

연속 회분식 반응기에서 최적 질소 제거를 위한 최적 궤적 찾기와 재최적화

김영황 · 유창규* · 이인범

포항공과대학교 화학공학과
790-784 경북 포항시 남구 효자동 산 31
*경희대학교 환경응용화학대학 환경학 및 환경공학/환경연구센터
446-701 경기도 용인시 기흥군 서천동 1
(2006년 10월 9일 접수, 2006년 2007년 1월 4일 채택)

Optimal Trajectory Finding and re-optimization of SBR for Nitrogen Removal

Young-Whang Kim, ChangKyoo Yoo*,†, and In-Beum Lee

Dept. of Chemical Engineering, POSTECH, San 31, Hyoja-dong, Nam-gu, Pohang 790-784, Korea

*Dept. of Environmental Science and Engineering/Center for Environmental Studies, College of Environmental and Applied Chemistry, Kyung Hee University, 1 Seocheon-dong, Giheung-gu, Yongin, Gyeonggi, 446-701, Korea

(Received 9 October 2006; accepted 4 January 2007)

요 약

본 연구는 생물학적 폐수 처리 공정인 연속 회분식 반응기(sequencing batch reactor, SBR)에서 질소 제거 최적화를 위해 활성 오니 공정모델(activated sludge model, ASM No.1, ASM1)과 반복 동적 프로그래밍(iterative dynamic programming, IDP)을 이용하여 SBR의 처리 기준을 만족하면서 최적 운전 조건을 탐색하고 하는 것을 목적으로 하였다. 연속 회분식 반응기의 최적화를 위해 에너지 최소화과 최소 회분 시간이 질소 처리의 농도 그래프의 면적과 비례하는 점을 이용하여 이를 고려한 새로운 performance index를 제안하였다. 회분 시간과 에너지에 대항하는 면적에 적절한 비중(weight)을 줌으로써 최소 회분 시간과 최소 에너지 문제를 동시에 고려하였다. SBR에서 IDP를 이용한 최적 운전시 최적 용존 산소 농도의 설정치가 전체 회분 시간과 전체 에너지 비용에 동시에 영향을 미침을 알 수 있었고 최적 운전시 기존의 운전 방법과 같은 유기물과 질소 제거가 가능하고 동시에 전체 비용을 20%까지 줄일 수 있었다. 더 나아가 공정이상으로 실제 공정이 모델과 다른 모델링 어려에 의해 잘못된 모사의 경우에도 IDP를 이용하여 다시 재최적화할 수 있음을 보였다.

Abstract – This article aims to optimize the nitrogen removal of a sequencing batch reactor (SBR) through the use of the activated sludge model and iterative dynamic programming (IDP). Using a minimum batch time and a maximum nitrogen removal for minimum energy consumption, a performance index is developed on the basis of minimum area criteria for SBR optimization. Choosing area as the performance index makes the optimization problem simpler and a proper weighting in the performance index makes it possible to solve minimum time and energy problem of SBR simultaneously. The optimized results show that the optimal set-point of dissolved oxygen affects both the total batch time and total energy cost. For two different influent loadings, IDP-based SBR optimizations suggest each supervisory control of batch scheduling and set-point trajectory of dissolved oxygen (DO) concentration, and can save 20% of the total energy cost, while meeting the treatment requirements of COD and nitrogen. Moreover, it shows that the re-optimization of IDP within a batch can solve the modelling error problem due to the influent loading changes, or the process faults.

Key words: Activated sludge model (ASM), Dissolved Oxygen (DO) Control, Iterative Dynamic Programming (IDP), Model-based Optimization, Nitrogen Removal, Sequencing Batch Reactor (SBR), Wastewater Treatment Process

1. 서 론

최근 폐수속의 유기물, 질소, 인 등의 영양 염류가 과다 배출되어 호수나 하천 등의 부영양화가 심각한 실정이다. 이러한 질소나 인을 생물학적으로 제거하는 방법중의 하나가 연속 회분 반응기

(sequencing batch reactor, SBR)이다. SBR은 유기물은 물론 질소와 인을 효과적으로 동시에 제거할 수 있다는 점에서 주목을 받아 왔다. SBR은 1개의 회분조에 반응조와 침전지의 기능을 갖게하여 반응과 혼합액의 침전, 상징수 배수, 슬러지 배출 공정을 단일조 내에서 처리하는 방식이다. 반응이 회분식으로 이루어지므로 원수의 계속적인 유입을 위하여 반응조는 대부분의 경우 몇 개의 SBR을 병렬로 배열하여 운전할 수 있다. 1주기는 유입, 반응, 침전, 처리수

† To whom correspondence should be addressed.
E-mail: ckyoo@khu.ac.kr

배출 및 슬러지 배출 등 총 5단계로 이루어진다. 이러한 SBR 시스템은 fill-and-draw 방식의 연속 회분 활성 슬러지 공정으로 불리며 1980년 초 미국에서 2차 처리를 위한 방법으로 다수 사용되어 왔다. 일찍부터 이론적인 각광을 받아 왔으며 최근 자동제어를 위한 이론 및 장비의 개발로 전 세계적으로 그 사용이 증가되고 있는 추세이다[1]. 국내에서도 다수의 폐수처리장에서 하폐수의 2차 처리를 위하여 SBR 공정이 설계, 시공 및 운전되고 있다. 그러나 생물학적 회분식 공정인 SBR의 경우 강한 비선형성, 미생물의 다양성, 시변성, 다양한 크기의 동특성, 실시간 측정의 어려움, 많은 외란 입력의 변화 같은 독특한 특성 때문에 불안정한 조업이 자주 발생하며 이로 인해 일년에 1~2회 정도는 반응기내의 미생물 유실이 발생한다. 이러한 독특한 특성 때문에 SBR 공정은 실시간 제어 및 감시가 어려워서 대부분 운전자의 경험에 의존하는 단점을 가지고 있다[1-3].

갈수록 폐수에 대한 법률이 강화되고 있기 때문에 이 법률을 만족시키고 비용을 절감시키기 위해 폐수처리 시스템에 대한 제어 및 최적 운전의 필요성이 점점 중요해지고 있다. SBR을 제어하기 위해 크게 두 가지 접근 방법이 제안되어져 왔다. 첫 번째 방식은 용존산소, pH 등의 온라인 센서를 이용한 모니터링 및 제어 접근 방식이고[4-6], 두 번째 방식은 활성 슬러지 모델(Activated Sludge Models)을 이용한 모델 기반 제어 및 최적화 접근 방식이다[7-14]. Offline에서 자주 사용되는 모델기반 최적화는 다양한 제어 기법을 적용할 수 있고 여러 가지 제어 전략을 평가하는데 온라인 센서를 이용하는 방법보다 더 체계적인 방법으로 알려져 있다. 현재까지 생물학적 폐수처리 공정에서 가장 잘 알려진 모델은 ASM1, ASM2, ASM2d와 같은 활성슬러지 모델(activated sludge model family, ASMs)이다[8, 11].

ASM 모델은 IWA(international water association)에서 1980년대 초반부터 제시한 방법으로 하수처리 모델링과 분석을 통하여 활성 오니 공정의 디자인과 운전을 위한 수학적 모델들을 제시하였다. ASM 모델은 하수처리 공정 내에서 일어나는 미생물 반응에 대한 수학적 모델은 이론적인 반응 속도식을 바탕으로 하여 여러 운전 변수에 대한 반응 결과를 제시해 주며, 복잡한 실험 과정을 거치지 않고도 하수처리 공정에서 발생하는 여러 상황에 대한 전산모사를 가능케 한다. 이러한 ASM 모델을 이용한 모델 기반 최적화는 폐수처리 공정에서 질소와 인 제거에 대해 최적 운전 조건을 찾는 데 사용되어 왔다. 하지만 실제 공장 규모의 처리장에서 모델기반 최적화 연구에서는 그동안 ASM의 선형모델이 처리장 최적화에 사용되어 왔고 ASM의 비선형모델은 모델의 비선형특성 때문에 실제 처리장의 운전 최적화에 직접 적용된 결과가 많이 보고되지 않고 있다. 이러한 SBR 공정에서 선형모델의 사용은 제어 측면에서 유출수의 유기물과 질소 농도를 주로 모델링 하는데 사용되었으나 선형모델의 한계 때문에 예측 성능의 저하와 모델링 에러를 가지는 것으로 알려져 왔다. 생물학적 폐수처리장의 최적화의 경우 모델의 예측 성능에 많이 좌우되고 처리장 최적화는 모델링 에러에 민감하기 때문에 선형모델의 경우 SBR의 제어 전략을 설정할 때는 주의가 필요하다.

지금까지 SBR 공정의 경우 대부분의 연구가 회분 제어 전략(batch control policy)을 찾기보다는 최소 회분 시간(minimum batch time)에 대해 연구 되어져 왔다. 현재까지 폐수처리분야에서 SBR의 최적 회분 궤적을 찾는 연구는 진행되지 않고 있다. 본 연구는 유기물

및 질소처리의 최적 운전으로 활성슬러지 모델(activated sludge model, [8-14])과 반복 동적 프로그래밍(iterative dynamic programming, [19-22])에 기반한 SBR 공정의 최적 회분 궤적(optimal batch trajectory)을 찾는 데 초점을 두고 연구를 수행하였다. SBR의 폭기 단계에서 용존 산소의 최적 운전 궤적과 최소 회분 시간을 찾는 방법, 공정 완료 시간과 에너지 소비량을 동시에 고려한 performance index 제안, 그리고 SBR의 회분 중간에 초기 유입 농도나 공정 이상이 있을 경우 회분내 재최적화(re-optimization)에 관한 연구를 수행하였다. 특별히 질소 제거를 위한 SBR의 최적 제어 수식화를 이용해 SBR의 동역학과 면적에 대한 이해와 주로 사용하던 복잡한 performance index 보다 더 간략하지만 여러 가지 문제를 함께 고려할 수 있는 새로운 performance index를 제안하였다. 이와 함께 공정 이상이 발생했을 경우 회분내 최적 회분 궤적을 찾는 방안을 제시하였다.

2. 연속 회분식 반응기에서 질소 제거의 동력학적 모델링

Fig. 1은 SBR의 회분내에서 일어나는 폐수 유입, 반응, 혼합액의 침전, 상정수 배수, 슬러지 배출 단계를 나타낸다. SBR은 단일 반응기내에서 미생물의 동력학적 특성을 이용하여 생물학적으로 폐수를 처리하는 방식이다. SBR은 회분으로 운전되기 때문에 유입 폐수 성분, 생물학적 운전 조건과 반응 시간에 따라 공정 효율이 많이 달라지게 된다. 따라서 SBR에서는 유기물 및 질소를 최적으로 처리하기 위해 최적 제어 전략을 찾을 필요가 있다. 회분공정인 SBR에 대한 제어 전략은 일반적으로 생물학적 반응에서 각 단계 변수들의 설정치와 종료 시간에 의해 달라진다. 생물학적 반응의 완료 점에 따라 SBR의 처리 효율, 처리 용량, 공정 성능 그리고 경제성이 달라진다. 만약 운전 시간이 짧다면 처리 기준, 법적 기준을 만족하지 못할 것이고 반대로 운전 시간이 길면 처리 조건은 만족하지만 운전 비용이 증가하게 된다. 예를 들어, 폭기 단계가 길어진다면

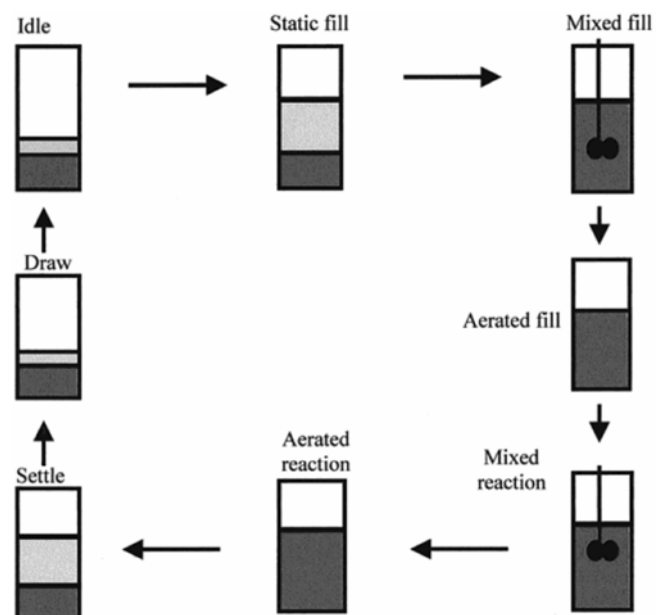


Fig. 1. Basic operation of a sequencing batch reactor [2].

폭기를 위한 에너지 소모가 증가하게 된다[1, 2].

본 연구는 생물학적 폐수 처리 공정에서 질소 제거에 초점을 두고 연구를 진행하였다. 일반적으로 미생물에 의한 질소 제거는 질산화 반응, 탈질화 반응 두 가지로 나뉜다. SBR의 경우 질산화 관련 반응은 각각 호기상(aerobic phase), 혐기상(anoxic phase)으로 나뉘며 서로 다른 미생물을 사용한다. 질산화에 관여된 미생물은 독립영양생물로 암모니아를 아질산염으로 산화시킨다. 이어 아질산염을 질산염으로 산화시킨다. SBR의 회분 내에서는 호기상에서 탄소 제거와 질산화 반응, 혐기상에서 탈질화 반응이 일어난다. 미생물 측면에서 질소 제거는 두 연속적인 반응으로 볼 수 있다. 첫 단계는 자가영양생물이 탄소를 소비해 호기성 성장을 하는 단계이다. 자가영양생물이 암모니아와 용존산소를 소비해 바이오매스와 아질산염을 생성시킨다. 두 번째 단계는 종속영양생물이 무산소 성장을 하는 단계로 종속영양생물이 질산염과 유기물중 탄소성분을 이용하여 바이오매스와 질소가스를 만든다.

생물학적 공정을 이용한 폐수처리장의 최적 운전 조건을 제시하기 위해 활성 슬러지 공정에 대해 알아볼 필요가 있다. 지금까지 많은 활성 슬러지 모델식이 개발되었으며, IWA에서는 1982년 이후 현재까지 Task group을 만들고 활성슬러지 공정에 대한 수학적 모델식을 정리하여 활성슬러지 모델 No. 1, 2, 2d, 3를 개발하였다[18]. 활성슬러지 모델은 유기물, 질소, 인 제거의 모델링에 효과적이고 모델 기반 최적화는 폐수 처리 공정에서 질소와 인 제거에 대해 최적 운전 조건(optimal batch trajectory)을 찾는 데 사용되어 왔다.

본 연구는 ASM1을 바탕으로 한 모델기반 최적화 기법을 이용한 폐수처리장의 운전 최적화에 관한 내용이다. SBR에 대한 수학적 해석을 하기 위해 중요한 운전 변수와 시스템 성능을 평가하는데 초점을 두고 연구를 진행하였다. 일반적인 회분식 반응기의 수학적 모델에 따라 “축적량 = 유입량 - 유출량 + 생성량 - 소모량”의 기본식에 의해 다음과 같은 비선형 미분 방정식으로 다음과 같이 나타낼 수 있다[18].

$$\frac{dS_i}{dt} = \frac{q_{in}}{V}(S_{i,in} - S_i) + r_i S \quad (1)$$

여기서 V는 부피, q_{in} 는 폐수 유입 속도, S_i 는 탄소와 질소의 기질 농도, $S_{i,in}$ 는 유입수 농도, r은 반응 속도이다.

질소 제거에 초점을 두고 ASM1의 13개 성분중 Table 1과 같이 탄소와 질소 제거를 위해 6개 성분과 5개 반응을 선택하여 연구를

진행하였다. 기초적인 동역학과 양론 상수는 ASM1에서 정해진 값을 사용하였고 일정한 부피 상태에서 완전 혼합이 되며 미분방정식은 다음과 같이 간단하게 나타낼 수 있다[18, 22].

$$\frac{dS_i}{dt} = r_i \quad (2)$$

본 연구에서는 SBR의 질소와 탄소 제거에 관련된 성분에 대해 6개의 비선형 상미분방정식으로 나타내었다. 여기서 성분은 유기물, 암모니아, 질산염, 용존 산소, 자가영양생물, 종속영양생물이고 관련 반응은 탄소 산화, 질산화, 탈질화 반응이다. 반응 속도 상수는 Table 1의 양론과 반응동역학으로 구할 수 있다.

3. 반복 동적 프로그래밍 (Iterative Dynamic Programming)

3-1. 반복 동적 프로그래밍

반복 동적 프로그래밍(IDP)은 SBR 공정을 나타내는 식 (2)와 같이 상미분방정식으로 표현되는 시스템을 최적화하는 하나의 도구이다[19]. IDP는 기존 동적 프로그래밍의 문제점인 격자점 불일치 (mismatching grid point problem), 많은 격자점으로 인한 변수차원 문제(high dimensionality), 시뮬레이션 시간이 많이 드는 문제를 해결한 방법으로 회분식 공정에 대해 최적 제어 전략을 찾는 유용한 도구이다. 반복 동적 프로그램은 비선형 모델에서 전역 최적해를 잘 찾을 수 있다는 장점이 있다[20-22].

일반적인 배치 공정의 경우 다음과 같은 비선형 동적 시스템으로 표현할 수 있다.

$$\frac{dx}{dt} = f(x, u, t) \quad (3)$$

초기 $x(0)$ 는 주어졌고 x 는 상태 벡터, u 는 $\alpha_i \leq u_i \leq \beta_i$ ($i = 1, 2, \dots, m$)로 제어 벡터를 나타낸다. 이 시스템에 대해 performance index(PI)는 최종 시간에 대한 스칼라함수로 주어진다.

$$PI[x(0), t_f] = \Psi(x(t_f)) + \int_0^{t_f} \phi(x, u, t) dt \quad (4)$$

여기서 Ψ 는 최종 상태변수의 함수이고, $\phi(\cdot)$ 의 함수로 제어 입력과 상태변수의 함수로 나타내어 진다[23].

Table 1. Kinetics for carbon and nitrogen removal[18]

Process	Components				Heterotroph biomass	Autotroph biomass	Kinetics
	COD	Dissolved oxygen	Ammonium	Nitrate			
Aerobic heterotrophic growth	$-\frac{1}{Y_H}$	$\frac{Y_H-1}{Y_H}$	$-i_{XB}$		1		$\hat{\mu}_H \left(\frac{S_S}{K_S + S_S} \right) \left(\frac{S_O}{K_{OH} + S_O} \right) X_H$
Anoxic heterotrophic growth	$-\frac{1}{Y_H}$		$-i_{XB}$	$\frac{Y_H-1}{2.86Y_H}$	1		$\hat{\mu}_H \left(\frac{S_S}{K_S + S_S} \right) \left(\frac{S_O}{K_{OH} + S_O} \right) X + \left(\frac{S_{NO}}{K_{NO} + S_{NO}} \right) \eta_g X_H$
Aerobic autotrophic growth		$\frac{Y_A-4.57}{Y_A}$	$-i_{XB} - \frac{1}{Y_H}$	$\frac{1}{Y_H}$		1	$\hat{\mu}_H \left(\frac{S_{NH}}{K_{NH} + S_{NH}} \right) \left(\frac{S_O}{K_{OA} + S_O} \right) X_H$
Decay of heterotrophs	$1-f_p$		$-i_{XB} - f_p i_{XB}$		-1		$b_H X_H$
Decay of heterotrophs	$1-f_p$		$-i_{XB} - f_p i_{XB}$			-1	$b_A X_A$

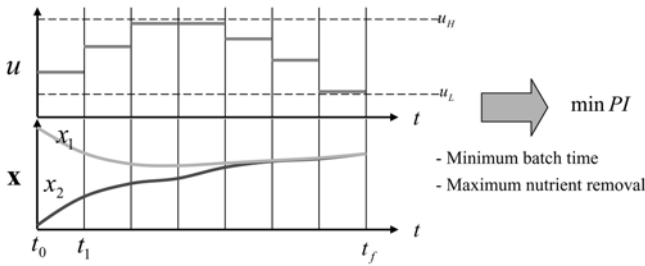


Fig. 2. Basic scheme of iterative dynamic programming (IDP).

3-2. 반복 동적 프로그래밍의 알고리즘

반복 동적 프로그램을 이용한 최적 제어 문제는 $0 \leq t \leq t_f$ 의 간격 내에서 performance index를 최소화(또는 최대화)시키는 제어 전략 $u(t)$ 를 찾는 것이다[22]. Fig. 2에서 반복 동적 프로그래밍에 대한 간략적인 설명을 나타내었다.

Fig. 2의 순서를 구현하기 위해 반복 동적 프로그래밍의 알고리즘은 다음과 같은 단계를 거쳐서 수행된다.

- 1) $[0, t_f]$ 를 P 단계로 나누어 시간 간격 L을 계산한다. $L = t_f/P$.
- 2) 허용 제어의 수(M)와 격자점 수(N)를 정한다. 또한 초기 제어값 $u(0)$, 초기 간격 크기 r, 축소 인자 γ 등을 정한다.
- 3) 초기 제어 전략 값을 설정하고 미분방정식을 $t = 0$ 에서 t_f 까지 풀어 x의 격자점을 생성시킨다.
- 4) 마지막 단계 P에서 시작하여 $t_f - L$ 에서 t_f 까지 각각의 격자점에서 여러가지의 허용 제어값들에 대해 미분방정식을 풀고 performance index를 최소화시키는 제어값을 저장한다.
- 5) 이전 단계인 P-1에서 마찬가지로 $t_f - 2L$ 에서 $t_f - L$ 까지 각각의 격자점에 대해 여러가지 허용 제어값을 이용해 미분방정식을 푼다. 그리고 마지막의 최적과 가장 가까운 격자점을 찾고 다시 $t_f - L$ 에서 t_f 까지 이전 단계, 즉 P 단계에서 각 격자점에 저장된 제어값들을 이용해 performance index를 최소화시키는 제어값을 찾고 저장시킨다.
- 6) 똑같은 과정을 P-2, P-3, ..., 1 단계까지 실행한다. 그리고 1단계까지 왔을 때 performance index를 최소화시키는 제어값을 저장시킨다.
- 7) 각각의 간격 크기를 다음과 같이 줄여서 해의 정확도를 증가시킨다.

$$r^{(j+1)} = \gamma r^{(j)} \tag{5}$$

여기서 j는 반복 횟수이다.

- 8) 6단계로 부터 가장 좋은 제어 전략을 초기 제어 전략값으로 사용하고 다시 3단계로 돌아가서 3-7단계를 반복한다[19, 22].

4. 질소 제거를 위한 SBR의 최적 제어 수식화

SBR의 질소 제거에 중점을 둔 변형된 활성오니 모델을 이용해 질소 제거와 최소 에너지를 동시에 고려한 다음 전체 회분 시간의 줄이기 위한 최적 운전 방안을 도출하였다. 폐수처리 공정의 실제 현장 적용에 용이하도록 최적화를 위해서 주요 변수는 호기상에서는 용존산소 농도 설정치로 두었고, 목적 함수는 최대 질소처리, 최소 에너지를 고려하여 운전 시간을 줄이기위해 반복 동적 프로그래밍을 이용하여 SBR의 최적 운전 조건을 찾아보았다.

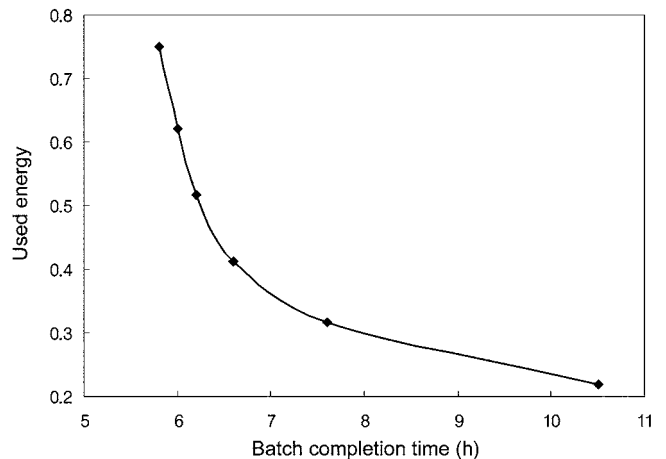


Fig. 3. Relationships between used energy and batch completion time [23].

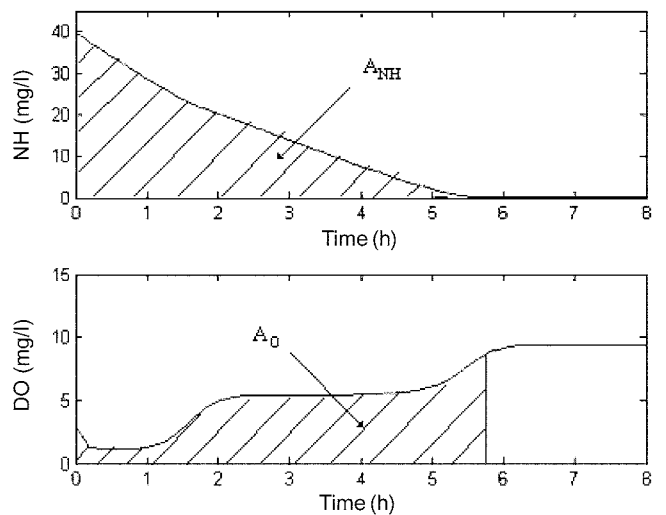


Fig. 4. Area of the ammonium and the oxygen concentration under constant aeration rate [23].

4-1. SBR의 동역학과 면적에 대한 이해

최적 제어 이론에서 잘 알려진 것과 같이 일반적으로 최소 회분 시간 문제는 bang-bang 제어 규칙을 따른다[21]. 실제로 폐수처리 공정에서 용존산소 농도의 설정치를 최대값으로 설정하여 운전하면 최소 회분 시간이 가능하므로 운전 시간을 줄일 수 있을 것이다. 이것은 에너지를 무한정 쓸 수 있다는 가정하에서만 가능한 것이다. 그러나 최소 회분 시간의 경우 운전 비용 중 에너지를 최대로 사용할 경우에 해당되는 내용이고, 에너지에 의한 비용이 증가하므로 에너지 비용이 실제 공정에 얼마나 많은 영향을 줄 것인가에 대해 먼저 살펴봐야 한다.

SBR의 동역학을 이해하기 위해 폭기에 사용된 에너지와 회분 완료 시간과의 관계는 Fig. 3에 나타내었다. 호기상에서는 용존산소의 최적 제적과 최소 회분 시간은 둘 다 중요한 변수이므로 최소 회분 시간, 최대 질소 처리의 관계를 나타내었다. 그림에서 보듯이 사용된 에너지와 회분 완료 시간은 반비례의 관계를 가짐을 알 수 있었다. 따라서 경과 시간과 소모된 에너지 양이 모두 performance index에

포함되어야 함을 알 수 있다[23].

Fig. 4는 일정한 양의 폭기를 하였을 경우 ASM 모델에서 미생물의 동특성에 기반을 두고 배치 시간에 따른 용존산소 농도와 암모니아 농도의 관계를 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이 일정하게 폭기시킬 때 암모니아의 농도에 대한 그래프에서 빗줄친 면적(A_{NH})은 유출수의 질과 운전 시간 문제와 관련이 있음을 알 수 있다. 반대로 용존산소 농도에 대한 그래프에서 빗줄친 면적(A_O)은 사용된 산소의 농도에 비례한다. 따라서 이 값은 직접적으로 사용된 에너지 양에 비례한다고 말할 수 있다. 따라서 이 두 면적의 값을 performance index로 두어 최적 운전 조건을 찾을 수 있다. 호기상에서는 최적 용존산소 농도를 찾는 것이 목적이므로 최적 용존산소 농도를 찾기 위해서는 A_O 를 최소화시키면 해답을 얻을 수 있다. 만약 A_O 가 커진다면 산소를 많이 주입시켜야 되고 따라서 폭기에 사용되는 에너지 양은 증가하게 된다. 반대로 A_O 가 작아지면 용존산소 필요량이 줄어들고 결국 폭기에 이용되는 에너지 양은 감소하게 된다[23].

4-2. 새로운 Performance Index 제안

SBR에서 질소 제거에 사용되는 에너지 비용을 줄이고 운전 시간을 최소화하는 Performance index를 제안하였다. 이를 위해 앞에서 질소 제거의 활성슬러지 모델 분석으로부터 호기상에서 시간에 따른 암모니아(S_{NH})의 궤적에 의해 생성된 면적(A_{NH})은 운전 시간과 유출수의 질에 비례함을 알 수가 있다. 그리고 우리가 제어하고자 하는 최적 용존산소에 대해서 마찬가지로 면적 최소화시키는 방법을 사용하였다[23]. 시간에 따른 최적 용존산소 그래프에서 면적(A_O)은 산소의 주입량과 비례한다. 즉, 면적이 크면 산소를 많이 주입시켜야 하고 그만큼 에너지도 많이 필요하게 된다. 이러한 관계는 다음과 같은 선형 비례식으로 표시될 수 있다.

$$Q = aT + bE_Q, R = cE_C + dC_O \tag{6}$$

여기서 Q, R은 PI의 최종 계산을 위한 선형 weight 계산식이고, T는 time cost, E_Q 는 effluent quality, E_C 는 에너지 소비량, C_O 는 산소의 가격, a, b, c, d는 Q, R 계산 시 각 항목에 대한 weight이다.

위의 결과로부터 산소 소비 면적(A_O)은 에너지 소비량에 직접적으로 비례하고 암모니아 축적 면적(A_{NH})은 운전 시간, 유출수의 질에 비례한다는 것을 착안하여 경과 시간과 면적 최소화를 조합시키고 각각의 항목에 대해 비중을 두어 새로운 performance index를 제안하였다[23].

$$J = \sum_{k=0}^N (Q \cdot S_{NH}(k)L + R \cdot U_{D_o}(k)L) \tag{7}$$

여기서 Q는 최소 회분 시간, 유출수의 질에 대한 비중이고 R은 에너지 최소화를 위한 비중이고 L은 시간 간격이다. 운전 시간을 줄이기 위해 Q를 R보다 크게 함으로써 최적화를 수행하여 문제를 해결하고, 반대로 최소 에너지 문제는 Q보다 R을 크게 함으로써 최적 운전 전략을 설정 할 수 있다.

5. 결과 및 분석

5-1. 연속 회분식 반응기의 운전 조건

연구 대상인 연속 회분식 반응기는 fill-and-draw 방식으로 12.5 L

Table 2. Initial conditions and systems of SBR optimization

Operational conditions	Values
Reactor volume	12.5 l
Total batch reaction time	12 h
Aerobic reaction time	8 h
Anoxic reaction time	4 h
Initial conditions	
COD concentration	150 mg/l
Ammonium concentration	40 mg N/l
Nitrate concentration	0
Dissolved oxygen concentration	3 mg/l
Heterotrophic microorganism concentration	400 mg/l
Autotrophic microorganism concentration	40 mg/l

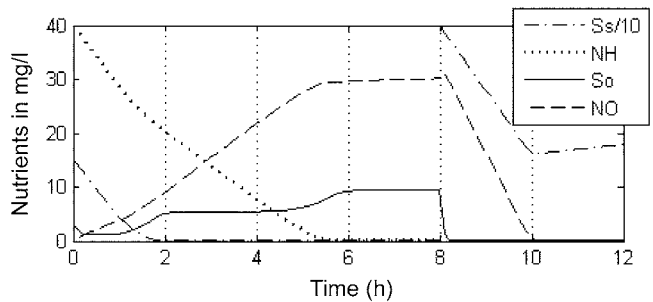


Fig. 5. Typical concentration profiles associated with the cyclic operation of the SBR at steady state.

의 부피를 가지며 호기상(8시간)과 혐기상(4시간)으로 주기적으로 운전 된다. 유입폐수는 도시의 하수와 같이 150 mg/l의 화학적 산소 요구량(COD)을 가지고 40 mg/l의 ammonium($NH_4^+ - N$)을 함유하고 있다[20]. Fixed time control(FTC)로 운전되는 기존 운전 전략은 총 12시간의 회분 시간을 가지게 되며 SBR의 운전 상태와 초기 상태가 Table 2에 나타내었다. 사용된 모델의 동역학, 양론 변수는 ASM 1의 규칙에 따라 사용하였다. Fig. 5는 정상 상태로 운전하였을 경우 미생물의 동특성에 따른 SBR의 배치내에서 시간에 따른 유기물, 암모니아, 용존산소, 질산이온의 전형적인 농도 변화를 보여준다.

5-2. Performance index에 에너지 관련 항이 없을 경우

반복 동적 프로그래밍을 이용해 SBR의 최소 회분 시간, 호기상에서 용존산소의 최적 궤적 등의 최적 운전 조건을 찾아보았다. 최적 운전 조건을 탐색하기 전에 먼저 performance index에 에너지 항이 없을 때를 고려하여 에너지에 무관한 경우 IDP를 수행하였다. 이 경우 SBR의 최적 제어 문제는 최소 회분 시간 문제에 해당한다. 즉, $R=0$ 인 경우에 해당되고 간단한 최적화를 수행하였다. 시뮬레이션 조건에서 $P = 16, u^{(0)} = 1.5, r^{(0)} = 2$ 격자점 수는 3으로 설정하였고 제약 조건은 $0.5 \leq u_{D_o} \leq 3$ (mg/l)로 설정하였다. 초기 궤적 전략(initial control policy)은 $u^{(0)} = 1.5, r^{(0)} = 2$ 로 설정하였고 반복 횟수는 20회로 일정하게 하였다. Q는 0.5, R은 0.2로 설정하였다. Fig. 6를 보듯이 최적 용존산소 농도가 한계치인 3 mg/l로 일정하게 유지되는 것을 알 수 있다.

5-3. SBR에서 최적 회분 궤적 찾기

앞의 연구 결과를 바탕으로 SBR 공정 호기상에서 용존산소 농도

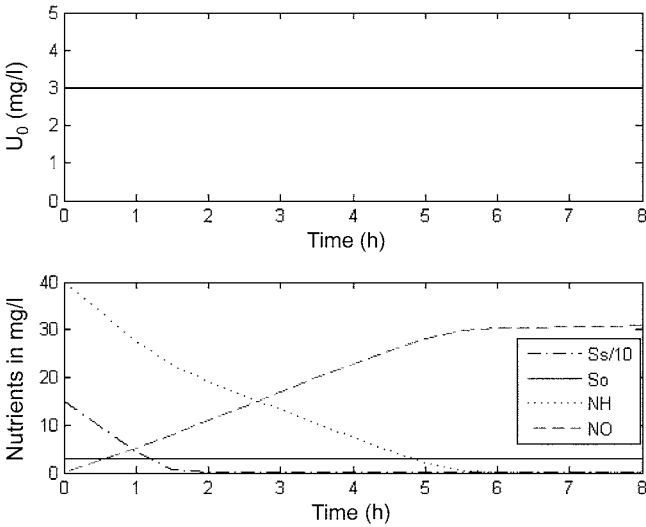


Fig. 6. When the performance index doesn't include the energy term.

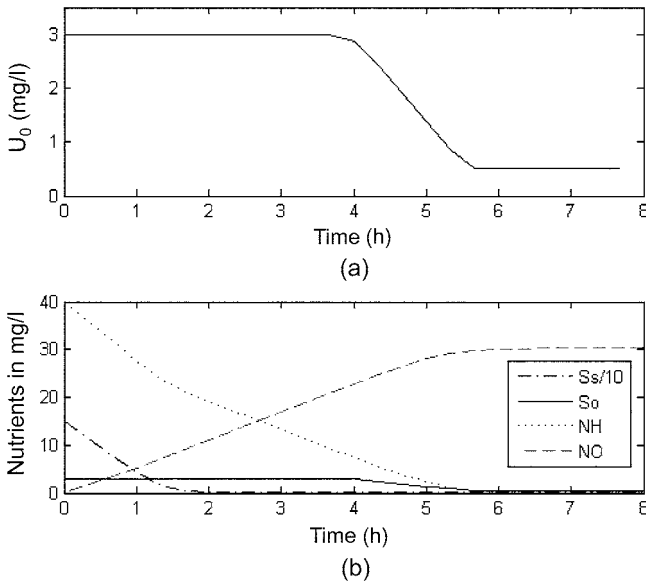


Fig. 7. Optimal control result of SBR using IDP (scenario 1: Q:R = 0.5:0.2); (a) optimal trajectory of DO at aerobic phase, (b) nutrient concentration profiles [23].

의 설정치는 기존의 질소 제거와 에너지 최소화에 큰 영향을 미침을 알 수 있었다. 이에 착안하여 혐기상에서 A_{NO} 의 최소화인 최적 용존산소를 제어 변수로 설정하여 IDP를 실행하였다. 최소 시간 문제와 용존산소 농도에 대한 비중(R)을 Q 보다 크게 하였을 때 2가지 시나리오를 분석해보았다. 에너지 비용과 질소 제거 비용을 고려하여 (1) Q:R = 0.5:0.2 (2) Q:R = 0.2:0.5로 2가지 경우의 시나리오 분석을 통해 각각에 대해 최적화를 수행하였다. 그리고 제약 조건은 앞에서와 마찬가지로 $0.5 \leq u_{Do} \leq 3$ (mg/l)로 설정하였다[23]. 앞에서 언급했듯이 Q를 크게하면 운전 비용과 유출 수질을 더 고려하는 경우이고 반대로 R을 크게하면 산소 주입량, 에너지 비용에 더 고려하는 경우이다. Initial control policy는 $u^{(0)} = 1.5$, $r^{(0)} = 2$ 으로 선

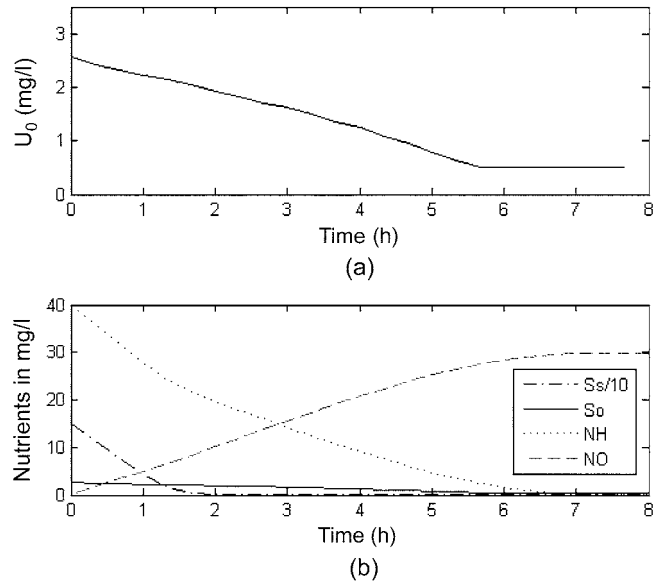


Fig. 8. Optimal control result of SBR using IDP (scenario 2: Q:R = 0.2:0.5); (a) optimal trajectory of DO at aerobic phase, (b) nutrient concentration profiles [23].

택하였고 반복 횟수는 20회로 일정하게 하였다. P를 24단계로 설정하여 시뮬레이션을 하였으며 전체적으로 대략 5분 정도의 시뮬레이션 시간이 걸렸다.

Fig. 7은 시나리오 1에서 반복 동적 프로그램을 이용한 SBR의 용존산소 농도의 최적 궤적과 유기물, 질소의 최적 농도 궤적을 나타낸다. 반응 완료 시간(t_1)은 5.6(hr)이고 $A_o = 0.6728$, $J = 2.4446$ 의 결과가 나왔다. 정상 상태 일때 $A_o = 0.725$, $J = 2.7692$, 반응 완료 시간은 5.6(hr)이다. 즉 최적 운전 조건의 경우 기존의 운전 조건에 비해 에너지 비용을 7.2% 정도 줄일 수 있었다. 전체 비용을 기존에 비교하여 11.7% 만큼 감소하였다. 시나리오 2는 에너지 측면을 더욱 강조한 경우로 $J = 1.0717$, $A_o = 0.4258$ 로 나타났다. 전체 비용은 61.3% 감소하였으나 대신 반응 완료 시간(t_1)은 7.2(h)로 기존에 비해 약 1시간 20분 가량 증가하였음을 알 수 있다[23]. Fig. 8은 시나리오 2에서 반복 동적 프로그램을 이용한 SBR의 용존산소 농도의 최적 설정치 궤적과 유기물, 질소의 최적 농도 궤적을 나타낸다.

5-4. 공정 이상으로 모델변수가 실제값과 다른 경우 회분내 재 최적화(re-optimization)

대규모 폐수처리장의 많이 발생하는 유입 성분 변동이나 미생물 종의 변동 및 공정 이상으로 모델링이 실제 미생물 반응 모델과 다른 경우가 자주 발생한다. 실제 폐수처리장에서는 SBR 공정의 공정 이상으로 인해 실제 공정 상태가 다르게 모델링 되었을 때 최적화 결과는 모델상의 에러로 인해 예측 성능의 저하와 예측 불일치 문제를 야기시킨다. 이러한 모델링 에러는 공정 최적화에도 영향을 미치게 되어서 실제 운전자가 원하는 최적 운전과는 차이가 발생하게 된다. 현장 생물학적 폐수 처리 공정에서 자주 일어날 수 있는 이러한 문제를 대처하기 위해 SBR의 회분 중간에 공정 이상이 있었을 경우 반복 동적 프로그래밍을 이용하여 회분 운전 도중 어떻게 다시 최적 운전 조건인 회분 기준 궤적을 찾을 것인지에 대한 SBR 회분내 재최적화(re-optimization)에 대한 연구를 수행하였다.

본 연구가 질소 제거의 최적 처리에 맞추어져 있으므로 활성슬러지 모델중 질소 제거와 관련된 동특성 변수인 질소의 비성장 속도 (μ_H)가 공정 이상이나 운전 조건 변화로 인해 최적화 모델과 실제 변수가 다른 경우 SBR 회분내 재최적화에 관하여 연구를 수행하였다. 즉, 모델링 이상이나 유입 농도가 변화로 인해 모델의 속도와 실제 성장 속도가 차이가 있는 경우 배치가 진행되는 동안 재최적화를 수행하였다.

2개의 사례 연구를 수행하였는데 시나리오 3은 모델에서 μ_H 값은 1이나 공정 변화에 기인한 실제 값은 0.75인 경우이고, 시나리오 4는 μ_H 의 실제 값은 0.5인 경우이다. 두 가지 경우 다 반응 진행 1시간째 호흡률 측정기(in-situ respirometry)를 통해 측정된 μ_H 값이 모델 값과 다르다는 것을 인지하였다고 가정하였다. 여기서 제약 조건은 $0.5 \leq u_{Do} \leq 3(\text{mg/l})$ 로 설정하였다. 나머지 조건도 앞절과 마찬

가지로 Initial control policy $u^{(0)} = 1.5, r^{(0)} = 2$ 으로 선택하였고 반복 횟수는 20회로 일정하게 하였다. Q는 0.5, R은 0.2로 설정하였다. P를 16단계로 설정하여 시뮬레이션을 하였으며 전체 최적화 시간은 2분 정도가 소요되었다. 시나리오 3에서 배치내 재최적화 결과 Fig. 9와 같이 반응 시간은 8시간이고 Cost 값은 1.5192가 나왔다. Fig. 9와 10에서 큰 점 표시된 것이 배치 내에서 재최적화를 수행한 결과 최적 운전 조건과 최적 호기 시간이고 그에 따른 배치 내 처리되는 유기물과 질소의 농도이다. Fig. 9와 10의 배치내 재최적화 결과 질소의 비성장 속도인 μ_H 가 감소되었기 때문에 기존의 최적 운전 조건으로는 완전한 질소 제거가 불가능하고 완전한 질소 제거를 위해서는 호기 기간내에서 최적 용존산소 농도가 3 mg/l까지 증가되어야 하고 반응 시간 또한 증가되어야 함을 알 수 있었다.

시나리오 4는 P=28, 초기 설정치 값들은 시나리오 3과 동일하게 수행하였다. Fig. 10는 시나리오 4에 대한 결과를 보여주고 있고 총 배치 시간은 12시간이고 Cost 값은 2.7791이다. 시나리오 3보다 더 급격한 μ_H 감소로 인해 호기 기간에서는 상당기간 최적 용존산소가 높게 유지되어야 함을 알 수 있었다. 또한 최적의 호기 시간 및 최적의 배치 시간도 재 최적화를 통해 다시 설정해야 함을 알 수 있었다.

6. 결 론

현재까지 SBR 제어에 관한 논문들은 주로 운전 시간을 줄이기 위한 연구만을 다루어왔다. 이에 본 연구는 IDP를 이용하여 SBR에 대해 최적 회분 궤적을 찾는 것과 공정 이상으로 잘못된 모델링으로 인해 실제 변수가 다르게 예측되었을 때 어떻게 재-최적화 할 것인가에 대해 연구하였다. 또한 에너지 비용에 관심을 두고 에너지 비용이 공정에 어떻게 영향을 미치는가 살펴보았다. 호기 단계에서는 용존산소 농도를 제어 변수로 사용하였으며 목적함수는 최대 질소 처리와 최소 에너지를 고려한 최소 회분 시간으로 하였다. 산소 소비 면적(A_{O_2})은 에너지 소비량, 최적 용존산소에 직접적으로 비례하고 암모니아 축적 면적(A_{NH})은 최소 회분 시간, effluent quality에 비례한다는 것을 착안하여 면적기반 performance index를 사용하였다. 두 가지 시나리오에 대해 최적 운전 조건을 찾은 결과 SBR의 용존산소 농도의 설정치는 질소 제거 뿐만 아니라 에너지 최소화에 큰 영향을 미침을 알 수 있었고 모델 최적화 결과 유입수 중 질소를 최적으로 제거할 수 있는 운전 조건과 호기 기간을 제시할 수 있음을 보였다. 더 나아가 공정 이상으로 실제 공정이 모델과 다른 모델링 에러에 의해 잘못된 모사의 경우에도 IDP를 이용하여 다시 재최적화할 수 있음을 보였다. 연구 결과로부터 제시된 방법이 생물학적 하수 처리 공정의 모델 기반 최적화를 위한 유용한 도구로 사용될 수 있음을 알 수 있었다. 이러한 ASM 모델은 결정해야 할 모델 변수가 많고 이를 실험적으로 구하기가 쉽지 않고 많은 시간이 모델 변수를 구하는데 필요한 단점이 있다. 최근에 주요한 모델 변수를 고려한 실험 및 모델을 통한 최적 보정 기법이 많이 연구되고 있다. 현재 환경관리시스템공학 연구실에서 모델 기반 최적화와 최적 보정 기법을 동시에 고려하는 방법에 대하여 연구를 하고 있다.

감 사

본 연구는 BK21 2단계 사업에 의해 지원받아 수행되었습니다.

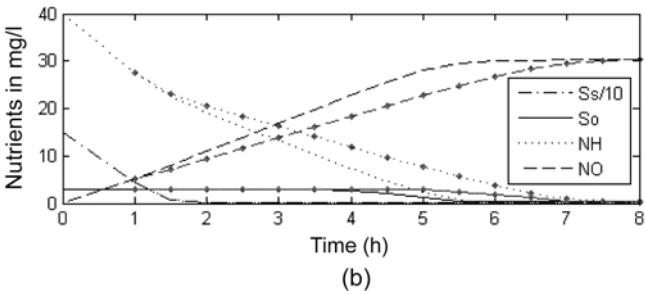
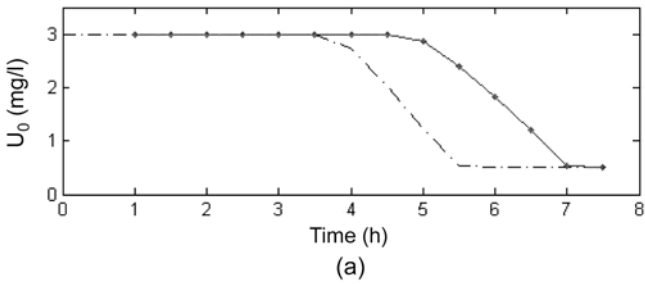


Fig. 9. The optimal dissolved oxygen and trajectories of scenario 3.

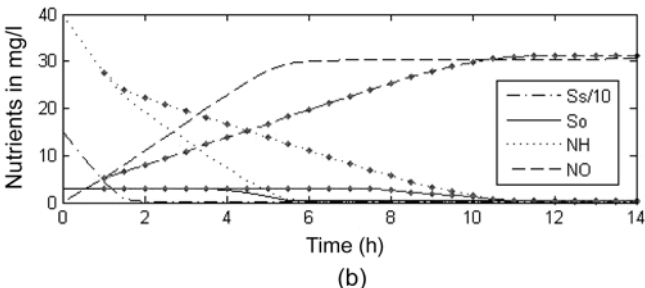
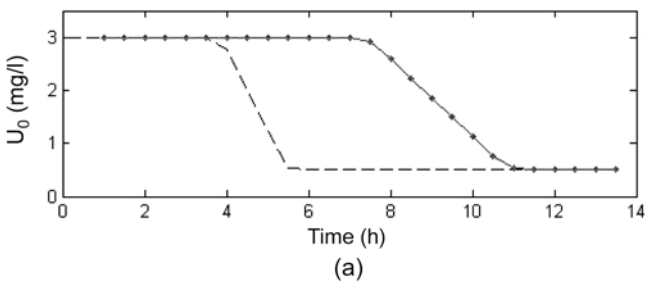


Fig. 10. The optimal dissolved oxygen and trajectories of scenario 4.

참고문헌

1. Wilderer, P. A., Irvine, R. L. and Goronszy, M. C., "Sequencing Batch Reactor Technology," IWA publishing(2001).
2. Mace and Mata-Alvarez, "Utilization of SBR Technology for Wastewater Treatment: An Overview," *I&EC*, **41**, 5539-5553(2002).
3. Yoo, C. K., Lee, D. S. and Vanrolleghem, P. A., "Application of Multiway ICA for on-line Monitoring of a Sequencing Batch Reactor," *Water Res.* **38**(7), 1715-1732(2004).
4. Chang, C. H. and Hao, O. J., "Sequencing Batch Reactor Systems for Nutrient Removal: ORP and pH Profiles," *J. Chem. Tech. Biotechnol.*, **67**(1), 27-38(1996).
5. Cohen, A., Hegg, D., Michele, M. D., Song, Q. and Kasabov, N., "An Intelligent Controller for Automated Operation of Sequencing Batch Reactors," *Wat. Sci. Tech.* **47**(12), 57-63(2003).
6. Azwar, M. A., Hussain and Ramachandran, K. B., "The Study of Neural Network-based Controller for Controlling Dissolved Oxygen Concentration in a Sequencing Batch Reactor," *Bioprocess Biosyst Eng.*, **28**(4), 251-265(2006).
7. Artan, N., Wilderer, P., Orhon, D., Tasli, R. and Morgenroth, E., "Model Evaluation and Optimisation of Nutrient Removal Potential for Sequencing Batch Reactors," *Water SA.*, **28**(4), 423-432(2002).
8. Demuynck, C., Vanrolleghem, P., Mingneau, C., Liessens, J. and Verstraete, W., "NDBEPR Process Optimisation in SBRs: Reduction of External Carbon Source and Oxygen Supply," *Wat. Sci. Tech.*, **30**(4), 169-179(1994).
9. Mikosz, J., Plaza, E. and Kurbiel, J., "Use of Computer Simulation for Cycle Length Adjustment in Sequencing Batch Reactor," *Wat. Sci. Tech.*, **43**(3), 61-66(2001).
10. Anderson, J. S., Kim, H. N., McAvoy, T. J. and Hao, O. J., "Control of an Alternating Aerobic-anoxic Activated Sludge System – Part 1: Development of a Linearization-based Modeling Approach," *Cont. Eng. Prac.*, **8**(3), 217-278(2000).
11. Kim, H. N., McAvoy, T. J., Anderson, J. S. and Hao, O. J., "Control of an Alternating Aerobic-anoxic Activated Sludge System – Part 2: Optimization Using a Linearized Model," *Cont. Eng. Prac.*, **8**(3), 279-289(2000).
12. Sin, G., Insel, G., Lee, D. S. and Vanrolleghem, P. A., "Optimal But Robust N and P Removal in SBRs: A Model-based Systematic Study of Operation Scenarios," *Water Sci. Technol.*, **50**(10), 97-105(2004).
13. Buitron, G., Schoeb, M. E., Moreno-Andrade, I. and Moreno, J. A., "Evaluation of two Control Strategies for a Sequencing Batch Reactor Degrading High Concentration Peaks of 4-chlorophenol," *Water Res.*, **39**(6), 1015-1024(2005).
14. Moreno, J. A., Betancur, M. J. and Moreno-Andrade, I., "Event-driven Time-optimal Control for a Class of Discontinuous Bioreactors," *Biotech. Bioeng.*, **94**(4), 803-814(2006).
15. Olsson, G., Andrews, J. F., "The Dissolved Oxygen Profile—a Valuable Tool for Control of the Activated Sludge Process," *Water Res.*, **12**(11), 986-1004(1987).
16. Corominas, L., Sin, G., Puig, S., Traore, A., Balaguer, M., Colprim, J. and Vanrolleghem, P. A., "Model-based Evaluation of an on-line Control Strategy for SBRs Based on OUR and ORP Measurements," *Water Sci. Technol.*, **53**(4-5), 161-169(2006).
17. Coelho, M. A. Z., Russo, C. and Araujo, O. Q. F., "Optimization of a Sequencing Batch Reactor for Biological Nitrogen Removal," *Water Res.*, **34**(10), 2809-2817(2000).
18. Olsson, G. and Newell, B., "Wastewater Treatment Systems: Modeling, Diagnosis and Control," IWA publishing, UK(1999).
19. Luus, R., "Optimal Control of Batch Reactors by Iterative Dynamic Programming," *J. Proc. Cont.*, **4**(4), 218-226(1994).
20. Luus, R. and Okongwu, O. N., "Towards Practical Optimal Control of Batch Reactors," *Chem. Eng. J.*, **8**(1), 1-9(1999).
21. Luus, R., "Iterative Dynamic Programming", Chapman & Hall/CRC, USA(2000).
22. Kirk, D. E., "Optimal Control Theory," Prentice-Hall Inc., New Jersey USA(1970).
23. Kim, Y. H., Yoo, C. K. and Lee, I., "Determining the Optimal Trajectory for Nitrogen Removal in a Sequencing Batch Reactor," Submitted to *Wat. Res.*,(2006).