

생물막 여과반응기를 이용한 고도질소 제거를 위한 운전제어법 개발

정진우 · 김성원^{*†} · 津野 洋^{**}

환경관리공단 상하수도지원처

^{*}고려대학교 공과대학 토목환경공학과

^{**}교토대학교 대학원 공학연구과 도시환경공학과

Development of Biological Filtration Process for Effective Nitrogen Removal and its Control strategies in Tertiary Treatment of Sewage

Jin-Woo Jeong · Sung-Won Kim^{*†} · Hiroshi Tsuno^{**}

Department of Water Supply & Sewerage Policy, Environmental Management Corporation

^{*}Department of Civil & Environmental Engineering, Korea University

^{**}Department of Urban and Environmental Engineering, Kyoto University

(Received 13 September 2005, Accepted 24 November 2005)

Abstract

The operational parameters and control strategies of a tertiary wastewater treatment process a biological filtration system were investigated. The biological filtration system consisted of a nitrification filter (Filter 1) and a polishing filter with anoxic and aerobic parts (Filter 2). SS, T-C-BOD, and T-N in effluent were kept stable at less than 3, 5 mg/L, and 5 mgN/L, respectively, under a HRT in Filter (filter-bed) of 0.37~2.3 h. T-N at the outlet of Filter 2 were about 1~5 mgN/L under the condition of LV of 50~202 m/d. Methanol addition was controlled based on the COD/N ratio or McCarty's equation. Constant COD/N ratio control results in excess addition under large diurnal fluctuation of NO_x-N, and McCarty's equation can be used to add appropriate amount of methanol. Control of methanol addition by on-line nitrate measurement, control of aeration by on-line DO measurement, and control of backwashing by head loss measurement are successfully operated. These results proved that this process prove the easy-maintenance and cost-effectively treatment is attainable.

keywords : Biological filtration system, Biological nitrogen removal, Control strategy, Methanol addition, SS removal, Tertiary wastewater treatment

1. 서 론

최근 산업발달 및 생활수준의 향상에 따라 방류수역의 수질오염 심화, 환경오염에 대한 시민의식의 향상, 처리수질의 배출허용기준 강화되고 있지만 대부분의 하수처리에 채용되고 있는 2차 처리공정인 표준 활성슬러지법으로는 방류수역의 수질개선 효과가 이루어지지 못하고 있다.

통상의 2차 처리를 통한 BOD, SS 등의 유기물만의 제거는 방류수역에서의 영양염류에 의한 조류 및 수생식물의 성장을 촉진시켜 DO의 고갈로 인한 하천의 자정능력 저하를 초래하게 되므로 궁극적으로 방류수역의 수질개선을 위해서 유기물뿐만 아니라 영양염류를 제거해야만 한다. 이를 위해서는 질소·인 등을 함께 제거할 수 있는 처리공법의 채택이 적극적으로 이루어져야 한다. 따라서 기존의 하수처리장에서는 2차 처리공정에 대한 처리공정 개선 및 추가시설 설치가 요구되고 있는 실정이다.

현재 일반적인 질소 제거의 경우 순환식 산화탈질법과 A₂O법(혐기-무산소-호기성조)등이 도입되고 있지만 이들 질소제거효율이 40~50%정도이어서 불충분한 현실이다(환경부, 2004). 이 때문에 기존의 하수처리시설에 질소제거능력을 향상시키고 동시에 부지 및 유지관리를 위한 인원 및 예산이 제한적이기 때문에 필요로 하는 부지면적을 작게 하면서 유지관리가 쉬운 시설이 필요한 실정이다.

이러한 현실을 바탕으로 본 연구에서는 2차 처리수를 대상으로 SS 및 질소제거를 목적으로 한 생물막 여과반응기를 개발하였다. 생물막 여과반응기는 물리적인 여과기능에 더불어 여재 표면에 부착 증식한 미생물에 의한 생물처리 기능을 가진 반응기(Chen et al., 2000; Hidaka et al., 2003a; Tusno et al., 2004)로 부지면적을 적게 차지하면서 고도처리가 가능하다. 하지만, 기존의 연구는 주로 생물막 여과반응기를 이용하여 질산화만을 목적으로 하여 질산화·탈질을 동시에 진행시키진 않았다(Tschui et al., 1994; Payraudeau et al., 2000). 더불어 최근 각종 수질항목을 연속적으로 측정할 수 있는 기술의 진보에 따라 on-line 제어가 가능하게 되었다.

[†] To whom correspondence should be addressed.
kueebio@korea.ac.kr

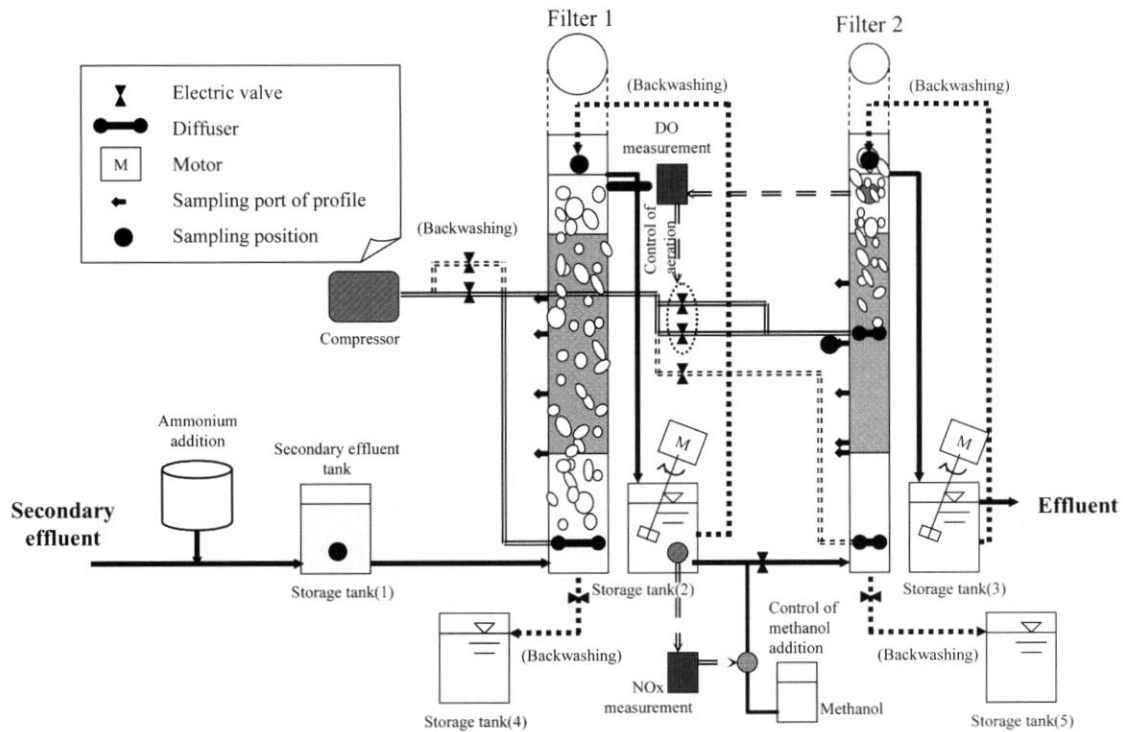


Fig. 1. Schematic diagram of pilot plant.

본 pilot plant 규모의 생물막 여과반응기를 이용하여 2차 처리수에 의한 연속처리실험을 통해 처리특성을 검토함과 동시에 자동 제어의 활용을 통한 운전제어법의 확립을 시도하였다. 본 연구에서의 목표수질은 하수 고도처리로서 적합한 $SS \leq 5 \text{ mg/L}$, $BOD \leq 3 \text{ mg/L}$, $T-N \leq 5 \text{ mgN/L}$ 로 설정하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1. 실험장치

합류식 하수도인 일본의 오사카 Konoike 하수처리장내에 Fig. 1과 같은 실험장치를 설치하였다. 처리장내의 2차 처리수를 본 연구의 대상하수로 하였으며 통수방향을 상향류식으로 Filter 1과 Filter 2로 구성하여 처리를 하였다.

생물막 여과반응기는 Filter 1과 Filter 2로 구성되어 있다. Filter 1은 원통형으로 직경 50 cm, 높이 381 cm이다. Filter 2는 역시 원통형으로 직경 50 cm, 높이 381 cm이다. 여층의 높이는 Filter 1, 2 모두 2 m이다. 여재는 발포 폴리리스틸렌제를 이용하였으며 유효경은 Filter 1의 여재는 4 mm, Filter 2는 3 mm로 하였다. 여재의 비중은 0.16으로 부유성이며 공극율은 0.4정도이다. 균일한 집수 및 부유성 여재의 유출을 방지하는 것을 목적으로 여재 상부에 스크린을 설치하였다.

Filter 1은 유기물 산화 및 질산화를 목적으로 하부로부터 포기를 하였다. Filter 2는 하부에 탈질균에 의한 탈질을 하는 것을 목적으로 무산소 상태 및 유기물이 충분히 존재하

는 것을 목적으로 하였다. 본 연구에서는 역세척 방법으로 공기세척과 처리수에 의한 물 세척을 조합한 세정을 실시하였다. 역세척 빈도는 Filter 1은 4일 간격으로 Filter 2는 손실수두가 2 m에 도달했을 시에 자동으로 행해지도록 하였다. 또 처리방식으로서 Filter 1과 Filter 2는 동시에 처리하지만 대상 원수인 2차 처리수내에 암모니아성 질소 (NH_4^+-N)가 포함되어 있지 않을 경우는 질산화를 목적으로 한 Filter 1의 운전을 필요로 하지 않기에 Filter 2 단독으로 처리를 하였다.

또한, 잉여 유기물의 산화 및 DO 농도의 회복을 목적으로 Filter 2의 중간(높이가 하단으로부터 2 m 장소)에 포기를 하여 상부를 호기성 조건으로 하였다.

2.2. 자동제어

여러 연구자들은 자동제어 장치에 관해 연구를 진행하였는데 그중에 무산소 여과층에 NO_3^- -N 농도를 on-line으로 측정하여 methanol 첨가량을 제어하였다. 유입 NO_3^- -N 농도를 측정된 제어(feed-forward 제어), 유출 NO_3^- -N 농도를 측정된 제어(feed-back 제어), 동시에 측정하여 제어하는 방법을 비교 검토하였다(Puznava et al., 2000). 그 결과, 양자를 동시에 제어하는 경우가 가장 효율이 좋은 것으로 나타났다. 하지만, 유입과 유출 농도를 동시에 제어하는 것은 초기에 많은 비용을 필요로 한다. 더불어 유출농도는 안정적인 수질을 확보하기 때문에 유입농도만을 제어해도 충분한 효과를 얻을 수 있을 것으로 생각되어진다. 이러한 제어법으로 3차 처리에 적용했을 경우 methanol 첨가량을 약 20%를 절감할 수 있었다(Koch et al., 1997).

또한, 호기성 여과지를 이용한 질산화 처리에서 DO 농도 및 NH₄⁺-N농도를 on-line 측정함에 따라 운전비용을 절감할 수 있었다는 보고도 있다(Puznava et al., 2000).

이러한 실험들은 methanol 주입량 및 aeration량을 제어함으로써 운전비용을 절감할 수 있는 효과를 얻을 수 있었다. 하지만, 이들 제어방법들은 탈질처리 후 NO₃⁻-N농도를 1.5~3 mgN/L 정도로 설정되어 있으며 이 후 포기를 행하지는 않았다. 또한, 탈질시의 설정치를 대부분 COD/N비에 맞추어져 있으므로 이론적으로 필요로 하는 methanol 첨가량보다 많이 첨가됨으로 인해 훨씬 짧은 HRT로 운전했을 시 과량 methanol 첨가의 우려를 낳을 수 있다. 이에 본 연구에서는 생물막 여과지에 재폭기 제어법의 설치 및 이론치에 가장 근접한 methanol 첨가 제어법을 적용하여 그 효율 등을 검토하였다.

a) on-line NO₃⁻-N 측정에 의한 methanol 주입량 제어

NO₃⁻-N 농도에 따라 methanol 주입량을 설정하여 높은 질소 제거 효율을 얻음과 동시에 과량의 첨가를 방지하기 위해 on-line NO₃⁻-N 측정장치를 도입하였다. Online nitrate monitor는 DiaMon Multi(Bran+Luebbe사) 장치를 이용하였다. 측정원리는 sampling한 시료를 여과막을 통해 걸러낸 후 UV법에 의해 약 20분 간격으로 측정하였다. 이를 통한 NO₃⁻-N 농도를 측정하여 methanol 첨가량 제어를 행하였다.

b) On-line DO monitor에 의한 포기량 제어

처리의 안정성을 높이며 불필요한 포기를 방지하지 함과 동시에 운전비용을 절감하기 위해 Filter 2의 유출수의 DO 농도를 제어하였다. On-line DO monitor로서 DO402 용존 산소계(Yokogawa)를 이용하였다. DO 농도 측정값에 따라 포기량을 2단계(포기량1 < 포기량2)로 설정하였다. 보통은 포기량 1로 설정하고 DO 농도가 설정값(6 mg/L) 미만일 경우

에는 포기량 2로 하였다. 또한, DO 농도가 설정값의 여유분(본 연구에서는 0.5 mg/L)에 도달했을 시 포기량은 포기량 1로 되돌아가도록 하였다.

c) 압력계에 의한 역세척 제어

생물막 여과반응기의 경우 연속 처리함에 따라 포착된 SS와 증식된 미생물에 의한 패실이 일어나기 때문에 정기적인 역세척이 필요로 한다. 본 연구에서는 역세척 방법으로 공기세척과 처리수에 의한 물 세척을 조합한 세정을 조합한 제어 방법으로 1회당 12분간 행하도록 하였다. 이들 제어조작은 sequence와 전기변에 의해 자동제어 되도록 하였으며 손실수두가 2 m에 도달했거나 역세척 후 운전계속 시간이 설정값(10 day)을 초과하였을 시 자동 역세척이 이루어지도록 하였다.

2.3. 운전조건

본 연구의 실험은 525 일간에 걸쳐서 장기간 실험을 실시하였다. 생물막 여과반응기의 운전조건을 Table 1에 표시한다. 운전기간을 Run 1~14까지 14개로 구분하여 연구를 진행시켰다. 실험기간중의 2차 처리수의 수온변화를 Fig. 2에 표시한다. 여름철에는 32°C 정도 겨울철에는 16°C 정도 까지 저하하였다.

Run 3~5 및 Run 10에서는 2차 처리수내에 암모니아성 질소농도가 낮아(거의 0.0 mgN/L) 이미 질산화가 이루어져진 것으로 판단하여 Filter 1을 운전하지 않고 대상수를 Filter 2만으로 통과시킨 운전을 실시하였다. 그 외 Run에서는 Filter 1과 Filter 2로 처리를 하였다.

또, Run 11~13에서는 암모니아성 질소부하를 상승시켜 질산화 능력을 검토하기 위해 2차 처리수내에 NH₄⁻-N와 알칼리제로서 중탄산칼륨(KHCO₃)을 인위적으로 조성하여 첨가하였다. 중탄산칼륨의 첨가목적은 NH₄⁺-N가 질산화에

Table 1. Operational conditions

		Run 1	Run 2	Run 3	Run 4	Run 5	Run 6	Run 7	Run 8	Run 9	Run 10	Run 11	Run 12	Run 13	Run 14
Operational dates	-	0 ~ 10	11 ~ 17	18 ~ 38	39 ~ 79	80 ~ 96	97 ~ 105	106 ~ 133	134 ~ 150	151 ~ 224	225 ~ 404	405 ~ 441	442 ~ 461	462 ~ 488	489 ~ 525
Flow rate	Filter 1	L/min	5	20	-	-	20	-	10	-	-	-	10	-	-
	Filter 2	L/min	-	-	1.1	-	2.2	-	-	2.8	-	-	3.5	4.4	-
HRT in filtration part	Filter 1	h	1.31	0.33	-	-	0.33	-	0.65	-	-	-	0.65	-	-
	Filter 2	h	-	0.95	-	-	0.48	-	-	0.37	-	-	0.30	0.24	-
	Total	h	2.3	1.3	0.95	0.5	0.8	1.1	1.0	0.37	1.0	0.95	0.89	-	-
	Filter 1	h	2.5	0.6	-	-	0.6	-	1.2	-	-	-	1.2	-	-
HRT in reactor	Filter 2	h	-	1.9	-	-	1.0	-	-	0.7	-	-	0.6	0.5	-
	Total	h	4.4	2.5	1.9	1.0	1.6	2.2	2.0	0.7	2.0	1.8	1.7	-	-
I.V	Filter 1	m/d	37	147	-	-	147	-	73	-	-	-	73	-	-
	Filter 2	m/d	-	50	-	-	101	-	-	128	-	-	160	202	-
Methanol addition	-	mgCOD/mgN	5	3.5	-	McCarty's equation	-	67% of McCarty's equation	-	McCarty's equation	-	120% of McCarty's equation	-	McCarty's equation	-
Backwashing interval	Filter 1	d	4	-	-	-	-	4	-	-	-	-	4	-	-
Backwashing condition	Filter 2	-	-	-	-	-	-	Head loss of 2 m-H ₂ O	-	-	-	-	-	-	-
Aeration rate	Filter 1	m ³ /(m ² ·min)	0.15	-	-	-	-	0.15	-	-	-	-	0.15	-	-
DO set point	Filter 2	mg/L	-	-	-	-	-	6	-	-	-	-	-	-	-
Aeration rate	*	m ³ /(m ² ·min)	-	-	-	-	-	0.03	-	-	-	-	-	-	0.06
in Filter 2	**	m ³ /(m ² ·min)	-	-	-	-	-	0.06	-	-	-	-	-	-	0.12

* DO >= Set point. ** DO < Set point.

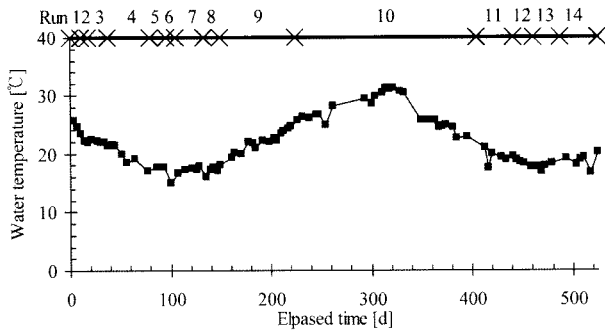


Fig. 2. The time course of temperature.

따라 알칼리도가 소비되기에 이를 보충하기 위함이었다.

Filter 1의 여층부 공탑 HRT는 0.33~1.31 h로 하였다.

Filter 2의 여층부 공탑 HRT는 Run 1~4는 0.95 h, Run 5~7은 0.48 h로 하였다. Run 8~12, 13, 14에서는 0.37, 0.30, 0.24 h까지 단축하였다. 이에 따라 여과속도 (LV)는 50 m/d에서 202 m/d까지 상승하였다.

Methanol 첨가 제어는 COD/N비 및 McCarty's equation (McCarty et al., 1969)에 근거하여 제어를 실시하였다. McCarty's equation은 다음과 같은 경험식이다.

$$C_m = 2.47N_0 + 1.53N_1 + 0.87D_0 \quad (1)$$

C_m = 탈질에 필요한 methanol량 (mg/L)

N_0 = 질산성 질소농도 (mgN/L)

N_1 = 아질산성 질소농도 (mgN/L)

D_0 = DO 농도 (mg/L)

식 (1)은 methanol의 COD_{Cr} 분해율을 95%로 하면 다음과 같은 식으로 변환된다.

$$C_m' = 3.52N_0 + 2.18N_1 + 1.24D_0 \quad (2)$$

C_m' = 탈질에 필요한 methanol량 (mgCOD_{Cr}/L)

본 연구에서는 실험원수의 수질데이터를 바탕으로 Filter 2만으로 운전하였을 시는 $N_1 = 0$ mgN/L, $D_0 = 6.0$ mg/L로서 Filter 1과 2를 동시에 운전하였을 시는 $N_1 = 0$ mgN/L, $D_0 = 8.0$ mg/L로서 NO₃⁻-N을 측정함에 따른 methanol 주입제어를 실시하였다. Run 8에서는 methanol 주입량을 McCarty's equation에 의한 필요량의 0.67배, Run 12~13에서는 1.2배로 한 methanol 첨가제어를 행하여 methanol 주입율의 영향을 검토하였다.

2.4. 분석방법

처리상황을 파악하기 위해 주 1~2회 정도의 빈도로 sampling을 하였다. 수온, DO, ORP는 현장에서 오전 9~10시 사이에 측정하였다. 더불어 auto sampler에 의한 24시간 composite sampling을 실시하여 pH, 알칼리도, SS, COD_{Cr}, BOD, NO_x⁻-N, NH₄⁺-N 등의 수질분석을 실시하였다. 실험은 Standard Method(APHA, 1995)에 근거하였다. 이하, 「T-」, 「S-」는 각각 「Total」, 「Soluble」을 의미한다.

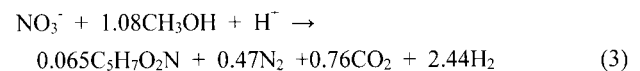
3. 결과 및 고찰

3.1. 처리특성

DO 농도변화를 Fig. 3에 나타낸다. 2차 처리수는 3~7 mg/L사이로 변동하여 Filter 1에서는 포기에 의해 DO가 10 mg/L정도까지 증가하였다. Filter 2 상부에서는 유출 DO 농도에 근거한 포기량 제어를 실시함에 따라 설정치인 6 mg/L로 안정적인 수질을 얻을 수 있었다.

SS 농도변화를 Fig. 4에 나타낸다. Filter 2만으로 운전했을 시는 2차 처리수에서 1~5 mg/L정도 유입하여 Filter 2 유출수에서는 0.2~2 mg/L이하를 유지하였다. Filter 1과 2를 동시에 운전하였을 시는 3~16 mg/L정도 유입하여 Filter 1에서 1~13 mg/L정도로 Filter 2에서는 0.8~4 mg/L 정도 이었다. 그러나 부하를 증가시킨 Run 14에서는 Filter 2 유출수의 SS 농도가 증가하여 약 6 mg/L정도까지 다다랐다. 이상의 분석결과에 의해 본 반응기에서는 Run 12이전 즉, LV 128 m/d이하의 경우 SS 제거율이 80% 정도이며 처리수도 SS 제거능력을 가진 것으로 나타났다. 그러나 Run 14에서 LV를 202 m/d까지 증가시킨 경우는 SS 제거는 본 연구의 목표 수질에 만족하지 못함을 알 수 있었다.

Run 12로 운전하였을 시의 SS의 물질수지 결과를 Fig. 5에 나타낸다. 2차 처리수의 SS를 100%로 한 값을 기준으로 했을 시에 탈질을 위한 첨가 methanol에 의한 변환량은 식 (3)(USEPA, 1995)과 같이 세포생성량이 모두 SS로 전환된 것으로 가정하여 구한 값이다.



Filter 1에서 SS는 30%정도 제거되었으며 약 10%가 sludge로 포착되고 나머지 20%가 무기화된 것을 나타냈다. Filter 2에 유입한 SS는 Filter 1 유출수에 의해 70% 정도의 SS가 더해지고 methanol 첨가에 의해 128% 정도의 SS가 증가하였다. 유입한 SS는 143% 정도가 sludge로 포착되었으며 34%가 무기화 된 것으로 나타났다. 이상의 결과로부터 본 반응기에서는 약 80% 정도의 SS 제거능력을 가진 것으로 나타났다.

S-COD_{Cr} 농도변화를 Fig. 6에 나타낸다. 운전조건을 COD/

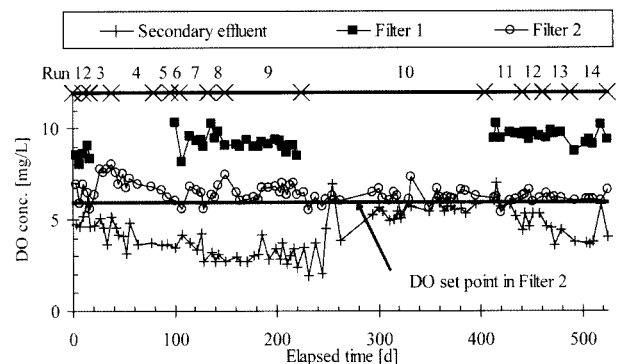


Fig. 3. The time course of DO concentration.

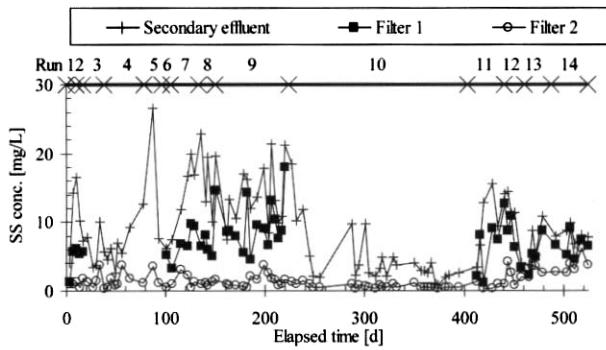


Fig. 4. The time course of SS concentration.

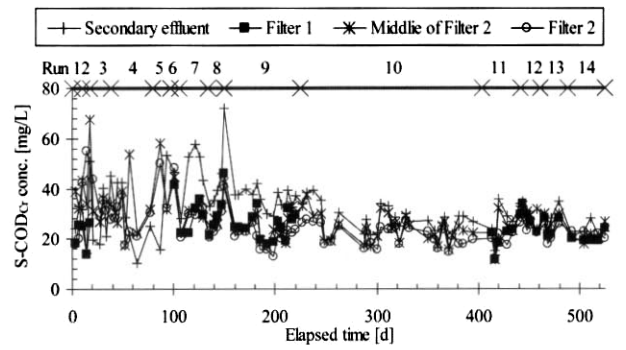


Fig. 6. The time course of S-CODCr concentration.

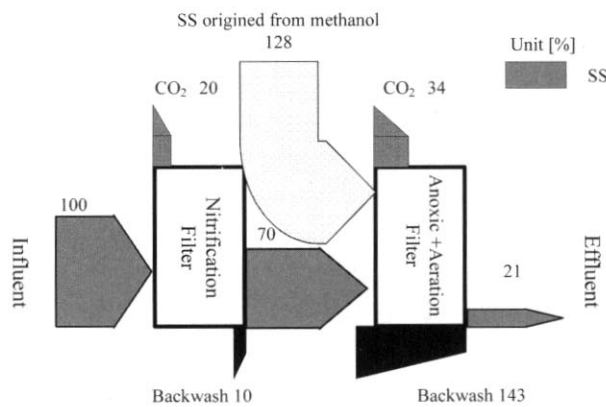


Fig. 5. Materials balances for SS.

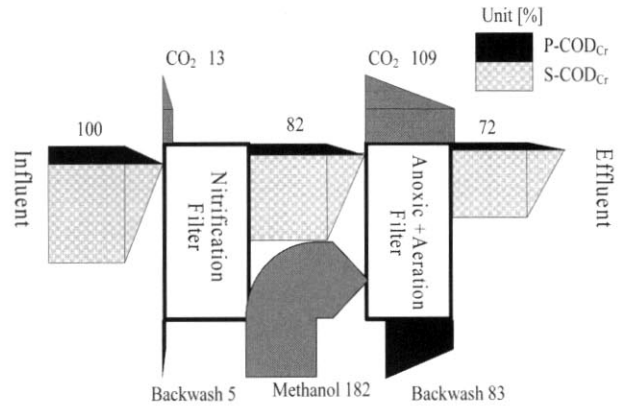


Fig. 7. Materials balances for CODCr.

N=5로 운전한 Run 1~2에서는 과량의 methanol 첨가량에 의해 유출수 수질이 높게 나타났으나 McCarty's equation으로 변화한 Run 4이후 안정적인 수질을 얻을 수 있었다. Run 10이후 2차 처리수가 15~40 mg/L정도 유입하여 Filter 2에서 20 mg/L 전후의 수질을 얻을 수 있었다. Methanol 첨가량을 증가시킨 Run 12에서 28~35 mg/L정도 유입하여 Filter 1에서 24~34 mg/L정도, Filter 2 유출수에서 23~28 mg/L정도 이었다. 또, Filter 2의 중간부분과 유출수 S-CODCr 농도를 비교하면 0.5~10 mg/L정도 감소하였다. 이로 인해 Filter 2상부에서 이분해성 용해성 유기물을 제거하는 것이 충분히 가능한 것으로 나타났다.

Run 12로 운전하였을 시의 CODCr의 물질수지 결과를 Fig. 5에 나타낸다. 2차 처리수의 CODCr를 100%로 한 값을 기준으로 하였다. Filter 1에서는 고행성 유기물의 제거가 중심이었으며 그 대부분이 무기화되었다. 이는 여과층내의 종속영양미생물에 의해 무기화 된 것으로 생각되어진다. Filter 2에서는 2차 처리수의 T-CODCr에 대해 1.8배의 methanol을 첨가하고 있지만 Filter 2의 유출수에서는 Filter 1 유출수의 용해성 유기물보다 낮은 것으로 보아 첨가한 methanol을 거의 소비함과 동시에 2차 처리수에 있는 용해성 유기물도 일부 제거된 것으로 생각되어진다. 역세적으로 배출된 량을 CODCr량으로 환산하였을 시 sludge 발생량은 첨가한 methanol의 83%이었다.

질소에 관한 처리결과로서 각각의 질소형태 농도변화를 Fig. 6에 나타낸다. NH4+-N의 경우, Run 10에서 2차 처리수는 0.02~3 mgN/L정도 유입하여 Filter 2 유출수는 거의

0.0 mgN/L이었다. Run 11~12의 경우, Filter 1에서 질산화 미생물을 축적한 후 데이터로서 1.6~3.9 mgN/L정도 유입하여 Filter 1에서 0.2~0.4 mgN/L정도로 거의 질산화가 이루어짐에 따라 Filter 2 유출수에서도 동일한 결과를 얻을 수 있었다. T-N 및 NOx-N에 관한 Run 별 처리결과는 다음과 같다. COD/N=3.5와 McCarty's equation의 0.67배로 운전한 Run 3과 8에서는 탈질에 필요한 유기물 부족으로 인해 불완전 탈질이 일어났다. Run 10의 경우, T-N 농도는 2차 처리수에서 8~21 mgN/L정도 유입하여 methanol 첨가가 적절하게 이루어진 경우에는 Filter 2에서 0.7~2.5 mgN/L 정도로 목표 수질을 만족하였다. 또한 NOx-N농도는 7~16 mgN/L정도 유입하여 Filter 2에서는 1 mgN/L이하까지 탈질이 진행되었다. 그 결과 Filter 2에서는 거의 완전하게 탈질이 이루어짐을 나타냈다. LV를 202 m/d로 상승시켜 운전한 Run 14에서는 Filter 2 중간부분에서 NOx-N농도가 5 mgN/L정도 잔존하였다. 이상의 분석결과로부터 Run 13이전의 운전조건의 경우 T-N 제거율이 거의 80%를 유지하여 Filter 1과 2에서 각각 질산화와 탈질이 이루어져 질소제거가 이루어졌지만, Run 14의 경우는 Filter 2의 하부에서 반응기의 탈질능력의 한계에 도달하여 NOx-N농도가 잔존한 것으로 판단된다.

3.2. Methanol 첨가제어

본 연구에서는 DO소비 및 탈질을 위한 유기물로서 methanol을 첨가하였다. 여러 연구자들이 실험적으로 제시한 methanol첨가량의 값은 4~7 mgCOD/mgN정도이었으며

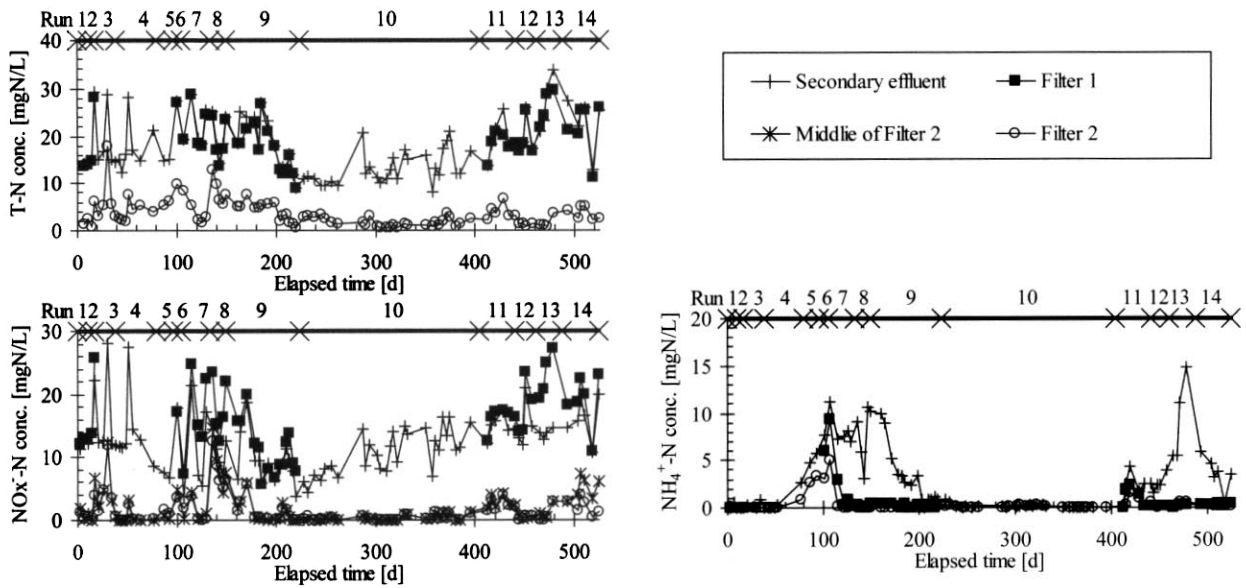


Fig. 8. The time course of nitrogen.

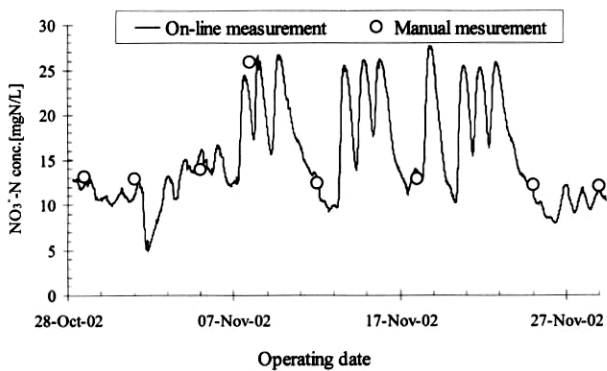


Fig. 9. Verification of on-line NO_3^- -N measurement.

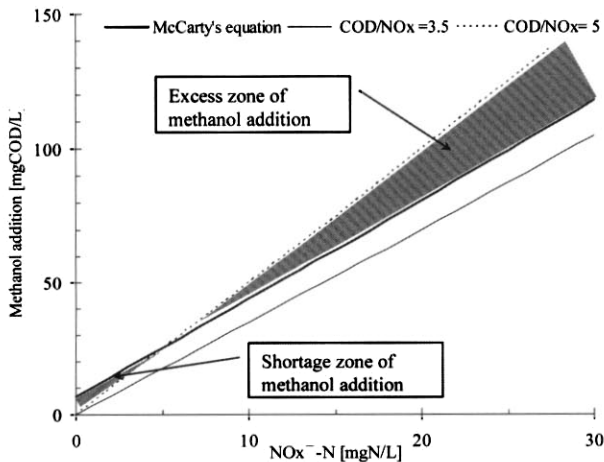


Fig. 10. Comparisons between COD/N and McCarty's equation.

유입 DO농도에 따라 약간 틀리긴 하다(Koch et al., 1997; Ghyoot et al., 1999; Hidaka et al., 2003b).

본 연구에서는 Methanol첨가량을 COD/N비에 근거한 제어(Run 1~3)와 McCarty's equation에 근거한 제어(Run 4~14)로 나누어 제어하였다. On-line monitor에 의한 Filter

2 유입수 일부분의 NO_3^- -N농도 측정결과를 Fig. 9에 나타낸다. Fig. 9에 제시된 바와 같이 시간변동에 따른 Filter 2에 유입 NO_3^- -N농도 변화가 매우 극심함을 알 수 있었다. Methanol첨가량에 관한 COD/N비 제어와 McCarty's equation에 근거한 제어 비교를 Fig. 10에 나타낸다. Fig. 10을 보면 알 수 있듯이 유입 NO_3^- -N농도가 5 mgN/L이상일 경우 COD/N=5제어에서는 McCarty's equation에 근거한 제어와 비교하여 과량으로 첨가됨을 알 수 있다. 더불어 NO_3^- -N농도가 높을수록 최적 첨가량과의 차이는 크게 됨을 알 수 있다. 한편, COD/N=3.5제어에서는 유입 NO_3^- -N농도에 관계없이 최적 첨가량보다 적게 첨가됨을 알 수 있다. 본 연구에서는 탈질을 위한 HRT이 최대 0.12 h로 매우 짧은 HRT으로 운전하였다. 따라서 Fig. 9와 같이 NO_3^- -N농도의 시간변동이 극심한 경우의 methanol첨가량 제어는 이론치에 근접한 McCarty's equation보다 COD/N비에 근거한 제어로 할 경우 약간의 과량의 methanol이 최종 유출수로 유기물 형태(BOD 혹은 S-COD_C)로 유출된 우려가 있으며 이는 Fig. 6에 제시한 바와 동일하다.

Fig. 11과 12는 Filter 2 하부로 유입하는 NO_3^- -N농도에 대한 유기물과 잔존 NO_3^- -N농도와 T-C-BOD농도의 관계를 DO농도에 의한 영향을 무시한 COD/N비 제어와 McCarty's equation제어를 비교하여 나타낸 것이다.

3.3. On-line NO_3^- -N 측정장치

24시간 composite sampling한 실험 분석값과 on-line nitrate 측정장치에 의한 측정값과의 상관관계를 Fig. 11에 나타낸다.

Fig. 11에 제시한 바와 같이 분석값과 측정값이 거의 일치함을 알 수 있다. 또한, 보다 정밀한 비교 분석을 위해 24시간 동안 2시간 간격으로 측정하여 측정값과 분석값 사이의 시간별 변화를 Fig. 12에 나타낸다. 실선은 on-line 측정값을 나타내며 마름모 표가 실험 분석값을 나타낸다.

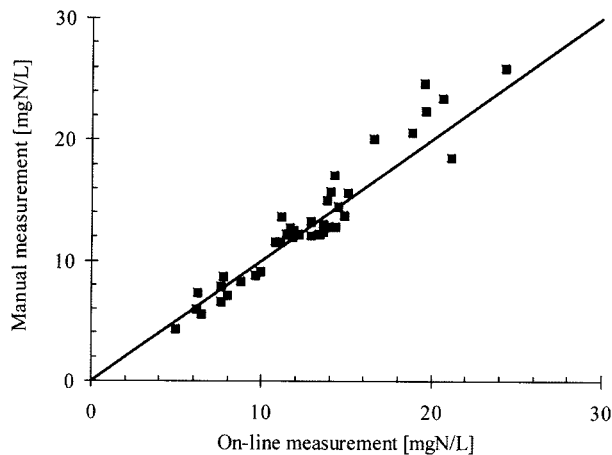


Fig. 11. Correlation between results from the on-line measurements and 24h composite sample.

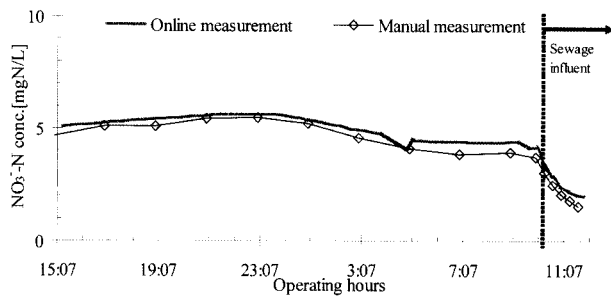


Fig. 12. The time course of verification of on-line NO₃-N measurement for 24 hours.

Filter 2에 유입하는 NO₃-N농도는 거의 5 mgN/L로 일정하기 때문에 어느 시점에서 유입 대상을 하수 원수로 변화시켜 유입시켰다. Fig. 12에서처럼 갑작스런 변화에도 거의 일치함을 알 수 있었다. 이를 통해 on-line nitrate 장치에 의해 설장값의 methanol이 적절하게 첨가되었으며 처리의 안정성을 높일 수 있었다.

3.4. 역세척의 영향

235일째(Run 10) 4시부터 손실수두가 2 m에 다다랐을 시점에서 역세척이 이루어진 Filter 2의 역세척 전후의 수질변화를 Fig. 13~15에 나타낸다. SS, S-COD_{Cr}, 질소 농도 어느 경우도 커다란 수질변화는 보이지 않고 안정적이었다.

SS 농도의 경우 2차 처리수내에 20~25 mg/L 정도 유입하여 Filter 2 유출수에서 역세척 여부와 관계없이 3 mg/L 정도 유지하였다. S-COD_{Cr} 경우는 2차 처리수내에 30~45 mg/L 정도 유입하여 Filter 2 유출수에서 역세척 여부와 관계없이 첨가한 methanol을 거의 소비함과 동시에 2차 처리수에 있는 용해성 유기물도 일부 제거되어 20 mg/L 전후의 안정적인 수질을 유지하였다. 질소농도의 경우는 Run 10의 경우 유입수인 2차 처리수내에 NH₄⁺-N 질소가 거의 없었으며 Filter 2 유출수에도 검출되지 않았다. 또한, 유입 NO₃-N농도에 따라와 on-line nitrate 장치 분석값이 거의 일치하였으며 이에 따라 적절한 methanol 주입에 의해 Filter 2의 탈질에는 별 다른 영향을 주지 못했다. 그 결과 1 mgN/L 이하의 안정적인 수질을 얻을 수 있었다.

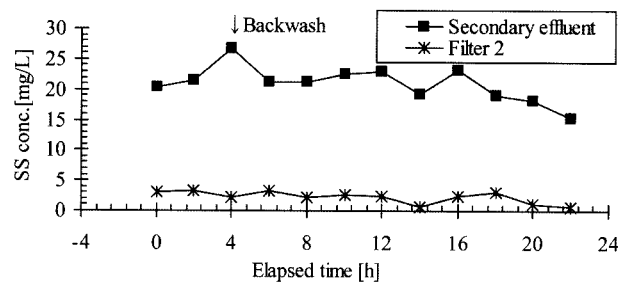


Fig. 13. The time course of SS conc. after backwashing in Filter 2.

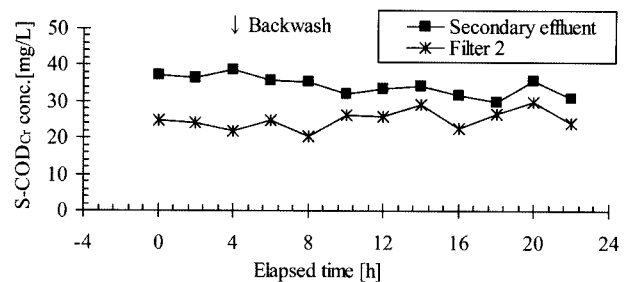


Fig. 14. The time course of S-COD_{Cr} after backwashing in Filter 2.

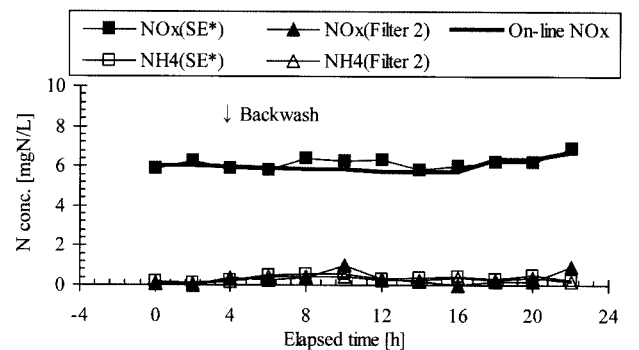


Fig. 15. The time course of N conc. after backwashing in Filter 2 (SE* : Secondary effluent).

이런 결과들은 자동운전에 의해 역세척이 이루어졌으며 역세척 전 후의 수질변동에도 생물막 여과 반응기에는 별 다른 영향을 주지 않아서 본 반응기의 주요 목표인 「유지관리의 용이성」을 충분히 만족시켰다고 생각된다.

4. 결론

본 연구는 SS 및 질소제거를 주된 목적으로 한 하수고도 처리와 유지관리의 용이성을 위해 자동제어 장치를 도입하여 약 525일간에 걸친 장기간 pilot plant 규모의 생물막 여과반응기를 이용하여 2차 처리수를 이용한 연속처리운전을 행하였으며 본 연구에서 얻어진 주된 결과는 다음과 같다.

- 1) 여과층 높이 2 m로 설정한 본 반응기에서는 처리수 SS 농도 3 mg/L 이하, T-C-BOD 농도 5 mg/L 이하, T-N 농도 5 mgN/L 이하의 고도처리 수준의 수질을 얻기 위해서는 McCarty's equation의 1.2배 methanol 첨가가 필요하며 SS 농도 5 mg/L, T-N 농도 5 mgN/L 정도까지 허용

- 할 경우에는 LV를 202 m/d(여충부 공답HRT=0.24h)까지 증가 가능한 것으로 나타났다.
- 2) 처리수의 COD_{Cr}를 100%로 한 값을 기준으로 한 COD_{Cr}의 물질수지 결과, Filter 1에서는 고행성 유기물의 제거가 중심이었으며 그 대부분이 무기화 되었다. Filter 2에서는 유출수에서 Filter 1 유출수의 용해성유기물보다 낮은 것으로 보아 첨가한 methanol을 거의 소비함과 동시에 2차 처리수에 있는 용해성 유기물도 일부 제거된 것으로 생각되어 진다.
 - 3) 유입 NO₃-N농도 변화가 매우 극심한 경우에는 본 반응기와 같이 짧은 HRT로 운전한 반응시스템의 경우, methanol첨가량의 제어를 COD/N비에 의한 제어보다 McCarty's equation에 근거한 제어의 경우가 안정적인 수질을 확보 할 수 있었다.
 - 4) 운전관리의 용이성을 위해 도입한 on-line DO monitor에 의한 포기량 제어의 경우는 설정값에 따라 포기량이 조절되었다. 또한, on-line nitrate 측정장치의 경우는 24시간 composite sampling한 실험 분석값과 on-line nitrate 측정장치에 의한 측정값사이에 linear한 상관관계를 유지하였다. 그 결과 적절한 methanol주입에 따라 안정적인 수질을 확보 할 수 있었다.
 - 5) 자동운전에 의해 역세척이 이루어졌으며 역세척 전 후의 수질변동에도 생물막 여과반응기에는 별다른 영향을 주지 않음에 따라 본 반응기의 주요 목표인 「유지관리의 용이성」을 충분히 만족시켰다고 생각된다.

참고문헌

환경부, 하수종말처리장 고도처리시설 실태점검 결과 (2004).
 APHA AWWA WEF, Standard Methods 19th Edition, USA (1995).
 Chen, J. J., McCarty, D., Slack, D. and Rundle, H., Full Scale

Case Studies of a Simplified Aerated Filter (BAF) for Organics and Nitrogen Removal., *Water Sci. Technol.*, **38**(1), pp. 79-86 (2000).

Ghyoot, W., Vandaele, S. and Verstraete, W., Nitrogen Removal from Sludge Reject Water with a Membrane-assisted Bioreactor, *Water Res.*, **33**, pp. 23-32 (1999).

Hidaka, T., Tsuno, H. and Kishimoto, N., Advanced Treatment of Sewage by Pre-coagulation and Biological Filtration process, *Water Res.*, **37**(17), pp. 4259-4269 (2003a).

Hidaka, T., Tsuno, H., Jeong, J., Kishimoto, N. and Oda, T., Utilization of Pre-coagulation Sludge in Biological Filtration Process, *J. of Japan Sewage Works Assoc.*, **40**(487), pp. 103-116 (2003b).

Koch, G. and Siegrist, H. F., Denitrification with Methanol in Tertiary Filtration, *Water Research.*, **31**, pp. 3029-3038 (1997).

McCarty., Beck, P. L. and Amant, P. St, Biological denitrification of Wastewaters by Addition of Organic Materials, Proc. of 24th Annual Purdue Industrial Waste Con, (1969).

Payraudeau, M., Paffoni, C. and Gousailles, M., Tertiary Nitrification in an Up Flow Biofilter on Floating Media: Influence of Temperature and COD Load, *Water Sci. Technol.*, **41**(4-5), pp. 21-27 (2000).

Puznava, N., Payraudeau, M., Le Tallec, X. and Reddet, E., Simultaneous Nitrification and Denitrification in Biostyr : A New Approach for Complete Nitrogen Removal. *Preprints, IAWQ Conference on Biofilm Systems, New York, October 17-20* (2000).

Tsuno, H., Hidaka, T. and Nakamoto, M., Development of Pre-coagulation and Bio-filtration Process for Advanced Treatment of Sewage, *Water Sci Technol., Water Supply.*, **4**(1), pp. 13-22 (2004).

Tschui, M., Boller, M., Gujer, W., Eugster, J., Mäder, C. and Stengel, C., Tertiary Nitrification in Aerated Pilot Biofilters., *Water Sci. Technol.*, **29**(10-11), pp. 53-60 (1994).

USEPA, Process Design Manual for Nitrogen Control (1995).