



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2022-0061041
(43) 공개일자 2022년05월12일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G21F 5/06 (2006.01) C22C 38/06 (2006.01)
(52) CPC특허분류
G21F 5/06 (2013.01)
C22C 38/06 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2021-0151337
(22) 출원일자 2021년11월05일
심사청구일자 2021년11월05일
(30) 우선권주장
1020200146654 2020년11월05일 대한민국(KR)

(71) 출원인
울산과학기술원
울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50
(72) 발명자
김지현
울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50
이정현
울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50
김태용
울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50
(74) 대리인
특허법인태백

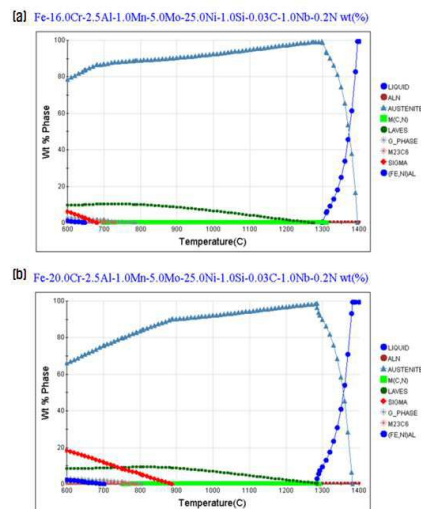
전체 청구항 수 : 총 12 항

(54) 발명의 명칭 알루미늄을 포함하는 오스테나이트계 스테인리스 강과 이의 제조 방법 및 용도

(57) 요약

본 발명은 알루미늄을 포함하는 오스테나이트계 스테인리스강, 이의 제조방법 및 이를 이용한 복합소재에 관한 것으로, 상기 오스테나이트 스테인리스강은 알루미늄을 포함하고, 크롬의 조성비를 조절함으로써, 부식저항성 및 염화물 유발 응력부식균열 저항성이 우수하고 상기 오스테나이트 스테인리스강을 코팅층으로 사용한 경우에도 우수한 안정성을 나타내어 사용후 핵연료의 건식저장 용기용 복합소재로 사용할 수 있다.

대표도 - 도1



(52) CPC특허분류

C21D 2211/001 (2013.01)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	1711101376
과제번호	2017M2A8A1092492
부처명	과학기술정보통신부
과제관리(전문)기관명	한국연구재단
연구사업명	원자력기술개발사업(R&D)
연구과제명	사용후 핵연료 건식 저장 용기용 기능성 복합 소재 기술 개발
기 여 율	1/2
과제수행기관명	울산과학기술원
연구기간	2019.12.21 ~ 2020.12.20

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	1415167890
과제번호	20194030202400
부처명	산업통상자원부
과제관리(전문)기관명	한국에너지기술평가원
연구사업명	에너지인력양성(R&D)
연구과제명	원전 주요 설비 건전성 평가 관리기술 고급트랙
기 여 율	1/2
과제수행기관명	울산과학기술원
연구기간	2021.01.01 ~ 2021.12.31

명세서

청구범위

청구항 1

13~19wt%의 크롬; 2~5wt%의 알루미늄; 7wt% 이하의 몰리브덴; 1~3wt%의 망간; 10~25wt%의 니켈 및 잔부의 철을 포함하는 오스테나이트계 스테인리스강.

청구항 2

제 1 항에 있어서,

상기 오스테나이트계 스테인리스강은 0.01~2wt%의 규소; 0.01~0.5wt%의 탄소; 1wt% 이하의 니오븀; 0.01~0.3wt%의 질소 및 기타 불순물을 더 포함하는 오스테나이트계 스테인리스강.

청구항 3

제 1 항에 있어서,

상기 오스테나이트계 스테인리스강은 미세조직의 95면적% 이상의 오스테나이트를 포함하는 오스테나이트계 스테인리스강.

청구항 4

제 1 항에 있어서,

상기 오스테나이트계 스테인리스강은 일부 페라이트 결정구조를 포함하는 오스테나이트계 스테인리스강.

청구항 5

제 1 항에 있어서,

상기 오스테나이트계 스테인리스강의 인장응력은 600 MPa 이상이고,

상기 오스테나이트계 스테인리스강의 항복강도는 300 MPa 이상인 것을 특징으로 하는 오스테나이트계 스테인리스강.

청구항 6

제 1 항에 있어서,

상기 오스테나이트계 스테인리스강의 부식 속도는 SL-EPR 실험 기준으로 1 내지 5 MPY인 것을 특징으로 하는 오스테나이트계 스테인리스강.

청구항 7

제 1 항에 있어서,

상기 오스테나이트계 스테인리스강의 염화물 부식 저항성은 염화부식균열 개시시간이 약 700시간 이후인 것을 특징으로 하는 오스테나이트계 스테인리스강.

청구항 8

10~19wt%의 크롬; 2~5wt%의 알루미늄; 7wt% 이하의 몰리브덴; 1~3wt%의 망간; 10~25wt%의 니켈 및 잔부의 철을 포함하는 슬라브를 제조하는 단계;

상기 슬라브를 1200~1500℃의 온도로 가열하고, 60% 이상의 압하율로 마무리 압연 온도에서 열간압연하여 중간재를 제공하는 단계; 및

상기 중간재를 1~100℃/s의 냉각속도로 600℃ 이하의 온도범위까지 냉각하여 최종재를 제공하는 단계를 포함하

는 오스테나이트계 스테인리스강의 제조방법.

청구항 9

제 8 항에 있어서,

상기 슬라브는 0.01~2wt%의 규소; 0.01~0.5wt%의 탄소; 1wt% 이하의 니오븀; 0.01~0.3wt%의 질소 및 기타 불순물을 추가로 포함하는 오스테나이트계 스테인리스강의 제조방법.

청구항 10

기재; 및

기재 상에 형성되되, 청구항 제1항 내지 제7항 중 어느 한 항에 따른 오스테나이트계 스테인리스강을 포함하는 코팅층을 포함하는 복합소재.

청구항 11

제 10 항에 있어서,

상기 기재는 304 스테인리스 스틸 및 15-15 Ti 합금으로 이루어진 군에서 선택된 1종 이상을 포함하는 복합소재.

청구항 12

제 10 항에 있어서,

상기 코팅층의 두께는 0.1 내지 2.0mm인 것을 특징으로 하는 복합소재.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은 알루미늄을 포함하는 오스테나이트계 스테인리스강, 이의 제조방법 및 이를 이용한 복합소재에 관한 것이다.

배경 기술

[0002] 계속적인 원전 가동으로부터 발생하는 사용 후 핵연료의 양이 지속적으로 증가함에 따라 임시저장 공간이 포화되면서 저장 공간의 확보 문제가 큰 이슈로 대두되고 있다. 이를 해결하기 위한 방안으로 중간저장 방식이 대두되고 있으며 중간저장 방식은 경제성, 사용 후 핵연료 발생량, 최종관리 정책과의 연계성 등이 고려의 대상이 될 수 있으며 최근에는 건식저장 방식이 선호되는 추세이다.

[0003] 건식저장 용기내 염분을 포함한 대기환경이 조성되면 급격하게 부식이 발생하여 재료의 건전성을 약화시킨다고 알려져 있다. 특히 중간저장의 경우 임시저장에 비해 저장 기간이 장기간으로 저장용기의 부식저항성능과 그에 따른 수명이 중요한 기술적 요소이다. 특히 염소이온을 포함한 이물질이 침입하게 되면 국부적인 수분과의 결합으로 인한 조해(deliquescence)와 이의 반복으로 인한 부식과정을 통해 응력부식균열 (Stress Corrosion Cracking)을 유발할 수 있다. 조해로 인한 부식가속화는 부식자체가 문제가 되는 것이 아니라 스테인리스강의 염화물 부식에 의한 녹 팽창압으로 철강소재의 구조내력을 저해하고, 또 재료표면의 보호성 피막 등이 파괴되며 그에 따른 균열의 생성과 성장으로 열화는 가속될 수 있으며, 수명 감소를 초래한다.

[0004] 사용 후 핵연료 건식저장용기용 스테인리스 강의 경우 다양한 부분에서의 용접부가 있으며, 용접부는 모재에 비해 다양한 열화에 더 민감하다. 특히, 용접부는 용접과정동안의 급격한 열이력으로 인한 입계석출물 형성을 통한 재료 예민화(sensitization)이 발생할 수 있으며, 예민화된 스테인레스강은 응력부식균열 현상에 매우 취약한 단점이 있다.

[0005] 기존 사용 후 핵연료 저장용기 소재의 경우 염화물 유발 응력부식균열에 의해 소재의 침투 및 pitting corrosion 이 발생할 수 있기 때문에 부식성능의 우수함을 활용하여 현재 건식저장용기의 가장 큰 문제점인 염화물 유발 응력부식균열 문제를 해결하기 위한 연구가 필요한 실정이다.

선행기술문헌

특허문헌

[0006] (특허문헌 0001) 대한민국 등록특허 제10-2157512호(2020.09.18. 공개)

발명의 내용

해결하려는 과제

[0007] 본 발명은 상술한 문제점을 해결하기 위해, 오스테나이트 스테인리스강의 조성비를 조절하여 부식 및 염화물 유발 응력부식균열 현상을 방지할 수 있는 알루미늄을 포함하는 오스테나이트 스테인리스, 이의 제조방법 및 이의 용도를 제공하는데 있다.

과제의 해결 수단

[0008] 상기 목적을 달성하기 위하여, 본 발명은 13~19wt%의 크롬; 2~5wt%의 알루미늄; 7wt% 이하의 몰리브덴; 1~3wt%의 망간; 10~25wt%의 니켈 및 잔부의 철을 포함하는 오스테나이트계 스테인리스강을 제공한다.

[0009] 또한, 본 발명은 13~19wt%의 크롬; 2~5wt%의 알루미늄; 7wt% 이하의 몰리브덴; 1~3wt%의 망간; 10~25wt%의 니켈 및 잔부의 철을 포함하는 슬라브를 제조하는 단계; 상기 슬라브를 1200~1500℃의 온도로 가열하고, 60% 이상의 압하율로 마무리 압연 온도에서 열간압연하여 중간재를 제공하는 단계; 및 상기 중간재를 1~100℃/s의 냉각 속도로 600℃ 이하의 온도범위까지 냉각하여 최종재를 제공하는 단계를 포함하는 오스테나이트계 스테인리스강의 제조방법을 제공한다.

[0010] 더불어, 기재; 및 기재 상에 형성되되, 상기 서술한 오스테나이트계 스테인리스강을 포함하는 코팅층을 포함하는 복합소재를 제공한다.

발명의 효과

[0011] 본 발명은 오스테나이트 스테인리스강은 알루미늄을 포함하고, 크롬의 조성비를 조절함으로써, 부식저항성 및 염화물 유발 응력부식균열 저항성이 우수하고 상기 오스테나이트 스테인리스강을 코팅층으로 사용한 경우에도 우수한 안정성을 나타내어 사용후 핵연료의 건식저장 용기용 복합소재로 사용할 수 있다.

도면의 간단한 설명

[0012] 도 1은 오스테나이트계 스테인리스강의 조성비에 따른 상변태도이다.

도 2는 오스테나이트계 스테인리스강의 조성에 따른 CCT 다이어그램 그래프이다.

도 3은 16wt%(a), 18wt%(b), 20wt%(c), 24wt%(d)의 크롬을 포함하는 오스테나이트계 스테인리스강 시편을 주사 전자 현미경으로 촬영한 이미지이다.

도 4는 오스테나이트계 스테인리스강을 제작한 후 용접을 수행하기 위해서 롤링한 판재시편을 15X15 mm 사이즈로 시편(용접봉)을 잘라서 제작한 후 절단면을 주사전자 현미경으로 촬영한 이미지이다.

도 5는 실시예에 따른 오스테나이트계 스테인리스강의 인장시험 결과를 나타낸 것이다

도 6은 오스테나이트계 스테인리스강의 인장시험 결과 시편의 파단면 사진이다.

도 7은 실시예에 따른 오스테나이트계 스테인리스강의 SL-EPR 실험 결과 그래프로, 시편 16Cr을 함유한 ASAS steel, 18Cr을 함유한 ASAS steel 그리고 304 stainless steel의 SL-EPR 실험결과이다.

도 8은 실시예에 따른 오스테나이트계 스테인리스강의 염화물 유발 응력부식균열 실험 예시 및 저항성 평가 결과 그래프이다.

도 9는 지그에서 롤의 움직임을 모사한 이미지(a)이고, 실시예에 따른 오스테나이트계 스테인리스강의 지그를 사용한 U-bend 모델에서 발생한 주응력 분포를 나타낸 이미지이다.

도 10은 실시예에 따른 오스테나이트계 스테인리스강의 코팅이 없거나, 2mm 코팅층이 있는 탑 리드(top lid)와 상부 셸(shell) 용접부의 원주 방향의 응력 분포를 나타낸 이미지이다.

도 11은 실시예에 따른 오스테나이트계 스테인리스강이 코팅된 건식 저장 용기의 중앙에서부터 탑 리드(top lid) 표면을 따라 발생한 von-Mises, 방사 방향(SS1), 축 방향(SS2), 원주 방향(SS3)의 응력 분포를 나타낸 그래프이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

- [0013] 이하, 본 발명에 대해 상세하게 서술한다.
- [0014] 본 발명은 부식저항성 및 염화물 유발 응력부식균열 저항성이 우수한 오스테나이트계 스테인리스강, 이의 제조 방법 및 이의 용도에 관한 것이다.
- [0015] 본 발명의 목적은 사용후 핵연료 건식 저장용기용 기능성 복합 소재 기반 기술을 개발하기 위한 것으로, 최적화된 조성의 합금을 설계 및 제작하여 기존 건식 저장용기용 소재 대비 향상된 장기 부식 성능 및 안정성을 갖도록 하는 오스테나이트계 스테인리스강을 제공하는 데에 있다.
- [0016] 또한 본 발명은 기존 사용 중인 사용후 핵연료 건식 저장용기의 개선을 위해, 최적화된 조성의 합금을 설계하고 제작하여 전산열역학 및 안정화도 계산을 통해 제작된 복합 소재의 다양한 물성, 조직적 평가, 장기 건전성 평가 및 유한요소해석을 통해 안정성 평가를 수행하였고, 이를 통해 사용후 핵연료 건식 저장용기용 기능성 복합층에 적용할 수 있다.
- [0018] 본 발명은 13~19wt%의 크롬; 2~5wt%의 알루미늄; 7wt% 이하의 몰리브덴; 1~3wt%의 망간; 10~25wt%의 니켈 및 잔부의 철을 포함하는 오스테나이트계 스테인리스강을 제공한다.
- [0019] 구체적으로, 상기 오스테나이트계 스테인리스강은 13~19wt%의 크롬; 2~5wt%의 알루미늄; 7wt% 이하의 몰리브덴; 1~3wt%의 망간; 10~25wt%의 니켈; 잔부의 철; 0.01~2wt%의 규소; 0.01~0.5wt%의 탄소; 1wt% 이하의 니오븀; 0.01~0.3wt%의 질소 및 기타 불순물을 포함한다.
- [0020] 상기 크롬(Cr)은 시그마 상에 영향을 미치는 요인으로, 본 발명은 크롬의 함량을 상기 범위로 조절함으로써 시그마 상을 억제하여 내식성을 향상시킬 수 있다. 또한, 상기 크롬은 오스테나이트 내에 고용되어 스테인리스강의 강도를 증가시킬 수 있다.
- [0021] 상기 알루미늄(Al)은 페라이트 안정제 역할을 하여 스테인리스강의 안정성을 향상시키고, 이에 따라 오스테나이트계 스테인리스강은 일부 페라이트 결정구조도 관찰될 수 있다.
- [0022] 상기 탄소(C)는 강재의 오스테나이트를 안정화시키고, 고용강화에 의해 강도를 확보하는데 효과적인 원소이다.
- [0023] 상기 망간(Mn)은 오스테나이트를 안정화시키는 역할을 하는 중요한 원소이다.
- [0024] 상기 규소(Si)는 알루미늄(Al)과 같이 탈산제로서 필수불가결하게 미량 첨가되는 원소이다. 다만, 규소(Si)가 과도하게 첨가되는 경우 입계에 산화물을 형성하여 고온연성을 감소시키고, 크랙 등을 유발하여 표면품질을 저하시킬 우려가 있는바, 본 발명은 규소(Si) 함량의 상한을 0.5%로 제한할 수 있다.
- [0025] 상기 오스테나이트계 스테인리스강은 미세조직의 95면적% 이상의 오스테나이트를 포함할 수 있다.
- [0026] 본 발명에 따른 오스테나이트계 스테인리스강은 상기와 같은 조성비를 가져 우수한 기계적 강도, 부식 저항성 및 염화물 부식 저항성을 나타낼 수 있다.
- [0027] 예를 들어, 오스테나이트계 스테인리스강의 인장응력은 600 MPa 이상 또는 700 MPa 이상이고, 상기 오스테나이트계 스테인리스강의 항복강도는 300 MPa 이상 또는 330 MPa 이상이고, 상기 오스테나이트계 스테인리스강의 연신율은 30% 이상일 수 있다.
- [0028] 또한, 상기 오스테나이트계 스테인리스강의 부식 속도는 SL-EPR 실험 기준으로 1 내지 5 MPY이다. 상기와 같은 부식 속도를 가짐으로써 본 발명의 오스테나이트계 스테인리스강은 부식저항성이 우수한 것을 알 수 있다.
- [0029] 더불어, 상기 오스테나이트계 스테인리스강의 염화물 부식 저항성은 염화부식균열 개시시간이 약 700 시간 이후, 800시간 이후, 900시간 이후 또는 1000시간 이후로 부식균열이 늦은 시간에 관측될 수 있다. 상기와 같은

염화물 부식 저항성을 가짐으로써, 본 발명의 오스테나이트계 스테인리스강은 염분을 포함한 대기환경에서 염화물 부식을 현저하게 감소시켜 사용후 핵연료 저장용기의 수명을 연장시킬 수 있다.

- [0030] 또한, 본 발명은 13~19wt%의 크롬; 2~5wt%의 알루미늄; 7wt% 이하의 몰리브덴; 1~3wt%의 망간; 10~25wt%의 니켈 및 잔부의 철을 포함하는 슬라브를 제조하는 단계; 상기 슬라브를 1000~1500℃의 온도로 가열하고, 40% 이상의 압하율로 마무리 압연 온도에서 열간압연하여 중간재를 제공하는 단계; 및 상기 중간재를 1~100℃/s의 냉각속도로 600℃ 이하의 온도범위까지 냉각하여 최종재를 제공하는 단계를 포함하는 오스테나이트계 스테인리스강의 제조방법을 제공한다.
- [0031] 상기 슬라브를 제조하는 단계는 13~19wt%의 크롬; 2~5wt%의 알루미늄; 7wt% 이하의 몰리브덴; 1~3wt%의 망간; 10~25wt%의 니켈; 잔부의 철; 0.01~2wt%의 규소; 0.01~0.5wt%의 탄소; 1wt% 이하의 니오븀; 0.01~0.3wt%의 질소 및 기타 불순물의 조성비로 혼합하여 제조할 수 있다.
- [0032] 상기 오스테나이트 스테인레스강 조성에 상응하는 특징들은 상술된 부분에서 대신할 수 있다.
- [0033] 상기 중간재를 제공하는 단계는 상기 슬라브를 1200~1500℃의 온도로 가열하고, 60% 이상의 압하율로 마무리 압연 온도에서 열간압연할 수 있다. 상기와 같이 가열한 후 열간압연을 하는 경우 합금성분이 충분히 고용될 수 있고, 결정립이 잘 형성될 수 있다.
- [0034] 상기 최종재를 제공하는 단계는 상기 중간재를 1~100℃/s의 냉각속도로 600℃ 이하의 온도범위까지 냉각하여 수행할 수 있다. 상기와 같이 냉각하는 경우 탄화물 생성 및 성장을 억제할 수 있다.
- [0035] 상기와 같이 제조된 오스테나이트계 스테인리스강의 인장응력은 600 MPa 이상 또는 700 MPa 이상이고, 상기 오스테나이트계 스테인리스강의 항복강도는 300 MPa 이상 또는 330 MPa 이상이고, 상기 오스테나이트계 스테인리스강의 연신율은 30% 이상일 수 있다.
- [0036] 또한, 상기 오스테나이트계 스테인리스강의 부식 속도는 SL-EPR 실험 기준으로 1 내지 5 MPY이고, 상기 오스테나이트계 스테인리스강의 염화물 부식 저항성은 염화부식균열 개시시간이 약 1000시간 이후에서 개시될 수 있다.
- [0038] 더불어, 기재; 및 기재 상에 형성되되, 상기 서술한 오스테나이트계 스테인리스강을 포함하는 코팅층을 포함하는 복합소재를 제공한다.
- [0039] 상기 오스테나이트 스테인레스강에 상응하는 특징들은 상술된 부분에서 대신할 수 있다.
- [0040] 상기 기재는 304 스테인리스 스틸 및 15-15 Ti 합금으로 이루어진 군에서 선택된 1종 이상을 포함하고, 구체적으로, 304 스테인리스 스틸 또는 15-15 Ti 합금일 수 있다.
- [0041] 상기 코팅층의 두께는 0.1 내지 2.0mm이다.
- [0042] 본 발명에 따른 복합소재는 상기와 같이 오스테나이트계 스테인리스강을 포함하는 코팅층을 포함하여 장기 부식 성능 및 안정성이 우수한 사용후 핵연료 저장용기에 적용할 수 있다.
- [0043] 또한, 본 발명에 따른 복합소재는 건식저장용기 뿐만 아니라 해양산업 및 염분이 있는 환경에서의 부식저항성이 뛰어난 재료로써, 다양한 분야에 적용할 수 있다.
- [0044] 이하에서는 실시예를 통하여 본 발명을 더욱 상세히 설명하고자 한다. 이들 실시예는 오로지 본 발명을 보다 구체적으로 설명하기 위한 것으로, 본 발명의 요지에 따라 본 발명의 범위가 이들 실시예에 의해 제한되지 않는다는 것은 당업계에서 통상의 지식을 가진 자에 있어서 자명할 것이다.
- [0046] **실시예-알루미늄 함유 오스테나이트 스테인리스강**
- [0047] 최적의 조성을 찾은 오스테나이트계 스테인리스강 (ASAS강)을 아크멜팅을 수행하여 약 1200℃ - 1500℃ 환경에서 주조를 수행한 후 60% 이상의 압하율로 마무리 압연 온도에서 열간압연하여 중간재를 제공하는 단계; 및 상기 중간재를 1~100℃/s의 냉각속도로 600℃ 이하의 온도범위까지 냉각하여 최종재를 제공하는 단계를 포함하는 오스테나이트계 스테인리스강의 제조방법을 제공한다.
- [0048] **비교예**

[0049] 304 스테인리스강(304 SUS or 304SS)을 상업적으로 입수하였다.

[0051] 실험예 1

[0052] 본 발명에 따른 오스테나이트계 스테인리스강의 최적의 조성을 찾기 위해서, 오스테나이트계 스테인리스강의 조성
에 따른 상변태도 및 CCT 다이어그램(CCT diagram)을 확인하였고, 그 결과를 도 1 및 도 2에 나타내었다.

[0053] 도 1은 오스테나이트계 스테인리스강의 조성비에 따른 상변태도이다. 도 1을 살펴보면, 전산 열역학 계산을 기
반으로 합금을 설계한 결과, 알루미늄이 함유된 슈퍼 오스테나이트계 스테인리스강의 시편제작을 위한 최적의
조성비를 구할 수 있었다. 20 wt% Cr 함량에서는 대부분의 온도 범위에서 시그마 상(sigma phase)이 나타나는
것으로 보아 적절치 않음을 확인할 수 있으며, 크롬 함량을 줄여야 하는 것을 확인하였다. 전산열역학 계산을
통하여 각 조성별 다양한 case의 상변태에 대한 해석결과를 얻을 수 있었으며, 주요 원소인 Cr과 Mo의 함량변화
는 시그마 상의 변화에 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었다.

[0054] 도 2는 오스테나이트계 스테인리스강의 조성에 따른 CCT 다이어그램 그래프이다. 도 2를 살펴보면, CCT diagram
은 0.1 wt% 생성까지의 그래프를 나타내었으며, CCT diagram을 통해서 조성에 따라 sigma phase, Laves phase,
chi phase와 같은 상이 생성될 수 있음을 확인하였다. 또한, 대부분의 상들이 공냉과 같은 느린 냉각 속도인
0.1 °C/s 에서도 0.1 wt%는 생성되기 힘들고 0.01 °C/s 보다 낮은 냉각 속도에서 생성될 수 있음을 확인하였으
며, 해당 phase들은 0.1 wt% 보다 낮은 값으로 작은 입자를 형성되어 기계적 특성에 영향을 미칠 수 있기 때문
에, 해당 조성 별로 phase 생성에 대해 비교를 하였다.

[0056] 실험예 2

[0057] 본 발명에 따른 오스테나이트계 스테인리스강의 미세구조를 관측하기 위해, 상기 실시예에서 제조한 오스테나이
트계 스테인리스강의 시편을 주사전자 현미경(SEM)으로 촬영하였고, 그 결과를 도 3 및 도 4에 나타내었다.

[0058] 도 3은 16wt%(a), 18wt%(b), 20wt%(c), 24wt%(d)의 크롬을 포함하는 오스테나이트계 스테인리스강 시편을 주사
전자 현미경으로 촬영한 이미지로, 합금 조성비를 기반으로 대조군을 포함한 합금을 제작한 결과 크롬 함유량이
많은 시편의 입계 내에서 특정한 석출물이 다량 보이는 것을 확인할 수 있다. 또한 크롬함유량이 증가함에 따라
해당 phase의 양이 증가하였으며, 재료의 외부 손상 (균열 및 파단) 정도가 더 큰 경향을 보여주었다.

[0059] 또한, 기본적으로 오스테나이트 입계가 형성이 되어있는 것을 확인할 수 있었고, 알루미늄이 포함된 합금의 경
우 Al이 페라이트 안정제(ferrite stabilizer) 역할을 하기 때문에 상대적으로 오스테나이트뿐 아니라 페라이트
도 일부 관측이 되는 것을 확인할 수 있었다.

[0060] 도 4는 오스테나이트계 스테인리스강을 제작한 후 용접을 수행하기 위해서 롤링한 판재시편을 15X15 mm 사이
즈로 시편(용접봉)을 잘라서 제작한 후 절단면을 주사전자 현미경으로 촬영한 이미지이다. 도 4의 (a)는 16wt%의
크롬을 포함하는 스테인리스강 시편 이미지이고, (b)는 16wt%의 크롬을 포함하는 스테인리스강으로 제작한 용접
봉의 절단면 이미지이고, (c)는 18wt%의 크롬을 포함하는 스테인리스강 시편 이미지이고, (d)는 18wt%의 크롬을
포함하는 스테인리스강으로 제작한 용접봉의 절단면 이미지이다.

[0061] 도 4를 살펴보면, 시편의 미세구조를 분석한 결과 시편을 롤링한 판재시편은 이전 시편과 차이거 거의 없는 것
을 확인하였다.

[0063] 실험예 3

[0064] 본 발명에 따른 오스테나이트계 스테인리스강(ASAS steel)의 기계적 강도를 확인하기 위해서, 실시예에서 제조
한 시편을 대상으로 인장시험을 수행하였으며, 그 결과는 도 5, 도 6 및 표 1에 나타냈다.

표 1

합금 종류	항복강도 (MPa)	파괴응력 (MPa)
16Cr - ASAS steel	339.53±8.6	706.24±18.5
18Cr - ASAS steel	366.09±5.0	768.86±4.3

[0066] 도 5 및 표 1은 실시예에 따른 오스테나이트계 스테인리스강의 인장시험 결과를 나타낸 것이다. 도 5 및 표 1을 살펴보면, 16Cr을 함유한 ASAS steel의 항복강도는 약 340 MPa, 인장응력은 706 MPa로 측정되었으며 연신율은 약 30%로 측정되었으며, 18Cr을 함유한 ASAS steel의 항복강도는 366 MPa, 인장응력은 776 MPa로 측정되었으며 연신율은 약 32.7%로 측정되었다.

[0067] 도 6은 오스테나이트계 스테인리스강의 인장시험 결과 시편의 파단면 사진이다. 도 6a는 16wt%의 크롬을 포함하는 스테인리스강 시편의 파단면 이미지이고, 도 6b는 18wt%의 크롬을 포함하는 스테인리스강 시편의 파단면 이미지이다.

[0068] 도 6을 살펴보면, 일반적인 ductile fracture를 나타내는 cup and cone 구조의 파단면이 주로 관찰되었으며, 16Cr의 경우 좀 더 grain boundary를 따라 파단이 발생한 것으로 보이며 18Cr은 Cr 함량이 높아 16Cr에 비해 grain boundary에 Cr 함량이 높고 많은 precipitation이 형성되어 좀 더 저항성이 높은 것으로 판단된다.

[0070] 실험예 4

[0071] 본 발명에 따른 오스테나이트계 스테인리스강(ASAS steel)의 기계적 강도를 확인하기 위해서, 실시예에서 제조한 시편을 대상으로 SL-EPR 실험을 수행하였으며, 그 결과는 도 7에 나타났다.

[0072] 도 7은 실시예에 따른 오스테나이트계 스테인리스강의 SL-EPR 실험 결과 그래프로, 시편 16Cr을 함유한 ASAS steel, 18Cr을 함유한 ASAS steel 그리고 304 stainless steel의 SL-EPR 실험결과로써, 각 실험은 3회씩 수행되었으며, 대표적 결과를 그림에 도시하였다.

[0073] 도 7을 살펴보면 304 stainless steel 에 비해 제작된 ASAS steel 의 부식저항성이 뛰어난 것을 MPY에서 확인할 수 있으며, 16Cr을 함유한 ASAS steel 시편은 3.9 MPY, 18Cr을 함유한 ASAS steel 시편은 3.4 MPY, 그리고 304 stainless steel 시편은 22.9 MPY 값을 나타내었으며 이를 통해 18Cr을 함유한 ASAS steel의 부식저항성이 가장 뛰어난 것을 확인할 수 있다.

[0075] 실험예 5

[0076] 본 발명에 따른 오스테나이트계 스테인리스강(ASAS steel)의 염화물 유발 응력부식균열 저항성 시험평가를 수행하였으며, 그 결과는 도 8에 나타났다.

[0077] 염화물 유발 응력부식균열 저항성 평가는 하기와 같이 수행하였다.

[0078] 온도 50℃, 상대습도 35%를 장시간 유지할 수 있는 장기부식테스트용 환경 챔버에 제작된 ASAS steel을 U-bend 형태로 제작하여 위치시키며, 이후 N6700C DC power supply를 통해 8V, 6A의 전류를 연결된 시편에 인가하여 일정한 전류를 꾸준히 흘려주며 34420A nano voltmeter를 통해 실시간 전압변화를 각 시편 당 1분에 1회씩 데이터를 측정하였다.

[0079] U 형태의 위치에 실험을 위한 재료 (종류별 ASAS steel, 304 stainless steel)를 위치시킨다. 이후 양 옆에 전기적 인슐레이션을 위하여 테플론 재질로 제작한 와셔를 이용하여 인슐레이션을 수행해주었다. 이후 U-bend 시편에 응력이 지속적으로 가해질 수 있도록 스프링 조립을 수행한 후, 볼트를 체결시켜 assembly 조립을 완성하였다.

[0080] 표 2와 같이, 챔버 내에 앞줄 1g/m² 염분을 도포한 시편을 각 3개씩 시편의 거치대에 거치하며, 뒷줄은 10g/m²의 염분을 도포한 시편을 위치시켰다. 도 8a의 A 지점은 DCPD 측정을 위한 전류의 인가를 위한 input 전선이며, 각각의 시편에서 DCPD 측정을 위해서 도 8a의 B와 같이 U-bend 시편에 spot welding 형태로 DCPD 측정선을 연결하였다. 전체 시편의 직류전원을 흘려주기 위하여 C와 같이 백금선을 각 시편 사이에 연결하였다.

표 2

[0081]

Temperature 50 ℃ Relative Humidity 35 %	10 g/m ²	1 g/m ²
18 Cr	3	3

16 Cr	3	3
304 SUS	3	3

- [0082] 도 8은 실시예에 따른 오스테나이트계 스테인리스강의 염화물 유발 응력부식균열 실험 예시 및 저항성 평가 결과 그래프이다. 도 8b는 16wt% 크롬을 포함하는 스테인리스강(16Cr)의 결과이고, 도 8c는 18wt% 크롬을 포함하는 스테인리스강(18Cr)의 결과이고, 도 8d는 304 스테인리스강(304 SUS)의 결과이다.
- [0083] 도 8을 살펴보면 본 발명의 오스테나이트계 스테인리스강은 부식저항성 소재로서 기존 재료에 비해 부식균열이 더 늦은 시간에 관측된 것을 확인할 수 있다.
- [0085] **실험예 6**
- [0086] 본 발명에 따른 오스테나이트계 스테인리스강(ASAS steel)의 안전관련 기준 및 안정성을 평가하기 위한 실험을 수행하였으며, 그 결과는 도 9 내지 도 11에 나타났다.
- [0087] 기술기준을 분석한 결과, 1) 내화구조 또는 불연재료를 사용할 것, 2) 고방사선 및 부식성물질에 강한 재료를 사용할 것, 3) 표면 제염이 용이한 재료를 사용할 것, 4) 사용 후 핵연료와 직접 접촉하는 부분의 재료는 물리·화학적으로 사용 후핵연료에 손상을 주지 않을 것, 5) 사용 후 핵연료 저장 환경의 영향에서도 그 기능이 유지될 수 있을 것, 6) 경년열화현상을 고려하여 중간저장시설의 수명기간 동안 그 기능을 유지할 수 있을 것이라는 주요 기술 기준을 확인할 수 있었다.
- [0088] 일반적으로 사용 후 핵연료 저장 용기에 적용되는 재질은 오스테나이트계의 스테인레스 강이고, 해당 재질은 내식성 환경에서 널리 사용되는 구조재 합금이며 ASME Sec. 에서도 이미 검증된 재료이므로 파괴인성에 대한 실험을 요구하지는 않지만, 본 발명에서 제작된 재료의 경우 파괴인성 평가가 필요하고, 해당 기술요건이 가장 먼저 나오는 이유도 수송/저장용기의 요건에서 가장 중요한 인자이기 때문에 충분한 보수성을 가지도록 요구하고 있다.
- [0089] 안정성 평가는 하기와 같이 수행하였다.
- [0090] Drop weight test 장치의 주요 구성요소는 수직으로 가이드 되는 자유낙하 weight와 견고하게 지지되는 Anvil로 구성되고, 수직고정과 베이스와 고정된 관계로 단단히 고정된 레일은 weight guide를 위하여 제공되고 weight는 레일 또는 레일과 맞물리는 장치로 수직한 단일 평면에서 자유롭게 낙하한다. Drop weight test 시편은 모재형 태는 200mmX100mmX3mm이고, 용접재 형태는 200mmX100mmX(2.5+0.5)mm이다.
- [0091] 도 9는 지그에서 롤의 움직임을 모사한 이미지(a)이고, 실시예에 따른 오스테나이트계 스테인리스강의 지그를 사용한 U-bend 모델에서 발생한 주응력 분포를 나타낸 이미지이다.
- [0092] 도 9를 살펴보면, Bending roll의 반경은 8.3 mm이며, Specimen guide roll의 반경은 5 mm이며, 3 mm의 소재가 bending roll에 알맞게 눌릴 수 있도록 bending roll 중심과 specimens guide roll 중심의 이격은 16.35 mm이다. 따라서, bending roll이 완전히 아래로 눌렸을 때 bending roll 표면과 specimens 표면에는 3.5 mm의 이격이 생겨, 3 mm 소재가 원활히 들어갈 수 있도록 설계하였다.
- [0093] 본 실험은 기존 304SS 합금에서 발생하는 응력과 동등 비교를 하기 위해 ASAS 강에서도 동등한 응력을 걸리게 하여 실험을 수행하였다.
- [0094] 304SS과 16Cr-ASAS 강 경우 U-bend 지그의 specimen roll의 반경이 8.3 mm일 경우 500 MPa 정도의 주응력이 발생하지만, 18Cr-ASAS 강은 615.7 MPa의 높은 주응력이 발생하였다. 따라서, ASAS-18Cr에 작용하는 주응력 값을 낮추기 위해 specimen roll의 반경을 14 mm로 변경하였었고, 해당 경우에는 524.2 MPa의 응력 값을 가지게 되었다.
- [0095] 도 10은 실시예에 따른 오스테나이트계 스테인리스강의 코팅이 없거나, 2mm 코팅층이 있는 탑 리드(top lid)와 상부 셸(shell) 용접부의 원주 방향의 응력 분포를 나타낸 이미지이다.
- [0096] 도 10을 살펴보면, 코팅이 없거나 2mm 코팅 층이 있는 탑 리드와 상부 셸 용접부의 원주 응력을 나타냈다. 모든 경우에서 응력 분포는 코팅 층 관계없이 용접부 근처에서 약 600 MPa의 높은 인장 응력을 나타내며, 이는 용접 효과가 건식 저장 용기의 응력을 발생하는데 가장 큰 영향을 미친다는 것을 의미한다. 코팅층이 있는 경우는

표면에서 발생하는 인장 응력이 낮았고, 코팅이 있는 모델에 발생하는 가장 높은 원주 응력은 case 1과 case 2에서 380 MPa이다. 즉, 코팅 층은 원주 인장 응력을 감소시킬 수 있는 것을 알 수 있다.

[0097] 도 11은 실시예에 따른 오스테나이트계 스테인리스강이 코팅된 건식 저장 용기의 중앙에서부터 탑 리드(top lid) 표면을 따라 발생한 von-Mises, 방사 방향(SS1), 축 방향(SS2), 원주 방향(SS3)의 응력 분포를 나타낸 그래프이다.

[0098] 도 11을 살펴보면, 코팅 층의 원주 응력이 ASAS 강 코팅 재료의 항복 강도에 도달했지만, 방사 방향의 응력은 그림에서 확인하듯이 압축 응력을 가지며, 압축 응력은 잠재적 균열 성장을 완화시킬 수 있다.

[0099] 따라서 코팅된 건식 저장 용기는 코팅이 되지 않은 용기보다 CISC 내성이 우수하다는 것을 알 수 있다.

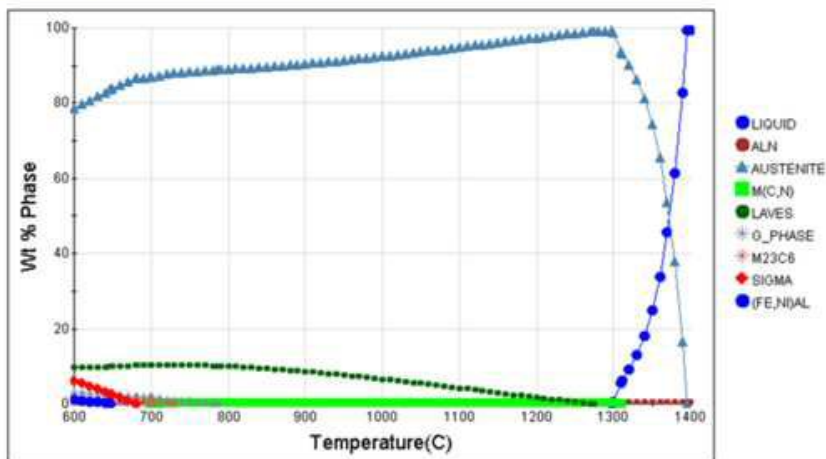
[0100] 이상으로 본 발명의 특정한 부분을 상세히 기술한 바, 당업계의 통상의 지식을 가진 자에게 있어서 이러한 구체적인 기술은 단지 바람직한 구현 예일 뿐이며, 이에 본 발명의 범위가 제한되는 것이 아닌 점은 명백하다. 따라서, 본 발명의 실질적인 범위는 첨부된 청구항과 그의 등가물에 의하여 정의된다고 할 것이다.

[0101] 본 발명의 범위는 후술하는 특허청구범위에 의하여 나타내어지며, 특허청구범위의 의미 및 범위 그리고 그 균등 개념으로부터 도출되는 모든 변경 또는 변형된 형태가 본 발명의 범위에 포함되는 것으로 해석되어야 한다.

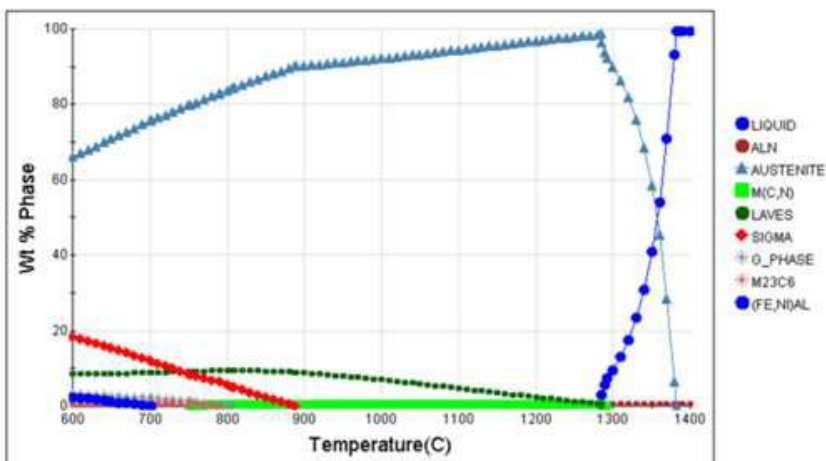
도면

도면1

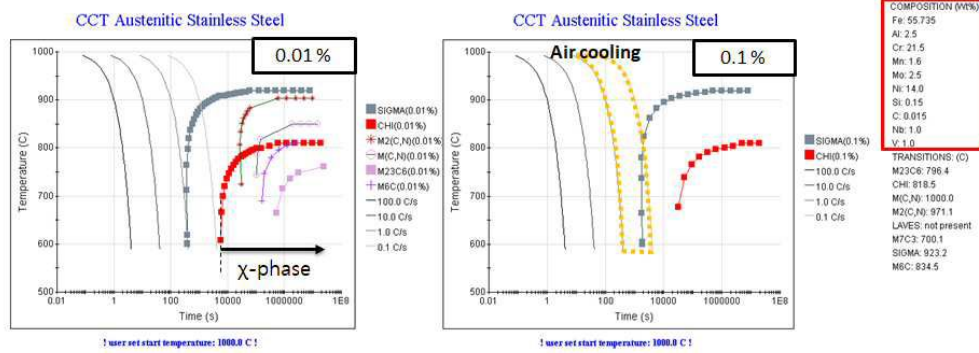
[a] Fe-16.0Cr-2.5Al-1.0Mn-5.0Mo-25.0Ni-1.0Si-0.03C-1.0Nb-0.2N wt(%)



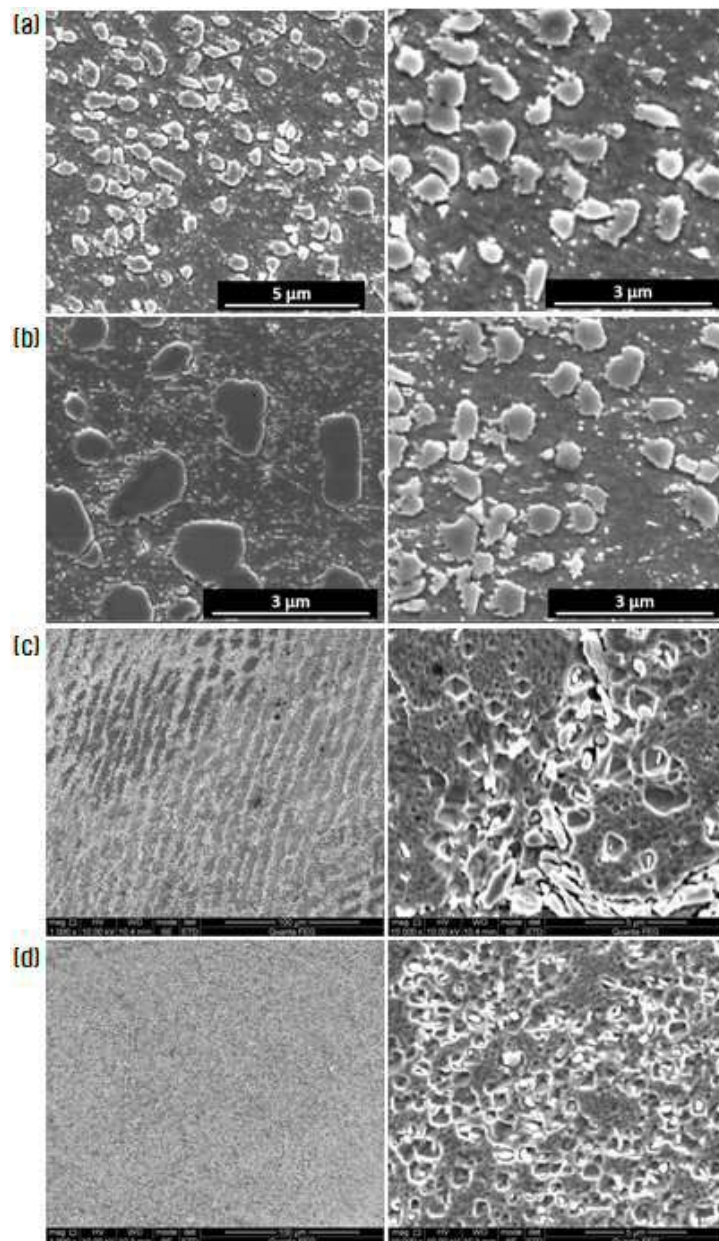
[b] Fe-20.0Cr-2.5Al-1.0Mn-5.0Mo-25.0Ni-1.0Si-0.03C-1.0Nb-0.2N wt(%)



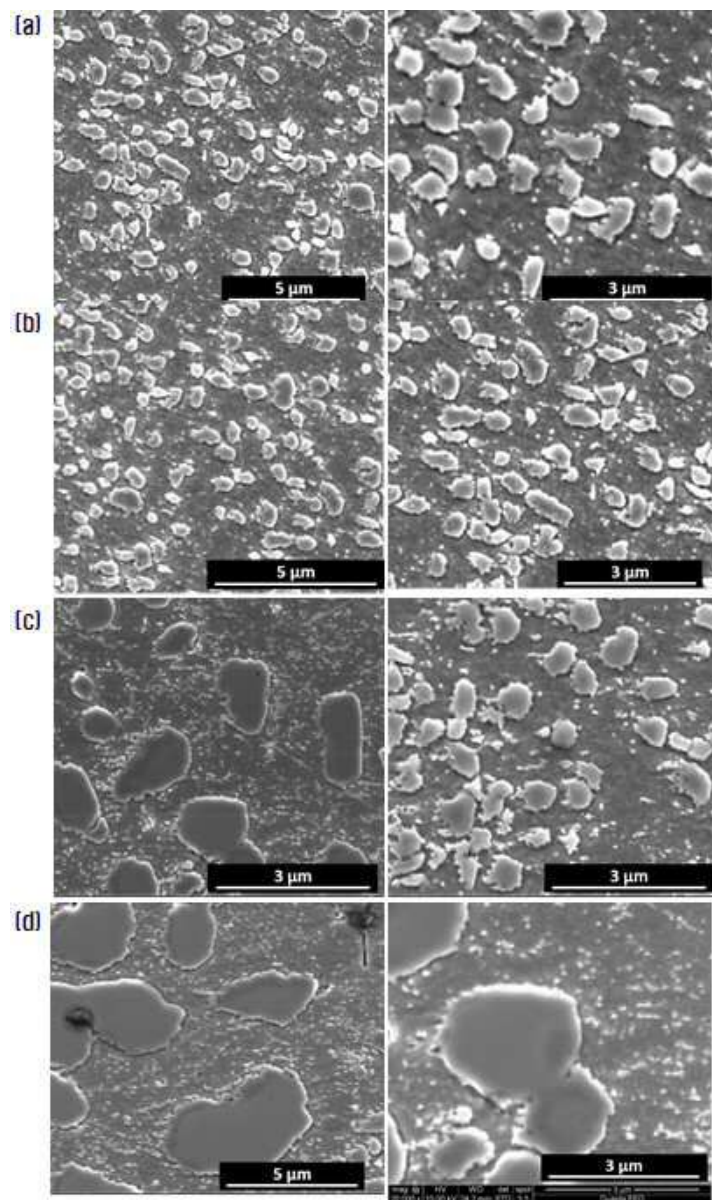
도면2



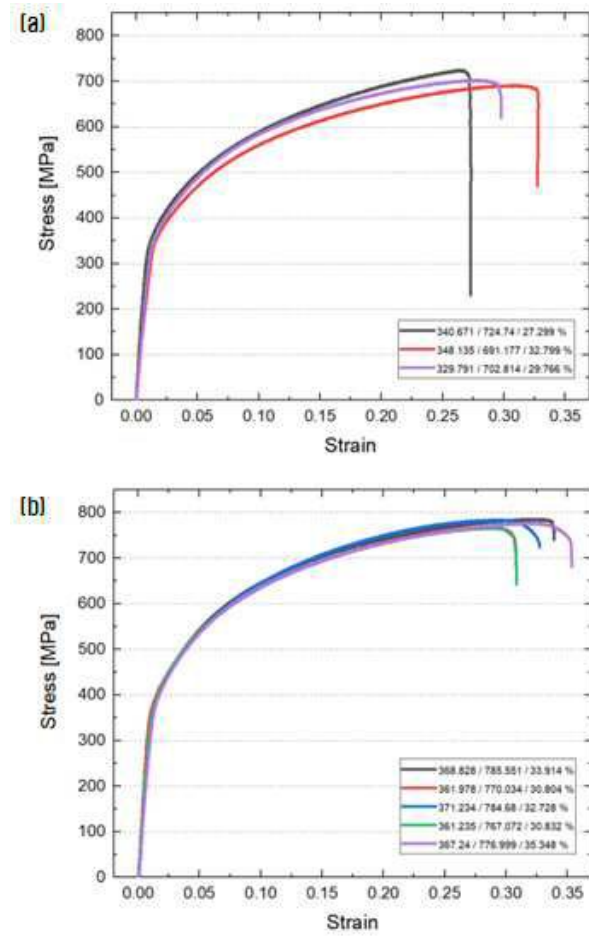
도면3



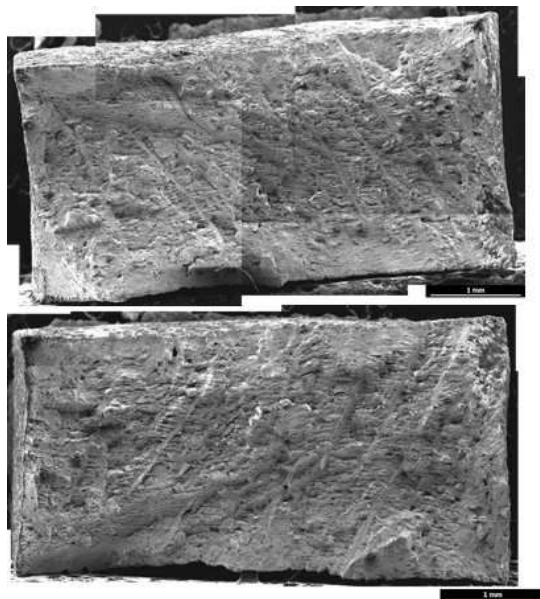
도면4



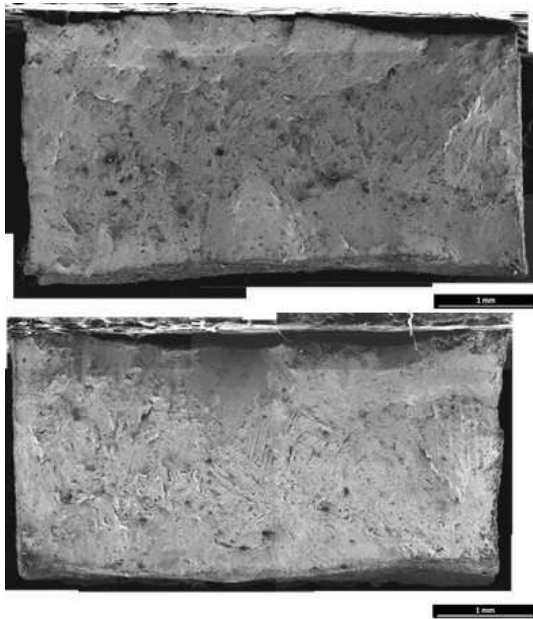
도면5



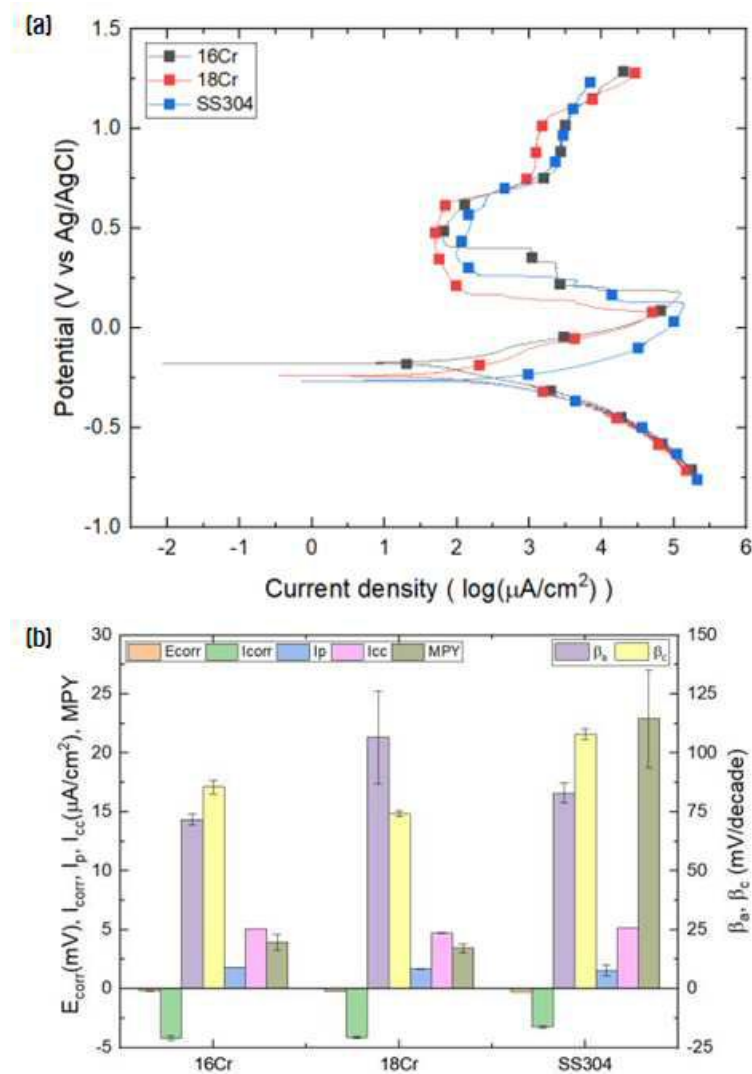
도면6a



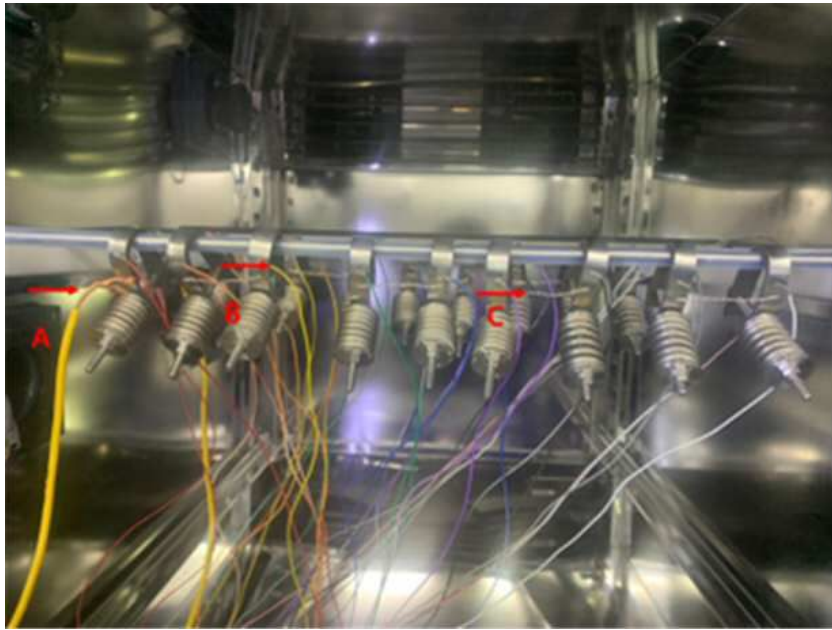
도면6b



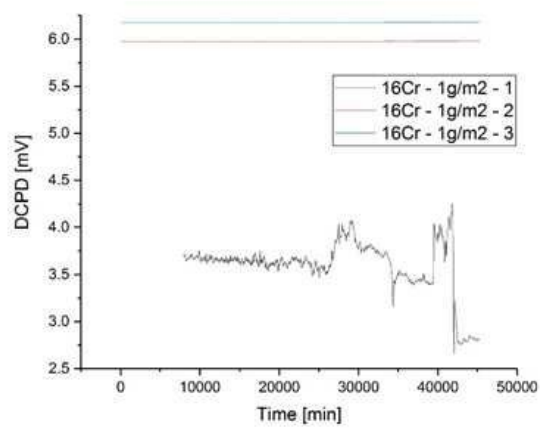
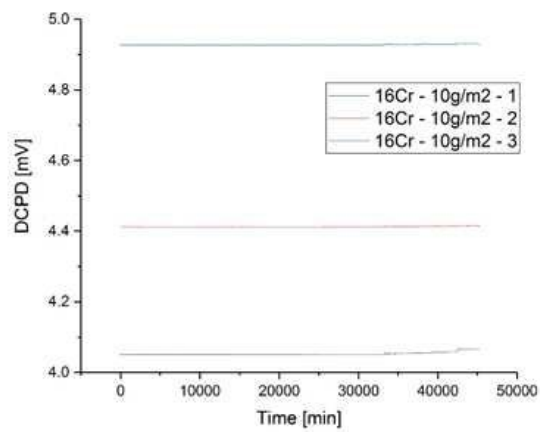
도면7



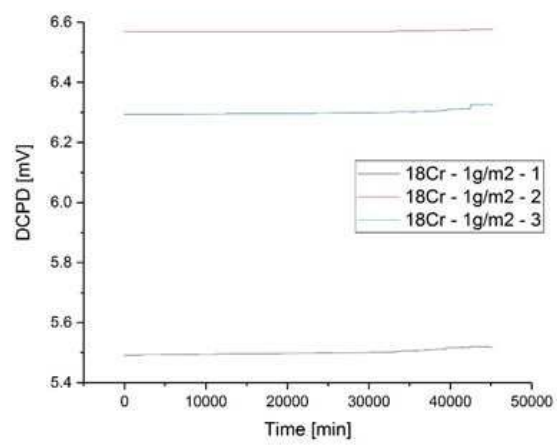
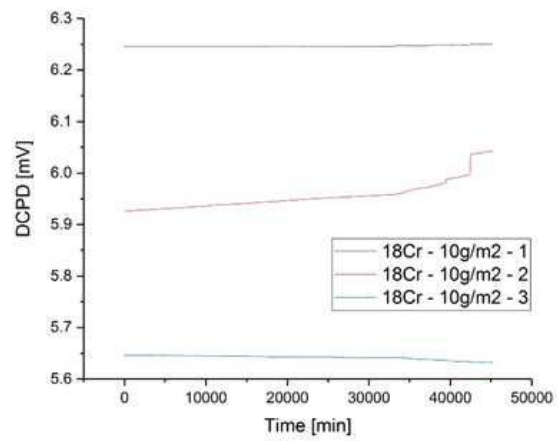
도면8a



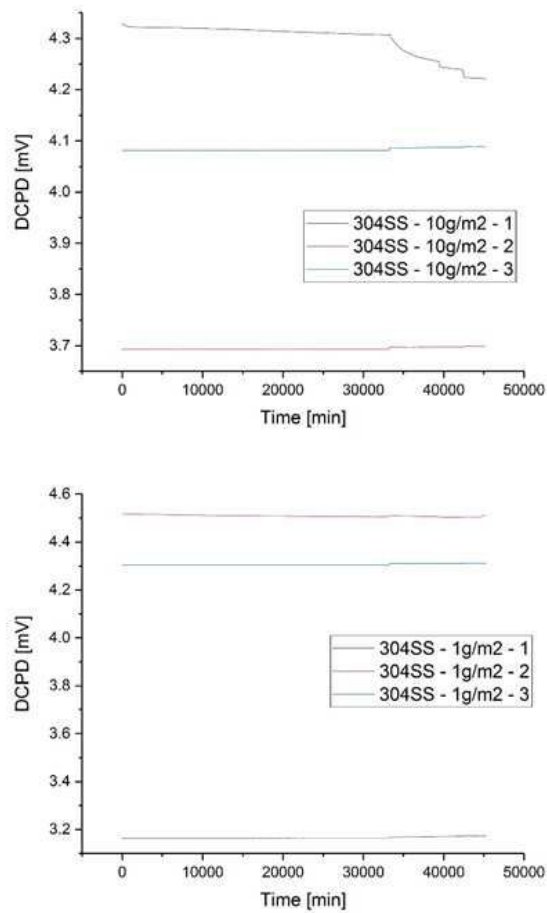
도면8b



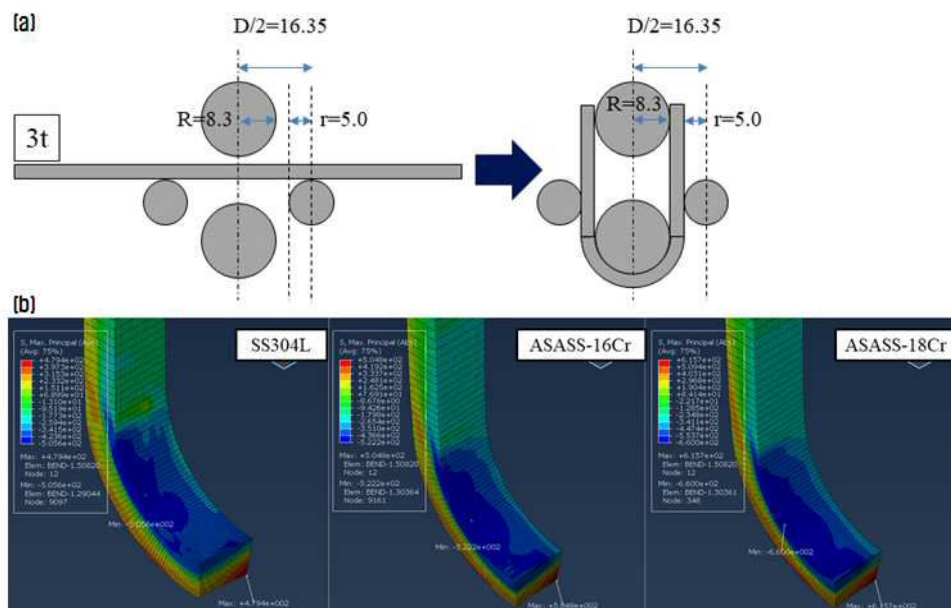
도면8c



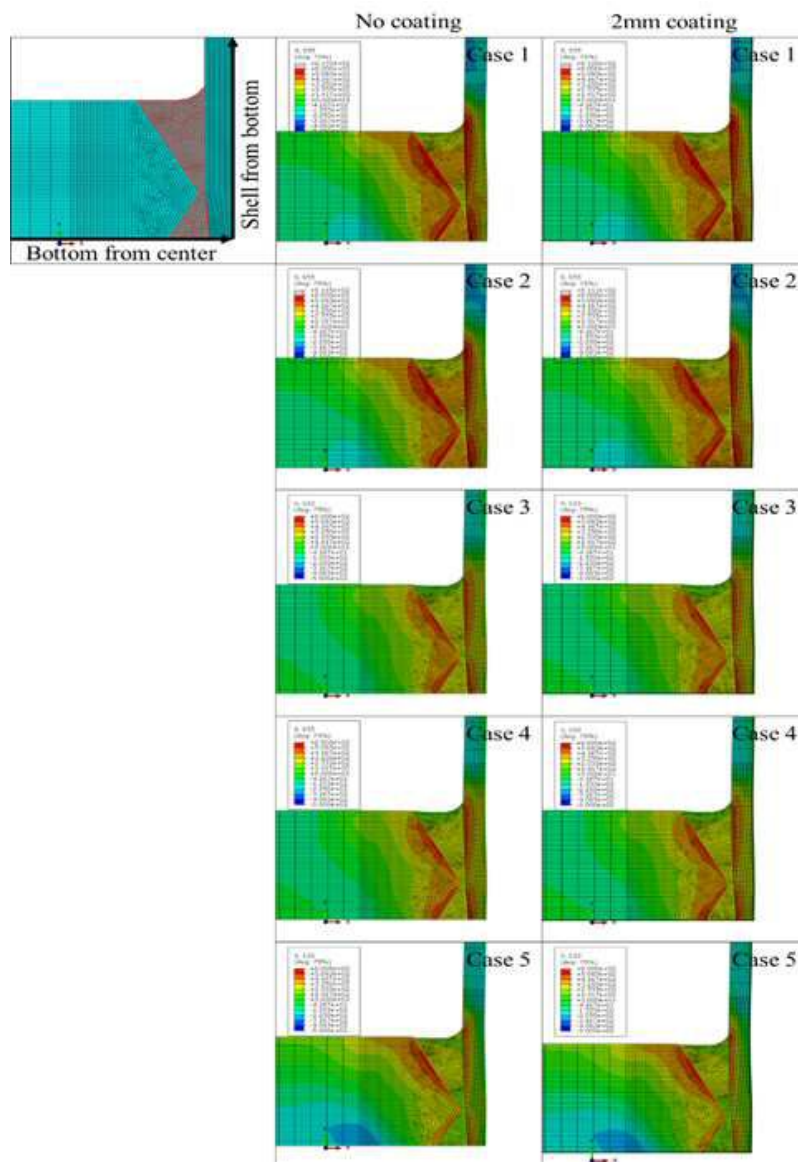
도면8d



도면9



도면10



도면11

