

호기성 소화 슬러지의 케이크 여과특성에 관한 연구

〈하〉



李在福

(경성대 환경공학과 부교수)

3. 실험결과 및 분석

3.1 슬러지의 비저항 및 공극율

잉여 슬러지의 호기성 소화를 진행하면서 부크너 펨넬 시험에 의해 측정된 슬러지 케이크의 평균 비저항을 25°C 온도에서 $5 \times 10^4 \text{ N/m}^2$ 의 압력에 대한 값으로 표시하여 그림 3에 나타내었는데 수직의 실선은 측정값들의 범위를 나타내고 점들은 평균값을 의미한다. 잉여 슬러지의 여과 케이크 평균 비저항은 $2.99 \times 10^{12} \text{ m/kg}$ 이었고 호기성 소화 슬러지의 평균 비저항은 2일간 폭기하였을 때 9.5% 정도 일시적으로 감소하였으며, 그 이후는 여과케이크 평균 비저항이 계속

증가하여 소화일수 109일의 시점에서는 여과 케이크 평균 비저항이 $7.95 \times 10^{12} \text{ m/kg}$ 에 달하여 잉여 슬러지의 여과 케이크 평균 비저항이 2.66배를 나타내었다. 활성 슬러지의 성장조건의 내생 호흡 단계에 있을 때에 체외 고분자 물질이 가장 활발히 생산되는 것이 Pavoni 등의¹³⁾ 실험에 의해 밝혀진 바가 있으므로, 본 연구에서 확인되지는 않았지만 호기성 소화 초기에 나타나는 비저항 감소는 내생 호흡 초기단계에서의 미생물이 체외 고분자 물질을 분비함에 따라 미세한 입자들이 응결에 의해 제어되기 때문으로 사료된다. 본 실험에서는 2일의 폭기에 의해 여과 케이크의 평균 비저항이 9.5% 감소하였으며 이는 곧 슬러지의 탈수에 소요되는 에너지가 절약될 수 있음을 의미한다.

잉여 슬러지의 호기성 소화를 진행하면서 응축시험에 의해 측정된 슬러지의 공극율 변화를 그림 4에 나타내었다. 0.05 kg/cm^2 로부터 12.8 kg/cm^2 까지의 아홉 단계인 하중조건에 대하여 각각 소화기간이 다른 슬러지에 대하여 4-7회 반복실험하여 평균값을 나타내었다. 소화일수 74일과 147일의 측정결과가 역방향의 공극율 변화를 보이기는 하나, 전체적으로 소화일수가 클수록 동일한 하중에 대한 공극율이 크게 나타나고 있으므로 호기성 소화가 진행될수록 같은 압축조건으로 만들어진 케이크 내에 함유된 수분의 함량이 증가하는 경향인 것을 알 수가 있다. 이 실험에 사용된 하중조건은 $4.90 \times 10^3 \text{ N/m}^2$ 에서 $1.25 \times 10^6 \text{ N/m}^2$ 까지의 압축압력에 해당하고 최종 하중 조건은 대기압력의 12.4배에 달하는 압력인데, 최종 하중단계에서 잉여

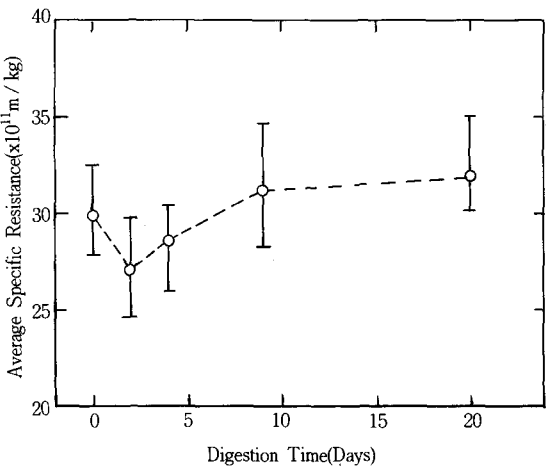


그림 3. Effects of digestion time on the average specific resistance.

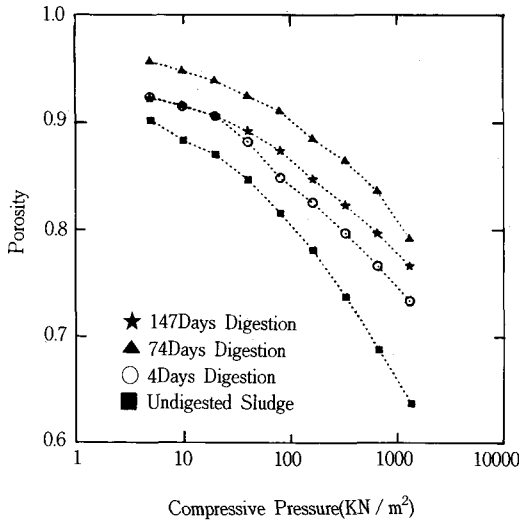


그림 4. Effects of digestion time on the cake porosity.

슬럿지의 공극율이 0.637, 소화일수 74일인 슬럿지의 공극율이 0.790을 나타내고 있다. 이것은 기계식 탈수 장치를 사용할 때 얻을 수 있는 고형분율(solidosity)의 한계 근사값을 실험적으로 보이는 의미를 갖는데 공극율과 고형분율의 합은 1로 정의된다. 최종 하중단계의 고형분율을 계산하면 74일간의 호기성 소화를 통해서 고형분율은 0.363에서 0.210으로 감소하여 잉여 슬럿지에 대한 값의 57.9%로 압축 케이크의 고형물 함량이 감소하는 것을 보여준다.

표 2에는 $1.57 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ 의 압력에 해당하는 1.6 kg/cm^2 의 하중조건에서 얻어진 공극율 실측자료를 최대값, 최소값 및 평균값으로 표시하였는데, 상관관계가 뚜렷하지는 않으나 반복실험을 통해 얻어진 슬럿지의 공극율은 소화일수에 따라 증가하는 양상을 나타내었다. 공극율이 크다는 것은 탈수 케이크의 함수율의 높음을 의미하므로 장기간의 호기성 소화는 슬럿지의 탈수성을 악화시키는 것을 알 수가 있다. 호기성 소화 슬럿지의 케이크 여과 특성상수를 도해법에²⁹⁾ 의하여 결정하여 표 3에 정리하였다. 압축계수, n 은 소화일수에 따라 증가하여 압력변화에 대하여 비저항의 변화가 더욱 민감한 것으로 나타났으나, 경험상수, β 는 소화일수에 대한 변화가 뚜렷하지 않았으며, 경험상수, α_0 와, ϵ_0 의 결정에 크게 영향을 주는 침강시험 결과는

각 소화일수에 대하여 대체로 유사하여 큰 차이를 보이지 않았다.

표 2. Cake porosity measurements at the pressure of $1.57 \times 10^5 \text{ N/m}^2$

Digestion Time (Days)	Porosity		
	Mean	Maximum	Minimum
0	0.779	0.823	0.720
4	0.823	0.864	0.715
74	0.882	0.888	0.864
109	0.838	0.896	0.780
147	0.845	0.857	0.728

표 3. Cake filtration constants of the aerobically digested sludge.

Digestion Time (Days)	Constants				
	α_0 [m/kg]	n [-]	ϵ_0 [-]	β [-]	ρ_s [N/m³]
0	1.58×10^9	1.64	0.989	0.34	18
4	1.41×10^9	1.70	0.989	0.28	18
74			0.989	0.26	18
109	1.58×10^9	2.10	0.989	0.32	18
147			0.989	0.30	18

3.2 슬럿지의 물리화학적 특성

W_u 등은¹⁸⁾ 성장조건에 따른 활성 슬럿지의 탈수성의 변화를 연구하여 슬럿지의 플록 형성 기능이 왕성할 때 탈수성이 우수함을 밝히고, 슬럿지의 침강성을 나타내는 지표인 SVI(sludge volume index)와 평균 비저항의 사이에 단조 증가관계가 존재함을 보였다. 이 보고는 플록 형성 기능을 표시하는 슬럿지의 응결성이 평균 비저항의 결정에 중요하게 작용함을 실험적으로 보인 것이다. 고분자 전해질에 의한 응집효과는 pH의 변화에 크게 영향을 받는 것으로 알려져 있는데 활성 슬럿지의 체외 고분자 물질도 예외는 아니다.^{9, 13)} 그림 5에는 소화일수에 따라 pH가 저하하여 약 15일 이후부터는 호기성 소화 반응조의 pH 값이 약 6.0 이하의 수준을 나타내고 있음을 보인다. pH의 저하는 그람 음성 간균(Gram-negative rod)인 Nitrosomonas와 Nitrobacter에 의해 진행되는 것으로 사료되는데, 이 미생물들은 호기성이고 30°C부근이 활동의 최적 온도조건이며 pH가 6이하에서 Nitrosomonas는 활동에 저해를 받게 된다.^{30, 31)} 회분식 반응조를 사용한 호기성 소화

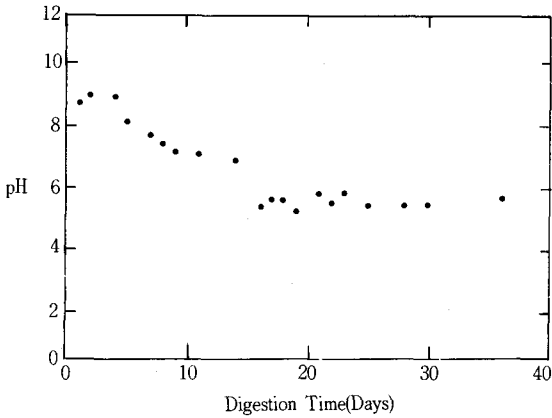


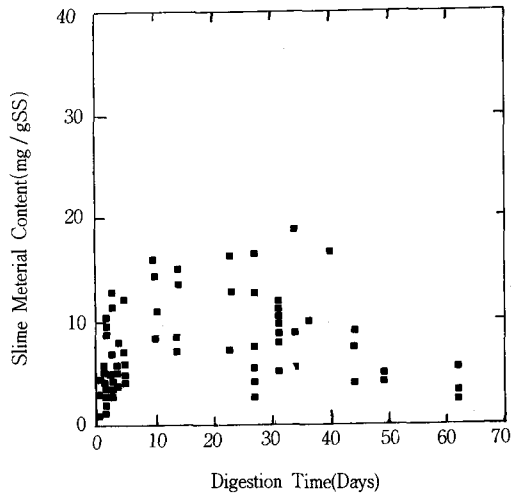
그림 5. Variation of pH of the aerobically digested sludge.

실험에서 잉여 슬러지의 경우는 pH가 8.7인데 비하여 소화일수 20일에는 pH 5.8로 저하되었고, pH 6.0부근으로 떨어진 소화일수 15일 쯤부터는 pH의 저하가 매우 완만하게 나타났다.

Pavoni 등은¹³⁾ 고령토(kaolinite)의 부유액에 미리 추출된 체외 고분자 물질을 200mg/l의 농도로 투여하여 응결에 미치는 pH의 영향을 조사하였는데, pH 4.0부근에서 부유액의 탁도가 가장 높았고 pH가 높아 갈수록 응결이 잘 되어 탁도가 낮았다. 그러므로 호기성 소화에 의해 pH가 낮아지는 것은 소화슬러지가 갖는 체외 고분자 물질에 의한 응결성을 약화시키는 요인으로 작용하여 부유액 중에서 또는 여과 케이크의 공극을 통해 흐르는 여액 중에서 미세한 입자의 이동을 원활하게 할 것이다. 여과 케이크의 모형에서 설명되는 바와 같이, 케이크의 여재접면부근에서는 액압이 매우 낮고 고형물은 압축력을 가장 많이 받아 공극율이 상당히 감소하므로 미세한 입자들의 이동이 원활하면 그만큼 여재접면쪽으로 몰려 있게 되어 케이크 및 여재의 폐색을 촉진할 수 있다. 현단계에서, pH의 저하는 소화 슬러지의 응결성을 저하시키고, 또한 케이크 및 여재의 폐색을 촉진하여 탈수성을 악화시키는 요인인 것으로 추론되며 장래 확인되어야 할 부분이다.

Gehr와 Henry가²⁴⁾ 제시한 방법에 준하여 체외 고분자 물질의 양을 소화일수에 대하여 분석한 결과를 그림 6과 그림 7에 나타내었다. 체외 고분자 물질을 분석 과정에서 분리단계에 따라 두가지로 구분하여 상대적으로 낮은 원심력 조건인 1470G에서 분리되는 슬라임

물질(slime material)과 13200G의 높은 원심력 조건에서 분리되는 교감물질(capsular material, CM)로 분류한다. 생물학적 슬러지의 응결성은 교감물질에 의해 지배되며 슬라임 물질의 영향은 상대적으로 적은 것으로 평가되고 있다.²⁴⁾ 세척단계에서 분리되는 슬라임의 함량변화를 표시한 그림 6은 소화일수가 길어짐에 따라 함량이 감소해 가는 것을 보이고 있다. 세척단계에서 분리된 상등액에도 비교적 상당한 양의 체외 고분자 물질이 존재하는 것을 보이고 있으며 장시간 소



a 그림 6. Slime material content variation in the washing step.

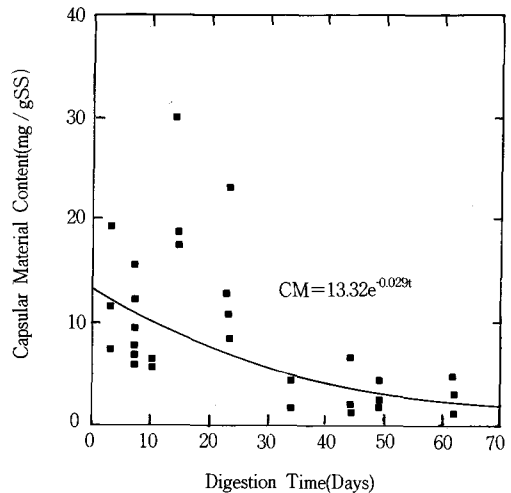


그림 7. Capsular material content variation in the aerobically digested sludge.

화에 따라 함량이 감소하는 것으로 나타났다.

고속 원심분리를 이용하여 응결성의 지배요인인 교감물질을 분리하였는데, 호기성 소화에 따른 교감물질의 함량변화로써 표현하여 그림 7에 나타내었다. 소화일수가 증가함에 따라 슬러지에 포함된 교감물질의 양이 감소함을 보이고 있어 자산화 과정을 통해서 교감물질의 분해도 진행되는 것으로 추측된다. 교감물질의 감소를 나타내는 일차 반응식을 세워서 분해속도 상수를 구한 결과 0.029day^{-1} (base e)를 얻었으며, 선형관계식을 세웠을 때의 상관계수는 0.69를 나타내었다. 교감물질의 분해속도상수의 값은 활성슬러지의 내생호흡계수가 일반적으로 나타내는 범위인 $0.04 - 0.075\text{day}^{-1}$ 보다는 다소 낮은 값이었다. 이러한 경향은 장기간의 포기 후에 슬러지의 비저항이 상승하는 현상에 대한 원인을 밝혀줄 가능성을 담고 있는 것으로 사료된다.

호기성 소화에 따른 슬러지의 구성성분은 표 4에 나타낸 바와 같다. 일본 위생시험법 주해의³²⁾ 조섬유 측정방법에 의하면 시료로부터 탄수화물, 단백질, 지방질을 제하고 남는 유기물이 조섬유라고 정의되어 있고, 또한 제등은³³⁾ 탄수화물, 단백질, 지방질 및 조섬유의 합계가 하수 슬러지의 휘발성 고형물량의 100%에 달했다고 보고하였으며, 이와 야지는³⁴⁾ 이를 인정한 바 있는데, 본 논문에서는 기타(others)로써 그 값들을 나타내었다.

호기성 소화가 진행됨에 따라 슬러지의 휘발성 고형물량이 점차 감소하고 있고 휘발성 유기물의 구성성분인 탄수화물, 단백질, 지방질도 각각 함량이 감소하고 있어서 전체적으로 자산화에 의하여 슬러지가 감량되고 있음을 보인다. 그리고, 괄호 속에 표시된 성분 구성비를 비교하면 소화일수의 증가에 따라 슬러지의 MLVSS에 대한 성분 구성비가 탄수화물, 단백질, 지

방질은 증가하고 기타의 구성비는 감소하는 것으로 나타나, 조섬유라고도 정의되는 기타성분의 함량이 탄수화물, 단백질, 지방질에 비하여 상대적으로 크게 감량되는 것을 알 수 있었다.

그림 8은 소화일수에 따라 슬러지를 Toyo 5A 여과지로 케이크 여과하여 얻어진 여액의 수질을 COD의 값으로 표시한 것인데 2회 반복 실험한 것을 함께 나타내었다. 슬러지의 안정화 공정인 호기성 소화를 통해서 여액 중에 존재하는 유기물질의 양이 증가하는 것을 보여주고 있으며 여액의 재처리가 필요할 것으로 판단된다. 호기성 소화가 진행됨에 따라 여액의 수질이 나빠지는 것은 슬러지의 미세한 입자들이 케이크 및 공극의 크기가 $7\mu\text{m}$ 인 Toyo 5A 여과지를 통과하여 흘러나오거나, 또는 호기성 소화과정에서 세포의 분해(cell lysis)에 의해 여액의 COD가 증가하는 것으로 사료되는데 추후 검정이 필요하다.

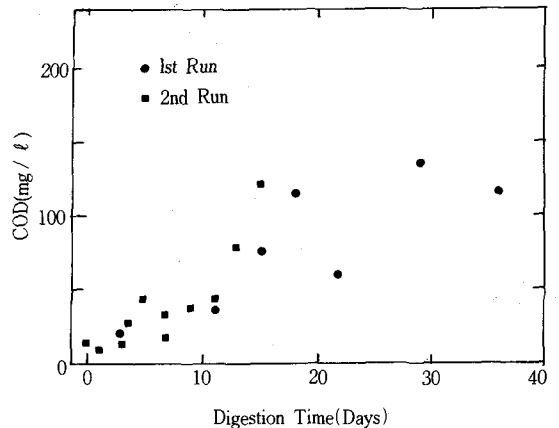


그림 8. Effects of digestion time on the filtrate quality.

표 4. Chemical composition of the aerobically digested sludge.

Digestion Time (Days)	MLVSS (mg / ℓ)	Components(mg / ℓ)			
		Carbohydrate	Protein	Lipid	Others
0	7237	1918(27%)	1737(24%)	65(1%)	3516(49%)
10	5304	1628(31%)	1618(31%)	58(1%)	2000(38%)
19	5086	1577(31%)	1663(33%)	71(1%)	1775(35%)
34	4300	1492(35%)	1543(36%)	65(2%)	1191(28%)

* A Value in Parentheses is the Percentage of MLVSS

4. 결 론

잉여 슬러지의 호기성 소화에 따른 케이크 여과특성 변화를 연구하기 위하여 슬러지의 평균 비저항과 공극률을 해석하고 탈수성 관련인자로서 슬러지의 물리화학적 특성변화를 실험적으로 조사한 결과 다음의 결론을 얻었다.

(1) 잉여 슬러지의 여과 케이크 평균 비저항은 2일

간 폭기하였을 때 9.5% 정도 일시적으로 감소하였으며, 그 이후는 소화일수가 길어짐에 따라 계속 증가하여 탈수성이 악화되었다.

(2) 호기성 소화가 진행될수록 동일한 하중에 대한 케이크의 공극율이 증가하여 같은 압축조건의 케이크 내에 함유된 수분의 함량이 증가하는 것으로 나타났다.

(3) 호기성 소화 슬러지의 압축계수는 소화일수에 따라 증가하여 압력변화에 대하여 비저항의 변화가 더욱 민감한 것으로 나타났다.

(4) 체외 고분자 물질 중 고속 원심분리를 이용하여 분리한 교감물질의 함량은 소화일수에 따라 감소하는 것으로 나타났으며 분해속도상수의 값은 0.029day^{-1} 를 얻었다. 활성 슬러지의 내생호흡계수의 일반적인 범위보다는 다소 낮은 값으로 나타났다.

(5) 호기성 소화가 진행됨에 따라 휘발성 유기물의 구성성분인 탄수화물, 단백질, 지방질의 함량이 각각 감소하였고, 성분 구성비를 비교하면 기타 성분의 함량이 탄수화물, 단백질, 지방질에 비하여 상대적으로 크게 감량되었다.

(6) 호기성 소화의 진행에 따라 슬러지의 pH가 저하하여 소화일수 15일 이후부터는 pH 6.0이하의 수준을 나타내었고, 소화일수의 증가에 따라 여액의 COD가 높아져서 악화된 수질을 나타내었다.

참고문헌

- Coackley, P. and Jones, B.R.S., "Vacuum sludge filtration, I. Interpretation of results by the concept of specific resistance," *Sewage and industrial Wastes*, Vol.28, pp.963-976(1956)
- Ruth, B. F., Montillin, G. H., and Montonna, R. E., "Studies in filtration, II. Fundamental axiom of constant pressure filtration," *Ind Engr. Chem.*, Vol.25, pp.153-161(1933)
- Carman, P.C., "Fundamental principles of industrial filtration," *Transaction institution of chemical Engineers*, Vol.16, pp.168-188(1938)
- Roberts, K. and Olsson, O., "Influence of colloidal particles on dewatering of activated sludge with polyelectrolyte," *Environ, Sci. Tech.*, Vol.9, pp.945-948(1975).
- Karr, P. A. and Keinath, T. M., "Influence of particle size on sludge dewaterability," *Jour. Water Poll. Control Fed.*, Vol.50, pp.1911-1930(1978).
- Lawler, D. F., Chung, Y. J., Hwang, S. J., and Hull, B. A., "Anaerobic digestion : Effects on particle size and dewaterability," *Jour. Water Poll. Control FEd.*, Vol.58, pp.1107-1117(1986)
- Novak, J. T., Goodman, G. L., Pariroo, A., and Huang, J. C., "The blinding of sludge during filtration," *Jour. Water Poll. Control fed.*, Vol.60, pp.206-214(1988)
- LaMer, V.K. and Healy, T.W., "Adsorption flocculation reactions of micromolecules at the solid-liquid interface," *Rev, Pure and Appl Chem* Vol.13, pp.112-113(1963)
- Tenny, M. W. and Stumm, W., "Chemical flocculation of microorganisms in biological waste treatment." *Jour. Water Poll. Control Fed.*, Vol.37, pp.1370-1388(1965)
- Tenny, M. W., Echellberger, W. F., Schuessler, R. G., and Pavoni, J. L., "Algal flocculation with synthetic organic polyelectrolytes," *Appl, Microbiol.*, Vol.18, pp.965-971(1969).
- Ford, D. L. and Eckenfelder, W. W., Jr., "Effect of process variables on sludge floc formation and setting characteristics," *Jour. Water Poll, Control Fed.* Vol.39, pp.1850-1859(1967)
- Kato a, Izaki, K., and Takahashi, H., "Floc-forming bacteria isolated from activated sludge," *Jour. Gen. Appl. Microbiol.*, Vol.17, pp.439-456(1971)
- Pavoni, J. L., Tenny, M. W., and Echellberger, Jr., W. F., "Bacterial exocellular polymers and biological flocculation." *Jour. Water Poll. Contol Fed.*, Vol.44-431(1972).
- Magara, Y. and Nambu, S., "Biochemical and physical properties of an activated sludge on settling characteristics," *Wat. Res.*, Vol.10 pp.71-77(1976)

15. Pitman, A. R., "Bioflocculation as a means of improving the dewatering characteristics of activated sludge," *Water Poll. Control*, Vol.24, pp.688-700(1975)
16. Lovett, D. A., Kavanagh, B. V., and Herbert, L. S., "Effect of sludge age and substrate composition on the settling and dewatering characteristics of activated sludge," *Wat. Res.*, Vol.17 pp.1511-1515(1983)
17. Knocke, W. R. and Zenkovich, T. L., "Effects of mean cell residence time and particle size distribution on activated sludge vacuum dewatering characteristics," *Jour. Water Poll. Control Fed.*, Vol.58, pp.1118-1123(1986)
18. Wn, Y. C., Smith, E. D., and Novak, R., "Filterability of activated sludge in response to growth conditions," *Jour. Water Poll. Control Fed.*, Vol.54, pp.444-456(1982).
19. Katsiris, N. and Katsiri, A., "Bound water content of biological sludge in relation to filtration and dewatering," *Wat. Res.*, Vol.21, pp.1319-1327(1987)
20. 이재복, 정태학, "생물학적 슬러지의 탈수성 해석에 관한 연구," *대한상하수도학회지*, 제4권, 제1호, pp.24-34(1990).
21. 이재복, 정태학, "압축성 탈수 케이크의 내부특성에 관한 연구," *대한상하수도학회지*, 제5권, 제1호, pp.22-30(1991)
22. Tiller, F. M., Crump, J. R., and Ville, F., "A revised approach to the theory of cake filtration." *Fine Particle Processing*, Vol.2, Edited by p. Somasundaran, American Institute of Mining, Metallurgical, and petroleum Engineers Inc., New York. pp.1549-1582(1980)
23. Shirato, M., Murase, T., Iritani, E., and hayashi, N., "Cake filtration-a technique for evaluating compression-permeability data at low compressive pressure," *Filtr. Sep.*, Vol.20, pp.404-406(1983)
24. Gehr, R. and Henry, J. G., "Removal of extracellular material, techniques and pitfalls," *Wat. Res.*, Vol.17, pp.1743-1748(1983).
25. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 15Th Ed., Amer. Public Health Assoc., Amer. Water Works Assoc., and Water Poll. Control Fed.(1981).
26. Herbert, D., Phipps, P. J., and Strange, R. E., *Chemical Analysis of Microbial Cells*, Academic Press, London and New York, pp.210-344(1971).
27. Lowry, O.H., Rosebrough, N. J., Farr, A. L., and Randall, R. J., "Protein measurement with the folin phenol reagent," *Jour. Biol. Chem.*, Vol.193, pp.265-275(1951).
28. 일본생물학회편, 생화학실험구좌 3, 지질의화학, 동경화학동인, 동경, pp.7-18(1974).
29. Tiller, F. M., and Leu, W., "Basic data fitting in filtration," *Jour. Chinese Inst. Chem. Engrns.*, Vol. 11, pp.61-70(1980).
30. Mavinic, D.S.and Koers, D.A., "Fate of nitrogen in aerobic sludge digestion," *Jour. Water Poll. Control Fed.*, Vol.54., pp.352-360(1982).
31. Mitchell, R., *Introduction to Environmental Microbiology*. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, pp.172-187(1974).
32. 일본약학회편, 위생시험법주해, 김원출판, 동경, pp.167-168(1980).
33. 제등화부, "실시설에における오니소화プロセス의 특성について," *하수도협회지*, 제22권, 제257호, pp.40-54(1985).
34. 이옥우, 야타행지 "염기성소화의 산생성상에における잉여활성오니의분해특성," *수질오탁연구*, 제10권, 제12호, pp.729-740(19870). ◻

눈길모아 오염예방 마음모아 환경보전