

수처리공정의 모델링과 지능제어의 적용

천성표, 김봉철, 김성신
부산대학교 전자전기통신공학부

Modeling and Intelligent control for Wastewater treatment process

Cheon Seong-pyo, Kim Bongchul, Kim Sungshin
Department of Electrical Engineering, Pusan National University

Abstract - The main motivation of this research is to develop an intelligent control strategy for Activated Sludge Process(ASP). ASP is a complex and nonlinear dynamic system because of the characteristic of a wastewater, the change of an influent flow rate, weather conditions, and etc. The mathematical model of ASP also includes uncertainties which are ignored or not considered by process engineer or controller designer. The ASP is generally controlled by a PID controller that consists of fixed proportional, integral, and derivative gain values. The PID gains can be adjusted by the expert in the ASP. The ASP model based on Matlab[®]5.3/Simulink[®]3.0 is developed in this paper. Various control methods are applied to the ASP model and the control results are discussed. Three control methods are designed and tested: conventional PID controller, fuzzy logic control approach to modify setpoints, and fuzzy-PID control method.

1. 서 론

폐수처리에 있어서 생물학적 영양염 제거를 위한 연속식반응기의 운전관리는 다양한 변수들의 원인, 결과의 결합에 의하여 결정되기 때문에 그 특성을 분석하기가 쉽지 않다. 반응기 공정의 설계를 위해서는 변화하는 유입수의 양과 수질에 적용할 수 있는 체계적인 운전 방법이 결정되어야 한다. 현재는 최초 플랜트 설계 과정에서 결정된 운전 방법과 시행착오를 통한 실질적인 운전자의 경험과 지식에 의하여 주관적으로 많은 부분이 결정되고 있다. 연속식반응기의 유출수의 수질을 향상시키며 동시에 효율적인 에너지 사용을 위해 기본적으로 제어되어야 할 것은 폭기량이다. 산소의 공급유무에 따라 각 반응기의 반응조건이 결정되며 연속식반응기를 이용하는 하폐수처리장의 유지비의 상당부분이 반응기를 폭기시키는데 사용되고 있으므로 전체적인 에너지 효율 역시 산소의 공급과 밀접한 관련이 있다. 따라서 산소의 공급, 반응시간의 조절이 필수적이라 할 수 있다. 제어의 적용에 앞서 활성슬러지 모델 No.1(Activated Sludge Model No.1)[1]에 의한 기본적인 연속식반응기 시스템의 모델을 구현하였으며, 모델의 성능 평가를 통하여 모델의 타당성을 검증하였다. 유입수의 유량 및 특성의 변화에 따라 각기 다른 조건의 반응기에서 수질 및 특성 변화를 분석 한 후, 현장에서 사용하는 전형적인 제어기법인 PID제어기법[2]을 이용하여 모의실험한 결과를 검토하여 제어기의 성능 향상과 효율적인 에너지 관리의 관점에서 기존의 운전방법을 향상시킬 수 있는 제어 방법을 제안 할 것이다. 이를 위해 PID제어기와 퍼지 논리[3],[4]와의 결합에 의한 지능제어 방법을 구성하고

적용하여 성능을 비교 분석하고자 한다.

2. 본 론

실제적인 제어기법의 제안 및 적용에 우선하여 제어하고자 하는 플랜트의 특성을 분석하고 전반적인 하폐수처리 시스템을 이해하는 과정은 필수적이다. 이를 위해서 Ulf Jeppsson의 Modelling Aspects of Wastewater Treatment Processes(1996)[5]와 IWA 그리고 COST에서 제시한 Benchmark[6],[7],[8]를 기반으로 하여 ASM No.1을 적용한 연속식반응기 시스템을 Matlab[®]5.3/Simulink[®]3.0로 모델링 하였다. 현재 대부분의 폐수처리장에서 사용되고 있는 제어기는 PID제어기로 우선적으로 PID제어기의 성능을 향상시키는 방법에 목적을 두고 있다. 하폐수처리장에서 기본적으로 행하고 있는 제어 중의 하나인 산소의 농도를 일정하게 유지하기 위해서 외부에서 주입되는 공기량을 조절해 주는 DO제어를 모의실험을 통해 실시 한 결과를 보여도록 하겠다.

2.1 ASM No.1 & Benchmark

1986년에 발표된 ASM No.1은 heterotrophs 및 autotrophs의 성장과 사멸 및 가수분해 등 8개의 공정과 4종류의 탄소성 물질 및 질소성 물질 등 시스템의 입력변수로서 13개의 성분을 포함한 Matrix형태로 표시된다. 유기물질 제거의 동력학식은 성장제한 기질에 대한 Monod식 형태로 나타내었다. 반응조는 ASM No.1을 바탕으로 모두 다섯 단으로 구성하였으며 2차 침전조의 경우는 이중지수 침전속도함수(Takacs *et al.*, 1991)를 이용하여 10개의 층으로 나누었으며 침전조 내부에서의 생물학적인 반응은 없는 것으로 간주했다.

2.1.1 Matlab[®]5.3/Simulink[®]3.0 모델

본 연구에서는 제어 및 수치해석 분야에서 그 성능을 인정받고 있으며 널리 사용되고 있는 Matlab[®]5.3/Simulink[®]3.0을 이용하여 구현하였다. 전체적인 모델의 구성은 그림 1에 나타내었으며 모델의 타당성 및 성능 평가를 위한 모의실험은 Matlab[®]5.3에서의 ODE45(Fourth-order Runge-Kutta Method)를 이용하여 Relative Tolerance를 1e-6으로 두고 플랜트에 유입되는 유량과 각 성분별 농도는 IWA에서 성능평가를 위해서 제안한대로 DRY Weather에서 14일간의 평균값을 사용하였다. 이를 통해 IWA에서 제시한 결과와 소수점 두 번째 자리이상의 정확성을 확인하였다.

2.2 DO의 농도제어

생물학적 반응조의 종류는 크게 질산화반응을 위한 호기조와 탈질반응을 위한 혐기조로 구성되어 있다. IWA에서 제시한 Benchmark에서의 질산화 및 탈질반응을 위한 연속식반응기의 구성은 그림 1에서와 같이 첫 번째와 두 번째 반응조는 혐기조로, 세 번째부터 다섯 번째까지 반응조는 호기조로 두고 다섯 번째 반응조와 2

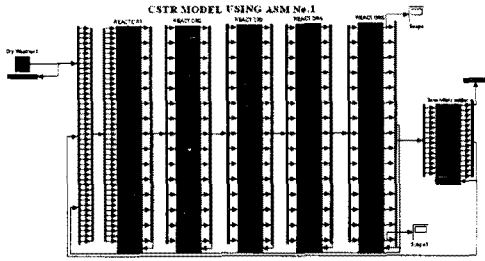


그림 1. Denitrification configuration using Matlab[®]5.3/Simulink[®]3.0.

차 침전조로부터 각각 일정량의 폐수와 슬러지를 첫 번째 반응조로 되돌려 보낸다. 따라서 세 번째 반응조에서부터 다섯 번째 반응조를 통과하는 동안 탈질과정을 거친 폐수를 다시 첫 번째와 두 번째 반응조에서 질산화과정을 거치게 해서 암모니아로 변환시키는 방법을 택했다. 결과적으로 다섯 번째 반응조는 탈질과정과 질산화과정을 연결시키는 역할을 하게 되는 것이다. 전체적인 과정의 원활한 진행을 위해서 다섯 번째 반응조의 DO 농도는 적절한 값을 유지할 수 있도록 제어되어야 한다.

본 연구에서는 이를 위해서 다양한 제어 방법을 고찰하였으며 실제 현장에서 사용되고 있는 PID제어기를 구현하여 DO제어를 수행한 후 PID제어기가 가진 장점을 최대한 활용함과 동시에 성능을 향상시킬 수 있는 방법을 모색하게 되었다.

2.2.1 PID Control

PID제어기는 많은 산업현장에서의 복잡한 플랜트에 실제로 사용되고 있는 제어기로서 그 구성이 단순하면서도 안정적이며 가격 대 성능비가 높고 제어기의 조율이 상대적으로 쉬워 대다수의 제어기 설계자와 현장의 실무자들에게 각광받고 있는 제어기중의 하나이다. 특히 연속식반응기의 경우 부하 변동에 대해 안정적이며 현장에서 실제로 적용되고 있다는 점등의 특징이 있다. 그러나 PID제어기는 프로세서의 동역학적 거동이 일차 시스템이거나 이차 시스템일 경우에 그 성능이 뛰어난 반면에 고차시스템이거나 비선형 프로세서에 적용이 쉽지 않은 단점이 있다. 실제 현장의 PID제어기를 조율하는 대표적인 예로 Ziegler-Nichols 방법[9]이 있으며 이는 수학적 이론에 의한 것이라기보다는 경험에 의해 나오는 이득값을 취하는 방법으로 부하의 변화에 대해 안정적인 반면에 오버슈트(overshoot)와 정착시간(settling time)이 크다는 단점이 있다. 그래서 최초의 제어기의 이득값은 Ziegler-Nichols 방법에 의해 구한 후 이 이득값을 현장 실무자의 경험에 의해 조금씩 다시 조율하는 방법을 사용하고 있다.

2.2.2 퍼지 셋포인트 변환기와 퍼지 PID 이득 조절기

많은 복잡한 시스템들이 선형방정식과 비선형방정식의 합으로 나타낼 수 있으며 제어기는 선형적인 부분뿐만 아니라 비선형적인 부분과 모델링 과정에서 무시되었던 부분까지도 고려해야만 한다. 퍼지 논리 제어 방법은 여러 복잡한 공정제어와 관련되어 많은 연구들과 실제 적용 과정에서 그 성능을 인정받고 있다. 따라서 퍼지 PID 제어 전략은 PID제어기의 장점과 퍼지 논리 제어의 장점을 결합시켜 전체적인 제어기의 성능을 향상시킬 수 있다. 그림 2는 운전자 모델의 학습 알고리즘을 보이고 있다. 운전자 모델은 프로세스에 대한 많은 경험을 가진 숙련된 운전자와 병렬로 연결되어 비정상적인 상태이거나 위급한 상황에서 운전자의 운전방법과 지식을 학

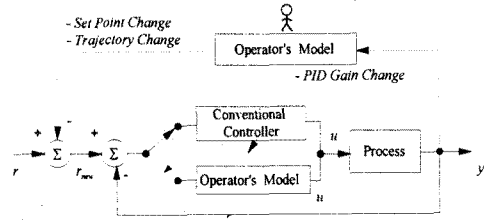


그림 2. The operator's model in the control hierarchy.

습하고 따라 하게 된다. 결국, 경험에 입각한 정보, 스스로 학습한 정보, 그리고 운전자의 지식이 운전자 모델을 발전시키는 데 사용된다. 그림 2에서 운전자 모델은 두 가지 제어구조를 갖는다. 제어기의 이득(Gain)을 조절하기 위한 내부프(inner loop)제어와 전체 프로세서를 감속하고 외란에 대해 안정하면서도 강인한 성능을 유지하기 위해 새로운 셋포인트(setpoint)와 운전조건을 제공하는 외부프(outer loop)제어를 행한다. 퍼지 셋포인트 변환기는 그림 3과 같이 구성되어 있다. 퍼지 셋포인트 변환 방법은 일정한 표본추출시간(sampling time)마다 프로세서 출력의 오차와 오차의 변화율을 이용하여 셋포인트에 어느 정도의 가감을 주어 PID제어기가 내부적으로는 새로운 셋포인트를 추종하도록 하여 시스템의 응답속도를 향상시키는 제어 전략이다. 그림 4의 퍼지 이득 조절기는 정해진 시간동안 여러 차례의 반복적인 플랜트의 운전을 통하여 최적의 PID제어기의 각 이득값을 찾는 방법으로 주어진 시간동안의 운전 결과를 분석하여 다음 번 플랜트의 운전을 위하여 PID제어기의 이득값을 조금씩 변환시키는 방법이다.

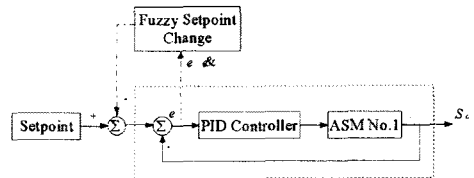


그림 3. Block diagram of the fuzzy setpoint changer.

3. 모의실험

본 논문에서는 IWA에서 제시한 14일 동안의 DRY Weather의 데이터를 이용하였으며 유입유량의 변화는 그림 5(a)와 같다. 제어기 없이 모델에 적용하여 그림 5(b)와 같은 DO농도 변화의 데이터를 분석한 후, 다섯 번째 반응조 내의 유지해야 할 산소농도를 2 mg/l 로 정하고 K_a 값의 범위를 실제 상황과 유사하게 0 day^{-1} 에서 240 day^{-1} 로 제한한 후 PID제어기의 각 이득값은 $K_p=80$, $K_i=3.2$, 그리고 $K_d=400$ 으로 두고 모의실험하여 그림 5(c)의 DO농도 변화를 얻었다. PID제어기에 셋포인트 변환을 주어 모의실험 했을 때의 결과는 산소농도의 변화는 그림 5(d)와 같다. 오차와 오차의 변화율로 새롭게 결정된 셋포인트가 그림 5(e)에 나타나고 있으며 실제 다섯 번째 반응조로 들어가는 K_a 값은 그림 5(f)와 같다. 결과에서 보는 바와 같이 단순한 PID제어기가 갖는 오실레이션 부분이 상당히 개선되어 전체적인 산소농도의 변화가 줄어들었다. 그리고 내부적

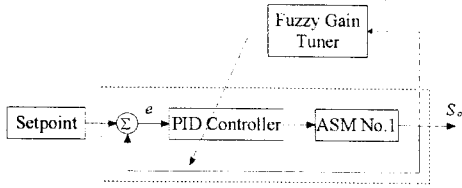


그림 4. Block diagram of the fuzzy PID gain tuner.

으로 새로운 셋포인트 변화에 의한 것이므로 전체적인 출력의 변화는 적으면서도 안정적으로 제어된다는 사실을 알 수 있다. 퍼지 이득 조절기를 적용한 경우는 그림 6(a)와 그림 6(b)의 경우는 초기의 PID제어기의 이득값을 $K_p=10, K_d=0, K_i=5$ 와 $K_p=100, K_d=0, K_i=50$ 으로 주었을 때의 결과이다. 이득값이 $K_p=10, K_d=0, K_i=5$ 일 경우에는 원하는 기준값(여기서는 1)에 미치지 못하는 성능을 보이고 있다. $K_p=100, K_d=0, K_i=50$ 일 경우에는 기준값으로 수렴하고는 있지만 퍼지 보상기의 역할이 거의 나타나지 않아 다시 이득값들의 초기치를 위의 두 값들 사이의 값으로 그림 6(c),(d)와 같이 변화시켜 보았다.

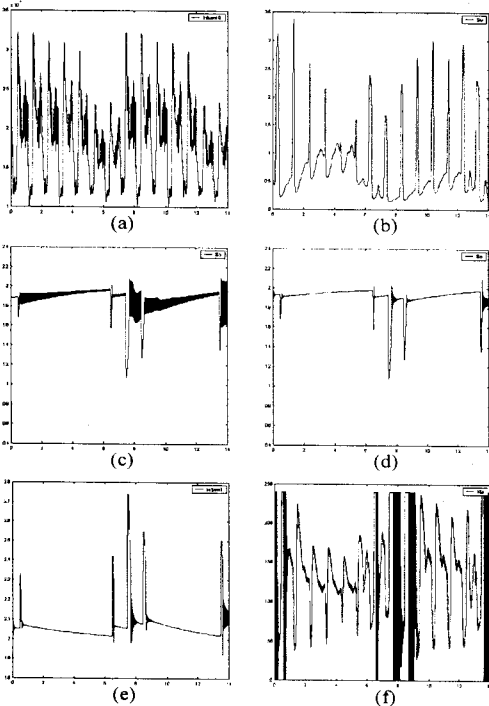


그림 5. Simulation results on the DRY weather data(14days) in the case of $K_p=80, K_i=3.2$ and $K_d=400$.

4. 결론

연속식반응기는 매우 많은 조절되어야 할 변수들이 포함되어 있으며 반응기 공정의 설계를 위해서는 변화하는 유입수의 양과 수질에 적응할 수 있는 체계적인 운전 방법이 결정되어야 한다. 본 논문에서는 효율적인 에너지 관리를 포함한 최적의 운전조건을 도출하기 위한 방법으

로 실제 현장에서 사용되고 있는 PID제어기를 구현하여 DO제어를 수행한 후 이를 분석하여 PID제어기가 가진 장점을 최대한 활용함과 동시에 성능을 향상시킬 수 있는 방법으로 퍼지 셋포인트 변환 방법과 퍼지 이득 변환기를 제안하였으며 이를 이용하여 보다 안정적이면서도 플랜트의 응답이 개선될 수 있다는 가능성을 제시하였다. 퍼지 셋포인트 변환기의 경우 PID제어기의 우수한 성능을 그대로 계승하면서도 그 성능을 향상시키고 보다 강인하고 안정한 제어방법으로 평가할 수 있으며 적절한 PID제어기의 이득값을 찾아내는 방법으로 퍼지 이득 변환기를 이용하여 PID제어기의 이득값을 조절할 수 있다는 사실을 검증하였다.

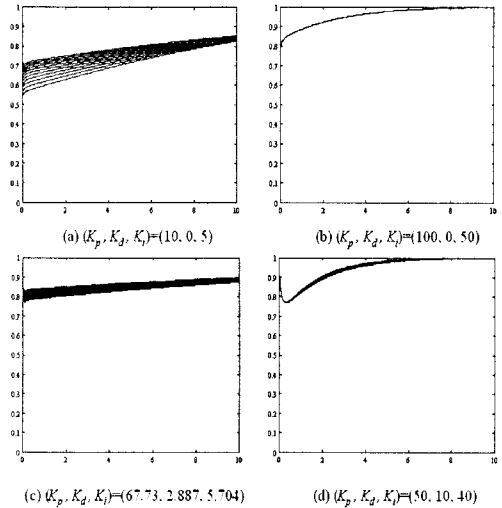


그림 6. Fuzzy gain tuner with different initial gains.

[참고 문헌]

- [1] Henze, M., Grady, C.P.L.Jr., Gujer, W., Marais, G.v.R and Matsuo, T. "IAWQ Task Group on Mathematical Modelling for Design and Operation of Biological Wastewater Treatment Activated sludge model No. 1". Scientific and Technical Reports No. 1, IAWQ, 1986
- [2] K. Astrom and T.Hagglund, "PID Controllers: Theory, Design and Tuning.", New York: ISA, 1995
- [3] S. Kim, A. Kumar, J.L. Dorrity, and G. Vachtsevanos, "Fuzzy modeling, control, control and optimization of textile process," Proc. of the 1994 Int. Joint Conf. of NAFIPS/IFIS/NASA, pp. 32-38, Dec. 1994.
- [4] S. Kim, G. Vachtsevanos, "An Operator's Model for Control and Optimization of Mechatronic Processes." In Chapter 13, "Mechatronics in Engineering Design and Product Development", Marcel Dekker, Inc. D. Popovic, L. Vlacic, pp. 565-584, Sep. 1998.
- [5] Jeppson, U. "Modelling Aspects of Wastewater Treatment Processes", Ph.D Thesis, Dept. of Industrial Electrical Engineering and Automation, Lund Institute of Technology, Sweden, 1996
- [6] Carl-Fredrik Lindberg, "Control and Estimation Strategies Applied to The Activated Sludge Process.", 1997
- [7] <http://spb.wau.nl/iawqstrprojct/benchmark.htm>
- [8] <http://www.ensic.u-nancy.fr/COSTWWTP>
- [9] B. Shahian and M. Hassul, "Control System Design using Matlab." Prentice Hall, 1993, pp. 171-173.