

연구논문

하수처리장 유입수의 특성평가를 위한 실시간 수질예측

김연권* · 채수권** · 한인선*** · 김주환*

한국수자원공사 K-water연구원*, 을지대학교 보건환경안전과 교수**, 모아엠(주)***

(2010년 9월 30일 접수, 2010년 12월 12일 승인)

Real-time Water Quality Prediction for Evaluation of Influent Characteristics in a Full-scale Sewerage Treatment Plant

Youn-Kwon Kim* · Soo-Kwon Chae** · In-Sun-Han*** · Ju-Hwan Kim*

K-water Research Institute, Korea Water Resources Corp., Daejeon, Korea*

Department of Environmental Health and Safety, Eulji University, Seongnam, Gyeonggi, Korea**

moreM, DMC High-Tech Industry Center, Seoul, Korea***

(Manuscript received 30 September 2010; accepted 12 December 2010)

Abstract

It is the most important subject to figure out characteristics of the wastewater inflows of sewerage treatment plant(STP) when situation models are applied to operation of the biological processes and in the automatic control based on ICA(Instrument, Control and Automation). For the purposes, real-time influent monitoring method has been applied by using on-line monitoring equipments for the process optimization in conventional STP. Since, the influent of STP is consist of complex components such as, COD, BOD, TN, NH₄-N, NO₃-N, TP and PO₄-P. MRA2(Microbial Respiration Analyzer 2), which is capable of real-time analyzing of wastewater characteristics is used to overcome the limitations and defects of conventional on-line monitoring equipments in this study. Rapidity, accuracy and stability of developed MRA2 are evaluated and compared with the results from on-line monitoring equipments for seven months after installation in Full-scale STP.

Keywords : Real-time influent prediction, MRA2, STP, Microbial respiration

1. 서론

최근 정부주도하에 수행되고 있는 수질원격감시 체계는 하수처리장의 운영과 관리에 있어 커다란 변화를 일으켰다. 특히, 온라인 계측기에 의한 공정 운영상태의 실시간 파악, 위기대응능력의 구비, 상시 안정적인 공정운영과 운영관리체계 개발에 대한 필요성 대두 등 경험에 의존하여 운영해 오던 기존 하수처리장의 운영관리 패러다임을 바꾸는 중대한 기점이 되었다(환경관리공단, 2006; 한국수자원공사, 2009). 이와 같은 관점에서 다양한 공정 최적화 방안과 기술들이 제안되어 왔다. 그 중에서도 하수처리장의 방류수질 또는 공정모사를 위한 모델개발과 현장적용, 그리고 자동제어(ICA: Instrument, Control and Automation)기술에 의한 무인운전 등 자동화와 관련한 공정최적화에 대한 많은 노력이 있었다(Olsson and Nielsen, 1997; 임미지 등, 2008). 이들 기술은 하수처리장의 안정적인 방류수질 확보를 위한 최적제어방안의 일환으로 활용되고 있다. 일반적으로 하수처리공정의 제어는 크게 센서에 의한 제어와 수학적 모델에 의한 제어, 그리고 규칙에 의한 제어 등으로 나뉘는데, 관련 기술간의 기능적 호환과 현장 적용성 등 많은 현안문제들이 효과적으로 선결 되었을때 그 효과를 극대화 할 수 있다. 다양한 계측센서를 활용한 ICA 기반의 자동제어 기술은 국내외를 막론하고 많이 시도되고 있는 추세이나 아직도 제한적 규모의 특정공법에 대해서만 국한되고 있는 실정이며, 이들 기술에 대한 정확도와 신뢰도 향상이 또 다른 숙제가 되고 있다(Kim, 2003; 한국수자원공사, 2009). 공정모사를 위한 모델의 활용이나 ICA 기반의 자동제어에 있어 무엇보다 중요한 것은 하수처리장으로 유입되는 유입수에 대한 특성 및 성상파악이다(Olsson and Nielsen, 1997; Vase and Praet; 2002). 하지만 하수처리장 유입수는 COD, BOD로 대변되는 유기물질성분 이외에도 TN, NH₄-N, NO₃-N, TP, PO₄-P 등의 다양한 영양염류 성분으로 이루어져 있으며, 물질에 따라 이온성 또는 입자성으로 존재하고 있어 실시간 물질별 계측이 매우 어렵다는 특

징을 가지고 있다. 이를 극복하기 위해 온라인 계측기를 이용한 실시간 계측노력이 많이 시도되어 왔는데, 이 경우 계측장비의 신속성, 정확성, 안정성 및 경제성 등이 매우 중요한 고려항목이 된다.

하수처리장 유입수 중 COD나 BOD 항목은 하수처리 미생물의 대사에 있어 가장 중요한 항목으로서 모델활용이나 ICA 기반의 하수처리장 자동제어시 핵심제어인자가 된다. 기존 이화학적 분석법은 COD 분석을 위해 시료채취로부터 분석까지 최소 3시간 이상의 많은 시간소요를 필요로 하므로, 실시간 모델활용이나 자동제어가 현실적으로 불가능하다. 최근 실시간 COD 분석을 위해 UV나 TOC 계측기를 이용하거나 간접 예측방법으로 Software sensor를 이용하는 방법 등이 제안되고 있으나 이는 정확한 COD 성상의 예측과는 차이가 있다(정 등, 2006; Matshe and Stumwohrer, 1996). 더욱이 COD 성분은 미생물에 의해 분해되는 BOD 성분과 쉽게 분해되는 COD(RBCOD, Readily Biodegradable COD)와 천천히 분해되는 COD(SBCOD, Slowly Biodegradable COD)에 대해서는 원론적으로 분석이 불가능하다(Cokgor *et al.*, 1998; Orhon *et al.*, 1996; Vanrolleghem *et al.*, 1997). 이러한 이유로 신속성, 정확성, 안정성 및 경제성 등이 고려된 실시간 하수처리장 유입수 특성분석기법과 관련 계측기의 개발이 시급하다 하겠다.

본 연구에서는 급속 미생물 호흡을 측정기기와 현장 계측용 SS, EC가 결합한 소프트웨어 센서를 이용한 하수처리장 유입수 실시간 분석기법을 연계하여 개발된 유입수 특성 분석장치 MRA2(Microbial Respiration Analyzer2)를 이용하여 실시간 분석이 가능토록 하고자 한다. 금번 연구는 하수처리장 운영 시 가장 중요한 파라미터인 유입수내 C 성분과 N 성분에 대한 실시간 분석능을 실험실 규모와 실규모 하수처리장에 적용하여 평가하였다. 본 연구의 결과는 하수처리장 유입수의 실시간 분석기술 및 이를 활용한 공정자동화, 공정최적화 기술분야와 크게 기여할 수 있을 것으로 기대한다.

II. 실험장치 및 방법

1. 유입수 특성 분석장치의 활용과 구성

하수처리장 유입수의 특성 및 성상분석을 위해서는 먼저 하수의 구성성분특성을 이해해야만 한다. 그림 1에서 보는 바와 같이, 하수처리장으로 유입되는 구성성분 중 가장 중요한 COD와 질소 성분에 대해 각각의 특성별로 구분하면 다양한 성상으로 나누어 짐을 확인 할 수 있다. 먼저 COD의 경우, 미생물에 의해 분해 가능한 물질과 분해 불가능한 물질로 나눌 수 있으며, 이는 각각 입자성과 용존성으로 구분되어 진다. 이때 분해가능물질과 분해 불가능 물질에 대한 구분은 기존 이화학적 분석방법으로는 구분이 불가능하며, 미생물의 호흡율법에 의해서만 구분이 가능하다. 하지만 이 방법 역시 최소 6시간 이상의 실험 시간을 필요로 하므로 별도의 방법론적 보완이 필요하다. TN으로 통칭되는 질소 성분의 경우, COD와 마찬가지로 입자성과 용존성으로 구분될 수 있을 뿐만 아니라 미생물 기작에 의해 $\text{NH}_4\text{-N}$ 에서 $\text{NO}_3\text{-N}$ 의 형태로 전환됨에 따라 이에 대한 계측방법이 필요하다.

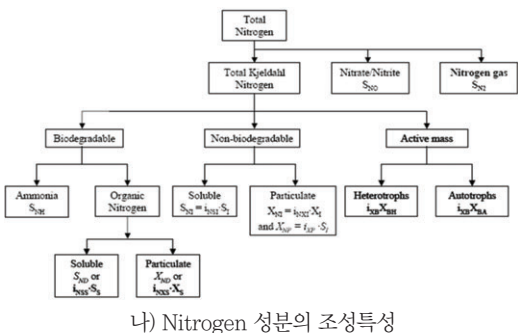
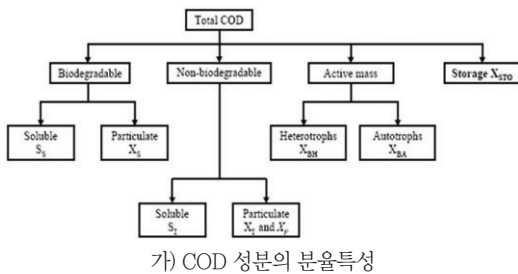


그림 1. 하수처리장 유입수 성상특성

금번 연구에서는 급속 미생물 호흡율 측정장치 (MRA)와 SS 및 EC로 구성된 소프트 웨어 센서부를 이용하여 유입수내 COD 성분과 질소성분을 구분하는 방법과 이를 계측장비로 구현한 MRA2를 개발하였다(그림 2 참조). MRA2를 이용한 COD 성분분석은 극도로 낮은 조성된 F/M비에서 나타나는 10~20분 이내 급속 미생물 호흡율 변화를 측정하여 생물학적 분해가능 COD원의 구분과 RBCOD를 정량화 할 수 있도록 MRA(Microbial Respiration Analyzer) 장치부로 구성되어 있다. MRA에서 계측된 생물분해가능 COD의 영역은 소프트 웨어부의 SS 및 EC 계측값과 맞물려 TCOD(Total COD)는 물론 Acetic acid와 같은 이온성 COD 성분정보를 보상하여 최종 COD 분율을 계산 할 수 있다. 질소 성분의 경우는 SS와 EC를 이용하여 입자성은 물론 이온성 질소성분을 정량화하는데, 이때 소프트 웨어 센서부에서 해당 하수처리장 유입수내 오염물질 조성특성에 기초한 분율변화 범위정보를 고려하여 질소성분을 검측하게 된다.

검측된 COD와 질소성분에 대한 추정결과를 MRA2의 연산부 CPU에서 데이터 스크리닝, 연산 수행 및 최종 획득된 정보를 저장하게 되고 출력부를 통해 실시간 데이터를 생산하게 된다. 이렇게 MRA2를 통해 생산된 실시간 유입수 정보는 공정 제어 시스템과 연계되어 운전애 직접 활용 될 수 있다. MRA2 CPU에서 수행되는 연산과정은 크게 각 물질별(항목별) 발생상관관계를 분석하는 단계와 고

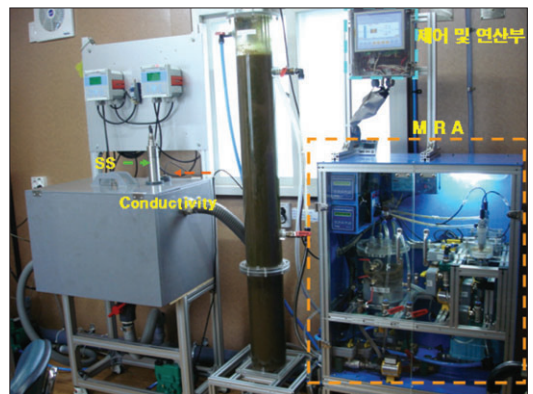


그림 2. 실시간 하수처리장 유입수 특성분석장치-MRA2

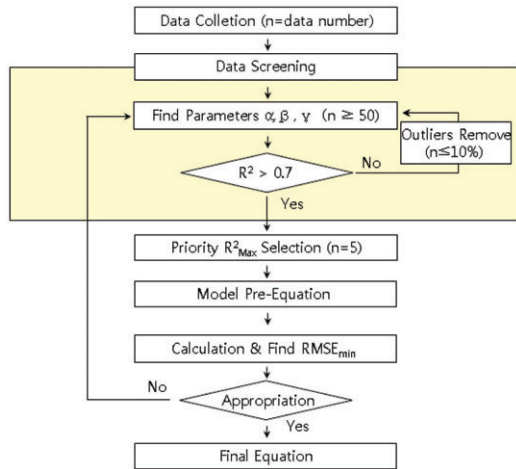


그림 3. MRA2에 탑재된 유입수 예측모델식 결정 알고리즘

려우선순위에 의거 변수별 예측모델식과 계수값을 결정하는 단계, 그리고 구해진 예측모델식별 정확도 검증을 통한 최종모델 선정단계 등 3단계로 나누어 진다. 이러한 일련의 과정은 그림 3과 같이 요약할 수 있다.

2. 실험방법

본 연구에서는 실시간 하수처리장 유입수 특성분석장치인 MRA2를 이용하여 하수내 C 성분과 N 성분추정의 신속성, 정확성, 안정성을 평가하고자 하였다. 이를 위해 먼저 실험실 규모의 실험을 통해 모니터링 인덱스의 정확도를 평가하였다. 기지의 농도로 조성된 하수시료에 대해 각각 SS와 EC를 이용하여 C 성분과 N 성분과의 발생특성에 대한 정확도를 평가하였다. COD 성분으로 사용된 TCOD와 PCOD(Particle COD)는 실증규모의 하수처리장 유입하수를 사용하였고, N 성분으로 사용된 NH₄-N은 타 성분과의 간섭을 방지하기 위해 공업용 암모니아와 증류수만을 사용하였다. 두 번째로 수행된 실험은 현장 적용성 평가를 통한 안정성을

평가하고자 22,000 m³/d 규모의 변형된 A₂O 공정으로 구성된 W 하수처리장에 MRA2를 설치하여 동절기를 포함하는 7개월간의 현장 테스트를 수행하였다.

현장 테스트시 사용된 하수처리장 유입수는 일반 가정하수와 공장폐수가 섞인 혼합수의 특성을 보이며, 1차 침전지 월류수를 유입하수로 실험에 사용하였다. MRA2 현장 테스트시 사용된 시료는 동일시간대의 유입하수를 채취하여 성분분석을 실시하였고, 온라인 계측기와 이화학적 분석을 병행하여 측정결과와 정확성 및 기기의 안정성을 비교하였다. 이화학적 수질분석방법은 Standard Method(1998)에 준하여 실험하였다. 특히, MRA2는 극도로 낮은 F/M비에서 운전되도록 설계되어 있으며, 실험동안 F/M비는 0.04~0.1 범위에서 운전되도록 하였다.

III. 실험결과

1. 모니터링 인덱스를 이용한 COD 및 N 성분 계측능력 평가

일반적으로 하수처리장 유입수내 COD 성분은 물리적 특성에 따라 크게 입자성 COD와 용존성 COD의 형태로 존재하며 각각의 변화특성을 나타내게 된다. 하지만 이들 대부분의 변화패턴은 불특정적인 강우사상이나 불명수 등의 영향이 적은 경우 대부분 유사한 발생특성을 나타냄으로서 SS와 TCOD와의 상관관계를 이용하여 그 농도를 추정할 수 있다. 또한 EC와 급속 미생물 호흡을 측정결과를 이용하여 TCOD 중에 존재하는 용존성 COD(Ss)와 그 중에서도 RBCOD 성분을 실시간으로 구분해 낼 수 있다. 금번 실험에서는 SS 성분을 COD 성분의 모니터링 인덱스로 활용하여 계측능력을 평

표 1. 모니터링 인덱스 정확도 평가용 시료특성

Items	Mode	1	2	3	4	5	6	7	8
TCOD (mg/L)		894	565	826	1008	850	739	920	682
PCOD (mg/L)		642	459	567	606	517	464	520	465
NH ₄ -N (mg/L)		336	212	170	119	78	34	1.3	0

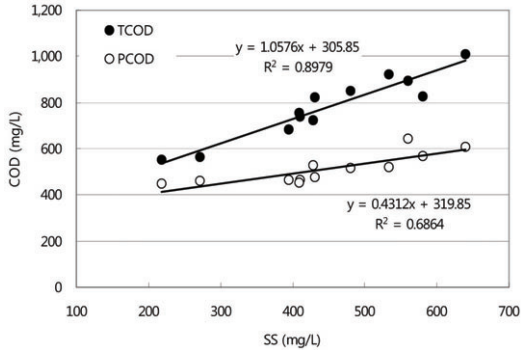


그림 4. 유입수내 COD 농도별 SS 예측 정확도 평가

가하였다. 그림 4에서 보는 바와 같이, 농도가 상이한 합성폐수의 COD 성분과 SS와의 회귀분석결과 $R^2=0.8979$ 의 높은 상관도를 확인 할 수 있었으며, PCOD와는 $R^2=0.6864$ 의 상관도를 보였다.

일반적으로 질소성분은 입자성 물질과 거동추이를 같이 하는 COD나 인 성분과는 달리 용존성 성분에 가까운 이온성 물질특성을 보인다. 금번 논문에서는 기지의 농도로 조제된 합성폐수 내 NH_4-N 모니터링을 위한 EC 적용성 사전평가를 수행하였다. EC에 의한 합성폐수 내 NH_4-N 의 검출시간은 기기 세팅에 따라 달라질 수 있으나 금번 실험의 경우 1분 간격으로 데이터 생산이 가능하였다. 그림 5에서 볼 수 있듯이, 농도가 상이한 합성폐수의 NH_4-N 농도와 EC 검측 결과값은 회귀분석결과 $R^2= 0.938$ 의 매우 높은 상관도를 보였다. 일반적으로 하수처리장으로 유입되는 하수 내 질소성분이 대부분 NH_4-N 임을 고려한다면, EC에 의한 NH_4-N 의 예측능은 매우 높은 것으로 판단되었다.

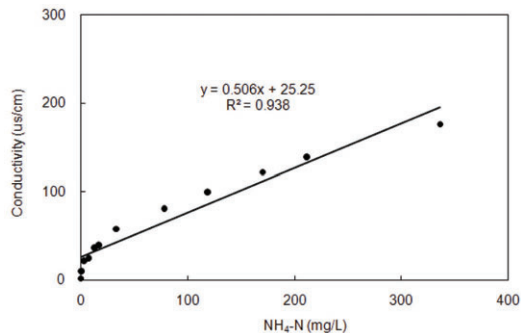
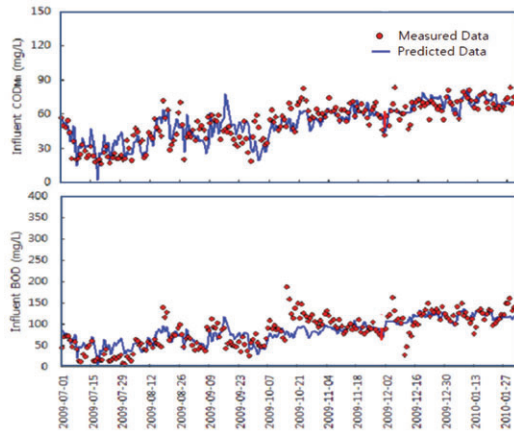


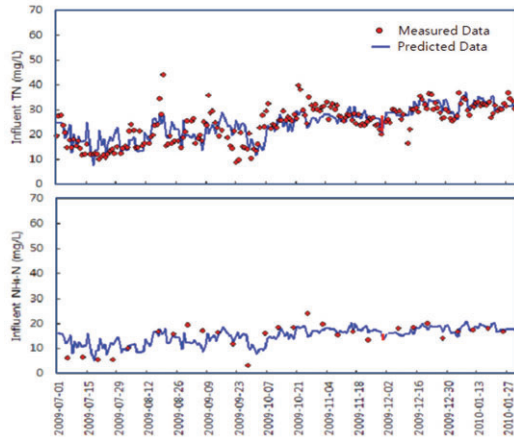
그림 5. 유입수내 NH_4-N 농도별 EC 예측 정확도 평가

2. 현장 적용성 및 정확성 평가

실규모의 변형된 A_2O 공정내 1차 침전지 월류부에 MRA2를 설치하여 동절기를 포함하는 7개월간의 현장 테스트 결과는 다음 그림 6과 같다. 예측된 유입수질의 결과는 분석대상 항목별 모니터링 인덱스 예측능력평가결과와 대상 하수처리장의 유입수 발생특성 결과, 그리고 MRA2에 탑재된 MRa의 급속 호흡율 예측결과를 이용하였으며, 그림 3의 절차를 통해 만들어진 예측모델을 통해 실시간 유입수질 예측결과를 만들었다. 현장 테스트시 비교대상으로 선정된 평가대상 물질은 COD_{Mn} 과 BOD 그리고 TN과 NH_4-N 로 이화학적 분석을 통해 MRA2의 실



가) 유입수내 COD, BOD 성분분석 결과



나) 유입수내 TN, NH_4-N 성분분석 결과

그림 6. MRA2를 이용한 실시간 하수처리장 유입수 특성 분석 결과

시간 예측결과와 비교하여 정확성을 평가하였다. 실험결과 MRA2는 유입수질내 목표대상물질(Target material)을 10~20분 이내 분석완료 할 수 있어 매우 빠른 응답성을 갖는 것으로 판단되었다. 또한 MRA2의 예측결과를 이화학적 수질결과와 비교한 결과, 정확한 예측능을 보이는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 실제 하수가 용존성과 입자성, 이온성과 비이온성 물질 등 다양한 혼합물의 특징을 보여 기존의 온라인 계측기를 이용할 경우 정확한 측정에 많은 제한이 있었다. 이에 반해 MRA2는 혼합물의 특성을 보이는 실제 하수에 대해서도 목표대상물질을 성상별로 정확히 예측 할 수 있는 것으로 판단되었다.

3. 계측결과 안정성 평가

동절기를 포함하는 7개월간 현장 테스트 결과, MRA2와 온라인 계측기의 데이터의 안정성은 다음 그림 7과 같다. 그림에서 확인 할 수 있듯이, 유지관리가 잘 되는 구간에서는 온라인 계측기나 MRA2 모두 이화학적 분석값과 유사한 추이를 보이고 있다. 하지만 시간경과에 따라 온라인 계측기의 분석값은 MRA2의 예측값에 비해 계측오차가 커짐을 확인 할 수 있었다. 이와 같은 이유는 기존 온라인 계측기의 계측센서부에 발생하는 오염이나 반응시약의 부족 등으로 인해 계측결과값에 오차를 유발하는 것으로 나타났다. 반면 MRA2는 상대적으로 안정적인 예측값을 나타냄을 확인 할 수 있었는데,

이러한 결과는 기존 온라인 계측기가 민감한 센서부와 이화학적 반응장비를 기반으로 구성되어 있어 오염으로부터 취약하고 반응시약의 지속적인 공급 등 유지관리결과에 따라 안정적인 데이터 획득이 좌우되는 것으로 판단되었다. 반면, MRA2는 계측부가 오염에 상대적으로 강한 SS와 EC센서로 구성되어 있을 뿐만 아니라, MRa내 자가세정 기능을 가지고 있어 오염과 반응시약의 충전 등 별도의 유지관리가 불필요한 장점으로 인해 안정적인 데이터 생산이 가능했던 것으로 판단되었다.

IV. 결 론

본 연구는 하수처리장 유입수의 특성평가를 위해 자체 개발한 실시간 유입수 예측기법과 이를 구현한 계측기(MRA2)를 이용하여 실증 규모의 하수처리장에서 7개월간 현장평가를 실시하였다. MRA2의 예측결과와 이화학적 분석결과를 비교하여 정확성 평가를 실시하였으며, 장기간 운전에 따른 안정성 평가를 위해 기존 온라인 계측기와 계측결과를 비교하여 연구결과를 평가하였다.

1. MRA2의 센서부를 구성하는 SS와 EC를 모니터링 인덱스로 이용하여 기지의 농도로 조성된 하수내 성상분석을 실시한 결과, 폐수내 C 성분과 N 성분분석에 직접활용이 가능한 것으로 평가되었다.
2. 현장 테스트 결과 MRA2는 COD, BOD, TN, NH₄-N 항목에 대해 최대 20분 이내 분석이 가능

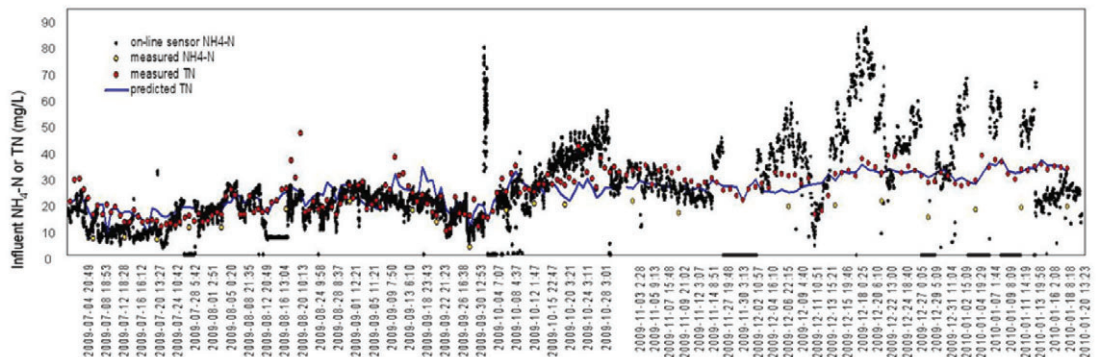


그림 7. 실시간 MRA2를 이용한 실시간 하수처리장 유입수 특성분석 결과

한 반응성을 보였으며, 수분석에 의한 이화학적 분석결과와 MRA2에 의한 실시간 유입수 예측결과는 비교적 정확한 것으로 나타났다.

3. 온라인 계측기와 MRA2의 7개월간 현장 테스트 결과, 오염으로부터 강하고 유지관리에 용이한 MRA2가 기존 온라인 계측기에 비해 안정적인 데이터 생산에 유리한 것으로 판단되었다.

4. 본 연구에서 제시된 실시간 유입수 예측기법과 장치는 기존 온라인 계측장비 또는 인력에 의해 결과를 수분내의 매우 짧은 시간에 획득 할 수 있을 뿐만 아니라, 단일 기기로 유입수질분석을 가능케 함으로서 공정자동화, 공정최적화 기술분야에 크게 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

- 환경관리공단, 수질원격감시체계(TMS)구축 업무처리 절차, SOP No. WTMS-OF-PC(2006).
- 한국수자원공사, 자가진단형 하수처리장 운영관리 시스템(상용화버전)의 개발 및 실규모 하수처리장 현장적용 연구(2차년도) (2009).
- 정형석, 이상형, 신항식, 송의열, 2006, 대도시 하수종말처리장 유입하수의 성상평가와 인공 신경망을 이용한 구성성분 농도예측, 대한환경공학회, 28(3), 308-315.
- 임미지, 선지윤, 박정진, 변임규, 박태주, 이태호, 2008, 이온선택성 미소전극을 이용한 암모니아성 질소 및 질산성 질소의 연속농도 측정, 한국물환경학회지, 24(6), 718-724.
- Cokgor, E. U., Sozon, S., Orhon, D., and Henze, M., 1998, Respirometric analysis of activated sludge behaviour - I. Assessment of the readily biodegradable substrate, *Wat. Sci. tech.*, 32(2), 461-475.
- Kim, Y. K., 2003, Respirometric monitoring of a microbial behavioral characteristics change through the retrofitting process, Ph. D. Thesis, Hanyang University.
- Matshe, N. and Stumwohrer, K., 1996, UV absorption as control parameter for biological treatment plants, *Wat. Sci. Tech.*, 33(12), 211-218.
- Olsson, L. and Nielsen, J., 1997, On-line and in situ monitoring of biomass in submerged cultivations, *TIBTECH*, 15, 517-522.
- Orhon, D., Yildiz, G., E. U., and Sozon, S., 1996, Respirometric evaluation of the biodegradability of confectionary wastewaters, *Wat. Sci. Tech.*, 32(12), 11-19.
- Vanrolleghem, P. A., van Daele, M., and Dochin, D., 1997, Practical identifiability of a bioetic model of activated sludge respiration, *Wat. Res.*, 29(11), 2561-2570.
- Vase, J. L. and Praet, E., 2002, On the use of fluorescence measurements to characterize wastewater, *Wat. Sci. Tech.*, 45(4-5), 109-116.