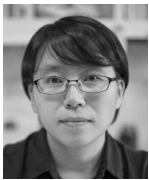


하수처리장 실시간 제어 · 진단 운영 기술 동향



김 창 원 |

부산대학교 사회환경시스템공학부 교수
IWA 이사 및 2012 IWA 세계물회의 총회장
cwkim@pusan.ac.kr



김 예 진 |

부산대학교 사회환경시스템공학부 연구교수
yjkim@pusan.ac.kr

서론

공정제어(Process control)의 정의는 공정의 어떠한 변수가 사용자가 원하는 값을 가지도록 하기 위한 모든 조치를 일컫는다. 활성슬러지 공정에서 그 어떠한 변수는 유출수질이 될 수도 있으며, 반응조 내의 용존산소 농도가 될 수도 있고, 단순하게는 변화하는 유입유량에 대비한 슬러지 반송율이 될 수도 있다. 제어 기술은 생물학적 공정의 최대 외란으로 간주되는 유입하수의 시간에 따른 변화에 대비하여 공정의 처리성능을 안정적으로 유지하며 운전의 경제성을 도모하기 위해 행해져왔다. 이제까지 활성슬러지 공정에 적용된 공정제어는 주로 피드백 제어(Feedback control)를 중심으로 적용되어 왔으며, 국제적으로는 유럽을 중심으로 현장적

용사례를 쉽게 찾아볼 수 있다(SMAC project).

공정에 대한 제어동작을 취하기 위해서는 필수적으로 제어를 수행하고자 하는 목적에 합당한 측정 변수가 필요하다. 기초상용계측기의 발달로 반응조 내의 pH나 DO, ORP, MLSS는 쉽게 측정가능하며, 최근 자동분석기의 눈부신 발달로 인해 실시간으로 반응조 내부의 영양염 농도까지 측정하여 자동으로 모니터링 할 수 있으나, 그렇지 않던 시절에는 반응조 내부의 농도를 추정하여 제어를 위한 정보를 제공하기 위해 공정모델링 기법(Process Modeling)이 활발하게 사용되었다. 본시 모델링 기법은 대상 활성슬러지 공정 내의 제거기작을 이해하는 기초적인 목적에서 출발하였다. 이후 공정 내부에 존재하는 영양염의 농도를 추정하여 제어 동작이나 진단을 위한 자료를 제공하기 위한 확장된 용도를 거쳐, 현재는 공정의 운전전략을 변화시켰을 경우 그 효과를 미리 추정하거나 특정한 외란이 발생하였을 때 공정의 처리성능에 미치는 영향을 추정하는 등의 시나리오 분석으로 널리 활용되고 있다.

이러한 활성슬러지 공정에 대한 제어나 모델링 기법은 근본적으로 실시간으로 변화하는 외란에 대응하여 하수처리공정의 안정적인 유출수질을 생산하기 위한 목적 하에 유기적으로 결합된 기술의 형태로 구현되어 왔다(Olsson et al., 2005). 이에 하수처리공정의 운영의 편의성과 객관성을 증대시키기

위한 기술이 더해지게 되는데 그것이 진단(Process diagnosis)기술이다. 진단이란, 좀더 구체적으로는 이상 감지와 규명(Fault detection and isolation)으로 일컬어질 수 있다. 하수처리장에서 매일 운전자에 의해 행해지는 점검 동작에서부터 국내 하수처리장에 대해 주기적으로 실시되는 기술진단이 쉽게 찾아볼 수 있는 공정진단의 실사례이다. 그리고 최근 정보기술의 발달 및 자동시스템기술의 발전과 더불어 자동으로 이상을 감지하고 이를 운전자에게 알려며(Alarming), 공정 성능을 알맞게 유지하기 위한 운영지침을 제안하여 운전자의 의사결정을 돕는 기능(Decision supporting) 또한 진단기술의 넓은 범주 안에 속한다고 볼 수 있다.

하폐수처리공정의 제어나 진단은 타 산업분야의 물리화학적 공정과는 본연적 차이를 가지는데, 대상 시스템이 생물학적인 공정이기 때문에 가지는 불확실성과, 그로 인한 정보의 부족이 그것이다. 또한, 유출수질을 제어대상으로 삼는 경우, 일반적인 여타 산업공정과 같이 절대적인 제어목표치를 가지지 않고 방류수 규제치 이하를 만족하면 되므로 제어변수의 상한값과 그에 따른 범위가 존재한다. 진단의 경우, 이상의 유무 뿐 아니라 공정 성능의 상/중/하와 같은 정성적인 진단 결과의 도출이 인간 운전자에게 보다 더 유용하다. 본 고에서는 이러한 특성을 가지고 있는 생물학적 하폐수처리공정에 대한 제어 및 진단기술의 적용동향에 대해 소개하고자 한다.

단변량 제어에서부터 관리자 제어 기술로

생물학적 하폐수처리공정의 제어기술은 처음 호기조 DO 농도 제어와 같은 단변량 제어부터 출발하게 된다. 호기조 DO 농도 제어는 공정의 경제성과 유기물 산화 반응의 안정성이라는 두 가지 목적을 동시에 달성할 수 있었으며, 덴마크 Aalborg 하수처리장을 포함한 7개 하수처리장에서 폭기비용

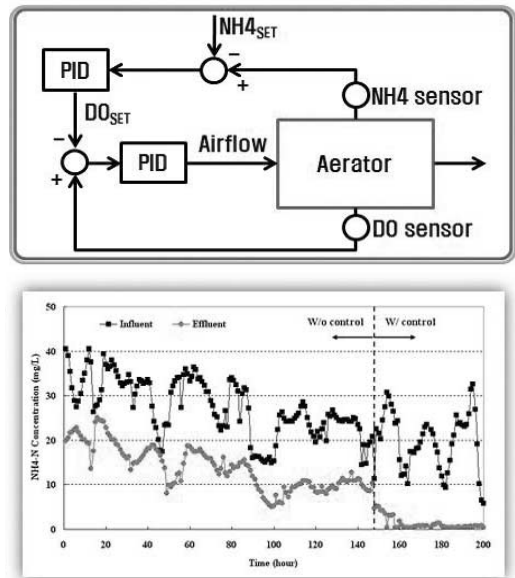


그림 1. 암모니아 농도의 실시간 측정을 통한 질산화 제어 사례(Olsson et al.,2005)

의 30%를 절감한 사례(Olsson et al., 2005)로 현장 적용성과 효과가 입증되었다.

그러나 최우선적으로, 모든 운전자의 최대 관심은 처리성능을 파악하는 데 있어 결정적인 반응조 내의 영양염 농도와 같은 제거대상물질의 농도일 것이다. 특히, 질산화/탈질 반응을 통해 질소를 제거하는 경우 호기조에서는 보다 우수한 질산화, 무산소조에서는 보다 완벽한 탈질 반응이 바람직하므로, 이러한 영양염 농도 혹은 영양염 제거반응율에 관한 제어에 관한 시도가 꾸준히 있어왔다. 그러나 이러한 제어는 필수적으로 반응조 내의 영양염 농도에 대한 실시간 측정치를 요구하였고, 실시간 측정장치의 개발과 현장 적용의 안정성이 어느 정도 검증되기 시작한 2000년대 초반까지 안정적인 영양염 농도 제어의 사례는 찾아보기 힘들었다. 반응조 내 암모니아 농도와 질산염 농도에 관한 자동분석기술의 발달로 인해 가능해진 영양염 농도 제어의 사례로는 호기조의 암모니아와 DO를 측정하여 암모니아성 질소의 제어 설정치와의 차이를 기반으로 DO 설정치를 변화시켜 보다 완벽한 질산화를

유도하며, 슬러지 톤당 송풍량을 17% 절감하며 안정적인 질산화 성능을 이끌어낸 스웨덴의 Kappala 하수처리장의 사례가 있다(Olsson et al., 2005). 또한, Denmark의 Helsingor 하수처리장 및 부산대학교의 연구사례에서는 언급한 질산화 제어와 병행하여 무산소조의 질산염을 실시간으로 측정하고, 질산염 농도 제어설정치와의 차이를 기반으로 외부 탄소원 농도를 필요한만큼 주입하여 무산소조에서의 보다 나은 탈질화를 유도함으로써 실시간 제어를 통해 최적의 질소제거를 달성하면서 고정된 약품주입으로 운전했을 때 보다 주입량을 최대 40%까지 절감하였다(부산대학교, “하수처리장으로부터 추출된 전문지식 및 예측 모듈을 활용한 웹 기반 통합 패키지형 진단·제어 시스템 개발” 중기청 산학 공동기술개발지원사업).

활성슬러지 공정의 제어 기술에 관한 연구가 활발히 진행되는 1990년대는 IT 기술의 초반 부흥이 동반되었던 시기로, 플랜트의 원격 제어와 감시 기능을 가진 시스템이 하수처리장에 적용되기 시작하였다. 데이터 저장 용량의 확장과 컴퓨팅 능력의 비약적 발전은 하수처리장의 운영방법에도 변화를 가져오게 되어, 축적된 데이터를 통해 운전자의 두뇌 안에만 존재하던 전문가 지식이 표현되기 시작하였다. 운전자의 축적된 지식은 공정의 한 변수에만 국한되지 않고 하수처리장 전반에 걸쳐(Plant-wide) 상호연계되는 단위공정에 대해 구축되기 때문에, 이를 제어기술로서 구현하여 보다 효율적인 전 공정 제어(Plant-wide control) 또는 관리자 제어(Supervisory control)에 대한 연구사례들이 등장하게 된다. 이를 위해 단위공정 전반에 관한 정보를

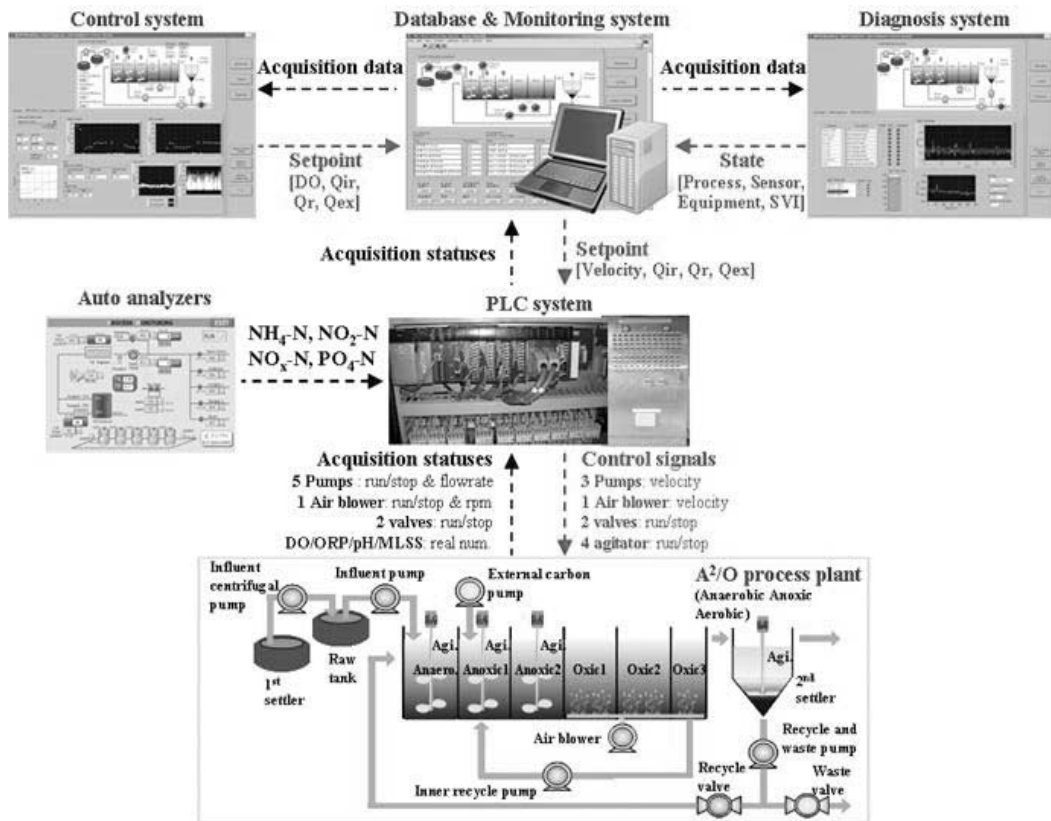


그림 2. 모델 기반 통합제어 시스템의 구조

실시간으로 획득해야 하고, 하나의 제어 동작이 전 단위공정에 미치는 복합적 영향을 과학적으로 분석하기 위해, 수학적 모델링이 본격적으로 사용되었다. 이에 활성슬러지 모델(Activated Models, IWA)이 공정거동을 모사하고 적절한 공정제어 방안을 도출하기 위해 유용하게 사용되어, 18m³/d의 파일럿 규모의 A2/O 공정에 적용되어 전력비 20% 절감과 약품비 40% 절감의 성과를 도출하였다(부산대학교, “하수처리장으로부터 추출된 전문지식 및 예측 모듈을 활용한 웹 기반 통합 팩키지형 진단·제어 시스템 개발”, 중기청 산학 공동기술개발 지원사업).

Off-line 경험적 진단에서 On-line 전문가 진단까지

운전자가 수행하는 활성슬러지 공정 진단은 공정 운영의 기본적인 업무로서, 측정된 수질자료로부터 하폐수처리의 성능을 계산하여 좋고 나쁨을 판단하거나 공정에 설치된 on-line 계측기의 측정값 혹은 변화 패턴을 바탕으로 처리성능의 이상 유무를 파악하는 정량적인 정보를 통한 진단과 슬러지의 색깔, 냄새, 플러크의 크기 등과 같은 정성적인 정보를 통한 감각적 진단으로 나뉠 수 있다. 운전자에 의한 이러한 진단 작업은 개개 하수처리장이 원수의 조성과 주변 환경에 따라 특징적(site-specific)이라

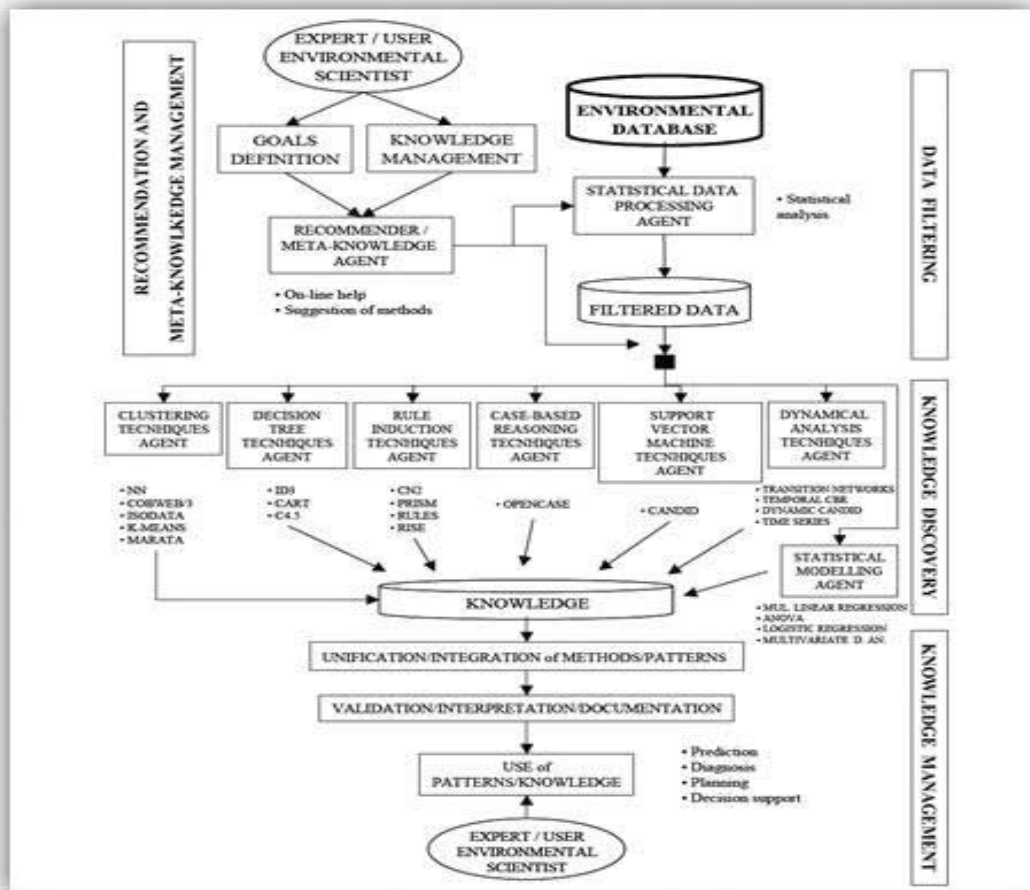
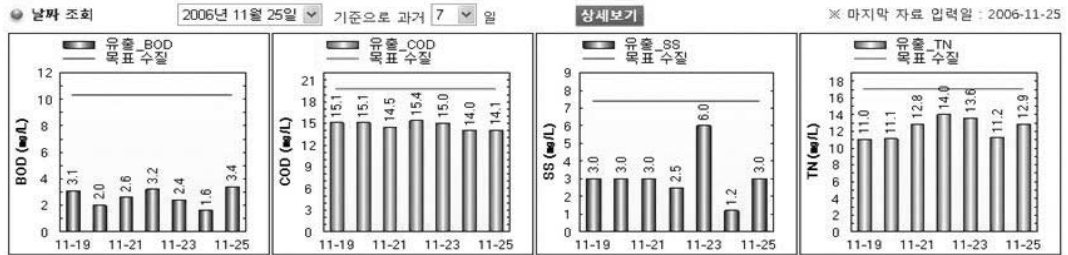


그림 3. 지식 기반 전문가 진단 시스템(Gibert et al., 2006)

현재상태진단

선택 파일명: PlantSY.mdb



● 운전 지도 (Operational Map)

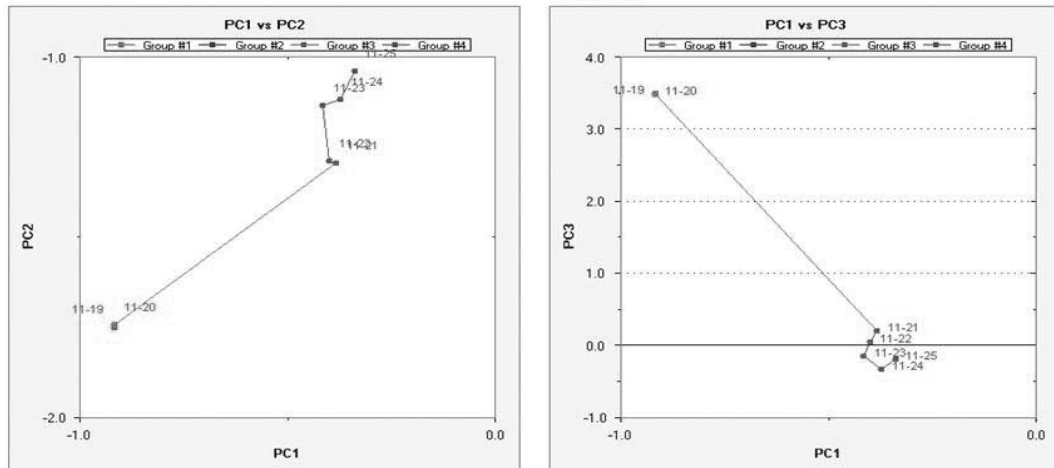


그림 4. 하수처리장 성능 진단을 위한 운전지도(부산대학교, 2008)

는 사실로 인해 경험에 크게 의존하였으며, 따라서 운전자의 숙련도에 따라 그 신뢰도가 차이가 있을 수 있다. 이러한 경험적 진단은 가시적인 문서나 수치로 구체화되기 힘들므로 진단의 정확성에 대한 연속성에 문제를 안고 있다고 할 수 있다.

이에, 공정 상태 판단의 주관성을 탈피하고 진단의 정확성의 일관적 유지를 위해 운전자가 행하는 추론과정(heuristics)을 표준화하여 시스템으로 구현하려는 시도가 행해졌다. 진단 결과의 중요도가 높으면서 인간 관찰 및 추론에 크게 의존하는 분야인 슬러지 침전능 진단에 관하여 시스템을 구축하여 스페인의 Granollers 하수처리장에 적용한 사례가 있으며(Comas et al., 2003), 연속회분식 반응기에서 특정 패턴을 가지게 되는 DO, ORP, pH 등의 상용기초계측기의 패턴 모양의 변화를 감지하

여 공정의 이상상태를 실시간으로 감지하여 진단한 사례가 있다(부경민, 2005; 김예진, 2006). 또한, 연속회분식 반응기에 설치된 펌프와 교반기와 같은 장비에 진동센서를 부착하여, 실시간으로 얻어지는 진동측정값을 Fourier 변환을 수행하여 장비의 오작동을 감지한 사례도 있다(최대원, 2005).

더 나아가, IT 기술의 발달과 더불어 시작된 Data 분석 기술을 통해, 축적된 운영 데이터로부터 지식을 추출하는 기술(Knowledge Discovery in Database)의 적용으로 운전자가 미처 파악하기 힘든 운영상황을 진단하여 알려주는 기술로까지의 확장이 이루어지게 된다. 이는 축적된 데이터를 대상으로 하여 다변량 통계분석 기법(Multivariate statistical analysis), 인공지능(Artificial intelligence) 기법을 포함한 데이터 기반 모델링

기법(Data-driven modeling methodologies) 등을 활용하여 구현되었다(Gibert et al., 2006).

이렇듯 하수처리장에서 축적된 데이터가 보유하는 해당 하수처리장의 특성에 관한 정보는 보다 가치롭게 활용될 수 있는데, 적절한 예로서 하수처리장 운영을 위한 운전지도(하수처리장 공정 운영 상태 진단을 위한 방법 및 장치, 10-0965756-0000, 부산대학교 산학협력단)를 들 수 있다. 하수처리장에서 일상적으로 얻어지는 측정 데이터와 운영 데이터들을 종합하여, 주성분분석과 군집분석, 그리고 판별분석으로 이어지는 일련의 다변량 통계 분석 기법을 활용하여 정의된 데이터 변환과정을 거쳐, 해당 운영일의 하수처리공정의 운영상태(과폭기, 고부하조건, 저부하조건 등)와 처리성능(인제거능, 질소제거능, 침전능)에 대한 진단결과를 하나의 문장으로 운전자에게 제시한다. 이로서 운전자는 일일이 수질측정의 결과로 제공되는 수치들을 읽고 운전자의 경험에 내재하는 해당 하수처리장의 유출수 수질에 대비하여 오늘의 수질이 어떠한지를 가능하지 않아도 손쉽게 공정 상태를 파악할 수 있게 된다(문태섭, 2011; 부산대학교, “데이터마이닝 기법에 의한 하수처리장 운전의 예측 진단”, 환경부 차세대핵심환경기술개발사업).

하수처리의 새 패러다임에 따른 제어·진단 기술의 발전방향

앞서 언급하였듯이, 제어기술과 진단기술은 각각 그 분야별로 고유한 목적에서 출발하여 개발되고, 적용되어져 왔다. 그러나 궁극의 공통적 목적은 안전한 유출수질의 생산과 경제적, 효율적 운전이었

다. 현재 하수처리는 새로운 패러다임을 맞이하였으며, 그것은 물부족에 대비한 하수처리수 재이용과, 에너지위기에 대비한 에너지 자립형 하수처리 시설, 그리고 하수처리장이라는 국가인프라의 효율적 운영관리를 위한 하수처리시설 권역별 통합운영관리를 말한다. 이러한 패러다임에 맞추어 제어·진단기술 또한 진화가 요구된다. 물부족 시대를 대비한 방류수질 이상의 고급 재이용수를 생산하는 하수처리시설의 고도제어와 진단기술이 보다 철저한 미량오염물질 모니터링 및 제어기술과 동반되어 개발, 구현되어야 할 것이다. 또한 하수처리장의 에너지자립율을 높이기 위하여, 처리장의 안정적 운영을 유지함과 동시에 에너지 절감을 유도할 수 있는 고급 제어 및 진단기술이 요구될 것이다. 이에 하수처리장에 신재생에너지 기술을 적절히 적용하는 것도 도움이 될 것이다. 마지막으로, 선진화된 유역관리 체계를 구축하고 과학적 통합수계관리를 위하여 정보관리 제어 기술과 하수처리시설의 통합 운영관리/진단 기술이 요구된다.

혹자는 활성슬러지 공정의 역사가 100년을 훌쩍 넘어 가는 지금, 그에 비하면 하수처리장에 대한 제어 및 진단 기술의 역사는 40년 남짓으로 짧고, 개발된 기술들에 비해 현장 구현의 사례가 많지 않다고 얘기할 수도 있을 것이다. 그러나 물 부족으로 인해 하수처리수 또한 자원으로 인식되고 사회 전반에 걸친 에너지 절감이 이슈화되는 요즘 하수처리장의 제어·진단 기술은 없어서는 안될 필수요건이 되었다. 변화를 두려워하면 개선할 수 없으며, 기존기술을 검증하지 않고서는 기술의 진화를 기대할 수 없다. 기존에 개발된 제어·진단기술의 보다 적극적 적용을 통해 새로운 기술로의 바람직한 진화가 이루어질 수 있기를 기대한다. 🍷

참고문헌

1. 김예진(2006) 연속회분식 공정 관리를 위한 추론모델 및 인공지능형 진단 알고리즘 개발, 부산대학교 박사학위논문
2. 문태섭(2011) 운전 진단 및 원인 추론을 통한 하수처리장 운전자의 의사결정지원 시스템 개발, 부산대학교 박사학위논문
3. 부경민(2005) 연속회분식반응기에서 기초계측기를 이용한 자동화 운전 제어전략, 부산대학교 박사학위논문
4. 최대원(2005), 시계열 데이터 마이닝을 이용한 SBR의 기기 고장 진단, 부산대학교 석사학위논문
5. J. Comas, I. R-Roda, M. S.-Marre, U. Cortes, J. Arraez and M. Poch (2003) A knowledge-based approach to the deflocculation problem: integrating on-line, off-line, and heuristic information, *Wat. Res.*, 37, 2377-2387.
6. K. Gibert, M. S.-Marre, I. R.-Roda (2006) GESCONDA: An intelligent data analysis system for knowledge discovery and management in environmental databases, *Environmental Modeling & Software*, 21, 115-120.
7. G. Olsson, M. K. Nielson, Z. Yuan, A. L.-Jensen and J.-Philippe Steyer (2005) *Instrumentation, Control and Automation in Wastewater Systems*, Scientific and Technical Report No. 15, IWA Publishing.