



(19) 대한민국특허청(KR)

(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2019년06월27일

(11) 등록번호 10-1993527

(24) 등록일자 2019년06월20일

- (51) 국제특허분류(Int. Cl.)

C22C 30/00 (2006.01)

- (52) CPC특허분류

C22C 30/00 (2013.01)

- (21) 출원번호 10-2017-0138596

- (22) 출원일자 2017년10월24일

심사청구일자 2017년10월24일

- (65) 공개번호 10-2018-0044831

- (43) 공개일자 2018년05월03일

- (30) 우선권주장

1020160138417 2016년10월24일 대한민국(KR)

- (56) 선행기술조사문헌

JP2002173732 A*

KR1020160014130 A

KR101684856 B1

KR101728936 B1

*는 심사관에 의하여 인용된 문헌

- (73) 특허권자

세종대학교산학협력단

서울특별시 광진구 능동로 209 (군자동, 세종대학교)

- (72) 발명자

김기범

서울특별시 강남구 논현2동 245번지 동양파라곤아
파트 102동 1102호

주마에브 엘요르존

서울특별시 광진구 천호대로 105길 7, 101호

(뒷면에 계속)

- (74) 대리인

특허법인이상

전체 청구항 수 : 총 10 항

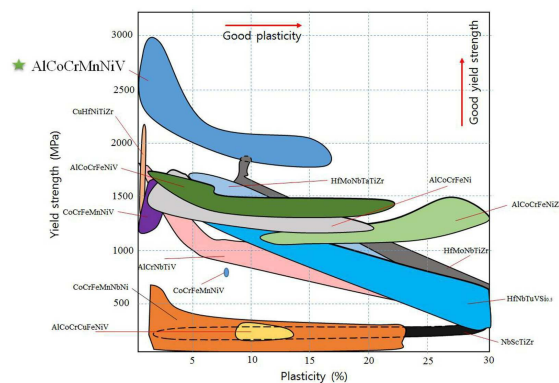
심사관 : 조현정

(54) 발명의 명칭 **우수한 강도를 갖는 하이엔트로피 합금**

(57) 요약

우수한 강도 및 연성을 갖는 하이엔트로피 합금을 제공한다. 하이엔트로피 합금은, 21 내지 25 원자%의 Al, 21 내지 25 원자%의 Co, 21 내지 25 원자%의 Cr, 21 내지 25 원자%의 Ni, 0 내지 8 원자%의 Mn, 0 내지 8 원자%의 V, 및 나머지는 불가피한 불순물의 조성비를 가진다.

대표도 - 도15



(72) 발명자

김영석

서울특별시 중랑구 동일로157나길 33

박혜진

경기도 남양주시 경춘로 377 마제스타워 101동
3203호

김희진

경기도 의정부시 신촌로 18-7 에스케이뷰아파트
204동 1501호

명세서

청구범위

청구항 1

Al: 21 내지 25 원자%, Co: 21 내지 25 원자%, Cr: 21 내지 25 원자%, Ni: 21 내지 25 원자%, Mn: 0 내지 8 원자%, 및 나머지는 불가피한 불순물의 조성비를 갖는 하이엔트로피 합금.

청구항 2

제1항에 있어서,

Mn: 2 내지 6 원자%의 조성비를 갖는 하이엔트로피 합금.

청구항 3

삭제

청구항 4

Al: 21 내지 25 원자%, Co: 21 내지 25 원자%, Cr: 21 내지 25 원자%, Ni: 21 내지 25 원자%, Mn: 2 내지 6 원자%, V: 2 내지 6 원자%, 및 나머지는 불가피한 불순물의 조성비를 갖는 하이엔트로피 합금.

청구항 5

제4항에 있어서,

Al: 22.5 내지 24 원자%, Co: 22.5 내지 24 원자%, Cr: 22.5 내지 24 원자%, Ni: 22.5 내지 24 원자%, Mn: 2 내지 6 원자%, V: 2 내지 4 원자%, 및 나머지는 불가피한 불순물의 조성비를 갖는 하이엔트로피 합금.

청구항 6

제1항 또는 제4항에 있어서,

항복강도가 1700 MPa 내지 2400 MPa이고, 연신율이 0.2% 내지 17%인 하이엔트로피 합금.

청구항 7

제6항에 있어서,

항복강도가 2000 MPa 내지 2300 MPa이고, 연신율이 6% 내지 16%인 하이엔트로피 합금.

청구항 8

제1항 또는 제4항에 있어서,

항복강도가 1900 MPa 내지 3000 MPa인 하이엔트로피 합금.

청구항 9

제8항에 있어서,

항복강도가 2500 MPa 내지 3000 MPa인 하이엔트로피 합금.

청구항 10

99% 이상의 순도를 갖는 금속들을 정량, 용융, 및 합금화하여 제1항 또는 제4항의 합금을 얻는 단계; 및

상기 합금을 열처리하는 단계를 포함하는 하이엔트로피 합금 제조방법.

청구항 11

제10항에 있어서,

상기 열처리하는 800 내지 950K의 온도에서 수행하는 하이엔트로피 합금 제조방법.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은 금속 합금에 관한 것으로, 보다 상세하게는 우수한 강도 및 연성을 갖는 하이엔트로피 합금에 관한 것이다.

배경 기술

[0002] 하이엔트로피 합금(high entropy alloy, HEA)은 일반적으로 4개 이상의 원소들이 동량 또는 거의 동량으로 구성되어 높은 혼합 엔트로피를 갖는 합금이다. 이러한 하이엔트로피 합금은 일반적인 다성분계 합금에서 금속간 화합물이 용이하게 생성되는 것과 달리, 높은 혼합 엔트로피로 인해 다성분 원소가 단순한 고용체를 형성하여 고용 강화를 통해 우수한 강도를 나타낼 수 있는 특징이 있다.

[0003] 하이엔트로피 합금을 조성하는 원소들의 구성 및 그에 따른 물성은 아직 완전히 밝혀지지 않았는데, 종래의 하이엔트로피 합금은 강도가 충분히 크지 않거나, 유연성(plasticity)이 제한되어 소성변형구간이 짧은 단점이 있다.

발명의 내용

해결하려는 과제

[0004] 본 발명이 해결하고자 하는 과제는, 우수한 강도 및 우수한 연성을 갖는 하이엔트로피 합금을 제공하는 것이다.

과제의 해결 수단

[0005] 상기 과제를 해결하기 위하여 본 발명의 일 측면은 하이엔트로피 합금을 제공한다. 상기 하이엔트로피 합금은 Al: 21 내지 25 원자%, Co: 21 내지 25 원자%, Cr: 21 내지 25 원자%, Ni: 21 내지 25 원자%, Mn: 0 내지 8 원자%, V: 0 내지 8 원자%, 및 나머지는 불가피한 불순물의 조성비를 가진다.

[0006] 상기 하이엔트로피 합금은 Mn: 2 내지 6 원자%의 조성비를 가질 수 있다.

[0007] 상기 하이엔트로피 합금은 V: 2 내지 6 원자%의 조성비를 가질 수 있다.

[0008] 상기 하이엔트로피 합금은 Mn: 2 내지 6 원자%, 및 V: 2 내지 6 원자%의 조성비를 가질 수 있다.

[0009] 상기 하이엔트로피 합금은 Al: 22.5 내지 24 원자%, Co: 22.5 내지 24 원자%, Cr: 22.5 내지 24 원자%, Ni: 22.5 내지 24 원자%, Mn: 2 내지 6 원자%, V: 2 내지 4 원자%, 및 나머지는 불가피한 불순물의 조성비를 가질 수 있다.

[0010] 상기 하이엔트로피 합금은 항복강도가 1700 MPa 내지 2400 MPa이고, 연신율이 0.2% 내지 17%일 수 있다.

[0011] 상기 하이엔트로피 합금은 항복강도가 2000 MPa 내지 2300 MPa이고, 연신율이 6% 내지 16%일 수 있다.

[0012] 상기 하이엔트로피 합금은 항복강도가 1900 MPa 내지 3000 MPa, 구체적으로 2500 MPa 내지 3000 MPa일 수 있다.

[0013] 상기 과제를 해결하기 위하여 본 발명의 다른 측면은 하이엔트로피 합금의 제조방법을 제공한다. 먼저, 99% 이상의 순도를 갖는 금속들을 정량, 용융, 및 합금화하여 Al: 21 내지 25 원자%, Co: 21 내지 25 원자%, Cr: 21 내지 25 원자%, Ni: 21 내지 25 원자%, Mn: 0 내지 8 원자%, V: 0 내지 8 원자%, 및 나머지는 불가피한 불순물의 조성비를 합금을 얻는다. 상기 합금을 열처리한다.

[0014] 상기 열처리하는 800 내지 950K의 온도에서 수행할 수 있다.

발명의 효과

[0015] 본 발명의 실시예들에 따른 하이엔트로피 합금은 항복강도 및 연신율이 우수하여 파괴내성이 향상될 수 있다.

이러한 하이엔트로피 합금은 열처리를 통해 항복강도가 더 향상될 수 있다.

[0016] 다만, 발명의 효과는 상기에서 언급한 효과로 제한되지 아니하며, 언급되지 않은 또 다른 효과들을 하기의 기재로부터 당업자에게 명확히 이해될 수 있을 것이다.

도면의 간단한 설명

[0017] 도 1은 본 발명의 실시예들에 따른 하이엔트로피 합금을 제조하는 데에 사용된 금속 시편들의 예를 나타낸 도면이다.

도 2는 본 발명의 실시예들에 따른 하이엔트로피 합금을 제조하는 데에 사용된 아크 용해 및 흡입 주조기의 구성을 도시한 도면이다.

도 3은 본 발명의 일 실시예에 따라 제조된 하이엔트로피 합금 시편을 도시한 도면이다.

도 4a 내지 도 4c는 본 발명의 실시예들에 따른 하이엔트로피 합금의 XRD(X-Ray Diffraction) 분석 그래프들이다.

도 5a 내지 도 5f는 본 발명의 실시예들에 따른 하이엔트로피 합금의 절삭 단면의 미세 조직을 SEM(Scanning Electron Microscope)으로 분석한 이미지들이다.

도 6a 내지 도 6f는 본 발명의 실시예들에 따른 하이엔트로피 합금의 절삭 단면의 미세 조직을 도시한 도면들이다.

도 7a 내지 도 7c는 본 발명의 실시예들에 따른 하이엔트로피 합금의 XRD 분석 그래프들이다.

도 8a 내지 도 8e는 본 발명의 실시예들에 따른 하이엔트로피 합금의 절삭 단면의 미세조직을 SEM으로 분석한 이미지들이다.

도 9a 내지 도 9e는 본 발명의 실시예들에 따른 하이엔트로피 합금의 절삭 단면의 미세 조직을 도시한 도면들이다.

도 10a는 본 발명의 일 실시예에 따른 하이엔트로피 합금의 XRD 분석 그래프 및 SEM 이미지이다.

도 10b는 본 발명의 일 실시예에 따른 하이엔트로피 합금의 절삭 단면의 미세조직을 도시한 도면이다.

도 11은 본 발명의 실시예들에 따른 하이엔트로피 합금의 항복강도 및 연신율을 평가하기 위한 만능시험기(universal testing machine)의 동작 원리를 도시한 도면이다.

도 12는 본 발명의 실시예들에 따른 하이엔트로피 합금의 항복강도 및 연신율을 측정한 그래프이다.

도 13은 본 발명의 실시예들에 따른 하이엔트로피 합금의 항복강도 및 연신율을 측정한 그래프이다.

도 14a 내지 도 14c는 본 발명의 실시예들에 따른 하이엔트로피 합금의 항복강도 및 연신율을 측정한 그래프이다.

도 15는 종래기술에 따른 하이엔트로피 합금에 비해, 본 발명의 실시예들에 따른 하이엔트로피 합금이 갖는 항복강도 및 연신율의 범위를 도시한 도면이다.

도 16은 제조예 1, 제조예 28 내지 제조예 30에 따른 합금의 XRD(X-Ray Diffraction) 분석 그래프들이다.

도 17a 내지 도 17c는 제조예 28 내지 제조예 30에 따른 합금의 절삭 단면의 미세 조직을 SEM(Scanning Electron Microscope)으로 분석한 이미지들이다.

도 18은 제조예 1, 제조예 28 내지 제조예 30에 따른 합금의 항복강도 및 연신율을 나타낸 그래프이다.

도 19는 제조예 1, 제조예 3, 제조예 8, 제조예 29, 제조예 31, 및 제조예 32에 따른 합금의 항복강도 및 연신율을 나타낸 그래프이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0018] 이하, 본 발명을 보다 구체적으로 설명하기 위하여 본 발명에 따른 바람직한 실시예를 첨부된 도면을 참조하여 보다 상세하게 설명한다. 그러나, 본 발명은 여기서 설명되어지는 실시예에 한정되지 않고 다른 형태로 구체화될 수도 있다.

- [0019] 본 발명의 일 실시예에 따른 하이엔트로피 합금은 Al: 21 내지 25 원자%, Co: 21 내지 25 원자%, Cr: 21 내지 25 원자%, Ni: 21 내지 25 원자%, Mn: 0 내지 8 원자%, V: 0 내지 8 원자%, 및 나머지는 불가피한 불순물의 조성비를 가질 수 있다. 이러한 조성비를 갖는 하이엔트로피 합금은 항복강도가 1700 MPa 내지 2400 MPa이고, 연신율이 0.2% 내지 17%일 수 있다.
- [0020] 이러한 하이엔트로피 합금은 4원계 합금으로서, Al, Co, Cr 및 Ni이 동량(즉, 25 원자%)으로 조성되며, 하기의 화학식 1로 나타내어질 수 있다.
- [0021] [화학식 1]
- [0022] AlCoCrNi
- [0023] 상기 화학식 1의 합금에서 Al, Co, Cr 및 Ni이 동량(원자%)으로 조성됨에 따라, 혼합 엔트로피가 최대인 단순한 고용체의 하이엔트로피 합금이 형성될 수 있다.
- [0024] 또는, 이러한 하이엔트로피 합금은 상기 화학식 1로 나타내어지는 조성에, Mn 및 V으로부터 이루어진 군으로부터 선택된 적어도 하나의 금속을 더 포함하여 이루어질 수 있다.
- [0025] 예를 들어, 상기 하이엔트로피 합금은 5원계 합금으로서, Al: 23.5 내지 24.5 원자%, Co: 23.5 내지 24.5 원자%, Cr: 23.5 내지 24.5 원자%, Ni: 23.5 내지 24.5 원자%, Mn: 2 내지 6 원자%, 및 나머지는 불가피한 불순물의 조성비를 가질 수 있다. 상기 하이엔트로피 합금은 하기의 화학식 2로 나타내어지는 조성을 포함할 수 있다.
- [0026] [화학식 2]
- [0027] $(\text{AlCoCrNi})_{100-x}\text{Mn}_x$ (단, $2 \leq x \leq 6$)
- [0028] 상기 화학식 2의 합금에서 Al, Co, Cr 및 Ni이 동량(원자%)으로 조성됨에 따라, 혼합 엔트로피가 최대로 될 수 있다. 한편, 상기 화학식 2의 조성에서 Mn의 첨가되는 양이 6 원자%를 초과하면, 항복강도가 1700 MPa 미만으로 감소되고, 연신율도 1% 미만으로 감소되므로, 고-강도 및 고-연성을 달성할 수 없다.
- [0029] 예를 들어, 상기 하이엔트로피 합금은 5원계 합금으로서, Al: 23.5 내지 24.5 원자%, Co: 23.5 내지 24.5 원자%, Cr: 23.5 내지 24.5 원자%, Ni: 23.5 내지 24.5 원자%, V: 2 내지 6 원자%, 및 나머지는 불가피한 불순물의 조성비를 가질 수 있다. 상기 하이엔트로피 합금은 하기의 화학식 3으로 나타내어지는 조성을 포함할 수 있다.
- [0030] [화학식 3]
- [0031] $(\text{AlCoCrNi})_{100-x}\text{V}_x$ (단, $2 \leq x \leq 6$)
- [0032] 상기 화학식 3의 합금에서 Al, Co, Cr 및 Ni이 동량(원자%)으로 조성됨에 따라, 혼합 엔트로피가 최대로 될 수 있다. 한편, 상기 화학식 3의 조성에서 V의 첨가되는 양이 6 원자%를 초과하면, 항복강도는 1700 MPa 이상으로 유지되지만, 연신율이 1.5% 미만으로 감소되므로, 고-강도 및 고-연성을 동시에 달성할 수 없다.
- [0033] 예를 들어, 상기 하이엔트로피 합금은 6원계 합금으로서, Al: 22.5 내지 24 원자%, Co: 22.5 내지 24 원자%, Cr: 22.5 내지 24 원자%, Ni: 22.5 내지 24 원자%, Mn: 2 내지 6 원자%, V: 2 내지 4 원자%, 및 나머지는 불가피한 불순물의 조성비를 가질 수 있다. 이러한 조성비를 갖는 하이엔트로피 합금은 항복강도가 2000 MPa 내지 2300 MPa이고, 연신율이 6% 내지 16%일 수 있다. 상기 하이엔트로피 합금은 하기의 화학식 4로 나타내어지는 조성을 포함할 수 있다.
- [0034] [화학식 4]
- [0035] $(\text{AlCoCrNi})_{100-x-y}\text{V}_x\text{Mn}_y$ (단, $2 \leq x \leq 4$, $2 \leq y \leq 6$)
- [0036] 상기 화학식 4의 합금에서 Al, Co, Cr 및 Ni이 동량(원자%)으로 조성됨에 따라, 혼합 엔트로피가 최대로 될 수 있다. 한편, 상기 화학식 4의 조성에서 Mn의 첨가되는 양이 6 원자%를 초과하거나, V의 첨가되는 양이 4 원자%를 초과하면, 항복강도가 2000 MPa 미만으로 감소하거나, 연신율이 6% 미만으로 감소되므로, 고-강도 및 고-연성을 동시에 달성할 수 없다.
- [0037] 이러한 하이엔트로피 합금은 4개 이상의 금속 원소들이 균질한 조성을 가지면서 무질서한 조밀 충전 구조를 갖는다. 이러한 하이엔트로피 합금은 높은 강도를 가지고, 우수한 연성을 가질 수 있다. 이와 같이, 본 실시예에 따른 하이엔트로피 합금은 강도가 크면서도 연성이 좋아 파괴내성이 우수할 수 있다. 따라서, 이러한 하이엔트

로피 합금은 우수한 기계적 특성을 가지며 자동차, 항공기 등의 내외장재에 고-강도 및 고-연성을 제공하기 위한 하드코팅재로 사용될 수 있다.

- [0038] 상기 합금 구체적으로, 상기 화학식들 1 내지 4 중 어느 하나의 합금은 99% 구체적으로 99.9% 이상의 순도를 갖는 금속들을 해당 조성을 만족하도록 정량하고 용해 및 합금화하여 모합금을 제조하는 단계와 상기 모합금을 금속응고법을 사용하여 성형하여 성형된 합금을 얻는 단계를 포함하여 제조할 수 있다. 상기 모합금은 고순도 아르곤 가스분위기하에서 아크 용해법을 사용하여 제조되 약 1800 내지 2200도 (°C)의 온도 범위에서 제조할 수 있다. 상기 금속응고법은 흡입주조(arc suction)법일 수 있다.
- [0039] 추가적으로, 상기 성형된 합금을 열처리할 수 있다. 이 열처리는 약 800 내지 950K의 온도, 구체적으로는 850 내지 900K로 진행될 수 있고, 약 24 내지 192시간 구체적으로는 약 48 내지 144시간 동안 진행될 수 있다. 한편, 이 열처리는 질소 또는 비활성 기체 분위기에서 진행될 수 있다. 이 경우, 합금의 강도는 약 1900 내지 3000 MPa, 구체적으로 2500 내지 3000 MPa를 나타내는 등 더 향상될 수 있다.
- [0040] 이하, 본 발명의 이해를 돕기 위하여 바람직한 실험예(example)를 제시한다. 다만, 하기의 실험예는 본 발명의 이해를 돕기 위한 것일 뿐, 본 발명이 하기의 실험예에 의해 한정되는 것은 아니다.
- [0041] <합금 제조예>
- [0042] 제조예 1: AlCoCrNi
- [0043] 도 1은 본 발명의 실시예들에 따른 하이엔트로피 합금을 제조하는 데에 사용된 금속 시편들의 예를 나타낸 도면이고, 도 2는 본 발명의 실시예들에 따른 하이엔트로피 합금을 제조하는 데에 사용된 아크 용해 및 흡입 주조기의 구성을 도시한 도면이다.
- [0044] 도 1에 도시된 것처럼, Al(순도 99.999%), Co(순도 99.95%), Cr(순도 99.95%), Ni(순도 99.99%)의 금속 시편을 준비하여, AlCoCrNi의 조성을 갖도록 총량으로 정량한 후, 도 2에 도시된 아크 용해기(arc melting)를 이용하여 고순도 Ar(99.99%) 기체 분위기에서 약 2000의 온도로 용해 및 합금화하여 하이엔트로피 모합금을 제조하였다. 시편 및 챔버 내에 남아있을 불순물, 잔류 산소와의 반응을 제거하기 위해 합금 원소들의 용해 전에 Ti 게터(getter)를 용해시킨 후, 합금화 공정을 수행하였다. 이때, 합금의 균일화 및 편석 발생을 방지하기 위해 모합금을 수 회 이상 반전시키며 용해하였다.
- [0045] 얻어진 하이엔트로피 모합금은, 금속 응고 주조법 중 하나인 흡입주조(arc suction)법에 의해, 메인 챔버와 석션 챔버 사이의 진공도 차이를 이용하여 수냉되고 있는 구리 몰드로 흡입하여, 지름 3 mm 및 길이 50 mm의 봉상(rod) 시편으로 제조되었다(도 3).
- [0046] 이하, 상기 하이엔트로피 합금 시편에 대한 결과를 HEA로 나타낸다.
- [0047] 제조예 2: (AlCoCrNi)₉₈V₂
- [0048] 도 1에 도시된 것처럼, V(순도 99.95%)을 더 준비하여, Al, Co, Cr, Ni 및 V를 최종 생성된 하이엔트로피 합금이 (AlCoCrNi)₉₈V₂의 조성을 갖도록 총량으로 정량화한 것을 제외하면, 제조예 1과 동일한 방법으로 봉상 시편을 제조하였다. 이하, 상기 하이엔트로피 합금 시편에 대한 결과를 HEA-V2로 나타낸다.
- [0049] 제조예 3: (AlCoCrNi)₉₆V₄
- [0050] Al, Co, Cr, Ni 및 V를 최종 생성된 하이엔트로피 합금이 (AlCoCrNi)₉₆V₄의 조성을 갖도록 총량으로 정량화한 것을 제외하면, 제조예 2와 동일한 방법으로 봉상 시편을 제조하였다. 이하, 상기 하이엔트로피 합금 시편에 대한 결과를 HEA-V4로 나타낸다.
- [0051] 제조예 4: (AlCoCrNi)₉₄V₆
- [0052] Al, Co, Cr, Ni 및 V를 최종 생성된 하이엔트로피 합금이 (AlCoCrNi)₉₄V₆의 조성을 갖도록 총량으로 정량화한 것을 제외하면, 제조예 2와 동일한 방법으로 봉상 시편을 제조하였다. 이하, 상기 하이엔트로피 합금 시편에 대한 결과를 HEA-V6로 나타낸다.
- [0053] 제조예 5: (AlCoCrNi)₉₂V₈

- [0054] Al, Co, Cr, Ni 및 V를 최종 생성된 하이엔트로피 합금이 $(\text{AlCoCrNi})_{92}\text{V}_8$ 의 조성을 갖도록 총량으로 정량화한 것을 제외하면, 제조예 2와 동일한 방법으로 봉상 시편을 제조하였다. 이하, 상기 하이엔트로피 합금 시편에 대한 결과를 HEA-V8로 나타낸다.
- [0055] 제조예 6: AlCoCrNiV
- [0056] Al, Co, Cr, Ni 및 V를 최종 생성된 하이엔트로피 합금이 AlCoCrNiV 의 조성을 갖도록 총량으로 정량화한 것을 제외하면, 제조예 2와 동일한 방법으로 봉상 시편을 제조하였다. 이하, 상기 하이엔트로피 합금 시편에 대한 결과를 HEAV로 나타낸다.
- [0057] 제조예 7: $(\text{AlCoCrNi})_{98}\text{Mn}_2$
- [0058] 도 1에 도시된 것처럼, Mn(순도 98%)을 더 준비하여, Al, Co, Cr, Ni 및 Mn를 최종 생성된 하이엔트로피 합금이 $(\text{AlCoCrNi})_{98}\text{Mn}_2$ 의 조성을 갖도록 총량으로 정량화한 것을 제외하면, 제조예 1과 동일한 방법으로 봉상 시편을 제조하였다. 이하, 상기 하이엔트로피 합금 시편에 대한 결과를 HEA-Mn2로 나타낸다.
- [0059] 제조예 8: $(\text{AlCoCrNi})_{96}\text{Mn}_4$
- [0060] Al, Co, Cr, Ni 및 Mn를 최종 생성된 하이엔트로피 합금이 $(\text{AlCoCrNi})_{96}\text{Mn}_4$ 의 조성을 갖도록 총량으로 정량화한 것을 제외하면, 제조예 7과 동일한 방법으로 봉상 시편을 제조하였다. 이하, 상기 하이엔트로피 합금 시편에 대한 결과를 HEA-Mn4로 나타낸다.
- [0061] 제조예 9: $(\text{AlCoCrNi})_{94}\text{Mn}_6$
- [0062] Al, Co, Cr, Ni 및 Mn를 최종 생성된 하이엔트로피 합금이 $(\text{AlCoCrNi})_{94}\text{Mn}_6$ 의 조성을 갖도록 총량으로 정량화한 것을 제외하면, 제조예 7과 동일한 방법으로 봉상 시편을 제조하였다. 이하, 상기 하이엔트로피 합금 시편에 대한 결과를 HEA-Mn6으로 나타낸다.
- [0063] 제조예 10: $(\text{AlCoCrNi})_{92}\text{Mn}_8$
- [0064] Al, Co, Cr, Ni 및 Mn를 최종 생성된 하이엔트로피 합금이 $(\text{AlCoCrNi})_{92}\text{Mn}_8$ 의 조성을 갖도록 총량으로 정량화한 것을 제외하면, 제조예 7과 동일한 방법으로 봉상 시편을 제조하였다. 이하, 상기 하이엔트로피 합금 시편에 대한 결과를 HEA-Mn8로 나타낸다.
- [0065] 제조예 11: AlCoCrNiMn
- [0066] Al, Co, Cr, Ni 및 Mn를 최종 생성된 하이엔트로피 합금이 AlCoCrNiMn 의 조성을 갖도록 총량으로 정량화한 것을 제외하면, 제조예 7과 동일한 방법으로 봉상 시편을 제조하였다. 이하, 상기 하이엔트로피 합금 시편에 대한 결과를 HEAMn로 나타낸다.
- [0067] 제조예 12: $(\text{AlCoCrNi})_{96}\text{V}_2\text{Mn}_2$
- [0068] 도 1에 도시된 것처럼, V(순도 99.95%) 및 Mn(순도 98%)을 더 준비하여, Al, Co, Cr, Ni, V 및 Mn를 최종 생성된 하이엔트로피 합금이 $(\text{AlCoCrNi})_{96}\text{V}_2\text{Mn}_2$ 의 조성을 갖도록 총량으로 정량화한 것을 제외하면, 제조예 1과 동일한 방법으로 봉상 시편을 제조하였다. 이하, 상기 하이엔트로피 합금 시편에 대한 결과를 HEA-Mn2V2로 나타낸다.
- [0069] 제조예 13: $(\text{AlCoCrNi})_{94}\text{V}_2\text{Mn}_4$
- [0070] Al, Co, Cr, Ni, V 및 Mn를 최종 생성된 하이엔트로피 합금이 $(\text{AlCoCrNi})_{94}\text{V}_2\text{Mn}_4$ 의 조성을 갖도록 총량으로 정량화한 것을 제외하면, 제조예 12와 동일한 방법으로 봉상 시편을 제조하였다. 이하, 상기 하이엔트로피 합금 시편에 대한 결과를 HEA-Mn4V2로 나타낸다.
- [0071] 제조예 14: $(\text{AlCoCrNi})_{92}\text{V}_2\text{Mn}_6$
- [0072] Al, Co, Cr, Ni, V 및 Mn를 최종 생성된 하이엔트로피 합금이 $(\text{AlCoCrNi})_{92}\text{V}_2\text{Mn}_6$ 의 조성을 갖도록 총량으로 정량화한 것을 제외하면, 제조예 12와 동일한 방법으로 봉상 시편을 제조하였다. 이하, 상기 하이엔트로피 합금 시

편에 대한 결과를 HEA-Mn6V2로 나타낸다.

[0073] 제조예 15: $(\text{AlCoCrNi})_{90}\text{V}_2\text{Mn}_8$

[0074] Al, Co, Cr, Ni, V 및 Mn를 최종 생성된 하이엔트로피 합금이 $(\text{AlCoCrNi})_{90}\text{V}_2\text{Mn}_8$ 의 조성을 갖도록 총량으로 정량 화한 것을 제외하면, 제조예 12와 동일한 방법으로 봉상 시편을 제조하였다. 이하, 상기 하이엔트로피 합금 시 편에 대한 결과를 HEA-Mn8V2로 나타낸다.

[0075] 제조예 16: $(\text{AlCoCrNi})_{94}\text{V}_4\text{Mn}_2$

[0076] Al, Co, Cr, Ni, V 및 Mn를 최종 생성된 하이엔트로피 합금이 $(\text{AlCoCrNi})_{94}\text{V}_4\text{Mn}_2$ 의 조성을 갖도록 총량으로 정량 화한 것을 제외하면, 제조예 12와 동일한 방법으로 봉상 시편을 제조하였다. 이하, 상기 하이엔트로피 합금 시 편에 대한 결과를 HEA-Mn2V4로 나타낸다.

[0077] 제조예 17: $(\text{AlCoCrNi})_{92}\text{V}_4\text{Mn}_4$

[0078] Al, Co, Cr, Ni, V 및 Mn를 최종 생성된 하이엔트로피 합금이 $(\text{AlCoCrNi})_{92}\text{V}_4\text{Mn}_4$ 의 조성을 갖도록 총량으로 정량 화한 것을 제외하면, 제조예 12와 동일한 방법으로 봉상 시편을 제조하였다. 이하, 상기 하이엔트로피 합금 시 편에 대한 결과를 HEA-Mn4V4로 나타낸다.

[0079] 제조예 18: $(\text{AlCoCrNi})_{90}\text{V}_4\text{Mn}_6$

[0080] Al, Co, Cr, Ni, V 및 Mn를 최종 생성된 하이엔트로피 합금이 $(\text{AlCoCrNi})_{90}\text{V}_4\text{Mn}_6$ 의 조성을 갖도록 총량으로 정량 화한 것을 제외하면, 제조예 12와 동일한 방법으로 봉상 시편을 제조하였다. 이하, 상기 하이엔트로피 합금 시 편에 대한 결과를 HEA-Mn6V4로 나타낸다.

[0081] 제조예 19: $(\text{AlCoCrNi})_{88}\text{V}_4\text{Mn}_8$

[0082] Al, Co, Cr, Ni, V 및 Mn를 최종 생성된 하이엔트로피 합금이 $(\text{AlCoCrNi})_{88}\text{V}_4\text{Mn}_8$ 의 조성을 갖도록 총량으로 정량 화한 것을 제외하면, 제조예 12와 동일한 방법으로 봉상 시편을 제조하였다. 이하, 상기 하이엔트로피 합금 시 편에 대한 결과를 HEA-Mn8V4로 나타낸다.

[0083] 제조예 20: $(\text{AlCoCrNi})_{92}\text{V}_6\text{Mn}_2$

[0084] Al, Co, Cr, Ni, V 및 Mn를 최종 생성된 하이엔트로피 합금이 $(\text{AlCoCrNi})_{92}\text{V}_6\text{Mn}_2$ 의 조성을 갖도록 총량으로 정량 화한 것을 제외하면, 제조예 12와 동일한 방법으로 봉상 시편을 제조하였다. 이하, 상기 하이엔트로피 합금 시 편에 대한 결과를 HEA-Mn2V6로 나타낸다.

[0085] 제조예 21: $(\text{AlCoCrNi})_{90}\text{V}_6\text{Mn}_4$

[0086] Al, Co, Cr, Ni, V 및 Mn를 최종 생성된 하이엔트로피 합금이 $(\text{AlCoCrNi})_{90}\text{V}_6\text{Mn}_4$ 의 조성을 갖도록 총량으로 정량 화한 것을 제외하면, 제조예 12와 동일한 방법으로 봉상 시편을 제조하였다. 이하, 상기 하이엔트로피 합금 시 편에 대한 결과를 HEA-Mn4V6로 나타낸다.

[0087] 제조예 22: $(\text{AlCoCrNi})_{88}\text{V}_6\text{Mn}_6$

[0088] Al, Co, Cr, Ni, V 및 Mn를 최종 생성된 하이엔트로피 합금이 $(\text{AlCoCrNi})_{88}\text{V}_6\text{Mn}_6$ 의 조성을 갖도록 총량으로 정량 화한 것을 제외하면, 제조예 12와 동일한 방법으로 봉상 시편을 제조하였다. 이하, 상기 하이엔트로피 합금 시 편에 대한 결과를 HEA-Mn6V6로 나타낸다.

[0089] 제조예 23: $(\text{AlCoCrNi})_{86}\text{V}_6\text{Mn}_8$

[0090] Al, Co, Cr, Ni, V 및 Mn를 최종 생성된 하이엔트로피 합금이 $(\text{AlCoCrNi})_{86}\text{V}_6\text{Mn}_8$ 의 조성을 갖도록 총량으로 정량 화한 것을 제외하면, 제조예 12와 동일한 방법으로 봉상 시편을 제조하였다. 이하, 상기 하이엔트로피 합금 시 편에 대한 결과를 HEA-Mn8V6로 나타낸다.

- [0091] 제조예 24: $(\text{AlCoCrNi})_{90}\text{V}_8\text{Mn}_2$
- [0092] Al, Co, Cr, Ni, V 및 Mn를 최종 생성된 하이엔트로피 합금이 $(\text{AlCoCrNi})_{90}\text{V}_8\text{Mn}_2$ 의 조성을 갖도록 총량으로 정량화한 것을 제외하면, 제조예 12와 동일한 방법으로 봉상 시편을 제조하였다. 이하, 상기 하이엔트로피 합금 시편에 대한 결과를 HEA-Mn2V8로 나타낸다.
- [0093] 제조예 25: $(\text{AlCoCrNi})_{88}\text{V}_8\text{Mn}_4$
- [0094] Al, Co, Cr, Ni, V 및 Mn를 최종 생성된 하이엔트로피 합금이 $(\text{AlCoCrNi})_{88}\text{V}_8\text{Mn}_4$ 의 조성을 갖도록 총량으로 정량화한 것을 제외하면, 제조예 12와 동일한 방법으로 봉상 시편을 제조하였다. 이하, 상기 하이엔트로피 합금 시편에 대한 결과를 HEA-Mn4V8로 나타낸다.
- [0095] 제조예 26: $(\text{AlCoCrNi})_{86}\text{V}_8\text{Mn}_6$
- [0096] Al, Co, Cr, Ni, V 및 Mn를 최종 생성된 하이엔트로피 합금이 $(\text{AlCoCrNi})_{86}\text{V}_8\text{Mn}_6$ 의 조성을 갖도록 총량으로 정량화한 것을 제외하면, 제조예 12와 동일한 방법으로 봉상 시편을 제조하였다. 이하, 상기 하이엔트로피 합금 시편에 대한 결과를 HEA-Mn6V8로 나타낸다.
- [0097] 제조예 27: $(\text{AlCoCrNi})_{84}\text{V}_8\text{Mn}_8$
- [0098] Al, Co, Cr, Ni, V 및 Mn를 최종 생성된 하이엔트로피 합금이 $(\text{AlCoCrNi})_{84}\text{V}_8\text{Mn}_8$ 의 조성을 갖도록 총량으로 정량화한 것을 제외하면, 제조예 12와 동일한 방법으로 봉상 시편을 제조하였다. 이하, 상기 하이엔트로피 합금 시편에 대한 결과를 HEA-Mn8V8로 나타낸다.
- [0099] 제조예 28: 열처리된 AlCoCrNi
- [0100] 제조예 1에서 얻어진 AlCoCrNi 하이엔트로피 합금 시편을 873 K에서 24시간동안 열처리하였다.
- [0101] 제조예 29: 열처리된 AlCoCrNi
- [0102] 제조예 1에서 얻어진 AlCoCrNi 하이엔트로피 합금 시편을 873 K에서 72시간동안 열처리하였다.
- [0103] 제조예 30: 열처리된 AlCoCrNi
- [0104] 제조예 1에서 얻어진 AlCoCrNi 하이엔트로피 합금 시편을 873 K에서 192시간동안 열처리하였다.
- [0105] 제조예 31: 열처리된 $(\text{AlCoCrNi})_{96}\text{V}_4$
- [0106] 제조예 3에서 얻어진 $(\text{AlCoCrNi})_{96}\text{V}_4$ 합금 시편을 873 K에서 72시간동안 열처리하였다.
- [0107] 제조예 32: 열처리된 $(\text{AlCoCrNi})_{96}\text{Mn}_4$
- [0108] 제조예 8에서 얻어진 $(\text{AlCoCrNi})_{96}\text{Mn}_4$ 합금 시편을 873 K에서 72시간동안 열처리하였다.
- [0109] <합금 평가예: 미세조직 분석>
- [0110] 제조된 하이엔트로피 합금의 봉상 시편들의 상(phase) 분석을 위해, X선 회절장비(Rigaku Model: D/MAX-2500/PC)를 이용하였다. X선 회절 분석에서는 $\lambda=1.5406 \text{ \AA}$ 의 파장을 가진 $\text{CuK}\alpha 1$ 타깃을 사용했고, 튜브 전압은 40 kV, 전류는 100 mA의 조건 하에 X선 분석을 수행하였다. X선 회절 스펙트럼은 연속주사 방법으로 10° 내지 80° 의 범위에서 $4^\circ/\text{min}$ 의 속도로 얻었다.
- [0111] 한편, 제조된 봉상 시편들의 미세조직을 분석하기 위해 주사전자현미경(SEM)을 이용한 분석도 수행하였다. 시편의 최하단 부분을 다이아몬드 커터기로 절단하고 콜드 마운팅을 수행하여, 정밀 연마(fine polishing)하였다. 그 후, 20 kV의 가속전압으로 SEM의 후방 산란 전자모드(back-scattered electron mode)를 이용하여 상 분석을 수행하였다.
- [0112] 도 4a 내지 도 4c는 제조예 1 내지 제조예 6에 따른 하이엔트로피 합금의 XRD(X-Ray Diffraction) 분석 그래프들이고, 도 5a 내지 도 5f는 제조예 1 내지 제조예 6에 따른 하이엔트로피 합금의 SEM(Scanning Electron Microscope) 이미지들이며, 도 6a 내지 6f는 제조예 1 내지 제조예 6에 따른 하이엔트로피 합금의 절삭 단면의

미세 조직을 도시한 도면들이다.

- [0113] 도 4a 내지 도 4c를 참조하면, 제조예 1의 시편에서 4개의 금속 원소를 함유하거나, 제조예 2 내지 제조예 6의 시편들에서 5개의 금속 원소를 함유함에도 불구하고, 제조된 합금들에서 비교적 단순한 피크들이 거의 동일한 2theta에 확인되는 것을 알 수 있다. 이로부터, 시편들 1 내지 6은 단순 고용체(simple solid solution)를 형성했음을 알 수 있다.
- [0114] 도 5a 내지 도 5f와, 도 6a 내지 도 6f를 참조하면, XRD 패턴의 차이가 없음에도 불구하고, 시편들 1 내지 6에서 첨가되는 V의 양이 증가할수록 미세조직에서 수지상정(dendrite)과 기지(matrix)의 비율이 변하는 것을 확인하였다.
- [0115] 도 7a 내지 도 7c는 제조예 7 내지 제조예 11에 따른 하이엔트로피 합금의 XRD 분석 그래프들이고, 도 8a 내지 8e는 제조예 7 내지 제조예 11에 따른 하이엔트로피 합금의 SEM 이미지들이며, 도 9a 내지 9e는 제조예 7 내지 제조예 11에 따른 하이엔트로피 합금의 절삭 단면의 미세 조직을 도시한 도면들이다.
- [0116] 도 7a 내지 도 7c를 참조하면, 제조예 7 내지 제조예 11의 시편들에서 5개의 금속 원소를 함유하는 합금임에도 불구하고, 비교적 단순한 피크들이 거의 동일한 2theta에서 확인되는 것을 알 수 있다. 이로부터, 시편들 7 내지 11 또한, 단순 고용체를 형성했음을 알 수 있다.
- [0117] 도 8a 내지 도 8e와, 도 9a 내지 도 9e를 참조하면, XRD 패턴의 차이가 없음에도 불구하고, 시편들 7 내지 11에서 첨가되는 Mn의 양이 증가할수록 미세조직에서 수지상정(dendrite)과 기지(matrix)의 비율이 변하는 것을 확인하였다. 특히, Mn의 양이 증가할수록 수지상정의 비율이 감소되는 것을 확인하였다.
- [0118] 도 10a는 제조예 17에 따른 하이엔트로피 합금의 XRD 분석 그래프 및 SEM 이미지이고, 도 10b는 제조예 17에 따른 하이엔트로피 합금의 절삭 단면의 미세 조직을 도시한 도면이다.
- [0119] 도 10a 및 도 10b를 참조하면, 제조예 17의 경우에도 마찬가지로, XRD 패턴이 거의 유사하게 나타나면서, 합금의 단면에서 수지상정이 42% 비율로 형성된 것을 확인하였다.
- [0120] <평가예: 기계적 특성 분석>
- [0121] 제조된 하이엔트로피 합금 시편의 기계적 특성을 평가하기 위해, 도 11에서와 같은, 만능시험기(Universal Testing Machine)를 이용하여 압축강도를 측정하였다. 압축강도 측정은 상온에서 등축 압축응력으로 시험하였으며 일정한 변형속도 (strain rate= 1×10^{-3} /s)의 조건에서 수행되었다. 압축시험을 위한 시편은 지름 3 mm, 높이 6 mm의 봉상 시편으로 준비하였으며, 시편의 파괴가 일어날 때까지 변형되었다.
- [0122] 표 1은 제조예 1 내지 제조예 6에 따른 하이엔트로피 합금의 금속 원소의 성분별 함량비(원자%) 및 항복강도와 연신율을 반복 평가한 평균 결과를 나타낸다. 도 12는 제조예 1 내지 제조예 5에 따른 하이엔트로피 합금의 항복강도 및 연신율을 측정한 그래프이다.

표 1

	조성	Al (at.%)	Co (at.%)	Cr (at.%)	Ni (at.%)	V (at.%)	항복강도 (MPa)	연신율 (%)
제조예 1	HEA	25	25	25	25	-	1753	16.71
제조예 2	HEA-V2	24.5	24.5	24.5	24.5	2	2009	14.18
제조예 3	HEA-V4	24	24	24	24	4	2064	13.84
제조예 4	HEA-V6	23.5	23.5	23.5	23.5	6	2086	6.95
제조예 5	HEA-V8	23	23	23	23	8	2046	1.06
제조예 6	HEAV	20	20	20	20	20	2381	1.34

- [0124] 표 1 및 도 12를 참조하면, AlCoCrNi로 조성되는 하이엔트로피 합금의 항복강도가 1753 MPa로서 종래의 다른 하이엔트로피 합금보다 큰 것으로 나타나며, 연신율 또한 우수한 것으로 확인되었다.
- [0125] 또한, AlCoCrNi의 4원계 하이엔트로피 합금에 V를 2 내지 8 원자%로 첨가한 경우, 항복강도가 2000 MPa 이상 2100 MPa이하로 크게 증가하고, 연신율도 비교적 높게 유지되는 것을 확인하였다.
- [0126] 항복강도 및 연신율을 모두 향상시키기 위해서는, AlCoCrNi의 하이엔트로피 합금에 V가 2 내지 6 원자%로 첨가되는 것이 바람직하며, V가 2 내지 4 원자%로 첨가되는 것이 더욱 바람직하다. V가 2 내지 4 원자%로 첨가되는

경우, 항복강도가 2000 MPa 이상 2100 MPa 이하면서, 연신율이 13% 내지 15%로 우수하므로, 고-강도 및 고-연성을 갖는 하이엔트로피 합금을 구현할 수 있다.

[0127] 표 2는 제조예 1과, 제조예 7 내지 제조예 10에 따른 하이엔트로피 합금의 금속 원소의 성분별 함량비(원자%) 및 항복강도와 연신율을 반복 평가한 평균 결과를 나타낸다. 도 13은 제조예 1과, 제조예 7 내지 제조예 10에 따른 하이엔트로피 합금의 항복강도 및 연신율을 측정한 그래프이다.

표 2

	조성	Al (at.%)	Co (at.%)	Cr (at.%)	Ni (at.%)	Mn (at.%)	항복강도 (MPa)	연신율 (%)
제조예 1	HEA	25	25	25	25	-	1753	16.71
제조예 7	HEA-Mn2	24.5	24.5	24.5	24.5	2	1724	10.76
제조예 8	HEA-Mn4	24	24	24	24	4	1786	8.26
제조예 9	HEA-Mn6	23.5	23.5	23.5	23.5	6	1856	7.81
제조예 10	HEA-Mn8	23	23	23	23	8	1532	0.86

[0129] 표 2 및 도 13을 참조하면, AlCoCrNi의 4원계 하이엔트로피 합금에 Mn을 2 내지 6 원자%로 첨가한 경우, 항복강도가 1700 MPa 이상 1900 MPa 이하이면서 연신율이 비교적 높게 유지되는 것을 확인하였다.

[0130] 항복강도 및 연신율을 모두 향상시키기 위해서는, AlCoCrNi의 하이엔트로피 합금에 Mn이 2 내지 6 원자%로 첨가되는 것이 바람직하며, Mn이 2 내지 4 원자%로 첨가되는 것이 더욱 바람직하다. Mn이 2 내지 4 원자%로 첨가되는 경우, 항복강도가 1700 MPa 이상 1900 MPa 이하이면서, 연신율이 8% 내지 11%로 우수하므로, 고-강도 및 고-연성을 갖는 하이엔트로피 합금을 구현할 수 있다.

[0131] 한편, 표 2에 포함되지는 않았지만, 동량(원자%)의 조성비를 갖는 AlCoCrNiMn의 하이엔트로피 합금 (제조예 11)은 취성이 커서 항복강도 및 연신율을 측정하기 어려운 것으로 확인되었다.

[0132] 표 3은 제조예 12 내지 제조예 27에 따른 하이엔트로피 합금의 금속 원소의 성분별 함량비(원자%) 및 항복강도와 연신율을 반복 평가한 평균 결과를 나타낸다. 도 14a는 제조예 17의 시편에 대해, 도 14b는 제조예 12 내지 제조예 15의 시편에 대해, 도 14c는 제조예 16, 제조예 18 및 제조예 19에 대해, 각각 하이엔트로피 합금의 항복강도 및 연신율을 측정한 그래프이다.

표 3

	조성	Al (at.%)	Co (at.%)	Cr (at.%)	Ni (at.%)	V (at.%)	Mn (at.%)	항복강도 (MPa)	연신율 (%)
제조예 12	HEA-Mn2V2	24	24	24	24	2	2	2177	11.4
제조예 13	HEA-Mn4V2	23.5	23.5	23.5	23.5	2	4	2028	8.3
제조예 14	HEA-Mn6V2	23	23	23	23	2	6	2012	8.65
제조예 15	HEA-Mn8V2	22.5	22.5	22.5	22.5	2	8	1558	0.2
제조예 16	HEA-Mn2V4	23.5	23.5	23.5	23.5	4	2	2298	8.2
제조예 17	HEA-Mn4V4	23	23	23	23	4	4	2002	15.26
제조예 18	HEA-Mn6V4	22.5	22.5	22.5	22.5	4	6	2047	6.43
제조예 19	HEA-Mn8V4	22	22	22	22	4	8	1770	5.4
제조예 20	HEA-Mn2V6	23	23	23	23	6	2	2177	7.26
제조예 21	HEA-Mn4V6	22.5	22.5	22.5	22.5	6	4	2073	5.63
제조예 22	HEA-Mn6V6	22	22	22	22	6	6	1691	2.85
제조예 23	HEA-Mn8V6	21.5	21.5	21.5	21.5	6	8	1885	4.43
제조예 24	HEA-Mn2V8	22.5	22.5	22.5	22.5	8	2	1905	5.35
제조예 25	HEA-Mn4V8	22	22	22	22	8	4	1588	2.52
제조예 26	HEA-Mn6V8	21.5	21.5	21.5	21.5	8	6	1639	1.87
제조예 27	HEA-Mn8V8	21	21	21	21	8	8	1568	0.92

[0134] 표 3을 참조하면, Al, Co, Cr 및 Ni를 포함하는 하이엔트로피 합금에 V 및 Mn이 모두 첨가된 경우, Al, Co, Cr 및 Ni의 4개 원소들은 각각 21 내지 24 원자%의 비율로 포함될 수 있다. 바람직하게는, Al, Co, Cr 및 Ni이 각각 22 내지 24 원자%로 포함되고, V가 2 내지 4 원자%, Mn이 2 내지 6 원자%로 포함되는 경우, 항복강도 및 연

신율이 우수한 것으로 확인된다(도 14b 및 도 14c). 이때, 하이엔트로피 합금의 항복강도는 2000 MPa 이상 2300 MPa 이하이고, 연신율은 6% 내지 16%로, 고-강도 및 고-연성을 갖게 된다.

[0135] 더욱 바람직하게는 하이엔트로피 합금이 $(\text{AlCoCrNi})_{92}\text{V}_4\text{Mn}_4$ 의 조성비를 가질 때 항복강도 2002 MPa, 연신율 15.26%로 우수한 강도 및 연성을 갖는 것으로 확인되었다(도 14a).

[0136] 도 15는 종래기술에 따른 하이엔트로피 합금에 비해, 본 발명의 실시예들에 따른 하이엔트로피 합금이 갖는 항복강도 및 연신율의 범위를 도시한 도면이다.

[0137] 도 15를 참조하면, 종래에 알려진 다른 하이엔트로피 합금에 비해, AlCoCrNi 합금이나, AlCoCrNi에 Mn 및/또는 V를 첨가한 합금이, 항복강도가 우수하면서도 연성이 뛰어난 것으로 확인되었다.

[0138] 따라서, 본 발명에 따른 하이엔트로피 합금은 자동차, 항공기 등의 내외장재에 고-강도 및 고-연성을 제공하기 위한 하드코팅재와 같은 분야에 적용될 수 있다.

[0139] <합금 평가예: 열처리에 따른 합금의 미세조직 및 기계적 특성 분석>

[0140] 도 16은 제조예 1, 제조예 28 내지 제조예 30에 따른 합금의 XRD(X-Ray Diffraction) 분석 그래프들이고, 도 17a 내지 도 17c는 제조예 28 내지 제조예 30에 따른 합금의 절삭 단면의 미세 조직을 SEM(Scanning Electron Microscope)으로 분석한 이미지들이다.

[0141] 도 16을 참조하면, 제조예 1의 AlCoCrNi 하이엔트로피 합금 시편 (As-cast), 이를 873K에서 24시간, 72시간, 및 192시간 열처리한 제조예 28의 시편 (24h), 제조예 29의 시편 (72h), 및 제조예 30의 시편 (192h)들 모두에서 비교적 단순한 피크들이 거의 동일한 위치의 2theta에서 확인되는 것을 알 수 있다. 이로부터, AlCoCrNi 하이엔트로피 합금의 경우 열처리를 하더라도 단순 고용체(simple solid solution)를 유지함을 알 수 있다.

[0142] 도 17a 내지 도 17c를 참조하면, 열처리 시간의 증가가 미세조직에 미치는 변화는 적은 것을 알 수 있다.

[0143] 표 4는 제조예 1, 제조예 3, 제조예 8, 제조예 28 내지 제조예 32에 따른 합금의 금속 원소의 성분별 함량비(원자%), 열처리 온도 및 시간, 그리고 항복강도와 연신율을 반복 평가한 평균 결과를 나타낸다. 도 18은 제조예 1, 제조예 28 내지 제조예 30에 따른 합금의 항복강도 및 연신율을 나타낸 그래프이다. 도 19는 제조예 1, 제조예 3, 제조예 8, 제조예 29, 제조예 31, 및 제조예 32에 따른 합금의 항복강도 및 연신율을 나타낸 그래프이다.

표 4

	Al (at.%)	Co (at.%)	Cr (at.%)	Ni (at.%)	V (at.%)	Mn (at.%)	열처리 온도 (K)	열처리 시간 (hr)	항복 강도 (MPa)	연신율 (%)
제조예 1	25	25	25	25	-	-	-	-	1753	16.71
제조예 28	25	25	25	25	-	-	873	24	1902	4.46
제조예 29	25	25	25	25	-	-	873	72	2925	2.78
제조예 30	25	25	25	25	-	-	873	192	2834	0.62
제조예 3	24	24	24	24	4	-	-	-	2064	13.84
제조예 31	24	24	24	24	4	-	873	72	2953	1.17
제조예 8	24	24	24	24	-	4	-	-	1786	8.26
제조예 32	24	24	24	24	-	4	873	72	2624	0.47

[0145] 표 2 및 도 18을 참조하면, AlCoCrNi의 4원계 하이엔트로피 합금을 873K로 24시간, 72시간, 그리고 192시간 열처리하는 경우(제조예들 28, 29, 30), 열처리 전에 비해 연신율은 감소하지만 항복강도가 약 1900 내지 3000 MPa로 크게 증가하는 것을 알 수 있다. 특히, 열처리 시간이 72시간인 경우, 항복강도는 2500 MPa 이상 구체적으로 2925 MPa로 가장 크게 증가하였다.

[0146] 표 2 및 도 19를 참조하면, AlCoCrNi의 4원계 하이엔트로피 합금에 V를 4 at% 첨가한 경우(제조예 3)와 이를 873K에서 72시간 동안 열처리한 경우(제조예 31)을 비교하면, 열처리 전에 비해 연신율은 감소하지만 항복강도가 2500 MPa 이상으로 크게 증가하는 것을 알 수 있다. 또한, AlCoCrNi의 4원계 하이엔트로피 합금에 Mn를 4 at% 첨가한 경우(제조예 8)와 이를 873K에서 72시간 동안 열처리한 경우(제조예 32)을 비교하더라도, 열처리 전에 비해 연신율은 감소하지만 항복강도가 2500 MPa 이상으로 크게 증가하는 것을 알 수 있다.

[0147] 이러한 결과를 참고할 때, AlCoCrNi의 4원계 하이엔트로피 합금 또는 여기에 V 및/또는 Mn을 소량 첨가한 경우 모두 열처리에 의해 항복강도가 크게 증가하는 것을 확인할 수 있다.

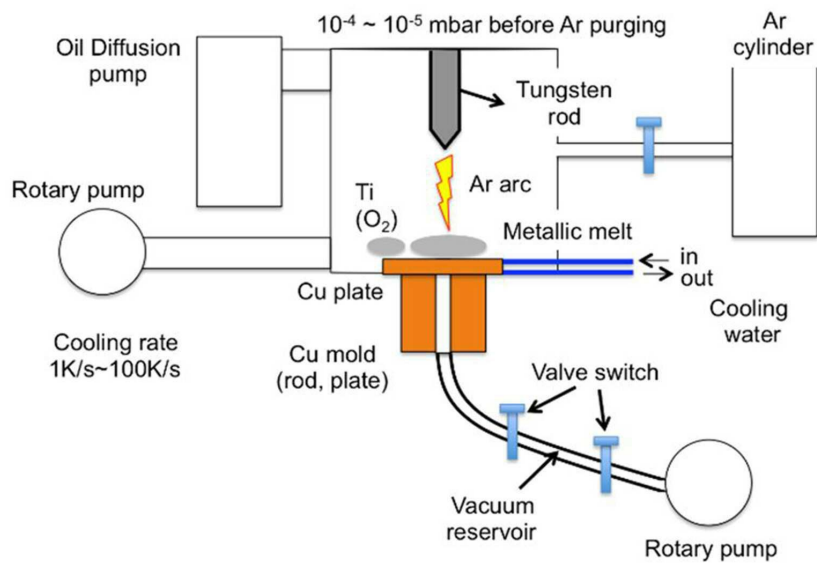
[0148] 한편, 본 명세서와 도면에 개시된 본 발명의 실시예들은 이해를 돕기 위해 특정 예를 제시한 것에 지나지 않으며, 본 발명의 범위를 한정하고자 하는 것은 아니다. 여기에 개시된 실시예들 이외에도 본 발명의 기술적 사상에 바탕을 둔 다른 변형 예들이 실시 가능하다는 것은, 본 발명이 속하는 기술 분야에서 통상의 지식을 가진 자에게 자명한 것이다.

도면

도면1



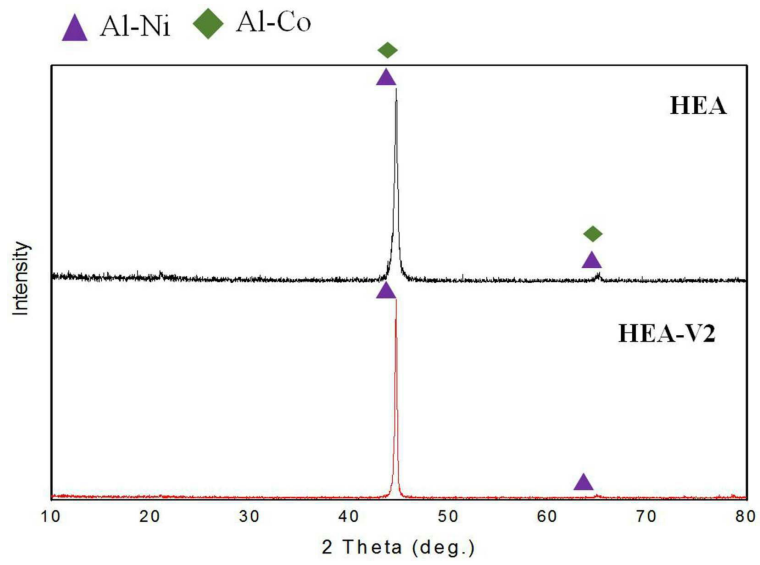
도면2



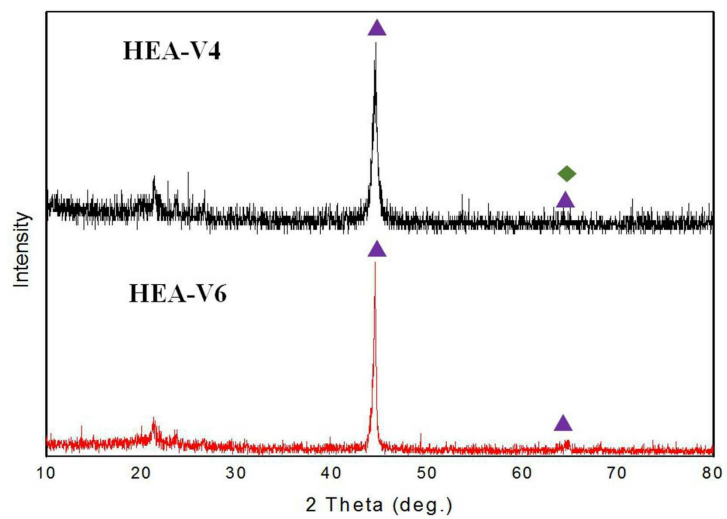
도면3



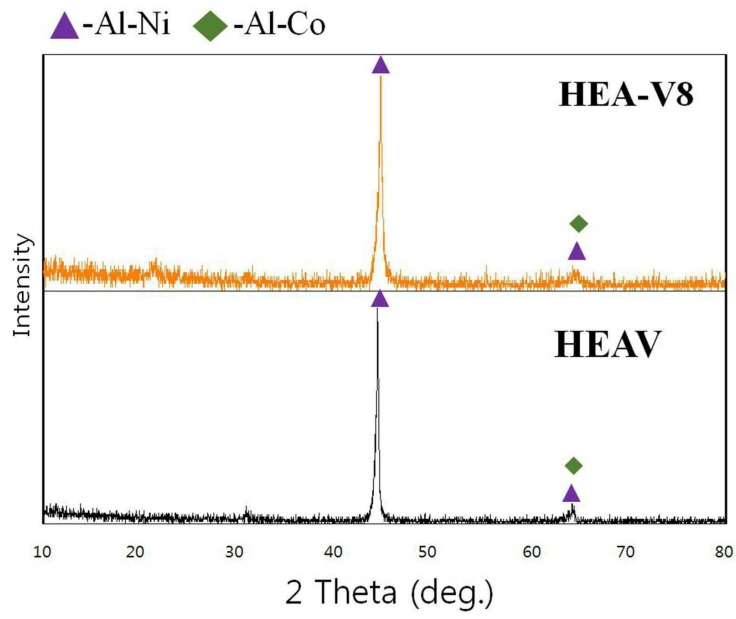
도면4a



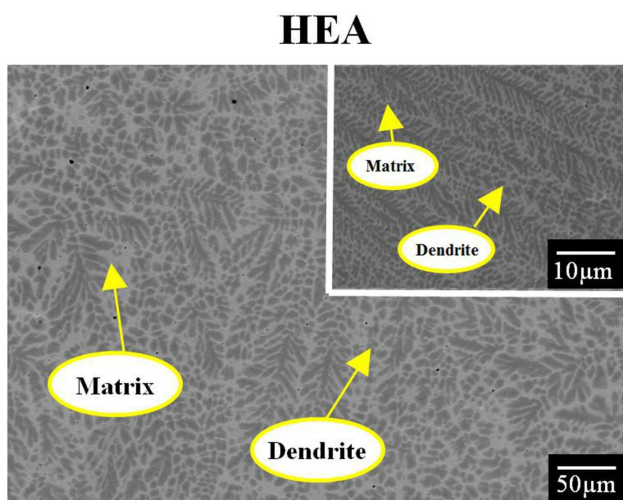
도면4b



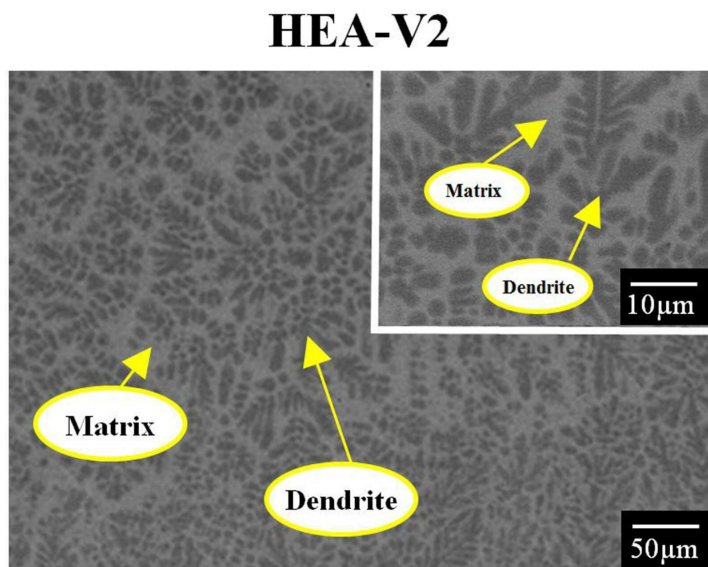
도면4c



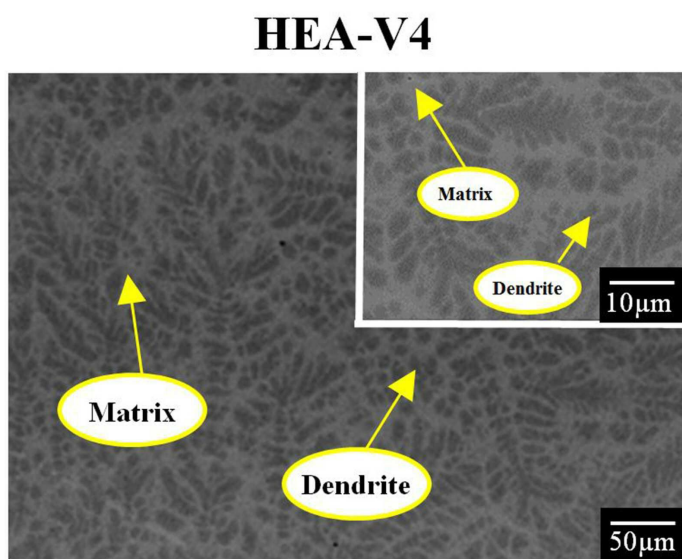
도면5a



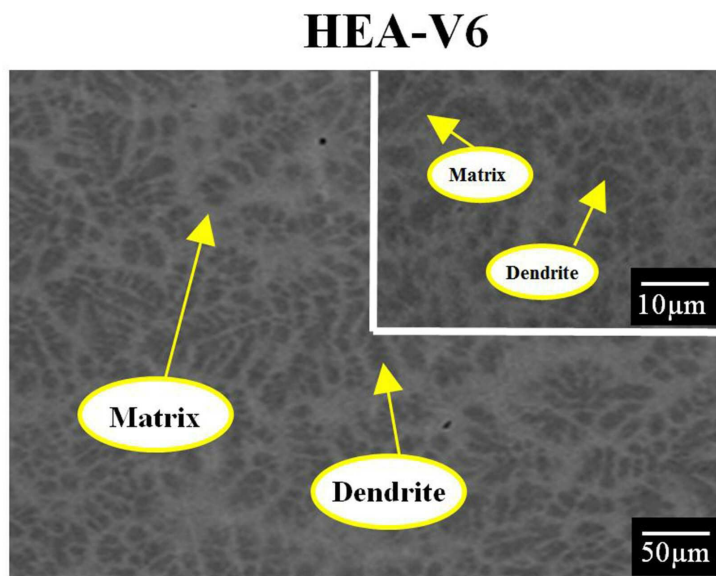
도면5b



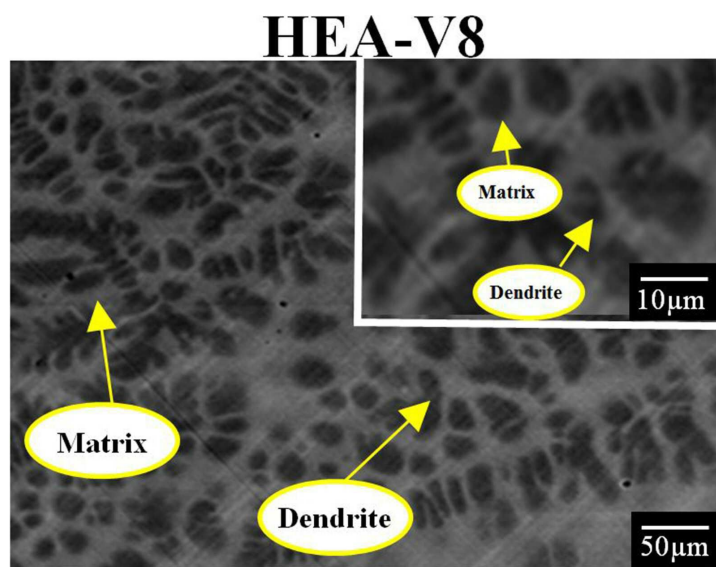
도면5c



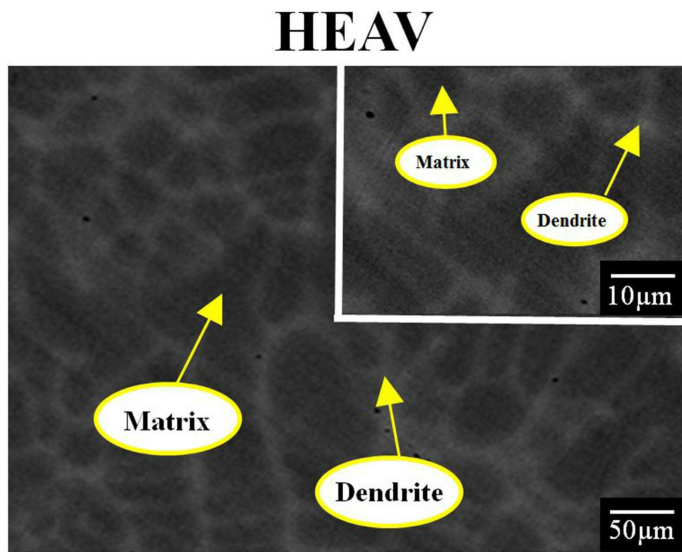
도면5d



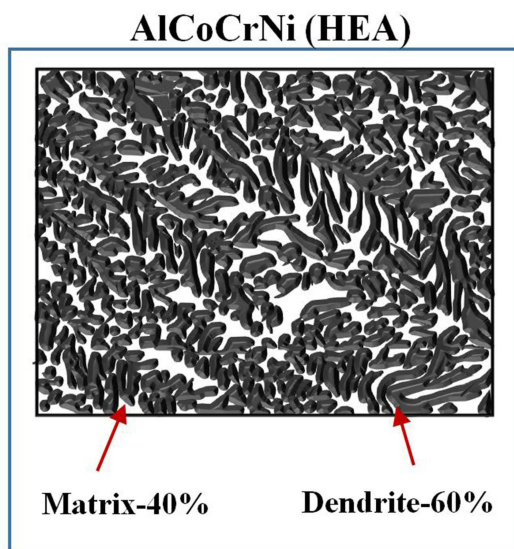
도면5e



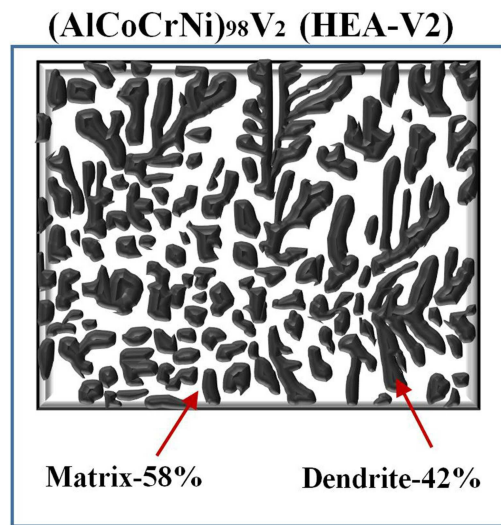
도면5f



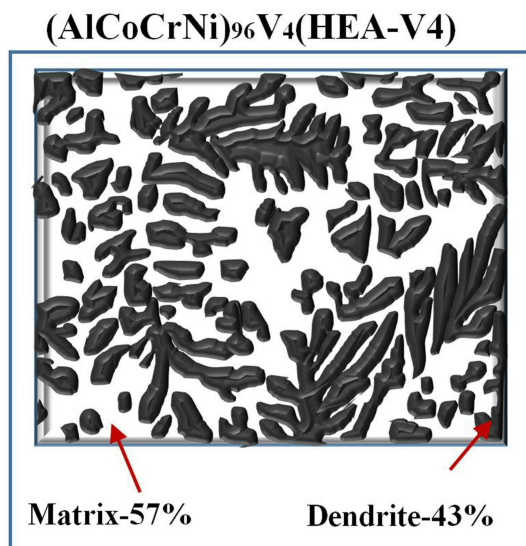
도면6a



도면6b

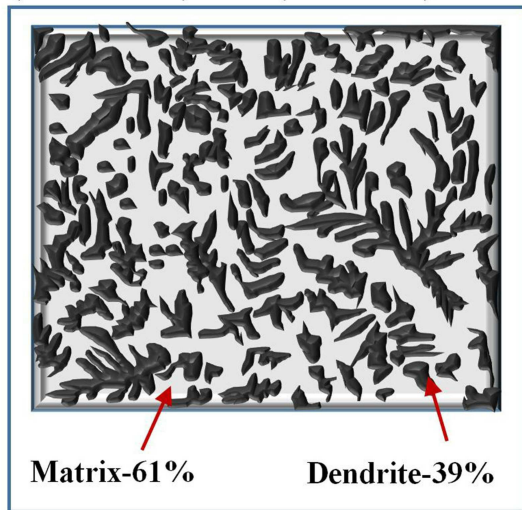


도면6c



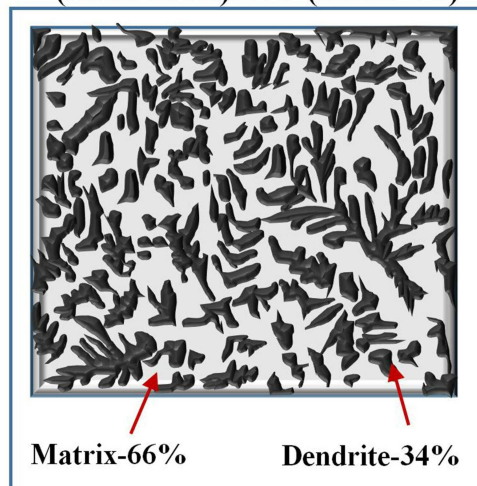
도면6d

$(\text{AlCoCrNi})_{94}\text{V}_6$ (HEA-V6)

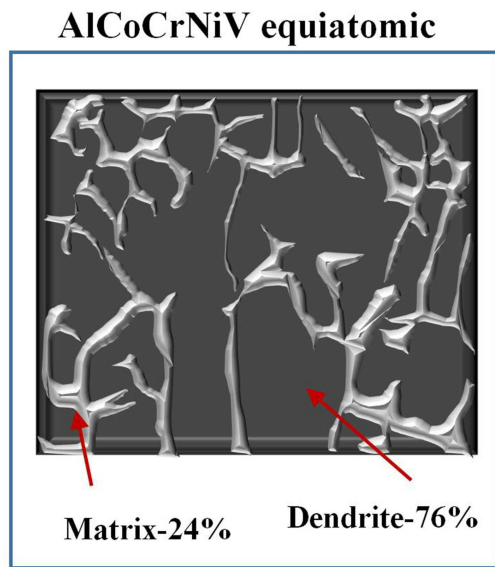


도면6e

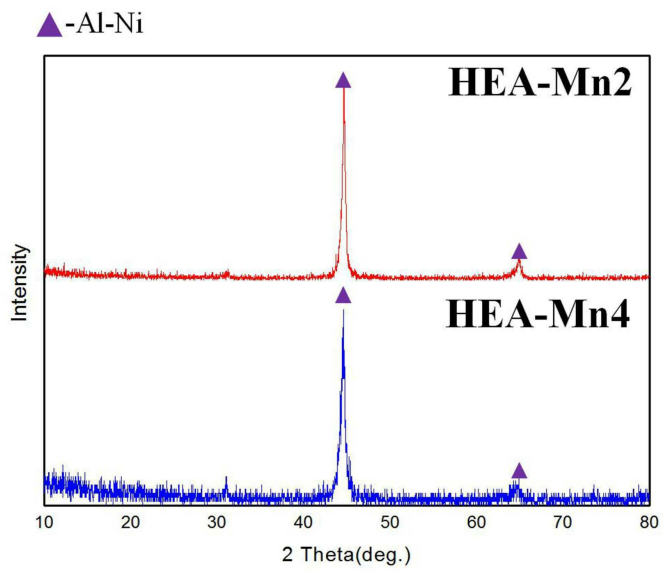
$(\text{AlCoCrNi})_{92}\text{V}_8$ (HEA-V8)



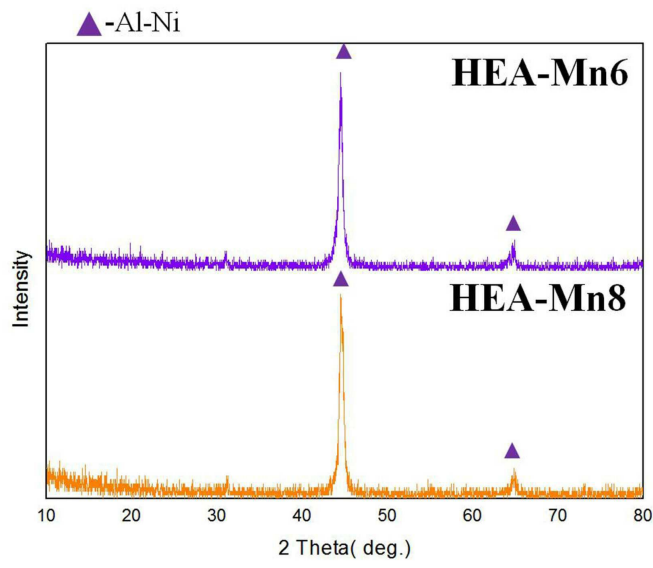
도면6f



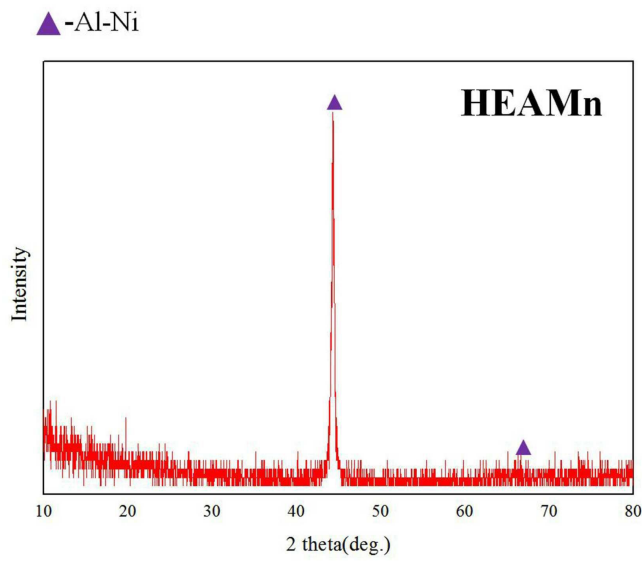
도면7a



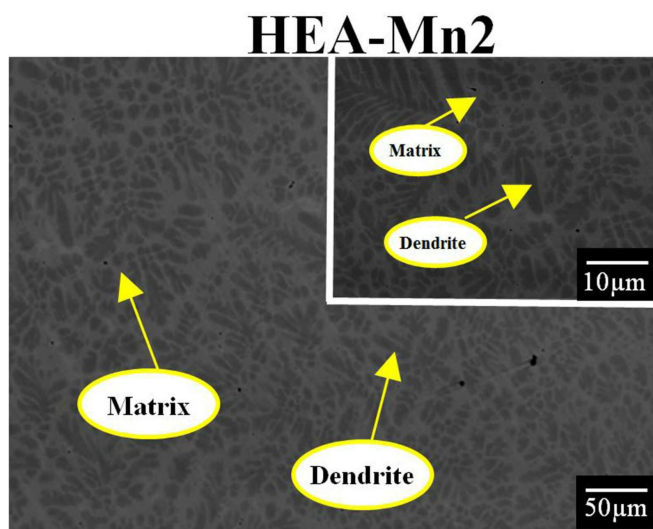
도면7b



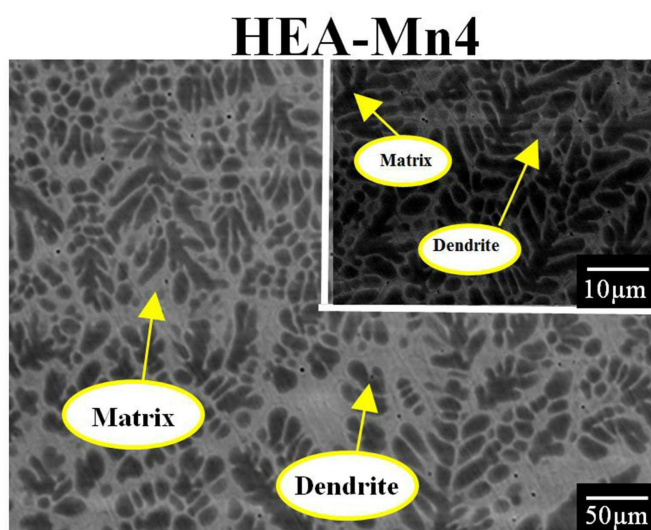
도면7c



도면8a

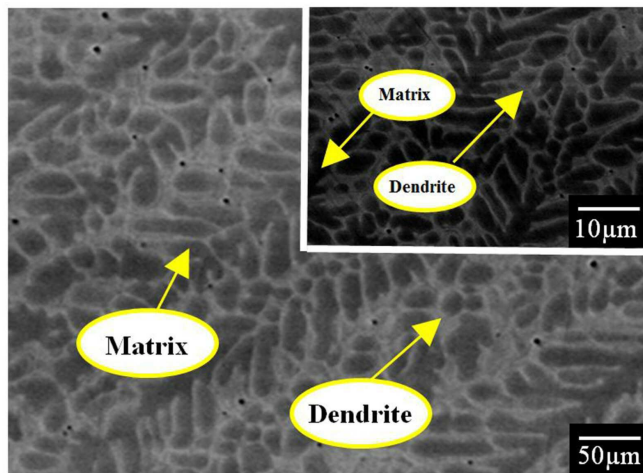


도면8b



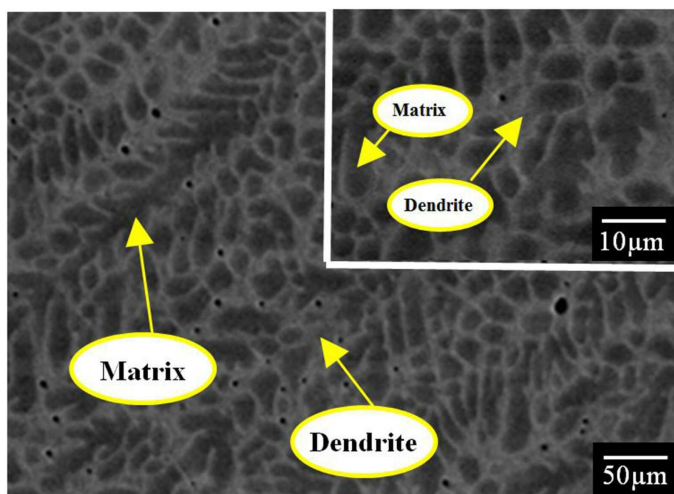
도면8c

HEA-Mn6



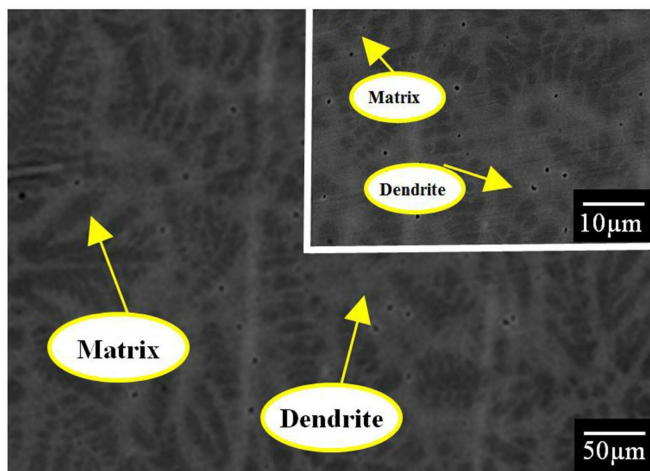
도면8d

HEA-Mn8



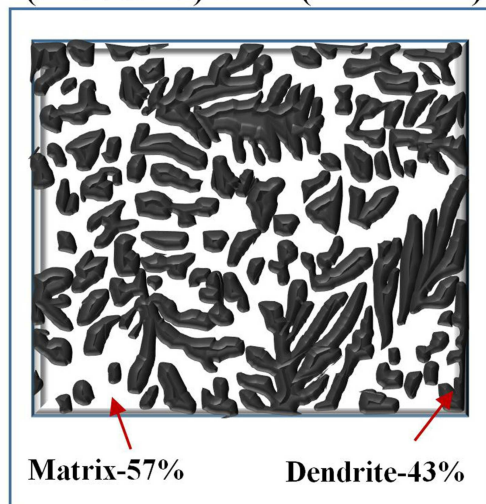
도면8e

HEAMn



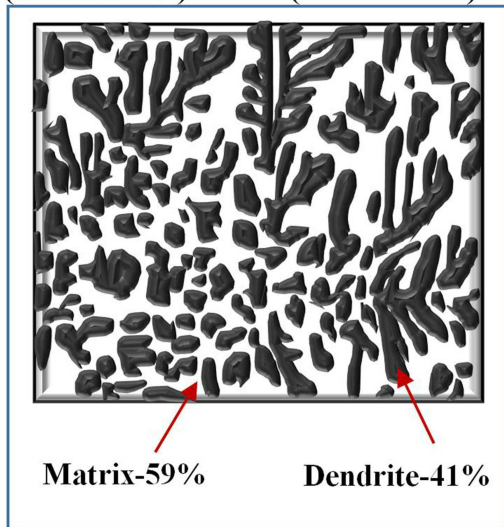
도면9a

(AlCoCrNi)₉₆Mn₂ (HEA-Mn2)



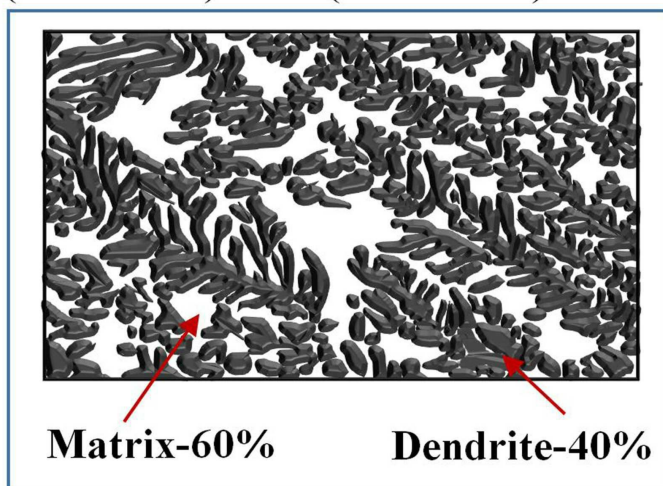
도면9b

(AlCoCrNi)₉₆Mn₄ (HEA-Mn4)



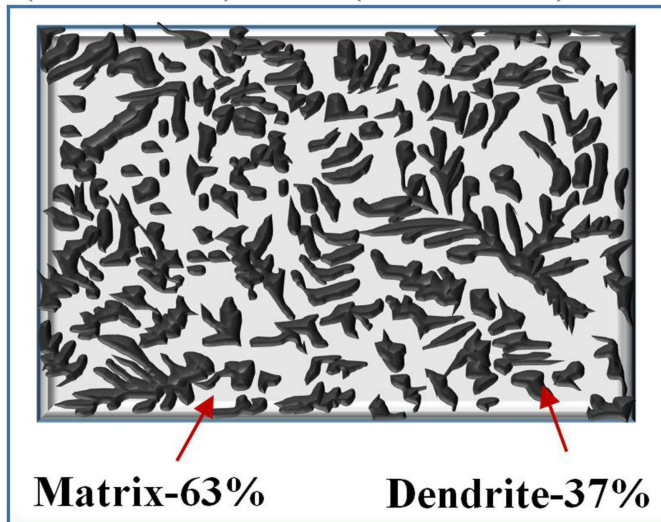
도면9c

(AlCoCrNi)₉₆Mn₆ (HEA-Mn6)



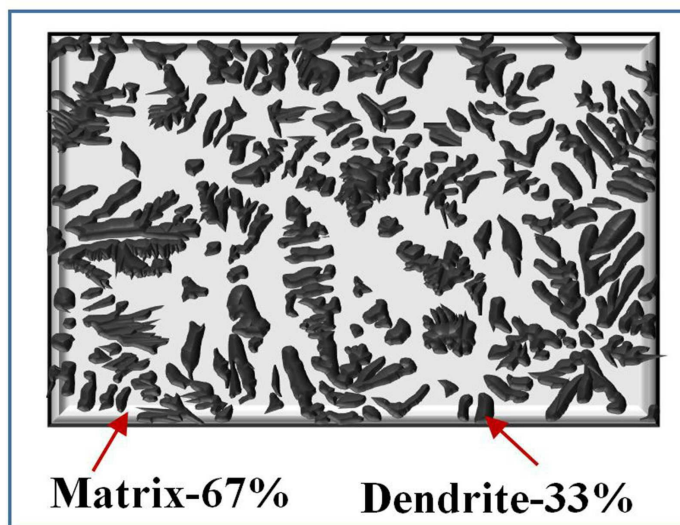
도면9d

(AlCoCrNi)₉₆Mn₈(HEA-Mn8)

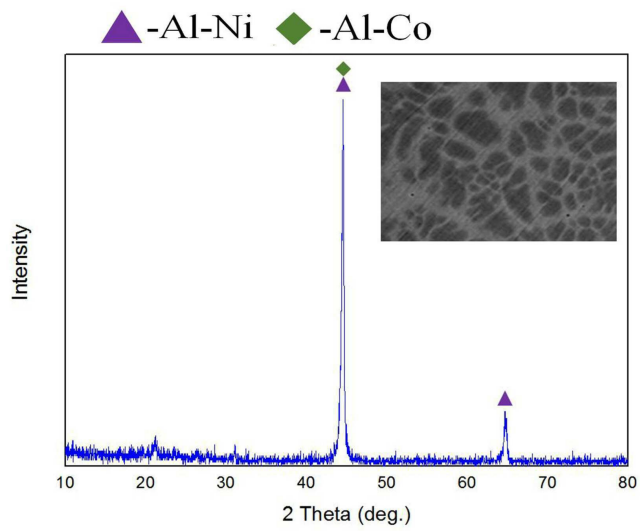


도면9e

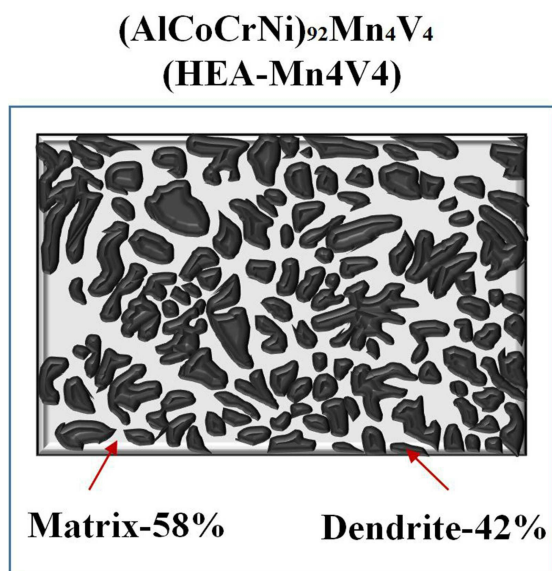
AlCoCrMnNi equiatomic



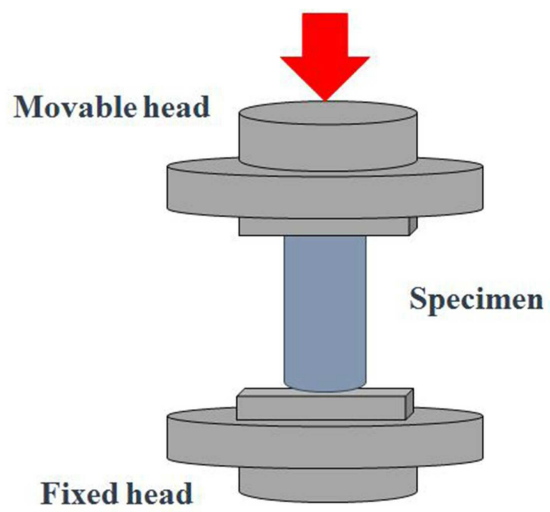
도면10a



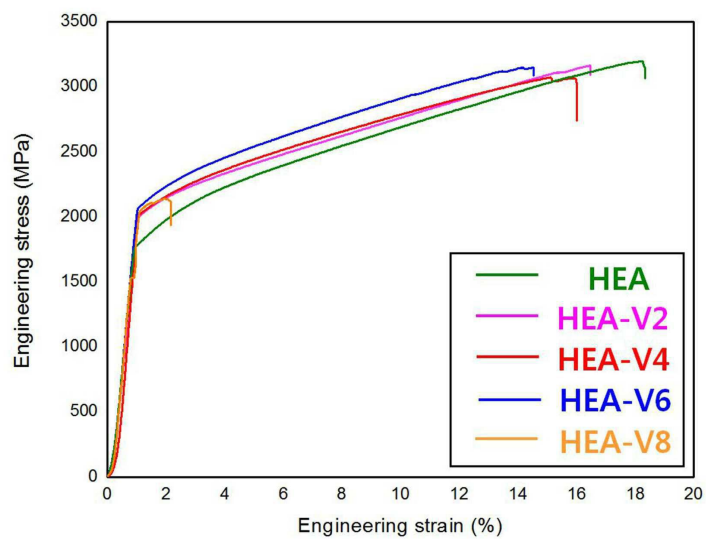
도면10b



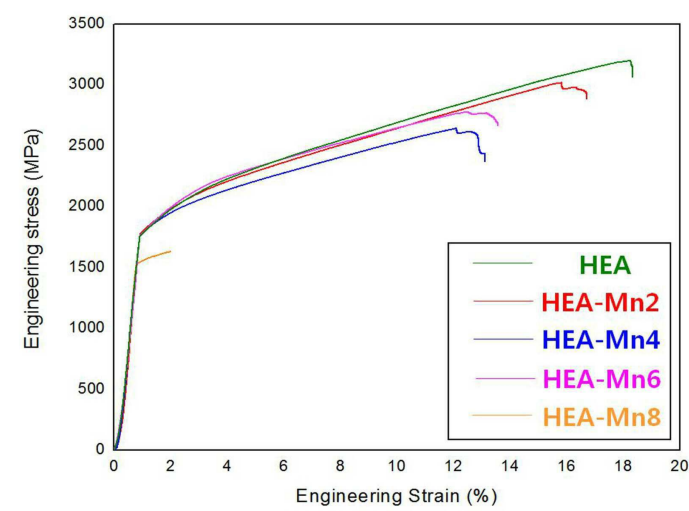
도면11



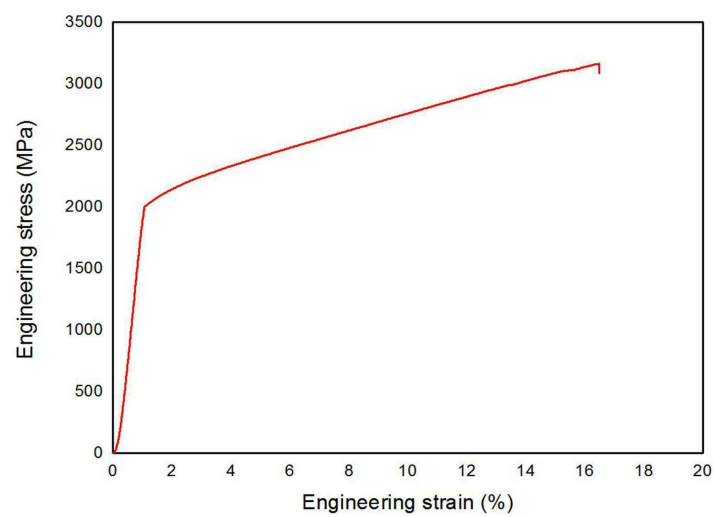
도면12



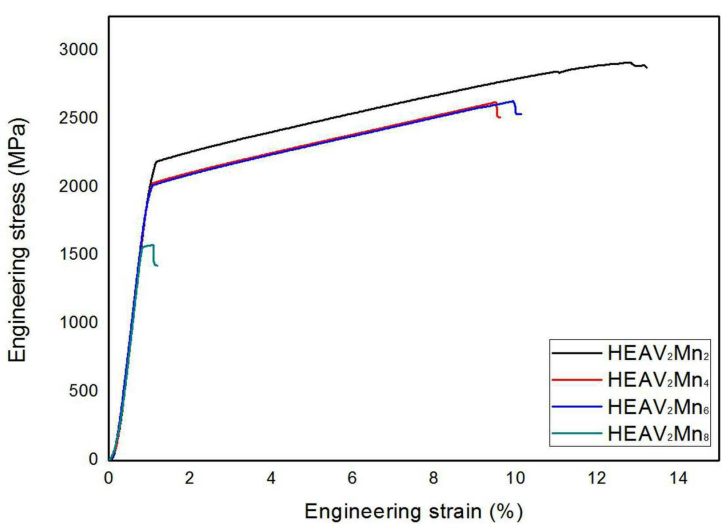
도면13



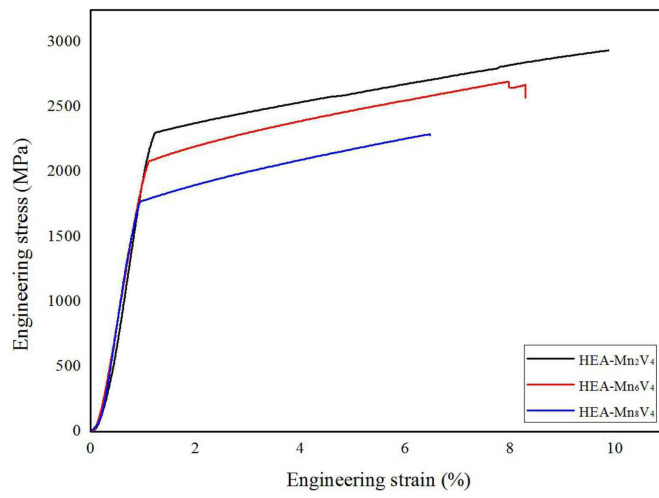
도면14a



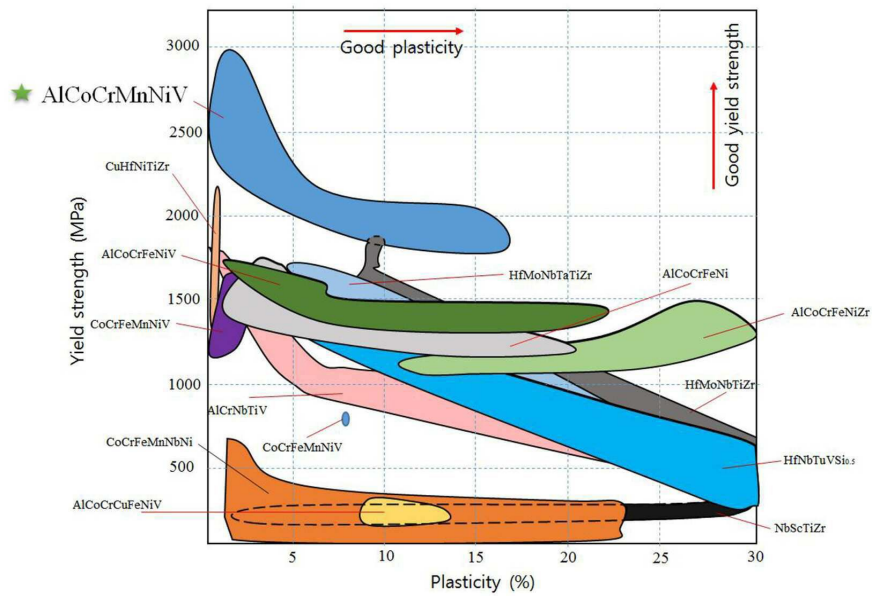
도면14b



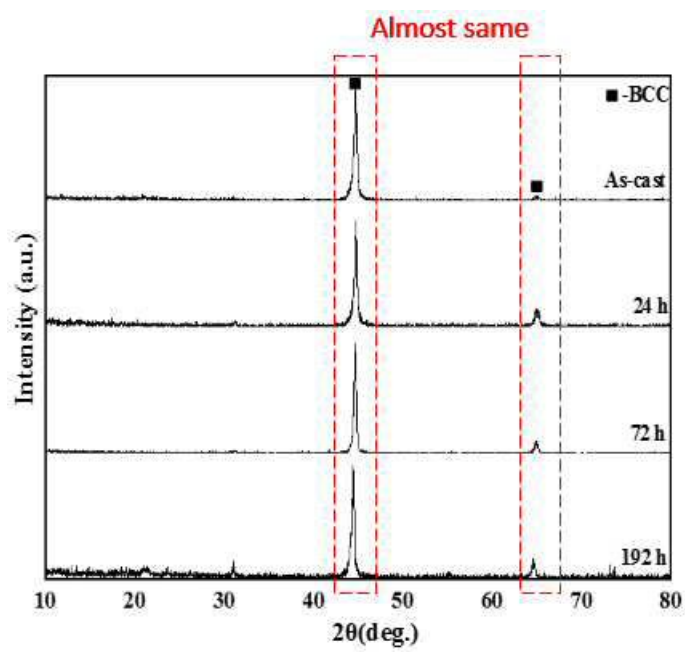
도면14c



도면15

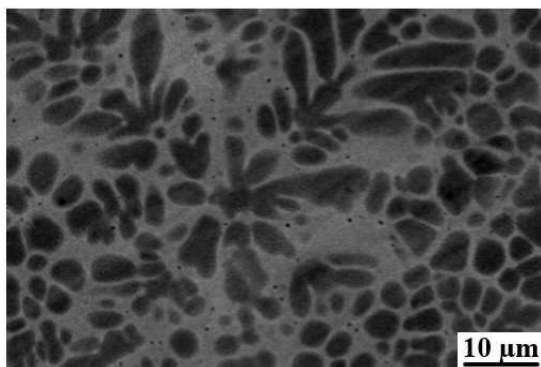


도면16



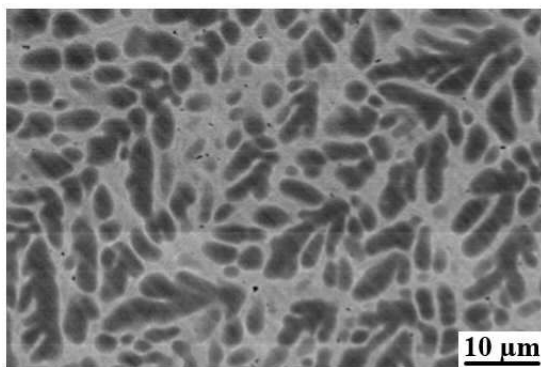
도면17a

24hrs



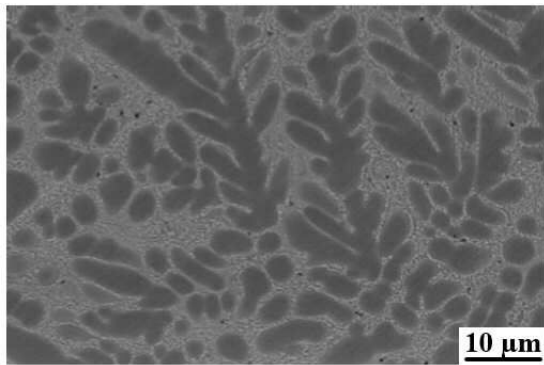
도면17b

72hrs

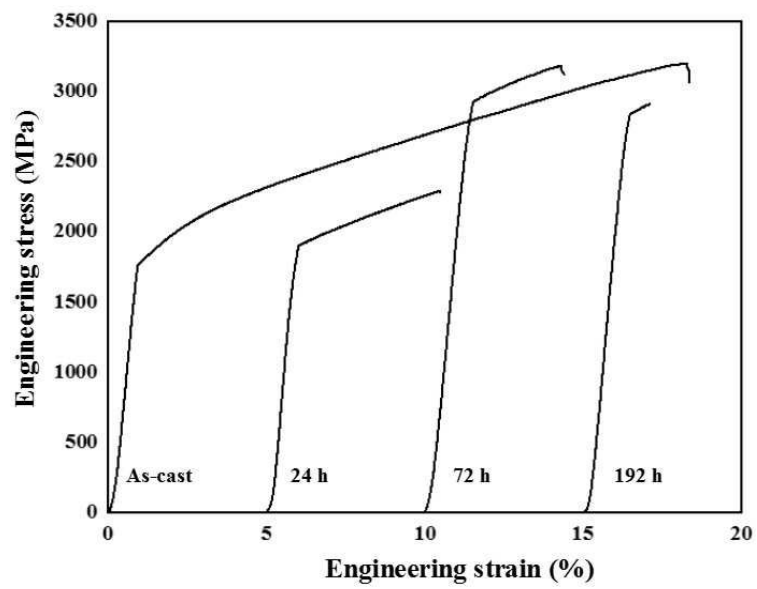


도면17c

192hrs



도면18



도면19

