

# 폐하수처리 미생물과 사상균의 분류특성 및 제어방법

## 〈2〉

宋 準 相

(국립환경연구원 연구관)

### 제2장 활성슬러지공법에서 발생하는 팽화현상의 사상체 미생물의 분리와 특성

#### 1. 슬러지 팽화현상의 개요

활성슬러지의 침전과 분리 특성은 슬러지내에 존재하는 사상 또는 floc을 형성하는 Zooglea 미생물의 상대적 분포수에 따라 달라진다. 대부분의 Bulking 현상은 구형 floc 형성 미생물보다 사상 미생물이 훨씬 많은 경우에 발생한다. 이런 미생물은 물리적으로 슬러지 침전(Settling)과 농축(Compaction)작용을 방해하여 방류수에 활성슬러지 고형물이 증가하는 원인이 된다. 최근까지는 대부분의 Bulking은 *Sphaerotilus natans*의 성장에 의하여 발생한다고 간주되었으나 최근에는 Bulking의 요인이 되는 20종 이상의 사상 미생물이 발견되었으며 서로 다른 요인에 따라 다른 미생물이 발견되는 것도 알게 되었다. 일련의 운전조건이나 폐수의 특성에 따라 과도성장하는 사상 미생물이 달라지는데 그 조건이나 특성은 다음과 같다.

- 1) 유기물의 부하량에 대한 용존 산소의 부족 또는 과잉
- 2) 질소 또는 인과 같은 영양물질의 결핍
- 3) 유기물 부하량의 부족 또는 과잉

4) 특수한 기질(처리물질)의 존재

그러므로 활성슬러지 Bulking을 방지하기 위한 합리적인 대책은 그 상황에 따른 Bulking 발생 사건의 원인 미생물을 동정하고 운전조건을 변화시켜 사상 발육을 억제시켜야 한다.

#### 2. 처리장에서의 Bulking 현상 발생 원인 미생물

표 2는 미국의 도시하수 처리장에서 발생한 bulking 현상의 원인 미생물을 우점종의 형태에 따라 분

류한 것이다. 사상체를 형성하지 않으면서도 활성슬러지 조의 점액 성막을 형성하여 문제를 일으키는 *Nocardia spp*가 33개 처리장에서 우점종으로 발견되었으며 다음으로는 Type 1701이 33개 처리장, Type 0041이 21개 처리장에서 Bulking 현상의 우점종으로 나타났다. 그러나 지금까지 가장 문제가 되는 사상체 미생물로 알려진 *S.natans*는 12개 처리장에서 나타났으며 관찰된 처리장도 29개 뿐이었다. 이상의 결과로 미루어 볼때 Type 0041, Type 1701과 *Nocardia spp*가 44-64 처리장에서 분리됨으로 가장 많은 문제

표 3. 활성슬러지공법의 운전중 발생하는 사상미생물의 종류와 조건

Suggested Causative Conditions	Indicative Filament Types
Low F / M	<i>M.parvicella</i> , <i>Nocardia sp.</i> , <i>H.hydrossis</i> , 0041, 0675, 0092, 0581, 0961, 0803
Low Do	1701, <i>S. natans</i> , 021 N, <i>Thiothrix sp.</i>
presence of sulfides	<i>Thiothrix sp.</i> , <i>Beggiatoa sp.</i> , 021 N
low PH	fungi
nutrient deficiency (N and / or P)	<i>Thiothrix sp.</i> , possibly 021 N

표 4. 폐수의 형태에 따라 발생되는 TYPE 1701과 *S. natans*의 발생

Dominant Filamentous Organism	Types of Wastes Treated					
	Entirely Domestic		Domestic + Industrial		Industrial	
	No. of plants	%	No. of plants	%	No. of plants	%
Type 1701	15	41	16	43	6	16
<i>S. natans</i>	8	100	0	0	0	

를 일으키는 것으로 나타났다.

또한 표 3에서 보는 바와 같이 처리조건이 나뉘에 따라 발견되는 미생물을 분류하면 낮은 F/M 비에서는 *M.parvicella* 등 9종류에 의한 팽화현상이 발생하며, 낮은 DO조건에서는 Type 1701 등 4종류가, Sulfide 존재시에는 3종류가 Bulking 현상 발생 원인 미생물인 것으로 나타났으며 pH가 낮은 경우에는 Fungi가 자라서 Bulking 현상이 발생한다. 그리고 표 4에서 보는 바와 같이 생활하수만 처리하는 처리장에서는 *S.natans*도 Bulking 현상의 원인 우점종으로 나타나고 있으나 산업폐수와 병행하여 처리하는 처리장에서는 *S.natans*는 자라지 못하고 Type 1701이 Bulking 현상 원인 우점종으로 나타났다. 이상의 결과로 미루어 볼때 폐수처리현장에서 가장 문제가 되는 bulking 현상은 처리조건이나 처리하는 폐수의 특성에 따라 각기 원인 우점종이 달라지므로 Bulking 현상의 대책을 마련하기 위하여는 이들 원인균을 분리하여 그 Type을 동정하므로 근본적인 대책을 실행할 수 있다.

### 3. 사상체 미생물의 Group 분류 및 특성

#### 가. Group별 분류 기준

네덜란드의 TNO 환경위생연구소에 근무하는 D.H.Eikelboom은 1, 100종의 활성 슬러지에서 팽화현상의 원인이 되는 사상균을 26개 Type을 분리하여 7 Group으로 분류하였다.

Group별 분류 기준으로는 사상균의 형태학적 특성에 의하여 분류하였으며, 다음의 7가지 기준에 따라 구분하였다.

- 1) 초(Sheath) 또는 Slime layer의 존재 여부
- 2) Gliding motility
- 3) Branching : true of false

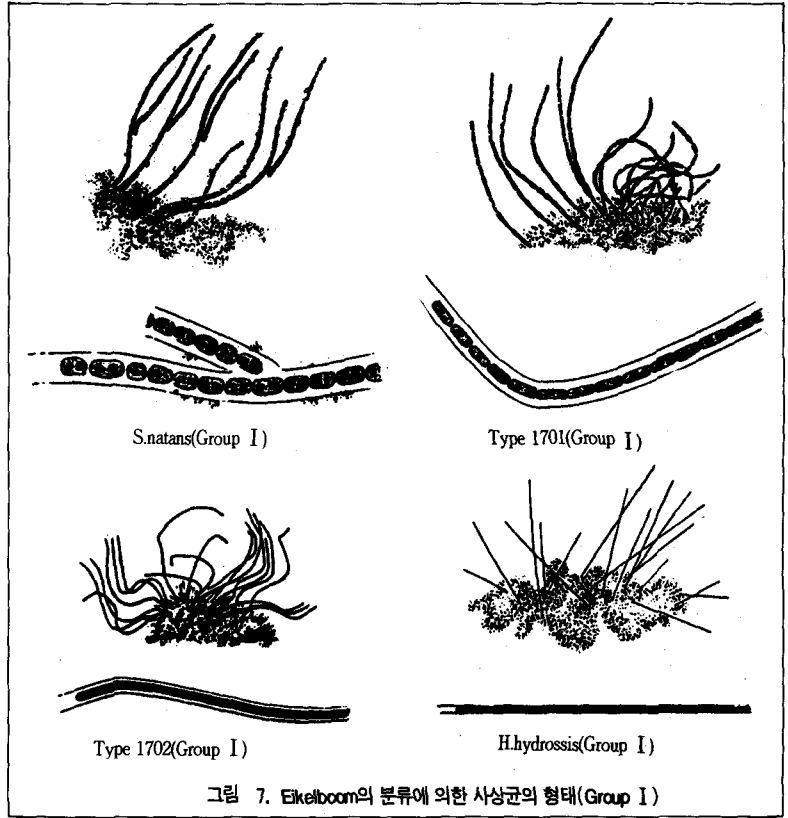


그림 7. Eikelboom의 분류에 의한 사상균의 형태(Group I)

표 5. Eikelboom에 의하여 분류된 Group I 사상균의 형태학적, 생화학적 특성(1975)

Designation	Trichome	Sheath	Motility	Cells	Intracellular deposits	Physiology	Other
Group I		Present				Gram negative	
1 Sphaerotilus natans	1000 um. false branching frequent			Cylindrical. 1.2-3.0 um D. 1.5-5.0 um L	PHB granules		Bacterial cells on filaments
2 Type 1701	200 um. false branching incidental			Cylindrical. 0.5-0.9 um W 2.5-3.5 um L	PHB granules	Some deposit Mn slowly	Bacterial cells on filaments
3 Type 1702	150 um. unbranched	Clearly visible by phase contrast microscopy		0.4-0.5 um D 2.4-4.0 um L	No PHB granules seen		
4 Haliscomenobacter hydroxsis	Small straight. unbranched			0.2-0.35 um W 2.5-4.0 um L	Electron dense granules. no PHB		
5 Type 0321	Small straight	Fibrillar Sheath		0.3 um D			H. hydroxsis could not be isolated when this was present

- 4) 사상체의 특성, 형태 및 크기
- 5) 그람 염색 결과
- 6) 세포의 직경, 길이 및 형태
- 7) Poly- $\beta$ -hydroxybutyrate(PHB), Polyphosphate, Sulfur와 같은 세포내 inclusion의 구성성분 및 존재 여부

이상의 기준에 따라서 약 800주의 사상균을 분리하였으며 앞서 말한 바와 같이 26 type으로 분류하였으며 7개 Group으로 분류하였다.

나. Group별 특성

1) Group I

Group I에 속하는 사상균은 표 5 및 그림 7에서 보는 바와 같이

*S.natans*, Type 1701, Type 1702, Type 0321 및 *H.hydraxis*와 같은 초(Sheath)를 형성하는 그람 음성 세균이다.

2) Group II

Group II에 속하는 사상균은 표 6 및 그림 8에서 보는 바와 같이 Type 0041, Type 0675 및 Type

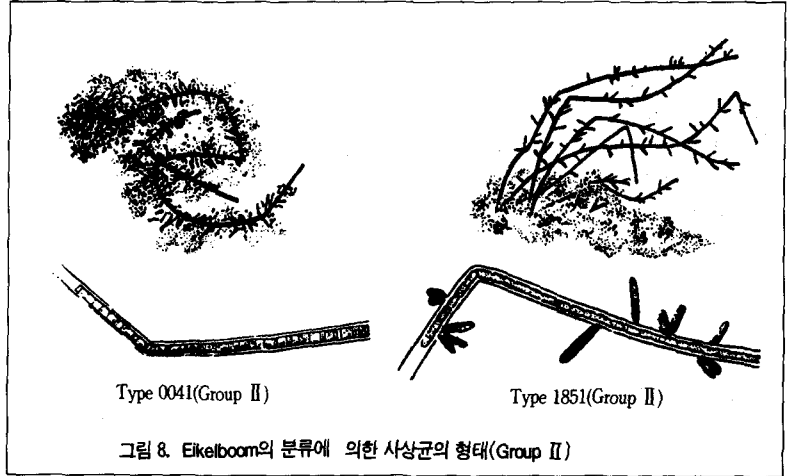


표 6. Eikelboom에 의하여 분류된 Group II 사상균의 형태학적, 생화학적 특성(1975)

Designation	Trichome	Sheath	Motility	Cells	Intracellular deposits	Physiology	Other
Group II		Present				Gram positive	
6 Type 0041	Several 100 um, occasional false branching	End cells not enclosed		Barrel shaped 1.0-1.4 um W, 0.7-2.3 um L			Hormogonia formed
7 Type 0675	Resembles type 0041			0.6-0.8 um W, 1.5-4.0 um L			
8 Type 1851	300 um, slightly bent			Cylindrical, 0.5-0.7 um W, 1.7-3.5 um L			Bacterial cells adhere to filament

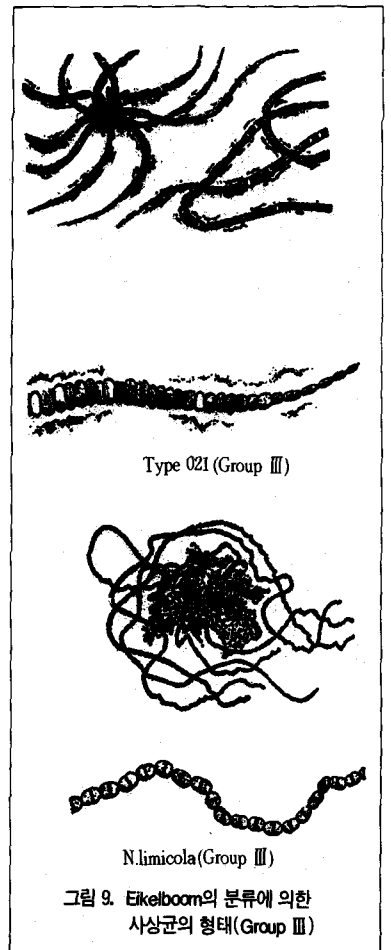


표 7. Eikelboom에 의하여 분류된 Group III 사상균의 형태학적, 생화학적 특성(1975)

Designation	Trichome	Sheath	Motility	Cells	Intracellular deposits	Physiology	Other
Group III	Curled	None					Resemble blue green algae
9 Type 021 N	Several mm, tapered, slime layer present			Basal cells discoid, 1.8-2.9 um W, 0.4-0.7 um L, apical cells Cylindrical, 0.6-0.8 um W, 2.0-3.0 um L	Volutin granules S. not normally present	Gram variable	Necroid cells present
10 Nostocoida limicola	200 um, occasional			Ovoid, 0.7-1.5 um D, 0.3-0.6 um L		Gram Positive	

1851과 같은 초를 형성하는 그람 음성 세균이다.

3) Group III

Group III에 속한 사상균은 표 7 및 그림 9에서 보는 바와 같이 Type 021N, *Nostocoida limicola* 및 Cyanophyceae와 같은 초를 형성하지 않고 Blue-Green Algae와 유사한 다세포 세균이다.

4) Group IV

Group IV에 속하는 사상균은 표 8 및 그림 10에서 보는 바와 같이 *Microthrix parvicella*, Type 0581 및 Type 0192와 같은 구부러지고 코일과 같은 형태의 가지(지: Branch)를 치지 않고, Phase Contrast 현미경으로 관찰시 격막(Septa)가 없으며, Volutin으로 된 Granule이 세포 내 존재하는 사상세균이다.

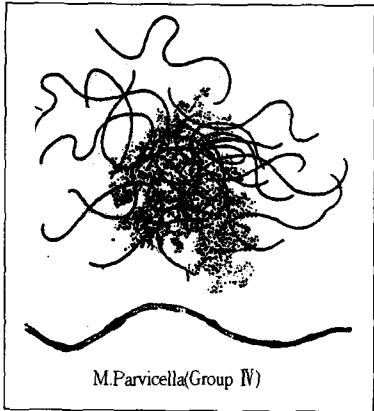
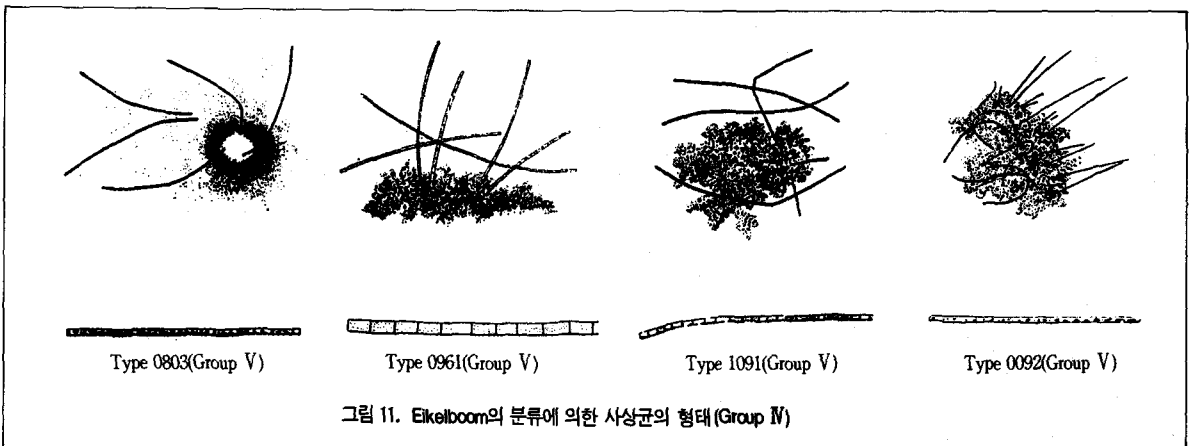


표 8. Eikelboom에 의하여 분류된 Group IV 사상균의 형태학적, 생화학적 특성(1975)

Designation	Trichome	Sheath	Motility	Cells	Intracellular deposits	Physiology	Other
Group IV	Slender, coiled, unbranched	None			Volutin Probably Present		
12 <i>Microthrix parvicella</i>	500 um, thin, strongly coiled			Cylindrical, 0.3-0.6 um D, 0.7-1.8 um L		Gram positive	
13 Type 0581	300 um, slender, coiled			0.3 um W, 0.7-1.6 um L		Gram negative	Metachromatic granules, electron dense granules
14 Type 0192	100 um, thin, slightly bent			0.15-0.25 um W, 1.5-3 um L	Volutin		

표 9. Eikelboom에 의하여 분류된 Group V 사상균의 형태학적, 생화학적 특성(1975)

Designation	Trichome	Sheath	Motility	Cells	Intracellular deposits	Physiology	Other
Group V	Straight, unbranched	None				Gram negative	
15 Type 0803				Cylindrical, 0.6-0.8 um W, 0.9-3.0 um L	Volutin		Electron dense areas at septa
16 Type 1091				0.6 um D, 0.7-1.6 um L			Intercalary regions suggest sheath
17 Type 0092	Slime layer			0.4-0.6 um D, 1.4-2.0 um L	Polyphosphate distributed throughout cells		Trichomes surrounded by slime layer
18 Type 0961	Several 100 um, straight or smooth coiled			Cylindrical, 1.1-1.5 um D, 0.9-3.0 um L			



5) Group V

Group V에 속하는 사상균은 짧고(100m 이하) 곧게 또는 약간 구부러진 사상체를 형성하는 그람 음성 세균으로 표 9 및 그림 11에서 보는 바와 같이 Type 0803, Type 1091, Type 0092 및 Type 0961 등이 이에 속한다.

6) Group VI

Group VI에 속하는 사상균은 활성 슬러지의 통상 분포균으로 gliding 하여 운동성을 나타내는 세균으로 표 10 및 그림 12에서 보는 바와 같이 Type 0914, *Beggiatoa spp.*, Type 1111 및 Type 1501 등이 이에 속한다.

7) Group VII

Group VII에 속하는 사상균은 앞의 분류 기준에 맞지 않는 기타 사상 미생물로서 Type 1863과 같이 연쇄상구균의 형태를 가진 사상체를 형성한 것과 Type 0411과 같이 세포 사이에 격막을 형성하는 타원형의 세포가 연결된 사상체를 가진 것들을 수 있으며 표 11 및 그림 13에서 보는 바와 같다.

4. 활성 슬러지 미생물의 분포 조절을 통한 팽화현상의 제어

가. 사상균보다 활성이 높은 미생물의 투여

1) *Arthrobacter sp.*의 이용

벨기에의 로우바인 카톨릭 대학교의 E. Van den Eynde는 슬러지 팽화현상의 원인 미생물인 *Sphaerotilus natans*와 비슷한 생화학적 특성 즉 대사 다양성을 가지며, 표 12에서 보는 바와 같이 보다 활성이 높은 균주인 *Arthrobacter sp.*를 *S. natans*를 혼합 배양하므로 탄소원이 주로 포도당인 인공하수를 이용하여 실험한 결과 슬러지 팽화현상의 지표가 되는 SVI가 현저히 감소하는 결과를 나타냈다. 이는 *Arthro-*

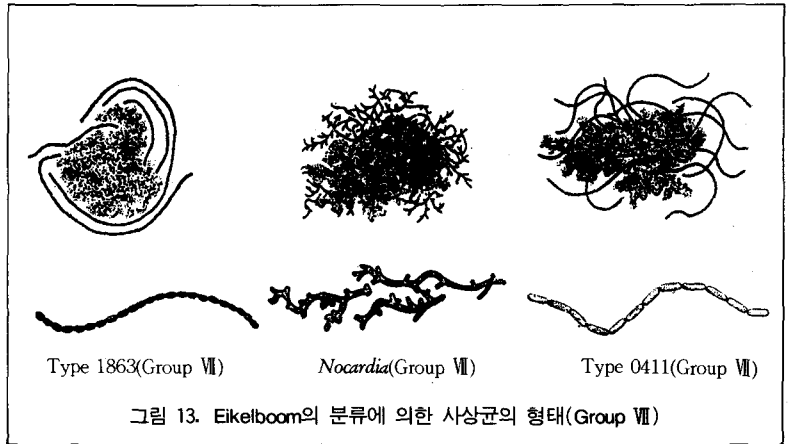


표 10. Eikelboom에 의하여 분류된 Group VI 사상균의 형태학적, 생화학적 특성(1975)

Designation	Trichome	Sheath	Motility	Cells	Intracellular deposits	Physiology	Other
Group VI		None	Gliding				
19 Type 0194	Slightly bent		Slight gliding movement	0.8 um W, 0.6-1.0 um L	S deposits present	Gram positive	
20 <i>Beggiatoa spp.</i>	0.8 um D. or 1.9 um D.		Distinct gliding movement		S deposits present	Gram negative	
21 Type 1111 <i>Flexibacter</i>	100 um, septated, bent		Slight but distinct gliding	0.5-0.8 um D.	No S deposits present	Gram negative	Electrodense granules
22 Type 1501 <i>Flexibacter</i> or <i>Microscilla</i>	50 um small, extremely flexible			0.5 um D.		Gram negative	

표 11. Eikelboom에 의하여 분류된 Group VII 사상균의 형태학적, 생화학적 특성(1975)

Designation	Trichome	Sheath	Motility	Cells	Intracellular deposits	Physiology	Other
Group VII							
23 Type 1863	Short chains of cells	None		Coccoid 0.8 um W, 0.5-1.0 um L.		Gram negative	
24 Type 0411 <i>Flexibacter</i>	Short, strongly coiled	None		0.5-0.7 um W, 1.5-4.7 um L.		Gram negative	

*bacter sp.*가 *S. natans*보다 활성이 높아 먼저 증식하므로 사상균의 증식이 상대적으로 줄어들 뿐 아니라 사멸 속도도 늦기 때문인 것으로 설명하고 있다.

2) Plug-flow Contact Tank의 설치  
그림 14에서 보는 바와 같이 폭기

조 용량의 약 1/20 정도 되는 Contact Tank를 설치하여 슬러지를 반응과 함께 원폐수를 유입시키면, 사상균보다 증식 속도가 빠른 Floc 형성 세균이 많이 증식하므로 사상균의 발육을 억제하게 되어 슬러지 팽화현상을 억제하는 방법이다. 이

방법은 네덜란드의 농업대학교 수질오염관리부의 J.H.Reisink 등이 연구 보고한 것이다. 연구 보고에 의하면 Contact Tank가 Complete Mixed Flow인 Circular Type인 경

우에는 Plug-flow인 rectangular Type보다 SVI 값이 높아지는데, 처음에는 거의 같은 효과를 나타내지만 나중에는 효과가 없는 것으로 연구 되었다.

표 12. 간헐적 혹은 연속적 인공폐수 주입에 따른 포도당의 제거율

미생물	간헐적 제거율 mg glucose / g dry wt min	연속적 제거율 mg glucose / g dry wt min
<i>S. natans</i>	1.8	1.2
<i>S. natans</i> + <i>Arthrobacter</i>	3.2	1.4
<i>Arthrobacter</i>	4.6	2.2
<i>Arthrobacter</i> + <i>S. natans</i>	4.5	1.4

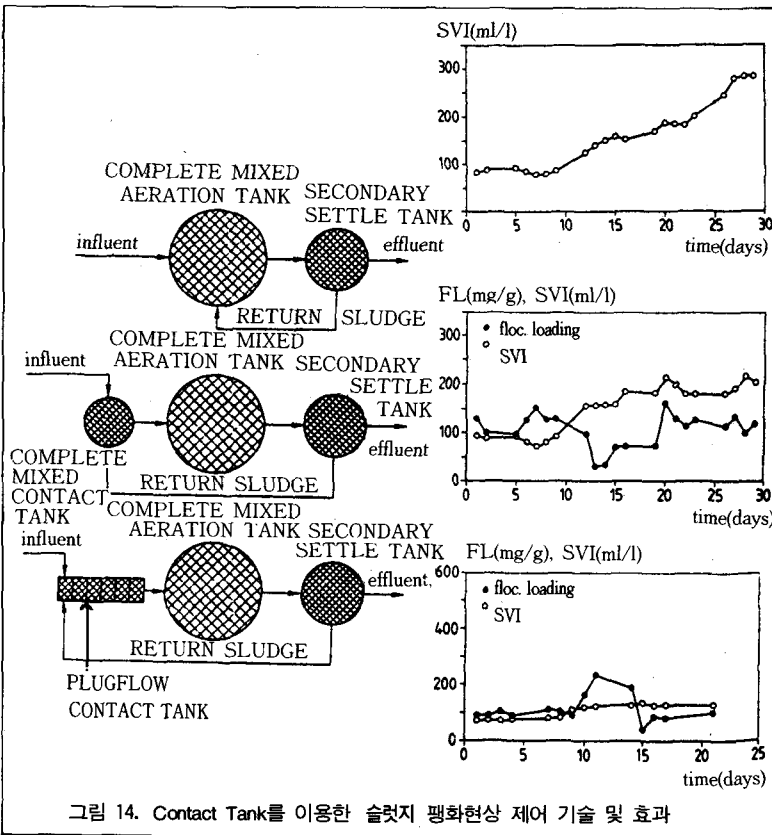


그림 14. Contact Tank를 이용한 슬러지 팽화현상 제어 기술 및 효과

본 방법의 기본적인 원리는 Contact Tank 내에서 일차적으로 원폐수의 유기물질을 Floc-forming Bacteria가 이용하여 증식되고 사상균보다 많은 개체수를 유지하는 우점종으로 변하게 된 후에 폭기조로 유입되므로 사상균의 증식이 억제된다.

그러나, 이 방법은 도시하수 처리에서는 매우 유용하지만 제품의 공정에 따라 원폐수의 조성이 변하는 산업폐수 처리장에서는 Contact Tank에 그 공장에서 배출되는 유기물질(난분해성 또는 독성 유기물질 포함)을 분해할 수 있는 고활성 균주를 분리하여 Contact Tank에 접종하여 효과를 얻을 수 있다. 주의하여야 할 점은 원폐수에 다량의 황산기가 포함되어 있을 경우, Contact Tank 내의 용존산소가 부족하게 되면 황산염 환원균의 증식으로 Sulfide 기가 생성되어 폭기조에서 *Beggiatoa alba*와 같은 사상균에 의한 슬러지 팽화현상이 발생할 수도 있으므로 주의하여야 한다.

#### 나. 사상균의 분해 효소 생성 세균의 투여

사상균에 대하여 Lytic Action 작용을 하는 효소를 생성하는 미생물을 슬러지나 토양 등에서 분리하여 생성된 효소나 균체를 폭기조에 투여하여 슬러지 팽화현상을 제어하는 방법으로 일본의 J. Yaguchi 등에 의하여 연구 보고되었다.

이와 같은 효소를 생성하는 미생물은 세균인 *Pseudomonas sp. Bacil-*

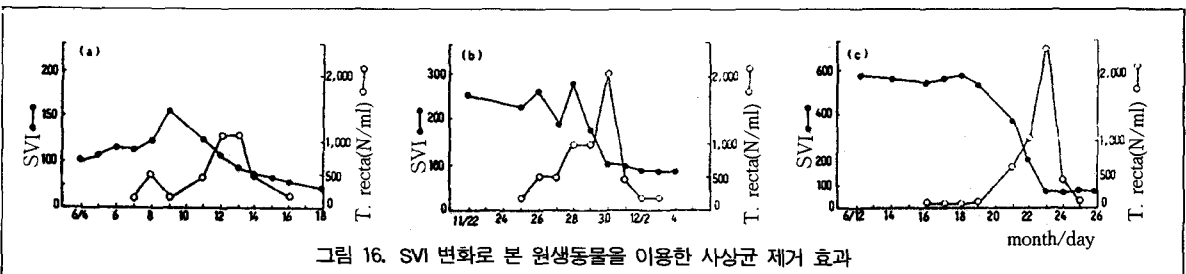


그림 16. SVI 변화로 본 원생동물을 이용한 사상균 제거 효과

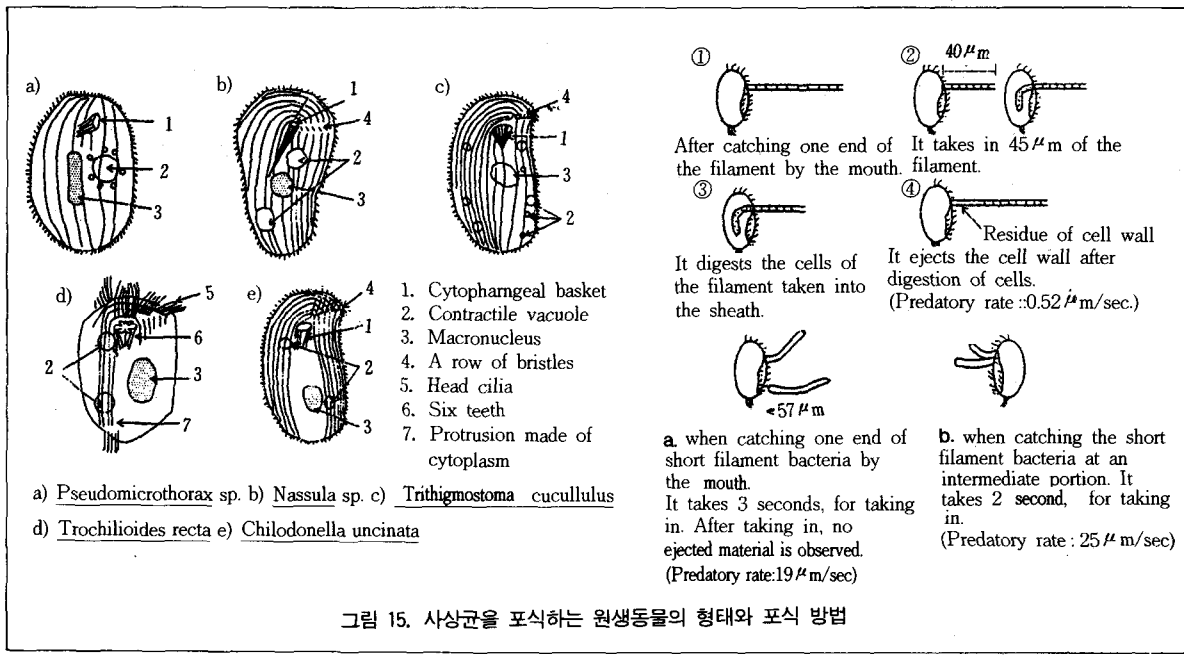


그림 15. 사상균을 포식하는 원생동물의 형태와 포식 방법

lus sp., *Xanthomonas maltophilia* 등과 진균류인 *Streptomyces* 등이 연구 보고되었다. 특히, *X. maltophilia* 는 슬러지 팽화현상의 원인 미생물인 Type 021N에 대하여 효과적인 Lytic Action을 하는 것으로 보고되었으며, 다음에 설명할 원생동물을 투여하는 것보다 대량 생산 측면에 보다 효과적인 것으로 설명하고 있다.

다. 사상균 포식 원생동물의 투여

그림 15에서 보는 바와 같은 사상균을 포식할 수 있는 섬모충류인 *Trithigmostoma cucullus*, *Trochiloides recta* 등을 폭기조에 투입하여 슬러지 팽화현상의 원인이 되는 사상균을 포식시키는 방법이다. 그림 16에서 보는 바와 같이 원생동물의 개체수가  $2,000/ml$  이상이 되면 SVI 값도 100 전후로 낮아지는 것을 알 수 있다.

본 연구는 일본의 공해연구소 및 Tegama 하수처리장에서 공동으로 연구 보고된 자료를 인용한 것으로 원생동물을 다량으로 증식시킬 수 있는 배지만 연구 개발된다면 가장 간편한 슬러지 팽화현상의 제어 대

책이 될 수 있다. <끝>

참고문헌

1. 환경청, 산업폐수 관리(환경감시 실무 요령) 1985.
2. 金甲中, 金五植 譯, 환경 미생물, 녹원 출판사, 1988.
3. 須藤隆一等, 生物相 からのみた處理機能 ① 診断, 일본 산업용수 조사회, 1983.
4. 中鹽眞喜夫, 미생물 과학 I, 분류, 대사, 세포 생리, 학회 출판사, 1980.
5. George Tchobanoglous, Wastewater Engineering: Treatment Disposal Reuse, Macgraw-Hill Book Company, second edition, 1979.
6. B. Chambers & J. Tomlinson, Bulking of Activated Sludge: Preventive and Remedial Methods, Ellis Horwood Limited, 1982.
7. W.O. Pipes, Microbiology of Activated Sludge Bulking, Advagced in Applied Microbiology, Vol. 24, 85-127, 1978.
8. A.D. Venosa, Lysis of Sphaerot-

- ilus natans Swarm Cells by Bdellovibrio bacteriovorus Applied Microbiology, Vol. 29, 702-705, 1975.
9. D.H. Eikelboom, Filamentous organisms observed in Activated Sludge, Water Research, Vol. 9, 365-387, 1975.
10. M.G. Richard, et al., Growth Kinetics of Sphaerotilus species and their Significance in Activated Sludge Bulking, SEEHRL, College of Engineering, Univ. of California, Berkely, 1982.
11. M.G. Richard, et al., Growth Kinetics of the Filamentous organism Type 012N and its Significance in Activated Sludge Bulking, SEEHRL, College of Engineering, Univ. of California, Berkely, 1984.
12. J.H. Rensink, et al., The Effect of Contact Tank Operation on Bulking Sludge and Biosorption Processes, Wat. Sci. Tech. Vol. 23, Kyoto, 857-866, 1991.