

침전지내장형 상분리 산화구공정에 의한 하수 고도처리특성 평가

홍기호 · 장 덕[†] · 한상배^{*}

건국대학교 공과대학 환경공학과

^{*}(주)그린기술산업

Performance Evaluation of Advanced Municipal Wastewater Treatment by Phased Isolation Intrachannel Clarifier Ditch

Ki-Ho Hong · Duk Chang[†] · Sang-Bae Han^{*}

Department of Environmental Engineering, Konkuk University

^{*}Green Engineering & Construction Co., Ltd

(Received 16 March 2004, Accepted 8 October 2004)

Abstract : Phased isolation intrachannel clarifier ditch process developed in this study is an enhanced biological nutrient removal process employing two ditches with intrachannel clarifiers. Bench-scale phased isolation ditch process was used to evaluate the system performance on municipal wastewater and detailed assessment of internal behavior in a ditch and each reactions. When the system was operated at the HRTs of 6~12hours, SRTs of 9~31days, and cycle times of 4hours, the system showed removals of BOD, TN, and TP as high as 88~97%, 73~78%, and 65~90%, respectively.

The internal behavior were well matched on each reactions such as nitrification, denitrification, and phosphorus release and uptake. As the SRT became longer, TN removal increased gradually, whereas TP removal decreased contrarily. However, the system was capable of producing an effluent TP concentration 1mg/L or less even at longer SRTs except the case of solids discharge by malfunction of intra-clarifier occurred by its geometrical limit. The system performance slightly decreased by hydraulic shock loading(increasing of influent flowrate and decreasing of system HRT). However, the higher system performance could be achieved again after four cycles. Thus, the system reliability could be successfully achieved short-term hydraulic shock loading that occurred in medium- and small-sized wastewater treatment plants suffering fluctuation of influent quality and flowrate during wet season.

keywords : Biological nutrient removal, Municipal wastewater treatment, Oxidation ditch, Temporal phase separation, Phased isolation ditch process

1. 서 론

도시화 및 산업화에 따른 인구증가는 생활하수 발생량의 급증을 초래하였으며, 이로 인해 주요 상수원으로 유입되는 영양염류의 지속적인 증가에 따른 하절기 녹조현상 및 하천수질의 악화현상을 유발하였다. 따라서 유기물제거를 위주로 구축된 기존 하수처리체계를 질소·인 처리체제로 전환하여야 할 필요성을 절감하게 되었으며, 이를 위한 하수 고도처리시설의 도입이 절실한 상황에 이르렀다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 질소·인 제거를 위한 각종 기술들을 도입하였으나, 현재까지 선진국 및 국내 하수처리장에서 사용하거나 연구 중에 있는 질소·인 동시제거를 위한 생물학적 영양염류제거(Biological Nutrient Removal: BNR) 공법은 무산소, 혐기, 호기 조건의 단위 반응조들이 조합을 이루고, 각 단위반응조들 사이에서 혼합액을 순환시켜서 유

기물 및 영양염류의 제거를 도모하는 내부순환포함 다단 완전혼합형 공정이 대부분이다(한국환경기술진흥원, 2002).

일반적으로 BNR공법에서는 유기물 산화를 비롯한 질산화, 탈질, 인방출 및 섭취 등을 수행하기 위하여 각 관여미생물들의 특성에 적합한 무산소, 혐기, 호기 조건이 공간적(spatial) 또는 시간적(temporal)으로 분할되며, 내부순환포함 다단 완전혼합형 BNR공정의 경우 대부분 공간적 분할방식을 채택하고 있다. 그러나 유입 유기물의 효율적인 이용이 요구되는 내부순환포함 다단 완전혼합형 BNR공법을 저농도 하수에 적용하는 경우, 무산소 조건에서의 탈질 및 혐기 조건에서의 인방출이 미비하여 전체 시스템의 질소·인 제거효율이 만족스럽지 않은 경향이 있다.

기존 설치된 대부분의 국내 하수관거는 합류식이며, 합류식관거 하수의 BOD농도는 약 75mg/L로서 미국하수의 0.34%, 유럽하수의 0.3%로 선진국 하수의 BOD농도에 비하여 매우 낮다. 현재 국내에서 운영중인 201개소의 하수처리시설중 유입수가 100mg/L 이상으로 유입되는 하수처리시설은 78개소이며, 대부분의 처리장유입수질이 설계수

[†] To whom correspondence should be addressed.
dchang@konkuk.ac.kr

준에 못 미치고 있다(하수도통계, 2002). 또한 국내 분류식 관거 하수의 BOD농도는 약 147mg/L로 합류식관거 하수의 BOD농도보다 높은 편이지만(하수도통계, 2002), 외국하수의 BOD농도보다는 여전히 낮아 영양염류제거 면에서 불리하다. 이러한 하수관거시스템과 하수성상의 차이점으로 인하여 외국의 탈질·탈인 공정을 국내하수에 바로 적용하기에는 큰 무리가 따를 수밖에 없으며, 기존 내부순환포합 다단 완전혼합형 BNR공법의 복잡한 반응구성에 대한 운전 전문성이 결여된 경우에는 선진외국에 비해 저하된 처리효율을 나타낼 수밖에 없으므로, 우리나라 실정에 적합한 국내 탈질·탈인 기술의 개발은 국내 수질환경 개선을 위해서도 절실히 필요하다.

특히, 유입하수의 부하변동이 매우 심한 중소규모 하수처리시설에 내부순환포합 다단 완전혼합형 BNR공법을 적용하는 경우에는 복잡한 반응구성에 따른 운전상의 부담으로 인해 공정의 불안정성 및 처리효를 저하 등을 초래할 수 있으므로 매우 유의해야 한다. 따라서 중소규모 BNR 하수처리시설에는 내부순환포합 다단 완전혼합형 BNR공법에 비해 공정구성이 상대적으로 단순한 산화구공법 및 SBR공법 등이 많이 적용되고 있으며(WEF and ASCE, 1998), 질소·인 제거를 위한 각종 산화구기술의 개발 및 적용은 1980년대 후반부터 유럽 및 미국을 중심으로 활발히 이루어져 오고 있다(Einfeldt, 1992; Hughes 등, 1995; Stensel and Coleman, 2000). 앞으로 국내 하수처리장 건설의 주는 중소규모 BNR시설이 될 것이며, 그 소요용량은 국내 전체 하수처리용량의 약 70%를 차지하게 될 것으로 예상되므로, 탈질 및 인방출시 유입 유기물의 이용을 극대화 할 수 있

는 중소규모 BNR 하수처리시설의 개발이 요구되고 있다.

따라서, 본 연구에서는 중소규모 하수 고도처리시설에 보다 적합하고 경제적인 시스템의 하나로서, 건설비가 저렴하고 유지관리가 용이한 산화구를 기반으로 간헐폭기 및 유로변경 방법을 조합·운영하여, 단순한 시간조작만을 통해 혐기, 무산소, 호기조건의 분리를 구현할 수 있고, 별도의 혐기조 없이도 인방출을 수행함과 동시에 무산소 및 혐기 조건시 유입수를 지속적으로 공급할 수 있으며, 산화구내 내장형침전지(intrachannel clarifier)를 도입함으로써 기존 고도처리 산화구공정들의 단점을 개선하고 보다 단순화한 효율적이고 경제적인 「침전지내장형 상분리 산화구공정(Phased Isolation Intrachannel Clarifier Ditch)」을 개발·적용하였다. 특성상 시스템 설비 및 구조와 운전조건이 단기간내에 신속적으로 변경가능하고, 다양한 운전조건영향 연구수행이 가능한 실험실규모 침전지내장형 상분리 산화구공정의 운전을 통해, 유입수 특성 및 기타 주요 운전인자의 변화에 따른 유기물 및 질소·인의 처리특성을 알아보고, 단위 산화구내부에서의 반응거동 조사 및 환경조건에 대한 시스템의 처리안정성을 검토하여, 본 공정의 중소규모 하수 고도처리 특성을 평가하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

내장형침전지가 장착된 상분리 산화구공정의 운전모식은 Fig. 1에 나타내었으며, 기본적으로 산화구에 침전지를 내장시킨 단위반응조인 침전지내장형 산화구 2개로 구성된다. 전체 반응과정은 간헐폭기 및 유로변경 방법의 조합을

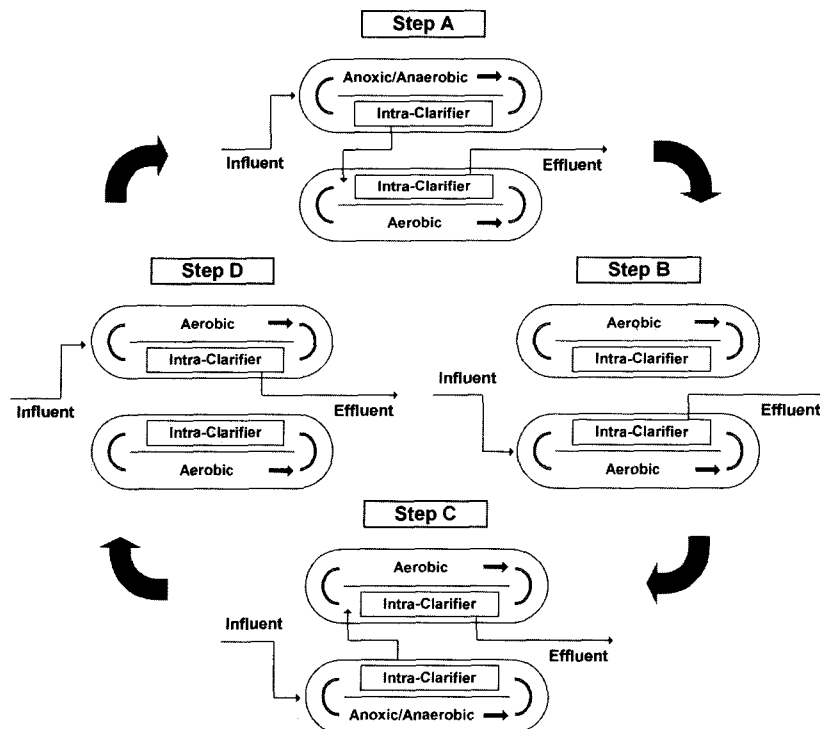


Fig. 1. Phase and alternating flow scheme for phased isolation intrachannel clarifier ditch system.

통해 Fig. 1에서와 같이 네 단계로 이루어지며, 각 단위 산화구는 시간에 따라 무산소, 혐기, 호기 단계를 거치게 된다.

A단계의 소요시간은 1.5시간이며, 유입수는 초기 무산소 조건의 단위 산화구로 유입되어 유기물제거와 동시에 전단계에서의 질산화가 탈질되고, 탈질 후에는 인의 방출이 일어나는 혐기성조건이 형성된다. 즉, 무산소 및 혐기조건은 별도의 공간적 상분리가 아닌 단일 산화구내에서의 시간적 상분리를 목표로 하고 있으며, 두 상 조건하에서 탈질과 인방출에 필수적인 탄소원, 즉 유입수가 계속 공급 가능하다는 장점을 가질 수 있다. 탈질 및 인방출 후에는 호기상태로 운전되고 있는 다음 산화구로 유입되어 잔류 유기물제거와 질산화 및 인섭취를 수행한 후 내장형침전지를 통하여 처리수가 유출된다.

B단계에서는 유입유료가 변경되어 A단계에서의 호기조건인 산화구로 유입되어 유기물제거 및 질산화 후 유출되며, 접촉시간은 0.5시간이다. 이 때 A단계에서 무산소 및 혐기조건으로 운전하였던 산화구는 독립적으로 공폭기를 실시하여 C단계로 전환하기 전에 인섭취와 아울러 잔류유기물 제거와 잔류 TKN을 질산성질소로 전환시키게 된다. C 및 D 단계는 유로만이 교차된채 A 및 D 단계와 동일한 과정이다. 이상의 4단계를 한 사이클이라 하며, 본 연구에서 한 사이클 주기는 4시간을 기준으로 운전하였고, 단일 산화구에 대해서는 무산소 및 혐기 1.5시간, 호기 2.5(0.5+1.5+0.5)시간으로 구성하였다.

본 연구에서 제작·사용한 실험실규모 침전지내장형 상분리 산화구공정은 크게 Fig. 2와 같이 아크릴재질의 대칭으로 설치된 침전지내장 산화구형 반응조 2기와 유로구성 및 운전의 자동제어를 위한 Programmable Logic Controller(PLC)로 구성된다.

산화구 2개의 총 유효용량은 30L(내장형침전지 2기 용량 제외)이고, 각 산화구는 규격이 200mmW×910mmL×340mmH이며, 중앙격벽으로 두 개의 수로로 분리되고 각 수로폭은 85mm이다. 산화구 양쪽 끝 부분은 흐름저항을 최소화하기 위하여 반원형으로 설계하였다. 산화구 양 끝 곡면부에는 유체회전에 의하여 바깥쪽으로 유속이 편중되

어 안쪽에 슬러지가 퇴적되는 현상을 방지하기 위하여 지름 80mm, 높이 220mm인 반원형 유도벽(guide wall)을 설치하였는데, 흐름의 입구쪽은 넓게 출구쪽은 좁게 설치해 곡면의 전후 유속분포를 보다 고르게 하고자 하였다. 또한 반응조내 수로에는 수류흐름형성 및 MLSS의 혼합을 위한 수중믹서와 공기공급을 위한 산기장치를 설치하였다.

기존 산화구공법의 최종침전지 대안으로 적용한 내장형 침전지는 산화구 수로내에 침전가능한 영역을 두어 슬러지와 상정수를 분리하는 방식이며, 일반적으로 침전지하부에서 슬러지를 수류흐름에 의해 자동으로 중력반송시킴으로써 슬러지 농축 및 반송설비가 필요없고, 이에 따른 운전비 및 소요부지를 감소시킬 수 있다는 장점이 있다(Bender, 1987; WEF and ASCE, 1998). 본 연구에서는 하부에 삼각배플을 설치한 상향류형 및 하부에 cone을 설치한 수평류형 침전지를 비롯한 여러 형태의 침전지 형식별 비교연구(김 등, 2000) 결과를 바탕으로, 혼합액이 전단으로 유입되는 수평류형 내장형침전지를 적용하였으며, 고액분리된 상정액은 위어를 통해 배출되도록 설계하였다. 아크릴재질의 내장형침전지 2개의 총 유효용량은 2L이고, 각 침전지는 규격이 60mmL×500mmL×150mmH이다. 침전지 하부의 cone을 통해 추가적인 동력 및 장치없이 고액분리된 슬러지가 수류에 의하여 반응조내로 순환되도록 하였으며, 내장형침전지 설치구역에서는 혼합액이 내장형침전지와 수로사이의 측면 및 하부를 통과하게 된다. 과일랫 및 실시설에 비해 상대적으로 유효수심이 낮은 실험실규모 연구의 한계상 원활한 고액분리를 위하여 침전지내에 6rpm의 저속모터와 기어, 타임벨트로 구성된 별도의 슬러지수집장치를 설치·가동하였다. 시스템의 유입 및 유출, 유로변경 및 간헐폭기, 자동밸브개폐, 공기흡입·차단 및 사이클주기 제어를 자동으로 제어하기 위한 PLC는 MASTER-K 30S(LG산전)를 사용하였으며, 연구목적에 따라 자동 및 수동으로 제어하였다.

유입하수로는 경기도내 분류식 하수배제지역 S환경사업소의 침사지 유출수를 이용하였으며, 정량펌프를 이용하여 일정한 유량이 공급되도록 하였다. 본 연구에 사용된 유입하수의 성상은 Table 1과 같으며, 유입원수내 아질산성질소(NO_2^-) 및 질산성질소(NO_3^-)는 거의 존재하지 않았다.

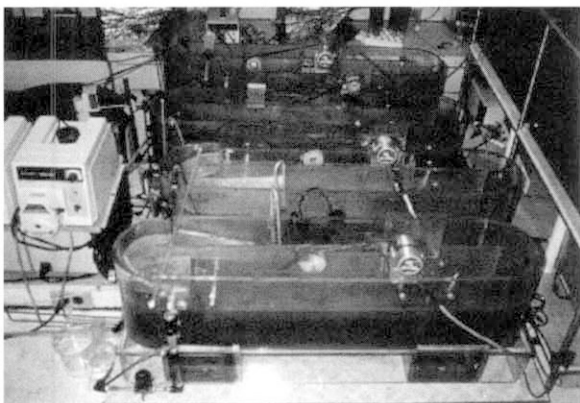


Fig. 2. Bench-scale phased isolation intrachannel clarifier ditch system.

Table 1. Characteristics of influent municipal wastewater

Parameters	Average	Range
pH	7.2	6.8~7.6
Alkalinity(mg/L CaCO_3)	180	145~210
TSS(mg/L)	160	40~250
VSS(mg/L)	125	32~195
BOD(mg/L)	165	100~200
TCODcr(mg/L)	295	260~365
SCODcr(mg/L)	90	60~120
TKN(mg/L)	38.3	30.0~48.7
Ammonia(mg/L)	22.9	16.5~28.0
TP(mg/L)	3.9	1.9~5.9

본 연구에서 측정된 모든 이화학적 분석은 미국 공중보건협회의 표준시험법(APHA, 1998)에 따라 수행하였으며, 시스템의 처리효율은 유입원수 농도와 호기조건(Fig. 1에서의 A 및 C 단계) 말기의 유출수농도를 기준으로 산정하였다. 또한 단계별 단일 산화구내 반응거동 관찰 및 상분리 정도를 파악하기 위하여, pH, ORP, DO를 연속적으로 자동 측정할 수 있는 Orion社의 PCMCIA Sensor Link를 사용하여 측정하였다.

실험실규모 침전지내장형 상분리 산화구공정은 사이클주기 4시간(무산소 및 혐기 1.5시간, 호기 2.5시간)을 기준으로, 시스템 HRT(내장형침전지 용적 포함) 6, 8 및 12시간, 시스템 SRT(내장형침전지 용적 포함) 9~31일의 다양한 조합의 조건하에서 운전되었으며, MLDO(Mixed liquor dissolved oxygen)은 호기조건에서 2mg/L 이하, 무산소 및 혐기조건에서 0.5mg/L 이하로 유지되었다. 미생물의 순운을 위해 본 시스템의 초기 운전시에는 시스템 HRT를 설계치에 비해 긴 16시간으로 설정하여 수온 23~25°C의 조건하에서 2주간 운전하였으며, 순운 후 질소·인 제거효율이 안정된 이후 시스템 HRT를 14시간, 12시간의 순으로 단계적으로 감소시켰으며, 순운기간중의 시스템 SRT는 20~25일로 운전하였다.

본 연구에서 시스템 SRT는 산화구내 총 MLSS의 양을 매일 폐기되는 슬러지량으로 나눈 값(kgMLSS in all ditches/kgWAS/d)으로 계산하였으며, 산화구 2기의 총 유효용량이 30L인 관계로 산화구 수로내부가 아닌 내장형침전지 하부에 고농도로 농축된 슬러지를 폐기하여 SRT를 조정하였다.

3. 결과 및 고찰

실험실규모 침전지내장형 상분리 산화구공정은 수온 15~28°C, 시스템 HRT 6~12시간, 시스템 SRT 9~31일, 사이클주기 4시간의 운전범위에서 정상 운전기간동안 전체적인 BOD, TN, TP는 각각 88~97%, 73~78%, 65~90%의 제거효율을 나타내었다. 시스템 처리수의 BOD 농도는 5~15mg/L 범위였고, 시스템 HRT, 시스템 SRT, 사이클주기 등의 운전조건 또는 그 조합에 따라 처리수의 TN 농도는 2.7~10.2mg/L 범위, TP 농도는 1mg/L 이하였다. 또한 운전조건에 관계없이 처리수의 SS 농도는 20mg/L 이하로 유지될 수 있었다.

대표적인 기존 상분리 산화구공법인 BioDenipho 및 BioDenitro공정의 경우 HRT 20~30시간, SRT 20~30일로 운전시, 본 침전지내장형 상분리 산화구공정과 유사한 처리특성을 나타내었으나(U.S. EPA, 1992; Stensel and Coleman, 2000; Irlzar 등, 2003), 본 공정에 비해 체류시간이 상당히 길고, BioDenitro공정의 경우 인제거가 불가능하다는 단점이 있다. 한편 BioDenipho공정의 경우 인제거를 위해 공정앞단에 여러단의 혐기조가 설치되어야 하며, 이차침전지 및 슬러지 반송시설이 필요하고, 이러한 시설들과 관련된 각종 부대설비 및 부지 소요, 반송슬러지내 질산성질소에 의한

인방출저해 가능성, 슬러지 반송에 의한 반응조내 실체류시간 감소영향 등을 고려할 때, 유로변경 및 간헐폭기, 침전지 내장 등의 방법을 적용한 본 공정의 경우 여러 면에서 그 장점이 부각될 수 있을 것이라 판단된다.

유입하수 특성, 시스템 HRT, 시스템 SRT, 사이클주기 등과 같은 설계 및 운전인자가 시스템 처리특성에 미치는 영향에 대해 보다 상세히 알아보기 위하여, 변경 인자를 제외한 다른 인자들은 최대한 고정하여 운전하였으며, 공정의 시간적 상분리거동 관찰 및 중소규모 하수처리장에서 발생가능한 유입부하 변동에 관한 실험을 추가적으로 실시하였다.

3.1. 유입 유기물/영양염류 비에 따른 질소·인 제거 특성

일반적으로 BNR 공정에서 유입 하수성상이 처리특성에 미치는 영향은 매우 크고(Randall 등, 1992), 특히 고효율의 영양염류제거를 위해서는 유입수내 유기물의 효율적인 이용이 필요하므로 유입수의 C/N(유기물/질소)비 및 C/P(유기물/인)비에 따른 처리특성 파악은 매우 중요하다. 특히 생물학적 탈질반응시 C/N비가 너무 낮을 경우 탄소원부족에 따른 저해요인으로 작용할 수 있는 반면, 너무 높을 경우에는 질산화미생물의 개체수를 줄일 수 있으므로 최적 C/N비를 유지하는 것은 매우 중요하다(U.S. EPA, 1993). 별도의 전담 혐기조를 필요로 하는 기존 BNR 공정의 경우 탈질반응에 요구되는 탄소원이 인방출에서도 손실될 수 있다. 그러나, 본 상분리 산화구공정의 경우 시간적 상분리에 따른 무산소 및 혐기단계의 형성 및 연속적인 하수공급, 즉 유기물 공급이 가능하여 인방출에 의한 탄소원의 손실없이 탈질단계에서 내부 탄소원의 최대이용이 가능하다는 장점을 가지고 있다.

실험실규모 침전지내장형 상분리 산화구공정에서 유입하수의 BOD/TKN비가 질소제거에 미치는 영향은 Fig. 3과 같고, 전체 운전기간동안 유입하수의 BOD/TKN비는 2.86~6.45의 넓은 범위를 나타내었다. 본 시스템에 적용된 유입 BOD/TKN비는 일반적으로 문헌상에서 제시된(Randall 등, 1993), 만족할만한 탈질효율을 얻기 위해 필요한 유입 BOD/TKN비 및 탈질조내 최저 BOD/NO_x-N비인 3.5와 유사하거나 큰 범위이었다.

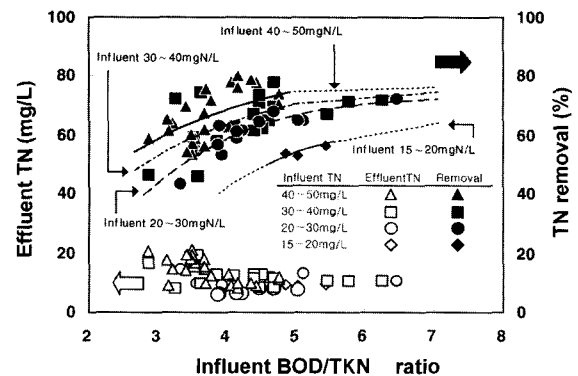


Fig. 3. Effect of influent BOD/TKN ratio on TN removal.

사이클주기를 4시간으로 유지하고, 수온 15~28℃, HRT 6시간, 8시간, 12시간, SRT 9~31일의 운전범위에서, 시스템의 전체적인 TN 제거효율은 시스템 HRT 및 SRT에 관계없이 유입 BOD/TKN비에 비례하였다. 이 때 유출수의 암모니아성 질소 평균농도는 2.2~3.8mg/L의 범위로 운전 조건에 크게 관계없이 대부분 일정하게 유지되었으며, 나머지는 질산성질소의 형태로 유출되었다. 또한 유입수의 TN 농도가 높을수록 BOD/TKN비에 따른 처리효율이 증가하는 경향을 나타내었는데, 유입 BOD/TKN비 3.7이상에서는 처리수중의 TN은 10mg/L미만으로 유지 가능하였으며, 3.7이하에서도 경우에 따라 효과적으로 유출수의 TN을 10mg/L미만으로 처리할 수 있었다. 그러나 유입수의 TN농도에 따라 다른 경향을 나타내었으며, 유입 TN농도가 높을수록 상대적으로 처리효율이 증가하였다.

유입 BOD/TKN비 5이상의 범위에서는 유입수의 BOD 및 TN농도에 관계없이 약 70%의 TN제거효율을 달성할 수 있었으나, 4~5의 범위인 경우에는 유입 BOD 및 TN농도에 따라 처리효율의 차이를 나타내었으며, 유입 BOD/TKN비가 4이하로 감소함에 따라 제거효율의 차이는 더 커지는 경향을 나타내었다. 또한, 유입 BOD/TKN비 4.8~5.3 범위에서 TN 제거효율은 유입 TN농도가 20mg/L 이하의 결과 및 이상의 결과는 각기 다른 경향을 나타내었지만, 처리수중 TN농도는 10mg/L미만으로 유지할 수 있었다. 이는 결과적으로 우리나라 하수의 질소 제거가 동일한 유입 C/N비와 처리공정에서 다른 선진국에 비하여 더 낮은 이율을 나타내는 것이다. 따라서 공정의 우수한 탈질효율을 위해서는 유입 C/N비도 중요하지만, 유입수 중의 유기물 및 질소 농도도 매우 중요한 영향을 미치는 것으로 판단된다.

한편, 유입하수의 COD/TKN비에 따른 TN제거효율의 변화는 유입 BOD/TKN비와 같은 경향을 나타내어, 유입 TN 농도가 40~50mg/L인 경우 대부분 70%이상의 처리효율을 얻을 수 있었으나, 낮은 유입 TN농도에서는 처리효율이 비교적 저하되는 경향을 나타내었다. 그러나 본 공정의 특성상 시스템으로부터 유출되는 질소의 형태중 질산성질소는 3~6mg/L정도이며, 유입 질소농도가 높은 경우에는 제거된 질소의 양이 상대적으로 많으므로 처리효율로 계산시 유입 질소농도가 낮은 경우에 비해 상대적으로 높은 처리효율을 나타내게 되지만, 유기물농도에 따른 질소제거특성은 큰 차이를 나타내지 않는다.

또한 COD의 경우 난분해성유기물이 포함되어 있기 때문에 유입수의 COD/TKN비만으로는 적정 C/N비를 도출하기가 까다로울 수 있으며, BOD와 같이 분해가 용이한 유기물의 자료와 동시에 검토해야 할 것으로 사료된다. 특히 본 침전지내장형 상분리 산화구공정은 시간적 상분리에 의하여 혐기 단계 이전에 탈질 반응이 수행되기 때문에 적정 C/N비를 도출하기 위해서는 유입 COD/TKN비 이전에 유입 BOD/TKN비를 검토해야 할 것으로 판단된다.

유입 C/N비가 고효율의 질소제거효율을 얻기 위해서는 주요인자인 바와 같이, 유입 C/P비는 BNR 공정에서 우수한

인제거효율을 확보하기 위한 중요 영향인자중 하나이다. 따라서 유입수의 C/P비가 본 공정의 인제거효율에 미치는 영향을 알아보고자 상기 운전범위와 동일한 조건하에서 운전한 결과, Fig. 7과 같이 전반적인 인제거효율은 유입 BOD/TP비에 따라 증가하는 경향을 보였다. Ekama 와 Marais(1984)는 도시하수의 경우, 유출수의 총인 농도를 1mg/L 이하로 유지하기 위해서는 유입 BOD/TP비가 최소한 20이어야 하고, 1mg/L의 인을 제거하기 위해서는 50~59mg/L의 COD가 소모되는 것으로 분석하였으나, 본 연구 결과에서는 처리수 중의 TP농도를 1mg/L 미만으로 유지하기 위해 유입 BOD/TP비가 40이상 필요하였다. 이는 본 공정의 경우 단일 반응조내에서 비폭기 조건시 탈질반응 수행후 인제거를 수행하게 되므로 기존 연구결과에 비해 상대적으로 높은 유입 BOD/TP비가 필요한 것으로 사료된다.

시스템 SRT를 30일로 운전한 경우 유입 C/P비에 관계없이 SRT 25일 이하인 경우에 비해 상대적으로 낮은 인제거효율을 나타냄으로서, 시스템의 인제거효율은 유입 C/P비뿐만 아니라 시스템 SRT에도 영향을 받을 수 있었으며, 비록 시스템 SRT에 따라 다른 제거 경향을 보이지만 유입 BOD/TP비가 40이하일 때 1mg/L 미만의 유출수 TP 농도를 얻을 수 있음을 확인하였다.

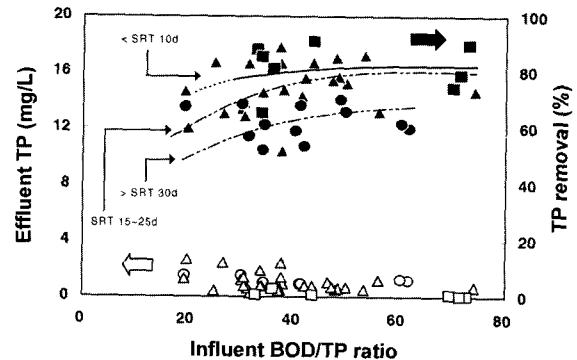


Fig. 4. Effect of influent BOD/TP ratio on TP removal.

3.2. 시스템 HRT 및 SRT에 따른 유기물 및 질소·인 제거특성

재래식 활성슬러지공정을 포함한 대부분의 BNR공정에서 수리학적 체류시간(HRT)의 영향은 매우 중요하며, 일반적으로 재래식 활성슬러지공정 및 BNR공정의 설계에 적용되는 HRT는 4~20시간으로 넓은 범위를 포함한다(WEF and ASCE, 1998). 산화구공정은 전형적으로 24시간 이상의 긴 체류시간을 가진 장기폭기 형태로 운전되나(Stensel and Coleman, 2000), 경우에 따라 활성슬러지공정의 HRT에 비해 짧은 시간으로 운전 가능하다(Randall 등, 1992). 기존 상분리 산화구공법의 하나인 BioDenitro 공법의 경우, 전단에 별도의 혐기조가 설치되어야 한다. 더구나 유입수 중에 쉽게 이용 가능한 유기물이 포함되었을 경우 반응속도가 매우 빠르기 때문에 적은 부피나 짧은 HRT로도 원활한 인방출이 가능하다. 그러므로 전단에 별도 혐기조를 포함하는 BNR 공정에서는 HRT가 너무 길거나 짧은 경우 탈질

에 영향을 미칠 수 있기 때문에, 적절한 HRT와 혐기조의 부피 즉, 혐기 HRT의 설계가 매우 중요하다. 본 연구에서 고안된 침전지내장형 상분리 산화구공정은 별도의 혐기조 없이 유로변경 및 간헐폭기 즉, 시간적 상분리를 통하여 유기물 및 질소·인 동시 제거를 수행하므로 시스템 HRT 내에서의 무산소, 혐기, 호기의 적절한 배분이 매우 중요하다.

본 실험실규모 침전지내장형 상분리 산화구공정에서는 HRT의 변화에 크게 영향을 받지 않았으며, 12시간 이하의 짧은 시스템 HRT에서도 BOD 20mg/L이하의 안정된 수질을 얻을 수 있었다. 또한 질소제거의 경우 시스템 HRT 6, 8, 12시간(내장형침전지 용적 포함)에서 평균 TN제거효율은 각각 73.0%, 76.9%, 78.2%로 우수한 결과를 나타내었다. 시스템 HRT변화에 따른 질산화특성은 Fig. 5와 같으며, HRT가 짧아질수록 유기물 및 질소 부하가 증가하여 질산화효율이 감소하는 경향을 나타내었다.

한편, 탈질효율은 Fig. 6과 같이 HRT가 짧아짐에 따라 다소 증가하는 경향을 나타내었는데, 이는 HRT가 짧을수록 불필요하게 소모되는 유기물의 양을 최소화하여 탈질반응에 필요한 탄소원으로 사용되기 때문으로 사료된다. 그러나 본 시스템에서 HRT가 너무 짧아지는 경우 상기 제시된 바와 같이 질산화효율 저하와 더불어 내장형침전지의 침전효율 저하로 인한 고형물 유출을 야기시킬 수 있으므로 이에 유의해야 할 것으로 판단된다. 인제거의 경우 HRT가 길어질수록 유기물부하가 적어짐에 따라 처리수의 TP농도가 1mg/L이상으로 유출되는 경우가 짧은 HRT의 조건에 비해 상대적으로 많이 나타났다.

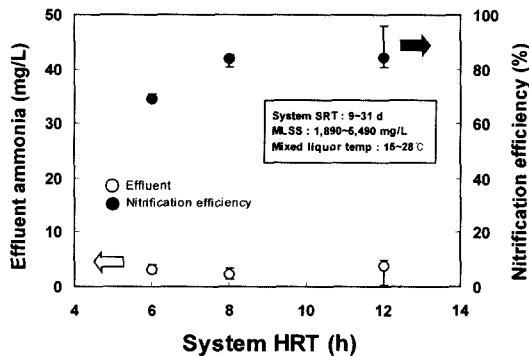


Fig. 5. Effect of system HRT on nitrification efficiency.

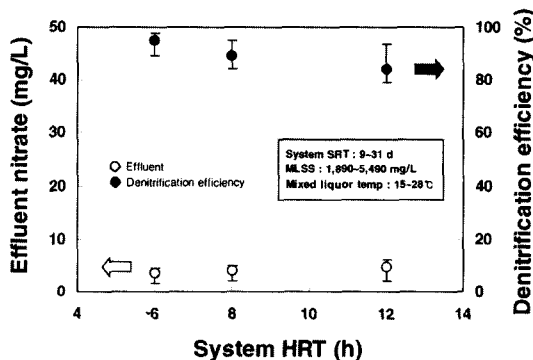


Fig. 6. Effect of system HRT on denitrification efficiency.

BNR공정에서 SRT는 HRT만큼 중요한 인자중 하나이며, 일반적으로 재래식 활성슬러지공정 및 BNR공정의 SRT는 각각 5~15일과 15~30일로 설계된다(WEF and ASCE, 1998). 본 공정의 시스템 SRT는 단위 시간당 시스템내 총 MLSS량을 폐슬러지량으로 나누어 산정하였다. 시스템 SRT 9~31일의 범위로 운전한 경우, 처리수의 BOD는 20mg/L이하로 유지되어, HRT와 마찬가지로 SRT의 영향은 없었다. 질소의 경우 유입 TN농도가 30mg/L이하인 경우 SRT가 길어짐에 따라 제거효율이 감소하는 경향을 나타내는데, 이는 MLSS가 부족할 때 또는 MLSS가 높은 경우에는 DO 공급부족으로 인한 질산화효율저하로 암모니아성 질소가 유출되었기 때문이었다. 한편, 유입수 질소농도가 30mg/L이하인 경우를 제외하고는 SRT가 길어짐에 따라 처리효율이 증가하는 경향을 나타내었다.

인제거의 경우 SRT가 짧아질수록 TP제거효율이 향상되는 경향을 나타내었으나, 내장형침전지의 규모 한계로 인해 발생한 고형물 유출을 제외하고는 긴 SRT에서도 대부분의 처리수 TP농도는 1mg/L미만으로 유지 가능하였다. 인제거는 시스템 외부로 폐슬러지를 배출시킴으로서 달성될 수 있으므로, SRT가 짧아질수록 TP제거효율이 향상되는 경향은 시스템 SRT와 슬러지내 함유된 인함량과의 관계로 설명할 수 있다. SRT가 감소할수록 폐슬러지로 배출되는 인의 양은 증가하며(Mamais and Jenkins, 1992), SRT 감소에 따른 슬러지생산량의 증가와 충분한 C/P비는 슬러지내 인함량을 상대적으로 감소시키면서도, 결과적으로는 처리수의 인농도를 저하시키게 되기 때문(Randall 등, 1992)으로 판단된다. 한편, U.S.EPA(1987)에서도 SRT가 길어질 때 슬러지의 증식(sludge yield)이 낮아지게 되어 인제거효율이 저하된다고 주장하였으며, Wenzel 등(1991)은 내생분해율이 낮은 Poly-P 박테리아의 경우 SRT가 길수록 시스템내에서 우점화되어 슬러지내의 높은 인함유량을 얻을 수 있어 인제거효율이 향상된다고 보고하였다.

3.3. 시간적 상분리에 따른 단위 산화구 내부거동

본 시스템은 호기, 무산소, 혐기조건의 변화에 따른 시간분할효과에 의해 하수중의 유기물과 질소, 인을 효율적으로 제거하는 공정이므로, 각 반응간에 영향을 미치지 않는 단계별 원활한 상분리는 매우 중요하다. 따라서 본 공정의 시간적 상분리특성을 보다 정확하게 알아보기 위하여 시스템의 정상 운전기간중 일정 조건(수온 25°C, 시스템 HRT 8시간, SRT 20일)하에서 시스템내 하나의 산화구에 대해 단일 사이클주기내의 질소 및 인의 거동을 포함한 DO 및 ORP 등의 상호관계에 대해 살펴보았으며, 이는 Fig. 7과 같다.

Fig. 7의 내부거동은 앞서 제시된 Fig. 1의 순서에 따라 진행되는 것을 나타낸 것이며, 산소공급유무 및 반응시간의 경과에 따라 반응조내 호기, 무산소, 혐기의 상분리가 원활하게 이루어짐을 알 수 있었다. 무산소 및 혐기조건으로 운전중인 산화구로부터 유출수가 유입되고 있는 초기 90분간 질산화 및 인섭취가 원활히 이루어졌다. 이후 유로변경

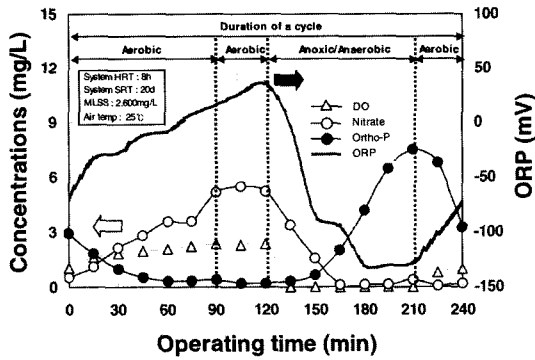


Fig. 7. Combined profiles of DO, ORP, nitrate, and ortho-P during a cycle in a ditch.

되어 하수가 직접 유입되는 30분간 질소 및 인의 변화는 거의 없었으며, 무산소조건으로의 전환 후 탈질반응이 약 45분간에 걸쳐 완전히 이루어졌다. 탈질이 거의 완료되는 시간에서는 혐기조건으로 전환되어 인이 방출되었으며, 이후 혐기조건이 종료되는 시간까지 인의 방출은 탄소원제한 없이 지속적으로 이루어졌다. 따라서 공간적으로 분할된 혐기조·무산소조·호기조로 구성된 기존 내부순환포함 다단 완전혼합형 BNR공법을 국내 저농도 하수에 적용하는 경우, 혐기조 후단의 무산소조건설 탈질효율이 낮아질 수 있는 문제점을 가지고 있으나, 본 공정의 경우 유로변경에 따른 연속적인 하수의 공급으로 인한 유입유기물의 활용 극대화와 간헐폭기에 따른 시간적 상분리의 조합을 통하여 경제적이고 고효율의 탈질 및 인방출이 도모 가능함을 알 수 있었다. 상기 운전조건하에서의 비질산화율 및 비탈질율은 각각 0.89mgN/gMLVSS/h 및 1.95mgN/gMLVSS/h이었으며, 비인섭취율 및 비인방출율은 각각 2.30mgP/gMLVSS/h 및 2.49mgP/gMLVSS/h이었다.

사이클주기내에서 연속적으로 이루어지는 반응조건별 DO 거동 관찰은 시간 흐름에 따른 상전환을 평가하는데 보다 용이한 장점이 있다. 호기조건 동안에는 DO농도가 지속적으로 증가하였으며, 무산소조건으로의 전환 초기에 DO농도는 0mg/L 가까이 빠르게 감소함에 따라, 한 사이클동안의 DO거동을 통하여 시간적 상분리가 원활하게 이루어짐을 확인할 수 있었다. ORP의 경우, 호기조건시 유기물제거, 질산화 및 인섭취 반응이 일어남에 따라 증가하였으며, 무산소조건에서는 탈질반응, 즉 환원반응에 의해 ORP가 급격히 감소하여, 상전환에 따라 뚜렷한 경향을 나타내었다. 또한 무산소조건 30분 경과 후 인이 방출되는 혐기조건이 형성되는 시점에서 ORP의 변곡점(ORP knee)이 관찰되었으며, 이후 혐기조건이 진행될수록 ORP가 다시 감소하였으나, 조건이 지속됨에 따라 ORP가 일정하게 유지됨을 알 수 있었다. 따라서 상기 반응조내 질산화, 탈질, 및 인의 방출 및 섭취 반응에 따른 ORP의 거동을 분석하여 시스템의 운전에 활용하는 경우, 최적의 무산소시간 도출 및 유입수의 부하변화에 신속하게 적용할 수 있는 실시간제어를 위한 기초자료로 이용가능할 것으로 사료된다.

3.4. 수리학적 충격부하시 시스템 안정성

우리나라는 기후적 특성상 강우가 하절기인 6~8월에 집중되는 특징을 가지고 있으며, 이러한 집중적이고 지속적인 강우는 하수관거를 통해 일부 또는 다량이 유입되어 유입하수의 성상을 변화시킬 수 있다. 그러나, 현재 하수처리시설중 대부분을 차지하고 있는 생물학적 하수처리공정은 유입하수의 성상에 따라 영향을 받을 수 있고, 특히 BNR공정의 경우 그 영향이 더욱 큰 것으로 알려져 있다. 따라서 본 연구에서는 집중적인 강우의 영향으로 인해 시스템으로 유입되는 단기적인 수리학적 충격부하에 의한 영향을 검토하고자 하였다. Fig. 8은 시스템 HRT 12시간 및 사이클주기 4시간으로 운전중인 상분리 산화구공정을 2 사이클(8시간)동안 HRT를 6시간(2배의 유입유량)으로 감소시켜 수리학적 충격부하가 시스템 성능에 미치는 영향을 알아본 것이다. 유입유량이 증가(시스템 HRT 감소)함에 따라 시스템 처리성능이 조금 감소하였으나, 4 사이클(16시간)후에는 수리학적 충격부하 이전의 처리성능을 회복하여 유입유량의 급변동에도 안정적으로 대처 가능함을 알 수 있었다.

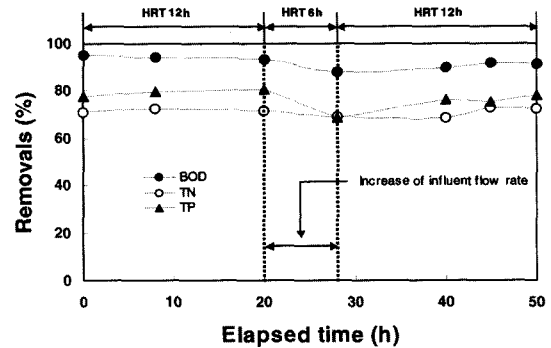


Fig. 8. Effect of hydraulic shock loading on system performance.

4. 결론

중소규모 하수 고도처리시설에 보다 적합하고 경제적인 시스템의 대안으로서, 실험실규모 침전지내장형 상분리 산화구공정을 제작·운전한 결과 유입수 특성 및 기타 주요 운전인자의 변화에 따른 시스템의 고도처리 특성과 장점을 확인할 수 있었다.

1. S환경사업소의 유입하수를 대상으로 사이클주기 4시간(무산소 및 혐기 1.5시간, 호기 2.5시간), 시스템 HRT 6~12시간, 시스템 SRT 9~31일의 운전범위에서 정상 운전기간동안 전체적인 BOD, TN, TP는 각각 88~97%, 73~78%, 65~90%의 높은 제거효율을 얻을 수 있었다.
2. 처리수내 TN 및 TP 농도를 10mg/L 및 1mg/L 이하로 만족하기 위한 유입 BOD/TKN비 및 BOD/TP비는 각각 3.7 및 40 이상이 필요하였다. 또한 12시간 이하의 짧은 시스템 HRT에서도 안정적인 BOD 및 TN, TP 제거효율을 얻을 수 있었으나, 인제거의 경우 HRT가 길어질수록 유기물부하가 적어짐에 따라 처리수의 TP농도가 1mg/L 이상으로 유출되는 경우가 짧은 HRT의 조건에 비해 상

- 대적으로 많이 나타남을 확인할 수 있었다.
3. SRT가 길어짐에 따라 질소제거효율은 대부분 증가하는 경향을 나타내었으며, 인제거의 경우 SRT가 짧아질수록 TP제거효율이 향상되는 경향을 나타내었으나, 내장형침전지의 규모 한계로 인해 발생한 고형물 유출을 제외하고는 긴 SRT에서도 대부분 처리수 TP농도는 1mg/L미만으로 유지 가능하였다.
 4. 시스템 HRT 12시간의 운전조건하에서 2배의 수리학적 충격부하(HRT 6시간)가 가해진 경우 시스템 유기물 및 영양염류 제거효율이 조금은 저하되었으나 이후 단기간 내에 회복되어, 중소규모 하수처리시설에서 강우가 집중되는 여름철에 발생가능한 단기간의 유량변동에 대하여 안정적으로 운전가능함을 알 수 있었다.

사 사

본 연구는 환경부 G-7 3단계 환경기술개발사업 연구비 지원에 의해 이루어진 결과의 일부이며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 김성원, 홍기호, 한상배, 장 덕, 산화구시스템에의 내장형침전지 적용 및 처리특성, 2000년도 대한상하수도학회·한국물환경학회 공동추계학술발표회 논문집, pp. 197-200 (2000).
- 한국환경기술진흥원, 환경공학기술개발연구보고, 한국환경기술진흥원, 서울 (2002).
- 환경부, 하수도통제, 환경부, 서울 (2002).
- American Public Health Association, American Water Works Association and Water Environmental Federation, *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 20th Ed., American Public Health Association, Washington DC, U.S.A. (1998).
- Bender, J.H., Assessment of Design Tradeoffs When Using Intrachannel Clarifiers, *Journal of Water Pollution Control Federation*, **59**(10), pp. 871-876 (1987).
- Einfeldt, J., The Implementation of Biological Phosphorus and Nitrogen Removal with The BioDeniphos Process on a 265,000PE Treatment Plant, *Water Science and Technology*, **25**(4/5), pp. 161-168 (1992).
- Ekama, G.A., Marais, G.V.R., and Siebritz, I.P., *Biological Excess Phosphorus Removal, Design and Operation of Nutrient Removal Activated Sludge Process*, Water Research Commission, Pretoria, South Africa (1984).
- Hughes, J.D., Holland, R., and Holbrook, R.D., Assessment of Phased Isolation Ditch Technology - Review and Update, *Proceeding of WEFTEC'95 68th Conference*, Miami Beach, Florida, U.S.A., pp. 95-110 (1995).
- Irlzar, I., Suecun, J., Palza, F., and Larrea, L., Optimizing nitrogen removal in the BioDenitro process, *Water Science and Technology*, **48**(11-12), pp. 429-436 (2003).
- Mamais, D. and Jenkins, D., The Effect of MCRT and Temperature on Enhanced Biological Phosphorus Removal, *Water Science and Technology*, **20**(5), pp. 955-965 (1992).
- Randall, C.W., Barnard, J.L., and Stensel, H.D., *Design and Retrofit of Wastewater Treatment Plants for Biological Nutrient Removal*, Technomic publishing Co., Inc., Lancaster, Pennsylvania, U.S.A. (1992).
- Stensel, H.D. and Coleman, T.E., *Technology Assessment: Nitrogen Removal Using Oxidation Ditches*, Water Environmental Research Foundation, Alexandria, U.S.A. (2000).
- U.S. EPA, Design Manual - Phosphorus Removal, EPA/625/1-87/001, Washington, DC., U.S.A. (1987).
- U.S. EPA, *Evaluation of Oxidation Ditches for Nutrient Removal*, EPA/832/R-92/003, Washington, DC., U.S.A. (1992).
- U.S. EPA, *Process Design Manual for Nitrogen Control*, EPA/625/R-93/010, Washington, DC., U.S.A. (1993).
- Water Environmental Federation and American Society of Civil Engineering, *Design of Municipal Wastewater Treatment Plants*, 4th ed., Water Pollution Control Federation and American Society of Civil Engineering, **II**, pp. 11-195 (1998).
- Wenzel, M.C., Ekama, G.A., and Marais, G.V.R., Kinetics of Nitrification Denitrification Biological Excess Phosphorus Removal Systems - a Review, *Water Science and Technology*, **23**, pp. 555-565 (1991).