

퍼지제어기를 이용한 축산폐수처리를 위한 연속회분식 반응기(SBR)의 폭기제어 Control of Aeration Phase in SBR for Piggery Wastewater Treatment using FLC

전병희, 배현, 서현용, 우혜진*, 김창원*, 김성신,

Byong-Hee Jun, Hyeon Bae, Hyun-Yong Seo, Hae-Jin Woo*, Chang-Won Kim* and

Sungshin Kim

부산대학교 전기공학과

*부산대학교 환경공학과

School of Electrical and Computer Engineering, Pusan National University, Busan, Korea

*Department of Environmental Engineering, Pusan National University, Busan, Korea

Tel: 051-510-2374, E-mail: sskim@pusan.ac.kr

요 약

본 연구에서는 축산폐수공공처리장내에 설치된 Pilot-scale SBR(유효부피, 20m³)를 이용하여 sub-cycle의 폭기/무산소구간을 최적화하기 위하여 DO를 입력으로 하여 넓은 운전조건에서 적용될 수 있는 퍼지제어기를 개발하고, 또한 부하이상을 신속히 진단하여 유입부하량을 제어할 수 있는 퍼지 시스템 제어기를 개발하였다. DO값을 입력으로 한 퍼지제어기로서 안정성과 연속성에서 우수하였으나 시스템에 따라서 소속함수의 범위를 재조정해야 할 필요가 있다. DO미분값은 변화폭이 큰 지점을 검출함으로써 지연시간(lag time)의 DO값에 관계없이 적용할 수 있는 장점이 있다. 제어기의 적용성과 안정성을 높이기 위해서는 두 가지 제어인자를 동시에 고려할 필요가 있으며 퍼지 소속함수에 대한 입력으로서 DO값과 DO미분값을 적용하였다. 그 결과 폭기구간에서 매우 안정적이고 신속하게 폭기제어지점의 검출을 보여주고 있어 최적화된 제어가 가능함을 보여준다. 현장실험결과 지연시간에서의 DO가 높고 외란이 심한 경우에도 적용될 수 있음을 보여주었다.

Keywords : SBR, 폭기제어, 퍼지, 축산폐수

1. 서론

우리나라에서 축산폐수의 오염부하량은 전체의 8%에 달한다고 보고되고 있으며, 축사가 대부분 상수원보다 상류지역에 산재하고 있어 이를 효과적으로 관리, 제어하는데 큰 장애요인이 되고 있다. 연속 회분식 반응기(Sequencing Batch Reactor, SBR)는 장치가 간단하고 경제성이 우수하여 축산폐수처리에 대한 현실적 대안이 될 수 있다. 특히 SBR은 제어대상으로서 많은 연구

들이 이루어져 있으며, 주로 pH, ORP, DO와 같은 일반적인 센서를 단독으로 이용하거나 또는 두가지 이상의 센서를 동시에 이용한 제어에 대한 연구가 주로 이루어졌다. 탈질과정에 대한 정보를 제공하지 못하는 pH와 달리 ORP(Oxidation Reduction Potential)는 인방출 종료점[1], 질산화 종료점[2], 탈질종료점[3]이 감지될 수 있다는 점에서 우수한 제어인자라 할 수 있다. 특히 폭기과정에서 ORP profile의 특성에 대해서는 많은 연구가 이루어졌다[4]. 이에 비해

DO는 ORP제어에 대한 보조인자로서 인식되는 경우가 많았으나 Pilot test결과 안정적인 제어인자로서 현장적용가능성이 높다고 판단되었다[5]. 하폐수처리에서의 퍼지로직시스템 적용에 대한 연구사례도 다수 있으며, 이중 대부분이 혐기시스템에서의 과부하방지나 독성물질유입을 진단하거나, 입출력변수의 패턴분류를 통하여 공정상태를 판별하기 위한 목적으로 이용되었다. 또한 이전에 제안된 제어전략들은 운전조건에 따라 제한적인 경우가 많고 외란에 대한 안정성 검토 또한 부족하다.

본 연구에서는 정상적 운전조건에서 SBR의 폭기/무산소구간을 최적화하기 위하여 가장 일반적인 측정변수인 DO를 입력으로 하여 넓은 운전조건에서 적용될 수 있는 제어기를 개발하고, 또한 부하이상을 신속히 진단하여 퍼지시스템으로 유입부하량을 동시에 제어할 수 있는 기법을 제시하고자 한다.

2. SBR

본 연구를 위해 Pilot-scale SBR(유효부피, 20m³)가 K시 축산폐수공공처리장내에 설치, 운전되었다. 원수성상이나 Pilot Plant의 사양은 전 등[5]의 논문에서 자세히 설명되었다. 반응기 내에는 pH, ORP, DO, MLSS Sensor가 설치되어 on-line Monitoring 및 제어를 위한 설비를 갖추었다.

운전은 기본적으로 1시간의 무산소 단계, 3시간의 호기 단계의 sub-cycle로 운전되었다. Fixed-time 운전의 경우 미리 입력된 시간에 따라 무산소-호기의 sub-cycle이 반복되지만 Real-time control에서는 각 단계의 시간은 원수와 미생물 상태에 따라 변동된다. 분석을 위한 시료는 Wattman GFC-40으로 여과한 후 Auto Analyzer 3(Bran+Luebbe)를 이용하여 분석실에서 NH₄⁺-N, NO₂⁻-N, NO₃⁻-N이 분석되었다.

3. Pilot Plant 관리 및 제어시스템

현장에 설치된 Pilot Plant는 전용선(ADSL)을 이용하여 원격 관리, 제어되었다. 기존의 개발툴로 짜여진 어플리케이션을 탈피하기 위해 C++ Builder로 자체관리시스템을 구축하였으며 장소에 제한받지 않고 공정상태를 확인이 가능하도록 Web기반 원격관리 시스템을 도입하였다.

또한, ORP, DO, pH, MLSS값들이 on-line으로 측정되어 1분간격으로 DB에 저장되어 그래프로서 보고되었고, 이런 값들은 생물반응기의 상태를 간접적으로 나타내어 국지제어인자로서 활용

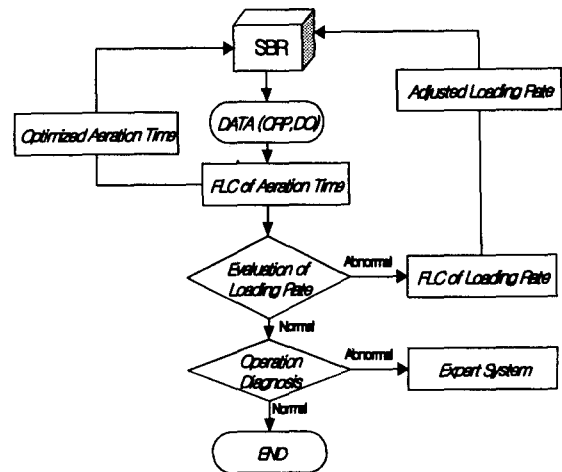


Fig. 1 The flow-chart of SBR management.

되고 있다.

본 연구의 목표중의 하나는 기존의 DO값에 의한 set point제어를 인공지능을 이용하여 더욱 정밀하게 제어하여 질산화에 필요한 폭기구간을 최적화시키는 것이다. 이를 위하여 DO와 DO의 변화값을 동시에 입력으로 한 퍼지논리 제어기(FLC)를 개발하였다(Fig. 1).

4. 결과 및 고찰

3.1 질산화에 따른 ORP, DO의 변화

0.16kgN/m³/d의 부하율이 적용된 SBR sub-cycle에서 질소농도와 ORP, DO의 변화를 Fig. 2에 나타내었다.

폭기구간에서는 질산화 반응이 완료되면 원수 주입과 함께 무산소구간이 시작되어 탈질반응이 시작된다. 여기서 질산화 종료지점을 정확히 검출하여 다음 무산소단계로 전환시키는 것은 폭기량 최적화에서 매우 중요하다. 질산화 종료지점을 검출하기 위한 기존의 알려진 제어인자를 이용하였을 때 예상되는 제어지점을 (A), (B), (C)로 나타낼 수 있다.

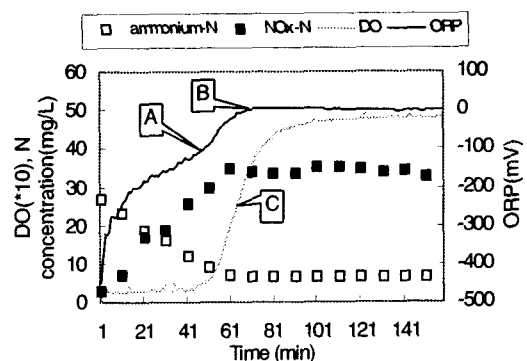


Fig. 2 The variation of DO and ORP during nitrification in SBR.

(A) : 서론에서 언급한 바와 같이 ORP는 가장 고전적인 제어인자이다. 주로 ORP변곡점이 질산화 종료지점과 잘 일치한다는 점에 근거하고 있으나 본 연구결과 이런 변곡점은 부하조건에 의존적이어서 낮은 부하율에서는 나타나지 않기도 하여 넓은 운전조건에 대한 제어인자로서는 부적합한 것으로 조사되었다.

(B) : ORP변곡점이 아닌 plateau는 운전조건에 의존하지 않고 일정하게 나타나 제어인자로서 적합하다는 것을 알 수 있었다. 그리고 ORP는 모든 산화, 환원반응에 영향을 받으므로 반응기 상태를 민감하게 나타내어 진단도구로서도 적용 가능하다고 판단되나 반대로 노이즈의 영향을 쉽게 받고 매우 높은 부하에서 재현성이 떨어지는 단점이 있었다. 그리고 제어지점이 실제 질산화 종료지점 보다 늦게 검출되어 제어가 다소 지연되는 단점도 있다.

(C) : DO값을 제어인자로서 이용한 것으로서 기존의 문헌에서 그 가능성을 논하였으나 실제 Pilot plant에서 검토한 결과 안정성이 매우 높다고 판단되었다. 주로 DO값이나, DO미분값을 이용하는데 이 두 방법에서 제어지점은 거의 동일하여 DO로서 3전후에서 제어되었다[5].

폭기가 지속되면 DO는 1이하를 유지하다가 질산화 종료지점에서 크게 상승하여 DO가 3 이상이 되면 노이즈나 lag time에서의 DO값과 구분되는 적절한 제어가 이루어졌다. 그러나 Fig. 2에서 보듯이 이 지점은 이미 질산화 종료지점 지난 지점으로서, 보다 정확한 제어를 위해서는 복수의 제어인자를 결합하여 구현할 필요가 있다고 판단되었다. 즉 DO상승이 시작되는 지점(x축의 50-60분 사이)이 이미 질산화가 종료된 지점이므로 이점을 신속하게 검출하기 위한 방법으로서 퍼지제어를 적용하고 평가하였다.

3.2 DO, ORP를 이용한 퍼지시스템

Fig. 3는 Fig. 2에서의 DO, ORP값을 입력으로 한 각각의 퍼지제어의 결과를 나타내었다. (A)는 DO값을 입력으로 한 퍼지제어기로서 안정성과 연속성에서 우수하였다. 그러나 lag time(0-50분)에서의 DO값이 높은 시스템에서는 소속함수의 범위를 재조정해야 하는 등 시스템에 따른 조정이 필수적이라고 판단된다. (B)는 DO의 미분값을 입력으로 한 결과로서 변화폭이 큰 지점만 특이적으로 검출함으로써 lag time의 DO값에 관계없이 적용할 수 있어 tuning이 생략될 수 있다고 판단된다.

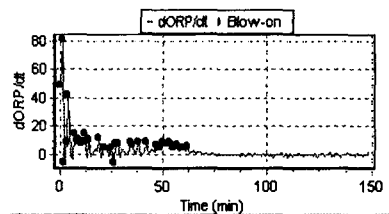
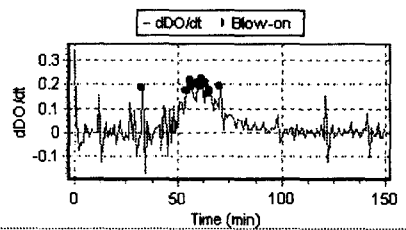
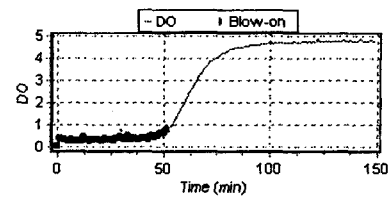


Fig. 3 Blow commands given by fuzzy controller with : (A) DO : (B) dDO/dt : (C)dORP/dt.

(C)는 ORP의 미분값을 이용한 결과이다. 변곡점이 나타나는 50분을 전후하여 변화율이 크므로 비교적 연속적으로 폭기가 이루어지나 변곡점 이전의 지점에서 폭기가 불안정하게 이루어짐을 알 수 있다. 이전의 연구에서 (A)와 (B)의 방법을 독립적으로 적용한 예가 있으며[5], 제어기의 적용성과 안정성을 높이기 위해서는 두 가지 제어인자를 동시에 고려할 필요가 있다고 판단되었다.

3.3 DO를 이용한 개선된 퍼지제어기

Fig. 4(A)는 퍼지의 소속함수에 대한 입력으로서 DO값과 DO미분값을 적용한 결과를 나타내었다. 폭기가 진행되면서 DO가 상승하기 시작하는 지점을 신속하게 검출하고 있으나 폭기신호의 도중에 폭기중지 신호(회원)가 산재하는 등 안정성에는 부족한 점이 있었다. 이는 DO 미분값이 센서의 성능, 시스템의 특성등으로 인해 노이즈에 민감하기 때문이라 판단되며 이를 상쇄시키기 위해 Moving average를 이용하여 DO미분값을 Filtering 한 결과가 Fig. 4(B)이다.

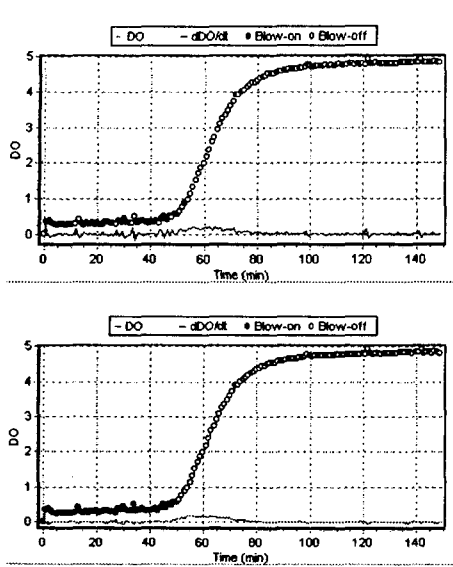


Fig. 4 Blower command given by fuzzy controller without data filtration (A) and with (B).

폭기구간에서 매우 안정적이고 신속한 검출을 보여주고 있어 DO값과 그 미분값을 동시에 이용했을 때 보다 최적화된 제어가 가능함을 보여준다.

Fig. 5은 퍼지제어기를 실제 장기 Pilot 운전결과에 적용시켰을 때 폭기구간의 변화를 보여준다.

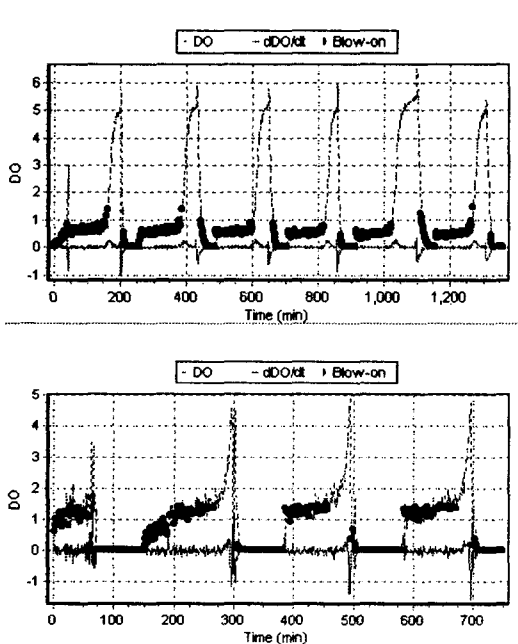


Fig. 5 Implement of fuzzy controller in stable phase(A) and relatively unstable(B).

(A)는 매우 전형적이면서 안정된 운전상태하에서 적용된 예를 보여준다. 점선은 기존의 제어방법이 적용된 실제 폭기기간중의 DO값을 나타내고 있으며 점은 퍼지제어기를 적용했을 때의 폭기구간을 나타낸다. 따라서 원이 없는 점선구간은 최적화에 의해 감소될 수 있는 폭기구간이라고 생각할 수 있다. 기존의 방법에서는 DO의 충분한 상승지점을 포착하여 제어하나 퍼지제어기에서는 미분값의 변화를 포함하여 신속한 제어가 가능해 졌다. (B)는 DO값의 노이즈가 크고 지체구간에서의 DO가 상대적으로 높은 운전중의 제어결과를 나타낸다. 역시 점선은 기존의 방법을 이용한 제어결과로서 퍼지제어와 비교하면 폭기시간이 감소될 수 있다는 것을 알 수 있다. (B)의 결과는 lag time에서의 DO가 다르고 노이즈가 심한 경우에도 별도의 tuning없이 적용된 것으로서 퍼지제어기의 넓은 적용성을 보여준다.

5. 참고문헌

[1] Lee, D. S., Jeon, C. O., and Park, J. M., "Biological nitrogen removal with enhanced phosphate uptake in a sequencing batch reactor using single sludge system," *Wat. Res.*, Vol. 35, pp.3968-3976, 2001.

[2] Ra, C. S., Lo, K. V., Shin, J. S., Oh, J. S. and Hong, B. J., "Biological nutrient removal with an internal organic carbon source in piggery wastewater treatment," *Wat. Res.*, Vol. 34, pp.965-973, 2000.

[3] Andreottola, G., Foladori, P. and Ragazzi, M., "On-line control of a SBR system for nitrogen removal from industrial wastewater," *Wat. Sci. Tech.*, Vol. 43, pp.93-100, 2001.

[4] Caulet, P., Bujon, B., Philippe, J. P., Lefevre, F. and Audic, J. M., "Upgrading of wastewater treatment plants for nitrogen removal : industrial application of an automated aeration management based on ORP evolution analysis," *Wat. Sci. Tech.*, Vol. 37, pp.41-47, 1998.

[5] 전병희, 김도환, 최은희, 배현, 김성신, 김창원, "DO와 ORP를 이용한 축산폐수처리 SBR운전 제어," *물환경학회지*, Vol. 18, pp.545-551, 2002.