

연속회분슬러지반응기(SBR)의 공정 모니터링 및 제어 Part. I

(Integration of process monitoring and supervisory control of SBR process)

유창규

화학산업체 뿐만 아니라 바이오, 제약, 반도체 등의 산업체에 사용되는 회분식 공정은 다품종 소량생산 공정이고 고부가가치 제품생산에 적합하기 때문에 산업계에서 중요한 역할을 담당해왔다. 회분식 공정은 원료를 반응기에 주입하는 단계와 시간에 따라 변하는 온도, 압력, 교반, 유량 등을 제어하면서 공정이 진행되는 단계, 마지막으로 일정 전환율에서 반응기로부터 제품을 뽑아내는 단계로 이루어져 있다. 일반적으로 회분식 공정은 배치마다 공정변수의 변화가 생기는데 이는 주로 평균추이를 벗어나는 변수들의 움직임, 원료 주입상의 에러, 불순물로 인해 생기는 외란 등으로 일어난다. 회분식 작업 중에 일어나는 이상 현상들은 한 배치 또는 일련의 여러 배치들에서 나오는 제품의 질을 크게 떨어뜨린다. 그럼에도 불구하고, 아직까지 대부분의 실제 산업체 현장에서는 한 회분 공정이 끝나면 제품의 품질을 따로 측정하여 그 공정이 잘 이뤄졌는지만 판단하는 오프라인 형식의 모니터링이 적용되고 있다. 따라서 제품의 품질이 나쁘게 나왔을 때 언제 어디에서 무엇 때문에 이상 현상이 일어났는지 판단할 수 있는 방법이 없기에 다음의 회분 작업에서도 이상현상을 감지하지 못한 채 품질이 크게 떨어지는 제품을 생산하는 경우가 많다. 이에 회분식 공정이 끝나기 전에 이상현상을 감지하고 이를 제거할 수 있는 온라인 형식의 모니터링 및 진단 방법이 절실히 요구되고 있다.

최근 폐수속의 유기물, 질소, 인 등의 영양염류가 과다배출되어 호수나 하천 등의 부영양화가 심각한 실정이다. 이러한 질소나 인을 생물학적으로 제거하는 방법 중의 하나가 연속회분슬러지공정(SBR)이다. SBR은 유기물은 물론 질소와 인을 효과

적으로 동시에 제거할 수 있다는 점에서 크게 주목을 받고 있다. SBR은 1개의 회분조에 반응조와 침전지의 기능을 갖게하여 반응과 혼합액의 침전, 상징수 배수, 슬러지 배출공정을 단일조내에서 처리하는 방식이다. 반응이 회분식으로 이루어 지므로 원수의 지속적인 유입을 위하여 반응조는 대부분의 경우 몇 개의 SBR을 병렬로 배열하여 운전할 수 있다. 1주기는 유입, 반응, 침전, 처리수 배출 및 슬러지 배출등 총 5단계로 이루어진다. 이러한 SBR 시스템은 fill-and-draw방식의 연속회분활성슬러지 공정으로 불리어지며 1980년초에 미국에서 2차처리를 위한 방법으로 다수 사용되어 왔다. 일찍부터 이론적인 각광을 받아 왔으며 최근 자동제어를 위한 이론 및 장비의 개발로 전 세계적으로 그 사용이 증가되고 있는 추세이다. 국내에서도 다수의 폐수처리장에서 하. 폐수의 2차처리를 위하여 SBR 공정이 설계, 시공 및 운전되고 있다. 그러나 생물학적 회분식 공정인 SBR의 경우 강한 비선형성, 미생물의 다양성, 시변성, 다양한 크기의 동특성, 실시간 측정의 어려움, 많은 외란 입력의 변화 같은 독특한 특성 때문에 불안정한 조업이 자주 발생하며 이로 인해 일년에 1-2회 정도는 반응기내의 미생물 유실이 발생한다. 이러한 독특한 특성때문에 SBR공정은 실시간 제어 및 감시가 어려워서 대부분 운전자의 경험에 의존하는 단점을 가지고 있다. 따라서 이러한 SBR 회분식 공정이 끝나기 전에 이상현상을 감지하고 이를 제거할 수 있는 온라인 방식의 통합 공정 모니터링 및 제어 기술이 절실히 요구되고 있다.

최근에 들어서야 데이터 투영법을 이용한 온라인 형식의 회분식 공정 모니터링 기술이 개발되었다. 회분식 공정의 다변량 통계 투영 방법은 데이터를 압축하여 저차원 공간을 형성하고 이에 데이터를 투영하여 정보를 도출하는 방법이다. Nomikos와 Macgregor(1994)는 측정된 공정 변수들을 이용한 회분식 공정 감시를 위해 다차원 주 성분 분석(Multiway Principal Component Analysis)에 기반한 모니터링 방법을 처음으로 제시하였다. 그 후로 비선형 주성분 분석, 동적 주성분 분석 등 여러 다양한

주성분 분석을 이용한 회분식 공정이 개발되어 왔고 실제 산업체에 적용하여 성공한 사례도 나오고 있다. Nomikos와 Macgregor가 제안한 다차원 주성분 분석은 그림 1의 approach A에서 보듯이 3차원 배열의 회분식 데이터 $X(I \times J \times K)$ 를 시간에 따라 잘라내어서 배치들과 변수의 데이터($I \times J$)를 시간에 따라 옆으로 2차원적으로 재배열하여 이 데이터($I \times KJ$)에 주성분 분석을 적용한다. 재배열한 2차원 데이터에서 열(column)의 평균들을 빼면 평균추이를 빼는 것과 같기 때문에 비선형적인 공정데이터의 성격을 미리 어느 정도 제거할 수 있다. 주성분 분석을 통해 나오는 스코어 벡터는 각 회분의 정보를 축약한 채로 가지게 되며 로딩 벡터는 시간에 따른 변수의 관계 정보를 축약한 채로 가지게 된다. 하지만 이 방법은 온라인 모니터링에 적용 시 몇 가지 단점을 가지고 있다. 우선 재배열된 테스트 데이터의 길이가 모델을 구성할 때 구한 로딩 벡터의 길이와 같아야지만 투영된 스코어 값을 구하게 되는데 회분 시작부터 현재 시간까지의 데이터만 있기 때문에 이를 적용할 수 없으므로 회분이 끝날 때까지의 변수들의 값을 예측하여 계산을 해야 하므로 정확한 스코어 값을 구할 수 없다. 또한 각 회분의 시간이 같아야 하는데 실제의 경우 각 회분마다 공정 시간이 다르므로 이를 융합할 수 있는 방법이 따로 필요하게 된다. 이런 단점을 보완할 수 있는 재배열 방법은 그림 1의 Approach B의 경우가 되겠다. 시간에 따라 잘라내어서 배치들과 변수의 데이터($I \times J$)를 시간에 따라 아래로 2차원적으로 재배열하여 이 데이터($IK \times J$)에 주성분 분석을 적용한다. 이 경우는 온라인 모니터링 적용 시 회분이 끝날 때까지의 값들을 예측할 필요가 없으며 각 회분의 시간이 달라도 된다. 하지만 이 방법으로 재배열한 뒤 열(column)의 평균을 뺀다 해도 평균추이를 빼는 것이 아니라 각 배치 및 시간에 따른 전체 평균을 빼게 되어 비선형적 성격의 데이터를 없앨 수 없다. 게다가 로딩 벡터는 시간에 따른 변수의 관계를 축약하는 게 아니라 전체 시간동안 변수의 평균관계를 축약하여 나타내기 때문에 시간에 따른 변수 관계의 변화를 제대로 파악할 수 없는 문제점이 생길 수

있다.

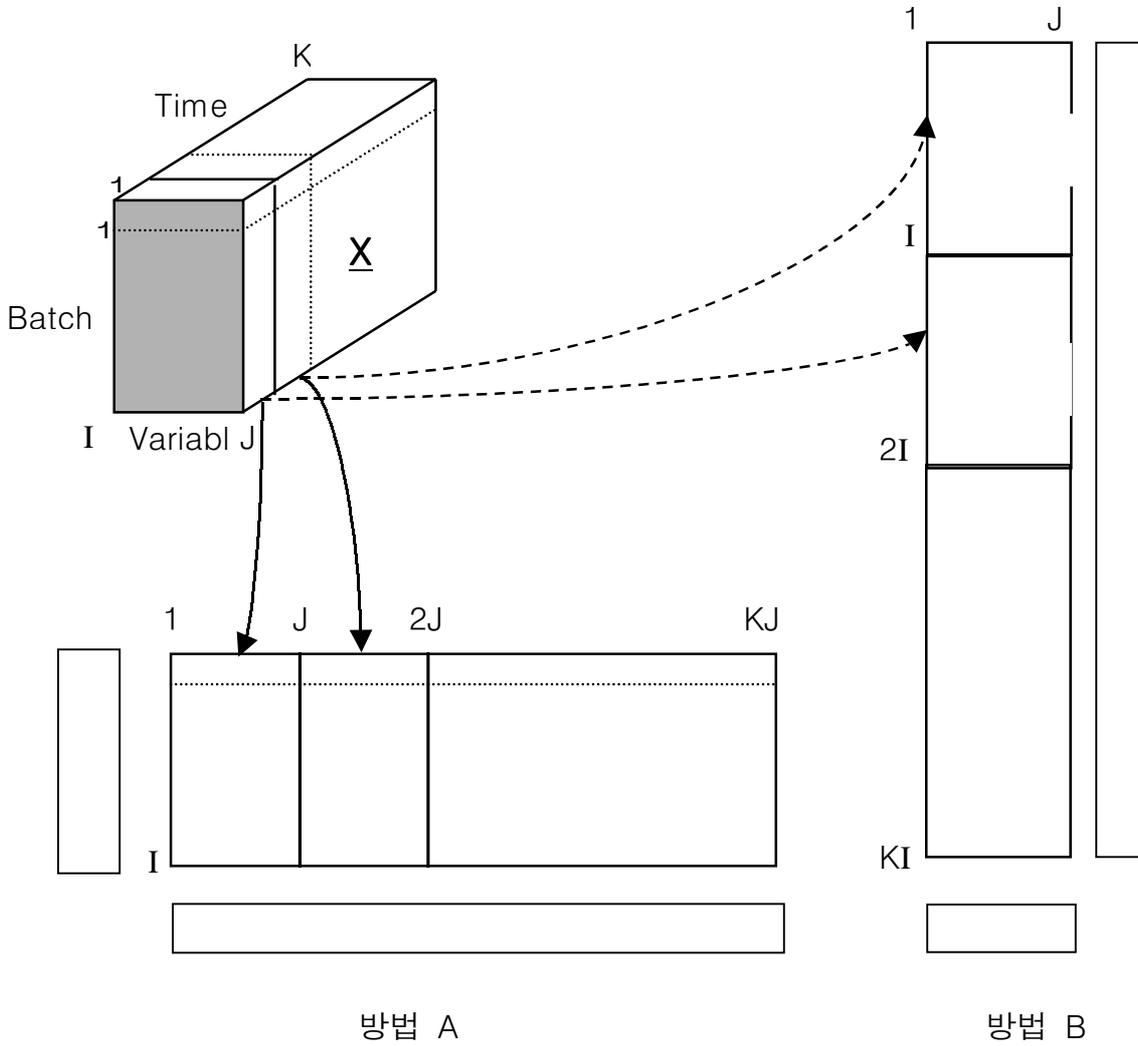


그림 1. 두 가지 재배열 방법

앞으로 SBR공정에 대한 새로운 공정 모니터링 방법과 공정 모니터링 방법에 기반한 supervisory control law에 관한 연구 내용을 제시한다. 가능하면 공정 모니터링 방법에 기반한 cycle length adjustment 방법과 공정 모니터링 및 제어의 통합 연구에 관한 정보를 제시한다.