(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2021년07월06일
(11) 등록번호 10-2274578
(24) 등록일자 2021년07월01일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
C22C 30/00 (2006.01) *C22C 14/00* (2006.01)
C22C 19/03 (2006.01)
(52) CPC특허분류
C22C 30/00 (2021.01)
C22C 14/00 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2019-0148153
(22) 출원일자 2019년11월19일
심사청구일자 2019년11월19일
(65) 공개번호 10-2021-0060755
(43) 공개일자 2021년05월27일
(56) 선행기술조사문헌
KR101562669 B1
Materials Transactions, JIM, Vol. 33, No. 4 (1992) pp. 337-345.
Intermetallics, Vol. 16 (2008) pp. 88-95.

(73) 특허권자
세종대학교산학협력단
서울특별시 광진구 능동로 209 (군자동, 세종대학교)
(72) 발명자
홍성환
서울특별시 광진구 동일로 54길 17, 202호
김기범
서울특별시 강남구 언주로130길 30, 동양파라곤아파트 102동 1102호
(74) 대리인
특허법인이상

전체 청구항 수 : 총 4 항 심사관 : 오준철

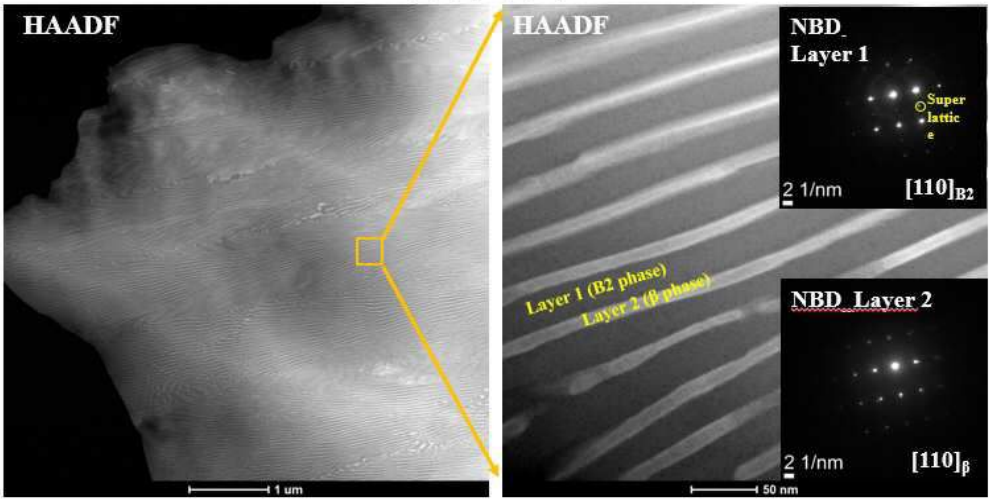
(54) 발명의 명칭 **복합 탄성 변형기구를 통해 초저탄성 계수 및 초고탄성 변형능 특성을 나타내는 초고강도 극미세 공정 합금**

(57) 요 약

복합 탄성 변형기구를 통해 초저탄성 계수 및 초고탄성 변형능 특성을 나타내는 초고강도 극미세 공정 합금이 개시된다. 이는 니켈(Ni) 40 mol%, 타이타늄(Ti) 40 mol%, 니오븀(Nb) (20-x) mol% 및 탄탈륨(Ta) x mol%(10≥x≥0)을 포함하고 1×10^{3} K/s 내지 1×10^{4} K/s의 냉각속도로 급속냉각되어 5nm 이상 50nm 이하의 층상 간격으로 이루어진 나노 층상구조를 가진다. 이러한 공정 합금은 상온에서 항복강도가 2000~2400 MPa이고, 평균 탄성계수가 35~40 GPa이고, 최대 탄성변형 한계가 7% 이상이다.

대 표 도 - 도5

투과전자현미경 미세조직 사진 ($Ni_{40}Ti_{40}Nb_{15}Ta_5$ alloy)



(52) CPC특허분류
C22C 19/03 (2013.01)

명 세 서

청구범위

청구항 1

삭제

청구항 2

니켈(Ni) 40 mol%, 타이타늄(Ti) 40 mol%, 니오븀(Nb) (20-x) mol% 및 탄탈륨(Ta) x mol%(10≥x≥0)을 포함하는 극미세 공정 합금이되,

상기 극미세 공정 합금은 1×10^{3} 내지 1×10^{4} 1K/s의 냉각속도로 급속냉각되어 나노 층상구조를 가지는 것인, 초저탄성 계수 및 초고탄성 변형능 특성을 나타내는 초고강도 극미세 공정 합금.

청구항 3

니켈(Ni) 40 mol%, 타이타늄(Ti) 40 mol%, 니오븀(Nb) (20-x) mol% 및 탄탈륨(Ta) x mol%(10≥x≥0)을 포함하는 극미세 공정 합금이되,

상기 극미세 공정 합금은 B2상 및 BCC상이 5nm 내지 50nm 범위의 층상간격으로 이루어진 나노 층상구조 미세조직 포함하는 것인, 초저탄성 계수 및 초고탄성 변형능 특성을 나타내는 초고강도 극미세 공정 합금.

청구항 4

니켈(Ni) 40 mol%, 타이타늄(Ti) 40 mol%, 니오븀(Nb) (20-x) mol% 및 탄탈륨(Ta) x mol%(10≥x≥0)을 포함하는 극미세 공정 합금이되,

상기 극미세 공정 합금은 변형 시 BCC 상은 선형적인 탄성 변형 거동을 나타내고, B2상은 응력조건에 따라 응력유기 가역 상전이 거동을 통해 비선형적인 탄성 변형 거동을 나타내는 것인, 초저탄성 계수 및 초고탄성 변형능 특성을 나타내는 초고강도 극미세 공정 합금.

청구항 5

니켈(Ni) 40 mol%, 타이타늄(Ti) 40 mol%, 니오븀(Nb) (20-x) mol% 및 탄탈륨(Ta) x mol%(10≥x≥0)을 포함하는 극미세 공정 합금이되,

상온에서 항복강도가 2000~2400 MPa이고, 평균 탄성계수가 35~40 GPa이고, 최대탄성변형 한계가 7% 이상인, 초저탄성 계수 및 초고탄성 변형능 특성을 나타내는 초고강도 극미세 공정 합금.

발명의 설명

기 술 분 야

[0001] 본 발명은 공정 합금 분야에 관한 것으로서, 보다 상세하게는 복합 탄성 변형기구를 통해 초저탄성 계수 및 초고탄성 변형능 특성을 나타내는 초고강도 극미세 공정 합금에 관한 것이다.

배 경 기 술

[0002] 최근 자동차, 스포츠용품, 생체이식 재료 및 휴대용 스마트기기, 플렉시블 디스플레이 등 다양한 분야에서 부품의 초소형화 및 고기능성이 요구되고 있다. 이를 위해서는 기존 구조재료의 물성을 극단적으로 뛰어 넘어 저탄성, 고강도 및 넓은 탄성 변형 한계와 같은 우수한 특성을 동시에 구현하기 위한 합금 소재의 개발이 절실하다.

[0003] 일반적인 금속들은 그 특성상 1% 이하의 매우 낮은 탄성 변형 한계를 나타낸다. 이들 소재로 만든 부품의 경우 낮은 연신율 상태에서 소성 변형이 발생하여 부품의 변형 회복 특성 및 피로 저항성이 현저히 낮아지게 되고, 이로 인해 부품의 소형화에 한계를 나타낸다.

[0004] 이러한 낮은 탄성 변형율로 인한 기술적 한계를 극복하기 위해 초탄성 특성을 나타내는 기능성 합금인 형상기억 합금 및 초탄성 타이타늄 합금에 대한 개발이 이루어지고 있다.

[0005] 형상기억 합금은 Ni, Ti으로 이루어진 금속간화합물인 B2-NiTi상 구조를 갖는 경우, 가해진 응력이 임계 응력에 도달하였을 때 B2 구조에서 B19' 구조로 응력유기 마르텐사이트 변태가 발생하게 되고, 이후 변태 완료 후 하중을 제거하게 되면 다시 B2 구조로 역변태가 발생하면서 가역 상변태 거동에 의한 비선형적 초탄성 특성을 나타낸다. 이외에 Ti, Nb, Zr, Sn, O 등의 원소로 이루어진 초탄성 타이타늄 합금의 경우에도 위의 형상기억 합금과 마찬가지로 가역 상변태 거동에 의한 비선형적 초탄성 특성을 나타낸다.

[0006] 그러나 위의 형상기억 합금 및 초탄성 타이타늄 합금은 초탄성 영역을 포함하여 항복 이전 완전 탄성 변형능이 약 2 ~ 4% 수준의 특성을 나타내고 있다.

[0007] 최근 이러한 합금들의 초탄성 특성을 이용하여 로봇 및 자동차, 항공기에 적용하기 위한 마이크로 액츄에이터 개발 연구가 진행 중이지만, 부품 성능의 향상을 위해 더욱 우수한 특성을 요구하고 있어 이들 요구를 충족시키기 위한 새로운 합금의 개발이 절실하다.

발명의 내용

해결하려는 과제

[0008] 상기와 같은 종래 기술의 문제점을 해결하기 위한 본 발명의 목적은 복합 탄성 변형기구를 통해 초저탄성 계수 및 초고탄성 변형능 특성을 나타내는 초고강도 극미세 공정 합금을 제공하는 것이다.

과제의 해결 수단

[0009] 본 발명은 초저탄성 계수, 초고탄성 변형능을 나타내는 초고강도 극미세 공정 합금을 제공하며, 이는: 니켈(Ni) 40 mol%, 타이타늄(Ti) 40 mol%, 니오븀(Nb) (20-x) mol% 및 탄탈륨(Ta) x mol% (10≥x≥0)을 포함한다.

[0010] 바람직하게는 극미세 공정 합금은 나노 층상구조를 가지며, 이를 위해 주조공정에서 1×10^{3} 내지 1×10^{4} K/s 범위의 냉각속도로 급속냉각된 것일 수 있다.

[0011] 상술한 극미세 공정 합금은 5nm 내지 50nm 범위 두께의 B2상과 BCC상의 나노 층상구조를 갖는다.

[0012] 상기 초저탄성 계수 및 초고탄성 변형능 특성을 나타내는 초고강도 극미세 공정 합금은 변형초기 B2/BCC 층상구조 및 항복 이전 B19'/BCC 층상구조일 때 선형적 탄성거동을 나타내고 응력조건에 따라 B2상 및 B19'상의 응력유기 마르텐사이트 변태에 의한 비선형 초탄성 거동을 나타내는 복합 변형 기구 특성을 구비한다.

[0013] 상기 초저탄성 계수 및 초고탄성 변형능 특성을 나타내는 초고강도 극미세 공정 합금은 상온에서 항복강도가 2000~2400 MPa이고, 평균 탄성계수가 35~40 GPa이며, 최대 탄성변형 한계가 7% 이상인 복합 탄성 변형기구를 통해 초저탄성 계수 및 초고탄성 변형능 특성을 나타낸다.

발명의 효과

[0014] 본 발명에 따르면 초저탄성 계수 및 초고탄성 변형능 특성을 나타내는 초고강도 극미세 공정 합금이 제공된다. 이러한 초저탄성 계수 및 초고탄성 변형능 특성을 나타내는 초고강도 극미세 공정 합금은 변형초기 B2/BCC 층상구조 및 항복 이전 B19'/BCC 층상구조일 때 선형적 탄성거동을 나타내고 응력조건에 따라 B2상 및 B19'상의 응력유기 마르텐사이트 변태에 의한 비선형 초탄성 거동을 나타내는 복합 변형 기구 특성을 구비한다. 이러한 본 발명에 의한 초고탄성 및 초고강도 극미세 공정 합금은 로봇, 휴대용 스마트기기, 자동차 및 항공우주 산업분야 뿐만 아니라 생체 의료용, 생활용품 분야 등에서 응용이 가능하며, 특히 높은 탄성 변형능이 요구되는 선형운동 엑츄에이터 소재로의 응용이 가능할 것으로 예상된다.

도면의 간단한 설명

[0015] 도 1은 본 발명에 채용되는 초저탄성 계수 및 초고탄성 변형능 특성을 나타내는 초고강도 극미세 공정 합금이

가지는 복합 탄성 변형을 설명하기 위한 도면이다.

도 2는 본 발명의 초저탄성 계수 및 초고탄성 변형능 특성을 나타내는 초고강도 극미세 공정 합금의 실시예와 비교예를 비교하여 도시한 XRD 그래프이다.

도 3은 본 발명의 초저탄성 계수 및 초고탄성 변형능 특성을 나타내는 초고강도 극미세 공정 합금에 대한 시차 주사 열량 분석을 이용한 상변태 온도 분석을 나타낸다.

도 4는 본 발명의 초저탄성 계수 및 초고탄성 변형능 특성을 나타내는 초고강도 극미세 공정 합금에 대한 주사 현미경 사진이다.

도 5 및 6은 본 발명의 초저탄성 계수 및 초고탄성 변형능 특성을 나타내는 초고강도 극미세 공정 합금에 대한 투과 전자현미경 관찰 미세조직 및 B2상 및 β(BCC)상의 조성을 나타낸다.

도 7은 본 발명의 초저탄성 계수 및 초고탄성 변형능 특성을 나타내는 초고강도 극미세 공정 합금의 실시예와 비교예에 대한 응력-변형율 선도를 나타낸다.

도 8a 및 8b는 본 발명에 따른 초저탄성 계수 및 초고탄성 변형능 특성을 나타내는 초고강도 극미세 공정 합금의 시편에 대한 하중 조건에 변화에 따른 loading-unloading cycle test 결과 및 실제 변형 전, 최대하중 조건, 변형 후 사진이다.

도 9는 본 발명에 따른 초저탄성 계수 및 초고탄성 변형능 특성을 나타내는 초고강도 극미세 공정 합금 시편에 대한 In-situ Synchrotron High Energy XRD이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0016] 이하 첨부한 도면을 참조하여 본 발명의 실시예를 상세하게 설명한다. 본 발명의 실시예를 설명함에 있어서, 관련된 공지기능 혹은 구성에 대한 구체적인 설명이 본 발명의 요지를 불필요하게 흐릴 수 있다고 판단되는 경우 그 상세한 설명을 생략한다.

[0017] 본 발명의 바람직한 실시예에 따른 초고강도 극미세 공정 합금은 Ni, Ti, Nb, Ta 등의 원소를 포함하며, 5nm 내지 50nm 범위 두께의 B2상과 BCC상이 나노 층상구조를 갖는 미세조직으로 구성되면서 복합 탄성 변형기구를 통해 초저탄성 계수 및 초고탄성 변형능 특성을 나타낸다. 상술한 바와 같은 나노 층상구조를 가지기 위해 본 발명에 따른 초저탄성 계수 및 초고탄성 변형능 특성을 나타내는 초고강도 극미세 공정 합금은 1×10^{3} 내지 1×10^{4} K/s의 냉각속도로 급속냉각된다.

[0018] 도 1은 본 발명에 채용되는 복합 탄성 변형을 설명하기 위한 도면이다. 복합 탄성 변형은 도 1에 보여지는 바와 같이 초기 상태에서 외력이 발생하였을 때 1차 선형 탄성 변형이 발생되고, 1차 선형 탄성 변형 이후 상구조 변화에 따른 비선형 탄성 거동을 나타내며, 상구조 변화 완료 후 넓은 범위의 2차 선형 탄성 변형을 나타내는 탄성 거동을 말한다.

[0019] 본 발명의 초저탄성 계수 및 초고탄성 변형능 특성을 나타내는 초고강도 나노 층상구조 극미세 공정 합금은 니켈(Ni) 40 mol%, 타이타늄(Ti) 40 mol%, 니오븀(Nb) (20-x) mol% 및 탄탈륨(Ta) x mol%을 포함하고 다음과 같은 화학식으로 표현할 수 있다.

[0020] [화학식 1]

[0021] $Ni_{40}Ti_{40}Nb_{20-x}Ta_{x}$ ($10\geq x\geq 0$)

[0022] 상기의 화학식에서 Ni과 Ti는 1:1 비율을 유지할 때 나노 층상구조 내에 B2상의 구현이 가능하게 된다. 또한, Ni 및 Ti 가 1:1 비율을 유지하면서 각각 40 mol%을 유지하고, Nb+Ta의 합이 20mol%를 유지할 때 소재 전체에 걸쳐서 나노 층상구조가 잘 유지된다. 이 비율이 달라지게 되면 나노 층상조직 이외에 마이크로 미터 크기의 수지상이 형성될 수 있고, 이 경우 마이크로 미터 크기의 수지상에 의해 탄성 변형율 한계에 도달하기 전에 우선적인 소성변형이 발생하게 되어 최종적으로는 탄성 변형율 한계가 감소 및 잔류 변형이 증가하게 된다.

[0023] 도 2는 본 발명의 초저탄성 계수 및 초고탄성 변형능 특성을 나타내는 초고강도 극미세 공정 합금의 실시예와 비교예를 대비하여 도시한 XRD 그래프이다. 도 2는 상기 화학식의 x의 조성에 따른 상분석이다. B2상은 상대적으로 Ni- 및 Ti-rich이고, β(BCC)상은 Nb- 및 Ta-rich이다.

[0024] 도 3은 본 발명의 초저탄성 계수 및 초고탄성 변형능 특성을 나타내는 초고강도 극미세 공정 합금에 대한 시차

주사 열량 분석을 이용한 상변태 온도 분석을 나타낸다. 도 3은 상온에서 비선형 탄성 변형기구를 갖는 B2상이 안정한지 B19`상이 안정한지를 나타내는 자료로서, 초기 상태에서 B2상이 안정해야 비선형 탄성 기구를 나타낼 수 있다.

[0025] 도 4는 본 발명의 초저탄성 계수 및 초고탄성 변형능 특성을 나타내는 초고강도 극미세 공정 합금에 대한 주사 현미경 사진이다. 도면에서 x의 조성이 0~10이 본 발명의 실시예이고, 15와 20이 비교예이다. 사진에서 알 수 있는 바와 같이 비교예(x=15, 20)에서 층상구조의 간격이 급격히 증가하는 것을 알 수 있다.

[0026] 도 5는 본 발명의 초저탄성 계수 및 초고탄성 변형능 특성을 나타내는 초고강도 극미세 공정 합금 $Ni_{40}Ti_{40}Nb_{20-x}Ta_x$ ($10 \geq x \geq 0$)에 대한 투과 전자현미경 관찰 미세조직을 나타낸다. 도면에서 좌측은 저배율 HAADF image이고, 우측은 고배율 HADDF image이다. 우측의 고배율 이미지에서 어두운 층은 B2상을 나타내고, 밝은 층은 β상을 나타내며, 우측의 상단 및 하단은 nano-beam 회절도이다.

[0027] 도 6은 본 발명의 초저탄성 계수 및 초고탄성 변형능 특성을 나타내는 초고강도 극미세 공정 합금에 대한 투과 전자현미경 사진이다. 도 6을 통해 B2/BCC 조성을 분석하면, B2상은 상대적으로 Ni- 및 Ti-rich이고, β(BCC)상은 Nb- 및 Ta-rich이다.

[0028] 도 7은 본 발명의 초저탄성 계수 및 초고탄성 변형능 특성을 나타내는 초고강도 극미세 공정 합금의 실시예와 비교예에 대한 응력-변형율 선도를 나타낸다. 화학식 1에서의 x가 본 발명의 실시예와 같이 0~10%일 경우 복합 탄성 변형에 의한 초고탄성, 초고강도 특성을 나타낸다. 반면에, 비교예인 10%보다 큰 경우(예컨대, x= 15, 20%)일 때는 선형적인 탄성 변형을 나타내면서 초고탄성 특성을 잃고 초고강도 특성만을 나타낸다(본 발명의 실시예는 최대 강도: 2400MPa, 최소강도: 0 MPa, 탄성 변형율: 7.6 %).

[0029] 이와 같이 본 발명의 초저탄성 계수, 초고탄성 변형능을 나타내는 초고강도 극미세 공정 합금($Ni_{40}Ti_{40}Nb_{20-x}Ta_x$)은 상온에서 항복강도가 2000~2400 MPa이고, 평균 탄성계수가 35~40 GPa이며, 최대 탄성변형 한계가 7% 이상인 특성을 가진다. 이러한 공정 합금은 공업용 구조재료 및 생체 소재로 바람직하게 사용될 수 있다.

[0030] 도 8a 및 8b는 본 발명에 따른 초저탄성 계수 및 초고탄성 변형능 특성을 나타내는 초고강도 극미세 공정 합금의 시편에 대한 하중 조건에 변화에 따른 loading-unloading cycle test 결과 및 실제 변형 전, 최대하중 조건, 변형 후 사진이다. 도 8a 및 8b에서 알 수 있는 바와 같이, 본 발명에 따른 시편은 저하중 조건에서 최대하중 조건까지 반복적인 cycle test를 진행 시에도 잔류 변형 없이 복합탄성 변형기구를 유지하면서 우수한 탄성 변형 특성을 나타낸다.

[0031] 도 9는 본 발명에 따른 초저탄성 계수 및 초고탄성 변형능 특성을 나타내는 초고강도 극미세 공정 합금의 시편에 대한 In-situ Synchrotron High Energy XRD이다. 도면은 BCC상은 loading-unloading 시 선형적인 탄성 격자 구조 변화를 나타내고, B2상은 loading-unloading 시 응력-유기 가역 상전이 반응(B2↔B19')에 의한 비선형 초탄성 변형을 나타냄을 보여준다.

[0032] 본 발명의 초저탄성 계수 및 초고탄성 변형능 특성을 나타내는 초고강도 극미세 공정 합금($Ni_{40}Ti_{40}Nb_{20-x}Ta_x$($10 \geq x \geq 0$))은 변형초기 B2/BCC 층상구조 및 항복 이전 B19'/BCC 층상구조일 때 선형적 탄성거동을 나타내고, 응력조건에 따라 B2상 및 B19'상의 응력유기 마르텐사이트 변태에 의한 비선형 초탄성 거동을 나타내는 복합 변형기구를 구비하는 것을 특징으로 한다.

[0033] 이러한 본 발명에 의한 초고탄성 및 초고강도 극미세 공정 합금은 로봇, 휴대용 스마트기기, 자동차 및 항공우주 산업분야뿐만 아니라 생체 의료용, 생활용품 분야 등에서 응용이 가능하며, 특히 높은 탄성 변형능이 요구되는 선형운동 엑츄에이터 소재로의 응용이 가능할 것으로 예상된다.

[0034] 본 발명의 소재는 기존의 단상 형상기억합금, 타이타늄 합금의 탄성 변형율 (2~4%) 대비 현저히 향상된 7% 이상의 높은 탄성 변형율을 나타내고, 이는 기존 초탄성 합금 대비 획기적이라 할 것이다.

[0035] 본 발명을 통해 개발된 합금은 7% 이상의 높은 탄성 변형율을 갖기 위해 주 미세조직이 B2상과 BCC상이 5nm 내지 50nm 범위 두께의 층상구조로 이루어진 복합상 나노 층상구조를 가진다. 이로써 수십~수백 마이크로 미터 크기의 B2상이 주 미세조직으로 이루어진 기존의 합금보다 높은 탄성 변형율을 나타낸다.

[0036] 통상의 마이크로 미터 크기의 B2상이 주 미세조직으로 이루어진 기존 합금의 경우 응력유기 마르텐사이트 변태 후 최종 파단 강도가 1000 MPa 이하인데 반해, 본 발명을 통해 개발된 합금은 약 2000 ~ 2400 MPa의 파단강도를

나타내며 이는 5nm 내지 50nm 범위 두께의 B2상 및 BCC상이 나노 층상구조로 이루어진 극미세 조직을 형성함에 따른 초고강도화의 구현이다.

[0037] 또한, 통상의 마이크로 미터 크기의 B2상이 주 미세조직으로 이루어진 기존합금의 경우 응력유기 마르텐사이트 변태(비선형 탄성 거동) 이후 낮은 파단강도로 인해 선형 탄성 변형능이 매우 제한되지만, 본 발명을 통해 개발된 합금은 응력유기 마르텐사이트 변해 이후 초고강도 특성을 통해 기존 합금에서 구현되지 않는 매우 넓은 범위의 선형 탄성 거동을 나타냄에 따라 복합 탄성 거동 효과를 나타내고, 이를 통해 기존 소재 대비 매우 향상된 탄성 변형 범위를 갖는 것이라 할 수 있다.

[0038] 또한, 위에서도 설명한 바와 같이 Ta의 함량이 0 ~ 10% 범위내에서 조성 제어를 통해 도 3의 cycle-loading-unloading test에서의 마르텐사이트 변태 개시 응력의 제어가 가능하고(비선형 탄성 거동 제어), Ta의 함량이 10%를 초과하는 경우 비선형 탄성 거동 특성을 잃게 되어 복합 탄성변형 거동이 아닌 선형 탄성 거동만을 나타낼 수 있다.

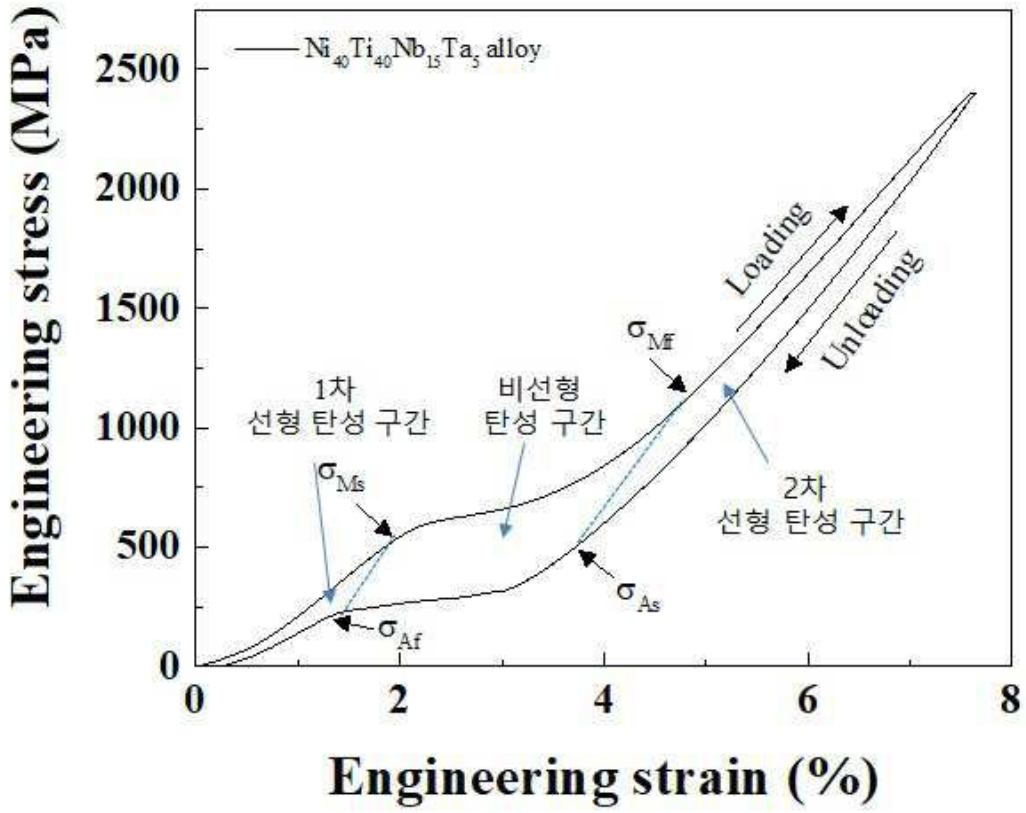
[0039] 또한 NiTi-Nb-Ta(M) 합금에서 M은 Ti 및 Nb과 고용관계를 갖으며 Nb 및 Ta을 일정부분 대체할 수 있는 용질 원소로서 Pd, Pt, Au, Hf 및 Cr으로 이루어진 군에서 선택되는 금속 원소가 채용될 수도 있다.

[0040] NiTi-Nb-Ta(M) 합금의 복합 탄성기구 중 선형 및 비선형 탄성 변형율을 7% 이상 확보하기 위해서는 5nm 내지 50nm 범위의 층상 간격으로 이루어진 나노 층상구조의 미세조직이 형성되도록 공정 조건을 적용해야 하고, 이를 위한 주조 공정은 급속응고법을 통해 1×10^{3} 내지 1×10^{4}K/s 범위의 높은 냉각속도 조건을 적용한다. 냉각속도가 위 조건 보다 낮으면 상술한 범위를 벗어나면 층상 간격의 형성이 어렵고, 더 높으면 비대한 간격이 얻어진다.

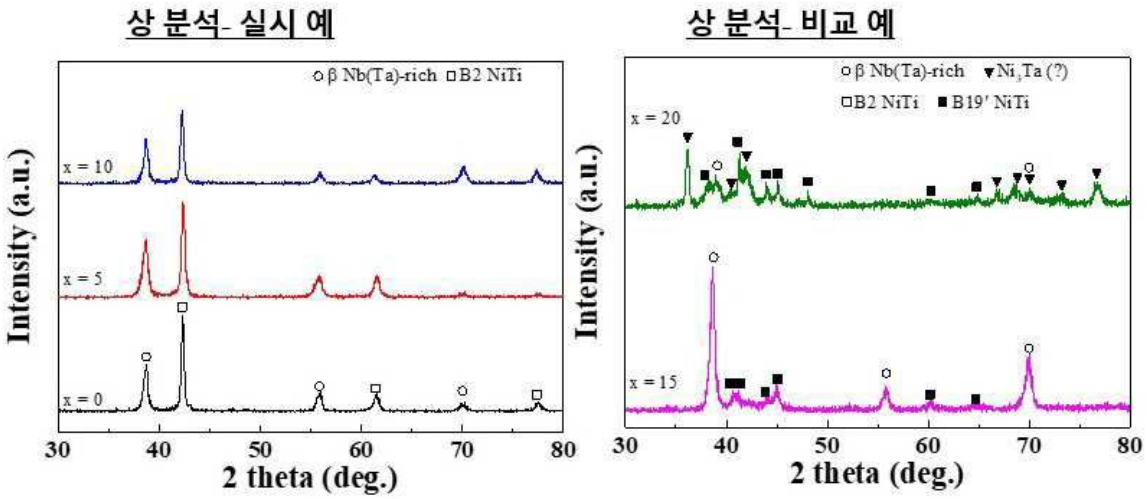
[0041] 이상, 본 발명의 상세한 설명에서는 구체적인 실시예에 관해서 설명하였으나, 본 발명의 범위에서 벗어나지 않는 한도 내에서 여러 가지 변형이 가능함은 당해 분야에서 통상의 지식을 가진 자에게 있어서 자명하다 할 것이다.

도면

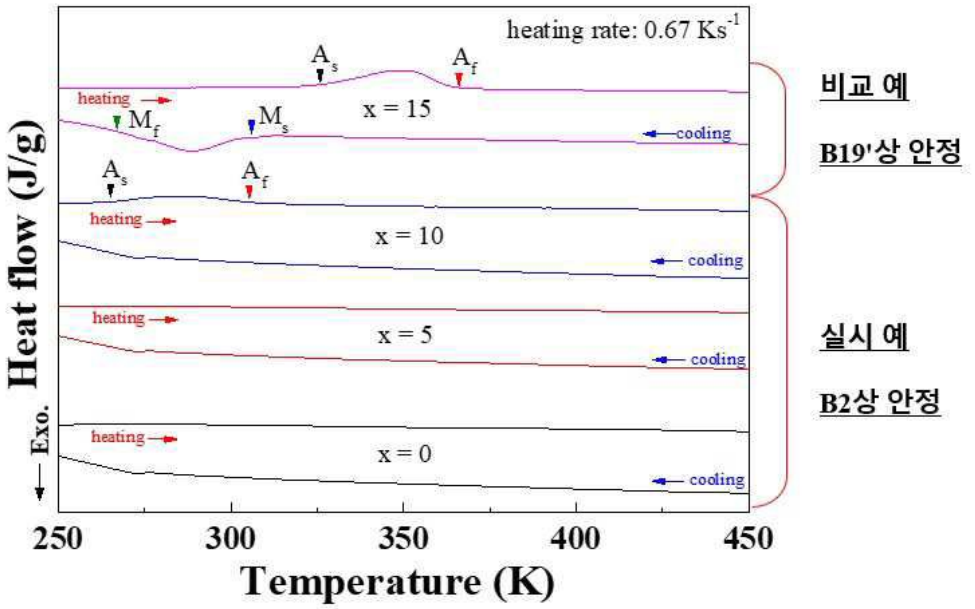
도면1


Ni40Ti40Nb15Ta5 alloy
Engineering stress (MPa)
Engineering strain (%)
Loading
Unloading
σMf
σMs
σAs
σAf
1차
선형 탄성 구간
비선형
탄성 구간
2차
선형 탄성 구간

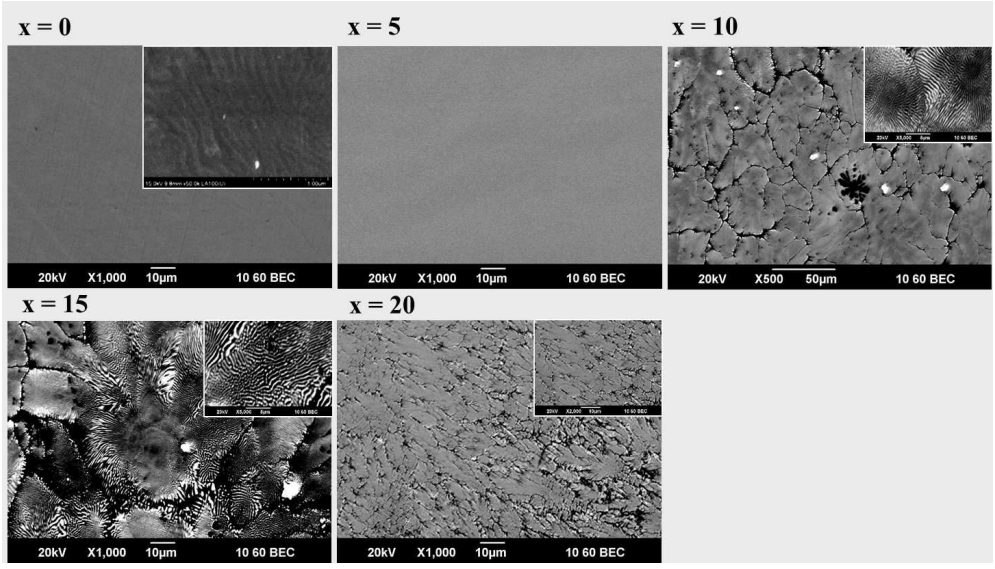
도면2


상 분석- 실시 예
상 분석- 비교 예
β Nb(Ta)-rich
B2 NiTi
Ni3Ta (?)
B19' NiTi
x = 10
x = 5
x = 0
x = 20
x = 15
Intensity (a.u.)
2 theta (deg.)

도면3

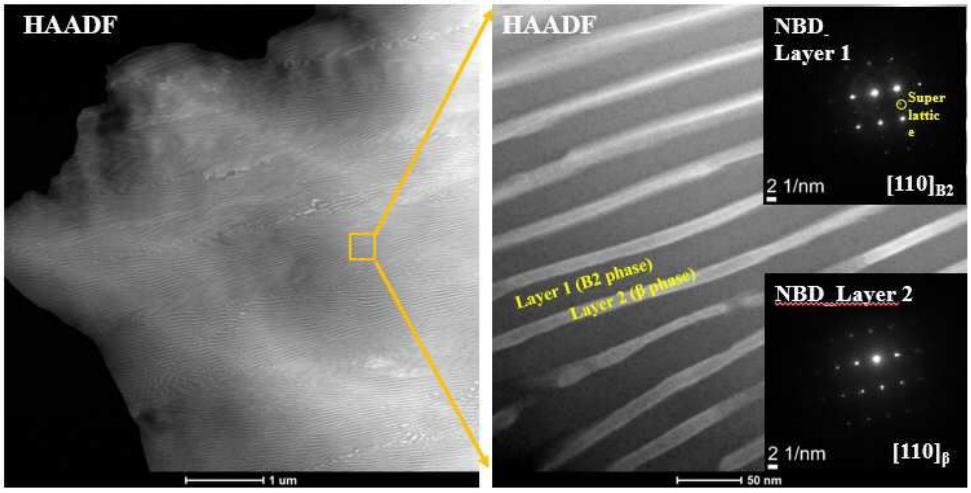

heating rate: 0.67 Ks-1
As
Af
Ms
Mf
heating
cooling
x = 15
x = 10
x = 5
x = 0
Heat flow (J/g)
Exo.
250
300
350
400
450
Temperature (K)
비교 예
B19'상 안정
실시 예
B2상 안정

도면4

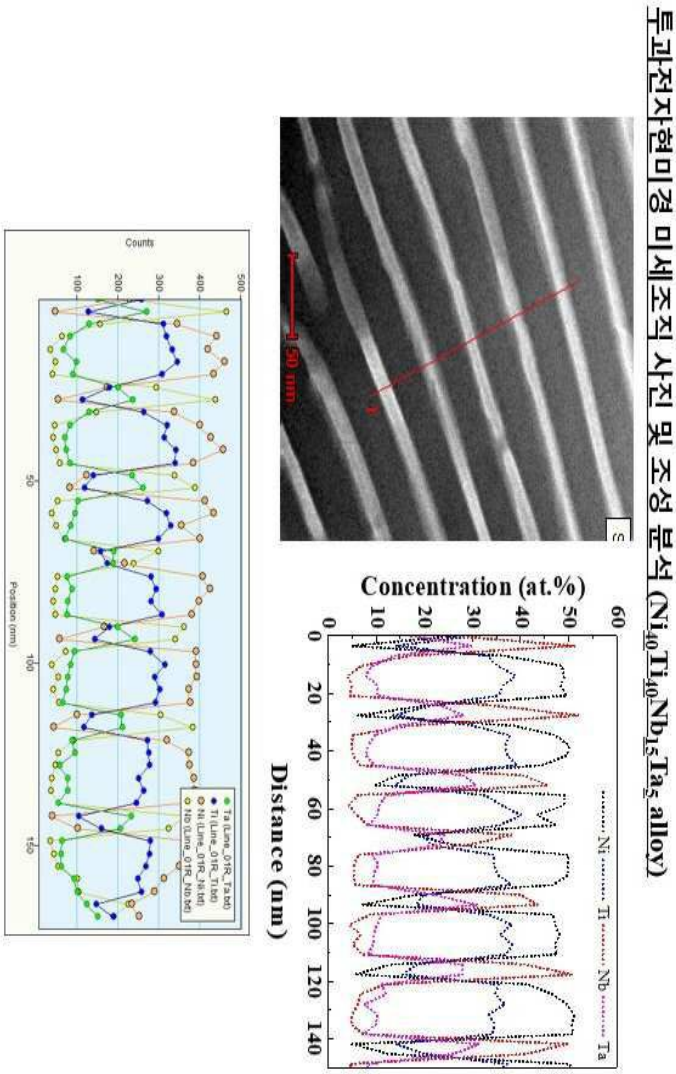

x = 0
x = 5
x = 10
x = 15
x = 20
20kV X1,000 10μm 10 60 BEC
20kV X500 50μm 10 60 BEC

도면5

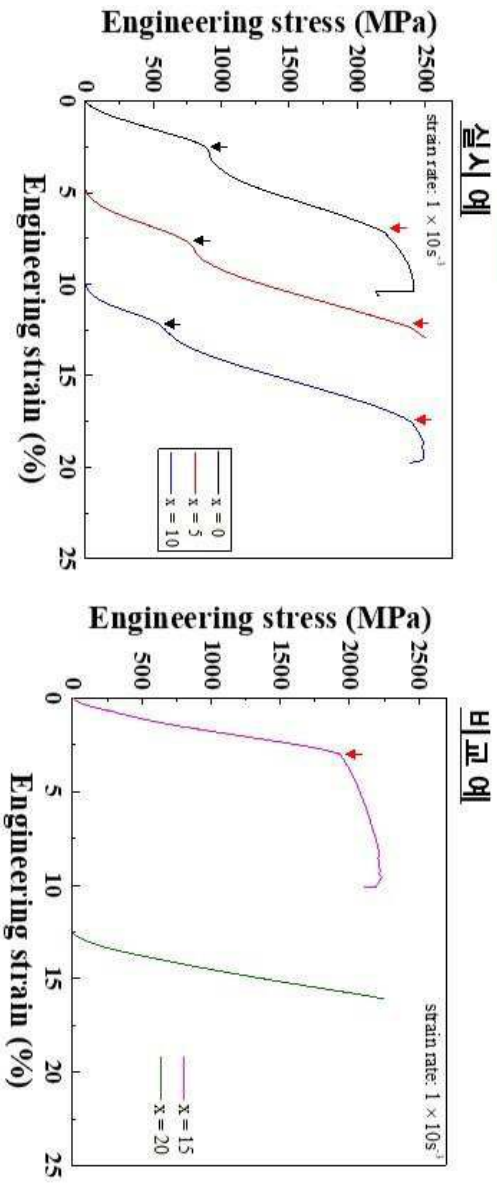
투과전자현미경 미세조직 사진 ($Ni_{40}Ti_{40}Nb_{15}Ta_5$ alloy)



도면6

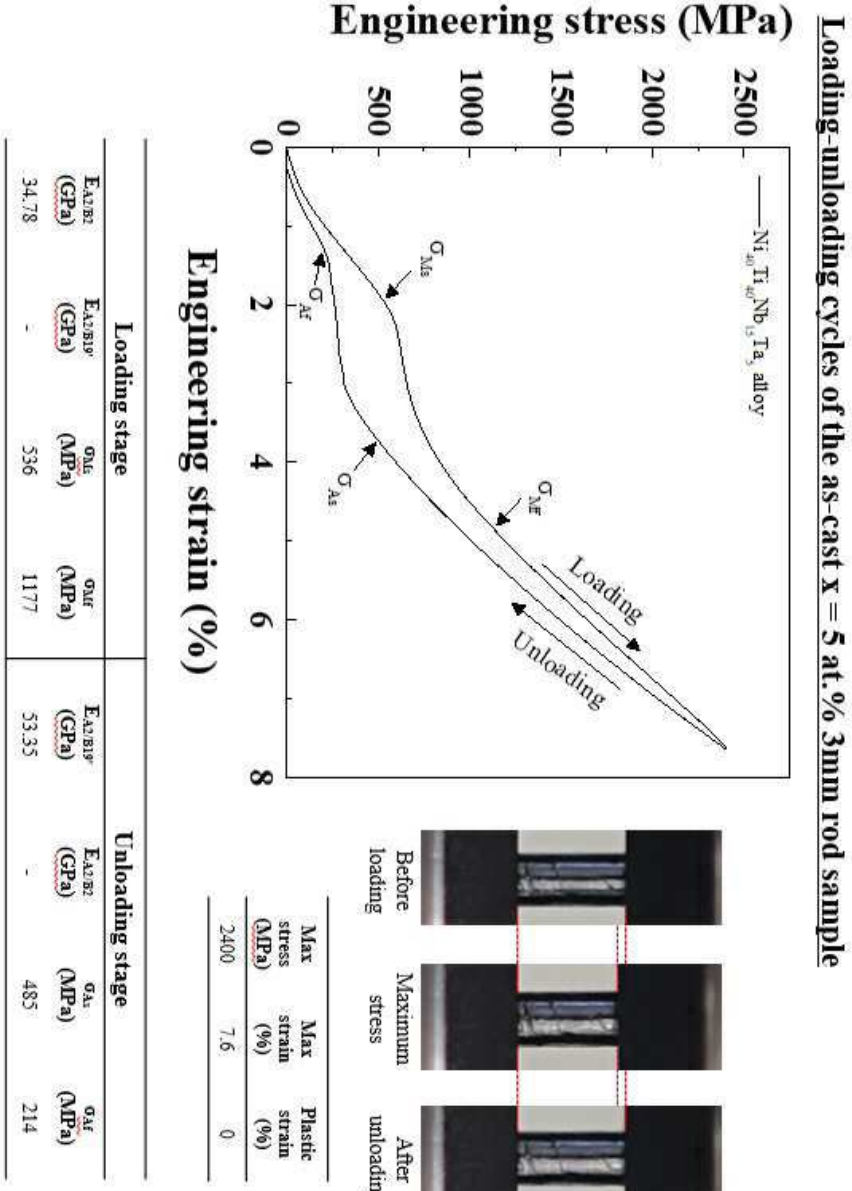

투과전자현미경 미세조직 사진 및 조성 분석 ($Ni_{40}Ti_{40}Nb_{15}Ta_5$ alloy)
150 nm
Concentration (at.%)
Distance (nm)
Ni
Ti
Nb
Ta
Counts
Position (mm)

도면7



실 시 예				Unloading stage			
Alloy No.	ε_e (%)	σ_y (MPa)	ε_p (%)	Alloy No.	ε_e (%)	σ_y (MPa)	ε_p (%)
x = 0	7.16	2221	3.5	x = 15	2.8	1931	5.4
x = 5	7.6	2430	0.3	x = 20	2.6	2240	0
x = 10	7.5	2420	2.2	-	-	-	-

도면8a

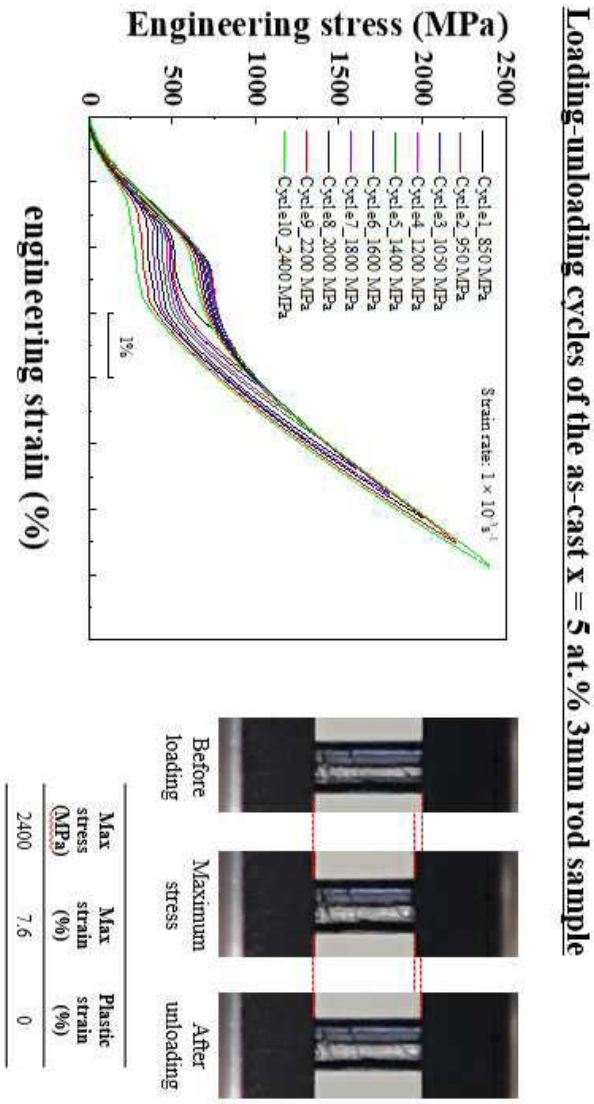


Max stress (MPa)	Max strain (%)	Plastic strain (%)
2400	7.6	0

Loading stage			
$E_{A2/B2}$ (GPa)	$E_{A2/B19'}$ (GPa)	σ_{Ms} (MPa)	σ_{Mf} (MPa)
34.78	-	536	1177

Unloading stage			
$E_{A2/B19'}$ (GPa)	$E_{A2/B2}$ (GPa)	σ_{As} (MPa)	σ_{Af} (MPa)
53.35	-	485	214

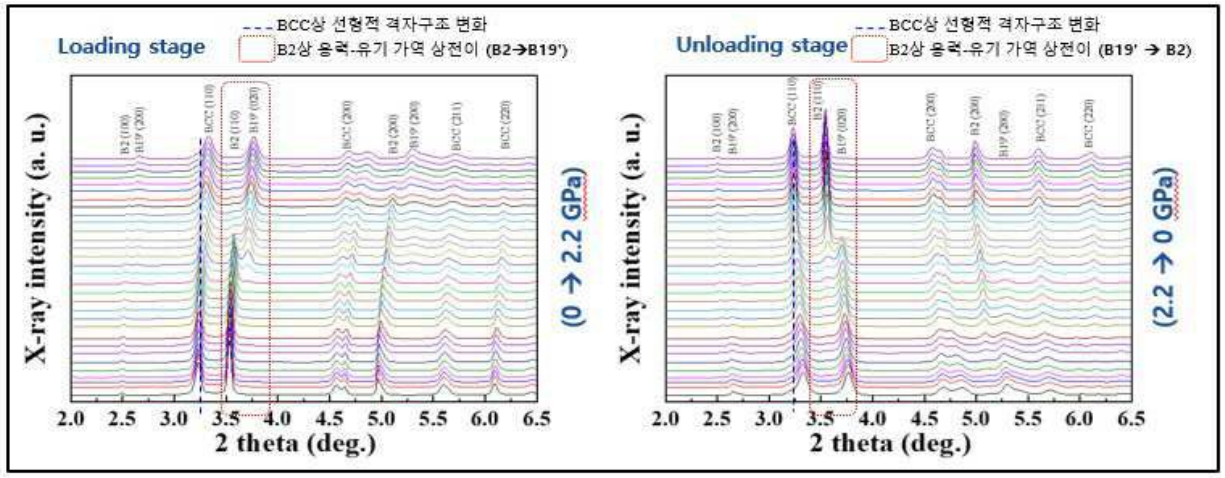
도면8b



Max stress (MPa)	Max strain (%)	Plastic strain (%)
2400	7.6	0

Loading-unloading cycles of the as-cast x = 5 at.% 3mm rod sample

In-situ Synchrotron High Energy XRD



β (BCC)상: loading-unloading 시 선형적인 탄성 격자구조변화

B2 상: loading-unloading 시 응력-유기 가역 상전이 반응 (B2←→B19')에 의한 비선형 초탄성 변형

도면9