

효과적 공간활용을 위한 Side Stream Plug-Flow Reactor를 이용한 하수 고도처리 공정 적용에 관한 연구

A study on Applicable to Advanced treatment of using Side Stream Plug-Flow Reactor

김삼주* · 현인환 · 독고석

Kim samju* · Hyun inHwan · Dockko-Suk

단국대학교 토목환경공학과

(2008년 4월 28일 접수 ; 2008년 6월 9일 채택)

Abstract

This study configured the conventional A²O (Anaerobic-Anoxic-Aerobic bioreactor) system which the fixed media immersed into the anoxic reactor(Named PFR system : Plug Flow Reactor) for evaluating the removal efficiency of nitrogen in the wastewater. The experimental equipment was a cylinder which was consist of 4 pleated PE Pipes(Length 330M, Diameter 100mm) including 2 rope shape media.

As a result, the average effluent T-N removal efficiency of the conventional A²O system was 17.9, 40.3, 50.6, 44.6% in each mode, but the average effluent T-N removal efficiency of the PFR system could achieve 38.8, 57.1, 71.8, 65.4% in each mode. It indicated that the PFR system caused to the increasing of C/N ratio that effected to the increasing of the denitrification efficiency. Not only the effective T-N removal efficiency but also the controllable install space will give advantages for retrofitting of the wastewater treatment plant with the conventional treatment system to the PFR system.

Key words : Plug Flow Reactor, Advanced treatment, Nutrient Removal, Internal Recycle

주 제 어 : 플러그 흐름형 반응조, 고도처리공정, 영양물질 제거, 내부반송.

1. 서론

2003년말 기준 국내의 가동 중인 하수처리장은 모두 243 개소로서, 이중 67개소는 고도처리 공정으로 가동 중에 있으며, 점차 고도처리 공법으로 교체될 전망이다. 이렇게 국내 적용되어 운전되고 있는 고도 처리 공정들은 저마다 다양한 특성을 나타내며, 고유의 운전 기법과 유지관리 기술을

요하고 있다.

특히 질소 제거에 있어 운전 기법과 특성이 다양하게 나타나고 있는데 생물학적 질소 제거는 두 가지 단계에 의하여 이루어진다. 첫 번째 단계에서 암모니아가 질산성질소로 산화되고 두 번째 단계에서 종속 영양미생물들에 의해 질산성 질소가 전자수용체로 사용되어 환원되면서 질소가스로 변환된다.

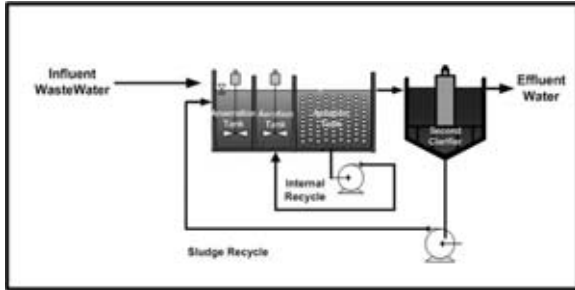
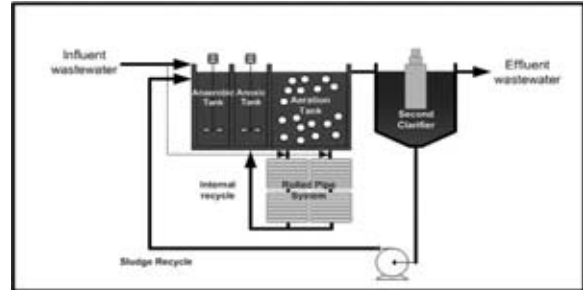


Fig. 1. b) Schematic diagram of A²O.



b) Schematic diagram of PFR-A²O.

현재 하수 내 질산성 질소를 제거하기 위하여 다양한 종류의 종속 영양 탈질 공정은 무산소조의 위치를 달리하여 전 탈질과 후 탈질 공정으로 이용하고 있으며, 전 탈질의 경우 폐수 내 유기물을 사용하므로 후 탈질에 비하여 기질 소모는 낮게 요구되고 있으나 내부순환 시 동력비가 많이 들고 처리 부피가 커진다는 단점을 갖고 있다. 후 탈질 또한 값비싼 외부 탄소원을 인위적으로 주입하여야 하고, 외부탄소원의 과량 투입 시 방류수의 2차 오염이 발생되는 단점을 갖고 있다.

또한, 기존의 하수처리장을 인, 질소제거를 위한 고도처리를 위하여 개조에는 새로운 넓은 부지가 확보되어야 하는 단점이 있다.

따라서 본 연구에서는 PE 주름관을 사용하여 내부에 로프형 끈상 접촉여재를 연결함으로써 미생물 접촉여재로 활용함을 통하여 별도의 반응조 형태 없이 Side stream으로서 PE 주름관내를 무산소조로 이용하여 탈질을 유도하는 공정의 적용을 평가하는 것이 목적이다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

본 연구를 실시하기 위하여 A시에 소재한 A하수종말처리장 내에 100m³/day규모의 파일럿플랜트 고도 처리 공정을 설치하였으며, A하수종말처리장에 설치되어 있는 스크린을 거친 후단의 유입수를 유량조정조로 이송하여 유입 원수로 사용하였다.

파일럿 플랜트의 반응조는 Fig. 1과 같이 PE(Polyethylene)로 제작되었으며, HRT 5.5시간(처리용량 120m³/day)이 유지되도록, 각각 3.5m³/day, 2.9m³/day, 5.9m³/day 규모의 반응조를 3단으로 구성하여, 1단을 혐기조, 2단을 무산소조, 3단을 포기조로 하는 반응조를 구현하였다. 또한 장방형으로 제작된 26.2m³/day 규모의 침전조를 설치하여 체류시간을 5.2시간으로 유지하였다.

내부 반송을 위한 Plug-Flow Reactor(PFR)는 Fig. 2와 같이 직경 2.5m원형 틀에 관경 100mm PE주름관 330m가 말려진 형태로 4기를 구성하였고, 각 PFR에는 시료 채취 및

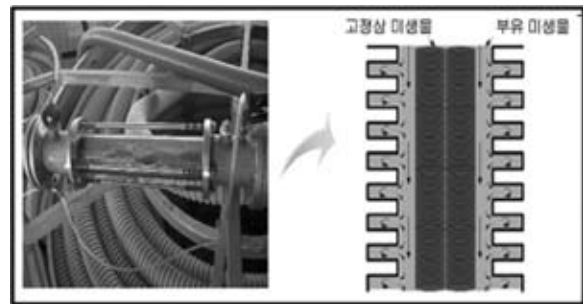


Fig. 2. Experimental PFR.

관내 흐름을 관찰하도록 점검부가 설치되었으며, 내부에는 로프형 끈상 접촉여재(HYOSUNG BC^{plus})가 삽입되었다.

유입수는 유량조정조에서 펌프(HANIL 유체펌프)에 의해 50m³/day가 혐기조로 유입되었고, PFR내 유기 탄소원으로 원수 70m³/day을 분할 유입하여 공급하였다. 이때, 유입수는 PFR 입구에 설치된 챔버를 통하여 유입되도록 하였다.

각 반응조 내 혼합을 위하여 교반장치를 설치 하였고, 포기조건인 3단에 공기공급을 위하여 송풍기 2기를 사용하였으며, 내부 반송 및 외부반송을 위해 각각 2기와 1기의 펌프를 사용하였다.

파일럿 플랜트에 사용된 펌프와 송풍기의 on/off 는 각각의 펌프와 송풍기에 연결된 인버터와 제어반 외부에 설치된 터치스크린을 통하여 간단하게 조작할 수 있도록 하였다.

2.2 실험방법

본 연구는 미생물 체류시간(SRT)에 따라 A²O공정에 로프형 끈상 접촉여재를 삽입한 파이프 형태의 PFR을 내부 반송라인에 연결하여, 다량의 질산성 질소를 함유한 내부반송수가 무산소조로 반송되는 동안 PFR내에서 탈질산화 반응을 유도함으로써 고도 처리 공정의 영양염류 제거 효율을 증대시키는 것으로 해당되는 파일럿 플랜트의 운전 조건을 Table 1에 나타내었다.

운전조건은 미생물 체류시간(SRT)에 따라 10, 15, 25, 30일로 변화 시키며 유입수와 방류수, 공정 Profile을 측정하였으며, 파일럿 플랜트의 유입유량, 슬러지 반송유량, DO농

도는 동일하게 유지하였다.

실험은 생물학적 처리방법에서 질소, 인 제거 시 중요한 운전 조건인 SRT를 변화 조건으로 모드1, 모드2, 모드3, 모드4로 나누어 운전하였으며, 유입유량은 120m³/day로 수리학적 체류시간(HRT)을 4시간으로 유지하였다. 포기조 내 용존산소 농도는 질산화를 유도하기 위하여 1~2.5mg/L로 유지하였으며, 내부반송 및 외부 반송은 유입유량의 100%인 120m³/day로 유지하였으며, 잉여슬러지는 슬러지 반송 라인에서 1일 1회 SRT에 따른 계산된 양을 폐기하였다.

3. 결과

3.1 A²/O 운전 결과

본 실험은 기본적인 A²/O공정을 파일럿 플랜트에서 실험하였으며, SRT 운전조건을 모드별로 달리하여 운전하였다.

pH의 경우 모드 1, 2, 3, 4에서 유입수 및 방류수가 7.0~8.0사이로 안정적으로 유지되었고, 알칼리도의 경우 모드 1, 2, 3, 4 유입농도 121.67, 114.29, 110.5, 116.21mg/L as CaCO₃에서 방류수 농도가 각각 평균 82.33, 70.54, 67.17, 67.92mg/L as CaCO₃로 나타났다. 이론적으로는 1mg/L의 NH₄⁺-N 질산화에 7.14mg/L의 알칼리도가 소모되는데, (Mikkil G., Mandt, Bruce A., Bell, 1982) 실험결과 각 온도조건에서 알칼리도와 NH₄⁺-N 농도가 이론적인 수치와 거의 동일한 수준으로 제거되는 것으로 나타났다.

TCOD_{Cr}의 경우 모드 1, 2, 3, 4 유입농도 123.25, 129.31, 121.2, 122.75mg/L에서 방류수 농도가 각각 평균 21.38, 18.1, 20.69, 24.96mg/L로 나타났으며, 제거율은 각각 82.3, 85.6, 82.6, 79.3%로 유기물 제거는 효과적으로 이루어진 것으로 사료된다.

NH₄⁺-N의 경우 모드 1, 2, 3, 4 유입 농도 19.67, 20.78, 21.87, 19.46mg/L에서 방류수 농도가 각각 평균 4.6, 3.01, 1.39, 1.7mg/L로 질산화율이 각각 76.5, 85.3, 93.5, 91.1%로 안정적인 수치를 나타낸 반면, T-N의 경우 모드 1, 2, 3, 4 유입 농도 22.67, 24.2, 25.2, 22.61mg/L에서 방류수 농도가 각각 평균 18.49, 14.32, 12.29, 12.27mg/L로 제거율이 17.9, 40.3, 50.6, 44.6%의 제거율을 보였다. 이는 NO₃⁻-N

탈질이 효과적으로 이루어지지 못한 점으로 사료된다.

이는 구조적으로 SRT 25에서의 질산화는 최적상태이었음에도 탈질을 유발시킬 수 있는 기질부족으로 인하여 탈질이 이루어지지 못하고 있음을 시사하고 있다.

PO₄⁻³-P의 경우 모드 1, 2, 3, 4 유입농도 2.14, 2.35, 2.59, 2.70mg/L에서 각각 0.72, 1.02, 1.45, 1.85mg/L의 방류수 농도를 나타냈으며, T-P의 경우 모드 1, 2, 3, 4 유입농도 2.51, 2.65, 2.98, 3.11mg/L에서 각각 0.82, 1.15, 1.65, 2.14mg/L의 방류수 농도로 나타났다.

방류수 TSS 농도는 각각 평균 5.65, 4.38, 3.73, 3.43mg/L로 10mg/L이하의 안정적인 수치를 보였으며, 운전조건이 침전조 내 슬러지 침강성에 거의 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

모드 1, 2, 3, 4 조건에서의 F/M비는 0.264~0.495, 0.226~0.437, 0.174~0.303, 0.14~0.249kg TCOD_{Cr}/kg MLVSS · day 범위로 운전되었고, u(비기질소모율)의 경우 0.21~0.43, 0.187~0.393, 0.139~0.264, 0.103~0.209 kg TCOD_{Cr}/kg MLVSS · day 범위로 운전되었다.

3.2 PFR-A²/O 운전 결과

본 실험은 A²/O 공정에 로프형 끈상 접촉여재를 삽입하여 무산소조 반응조 (PFR)를 설치한 후의 운전결과 이다. 내부반송라인에 PFR을 연결하였고, PFR내에서 탄소원 공급을 위하여 유입수를 분할 유입하였으며, SRT 운전조건은 A²/O 와 동일하게 운전하였다.

pH의 경우 모드 1, 2, 3, 4에서 유입수 및 방류수가 7.0~8.0사이로 안정적으로 유지되었고, 알칼리도의 경우 모드 1, 2, 3, 4 유입농도 117.42, 121.29, 123.46, 129.58mg/L as CaCO₃에서 방류수 농도가 각각 평균 81.63, 81.63, 72.17, 64.54, 65.46mg/L as CaCO₃로 나타났다. 실험결과 각 온도조건에서 알칼리도와 NH₄⁺-N 농도가 이론적인 수치와 거의 동일한 수준으로 제거되는 것으로 나타났다.

TCOD_{Cr}의 경우 모드 1, 2, 3, 4 유입농도 124.64, 142.6, 137.61, 145.22mg/L에서 방류수 농도가 각각 평균 19.06, 14.69, 22.5, 25.1mg/L로 나타났으며, 제거율은 83.0, 88.7, 82.7, 81.4%로 A²/O와 거의 동일하거나 약간 효율이

Table 1. Operation Factor of PFR-A²/O & A²/O

	Influent flow (m ³ /day)	Return Sludge rate, (%)	DO Conc. (mg/L)	HRT (hr)	F/M ratio mg TCOD _{Cr} /mg MLVSS·day	C/N ratio mg TCOD _{Cr} /mg T-N	MLSS (mg/L)
PFR-A ² /O	120	100	1-2.5	5.5	0.1-0.3	5.9	1,800 - 4,000
A ² /O				5	0.08-0.25		
SRT(day)	Mode1		Mode2		Mode3		Mode4
	10		15		25		30

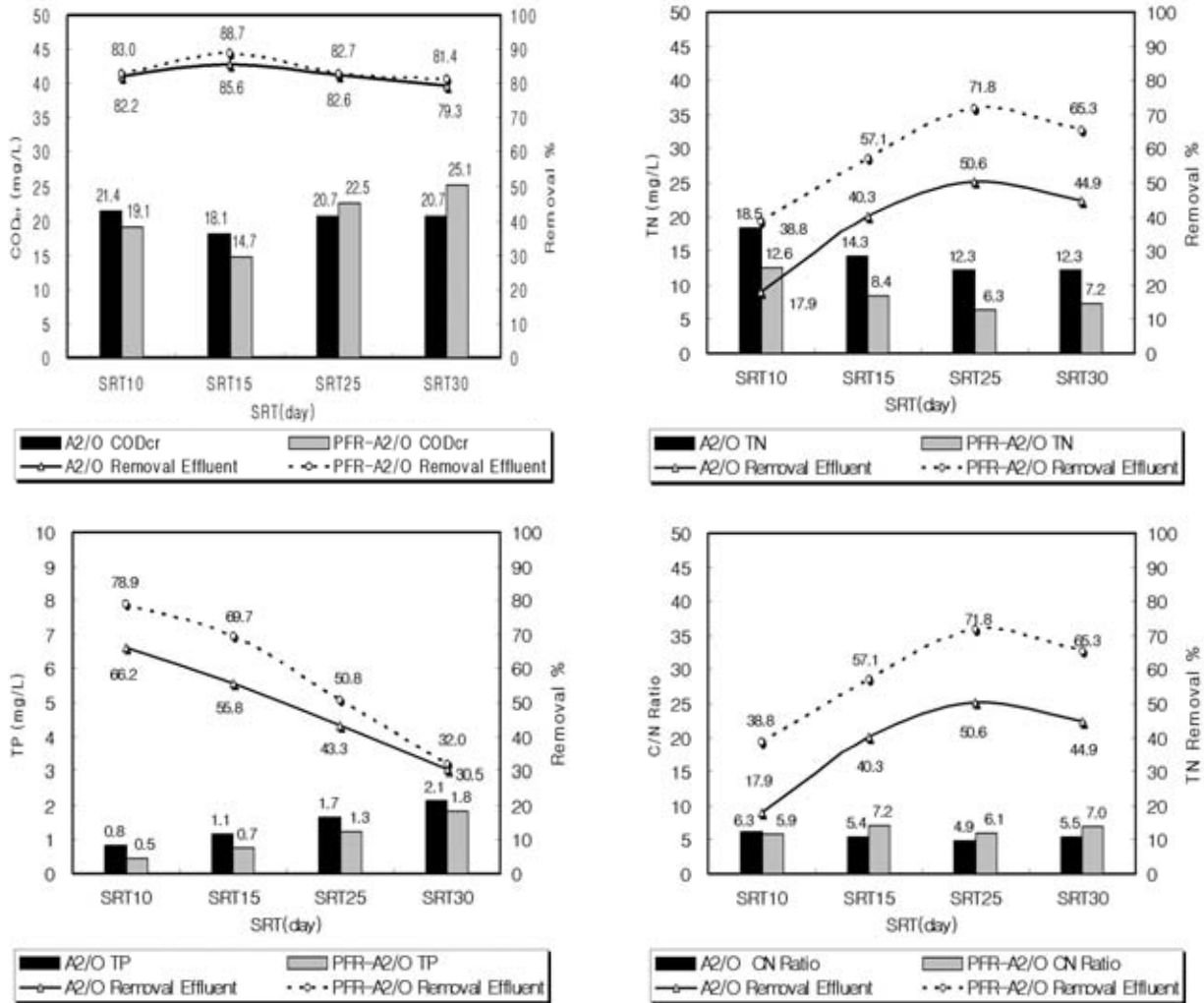


Fig. 3. Profiles of pollution source for SRT(A²/O & PFR A²/O).

상승하였다.

NH₄⁺-N의 경우 모드 1, 2, 3, 4 유입 농도 18.18, 17.62, 20.11, 17.85mg/L에서 방류수 농도가 각각 평균 3.98, 1.9, 0.64, 0.93mg/L로 질산화율이 77.75, 88.3, 96.8, 94.7%로 A²/O에 비하여 약간 상승하였으며, T-N의 경우 모드 1, 2, 3, 4 유입 농도 20.93, 20.2, 22.79, 21.46mg/L에서 방류수 농도가 각각 평균 12.58, 8.38, 6.33, 7.24mg/L로 제거율이 38.8, 57.1, 71.8, 65.4%로서 A²/O에 비하여

17~21% 향상되었다. 이는 PFR내에서 무산소 공정이 효과적으로 작용한 것으로 판단된다.

또한, PO₄⁻³-P의 경우도 4개의 모드에 대하여 2~14% 제거율이 향상되었다. 이는 무산소 PFR에 의하여 혐기공정이 보다 효과적으로 작용하였음을 보여주고 있다.

방류수 TSS 농도는 각각 평균 5.54, 4.67, 3.82, 3.89mg/L로 10mg/L이하로서, 운전조건이 침전조 내 슬러지 침강성에 거의 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

Table 2. Analysis of pollution source according to various for SRT (A²/O & PFR-A²/O).

Unit : Removal Effluent (%)

	Mode1		Mode2		Mode3		Mode4	
	A ² /O	PFR-A ² /O	A ² /O	PFR-A ² /O	A ² /O	PFR-A ² /O	A ² /O	PFR-A ² /O
TCOD _{cr}	82.25	82.96	85.58	88.74	82.58	82.69	79.25	81.36
T-N	17.89	38.78	40.33	57.11	50.56	71.82	44.91	65.35
T-P	66.22	78.87	55.78	69.68	43.27	50.84	30.46	32.00
TSS	88.39	86.8	97.97	91.30	92.53	93.82	92.26	93.32
C/N	6.3	5.7	5.4	7.2	4.9	6.1	5.5	7.0

모드별 조건에서의 F/M비는 각각 0.2~0.821, 0.211~0.683, 0.174~0.381, 0.152~0.411kg TCOD_{Cr}/kg MLVSS · day 범위로 운전되었고, u(비기질소모율)의 경우 0.151~0.768, 0.18~0.644, 0.136~0.339, 0.115~0.369kg TCOD_{Cr}/kg MLVSS · day 범위로 운전되었다.

3.3 C/N 비에 따른 T-N 제거 효과

Fig. 3은 C/N비(COD/T-N) 변화에 따른 총 질소 제거율의 변화를 나타낸 그래프이다.

A²/O 공정인 경우 C/N 비는 5.5 (4.9~6.3) 범위로 유입되었으며, 운전 기간 중 T-N은 38.4% 처리효율을 보였으며, PFR-A²/O 공정인 경우 C/N 비는 6.6 (5.9~7.2) 범위로 유입되었으며, 운전 기간 중 T-N은 60% 처리 효율을 보였다. 이는 PFR에 원수를 분할 주입함으로써 C/N비가 증가되어 탈질이 향상된 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) PFR을 내부 반송라인에 연결하여 하수의 처리효율을 검토한 결과 T-N의 경우 A²/O공정보다 최대 2배정도의 높은 질소제거율을 나타내었다. 이는 PFR내에서 내부반송되는 다량의 질산성 질소를 탈질산화 반응을 유도하여 무산소조로 내부반송되었기 때문이며, 또한 PFR에서 질산성질소의 부하를 저감시켜 전체적으로 낮은 C/N비의 유입수 성상을 보정하기 때문에 별도의 외부 탄소원 없이도 유기물제거 효율을 증대시킬 수 있다.
- 2) 탈질에 따른 질소제거효율은 모드3, 모드4에서 가장 높은것으로 나타내었으며, T-P의 경우 모드별로 큰 차이를 보이지 않았으나 그중 모드1에서 가장 높은 제거 효율을 나타내었다. 그러므로 유기물제거를 포함한 전체적인 SRT에 따른 운전모드는 15~25일의 SRT가 가장 효과적이다.
- 3) A²/O공정만을 적용하여 하수의 처리효율을 검토한결과 T-N의 경우 각 모드에서 저조한 제거율을 나타냈

었다. 이는 암모니아성 질소의 질산성질소로의 질산화는 안정적이나 유입수내 낮은 C/N비로 인하여 효과적인 탈질이 이루어지지 못했기 때문이다.

- 4) PFR 반응조의 경우 기존 A²/O 반응조에 Side stream 으로서 설치공간을 마음대로 변형시킬수 있는 PE주름관을 사용하였기에 기존 시스템을 개조하는데 매우 효과적일 것으로 사료된다

이상의 결론을 통해 로프형 끈상 접촉 여재를 삽입한 파이프 형태의 PFR 이용한 A²/O공정의 개조 적용이 가능한 것으로 판단된다.



참고문헌

1. 고광백 (2004) *폐수처리 공학*, 동화기술, 서울
2. 김남천 (2000) *환경미생물 제어 공학*, pp.187~195, 동화기술, 서울
3. Anand Sundararajan, and Lu-kwang Ju. (1995) Biological oxygen transfer enhancement in *wastewater treatment systems*, *Water Environment Research*, Vol. 67, No. 5.
4. Alison, H. and Peter H. Dare. (1993) Measuring maximum specific growth rate and half saturation coefficient for activated sludge systems using a freeze concentration technique., *Wat. Res.*, Vol. 27, No. 12.
5. Dewey, R., and Merna Hurd. (1971) Study Of Complete Mixing Activated Sludge System. *WPCF*, Vol. 43, No. 3, Part 1.
6. Henze, Z. (1998) *Activated Sludge Modelling Process in Theory and Operation*. John And Wiley & Sons.
7. Mikkil G. Mandt, and Bruce A. Bell. (1982) *Oxidation Ditches In Wastewater Treatment*, Ann Arbor Science Publishers, United States of America.