

시계열 데이터 마이닝을 이용한 하수처리 연속 회분식 반응기 장비 진단

Defect Analysis of the SBR Wastewater Treatment Plant for Unmanned Automation Based on Time-series Data Mining

배현, 최대원, 천성표, 김성신, 김예진*

Hyeon Bae, Dae-Won Choi, Seong-Pyo Cheon, Sungshin Kim, Yejin Kim*

부산대학교 전기공학과, *부산대학교 환경공학과

요 약

본 연구는 연속 회분식 반응기(SBR) 공정에서 시계열 데이터 마이닝을 이용하여 공정에 사용된 기기의 고장 진단 알고리즘 개발에 대한 내용을 보여주고 있다. 공정에서 비정상적인 반응을 유발하는 장비 관리에 대한 연구는 폭넓게 수행되고 있지 않으므로, 이러한 장비 진단은 소규모 하·폐수처리장을 무인자동화로 통합관리에 유용하게 적용될 수 있다. 본 연구에서는 진동신호를 이용하여 무인자동화를 위해 선행되어야 하는 공정기기의 공장진단에 관한 알고리즘을 개발하였다.

Abstract

This paper describes how to diagnose SBR plant equipment using time-series data mining. It shows the equipment diagnostics based upon vibration signals that are acquired from each device for process control. Data transform techniques including two data preprocessing skills and data mining methods were employed in the data analysis. The proposed method is not only suitable for SBR equipment, but is also suitable for other industrial devices. The experimental results performed on a lab-scale SBR plant show a good equipment-management performance.

Key Words : 시계열 데이터 마이닝, SBR, 고장진단, 웨이블릿 변환, 푸리에 변환

1. 서 론

최근의 하·폐수 및 축산폐수 처리장의 대형화와 자동화에 따라 설비의 안정적 운전이 요구되고 있다[1]. 하·폐수 및 축산폐수 처리장에서 자동제어의 궁극적인 목적은 처리수의 수질 향상과 이에 따른 처리 시간의 감소 및 최적의 운전 조건을 도출하기 위해서이다. 연속 회분식 반응기(Sequencing Batch Reactor, SBR)는 다양한 원수의 성상, 독성 및 부하변동에 강하며 원수 투여량과 반응 시간의 조절이 가능한 가 효율적인 시스템이다. 반면 SBR 플랜트의 유출수에 가장 큰 교란을 야기하는 원인 중 대부분은 각종 기기 및 장비의 고장이다. 유출수에 영향을 직접적으로 미칠 수 있는 송풍기, 교반기, 펌프 등의 고장을 빠르게 감지하는 것은 SBR 플랜트의 안정적인 유출 수질을 보장하기 위해 필수적인 요소다. 대부분의 하수처리장에서 기기의 점검과 보수는 주기적인 점검에 의해 행해지기 때문에, 갑작스러운 기기의 고장을 자동으로 감지하지 못하여 유출 수질의 악화를 초래하기 마련이다.

본 연구에서는 PC기반 제어 시스템을 이용하여 산화환원 전위(ORP)와 용존산소(DO) 프로파일을 통한 상태 모니터링 및 공정 제어를 수행하고, 진동센서로부터 획득한 데이터의

진처리와 의사결정나무(decision tree)를 이용한 기기 고장 진단에 관한 연구를 보여주고 있다.

2. 연속 회분식 반응기

연속 회분식 반응기(Sequencing Batch Reactor, SBR) 공정은 미생물에 의한 생물학적 반응(anaerobic, anoxic 단계) 및 침전과 방류의 모든 단위공정이 하나의 반응조 안에서 이루어지는 공정으로 유기물과 질소, 인을 동시에 처리할 수 있는 여러 공정들 중에서 가장 간결하고 효과적인 공정이라고 할 수 있다. 또한, 생물학적 질소제거를 위한 SBR은 처리하고자 하는 폐수의 유입시간과 반응시간에 따라 공정효율이 달라진다. SBR은 무산소-호기기간이 생물학적 반응으로 폐수를 처리하는 공법이기 때문에 대부분 경험에 기초하여 운전이 이루어지고 있는 실정이다.

폐수처리 공정들 중 일반적인 방법은 연속식으로 액체의 흐름이 각각의 반응조를 통과하기 때문에 모든 반응조가 일정한 처리 수 부피를 가지고 있다. 그러나 이와는 다르게 SBR에서는 처리수의 흐름과 반응조의 부피가 미리 결정되어 있으면서 주기적인 운전 전략에 따라 변화한다. 즉, SBR은 시간에 의존하여 주기적으로 하나의 Sub-Cycle(무산소-호기공정)이 끝나면 다시 한 Cycle이 시작하는 무산소 기간에 원수가 주입되는 공정 시스템이다.

접수일자 : 2005년 4월 1일

완료일자 : 2005년 6월 29일

감사의 글 : 본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R01-2003-000-10714-0)지원으로 수행되었음.

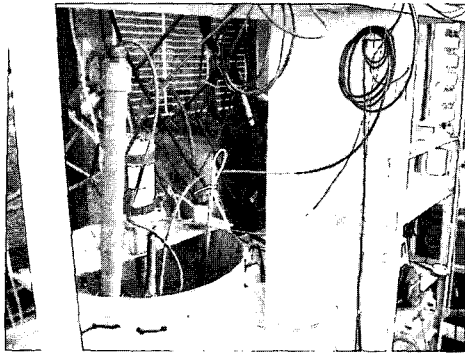


그림 1. 고장 진단을 위한 대상 SBR 플랜트.

Fig. 1. Physical SBR plant for equipment diagnosis.

3. 시계열 데이터마이닝을 이용한 고장진단

3.1 시계열 데이터마이닝

본 논문에서는 공정기에서 추출된 진동신호를 이용해서 시계열 데이터 마이닝을 적용 시켰다. 데이터분석 기법은 진동신호에 대한 푸리에 변환과 웨이블릿 변환 그리고 의사결정나무, 의사결정규칙 등과 같은 기계학습 기법 등 크게 세 그룹으로 적용하였다. 기기로부터 획득한 진동신호를 푸리에 변환한 후 에너지 값에 대한 의사결정나무 기법을 적용해서 고장진단 하였다. 푸리에 변환으로 진단이 불가능한 기기는 웨이블릿을 사용해서 분류 가능함을 연구하였다.

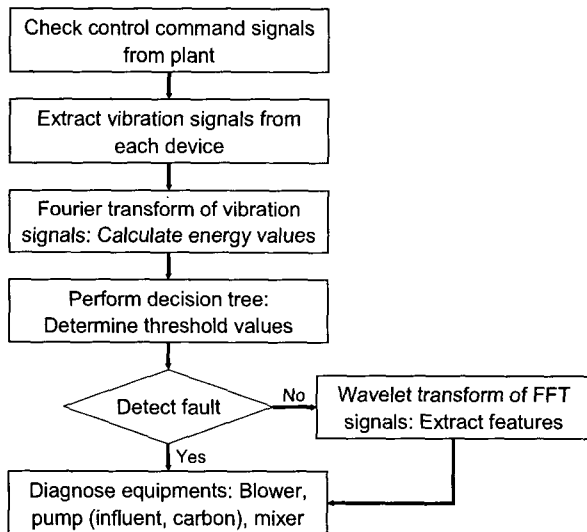


그림 2. 고장 진단 시계열 데이터 마이닝 알고리즘.

Fig 2. Time-series datamining algorithm in this study.

3.1.1 푸리에 변환

시간과 주파수영역의 신호는 푸리에 변환(Fourier transform)을 통하여 서로간의 domain으로 변환이 가능하다. 이것은 하나의 신호가 무한한 정현파들의 합으로 표현할 수 있다는 푸리에 정리를 기본으로 하여 이루어진다. 일반적으로 컴퓨터를 이용하여 계산되는 푸리에 변환 방법으로는 DFT(Discrete Fourier Transform)와 FFT (Fast Fourier Transform)가 있다. DFT는 연속적인 신호를 시간에 따라 sampling을 한 형태의 신호로 생각하여 푸리에 변환식을 그

대로 계산한다. 반면, FFT는 DFT가 계산시간이 너무 오래 걸리기 때문에 고안된 방법으로서, 샘플링된 전체 신호를 전부 변환하는 것이 아니라 적절한 알고리즘에 의해 계산에 필요한 신호를 최소화하여 고속으로 푸리에 변환을 계산한다. 변환시간의 문제로 인해 실제적으로는 거의 대부분 FFT를 사용하게 된다. 본 논문에서도 연산을 빠르게 수행하는 FFT를 사용하여 고장진단을 수행하였다.

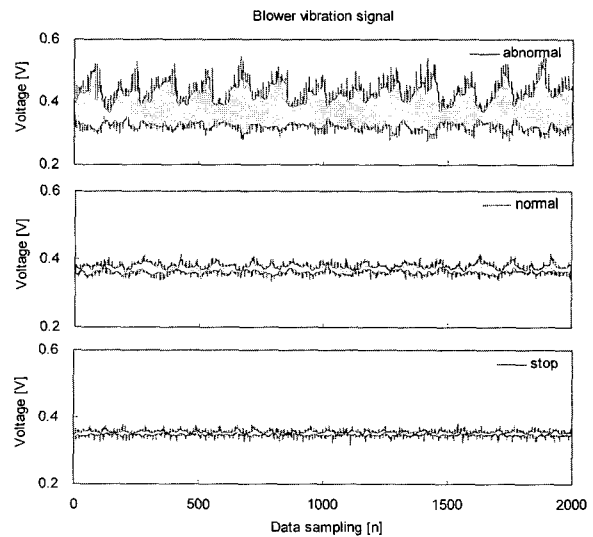
3.1.2 웨이블릿 변환

웨이블릿은 1983년 Morlet에 의해 소개된 이후 신호를 분석하고 해석하는데 효과적인 수학적 도구로 알려져, 순수수학분야부터 여러 응용분야에 이르기까지 폭 넓게 연구되어 왔다. 웨이블릿 변환은 푸리에 변환(Fourier transform)에 기반을 둔 기존의 신호처리 알고리즘에 비해 속도가 빠르고 시간과 주파수영역에서 신호의 국소화를 효율적으로 구현하기 때문에, 신호 및 영상처리 분야에 많이 응용되고 있다.

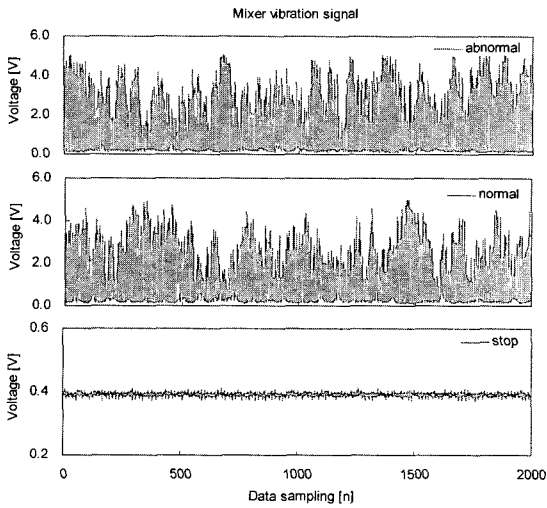
웨이블릿 변환은 기본함수로 사인, 코사인 함수뿐만 아니라 좀 더 복잡한 웨이블릿 모함수를 사용할 수 있고, 푸리에 변환에는 없는 공간에 대한 특성을 갖고 있다는 장점이 있다. 본 논문에서도 이러한 장점을 통해 푸리에 변환으로 진단하기 어려운 고장에 대하여 웨이블릿을 적절히 사용하였다.

3.2 진동신호 측정

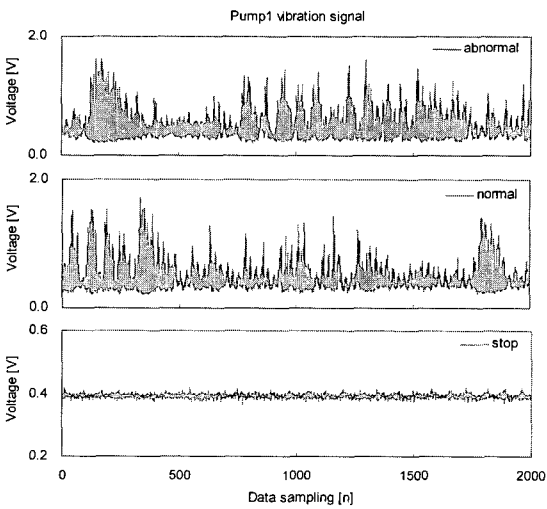
공정기기의 고장 진단에 필요한 신호는 진동센서(vibration sensor)를 공정기기 송풍기, 교반기, 원수펌프, 외부탄소펌프의 회전자 부위 케이스에 수직방향으로 부착하였다. 실험에 있어서 공정기기의 상태는 정상, 비정상, 정지 상태로 구분하였다. 정상 상태는 일반적으로 SBR의 공정에 이상상태가 발견되지 않는 공정기기의 진동신호를 취득했으며, 비정상 상태는 SBR공정에서 비정상공정이 일어나는 조건을 똑 같이 주었다. 송풍기는 관의 막힘, 교반기는 관의 불규칙적인 동작, 원수펌프 그리고 외부탄소펌프는 관의 슬러지에 의한 비정상적인 동작의 조건을 만들어 주었다. 그림 3에서 보인 송풍기, 교반기, 원수 펌프의 진동신호로 기기의 정지와 동작 상태를 확인하는 것은 가능하지만 교반기와 펌프의 경우 이상 유무를 확인하는 것은 쉽지 않다. 따라서 정확한 진단을 위하여 전처리 기법과 데이터 마이닝 기법을 적용하여 기기의 고장을 수행하여야 한다.



(a) 송풍기 진동신호.



(b) 교반기 진동신호.



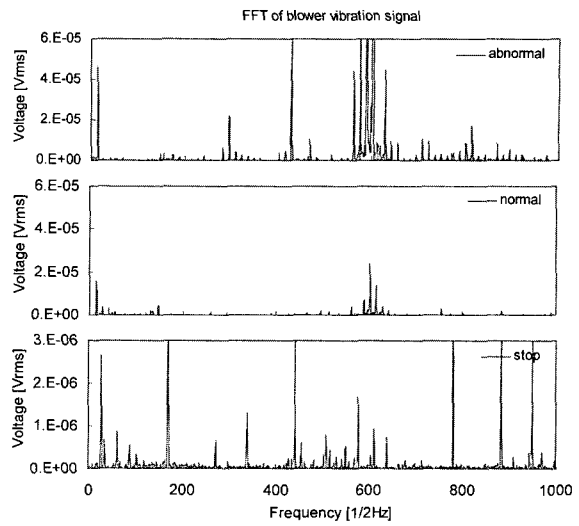
(c) 원수펌프 진동신호

그림 3. 세 가지 조건에서의 진동신호.

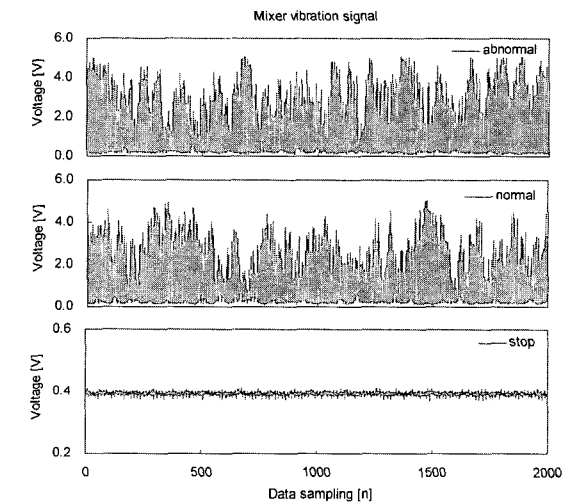
Fig. 3. Vibration signals of three equipment.

3.3 진동신호의 푸리에 변환

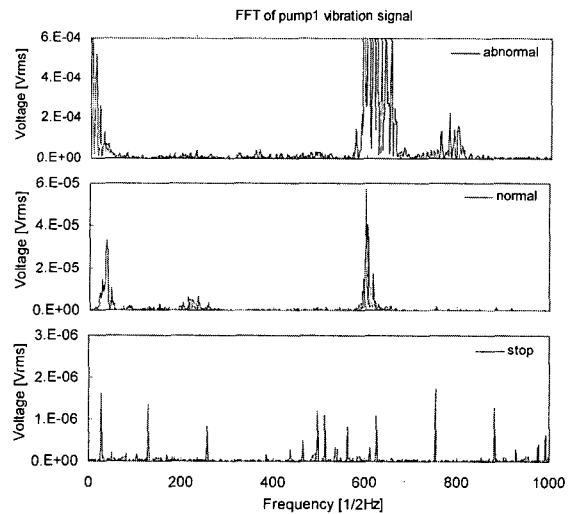
진동센서로부터 취득한 데이터로 공정기기의 이상 유무를 판단하여 진단하는 데는 많은 어려움이 따른다. 정지의 진동 값과 비정상, 그리고 정상동작의 값은 구별이 쉽게 될 수 있지만, 비정상과 정상 데이터 값은 육안으로나 에너지 값으로 구별하기가 어렵다. 물론 진동센서에서 출력되는 전압의 최대와 최소의 차이를 구하면 가능하지만 노이즈에 취약하므로 현장에서 적용할 경우 성능을 보장하기 어렵다. 결국 신호의 전처리 기법인 푸리에 변환 기법을 적용하여 노이즈에 강하고 SBR 공정기기의 상태를 적절하게 진단하는 알고리즘을 개발하였다. 푸리에 변환은 시계열 데이터마이닝에서 데이터로부터 특징점을 찾기 위한 변환 방법으로 널리 사용되고 있다. 본 논문에서도 푸리에 변환을 통하여 합성되어 나타나는 진동신호에서 정지, 비정상, 정상동작의 진동성분을 분리 할 수 있고 각 기기의 진동특성으로부터 기기의 고장진단을 수행할 수 있다. 그림 4는 송풍기, 교반기, 원수 펌프, 탄소원 펌프의 진동 신호에 대한 푸리에 변환결과 중 송풍기, 교반기, 원수 펌프의 결과를 보여주고 있다.



(a) 송풍기 진동신호의 푸리에 변환.



(b) 교반기 진동신호의 푸리에 변환.



(c) 원수 펌프 진동신호의 푸리에 변환.

그림 4. 진동신호의 푸리에 변환 결과.

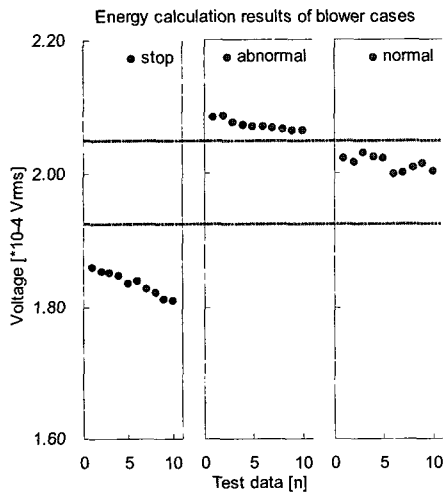
Fig. 4. FFT transformed signals of three raw signals.

3.3.1 푸리에 변환 신호로부터 에너지 값 계산

정지 FFT, 비정상 FFT, 정상 동작 FFT 모두 특정 주파수에서 특징점을 보인다는 것을 알 확인 할 수 있다. 각 기기의 이상 유무에 따라 푸리에 변환한 데이터의 에너지 값을 비교하였다. 에너지 값은 푸리에 변환한 각 데이터 값을 제곱해서 평균한 것이다. 각 SBR 공정기기의 푸리에 변환된 데이터 샘플 개수는 1000개이며, 이 값에 대한 푸리에 변환 결과의 에너지 값을 식 (1)을 통해 구하였다.

$$Energy = \frac{1}{n} \sum_{x=1}^n f^2(x) \quad (1)$$

그림 5는 송풍기의 정지, 비정상, 정상 동작에 관한 FFT 에너지 값을 비교한 것이다. 각 기기의 경우 각 상태별 에너지의 분포가 다르다는 것을 확인 할 수 있다. 그리고 그림 6에서는 원수 펌프의 규칙 도출 결과를 보여주고 있는데, 앞서 언급한 송풍기와 원수 펌프의 경우 에너지 값을 진단 특징으로 사용가능하였다. FFT의 에너지 값으로 분류가 가능한 기기는 데이터 마이닝의 기법인 결정나무(decision tree)로 규칙을 도출하여 진단하였다. 교반기의 경우에는 푸리에 변환 결과로 분류하는 것이 어렵다는 것을 의사결정나무의 에러 값으로 확인 할 수 있다[2]. 의사결정나무로 고장분류가 가능한 SBR 공정기기는 의사결정나무에서 생성된 규칙(rule)에 의해서 실시간 공정기기 진단이 가능하다.



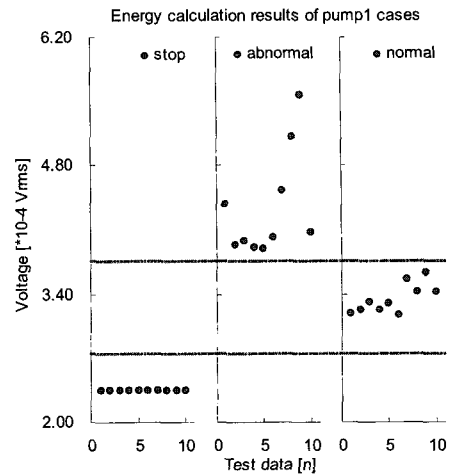
(a) 송풍기 에너지 값 분포.

Rules:

- Rule 1: (10, lift 2.7)
b-FFT-avr ≤ 0.0001859203
→ class 1 [0.917]
- Rule 2: (10, lift 2.7)
b-FFT-avr > 0.0001859203
b-FFT-avr ≤ 0.0002030861
→ class 2 [0.917]
- Rule 3: (10, lift 2.7)
b-FFT-avr > 0.0002030861
→ class 3 [0.917]

(b) 도출된 진단 규칙.

그림 5. 송풍기의 고장진단을 위한 규칙 도출.
Fig. 5. Extraction of diagnostic rules for blowers.



(a) 원수 펌프 에너지 값 분포.

Rules

- Rule 1: (10, lift 2.7)
P1-FFT-avr ≤ 0.0002559595
→ class 1 [0.917]
- Rule 2: (10, lift 2.7)
P1-FFT-avr > 0.0002781371
→ class 2 [0.900]
- Rule 3: (10, lift 2.7)
P1-FFT-avr > 0.0002559595
P1-FFT-avr ≤ 0.0002781371
→ class 3 [0.786]

(b) 도출된 진단 규칙.

그림 6. 원수 펌프의 고장진단을 위한 규칙 도출.
Fig. 6. Extraction of diagnostic rules for pumps.

3.4 푸리에 변환 신호의 웨이블릿 변환

본 논문에서 적용한 대상 기기 중 교반기의 경우 푸리에 변환으로 구별하기 어려웠다. 그림 7에서 보는 바와 같이 푸리에 변환 후 계산된 에너지 값의 분포가 분류가 어렵게 섞여 있음을 알 수 있었다. 따라서 푸리에 변환된 데이터를 웨이블릿 변환하여 적용하였다(그림 8).

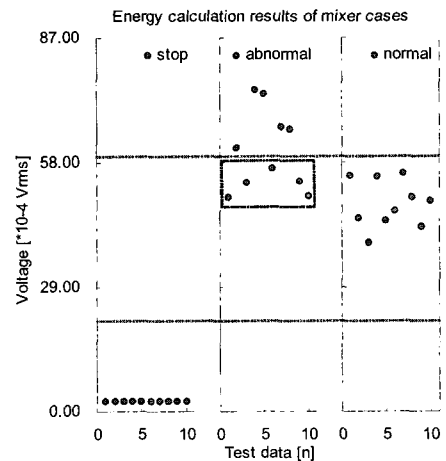


그림 7. 푸리에 변환으로 진단되지 않는 교반기 고장.
Fig. 7. No classified case for mixer signals.

FFT 에너지로 진단이 어려운 교반기의 경우 웨이블릿 모 합수로는 Coeiflet을 사용하였고[3], 10개의 detail level로 변환하였다. 레벨이 커질수록 FFT 데이터의 저주파 성분만 추출하게 된다. FFT된 데이터에서는 고주파 성분이 많이 포함되어있고 고주파 영역에서 M(믹서)의 고장 분류 가능하다[4]. 그림 9는 웨이블릿 변환 결과 중 1번째 2번째 상세계수를 보여주고, 그림 10은 추출된 에너지 값과 규칙을 보여주고 있다.

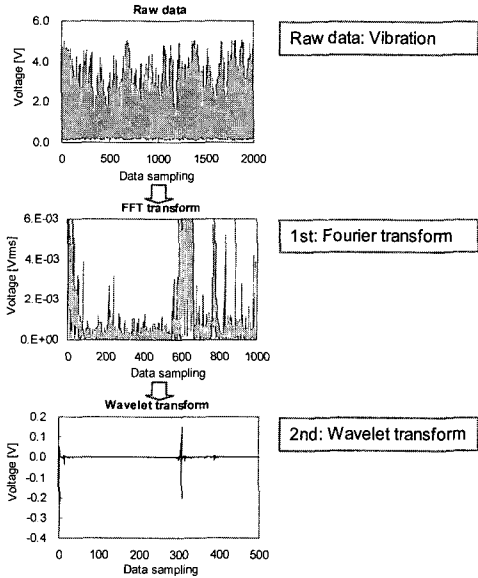
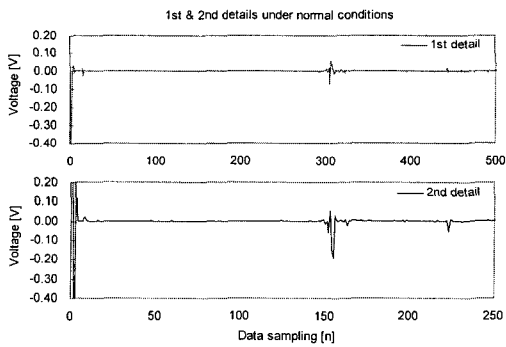
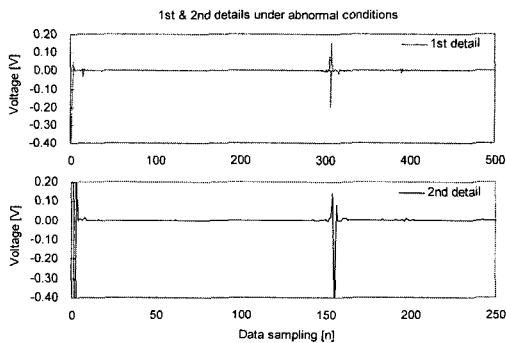


그림 8. 교반기 진단 알고리즘 적용 순서.
Fig. 8. Combination algorithm for diagnosis.

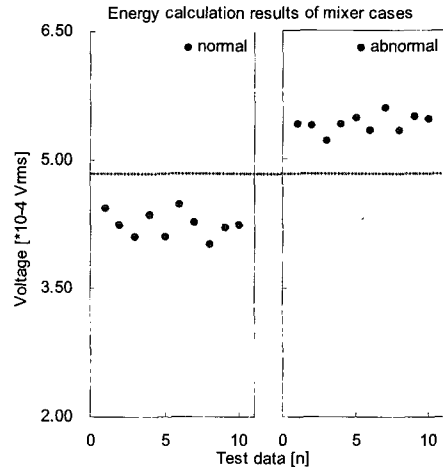


(a) 정상상태 신호의 웨이블릿 변환 결과.



(b) 고장상태 신호의 웨이블릿 변환 결과.

그림 9. 푸리에 변환된 신호의 웨이블릿 변환.
Fig. 9. Results of wavelet transform.



(a) 교반기 웨이블릿 에너지 분포

Rules

Rule 1: (10, lift 1.8)
M-Wavelet-avr>0.000446892
→ class 1 [0.917]

Rule 2: (10, lift 1.8)
M-Wavelet-avr≤0.000446892
→ class 2 [0.917]

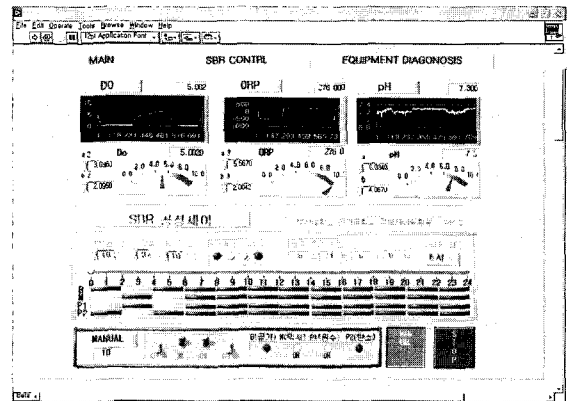
(b) 교반기 진단 규칙.

그림 10. 웨이블릿을 통한 교반기 진단 규칙 도출.
Fig. 10. Extraction of diagnostic rules for mixers.

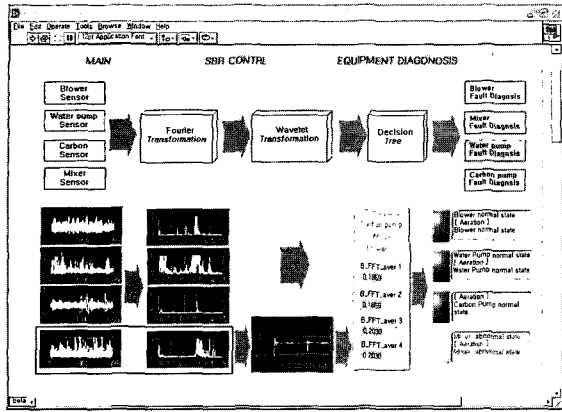
3.5 연속 회분식 반응기의 제어와 진단시스템

SBR의 원활한 운영을 위해서는 크게 두 가지 기능을 가진 시스템이 필요하다. 운영의 자동화를 위한 제어시스템과 관리에 있어서 중요한 진단시스템이 그것이다. 일반적으로 제어시스템은 널리 개발되어 사용되고 있는 반면, 진단시스템을 통합하여 적용한 사례는 많지가 않다. 본 논문에서 이러한 관리시스템의 개발을 위하여 NI(National Instrument Co.)에서 제공하는 LABView를 이용하여 어플리케이션을 구성하였다. 그래픽 기반 틀이므로 개발과 장비와의 인터페이스가 쉬운 장점이 있다.

그림 11은 최종 개발 시스템으로 (a)의 국지제어시스템과 (b)의 진단시스템을 통해 플랜트 관리의 궁극적인 목적인 무인 자동화관리가 가능할 것이다. 실제 개발된 시스템의 적용을 통해 공정의 원활한 운영과 관리가 가능함을 확인할 수 있었다.



(a) 플랜트 국지제어를 위한 제어시스템.



(b) 기기 진단을 위한 진단시스템.

그림 11. 플랜트 국지제어와 진단을 위한 관리 시스템.
Fig. 11. SBR management system based on control and diagnosis functions.

4. 결 론

본 논문에서는 연속 회분식 반응기(SBR)의 공정기에 대한 고장진단 연구이다. 공정기기 고장에 대한 확인은 DO, ORP, pH 센서의 데이터 분석만으로는 매우 어렵다. 진동 센서로부터 취득된 데이터는 전처리 기법을 적용하여 고장 분류가 가능하도록 데이터를 가공했다. 먼저, 푸리에 변환과 에너지 값에 의해서 고장 분류를 수행하였고 푸리에 변환과 에너지 값만으로는 고장 분류가 불가능한 교반기의 경우에는 진동 센서로부터 취득한 데이터를 웨이블릿으로 변환하여 고장 진단을 수행하였다.

참 고 문 헌

- [1] A. Punal, E. Roca and J. M. Lema, "An expert system for monitoring and diagnosis of anaerobic wastewater treatment plants," *Water Research*, vol. 36, no. 10, pp. 2656-2666, May. 2002.
- [2] William J. E. Potts, *Decision Tree Modeling*, SAS Institute, Inc., pp. 14-24, 1999.
- [3] W. J. Staszewski, "Wavelet Based Compression and Feature Selection for Vibration Analysis," *Journal of Sound and Vibration*, 211(5), pp.735-760, 1998.
- [4] D. Boulahbal, M. F. Golnaraghi and F. Ismail, "Amplitude and Phase Wavelet Maps for the Detection of Cracks in Gearing Systems," *Mechanical Systems and Signal Processing*, 13(3), pp.423-436, 1999.

저 자 소 개



배현(Hyeon Bae)

2001년 : 부산대학교 전기공학과 졸업 (공학석사)
2005년 : 부산대학교 전기공학과 졸업 (공학박사)

관심분야 : 지능제어, 공정자동화, 데이터 마이닝

E-mail : baehyeon@pusan.ac.kr



김성신(Sungshin Kim)

1986년 : 연세대학교 전기공학과 졸업 (공학석사)

1996년 : Georgia Institute of Technology, 전기공학과 졸업(공학박사)

1998년~현재 : 부산대학교 전기공학과 부교수

관심분야 : 지능 시스템, 데이터 마이닝

Phone : +82-51-510-2374

Fax : +82-51-513-0212

E-mail : sskim@pusan.ac.kr



최대원(Dae-Won Choi)

2002년 : 경북대학교 전자공학과 졸업 (공학사)

2005년 : 부산대학교 전기공학과 졸업 (공학 석사)

2005년~현재 : (주)백센타이어 연구소 근무

관심분야 : 지능제어, 고장진단



전성표(Seong-Pyo Cheon)

2001년 : 부산대학교 전기공학과 졸업 (공학석사)

2001년~2003년 : LG CNS 근무

2004년~ 현재 : 부산대학교 전기공학과 박사과정

관심분야 : 신경회로망, 데이터 마이닝

E-mail : buzz74@pusan.ac.kr



김예진(Yejin Kim)

2002년 : 부산대학교 환경공학과 졸업 (공학석사)

2002년~2004 : 부산대학교 환경공학과 박사수료

관심분야 : 하·폐수처리, 폐지 논리, 데이터 마이닝

E-mail : yjkim@pusan.ac.kr

Phone : +82-51-510-1694