분한 炭素源이 되지만 窒素와 磷과 같은 營養鹽類가 不足하므로 微生物에 의한 分解作用을 기대하기 힘들다 (16-18).

그러므로, 遺傳工學 技法이 開發되면서 窒素固定 能力을 가진 遺傳因子를 油 分解菌에 移轉한 새로운 菌株를 연구개발하거나, 乳化 酸素 生成을 다량으로 생성하는 能力을 가진 菌株를 연구개발하여 다량의 유화효소를 생산하여 현재 사용하고 있는 毒性이 강한 化學的 乳化劑 대신 사용하고자 하는 연구가 진행 중에 있다.

2) 難分解性 有機鹽素化合物 分解菌株의 研究 開發 分野

일반적으로 有機鹽素化合物은 毒性이 강하고 많은 種類의 異性體가 있기 때문에 같은 化學적인 特성을 가진 物質이라도 微生物은 분해하기도 하고 분해하지 못하기도 한다. 또한 분해력을 증진시키거나 새로운 Plasmid DNA를 접합한 새로운 菌株라도 分解 容易한 物質과 같이 存在할 경우에는 Chromosomal DNA의 대사작용이 활발해지므로 有機鹽素化合物을 分解하는 能力이 喪失되게 된다(21-25).

그러므로 難分解性 汚染物質을 분해하는 菌株를 연구개발 하는데는 遺傳子를 인위적으로 조작하는 것보다는 자연적으로 새로운 Plasmid를 생성하는 방법이 이용되고 있다. 美國의 유명한 環境遺傳子 學者인 A.M. Chakrabarty는 여러 菌株를 混合하여 연속배양하면서 분해하고자 하는 물질인 基質의 농도를 증가시키는 New Plasmid-breeding 技術을 이용하여 월남전의 Agent Orange로 유명한 2,4,5-Trichlorophenoxyacetic acid를 分解하는 菌株를 연구하여 *Pseudomonas cepacia* AC 1100라고 명명하였다(19). 그러나, 이와 같이 開發된 새로운 菌株의 安全性 評價되지 않으며 自然環境 즉 오염된 토양을 無毒化하는데 활용하지 못하고 있으며, 단지 廢棄物 處理場과 같이 菌이 自然界로 배출되지 않도록 한 후에야 그 활용이 가능하다.

4. 結 果

廢水나 廢棄物을 효과적으로 처리하거나 資源化

하여 再利用하는데 微生物의 生活을 제고시켜 인위적으로 菌株를 개발하여 활용하는 연구가 1970년대 이후 새로운 과제로 등장하게 되었다. 과거의 廢下水處理는 物理化學的인 處理條件을 맞추어 줌으로 자연히 增殖된 微生物을 이용하여 처리하였지만, 難分解性인 새로운 化學物質이 다량으로 배출되므로 處理限界에 도달하게 되었다.

그러므로 美國 등 先進國에서는 1970년대 이후, 우리나라에서는 1980년대 중반부터 微生物의 活性을 增殖시키거나 새로운 菌株를 개발하여 활용하고자 하는 연구가 활발히 진행되었다. 그러나, 아직도 廢下水 處理場의 處理效率를 增進시키는 微生物을 연구개발하여 보급된 것을 제외하고는 아직도 實用化되지 못하고 있다.

지금까지는 微生物學이나 遺傳工學을 전공한 學者들이 새로운 藥品이나 농축산 品種을 개발하는 분야에 주로 종사하였으며, 環境汚染 問題는 土木工學이나 分析化學을 전공한 사람들의 전유물로 간주되어 왔지만 단 하나뿐인 우리의 環境을 깨끗이 보전하여 자손대대로 물려주기 위하여는 微生物을 이용한 環境汚染 防止 技術개발에 많은 投資와 努力이 경주되어야 하겠다.

REFERENCES

1. Gray, H.F. 1940. Sewerage in ancient and medieval times. *Sewerage Works Journal* **12**, 939-46.
2. Hughes, D.E. 1977. Microbes and effluent treatment. in : *Treatment of Industrial Effluents*, eds. A.G. Calley, C.F. Forster & D.A. Stafford, pp. 1-6. London : Hodder & Stoughton.
3. Hawkes, H.A. 1965. The ecology of sewage bacteria beds. in : *Ecology and the Industrial Society*, Symposium of the British Ecological Society, eds. G.T. Goodman, R.W. Edwards & J.M. Lambert, pp. 119-48. Oxford : Blackwell Scientific.
4. Pike, E.B. & Curds, C.R. 1971. The microbial ecology of the activated sludge process. *Society for Applied Bacteriology Symposium* **1**, 123-48.
5. Leach, J.M., Mueller, J.C. & Walden, C.C. 1978. Biological toxification of pulp with effluents. *Process Biochemistry* **13**(1), 18-22.
6. Painter, H.a.(1978). Biotechnology of wastewater treatment. in : *The oil industry and microbial ecosystems*, eds. K.W.A. Chater & H.J. Somerville, pp. 178-98. London : Heyden and Sons.
7. Hawkes, H.A. 1978. The ecology of activated sludge. in : *The oil Industry and microbial Ecosystems*. eds. K.W.A. Chater & H.J. Somerville, pp. 217-33.
8. Barth, E.F., Brenner, R.F. 1968. Chemical biological control of nitrogen and phosphorus effluent. *Journal of water pollution control federation* **40**, 2040-54.
9. Howell, J.A. 1978. Alternative approaches to activated sludge and trickling filters. in : *The oil industry and microbial ecosystems*, eds. K. W.A. Chater & H.J. Somerville, pp. 199-216. London : Heyden and Sons.
10. Buhr, H.O. & Andrews, J.F. 1977. The thermophilic anaerobic digestion process. *Water Research* **11**, 129-43.
11. Bryant, M.P., Varel, V.H., Frobish, R.A. & Isaacson, H.R. 1976. Biological potential of thermophilic methanogenesis from cattle wastes. in : *Microbial energy conversion*, eds. H. G. Schlegel & J. Barnea, pp. 347-59. Göttingen : Erich Goltze.
12. Konstandt, H.G. 1976. Engineering, operation and economics of methane gas production. in : *Microbial energy conversion*, eds. H.G. Schlegel & J. Barnea, pp. 379-98. Göttingen : Erich Goltze.
13. Healy, J.B. & Young, L.Y. 1978a. Catechol and phenol degradation by a methanogenic population of bacteria. *Applied and environmental microbiology* **35**, 216-18.
14. Healy, J.B. & Young, L.Y. 1978b. Methanogenic biodegradation of aromatic compounds. in : *Microbial Degradation of Pollutants in Marine Environments*, eds. P.H. Pritchard & A.W. Bourquin. Washington ; United States Environmental Protection Agency(in press).
15. Thauer, R.K., Jungermann, K. & Decker, K. 1977. Energy conservation in chemotrophic anaerobic bacteria. *Bacteriological Reviews* **41**, 100-80.

16. van der Linden, A.C. 1978. Degradation of oil in the marine environment. in : Developments in biodegradation of hydrocarbons, vol. I. ed. R.J. Watkinson, pp.165-200. London : Applied Science.
17. Jamison, V.W., Raymond, R.L. & Hudson, J.O. 1969. Microbial hydrocarbon co-oxidation, III. Isolation and characterization of an α, α' -dimethyl-cis, cis-muconic acid-producing strain of *Nocardia corallina*. *Applied Microbiology* 17, 853-6.
18. Williams, P.A. 1978. Microbial genetics relating to hydrocarbon formation. in : Developments in biodegradation of hydrocarbons, vol. I, ed. R.J. Watkinson, pp.135-64. London : Applied Science.
19. Friello, D.A., Mylroie, J.R. & Chakrabarty, A. M. 1976. Use of genetically engineered multi-plasmid micro-organisms for rapid degradation of fuel hydrocarbons. in : Proceeding of the third international biodegradation symposium, eds. J.M. Sharpley & A.M. Kaplan, pp. 205-14. London : Applied Science.
20. Colby, J., Stirling, D.I. & Dalton, H. 1977. The soluble methane monooxygenase of *Methylococcus capsulatus*(Bath). *Biochemical Journal* 165, 395-402.
21. Chapman, P. 1976. Microbial degradation of halogenated compounds. *Biochemical society transactions* 4, 463-546.
22. Furukawa, K., Tonomura, K. & Kamibayashi, A. 1978. Effect of chlorine substitution in the biodegradability of polychlorinated biphenyls. *Applied and environmental Microbiology* 35, 223-7.
23. Johanides, V. & Hrsak, D. 1976. Changes in mixed bacterial cultures during linear alkylbenzenesulphonate(LAS) biodegradation. in : Fifth international symposium on fermentation, ed. H. Dellweg, p.426. Berlin : Westkreuz.
24. Baggi, G., Beretta, L., Galli, E., Scolastico, C. & Treccani, V. 1978. Biodegradation of polyoxyethylene alkylphenols. in : The oil industry and microbial ecosystems, eds. K.W.A. Chater & H.J. Somerville, pp. 129-36. London : Heyden and Sons.
25. 徐胤洙, 宋準相 등. 1986. 環境汚染物質處理 菌株開發에 관한 研究, NIER No. 86-13-179.
26. 徐胤洙, 宋準相 등. 1986. 環境汚染物質處理를 위한 生物工學的 研究(I), 科學技術處
27. 徐胤洙, 宋準相 등. 1987. 環境汚染物質處理를 위한 生物工學的 研究(II), 科學技術處
28. 徐胤洙, 宋準相 등. 1988. 環境汚染物質處理를 위한 生物工學的 研究(III), 科學技術處