

유가공폐수 처리수의 재이용에 관한 연구

곽필재 · 우달식 · 남상호

건국대학교 환경공학과

A study on the Reclamation and Reuse of Milk Manufacturing Wastewater

Phill-Jae kwak · Dal-Sik Woo · Sang-Ho Nam

Department of Environmental Engineering, Kon-kuk University

Abstract

We met the continued population growth, contamination of both surface and groundwaters, deficiency of water resources, and increase of water demand. Wastewater reclamation and reusing system are important facilities in water resources planning aspect. The required water quality for reclaimed wastewater varies with each application.

This study was conducted to examine the possibilities of the wastewater reclamation and reusing on milk manufacturing wastewater. Biofiltration could reduce the COD_{Cr}, NH₃-N. Turbidity was reduced highly by coagulation. In conclusion, we identified the possibilities of wastewater reclamation and reusing on milk manufacturing wastewater's by biological activated carbon filter.

I. 서 론

생활수준이 향상되고 식생활의 형태가 변함에 따라 우유를 비롯한 각종 유가공제품의 생산량은 증가하므로, 이로 비례해서 유가공 업체에서의 폐수발생량과 물사용량도 많아지고 있다. 한편 유가공업체에서 사용되고 있는 세척용수는 상당히 많은 양이 필요로 하나, 거의 대부분 수돗물을 이용하고 있기 때문에 상당량의 수돗물이 낭비되고 있는 실정이다. 현재 우리나라의 주요 유가공 제조업체의 경우 처리수를 재이용하는 사례는 거의 없으나, 장래 수자원의 고갈과 수도요금의 상승 등을 고려할 때 이들 업체에서 발생하는 폐수 처리수의 재이용에 관한 연구가 절실히 요구되고 있다.

한번 사용한 물을 재이용하는 물을 “중수”라고 한다.

“중수도”는 물재활용 시스템(Water Recycling System)을 포함한 모든 물의 재이용 시설로서 미국에서는 Water Reclamation and Reusing System, 일본에서는 排水再利用 또는 中水道로 표현하고 있다^{1,2)}.

재이용을 위한 처리시설은 일반 정수처리 및 폐수처리 시설을 처리수 수질목표에 맞추어 여러 가지 공정을 조합하여 선정한다^{3,4)}. 처리공정을 거치고 나서 발생하는 재이용수의 문제점은 처리수의 특성에 따른 배관재료의 부식, 스케일, 슬라임 등이다. 이러한 문제점은 처리수의 처리 정도에 따라 달라지지만 일반적으로 pH, 탁도, 경도, 전기전도도, 알칼리도, 염소 및 황산이온, 잔류염소, 유기물, 용존산소 등의 영향을 받는다⁵⁾.

처리수의 수질목표는 사용목적에 따라 정해지는 것이 일반적이기 때문에 처리방법에 따라 유기물의 함량은 다양하다⁶⁾. 유기물이 많은 물은 슬라임을 일으키기 쉬워서 관로의 막힘, 냄새, 부분적인 부식 등의 문제점을 발생시키므로 처리 공정별로 유기물특성 및 수질 특성을 분석하여 발생할 수 있는 문제점을 최소화하여야 한다^{7,8,9)}.

본 연구는 우유공장폐수의 생물학적 처리수를 대상으로 생물여과법을 이용하여 유기물 제거특성을 고찰하고 여재 표면에 부착된 미생물에 의한 산소소비량을 측정하여 간접적인 유기물 분해특성을 파악하였다. 또한 부착미생물의 관찰 및 그 수를 계수하여 최적여재를 선정하고, 유출수의 응집특성을 고찰하여 재이용 가능성을 파악하고자 연구를 수행하였다.

II. 실험장치 및 방법

1. 실험장치

본 연구에서 사용된 생물여과 반응조는 Fig. 1과 같이 내경 29mm, 높이 250mm의 아크릴관으로 3개를 제작하였다. 각 반응조에 여재를 각각 100mm씩 충전하고 원수는 정량주입펌프를 이용하여 연속하향류로 주입하였다. 실험에 이용된 여재는 Degremont사의 Biolite(비표면적 700m²/g, 유효경 1-4mm), Norit사의 이탄계 정형입상활성탄 row 0.8 supra(요오드 흡착력 1,100mg/g, 비표면적 1,200m²/g, 총세공용적 1.0cm³/g), Calgon사의 Filtrasorb 400(요오드 흡착력 1,000mg/g, 유효경 0.55-0.75mm, 비표

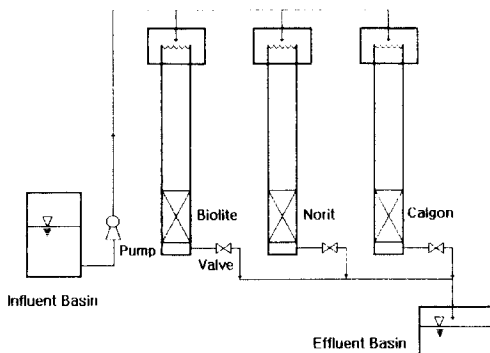


Fig. 1. Schematic diagram of biological filters.

면적 1,050-1,200m²/g, 총세공용적 0.85-0.95cm³/g)을 사용하였다.

2. 실험방법

실험에 사용된 대상원수는 활성슬러지공법으로 운전되고 있는 건국대학교 우유공장 폐수처리장의 유출수를 이용하였다. 체류시간은 원수유입량을 조절하여 3개의 반응조 모두 2시간으로 하였으며 약 80일동안 COD_{Cr}, NH₃-N을 측정하여 오염물질의 제거특성을 평가하였다. 모든 수질분석은 미국의 표준수질조사방법¹⁰⁾, 공해공정시험법¹¹⁾에 따랐다.

2.1. 부착미생물에 의한 유기물의 산소소비량

실험개시 20, 80일째에 생물활성탄 반응조의 상부에서 각각 0.2g(습중량)의 활성탄을 채취하여 BOD병에 넣고 무기염류가 포함된 BOD희석수 300mℓ을 가한 후 glucose, humic acid, LAS(Linear alkylbenzene sulfonates)를 첨가하여 각각 25mg/ℓ가 되게 하였다. 유기물이 첨가되지 않은 blank를 포함한 각 BOD병은 밀봉하여 incubator에 넣고 20일째의 경우 25℃, 80일째의 경우는 20℃에서 배양하여 매일 2주간 활성탄에 부착된 미생물에 의한 산소소비량을 측정하여 유기물의 분해정도를 간접적으로 살펴보았다.

2.2. 부착미생물의 관찰 및 계수

반응조내 생물활성탄에 부착된 미생물의 형태는 주사전자현미경(SEM, Akasi model alpha-25A)으로 관찰하였다. 부착미생물의 계수는 실험개시 80일째, 각 반응조 상부에서 1.0g(濕重량)의 생물막부착 여재를 채취하여 멸균시킨 50mℓ vial에 넣고, 이것에 BOD 희석수 50mℓ를 첨가하였다. 초음파처리장치(Sonics & Materials Inc. Model VCX 400)에 의해 전력 40W, 2분간 초음파처리(Sonication)를 하고 활성탄에서 부착세균을 분리하였다. 분리된 현탁용액을 희석하여 R2A배지에 도말하고 20℃, 7일간 배양하여 종속영양세균수(HPC)를 측정하였다.

2.3. 응집특성

유출수의 응집특성을 고찰하기 위해 Alum을 이용하여 Jar Test를 실시하였다. 실험조건으로 급속교반은 120rpm, 3분, 완속교반은 20rpm, 15분, 침전시간은 30분으로 하였다. 상징액을 일정량 취하여 pH, 탁도, 알칼리도를 측정하였다.

Table 1. Quality of raw water

Parameter	Range	Mean
Water temp(°C)	27.2 ~ 29.4	28.3
Turbidity(NTU)	5.63 ~ 11.8	7.65
pH	8.15 ~ 9.22	8.56
DO(mg/ℓ)	4.2 ~ 6.5	5.2
Alkalinity (mg/ℓ as CaCO ₃)	45.4~60.3	52.5
Conductivity (μmhos/cm)	822 ~ 1048	942
TDS(mg/ℓ)	413 ~ 525	472
COD _{Cr} (mg/ℓ)	15.5 ~ 56.4	42.2
NH ₃ -N(mg/ℓ)	0.16 ~ 1.18	0.59
DOC(mg/ℓ)	4.78 ~ 29.28	14.99
UV ₂₅₄ (cm ⁻¹)	0.145 ~ 0.205	0.180

III. 결과 및 고찰

1. 원수의 수질특성

본 연구는 건국대학교 우유공장 폐수처리장의 유출수를 이용하였다. 폐수처리장의 일일 처리용량은 250ton이며 우유공장에서 하루에 필요로 하는 세척수량은 약 150ton이다. 처리장에서 발생하는 폐수의 전량이 재이용 가능하므로, 상당한 경제적 이득을 볼 수 있다고 판단된다. 실험기간 pH는 8.15~9.22의 약 알칼리성을 나타내었으며, DO는 평균 5.2mg/ℓ로 다소 낮았다. COD_{Cr}은 15.5~56.4mg/ℓ로 변화폭이 매우 컸으며 평균 42.2mg/ℓ이었다. 실험기간 대상원수의 수질특성은 Table 1과 같다.

2. 부착미생물에 의한 유기물의 산소 소비량

반응조를 운전한지 20, 80일째에 반응조의 상부에서 채취한 3종의 여체에 부착된 미생물을 BOD병에 접종시킨 후 20일째는 25°C, 80일째는 20°C에서 배양하여 2주간 용존산소량을 측정하여 그 변화를 Fig. 2에 나타내었다.

실험 20일째의 경우, 이분해성 유기물질인 Glucose를 첨가한 BOD병에서는 3종의 여체 모두 1일째에 급격한 산소소비가 일어났으며, 이 기간에 미생물에 의해 glucose의 활발한 분해작용이 일어나고 있는 것을 알 수 있었다. 난분해 유기물인 LAS를 첨가한 BOD병에서는

Norit, Calgon사의 활성탄의 경우 4일째까지는 산소소비량이 거의 없었으나 5일 이후 산소소비가 이루어졌으며, Degremont사의 Biolite는 6일 이후 서서히 분해가 이루어졌다. 난분해 물질인 humic acid를 첨가한 BOD병에서는 Norit사의 활성탄만이 서서히 산소 소모가 이루어져 4mg/ℓ 정도 소비되었으나 나머지 두 여체는 거의 산소소비가 이루어지지 않았다. 실험 80일째의 경우, glucose를 첨가한 BOD병에서는 2일 이후 급격한 산소소비가 이루어졌다. LAS을 첨가한 경우 Norit, Calgon사의 활성탄에서는 배양 8일 이후에, Biolite에서는 10일 이후에 급격한 산소소비가 이루어졌다. Humic acid를 첨가한 BOD병에서는 Norit사, Calgon사의 활성탄에서 약간의 산소소비가 이루어졌으며, 80일째가 20일째보다 다소 산소소비가 느렸다. 이는 배양온도가 20일째의 경우 25°C에 비해 20°C로 다소 낮았기 때문이며, 20일째의 경우 Norit 활성탄에서만 미생물이 부착되어 humic acid의 분해가 다소 이루어진 것으로 판단된다. 이상의 결과로 부터 각 유기물질에 따른 분해특성을 정리하면, 이분해성 유기물질인 글루코스의 경우 3종의 여체 모두에서 미생물의 의한 산소소비가 시료 채취 1~4일 사이에 거의 이루어졌다.

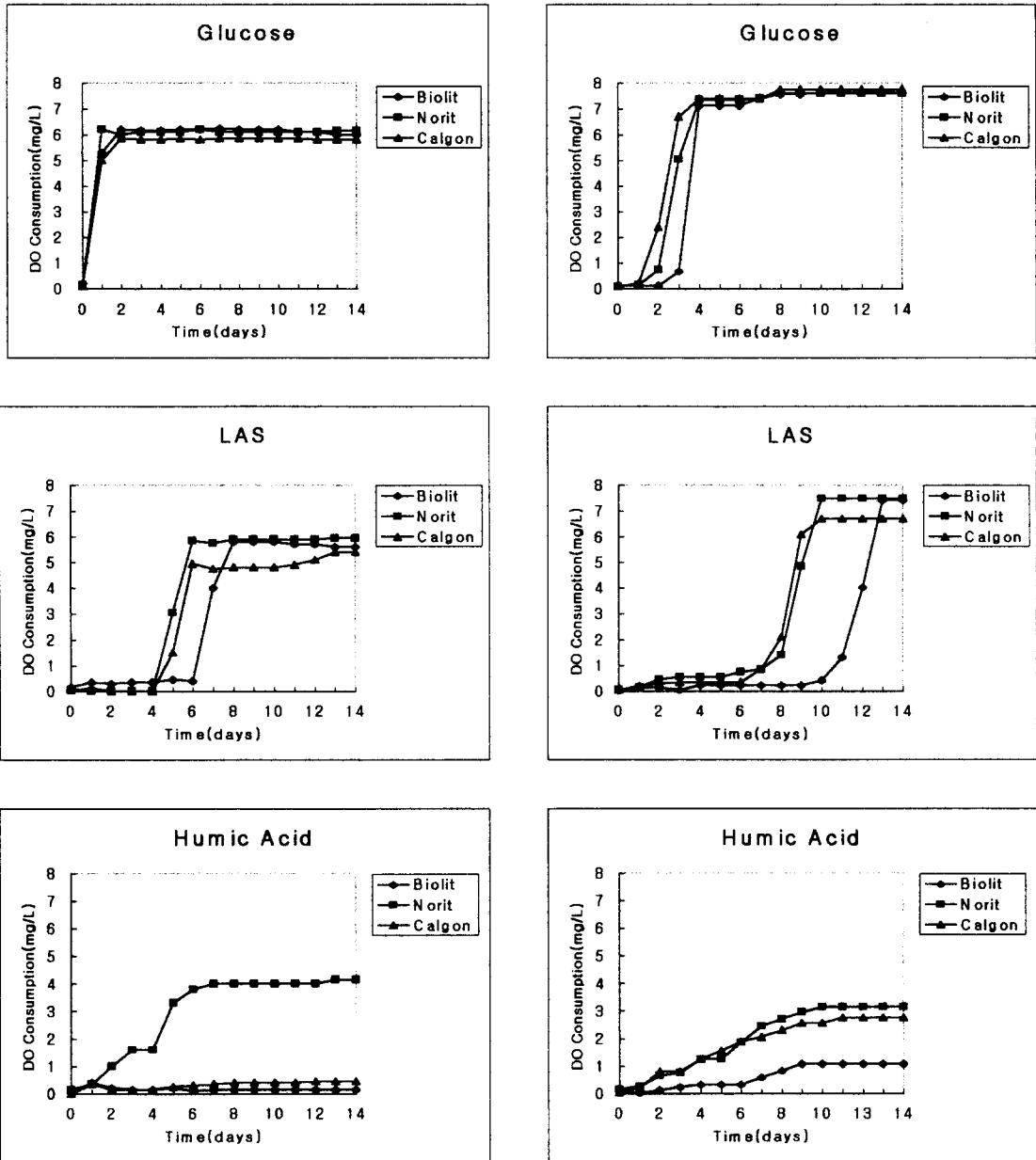
LAS의 경우는 5 ~ 11일 사이에 분해가 이루어졌으나, humic acid는 실험기간동안 약간의 산소소비만이 이루어져 미생물에 의한 분해현상은 일어나기 거의 힘든 것을 확인할 수 있었다. 활성탄 종류별로 살펴보면 Norit 활성탄이 다른 2종의 여체보다 다소 유기물 분해능이 우수하였다.

3. 부착 미생물의 관찰 및 계수

여체표면에 부착되어 있는 미생물을 관찰하기 위해 미생물이 부착되어 있지 않은 3종의 여체의 표면과 미생물이 부착된 여체를 전자현미경으로 촬영하였으며, 그 결과는 Fig. 3~ Fig. 5와 같다.

Fig. 3과 같이 Degremont사의 Biolite는 미생물이 서식하기에는 불리한 표면을 가지고 있음을 볼 수 있었다.

Fig. 4에 나타난 바와 같이 Norit사의 활성탄은 Fig. 5에 나타난 Calgon사의 활성탄에 비해 비교적 표면에 넓은 macropore와 작은 micropore가 불규칙하게 잘 발달되어 있었고, 비표면적이 넓어 미생물 부착에 용이한 표면을 보유하고 있음을 확인하였다. Calgon사의 활성탄은 macropore와 micropore가 비교적 고루 발달되어 있었다.



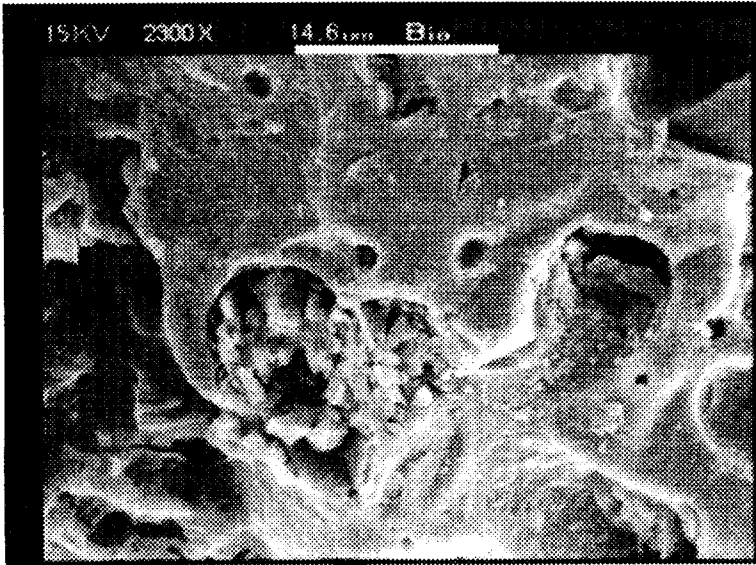
(a) 20 days

(b) 80 days

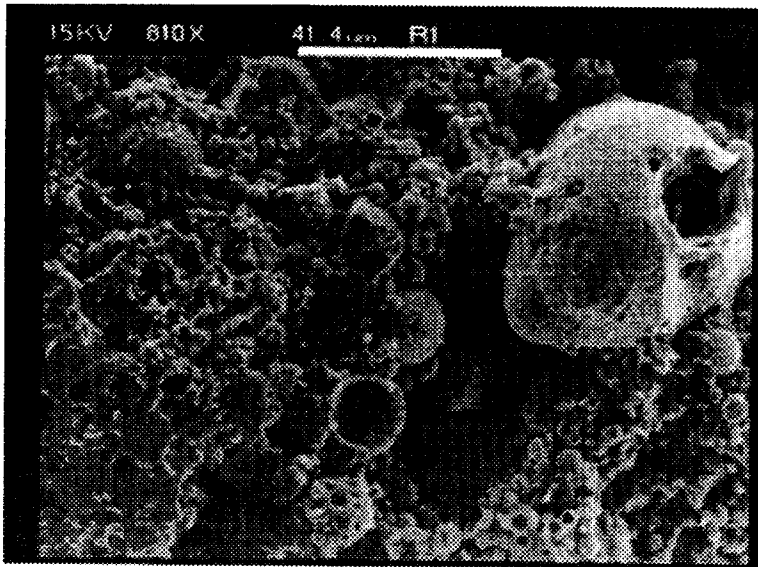
Fig. 2. Variation of DO consumption on biological filters (a) after 20days and (b) after 80 days.

실험 70일째에 반응조 상부에서 미생물이 부착되어 있는 활성탄을 채취하여 전자현미경으로 관찰한 결과에 의하면, Norit사의 활성탄 표면은 구균형, rod형, stalk형의 미생물이 서로 얽혀 고르게 부착되어 있었으며, macropore

내부에 stalk형태의 미생물이 고착된 것을 볼 수 있었다. Calgon사의 활성탄은 표면에 부분적으로 다양한 형태의 미생물이 부착되어 있었으나, Degremont사의 Biolite는 부분적으로 표면에 공극이 적어 흡착 및 미생물 부착



(a) surface of Biolite (bar=146 μ m)



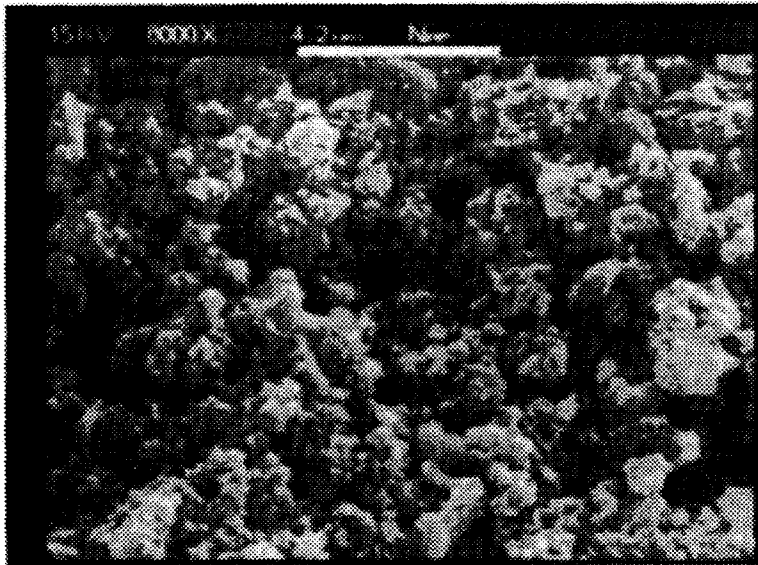
(b) microbes attached to Biolite(bar=41.4 μ m)

Fig. 3. Scanning electron micrograph of (a) free and (b) biological filters(Degremont Co).

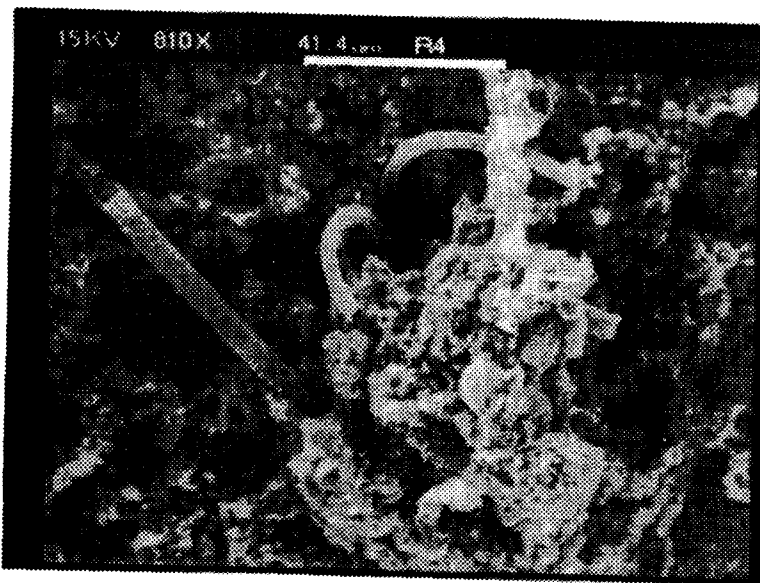
이 진행되어 있지 않음을 알 수 있었다.

이를 확인하기 위해서 실험 80일째에 각 반응조의 상부에서 활성탄을 채취하여 초음파처리장치(Sonics &

Materials INC. Model VCX 400)에 의해 부착세균을 분리하여 세균수를 측정하였다. Norit 활성탄, Calgon 활성탄, Biolite에 부착된 세균수는 각각 4.8×10^7 , 2.0×10^7 ,



(a) surface of activated carbon (bar=4.2 μ m)



(b) microbes attached to activated carbon (bar=41.4 μ m)

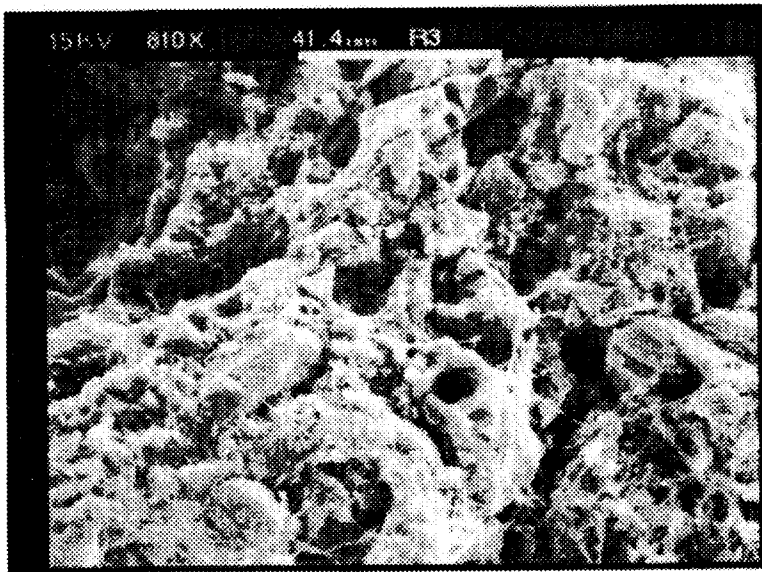
Fig. 4. Scanning electron micrograph of (a) free and (b) biological filters(Norit Co.).

1.2×10^6 CFU/g(습중량)이었다. 전자현미경으로 관찰하여 얻은 결과와 마찬가지로 Norit활성탄이 가장 많이 미생물이 부착되어 있었다.

결론적으로 Norit사의 이탄계 정형입상활성탄은 Calgon사의 활성탄과 Degremont사의 Biolite에 비해서 미생물부착에 용이한 표면특징을 가지고 있었고, 부착세균



(a) surface of activated carbon (bar=4.2 μm)



(b) microbes attached to activated carbon (bar=41.4 μm)

Fig. 5. Scanning electron micrograph of (a) free and (b) biological filters(Calgon Co.).

수가 다소 많이 부착되어 있어 미생물분해가 유리함을 확인할 수 있었다.

4. 유기물 및 암모니아성 질소의 제거특성
운전기간중 각 여재별 COD_{Cr}의 변화는 Fig. 6과 같다. Norit, Calgon사의 활성탄을 충전한 반응조는 COD_{Cr} 제

거울이 각각 65.0%, 53.9% 이었으며 평균 유출수의 농도는 14.8mg/l, 19.7mg/l 이었다. 이는 COD_{Cr}만을 기준으로 청소용, 레크레이션(연못, 분수), 살수용, 냉각용수 등에 이용 가능한 수준이었다¹⁾. Norit 활성탄을 충전한 반응조가 Calgon 활성탄을 충전한 반응조보다 다소 높은 제거율을 보인 것은 Fig. 4, 5에서 보듯이 활성탄 표면에 미생물이 많이 부착되어 유기물 분해가 다소 용이한 것으로 판단된다.

Biolite를 충전한 반응조는 COD_{Cr}의 제거율이 22.0%로 낮았다. Biolite는 경우 흡착 및 미생물 분해가 잘 일어나지 않는 것으로 생각되며, 여재에 붙어있는 미생물이 탈리되어 간혹 유입수보다 COD_{Cr}이 더 높게 나온 경우도 있었다.

암모니아성 질소의 농도는 Fig. 7과 같이 Norit, Calgon사의 활성탄을 충전한 반응조의 경우 각각 0.39mg/l(평균 제거율 52.2%), 0.50mg/l(평균 제거율 37.8%)이었으며 Degremont사의 Biolite로 충전한 반응조는 0.71mg/l(평균 제거율 12.1%) 이었다. 반응조 유입수의 암모니아성 질소 농도가 높지 않아 재이용시 큰 문제는 되지 않을 것으로 생각된다.

결론적으로 활성탄을 이용한 생물여과만으로도 유기물은 60%이상, 암모니아성 질소는 40%이상 제거가 되므로 후속공정으로 응집 및 소독을 실시하면 더욱 다양한 용도로 재이용이 가능할 것으로 판단된다.

5. 응집특성

응집실험 후 탁도 및 pH의 변화는 Fig. 8과 Fig. 9와 같다. Norit사의 활성탄을 충전한 반응조의 유출수는 탁도가 평균 4.4 NTU 였으며, 응집제를 25mg Alum/l 주입하였을 때 평균 1.2 NTU의 잔류탁도를 나타내었다. 이

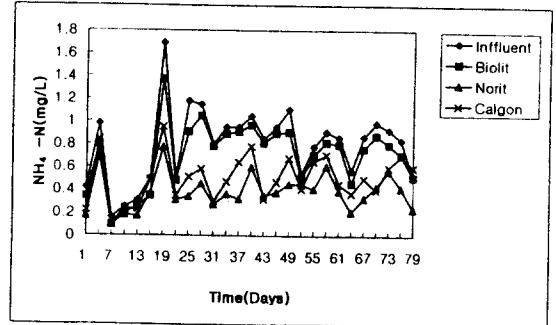


Fig. 7. Variation of NH₄-N.

때 pH는 응집전 평균 8.62에서 약 8.0으로 알칼리도는 평균 55mg/l(as CaCO₃)에서 50mg/l(as CaCO₃)으로 pH와 알칼리도는 각각 0.5, 5mg/l(as CaCO₃)가 감소하였다.

Calgon사의 활성탄을 충전한 반응조의 유출수는 탁도가 평균 3.7 NTU 였으며, 응집제를 25mg Alum/l 주입하였을 때 평균 1.0 NTU의 잔류탁도를 나타내었다. 이때 pH는 응집전 평균 8.55에서 약 8.0으로, 알칼리도는 평균 53mg/l(as CaCO₃)에서 50mg/l(as CaCO₃)으로 각각 0.55, 3mg/l(as CaCO₃)가 감소하였다.

Biolite사의 활성탄을 충전한 반응조의 유출수는 탁도가 5~15 NTU 였으며 응집제를 35mg Alum/l 주입하였을 때 1.8~3 NTU의 잔류탁도를 나타내었다. 이때 pH는 응집전 평균 8.4에서 약 7.8로, 알칼리도는 평균 58mg/l(as CaCO₃)에서 51mg/l(as CaCO₃)로 각각 0.7, 7mg/l(as CaCO₃)가 감소하였다.

결론적으로 Norit사와 Calgon사의 활성탄을 충전한 반

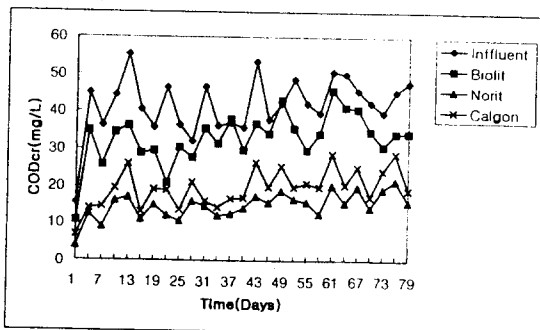


Fig. 6. Variation of COD_{Cr}.

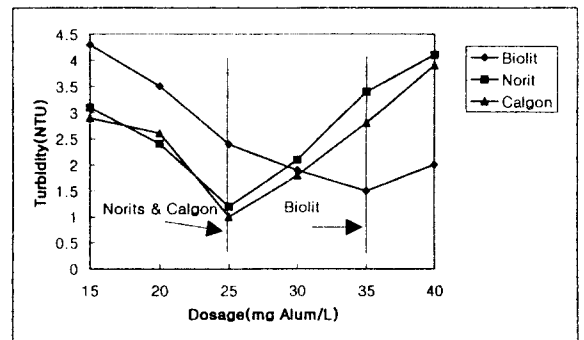


Fig. 8 Variation of Turbidity with Dosage.

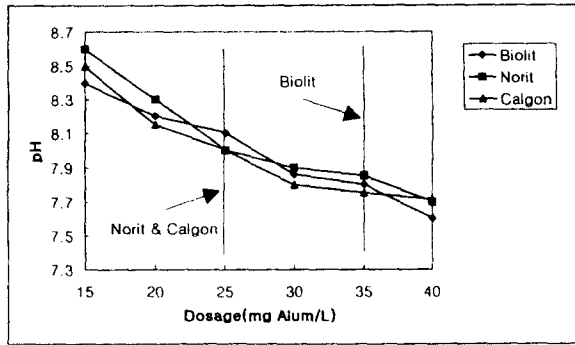


Fig. 9. Variation of pH with Alum Dosage.

응조는 응집후 평균 1.0~1.2 NTU의 잔류탁도를 나타냈었으므로 이후에 간단한 소독처리를 병행하면 매우 나쁜 용도로 재이용할 수 있을 것으로 생각된다. Biolite를 충전한 반응조는 응집세량이 다소 많이 소비되었으며 최적주입량에서의 pH변화도 비교적 컸다.

IV. 결 론

유유공장폐수의 처리수를 재이용하기 위해 생물여과법을 적용하여 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 여재에 부착된 미생물에 의해 산소소비량을 구하여 유기물 분해를 간접적으로 확인한 결과 이분해물질인 glucose는 1-4일만에 쉽게 분해되었으나, humic acid의 경우 분해가 어려웠다.
2. Norit, Calgon사의 활성탄을 사용한 반응조에서는 COD_{Cr}이 평균 60%이상 제거되었으며 유출수도 매우 안정한 값을 나타내었다.
3. 각 반응조의 유출수에 대하여 응집실험 결과, Norit와 Calgon사의 활성탄을 충전한 반응조는 Biolite를 충전한 반응조에 비해 응집제의 소비량이 적었으며 잔류탁도도 0.1~1.2 NTU를 보였다.
4. 유유공장폐수의 처리수를 활성탄이 충전된 생물여과공정에 적용한 결과 우수한 유기물 제거와 응집효과를 거두어 재이용 가능성을 확인하였다.

참 고 문 헌

1. 건설기술연구원 : 중수도 시설방안, 1994.
2. Herman W. et al. : Industrial, Commercial, and Institutional Water Conservation and Reuse Programs In Texas(A State Level Perspective), in *Proceedings of the 1996 AWWA Annual Conference*, Toronto, Ontario, 175-186, 1996.
3. Metcalf & Eddy : *Wastewater Engineering* 3rd ed., McGraw-Hill, 1991.
4. Leeuwen V., et al. : Water Reclamation ; Selection of Unit Processes, in the *Proceedings of 1994 Recycled Water Seminar*, Newcastle, New South Wales, Australia, 65-73, 1994.
5. Yoloye O., et al. : Reclaimed water ; Responsiveness to Industrial Water Quality Concerns, in *Proceedings of the 1996 Water Reuse Conference*, San Diego, CA, 801-818, 1996.
6. Amy, G., et al. : Molecular Weight Distribution of Soluble Organic Matter in Various Secondary and Tertiary Effluents, *Water Science and Technology*, 19(3-4), 529-538, 1987.
7. Jih-Fen K., et al. : Granular Activated Carbon Filtration for Water Resue, in the *Proceedings of 1994 Water Reuse Symposium*, Dallas, Texas, 671-686, 1994.
8. Scott R. S., et al. : Granular Activated Carbon Removal of Organic Compounds for Wastewater Reclamation, in the *Proceedings of Water Reuse Symposium II : Water Reuse in the Future*, Washington DC, vol. 2, 1255-1266, 1981.
9. Kee K. C., et al. : A Study of Reclamation of Sewage for Industrial Waters, *Water Science and Technology*, 23(10-12), 2181-2187, 1991.
10. APHA-AWWA-WPCF. : *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 18th ed., Washington, D. C., 1992.
11. 환경처 : 수질오염·폐기물 발생시행방법, 동화기술, 1993.