

하수 내 총질소 성분 제거를 위한 YPNR 공정의 실증 연구

임은태¹ · 정귀택^{2,3,4} · 방성훈¹ · 김용운^{1,3} · 박재희^{3,4} · 박석환^{3,4} · 박돈희^{2,3,4,5,6,7*}

¹(주)태림인더스트리, ²전남대학교 생명과학기술학부, ³바이오에너지 및 바이오소재 협동과정, ⁴공업기술연구소 ⁵촉매연구소, ⁶기능성식품연구센터, ⁷서울대학교 화학생명공학부

Practical Demonstration of YPNR Process to Elimination the Total Nitrogen Ingredient in Sewage

Eun-Tae Lim¹, Gwi-Taek Jeong^{2,3,4}, Sung-Hun Bhang¹, Yong-Un Kim^{1,3}, Jae-Hee Park^{3,4}, Seok-Hwan Park^{3,4}, and Don-Hee Park^{2,3,4,5,6,7*}

¹Taerim Industry Co., Ltd, Jeonnam 520-340, Korea, ²School of Biological Sciences and Technology, ³Interdisciplinary Program of Graduate School for Bioenergy & Biomaterials, ⁴Engineering Research Institute, ⁵Research Institute for Catalysis, ⁶Functional Food Research Center, Chonnam National University, Gwangju 500-757, Korea., ⁷School of Chemical and Biological Engineering, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea.

Abstract This study performed verification experiment for the removal of total nitrogen in sewage from a Town M village sewage treatment plant using YPNR processes. The total nitrogen discharged after the denitrification process was maintained at a level of 8-15 mg/L, which results in the total nitrogen removal efficiency above 68% on average. The total nitrogen components in discharged water consisted of 16% of ammonia nitrogen, 6% of nitrite nitrogen, and 77% of nitrate nitrogen, which reaches a 95% nitrification efficiency. Hence, the YPNR advanced treatment process used in this study can be successfully applied to sewage treatment.

Keywords: sewage treatment plant, denitrification, nitrification, verification experiment, total nitrogen removal

서 론

오·폐수 중의 질소와 인 성분은 하천 및 호수의 부영양화를 발생시키며, 바다에서는 적조의 발생을 야기하게 된다. 특히 질소를 포함한 오·폐수는 얇은 하천에서 조류(algae)와 수생식물의 성장을 증진시켜 수자원의 사용을 제한하게 된다(1, 2). 오·폐수 중의 총질소(T-N)는 지역별 오염물질 총량규제의 실시와 더불어 2008년부터 폐수종말처리시설과 공공하수처리시설의 규제가 대폭 강화되어 법적 방류허용기준 외에 더욱 높은 제거효율을 요구하고 있다(3, 4).

현재 개발된 오·폐수 중의 질소 고도처리 기술은 생물학적 방법과 물리화학적 방법을 단독 또는 병합하여 실제 현장에 적용하고 있다. 처리 방법의 선택은 각 산업체에서 발생하는 오·폐수 내 오염물질의 성상과 농도에 따라 가장 효과적인 방법을 선택하고 있다(4-6). 생물학적 처리법에 의한 질소처리는 오·폐수 중의 암모늄 이온(NH_4^+)이 호기성 상태에서 질산화 미생물에 의해 생물학적으로 질산화(nitrification; $\text{NH}_4^+ \rightarrow \text{NO}_3^-$) 되었다가, 다시 무산소 상태에서 탈질 미생물에 의해 생물학적 탈질화(denitrification; $\text{NO}_3^- \rightarrow \text{N}_2$)가 일어나 질소화합물이 질소가스로 환원됨으로 오·폐수 중의 질소성분의 제거가 이루어진다. 오·폐수 중의 질소 성분을 제거하기 위해서는 유출되는 오·폐수의 성상에 따라 다르지만, 일반적으로 질산화와 탈질화가 모두 필요하다. 알려진 생물학적 질소처리 공법들은 침전조의 수에 따라 single sludge process, dual sludge process,

*Corresponding author

Tel: +82-62-530-1841, Fax: +82-62-530-1910
e-mail: dhpark@chonnam.ac.kr

triple sludge process로 구분되며, 이외에도 4단 Bardenpho process 등이 있다(3-5, 7, 8).

현재 널리 쓰이고 있는 상용기술은 고농도의 산업폐수에서 유입수의 유기물 농도가 낮은 경우 외부탄소원을 사용하여 탈질공정을 높은 효율로 수행할 수는 있으나, 질산화공정에서 높은 효율을 얻기가 어려워 질산화 효율이 떨어져 총질소의 제거효율이 낮은 문제가 있다(4, 7). 하수의 경우에는 유입수량과 수질의 불규칙성 때문에 질산화 공정에서 질산화 미생물의 관리가 어려워 첨가탄소원을 사용하더라도 질산화 공정에 문제가 발생하여 총질소 제거효율이 떨어지는 문제가 있다(3).

본 연구에서는 기존의 하수고도처리 공법의 개선방법으로 호기조 내에 다공성 담체를 적용하였다. 다공성 담체의 적용은 고농도 미생물의 유지가 가능하고, 생물막적 처리 뿐만 아니라 담체에 의한 여과작용 등이 복합적으로 이루어지기 때문에 우수한 처리효율을 얻을 수 있는 장점이 있다. 이는 고농도의 미생물군의 유지와 다공성 담체에 의한 여과작용으로 유출되는 SS (suspended solid)의 양을 최소화하여 처리효율을 높여주고 기존 공정의 대규모 호기조의 폭기에 따른 소요동력을 줄일 수 있을 것으로 기대되고 있다(9).

본 연구에서 적용한 YPNR (Youngam Phosphate & Nitrogen Removal) 고도처리 공법(Fig. 1)은 기존의 Bardenpho 공법의 단점을 보완, 개선한 공법으로서 혐기조, 무산소조 및 호기조로 구성된 생물반응조 중 호기조 내에 고정상 미생물 담체 (질산화 여재)를 충전하여 유효 미생물량을 늘림으로써 질산화율을 극대화하고 체류시간을 단축시키고자 하였다. 본 공정의 특징은 유기물 분해 미생물 및 질산화 미생물을 50~70%는 부유상태로 유지하고, 30~50%는 부착 상태로 유지함으로써 인 제거시 수반되는 슬러지의 배출에 대비하여 미생물 농도를 적정 수준으로 유지할 수 있게 하였다. 또한, 제 1 및 제 2호기조 내에 접촉 여재 및 산기관을 포함하는 질산화 장치를 구비시킴으로써 슬러지 유지시간을 길게 유지하고 용존산소가 안정적으로 유지되도록 하였다(3, 10).

본 연구에서는 하수나 마을하수에 중 총질소의 고도처리를 위하여 오·폐수의 고도처리 공법인 YPNR 공법을 하수처리 현장에서 실증연구를 수행하여 질산화 효율 및 총질소 제거효율에 대한 실증연구를 수행하였다.

재료 및 방법

실험재료

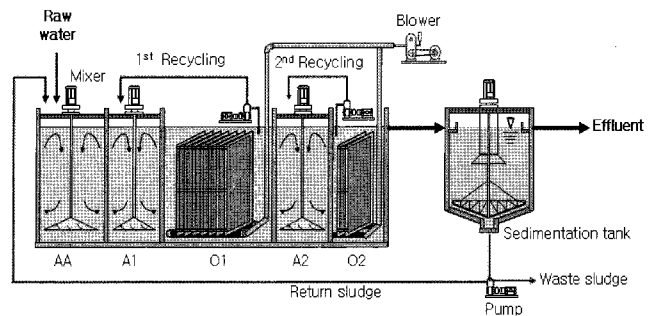
본 실험에 사용한 시료 폐수는 M군 M면 C마을에서 발생되어 마을하수처리장으로 유입되는 하수로서 집수조에서 생물학처리조로 이송되는 마을하수를 대상으로 실증연구를 실시하였다. 실험에 사용한 하수의 성상을 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Properties of sewage of M town

Component	Item	Raw water
	pH	6.7
	BOD (mg/L)	68.7
	COD (mg/L)	43.1
	SS (mg/L)	58.2
	T-N (mg/L)	35.5
	NH ₃ -N (mg/L)	35.0
	NO ₂ -N (mg/L)	0.2
	NO ₃ -N (mg/L)	1.3

YPNR 고도처리공법 현장 적용

M면 마을하수처리장에 YPNR 고도처리공법의 실증시설(Fig. 1)을 설치하여 연구를 수행하였으며, 현장실험에 사용된 처리설비의 규모는 Table 2에 나타내었다. 하루에 유입되는 폐수의 유입량은 70 m³/일이었다.



* AA : AnAerobic, A : Anoxic, O : Oxic

Fig. 1. Schematic diagram of YPNR process used in pilot-scale test(3).

분석방법

YPNR 공법의 효율 및 각 오염물질의 제거상태를 확인하기 위하여 각 공정별로 시료를 채수하여 분석하였다. 유입수는 생물반응조의 첫 번째 조에 유입되는 지점에서 채수하였으며, 방류수는 침전조에서 배출되는 지점에서 채수하였다. 생물반응조 별로 유출되는 쪽에서 채수하여 분석하였다. BOD₅, COD_{Mn}, MLSS (mixed liquor suspended solid), T-N 항목은 수질오염공법시험법(11)으로 분석하였으며, 무기성 질소인 NH₃-N, NO₂-N, NO₃-N 항목은 간이 분석방법(3, 7)으로 분석하였다.

결과 및 고찰

YPNR 공정을 적용한 마을하수 처리현장에서의 질소처리

YPNR 공법을 M군 M면 C마을 하수처리장에 실증 적용

하여 실증연구를 수행하였다. Table 2에 나타난 것과 같이 유효용량 37.6 m³의 처리시설에 평균 70 m³/일의 하수를 처리하였으며, 처리결과를 Fig. 2-6에 나타내었다.

처리대상 하수의 평균 온도는 12.8℃이었으며, 체류시간은 12.9시간, MLSS는 동결기임을 감안하여 2,200 mg/L 정도를 유지하였고, 호기조의 DO는 평균 4~5 mg/L를 유지하였다. 유입 총질소의 농도 대 유기물 (BOD)의 농도 비 (C/N ratio)는 평균 2.0이었으며, 유입 총인의 농도 대 유기물 (BOD)의 농도 비 (C/P ratio)는 평균 21.1이었고, F/M 비는 평균 0.14이었다.

Table 2. Biological sewage treatment facilities and working conditions of M town

Item		Value
Treatment quantity		70 m ³ /day
▶ Biological treatment facilities		
Facility (m ³)	• anaerobic basin	3.9
	• 1 st anoxic basin	3.9
	• 1 st oxic basin	7.6
	• 2 nd anoxic basin	3.9
	• 2 nd oxic basin	3.4
	• sedimentation tank	8.1
Working conditions (mg/L)	• MLSS	2,200
	• DO in oxic basin	4~5
	• Temp. (℃)	12.8
	• HRT(hydraulic retention time) (hr)	12.9
	• C/N ratio	1.9

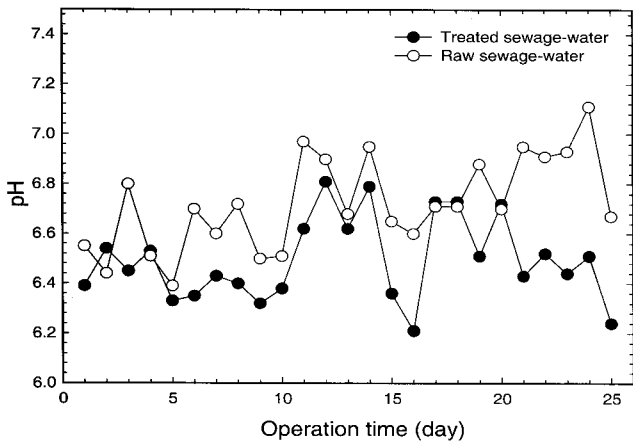


Fig. 2. Variation of pH of sewage in denitrification process of M town.

Fig. 2는 처리기간의 경과에 따른 유입수 및 처리수 중의 pH 변화를 나타낸 것이다. 유입수 중의 pH는 시험기간 20일 동안 6.4에서 7.1 정도로 유입되었다. 탈질공정 후 배출되는 처리수 중의 pH는 역시 6.2에서 6.8 정도로 유입수에 비하여 거의 하락이 일어나지 않았다. 방 등(8)에 의하면 유지폐수의 탈질공정에서 처리기간 동안 pH의 변화는 처리수의 pH가 원폐수에 비하여 1-1.5 정도 낮게

유지되었고, 염색폐수의 탈질공정에서는 처리수의 pH가 원폐수에 비하여 1.3-2 정도 낮게 유지되었다고 보고하였다. 탈질반응은 탄산이 중탄산염으로 전환되면서 질산성 질소가 질소가스로 대기 중으로 방출되는 것을 말한다. 이러한 탈질반응의 결과 알칼리도가 생성되고, 생성된 알칼리도는 공정에서 pH를 상승시켜 혐기·호기조건에서 질산화에 의한 알칼리도의 손실을 일부 상쇄시킨다. 탈질반응에 대한 최적 pH는 7-8 정도이며, 최적 조건은 미생물과 처리 대상에 따라 다르게 나타난다(12).

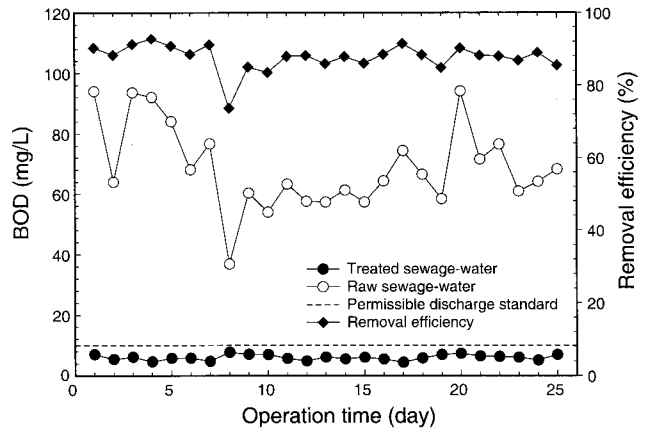


Fig. 3. Variation of BOD of sewage in denitrification process of M town.

Fig. 3은 처리기간의 경과에 따른 BOD의 변화를 나타낸 것이다. 유입수 중의 BOD는 처리기간 내에 최소 36.8 mg/L에서 최대 94.0 mg/L, 평균 68.7 mg/L 수준으로 처리시설에 유입되었다. YPNR 처리공법을 거친 처리수 중의 BOD는 시험기간 25일 동안 4.4~7.7 mg/L, 평균 6.0 mg/L 정도를 유지하여 법적 방류기준인 10 mg/L의 약 60% 수준이었다. BOD 제거율은 처리기간 동안 79~95%를 유지하였고, 평균 91% 이상의 BOD가 제거되었고, 유입수질의 변동에도 매우 안정적으로 유지되었다.

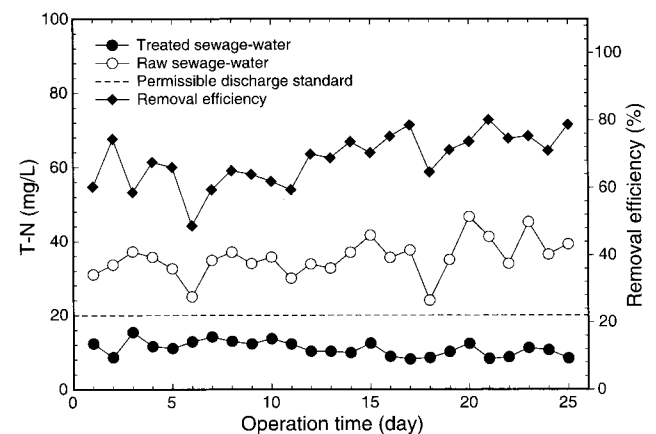


Fig. 4. Variation of T-N concentration of sewage in denitrification process of M town.

Fig. 4는 처리기간의 경과에 따른 T-N의 변화를 나타낸 것이다. 유입수 중의 T-N은 처리기간 내에 24~46.7 mg/L, 평균 35.5 mg/L 수준으로 처리시설에 유입되었다. YPNR 처리공법을 거친 처리수 중의 T-N은 시험기간 25일 동안 8.1~15.4 mg/L, 평균 11.0 mg/L 정도를 유지하여 법적 방류기준인 20 mg/L의 약 60% 수준이었다. T-N 제거율은 처리기간 동안 49~80%를 유지하였고, 평균 71% 이상의 T-N 제거율을 나타내어 동절기임에도 불구하고 유입수질의 변동에 매우 안정적인 처리효율은 보였다.

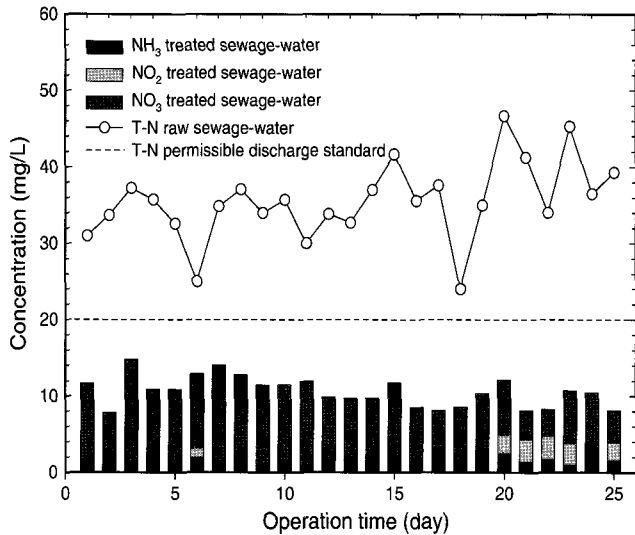


Fig. 5. Variation of inorganic nitrogen concentration of sewage effluent in denitrification process of M town.

Fig. 5는 처리기간의 경과에 따른 방류수의 T-N과 방류수 중의 T-N을 구성하는 무기성질소 성분의 변화를 나타낸 것이다. 방류수 T-N 성분의 구성은 약 16%의 암모니아성 질소, 약 6%의 아질산성 질소, 약 77%의 질산성 질소로 구성되어 있었다. 이는 방류수 중의 총질소 성분의 대부분이 질산화가 진행되어 아질산성 질소나 질산성 질소로 구성되어 있음을 나타내었다.

Fig. 6은 처리기간의 경과에 따른 유입수의 T-N과 방류수 중의 암모니아성 질소를 기준으로 질산화율을 산정하여 처리기간에 따른 질산화율의 변화를 나타내었다. Table 1에 나타내었듯이 유입수 중의 T-N 성분은 약 99%가 암모니아성 질소로 구성되어 있었다. 방류수 중에는 유기성 질소성분이 거의 없으므로 방류수 중의 암모니아성 질소 성분의 함량으로 질산화율을 산정하였다. 유입수 중의 T-N 농도는 처리기간 내에 24~46.7 mg/L, 평균 35.5 mg/L이었으며, 처리수의 암모니아성 질소는 0.9~3.4 mg/L이며, 평균 1.7 mg/L로 유출되어 질산화율은 91~98%, 평균 약 95%를 나타내었다. 본 연구에서는 유입 수질의 변동에도 질산화율은 매우 안정적이고 높은 효율로 유지되었다. 이런 결과는 동절기 임에도 질산화 여재장치에 의해 질산화 미생물의 농도가 충분히 유지될 수 있어서 안정적인 처리

효율을 나타낸 것으로 생각된다.

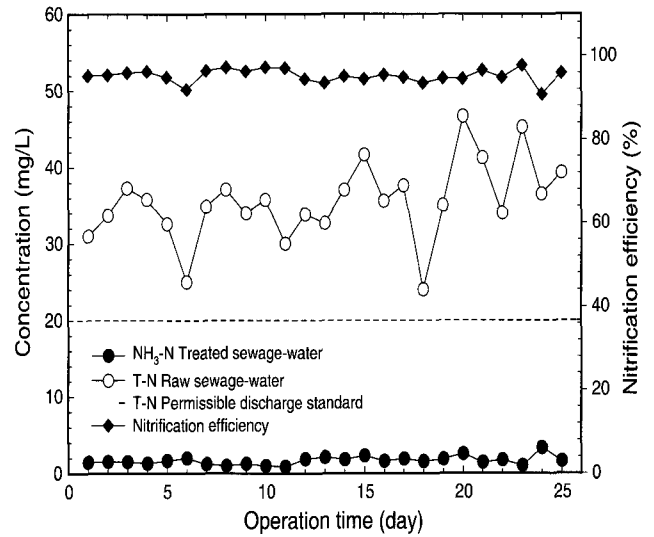


Fig. 6. Variation of nitrification efficiency in denitrification process of M town.

본 연구에 적용한 YPNR 공법과 유사한 공법들을 비교해 보면, Bardenpho 공법(13-16)의 장점은 슬러지 생산량이 적고, 안정화조와 소화조의 설치가 불필요하며, 타 공법에 비해 안정된 총질소 제거율을 보이며, 탈수 케이크의 퇴비화가 가능하다고 알려져 있다. 단점으로는 내부순환비가 매우 크기 때문에 펌프의 동력 및 유지관리비가 크며, 체류시간이 길어 큰 반응조를 필요로 한다는 문제점이 있다고 보고되고 있다. A2O4 공법(4, 7, 13, 16)의 장점은 Bardenpho 공법의 장점을 모두 가지면서 2단 공정으로 유무기물 분해 효율이 높으며, 1차, 2차 내부반송에 의한 질소 제거효율을 높이고 충격부하에 강하여 고농도 폐수처리에 적합하다는 것이다. 단점으로는 6개의 다단으로 이루어지고 두 개의 내부반송이 있어 초기 시설비가 다소 높을 수 있다는 점이 보고되었다.

본 연구에서 적용한 YPNR 공법의 장점은 호기조 내에 질산화 여재를 충전하여 유효 미생물량을 늘림으로써 체류시간을 단축하고, 부유상태의 미생물량을 낮게 유지하여도 질산화율을 극대화시켜 동절기 유기물 분해 및 질산화 효율의 저하를 최소화 할 수 있으리라 판단된다. 또한 반응조를 다단으로 구성하여 유량 및 농도부하 변동에 대해 안정적 처리가 가능하다고 판단된다. 단점은 초기 시설비가 다소 높을 수 있으며, 교반기, 공기공급기, 반송펌프 등의 기계류의 사용이 많으므로 정기적인 점검이 필요하다는 점이 있다(3, 16).

위의 3가지 공법 모두 전탈질과 후탈질 공정을 이용함으로써 고효율의 처리가 가능하다는 장점을 가지고 있으나, Bardenpho 공법은 필요 체류시간이 더 길어 반응조의 용적이 크게 필요하며, 2차 내부반송이 없는 단점을 가지고 있으나, A2O4 공법과 YPNR 공법은 이 두 단점을 모

두 극복하고 있다(16). 특히, 유입수의 변화가 심한 저농도의 하수의 경우 YPNR 공법이 적합하다고 판단된다.

요 약

본 연구는 오·폐수 내에 존재하는 총질소 성분의 생물학적 처리공정의 실증에 관한 연구를 수행한 것으로써 M면의 마을하수처리장에 YPNR 고도처리 공법을 적용하여 25일의 처리기간 동안 마을하수 중의 총질소 성분의 제거에 관한 자료를 확보하여 얻은 결론은 다음과 같다. 마을하수 처리현장에 적용한 결과, 첨가탄소원 없이도 현재 배출허용기준에 적합한 70% 정도의 질소처리 효율을 나타내었다. 특히 유입 총질소 성분 중 95%는 질산화공정을 통해 질산성 질소로 전환되어 탈질공정에서 제거되고 방류되는 총질소 성분 중 질산성 질소 성분이 약 77%로서 이는 향후 강화되는 총질소 규제시 외부탄소원을 소량 투여해 줄으로써 현재의 방류수질보다 약 70% 낮은 방류수질을 유지할 수 있을 것으로 생각된다. 결론적으로 본 실험에서 사용된 YPNR 고도처리 공정은 하수, 마을하수처리에 적용될 수 있다고 판단된다.

감 사

본 연구는 교육과학기술부와 한국산업기술진흥원의 지역 혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과이며, 이에 감사드립니다. 또한 지식경제부와 에너지기술자원평가원의 특성화대학원사업의 일부 지원에 감사드립니다.

접수 : 2009년 2월 20일, 게재승인 : 2009년 3월 23일

REFERENCES

1. Ministry of Environment (2006), White Paper on Environment, Korea.
2. Cho, Y. I. (1998), Environmental Engineering, Donghwa Technology Publishing Co., Korea.
3. Lim, E. T. (2008), Practical demonstration of A2O4/YPNR processes to reduce the total nitrogen ingredient in sewage and wastewater, Ph.D. Dissertation, Chonnam National University, Gwangju.
4. Bhang, S. H., E. T. Lim, G. T. Jeong, J. H. Park, S. H. Park, S. J. Kim, and D. H. Park (2008), Application of advanced treatment process for nitrogen compounds removal of industrial waste-water, *Korean J. Biotechnol. Bioeng.* **23**, 541-545.
5. Samsung Engineering Co. Ltd. (2001), Short-cut nitrogen removal technology using *Nitrosomonas* immobilized media, Research report, Ministry of Environment, Korea.
6. Kim, K. S. *et al.* (2000), Advanced treatment technology of sewage, Donghwa Technology Publishing Co., Korea.
7. Bhang, S. H. (2007), Nitrogen compounds removal of industrial waste-water using advanced treatment process, M. S. Thesis, Chonnam National University, Gwangju.
8. Jeong, G. T., S. H. Park, J. H. Park, Bhang, S. H., E. T. Lim, and D. H. Park (2008), Study of Factors Influenced on denitrification in wastewater treatment, *Korean J. Biotechnol. Bioeng.* **23**, 535-540.
9. Kim, D. H. (2007), Advanced wastewater treatment using anoxic-aerobic reactor filled with porous media, *Journal of the Korean Society of Water and Wastewater*, **21**, 83-89.
10. Yeongam-gun, Korean patent, 10-701524 (2007).
11. Notice of Ministry of Environment (1995), *Standard methods for the examination of water and wastewater* (1995-91), Korea.
12. Seon, Y. H. (2008), The removal of organics and nutrients in an anoxic/oxic process using surface-modified media, *Korean J. Biotechnol. Bioeng.* **23**, 70-76.
13. Barnard, J. L. (1974), Cut P and N without Chemicals, In *Water and Waste Engineering*, pp3-36.
14. AO and A2O system, Biological dephosphate and denitrification system, NGK Co., Japan.
15. Gang, Y. T. and T. H. Kim (1996), Improvement of existing wastewater treatment system for an advanced wastewater treatment, *Journal of Korea Technological Society of Water and Waste Water Treatment* **4**, 45-54.
16. Lim, E. T. *et al.* (2009), Evaluation of pilot-scale modified A₂O₄ processes for the removal of nitrogen compounds from sewage, *Bioresource Technology* (In press).