

고강도 인바합금의 석출거동 및 기계적 특성

정재용¹ · 이규동¹ · 하태권^{1#} · 정효태¹

강릉대학교 금속재료공학과

Precipitation Behavior and Mechanical Properties of High Strength Invar Alloy

J. Y. Jung, K. D. Lee, T. K. Ha, H. T. Jeong

Dept. of Metal and Materials Engineering, Kangnung National University, Gangneung 210-702

Abstract

Precipitation characteristics of the Fe-36Ni based high strength Invar alloy for power transmission wire was investigated in this study. High strength can be obtained in this alloy through precipitation hardening and strain hardening by cold working. FactSage® in this study, revealing that equilibrium phases which can be formed are two kind of MC-type precipitates and MoC carbide. The latter stoichiometric carbide was expected to be formed at relatively lower temperature 770°C. High strength above 1000MPa and 40% of elongation were obtained at room temperature in both cases. +

Key Words : Invar Alloy, Precipitation, Aging, Microstructure, High Strength

1. 서 론

Fe-36%Ni(wt.%)의 기본 조성인 인바 합금은 자기 수축에 의한 보상 효과로 실온에서부터 합금의 큐리(Curie) 온도인 230°C 근방까지 열팽창이 거의 일어나지 않는 고부가가치 강종으로서[1-3] 정밀 계측기계, Thermostatic bimetal, 칼라 TV의 shadow mask 등 전자부품용 소재로 널리 사용되어 왔다.[4]

인바 합금의 발명 이후 지난 100여년 동안 기본 조성에 Co, Mo, W, Ti, Al, Cr, C 등을

첨가하여 온도변화에 따른 탄성변화를 보상한 Elinvar, 낮은 열팽창 특성과 석출에 의한 강화 효과를 함께 실현시킨 Metelinvar, 기존 인바 합금의 문제점 중의 하나인 temporal/dimensional instability[6]를 상쇄시킨 fixinvar등을 비롯한 다양한 종류의 인바 합금들이 개발되어 사용되고 있다.[5]

최근 전력수요도가 급증하고 있으며, 기존 송전선로에 송압하여 송전량을 증가시킬 경우, 전선온도가 상승하여 전선의 처짐 정도가 증가되어 고압전류 통과시 지상으로부터

1. 강릉대학교 금속재료공학과 E-mail:hackplayer@naver.co.kr

안전에 필요한 높이를 확보할 수 없다는 문제가 생긴다.

이러한 문제점 보완을 위해 선진국에서는 고압송전선 보강재로 기존의 고탄소강재 대신 열팽창 계수가 작은 (탄소강의 1/10수준) 인바계 합금(Invar, 36%Ni-Fe-Co) 선재를 사용하여 기존 송전선로를 그대로 활용, 승압 송전을 실시하고 있으며, 이러한 송전선교체에 의한 승압 송전이 최근에는 국내를 비롯한 동남아시아 국가로 확산되고 있는 추세이다[6].

본 연구에서는 고강도 인바 합금의 합금원소 변화와 시효조건에 따른 석출물의 종류와 분포를 확인하고, 열역학적 전산모사를 통해 응고 시 생성될 수 있는 평형상의 종류와 그 분율을 계산하고 나아가 조대한 석출물을 억제할 수 있는 방안에 대하여 연구하였으며, 기존의 송전선로를 그대로 활용하면서 승압 송전을 가능하게 하는 고품위 고강도 인바합금을 개발하고자 하였다. 이를 위하여 기존의 Fe-36Ni계 인바합금에 탄소를 일정량 첨가하고 대표적인 탄화물 생성원소인 Nb과 V을 소량 첨가하여 탄화물의 석출에 의한 추가적인 강화를 이루고자 하였다[7].

강화효과의 정량화를 위해 시효처리 후 경도의 변화를 측정하였고, 투과전자현미경을 통해 생성되는 석출물의 분포와 종류를 확인하였다.

2. 실험 방법

2.1 열간 압연 및 기계적 특성

열간 압연은 약 1180℃와 1280℃에서 6Pass에 걸쳐 최종 두께 10mm로 압연하였다. 압연 시의 롤 회전 속도는 70mpm이었고, 압연하중은 최소 5톤에서 최고 245톤으로

나타났으며 변형을 속도는 초기 2.7에서 최종 11.3/s였다. 열간 압연 된 판재는 압연 방향으로 절단하여 기계적 특성 및 열팽창 계수 측정을 위한 시편으로 가공되었다. 인장시편은 표점거리 27mm, 표점부 직경 6.4mm의 표준시편 이었고, 열팽창 계수 측정용 시편은 원통형으로 직경 5mm에 길이 20mm였다.

2.2 열역학 전산모사

열역학적 평형상의 종류 및 분율을 계산하기 위해 열역학 software인 FactSage[®]를 이용하여 C, Mn, 그리고 Al의 함량변화에 따른 평형상 및 강화상의 평형분율을 계산하였다.

2.3 열팽창 계수 측정

온도에 따른 열팽창 계수의 측정은 수소분위기에서 진행되었고 승온 속도는 2℃/min으로 설정하였다. 측정에 사용된 장비는 독일 NETZSCH 사의 DIL 402C 이다. 측정온도는 상온에서 300℃ 까지였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 기계적 특성 및 열팽창계수의 측정

그림 1 은 열간 압연 전 예열온도를 각각 1180℃와 1280℃로 두 시간씩 유지하여 열간 압연한 판재의 미세조직을 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯, 압연 전 예열 온도가 1180℃인 경우에는 조대한 석출상이 압연방향으로 길게 분포하고, 예열온도를 1280℃로 한 경우에는 석출상이 거의 사라진 것으로 나타났다. 인장실험결과 예열 온도가 높은 경우 예열 온도가 낮은 경우에 비하여

항복강도는 약간 감소하나 가공경화 속도는 거의 일정하고 연신율이 향상되어 인장강도는 1000Mpa 정도로 거의 일정한 것으로 나타났다.

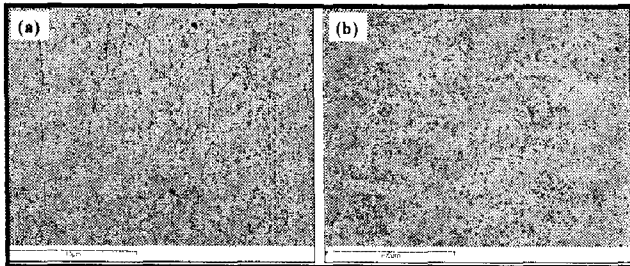


Fig. 1 Back-Scattered image showing the typical microstructure of hot-rolled plate at (a) 1180°C and (b) 1280°C, respectively.

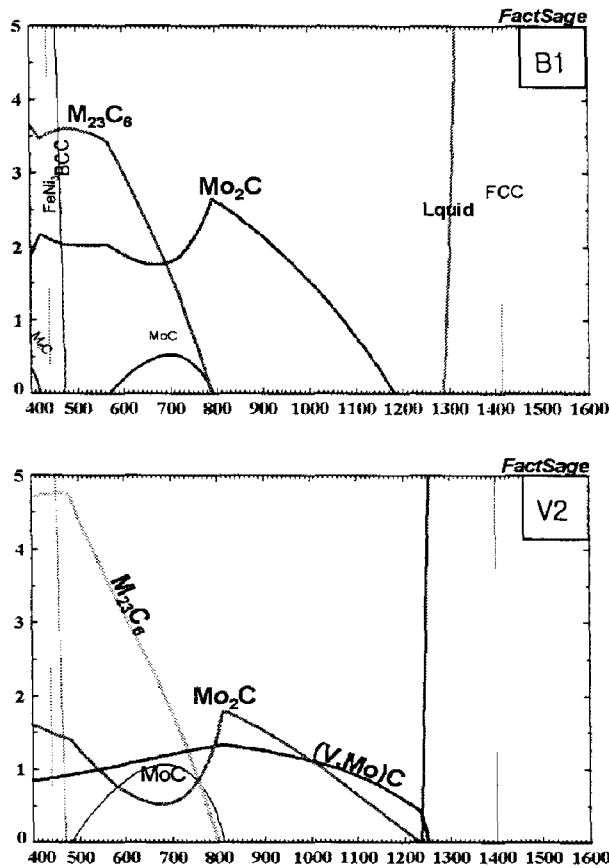


Fig. 2 Phase Equilibrium

3.2 열역학적 상평형 분석

그림 2 는 FactSage®의 software를 이용하여 계산한 상태도를 나타낸 것이다.

B1의 주요 석출상 Mo_2C 외에도 $M_{23}C_6$ 가 800°C이하에서 석출하기 시작하여 최대 3.7Wt.%까지 석출된다. V2의 주요석출상 (V, Mo)C는 1250°C의 액상영역에서 석출된다. Mo_2C 또한 비교적 높은 온도인 1230°C에서 석출되며, $M_{23}C_6$ 은 800°C이하에서 4.7Wt.%까지 석출된다.

3.3 열팽창계수 측정 및 냉간 인발공정 모사

그림 3는 열간 압연 후 그리고 냉간 인발을 행한 후의 인바 합금의 열팽창 계수를 측정된 결과이다. 열간 압연한 상태에서 200°C까지 열팽창 계수는 5×10^{-6} 정도를 유지하며 냉간 인발을 거친 후에는 거의 영에 가까운 열팽창 계수를 나타내는 것을 알 수 있다. 그림 4은 열간 압연한 판재를 다시 압하율 67%로 냉간압연하여 인장시험 한 결과를 나타낸 것이다. 압하율 67%는 인발 시 단면의 직경을 1/2로 감소시키는 것과 같은 변형효과를 부여하는 것으로 이와 같은 가공경화는 송전선용 인바 합금에서 목표로 하는 고강도화를 달성하는 방법의 하나이다. 냉간 가공에 의해 1300MPa 이상의 인장강도를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

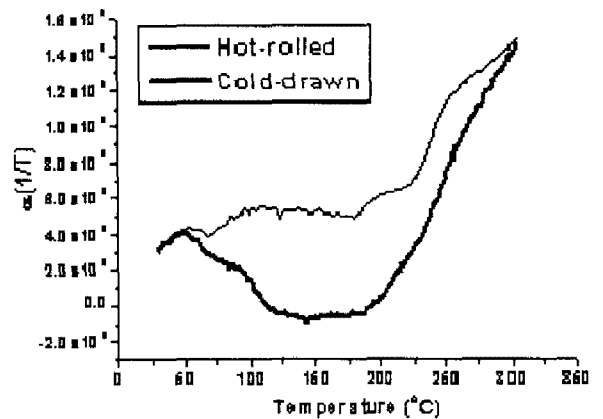


Fig. 3. Thermal expansion coefficient of hot-rolled and cold-drawn Invar alloy

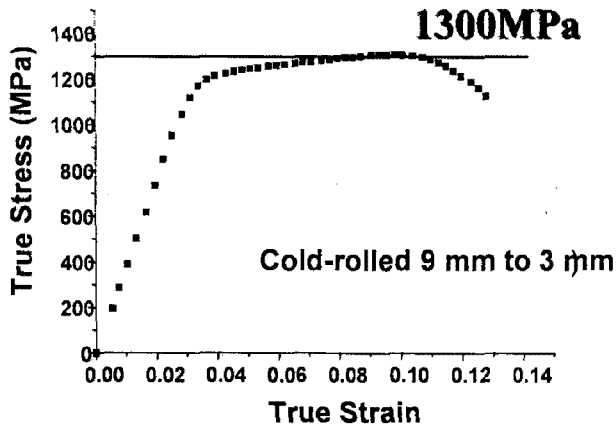


Fig. 4. Stress-strain curve of cold-rolled Invar alloy plates.

4. 결 론

Invar Alloy은 주조 후 나타나는 조대한 입계 석출물은 비평형 상으로 후속열처리에 의해 재용해 시킬 수 있으며 열간 압연에서 열처리 온도를 1180℃와 1280℃로 하였을 때, 열간 압연 후의 판재에 대한 인장시험 결과를 분석해 보면 열간 압연온도가 높을수록 항복강도는 다소 감소하나 인장강도는 유지되며 연신율은 향상되어 인발 특성이 좋아질 것으로 예상되며, 압하율 67%의 냉간 압연을 통해 1300MPa의 고강도를 얻을 수 있다.

상평형 분석 결과, 강도향상에 기여할 수 있는 주요 석출상은 B1조성의 경우 HCP구조의

Mo₂C였으며, V2조성의 경우에는 FCC구조의 (Mo, V)C 였다. V함량이 높은 경우에는 주로 (Mo, V)C가 석출되었다

참 고 문 헌

- [1] A. Campbell and G. Greuzet, in: *Metallic Magnetism*, edited by H. Capellmann, Springer, Berlin (1987), p. 207.
- [2] R. J. Weiss: Proc. Phys. Soc. London, 82, 281 (1963).
- [3] M. Shiga: Solid state commun., 10, 1233 (1963).
- [4] J. Wittenauer: The Invar Effect, TMS, (1996)
- [5] K. Hamada, Y. Yamaoka, H. Tsubono and Y. Kawabata: Wire J. Int. Vol. 4 (1988), p. 84.
- [6] US Patent No. 6,221,183 B1 (2001).
- [7] A. H. M. Van den Berg, A. A. M. Flaman, and J. F. Tiers: "Invar Shadow Masks for Color Television Tubes", The Iron-Nickel Alloys, ed. G. Beranger, F. Duffaut, J. Morlet and J. F. Tiers(Parris: Lavoisier, 333 (1966).
- [8] B. S. Lement, B. L. Averbach and M. Cohen: Trans. America Soc. Metals, 43, 1072 (1951)
- [9] R. Cozar, B. Boulogne, and P. L. Reydet, in: *The Invar Effect*, edited by J. Wittenauer, TMS, Warrendale, PA (1997), p.239.
- [10] C. E. Guillaume: Nobel Prize Address, (19020).