

고강도 인바합금의 석출거동과 기계적 특성 연구

정재용¹ · 이규동¹ · 하태권[#] · 정효태¹

Study on Precipitation and Mechanical Properties of High Strength Invar Alloy

J. Y. Jeong, K. D. Lee, T. K. Ha, H. T. Jeong
(Received May 8, 2008)

Abstract

Effect of V addition on the precipitation behavior and strength of Fe-36Ni based high strength Invar alloy for power transmission wire was investigated. Fe-36Ni Invar alloy plates were fabricated using conventional ingot casting followed by hot rolling. High strength can be obtained through precipitation hardening and strain hardening by cold rolling. Simulation using FactSage[®] revealed that equilibrium phases which can be formed are two kinds of MC-type precipitates, Mo₂C and M₂₃C₆ carbide. The latter stoichiometric carbide was expected to be formed at relatively lower temperature of 800 °C.

Key Words : Invar Alloy, Precipitation Hardening, High Strength, Phase Calculation

1. 서 론

인바(Invar) 합금은 프랑스 표준국(French Bureau of Standards) 에서 연구하던 스위스 출신의 Charles Edouard Guillaume 에 의해 1896 년에 개발이 되었고, 소재의 중요성을 인정받아 1920 년에 노벨 물리학상을 수여 받게 된다[1]. Fe-36%Ni(wt.%)의 인바 합금은 상온에서 오스테나이트 단상으로 열팽창계수가 $2.6 \times 10^{-6} \text{m/m}^\circ\text{C}$ 로 나타나며, 실온에서 합금의 큐리(Curie) 온도인 230°C 근방까지 열팽창이 거의 일어나지 않는 고부가가치 강종으로서[2~4] 정밀 계측기계, 바이메탈 (bimetal), 칼라 TV 의 새도우 마스크 등 전자부품용 소재로 널리 사용되어 왔다[5~6].

1980 년대 이후 산업의 팽창에 의한 도시의 과밀화가 진행됨에 따라 대도시 근교의 전력수요가 급증하면서 송전량의 증가가 요구되고 있다. 기존의 ACSR(Aluminum Conductor Steel Reinforced) 송

전선로에 송전량을 증가시킬 경우 많은 문제점을 유발할 수 있다. 대표적인 문제점으로는 (i) 전선 온도가 상승하여 전선의 처짐(Sagging) 정도가 증가하여 고압전류 통과시 지상으로부터 안전에 필요한 높이를 확보 할 수 없는 문제, (ii) 처짐 현상에 의해 경간 거리의 감소로 철탑건설비의 증가에 따른 경제적 손실과 삼림훼손과 같은 환경문제, (iii) 고온환경 하에서 장시간 노출로 인한 전선의 크리프 현상 (iv) 고온환경 하에서의 장시간 사용으로 인한 강도의 저하 등을 들 수 있다[7]. 이러한 문제점을 보완하기 위해 선진국에서는 고압송전선 보강재로 기존의 고탄소강재 대신 열팽창 계수가 작은(탄소강의 1/10 수준) 인바계 합금(36%Ni-Fe-Co)선재를 사용한 ACIR (Aluminum Conductor Invar Reinforced) 송전선을 사용하여 기존 송전선로를 그대로 활용, 승압 송전을 실시하고 있으며[8~10], 이러한 송전선 교체에 의한 승압 송전이 최근에는 국내를 비롯한 동남아시아 국가

1. 강릉대학교 금속재료공학과
교신저자 : 강릉대학교 금속재료공학과,
E-mail : tkha@kangnung.ac.kr

로 확산되고 있다.

본 연구는 기존의 송전선로를 그대로 활용 하면서 송압송전을 가능하게 하는 고품위 고강도 인바합금을 개발하고자 하는 최종목표를 위하여 시작하였다. 고강도 인바합금의 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 방안을 연구하고자 하였으며, 강화효과의 정량화를 위해 시효 처리 후 경도의 변화를 측정하였고, 투과전자현미경을 통해 생성되는 석출물의 분포와 종류를 확인 하였다.

본 논문에서는 합금성분 중 강력한 탄화물 생성원소인 바나듐의 첨가에 따른 석출거동과 기계적 특성에 미치는 영향에 대하여 알아보하고자 하였다.

2. 실험 방법

2.1 시편제작 및 열간 압연

본 연구에 사용된 인바합금은 Table 1과 같은 합금성분을 목표로 50Kg급 진공유도용해로(VIM)을 이용하여 잉곳 주조 후 약 1180℃에서 6패스에 걸쳐 최종두께 10mm, 폭 140mm의 판재형태로 열간 압연하였다. 압연시의 롤 회전 속도는 70mpm 이었고, 변형률 속도는 초기 2.7/s에서 최종 11.3/s 였다. 열간 압연된 판재는 압연방향으로 절단하여 기계적 특성 및 석출을 위한 열처리 연구를 위한 시편으로 가공되었다.

Table 1 Chemical Compositions of Invar Alloys used in this study (wt.%).

	Ni	Co	Cr	C	Mo	Mn	Si	V
B1	36	0.9	0.7	0.3	2.75	0.23	0.17	-
V2	36	0.9	0.7	0.3	2.75	0.23	0.17	0.4

2.2 열역학적 상평형 계산

열역학적 평형상의 종류 및 분율을 계산하기 위해 열역학 계산 소프트웨어인 FactSage®를 이용하여 V 첨가에 따른 평형상 및 강화상의 평형분율을 계산하였다.

2.3 열연재의 미세조직 및 TEM의 관찰

열간 압연 후 판재 폭의 중앙부위를 적당한 크기로 채취하여 마운팅 한 후 연마하여 글리세리자 (Glyceregia) 용액을 이용해 에칭하여 광학현미경을 통해서 관찰하였으며, 석출물의 종류와 분포를 확인하기 위해서 TEM 을 이용해서 분석을 실시하였다.

2.4 기계적 특성 평가

열역학 계산과 미세조직 분석결과 석출물이 많아 고강도를 기대할 수 있는 B1과 V2를 1180℃에서 82~84%로 압연한 압연재를 400~900℃에서 1~3 시간 동안 시효 처리한 후 비커스 경도기를 이용하여 경도를 측정하고, 열간압연 한 판재를 67% 냉간압연 후 인장시험을 통해 강도를 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 열역학적 상평형 분석

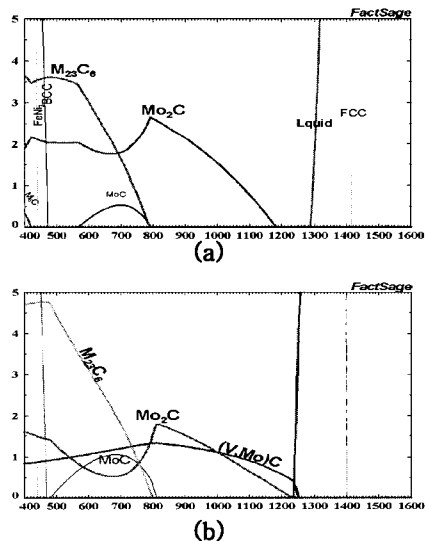


Fig. 1 Results of Phase Equilibrium Simulation on (a) B1 and (b) V2

Fig. 1 은 FactSage®를 이용하여 계산한 평형상 분율을 나타낸 것이다. B1의 주요 석출상인 Mo₂C 외에도 M₂₃C₆이 800℃이하에서 석출하기 시작하여 최대 3.7wt.%까지 석출된다. V2의 주요 석출상인 (V, Mo)C는 1250℃의 액상영역에서부터 석출되기 시작하며, M₂₃C₆은 800℃ 이하에서 4.7wt.%까지 석출된다. 상대적으로 Mo₂C의 석출량은 B1

에 비해 감소하는 것으로 나타났다.

이와 같이 액상영역에서부터 석출된 (V, Mo)C는 이후 다양한 열이력에도 매우 안정하게 존재함으로 V2 인바합금의 고강도화에 크게 기여할 것으로 기대된다. 또한 그림에서 알 수 있는 바와 같이 800℃ 전후에서 열처리를 행함으로써 보다 많은 양의 탄화물을 석출시킬 수 있을 것으로 판단되며 이를 이용하면 추가적인 2차 경화효과도 기대할 수 있을 것이다. 실제로 고압 송전선으로 제조할 때, 인발을 통한 가공경화를 이용하여 송전선의 강도를 확보하게 되는데 이러한 탄화물의 석출을 이용한 석출경화효과를 함께 이용하면 획기적인 강도의 향상을 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

3.2 열연재의 미세조직 및 TEM의 분석

Fig. 2는 열간압연 후에 관찰한 B1과 V2의 광학현미경 미세조직을 보여주고 있다.

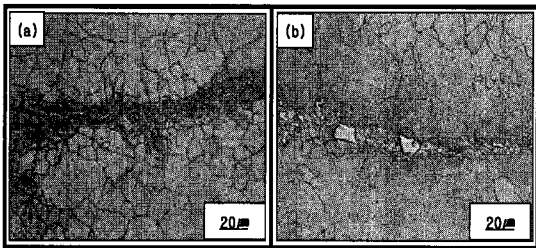


Fig. 2 Optical micrographs of hot rolled (a) B1, and (b) V2 Invar alloy

앞 절의 Fig. 1에서 예측된 바와 같이 V첨가에 따라 주조 시에 생성된 것으로 생각되는 조대한 석출물이 많아지고, 열간압연을 행한 후에도 이러한 조대한 석출물은 사라지지 않고 잔존해 있음을 알 수 있다. 이러한 석출물을 인바합금의 강화에 효과적으로 이용하기 위해서는 액상에서 생성되는 이러한 석출물의 양과 분포를 조절할 수 있어야 할 것이다. 추가적인 합금설계를 통해서 석출물의 생성온도를 낮추어 액상에서는 생성되지 않거나 그 생성량을 최소화 하는 것이 필요할 것으로 판단된다.

Fig. 3은 B1과 V2 인바합금을 TEM으로 관찰하고 석출물에 대한 성분분석을 행한 결과이다.

Fig. 3에서 보면 B1 열연재는 석출물이 거의 관찰되지 않으며, 관찰된 석출물은 대부분 HCP구조의 Mo₂C로 나타났다. 이에 반하여, V2 열연재는 B1

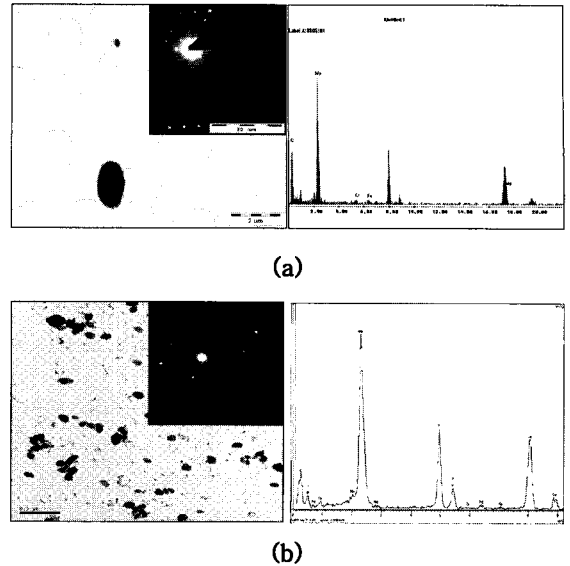


Fig. 3 TEM images of hot rolled Invar alloy (a) B1 and (b) V2

에 비해 미세한 석출물이 많이 분포되어 있으며, FCC구조의 (Mo, V)C로 이루어져 있음을 알 수 있다. 이는 열역학 상평형 계산결과를 뒷받침해주는 중요한 결과이다.

3.3 경도 분석

Fig. 4는 열연판재에 대하여 400 ~ 900℃의 온도 범위에서 1 ~ 30시간동안 시효처리한 후 경도를 측정된 결과를 나타낸 것이다. Fig. 4(a)에서 나타난 B1 열연판재의 열처리 경도의 변화를 보면, 시효 온도 400, 800, 900℃에서는 시효 초기에 탄화물의 석출에 의한 것으로 판단되는 경도의 증가가 관찰되고, 이는 400℃에서 1시간 석출 열처리를 한 경우 가장 높은 것으로 나타났다.

Fig. 4(b)에 나낸 것과 같이 V2 열연판재는 B1에 비해서 석출 열처리에 의한 경도향상이 적고, 700, 800, 900℃에서 장시간 열처리를 해야 경도가 증가되는 것을 관찰할 수 있다.

이를 Fig. 1의 상평형 계산결과와 비교해보면 V의 첨가에 의해 생성되는 (Mo, V)C 석출물은 시효에 의한 경도향상 효과가 크지 않으며, B1의 결과에서 볼 수 있듯이 Mo₂C 석출물이 시효에 의한 경도향상에 더욱 효과적인 것을 알 수 있다.

Fig. 5는 열간 압연한 B1 판재를 다시 압하율 67%로 냉간 압연하여 인장시험한 결과를 나타낸 것이다. 압하율 67%는 송전선 제조에 필요한 공

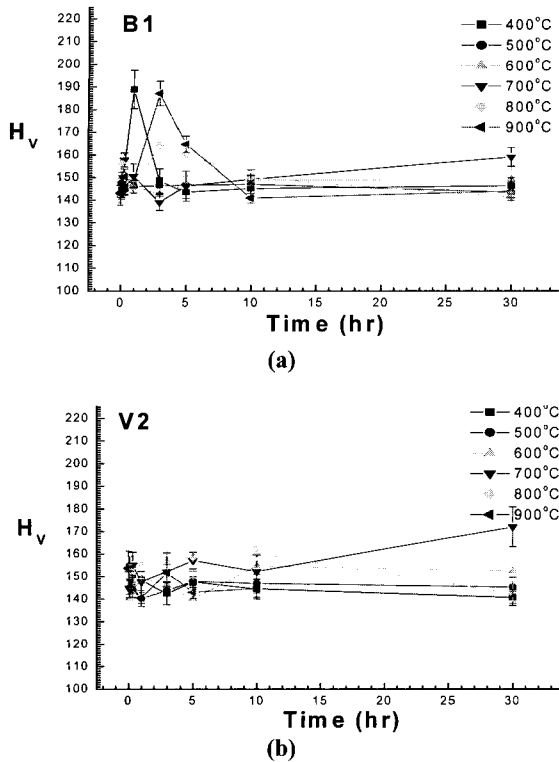


Fig. 4 Hardness of (a) B1 and (b) V2 Invar alloy, measured as a function of ageing times at various temperatures ranging from 400 to 900 °C

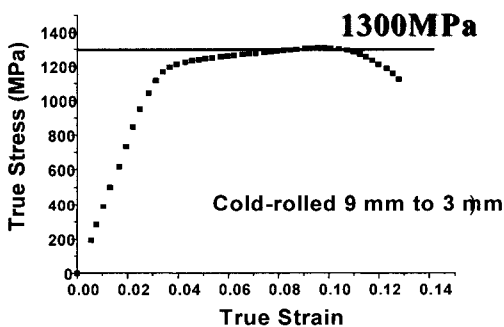


Fig. 5 Stress-strain curve of cold-rolled B1 Invar alloy

정인 인발에서 단면의 직경을 1/2로 감소시키는 것과 같은 변형효과를 부여하는 것으로 이와 같은 가공화는 송전선용 인바 합금에서 목표로 하는 고강도화를 달성하는 방법의 하나이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 냉간 가공에 의해 1300MPa 이상의 인장강도를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 고강도 인바합금의 V첨가에 따른 석출물의 종류와 분포를 확인하고, 기계적 특성을 평가하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 상평형 분석 결과, 강도향상에 기여할 수 있는 주요 석출상은 B1조성의 경우 Mo_2C 였으며, V2조성의 경우에는 (Mo, V)C 였다.

(2) TEM을 통해 관찰한 결과, B1판재의 경우 주된 석출상은 HCP구조의 Mo_2C 였으며, V2판재의 경우에는 FCC구조의 (Mo, V)C 였다.

(3) 열간압연한 판재를 400 ~ 900°C에서 시효 열처리 후 경도 측정된 결과, B1 열연판재의 경우 400, 800, 그리고 900°C에서는 짧은 열처리가 효과적이고, V2 열연 판재의 경우에는 700°C 이상에서 장시간 열처리를 해야만 강화 효과를 기대할 수 있는 것으로 나타났다. B1 합금의 경우 압하율 67%의 냉간 압연을 통해 1300MPa의 강도를 얻을 수 있다.

참고 문헌

- [1] C. E. Guillaume, 1920, Nobel Prize Address.
- [2] A. Campbell, G. Greuzet, 1987, *Metallic Magnetism*, edited by H. Capellmann, Springer, Berlin, p. 207.
- [3] R. J. Weiss, 1963, *Proc. Phys. Soc. London*, Vol. 82, p. 281.
- [4] M. Shiga, 1963, *Solid State Commun.*, Vol. 10, p. 1233.
- [5] J. Wittenauer, 1966, *The Invar Effect*, TMS.
- [6] A. H. M. Van den Berg, A. A. M. Flaman, J. F. Tiers, 1996, *Invar Shadow Masks for Color Television Tubes*, *The Iron-Nickel Alloys*, ed. G. Beranger, F. Duffaut, J. Morlet, J. F. Tiers(Lavoisier, 333).
- [7] S. S.S. Kim, B. G. Kim, 2006, *J. Korean Inst. Electric. Electron. Mater. Eng.*, Vol. 19, p. 91.
- [8] K. Hamada, Y. Yamaoka, H. Tsubono, Y. Kawabata, 1988, *Wire J. Int.* Vol. 4, p. 84.
- [9] B. S. Lement, B. L. Averbach, M. Cohen, 1951, *Trans. American Soc. Metals*, Vol. 43, p. 1072.
- [10] R. Cozar, B. Boulogne, P. L. Reydet, 1997, *The Invar Effect*, edited by J. Wittenauer, TMS, Warrendale, PA, p. 239.
- [11] US patent No. 6,221,183 B1, 2001.