



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2023-0069840
(43) 공개일자 2023년05월19일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
C01B 3/34 (2006.01) G05B 19/418 (2006.01)
(52) CPC특허분류
C01B 3/34 (2013.01)
G05B 13/048 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2022-0147675
(22) 출원일자 2022년11월08일
심사청구일자 없음
(30) 우선권주장
1020210155944 2021년11월12일 대한민국(KR)

(71) 출원인
창원대학교 산학협력단
경상남도 창원시 의창구 창원대학교 20(퇴촌동)
(72) 발명자
김순호
경상남도 창원시 마산합포구 3·15대로 154, 106
동 2304호(월포동, 월포 벽산블루밍)
(74) 대리인
김연권

전체 청구항 수 : 총 4 항

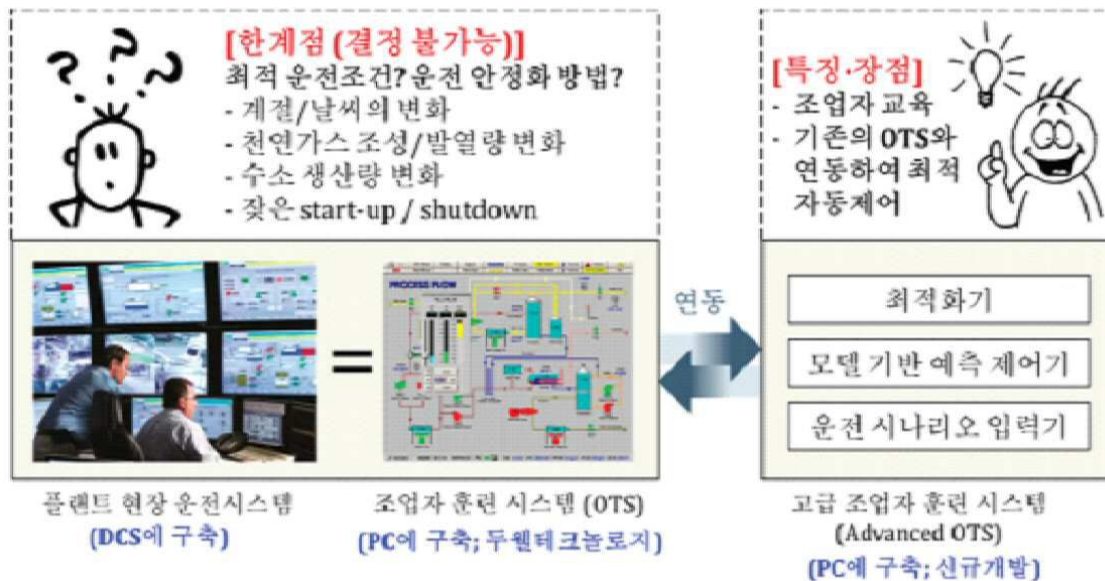
(54) 발명의 명칭 스팀-메탄개질을 통한 수소 생산 공정의 제어시스템 및 그 방법

(57) 요약

본 발명은 스팀-메탄개질을 통한 수소 생산 공정의 제어시스템을 개시한다. 본 발명은 [식 1]을 이용하여 현재 시점 k에서 여러 미래 입력 시나리오(scenario)를 생각하는 입력 시나리오 단계(Input Scenario); [식 2]를 이용하여 공정모델과 k 시점에서의 측정치를 이용하여 미래의 출력을 예측하는 모델 예측(Model Prediction) 단계;

(뒷면에 계속)

대표도 - 도1



[식 3]과 같은 목적함수를 최소화하는 입력 시나리오(scenario)를 선택하는 제한된 최적화(Constrained Optimization) 단계; 및 첫번째 입력요소를 공정에 적용하고, 상기 입력 시나리오 단계, 상기 모델 예측 및 상기 제한된 최적화를 반복 수행하는 수평적 전략 후퇴(Receding Horizon Strategy) 단계; 를 포함하는 것을 을 특징으로 한다.

[식 1]

$$\Delta U^m(k) = [\Delta u(k) \quad \Delta u(k+1) \quad \cdots \quad \Delta u(k+m)]$$

[식 2]

$$Y^p(k) = [y(k+1|k) \quad y(k+1|k) \quad \cdots \quad y(k+p|k)]$$

[식 3]

$$\begin{aligned} \min_{\Delta U^m(k)} & \left[\sum \|Y^{sp} - Y^p(k)\|_Q^2 + \|\Delta U^m(k)\|_R^2 + \|u(k+m) - u^{ss}\|_S^2 \right] \\ \text{subject to } & Y^{\min} \leq Y^p(k) \leq Y^{\max}, \quad U^{\min} \leq U^m(k) \leq U^{\max}, \text{ etc.} \end{aligned}$$

한편, 본 발명은, 창원시청(부처명: 고용노동부) '고용안정 선제 대응 패키지 지원사업(세부사업명: 신성장산업 고용확정형 기술혁신 중점지원사업)'의 일환 으로 "수소 생산 공정으로부터 이산화탄소 포집 개발(세부과제번호: 2020-0278, 연 구기간: 2020.05.01~2021.12.31)"을 통해 개발된 기술에 관한 것이다.

(52) CPC특허분류

G05B 19/41885 (2013.01)

C01B 2203/16 (2013.01)

명세서

청구범위

청구항 1

[식 1]을 이용하여 현재 시점 k 에서 여러 미래 입력 시나리오(scenario)를 생각하는 입력 시나리오 단계(Input Scenario);

[식 2]를 이용하여 공정모델과 k 시점에서의 측정치를 이용하여 미래의 출력을 예측하는 모델 예측(Model Prediction) 단계;

[식 3]과 같은 목적함수를 최소화하는 입력 시나리오(scenario)를 선택하는 제한된 최적화(Constrained Optimization) 단계; 및

첫번째 입력요소를 공정에 적용하고, 상기 단계들을 반복 수행하는 수평적 전략 후퇴(Receding Horizon Strategy) 단계;

[식 1]

$$\Delta U^m(k) = [\Delta u(k) \quad \Delta u(k+1) \quad \dots \quad \Delta u(k+m)]$$

[식 2]

$$Y^p(k) = [y(k+1|k) \quad y(k+1|k) \quad \dots \quad y(k+p|k)]$$

[식 3]

$$\min_{\Delta U^m(k)} \left[\sum \|Y^{sp} - Y^p(k)\|_Q^2 + \|\Delta U^m(k)\|_R^2 + \|u(k+m) - u^{ss}\|_s^2 \right]$$

$$\text{subject to } Y^{\min} \leq Y^p(k) \leq Y^{\max}, \quad U^{\min} \leq U^m(k) \leq U^{\max}, \text{ etc.}$$

를 포함하는 것을 특징으로 하는 스팀-메탄개질을 통한 수소 생산 공정의 제어시스템.

청구항 2

제1항에 있어서,

상기 스팀-메탄개질을 통한 수소 생산 공정의 제어시스템은 고급 조업자 훈련 시스템(Advanced OTS)과 연동되는 것을 특징으로 하는 스팀-메탄개질을 통한 수소 생산 공정의 제어시스템.

청구항 3

제1항에 있어서,

상기 스팀-메탄개질을 통한 수소 생산 공정의 제어시스템은 DSC 기반의 수소 생산시설 현장 운전 시스템과 연동되는 것을 특징으로 하는 스팀-메탄개질을 통한 수소 생산 공정의 제어시스템.

청구항 4

제1항에 있어서,

상기 스팀-메탄개질을 통한 수소 생산 공정의 제어시스템은 이산화 탄소 포집에 사용되는 것을 특징으로 하는 스팀-메탄개질을 통한 수소 생산 공정의 제어시스템.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은 스팀-메탄개질을 통한 수소 생산 공정의 제어시스템 및 그 방법에 관한 것이다.

배경 기술

[0003] 2040년 수소 경제 선도국가 도약을 위한 대규모 수소 공급·소비 체계 구축이 필요하다. 수소가 도시의 주된 에너지원이 되고 지속성장이 가능한 도시기반 수소플랫폼을 구축하기 위해서는 on-site 수소 생산(수소충전소에서 도시가스를 공급받아 직접 수소 생산 및 충전에 활용)과 그에 상응하는 핵심요소기술의 개발이 필수적이다.

[0004] 현재 전체 수소 소비량의 48%는 천연가스 스팀 개질을 통해 공급되고 있으며, 천연가스 스팀 개질 외 다른 수소 생산 후보기술로서, 바이오매스 및 가연성 폐자원 가스화, 수전해(전기 분해, 광 분해, 열 분해) 등이 논의되고 있으나, 기술성숙도 및 산업화(대량생산) 가능성, 에너지 전환 효율을 고려할 때, 중·단기적으로 천연가스 스팀 개질 방법이 증가하는 수소 수요량을 만족시키기 위한 유일한 대안이 될 것으로 예상된다.

[0005] 국내와 더불어 국외에서도, 메탄가스 개질을 통한 수소 생산 공정의 운영시스템 및 그 방법에 관한 기술개발은 보고되지 않아 기술개발의 부재가 존재한다.

[0006] 다만, Honeywell, AVEVA, AspenTech 등의 일부 제어시스템 개발/구축을 주요 사업영역으로 하는 선진사들을 중심으로, 전통적인 화학공정에 범용적으로 적용 가능한 제어/운영시스템이 개발/적용된 사례는 다수 보고되고 있으나, 이러한 범용 제어시스템은 일반적인 화학공정을 대상으로 한 것으로서, 메탄가스 개질을 통한 수소 생산 공정에서의 적용을 위해서는, 공정 특성을 고려한 알고리즘 개선 및 변형이 필요하며, 직접적인 활용은 불가능하다.

[0007] 또한, 기존의 범용적인 조업자 훈련 시스템(OTS)은 아래와 같은 기술적인 한계 지닌다.

[0008] - 실제 생산시설을 모사하기 위한 [가상공정]과 [기초 제어기]로만 구성

[0009] - 이때, [기초 제어기]는 온도/압력/유량을 사용자가 입력한 설정치로 조절하기 위한 단순 PID제어기로 구성

[0010] - 기존의 조업자 훈련 시스템은 상기 기술한 비정상적인 상황, 즉, 공정 운전 또는 주변 환경이 변화하는 상황에서, 조업자들에게 공정 안정화를 위해 어떻게 대처해야 하는지 제시하지 못함 (예시: 여름철 기온이 높은 날, PSA 분리 성능 하락에 의해 수소 순도가 저하될 경우, 조업자들은 [기초 제어기]의 설정치(온도/압력/유량)를 어떻게 변화시켜야 하는가?)

[0011] 한편, 본 발명은, 창원시청(부처명: 고용노동부) '고용안정 선제 대응 패키지 지원사업(세부사업명: 신성장산업 고용확정형 기술혁신 중점지원사업)'의 일환으로 "수소 생산 공정으로부터 이산화탄소 포집 개발(세부과제 번호: 2020-0278, 연 구기간: 2020.05.01~2021.12.31)"을 통해 개발된 기술에 관한 것이다.

발명의 내용

해결하려는 과제

[0013] 본 발명의 실시예는 비정상적인 상황, 주변환경/운전상황 변화에 대해서도 공정을 빠르게 안정화하고, 경제적/환경적 관점에서 최적 운전 가능한 시스템 및 숙련된 조업자 양성을 통한 경쟁력 확보가 가능한 스팀-메탄개질을 통한 수소 생산 공정의 제어시스템 및 그 방법을 제공하고자 한다.

[0014] 본 발명의 실시예는 Start-up / shutdown 시간 단축 및 향상된 제어 성능 (주변 환경 변화 및 외란에 대한 강건 제어)이 확보가 가능한 스팀-메탄개질을 통한 수소 생산 공정의 제어시스템 및 그 방법을 제공하고자 한다.

[0015] 본 발명의 실시예는 수소 생산량 변화에 따른 최적 운전조건 결정(자동제어/자동최적화), 특히, 경제성/환경성을 모두 고려하여 최적 운전조건 결정할 수 있는 스팀-메탄개질을 통한 수소 생산 공정의 제어시스템 및 그 방법을 제공하고자 한다.

[0016] 본 발명의 실시예는 이산화 탄소 포집에 사용 가능한 스팀-메탄개질을 통한 수소 생산 공정의 제어시스템 및 그 방법을 제공하고자 한다.

과제의 해결 수단

[0018] 본 발명의 실시예에 따른 스팀-메탄개질을 통한 수소 생산 공정의 제어시스템은 [식 1]을 이용하여 현재 시점 k에서 여러 미래 입력 시나리오(scenario)를 생각하는 입력 시나리오 단계(Input Scenario); [식 2]를 이용하여 공정모델과 k 시점에서의 측정치를 이용하여 미래의 출력을 예측하는 모델 예측(Model Prediction) 단계; [식 3]과 같은 목적함수를 최소화하는 입력 시나리오(scenario)를 선택하는 제한된 최적화(Constrained Optimization) 단계; 및 첫번째 입력요소를 공정에 적용하고, 상기 단계들을 반복 수행하는 수평적 전략 후퇴(Receding Horizon Strategy) 단계;를 포함한다.

[0019] [식 1]

$$\Delta U^m(k) = [\Delta u(k) \quad \Delta u(k+1) \quad \dots \quad \Delta u(k+m)]$$

[0020]

[0021] [식 2]

$$Y^p(k) = [y(k+1|k) \quad y(k+1|k) \quad \dots \quad y(k+p|k)]$$

[0022]

[0023] [식 3]

$$\min_{\Delta U^m(k)} \left[\sum \|Y^{sp} - Y^p(k)\|_Q^2 + \|\Delta U^m(k)\|_R^2 + \|u(k+m) - u^{ss}\|_s^2 \right]$$

subject to $Y^{\min} \leq Y^p(k) \leq Y^{\max}$, $U^{\min} \leq U^m(k) \leq U^{\max}$, etc.

[0024]

[0025] 상기 스팀-메탄개질을 통한 수소 생산 공정의 제어시스템은 고급 조업자 훈련 시스템(Advanced OTS)과 연동될 수 있다.

[0026] 상기 스팀-메탄개질을 통한 수소 생산 공정의 제어시스템은 DSC 기반의 수소 생산시설 현장 운전 시스템과 연동될 수 있다.

[0027] 상기 스팀-메탄개질을 통한 수소 생산 공정의 제어시스템은 이산화 탄소 포집에 사용될 수 있다.

발명의 효과

[0029] 본 발명의 실시예에 따르면, 비정상적인 상황, 주변환경/운전상황 변화에 대해서도 공정을 빠르게 안정화하고, 경제적/환경적 관점에서 최적 운전 가능한 시스템 및 숙련된 조업자 양성을 통한 경쟁력 확보가 가능한 스팀-메탄개질을 통한 수소 생산 공정의 제어시스템 및 그 방법을 제공할 수 있다.

[0030] 본 발명의 실시예에 따르면, Start-up / shutdown 시간 단축 및 향상된 제어 성능 (주변 환경 변화 및 외란에 대한 강건 제어)이 확보가 가능한 스팀-메탄개질을 통한 수소 생산 공정의 제어시스템 및 그 방법을 제공할 수 있다.

[0031] 본 발명의 실시예에 따르면, 수소 생산량 변화에 따른 최적 운전조건 결정(자동제어/자동최적화), 특히, 경제성/환경성을 모두 고려하여 최적 운전조건 결정할 수 있는 스팀-메탄개질을 통한 수소 생산 공정의 제어시스템 및 방법을 제공할 수 있다.

[0032] 본 발명의 실시예에 따르면, 이산화 탄소 포집에 사용 가능한 스팀-메탄개질을 통한 수소 생산 공정의 제어시스템 및 그 방법을 제공할 수 있다.

도면의 간단한 설명

[0034] 도 1은 본 발명의 실시예에 따른 스팀-메탄개질을 통한 수소 생산 공정의 제어시스템을 도시한 개략도이고, 도 2는 본 발명의 실시예에 따른 스팀-메탄개질을 통한 수소 생산 공정의 제어시스템을 이용한 수소 생산 공정 방법을 도시한 흐름도이다.

도 3은 본 발명의 실시예에 따른 스팀-메탄개질을 통한 수소 생산 공정의 제어시스템 및 그 방법의 모델예측제어(Model Predictive Control)를 도시한 개략도이다.

도 4는 본 발명의 실시예에 따른 스팀-메탄개질을 통한 수소 생산 공정의 제어시스템 및 방법을 통한 실험 결과를 도시한 그래프이다.

도 5 및 도 6은 본 발명의 실시예에 따른 수소충전소 제어시스템을 도시한 개략도이다.

도 7은 본 발명의 실시예에 따른 스팀-메탄개질을 통한 수소 생산 공정의 제어시스템을 이용한 수소 생산 공정 및 이산화탄소 포집 공정을 도시한 흐름도이다.

도 8은 본 발명의 실시예에 따른 스팀-메탄개질을 통한 수소 생산 공정의 제어시스템을 이용한 이산화탄소 포집 공정의 3차 스플라인 선점법을 도시한 것이다.

도 9는 본 발명의 실시예에 따른 스팀-메탄개질을 통한 수소 생산 공정의 제어시스템을 이용한 이산화탄소 포집 공정의 장거리 경계조건(FSBC)의 설정은 와 같다.

도 10는 본 발명의 실시예에 따른 스팀-메탄개질을 통한 수소 생산 공정의 제어시스템을 이용한 수소 생산 공정 및 이산화탄소 포집 공정의 기울기 기반의 적응-예측 선점 배열법을 도시한 것이다.

도 11은 본 발명의 실시예에 따른 스팀-메탄개질을 통한 수소 생산 공정의 제어시스템을 이용한 이산화탄소 포집 공정의 장치를 도시한 것이다.

도 12는 본 발명의 실시예에 따른 스팀-메탄개질을 통한 수소 생산 공정의 제어시스템을 이용한 이산화탄소 포집 공정의 에너지 효율 최적화를 위한 사용 진공펌프의 특성 곡선을 도시한 것이다.

도 13은 본 발명의 실시예에 따른 스팀-메탄개질을 통한 수소 생산 공정의 제어시스템을 이용한 이산화탄소 포집 공정의 에너지 효율 최적화를 위한 상용 진공펌프의 에너지 소모를 도시한 것이다.

도 14는 본 발명의 실시예에 따른 스팀-메탄개질을 통한 수소 생산 공정의 제어시스템을 이용한 이산화탄소 포집 공정의 에너지 효율 최적화를 위한 흡착 및 탈착 시간이 에너지 소모에 미치는 영향 분석을 도시한 것이다.

도 15는 본 발명의 실시예에 따른 스팀-메탄개질을 통한 수소 생산 공정의 제어시스템을 이용한 이산화탄소 포집 공정의 에너지 효율 최적화 결과를 도시한 것이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0035] 이하 첨부 도면들 및 첨부 도면들에 기재된 내용들을 참조하여 본 발명의 실시예를 상세하게 설명하지만, 본 발명이 실시예에 의해 제한되거나 한정되는 것은 아니다.

[0036] 본 명세서에서 사용된 용어는 실시예들을 설명하기 위한 것이며 본 발명을 제한하고자 하는 것은 아니다. 본 명세서에서, 단수형은 문구에서 특별히 언급하지 않는 한 복수형도 포함한다. 명세서에서 사용되는 "포함한다(comprises)" 및/또는 "포함하는(comprising)"은 언급된 구성요소, 단계는 하나 이상의 다른 구성요소, 단계의 존재 또는 추가를 배제하지 않는다.

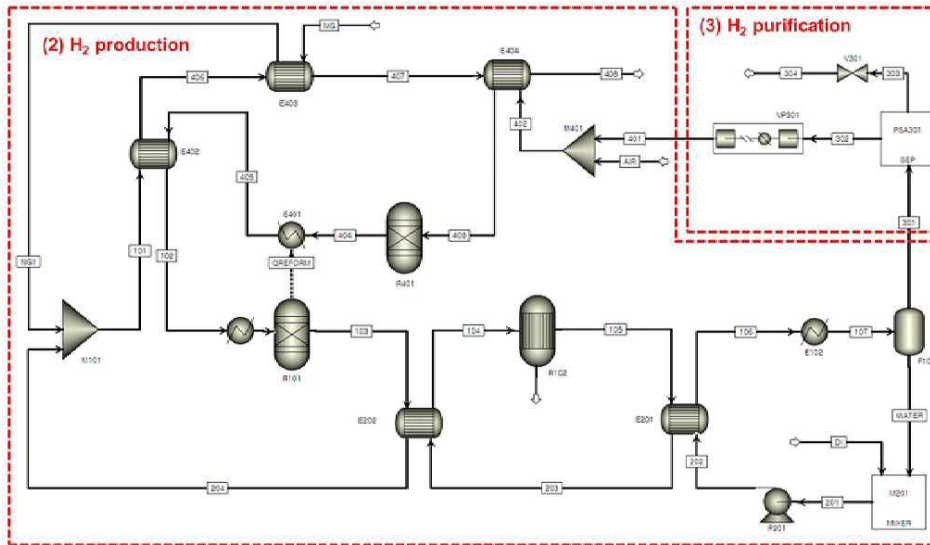
[0037] 본 명세서에서 사용되는 "실시예", "예", "측면", "예시" 등은 기술된 임의의 양상(aspect) 또는 설계가 다른 양상 또는 설계들보다 양호하다거나, 이점이 있는 것으로 해석되어야 하는 것은 아니다.

[0038] 또한, '또는'이라는 용어는 배타적 논리합 'exclusive or'이기보다는 포함적인 논리합 'inclusive or'를 의미한다. 즉, 달리 언급되지 않는 한 또는 문맥으로부터 명확하지 않는 한, 'x가 a 또는 b를 이용한다'라는 표현은

포함적인 자연 순열들(natural inclusive permutations) 중 어느 하나를 의미한다.

- [0039] 또한, 본 명세서 및 청구항들에서 사용되는 단수 표현("a" 또는 "an")은, 달리 언급하지 않는 한 또는 단수 형태에 관한 것이라고 문맥으로부터 명확하지 않는 한, 일반적으로 "하나 이상"을 의미하는 것으로 해석되어야 한다.
- [0040] 아래 설명에서 사용되는 용어는, 연관되는 기술 분야에서 일반적이고 보편적인 것으로 선택되었으나, 기술의 발달 및/또는 변화, 관례, 기술자의 선호 등에 따라 다른 용어가 있을 수 있다. 따라서, 아래 설명에서 사용되는 용어는 기술적 사상을 한정하는 것으로 이해되어서는 안 되며, 실시예들을 설명하기 위한 예시적 용어로 이해되어야 한다.
- [0041] 또한, 특정한 경우는 출원인이 임의로 선정한 용어도 있으며, 이 경우 해당되는 설명 부분에서 상세한 그 의미를 기재할 것이다. 따라서 아래 설명에서 사용되는 용어는 단순한 용어의 명칭이 아닌 그 용어가 가지는 의미와 명세서 전반에 걸친 내용을 토대로 이해되어야 한다.
- [0042] 다른 정의가 없다면, 본 명세서에서 사용되는 모든 용어(기술 및 과학적 용어를 포함)는 본 발명이 속하는 기술 분야에서 통상의 지식을 가진 자에게 공통적으로 이해될 수 있는 의미로 사용될 수 있을 것이다. 또 일반적으로 사용되는 사전에 정의되어 있는 용어들은 명백하게 특별히 정의되어 있지 않는 한 이상적으로 또는 과도하게 해석되지 않는다.
- [0043] 한편, 본 발명의 설명함에 있어서, 관련된 공지 기능 또는 구성에 대한 구체적인 설명이 본 발명의 요지를 불필요하게 흐릴 수 있다고 판단되는 경우에는, 그 상세한 설명을 생략할 것이다. 그리고, 본 명세서에서 사용되는 용어(terminology)들은 본 발명의 실시예를 적절히 표현하기 위해 사용된 용어들로서, 이는 사용자, 운용자의 의도 또는 본 발명이 속하는 분야의 관례 등에 따라 달라질 수 있다. 따라서, 본 용어들에 대한 정의는 본 명세서 전반에 걸친 내용을 토대로 내려져야 할 것이다.
- [0045] 도 1은 본 발명의 실시예에 따른 스팀-메탄개질을 통한 수소 생산 공정의 제어시스템을 도시한 개략도이고, 도 2는 본 발명의 실시예에 따른 스팀-메탄개질을 통한 수소 생산 공정의 제어시스템을 이용한 수소 생산 공정 방법을 도시한 흐름도이다.
- [0046] 본 발명의 실시예에 따른 스팀-메탄개질을 통한 수소 생산 공정의 제어시스템은 수소전기차 충전소용 온-사이트 수소 생산 공정의 고급 조업자 훈련 시스템(Advanced OTS)을 포함할 수 있다.
- [0047] 본 발명의 실시예에 따른 스팀-메탄개질을 통한 수소 생산 공정의 제어시스템은 기존의 "조업자 훈련 시스템과"과 연동하여, 비정상적인 상황, 주변 환경의 변화 등 실제 수소 생산 시설 운전 과정에서 발생 가능한 다양한 시나리오들을 생성함과 동시에, 조업자들에게 공정을 안정화하기 위한 최적 운전 방법을 제시함으로써(시스템적인 측면에서 계산을 통해 최적 운전 조건을 제시), 조업자들을 교육하는 목적으로 활용 가능하다.
- [0048] 본 발명의 실시예에 따른 스팀-메탄개질을 통한 수소 생산 공정의 제어시스템은 "고급 조업자 훈련 시스템"이 기존의 "조업자 훈련 시스템"뿐만 아니라, "DSC 기반의 수소 생산시설 현장 운전 시스템"과 직접적인 연동을 통해, 실제 생산시설을 직접 자동제어하는데에도 활용가능(유지보수 용이)하다.
- [0049] 본 발명의 실시예에 따른 스팀-메탄개질을 통한 수소 생산 공정의 제어시스템 및 그 방법은 수소전기차 충전소 또는 수소생산 공정/시설의 유지/보수/운영에 사용될 수 있다.
- [0050] 조업자들의 운전 교육에 활용하여 기존의 "조업자 훈련 시스템"과의 연동을 통해, 비정상적인 상황 또는 주변환경/운전상황 변화에 따른 공정 운전 방법 교육을 통해 최적 운전 가이드라인 제공, 시나리오 선택 및 조율이 가능하다.
- [0051] 최적 자동제어 시스템으로 직접적으로 활용하여 실제 수소전기차 충전소용 온-사이트 수소 제조 현장에서 설치된 DCS와의 연동을 통해, 설비 운전이 직접적으로 활용할 수 있다.
- [0052] 따라서, 비정상적인 상황 또는 주변환경/운전상황 변화에 대해서도 공정을 빠르게 안정화하고, 경제적/환경적 관점에서 최적 운전 가능한 시스템 및 숙련된 조업자 양성을 통한 경쟁력 확보가 가능하다.
- [0053] 또한, Start-up / shutdown 시간 단축 및 향상된 제어 성능(주변 환경 변화 및 외란에 대한 강건 제어)이 확보가 가능하다.

[0054] 또한, 수소 생산량 변화에 따른 최적 운전조건 결정(자동제어/자동최적화), 특히, 경제성/환경성을 모두 고려하여 최적 운전조건 결정할 수 있다.



[0055]

[0057] 도 3은 본 발명의 실시예에 따른 스팀-메탄개질을 통한 수소 생산 공정의 제어시스템 및 그 방법의 모델예측제어(Model Predictive Control)를 도시한 개략도이다.

[0058] 모델예측제어(Model Predictive Control) 방법은 하기와 같다.

[0059] Input Scenario 단계(S110): 현재 시점 k에서 여러 미래 입력 scenario를 생각([식 1] 참조)한다.

[0060] [식 1]

$$\Delta U^m(k) = [\Delta u(k) \quad \Delta u(k+1) \quad \cdots \quad \Delta u(k+m)]$$

[0061]

[0062] Model Prediction 단계(S120): 공정모델과 k 시점에서의 측정치를 이용하여 미래의 출력을 예측([식 2] 참조)한다.

[0063] [식 2]

$$Y^p(k) = [y(k+1|k) \quad y(k+1|k) \quad \cdots \quad y(k+p|k)]$$

[0064]

[0065] Constrained Optimization 단계(S130): [식 3]과 같은 목적함수를 최소화하는 입력 scenario를 선택한다.

[0066] [식 3]

$$\min_{\Delta U^m(k)} \left[\sum \left\| Y^{sp} - Y^p(k) \right\|_Q^2 + \left\| \Delta U^m(k) \right\|_R^2 + \left\| u(k+m) - u^{ss} \right\|_s^2 \right]$$

subject to $Y^{\min} \leq Y^p(k) \leq Y^{\max}$, $U^{\min} \leq U^m(k) \leq U^{\max}$, etc.

[0067]

[0068] Receding Horizon Strategy 단계(S140): 첫번째 입력요소를 공정에 적용하고, 상기 단계들을 반복한다.

[0070] 또한, 본 발명은 하기의 식과 그래프들을 이용할 수 있다.

State Space Model

$$\begin{aligned} x(t+1) &= Ax(t) + B_u u(t) + B_d d(t) + w(t) \\ \bar{y}(t) &= Cx(t) \\ y(t) &= \bar{y}(t) + v(t) \end{aligned}$$

Assumption:

A state space model augmented to include the disturbance dynamic model.

Derive Difference Form

$$\begin{aligned} &\begin{cases} x(t+1) = Ax(t) + B_u u(t) + B_d d(t) + w(t) \\ x(t) = Ax(t-1) + B_u u(t-1) + B_d d(t-1) + w(t-1) \end{cases} \\ \Delta x(t+1) &= A\Delta x(t) + B_u \Delta u(t) + B_d \Delta d(t) + \Delta w(t) \\ &\begin{cases} \bar{y}(t+1) = Cx(t+1) \\ \bar{y}(t) = Cx(t) \end{cases} \\ \bar{y}(t+1) &= \bar{y}(t) + C\Delta x(t+1) \\ &= \bar{y}(t) + C(A\Delta x(t) + B_u \Delta u(t) + B_d \Delta d(t) + \Delta w(t)) \\ &= \bar{y}(t) + CA\Delta x(t) + CB_u \Delta u(t) + CB_d \Delta d(t) + C\Delta w(t) \end{aligned}$$

[0071]

$$\begin{bmatrix} \Delta x(t+1) \\ \bar{y}(t+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ CA & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x(t) \\ \bar{y}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_u \\ CB_u \end{bmatrix} \Delta u(t) + \begin{bmatrix} B_d \\ CB_d \end{bmatrix} \Delta d(t) + \begin{bmatrix} I \\ C \end{bmatrix} \Delta w(t) \quad \text{and} \quad y(t) = \begin{bmatrix} 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x(t) \\ \bar{y}(t) \end{bmatrix} + v(t)$$

$$\text{Let } X(t) = \begin{bmatrix} \Delta x(t) \\ \bar{y}(t) \end{bmatrix}, \Phi = \begin{bmatrix} A & 0 \\ CA & I \end{bmatrix}, \Gamma_u = \begin{bmatrix} B_u \\ CB_u \end{bmatrix}, \Gamma_d = \begin{bmatrix} B_d \\ CB_d \end{bmatrix}, \Gamma_w = \begin{bmatrix} I \\ C \end{bmatrix}, \Xi = \begin{bmatrix} 0 & I \end{bmatrix}$$



$$\begin{aligned} X(t+1) &= \Phi X(t) + \Gamma_u \Delta u(t) + \Gamma_d \Delta d(t) + \Gamma_w \Delta w(t) \\ y(t) &= \Xi X(t) + v(t) \end{aligned}$$

P Step Prediction

$$\begin{aligned} X(t+1|t) &= \Phi X(t|t) + \Gamma_u \Delta u(t) + \Gamma_d \Delta d(t) \\ X(t+2|t) &= \Phi^2 X(t|t) + \Phi \Gamma_u \Delta u(t) + \Gamma_u \Delta u(t+1) + (\Phi \Gamma_d + \Gamma_d) \Delta d(t) \\ &\vdots \\ X(t+p|t) &= \Phi^p X(t|t) + \Phi^{p-1} \Gamma_u \Delta u(t) + \dots \Gamma_u \Delta u(t+p-1) + (\Phi^{p-1} \Gamma_d + \dots \Gamma_d) \Delta d(t) \end{aligned}$$

Assumption:

$\Delta d(t) = \text{constant}$

□
□
□



Rearrange by Matrix Form

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} y(t+1|t) \\ y(t+2|t) \\ y(t+3|t) \\ \vdots \\ y(t+p|t) \end{bmatrix} &= \Xi \begin{bmatrix} X(t+1|t) \\ X(t+2|t) \\ X(t+3|t) \\ \vdots \\ X(t+p|t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Xi \Phi^1 \\ \Xi \Phi^2 \\ \Xi \Phi^3 \\ \vdots \\ \Xi \Phi^p \end{bmatrix} X(t|t) + \begin{bmatrix} \Xi \Gamma_u & 0 & 0 & \square & \square & \square & 0 \\ \Xi \Phi \Gamma_u & \Xi \Gamma_u & 0 & \square & \square & \square & 0 \\ \Xi \Phi^2 \Gamma_u & \Xi \Phi \Gamma_u & \Xi \Gamma_u & \square & \square & \square & 0 \\ \square & \square & \square & \Xi \Gamma_u & \square & \square & \square \\ \square & \square & \square & \square & \Xi \Gamma_u & \square & \square \\ \Xi \Phi^{p-1} \Gamma_u & \Xi \Phi^{p-2} \Gamma_u & \Xi \Phi^{p-3} \Gamma_u & \square & \square & \square & \Xi \Gamma_u \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u(t) \\ \Delta u(t+1) \\ \Delta u(t+2) \\ \vdots \\ \Delta u(t+p-1) \end{bmatrix} \\ &+ \begin{bmatrix} \Xi \Gamma_d & 0 & 0 & \square & \square & \square & 0 \\ \Xi \Phi \Gamma_d & \Xi \Gamma_d & 0 & \square & \square & \square & 0 \\ \Xi \Phi^2 \Gamma_d & \Xi \Phi \Gamma_d & \Xi \Gamma_d & \square & \square & \square & 0 \\ \square & \square & \square & \Xi \Gamma_d & \square & \square & \square \\ \square & \square & \square & \square & \Xi \Gamma_d & \square & \square \\ \Xi \Phi^{p-1} \Gamma_d & \Xi \Phi^{p-2} \Gamma_d & \Xi \Phi^{p-3} \Gamma_d & \square & \square & \square & \Xi \Gamma_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta d(t) \\ \Delta d(t) \\ \Delta d(t) \\ \vdots \\ \Delta d(t) \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$Y(t+1|t) = S^X X(t|t) + S^u \Delta U(t) + S^d \Delta D(t)$$

[0073]

State Correction

$$\begin{aligned} X(t|t) &= X(t|t-1) + \bar{K}(y(t) - \Xi X(t|t-1)) \\ X(t+1|t) &= \Phi X(t|t) + \Gamma_u \Delta u(t) + \Gamma_d \Delta d(t) \\ &= \Phi X(t|t-1) + \Gamma_u \Delta u(t) + \Gamma_d \Delta d(t) + \Phi \bar{K}(y(t) - \Xi X(t|t-1)) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} X(t+1) &= \Phi X(t) + \Gamma_u \Delta u(t) + \Gamma_d \Delta d(t) + \Gamma_w \Delta w(t) \\ X(t+1|t) &= (\Phi - K\Xi)X(t|t-1) + \Gamma_u \Delta u(t) + \Gamma_d \Delta d(t) + K(\Xi X(t) + v(t)) \\ (X(t+1) - X(t+1|t)) &= (\Phi - K\Xi)(X(t) - X(t|t-1)) + \Gamma_w \Delta w(t) - Kv(t) \end{aligned}$$

where $\begin{cases} X(t+1) = \Phi X(t) + \Gamma_u \Delta u(t) + \Gamma_d \Delta d(t) + \Gamma_w \Delta w(t) \\ y(t) = \Xi X(t) + v(t) \end{cases}$

State Prediction Error

Error Dynamics

$$(\tilde{X}(t+1|t)) = (\Phi - K\Xi)\tilde{X}(t|t-1) + \Gamma_w \Delta w(t) - Kv(t) \Leftarrow \text{Def} \begin{cases} \tilde{X}(t|t-1) = (X(t) - X(t|t-1)) \\ \tilde{X}(t+1|t) = (X(t+1) - X(t+1|t)) \end{cases}$$

SPE Covariance

$$\begin{aligned} P_t &= \sigma_{\tilde{X}(t|t-1)}^2 = E\left\{\left(\tilde{X}(t|t-1) - E\{\tilde{X}(t|t-1)\}\right)\left(\tilde{X}(t|t-1) - E\{\tilde{X}(t|t-1)\}\right)^T\right\} \\ &= E\left\{\tilde{X}(t|t-1)\tilde{X}(t|t-1)^T\right\} \end{aligned} \quad \begin{array}{l} \text{Assumption} \\ E\{\tilde{X}(t|t-1)\} = 0 \end{array}$$

$$\begin{aligned} P_{t+1} &= \sigma_{\tilde{X}(t+1|t)}^2 = E\left\{\tilde{X}(t+1|t)\tilde{X}(t+1|t)^T\right\} \Leftarrow \tilde{X}(t+1|t) = (\Phi - K\Xi)\tilde{X}(t|t-1) + \Gamma_w \Delta w(t) - Kv(t) \\ &= E\left\{(\Phi - K\Xi)\tilde{X}(t|t-1)\tilde{X}(t|t-1)^T(\Phi - K\Xi)^T + E\left\{\Gamma_w \Delta w(t)\Delta w(t)^T \Gamma_w^T\right\} + E\left\{Kv(t)K^T\right\}\right\} \\ &= (\Phi - K\Xi)E\left\{\tilde{X}(t|t-1)\tilde{X}(t|t-1)^T\right\}(\Phi - K\Xi)^T + \Gamma_w R_1 \Gamma_w^T + KR_2 K^T \end{aligned}$$

$$P_{t+1} = (\Phi - K\Xi)P_t(\Phi - K\Xi)^T + \Gamma_w R_1 \Gamma_w^T + KR_2 K^T$$

P_{t+1} is Matrix. For Minimizing, Choose arbitrary vector α and make scalar

$$\begin{aligned} \alpha^T P_{t+1} \alpha &= \alpha^T \left\{ (\Phi - K\Xi)P_t(\Phi - K\Xi)^T + \Gamma_w R_1 \Gamma_w^T + KR_2 K^T \right\} \alpha \\ &= \alpha^T \left\{ \Phi P_t \Phi^T + \Gamma_w R_1 \Gamma_w^T - K\Xi P_t \Phi^T - \Phi P_t \Xi^T K^T + K(\Xi P_t \Xi^T + R_2)K^T \right\} \alpha \\ &= \alpha^T \left\{ \left[K - \Phi P_t \Xi^T (\Xi P_t \Xi^T + R_2)^{-1} \right] (\Xi P_t \Xi^T + R_2) \left[K - \Phi P_t \Xi^T (\Xi P_t \Xi^T + R_2)^{-1} \right]^T \right. \\ &\quad \left. - \Phi P_t \Xi^T (\Xi P_t \Xi^T + R_2)^{-1} \Xi P_t \Phi^T + \Phi P_t \Phi^T + \Gamma_w R_1 \Gamma_w^T \right\} \alpha \end{aligned}$$

Ricatti difference equation(RDE)

$$\begin{aligned} P_{t+1} &= \Phi P_t \Phi^T + \Gamma_w R_1 \Gamma_w^T - \Phi P_t \Xi^T (\Xi P_t \Xi^T + R_2)^{-1} \Xi P_t \Phi^T \\ &\because \left(K - \Phi P_t \Xi^T (\Xi P_t \Xi^T + R_2)^{-1} \right) \end{aligned}$$

Cost(Objective) Function

$$\text{MIN}_{\Delta U(t)} \left[J = (Y(t+1|t) - Y(t+1|t))^T Q (Y(t+1|t) - Y(t+1|t)) + \Delta U^T(t) R \Delta U(t) \right]$$

Equality constrained : $Y(t+1|t) = S^X X(t|t) + S^u \Delta U(t) + S^d \Delta D(t)$

For simple rearranging, Assume : $\varepsilon(t) = Y(t+1|t) - S^X X(t|t) - S^d \Delta D(t)$

$$\begin{aligned} J &= (S^u \Delta U(t) - \varepsilon(t))^T Q (S^u \Delta U(t) - \varepsilon(t)) + \Delta U^T(t) R \Delta U(t) \\ &= \Delta U^T(t) (R + S^{uT} Q S^u) \Delta U(t) - \Delta U^T(t) S^{uT} Q \varepsilon(t) - \varepsilon^T(t) Q S^u \Delta U(t) + \varepsilon^T(t) \varepsilon(t) \\ &= (\Delta U^T(t) - (R + S^{uT} Q S^u)^{-1} S^{uT} Q \varepsilon(t))^T (R + S^{uT} Q S^u) (\Delta U(t) - (R + S^{uT} Q S^u)^{-1} S^{uT} Q \varepsilon(t)) \\ &\quad - \varepsilon^T(t) Q S^u (R + S^{uT} Q S^u)^{-1} S^{uT} Q \varepsilon(t) + \varepsilon^T(t) \varepsilon(t) \end{aligned}$$

$$\Delta U(t) = (R + S^{uT} Q S^u)^{-1} S^{uT} Q \varepsilon(t) \Rightarrow u(t) = u(t-1) + [1 \ 0 \ \bullet \ \bullet \ 0] (R + S^{uT} Q S^u)^{-1} S^{uT} Q \varepsilon(t))$$

Inequality Constrained Matrix

Input magnitude constraints	$\rightarrow$	$u_{\min} \leq u(k+l k) \leq u_{\max}$
Input rate constraints	$\rightarrow$	$ \Delta u(k+l k) \leq \Delta u_{\max}, \quad l=0, \dots, m-1$
Output magnitude constraints	$\rightarrow$	$y_{\min} - s \leq y(k+j k) \leq y_{\max} + s, \quad j=1, \dots, p$

We want to express the above constraints as a linear inequality in the form of

$$\underline{\underline{C^u \Delta U(k) \geq C(k)}}$$

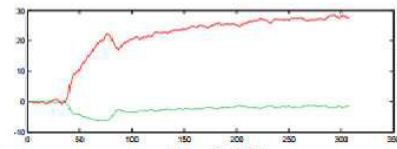
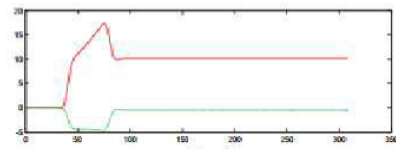
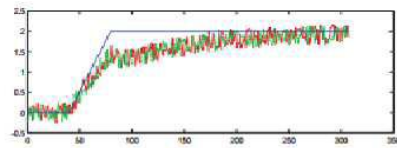
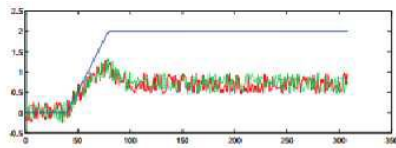
Input Magnitude Constraints

$$\begin{aligned} u_{\min} \leq u(k+l|k) \leq u_{\max}, \quad l=0, \dots, m-1 \\ \left[\begin{array}{l} u(k+l|k) \geq u_{\min} \rightarrow u(k-1) + \sum_{i=0}^l \Delta u(k+i|k) \geq u_{\min} \\ -u(k+l|k) \geq -u_{\max} \rightarrow -u(k-1) - \sum_{i=0}^l \Delta u(k+i|k) \geq -u_{\max} \end{array} \right] \end{aligned}$$

 **Rearrange by Matrix Form**

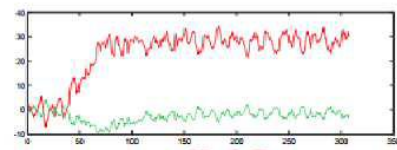
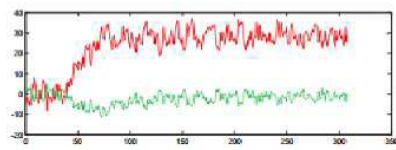
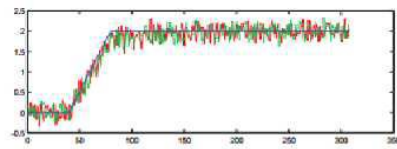
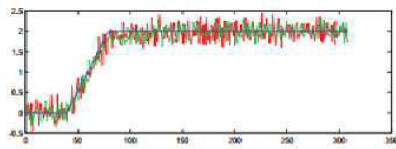
$$\left[\begin{array}{cccc} I & 0 & \dots & 0 \\ I & I & 0 & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & 0 \\ I & I & \dots & I \end{array} \right] \left[\begin{array}{c} \Delta u(k|k) \\ \Delta u(k+1|k) \\ \vdots \\ \Delta u(k+m-1|k) \end{array} \right] \geq \left[\begin{array}{c} u_{\min} - u(k-1) \\ u_{\min} - u(k-1) \\ \vdots \\ u_{\min} - u(k-1) \\ u_{\max} - u(k-1) \\ u_{\max} - u(k-1) \\ \vdots \\ u_{\max} - u(k-1) \end{array} \right]$$

$$\left[\begin{array}{c} I_L \\ -I_L \end{array} \right] \Delta U(k) \geq \left[\begin{array}{c} u_{\min} - u(k-1) \\ \vdots \\ u_{\min} - u(k-1) \\ u_{\max} - u(k-1) \\ \vdots \\ u_{\max} - u(k-1) \end{array} \right]$$



K=0

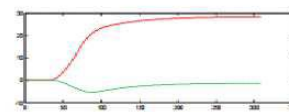
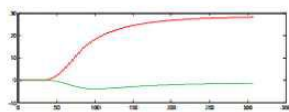
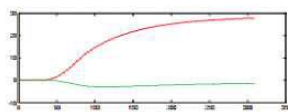
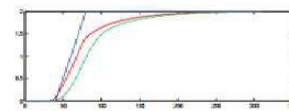
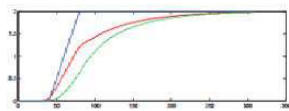
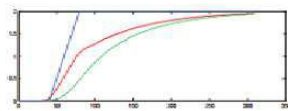
K=0.05



K=1

K=0.5

f=0.5, Optimal Kalman Filter

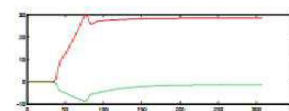
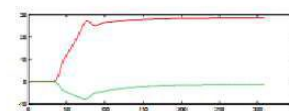
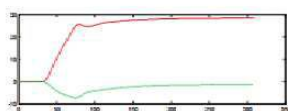
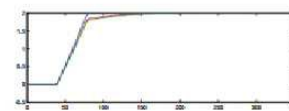
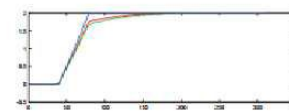
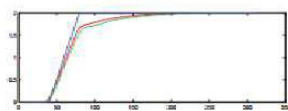


R=30

R=20

R=10

f=-1



R=1

R=0.1

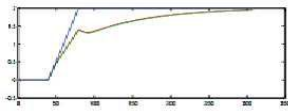
R=0.01

f=1

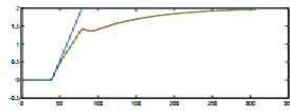
[0080]

[0081]

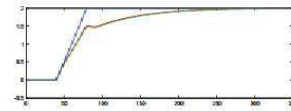
R=0.02; q1=1; q2=25



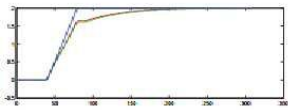
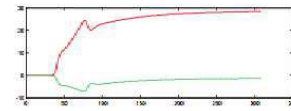
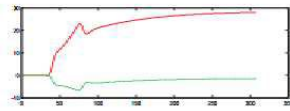
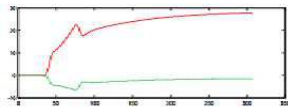
f=-1



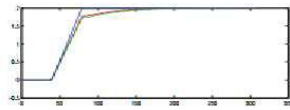
f=-0.6



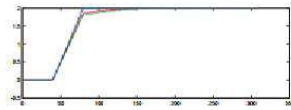
f=-0.2



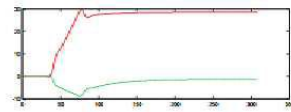
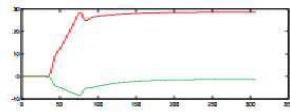
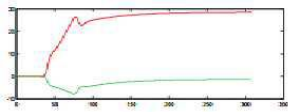
f=0.2



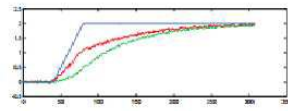
f=0.6



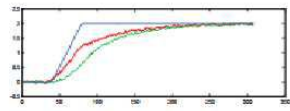
f=1



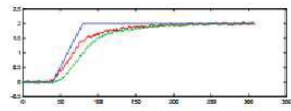
f=0.5, Optimal Kalman Filter, $\sigma_v=0.1$ (v:white noise)



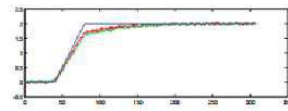
R=30
f=0.5



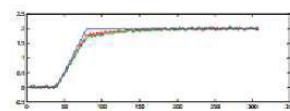
R=20



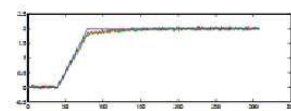
R=10



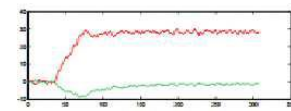
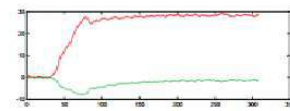
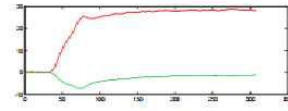
R=1



R=0.1



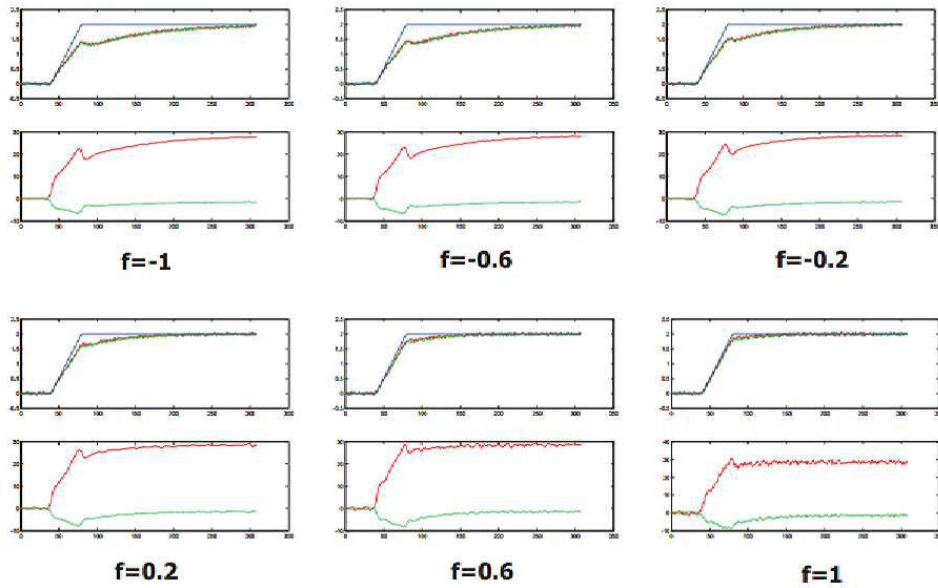
R=0.01
f=1



[0082]

[0083]

R=0.02; q1=1; q2=25, $\sigma_v=0.1$ (v:white noise)



[0084]

[0086] 도 4는 본 발명의 실시예에 따른 스팀-메탄개질을 통한 수소 생산 공정의 제어시스템 및 방법을 통한 실험 결과를 도시한 그래프이다.

[0087] 본 발명의 실시예에 따른 스팀-메탄개질을 통한 수소 생산 공정의 제어시스템 및 그 방법 [표 1]과 같이 다양한 기기에 탑재될 수 있다.

[0088] [표 1]

항목	내용
운전 시나리오 입력기	비정상적인 상황, 주변 환경의 변화 등 실제 수소 생산시설 운전 과정에서 발생 가능한 다양한 시나리오들을 생성
최적화기	경제성/환경성을 고려한 최적 운전 조건 계산 알고리즘 개발
모델기반 예측 제어기	다변수 공정에 존재하는 입/출력 변수들간의 상호간섭을 고려하여 자동 제어 (기존의 PID제어의 단점 보완을 통한 성능 향상)
연동 프로그램	"고급 조업자 훈련 시스템"과 기존의 "조업자 훈련 시스템" 연동을 위한 알고리즘
인터페이스	"고급 조업자 훈련 시스템"의 독립적인 사용자 친화적 인터페이스 개발

[0089]

[0090] 운전 시나리오 입력기에 탑재되는 경우, 비정상적인 상황, 주변 환경의 변화 등 실제 수소 생산시설 운전 과정에서 발생 가능한 다양한 시나리오들을 생성할 수 있다.

[0091] 최적화기에 탑재되는 경우, 는 경제성/환경성을 고려한 최적 운전 조건 계산 알고리즘을 개발할 수 있다.

[0092] 모델기반 예측 제어기에 탑재되는 경우, 다변수 공정에 존재하는 입/출력 변수들간의 상호간섭을 고려하여 자동 제어(기존의 PID 제어의 단점 보완을 통한 성능 향상)할 수 있다.

[0093] 연동 프로그램에 탑재되는 경우, "고급 조업자 훈련 시스템"과 기존의 "조업자 훈련 시스템" 연동을 위한 알고리즘을 생성할 수 있다.

[0094] 인터페이스에 탑재되는 경우, "고급 조업자 훈련 시스템"의 독립적인 사용자 친화적 인터페이스를 개발할 수 있다.

[0095] 도 4를 참조하면, "모델기반 예측 제어기"에 탑재할 공정모델의 경우, 빠른 안정화를 나타내는 것을 알 수 있다.

[0097] 도 5 및 도 6은 본 발명의 실시예에 따른 수소충전소 제어시스템을 도시한 개략도이다.

- [0098] 실시예에 따라, 본 발명의 실시예에 따른 스팀-메탄개질을 통한 수소 생산 공정의 제어시스템 및 그 방법을 이용하여 수소충전소 제어시스템을 개발할 수 있다.
- [0099] 본 발명의 실시예에 따른 수소충전소 제어시스템은 수소전기차 충전 시, 수소용기의 최대 허용 온도를 초과하지 않도록 충전속도를 제어할 수 있다.
- [0100] 예를 들어, SAE J2601, 2601-2 및 JPEC-S0003을 기반으로 하는 충전 프로토콜 모사 및 개선을 구현할 수 있다.
- [0102] 도 7은 본 발명의 실시예에 따른 스팀-메탄개질을 통한 수소 생산 공정의 제어시스템을 이용한 수소 생산 공정 및 이산화탄소 포집 공정을 도시한 흐름도이다.
- [0103] 본 발명의 실시예에 따른 스팀-메탄개질을 통한 수소 생산 공정의 제어시스템은 이산화 탄소 포집에 사용될 수 있다.
- [0104] 따라서, 본 발명의 실시예에 따른 스팀-메탄개질을 통한 수소 생산 공정의 제어시스템은 수소 생산 공정 및 이산화 탄소 포집 공정 중 적어도 어느 하나에 사용될 수 있다.
- [0105] 본 발명의 실시예에 따른 스팀-메탄개질을 통한 수소 생산 공정의 제어시스템을 이용한 이산화탄소 포집 공정은 본 발명의 실시예에 따른 스팀-메탄개질을 통한 수소 생산 공정의 제어시스템을 이용한 수소 생산 공정과 동일한 구성요소를 포함하고 있으므로, 동일한 구성요소에 대한 설명은 생략하기로 한다.
- [0106] 이산화 탄소 포집 공정에 사용되는 압력 변동 흡착은 많은 단계의 운전스텝들로 구성되어 있는데, 본 발명의 실시예에 따른 스팀-메탄개질을 통한 수소 생산 공정의 제어시스템을 이용한 이산화 탄소 포집 공정은 컴퓨터 기반의 공정모델을 통한 분석을 통해 시행착오를 줄이고 공정을 최적화하는데 매우 큰 도움이 된다.
- [0107] 또한, 기존의 이산화 탄소 포집 공정은 기존의 물질전달속도식의 성능(정확성) 한계가 존재하고, 수치적으로 편미분 방정식을 푸는 어려움(큰 수치오차 발생)이 있으며, 추정해야 할 많은 파라미터가 존재하였다.
- [0108] 그러나, 본 발명의 실시예에 따른 스팀-메탄개질을 통한 수소 생산 공정의 제어시스템을 이용한 이산화 탄소 포집 공정은 새로운 물질전달속도식의 제시하고, 새로운 수치해석 방법을 제시하며, 새로운 파라미터 추정 방법을 제시하여 정교한 공정모델의 제작 및 공정 최적화가 가능하다.
- [0109] 이산화탄소 포집 공정의 물질 및 에너지 수지식은 하기 [식 4]와 같다.
- [0110] [식 4]

$$\text{Total mass balance : } \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon} \rho_s \sum_{i=1}^2 \frac{\partial q_i}{\partial t} + \frac{\partial(uC)}{\partial z} = 0$$

$$\text{Component mass balance : } \frac{\partial C_i}{\partial t} + \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} \rho_s \frac{\partial q_i}{\partial t} - \frac{D_{ax}}{L^2} \frac{\partial^2 C_i}{\partial z^2} + \frac{1}{L} \frac{\partial(uC_i)}{\partial z} = 0$$

$$\text{Energy balance : } \left(\varepsilon \rho_g c_g + (1-\varepsilon) \rho_s c_s \right) \frac{\partial T}{\partial t} - (1-\varepsilon) \rho_s \sum_{i=1}^2 (-\Delta H_i) \frac{\partial q_i}{\partial t} - \lambda_{ax} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}$$

$$\text{Mass-transfer rate* : } \frac{\partial q_i}{\partial t} = g(q_i, q_i^*(C_i, T)) + \rho_g c_g \frac{\partial(uT)}{\partial z} + \frac{2h_i}{r_{b,i}} (T - T_w) = 0$$

$$\text{Energy balance (wall): } \rho_w c_w \pi (r_{b,o}^2 - r_{b,i}^2) \frac{\partial T_w}{\partial t} = 2\pi r_{b,i} h_i (T - T_w) - 2\pi r_{b,o} h_o (T_w - T_{amb})$$

[0112]

[0113] (Ergun equation, ideal gas law, Wakao equation, empirical equation for $\ddot{E}_{ax}$, multi-component isotherm (LeVan and Vermeulen approach, 1981))

[0114] 이산화탄소 포집 공정의 물질 전달 속도식은 하기 [식 5]와 같다.

[0115] [식 5]

$$\text{Linear driving force (LDF) model: } \frac{\partial q_i}{\partial t} = K_i^L (q_i^* - q_i)$$

$$\text{Quadratic driving force (QDF) model: } \frac{\partial q_i}{\partial t} = K_i^Q (q_i^{*2} - q_i^2) / q_i$$

$$\begin{aligned} \text{Proposed empirical model: } \frac{\partial q_i}{\partial t} &= k_i^L (q_i^* - q_i) + k_i^Q |q_i^* - q_i| (q_i^* - q_i) / q_i \\ \text{where } k_i^L &= \alpha_i^L \exp(-\beta_i^L / T) \text{ and } k_i^Q = \alpha_i^Q \exp(-\beta_i^Q / T) \end{aligned}$$

[0116]

[0117] 물질 전달 속도식은 입자 내부 확산을 모사하기 위한 편미분방정식은 많은 계산량 요구되어 간단한 통폐합 파라미터 모델이 주로 이용된다.

[0118] 이산화탄소 포집 공정의 3차 스플라인 선점법은 도 8과 같다.

[0120] 이산화탄소 포집 공정의 장거리 경계조건(FSBC)의 설정은 도 9와 같다.

[0121] 이산화탄소 포집 공정의 기울기 기반의 적응-예측 선점 배열법은 도 10과 같다.

[0122] 이산화탄소 포집 공정의 장치는 도 11과 같다.

[0123] 이산화탄소 포집 공정의 에너지 효율 최적화는 [식 6]과 같다.

[0124] [식 6]

$$\begin{aligned} \min_U J(U) &= E_b + E_v \\ \text{subject to } & \text{CO}_2 \text{ purity} > 95\%, \text{ CO}_2 \text{ recovery} > 80\% \\ \text{where } U &= [t_{\text{AD-PU}}, t_{\text{PR-BL}}, P_{\text{Desorp}}, u_{\text{AD}}, u_{\text{PU}}] \end{aligned}$$

- Operating cost: blower and vacuum pump
- Flue gas contains 15% CO₂ → Two-stage PSA process
- 4-step Skarstrom cycle
- Cost calculation based on the real (non-ideal) blower and vacuum pump

[0125]

[0126] 이산화탄소 포집 공정의 에너지 효율 최적화를 위한 사용 진공펌프의 특성 곡선은 도 12와 같다.

[0127] 이산화탄소 포집 공정의 에너지 효율 최적화를 위한 상용 진공펌프의 에너지 소모는 도 13과 같다.

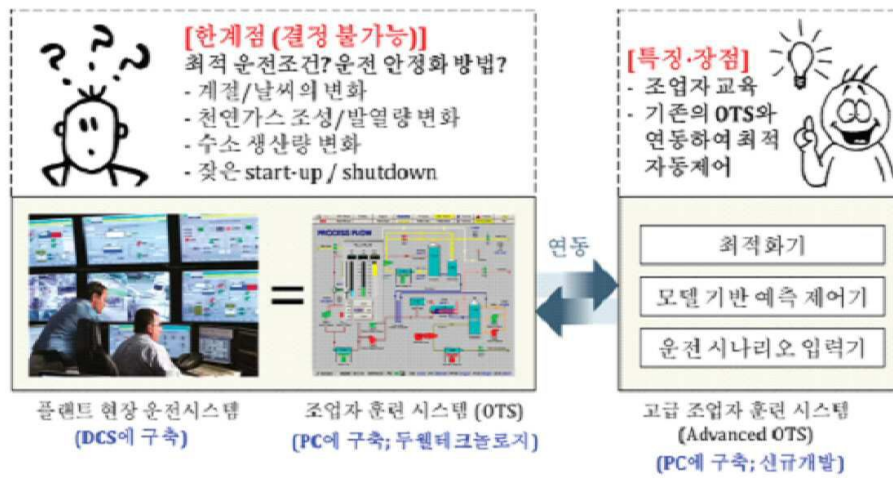
[0128] 이산화탄소 포집 공정의 에너지 효율 최적화를 위한 흡착 및 탈착 시간이 에너지 소모에 미치는 영향 분석은 도 14와 같다.

[0129] 이산화탄소 포집 공정의 에너지 효율 최적화 결과는 도 15와 같다.

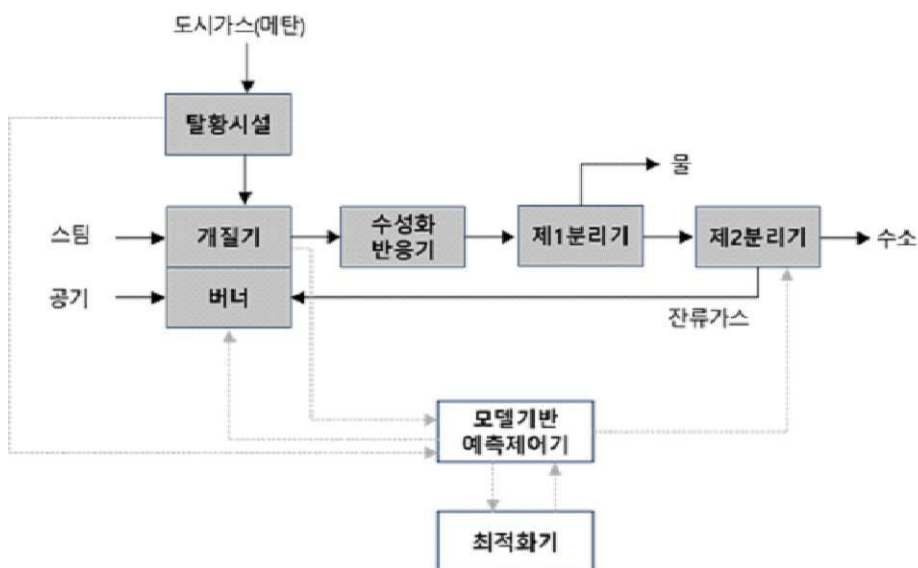
[0131] 이상과 같이 본 발명은 비록 한정된 실시예와 도면에 의해 설명되었으나, 본 발명은 상기의 실시예에 한정되는 것은 아니며, 본 발명이 속하는 분야에서 통상의 지식을 가진 자라면 이러한 기재로부터 다양한 수정 및 변형이 가능하다. 그러므로, 본 발명의 범위는 설명된 실시예에 국한되어 정해져서는 아니 되며, 후술하는 특허청구 범위뿐 아니라 이 특허청구범위와 균등한 것들에 의해 정해져야 한다.

도면

도면1



도면2



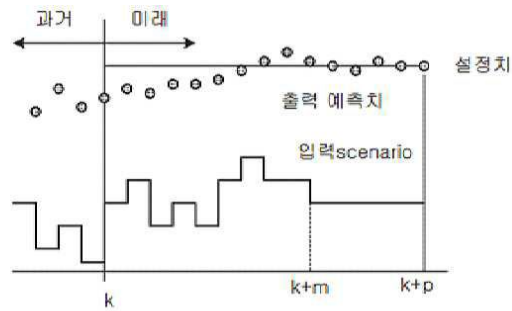
도면3

1. **Input Scenario**: 현재 시점 k 에서 여러 미래 입력 scenario를 생각하고

$$\Delta U^m(k) = [\Delta u(k) \quad \Delta u(k+1) \quad \dots \quad \Delta u(k+m)]$$

2. **Model Prediction**: 공정모델과 k 시점에서 예측치를 이용하여 미래의 출력을 예측한 후

$$Y^p(k) = [y(k+1|k) \quad y(k+2|k) \quad \dots \quad y(k+p|k)]$$



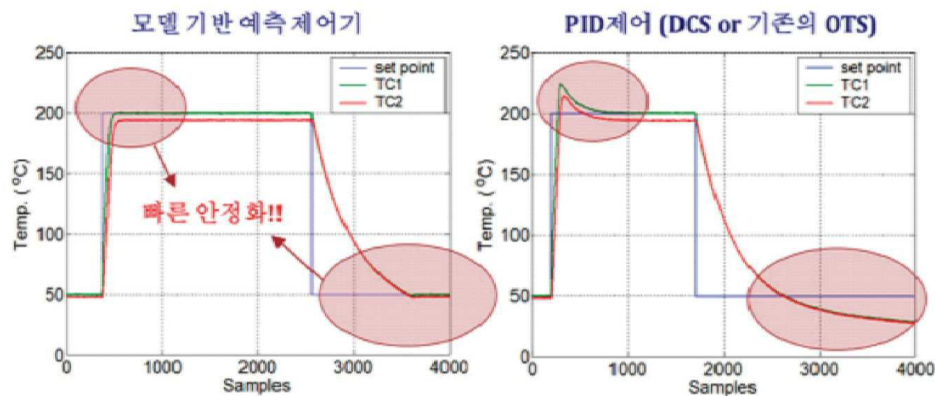
3. **Constrained Optimization**: 다음과 같은 목적함수를 최소화하는 입력 scenario를 선택한 후

$$\min_{\Delta U^m(k)} \left[\sum \|Y^{sp} - Y^p(k)\|_Q^2 + \|\Delta U^m(k)\|_R^2 + \|u(k+m) - u^{ss}\|_s^2 \right]$$

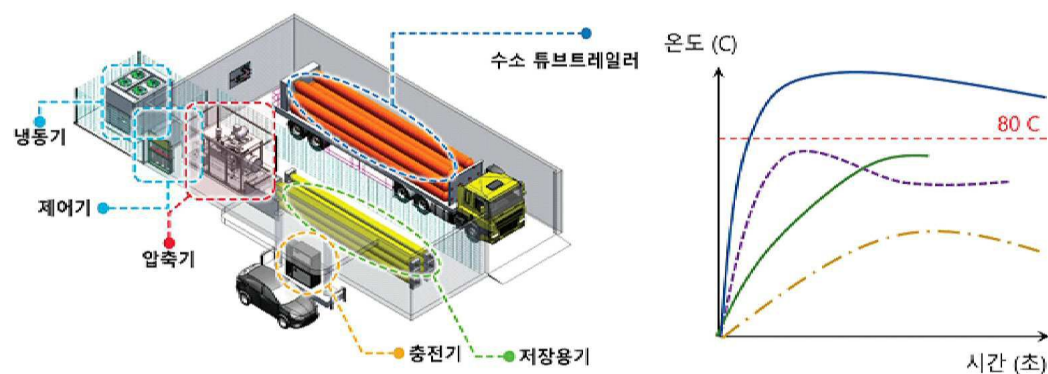
subject to $Y^{min} \leq Y^p(k) \leq Y^{max}, U^{min} \leq U^m(k) \leq U^{max}, \text{ etc.}$

4. **Receding Horizon Strategy**: 첫번째 입력요소를 공정에 적용하고 위의 과정을 반복

도면4

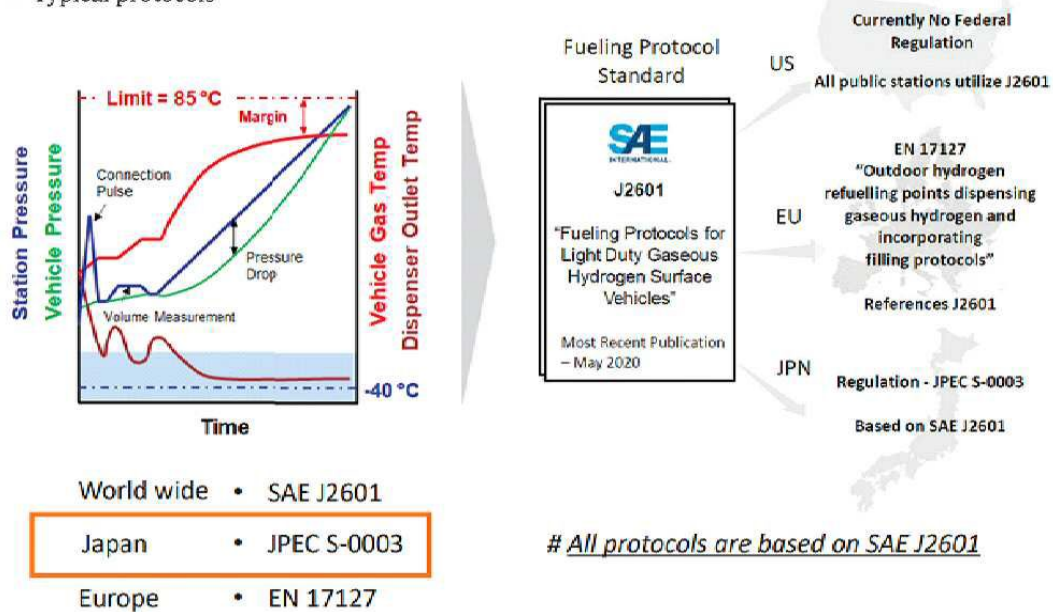


도면5

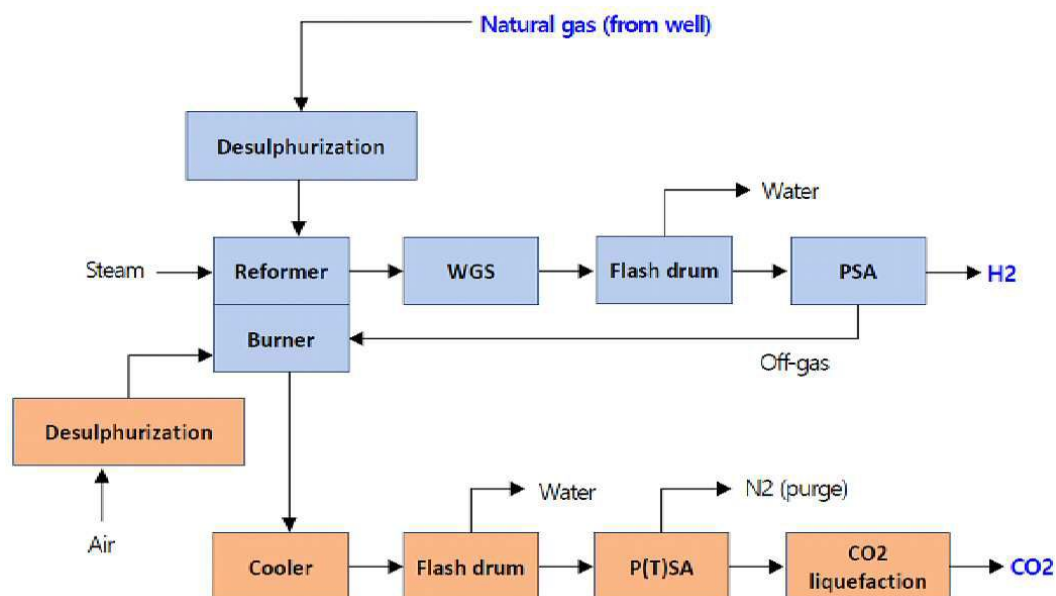


도면6

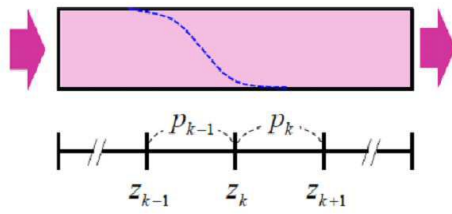
● Typical protocols



도면7



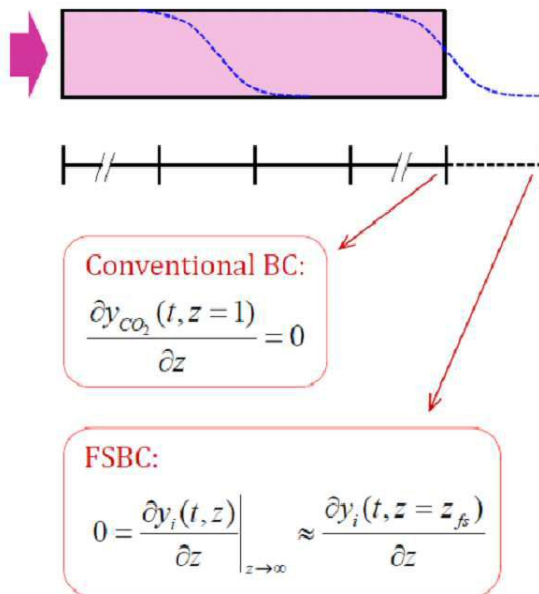
도면8



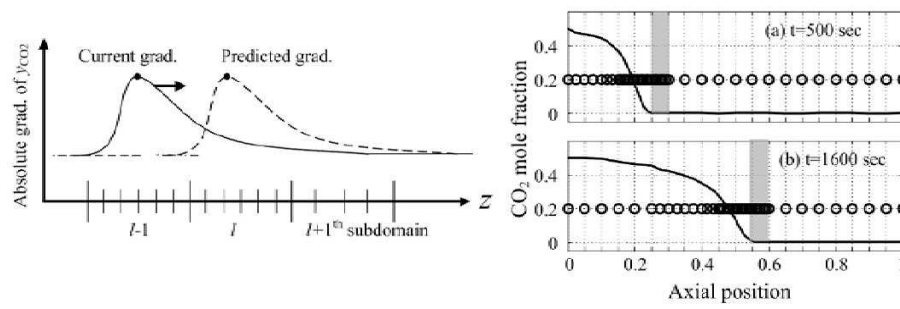
$$\begin{aligned} p_k(z_{k+1}) &= p_{k+1}(z_{k+1}) \\ p_k'(z_{k+1}) &= p_{k+1}'(z_{k+1}) \\ p_k''(z_{k+1}) &= p_{k+1}''(z_{k+1}) \end{aligned}$$



도면9



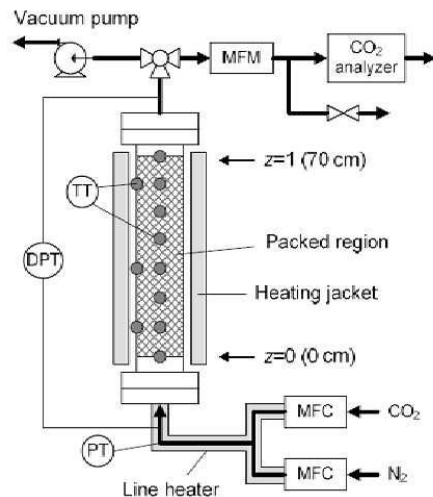
도면10



CO ₂ mass transfer coefficient (1/sec)	CPU time (sec)	
	Fixed-grid	Adaptive-grid
0.06	98	24
0.2	812	85

→ 90% decrease!!

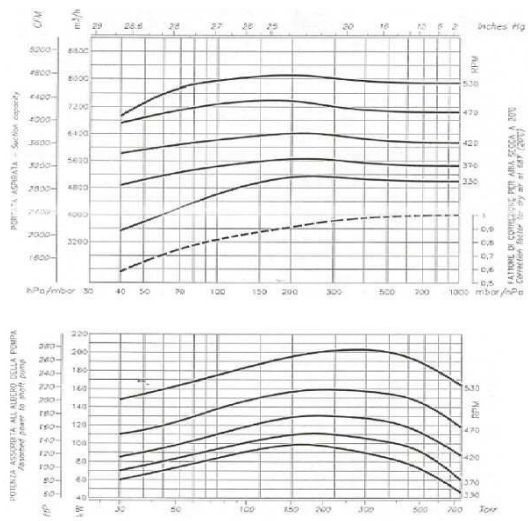
도면11



Bed inner diameter: 2.5 cm
Bed outer diameter: 3.4 cm
Particle size: 0.16-0.26 cm

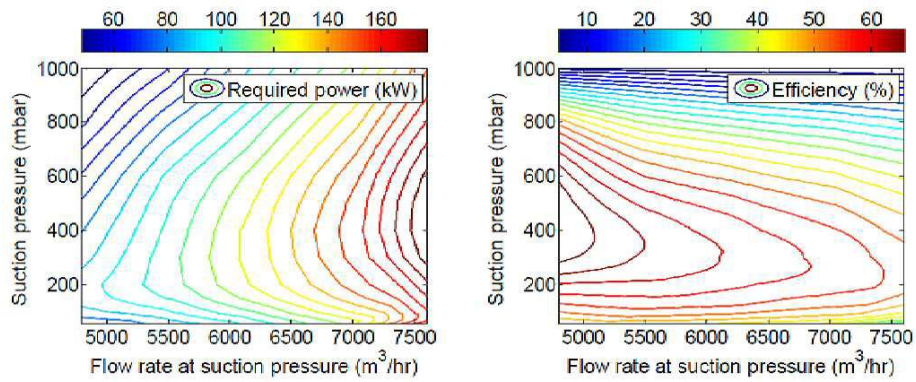


도면12



Travaini Pumps USA; TRVK3003

도면13

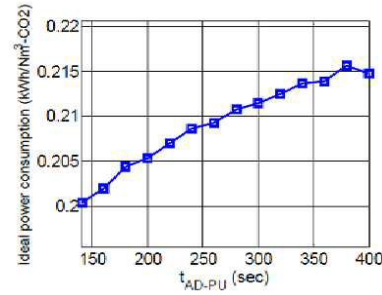
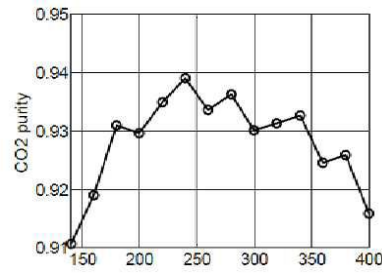
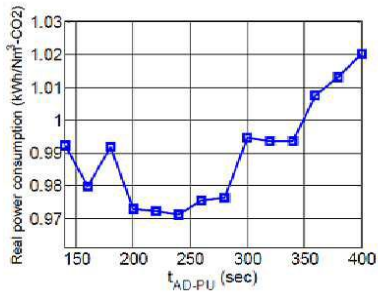


$$W_{ideal} = nRT_1 \left(\frac{k}{k-1} \right) \left(\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right) \quad \text{where } P_1 : \text{suction press.}, P_2 : \text{discharge press.}$$

도면14

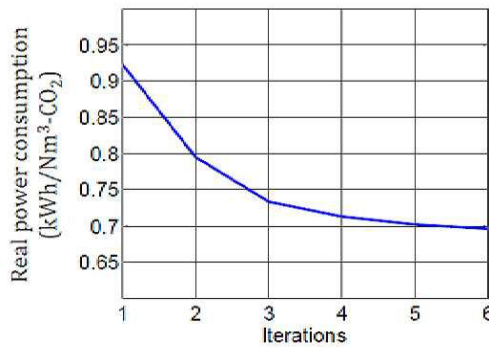
흡착 및 탈착 시간이 에너지 소모에 미치는 영향 분석

$$\begin{aligned} t_{PR,BL} &= 40 \text{ sec} \\ P_{Desorp} &= 5.07 \text{ kPa} \\ u_{AD} &= 83.3 \text{ cm/sec} \\ u_{PU} &= 41.7 \text{ cm/sec} \end{aligned}$$



도면15

- Cyclic steady state (CSS): about 20 cycles
- CPU time for CSS: 15 min (Intel i7, 2.8GHz)
- Real cost: 0.69 kWh/Nm³-CO₂
- Ideal cost: 0.18 kWh/Nm³-CO₂



Decision variable	Initial condition	Optimized condition
AD&PU time (sec)	280	251
PR&BL time (sec)	40	75
Desorp. P (kPa)	5.07	24.2
Feed gas velocity (cm/sec)	83.3	67.4
Purge gas velocity (cm/sec)	41.7	51.8