

바이오필터와 황-석회석을 이용한 마을하수 처리 공정 개발

Development of Process for Village Scale Wastewater Treatment Using Biofilter and Sulfur-limestone

김 태 규*

Kim, Tae Kyu

Abstract

This process which has a connection of biofilter and sulfur-limestone has been developed to treat organic substances including BOD, COD and SS etc. and to treat sulfur-limestone is for denitrification.. The whole process consists of chemical reaction tank, sedimentation tank, trickling filter, denitrification tank. The trickling filter is equipped with a reactor filled with absorptive filter, and the sulfur denitrification tank is filled with sulfur-limestone mixed media. After setting up practical facilities whose capacity is 60 tons a day, we have observed the removal efficiencies of pollutants through 60 experiments during Summer and Winter seasons. The average concentration of polluted water was BOD for 3.6 mg/L, COD_{Mn} for 11.3 mg/L, SS for 2.8 mg/L, T-N for 8.6 mg/L, and T-P for 0.8 mg/L, and the rate of treatment efficiencies 96.5%, 84.7%, 96.5%, 79.2%, and 80.8%, respectively was found through the experiments. The average treatment efficiency for BOD and COD_{Mn} was 85.0% and 55.7%, respectively and the average removal efficiency for NH₄⁺-N was 84.9% in the trickling filter.

The removal efficiency in the denitrification tank is as follows; The removal rate of NO₃⁻-N was as high as 93.2% within the compass of pH 6.3 to 7.3 through 16.8~37.0 mg/L flown into NO₃⁻-N and 0.1~8.3 mg/L outflow. It had observed that this process has implemented highly efficient and advanced treatment without external carbon sources and internal recycle during its process.

In conclusion, this process is suitable for a sewerage in a small village due to the merits of low power consumption and easy maintenance.

Keywords : Nutrient Removals, Nitrification, Denitrification, Biofilter, Sulfur - limestone

I. 서 론

정부의 초창기 소규모 하수처리 정책은 BOD, COD, SS 등 부유물질 처리에 초점을 두었다 (Ministry of Environment, 2001). 유입하수의 성상이 T-N이나 T-P 보다는 BOD나 SS의 농도

* 충북대학교 환경공학부 대학원
* Corresponding author. Tel.: +82-2-3663-0365
Fax: +82-2-3663-0364
E-mail address: yahn3665@hanmail.net

가 상대적으로 높고 수질오염의 주요인으로 작용한다는 판단 때문이었다. 그러나 2002년 이후 환경부는 T-N과 T-P의 수질오염 부하량이 높은 점을 감안, 오수처리 위주의 농어촌환경정책에서 T-N, T-P 처리의 비중을 높이는 고도처리 정책으로 전환했다(Ministry of Environment, 2003). 이로 인해 유기물질 제거에 탁월한 효과를 가진 토양 피복형 접촉공법이나(Lue, 2003) 바이오필터를 이용한 오수처리기술 등 기존의 유기물질 처리에 국한된 공법으로는 T-N과 T-P의 처리효율성을 높일 수 없었고 강화된 BOD, COD, SS 등의 방류수 수질기준 또한 충족하기 어려워 소규모 하수의 실증시설에 적용이 불가능해졌다. 따라서 이를 대체하기 위한 다양한 처리공정들이 개발되기 시작했다. 질소, 인 제거를 위한 생물학적 처리공정인 A/O형 process, A²/O process 등이 바로 이 같은 공법들이다. 그러나 이 또한 초기 소규모 하수 처리장에 적용된 제거공정들은 단순히 질소, 인 제거효율에만 국한된 나머지 유입하수 성상과 소규모 하수처리장 고유의 제거특성과는 거리가 멀었다. 실제로 이 같은 공법으로 시공된 소규모 하수처리 시설의 70% 이상이 적정처리를 하지 못하고 있거나 가동이 중단되어 있는 상태이다. 이로 인해 소규모 하수처리장이 설치된 농어촌지역 수질환경은 오히려 오염부하로 인한 심각한 위협요인이 되고 있으며 실제로 이들 농어촌지역 수질오염의 주범으로 작용하고 있다(Ministry of Environment, 2004).

대부분의 생물학적 처리공법들은 주로 하수관거와 정화조가 제대로 정비되어 있지 않은 상황에서 실제 유입부하가 설계부하보다 낮아 유입되는 유기물 부하에 특히 민감하게 연동하는 질소와 인의 제거효율을 극대화하기가 매우 어렵다(Im, 2005). 뿐만 아니라 미생물 단위조작에 의한 전문적인 유지관리의 필요성, 호기조건 충족을 위한 공기 주입장치 시설과 포기 및 내부반송으로 인한 에너지 소모량 증가, 동절기와 하절기의 불안정한 유입유량과 수온 차이로 인한 처리율 저하, 15~24시간에

이르는 긴 수리학적 체류시간 등의 문제를 안고 있다. 이는 처리공정이 혐기조, 탈질조, 혐기조가 직렬로 연결되는 주류공정(main stream)으로 구성되어 있어 기본적으로 내부반송과 포기가 필수적으로 이루어져야 하기 때문이다.

더욱이 앞으로 강화될 수질기준(BOD 10 ppm 이하, TN TP 1 ppm 이하)에 대처하기 위해서는 생물학적 고도처리의 단점인 낮은 C/N비에서의 처리효율 저하와 미생물 단위조작에 의한 유지관리의 어려움, 내부반송과 포기시설로 인한 과중한 비용 부담 등의 문제를 해소할 수 있는 기술적 뒷받침이 이루어져야 한다. 이미 국내외에서 수리학적 체류시간에 대처하기 위해 media를 이용한 공정개발이 이루어지고 있으며(You, 2005), 낮은 C/N비 문제를 해결하기 위해 Biosorption을 이용한 DBS(Denutrient Biosorption System)공정(Ko, 2003), 유기물 흡착을 이용한 Dephanox 공정(Sin & Kwak, 2002), 수정 Bardenpho Process, 반응조를 호기와 혐기로 전환해 처리하는 Bio-denitro process(Bitton G, 1994), 표준활성슬러지 전탈질 공정인 MLE(Modified Ludzack-Ettinger) 공정(Lopez Archilla, A. I., 2004), 생물학적 인 제거에 화학적 공정을 연계한 Phostrip Process(Rowan, A. K., 2003), 유로변경과 간헐포기를 접목한 PID(Phased Isolation Ditch) 등의 공정(Beijerinck, M. W., 1990)이 개발되고 있다. 이와 함께 국내에서 개발된 황탈질 공정인 SBF(sulfur bio filter)공법과 SOD(sulfur oxidized development)공법 등이 있다.

기존에 오수처리를 위해 개발된 바이오필터를 이용한 처리기술은 내부반송이나 포기시설, 미생물 조작이 필요 없으며 처리과정에서 슬러지가 발생되지 않고, 동절기에도 처리효율이 저하되지 않을 뿐만 아니라 악취발생 등의 2차오염이 없어 소규모 오수처리에 적합한 공법이지만 질소, 인 처리를 위한 고도처리 공정으로는 강화된 법적 방류수 수질기준을 충족시킬 수 없는 한계를 지니고 있었다.

이 연구는 이 같은 문제를 해결하기 위해 기존의 바이오필터공정에 황-석회석을 이용한 탈질공정을 유기적으로 연결해 소규모 하수처리에 적합한 기존의 장점을 살리면서 질소, 인 등의 고도처리를 실현 할수 있는 단일흐름의 공정(single stream process) 개발에 역점을 두었다. 특히 생물학적 처리공정의 문제점으로 지적되고 있는 포기시설이나 내부반송 없이도 각 단위공정의 오염물질 처리효율을 높이고 슬러지 발생을 억제하며 외부 탄소원 주입이나 미생물 단위조작이 필요 없고 응집을 위한 약품 사용량을 획기적으로 줄이며 유지관리가 용이한 (Kwon & Cheon, 2005) 처리공법을 개발하는데 연구의 방향을 두었다.

바이오필터 공정은 유입원수를 고농도 DO 유지가 가능한 흡수성 여재로 충전된 반응기와 살수여상 방식에 의해 유기물 제거와 질산화를 실현하고, 황-석회석이 일정비율로 충전된 탈질조공정은 독립영양미생물에 의해 석회석을 알칼리도 공급원으로 이용하여 질산성 질소를 질소가스로 탈질시키는 공정이다. 앞으로 보다 체계적인 연구가 이루어진다면 중소규모의 하수처리장과 농촌지역의 마을단

위 하수처리시설 등 다양한 수 처리시설이나 고도처리에 적용함으로써 안정적인 유기물제거와 질소 및 인을 처리, 하천수계의 부영양화를 방지할 수 있는 이상적인 마을하수도 처리 기술이 될 것이다.

이 연구에서는 바이오필터와 황-석회석을 이용한 하수처리 공정의 유기물질 및 영양염류 처리효과를 관찰하기 위해 양평군 용문면의 마을하수도를 이용, 연계공정에 따른 유기물질 제거효율과 특성을 파악하고 고도처리 공정에 필수적인 질소와 인 제거의 효율 및 특성, 동하절기의 계절적 제거효율의 특성에 대한 실험과정과 결과를 분석하고 고찰, 소규모 하수처리에 적합한 공정인지의 여부를 판단하는데 중점을 두었다.

II. 재료 및 방법

1. 유입폐수 성상

재료는 양평군 용문면의 마을하수로 성상은 Table 1과 같다. 유기물질 평균농도는 BOD 105.8 mg/L, COD_{Mn} 75.0 mg/L, SS 84.4 mg/L, 영양물

Table 1. Characteristics of domestic wastewater used in this study

Items	Characteristics and concentration		
	Maximum	Minimum	Average
Temperature (°C)	21.8	7.0	12.0
pH	8.0	7.0	7.7
DO (mg/L)	2.6	0.0	0.9
Alkalinity (mg/L)	288.0	165.0	233.6
SS (mg/L)	124.3	37.5	84.4
BOD ₅ (mg/L)	150.1	70.5	105.8
COD ^{Mn} (mg/L)	121.2	53.6	75.0
COD _{Cr} (mg/L)	152.6	136.2	146.2
T-N (mg/L)	59.8	28.0	41.5
NH ₄ ⁺ -N (mg/L)	46.3	21.8	32.4
NO ₃ ⁻ -N (mg/L)	2.9	ND	0.67
NO ₂ ⁻ -N (mg/L)	0.9	ND	0.2
T-P (mg/L)	5.4	2.3	4.0
Bacteria (piece/mL)	48,000	90	14,484
C/N (COD _{Mn} /T-N)	3.13	1.10	1.86

질 평균농도는 T-N 41.5 mg/L, T-P 4.0 mg/L이며, 동하절기를 포함 총 60회의 수질을 분석했으며 수온은 7.0~21.8℃, pH는 6.99~8.03, 용존산소는 0.0~2.62 mg/L이었다. BOD : T-N : T-P 비는 평균 26.5 : 10.4 : 1로서 질소, 인 농도에 비해 유기물이 상대적으로 적은 불균형 상태였다.

2. 공정 운영

Fig. 1은 처리계통도로 약품반응조, 응집침전조, 살수조, 바이오필터조, 탈질조가 주 공정을 이루고 있으며 내부반송이 없는 유기적 연결의 단일흐름 공정이다. 집수조는 HRT를 1.5시간으로 설계해 유입관로의 레볼보존과 후속공정의 유효용량을 극대화시켰고, 스크린은 하수중의 협잡물을 제거해 후속공정의 처리기능 저하를 방지하는 시설이다.

유량조정조는 유입수의 유량과 시간적 변동을 흡수해서 균등화함으로서(유량조정비 1.3~1.5) 처리효율을 높이며, 약품반응조는 PAC과 원수를 반응

시켜 $AlPO_4$ 의 생성물과 침강성이 양호한 floc을 형성시키는 시설로 HRT를 15분으로 설계했다. 침전조는 표면부하율 $25\sim50\text{ m}^3/\text{m}^2$ 침전시간 2~4시간으로 설계된 부유물질과 인을 제거하는 시설이며, 살수조는 처리수를 바이오필터조에 공급하고, 바이오필터조는 호기성 생물막조로서 용적부하는 $0.06\sim0.16\text{ kg BOD}/\text{m}^3\text{일}$ 이며 증식속도가 느린 질산화균을 다량 부착성장시켜 질산화를 향상시키고 미생물에 의해 유기물을 산화분해 시키는 시설이다.

처리수조는 처리수를 탈질조로 이송시키기 위해 저류시키는 시설이며, 입상황과 석회석을 3:1의 비율로 배합해 주입한 탈질조는 용적부하 $0.25\sim0.35\text{ kg NO}_3^- - \text{N}/\text{m}^3\text{일}$, EBCT(Empty Bed Contact Time) 1.9~2.7 h, 선속도(LV, Linear Velocity) $15\sim25\text{ m}^3/\text{m}^2\text{일}$, 유입평균 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 28 mg/l, 소요용량과 면적은 $60\text{ m}^3/\text{일} \times 28\text{ mg/l} \div 1000 = 1.68\text{ kg NO}_3^- - \text{N}/\text{일}$, $1.68\text{ kg NO}_3^- - \text{N}/\text{일} \div (0.25\sim0.35\text{ kg NO}_3^- - \text{N}/\text{m}^3\text{일}) = 4.8\sim6.72\text{ m}^3$, $60\text{ m}^3/$

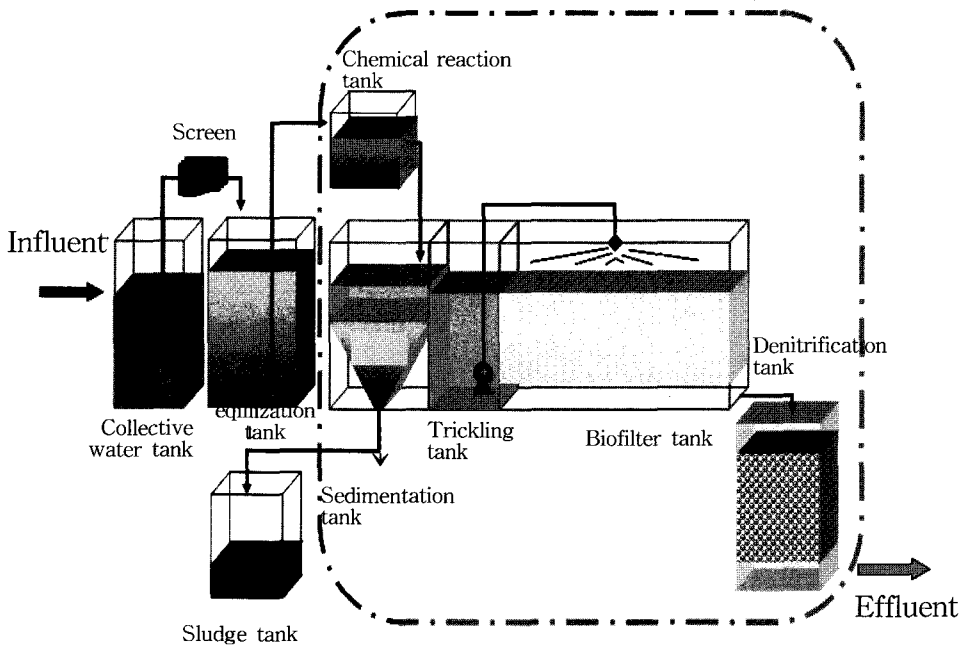


Fig. 1 Process developed in this study.

일÷(15~25 m³/m²일)=2.4~4.0 m²로 설계했으며 질산화액을 탈질시키고, 소독방류조는 황-석회석 공극률 감소를 방지하기 위한 역주입 수량의 확보와 저류수를 방류시키며, 슬러지저류조는 슬러지를 인발해 저장하는 시설이다. 공정의 제거효율은 BOD₅ 94.5%, COD_{Mn} 84.6%, SS 95%, T-N 75%, T-P 75%가 되도록 설계했다.

3. 실험방법

공정별 수질분석은 수질오염공정시험법에 의해 실시했으며 여재는 여상의 상부, 중부, 하부의 외부에서 50 cm 되는 지점에서 105 °C에서 24시간 건조하고 같은 조건에서 건조된 여재와의 무게차이를 측정하는 건조밀도와 SEM 사진촬영 등을 통해 물성과 특성 부착미생물상의 조사를 통해 실시했다. Fig. 2는 미생물이 부착되지 않은 흡수성여재의

SEM(Scanning Electron Microscopy) 촬영사진이다.

분석항목은 각 단위공정별 BOD, COD, DO, SO₄²⁻, T-N, T-P, NH₄⁺-N, NO₃⁻-N 등이며 standard Methods와 HACH DR-4000에 준하여 NH₄⁺-N, T-P는 HACH manual의 Nessler법 및 HACH phospho Ver3 방법을 이용하여 측정하였다.

여재물성을 알아보기 위해 유입수의 걸보기 밀도, 경도, 반발탄성률, 인장강도, 신장률, 인열강도, 공기투과도, 영구압축변형률 등을 JIS K 6400 방법으로 실험했으며 여재의 특성을 관찰하기 위해 상부 중부 하부의 미생물 부착량을 건조밀도에 의해 7회 조사했다.

특히 NO₃⁻-N는 유기물 간섭을 막기 위해 공극 크기가 0.45인 membrane 여과지에 여과하여 측정하였다. 유입수 성상과 처리효율 분석을 위해 동하절기를 포함 총 60회의 채집과 분석을 실시하여 처리효율과 공정별 특성을 파악하고자 하였다.

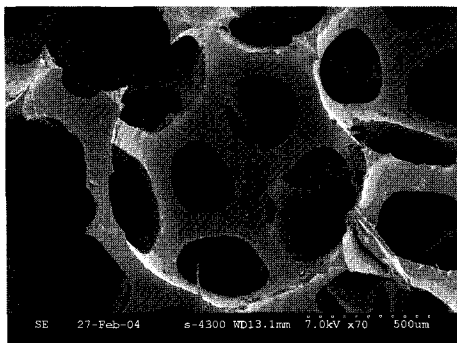
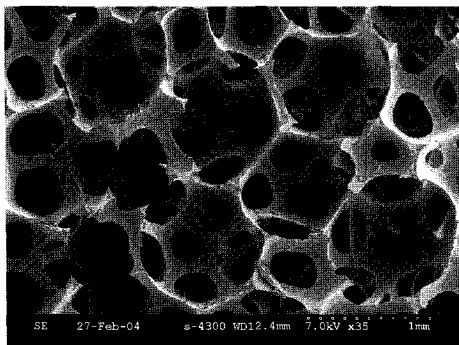


Fig. 2 Features of biofilter opening

III. 결과 및 고찰

1. 유기물 제거 특성

유기물질 제거원인 바이오필터의 미생물 부착량은 여재층의 상층부에 다량의 미생물이 성장하나 하부에도 약간의 미생물이 성장하며, Table 2와 같이 여재층 각 부위에서 미생물이 고르게 분포하고 상층부 여재 절개 시 내부에도 미생물이 성장하고 있음을 발견할 수 있었다.

BOD₅ 유입수 농도는 평균 105.8 mg/L이었으나, 침전조에서 52.6 mg/L, 바이오필터조에서 7.9

Table 2 Microorganism sticking quantity of biofilter

Section	Top	Center	Bottom
Picking part	Filter surface	0.8 m Part	1.5 m Part
Sticking amount (g/Number)	0.7996~0.8452	0.4932~0.5482	0.1394~0.2127

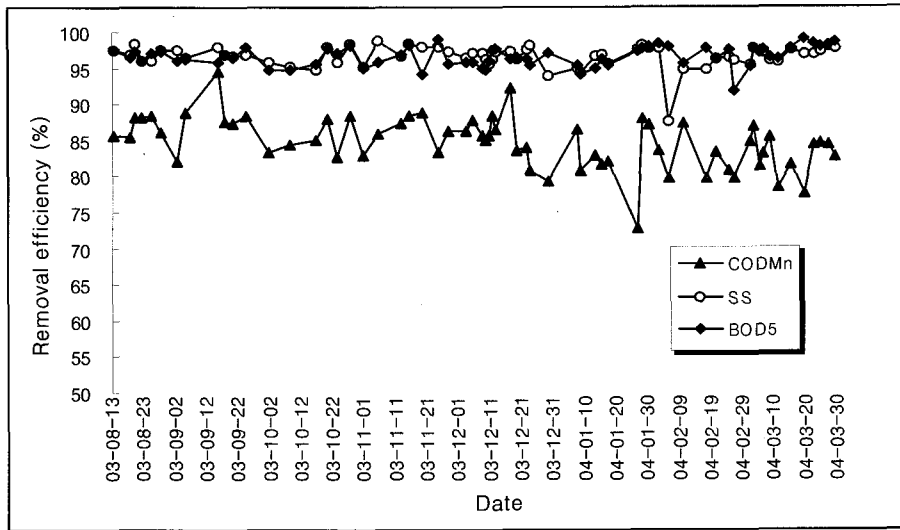


Fig. 3 BOD₅, COD_{Mn}, and SS removal characteristics with temporal variation.

mg/L, 탈질조에서 소량의 제거를 거쳐 방류수에서는 3.6 mg/L으로 제거되었다. 하절기의 경우 유입 농도가 낮았는데 이는 우수가 유입되어 BOD₅ 농도가 희석되었기 때문이다. 제거효율은 평균 96.5%로 나타났다. 주로 침전반응과 바이오필터조에서 생물학적 분해에 의해 처리되었으며 침전조와 바이오필터조가 주처리 공정임을 알 수 있었다.

COD_{Mn} 유입수의 농도는 75.0 mg/L, 방류수의

농도는 11.3 mg/L, 제거효율은 평균 84.7%로 나타났다. SS의 유입 및 방류수 농도변화로 유입수 농도는 불규칙하나 방류수는 안정적으로 처리됨을 알 수 있었다. 유입수는 84.4 mg/L, 방류수는 2.8 mg/L, 제거효율은 96.5%로 나타났다. Table 2에 유입 유출수의 농도와 제거효율을 나타냈다.

BOD₅와 SS의 제거율은 동절기와 하절기 모두 균일하게 처리되었으나 COD_{Mn}의 제거율은 계절에

Table 3 Influent and effluent concentration and removal efficiency for pollutants

Items	Concentration and removal efficiency					
	Influent (mg/L)		Effluent (mg/L)		Removal efficiency (%)	
	Range	Average	Range	Average	Range	Average
SS	37.5~124.3	84.4	1.3~5.6	2.8	87.4~98.7	96.5
BOD ₅	70.5~150.1	105.8	1.2~7.7	3.6	91.8~99.0	96.5
COD _{Mn}	53.6~121.2	75.0	6.2~20.3	11.3	72.7~94.4	84.7
COD _{Cr}	136.2~152.6	146.2	10.0~27.0	20.1	82.0~93.2	86.2
T-N	28.0~59.8	41.5	2.6~15.2	8.6	63.0~92.2	79.2
NH ₄ ⁺ -N	23.4~44.1	32.4	1.0~9.6	4.9	70.9~96.1	85.0
NO ₃ ⁻ -N	16.8~37.0	25.0	0.1~8.3	1.8	69.8~99.8	93.2
T-P	2.3~5.4	4.0	0.2~1.2	0.8	72.5~95.0	80.8

상관없이 변동이 심하게 나타난 것으로 나타났다. 이는 소규모 하수처리시설에서 나타나는 일반적인 현상으로 유입수의 성상이 불안정하고 BOD₅나 SS의 유입농도에 비해 COD_{Mn}의 농도가 절반 수준에 불과해 이로 인한 미생물의 처리안정성이 낮아졌기 때문이다. 하지만 방류수의 수질은 안정적으로 처리되었다. Fig. 3에 오염물질의 제거효율을 나타냈다.

Table 3와 같이 유기물질의 대부분은 침전조와 바이오필터조에서 분해되었으나 황-석회석 탈질조에서도 BOD₅, COD_{Mn}, SS를 각각 3.6 mg/L, 11.3 mg/L, 2.8 mg/L로 낮추어 주 처리 공정의 바이오필터조의 제거율을 다시 절반으로 처리함으로써 전체 공정의 각 단위공정별 유기적인 연계는 물론 유기물질과 질소를 각각 10 mg/L와 1 mg/L 이하로 처리하는 고도처리에 적합한 상호 보완적인 시스템 공정으로 관찰되었다.

2. T-N 제거 특성

처리공정에서의 정상적인 질산화는 pH 7.0~8.5에서 일어나며, 6.3 이하에서는 정지되고, NH₄⁺-N 1.0 mg을 산화시키는데 7.14 mg의 알칼리도가 소

모 된다(Driscoll & Bisogni, 1975). 본 공정에서 pH와 알칼리도는 평균 7.4mg/L, 219.6 mg/L로 질산화에 필요한 최적 조건의 pH와 알칼리도이며, NH₄⁺-N을 27.5 mg/L로 제거했다. 10 °C 이하에서 질산화율은 감소하지만, 유출수의 NH₄⁺-N 농도가 4.9 mg/L의 처리효율을 보인 것은 밀폐형의 바이오필터 반응기가 미생물증식으로 발생하는 열을 외부에 방출하지 않고 수온을 유지해 동절기에도 일관되게 처리했기 때문인 것으로 관찰되었다.

질산화 반응이 효과적으로 일어나려면 슬러지 일령이 10일 이상 필요하다. 질산화균의 성장과 증식에 필요한 충분한 산소가 공급되어 평균 DO농도를 2.5 mg/L 이상 유지해야 한다(Koenig & Liu, 1997). 바이오필터조는 흡수성여재를 사용해 생물막의 산소 전달율을 극대화한 것으로 관찰되었다. 고효율의 질산화를 위해서는 BOD 용적부하량을 0.048~0.096 kg BOD/m³·일로 유지해야 한다(Boon & Laudelout, 2001).

Fig. 4와 같이 바이오필터의 BOD 용적부하량은 0.03~0.07 kg BOD/m³·일로 나타났는데 이는 응집침전에서 유기물 부하량을 최대한 저감시켰기 때문이다. BOD 용적부하가 너무 과다하면 질산화를

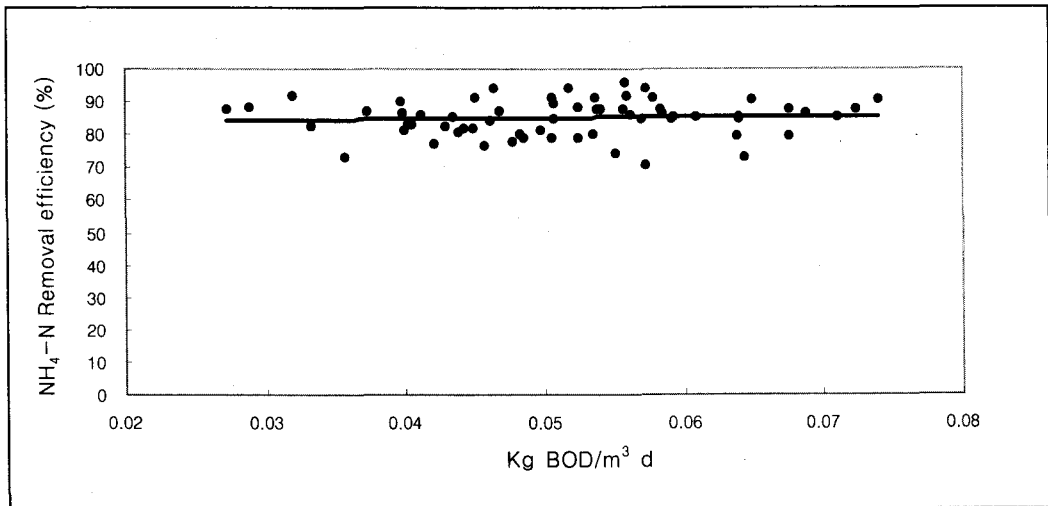


Fig. 4 NH₄-N removal efficiency as a function of influent BOD loading rate.

도 급격히 감소할 수 있으나 본 공정에서는 설계치로 정확하게 유입되었다. NH_4^+-N 의 용적부하는 $0.020\sim 0.049 \text{ kg NH}_4^+-\text{N}/\text{m}^3$ ·일로 유입되어 저부하유입시 질산화율도 다소 증가한 것으로 나타났다.

Table 3과 Fig. 5는 T-N 유입 및 방류수 농도의 변화를 나타낸 것으로 원으로 이루어진 실선은 제거효율, 세모의 실선은 유입수 농도, 네모의 실선은 방류수 농도를 나타낸 것이다. 유입되는 하수의 T-N 농도는 높은 편이었으며 변화의 폭은 $28.0\sim 59.8 \text{ mg/L}$ 로 나타났다. 유입수는 41.5 mg/L , 방류수 농도는 8.6 mg/L , 제거효율은 평균 79.2%로 나타났다. 황-석회석 탈질조의 운전은 하절기에 시작했으며 초기 T-N 제거효율이 동절기인 후반 제거율에 비해 양호함을 확인할 수 있었다. 독립영양균으로서 생체합성을 위해 CO_2 나 HCO_3^- 같은 무기탄소를 이용하고, 전자공여체로 환원된 황화합물을 이용 NO_3^--N 을 N_2 로 환원시키는 대사과정을 통해 에너지를 얻는다(Chae, 2002). 유입, 유출수 pH는 황탈질의 최적 pH 조건인 7.0보다는 낮았으며 유입, 유출수 pH에서 평균 85%의 처리효율을 나타냈다. 이는 입상상에 부착 성장하는 미생물을 이용했기 때문에 부유성장 공정보다 pH 영향을 적게 받았기 때문이다.

유입수의 알칼리도는 $15.0\sim 77.5 \text{ mg as CaCO}_3/\text{L}$, 유출수는 $15.0\sim 68.0 \text{ mg as CaCO}_3/\text{L}$ 로 탈질조에 충전된 석회석과 유입된 질산화액과의 충분한 접촉시간이 제공되어 알칼리도 공급이 원활했기 때문이다. 황이용 탈질균의 최적 온도는 30°C 이며, 이때의 활성화 에너지는 53.2 kJ/mole 이다(Payne, 1981). 탈질조 유입수 온도는 $6.6\sim 21.6^\circ\text{C}$ 로 바이오필터조의 미생물이 질산화 여액의 온도상승에 기여했기 때문이다. 동절기에는 처리효율이 저하되지만 공정은 평균수온 9.5°C 를 유지했다. NO_3^--N 의 용적부하에 따른 탈질효율은 $0.53 \text{ kg NO}_3^--\text{N}/\text{m}^3$ ·일 까지 비례해 증가하며, $0.55 \text{ kg NO}_3^--\text{N}/\text{m}^3$ ·일에서 감소한다. EBCT $1.9\sim 2.7 \text{ hr}$ 에서 $0.25\sim 0.35 \text{ kg NO}_3^--\text{N}/\text{m}^3$ ·일을 적용했으며, 유입용적부하는 $0.14\sim 0.30 \text{ kg NO}_3^--\text{N}/\text{m}^3$ ·일이었으며, 최대용적부하인 $0.3 \text{ kg NO}_3^--\text{N}/\text{m}^3$ ·일에서 탈질율은 평균 93.0%로 나타났다. T-N 용적부하의 증가에도 처리효율은 차이가 없는 것은 바이오필터조의 암모니아성질소 유입용적부하가 낮고, 탈질조의 질산성질소 설계 용적부하보다 유입 용적부하가 낮았기 때문이다.

Fig. 6은 탈질조 유입 전후의 황산이온 변동으로 위의 실선은 유입전의 황산이온, 아래 실선은 유입

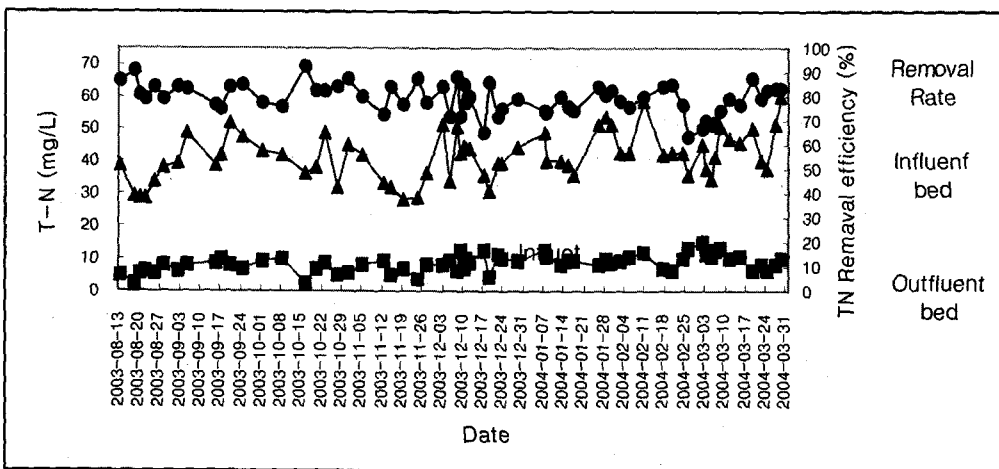


Fig. 5 T-N removal characteristics with temporal variation.

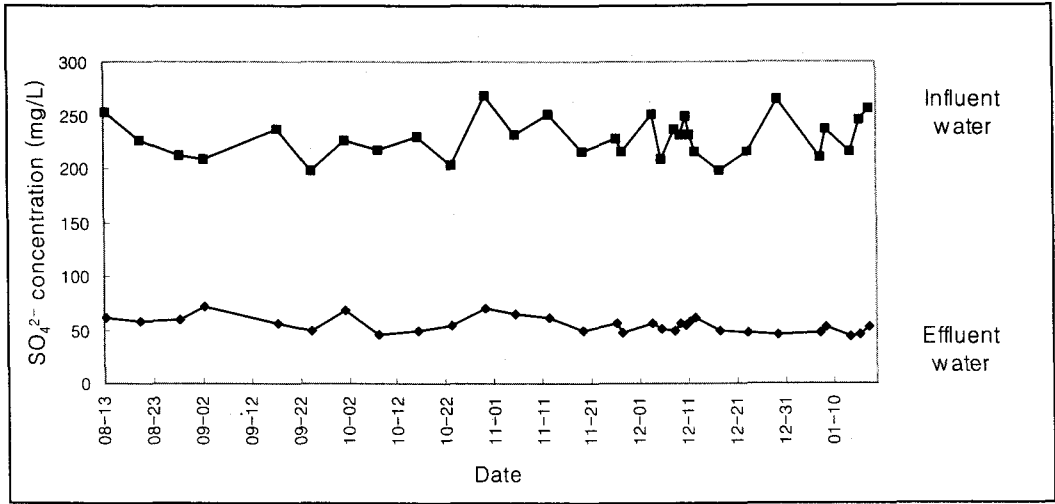
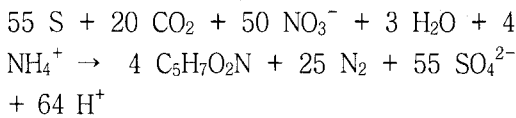


Fig. 6 Temporal variation of SO₄²⁻.

후의 황산이온 농도로 유입에 비해 현저하게 증가했다. 본 공정에서 발생된 SO₄²⁻는 199.0~268.0 mg/L, 최대 황산염 농도는 300 mg/L 이하로 SO₄²⁻에 의한 악영향은 없으며 황 소모량은 제거된 질소의 양에 비례해 소모되었다(WPCF, 1983). 황이용 탈질에서 질산성 질소가 제거됨에 따라 이론적으로 발생하는 황산이온의 양은 아래의 반응식으로 예측할 수 있다(Chung, 200).



황탈질에서 황산이온 생성은 이론적으로 1 g의 질산성 질소 처리시 7.54 g의 황산이온이 생성된다. 1 g 질산성질소 제거당 황산이온 증가량의 상관관계로 이론적인 값 대비 78.6% 상관도에 평균 7.87 g/g NO₃⁻-N값을 보였다. 제거된 NO₃⁻-N 당 SO₄²⁻ 생성량이 높은 것은 유입수에 포함된 DO가 *T. thiooxidans*에 의해 소모되었기 때문이다(Kim, 1999).

본 공정에서 사용된 황은 분말이 아닌 입상황의

형태로 미생물에 의해 산화되며 중간에 구멍이 뚫리기 시작해 점점 그 형태가 커지며 전체가 소진되는 것으로 관찰되었다. 황은 T-N중에 포함되어 있는 질산성 질소와 아질산성 질소 등의 질소성분은 제거하나 암모니아성 질소를 제거하기 위해서는 암모니아성 질소를 질산성 질소로 바꾸는 질산화가 필요하며 본 공정에서는 살수여상과 바이오필터조에서 90%의 질산화가 이루어지고 황을 통해 85%의 제거효율을 보인 것으로 나타났다. 따라서 전체 공정의 T-N제거율은 80%로 나타났으며 황만을 이용한 질소제거율은 별도로 측정하기가 어려웠다.

3. T-P 제거특성

Fig. 7은 T-P 유입 및 방류수 농도의 변화이다. 유입수 T-P 농도는 4.0 mg/L, 방류수 농도는 0.8 mg/L, 제거효율은 평균 80.8%로 나타났다. 인은 수중에서 응집제와 반응하여 불용성 수화물을 형성하여 침전조에서 침전된다. 그러나 많은 양을 투입하면 pH와 알칼리도를 저하시켜 처리공정에 악영향을 주어 유기물분해와 질산화율이 현저하게 저하되므로 양 조절이 필요하다.

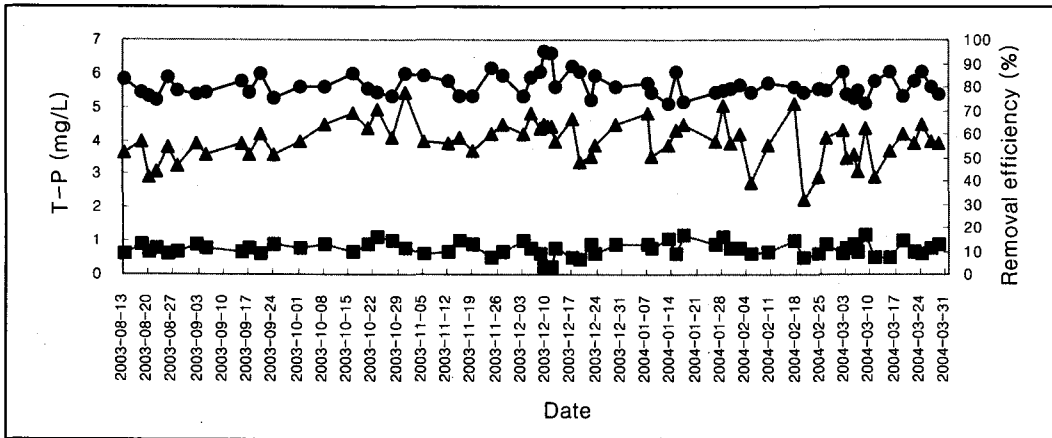


Fig. 7 T-P removal characteristics with temporal variation.

본 공정에서는 알칼리도 소모반응인 후속공정의 질산화에 영향을 미치지 않게 하기 위하여 pH 강하가 적은 PAC를 응집제로 사용하였다.

본 공정에서는 약품반응과 침전에 의해 대부분의 인이 제거되었으며 바이오필터조에서도 T-P농도가 4.0 mg/L에서 0.9 mg/L로 낮아져 미생물에 의한 인의 섭취가 일부 일어나는 것으로 관찰되었다. 인 처리를 위해 응집제로 사용한 PAC는 Jar Test 실험결과에 의해 1.8 kg/일의 양으로 투입되었다.

4. 동절기와 하절기의 오염물질 제거 특성

Fig. 8은 동절기와 하절기의 유입수, 방류수의 처리효율 비교이다. 유입 항목별 동절기와 하절기의 처리효율은 크게 차이가 없었다. 하절기의 경우 모든 항목에서 강우의 영향으로 유입농도는 낮았지만 유입유량이 증가해 유기물 부하량은 크게 차이가 없었으며, 수온에 의한 영향도 적은 것으로 나타났다. 동절기의 BOD 제거율은 95.2%, 하절기는 96.8%로 약간 높게 나타났다. COD의 경우도 BOD와 유사한 경향을 나타내 동절기의 COD 제거율은 82.7%, 하절기에는 4.4% 증가한 87.1%의 제거율을 나타냈다.

유기물은 동절기에 비해 하절기의 유입농도가 다

소 낮게 나타났으나 부유물질의 경우 이와 반대로 하절기에 오히려 유입농도가 높은 것으로 나타났다. 이는 하절기의 잦은 강우로 인해 하수관거에 누적된 토사성분이 유입되었기 때문인 것으로 조사되었다. SS의 처리효율은 동절기 보다 하절기에 1.2% 증가하는 것으로 나타났으나 이는 하절기 수온상승에 의한 미생물의 활성도 증가보다는 하절기 유입농도의 증가와 약품반응에 의한 안정된 처리조건 때문이었다.

T-N의 경우 하절기의 처리효율은 84.4%였으나 동절기에 75.6%로 감소하여 8.8%의 감소율을 나타내었다. 일반적으로 부유성장식 생물학적 처리에서는 계절적 변화에 따라 미생물의 활성도가 큰 차이를 보여 10%이상의 처리효율이 감소되지만 본 공정은 부착성장 미생물을 이용하기 때문에 부유성장식 처리공정보다 온도변화에 적은 영향을 받은 것으로 관찰되었다.

T-P의 경우 하절기에 79.0%의 처리효율을 보였으나 동절기에 78.3%로 0.7% 감소하였다. 이는 T-P의 처리공정이 화학적 처리이므로 계절적 영향을 거의 받지 않는 것을 의미한다.

생물학적 처리공정들이 동절기에 처리효율이 크게 저하되고 있는 것은 처리조 내의 수온이 급격하게 저하되기 때문이다. 이는 처리조가 개방형이어

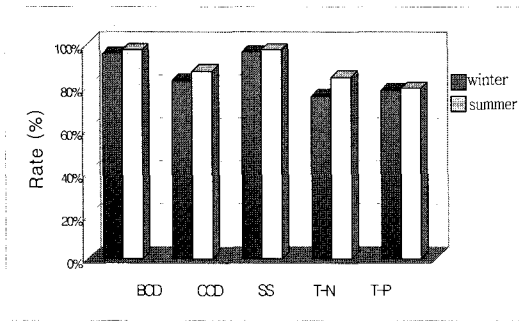


Fig. 8 Comparison of removal efficiencies of BOD, COD, SS, T-N and T-P between winter and summer season, respectively.

서 미생물의 활성화 과정에서 발생하는 열이 외부로 방출되어 미생물의 활동이 일시 중단되거나 활동율이 저하되었기 때문이다.

그러나 본 공정에서는 수온의 변화 없이 안정된 처리효율을 보였는데 이는 바이오필터 반응기가 완전개방형태가 아닌 밀폐형 구조로서 미생물 세포합성과 증식으로 인해 발생하는 열의 일부가 외기로 방출되지 않고 여상에 보존되어 동절기 기간 중에도 유입 수온보다 여상내부의 온도가 높게 유지되었기 때문이다. 일반적으로 질산화 반응은 4~45℃ 범위에서 일어나며 질산화 미생물인 *Nitrosomonas*의 성장 시 최적온도의 범위는 10~30℃로 알려져 있다.

IV. 결 론

본 연구에서 개발한 바이오필터와 황-석회석을 이용한 하수처리공정 개발에서 유기물질과 질소 및 인 제거 특성에 관한 연구를 수행한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 생물학적 처리공정은 유입수의 C/N비에 따라 질산화와 탈질효율이 영향을 받기 때문에 평균 C/N비를 4~7로 유지해야 하나, 본 공정에 유입된 COD_{Mn}과 T-N은 각각 75 mg/L, 41.5 mg/L로 평균 C/N비가 1.81인 불균형상태였으며, 이를 중속영양탈질 공정에 의해 적정처리 하기 위해서는 메탄을 등의 외부 탄소원이 주입되어야 하지만, 본

공정에서는 독립영양미생물을 이용한 질소제거로 C/N비 조절에 관계없이 유기물질과 질소, NO₃⁻-N의 제거효율이 각각 평균 95%와 93.2%, 80%로 나타나 높은 제거효율을 보였다. 이는 본 연구의 Process가 유기물 분해와 질산화 및 탈질과정에서 미생물을 부착성장 시키는 생물막 공정으로 동하절기 수온변화에 민감하게 작용하는 부유성장식보다 상대적으로 훨씬 안정돼 있으며, 기존 생물학적 처리공정의 활성슬러지조나 포기조에 비해 수온 산소량 등의 충분한 호기성 조건을 유지할 수 있었기 때문이다.

2. 황-석회석 탈질조의 유입수 알칼리도(15.0~77.5 mg/L)와 유출수 알칼리도(15.0~68.0 mg/L)가 거의 변화를 보이지 않은 것은 석회석에 의해 알칼리도가 충분히 공급되었기 때문이며 BOD 및 SS 농도가 각각 5.4~11.2 mg/L, 1.5~7.0 mg/L로 유입되어 1.2~7.7 mg/L, 1.3~5.6 mg/L로 유출된 것은 황-석회석이 충전된 탈질조에서 filtering 효과를 보이며 중속영양탈질도 일부 진행되었기 때문이다. 이는 개별공정인 바이오필터와 황-석회석 탈질조를 유기적으로 연계했을 때 상호 보완성이 높았다는 결과이며 앞으로 강화될 방류수 수질기준에도 충분히 대처할 수 있는 고효율의 고도처리 공정임이 입증되었다.

3. 본 공정은 바이오필터조와 황-석회석 탈질조의 독립영양 탈질법을 접목한 공정으로 유입수의 부하변동에 관계없이 방류수 수질기준을 충족시켰으며, 처리과정에서의 악취발생, 겨울철의 동결과 이로 인한 처리효율 저하, 슬러지 발생 등 기존 생물학적 처리공정의 단점을 개선함으로써 전문적인 관리가 불가능한 지역이나 소규모의 농촌지역 마을 하수처리시설에 보다 효과적으로 적용이 가능한 공정으로 관찰되었다.

References

1. Batchelor, B. and A. W. Lawrence, 1978, A

- kinetic model for autotrophic denitrification using elemental sulfur, *Wat. Res.*, 12, pp. 1075~1084.
2. Beijerinck, M. W., 1990, Chemosynthesis at denitrification with sulfur as source of energy, *Proceedings Amsterdam Academy of Science*, 22, February 28, pp. 898~908.
 3. Bitton, G., 1994, *Wastewater Microbiology*, John Wiley & Sons, INC., New York, pp. 189~198.
 4. Boon, B. and H. Laudelout, 2001, Kinetics of nitrate oxidation by nitrobacter, *winogradskyi*, *Biochem j.*, pp. 85 : 440.
 5. Chae, Y-D. 2002, Two plans for the supply of alkalinity when denitrified with Sulfur, a master,s degree thesis, Inha university, in korea, pp. 40~44.
 6. Chung, B-G. 2000, The Effect of temperature, pH, alkalinity's independent nutrition discharging efficiency using sulfur, a master,s degree thesis, Inha university, in korea, pp. 60~66.
 7. Driscoll, C. T. and J. J. Bisogni, 1978, The use of sulfur and sulfide in packed bed reactors for autotrophic denitrification, *J. WPCF*, pp. 569~577.
 8. Im, H-U. 2005, Appositive stability for nutrition salts treatment process development with floating filter, a master,s degree thesis, chungbuk univercity, in korea, pp. 4~6
 9. Kim, U-K. 1999, Simultaneous execution possibility of alkalinity's required amount and subordinated nutrition discharging denitrification using sulfur, a master,s degree thesis, Inha university, in korea, pp. 20~26.
 10. Ko, K-B. 2003, "Wastewater treatment engineering", Dong technology, seoul, in korea, pp. 260~264
 11. Koenig, A. and L. H. Liu, 1997, Autotrophic denitrification of landfill leachate by *Thiobacillus denitrificans*, *Proceedings of The 8th International Conference of Anaerobic Digestion*, Sedai, Japan, 25-29 May, 1, pp. 299~306.
 12. Kwun, S.-K. & G.-S. Cheon, S.-B. Kim. 2005, Enhancement of Sewage Treatment Efficiencies by Recirculation in Absorbent Biofilter System, *Korean Journal of Environmental Agriculture*, 47(3), pp. 69~70.
 13. Lopez-Archilla, A. I., 2004, Microfilamentous microbial communities in the metal-rich and acidic River Tinto, Spain, *FEMS Microbiology Letters*, 21, pp. 68~72.
 14. Lue, J-K. 2003, Discharge regulation condition for nitrogen phosphorus of waste, discharging water, *korean Journal of environment hi-technology*, seoul, 1, pp. 21~27
 15. Ministry of Environment, 2001, Sewage works propulsion management plan, Seoul, Korea.
 16. Ministry of Environment, 2004, Domestic sewage treatment plant's actual operation conditions and improvement plan, Seoul, in Korea.
 17. Ministry of Environment, 2004, Sewage works propulsion management plan, Seoul, Korea.
 18. Payne W. J. 1981, *Denitrification*, John Wiley & sons, N.Y.
 19. Rowan, A. K., 2003, Composition and diversity of ammonia-oxidising bacterial communities in wastewater treatment reactors of different desin treating identical wastewater, *FEMS Microbiology Letters*, 43, pp. 195~206.
 20. Sin, H-S. J-Y. Kwak, 2002, Removal technology in nitrogen & phosphorus, Environment management research office, seoul, in korea, pp. 21~26.
 21. You, H-D. 2005, Development of hibrid process for nutrient removal using contact stabilization technique, a doctor,s degree thesis, chungbuk university, in korea, pp. 26~37
 22. WPCF. 1983, Nutrients control, *WPCF*, Washington, DC., MOP FD-7.