(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2013-0098812
(43) 공개일자 2013년09월05일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
B01D 65/10 (2006.01) *B01D 65/00* (2006.01)
G06Q 10/00 (2006.01) *C02F 1/44* (2006.01)
(21) 출원번호 10-2012-0020628
(22) 출원일자 2012년02월28일
심사청구일자 2012년02월28일

(71) 출원인
경희대학교 산학협력단
경기도 용인시 기흥구 덕영대로 1732, 국제캠퍼스 내 (서천동, 경희대학교)
(72) 발명자
유창규
경기도 용인시 영덕동 976번지 호반베르디움아파트 502동 1204호
김민정
경기도 의왕시 오전동 동백아파트 110-206
(74) 대리인
특허법인다나

전체 청구항 수 : 총 11 항

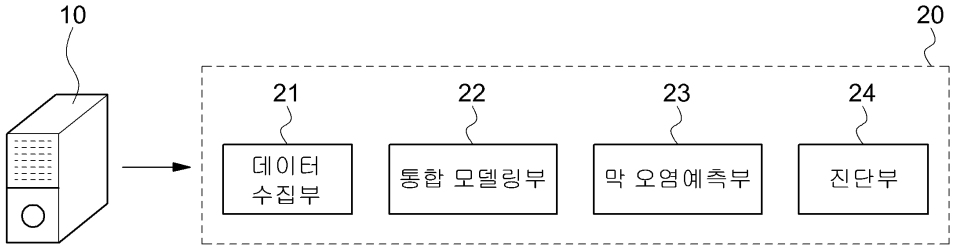
(54) 발명의 명칭 **통합 모델을 이용한 막 오염 예측 및 진단 방법과 시스템**

(57) 요 약

본 발명은 실제의 막오염에 있어서 복수개의 메커니즘이 통합적으로 미치는 영향을 파악하고, 막오염 현상을 예측하기 위한 새로운 모델인 막 오염 통합 모델을 생성하고 네 가지의 막 오염 모델을 하나의 식으로 통합하여 해석할 수 있는 통합 모델을 이용한 막 오염 예측 및 진단 방법과 시스템을 제공한다.

본 발명인 통합 모델을 이용한 막 오염 예측 방법은 통합 모델링부가 완전세공막힘 모델, 중간세공막힘 모델, 케익형성 모델 및 표준세공막힘 모델을 이용하여 막간차압(TMP,)을 산출하기 위한 막 오염 통합 모델을 생성하는 단계; 데이터 수집부가 주기적으로 막간차압 데이터가 포함된 막 오염 실측 데이터를 수집하는 단계; 상기 막 오염 예측부가 상기 통합 모델의 막간차압을 산출하는 단계; 상기 막 오염 예측부가 상기 막 오염 실측 데이터의 막간차압과 통합 모델의 막간 차압을 이용하여 상기 통합 모델에 대한 최적화 매개변수를 산출하는 단계; 상기 막 오염 예측부가 상기 최적화 매개변수를 이용하여 상기 막 오염 통합 모델의 막간 차압 예측 값을 산출하는 단계를 포함한다.

대 표 도 - 도2



특허청구의 범위

청구항 1

통합 모델링부가 완전세공막힘 모델, 중간세공막힘 모델, 케익형성 모델 및 표준세공막힘 모델을 이용하여 막간 차압(TMP,Trans Membrane Pressure)을 산출하기 위한 막 오염 통합 모델을 생성하는 단계;

데이터 수집부가 주기적으로 막간차압 데이터가 포함된 막 오염 실측 데이터를 수집하는 단계;

상기 막 오염 예측부가 상기 통합 모델의 막간차압을 산출하는 단계;

상기 막 오염 예측부가 상기 막 오염 실측 데이터의 막간차압과 통합 모델의 막간 차압을 이용하여 상기 통합 모델에 대한 최적화 매개변수를 산출하는 단계;

상기 막 오염 예측부가 상기 최적화 매개변수를 이용하여 상기 막 오염 통합 모델의 막간 차압 예측 값을 산출하는 단계;

를 포함하는 통합 모델을 이용한 막 오염 예측 방법.

청구항 2

제 1 항에 있어서,

상기 막 오염 통합 모델을 생성하는 단계는, 하기의 [수학식 2] 내지 [수학식 6]에 의하여 실행되는 통합 모델을 이용한 막 오염 예측 방법.

[수학식 2]

$$\frac{P}{P_0} = \frac{RA_0}{R_0A}$$

(P/P_0: 막간 차압, R/R_0: 투과저항, A/A_0: 투과면적)

[수학식 3]

$$V = \frac{\exp(k_i J_0 t) - 1}{K_i} - \frac{J_0}{k_b} \cdot \ln(1 - k_b t)$$

(V: 막 오염 통합 모델의 투과부피)

[수학식 4]

$$\frac{R}{R_0} = (1 + k_c J_0 V) + \left(1 + \frac{k_s V}{2}\right)^{-2}$$

(R/R_0: 막 오염 통합 모델의 투과 저항)

[수학식 5]

$$\frac{R}{R_0} = \left[1 + K_c J_0 \left(\frac{\exp(k_i J_0 t) - 1}{k_i} - \frac{J_0}{k_b} \cdot \ln(1 - k_b t)\right)\right] + \left[1 - \frac{K_s}{2}\left(\frac{\exp(k_i J_0 t) - 1}{k_i} - \frac{J_0}{k_b} \cdot \ln(1 - k_b t)\right)\right]^{-2}$$

[수학식 6]

$$\frac{P}{P_0}=\frac{a\cdot\exp(k_f J_0 t)}{1-k_b t}\cdot\left\{\left[1+K_c J_0\left(\frac{\exp(k_f J_0 t)-1}{k_i}-\frac{J_0}{k_b}\cdot\ln(1-k_b t)\right)\right]+\left[1-\frac{K_s}{2}\left(\frac{\exp(k_f J_0 t)-1}{k_i}-\frac{J_0}{k_b}\cdot\ln(1-k_b t)\right)\right]^{-2}\right\}$$

(P/P_0: 막 오염 통합 모델의 막간차압, a: 최초 막간 차압 매개변수, k_b: 완전세공막힘 모델의 매개변수, k_i: 중간세공막힘 모델의 매개변수, k_c: 케익형성 모델의 매개변수, k_s: 표준세공막힘 모델의 매개변수, J_0: 최초 플럭스)

청구항 3

제 3 항에 있어서, 상기 최적화 매개변수를 산출하는 단계는,

유전자 알고리즘을 이용한 하기의 [수학식 7]로 정의되는 목적 함수에 의하여 실행되는 통합 모델을 이용한 막 오염 예측 방법.

[수학식 7]

$$f=\min\sum_{i=1}^{m}\left[\left(\frac{P}{P_0}\right)_{i,measured}-\left(\frac{P}{P_0}\right)_{i,model}\right]^2$$

($_{I,measured}$: 막 오염 실측 데이터의 막간 차압, $_{i,\ model}$: 막 오염 통합 모델의 막간 차압, m: 막 오염 실측 데이터의 데이터 수)

청구항 4

제 4 항에 있어서, 상기 막 오염 통합 모델의 막간 차압 예측 값을 산출하는 단계는,

상기 [수학식 7]에 의하여 산출되는 최적화 매개변수를 상기 [수학식 6]으로 정의되는 막 오염 통합 모델에 대입함으로써 실행되는 통합 모델을 이용한 막 오염 예측 방법.

청구항 5

제 4 항에 있어서,

상기 막 오염 예측부가 상기 막 오염 통합 모델의 막간 차압 예측 값과 상기 막 오염 실측 데이터의 막간 차압을 이용하여 상기 막 오염 통합 모델의 정확도를 판단하는 단계

를 더 포함하는 통합 모델을 이용한 막 오염 예측 방법.

청구항 6

제 5 항에 있어서, 상기 막 오염 통합 모델의 정확도를 판단하는 단계는,

하기의 [수학식 8]로 정의되는 상기 막 오염 통합 모델의 막간 차압 예측값과 상기 막 오염 실측 데이터의 막간 차압간의 평균 제곱근 편차(RMSE, Root Mean Square Error)의 값을 통하여 판단하는 통합 모델을 이용한 막 오염 예측 방법.

[수학식 8]

$$RMSE=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{m}\left[\left(\frac{P}{P_0}\right)_{i,measured}-\left(\frac{P}{P_0}\right)_{i,\mathrm{modeled}}\right]^2}{m-1}}$$

($_{i,\ modeled}$: 막 오염 통합모델의 막간 차압 예측 값)

청구항 7

통합 모델링부가 완전세공막힘 모델, 중간세공막힘 모델, 케익형성 모델 및 표준세공막힘 모델을 이용하여 막간차압(TMP)을 산출하기 위한 막 오염 통합 모델을 생성하는 단계;

데이터 수집부가 주기적으로 막간차압 데이터가 포함된 막 오염 실측 데이터를 수집하는 단계;

상기 막 오염 예측부가 상기 통합 모델의 막간차압을 산출하는 단계;

상기 막 오염 예측부가 상기 막 오염 실측 데이터의 막간차압과 통합 모델의 막간 차압을 이용하여 상기 통합 모델에 대한 최적화 매개변수를 주기적으로 산출하는 단계;

진단부가 상기 주기적으로 산출되는 최적화 매개변수를 독립 변수로 하고, 상기 막 오염 실측 데이터의 막간 차압을 종속 변수로 한 다중 회귀 분석 방법을 통하여 막 오염 현상에서 기여도가 가장 높은 모델을 진단하는 단계

를 포함하는 통합 모델을 이용한 막 오염 진단 방법.

청구항 8

제 7 항에 있어서, 상기 진단하는 단계는

상기 완전세공막힘 모델, 중간세공막힘 모델, 케익형성 모델 및 표준세공막힘 모델의 각각의 매개변수가 적용된 완전 회귀 모델을 이용하여 상기 종속 변수에 대한 단일 회귀 분석을 하는 단계;

상기 완전 회귀 모델에 대한 에프검정을 실행하여 평균회귀자승합을 산출하는 단계;

상기 완전세공막힘 모델, 중간세공막힘 모델, 케익형성 모델 및 표준세공막힘 모델 중 어느 하나의 매개변수를 제외한 각각의 축소 회귀 모델을 이용하여 단일 회귀 분석을 하는 단계;

상기 각각의 축소 회귀 모델에 대한 에프검정을 실행하여 평균회귀자승합을 산출하는 단계; 및

상기 완전 회귀 모델의 평균회귀자승합과 상기 축소 회귀 모델의 평균회귀자승합 간의 차를 이용하여 기여도가 가장 큰 모델을 진단하는 단계

를 포함하는 통합 모델을 이용한 막 오염 진단 방법.

청구항 9

막간차압 데이터가 포함된 막 오염 실측 데이터를 주기적으로 수집하는 데이터 수집부;

완전세공막힘 모델, 중간세공막힘 모델, 케익형성 모델 및 표준세공막힘 모델을 이용하여 막간차압을 산출하기 위한 막 오염 통합 모델을 생성하는 통합 모델링부;

상기 막 오염 통합 모델의 막간차압을 산출하고 상기 막 오염 실측 데이터의 막간차압을 이용하여 상기 막 오염 통합 모델에 대한 최적화 매개변수를 산출하며, 상기 최적화 매개변수를 이용하여 상기 막 오염 통합 모델의 막간 차압 예측 값을 산출하는 막 오염 예측부

를 포함하는 통합 모델을 이용한 막 오염 예측 시스템.

청구항 10

제 9 항에 있어서,

상기 막 오염 예측부는 상기 막 오염 통합 모델의 막간 차압 예측 값과 상기 막 오염 실측 데이터의 막간 차압을 이용하여 상기 막 오염 통합 모델의 정확도를 판단하는 통합 모델을 이용한 막 오염 예측 시스템.

청구항 11

막간차압 데이터가 포함된 막 오염 실측 데이터를 주기적으로 수집하는 데이터 수집부;

완전세공막힘 모델, 중간세공막힘 모델, 케익형성 모델 및 표준세공막힘 모델을 이용하여 막간차압을 산출하기 위한 막 오염 통합 모델을 생성하는 통합 모델링부;

상기 막 오염 통합 모델의 막간차압을 산출하고 상기 막 오염 실측 데이터의 막간차압을 이용하여 상기 막 오염 통합 모델에 대한 최적화 매개변수를 주기적으로 산출하는 막 오염 예측부; 및

상기 주기적으로 산출되는 최적화 매개변수를 독립 변수로 하고, 상기 막 오염 실측 데이터의 막간 차압을 종속변수로 한 다중 회귀 분석 방법을 통하여 막 오염 현상에서 기여도가 가장 높은 모델을 진단하는 진단부

를 포함하는 통합 모델을 이용한 막 오염 진단 시스템.

명 세 서

기 술 분 야

[0001] 본 발명은 막 오염 현상을 설명하는 단일 모델을 통합하여 막오염 통합 모델을 생성하며, 이를 이용하여 막 오염 현상을 예측하고 진단할 수 있는 방법 및 시스템에 관한 것이다.

배 경 기 술

[0002] 분리막(membrane)은 특정 성분을 선택적으로 통과시킴으로써 혼합물을 분리시킬 수 있는 액체 혹은 고체막 혹은 공경(pore diameter, 수십㎚~수십㎛)과 표면입자에 의하여 용액 내에 포함된 처리대상 물질을 분리해 낼 수 있는 막이다.

[0003] 분리막을 이용하여 폐수를 처리할 때 여과시간이 증가함에 따라 투과유속이 급격히 감소하는 막오염 현상이 발생한다. 이는 폐수에 함유된 부유물질이나 분리막 표면에 쉽게 흡착하는 성질을 가진 물질들이 막 표면과 기공에 축적되어 흐름을 감소시키기 때문이다. 이러한 막오염은 분리대상 물질과 막 재질간의 상호작용에 의해서 일어나며, 투과 물질의 크기와 막 기공의 크기도 밀접한 관계가 있다. 또한 막 형태 및 운전조건 등에 의해 상당한 영향을 받는데, 막오염은 여러 가지 복합적인 요인이 동시에 작용하여 발생하며 이러한 현상으로 투과유속이 감소하고 배제율이 증가되게 된다.

[0004] 도 1은 여과시간변화에 따른 투과유속의 감소를 나타내는 정압 막힘 여과 모델의 모식도이다. 정압 막힘 여과모델은 세공의 크기가 균일하다는 가정에서 유도되었으며, 세공막힘 모델과 케익형성 모델이 있다.

[0005] 완전세공막힘 모델(Complete pore blocking model)은 용질의 입자크기와 분리막의 세공 크기가 같아서 용질입자가 세공을 완전히 막아버리지만 입자들끼리는 서로 중첩되지 않는 형태로 세공의 수가 감소하며, 막힌 면적은 투과부피에 비례한다.

[0006] 중간세공막힘 모델(Intermediate pore blocking model)은 완전차폐모델과 케익형성 모델의 중간 형태로 막표면에 도달한 입자들이 세공 하나 하나를 반드시 막는 것이 아니라 세공을 막을 수도 있고, 입자들끼리 중첩될 수

도 있는 형태를 나타낸다.

[0007] 표준세공막힘 모델(Standard pore blocking model)은 입자의 크기가 분리막의 세공 크기에 비하여 상당히 작은 경우에 입자들이 세공속으로 침투하여 세공벽에 부착되며, 세공의 일부 또는 전체를 막아 세공부피를 감소시킨다. 감소된 세공부피는 투과부피에 비례하게 된다.

[0008] 케익형성 모델(Cake filtration model)은 입자의 크기가 분리막의 세공보다 커서 세공속으로 침투되지 못하고 이미 세공을 막고 있거나 표면에 존재하는 입자 등에 중첩되어 케익을 형성한다.

[0009] 그러나 막오염 발생에 있어서 실질적으로는 하나의 주요 메커니즘을 포함한 복수개의 막오염 메커니즘이 동시에 또는 순차적으로 작용하기 때문에 실제적인 단일 막오염 메커니즘 만으로 규명하기에는 너무 복잡하다. 그러므로, 막오염 현상을 좀 더 정확히 예측하기 위해서는 복수개의 막오염 메커니즘이 결합되어 발생하는 효과를 고려하고, 막오염의 각 단계에 있어서 주요 메커니즘을 규명하여야 한다.

발명의 내용

해결하려는 과제

[0010] 본 발명은 실제의 막오염에 있어서 복수개의 메커니즘이 통합적으로 미치는 영향을 파악하고, 네 가지의 막오염 모델을 하나의 식으로 통합하여 새로운 모델인 막오염 통합 모델을 생성하며, 이를 이용하여 막오염 현상 예측 및 진단 방법을 제공한다.

[0011] 또한 막 오염 통합 모델을 이용하여 막 오염 현상을 더 정확하게 예측하며, 네 가지 막 오염 모델 중 막 오염 현상에 주도적인 역할을 하는 주요 모델의 진단 방법과 시스템을 제공한다.

과제의 해결 수단

[0012] 본 발명인 통합 모델을 이용한 막 오염 예측 방법은 통합 모델링부가 완전세공막힘 모델, 중간세공막힘 모델, 케익형성 모델 및 표준세공막힘 모델을 이용하여 막간차압(TMP,)을 산출하기 위한 막 오염 통합 모델을 생성하는 단계; 데이터 수집부가 주기적으로 막간차압 데이터가 포함된 막 오염 실측 데이터를 수집하는 단계; 상기 막 오염 예측부가 상기 통합 모델의 막간차압을 산출하는 단계; 상기 막 오염 예측부가 상기 막 오염 실측 데이터의 막간차압과 통합 모델의 막간 차압을 이용하여 상기 통합 모델에 대한 최적화 매개변수를 산출하는 단계; 상기 막 오염 예측부가 상기 최적화 매개변수를 이용하여 상기 막 오염 통합 모델의 막간 차압 예측 값을 산출하는 단계를 포함한다.

[0013] 상기 막 오염 통합 모델을 생성하는 단계는, 하기의 수학식 2 내지 수학식 6에 의하여 실행될 수 있다.

[0014] [수학식 2]

[0015] $$\frac{P}{P_0} = \frac{RA_0}{R_0A}$$

[0016] (P/P_0: 막간 차압, R/R_0: 투과저항, A/A_0: 투과면적)

[0017] [수학식 3]

[0018] $$V = \frac{\exp(k_i J_0 t) - 1}{K_i} - \frac{J_0}{k_b} \cdot \ln(1 - k_b t)$$

[0019] (V: 막 오염 통합 모델의 투과부피)

[0020] [수학식 4]

$$\frac{R}{R_0} = (1 + k_c J_0 V) + \left(1 + \frac{k_s V}{2}\right)^{-2}$$

[0021]

[0022] (R/R_0: 막 오염 통합 모델의 투과 저항)

[0023] [수학식 5]

$$\frac{R}{R_0} = \left[1 + K_c J_0 \left(\frac{\exp(k_i J_0 t) - 1}{k_i} - \frac{J_0}{k_b} \cdot \ln(1 - k_b t)\right)\right] + \left[1 - \frac{K_s}{2}\left(\frac{\exp(k_i J_0 t) - 1}{k_i} - \frac{J_0}{k_b} \cdot \ln(1 - k_b t)\right)\right]^{-2}$$

[0024]

[0025] [수학식 6]

$$\frac{P}{P_0} = \frac{a \cdot \exp(k_i J_0 t)}{1 - k_b t} \cdot \left\{\left[1 + K_c J_0 \left(\frac{\exp(k_i J_0 t) - 1}{k_i} - \frac{J_0}{k_b} \cdot \ln(1 - k_b t)\right)\right] + \left[1 - \frac{K_s}{2}\left(\frac{\exp(k_i J_0 t) - 1}{k_i} - \frac{J_0}{k_b} \cdot \ln(1 - k_b t)\right)\right]^{-2}\right\}$$

[0026]

[0027] (P/P_0: 막 오염 통합 모델의 막간차압, a: 최초 막간 차압 매개변수, k_b: 완전세공막힘 모델의 매개변수, k_i: 중간세공막힘 모델의 매개변수, k_c: 케익형성 모델의 매개변수, k_s: 표준세공막힘 모델의 매개변수, J_0: 최초 플럭스)

[0028] [수학식 7]

$$f = \min \sum_{i=1}^{m} \left[\left(\frac{P}{P_0}\right)_{i,measured} - \left(\frac{P}{P_0}\right)_{i,model}\right]^2$$

[0029]

[0030] ($_{I,measured}$: 막 오염 실측 데이터의 막간 차압, $_{i,\ model}$: 막 오염 통합 모델의 막간 차압, m: 막 오염 실측 데이터의 데이터 수)

[0031] 상기 막 오염 통합 모델의 막간 차압 예측 값을 산출하는 단계는, 상기 수학식 7에 의하여 산출되는 최적화 매개변수를 상기 수학식 6으로 정의되는 막 오염 통합 모델에 대입함으로써 실행될 수 있다.

[0032] 상기 막 오염 예측부가 상기 막 오염 통합 모델의 막간 차압 예측 값과 상기 막 오염 실측 데이터의 막간 차압을 이용하여 상기 막 오염 통합 모델의 정확도를 판단하는 단계를 더 포함한다.

[0033] 상기 막 오염 통합 모델의 정확도를 판단하는 단계는, 하기의 [식 8]로 정의되는 상기 막 오염 통합 모델의 막간 차압 예측값과 상기 막 오염 실측 데이터의 막간 차압간의 평균 제곱근 편차(RMSE, Root Mean Square Error)의 값을 통하여 판단할 수 있다.

[0034] [수학식 8]

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{m} \left[\left(\frac{P}{P_0}\right)_{i,measured} - \left(\frac{P}{P_0}\right)_{i,modeled}\right]^2}{m - 1}}$$

[0035]

[0036] ($_{i,\ modeled}$: 막 오염 통합모델의 막간 차압 예측 값)

[0037] 통합 모델을 이용한 막 오염 진단 방법은 통합 모델링부가 완전세공막힘 모델, 중간세공막힘 모델, 케익형성 모델 및 표준세공막힘 모델을 이용하여 막간차압(TMP,Trans Membrane Pressure)을 산출하기 위한 막 오염 통합 모델을 생성하는 단계; 데이터 수집부가 주기적으로 막간차압 데이터가 포함된 막 오염 실측 데이터를 수집하는 단계; 상기 막 오염 예측부가 상기 통합 모델의 막간차압을 산출하는 단계; 상기 막 오염 예측부가 상기 막 오

염 실측 데이터의 막간차압과 통합 모델의 막간 차압을 이용하여 상기 통합 모델에 대한 최적화 매개변수를 주기적으로 산출하는 단계; 진단부가 상기 주기적으로 산출되는 최적화 매개변수를 독립 변수로 하고, 상기 막 오염 실측 데이터의 막간 차압을 종속 변수로 한 다중 회귀 분석 방법을 통하여 막 오염 현상에서 기여도가 가장 높은 모델을 진단하는 단계를 포함한다.

[0038] 상기 진단하는 단계는 상기 완전세공막힘 모델, 중간세공막힘 모델, 케익형성 모델 및 표준세공막힘 모델의 각각의 매개변수가 적용된 완전 회귀 모델을 이용하여 상기 종속 변수에 대한 단일 회귀 분석을 하는 단계; 상기 완전 회귀 모델에 대한 에프검정을 실행하여 평균회귀자승합을 산출하는 단계; 상기 완전세공막힘 모델, 중간세공막힘 모델, 케익형성 모델 및 표준세공막힘 모델 중 어느 하나의 매개변수를 제외한 각각의 축소 회귀 모델을 이용하여 단일 회귀 분석을 하는 단계; 상기 각각의 축소 회귀 모델에 대한 에프검정을 실행하여 평균회귀자승합을 산출하는 단계; 및 상기 완전 회귀 모델의 평균회귀자승합과 상기 축소 회귀 모델의 평균회귀자승합 간의 차를 이용하여 기여도가 가장 큰 모델을 진단하는 단계를 포함한다.

[0039] 본 발명인 통합 모델을 이용한 막 오염 예측 시스템은 막간차압 데이터가 포함된 막 오염 실측 데이터를 주기적으로 수집하는 데이터 수집부; 완전세공막힘 모델, 중간세공막힘 모델, 케익형성 모델 및 표준세공막힘 모델을 이용하여 막간차압을 산출하기 위한 막 오염 통합 모델을 생성하는 통합 모델링부; 상기 막 오염 통합 모델의 막간차압을 산출하고 상기 막 오염 실측 데이터의 막간차압을 이용하여 상기 막 오염 통합 모델에 대한 최적화 매개변수를 산출하며, 상기 최적화 매개변수를 이용하여 상기 막 오염 통합 모델의 막간 차압 예측 값을 산출하는 막 오염 예측부를 포함한다.

[0040] 상기 막 오염 예측부는 상기 막 오염 통합 모델의 막간 차압 예측 값과 상기 막 오염 실측 데이터의 막간 차압을 이용하여 상기 막 오염 통합 모델의 정확도를 판단할 수 있다.

[0041] 본 발명인 통합 모델을 이용한 막 오염 진단 시스템은 막간차압 데이터가 포함된 막 오염 실측 데이터를 주기적으로 수집하는 데이터 수집부; 완전세공막힘 모델, 중간세공막힘 모델, 케익형성 모델 및 표준세공막힘 모델을 이용하여 막간차압을 산출하기 위한 막 오염 통합 모델을 생성하는 통합 모델링부; 상기 막 오염 통합 모델의 막간차압을 산출하고 상기 막 오염 실측 데이터의 막간차압을 이용하여 상기 막 오염 통합 모델에 대한 최적화 매개변수를 주기적으로 산출하는 막 오염 예측부; 및 상기 주기적으로 산출되는 최적화 매개변수를 독립 변수로 하고, 상기 막 오염 실측 데이터의 막간 차압을 종속 변수로 한 다중 회귀 분석 방법을 통하여 막 오염 현상에서 기여도가 가장 높은 모델을 진단하는 진단부를 포함한다.

발명의 효과

[0042] 본 발명인 통합 모델을 이용한 막 오염 예측 및 진단 방법과 시스템은 실제의 막오염에 있어서 복수개의 메커니즘이 통합적으로 미치는 영향을 파악하고, 막오염 현상을 예측하기 위한 새로운 모델인 막 오염 통합 모델을 생성하고 네 가지의 막 오염 모델을 하나의 식으로 통합하여 해석할 수 있다.

[0043] 또한 막 오염 통합 모델을 이용하여 막 오염 현상을 더 정확하게 예측하며, 네 가지 막 오염 모델 중 막 오염 현상에 주도적인 역할을 하는 주요 모델을 진단 할 수 있다.

도면의 간단한 설명

[0044] 도 1은 시간변화에 따른 투과유속의 감소를 나타내는 정압 막힘 여과 모델의 모식도,

도 2는 본 발명의 일실시예에 따른 통합 모델을 이용한 막 오염 예측 및 진단 시스템의 구성도,

도 3은 본 발명의 일실시예에 따른 통합 모델링부의 동작 순서도,

도 4는 본 발명의 일실시예에 따른 막 오염 예측부의 동작 순서도,

도 5는 막오염 실측 데이터, 막 오염 통합 모델 및 개별적인 막 오염 모델의 막간 차압을 도시한 그래프,

도 6은 실측 데이터, 막 오염 통합 모델 및 개별적인 막 오염 모델의 막간 차압간의 평균 제곱근 편차를 수치적으로 산출한 표,

도 7은 본 발명의 일실시예에 따른 진단부의 동작 순서도, 및

도 8은 본 발명의 일실시예에 따른 막 오염 모델의 기여도를 나타낸 표이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0045] 이하, 첨부한 도면을 참조하여 본 발명의 바람직한 실시 예를 설명하면 다음과 같다. 하기의 각 도면의 구성 요소들에 참조 부호를 부가함에 있어서, 동일한 구성 요소들에 한해서는 비록 다른 도면상에 표시되더라도 가능한 한 동일한 부호를 가지도록 하며, 본 발명의 요지를 불필요하게 흐릴 수 있다고 판단되는 공지 기능 및 구성에 대한 상세한 설명은 생략한다.

[0046] 도 2는 본 발명의 일실시예에 따른 통합 모델을 이용한 막 오염 예측 및 진단 시스템의 구성도이다.

[0047] 데이터 데이터 수집부(21)는 막 여과 수처리 시스템(10)으로부터 주기적으로 막 오염 실측 데이터를 수집한다. 막 오염 실측 데이터에는 막 여과 수처리 시스템(10)에 실제로 사용되는 분리막의 막간차압이 일정한 주기에 따라 측정되어 데이터로 포함되어 있다. 데이터 수집부(21)는 막 여과 수처리 시스템(10)과 유선상으로 연결되어 있거나 또는 무선 통신 모뎀을 이용하여 데이터 통신을 한다.

[0048] 통합 모델링부(22)는 완전세공막힘 모델, 중간세공막힘 모델, 케익형성 모델 및 표준세공막힘 모델이 분리막에 끼치는 영향을 통합적으로 분석하기 위한 수학적 모델을 생성한다. 통합 모델링부(22)의 막 오염 통합 모델을 생성하는 수학적 단계는 다음과 같다.

[0049] 분리막의 투과속도(Q)는 [수학식 1]과 같이 막간차압(P)과 투과저항(R)으로 표시되는 Darcy의 법칙으로 나타낼 수 있다. 막간차압(P)을 구동력으로 하는 여과공정에서 미립자를 함유한 콜로이드 용액의 투과속도는 시간이 지남에 따라 감소하는 현상이 발생한다. 투과속도의 저하현상은 막 표면의 세공이 현탁 입자에 의해 막히거나 용액중의 현탁 입자가 막 표면에 누적되어 케익층을 형성하는 등의 막 오염이 발생하여 투과저항이 증가하기 때문이다.

[0050] [수학식 1]

[0051] $$Q=\frac{PA}{R\mu}$$

[0052] 상기의 수학식 1에서 μ는 고유점도, A는 분리막의 면적을 의미한다.

[0053] 투과속도가 불변인 경우 압력차는 분리막의 막오염 현상이 진행될수록 증가하는 경향을 보이며, [수학식 1]은 [수학식 2]로 표현될 수 있다.

[0054] [수학식 2]

[0055] $$\frac{P}{P_0}=\frac{RA_0}{R_0A}$$

[0056] (P/P_0: 막간 차압, R/R_0: 투과저항, A/A_0: 투과면적)

[0057] [수학식 2]에서 P/P_0는 최초의 막간차압에 대한 변화량을, A_0/A는 투과면적 변화량을 의미하며, R/R_0는 막표면의 케익층 형성으로 인하여 증가된 투과저항을 의미한다. 이하, 설명을 함에 있어서 P/P_0는 막간 차압으로, R/R_0는 투과저항으로, A/A_0는 투과면적으로 표기하기로 한다.

[0058] 분리막이 완전세공막힘 모델과 중간세공막힘 모델에 의하여 막오염 현상이 진행되는 경우 분리막의 일부 세공은 여과 작용을 할 수 없게 된다. 따라서 여과작용이 진행되는 동안 막히지 않은 세공에서의 플럭스는 증가하게 된다.

[0059] 완전세공막힘 모델과 중간세공막힘 모델에 있어서, 여과작용이 가능한 투과면적(A/A_0)는 하기의 [표 1]을 통하여

구할 수 있으며, [표 1]을 통하여 산출된 수치를 [수학식 2]에 대입함으로써 여과작용이 가능한 면적을 통하여 여과되는 증가 플럭스를 계산 할 수 있다. 하기의 [표 1]에서 k_b와 k_i는 각각 완전세공막힘 모델과 중간세공막힘 모델의 매개변수를 의미하며, J_0는 여과작용이 시작되는 시점에서의 최초플럭스를 의미한다.

표 1

[0060]

	완전세공막힘모델	중간세공막힘모델
투과 면적 (m^2)	$\frac{A}{A_0}=1-k_bt$	$\frac{A}{A_0}=\exp(-k_iJt)$
증가플럭스 ($L/m^3 \cdot hr$)	$J=\frac{J}{1-k_bt}$	$J=\frac{J}{\exp(-k_iJt)}$
투과 면적 (m^2)	$V=-\frac{J}{k_b}\cdot\ln(1-k_bt)$	$V=\frac{\exp(k_iJt)-1}{K_i}$

[0061] 케익형성모델 및 표준세공막힘 모델에 있어서 투과저항은 분리막의 표면에 형성되는 케익층에 의하여 증가되며, 증가되는 투과저항 (R/R_0)은 하기의 [표 2]를 이용하여 산출할 수 있다.

표 2

[0062]

	케익형성 모델	표준세공막힘 모델
투과저항	$\frac{R}{R_0}=1+K_cJ_0V$	$\frac{R}{R_0}=\left(1-\frac{k_sV}{2}\right)^{-2}$

[0063] 막 오염 통합 모델은 분리막의 막힘 현상에 따른 투과면적의 감소와 케익층의 형성에 따른 투과 저항의 증가를 설명하기 위하여 이용될 수 있다.

[0064] 도 3은 본 발명의 일실시예에 따른 통합 모델링부(22)의 동작 순서도이다.

[0065] 통합 모델링부(22)는 완전세공막힘 모델과 중간세공막힘 모델의 결합 효과에 의하여 분리막의 막힘 현상이 발생하는 경우 [표 1]의 완전세공막힘 모델과 중간세공막힘 모델 각각의 투과부피의 합에 의하여 막 오염 통합 모델의 투과부피를 산출할 수 있으며, 이는 [수학식 3]으로 나타낼 수 있다(S301).

[0066] [수학식 3]

$$V=\frac{\exp(k_iJ_0t)-1}{K_i}-\frac{J_0}{k_b}\cdot\ln(1-k_bt)$$

[0067]

[0068] (V: 막 오염 통합 모델의 투과부피)

[0069] 또한, 여과액에 가해지는 투과저항은 케익형성 모델과 표준세공막힘 모델 현상의 결합 효과에 의하여 발생되므로, 통합 모델링부(22)는 하기의 수학식 4에서 보는 바와 같이 [표 2]의 투과저항의 합으로 막 오염 통합 모델의 투과 저항을 산출할 수 있다(S302).

[0070] [수학식 4]

[0071] $$\frac{R}{R_0}=(1+k_cJ_0V)+\left(1+\frac{k_sV}{2}\right)^{-2}$$

[0072] (R/R_0: 막 오염 통합 모델의 투과 저항)

[0073] [수학식 3]의 투과부피(V)를 [수학식 4]에 대입하면 막 오염 통합 모델의 투과저항은 하기의 [수학식 5]에 의하여 표현될 수 있다(S303).

[0074] [수학식 5]

[0075] $$\frac{R}{R_0}=\left[1+K_cJ_0\left(\frac{\exp(k_iJ_0t)-1}{k_i}-\frac{J_0}{k_b}\cdot\ln(1-k_bt)\right)\right]+\left[1-\frac{K_s}{2}\left(\frac{\exp(k_iJ_0t)-1}{k_i}-\frac{J_0}{k_b}\cdot\ln(1-k_bt)\right)\right]^{-2}$$

[0076] [수학식 5]의 투과 저항을 [수학식 2]에 대입하면 하기의 [수학식 6]과 같은 막 오염 통합 모델 막간 차압에 대한 수식을 구할 수 있다(S304).

[0077] [수학식 6]

[0078] $$\frac{P}{P_0}=\frac{a\cdot\exp(k_iJ_0t)}{1-k_bt}\cdot\left\{\left[1+K_cJ_0\left(\frac{\exp(k_iJ_0t)-1}{k_i}-\frac{J_0}{k_b}\cdot\ln(1-k_bt)\right)\right]+\left[1-\frac{K_s}{2}\left(\frac{\exp(k_iJ_0t)-1}{k_i}-\frac{J_0}{k_b}\cdot\ln(1-k_bt)\right)\right]^{-2}\right\}$$

[0079] (P/P_0: 막 오염 통합 모델의 막간차압, a: 최초 막간 차압 매개변수, k_b: 완전세공막힘 모델의 매개변수, k_i: 중간세공막힘 모델의 매개변수, k_c: 케익형성 모델의 매개변수, k_s: 표준세공막힘 모델의 매개변수, J_0: 최초 플럭스)

[0080] [수학식 6]에서 $\exp(k_iJ_0t)/(1-k_bt)$는 [표 1]의 투과면적(A/A_0)에 의하여 구할 수 있으며, a는 막 오염의 최초 값과 일치시키기 위한 매개변수이다.

[0081] 도 4는 막 오염 예측부의 동작 순서도이다. 막 오염 예측부(23)는 데이터 베이스에 저장된 막 오염 실측 데이터를 이용하여 수학식 6으로 표현되는 막 오염 통합모델의 4가지 매개변수(k_b, k_i, k_c 및 k_s)를 유전자 알고리즘(GA, Genetic algorithm)을 이용하여 최적화 할 수 있다. 유전자 알고리즘은 목적 함수의 미분 과정이나 특별한 수학적 연산 없이 매개변수의 병렬적인 탐색이라는 측면에서 최적화를 수행할 수 있다.

[0082] 막 오염 예측부(23)는 막 오염 실측 데이터의 막간차압과 막 오염 통합 모델의 막간차압에 최소 제곱 오차법을 적용하여 4가지 매개변수에 대한 최적화 매개변수 세트를 산출할 수 있으며, 이는 하기의 [수학식 7]과 같은 목적 함수로 표현될 수 있다(S401).

[0083] [수학식 7]

[0084] $$f=\min\sum_{i=1}^{m}\left[\left(\frac{P}{P_0}\right)_{i,measured}-\left(\frac{P}{P_0}\right)_{i,model}\right]^{-2}$$

[0085] ($_{I,measured}$: 막 오염 실측 데이터의 막간 차압, $_{i,model}$: 막 오염 통합 모델의 막간 차압, m: 막 오염 실측 데이터의 데이터 수)

[0086] [수학식 7]에 있어서 $_{I,measure}$는 막 오염 실측 데이터의 막간 차압을, $_{i,model}$은 막 오염 통합 모델의 막간 차압을 나타내며 m은 막 오염 실측 데이터의 데이터 수를 나타낸다.

[0087] 막 오염 예측부(23)는 [수학식 7]을 이용하여 산출되는 4가지 매개변수에 대한 최적화 매개변수를 수학식 6에 대입하여 막 오염 실측 데이터가 측정된 시점에 있어서의 막 오염 통합모델에 대한 막간 차압 예측 값을 산출할

수 있다(S402).

[0088] 막 오염 예측부(23)는 하기의 [수학식 8]과 같이 막 오염 통합 모델의 막간 차압 예측 값과 막 오염 실측 데이터의 막간 차압간의 평균 제곱근 편차(RMSE, Root Mean Square Error)를 이용하여 막 오염 통합모델의 막간 차압 예측 값의 정확도를 평가할 수 있다(S403). 막 오염 예측부(23)는 하기의 [수학식 8]에 의해 산출되는 평균 제곱근 편차의 값이 작게 나올수록 막 오염 통합모델이 실제 모델에 근접해 있다고 판단할 수 있다.

[0089] [수학식 8]

[0090]
$$RMSE=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{m}\left[\left(\frac{P}{P_0}\right)_{i,measured}-\left(\frac{P}{P_0}\right)_{i,modeled}\right]^{-2}}{m-1}}$$

[0091] ($_{i,\ modeled}$: 막 오염 통합모델의 막간 차압 예측 값)

[0092] [수학식 8]에서 $_{i,\ modeled}$는 막 오염 통합모델의 막간 차압 예측 값을 나타낸다.

[0093] 도 5a및 도 5b는 두 개의 막오염 실측 데이터의 막간 차압, 막 오염 통합 모델을 이용하여 예측된 막간 차압과 개별적인 막 오염 모델을 이용하여 예측된 막간 차압을 나타낸 그래프이며, 도 6은 두 개의 막오염 실측 데이터의 막간 차압과 막 오염 통합 모델 및 개별적인 막 오염 모델의 막간 차압 예측값과의 평균 제곱근 편차를 수치적으로 산출한 표이다. 막 오염 통합 모델의 막간 차압 예측값의 평균 제곱근 편차는 개별적인 막 오염 모델의 막간 차압 예측값 중 그 수치가 가장 낮은 경우보다 편차가 더 작게 나타나는 것을 알 수 있다.

[0094] 진단부(24)는 막 오염 통합 모델을 이용하여 산출한 최적화 매개변수를 데이터 수집부(21)에서 주기적으로 수집하는 막오염 실측 데이터에 대한 다중 회귀 분석을 통하여 각 모델의 기여도를 평가할 수 있다.

[0095] 예를 들면, 데이터 수집부(21)는 50일 동안 2일을 주기로 하여 막 오염 실측 데이터를 수집하면, 막 오염 예측부(23)는 최초 2일(즉, m=2)동안의 최적화 매개변수 세트를 산출하며, 최종적으로는 50일(즉, m=25)동안의 데이터 수에 따른 최적화 매개변수 세트를 산출한다. 따라서, 최적화 매개변수 세트는 데이터 수집부(21)의 막 오염 실측 데이터 수집 주기에 따라 주기적으로 업데이트 된다.

[0096] 진단부(24)는 막 오염 현상에 있어서, 4가지 모델 중 가장 기여도가 높은 모델을 찾아내기 위해서 다중 회귀 분석 방법(MRA, multiple regression analysis)을 주기적으로 업데이트 되는 최적화 매개변수 세트에 적용한다. 진단부(24)는 예를 들면, 50일 동안 2일을 주기로 업데이트 되는 25개의 최적화 매개변수 세트 k_b, k_i, k_c 및 k_s를 독립변수로, 막 오염 실측데이터의 막간차압$_{I,\ measure}$을 종속변수로 설정한다.

[0097] 진단부(24)는 4개의 독립변수 모두가 적용된 완전 회귀 모델(Full Regression Model)을 이용하여 종속변수에 대한 회귀분석을 하고(S701), 이에 대한 에프검정(F-test)을 실행함으로써 완전 회귀 모델에 대한 평균회귀자승합(MSR, Mean Squared Regression)을 산출한다(S702). 완전 회귀 모델에 대한 평균회귀자승합은 완전 회귀 모델이 막 오염 실측데이터의 막간차압을 얼마나 잘 설명하는지에 대한 평가 지표가 된다.

[0098] 진단부(24)는 이후 4개의 독립변수 중 하나의 독립변수를 제외한 각각의 축소 회귀 모델(Reduced Regression Model)을 이용하여 종속변수에 대한 회귀분석을 하고(S703), 이에 대한 에프검정을 실행함으로써 축소 회귀 모델에 대한 평균회귀자승합을 산출한다(S704). 축소 회귀 모델은 4개의 독립변수 중 하나의 독립변수가 제외된 것이므로 각각 (k_b, k_i, k_c), (k_b, k_i, k_s), (k_b, k_c, k_s) 및 (k_i, k_c, k_s)를 독립변수로 하는 모델이 이용될 수 있으며, 따라서 진단부(24)는 4개의 축소 회귀 모델에 대한 평균회귀자승합을 각각 산출한다.

[0099] 진단부(24)는 4개의 축소 회귀 모델에 대한 평균회귀자승합과 완전 회귀 모델에 대한 평균자승합의 차를 이용하여 각각의 독립변수, 즉 각각의 최적화 매개변수가 막 오염 실측 데이터에 기여하는 정도를 평가할 수 있다(S705). 진단부(24)는 4개의 축소 회귀 모델에 대한 평균회귀자승합과 완전 회귀 모델에 대한 평균자승합의 차가 가장 큰 값을 나타내는 경우에 있어서 제외된 독립변수를 막 오염에 있어서 기여도가 가장 큰 주요 매개변수로 평가할 수 있다(S706).

[0100] 도 8은 4개의 매개변수에 따른 각각의 기여도와 기여율을 나타낸다. 실측데이터 1에서는 중간세공막힘 모델의

매개변수(k_i)가 제외된 축소회귀모델의 평균회귀자승합과 완전회귀모델의 평균회귀자승합간의 차가 가장 크게 나타나고, 실측데이터 2에서는 케익형성 모델의 매개변수(k_c)가 제외된 축소회귀모델의 평균회귀자승합과 완전회귀모델의 평균회귀자승합간의 차가 가장 크게 나타남을 알 수 있다. 이를 통해 실측데이터 1에서는 중간세공막힘모델이, 실측데이터 2에서는 케익형성모델이 막오염에 있어 기여도가 큰 매개변수로 평가될 수 있다.

[0101] 본 발명의 실시예들은 다양한 컴퓨터로 구현되는 동작을 수행하기 위한 프로그램 명령을 포함하는 컴퓨터 판독 가능 매체를 포함한다. 상기 컴퓨터 판독 가능 매체는 프로그램 명령, 데이터 파일, 데이터 구조 등을 단독으로 또는 조합하여 포함할 수 있다. 상기 매체에 기록되는 프로그램 명령은 본 발명을 위하여 특별히 설계되고 구성된 것들이거나 컴퓨터 소프트웨어 당업자에게 공지되어 사용 가능한 것일 수도 있다. 컴퓨터 판독 가능 기록 매체의 예에는 하드 디스크, 플로피 디스크 및 자기 테이프와 같은 자기 매체(magnetic media), CDROM, DVD와 같은 광기록 매체(optical media), 플롭티컬 디스크(floptical disk)와 같은 자기-광 매체(magneto-optical media), 및 롬(ROM), 램(RAM), 플래시 메모리 등과 같은 프로그램 명령을 저장하고 수행하도록 특별히 구성된 하드웨어 장치가 포함된다. 프로그램 명령의 예에는 컴파일러에 의해 만들어지는 것과 같은 기계어 코드뿐만 아니라 인터프리터 등을 사용해서 컴퓨터에 의해서 실행될 수 있는 고급 언어 코드를 포함한다.

[0102] 이상과 같이 본 발명에서는 구체적인 구성 요소 등과 같은 특정 사항들과 한정된 실시예 및 도면에 의해 설명되었으나 이는 본 발명의 보다 전반적인 이해를 돕기 위해서 제공된 것일 뿐, 본 발명은 상기의 실시예에 한정되는 것은 아니며, 본 발명이 속하는 분야에서 통상적인 지식을 가진 자라면 이러한 기재로부터 다양한 수정 및 변형이 가능하다. 따라서 본 발명의 사상은 설명된 실시예에 국한되어 정해져서는 아니되며, 후술하는 특허청구범위뿐 아니라 이 특허청구범위와 균등하거나 등가적 변형이 있는 모든 것들은 본 발명 사상의 범주에 속한다고 할 것이다.

부호의 설명

[0103] 10: 막 여과 수처리 시스템

20: 막 오염 예측 및 진단 시스템

21: 데이터 수집부

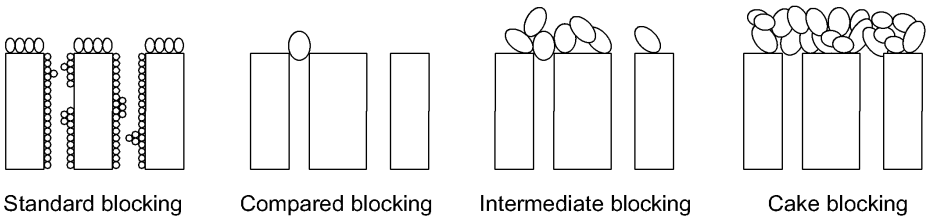
22: 통합 모델링부

23: 막 오염 예측부

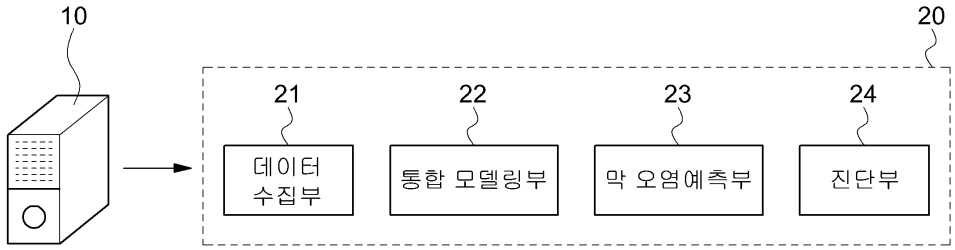
24: 진단부

도면

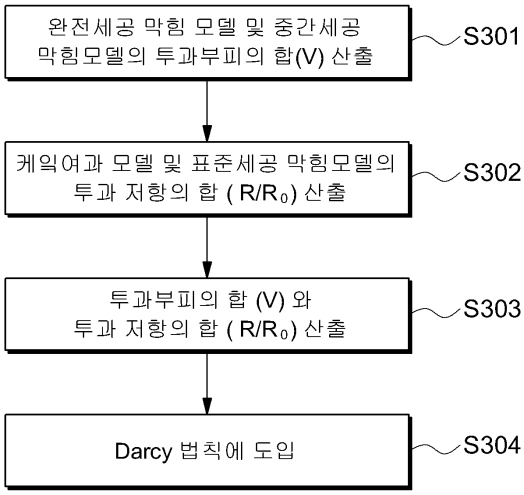
도면1



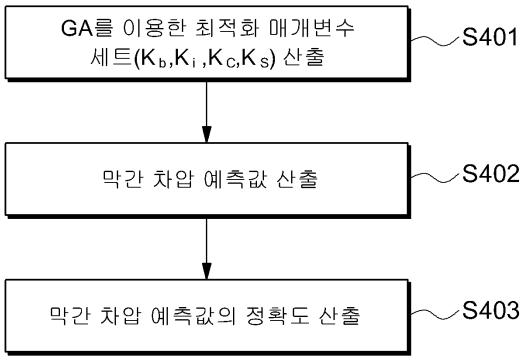
도면2


10
20
21
22
23
24
데이터 수집부
통합 모델링부
막 오염예측부
진단부

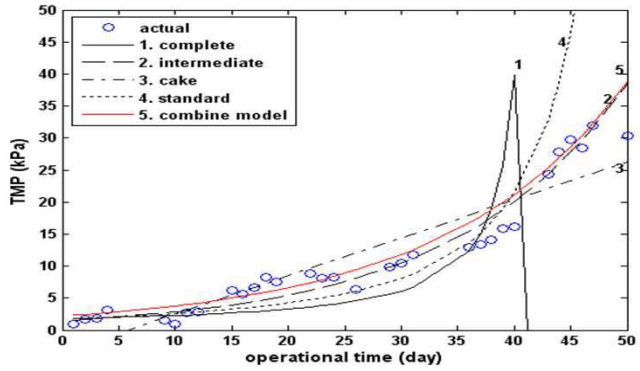
도면3


완전세공 막힘 모델 및 중간세공 막힘모델의 투과부피의 합(V) 산출
S301
케익여과 모델 및 표준세공 막힘모델의 투과 저항의 합 (R/R0) 산출
S302
투과부피의 합 (V) 와 투과 저항의 합 (R/R0) 산출
S303
Darcy 법칙에 도입
S304

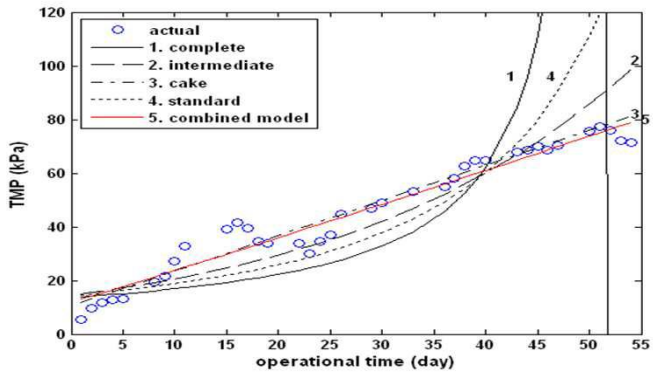
도면4


GA를 이용한 최적화 매개변수 세트(Kb,Ki ,KC,KS) 산출
S401
막간 차압 예측값 산출
S402
막간 차압 예측값의 정확도 산출
S403

도면5a



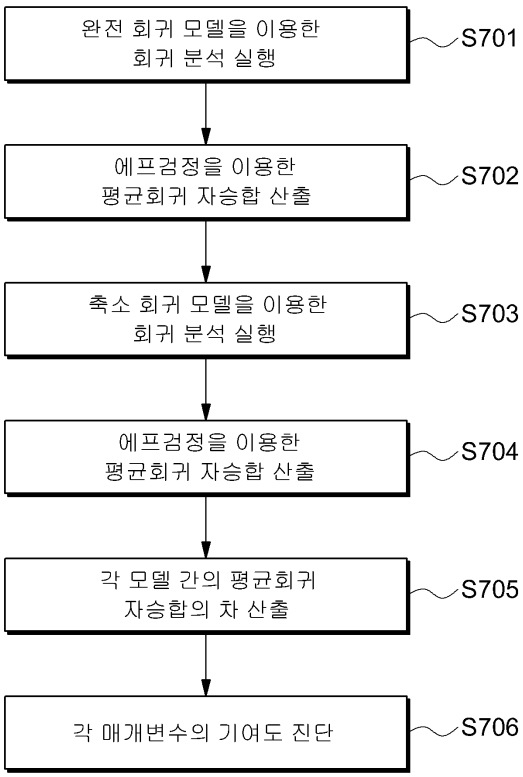
도면5b



도면6

막간 차압 예측값		평균 제곱근 편차	
		실측 데이터1	실측데이터2
개별 모델	완전 세공 막힘	28.36	89.04
	중간 세공 막힘	2.66	1.79
	케익 여과	4.12	0.897
	표준 세공 막힘	28.03	4.38
통합 모델		2.37	0.889

도면7



도면8

매개변수	실측데이터1		실측데이터2	
	기여도	기여율(%)	기여도	기여율(%)
완전세공막힘(κ_b)	0.2786	6.42	3.48	2.65
중간세공막힘(κ_i)	2.3528	54.22	53.83	41.07
케익여과 (κ_c)	1.5357	35.39	70.47	53.77
표준세공막힘(κ_s)	0.1722	3.97	3.92	2.51