GOVP1200511492

최 종
연구보고서

완전자동 실시간 축산폐수 처리기술 개발

Development of a real-time control technology for animal wastewater treatment process

연 구 기 관

강 원 대 학 교

농 림 부

2016/05/20 09:49-운영지원과/허민지

자료출처 : 완전자동 실시간 축산폐수 처리기술 개발 / 농림부

제 출 문

농림부 장관 귀하

본 보고서를 “완전자동 실시간 축산폐수 처리기술 개발” 과제의 최종보고서로 제출합니다.

2003 년 7 월

주관연구기관명 : 강원대학교
총괄연구책임자 : 라 창 식
세부연구책임자 : 라 창 식
연 구 원 : 신 종 서

요 약 문

I. 제 목

완전자동실시간 축산폐수 처리기술 개발

II. 연구개발의 목적 및 필요성

축산폐수에 대한 규제가 강화되면서 소· 중규모 축산농가들이 서둘러 현장에 폐수 처리 시설을 갖추고 발생하는 분뇨 및 폐수 처리· 정화에 많은 노력을 기울이고 있으나 처리시스템 설비에 고비용이 투자되고 처리효율도 낮아 큰 어려움을 겪고 있는 실정이다. 따라서 시설비용이나 토지 면적이 많이 요구되지 않아 경제적이면서도 효율이 매우 높은 기술의 확립이 이루어져야 한다. 이를 위해서는 슬러리 형태로 발생하는 축산 분뇨 및 오·폐수 내에 고농도로 존재하는 유기물질· 질소· 인등의 오염물질을 완전히 제거할 수 있는 처리기술 확립이 필요하며 가변적인 축산폐수의 특성과 처리시스템의 변이에 스스로 반응할 능력이 있어 처리용량을 최적화 할 수 있는 기술의 확립이 요망된다. 또한 원수질 특성변이에 상관없이 일정한 처리수질과 처리효율을 얻을 수 있고 생물학적 오염물질 제거 단계와 폭기 등에 소모되는 전기에너지 비용의 최적화가 가능할 뿐 만 아니라 축산분뇨 및 오·폐수내의 자체 유기물을 이용한 고농도의 질소· 인의 제거로 처리비용을 최소화시킬 수 있는 기술 개발이 필요하다. 이를 위해서는 시스템 내에서 처리가 완료되었을 때 처리단계를 다음단계로 전환시키거나 처리수를 배출 하고 새로운 폐수를 유입시킬 능력이 있는 완전자동 실시간 처리기술(Real-time treatment technology)의 개발· 확립이 절실하다.

III. 연구개발 내용 및 범위

본 연구는 축산폐수 특성변이에 관계없이 항상 일정한 처리수질과 완전 처리를 얻

을 수 있는 처리기술, 즉 시스템에서 오염물질이 제거가 완료되었을 때 처리수를 내보내고 새로운 폐수를 유입시키는 실시간 처리기술(Realtime Control Technology)을 개발·확립하기 위해 수행하였다.

우선 실시간 처리시스템의 가동 기법을 설정하기 위해 ORP와 pHmV- time 변화 유형과 오염물질거동과의 상관관계를 확립하였으며, 영향 요인에 따른 제어인자의 반응을 분석하여 완전자동 실시간 컴퓨터 제어 방법을 개발하였다. 개발된 컴퓨터 제어 방법을 pilot 규모의 SBR시설에 적용하여 가변적 축산폐수 처리효율과 운전 특성을 평가하고 처리시설과 제어 기술의 최적화를 방안을 확립하였다.

IV. 연구개발 결과 및 활용에 대한 건의

1. 연구개발 결과

1) 실시간 컴퓨터 자동제어 방법 개발

1-1) 운전모드별 ORP, pH 변화특성 및 2단계 SBR의 운전특성

돈사폐수 처리를 위해 pilot 규모의 SBR(Sequencing Batch Reactor) 시스템을 설비하고 SBR에서의 오염물질 제거 특성과 운전 모드별 ORP, pH의 변화 특성을 파악하였다. ORP와 pHmV의 변화는 반응조내의 물질성상 변화에 반응하면서 특정 오염물질의 제거가 완료되는 시점에서 매우 특이적인 변화가 목격되었으며 이 시점(NBP, KNP, RCMP)이 컴퓨터 자동제어 시점으로 활용될 수 있었다.

24h/cycle, "feeding → Anoxic → Aerobic → Anoxic → Aerobic → Settle → Discharge"순으로 운전되는 2단계 SBR에서 각 반응조내 오염물질 변화를 살펴본 결과 TOCs 제거의 경우에는 1st SBR이, NH_4-N 제거의 경우에는 2nd SBR의 역할이 상대적으로 크게 나타났으며 C, N 모두 loading rate이 증가할수록 2nd SBR의 역할이 커지는 것으로 나타났다. 단일 SBR의 운전을 위한 적정 TOCs loading rate은 약 50g/m^3 정도였으며 완전 NH4-N의 제거를 얻기 위한 loading rate 범위는 약 65g/m^3 수준인 것으로 판단되었다. 2개의 SBR을 연계하여 운전하는 것 보다는 각 반응조를 독립적으로 운전하는 것이 전체 처리용량을 증가 시키는 것으로 나타났다.

1-2) ORP와 pHmv를 이용한 자동제어 방법 개발과 제어인자의 안정성 분석

ORP 및 pHmV curve 상에서 발생하는 각 point를 효율적으로 detection 할 수 있는 기법을 분석하고 각 제어인자들에 대한 영향 요인들을 분석 · 파악하여 최종적으로 안정적인 컴퓨터 제어 기술을 개발하였다. ORP 및 pHmV-time profile상에서 특이적인 오염물질의 제거 완료와 함께 나타나는 NBP(Nitrogen Break Point)와 NKP(Nitrate Knee Point)는 Moving range의 모니터링을 통해 쉽게 detection 될 수 있었다. 그러나 moving range 단독으로 이용하면서 ORP 및 pHmv curve 상에서 발생하는 각 point를 detection하는 방법은 다소 불안정하였다. 안정적인 detection을 위해서는 ORP 및 pHmV의 MRG 변화 값의 Moving slope change (MRG-Mdx/dt)의 특이적인 양상을 이용하거나 혹은 ORP와 pHmV의 moving slope change를 이용하여 순차적으로 각 point를 detection 하는 것이 효율적인 것으로 밝혀졌다.

호기조건에서의 제어인자의 안정성을 파악한 결과 ORP와 DO에서는 NBP가 발생하지 않거나 혹은 가짜 NBP가 다수 발생하는 경우가 많이 나타나 호기공정의 자동제어에 ORP와 DO를 이용하는 것은 불안정적인 제어 결과가 됨을 알 수 있었다. 그러나 pHmV를 이용해서는 항상 NBP 발생시점을 정확하게 detection 하는 것이 가능하였다. 반응조내 NOx-N 농도 영향과 제어인자의 안정성을 비교한 시험에서도 반응조내에 NOx-N이 축적됨에 따라 ORP-time profile에서 자동제어 시점의 detection은 불가능하였으나 pHmV-time profile에서는 NBP가 항상 뚜렷이 발현하여 자동제어 시점 detection에 아무런 어려움이 없었다. 제어인자에 대한 유기물 농도의 영향 분석에서도 ORP는 반응조내 유기물 농도에 영향을 받는 것으로 나타났으나 pHmV에서는 이와는 상관없이 항상 NBP가 발생하는 것으로 파악되었다. 따라서 자동제어의 안정성 측면에서 호기적 공정의 자동제어에는 ORP-time profile 보다는 pHmV-time profile을 이용하는 것이 안정적임을 알게 되었다. 반면, 무산소 공정의 자동제어 인자로서는 ORP가 pHmV보다 효율적인 인자임을 알 수 있었다.

2) 개발된 실시간 컴퓨터 자동제어 기술 평가

개발된 제어 방법에 의거하여 ORP와 pHmV를 병용하는 컴퓨터 제어 알고리즘을 구성하고 pilot 규모의 SBR 돈사폐수 처리시설에 적용하여 그 유용성을 평가하였다. 모든 처리공정은 개발된 컴퓨터 제어기술에 의해 운전되도록 하였으며 원거리 제어 기술을 이용하여 처리시스템의 운전 상황을 감시 · 진단하였다.

pHmV-time profile의 변화 패턴을 이용하여 호기적 공정만을 자동 제어한 경우 TOCs의 적정 부하량은 약 55g/m^3.cycle이었으며 유출수내 NOx-N의 농도를 고려한 NH_4-N의 적정 부하량은 약 60g/m^3. cycle 수준으로 나타났다. NH_4-N의 평균 부하량은 16~79g/m^3.cycle 수준이었으며 유출수내 NH_4-N의 농도는 0mg/L로 항상 완전한 제거가 이루어졌다. ORP와 pHmV를 병용하여 무산소, 호기공정 모두를 자동 제어한 경우(Real-time control IV, V, VI)에 있어서도 NH_4-N의 부하량 변화와 상관없이 항상 100%의 완전 제거효율을 보였는데 이는 개발된 실시간 완전자동 제어기술의 유용성을 보여주는 것이라 할 수 있다. 무산소, 호기공정을 모두 자동제어하면서 처리 cycle을 3개의 subcycle로 구성한 경우 (Real-time control V, VI) NH_4-N 부하량 400g/m^3.cycle 이상의 수준에서도 안정적인 자동제어와 완전 질산화가 이루어졌다. 그러나 유출수내 NOx-N의 농도를 고려한 NH_4-N 적정 부하량 수준은 200g/m^3.cycle로 나타났으며 TOCs의 적정 부하량 수준은 100g/m^3.cycle로 나타났다. Real-time IV에서와 같이 독립된 1 cycle로 운전할 때보다 subcycle을 가지고 운전할 때 NH_4-N 유입량 대비 NOx-N의 배출량은 훨씬 적은 것으로 나타났으며 평균 처리용량은 크게 증가하는 것으로 나타났다. 따라서 Real-time V와 VI에서와 같은 운전 모드 구성과 완전자동제어는 외부탄소원 절감 효과를 가져올 수 있음과 동시에 처리효율을 항상 일정하고 높게 유지시키는 것으로 나타났다. 개발된 실시간 컴퓨터 자동제어 기술의 안정성을 파악한 결과 93%이상의 성공적인 제어가 이루어졌으며 이상현상 발생시에도 원거리 감시, 진단, 제어방법에 의해 빠른 응급조치 혹은 제어가 가능하였다.

2. 활용에 대한 건의

본 연구를 통해 개발된 ORP와 pHmV를 병용하는 실시간 컴퓨터 자동제어 기술은 처리조내 오염물질 변화와 미생물 활성 변화에 따라 유기적으로 반응하면서 스스로 처리시간과 처리단계를 조절하기 때문에 처리환경의 인위적인 조작 없이도 시스템을 최적의 상태로 유지할 수 있는 것으로 기대된다. 특히 설계에 의존한 시설을 이용하여 가변적인 축산폐수를 처리할 때 나타나는 미처리 방류 문제와 과잉처리로 인한 처리비용 낭비문제를 해결할 수 있을 것으로 기대되며 중/소규모 축산농가가 겪는 전문인력 부족으로 인한 처리시설의 적절한 관리/운전 불가능 문제를 해결하여 줄 것으로 여겨진다. 또한 대규모 축산폐수 공공 처리장이나 농가에 설비된 처리시설의 운전을 정상화하고 최적화를 이루는데 개발된 기술이 효율적으로 사용될 수 있을 것으로 판단된다. 아울러 시험, 평가된 온라인 원거리 감시・진단・제어기술은 여러 곳에 산재하여있는 축산폐수 처리시설이나 농촌의 소규모 처리시설을 효율적으로 운전관리 및 감시할 수 있기 때문에 중앙관리 센터에서의 통합관리를 가능케 할 것으로 판단된다.

Summary

I. Title

Development of a real-time control technology for animal wastewater treatment process

II. Research Objectives and Background

Since a regulation on animal wastewater discharge had strictly set to prevent environmental pollution, much efforts has been provided to properly manage the animal wastewater and manure. However, many difficulties are still remained because tremendous finance are required to install and operate the treatment processes, as well as treatment efficiencies of process are poor. Therefore, an efficient and economical treatment process, which can completely remove the pollutants in animal wastewater and optimize the treatment capacity by responding itself to the changes of operational condition and influent fluctuation, should be developed for the treatment of animal wastewater. Also, a novel treatment technology, which stable treatment and optimization of electrical energy usage are feasible, should be established as soon as possible. To achieve these, development of real-time control technology is very urgent.

III. Research Scope and Contents

This research was conducted to invent a novel real-time control technology, which can artificially terminate the treatment on the completion of removal and hence can obtain stable and complete removal in spite of the

variation of influent and system condition. To develop computerized real-time control technology, correlation of specific changes of ORP and pHmV-time profile with pollutants in reactor was studied, and factors on control parameters were analyzed. The newly invented technology was applied to pilot scale SBR process to evaluate its usefulness and operational characteristics in the treatment of animal wastewater. Finally, an optimized real-time control and treatment method was established.

IV. Research Results and Suggestion

1. Results

1) Development of computerized real-time control technology

1.1) Operational characteristics of two stage SBR process and specific features of ORP and pHmV

A pilot scale of sequencing batch reactor (SBR) process was setup for the treatment of animal wastewater, and pollutant removal characteristics and changes of ORP and pHmV curve patterns with various operational modes were studied. ORP and pHmV were responded to the change of pollutants in reactor, and specific features were occurred on the completion of pollutant removal. The observed points such as NBP, NKP and RCMP on ORP-time /or pHmV-time profiles could be used for real-time control of process. The removal patterns of pollutants in each reactor was tracked, operating the system under a condition of 24h/cycle and a sequence of "feeding -> anoxic -> aerobic -> anoxic -> aerobic -> settle -> decanting". In the removals of TOCs and NH_4-N, the role of 2nd SBR was increased with the increases of C and N loading rates. It was revealed that NH_4-N loading rate to achieve complete removal and optimum TOCs loading rate for single SBR was

approximately 65g/m^3.cycle and 50g/m^3.cycle, respectively. To enhance the treatment capacities, it was found that process should be operated in single SBR type rather than two-stage type.

1-2) Development of real-time control strategies using ORP and pHmV, and stability of parameters

A stable real-time control technology was finally developed by inventing the strategies to detect each point on ORP and pHmV curves in series and by analyzing the stabilities of real- time control parameter. The NBP and NKP occurring on ORP and pHmV-time profile could be easily detected by monitoring the moving range (MRG). However, the detection of control points using MRG was a little unstable. For stable detection, it was better to use the specific feature of moving slope change of the MRG value and the parameter values. Under an aerobic condition, NBP was not frequently observed and several false control points were occurred on ORP and DO curves, but the detection of NBP on pHmV curve was always feasible. In a experiment to examine the effects of NOx-N in reactor, detection of real-time control points on ORP-time profile was became impossible as NOx-N accumulated. However, there were no any difficulties in the detection of that point on pHmV-time profile, since the control point was always distinctly occurred on pHmV curve. The occurrence of NBP on ORP curve was affected by the level of organic matter in reactor, but not in pHmV. Therefore, a stable aerobic process control could be achieved by using pHmV-time profile rather than ORP. Meanwhile, it was revealed that ORP is more reliable control parameter than pHmV for the real-time control of

anoxic process.

2) Evaluation of the invented real-time control technologies

The developed real-time control techniques were applied to pilot scale SBR process and the usefulness in the treatment of variable animal wastewater was evaluated. All process control was done with the programmed real-time control strategies and the operation status was diagnosed on web with a remote control method. When only the aerobic process was controlled in real-time mode, an optimum loading rate of TOCs and NH_4-N was approximately 55g/m^3.cycle and 60g/m^3.cycle, respectively. In full real-time control of aerobic/anoxic process using ORP and pHmV (real-time IV, V, VI), complete removal of NH_4-N (100%) was obtained despite of the loading rate variation. This result might prove the usefulness of real-time control technology developed in this research. In full real-time control V and VI, which operational cycle was composed of three subcycles, an optimum loading rate of NH_4-N and TOCs was 200g/m^3.cycle and 100g/m^3.cycle, respectively. Process operation as in real-time VI was resulted in increase of treatment capacity and a very low NOx-N concentration in final effluent. Therefore, It was founded that operation mode as in real-time control VI could enhance pollutants removal efficiencies and capacities, as well as reduce the supplemental carbon source addition. Over 93% of successful real-time control was achieved and an efficient management of treatment process was possible with the remote on-line control technique.

2. Suggestion for application

Since the real-time control technology using ORP and pHmV in simultaneous manner can control the duration of treatment and stage by responding to the changes of pollutant and microorganism activities, an optimum operation of process could be achieved without any hand management. Also, It is expected that poor or over treatment problems, which has being happened continuously, could be prevented with this technology. The computerized real-time and remote control technologies would be a practical means to maintain scattered local treatment facilities properly, since the operation status of many process sited on various local area can be guarded and controlled from a far center as well as complete and stable treatment can be always ensured.

CONTENTS

Chapter 1. Introduction · 17

Section 1. Research Objectives and Background · · · · · · · · · · · · · · · · 17

Section 2. Research Scope and Contents · 19

Chapter 2. Literature Review and Information · · · · · · · · · · · · · · · · 21

Chapter 3. Research Results and Discussion · · · · · · · · · · · · · · · · · 24

Section 1. Development of Real-time Control Technology · · · · · · · · · · · 24

1.1. Materials and Methods · 24

1.1.1. Treatment Process and Control Facility · · · · · · · · · · · · · · · · 24

1.1.2. Experimental Design and Process Operation · · · · · · · · · · · · · 29

1.1.3. Analysis Methods · 30

1.2 Results and Discussion · 33

1.2.1. Characteristics of Pollutants Removals in 2 Stage SBR and Specific Features of ORP and pHmV · 33

1.2.1.1. Specific Feature of ORP and pHmV-time Profile · · · · · · · · · · 33

1.2.1.2. Characteristics of Operation and Pollutant Removal · · · · · · · · · 46
1.2.2. Analysis of Control Parameters and Development of real-time control strategies using ORP and pH · 58
1.2.2.1. Patterns of ORP and pHmV-time Profile in Aerobic/Anoxic Process · 58
1.2.2.2. Detection Strategies of Real-time Control Point · · · · · · · · · · 61
1.2.2.3. Stability of Control Parameters and Factors on ORP and pH · · · 67

Section 2. Evaluation of Real-time Control Technologies and Operation Characteristics · 88
2.1. Materials and Methods · 88
2.1.1. Real-time and remote Control System · · · · · · · · · · · · · · · · 88
2.1.2. Experimental Design and Process Operation · · · · · · · · · · · · · 89
2.1.3. Analysis Methods · 89
2.2. Results and Discussion · 94
2.2.1. Real-time Control of Aerobic Process Using pHmV · · · · · · · · · 94
2.2.1.1. ORP and pHmV-time Profile · 94
2.2.1.2. Operational Characteristics · 99
2.2.2. Real-time Control of Anoxic/Oxic Process Using ORP and pHmV · 106
2.2.2.1. Operational Characteristics in Real-time Control IV · · · · · · · · 106
2.2.2.2. Operational Characteristics in Real-time Control V and VI · · · 116

Chapter 4. Contribution to Other Research Field · · · · · · · · · · · · · 134

Chapter 5. Practical Using and Field Application · · · · · · · · · · · · · 137

Chapter 6. References · 138

목 차

제 1 장. 연구 개발 과제의 개요 · 17

제 1 절. 연구개발의 필요성 및 목적 · 17

1. 연구개발의 필요성 · 17

가. 기술적 측면 · 17

나. 경제· 사회적 측면 · 18

다. 사회· 문화적 측면 · 18

제 2 절. 연구개발의 내용 및 범위 · 19

1. 연구개발 목표와 내용 · 19

가. 1차년도 · 19

나. 2차년도 · 19

다. 3차년도 · 20

제 2 장. 국내외 기술 개발 현황 · 21

제 3 장. 연구개발수행 내용 및 결과 · · · · · · · · · · · · · · · · · · · 24

제 1 절. 실시간 컴퓨터 자동제어 방법 개발 · · · · · · · · · · · · · · · · · 24

1. 재료 및 방법 · 24

가. 처리시스템 및 컴퓨터 제어 장치 · · · · · · · · · · · · · · · · · · · 24

나. 실험설계 및 시스템 운전 방법 · · · · · · · · · · · · · · · · · · · 29

다. 분석항목 및 방법 · 30

2. 결과 및 고찰 · 33

가. 2단계 SBR에서의 오염물질 제거 특성과 운전모드별 ORP, pH특성33

1) Operation 별 ORP/pHmV-time 변화 · · · · · · · · · · · · · · · · 33

가) Operation I, II에서의 ORP/pHmV-time 변화 · · · · · · · · · · 33

나) Operation III에서의 ORP/pHmV-time 변화 · · · · · · · · · · · 37

다) Operation IV, V(Run I, II, III)에서의 ORP/pHmV-time 변화 · 41

2) 운전모드별 오염물질 제거 및 운전 특성 · · · · · · · · · · · · · · 46

가) Operation III에서의 운전 특성 · · · · · · · · · · · · · · · · · 46

나) Operation V에서의 오염물질 제거 및 운전 특성 · · · · · · · · · 51

나. ORP와 pH를 이용한 각 인자의 자동제어 방법개발과 제어 인자 분석 · 58

1) 호기/무산소 조건에서의 ORP와 pHmV 변화 pattern · · · · · · · 58

2) 제어 시점 인식 방법 · 61

3) ORP와 pH에 대한 영향요인 분석 및 자동제어 인자로서의 pH와 ORP의 안정성 · 67

가) 호기조건의 자동제어 인자로서의 ORP와 pH의 안정 ····67
(1) 포기조건의 영향과 제어인자의 안정성 ····67
(2) NOx-N의 영향과 제어인자의 안정성 ····75
(3) 유기물 영향 분석 및 제어인자의 안정성 ····79
나) 무산소 조건의 자동 제어인자로서의 pH-mV와 ORP의 안정성과 영향요인 ····83
(1) pH와 ORP의 안정성 ····83
(2) C/N ratio의 영향 ····83

제 2 절. 실시간 컴퓨터 자동제어 기술 평가 및 운전 특성 ····88
1. 재료 및 방법 ····88
가. 처리시스템의 컴퓨터 자동제어 및 원거리 제어 ····88
나. 실험설계 및 운전방법 ····89
다. 분석방법 ····89
2. 결과 및 고찰 ····94
가. pHmV를 이용한 호기공정의 자동제어 ····94
1) ORP와 pHmV-time profile ····94
2) 운전 특성 ····99
나. ORP와 pH를 병용 이용한 무산소/호기 공정의 자동제어 ····106
1) Real-time IV에서의 운전특성 ····106
가) ORP와 pHmV-time profile ····106
나) 운전 특성 ····109
2) Real-time V, VI에서의 운전특성 ····116
가) ORP와 pHmV-time profile ····116
나) 운전 특성 ····122

제 4 장. 목표달성도 및 관련분야에의 기여도 ·····134

제 5 장. 연구 개발결과의 활용계획 ·····137

제 6 장. 참 고 문 헌 ·····138

제 1 장. 연구개발과제의 개요

제 1 절. 연구개발의 필요성 및 목적

1. 연구개발의 필요성

가. 기술적 측면

최근 가축 분뇨 및 오·폐수처리 문제가 축산업 발전에 가장 중요한 현안으로 대두됨으로서 국가 혹은 축산농가 단위에서 환경문제 해결이 무엇보다도 시급한 과제로 인식되고 있다. 축산폐수의 배출에 의한 환경문제를 해결하려는 목적으로 1991년부터 정부의 주도하에 축산폐수 공공처리 시설들이 설립되어 운영되고 있으나 발생하는 폐수를 효율적으로 처리하지 못하는 문제점이 있어 막대한 국가 예산이 추가적으로 투자되고 있는 실정으로 기존 설비되어 운영되고 있는 축산폐수 처리시스템에 적

용하여 처리효율을 높일 수 있는 기술개발이 절실한 상태이다. 또한, 축산폐수에 대한 규제가 강화되면서 소· 중규모 축산농가들이 서둘러 현장에 폐수 처리 시설을 갖추고 발생하는 분뇨 및 폐수 처리· 정화에 많은 노력을 기울이고 있으나 처리시스템 설비에 고비용이 투자되고 처리효율도 낮아 큰 어려움을 겪고 있는 실정에서 시설비용이나 토지 면적이 많이 요구되지 않아 경제적이면서도 효율이 매우 높은 기술의 확립이 이루어져야 한다. 이를 위해서는 슬러리 형태로 발생하는 축산 분뇨 및 오·폐수 내에 고농도로 존재하는 유기물질· 질소· 인등의 오염물질을 완전히 제거할 수 있는 처리기술 확립이 필요하며 가변적인 축산폐수의 특성과 처리시스템의 변이에 스스로 반응할 능력이 있어 처리용량을 최적화 할 수 있는 기술의 확립이 요망되고 원 수질 특성변이에 상관없이 일정한 처리수질과 처리효율을 얻을 수 있고 생물학적 오염물질 제거 단계와 폭기등에 소모되는 전기 에너지 비용의 최적화가 가능할 뿐 만 아니라 축산분뇨 및 오·폐수내의 자체 유기물을 이용한 고농도의 질소· 인의 제거로 처리비용을 최소화시킬 수 있는 기술 즉, 시스템 내 에서 처리가 완료되었을 때 처리단계를 다음단계로 전환시키거나 처리수를 배출 하고 새로운 폐수를 유입시킬 능력이 있는 완전자동 실시간 처리기술(Real-time treatment technology) 개발· 확립이 절실하다.

나. 경제· 산업적 측면

축산폐수 실시간 완전자동 처리기술의 개발· 확립으로 외국기술 이용에 따른 외화유출을 억제할 필요가 있다. 또한 축산폐수 공공처리장이나 단위농가에 설비된 처리시스템 등 기존 설치 운전되고 있는 저 효율의 축산폐수 처리시스템에 적용하여 처리효율과 처리용량을 극대화 할 수 있는 기술의 개발로 축산폐수 처리시설의 추가 설립을 최소화 하여 국고낭비를 예방하여야 한다. 이를 위해서는 완전자동 실시간 축산폐수 처리 기술의 확립으로 효율적인 탈질· 인을 위해 사용되는 고비용의 추가 탄소원 구입비용과 처리과정 중에 사용되는 전기 에너지량의 최적화가 이루어져 축산폐수 처리 및 유지비용의 절감을 이끌 수 있어야만하며 기존설비의 재사용을 통해

축산폐수 처리시스템 설비비용 부담 문제가 해소되어 농촌경제 활성화를 유도하고 궁극적으로 이로 인해 축산업 뿐만 아니라 환경산업 분야의 활성화가 이끌어져야 한다.

다. 사회· 문화적 측면

농촌지역의 중요한 소득원인 동시에 중요한 단백질 공급원 역할을 담당해온 축산업에 인해 유발되는 수질 및 토양 오염문제 예방이 필요하고, 대규모 혹은 소규모 농가 현장에 저비용으로 설비하여 축산폐수를 완전 처리함에 따른 농가 부담문제 해소 및 농가 소득 증대로 농촌의 황폐화 방지가 필요하다. 또한, 축산폐수 처리시스템으로부터 방출되는 처리수내 질소· 인· 유기물의 농도가 매우 낮고 고형물의 함량이 매우 낮아 처리수의 농업용수로의 재이용시 환경오염문제를 유발하지 않을 뿐만 아니라 기존의 액비 살포를 위해 사용되는 특정기기의 사용 없이 스프링 쿨러를 이용한 방목지 혹은 목초재배지의 살포나 관개 수로를 이용한 논으로의 관수가 가능한 축산폐수 처리기술 개발로 기존의 액비나 부숙 발효된 유기비료의 과도한 토양 살포로 인해 야기되어 왔던 토양 및 지하수 오염문제 해결이 필요하다. 현재 여러 가지 문제로 방치되거나 혹은 저 효율 문제로 제대로 운전되고 있지 않은 축산폐수 공공처리시설이나 농가 간이 처리시스템의 upgrade를 통한 당국의 사업 관리력 부족이미지 또한 해소하여야 한다.

제 2 절. 연구개발의 내용 및 범위

1. 연구개발 목표와 내용

본 연구는 축산폐수 특성변이에 관계없이 항상 일정한 처리수질과 완전 처리를 얻을 수 있는 처리기술 즉 시스템에서 오염물질이 제거가 완료되었을 때 처리수를 내보내고 새로운 폐수를 유입시키는 실시간 처리기술(Realtime Control Technology)을

개발·확립하기 위해 수행된 연구로서 연차별 연구개발 내용 및 범위는 다음과 같다.

가. 1차년도

○ 실시간 축산분뇨 및 오·폐수 처리 시스템 제작·설치

○ 실시간 처리시스템의 가동 기법 설정

○ 생화학적 변화와 ORP 및 pH-time 변화 유형과의 상관관계 확립

○ 자동제어에 영향을 미치는 요인 규명

○ 완전자동 실시간 처리를 위한 컴퓨터제어 방법 개발

나. 2차년도

◆ 1차 년도에 개발된 컴퓨터 제어 방법을 사용한 "실시간 축산폐수 처리시스템의 최적화 가동조건 파악"

○ 개발된 제어방법의 폐수처리효율 평가

○ 최적화를 위한 오염물질 부하량 범위 규명

○ 처리비용 최소화와 처리효율 및 처리용량 최대화를 위한 operation perameter 파악

다. 3차년도

◆ "최적제어조건의 실시간 축산폐수 처리시스템 확립 및 평가"

○ 최적 제어조건 설정

○ Shock loading 방지를 위한 처리 sequence 및 컴퓨터 제어방법 재 설정 및 보완

○ 최적화된 실시간 처리시스템의 축산폐수 처리효율 평가

○ 폐수처리용량 및 안전성 분석

○ 외부탄소원 절감 방안 마련

제 2 장. 국내외 기술 개발 현황

국내의 이천시·용인시·논산시 등 전국의 많은 곳이나 국외에서 설비·운전되고 있는 다양한 축산폐수 공공처리시설이나 축산농가에 설비된 중·소규모 처리시스템과 기술들을 살펴보면 거의 모든 시설들이 설계에 의존한 기술을 도입·시공·운전하도록 한 것으로서 가변성이 매우 심한 축산폐수의 처리에 적절하지 않으며, 처리시설들의 처리단계나 시간이 디자인에 의존하여 결정되어 운전되기 때문에 유입수의 농도가 설계 농도보다 높았을 때 처리시스템으로부터 처리가 제대로 이루어지지 못하고 대부분의 오염물질들이 그대로 방출되어 심각한 환경오염 문제를 야기할 수 있고, 유입수내 오염물질의 농도가 축산 폐수처리시스템의 설계농도보다 매우 낮았을 시는 시스템 내에서 이미 처리가 완료되었음에도 불구하고 처리가 계속 진행되는 결과 과도한 처리비용의 낭비를 초래하게 되고, 수시로 변화하는 축산폐수나 처리시스템의 활성변화에 스스로 반응하여 자동으로 각 처리단계와 처리시간을 조절할 수 있는 기술이 없어 매우 가변적인 축산폐수 처리 시 경우에 따라서는 처리시설 자체가 전혀 기능을 하지 못하는 원인이 되며, 축산폐수 처리시스템이 많은 처리단계로 분

리되어 각각의 처리조 설비에 많은 비용이 소요될 뿐 아니라 많은 토지 면적을 차지하여 시스템의 설비가 재정적으로 큰 부담이 되는 문제점을 지니고 있다. 따라서 국내외적으로 각 농가나 대규모 축산단지에 최소의 설비비용으로 설치가 가능한 시스템의 확립과 보급이 매우 중요하며, 또한 축산폐수 처리가 완료되었을 때 처리수를 방류하고 새로운 폐수를 유입시킬 수 있는 실시간 완전자동 처리기술이 개발되어 현재까지 축산폐수처리 시 지적되어온 제반의 모든 문제점을 해결함은 물론 축산폐수 처리시스템의 처리용량 및 처리효율과 처리비용의 최적화를 가능케 하는 기술개발도 매우 시급하다. 이를 위해 전 세계적으로 가변성이 심한 축산폐수 특성과 시스템내의 오염물질 변화 및 처리수준에 스스로 반응할 능력이 있어 축산폐수 처리효율이 매우 높고 항상 일정한 처리수질을 나타냄은 물론 처리 완료시점을 스스로 인식해 최종 처리수를 방출하고 새로운 폐수를 유입시키는 완전자동 실시간 축산폐수 처리기술을 개발하려는 연구가 많이 수행되어왔다.

생물학적 처리공정에서 공정 상태를 실시간으로 자동제어하기 위한 인자로서 pH, ORP(oxidation-reduction potential), DO에 관한 연구가 많이 수행되어 왔으며 (Heduit과 Thevenot, 1992; Al-Ghusain 등, 1994; Lo 등, 1994; Hao and Huang, 1996; Yu 등, 1997; Ra 등 1998, 1999, 2000; Chen 등, 2002), 그 결과 최근 들어 ORP와 pH는 생물/화학적 처리공정을 위한 탄력적이고 능률적인 제어인자로서 인식되게 되었다. ORP는 산화/환원의 전기 활성도를 나타내는 것으로 처리시스템내의 화학적 요소, 다양한 생물반응, pH, 온도와 같은 전기적 활성도에 기여하는 모든 인자들을 반영하는(Peddie 등, 1990) 인자로서 하수 처리공정에 있어서 혐기조, 연속회분식 공정, 최적 산소량을 기록하고 제어하는 요소로서 널리 이용되고 있다. ORP를 이용하는 제어방법중의 하나는 ORP의 절대 값에 기초한 공정제어로서 ORP값의 상한치와 하한치를 두어 폭기를 제어하는 방법이며, 또 다른 방법은 시간 경과에 대한 ORP값의 상대적인 변화에 기초하여 제어하는 방법이 있다. 또한 pH도 생물학적 처리공정을 제어하기 위한 중요한 정보를 제공하며, 특히 질산화와 탈질과 같은 생물학적 반응을 확인할 수 있는 인자로 보고 되고 있다. 그러나 처리시설 제어인자로서

용존산소에 대한 연구들은 대부분 DO를 독립된 하나의 제어인자로 이용하기 보다는 단지 모니터링 및 제어를 위한 보조 수단으로 사용하였는데 이는 DO 자체의 특성은 비교적 간단하지만 유입부하의 변동 등에 따른 특성변화와 센서의 잡음 등 때문에 제어가 어려웠기 때문으로 판단된다. 이같이 ORP와 pH에 대한 각각의 연구결과들을 살펴보면 자동제어 인자로서 ORP와 pH 모두 효율적으로 이용될 수 있는 것으로 보고 되고 있으나 처리공정 제어에 있어서 pH, ORP의 안정성과 신뢰성에 대해서는 연구자들마다 상당한 이견을 보이고 있으며 연구조건에 따라 서로 다른 결과를 보고하고 있기도 하다. 예로 몇몇 연구결과를 보면 호기적 단계에 있어서 pH가 감소하는 최저점은 질산화 종료 시점과 잘 일치는 하지만 pH를 자동제어 인자로 사용하기에는 어려움이 있는 반면에 ORP는 pH와는 달리 안정적이고 유용한 호기적 단계의 자동제어 인자라는 보고가 있는가하면 호기적 혹은 무산소 단계에 있어서 ORP 보다는 pH에서 질산화와 탈질 반응이 잘 나타나므로 pH가 효율적인 제어인자로 사용될 수 있고 특히 호기적 단계에서 pH에서는 질산화 반응의 완료시점인 NBP가 잘 나타나지만 ORP에서는 이 시점을 찾기 어렵다는 서로 상반되는 보고도 있다. 대체적으로 이러한 연구결과들은 전체 공정의 제어인자로서 어느 것이 보다 안정적이며 유용한가를 검토하거나, 혹은 하나의 특정제어인자만을 가지고 시험하여 그 유용성을 평가한 것이라 할 수 있다. 그러나 실제로 처리공정은 매우 다양한 cycle이나 처리방법 혹은 다양한 조건의 운전모드를 가지고 운전될 수 있기 때문에 어느 하나의 특정 인자가 전체 공정 제어에 적합한지를 평가하여 기술을 개발하기 보다는 호기 혹은 무산소 등의 각 처리단계별 혹은 운전 조건별로 가장 안정적이고 적합한 제어인자를 확보하여 자동제어 및 운전상태 진단기술을 개발하는 것이 바람직한 것으로 판단된다. 비록 처리공정의 자동제어 인자로서 ORP 및 pH가 유용하다는 것이 밝혀져 왔으나 그 안정성에서 상반된 의견이 표출되는 것은 아직까지도 매우 가변적인 상황 하에서도 처리시스템을 효율적으로 자동 제어할 수 있는 기술 개발이 이루어지지 않았기 때문이라 할 수 있으며 실제로 ORP 및 pH를 이용한 pilot 규모이상에서 시행된 자동제어 기술에 관한 연구 보고는 매우 적은 것이 사실이다.

따라서 본 연구에서 pilot 규모의 시험을 거쳐 개발 · 평가된 ORP와 pH를 병용하는 축산폐수 처리시설의 완전자동화 및 원거리 제어기술은 매우 가변적인 상황에서도 폐수처리공정의 완전자동제어를 가능케 하는 것으로서 매우 의의가 크다 할 수 있으며 본 기술개발을 통해 지금까지 축산폐수 처리에 있어서의 다양한 문제점과 애로사항을 해결할 수 있고 기존의 생화학적 처리방법이나 시설에서 만성적으로 발생하곤 하였던 문제들의 해결이 가능하게 되었다고 생각된다.

제 3 장. 연구개발수행 내용 및 결과

제 1 절. 실시간 컴퓨터 자동제어 방법 개발

1. 재료 및 방법

가. 처리시스템 및 컴퓨터 제어 장치

돈사폐수 처리를 위해 설비된 pilot규모의 SBR(Sequencing Batch Reactor) 시스템은 강원대학교 동물자원과학대학 부속목장에 설비되었다. 시스템의 설비를 위해 목장 내에 사용되지 않고 있는 낡은 사일리지 저장용 콘크리트 구조물을 개/보수·방수처리하고 배관 및 기계장치를 설치하여 내경 기준 가로 394cm, 세로 300cm, 높이 350cm 용적을 지닌 pilot 규모의 돈사폐수 처리시설로 전환하였다.

설비된 처리시스템의 개략적 단면도는 Fig. 3-1-1에 나타나있다. 처리시설의 총

용적은 38.85m^3로 1st SBR과 유출수 저장조(effluent storage tank)의 용적은 각 7.35m^3였으며 주 처리조인 2nd SBR의 용적은 24.15m^3이었다. 유출수 저장조를 제외한 실제 돈사폐수의 처리 역할을 하는 처리조의 규모는 31.5m^3이었다. 처리 중 거품 발생에 의한 carrying over 현상 및 외부로의 넘침을 방지하기 위하여 1st SBR 및 2nd SBR의 유효용적을 각각 6m^3 및 19m^3로 유지하였다.

처리시설로의 공기공급을 위해 구조물 벽면에 aerator (3 h.p)를 설치하고 1st SBR에 2개, 2nd SBR에 4개의 membrane 산기관을 바닥에 설비·배관하여 폭기시 균일한 공기공급 및 교반이 이루어지도록 하였다. 또한, 각 산기관으로 향하는 공기 pipe에 조절 밸브를 설치하여 폭기량의 인위적인 조절이 가능하게 하였다. 혐기적 혹은 무산소 처리시 처리조의 원활한 혼합을 위해 각 처리조 바닥 측벽 면에 수중 교반기를 설치하였으며, 폐수의 유입 및 유출을 위한 펌프을 설비하였다. 각 펌프에 의한 유입 및 유출 물량 및 작동 시간은 각 처리조에 설치된 level switch에 의해 조절되도록 하였다. 설비된 시스템의 관리를 위해 처리시스템 상부에 활동판을 제작·설비하였으며 안전사고 예방 및 빗물, 낙엽 등 다른 물질의 유입을 방지하고자 설비완료 후 외부에 천막을 설비하였다(Fig. 3-1-2, 3, 4.).

설비된 돈사폐수 처리시스템은 목장 돈사로부터 약 20m 정도 떨어진 위치였으며 Fig. 3-1-5의 처리시스템 흐름도와 같이 SBR 시스템으로의 폐수의 유입은 돈사 옆 지하의 돈 분뇨 및 오·폐수 저장/침전조로 부터 펌프(1 h.p)를 이용하여 이루어졌다. 1차 SBR로 유입된 폐수는 생물학적으로 선 처리된 다음 2차 SBR로 이송되어 처리된 후 배출되도록 하였다. 폐수 처리과정 중 발생하는 생물학적 변화를 모니터하고 최종적으로 특이적인 변화를 이용한 실시간 완전자동 폐수처리 기술을 개발하기 위해 2nd SBR에 pH(5733526, Istek) 및 ORP (Ag/AgCl, 003-B, Istek) probe를 설치하고 컴퓨터를 이용하여 1분 간격으로 자동 모니터 및 저장되도록 하였으며, 또한 모든 처리과정 제어를 위한 컴퓨터 제어장치 및 control panel을 제작하여 설비하였다. 모든 처리순서 및 기계작동을 위한 컴퓨터 장치는 처리시설로부터 약 25m 정도 떨어진 사무실에 설치하였다. 컴퓨터에서 발생하는 명령인 미세한 전기적 신호에

따라 기계를 운전하고자 7개의 solid state relay 및 4개의 level switch 차단장치가 control panel에 설비되었다.

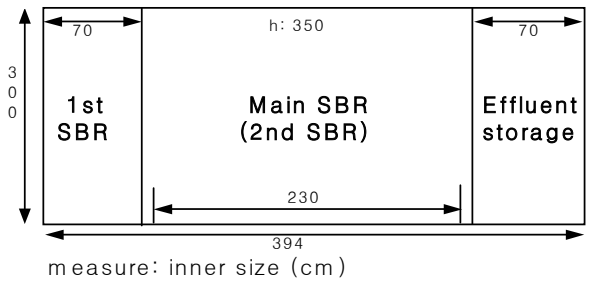


Figure 3-1-1. Schematic layout of the treatment system

Figure 3-1-2. Photographs of construction site

Figure 3-1-3. Photographs of treatment system

Figure 3-1-4. Photographs of treatment system

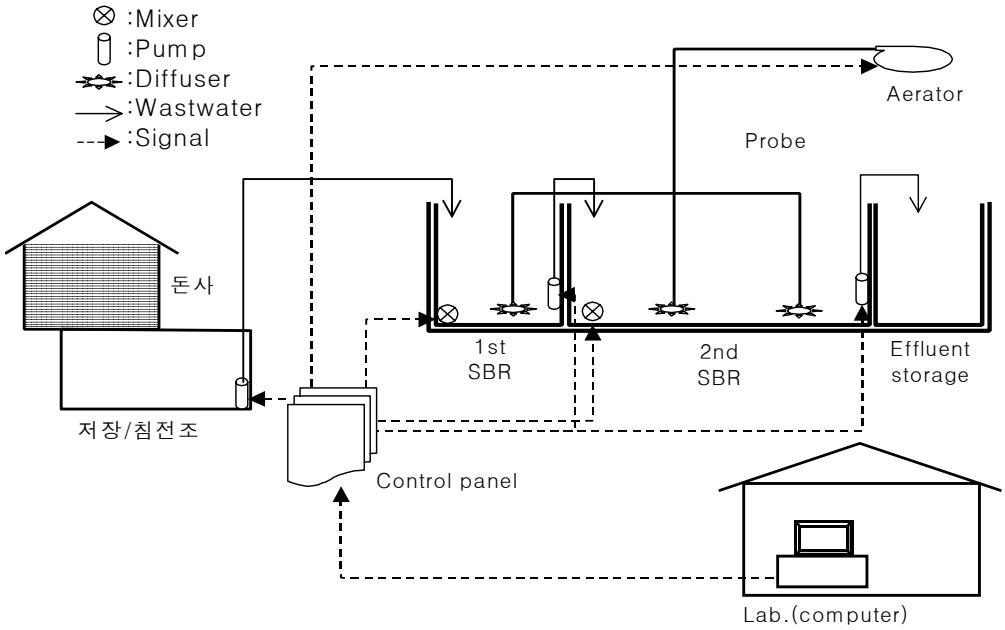


Figure 3-1-5. Schematic of process with on-line computer control system

나. 실험설계 및 시스템 운전 방법

본 연구에서는 고농도 돈사 뇨·폐수를 효율적으로 처리할 수 있는 자동제거 기술

을 개발하기 위하여 설비된 2단계 SBR 시스템을 5개의 운전모드(Operation I-V)로 운전하면서 생물학적 반응 시 일어나는 생·화학적 특성과 ORP, pH-mV의 변화와의 상관관계를 파악하고 각 운전모드에서의 오염물질 제거특성을 파악하고자 하였다.

Table 3-1-1에 나타나 있는 것과 같이 operation I과 II는 16시간을 1cycle로 하여 운전하면서 ORP와 pH-mV를 모니터하고 생물학적 반응이 종료되는 특이시점들을 확인하고자 운전하였다. Operation III, IV 및 V (Run I, Run II, Run III)는 24시간을 1cycle로 하여 운전하면서 ORP와 pH-mV를 이용한 자동제어 방법을 파악하고자 하였다. 또한, 다양한 오염물질 농도와 운전모드 하에서의 오염물질 제거특성을 파악하여 2단계 SBR시스템의 적정 운전방법을 찾고자 하였다. Operation I에서는 primary SBR과 main SBR의 operation mode를 다르게 하였으며 operation II, III, IV, V에서는 두 처리조 모두 동일한 operation mode를 가지고 운전하였다. 또한 각각 operation II와 III, operation IV와 V의 operation sequence는 동일하였으나 각 phase의 시간이 변경되었고, 특히 operation V에서는 다시 유입량을 2, 1, 1.5m^3으로 달리 하여 Run I, II, III으로 나눠 운전하였다. 각 운전에서의 operational mode는 아래와 같다.

◇ Operation I:

° Primary SBR sequence:

Influent loading→ anaerobic→ settle→ effluent discharge(transfer)

° Main SBR sequence:

Influent loading→ anoxic/anaerobic→ aerobic→ anoxic→ settle→discharge

◇ Operation II and III:

° Primary and Main SBR sequences

Influent loading→ anoxic/anaerobic→ aerobic→ anoxic→ settle→ discharge

◇ Operation IV and V(Run I, Run II, Run III):

° Primary and Main SBR sequences

Influent loading→ anoxic/anaerobic→ aerobic→ anoxic→ aerobic→ settle→ discharge

각 운전에서의 수처리 시간과 각 처리조의 working volume은 Table 3-1-2에 나타나있다. 각 operation에서 비교적 HRT를 길게 유지한 것은 특이적인 오염물질 제거가 완료됨에 따라 나타나는 Nitrogen break point (NBP) 및 Nitrate knee point (NKP)를 ORP 및 pH mV curve 상에서 나타나도록 유도하기 위함이었다. Influent loading rate의 변화 시 유입펌프의 level 스위치 높이를 조정하여 일정한 working volume을 유지하였다. Operation I, Ⅱ, Ⅲ, IV의 경우 처리조의 총 유효용적은 $23m^3$를, operation V에서는 $25m^3$를 유지하도록 하였다. 효율적인 탈질을 얻기 위해 추가 탄소원으로 influent 유입시 methanol을 Influent 유입시main SBR로 Table 3-1-3과 같이 첨가하였다.

다. 분석항목 및 방법

채취된 sample의 분석을 위해 TOCs, CODcr, NH_4-N, NO_x-N, PO_4^{3-} MLSS, MLVSS, TS, TVS가 분석되었다. NH_4-N, NO_x-N, PO_4^{3-}의 분석은 자동 수질 분석기(Zellweger)를 사용하여 분석하였으며 총 유기화합물의 분석은 TOC analyzer (TOC-5000A, Shimadzu)를 이용하여 분석하였다. 이외 모든 분석은 standard method (A.P.H.A, 1995)에 준하여 분석하였다.

Table 3-1-1. Operational modes for treatment system

Operation		Sequence						
I	1st reactor	Feeding (0.07hr)	Reaction (14.5hr)				Sludge settling (1.23hr)	Discharge (0.17hr)
		NA	NA(14.5hr)				NA	
		NM	M(14.5hr)				NM	
	2nd reactor	Feeding (0.17hr)	Reaction (14.5hr)				Sludge settling (1.17hr)	Discharge (0.17hr)
		NA	NA(3hr)	A(7.5hr)	NA(4hr)		NA	
		NM	M(3hr)	NM(7.5hr)	M(4hr)		NM	
II	1st reactor & 2nd reactor	Feeding (0.07hr)	Reaction (14.3hr)				Sludge settling (1.3hr)	Discharge (0.17hr)
		NA	NA(4hr)	A(6.83hr)	NA(3.5hr)		NA	
		NM	M(4hr)	NM(6.83hr)	M(3.5hr)		NM	
III	1st reactor & 2nd reactor	Feeding (0.22hr)	Reaction (23hr)				Sludge settling (0.60hr)	Discharge (0.18hr)
		NA	NA(6hr)	A(11hr)	NA(6hr)		NA	
		NM	M(6hr)	NM(11hr)	M(6hr)		NM	
IV	1st reactor & 2nd reactor	Feeding (0.25hr)	Reaction (23hr)				Sludge settling (0.58hr)	Discharge (0.17hr)
		NA	NA(7hr)	A(8hr)	NA(6hr)	A(2hr)	NA	
		NM	M(7hr)	NM(8hr)	M(6hr)	NM(2hr)	NM	
V (Run-I,II,III)	1st reactor & 2nd reactor	Feeding (0.23hr)	Reaction (22hr)				Sludge settling (1.2hr)	Discharge (0.57hr)
		NA	NA(8hr)	A(8hr)	NA(5hr)	A(1hr)	NA	
		NM	M(8hr)	NM(8hr)	M(5hr)	NM(1hr)	NM	

Table 3-1-2. Hydraulic retention time for each operation

Operation		HRT			Reactor working volume		
		Total	1st SBR	2nd SBR	1st SBR	2nd SBR	Total
I		15.3d	3.3d	12d	$5m^3$	$18m^3$	$23m^3$
II		15.3d	3.3d	12d	$5m^3$	$18m^3$	$23m^3$
III		21.6d	6.6d	15d	$5m^3$	$18m^3$	$23m^3$
IV		9.3d	2.86d	6.43d	$5m^3$	$18m^3$	$23m^3$
V	Run I	12.5d	3d	9.5d	$6m^3$	$19m^3$	$25m^3$
	Run II	25d	6d	19d	$6m^3$	$19m^3$	$25m^3$
	Run III	16.7d	4d	12.7d	$6m^3$	$19m^3$	$25m^3$

Table 3-1-3. Supplemental carbon source addition.

Operation Numbers	MtOH addition rate and methods
I	No addition
II	170 ml/m^3 influent at feeding
III	3 L/m^3 influent at feeding
IV	720 ml/m^3 influent at feeding and 720ml at 2nd anoxic phase
V	750 ml/m^3 influent at feeding

2. 결과 및 고찰

가. 2단계 SBR에서의 오염물질 제거 특성과 운전모드별 ORP와 pHmV 변화

특성

1) Operation 별 ORP/pHmV-time 변화

가) Operation I, II에서의 ORP/pHmV-time 변화

Fig. 3-1-6, 3-1-7은 16시간/cycle, "Feed → Anoxic/Anaerobic → Aerobic → Anoxic → Settle → Effluent discharge" 를 기본 운전 모드로 한 operation I, II에서 얻어진 전형적인 ORP, pH curve pattern을 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 ORP 및 pH 변화 패턴은 각 처리 phase에서 특이적으로 변화하는 양상을 나타냈었다. 시스템의 운전기간 중 얻어진 typical ORP 및 pH mV-time profile을 살펴볼 때 1st SBR에서 선 처리된 유입수가 처리조로 유입됨에 따라 ORP curve가 상승하는 결과를 나타냈으며 pH-mV curve는 크게 감소하는 것으로 나타났다. 이는 유입수가 loading 됨에 따른 처리조 내의 물질성상 변화에 의한 것으로서 1차 처리조로부터 다량의 NOx-N을 함유하고있는 산화된 물질이 반응조로 유입됨에 따라 산화환원 전위는 상승하였으며 pH-mV의 변화는 유입수의 pH와 관계가 있을 것으로 판단된다. 참고로 절대 pH unit 값과 그래프에 나타낸 pH-mV 값은 반비례 관계가 있다. Feeding 후 무산소 처리가 진행됨에 따라 ORP 및 pH-mV curve는 서서히 하락하는 결과를 보였는데 이는 탈질이 진행됨에 따라 ORP값이 하락하고 alkalinity 생성에 의한 pH 상승 결과라 할 수 있다. 그 후 호기적 처리과정에서의 급격한 ORP값의 상승은 ORP가 O_2에 매우 민감하게 반응하기 때문이며 아울러 산화가 진행됨에 따라 전위가 높아진 결과이다. pH-mV의 상승 또한 호기적 처리와 더불어 NH_4-N가 NO_x-N로 산화됨에 따라 NO_x-N의 양의 증가하고 alkalinity가 소모됨에 따른 결과이다. 호기적 처리후 무산소 처리에서 나타나는 curve 변화는 O_2의 고갈에 따른 전위의 감소 및 탈질에 의한 결과로 feeding 후 나타나는 변화와 동일한 현상이라 할 수 있다.

그러나 본 operations에서 얻어진 ORP/pHmV-time profile은 실시간 조절 기술개발에의 응용·적용을 위해서는 만족스럽지 못한 것으로서 이는 시스템 운전 동안 완전한 오염물질의 제거가 일어나지 않음에 따라 각 오염물질의 고갈과 함께 특이적으로 발생하는 Nitrogen break point (NBP), Nitrate knee point (NKP)와 같은 실시간 조절 point가

발생하지 않았기 때문이다.

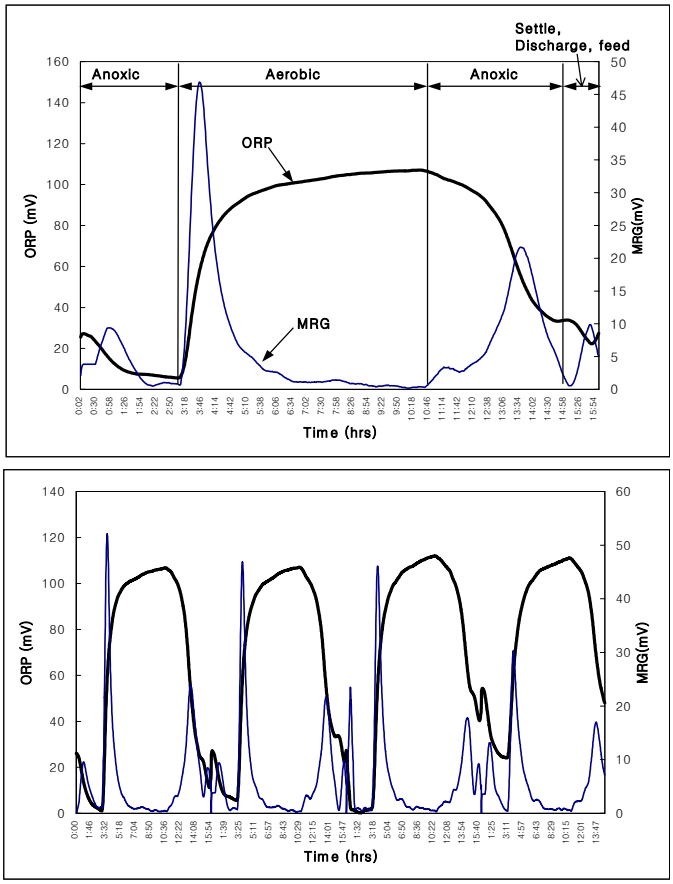


Figure 3-1-6. Typical ORP curve in operation I & II

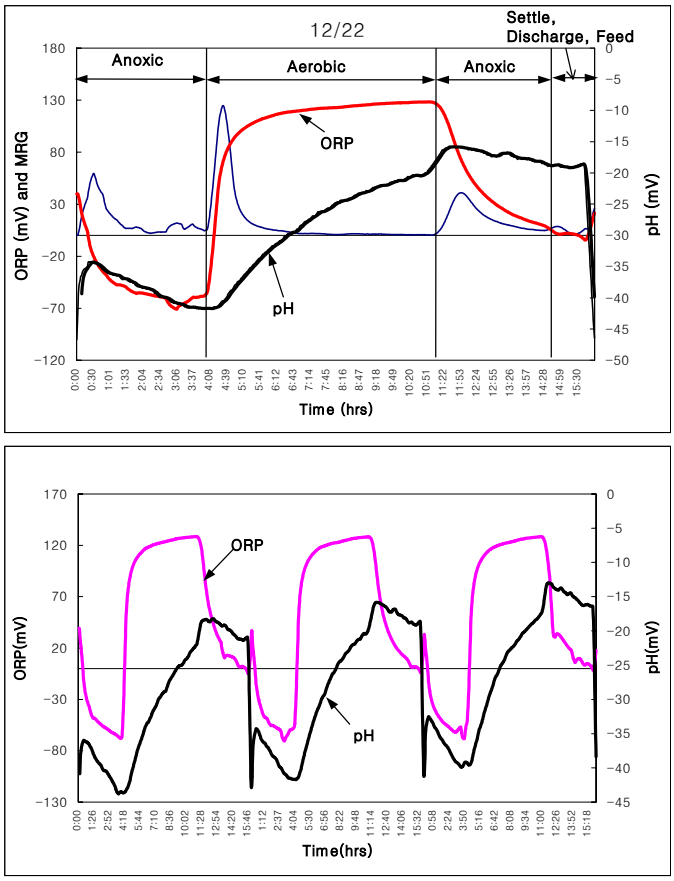


Figure 3-1-7. Typical ORP and pH mV curve in operation I & II

나) Operation III에서의 ORP/pH mV-time 변화

Fig. 3-1-8은 operation III을 가동하면서 지속적으로 얻어진 ideal 한 ORP 및

pH-mV 변화 pattern을 나타낸 것이다. 본 운전에서는 operation I, II 에서와는 달리 실시간 처리기술 개발에 유용하게 이용될 수 있는 ideal한 ORP 및 pH-time profile 변화 패턴이 관찰되었다. Fig. 3-1-8에서 발견되는 것과 같이 Influent와 추가탄소원이 loading된 후 효율적인 탈질이 일어남에 따라 NOx-N이 고갈되는 시점을 나타내는 NKP(nitrate Knee Point)가 ORP와 pH-mV curve상에서 나타났다. 탈질 과정 종료와 더불어 ORP가 급격히 하락하였으며 탈질과정 중 alkalinity의 생성으로 감소추세를 보이던 pH-mV는 이 시점에서부터 서서히 상승하기 시작하였다. 위의 operation I, II 에서의 curve pattern에서와 같이 호기적 처리가 시작됨에 따라 ORP 및 pH-mV curve는 상승하다가 처리조 내의 암모니아성 질소가 완전히 제거되는 시점에서 ORP가 급상승하고 pH-mV의 상승이 중지되는 Nitrogen Break Point (NBP)가 발견되었다. Curve상에서 발생하는 NBP는 처리조 내의 nitrifier의 oxygen uptake rate이 질소의 고갈과 더불어 급격히 감소함에 따라 나타나는 것으로 NBP 발생이후에는 반응물내의 O_2가 증가함에 따라 추가적인 CO_2 stripping이 발생하게 되고 이의 결과로 ORP 및 pH가 증가 (pH-mv는 감소)하게 된다. NBP 발생 후 호기적 처리가 계속됨에 따라 ORP curve가 일정해지는 plateau가 나타났으며 이때의 pH-mV curve는 지속적으로 감소하다가 일정해지는 것으로 나타났다. Plateau가 시작되는 RCMP(residual carbon manipulation point)는 DO 농도가 saturation되기 시작하는 시점으로 처리조내에 biodegradable organic matter가 잔재한다면 유기물만의 지속적인 분해가 일어나는 시점이라 할 수 있다. 호기적 처리 후의 무산소 처리 단계에서의 ORP 및 pH-mV curve를 살펴보면 air-off와 더불어 pH-mV는 증가하다가 일정해지는 경향을 보였는데 이러한 pH-mV curve 변화는 aeration 중지로 CO_2 air-stripping이 정지되고 반대로 CO_2가 재 용해되어 발생하는 현상으로 판단된다. ORP curve가 aeration 정지 후에도 한동안 일정한 경향을 보이다가 하락하는 것은 O_2 고갈과 탈질에 의한 것으로 판단되나 ORP curve가 하락하는 시점에서 pH-mV가 감소하지 않았던 것으로 미루어 활발한 탈질은 이루어지지 않았던 것으로 판단되며 이는 denitrifier가 탈질과정에서 사용할 에너지원이 부족했기 때문으로 여겨진다.

침전과 최종 방류수 배출이 이루어진 후 다량의 NO_x-N을 함유하고 있는 유입수와 추가탄소원이 함께 loading됨에 따라 ORP는 상승하였으며 공급된 추가 탄소원을 이용한 활발한 탈질과정 중에도 일정한 curve를 나타내다가 nitrate가 고갈되는 시점 즉 탈질이 완료되는 시점(NKP)에서 갑작스런 하락을 보였다. 탈질과정 중에서 NO_x-N과 반응하여 나타나는 ORP curve 변화는 서서히 증가하는 추세, 일정한 추세, 서서히 감소하는 추세를 보이게 되며 각 변화가 나타나는 것은 처리조의 산화상태와 NO_x-N의 농도 등에 따라 달라지게된다. 공급된 탄소원을 이용한 활발한 탈질과정 동안 pH-mV curve는 지속적으로 하락하였는데 이는 탈질과정중의 NO_x-N 농도 감소와 함께 alkalinity의 회복에 의한 현상이며 탈질의 완료와 더불어 인의 용출이 시작됨에 따라 pH-mV curve는 다시 서서히 증가하는 것으로 판단된다. Fig. 3-1-9는 시스템의 운전 동안 얻어진 다른 유형의 ORP 변화 pattern을 보여주고 있다. Fig. 3-1-9의 아래 그래프의 경우 1, 2번째 cycle은 NBP와 NKP가 모두 목격되는 ideal한 ORP curve 형상을 나타냈으나 3, 4번째 cycle에서는 탈질의 완료 시점을 나타내는 NKP가 발생하지 않았다. NKP가 발생하지 않은 원인은 anoxic phase의 시간이 짧아 탈질산이 완료되지 못했기 때문이었으며 단편적으로 HRT에 의존하는 수처리 기술의 단점을 보여준다 할 수 있다. 반면 Fig. 3-1-9의 위의 그래프의 경우 두 번째 cycle에서만 모든 point가 나타났으며 1번째 cycle에서는 NBP가 발생하지 않았고 3, 4, 5번째 cycle에서는 NBP, NKP 모두 나타나지 않았다. 두 번째 cycle에서의 NBP 발생은 제시된 MRG의 변화 패턴에서 발견할 수 있다. 이와 같은 NKP의 미발생은 아래 그래프에서와 같이 탈질산 시간 부족 때문이었으나 curve상에서 NBP가 나타나지 않은 것은 불완전한 암모니아성 질소의 제거로 인한 것이 아니라 어떤 영향에 의해 NBP가 masking 되었기 때문인 것으로 처리수 분석결과 밝혀졌다. NBP가 나타나지 않은 cycle에서 배출된 처리수를 분석 해본 결과 NH_4-N의 농도가 전혀 검출되지 않아 처리조 내에서 암모니아성 질소의 제거는 완료되었음을 알 수 있었다.

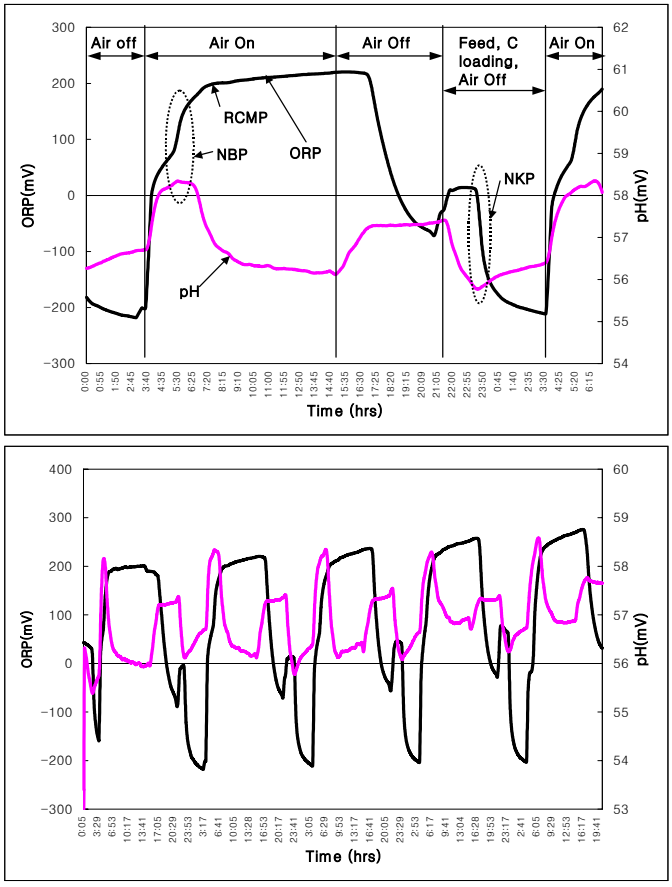


Figure 3-1-8. Typical and ideal ORP/pH curves in operation III

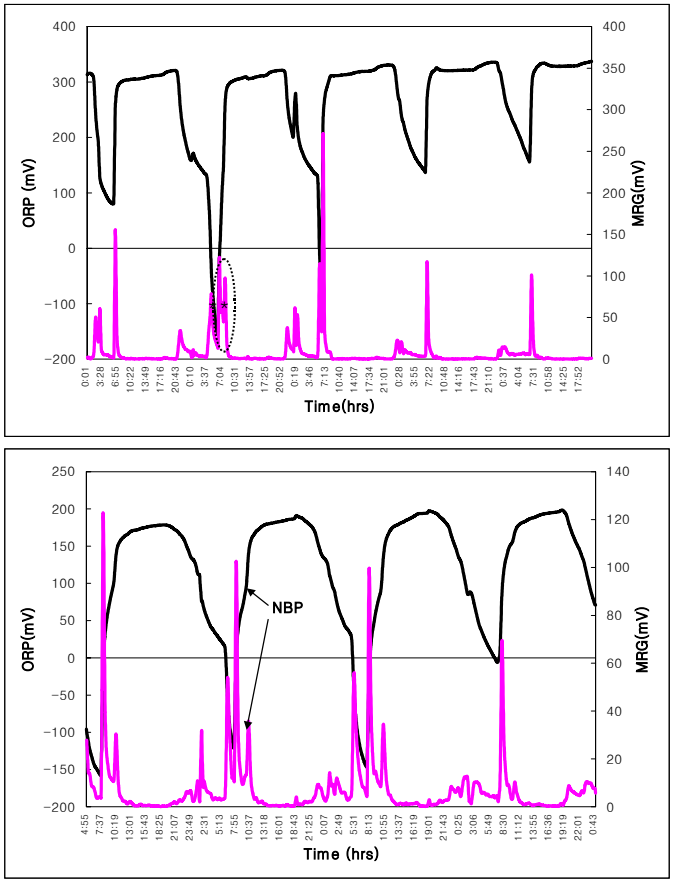


Figure 3-1-9. ORP curves in operation III.

다) Operation IV, V(Run I,II,III)에서의 ORP/pHmV-time 변화

Fig. 3-1-10, 11, 12, 13, 14는 "feed → anoxic/anaerobic → 1st aerobic →

anoxic/anaerobic → 2nd aerobic → settle → final effluent discharge" 순으로 구성된 sequence를 24시간 1cycle로 운전한 operation IV와 V에서의 운전모드와 특이적인 curve pattern를 나타낸 것이다. 본 그림에 나타낸 ORP 및 pH-mV pattern에 관한 분석은 이미 앞 절에 자세히 설명되었다. Fig. 3-1-10의 그래프에 나타난 ORP와 pHmV curve를 볼 때 influent loading과 무산소 처리 후의 1st 호기적 처리 phase에서는 암모니아성 질소의 제거 완료를 의미하는 NBP가 두 curve 상에서 모두 발견되었음을 알 수 있다. 이러한 경우에 있어서는 이미 1st aerobic phase에서 NH_4-N의 완전제거가 이루어져 2nd aerobic phase에서 제거될 수 있는 암모니아성 질소가 고갈되었기 때문에 2nd 호기적 조건에서는 NBP가 나타나지 않게 된다. 이러한 조건에서의 두 curve를 비교할 때 pHmV curve에서는 2nd 호기적 조건의 시작과 함께 pH mV가 바로 하강하여 NH_4-N이 존재하지 않는 것을 즉시 알 수 있었던 반면 ORP curve에서는 이점을 인식하기에 다소 어려움이 있었다. Fig. 3-1-11은 운전 중에 얻어진 ORP curve중 모든 처리단계마다 각 반응의 종료를 의미하는 특이적인 시점이 모두 나타나는 ORP curve를 보여준다. 1st 호기조건하에서 NBP가 발생함을 알 수 있으며 호기적 조건 다음의 무산소 조건(2nd Anoxic)에서도 완전 탈질화를 의미하는 NKP가 발생하였음을 알 수 있다. 또한, Feeding 후(즉 1st SBR 에서의 transfer)주어진 무산소 조건(1st Anoxic)에서도 Feeding에 의해 1st SBR로부터 유입된 NOx-N의 완전탈질화가 이루어졌음을 알 수 있다.

Fig. 3-1-12는 Fig. 3-1-11과 달리 Feeding 후 무산소 조건(1st Anoxic)과 1st 호기적 조건 내에서는 NKP와 NBP가 발생하였으나 2nd 무산소조건 에서는 NKP가 발생하지 않은 경우의 curve를 나타낸 것이다. Fig. 3-1-13은 또다른 특이적인 curve를 나타낸 것이다. pH mV curve를 볼 때 1st 호기조건에서 완전 질산화가 이루어져 NBP가 발생하였음을 볼 수 있다. 그러나, ORP curve 상에서는 NBP로 인식 될 수 있는 2개의 굴곡점이 발생하였으며 2번째 굴곡점이 NBP와 일치함을 알 수 있다. 본 그래프에서의 결과를 통하여 판단할 때 호기적 처리 중 ORP에서 비 특이적인 굴곡점이 발생하는 조건에서도 pHmV curve 에서는 안정적인 NBP의 발현이 가능함을

알 수 있다.

Fig. 3-1-14는 호기적 처리시간 동안 질산화 반응이 완료되지 못한 경우의 ORP와 pHmV curve를 나타낸 것이다. pHmV curve를 가지고 판단할 때 호기적 조건 중 NBP가 발생하지 않았음을 분명하게 알 수 있다. 그러나, ORP curve 에서는 Fig. 3-1-13에서와 같이 NBP로 잘못 인식될 수 있는 비 특이적인 굴곡점이 발생하였다. 따라서, 본 결과들을 가지고 판단할 때 호기적 조건에서의 NBP인식은 ORP보다는 pHmV가 안정적이라고 잠정적 결론을 얻게 되었다.

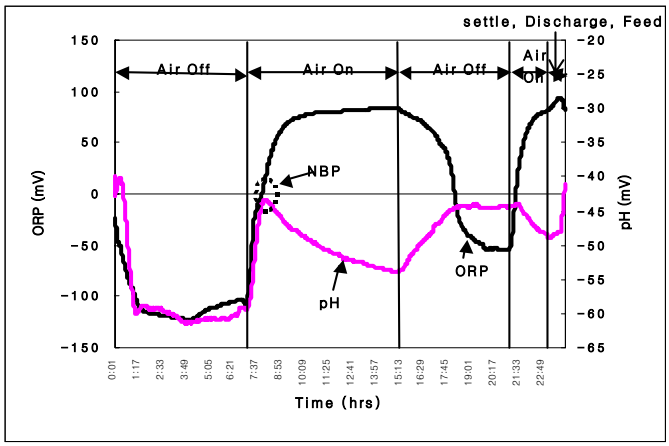


Figure 3-1-10. Operational mode and ORP/pH curves

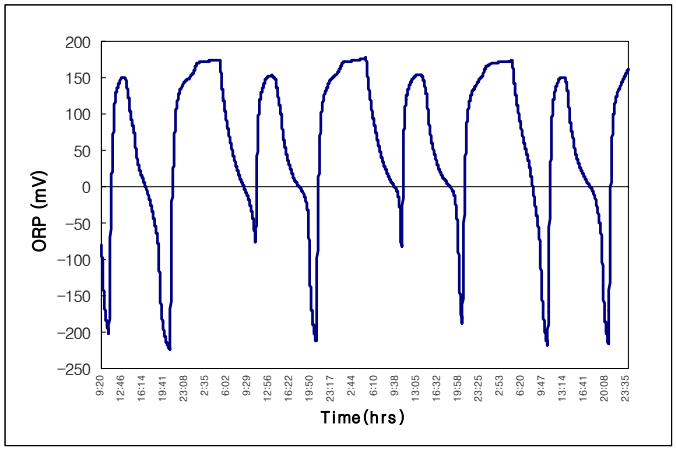


Figure 3-1-11. Typical ORP curves in operation IV & V

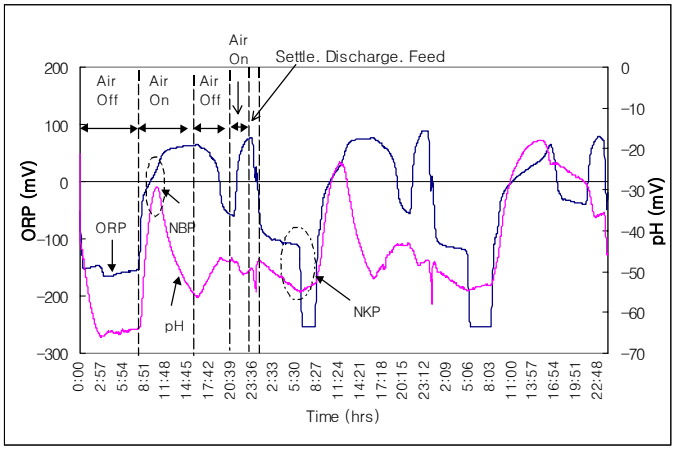


Figure 3-1-12. Specific ORP/pH-mV profile

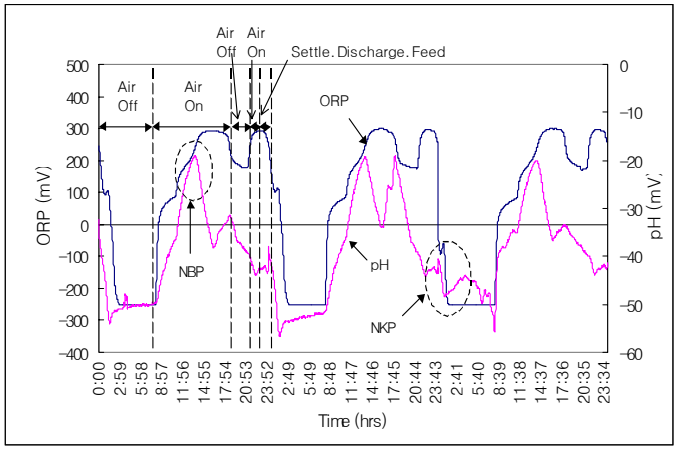


Figure 3-1-13. Specific ORP/pH-mV profile

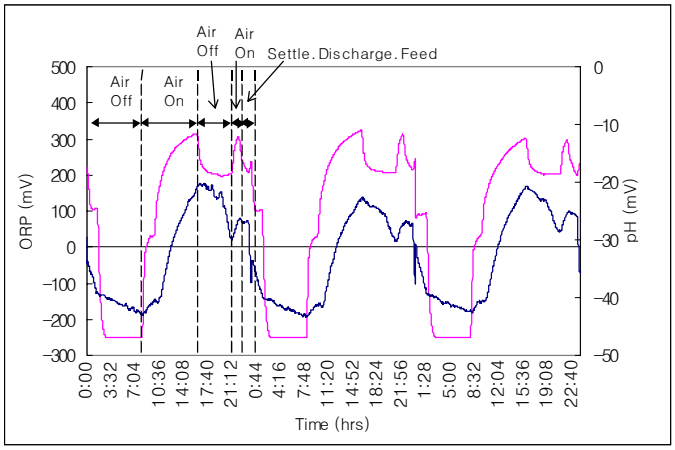


Figure 3-1-14. Specific ORP/pH-mV profile

2) 운전모드별 오염물질 제거 및 운전 특성

가) Operation III에서의 운전특성

Table 3-1-5는 operation III의 유입수 성상과 제거 효율을 보여주는 것이다. 유입수의 평균 TOCs과 NH_4-N의 농도는 458.6mg/L와 358.3mg/L로 C/N(TOCs/NH_4-N) 비가 약 0.33수준으로 안정적인 질소제거를 위해서는 탄소원의 부족한 것으로 나타났다. 3L/m^3 의 메탄올(TOCs 농도: 315.6g/L)을 첨가함에 따라 얻어진 초기 C/N ratio는 2.98 수준이었다. 또한, TVS/TS ratio가 0.32 수준으로 고형물중 유기물의 함량이 적었던 것으로 나타났으며, VSS/SS ratio는 0.61수준으로 나타나 부유물질 중 유기물이 차지하는 비율이 많은 것으로 나타났다. 또한, SS/TS ratio가 0.08로 나타나 대부분의 오염물질은 용존성으로 이루어 진 것으로 나타났다.

Operation III에서의 유기화합물 제거효율은 약 66.9%수준으로 비교적 낮았으나 암모니아성 질소의 제거효율은 99.9%로 매우 높은 효율을 보였다. 각 처리조 에서의 오염물질 제거특성을 나타낸 Fig. 3-1-15를 살펴볼 때 평균 수 처리시간 4.7일 조건에서 운전된 1st SBR에서 TOCs와 $CODcr_s$의 대부분이 제거되고, 1st SBR에 비해 상당히 긴 처리시간(17일)이 주어진 2nd SBR에서는 제거가 미미하였던 것으로 보아, 얻어진 낮은 유기화합물의 제거효율은 유입수의 성상 특성에 기인한 것으로 유입수 $CODcr_s$나 TOCs의 상당 부분이 미생물이 분해하기 어려운 난분해성 물질로 구성되었던 것으로 판단된다. 또한 2nd SBR에서의 낮은 유기화합물 제거는 평균 22g/m^3.d($CODcr_s$ 기준)로 낮은 부하량이 유지됨에 따라 1st SBR에서 loading 된 대부분의 분해성 유기물이 제거되었기 때문이었던 것으로 여겨진다.

암모니아성 질소의 경우에는 거의 100%의 제거율을 보였는데, 이러한 높은 제거효율은 특이적인 오염물질의 제거가 완료되는 시점을 표출하는 ORP와 pH curve를 모니터하기 위해 긴 수처리 시간이 적용된 결과, 평균 NH_4-N의 부하량이 17g/m^3.d로 낮았기 때문으로 판단된다. 유출수내 평균 NOx-N의 농도는 15mg/L로 비교적 좋은 탈질산화 과정이 유지되었으며 PO_4^{3-}의 제거효율은 약 43% 수준, 고형물의 제거효율은 34~52% 수준을 나타내었다. Fig. 3-1-15는 각 SBR의 역할을 나타낸 것으로 유기물 제거에 있어서는 1st SBR에서 대부분의 유기물 제거가 이루어 졌으며, 암모니아는 2nd SBR에서 많은 제거가 일어나는 것으로 나타났다.

Fig. 3-1-16은 operation III에서의 유기물 부하량에 따른 제거 효율을 나타내는 것이다. 2 stage SBR 에서의 유기물 제거효율은 부하량이 증가할 수 록 상승하였으며 유출수내 TOCs의 농도는 loading rate에 상관없이 40mg/L수준로 안정적이고 일정하였다. 그러나, 각각의 SBR을 기준으로 부하량별 처리효율 변화를 알아본 결과 (Fig. 3-1-17), TOCs 부하량이 증가함에 따라 제거효율은 좋아졌으나, TOCs loading rate이 15g/m^3 에서 40g/m^3 로 증가함에 따라 유출수의 농도가 60mg/L까지 상승하는 것으로 나타났다.

Fig. 3-1-18은 2단계 SBR의 NH_4-N loading rate 별 제거효율변화를 나타낸 것이다. 운전 중 얻어진 부하량 범위수준에서 (20g/m^3.d) NH_4-N의 제거효율은 거의 100%의 제거 효율을 보였다. 각 SBR에서의 NH_4-N 제거효율을 비교한 결과(Fig. 3-1-19) 단일 SBR 기준 시 부하량이 50g/m^3.d 이상에서는 제거효율이 떨어지는 것을 볼 수 있었으며, 유출수내 NOx-N의 농도 역시 매우 가변적인 것을 볼 수 있었다.

Table 5. Removal efficiencies in operation mode III.

Parameter (mg/L)	Influent			Effluent			Removal (%)
	Means	Min. - Max.	St. Dev.	Means	Min. - Max.	St. Dev.	
TOC	119.4	61.0 - 204.0	39.8	39.6	26.0 - 53.0	6.8	66.8
COD_{cr}	458.6	232.0 - 776.0	160.9	158.3	35.0 - 342.0	78.2	65.5
NH_4-N	358.3	239.2 - 429.2	44.0	0.4	0.0 - 8.4	1.4	99.9
NO_x-N	0.1	0.0 - 1.1	0.2	15.0	0.0 - 78.7	14.1	-
PO_4^{3-}	23.2	4.4 - 38.9	9.1	13.3	7.7 - 21.8	4.2	42.7
TS(g/L)	1.2363	0.84 - 5.34	0.95	0.81	0.11 - 1.14	0.17	34.1
TVS(g/L)	0.3931	0.23 - 1.62	0.29	0.23	0.06 - 0.40	0.07	42.2
SS(g/L)	0.1038	0.03 - 0.49	0.09	0.06	0.00 - 0.31	0.07	41.1
VSS(g/L)	0.0628	0.026- 0.20	0.04	0.03	0.00 - 0.10	0.04	52.4

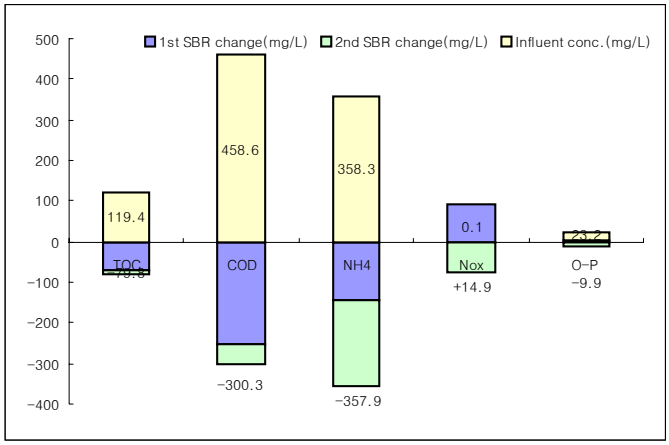


Figure 3-1-15. Pollutant removal in operation III.

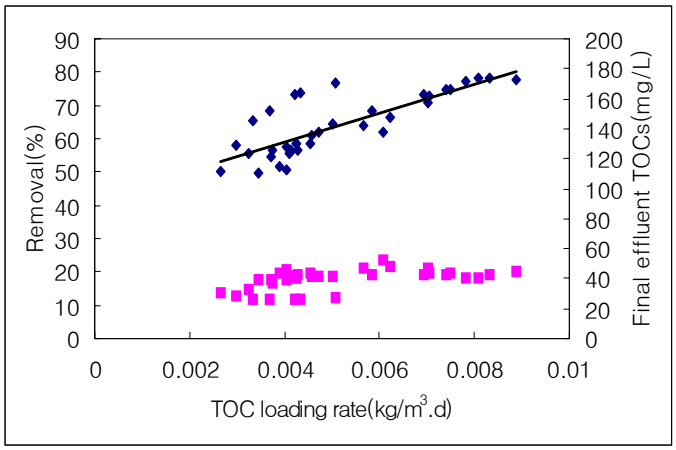


Figure 3-1-16. Removal efficiency vs TOCs loading rate to 2 stage SBR

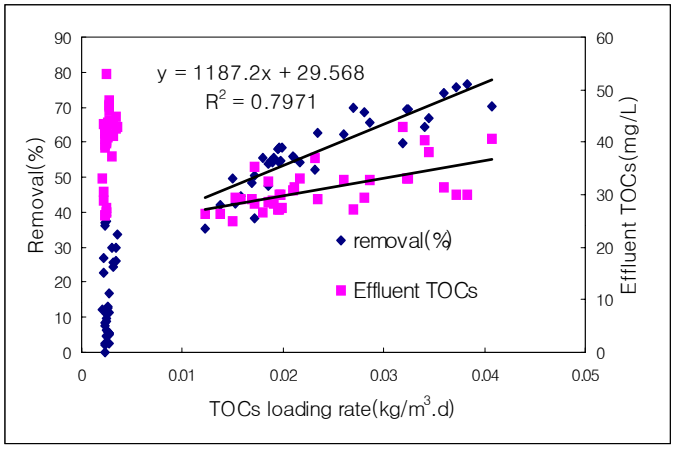


Figure 3-1-17. Removal efficiency vs TOCs loading rate to each SBR

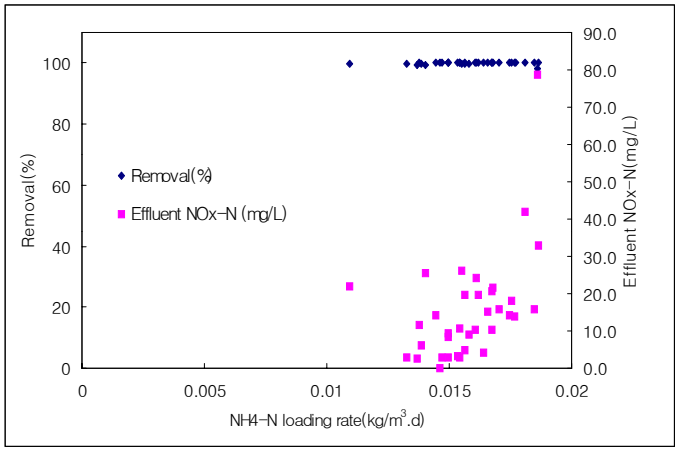


Figure 3-1-18. Removal efficiency of nitrogen vs loading rate to 2 stage SBR

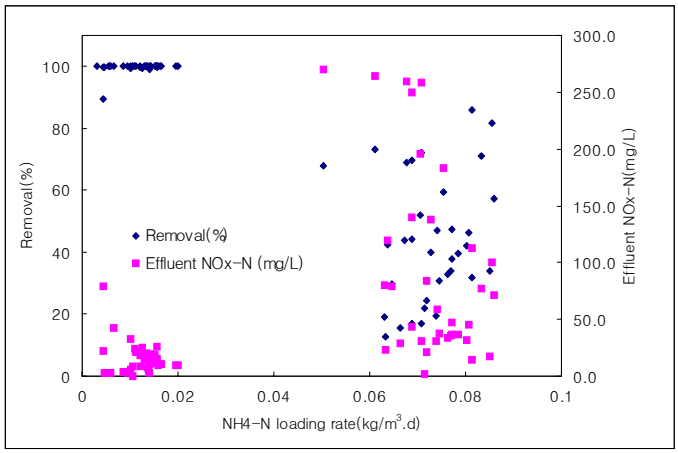


Figure 3-1-19. Removal efficiency of nitrigen vs loading rate to each SBR

나) Operation V에서의 오염물질 제거 및 운전특성

Table 3-1-6은 operation V에서 사용된 총 유입수의 성상을 나타낸 것이며 Table 3-1-7, 3-1-8, 3-1-9는 각 운전별 돈사 폐수 성상과 평균 처리효율을 나타낸 것이다. Operation V에서의 유입성상으로 평균 TOCs 농도는 402.9mg/L, NH_4-N의 농도는 782.4mg/L로 C/N ratio는 0.51였으며 메탄올이 750mL/m^3주입된 후 TOCs/NH_4-N ratio는 0.82수준이었다.

각 Run에서 2단계 SBR로의 평균 TOCs의 loading rate은 Run I, II, III 각각 40 g/m^3.d, 17g/m^3.d, 20g/m^3.d 이었다. 서로 부하량 변화가 다른 각 Run에서의 TOCs의 평균 처리효율은 각각 83.4%, 75.2%, 66%로서 부하량이 가장 높았던 Run I에서 가장 높았다. 반면, 각 Run 에서의 NH_4-N 평균 부하량과 처리효율은 각각 65g/m^3.d: 85%, 37g/m^3.d: 100%, 47g/m^3.d: 99%이었으며 유출수내 평균 NOx-N농도는 각각 18mg/L, 2mg/L, 8mg/L로 총 질소 제거는 Run II에서 가장 효율적이었다

C, N 제거에 있어서 각 Reactor의 제거 역할을 분석한 결과 TOCs 제거의 경우에는 1st SBR의 역할이 컸던 것으로 타나났으나 NH_4-N의 경우에는 1st SBR에 비해 2nd SBR의 역할이 매우 큰 것으로 나타났으며 loading rate이 증가 할 수록 1st SBR의 제거 역할은 점차 감소하고 상대적으로 2nd SBR 역할이 증가하는 것으로 나타났다(Fig.3-1-20, 3-1-21).

Fig. 3-1-22은 2단계 SBR로의 총 TOCs 부하량 별 제거효율을 나타낸 것이다. 운전된 loading rate 범위 내에서 부하량이 증가할수록 제거 효율이 증가하는 경향을 보였으나, 각각의 SBR로의 부하량 별 처리효율 변화를 분석한 (Fig. 3-1-23) 결과 단일 SBR 기준으로 약 50g/m^3 이상 증가함에 따라 처리효율은 비교적 일정한 반면 처리수질이 악화되기 시작하는 것으로 나타나 단일 SBR의 운전을 위한 적정 TOCs loading rate은 약 50g TOCs/m^3.d 내외인 것으로 판단된다. 그러나 TOCs의 적정 loading rate은 돈사폐수의 특성에 따라 차이가 클 것으로 사료되는데 이는 폐수의 저장 기간 및 관리 방법, 돼지 연령, 사료 종류 등에 따라 난분해성 유기물의 함량이 상이하기 때문이다. 따라서 돈사 폐수 처리를 위한 적정 loading rate 범위는 TOCs 기준보다는 NH_4-N 혹은 T-N을 기준으로 하는 것이 바람직할 것으로 판단되는데

이는 돈사 폐수 내 난분해성 유기물 함량의 상이함 이외에도 스크린 된 돈사 폐수의 경우 NH_4-N의 농도가 매우 높아 C/N 비율이 낮은 이유로 효율적 생물학적 처리를 위해서는 추가 탄소원의 보충이 반드시 필요하기 때문이기도 하다.

Fig. 3-1-24는 2단계 SBR로의 NH_4-N loading rate 별 처리효율변화를 파악한 것으로서 약 65g/m^3 이상에서 처리효율이 감소하는 것으로 나타남에 따라 완전 NH_4-N의 제거 효율을 얻기 위한 2단계 SBR의 적정 NH_4-N loading rate은 약 65g NH_4-N/m^3 이하인 것으로 분석된다. 3-1-25는 1st 와 2nd SBR로의 각각의 loading rate 별 처리효율과 처리수내 NO_x-N 농도를 나타낸 것이다. 단일 SBR을 기준으로 적정 NH_4-N 부하량의 범위를 파악한 결과 2단계 SBR에서와 비슷한 수준인 것으로 밝혀져 1st SBR과 2nd SBR을 연계하여 전체 단위 용적에 따라 적정 부하량을 유지하는 것보다는 2개의 SBR 조를 각각 따로 운전하면서 각 처리조별로 적정 부하량을 유지하는 것이 전체 처리 용량을 증가시키는 것으로 분석되었다.

Table 3-1-6. Characteristic of wastewater in operation V.

Parameter (mg/L)	Influent			
	Means	Min	Max	St.Dev
TOC	402.88	275.90	689.70	110.56
NH_4-N	782.37	570.52	1138.50	119.65
NOx-N	0.67	0.00	19.74	2.65
PO_4^{3-}	35.36	7.63	66.03	15.39
TS(g/L)	2.35	1.63	3.96	0.45
TVS(g/L)	0.93	0.43	2.29	0.31
SS(g/L)	0.27	0.08	0.52	0.09
VSS(g/L)	0.28	0.18	0.52	0.07

Table 3-1-7. Removal efficiencies in operation V-Run I

Parameter (mg/L)	Influent				Effluent				Removal (%)
	Means	Min	Max	St.Dev	Means	Min	Max	St.Dev	
TOC	497.44	279.60	689.7	127.10	82.81	60.00	149.70	26.08	83.4
NH_4-N	825.37	607.75	1138.5	129.68	128.36	0.00	353.31	114.62	84.4
NOx-N	0.44	0.00	1.18	0.44	18.26	0.52	103.27	21.69	
PO_4^{3-}	32.09	17.35	54.89	10.45	16.52	10.59	21.70	3.18	48.5
TS(g/L)	2.53	1.90	2.88	0.28	1.93	1.65	2.62	0.31	23.8
TVS(g/L)	1.01	0.70	1.29	0.17	0.49	0.27	0.95	0.22	51.1
SS(g/L)	0.34	0.18	0.49	0.08	0.15	0.01	0.59	0.17	55.4
VSS(g/L)	0.34	0.21	0.47	0.07	0.18	0.07	0.52	0.13	48.5

Table 3-1-8. Removal efficiencies in operation V-Run II

Parameter (mg/L)	Influent Means	Min	Max	St.Dev	Effluent Means	Min	Max	St.Dev	Removal (%)
TOC	380.72	238.00	518.00	71.17	94.30	72.10	132.70	13.45	75.2
NH_4-N	830.96	702.35	963.02	77.54	0.00	0.00	0.00	0.00	100.0
NOx-N	0.40	0.00	3.66	1.09	2.08	0.00	9.39	2.81	
PO_4^{3-}	51.39	25.80	66.03	9.75	21.03	16.88	26.76	26.76	59.1
TS(g/L)	2.41	1.95	2.79	0.24	1.99	1.61	3.85	0.43	17.3
TVS(g/L)	0.99	0.67	1.29	0.16	0.57	0.28	1.83	0.30	42.7
SS(g/L)	0.23	0.14	0.44	0.08	0.38	0.18	2.75	0.52	-61.9
VSS(g/L)	0.25	0.18	0.38	0.05	0.27	0.17	0.39	0.06	-7.4

Table 3-1-9. Removal efficiencies in operation V-Run III

Parameter (mg/L)	Influent Means	Min	Max	St.Dev	Effluent (2nd.) Means	Min	Max	St.Dev	Removal (%)
TOC	326.95	284.20	376.10	22.75	111.24	83.90	161.90	20.60	66.0
NH_4-N	726.90	570.52	986.51	105.61	6.16	0.00	30.86	10.63	99.2
NOx-N	0.85	0.00	19.74	3.94	7.93	0.33	14.03	3.28	
PO_4^{3-}	29.17	7.63	59.95	14.52	26.18	14.88	38.19	6.81	10.3
TS(g/L)	1.94	1.63	2.25	0.20	1.71	1.71	2.27	0.20	11.9
TVS(g/L)	0.68	0.43	0.87	0.11	0.51	0.51	0.84	0.13	25.7
SS(g/L)	0.22	0.08	0.31	0.05	0.33	0.33	0.48	0.13	-48.5
VSS(g/L)	0.24	0.19	0.29	0.03	0.29	0.29	0.46	0.09	-19.4

.

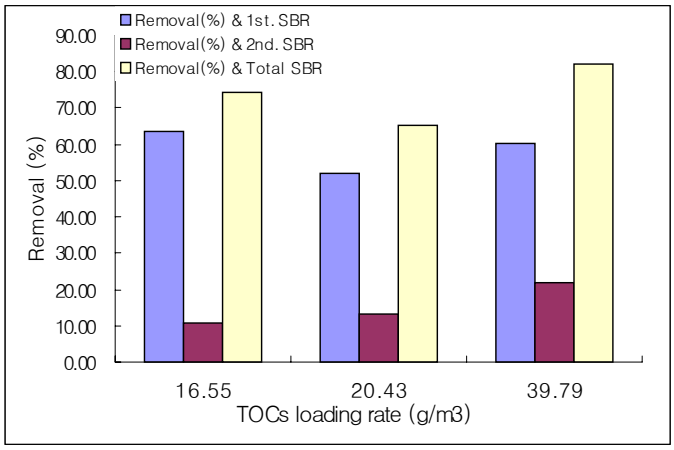


Figure 3-1-20. Removal characteristics of TOCs

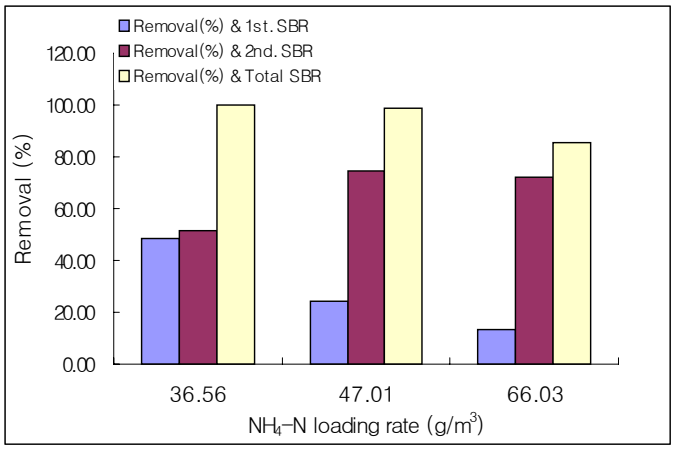


Figure 3-2-21. Removal characteristics of nitrogen

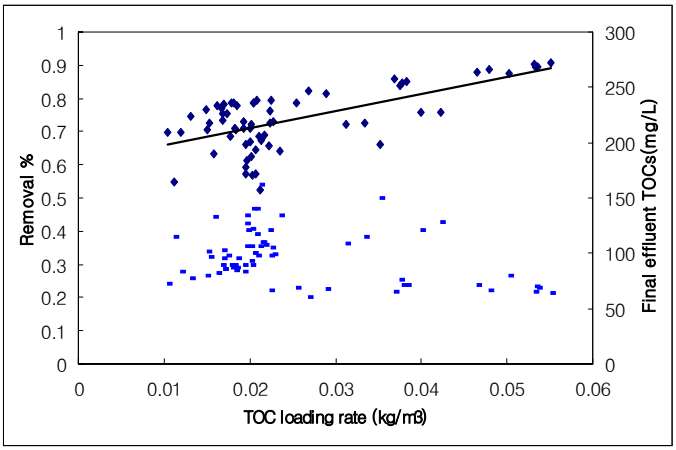


Figure 3-1-22. Removal Efficiency vs TOCs loading rate to 2 stage SBR

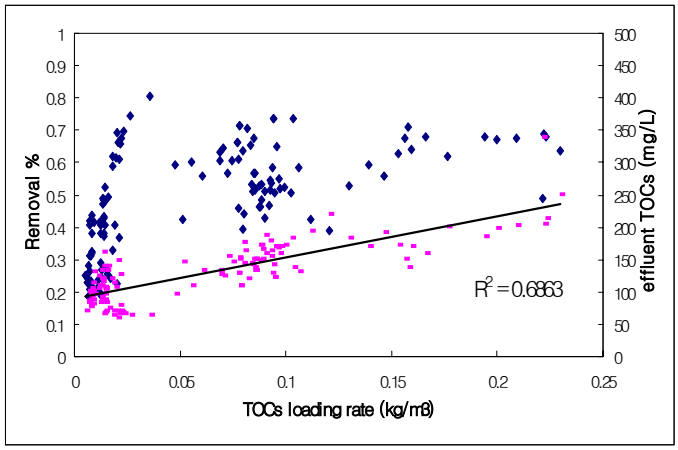


Figure 3-1-23. Removal Efficiency vs TOCs loading rate to each SBR

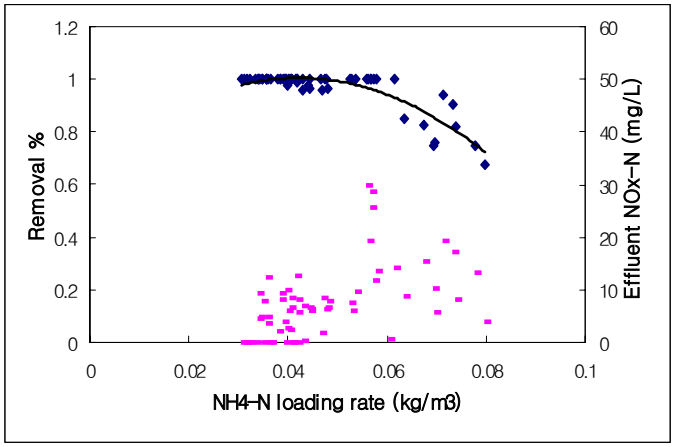


Figure 3-1-24. Removal Efficiency of nitrogen vs loading rate to 2 stage SBR

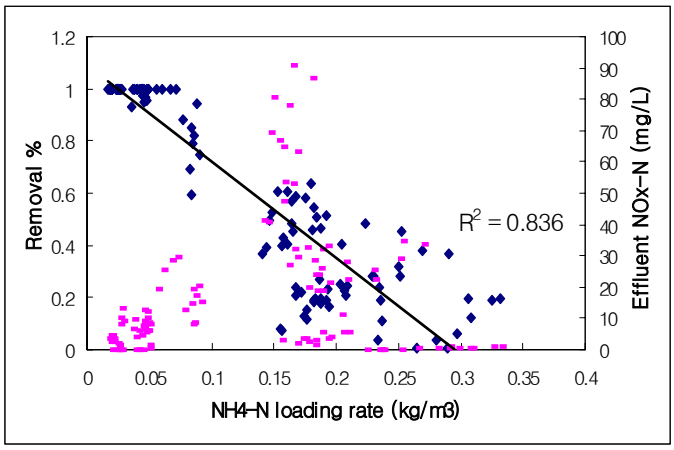


Figure 3-1-25. Removal Efficiency of nitrogen vs loading rate to each SBR

나. ORP와 pH를 이용한 각 인자의 자동제어 방법개발과 제어 인자의 분석

본 시험에서는 처리시스템 가동 중 모니터된 ORP 및 pH-mV의 변화 패턴을 이용한 실시간 컴퓨터 자동제어 방법 개발을 위한 다양한 분석이 행하여졌다. ORP 및 pH-mV curve상에서 특이적으로 발생하는 각 point를 효율적으로 detection할 수 있는 방법 개발과 ORP 및 pH-mV curve 에 영향을 미치는 요인을 분석하여 최종적으로 안정적인 컴퓨터 제어 방법을 개발하고자 하였다.

1) 호기/무산소 조건에서의 ORP와 pHmV 변화 pattern

Fig. 3-1-26은 시스템 운전동안 2nd SBR에서 모니터된 ORP와 pH-mV 변화 curve중 오염물질의 특이적인 변화 시점을 나타내는 profile이다. 호기적 처리단계의 종료 후 탈질을 위한 anoxic 상태에서의 ORP와 pH-mV curve를 살펴보면, 공기공급의 중단과 더불어 pH-mV는 증가하다가 일정해지는데 이러한 pH-mV변화는 포기중지로 CO_2 air-stripping이 중지되고 CO_2의 재용해 현상이 일어남에 따라 발생하는 것으로 판단된다. ORP는 폭기 중지 후에도 한동안 일정한 패턴을 유지하다가 감소하였는데, 이는 포기중지로 인한 O_2의 감소와 탈질산에 의한 것으로 여겨지나, ORP가 크게 감소함에도 불구하고 pH-mV가 감소하지 않고 일정하였던 것으로 보아 활

발한 탈질산은 이루어지지 않았음을 알 수 있으며, 이는 탈질 과정에 관여하는 미생물이 사용할 에너지원이 부족하였기 때문이었던 것으로 판단된다. 슬러지의 침전과 최종 방류수의 배출이 이루어진 후에 1st SBR로부터 산화된 상등수가 유입되고 동시에 탄소원으로 메탄올이 함께 유입됨에 따라 ORP는 상승하다가 갑작스런 하락을 보였는데, 이 시점이 바로 NOx-N의 고갈을 의미하는 탈질 종료시점, 즉 Nitrate Knee Point (KNP)이다 (Koch 등 1985; Wareham 등 1993; Ra 등 1999). 탈질 과정 중 NOx-N과의 반응으로 나타나는 ORP curve의 변화는 항상 동일한 양상을 가지는 것이 아니라, 탈질이 진행되면서 ORP가 서서히 증가하는 경우, 변화가 없이 일정한 경우, 서서히 감소하는 경우의 3가지 양상을 보이는데 각 변화양상이 나타나는 것은 처리조내 오염물질의 산화정도 및 NOx-N의 농도 등 다양한 요인에 의해 달라지지만, NKP가 나타나는 시점에서의 ORP는 예외 없이 갑작스런 큰 폭의 하락을 보이게 된다. pH-mV curve의 경우에는 탈질이 진행됨에 따라 지속적으로 하락하다가 탈질이 종료되는 시점(NKP)에서부터 다시 서서히 증가하는 양상을 띠는데, 탈질 과정 중의 이러한 pH-mV의 감소는 탈질로 인한 알칼리도의 회복과 NOx-N 농도 감소에 의한 것이며, 탈질 완료 후 나타나는 pH-mV의 증가는 인의 용출과 발효가 시작되기 때문인 것으로 판단된다. 무산소 처리 후 호기적 처리가 시작됨에 따라 ORP 및 pH-mV는 상승하다가 처리조내의 암모니아성 질소가 완전 산화되는 시점에서 ORP는 다시 급상승하고 pH-mV는 상승이 중지된 다음 하락하기 시작하는 특이적인 Nitrogen Break Point (NBP)가 발생하였는데, ORP와 pH-mV profile에서의 이러한 특이적인 NBP의 발생은 처리조내의 질산화 미생물의 산소소모량 (oxygen uptake rate)이 암모니아성 질소의 고갈과 더불어 감소함에 따라 O_2의 농도가 상대적으로 증가하고, 추가적인 CO_2 stripping이 발생하게되어 나타나는 것으로 판단된다. NBP 발생이후에도 호기적 처리가 계속됨에 따라 ORP와 pH-mV의 변화가 비교적 일정해지는 plateau가 나타나는데 이 시점은 DO 농도가 포화되기 시작하는 시점으로 처리조내에 biodegradable organic matter가 잔존한다면 지속적인 분해가 일어나게 된다.

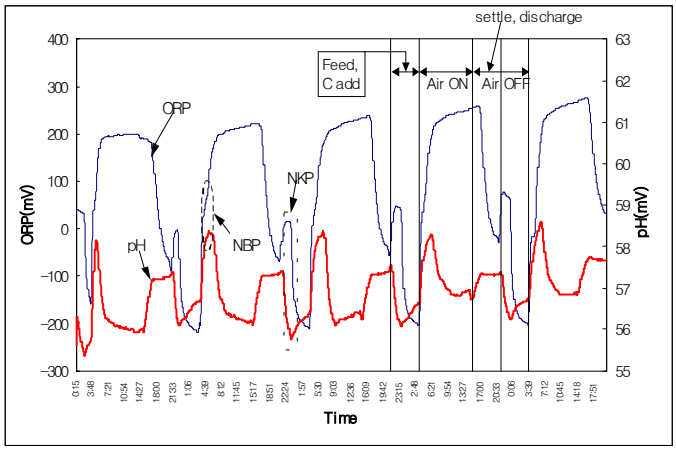


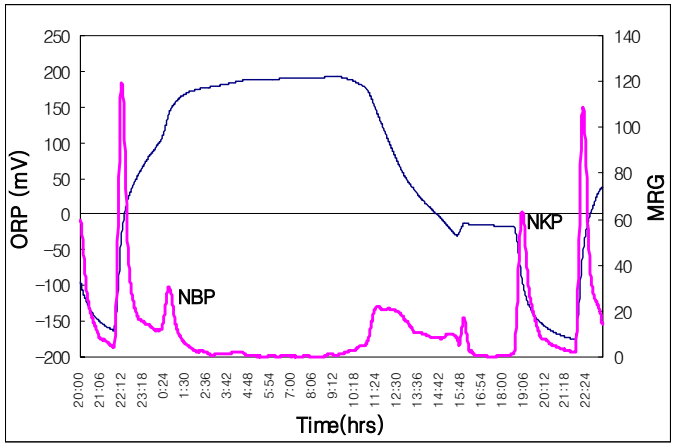
Figure 3-1-26. Ideal ORP- and pH(mV)-time profile

2) 제어 시점 인식 방법

Fig. 3-1-27은 ORP 및 pH-mv curve의 moving range(MRG) pattern을 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 것 과 같이 curve상의 NBP 및 NKP는 moving range의 모니터링을 통해 쉽게 detection 될 수 있는 것으로 밝혀졌다. 변화 양상을 살펴볼 때 호기적 처리시작 즉시 ORP의 moving range 값은 큰 폭으로 상승하다가 점차 감소하고 NBP 발생시점에서 다시 증가하였으며 호기적 처리가 종료됨에 따라 다시 증가하다가 점차 감소한 후 최종적으로 NKP의 발생과 더불어 큰 폭으로 변화하는 양상을 나타냈다. pH-mV의 MRG의 경우에도 ORP-MRG 변화와 비슷한 양상이 관찰되었다. 그러나 moving rage를 단독으로 이용하여 ORP 및 pH-mV curve상에서 발생하는 각 point를 detection하는 방법은 다소 어려움이 있는데 이는 모든 모니터된 curve의 분석결과 NBP가 발견되는 시점에서의 MRG 변화폭이 일정하지 않아 순차적으로 각 point를 인식하는데 어려움이 있기 때문이다. 따라서 ORP 및 pH-mV curve의 MRG 변화값의 moving slope change(MRG-Mdx/dt)의 특이적인 양상을 이용하는 것이 바람직 할 것으로 사료되는데 이는 각 실시간 조절 포인트의 발생 폭 차이에도 불구하고 MRG-Mdx/dt 이용 시 항상 일정한 조절 시점이 detection되기 때문이다. Fig. 3-1-28, 29는 각 실시간 조절 시점에서 특이적인 형태를 발생시키는 MRG-Mdx/dt의 변화 pattern을 나타낸 것이다. ORP의 MRG-Mdx/dt의 변화 패턴을 살펴볼 때 aeration 시작과 더불어 높은 positive value와 negative value를 차례로 나타내다가 각 NBP 및 NKP 시점에서 다시 높은 positive값을 나타내는 것으로

밝혀졌으며 pH-mV MRG Mdx/dt의 변화 pattern도 거의 동일한 양상을 띠는 것으로 나타났다.

Fig. 3-1-30은 3-1-26에서 보여진 첫째, 둘째 cycle의 ORP 및 pH-mV curve와 r=10 조건 하에서 1분 간격으로 모니터링 하면서 얻어진 Moving Slope Change (MSC)를 나타낸 것이다. Fig. 3-1-30에서 알 수 있듯이 ORP와 pH-mV curve 상에서 나타나는 특정오염물질의 제어시점은 MSC를 이용하여 쉽게 찾을 수 있었다. 호기적 처리과정 중 ORP에서 나타나는 NBP는 MSC curve에서 뚜렷하게 나타나는 두 번째 positive peak이며, 무산소 상태에서 목격되는 NKP는 두 번째 negative peak임을 쉽게 발견할 수 있다. 또한 호기적 처리 중 pH-mV에서 발생하는 NBP는 MSC curve상에서 positive peak 다음에 나타나는 negative peak이고, pH-mV curve에서 무산소 처리 중 발생하는 NKP는 negative peak가 나타난 후 positive value로 전환되는 시점임을 알 수 있다. 호기적 상태에서의 pH-mV 변화는 그림에서와 같이 포기시작과 함께 질산화과정이 활발히 일어나 증가하다가 NBP에서 감소하는 경우와, 초기 CO_2 air-stripping에 의해 감소하다가 질산화가 일어남에 따라 상승하고 NBP에서 다시 감소하는 경우가 있는데, 어떤 경우이던 MSC상에서 positive peak가 발생한 후에 나타나는 negative peak가 NBP이다. Fig. 3-1-30에 나타낸 것과 같은 비슷한 개념의 Moving range change (이동범위변화)를 이용하여 ORP상에서 발생하는 NBP와 NBP 발생 후 나타나는 RCMP(residual carbon manipulation point)를 실시간 제어 시점으로 사용하여 시스템을 자동 제어하는 방법과, 그 효율성 및 pH-mV를 실시간 제어 parameter로 이용하여 제어시점을 인식하는 방법은 이미 보고 되었는데 (Ra 등 1998, 1999, 2000) 이러한 연구보고들은 폐수를 시스템으로 유입시킬 때 ORP를 이용하여 오염물질의 부하량과 폐수 유입량을 유동적으로 조절함에 따라 일정한 aeration rate하에서 지속적이고 안정적인 ORP-time profile을 얻고 이를 이용하여 실시간 자동 제어한 결과에 관한 것이다. 따라서 안정적인 자동제어를 위해서는 자동제어 인자에 대한 요인들을 알아보고 그 영향에 대한 적절한 조치가 필요하다 할 수 있다.


250
200
150
100
50
0
−50
−100
−150
−200
ORP (mV)
140
120
100
80
60
40
20
0
MRG
NBP
NKP
20:00
21:06
22:12
23:18
0:24
1:30
2:36
3:42
4:48
5:54
7:00
8:06
9:12
10:18
11:24
12:30
13:36
14:42
15:48
16:54
18:00
19:06
20:12
21:18
22:24
Time(hrs)

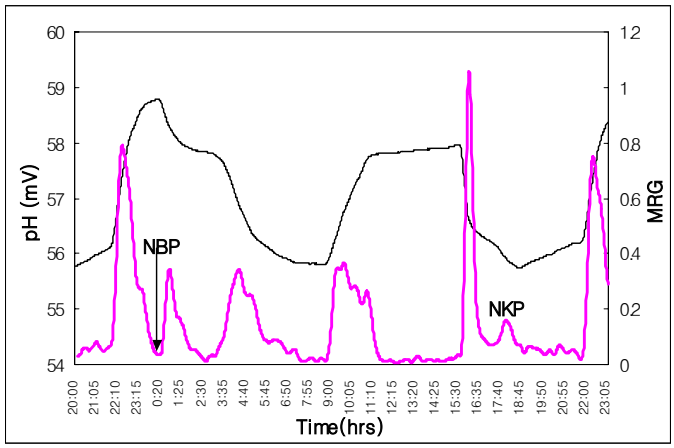


Figure 3-1-27. Moving range patterns of ORP and pH-mV

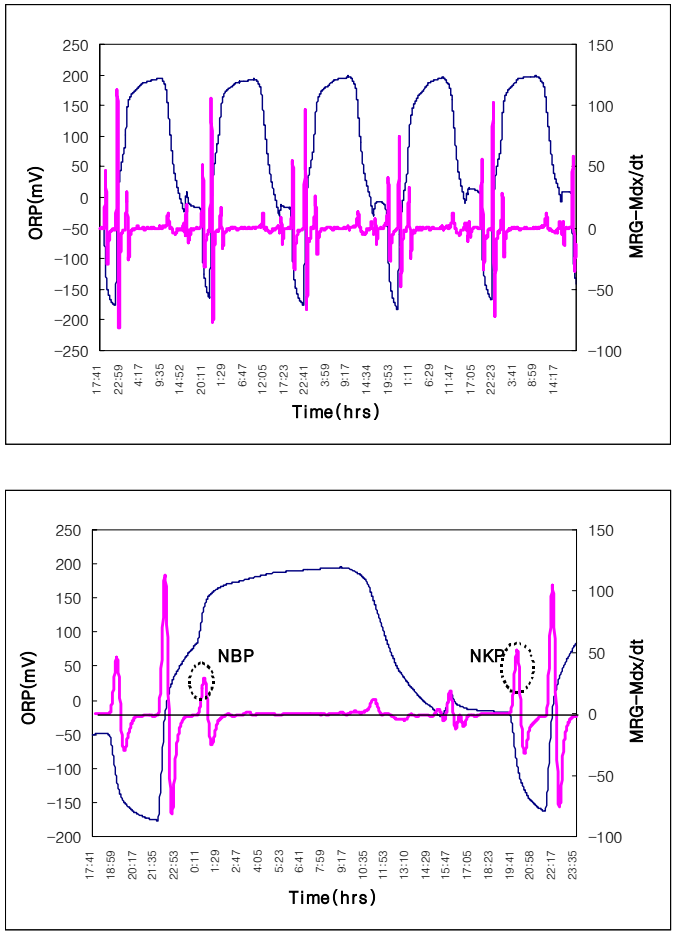


Figure 3-1-28. MRG-Mdx/dt feature

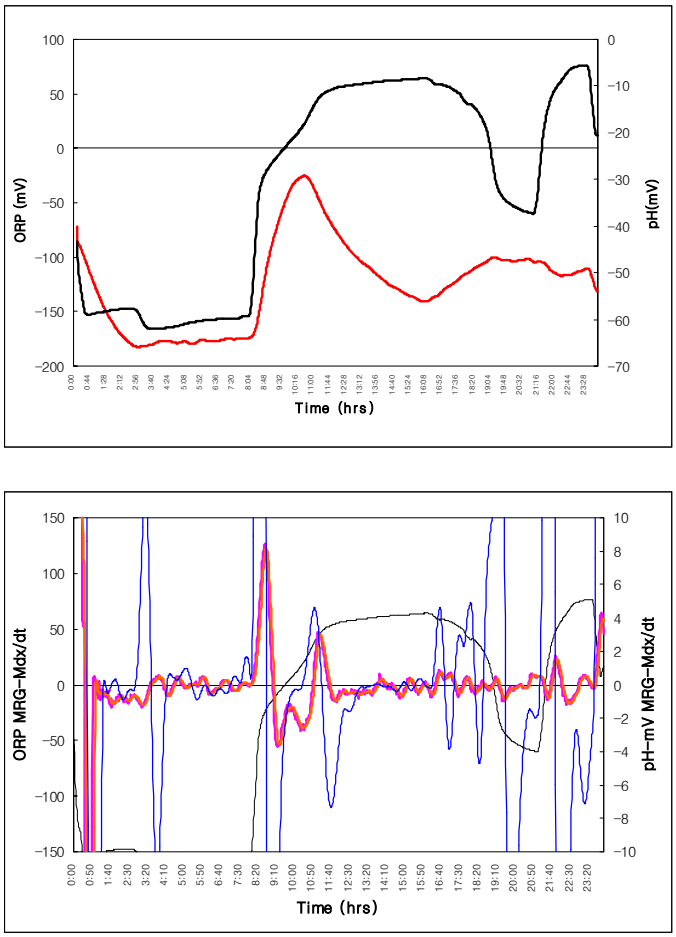


Figure 3-1-29. Mdx/dt feature

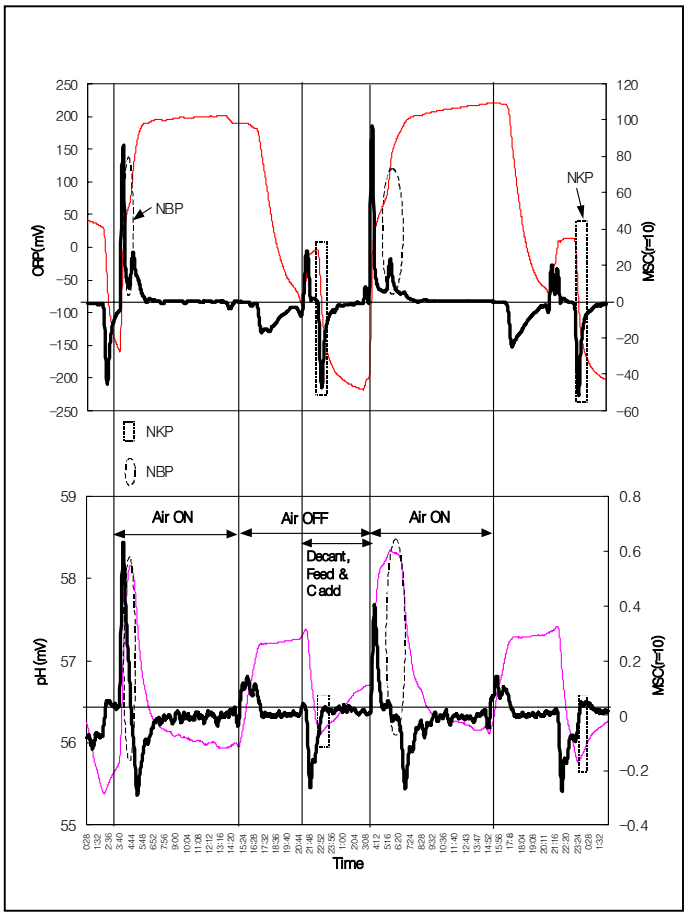


Figure 3-1-30. Control strategy using MSC patterns

3) ORP와 pH에 대한 영향요인 분석 및 자동제어 인자로서의 pH와 ORP의 안정성

1) 호기조건의 자동제어 인자로서의 ORP와 pH의 안정성

가) 포기조건의 영향과 제어인자의 안정성

ORP상에서 발생하는 NBP를 실시간 제어 point로 이용하면서 안정적인 자동제어를 성취하기 위해서는 우선 그림에서와 같이 안정적이고 이상적인 curve를 얻을 수 있어야한다. ORP에 영향 하는 많은 인자들 중 오염물질 부하량과 포기량의 조화가 이루어지지 않고는 NBP를 안정적으로 발생시키는 ORP curve를 얻을 수는 없으며, 특히 축산폐수와 같이 가변적인 폐수의 경우, 시스템으로 일정량의 폐수가 유입될 때에도 그 부하량은 변화가 심할 수밖에 없고, 이러한 상황 하에서의 일정한 aeration rate의 유지는 경우에 따라 시스템 OUR에 비해 과포기 조건이 되거나, 혹은 포기량이 부족한 조건이 될 수 있어 이상적인 ORP curve를 안정적으로 얻기 어려울 수밖에 없다. Fig. 3-1-31과 3-1-32는 이러한 것을 나타내는 것으로 45L의 실험실 규모의 SBR을 이용・서로 다른 포기량 조건에서 운전하면서 O_2 공급량, 즉 포기량이 ORP 및 pH-mV curve pattern에 미치는 영향을 파악하고 호기단계의 자동제어 인자로서의 pH-mV와 ORP를 비교 평가한 것이다. Fig. 3-1-31은 6L/min.의 aeration 조건에서 운전하면서 얻은 ORP와 pH-mV의 변화 pattern을 나타낸 것으로 포기량과 부하량이 조화를 이루며 매우 이상적이고 안정적인 curve가 얻어졌으나, 다소 낮은 포기율인 2.5L/min.의 조건에서 운전하였을 시에는 Fig. 3-1-32 에서와 같은 curve 패턴의 변화를 가져오면서 ORP curve상에서 다수의 가짜 NBP가 발생함을 알 수 있었다. Fig.3-1-31에서와 같이 이상적인 ORP curve가 발생할 때에는 앞서 설명한 것과 같이 MSC의 두 번째 positive peak가 NBP이었으나 Fig. 3-1-32와 같이 낮은 aeration하에서는 MSC curve 상에서 NBP를 나타내는 peak를 확인하기 어려웠다. 그러나 pH-mV curve의 경우에는 낮은 aeration rate 조건 하에서도 MSC상에서 NBP를 확인할 수 있었으며 이상적인 curve인 Fig. 3-1-31에서와 같이 NBP는 바로 positive peak 후에 발생하는 negative peak임을 알 수 있었다. Fig. 3-1-31과 3-1-32에서의 curve 패턴은 ORP에 대한 aeration rate, 즉 O_2의 영향을 보여주는 것으로 처리조의 변화양상을 모니터 하여 시스템을 진단하고 최종 자동제어에 필요한 이상적인 ORP curve를 얻기 위해서는 aeration rate이 적절히 조절되어야함을 보여

주는 것이라 할 수 있다. 이상적인 ORP curve를 나타내는 적정 aeration rate을 처리조 단위용적을 기준으로 연구·제시하기는 어려운 일인데, 이는 동일 aeration rate 조건 하에서도 포기장치와 산기관에 따라 산소 전달율이 다르며, 또한 처리조 미생물의 OUR 및 오염물질 부하량 등에 따라 적정 aeration rate이 달라지기 때문이다. 따라서 이상적인 ORP curve를 얻기 위해서는 설비된 시스템을 가능한 한 일정한 부하량 조건에서 운전하면서 ORP와 DO를 모니터 하여 결정하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

Fig. 3-1-33과 3-1-34는 실험재료 및 방법에 언급된 것과 같이 2nd SBR을 단일 SBR로 이용하면서 시험하여 얻어진 ORP, pH, DO curve를 나타낸 것이다. Fig. 3-1-33은 Fig. 3-1-32에서와 같은 ORP 및 pH-mV curve를 나타내는 경우에 있어서의 처리조 내 질소원의 거동을 나타낸 것이다. 암모니아성 질소의 농도 변화와 ORP 및 pH-mV curve 변화를 비교할 때 호기적 처리 중 ORP상에서 발생한 굴곡점은 질산화가 종료되는 NBP가 아님을 확인할 수 있다. 반면 ORP상에서 NBP가 나타나지 않는 조건에서도 pH-mV curve에서는 질산화가 완료되는 시점인 NBP가 뚜렷하게 발생하는 것을 알 수 있다.

Fig. 3-1-34의 a, b, c는 호기적 처리과정 중에 주로 나타나는 3가지의 서로 다른 ORP, pH-mV, DO curve 양상을 보여주는 것이다. Fig. 3-1-34 a는 NBP가 ORP, pH-mV, DO에서 거의 동일한 시점에 발생하는 것을, Fig. 3-1-34 b는 ORP, pH-mV, DO curve가 각각 서로 다른 pattern을 보이는 경우를, Fig. 3-1-34 c는 ORP와 DO의 curve pattern은 비슷하나 pH-mV curve는 다른 양상을 나타내는 경우를 보이고 있다. Fig. 3-1-34 a를 볼 때 ORP에서 NBP로 인식되는 굴곡점이 발생할 때 pH-mV curve에서 NBP 발생시 발견되는 감소 현상이 나타나고 DO에서도 NBP 발생이후 나타나는 DO증가와 포화가 일어난 것으로 보아 ORP, DO, pH-mV에서 동시에 발생한 각각의 굴곡점이 바로 완전질산화 시점인 NBP이었음을 쉽게 확인할 수 있다. Fig. 3-1-34 b의 경우, ORP에서는 NBP로 인식될만한 어떠한 굴곡점은 발생하지 않은 채 plateau에 도달하여 어느 지점이 NBP이었는지를 알 수 없었으

며, DO curve에서는 3-1-34 a에서와 같이 O_2농도가 증가하면서 포화되는 굴곡점이 발생하였으나 암모니아성 질소 분석결과 이 시점이 NBP가 아니었음을 확인할 수 있었다. 그러나 pH-mV에서는 ORP와 DO가 plateau에 도달한 다음에 NBP로 인식되는 굴곡점이 늦게 발생하였는데 이 시점이 바로 질산화 종료를 의미하는 NBP이었음을 처리조 내 NH_4-N 분석결과 알 수 있었다. Fig. 3-1-34 c의 경우에서는 먼저 DO의 농도가 증가하여 포화되는 굴곡점이 발생한 후 ORP에서도 굴곡점이 발생하여 ORP와 DO에서 NBP로 인식될 만한 변화가 발견되었으나, 이때 pH-mV curve에서는 NBP로 인식될 수 있는 어떤 변화도 발생하지 않고 오히려 Fig. 3-1-34 b에서와 같이 ORP가 plateau에 도달한 후 pH-mV에서 NBP가 발생한 것을 알 수 있다. 이 등 (2001)과 임등 (1994)은 SBR 공정에 있어서 DO 농도가 증가하는 시점(DO break point)과 질산화 종료시점은 정확하게 일치하여 DO는 질산화 종료의 좋은 지표가 된다고 하였으나 본 연구를 통해 시스템의 운전조건과 상태에 따라 DO의 증가 시점과 NBP의 발생시점이 일치하지 않을 수도 있음을 알 수 있었으며, pH가 NBP의 발생시점을 나타내는 좋은 지표가 됨을 알 수 있었다. 또한 pH에서 질산화 종료시점은 쉽게 찾을 수 있으나 pH의 경사도 변화는 질산화 종료시점에만 특이적으로 나타나는 것이 아니라 전 구간에 걸쳐 다양한 증감을 나타내기 때문에 pH를 호기적 공정의 자동제어인자로 사용하기에는 어려움이 있고 오히려 ORP의 경사도 값이 DO와 pH에서와는 달리 매우 안정적이기 때문에 호기적 공정의 자동제어인자로서 ORP가 유용하다는 이 등(2001)의 연구결과와, pH의 경우 변화 범위가 크지 않아 peak point를 발견하는데 어려움이 있고 CO_2의 탈기나 인 섭취 영향에 따라 NBP가 명확하지 않다는 고 등(2002)의 보고와는 달리, 부하량과 포기량의 조화가 이루어지지 않거나 혹은 처리조 미생물의 활성 변화가 발생하는 등 다양한 변화가 일어나는 처리시스템의 호기적 처리과정을 진단하는데 있어서 ORP와 DO를 이용할 때에는 처리조 조건에 따라 정확한 NBP 발생시점을 찾을 수 없는 경우가 발생하나, pH-mV를 이용하여 진단할 때는 항상 NBP가 발생하는 시점을 정확하게 찾는 것이 가능하기 때문에 호기적 처리과정을 자동제어하기 위한 인자로는 ORP나 DO 보다는 pH-mV가

안정적임을 알 수 있었다.

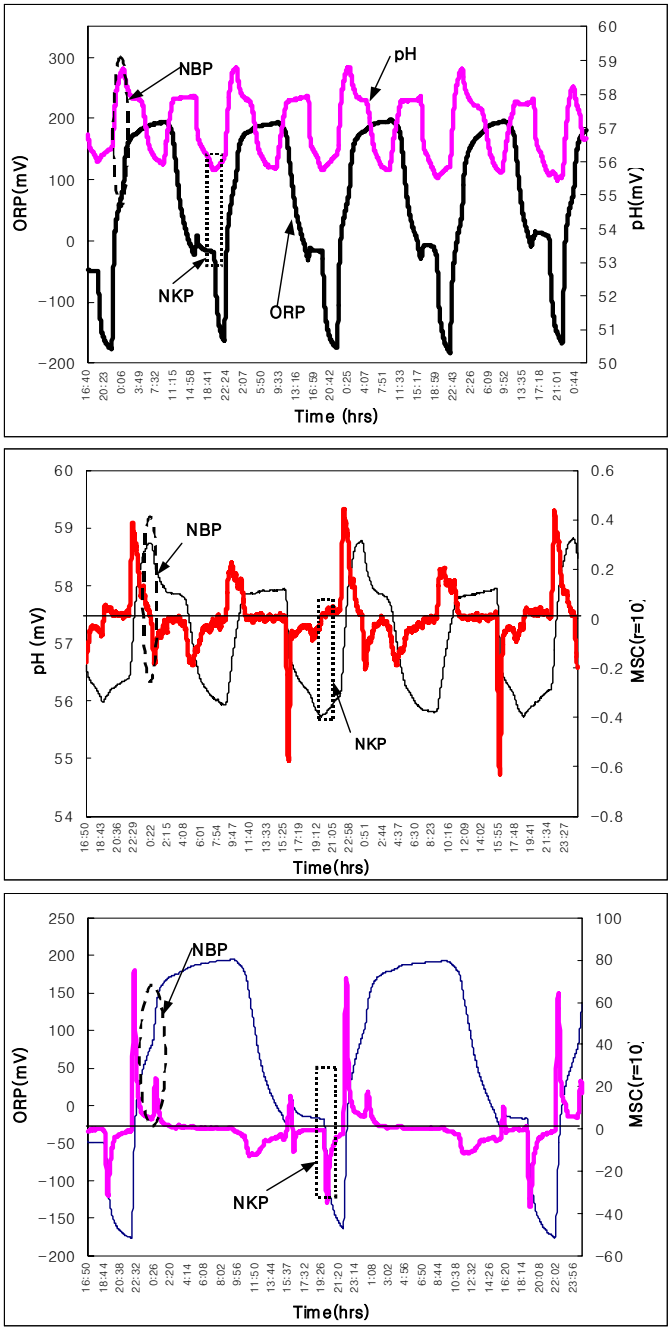


Figure 3-1-31. ORP, pH(mV) and MSC patternsunder a balanced condition

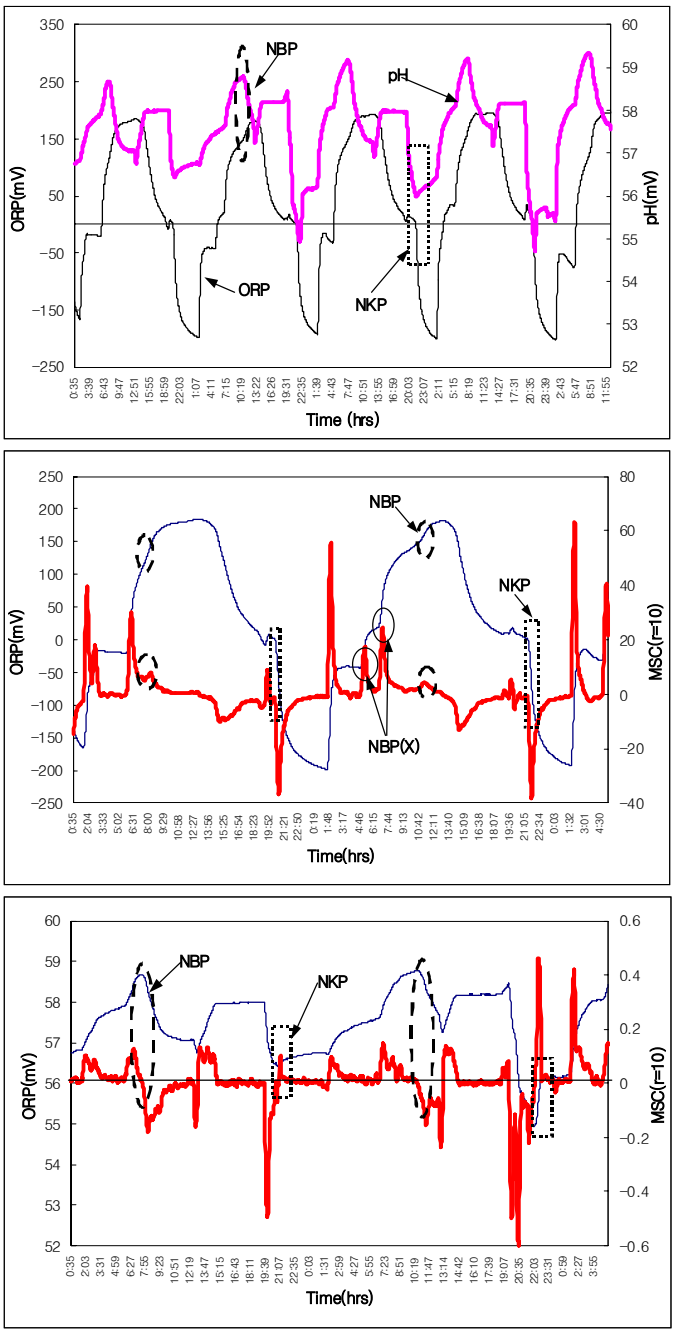


Figure 3-1-32. ORP, pH(mV) and MSC patterns under low- aeration condition

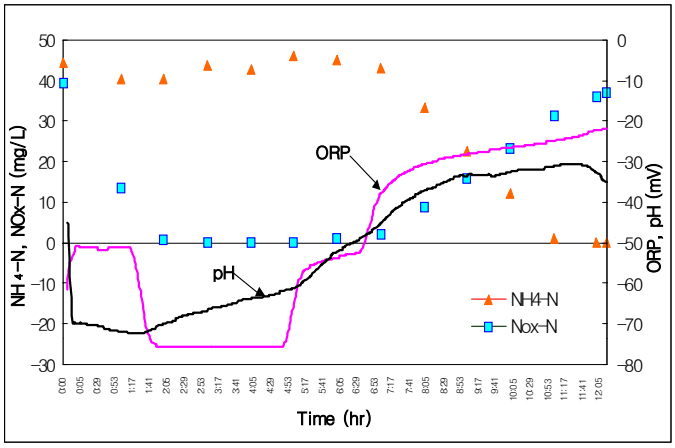


Figure 3-1-33. Track of nitrogen and ORP/pH(mV) curves

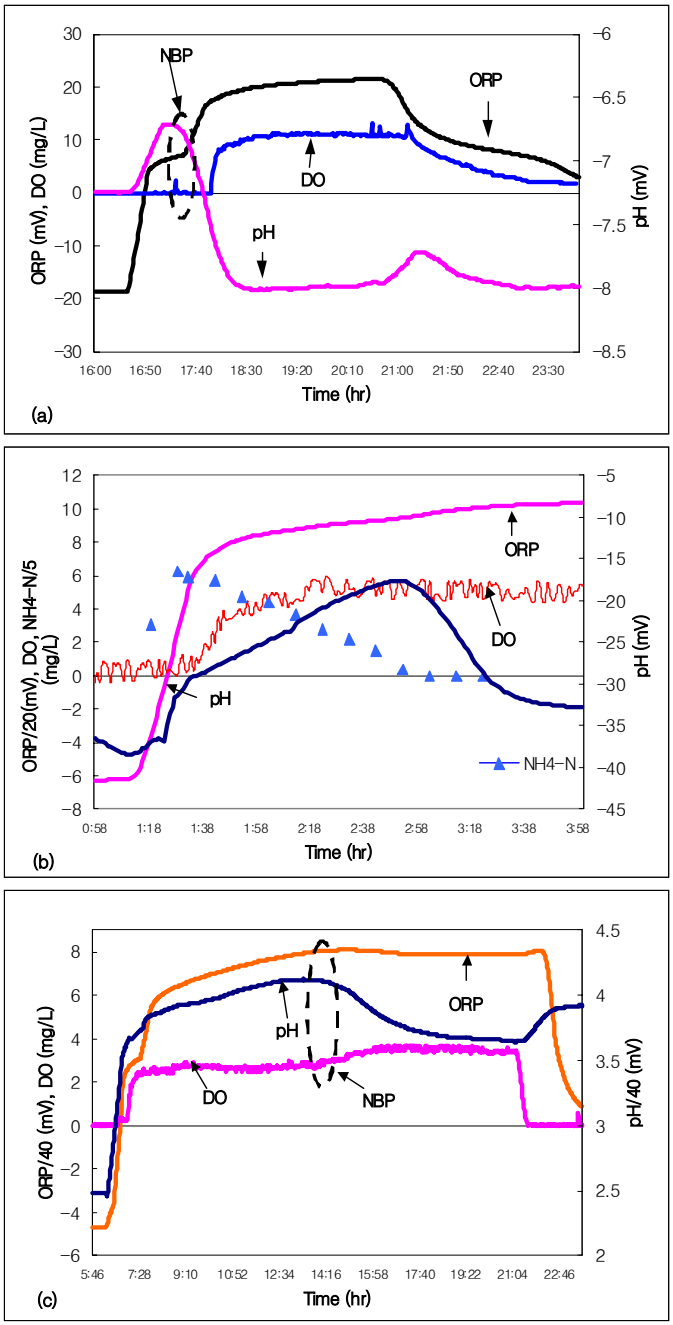


Figure 3-1-34. ORP,pH(mV) and DO patterns

(2) NOx-N의 영향과 제어인자의 안정성

NOx-N이 제어인자에 미치는 영향을 파악하기 위하여 반응조내의 NOx-N의 농도에 따른 ORP와 pH-mV curve의 변화를 시험하였다. 40L의 SBR 반응조를 Feeding -> Aeration -> Anoxic의 sequence와 NH_4-N 부하량 4.5g/m^3cycle 조건하에서 운전 하면서 반응조내 NOx-N의 농도 변화와 ORP, pH-mV, DO curve의 변화를 모니터 하였다, 빠른 NOx-N 농도 변화를 유발하기 위하여 Feeding 시 KNO_3 시약을 이용 매 cycle당 NOx-N 3.125g/m^3을 첨가하였으며 무산소 시간은 30분 제공하였다. Fig 3-1-35, 36, 37에 나타낸 것과 같이 운전이 지속됨에 따라 반응조내 NOx-N의 양은 계속 축적되었으며 이러한 조건하에서 ORP curve 상에 변화가 일어남을 알 수 있었다. 반응조 내 NOx-N의 농도가 약 25mg/L로 낮음에도 불구하고 (Fig 3-1-35) NOx-N이 축적됨에 따라 Feeding 시 나타나는 ORP의 하향폭이 크게 감소하였으며 호기적 처리 조건에서 완전 질산화가 이루어 졌음에도 불구하고 ORP 상에서는 NBP를 찾을 수 없었다. 그러나 pH-mV curve 상에서는 NOx-N의 농도증가에 상관없이 NBP가 뚜렷이 나타났음을 알 수 있었다. Fig 3-1-36과 3-1-37에서와 같이 반응조내 NOx-N의 농도가 지속적으로 축적되어 매우 높은 수준인 300mg/L 수준에 도달함에도 불구하고 pH-mV curve 상에서의 NBP의 발생은 지속적으로 유지됨을 알 수 있었다. 따라서 ORP보다는 pH-mV가 최적 조건의 자동제어를 위한 안정적인 인자임을 알 수 있었다. 이러한 결과는 ORP특성에 기인한 것으로 앞서 언급한 것과 같이 ORP는 산소에 매우 민감하지만 NOx-N이 존재하는 조건하에서 O_2에 대한 민감성은 감소하게 되며 NOx-N이 축적되어 고농도 일때에는 O_2 공급에도 불구하고 O_2에 대한 특이적인 변화가 나타나지 않게 되기 때문으로 판단된다.

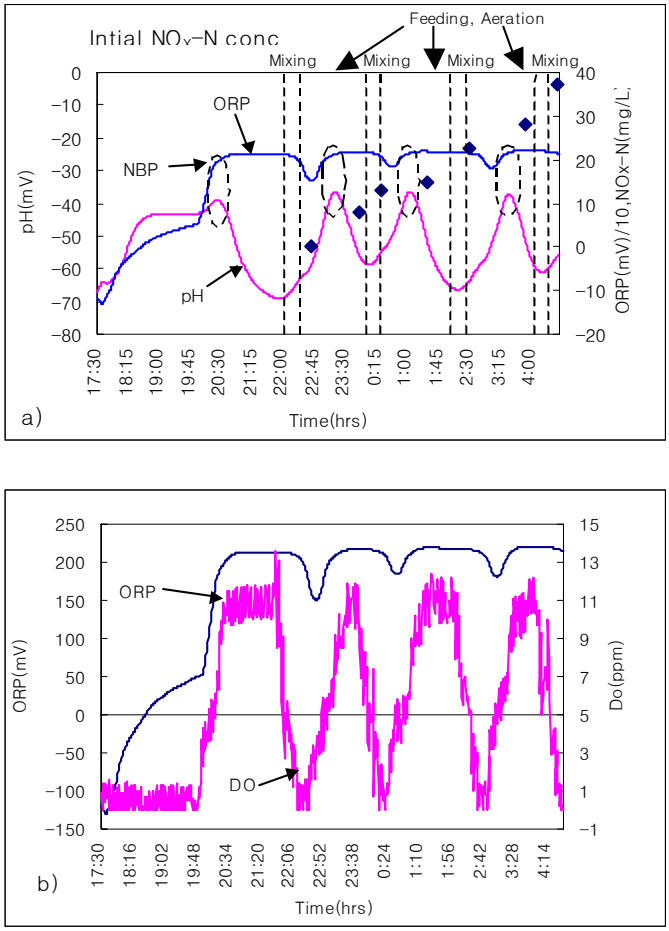


Figure 3-1-35. ORP, pHmV & DO curve pattern vs [NOx-N]

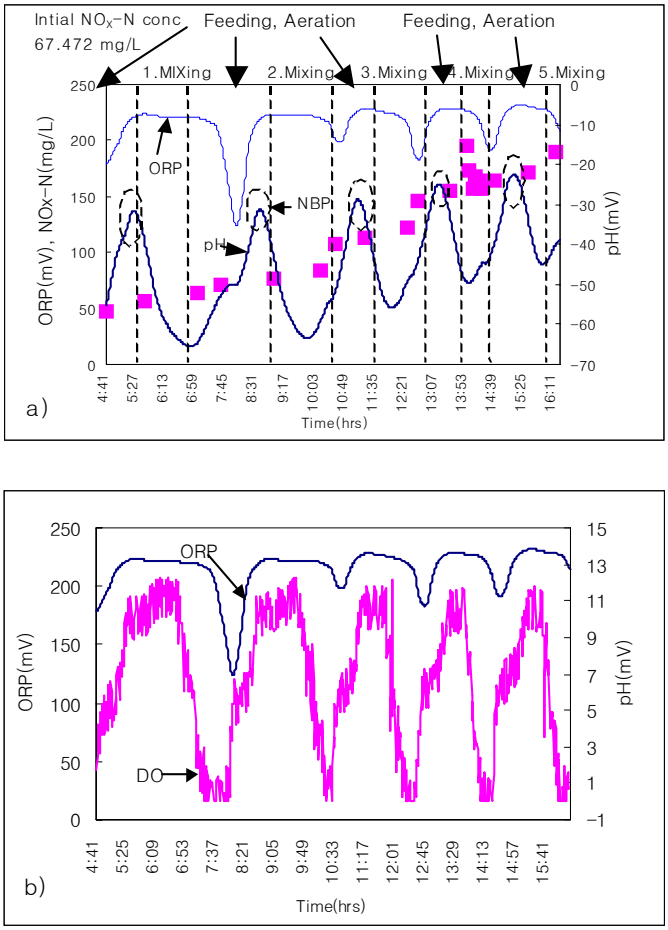


Figure 3-1-36. ORP, pHmV & DO curve pattern vs [NOx-N]

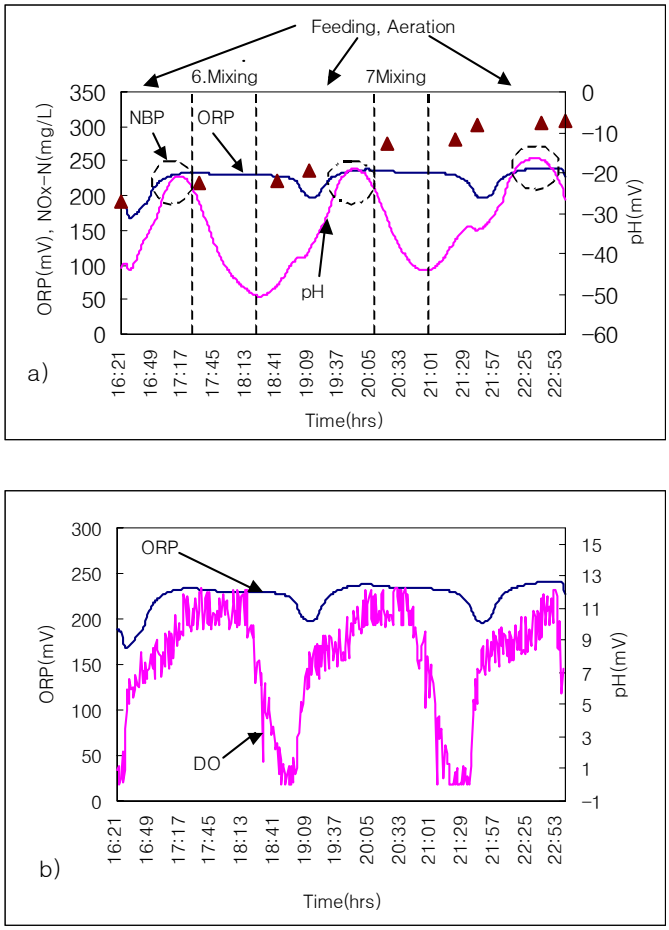


Figure 3-1-37. ORP, pHmV & DO curve pattern vs [NOx-N]

(3) 유기물 영향 분석 및 제어인자의 안정성

본 시험에서는 유기물 농도가 ORP , pH-mV curve 에 미치는 영향을 알기 위하여 다양한 유기물 농도 조건 하에서 운전하면서 ORP와 pH-mV의 변화를 모니터 하였다.

Feeding시 Glucose 첨가량을 달리하여 반응조내의 TOCs 농도를 753.6, 2816, 5183, 9945mg/L로 변화시켰으며 NH_4-N농도는 항상 5mg/L 이하를 유지하도록 하였다.

실험 결과 Fig 3-1-38과 같이 초기 TOCs 농도 753.6mg/L에서는 폭기시 ORP curve와 pH-mV curve 모두에서 NBP가 나타났으며 DO의 증가점하고도 일치 하였다. 하지만glucose 첨가량이 증가함에 따라 반응조내 TOCs 농도가 축적되어 초기 TOC농도가 2816mg/L, 5183mg/L, 9945mg/L 으로 증가 하였고 이때 ORP curve에서는 NBP 가 나타나지 않았다. 그러나 이러한 경우에 있어서도 pH-mV curve에서는 지속적으로 NBP point가 발견 되었다. Fig 3-1-38에서 pH-mV curve가 상승하다가 감소하는 NBP가 발생한 후 계속적인 pH-mV curve의 하락이 이어지다 비정상적으로 크게 상승하는 것을 볼 수 있는데 이는 폭기 중지로 인한 CO_2의 재용해가 일어나고 NOx-N의 완전 탈질이 일어나 후에도 고농도의 유기물들의 발효에 의한 acidity 생성이 지속되었기 때문이라고 판단된다. 또한 호기적 조건에서 NBP가 일어난 후 무산소 조건에서 NKP가 전혀 발생하지 않았는데 이는 고농도 TOCs의 loading 으로 인하여 NKP가 masking 되었기 때문인 것으로 추측된다. 이러한 pattern은 실험마다 나타났는데 이는 C/N ratio가 너무 높기 때문이며 질산화 완료 시점인 NBP가 나타나기 전에 유기물의 산화가 완전히 이루어지려면 초기 C/N ratio가 중요한 인자로 생각된다.

Fig. 3-1-39는 고농도의 NH_4-N과 유기물을 첨가 하였을 때의 curve pattern을 나타낸 그래프로 반응조 내에 초기 TOCs 농도는 6540mg/L, NH_4-N 농도가 약 32mg/L 이었다.이때 역시 ORP curve에서는 NBP가 나타나지 않았지만 pH-mV curve에서는 NBP가 나타난 것을 볼 수 있었다. 또한 Fig 3-1-39에서의 TOCs 거동과 NH_4-N거동을 나타낸 그래프를 볼 때 유기물 농도는 유입 후 점차 증가하여

aeration 조건동안 일정한 농도를 유지하는 것으로 나타났으나 암모니아 농도는 지속적인 감소를 보여 pH-mV curve에서 NBP 가 발생할 때 NH_4-N이 0mg/L 로 되는 것을 알 수 있었다. TOC의 경우 호기조건임에도 불구하고 제거가 일어나지 않은 것은 미생물이 유기물을 흡착하고 있는 상태에서 높은 양의 (13L/min) 공기 주입으로 흡착된 유기물의 탈리가 일어난 결과로 추측된다.

실험결과 처리 시스템 내 TOCs 농도가 1000mg/L 이상의 조건에서는 ORP curve 상에서 NBP 가 나타나지 않는 것을 볼 수 있었으나, pH curve상에서는 유기물 농도와 관계없이 NBP가 나타나 자동제어 시 pH-mV가 좀더 안정적인 parameter 인 것으로 확인되었다.

따라서, 자동제어를 하기 위한 curve의 안정성으로 볼 때 호기적 조건에서는 pH curve가 ORP curve 보다 외부 환경에 유동이 적은 것으로 판단되어 안정성 있는 NBP를 얻기 위한 자동제어 인자로는 pH curve를 선택함이 옳다고 판단된다.

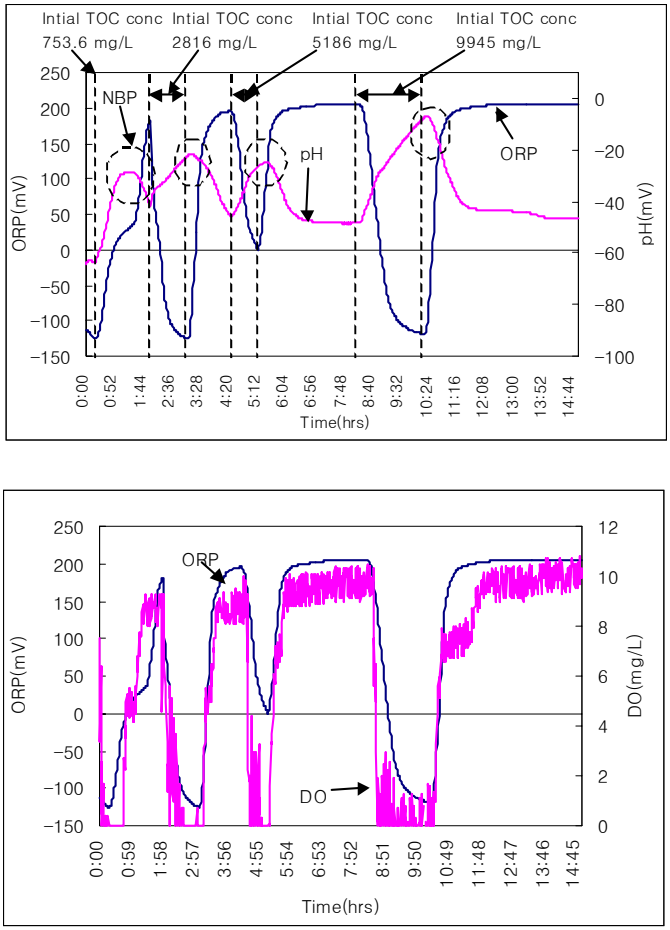


Figure 3-1-38. ORP, pH & DO vs TOCs

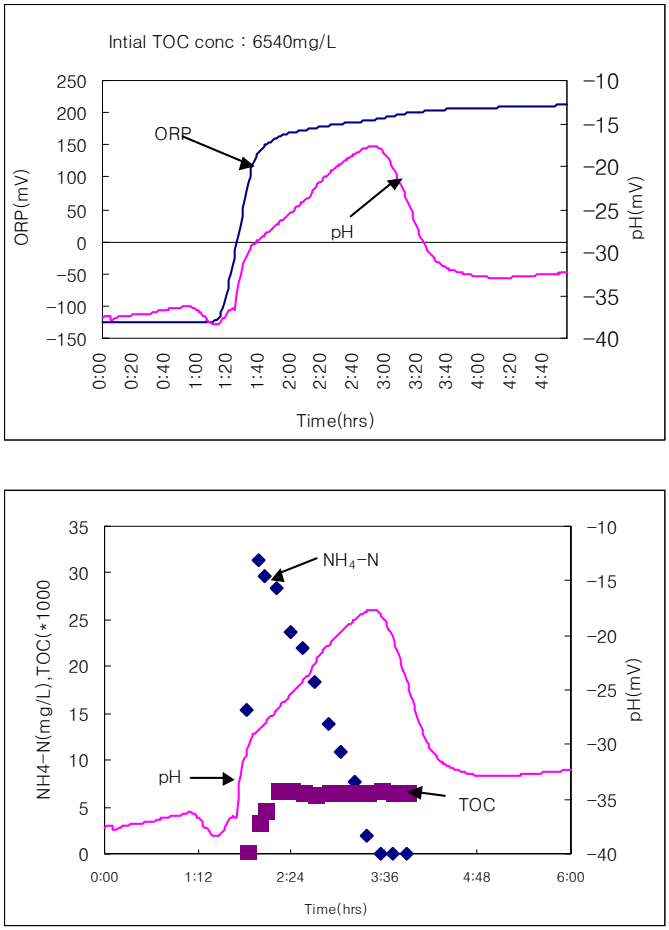


Figure 3-1-39. ORP, pH vs C & N track

나) 무산소 조건의 자동제어 인자로서의 pH-mV와 ORP의 안정성과 영향요인.

(1) pH와 ORP의 안정성

무산소 처리단계의 모니터나 제어를 위해서는 ORP를 이용하는 것이 안정적인데, 이는 비록 앞에서 언급한 것과 같이 ORP, pH-mV 모두에서 탈질이 완료되는 시점인 NKP가 발생하나 가변적 처리 상황에서 안정성은 ORP가 높기 때문이다. Fig 3-1-40 a, b는 이러한 사실을 나타낸 것으로 ORP curve상에서는 탈질이 완료되는 시점인 NKP가 뚜렷하게 발생하였으나, pH-mV curve에서는 이 시점에서 아무런 변화가 일어나지 않아 pH-mV를 이용하여 NKP를 안정적으로 인식하는 데에는 한계가 있음을 알 수 있었으며, 경우에 따라서는 Fig. 3-1-40 a에서와 같이 NKP로 잘못 인식될 수 있는 변화가 pH-mV상에서 발생함을 알 수 있었다 (?? 표시된 부분). 또한, NBP 발생 후 잔존해 있는 생물학적 분해 가능한 유기물이 잔존해 있을 경우 pH curve가 매우 특이적으로 나타나는 것을 유기물과 질서의 영향에서 볼 수 있어 무산소단계의 제어인자는 ORP가 매우 안정하다는 것을 볼 수 있었다.

(2) C/N ratio의 영향

NKP는 denitrification이 일어나고 완료되어야만 발현되는 것이기 때문에 denitrification이 일어나는 조건 파악이 매우 중요하다.

실제 loading된 탄소 원의 TOC양과 NO_x-N 농도를 기준으로 C/N비를 2.1, 4.33, 8.35, 9.41로 조절하고 6시간 동안의 탈질율을 파악한 결과 (Fig. 3-1-41), 시험된 C/N비 수준에서의 NO_x-N 제거율이 별 차이를 나타내지 않음에 따라 실제 공급된 TOC와 NO_x-N을 기준으로 C/N 비 2이상의 수준은 탈질에 충분한 것으로 판단하였다. 따라서 C/N비를 다소 낮은 수준인 0, 0.64, 1.33, 2.32, 4.78로 조절하고 시간당 탈질 율을 분석하였다. 분석 결과 Fig 3-1-42와같이 외부 탄소원이 공급되지 않은 경우 잔존 유기물과 endogenous respiration에 의한 탈질율은 약 0.4mg/h 정도로 매우 낮았으며 시험된 C/N비에서의 NO_x-N 제거율은 1.7 mg/h에서 1.9 mg/h 정도로 Fig 3-1-41의 시험에서와 같이 별 차이가 없는 것으로 나타났다. 그러나 Fig 3-1-42 그

래프에서 알 수 있는 것과 같이 C/N비가 1.3이상인 경우 5시간 때에 완전한 탈질을 얻을 수 있었으나 C/N비 0.64의 경우 6시간에서도 완전한 탈질이 일어나지 않았으며 4시간 이후의 NO_x-N 제거율이 잔존 유기물 이용 및 endogenous respiration에 의한 제거율과 거의 비슷한 수준이었던 것으로 나타남에 따라 4시간 이후부터는 탈질을 위한 탄소원이 다소 부족했던 것으로 판단되었다. Fig.3-1-42의 아래 그래프는 탈질 중의 TOC의 변화를 나타낸 것으로 TOC 공급량이 많을수록 제거율도 높았음을 알 수 있다. 실제 제거된 NO_x-N mg 당 TOC 제거율을 분석한 결과 C/N 0.64, 1.33, 2.32, 4.78에서 각각 1.48, 1.64, 1.9, 2.13으로 비례적으로(r^2 = 0.9346) 높게 나타났다. 이러한 결과는 감소한 TOC 모든 양이 denitrifier의 에너지원으로 사용된 것은 아니며 여분의 탄소원은 미생물 성장 및 다른 대사과정에도 이용되었던 것으로 판단된다. 아울러 교반중 탄소원의 휘발로 인한 TOC의 감소가 발생하는 것으로 밝혀졌으며 methanol 첨가량 ml/L 당 TOC volatilization rate/h는 약 1.418 정도인 것으로 나타났다. 본 data를 이용, 외부탄소원 적정 공급량 결정 조건을 첫째, 탈질 완료후의 TOC 농도가 외부 탄소원이 첨가되지 않은 경우와 비교하여 높지 않아야 하며 즉, 첨가된 모든 TOC가 탈질 과정에서 완전히 고갈되어야 하며, 둘째 완전한 탈질을 얻을 수 있고 탈질율에 영향을 미치지 않는 최소양 이어야 한다고 설정하여 endoenous respiration에 의한 탈질율과 safty factor 0.1을 적용·분석한 결과 적정 외부탄소원 공급량을 위한 지표로 TOC loading/NO_x-N은 0.83이 적당한 것으로 파악되었다.

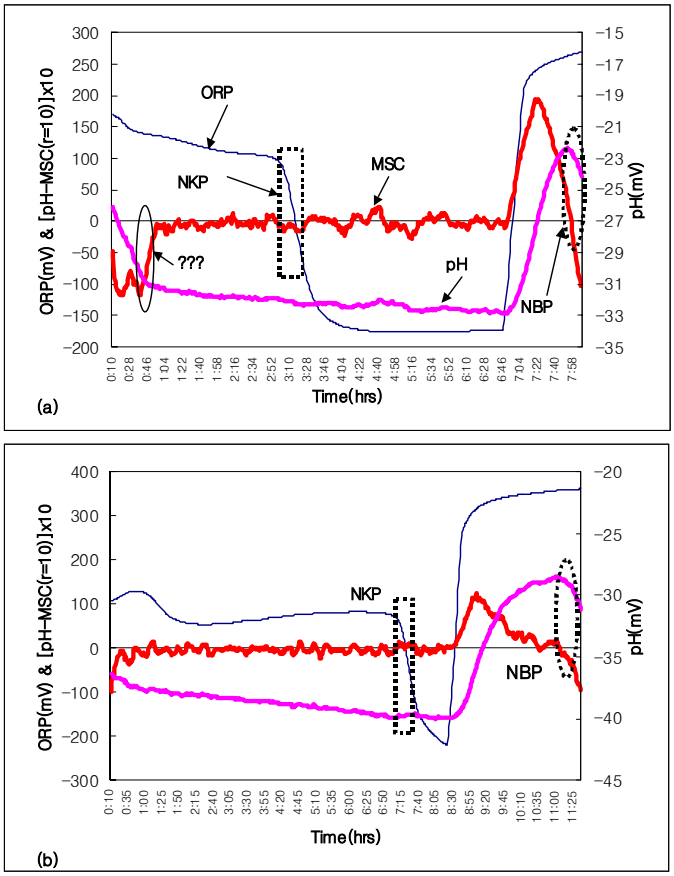


Figure 3-1-40. ORP and pH(mV) patterns

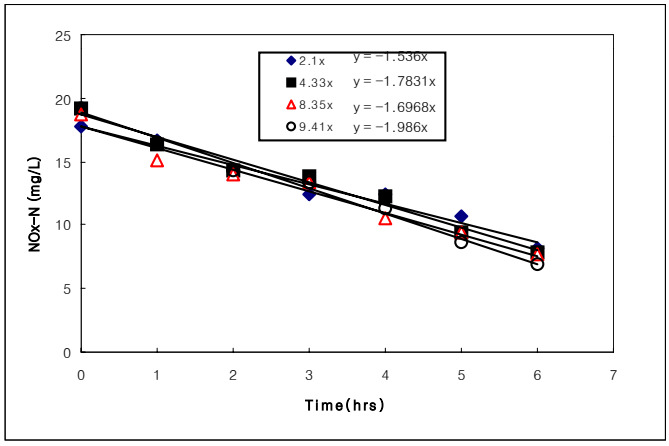
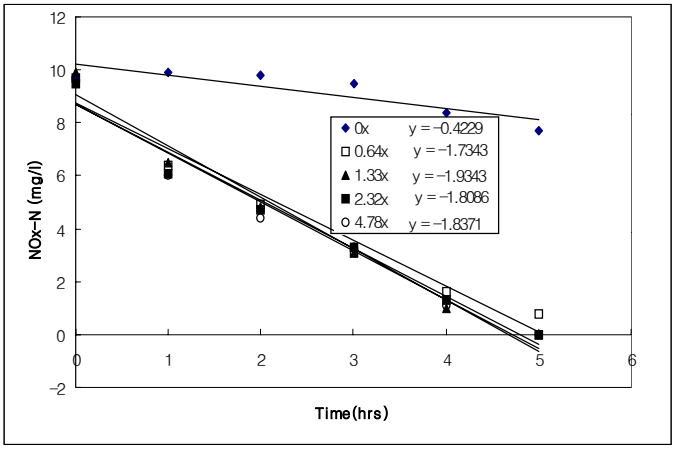
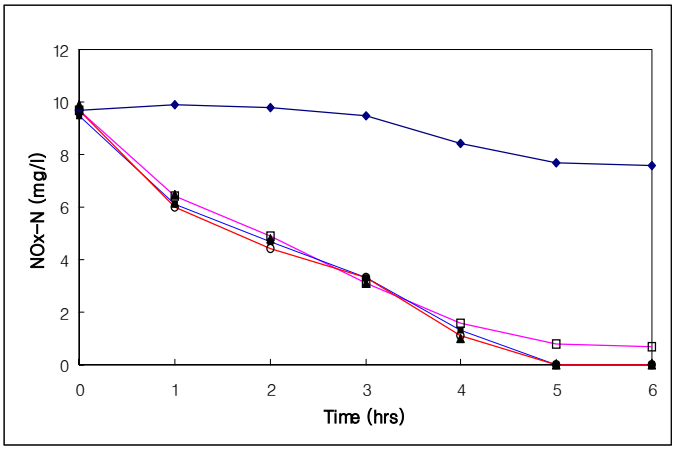


Figure 3-1-41. Denitrification rate at different levels of C/N





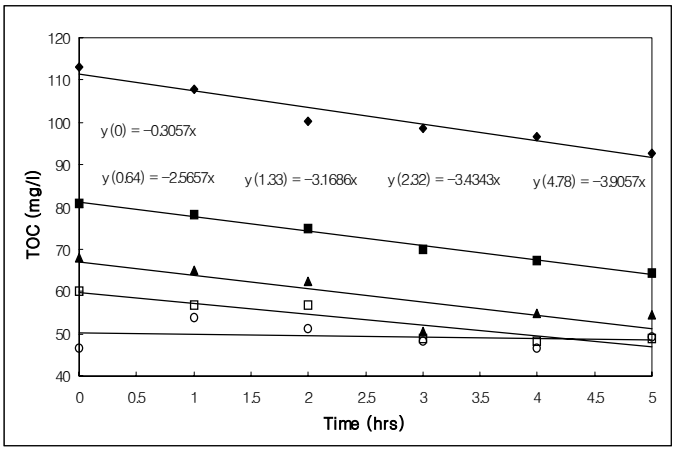


Figure 3-1-42. NOx-N and TOCs removal during denitrification

제 2 절. 실시간 컴퓨터 자동 제어 기술 평가 및 운전 특성

1. 재료 및 방법

본 연구에서는 앞서 나타난 결론에 의거하여 축산폐수처리시설의 완전자동제어와 원거리 진단/제어를 실시하였고 그 유용성을 평가하였다.

가. 처리시스템의 컴퓨터 자동제어 및 원거리 제어

돈사폐수 처리를 위해 설비된 pilot 규모의 2단계 SBR(sequencing batch reactor)은 앞서 수행한 시험 결과 각각의 SBR을 따로 운전하면서 적정 조건을 유지하는 것이 처리능력을 증가시킬 수 있는 것으로 판단됨에 따라 1st SBR을 저장조로 사용하고, 2nd main SBR 만을 처리반응조로 설비하여 단일 SBR 시스템으로 전환하였다(Fig. 3-2-1). 처리시설은 유입수 저장조($6m^3$), SBR($18m^3$), 유출수 저장조($6m^3$)로 구성되었다. 반응조의 생·화학적 변화를 모니터하기 위해 ORP, pH probe를 설치하였고, 공기 공급을 원활히 하기 위해 blower를 설치하였다. 또한, 반응조의 원활한 교반을 위해 수중 교반기를 설치하였으며, 폐수의 유입과 유출을 위한 펌프를 설치하였다. 각 펌프에 의한 유입, 유출량은 처리조에 설치된 level switch에 의해 조절되었다. 처리시설의 제어 및 운전을 위해서 control panel을 설비하였고 현장에서 운전되는 시스템을 감시· 진단· 제어하기 위하여 원거리 감시· 제어 기술을 적용하였다.

처리과정중 발생되는 전기적인 신호를 모니터 하기 위해 ORP, pH 계측기를 input board를 통해 컴퓨터에 연결하였으며 C 언어로 제작된 프로그램을 이용 1분 간격으로 전달되는 신호상에서 실시간 제어 시점 발견 시 out boad를 통해여 처리시설을 자동 제어하도록 하였다. 반응조의 운전은 컴퓨터를 통하여 프로그램된 순서에 의해 운전되었다. Fig. 3-2-2는 실시간 자동제어 처리시설 및 제어방법의 개략도를 나타낸 것이다.

Fig. 3-2-3은 원거리 감시· 진단· 제어방법을 나타낸 것으로 처리시설의 자동제어 및 운전상황이 처리시설 현장으로부터 약 25km 떨어진 대학 연구실에서 컴퓨터 모니터를 통해 감시· 진단되었으며 문제 발생시 현장 방문 없이 직접 제어 되었다. 원거리 제어를 위해 현장에 설비되어 있는 컴퓨터 제어시설과 연구실 컴퓨터를 네트워크로 연결하였으며 하루 1~2회 처리시설현장 컴퓨터에 접속하여 이상 유· 무를 관찰하고 저장된 data를 다운로드하여 분석하였다.

나. 실험설계 및 운전방법

제 1절에서의 연구를 통해 개발된 ORP와 pHmV-time profile을 이용하는 컴퓨터 자동제어 방법을 처리시설에 적용하고, 돈사폐수 처리에 대한 효율성과 안정성을 파악하여 개발된 완전자동 및 원거리 제어 기술을 최종 평가하였다. 완전자동제어 기술을 단계적으로 평가하기 위해 Table 3-2-1에서와 같이 총 6 real-time control이 (operation I~VI) 행하여 졌으며 각 operation에서의 운전특성과 오염물질 제거 특성이 분석되었다.

Real-time I, II, III는 유입 후 12시간의 Anoxic 조건을 두어 무산소, 혐기상태를 유도하였으며 호기단계는 pHmV-time profile을 이용하여 자동제어 하였다. Real IV는 full real-time control로 무산소공정은 ORP-time profile을 이용하여 제어하였으며, 호기공정은 pHmV- time profile을 이용하여 제어하였다. Real-time V, VI 역시 Full-real-time control이 행하여 졌으며 한 cycle이 3개의 subcycle로 구성 되도록 하여 완전자동 제어 조건하에서 3번 유입, 1번 배출이 이루어지도록 하였다. Real-time V에서는 3번째 Influent 유입 후 Anoxic 조건에서 NKP가 발생한 후 3시간의 혐기성 상태를 유지한 다음 호기적 처리가 진행되도록 하였으나, Real-time VI에서는 이와 같은 혐기공정시간을 두지 않고 진행되도록 하였다.

다. 분석방법

채취된 sample의 분석을 위해 TOC, CODcr, NH_4-N, NO_x-N, PO_4^{3-} MLSS, MLVSS, TS,

TVS, SS, VSS가 분석되었다. NH_4-N, NO_x-N, PO_4^{3-}의 분석은 자동 수질 분석기 (Zellweger)를 사용하여 분석하였으며 총 유기화합물의 분석은 TOC analyzer (TOC-5000A, Shimadzu)를 이용하여 분석하였다. 이외 모든 분석은 standard method (A.P.H.A, 1995)에 준하여 분석하였다.

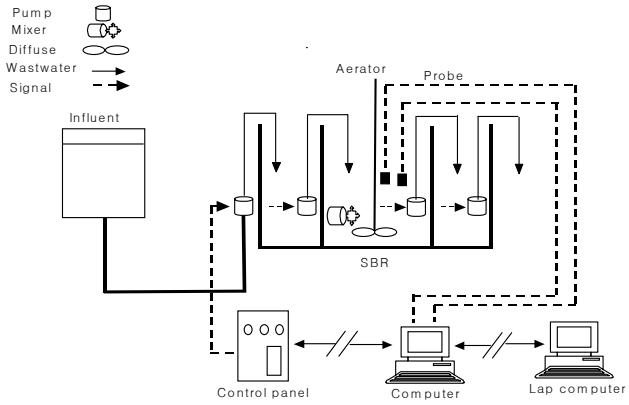


Figure 3-2-1. Schematic of process with on-line computer control system

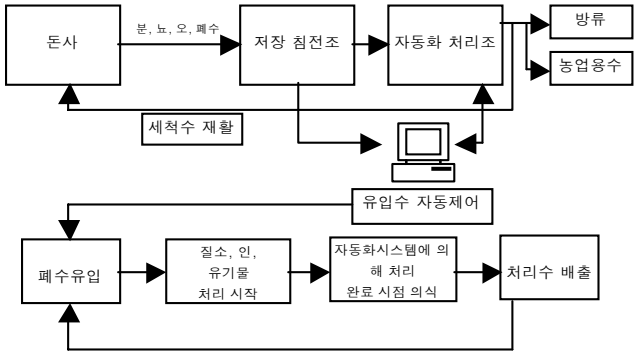


Figure 3-2-2. Schematic of automatic treatment

Figure 3-2-3. Remote control system

Table 3-2-1. Operation modes for SBR

<table>
<tr><th>Operation</th><th>Feed-ing</th><th colspan="10">Reaction</th><th>settle</th><th>Discharge</th></tr>
<tr><td rowspan="2">I</td><td>NA</td><td colspan="4" rowspan="2">M(12h)</td><td colspan="5">A</td><td colspan="2">NA</td></tr>
<tr><td>NM</td><td colspan="5">Real time control</td><td colspan="2">NM</td></tr>
<tr><td rowspan="2">II</td><td>NA</td><td colspan="4" rowspan="2">M(12h)</td><td colspan="5">A</td><td colspan="2">NA</td></tr>
<tr><td>NM</td><td colspan="5">Real time control</td><td colspan="2">NM</td></tr>
<tr><td rowspan="2">III</td><td>NA</td><td colspan="4" rowspan="2">M(12h)</td><td colspan="5">A</td><td colspan="2">NA</td></tr>
<tr><td>NM</td><td colspan="5">Real time control</td><td colspan="2">NM</td></tr>
<tr><td rowspan="2">IV</td><td>NA</td><td colspan="4">M</td><td colspan="5">A</td><td colspan="2">NA</td></tr>
<tr><td>NM</td><td colspan="4">Real time control</td><td colspan="5">Real time control</td><td colspan="2">NM</td></tr>
<tr><td rowspan="2">V</td><td>NA</td><td>M</td><td>A</td><td rowspan="4">Feed-ing</td><td>M</td><td>A</td><td rowspan="4">Feed-ing</td><td>M</td><td>M</td><td>A</td><td colspan="2">NA</td></tr>
<tr><td>NM</td><td colspan="2">Real time control</td><td colspan="2">Real time control</td><td>R-T</td><td>(3h)</td><td>R-T</td><td colspan="2">NM</td></tr>
<tr><td rowspan="2">VI</td><td>NA</td><td>M</td><td>A</td><td>M</td><td>A</td><td>M</td><td colspan="3">A</td><td colspan="2">NA</td></tr>
<tr><td>NM</td><td colspan="2">Real time control</td><td colspan="2">Real time control</td><td colspan="3">Real time control</td><td colspan="2">NM</td></tr>
</table>

NA: No aeration, A: Aeration, NM: NO mixing, M: Mixing, R-T: Real-time control

2. 결과 및 고찰

가. pHmV를 이용한 호기공정의 자동제어

1) ORP와 pHmV-time profile

Real-time control I, II, III에서의 행해진 pHmV-time profile을 이용한 호기공정의 자동제어 알고리즘은 Fig. 3-2-4에 개략적으로 나타나있다.

Fig. 3-2-5와 3-2-6은 이러한 제어 방법으로 운전된 Real-time I, II, III에서 얻어진 서로 다른 특이유형의 ORP 및 pHmV-time profile을 나타낸 것이다. Fig. 3-2-5는 Feeding 후 주어진 12시간의 Anoxic 조건에서 탈질이 일어나지 않은 profile을 Fig. 3-2-6은 완전탈질이 일어난 profile을 보여주고 있다. 완전 탈질이 일어나지 않은 Fig. 3-2-5에서는 Anoxic 기간동안 ORP-mV 값이 100~200 mV의 수준을 나타내고 있으나, Fig. 3-2-6에서는 완전탈질이 이루어져 ORP-mV의 값은 NKP가 나타난 후 급격히 하락되어 -200mV 이하 까지 떨어지는 것을 확인 할 수 있었다. 이 두 그래프는 수처리 시간으로 제어할 때의 문제점을 잘 나타내는데 Fig. 3-2-5에서는 NOx-N의 불완전한 탈질로 인한 수질의 악화를, Fig. 3-2-6은 탈질이 활발이 일어나 빨리 종료됨에 따른 에너지 비용낭비 및 처리용량 감소 문제를 보여준다. 동시에 이 두 그래프는 C/N ratio 즉, TOCs/NOx-N 비의 중요성을 다시 말해주는 것으로 완전탈질이 이루어진 cycle에서의 유출수 내 NOx-N의 농도를 기준으로 첨가된 외부탄소원의 주입비를 추적해본 결과 TOC/NH_4-N의 비가 0.9수준에서도 비교적 효율적인 탈질이 이루어진 것으로 나타남에 따라 track study을 통해 얻은 적정 C/N(TOCs/ NOx-N)비 0.83이 합리적인 결과였음을 알 수 있었다. 하지만, 수처리시간에 의존한 제어가 아닌 실시간 컴퓨터 완전 제어로 이루어진 호기조건에서는 완전탈질 여부와 관계없이 항상 효율적으로 NBP가 발생하여 자동제어가 가능하였다. Fig. 3-2-7 (a),(b)는 완전 탈질이 일어나지 않은 Anoxic 단계와 aerobic 단계에서의 ORP와 pHmv-time profile과 질소 거동을 보여주는 것으로 12 시간 동안의 Anoxic 조건에서 NOx-N의 탈질이 종료되지 않아 NBP가 나타나지 않은 채 다음 처리단계인 호기적 처리가 진행되었음을 알 수 있다. 하지만, 호기단계에서는 NBP 시점이

pHmV curve 상에서 잘 나타났고, 이 시점에서 NH_4-N가 0mg/L가 되는 것을 볼 수 있어 제어가 제대로 이루어짐을 확인하였다. ORP-time profile 상에서는 NBP를 확인할 수 없었다.

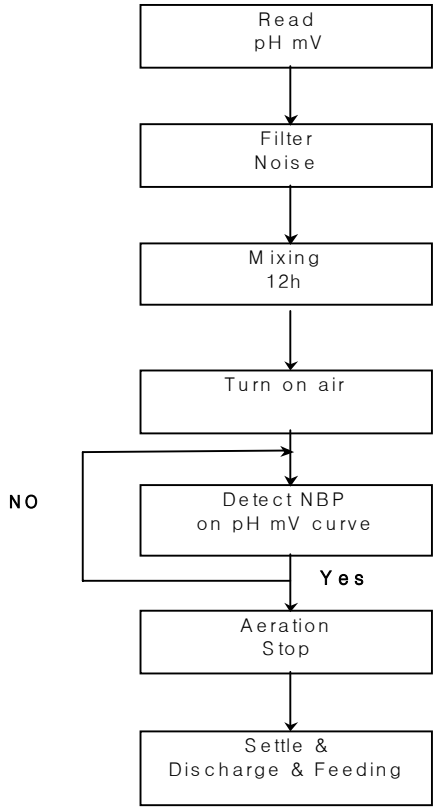


Figure 3-2-4. Control strategy in real-time I, II, III

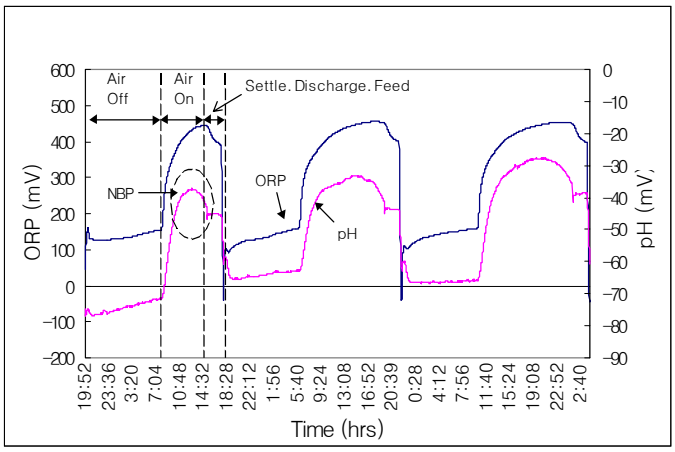


Figure 3-2-5. Operational mode and ORP/pH-mV profile

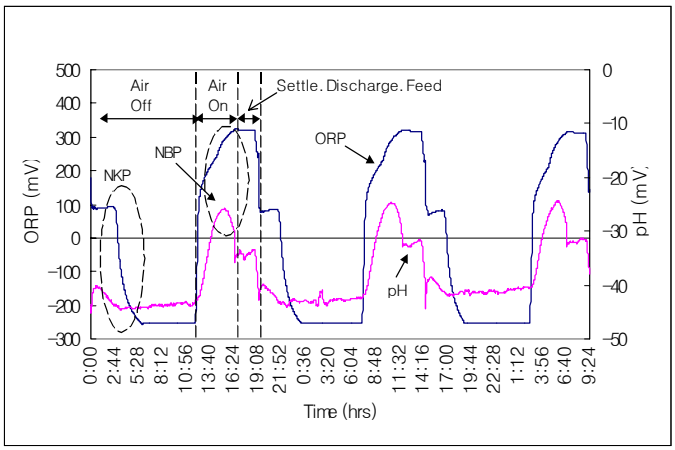


Figure 3-2-6. Operational mode and ORP/pH-mV profile

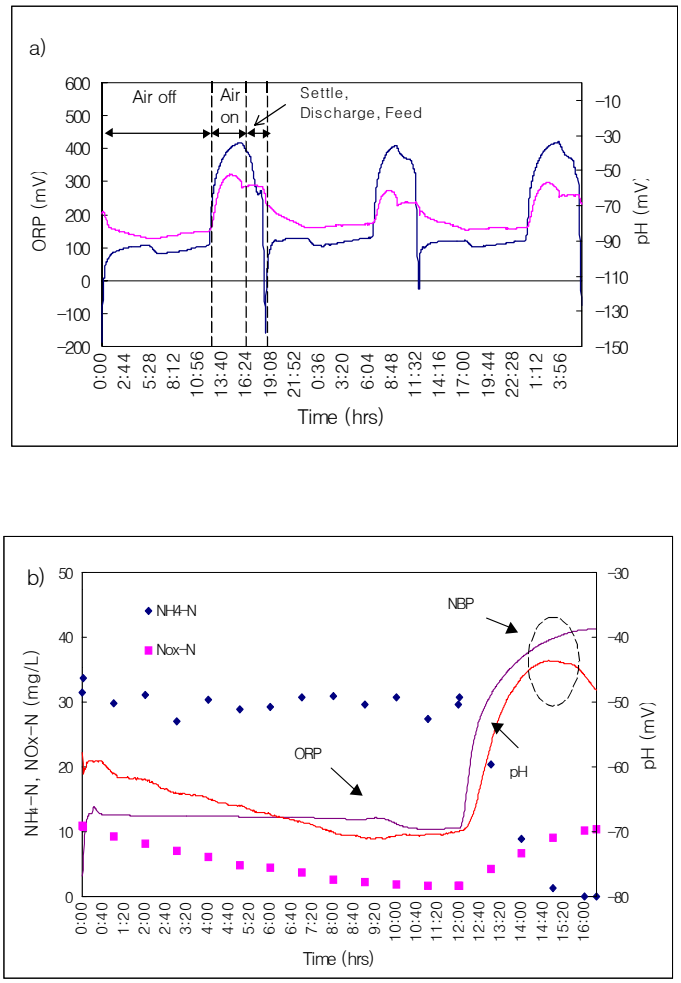


Figure 3-2-7. Track of N and ORP/pH mV profile

2) 운전특성

Table 3-2-2는 real-time I, II, III 시험에 사용된 돈사 폐수의 성상을 나타낸 것이다. 유입수 내 평균 CODcr과 NH_4-N의 농도는 2328mg/L와 1063mg/L로 평균 C/N (CODcr/NH_4-N)은 2.2 수준으로서 안정적인 질소 제거를 위해서는 유기물의 농도가 부족한 것으로 나타났다. 또한, TVS/TS ratio가 0.47로 나타나 오염물질 중 유기물의 함량이 적었던 것으로 판단되며, VSS/SS ratio는 0.81수준으로 나타나 부유물질의 대부분은 유기물로 구성됨을 알 수 있었다. 또한, SS/TS ratio가 0.16으로 대부분의 오염물질은 용존 상태로 폐수 내 존재함을 알 수 있었다.

Table 3-2-3, 3-2-4, 3-2-5는 호기적 처리단계의 Real-time control 조건하에서 얻어진 처리효율과 제거 특성을 나타낸 것이다. Real-time I의 경우 TOCs 부하량과 NH_4-N의 부하량은 각각 80.7, 78.6g/m^3.cycle 였고, 오염물질의 평균 제거 효율은 TOCs, CODscr, NH_4-N, PO_4^{3-}, TS, TVS, SS, VSS 각각 80.5, 78.6, 100, -26.6, 23.2, 61.3, 44.4, 59%로 나타났다.

Real-time II의 경우는 TOCs 부하량과 NH_4-N의 부하량이 각각 17.7, 15.9g/m^3.cycle로 Real-time I에서 보다 낮았음에도 불구하고 평균제거 효율이 TOCs, CODscr, NH_4-N, PO_4^{3-}, TS, TVS, SS, VSS 각각 48.9, 72.9, 100, -16.5, -43.4, -73.7, -82.5%로 암모니아를 제외한 오염물질의 제거 효율이 I보다 낮게 나타났다. 이는 Fig. 3-2-9, 3-2-10에 나타낸것과 같이 유기물의 제거효율은 TOCs 기준 1kg/cycle이하에서는 부하량이 낮을수록 제거효율이 감소하기 때문으로 판단된다.

Real-time III의 평균 TOCs와 NH_4-N의 부하량은 각각 35.7, 26.7g/m^3.cycle 이었으며 오염물질의 평균 제거 효율은 TOCs, CODscr, NH_4-N, PO_4^{3-}, TS, TVS, SS, VSS 각각 82.5, 41.3, 100, 22.6, 22.2, 38.8, -24.4, 10.9로 나타났다. Real-time I, II, III에서 고형물의 제거효율이 negative 값을 보인 것은 유출수 배출시 상당량의 고형물이 함께 배출되었기 때문이며 인의 제거가 없이 오히려 늘어난 것은 완전 탈질이 일어나지 않음에 따라 인의 용출되는 조건이 형성되지 않았기 때문으로 사료되며, 또한 유출수 배출시 넘어온 고형물에 기인한 것으로도 추측된다.

Table 3-2-2. Characteristics of wastewater (unit : mg/L)

Parameter	Influent			
(mg/L)	Means	Min.	Max.	St. Dev
TOCs	1152.6	50.4	3062.0	787.2
CODcrs	2328.2	142.1	6658.6	1548.9
NH_4-N	1062.7	162.2	1757.4	479.5
NOx-N	0.5	0.0	2.6	0.7
PO_4^{3-}	20.6	2.4	48.8	9.8
TS (g/L)	3.64	0.57	6.82	1.68
TVS (g/L)	1.70	0.15	3.61	0.88
SS (g/L)	0.57	0.07	1.75	0.40
VSS (g/L)	0.46	0.06	1.56	0.35

Table 3-2-3. Removal efficiencies in Real-I

Parameter	Influent				Effluent				Removal
(mg/L)	Means	Min.	Max.	St. Dev	Means	Min.	Max.	St. Dev	(%)
TOCs	1453.94	631.00	2440.00	533.23	283.38	223.20	405.20	50.02	80.5
CODcrs	4069.05	2353.38	6658.63	1329.51	872.57	199.35	4231.87	963.30	78.6
NH_4-N	1414.56	901.00	1713.29	231.33	0.00	0.00	0.00	0.00	100
NOx-N	0.21	0.00	1.07	0.35	22.90	8.62	43.63	10.91	
PO_4^{3-}	19.07	8.87	37.71	8.17	24.16	18.34	28.23	2.94	-26.6
TS (g/L)	4.16	3.19	5.36	0.69	3.19	2.94	3.61	0.18	23.2
TVS (g/L)	1.93	1.33	2.64	0.43	0.75	0.65	0.99	0.09	61.3
SS (g/L)	0.40	0.27	0.60	0.09	0.22	0.16	0.36	0.06	44.4
VSS (g/L)	0.30	0.20	0.49	0.08	0.12	0.10	0.17	0.02	59

Table 3-2-4. Removal efficiencies in Real-II

Parameter	Influent				Effluent				Removal
(mg/L)	Means	Min.	Max.	St. Dev	Means	Min.	Max.	St. Dev	(%)
TOCs	318.68	166.60	618.90	172.03	162.82	146.60	193.40	17.74	48.9
CODcrs	1645.83	583.16	3648.85	1054.75	446.54	196.87	840.01	244.13	72.9
NH_4-N	557.64	458.85	655.23	69.19	0.00	0.00	0.00	0.00	100
NOx-N	0.05	0.00	0.32	0.13	1.86	0.00	5.24	2.32	
PO_4^{3-}	12.28	11.60	13.47	0.66	14.32	13.38	14.90	0.52	-16.5
TS (g/L)	1.65	1.19	2.12	0.33	2.37	1.97	2.70	0.29	-43.4
TVS (g/L)	0.75	0.44	1.08	0.25	0.62	0.41	0.85	0.17	17.4
SS (g/L)	0.28	0.13	0.42	0.11	0.48	0.12	0.62	0.17	-73.7
VSS (g/L)	0.14	0.06	0.21	0.05	0.26	0.04	0.45	0.19	-82.5

Table 3-2-5. Removal efficiencies in Real-III

Parameter	Influent				Effluent				Removal
(mg/L)	Means	Min.	Max.	St. Dev	Means	Min.	Max.	St. Dev	(%)
TOCs	643.29	50.40	2124.00	650.27	112.66	73.18	152.60	32.76	82.49
CODcrs	142.13	142.13	4435.01	1049.29	83.38	83.38	656.50	138.69	41.33
NH_4-N	480.73	162.16	1096.32	306.05	0.00	0.00	0.00	0.00	100
NOx-N	0.35	0.00	1.78	0.48	7.75	0.00	22.45	8.41	
PO_4^{3-}	18.39	12.82	35.65	5.41	14.24	10.63	20.94	2.32	22.58
TS (g/L)	2.40	0.57	5.22	1.68	1.86	0.00	4.64	1.17	22.22
TVS (g/L)	1.22	0.15	2.82	0.93	0.74	0.00	2.84	0.86	38.83
SS (g/L)	0.59	0.07	1.75	0.52	0.74	0.00	5.04	1.43	-24.39
VSS (g/L)	0.49	0.06	1.56	0.45	0.54	0.00	3.37	1.04	-10.94

Fig. 3-2-8은 C/N ratio에 따른 TOCs의 제거특성을 나타낸 것이다. 유입수의 C/N ratio가 높을수록 TOCs의 제거효율이 좋은 것을 알 수 있었으며, 특히 C/N ratio 1.0이상에서 좋은 처리 효율을 얻을 수 있음을 알 수 있었다. 또한 C/N ratio와 관계없이 유출수 내 TOCs의 농도는 일정한 것으로 나타났다.

또한 유기물 부하량에 따른 처리효율과 유출수 내 유기물 농도를 비교 분석한 결과 (Fig 3-2-9, 3-2-10) 유기물 부하량이 증가할 수 록 제거효율이 우수한 것을 알 수 있었고 제거량이 일정한 비율로 증가하였다. CODcr 기준 적정 loading rate은 약 110g/m^3.cycle 정도로 파악되며 TOCs 기준으로는 두 그래프를 비교하여 판단할 때 약 55g/m^3.cycle 정도일 것으로 추정되었다.

질소의 경우 호기적 처리공정만을 Real-time으로 제어한 Real-Ⅰ,Ⅱ, Ⅲ에 있어서의 평균 NH_4-N loading rate은 각각 78.6g/m^3.cycle, 15.9g/m^3.cycle, 26.7g/m^3.cycle로 서로 다른 부하량 조건에서도 NH_4-N의 완전제거가 이루어졌고, 평균 NO_x-N 농도도 Real-Ⅰ: 22.9mg/L, Real-Ⅱ: 1.86mg/L, Real-Ⅲ: 7.75mg/L로 비교적 탈질효과도 만족스러웠으며 예상대로 유출수내 NO_x-N의 평균 농도는 NH_4-N의 loading과 비례하게 나타났다. 이러한 유출수의 NOx-N의 농도가 NH_4-N의 부하량과 비례하는 것은 처리모드 구성이 추가탄소원의 소모량을 최소화하기 위해 전탈질 공정을 선택함에 따른 것으로 판단된다. 실시간 컴퓨터 자동 제어에 있어서는 부하량에 관계없이 호기적 처리과정 중 항상 100%의 NH_4-N의 제거가 보장되기 때문에 NH_4-N을 기준으로 한 loading rate은 유출수 내 NO_x-N 농도가 20mg/L이하이고 유출수 농도도 비교적 일정한 수준인 약 60g/m^3.cycle가 적정 수준인 것으로 파악된다(Fig 3-2-11).

Real-time I, II, III에서 평균 수처리 시간은 각각 24.5, 19.3, 18.3시간으로 평균 0.98, 1.24, 1.31cycle/d이 운전되었다. 따라서, Real-time I, II, III에서의 TOCs의 평균 처리량은 각각 79.1, 21.9, 46.8g/m^3.d였으며 NH_4-N의 처리량은 77.0, 19.7, 35.0g/m^3.d 였다.

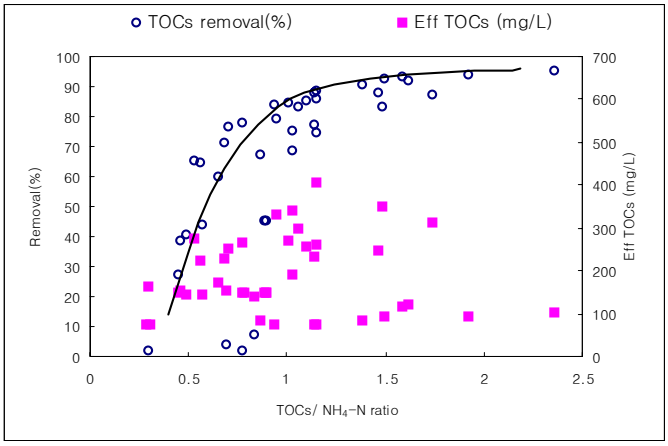


Figure 3-2-8. Removal characteristics of TOCs vs C/N ratio

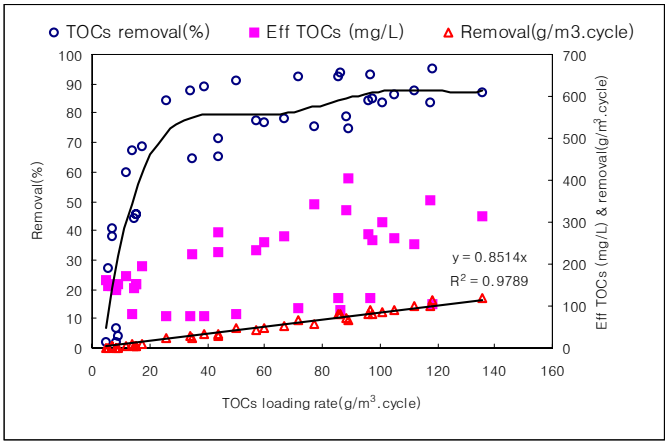


Figure 3-2-9. Removal efficiency vs TOCs loading rate

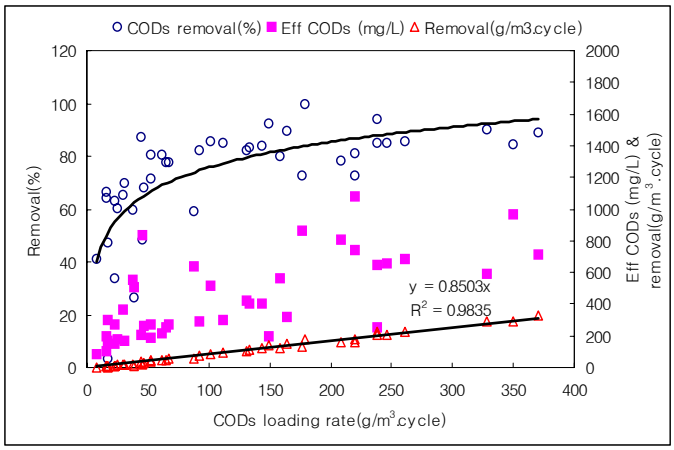


Figure 3-2-10. Removal efficiency vs CODcr loading rate

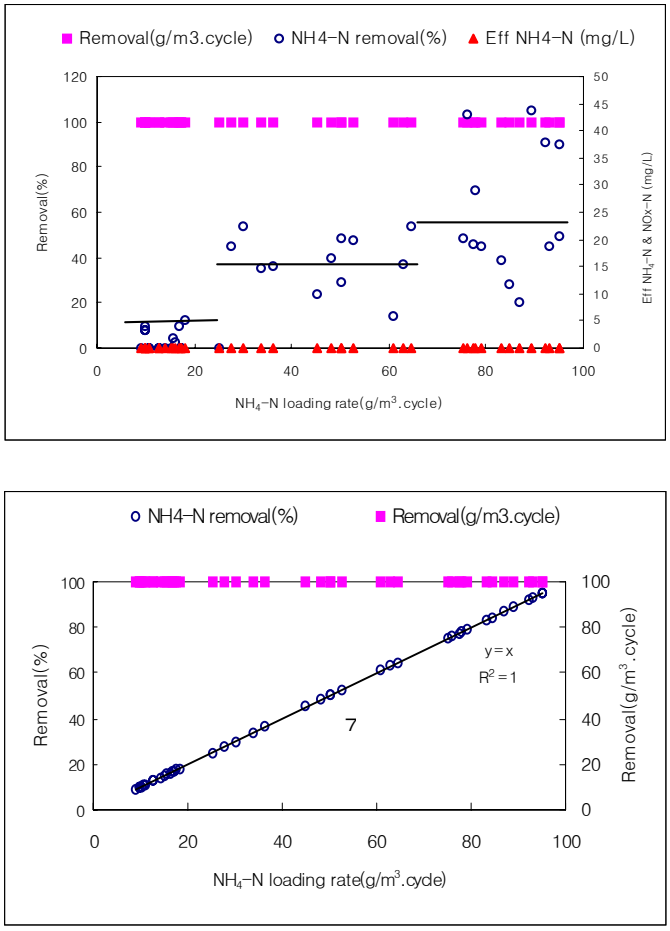


Figure 3-2-11. N removal characteristic in real-time control vs loading rate

나. ORP와 pH를 병용 이용한 무산소/호기 공정의 자동제어

1) Real-time IV에서의 운전특성

Real-time IV는 real-time I, II, III와는 달리 무산소/호기 공정모두 자동 제어 하였으며, 무산소 공정의 자동제어는 ORP mV-time profile이 이용되었고, 호기 공정의 자동제어는 pH mV-time profile이 사용되었다. 자동제어 모드는 Fig. 3-2-12에서 보는 것과 같이 유입 후 ORP curve 상에서 NKP가 발견되면 3시간의 혐기적 시간이 주어진 다음 다음단계인 호기단계가 진행되도록 하였다. 그 후 호기공정에서 NBP가 발견되면 호기를 중지하고 침전, 방류가 순차적으로 이루어지도록 하였다.

가) ORP와 pH mV-time profile

Fig. 3-2-13은 무산소/호기공정이 모두 완전 자동 제어된 Real-time IV에서 얻어진 ORP와 pHmV-time profile을 나타낸다. 폐수의 유입 후 무산소 조건에서 ORP-time profile 상에서 NKP가 발생한 후 3시간동안의 혐기적 조건이 주어졌으며 그 후 호기적 조건이 시작되었음을 알 수 있다. 또한 호기적 처리 중 pHmV curve 상에서 NBP가 발생 하였을 때 모든 처리가 중지되고 침전 및 배출이 순차적으로 이루어 졌음을 알 수 있다. Real-time IV 운전 중 ORP 상에서 지속적으로 가짜 NBP가 발생하여 ORP를 호기적 처리 공정의 제어에 이용 시 발생하는 문제점을 추측 할 수 있었다. Fig. 3-2-14는 질소원의 거동과 ORP 및 pHmV의 변화를 보여주는 것으로서 무산소 처리 중 ORP상에서 NKP가 발생할 때 NOx-N의 농도가 0mg/L로 됨을 확인할 수 있었으며 호기적 처리 중 pHmV curve에서 NBP가 발생할시 반응조 내 NH_4-N의 산화가 종료되었음을 알 수 있다. 또한 호기적 처리 중 ORP curve 상에서 나타나는 굴곡점은 가짜 NBP로서 이때 NH_4-N의 산화가 종료되지 않았음을 알 수 있다.

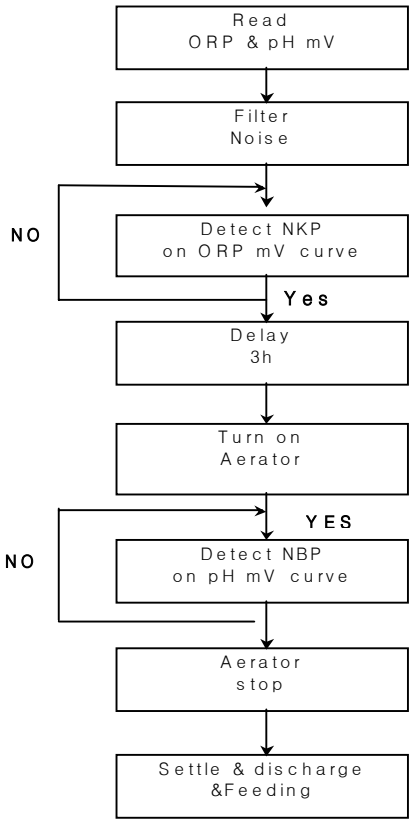


Fig 3-2-12. Control strategy in real-time IV

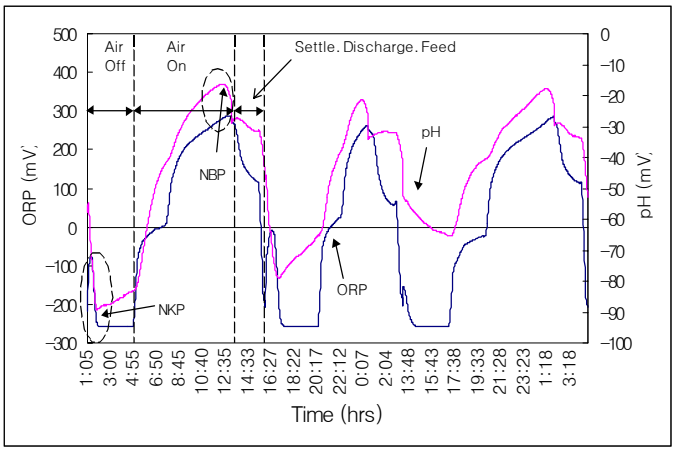


Figure 3-2-13. Typical ORP/pH profile in full real-time control

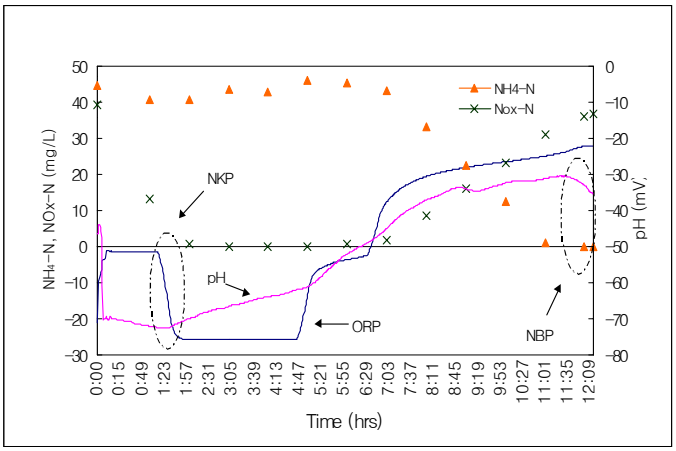


Figure 3-2-14. Tracks of nitrogen in full real-time control

나) 운전특성

Table 3-2-6는 real-time IV 시험에 사용된 돈사 폐수의 성상을 나타낸 것이다. 유입수 내 평균 CODcr과 NH_4-N의 농도는 2316.0mg/L와 1391.2mg/L로 평균 C/N(CODcr/NH_4-N)은 1.67 수준으로서 안정적인 질소 제거를 위해서는 유기물의 농도가 부족한 것으로 나타났다. 또한, TVS/TS ratio가 0.43으로 나타난 것으로 보아 약 57%가 유기물이 아닌 것으로 나타났으며, VSS/SS ratio는 0.8수준으로 나타나 SS의 경우에는 대부분 유기물로 구성됨을 알 수 있다. 또한, SS/TS ratio가 0.18로 나타나 고형물의 대부분이 용존 상태인 것을 알 수 있었다.

Real-IV에서 얻어진 평균 유기물, 질소의 loading rate은 TOCs, CODcr, NH_4-N 각각 100.4g/m^3.cycle, 131.7g/m^3.cycle, 77.3g/m^3.cycle이었으며, 평균 처리효율은 TOCs, CODscr, NH_4-N, PO_4^{3-}, TS, TVS, SS, VSS 각각 89.3, 82.9, 100, 19.4, 34.3, 58.6, 78.9, 22.2%로 유기물과 질소의 제거에 있어 높은 제거효율을 보였다. 그러나 유출수의 NOx-N의 농도는 평균 26.1mg/L로 다소 높게 나타났다.

Fig 3-2-15는 C/N ratio에 따른 TOCs 제거 특성을 나타낸 것이다. Real-time I, II, III에서와 같이 C/N ratio가 높을수록 TOCs의 제거 효율이 좋아 지는 것을 볼 수 있었다. 유기물 부하량에 따른 처리효율과 유출수 농도를 비교분석한 결과 (Fig. 3-2-16, 3-2-17) 2단계 SBR 시험과 real-time I, II, III에서와 같이 유기물 부하량이 증가할 수 록 제거 효율이 높아짐을 알 수 있었고, 부하량이 높아짐에 따라 일정한 비율로 제거량이 증가하는 것을 알 수 있었다.

NH_4-N의 경우 loading rate 증가와 관계없이 항상 100%의 제거 효율을 보여 유출수의 NH_4-N의 농도는 항상 0mg/L을 나타내었다(Fig. 3-2-18). NH_4-N 제거효율이 이렇게 항상 일정하고 높게 나타나는 것은 개발 적용된 ORP와 pH mV를 병용하는 실시간 컴퓨터 완전 자동 기술의 효율을 보여주는 것으로 실시간 자동 제어 하에서는 유입수의 NH_4-N의 농도와 관계없이 호기적 처리 과정 중 질산화의 완료가 항상 보장되기 때문이다(Fig.3-2-19) 또한, NH_4-N loading rate이 증가함에 따라 유출수 내의 NOx-N의 농도는 증가하는 것을 볼 수 있었는데, 이는 호기공정의 자동 제어

에서 언급한 것과 같이 전 탈질 공정을 선택함에 따라 나타나는 현상으로 사료된다.

또한 PO_4^{3-}의 제거효율은 호기적 처리단계만을 자동 제어한 경우(Real-Ⅰ,Ⅱ,Ⅲ) 보다 높았는데, 이는 Full real-time control의 경우에 무산소 처리단계에서 완전 탈질이 일어난 후 Bio-P-bacteria로 부터 인의 release에 필연적인 일정시간의 anaerobic 상태가 항상 유지되었기 때문이다. Fig. 3-2-20은 Real-Ⅰ,Ⅱ,Ⅲ에서의 NKP가 나타나지 않았을 시의 인의 거동과 Real-Ⅳ에서 NKP가 항상 나타나도록 유지되었을 시의 인의 거동을 나타낸 것이다.

Fig. 3-2-21은 각 cycle에서의 NBP와 NKP 발생까지 소요된 시간의 변이를 나타낸 것으로서 완전 질산화 및 탈질이 이루어지는데 까지 경과한 시간은 NH_4-N의 loading rate보다는 주로 시스템 내의 미생물 활성에 따라 차이가 나타나는 것으로 나타났다. Real-time Ⅳ에서 1cycle의 평균 시간은 14.5h 이었으며 1일 1.66cycle이 운전되어 NH_4-N 처리량은 평균 128.3g/m^3.d로 나타났다. 하지만, 시험된 Real-time Ⅳ의 유출수 NOx-N 농도는 평균 26.1mg/L로 나타나 전 탈질 공정의 한계를 보여주었다.

Table 3-2-6. Removal efficiencies in Real-time IV

Parameter (mg/L)	Influent				Effluent				Removal (%)
	Means	Min.	Max.	St. Dev	Means	Min.	Max.	St. Dev	
TOCs	1806.3	925.8	3062.0	647.9	192.4	134.8	457.9	76.4	89.3
CODcrs	2361.2	1256.3	5050.3	1065.2	403.9	85.1	988.5	324.5	82.9
NH_4-N	1391.2	1085.3	1765.1	223.9	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0
NOx-N	1.3	0.0	5.2	1.4	26.1	0.0	83.2	23.3	
PO_4^{3-}	25.2	11.4	48.8	13.0	20.3	6.7	42.0	11.3	19.4
TS (g/L)	6.0	5.0	6.8	0.6	3.9	2.1	11.3	3.4	34.3
TVS (g/L)	2.6	1.4	3.6	0.8	1.1	0.1	4.3	1.4	58.6
SS (g/L)	1.1	0.5	1.6	0.3	0.2	0.0	1.5	0.5	78.9
VSS (g/L)	0.9	0.3	1.4	0.4	0.7	0.0	5.3	1.7	22.2

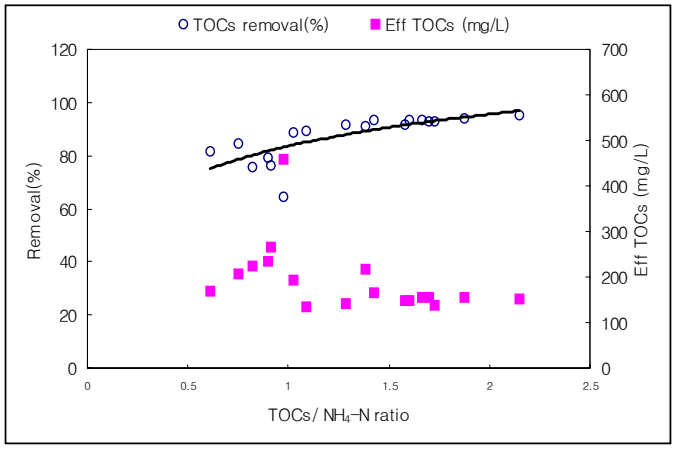


Figure. 3-2-15. Removal characteristics of TOCs vs C/N ratio

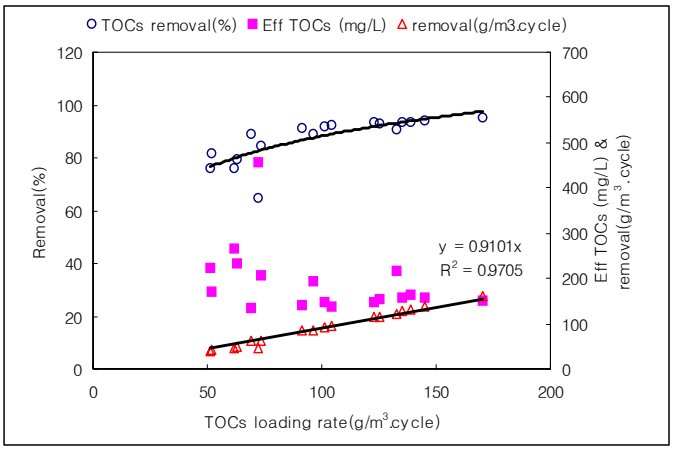


Figure 3-2-16. Removal efficiency vs TOCs loading rate

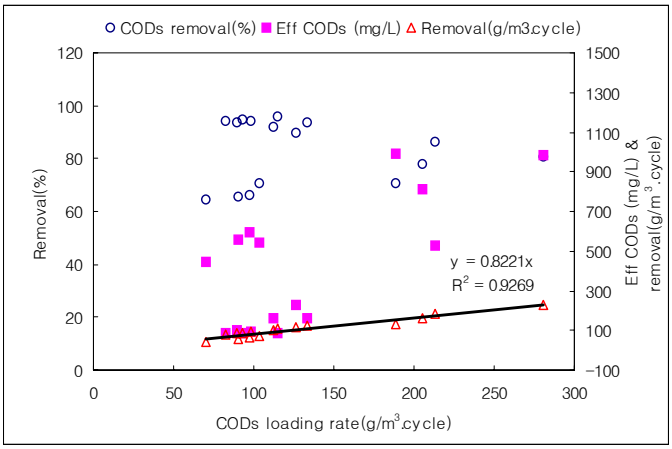


Figure 3-2-17. Removal efficiency vs CODcr loading rate

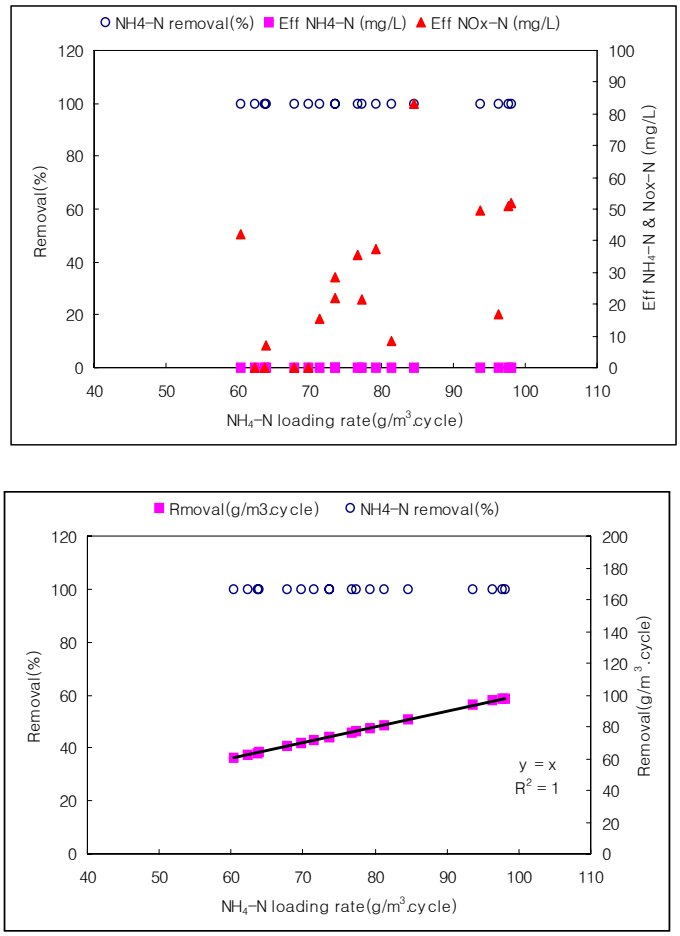


Figure 3-2-18. N removal characteristic in real-time control vs loading rate

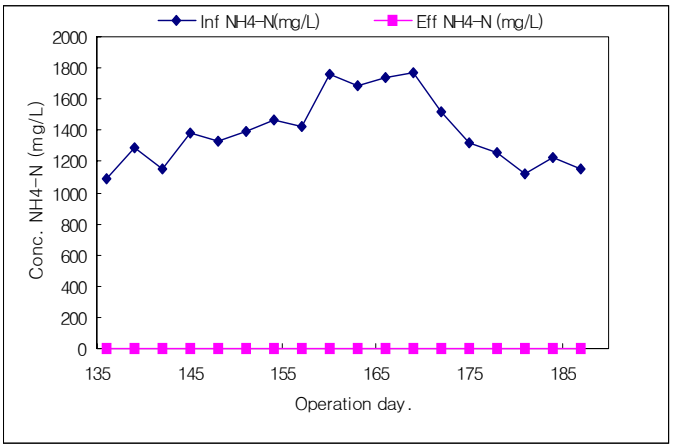


Figure 3-2-19. Variations of NH_4-N(mg/L)

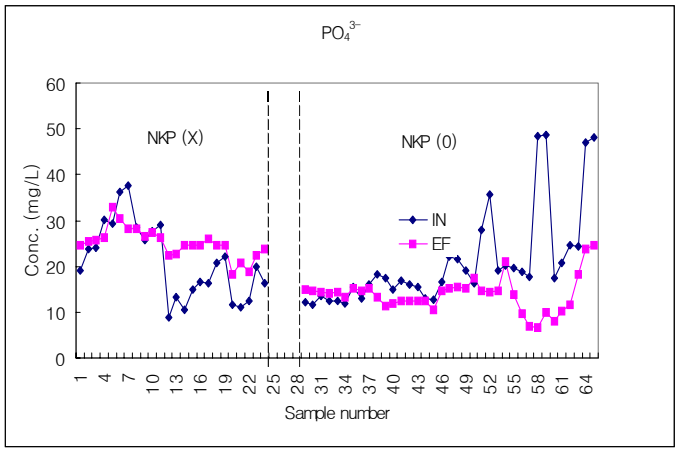


Figure 3-2-20. Track of PO_4^{3-}

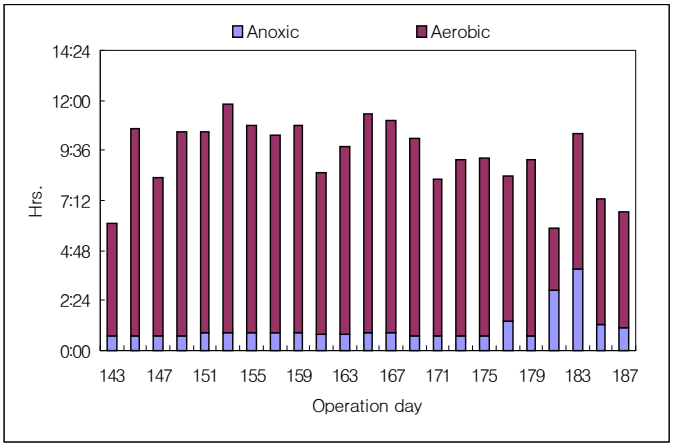


Figure 3-2-21. Variation of cycle time in full real-time control

2) Real-time V, VI에서의 운전특성

Real-time V, VI에서는 무산소/호기공정의 자동제어 조건하에서 처리 cycle이 3개의 subcycle로 구성되어 폐수유입 3회, 유출 1회가 이루어지도록 하였다. 3개의 subcycle의 운전은 모두 컴퓨터를 사용한 실시간 자동제어를 통해 이루어졌으며, Fig. 3-2-22, 3-2-23과 같은 순서로 프로그램 되었다. Real-time V는 3번째 유입 후 ORP curve에서 NKP 발생한 다음 3시간의 혐기성 조건을 주어 인의 용출을 유도하였으며, Real-time VI에서는 혐기성공정 없이 바로 호기공정을 실시하였다.

가) ORP와 pH mV-time profile

Fig. 3-2-24는 real-time V의 운전 중 얻어진 전형적인 ORP, pHmV curve pattern을 나타낸다. 폐수 유입 후 무산소 조건에서 탈질이 진행됨에 따라 ORP 값은 점차 하락 하여 NKP가 발생한 후 처리가 종료되고 호기적 처리가 시작 되었다. 호기적 처리단계에서는 pHmV curve 상에서 NBP가 인식되었을 때 모든 처리가 중지되고 새로운 폐수가 유입되었음을 알 수 있다. 질소의 거동을 나타낸 Fig. 3-2-25을 보면 ORP curve 에서 NKP가 나타나는 시점이 NOx-N이 0mg/L가 되는 시점임을 알 수 있으며, pHmV 상에서 NBP가 나타나는 시점이 바로 NH_4-N이 0mg/L되는 시점임을 확인 할 수 있다.

또한, Fig. 3-2-26은 Real-time VI에서의 전형적인 ORP, pHmV curve pattern을 보여주고 있는 것으로 모든 처리가 Fig. 3-2-23의 알고리즘에 따라 자동제어 되었음을 알 수 있다.

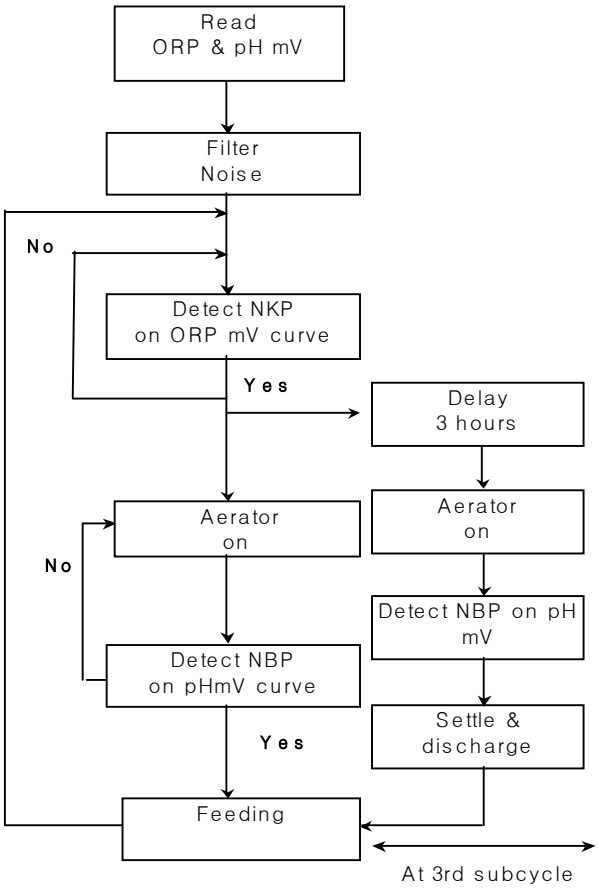


Figure 3-2-22. Control strategy in real-time V

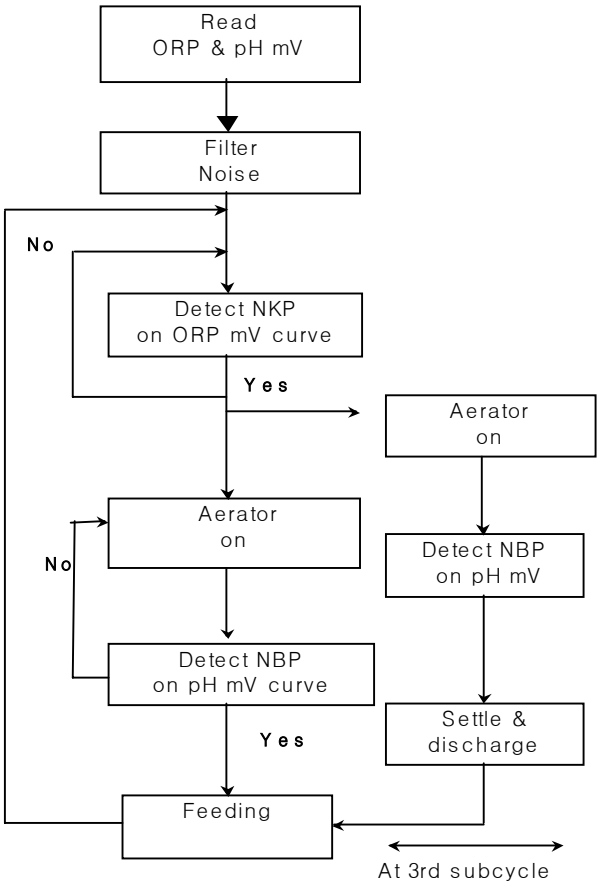


Figure 3-2-23. Control strategy in real-time VI

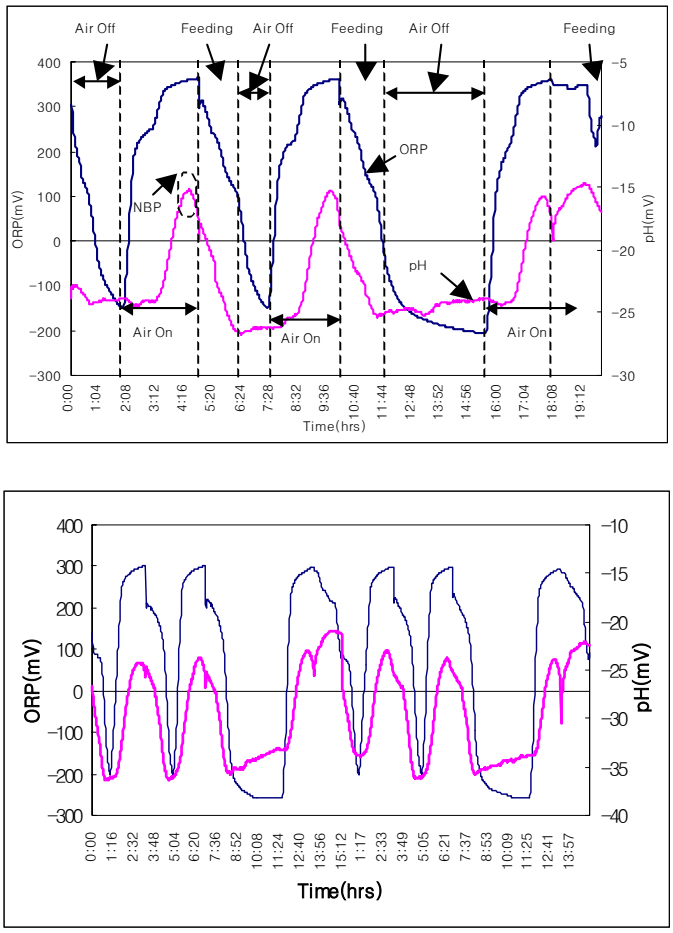


Figure 3-2-24. Typical ORP/pH profile in full real-time control V

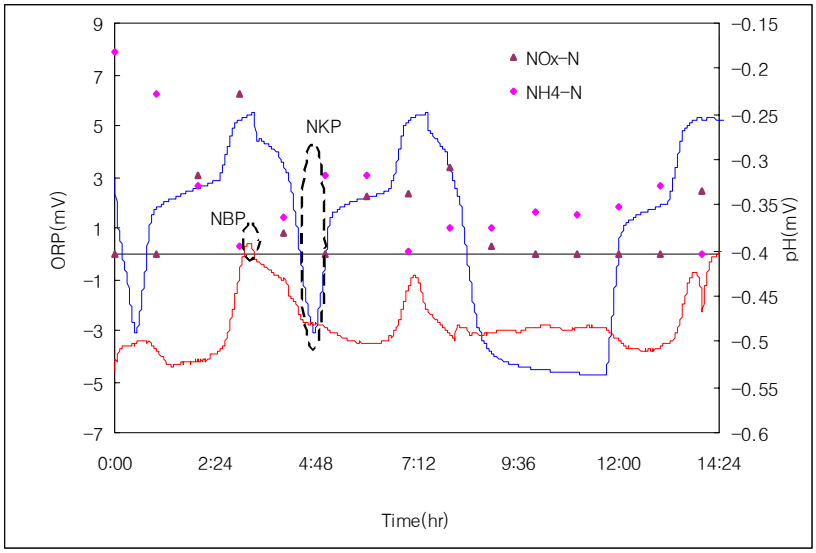


Figure 3-2-25. Tracks of nitrogen in full real-time control V

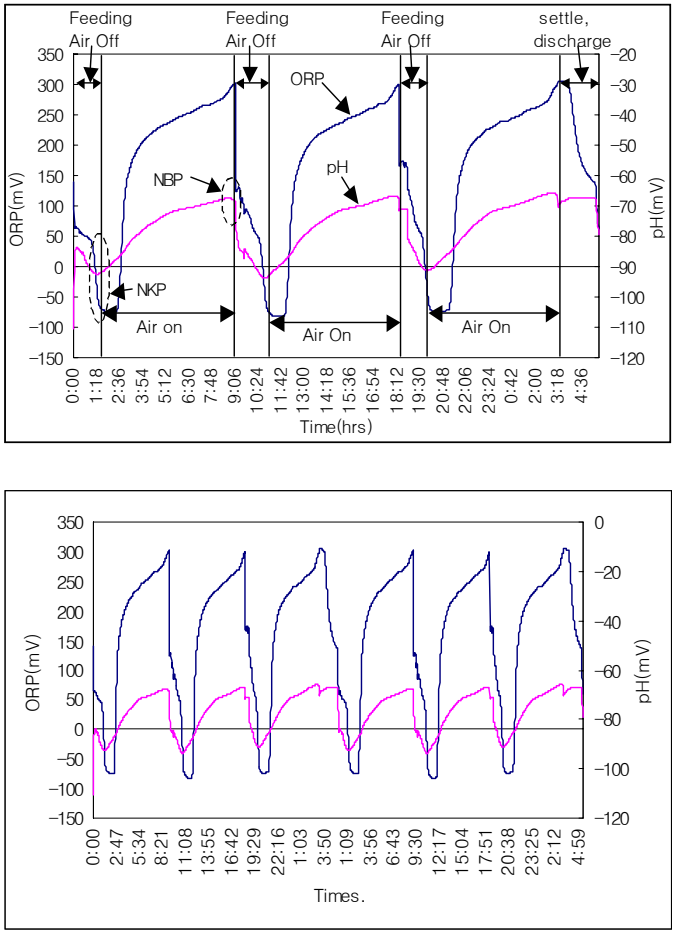


Figure 3-2-26. Typical ORP/pH profile in full real-time control VI

나) 운전특성

Table 3-2-7, 8은 real-time V, VI의 시험에 사용된 돈사폐수의 특성과 제거 효율을 나타낸 것이다. Real-time V의 유입수 평균 CODcr과 NH_4-N은 각각 548.5mg/L, 589.3mg/L였으며 C/N ratio(CODcr/NH_4-N)는 0.93수준으로 나타났다. 또한 TVS/TS ratio가 0.28수준으로 대부분의 고형물들이 유기물이 아닌 것을 알 수 있었으나, VSS/SS ratio은 0.75로 나타나 부유고형물은 유기물질을 많이 함유하는 것으로 나타났다. 또한 SS/TS ratio가 0.16으로 나타나 고형물의 대부분이 폐수 내에 용존 된 상태로 존재하는 것을 알 수 있었다. Real-time VI에서의 유입수 평균 CODcr과 NH_4-N은 각각 2771.9mg/L, 1301.4mg/L였으며 C/N ratio(CODcr/NH_4-N)는 2.13 수준이었다. TVS/TS ratio는 0.41수준, VSS/SS ratio는 0.5, SS/TS ratio는 0.19로 나타났다.

운전결과 Real-time V에서 얻어진 CODcr, TOCs, NH_4-N의 평균 loading rate은 47.8g/m^3.cycle, 20.3g/m^3.cycle, 54.9g/m^3.cycle 였으며, 평균 처리효율은 TOCs, CODscr, NH_4-N, PO_4^{3-}, TS, TVS, SS, VSS 각각 43.5, 29.5, 100, -35.1, -36.8, -50.3, -162.4, -54.9%로 나타났다. 또한, 유출수의 NOx-N의 농도는 평균 4.8mg/L로 매우 낮게 나타났다. Real-time V에서 얻어진 유출수 내 고형물 증가 현상은 Real-time I, II, III에서와 같이 침전 후 유출수 decant 과정에서 다량의 고형물이 함께 배출되었기 때문이며 이는 유출수내 인 증가의 원인으로도 작용하였을 것으로 판단된다. 또한 시스템 운전 시 슬러지 폐기 없이 운전되어 시스템 내 인의 축적이 일어난 것으로 판단된다.

Real-time VI에서 CODcr, TOCs, NH_4-N의 평균 loading rate은 329.7g/m^3.cycle, 135.9g/m^3.cycle, 159.4g/m^3.cycle 였으며, 평균 처리효율은 TOCs, CODscr, NH_4-N, PO_4^{3-}, TS, TVS, SS, VSS 각각 82.3, 66.2, 100, 4.8, 20.0, 30.4, 29.3, 48.1%로 나타났다. 유출수의 NOx-N의 농도는 평균 10.4mg/L로 낮게 나타났다.

Real-time V, VI의 서로 다른 운전조건과 부하량 수준에서도 NH_4-N의 경우 100%의 제거 효율을 얻을 수 있었는데 이는 바로 실시간 자동제어 기술의 유용성을 나타내는 것이라 할 수 있다.

Table 3-2-7. Removal efficiencies in Real-V

Parameter	Influent				Effluent				Removal
(mg/L)	Means	Min.	Max.	St. Dev	Means	Min.	Max.	St. Dev	(%)
TOCs	219.1	87.7	460.7	79.6	123.8	50.2	340.5	49.8	43.5
CODcrs	548.5	165.4	1336.1	292.9	386.5	82.3	1792.0	430.7	29.5
NH_4-N	589.3	245.9	1037.3	150.8	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0
NOx-N	1.7	0.0	12.9	2.8	4.8	0.0	28.6	7.8	
PO_4^{3-}	16.6	2.6	35.7	8.0	22.4	15.8	30.3	3.6	-35.1
TS(g/L)	2.5	1.3	5.3	1.2	3.4	1.0	10.3	2.7	-36.8
TVS(g/L)	0.7	0.4	1.7	0.4	1.1	0.3	3.9	1.1	-50.3
SS(g/L)	0.4	0.1	0.9	0.2	1.1	0.1	9.1	2.0	-162.4
VSS(g/L)	0.3	0.1	0.7	0.1	0.4	0.1	2.5	0.7	-54.9

Table 3-2-8. Removal efficiencies in Real-VI

Parameter	Influent				Effluent				Removal
(mg/L)	Means	Min.	Max.	St. Dev	Means	Min.	Max.	St. Dev	(%)
TOCs	1162.9	499.8	2319.0	427.7	206.2	78.0	400.1	76.0	82.3
CODcrs	2771.9	748.2	6462.8	1718.3	938.0	216.1	2563.0	619.8	66.2
NH_4-N	1301.4	682.2	2644.6	443.1	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0
NOx-N	0.0	0.0	0.1	0.0	10.4	0.0	32.7	10.3	
PO_4^{3-}	12.8	3.1	26.4	5.9	12.2	7.5	22.6	3.6	4.8
TS(g/L)	3.1	1.9	4.5	0.8	2.5	1.3	3.6	0.5	20.0
TVS(g/L)	1.3	0.8	1.9	0.4	0.9	0.4	1.6	0.4	30.4
SS(g/L)	0.6	0.4	0.8	0.1	0.4	0.1	0.9	0.2	29.3
VSS(g/L)	0.3	0.1	0.6	0.1	0.2	0.1	0.4	0.1	48.1

Fig. 3-2-27은 C/N ratio에 따른 TOCs 제거 특성을 나타낸 것으로 C/N ratio가 높을수록 제거효율이 좋아 지는 것을 알 수 있었으며 Real-time I, II, III, IV에서와 마찬가지로 C/N ratio 1.0이상에서 80%이상의 높은 처리효율을 나타내었다. 또한 Real-time I, II, III, IV에서와 같이 TOCs와 CODscr의 부하량이 증가함에 따라 점차 제거 효율 역시 증가함을 볼 수 있었고, 제거량은 부하량이 증가함에 따라 일정한 비율로 증가하였다(Fig. 3-2-28, 29). Real-time V, VI에서와 같은 운전모드에서의 loading rate은 TOCs 100g/m^3.cycle과 CODcr 350g/m^3.cycle 수준이 적당할 것으로 추정된다.

NH_4-N의 경우 Fig. 3-2-30, 31에 나타나는 것과 같이 NH_4-N는 부하량과 유입농도에 상관없이 항상 완벽한 NH_4-N의 제거를 보여 유출수의 NH_4-N의 농도는 항상 0mg/L을 나타내었다. 또한 유출수의 NOx-N의 농도 역시 대부분 20mg/L 미만인 것으로 나타났다(Fig. 3-2-29). 이는 완전 자동제어의 효율성과 3개의 subcycle로 운전할 시의 장점을 말해주는 것으로 Real-time IV에서와 같이 전탈질 공정을 도입한 1cycle로 운전할 시 배출되는 NOx-N 농도는 NH_4-N의 산화량에 의해 좌우되지만, 3개의 subcycle로 운전할 때는 앞선 2번의 NOx-N은 오염물질이 유입됨에 따라 탈기되므로 실제 NH_4-N의 부하량에 비해 NOx-N의 양을 줄이는 역할을 하게 된다. 실제로 Real-time IV에서의 유출수의 NOx-N의 농도는 26.1mg/L로 유입 NH_4-N loading rate 231.9g/m^3 기준으로 배출된 NOx-N의 양은 78.3g이었으나, Real-time V와 VI에서는 각각 49.8g과 49.1g으로 나타나 유입량 대비 NOx-N의 배출량은 Real-time V, VI에서 훨씬 좋은 제거 효과를 기대할 수 있었다.

Real-time V, VI의 평균 수처리 시간(Fig. 3-2-32)은 각각 19.7 h/cycle과 26.0 h/cycle로 1일 1.22 cycle과 0.92cycle이 운전되어 평균 NH_4-N 처리량은 각각 67.1g/m^3.d와 147.4g/m^3.d이었다. 높은 처리능력을 보인 Real-time VI에서의 NH_4-N제거 특성을 살펴보면(Fig. 3-2-33) NH_4-N의 loading rate 400g/m^3.cycle 수준에서도 효율적인 자동제어가 이루어 졌음을 알 수 있다. 그러나 Real- time VI의 운전모드 및 제어조건에서 유출수내 NOx-N의 농도가 20mg/L이하이고 비교적 일정한 처리수

를 얻을 수 있는 적정 NH_4-N loading rare은 200g/m^3.cycle로 판단된다. Fig. 3-2-34는 Real-time I, II, III IV, V, VI 운전 중 기간별 평균 NH_4-N의 부하량과 호기적 조건에서 NBP가 발생하여 제거가 이루어 질 때 까지 걸린 평균 시간을 나타낸 것으로 NBP가 나올 때 까지 소모된 시간은 NH_4-N 1 g/m^3에 약 0.072시간인 것을 알 수 있었다. 비록 평균 부하량 별 평균 소요 시간은 이와 같은 상관관계를 나타내고 있으나 각 cycle 에서의 소요시간 변이는 앞서 언급한 것과 간이 시스템내의 미생물 활성과 운전상황에 따라 차이가 나타나게 된다.

Table 3-2-9는 개발· 평가된 "ORP와 pH를 병용하는 컴퓨터 실시간 제어 기술"의 안정성을 나타낸 것이다. 운전중 제어 Error나 이상이 발생한 횟수를 파악한 결과 Real-time I~III에서 17회 IV에서 12회, V와 VI에서 22회로 파악되었다. 그러나 이러한 제어의 이상은 대부분이 추가 탄소원인 메탄올이 유입 되지 않을 경우에 발생하였다. 또한 pump의 고장 등으로 인한 유입· 유출이 이루어지지 않은 경우에서도 이상현상이 발생하였다. 그러나 컴퓨터 제어 시스템의 오작동에 의해 제어가 실패한 경우는 각각 12, 7, 15회로 기계적 고장과 메탄올이 없어 유입되지 않을 경우를 제외하면 평균 93.3% 이상의 성공적인 제어가 이루어 졌다. 이상현상 발생은 원거리 감시 및 진단방법에 의해 문제가 발생하는 즉시 연구실 컴퓨터를 통해 쉽게 알 수 있었으며, 기술상의 문제인 경우 즉시 pc 상에서 임의 제어하여 응급 해결하였다. 그러나 기계적 설비의 고장이나 메탄올 부족 등에 의한 이상현상 발생시에는 현장관리인에게 먼저 전화를 걸어 응급조치 방법을 알려주고 그 후 현장에 직접 방문하여 처리시스템의 문제를 해결하였다. 이러한 원거리 감시· 진단 및 제어 기술은 원거리에 위치한 수많은 시설의 온라인 감시· 진단· 제어를 가능케 하기 때문에 그 응용력 및 적용분야가 매우 클 것으로 판단된다(Fig. 3-2-35).

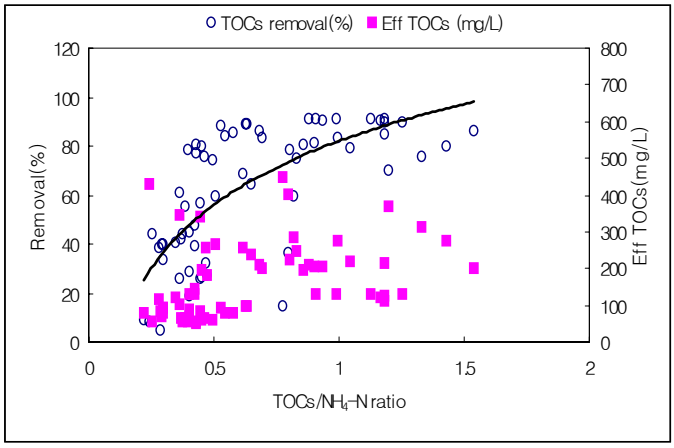


Figure 3-2-27. Removal characteristic of TOCs vs C/N ratio

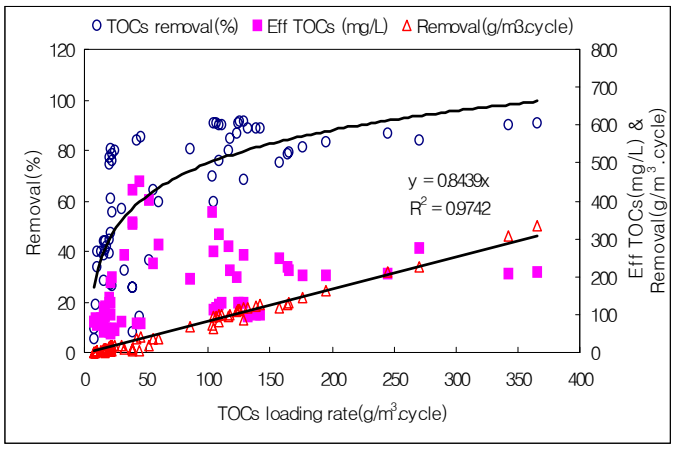


Figure 3-2-28. Removal efficiency vs TOCs loading rate

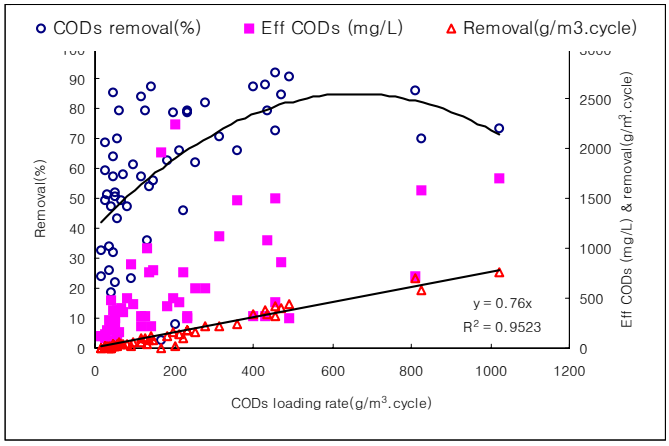
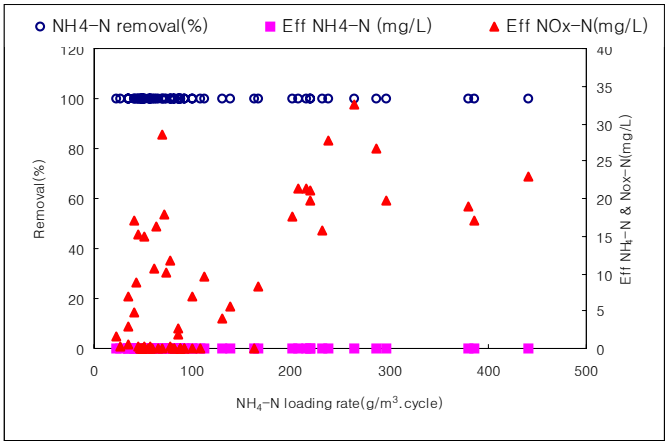


Figure 3-2-29. Removal efficiency vs CODcr loading rate



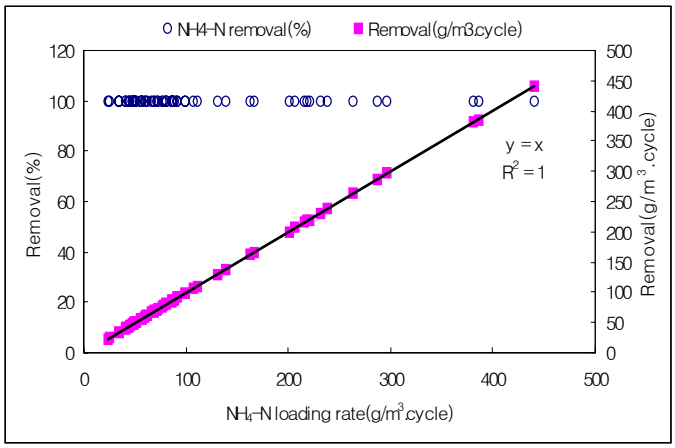


Figure 3-2-30. N removal characteristic in real-time control vs loading rate

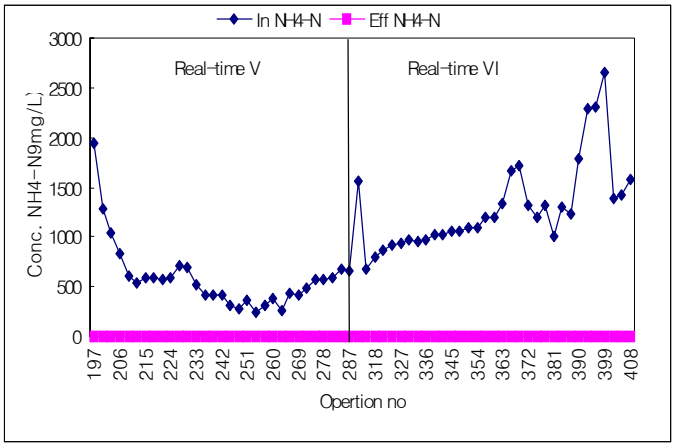


Figure 3-2-31. Variation of NH_4-N(mg/L)

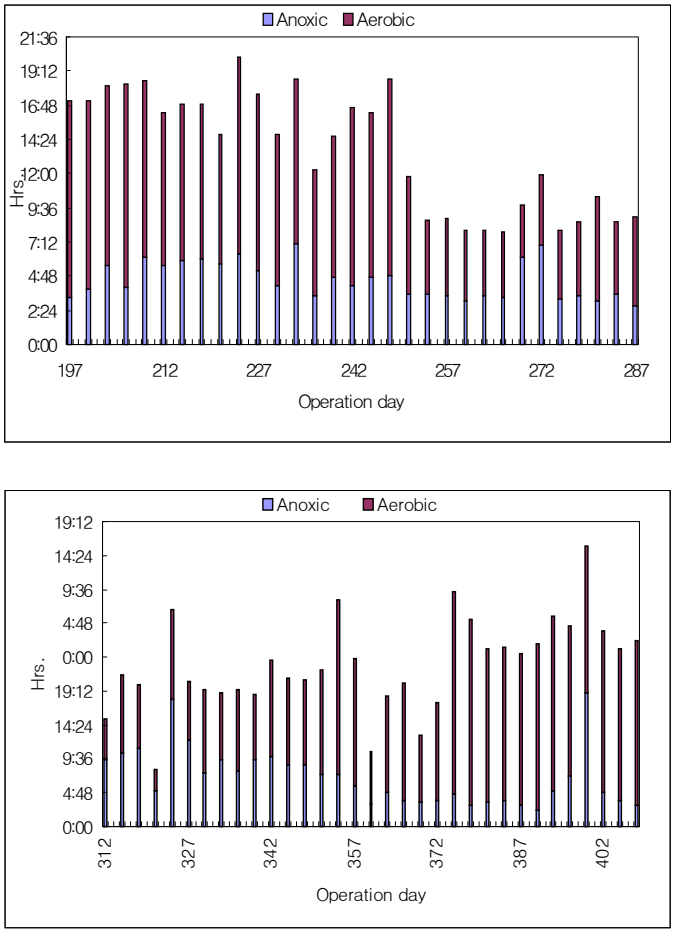


Figure 3-2-32. Variation of cycle time in full real-time control V, VI

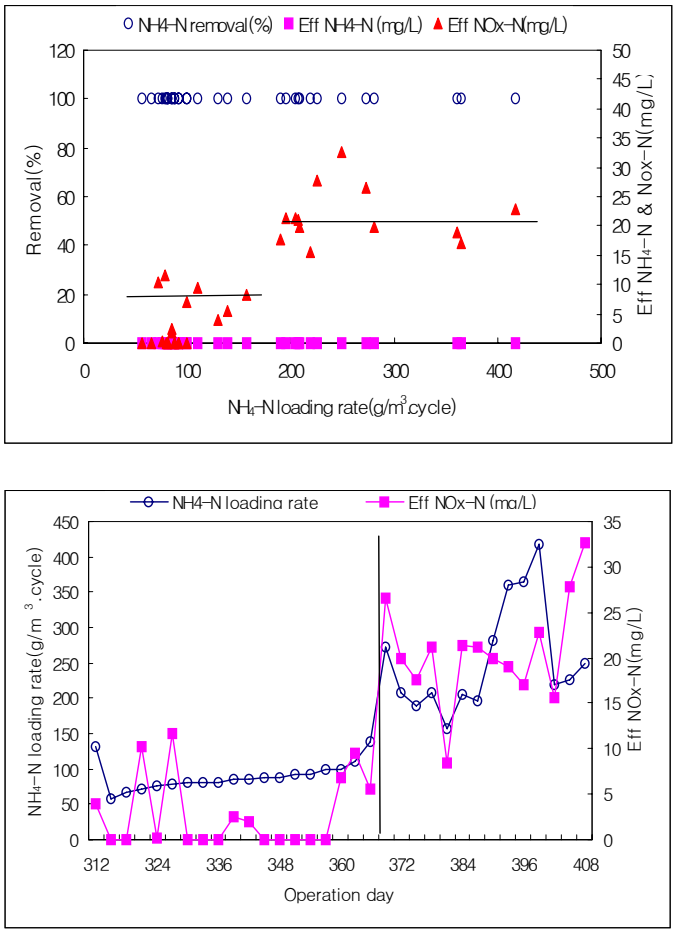


Figure 3-2-33. N removal characteristics vs loading rate in real-time control VI

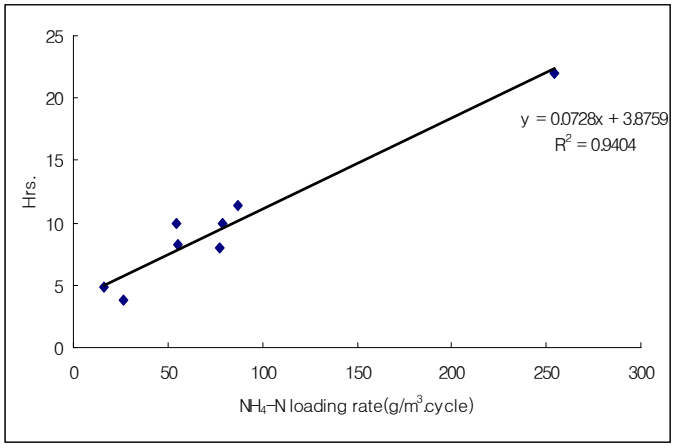


Figure 3-2-34. Average consumed time vs average NH_4-N loading rate

Table. 3-2-9. Stability of real-time control technology

	Real-time I, II, III	Real-time IV	Real-time V, VI
Total no of fail	17/144	12/268	22/239
Fail no due to technology	12/144	7/268	15/239
Successful control(%)	91.7	97.4	93.7

Figure. 3-2-35. Remote control of treatment facility

제 4 장. 목표달성도 및 관련분야에의 기여도

본 연구는 처리시스템 내에서 일어나는 오염물질의 변화를 예측·감시하여 각 처리단계에서의 특정오염물질이 완전히 제거되는 시점에서 처리단계를 전환시키거나 혹은 처리를 중지시켜 축산폐수의 특성변이에 관계없이 항상 일정한 처리수질과 완전 처리를 얻을 수 있는 처리기술 개발·확립, 즉 시스템에서 오염물질이 제거가 완료되었을 때 처리수를 내보내고 새로운 폐수를 유입시키는 실시간 완전자동축산폐수 처리기술 (Realtime Control Technology)의 개발·확립을 최종 목표로 3년에 걸쳐 수행되었다. 각 년차별 연구개발 목표 및 내용은 제 2장에 서술되어있다.

완전자동 실시간 축산폐수 처리기술 개발을 위해 1차 년도에 SBR 시설이 설비되었으며 처리시설의 규모는 약 30톤이었다. 연구 계획서에는 5톤 규모로 시험하는 것으로 계획되었으나 얻어진 연구결과를 직접 현장에 적용할 수 있게 하기 위하여 실규모에 가까운 30톤 규모로 하여 연구를 수행하였다. 설비된 처리시스템은 timer를 사용하지 않고 컴퓨터를 이용해 제어/감시하기 위하여 자동 모니터 장치 및 computer control 장치가 제작·설비되었다. 또한 현장에서 운전되는 시스템을 현장을 방문하지 않고 감시·조작하기 위하여 원거리 감시/제어 기술도 개발·활용하였다. 처리시스템의 운전기법을 설정하기 위해 C, N, P의 복합 처리가 가능한 처리 cycle을 기본으로 5가지 operational mode에 대한 축산 폐수 처리 결과를 얻었으며 각 운전 모드에서의 ORP와 pH-mV의 변화를 모니터하여 처리시스템내 오염물질의 생화학적 변화에 따라 특이적으로 반응하는 다양한 ORP 및 pH(mV)-time profile을 얻을 수 있었다. 또한 세밀한 연구를 통해 자동 제어에 영향을 미치는 요인, 즉 ORP 및 pH-mV 변화 pattern에 영향하는 factor를 규명하였다. 시스템내의 오염물질의 변화에 따라 ORP 및 pH(mV)-time profile에서 특이적으로 발생하는 NBP 및 RCMP, NKP를 안정적으로 detection 할 수 있는 방법개발이 이루어졌으며 ORP 혹은 pH를 단독으로 이용하는 것 보다 병용하여 이용하는 것이 자동제어의 안정성을 높일 수

있다는 것을 파악하고 컴퓨터 제어 프로그램을 개발하였다.

2년차 연구에서는 ORP와 pH를 병용하는 컴퓨터 자동제어 기술을 pilot 규모의 축산폐수 처리시설에 적용하고 그 처리효율 및 자동제어 기술의 안정성과 최적화를 위한 운전 조건을 파악하였다. 실시간 축산폐수 처리시스템의 최적화 운전조건을 구명하기 위하여 개발된 컴퓨터 자동 제어기술을 폐수 처리시설에 적용하여 그 효율을 평가하였으며 또한 자동제어 기술을 적용하지 않은 SBR에서의 돈사폐수 처리효율과 오염물질 제거특성을 분석하였다. 2단계 SBR의 돈사폐수 처리효율의 평가가 3 operation phase로 나누어 시험·분석 완료되었으며 각 operation 조건별 제거 특성 및 처리조별 오염물질 제거 역할이 구명되어 실시간 컴퓨터 제어기술 평가에 응용되었다. ORP와 pH를 병용·이용하는 개발된 컴퓨터 자동제어 방법의 안정적인 운전 가능성을 분석한 후 시설에 적용하여 운전하면서 가변적 돈사폐수에 대한 처리효율 및 안정성 분석을 하였다. 돈사폐수에 대한 자동 제어 기술의 유용성을 평가하기 위해 4 operation phase (Real-I, II, III, IV)로 나누어 시험을 하였으며 Real-I, II, III에서는 서로 다른 조건에서의 호기적 공정의 자동제어 방법을, Real-IV에서는 완전자동제어 (Full Real-time control)방법을 적용하여 개발된 기술의 유용성 및 안정성 평가 시험을 완료하였다. 또한 최적화 운전인자의 파악을 위하여 유입수 성상에 따른 처리특성과 C, N 부하량에 따른 오염물질 제거 특성 및 처리효율 등을 분석하여 실시간으로 조절되는 SBR로의 적정 C, N loading rate을 운전 조건별로 파악하였으며 무산소 처리단계의 안정적인 자동제어를 위한 추가 탄소원의 첨가수준 및 유입수 C/N비에 따른 유기물 제거효율 등의 분석이 완료되었다. 아울러 포기조건 뿐만 아니라 처리조내의 NOx-N 농도와 유기물 농도 등이 자동 제어에 미치는 영향을 자세히 분석하여 다양한 조건에서도 안정적인 실시간 컴퓨터 자동제어 유지를 위해서는 ORP와 pH를 병용하여 이용하되 무산소 조건의 자동제어를 위해서는 ORP를 호기적 조건의 자동제어를 위해서는 pH-mV를 이용하는 것이 매우 안정적이고 효율적임을 확인하였다.

3년차 연구에서는 1, 2년차 시험을 통해 얻어진 결과를 기반으로 처리/운전 조건을 재설정하였으며 단위 용적당 처리량을 늘리고 외부탄소원의 사용을 절감할 수 있는 운전모드와 한번에 고농도의 폐수가 유입됨에 따라 shock loading이 발생하는 것을 막기 위한 운전모드로 1 처리 사이클이 3개의 하부 사이클로 구성된 sequence를 설정하고 이의 자동제어를 위해 컴퓨터 제어 방법을 개발하였다. 이와 같이 재설정된 운전모드와 개발된 자동제어 방법의 평가를 위해 가변적 돈사폐수 처리 조건하에서 2 operation phase (Real-time control V & VI)로 나누어 시험이 진행되었으며 각 operation에서의 폐수처리용량과 오염물질 제거특성 및 안정성 분석을 평가하여 개발된 제어 방법과 운전 모드에 관한 평가를 완료하였다. 이와 같이 체계적으로 연구를 수행함에 의해 최종적인 연구목표인 “컴퓨터를 이용한 실시간 완전자동 축산폐수처리기술“이 개발/확립되게 되었다.

본 연구에서 최종 개발된 “완전자동 실시간 축산폐수 처리기술”과 원거리 제어기술은 축산분뇨 및 오·폐수 처리에 획기적인 기술로서 대규모의 축산폐수 공공 처리장이나 혹은 전문 인력이 없는 소규모 농가에서 발생하는 처리수질 및 처리효율의 불안정 등의 여러 문제점을 해결할 수 있을 것으로 여겨지며, 개발된 기술의 적용으로 기존 설비 운전되고 있는 저 효율의 처리시스템의 효율 및 처리용량의 최적화가 가능할 것이며, 신기술을 이용한 축산폐수 처리 문제해결로 환경업체 및 연구단체에 귀중한 정보를 제공할 수 있을 것이며, 본 연구에서 개발된 기술은 폐수처리시설의 실시간 자동제어에 대한 것으로서 고농도 유기성 폐수인 축산폐수 뿐만 아니라 생활하수처리 시설 등의 자동제어에도 적용될 수 있어 새로운 개념의 폐수처리 공정개발에 크게 기여할 것으로 여겨진다. 또한 본 연구에서 제시된 ORP 혹은 pH-mV에 대한 결과들은 다양한 생물학적 처리공정의 상태를 진단하거나 이해하는데 효율적으로 응용될 수 있을 것으로 판단된다.

제 5 장. 연구개발결과의 활용계획

본 연구를 통해 최종 개발된 완전자동 실시간 자동제어 기술과 연구결과들은 축산폐수와 같이 변화가 심한 고농도 폐수 처리에 매우 유용한 것으로서 다음과 같이 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

○ 처리수질 불안정 및 저효율 등의 문제를 지니고 있는 대규모 축산폐수 공공 처리장의 기술 개선 및 문제점 해결에 개발된 기술이 효율적으로 활용될 수 있으며,

○ 각 농가에 설비되었으나 전문 인력이 없어 제대로 가동하고 있지 못한 처리시설의 정상화 및 자동화에 유용하게 활용될 것이고,

○ 축산폐수 처리에 있어서 과잉처리에 의한 비용낭비와 미처리 방류와 같은 문제를 해결하여 처리시설의 최적화에 효과가 기대되고,

○ 축산폐수뿐만 아니라 다양한 폐수 처리설의 최적화를 위한 기술 개발에 본 연구에서 얻어진 자료가 매우 유용하게 활용될 수 있을 것으로 여겨진다.

○ 또한 본 연구에서 수행된 온라인 원거리 제어 기술은 여러 곳에 산재해있는 축산폐수 처리시설의 원거리감시 · 진단 및 제어를 가능케 하여 1명의 전문가가 수많은 처리시설을 관리할 수 있게 하기 때문에 축산폐수 처리에 대한 전문 인력 부족 문제 해결에 유용하게 활용될 것으로 판단된다.

본 연구에서 pilot 규모의 시험을 통해 개발된 기술은 대규모 축산폐수 공공 처리장과 축산농가에 적용하여 실용화 시험 및 현장시험을 수행할 예정에 있으며 현장시험이 완료 되는대로 기술 및 결과에 대한 홍보과정에 착수하고 개발된 기술을 환경업체에 이전하여 현장에 보급하고자 한다.

제 6 장. 참 고 문 헌

1. Al-Ghusain, I. A. Huang, J. and Lim, B. S. (1994), Using pH as real-time control parameter for wastewater treatment and sludge digestion processes, Wat. Sci. tech. 30(4), pp 159-168.

2. Al-Ghusain, I. A. and Hao, O. J. (1995) Use of pH as control parameter for aerobic/anaerobic sludge digestion. J. Envir. Engrg. ASCE, 121(3): 225-235.

3. A.P.H.A.(1995), standard methods for the examination of water and wastewater, 19th edition, Washington, DC.

4. A.Spagni, J.Buday, P.Ratin, and G.Bortone (2001) Experimental considerations on monitoring ORP, pH, conductivity and dissolved oxygen in nitrogen and phosphorus biologicla removal process, water Science and Technilogy Vol. 43 No. 11 pp 197~204

5. Barnes, D., and P. J. Bliss. (1983) Biological Control of Nitrogen in Wastewater Treatment. E. & F. N. Spon, London.
Barth, E. F., et al. 1983. Technology evaluation of sequencing batch treatment. JWPCF., 55: 484.

6. By craig C, Peddie, Donald S, Mavinic, and Christopher J, Jenkins,(1997)

Use of ORP for monitoring and Control of Aerobic Sludge Digestion?Journal of Environmental Engineering , ASCE, Vol. 133, No, 3, May/June, p 461~4711

7. Chang, C. H.and Hao, O.J.(1996) Sequencing batch reactor system for nutrient removal: ORP and pH profiles. J. Chem. Tech. Biotechnol., 67, 27-38

8. Chang, C. N., Yu, R. F., Chao, A. C. and Seishu, T. (1994) On-line monitoring and control of the textile wastewater color removal process. Water science and technology, 30(3): 265-270.

9. Chang, C. N., Lin, J. G., Chao, A. C., Cho, B. C. and Yu, R. F. (1997) The Pretreatment of Acrylonitrile and Styrene with the Ozonation Process, Water science and technology, 36(2-3), 263-270.

10. Charpential, J., Martin, H.G. and Mogno,Y.,(1989) Oxidation- reduction potential(ORP) regulation as a way to optimize aeration and C,N and P removal experimental basis and various full-scale examples. Water science & technology., 21(10/11) 1209-1223

11. Chen, K.C., Chen, C.Y., Peng, J.W. and Houng, J.Y. (2002), Real-time control of an immobilized-cell reactor for wastewater treatment using ORP, Water research, 36, pp 230-238.

12. Ewa Lie and thomas Welander (1994) Influence of dissolved oxygen and oxidation-reduction potential on the denitrification rate of activated sludge, Wat. Sei. Tech. Vol. 30 No. 6 pp 91~100

13. E.Paul, S.Plisson-Saune, M.Mauret and J.Cantet (1998) Process state evaluation of alternating oxic-Anoxic ativated sludge using ORP, pH, and DO, Wat. Sci. Tech. Vol. 38 VO. 3 pp. 229~306

14. Hao, O.J. and Huang, J. (1996). Alternating aerobic-anoxic process for nitrogen removal:process evaluation, Water Environmant Research, 68(1), pp 83-93.

15. Heduit, A and Thevenot, D.R. (1992), Elements in the interpretation of platinum electrode potentials in biological treatment, Wat. Sci. Tech. 26(5), pp 1335-1344.

16. Irvine, R. L., et al., 1979. Sequencing batch biological treatment of wastewater an overview. JWPCF., 51:235.

17. Jenkins, C. J., and Mavinic, D. S. (1989) Anoxic-aerobic digestion of waste activated sludge: PartⅡ-Supernatant characteristics, ORP monitoring results and overall rating system. Envir. Tech. Letters, 10(4): 371-384.

18. Kjaergaard, L. (1977) The redox potential: Its use and control in biotechnology. Advances in biochemical engineering, T. K. Ghose, A. Fiechter, and N. Blakebrough, eds., Springer-Verlag, New York, N. Y.

19. Koch, F.A. and Oldham, W.K. (1985), Oxidation-reduction potential-a tool for monitoring, control and optimization of biologicalnutrient removal system, Wat. Sci. Tech., 17, pp 259-281.

20. kuo-Cheng Chen, Ching-Yen Chen, Tuin-Wei Peng Jer-Yiiing Houng (2002), Real-time control of an immobilized-cell reactor for wastewater treatment using ORP, Water research 36 pp 230~238

21. Lo, C.K., Yu, C.W., Tam, N.F.Y. and Traynor, S. (1994), Enhanced nutrient removal by oxidation-reduction potential (ORP) controlled aeration in a laboratory scale extended aeration treatment system, Wat. Sci. tech. 28(10), pp 2087-2094.

22. M.Mauret, F.Ferrand, V.boisdon, M.Sperandio and E.Paul (2001) Process using Do and ORP signals for biological nitrification and denitrification:validation of a food-processing industry wastewater treatment plant on boosting with pure oxygen,
Water Science and Technology Vol. 44 No. 2~3 pp 163~170

23. Okada, M., Sudo, R. and Terazona, K. (1984). Removal of nutrients and BOD from soybean fermentation wastewater in a ten-year-old sequencing batch reactor activated sludge process, Wat. Sci. Tech., 22(9), pp 85-93.

24. Paul, E., Plisson-Saune, S., Mauret, M.and Cantet, J. (1998) Process State Evaluation of Alternating Oxic-Anoxic Activated Sludge Using ORP, pH and DO. Water science & technology., 22(9), pp85-93

25. Peddie, C.C and Mavinic,(1990) D.S.A pilot scale evaluation of anaerobic-anoxic sludge digestion. Can. J.Civ. Eng., 17, 68-78

26. Plisson-Saune, S., Capdevile, B., Mauret, M., Debuin, A. and Baptiste, P.(1996) Real-time control of nitrogen removal using three ORP bending point: signification, control strategy and results. Water science & technology., 33(1), pp275-280

27. Ra, C.S., Lo, K.V., Shin, J.S., Oh, J.S. and Hong, B.J. (2000). Biological nutrient removal with an internal organic carbon source in piggery wastewater treatment, Water research, 34(3), pp 965-973.

28. Ra, C.S., Lo, K.V. and Mavinic, D.S. (1999). Control of a swine manure treatment process using a specific feature of oxidation reduction potential, Bioresource technology, 70, pp 117-127.

29. Ra, C.S., Lo, K.V. and Mavinic, D.S. (1998). Real-time control of two-stage sequencing batch reactor system for the treatment of animal wastewater, Environmental Technology, 19, pp 343-356.

30. Ruey-Fang Tu Shu-liang liaw Cheng-Nam chang and Wan Yuan Cheng(1997). Application of artifical neural network in real-time control on continuous-flow SBR system National Scirnce Council of R.O.C grant number NSC 85-2211-E008-006

31. S.Plisson-Saune, B.Capdeville, M.Mauret, A.Deguin and Baptiste (1996) Real-time control using three ORP bending-point:signification, control strategy and results, Wat. Sci. Tech. Vol. 33 No. 1 pp 275~280

32. U. S. Enviormental Protection Agency:(1975) Process design Manual for nitrogen control.Office of Technology Transfer, Washington D.C., October

33. T. Zipper, N. Fleischmann and R.Haberl (1998) Developmet of a new system for control and optimization of small wastewater treatment plants using oxidation-reduction potential (ORP) Wat. Sci. Tech. Vol. 38 No. 3. pp. 307~314

34. Yu, R.F., Liaw, S.L., Chang, C.N., Lu, H.J. and Cheng, W.Y. (1997). Monitoring and control using on-line ORP on the continuous-flow activated sludge batch reactor system, Wat. Sci. Tech., 35, pp 57-66.

35. Wareham, D.G., Hall, K.J. and Mavinic, D.S. (1993), Real-time control of aerobic-anoxic sludge digestion using ORP, J. Environ. Eng., 119, pp 120-136.

36. Watanabe, S., et.al. Basic studies of an ORP/external carbon source system for the biological denitrification process. Inst. and Cont. of Wat. and Waste. Treat. and Transp. Sys. in Proc. 4th IAWPRC workshop, 27 April-4 May, Houston and Denver, USA, pp. 641-644.

37. Wouters-Wasiak, K., Heduit, A., Audic, J. M. and Lefevre, F., 1994. Real-time control of nitrogen removal at full-scale using oxidation reduction potential. Water science and technology, 30(4):207-210

38. Yu, R. F., Liaw, S. L., Chang, C. N., Lu, H. J. and Chang, W. Y. 1997.

The monitoring and control using on-line ORP in the continuos-flow activated sludge batch reactor system. Water science and technology, 35(1) : 57-66.

39. 고광백, 서준석. (2002). ORP와 pH 측정에 의한 간헐폭기 고도처리 공정 제어의 평가, 한국물환경학회지, 18(4), pp 401-409.

40. 서인석, 김병균, 박승국. (2000). 간헐포기 형태의 활성슬러지 공정에서 질소, 인 및 pH, ORP의 거동에 관한 연구, 한국물환경학회지, 16(1), pp 65-76.

41. 이병헌, 강성재, 감성희, 이동석, 유평종. (2001). 자동제어 AOAS SBR 공정의 영양소 제거, 한국물환경학회지, 17(6), pp 703-709.

42. 임봉수. (1994). pH 제어를 이용한 선택적인 Aerobic-anoxic 슬러지 소화, 한국물환경학회지, 10(1), pp 56-61.