

연속회분식반응기에서 패턴매칭방법을 이용한 유입수 부하수준 진단 알고리즘 개발

김예진 · 안유가* · 김효수 · 신중필** · 김창원†

부산대학교 사회환경시스템공학부 · *하이닉스반도체 · **일본 아이즈대학

(2008년 12월 16일 접수, 2009년 2월 23일 채택)

Development of a Diagnosis Algorithm of Influent Loading Levels Using Pattern Matching Method in Sequencing Batch Reactor (SBR)

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

Department of Environmental Engineering, Pusan National University

*Hynix Semiconductor · **Aizu International University

ABSTRACT : DO, ORP and pH values measured during SBR operation can provide information about removal reaction of organic contaminants and nutrient materials in the reactor. It is already generalized control strategy to control reaction phase time using their special patterns indicating the end of the removal reactions. However, those informations are limited to point out the end time of oxidative reaction in the aerobic phase or reductive reaction in the anoxic phase without giving quantitative value of influent loading level. In this research, a diagnosis algorithm which can estimate the loading level of carbon and ammonia as high, medium and low was developed using the basic measurements like DO, ORP, and pH. It will be possible to know the level of influent loading rate from those on-line measurements without experimental analysis.

Key Words : Carbon Oxidation, Discriminant Analysis, Nitrification, Dynamic Time Warping, ORP, Sequencing Batch Reactor

요약 : 연속회분식반응기에서 측정되는 기초상용계측기의 프로파일은 공정 내에서 수행되는 유기오염물질 및 영양염류 제거반응의 진행 정도에 대한 정보를 제공할 수 있다. 특히 호기성 반응구간에 측정되는 pH나 DO, ORP의 변곡점 등의 정보를 이용한 반응 종료 감지는 널리 알려진 응용사례라고 할 수 있다. 그러나 이러한 정보들은 반응의 종료 여부에 대한 정보를 제공할 뿐, 현재 공정에 가해지는 부하에 대한 정보를 제공하지는 못한다. 본 논문에서는 운전자에게 공정 유입수 내의 호기적 반응을 요하는 부하, 즉 암모니아 부하 및 유기물 부하의 고/중/저에 관한 정보를 제공할 수 있는 기초상용계측기의 정보를 활용한 진단 알고리즘을 개발하였다. 본 알고리즘으로 인해, 연속회분식반응기를 운전할 시에 수시로 변화하는 유입수의 부하를 습식분석 없이 자동 계측기 프로파일로부터 얻어낼 수 있을 것으로 사료된다.

주제어 : 연속회분식 반응기, 동적 시간 와핑, 질산화, 판별분석, 탄소산화, ORP

1. 서론

연속회분식반응기(Sequencing Batch Reactor, SBR)는 공정 운전이 간단하고 부하 변동에도 강하며 소요 설치 부지가 작다는 장점을 가지고 있다는 점에서 일반적으로 축산 폐수와 같은 고농도 유기물 및 질소성분 등을 포함하고 있는 폐수처리와 부하 변동이 심한 중-소규모 마을 하수처리에 적합한 공정으로 간주되어진다. 더군다나 하나의 반응조에서 탄소산화, 질산화, 탈질 반응 등의 제거 기작이 순차적으로 수행될 수 있는 공정 형식에 의해 시간에 따른 반응조 내부의 제거 반응이 동적이며 이러한 특성은 반응조에서 측정되는 DO, pH, ORP와 같은 기초상용계측기의 프로파일이 제거반응에 대한 정보를 제공할 수 있다.^{1,2)}

연속회분식반응기에서 측정되는 기초상용계측기의 프로파일을 사용하여 질산화 및 탈질 반응의 종료를 감지하는 연구는 많은 연구자들에 의해 수행되어 왔다. 이들 기초상용계측기의 변화패턴이 호기 단계에서의 탄소산화 및 질산화의 반응 종료 여부를 간접적으로 제공하여 이를 이용한 반응시간 제어 알고리즘에 관한 연구사례 또한 쉽게 찾아볼 수 있다.^{6~10,12)}

이들 연구사례 중 호기 단계의 제어 전략은 대부분 산소 소모성 반응인 탄소산화와 질산화의 완료 시에 발생하는 DO 지체기(DO lag time)의 종료와 pH 및 ORP의 변곡점을 감지함으로써 불필요한 폭기를 줄이고 다음 반응 단계로 진행할 수 있는 정보를 제공한다. 그러나 이러한 제어 알고리즘들은 단지 반응의 종료 여부만 제공할 뿐, 현재 유입수의 상태를 알려주지는 못한다. 이에 본 연구에서는 각 기초상용계측기로부터 얻어지는 DO 지체기의 지속시간, pH 변곡점이 보이기까지의 시간과 ORP의 변화폭을 이용하여

† Corresponding author

E-mail: cwkim@pusan.ac.kr

Tel: 051-510-2416

Fax: 051-515-5347

유입 부하의 수준을 고/중/저로 나누어 추론할 수 있는 알고리즘을 개발하고자 하였다.

동적 시간 와핑(Dynamic Time Warping)이란 두 패턴 요소간의 대응을 수행하여 유사도를 계산하는 방법이다. 이 방법을 사용하여 1차원적인 시계열 정보를 지닌 비선형적인 패턴간의 최적인 정합을 이루고 패턴간의 상이도를 계산해 낸다. 본 연구에서 운전한 SBR 공정에서 획득된 DO 프로파일에서 관찰되는 DO 지체기는 부하나 C/N 비의 운전조건이 변화함에 따라 그 지속시간이 변하는 패턴을 보여주었으며, 이 지속시간의 크기는 부하의 고/중/저에 관련이 있는 것으로 나타났다. 본 연구는 이러한 점을 이용하여 대략적인 부하 수준의 감지를 DO 지체기를 포함하는 DO 프로파일의 패턴 매칭을 통하여 수행하였고, 그 결과로 도출되는 상이도를 의미하는 D 값과 DO, pH 및 ORP 프로파일의 변화패턴이 가지는 정보를 이용한 판별함수를 도출하여 부하 수준에 대한 진단 결과를 도출하도록 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 대상 반응기 및 운전 조건

유입부하 조건이 다를 때의 ORP 프로파일의 모양을 수집하기 위한 SBR의 구조를 Fig. 1에서 나타내었다. 유효 높이가 50 cm, 지름 39 cm, 유효용적 60 L이고, 반응기의 재질은 스테인레스 스틸로 구성되었다. 원수의 유입은 정량 펌프에 의해 210 mL/min로 일정하게 유지시켰으며, 바닥은 140 L/min의 소형 송풍기(LP-140A)와 연결된 6개의 산기기로부터 60 L/min의 공기를 공급하였다. 또한 내부 온도를 30°C로 유지하기 위하여 가열기와 온도조절 장치를 설치하였다. 무산소 기간 동안 원수 및 외부탄소원의 원활한 혼합을 위한 혼합장치를 설치하여 60 rpm의 교반속도로 일정하게 유지하였다.

데이터 수집을 위해 DO (Knick, Stratos, 2401 Oxy), ORP (US Filter Strantrol 880), pH (US Filter Strantrol 886) 계측기가 설치되었으며 측정된 신호는 4~20 mA의 전류신호로 PLC에 전달되고 PLC는 이러한 전류신호값을 적절히 제어

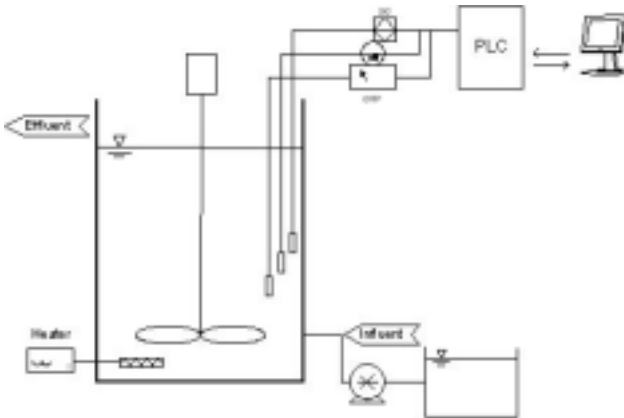


Fig. 1. Schematic of SBR system.

하여 PC의 모니터 스크린을 통해 그 신호값을 전달한다. 또한 시스템의 운전 및 스케줄은 PC용 원격 감시/제어 시스템 소프트웨어인 CIMON으로 제작된 스케줄 모드에 의해 조절되고 이에 따라 유입수 펌프, 외부탄소원 펌프, 송풍기, 교반기가 ON/OFF 작동이 된다.

본 논문에 쓰인 실험 데이터는 주로 질소 성분에 주목하여 분석되었으며, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 와 $\text{NO}_x\text{-N}$ 이 Auto Analyzer 3 (Bran+Luebbe)에 의해 분석되었다. 용존성 성분을 측정하기 위해 시료는 0.45 μm filter (Watman)으로 여과되었다. 대부분의 실험의 기준이 되는 기본 MLVSS 농도는 7000 mg/L 정도였다.

다양한 조건에서 연구를 수행하기 위하여 선택된 기질들을 가지고 조제한 합성폐수를 대상원수로 하였다. 합성폐수는 국내의 소규모 발생원 중 하나인 축산폐수를 기준으로 하여 조제하였다. 합성폐수 내 유기물은 비교적 분해가 빠른 3가지 물질을 이용하며, C/N 비를 조절하기 위해선 암모니아 농도는 일정하게 유지한 상태에서 유기물의 glucose : acetate : lactose 비를 2 : 2 : 1로 혼합하여 비의 크기를 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 기초상용 계측기 프로파일의 획득

다양한 기초상용 계측기 프로파일을 얻기 위하여 여러 조건을 변화시켜 실험을 수행하였다. 암모니아 부하는 sub cycle에 대한 부하로써 저, 중, 고부하로 각각 0.02, 0.05, 0.08 $\text{kg NH}_4^+\text{-N/m}^3\text{/sub cycle}$ 로 변화시키고 각 부하에 대하여 C/N 비를 1, 3, 5, 7로 하여 실험을 수행하였다. MLVSS 6,000~7,000 mg/L, 온도는 30°C로 일정하게 유지하였다 (Table 1).

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

본 연구의 분석 대상 데이터는 1차원 시계열 데이터로 비선형적인 특성을 지니며 매칭을 통해 분류를 목적으로 함으로, 패턴 매칭기법을 적용하기에 적합한 데이터이다. 그리고 각 데이터에 포함되어 있는 정보를 효율적으로 알

Table 1. Experimental condition for the SBR operation

Contents	Conditions		
N-Load ($\text{kg NH}_4^+\text{-N/m}^3 \cdot \text{subcycle}$)	0.02	0.05	0.08
C/N ratio	1, 3, 5, 7	1, 3, 5, 7	1, 3, 5, 7
MLVSS (mg/L)	6,000 ~ 7,000		
Temperature (°C)	30		

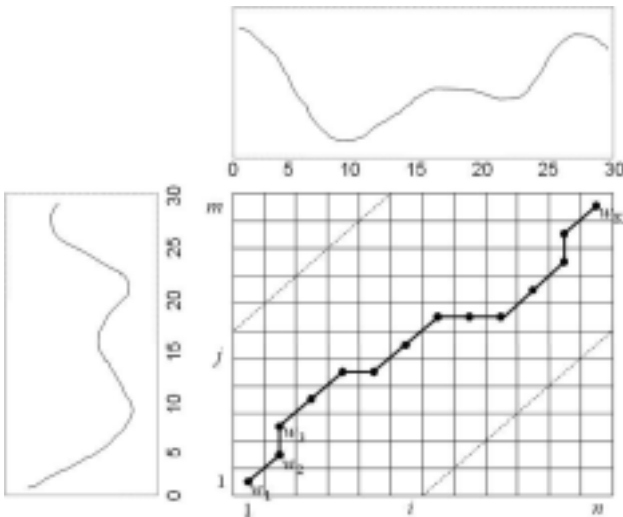


Fig. 2. DP matching method using template pattern and test pattern.

기 위해서는 특징적인 정보 추출 방법이 필요하다. 비선형 시간 정렬 알고리즘은 보다 복잡하고 많은 연산을 필요로 한다. 이러한 방법의 장점은 중요한 특징들을 인지하여 시간 정렬된 패턴 벡터 안에 그러한 특징들을 유지하려고 하는데 있다.^{5,11)} 본 연구에서는 특징 추출을 위하여 동적 시간 와핑(DTW) 방법을 이용하였다.

DTW 알고리즘은 하나의 패턴이 다른 대상 패턴과 최대 로 일치할 때까지 패턴의 시간 축을 와핑하여 패턴간의 시간 차이를 제거한다(Fig 2). 모든 패턴 벡터들은 같은 수의 특징 벡터를 가지는 같은 카테고리의 기준(Reference) 패턴 벡터에 대하여 와핑된다. 적절한 특징이 추출되고 나면, 대향 패턴들은 다음과 같이 특징 벡터의 연속(Sequence)으로 표현된다.

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

$$B = b_1, b_2, \dots, b_j, \dots, b_M$$

여기서 A는 기준 패턴이고 B는 A에 대하여 와핑될 패턴 벡터이다. Fig. 2는 i축과 j축에 대하여 진행된 A와 B를 보여주고 있다.

입력 패턴 시간 j와 기준 패턴 시간 i에서의 와핑 함수 F를 고려해보면, 여기서 i는 아래와 같다.

$$i = j(i)$$

두 특징 벡터 a_i 와 b_{j_i} 간의 차(difference)를 평가하는 거리는 다음을 통해 구한다.

$$d(i, j) = \| a_i - b_j \|^2$$

와핑 함수가 B에 대하여 적용될 때, 이 거리는 다음과 같은 설명에 따른다. 두 특징 벡터 사이의 차이를 표현하는 거리의 합에 대한 최소값을 계산하기 위한 알고리즘이

다. 동적 프로그래밍 식은 다음과 같고, 초기 조건은 아래에 있다.

$$g(i, j(i)) = \min [g_{i1}(i-1, j(i-1)) + d(i, j(i)) \times w(i)]$$

$$g_1(1, 1) = d(1, 1) \times w(1) = d(1, 1)$$

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

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

P=0일 때 동적 프로그래밍 식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$g(i, j(i)) = \min \left\{ \begin{array}{l} g(i-1, j-1) + d(i, j(i)) \\ g(i-1, j) + d(i, j(i)) \end{array} \right.$$

와핑 함수가 이러한 기울기(slope) 제약(constraint)에 따라 이동할 때 허용되는 경로를 Fig. 3(a)에서 보여주고 있다.

P=1일 때 동적 프로그래밍 식은 다음과 같다.

$$g(i, j(i)) = \min \left\{ \begin{array}{l} g(i-1, j-2) \\ + (d(i, j-1) + d(i, j))/2 \\ g(i-1, j-1) + d(i, j) \end{array} \right.$$

와핑 함수가 이러한 기울기(slope) 제약(constraint)에 따라 이동할 때 허용되는 경로를 Fig. 3(b)에서 보여주고 있다.

P=2일 때 동적 프로그래밍 식은 다음과 같다.

$$g(i, j(i)) = \min \left\{ \begin{array}{l} g(i-1, j-1) + d(i, j) \\ g(i-1, j-2) + \\ (d(i, j-1) + d(i, j))/2 \\ g(i-1, j-3) + \\ (d(i, j-2) + d(i, j-1) + \\ d(i, j))/3 \end{array} \right.$$

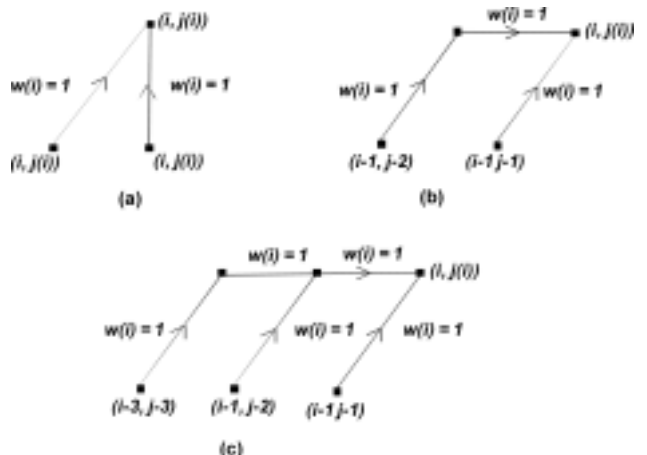


Fig. 3. Possible Warping Function Paths Under Different Slope Constraints.

와평 함수가 이러한 기울기(slope) 제약(constraint)에 따라 이동할 때 허용되는 경로를 Fig. 3(c)에서 보여주고 있다.

2.4. 판별 분석

판별분석(discriminant analysis)은 2개 이상의 모집단으로부터의 표본이 섞여 있을 때 개개의 경우에 대하여 그것이 어느 모집단에 속해 있는지를 판별하기 위하여 함수를 만들어서 판별작업을 실시하는 분석방법이다. 계량적으로 측정된 독립변수들을 이용하여 명목적으로 측정된 종속변수를 분류하는 방법으로서 개별변수만을 이용하여 집단을 분류할 때보다 여러 개의 의미 있는 변수들을 동시에 고려하여 집단간의 차이를 나타내 주는 장점을 가지므로 보다 의미 있는 결과를 나타내는 경우가 많다. 집단간의 차이를 가장 설명해주는 기준으로 판별분석에서는 집단간 분산의 비율을 사용하며 이를 극대화시키는 독립변수들의 선형결합을 판별식이라 한다.^{3,4)}

이를 위한 기본 가정으로는 첫째, 분석대상인 각 집단이 다변량 정규분포를 이루고, 분포 및 공분산 구조가 같으며, 오분류 비용이 동일하여야 한다. 분류에 사용되는 판별 방정식은 다음과 같다.

$$Y(X) = W_1X_1 + W_2X_2 + \dots + W_NX_N + C$$

여기서, Y는 판별점수, X_N는 독립변수, W_N는 독립변수의 가중치, C는 상수이다. 위의 식을 피셔의 선형판별함수라 하고 분류규칙은 변수 X는 Y(X)가 최대값을 가지는 모집단에 분류한다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 부하 및 C/N 비 변화에 따른 기초상용계측기의 프로파일

질산화 반응은 SBR의 호기 단계에 발생하는 반응으로써, 유입 원수에 포함된 암모니아성 질소 성분들이 자가 영양균에 의해 질산성 질소로 산화된다. 질산화 반응에는 용존 산소가 전자 수용체로 사용되기 때문에 실시간으로 측정되는 DO의 프로파일은 이러한 반응의 종료 여부에 대한 정보를 가진다. 일정한 폭기량으로 공정이 운전된다는 전제 하에서, 탄소산화와 질산화와 같은 산소 소모 산화 반응이 진행되면 DO 센서에 의해 측정되는 잔류 용존 산소는 낮은 농도를 보이게 되지만, 반응이 완료되면 더 이상 산소가 소모되지 않기 때문에 잔류 용존 산소의 양이 증가하여 DO 측정값이 상승하는 경향을 나타낸다. DO 농도가 반응에 의한 소모로 인해 낮은 농도로 유지되는 기간을 DO 지체기(DO lag time)라고 불린다. 유입되는 질소 부하가 높을수록 질산염으로 산화시키는데 오랜 시간을 소요하므로 이와 관련하여 용존 산소의 소모도 지속적으로 이루어져 DO 지체기는 길어지게 된다. Fig. 4는 부하가 높아짐에 따른 DO 지체기의 증가를 C/N 비별로 정리

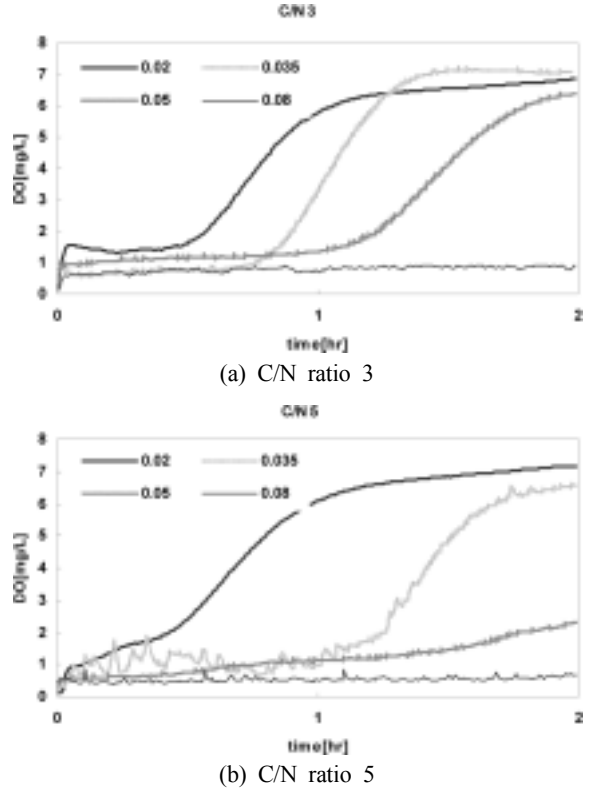


Fig. 4. DO profiles with loading variation according to C/N ratio under same F/M ratio (0.02, 0.035, 0.05, 0.08 kg NH₄⁺-N/m³/sub-cycle).

하여 보여주고 있다.

이러한 DO 지체기는 두 가지 측면에서 중요한 정보를 가지고 있다고 말할 수 있는데, 그 첫 번째는 질산화 종료 진단의 측면에서이다. DO 지체기가 종료되고 DO가 가파르게 상승하는 패턴이 2 시간의 호기 기간 내에 발생한다면, 주어진 2 시간의 호기기간 안에 질산화가 종료되었음을 의미한다. 하지만 2 시간의 호기기간 내에도 DO 지체기의 종료가 발견되지 않는다면, 유입 부하가 그만큼 높음을 의미하며 질산화가 완료되지 못함을 의미하게 된다. 두 번째 측면은, 일정량의 폭기량과 MLSS 농도의 큰 변화가 없다는 전제 하에서 DO 지체기는 유입 부하와 선형적 비례관계를 가진다는 것이다. 따라서 DO 지체기의 발생 시점에 따른 DO 프로파일의 모양의 차이를 인식하여 유입 질소의 부하 감지가 가능하다.

3.2. 표준 프로파일 생성

일반적으로 질산화 기간에 DO 농도는 유입 부하와 연관이 크다. 산화해야할 부하가 크다면 그만큼 산소가 소모되는 기간이 길기 때문이다. 또한 부하가 아주 높다면 정해진 2시간 내에 질산화가 종료되지 않아서 반응 시간이 끝났음에도 불구하고 여전히 낮은 농도로 유지되고 이러한 경우에는 질산화가 미완료되어 유출수에는 암모니아성 질소가 잔류하게 된다. Table 2에서는 표준 프로파일을 만들기 위한 운전조건이 설명되어져 있다. 정상 패턴과 비정

Table 2. Experimental conditions to make standard profiles

	completenitrification			incomplete nitrification
	Low	Medium	High	Abnormal
loading*	0.02	0.035	0.05	0.05/0.08
C/N ratio	1, 3, 5, 7	1, 3	1, 3	5, 7/1, 3, 5, 7
Case No.	L1, L2, L3, L4	M1, M2	H1, H2	Un1, Un2, Un3, Un4, Un5, Un6

상 패턴을 분류하기 위해서는 DO 프로파일에 영향을 주는 부하를 기준으로 나누었다. 부하가 0.02인 것을 저부하 정상 프로파일, 0.035인 것을 표준부하 정상 프로파일, 0.05 부하의 C/N 비가 1과 3인 것을 고부하 정상 프로파일, 0.05 부하의 C/N 비가 5와 7과 0.08 부하인 것은 비정상 프로파일로 분류하였다. 패턴 매칭을 수행하기 위해서는 각 조건을 대표하는 표준 프로파일이 필요하게 되며, 이는 해당 조건에서 얻어진 DO 프로파일을 시간에 따라 평균함으로써 얻어졌다. Fig. 5는 각 조건에 대해 얻어진 표준 프로파일을 보여주고 있다. Fig. 5(a), (b), (c)에서는 질산화 기간 동안 DO 지체기가 발생하는 것을 볼 수 있다. 부하가 높아짐에 따라 DO 지체기는 점점 증가하게 되고 이는 질소 산화가 완료되는데 시간이 많이 필요로 하기 때문이다. 비정상 프로파일인 Fig. 5(d)는 질산화가 미완료된 프로파일이고 정해진 반응 시간이 끝날 때까지 DO 지체기가 지속되는 것을 볼 수 있다.

3.3. DP 매칭 수행을 통한 패턴 유사도 산출

각 조건에서 얻어진 DO 프로파일을 세 가지 부하인 정상 프로파일과 비정상 프로파일 패턴에 매칭시켜 상이도 값을 얻고자 하였다. 이로써 계산된 상이도 값 D는 질산화 완료 유무와 유입 질소 부하를 감지하는데 중요한 역할

을 하는 독립변수가 된다. Table 3은 표준 프로파일을 생성하는데 사용되었던 각각의 프로파일이 표준 프로파일에 대하여 DP 매칭 수행을 통해 얻어진 상이도 값에 관한 것이다.

Table 3에서 D_L 은 저부하조건인 정상 표준 프로파일과 매칭한 것이고 D_M 는 표준부하조건인 정상 표준 프로파일과 매칭한 것이며 D_H 은 고부하에서의 정상 표준 프로파일과 매칭한 것이다. D_{in} 는 비정상 프로파일과 매칭하여 얻은 상이도 값 D이다. 표에서 보면 각 그룹에 속한 경우 상이도 값(D)이 적어 그만큼 서로 유사한 패턴임을 알 수 있

Table 3. Calculated D values from DTW

Case No.	D_L	D_M	D_H	D_{in}
L1	7.1	19.2	69.8	409.7
L2	8.9	23.6	64	410.4
L3	4.9	24.4	87.6	445.3
L4	7.4	12.4	37.9	368.8
M1	30.8	26.5	61.7	319.4
M2	50.1	20	18.8	190.4
H1	45.7	31	3.8	211.5
H2	49.7	31.2	3.3	169.6
Un1	672.6	387	265.6	15.7
Un2	437.1	250.5	155.3	84.5
Un3	787.6	473.2	352.3	23.3
Un4	883.7	558.4	441.8	40.1
Un5	925.2	598	483.1	72.8
Un6	916	589	474.2	59.8

D_L : D value for the standard profile of low loading rate cases

D_M : D value for the standard profile of medium loading rate cases

D_H : D value for the standard profile of high loading rate cases

D_{in} : D value for the standard profile of incomplete nitrification cases

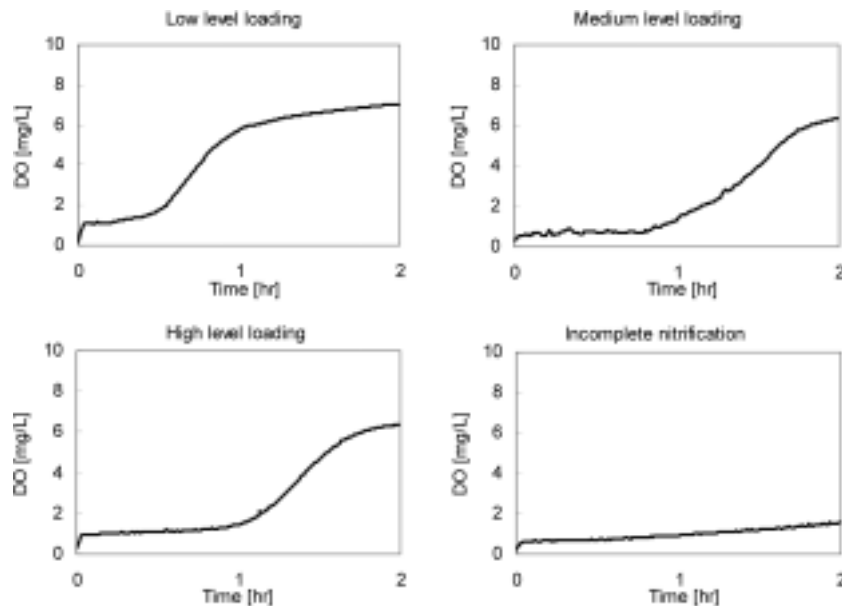


Fig. 5. Standard profiles of each case.

다. 이를 근거로 하여 패턴들간의 상이도 값을 이용한 유입 질소 부하의 분류의 가능성이 있음을 보였다.

3.4. 판별함수 도출

앞서 산출된 상이도 값(D)를 보면 부하의 고/중/저의 분류 가능성을 보였지만 M1과 M2의 경우 상이도 값만으로는 명확한 판정을 내릴 수 없다는 사실을 알 수 있다. 이에 본 연구에서는 보다 정확한 판별 기준을 제시하기 위해 판별 분석을 실시하였다. 분석에 사용된 독립 변수는 상이도 값(D) 외에도 호기기간의 특성을 반영하는 DO 지체기의 지속시간(DO_time)과 pH 변곡점까지 도달하는 시간(pH_time), ORP 초기값(ORP_ini)을 추가로 선정하였다. Table 4에서는 각각의 실험조건에서 측정된 프로파일로부터 획득한 센서 측정값이 제시되어 있다. 이 값을 바탕으로 SPSS 프로그램을 이용하여 판별 분석을 실시하여 각 분류 그룹에 해당하는 판별함수를 도출하였다. 그 결과로, Table 5에서 보이는 바와 같은 각 분류 그룹에 대한 판별 계수들(각 변수에 대한 가중치들)이 도출되었고 이들을 결합한 판별 함수로 질산화 완료 및 유입 질소 부하를 분류할 수 있다. 하나의 경우에 대해 판별 분석을 하면 4개의 판별 함수값 중 가장 높은 값을 가지는 그룹으로 분류된다.

Table 4. Data for discriminant analysis

Case No.	ORP_ini	pH_time	DO_time
L1	32.5	27	38.5
L2	34	33	40
L3	-222.6	30	34
L4	-221.4	42	43
M1	-73.5	54	58.5
M2	-259.4	66	80.5
H1	-372.6	60	73.5
H2	-166.7	66	81.5
Un1	-272.6	96	120
Un2	-235.5	96	95
Un3	-281.6	120	120
Un4	-213.7	120	120
Un5	-380.3	120	120
Un6	-376	120	120

Table 5. Discriminant coefficient of each case

	Low	Medium	High	Abnormal
D1	-54.0	-213.2	-376.7	232.6
D2	-88.7	-253.2	188.1	80.8
D3	79.2	227.0	34.4	-139.9
D4	43.3	138.6	85.0	-103.4
ORP_ini	-0.9	-0.6	-0.8	1.1
pH_time	2.0	61.1	20.8	-28.7
DO_time	59.2	236.6	163.1	-172.7
(Constant)	-22.9	-62.9	-37.7	-43.0

Table 6. Calculated D values from DTW

	A	B	C	D
D1	3.4	97	19.4	882
D2	18.1	30	26	561
D3	76.2	47	7.3	440.8
D4	446.7	153.1	216	48.7

Table 7. Results of discriminant function of each validation

		A	B	C	D
complete nitrification	Low	30	19	9	-76
	Medium	20	105	51	-162
	High	-9	35	65	-100
incomplete nitrification	Abnormal	-116	-151	-136	46

3.5. 개발된 판별 알고리즘의 검증

도출된 판별 함수에 대하여 표준 프로파일의 생성과 판별함수 도출에 사용되지 않은 프로파일을 적용하여 개발된 알고리즘을 검증해보고자 하였다. 부하의 고, 중, 저(A: 0.02 kgNH₄⁺-N/m³/sub-cycle; B: 0.035 kgNH₄⁺-N/m³/sub-cycle; C: 0.05 kgNH₄⁺-N/m³/sub-cycle) 그리고 2시간 안에 반응이 완료되지 않은 경우의 4가지 경우(D: 0.08 kgNH₄⁺-N/m³/sub-cycle)를 검증해 보았다. 4가지 경우를 각 표준 프로파일에 매칭하여 상이도 값(D)를 얻었으며 그 외 독립 변수들의 값을 통해 판별 함수식에 대입하였다. 이에 대한 상이도 값(D)는 Table 6에 나타나 있다. 이 결과에, 각각의 검증 대상 프로파일이 가지는 DO 지체기, pH 변곡점까지의 시간, ORP 초기값을 대입하여 얻은 판별 함수값은 Table 7에 나타나 있다.

Table 7에 제시된 판별 함수의 결과를 보면 함수값이 제일 큰 경우가 그 프로파일이 속하는 그룹이 된다. 그룹이 잘 분류되었는지 알아보기 위하여 반응 시간에 따른 NH₄⁺-N 분석 결과를 비교하여 확인하였다. Fig. 6은 A~D 경우에 측정된 DO 프로파일과 NH₄⁺-N를 나타내고 있다. A~C는 질산화가 완료된 정상 상태로 각각의 유입 질소 부하를 잘 나타내었고 D는 질산화가 완료되지 않은 비정상 상태로 잘 분류된 것을 확인할 수 있었다.

4. 결론

패턴 매칭 방법은 인간 운전자가 매일 매일 공정에 설치된 센서의 프로파일을 관찰하고 운전자의 경험적 지식을 통해 구축된 가상적 표준 프로파일에 관찰된 프로파일을 대조하며, 공정의 상태를 진단해 내는 방법을 모사할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 또한 판별함수의 적용은 인간 운전자가 행하는 신호 패턴에 대한 육안적 관찰과 더불어 행해지는 수치에 의한 이성 판단의 과정을 모사할 수 있다. 하·폐수 처리 플랜트에서는 이러한 운전자의 수동적인 진단 작업이 매우 중요하게 작용하기 때문에 패턴 매

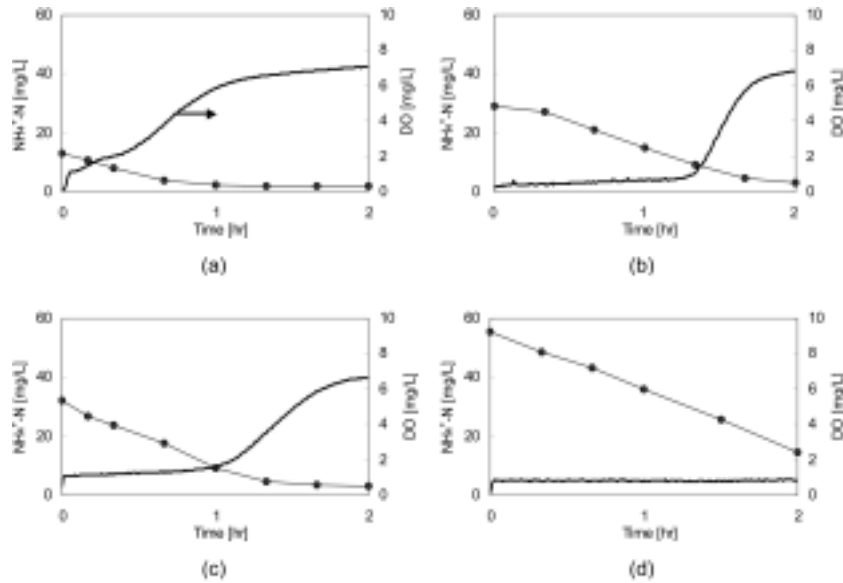


Fig. 6. DO profiles with $\text{NH}_4^+\text{-N}$ profiles test A(a), test B(b), test C(c), test D(d).

칭 방법은 수작업을 자동화할 수 있다는 점에서 매우 높은 적용성을 지닌다고 할 수 있다.

본 연구에서는 연속 회분식 반응기의 운전주기에 따라 매우 동적인 특성을 가지는 센서 프로파일의 모양이 공정의 질산화/탄소산화 반응의 종료여부 및 부하량 등에 관한 정보를 가지고 있다는 점에 착안하여, 이러한 센서 프로파일들을 대상으로 패턴 매칭을 적용하여 보았다. 패턴 매칭을 통해 DO 프로파일의 모양이 어느 부하수준에 가까운지를 보여주기 위한 상이도 값 D를 도출하였고, 이 외에 DO 지체기의 지속시간과 pH 변곡점까지 도달하는 시간, ORP 초기값 등의 정보를 이용하여 부하수준을 판정 내릴 수 있는 판별함수를 도출하였다. 알고리즘 도출을 위한 과정에 사용되지 않았던 다른 대상 프로파일을 적용해 본 결과, 알맞은 부하의 진단이 수행되었음을 알 수 있었다.

사 사

이 논문은 2004년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음(KRF-2004-042-D00114).

참 고 문 헌

1. 김예진, “연속회분식 공정 관리를 위한 추론모델 및 인공지능형 진단 알고리즘 개발,” 부산대학교(2006).
2. 부경민, “연속회분식반응기에서 기초계측기를 이용한 자동화 운전 제어전략,” 부산대학교(2005).
3. 양경숙, 허명희, “다변량 자료분석,” SPSS 아카데미(2001).
4. 최용석, 정광모, “다변량분석기법과 응용,” 자유아카데미, pp. 157~197(2003).
5. Keogh, E. J. and Pazzani, M. J., “Derivative dynamic time warping,” <http://www.cs.ucr.edu/~eamonn/sdm01.pdf>

6. Hao, O. J., Huang, J., “Alternating aerobic-anaerobic process for nitrogen removal: process evaluation,” *Water Environ. Res.*, **68**(1), 83~93(1996).
7. Kim, H., Hao, O. J., “pH and oxidation-reduction potential control strategy for optimization of nitrogen removal in an alternating,” *Water Environ. Res.*, **73**(1) 95~101 (2001).
8. Koch, F. A., Oldham, W. K., “Oxidation-reduction potential (ORP) regulation as a way to optimize aeration and N and P removal: experimental basis and various full-scale examples,” *Water. Sci. Technol.*, **21**, 1209(1985).
9. Mauret, M., Ferrand, F., Boisdon, V., Sperandio, M., Paul, E., “Process using DO and ORP signals for biological nitrification and denitrification: validation of a food-processing industry wastewater treatment plant on boosting with pure oxygen,” *Water Sci. Technol.*, **44**(2-3), 163~170(2001).
10. Plisson-Saune, S., Capdeville, B., Mauret, M., Deguin, A., Baptiste, P., “Real-time control of nitrogen removal using three ORP bending-points: signification, control strategy and Results,” *Water Sci. Technol.*, **33**(1), 275~280 (1996).
11. Casarotto S., Bianchi, A. M., Cerutti, S., and Chiarenza, G. A., “Dynamic time warping in the analysis of event-related potentials,” *IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine*, January/February, 68~77(2005).
12. Yu, R.-F., Liaw, S.-L., Chang, C.-N., Cheng, W.-Y., “Applying real-time control to enhance the performance of nitrogen removal in the continuous-flow SBR system,” *Water Sci. Technol.*, **38**(3), 271~280(1998).