



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2021년03월10일
(11) 등록번호 10-2225980
(24) 등록일자 2021년03월04일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
C22C 38/58 (2006.01) C22C 27/02 (2006.01)
(52) CPC특허분류
C22C 38/58 (2013.01)
C22C 27/025 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2019-0012913
(22) 출원일자 2019년01월31일
심사청구일자 2019년01월31일
(65) 공개번호 10-2020-0095162
(43) 공개일자 2020년08월10일
(56) 선행기술조사문헌
KR1020170110019 A*
KR1020180105857 A
*는 심사관에 의하여 인용된 문헌

(73) 특허권자
서울대학교산학협력단
서울특별시 관악구 관악로 1 (신림동)
(72) 발명자
박은수
경기도 수원시 팔달구 수성로232번길 7, 104동
403호 (화서동, 래미안아파트)
오현석
서울특별시 동작구 동작대로29길 110, 101동
1404호 (극동아파트, 사당동)
(뒷면에 계속)
(74) 대리인
특허법인다울

전체 청구항 수 : 총 9 항

심사관 : 정현목

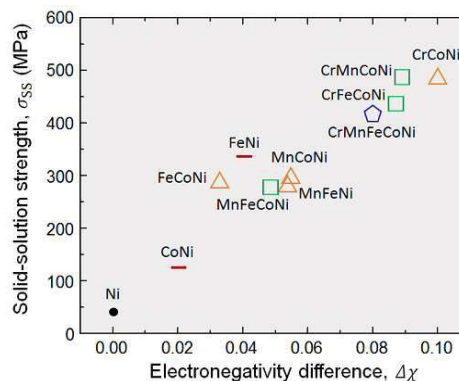
(54) 발명의 명칭 CCA의 고용 강화 예측 방법과 이를 이용한 고용 강화가 제어된 CCA의 설계 방법 및 이를 통해 도출된 V계 합금

(57) 요약

본 발명은 CCA(complex concentrated alloy)의 고용 강화를 예측하는 방법에 관한 것으로,

(뒷면에 계속)

대표도 - 도3



다음의 수학식에 의해서 상기 고용 강화를 예측하고,

$$\sigma_{ss} = (4293 \pm 448)\Delta\chi + (84 \pm 27) \text{ (MPa)}$$

$\Delta\chi$ 는 다음의 수학식으로 계산되며,

$$\Delta\chi = \sqrt{\sum_X c_X (\chi_X - \langle\chi\rangle_{\text{element}})^2}$$

c_x 는 x 원소의 조성이고, χ_x 는 x 원소의 전기음성도이며, $\langle\chi\rangle_{\text{element}}$ 는 $\sum_x c_x \chi_x$ 로 표현되는 평균 전기음성도인 것을 특징으로 한다.

본 발명은, 전기음성도 값을 이용하여 CCA의 고용 강화를 쉽게 예측할 수 있는 효과가 있다.

또한, 본 발명은 전기음성도 값을 이용하여 CCA의 고용 강화를 예측함으로써, 고용 강화가 원하는 값으로 제어된 CCA를 설계할 수 있는 효과가 있다.

(72) 발명자

류욱하

경상북도 경산시 압량면 화랑로63길 3, 101동 140
5호(한라빌라트)

김상준

대구광역시 남구 삼각지3길 38-6 (대명동)

윤국노

서울특별시 관악구 남부순환로228길 56, 1층 101호

명세서

청구범위

청구항 1

Cr, Mn, Fe, Co, Ni로 구성된 그룹에서 선택된 2개 이상의 원소로 구성되며 미세구조가 단일상인 CCA(complex concentrated alloy)의 고용 강화를 예측하는 방법으로서,

다음의 수학식에 의해서 상기 고용 강화를 예측하고,

$$\sigma_{SS} = (4293 \pm 448)\Delta\chi + (84 \pm 27) \text{ (MPa)}$$

$\Delta\chi$ 는 다음의 수학식으로 계산되며,

$$\Delta\chi = \sqrt{\sum_X c_X (\chi_X - \langle\chi\rangle_{\text{element}})^2}$$

c_x 는 x 원소의 조성이고, χ_x 는 x 원소의 전기음성도이며, $\langle\chi\rangle_{\text{element}}$ 는 평균 전기음성도로서 $\sum_x c_x \chi_x$ 로 표현되는 것을 특징으로 하는 CCA의 고용 강화 예측 방법.

청구항 2

삭제

청구항 3

V를 필수적으로 포함하고 Cr, Mn, Fe, Co, Ni로 구성된 그룹에서 선택된 하나 이상의 원소를 포함하며 미세구조가 단일상인 CCA(complex concentrated alloy)의 고용 강화를 예측하는 방법으로서,

다음의 수학식에 의해서 상기 고용 강화를 예측하고,

$$\sigma_{SS} = (4293 \pm 448)\Delta\chi + (84 \pm 27) \text{ (MPa)}$$

$\Delta\chi$ 는 다음의 수학식으로 계산되며,

$$\Delta\chi = \sqrt{\sum_X c_X (\chi_X - \langle\chi\rangle_{\text{element}})^2}$$

c_x 는 x 원소의 조성이고, χ_x 는 x 원소의 전기음성도이며, $\langle\chi\rangle_{\text{element}}$ 는 평균 전기음성도로서 $\sum_x c_x \chi_x$ 로 표현되는 것을 특징으로 하는 CCA의 고용 강화 예측 방법.

청구항 4

Cr, Mn, Fe, Co, Ni로 구성된 그룹에서 선택된 2개 이상의 원소로 구성되며 미세구조가 단일상인 CCA(complex concentrated alloy)를 설계하는 방법으로서,

설계 대상 합금에 요구되는 고용 강화 값을 도출하는 준비 단계; 및

다음의 수학식에 의해서 도출된 고용 강화 값을 만족하도록 합금 조성을 산출하고,

$$\sigma_{SS} = (4293 \pm 448)\Delta\chi + (84 \pm 27) \text{ (MPa)}$$

$\Delta \chi$ 는 다음의 수학적식으로 계산되며,

$$\Delta \chi = \sqrt{\sum_X c_X (\chi_X - \langle \chi \rangle_{\text{element}})^2}$$

c_x 는 x 원소의 조성이고, χ_x 는 x 원소의 전기음성도이며, $\langle \chi \rangle_{\text{element}}$ 는 평균 전기음성도로서 $\sum_x c_x \chi_x$ 로 표현되는 것을 특징으로 하는 고용 강화가 제어된 CCA의 설계 방법.

청구항 5

V를 5 at.% 이상 필수적으로 포함하고 Cr, Mn, Fe, Co, Ni로 구성된 그룹에서 선택된 하나 이상의 원소를 포함하며 미세구조가 단일상인 CCA(complex concentrated alloy)를 설계하는 방법으로서,

설계 대상 합금에 요구되는 고용 강화 값을 도출하는 준비 단계; 및

다음의 수학적식에 의해서 도출된 고용 강화 값을 만족하도록 합금 조성을 산출하고,

$$\sigma_{ss} = (4293 \pm 448)\Delta \chi + (84 \pm 27) \text{ (MPa)}$$

$\Delta \chi$ 는 다음의 수학적식으로 계산되며,

$$\Delta \chi = \sqrt{\sum_X c_X (\chi_X - \langle \chi \rangle_{\text{element}})^2}$$

c_x 는 x 원소의 조성이고, χ_x 는 x 원소의 전기음성도이며, $\langle \chi \rangle_{\text{element}}$ 는 평균 전기음성도로서 $\sum_x c_x \chi_x$ 로 표현되는 것을 특징으로 하는 고용 강화가 제어된 CCA의 설계 방법.

청구항 6

청구항 4 또는 청구항 5에 있어서,

다음의 수학적식에 의해서 계산되는 VEC 값을 계산하고,

$$VEC = \sum_X c_X VEC_X$$

c_x 는 x 원소의 조성이고, VEC_x 는 x 원소의 VEC 값이며,

VEC 값이 7.5 이상인 합금 조성만을 선택하는 것을 특징으로 하는 고용 강화가 제어된 CCA의 설계 방법.

청구항 7

삭제

청구항 8

5 at% ~ 95 at%의 V와;

Cr, Mn, Fe, Co, Ni로 구성된 그룹에서 선택된 하나 이상의 원소를 잔부로서 포함하되,

Cr, Mn, Fe, Co, Ni로 구성된 그룹에서 선택된 원소가 5 at% 이상 포함되어 미세구조가 단일상인 CCA(complex concentrated alloy)를 구성하며,

다음의 수학적식에 의해서 고용 강화 값을 예측하고,

$$\sigma_{ss} = (4293 \pm 448)\Delta\chi + (84 \pm 27) \text{ (MPa)}$$

$\Delta\chi$ 는 다음의 수학식으로 계산되며,

$$\Delta\chi = \sqrt{\sum_X c_X (\chi_X - \langle\chi\rangle_{\text{element}})^2}$$

c_x 는 x 원소의 조성이고, χ_x 는 x 원소의 전기음성도이며, $\langle\chi\rangle_{\text{element}}$ 는 $\sum_x c_x \chi_x$ 로 표현되는 평균 전기음성도이고,

예측된 $\Delta\chi$ 값이 0.0588 이상인 것을 특징으로 하는 V계 합금.

청구항 9

5 at% ~ 95 at%의 V와;

Cr, Mn, Fe, Ni로 구성된 그룹에서 선택된 하나 이상의 원소를 잔부로서 포함하되,

Cr, Mn, Fe, Ni로 구성된 그룹에서 선택된 원소가 5 at% 이상 포함되어 미세구조가 단일상인 CCA(complex concentrated alloy)를 구성하며,

다음의 수학식에 의해서 고용 강화 값을 예측하고,

$$\sigma_{ss} = (4293 \pm 448)\Delta\chi + (84 \pm 27) \text{ (MPa)}$$

$\Delta\chi$ 는 다음의 수학식으로 계산되며,

$$\Delta\chi = \sqrt{\sum_X c_X (\chi_X - \langle\chi\rangle_{\text{element}})^2}$$

c_x 는 x 원소의 조성이고, χ_x 는 x 원소의 전기음성도이며, $\langle\chi\rangle_{\text{element}}$ 는 $\sum_x c_x \chi_x$ 로 표현되는 평균 전기음성도이고,

예측된 $\Delta\chi$ 값이 0.0588 이상인 것을 특징으로 하는 V계 합금.

청구항 10

삭제

청구항 11

청구항 8 또는 9에 있어서,

다음의 수학식에 의해서 계산되는 VEC 값을 계산하고,

$$VEC = \sum_X c_X VEC_X$$

c_x 는 x 원소의 조성이고, VEC_x 는 x 원소의 VEC 값이며,

VEC 값이 7.5 이상인 것을 특징으로 하는 V계 합금.

청구항 12

25 at%~ 40 at%의 V와 잔부의 Ni로 구성되고,
 준안정한 단일의 fcc상인 CCA(complex concentrated alloy)를 구성하며,
 다음의 수학적식에 의해서 고용 강화 값을 예측하고,

$$\sigma_{ss} = (4293 \pm 448)\Delta\chi + (84 \pm 27) \text{ (MPa)}$$

$\Delta\chi$ 는 다음의 수학적식으로 계산되며,

$$\Delta\chi = \sqrt{\sum_X c_X (\chi_X - \langle\chi\rangle_{\text{element}})^2}$$

c_x 는 x 원소의 조성이고, χ_x 는 x 원소의 전기음성도이며, $\langle\chi\rangle_{\text{element}}$ 는 $\sum_x c_x \chi_x$ 로 표현되는 평균 전기음성도이고,

예측된 $\Delta\chi$ 값이 0.0588 이상인 것을 특징으로 하는 V-Ni 초고강도 이원계 합금.

발명의 설명

기술 분야

- [0001] 본 발명은 합금의 고용 강화를 예측하고 합금을 설계하는 방법에 관한 것으로, 더욱 자세하게는 CCA의 고용 강화를 예측하고 이를 이용하여 CCA를 설계하는 방법에 관한 것이다.

배경 기술

- [0002] 일반적으로 합금(alloy)은 금속에 다른 금속 또는 원소를 합쳐서 얻는 금속 성질을 띤 물질을 말하며, 원래의 금속과는 다른 특성을 나타내도록 하여 개량하기 위하여 다양한 조성의 합금이 개발되고 있다.
- [0003] 최근 종래의 일반적인 합금과는 다른 원리의 합금으로서 하이엔트로피 합금 등이 개발되고 있다. 하이엔트로피 합금(high entropy alloy)은 여러 개의 금속 원소가 유사한 분율로 구성되어 첨가된 모든 원소가 주 원소로서 작용하는 합금 시스템으로, 합금 내에 유사한 원자 분율로 인하여 높은 혼합 엔트로피가 유발되고 이에 금속간 화합물 혹은 중간체화합물 대신에 고온에서 안정한 고용체를 형성한다.
- [0004] 이러한 하이엔트로피 합금의 개념에서 출발하여 최근에 보다 확장된 개념으로 기존 기지 원소로 둘러싸인 용질과 달리 용질원소간 상호작용이 특성에 영향을 미치는 CCA(complex concentrated alloy)가 알려지고 있다. CCA는 치환형 고용 원소의 분율이 각 원소별로 5 at% ~ 95 at% 범위까지 확장 가능하며 용질원소간 긴밀한 상호작용을 하면서도 미세구조가 단일상을 나타내는 특징이 있다. 이러한 특성으로 인하여 CCA는 고농도 용매상태의 단일상을 나타내거나 금속간 화합물 등의 석출을 동반하는 전통적인 합금들과는 다른 특성을 나타낼 것으로 기대되고 있으며, CCA의 특성에 대한 활발한 연구가 최근 이어지고 있다. 그러나 현재까지는 특정한 조성으로 제조된 CCA에 대하여 특성을 연구하는 정도에 머물고 있으며, CCA 합금을 설계하기 위한 이론적 기준이 체계적으로 제시되지는 못하고 있는 실정이다.

선행기술문헌

비특허문헌

- [0005] (비특허문헌 0001) Change in the primary solidification phase from fcc to bcc-based B2 in high entropy or complex concentrated alloys, Scripta Materialia 127 (2017) 186-190
- (비특허문헌 0002) Effect of anisotropic microstructure on high-temperature compression deformation of CoCrFeNi based complex concentrated alloy, Kovove Mater. 55 2017 369-378

발명의 내용

해결하려는 과제

[0006] 본 발명은 전술한 종래 기술의 문제점을 해결하기 위한 것으로서 CCA의 특성을 예측하는 방법 및 그에 따른 CCA 설계 방법을 제공하는데 그 목적이 있다.

과제의 해결 수단

[0007] 상기 목적을 달성하기 위한 본 발명에 의한 CCA의 고용 강화 예측 방법은,

[0008] 미세구조가 단일상인 CCA(complex concentrated alloy)의 고용 강화를 예측하는 방법으로서,

[0009] 다음의 수학식에 의해서 상기 고용 강화를 예측하고,

$$\sigma_{SS} = (4293 \pm 448)\Delta\chi + (84 \pm 27) \text{ (MPa)}$$

[0011] $\Delta\chi$ 는 다음의 수학식으로 계산되며,

$$\Delta\chi = \sqrt{\sum_X c_X (\chi_X - \langle\chi\rangle_{\text{element}})^2}$$

[0013] c_x 는 x 원소의 조성이고, χ_x 는 x 원소의 전기음성도이며, $\langle\chi\rangle_{\text{element}}$ 는 $\sum_x c_x \chi_x$ 로 표현되는 평균 전기음성도인 것을 특징으로 한다.

[0014] 이때, CCA가, Cr, Mn, Fe, Co, Ni로 구성된 그룹에서 선택된 2개 이상의 원소로 구성된 CCA일 수 있다.

[0015] 또한, CCA가, V를 필수적으로 포함하고 Cr, Mn, Fe, Co, Ni로 구성된 그룹에서 선택된 하나 이상의 원소를 포함하는 CCA일 수 있다.

[0016] 본 발명의 다른 형태에 의한 고용 강화가 제어된 CCA의 설계 방법은,

[0017] 미세구조가 단일상인 CCA(complex concentrated alloy)를 설계하는 방법으로서,

[0018] 설계 대상 합금에 요구되는 고용 강화 값을 도출하는 준비 단계; 및

[0019] 다음의 수학식에 의해서 도출 고용 강화 값을 만족하도록 합금 조성을 산출하고,

$$\sigma_{SS} = (4293 \pm 448)\Delta\chi + (84 \pm 27) \text{ (MPa)}$$

[0021] $\Delta\chi$ 는 다음의 수학식으로 계산되며,

$$\Delta\chi = \sqrt{\sum_X c_X (\chi_X - \langle\chi\rangle_{\text{element}})^2}$$

[0023] c_x 는 x 원소의 조성이고, χ_x 는 x 원소의 전기음성도인 조성 산출 단계를 포함하는 것을 특징으로 한다.

[0024] 이때, 다음의 수학식에 의해서 계산되는 VEC 값을 계산하고,

$$VEC = \sum_X c_X VEC_X$$

[0026] c_x 는 x 원소의 조성이고, VEC_x 는 x 원소의 VEC 값이며,

[0027] VEC 값이 7.5 이상인 합금 조성만을 선택하여, fcc상의 CCA를 설계할 수 있다.

[0028] CCA가, Cr, Mn, Fe, Co, Ni로 구성된 그룹에서 선택된 2개 이상의 원소로 구성된 CCA일 수 있다.

[0029] CCA가, V를 필수적으로 포함하고 Cr, Mn, Fe, Co, Ni로 구성된 그룹에서 선택된 하나 이상의 원소를 포함하는 CCA일 수도 있다.

[0030] 본 발명의 또 다른 형태에 의한 V계 합금은,

[0031] 5 at% ~ 95 at%의 V와;

[0032] Cr, Mn, Fe, Co, Ni로 구성된 그룹에서 선택된 하나 이상의 원소를 잔부로서 포함하되,

[0033] Cr, Mn, Fe, Co, Ni로 구성된 그룹에서 하나 이상의 선택된 원소가 5 at% 이상 포함되어 미세구조가 단일상인 CCA(complex concentrated alloy)를 구성하여, 고용 강화 효과가 증가됨으로써 강도가 향상된 것을 특징으로 한다.

[0034] 본 발명의 다른 형태에 의한 V계 합금은,

[0035] 5 at% ~ 95 at%의 V와;

[0036] Cr, Mn, Fe, Ni로 구성된 그룹에서 선택된 하나 이상의 원소를 잔부로서 포함하되,

[0037] Cr, Mn, Fe, Ni로 구성된 그룹에서 선택된 원소가 5 at% 이상 포함되어 미세구조가 단일상인 CCA(complex concentrated alloy)를 구성하는 것을 특징으로 한다. 상대적으로 고가인 Co를 제외한 Cr, Mn, Fe, Ni로 구성된 그룹에서 원소를 선택함으로써, 고용 강화 효과에 의한 고강도 특성은 유지하면서도 합금의 제조 비용은 낮출 수 있다.

[0038] 이때, 다음의 수학적식에 의해서 고용 강화 값을 예측하고,

[0039]
$$\sigma_{SS} = (4293 \pm 448)\Delta\chi + (84 \pm 27) \text{ (MPa)}$$

[0040] $\Delta\chi$ 는 다음의 수학적식으로 계산되며,

[0041]
$$\Delta\chi = \sqrt{\sum_X c_X (\chi_X - \langle\chi\rangle_{\text{element}})^2}$$

[0042] c_X 는 x 원소의 조성이고, χ_X 는 x 원소의 전기음성도이며,

[0043] 예측된 고용 강화 값이 0.0588 이상인 것이 바람직하다.

[0044] 또한, 다음의 수학적식에 의해서 계산되는 VEC 값을 계산하고,

[0045]
$$VEC = \sum_X c_X VEC_X$$

[0046] c_X 는 x 원소의 조성이고, VEC_X 는 x 원소의 VEC 값이며,

[0047] VEC 값이 7.5 이상인 경우에 fcc상인 합금을 얻을 수 있다.

[0048] 본 발명의 마지막 형태에 의한 V-Ni 초고강도 이원계 합금은, 25 at%~ 40 at%의 V와 잔부의 Ni로 구성되며, 준안정한 단일의 fcc상인 CCA(complex concentrated alloy)를 구성하는 것을 특징으로 한다.

발명의 효과

[0049] 상술한 바와 같이 구성된 본 발명은, 전기음성도 값을 이용하여 CCA의 고용 강화를 쉽게 예측할 수 있는 효과가 있다.

[0050] 또한, 본 발명은 전기음성도 값을 이용하여 CCA의 고용 강화를 예측함으로써, 고용 강화가 원하는 값으로 제어된 CCA를 설계할 수 있는 효과가 있다.

[0051] 나아가 본 발명의 V계 합금은, 종래에 Cr, Mn, Fe, Co, Ni로 구성된 CCA에 비하여 강도가 향상된 CCA를 제공할 수 있는 효과가 있다.

도면의 간단한 설명

[0052] 도 1은 Cr, Mn, Fe, Co, Ni로 구성된 CCA에 대하여 고용 강화(σ_{SS})와 원자주변의 국부적 압력의 차이(ΔP_{solute})를 비교한 그래프이다.

도 2는 Cr, Mn, Fe, Co, Ni로 구성된 CCA에 대하여 원자주변의 국부적 압력의 차이(ΔP_{solute})와 전하 수송 (Charge transfer, $dQ(n)$)을 비교한 그래프이다.

도 3은 Cr, Mn, Fe, Co, Ni로 구성된 CCA에 대하여 전기음성도 차이($\Delta\chi$)와 고용 강화(σ_{SS}) 값을 비교한 그래프이다.

도 4는 Ni와 V의 CCA에 대한 원자주변의 국부적 압력의 차이(ΔP_{solute})와 전하 수송 (Charge transfer, $dQ(n)$)을 비교한 그래프이다.

도 5는 V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni로 구성되고 fcc상인 조성들에 대하여 전기음성도 차이와 혼합 엔트로피를 기준으로 분포시키고, 고용 강화 예측 값을 계산한 결과를 나타낸 그래프이다.

도 6은 Ni-V 이원계 합금의 상태도이다.

도 7 내지 8은 제조된 63.2 at%Ni 합금의 표면에 대한 전자현미경 사진 및 EDS 분석 결과이다.

도 9는 제조된 63.2 at%Ni 벌크 합금에 대한 고에너지 X-선 회절 실험 결과이다.

도 10은 다양한 CCA에 대하여 인장 시험을 수행한 결과이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

- [0053] 첨부된 도면을 참조하여 본 발명에 따른 실시예를 상세히 설명한다.
- [0054] 본 발명의 발명자들은 Cr, Mn, Fe, Co, Ni로 구성된 그룹에서 선택된 2개 이상의 원소로 구성되고 미세구조가 fcc 단일 상인 CCA의 특성을 연구한 결과, fcc상의 고용 강화 효과가 구성원소의 전기음성도 (electronegativity)와 관련됨을 도출할 수 있었다.
- [0055] Cr, Mn, Fe, Co, Ni로 구성된 CCA의 fcc상에서의 고용 강화는, 도 1에 도시된 것과 같이 원자주변의 국부적 압력의 차이(atomic level pressure difference, ΔP_{solute})에 의해 유발되며, 이는 원자주변의 국부적 압력의 차이가 전위(dislocation)의 움직임을 방해하기 때문이다.
- [0056] Cr, Mn, Fe, Co, Ni로 구성된 CCA에서 원자주변의 국부적 압력의 차이(ΔP_{solute})는, 도 2에 도시된 것과 같이 원소간의 전기음성도 차이에 의해서 나타나는 전하 수송(charge transfer)에 의해서 발생하므로, 본 발명의 발명자들은 구성원소의 전기음성도를 기준으로 Cr, Mn, Fe, Co, Ni로 구성된 CCA의 fcc상에서의 고용 강화를 예측할 수 있을 것으로 예상하였다.
- [0057] 도 3은 Cr, Mn, Fe, Co, Ni로 구성된 CCA에 대하여 전기음성도 차이와 고용강화 값을 비교한 그래프이다.
- [0058] 본 발명의 발명자들은 앞서 살펴본 것과 같이, Cr, Mn, Fe, Co, Ni로 구성된 CCA의 fcc상에서의 고용 강화가 구성원소의 전기음성도와 관련이 있을 것으로 생각하고, CCA의 전기음성도 차이($\Delta \chi$)와 고용 강화(σ_{ss}) 값을 비교한 결과, 이들이 서로 비례 관계에 있음을 확인할 수 있었다.
- [0059] 나아가 본 발명의 발명자들은, 다음의 표 1과 같은 Allen 스케일의 전기음성도를 기준으로 Cr, Mn, Fe, Co, Ni 원소들에 V를 혼합하는 경우에 고용 강화 효과가 상승될 것으로 예상하였다.

표 1

	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni
Electronegativity, χ_{Allen}	1.53	1.65	1.75	1.80	1.84	1.88

[0061] 도 4는 Ni와 V의 CCA에 대한 원자주변의 국부적 압력의 차이(ΔP_{solute})와 전하 수송 (Charge transfer, $dQ(n)$)을 비교한 그래프이다.

[0062] 도시된 것과 같이, 원자주변의 국부적 압력의 차이(ΔP_{solute})가 전하 수송(charge transfer, $dQ(n)$)에 비례하는 결과를 보이는 것으로 부터, V를 추가하는 경우에도 구성원소의 전기음성도 차이($\Delta \chi$)와 고용 강화(σ_{ss}) 값이 비례하는 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

[0063] 본 발명의 발명자들은 최종적으로, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni로 구성된 그룹에서 선택된 2개 이상의 원소로 구성된 CCA의 고용 강화(σ_{ss})를 예측할 수 있는 다음의 식을 발명하였다.

[0064]
$$\sigma_{\text{ss}} = (4293 \pm 448)\Delta\chi + (84 \pm 27) \text{ (MPa)}$$

[0065] 여기서 전기음성도 차이($\Delta \chi$)는 Allen 스케일의 전기음성도를 기준으로 다음의 표준편차 식으로 표현된다.

[0066]
$$\Delta \chi = \sqrt{\sum_X c_X (\chi_X - \langle \chi \rangle_{\text{element}})^2}$$

[0067] c_x 는 x 원소의 조성이고, χ_x 는 x 원소의 전기음성도이며, $\langle \chi \rangle_{\text{element}}$ 는 평균 전기음성도로서 $\sum_x c_x \chi_x$ 로 표현된다.

[0068] 상기한 V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni로 구성된 CCA에 대한 고용 강화 예측 방법을 기준으로, 원하는 고용 강화 값을 갖는 CCA를 설계할 수 있다.

[0069] 이를 위해서는 먼저, 준비 단계로서 설계 대상 합금에 요구되는 고용 강화 값을 도출하여야 한다.

[0070] 다음으로 조성 산출 단계로서, 준비 단계에서 도출된 고용 강화 값을 만족하는 합금 조성을 상기한 고용 강화 예측 방법의 수식을 통해서 산출한다.

[0071] 이때, 본 발명의 발명자들은 V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni로 구성된 합금이 미세구조가 fcc 단일상인 CCA가 형성되는 경우를 만족할 수 있는 조건으로서, 다음의 식으로 계산되는 CCA의 원자가 전자 농도(valence electron concentration, 이하 VEC)를 함께 특정하였다.

[0072]
$$\text{VEC} = \sum_X c_X \text{VEC}_X$$

[0073] c_x 는 x 원소의 조성이고, VEC_x 는 x 원소의 VEC 값이다.

[0074] V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni로 구성된 합금이 미세구조가 fcc 단일상인 CCA를 형성하도록 하기 위해서는, VEC 값이 7.5 이상이 되도록 구성하여야 한다.

[0075] 도 5는 V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni로 구성되고 미세구조가 fcc 단일상인 CCA 조성들에 대하여 전기음성도 차이와 혼합 엔트로피를 기준으로 분포시키고, 고용 강화 예측 값을 계산한 결과를 나타낸 그래프이다. 본 도면은 V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni로 구성할 수 있는 모든 조성 조합에 대해 5 at.% 간격으로 계산하였다.

[0076] V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni로 구성되고 미세구조가 fcc 단일상인 CCA에 대하여 고용 강화 값을 예측한 결과, 빨간색으로 표시된 V를 5 at.% 이상 포함하는 합금 조성들은 모두 전기음성도 차이가 0.0588 이상을 나타내어, 고용 강화 효과가 V를 첨가하지 않는 경우에 비해 상대적으로 높게 예측되는 것을 확인할 수 있다.

[0077] 이로부터 Cr, Mn, Fe, Co, Ni로 구성된 CCA에 비하여, V를 필수적으로 포함하고 Cr, Mn, Fe, Co, Ni로 구성된 그룹에서 선택된 하나 이상의 원소를 포함시켜서 제조된 경우가 고강도의 CCA임을 알 수 있다.

[0078] 본 발명에 따른 CCA의 고용 강화를 예측하는 방법과 그에 따라서 설계된 CCA가 정확한 결과를 나타내는지 확인하기 위하여, Ni-V 이원계 합금에 대하여 확인을 수행하였다.

[0079] 도 5에서 Ni-V 이원계 합금 중 fcc 단일상 제조가 가능한 5 at% 이상의 V와 40 at% 이하의 V를 포함하는 조성 부분을 보라색으로 표시하였으며, 특히 63.2 at%Ni인 Ni-V계 CCA를 제작하여 특성을 확인하였다.

[0080] 도 6은 Ni-V 이원계 합금의 상태도이다. 도 6을 통해 알 수 있는 바와 같이 V이 25 at.% 이상 40 at.% 이하인 조성 영역에서 공석(Eutectoid) 영역을 형성함으로써 준안정 단일 fcc상이 형성되기 용이할 것으로 판단되며, 이를 통해 준안정 단일 fcc상을 갖는 Ni_{63.2}V_{36.8} (at.%) CCA를 제작하였다. 먼저 아크 주조 용해 후 석선 캐스팅을 거쳐 모합금을 주조하였다. 이후 30%의 냉간압연을 통해 주조조직을 파괴하였고, 1075℃에서 45시간 동안 균질화처리를 수행하였다. 균질화된 시편은 60%의 냉간압연과 920℃에서 3분의 열처리 및 수냉과정을 통해 재결정화를 수행하였다.

[0081] 도 7 내지 8은 제조된 63.2 at%Ni 합금의 표면에 대한 전자현미경 사진 및 EDS 분석 결과이다. 도면에서 알 수 있는 바와 같이 제조된 합금 표면에 어떤 석출상도 발견되지 않았고 조성편차도 없었다.

[0082] 또한, 도 9는 제조된 63.2 at%Ni 벌크 합금에 대한 고에너지 X-선 회절 실험 결과이다. 고에너지 X-선 회절 실험을 하는 경우 제조된 벌크 시편을 투과하여 벌크의 결정성에 대한 정보를 고분해능으로 확인할 수 있으며, 도면에서 알 수 있는바와 같이 fcc 단일상이 얻어진 것을 확인할 수 있다.

[0083] 도 7 내지 도 9에서 확인되는 것과 같이 제조된 63.2 at%Ni 벌크 합금에서 fcc 단일상의 CCA가 제조된 것을 확

인할 수 있다.

[0084] 도 10은 다양한 CCA에 대하여 인장 시험을 수행한 결과이다.

[0085] 원자수가 다른 (Non-equiatomic) $\text{Ni}_{63.2}\text{V}_{36.8}$ CCA가 원자수가 같은 (Equiatomic) $\text{Cr}_{33.3}\text{Co}_{33.3}\text{Ni}_{33.3}$ CCA 및 $\text{Cr}_{20}\text{Mn}_{20}\text{Fe}_{20}\text{Co}_{20}\text{Ni}_{20}$ CCA에 비하여 고강도 특성을 나타내는 것을 확인할 수 있으며, 이는 도 5에서 예측한 V가 첨가된 CCA의 경우에 고용 강화가 높아지는 것과 일치하는 결과이다.

[0086] 이로부터 본 발명의 CCA의 고용 강화 예측 방법 및 그에 따른 CCA 설계 방법이 실제 CCA의 강도 특성을 예측하고 설계하는 것에 적용될 수 있음을 알 수 있다.

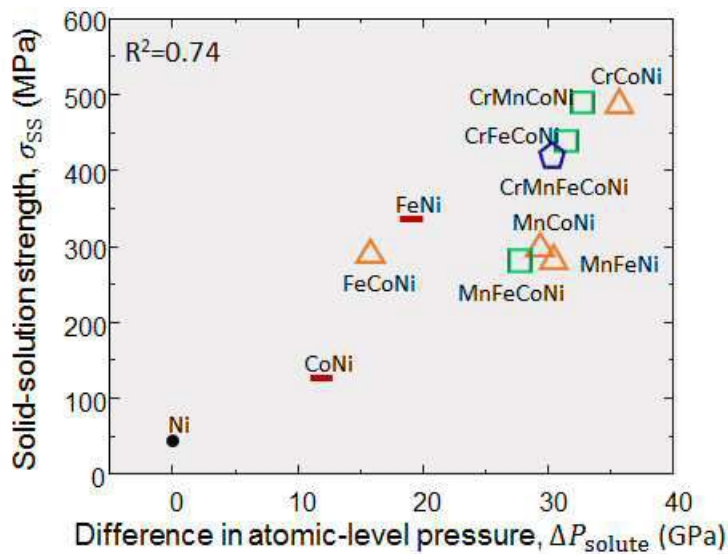
[0087] 또한, V를 필수적으로 포함하고 Cr, Mn, Fe, Co, Ni로 구성된 그룹에서 선택된 하나 이상의 원소를 포함시켜서 제조된 미세구조가 fcc 단일상인 CCA의 경우는 고강도의 CCA를 구성할 수 있음을 확인할 수 있다.

[0088] 한편, Co는 상대적으로 고가의 원소이기 때문에, Co를 제외한 Cr, Mn, Fe, Ni로 구성된 그룹에서 선택된 하나 이상의 원소와 V로 CCA를 구성하는 경우, 상대적으로 낮은 비용으로 성능이 유사한 고강도의 CCA를 구성할 수 있다.

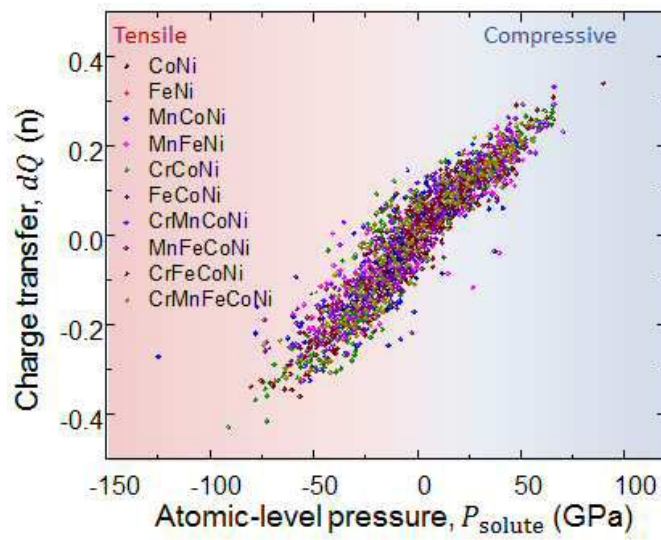
[0089] 이상 본 발명을 바람직한 실시예를 통하여 설명하였는데, 상술한 실시예는 본 발명의 기술적 사상을 예시적으로 설명한 것에 불과하며, 본 발명의 기술적 사상을 벗어나지 않는 범위 내에서 다양한 변화가 가능함은 이 분야에서 통상의 지식을 가진 자라면 이해할 수 있을 것이다. 따라서 본 발명의 보호범위는 특정 실시예가 아니라 특허청구범위에 기재된 사항에 의해 해석되어야 하며, 그와 동등한 범위 내에 있는 모든 기술적 사상도 본 발명의 권리범위에 포함되는 것으로 해석되어야 할 것이다.

도면

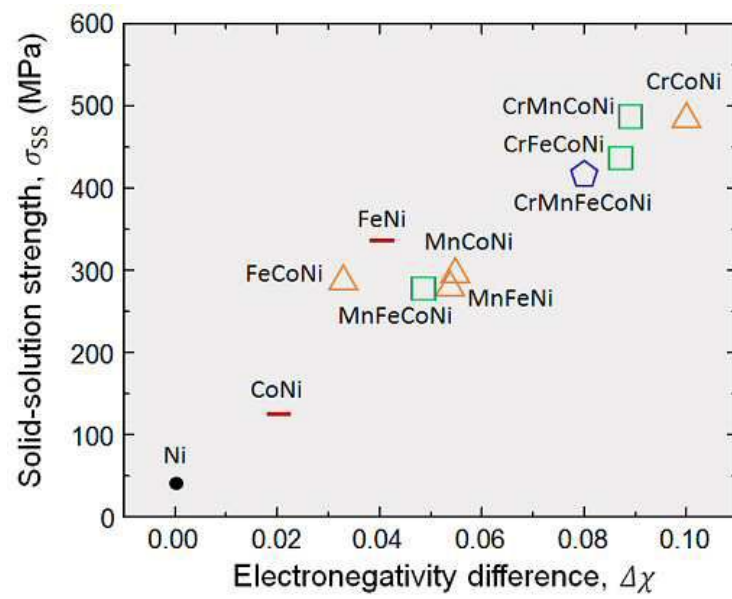
도면1



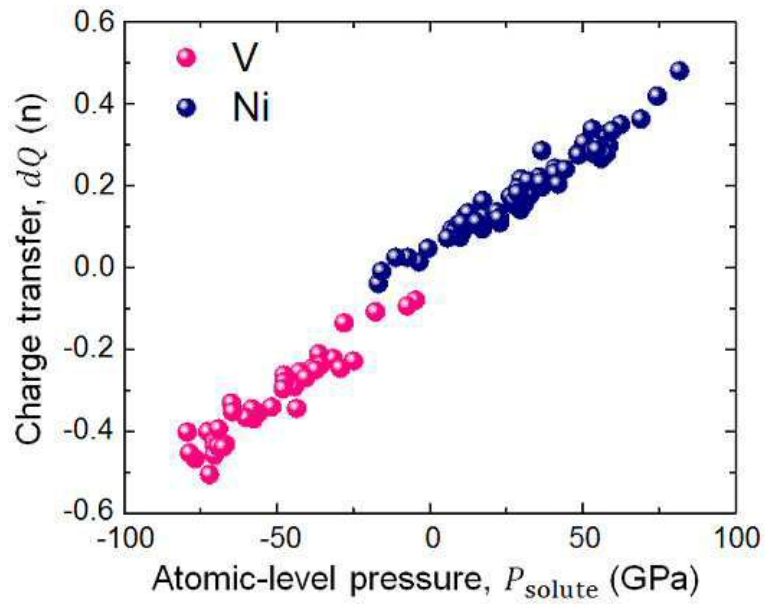
도면2



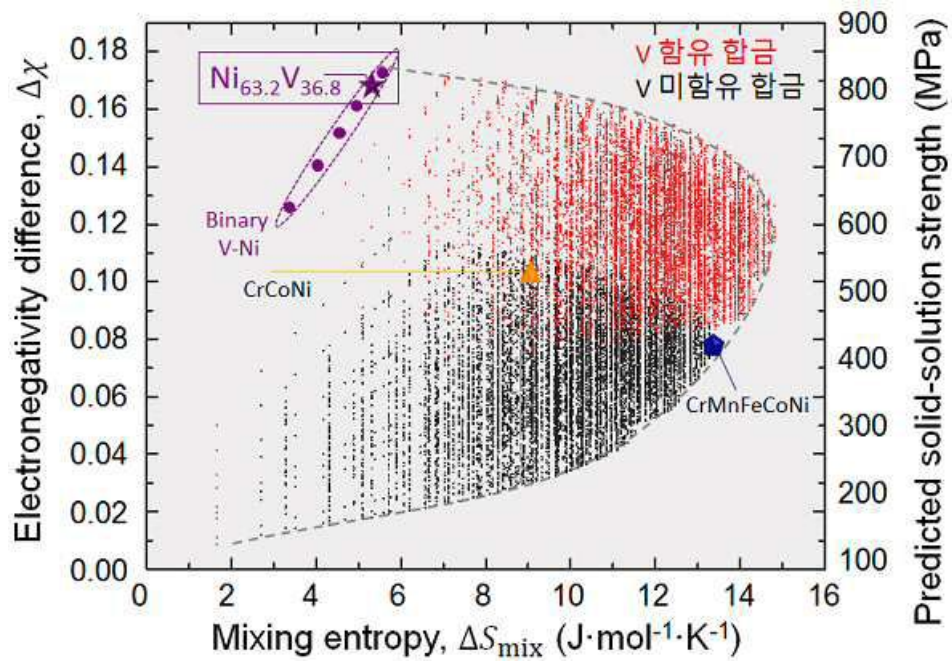
도면3



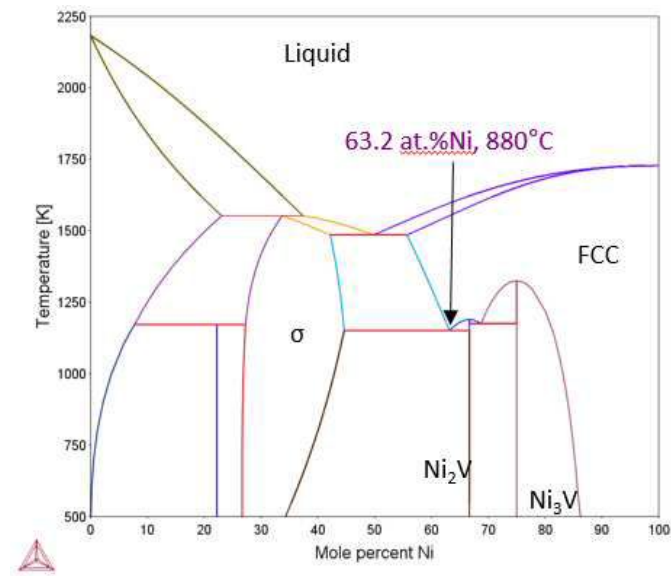
도면4



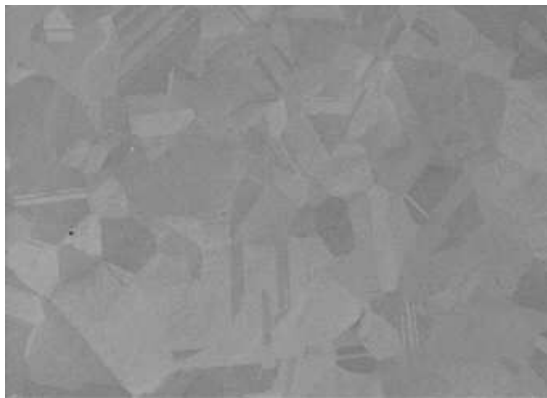
도면5



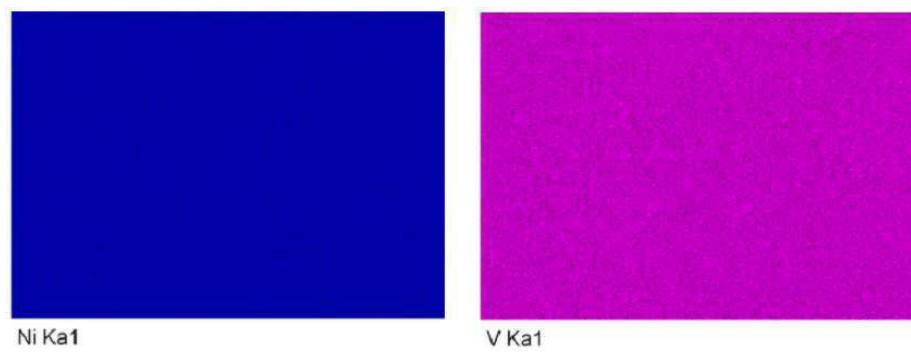
도면6



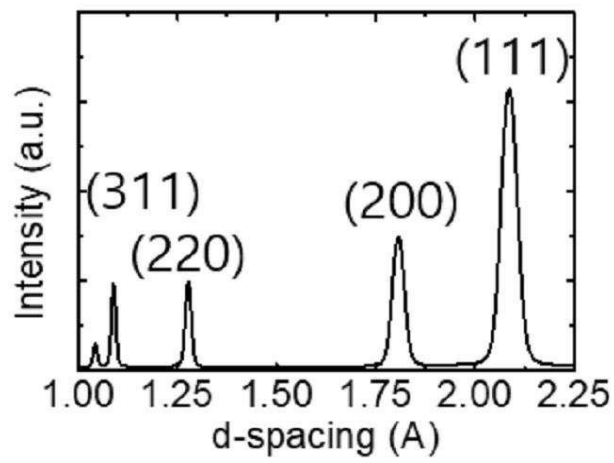
도면7



도면8



도면9



도면10

