



**(19) 대한민국특허청(KR)**  
**(12) 등록특허공보(B1)**

(45) 공고일자 2021년02월24일  
(11) 등록번호 10-2220219  
(24) 등록일자 2021년02월19일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)  
C22C 30/00 (2006.01) C22C 1/02 (2006.01)  
C22C 27/02 (2006.01) C22F 1/00 (2006.01)  
(52) CPC특허분류  
C22C 30/00 (2021.01)  
C22C 1/02 (2013.01)  
(21) 출원번호 10-2019-0011024  
(22) 출원일자 2019년01월29일  
심사청구일자 2019년01월29일  
(65) 공개번호 10-2020-0093826  
(43) 공개일자 2020년08월06일  
(56) 선행기술조사문헌  
JP2002173732 A\*  
KR1020170136197 A\*  
\*는 심사관에 의하여 인용된 문헌

(73) 특허권자  
서울대학교산학협력단  
서울특별시 관악구 관악로 1 (신림동)  
(72) 발명자  
박은수  
경기도 수원시 팔달구 수성로232번길 7, 104동 403호  
오현석  
서울특별시 동작구 동작대로29길 119, 101동 140 4호  
김상준  
대구광역시 북구 성북로 70 침산화성파크드림 1002동 602호  
(74) 대리인  
강문호

전체 청구항 수 : 총 6 항

심사관 : 배근태

**(54) 발명의 명칭 BCC 2상 복합구조를 가지는 내열 고엔트로피 초합금 및 그 제조 방법**

**(57) 요약**

본 발명은 BCC 2상 복합구조를 가지는 내열 고엔트로피 초합금 및 그 제조 방법에 관한 것으로, (A2 기지: 연성이 우수한 불규칙상) - (B2 석출물: 강도가 우수한 규칙상) 구성의 미세구조를 내화금속으로 구성된 BCC 고엔트로피 합금에 구현하여 BCC A2 상과 B2 상 복합구조를 가지는 내열 고엔트로피 초합금 및 그 제조 방법에 관한 것이다. 본 발명에서는 원소간의 혼합 엔탈피 관계를 이용해 두 BCC 상의 분리를 유발하고, 고엔트로피 효과를 통해 BCC 상 이외의 금속간 화합물의 형성을 억제하여 A2 상과 B2 상만으로 구성된 BCC 2상 복합구조를 가지는 내열 고엔트로피 초합금을 개발하였으며, 조성 및 공정의 정밀제어를 통해 연성이 우수한 불규칙 A2 상 기지에 강도가 우수한 규칙 B2 상을 석출물로 형성하여 우수한 연성 및 강도를 동시에 확보할 수 있다. 특히, 기지와 유사한 결정구조를 가지는 석출 B2 상을 나노 크기로 제어하는 경우 Ni기 초합금에서와 같이 우수한 크리프 특성을 나타낸다.

(52) CPC특허분류

*C22C 27/02* (2013.01)

*C22F 1/002* (2013.01)

*C22C 2200/00* (2013.01)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	0417-20180035
부처명	산업통상자원부
과제관리(전문)기관명	서울대학교 신소재공동연구소
연구사업명	산업기술혁신사업
연구과제명	입방형 나노구조 고온내열 고엔트로피 초합금 개발
기 여 율	1/1
과제수행기관명	서울대학교
연구기간	2017.07.01 ~ 2019.12.31

공지예외적용 : 있음

---

## 명세서

### 청구범위

#### 청구항 1

전체 합금 조성이 하기 (화학식)과 같이 표현되며;

전체 구성에서 상기 Ti의 함량이 적어도 15 at.% 이상이고,

전체 구성에서 상기 Zr과 Hf의 함량의 합이 적어도 15 at.% 이상이고,

전체 구성에서 상기 Mo, W 함량의 합이 10 at.% 이고,

열처리 과정에서 용해도 겹 내부에서 상분리 메커니즘을 통해 BCC 상분리 변태가 일어나는 것을 특징으로 하는,

BCC 2상 복합구조를 가지는 내열 고엔트로피 초합금.

(화학식)



(단,  $0 \leq a \leq 1$ ,  $0 \leq b \leq 1$ ,  $0 \leq c \leq 1$ ,  $0 \leq d \leq 1$ ,  $0 \leq e \leq 1$ ,  $0 \leq a+b+c \leq 1$ ,  $0 \leq d+e \leq 1$ ,  $30 \leq x \leq 50$ ,  $10 \leq y \leq 20$  at.%)

#### 청구항 2

청구항 1에 있어서,

상기 내열 고엔트로피 초합금은 A2 상 (불규칙 BCC) 기지에 B2 상 (규칙 BCC)이 석출상으로 분포하며;

상기 석출상은 0.01 내지 10  $\mu\text{m}$ 의 평균 입자 크기를 가지는 것을 특징으로 하는 BCC 2상 복합구조를 가지는 내열 고엔트로피 초합금.

#### 청구항 3

청구항 1에 있어서,

(Cr, Si)으로 구성된 원소군에서 적어도 1 종 이상의 원소를 5 at.% 이하 첨가하여 내산화성을 향상시킨 것을 특징으로 하는, BCC 2상 복합구조를 가지는 내열 고엔트로피 초합금.

#### 청구항 4

전체 합금의 모원소를 하기 (화학식)과 같이 준비하되,

전체 구성에서 상기 Ti의 함량이 적어도 15 at.% 이상이고,

전체 구성에서 상기 Zr과 Hf의 함량의 합이 적어도 15 at.% 이상이고,

전체 구성에서 상기 Mo, W 함량의 합이 10 at.% 이하로 준비하는 단계;

상기 원료물질을 용해하여 합금을 제조하는 단계; 및

제조된 합금을 A2와 B2 2상이 열역학적 평형을 이루는 1000 $^{\circ}\text{C}$  내지 1300 $^{\circ}\text{C}$  범주의 열처리 온도에서 1 시간 내지 96 시간 동안 에이징 (Aging) 열처리함으로써 용해도 겹 내부에서 상분리 메커니즘을 통해 BCC 상분리 변태가 일어나는 단계;

를 통해 제조되는 것을 특징으로 하는 BCC 2상 복합구조를 가지는 내열 고엔트로피 초합금의 제조 방법

(화학식)



(단,  $0 \leq a \leq 1$ ,  $0 \leq b \leq 1$ ,  $0 \leq c \leq 1$ ,  $0 \leq d \leq 1$ ,  $0 \leq e \leq 1$ ,  $0 \leq a+b+c \leq 1$ ,  $0 \leq d+e \leq 1$ ,  $30 \leq x \leq 50$ ,  $10 \leq y \leq 20$  at.%)

**청구항 5**

청구항 4에 있어서,

상기 원료물질에 (Cr, Si)으로 구성된 원소군에서 적어도 1 종 이상의 원소를 5 at.% 이하 첨가하여 내산화성을 향상시킨 것을 특징으로 하는, BCC 2상 복합구조를 가지는 내열 고엔트로피 초합금 제조 방법.

**청구항 6**

청구항 4에 있어서,

상기 원료물질을 용해하여 합금을 제조하는 단계 후 단일 BCC 고용체가 안정한 1300℃ 이상 1600℃ 이하의 온도 범위에서 1 시간 내지 48 시간 동안 용체화 처리 (Solution treatment) 후 급냉하는 단계;를 추가적으로 포함하는 것을 특징으로 하는, BCC 2상 복합구조를 가지는 내열 고엔트로피 초합금 제조 방법.

**발명의 설명**

**기술 분야**

[0001] 본 발명은 BCC 2상 복합구조를 가지는 내열 고엔트로피 초합금 및 그 제조 방법에 관한 것이다.

**배경 기술**

[0003] 일반적으로 가스 터빈 블레이드와 같이 저온-고온 사이클 및 고압력의 복합 극한환경에서 사용되는 재료는 고온에서 우수한 기계적 특성을 요한다. 이러한 극한환경 소재로써 대표적으로 Ni기 초합금 (Superalloy)이 고온에서의 항복강도가 뛰어난 특성으로 인하여 주로 사용되며, 이러한 Ni기 초합금은 복합 FCC 구조를 가져 연성이 뛰어난  $\gamma$  상을 기지로 하여 강도가 뛰어난  $Ni_3(Al, Cr)$   $\gamma'$  규칙상을 석출물로 가지고 있어 우수한 기계적 성질을 가지는 것을 특징으로 한다. 하지만, Ni기 초합금의 상대적으로 낮은 녹는점으로 인하여 800℃ 이상의 온도에서 연화가 일어나 기계적 성질이 급격히 열화되어 사용에 제한이 있으며, 1000℃ 이상의 초고온에서 안정적으로 활용 가능한 고온 구조재료 개발이 필요한 실정이다.

[0004] 최근 4 족 내지 6족의 전이금속으로 구성되고 체심입방 결정구조를 가지는 고엔트로피 합금은 1000℃ 이상의 고온에서 기존에 사용되고 있는 초합금보다 우수한 고온 기계적 물성을 갖는 것으로 알려지면서 다양한 연구가 진행되고 있다. 하지만 Nb, Mo, Ta, W와 같이 내화금속은 고온 환경에서 산화에 취약하며, 이들로 구성된 고엔트로피 합금 또한 열악한 산화 저항성을 띄게 된다. 금속 소재의 산화저항성을 향상시키는 방법으로는 Al, Cr, Si와 같은 원소를 합금화하는 것이 효과적이거나, Nb, Mo, Ta, W 등의 내화금속으로 구성된 합금에 Al, Cr, Si을 합금화할 경우 금속간화합물이 형성되어 소재의 연성이 크게 감소하여 취성이 발생한다는 문제점이 있다. 특히, 내화금속 원소로 구성된 고엔트로피 합금은 BCC 격자 내부에 원소들이 불규칙적으로 분포한 A2 구조를 가지는데, 산화 저항성 향상을 위해 Al을 첨가할 경우, BCC 내부에 두 개의 아격자 (sublattice)를 가지는 규칙상인 B2 구조로의 전이가 일어나며, 이러한 B2 구조를 가질 경우에는 강도는 증가하나 취성이 나타나 상온에서 구조재료 활용이 어려운 것으로 알려져 있다.

**선행기술문헌**

**비특허문헌**

- [0006] (비특허문헌 0001) Acta Materialia (2016, Vol. 122, pp. 448-511)
- (비특허문헌 0002) JOURNAL OF MATERIALS SCIENCE (2003, Vol. 38, pp. 3995-4002)

**발명의 내용**

**해결하려는 과제**

[0007] 본 발명은 전술한 종래 기술의 문제점을 해결하기 위한 것으로서, Ni기 초합금이 나타내는 (기지: 연성이 우수한 불규칙상) - (석출물: 강도가 우수한 규칙상) 구성의 복합 미세구조를 내화금속으로 구성된 BCC 고엔트로피 합금에 구현하여 A2 상과 B2 구조로 구성된 BCC 2상 복합구조를 가지는 내열 고엔트로피 초합금 및 그 제조 방법을 제공하는데 그 목적이 있다.

**과제의 해결 수단**

[0009] 상술한 과제를 해결하기 위하여 본 발명에 의한 BCC 2상 복합구조를 가지는 내열 고엔트로피 초합금은 (Nb,Ta,Mo,W)<sub>x</sub>Al<sub>y</sub>(Ti,Zr,Hf)<sub>100-x-y</sub> (단, 30 ≤ x ≤ 50, 10 ≤ y ≤ 20 at.%)의 조성식으로 표현되며, 상기 Ti의 함량이 적어도 15 at.% 이상이고, 상기 Zr과 Hf의 함량의 합이 적어도 15 at.% 이상이고, 상기 Mo, W 함량의 합이 10 at.% 이하인 것을 특징으로 한다.

[0010] 본 발명에 의한 BCC 2상 복합구조를 가지는 상기 내열 고엔트로피 초합금은 A2 상 (불규칙 BCC) 기지에 B2 상 (규칙 BCC)이 석출상으로 분포하며, 석출상은 0.01 내지 10 μm의 평균 입자 크기를 가지는 것을 특징으로 한다.

[0011] 또한, 본 발명에 의한 BCC 2상 나노구조를 가지는 고엔트로피 내열 초합금은 구성원소 대비 산소와의 친화도가 현저히 큰 (Cr, Si)으로 구성된 원소군에서 적어도 1 종 이상의 원소를 5 at.% 이하 첨가하여 내산화성을 더욱 향상시키는 것이 가능하다.

[0012]

**발명의 효과**

[0013] 본 발명에 의한 BCC 2상 복합구조를 가지는 내열 고엔트로피 초합금은, 연성이 우수한 불규칙 A2상을 기지로 하여 강도가 우수한 규칙 B2 상을 석출물로 형성하여 우수한 연성 및 강도를 동시에 확보할 수 있다. 특히, 규칙 B2 석출물을 나노스케일로 제어하는 경우 더 우수한 크리프 특성을 나타내는 효과가 있다.

**도면의 간단한 설명**

[0015] 도 1은 본 발명의 합금을 구성하는 원소들간 2원 혼합 엔탈피를 나타내는 도식이다.  
 도 2는 본 발명의 합금 시스템 중 Ti<sub>50</sub>Zr<sub>50</sub>, Nb, Al를 축으로 하는 의사 3원 합금계의 1200℃에서 등온 상평형도 (Isothermal section)를 나타낸 것이다.  
 도 3은 본 발명의 실시예 1 내지 실시예 8에 의한 내열 고엔트로피 초합금의 시차주사현미경 (SEM) 이미지이다.  
 도 4는 본 발명의 (a) 비교예 4와 (b) 비교예 5에 의한 합금의 시차주사현미경 (SEM) 이미지이다.  
 도 5는 본 발명의 실시예 1과 비교예 3의 상온 인장시험을 통해 얻어진 응력-변형률 곡선을 보여준다.

**발명을 실시하기 위한 구체적인 내용**

[0016] 아래에서는 첨부한 도면을 참고로 하여 본 발명의 실시예에 대해 본 발명이 속하는 기술 분야에서 통상의 지식을 가진 자가 용이하게 실시할 수 있도록 상세히 설명한다. 본 발명은 여러 가지 상이한 형태로 구현될 수 있으며 여기에서 설명하는 실시예에 한정되지 않는다. 도면에서 본 발명을 명확하게 설명하기 위해서 설명과 관계없는 부분은 생략하였으며, 명세서 전체를 통하여 동일 또는 유사한 구성요소에 대해서는 동일한 도면부호가 사용되었다. 또한 널리 알려져 있는 공지기술의 경우 그 구체적인 설명은 생략한다.

[0018] 4족 내지 6족 전이금속 원소가 Al과 결합하여 형성하는 B2 상은 Ti-Al-Nb, Ti-Al-Ta 등의 3원계 합금시스템에 존재함이 보고되었으며, 이러한 3원계 합금시스템은 Ti, Al 그리고 (Nb, Ta)으로 구성된 원소군에서 선

택된 하나의 원소로 구성된다. 하지만, 상기 3원계 합금시스템에서 B2 상은 고온에서 존재하는 A2 상의 규칙-불규칙 변태를 통해 발생하기 때문에, A2 상이 모두 B2로 전이되어 A2 상과 B2 상이 공존하는 미세구조를 형성할 수 없을 뿐만 아니라, 변태 속도가 매우 빨라 켈칭 공정을 통해서도 변태를 억제할 수 없다. (JOURNAL OF MATERIALS SCIENCE 38 (2003) 3995-4002.) 또한, 상기 3원계 합금에서 B2가 형성되는 조성 영역 근처에서 Ti-Al 금속간 화합물과 (Nb, Ta)-Al 금속간 화합물이 안정상으로 존재하여 합금의 제조과정에서 금속간화합물이 형성되어 소재의 취성을 유발하게 된다. (Journal of Phase Equilibria and Diffusion 39.5 (2018) 549-561.) 이렇듯 현재까지 보고된 결과를 요약하면, 상기 3원계 합금시스템에서는 A2 상과 B2 상이 평형을 이루는 2상 영역이 상평형도에 존재하지 않기 때문에 Ni 계 초합금과 같은 (기지: 연성이 우수한 불규칙상)-(석출물: 강도가 우수한 규칙상) 구성의 미세구조를 구현할 수 없다.

[0019] 본 연구에서는 상기한 Ti-Al-(Nb, Ta) 3원계 합금시스템에서, 원소간 양의 혼합 엔탈피 특성을 이용하여 A2 상과 B2 상의 분리를 유발하고, 고엔트로피 합금 설계법을 이용하여 A2 상과 B2 상 이외의 금속간 화합물의 형성을 억제하여, BCC 결정구조를 가진 A2 상과 B2 상이 2상 평형을 이루는 합금 시스템을 개발하였다. 특히, 개발된 A2 상과 B2 상의 2상 평형영역을 정밀 제어함으로써 (A2 기지: 연성이 우수한 불규칙상) - (B2 석출물: 강도가 우수한 규칙상) 관계의 독특한 BCC 2상 복합구조를 가지는 내열 고엔트로피 초합금을 개발하였다.

[0020] 도 1은 본 발명의 합금을 구성하는 원소들간 2원 혼합 엔탈피를 나타내는 도식이다. Zr은 Nb와 양의 혼합 엔탈피를 가지고 있어, (+4 kJ/mol) 서로 분리되려는 물리학적 관계를 가진다. 이는 Zr-Nb 이원 상태도에서 miscibility gap으로 나타나며, Zr-Nb 합금은 1000 °C 이하의 온도에서 두 BCC (A2)로의 분리가 일어날 수 있다. 이러한 특성을 지닌 Zr을 Ti-Al-Nb 합금계의 Ti와 치환할 경우, Zr 함량이 많은 BCC 상과, Nb 함량이 많은 BCC 상으로의 분리가 일어난다. 이 때, 합금의 구성 원소 중 Al 과 가장 강한 결합력을 가지고 있는 Zr이 다량 포함된 BCC 상의 Al 함량이 증가하게 되고, Al 함량이 많은 Zr-rich의 BCC 상은 규칙 B2상을 구성하고, Al 함량이 적은 Nb-rich의 BCC 상은 불규칙 A2 상을 구성하여 2상 분리를 유발할 수 있다.

[0021] 도 2는 본 발명의 합금 시스템 중 Ti<sub>50</sub>Zr<sub>50</sub>, Nb, Al를 축으로 하는 의사 3원 합금계 (Pseudo ternary alloy system)의 1200°C에서 등온 상평형도 (Isothermal section)를 나타낸 것이다. 이는 Ti-Al-Nb 3원계 합금 시스템에서 Ti의 절반의 몰분율을 Zr으로 치환한 4원계 합금시스템의 의사 3원계 상평형도이며, Thermo-Calc 프로그램의 TCHEA 3 database를 활용하여 작도하였다. 도면을 통해 본 발명에 의한 2상 구조의 내열 고엔트로피 초합금은 A2 와 B2 상을 제외한 금속간 화합물의 형성을 막을 수 있음을 확인할 수 있다. 이러한 독특한 상 안정성은 다성분계로 구성된 고엔트로피 합금의 주요 특성인 고엔트로피 효과이며, 첩언하면 고엔트로피 효과는 하기 수식으로 표현되는 혼합 엔트로피가 증가함 의해 깃스 에너지가 안정화되어 다양한 원소들을 고용할 수 있는 BCC와 FCC 및 HCP와 같은 단순한 결정구조의 상이 안정화되는 효과를 말한다.

[0022] 
$$\Delta S_{conf} = R \sum_i x_i \ln x_i$$

[0023] (여기서, R은 기체상수이고,  $x_i$ 는 원소 i의 첨가 원자분율을 의미한다.)

[0024] 부연하면, 본 발명에서 A2 상과 B2 상 이외의 금속간 화합물은 모두 Al과 결합하여 형성되는 금속간 화합물이며, 이들은 특정 원소인 Al과 선택적으로 결합하여 화합물을 형성한다.(ZrAl, Zr<sub>2</sub>Al, Nb<sub>3</sub>Al) 이에 반해 A2 상과 B2 상과 같은 BCC 상은 4족 내지 6족 전이금속 원소를 모두 고용할 수 있으며, 고엔트로피 효과에 의해 본 발명의 고엔트로피 합금에서는 B2 외의 금속간화합물의 형성이 억제된다.

[0025] 따라서, 도 2를 통해 Nb<sub>x</sub>Al<sub>y</sub>(Ti<sub>50</sub>Zr<sub>50</sub>)<sub>100-x-y</sub> (30 ≤ x ≤ 50, 10 ≤ y ≤ 20 at.%) 조성 영역에서 본 발명의 BCC 2상 구조를 가지는 내열 고엔트로피 초합금을 제조할 수 있는 가능성이 있음을 확인할 수 있다. 하지만, 도 2에서 수행한 상평형 시뮬레이션은 BCC 격자의 규칙 격자상과 불규칙 격자상 정보를 포함하지 않기 때문에, A2 상과 B2 상의 2상 평형 영역은 나타나지 않는다.

[0026] Al은 B2 상을 구성하는 주요 원소로 작용하여 10 at.% 미만으로 구성할 경우 합금이 B2 상을 형성하지 않고 불규칙 A2 상을 유지하며, 20 at.%을 초과하여 구성할 경우 합금이 B2 상만으로 구성되거나, A2 상과 B2 상 외의 다른 금속간 화합물이 석출되기 때문에, 10 at.% 이상 20 at.% 이하로 포함하는 것이 바람직하다.

[0027] Ta은 Zr, Hf과 양의 혼합 엔탈피를 가지고, (Ta-Zr: +3 kJ/mol, Ta-Hf: +3 kJ/mol) Nb와 전을 고용체

를 형성하기 때문에, 상기에서의 Nb와 동일한 효과를 낼 수 있으며, 상기 합금에서 Nb를 대체할 수 있다.

[0028] Hf은 Zr과 매우 유사한 물리학적 특성을 가지며, Nb 및 Ta와 양의 혼합 엔탈피를 가지기 때문에, (Hf-Nb: +4 kJ/mol, Hf-Ta: +3 kJ/mol) Zr를 대체할 수 있다.

[0029] Mo와 W은 Zr, Hf과 음의 혼합 엔탈피를 가지기 때문에, (Mo-Zr: -6 kJ/mol, Mo-Hf: -4 kJ/mol, W-Zr: -9 kJ/mol, Mo-Hf: -6 kJ/mol) Nb와 동일한 효과를 낼 수 없으나, Nb, Ta와 전용 고용체를 형성하고 합금의 강도를 향상시키는 원소로 알려져 있어, Nb를 10 at.% 이하의 함량으로 치환하여 합금의 강도를 증가시키는 효과가 있다. 단, 10 at.%을 초과하여 포함할 경우 다른 금속간 화합물의 형성을 유발하기 때문에 10 at.% 이하로 구성하는 것이 바람직하다.

[0030] 상기에서 설명한 바와 같이, 고엔트로피 효과를 통해 금속간 화합물의 석출을 억제하기 위해서, 상기 Ti의 함량이 적어도 15 at.% 이상이고, 상기 Zr과 Hf의 함량의 합이 적어도 15 at.% 이상으로 구성하는 것이 바람직하다.

[0031] 또한, 본 발명에 의한 BCC 2상 나노구조를 가지는 고엔트로피 내열 초합금은 구성원소 대비 산소와의 친화도가 현저히 큰 (Cr, Si)으로 구성된 원소군에서 적어도 1 종 이상의 원소를 전체 조성 대비 5 at.% 이하 첨가하여 내산화성을 더욱 향상시키는 것이 가능하다. 단, (Cr, Si)의 함량이 5 at.%를 초과하는 경우에는 추가적인 금속간 화합물을 형성하게 되어 바람직하지 않다.

[0032] 본 발명에 따른 BCC 2상 복합구조를 가지는 내열 고엔트로피 초합금을 제조하는 방법은, 상기 원료물질을  $(Ti, Zr, Hf)_{100-x-y}(Nb, Ta, Mo, W)_xAl_y$  (단,  $30 \leq x \leq 50$ ,  $10 \leq y \leq 20$  at.%)의 몰분율로 준비하는 단계, 상기 원료물질을 용해하여 합금을 제조하는 단계 및 후속 열처리 공정을 통해 미세구조를 제어하는 단계를 포함한다.

[0033] 본 발명에서 후속 열처리 단계는 크게 두 가지 방법이 가능하며, 첫 번째로 A2와 B2 2상이 열역학적 평형을 이루는 1000℃ 내지 1300℃ 범주의 열처리 온도에서 1 시간 내지 96 시간 동안 에이징 (Aging) 열처리를 수행하여 기지에 석출된 규칙 B2 상의 형태, 크기 및 분율을 제어하는 것이 가능하다.

[0034] 또한, 두 번째로 상기 원료물질을 용해하여 합금을 제조하는 단계 후 단일 BCC 고용체가 안정한 1300℃ 이상 1600℃ 이하의 온도 범위에서 1 시간 내지 48 시간 동안 용체화 처리 (Solution treatment) 후 급냉하는 단계를 추가적으로 포함할 수 있다. 이러한 열처리 단계를 추가함에 따라 균질화된 A2 단일상을 얻을 수 있으며, 상기 첫 번째 열처리 단계를 순차적으로 진행함을 통해 B2 석출상의 형태, 크기 및 분율을 더 효과적 정밀하게 제어할 수 있다.

[0035] 이로써, 본 발명에 따른 BCC 2상 복합구조를 가지는 내열 고엔트로피 초합금의 미세구조를 특성 맞춤 형으로 제어할 수 있다.

[0037] 표 1은 본 발명의 실시예 1 내지 8 및 비교예 1 내지 5의 원자비 (at.%)로 표현한 합금의 구성과 공정에 따른 미세구조를 나타낸다.

표 1

[0038]

	Ti	Zr	Hf	Nb	Mo	Ta	W	Al	Heat tretment	Microstructure
실시예1	25	25		30				20	As-cast ingot	B2 in A2
실시예2	15	15		50				20	As-cast ingot	B2 in A2
실시예3	27.5	27.5		30				15	As-cast ingot	B2 in A2
실시예4	25	12.5	12.5	20	10			20	As-cast ingot	B2 in A2
실시예5	25	12.5	12.5	20	5	5		20	As-cast ingot	B2 in A2
실시예6	25	12.5	12.5	20	5	2.5	2.5	20	As-cast ingot	B2 in A2
실시예7	30	15	15	20	10			10	1200℃ 72h Quenching	B2 in A2
실시예8	20		20	30	10			20	1200℃ 72h Quenching after 1400℃ 12h	B2 in A2
비교예1	25	25	25	25					1300℃ 6h Quenching	A2
비교예2	25	25		25				25	As-cast ingot	B2

비교예3	50			29				21	As-cast ingot	B2 + Orthorhombic
비교예4	20	10	10	20	20			20	1500°C 6h Quenching	A2 + compounds
비교예5	10	10		60				20	As-cast ingot	A2 + compounds

[0039] 도 3은 실시예 1 내지 실시예 8의 조성으로 제조된 BCC 2상 복합구조를 가지는 고엔트로피 내열 초합금의 미세 구조이다. 도면에서 알 수 있는 바와 같이 본 발명의 실시예 1 내지 8과 같이 합금을 구성하여 제조할 경우 A2 상의 기지 내에 B2 상이 나노 석출물 형태로 분포한 미세구조를 구성할 수 있다.

[0040] 하지만, 비교예 1과 같이 Al을 포함하지 않을 경우, 불규칙 BCC인 A2 상만으로 합금이 구성되며, 비교예2과 같이 Al을 25 at.% 수준으로 구성하면 A2 상이 안정화되지 못해 B2 단일상 합금이 형성된다. 또한, 비교예 3와 같이 Zr 혹은 Hf을 포함하지 않을 경우, B2 상 뿐만 아니라 orthorhombic 구조를 가지는 Ti-Al-Nb 화합물이 형성 된다.

[0041] 도 4는 비교예 4 및 비교예 5 조성으로 제조된 합금의 미세구조이다. 비교예 4와 같이 Mo를 10 at.% 이상 포함 할 경우, 적어도 1 종류 이상의 공정 반응 (Eutectic reaction)에 의한 공정구조가 나타나며, 비교예 5와 같이 Nb가 50 at.% 이상 포함될 경우, Nb-Al 금속간 화합물이 판상 형태로 석출된다.

[0042] 도 5는 본 발명의 실시예 1과 비교예 3에 의한 합금의 상온 압축 실험 결과이다. 도면에서 알 수 있는 바와 같이, 비교예 3과 같이 규칙상인 B2 상만을 포함할 경우 극단적인 취성이 발생하며, 본 발명의 BCC 2상 복합 구조를 가지는 내열 고엔트로피 초합금과 같이 A2 상의 기지 내에 B2 상이 석출물 형태로 분포할 경우, 1400 MPa 이상의 높은 강도를 유지하면서도 동시에 30% 이상의 매우 높은 연신율을 확보할 수 있다.

[0044] 이상 본 발명을 바람직한 실시예를 통하여 설명하였는데, 상술한 실시예는 본 발명의 기술적 사상을 예 시적으로 설명한 것에 불과하며, 본 발명의 기술적 사상을 벗어나지 않는 범위 내에서 다양한 변화가 가능함은 이 분야에서 통상의 지식을 가진 자라면 이해할 수 있을 것이다. 따라서 본 발명의 보호범위는 특정 실시예가 아니라 특허청구범위에 기재된 사항에 의해 해석되어야 하며, 그와 동등한 범위 내에 있는 모든 기술적 사상도 본 발명의 권리범위에 포함되는 것으로 해석되어야 할 것이다.

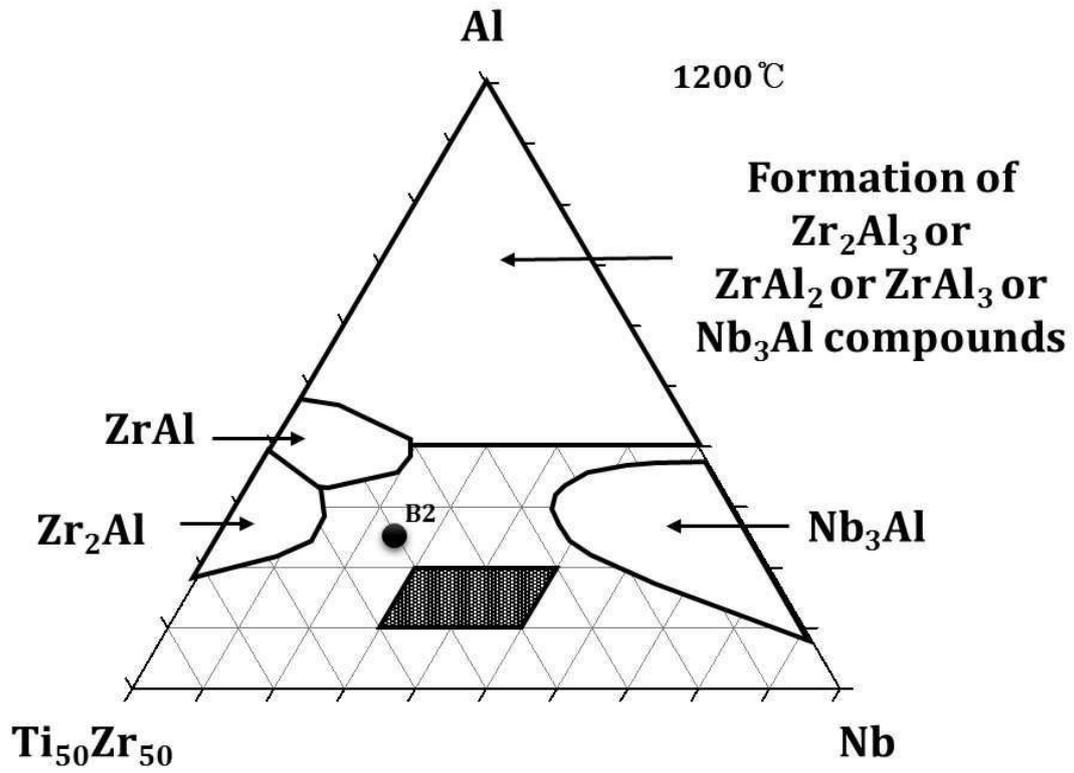
도면

도면1

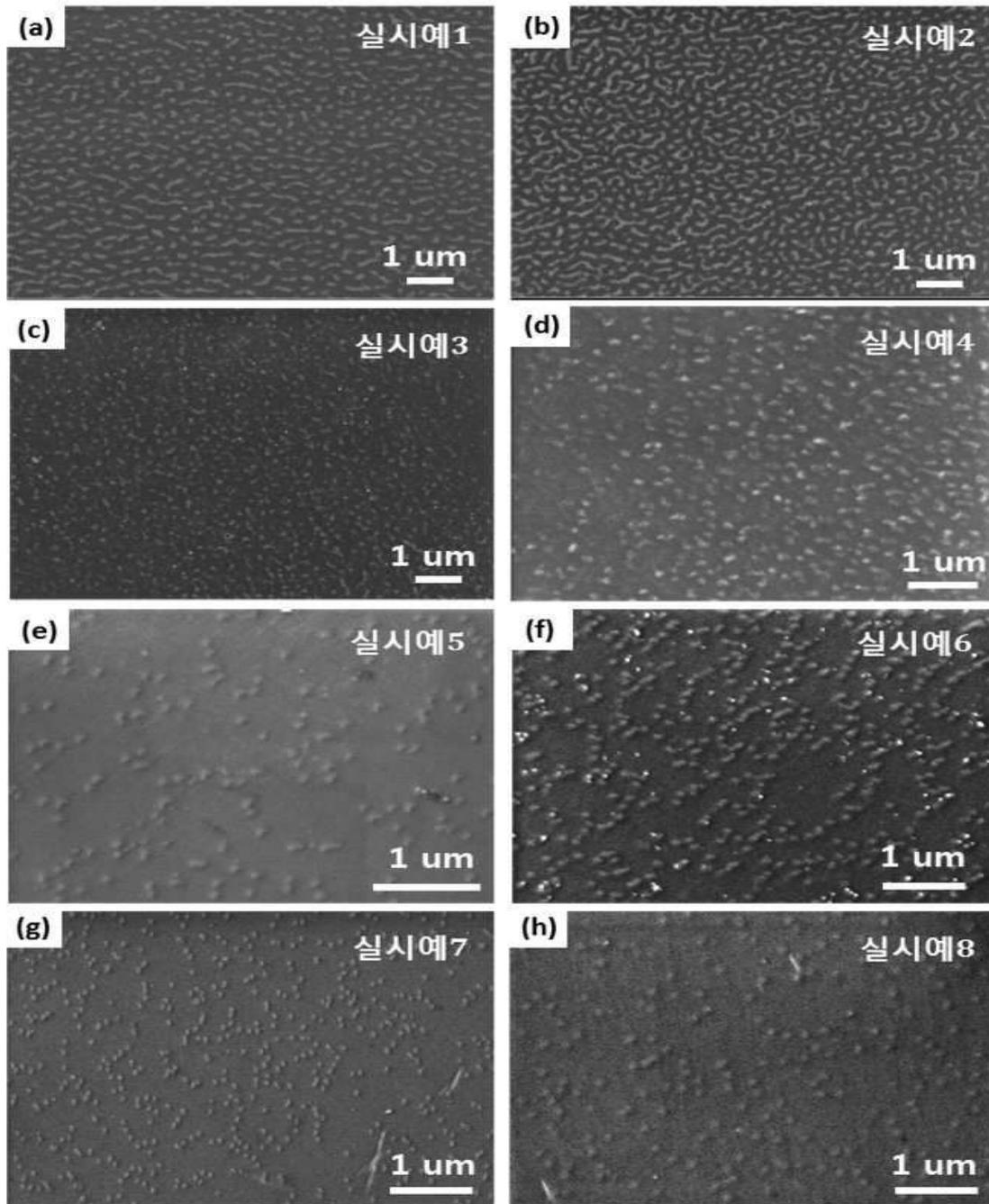
unit: kJ / mol

	Ti	Zr	Hf	Nb	Ta	Mo	W	Al
Ti	0	0	0	2	1	4	-6	-30
Zr	sym	0	0	4	3	-6	-9	-44
Hf	sym	Sym	0	4	3	-4	-6	-39
Nb	sym	sym	sym	0	0	-6	-8	-18
Ta	sym	sym	sym	sym	0	-5	-7	-19
Mo	sym	sym	sym	sym	sym	0	0	-5
W	sym	sym	sym	sym	sym	sym	0	-2
Al	sym	0						

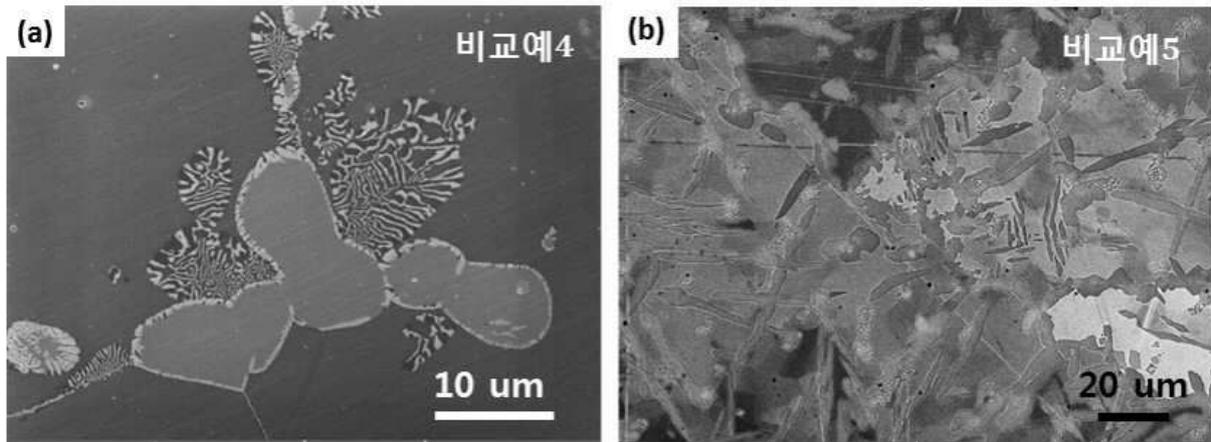
도면2



도면3



도면4



도면5

