[논문] 한국소성가공학회지, 제 31 권 제 5 호, 2022
Transactions of Materials Processing, Vol.31, No.5, 2022
http://data.doi.or.kr/10.5228/KSTP.2022.31.5.273

열간압연 된 $Fe_{55}Co_{17.5}Ni_{10}Cr_{12.5}Mo_5$ 고엔트로피합금의 소둔 조건에 따른 기계적 특성 변화

박해돈[1] · 배동화[1] · 원종우[2] · 문종언[3] · 김형섭[4] · 설재복[5] · 성효경[5] · 배재웅[6] · 김정기[5,#]

Annealing Effect on the Mechanical Properties of Hot-Rolled $Fe_{55}Co_{17.5}Ni_{10}Cr_{12.5}Mo_5$ High-Entropy Alloy

H. D. Park, D. H. Bae, J. W. Won, J. Moon, H. S. Kim, J. B. Seol, H. Sung, J. W. Bae, J. G. Kim
(Received June 30, 2022 / Revised August 30, 2022 / Accepted August 31, 2022)

Although the mechanical properties of high-entropy alloys depend on the annealing conditions, limited works were established to investigate the annealing effect on the mechanical properties of Mo-added high-entropy alloys. Therefore, in the present work, the annealing effects on the microstructural evolution and mechanical properties of Mo-added high-entropy alloy were investigated. As a result, incomplete recrystallization from the limited annealing time not only suppresses deformation-induced phase transformation during cryogenic tensile test but also induces a deformation instability that results into the ductility reduction compare with the fully recrystallized sample. This result represents adjustment of annealing time is useful to control both transformation-induce plasticity and deformation instability of high-entropy alloys, and this can be applied to control the mechanical properties of metallic alloys by combining pre-straining and subsequent annealing.

Keywords: High-entropy alloy, Annealing, Microstructure, Mechanical properties

1. 서 론

2000 년대 이후 기존 합금 설계법에서 탈피해 동일 비율의 4 원계 이상 원소를 혼합해 단상의 기지를 획득하는 신 합금 설계 전략이 수립되면서 고엔트로피합금(High-entropy alloy, HEA)에 관한 연구가 활성화되었으며, 그간 격자 변형을 동반한 기계적 특성의 향상, 높은 열적 안정성 및 우수한 내수소취성에 의해 다수의 연구가 수행되어왔다 [1-3]. 특히 최근에 액화가스 저장에 대한 중요성이 커지며 HEA 기반 합금의 극저온 적용성에 대한 평가가 수행되었는데, 이는 주로 온도 변화에 따른 적층결함 에너지 변화 및 변형기구 전환이 발생하는 면심입방구조(Face-centered cubic, FCC) 기반 HEA 에서 활발히 진행되고 있다 [4,5].

초기 HEA 는 CoCrFeMnNi, CoCrNi, FeCoCrNi 등 등원소 기반 HEA 설계가 주를 이루었으나 [6,7], 최근 타 합금 원소 대비 고가인 Co, Cr, Ni 등의 비율을 줄이기 위해 Fe 계 비등원소 HEA 의 설계에 관한 결과 역시 다수 보고되고 있다 [8,9]. 이들 비등원소 HEA 의 경우, 등원소 기반 HEA 에 비해 적층결함에너지 제어를 위한 범위가 넓어 전위 기반 강화기구에 국한되지 않고 변형유기 쌍정 강화기구 및 변형유기 상변태 강화기구와 같은 다양한 변형기구를 유발해 극저온 환경에서의 강도 증가 및 연신율 향상에 기여한다. [10,11].

1. 경상국립대학교 나노신소재융합공학과, 석사과정
2. 한국재료연구원 타이타늄연구실, 선임연구원
3. 포항공과대학교 신소재공학과, 박사후연구원
4. 포항공과대학교 신소재공학과, 교수
5. 경상국립대학교 나노신소재융합공학과, 교수
6. 부경대학교 금속공학과, 교수
Corresponding Author: Gyeongsang Nat. Univ. K-metal center
E-mail: junggi91@gnu.ac.kr
ORCID: 0000-0002-3423-5401

특히, Mo 를 첨가한 Fe 계 HEA 는 최근 타 HEA 에 비해 높은 강도 및 연신율을 가지고 있어 상온 및 극저온에서 변형유기쌍정 및 상변태 변형기구에 관한 고찰이 다수 진행되었으나 [12], 단일 후처리 공정 후 변형기구의 분석이 주를 이루며 동일 합금에서 공정 조건에 따른 미세조직 및 기계적 특성 변화에 관한 연구는 현재 진행된 사례가 없다. 특히, 열처리에 따른 초기 미세조직 변화는 단순 인장 변형에 국한되지 않고 대변형 구간에서의 특성에도 영향을 미칠 만큼 중요한 문제로 열처리 온도 및 시간 제어에 관한 연구는 공정 최적화 측면에서 중요한 문제로 대두된다 [13,14].

예를 들자면, Park 의 연구에서는 CoCrCuFeNi HEA 에서는 열처리 온도 변화에 따라 부분 재결정이 일어나는 영역이 발생하고 구리 과다 상에 의해 재결정된 결정립의 성장이 방해되면서 미세한 이상의 구조가 나타나 기존 혼합비 법칙보다 더 높은 강도가 보고되었다 [15]. 또한, Wu 의 연구에서 비등원자 $Fe_{40}Mn_{10}Cr_{25}Ni_{25}$ HEA 에 합금에 냉간 압연 후 750 °C 열처리를 통하여 고밀도 전위와 미량의 체심입방구조 (Body-centered cubic, BCC) 석출물을 포함하는 완전히 재결정화 되지 않은 미세 결정립과 많은 BCC 석출물을 포함하는 완전히 재결정된 미세 결정립으로 구성된 부분, 재결정화된 미세 결정립에 의해 높은 항복강도와 높은 연성의 좋은 조합을 나타낸다고 보고되었다 [16]. 하지만 Yin 의 연구에서 $Fe_{35}Ni_{35}Cr_{25}Mo_5$ HEA 를 800 °C 이하에서 열처리를 진행하였을 경우 강도는 높지만 연성은 낮게 나타나며, 인장 파면에서 부분 재결정으로 인한 연성 파괴와 벽개 파괴가 동시에 발생함을 확인되었다 [17]. 기존 연구에서는 상기 기계적 물성 저하에 대해 상대적으로 낮은 수준의 회복 및 재결정으로 인해 전위 밀도가 더 높기 때문이라고 보고하고 있으므로 열처리 중에 발생하는 부분 재결정이 소재의 기계적 특성에 긍정적인 영향만 미친다고 단정할 수는 없다.

따라서, 본 연구에서는 열처리 시간 변화에 따른 $Fe_{55}Co_{17.5}Ni_{10}Cr_{12.5}Mo_5$ FCC 계 HEA 의 미세조직 변화가 변형기구 및 기계적 특성에 미치는 영향에 대해 분석하였다. 열처리 시간에 따른 재결정 정도를 제어하기 위해 5 min, 10 min, 그리고 20 min 으로 열처리 시간을 제어했으며, 넓은 범위에서 주사전자현미경(Scanning electron microscope, SEM) 이미지 획득을 위해 결정립 크기 분포에 대한 정량적인 분석을 실시했다. 이후, 변형 조직 내 미소변형 및 상분포의 확인을 위해 후방산란회절 분석장비(Electron backscatter diffraction, EBSD) 분석을 실시하고 열처리 조건에 따른 변형유기쌍정 및 상변태 변형거동의 차이에 대해 고찰하였다. 끝으로 이들 변형거동과 불완전 재결정화가 기계적 특성에 미치는 영향을 확인하기 위해 상온 및 극저온 환경에서 일축 인장 시험을 수행해 응력-변형률 곡선을 획득 후 비교하였다.

2. 실험 방법

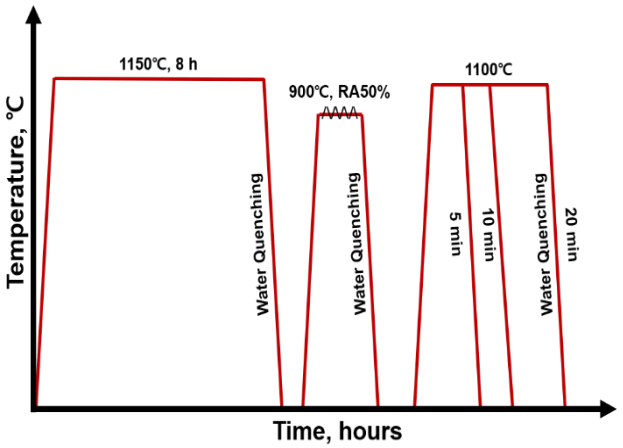

Fig. 1 Schematic of the Processing map of the $Fe_{55}Co_{17.5}Ni_{10}Cr_{12.5}Mo_5$ HEA specimens.

본 연구에 활용한 $Fe_{55}Co_{17.5}Ni_{10}Cr_{12.5}Mo_5$ (at%) HEA 판재는 Fig. 1의 공정도에 요약된 바와 같은 용체화처리, 열간압연 및 열처리 과정을 거쳐 제조되었다. 초기 잉곳은 8 kg 용량의 진공유도용융기를 활용하여 제조 후 1150 ℃의 온도에서 8시간 동안 용체화처리했으며, 균질화 된 잉곳을 900 ℃로 다시 재가열 후 50% 압하율로 열간압연을 진행하고 수냉하여 판재를 획득했다. 이후, 열연재의 결정립 크기 제어를 위해 1100 ℃에서 5, 10, 20분 간 열처리 후 수냉하는 과정을 거쳤다. 향후 설명의 용이함을 위해 열처리된 HEA 판재는 열처리 시간에 따라 각각 5 min, 10 min, 20 min 시험편으로 명명하였다.

열처리 조건 차이에 따른 HEA 열연재의 미세조직 변화를 확인하기 위해 주사전자현미경(JSM-7900F, JEOL, Japan)과 EBSD(C-Nano, Oxford, UK)를 활용하였으며, 주사전자현미경 관찰 및 EBSD 분석을 위한

시험편은 연마종이, 다이아몬드 서스펜션 및 SiO_2 콜로이달 용액을 활용한 기계적 연마를 통해 준비하였다. EBSD 분석 결과는 TSL OIM software을 활용해 상분포 및 KAM(Kernel average misorientation) 분포를 정량화하였다. 또한, 열처리 시간에 따른 결정립 크기의 정확한 분포를 확인하기 위해 저배율에서 SEM 후방산란전자 관찰 모드를 활용해 다량의 이미지를 수합 후 Image J 분석 소프트웨어를 활용해 시편 당 200개 이상의 결정립 크기를 측정하여 정량화하였다.

초기 미세조직 변화에 따른 상온(298 K) 및 극저온(77 K)에서의 기계적 특성을 확인하기 위해 시험편의 압연방향을 따라 표점거리 6.4 mm, 너비 2.5 mm 크기를 가지는 판상의 인장시편을 가공하였다. 일축 인장시험을 수행하기 위해 100 kN 로드셀을 사용하는 만능시험기(Instron 1361, Instron, USA)를 활용했으며, 1×10^{-3} s^{-1} 의 변형률 속도 조건으로 298 K 및 77 K 조건에서 시험을 수행하였다. 이 때, 인장시험 중 정확한 변형률 측정을 위해 인장시편 표면에 흰색과 검정색 패턴을 도포한 후 디지털 이미지 대조(ARAMIS 12M, GOM Optics, Germany)를 활용하였으며, 인장시험 후 변형 미세조직을 관찰하기 위해 각 시험편에서 15% 및 40% 변형률 지점을 지정하여 EBSD 분석을 수행하였다. 아울러 인장시험 후 파면 분석을 위해 SEM(JSM-7900F, JEOL, Japan)을 이용하여 변형 후 인장시험편을 관찰하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 열처리에 따른 초기 미세조직 변화

Figure 2는 5 min, 10 min, 20 min 시험편의 인장시험 전 inverse pole figure (IPF) 및 상 분포를 나타낸 결과이다. 열처리가 진행됨에 따라 통상적인 압연 미세조직이 재결정이 진행되며 사라짐을 확인할 수 있으며, 모든 열처리 조건에서 단상의 FCC를 가지고 있음을 확인할 수 있다. 다만, 현 EBSD 결과에서는 획득한 결정립 개수가 적고, 조대한 결정립과 미세한 결정립이 혼합되어 있기 때문에 정확한 결정립 크기를 정량화 하기에는 한계가 있다. 따라서, 상기 문제점을 해결하기 위해 저배율 SEM 후방산란전자 관찰을 수행하여 Fig. 3과 같이 열처리 시간에 따른 결정립 변화 정보를 획득했다.

Figure 3(a), (b), (c)는 5 min, 10 min, 20 min 시험편에서 대표적인 SEM 후방산란전자 이미지를 보여주고 있으며, 주요 결정립계는 검은색 선으로 표시하였다. 이미지 분석 결과, 결정립 크기가 일정한 분포를 보이는 20 min 시험편과 비교해 5 min 과 10 min 시험편에서는 큰 결정립과 작은 결정립이 혼합된 형태를 보인다. 상기 5 min 과 10 min 열처리 시편에서의 분산된 결정립 크기는 짧은 열처리 시간이 완전한 재결정 및 결정립 성장을 유발하는데 있어 부족함을 보여준다. Figure 3(d)는 다수의 SEM 후방산란전자 이미지들을 활용하여 획득한 시험편의 평균 결정립의 크기를 보여주고 있으며, 열처리 시간이 증가함에 따라 평균 결정립 크기는 176.9 μm (5 min), 84.6 μm (10 min), 126.0 μm (20 min)로 변화하였다. 5 min 시험편에서의 상대적으로 큰 평균 결정립 크기는 용체화 처리 후 열간 압연 과정에서 형성된 조대 결정

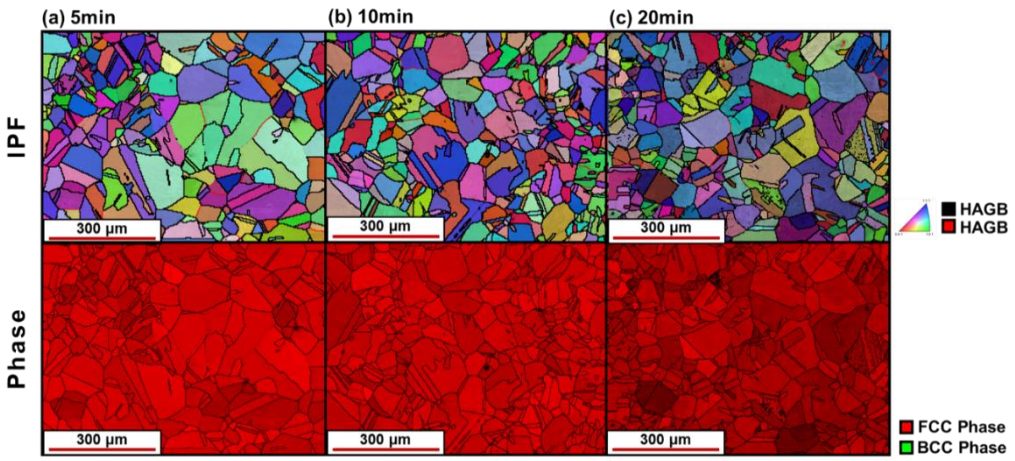

Fig. 2 EBSD inverse pole figure (IPF) and phase distribution maps of the (a) 5 min, (b) 10 min, (c) 20 min samples.

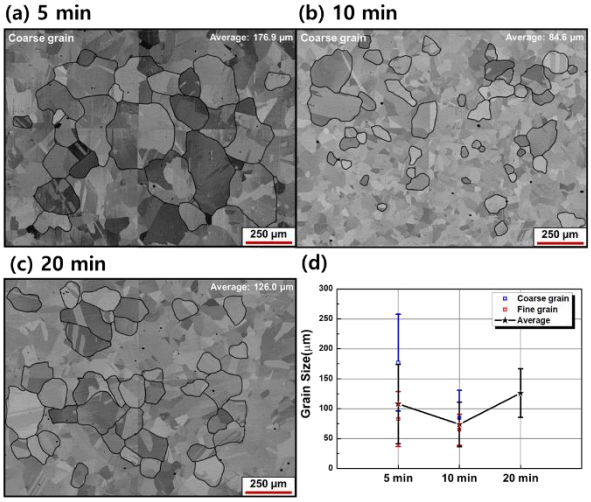

Fig. 3 Representative SEM BSE micrographs of the (a) 5 min, (b) 10 min, and (c) 20 min samples. (d) The average grain size changes as the increase of annealing time. Fine and coarse grain size distribution represent an incomplete recrystallization occurs at the 5 min and 10 min samples.

립(Fig. 2)이 재결정이 일어나지 못하고 잔류한데에 기인한다. 실제로 재결정이 발생하며 형성된 미세 결정립과의 크기 차이가 94 μm 로 크게 발생하고 있고 이에 따른 평균 결정립 크기 편차가 ± 135 μm 에 달하는 것을 확인할 수 있다. 10 min 시험편에서는 용체화 처리에 의해 형성된 조대 결정립의 재결정화와 미세 결정립의 성장으로 인해 조대 결정립과 미세 결정립의 크기 차이가 20 μm 로 감소함을 확인할 수 있으며, 20 min 시험편에서는 조대 결정립과 미세 결정립의 크기 차이가 발생하지 않음을 알 수 있다. 따라서, 열처리 시간이 증가함에 따라 완전 재결정이 발생하면서 평균 결정립 크기 편차는 감소하는 것을 알 수 있다. 또한, 열처리 중 발생하는 불완전 재결정은 HEA 의 기계적 특성에도 영향을 미칠 수 있기 때문에 상온 및 극저온 환경에서의 일축 인장시험을 수행하였다.

3.2 열처리에 따른 기계적 특성 변화

Figure 4는 298 K와 77 K의 온도에서 인장시험을 수행한 $Fe_{55}Co_{17.5}Ni_{10}Cr_{12.5}Mo_5$ HEA의 응력-변형률 곡선을 보이고 있다. 그림 3(d)의 결정립 크기와 같이 용체화 처리 후 열간 압연 과정에서 형성되고 완전한 재결정이 발생하지 않아 잔류한 조대결정립이

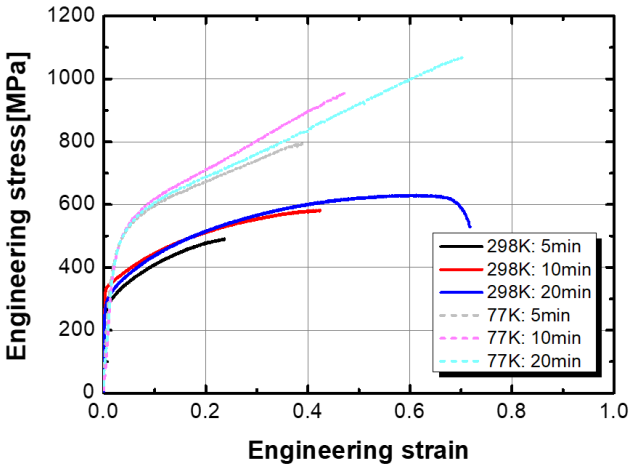

Fig. 4 Engineering stress-strain curves of the annealed $Fe_{55}Co_{17.5}Ni_{10}Cr_{12.5}Mo_5$ HEA specimens tensile tested at 298 K and 77 K.

있는 5 min 시험편은 10 min과 20 min 시험편 대비 큰 평균 결정립 크기를 가지고 있으므로 298 K와 77 K 조건 모두에서 가장 낮은 항복강도를 보이고 있다. 반면, 10 min 시험편의 경우 재결정에 의해 형성된 미세결정립의 분율이 증가하여 평균 결정립 크기가 84.6 μm로 감소해 가장 높은 항복강도가 나타나게 된다. 완전 재결정 후 결정립 성장이 발생한 20 min 시험편은 10 min 대비 큰 결정립 크기(126.0 μm)를 가지고 있으므로 10 min 시험편 대비 항복강도의 감소가 발생함을 확인할 수 있다. 또한, 불완전 재결정이 발생한 5 min과 10 min 시험편은 균일 연신율 구간에서 네킹 없이 파단이 발생함을 확인할 수 있는데, 이는 불완전 재결정 중 발생한 조대 결정립과 미세 결정립 사이 계면에서의 변형률 집중에 의한 조기 파단에 기인한 것으로 예상된다 [17]. 또한, $Fe_{55}Co_{17.5}Ni_{10}Cr_{12.5}Mo_5$ HEA의 기계적 특성은 온도에 따라 차이가 발생하는데 77 K 환경에서는 298 K에 비해 약 140 MPa 높은 항복강도를 보이고 높은 가공경화율과 연신율이 관찰됨을 확인할 수 있다. 상기 77 K 환경에서의 가공경화율 및 연신율 향상은 FCC계 HEA의 소성변형 중 발생하는 변형유기쌍정 및 상변태 현상에 기인하는 것으로 예상되며 [10,11], 이에 대한 확인을 위해 15%, 40% 변형 구간에서의 미세조직을 EBSD를 활용해 분석했다.

3.3 열처리 조건에 따른 변형기구 변화

Figure 5 는 5 min 인장시험편의 15%와 40% 구간에서의 변형 미세조직을 EBSD 를 이용해 분석한 결과로 298 K 조건 15% 변형률(Fig. 5(a))에서는 FCC 단상을 유지하면서 결정립 내에 높은 KAM 분포가 나타나는데, 이는 열간 압연 후 재결정화 되지 못한 조대 결정립 내에 미소 변형이 남아있기 때문이다. 이렇게 잔존한 미소 변형의 경우, 셀 형태의 조직을 형성해 고변형 구간에서의 쌍정 형성을 방해하며, Fig. 5(b)와 같이 고변형 구간에서도 형성된 변형쌍정이 거의 보이지 않음을 확인할 수 있다. 이러한 현상은 77 K 환경에서도 동일하게 관찰할 수 있는데 저변형(Fig. 5(c)) 및 고변형(Fig. 5(d)) 구간을 지날수록 변형유기 육방밀집구조 (Hexagonal closed packed, HCP) 및 BCC 상이 관찰되지만, 대부분의 기지는 FCC 상을 유지함을 확인할 수 있다. 상기 5 min 시험편에서의 제한된 변형유기쌍정 및 상변태 거동은 타 열처리 조건 대비 낮은 가공경화율과 관계 있으며, 최종적으로 가장 낮은 인장강도 및 연신율로 이어지게 된다.

Figure 6 는 10 min 인장시험편의 15%와 40% 구간에서의 변형 미세조직을 보이며, 5 min 시험편과 비교해 재결정화 되지 못한 조대 결정립의 비율이 감소했기 때문에 상온 15% 변형영역(Fig. 6(a))에서 FCC 기지 내 낮은 KAM 분포가 관찰됨을 확인할 수 있다. 이에 미소 변형에 의한 셀 형태의 조직이 나타나는 대신, 40% 변형 구간(Fig. 6(b))에서 다수의 변형쌍정이 관찰됨을 확인할 수 있다. 이로 인해 5 min 시험편 대비 높은 가공경화율을 보임을 확인할 수 있고 77 K 영역에서도 5 min 대비 TRIP 거동이 우세해져 저변형(Fig. 6(c)) 및 고변형(Fig. 6(d)) 구간 모두에서 5 min 시험편보다 더 많은 HCP 및 BCC 분포를 보인다.

Figure 7 은 20 min 인장시험편의 15%와 40% 구간에서의 변형 미세조직으로 완전 재결정화 된 결정립은 미소변형을 갖지 않아 결정립계에서의 응력집중이 발생하고 298 K 온도에서 15%(Fig. 7(a))의 변형만 가해져도 쌍정이 형성되며, 40% 변형(Fig. 7(b))이 가해질 경우 다수의 쌍정이 관찰되었다. 5 min 과 10 min 시험편 대비 더 활발한 변형쌍정의 형성은 20 min 시험편의 Fig. 3 의 응력-변형률 곡선과 같이 높은 인장강도와 연신율에 영향을 미치게 된다. 또한, 77 K 의 온도에서 20 min 시험편은 5 min 과 10 min 시험편보다 많은 HCP 및 BCC 상이 관찰되었으며, 고변형률(Fig. 7(d))로 갈수록 BCC 상의 분율이 증가함을 확인할 수 있다. 또한, 20 min 시험편의 고변형 구간에서는 상변태된 BCC 상의 KAM 이 저변형 구간에 비해 높음을 알 수 있으며, 이는 BCC 상 역시 소성변형 중 변형에너지를 흡수하여 20 min 의 가공경화에 기여함을 보여준다. 따라서, EBSD 분석 결과를 통해 초기 미세조직 차이에 따라 변형유기쌍정 및 상변태 거동의 차이가 발생함을 확인했으며 정량적인 HCP 및 BCC 상의 변화를 확인하기 위해 Fig. 8 과 같이 77 K 에서 변형률에 따른 $Fe_{55}Co_{17.5}Ni_{10}Cr_{12.5}Mo_5$ HEA 의 상분율 변화를 확인했

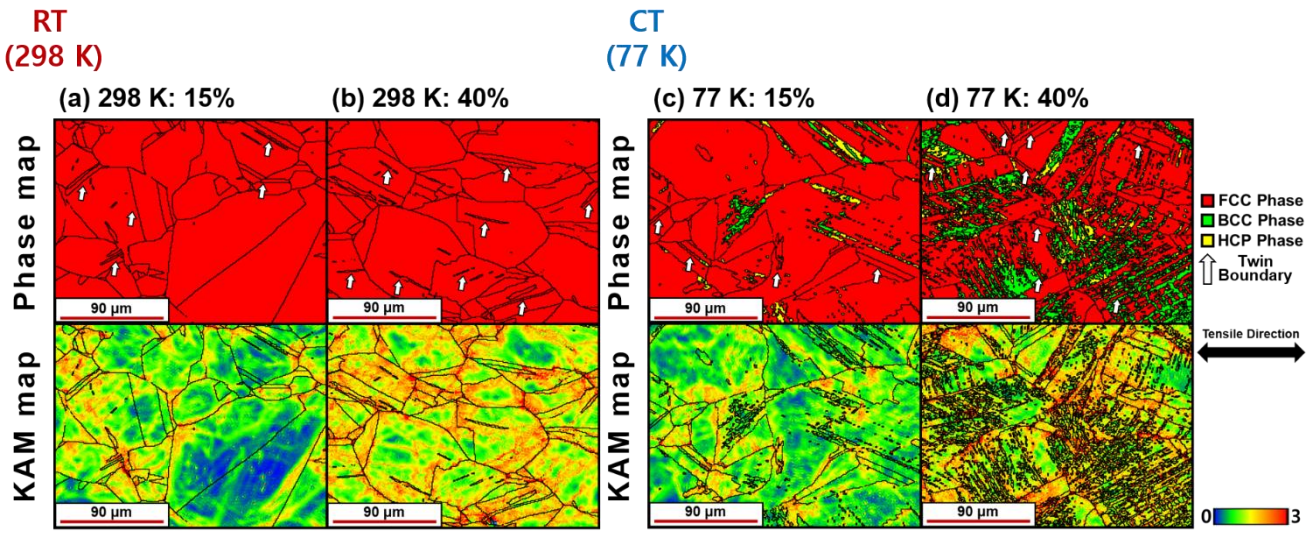

Fig. 5 EBSD phase distribution, and KAM maps of the tensile deformed 5 min sample: (a) 298 K @ 15%, (b) 298 K @ 40%, (c) 77K @ 15%, and (d) 77 K @ 40%.

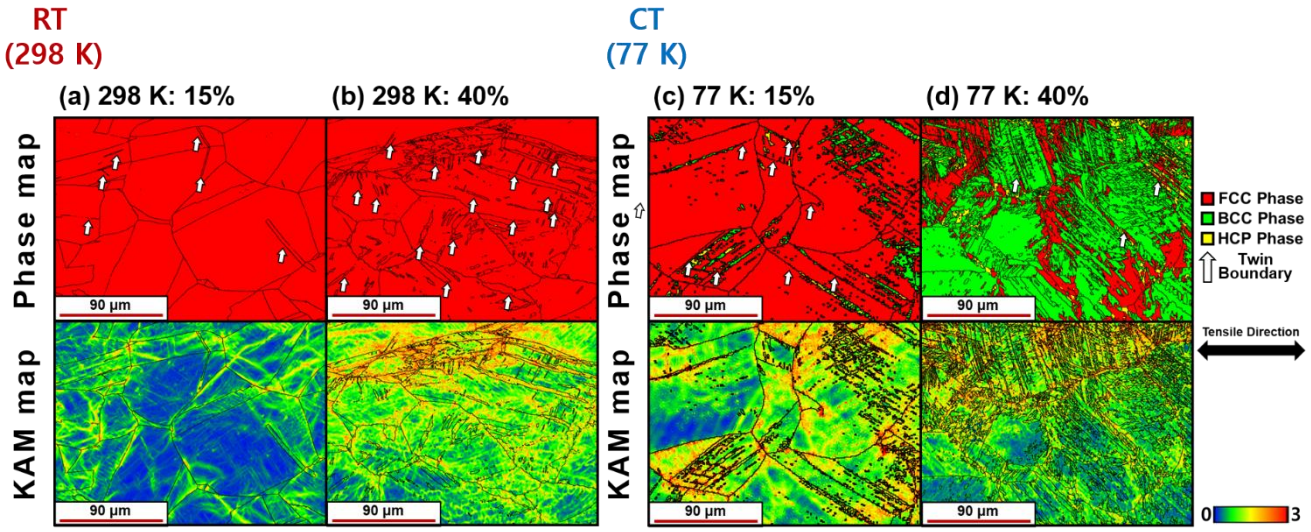

Fig. 6 EBSD phase distribution, and KAM maps of the tensile deformed 10 min sample: (a) 298 K @ 15%, (b) 298 K @ 40%, (c) 77K @ 15%, and (d) 77 K @ 40%.

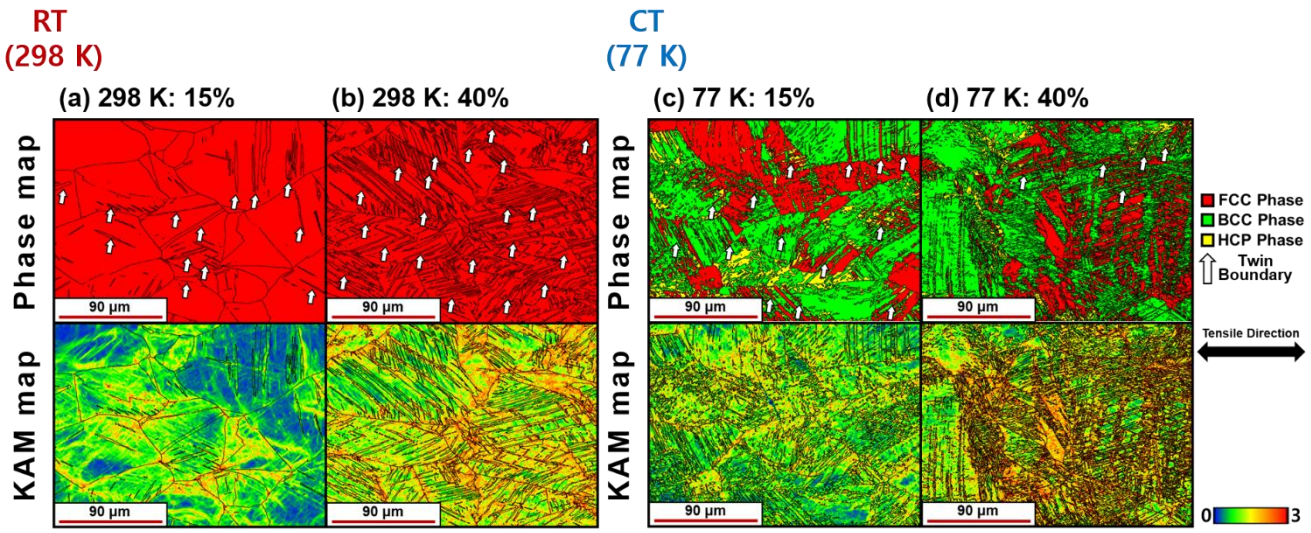

Fig. 7 EBSD phase distribution, and KAM maps of the tensile deformed 20 min sample: (a) 298 K @ 15%, (b) 298 K @ 40%, (c) 77K @ 15%, and (d) 77 K @ 40%.

다.

상분율 변화 확인 결과, 초기 미세조직 내 미소변형이 존재하는 5 min 과 10 min 시험편은 20 min 시험편에 비해 15% 변형률 구간에서 상변태가 억제됨을 억제됨을 확인할 수 있고 불완전 재결정 비율이 가장 높은 5 min 시험편은 고변형률 구간에서도 변형유기 상변태가 억제된 것을 확인할 수 있다. 반면, 20 min 시험편은 변형 초기부터 HCP 및 BCC 변형유기 상 변태가 크게 발생한 것을 확인할 수 있고 40% 변형률에서는 FCC→HCP→BCC 로의 순차적인 상변태에 따라 HCP 분율은 감소하고 BCC 분율은 증가하는 현상을 관찰할 수 있다 [18]. 상기 결과는 불완전 열처리에 의해 잔존하는 미소변형이 변형유기쌍정 및 상변태 거동을 억제함을 보여주며, 향후 사전 변형량에 따른 HEA 의 변형거동 제어 가능성을 보여주고 있다.

상기 미세조직 분석 결과들을 통해 열처리 시간에 따른 $Fe_{55}Co_{17.5}Ni_{10}Cr_{12.5}Mo_5$ HEA 의 기계적 특성 변화는 다음과 같이 설명할 수 있다. 첫 번째로 짧은 열처리 시간에 의해 잔류하는 조대 결정립과 재

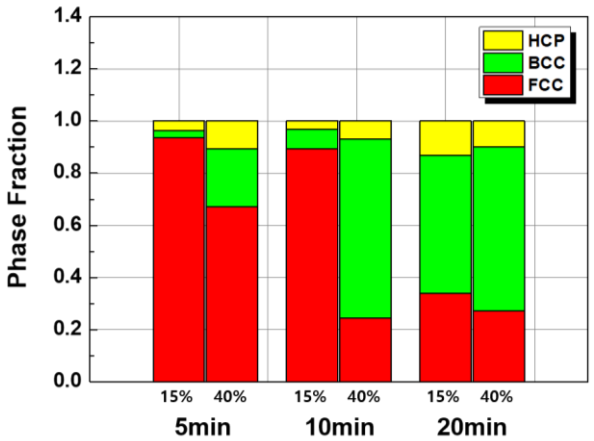

Fig. 8 Phase fraction changes as the increase of plastic strain in the annealed $Fe_{55}Co_{17.5}Ni_{10}Cr_{12.5}Mo_5$ HEA specimens tensile test at 77 K

결정에 의해 생성된 미세 결정립 사이 계면에서 변형 집중이 발생하여 5 min 과 10 min 시험편은 인장시험 중 네킹이 발생하기 이전에 먼저 파단이 발생했을 것으로 보인다. 두 번째로 Figs. 5-7 의 EBSD 분석 결과와 같이 열간 압연에 의해 형성된 미소변형이 완전히 회복되지 못한 5 min 과 10 min 시험편의 경우 20 min 시험편에 비해 변형유기쌍정 및 상변태 거동이 억제되어 더 낮은 쌍정 및 상변태 분율을 나타낸다. 따라서, 완전 재결정화 된 20 min 시험편은 타 열처리 조건에 비해 소성변형 중 높은 쌍정과 상변태가 발생하게 되고 Fig. 4 의 응력-변형률 곡선과 같이 가장 높은 인장강도와 연신율을 가지게 되었을 것으로 예상된다.

4. 결 론

본 연구에서는 $Fe_{55}Co_{17.5}Ni_{10}Cr_{12.5}Mo_5$ HEA 의 열처리 조건에 따른 미세조직 및 기계적 특성의 변화를 인장시험 및 SEM 기반 미세조직 관찰 기법을 활용해 분석하였으며, 하기와 같은 결론들을 도출했다.

(1) 5 min 과 10 min 열처리 조건에서는 재결정에 의해 형성된 미세 결정립과 열간압연 후 잔류한 조대 결정립이 혼합된 미세조직을 보이고 있으며, 미세 결정립 – 조대 결정립 사이 계면에서의 변형률 집중 현상이 발생하여 완전 재결정이 일어난 20 min 시험편 대비 낮은 연신율이 발생했을 것으로 예상된다.

(2) 열간 압연 후 미소 변형이 남아있는 5 min 과 10 min 시험편에서는 20 min 시험편과 비교해 인장시험 중 변형유기쌍정 및 상변태 거동이 더 적게 발생하며, 열처리 시간이 짧아질수록 잔류한 미소변형이 많아져 고변형 구간에서의 쌍정 및 상 분율이 감소함을 확인할 수 있다.

상기 결론을 통해 열처리 시간의 제어에 따라 열간 압연재의 재결정화도를 제어할 수 있으며, 내부 잔류 변형량을 제어함을 통해 변형유기쌍정 및 상변태 거동의 차이를 유발함으로써 기계적 특성의 변화를 유발할 수 있음을 보인다.

후 기

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MSIT) (2022R1G1A1007479). This work was also supported by the Ministry of Trade, Industry, and Energy of the Republic of Korea (20214000000480).

REFERENCES

[1] E. P. George, D. Raabe, R. O. Ritchie, 2019, High-entropy alloys, Nat. Rev. Mater. Vol. 4, pp. 515-534. https://doi.org/10.1038/s41578-019-0121-4

[2] M.-H. Tsai, J.-W. Yeh, 2014, High-entropy alloys: A critical review, Mater. Res. Lett. Vol. 2, pp. 107-123. https://doi.org/10.1080/21663831.2014.912690

[3] Y. F. Ye, Q. Wang, J. Lu, C. T. Liu, Y. Yang, 2016, High-entropy alloy: Challenges and prospects, Mater. Today Vol. 19, pp. 349-362. https://doi.org/10.1016/j.mattod.2015.11.026

[4] B. Gludovatz, A. Hohenwarter, D. Catoor, E. H. Chang, E. P. George, R. O. Ritchie, 2014, A fracture-resistant high-entropy alloy for cryogenic applications, Science Vol. 345, pp. 1153-1158. https://doi.org/10.1126/science.1254581

[5] G. T. Lee, J. W. Won, K. R. Lim, M. Kang, H. J. Kwon, Y. S. Na, Y. S. Choi, 2021, Effect of microstructural features on the high-cycle fatigue behavior of CoCrFeMnNi high-entropy alloys deformed at room and cryogenic temperatures, Met. Mater. Int. Vol. 27, pp. 593-602.

https://doi.org/10.1007/s12540-020-00786-7

[6] M. Vaidya, K. Guruvidyathri, B. S. Murty, 2019, Phase formation and thermal stability of CoCrFeNi and CoCrFeMnNi equiatomic high entropy alloys, J. Alloy. Compd. Vol. 774, pp. 856-864. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.09.342

[7] F. Otto, Y. Yang, H. Bei, E. P. George, 2013, Relative effects of enthalpy and entropy on the phase stability of equiatomic high-entropy alloys, Acta Mater. Vol. 61, pp. 2628-2638. https://doi.org/10.1016/j.actamat.2013.01.042

[8] Z. Li, D. Raabe, 2017, Strong and ductile non-equiatomic high-entropy alloys: Design, processing, microstructure, and mechanical properties, JOM Vol. 69, pp. 2099-2106. https://doi.org/10.1007/s11837-017-2540-2

[9] M. J. Yao, K. G. Pradeep, C. C. Tasan, D. Raabe, 2014, A novel, single phase, non-equiatomic FeMnNiCoCr high-entropy alloy with exceptional phase stability and tensile ductility, Scr. Mater. Vol. 72-73, pp. 5-8. http://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2013.09.030

[10] Z. Yang, D. Yan, W. Lu, Z. Li, 2021, A TWIP-TRIP quinary high-entropy alloy: Tuning phase stability and microstructure for enhanced mechanical properties, Mater. Sci. Eng. A Vol. 801, pp. 140441. https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.140441

[11] J. Su, D. Raabe, Z. Li, 2019, Hierarchical microstructure design to tune the mechanical behavior of an interstitial TRIP-TWIP high-entropy alloy, Acta Mater. Vol. 163, pp. 40-54. https://doi.org/10.1016/j.actamat.2018.10.017

[12] H. D. Park, J. W. Won, J. Moon, H. S. Kim, H. Sung, J. B. Seol, J. W. Bae, J. G. Kim, 2022, $Fe_{55}Co_{17.5}Ni_{10}Cr_{12.5}Mo_5$ high-entropy alloy with outstanding cryogenic mechanical properties driven by deformation-induced phase transformation behavior, Met. Mater. Int. https://doi.org/10.1007/s12540-022-01215-7

[13] Y. X. Zhuang, H. D. Xue, Z. Y. Chen, Z. Y. Hu, J. C. He, 2013, Effect of annealing treatment on microstructures and mechanical properties of FeCoNiCuAl high entropy alloys, Mater. Sci. Eng. A Vol. 572, pp. 30-35. https://doi.org/10.1016/j.msea.2013.01.081

[14] J. Gu, M. Song, 2019, Annealing-induced abnormal hardening in a cold rolled CrMnFeCoNi high entropy alloy, Scr. Mater. Vol. 162, pp. 345-349. https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2018.11.042

[15] N. Park, I. Watanabe, D. Terada, Y. Yokoyama, P. K. Liaw, N. Tsuji, 2015, Recrystallization behavior of CoCrCuFeNi high-entropy alloy, Metall. Mater. Trans. A Vol. 46, pp. 1481-1487. https://doi.org/10.1007/s11661-014-2594-5

[16] Y. Wu, X. Jin, M. Zhang, H. Yang, J. Qiao, Y. Wu, 2021, Yield strength-ductility trade-off breakthrough in Co-free $Fe_{40}Mn_{10}Cr_{25}Ni_{25}$ high-entropy alloys with partial recrystallization, Mater. Today Commun. Vol. 28, pp. 102718. https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2021.102718

[17] Y. Yin, Q. Tan, Q. Sun, W. Ren, J. Zhang, S. Liu, Y. Liu, M. Bermingham, H. Chen, M.-X. Zhang, 2022, Heterogeneous lamella design to tune the mechanical behaviour of a new cost-effective compositionally complicated alloy, J. Mater. Sci. Technol. Vol. 96, pp. 113-125. https://doi.org/10.1016/j.jmst.2021.03.083

[18] J. W. Bae, J. B Seol, J. Moon, S. S. Sohn, M. J. Jang, H. Y. Um, B. J. Lee, H. S. Kim, 2018, Exceptional phase-transformation strengthening of ferrous medium-entropy alloys at cryogenic temperatures, Acta Mater. Vol. 161, pp. 388-399. https://doi.org/10.1016/j.actamat.2018.09.057