

제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “국내 학·연 극지연구진흥프로그램(PAP사업)”에 관한 연구 “극지 환경 피로파괴 저항성이 큰 TRIP 하이엔트로피 합금 개발” 과제의 최종보고서(보고서명: FCC 하이엔트로피 합금의 변형기구 제어에 따른 극저온 물성 변화에 관한 고찰)로 제출합니다.

2018. 06. 20



연구기관명 : 서울대학교

연구책임자 : 박 은 수

참여연구원 : 오 현 석
“ : 예 정 원
“ : 이 정 수
“ : 김 완
“ : 안 혜 상
“ : 윤 국 노
“ : 김 경 준
“ : 김 상 준
“ : 김 일 환
“ : 류 옥 하
“ : 오 현 석
“ : 김 소 연
“ : Khurram Yaqoob

요 약 문

I. 제 목 :

FCC 하이엔트로피 합금의 변형기구 제어에 따른 극저온 물성 변화에 관한 고찰

II. 연구개발의 목적 및 필요성 :

본 연구에서는 극저온 환경 하에서 구조용 소재로 적용 가능한 극저온 환경 피로파괴 저항성이 큰 TRIP 하이엔트로피 신합금을 개발하고자 하였다. 부연하면, 1) 큰 σ_y/k 비를 가져 저온 인성이 우수한 것으로 보고된 전이금속 계열 FCC 하이엔트로피 신합금을 설계하고, 2) 조성 제어를 통해 적층 결함 에너지 조절을 통해 변형 시 Twin이 활성화 된 소성 특성 발현을 도모하여, 최종적으로는 3) 남극 및 북극 등의 극저온환경에서 최적의 강도 및 파괴 저항성을 갖는 TWIP/TRIP 하이엔트로피 신합금을 개발하고자 하였다. 이를 위하여 하이엔트로피 합금의 맞춤형 재료설계를 통한 특성제어 및 제조공정을 최적화하고, 지속가능한 극저온 신소재 개발에 관한 원천 기술 및 노하우를 축적하여, 극저온개발의 국가적 역량을 제고하고 선도적 역할을 수행하도록 하는 신소재 개발의 시금석을 제공하고자 하였다.

III. 연구개발의 내용 및 범위 :

현재 일반적으로 상온에서 사용 중인 고강도 구조용 소재들이 극저온에서는 사용이 어렵다는 사실이 밝혀지면서, 극저온 환경에서 손상 저항성이 큰 구조용 신소재의 개발이 큰 화두로 떠오르고 있다. 하지만 현재 국내의 극저온 관련 소재 연구는 거의 전무한 상황이며, 향후 극저온개발의 주도권 확보를 위해 관련 신소재 개발을 위한 연구가 시급한 실정이다.

본 연구에서는 우수한 저온 파괴인성을 가지는 것으로 알려진 FCC 하이엔트로피 합금의 조성제어를 통하여 적층 결함 에너지 조절을 통해 변형 시 Twin이 활성화 된 소성 특성이 발현되도록 하여, 지금까지 보고된 적이 없는 극저온 환경 피로파괴 저항성이 큰 TWIP/TRIP 하이엔트로피 신합금을 개발하고자하였다.

IV. 연구개발결과 :

본 연구의 1차 년도에는 저온 인성이 우수한 FCC 하이엔트로피 합금의 조성 제어를

통해 적층 결함 에너지를 조절하여 고강도 고인성이 동시에 구현가능 하도록 하는 TWIP (Twin-induced plasticity) 및 TRIP 특성을 나타내는 하이엔트로피 신합금을 개발하고, 상온 기계적 특성을 평가하여 특정 조성에서 항복강도 500 MPa 이상, 인장강도 950 MPa 이상, 연신 60% 이상의 고강도 고연신 특성과 150 MPa·m^{1/2} 이상의 파괴인성을 가지는 조성영역을 확인하였다.

또한 2 차년도에는 50 이상의 커다란 σ_y/κ (항복강도/열전도도)를 가져 저온 인성이 우수한 합금 시스템으로 조성을 최적화하여 저온 모사 환경(200 K)에서 1000 MPa 이상의 인장강도를 가지며, 상온 대비 20% 이상 향상된 파괴 인성 특성역시 확보하여, 극저온 환경 하에서 구조용 소재로 적용 가능한 극저온 환경 피로파괴 저항성이 큰 TRIP 하이엔트로피 신합금을 개발하고자 하였다. 뿐만 아니라, 기보고 된 극저온 특성이 가장 우수한 소재 대비 20% 이상의 파괴 인성 향상 효과 역시 확인하였다. 추가로, 본 연구에서는 현재 국내에서는 미비한 극저온 소재 연구 분야를 기초를 다지기 위해 개발 합금의 저온 변형기구를 체계적으로 고찰하고, 개발 소재를 실제 극저온(모사)환경에 노출 후 재료의 특성저하에 관한 데이터베이스를 구축하고자 하였다.

V. 연구개발결과의 활용계획 :

극저온연구소로 대표되는 국내의 우수한 극저온 분야 연구수준에 비해, 극저온 소재 관련 연구는 선진국에 비해 매우 미비한 실정이고, 특히 북극 및 남극 기지 증설 및 본격적 극저온 활용을 위해서는 현재보다 더 극한의 환경에서 구동 가능한 신소재 개발이 절실하다. 따라서 본 과제를 통하여 극저온 환경 피로파괴 저항성이 큰 TWIP/TRIP 하이엔트로피 신합금을 개발에 관한 연구를 행함으로써, 관련 기술 수준을 획기적으로 향상시켜 극저온 소재 분야의 Fast-Follower에서 First-Mover로 발돋움하여 국내의 관련분야 연구를 선진국 수준으로 급격히 향상시키는데 일조할 것으로 기대한다. 또한 본 연구를 통해 현재는 걸음마 단계에 불과한 국내의 극저온 소재 연구 분야의 연구 인프라를 구축하여 미래의 첨단 신소재 개발 기술의 초석으로 삼고, 학제간 적극교류를 통하여 국가적 연구역량발전에 기여할 수 있다.

영문 요약서 (Summary)

I. Title :

A Study on the Change of Properties at Cryogenic Temperature by Controlling Deformation Mechanism of FCC High Entropy Alloy

II. Purpose :

Through this 2 year project, we developed damage-tolerant TRIP high-entropy alloys for sustainable arctic materials, which improves durability under extremely low temperature compared to conventional low temperature materials:

- 1) Development of TWIP/TRIP high-entropy alloys by controlling alloy composition in FeCoNiMnCr-based high entropy alloy system due to manipulating stacking fault energies for activating twinning behavior
- 2) Evaluation of mechanical properties, especially fracture toughness at room/liquid nitrogen temperature
- 3) Investigation of deformation mechanism of developed alloys with TWIP/TRIP behaviors
- 4) Database construction for material degradation in polar (simulation) environment

III. Contents :

In this project, the novel TWIP/TRIP high-entropy alloy was developed for sustainable arctic materials in polar environment. Arctic material undergoes extremely severe operating conditions, especially cyclic low temperature. For sustainable application of developed novel TWIP/TRIP high entropy alloys, fracture toughness should be higher than conventional low temperature materials.

IV. Results :

The TWIP/TRIP high-entropy alloy developed through the first stage of this work exhibit high strength at room temperature. (yield strength > 500 MPa,

fracture strength > 950 MPa) Moreover, these alloys show very large fracture toughness over than 150 MPa · m^{1/2}.

Moreover, during the 2nd year of this work, we optimized the HEA composition and measured the mechanical properties at low temperature, 200 K. The improved low temperature mechanical properties of novel TWIP/TRIP high-entropy alloy compared to conventional low temperature alloys will be explained by verifying the deformation mechanism of developed alloys. Finally, based on the discussion with Korea Polar Research Institute, we will construct database for material degradation in polar (simulation) environment.

V. Expected Contributions :

As a frontier of arctic materials research, the field of the structural materials in pole environment is in the beginning stage. The development of damage-tolerant TWIP/TRIP high-entropy alloys with superior fracture toughness and strength provides reliability and predictability as novel arctic materials for structural application. Indeed, our research results show that the application of these paradigm-shifting materials can be greatly extended by using the developed TWIP/TRIP high-entropy alloys as a arctic structural materials. This would in turn permit a more widespread and cost-effective application in various industries with extreme conditions. Utilization of novel TWIP/TRIP alloys with ultra-high strength and toughness in structural metallic alloys may present a new breakthrough application of metallic materials in the near future.

영 문 목 차 (Contents)

Chapter 1. Introduction

Verse 1. Research necessity

1. Research necessity of low temperature materials
2. Difficulties of studying low temperature materials

Verse 2. Significance of the study

Chapter 2. Current Status of The Technology

Verse 1. Domestic/International Status of low temperature materials

Verse 2. Novel approaches

Chapter 3. Experimental Results

Verse 1. Research methodology

1. Purpose of study
2. Research methodology

Verse 2. Contents of research

1. Manipulating stacking fault energy of high entropy alloys
2. Solid solution strengthening of high entropy alloys
3. Property control by alloying Al with FCC high entropy alloys

Verse 3. Excellence of results

Chapter 4. Achievements

Verse 1. Achievements by year

Verse 2. Overall evaluation

Chapter 5. Application plans

Verse 1. Possibility of application to low temperature materials

Verse 2. Potentials for commercialization

Chapter 6. References



목 차

제 1 장 서론

제 1 절 연구 개발의 필요성 및 기존 연구의 문제점

1. 연구 개발의 필요성
2. 저온용 구조 소재 개발의 어려움 및 개발의 방향성

제 2 절 본 연구 개발의 중요성

제 2 장 국내외 기술개발 현황

제 1 절 국내/외 극저온 소재 기술개발 현황

제 2 절 소재적 한계를 해결하기 위한 독창적 노력

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제 1 절 각 차년도별 연구 목적과 수행 방법론

1. 최종 연구 목표
2. 연구 수행 방법론

제 2 절 연구 수행 내용

1. 하이엔트로피 합금의 적층 결함 에너지(SFE) 제어
2. 하이엔트로피 합금 강화를 위한 고용강화 기구 도입
3. AI 첨가에 따른 SFE 제어 및 특성 개선 효과

제 3 절 연구 수행 성과의 우수성

제 4장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

제 1 절 각 차년도 별 연구 목표 및 성과의 달성 정도

제 2 절 연구 결과의 종합적 달성 정도

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

제 1 절 연구 개발 결과의 적용 가능성 및 사업화 추진 방향

제 2 절 연구 성과의 기술 및 경제 산업적 측면에서의 효과

제 6 장 참고문헌



제 1 장 서론

제 1 절 연구 개발의 필요성 및 기존 연구의 문제점

1. 연구 개발의 필요성

최근 가속화 되고 있는 인구 증가와 환경오염 및 자원 고갈 등의 문제가 대두됨에 따라 세계적인 관심이 지하 공간, 심해저 개발을 넘어 남극 및 북극을 포함하는 극지 개발에 집중되고 있다. 특히 미국, 캐나다, 러시아 및 북유럽 국가 등 북극해와 맞닿아 있는 국가들을 중심으로 북극자원 개발이 빠르게 진행되고 있으며, 우리와 가까운 동아시아 국가인 일본, 중국 역시 극지의 석유 개발권, 자원 채굴권 등의 획득에 심혈을 기울이고 있다. 뿐만 아니라 최근 환경오염 및 기후변화에 효과적으로 대응하기 위해 선진국을 중심으로 앞 다투어 남극 대륙에 연구소를 설립하고 생태학, 우주/천문학 등의 연구에 매진하고 있다.

이처럼 세계의 관심이 극지방으로 향하게 되면서 연구자 등을 위한 거주지 등은 물론 자원 채굴을 위한 해양 플랜트, 채굴한 자원을 수송할 수 있는 파이프라인 등 극지 구조용 소재 개발 관련 산업이 세계적으로 빠른 성장세를 보이고 있다. 저온에서도 우수한 물성을 보이는 극지용 소재 개발은 구조용 소재 분야 최첨단 기술의 집약체로 가까운 미래에 큰 규모의 시장을 형성할 것으로 기대된다. ([그림 1]-a) 하지만 이와 같은 국제 환경 변화에도 불구하고 현재 국내의 극지 관련 연구는 주로 생물, 환경, 천체 과학 위주로 극지용 신소재에 대한 연구는 거의 전무한 상황이다.

2. 저온용 구조 소재 개발의 어려움 및 개발의 방향성

한편, 일반적으로 상온에서 사용 중인 고강도 구조용 소재들이 극지에서는 사용이 어렵기 때문에 극지에 기존 상용소재를 이용하여 구조물을 건설하는 일에 많은 제약이 따른다. 특히, [표 1]에 나타난 것과 같이 극지에서 일반소재가 견딜 수 있는 봄은 약 1~2개월 정도로 매우 한정적이며, 낮은 기온과 강한 풍속 등 가혹한 극지 기후가 재료특성의 심각한 저하를 유발하게 된다. 따라서 이러한 환경에서 구조물을 건설하거나 장비를 구축한다 하더라도 가혹한 환경과 다양한 응력 상황 하에서 구조물들이 쉽게 변형되거나 파괴 될 수 있기 때문에 극지환경 대응이 가능한 신소재의 개발과 적용이 절실한 상황이다.

상기와 같은 이유에서, 극지 환경에서 사용될 재료는 가혹한 온도변화에 대응하여 파단 손실 저항성이 커야하고 (특히, $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 이하의) 저온에서 높은 파괴 인성이 요구된다. 파괴 인성 (Fracture toughness)이란 재료가 균열에 대하여 저항하는 능력을 평가하는 인자로 손상에 대한 저항성 (Damage tolerance)의 개념이다. 다시 말하면, 모재에 균열이 발생한 경우 그 부분을 기점으로 하여 하중을 증가시키지 않아도 균열이 성장하며 파괴가 일어나게 되는데 이에 대한 저항성을 파괴 인성이라고 부르며, 균열 성장이 느린 재료를 파괴 인성 값이 큰 재료라고 한다. 이 값은 직접적으로 균열의 전파 실험을 통해 측정하거나, 응력-변형률 곡선의 아래 면적을 계산하여 인성 값을 구함으로써 예측할 수 있다. 따라서 파괴 인성의 향상을 위해서는 강도 및 연성으로 대변되는 합금의 기계적 물성 향상이 필수적이다.

제 2 절 본 연구 개발의 중요성

현재, 극지 등의 극저온 환경에서는 다양한 구조물들이 활용되고 있으며, 제시된 [그림 2]는 극지 환경에서 쉽게 접할 수 있는 대표적인 건축물들이다. 극지 구조물은 다양한 방향에서 불어오는 강풍에 의한 응력은 물론, 저온 환경에서 재료내부에서 발생하는 응력도 받게 된다. 특히 해양 플랜트와 같은 거대 구조물의 경우 쉽게 개/보수가 불가능하기 때문에 재료가 강한 응력 상황에서도 변형되지 않는 것이 매우 중요하다. 또한 [그림 2]의 b)에서와 같이 해수면이 지속적으로 결빙과 해빙을 반복하기 때문에 반복 응력에 대한 재료의 피로거동이 일어나게 된다. 실제로 남극 세종기지에 설치된 접안 시설의 강관 말뚝의 경우에도 수년간의 반복 결빙에 의한 압축응력으로 구조물이 손상 및 파손된 상태이며, 이는 연구원들의 안전과 직결된 문제이기 때문에 조속한 해결이 요구되는 부분이다.

극지에서 재료의 파단은 비단 대형 구조물에서만 벌어지는 현상이 아니다. 일례로 [그림 2]의 c)의 사진에서는 결빙에 의해 파손된 승용차의 손잡이를 확인 할 수 있다. 이 같은 현상은 일반 강종의 저온에서의 연성-취성 천이에 의한 취성파괴가 원인으로, 최근 점점 많은 인원과 물자들이 극지로 향하고 있고, 가까운 미래에는 더욱 극지환경에 노출된 재료들의 취성이 심각한 문제로 대두 될 것으로 판단된다. 따라서 저온에서 우수한 파괴인성을 가지는 소재개발은 극지 거주자의 생활과 밀접하게 관련되어 있으며, 극지 구조물의 수명과 안전 신뢰성을 향상시키는 데에 매우 중요한 요소이며, 본 연구에서 제안한 TWIP/TRIP 하이엔트로피 합금의 개발은

그 대안이 될 수 있을 것이라고 사료된다.

종합하면, 전 세계적으로 극지 개발에 관심이 고조됨에 따라 극지 환경에서도 상온 이상의 기계적 특성을 보일 수 있는 패러다임 전환형 신소재 개발의 필요성이 대두되고 있다. 하이엔트로피 합금은 우수한 극저온 파괴인성으로 인해 차세대 극저온 소재로 기대를 모으고 있으며, 본 연구에서는 하이엔트로피 합금의 적층 결합 에너지를 제어할 수 있는 합금 설계를 바탕으로 변형 시 Twin의 거동을 활성화 시켜 기존 **철강 재료의 획기적인 발전을 가져왔던 TWIP/TRIP 거동이 나타날 수 있도록 적용하여 우수한 기계적 특성 뿐 아니라 저온 파괴인성을 갖는 신개념 하이엔트로피 신합금을 개발하고자 한다.** 본 연구진이 개발할 TWIP/TRIP 하이엔트로피 합금은 커다란 σ_y/k (항복강도/열전도도)를 가져 현재 사용되고 있는 9-니켈강 등이 활용될 수 없는 극저온 영역까지 우수한 기계적 특성을 보일 수 있으며, 이는 **가까운 미래에 극지 분야 및 극저온 분야의 지속가능한 신소재에 관한 수요를 담당할 신개념 합금이 될 것으로 사료된다.** 또한 본 연구를 통해 국내에서 아직은 미비한 극지 소재 분야의 전문가를 양성하고 노하우를 축적하여, 결과적으로는 국가의 첨단 신소재 개발 역량을 발전시킬 수 있고, 이를 통해 극지연구 및 관련 소재 강국으로서 발돋움 할 수 있는 기회를 제공하고자 한다.





그림 1. 극지 건축물 (a) 극지 해양 플랜트 사업 발전 현황 (b) 미국의 아문센-스콧 남극 기지 (c) 북극의 송유관

	Baffin bay	Canadian arctic archipelago	Chukchi sea	Barents sea	Laptev sea
Winter season (month.)	10	9	10-12	12	9
Temperature (℃)	22 ~ -41	11 ~ -51	30 ~ -50	10 ~ -39	33 ~ -53
Wave height (m)	Max 12.6	ND	Max 14	Max 10	Max 10
Wind speed (m/s)	Max 29	ND	Max 43	Max 32	Max 51

표 1. 북극해의 극지 환경 - ND는 No data (데이터 없음)를 의미

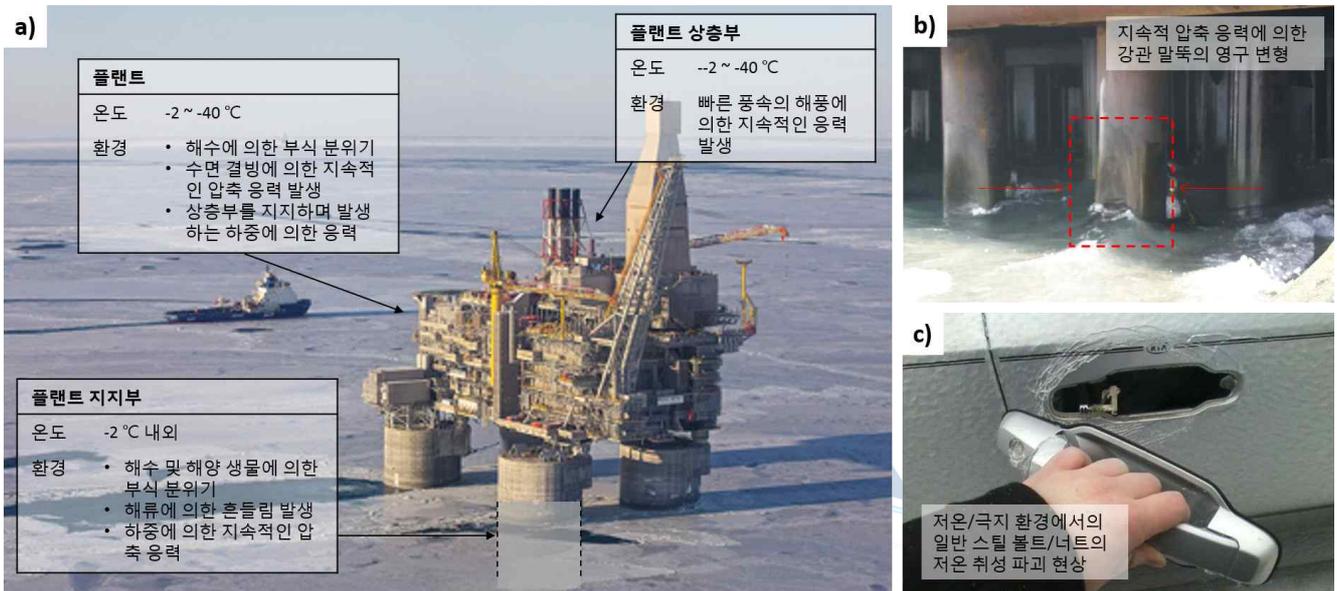


그림 2. 극저 건축물이 받는 응력의 종류 (a) 극저 해양 플랫폼이 받는 응력 상태를 나타낸 도식. 극저 해양 플랫폼의 경우 가혹한 환경에서 다양한 응력상태에 놓이게 되며 이와 같은 문제를 해결하기 위해서는 높은 파괴 인성을 갖는 재료의 개발이 절실하다. (b) 남극 세종기지 점안시설의 강관 말뚝의 모습. 결빙에 의한 지속적인 압축 응력의 작용에 의해 변형이 일어난 상태. (c) 승용차의 손잡이가 결빙에 의해 파손된 모습. 시베리아의 저온 환경에서 일반 강재의 연성-취성 천이에 의한 취성 파괴 현상.

제 2 장 국내외 기술개발 현황

제 1 절 국내/외 극저온 소재 기술개발 현황

본 보고서의 제 1장에서 확인한 이유에서, 최근에는 극저온 신소재 개발을 위해 우수한 저온 파괴 인성을 가지는 재료들에 대한 연구가 진행되고 있다. 하지만 상온에서 고강도 특성을 가진 체심입방 (BCC)의 결정구조를 가지는 페라이트계 강은 $-50\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 의 온도에서 연성-취성 전이 (DBTT)를 보여 극저온 구조용 소재에 적합하지 않은 것으로 알려지면서 대체재의 개발이 활발히 진행 되어왔다. 이에 따라 초기에는 오스테나이트 상을 가지는 스테인리스강이, 다음으로 9%의 니켈을 포함하는 9-니켈강, 그리고 미세조직 제어를 통하여 높은 강도를 가지는 TMCP강들에 대한 연구가 지속되고 있지만 관련 강종들이 가지는 용접성, 강도 및 취성 등의 문제들로 인해 저온 지속가능성을 가지고 활용할 수 있는 신소재의 개발이 다각도로 모색되고 있다. [그림 3]

특히, 저온 구조 소재 관련 신소재개발 연구는 현재 독일, 일본 등 전통적으로 소재분야를 선도하는 국가들을 중심으로 진행되고 있다. 국내에서는 포스코 (2006년부터) 및 동국제강 (2010년부터)에서 TMCP강을 생산해 출하하고 있지만 주로 초대형 선박 등의 조선업 중심으로 응용되고 있으며, 극저온 소재로서의 응용을 위해 TMCP강의 단점을 보완한 차세대 극저온 소재에 대한 연구는 미비한 상황이다. 특히, 최근 엔트로피 제어를 통해 다성분 원소중심의 고용체를 형성하는 하이엔트로피 합금이 저온에서 우수한 인성을 나타냄이 보고되었으나 국내에서는 관련 소재에 대한 극저온소재로 응용을 위한 연구개발이 미비한 실정이다. 특히 관련 소재 개발에 있어 소재를 연구하는 연구자와 극저온 전문가간의 활발한 교류가 필수적이지만 아직까지 협력의 기회가 제한적인 실정이다.

제 2 절 소재적 한계를 해결하기 위한 독창적 노력

한편, 본 연구에서는 TWIP/TRIP 등의 변형 기구 특성을 제어하는 방법을 통한 합금 특성의 개선 이외에도, 최근 각광 받고 있는 하이엔트로피 합금(HEA, High entropy alloy)의 도입을 통한 조성적 최적화 역시 수행하고자 한다. 하이엔트로피 합금이란 기존의 단원소 중심 합금설

계의 패러다임에서 벗어나 다종의 주원소를 가지는 합금으로, 하이엔트로피 효과에 의한 열역학적 안정성, 극심한 격자 뒤틀림, 매우 느린 속도의 확산, 마지막으로 다종 원소간의 상호작용에 의한 카테일 효과 등을 특징으로 한다. 특히, [그림 4 - 그림 5]에 나타난바와 같이 최근 FeCoNiMnCr 하이엔트로피 합금이 상온 ~ -196°C 까지의 극저온에서 현존하는 금속 소재 중 가장 우수한 파괴 인성을 가지며 저온 파괴인성 감소 효과가 없는 것이 Science에 (vol.345, 2014) 보고되면서 학계에 큰 관심을 모으고 있다. 이러한 사실에 기초하여 본 연구진은 열처리 과정 중 결정립계에 탄화물을 형성하는 오스테나이트계 강이나, 극저온에서 취화거동을 보이는 니켈강 등의 기존 저온 구조용 소재의 대안으로써 기존에 보고된 바 없는 저온에서 우수한 파괴인성을 갖는 “신개념 TRIP 하이엔트로피 합금을 개발”하고자 하였다. [1]

하이엔트로피 합금이 저온에서 우수한 파괴인성과 함께 파괴인성 저하가 일어나지 않는 이유는 하이엔트로피 합금 특유의 심한 격자뒤틀림에 의해 저온에서 나노미터 단위의 미세 쌍정을 발생시키며 변형 거동을 진행하는 TWIP 특성 때문이다. TWIP 특성은 기지 내 적층결합 에너지를 낮춰 Twin이 변형 시 활성화 될 수 있도록 하는 조건에서 나타나며 이를 더 활성화 시키는 경우 상변화를 통해 소성이 발생하는 TRIP 거동을 나타내게 된다. 이러한 개념을 이용해 대표적인 강재인 TWIP/TRIP 강이 개발되었지만 하이엔트로피 합금에서는 이러한 특성을 가지는 합금시스템이 아직 보고된 바 없다.

이에 본 연구에서는 저온 특성이 우수한 것으로 알려진 fcc FeNiCoMnCr 하이엔트로피 합금의 적층결합 에너지를 제어하는 합금설계를 통하여 Twin이 저온 뿐 아니라 상온에서도 활성화 될 수 있는 조건을 만들어주어 TWIP 하이엔트로피 합금, 더 나아가 활성화된 Twin이 상변화를 유발하여 소성을 부여하는 TRIP 하이엔트로피 합금을 새롭게 개발하여 상온에서의 기계적 물성은 물론, 극저온에서도 우수한 파괴 인성 특성을 갖는 새로운 개념의 하이엔트로피 합금을 개발하고자 하였다.

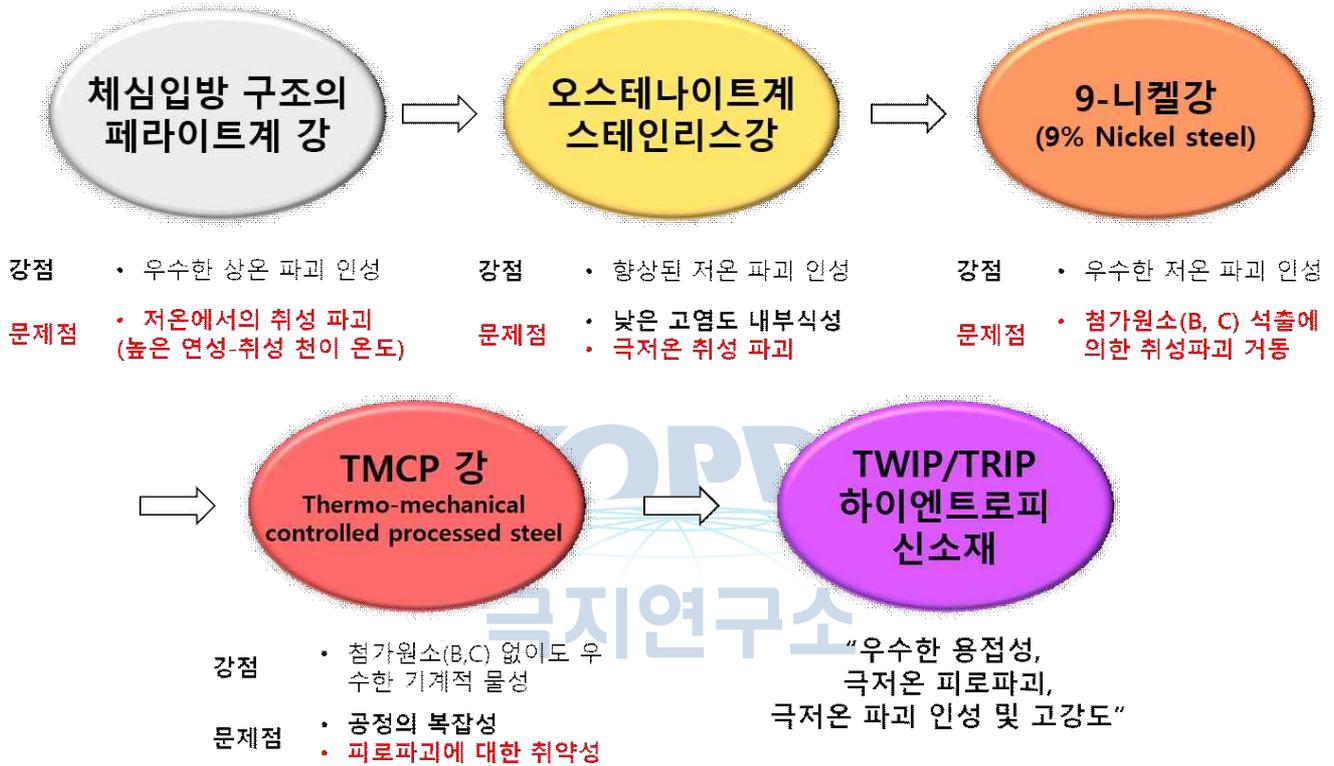


그림 3. 저온 구조재료로 사용되고 있는 재료들의 특징과 나아가야 할 방향

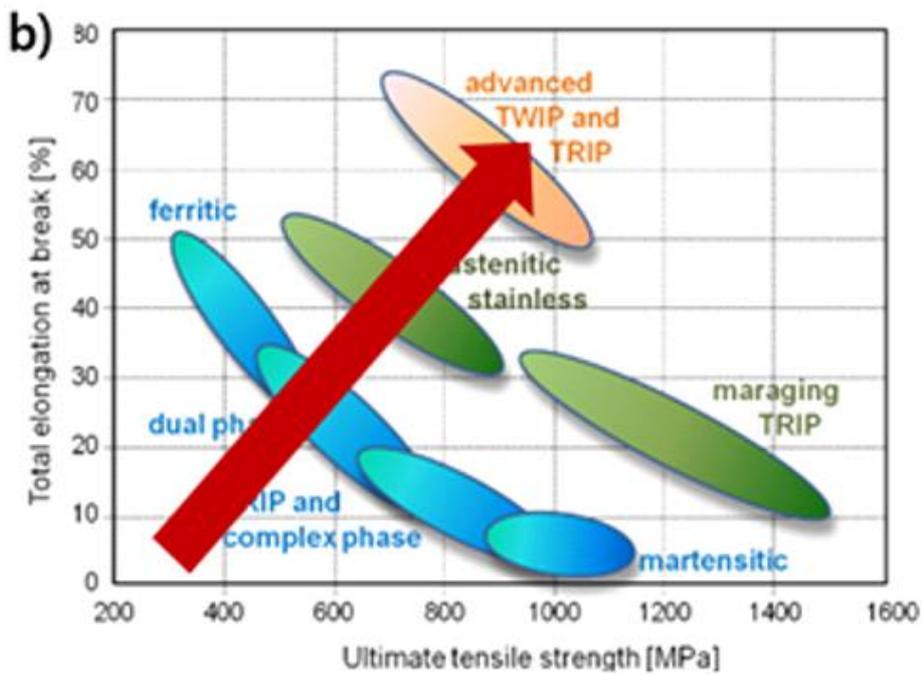
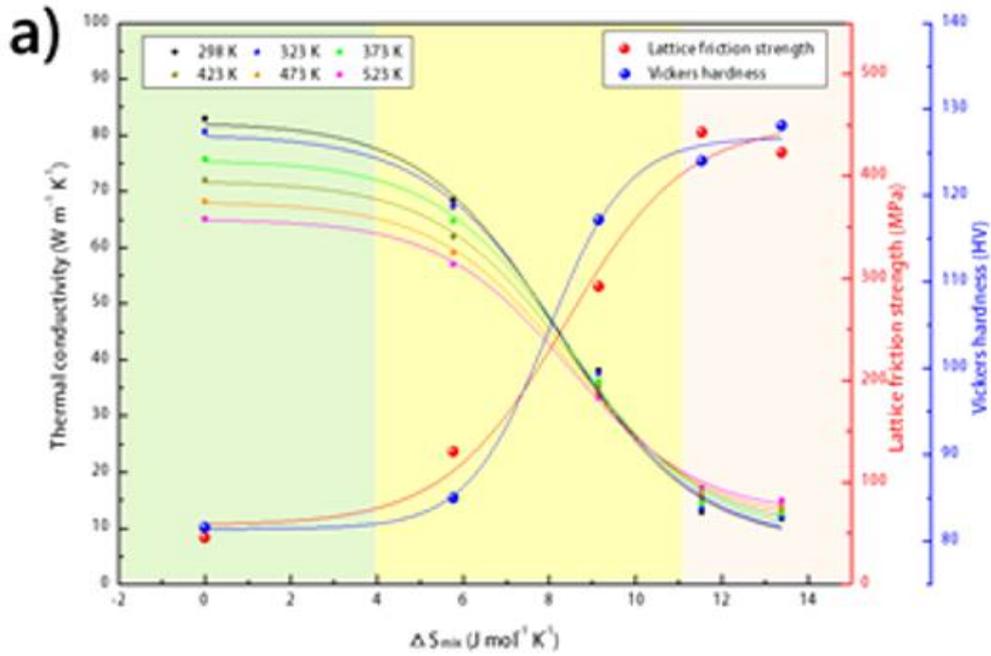


그림 4. HEA의 강도 및 열전도도 변화 및 TWIP/TRIP 강의 특성 향상을 보여주는 도식 (a) 하이엔트로피 합금에서 강도 증가와 열전도도(열팽창계수) 감소를 보여주는 도면 (b) 강에서 TWIP/TRIP 거동을 통한 물성 향상 [3]

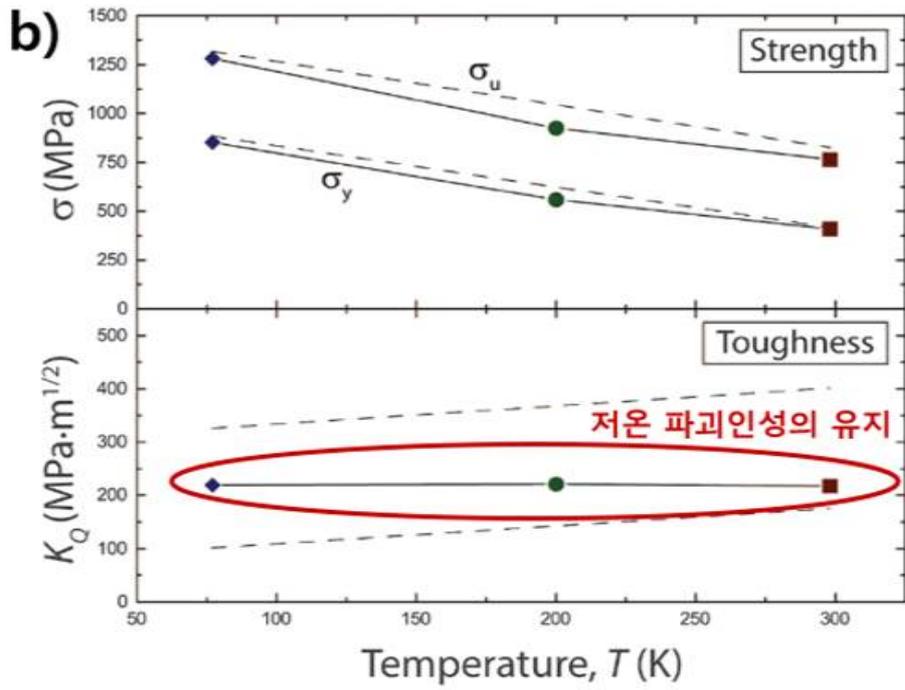
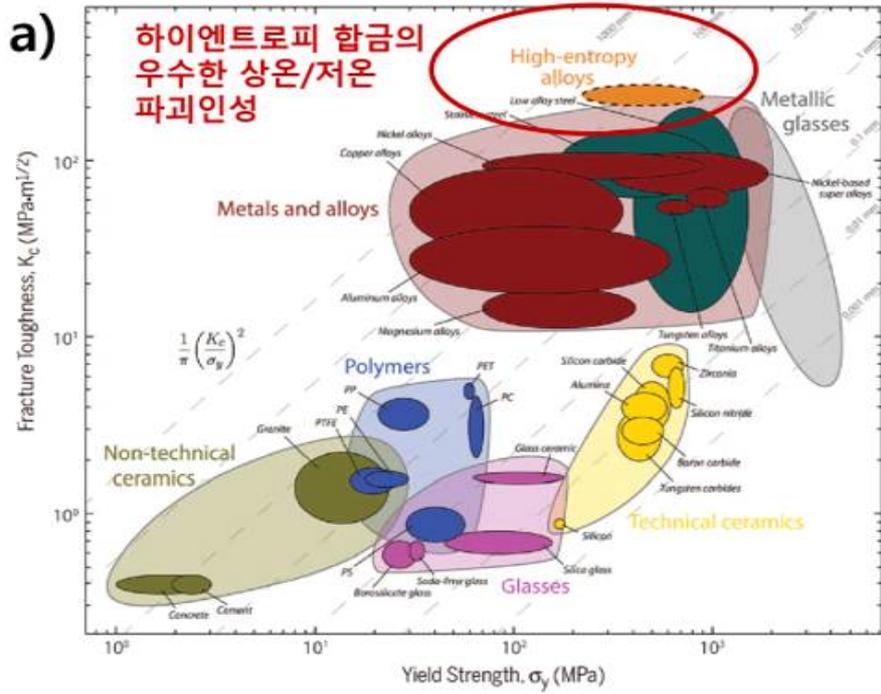


그림 5. HEA의 (a) 우수한 저온 파괴인성 및 (b) 저온에서 파괴인성의 저하가 없는 우수한 손상저항 특성

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제 1 절 각 차년도별 연구 목적과 수행 방법론

1. 최종 연구 목표

본 연구에서는 “극저온 피로 파괴 저항성이 큰 합금 소재 개발”을 위하여 다양한 연구를 수행하였다. 연구의 1차 년도인 2016년 - 2017년에 수행된 연구에서는 열역학 시뮬레이션을 통한 합금 설계를 수행하였으며, 해당 합금에 대한 물성을 상온에서 확인함으로써, 저온 특성의 척도로 삼았다. 부연하면, 시뮬레이션을 위해 상용 소프트웨어인 Thermo-calc 소프트웨어의 활용을 통해 합금계의 상안정성은 물론 적층 결함 에너지(SFE, Stacking fault energy)의 계산을 수행하였다. 뿐만 아니라 전체 합금계에서의 통계적 분석을 통하여 TWIP 혹은 TRIP 이 발생하기 쉬운 조성 영역을 확인하기 위한 통계적 근사식을 확립하였다. 추가적으로, 상기와 같이 개발한 다종의 합금에 대한 상온에서의 강도, 인성 등의 특성을 정밀하게 평가하였다.

연구의 2차 년도인 2017년 - 2018년에 수행된 연구에서는 설계된 합금에 대해, 극저온 모사온도(200K)에서의 저온 기계적 물성을 평가하고, 해당 소재를 향후 극저온 인프라에 적용할 수 있도록 하는 소재 설계 데이터베이스 구축을 수행하였다. 부연하면, 설계된 합금의 변형 거동 이해를 위해 실시간 X선 관찰을 통하여 변형 간, 상변태 특성 등을 정밀하게 예측하였으며, 이를 통해 1차 년도에 개발된 합금들의 특성을 체계적으로 연구할 수 있었다. 또한, 저온 변형 이후의 미세구조와 상 등을 SEM, EBSD 등의 정밀 분석 기술을 통해 분석함으로써 실제 활용 상황에서 발생할 수 있는 문제 등에 대해 심도 깊게 고찰하였다.

하기에서는 본 연구에 적용된 다양한 연구 수행 방법론에 대해 상술한다.

2. 연구 수행 방법론

가. 합금설계 및 열역학적 안정성 계산

TWIP/TRIP 하이엔트로피 합금개발을 위해 우수한 저온 기계적 물성을 보이는 것으로 보고된 면심입방 결정구조(FCC, Face centered cubic)의 하이엔트로피 합금조성에서 재료의 적층 결함 에너지 조절을 통해 Twin 변형에 대한 활성도를 제어하여 독특한 TWIP/TRIP을 나타내

는 신개념 하이엔트로피 합금을 개발하고자 하였다. 특히 기존 보고된 하이엔트로피 합금 조성인 FeCoCrNiMn의 조성을 제어하여 적층결함에너지(SFE)를 조절함으로써 TWIP 및 TRIP 효과를 구현하고자 하였다. 이를 부연하면, 하이엔트로피 합금의 SFE를 높일 것으로 예상되는 Mn 및 Ni의 분율을 제한하여 전체 합금의 SFE를 낮추는 방향으로 합금을 개발하고자 하였으며, 이에 대한 상안정성과 적층결함에너지는 Thermo-calc software에 내장된 다양한 데이터베이스(TCFE 8, SSOL 6, TCHEA 1 등)를 통해 계산하였다.

나. 기계적 특성 평가 I_상은 항복 강도, 인장강도 및 연성 측정

상기 설계한 합금에 대해, 인장 시험은 ASTM E8에 근거하여 판상의 인장 시편을 가공하여 이중 칼럼 만능 재료 시험기를 이용하여 측정하였으며, 본 실험에서 측정된 정보들을 데이터베이스화 하여 정리하고 우수한 특성을 보이는 TWIP/TRIP 하이엔트로피 합금 조성 영역을 확보하고자 하였다. 이와 더불어 선택된 합금군을 기반으로 저온에서의 기계적 물성을 동일 방법으로 측정하고, 평가하여 상온에서는 물론이고 저온에서도 우수한 기계적 인성 및 강도를 보이는 합금을 개발하고자 하였다.

다. 기계적 특성 평가 II_상은 및 저온 파괴인성 측정

1 차 년도에는 재료의 상온파괴 인성을 ASTM E1820-05에 근거하여 노치시편을 제작하여 측정하였으며, 획득한 데이터 중 우수한 특성을 가지는 하이엔트로피 합금의 조성을 선정하였다. 추가로, 2 차 년도에는 같은 방법으로 극저 온도 (200 K) 등의 저온 분위기에서 파괴인성을 측정하여 관련 결과들을 데이터베이스 하고자 하였다.

라. 열팽창/열전도도 측정

열팽창계수는 ASTM E831-14에 근거하여 직육면체 시편을 가공하여 TMA(Thermo mechanical analyzer)를 이용하여 측정하였다. 특히 냉각 장치를 이용하여 극저 온도인 영하 40℃에서부터 상온까지의 열팽창 계수를 측정하고 기존 콘크리트 복합재와의 값을 비교하여, 반복적인 결빙, 해빙에 의한 변형 및 손상의 가능성에 대해 논의하고자 하였다. 또한, 열전도도를 측정하여 저온 소재를 평가하는 평가인자인 σ_y/k (항복강도/열전도도) 값이 50 이상인 신 합금 조성을 개발하고자 하였다. 한편 열전도도는 국제 표준인 ASTM E1461 법을 준용하여 LFA(Laser Flash analysis)법을 통해 확보하였다.

마. 저온 변형기구 규명

상은 및 저온에서 TWIP/TRIP 거동을 보인 신탄금에 대하여 변형 전후에 쌍정의 발생 혹은 마르텐사이트 변태의 여부에 대하여 주사 전자 현미경 및 X-선 회절 장비 등을 통하여 분석하고 미세구조 변화와 기계적 특성 간 상관관계를 고찰하여 개발 신소재의 변형기구를 규명하고자 하였다. 상기 연구 방법에 대한 분석법의 일환으로써 미국의 Argonne national lab의 X선 싱크로트론인 APS(Advanced Photon source)에 방문하여, 극저온 분위기 조성 후, 변형 거동에 대해 실시간 분석을 수행하였다.

바. 극지 환경 재료물성 저하에 관한 데이터베이스 구축

본 연구에서는 본 연구의 지속성과 국가의 저온 구조용 소재 개발 역량의 발전을 도모하기 위하여 쇄빙선 아라온호, 세종 과학기지, 장영실 과학기지 등의 극지 연구소들과 협력·공조하여 극지(모사)환경 노출 시편에 대한 특성 저감에 관한 평가 및 데이터베이스를 구축하고자 노력하였으며, 소재 개발 데이터베이스 구축의 일환으로써, 다양한 통계적 근사식을 개발하고 이를 지적재산권화 하였다.



제 2 절 연구 수행 내용

본 연구에서는 맞춤형 재료설계를 통하여 극지 환경 피로파괴 저항성이 큰 신탄금 TWIP/TRIP 하이엔트로피 합금 개발을 행하고자 하였다. 이러한 연구는 기존에 시도된 바 없는 새로운 연구로 하이엔트로피 합금의 우수한 저온 파괴인성과 Twin 기반 변형의 활성화를 통해 재료의 기계적 물성 향상이 가능한 TWIP/TRIP 개념을 융합하여 지속가능한 극지 신소재를 개발하는 독창성을 가진다. 특히, 본 연구에서는 소재 개발 분야와 극지 전문가간의 융합형 연구를 지향하여, 개발 합금의 저온 변형 기구 규명 및 극지(모사)환경 내 재료 특성 저하에 관한 데이터베이스를 구축하여 향후 개발 신소재가 우리나라 극지분야 연구개발에 중요한 밑거름이 될 수 있도록 하고자 하였다.

1. 하이엔트로피 합금의 적층 결함 에너지(SFE) 제어

상기 연구 목표의 달성을 위해 본 연구의 첫 단계에서는 낮은 SFE를 가지는 합금을 설계하였다. 이때, 일반적으로 소재가 낮은 SFE를 갖는 경우 Dislocation의 이동에 의한 Slip 기반의 변형이 아닌, Twin 기반의 TWIP (Twin Induced Plasticity) 혹은 상변화 기반의 TRIP

(Transformation induced plasticity)를 갖게 된다. 상기 SFE의 계산은 열역학 시뮬레이션을 통해 수행되었으며, 이 기법은 합금 설계에 대한 가이드라인을 제공함으로써 실제 연구에 있어서의 시행착오를 최소화 하는데 기여한다.

특히 이를 통해, 먼저 낮은 SFE를 가질 것으로 예상되는 합금 영역을 계산하고, 방향성을 확인함으로써 TWIP 혹은 TRIP 기반의 변형을 보이는 합금을 다종 개발하였다. 실제로 [그림 6]은 합금의 적층 결함 에너지에 직접적으로 관계되는 Austenite 상과 Martensite 상 간의 깃스 자유에너지 차이를 플롯(Plot)한 도면으로써, 각 원소가 적층 결함 에너지에 미치는 영향에 대한 정보를 나타낸다. 이를 통해 적층 결함 에너지를 높이는 원소인 Mn 및 Ni의 양은 줄이고, 반대의 영향력을 가진 Cr, Fe, Co 등은 늘려 SFE를 제어할 수 있었다.

한편 FCC 결정상을 불안정화 시키는 합금 원소인 Cr의 양은 동원소비율인 20 at.%를 유지한 상태에서, Co와 Fe를 하나의 그룹으로, Mn과 Ni을 다른 그룹으로 하여 [표 2]에 나타난 바와 같이 합금 조성을 제어하였다. 실제로 계산한 결과와 마찬가지로 합금 조성이 제어됨에 따라 SFE에 직접적인 영향을 미치는 깃스 자유에너지 차이가 급격하게 감소하였으며, 이에 따라 변형 기구 역시 Slip에서 TWIP으로, 혹은 TWIP에서 TRIP으로, 최종적으로는 안정한 HCP 상이 상온에서도 형성되는 Dual phase 특성이 발현 되었다.

실제로 [그림 7]은 변형 기구 차이에 따른 변형 전후 미세 구조 차이를 나타내는 도면으로써, Slip 기반의 변형인 경우 확인할 수 없었던 다양한 크기의 Twin 혹은 Austenite(빨간색)에서의 Martensite(녹색)으로 상변화가 관찰됨을 확인할 수 있었다. 종합하면, 본 단계에서는 상기와 같은 열역학 시뮬레이션을 통해 합금을 설계하고, 이에 따라 극저온에서 활용 가능한 특성의 발현이 가능함을 확인할 수 있었다.

2. 하이엔트로피 합금 강화를 위한 고용강화 기구 도입

본 연구 단계에서는 기지 합금의 특성 최적화를 위해 FCC 단상 구조 합금 전반에 걸친 고용강화 효과에 대해 고려하였다. 이때, 일반적으로는 합금을 구성하는 구성 원소의 개수에 따라 고용 강화 특성이 결정된다고 알려져 있으나, [그림 8]에 나타난 바와 같이 그 경향을 벗어난 경우가 존재한다. 특히 3원계의 Cr-Co-Ni 합금의 경우에는 각 원소간의 차이, 전자 구조의 차이 등에서 기인한 강화 효과에 의해 5원계의 Cr-Mn-Fe-Co-Ni의 5원계 합금 보다 더욱 우수한 강도 특성을 가지는 것으로 보고된 바 있다. [2]

따라서, 본 연구에서도 기지 합금의 강도를 제어하고자 [그림 9]와 같이 3원계의 합금을 고려하였다. 이때, 상온에서 HCP 결정구조를 가지는 Cr의 경우 그 양의 많아져 35 at.%를 초과할 경우 그림에 나타난 바와 같이 안정한 FCC 단일 결정구조를 가질 수 없으므로, Cr을 35 at.%로 고려한 상태에서 다른 합금 원소의 양을 체계적으로 조절하여 그 특성을 확인하였다.

뿐만 아니라 기존의 5원계 합금의 계산 결과를 토대로 [그림 10]에 나타난 바와 같이 각 합금원소가 SFE에 영향을 미치는 요인을 확인하였으며, 이를 플롯(Plot)하면 해당 도면의 오른쪽 그림과 같다. 즉, 본 3원계 합금에서 역시 합금 조성에 따라 TWIP 혹은 TRIP 특성이 발현됨을 확인할 수 있었다.

이때, 해당 변형 기구가 저온에서 작동하는지 확인하기 위하여 미국의 Argonne national lab.에 위치한 X-선 싱크로트론인 APS의 11-ID-D 빔라인을 방문하여 실시간 변형 거동 관찰실험을 극저온인 70 K에서 수행하였으며, 그 결과는 [그림 11] 내지 [그림 12]와 같다. 실제로 도면에 나타난 바와 같이 상온에서 Slip 기반의 변형을 보일 것으로 예상되었던 Cr₃₅Co₁₀Ni₅₅ 합금의 경우에는 변형 중에 새로운 상에 관한 정보가 나타나지 않았으나, TWIP에 의한 변형 혹은 TRIP에 의한 변형을 가지는 합금의 경우에는 [그림 11]에 나타난 바와 같이 새로운 상 혹은 새로운 결정학적 결합에 대한 피크가 발생함을 알 수 있었다.

또한 [그림 12]에 나타난 바와 같이 상기 합금 중 일부에 대한 기계적 물성 평가가 역시 동시에 수행하였는데, 극저온에서 UTS(Ultimate tensile stress)가 1050 MPa 이상의 매우 우수한 강도를 나타내는 것을 알 수 있었다. 종합하면, 단순히 5원계 하이엔트로피 합금에서 뿐만 아니라, 고용 강화 효과를 고려하여 제조된 새로운 기지의 합금에서 역시 다양한 변형 거동 및 우수한 저온 특성을 나타내는 것을 확인할 수 있었다.

3. Al 첨가에 따른 SFE 제어 및 특성 개선 효과

본 연구에서는 상기와 같이 개발한 다양한 종류의 합금에 합금 원소를 추가로 투입함으로써 특성 개선을 꾀하였다. 그 중에서도, 다른 구성원소인 Cr, Mn, Fe, Co 및 Ni과는 크기 차이가 커서 쉽게 고용 강화 효과를 나타낼 수 있으나, FCC 하이엔트로피 합금에 고용될 수 있는 원자로서 Al을 선택하여 합금화 하였다. 다만 합금 원소가 적어 구성엔트로피가 낮은 Cr-Co-Ni의 3원계 합금은 쉽게 FCC 상안정성이 저해되어 석출물 형성 등에 의해 특성 저해가

나타날 수 있어 본 연구에서는 5원계의 합금을 기지 합금(Base alloy)로 활용하였다.

또한 하기에서는 상기의 소재가 극지에서 완전히 사용될 수 있도록 극지 모사 환경을 구축하고, 이에 따른 변형 거동 등을 체계적으로 분석하였다. 먼저 제조한 합금에 대한 변형 전후 상 분석을 시작으로, 미세구조 변화 및 실시간 변형 거동 등에 대한 분석을 수행하였다. 뿐만 아니라, 극저온에서 소재 평가에 활발히 활용되는 인자인 열전도도-강도 비를 확인함으로써, 극저온에서의 활용 가능성을 간접적으로나마 평가하였다.

가. SFE 및 상안정성을 고려한 HEA 설계 인자 개발

한편, Al의 경우에는 일반적으로 FCC 합금에 첨가되어 SFE를 급격하게 높인다는 보고가 있어, 기지 합금의 SFE를 최대한 낮게 유지하도록 하였다. 이를 위해 상기 단계들에서 개발된 합금들 중 Dual phase 특성을 보이는 것으로 알려진 $\text{Cr}_{20}\text{Mn}_8\text{Fe}_{32}\text{Co}_{32}\text{Ni}_8$ 합금을 기본으로 Al을 소량씩 첨가하며 그 특성의 변화를 확인하고자 하였다.

이때, 실제적인 실험에 앞서, [그림 13]과 같이 개발된 합금들에 대하여 상안정성을 계산함으로써 기계적 물성을 급격히 저하시킬 수 있는 금속간 화합물 등의 형성을 최소화하고자 하였다. 이때, FCC 결정 구조를 가지는 합금에 첨가되는 Al은 FCC 합금의 상안정성을 급격히 낮춘다는 보고가 있어, Al의 양을 1 at.% 씩 조절해가며, 최적의 조성을 확인하였으며, 그림에 나타난 바와 같이 Al을 최대 5 at.% 까지 첨가하였다.

한편, 하이엔트로피 합금(HEA)의 경우에는 다종의 주원소가 동시에 합금화 원소로 작동하기 때문에, 그 합금 설계에 있어 다양한 인자의 고려가 필수적인데, 특히 합금의 적층결함에너지(SFE)의 경우 합금 원자들이 배치된 면밀도와 새로이 형성되는 적층 결함과의 모상간의 계면 에너지 등에 의해 결정되는 인자로, 그 계산이나 측정이 매우 어려운 것으로 알려져 있다.

따라서 본 연구에서는 다양한 조성의 HEA에 대한 합금에 대한 열역학 계산을 진행함으로써, 각 합금화 원소의 분율에 따라 SFE가 변하는 양상을 예측하였으며, 이를 간단한 수식으로 예측 가능하게 하였다. 특히 기존에는 TEM 및 high energy X-ray source 등을 통해서만 계산 가능하였던 SFE를 간단히 계산할 수 있도록 하였다. 이를 위하여, 본 연구에서는 적층 결함이 발생하며 형성되는 상인 ϵ martensite 의 상안정성을 계산함과 동시에, FCC 결정 구조의 소재의 모상인 α austenite 상의 상안정성을 비교하는 방식으로 SFE를 예측할 수 있도

록 하였다.

실제로 [그림 14]에서 확인할 수 있는 바와 같이, FCC 계열 HEA를 구성하는 하이엔트로피 합금인 Fe, Co, Cr, Ni, Mn 및 Al 등에 대한 각각의 상안정성을 계산하고 이를 fitting 하여 일반식을 아래와 같이 간단한 1차식의 형태로 계산할 수 있었다. 이때, 각 합금 원소별 깎스 자유 에너지 차이에 대한 계산 값은 [표 3]에 상술하였다.

$$dGF_{FCC-HCP} = -39.6X_{Cr} - 78.5X_{Fe} - 72.6X_{Mn} + 87.0X_{Co} + 211.2X_{Ni} + 232.5X_{Al} + 1798.8$$

이때, 위 식에 의해 계산된 값은 상기 도면에서 확인할 수 있는 것과 같이 10% 이내의 오차 범위에 대부분이 들어오는 것을 확인할 수 있었기 때문에, 이를 통해 본 연구를 통해 확보한 수식에 의해 기존에는 매우 복잡한 방법을 통해서만 계산이 가능하였던 FCC 계열 HEA의 SFE를 쉽게 예측할 수 있음을 알 수 있다.

나. 실제 합금의 제조 공정 제어

본 단계에서는 상기와 같이 상안정성과 SFE를 고려하여 제조한 합금이 최적의 특성을 나타낼 수 있도록 합금 제조를 위한 공정의 최적화를 수행하였다. 이를 위해 [그림 15]와 같이 아크 용해를 통해 제조한 합금에 열연/균질화/냉연 등의 공정을 순차적으로 수행하여 최적의 특성을 나타내는 합금을 제조할 수 있었다.

이때, 제조된 합금의 미세구조는 [그림 16]에서 확인할 수 있다. 그림에 나타난 바와 같이 기지 합금에 Al을 약 2 at.% 까지 첨가하더라도 새로운 석출상의 발생은 확인할 수 없었다. 또한, 상기 제조 공정을 통해 제조된 각 소재의 입계 크기는 약 6 μ m로 거의 동일하여, 물성에 크게 영향을 미치지 않을 것임을 예상할 수 있다. 하지만 Al이 약 3 at.% 첨가된 이후에는 새로운 석출상으로 보이는 영역을 확인할 수 있었으며, 이는 Al 첨가량이 5 at.%로 증가됨에 따라 더욱 많아지는 경향을 확인할 수 있었다.

이때, 상기 합금들에 대한 상분석을 위해 XRD 분석을 수행하였다. [그림 17]에서 보이는 바와 같이 SFE를 고려하여 제조된 기지 합금의 경우에는 이전에 확인했던 바와 같이 상온에서도 FCC 상과 HCP 상 간의 Dual phase를 가지는 것을 확인할 수 있었으며, Al이 첨가됨에 따라 HCP 상이 사라지는 것을 확인할 수 있었다. 뿐만 아니라 Al이 3 at.% 이상 첨가된 경우에는

새롭게 BCC상이 석출된 것을 확인할 수 있었는데, 이는 SEM 이미지 분석에서 확인한 바와 같이 Al 첨가에 따른 새로운 상의 석출로 생각할 수 있다. 따라서 **단일상의 우수한 상안정성 확보를 위해서는 Al의 첨가량 제어가 매우 중요함**을 알 수 있다.

다. 제조된 합금의 상온에서의 기초 물성 측정

이때, [그림 18]은 본 연구에 의한 대표적인 조성들의 상온에서의 인장 곡선을 나타내는 것으로, SFE를 최적화하여 낮은 기지 합금에 Al을 첨가할수록 강도가 급격히 상승하는 것을 확인할 수 있다. 이는 상기한 바와 같이 **Al 첨가에 따른 급격한 고용 강화 효과**에 의한 것으로 생각된다.

[그림 19]는 최저의 SFE를 가질 것으로 예상되는 기지 합금에 Al을 첨가함에 따라 발생하는 변형기구의 차이를 체계적으로 나타내는 EBSD 이미지이다. 특히 ϵ martensite의 상안정이 매우 높아 매우 낮은 SFE를 갖는 Base 합금의 경우에는 변형 이전부터 HCP상(녹색)을 가지고 있는 Dual phase를 가지는 것을 볼 수 있으며, 변형 이후에는 대부분의 상이 HCP로 변태 되는 TRIP 특성을 나타내는 것을 알 수 있다. 한편, Al을 첨가하며 SFE가 높아진 합금들의 경우에는 변형 전에는 HCP 상이 전혀 확인되지 않고 모두 FCC상(노란색)으로 존재하는 것을 확인할 수 있다. 다만, Al이 과량 첨가 되는 경우에는 Al에 의해 BCC상(빨간색)이 안정화 되는 문제가 있는 것을 확인할 수 있다.

이때, Al이 2 at.% 첨가된 경우에는 변형 전후에 모두 HCP 상이 확인되지 않는 것을 확인할 수 있으나, 변형 이후 전체적인 grain에서 twin boundary가 형성된 것을 확인할 수 있는데, 이는 기존 인성이 매우 우수한 합금들에서 발생했던 결과로 본 합금이 향후 저온 소재로 활용될 수 있음을 의미한다. 즉, **Dual phase를 보이는 기지 합금에 Al 고용량을 제어함으로써 SFE를 쉽게 제어할 수 있음**을 알 수 있으며, 이는 본 연구에서 개발한 근사식을 통해서도 쉽게 확인할 수 있는 결과이다.

한편, [그림 20]은 [그림 18]에 나타난 응력-변형률 곡선을 해석하여 본 연구에 의해 개발된 합금의 진응력-변형률 곡선과 함께, 변형 경화율의 값을 나타낸 것이다. 이때, 진응력 곡선과 변형 경화율 곡선이 만나는 점이 소재가 급격한 소성변형을 가지는 Necking 구간으로 알려져 있는데, 본 연구에 따르면 약 10 %의 진응력 구간에서 TRIP 특성을 보이는(1 at.%의 Al을 포함하는 합금) HEA의 경우에 변형 지연이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이와 같은 사실을 통해

상온에서는 상기 합금의 특성이 가장 우수할 것임을 예측 가능하며, 이와 같은 현상이 저온에서도 적용가능한 지에 대한 연구가 필요하다.

라. 제조된 합금의 극저온 적용 가능성 확인

연구의 최종 단계에서는 본 연구에서 개발한 합금들을 SFE 및 열전도도 등을 기반으로 분석하고, 체계화함으로써 이를 데이터베이스화 하였다. 이를 통해 본 연구 결과가 향후 극저온 소재 개발에 있어 최소한의 가이드라인으로 작용할 것으로 기대하고 있으며, 뿐만 아니라 현재는 걸음마 단계에 불과한 HEA에 대한 연구 방향성을 제시함으로써, 국가적인 소재 산업으로 성장시킬 수 있는 발판을 마련하였다.

이때, 특별히 다른 합금화 원소들과 큰 원자 반경 차이를 가지는 Al 원소의 경우에는 합금화되며 큰 격자 변형(Lattice distortion)을 야기하게 되는데, 이에 따라 급격하게 열전도도를 낮추는 것을 예상할 수 있다. 실제로 [그림 21]에 계산된 바와 같이 Al이 합금화되어 새로운 BCC 상을 형성하지 않더라도, **높은 열전도도를 가지는 Al 원소가 합금 전체의 Al의 열전도도를 감소시키는 것은 매우 특별한 현상**으로 볼 수 있다. 부연하면, Al의 첨가에 따른 열전도도의 급격한 감소는 Al 첨가에 따른 격자 변형에 의한 결과로 볼 수 있으며, Al의 첨가가 강도 증가는 물론 극저온 물성에 중요한 열전도도 감소에 역시 중요한 영향을 미쳤다고 볼 수 있다.

[그림 22]는 상기 결과 및 상온에서의 소재 항복 강도 등의 기계적 물성을 종합하여 판단한 결과를 나타낸다. 일반적으로 큰 σ_y/κ (항복강도/열전도도)를 갖는 소재는 극저온에서 활용도가 높은 것으로 알려져 있으며, 실제로도 SUS 316 ($\sigma_y/\kappa = \sim 15$), 9-Nickel steel ($\sigma_y/\kappa = \sim 25$) 등의 소재는 극저온 물성이 매우 우수한 것으로 알려져 있다. 즉, **저온 특성을 대변하는 것으로 알려진 강도-전도도비의 결과를 본 합금에 대해 확인한 결과 단상을 보이는 Al 2 at.% 첨가 합금에서도 44 이상의 높은 값을 가지는 것을 확인**하였다. 이는 현재 상용 소재의 2배 수준으로써, 큰 원자 반경 차이를 가지는 Al의 경우에는 합금의 합금화에 따라 저온 물성을 급격히 상승시킬 것으로 기대할 수 있다.

마. 제조된 소재의 극저온 변형 메커니즘 규명 및 고인성화 경향성 확인

실제로 [그림 23]은 상기 결과는 본 연구에 의해 개발된 HEA들을 영하 100도의 극저 온도 환경에서 Charpy V-notch test(CVNT) 한 결과를 나타낸다. CVNT 시험법은 소재의 파괴 인성 값을 대변해주는 물리량으로써, 강도, 연성 등의 기본적인 기계적 물성은 물론 균열 전파에 대한

저항성 등을 종합적으로 나타내는 값으로써, 소재 특성을 잘 대변할 수 있다.

본 값들은 -100°C 의 극저온에서 측정된 결과를 나타낸다. 이때, 현존하는 금속 소재 중, 극저온에서 가장 우수한 파괴 인성을 보이는 것으로 알려진 5원계 Cantor 합금의 경우 약 $137.73 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{3/2}$ 의 매우 높은 값을 보이는 것을 확인하였다.

한편, 본 연구를 통해 개발한 합금 중, 기지 합금에 Al을 2 at.% 포함한 합금은 약 $162.63 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{3/2}$ 의 파괴 인성 값을 보였는데, 이는 기존 금속 소재 중 가장 우수한 것으로 알려진 Cantor 합금 대비 20% 이상의 특성 향상을 보이는 것으로써, 세계 최고 수준의 저온 파괴 인성을 나타낸 결과의 가치가 있다. 이와 같은 결과는 합금의 하이엔트로피화에 따른 격자 비틀림 효과 등에 의한 고용 강화 효과와 더불어, 첨가 원소인 Al의 크기 차이에 의해 유발된 강화 효과 및 TWIP/TRIP 등의 독특한 변형 거동에 의해 야기된 것으로 판단할 수 있다. 하기에 는 각 합금들이 우수한 물성을 보일 수 있었던 이유에 대해 고찰 한다.

[그림 24]에서 확인할 수 있는 바와 같이 FCC의 기지에 HCP 혹은 BCC 의 이상을 가져 Dual phase를 가지는 기지 합금의 경우에는 파괴 인성 값이 굉장히 낮은 것을 확인할 수 있는데, 이는 극저온에서의 크랙 전파기 상 간의 계면을 통해 쉽게 발생하기 때문이라고 판단할 수 있다. 즉, 본 연구의 주제인 극저온 환경 피로 저항성이 우수한 합금을 개발하기 위해서는 물론 우수한 변형거동을 가지는 합금을 개발하는 것이 중요하나, 반대로 단상의 합금을 유지하는 것이 매우 중요하다는 것을 확인할 수 있다.

한편, TRIP 특성을 가지는 합금의 경우에는 Dual phase를 가지는 합금의 경우보다 2.5배 가량 우수한 파괴 인성 값을 가지는 것을 확인할 수 있는데, 이는 극저온에서도 전위 활주 이외의 변형 거동이 크랙 전파를 방해하여 인성향상에 도움이 되었음을 의미한다. 이와 같은 결과는 [그림 25]에서 확인할 수 있다. 뿐만 아니라, 저온에서는 SFE가 낮아지는 효과가 커 상온에서의 TRIP(빨간 테두리) 거동의 경우보다 더욱 많은 양의 상변화가 가능함을 확인할 수 있다.

이때, [그림 26]에 나타난 TWIP 거동을 가지는 합금의 경우에는 기존에 현존하는 소재 중, 가장 우수한 파괴 인성 값을 가진다고 알려진 Cantor 합금 대비 20% 이상 우수한 파괴인성 값을 가지는 것을 확인할 수 있었으며, 이는 소재 전체에서 발생하는 나노 단위의 twinning에 의한 효과로 보인다. 즉, 새로운 상이 형성되어 쉽게 crack이 전파할 수 있는 환경이 제공되는

경우 보다는 twinning에 의해 효과적으로 crack의 전파만을 방지할 수 있는 TWIP 특성의 합금 계가 가장 적합한 극저온 소재임을 확인할 수 있으며, 이는 현존하는 어떤 소재보다도 우수한 값을 가짐을 알 수 있다.

제 3 절 연구 수행 성과의 우수성

본 연구에서는 극저온 환경 하에서 구조용 소재로 적용 가능한 극저온 환경 피로파괴 저항성이 큰 TRIP 하이엔트로피 신합금을 개발하고자 하였다. 부연하면, 1) 커다란 σ_y/κ 비를 가져 저온 인성이 우수한 것으로 보고된 전이금속 계열 fcc 하이엔트로피 신합금을 설계하고, 2) 조성 제어를 통해 적층 결합 에너지 조절을 통해 변형 시 Twin이 활성화 된 소성 특성 발현을 도모하여, 최종적으로는 3) 남극 및 북극 등의 극저온환경에서 최적의 강도 및 파괴 저항성을 갖는 TWIP/TRIP 하이엔트로피 신합금을 개발하고자 하였다.

종합하면, 본 연구에서는 기 보고된 소재 중 가장 우수한 극저온 파괴 인성을 가지는 소재를 개발하였으며, 이를 통해 향후 극저온 분야에서의 구조 소재 개발을 위한 데이터베이스를 마련하였다. 특히 기존에는 쉽게 확인할 수 없었던 SFE를 계산할 수 있는 통계적 계산법을 마련하였으며, 이를 위하여 하이엔트로피 합금의 맞춤형 재료설계를 통한 특성제어 및 제조공정을 최적화하고, 지속가능한 극저온 신소재 개발에 관한 원천 기술 및 노하우를 축적하여, 향후 극저온개발의 국가적 역량을 제고하고 선도적 역할을 수행하도록 하는 신소재 개발의 시금석을 제공하고자 하였다.

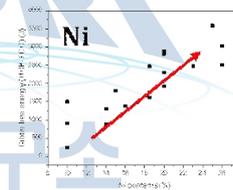
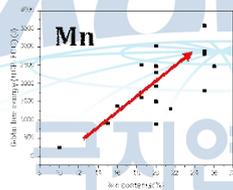
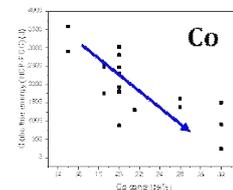
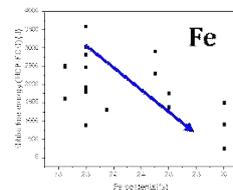
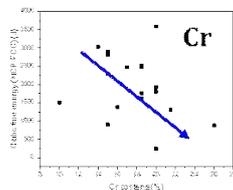
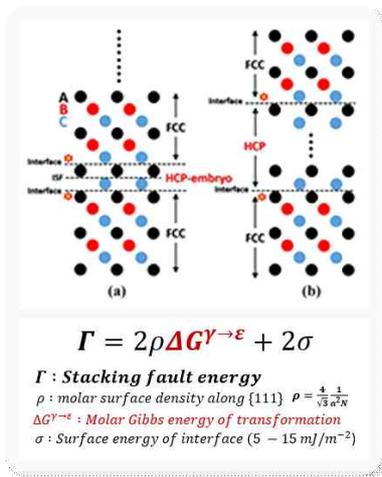


그림 6. 합금 원소 별 적층 결함에너지에 대한 영향력을 나타낸 도면

구분	조성	$\Delta G(\text{hcp-fcc})$	변형 기구
1	$\text{Cr}_{20}(\text{MnNi})_{40}(\text{FeCo})_{40}$	1927.8	slip
2	$\text{Cr}_{20}(\text{MnNi})_{36}(\text{FeCo})_{44}$	1494.4	slip
3	$\text{Cr}_{20}(\text{MnNi})_{32}(\text{FeCo})_{48}$	1108.4	slip
4	$\text{Cr}_{20}(\text{MnNi})_{28}(\text{FeCo})_{52}$	771.0	twip
5	$\text{Cr}_{20}(\text{MnNi})_{24}(\text{FeCo})_{56}$	482.9	twip
6	$\text{Cr}_{20}(\text{MnNi})_{20}(\text{FeCo})_{60}$	245.3	trip
7	$\text{Cr}_{20}(\text{MnNi})_{16}(\text{FeCo})_{64}$	59.4	dual phase

표 2. 합금 원소별 Martensite 상과 Austenite 상 간의 Gibbs 자유 에너지 차이 및 그에 따른 변형 기구의 변화를 나타낸 도면

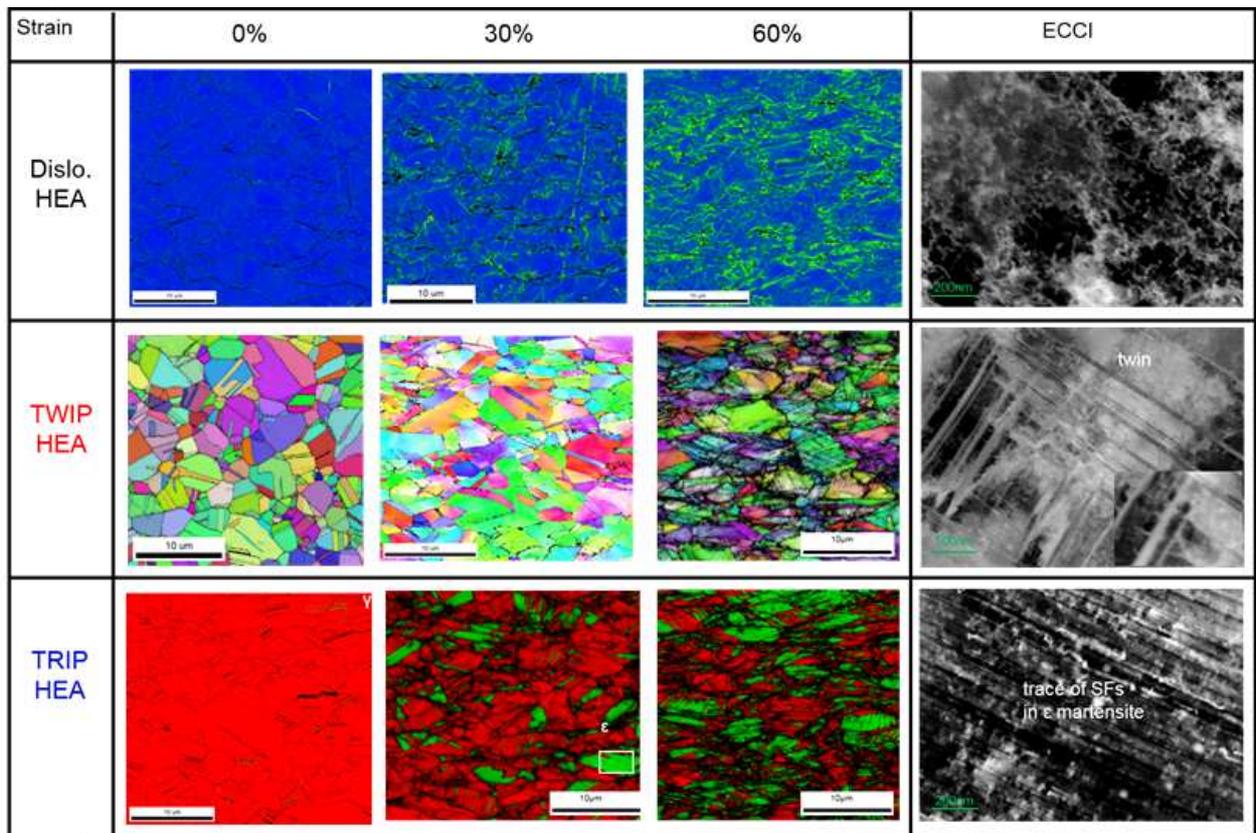


그림 7. 변형 기구 차이에 따른 변형 전후 미세 구조 차이를 나타내는 도면

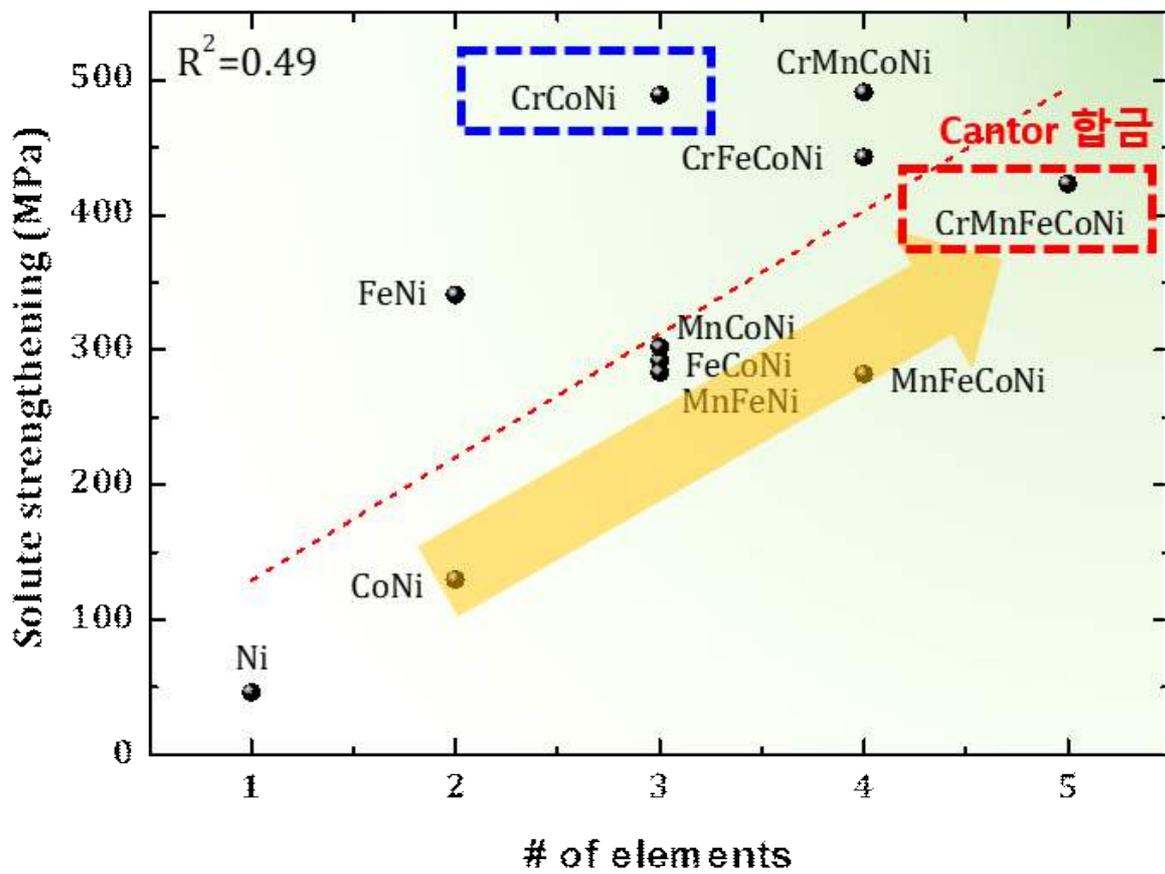


그림 8. FCC 단일 고용합금의 원소 개수에 따른 고용 강화 효과

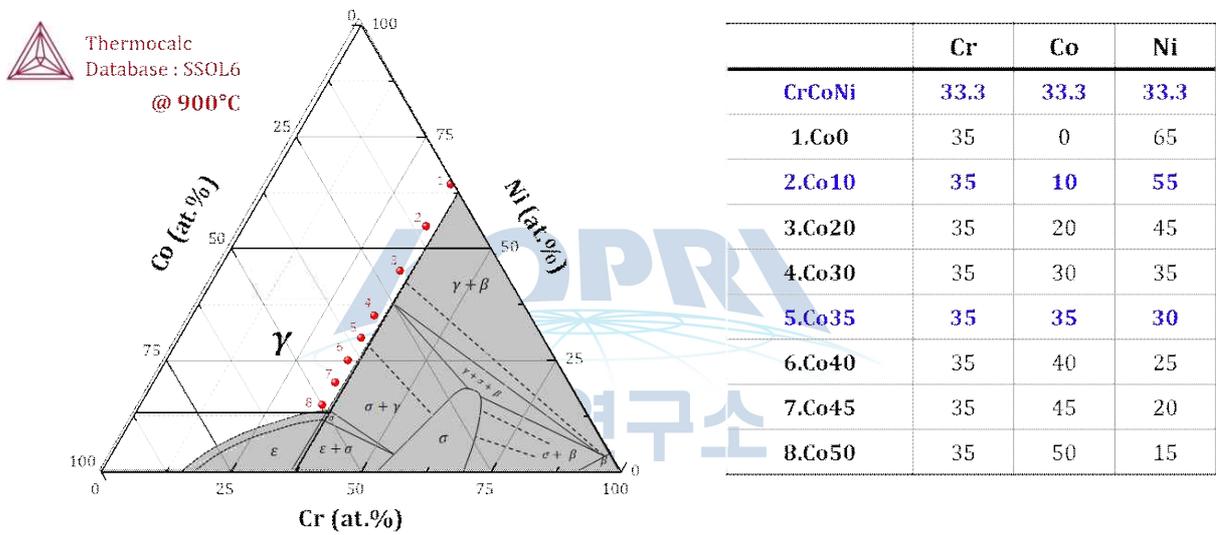


그림 9. Co-Cr-Ni 3원계 합금의 시험 합금 조성(우) 및 상안정성 계산 결과(좌)

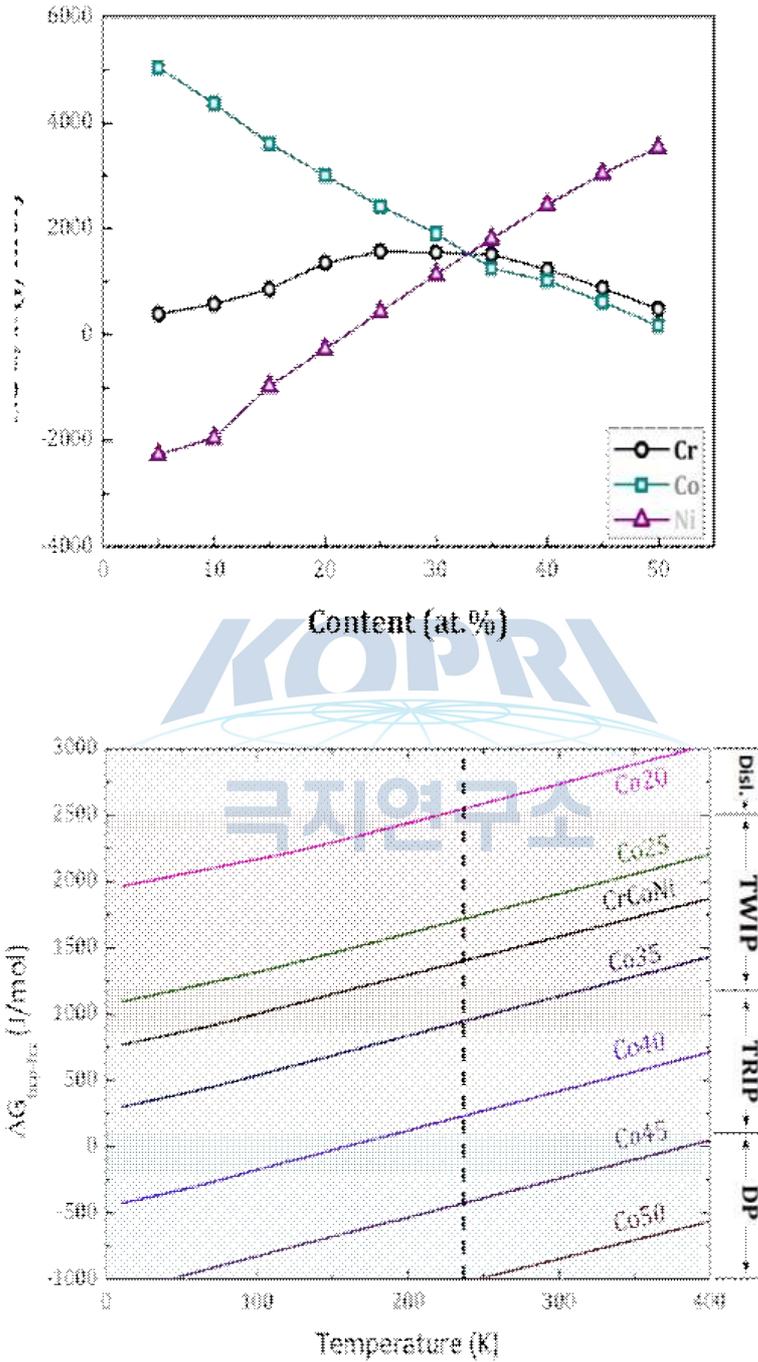


그림 10. Co-Cr-Ni 3원계 합금의 원소 분율에 따른 SFE 변화 양상(상) 및 합금 조성에 따른 깁스 자유에너지 차이(하)

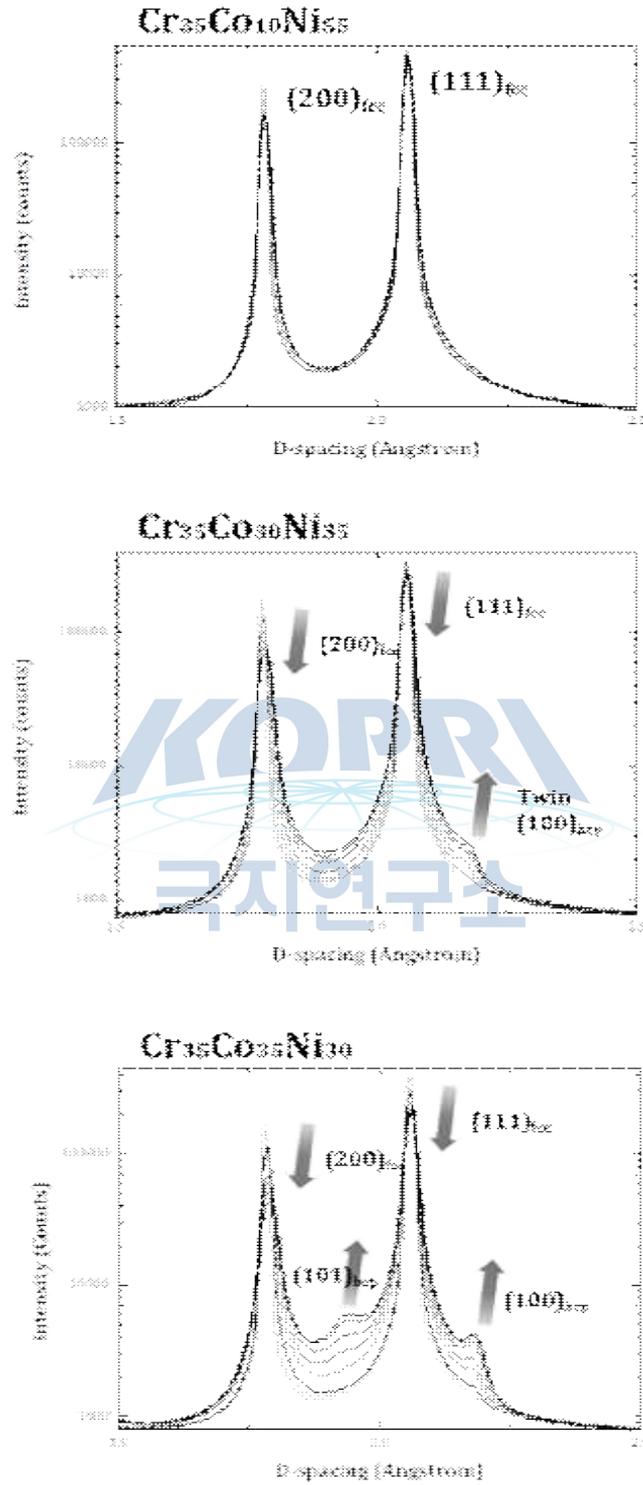


그림 11. 변형 기구에 따른 실시간 X선 회절 분석 결과

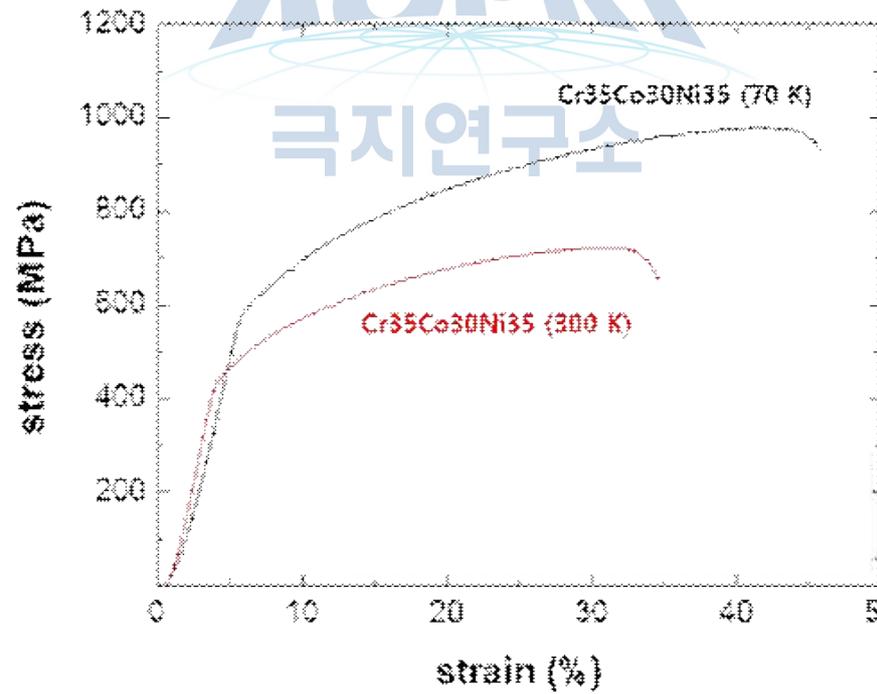
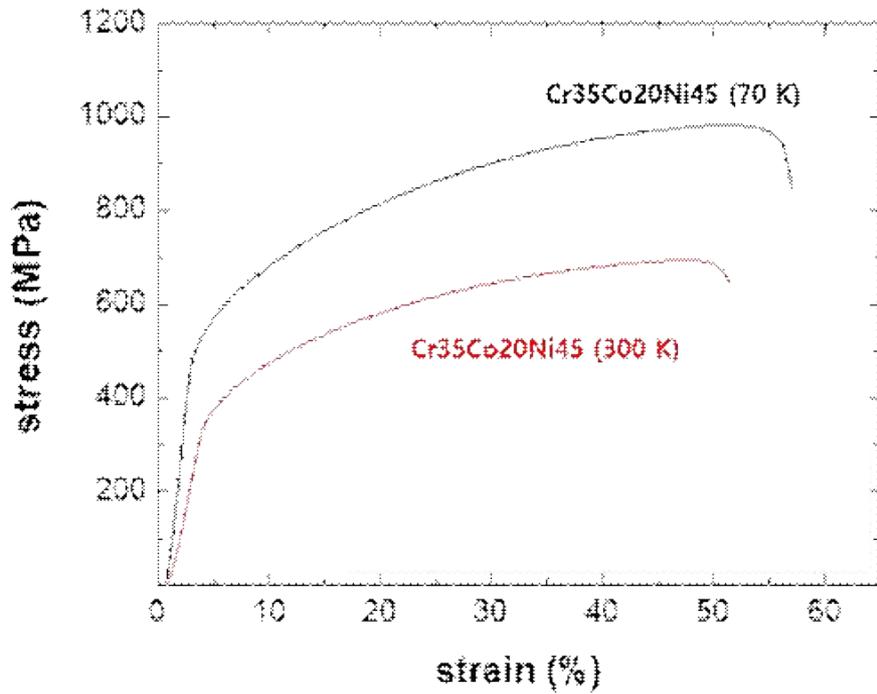
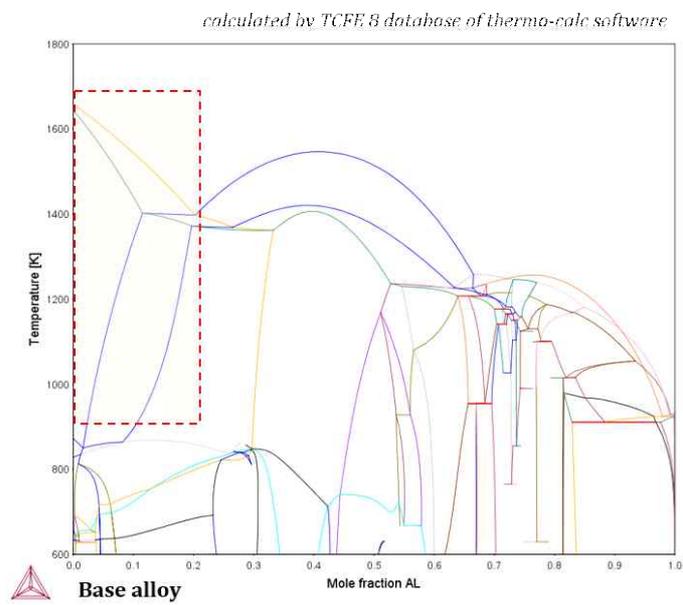


그림 12. 극저온(70K)에서의 인장시험에 의한 강도-변형률 커브 결과



Composition	ΔG (HCP-FCC)
1 Base alloy (Dual phase)	59.4
2 Base alloy + Al 1.0	642.3
3 Base alloy + Al 2.0	1213.7
4 Base alloy + Al 3.0	1773.5
5 Base alloy + Al 5.0	2912.1

그림 13. HEA의 FCC 안정 상 영역을 나타낸 도면

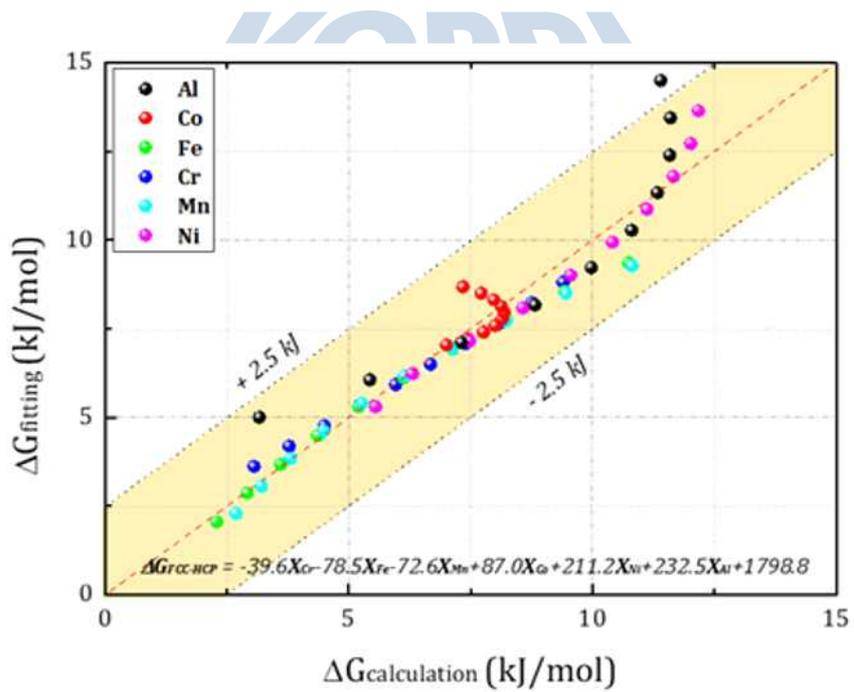
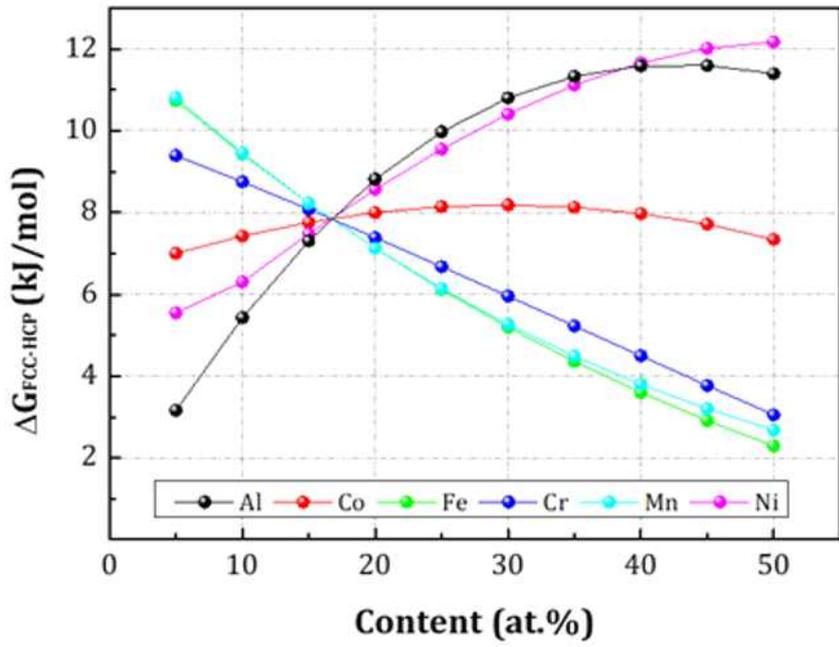


그림 14. 합금 원소의 종류에 따른 소재의 SFE 및 상안정성 계산 결과(상) 및 계산 인자 도출 식(하)

원소	구분	조성 (at.%)					$\Delta G_{\text{hcp-fcc}}$ (J/mol)	$\Delta G'_{\text{hcp-fcc}}$ (J/mol)
		Fe	Mn	Co	Cr	Al		
Fe	1	5	23.75	23.75	23.75	23.75	6470.18	5763.78
	2	10	22.5	22.5	22.5	22.5	5955.43	5433.65
	3	15	21.25	21.25	21.25	21.25	5451.85	5103.53
	4	20	20	20	20	20	4987.32	4773.40
	5	25	18.75	18.75	18.75	18.75	4541.79	4443.28
	6	30	17.5	17.5	17.5	17.5	4108.91	4113.15
	7	35	16.25	16.25	16.25	16.25	3683.64	3783.03
	8	40	15	15	15	15	3262.31	3452.90
	9	45	13.75	13.75	13.75	13.75	2842.64	3122.78
	10	50	12.5	12.5	12.5	12.5	2423.66	2792.65
Mn	11	23.75	5	23.75	23.75	23.75	7966.86	6253.15
	12	22.5	10	22.5	22.5	22.5	6837.14	5759.90
	13	21.25	15	21.25	21.25	21.25	5847.74	5266.65
	14	20	20	20	20	20	4987.32	4773.40
	15	18.75	25	18.75	18.75	18.75	4244.36	4280.15
	16	17.5	30	17.5	17.5	17.5	3608.09	3786.90
	17	16.25	35	16.25	16.25	16.25	3069.54	3293.65
	18	15	40	15	15	15	2622.72	2800.40
	19	13.75	45	13.75	13.75	13.75	2246.33	2307.15
	20	12.5	50	12.5	12.5	12.5	1918.93	1813.90
Co	21	23.75	23.75	5	23.75	23.75	4614.52	2949.40
	22	22.5	22.5	10	22.5	22.5	2731.45	3557.40
	23	21.25	21.25	15	21.25	21.25	4061.23	4165.40
	24	20	20	20	20	20	4987.32	4773.40
	25	18.75	18.75	25	18.75	18.75	5761.21	5381.40
	26	17.5	17.5	30	17.5	17.5	6379.57	5989.40
	27	16.25	16.25	35	16.25	16.25	6836.90	6597.40
	28	15	15	40	15	15	7133.79	7205.40
	29	13.75	13.75	45	13.75	13.75	7270.95	7813.40
	30	12.5	12.5	50	12.5	12.5	7247.29	8421.40
Cr	31	23.75	23.75	23.75	5	23.75	6208.49	5887.53
	32	22.5	22.5	22.5	10	22.5	5823.58	5516.15
	33	21.25	21.25	21.25	15	21.25	5415.19	5144.78

	34	20	20	20	20	20	4987.32	4773.40
	35	18.75	18.75	18.75	25	18.75	4540.61	4402.03
	36	17.5	17.5	17.5	30	17.5	4077.35	4030.65
	37	16.25	16.25	16.25	35	16.25	3599.81	3659.28
	38	15	15	15	40	15	3110.23	3287.90
	39	13.75	13.75	13.75	45	13.75	2610.86	2916.53
	40	12.5	12.5	12.5	50	12.5	2103.92	2545.15
Al	41	23.75	23.75	23.75	23.75	5	1448.56	3013.15
	42	22.5	22.5	22.5	22.5	10	2858.64	3599.90
	43	21.25	21.25	21.25	21.25	15	4036.22	4186.65
	44	20	20	20	20	20	4987.32	4773.40
	45	18.75	18.75	18.75	18.75	25	5720.66	5360.15
	46	17.5	17.5	17.5	17.5	30	6247.73	5946.90
	47	16.25	16.25	16.25	16.25	35	6582.77	6533.65
	48	15	15	15	15	40	6742.95	7120.40
	49	13.75	13.75	13.75	13.75	45	6747.74	7707.15
	50	12.5	12.5	12.5	12.5	50	6619.58	8293.90

표 3. 합금 원소별 $\Delta G_{hcp-fcc}$ 차이를 나타낸 표

KOPRI
극지연구소

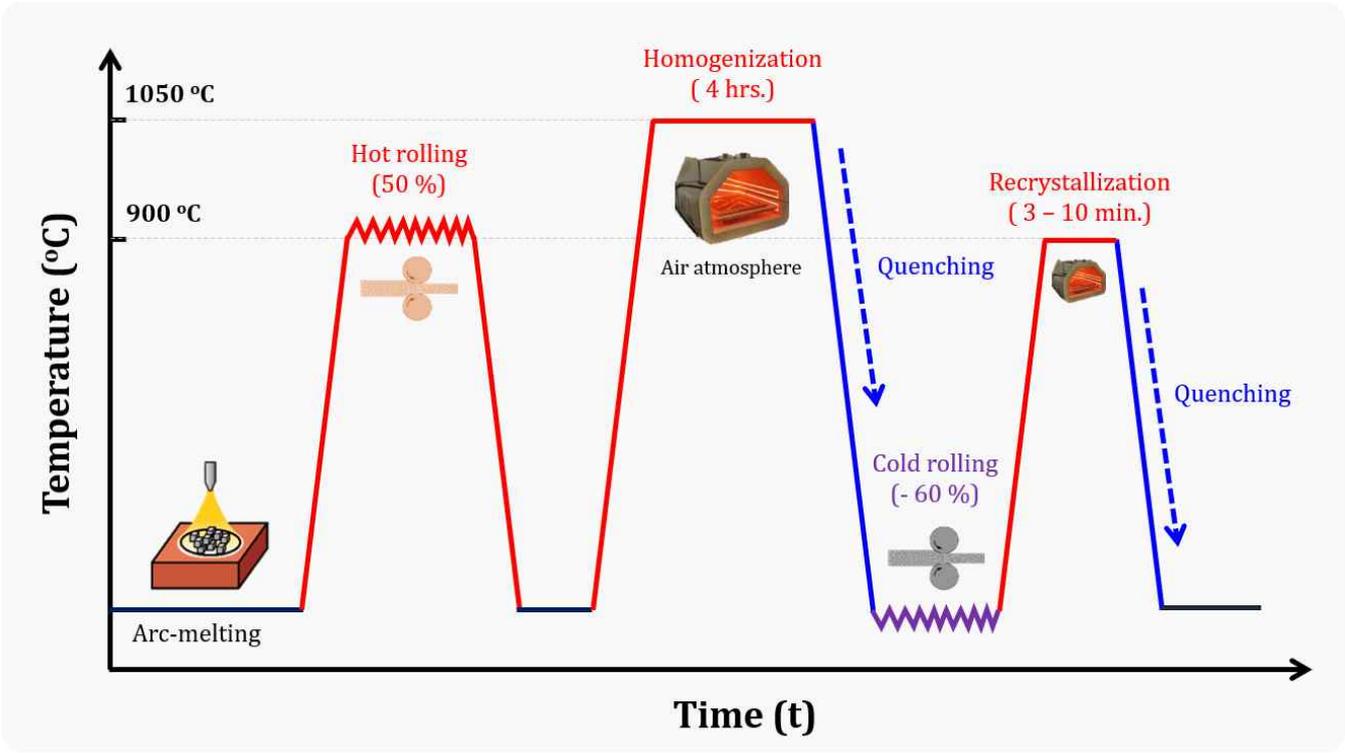


그림 15. 최적화 된 합금 제조 공정을 나타낸 도면

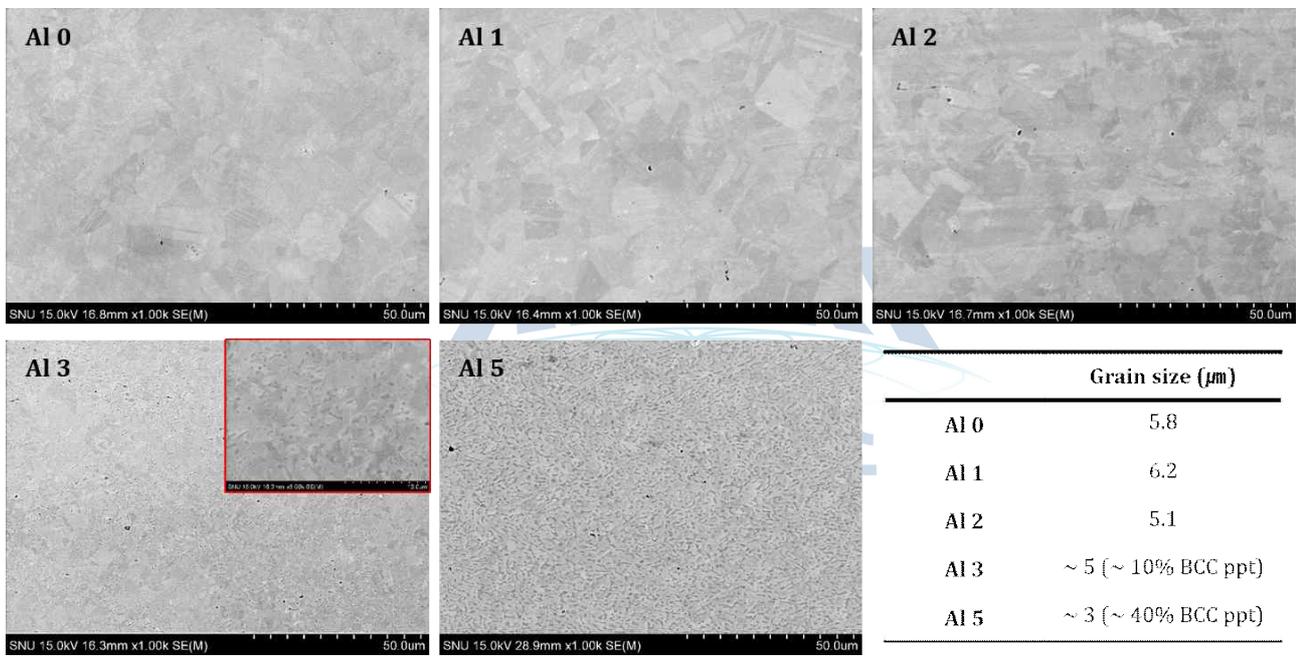


그림 16. Al 첨가에 따른 합금 미세구조의 변화

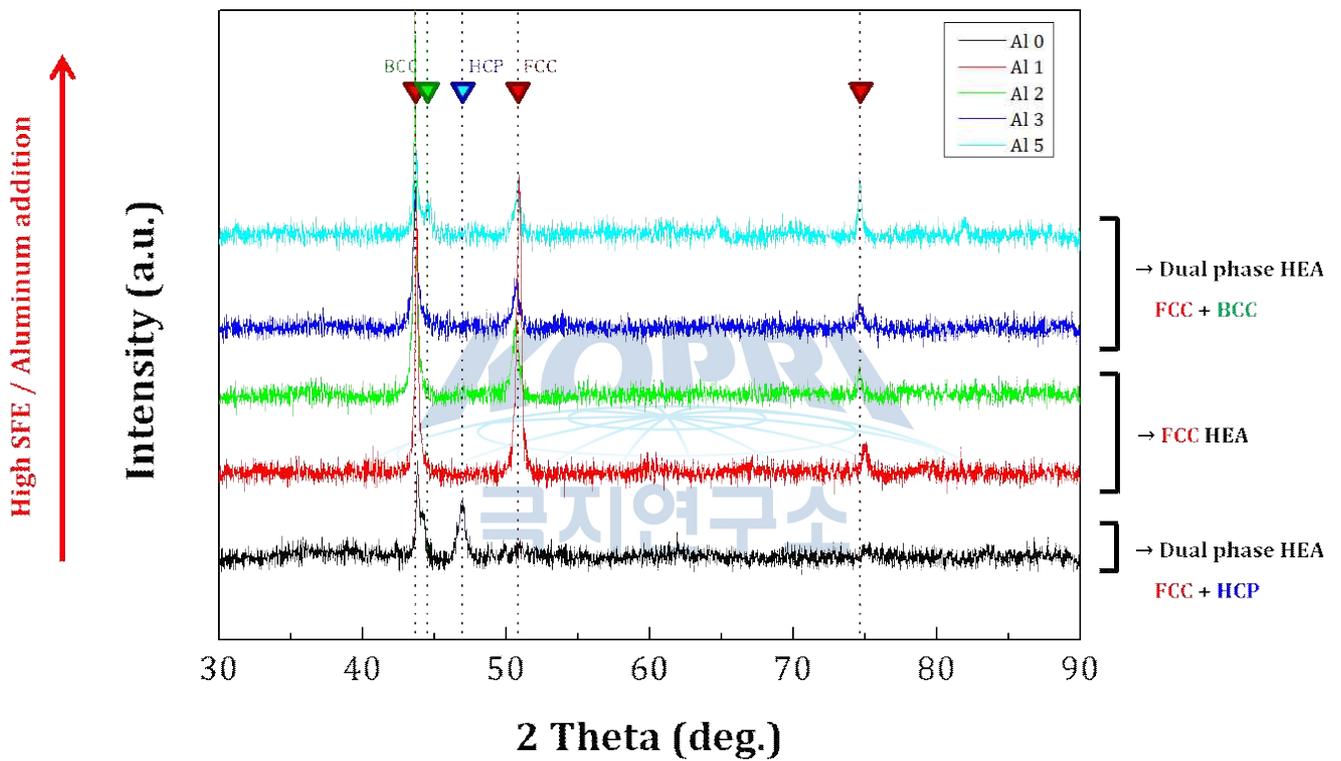


그림 17. Al 첨가에 따른 합금 상변화

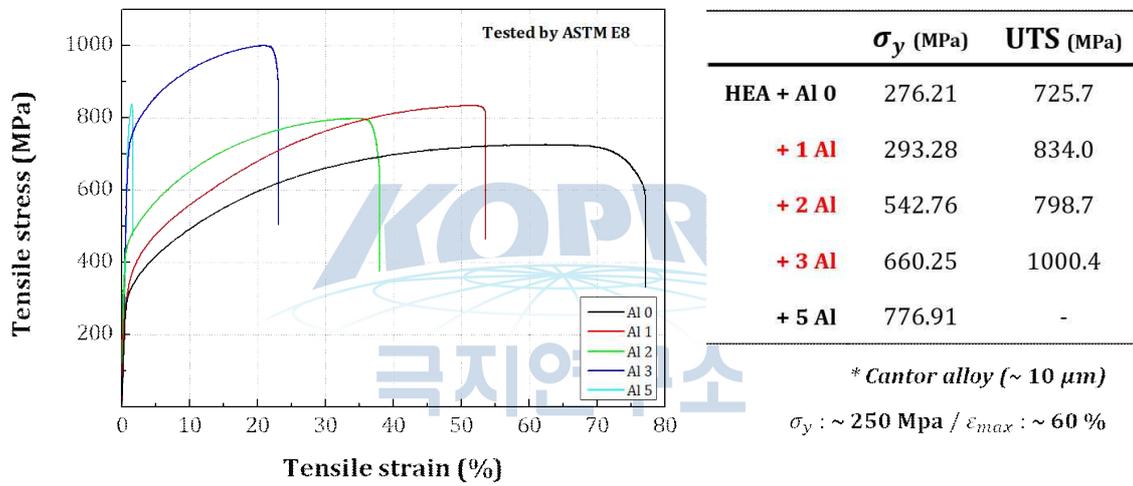


그림 18. Cr20Co32Fe32Ni8Mn8 + Al 합금의 상온 인장 곡선

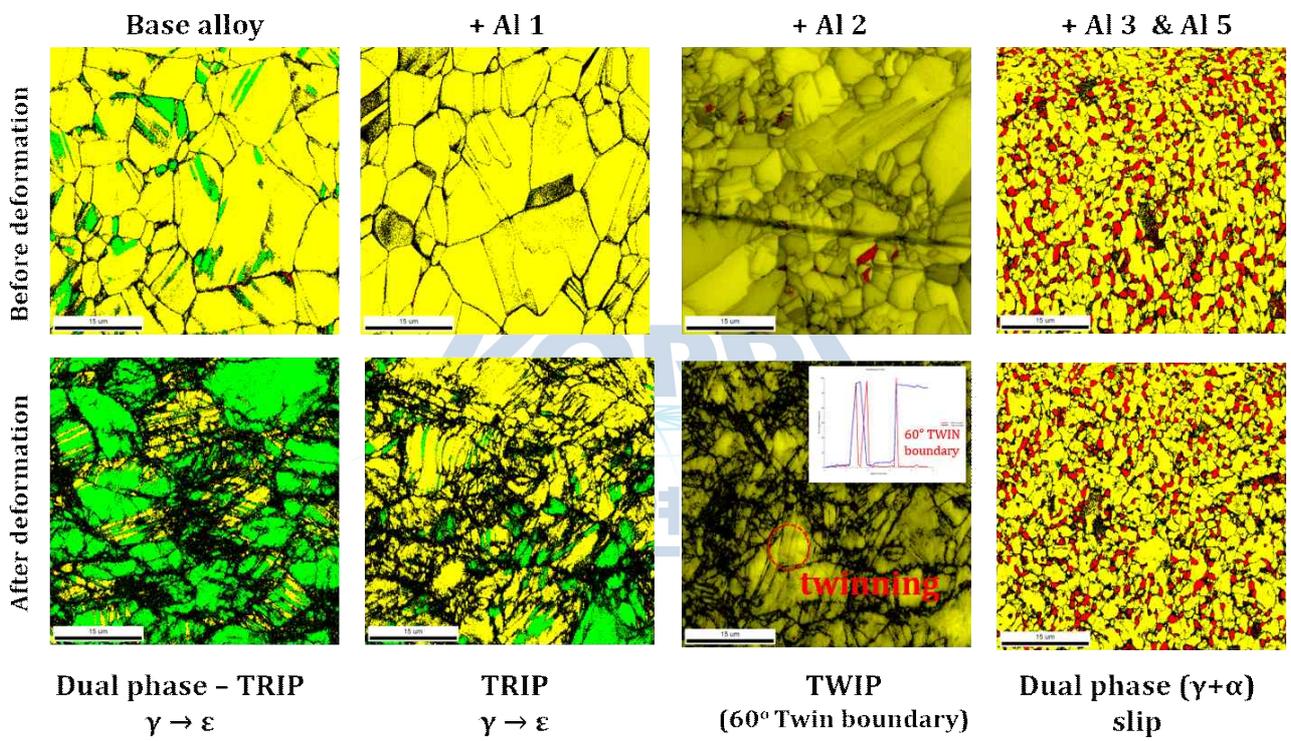


그림 19. Al 첨가에 따른 소재의 변형 이후의 EBSD 맵

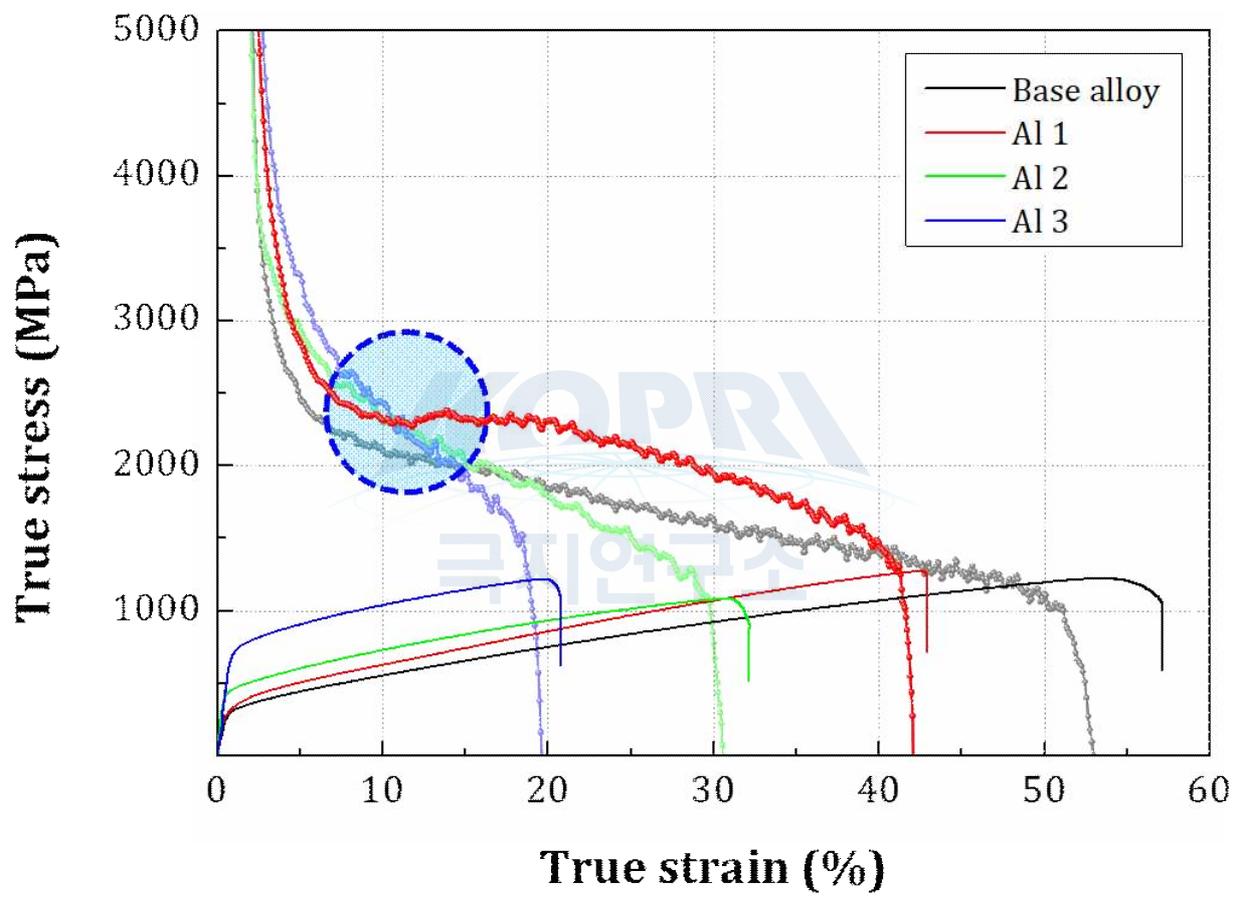


그림 20. 개발된 합금의 진응력 곡선 및 변형 경화율 곡선

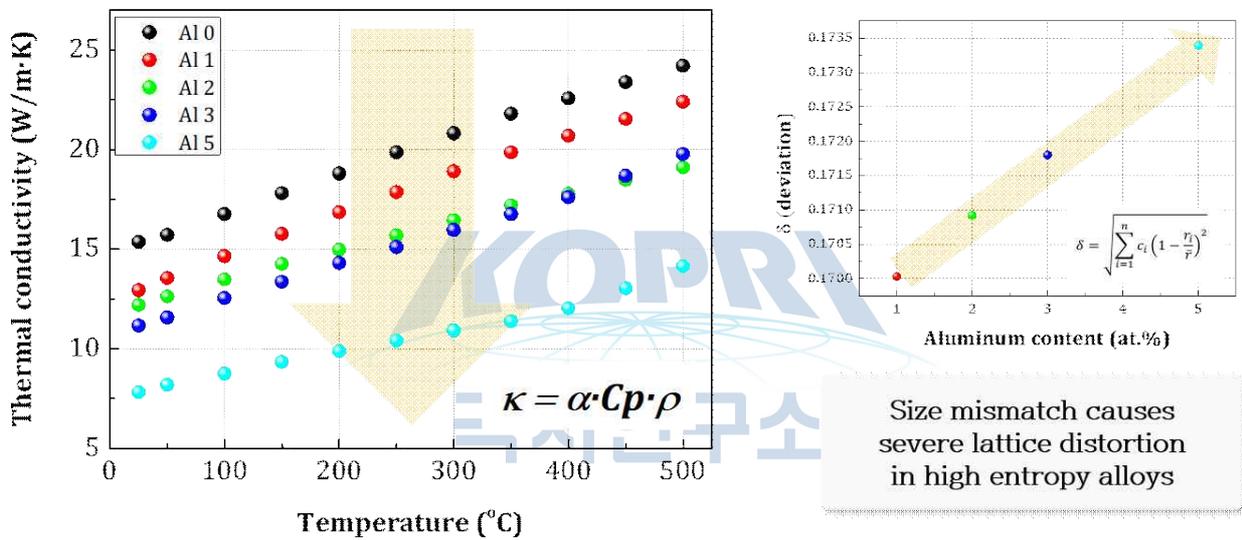


그림 21. 본 연구에 의해 개발된 HEA의 온도에 따른 열전도도 변화 정도

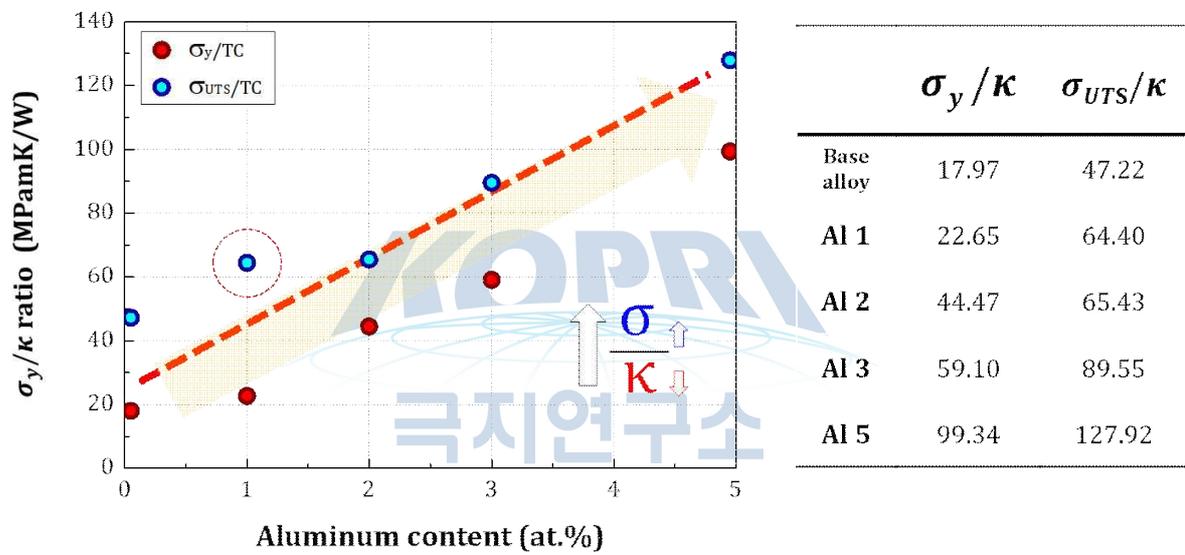


그림 22. 본 연구에 의해 개발된 HEA의 조성 에 따른 강도-전도도비 변화

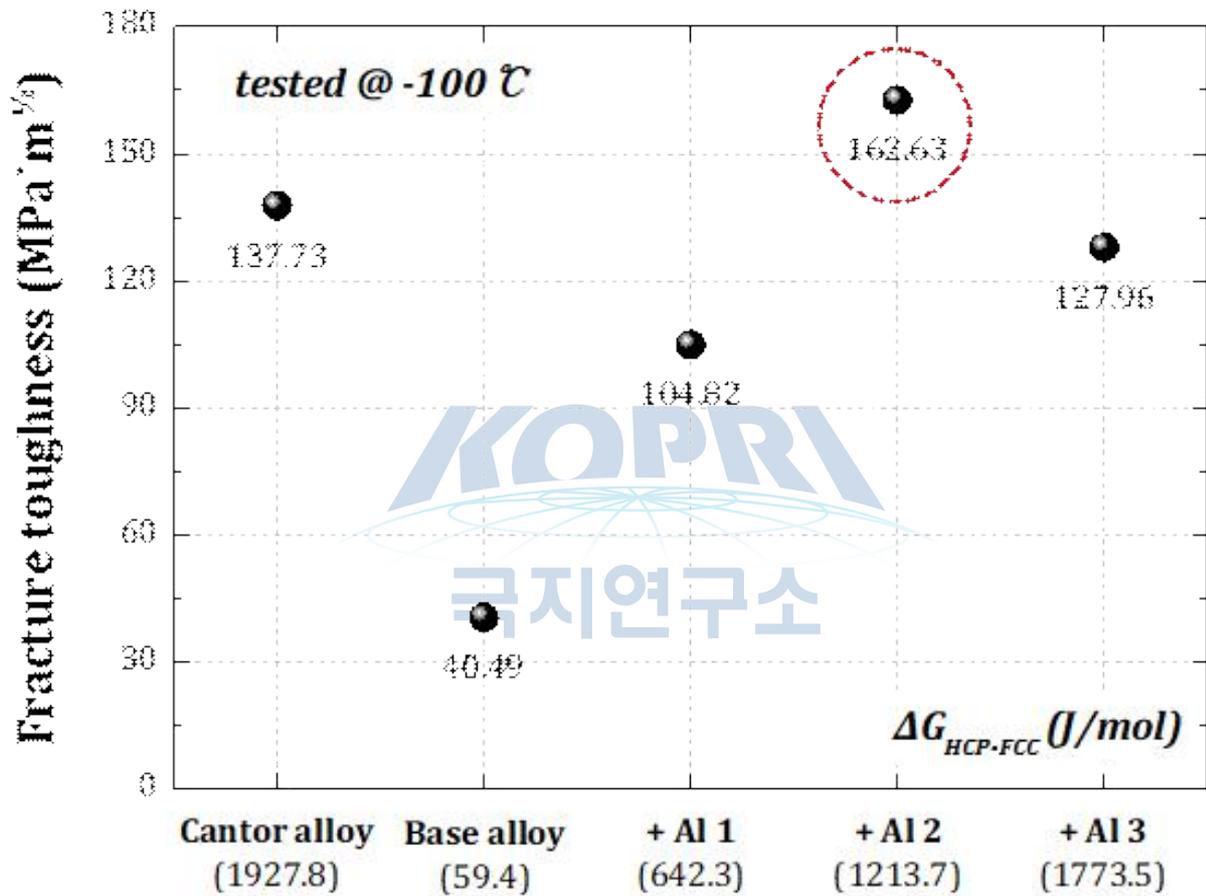


그림 23. HEA의 조성에 따른 저온 CVNT 결과

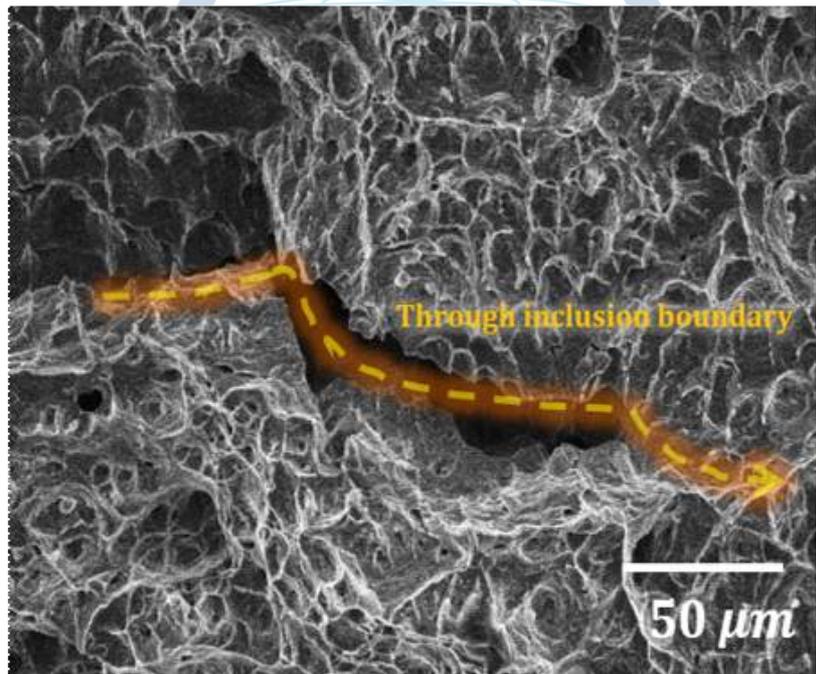
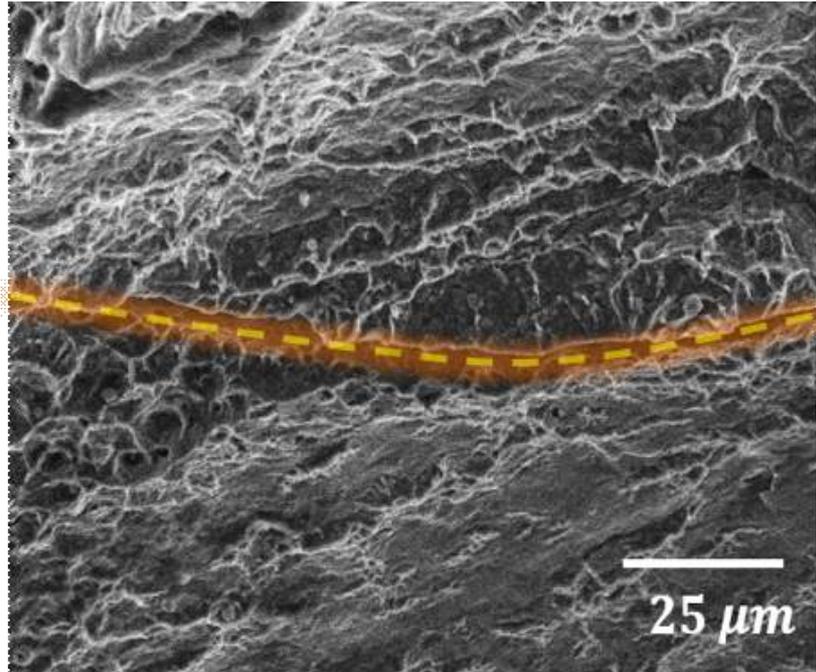


그림 24. Al이 포함되지 않은 DP합금(상)과 BCC 제 2상이 석출된 DP합금(하)의 파단면

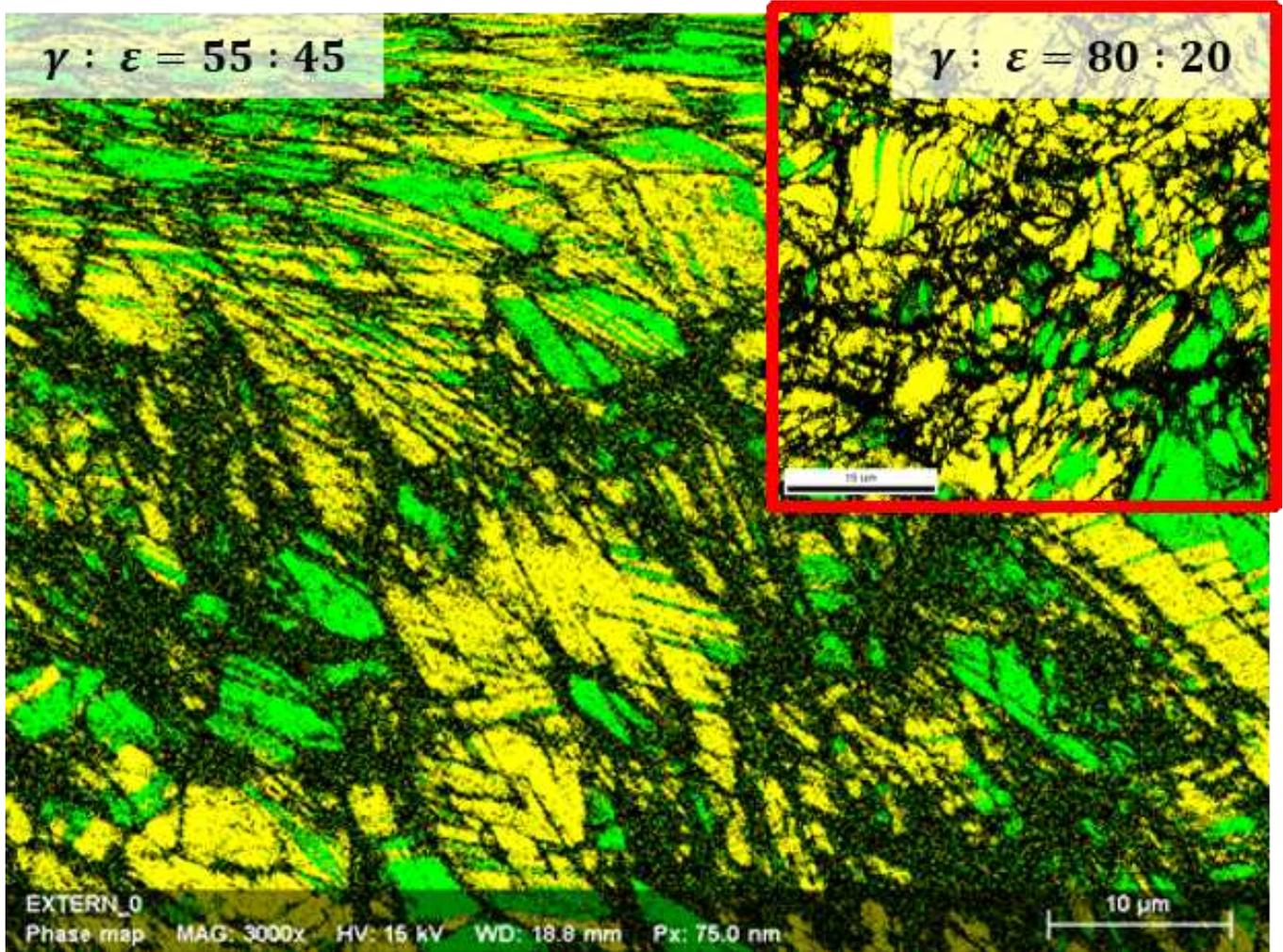


그림 25. TRIP 거동 합금의 CVNT 이후 상분석 결과

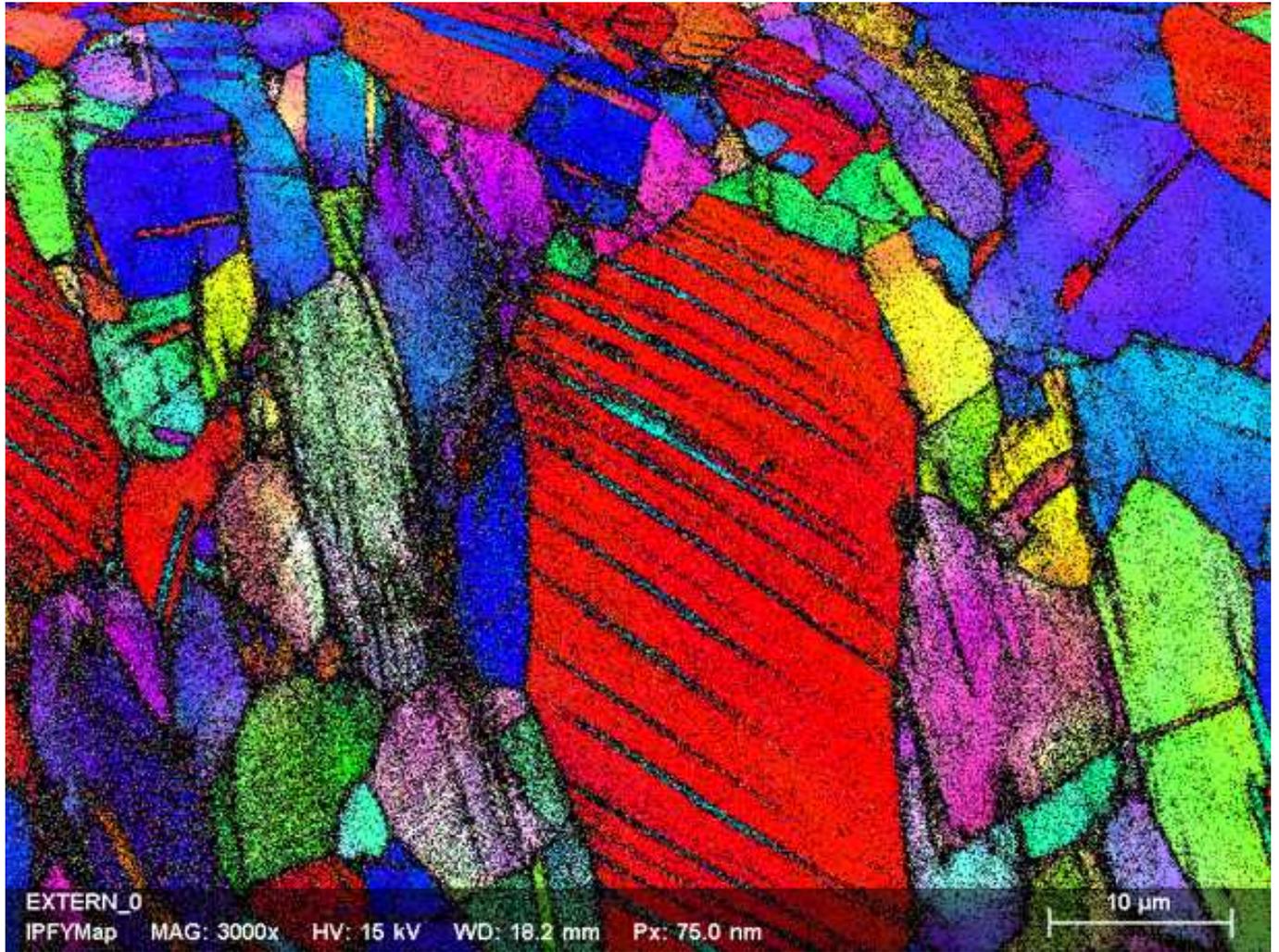


그림 26. TWIP 거동 합금의 CVNT 이후 EBSD 분석 결과

제 4장 연구 개발 목표 달성도 및 대외기여도

제 1 절 각 차년도별 연구 목표 및 성과의 달성 정도

2016년도 정성적 성과 (1차 년도)		
연구개발목표	달성내용	달성도
TWIP/TRIP 하이엔트로피 합금 설계	<ul style="list-style-type: none"> 적층 결함 에너지 제어를 통한 TWIP/ TRIP 하이엔트로피 합금 개발 완료 설계한 하이엔트로피 합금의 열역학적 상 안정성 계산 및 평가 (단일상 합금 제조) 완료 	100 %
상온 기계적 특성 평가	<ul style="list-style-type: none"> 인장실험 및 기계적 특성 분석 수행 <ul style="list-style-type: none"> - 최대 항복강도 > 500MPa 달성 (초과달성) - 최대 인장강도 > 950 MPa 달성 (초과달성) - 최대 연신 > 60 % 이상 달성 (초과달성) 파괴인성 측정 > 155 MPa·m^{1/2} (초과달성) 	100 %
2017년도 정성적 성과 (2차 년도)		
연구개발목표	달성내용	달성도
저온 기계적 특성 평가 (극저 모사 온도 : 200 K)	<ul style="list-style-type: none"> 저온 인장 강도 > 1050 MPa (초과달성) 저온 파괴 인성 > 160 MPa·m^{1/2} - 상온 대비 30 %이상 상승 (초과달성) σ_y/k (항복강도/열전도도) > 50 달성 	100 %
저온 변형기구 규명	개발 합금의 저온변형 전후 SEM 및 X-선 회절 분석을 통한 변형기구 규명 - EBSD 평가 진행	100 %
극저환경 인프라 구축	개발 합금의 극저(모사)환경에서 재료특성 저하에 관한 데이터베이스 구축	100 %

표 4. 각 차년도별 연구 목표 및 성과의 달성 정도

제 2 절 연구 결과의 종합적 달성 정도

상기의 5장 1절에서 확인할 수 있는 바와 같이, 본 연구를 통해 수행하고자 하였던 실험적 정량 값은 대부분의 목표치에서 초과 달성하였으며, 일부 합금계에서는 기보고된 소재 중 가장 우수한 수준의 특성을 나타내는 것을 확인할 수 있었다. 뿐만 아니라, 열역학 시뮬레이션을 통해 축적한 데이터를 토대로 합금의 SFE를 예측할 수 있는 통계적 근사식 역시 제시할 수 있었다. 이를 통해 세계 최대의 재료 학회인 미국 TMS 학회를 포함한 학회에서 구두 발표를 수행함으로써, 국제적 기술교류 및 검증을 수행하였다.

뿐만 아니라, 본 연구를 수행함에 있어 다양한 연구 성과 역시 창출하였다. 먼저 1차년도 연구 달성 목표였던 SCI 급 논문지 1건의 논문 투고를 포함하여 총 2편의 논문을 게재하였으며, 확보한 결과를 바탕으로 FCC HEA에 대한 특허 역시 출원하여, 등록을 앞두고 있다. 또한 연구의 2차년도에는 확보한 결과를 토대로 NCS 급 논문 투고를 준비 중에 있어 아직 게재를 준비 중에 있으나, 2018년 이내에 게재를 목표로 준비 중에 있다. 또한 다양한 합금계의 HEA에 대한 특허 역시 1건 출원한 상태이다.

추가적으로, 현재는 전무하다고 할 수 있는 국내의 극저온 소재 개발 분야 전문 인력 양성을 위해 다양한 연구원이 본 연구에 참여할 수 있도록 하였다. 실제로 본 연구를 통하여 총 13 명의 연구원이 하이엔트로피 합금 설계에 관한 노하우를 축적하였으며, 그 중, 2명의 공학 박사과 3명의 공학 석사를 배출하는 결과를 얻었다.

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

제 1 절 연구 개발 결과의 적용 가능성 및 사업화 추진 방향

본 연구에서 개발하고자 하는 TWIP/TRIP 특성을 가지는 하이엔트로피 합금은 상온에서는 물론 극저온에서도 높은 강도 및 파괴인성을 보일 것으로 기대되고 있으며, 이를 통해 **향후 극지에서 사용되는 많은 구조용 금속 소재에 적용 할 수 있을 것으로 판단된다.** 또한 이후 연구를 더욱 진행하여 TWIP/TRIP 특성은 유지한 채로, 내식성 소재, 저열팽창 소재 및 저온 용접재료 등의 극저온 기능성 금속 재료로의 확장 가능성도 충분할 것으로 사료된다. 따라서 본 연구를 통하여 아직까지 시작 단계인 국내 극저온 소재 개발에 관한 전략적 로드맵을 확립하여 “한국형 첨단 저온소재산업”을 개척하는 것이 가능할 것으로 사료된다.

뿐만 아니라 2차 년도에 개발한 합금을 토대로 극저온에서 적용 가능성이 가장 우수한 TWIP 기반의 합금을 집중적으로 개발함으로써 **향후 우주 소재 개발 등의 미래 산업에 임함에 있어 선도적인 소재 분야의 선점이 가능할 것으로 기대하고 있다.**

한편, 상기한 것과 같이 본 연구를 통해 개발한 소재의 상용화를 위해서는 **다양한 연구소 및 산업체 등과 협력하여 소재 대형화 및 상용 소재 개발 등이 필요하다.** 부연하면, 포스코, 현대 제철 등의 소재 관련 기업 및 현대 및 두산 중공업 등의 실제 사용자 기업 등과 연계하여 소재 개발을 발전해나가야 한다. 뿐만 아니라, 현재 기술의 발전을 위해서는 연구소 단위의 대형화 연구가 진행되어야 하며, 이를 위해서는 극지 연구소, 생산기술 연구원 및 재료 연구소 등과의 협력 연구 역시 필요하다.

즉, 현재는 극저온 모사 환경에서의 일부의 기계적 특성 등에 대해서만 논의 된 상태이지만, 향후에는 실제 극지 환경에서의 소재 특성 뿐만 아니라, 장시간 활용을 위한 피로 시험, 극저온 수소 취성 평가 등에 대한 연구가 반드시 필요하다. 종합하면, 본 소재의 상용화를 위해 향후 5년 간 해당 결과의 발전적 연구를 위해 연구소 간 연계를 통한 기술의 발전 및 현재 출원 특허의 기술 이전 등을 활발히 수행하고, **10년 이내에 실제 상용화에 이를 수 있는, 기업체와의 협력이 필수적일 것으로 예상한다.**

제 2 절 연구 성과의 기술 및 경제 산업적 측면에서의 효과

과거부터 과학기술의 발달은 재료혁명, 즉 새로운 소재의 개발에 따른 패러다임의 전환에 의해 진행되어 왔다. 이와 같은 현상이 최근에는 철강 등 기존 단일 원소 중심의 합금 개발에서 다성분계 원소 중심의 합금 개발, 즉 하이엔트로피 합금의 개발로 나타나고 있다. 이러한 사실에 기초하여 본 연구에서 개발하고자 하는 저온 피로변형 저항성이 큰 TWIP/TRIP 하이엔트로피 합금은 신개념 극저온 소재를 개발하고자했던 도전적인 과제였으며, **결과적으로는 첨단산업이 요구하는 극한환경 극저온 대응 고급 소재 기술 개발의 시발점**이 될 수 있다. 부연하면, 본 연구에서는 신개념 하이엔트로피 합금의 특성 맞춤형 설계 기술과 물성 평가 및 분석을 통한 미세 구조와 특성간의 상관관계 규명이라는 종합적인 연구를 수행하여, 관련 연구 노하우를 축적하게 된다면 향후 극저온 소재라는 첨단 소재 개발에 관한 **전세계적 리더 그룹으로서의 입지를 굳건히 다질 수 있을 것으로** 사료된다.

현재 소재 관련 연구는 범용 제품에서 벗어나 첨단 제품으로 옮겨가고 있으며, 이러한 흐름에 발맞추기 위하여 우리도 고급 기술의 소재를 개발에 집중해야하며, 관련 첨단 소재의 개발 역량을 갖추었을 때 비로소 소재 강국으로 거듭날 수 있다. 이러한 첨단 소재 기술의 발전은 현재 개발된 기술의 개선에 그칠 것이 아니라 새롭고 획기적인 소재의 개발을 통해서 이룩할 수 있다. 이러한 **패러다임을 바꿀 수 있는 신소재로 본 연구에서는 TWIP/TRIP 하이엔트로피 합금을 제안**하였다. 인류가 향후 극저온의 자원 및 광대한 인프라를 활용하기 위해서 저온용 구조 재료의 개발은 해결되어야 할 제 1의 당면 과제이다. 따라서 본 연구를 통하여 저온에서 사용될 수 있는 구조용 신소재를 개발하는 경우 관련 고급 소재 시장을 리딩하는 부가가치 창출이 가능할 것으로 사료된다.

특히, 원재료 비용만 고려하였을 때 ([표 5] 참고), 극저온에서 활용되는 높은 니켈 함량의 9%Ni 강 및 Inconel 등의 강종과 비교하여 10% 이상의 비용 절감이 가능할 것으로 판단된다. 뿐만 아니라 현재 특허권 등의 문제로 인해 전량 수입 하고 있는 고품위 저온 소재의 국산화를 통해 해당 비용 절감 효과는 극대화 될 것으로 판단된다. 종합하면, **본 소재의 개발은 현재 중·저급 시장에 편중된 우리의 소재 산업을 고급소재 산업으로 진일보 시키는 데에 중요한 초석 역할을 할 수 있을 것으로 기대한다.**

※ 영국 LME(London metal exchange) 공시 가격 기준

합금 구분	원소	Fe	Ni	Mn	Co	Cr	Al	Nb	Mo	Ti	총계 (\$/ kg)
	가격 (\$/kg)	0.5	12.3	4.4	5.1	2.8	0.8	41.5	15.5	4.4	
Inconel 718	조성비 (at.%)	14.7	5.5	0	0	21	0	5	3.3	1	3.97
Al-HEA	조성비 (at.%)	30.4	7.6	7.6	30.4	19	5	0	0	0	3.54

표 5. 본 연구에서 개발한 합금과 경쟁 강종과의 가격 비교

제 6 장 참고문헌

- [1] A fracture-resistant high-entropy alloy for cryogenic applications, *Science* 345 (2014), *Bernd et al.*
- [2] Lattice Distortions in the FeCoNiCrMn High Entropy Alloy Studied by Theory and Experiment, *Entropy* 18 (2016), *H.S.Oh et al.*
- [3] Manipulation of σ_y/κ ratio in single phase FCC solid-solutions, *APL* 109 (2016), *J.I.Lee et al.*
- [4] Effect of aluminum on the microstructure and properties of two refractory high-entropy alloys, *Acta Mat.* 68 (2014), *Senkov et al.*
- [5] Decomposition of the single-phase high-entropy alloy CrMnFeCoNi after prolonged anneals at intermediate temperatures, *Acta Mat.* 112 (2016), *Otto et al.*
- [6] Alloy Design and Properties Optimization of High-Entropy Alloys, *JOM* 64 (2012), *Zhang et al.*
- [7] A critical review of high entropy alloys and related concepts, *Acta Mat.* 122 (2017), *Miracle et al.*

