



공개특허 10-2021-0116144



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2021-0116144
(43) 공개일자 2021년09월27일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
C01B 3/36 (2006.01) *C01B 3/40* (2006.01)

(52) CPC특허분류

C01B 3/36 (2013.01)

C01B 3/40 (2013.01)

(21) 출원번호 10-2020-0054497

(22) 출원일자 2020년05월07일

심사청구일자 없음

(30) 우선권주장

16/821,605 2020년03월17일 미국(US)

(71) 출원인

바요테크 인코포레이티드

미국 87113 뉴멕시코주 앤버커키 스위트 비 파세
오 알라메다 엔이 8601

(72) 발명자

무어 로버트 찰스

미국 87015 뉴멕시코주 엣지우드 썬더 마운틴 로
드 161

닉 허벌트 리

미국 87107 뉴멕시코주 로스 란초스 찰스 플레이
스 엔더블유 703

(뒷면에 계속)

(74) 대리인

유미특허법인

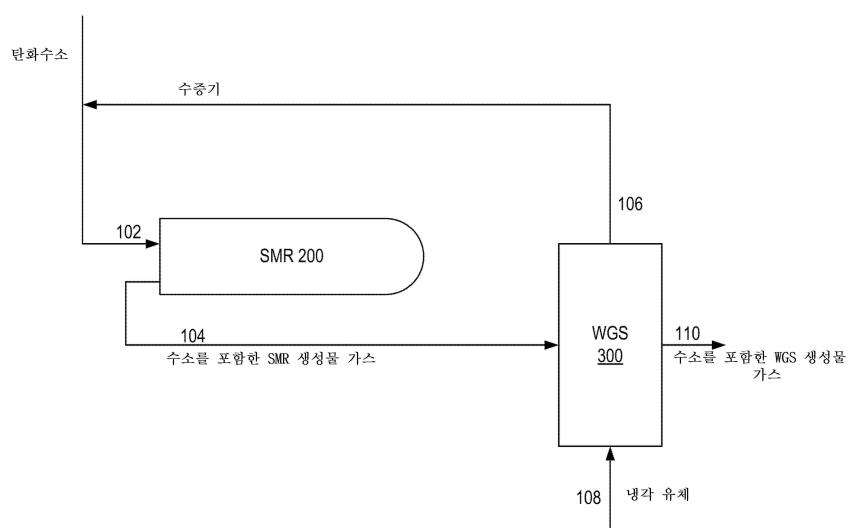
전체 청구항 수 : 총 20 항

(54) 발명의 명칭 수소 생성 시스템

(57) 요 약

수소 생성 시스템은 제 1 단부가 폐쇄된 외부 투브 및 이 외부 투브 내에 배치된 제 1 단부가 개방된 내부 투브를 포함하는 SMR(steam methane reformer)을 포함한다. 내부 투브 내에는 SMR 유동 채널이 형성되고, 외부 투브와 내부 투브 사이에는 환형 공간이 형성된다. 유동 채널은 환형 공간과 유체 연통된다. SMR은 외부 투브와 내부 투브 사이의 환형 공간 내에 배치된 발포체를 포함한다. 이 시스템은 반응 투브를 포함하는 WGS(water gas shift) 반응기 - 반응 투브 내에는 WGS 반응 채널이 형성되고, 이 WGS 반응 채널은 SMR 유동 채널과 유체 연통됨 -; WGS 반응 채널 내에 배치된 열전달 물질; 및 WGS 반응 채널 내에 배치된 WGS 촉매를 포함한다.

대 표 도 - 도1



(52) CPC특허분류

C01B 2203/0233 (2013.01)

C01B 2203/0277 (2013.01)

C01B 2203/0883 (2013.01)

C01B 2203/1029 (2013.01)

C01B 2203/1614 (2013.01)

(72) 발명자

캡스테프 밀리센트

미국 28376 노스캐롤라이나주 래포드 블루 워터 드
라이브 133

크리쉬나풀씨 비스와나쓰

미국 87112 뉴멕시코주 앤버커키 버터플라이 메이
든 트레일 엔이 2109

본트쉐브 란코 피.

미국 87109 뉴멕시코주 앤버커키 아가일 에이브 엔
이 8009

명세서

청구범위

청구항 1

수소 제조 시스템으로서,

상기 시스템은:

SMR(steam methane reformer) 및 WGS(water gas shift) 반응기를 포함하고, 상기 SMR은

외부 투브 - 상기 외부 투브의 제 1 단부는 폐쇄됨 -;

상기 외부 투브 내에 배치된 내부 투브 - 상기 내부 투브의 제 1 단부는 개방되고, SMR 유동 채널이 상기 내부 투브 내에 형성되고, 환형 공간이 상기 외부 투브와 상기 내부 투브 사이에 형성되고, 상기 유동 채널은 상기 환형 공간과 유체 연통됨 -; 및

상기 외부 투브와 상기 내부 투브 사이의 상기 환형 공간 내에 배치된 밸포체를 포함하고,

상기 WGS 반응기는

반응 투브 - WGS 반응 채널이 상기 반응 투브 내에 형성되고, 상기 WGS 반응 채널은 상기 SMR 유동 채널과 유체 연통됨 -;

상기 WGS 반응 채널 내에 배치된 열전달 물질; 및

상기 WGS 반응 채널 내에 배치된 WGS 촉매를 포함하는, 수소 제조 시스템.

청구항 2

제 1 항에 있어서,

상기 SMR 유동 채널의 출구는 상기 WGS 반응 채널의 입구와 유체 연통된, 수소 제조 시스템.

청구항 3

제 1 항에 있어서,

상기 WGS 반응기는 하우징을 포함하고, 상기 WGS 반응기의 반응 투브는 상기 하우징 내에 배치되고, 냉각 유체 채널이 상기 WGS 반응기의 하우징과 반응 투브 사이에 형성된, 수소 제조 시스템.

청구항 4

제 3 항에 있어서,

상기 냉각 유체 채널의 출구는 상기 SMR의 환형 공간의 입구와 유체 연통된, 수소 제조 시스템.

청구항 5

제 3 항에 있어서,

상기 WGS 반응 채널의 입구와 상기 냉각 유체 채널의 출구는 상기 WGS 반응기의 제 1 단부에 배치된, 수소 제조 시스템.

청구항 6

제 3 항에 있어서,

상기 WGS 반응기는 상기 냉각 유체 채널을 통한 냉각 유체의 유량을 제어하도록 구성된 유량 제어기를

포함하는, 수소 제조 시스템.

청구항 7

제 1 항에 있어서,

상기 SMR의 발포체는 SMR 촉매를 포함하는, 수소 제조 시스템.

청구항 8

제 7 항에 있어서,

상기 SMR 촉매는 상기 SMR의 발포체 상에 배치된, 수소 제조 시스템.

청구항 9

제 7 항에 있어서,

상기 SMR 촉매는 수소 및 일산화탄소를 생성하는 SMR 수소 생성 반응을 촉매하도록 구성된, 수소 제조 시스템.

청구항 10

제 7 항에 있어서,

상기 SMR은 상기 외부 튜브와 상기 내부 튜브 사이의 환형 공간 내에 배치된 외부 열교환 발포체를 포함하고, 상기 외부 열교환 발포체와 상기 외부 튜브의 제 2 단부 사이의 거리는 상기 발포체 어셈블리와 상기 외부 튜브의 제 2 단부 사이의 거리보다 작은, 수소 제조 시스템.

청구항 11

제 1 항에 있어서,

상기 SMR은 상기 SMR 유동 채널 내에 배치된 내부 열교환 발포체를 포함하는, 수소 제조 시스템.

청구항 12

제 1 항에 있어서,

상기 SMR을 통한 베이요넷 유로(bayonet flow path)는 상기 외부 튜브의 제 2 단부의 입구로부터, 상기 외부 튜브와 상기 내부 튜브 사이의 환형 공간을 따라 상기 외부 튜브의 제 1 단부를 향해, 그리고 상기 SMR 유동 채널을 따라 상기 내부 튜브의 제 2 단부의 출구까지 형성된, 수소 제조 시스템.

청구항 13

제 1 항에 있어서,

상기 WGS 촉매는 WGS 촉매 물질을 포함하는 발포체를 포함하는, 수소 제조 시스템.

청구항 14

제 13 항에 있어서,

상기 WGS 촉매 물질은 발포체 기판을 포함하고, 상기 WGS 촉매 물질은 상기 발포체 기판 상에 배치된, 수소 제조 시스템.

청구항 15

제 1 항에 있어서,

상기 WGS 촉매는:

상기 WGS 반응 채널 내에 배치되고 제 1 온도 범위에서 수소 생성 반응을 촉매하도록 구성된 제 1 WGS 촉매; 및 상기 WGS 반응 채널 내에 배치되고 상기 제 1 온도 범위보다 낮은 제 2 온도 범위에서 상기 수소 생성 반응을 촉매하도록 구성된 제 2 WGS 촉매를 포함하는, 수소 제조 시스템.

청구항 16

제 15 항에 있어서,

상기 열전달 물질은 상기 제 1 WGS 촉매와 상기 제 2 WGS 촉매 사이의 상기 WGS 반응 채널 내에 배치된, 수소 제조 시스템.

청구항 17

제 1 항에 있어서,

상기 WGS 반응 채널 내에 배치된 상기 열전달 물질은 발포체를 포함하는, 수소 제조 시스템.

청구항 18

제 1 항에 있어서,

상기 수소 제조 시스템은 노(furnace)를 포함하며, 상기 SMR의 일부는 상기 노 내에 배치된, 수소 제조 시스템.

청구항 19

제 18 항에 있어서,

상기 SMR의 외부튜브의 제 1 단부는 상기 노 내에 배치된, 수소 제조 시스템.

청구항 20

제 18 항에 있어서,

상기 수소 제조 시스템은 상기 SMR의 외부튜브의 외면 상에 배치된 외부 열전달 물질을 포함하는, 수소 제조 시스템.

발명의 설명**기술 분야**

[0001]

본 발명은 수소 생성 시스템에 관한 것이다.

배경기술

[0002]

수소 생성 반응은 메탄과 같은 탄화수소를 수소 가스로 변환시킨다. 수소 가스는, 예를 들면, 차량의 연료로서 사용될 수 있다.

발명의 내용

[0003]

본 명세서에서는 탄화수소로부터 에너지 효율이 높은 저배출의 수소 가스(H₂) 생성 시스템에 대해 설명한다. 이 시스템은 유로를 따라 흐르는 유입하는 반응물 유체가 유로를 따라 흐르는 유출하는 유체로부터 회수된 열의 전달에 의해 가열되는 베이요넷 유로(bayonet flow path)를 갖는 SMR(steam methane reactor)를 포함한다. 베이요넷 유로를 따라 배치된 촉매 발포체 및 열전달 발포체는 SMR 내에서 수소 생성 반응을 촉매하고, 유입하는 반응물 유체로의 열전달을 촉진시킨다. SMR로부터의 생성물 유체가 WGS(water gas shift) 반응기에 제공된다. 이 유체는 WGS 반응기 내의 반응 채널을 따라 배치된 하나 이상의 WGS 촉매 및 하나 이상의 열전달 물질을 통해 흐른다. WGS 촉매 및 열전달 물질은 WGS 내에서 수소 생성 반응을 촉매하고, 발열성 WGS 수소 생성 반응에 의해 생성되는 열의 제거를 촉진한다. WGS 수소 생성 반응으로부터의 열에 의해 가열된 냉각 유체는 SMR로의 투입(input)으로서 제공될 수 있다. SMR 내의 유체 흐름 사이의 열전달을 사용하면 에너지 효율적인 수소의 제조가 실현될 수 있다.

[0004]

일반적인 양태에서, 수소 생성 시스템은 제 1 단부가 폐쇄된 외부튜브 및 이 외부튜브 내에 배치된 제 1 단부가 개방된 내부튜브를 포함하는 수증기 메탄 개질기(SMR; steam methane reformer)를 포함한다. 내부튜브 내에는 SMR 유동 채널이 형성되고, 외부튜브와 내부튜브 사이에는 환형 공간이 형성된다. 유동 채널은 환형 공간과 유체 연통된다. SMR은 외부튜브와 내부튜브 사이의 환형 공간 내에 배치된 발포체를 포함한다. 이 시스템은 반응튜브를 포함하는 WGS(water gas shift) 반응기 - 반응튜브 내에는 WGS 반응 채널이 형성되고, 이

WGS 반응 채널은 SMR 유동 채널과 유체 연통됨 -; WGS 반응 채널 내에 배치된 열전달 물질; 및 WGS 반응 채널 내에 배치된 WGS 촉매를 포함한다.

[0005] 실시형태는 다음의 특징 중 하나 또는 둘 이상의 임의의 조합을 포함할 수 있다.

[0006] SMR 유동 채널의 출구는 WGS 반응 채널의 입구와 유체 연통된다.

[0007] WGS 반응기는 하우징을 포함하고, WGS 반응기의 반응 투브는 이 하우징 내에 배치되고, 여기서 냉각 유체 채널이 WGS 반응기의 하우징과 반응 투브 사이에 형성된다. 냉각 유체 채널의 출구는 SMR의 환형 공간의 입구와 유체 연통된다. WGS 반응 채널의 입구와 냉각 유체 채널의 출구는 WGS 반응기의 제 1 단부에 배치된다. WGS 반응기는 냉각 유체 채널을 통한 냉각 유체의 유량을 제어하도록 구성된 유량 제어기를 포함한다.

[0008] SMR의 발포체는 SMR 촉매를 포함한다. SMR 촉매는 SMR의 발포체 상에 배치된다. SMR 촉매는 수소와 일산화탄소가 생성되는 SMR 수소 생성 반응을 촉매하도록 구성된다. SMR은 외부 투브와 내부 투브 사이의 환형 공간 내에 배치된 외부 열교환 발포체를 포함하며, 외부 열교환 발포체와 외부 투브의 제 2 단부 사이의 거리는 발포체 어셈블리와 외부 투브의 제 2 단부 사이의 거리보다 작다.

[0009] SMR은 SMR 유동 채널 내에 배치된 내부 열교환 발포체를 포함한다.

[0010] SMR을 통한 베이요넷 유로는 외부 투브의 제 2 단부의 입구로부터 외부 투브와 내부 투브 사이의 환형 공간을 따라 외부 투브의 제 1 단부를 향해 SMR 유동 채널을 따라 내부 투브의 제 2 단부의 출구까지 형성되어 있다.

[0011] WGS 촉매는 WGS 촉매 물질을 포함하는 발포체를 포함한다. WGS 촉매 물질은 발포체 기판을 포함하고, WGS 촉매 물질은 발포체 기판 상에 배치된다.

[0012] WGS 촉매는 WGS 반응 채널 내에 배치되고 제 1 온도 범위에서 수소 생성 반응을 촉매하도록 구성된 제 1 WGS 촉매; 및 WGS 반응 채널 내에 배치되고 제 1 온도 범위보다 낮은 제 2 온도 범위에서 수소 생성 반응을 촉매하도록 구성된 제 2 WGS 촉매를 포함한다. 열전달 물질은 제 1 WGS 촉매와 제 2 WGS 촉매 사이의 WGS 반응 채널 내에 배치된다.

[0013] WGS 반응 채널 내에 배치된 열전달 물질은 발포체를 포함한다.

[0014] 이 시스템은 노(furnace)를 포함하며, SMR의 일부는 이 노 내에 배치된다. SMR의 외부 투브의 제 1 단부는 노 내에 배치된다. 이 시스템은 SMR의 외부 투브의 외면 상에 배치된 외부 열전달 물질을 포함한다.

[0015] 이전의 양태와 조합될 수 있는 일반적인 양태에서, 수소를 제조하는 방법은 베이요넷 유동 경로를 따라 배치된 발포체를 통해 제 1 가스를 유동시키는 것을 포함하여, SMR(steam methane reformer)의 베이요넷 유동 경로를 따라 제 1 가스를 유동시켜 제 1 생성물을 생성하는 단계; SMR에서 생성된 제 1 생성물을 WGS(water gas shift) 반응기의 반응 투브 내에 형성된 WGS 반응 채널의 입력에 제공하는 단계; 및 제 1 생성물을 포함하는 제 2 가스를 WGS 반응 채널을 통과시켜 제 2 생성물을 생성하는 단계를 포함한다. 제 2 가스를 유동시키는 단계는 제 2 가스를 WGS 반응 채널 내에 배치된 열전달 물질을 통과시켜 유동하는 제 2 가스의 온도를 감소시키는 단계; 및 제 2 가스를 반응 채널 내에 배치된 WGS 촉매를 통과시키는 단계를 포함한다.

[0016] 실시형태는 다음의 특징 중 하나 또는 둘 이상의 임의의 조합을 포함할 수 있다.

[0017] SMR의 베이요넷 유로를 따라 제 1 가스를 유동시키는 것은 환형 공간으로부터 SMR 유동 채널 내로 제 1 가스를 유동시키는 것을 포함하고, 환형 공간은 외부 투브와 외부 투브 내에 배치된 내부 투브 사이에 형성되고, SMR 유동 채널은 내부 투브 내에 형성된다. SMR의 베이요넷 유로를 따라 제 1 가스를 유동시키는 것은 제 1 가스를 외부 투브의 제 2 단부의 입구로부터, 환형 공간을 따라 외부 투브의 제 1 단부를 향해, 그리고 내부 투브 내에 형성된 SMR 유동 채널을 따라 내부 투브의 제 2 단부의 출구까지 유동시키는 것을 포함한다. 이 방법은 내부 투브 내에 형성된 유동 채널을 따라 유동하는 가스로부터의 열로 환형 공간을 따라 유동하는 제 1 가스를 가열하는 것을 포함한다.

[0018] 베이요넷 유로를 따라 배치된 발포체를 통해 제 1 가스를 유동시키는 것은 촉매 발포체를 통해 가스를 유동시키는 것을 포함한다.

[0019] 이 방법은 WGS 반응기의 하우징과 WGS 반응기의 반응 투브 사이에 형성된 냉각 유체 유로를 통해 냉각 유체를 유동시키는 것을 포함한다. 유동하는 제 2 가스를 WGS 반응 채널 내에 배치된 열전달 물질에 접촉시키는 것은 유동하는 제 2 가스로부터 냉각 유체에 열을 전달하는 것을 포함한다. 이 방법은 냉각 유체를 100 °C 내지 300

℃의 온도까지 가열하는 것을 포함한다. 이 방법은 냉각 유체 유로로부터 SMR의 베이요넷 유로의 투입부에 가열된 냉각 유체를 제공하는 것을 포함한다. 이 방법은 냉각 유체 유로로부터 WGS 반응 채널의 투입부에 가열된 냉각 유체를 제공하는 것을 포함한다. 이 방법은 제 1 생성물이 WGS 반응 채널의 투입부에 제공되는 속도에 기초하여 냉각 유체 유로를 통한 냉각 유체의 유량을 조정하는 것을 포함한다.

[0020] 이 방법은 WGS 촉매 구조물이 수소 생성 반응을 촉매하는 온도 이상의 온도에서 WGS 반응 채널의 투입부에 제 1 생성물을 제공하는 것을 포함한다. 이 방법은 200℃ 내지 450℃의 온도에서 WGS 반응 채널의 투입부에 제 1 생성물을 제공하는 것을 포함한다.

[0021] WGS 촉매를 통해 제 2 가스를 유동시키는 것은 WGS 반응 채널 내에 배치된 제 1 WGS 촉매를 통해 제 2 가스를 유동시키는 것 - 제 1 WGS 촉매는 제 1 온도 범위 내에서 수소 생성 반응을 촉매하도록 구성됨 -; 및 반응 채널 내에 배치된 제 2 WGS 촉매를 통해 제 2 가스를 유동시키는 것을 포함하며, 제 2 WGS 촉매는 제 1 온도 범위보다 낮은 제 2 온도 범위에서 수소 생성 반응을 촉매하도록 구성된다. 이 방법은 제 1 WGS 촉매를 통해 제 2 가스를 유동시킨 후에 열전달 물질을 통해 제 2 가스를 유동시키는 것을 포함한다.

[0022] 열전달 물질에 제 2 가스를 유동시키는 것은 유동하는 제 2 가스의 온도를 WGS 촉매가 수소 생성 반응을 촉매할 수 있는 온도까지 감소시키는 것을 포함한다.

[0023] 이 방법은 제 1 가스를 SMR의 베이요넷 유로를 따라 유동시켜 일산화탄소 및 수소를 생성하는 것을 포함한다. WGS 반응 채널의 투입부에 제 1 생성물을 제공하는 것은 WGS 반응 채널의 투입부에 일산화탄소를 제공하는 것을 포함한다.

[0024] 이 방법은 제 2 가스를 WGS 반응 채널을 따라 유동시켜 이산화탄소 및 수소를 생성하는 것을 포함한다.

[0025] 이전의 양태와 조합될 수 있는 일반적인 양태에서, SMR 시스템은 외부 투브 - 이 외부 투브의 제 1 단부는 폐쇄됨 -; 및 외부 투브 내에 배치된 내부 투브를 포함하며, 내부 투브의 제 1 단부는 개방된다. 내부 투브 내에는 유동 채널이 형성되고, 외부 투브와 내부 투브 사이에는 환형 공간이 형성되고, 유동 채널은 환형 공간과 유체 연통된다. 이 SMR 시스템은 외부 투브와 내부 투브 사이의 환형 공간 내에 촉매를 포함하는 촉매 발포체를 포함한다.

[0026] 실시형태는 다음의 특징 중 하나 또는 둘 이상의 임의의 조합을 포함할 수 있다.

[0027] 촉매 발포체는 발포체 기판을 포함하고, 촉매는 이 발포체 기판 상에 배치된다.

[0028] SMR 시스템은 외부 투브와 내부 투브 사이의 환형 공간 내에 배치된 외부 열교환 발포체를 포함한다. 외부 열교환 발포체와 외부 투브의 제 2 단부 사이의 거리는 촉매 발포체와 외부 투브의 제 2 단부 사이의 거리보다 작다. 외부 열교환 발포체는 환형 형상을 갖는다.

[0029] 촉매 발포체는 환형 형상을 갖는다.

[0030] SMR 시스템은 유동 채널 내에 배치된 내부 열교환 발포체를 포함한다.

[0031] 촉매 발포체는 내부 투브와 접촉한다.

[0032] 촉매 발포체의 두께는 환형 공간의 너비와 동일하다.

[0033] 촉매 발포체는 10 ppi(pores per inch) 내지 30 ppi의 기공률을 갖는다.

[0034] 내부 투브를 따르는 상기 촉매 발포체의 길이는 10 인치 내지 5 피트이다.

[0035] 외부 투브의 외부 가열 섹션 내의 촉매 발포체의 길이는 외부 투브의 길이의 10% 내지 30%이다.

[0036] 촉매 발포체는 금속 발포체를 포함한다. 촉매 발포체는 니켈을 포함한다.

[0037] 촉매 발포체는 탄화규소를 포함한다.

[0038] SMR 시스템을 통한 베이요넷 유로는 외부 투브의 제 2 단부의 입구로부터 외부 투브와 내부 투브 사이의 환형 공간을 따라 외부 투브의 제 1 단부를 향해 유동 채널을 따라 내부 투브의 제 2 단부의 출구까지 형성되어 있다.

[0039] 유동 채널의 단면적과 환형 공간의 단면적 사이의 비율은 1 내지 5이다.

[0040] 내부 투브는 외부 투브와 동축이다.

- [0041] 외부 투브와 내부 투브 사이의 환형 공간의 너비는 0.2 인치 내지 4 인치이다.
- [0042] 외부 투브의 길이는 8 피트 내지 30 피트이다.
- [0043] SMR 시스템은 유동 채널 내에 배치된 세장형 배플을 포함한다.
- [0044] SMR 시스템은 외부 투브의 제 1 단부의 외면 상에 배치된 열전달 물질을 포함한다. 열전달 물질은 외부 투브의 제 1 단부의 외면 상에 배치된 핀(fin)을 포함한다. 열전달 물질은 외부 투브의 제 1 단부의 외면 상에 배치된 배플을 포함한다. 열전달 물질은 외부 투브의 제 1 단부의 외면 상에 배치된 발포체를 포함한다.
- [0045] 이전의 양태와 조합될 수 있는 일반적인 양태에서, SMR 시스템에서 수소를 제조하는 방법은 SMR 시스템의 베이요넷 유로를 따라 가스를 유동시키는 것을 포함한다. 베이요넷 유로는 외부 투브와 이 외부 투브 내에 배치된 내부 투브 사이에 형성된 환형 공간 - 이 외부 투브의 제 1 단부는 폐쇄되고, 내부 투브의 제 1 단부는 개방됨 -; 및 내부 투브 내에 형성된 유동 채널에 의해 형성되며, 유동 채널은 환형 공간과 유체 연통된다. 베이요넷 유로를 따라 가스를 유동시키는 것은 외부 투브와 내부 투브 사이의 환형 공간 내에 배치된 촉매 발포체를 통해 가스를 유동시키는 것을 포함한다.
- [0046] 실시형태는 다음의 특징 중 하나 또는 둘 이상의 임의의 조합을 포함할 수 있다.
- [0047] 베이요넷 유로를 따라 가스를 유동시키는 것은 외부 투브와 내부 투브 사이의 환형 공간 내에 배치된 외부 열교환 발포체를 통해 가스를 유동시키는 것을 포함한다.
- [0048] 이 방법은 촉매 발포체를 통해 가스를 유동시키기 전에 외부 열교환 발포체를 통해 가스를 유동시키는 것을 포함한다.
- [0049] 베이요넷 유로를 따라 가스를 유동시키는 것은 유동 채널 내에 배치된 내부 열교환 발포체를 통해 가스를 유동시키는 것을 포함한다.
- [0050] 베이요넷 유로를 따라 가스를 유동시키는 것은 환형 공간으로부터 유동 채널 내로 가스를 유동시키는 것을 포함한다. 이 방법은 외부 투브의 제 1 단부의 환형 공간으로부터 내부 투브의 제 1 단부의 유동 채널 내로 가스를 유동시키는 것을 포함한다.
- [0051] 이 방법은 내부 투브 내에 형성된 유동 채널 내에서 유동하는 가스로부터의 열로 환형 공간 내에서 유동하는 가스를 가열하는 것을 포함한다.
- [0052] 이 방법은 외부 투브의 제 1 단부에서 환형 공간 내의 가스를 가열하는 것을 포함한다.
- [0053] 이 방법은 난류로 베이요넷 유로의 적어도 일부를 따라 가스를 유동시키는 것을 포함한다.
- [0054] 이 방법은 베이요넷 유로를 따라 흐르는 가스로부터 수소를 제조하는 것을 포함한다.
- [0055] 이전의 양태들 중 임의 것과 조합될 수 있는 일 양태에서, WGS(water gas shift) 반응기 시스템은 하우징; 이 하우징 내에 배치된 반응 투브 - 반응 투브 내에는 반응 채널이 형성되어 있고, 하우징과 반응 투브 사이에는 냉각 유체 채널이 형성되어 있음 -; 반응 채널 내에 배치된 수소 생성 반응을 촉매하도록 구성된 촉매; 및 반응 채널 내에 배치된 열전달 물질을 포함한다.
- [0056] 실시형태는 다음의 특징 중 하나 또는 둘 이상의 임의의 조합을 포함할 수 있다.
- [0057] 촉매는 반응 채널 내에 배치되고 제 1 온도 범위에서 수소 생성 반응을 촉매하도록 구성된 제 1 촉매; 및 반응 채널 내에 배치되고 제 1 온도 범위보다 낮은 제 2 온도 범위에서 수소 생성 반응을 촉매하도록 구성된 제 2 촉매를 포함한다. 열전달 물질은 제 1 촉매와 제 2 촉매 사이의 반응 채널 내에 배치된다. 제 1 촉매는 200°C 내지 450°C의 온도에서 수소 생성 반응을 촉매하도록 구성된다. 제 2 촉매는 180° C 내지 350°C의 온도에서 수소 생성 반응을 촉매하도록 구성된다.
- [0058] 열전달 물질과 반응 채널의 입구 사이의 거리는 촉매 구조물과 반응 채널의 입구 사이의 거리보다 작다. 촉매는 200°C 내지 450°C의 온도에서 수소 생성 반응을 촉매하도록 구성된다.
- [0059] 촉매는 촉매 물질을 포함하는 발포체를 포함한다. 촉매 발포체는 발포체 기판을 포함하고, 촉매 재료는 이 발포체 기판 상에 배치된다. 발포체는 5 ppi(pores per inch) 내지 30 ppi의 기공률을 갖는다.
- [0060] 촉매는 촉매 펠릿을 포함한다.

- [0061] 열전달 물질은 발포체를 포함한다. 발포체는 5 ppi 내지 30 ppi의 기공률을 갖는다.
- [0062] 열전달 물질은 핀(fin)을 포함한다.
- [0063] WGS 반응기 시스템은 냉각 유체 채널 내에 배치된 냉각 채널 열전달 물질을 포함한다. 냉각 채널 열전달 물질은 발포체를 포함한다.
- [0064] 하우징은 원통형 하우징을 포함하고, 반응 튜브는 원통형 하우징과 동축이다.
- [0065] WGS 반응기 시스템은 반응 튜브 내에 배치된 내부 튜브를 포함하고, 반응 채널은 반응 튜브와 내부 튜브 사이의 환형 공간에 의해 형성되고, 내부 냉각 유체 채널이 내부 튜브 내에 형성된다.
- [0066] WGS 반응기 시스템은 하우징 내에 배치된 다수의 반응 튜브를 포함한다.
- [0067] 반응 채널의 입구와 냉각 유체 채널의 출구는 WGS 반응기의 제 1 단부에 배치된다.
- [0068] 반응 채널의 입구가 냉각 유체 채널의 출구와 유체 연통된다.
- [0069] 냉각 유체 채널의 출구는 SMR(steam methane reformer)의 입구와 유체 연통되도록 구성된다.
- [0070] WGS 반응기는 냉각 유체 채널을 통한 냉각 유체의 유량을 제어하도록 구성된 유량 제어기를 시스템 포함한다.
- [0071] 일반적인 양태에서, WGS 반응기에서 수소를 제조하는 방법은 WGS 반응기의 하우징과 이 하우징 내에 배치된 반응 튜브 사이에 형성된 냉각 유체 채널을 통해 냉각 유체를 유동시키는 것; 및 반응 튜브 내에 형성된 반응 채널을 통해 일산화탄소 및 수증기를 포함하는 가스를 유동시키는 것을 포함한다. 반응 채널을 통해 가스를 유동시키는 것은 반응 채널 내에 배치된 열전달 물질을 통해 가스를 유동시켜 유동하는 가스로부터의 열을 냉각 유체 채널 내의 냉각 유체에 전달하는 것; 및 반응 채널 내에 배치되어 수소 생성 반응을 촉매하도록 구성된 촉매를 통해 가스를 유동시키는 것을 포함한다.
- [0072] 실시형태는 다음의 특징 중 하나 또는 둘 이상의 임의의 조합을 포함할 수 있다.
- [0073] 열전달 물질을 통해 가스를 유동시키는 것은 유동하는 가스의 온도를 촉매 구조물이 수소 생성 반응을 촉매하는 온도까지 감소시키는 것을 포함한다. 이 방법은 유동하는 가스의 온도를 200°C 내지 450°C까지 감소시키는 것을 포함한다.
- [0074] 촉매를 통해 가스를 유동시키는 것은 반응 채널 내에 배치된 제 1 촉매를 통해 제 2 가스를 유동시키는 것 - 제 1 촉매는 제 1 온도 범위 내에서 수소 생성 반응을 촉매하도록 구성됨 -; 및 반응 채널 내에 배치된 제 2 촉매를 통해 가스를 유동시키는 것을 포함하며 제 2 촉매는 제 1 온도 범위보다 낮은 제 2 온도 범위에서 수소 생성 반응을 촉매하도록 구성된다. 이 방법은 제 1 온도 범위 내의 온도에서 반응 채널 내로 가스를 받아들이는 것을 포함한다. 이 방법은 200°C 내지 450°C의 온도에서 반응 채널 내로 가스를 받아들이는 것을 포함한다. 이 방법은 제 1 촉매를 통해 가스를 유동시킨 후에 열전달 물질을 통해 가스를 유동시키는 것을 포함한다. 열전달 물질을 통해 가스를 유동시키는 것은 유동하는 가스의 온도를 제 2 온도 범위까지 감소시키는 것을 포함한다. 이 방법은 유동하는 가스의 온도를 180° C 내지 350°C까지 감소시키는 것을 포함한다.
- [0075] 이 방법은 반응 튜브 내에 배치된 내부 튜브 내에 형성된 내부 냉각 유체 채널을 통해 냉각 유체를 유동시키는 것을 포함한다.
- [0076] 반응 채널을 통해 가스를 유동시키는 것은 WGS 반응기의 제 1 단부로부터 WGS 반응기의 제 2 단부까지 가스를 유동시키는 것을 포함하고; 냉각 유체 채널을 통해 냉각 유체를 유동시키는 것은 WGS 반응기의 제 2 단부로부터 WGS 반응기의 제 1 단부까지 냉각 유체를 유동시키는 것을 포함한다.
- [0077] 이 방법은 반응 채널을 통한 가스의 유량에 기초하여 냉각 유체 채널을 통한 냉각 유체의 유량을 조정하는 것을 포함한다.
- [0078] 이 방법은 100 °C 내지 300 °C의 온도에서 냉각 유체 채널로부터 냉각 유체를 배출하는 것을 포함한다.
- [0079] 이 제조 방법은 냉각 유체 채널로부터 반응 채널의 투입부에 수증기를 제공하는 것을 포함한다.
- [0080] 이 방법은 냉각 유체 채널로부터 SMR의 투입부에 수증기를 제공하는 것을 포함한다.
- [0081] 본 명세서에 기재된 접근방법은 다음의 장점들 중 하나 이상을 가질 수 있다. 유체 흐름을 목표 온도로 가열 및 냉각시키는데 회복된 열을 사용하면 수소 생성 프로세스의 에너지 효율이 높아질 수 있고, 저배출 프로세스가

될 수 있다. 예를 들면, 시스템 구성 및 동작을 변화시킴으로써 목표 처리량을 달성할 수 있게 하는 모듈식일 수 있다. 시스템은 대규모의 에너지 효율적인 수소 생성을 위해 확장될 수 있다.

[0082] 하나 이상의 구현형태의 세부사항은 첨부된 도면 및 이하의 상세한 설명에서 설명된다. 다른 특징 및 장점은 상세한 설명, 도면 및 청구항으로부터 명백해질 것이다.

도면의 간단한 설명

[0083] 도 1은 수소 생성 시스템의 다이어그램이다.

도 2a는 SMR(steam methane reformer)의 단면도이다.

도 2b는 도 2a의 SMR의 A-A' 선을 따른 단면도이다.

도 2c는 도 2a의 SMR의 B-B' 선을 따른 단면도이다.

도 3은 WGS 반응기의 다이어그램이다.

도 4는 WGS 반응기의 다이어그램이다.

도 5는 WGS 반응기의 다이어그램이다.

도 6은 수소 생성 시스템의 다이어그램이다.

도 7은 프로세스 흐름도이다.

도 8은 SMR의 내부 투브와 외부 투브 사이의 온도차의 플롯이다.

도 9a 및 도 9b는 각각 발포체를 구비한 그리고 구비하지 않은 SMR의 열전달의 시뮬레이션이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0084] 본 명세서에서는 탄화수소로부터 에너지 효율이 높은 저배출의 수소 가스(H₂) 생성 시스템에 대해 설명한다. 이 시스템은 유로를 따라 흐르는 유입하는 반응물 유체가 유로를 따라 흐르는 유출하는 유체로부터 회수된 열의 전달에 의해 가열되는 베이요넷 유로를 갖는 SMR(steam methane reactor)를 포함한다. 베이요넷 유로를 따라 배치된 촉매 발포체 및 열전달 발포체는 SMR 내에서 수소 생성 반응을 촉매하고, 유입하는 반응물 유체로의 열전달을 촉진시킨다. SMR로부터의 생성물 유체가 WGS(water gas shift) 반응기에 제공된다. 이 유체는 WGS 반응기 내의 반응 채널을 따라 배치된 하나 이상의 WGS 촉매 및 하나 이상의 열전달 물질을 통해 흐른다. WGS 촉매 및 열전달 물질은 WGS 내에서 수소 생성 반응을 촉매하고, 발열성 WGS 수소 생성 반응에 의해 생성되는 열의 제거를 촉진한다. WGS 수소 생성 반응으로부터의 열에 의해 가열된 냉각 유체는 SMR로의 투입(input)으로서 제공될 수 있다. SMR 내의 유체 흐름 사이의 열전달을 사용하면 에너지 효율적인 수소의 제조가 실현될 수 있다.

[0085] 본 명세서에 기재된 수소 생성 시스템은 모듈식이며, 설치면적이 작다. 이 시스템은 상당한 다운타임(downtime) 없이 업그레이드되거나 정지될 수 있다. 투브, 매니폴드, 플랜지, 및 촉매와 같은 시스템의 요소는 쉽게 분해되거나 교체될 수 있으므로 낮은 다운타임으로 유지보수 또는 동작의 조정이 가능하다.

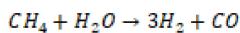
[0086] 도 1을 참조하면, 동작 구성으로 도시된 수소 생성 시스템(100)의 개략도는 SMR(200) 및 WGS 반응기(300)를 포함하며, 이들은 함께 천연 가스, 바이오가스, 메탄, 메탄올, 또는 기타 적합한 탄화수소와 같은 탄화수소로부터 수소 가스(H₂)를 생성한다. 탄화수소 및 수증기(steam)를 포함하는 유체(102)가 SMR 내에 투입되고, 촉매 발포체의 존재 하에서 반응된다. SMR(200)을 통해 흐르는 유체로부터 회복된 열 및 외부에서 가해진 열은 SMR(200)을 통해 흐르는 반응물의 온도를 SMR 수소 생성 반응을 일으키는 온도까지 상승시킨다. SMR을 통해 흐르는 유체로부터의 잔류열을 사용하여 반응물을 가열하면 외부 열원에 미치는 가열 부하를 저감시킴으로써 에너지 효율이 높은 작동이 가능해진다. SMR에서 생성되는 생성물 가스(104)는 수소 가스 및 일산화탄소를 포함한다.

[0087] 생성물 가스(104)(예를 들면, 수소 및 일산화탄소)의 적어도 일부는 수증기와 함께 WGS 반응기(300) 내에 유체 투입으로서 제공된다. 에너지 효율적인 작동을 위해, 생성물 가스(104)는 WGS 반응기(300) 내로 투입하기에 적합한 온도로 SMR(200)로부터 배출되고, 이로 인해 WGS 반응기(300) 내로 투입되는 유체의 능동적인 가열 또는 냉각을 피할 수 있다. WGS 반응기(300) 내로 투입되는 유체는 WGS 반응기(300)의 반응 채널을 따라 흐르고, 촉매 발포체와 같은 WGS 촉매의 존재 하에서 반응하여 수소 및 이산화탄소를 생성한다. 발포체와 같은 열전달 물질이 반응 채널 내에 배치되고, 발열성 WGS 수소 생성 반응에 의해 생성되는 과잉의 열을 WGS 반응기(300)를 통

해 흐르는 냉각 유체(108)에 전달한다. 열전달 물질에 의해 촉진되는 열전달에 의한 반응 채널 내의 유체의 냉각은 WGS 반응기(300)에서의 능동 냉각을 꾀할 수 있게 하여 에너지 효율적인 작동을 가능하게 한다. WGS에서 생성되는 생성물 가스(110)는 수소 가스 및 이산화탄소를 포함한다. 수증기의 형태로 가열된 냉각 유체(106)는 SMR(200) 내로 투입되는 유체(102)의 일부로서 제공될 수 있다. 일부의 실시례에서, 추가의 수증기가, 예를 들면, 시스템의 시동을 위해 외부 수원으로부터 제공된다.

[0088] 도 2a 내지 도 2c를 참조하면, SMR(200)은 외부 투브(202) 및 이 외부 투브(202)와 동심으로 배치된 내부 투브(204)의 2 개의 동심 투브를 포함한다. SMR(200)의 제 1 단부(206)에서 외부 투브(202)의 제 1 단부는 폐쇄되고, 내부 투브(204)의 제 1 단부는 개방된다. 환형 공간(210)이 외부 투브(202)와 내부 투브(204) 사이에 형성된다. 유동 채널(212)이 내부 투브(204) 내에 형성되고, 환형 공간(210)과 유체 연통된다. 세장형 배플(213)이 내부 투브(204)의 길이의 적어도 일부를 따라 배치된다.

[0089] SMR(200)을 통해 흐르는 유체(예를 들면, 가스)는 입구(214)로부터 제 2 단부(216)의 환형 공간(210) 내로, 이 환형 공간(210)을 따라 SMR의 제 1 단부(206)에서 외부 투브(202)의 제 1 단부를 향해, 유동 채널(212) 내로, 이 유동 채널(212)을 따라 SMR의 제 2 단부(216)에서 내부 투브(204)의 제 2 단부(216)를 향해, 그리고 내부 투브(204)의 제 2 단부(216)에서 출구(220)로의 SMR(200)을 통한 베이요넷 유로(도 2a에 화살표로 표시됨)를 따른다. 반응물(예를 들면, 탄화수소 및 물)은 입구(214)에서 베이요넷 유로 내에 투입된다. 수소 생성 반응이 SMR 촉매의 존재 하에서 외부 투브(202)의 제 1 단부(206)를 향하여 발생하여, SMR(200)로부터 출구(220)를 통해 배출되는 생성물(예를 들면, 수소 가스 및 일산화탄소)을 생성한다. SMR(200)에서 일어나는 예시적인 수소 생성 반응은 다음과 같이 표시된다:



[0090]

[0091] 수소 생성 반응은 600 °C 내지 1000 °C와 같은 반응 온도 위에서 일어나는 흡열 반응이다. 외부 열원(222)은 SMR(200)의 제 1 단부(206)에서 환형 공간(210)을 따라 유동하는 유체를 적어도 반응 온도까지 가열한다. 외부 열원(222)은 연소(예를 들면, 가스로), 태양 에너지, 또는 다른 적절한 에너지원에 의해 구동될 수 있다.

[0092]

SMR(200)의 제 1 단부(206)에서 환형 공간(210) 내의 유체는 외부 열원(222)에 의해 가열된다. 가열된 유체는 SMR(200)의 제 1 단부(206)에 있는 환형 공간(210)으로부터 유동 채널(212)에 유입되며, 고온으로 유동 채널에 들어간다. 외부 투브(202), 내부 투브(204)(및 따라서 환형 공간(210)) 및 유동 채널(212)이 동심인 SMR의 베이요넷 유로는 유동 채널(212)을 따라 흐르는 고압 유체로부터의 열이 환형 공간(210)을 따라 흐르는 저온 유체로 되돌려질 수 있는 구성을 제공한다. 내부 투브(204)는 이러한 열전달을 용이하게 하도록 설계되며, 예를 들면, 내부 투브(204)는 금속 또는 탄화규소와 같은 열전도율이 높은 물질로 형성될 수 있고, 벽을 얇게 할 수 있다. 환형 공간(210)을 따라 흐르는 유체의 온도를 상승시키기 위해 회복된 열을 사용하면 외부 열원(222)에 미치는 부하가 줄어들어 수소 생성 반응의 에너지 효율이 향상된다. 또한, 외부 열원(222)이 연소로인 경우, 이 연소로에 미치는 저감된 부하는 외부 열원(222)의 탄화수소 소비를 감소시킴으로써 수소 생성 반응과 관련된 배출을 저감시킨다.

[0093]

특히 도 2a 및 도 2b를 참조하면, 촉매 발포체(230)가 외부 투브(202)와 내부 투브(204) 사이의 환형 공간(210) 내에 배치된다. 촉매 발포체(230)는 수소 생성 반응(예를 들면, 탄화수소 및 물로부터 수소 및 일산화탄소의 생성)을 촉매하는 SMR 촉매를 포함한다. 수소 생성 반응은 촉매 발포체(230)가 배치되는 그리고 반응 온도의 온도나 반응 온도보다 높은 온도에 있는 베이요넷 유로의 일부에서 주로 발생한다. 예를 들면, 수소 생성 반응은 외부 열원(222)에 의해 가열되는 단부 공간(223) 내의 부분, 예를 들면, SMR(200)의 제 1 단부(206)를 향하는 환형 공간(210)의 가열된 부분(221) 및 SMR(200)의 제 1 단부(206)의 단부 공간(223)에서 발생한다. 수소 생성 반응은 또한 가열된 부분(221)의 외부 영역, 예를 들면, 유동 채널(212)을 따라 흐르는 유체로부터의 열전달에 의해 반응 온도까지 또는 반응 온도를 초과하는 온도까지 가열되는 영역(이하에서 더 설명됨)에서도 발생할 수 있다.

[0094]

일부의 실시례에서, SMR 촉매는 발포체 기판 상에 코팅되어 촉매 발포체(230)를 형성한다. 일부의 실시례에서, SMR 촉매는 발포체 기판 내에 통합되거나 함침되어 촉매 발포체(230)를 형성한다. 촉매 발포체(230)는 촉매 발포체(230)의 상류측(232)으로부터 하류측(234)으로 하나 이상의 유체 유로가 형성되는 다공질 구조물이다. 유체가 SMR(200)을 통해 베이요넷 유로를 따라 흐름에 따라, 유체는 촉매 발포체(230)의 유체 유로를 통해 흐르고, 촉매 발포체(230) 내의 촉매는 유동하는 유체 내에서 수소 생성 반응을 촉매한다. 촉매 발포체(230)의 기공률은 촉매 발포체(230)와 유동하는 유체 사이의 접촉을 위한 높은 표면적을 제공하며, 이는 수소 생성 반응의 효율적

인 촉매작용을 촉진시킨다.

[0095] 촉매 발포체(230)는 이 촉매 발포체(230)가 외부 열원(222)으로부터 촉매 발포체(230)를 통해 흐르는 유체에의 열전달을 촉진시키도록 열전도성 물질을 포함하며, 이 유체는 내부튜브(202)의 내의 유동 채널(212), 또는 둘 모두를 따라 흐른다. 촉매 발포체(230)와 외부튜브(202) 사이의 물리적 접촉으로 인해 외부 열원(222)으로부터 촉매 발포체를 통해 흐르는 유체로의 열전달이 가능해진다. 촉매 발포체(230)와 내부튜브(204) 사이의 물리적 접촉으로 인해 유동 채널(212)을 따라 흐르는 유체로부터 촉매 발포체를 통해 흐르는 유체로의 열전달이 가능해진다. 촉매 발포체(230)의 높은 표면적은 열전달을 촉진한다. 촉매 발포체(230)의 기공률은 또한 환형 공간(210)의 적어도 일부 내에서 난류 유체 유동을 유발할 수 있으며, 환형 공간(210)을 따라 흐르는 유체에의 열전달을 더욱 촉진시키고, 수소 생성 프로세스의 에너지 효율을 향상시킨다.

[0096] 촉매 발포체(230)는 환형 형상을 갖는다. 도 2a 및 도 2b에 도시된 바와 같이, 촉매 발포체(230)의 환형부의 두께(t_c)(단순히 촉매 발포체(230)의 두께로 지칭됨)는 외부튜브(202)의 외벽과 외부튜브(202)의 내벽 사이의 반경방향 거리(환형 공간(210)의 너비로 지칭됨)와 동일하므로 촉매 발포체(230)는 외부튜브(202) 및 내부튜브(204)의 둘 모두와 물리적으로 접촉된다. 촉매 발포체(230)와 내외부튜브(204, 202) 사이의 접촉으로 인해 외부열원(222) 및 내부튜브(202) 내의 유동 채널(212)을 따라 흐르는 유체로부터 촉매 발포체(230)를 통해 흐르는 유체로의 열전달이 가능해진다. 일부의 실시례에서, 촉매 발포체(230)의 두께(t_c)는 환형 공간(210)의 너비보다 작고, 촉매 발포체(230)는 단 하나의 튜브와, 예를 들면, 외부튜브(202) 또는 내부튜브(204)와 물리적으로 접촉될 뿐이다.

[0097] 촉매 발포체(230)의 기공률(예를 들면, ppi) 및 촉매 발포체(230)의 길이(촉매 발포체(230)의 상류측(232)으로부터 하류측(234)으로의 외부튜브(202)의 축선을 따르는 촉매 발포체의 길이를 지칭함)는 촉매 발포체(230)의 표면적에 영향을 미치고, 이에 따라 촉매작용의 효율 및 열전달에 영향을 미친다. 증가된 기공률 및 길이의 둘 모두는 유동하는 유체와 촉매 발포체(230) 사이의 접촉의 기회를 증가시키고, 이로 인해 촉매작용 및 열전달의 둘 모두의 효율을 향상시킨다. 촉매 발포체(230)의 길이는 또한 유체가 촉매 발포체(230)를 통해 흐를 때 촉매 발포체(230)를 통한 압력 강하에 영향을 미친다. 증가된 기공률 및 길이의 둘 모두는 촉매 발포체(230)를 통한 압력 강하를 증가시키며, 이는 베이요넷 유로를 따른 유체 유동을 느리게 함으로써 SMR(200)의 처리량을 감소시킨다. 촉매 발포체(230)의 기공률 및 길이는 촉매 발포체(230)를 통한 낮은 압력 강하의 상태로 효율적인 촉매작용 및 열전달을 달성하도록 선택될 수 있다. 예를 들면, 촉매 발포체(230)는 10 ppi(pores per inch) 내지 30 ppi의 기공률을 가질 수 있다. 일부의 실시례에서, 촉매 발포체(230)는 (도 2a의 실시례에서와 같이) 완전히 외부튜브(202)의 가열된 부분(221) 내에 있으며, 예를 들면, 촉매 발포체(230)의 길이(l_c)는 외부튜브(202)의 가열된 부분(221)의 길이의 10% 내지 30%, 예를 들면, 10 인치 내지 5 피트의 길이이다. 일부의 실시례에서, 촉매 발포체(230)는 외부튜브(202)의 가열된 부분(221)을 넘어 연장되고, 외부튜브의 전체 길이까지 연장될 수 있다. 일부의 실시례에서, 촉매 발포체(230)의 기공률 및 길이는 촉매 발포체(230)를 통해 1 psi(pound per square inch) 미만의 유체 압력 강하가 발생하도록 선택될 수 있다.

[0098] 촉매 발포체(230)는 촉매 발포체(230)를 통해 흐르는 유체로의 열전달, 예를 들면, 유동 채널(212)을 따라 흐르는 유체로부터의 열전달, 외부열원(222)으로부터의 열전달, 또는 둘 모두를 촉진하는데 충분한 열전도율을 갖는 물질(예를 들면, 발포체 기판)을 포함한다. 촉매 발포체(230)의 물질은 SMR(200)이 동작하는 온도 범위 내에서 SMR(200)의 베이요넷 유로를 따라 흐르는 유체(예를 들면, 수소 생성 반응의 반응물과 생성물)에 비반응성이 있다. 촉매 발포체(230)의 물질은, 예를 들면, 튜브(202, 204)로부터 촉매 발포체(230)의 충간박리를 피하기 위해 외부튜브(202), 내부튜브(204), 또는 둘 모두의 물질과 열적으로 호환성이 있는, 예를 들면, 유사한 열팽창계수를 가질 수 있다. 예를 들면, 발포체는 니켈 또는 스테인리스강 발포체, 또는 탄화규소 발포체와 같은 금속 발포체; 또는 또 다른 적합한 물질일 수 있다.

[0099] 도 2a를 참조하면, 열전도성 물질로 형성된 외부 열교환 발포체(250)는 외부튜브(202)와 내부튜브(204) 사이의 환형 공간(210) 내에 배치된다. 외부 열교환 발포체(250)와 외부튜브(202)의 제 2 단부(216)에서의 입구 사이의 거리는 촉매 발포체(230)와 입구(214) 사이의 거리보다 짧아서 환형 공간(210)을 따라 흐르는 유체는 외부열교환 발포체(250)를 통해 흐른 후에 촉매 발포체(230)를 통해 흐르게 된다. 외부 열교환 발포체(250)는 내부튜브(204)와 물리적으로 접촉하여 유동 채널(212)을 따라 흐르는 유체로부터 외부 열교환 발포체(250)를 통해 흐르는 유체로의 열전달을 촉진한다.

[0100] 도 2c를 참조하면, 열전도성 물질로 형성된 내부 열교환 발포체(252)는 내부튜브(204) 내에 형성된 유동 채널

(212) 내에 배치된다. 내부 열교환 밸포체(252)는 내부 튜브(204)와 물리적으로 접촉하여 내부 열교환 밸포체를 통해 흐르는 유체로부터 환형 공간(210)을 따라 흐르는 유체로의 열전달을 촉진한다. 외부 열교환 밸포체(250)와 내부 열교환 밸포체(252)의 기공률은 밸포체(250, 252)와 이 각각의 밸포체를 통해 흐르는 유체 사이의 접촉을 위한 높은 표면적을 제공하고, 이는 효율적인 열전달을 제공한다. 외부 열교환 밸포체(250) 및 내부 열교환 밸포체(252)의 기공률은 또한 환형 공간(210) 또는 유동 채널(212)의 각각의 적어도 일부 내에 난류 유체 유동을 유발하여 열전달을 더욱 촉진할 수 있다. 일부의 실시례에서, 예를 들면, 내부 열교환 밸포체(252)에 추가하여 또는 이것 대신에 촉매 밸포체가 유동 채널(212) 내에 배치될 수 있다.

[0101] 외부 열교환 밸포체(250)와 내부 열교환 밸포체(252)에 의해 가능한 열전달로 인해 환형 공간(210) 내의 유체는 유동 채널(212)을 따라 흐르는 더 높은 온도의 유체로부터 회수된 과잉의 열을 사용하여 이 유체가 촉매 밸포체(230)에 도달하기 전에 예열될 수 있다. 환형 공간(210)을 따라 흐르는 유체를 예열시키는데 회복된 열을 사용하면 환형 공간(210)을 따라 흐르는 유체를 반응 온도까지 가열하기 위해 외부 열원(222)에 의해 제공되는 열량을 절감시킬 수 있으므로 SMR(200)의 효율을 향상시킨다.

[0102] 외부 열교환 밸포체(250)는 환형 형상을 갖는다. 외부 열교환 밸포체(250)의 환형부의 두께(외부 열교환 밸포체(250)의 두께로 지칭됨)는 외부 열교환 밸포체(250)가 외부 튜브(202) 및 내부 튜브(204)의 둘 모두와 물리적 접촉하도록 환형 공간(210)의 너비와 동일하다. 일부의 실시례에서, 외부 열교환 밸포체(250)의 두께는 환형 공간(210)의 너비보다 작고, 외부 열교환 밸포체(250)는 튜브들 중 하나와만, 예를 들면, 내부 튜브(204)와만 물리적으로 접촉한다.

[0103] 내부 열교환 밸포체(252)도 환형 형상을 갖는다. 내부 열교환 밸포체(252)의 환형부의 두께(t_i)는 내부 열교환 밸포체(252)가 내부 튜브(204)와 물리적으로 접촉하도록 내부 튜브(204)와 세장형 배플(213) 사이의 반경방향 거리와 동일하다 일부의 실시례에서, 내부 열교환 밸포체(252)의 두께(t_i)는 이 반경방향 거리보다 작고, 내부 열교환 밸포체(252)는 내부 튜브(204)와 물리적으로 접촉하지만 세장형 배플(213)과는 물리적으로 접촉하지 않는다. 일부의 실시례에서, 세장형 배플(213)은 존재하지 않으며, 내부 열교환 밸포체(252)는 유동 채널(212)의 반경 이하의 두께를 갖는 환형 또는 원통형이다.

[0104] 외부 열교환 밸포체(250) 및 내부 열교환 밸포체(252)의 각각의 기공률 및 길이는 각각의 열교환 밸포체(250, 252)를 통한 낮은 압력 강하로 효율적인 열전달을 달성하도록 선택될 수 있다. 예를 들면, 각각의 열교환 밸포체(250, 252)는 10 ppi 내지 30 ppi의 기공률을 가질 수 있다. 외부 열교환 밸포체(250)의 길이는, 예를 들면, 4 인치 정도로 작을 수 있고, 촉매 밸포체(230) 입구(212) 와 상류측(232) 사이의 거리만큼 길 수 있다. 내부 열교환 밸포체(252)의 길이는, 예를 들면, 4 인치 정도로 작을 수 있고, 내부 튜브(204)의 제 1 단부(208)와 내부 튜브(204)의 제 2 단부(218)에서의 출구 사이의 거리와 동일할 수 있다. 일부의 실시례에서, 외부 열교환 밸포체(250) 및 내부 열교환 밸포체(252)의 기공률 및 길이는 외부 열교환 밸포체(250)와 내부 열교환 밸포체(252)의 각각을 통해 1 psi 미만의 압력 강하가 발생하도록 선택될 수 있다. 일부의 실시례에서, 외부 열교환 밸포체(250), 내부 열교환 밸포체(252), 또는 둘 모두 존재하지 않는다.

[0105] 외부 열교환 밸포체(250) 및 내부 열교환 밸포체(252)는 환형 공간(210)을 따라 흐르는 유체에의 열전달을 촉진하기에 충분한 열전도율을 갖는 물질로 형성된다. 열교환 밸포체(250, 252)의 물질은 SMR(200)이 동작될 온도 범위 내에서 SMR(200)의 베이요넷 유로를 따라 흐르는 유체(예를 들면, 수소 생성 반응의 반응물과 생성물)에 비반응성이다. 외부 열교환 밸포체(250) 및 내부 열교환 밸포체(252)의 물질은, 예를 들면, 충간박리를 피하기 위해, 내부 튜브(204)와 열적으로 호환성이 있을 수 있으며, 예를 들면, 내부 튜브(204)와 유사한 열팽창 계수를 가질 수 있다. 예를 들면, 열교환 밸포체(250, 252)는 니켈 또는 스테인리스강 밸포체와 같은 금속 밸포체, 또는 탄화규소 밸포체, 또는 적합한 물질일 수 있다.

[0106] 베이요넷 유로를 따라 촉매 밸포체(230), 외부 열교환 밸포체(250) 및 내부 열교환 밸포체(252)의 존재로 인해 SMR(200)을 통한 높은 처리량 및 SMR(200)의 에너지 효율적인 작동이 가능해진다. 예를 들면, 유동 채널(212)을 따라 흐르는 더 고온의 유체로부터 회복된 열로 환형 공간(210)을 따라 흐르는 유체를 가열함으로써 외부 열원(222)으로부터 더 적은 열을 투입하여 반응 온도에 도달할 수 있으므로 에너지 효율적인 SMR 작동을 제공할 수 있다. 또한, 회복된 열로 환형 공간(210)을 따라 흐르는 유체를 가열함으로써, 환형 공간(210)은 0.2 인치 내지 4 인치와 같이 비교적 넓게 제작될 수 있고, 이것은 비교적 큰 체적의 가스 흐름을 수용할 수 있다.

[0107] 도 2a를 참조하면, 열전달 물질(258)이 외부 튜브(202)의 제 1 단부(206)의 외면 상에 배치되어 외부 열원(222)으로부터 SMR(200)의 베이요넷 유로를 따라 흐르는 유체에의 열전달을 촉진한다. 도 2a의 실시례에서, 열전달

물질(258)은 편이고; 일부의 실시례에서, 이 열전달 물질(258)은 배플, 발포체, 또는 열전달을 촉진하기에 적합한 다른 구조일 수 있다. 열전달 물질(258)은 외부 열원(222)으로부터 환형 공간(210)을 따라 흐르는 유체로의 열전달 효율을 향상시키고, 베이요넷 유로 내의 유체를 가열하는데 사용되는 외부 열원(222)에 의해 생성되는 열량을 증가시킴으로써 SMR의 에너지 효율적인 작동에 기여한다.

[0108] 촉매 발포체(230), 내부 열교환 발포체(252) 및 외부 열교환 발포체(250)의 위치, 길이 및 특성(예를 들면, 기공률, 열전도율)은 베이요넷 유로를 따라 하나 이상의 지점에서 원하는 온도를 달성하도록 선택될 수 있다. 예를 들면, 발포체의 위치, 길이, 및 특성은 고효율의 수소 생성 반응을 촉진하도록 촉매 발포체(230)에서 목표 온도를 달성하도록 선택될 수 있다. 일부의 실시례에서, SMR로부터 배출된 유체는 추가의 수소 생성 반응에서 반응물로서 작용하도록 WGS 반응기에 제공되며, 발포체의 위치 및 길이는 유동 채널(212)의 출구로부터 배출되는 유체의 목표 온도, 예를 들면, WGS 반응기 내로 투입하기 위한 목표 온도를 달성하도록 선택될 수 있다. WGS 반응기 내로 투입하기 위한 목표 온도로 SMR(200)로부터 유체를 배출함으로써, WGS 반응기의 투입물을 예열하기 위한 외부 열원의 사용은 저감되거나 제거될 수 있고, 시스템의 전체적인 효율이 향상될 수 있다.

[0109] 촉매 발포체(230), 외부 열교환 발포체(250) 및 내부 열교환 발포체(252)는 SMR(200)로부터 제거될 수 있고, 예를 들면, 상이한 특성의 발포체(예를 들면, 상이한 기공률, 길이, 열전도율, 또는 기타 특성)와 교체될 수 있다. 예를 들면, 하나 이상의 발포체를 교환하면, SMR(200)로부터 배출된 유체의 목표 처리량 또는 목표 온도와 같은 원하는 성능을 달성하는데 도움이 될 수 있다.

[0110] 일부의 실시례에서, 외부 튜브(202)의 길이는, 예를 들면, 모듈식 수소 생성 시스템의 경우에 8 피트 내지 30 피트이다. 일부의 실시례에서, 외부 튜브(202)는, 예를 들면, 산업 플랜트 규모의 수소 생성 시스템의 경우에 더 길 수 있다. 환형 공간의 너비는 0.2 인치 내지 4 인치일 수 있다. 유동 채널(212)의 단면적과 환형 공간(210)의 단면적 사이의 비율(도 2b 참조)은 수소 생성 반응으로부터 발생된 가스의 몰수의 증가에 대응하기 위해 1보다 크며, 예를 들면, 1 내지 5이다.

[0111] 일부의 실시례에서, 촉매 발포체(230), 외부 열전달 발포체(250), 내부 열전달 발포체(252), 또는 이들 중 임의의 2 개 이상의 조합은, 예를 들면, 불균일한 기공률 또는 다중물질 조성을 갖는 불균일한 구조물이다. 예를 들면, 발포체를 통한 유체 압력 강하가 덜 중요한 위치에서 발포체는 열전달을 향상시키는데 더 작은 기공으로 구성될 수 있다. 발포체는 다중물질 발포체, 예를 들면, 열전달 효율을 위한 알루미늄 또는 구리의 내부 셀과의 화학적 적합성을 위해 니켈의 외부 셀을 갖는 발포체일 수 있다. 일부의 실시례에서, 외부 열전달 발포체(250), 내부 열전달 발포체(252), 또는 둘 모두는 고체의 원통형 튜브로 교체될 수 있다.

[0112] SMR에서의 열전달(예를 들면, 유동 채널을 따라 흐르는 유체로부터 환형 공간(210)을 따라 흐르는 유체로의 열전달)은 유동하는 유체의 압력에 관련이 있다. 유체 압력이 증가하면 일반적으로 열전달이 증가한다. 고압에서 작동하는 SMR의 내부 튜브(204) 및 외부 튜브(202)의 벽은 저압에서 작동하는 SMR의 내부 튜브(204) 및 외부 튜브(202)의 벽보다 두껍다. 벽 두께가 증가하면 열전달이 감소할 수 있다. SMR 구성요소(예를 들면, 내부 튜브 및 외부 튜브의 벽 두께) 및 작동 파라미터(예를 들면, 유체 압력)는 이러한 경합하는 요소들의 균형을 맞추도록 설계될 수 있다.

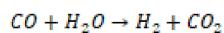
[0113] 도 2a 내지 도 2c의 실시례에서, SMR(200)은 외부 튜브(202) 및 내부 튜브(204)를 포함하는 단일 세트의 튜브를 포함한다. 일부의 실시례에서, SMR은 다수의 세트의 튜브를 포함하며, 각각의 세트는 외부 튜브 및 내부 튜브를 갖는다. 다수의 세트의 튜브는 처리량을 증가시키기 위해 병행하여 작동될 수 있고, 다수의 세트의 튜브를 위한 충분한 열을 생성하는 치수의 단일의 외부 열원(222)에 의해 가열될 수 있다.

[0114] 수소 가스와 일산화탄소 및 과잉의 수증기를 포함하는 SMR(200)에서의 수소 생성 반응의 생성물은 출구(220)를 통해 SMR(200)로부터 배출된다. SMR 배출물은 WGS 반응기(300)에 투입물로서 제공되며, 여기서 일산화탄소 및 물(예를 들면, 수증기)이 WGS 촉매의 존재 하에서 반응하여 수소 가스 및 이산화탄소를 생성한다.

[0115] SMR(200)로부터의 배출물은 WGS 반응기(300) 내로의 투입을 위해 충분한 온도에 있다. WGS 반응기는 하나 이상의 WGS 촉매를 포함하며, 이들 각각은 각각의 온도 범위에서 작동하며, SMR 배출물은 WGS 촉매의 온도 범위의 온도나 이를 초과하는 온도에 있으므로 WGS 반응기 내로 투입되기 전에 SMR의 외부의 능동적인 가열이 이루지지 않는다. SMR 배출물의 온도는 유동 채널(212)을 따라 흐르는 유체와 SMR의 환형 공간(210)을 따라 흐르는 유체 사이의 열전달에 영향을 주는 파라미터, 예를 들면, 외부 열전달 발포체(250), 내부 열전달 발포체(252), 외부 튜브(202) 및 내부 튜브(204)의 직경 및 물질, 베이요넷 유로를 따르는 유체의 유량, 또는 기타 인자의 특성의 조정에 의해 제어될 수 있다.

[0116] 도 3을 참조하면, 예시적인 WGS 반응기(300)는 하우징(302) 및 이 하우징(302) 내에 배치된 반응 튜브(304)를 포함한다. 반응 채널(306)이 이 반응 튜브(304) 내에 형성되어 있다. 예를 들면, 하우징(302) 및 반응 튜브(304)의 둘 모두는 원통형 튜브일 수 있고, 반응 튜브(304)는 원통형 하우징(302)과 동축이다. 도 3의 실시례에서, 반응 채널(306)은 반응 튜브(304)와 이 반응 튜브(304) 내에 배치된 내부 튜브(308) 사이에 형성된 환형 공간이다. 일부의 실시례에서, 반응 채널(306)은 원통형이고, 이 반응 튜브(304) 내에는 내부 튜브가 배치되지 않는다.

[0117] SMR로부터 배출되는 유체와 같은 반응물 유체는 WGS 반응기(300)의 제 1 단부(310)에서 반응 채널(306)의 입구(305) 내로 들어가 반응 채널(306)을 따라 흐른다. 수소 생성 반응이 반응 채널(306) 내에 배치된 WGS 촉매의 존재 하에서 반응 채널(306)을 따라 일어난다. 이 수소 생성 반응은 WGS 반응기의 제 2 단부(312)의 출구(307)를 통해 반응 채널(306)로부터 배출되는 생성물(예를 들면, 수소 가스 및 이산화탄소)을 생성한다. 예를 들면, WGS 반응기(300)의 제 1 단부(310)에 있는 반응 채널(306)의 입구(305)는 SMR(200)의 출구(220)와 유체 연통되고(도 2a 참조), SMR로부터 배출되는 유체는 WGS(300)의 반응 채널(306) 내에 제공된다. WGS 수소 생성 반응의 일례는 다음과 같이 표시된다:



[0118] .

[0119] WGS(300)에서의 수소 생성 반응은 발열 반응이다. WGS(300)에서 수소 생성 반응에 의해 생성되는 열은 WGS의 하우징(302)과 반응 튜브(304) 사이에 형성된 냉각 유체 채널(314)을 따라 흐르는 냉각 유체(예를 들면, 물)에 의해 제거된다. 냉각 유체는 또한 내부 튜브(308) 내에 형성된 내부 냉각 유체 채널(316)을 통해 흐를 수 있다. 냉각 유체는 WGS 반응기(300)의 제 2 단부(312)에서 냉각 유체 채널(314) 및 내부 냉각 유체 채널(316)의 각각의 입구로 들어가고, WGS 반응기(300)의 제 1 단부(310)에서 냉각 유체 채널(314) 및 내부 냉각 유체 채널(316)의 각각의 출구로부터 배출된다. 반응 채널(308) 내에서 유체의 유동 방향은 WGS 반응기(300)의 제 1 단부(310)로부터 제 2 단부(312)를 향하고, 냉각 흐름의 유동 방향은 그 반대로서 WGS 반응기(300)의 제 2 단부(312)로부터 제 1 단부(310)를 향한다. 냉각 유체가 냉각 유체 채널(314) 및 내부 냉각 유체 채널(316)을 따라 흐름에 따라 냉각 유체는 반응 채널(308)을 따라 흐르는 유체로부터의 열로 가열된다. 일부의 실시례에서, 냉각 유체는 입구에서 액체의 물이고, 출구에서 이 냉각 유체는 가열되어 수증기 또는 액체 물과 수증기의 혼합물이 된다.

[0120] WGS 촉매 및 열전달 물질은 WGS 반응기(300)의 반응 채널(306) 내에 배치된다. WGS 촉매 및 열전달 물질의 구성은, 예를 들면, 목표 처리량 또는 수소 생성 효율을 달성하도록 조정되어 목표 온도 범위에서의 작동을 달성할 수 있거나 다른 목표를 달성할 수 있다. 예를 들면, 반응 채널(306)을 따르는 WGS 촉매 및 열전달 물질의 위치는 조정될 수 있다. WGS 촉매 및 열전달 물질의 구조 및 범위는 조정될 수 있다. 도 3의 실시례에서, WGS 반응기(300)는 2 개의 WGS 촉매(330, 332) 사이에 배치된 열전달 물질(334)을 갖는 2 촉매 시스템으로서 구성된다. 도 4의 실시례에서, WGS 반응기(300)는 열전달 물질(434) 및 단일의 WGS 촉매(430)를 갖는 1 촉매 시스템으로서 구성된다. WGS 촉매 및 열전달 물질의 다른 구성도 또한 가능하다.

[0121] 도 3에 도시된 WGS 반응기(300)의 2 촉매 구성에서, 제 1 WGS 촉매(330) 및 제 2 WGS 촉매(332)는 반응 채널(306) 내에 배치된다. 제 1 WGS 촉매(330)는 제 1 온도 범위, 예를 들면, 200 °C 내지 450 °C에서 WGS 수소 생성 반응을 촉매한다. 제 1 WGS 촉매(330)는, 예를 들면, 310 °C 내지 450 °C의 온도에서 WGS 수소 생성 반응을 촉매하는 고온 WGS 촉매일 수 있다. 제 1 WGS 촉매(330)는, 예를 들면, 200 °C 내지 350 °C의 온도에서 WGS 수소 생성 반응을 촉매하는 중온 WGS 촉매일 수 있다. 반응물은, 제 1 WGS 촉매(330)가 제 1 WGS 촉매(330)를 통해 흐르는 가스 내에서 수소 생성 반응을 촉매할 수 있도록, 제 1 온도 범위 내의 온도에서 반응 채널(306) 내에 투입된다.

[0122] 제 2 WGS 촉매(332)는, 제 1 WGS 촉매(330)와 반응 채널(306)의 입구 사이의 거리가 제 2 WGS 촉매(332)와 반응 채널(306)의 입구(305) 사이의 거리보다 작도록, 반응 채널(306)을 따라 배치된다. 반응 채널(306)을 따라 흐르는 가스는 제 1 WGS 촉매(330)를 통해 흐른 후에 제 2 WGS 촉매(332)를 통해 흐른다. 제 2 WGS 촉매(332)는 제 1 온도 범위보다 낮은 제 2 온도 범위에서 WGS 수소 생성 반응을 촉매한다. 예를 들면, 제 2 WGS 촉매(332)는, 예를 들면, 180 °C 내지 350 °C에서 WGS 수소 생성 반응을 촉매한다. 제 1 WGS 촉매(330)는 고온 WGS 촉매이고, 제 2 WGS 촉매(332)는 중온 WGS 촉매일 수 있고; 또는 제 2 WGS 촉매(332)는, 예를 들면, 180 °C 내지 250 °C의 온도에서 WGS 수소 생성 반응을 촉매하는 저온 WGS 촉매일 수 있다. 제 1 WGS 촉매(330)가 중온 WGS 촉매일 때, 제 2 촉매(332)는 저온 WGS 촉매일 수 있다.

- [0123] 열전달 물질(334)은 제 1 WGS 촉매(330)와 제 2 WGS 촉매(332) 사이의 반응 채널(306) 내에 배치되고, 열전달 물질(334)과 반응 채널(306)의 입구(305) 사이의 거리는 제 2 WGS 촉매(332)와 반응 채널(306)의 입구(305) 사이의 거리보다 작다. 반응 채널(306)을 따라 흐르는 유체는 처음에 제 1 WGS 촉매(330)를 통해 흐르고, 다음에 열전달 물질(334)을 통해, 그리고 다음에 제 2 WGS 촉매(332)를 통해 흐른다. 열전달 물질(334)은 반응 튜브(304), 내부 튜브(308), 또는 이들 둘 모두와 물리적으로 접촉한다. 열전달 물질(334)은 반응 채널(306)을 따라 흐르는 유체로부터의 열(예를 들면, 제 1 촉매(330)에서 발생하는 발열성 수소 생성 반응에 의해 생성되는 열)을 원위치에서 냉각 유체 채널(314), 내부 냉각 유체 채널(316), 또는 둘 모두를 따라 흐르는 냉각 유체에 전달하는 것을 촉진한다. 이러한 열전달은 반응 채널을 따라 흐르는 가스의 온도를 제 2 WGS 촉매(332)가 수소 생성 반응을 촉매할 수 있는 온도 범위까지 저하시킨다.
- [0124] 일부의 실시례에서, 반응 채널(306) 내에 받아들여진 유체가 투입측의 열전달 물질을 통해 흐른 후에 제 1 촉매(330)를 통해 흐르도록 투입측의 열전달 물질(미도시)이 반응 채널(306) 내에 배치된다. 이 투입측의 열전달 물질은 유체의 온도를 제 1 WGS 촉매(330)가 수소 생성 반응을 촉매할 수 있는 온도 범위까지 저하시킨다. 예를 들면, SMR(200)로부터의 유체(도 2)가 제 1 WGS 촉매(330)에 대해서는 너무 높은 온도로 WGS(300) 내에 투입물로서 제공되는 경우, 투입측의 열전달 물질은 투입 유체의 온도를 제 1 WGS 촉매(330)의 온도 범위까지 저하시킨다. 일부의 실시례에서, 배출측의 열전달 물질(미도시)은, 유체가 제 2 촉매(332)를 통해 흐른 후에 배출측의 열전달 물질을 통해 흐르도록, 반응 채널(306) 내에 배치된다. 이 배출측의 열전달 물질은 WGS 수소 생성 반응의 완료 후에 냉각 유체로의 열의 회수를 촉진하여 WGS 반응기의 에너지 효율을 향상시킨다.
- [0125] 열전달 물질(336, 338)은 냉각 유체 채널(314) 내 및 내부 냉각 유체 채널(316) 내에 각각 배치된다. 냉각 유체 채널(314) 및 내부 냉각 유체 채널(316)을 따라 흐르는 냉각 유체는 각각 열전달 물질(336, 338)을 통해 흐른다. 열전달 물질(336)은 반응 튜브(304)와 물리적으로 접촉하여 반응 채널(306)을 따라 흐르는 유체로부터 냉각 유체 채널(314)을 따라 흐르는 냉각 유체로 열의 전달을 촉진한다. 열전달 물질(338)은 내부 튜브(308)와 물리적으로 접촉하여 반응 채널(306)을 따라 흐르는 유체로부터 내부 냉각 유체 채널(316)을 따라 흐르는 냉각 유체로 열의 전달을 촉진한다.
- [0126] 냉각 유동이 냉각 유체 채널(314, 316)을 따라 흐름에 따라, 이 냉각 유체는 반응 채널을 따라 흐르는 유체로부터의 열전달에 의해 가열된다. 일부의 실시례에서, 가열된 냉각 유체는 SMR(200)에의 투입물로서 제공되거나 WGS(300)의 반응 채널(306)에의 투입물로서 반환된다. 예를 들면, 가열된 냉각 유체는 SMR 내로의 투입물에 적절한 온도 및 유량으로 생성된 포화수 또는 2상수(액체/수증기)일 수 있다.
- [0127] 도 3에 도시된 WGS 반응기(300)의 구성에서, 열전달 물질(336, 338)은 열전달 물질(334)과 정렬된다. 일부의 실시례에서, 열전달 물질(336, 338)은 열전달 물질(334)과 정렬되지 않는다. 열전달 물질(336, 338)은 냉각 유체 채널(314) 및 내부 냉각 유체 채널(316)의 각각의 길이의 일부 또는 전부를 따라 연장할 수 있다. 일부의 실시례에서, 열전달 물질(336, 338) 중 하나만 존재하거나 열전달 물질(336, 338) 중 어느 것도 존재하지 않는다.
- [0128] WGS 반응기(300) 내의 촉매의 구성으로 인해 다른 촉매에 영향을 주지 않으면서 단일 촉매의 활성화 및 환원이 가능해진다. 일반적으로, WGS 반응기(300) 내의 촉매(들)은 촉매를 금속성 활성 형태로 환원시키기 위해 약간 상승된 온도에서 촉매를 통해 환원 가스를 천천히 유동시킴으로써 활성화된다. 일부의 실시례에서, WGS 촉매(들)은 WGS를 SMR에 연결하기 전에 외부에서 활성화된다.
- [0129] 도 4를 참조하면, WGS 반응기(300)는 WGS 반응기(300)의 반응 채널(306) 내에 단일의 WGS 촉매(430)이 배치된 단일 촉매 시스템으로서 구성된다. WGS 촉매(430)는, 예를 들면, 200 °C 내지 450 °C의 온도에서 WGS 수소 생성 반응을 촉매한다. WGS 촉매(430)는 고온 WGS 촉매 또는 중온 WGS 촉매일 수 있다.
- [0130] 열전달 물질(434)은, 열전달 물질(434)과 반응 채널(306)의 입구(305) 사이의 거리가 WGS 촉매와 반응 채널(306)의 입구(305) 사이의 거리보다 작도록, 반응 채널(306) 내에 배치된다. 반응 채널(306)을 따라 흐르는 유체는 먼저 열전달 물질(434)을 통해 흐르고, 다음에 WGS 촉매(430)를 통해 흐른다. 열전달 물질(434)은 반응 튜브(304), 내부 튜브(308), 또는 둘 모두와 물리적으로 접촉하여 반응 채널(306) 내로 받아들여진 유체로부터의 열을 냉각 유체 채널(314), 내부 냉각 유체 채널(316), 또는 둘 모두를 따라 흐르는 냉각 유체로 전달하는 것을 촉진한다. 이러한 열전달은 WGS 촉매(430)가 WGS 수소 생성 반응을 촉매할 수 있는 온도 범위 내까지 유체의 온도를 저하시킨다. 예를 들면, SMR(200)로부터 배출된 일산화탄소(도 2)가 WGS 촉매(430)에 대해서는 너무 높은 온도로 WGS(300) 내에 투입물로서 제공되는 경우, 열전달 물질(434)은 투입 유체의 온도를 촉매(430)의 온도 범위까지 저하시킨다.

[0131]

열전달 물질(436, 438)은 냉각 유체 채널(314) 내 및 내부 냉각 유체 채널(316) 내에 각각 배치되며, 반응 채널(306)을 따라 흐르는 유체로부터 냉각 유체 채널(314) 및 내부 냉각 유체 채널(316)을 따라 흐르는 냉각 유체로의 열전달을 촉진시킨다. 도 4에 도시된 WGS 반응기(300)의 구성에서, 열전달 물질(436, 438)은 열전달 물질(434)과 정렬된다. 일부의 실시례에서, 열전달 물질(436, 438)은 열전달 물질(434)과 정렬되지 않는다. 열전달 물질(436, 438)은 냉각 유체 채널(314) 및 내부 냉각 유체 채널(316)의 각각의 길이의 일부 또는 전부를 따라 연장할 수 있다. 일부의 실시례에서, 열전달 물질(436, 438) 중 하나만 존재하거나 열전달 물질(436, 438) 중 어느 것도 존재하지 않는다.

[0132]

도 3 및 도 4의 WGS 촉매(330, 332, 430)는 촉매 물질로 형성된 펠릿, 비드, 새들(saddle), 링, 또는 기타 구조일 수 있다. WGS 촉매(330, 332, 430)는, 예를 들면, 촉매 물질이 기판 상에 배치되거나 기판 내에 통합된 기판 및 촉매 물질을 포함하는 촉매 밸포체, 포일, 핀(fin), 또는 기타 구조일 수 있다. 촉매 밸포체는 하나 이상의 유로가 형성된 다공질 구조이다. 촉매 밸포체의 기공률은 높은 표면적을 달성하도록 선택될 수 있으며, 효율적인 촉매작용 뿐만 아니라 촉매 밸포체를 통한 낮은 압력 강하를 가능하게 하고, 반응 채널(306)을 따라 효율적인 유체 유동을 가능하게 한다. 예를 들면, 촉매 밸포체는 5 ppi 내지 30 ppi의 기공률을 가질 수 있다. 촉매 밸포체의 물질은 WGS(300)가 작동되는 온도 범위에서 반응 채널(306)을 따라 흐르는 유체(예를 들면, WGS 수소 생성 반응의 반응물 및 생성물)에 대해 비반응성이다. 예를 들면, 촉매 밸포체는 구리 또는 알루미늄과 같은 금속 밸포체, 또는 탄화규소 필름, 또는 다른 적합한 물질일 수 있다. 도 3의 2 촉매 구성에서, 제 1 WGS 촉매(330) 및 제 2 WGS 촉매(332)의 둘 모두는 동일한 구조를 가질 수 있거나, 제 1 WGS 촉매(330) 및 제 2 WGS 촉매(332)의 각각은 별개의 구조를 가질 수 있다.

[0133]

열전달 물질(334, 336, 338, 434)은 반응 채널(306)을 따라 흐르는 유체로부터 냉각 유체 채널(314) 또는 내부 냉각 유체 채널(316) 또는 둘 모두를 따라 흐르는 냉각 유체(106)로의 열전달을 가능하게 하는데 충분한 열전도율을 갖는 물질이다. 반응 채널(306) 내에 배치된 열전달 물질(334, 434)은 WGS(300)가 작동되는 온도 범위에서 반응 채널(306)을 따라 흐르는 유체(예를 들면, WGS 수소 생성 반응의 반응물 및 생성물)에 대해 비반응성이다. 예를 들면, 열전달 물질(334, 434)은 구리 또는 알루미늄과 같은 금속, 또는 탄화규소, 또는 다른 적합한 물질일 수 있다.

[0134]

열전달 물질(334, 336, 338, 434)은 밸포체, 핀, 포일, 링, 새들, 비드, 또는 펠릿, 또는 열전달을 가능하게 하는 기타 구조일 수 있다. 이 밸포체의 실시례에서, 밸포체의 기공률 및 길이는 높은 표면적을 달성하도록 선택될 수 있으며, 효율적인 열전달 뿐만 아니라 밸포체를 통한 낮은 압력 강하를 가능하게 하고, 반응 채널(306)을 따라 효율적인 유체 유동을 가능하게 한다. 예를 들면, 열전달 물질(334, 336, 338, 434)은 5 ppi 내지 30 ppi의 기공률을 갖는 밸포체일 수 있다.

[0135]

도 3 및 도 4를 참조하면, 냉각 유체 채널(314, 316)을 따른 냉각 유체의 유량은 유량 제어기(340)에 의해 제어된다. 유량은 반응 채널(306) 내로 투입되는 유체의 온도, 유량 제어기(314, 316) 내로 투입되는 냉각 유체의 온도에 기초하여 선택되거나 조정될 수 있다. 유량은 반응 채널(306)로부터 배출되는 유체의 목표 배출 온도, 냉각 유체의 목표 배출 온도, 또는 둘 모두에 기초하여 선택되거나 조정될 수 있다. 유량은 촉매 구성, 촉매(들)의 유형(예를 들면, 고온, 중온, 또는 저온 WGS 촉매), 또는 둘 모두에 기초하여 선택되거나 조정될 수 있다. 유량은 실제의 또는 원하는 처리량에 기초하여 선택되거나 조정될 수 있다.

[0136]

WGS 반응기(300)의 반응 채널(306) 내에서 유체의 냉각으로 인해 WGS 수소 생성 반응이 높은 에너지 효율로 수행될 수 있다. 반응 채널(306) 내의 유체로부터 냉각 유체로의 열전달은 반응 채널(306) 내의 유체를 냉각시키며, 예를 들면, 발열성 수소 생성 반응 동안에 생성되는 열을 제거하고, 유체의 에너지 집약적인 능동적 냉각 없이 유체의 온도를 WGS 촉매(들)에 적절한 온도 범위까지 저하시킨다. 또한, WGS 반응기에서의 열전달로 인해 등온 조건이 달성될 수 있으며, WGS 수소 생성 반응의 전환 효율을 향상시킬 수 있다.

[0137]

도 5를 참조하면, WGS 반응기(500)는 하우징(502) 내에 배치된 다수의 반응 튜브(504a-504c)를 포함한다. 반응 채널(506a-506c)이 각각의 반응 튜브(504a-504c)(총칭하여 반응 튜브(504)라 함) 내에 형성된다. 반응 가스는 WGS 반응기(500)의 제 1 단부(510)에서 반응 채널(506a-506c)(총칭하여 반응 채널(506)이라 함) 내로 유입되고, 생성물 가스는 WGS 반응기(500)의 제 2 단부(512)에서 반응 채널(506)로부터 나간다.

[0138]

냉각 유체 채널(514)가 하우징(502)과 반응 튜브(504) 사이의 공간 내에 형성된다. 냉각 유체는 WGS 반응기의 제 2 단부(512)에서 냉각 유체 채널(514) 내로 유입되고, WGS 반응기(500)의 제 1 단부(510)에서 냉각 유체 채널로부터 나간다.

- [0139] 도 5의 실시례에서, WGS 반응기(500)는 각각의 반응 채널(506) 내에 배치된 고온 WGS 촉매 또는 중온 WGS 촉매와 같은 단일 촉매(522)를 구비하는 단일 촉매 시스템이다. 열전달 물질(524)이 각각의 반응 채널(506) 내에 배치되어 반응 채널(508) 내의 가스로부터 냉각 유체 채널(514) 내의 냉각 유체로의 열전달을 촉진한다. 일부의 실시례에서, 다수의 반응 투브를 포함하는 WGS 반응기(500)는 2 촉매 시스템으로서 구성될 수 있다.
- [0140] 도 6을 참조하면, SMR(200) 및 WGS(300)는 탄화수소로부터 수소 가스(H₂)를 제조하기 위한 시스템(600)으로 통합된다. 외부 열원으로서의 연소로(602)는 SMR(200)의 제 1 단부를 가열한다. 이 시스템(600)은 또한 WGS(500), 다수 세트의 외부 투브 및 내부 투브, 또는 둘 모두로 구현될 수 있다.
- [0141] SMR(200) 내에서의 수소 생성 반응은 SMR 촉매를 포함하는 촉매 발포체의 존재 하에서 탄화수소 및 수증기(steam)를 포함하는 반응물로부터 수소 가스(H₂) 및 일산화탄소(CO)를 생성한다. 수소 가스 및 일산화탄소는 SMR의 내부 투브 내에 형성된 유동 채널로부터 SMR 생성물 라인(604) 상으로 과잉의 수증기와 함께 배출된다. SMR(200)로부터의 유체(예를 들면, 수소 가스, 일산화탄소, 및 수증기)는 WGS(300)의 반응 채널에 투입물로서 제공된다. SMR(200)의 출구는 SMR 생성물 라인(604)을 경유하여 WGS(300)의 입구와 유체 연통된다. 일부의 실시례에서, 추가의 수증기가 수증기 대 일산화탄소의 목표 비율을 달성하기 위해, 예를 들면, 물 저장부(614)(후술됨)로부터, 또는 WGS(300)의 냉각 유체 배출 라인(620)으로부터 WGS(300)의 반응 채널 내에 제공된다.
- [0142] 위에서 논의된 바와 같이, 유동 채널을 따라 SMR(200)의 출구를 향해 흐르는 유체는 SMR의 환형 공간을 따라 흐르는 유입하는 유체와의 열전달에 의해 냉각된다. 따라서, SMR의 출구에서 유체의 온도는 환형 공간 내의 유체와의 열전달의 정도에 의해 적어도 부분적으로 제어될 수 있다. 열전달, 및 이에 따라 출구 유체 온도는 SMR(200)의 구성(예를 들면, 촉매 발포체 및 열교환 발포체의 위치, 길이, 기공률, 또는 기타 특성)에 의해, 그리고 SMR의 작동(예를 들면, SMR(200)의 베이요넷 유로를 따르는 유체의 유량)에 의해 영향을 받는다. SMR(200)의 구성, 작동, 또는 둘 모두는 SMR(200)로부터 배출되는 유체가 WGS(300)의 반응 채널 내에 투입되기에 적합한 온도가 되는 열전달을 달성하도록 조정될 수 있다. 예를 들면, WGS(300)가 반응 채널의 투입물을 향하는 고온 또는 중온 WGS 촉매로 구성되어 있는 경우, SMR(200)은 일산화탄소 및 수증기가 WGS 촉매(430)를 활성화시키는 범위의 온도로 WGS(300)의 반응 채널에 도달하도록 구성될 수 있다. SMR(200) 내에서 열전달을 사용하여 SMR로부터 배출되는 유체에 대해 목표 온도를 달성함으로써, 외부의 능동적인 냉각 장치가 SMR(200)과 WGS(300) 사이에 사용되지 않으며, 외부의 능동 가열 장치(예를 들면, 노(602))의 역할이 축소될 수 있고, 따라서 시스템 레벨의 수소 생성 프로세스의 에너지 효율이 높아지는데 기여한다.
- [0143] WGS(300) 내의 수소 생성 반응은 수소 가스 및 이산화탄소(CO₂)를 생성하고, 이들은 WGS(300)의 반응 채널로부터 WGS 생성물 라인(608) 상으로 과잉의 수증기와 함께 배출된다. 과잉의 수증기는 증기 액체 분리기(VLS)(610)에서 WGS 생성물 라인(608) 상의 유체로부터 제거된다. 나머지 수소 가스 및 이산화탄소는 분리를 위해 하류(611)로 이송되고, 이산화탄소는 (예를 들면, 아래에서 논의되는 굴뚝을 통해) 폐기되고, 수소 가스는, 예를 들면, 연료로서 사용하기 위해 수소 저장부로 이송된다. 분리된 수증기는 수증기 라인(612)을 따라 물 저장부(614)로 흐르고, 이것은 또한 외부 수원(616)으로부터 제공된 물을 저장한다. 수증기 라인(612) 상의 분리된 수증기, 외부 수원(616)으로부터의 물, 또는 둘 모두는 물 저장부(614) 내에 저장되기 전에 처리될 수 있다.
- [0144] 물 저장부(614)로부터의 물은 WGS(300) 내에 투입되는 냉각 유체로서 냉각 유체 라인(618)을 따라 제공된다. WGS(300)로부터 배출되는 액체 물과 수증기의 혼합물인 가열된 냉각 유체는 냉각 유체 배출 라인(620)을 따라 흐른다. 가열된 냉각 유체는 궁극적으로 SMR(200) 내로 투입되는 반응물로서 제공된다. WGS(300)로부터 배출되는 가열된 냉각 유체의 온도는 WGS(300)의 구성(예를 들면, WGS 촉매 및 열전달 물질(들)의 유형, 위치, 또는 기타 특성)에 의해, 그리고 WGS(300)의 작동(예를 들면, 반응 채널을 따른 유체의 유량 및 냉각 유체의 유량)에 의해 영향을 받는다. WGS(300)의 구성, 작동, 또는 둘 모두는 가열된 냉각 유체가 목표 온도, 예를 들면, SMR(200) 내에 투입되기에 충분한 온도로 배출되도록 조정될 수 있다. 냉각 유체를 WGS(300) 반응 채널 내의 유체로부터 회수된 열을 사용하여 목표 온도까지 가열함으로써, SMR 투입 유체를 가열하기 위한 외부의 능동적인 가열 요소가 사용되지 않는다. 또한, 발열성 WGS 수소 생성 반응으로부터의 열을 제거하는 데에 외부의 능동적인 냉각이 사용되지 않는다. SMR 투입 유체를 가열하기 위해 회수된 열을 사용하는 것과 발열성 WGS 수소 생성 반응의 냉각은 시스템 수준의 높은 에너지 효율에 기여한다.
- [0145] WGS(300)로부터 배출되는 가열된 냉각 유체는 냉각 유체 배출 라인(620)을 따라 어큐뮬레이터(622)로 흐른다. 어큐뮬레이터(622)는 또한 물 라인(624)을 따라 물 저장부(614)로부터 추가의 물을 받아들인다. 어큐뮬레이터(622)로부터 어큐뮬레이터 배출 라인(626) 상으로 배출되는 수증기 및 물은 열교환기(634)에서 연소로(602)의 연도 가스(636)로부터의 열로 가열된다. 탄화수소 라인(630)을 통해 제공되는 탄화수소는 열교환기(635)에서 연

도 가스(636)으로부터의 열로 가열된다. 가열된 수증기 및 탄화수소(632, 633)는 각각 혼합기(628) 내에서 혼합되어 SMR 투입 라인(638) 상으로 배출되고, 이것은 가열된 수증기 및 탄화수소를 SMR(200)의 외부 투브의 입구에 공급한다. 연도 가스(636)로부터 회수된 열을 사용하여 수증기와 탄화수소의 혼합물을 SMR 내로 투입하기에 충분한 온도까지 가열하는 것은 시스템 수준의 높은 에너지 효율에 기여한다. 이러한 구성에서, WGS 냉각 유체 유동 채널의 출구는 가열된 WGS 냉각 유체가 궁극적으로 SMR(200) 내에 투입되는 유체의 성분으로서 제공되도록 SMR(200)의 입구와 유체 연통된다. 연도 가스(636)는 열교환기(634)를 통과한 후에 연도 가스 굴뚝(640)으로 폐기된다.

[0146] 도 7을 참조하면, SMR 및 WGS 반응기를 포함하는 수소 생성 시스템의 작동에서 반응물을 포함하는 유체(예를 들면, 가스)가 SMR에 투입물(700)로서 제공된다. 특히, 유체는 SMR의 제 2 단부에서 SMR의 외부 투브와 내부 투브 사이에 형성된 SMR의 환형 공간의 입구 내에 제공된다. 입구에 제공되는 유체는 탄화수소, 예를 들면, 메탄, 천연 가스, 바이오가스, 메탄올, 또는 기타 탄화수소를 포함한다. 입구에 제공되는 유체는 또한 수증기를 포함한다.

[0147] 유체는 SMR의 베이요넷 유로를 따라 흐른다. 특히, 유체는 환형 공간을 따라 SMR의 제 2 단부로부터 제 1 단부로 흐른다(702). 환형 공간을 따라, 유체는 SMR의 내부 투브 내에 형성된 유동 채널을 따라 흐르는 고온 유체로부터 환형 공간을 따라 흐르는 저온 유체로의 열전달을 촉진하는 외부 열교환 밸포체를 통해 흐른다(704). 외부 열교환 밸포체는 또한 환형 공간을 따라 흐르는 유체에 난류를 유발하여 열전달 효율을 향상시킬 수 있다.

[0148] 환형 공간을 따라 흐르는 유체는 SMR의 제 1 단부를 향해 연소로와 같은 외부 열원에 의해 가열된다(706). SMR의 가열된 영역에서, 유체는 촉매 밸포체(708)를 통해 흐르며, 이것은 SMR 수소 생성을 촉매하여 탄화수소 및 수증기 반응물로부터 수소 가스 및 일산화탄소를 생성한다(710). 촉매 밸포체는 이를 통해 흐르는 가스에의 열전달, 예를 들면, SMR의 내부 투브 내의 유동 채널을 따라 흐르는 고온 생성물 유체로부터의 열전달 및 외부 열원으로부터의 열전달을 촉진한다.

[0149] 이제 더 고온이고, 수소 및 일산화탄소를 포함하는 유체는 환형 공간으로부터 SMR의 제 1 단부에서 유동 채널 내로 유입된다(712). 유동 채널 내의 유체는 환형 공간 내의 유체의 유동 방향과 반대로 SMR의 제 1 단부로부터 SMR의 제 2 단부를 향해 흐른다. 유동 채널 내의 유체는 유동 채널을 따라 흐르는 고온 유체로부터 환형 공간을 따라 흐르는 저온 유체로의 열전달을 촉진하는 내부 열교환 밸포체를 통해 흐른다(714). 내부 열교환 밸포체는 또한 유동 채널을 따라 흐르는 유체에 난류를 유발하여 열전달 효율을 향상시킬 수 있다. 내부 투브 내의 세장형 배플의 존재는 또한 열전달 효율을 향상시킨다.

[0150] 유동 채널을 따라 흐르는 유체가 SMR의 출구에 도달하면, 이 유체(수소 가스, 일산화탄소, 및 수증기를 포함함)는 SMR의 제 2 단부에서 SMR로부터 배출된다(716). SMR 배출 유체는 WGS 반응기의 반응 채널 내에 투입물로서 제공된다(720). 환형 공간을 따라 흐르는 유체와 SMR 내의 유동 채널을 따라 흐르는 유체 사이의 열전달에 의해, 일산화탄소는 WGS 반응기 내로의 투입을 위해 충분한 온도(WGS 촉매가 WGS 수소 생성 반응을 촉매할 수 있는 온도 범위 내의 온도 또는 이 온도 범위를 초과하는 온도)로 될 수 있다. 예를 들면, SMR로부터 배출되어 WGS 반응기의 반응 채널 내에 투입물로서 제공되는 유체는 200 °C 내지 적어도 450°C의 온도이다.

[0151] 일산화탄소 및 수증기를 포함하는 유체는 WGS 반응기의 반응 채널을 따라 흐르고, 하나 이상의 WGS 촉매 및 하나 이상의 열전달 물질을 통해 흐른다(722). 물과 같은 냉각 유체는 하나 이상의 냉각 유체 채널을 따라 흐른다(724). 반응 채널을 따르는 유체 유동 방향은 냉각 유체 채널을 따르는 유체 유동 방향의 반대이다. 냉각 유체의 유량은, 예를 들면, 반응 채널을 따르는 유체 유동의 유량에 기초(예를 들면, SMR의 처리량에 기초함)하여, 냉각 유체를 위한 목표 배출 온도에 기초하여, 또는 WGS의 구성 또는 작동에 기초하여 조정될 수 있다(726).

[0152] 도 7의 실시례에서, WGS 반응기는, 예를 들면, 도 3에 도시된 바와 같은 2 촉매 시스템으로서 구성된다. 반응 채널 내의 유체는 제 1 WGS 촉매, 예를 들면, 고온 또는 중온 WGS 촉매를 통해 흐른다(728). 제 1 WGS 촉매는 제 1 온도 범위, 예를 들면, 200 °C 내지 450 °C에서 WGS 수소 생성 반응을 촉매하여 수소 가스 및 이산화탄소를 생성한다(730). 다음에 반응 채널 내의 유체는 반응 채널 내에 배치된 열전달 물질을 통해 흐른다(732). 열전달 물질은 유체의 온도를 냉각 유체 채널(들)에서 흐르는 냉각 유체로의 열전달에 의해 제 2 WGS 촉매가 작용하는 제 2 온도 범위까지 저하시킨다. 이 열전달은 냉각 유체의 온도를, 예를 들면, 100 °C 내지 300 °C까지 상승시킨다. 이제 제 2 온도 범위인 반응 채널 내의 유체는 제 2 WGS 촉매, 예를 들면, 중온 또는 저온 WGS 촉매를 통해 흐른다(734). 제 2 WGS 촉매는 제 1 온도 범위보다 낮은 제 2 온도 범위, 예를 들면, 180 °C 내지 250 °C에서 WGS 수소 생성 반응을 촉매하여 수소 가스 및 이산화탄소를 생성한다.

[0153] 수소 가스, 이산화탄소, 및 과잉의 수증기를 포함하는 유체가 WGS 반응기의 반응 채널로부터 배출된다(738). 과잉의 수증기가 분리되고(740), 분리된 수증기는 WGS 반응기로부터의 냉각 유체(예를 들면, 수증기와 액체 물의 혼합물)과 함께 재순환되어(742), 예를 들면, WGS 반응 채널 내로의 투입물로서 또는 SMR 내로의 투입물로서 사용된다.

[0154] 실시례

[0155] 외부 열원으로부터 SMR의 환형 공간을 따라 흐르는 유체로의 열전달에서 측매 발포체의 역할을 평가하기 위해 SMR에서의 열전달의 시뮬레이션 및 실험이 수행되었다.

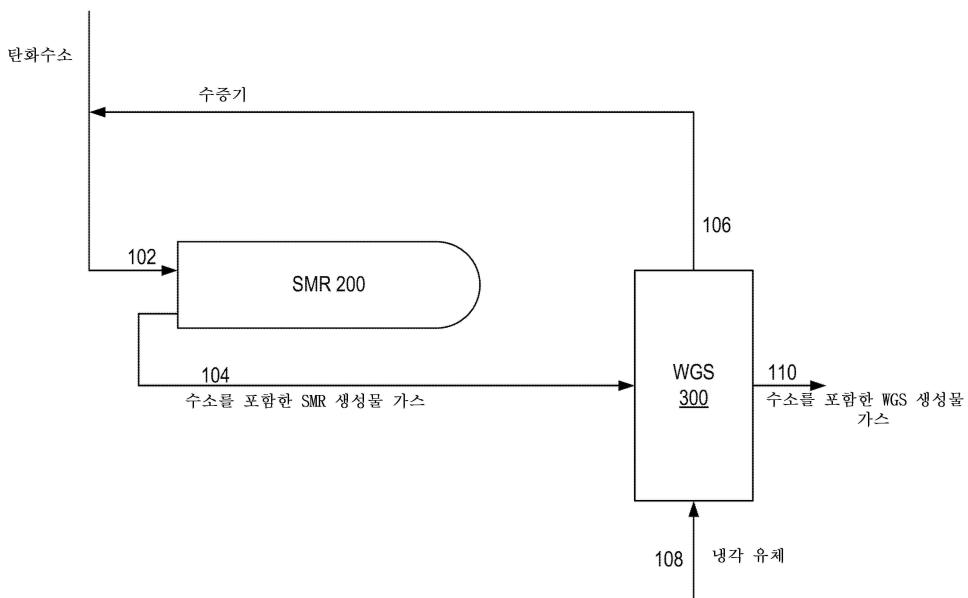
[0156] 도 8을 참조하면, 다양한 기공률의 발포체를 SMR의 환형 공간 내에 배치하였다. 각각의 발포체 유형에 대해, SMR을 400 °C까지 가열하였고, 외부 투브와 내부 투브 사이의 온도차를 서모커플로 측정하였다. 3 개의 발포체 (10 ppi, 20 ppi, 및 30 ppi)의 각각에 대한 온도차, 및 빈 환형 공간(발포체 없음)에 대한 온도차는 도 8에 표시되어 있다. 더 낮은 온도차는 열전달로 인한 온도 평형을 나타낸다. 외부 투브와 내부 투브 사이의 측정된 온도차는 발포체가 존재하는 경우에 비해 발포체가 없는 경우가 약 50 °C 높았고, 이는 발포체가 없는 경우의 열전도의 부족 및 발포체가 있는 경우의 효과적인 열전도를 나타낸다.

[0157] 도 9a 및 도 9b를 참조하면, SMR(150)의 열전달 특성을 시뮬레이션하여 외부 열원으로부터 SMR 내로의 열전달에 미치는 발포체의 효과를 표현하였다. SMR(150)은 외부 투브(152) 및 내부 투브(154)를 가지며, 외부 투브(152)와 내부 투브(154) 사이에 환형 공간(160)이 형성되어 있고, 내부 투브(152) 내에는 유동 채널(162)이 형성되어 있다. 도 9a 및 도 9b는 SMR의 절반만의 단면도를 도시하며, 축선 X-X'는 유동 채널(162)의 중심을 따르는 축선이다. 외부 열원(172)은 SMR의 가열된 부분(171)에 열을 공급한다. 도 9a에서는, 발포체(180)가 환형 공간(160) 내에 배치되어 있다. 도 9b에서는, 환형 공간 내에 발포체가 없다(도 9b). 입구 유체 유량, 입구 유체 온도, 환형 너비, 및 투브 치수를 포함하는 기타 파라미터는 동일하였다. 열원(172)은 875 °C에서 유지되는 외부 투브(152)의 단면으로서 시뮬레이션되었다. 도 9a 및 도 9b에서 볼 수 있는 바와 같이, 발포체(180)가 환형 공간(130) 내에 존재하면(도 9a), 환형 공간(160) 내의 유체는 760 °C를 초과하는 온도에 도달하였고, SMR 내에 발포체가 없으면(도 9b), 환형 공간(160) 내의 유체는 불과 450 °C의 온도에 도달하였다. 환형 공간 내에 존재하는 발포체(180)로 인해, 예를 들면, 열전달에 의해 그리고 환형 공간(160)으로부터 유동 채널(162) 내로 가열된 유체의 흐름에 의해 내부 투브(152) 내의 유동 채널(162) 내의 유체의 온도가 증가하였다. 이들 결과는 SMR의 환형 공간 내에 배치된 발포체에 의해 제공되는 효과적인 열전달을 입증한다.

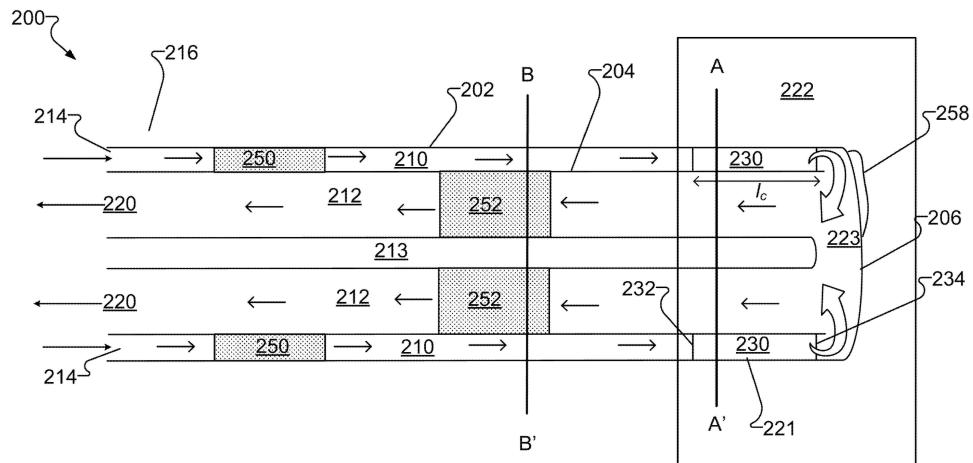
[0158] 주제의 특정 실시형태를 설명하였다. 다른 실시형태는 다음의 청구항의 범위 내에 포함된다.

도면

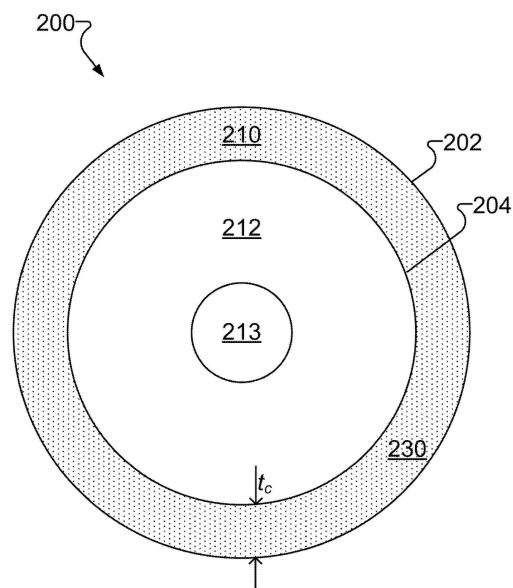
도면1



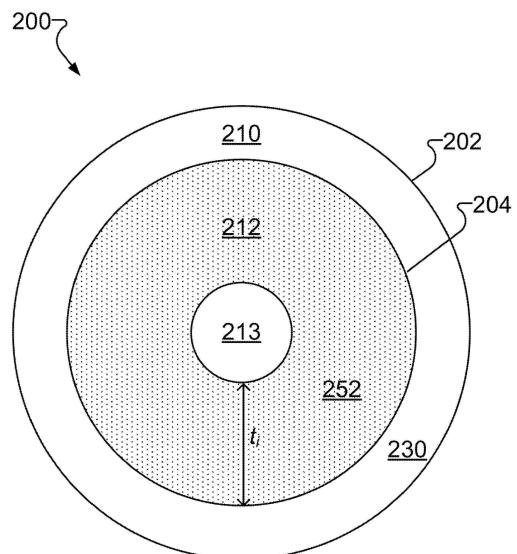
도면2a



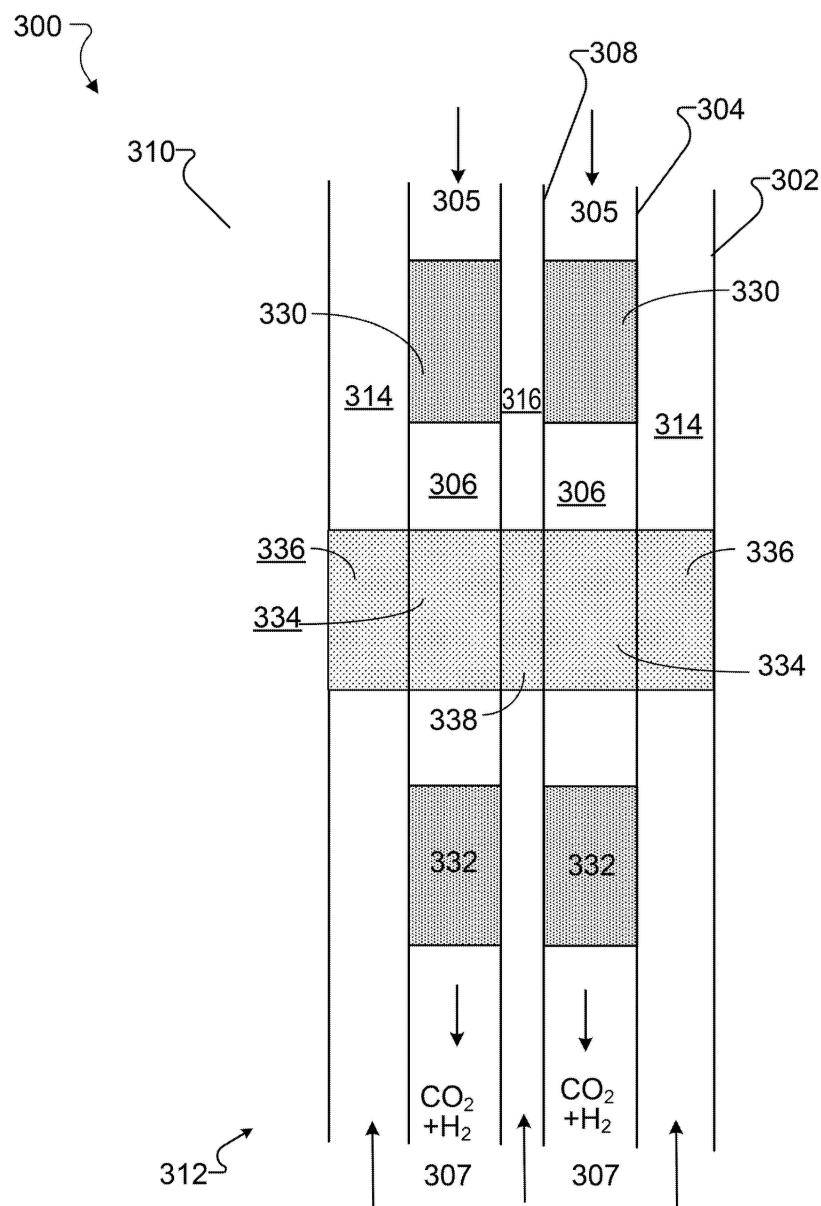
도면2b



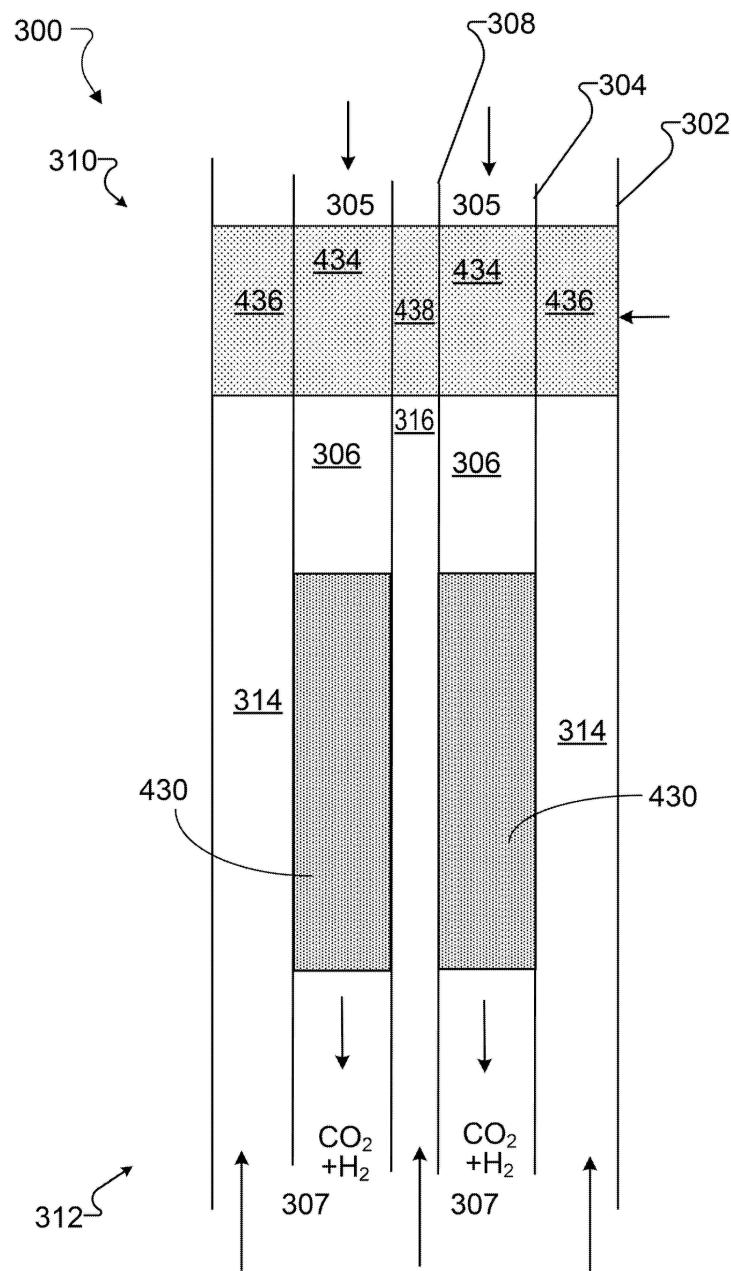
도면2c



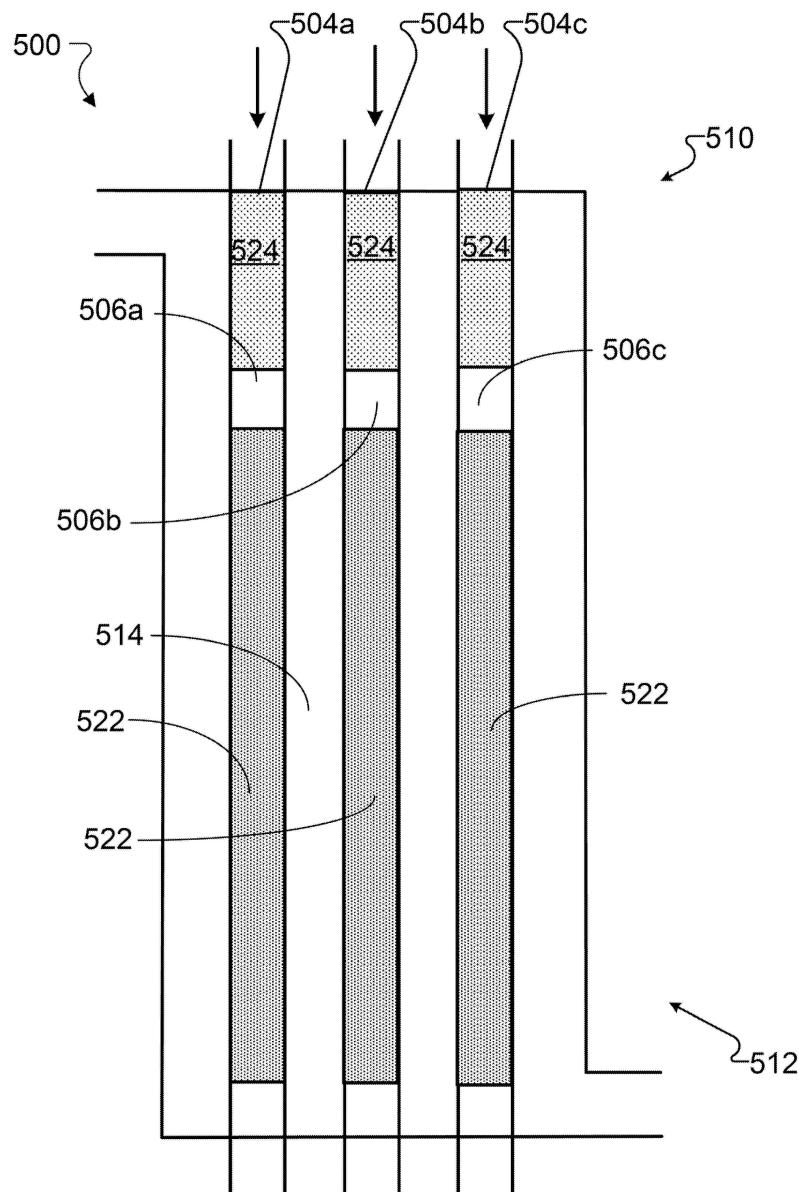
도면3



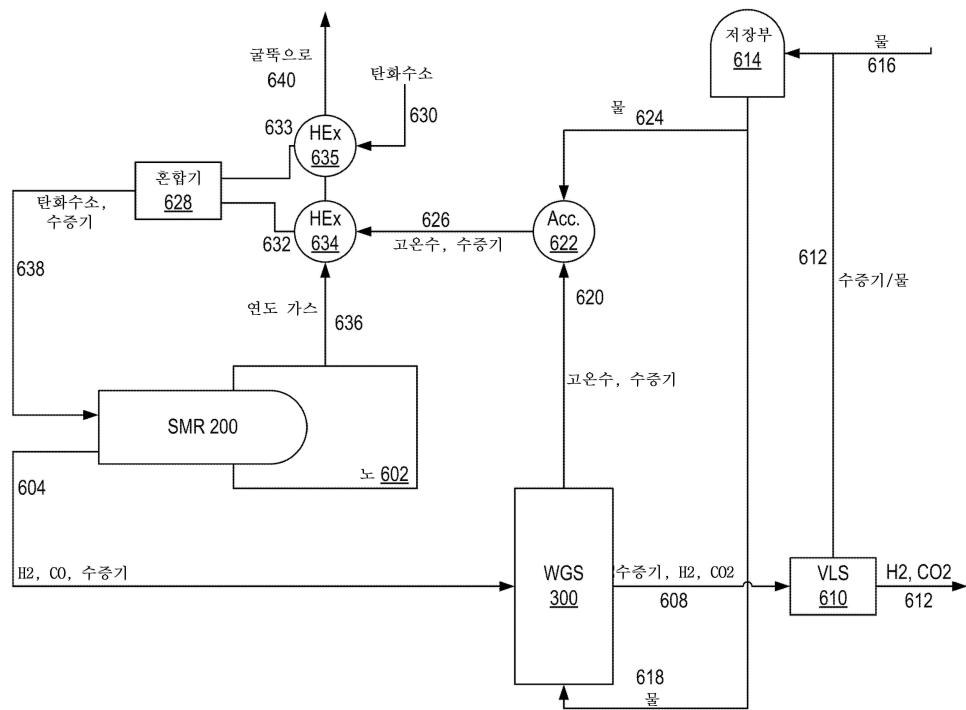
도면4



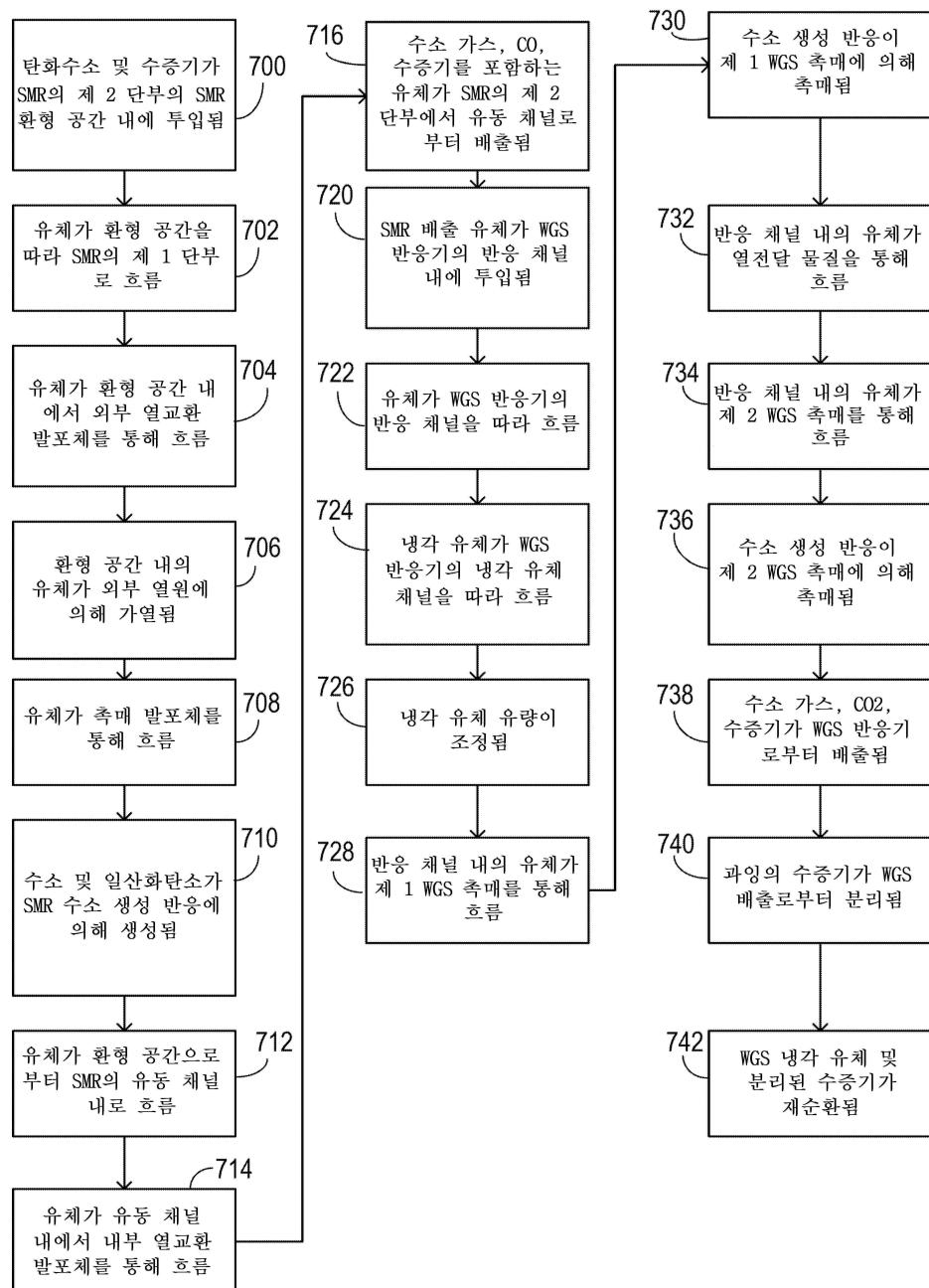
도면5



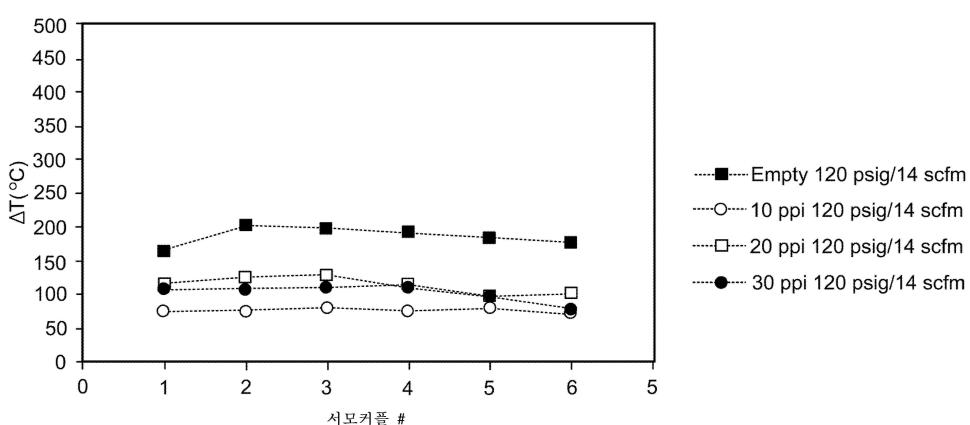
도면6



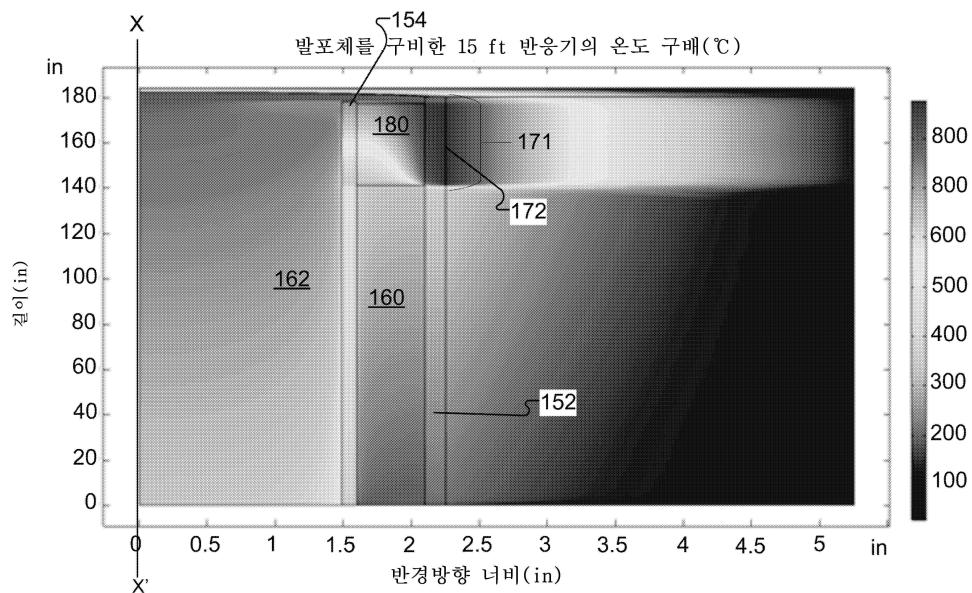
도면7



도면8



도면9a



도면9b

