(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2020-0121112
(43) 공개일자 2020년10월23일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G01N 17/00 (2020.01) *G01N 3/08* (2006.01)
G21F 5/06 (2006.01)
(52) CPC특허분류
G01N 17/002 (2013.01)
G01N 17/006 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2019-0043727
(22) 출원일자 2019년04월15일
심사청구일자 2019년04월15일

(71) 출원인
한국수력원자력 주식회사
경상북도 경주시 양북면 불국로 1655
인하대학교 산학협력단
인천광역시 미추홀구 인하로 100(용현동, 인하대학교)
(72) 발명자
윤상희
인천광역시 미추홀구 인하로 100, 2북 290(용현동)
박상헌
인천광역시 미추홀구 비룡길41번길 20, 202호(용현동, 신원빌라)
(뒷면에 계속)
(74) 대리인
이은철

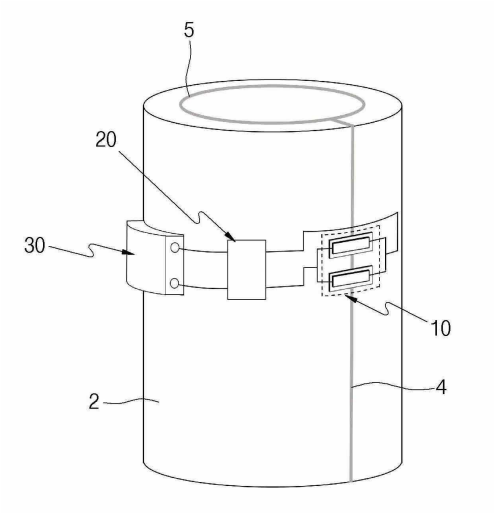
전체 청구항 수 : 총 13 항

(54) 발명의 명칭 **사용후핵연료 저장용 금속 캐니스터의 응력부식균열 모니터링 방법 및 시스템**

(57) 요 약

본 발명은 사용후핵연료가 보관되는 금속 캐니스터의 응력부식균열을 감지하는 모니터링 방법 및 시스템으로서, 전기전도성 복합재를 부착하는 단계와, 전기전도성 복합재 내부의 비 전도성화 현상의 발생 여부를 실시간으로 측정함으로써, 용접부위의 응력부식균열 발생 징후 및 발생 여부를 미리 관측하는 비 전도성화 관측 단계로 구성됨으로써, 장시간이 경과되면서 응력부식균열이 발생되는 것을 실시간으로 관측하면서 사전에 그 징후를 발견하여 대응책을 미리 준비함으로써, 방사선의 피폭이 극소화 될 수 있고, 일정 조건 하에서 시스템의 재활용이 가능하며, 장시간 동안 별도의 전력공급 없이도 구동 가능한 응력부식균열 모니터링 방법 및 시스템을 제공하고자 한다.

대 표 도 - 도4



(52) CPC특허분류
G01N 3/08 (2013.01)
G21F 5/06 (2013.01)
G01N 2203/0062 (2013.01)
(72) 발명자
임현철
전라북도 전주시 완산구 백제대로 13, 103동 801호(삼천동1가, 우성아파트)
정성환
대전광역시 유성구 유성대로1312번길 70(장동)
김용덕
대전광역시 유성구 유성대로1312번길 70(장동)
이동희
대전광역시 유성구 유성대로1312번길 70(장동)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업
과제고유번호 57514-1
부처명 한국수력원자력(주)
과제관리(전문)기관명 공기업
연구사업명 K-CLOUD(미래에너지 기술 연구과제)
연구과제명 사용후핵연료 건식저장 캐니스터 용접부 건전성 감시를 위한 스마트 소재 기반 결함 감시 기술개발 (1차년도)
기 여 율 1/1
과제수행기관명 인하대학교 산학협력단
연구기간 2018.02.01 ~ 2019.01.31

명 세 서

청구범위

청구항 1

사용후핵연료가 보관되는 금속 캐니스터(2)에 형성된 용접부위에서 발생되는 응력부식균열을 감지하는 모니터링 방법으로서,

상기 용접부위에, 전도성 미세 입자(121)가 절연부재의 내부에 분포되어 이루어지는 전기전도성 복합재(120)를 부착하는 단계;와

상기 전기전도성 복합재(120)가 용접부위의 변형으로 인해 함께 변형되면서, 전기전도성 복합재(120) 내부의 상기 전도성 미세 입자(121) 간의 간격 증가로 인해 전기전도성 복합재(120)가 비전도성 물질이 되는 비 전도성화 현상의 발생 여부를 실시간으로 측정함으로써, 용접부위의 응력부식균열 발생 징후 혹은 응력부식균열 발생을 모니터링 하는 비 전도성화 관측 단계; 로 구성되는 사용후핵연료 저장용 금속 캐니스터의 응력부식균열 모니터링 방법.

청구항 2

제1항에 있어서,

상기 부착하는 단계는 전기전도성 복합재(120)와 용접부위 사이에 절연소재를 삽입하는 단계를 포함하는 것을 특징으로 하는 사용후핵연료 저장용 금속 캐니스터의 응력부식균열 모니터링 방법.

청구항 3

제2항에 있어서,

상기 절연소재를 삽입하는 단계에서는 전기전도성 복합재(120)의 기저를 이루는 절연물질과 동일한 소재로 절연소재를 제작함으로써, 절연소재와 전기전도성 복합재(120)가 동일한 변형률로 변형되어, 전기전도성 복합재(120)의 변형률과 용접부위의 변형률이 서로 직접 대응되고,

상기 전기전도성 복합재(120)를 부착하는 단계 전에 전기전도성 복합재(120)를 제작하는 단계를 더 포함하되,

전기전도성 복합재(120)를 제작하는 단계에서는 상기 용접부위의 변형률에 대응되는 변형 량으로 인하여 전기전도성 복합재(120)가 비전도성 물질로 전환되는 비 전도성화 현상이 발생되도록, 전기전도성 복합재(120)의 기저를 이루는 절연물질에 함유되는 전도성 미세 입자(121)의 혼합 중량비를 조절하는 것을 특징으로 하는 사용후핵연료 저장용 금속 캐니스터의 응력부식균열 모니터링 방법.

청구항 4

제1항에 있어서,

상기 부착하는 단계에서는 전기전도성 복합재(120)를 복수개로 마련하여 부착하고, 복수개의 전기전도성 복합재(120) 중 적어도 어느 하나의 전기전도성 복합재(120)는 함유되는 전도성 미세 입자(121)의 농도가 나머지 전기전도성 복합재(120)와 서로 다르게 형성되며, 상기 어느 하나의 전기전도성 복합재(120)와 나머지 전기전도성 복합재(120)는 서로 병렬로 연결됨으로써, 용접부위의 변형에 따른 비 전도성화 현상이 복수개의 단계로 발생되는 것을 특징으로 하는 사용후핵연료 저장용 금속 캐니스터의 응력부식균열 모니터링 방법.

청구항 5

제4항에 있어서,

상기 적어도 어느 하나의 전기전도성 복합재(120)에서 비 전도성화 현상이 발생되는 시점의 변형률인 제1 비 전도성화 변형률은 용접부위의 변형 시작지점의 변형률보다 더 크면서 용접부위의 균열이 시작되는 변형률보다는 작고, 나머지 전기전도성 복합재(120)에서 비 전도성화 현상이 발생되는 시점의 변형률인 제2 비 전도성화 변형률은 상기 균열이 시작되는 변형률 보다 같거나 크게 형성됨으로써,

금속 캐니스터(2)의 용접부위에서 균열이 발생되기 전에 용접부위의 균열이 발생될 징후가 미리 감지 가능한 것을 특징으로 하는 사용후핵연료 저장용 금속 캐니스터의 응력부식균열 모니터링 방법.

청구항 6

제1항에 있어서,

상기 전기전도성 복합재(120)를 부착하는 단계에서는 전기전도성 복합재(120)의 저항을 측정하는 측정모듈과, 측정모듈에 전원을 공급하는 구동모듈을 설치하는 단계를 포함하는 것을 특징으로 하는 사용후핵연료 저장용 금속 캐니스터의 응력부식균열 모니터링 방법.

청구항 7

제6항에 있어서,

상기 구동모듈은 금속 캐니스터(2) 내부의 사용후핵연료로부터 발생되는 열에너지로 전류를 발생시키는 열전소자로 구성되는 것을 특징으로 하는 사용후핵연료 저장용 금속 캐니스터의 응력부식균열 모니터링 방법.

청구항 8

사용후핵연료가 보관되는 금속 캐니스터(2)에 형성된 용접부위에서 발생되는 응력부식균열을 감지하는 모니터링 시스템으로서,

전도성 미세 입자(121)가 절연부재의 내부에 분포되게 제작되는 전기전도성 복합재(120)로 이루어져서 상기 용접부위에서 용접으로 접합된 지점 양 측에 동시에 걸쳐지는 형태로 설치되는 검지 모듈과;

상기 전기전도성 복합재(120)가 용접부위의 변형으로 인해 함께 변형되면서, 전기전도성 복합재(120) 내부의 상기 전도성 미세 입자(121) 간의 간격 증가로 인해 전기전도성 복합재(120)의 저항이 비약적으로 상승되는 비 전도성화 현상의 발생 여부를 실시간으로 측정하는 측정 모듈(20); 및,

상기 측정 모듈(20)에 전원을 공급하는 구동 모듈(30); 로 구성되는 사용후핵연료 저장용 금속 캐니스터의 응력부식균열 모니터링 시스템.

청구항 9

제8항에 있어서,

상기 전기전도성 복합재(120)와 용접부위 사이에는 절연소재가 삽입되는 것을 특징으로 하는 사용후핵연료 저장용 금속 캐니스터의 응력부식균열 모니터링 시스템.

청구항 10

제9항에 있어서,

상기 절연소재는 전기전도성 복합재(120)의 기저를 이루는 절연부재와 동일한 소재로 이루어짐으로써, 절연소재와 전기전도성 복합재(120)가 동일한 변형률로 변형되어, 전기전도성 복합재(120)의 변형률과 용접부위의 변형률이 서로 직접 대응되고,

상기 용접부위의 변형률에 대응되는 변형 량으로 인하여 전기전도성 복합재(120)가 비전도성 물질로 전환되는 비 전도성화 현상이 발생되도록, 전기전도성 복합재(120)의 기저를 이루는 절연물질에 함유되는 전도성 미세 입자(121)의 혼합 중량비가 조절되는 것을 특징으로 하는 사용후핵연료 저장용 금속 캐니스터의 응력부식균열 모니터링 시스템.

청구항 11

제8항에 있어서,

상기 전기전도성 복합재(120)는 복수개로 마련되고, 복수개의 전기전도성 복합재(120) 중 적어도 어느 하나의 전기전도성 복합재(120)는 함유되는 전도성 미세 입자(121)의 농도가 나머지 전기전도성 복합재(120)와 서로 다르게 형성되며, 상기 어느 하나의 전기전도성 복합재(120)와 나머지 전기전도성 복합재(120)는 서로 병렬로 연결됨으로써, 용접부위의 변형에 따른 비 전도성화 현상이 복수개의 단계로 발생되는 것을 특징으로 하는 사용후

핵연료 저장용 금속 캐니스터의 응력부식균열 모니터링 시스템.

청구항 12

제11항에 있어서,

상기 적어도 어느 하나의 전기전도성 복합재(120)에서 비 전도성화 현상이 발생되는 시점의 변형률인 제1 비 전도성화 변형률은 용접부위의 변형 시작지점의 변형률보다 더 크면서 용접부위의 균열이 시작되는 변형률보다는 작고, 나머지 전기전도성 복합재(120)에서 비 전도성화 현상이 발생되는 시점의 변형률인 제2 비 전도성화 변형률은 상기 균열이 시작되는 변형률 보다 같거나 크게 형성됨으로써,

금속 캐니스터(2)의 용접부위에서 균열이 발생되기 전에 용접부위의 균열이 발생될 징후가 미리 감지 가능한 것을 특징으로 하는 사용후핵연료 저장용 금속 캐니스터의 응력부식균열 모니터링 시스템.

청구항 13

제8항에 있어서,

상기 구동 모듈(30)은 내부에 열에너지가 온도 차이를 형성시키면서 전류를 발생시키는 열전소자가 설치됨으로써,

사용후핵연료 저장용 금속 캐니스터(2) 내부의 사용후핵연료로부터 전달받는 열에너지로부터 전류를 발생시켜 측정 모듈(20)을 구동하는 것을 특징으로 하는 사용후핵연료 저장용 금속 캐니스터의 응력부식균열 모니터링 시스템.

발명의 설명

기 술 분 야

[0001] 본 발명은 사용후핵연료가 저장되는 금속 캐니스터에서 발생되는 응력부식균열의 발생 징후 및 발생 여부를 모니터링 하는 방법 및 시스템에 관한 것이다.

배 경 기 술

[0002] 전 세계적으로 원전에서 발생하는 사용후핵연료는 영구적으로 처분하기 전에 저장되고 있다. 국내에서도 원전의 상업운전을 시작한 후 발생한 사용후핵연료를 원전 내 저장소에 보관하여 왔다. 원전 내 저장소의 용량이 포화됨에 따라 조밀 저장대 설치, 원전 간 수송 등을 통해 포화시점을 연장시켜 왔으나 이러한 수단도 저장소의 포화를 궁극적으로 해결할 수는 없다. 최근 고리 1호기의 해체가 결정됨에 따라 고리 1호기 내 사용후핵연료는 다른 장소로 이동ㅇ저장되어야만 하는 상황이다. 따라서 사용후핵연료는 최종적 관리정책이 결정되기 전까지 밀봉된 상태로 일정기간 저장되어야 한다.

[0003] 사용후핵연료 저장방식 중 건식 저장방식은 습식 저장방식 대비 비용, 확장 유연성 및 안전성 측면에서 우수한 것으로 알려져 있다. 국내에서도 2011년 미국 유카 마운틴(Yucca Mountain) 방폐장 계획의 취소와 일본 후쿠시마 원전의 지진해일에 의한 사고 이후 건식 저장방식에 대해 주목하고 있다. 최근 다양한 건식 저장기술 중 사용후핵연료를 금속 캐니스터(2)에 밀봉한 후 이를 콘크리트 캐스크(cask)에 넣는 콘크리트 캐스크형 건식 저장방식에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 금속 캐니스터(2)는 제작과정 및 밀봉과정에서 용접부가 형성되고 콘크리트 캐스크형 건식 저장방식에 있어 대기 중 수분이나 염화물의 금속 캐니스터(2)로의 유입은 필연적이기 때문에 저장 중 용접부에 응력부식균열이 발생할 수 있는 것으로 보고되고 있다. 금속 캐니스터(2)의 응력부식균열에 의한 밀봉건전성 파괴는 안전성 측면에서 격납유지요건을 만족시키지 못할 수 있기 때문에 세계 각국에서는 사용후핵연료 건식 저장용 금속 캐니스터(2) 용접부의 응력부식균열 발생 혹은 발생 징후를 모니터링 할 수 있는 다양한 기술을 개발하고 있다.

[0004] 현재까지 알려진 사용후핵연료 금속 캐니스터(2)의 밀봉건전성 혹은 사용후핵연료 금속 캐니스터(2) 용접부의 응력부식균열을 감시하는 기술로는 금속 캐니스터(2) 내 온도변화 측정, 금속 캐니스터(2) 내 밀폐충전가스의 누설 측정, 누설 방사선 측정 등이 있다.

[0005] 상기 종래기술들은 균열 혹은 파손 등과 같은 물리량을 직접적으로 감지하여 금속 캐니스터(2)의 밀봉건전성을 모니터링 하는 것이 아니라 금속 캐니스터(2) 파손 시 발생하는 2차 현상과 관련된 간접적 물리량을 모니터링

하는 방법이므로, 금속 캐니스터(2) 용접부와 같은 협소한 부위에 적용하기 힘들고 설사 적용하더라도 응력부식균열의 발생을 조기에 감지하기 힘들다.

[0006] 이러한 문제점으로 인해 밴드 부재 모니터링, 균열 성장 센서(crack growth sensor), 균열 진전 센서(crack propagation sensor)와 같은 직접적 방법이 개발되었으나 상기 종래기술들은 금속 캐니스터(2) 자체가 아닌 금속 캐니스터(2)와 동일한 소재로 만들어진 대체시료를 이용한 감시 방법이므로, 사용후핵연료 저장용 금속 캐니스터(2) 용접부의 응력부식균열을 모니터링 함에 있어 큰 오차가 생기고 실시간 모니터링이 불가하다.

[0007] 최근 들어 다양한 비파괴검사 기반 모니터링 기술이 개발되고 있으나 이 기술들은 감시신뢰도와 실시간 모니터링 측면에서 미흡한 것으로 보고되고 있다. 더불어 상기 모든 종래기술들은 사용후핵연료 저장용 금속 캐니스터(2)에서 응력부식균열의 발생 여부만 파악할 뿐 응력부식균열의 발생 징후를 모니터링 할 수 없기 때문에 금속 캐니스터(2)의 밀봉건전성을 위협하는 상황의 발생에 대한 사전 감지 및 이를 통한 예방이 불가능하다.

[0008] 또 다른 종래기술로는 구조물에 과거에 걸린 부하의 검출 방법 및 이를 이용하는 부하 검출 센서가 있다. 상기 종래기술은 센싱 소자에 발생한 물리적 파괴에 의한 전기 저항의 비가역적 변화에 의해 상기 구조물에 걸린 과거의 부하 정도를 정량적으로 검출하는 방법이므로 특정 한계신장률 이상의 부하가 발생한 후 상기 한계신장률 이하의 부하로 돌아가는 경우 상기 센싱 소자에 물리적 파괴가 일어나 재사용이 불가능하다. 따라서 금속 캐니스터(2) 용접부의 응력부식균열 발생 징후를 실시간으로 모니터링 할 수 없고 장기간 사용이 불가하다.

[0009] 원전 운영에 있어 사용후핵연료의 지속적 발생과 사용후핵연료에 대한 밀봉이 가지는 중요성을 고려할 때 사용후핵연료 저장용 금속 캐니스터(2) 용접부의 응력부식균열 발생 징후를 사전에 모니터링 하는 방법의 개발은 시급하다고 할 수 있다. 더불어 금속 캐니스터(2) 내부에 사용후핵연료가 장전되어 있으므로 상기 모니터링 방법은 별도의 외부 전원장치 없이 구동되는 방식인 것이 바람직하다.

선행기술문헌

[0010] 등록특허공보 제10-1164518호(공고일자: 2012. 07. 11)

[0011] 공개특허공보 제10-2019-0004888호(공개일자: 2019. 01. 15)

[0012] 등록특허공보 제10-1911918호(공고일자:2018. 10. 25))

발명의 내용

해결하려는 과제

[0013] 이에 본 발명은 사용후핵연료가 저장되는 금속 캐니스터에서 사용후핵연료 저장 과정에서 형성되는 금속 캐니스터의 용접부위에서 장시간이 경과되면서 응력부식균열이 발생되는 것을 실시간으로 모니터링 하여 사전에 응력부식균열의 발생 징후 또는 발생 여부를 감지하여 대응책을 마련할 수 있고, 일정 조건 하에서 재활용이 가능하며, 장시간 동안 별도의 전력공급 없이도 구동 가능한 사용후핵연료가 저장되는 금속 캐니스터의 응력부식균열 모니터링 시스템 및 방법을 제공하고자 한다.

과제의 해결 수단

[0014] 이러한 목적을 달성하기 위한 본 발명에 따른 모니터링 방법은, 상기 용접부위에, 전도성 미세 입자(121)가 절연부재의 내부에 분포되어 이루어지는 전기전도성 복합재(120)를 부착하는 단계와, 전기전도성 복합재(120)가 용접부위의 변형으로 인해 함께 변형되면서, 전기전도성 복합재(120) 내부의 상기 전도성 미세 입자(121) 간의 간격 증가로 인해 전기전도성 복합재(120)가 비전도성 물질이 되는 비 전도성화 현상의 발생 여부를 실시간으로 측정함으로써, 용접부위의 응력부식균열 발생 징후 또는 발생 여부를 모니터링 하는 비 전도성화 관측 단계로 구성된다.

[0015] 이 경우 상기 부착하는 단계는 바람직하게는 전기전도성 복합재(120)와 용접부위 사이에 절연소재를 삽입하는 단계를 포함한다.

[0016] 이때 상기 절연소재를 삽입하는 단계에서는 바람직하게는 전기전도성 복합재(120)의 기저를 이루는 절연부재와 동일한 소재로 절연소재를 제작함으로써, 절연소재와 전기전도성 복합재(120)가 동일한 변형률로 변형되어, 전기전도성 복합재(120)의 변형률과 용접부위의 변형률이 서로 직접 대응된다.

[0017] 한편, 부착하는 단계에서는 바람직하게는 전기전도성 복합재(120)를 복수개로 마련하여 부착하며, 복수개의 전

기전도성 복합재(120) 중 적어도 어느 하나의 전기전도성 복합재(120)는 함유되는 전도성 미세 입자(121)의 농도가 나머지 전기전도성 복합재(120)와 서로 다르게 제작함으로써, 용접부위의 변형에 따른 비 전도성화 현상이 두 단계로 발생되게 조절한다.

[0018] 특히 상기 적어도 어느 하나의 전기전도성 복합재(120)에서 비 전도성화 현상이 발생되는 시점의 변형률인 제1 비 전도성화 변형률은 바람직하게는 용접부위의 변형 시작지점의 변형률보다 더 크면서 용접부위의 균열이 시작되는 변형률보다는 작고, 나머지 전기전도성 복합재(120)에서 비 전도성화 현상이 발생되는 시점의 변형률인 제2 비 전도성화 변형률은 상기 균열이 시작되는 변형률 보다 같거나 크게 형성된다.

[0019] 따라서 금속 캐니스터(2)의 용접부위에서 균열이 발생되기 전에 용접부위의 균열이 발생될 징후가 미리 감지 가능하다.

[0020] 한편, 상기 전기전도성 복합재(120)를 부착하는 단계에서는 바람직하게는 전기전도성 복합재(120)의 저항을 측정하는 측정모듈과, 측정모듈에 전원을 공급하는 구동모듈을 설치하는 단계를 포함한다.

[0021] 이 경우 상기 구동모듈은 바람직하게는 금속 캐니스터(2) 내부의 사용후핵연료로부터 발생되는 열에너지로 전류를 발생시키는 열전소자로 구성된다.

[0022] 한편, 본 발명에 따른 모니터링 시스템은 전도성 미세 입자(121)가 절연부재의 내부에 분포되게 제작되는 전기전도성 복합재(120)로 이루어져서 상기 용접부위에서 용접으로 접합된 지점 양 측에 동시에 걸쳐지는 형태로 설치되는 검지 모듈과, 상기 전기전도성 복합재(120)가 용접부위의 변형으로 인해 함께 변형되면서, 전기전도성 복합재(120) 내부의 상기 전도성 미세 입자(121) 간의 간격 증가로 인해 전기전도성 복합재(120)가 비전도성 물질이 되는 비 전도성화 현상의 발생 여부를 실시간으로 측정하는 측정 모듈(20) 및, 측정 모듈(20)에 전원을 공급하는 구동 모듈(30)로 구성된다.

[0023] 이 경우 상기 전기전도성 복합재(120)와 용접부위 사이에는 바람직하게는 절연소재가 삽입된다.

[0024] 이때 상기 절연소재는 바람직하게는 전기전도성 복합재(120)의 기저를 이루는 절연부재와 동일한 소재로 이루어짐으로써, 절연소재와 전기전도성 복합재(120)가 동일한 변형률로 변형되어, 전기전도성 복합재(120)의 변형률과 용접부위의 변형률이 서로 직접 대응된다.

[0025] 그리고 상기 전기전도성 복합재(120)는 복수개로 마련되며, 바람직하게는 복수개의 전기전도성 복합재(120) 중 적어도 어느 하나의 전기전도성 복합재(120)는 함유되는 전도성 미세 입자(121)의 농도가 나머지 전기전도성 복합재(120)와 서로 다르게 형성됨으로써, 용접부위의 변형에 따른 비 전도성화 현상이 복수개의 단계로 발생된다.

[0026] 특히 상기 적어도 어느 하나의 전기전도성 복합재(120)에서 비 전도성화 현상이 발생되는 시점의 변형률인 제1 비 전도성화 변형률은 바람직하게는 용접부위의 변형 시작지점의 변형률보다 더 크면서 용접부위의 균열이 시작되는 변형률보다는 작고, 나머지 전기전도성 복합재(120)에서 비 전도성화 현상이 발생되는 시점의 변형률인 제2 비 전도성화 변형률은 상기 균열이 시작되는 변형률 보다 같거나 크게 형성됨으로써, 금속 캐니스터(2)의 용접부위에서 균열이 발생되기 전에 용접부위의 균열이 발생될 징후가 미리 감지 가능하다.

[0027] 또한 상기 구동 모듈(30)은 바람직하게는 내부에 열에너지가 온도 차이를 형성시키면서 전류를 발생시키는 열전소자가 설치됨으로써, 사용후핵연료 저장용 금속 캐니스터(2) 내부의 사용후핵연료로부터 전달받는 열에너지로부터 전류를 발생시켜 측정 모듈(20)을 구동시킨다.

발명의 효과

[0028] 본 발명에 따른 사용후핵연료 저장용 금속 캐니스터의 응력부식균열 모니터링 방법 및 시스템은 장시간이 경과되면서 금속 캐니스터에 응력부식균열이 발생되는 것을 실시간으로 모니터링 하면서 사전에 그 징후를 발견하여 대응책을 미리 준비함으로써, 방사선의 피폭이 극소화 될 수 있고, 일정 조건 하에서 시스템의 재활용이 가능하며, 장시간 동안 별도의 전력공급 없이도 구동 가능한 효과가 있다.

도면의 간단한 설명

[0029] 도 1은 용접부위에 잔류하는 응력 분포를 개념적으로 나타내는 그래프,

도 2는 사용후핵연료의 저장설비를 나타내는 투시 사시도,

도 3은 금속 캐니스터에서 응력부식균열이 발생되는 부위를 나타낸 사시도,

도 4는 본 발명에 따른 응력부식균열 모니터링 시스템의 사시도,

도 5a는 도 4에서 검지 모듈을 나타내는 사시도,

도 5b 및 도 5c는 응력부식균열과 전기전도성 복합재의 비 전도성화 현상 간의 관계를 나타내는 개념도,

도 6a 및 도 6b는 응력부식균열과 전기전도성 복합재의 비 전도성화 현상 간의 관계를 나타내는 그래프,

도 7은 도 5a의 변형 실시예,

도 8은 도 4에서 측정 모듈의 구성도,

도 9는 도 4에서 구동 모듈의 구성도,

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0030] 본 발명의 실시예에서 제시되는 특정한 구조 내지 기능적 설명들은 단지 본 발명의 개념에 따른 실시예를 설명하기 위한 목적으로 예시된 것으로, 본 발명의 개념에 따른 실시예들은 다양한 형태로 실시될 수 있다. 또한 본 명세서에 설명된 실시예들에 한정되는 것으로 해석되어서는 아니 되며, 본 발명의 사상 및 기술 범위에 포함되는 모든 변경물, 균등물 내지 대체물을 포함하는 것으로 이해되어야 한다.

[0031] 이하에서는 첨부된 도면을 참조하여 본 발명에 대해 상세히 설명한다.

[0032] 본 발명에 따른 사용후핵연료 저장용 금속 캐니스터의 응력부식균열 모니터링 방법은 사용후핵연료가 보관되는 금속 캐니스터(2)에 형성된 용접부위에, 전도성 미세 입자(121)가 절연부재의 내부에 분포되어 이루어지는 전기전도성 복합재(120)를 부착하는 단계와, 전기전도성 복합재(120)가 용접부위의 변형으로 인해 함께 변형되면서, 전기전도성 복합재(120) 내부의 상기 전도성 미세 입자(121) 간의 간격 증가로 인해 전기전도성 복합재(120)가 비전도성 물질이 되는 비 전도성화 현상의 발생 여부를 실시간으로 측정함으로써, 용접부위의 응력부식균열 발생 징후 또는 발생 여부를 미리 모니터링 하는 비 전도성화 관측 단계로 구성된다.

[0033] 사용후핵연료는 연료로서의 수명은 다했으나, 온도가 매우 높으며 특히 일정 수준의 방사선을 지속적으로 방출하기 때문에 반드시 오랜 기간 동안 밀폐될 수 있게 격리하여 보관시켜야 한다.

[0034] 그런데 앞서 배경 기술 란에서 설명된 바와 같이 사용후핵연료가 저장되는 금속 캐니스터(2)는 사용후핵연료의 삽입 과정에서 완전한 밀폐를 위해 용접되므로, 용접부위가 외부 염화물 또는 수분에 노출되고 또한 잔류응력으로 인해 응력부식균열이 발생될 수 있다.

[0035] 응력부식균열이 발생되는 경우 방사능의 누출로 인한 대형사고가 초래될 수 있으므로, 사전에 응력부식균열이 방지되어야 하나 앞서 배경기술에서 설명된 바와 같이 응력부식균열의 발생을 저지시킬 수 있는 기술이 종래에는 부재한 상황이다.

[0036] 본 발명에 따른 응력부식균열 모니터링 방법에서는 이에 대해 금속 캐니스터(2)의 용접 부위에 잔류 응력이 작용되므로 극히 미세하게나마 파단 직전의 변형이 발생된다는 점과, 전기전도성 복합재가 극히 미세한 변형을 전달 받으면서 극명한 성질 변화가 발생되는 비 전도성화 현상을 접목시킬 수 있다는 발상의 전환을 함으로써, 사전에 응력부식균열의 발생 징후를 예측할 수 있게 된 것이다.

[0037] 본 발명의 경우 전기전도성 복합재(120)에서 비 전도성화 현상이 발생된다. 전기전도성 복합재(120)는 수지와 같은 비전도성 물질로 이루어지는 기저 물질에 전기전도성 미세 입자(121)가 비교적 균일하게 분포되게 형성된 부재이다.

[0038] 비전도성 물질인 기저 부재의 형성 과정에서 전도성 미세 입자(121)를 점점 더 큰 농도로 혼합하다 보면 미세입자들은 클러스터를 형성하게 되고, 클러스터의 크기가 성장하면서 클러스터 간의 연결이 이루어진다. 이 경우 클러스터 간의 연결이 계속 확장되다 보면 어느 순간에 전도성 미세 입자와 기저 물질의 복합체 전체가 비전도성 물질에서 전도성 물질로 전이되고, 이것은 전도성 미세 입자의 농도 변화에 따른 전도성화 현상에 해당된다.

[0039] 본 발명에서는 비전도체에서 전도체로의 전환과는 반대로 전도체에서 비전도체로의 전환에 해당되는 비 전도성화 현상이 이용된다. 즉 전도체로 형성된 전기전도성 복합재(120)를 용접 부위에 접합시킨 상태에서 용접부위에

작용되는 잔류 응력으로 인해 용접부위에 균열이 발생할 정도의 변형이 발생될 경우, 전기전도성 복합재(120)는 용접으로 접합된 접합선을 중심으로 하여 양 측으로 힘을 받는다.

[0040] 이때 전기전도성 복합재(120)는 도 5b 및 도 5c에 도시된 바와 같이 용접부위에 균열이 발생되고, 균열이 커짐으로써 전기전도성 복합재(120)의 전기전도를 가능하게 만들어 주던 전도성 미세 입자(121) 클러스터 간의 간격도 커지면서 전류의 흐름이 5b에서 5c로 변화되는 것처럼 순간적으로 끊어짐이 발생된다. 그리고 전류의 흐름이 끊어지는 현상이 용접부위에 대응되는 지점을 따라 전기전도성 복합재(120) 전체로 퍼지면서 전기전도성 복합재(120)는 비 전도성 물질로 전환되면서 전기저항이 무한대로 근접하게 된다.

[0041] 이와 같이 금속 캐니스터(2)에 형성된 용접부위의 변화에 따라 전기전도성 복합재(120)도 함께 미세하게 형태가 변화되면서 도체에서 부도체로 전환되는 비 전도성화 현상을 이용하여, 금속 캐니스터(2)의 용접부위에 전기전도성 복합재(120)를 부착시키고, 전기전도성 복합재(120)의 전기저항을 실시간으로 모니터링 함으로써, 용접 부위의 미세한 변형이 발생됨이 실시간으로 체크되고, 따라서 응력부식균열의 발생 전에 그 조짐을 미리 알 수 있다.

[0042] 이때 금속 캐니스터(2)는 전기전도성이 있으므로 전기전도성 복합재(120)의 저항을 측정할 때 교란이 발생되지 않도록 전기전도성 복합재(120)의 설치 과정에서 도 5a에 도시된 바와 같이 절연소재를 전기전도성 복합재(120)와 용접부위 사이에 삽입되게 설치한다.

[0043] 특히 절연소재는 그 재질이 전기전도성 복합재(120)의 기저를 이루는 절연물질과 동일한 소재 또는 전기전도성 복합재(120)의 기저를 이루는 절연물질보다 큰 항복변형률이나 탄성변형률을 가지는 소재를 선택한다. 왜냐하면 용접부위에서 잔류응력으로 인해 발생되는 변형은 극히 미세하므로, 용접부위의 변형률이 감쇄되지 않고 최대한 그대로 전기전도성 복합재(120)로 전달되어야 하기 때문이다.

[0044] 참고로 도 5b에서 5c로 전환될 때 발생되는 균열은 금속 캐니스터(2)에 발생되는 균열이며, 도 5b와 도 5c에 도시된 기저물질과 전도성 미세 입자(121) 클러스터는 전기전도성 복합재(120)의 미세 구조를 도식화 하여 나타낸 것이다.

[0045] 또한, 전기전도성 복합재(120)를 제작하는 단계에서는 상기 용접부위의 변형률에 대응되는 변형 량으로 인하여 전기전도성 복합재(120)가 비전도성 물질로 전환되는 비 전도성화 현상이 발생되도록, 전기전도성 복합재(120)의 기저를 이루는 절연물질에 함유되는 전도성 미세 입자(121)의 농도를 조절한다.

[0046] 즉 기저물질 내부에 분산되는 전도성 미세 입자(121)의 농도를 미세하게 조절함으로써, 용접부위가 잔류 응력으로 인해 항복 변형이 시작되는 시점과 용접부위에서 균열이 발생되는 시점 사이에서 전기전도성 복합재(120)의 비 전도성화 현상이 발생되게 조절될 수 있다.

[0047] 여기서 참고로 전기전도성 복합재(120)의 저항 변화를 측정하는 측정 모듈(20)과, 측정 모듈(20)에 전류를 공급하는 구동 모듈(30)이 도 4에 도시된 바와 같이 설치될 수 있다.

[0048] 그리고 전기전도성 복합재(120)는 도 4 및 도 5a에 도시된 바와 같이 적어도 두 개가 병렬로 설치될 수 있다. 이때 병렬로 연결되는 두 개의 전기전도성 복합재(120)의 비 전도성화 현상은 서로 다른 시점에서 형성되도록 제작된다.

[0049] 본 발명에서는 두 개의 전기전도성 복합재(120)가 포함하는 전도성 미세 입자(121)의 농도가 서로 다르게 제작됨으로써, 용접부위의 변형 과정을 보다 세밀하게 추적할 수 있다.

[0050] 또한, 별도로 도시되진 않았지만 전도성 미세 입자(121)의 농도가 모두 서로 다른 복수개의 전기전도성 복합재(120)를 모두 병렬연결 함으로써, 전기전도성 복합재(120)의 수만큼 복수개의 단계로 변화를 관찰할 수도 있다.

[0051] 참고로 여기서 용접 부위의 인장 변형이 발생될 경우 전도성 미세 입자(121)의 농도가 작아서 저항이 먼저 무한대로 변화되는 비 전도성화 현상이 발생되는 것을 제1전기전도성 복합재(12)라 하고, 용접부위의 변형이 더 진행되어 균열이 발생된 후에 비 전도성화 현상이 발생되는 것을 제2전기전도성 복합재(13)라 칭하기로 한다.

[0052] 참고로 도 6a에는 어느 하나의 전기전도성 복합재(120)의 변형률에 따른 전기저항과 물리적 연결상태의 변화 선도가 도시되어 있다.

[0053] 전기전도성 복합재(120)의 변형률(ε_c)이 비 전도성화 변형률 보다 작으면 전기전도성 복합재(120)는 물리적 연결성이 유지되고, 전기저항은 비례하여 증가된다. 이후 전기전도성 복합재(120)의 변형이 커져 비 전도성화 변

형률($\varepsilon_{c,p}$)에 도달되면 전기전도성 복합재(120)는 물리적으로는 파단된 것은 아니지만, 전기적으로 절연되어 무한대의 전기저항 값을 가지게 된다. 이후 전기전도성 복합재(120)의 변형이 비 전도성화 변형률 보다 작아지게 되면 전기전도성 복합재(120)는 전기적 절연 이전의 상태로 복귀되고, 반대로 전기전도성 복합재(120)의 변형이 계속 되어 전기전도성 복합재(120) 자체의 파단이 일어나는 파손변형률($\varepsilon_{c,f}$)에 도달되면 전기전도성 복합재(120)는 물리적으로도 연결이 끊어진다.

[0054] 이와 같은 도 6a의 설명을 참고하여, 도 6b에 도시된 제1 및 제2전기전도성 복합재(13)의 병렬연결 상태에서의 변형률과 전기저항의 관계를 설명하기로 한다.

[0055] 도 6b에서는 도 5a와 같이 적어도 두 개의 전기전도성 복합재(120), 즉 제1전기전도성 복합재(12)와 제2전기전도성 복합재(13)이 병렬로 연결된 상태에서 용접부위의 변형률과의 관계가 도시되어 있다. 이 경우 작은 변형률에서 비 전도성화 현상이 일어나는 복합재를 제1전기전도성 복합재(12)라 두고, 제1전기전도성 복합재(12)의 비 전도성화 변형률을 제1 비 전도성화 변형률이라 하며, 큰 변형률에서 비 전도성화 변형이 일어나는 복합재를 제2전기전도성 복합재(13)라 두고, 제2전기전도성 복합재(13)의 비 전도성화 변형률을 제2퍼코레이션 변형률이라 칭하기로 한다.

[0056] 용접부위의 항복 변형률($\varepsilon_{w,y}$)에 도달되기 전에는 용접부위에는 잔류응력이 작용될 뿐이므로 제1 및 제2전기전도성 복합재(13)도 변형이 일어나지 않는다. 그런데 응력부식균열의 영향으로 용접부위의 변형이 항복 변형률($\varepsilon_{w,y}$)에 도달되어 실제 변형이 시작된 후에는 제1 및 제2전기전도성 복합재(13)의 변형도 시작된다.

[0057] 이때 도 6b에 도시된 바와 같이 제1전기전도성 복합재(12)가 제1 비 전도성화 변형률($\varepsilon_{c,p1}$)에 도달되면 제1전기전도성 복합재(12)는 전기적으로 절연 상태가 되어 제1전기전도성 복합재(12)의 저항(R1)은 무한대가 된다.

[0058] 이 경우 전체 저항(Rt)는 $1/Rt = 1/R1 + 1/R2 = 1/\infty + 1/R2 = 0 + 1/R2$ 이 되어 $Rt = R2$ 의 값을 갖는다.

[0059] 그리고 도 6b에서와 같이 용접부위의 변형이 보다 더 진전되어 용접부위의 파단 변형률($\varepsilon_{w,f}$)을 지나면 미세한 균열만으로도 제2전기전도성 복합재(13)에게는 큰 변형에 해당되므로 순식간에 제2전기전도성 복합재(13)의 변형률이 제2 비 전도성화 변형률($\varepsilon_{c,p2}$)에 도달된다. 이때 제2전기전도성 복합재(13)도 전기적으로 절연 상태가 되어 전체 저항(Rt) 역시 무한대가 된다.

[0060] 따라서 제1 비 전도성화 변형률($\varepsilon_{c,p1}$)이 측정 모듈(20)을 통해 측정되면, 응력부식균열이 발생될 수 있다는 징후가 포착될 수 있다. 다만 응력부식균열의 발생은 실제로는 상당한 시간을 통해 일어나므로 응력부식균열에 대비할 충분한 시간적 여유를 얻을 수 있으며, 이러한 상황 변화가 실시간으로 즉각 포착 가능하다. 이러한 점에서 종래 사용되던 간헐적인 비파괴 검사 만으로는 대처하기 힘든 돌발 상황도 충분히 예측 가능하며, 상황 판단을 위한 비용과 시간 면에서도 대폭적으로 절감되는 효과가 있다.

[0061] 그리고 전기전도성 복합재(120)의 배열은 반드시 도 5a의 형태로 한정되는 것은 아니며, 국부적인 용접부위에도 얼마든지 적용될 수 있게 도 7과 같은 형태로 설치될 수도 있다. 이 경우 실제로 절연소재와 전기전도성 복합재(120)의 두께는 도시된 두께보다 훨씬 작게 형성될 수 있으므로 제1전기전도성 복합재(12)와 제2전기전도성 복합재(13)은 용접부위의 변형에 따라 동일한 변형률로 반응될 수 있다.

[0062] 한편, 전기저항을 측정하는 측정 모듈(20)은 도 8과 같이 형성될 수 있다. 여기서 전류 발생회로는 도 8에 표시된 구동 모듈(30)에서 전원을 공급받게 된다.

[0063] 이 경우 구동 모듈(30)은 도 9에 도시된 바와 같이 p형 열전소재(31) 및, n형 열전소재(32)와, 금속 전극(33,34)과 충전 커패시터(35) 및 정전압 발생회로(36)로 조합된 열전소자 형태로 제작될 수 있으며, 비록 연료로서의 작용은 더 이상 할 수 없지만 아주 오랜 시간 동안 계속 발열이 되는 사용후핵연료로부터 아주 오랜 시간 열에너지를 공급받음으로써, 구동 모듈(30)은 실질적으로 외부 전력 공급 없이도 거의 반영구적으로 작동이 가능하다. 따라서 불시의 정전사고의 경우에도 응력부식균열의 모니터링이 중단 없이 가능하다.

[0064] 한편, 본 발명에 따른 사용후핵연료 저장용 금속 캐니스터의 응력부식균열 모니터링 시스템은 위에서 함께 상술되었으므로 더 이상의 반복을 피하기 위해 생략하기로 한다.

[0065] 이상에서 설명한 본 발명은 전술한 실시예 및 첨부된 도면에 의해 한정되는 것이 아니고, 본 발명의 기술적 사

상을 벗어나지 않는 범위 내에서 여러 가지 치환, 변형 및 변경이 가능함은 본 발명이 속하는 기술분야에서 통상의 지식을 가진 자에게 명백할 것이다.

부호의 설명

[0066]

B : 균열

C : 전류

1 : 캐스크

2 : 금속 캐니스터

3 : 사용후핵연료

4 : 축 방향 용접부위

5 : 상면 및 저면 용접부위

10 : 검지 모듈

11 : 절연소재

12 : 제1전기전도성 복합재

13 ; 제2전기전도성 복합재

14 : 전기신호 입력선

15 : 전기신호 출력선

16 : 보호층

20 : 측정 모듈

21 : 전류 발생회로

22 : 직류 전압 측정회로

30 : 구동 모듈

31 : p형 열전소재

32 : n형 열전소재

33,34 : 금속 전극

35 : 충전 커패시터

36 : 정전압 발생회로

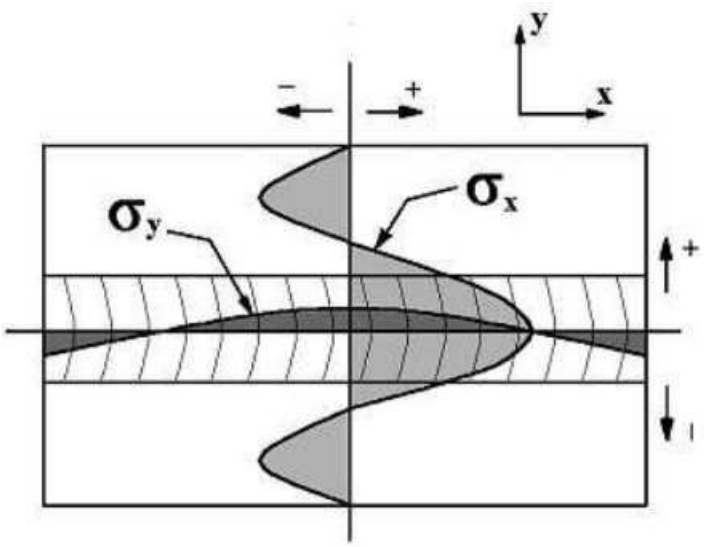
120 : 전기전도성 복합재

121 : 전도성 미세입자

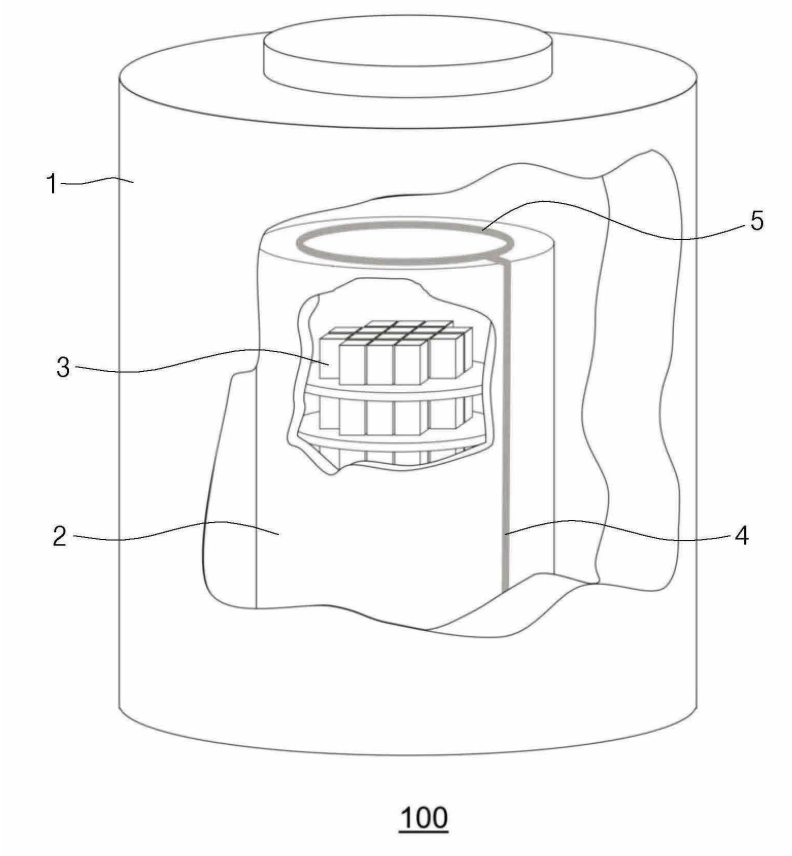
122 : 기저물질

도면

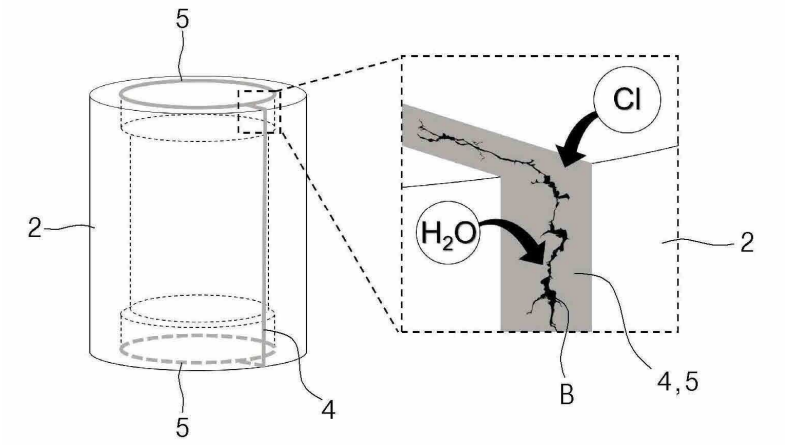
도면1



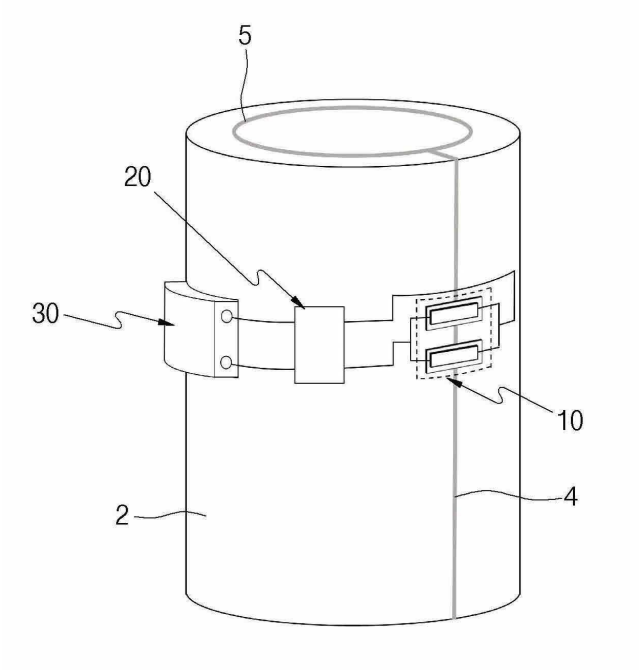
도면2



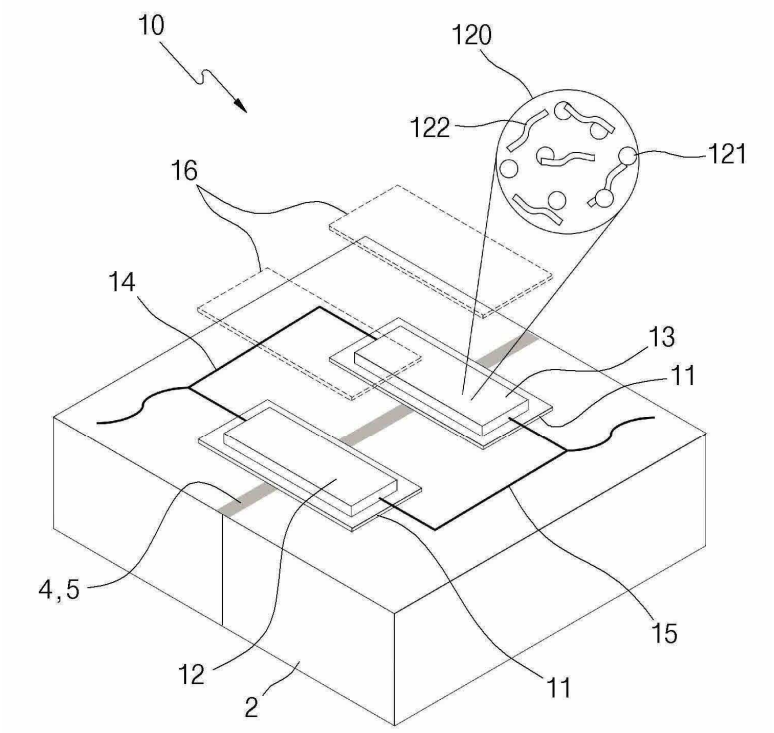
도면3



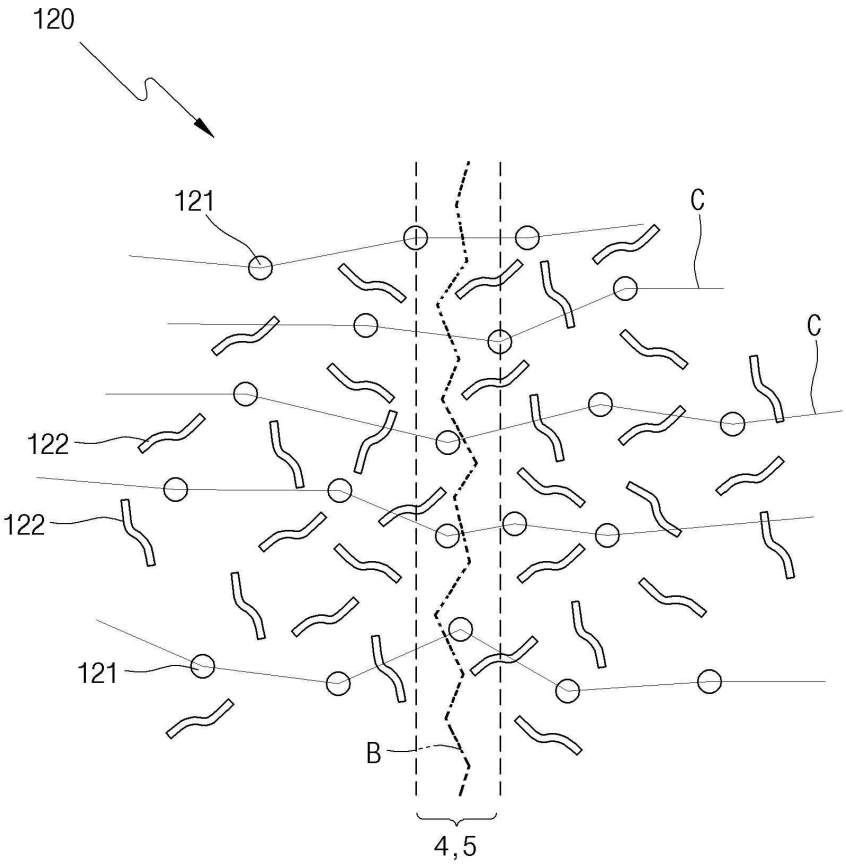
도면4



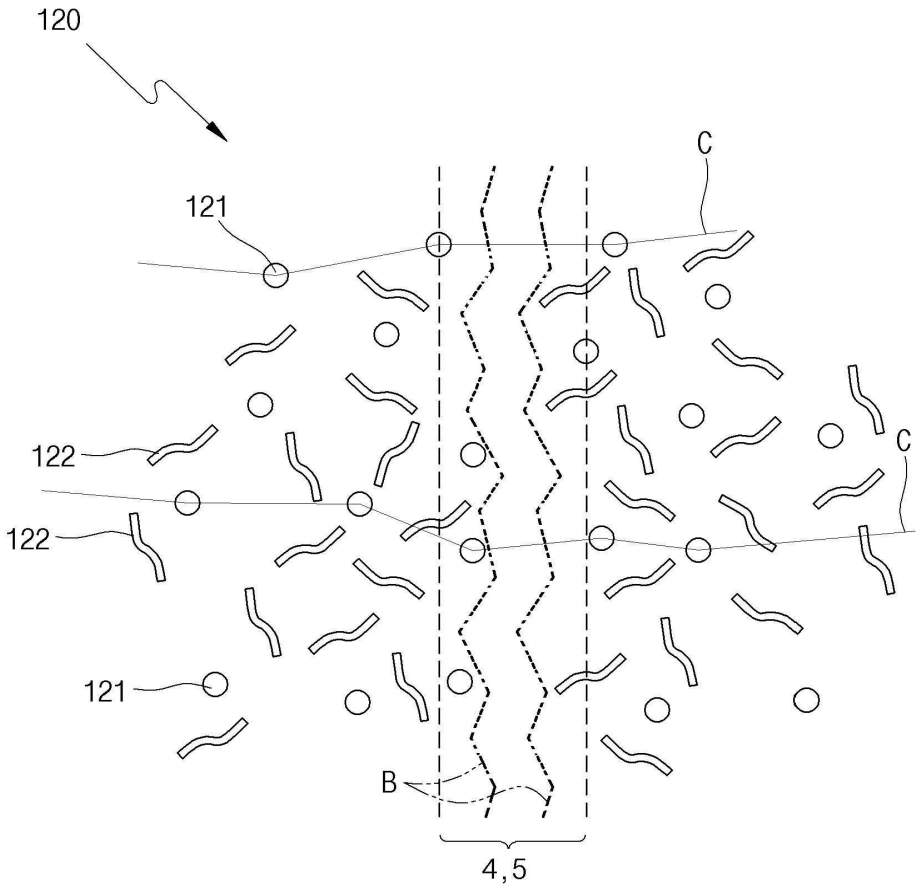
도면5a



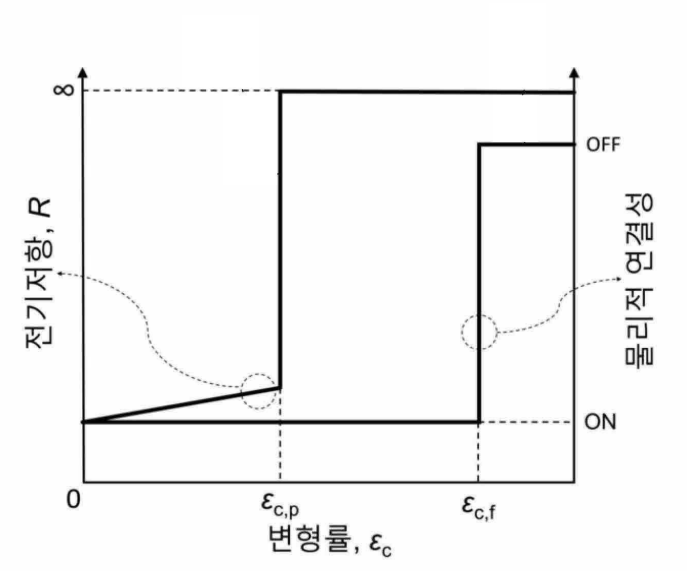
도면5b



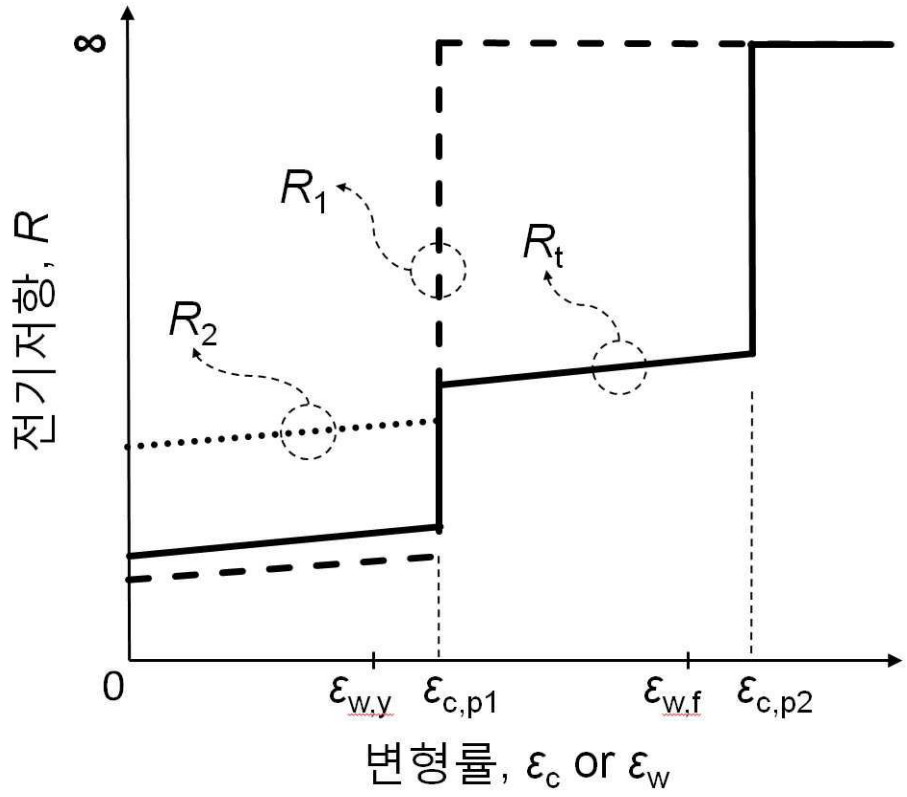
도면5c


120
C
121
122
122
C
121
B
4,5

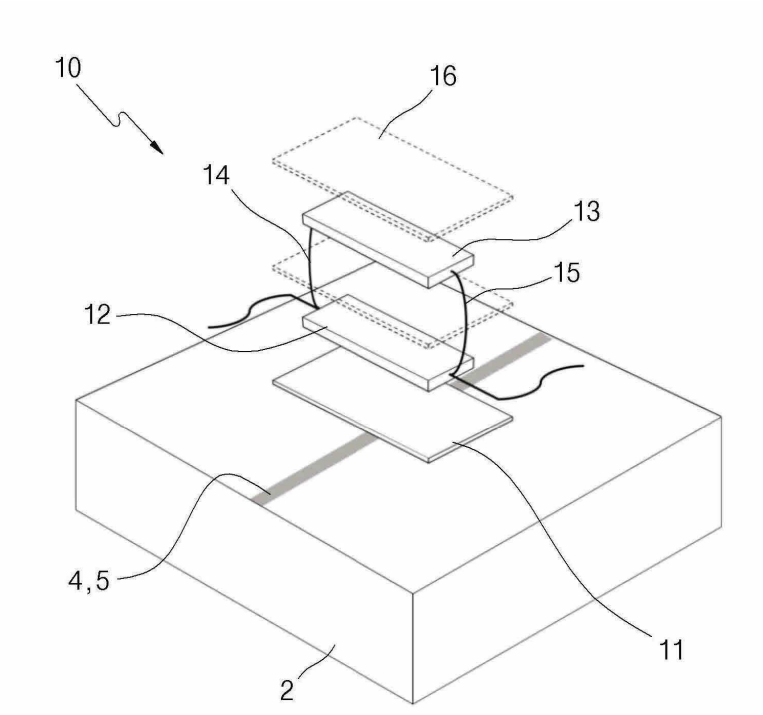
도면6a


∞
OFF
전기저항, R
물리적 연결성
ON
0
$\varepsilon_{c,p}$
$\varepsilon_{c,f}$
변형률, ε_c

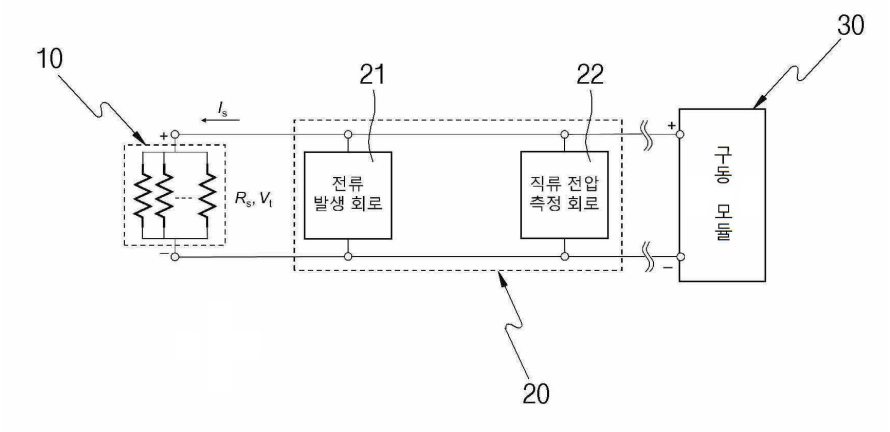
도면6b


∞
전기저항, R
R_1
R_t
R_2
0
$\varepsilon_{w,y}$
$\varepsilon_{c,p1}$
$\varepsilon_{w,f}$
$\varepsilon_{c,p2}$
변형률, ε_c or ε_w

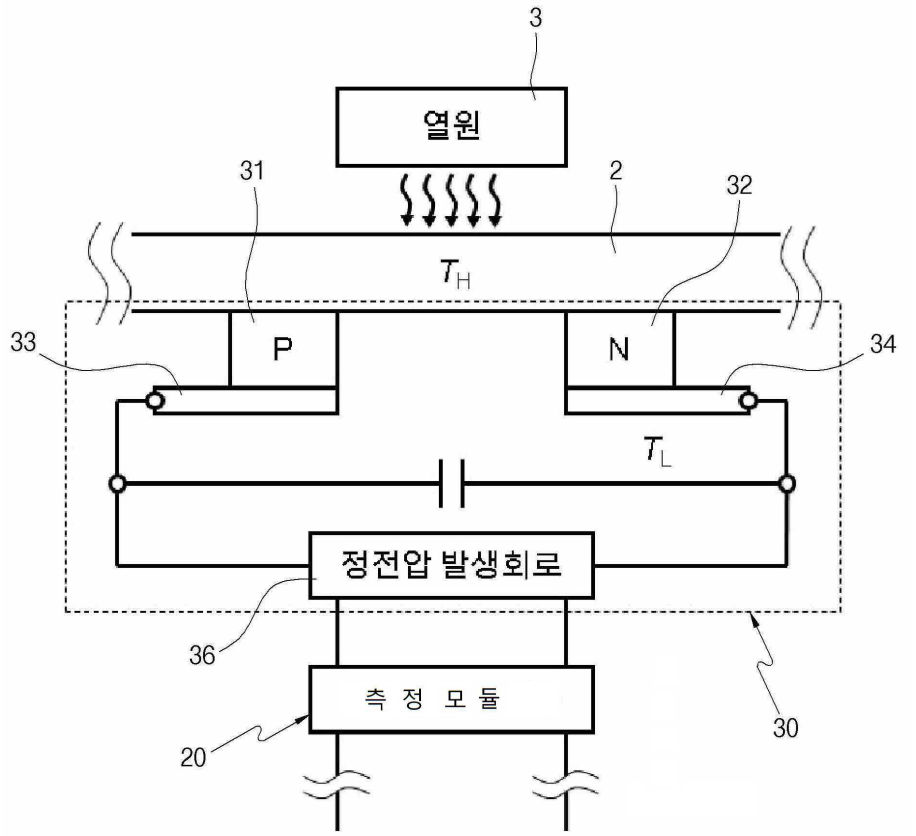
도면7


10
16
14
13
15
12
4,5
11
2

도면8


10
21
22
30
I_s
R_s, V_t
전류
발생 회로
직류 전압
측정 회로
구동 모듈
20

도면9


3
열원
31
2
32
T_H
33
P
N
34
T_L
정전압 발생회로
36
측 정 모 듈
30
20