

회분식 가스 제조 공정용 실시간 감시 시스템의 개발

이 영 학, 이 돈 용, 한 중 훈

포항공과대학교 화학공학과, 지능자동화 연구센터
(1998년 11월 6일 접수, 1998년 11월 19일 채택)

Development of a Monitoring System for Batch Gas Manufacturing Processes

Young-Hak Lee, Don-Yong Lee, Chong-hun Han

*Department of Chemical Engineering and Automation Research Center
Pohang University of Science and Technology, Pohang, Kyung-buk, 790-784, Korea
(Received 6 November 1998; Accepted 19 November 1998)*

요 약

가스 산업계에서 분산 제어 시스템 (DCS)이나 공정 정보 시스템 (PIS)이 널리 도입됨에 따라 데이터를 기반으로 하는 공정 이상 감시 기술이 많은 관심을 끌고 있다. 하지만 회분식 공정의 경우는 공정의 강한 비선형성으로 인해 이러한 기술들이 효과적으로 이용되지 못했다. Multiway principal component analysis (MPCA)가 개발됨에 따라 이러한 문제점을 해결하면서 산업계에 널리 이용되고 있는데 이 또한 다양한 정보를 해석하기 위해서는 상당한 통계적 지식이 요구되고 이 결과 운전원들이 이용하기가 어렵다는 단점이 있다. 이를 해결하기 위해서 본 논문에서는 운전원들이 쉽게 이해하고 활용할 수 있는 도구들을 제-공하는 회분식 가스 제조 공정용 실시간 감시 시스템을 소개한다. 본 시스템은 데이터의 수집부터 이상의 원인을 파악하는 진단에 이르기 까지 감시와 진단에 필요한 기능들을 모두 제공하는 총괄적인 시스템으로 개발된 시스템은 회분식 가스제조, 정밀화학제품, 의약품 등의 회분식 고부가가치 제품생산에 널리 이용될 것으로 보인다. 개발된 시스템은 산업체의 전형적인 회분식 반응기 감시를 위한 감시 시스템을 구축하여 봄으로써 검증하였으며 검증 결과 감시와 진단에 매우 효과적이라는 것을 알 수 있었다.

Abstract - As distributed control systems (DCS) and plant information systems (PIS) are introduced into gas industries, process monitoring systems based on process data have attracted significant interests. However, these technologies have not been fully due to strong nonlinearities of batch processes. The multiway principal component analysis, which has been recently developed, has solved these problems and has been widely used in the industries. However, the lack of statistical background of process operators has been one of major obstacles for maximum utilization of the technology. This paper introduces a real time monitoring system for batch gas manufacturing processes that offers a variety of tools that operators can understand and use without serious difficulties. The proposed integrated system covers the whole spectrum of monitoring and diagnosis that include data collection, monitoring and diagnosis. The developed system has been verified to be very effective for monitoring and diagnosis using its application to the construction of monitoring system for a typical industrial batch reactor.

Key Words : Multiway PCA, Monitoring and Diagnosis, ODBC technique

1. 서 론

현재 화학 공장에 분산 제어 시스템 (DCS)이

설치되고, 공정 정보 시스템 (PIS) 이 구축됨에 따라 방대한 양의 조업 데이터를 축적하고 활용할 수 있게 되었다. 이에 따라 공정의 이상을

조기에 감지하는 감시 기법들이 학계와 산업계의 많은 주목을 받게 되었고 획기적인 발전을 이룩해 왔다. 이 중에서도 통계 공정 제어 (Statistical Process Control)[5] 등의 품질 관리 기법들과 다변량 통계적 기법들은 많은 변수들이 서로 강한 상관 관계를 가질 때 이를 작은 차원으로 투영—PCA(Principal Component Analysis)[12], PLS (Partial Least Square method)[1] 등—하여 공정을 감시할 수 있는 기술 등이 주목 받고 있으며 많은 성공적인 응용 사례들이 발표되어 왔다[3,6,9,13].

최근 공정산업계에서는 다양한 제품에 대한 시장요구를 수용하기 위해 기존의 연속공정을 통한 대량 생산으로부터 회분식 공정을 통한 고부가가치의 정밀 화학 제품 생산으로 그 중심이 옮겨가고 있다. 가스 제조 공정에서도 석탄가스와 같은 원료를 일정량 취하여 가스화실에 넣어 가스화하고 가스가 발생하지 않으면 잔재(코우크스)를 제거하는 데 이러한 조작을 반복하여 원료를 가스화하는 회분식 가스제조방법이 많이 활용된다. 이러한 다품종 소량 생산 공정의 연속식 공정의 경우와는 공정 특성상 기존의 연속식 공정에 이용되어 오던 기술을 이용하는 데 많은 어려움이 있다. 그 이유는 공정이 강한 비선형성을 가지고 있고, 온라인으로 품질을 측정할 수 있는 센서들이 부족하며, 회분조업의 전체시간이 일정치 않기 때문이다. 현장에서는 회분식 조업의 단계에 따라 몇 가지 중요한 공정 변수들만을 분석하여 그 추이가 어떻게 되는지를 조업자의 경험에 의존하여 파악하고 있는 것이 현실이다. 이러한 상황에서 회분식 공정 자체의 불안정과 운전원의 부주의 등으로 인해 공정의 센서값들은 물론 제품의 품질이 큰 변동폭을 나타내면서 불규칙한 조업이 이루어지게 된다.

이러한 것들은 MacGregor 등[6,7,8]이 제안한 multiway PCA에 의한 감시 기법을 이용하면 쉽게 해결할 수 있으며 회분식 공정의 실시간 감시에 널리 적용될 수 있다. 하지만 대부분의 경우 이러한 기술은 현장 조업자들이 쉽게 활용할 수 있도록 설계된 소프트웨어가 없어 기술 전파에 어려움이 있으며, 이로 인해 스웨덴에서 개발된 Simca-P[11] 등의 해석 소프트웨어를 이용하기는 하지만 다변량 통계적 기법과 프로그래밍에 대한 상당한 양의 이론적 배경이 필요하여 산업계에서의 본격적인 활용에 큰 제약 조건으로 작용하고 있다.

본 논문에서는 회분식 공정의 상태를 실시간으로 감시하고 진단하여 품질을 관리할 수 있는 시스템을 소개하고자 한다. 본론에서는 먼저 개발된 시스템의 데이터 서버와 공정정보시스템과

의 인터페이스를 설명하고, 개발된 시스템의 전체 구조 및 기능을 설명한 후, 사례 연구를 통하여 개발된 시스템이 실제 공정의 감시 및 진단에 어떻게 활용되는가를 보여 주고자 한다.

2. 개발된 시스템의 구조와 기능

본 연구에서 개발된 시스템의 구조는 그 기능에 따라 PIS(Plant Information System), 데이터 전처리 시스템(Data Preprocessing System), 공정 감시 시스템(Monitoring System), 그리고 진단 시스템(Diagnosis System) 모듈로 구성되어 있으며 전체 구조는 그림 1과 같이 표현될 수 있다. 본 연구에 필요한 데이터를 도입하기 위해서 현장에서 많이 사용되고 있는 Honeywell사의 PHD 소프트웨어와 ODBC 기술을 이용하였다.

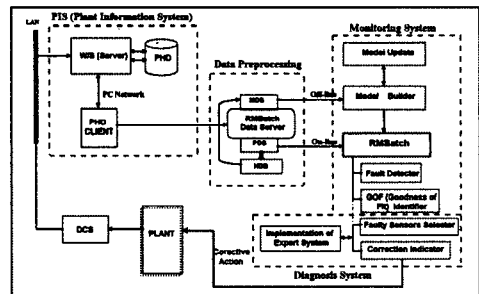


Fig 1. Overall architecture of system

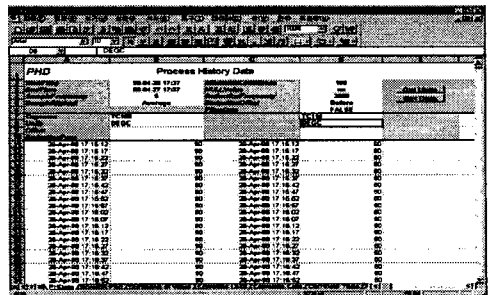


Fig 2. On-line data collection from PIS

2.1. PIS 모듈

PIS(Plant Information System)는 DCS (Distributed Control System)로부터 운전자료를 실시간으로 자동 수집하여 생산, 조업, 운전관리에 필요한 정보를 실시간으로 제공해주고, 이력 정보(Historical Data)를 압축 보관하여 항상 검색 및 실시간 분석을 가능하게 하는 공정 정보 시스템이다. 이러한 기능들은 PHD(Process History Database)라는 소프트웨어를 통해 구현

되며 네트워크를 통해 PHD client, 즉 일반 컴퓨터에까지 실시간으로 공정 데이터를 제공한다. 얻어지는 데이터의 형식은 EXCEL 프로그램에서 Visual Basic을 통해 구현될 수 있다. PHD로부터 얻어진 실시간 데이터를 Active X를 이용하여 window화면은 그림 2와 같다. PHD에서 실시간으로 얻어진 데이터를 직접 불러들여서 우리가 원하는 작업을 할 수 있다. 즉, 시스템내의 데이터 서버에 이러한 공정 데이터가 제공된다.

2.2. 데이터 전처리 시스템

데이터 전처리 시스템은 PHD로부터 얻은 데이터를 센터링이나 스케일링 등을 통해 처리하여 모델링을 위한 데이터베이스(MDB) 및 실시간 감시를 위한 데이터베이스(PDB)를 생성시키는 역할을 수행한다. 모델링을 위해 필요한 데이터, 실시간 감시를 위한 데이터, 그 외에 기타 데이터는 이력데이터베이스(HDB)에 모두 저장되게 된다. 이 시스템을 거침으로써 실제로 공정 감시 모델 구성에 이용되는 데이터와 실시간 감시 및 진단 데이터가 생성된다.

분류된 데이터는 PHD의 드라이브 매니저와 시스템의 데이터 서버사이를 연결시켜주는 ODBC(Open DataBase Connectivity) 기술에 의해 처리되고, PDB와 MDB는 각각 실시간 공정 감시 및 진단 모듈과 모델 구성을 위한 부분으로 도입된다.

일반적으로 데이터베이스에 저장된 정보를 응용프로그램에 그 데이터를 가져오기위해 각 제조사 마다 별개의 프로그램을 마련하고 하고 있다. 너무나 많은 application 방법, 데이터 프로토콜 및 DBMS(database management system)가 존재하므로 이러한 상이한 기술들을 통합하여 사용할 수 있도록 하는 표준 인터페이스로 ODBC 기술이 도입되었다.

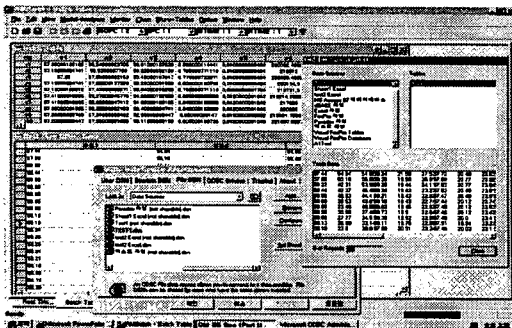


Fig 3. Data Processing

그림 3은 데이터 서버에서 데이터를 관리해주는

는 메뉴들이고, 온라인으로 도입되는 데이터를 보여주고 있다. ODBC Data Source Administrator는 데이터의 형식이나 데이터 소스 이름을 결정해주고 온라인으로 도입되는지의 여부를 확인하는 DB sea window를 보여준다.

2.3. 공정 감시 시스템 모듈

공정 감시 시스템은 크게 모델 구성이나 모델 개선 및 오프 라인 감시를 수행하기 위한 해석 부분과 실시간 감시를 할 수 있는 감시 부분으로 나눌 수 있다. 해석 부분에서는 MPCA모델의 구성하고, MDB(혹은 HDB)를 분석함으로써 정상조업(normal operation) 경향을 분석하거나, 조업개선 혹은 오프 라인으로 공정을 감시하기 위한 도구(Score charts, SPE chart)를 제공한다. 감시 부분에서는 실시간으로 들어오는 데이터를 이상 감지기(Fault Detector: T2 혹은 Score Charts)로 분석하여 회분식 공정의 현재 조업 상태의 정상 여부를 판단할 수 있다. 특히 스코어 차트들은 서로 직교하는 t-score벡터들의 추이를 각 PC에 대해 보여줌으로써 변수들을 몇 개의 축소변수로 묶어서 공정 상태를 감시할 수 있는 틀을 제공하고 있다. 모든 PC에 대해서 통합된 형태로 감시할 수 있는 것이 T2 차트가 된다. 이를 제공하는 모델의 "GOODNESS OF FIT(GOF)"현재 도입되는 데이터가 구성한 모델을 통해서 감시하는 것이 적절한지에 대한 판단을 제공한다는 함께 보여주는 GOF 확인기(SPE Chart)가 있다.

2.4. 진단 시스템 모듈

진단 시스템은 공정 감시 시스템과 결합되어 있어 이상 감지거나 GOF 확인기에서 감지된 이상현상 (fault)이 어떤 센서로부터 발생하였는지를 확률적으로 높은 것에서부터 낮은 것까지 온라인으로 보여주는 이상 센서 선택기 (Faulty Sensor Selector)와 그 이상에 대한 보정 작업을 제공하는 수정 지시기 (Correction Indicator)로 구성된다. 특히 이 진단 시스템은 사용 횟수가 증가하면 할수록 공정 조업 지식이 축적되므로 시간이 지남에 따라 보다 정확한 진단 시스템으로 발전하게 된다.

3. 사례 연구

3.1. 대상 공정과 데이터 처리

본 사례연구의 대상 공정은 전형적인 회분식 반응기이며 측정 변수 11개, 한 회분동안 241개의 측정값들이 저장된다. 측정 변수들은 표 1에 나타내었으며, 대략적인 공정도는 그림 4와 같

다. 이의 구현을 통해 실제 가스제조공정의 감시 시스템을 형성할 수 있는 가능성을 타진해 보았다.

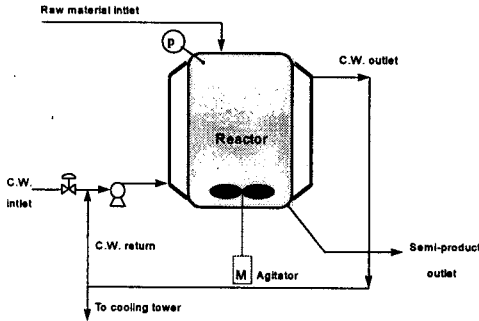


Fig 4. Schematic diagram of typical batch reactor

운전 사이클은 반응기 내부의 코팅과 Cleaning으로부터 시작된다. 이 과정이 끝나면 반응기 내부 온도를 반응이 일어날 수 있는 적정 수준까지 올려준 후 반응물과 기타 물질을 주입한다. 좀더 가열시키면 반응이 일어나게 되며 반응시간은 6.5시간 정도이다. 반응이 끝났다고 판단되면 반응기로부터 제품을 꺼낸다.

위 공정은 스티프, 냉각수, 급냉수의 공급량의 3개의 조작변수를 갖는다. 스티프는 반응이 일어나기 전에 반응온도를 최소의 시간에 원하는 수준까지 올려서 반응물질을 가열시켜주고, 냉각수는 열을 제거해주며, 급냉수는 열을 제거시켜줌과 동시에 반응물질의 부피를 일정하게 유지시켜준다. 또한 스티프에 의한 가열작업 후에 반응온도와 공정의 외란을 제거해 주기 위해 캐스케이드 제어가 이용된다.

Table 1. Process measurements

| No | Measurement | No | Measurement |
|----|---------------------|----|-------------------|
| 1 | Reactor temp. | 6 | Adding water heat |
| 2 | Jacket inlet Temp. | 7 | Jacket heat |
| 3 | Jacket outlet temp. | 8 | Agitator heat |
| 4 | Reactor pressure | 9 | Sealing heat |
| 5 | Conversion | 10 | Condenser heat |
| | | 11 | Agitator ampere |

모델을 구성하기 위한 데이터는 2111241의 형태를 가지고 있으며 21개의 회분에 대해 11개의 변수, 241 시간 간격을 가진다. 이러한 모델 데이터는 모델의 비선형성을 제거하기 위해 212651의 데이터 형태로 전환되어 시스템의 데

이터 서버를 통해 시스템으로 도입된다. 온라인으로 도입되는 11개의 변수에 대한 데이터는 각 시간에 따라 실시간 감시 및 진단이 이루어진다.

3.2. 모델 구성 및 분석

시스템의 모델 구성기를 이용하여 위에서 설명한 회분식 반응기에 대해 공정감시 시스템을 MPCA 모델링기법을 이용하여 구축했다. 모델링에 이용한 데이터는 21개의 정상 회분이며, 각 회분은 11개의 변수(열)와 241번의 측정값(행)으로 이루어진 데이터 행렬이다. unfolding 한 행렬에 대해 3개의 PC를 구했으며, 각 PC가 모델을 설명하는 정도(R2X)와 고유벡터 값을 표2에 정리하였다.

Table 2. Model Overview

| # ofPc | R2X | Eigenvalue |
|--------|-------|------------|
| 1 | 0.365 | 7.669 |
| 2 | 0.581 | 4.537 |
| 3 | 0.710 | 2.707 |

구성한 모델은 여러 가지 차트들에 의해 많은 정보들을 가지고 있다. t1-t2 Scatter Plot(a), Times Variation Plot(b), Batches Variation Plot(c), Variables Variation Plot(d) 등의 차트들이 이에 해당하며 그림 5에 이 차트들을 나타냈다. 이는 공정감시 시스템 모듈의 해석부를 위해 제공되는 차트들이다.

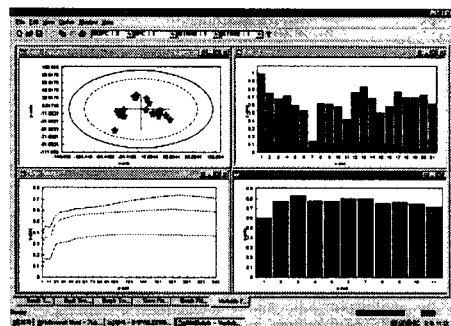


Fig 5. Charts for analysis of model

먼저 그림 5의 (a)를 통해서는 축소공간에서 회분들의 추이를 볼 수 있다. 즉 각 회분에 대해 한 t-score 값이 생기므로 각 회분의 유사성이나 모델에서 크게 벗어나는 회분 등을 알 수 있다. 특히 같은 모드를 갖는 그룹들을 나눌 수 있는데 각 모드를 분석하여 좋은 모드와 그렇지 못한 모드를 선정한 후 각 PC에 대한 contribution plot을 통해 각 모드의 특성을 측정

변수들로 나타낼 수 있으며 (a)의 경우 아래 모드보다 위의 모드가 더 좋을 경우 아래 것을 위로 이동시키기 위한 적절한 변수들의 조작 방향을 제시할 수 가 있다. (b)를 보면 12번째 회분부터 17번째 회분까지 주로 두번째 PC에 의해 주로 영향을 받으므로 두번째 PC에 영향을 주는 변수들이 9,10,11 번째 변수들입을 (d)를 통해 알 수 있다. 표1에서 보면 대부분이 열량과 관계되는 변수들이다. 또한 (a)에서 상부의 모드는 2,3,4번째 변수들이 주영향을 끼치고 있다. 결국 2,3,4,변수와 9,10,11변수들의 상호작용을 통해 하단의 모드르 상단의 모드로 이동시킬 수가 있다. 이런 분석은 공정 조업 개선을 위한 기본적인 방법으로 이용될 수 있다. (c)의 경우는 각 시간대와 그 시간대에서 PC의 영향을 보여주고 있으며, 반응 초기에 모델이 잘 설명하지 못하고 있다. 이런 경우는 나중에 다룰 GOF 확인기(SPE 차트)를 통해 보완된다.

3.3. 공정 감시 및 진단

모델링이 끝나고 나면 다변량 SPC 감시 차트를 이용해 이상을 감시하게 되며 이상 감지기와 GOF 확인기를 통해 이루어진다. k시간까지 얻어진 데이터를 바탕으로 앞으로 이 회분이 정상적인 조업으로 끝날 수 있는 지를 판단하는 작업은 다음의 두 단계로 이루어진다. 첫째, 한 회분이 끝나는 시간까지 각 센서 값들을 예측한다. 둘째, 예측된 한 행의 데이터를 이미 구성된 모델에 투영하여 그 모델에 의해 구해진 한계 값들과 비교해 현재 조업 중 어떤 시간에 이상이 발생했는지를, 또한 이 회분이 끝까지 정상적인 상태를 유지할 것인지를 판단한다. 특정 시간에서의 이상 유무는 GOF 확인기를 통해서, 이 회분을 재운전해야 할 지는 이상 감지기를 이용해 결정하게 된다. 결국 이 시스템을 이용함으로써 비정상적인 거동을 보이는 조업뿐만 아니라 조업자들의 경험으로는 판단하지 못하는 조업 조건의 미묘한 이상도 조기에 감시할 수 있게 된다.

실시간으로 공정을 감시하면서 측정값들에 대한 각 변수의 실시간 기여도(contribution)를 통해 공정의 어느 부분이 현재 불안정한지를 파악할 수 가 있으며, 발생한 공정의 이상에 대한 진단을 수행할 수 있다. 각 기여도는 모델을 이용해 95% 및 99% 신뢰구간을 통해 정상 영역을 벗어나는 변수를 파악할 수 있다. 실제 시스템에서는 정상은 파란색, 95%신뢰구간을 벗어나면 노란색, 99% 신뢰구간을 벗어나면 빨간색으로 변하게 된다. 즉 이러한 기여도가 이상센서의 선택기 기능을 수행하고 있다. 이상이 발생했을 때의 기여도를 시간에 따라 수집하여 그

이상에 대한 fault library에 저장한다. 도입되는 측정값들의 실시간 진단을 위해 미리 저장되어 있는 fault library의 이상과 패턴 매칭함으로써 현재 불안정한 공정상태를 개선하기 위한 보정 작업을 할 수 있다. 공정에 이 시스템이 적용되어 진행하면서 전문가 시스템의 형태로 이상들을 미연에 방지할 수 있게된다.

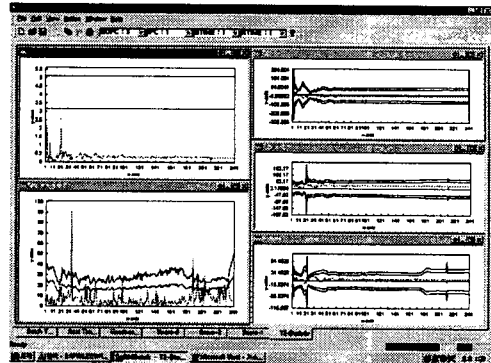


Fig 6. Monitoring charts for a normal batch

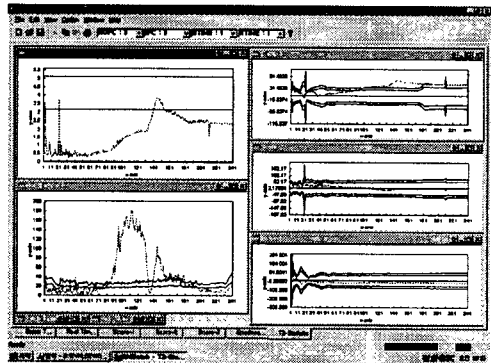


Fig 7. Monitoring charts for a abnormal batch

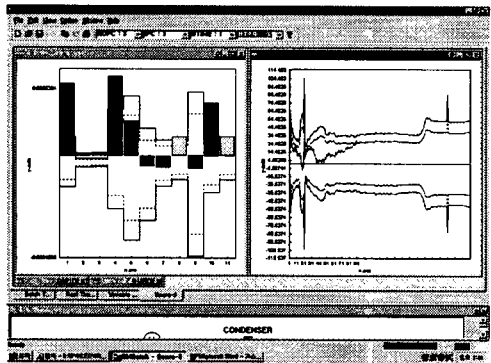


Fig 8. Contribution charts for detected faults

그림 6은 한 회분의 시간에 따른 이상 감시기

(T2-statistic) 및 세부 이상감시기(score 값)와 GOF 확인기(SPE값)를 보여 주고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 정상 조업을 하는 회분임을 알 수 있다. 또한 그림 7에서는 비정상인 회분이 한계값을 벗어남으로써 이상이 감지되는 것을 볼 수 있다. 특히 세 번째 score값이 정해놓은 제어 한계값을 넘어서는 것을 볼 수 있다.

세 번째 score 차트에서 감지된 이상에 대한 각 변수의 기여도는 그림 8에 나타내었다. 반응기 온도, 압력, 용축기 열량의 변수들이 이러한 이상의 원인을 제공하고 있음을 감지할 수 있고, 공정에 대한 지식베이스와 연결하여 적절한 action을 제공하여 불안정한 상태를 제거하게 된다.

4. 결 론

본 연구에서는 다변량 통계적 분석 방법에 기반한 실시간 회분식 공정 감시 시스템의 prototype을 개발하였다. 개발된 시스템을 이용하여 회분식 고분자 반응기의 실시간 감시 시스템을 구축하는 데 사용하여 보았으며 그 결과 단기간에 효과적인 감시 시스템을 구축할 수 있었다. 사례 연구 결과 본 시스템은 실제 공장의 조업자들이 공정 조업상의 많은 이상들을 신속하고 정확하게 감지할 수 있도록 하여 조업상의 문제를 대처하는데 큰 도움이 될 것으로 판단되었다. 현재 GUI환경과 데이터베이스와의 인터페이스를 개발 중에 있으며 추후 알고리즘 개선과 많은 사례 연구 등을 통하여 시스템을 지속적으로 보완 개선하여 보다 정확하고 신속한 회분식 공정의 실시간 감시 시스템으로 개발할 계획이다. 개발된 시스템은 공정 조업 데이터들이 축적됨에 따라 계속 기능이 향상될 수 있는 시스템으로 감시뿐만 아니라 진단, 그리고 축적된 조업 데이터들의 해석을 통하여 공정 조업의 개선까지 할 수 있는 기능을 제공할 것이다.

감 사

본 연구를 위해 포항공대 공정산업의 지능자동화 연구센터를 통해 재정적 지원을 해주신 한국과학재단에 감사를 드립니다.

참고문헌

1. Geladi, P. and B. Kowalsky, Partial Least Square Regression: A Tutorial, *Anal. Chem. Acta*, **185**, 1-17(1986)
2. Johnson, R.A. and Wichern, D.W., *Applied*

- Multivariate Statistical Analysis*, 3rd ed., Prentice Hall(1992).
3. Kourti, T.P. Nomikos and J.F. MacGregor, Analysis, monitoring and fault diagnosis of batch processes using multiblock and multiway PLS, *J. Proc. Cont.* **5**, 4, 277-284(1995).
4. Kosanovich, K. A., K. S. Dahl and M. J. Pivoso, Improved Process Understanding Using Multiway Principal Component, *Ind. Eng. Chem. Res.* **35**, 138-146(1996).
5. MacGregor, J.F. Statistical Process Control for the Process Industries, The 4th International Symp. on PSE, Montebello, Quebec, Canada August 5-9(1991).
6. Nomikos, P. and J.F. MacGregor, Mutivariate SPC Charts for Monitoring Batch Processes, *Technometrics*, **37**, 1, 41-59(1995).
7. Nomikos, P. and J.F. MacGregor, "Monitoring Batch Process Using Multiway Principal Component Analysis, *AIChE*, **40**, 8, 1361-1375(1994).
8. Nomikos, P. and J.F. MacGregor, "Multi-way partial least squares in monitoring batch processes, *Chem and Int. Lab. Sys.*, **30**, 97-108(1995).
9. Santen, A., G. Koot and L. Zullo, Statistical Data Analysis of a Chemical Plant, *PSE97-ESCAPE-7, Suppl.*, **21**, S1123-1128(1997).
10. Shin, D. and V. Venkatasubramanian, "Intelligent Tutoring System Framework For Operator Training for Diagnostic problem Solving", Symp. on Comp. Pro. Eng.-6, *Comp. Chem Eng.*, s1365-s1370(1996).
11. Simca-p 3.01 1996, Umetri AB, P.O. Box 7960, 90719 Umea, Sweden.
12. Wold, S., K. Esbensen, and P. Geladi, Principal Component Analysis, *Chem and Int. Lab. Sys.*, **2**, 37-52(1987).
13. Zhang, J., Martin, E.B. and Morris, A.J., "Fault detection and diagnosis using mutivariate statistical techniques", *Trans IChemE*, **74**, A,89-96(1996).