

〈下水道심포지엄 特輯〉

嫌氣性反應의 生化學的 原理에 관하여

서울市立大學 工學部 教授

金 東 玟

1. 序 論

嫌氣性反應은 오래 前부터 廢水슬러지와 糞尿의 消化에 適用되오고 있으며, 最近에는 一般 廢水處理에도 適用하려는 研究가 試圖되고 있다. 그리고 이 分野의 科學的 知識은 지난 10 餘年 間에 刮目할만하게 넓혀졌다. 이 機會에 複合有 機物質의 嫌氣性反應에 관하여, 그 生化學的 基礎理論의 첫 部分을 既存 文獻을 정리하여 紹介 한다.

2. 嫌氣性反應의 特性

1970年代에 2次에 걸친 世界 에너지 危機를 經驗한 後, 廢水處理分野에서는 嫌氣性反應의 效率向上에 관하여 활발한 研究가 推進되고 있다. 이미 알려진 바와 같이, 好氣性處理에서는 曝氣用에너지가 所要되며, 流入基質의 40% 정도가 細胞物質로 轉換되는 까닭에 剩餘슬러지의 處分이라는 課題가 뒤 따른다. 그러나, 嫌氣性處理에서는 曝氣가 不必要하며, 好氣性의 경우와는 달리, 流入基質의 90% 이상을 有價가스로 그리고 5% 정도 만을 細胞物質로 轉換시킬 수 있는 長點이 있다. 反面에 嫌氣性方法에는 긴 反應時間, 酸生成相과 메탄生成相간의 反

應差異에서 오는 運轉困難, 냄새發生 등의 短點이 있으며, 이 때문에 그 工法이 忌避되어 왔다.

嫌氣性方法에 증사하는 微生物의 物質代謝를 살펴볼 때, 主된 異化作用은 發酵이다. 葡萄糖의 發酸反應 例에서 보듯이, 發酸反應에 있어서의 ATP 生産量은 好氣性呼吸의 1/20 정도 밖에 되지 않으며, 最初基質의 많은 部分은 아직도 에너지含有度가 높은 物質로 1次轉換된다. 同化作用, 즉 細胞合成에서는 異化作用에서 生産된 ATP 형태의 에너지를 使用하므로 嫌氣性反應에 증사하는 細菌의 增殖速度는 好氣性細菌의 경우에 比하여, 이와같이 構造的으로 훨씬 낮은 수 밖에 없다.

嫌氣性細菌의 낮은 增殖速度는 廢水處理과 관련하여 두가지 點에서 중요하다. 첫째로, 反應槽에 適正濃度の 細菌을 維持하면서 流入基質을 代謝시키려면 滯留期間이 길어야 한다. 둘째로, 細菌의 낮은 增殖速度는 窒素, 磷 등 營養物質의 所要量이 적음과 處分對象이 되는 剩餘 細胞 生産量이 적음을 뜻한다.

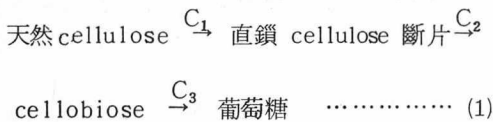
3. 複合有機物の 加水分解

嫌氣性反應槽에서 處理對象이 되는 流入基質

은 주로 炭水化物, 脂質, 蛋白質의 세가지이다. 이들을 炭水化物的의 경우 주로 纖維素, 半纖維素 澱粉 등의 複合高分子의 형태로 流入되며, 脂質과 蛋白質의 경우에도 비슷한 高分子의 형태로 流入된다(第4章의 4.1項參照). 그런데, 이러한 高分子物質이 細胞에 의하여 最終的으로 代謝되려면 먼저 물에 溶解되어 低分子로 分解되어야 한다. 따라서 그러한 基質에 대한 嫌氣性反應의 先行段階는 加水分解이며, 그러한 加水分解는 여러 細菌으로부터 각각 特異하게 分泌되는 細胞外酵素에 의하여 連鎖的으로 수행된다.

炭水化物質은 加水分解에 의하여 葡萄糖으로 分解되며, 脂質은 脂肪酸으로, 그리고 蛋白質은 아미노酸으로 分解된다. 이렇게 分解된 低分子物質은 細胞에 의하여 攝取된 後 異化 및 同化된다.

纖維素의 경우는 아래와 같이 3段階의 加水分解를 거쳐서 葡萄糖으로 轉換된다.¹⁾



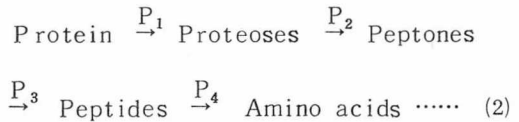
위에서 C₁, C₂, C₃는 각각 特異한 加水分解 酵素이다. 이렇게 分解된 葡萄糖이나 기타의 單糖類는, 細胞에 吸收되어 에너지供給을 위한 解糖經路를 거쳐서 피루브酸까지 中間分解된 後, 嫌氣性狀態에서 다시 여러 脂肪酸, 알데히드, 알콜, CO₂, H₂ 등 多様な 物質로 生成된다. 이때의 生成物質分布狀態는 pH, 溫度, 水素分壓 등 環境條件에 따라서 달라진다.

脂質은 주로 單純脂質로 구분되는데, 單純脂質에는 中性脂肪과 기름, 왁스가 포함되며, 複合脂質에는 磷脂質과 糖脂質이 포함된다.²⁾ 그리고 앞의 두가지 分類에 속하지 않은 前驅物質이나 代謝產物은 誘導脂質로 分類된다. 脂質중에서 가장 많은 것이 中性脂質인데, 이는 脂肪酸과 글리세롤의 에스테르이다. 脂肪酸은 C₁₄ 부터 C₂₂까지의 炭素數를 갖은 것이 많다.

脂質은 細胞外酵素인 Lipase에 의하여 加水分解되는데, 單純脂質의 경우, 1몰의 中性脂質로부터 1몰의 글리세롤과 3몰의 高級脂肪酸이 生成된다. 글리세롤은 알코올의 分解經路를 따

라서 더 分解되며, 高級脂肪酸은 Knoop의 β酸化理論에 따라서 보다 低級의 脂肪酸을 거쳐 아세트酸과 水素로 分解된다.³⁾ 그러나 條件에 따라서, 프로피온酸과 브티르酸으로 될때도 있다.

蛋白質은 Pseudomonas, Proteus, Bacteriaceae, Bacillaceae屬 細菌의 酵素에 의하여 다음과 같이 加水分解된다.



아미노酸은 細胞에 攝取되어 암모니아, 二酸化炭素, 아세트酸, 포름酸, 프로피온酸 등으로 生成된다.

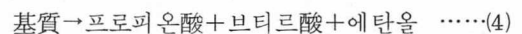
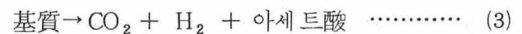
炭水化物, 脂質, 蛋白質 등이 加水分解된 後 發酵細菌에게 攝取되어 生成된 이러한 物質들은 아직도 상당 水準의 에너지를 含有하고 있지만, 일반 發酵細菌이 그것들을 더 代謝하지 못한다. 그 後의 代謝는 별도 그룹의 細菌群에 의하여 수행되며, 그 결과 메탄, 二酸化炭素 등 最終物質이 生成된다.

4. 嫌氣性反氣의 각 段階

現在까지 알려진 바에 의하면 메탄이 生成되기까지의 嫌氣成反應은, 酸生成, 아세트酸生成, 메탄生成에 종사하는 細菌群에 의하여 段階的으로 수행된다.

(1) 酸生成

酸生成은 前項에서 설명한 바와같이 氣質이 加水分解된 後부터 細胞에 의하여 二酸化炭素, 水素, 그리고 여러 카르복시酸으로 生成될때까지의 過程을 가르킨다. 酸生成의 異化作用은 다음 둘중의 한 經路를 밟는다.



첫 經路에서 生成된 物質은, 세계 段階의 細菌그룹에 의하여, 직접 메탄으로 轉換될 수 있다. Bryant 등⁴⁾에 의하면, 이 첫 經路의 反應은 熱力學的으로 볼때 시스템內의 水素分壓이

充分히 낮을 때에 일어난다. 그것은, 또한 자유 에너지의 변화 ΔG° 가陰이어야 함을 뜻하기도 한다. 시스템内の 水素分壓이 높을 때에는 위

除去하여 分壓을 낮게 유지하면 ΔG° 값은陰이 된다. 그러한 役割을 하는 것이 메탄生成細菌과 黃酸還元細菌이다. 즉,

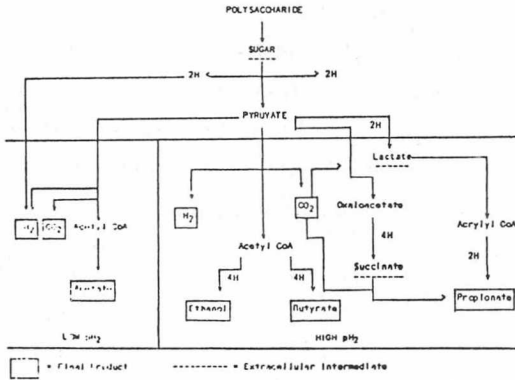
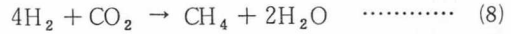
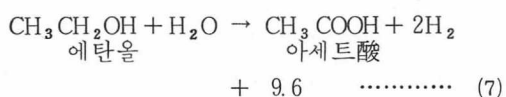
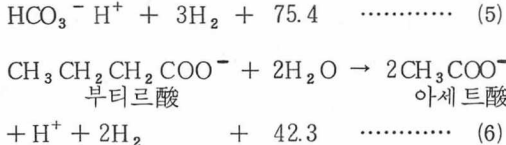
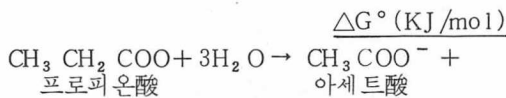


그림 1 炭水化物的 發酵反應 經路와 水素 分壓에 따른 生性物質의 分析狀態

反應은 둘째 經路를 밟게 되며, 그 결과로 프로피온酸, 브티르酸, 에탄올 등 還元物質이 生成된다. 그림 1 은, 炭水化物的 發酵反應에 있어서, 水素分子의 分壓에 따른 酸生成의 두 經路를 나타낸 것이다.

(2) 아세트酸生成

이 둘째 段階의 細菌그룹은 첫 段階에서 生成된 프로피온酸, 부티르酸 등 有機酸과 에탄올을 아래와 같이 代謝한다.

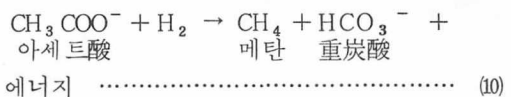


위의 아세트酸生成反應이 外部로부터의 에너지 供給없이 進行되려면, 自由 에너지 變化 값 ΔG° 는陰이어야 한다. 그런데, 發生되는 水素가스를 시스템內에 蓄積시키지 않고, 신속히

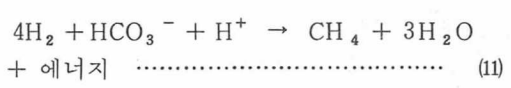
이와같이 아세트酸生成細菌의 代謝活動은 메탄生成細菌 등에게 크게 依存하는 것 같다. 어떤 種들은 後者の 細菌과, 같은 培地에 共生할 때에만 增殖할 수 있는 것으로 알려져 있다.^{5) 6)}

(3) 메탄生成

메탄成細菌은 形態上으로 Methanobacterium, Methanococcus, Methanosarcina, Methanospirillum의 4屬으로 分類되고 있다.⁷⁾ 이러한 細菌들이 직접 利用할 수 있는 基質은 아세트酸, 水素, 二酸化炭素, 포름酸, 메탄올뿐이며^{8) 9)} 이외의 脂肪酸과 알콜 등은 非메탄細菌과 메탄細菌의 相助下에 메탄과 二酸化炭素로 轉換된다.^{10) 11)} 그러한 非메탄細菌이 일부의 아세트酸生成細菌이다. Jeris와 McCart^{12) 13)}에 의하면, 炭水化物, 脂質 및 蛋白質을 嫌氣性으로 發酵시킬 때 가장 많이 生成되는 中間物質이 아세트酸이며, 最終發酵產物인 메탄의 約 70%가 그것으로부터 轉換된다고 한다.



위의 重炭酸은 다시 二酸化炭素로 轉換되는데, 그 率은 pH에 따라서 다르다. 그 式은 二酸化炭素를 溶存形態로 바꾸어서 다시쓰면,



첫 經路를 제외한 메탄生成의 대부분은 이 둘째 經路를 통하여 이루어지는데, 이 둘째 經路는 嫌氣性反應 전체를 左右할만큼 重要하다. 왜냐하면, 이 經路의 反應은 시스템內的 水素를 除去하고, 그 分壓을 낮게 維持하므로써 아세트酸生成을 可能케 하는 役割을 하기 때문이다. 만약, 시스템內的 水素分壓이 許容水準, 예컨대 10^{-4} 氣壓을 超過하면, 아세트酸生成은 中斷되고 기타의 酸이 生成된다. 基質은 最終적으로 메탄으

로 轉換시키는 主經路가 아세트酸生成임을 감안할 때, 그러한 水素分壓의 上昇은 바람직하지 않다.

메탄生成細菌은 弱하고, 增殖速度가 낮으므로, 溫度, pH 등의 條件을 適合하게 安定시키는 것이 重要하다. 水素分壓은 시스템內的 전반적인 發酵反應速度에 대하여 重要한 影響을 주지만, 그 許容限界가 너무 낮으므로 監視하기가 어렵다. 대신에 水素分壓이 너무 높아질 경우 시스템內에는 프로피온酸 등 非아세트酸이 蓄積되므로서 pH가 低下되는 現象을 볼 수 있다.

메탄生細菌은 絶對嫌氣性細菌이므로 自由酸素 O_2 는 이들 細菌에게 毒하며, NO_3^- 등의 結合酸素조차도 그 增殖을 阻害한다.

5. 結 論

嫌氣性反應에 관하여, 그 特性과 複合氣質의 加水分解, 分解된 單純基質의 3段階 連鎖反應 등을 說明하였다. 嫌氣性反應은 비교적 複雜하다. 이 分野의 基礎知識은 앞으로 影響因子, 生物分解性, Kinetics 등에 관하여 더 공부하므로서 補完되어야 한다. 嫌氣性反應의 生化學的 原理에 관하여 일부분만 다룬 것에 대하여 慍懼스럽게 생각한다.

參 考 文 獻

1. 矢國淳一外, 「嫌氣性消化におけるセルロース의 分解に及ぼす pH의 影響」, 土木學 第39回學術講演概要集II - 455(1984), pp. 909~910.
2. Deuel, H. J., Jr, The Lipids, Their Chemistry and Biochemistry, Interscience (1951) p.1
3. Smith, E. L., et al., Principles of Biochemistry: General Aspects, Mc Graw-Hill (1983) p. 514
4. Bryant, M. P., et al., "Methanobacillus Omelianskii, a Symbiotic association of two species of bacteria," Arch. Microbiol. Vol. 59(1967) pp. 20~32
5. McNerney, M. J., et al., "Anaerobic bacterium that degrades fatty acids in syntrophic association with methanogens," Arch. Microbiol. 122(1979) pp. 129~135
6. Boone, D. R. and Bryant, M. P., "Propionate degrading bacterium Syntrophobactor Wolinii, SP. nov., gen. nov. from methanogenic ecosystems," App. Environ. Microbiol.
7. Stanier, R. Y., et al., The Microbial World, Prentice-Hall (1976) pp. 705~706
8. Wolfe, R. S., "Microbial Formation of Methane," Adv. Microbiol. 114 (1971) pp. 1231~1240.
9. Zeikus, J. G., "Biology of Methanogenic Bacteria." Bact. Rev. Vol. 41 (1977) pp. 514~541.
10. Bryant, M. P., et al., "Methanobacterium Omelianskii, A Symbiotic Association of Two Species of Bacteria." Arch. Microbiol. Vol. 59(1967) pp. 20~32.
11. Bryant, M. P., et al., "Growth of Desulfovibrio in lactate or ethanol media low in sulfate in association with H_2 - utilizing methanogenic bacteria," Applied and Environ. Microbiol. Vol. 33(1977) pp. 1162~1169.
12. Jeris, J. C. and McCarty, P. L., "The Biochemistry of Methane Fermentation Using C^{14} Tracers," J. Water Poll. Control Fed., Vol. 37(1965) pp. 178~192.
13. McCarty, P. L., "Anaerobic Treatment of Soluble Wastes." Advances in Water Quality Improvement, ed. by E. F. Gloyna and W. W. Eckenfeder, Univ. of Texas Press (1968)