

# 용접 후 응력제거열처리 조건에 따른 티타늄 합금 용접부 평가

최진강\*<sup>†</sup> · 이희준\* · 양해진\*\* · 조성원\*\*\*

## The effect of post welding heat treatment conditions on Ti-3Al-2.5V weldment.

Choi, Jin-Kang\*<sup>†</sup> · Yi, Hui-Jun\* · Yang, Hae-Jin\*\* · Joo, Sung-Won\*\*\*

### 초 록

티타늄 용접부는 수소취성과 잔류응력에 대한 영향을 최소화 하기 위해 용접 후 잔류응력 제거 열처리 작업을 수행하고 있다. 하지만, 현재 항공 분야에 널리 사용하고 있는 규격에 따라 열처리 온도가 다양하게 설정되어 있어 현장에 적용하기에는 어려움이 있다. 이에 규격 별로 대표하고 있는 열처리 조건을 선정하여 열처리 조건에 따른 용접부에 대한 잔류응력, 잔류수소량을 확인하였고, 용접부에 대한 강도와 충격 인성을 확인하였다.

Key Words: Titanium alloy, TIG welding, PHWT, Residual stress, Hydrogen

### 1. 서 론

티타늄 합금 용접부의 경우 용접부에 대한 수소취소 방지와 잔류 응력 제거를 위해 용접 후 응력 제거 열처리(PWHT, Post Weld Heat Treatment)를 수행하고 있다. 티타늄 합금이 상용화되어 사용되기 시작하던 1950년대 후반부터 용접부에 발생되었던 취성파괴에 대한 다양한 연구가 이루어졌으며 이 결과 용접부 혹은 노치부에 형성된 판상의 수소화물(Hydride) 취성파괴에 대한 원인이라는 것을 확인하였다. 이에 티타늄 합금의 제조 과정에서 합금 내 수소(H<sub>2</sub>) 허

용량을 120ppm 이하로 규정하고 있다. 또한, 국부적으로 용접입열이 부여됨에 따라 발생하는 불균일한 냉각사이클에 따라 발생하는 용접 잔류응력이 용접부 취성 파괴의 Driving force로 작용함에 따라 이를 제거하기 위하여 용접 후 응력제거 열처리 공정을 통해 용접부에 불균일하게 분포되어 있는 잔류응력을 제거하고 있다 [1-4]. 하지만, 사용 규격에 따라 열처리를 규정하는 온도와 열처리 시간이 상이함에 따라 사용하는 티타늄 합금의 종류와 시공 방법에 따라 정확한 열처리 조건과 그에 따른 용접부에 대한 기계적 성질에 대한 평가가 필요하다. 이에 금번 연구에서는 용접 후 열처리 조건에 따른 용접부 잔류응력과 잔류 수소량을 확인하고자 하였으며 이와 더불어 열처리 조건에 따른 용접부에 대한 기계적 성질을 확인하고자 하였다.

\* 현대로템 주식회사 용접기술센터

\*\* 현대로템 주식회사 중기생산기술팀

\*\*\* 현대로템 주식회사 추진연구팀

† 교신저자, E-mail: jkchoi@hyundai-rottem.co.kr

## 2. 실험 방법

### 2.1 열처리 시험 및 용접 시험편 제작

금번 연구에서는 티타늄 합금(Ti-3Al-2.5V)에 대한 용접 후 응력제거 열처리 조건을 확인하고자 규격 연구를 통하여 Table 1과 같이 항공 분야에 가장 널리 사용되는 규격에서 제시하고 있는 응력 제거 열처리 조건을 정리하였다.

Table 1 PWHT condition of Ti-3Al-2.5V, referenced from various specification

Specification	Temperature (°C)	Hold time (Hour)
ASME handbook	540~650	0.50~2.00
AMS-H-81200	370~595	0.25~4.00
MIL-HDBK-697	371~648	0.50~3.00

이에 최적 용접 후 열처리 조건 시험을 위해 아래 Table 2와 같이 열처리 조건 시험을 위한 최고 구간에서의 Hold time과 온도를 설정하였다. Hold time의 경우 ASME hand book을 참고하여 2시간으로 선정하였다.

Table 2 PWHT condition of test

Identification	Temperature (°C)	Hold time (Hour)
PW01	370	2.00
PW02	480	
PW03	540	
PW04	640	

사용한 용접 모재와 용가제의 기계적 성질과 화학적 성질을 Table 3과 4와 같이 나타내었으며 용접 시험편 제작은 자동 TIG 용접 장치를 사용하였으며 보호 가스는 순도 99.9%의 Ar가스를 사용하였다. 유량은 15 l/min이며 이면 백비드와 용접부 산화 방지를 위해 이용한 1차·2차

퍼징 장치의 유량은 각각 25 l/min와 50 l/min이다. 용접 시험편 제작 후 용접 후 잔류응력 제거 열처리를 위해 진공 열처리 노에서 해당 열처리조건에 맞추어 열처리를 실시하였다. Hold time 후 냉각 시 Ar 가스를 이용하여 냉각하였다.

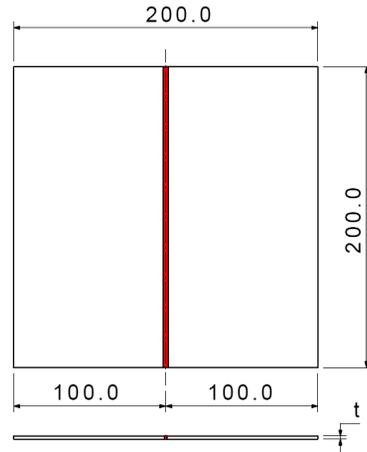


Fig. 1 Illustration of Titanium weld coupons

Table 3 Mechanical properties of Ti-3Al-2.5V

Mechanical properties		
Yield strength(MPa)	Tensile strength(MPa)	Elongation (%)
610.0	720.0	17.0

Table 4 Chemical composition of Ti-3Al-2.5V

Chemical composition (wt%)						
Ti	C	O	N	Al	V	Fe
Bal	0.03	0.12	0.02	3.02	2.49	0.25

Table 5 Welding condition of specimen

Identification	Current (A)	Volt (V)	Welding speed (cm/min)	Wire feeding speed (cm/min)	Remarks
Weld	145.0	14.0	25.0	40.0	-

## 2.2 잔류응력과 잔류 수소량 측정

잔류응력은 스트레인게이지법을 이용하였다. 스트레인을 측정하기 위하여 게이지를 부착한 후 절단단을 이용하여 절단하였으며 절단 후 용접선 평행방향의 응력( $\sigma_1$ )과 용접선 직각방향의 응력( $\sigma_2$ )을 아래 식 (1)과 (2)를 이용하여 계산하였다.

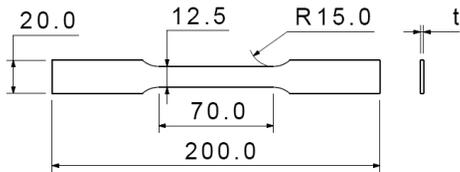
$$\sigma_1 = -E(\epsilon_1 + \epsilon_2)/(1 - \nu^2) \quad (1)$$

$$\sigma_2 = -E(\epsilon_2 + \epsilon_1)/(1 - \nu^2) \quad (2)$$

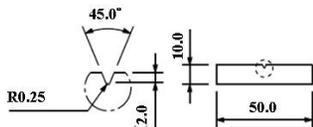
용접부에 남아 있는 잔류 수소량 측정을 위하여 ASTM E 1447을 기준하여 용접부에 대한 수소량을 측정하였다.

## 2.2 기계적 성질 시험 방법

인장 시험편은 ASTM E 370에 따라 Figure 2와 같이 용접선 직각 방향으로 채취하여 제작하였다. 인장 시험은 만능시험기(Instron 8501)를 이용하여 시험하였다. 충격 시험편은 ASTM E 23에 근거하여 제작하였으며 노치 위치는 용접 중심부와 용접선에서 1mm 구간으로 하였다.



(a) Tensile specimen



(b) Charpy impact test specimen

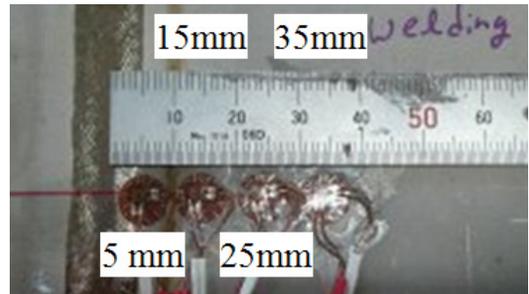
Fig. 2 Illustration of tensile test, Charpy impact test and notch tensile test specimens

## 3. 시험 결과

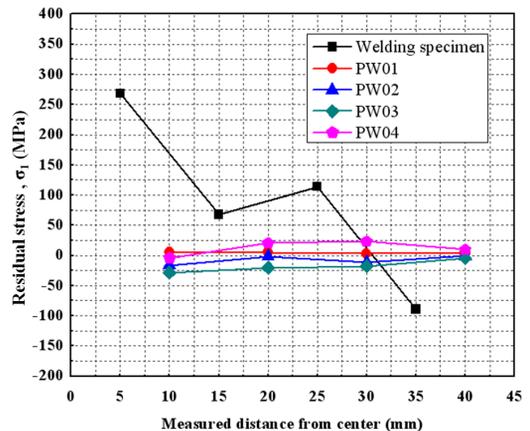
### 3.1 잔류 응력 및 잔류 수소량 확인

스트레인 게이지법을 이용하여 측정된 잔류응력 결과를 Figure 3과 같이 나타내었다. Figure 3의 (a)는 측정 시 스트레인 게이지를 부착한 것을 나타낸 것이며 측정 결과 최초 용접 시 발생된 잔류응력이 열처리 조건에 관계없이 열처리 후  $\pm 25\text{MPa}$  수준으로 줄어드는 것을 확인하였다.

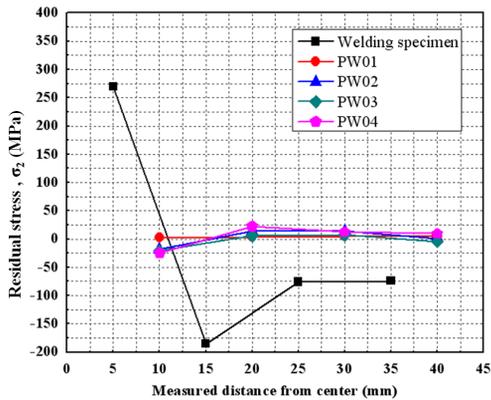
잔류수소량의 경우 티타늄 합금 제조 과정에서 120ppm 이하로 제한하고 있으나 금번 연구에서는 변동량에 대한 참고 자료 확보를 위해 측정하였다. 측정 결과를 Figure 4와 같이 나타내었다. 전 시험편에 대한 최대 허용 기준인 120ppm 이하로 나타났으며 이로 인해 용접 중 대기중으로부터 유입되는 수소의 양이 최대 허용 기준 범위를 만족시킨다는 것을 알 수 있다.



(a) Measured points



(b) Residual stress of  $\sigma_1$



(C) Residual stress of  $\sigma_2$

Fig. 3 Measured results of residual stresses and points

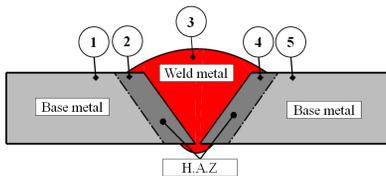
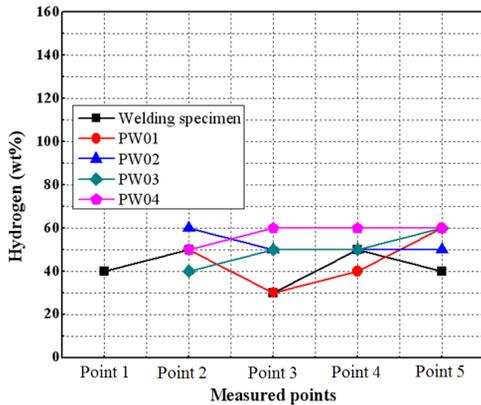


Fig. 4 Measured results of hydrogen in weldment

### 3.2 기계적 성질 평가

열처리 조건에 따른 인장 시험 결과를 Figure 5와 같이 나타내었다. 열처리 조건에 따라 인장 강도와 항복강도 확인 결과 540°C 열처리 조건을 적용한 PW03에서 인장 강도와 항복강도의 저하를 나타내다 640°C 조건에서 다시 증가하는 것을 나타내었다. 충격 시험 결과의 경우 노치가 용접선에서 1.0mm 구간에서는 열처리 조건에

따라 충격인성에 큰 차이가 없으나 노치가 용접부 중심부에 위치한 경우 충격 인성이 저하하는 현상을 나타내고 있다.

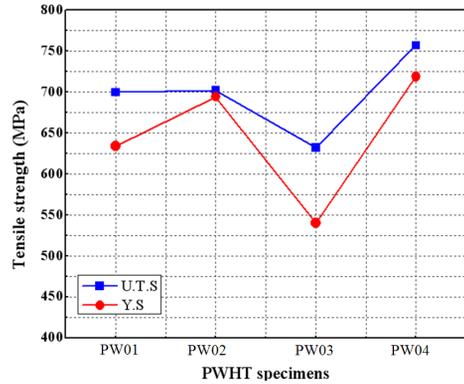


Fig. 5 Results of tensile test

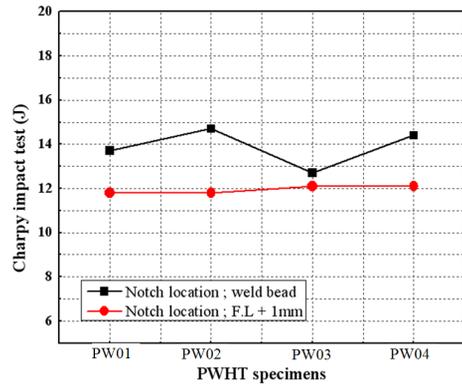


Fig. 6 Results of Charpy impact test

## 4. 결 론

이번 연구에서는 티타늄 합금 용접부에 대한 응력제거 열처리 조건에 따른 용접부 잔류응력 변화량과 수소량을 확인하였고 열처리 조건에 따른 강도와 충격 인성을 확인하였다.

- (1) 열처리 조건에 따른 잔류 응력과 잔류 수소량 확인의 경우 열처리 조건에 관계없이 용접부 잔류응력이 감소되는 것을 확인하였고 용접 중 대기로부터 유입되는 수소량이 티타늄 합금 용접부의 수소취성을 방지하는 최대

허용량 이하로 나타나는 것을 확인하였다.

- (2) 인장 시험 결과, 540℃ 온도구간에서 2시간 동안 열처리를 수행한 시험편에 대한 인장 강도와 항복 강도가 저하하는 현상을 나타내었으며 충격 시험 결과 동일한 온도구간에서 충격인성이 저하하는 것을 확인하였다.
- (3) (2)항에 나타난 540℃ 구간에서의 강도 및 충격 인성저하 현상이 티타늄의 사용 온도 혹은 변태온도에 대해 영향인지는 좀 더 구체적인 연구가 필요하다고 판단된다.

#### 참 고 문 헌

- 1. ASTM International, ASTM Welding Handbook, 2002
- 2. Smith, L. S. and Gittos, M. F., "A review of weld metal porosity and hydride cracking in titanium and its alloys," TWI, 1998
- 3. Frolov, V. V., "The effect of the heterogeneity of distribution of hydrogen in welds in titanium alloys on their mechanical properties," Science and technical, 1978, No. 2, pp1-3
- 4. Nazimov, O. P., Kolachev, B. A. and Gorshkov, Yu. V., "Hydrogen segregation in the heat affected zone of joints in titanium alloys OT4 and OT4-1," Science and technical, 1971, No. 9, pp11-12
- 5. Ellis, M. B. D and Gittos, M. F., "Tungsten inert gas welding of titanium and its alloys," Welding and metal fabrication, January, 1995, pp.9-12