

연속회분식반응기에서 패턴매칭방법을 이용한 탈질완료 감지 알고리즘 개발

김예진 · 안유가* · 신중필** · 김창원†,*

부산대학교 환경기술산업개발연구소 · *부산대학교 환경공학과 · **일본 아이즈 대학교 컴퓨터소프트웨어공학과

(2007년 6월 29일 접수, 2007년 8월 6일 채택)

Detection of Denitrification Completion Using Pattern Matching Method in Sequencing Batch Reactor(SBR)

Yejin Kim · Yuga Ahn* · Jungphil Shin** · Changwon Kim†,*

Institute for Environmental Technology and Industry, Pusan National University

**Department of Environmental Engineering, Pusan National University*

***Department of Computer Software, The University of Aizu, Japan*

ABSTRACT : The profiles of on-line sensors such as DO, ORP and pH can provide useful information about pollutant removal reaction in sequencing batch reactor. For detection of denitrification completion, the nitrate knee point from ORP profile has been considered as a main indicator of denitrification completion. However, many researchers pointed out that the nitrate knee usually disappeared when the progress of denitrification is so fast and it makes the fault at detection of denitrification completion. In this paper, dynamic time warping(DTW) method and discriminant analysis were used to detect and isolate the profiles of two cases, denitrification completed and uncompleted. As the results, proposed methods can detect state of denitrification successfully.

Key Words : Denitrification, Discriminant Analysis, Dynamic Time Warping, ORP, Sequencing Batch Reactor

요약 : 연속 회분식 반응기에서 측정되는 기초 상용계측기의 프로파일은 공정 내에서 행해지는 제거반응의 진행 정도에 대한 정보를 제공할 수 있다. 특히 ORP(산화환원전위, Oxidation-Reduntion Potential, ORP) 프로파일에서 관찰되는 탈질 완료를 알리는 굴곡점(nitrate knee point, NKP)을 이용한 탈질 반응의 완료 감지는 널리 알려진 응용사례라고 할 수 있다. 그러나 ORP 굴곡점의 재현성이 부족하고, ORP 신호 자체가 가지는 잡음 등의 문제로 탈질 반응의 완료를 감지한 공정 제어의 현장 적용은 미비한 상태이다. 본 논문에서는 이러한 기존의 문제점을 극복할 수 있는 대안으로 ORP 프로파일의 패턴을 인지하여 탈질의 종료 여부를 진단할 수 있는 알고리즘을 제안하였다. 동적 시간 왜핑 방법을 사용하여 패턴인지를 수행한 결과, ORP 굴곡점의 출현 여부와 상관없이 공정의 탈질 완료 여부를 감지할 수 있었다.

주제어 : 연속회분식 반응기, 탈질반응, 동적 시간 왜핑, 판별분석, ORP

1. 서론

연속 회분식 반응기(Sequencing Batch Reactor, SBR)는 공정 운전이 간단하고 부하 변동에도 강하며 소요 설치 부지가 작다는 장점을 가지고 있다는 점에서 일반적으로 축산폐수와 같은 고농도 유기물 및 질소성분 등을 포함하고 있는 폐수 처리와 부하 변동이 심한 중-소규모 마을 하수 처리에 적합한 공정으로 간주되어진다. 더군다나 하나의 반응조에서 탄소산화, 질산화, 탈질 반응 등의 제거기작이 순차적으로 수행될 수 있는 공정 형식에 의해 시간에 따른 반응조 내부의 제거반응이 동적이며 이러한 특성에 의해 반응조에서 측정되는 DO, pH, ORP와 같은 기초 상용 계측기의 프로파일 이 제거반응에 대한 정보를 제공할 수 있다.^{1,2)}

연속 회분식 반응기에서 측정되는 기초 상용계측기의 프로 파일을 사용하여 질산화 반응의 종료와 탈질화 반응의 종료를 감지하는 연구는 많은 연구자들에 의해 수행되어 왔으며,³⁾ ORP 는 질산화 종료점, 탈질 종료점, 인 방출 종료점이 감지될 수 있다는 점에서 우수한 제어 인자라 할 수 있다. 이 중 탈질 종료 감지의 경우에는 다음의 두 가지 방법이 제어 수단으로 사용되고 있다. 첫 번째는 ORP의 굴곡점(nitrate knee point, NKP)이라는 변곡점을 이용한 것이다.⁴⁾ 그러나 이 방법은 시간에 대한 변화량인 Δ 값에 의해 나타나는 지점이 시스템이나 센서 자체의 noise에 따라 지점을 구별되기 매우 어렵다는 단점을 가진다. 두 번째는 ORP의 절대값을 이용한 제어방법이다.⁵⁾ 이는 시스템의 성질이나 활성슬러지의 특성에 따라 값의 변동이 있으며, ORP 신호의 잡음이 존재할 경우 정확한 진단이 힘들다는 단점이 있다.¹⁾ 그러나 운전자가 육안으로 ORP 신호를 관찰하여 탈질 반응의 종료를 감지하고 판단한다는 점을 모방할 수 있다면, 안정적이고 재현성

† Corresponding author

E-mail: cwkim@pusan.ac.kr

Tel: 051-510-2416

Fax: 051-515-5347

있는 진단 결과를 제공해 줄 수 있을 것이다.

인간 운전자의 육안 관찰 및 판단 행위를 모방하기 위해서는, 패턴인식 기법 중 하나인 동적 시간 왜핑(Dynamic Time Warping, DTW) 방법의 응용을 고려할 수 있다. 동적 시간 왜핑이란 두 패턴 요소간의 대응을 수행하여 유사도를 계산하는 방법이다. 이 방법을 사용하여 1차원적인 시계열 정보를 지닌 비선형적인 패턴간의 최적의 정합을 도출하고 동시에 패턴간의 유사도(또는 상이도)를 계산해 낸다. 이러한 기법은 문자인식 및 각종 타 산업 분야에서 많은 응용이 행해져 왔으나, 수처리 공정의 운전 자동화 및 제어에 응용된 바는 전무하다. 본 연구에서 운전한 SBR 공정에서 획득된 ORP 프로파일은 부하나 C/N 비의 운전조건이 변화함에도 불구하고 탈질이 완료되었을 때 일정한 지점에 평형을 이루는 동일한 패턴을 보이고, 탈질이 완료되지 않았을 경우 완료되었을 때보다 일정 정도 높은 지점에 평형을 이루는 특징 패턴을 보였다. 이러한 패턴의 차이점을 이용하여 본 연구에서는 이러한 패턴들에 동적 프로그래밍 방법을 적용하여 탈질 완료 패턴 감지를 수행하고, 판별분석을 통하여 탈질 반응이 완료되었을 경우인지 완료되지 못한 경우인지를 판별 할 수 있는 기준을 마련하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 대상 반응기 및 운전 조건

탈질 반응의 종료 여부에 따른 ORP 프로파일의 모양을 수집하기 위한 SBR의 구조를 Fig. 1에서 나타내었다. 유효 용적은 60 L이고 반응기의 재질은 스테인레스 스틸로 구성되었다. 내부 온도는 30℃로 일정하게 유지되었다. 원수의 유입은 정량펌프에 의해 이루어졌으며, 공기 공급을 위한 산기기가 설치되었다. 원수 및 외부탄소원의 원활한 혼합을 위한 교반기가 설치되었다. 데이터의 수집을 위해 DO, ORP, pH 센서를 설치하였으며 센서로부터 얻어진 측정값은 30초마다 PC에 저장되었다.

다양한 조건에서 연구를 수행하기 위하여 선택된 기질들을 가지고 조제한 합성폐수를 대상원수로 하였다. 대상 SBR의 적용 분야가 축산폐수를 처리하는 소규모 처리시설을 대상으로 하였으므로, 합성폐수는 국내의 소규모 발생원 중 하나

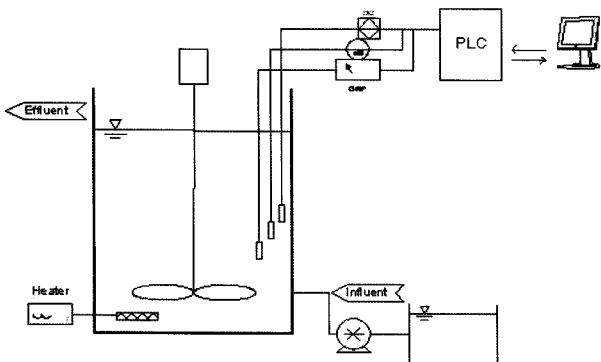


Fig. 1. Schematic of SBR system.

Table 1. Experimental condition for the SBR operation

Contents	Condition		
	N-Load(kg NH ₄ ⁺ -N/m ³ · sub-cycle)	0.02	0.05
C/N ratio	1, 3, 5, 7	1, 3, 5, 7	1, 3, 5, 7
MLVSS(mg/L)	6,000 ~ 7,000		
Temperature(℃)	30		

인 축산폐수를 기준으로 하여 조제하였다. 합성폐수 내 유기물은 비교적 분해가 빠른 3가지 물질을 이용하며, 암모니아 농도는 일정하게 유지한 상태에서 유기물의 glucose : acetate : lactose 비를 2:2:1로 혼합하여 C/NH₄⁺-N 비를 조정하였고, 알칼리도는 질산화에 필요한 충분한 양을 첨가하였다.

운전 방법은 총 cycle을 24시간으로 하여 각 sub-cycle은 무산소 2시간/호기 2시간으로 구성되었으며 원수 유입은 간헐 주입 방법으로 무산소 기간 시작에 주입된다. 4번의 sub-cycle이 반복되고 5번째 sub-cycle은 잔여 질산염의 탈질을 위한 외부탄소원만을 주입한다. 이후 침전 3시간, 슬러지 폐기와 공폭 1시간을 갖도록 운전하였다.

2.2. 조건별 ORP 프로파일의 획득

다양한 ORP 프로파일을 얻기 위하여 여러 조건을 변화시켜 실험을 수행하였다. 암모니아 부하는 sub cycle에 대한 부하로써 저, 중, 고부하로 각각 0.02, 0.035, 0.05, 0.08 kg NH₄⁺-N/m³/sub-cycle로 변화시키고 각 부하에 대하여 C/N 비를 1, 3, 5, 7로 하여 실험을 수행하였다. MLVSS 6,000~7,000 mg/L, 온도는 30℃로 일정하게 유지하였다(Table 1).

2.3. 동적 시간 왜핑(Dynamic Time Warping, DTW)

본 연구의 분석 대상 데이터는 1차원 시계열 데이터로 비선형적인 특성을 지니며 패턴 매칭을 통한 분류가 목적이었으므로, 본 기법을 적용하기에 적합한 데이터라고 할 수 있다. 각 데이터에 포함되어 있는 정보를 효율적으로 추출하기 위해서는 특징적인 정보 추출 방법이 필요하한데, 본 연구에서는 특징 추출을 위하여 동적 시간 왜핑(DTW) 방법을 이용하였다.

DTW 알고리즘은 하나의 패턴이 다른 대상 패턴과 최대한 일치할 때까지 패턴의 시간 축을 늘이거나 줄여 패턴간의 시간 차이를 제거한다(Fig. 2). 인식하고자 하는 패턴의 표준 프로파일이 기준 벡터(reference vector)로써 사전에 선정되고, 매칭하고자 하는 패턴 벡터들은 같은 수의 특징 벡터를 가지는 기준(reference) 패턴 벡터에 대하여 왜핑된다.^{6,7)} A

Table 2. Standard profile conditions

C/N ratio	Denitrification Uncomplete		Denitrification Complete		
	loading	case No.	C/N ratio	loading	case No.
1	0.02, 0.05, 0.035, 0.08	1, 2, 3, 4, 5, 6,	5	0.02, 0.05, 0.035, 0.08	7, 8, 9,
					10, 11, 12, 13, 14
3	0.02, 0.035,		7	0.02, 0.05, 0.035, 0.08	

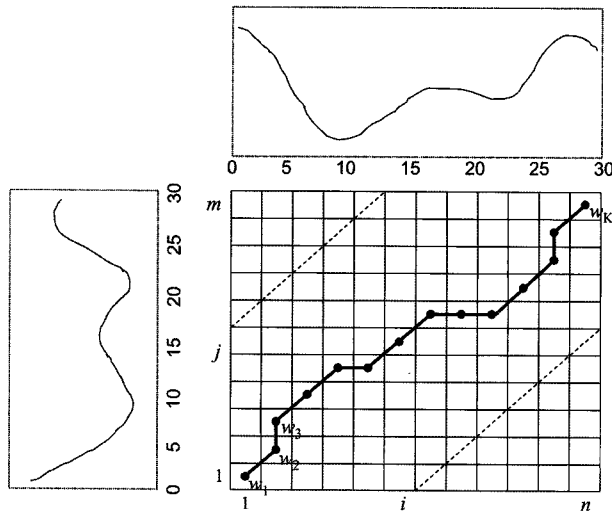


Fig. 2. DP matching path using template pattern and test pattern.

를 기준 패턴, 이고 B를 A에 대하여 와핑될 패턴 벡터라고 할 때, Fig. 2는 i 축과 j 축 각각에 A와 B를 보여주고 있다.

$$A = a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_K$$

$$B = b_1, b_2, \dots, b_j, \dots, b_M \tag{1}$$

입력 패턴 시간 j 와 기준 패턴 시간 i 에서의 와핑을 고려해보면, 여기서 i 는 아래와 같다.

$$i = j(i) \tag{2}$$

두 특징 벡터 a_i 와 $b_{j(i)}$ 간의 차(difference)를 평가하는 거리는 다음을 통해 구해지며, $d(i, j)$ 에 관한 행렬이 생성된다.

$$d(i, j) = \| a_i - b_j \| \tag{3}$$

A와 B, 두 특징 벡터 사이의 차이를 표현하는 거리의 합의 최소가 되는 경로를 선택하고, 거리의 합의 최소값을 계산하기 위하여 다음과 같은 알고리즘을 사용한다. 동적 프로그래밍 식은 다음 식 (4)와 같고, 초기 조건은 식 (5)와 같다.

$$g(i, j(i)) = \min[g_1(i-1, j(i-1)) + d(i, j(i)) \times w(i)] \tag{4}$$

$$g_1(1, 1) = d(1, 1) \times w(1) = d(1, 1) \tag{5}$$

여기서 시간 정규(normalized) 거리는 다음 식을 통해 구한다.

$$D(A, B) = \frac{1}{N} g_K(i(K), j(K)) \tag{6}$$

매칭 경로에 대한 기울기 제한을 어떻게 가하느냐에 따라 동적 프로그래밍 식은 달라진다(Fig. 3). 기울기 제한을 나타

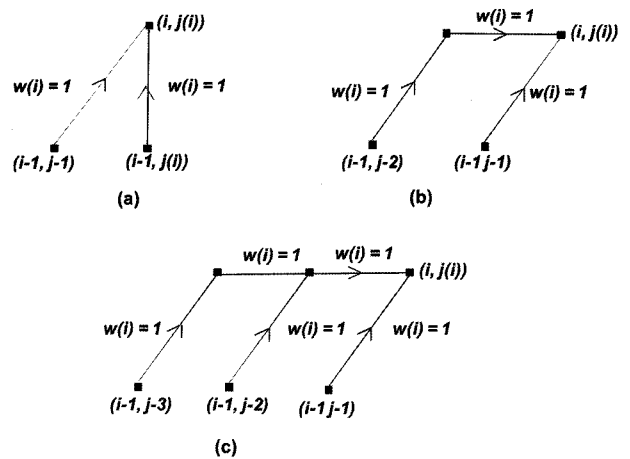


Fig. 3. Possible warping function paths under different slope constraints (a) $P=0$, (b) $P=1$ and (c) $P=2$.

내는 변수 $P=0$ 일 때 동적 프로그래밍 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$g(i, j(i)) = \min \begin{cases} g(i-1, j-1) + d(i, j(i)) \\ g(i-1, j) + d(i, j(i)) \end{cases} \tag{7}$$

$P=1$ 일 때 동적 프로그래밍 식 (8)과 같다.

$$g(i, j(i)) = \min \begin{cases} g(i-1, j-2) + (d(i, j-1) + d(i, j))/2 \\ g(i-1, j-1) + d(i, j) \end{cases} \tag{8}$$

$P=2$ 일 때 동적 프로그래밍 식 (9)와 같다.

$$g(i, j(i)) = \min \begin{cases} g(i-1, j-1) + d(i, j) \\ g(i-1, j-2) + (d(i, j-1) + d(i, j))/2 \\ g(i-1, j-3) + (d(i, j-2) + d(i, j-1) + d(i, j))/3 \end{cases} \tag{9}$$

2.4. 판별분석

판별분석(discriminant analysis)은 2개 이상의 모집단으로부터의 표본이 섞여 있을 때 개개의 경우에 대하여 그것이 어느 모집단에 속해 있는지를 판별하기 위한 함수를 구하는 다변량 통계분석기법이다. 계량적으로 측정된 독립변수들을 이용하여 명목적으로 측정된 종속변수를 분류하는 방법으로서 개별변수만을 이용하여 집단을 분류할 때보다 여러 개의 의미 있는 변수들을 동시에 고려하여 집단간의 차이를 나타내 줄 수 있다. 집단간의 차이를 가장 잘 설명해주는 기준으로 판별분석에서는 집단간 분산의 비율을 사용하며 이를 극대화시키는 독립변수들의 선형결합을 판별식이라 한다. 이를 위한 기본 가정으로는 분석대상인 각 집단이 다변량 정규분포를 이루고, 분포 및 공분산 구조가 같으며, 오분류 비용이 동일하여야 한다. 분류에 사용되는 판별 방정식은 다음과 같다. 아래의 식을 피셔의 선형판별함수라 하고 분류규칙은 변수 X 는 $Y(X)$ 가 최대로 하는 모집단에 분류한다는 것이다.⁸⁾

$$Y(X) = W_1 X_1 + W_2 X_2 + \dots + W_N X_N \tag{10}$$

여기서, Y는 r그룹에 대한 판별점수, X_N는 독립변수, W_N는 독립변수의 가중치이다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 조건별 ORP 프로파일로 표준패턴 생성

C/N 비와 암모니아 부하를 변화시켜 운전하여 얻은 ORP 프로파일과 동 시간대의 질산염 농도 분석을 수행한 결과를 바탕으로 탈질이 완료된 경우의 ORP 프로파일과 불완료된 경우의 ORP 프로파일을 분류하였다. 선택된 패턴은 하루 총 5개 sub-cycle의 2번째 sub-cycle 프로파일을 대상으로 하였다. 무산소 기간 초기에 주입된 원수 내 포함된 탄소원이, 무산소 기간 직전의 호기기간에 암모니아의 질산화로 인해 존재하는 질산염을 탈질시키는데 쓰이므로 원수 내의 C/N 비에 따라 탈질 반응의 완료 여부가 결정되었다. 일반적으로, 매우 낮은 C/N 비로 여겨지는 1의 경우와, 0.35 이하의 암모니아 부하에서의 C/N 비 3의 조건에서는 탄소원이 부족하여 원활한 탈질이 이루어지지 않았다. 0.05, 0.08 kg NH₄⁺/m³/sub cycle 조건 및 C/N 비 3의 조건과, 모든 부하조건에서 C/N 비가 5, 7인 경우엔 주어진 무산소 기간 2시간 내에 탈질이 완료됨을 관찰할 수 있었다. 따라서 주로 C/N 비가 5, 7인 실험에서 얻어진 탈질이 완료된 경우의 ORP 프로파일들의 동시간대 측정값들끼리 평균값을 계산하여 탈질이 완료된 경우의 표준 프로파일로 생성하였고, 주로 C/N 비가 1, 3인 경우에 얻어진 탈질이 불완료된 ORP 프로파일들을 평균 하여 탈질이 불완료된 프로파일로 정했다(Table 2).

Fig. 4는 탈질이 완료된 경우의 ORP 표준 프로파일(Fig. 4(a), standard pattern A)와 탈질이 완료되지 않았을 경우의 ORP 표준 프로파일(Fig. 4(b), standard pattern B)을 보여준다. 무산소 기간이 시작되면서, 호기 단계에서 잔류하게 된 DO의 소모에 뒤이어 탈질 반응이 일어나면서 ORP는 급격하게 하강하게 되는데, 탈질에 필요한 탄소원 충분하지 않아 탈질이 완료되지 못하는 경우에 ORP 프로파일은 충분한 환원반응이 일어나지 못한 반응조 내 상황을 반영하여 충분히 하강하지 못하고 완만한 곡선을 갖는다. 반면에 탈질이 완료된 경우 ORP 프로파일은 혐기성 조건으로 진행되어 탈질이 완료되지 못했을 경우에 비교하여 볼 때 더 큰 폭으로 하강하게 된다. 연속 회분식 반응기를 운전함에 있어, 무산소 기간에 탈질 완료의 여부에 따라 ORP가 하강하는 폭은, MLSS 농도가 큰 변화가 없고 처리원수의 조성이 완전히 달라지지 않는 한 일정하다는 것이 실험적으로 증명되었다.⁵⁾

3.2. 표준패턴에 대한 DTW 수행

각 조건별로 얻어진 ORP 프로파일을 MATLAB 코드로 짜여진 DTW 수행 프로그램을 이용하여 두 개의 표준 패턴과 매칭 시켜 보았다. 이를 통해 완전 탈질 프로파일과 불완전 탈질 프로파일의 유사도를 알 수 있는 상이도 값(D)을 얻

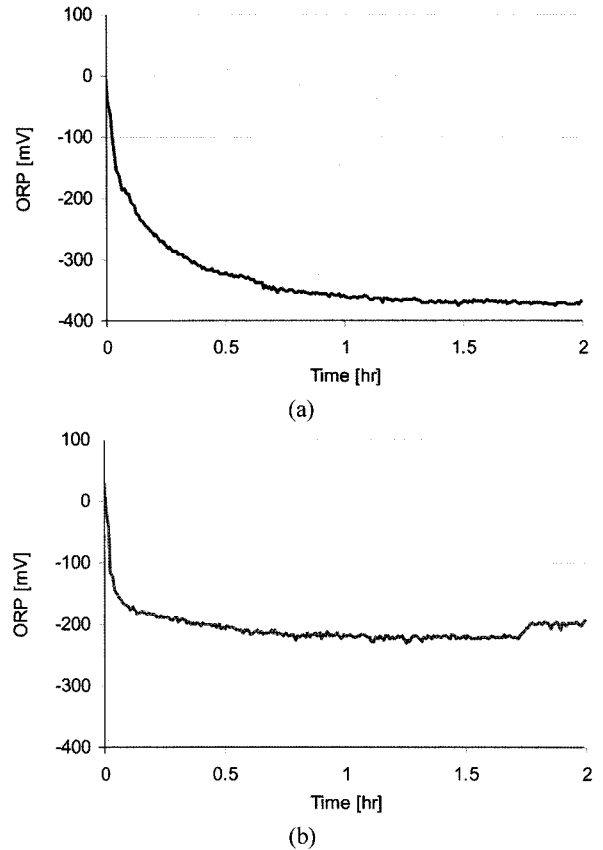


Fig. 4. ORP profile of (a) completed and (b) uncompleted denitrification.

었다(Table 3). 하나의 패턴이 탈질이 완료된 경우의 표준패턴 A(standard pattern A)에 매칭되었을 경우에 계산된 상이도 값을 D_A, 그리고 탈질이 불완료된 경우의 표준패턴 B(standard pattern B)에 매칭되었을 경우의 상이도 값을 D_B라고 명명하였다.

Table 3. Calculated D values from profile matching

Category	case number	Ammonia Loading rate	C/N ratio	D _A	D _B
Denitrification completed	1	0.02	1	467.6	8725.8
	2	0.05	1	2500.0	30410.0
	3	0.035	1	1094.9	27738.0
	4	0.08	1	2606.9	22260.0
	5	0.02	3	3162.1	20707.0
	6	0.035	3	2648.8	24756.0
	7	0.02	5	12349.0	1825.4
Denitrification uncompleted	8	0.05	5	12234.0	1317.0
	9	0.035	5	17293.0	709.94
	10	0.08	5	19661.0	2427.5
	11	0.02	7	14301.0	834.6
	12	0.05	7	15094.0	1928.7
	13	0.035	7	16908.0	474.79
	14	0.08	7	16910.0	657.37

Table 3에 의하면, 완전 탈질이 일어났을 경우의 ORP 패턴들(Case number 1~6)은 완전 탈질 표준 패턴과 유사하기 때문에 D_B 값보다 D_A 값이 낮은 분포를 보이고 불완전 탈질로 가정된 경우(Case number 7~14)들은 불완전 탈질 표준 패턴과 더 유사하여 D_A 값보다 D_B 값이 작게 나타나는 것을 알 수 있다.

3.3. 판별함수 도출

앞서의 연구 결과에서, 동적 프로그래밍을 적용하여 표준 패턴과 대상패턴을 매칭 하여 얻은 D_A 와 D_B 값을 이용하여 소속 그룹을 분별할 수 있는 가능성을 확인하였다. 그러나 D 값의 분포를 상대적으로 비교한 결과로 정성적으로 소속 그룹을 확인 할 수는 있었지만 소속 그룹 판별을 위한 객관적 기준이 부재하였다. 새로운 패턴이 얻어지고 두 표준패턴에 관한 상이도 값을 계산한 후, 계산된 결과를 이용하여 정량적으로 소속 그룹을 판단하기 위한 수단이 요구되었다. 이에 본 연구에서는 다변량 통계분석 방법인 판별분석을 이용하여 두 그룹을 판별하는 함수를 도출하였다. 앞서 언급한 바와 같이 case1~case6을 탈질이 완료된 그룹, case7~case14를 탈질이 완료된 그룹으로 사전 지정하였다. 판별함수를 도출하기 위해 사용된 변수는 D_A , D_B 값과 두 시간 동안 측정된 ORP 프로파일의 한 데이터 셋에서 추출 가능한 ORP_{max} (무산소 단계에서의 ORP최대값), ORP_{min} (무산소 단계에서의 ORP 최소값), ORP_{avg} (무산소 단계에서의 ORP 값의 평균), 그리고 ORP_{std} (무산소 단계에서의 ORP 값의 표준 편차)가 추가로 사용되었다. 그 이유는 탈질의 완료 여부에 따라 패턴의 모양이 달라지는 것을 상이도 값이 반영하여 판별에 쓰일 수도 있지만 기존 연구자들에 의해 도출되었던 판별기준인 무산소 단계에서의 ORP 최소값을 반영하면 보다 안정적인 판별을 수행할 수 있을 것으로 판단했기 때문이다. 통계 프로그램 패키지인 SPSS v.12을 통해 앞에서 언급된 변수들을 이용하여 판별분석을 수행하였다. 도출된 판별 함수는 식 (11), (12)와 같다.

$$Y_{good} = -16.3 + 27.7D_A + 0.5D_B + 6.4OPR_{max} - 27.0ORP_{min} + 12.8ORP_{avg} - 1.6ORP_{std} \quad (11)$$

$$Y_{bad} = -28.8 - 36.9D_A - 0.6D_B - 8.5OPR_{max} + 36.0ORP_{min} + 17.0ORP_{avg} + 2.2ORP_{std} \quad (12)$$

식 (11)은 탈질이 완료된 그룹의 판별 함수이고 식 (12)는 탈질이 완료되지 않은 그룹의 판별 함수이다. 이로써 DTW 알고리즘에 의해 상이도 값을 도출함으로써 행해진 패턴인식 과정과, 계산된 상이도 값 및 패턴의 특징을 대변하는 기타 변수들을 입력변수로 하여 판별함수에 의해 탈질 반응의 완료 여부를 판별하는 감지 알고리즘이 제작되었다.

3.4. 판별 알고리즘의 검증

개발된 감지 알고리즘의 검증을 위해, 표준패턴을 생성하

Table 4. Calculated D values and discriminant function values of each cases

	D_A	D_B	Y_{good}	Y_{bad}
test A	9657.3	4402.9	-8.80	-41.17
test B	14155.0	1245.4	16.89	-72.33

는 과정과 판별함수를 도출하는 과정에 쓰이지 않은 두 개의 테스트 패턴(test A, test B)을 선정하였다. Fig. 5에서 보이는 바와 같이 test A와 test B는 문헌에서 보고된 바 있는 ORP 굴곡점(nitrate knee point)이 발현된 탈질 반응이 완료된 프로파일로써, 원수 조건은 각각 0.05, 0.08 kg NH_4^+-N/m^3 /sub-cycle였으며 C/N 비는 동일하게 3이었다. 이 두 패턴들은 ORP 굴곡점에 대한 사전 지식이 없는 운전자가 육안으로 관찰했을 때, 탈질이 완료된 프로파일과 탈질이 불완료된 프로파일에 비교하여 어느 패턴과 더 가까운지가 확실하게 구분되지 않는 프로파일이다. 두 프로파일을 두 표준 프로파일에 매칭시켜 상이도 값 D_A , D_B 값을 산출하고, 이를 포함한 기타 변수들을 판별함수에 입력하여 출력값을 얻은 결과가 Table 4에 보여져 있다. 두 테스트 패턴 모두 결과는 탈질완료를 나타내는 함수(Y_{good})의 출력값이 컸으므로 모두 탈질 완료 그룹으로 분류될 수 있었다. 이러한 검증과정을 통해 본 연구에서 도출된 탈질 완료/불완료 감지 알고리즘은 ORP의 프로파일 모양이 상이한 패턴에 대해서도 탈질 반응의 상태를 잘 분류 할 수 있는 것으로 판단되었다.

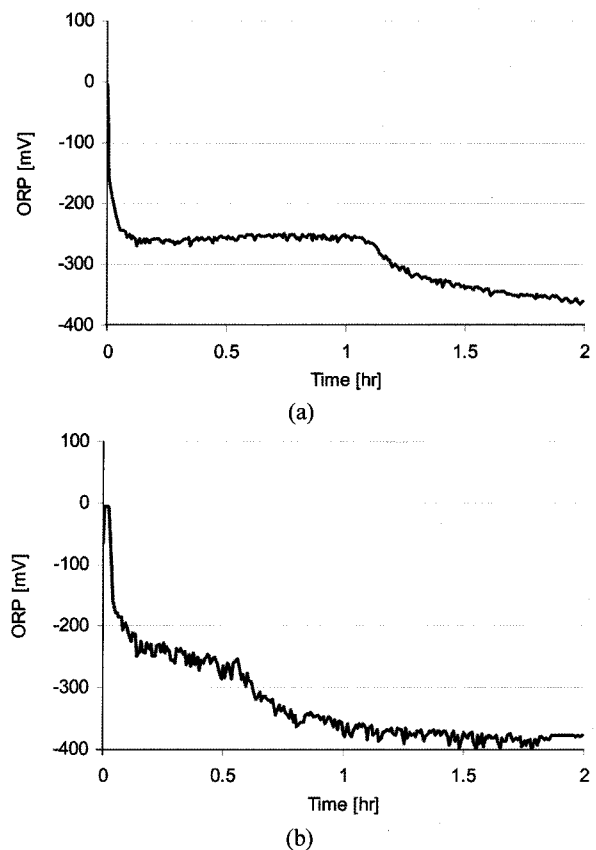


Fig. 5. ORP profile of (a) test A and (b) test B.

4. 결론

본 연구의 목적은 연속 회분식 반응기의 무산소 단계에서 얻어지는 ORP 프로파일을 대상으로 DTW 및 판별분석을 이용하여 무산소 단계의 탈질 반응의 완료 여부를 감지하는 알고리즘을 개발하는 것이다. 이를 위하여 다양한 운전조건에서 SBR을 운전하여 ORP 프로파일을 수집하였고 탈질 완료와 탈질 불완료의 표준 패턴을 생성하였다. 이후 패턴 인식 방법의 하나인 동적 시간 와핑(DTW)으로 표준패턴과 여러 조건의 ORP 프로파일을 매칭하여 두 패턴 간의 상이도 값(D_A , D_B)을 산출하였다. 탈질 완료와 불완료에 대한 객관적 분류는 판별 분석을 통해 이루어졌다. 이에 사용된 변수는 두 개의 기준 패턴으로부터 산출된 D_A , D_B 값과 ORP 프로파일에서 얻을 수 있는 ORP의 최대값, 최소값, 평균값, 분산값이고 이를 사용하여 두 그룹을 구분할 수 있는 판별 함수를 도출하였다. 새로운 패턴에 적용하여 본 결과 두 기준 패턴과의 상이도를 계산하여 탈질 완료 상태의 판별이 잘 수행되었음을 알 수 있었다. 이러한 알고리즘을 통해 운전자가 상주하지 않은 소규모 연속 회분식 공정에서 탈질 반응의 미완료를 신속하게 감지할 수 있을 것으로 보이며, 운전자의 육안 관찰과 추론 과정을 모방하였으므로 향후 하·폐수 처리장의 운전지원에 응용되어 보다 신뢰성 있는 이상감지 및 의사결정지원을 수행할 수 있을 것으로 보인다.

사 사

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었음.

참고문헌

1. 김예진, "연속회분식 공정 관리를 위한 추론모델 및 인공지능형 진단 알고리즘 개발," 부산대학교 박사학위논문 (2006).
2. 부경민, 전병희, 임정훈, 우혜진, 김창원, "축산폐수처리를 위한 SBR에서 호기기간 제어를 위한 ORP 제어구조 결정," 한국물환경학회지, **19**(1), 9~16(2003).
3. Paul, E., Plisson-Saune, S., Mauret, M., and Cantet, J., "Process state evaluation of alternating oxic-anoxic activated sludge using ORP, pH and DO," *Water Sci. Technol.*, **38**(3), 299~306(1998).
4. Ra, C. S., Lo, K. V., and Mavinic, D. S., "Control of a swine manuar treatment process using a specific feature of oxidation reduction potential," *Bioresour. Technol.*, **70**, 117~127(1999).
5. 부경민, "연속회분식반응기에서 기초계측기를 이용한 자동화 운전 제어전략," 부산대학교 박사학위논문(2005).
6. Sakoe, H. and Chiba, S., "Dynamic Programming Algorithm Optimization For Spoken Word Recognition", *IEEE trans. on Acoustics, Speech and Signal Processing*, **26**(1), 43~49(1978).
7. Sakoe, H., Isotani, R., Yoshida, K., Iso, K., and Watanabe, T., "Speaker-Independent Word Recognition Using Dynamic Programming Neural Networks," in *Proceedings of The IEEE Int. Conf. On Acoustics, Speech and Signal Processing*, ICASSP '89, pp. 29~32(1989).
8. 최용석, 정광모, "다변량분석기법과 응용," 자유아카데미, 157~197(2003).