

ORIGINAL ARTICLE

동적시간와핑을 이용한 연속회분식 반응기의 장비고장 감지

김예진*

부산가톨릭대학교 환경공학과

Detection of Equipment Faults at Sequencing Batch Reactor Using Dynamic Time Warping

Yejin Kim*

Department of Environmental Engineering, Catholic University of Pusan, Busan 46252, Korea

Abstract

The biological wastewater treatment plant, which uses microbial community to remove organic matter and nutrients in wastewater, is known as its nonlinear behavior and uncertainty to operate. Therefore, operation of the biological wastewater treatment process much depends on observation and knowledge of operators. The manual inspection of human operators is essential to manage the process properly, however, it is impossible to detect a fault promptly so that the process can be exposed to improper condition not securing safe effluent quality. Among various process faults, equipment malfunction is critical to maintain normal operational state. To detect equipment faults automatically, the dynamic time warping was tested using on-line oxidation-reduction potential (ORP) and dissolved oxygen (DO) profiles in a sequencing batch reactor (SBR), which is a type of wastewater treatment process. After one cycle profiles of ORP and DO were measured and stored, they were warped to the template profiles which were prepared already and the distance result, accumulated distance (D) values were calculated. If the D values were increased significantly, some kinds of faults could be detected and an alarm could be sent to the operator. By this way, it seems to be possible to make an early detecting of process faults.

Key words : Dynamic time warping (DTW), Fault detection, SBR, Wastewater treatment

1. 서론

생물학적 하·폐수처리공정은 활성슬러지의 특성에 의해 비선형적인 특성을 보이며, 운전함에 있어 불확실성을 고려해야 한다(Olsson and Newell, 1999). 따라서, 생물학적 하·폐수처리공정의 운전은 운전자의 경험적 지식에 크게 의존하게 된다. 운전자는 매일 다양한 형태의 관찰을 수행하며, 이는 운전자가 정성적으로 공정을 진단하는 근거가 된다. 운전자가 수행하는 다양한 정성

적인 관찰은 펌프류의 작동 소리 등과 같은 청각적 정보, 슬러지의 색깔과 같은 시각적 정보, 심지어 슬러지의 냄새와 같은 후각적인 정보를 활용해서도 이루어 질 수 있는데, 이 모든 관찰활동 중에서 가장 중요한 행위는 계측기의 값을 관찰하거나 시계열 그래프를 관찰하는 일라고 할 수 있다. 공정에 이상이 발생할 경우, 계측기의 값은 이상 징후를 보이게 되며, 간단히 계측기 값이 정상적인 범위 밖을 벗어날 경우 운전자에게 이상이 존재한다는 메시지를 보내는 등의 조작은 쉬우나, 계측기 값이 어렵

Received 26 January, 2016; Revised 18 February, 2016;

Accepted 26 February, 2016

*Corresponding author : Yejin Kim, Department of Environmental Engineering, Catholic University of Pusan, Busan 46252, Korea
Phone : +82-51-510-0621
E-mail : yjkim@cup.ac.kr

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.

© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

한 일정한 패턴을 가지고 변화하는 연속회분식반응기 (sequencing batch reactor, SBR)의 경우는 용존산소 (dissolved oxygen, DO) 및 산화환원전위(oxidation-reduction potential, ORP)의 계측기의 시계열 측정 패턴의 일그러짐을 감지해야 하므로 제시간에 고장을 감지하기 힘들다.

생물학적 처리 공정에서, ORP나 DO는 매우 기초적인 온라인 계측항목에 속하며, 공정이 현재 하 폐수를 처리함에 있어 큰 이상이 존재하는지를 파악하기 위한 기본적인 관찰대상이 된다. 이것은 항상 동적인 상태로 운전되는 SBR의 경우 더욱 중요해지는데, SBR의 경우 운전 단계에 따라 전형적이나 매우 동적인 시계열 프로파일을 형성하기 때문이다(Kim et al., 2006a; Jun et al., 2003; Poo et al., 2003; Kim et al., 2006b). 공정에 이상이 생기는 경우, ORP나 DO의 시계열 프로파일은 전형적인 형태에서 벗어나게 되는데 이러한 프로파일의 변화를 즉각적이고 자동적으로 감지하여 운전자에게 알려주는 것은 공정을 안정적으로 유지하는 데 매우 유용할 것이다.

연속회분식반응기에서의 이상 감지를 위한 연구사례로는 DO 및 ORP 프로파일의 시간대별 평균과 표준편차를 계산하여 변화의 상한선과 하한선을 동적으로 부여하여 범위 밖의 계측값이 발생할 경우 이상이라고 진단하는 관리도 기법(Control Chart)을 활용한 사례가 존재한다(Kim et al., 2006a). 그러나 SBR의 DO와 ORP 프로파일은 이상상태의 존재 뿐 아니라 유입부하의 변동에 의해 그 변동 폭이 변할 수 있어 관리도 기법만으로는 한계가 존재하였다. 이처럼 SBR을 운전함에 있어 같은 모양을 가지나 변동 폭이 큰 프로파일의 형태가 변화하는 것을 감지하기 위한 방법으로 동적시간과핑(dynamic

time warping, DTW) 방법이 사용된 사례가 있다(Kim et al., 2010; Jun, 2011). DTW 방법은 전형적인 패턴 인식 방법의 하나로서, 표준 패턴에 새로이 얻어진 패턴을 최대한 매칭한 후의 차이를 계산하여 패턴의 모양이 다를 경우 정량화된 수치로 제시할 수 있는 알고리즘이다. 본 연구에서는 DTW 방법을 활용하여, 연속 회분식 반응기의 기초계측기인 DO와 ORP를 대상으로 운전자의 경험에 의해 존재하는 표준적인 패턴과 관찰된 패턴을 비교하여 이상을 감지하는 과정을 모방하기 위한 알고리즘을 개발하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 대상 공정 및 데이터 수집

본 연구를 위해 운전된 연속회분식반응기는 유효용량 60 L로 설계되어 축산폐수 수준의 고부하의 합성폐수를 처리하기 위해 운전되었다. 매 30초마다 DO와 ORP 계측값이 전송되어 연결된 운영 시스템에 저장되었으며, 시간에 따른 계측값의 프로파일이 실시간으로 운영화면에 제시되어 운전자가 수시로 공정의 상황을 확인할 수 있도록 운전되었다. 질산화와 탈질반응을 순차적으로 유도하기 위하여 Fig. 1과 같이 무산소와 호기 조건을 번갈아가며 운전을 수행하였다.

암모니아 부하는 sub cycle에 대한 부하로써 저, 중, 고부하로 각각 0.035 kg NH₄⁺-N/m³ sub cycle 로 고정시키고 각 부하에 대하여 C/N 비를 3, 5, 7로 변화시켜 실험을 수행하였다. MLVSS는 6,000~7,000 mg/L, 온도는 30℃로 일정하게 유지하였다. Table 1은 부하 및 C/N 비 변화를 수행한 운전조건을 제시하고 있으며, Fig. 2는 기기고장이 없는 정상 조건에서의 DO와 ORP 프로파일

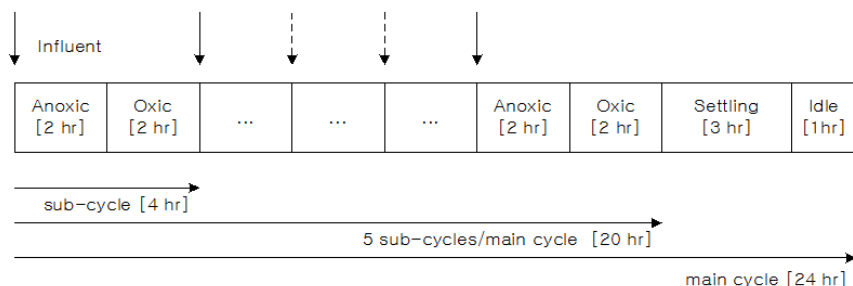


Fig. 1. Operating schedule of SBR.

Table 1. Experimental conditions for the SBR operation

Operating conditions	Loading rate*	C/N ratio	Temp. [°C]	MLVSS [mg/L]
Normal	0.035	3, 5, 7 (low, normal, high)	30	6,000~7,000
Fault	0.035	5	30	6,000~7,000

* kg NH₄⁺-N/m³

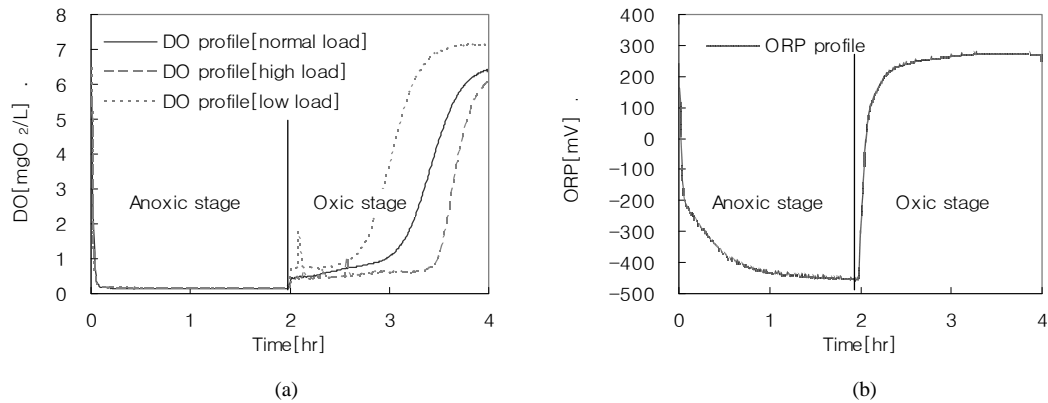


Fig. 2. Profiles of (a) DO and (b) ORP from normal operation.

을 제시하고 있다.

장비 고장 실험은 Table 2에서 보이는 바와 같이, 대상 연속회분식 반응기에서 표준 부하 및 암모니아 부하 0.035 kg NH₄⁺-N/m³/sub-cycle, C/N비 5의 조건에서 MLVSS 농도를 6,000~7,000 mg/L로 고정하고 온도를 30°C로 유지하여 실험하였다. 송풍기의 경우 호기단계 시작 후 60분 지점에 정지시켜 호기단계 진행 중에 송풍기가 고장나는 상황을 모사하였고, 유입펌프와 교반기는 무산소단계 이전부터 고장난 상황을 모사하였다. 세 가지 장비 모두 연속회분식 반응기의 경우 매우 치명적인 이상을 초래할 수 있는 고장유형에 해당한다. 고장 상황에서의 DO와 ORP의 값은 저장되어 DTW에 적용되

었다.

2.2. DTW 방법

DTW 방법은 대표적인 비선형 시간 정렬 알고리즘으로서, Sakoe and Chiba(1978)에 의해 소개되었는데, 글자의 모양을 인식하기 위해 사용된 바 있는 패턴인식 방법이다(Sakoe et al., 1989). DTW 방법의 알고리즘은 하나의 패턴이 다른 대상 패턴과 최대한 일치할 때까지 패턴의 시간 축을 왜곡함으로써 패턴간의 시간 차이를 제거한다(Casarotto et al., 2005). 모든 패턴 벡터들은 같은 수의 특징 벡터를 가지는 같은 카테고리의 표준(Template) 패턴 벡터에 대하여 왜곡된다(Fig. 3). 적절

Table 2. Experimental conditions about facility fault

Fault types	Experimental conditions
Blower fault	Blower stop after 60 mins from aeration phase start
Mixer fault	No Mixing at anoxic phase
Influent pump fault	No Feeding

한 특징이 추출되고 나면, 대항 패턴들은 식(1)과 같이 특징 벡터의 연속(Sequence)으로 표현된다.

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

$$B = b_1, b_2, \dots, b_j, \dots, b_M \quad (2)$$

Where, A : Template pattern
B : Test pattern

입력 패턴 시간 j와 표준 패턴 시간 i에서의 와핑을 고려할 때, 여기서 i는 식(2)와 같다.

$$i = j(i) \quad (3)$$

두 특징 벡터 a_i 와 b_{ji} 간의 차(Difference)를 평가하는 거리는 아래 식(3)을 통해 구한다.

$$d(i, j) = \|a_i - b_j\| \quad (4)$$

와핑 함수가 B에 대하여 적용될 때, 이 거리는 식 (4)와 같이 된다.

$$d(i, j) = \|a_i - b'_j\| \quad (5)$$

여기서 b'_j 는 와핑 함수를 적용한 후 B의 j번째 요소이다. 그리고 와핑 함수에서의 이러한 거리의 가중치 합은 식 (5)와 같다.

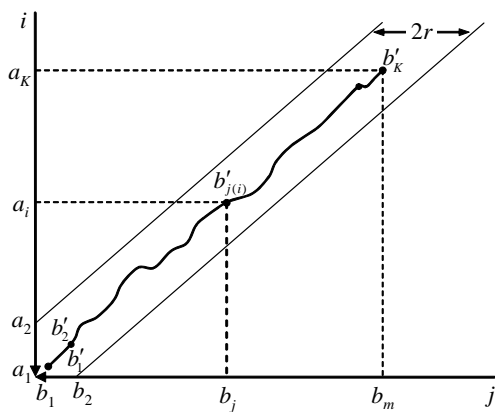


Fig. 3. Warping function and adjustment window.

$$E(F) = \sum_{i=1}^K d(i, j(i)) * w(i) \quad (6)$$

여기서 $w(i)$ 는 양(nonnegative)의 가중치 계수이다. 와핑 함수가 두 패턴 벡터들을 최적으로 정렬하기 위해 결정될 때(Fig. 4) E는 최소값이 된다. A와 B 사이의 최소 잔차 거리는 둘의 시간적 차이를 최소화한 후 여전히 존재하는 거리이다. 시간 정규 차, 즉 두 패턴 벡터들 사이의 상이도를 나타내는 거리 D 값은 식(6)과 같이 정의된다.

$$D(A, B) = \text{Min}_F \left[\frac{\sum_{i=1}^K d(i, j(i)) * w(i)}{\sum_{i=1}^K w(i)} \right] \quad (7)$$

3. 결과 및 고찰

3.1. 정상 패턴에 대한 DTW

고장 패턴과 정상 패턴을 매칭함에 있어 우선적으로 수행되어야 할 작업은 표준 패턴을 만드는 일이다. 본 연구에서는 운전되었던 유입수 부하 조건의 가장 중심이 되는 $0.035 \text{ kg NH}_4^+ \text{-N/m}^3 \text{/sub-cycle}$ 의 C/N비 5의 조건에서 정상적으로 운전되었던 sub-cycle들의 DO와 ORP 패턴을 시간대별로 평균하여 표준 패턴(Template pattern)을 제작하였다(Fig. 5).

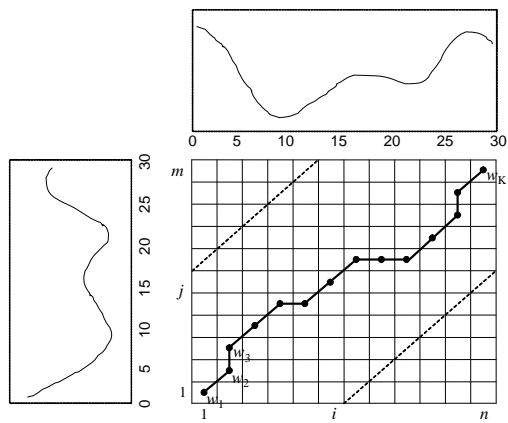


Fig. 4. DP matching method using template pattern and test pattern.

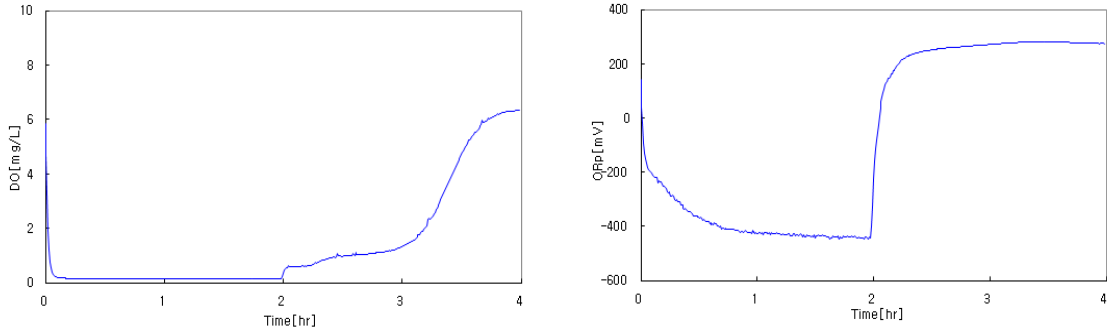


Fig. 5. Template patterns of (a) DO and (b) ORP.

또한 정상적으로 운전되었던 부하 $0.035 \text{ NH}_4^+ \text{-N/m}^3$ /sub-cycle 및 C/N비 3,5,7의 경우에 대하여 서로간의 DTW 방법을 실시하였다. 이 작업은 장비 고장시의 DO와 ORP의 패턴과 표준 패턴과 가지는 거리 D의 분포와 비교하기 위함이다. C/N비 3과 7 사이, 그리고 3과 5 사이, 5와 7 사이의 DO 프로파일과 ORP 프로파일을 서로 매칭한 결과인 D 값이 아래 Table 3에 표현되어 있다. Fig. 4(a)에서 보이는 바와 같이 C/N비 3(low load)과

C/N비 7(high load)의 DO 프로파일은 육안으로 관찰하기에도 차이가 존재한다. 이러한 차이가 가장 큰 D 값 (182.43)을 형성하였음을 알 수 있다. 그러나 C/N비 5(normal load)와 C/N비 7(high load)사이의 D 값은 C/N비 5(normal load)와 3(low load)의 D 값보다 더 작았는데, 이는 DTW의 특성상 표준 패턴과의 차이를 최대한 없애는 방향으로 시간차를 없애며 테스트 패턴을 늘려 맞추는 후 남아있는 차이의 합을 D 값으로 계산하는

Table 3. Distance values of each test with load variations for normal cases

Items	D value		D value		D value	
	C/N 5 (normal)	C/N 7 (high)	C/N 5 (normal)	C/N 3 (low)	C/N 3 (low)	C/N 7 (high)
DO	16.36		50.81		182.43	
ORP	11697		10522		11529	

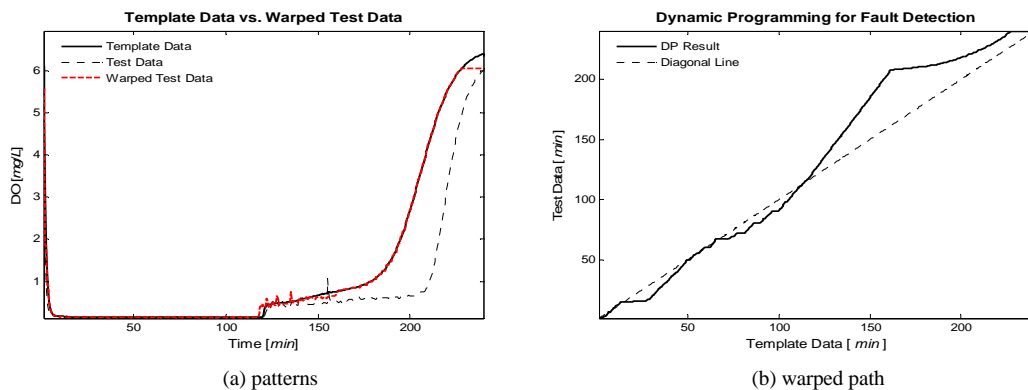


Fig. 6. DTW result of DO profiles for normal load and high load.

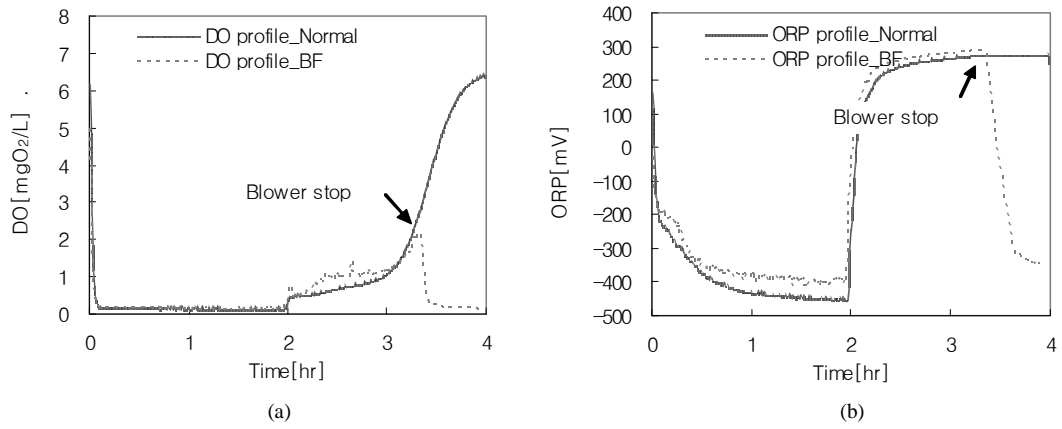


Fig. 7. DO (a) and ORP (b) profile with blower fault.

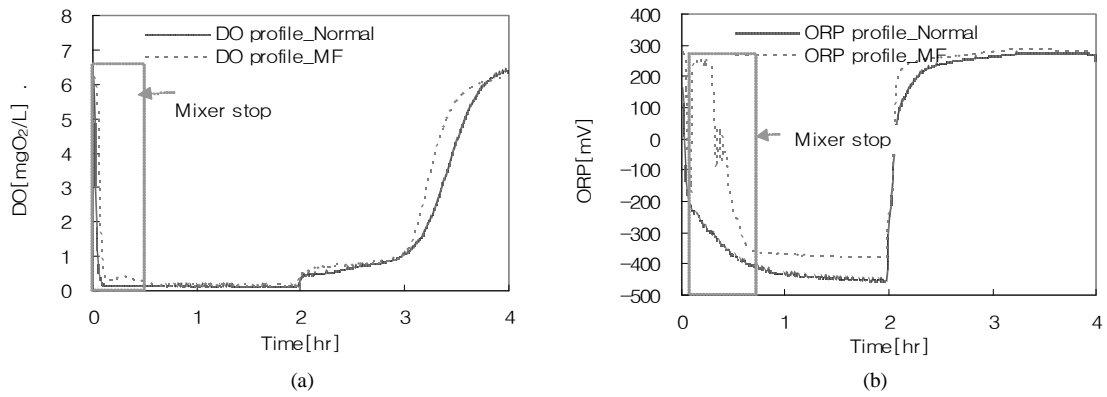


Fig. 8. DO(a) and ORP(b) profile with mixer fault.

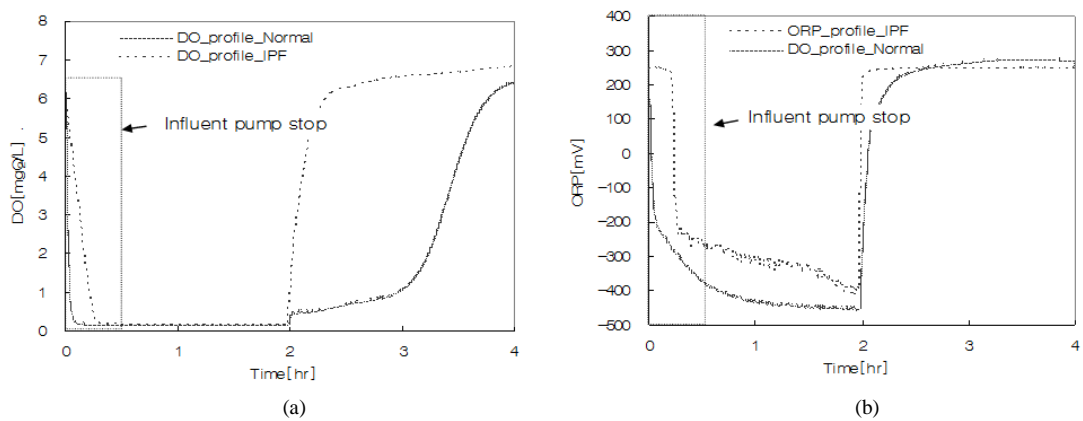


Fig. 9. DO(a) and ORP(b) profile with influent pump fault.

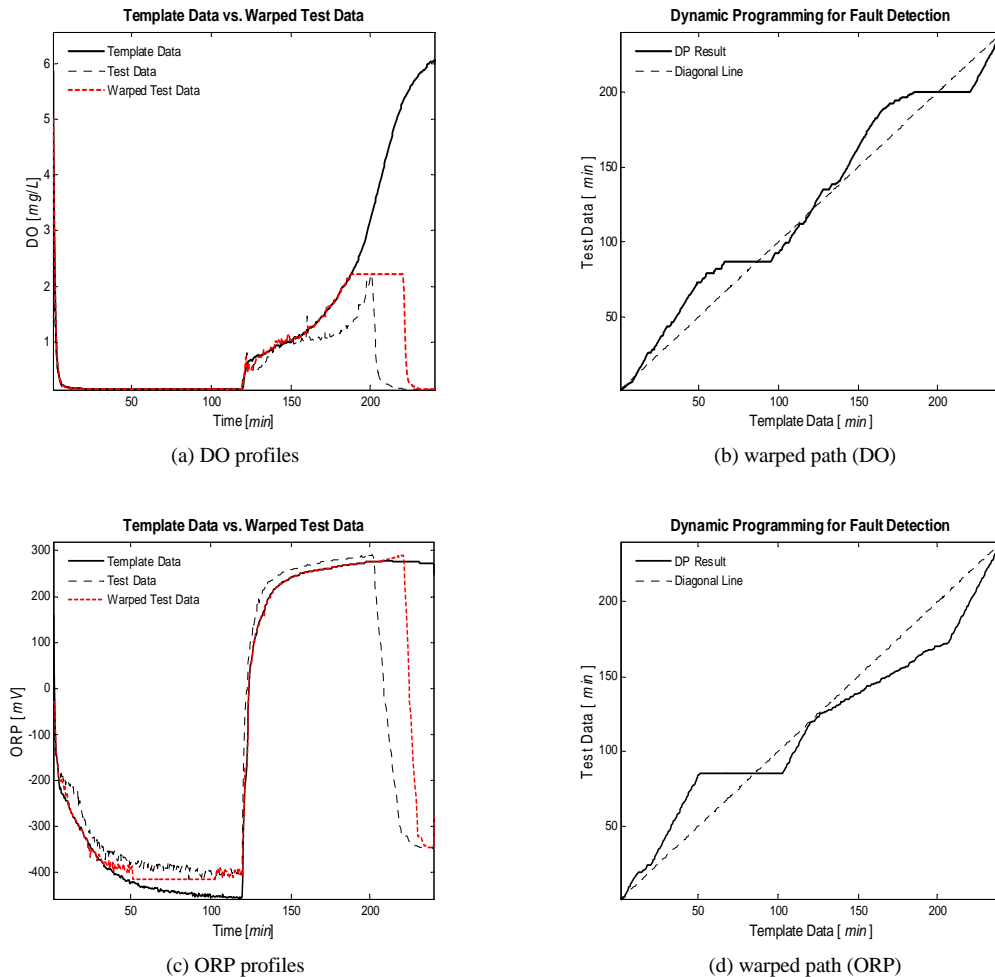


Fig. 10. DTW result of blower fault profiles with the standard profiles.

특성으로 인한 것이다. 다시 말해, 호기 단계가 끝나는 지점에서의 DO 값의 절대값의 차이가, 외핑 후 남아있는 두 패턴간의 거리 값으로 표현되었기 때문이다.

3.2. 고장 패턴 획득

SBR 반응기에 필수적으로 설치되어야 하는 장비는 송풍기, 교반기, 유입 펌프의 세 가지로 볼 수 있다. 본 연구에서는 앞서 설명된 고장 유발 조건에 의해 각 기기의 고장을 순차적으로 유발시켜 DO와 ORP의 패턴을 획득하였다. 송풍기가 호기 단계에 멈출 경우 탄소산화와 질산화에 필요한 산소가 공급되지 않기 때문에 더 이상 산

화 반응은 일어나지 않게 되며, 고장이 발생한 즉시 DO 농도와 ORP 값은 급격하게 감소한다(Fig. 7). 무산소 단계에 교반기가 멈추면 활성슬러지와 유입수의 원활한 혼합이 불가능하며, 이로 인해 탈질 속도가 느려짐에 의해 ORP 값은 정상적인 경우와는 달리 즉시 감소하지 않게 됨을 관찰할 수 있다(Fig. 8). 또한 무산소 단계에 유입 펌프가 작동하지 않으면 탈질에 필요한 유기물을 공급받지 못하게 되어 탈질 반응이 저해되며, 이에 따라 DO와 ORP 프로파일은 활성슬러지의 DO 소모 반응에 의해 천천히 감소하는 패턴을 보인다(Fig. 9).

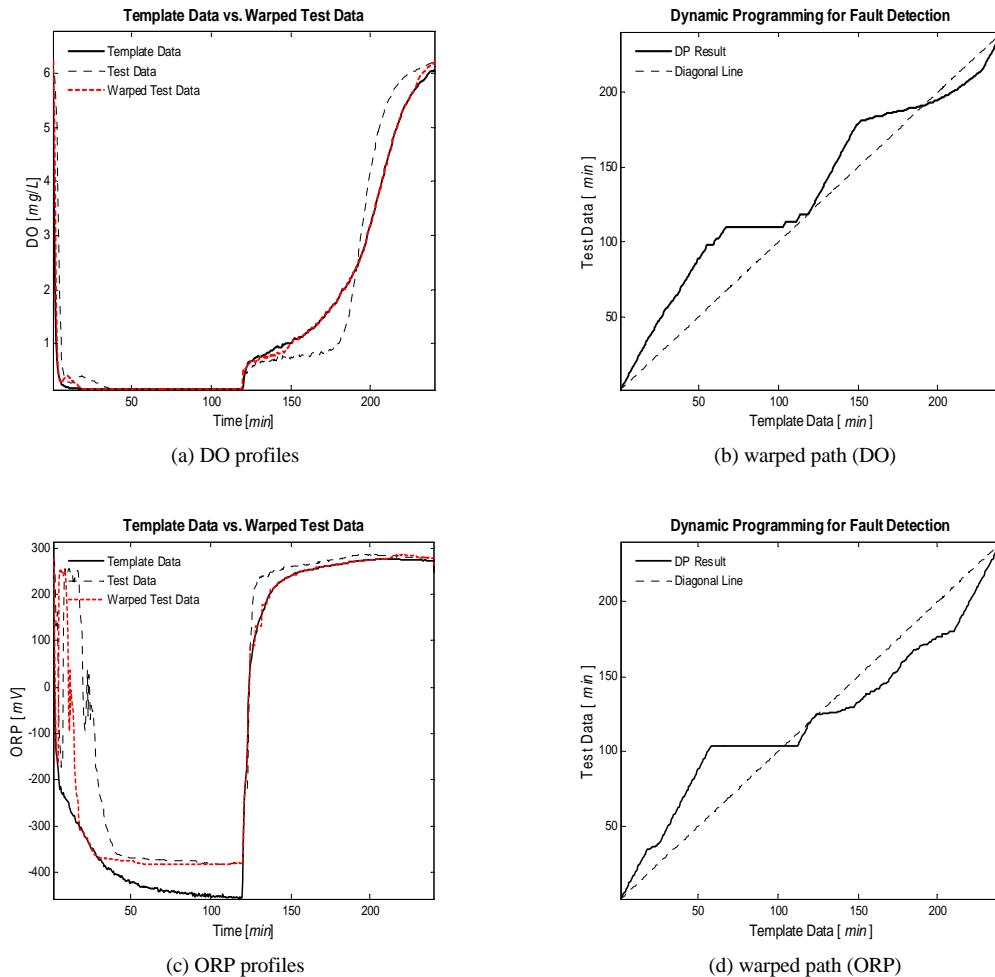


Fig. 11. DTW result of mixer fault profiles with the standard profiles.

3.3. 송풍기 고장에 대한 DTW

호기 단계에 송풍기는 탄소산화 및 질산화에 필요한 산소를 공급하는 역할을 한다. 정상적인 DO 프로파일은 산화 반응의 진행 중에는 일정한 lag time을 보이다가 질산화가 완료되면 상승하는 거동을 보이고 ORP 프로파일 또한 산화반응에 의해 상승하는 패턴을 가진다. 그러나 산소 공급을 위한 송풍기가 반응이 진행되는 도중 정지하면 DO 농도와 ORP 값은 급격히 하강하게 된다 (Fig. 7). Fig. 10은 표준 패턴에 적용시킨 DTW를 보여 준다. 큰 변화가 발생한 지점에서 와핑 되는 패턴은 큰 오차가 발생하게 되고 상이도 값(D)은 DO의 경우 327.23,

ORP의 경우 25,479로 증가하였다.

3.4. 교반기 고장에 대한 DTW

교반기는 무산소 단계에 주입되는 유입수와 활성슬러지를 적절하게 혼합시켜 탈질 반응을 원활하게 일어나게 한다. 정상적인 경우에는 유입된 원수가 교반에 의해 활성슬러지와 접촉이 증가되어 DO 소모와 탈질 반응이 빠르게 진행되고 이에 따라 DO와 ORP 값은 거의 수직적으로 하강하는 경향을 보인다. 그러나 교반기가 고장이 나고 혼합이 이루어지지 않으면 DO의 감소 속도는 낮아지게 되고 ORP는 크게 변동하며 천천히 하강한다

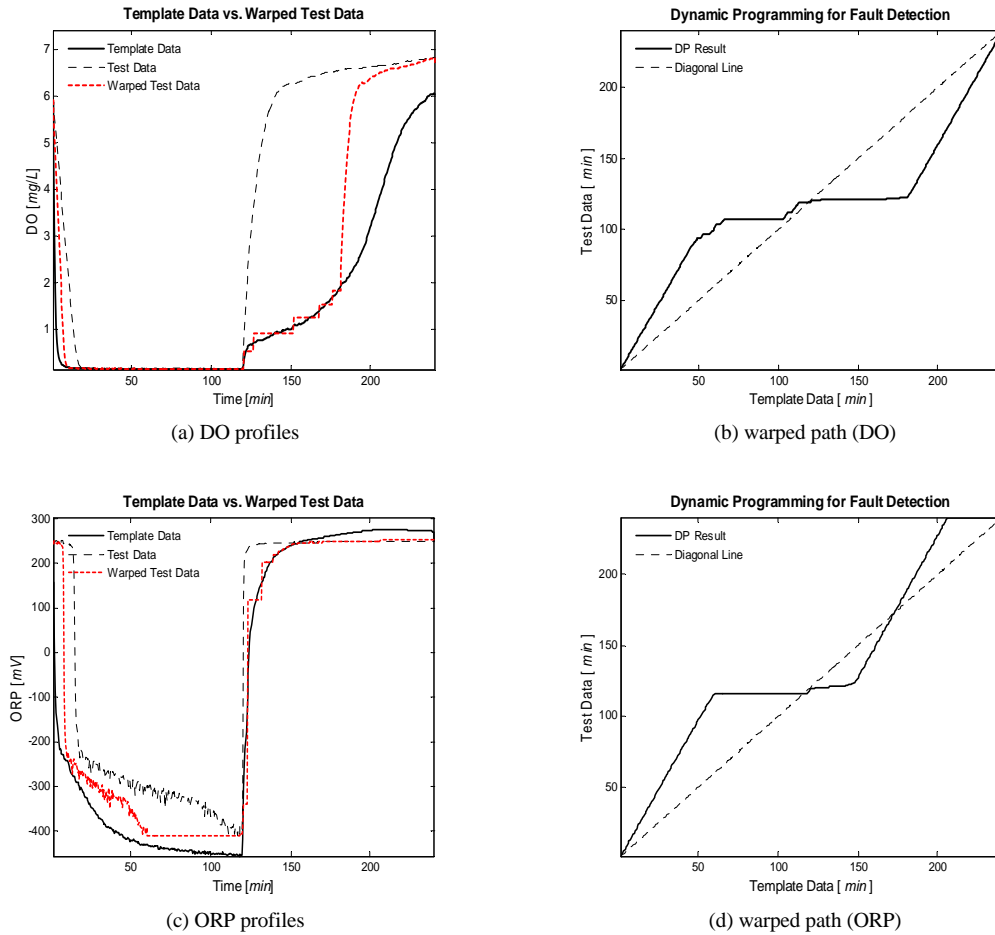


Fig. 12. DTW result of influent fault profiles with the standard profiles.

(Fig. 8). Fig. 11은 비정상 프로파일이 정상 프로파일에 외핑한 결과이다. 이로 인해서 계산된 상이도 값(D)는 DO의 경우는 298.47, ORP의 경우 20,008이었다.

3.5. 유입 펌프 고장에 대한 DTW

무산소 단계 초기에는 탈질 반응에 필요한 탄소원을 포함한 원수가 펌프에 의해 유입되어야 한다. 유입된 기

질에 포함된 유기물질을 제거하기 위해 용존 산소는 신속하게 소비되어 탈질 반응으로 진행하게 되고, 이로 인해 무산소 단계 시작 직후 DO 프로파일 및 ORP 프로파일은 수직적으로 하강하는 패턴을 보여야 한다. 그러나 펌프 고장으로 인해 원수가 유입되지 않으면 DO의 하강 속도는 느려지고 ORP는 DO 값이 0 근처로 떨어질 때까지

Table 4. Summary of the D values for faults of the equipments

D values	Blower	Mixer	Pump
DO	357.01	298.47	327.13
ORP	18,848	20,008	25,129

지 감소하지 않는다(Fig. 9). 이런 현상은 공정에서 DO 소모에 의해 제거되어야 할 기질이 없기 때문에 일어나는 일반적인 현상이다. Fig. 12는 펌프 고장의 비정상 프로파일이 표준 프로파일에 외평한 결과이다. 이로 인해서 계산된 상이도 값(D)은 DO의 경우 327.13, ORP의 경우 25,179였다.

4. 결론

본 연구에서는 연속회분식반응기의 장비고장 진단을 위하여 DTW 방법을 사용한 이상감지를 시도하였다. 고장이 존재하는 조건에서 무산소 단계와 호기 단계를 거치고 난 후 얻어지는 DO와 ORP 프로파일은 미리 준비되어 있던 표준 패턴에 외평되고 패턴의 유사성을 의미하는 D 값이 계산되었다. 그 결과로서 Table 4에 제시된 D 값은 Table 3에 제시된 D 값과는 큰 차이를 가지고 있어 DTW 방법을 이용한 장비고장 진단 알고리즘 개발의 가능성을 보여주었다. DTW 방법을 활용한 고장진단 알고리즘을 실시간으로 이용한다면, D 값이 정상 패턴의 값들과 크게 달라지면 일련의 고장 상황이 발생하였음을 감지하고 운전자에게 경고 메시지를 보낼 수 있어 이상상태의 이른 감지가 가능해진다. 더구나 개발된 알고리즘은 부하의 변동으로 인해 DO 프로파일의 지연구간이 길어지는 변화를 이상이라고 감지하지 않을 수 있어 보다 유연한 감지능을 보여주었다. 이로서 본 연구에서 제안된 장비고장진단 알고리즘은 운전자가 육안으로 프로파일을 관찰하고 경험적 지식 내에 존재하는 정상상태에서의 표준 프로파일과 비교하여 이상이 있다고 감지하는 과정을 그대로 모사할 수 있었다는 점에서 의미를 가진다. 그러나 오직 증가하는 D 값으로 어떤 유형의 고장이 발생하였는지를 감지하는 것이 불가능하므로 추가적인 연구가 필요하다. 이러한 점을 개선하기 위해서는, 빈번하게 발생하는 고장 패턴을 수집하여 각 고장유형의 기준패턴으로 설정하여 2차적인 외평을 실시함으로써 이러한 부분을 보완해야 한다.

감사의 글

본 연구는 한국연구재단(과제번호 D00114)에 의해 수행되었음.

REFERENCES

- Sakoe, H., Chiba, S., 1978, Dynamic programming algorithm optimization for spoken word recognition, *IEEE trans. on Acoustics, Speech and Signal Processing*, 26(1), 43-49.
- Sakoe, H., Isotani, R., Yoshida, K., Iso, K., Watanabe, T., 1989, Speaker-independent word recognition using dynamic programming neural networks, *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Acoustics, Speech and Signal Processing*, ICASSP, 29-32.
- Jun, B. H., Poo, K. M., Lim, J. H., Kim, J. R., Woo, H. J., Kim, C. W., 2003, External carbon feeding strategy for enhancing nitrogen removal in SBR, *Wat. Sci. Tech.*, 49(5-6), 325-331.
- Jun, B. H., 2011, Fault detection using dynamic time warping (DTW) algorithm and discriminant analysis for swine wastewater treatment, *J. Hazard. Mater.*, 185(1), 262-268.
- Olsson, G., Newell, B., 1999, *Wastewater treatment systems - modelling, diagnosis and control*, IWA publishing, UK.
- Poo, K. M., Jun, B. H., Lee, S. H., Im, J. H., Woo, H. J., Kim, C. W., 2003, Treatment of strong nitrogen swine wastewater at full-scale sequencing batch reactor, *Wat. Sci. Tech.*, 49(5-6), 315-323.
- Casarotto, S., Bianchi, A. M., Cerutti, S., Chiarenza, G. A., 2005, Dynamic time warping in the analysis of event-related potentials, *IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine*, 68-77.
- Kim, Y. J., Bae, H., Poo, K. M., Ko, J. H., Kim, C. W., Woo, H. J., 2006a, Equipment fault diagnosis system of sequencing batch reactor (SBR) using rule-based fuzzy inference and on-line sensing data, *Wat. Sci. Tech.*, 53(4-5), 383-392.
- Kim, Y. J., Bae, H., Ko, J. H., Poo, K. M., Kim, S., Woo, H. J., Kim, C. W., 2006b, Rule-based fuzzy inference system for estimating the influent COD/N ratio and ammonia load to a sequencing batch reactor, *Wat. Sci. Tech.*, 53(1), 199-207.
- Kim, Y., Bae, H., Kim, H., Shin, J., Kim, C., 2010, Settling state detection of SBR based on DO profile analysis using dynamic time warping, *Korean J. Chem. Eng.*, 27(2), 504-510.