

생물 세정탑에 의한 생물 탈취에서의 동력학적 이론

허 목

제주대학교 해양과학부

Kinetic Theory on Biological Deodorization by Bioscrubbers

Mock Huh

Department of Ocean Sciences, Cheju National University

1. 서론

생물 탈취법은 저에너지 소비형 기술이며, 경제적이고, 안전하며, 2차 공해의 발생의 적고, 장치의 유지 관리가 용이하다는 장점들을 갖고 있어서 최근에 가장 주목받고 있는 첨단 기술의 하나이다. 생물 탈취의 원리는 각종 미생물을 이용하여 공기중의 악취 물질을 인위적으로 제어하는 방법으로, 과거로부터 악취의 확산 방지에 토양의 효과를 적극적으로 활용하였던 것과 같이 자연계에서의 미생물에 의한 생물 화학적 산화 분해에 의해 일어나는 탈취 현상을 인위적으로 조정 관리하여 효율화하는 것이다.

여기서 이용되는 미생물은 이와 같은 산화 분해로부터 에너지를 얻어 증식한다. 그리고 악취 물질을 구성하는 C, H, N, S 등의 물질의 일부는 미생물의 균체를 구성하는 성분이 되지만, 대부분은 미생물에 의해 산화되어 CO₂, H₂O, NO₃, SO₄ 등으로 바뀌어진다.

따라서 악취 물질을 분해하는 능력은 있어도 에너지원 또는 탄소원을 별도로 첨가하지 않으면 증식이 불가능한 중속

영양형(heterotrophic)미생물은 생물 탈취에 실용적이지 않는 경우가 많다.

이와 같은 미생물학적 특성을 응용한 각종 생물 탈취법 (Table 1)이 개발되어 각종 탈취 현장에 적용되고 있으며, 특히 생물 탈취 장치로서 가장 다양하게 상용화되고 있는 생물 세정탑(Bioscrubbers)에 의한 생물 탈취 기구를 해석하기 위해 미생물학적 대사현상과 정상상태에서의 그 성능을 simulation하기 위한 동력학적 이론의 전개가 필요하다.

2. 탈취 미생물과 대사⁶⁾

대표적인 악취 물질별 생물 탈취 미생물의 종류와 특성은 아래와 같다.

2.1. 질소계 악취 물질

트리메틸아민((CH₃)₃N)으로 대표되는 유기 질소계 악취 물질은 생물학적 탈메틸반응에 의해 NH₃까지 분해된다. NH₃는 화학독립영양형 아질산균에 의해 생물학적으로 산화되어

Table 1. 생물 탈취법의 분류¹⁻⁵⁾

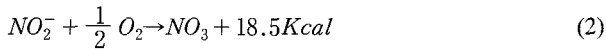
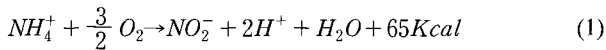
분 류	특 징				탈취
	악취성분 제거기구	미생물 존재형태	재 료		
고상형 Fixed Bed	생물여재형 Biofilter	수착 Biosorption	부착 Attached	토양	토양탈취(Soil Filter)법
				섬유상이탄 퇴비 고정화담체 등	피트탈취(Peat Filter)법 퇴비탈취(Compost Filter)법 고정화생물탈취(Immobilized Filter)법
액상형 Liquid Bed	현탁생물반응형 (가스분산형) Suspended Bioreactor	흡수 Absorption	부유 Suspended	활성슬러지 등	활성슬러지(Activated Sludge)탈취법 등
	부착생물세정탑형 (액분산형) Attached Bioscrubber	흡수 Absorption	부착 Attached	충진제 등	생물세정탑(Bioscrubber)탈취법 등

E-mail: huhmock@cheju.ac.kr

Tel: 064-754-3442

Fax: 064-757-7983

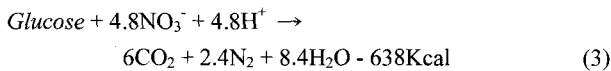
아질산(NO₂)을 생성하고, 아질산은 다시 질산균에 의해 질산(NO₃)로 다음 반응식과 같이 최종 산화된다.



아질산균은 *Nitrosomonas*, *Nitrococcus*, *Nitrosopira*, *Nitrosolobus*, *Nitrovibrio*의 5속으로 분류된 7종의 균이고, 질산균은 *Nitrobacter*, *Nitrospina*, *Nitrococcus*, *Nitrospira*의 4속으로 분류된 5종의 균이다.

그러나 상기의 독립영양형만이 아닌 종속영양형 즉, 세균 증식에 필요한 탄소원을 CO₂가 아닌 유기탄소원을 이용하는 미생물중에서도 NH₃의 산화에 기여하는 종류가 최근의 연구에서 발표되어지고 있다. 이들 질화세균의 생육 온도의 범위는 5~30℃(최적 25~30℃), 생육 pH범위는 6~8(최적 7.5~8.0)이다.

한편, 질산염을 이용한 유기물산화(질산염 호흡 또는 생물학적 탈질)에 의해 생육하는 세균(*Pseudomonas*속 등)도 존재한다.



그러나 생물탈취법에서는 악취 함유 공기를 강제로 생물 반응조로 송기시키기 때문에 호기적 반응 조건이 형성되고, 유기물의 공급량이 부족하기 때문에 생물학적 질화와 탈질을 동시에 확보하기에는 곤란한 것이 최근까지의 연구결과이며, 오·폐수 처리에서와 같이 탈질 반응조를 별도로 두는 방법도 연구의 과제가 될 수 있다.

생물탈취법에 있어서 아민계의 악취가 위에서의 반응에 따라서 어느 단계에 까지 변화하는가 하는 것은, 그 악취성분의 조성, 유입부하, 운전조건 등에 따라 크게 차이가 있을 수 있다. 예를 들어, NH₃만을 제거코자 할 때에 질화반응이 우세하지 못하면 반응수중에 NH₃가 축적되어 pH가 상승되고, 질화반응이 우세하게 잘 진행되면 NO₃⁻가 축적되어 pH가 하강될 수 있다. 따라서 생물탈취장치에서의 pH의 감시와 조정이 중요한 운전관리지표가 된다.

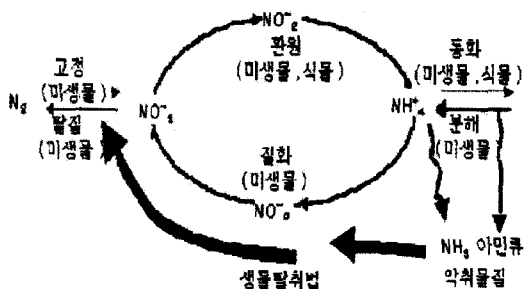
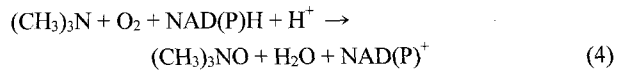


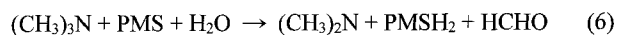
Fig. 1. 질소의 순환과 생물탈취기구.

그리고 트리메틸아민은 탄소를 함유한 질소계 악취화합물이지만 탄소-탄소간의 결합이 없는 C1화합물이외의 다른 유기물을 이용하는 것과 그렇지 못한 것들이 있다. 이들은 *Pseudomonas*속과 *Bacillus*속 등의 많은 종류가 있으며, 이들에 의한 트리메틸아민의 분해경로는 다음의 2가지 경로로 디메틸아민이 되고, 메틸아민을 경유하여 암모니아까지 분해된다.

(i) 트리메틸아민-N-옥사이드를 생성하는 경로



(ii) 디메틸아민으로 직접 분해되는 경로



2.2. 유황계 악취 물질

메틸멜캅탄(MM; CH₃SH), 황화메틸(DMS; (CH₃)₂S), (DMDS; (CH₃)₂S₂)로 대표되는 유기유황계 악취물질이 생물학적 분해 반응을 받게되면, 그들 물질중의 유황은 황화수소(H₂S) 혹은 황화물(S₂)로 아래의 Fig. 2, 3과 같이 유리된다.

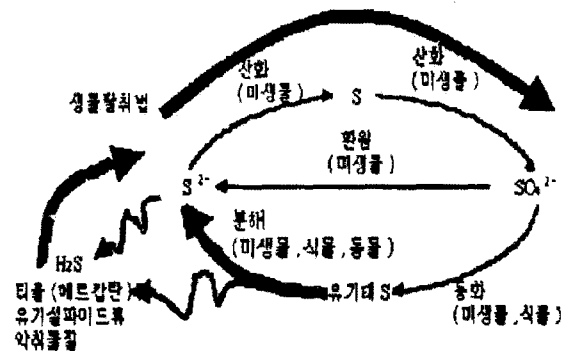


Fig. 2. 유황의 순환과 생물탈취기구.

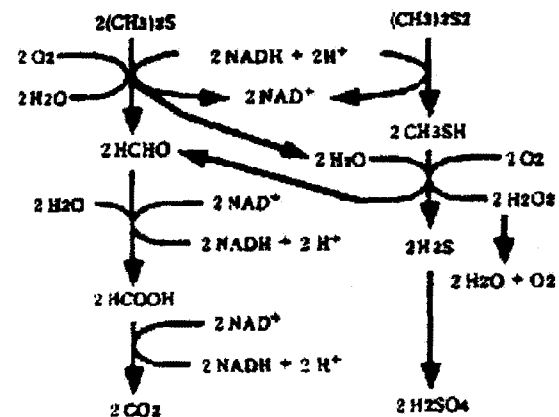


Fig. 3. 미생물에 의한 유기유황계 악취물질의 분해경로.

Table 2. Thiobacillus속 세균의 생리적 분류

절대독립영양	호산성	호기	<i>T. thiooxidans</i>
			<i>T. kabolis</i>
			<i>T. ferrooxidans</i>
	비호산성		<i>T. rhioparus</i>
			<i>T. neapolitans</i>
통성독립영양		통성혐기	<i>T. denitrificans</i>
		호열성	<i>T. thomophilca</i>
	호산성	호기	<i>T. acidophilus</i>
혼합영양	비호산성		<i>T. novellus</i>
			<i>T. intermedius</i>
		통성혐기	<i>T. versutus</i>
			<i>T. delicatus</i>
			<i>T. perometabolis</i>
			<i>T. rubellus</i>

이들 유기유황계 악취 물질의 분해 미생물로는 *Hyphomicrobium*속, *Thiobacillus*속의 세균들이 있다.

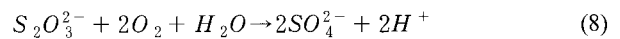
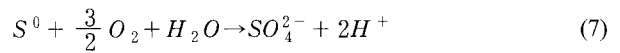
이들 세균들은 그들의 자원화(먹이로 이용) 가능한 물질이 한정되어 있는 특징을 갖고 있다. 예를 들어, DMS분해균인 *Hyphomicrobium* EG는 DMS를 포함해서 트리메틸아민, 디메틸아민, 메틸아민, 개미산, 디메틸술폰 등도 이용 가능하나 DMDS는 자원화 할 수 없으며, 최적 생육 pH는 7.0~7.5, 최적생육온도는 30°C이다.

그리고 *Thiobacillus thioiparus* TK-m은 MM, DMS, DMDS와 이황화탄소, 황화카르보닐, 황화수소, 티오황산, 유황 등이 자원화 가능하며, 최적생육 pH는 6.5~7.0, 최적생육온도 30°C이다. 유기유황계 화합물들의 최종 분해산물로 H₂SO₄가 생성되기 때문에 pH가 저하될 수 있기 때문에 pH의 조절에 유의하여야 할 것이다.

H₂S의 산화에는 광독립영양형의 홍색 및 녹색유황세균과 화학독립영양형의 *Thiobacillus*속, *Sulfolobus*속의 여러 유황산화세균들이 이용 가능하나, 주로 *Thiobacillus*속의 세균들

이 탈취미생물로 주목받고 있다. *Thiobacillus*속의 세균은 아래의 표에서와 같이 다양한 종류가 있는 그램음성의 단간균이며, 극성편모로 운동하고, 유황산화를 화학적 암반응으로 행하는 대표적 세균이다.

에너지원으로는 통상 단위체 유황(S⁰), 황화수소, 티오황산, 포리티온산, 아황산 등을 전자공여체로 이용하게 된다. 특히, 통성독립영양형인 *T. novellus*와 같이 예외적으로 유기물을 이용하는 종도 있으나, 대부분의 *Thiobacillus*속 세균은 에너지원을 환원형 무기유황화합물을 전자공여체로 이용하고, CO₂를 유일한 탄소원으로 하여 다음 반응식과 같이 최종적으로 황산염이 생성된다.



생물탈취법에서 환원형 무기유황화합물은 생물학적 산화에 의해 황산염으로 축적되어서 통상 액성이 산성화되지만, *Thiobacillus*속 일부 세균은 최적생육 pH가 아래 Fig. 5에서

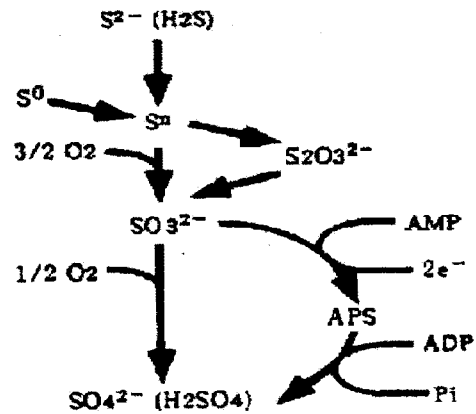


Fig. 4. 유황세균에 의한 H₂S의 분해경로.

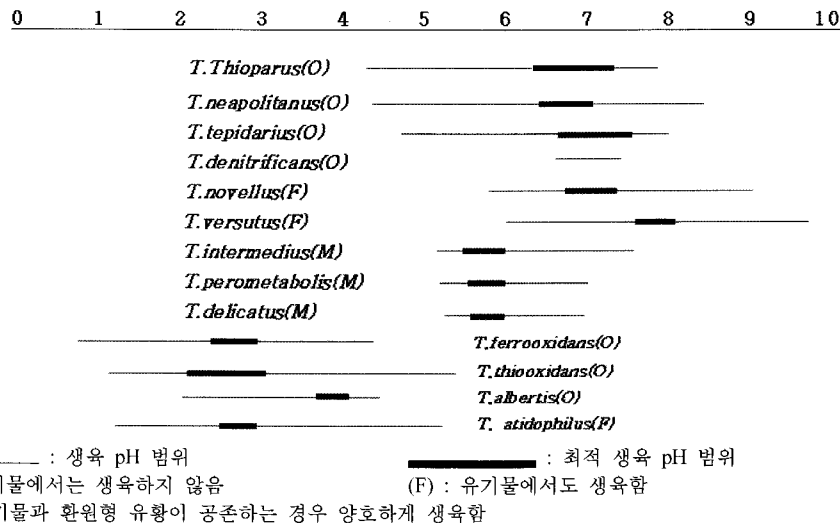


Fig. 5. Thiobacillus속 세균의 생육 pH범위.

와 같이 강산성이므로, pH의 하강에 따른 탈취효율의 뚜렷한 저하가 나타나지 않게 된다. 그러나 유기유황계 악취물질의 제거효율은 산성 조건에서 현저하게 저해되므로, pH의 조정이 필수적이다.

2.3. 기타 악취 물질

악취에는 질소계, 유황계 악취 물질들 이외에 많은 물질들이 관여된다. 대표적인 물질로는 저급지방산, 알데하이드, 스틸렌, 톨루엔 등이 있으며, 이들중에서 저급지방산이나 알데하이드를 분해하는 미생물은 자연계에 널리 분포하고 있다. 또한 스틸렌은 *Pseudomonas*속 세균등에서 그 분해가 확인되고 있다. 그러나 이들 분해균주가 존재한다고 하는 것과 생물탈취장치에서 그 처리가 가능하다고 하는 것은 결코 일치하지 않는다. 예를 들면, 가스상으로 존재하는 이들 물질의 액상에서의 용해도가 낮아서 기·액간의 물질이동저항이 높은 경우는, 기·액 접촉장치에 따라서 생물탈취효율이 결정된다. 그리고 생물탈취장치가 이들 물질의 대사미생물들에 따라서 적절한 생육형태, 생육조건을 유지하지 못하는 경우에는 그 제거가 곤란하다. 그러므로 이들 처리대상 악취물질에 대한 분해미생물이 존재한다고 하는 것은 생물탈취장치의 적용이 가능하다고 하는 하나의 필요조건일 뿐이다. 결국, 다양한 종류의 악취 물질을 대상으로 한 생물탈취법의 적용을 위해서는 시행오차적 검토를 통해서 기액접촉으로부터 미생물반응이라고 하는 일련의 악취물질의 제거과정의 최적 조건을 검색하여야 한다는 것이다.

3. 생물탈취속도와 지배인자

3.1. 생물탈취 장치내에서의 물질수지

악취물질 제거속도를 지배하는 인자로서는 기액간의 물질이동, 액상중에서의 악취물질의 이동, 그리고 미생물 자체에 의한 반응속도가 거론된다.

생물탈취 장치내에서의 취기가스의 추출흐름을 가정하여 악취 물질에 부착한 미생물 수지는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{F}{S_a} \frac{dz}{dl} = R_v \quad (9)$$

여기서 F는 취기가스의 몰유량(k·mol/m³·h), z는 취기가스 중의 악취물질 농도(-), l는 탈취장치입구로부터의 거리(m), Sa는 탈취장치의 단면적, -Rv는 탈취장치 단위체적당 악취물질 제거속도(k·mol/m³·h)이다. 취기가스의 체적유량을 Cv(m³/h), 기체정수를 R(0.028m³atm/k·mol·K), 온도를 T(K), 탈취장치내 평균압력을 P(atm)이라 하면 탈취장치내에서의 취기가스의 공탈속도 Ug(m/h)는 다음 식과 같이 된다.

$$U_g = \frac{G_v}{S_a} = \frac{RTF}{PS_a} \quad (10)$$

3.2. 악취 물질 제거 속도

취기가스로부터 액상에서의 악취물질의 용해속도가 악취물질 제거속도를 지배하는 경우에 -Rv는 다음 식과 같이 된다.

$$-R_v = K_{Las}(C_s - C) \quad (11)$$

단, K_{Las}(1/h)는 주요 악취 물질에 대한 액측 총괄물질이동 용량계수이다. 가스측에서의 물질이동, 저항이 미생물에 의한 탈취속도를 지배하는 것은 없다고 보아도 좋다. 기액계면과 기상본체와의 평행관계로부터 Pz = HCs가 성립한다. 여기서 P는 전압, H는 헨리정수, Cs는 기상과 평행관계에 있는 액중 악취물질 농도, C는 액중에 용존해 있는 악취물질 농도이다.

식 (10) 및 (11)을 식 (9)에 대입하고 C=0 즉, 액중에 용해된 악취물질은 즉시 미생물에 의해 산화분해된다고 가정하여 적분하면 장치내를 취기가스가 1회 통과할 때의 악취물질 제거율 η는 다음식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\eta = 1 - \frac{Z_e}{Z_0} = 1 - \exp(K_{Las} \cdot \frac{h}{U_g a}) \quad (12)$$

단, Ze 및 Zo는 각각 탈취장치 입구 및 출구에서의 취기가스 중에 용해된악취물질 농도이다. 또, α(=H/ΨRT)는 악취물질의 액중에서의 물질수지에 의한 용해도를 나타내는 무차원 변수이다. 헨리의 정수가 큰 경우, 그리고 액중에서의 악취물질의 확산계수가 작은 경우, α의 값은 크게 되어 악취물질의 제거율이 낮아진다.

K_{Las}를 H와 Ψ의 값으로 분리하면 기액간 물질이동이 탈취속도를 지배하고 있는 경우의 악취물질 제거율을 이 식에 의해 계산이 가능하다. 미생물 자체에 의한 악취물질 제거속도가 기액간에서의 물질이동속도에 비해서 작은 경우에 η는 식에서 구해지는 값보다 작게 된다. 아래의 식은 이 방식에서의 최대 제거율을 나타내고 있어서 이 방식의 탈취장치에 있어서 악취물질 제거특성의 평가에 유용하다.

악취물질 제거속도가 미생물 반응속도 자체에 지배되는 경우 장치 단위 체적당 악취물질 제거속도 -Rv는 식 (13)과 같이 Michaelis-Mentan형에 근사되는 경우가 많다.

$$-R_v = R_m \frac{Z}{(K_s + Z)} \quad (13)$$

여기서 Rm은 장치 단위체적당 최대 악취물질 제거속도, Ks는 탈취속도가 Rm의 1/2이 되는 경우의 악취물질 농도이다. 고정상타입에서는 탈취에 유효한 미생물의 농도를 평가하는 것이 곤란하다. 악취물질 농도 Z가 작게 되면 -Rv는 악취물질 농도의 1차 반응으로 되고 Z가 크게 되면 0차 반응에 가깝게 된다. Z가 크게 되면 암모니아의 예에서 보듯이 악취물질이 미생물의 반응을 저해하여 제거속도를 떨어뜨리는

경우가 있기 때문에 주의할 필요가 있다.

3.3. 악취물질 제거율의 계산

가스분산형 즉 산기장치를 통해서 액중으로 취기가스를 통과시키는 방식에서는 악취물질이 액중에 용해할 때에 기액간 물질이동용량계수 K_{Las} 는 다음 식과 같다.

$$K_{Las} = \Psi a U_g \quad (14)$$

여기서 Ψ 는 악취물질 고유의 계수로 그 내용은 액중에서 산소의 확산계수에 대한 악취물질 확산계수의 비이다. Ψ 에 따른 보정을 하면 산소용해에 대해서 보고된 K_{La} 를 그대로 η 의 예측에 사용할 수 있다. 한편 a 는 산기장치에 따라서 결정되는 계수로 세라믹제 다공질 산기관 등 3 mm 정도의 미세한 기포를 발생시키는 산기장치에서는 a 의 값이 1전후이다. 다공관 등 5~6 mm 이상의 조대기포를 발생시키는 산기장치에서는 a 의 값이 0.5 정도로 된다.

윗 식을 정리하면 n 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$n = 1 - \exp(-ah/a) \quad (15)$$

액중의 미생물에 의한 악취물질 제거속도가 기상에서 액상으로의 악취물질 용해속도보다 하락하면 용존 악취물질 농도가 상승하여 악취물질 제거율은 낮아진다. 액중에 현탁하고 있는 미생물의 활성 및 그 농도가 충분히 높으면 기포를 미세화하는 등으로 효율을 높여 취기가스와 액을 접촉시켜서 악취물질 제거율을 상승시킬 수 있다.

3.4. 액상타입 탈취장치에 있어서 황화수소 제거율의 비교

미생물에 의한 악취물질 제거속도가 충분히 크고 악취물질이 액중으로의 용해속도가 탈취속도를 지배하고 있는 경우에는 악취물질의 제거율은 기포탑에서는 통기량에 관계 없이 거의 일정 하지만 충전탑이나 다공관탑에서는 통기량의 증대에 따라서 낮아진다. 다만 포기탑에서도 U_g 가 대략 100 m/h 이상이 되면 K_{Las} 는 한계에 도달하기 때문에 미생물 활성이 충분히 높아도 제거율은 낮아지리라 예상된다.

4. 생물세정탑과 동력학적 이론

생물세정탑은 통상적으로 몇(N)단의 세정탑과 1개의 산화반응조로 구성되며, 그들이 각각 별개로 제작되는 것과 서로 통합된 형태인 것으로 크게 구분될 뿐이다. 그리고 slurry는 그들 세정탑과 산화반응조 간을 순환시키게 되고, 탈취대상 가스는 세정탑에서 흡수되어 일부 산화되며 그 산화반응은 산화반응조에서 완료되어진다.

여기에서의 생물산화율 즉, 생물학적 탈취효율은 대상가스의 Henry 정수, 가스유속에 대한 액체순환유속의 비, 그리고 세정탑의 단수와의 함수관계 등의 각종 인자들에 의한 영향을 고려하여야 한다. 이들을 고려한 연구들으로써, Calvert⁸⁾

는 미생물 slurry가 물에 흡수된 가스상 오염물질의 생물학적 산화에 이용되게 하였고, Nyer⁹⁾는 현탁 slurry형과 bio-filter형의 두 형태의 탈취장치 모두에서 초산아민이 흡수, 산화되게 하였다. 그리고 이에 기초해서 Gilbert¹⁰⁾는 영양원의 첨가, pH제어, 산화를 위한 체류시간을 증가시키기 위해서 교반혼합조를 세정탑의 외부에 추가시켰고, Kirchmer¹¹⁾는 세정탑과 산화반응조사이에 미생물 slurry가 순환되는 조건하에서 세정탑에 유리 충진제를 충전시켰다.

Ottengraf⁷⁾는 세정탑과 산화반응조를 분리시킨 현탁생물세정탑의 설계지침을 제안하고 있는 바, 세정탑에서는 생물반응은 없이 물리적 흡수에 의한 것으로 가정하여 설계토록 하고 생물반응조에서는 Monod식에 의한 설계방법을 제안하고 있다.

그러나 악취가스는 세정탑에서 흡수됨과 동시에 부분적인 산화가 발생되고 그 산화의 정도는 미생물의 농도, 반응속도, 세정탑내 액체용량 등의 영향을 고려하여야 할 것이다. 산화반응조에서는 잔존하는 악취가스의 산화에 충분한 액의 체류시간과 미생물의 증식을 위한 미생물 체류시간을 또한 고려하여야 한다.

4.1. 생물화학적 반응속도

미생물의 증식 속도는 Monod식으로 기술된다.

$$\mu = \frac{\beta S_L}{K_S + S_L} \quad (16)$$

여기에서 μ 는 비증식 속도(1/h), β 는 최대비증식속도(1/h), K_S 는 포화정수(half-saturation coefficient), 즉, 최대비증식속도의 1/2의 비증식속도가 되는 기질농도와 같은 값이다. 그리고 단일의 기상 기질로만 제한되고, 저해는 받지 않는 것으로 한다. 또 단위 용적 당의 활성 미생물의 증식 속도 r_{XB} 는 식 (17)으로 주어진다.

$$r_{XB} = \mu X_B \quad (17)$$

r_{XB} 의 단위는(g-COD/m³/h)이다. n단계에서의 비증식속도는 μ_n , 반응조에서의 비증식 속도를 μ_0 라고 한다. 여기에서 Y는 순증식 수율, 즉 미생물체로의 기질의 변환 계수(g-COD biomass/g-COD substrate)라면 단위 용적당의 기질 소비 속도는 식 (18)으로 주어진다.

$$r_S = -\frac{\mu X_B}{Y} \quad (18)$$

r_S 의 단위는 (g-COD/m³/h)이다. 또한 미생물은 내생산화(자산화) 대사로 붕괴한다. 여기서 미생물의 자산화 과정은 종래의 모델을 채용한다. 단위 용적당의 활성 미생물의 붕괴속도(자산화속도)는 식 (19)으로 주어진다.

$$r_{XB} = -bX_B \quad (19)$$

여기서 b 는 비사멸 속도(1/h)이다. 단위 용적당의 미생물 잔해의 생성 속도 r_{XD} 는 식 (20)으로 주어진다.

$$r_{XD} = bf_D X_D \quad (20)$$

여기에서 f_D 는 활성 미생물이 붕괴에 의해 균체 잔해로 변환되는 비율을 나타내는 계수이다. r_{XD} 의 단위는(g-COD/m³/hr)이다. 생물세정탑 전체에서의 비사멸 속도는 일정하다고 가정한다.

4.2. 용량계수

가스 흡수에 있어서 물질 이동은 기상 농도의 함수 즉, 기상기준의 총괄용량 계수 $K_G a$ 로 표현된다. 그리고 액상에서 발생하는 생물 화학적 반응 때문에 액상의 기질농도에 기초하는 표현 즉, 액상기준의 총괄용량계수는 $K_L a$ 로 기술하는 편이 편하다. 2개의 총괄용량계수 사이의 관계는 $K_L a = H K_G a$ 로 표현된다. 여기서 H 는 무차원의 Henry정수이다. 따라서 총괄 용량 계수 $K_L a$ 는 식 (21)으로 주어진다.

$$\frac{1}{K_L a} = \frac{1}{H k_G a} + \frac{1}{k_L a} \quad (21)$$

여기서, k_G 및 k_L 은 각각 기상 및 액상에 고유의 물질 농도에 기초하는 물질 이동 계수(즉, 경막물질 이동 계수)이고, a 는 단위 액상용적당의 계면면적이다.

k_G 및 k_L 의 단위는(m/h)이고, a 의 단위는(1/m)이다. 그리고 위의 식은 아래와 같이 변형된다.

$$K_L a = \frac{k_L a}{\left[1 + \frac{k_L a}{H k_G a}\right]} \quad (22)$$

또는

$$K_L a = \frac{H k_G a}{\left[1 + \frac{H k_G a}{k_L a}\right]} \quad (23)$$

$\frac{H k_G}{k_L}$ 1일 때, 가스쪽의 저항이 지배적이 되고 $K_L \approx H k_G$ 이 된다.

$\frac{H k_G}{k_L} > 1$ 일 때, 액쪽의 저항이 지배적이 되고 $K_L \approx k_L$ 된다.

그러므로 $K_L a$ 는 H 가 작은 경우에는 H 의 증가와 함께 직선적으로 증가하고, H 가 큰 경우에는 $k_L a$ 에 가까워진다.

4.3. 정상상태에서의 simulation

정상상태에서의 예측은 아래의 동력학정수를 이용해서 구해진다. 즉, $\mu = 0.3(1/h)$, $K_S = 0.1(g-COD/m^3)$, $Y = 0.3(g-COD\ biomass/g-COD\ substrate)$

$b = 0.005(1/h)$, $f_D = 0.2$ 이다. 이들 값들은 모든 기질과 균중에 공통적이지는 않지만 생물 분해성 유기화합물의 존재하에서 생육하는 많은 종속 영양 미생물군에 대해서는 이것들과 동정도의 크기의 수치가 나타난다. 그리고 계산에서 유입 기상농도는 $1(g-COD/m^3)$ 로 하였다. 예를 들어, 유기화합물이 아세트이면 표준 상태에서 이것에 상당하는 농도는 $190(ppm)$ 이다. 또 특정하지 않는 한, 장치의 동역학 정수의 값은 $V_0 = 10(m^3)$, $V_i = 0.05(m^3)$, $F_G = 3,600(m^3/h)$, $F_L = 18(m^3/h)$, $F_w = 0.208(m^3/h)$ 이다. 이러한 유속과 장치 용적에 있어서 $\Theta X \approx 2(day)$ 이고, 경막 물질 이동 계수의 값 $k_G = 360(m/h)$, $k_L = 1.8(m/h)$ 이다. 이들은 세정탑에서의 중간값 정도이다. 단위 액상 용적당의 계면 면적 a 는 $1,000(1/m)$ 이다.

1단 세정탑에서 Henry정수가 다른 3개의 조건하에서 탑안의 순환액의 hold up V_1 의 함수로서 예측한 제거 효율을 Fig. 6에 나타내었다. 실선은 세정탑내에 생물 반응이 존재한다고 했을 경우의 예측이고, 점선은 세정탑내에 생물 반응이 없다고 한 경우의 예측이다. 그림에서 제거 효율이 hold up의 증가에 따라서 상승하고, 점차 hold up과 무관계한 일정의 제거 효율로 접근하는 것이 나타내져 있다. 또 세정탑내에서의 생물 화학적 반응이 있는 경우와 없는 경우 모두에서 동일한 제거 효율은 물리 흡수에 지배됨을 나타낸다.

한편, 1단 세정탑에서 Henry정수가 다른 3개의 조건하에서, 순환액 유속의 함수로서 예측한 제거 효율을 Fig. 7에 나타낸다. 실선은 세정탑 내로 생물 반응이 존재한다고 한 경우의 예측이고, 점선은 세정탑 내에 생물 반응이 없다고 한 경우의 예측이다. $H = 0.0005$ 의 경우 A 는 항상 1보다 커

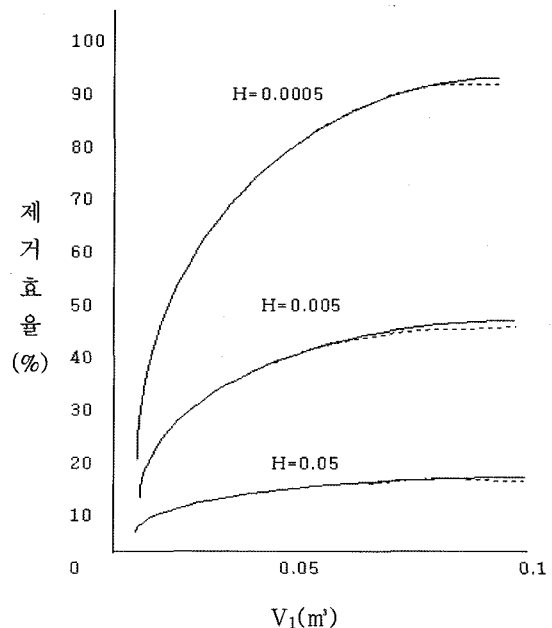


Fig. 6. 순환액의 hold up에 따른 제거효율의 예측.

$\mu = 0.3(1/h)$, $K_S = 1.0(g-COD/m^3)$,
 $Y = 0.3(g-COD\ biomass/g-COD\ substrate)$
 $b = 0.005(1/h)$, $V_0 = 10(m^3)$
 $F_G = 3600(m^3/h)$, $a = 1000(1/m)$

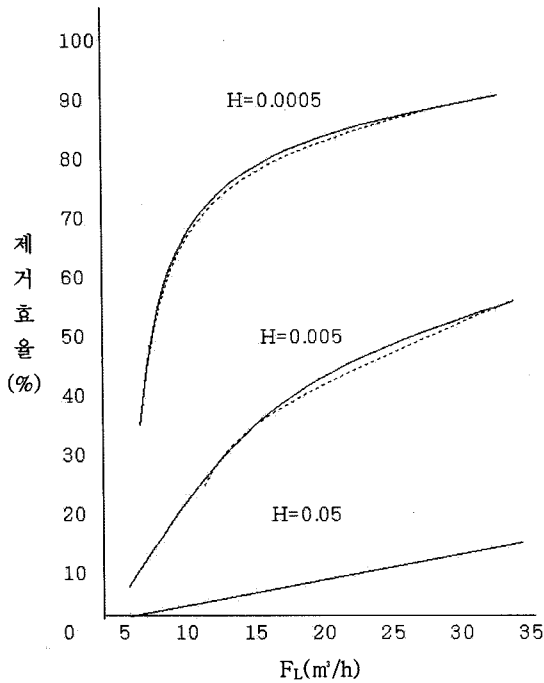


Fig. 7. 순환액 유속에 따른 제거 효율의 예측.
 $\mu = 0.3(1/h)$, $K_S = 1.0(g-CODm^3)$,
 $Y = 0.3(g-COD\ biomass/g-COD\ substrate)$
 $b = 0.005(1/h)$, $V_0 = 10(m^3)$, $V_1 = 0.05(m^3)$
 $F_W = 0.208(m^3/h)$, $k_G = 360(m/h)$
 $k_L = 1.8(m/h)$, $a = 1000(1/m)$
 실선은 세정탑내에 생물 반응이 있다고 한 경우,
 점선은 세정탑내에 생물 반응이 없다고 한 경우의 예측

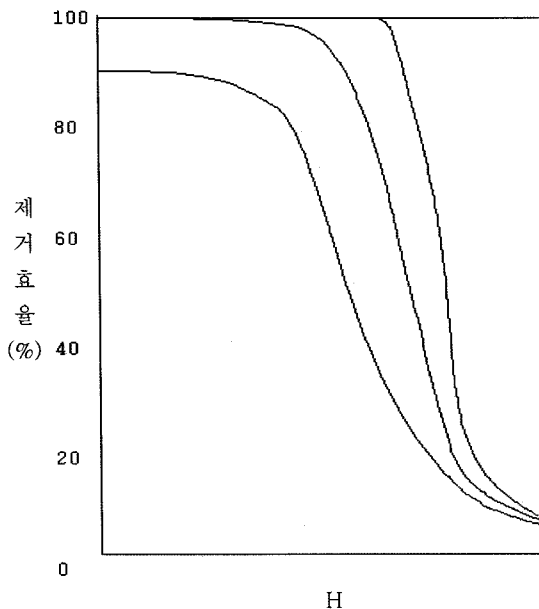


Fig. 8. Henry 정수에 따른 제거 효율과 흡수인자의 예측.
 $\mu = 0.3(1/h)$, $K_S = 1.0(g-CODm^3)$,
 $Y = 0.3(g-COD\ biomass/g-COD\ substrate)$
 $b = 0.005(1/h)$, $V_2 = 10(m^3)$, $V_1 = 0.05(m^3)$
 $F_G = 3600(m^3/h)$, $F_L = 18(m^3/h)$,
 $F_W = 0.208(m^3/h)$, $k_G = 360(m/h)$
 $k_L = 1.8(m/h)$, $a = 1000(1/m)$

지고 제거 효율은 높다. 액 유속이 $10(m^3/h)$, 즉 $A \approx 5.6$ 에 상당하는 값을 넘으면 제거 효율은 액 유속에 의존도가 낮은 함수가 된다. $H = 0.005$ 에서는 A 가 1에 가까운 차수가 되고, 제거 효율은 액유속의 증가에 따라서 증가한다. $H = 0.05$ 에서는 작고 제거 효율은 낮다. 따라서 대단히 용해성이 높은 화합물은 이와 같은 장치에 용이하게 제거될 수 있지만, 용해도가 낮은 물질은 물리 흡수가 곤란하기 때문에 높은 제거 효율로 제거할 수 없다.

Henry정수에 따른 1단, 2단, 및 5단의 세정탑에 예측되는 제거 효율을 Fig. 8에 나타내었다. 제거 효율은 단수의 증가에 따라 증가한다. 흡수인자가 1보다 작을 때 세정탑 전체에서의 제거 효율은 H의 증가에 따라서 급격하게 감소한다. 또 H가 큰 경우에는 단수를 증가하여도 제거 효율은 겨우 증가할 뿐이다.

1단 세정탑에 있어서 2개의 H의 조건하에서 오니 체류시간 Θ_X 의 함수로서 미생물농도를 나타낸 것이 Fig. 9이다. 활성 미생물체와 사멸 미생물체 모두가 Θ_X 의 증가에 따라 증가한다. 또 보다 높은 제거 효율이 얻어지는 낮은 H의 조건하에서 미생물 농도는 높아진다. 즉, 미생물의 증식에 많은 양의 기질이 이용되는 것이다. 이와 같은 범위에서의 미생물 농도는 활성오니 폐수처리에서의 농도와 같은 차수이다. 여기에서의 예의 경우에, Henry정수가 높은 조건하에서는 기상으로부터의 기질의 총제거량이 낮기 때문에 정상 상태에서의 미생물 농도는 낮아진다. 활성오니 처리장치의 경우와 같이 산화 반응조의 용적을 조정하여 미생물 농도를 높게 하거나 낮게 하는 것이 가능하게 된다.

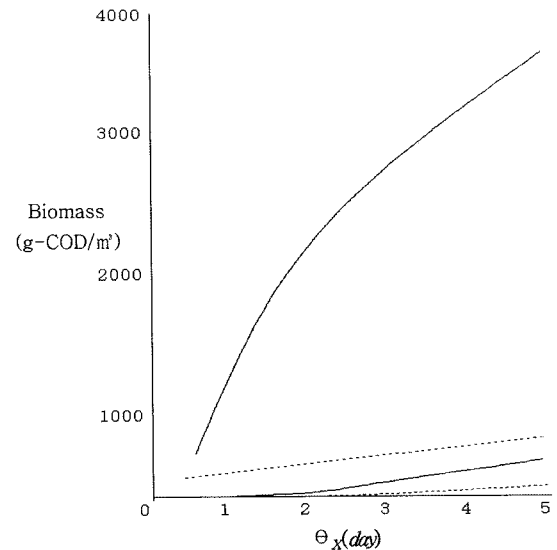


Fig. 9. 오니 체류 시간에 따른 미생물체 농도의 예측.
 $\mu = 0.3(1/h)$, $K_S = 1.0(g-CODm^3)$,
 $Y = 0.3(g-COD\ biomass/g-COD\ substrate)$
 $b = 0.005(1/h)$, $V_0 = 10(m^3)$, $V_1 = 0.05(m^3)$
 $F_G = 3600(m^3/h)$, $F_L = 18(m^3/h)$,
 $F_W = 0.208(m^3/h)$, $k_G = 360(m/h)$
 $k_L = 1.8(m/h)$, $a = 1000(1/m)$

5. 결론

생물세정탑에 대한 동역학적 해석에 의한 성능해석에 있어서 종속 영양 미생물에서의 동역학정수 μ , K_s , Y , b 의 대표적인 값의 범위내에서 생물 세정 장치 전체의 제거 효율의 예측치는 큰 차이를 보이지 않았다. 단, $\mu > 0.5(1/h)$ 의 경우를 제외하고 세정탑 부분에서 기질이 산화되는 비율은 총 흡수량의 10~20[%] 이하가 되고, 나머지의 기질은 산화 반응조에서 산화되었다. 또 오니 체류 시간이 유출 속도를 넘는 경우에는 예측된 제거 효율은 오니체류 시간과 대부분 무관하였다. 이 예측에 고려된 변수의 범위 내에서 세정탑에서의 생물 화학적 반응의 역할은 적은 것을 나타내고 있다.

결론적으로 생물세정탑에 의한 생물탈취에서의 효율은 물리적 흡수 즉, 흡수인자나 세정탑의 단수와 같은 인자들에 의해 크게 지배되어지므로 장치 전체적인 성능은 오염가스의 Henry 정수값에 크게 의존되는 함수관계로써 H값의 감소에 따라 그 제거효율이 증가된다는 것이다.

참고문헌

1. 허목, 분뇨처리장 발생악취의 생물학적 탈취, 박사학위논문(1987).
2. 허목, 간접폭기형 생물침적 탈취장치에 의한 분뇨처리장의 악취처리, 대한환경공학회지, **11**(1), (1989).
3. 허목, 토양탈취에서 생물분해를 포함한 제거기구의 고찰, *J. Odor. Res. & Eng.*, **21**(3), (1990).
4. 허목 토양탈취에 의한 황화수소의 생물분해, 일본취기대책연구협회, **21**(3), (1991).
5. 허목, A Study on control for the nightsoil treatment Plant by a biologicalcontact filtered deodorator, 한국폐기물학회지, **9**(2), (1992).
6. 허목, 생물탈취법의 설계기술, 첨단환경기술지, **10**(1), (2002).
7. Ottengraf. S. P. P, "Exhaust Gas Purification," in Biotechnology, Rehm. H. - J. and Reed. G, Eds., Vol. 8, Chapter 12, VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim, Germany, pp. 426~452(1986).
8. Calvert. S, Goldshmid. J, Leith. D, Mehta. D, "Biological Mass Slurries," in Wet Scrubber System Study, Volume I: Scrubber Handbook, EPA - R2 - 72 -118a, U. S. Environmental Protection Agency, pp. 4~29(1972).
9. Nyer. E. K, "Biological Treatment of Organic Pollutants," M. S. Thesis, Purdue University, West Lafayette IN (1974).
10. Gilbert. S. G, Jr., "Evaluation of the Kinetic and Mass Transfer Limitations of the Rotating Biological Scrubber," M. S. Thesis, Purdue University, West Lafayette, IN(1977).
11. Kirchner. K, Kramer. P, Rehm. H. - J., "Absorption and oxidation of pollutants using bacterial cultures(monocultures)," *Int. Chem. Eng.*, **25**, 428(1985).
12. Grady. C. P. L. Jr., Lim. H. C., Biological Wastewater Treatment, Marcel Dekker(1980).
13. Laurent. A, Charpentier. J. - C., "The use of experimental laboratory - scale models in predicting the performance of gas - liquid reactors," *Int. Chem. Eng.*, **23**, 265(1983).
14. Chang. H. - C., "An Integrated Theory for Suspended Growth Bioscrubbers," M. S. Thesis, Clemsory University(1992).