



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2012-0098251
(43) 공개일자 2012년09월05일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
C02F 3/06 (2006.01) B01D 65/08 (2006.01)
B01D 65/02 (2006.01)
(21) 출원번호 10-2011-0018088
(22) 출원일자 2011년02월28일
심사청구일자 2011년02월28일

(71) 출원인
경희대학교 산학협력단
경기도 용인시 기흥구 덕영대로 1732, 국제캠퍼스내 (서천동, 경희대학교)
(72) 발명자
유창규
경기도 용인시 기흥구 덕영대로 1732, 국제캠퍼스 공과대학 (서천동, 경희대학교)
김민정
경기도 용인시 기흥구 덕영대로 1732, 국제캠퍼스 공과대학 275 (서천동, 경희대학교)
(74) 대리인
특허법인다나

전체 청구항 수 : 총 18 항

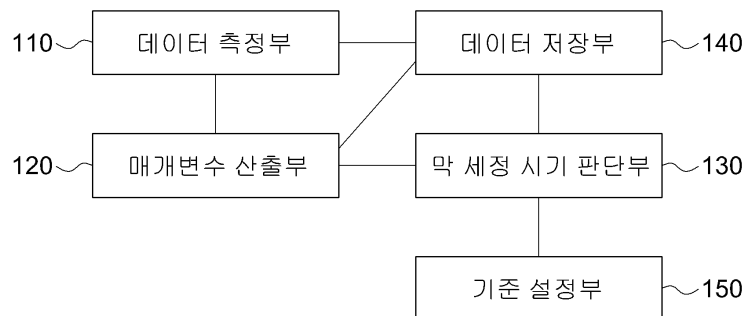
(54) 발명의 명칭 생물막반응조의 막 세정 시기 예측 방법 및 시스템

(57) 요약

본 발명은 생물막반응조의 막간 압력차를 예측 하고, 막간 압력차의 예측을 통해 멤브레인 모듈의 세정 시기를 예측할 수 있는 선형 모델을 제공하고, 멤브레인 모듈의 정확한 세정 시기를 예측하는 방법 및 시스템을 제공한다. 또한, 통계학적 최소 자승법과 순환 최소 자승법을 사용하여 예측 모델을 구축하고, 예측 모델에 RMSE를 적용하여 그 유효성을 검토할 수 있다.

본 발명에 따른 생물막반응조의 막 세정 시기 예측 방법은, 막간압력차-시간 사이의 지수적 관계식을 갖는 생물막반응조의 막 세정 시기 예측 방법에 있어서, 상기 막간압력차-시간 곡선의 추정지표 선형화를 수행하여 선형 관계식을 도출하는 1단계; 생물막반응조 운전 시간 및 막간 압력차를 측정하는 2단계; 측정된 시간 및 막간 압력차에 최소 자승법을 적용하여 상기 선형 관계식의 매개변수를 도출하는 3단계; 및 상기 선형 관계식에 막 세정이 필요한 경우의 막간 압력차를 대입하여, 막 세정 시기를 도출하는 4단계를 포함한다.

대표도 - 도5



이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호 KRF-2009-0076129

부처명 교육과학기술부

연구사업명 일반연구자 사업

연구과제명 환경정보학과 시스템최적화의 원천 기술을 이용한 통합관리시스템 개발

주관기관 경희대학교 국제캠퍼스 산학협력단

연구기간 2009.05.01 ~ 2012.04.30

특허청구의 범위

청구항 1

막간압력차-시간 사이의 지수적 관계식을 갖는 생물막반응조의 막 세정 시기 예측 방법에 있어서,
 상기 막간압력차-시간 곡선의 추정지표 선형화를 수행하여 선형 관계식을 도출하는 1단계;
 생물막반응조 운전 시간 및 막간 압력차를 측정하는 2단계;
 측정된 시간 및 막간압력차에 최소 자승법을 적용하여 상기 선형 관계식의 매개변수를 도출하는 3단계; 및
 상기 선형 관계식에 막 세정이 필요한 경우의 막간 압력차를 대입하여, 막 세정 시기를 도출하는 4단계
 를 포함하는 생물막반응조의 막 세정 시기 예측 방법.

청구항 2

제 1 항에 있어서, 상기 1단계는,

$$TMP = TMP_0 e^{\kappa_t t}$$

막간압력차-시간 사이의 지수적 관계식인 (여기서 TMP는 막간 압력차, TMP_0 는 여과 시작 전 최초의 막간 압력차, κ_t 는 생물막반응조 시스템의 특성에 의해 결정되는 시간 기반의 파울링 계수, t는 생물막반응조 프로세스 경과 시간)의 양변에 자연로그를 취함으로써, 상기 선형 관계식을 도출하는 것을 특징으로 하는 생물막반응조의 막 세정 시기 예측 방법.

청구항 3

제 2 항에 있어서, 상기 3단계는,

$$\ln TMP = \ln TMP_0 + \kappa_t t$$

상기 선형 관계식 에 있어서, TMP와 t의 측정값으로 최소 자승법을 적용하여 매개변수 $\ln TMP_0$ 및 κ_t 를 도출하는 것을 특징으로 하는 생물막반응조의 막 세정 시기 예측 방법.

청구항 4

제 3 항에 있어서, 상기 4단계는,

40 내지 50 kPa 의 막간 압력차를 상기 선형방정식에 대입하여 상기 막 세정 시기를 도출하는 것을 특징으로 하는 생물막반응조의 막 세정 시기 예측 방법.

청구항 5

제 1 항에 있어서,

Root Mean Square Error를 이용하여 상기 매개변수의 유효성을 확인하는 4단계를 더 포함하는 생물막반응조의 막 세정 시기 예측 방법.

청구항 6

제 5 항에 있어서,

상기 Root Mean Square Error는 상기 막간 압력차의 측정값과 산출값을 기반으로 산정되는 것을 특징으로 하는 생물막반응조의 막 세정 시기 예측 방법.

청구항 7

막간압력차-투과용량 사이의 지수적 관계식을 갖는 생물막반응조의 막 세정 시기 예측 방법에 있어서,
상기 막간압력차-부피 곡선의 추정지표 선형화를 수행하여 선형 관계식을 도출하는 1단계;
생물막반응조의 막을 통과한 투과용량 및 막간 압력차를 측정하는 2단계;
측정된 투과용량 및 막간압력차에 최소 자승법을 적용하여 상기 선형 관계식의 매개변수를 도출하는 3단계;
및
상기 선형 관계식에 막 세정이 필요한 경우의 막간 압력차를 대입하여, 막 세정 시기를 도출하는 4단계
를 포함하는 생물막반응조의 막 세정 시기 예측 방법.

청구항 8

제 7 항에 있어서, 상기 1단계는,

$$TMP = TMP_0 e^{\kappa_v V}$$

막간압력차-시간 사이의 지수적 관계식인 (여기서 TMP는 막간 압력차, TMP_0 는 여과 시작 전 최초의 막간 압력차, κ_v 는 생물막반응조 시스템의 특성에 의해 결정되는 시간 기반의 파울링 계수, V 는 막을 통과한 투과 용량)의 양변에 자연로그를 취함으로써, 상기 선형 관계식을 도출하는 것을 특징으로 하는 생물막반응조의 막 세정 시기 예측 방법.

청구항 9

제 7 항에 있어서, 상기 2단계는,

$$\ln TMP = \ln TMP_0 + \kappa_v V$$

상기 선형 관계식 $\ln TMP = \ln TMP_0 + \kappa_v V$ 에 있어서, TMP와 t의 측정값으로 최소 자승법을 적용하여 매개변수 $\ln TMP_0$ 및 κ_v 를 도출하는 것을 특징으로 하는 생물막반응조의 막 세정 시기 예측 방법.

청구항 10

제 9 항에 있어서, 상기 4단계는,

$$t = \frac{J}{VA}$$

(J는 막을 통과하는 투과 플럭스, A는 막의 표면적, t는 생물막반응조 운전 시간)를 이용하여 상기 막 세정 시기를 도출하는 것을 특징으로 하는 생물막반응조의 막 세정 시기 예측 방법.

청구항 11

막간압력차-시간 사이의 지수적 관계식을 갖는 생물막반응조의 막 세정 시기 예측 방법에 있어서,
상기 막간압력차-시간 곡선의 추정지표 선형화를 수행하여 선형 관계식을 도출하는 1단계;
미리 정해진 시간 시기로 생물막반응조 운전 시간 및 막간 압력차를 측정하여 측정값 도출하는 2단계;

측정된 시간 및 막간압력차에 순환 최소 자승법을 적용하여 상기 측정값이 도출될 때 마다 상기 선형 관계식의 매개변수를 도출하는 3단계; 및

상기 매개변수의 도출값에 통계적 품질 관리 기법을 적용하여, 막 세정 시기를 예측하는 4단계
포함하는 생물막반응조의 막 세정 시기 예측 방법.

청구항 12

제 11 항에 있어서, 상기 1단계는,

$$TMP = TMP_0 e^{\kappa_t t}$$

막간압력차-시간 사이의 지수적 관계식인 (여기서 TMP는 막간 압력차, TMP_0 는 여과 시작 전 최초의 막간 압력차, κ_t 는 생물막반응조 시스템의 특성에 의해 결정되는 시간 기반의 파울링 계수, t 는 생물막반응조 프로세스 경과 시간)의 양변에 자연로그를 취함으로써, 상기 선형 관계식을 도출하는 것을 특징으로 하는 생물막반응조의 막 세정 시기 예측 방법.

청구항 13

제 12 항에 있어서, 상기 3단계는,

$$\ln TMP = \ln TMP_0 + \kappa_t t$$

상기 선형 관계식 $\ln TMP = \ln TMP_0 + \kappa_t t$ 에 있어서, 일단위로 갱신되는 TMP와 t 의 측정값으로 최소 자승법을 적용하여 일단위로 매개변수 및 κ_t 를 도출하는 것을 특징으로 하는 생물막반응조의 막 세정 시기 예측 방법.

청구항 14

제 13 항에 있어서, 상기 4단계는,

상기 매개변수의 분포가, 중심선(Center Line)을 수렴한 후 상기 중심선(Center Line)을 벗어나 $\pm 1\sigma$ 로 향하는 시점을 막 세정 시기로 예측하는 것을 특징으로 하는 생물막반응조의 막 세정 시기 예측 방법.

청구항 15

생물막반응조로부터 운전시간에 따른 막간압력차 데이터를 측정하는 데이터 측정부;

상기 데이터 측정부로부터 측정한 데이터에 최소자승법을 적용하여 막간압력차-운전 시간 사이의 선형 방정식의 매개변수를 산출하는 매개변수 산출부; 및

상기 선형방정식에 기설정된 막간압력차의 기준치를 대입하여 막 세정 시기를 예측하는 막세정 시기 판단부를 포함하는 생물막반응조의 막 세정 시기 예측 시스템.

청구항 16

생물막반응조로부터 운전시간에 따른 막간압력차 데이터를 미리 지정된 시간 주기로 측정하는 데이터 측정부;

상기 데이터 측정부로부터 측정한 데이터에 선형 최소자승법을 적용하여 막간압력차-운전 시간 사이의 선형 방정식의 매개변수를 산출하는 매개변수 산출부; 및

상기 매개변수의 분포도에 품질관리기법을 적용하여 막 세정 시기를 예측하는 막 세정 시기 판단부

를 포함하는 생물막반응조의 막 세정 시기 예측 시스템.

청구항 17

제 15 항 또는 제 16 항에 있어서,

상기 선형 방정식은 하기 수학식인 것을 특징으로 하는 생물막반응조의 막 세정 시기 예측 시스템.

[수학식]

$$\ln TMP = \ln TMP_0 + \kappa_t t$$

(여기서 TMP 는 막간압력차, κ_t 는 생물막반응조 시스템의 특성에 의해 결정되는 시간 기반의 파울링 계수, t 는 운전일수를 의미함.)

청구항 18

제 16 항에 있어서,

상기 막 세정 시기 판단부는 상기 매개변수의 분포가 중심선(Center Line)을 수렴한 후 상기 중심선(Center Line)을 벗어나 $\pm 1\sigma$ 로 향하는 시점을 막 세정 시기로 예측하는 것을 특징으로 하는 생물막반응조의 막 세정 시기 예측 시스템.

명세서

기술 분야

[0001] 본 발명은 생물막반응조의 막 세정 시기 예측 방법 및 시스템에 대한 것으로, 상세하게는 추정지표의 선형화를 통해 막간압력차 관계식을 선형화 하고, 최소자승법 또는 순환 최소자승법을 이용하여 매개변수를 도출함으로써, 생물막반응조의 막 세정 시기를 예측하는 방법 및 시스템에 관한 것이다.

배경 기술

[0002] 활성 슬러지 공정은 활성 슬러지(Activated sludge) 조건에서 하수를 산화하는 세균 군집과 함께 공기공급조(포기조)에서 공기를 공급하여 하수 속의 콜로이드 상태 또는 용해한 물질이 침전하거나 활성 슬러지에 흡착되어 정화되는 폐수처리 공법의 하나이다. 이러한 활성 슬러지 공정에 있어서, 정화작용을 수행한 활성 슬러지를 다시 본처리과정으로 반송하고, 2차 고형물을 제거하기 위해 멤브레인 모듈을 활용한 것을 생물막반응조(Membrane Bioreactor : MBR)라 한다.

[0003] 생물막반응조는 생물반응조에서 산소를 공급하고 세균 군집을 교반하여 정화가 일어나도록 하고, 정화된 물을 멤브레인 모듈에 통과시킴으로써, 슬러지와 고형물을 걸러내어 2차적으로 정화가 일어나도록 하는 것이다.

[0004] 생물막반응조는 멤브레인 모듈의 위치에 따라 측류형과 수몰형으로 분류할 수 있다.

[0005] 도 1은 측류형의 생물막반응조를 도시한 것이고, 도 2는 수몰형의 생물막반응조를 도시한 것이다.

[0006] 도 1 및 도 2를 참조하면, 측류형의 생물막반응조는 멤브레인 모듈(10)이 바이오리액터(20)로부터 분리되어 있는 반면, 수몰형의 생물막반응조는 멤브레인 모듈(10)이 바이오리액터(20)에 수몰된 형태로 제공된다.

[0007] 측류형의 경우 멤브레인 모듈(10)에서 걸러진 슬러지를 바이오리액터(20)로 반환하는 공정이 더 추가된 것에 차이가 있을뿐, 바이오리액터(20)에서 정화된 물을 멤브레인 모듈(10)에 투과하여 제 2차 정화를 수행한다는 점은 양자 모두 동일하다.

[0008] 활성 슬러지 공정에 있어서 멤브레인 모듈을 이용하게 되면, 슬러지와 고형물이 막을 통과하지 못하게 됨으로써, 세균 군집을 완벽하게 보존할 수 있다는 이점과, 2차 정화 처리 과정을 거침으로써, 모든 고형물이 걸러

질 수 있는 시스템을 제공할 수 있다는 이점을 갖게 된다.

- [0009] 그러나, 이러한 멤브레인 모듈을 이용한 활성 슬러지 공정에 있어서, 콜로이드 입자 등이 분산된 현탁 수용액을 막여과시킬 때 농도분극으로 막표면에 용질이 쌓인 케익층(cake layer)이나 젤층(gel layer)에 의해 발생하는 막오염(membrane fouling)은 공정의 전체 효율을 떨어뜨리게 되므로, 막을 주기적으로 세척 또는 교체해 주어야 한다.
- [0010] 막 표면의 슬러지 퇴적물, 케익층(cake layer)이나 젤층(gel layer)의 형성 미생물의 성장 등이 파울링 현상의 원인으로 지목되고 있다. 뿐만 아니라, 콜로이드, 여과된 고형물로 인해 미립자 막오염(Particulate fouling)이 진행될 수 있으며, 혼압액 부유 고형물(Mixed Liquor Suspended Solid : MLSS) 용존 산소량, 슬러지 보존 시간 등도 미립자 막오염에 영향을 끼치는 인자로 작용할 수 있다.
- [0011] 이처럼 막오염을 원인이 되는 인자의 다양성으로 인해 파울링 프로세스의 예측은 복잡한 계산과정이 필요하고, 이에 따라 아직까지 파울링 메커니즘에 대해 일반적으로 수용되는 보편적 모델은 없는 실정이다.

발명의 내용

해결하려는 과제

- [0012] 상기와 같은 문제점을 해결하기 위해 안출된 본 발명은, 본 발명은 생물막반응조의 막간 압력차를 예측 하고, 막간 압력차의 예측을 통해 멤브레인 모듈의 세정 시기를 예측할 수 있는 선형 모델을 제공하여, 예측 모델의 정확성을 향상 시키는 것에 목적이 있다.
- [0013] 또한, 예측 모델을 제시하기 위한 방법으로, 통계학적 최소 자승법과 순환 최소 자승법을 사용하고, 예측 모델에 RMSE를 적용하여 그 유효성을 검토하는 것에 다른 목적이 있다.

과제의 해결 수단

- [0014] 상기 목적을 해결하기 위한 본원의 제 1 발명, 생물막반응조의 막 세정 시기 예측 방법은, 막간압력차-시간 사이의 지수적 관계식을 갖는 생물막반응조의 막 세정 시기 예측 방법에 있어서, 상기 막간압력차-시간 곡선의 추정지표 선형화를 수행하여 선형 관계식을 도출하는 1단계; 생물막반응조 운전 시간 및 막간 압력차를 측정하는 2단계; 측정된 시간 및 막간압력차에 최소 자승법을 적용하여 상기 선형 관계식의 매개변수를 도출하는 3단계; 및 상기 선형 관계식에 막 세정이 필요한 경우의 막간 압력차를 대입하여, 막 세정 시기를 도출하는 4단계를 포함한다.
- [0015] 이때, 본원의 제 1 발명은, 막간압력차-시간 사이의 지수적 관계식을 갖는 생물막반응조의 막 세정 시기 예측 방법에 있어서, 상기 막간압력차-시간 곡선의 추정지표 선형화를 수행하여 선형 관계식을 도출하는 1단계; 미리 정해진 시간 시기로 생물막반응조 운전 시간 및 막간 압력차를 측정하여 측정값 도출하는 2단계; 측정된 시간 및 막간압력차에 순환 최소 자승법을 적용하여 상기 측정값이 도출될 때 마다 상기 선형 관계식의 매개변수를 도출하는 3단계; 및 상기 매개변수의 도출값에 통계적 품질 관리 기법을 적용하여, 막 세정 시기를 예측하는 4단계를 포함하는 형태로 실시될 수도 있다.
- [0016] 본원의 제 2 발명, 생물막반응조의 막 세정 시기 예측 시스템은, 생물막반응조로부터 운전시간에 따른 막간압력차 데이터를 측정하는 데이터 측정부; 상기 데이터 측정부로부터 측정한 데이터에 최소자승법을 적용하여 막간압력차-운전 시간 사이의 선형 방정식의 매개변수를 산출하는 매개변수 산출부; 및 상기 선형방정식에 기 설정된 막간압력차의 기준치를 대입하여 막 세정 시기를 예측하는 막세정 시기 판단부를 포함한다.
- [0017] 이때, 본원의 제 2 발명은, 생물막반응조로부터 운전시간에 따른 막간압력차 데이터를 미리 지정된 시간 주기로 측정하는 데이터 측정부; 상기 데이터 측정부로부터 측정한 데이터에 선형 최소자승법을 적용하여 막간압력차-운전 시간 사이의 선형 방정식의 매개변수를 산출하는 매개변수 산출부; 및 상기 매개변수의 분포도에 품질관리기법을 적용하여 막 세정 시기를 예측하는 막 세정 시기 판단부를 포함하는 형태로 실시될 수도 있다.

발명의 효과

[0018] 상기와 같은 구성을 갖는 본 발명에 따르면, 정규 분포를 갖는 예측 모델을 제시할 수 있어, 생물막반응조의 막간 압력차와 멤브레인 모듈의 정확한 세정 시기를 예측할 수 있는 이점이 있다.

도면의 간단한 설명

[0019] 도 1은 종래기술에 따른 측류형의 생물막반응조,
 도 2는 종래기술에 따른 수몰형의 생물막반응조,
 도 3a 및 도 3b는 생물막반응조 프로세스에 순환 최소 자승법을 적용하여, 일일 간격으로 κ 와 b의 분포를 나타낸 예시도,
 도 4a 및 도 4b는 κ 와 b의 분포가 중심선을 벗어나 로 향하게 되는 시점의 부분 확대도, 및
 도 5는 본 발명의 일실시예에 따른 생물막반응조의 막 세정 시기 예측 시스템의 블록도이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0020] 이하 첨부된 도면을 참조하여 본 발명의 바람직한 실시예를 상세히 설명하기로 한다. 이에 앞서, 본 명세서 및 청구범위에 사용된 용어나 단어는 통상적이거나 사전적인 의미로 한정해서 해석되어서는 아니되며, 발명자는 그 자신의 발명을 가장 최선의 방법으로 설명하기 위해 용어의 개념을 적절하게 정의할 수 있다는 원칙에 입각하여 본 발명의 기술적 사상에 부합하는 의미와 개념으로 해석되어야만 한다. 따라서, 본 명세서에 기재된 실시예와 도면에 도시된 구성은 본 발명의 가장 바람직한 일실시예에 불과할 뿐이고 본 발명의 기술적 사상을 모두 대변하는 것은 아니므로, 본 출원시점에 있어서 이들을 대체할 수 있는 다양한 균등물과 변형예들이 있을 수 있음을 이해하여야 한다.

[0021] 중간 시험 규모(pilot scale) 생물막반응조 프로세스에서 투과 플럭스가 일정한 경우, 막간압력차(Trans Membrane Pressure : TMP) 곡선은 최초 1, 2개월 사이 여과 과정의 끝에서 가파르게 증가하는 전형적인 지수 함수 특성을 나타낸다. 이와 같이, 여과 과정의 끝에서 TMP가 급격하게 상승하는 것은, 비균질 파울링 영역 감소 모델, 비균질 파울링 포어(pore) 감소 모델, 임계 흡입 압력 모델, 여과 이론(percolation theory), 비균질 섬유 다발 모델 등으로 설명할 수 있다.

[0022] 이 중 하나인 비균질 파울링 영역 감소 모델에 있어서, MBR 프로세서의 진행 과정에 따른 막간 압력차(Trans Membrane Pressure : TMP)는 하기 수학식 1과 같이 나타낼 수 있다.

[0023]

수학식 1

$$TMP = TMP_0 e^{\kappa_i t}$$

[0024]

[0025] 여기서 TMP_0 는 파울링이 시작되기 전 여과 시간이 0인 경우 최초의 막간 압력차를 의미하는 것이고, t는 여과 시간을 의미하며 단위는 일(day) 단위이다. 또한, κ_i 는 MBR 시스템의 특성에 의해 결정되는 시간 기반의 파울링 계수로 단위는 1/day 이다.

[0026] 상기 수학식에서, 멤브레인에 대한 화학적 세정을 진행해야 하는 막간 압력차의 최대 허용값을 정하고 MBR 시스템의 특성값인 κ_i 를 알 수 있다면, 멤브레인을 세정해야 하는 시기 t를 연산할 수 있게 된다.

[0027] 일반적으로 파울링 현상에 의해 발생하는 막간 압력차는 40~50kPa 이므로, 막간 압력차의 최대 허용값은 40~50kPa 이내인 것이 바람직하다.

[0028] 상기 수학식 1을 일정한 플럭스 모드로 동작하는 중간실험 규모의 MBR 시스템에 적용한다면, 먼저, 필터를 투

과한 누적 용량은 하기 수학식 2와 같이 나타낼 수 있다.

수학식 2

$$V=JA t$$

여기서 J는 필터를 통과하는 투과 플럭스를 나타내고, A는 멤브레인의 표면적, t 는 여과 시간을 의미한다.

이를 이용하여 수학식 1에 나타난 TMP 함수를 필터링 시간 대신 필터를 투과한 누적 용량에 대한 함수로 변경하면 하기 수학식 3과 같이 나타낼 수 있다.

수학식 3

$$TMP=TMP_0 e^{\kappa_v t}=TMP_0 e^{[\kappa_v/(JA)]V}=TMP_0 e^{\kappa_v V}$$

여기서 κ_v 는 부피 기반의 비가역적인 파울링 계수를 나타내며 단위는 $1/m^3$ 이다. 수학식 1과 마찬가지로, 막 세척에 필요한 최대 막간압력차를 지정하고, 시스템 특성에 따른 파울링 계수 κ_v 가 주어진다면, 필터를 투과한 누적 용량 V를 계산함으로써, 막 세척 시기를 산정할 수 있게 된다.

수학식 3에 있어서, κ_v 와 활성 슬러지액의 수용성 물질의 농도가 비례관계를 갖는 것으로 가정될 수 있다면, 상기 수학식 3은 하기 수학식 4와 같이 변형될 수 있다.

수학식 4

$$TMP=TMP_0 e^{\kappa_v V}=TMP_0 e^{\kappa_L CV}=TMP_0 e^{\kappa_L L}$$

여기서 L은 kg 단위의 멤브레인 표면의 유기 오염물의 누적량을 의미하고, κ_L 은 유기 오염물 기반의 파울링 계수를 의미하며 단위는 $1/kg$ 이다. 또한, C는 혼탁액의 수용성 물질 중 유기물의 농도를 의미한다.

상기 수학식 1, 3 및 4에서 살펴볼 수 있는 바와 같이, MBR 프로세스에서 TMP를 모델링 한 경우, TMP는 t, V 및 L에 대해 선형 함수가 아닌 지수 함수의 형태를 갖게 되어, TMP와 t, V 및 L의 분포는 통계학 적으로 비정규분포를 나타나게 되므로, 막 세척 간격을 정확하게 예측하기 어렵다는 문제점이 있다.

일반적으로 비정규분포는 응용 과학 및 공학에서 적용되는 관련 파라미터의 시간 혹은 공간의 변화를 표현하기 위해 사용된다. 비정규분포는 같은 변량의 정규 분포와 비교할 때 데이터의 확률밀도는 중간지점에서 피크 값을 갖고 헤비 테일(heavy tails)을 갖는다는 특징이 있다. 이러한 비선형 분포를 갖는 모델링 시스템은 그 성능에 있어서, 정규 분포보다 예측 능력이 현저히 떨어진다는 단점을 갖게 된다. 그러므로, 정확한 예측을 위해서, 측정 변수를 정규분포 또는 선형 모델로 변환할 필요가 있다.

[0039] 상기 수학식 1, 3 및 4에서 살펴볼 수 있는 바와 같이, 막간압력차(TMP)는 지수 형태의 관계식을 갖는 비가우시안 분포의 일종인 대수정규분포(Lognormal Distribution)의 형태를 띄고 있다. 그러므로, 이와 같은 모델로 정확한 막간압력차를 예측하거나, 멤브레인의 적절한 세척 시기를 예측하는 것은 어렵게 된다. 이를 해결하기 위한 방법으로, 막간 압력차를 선형화된 변수로 변경하거나, 정규화를 수행해야 할 것이다.

[0040] 상기 수학식 1, 3 및 4의 막간 압력차(TMP)의 추정지표를 선형화(Stochastic linearization)를 수행하기 위해, 자연 로그 변환을 시도할 수 있다. TMP와 막 세척 시기의 정확한 예측을 위한 모델을 구축하기 위해, 상기 수학식 1, 3 및 4의 양변에 자연로그를 취하는 것이다.

[0041] 즉, 상기 수학식 1, 3 및 4의 양변에 자연로그를 취하게 되면, 지수적 파울링 모델은 1차 선형 모델로 변환될 수 있다.

[0042] 예컨대, 상기 수학식 1의 양변에 자연로그를 취하게 되면, 하기 수학식 5와 같이 일차 함수로 표현될 수 있다.

수학식 5

$$\ln TMP = \ln TMP_0 + \kappa_t t$$

[0043]

[0044] 즉, 매개변수인 $\ln TMP_0$ 와 κ_t 가 주어진다면, TMP의 한계값을 정하여, 멤브레인 세척 시기 t 를 산정할 수 있게 된다.

[0045] 즉, 수학식 1, 3 및 4의 양변에 자연로그를 취하게 되면, 하기 수학식 6과 같은 1차 선형 모델로 변환될 수 있다.

수학식 6

$$y = \kappa t + b$$

[0046]

[0047] 즉, MBR 프로세서의 모델링 함수는 로그함수를 취함으로서, 상기 수학식 6과 같은 선형성을 갖는 일차함수로 표현될 수 있다. 여기서 y 는 $\ln TMP$ 를 나타내고, κ 는 κ_t , κ_L , κ_V 의 관계식, t 는 운전 일수를 나타내고, b 는 $\ln TMP_0$ 값을 나타낸다.

[0048] 이때, 매개변수 κ 와 b 값을 구하기 위해, 최소자승법(least-square method)를 활용할 수 있다. 최소자승법은 측정된 TMP 값과, 운전일수 t 의 데이터를 이용하여, 매개변수 κ 와 b 의 값을 예측하는 통계학적 방법이다.

[0049] 최소자승법을 통해 κ 와 b 값을 예측한 후, 파울링의 한계 TMP를 정함으로써, 막 세정이 필요한 운전일수 t 를 산정할 수 있는 것이다.

[0050] 최소자승법으로 도출된 κ 와 b 값의 유효성을 검증하기 위해 RMSE(Root Mean Square Error)를 사용할 수 있다. RMSE는 지수 형태의 관계식에 의해 예측된 값과, 실제 측정된 값의 차이를 측정하기 위한 것이다.

[0051] RMSE는 하기 수학식 8과 같이 정의될 수 있다.

수학식 8

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{n-1}}$$

[0052]

[0053] 여기서 Y_i 는 실제로 측정된 TMP 값을, $\hat{Y}_i$ 는 모델에 의해 예측된 TMP 값을 나타내며, n 은 샘플의 수를 나타내는 것이다.

[0054] 위와 같은 최소자승법을 이용하면, 생물막반응조 프로세스에 적용 가능한 하나의 관계식을 도출할 수 있다. 그러나 최소자승법을 사용하는 경우에는, 생물막반응조 전체 프로세스에 걸쳐 하나의 관계식을 사용하기 때문에, 막간 압력차가 다른 측정값의 오차에 의해 영향을 받는 경우에는, 막간압력차의 측정값이 정상인지 비정상인지를 판단할 수 없다는 문제점을 갖는다.

[0055] 이와 같은 문제점을 해결하기 위한 방안으로, 순환 최소자승법을 적용하여, 실험 날짜별로, 적합한 막간압력차에 대한 관계식을 도출할 수 있다.

[0056] 순환 최소자승법을 적용하기 위해서는, 생물막반응조 공정에 있어, 막간압력차 데이터는 주기적으로 업데이트되어야 하며, 일단위로 업데이트 되는 것이 바람직하다. 순환 최소자승법은 일일 단위로 업데이트 되는 데이터를 누적하여 κ 와 b 값을 일단위로 산정하게 된다. 따라서, 일일 간격으로 막간압력차의 예측 모델이 달라지게 되므로, 더 정확한 막 세정 시기를 결정할 수 있다.

[0057] 즉, 최소자승법은 전기간에 걸쳐 동일한 κ , b 값을 사용하게 되지만, 순환 최소자승법을 이용하면, 누적 데이터에 적합한 κ , b 값을 날마다 업데이트 함으로써, 좀 더 정확한 예측 모델을 구축할 수 있는 이점이 있다.

[0058] 순환 최소자승법을 적용하는 경우, 막 세정 시기를 결정하기 위한 방법으로 통계적 품질관리기법(Statistical Quality Control : SQC)을 적용할 수 있다. 통계적 품질관리기법은 데이터 변동을 의미 있는 변동과 의미 없는 변동으로 나누고, 변동하고 있는 데이터에서 일정한 규칙성을 찾기 위함이다.

[0059] 도 3a 및 도 3b는 생물막반응조 프로세스에 순환 최소자승법을 적용하여, 일일 간격으로 κ 와 b 의 분포를 나타낸 예시도이고, 도 4a 및 도 4b는 κ 와 b 의 분포가 중심선을 벗어나 $\pm 1\sigma$ 로 향하게 되는 시점의 부분 확대도이다.

[0060] 도 3a와 도 3b, 도 4a와 도 4b의 a-a 및 b-b 지점에서 살펴볼 수 있는 바와 같이, 프로세스가 진행됨에 따라, κ 와 b 는 중심선에 근접했다가 로 이동하는 현상을 관찰할 수 있고, 결국, b 는 프로세스가 진행됨에 증가하는 경향을, κ 는 프로세스가 진행됨에 따라 감소하는 경향을 보이는 것을 확인할 수 있다.

[0061] 이와 같이 나타나는 분포표에서, b 와 κ 가 중심선을 벗어나, $\pm 1\sigma$ 로 전이되는 경향을 나타내는 시점에서 막 세정이 필요한 것으로 결정할 수 있다.

[0062] 즉, 순환 최소자승법에 의해 날마다 갱신되는 κ 와 b 값을 통계적 품질관리기법을 이용하여, 중심선을 기준으로 $\pm 3\sigma$ 에 분포시켰을 때, κ 와 b 값은 일정 시간이 지나면, 중심선에 수렴하게 되고, 이후에는 중심선을 벗어나 $\pm 1\sigma$ 로 향하게 된다. 이때, κ 와 b 값이 중심선을 벗어나는 경향이 발생하는 경우, 파울링에 따라, 편차가 증가하는 것으로 판단하여, 막 세정 시기가 필요함을 판단할 수 있는 것이다.

[0063] 도 5는 본 발명의 일실시예에 따른 생물막반응조의 막 세정 시기 예측 시스템의 블록도이다. 도 5를 참조하면 생물막반응조의 막 세정 시기 예측 시스템은, 데이터 측정부(110), 매개변수 산출부(120), 막 세정 시기 판단부(130) 및 데이터 저장부(140)를 포함한다. 생물막반응조의 막 세정 시기 예측 시스템은, 파울링이 일어날 때의 한계 막간압력차 값을 설정할 수 있는 기준 설정부(150)를 더 포함할 수 있다.

[0064] 먼저, 데이터 측정부(110)는 생물막반응조로부터 운전일수에 따른 TMP 데이터를 측정하고 데이터 저장부(14

0)로 저장한다. 데이터 측정부(110)는 생물막반응조에 포함된 압력센서로부터 TMP 데이터를 획득하거나, 사용자의 외부 입력에 기초하여 TMP 데이터를 획득할 수 있다.

[0065] 매개변수 산출부(120)는 데이터 측정부(110)로부터 측정 데이터를 독출하여, 생물막반응조의 TMP 예측 선형 모델의 매개변수를 도출한다. 예컨대, 상기 수식식 6과 같이 선형적 TMP 예측 모델에 있어서 측정데이터에 최소자승법 또는 순환 최소자승법을 적용함으로써 k 와 b 를 도출할 수 있다.

[0066] 이때, 순환 최소자승법을 적용하여 매개변수를 도출하는 경우, 데이터 측정부(110)는 미리 지정된 주기, 바람직하게는 일일 단위로 측정 데이터를 업데이트 하는 것이 바람직하고, 매개변수 산출부(120)도 일일 단위로 k 와 b 를 도출하여 데이터 저장부(140)에 저장한다.

[0067] 막 세정 시기 판단부(130)는 매개변수 연산 결과를 이용하여 생물막반응조의 막 세정 시기를 판단한다. 매개변수 산출부(120)가 최소자승법을 이용하여 매개변수를 도출한 경우, 도출된 매개변수를 이용한 TMP 예측 선형 모델은 공정 동작 전체 일수에 적용되는 모델이므로, 기준 설정부(150)로부터 파울링이 예측되는 한계 TMP 값을 통해 막 세정 시기를 예측 한다.

[0068] 또는 매개변수 산출부(120)가 순환최소자승법을 이용하여 매개변수를 도출한 경우, 도출된 매개변수를 이용한 TMP 예측 선형 모델은 해당 날짜에만 적용될 수 있는 모델이므로, 기준 설정부(150)는 매개변수에 품질관리기법을 적용함으로써, 막 세정 시기를 예측할 수 있다.

[0069] 이상과 같이, 본 발명은 비록 한정된 실시예와 도면에 의해 설명되었으나, 본 발명은 이것에 의해 한정되지 않으며 본 발명이 속하는 기술분야에서 통상의 지식을 가진 자에 의해 본 발명의 기술사상과 아래에 기재될 특허청구범위의 균등범위 내에서 다양한 수정 및 변형이 가능하다.

부호의 설명

[0070] 10 : 멤브레인 모듈

20 : 바이오리액터

110 : 데이터 측정부

120 : 매개변수 산출부

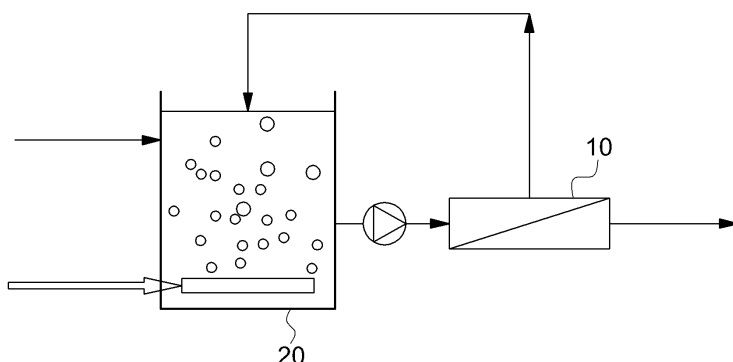
130 : 막 세정 시기 판단부

140 : 데이터 저장부

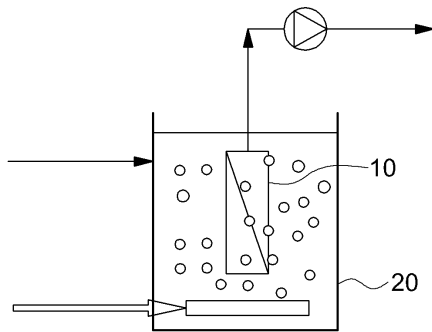
150 : 기준 설정부

도면

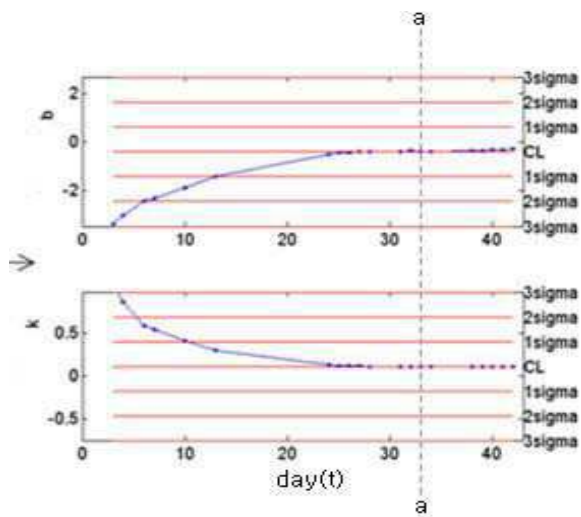
도면1



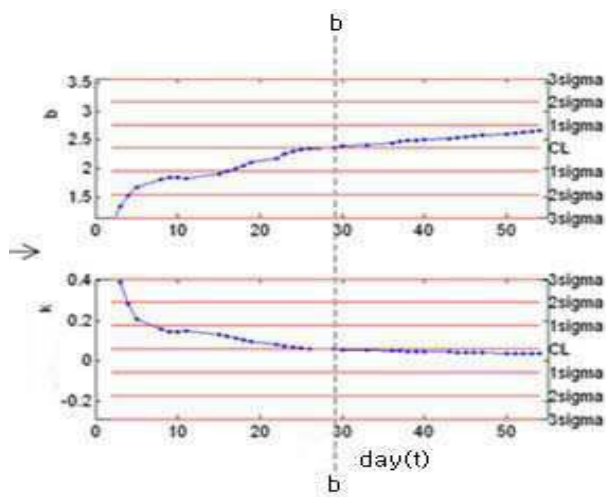
도면2



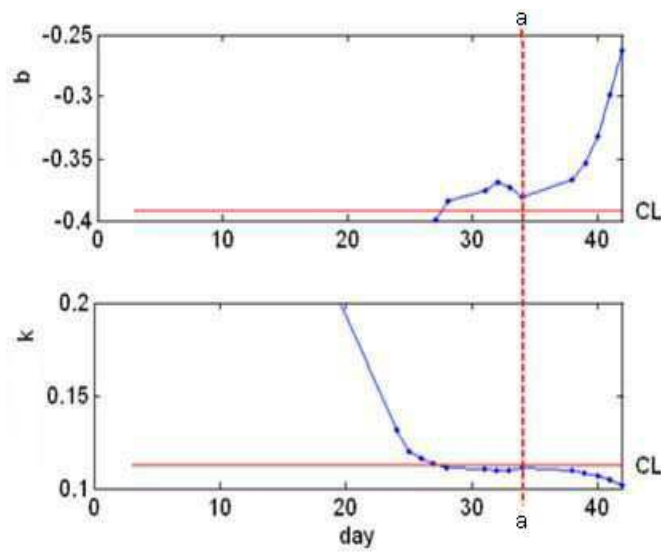
도면3a



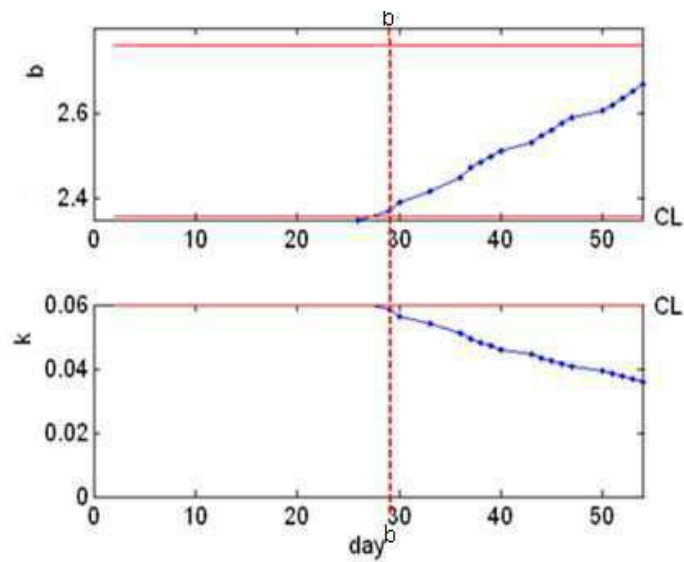
도면3b



도면4a



도면4b



도면5

