

# 고강도 인바합금의 강도에 미치는 미세구조와 시효처리 조건의 영향

정재용<sup>1</sup>, 이규동<sup>1</sup>, 하태권<sup>1#</sup>, 정효태<sup>1</sup>

## Effect Of The Microstructure And Aging Treatment Conditions On Strength Of High Strength Invar Alloy

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

### 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 solution hardening, precipitation hardening and strain hardening by cold working. In the present study, ingots of Fe-36Ni based Invar alloys with the contents of C, Mo and V varied. Microstructure observations by OM, SEM, and TEM were carried out to validate the simulation results. BCC phase and FeNi<sub>3</sub> phase are also expected at lower temperatures below 500°C. Aging treatments were carried out at temperatures ranging from 400 to 900°C for time intervals from 3 min to 100hrs. Peak aging condition was obtained as 400°C and 1 hr. With temperature increased, peak strength was decreased abruptly. Microstructure observation was conducted by optical microscopy, scanning electron microscopy, and transmission electron microscopy.

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

### 1. 서 론

최근 고도의 경제성장에 따라 전력수요도가 급증하고 있으며, 이에 따른 전력공급을 위해 원자력 발전소를 주축으로 하여 석유, 석탄, 천연가스 등 다양한 화석연료를 사용한 화력발전소의 건설이 계속 추진되고 있다.

특히, 최근 들어 산업의 팽창에 의한 도시의 과밀화가 진행됨에 따라 대도시 근교의 전력수요가 급증하면서 매년 전력예비율의 감소로 인해 안정된 전력공급을 위한 송전량의 증가가 요구되고 있다.

송전량을 증가시키기 위해서는 신규 송전선로를 가설하기 위한 송전탑을 설치해야 하는데 이 경우 도시근교의 용지난과 지가상승으로 과도한 설치비용이 소요되어 신규 송전 선로의 추가설치는 어려운 실정이다.

이러한 상황 하에서, 송전량 증가요구에 대한 대안으로 기존의 송전선로를 이용하여 송전량을 증가시키는 방법이 있으나, 기존 송전선로에 승압하여 송전량을 증가시킬 경우, 전선온도가 상승하여 전선의 처짐 정도가 증가되어 고압전류 통과시 지상으로부터 안전에 필요한 높이를 확보할 수 없다는 문제가 생긴다.

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

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[1-2]. 국내 전선업계에서는 전선보강재로 인바합금 선재를 전량수입 사용하고 있으나 높은 소재수입가격으로 비용부담이 증가되고 있는 실정이며, 인바합금의 고강도화를 위해 첨가하는 다양한 합금원소들에 의해 주조 시 조대한 석출물이 입계에 생성되고 이러한 석출물 주변에서 후속 공정인 압연 및 인발을 거치는 동안에 크랙들이 발생하여 송전선으로 제조하는 도중 단선이 일어나거나 송전선으로 사용하는 도중 단선의 위험을 내재하여 이 합금의 폭 넓은 사용을 가로막고 있는 실정이다.

본 연구에서는 합금원소의 변화와 시효조건에 따른 석출물의 종류와 분포를 변화시킴으로써 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[3]. 강화효과의 정량화를 위해 시효처리 후 경도의 변화를 측정하였고, 투과전자현미경을 통해 생성되는 석출물의 분포와 종류를 확인하였다.

## 2. 실험 방법

본 연구에 사용된 Invar Alloy합금은 표 1과 같이 합금원소를 달리 첨가하여 Ingot 주조 후 slab를 열간압연을 통해 두께10mm, 폭 140mm의 판재형태로 제작하였다.

### 2.1 열연재의 미세조직 관찰

시편을 적당한 크기로 절단 마운팅한 후 연마하여 Glyceregia용액을 이용하여 에칭처리를 행하여 그림 1과 같이 OM을 통해서 결정입자의 형상을 관찰하였고, 석출물의 분포를 확인하기 위해서 SEM과 TEM을 이용해서 분석을 실시하였다.

Table 1 Invar Alloy Of Composite

조성	B1	V1	V2	W1	C1	T1
Ni	36	36	36	36	32.5	36
Co	0.9	0.9	0.9	0.9	5.0	0.9
Mo	2.75					
Cr	0.7					
Mn	0.23					
Si	0.17					
C	0.3	0.3	0.45	0.3	0.3	0.3
V	-	0.4	0.4	-	-	-
Al	-	-	-	0.3	-	-
W	-	-	-	0.3	-	-
Nb	-	-	-	-	-	1.2
Ti	-	-	-	-	-	1.0

### 2.2 미소경도 시험

그림 1의 분석결과 석출물이 많아 고강도를 기대할 수 있는 Base와 V2를 1180℃에서 82 ~ 84%로 압연한 열간압연재와 50%, 70%로 압연한 냉간압연재를 400 ~ 900℃에서 Aging처리하여 비커스 경도기를 이용하여 각각 12회씩 측정 후, 최대값 및 최소값을 제외한 측정치의 평균값으로 산출하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 열연재의 미세조직

그림 1은 Invar합금의 각 합금성분별 미세조직을 보여주고 있다.

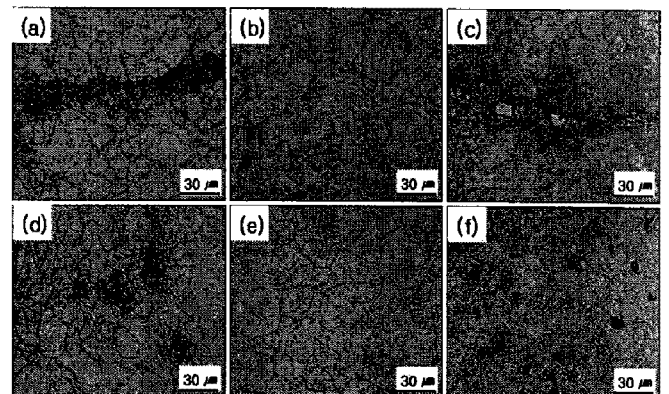


Fig. 1 Optical micrographs of as-received Invar Alloy Hot rolled plate by (a) B1, (b) V1, (c) V2, (d) W1, (e) Alfa, and (g) T1

V함량이 높아짐에 따라 주조시 발생한 조대한 석출물이 많아짐과, 열간압연을 행한 후에도 조대한 석출물은 사라지지 않음을 알 수 있다. T1의 경우에는 액상에서 정출된 조대 석출물이 균일하게 분포함을 보여주고 있다.

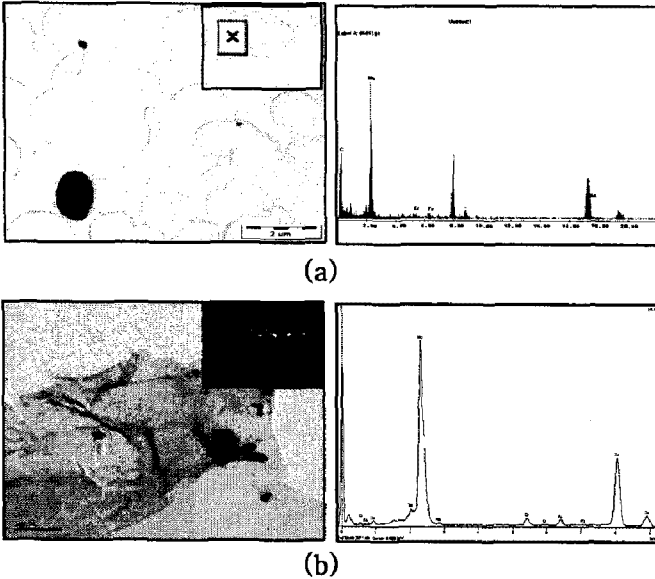


Fig. 2 TEM images of Hot rolled plate (a) and Cold rolled plate by B1

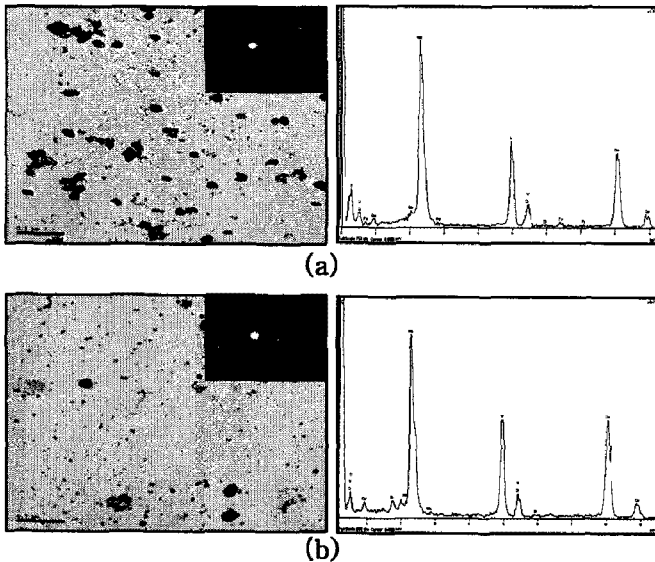


Fig. 3 TEM images of Hot rolled plate (a) and Cold rolled plate by V2

그림 2에서 알 수 있는 바와 같이 B1 열연재는 석출물이 거의 없고, 냉연재는 열연재보다는 다소 높은 함량의 석출물을 포함하고 있으며, 대부분의 석출물은 HCP구조의  $Mo_2C$ 로 이루어져 있다[4].

이에 반하여, 그림 3에서와 같이 V2는 B1에 비해 많은 석출물이 관찰되고, 냉연재의 경우는 미세한 석출물들이 관찰 된다. V2의 석출물은 B1의 석출물과는 달리 대부분 FCC구조의 (Mo, V)C로 이루어져 있다.

### 3.2 미소경도

그림 4(a)에 나타낸 바와 같이 B1 열연판재의 열처리 경도는 400, 800, 900°C 초기에는 석출에 의해 경도가 높고, 400°C에서 1시간 석출 열처리를 한 경우 가장 높은 경도를 보이고 있다. 냉연판재인 (b)는 냉간압연에 의해 가공경화가 일어나 열간압연재 보다 높은 경도를 나타냄을 보여주고, (c)는 400, 500, 600°C에서 5시간 이내로 열처리하면 경도향상을 기대할 수 있음을 보여준다.

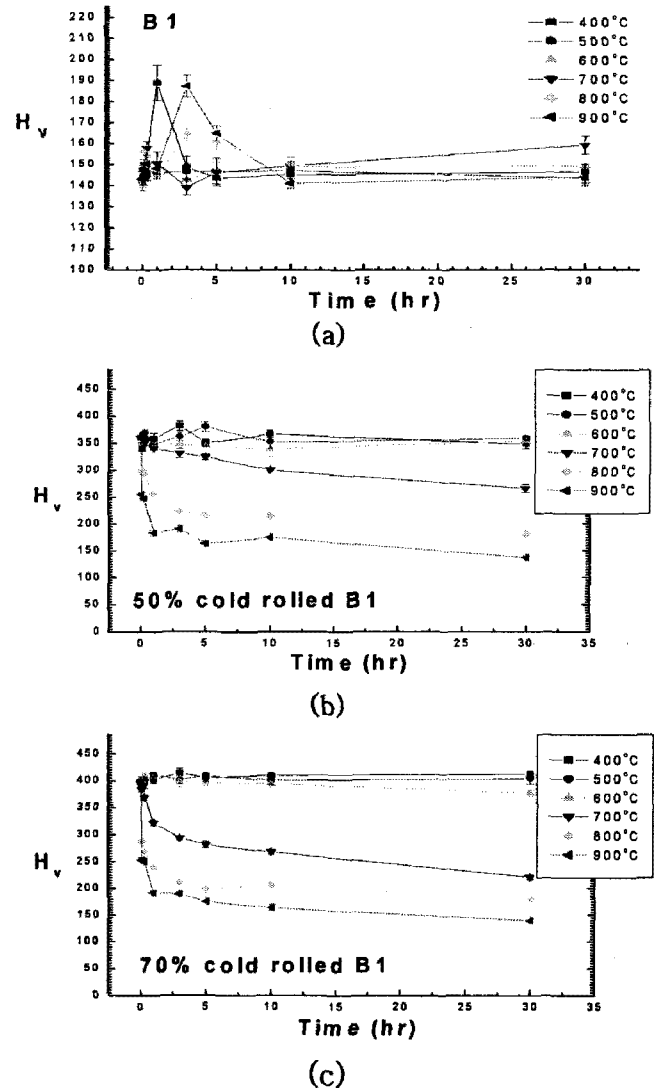
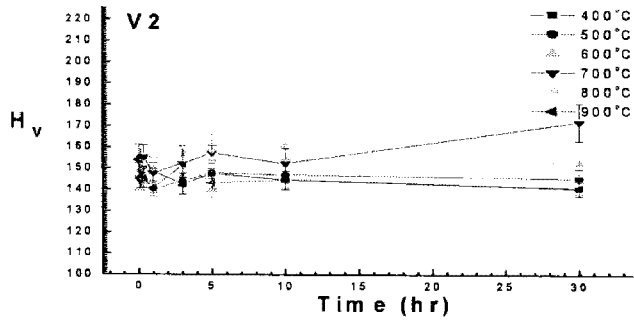
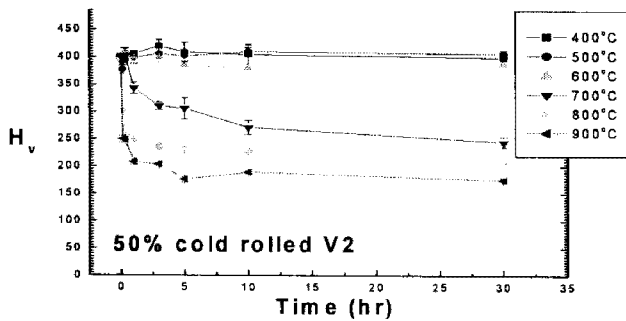


Fig. 4 Hardness of Hot rolled plate (a), 50% Cold rolled plate (b) and 70% cold rolled plate (c) by B1

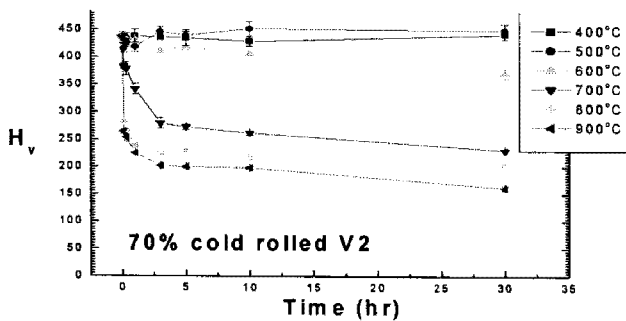
그림 5(a)에 나타낸 것과 같이 V2 열연판재는 B1에 비해서 석출 열처리에 의한 경도향상이 적고, 700, 800, 900°C에서 장시간 열처리를 해야 경도 향상을 기대할 수 있다. 그림 5(b)와 같이 50% 냉간압연시 가공경화에 의해 B1보다 높은 경도를 얻을 수 있고, 70% 냉간압연인 (c)는 400, 500, 600°C에서 5시간 이내의 열처리로 경도향상을 기대할 수 있다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 5 Hardness of Hot rolled plate (a), 50% Cold rolled plate (b) and 70% cold rolled plate (c) by V2

#### 4. 결론

Invar Alloy의 미세구조와 미소경도시험을 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다. TEM을 통해 관찰한 결과, B1열연 및 냉연판재의 경우 주된 석출상은 HCP구조의 Mo<sub>2</sub>C였으며, V2조성의 경우에는 FCC구조의 (Mo, V)C였다. Mo<sub>2</sub>C와 (Mo, V)C 석출상은 강도향상을 기대할 수 있으며, V함량이 높은 경우에는 주로 (Mo, V)C가 석출된다. B1 열연 판재의 경우 400, 800, 그리고 900°C에서 짧은 열처리가 효과적이고, V2 열연 판재의 경우에는 700°C 이상에서 장시간 열처리를 해야 효과적이며, 냉연판재의 경우에는 600°C 이하 5시간 이내의 짧은 열처리가 효과적인 것으로 판단된다.

#### 참고 문헌

- [1] A. Campbell and G. Greuzet, in: *Metallic Magnetism*, edited by H. Capellmann, Springer, Berlin (1987), p. 207.
- [2] K. Hamada, Y. Yamaoka, H. Tsubono and Y. Kawabata: *Wire J. Int.* Vol. 4 (1988), p. 84.
- [3] US Patent No. 6,221,183 B1 (2001).
- [4] R. Cozar, B. Boulogne, and P. L. Reydet, in: *The Invar Effect*, edited by J. Wittenauer, TMS, Warrendale, PA (1997), p.239.