

Ti 鎔接材의 機械的 特性 및 疲勞크랙 進展舉動에 關한 研究

최 병 기*, 장 경 천**

* 조선대학교 공과대학 기계공학부

** 한국생산기술연구원

A Study on the Mechanical Properties and the Fatigue Crack Propagation Behavior of Ti Welding Material

Byung-Ki Choi*, Kyeong-Cheun Jang**

* Dept. of Mechanical Eng., Chosun Univ.

** Korea Institute of Industrial Technology

ABSTRACT

The purpose of this paper was to investigate the welding characteristics and the fatigue crack propagation behavior of titanium commonly using power station, aircraft and ship. The experimented material was TIG welded in order to look over the characteristics according to the notch position and compare with other materials.

We compared and reviewed the fatigue crack propagation behavior of nonwelded base metal and welded specimens having different notch position to evaluate the fatigue crack propagation behavior by welding condition.

1. 서론

티타늄 합금은 고온에서 피로강도가 인장강도의 0.55~0.65 정도를 유지하기 때문에 기존 철강재료의 0.35~0.50 정도에 비하여 월등히 높다.⁽¹⁾

따라서 고온에서 내피로성이 요구되는 엔진부품의 대체 소재로서 유망하다 하겠으며, 이러한 티타늄 합금을 사용함으로써 인해 자동차의 경량화⁽²⁾ 및 엔진성능의 향상을 기대할 수 있다.

그러나, 티타늄은 고온에서 가스와의 친화력이 강하고, 다른 원소나 화합물과 활발하게 반응하여

산화되므로 용접 용접시공에서 완전 가스실딩해야 하는 어려움이 있기 때문에 티타늄에 대한 연구는 미흡한 실정이다.⁽³⁾

일반적으로 용접급속의 열영향을 받는 부분에서는 결정입도가 조대화되고, 가열온도의 냉각조건에 따라 조직이 달라져서 열처리에 기계적 성질이 크게 달라진다고 보고하였다.⁽⁴⁾

이와 같이 용접이음은 용접재료 및 용접조건, 용접환경에 따라 용접부의 기계적 성질에 커다란 영향을 미치고 있다.

따라서 본 연구에서는 티타늄의 용접성을 평가하기 위하여 여러 용접조건으로 용접하여 각각의 용접조건에 따른 기계적 성질을 비교·검토하였으며, 용접에 따른 피로크랙 진전거동을 평가하기 위하여 용접하지 않은 모재 시험편과 용접재의 각 부위별로 노치를 가공하여 피로크랙의 발생수명 및 전파수명을 각각 비교·검토하였다.

2. 실험방법

본 실험에 사용한 재료는 ASTM B265 grade 2로서 풀림 처리한 순수 티타늄으로서 두께 12mm 압연판재를 사용하였다.

Table 2-1은 본 실험에 사용된 순수 티타늄의 화학적 성분을 나타냈으며, 인장시험과 경도시험을 통해 구한 기계적 성질은 Table 2-2에 나타내었다.

Table 1 Chemical compositions of specimen

Component	N	C	H	Fe	O	Ti
Weight(%)	0.006	0.002	0.002	0.03	0.144	BAL

Table 2 Mechanical properties of specimen

Yield Stress (Kgf/mm ²)	Tensile Stress (Kgf/mm ²)	Elongation (%)
40	49	28

본 연구에서는 순수 티타늄의 용접성을 알아보기 위하여 용접조건을 각각 달리하여 기계적 성질을 평가하였는데 용접조건은 다음과 같다.

첫째, 용접이음의 패스 수에 따라 4, 5, 7 패스로 분류하였으며, 본 실험에서는 편의상 4패스의 용접 시험편은 A1, 5패스는 A2, 7패스는 A3라 칭하였다.

둘째, 실드가스의 양에 따른 분류로 15l/min으로 용접된 시험편을 B1, 20l/min을 B2, 25l/min을 B3으로 칭하였다.

셋째, 층간 용접시간 간격에 따른 분류는 층별 용접 후 냉각에 소요된 시간에 따라서 5분의 시간 경과 후 다음 층의 용접이 이루어진 시험편을 C1, 층간별로 3분 경과 후 용접된 시험편을 C2, 층간별로 1분 경과 후 용접된 시험편을 C3라 칭하였다.

Table 3 Welding conditions of welding pass

Welding plate no.	Welding type	Shape of joint	Pass	Welding current (A)	Arc voltage (V)
A1	4 pass		1	140	15
			2	130	14.5
			3	145	16
			4	130	14.5
A2	5 pass		1	140	15
			2	145	16
			3	130	14.5
			4	140	15
			5	130	14.5
A3	7 pass		1	140	15
			2	145	16
			3	130	14.5
			4	130	14.5
			5	145	16
			6	130	14.5
			7	130	14.5

티타늄의 용접 이음홈 형상은 용접조건에서 맞대기 이음 용접 시 두께 1.5~16mm는 V형상을, 두께 12~38mm는 X형상이나 U형상을 선택하도록 되어 있으나,⁽⁵⁾ V형상으로 용접조건을 설정하면, 한편 용접을 하여야 하기 때문에 변형 발생과 비드 폭의 증대로 비드 표면의 완전 실당을 하기가 어렵고, 또한 용착량이 증대되어 용접 입열도 동시에 많아져 기계적 성질의 저하가 우려되므로 본 실험에서는 X형 이음홈 형상으로 용접을 하였다.

Tables 3~5는 본 실험의 용접조건을 나타내고 있다.

Table 4 Welding conditions of shielding gas amounts

Welding plate no.	Welding type	shape of joint	Pass	Welding current (A)	Arc voltage (V)
B1	15 (l/min)		1	140	15
			2	145	16
			3	130	14.5
			4	140	15
			5	130	14.5
B2	20 (l/min)		1	140	15
			2	145	16
			3	130	14.5
			4	140	15
			5	130	14.5
B3	25 (l/min)		1	140	15
			2	145	16
			3	130	14.5
			4	140	15
			5	130	14.5

Table 5 Welding conditions of welding time interval

Welding plate no.	After pass	Shape of joint	Pass	Pre-heating (°C)	Welding current (A)	Arc voltage (V)
C1	5 Min.		1	22	140	15
			2	124	145	16
			3	113	130	14.5
			4	125	140	15
			5	145	130	14.5
C2	3 Min.		1	22	140	15
			2	132	145	16
			3	160	130	14.5
			4	165	140	15
			5	215	130	14.5
C3	1 Min.		1	22	140	15
			2	270	145	16
			3	295	130	14.5
			4	325	140	15
			5	355	130	14.5

Figs. 1, 2는 실험에 사용된 인장 시험편과 충격 시험편의 형상을 나타내고 있다. 인장 시험편은 두께 12mm의 판재를 X형 맞대기 용접한 후 와이어 커터에 의하여 가공한 후 덧살부위를 밀링가공하였으며, 연삭기로 표면을 연마하였다. 충격 시험편은 3호 시험편으로 제작하였으며, 노치는 \varnothing 2mm의 와이어에 의해 노치 깊이가 2mm가 되도록 가공하였다.

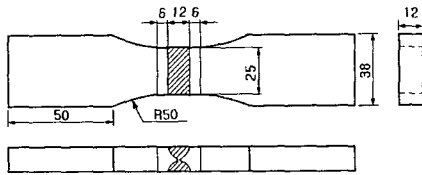


Fig. 1 Geometry of tensile test specimen

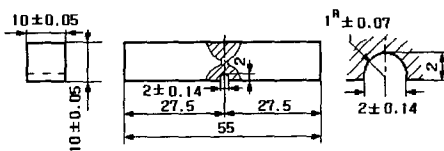


Fig. 2 Geometry of impact test specimen

피로 시험편은 ASTM E647-83에 준하여 압연 방향과 크랙 진전방향이 직각이 되도록 채취하였으며, 시험편 가공은 용접하지 않은 모재 시험편과 노치선단에서 약 2~3mm 근방에 온도영향부, HAZ, 본드부, 용착부를 차례로 위치시켜서 제작하였다.

시험편의 형태는 Fig. 3과 같은 C-T(Compact Tension) 시험편이며, Photo. 2-1은 모재 시험편을 제외한 각각의 용접된 시험편을 부식액(HNO_3 : HF = 2 : 1)을 사용하여 부식시킨 후 사진촬영한 것이다.

피로 시험기는 A/D, D/A 변환기를 내재한 소형 컴퓨터에 의해 하중의 설정 및 제어를 하도록 되어 있으며, 이 A/D, D/A 분해능과 로드셀로부터의 출력을 변형률 증폭기에서 증폭시켜 D/A에 의해 소형 컴퓨터에 입력해 변형률 증폭기의 증폭전원에 의해 하중의 감도가 변화하도록 되어 있는 용량 $\pm 10\text{ton}$ 의 전기유압식 서보 피로시험기(SHIMADZU SERVOPULSER)를 사용하였다.

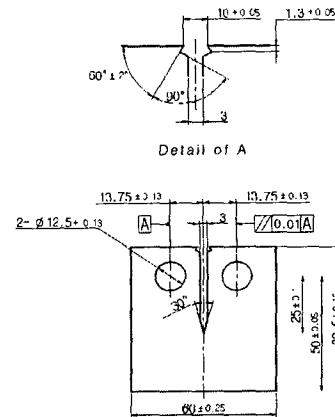


Fig. 3 Geometry of C-T specimen

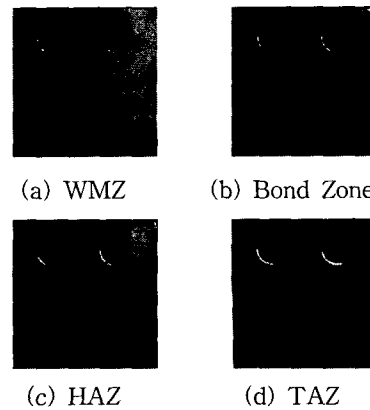


Photo. 1 Welded specimen shapes

3. 실험결과 및 고찰

3.1 인장시험

인장시험용 용접 시험편은 맞대기 용접한 것으로 한국선급협회 R2A 호 규격에 의하여 가공하였으며, 용접 이음부는 모재면과 같은 두께가 되도록 밀링 가공하였다.

인장시험기(United Model No. SFM-60)의 용량은 50ton이며, 인장강도, 연신율 등을 측정할 결과 모든 시험에서의 파단은 용착금속부에서 발생하였다.

Figs. 4~6은 인장시험 결과를 나타낸 것으로서, Fig. 4를 보면 용접 패스수에 따른 용접방법에 의한 인장시험 결과, 용접 패스수가 적은 A1 시험편이 연신율은 적은 반면 인장강도는 가장 높게 나타났다.

또한, Fig. 5는 실딩가스의 양에 따른 용접방법으로서 실딩가스의 양이 25l/min의 용접조건에 의하여 용접한 B3 시험편이 인장강도와 연신율이 가장 높게 가장 높게 나타났다.

Fig. 6은 층간 용접 시간에 의한 용접방법으로서 용접 후 냉각시간이 길수록 인장강도는 높게 나타났고, 연신율은 증가했으며 충격 흡수에너지 값은 용접 후 냉각시간이 짧을수록 다소 감소하였으나, 그다지 인장강도나 연신율에 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

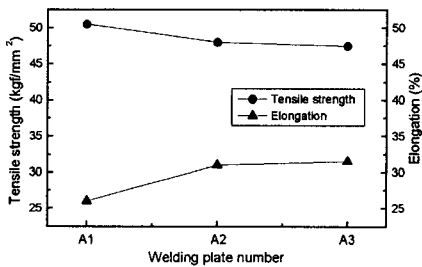


Fig. 4 Result of tensile test according to welding pass condition

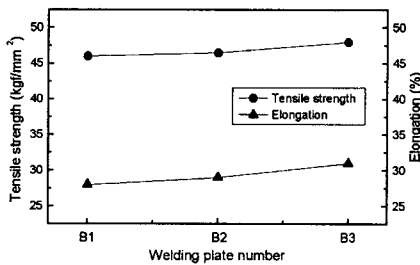


Fig. 5 Result of tensile test according to shielding gas amounts

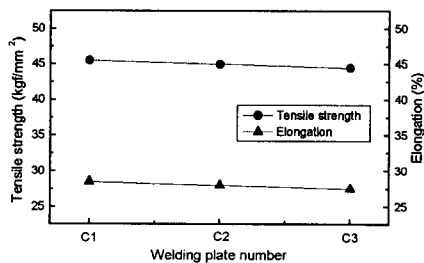


Fig. 6 Result of tensile test according to welding time interval

3.2 경도시험

Fig. 7은 용접 패스 수에 따른 시험편의 경도분포를 나타낸 것으로서 경도분포는 A1, A2, A3 순으로 나타났으며, 용착부보다 HAZ에서 경도분포가 매우 크게 나타나고 열영향부에서 멀어질수록 거의 일정한 형태로 분포하였다.

Fig. 8은 실딩가스량에 따른 용접의 경도분포를 나타낸 것으로서 B1이 경도값이 가장 높게 나타났고 B2, B3는 거의 비슷하게 나타났다.

Fig. 9는 용접 패스의 시간 간격에 의한 것으로서 경도분포도 열영향부가 높은 경도분포를 나타내고 있으며, C3가 조금 높은 경도값을 나타내고 있지만 C1, C2와 거의 비슷하게 나타났다.

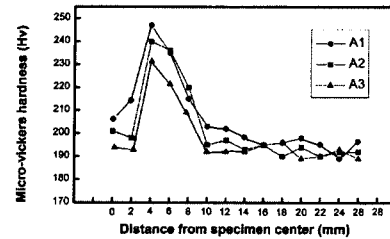


Fig. 7 Hardness distribution in welding according to welding pass condition

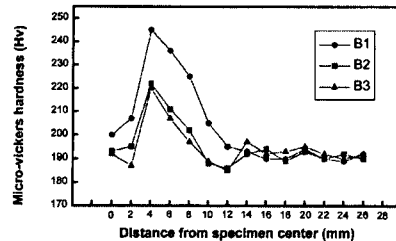


Fig. 8 Hardness distribution in welding according to shielding gas amounts

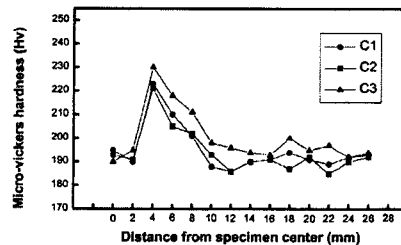


Fig. 9 Hardness distribution in welding according to welding time interval

3.3 충격시험

Figs. 10~12는 본 실험에 의하여 구해진 시험편들의 흡수 에너지값⁽⁶⁾을 나타내고 있다.

Fig. 10에서 보면 패스 수에 따른 용접조건에서는 7패스의 A3가 흡수에너지가 가장 높게 나타났으며, 패스 수가 증가함에 따라 흡수에너지가 높아지는 경향을 나타내었다.

Fig. 11은 실딩가스량에 의한 용접조건으로서 25l/min과 20l/min은 거의 비슷한 흡수에너지값을 나타냈으나 15l/min은 흡수에너지가 낮게 나타났다.

Fig. 12는 층간 용접 시간에 따른 것으로서, 흡수에너지의 값은 C₁, C₂는 거의 영향을 받지 않는 것으로 나타났으며, C₃는 다소 낮게 나타났다.

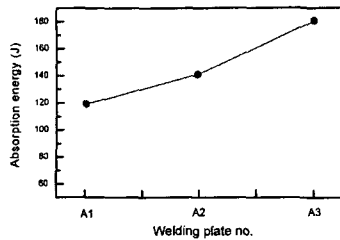


Fig. 10 Result of impact test according to welding pass condition

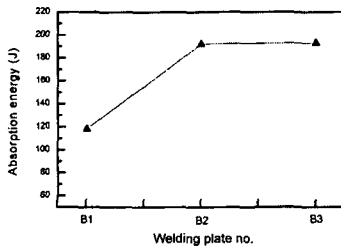


Fig. 11 Result of impact test according to shielding gas amounts

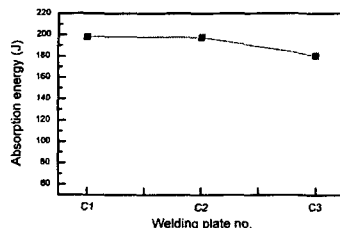


Fig. 12 Result of impact test according to welding time interval

3.4 피로크랙길이와 하중 반복수와의 관계

Fig. 13은 모재와 용접된 시험편 모두를 그려 넣은 그래프이다. 그리고 Fig. 14는 피로크랙진전 초기단계에서 크랙을 1mm 진전시키는데 소요되는 평균 사이클 수를 표시한 막대그래프이다.

Fig. 14를 살펴보면 초기크랙 1mm까지 진전하는데 모재의 경우와 비교하여 WMZ는 약 811% 높게 나타나고 있으며, 최종 파단수명은 약 459% 높게 측정되었으며, 이는 용접부위를 이종재의 강한 재료로 생각할 때, 이 부분에서부터 시작한 초기크랙은 용접부의 영향으로 단일 재료인 모재의 경우보다 높은 파단수명을 나타내었던 것으로 사료되며, 용접으로 인하여 파단수명이 모재의 경우보다도 약 127~895%정도 향상되었음을 알 수 있으며, 그 중 Bond Zone 재료는 가장 높은 파단수명 향상을 나타내었으며, TAZ의 경우는 최종 파단부분에 용접이 행하여 졌으므로, 피로수명에는 큰 영향을 미치지 못하여 모재의 수명과 큰 차이가 없다고 사료된다.

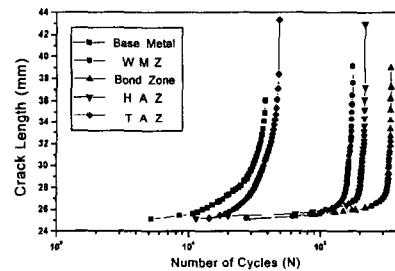


Fig. 13 Relation between crack length and number of cycles for all specimens

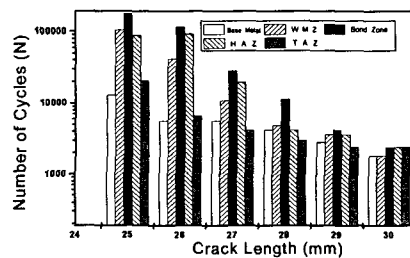


Fig. 14 Relation between number of cycles and crack length per 1mm for all specimens

3.5 피로크랙진전속도와 크랙길이와의 관계

본 연구에서는 피로크랙 진전속도 da/dN 은 7

점 다항식 근사법(Seven point incremental polynomial method)⁽⁷⁾을 사용하였다.

Figs. 15, 16은 모재를 포함한 시험편들의 크랙 진전속도와 크랙길이의 관계를 나타낸 것이다.

용착부, Bond zone 및 HAZ에서의 초기크랙 진전속도는 모재 시험편에 비하여 각각 14.5배, 30배, 15배 정도 낮은 속도를 나타내고 있으나, TAZ에서는 거의 모재와 비슷한 초기크랙 진전속도로 나타났다.

용접으로 인한 이종재료를 통과하는 피로크랙 진전속도는 모재의 경우에 비하여 초기에는 매우 낮은 피로크랙 진전속도를 나타내지만 용접에 의한 영향부를 지나서는(a가 약 28~30mm 정도) 모재의 피로크랙 진전속도보다 더 빠르게 진전하는 것으로 나타났다.

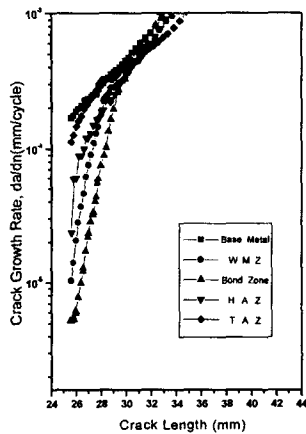


Fig. 15 Relation between crack behavior rate and crack length for all specimens

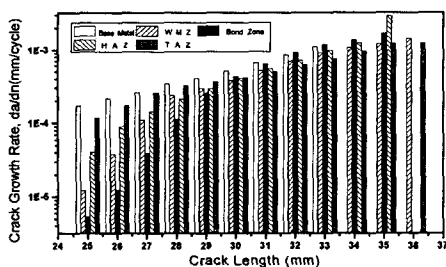


Fig. 16 Relation between crack behavior rate average and crack length per 1mm for all specimens

4. 결 론

Ti 용접재 시험편을 통하여 기계적 특성 및 피로크랙 진전거동을 측정해 본 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 4패스는 7패스와 비교하였을 때 인장강도는 10%정도 높게 나타났으나, 연신율은 30%정도 감소함을 알 수 있었다. 또한 실딩가스량이 많고, 용접 후 층간용접 시간간격이 길수록 인장강도는 높게 나타났으나, 연신율은 감소하였다.
- 2) 충격 흡수에너지값은 패스 수가 많을수록, 실딩가스량이 많을수록 높게 나타났으나, 경도값은 패스 수가 적을수록 높게 나타났으며, 용접층간 시간간격에는 거의 영향을 받지 않는 것으로 나타났다.
- 3) 초기크랙 진전속도는 Bond부, 용착부, HAZ, 온도영향부 순으로 느리게 나타났으나, 피로수명은 Bond부, HAZ부, 용착부, 온도영향부 순으로 높게 나타났다.

참 고 문 헌

- (1) Blaeslack W.A and Banas C.M.: A Comparative Evaluation of Laser and Gas Tungsten Arc Weldments in High-temperature Titanium Alloys, *Welding Journal*, 60-7, 121-130s, 1981.
- (2) 김홍건의 4명 자동차 시트 프레임의 경량화 설계에 관한 연구, 한국공작기계학회지, 8권, 5호, pp. 83-89, 1999.
- (3) Shin, 鋼 鎔接後 鎔接部가 機械的 性質에 미치는 영향에 관한 研究, 淸州대학교 산업경영 대학원 공업재료공학과, 1989
- (4) Schönherr, W. W., "Analysis Based on Cases of Damage Involving Brittle Fracture Collocated by the SC XD of the IIW", *The Japan Welding Society*, pp. IA1.5-IA1.11, 1971.
- (5) Kim, 반자동용접재료의 선택법과 사용법, 기전연구사, 1. 20, pp. 99-300, 1990.
- (6) 재료시험법, 원창출판사, Vol. 1, pp. 121-147, 1994.
- (7) 中村 宏, 恒成, 利康, 堀川 武, 岡崎 章三, 機械の疲勞壽命設計, 養賢堂, 東京, 1983.