

티타늄재 맞대기 용접부의 개선형상에 따른 잔류응력 평가

심백섭, 김일수, 김인주(목포대학교 기계공학과), 차용훈(조선대학교 기계공학부)

The Residual Stresses Evaluation of Butt Welded Zone on the Joint Shape in the Titanium Plate

B. S. Sung, I. S. Kim, I. J. Kim(Mech. Eng. Dept., MOKPO), Y. H. Cha(Mech. Eng. Dept., CHOSUN)

ABSTRACT

In this study, the welded residual stresses test was carried out with pure titanium and TIG welded material using in chemical plants and airplane frames etc.. The relationship between process parameters and residual stresses is complex since a number of factors are involved. Extensive studies have been carried out to determine the effects of various process parameters on residual stress.

The result of micro-hardness about butt welded spacemen was measured of low hardness value in the melting metal zone, but was measured of high hardness value in the distance base metal and heat affect zone. The residual stress of welded zone on the Titanium plate by the sectioning method and finite element method was high measured in the spacemen of high current and voltage. Also, compressive residual stress in the range of distance about 15~20mm from the middle of the deposited metal area is very change. The result of impact test about butt welded spacemen of pure titanium plate was measured of very difference in the welded bead, heat affect zone and base metal, and be measured of high impact value in the heat affect zone. The measure result of welded residual stresses about pure titanium is high measured then nominal steel plate. The V-Type butt welded spacemen, that of the measurement result on the welded residual stress is high measure then X-Type butt welded spacemen

1. 서 론

티타늄 및 그 합금은 비교적 새로운 공업재료이며 1952년부터 구조용 재료로서만 사용되고 있다. 그러나 산업발전과 더불어 산업구조물의 환경도 점점 복잡해지고 있으며, 이러한 구조물에 대한 안정성을 고려한 경량·고강도의 재질 선정 개념도 다변화되고 있다. 티타늄은 안경테, 시계, 카메라 등 일상생활용품과, 골프채, 등산용구, 경주용 자동차 등 레저용 그리고 인공뼈, 인공치아 등 생체적합성이 좋은 이유로 의료용으로 많이 사용되어지고 있다. 뿐만 아니라 항공기의 프레임과 생산성에 강한 특징을 가지고 있어서 화학장치에 널리 사용되고 있는 실정이다¹⁻³⁾. 최근에 이와같이 티타늄 및 티타늄 합금에 대한 이용이 증가하고 있으나 이에 대한 연구 자료가 미흡한 실정이다. 더구나 티타늄 및 티타늄 합금의 새로운 용도는 계속적으로 개발, 발견되고 있다. 일반적으로 맞대기 용접부의 개선방법에 따라

박판에서 V자형 용접을 하고, 후판인 경우 X자형 용접을 하는데 용접부의 개선형상은 구조물의 특성 및 접합방법의 결정에 따라 개선형상을 선택하고 있다. 같은 두께를 용접할 경우에는 X자형이 V자형보다 잔류응력이 작게 측정되는데, 이것은 구조물 용접시 굽힘 및 휨 작용에 따라 발생하는 응력이 X자형의 경우 한쪽에서만 용접하는 V자형 보다 양방향 쪽에서 용접함에 따라 완화되는 효과가 발생하므로 잔류응력이 작게 측정된다⁴⁻⁵⁾. 그럼에도 불구하고 일반 강재에서는 용접잔류응력 평가에 대한 많은 연구가 진행되어 왔으나, 순수티타늄재에 대한 평가는 재질이 고가라는 이유로 많은 연구가 진행되어 오고 있지 않고, 티타늄 합금재에 대한 연구가 몇몇 학자들에 의해서 연구되고 있다⁶⁻⁹⁾. 더구나 순수티타늄재의 용접부에 대한 잔류응력 평가, 개선방법에 따른 잔류응력의 차이를 논한 연구는 미진한 상태에 있다. 따라서 본 연구에서는 항공기의 프레임과 화학장치, 담수화 장치, 선박부품, 판형 열교환기, 냉간스

피이닝, 프레스 부품, 백금을 입힌 양극 등의 우수한 성형성으로 인하여 산업전반에 걸쳐 많이 사용되고 있는 순수티타늄 (ASTM B265 GR3) 99.1%인 판을 용접조건 변화에 따라 Butt 용접하고, 용접하고자 하는 부분을 V자형, X자형으로 개선형을 달리하여 용접하였다.

용접잔류응력을 완화할 목적으로 순도가 좋은 용접봉을 사용하여 이에 대한 용접부의 특성 및 용접잔류응력을 측정하고, 경도시험 및 충격시험을 통하여 용접부에 대한 성능평가를 하고자 한다. 또한 실험에서 구한 용접잔류응력을 비교하기 위하여 이론적인 방법인 수치해석 해석용 프로그램을 이용하여 실험값과 비교 분석하였다.

2. 실험 및 해석

2.1 재료 및 시험편

본 실험에 사용한 시험편의 재료는 내식성이 강한 Ti이 99.1%인 순수티타늄(ASTM B265, GR.3)이다.

기계적 성질을 구하기 위하여 인장시험 KS B 0801에 따라 시험편을 제작하였으며, 사용된 순수티타늄의 화학적 성분과 기계적 성질은 Table 1과 Table 2와 같다.

용접잔류응력 시험편을 제작하기 위하여 압연방향으로 길이 300 mm, 폭 200 mm, 두께 12 mm의 평판을 X자형, V자형 맞대기 이음으로 용접하였으며, Fig. 1과 같이 X형 맞대기 이음으로 하기 위하여 모재를 양면 베벨각 30° 로 밀링가공하였고, V형 맞대기 이음을 하기 위하여 베벨각을 60° 하였다.

Table 3은 티타늄을 TIG용접에 사용된 용접봉의 화학적 성분이고, 실드가스는 고순도 아르곤가스를 사용하였다. 순수티타늄에 대한 용접조건 및 인장강도 실험결과를 Table.4와 Table 5에 나타냈다.

Table 1 Chemical compositions of base metal

(wt.%)

N	C	H	Fe	O	Ti
0.05	0.08	0.015	0.25	0.30	99.1

Table 2 Mechanical properties of base metal

Yield Strength (kgf/mm ²)	Tensile Strength (kgf/mm ²)	Elongation (%)	Young's Module (kgf/mm ²)
35	53	25	11,850

Table 3 Chemical compositions of welded rod

(wt.%)

N	C	H	Fe	O	Ti
0.012	0.03	0.005	0.1	0.1	BAL

Table 4 Welding conditions of butt welding

Type	Current (A)	Voltage (V)	Welding speed (cm/min)	pass	Layer	Number of test specimen
X	140	16	15	1	4	1
		15		2		
		14		3		
		13		4		
		17	15	1	4	2
		16		2		
		15		3		
		14		4		
V	140	20	15	1	3	3
		19		2		
		18		3		
		22	15	1	3	4
		21		2		
		20		3		

Table 5 Mechanical properties of welded specimen

Type	Specimen No.	Yield Strength (kgf/mm ²)	Tensile Strength (kgf/mm ²)	Elongation (%)
X	1	38.45	57.5775	24.42
	2	39.67	59.4551	24.13
V	3	35.48	56.8521	23.56
	4	37.78	57.3724	23.35

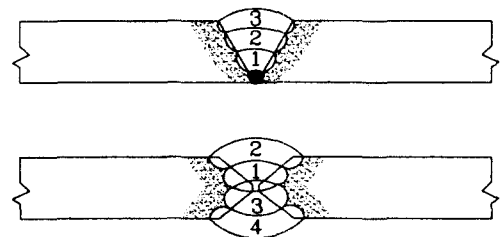


Fig. 1 Welded pass number

2.2 잔류응력 측정

용접한 시험편은 단면절단법을 사용하여 용접잔류응력값을 측정하였다. 측정에 사용한 시험기는 포터블식인 MT-16A이며, 데이터 획득을 위하여 노트북에 SAS 98 Software of residual stress analysis를 설치하고, National Instrument CO., LTD.의 데이터 획득 카드 Ni-DAQ Capabilities인 PCMCIA를 장착하여, 인터페이스 한 다음 σ_x , σ_y 의 용접잔류응력값을 측정하였다.

스트레인게이지는 KYOWA ELECTRONIC INSTRUMENTS CO., LTD.에서 제작한 KFG-2-120-D 16-11 Type의 게이지(Gage Length : 1mm, Gage Factor : 2.10, Gage Resistance : $120.2 \pm 0.3 \Omega$)를 사용하였다.

2.3 해석용 프로그램 및 해석 모델

용접잔류응력 및 변형률 해석용 프로그램 구성은 1개의 주 프로그램과 48개의 보조 프로그램 및 5개의 함수로 구성되어 있으며, 입력 데이터를 조절함으로써 손쉽게 수치 시뮬레이션을 수행하도록 구성하였다. 입력 데이터의 형식에 맞추어 데이터를 입력하면, 해석모델 형상의 전 절점에 대해 요소좌표를 자동적으로 정의하여 형상함수 및 야코비언(Jacobian)메트릭스를 구성한다.

열분포 이력을 열하중으로 하므로 용접이 수행되는 과정의 온도상승 및 냉각에서의 온도이력을 입력하여 온도를 하중으로 치환하고, 요소의 강성메트릭스를 구성한다. 재료의 항복응력, 소성경화계수, 열팽창률 등을 온도의 변화에 따라 계산하고, 요소의 강성메트릭스를 중첩한다. 또한, 평형방정식을 계산하여 응력, 소성변형률 등을 계산한다. 재료의 탄·소성여부를 Von-mises 항복함수를 토대로 판단하여 온도, 변위, 응력, 소성변형률 및 상당응력 등을 출력하게 되고, 다층-다패스의 경우, 이러한 결과치가 중첩과정을 반복하게 된다. 해석은 2차원 열전도 프로그램을 이용하여 열분포 특성을 파악하였고, 이 데이터를 입력하여 2차원 용접잔류응력 해석용 유한요소 프로그램에 의해 시험편 표면의 용접잔류응력을 해석하였다. 해석모델에서 x는 용접선 방향, y는 판의 폭 방향이다.

또한, FEM해석을 위한 모델 사이즈는 Table 6과 같으며, 요소분할은 4절점 아이소 파라메트릭을 도입하여 4절점 사각형 요소를 사용하였으며, 총 요소수 564개, 총 절점수 722개로 분할하였다. 용접잔류응력 해석에서 사용한 경계조건은 Fig. 2에 나타난 것과 같이 맞대기 용접 중앙단면을 아래에서 구속한 경우를 대상으로 하였다.

Table 6 Modeling size for FEM analysis

Model design	Size (mm)	
Length of plate	300	
Width of plate	200	
Bead width	X	12
	V	10
Thickness of plate	12	
Root gap size	1	
Root face size	1	
Size of modeling	150	
Bevel angle	60°	

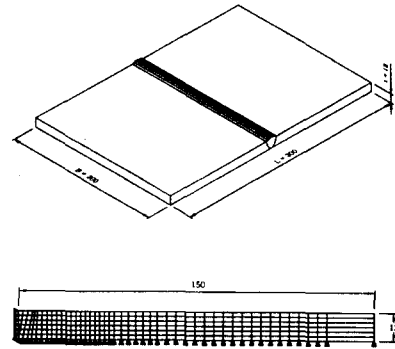


Fig. 2 Modeling for FEM analysis

3. 실험결과 및 고찰

3.1 경도시험 고찰

측정에 사용한 경도시험기는 Matsuzawa Ltd.에서 제작한 비이커스 경도계로 사용하중은 1000 gf를 사용하였다. 경도시험시 측정위치가 용접부위별로 정확하도록 샌드페이퍼 #200~2000으로 연마한 다음, 가죽으로 폴리싱(A1203, 0.1 μ m)하여 최종적으로 에칭액(10% HF, 5% HNO₃)으로 하고 용착금속부, 열영향부 및 모재부가 구별된 상태에서 경도시험을 행하였다.

경도측정 위치는 잔류응력값을 정성적으로 비교하고자 모재면에서 두께방향으로 2mm 지점인 위치에서 용접부 중앙의 좌·우로 측정하였다. Fig. 3에서 경도분포는 비드부와 세립부 사이의 경계부에서 경도값이 높게 나왔으며, 경도의 증가가 열영향부의 역학적인 특성에 많은 영향을 주었음을 알 수 있다.

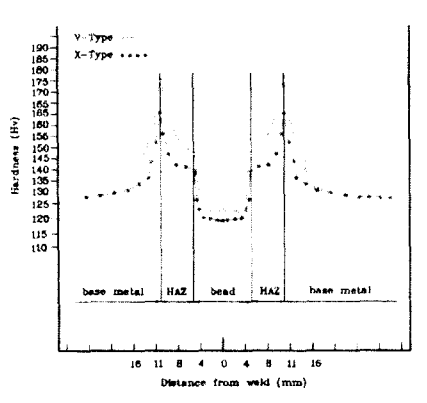


Fig. 3 Distribution of micro-vickers hardness measured from weld bead

3.2 충격시험 고찰

본 논문에서 사용한 샤르피 충격시험기는 용량이 26.45kgf·m이고 반경이 0.634m로 용접조건 및 맞대기 용접부 개선형상에 따라 실시하였으며, 시험편은 KS B 0810 규격에 따라 용착금속부, 열영향부, 모재부에 대하여 각각 시험편을 제작하여 실험을 실시하였다.

Fig. 4에서 보듯이 충격시험결과 용착금속부에서 충격값이 가장 크게 측정되었으며, 열영향부에서 가장 낮게 측정되었다. 또한 V자형 맞대기 용접 시험편 보다 X자형 용접 시험편에서 높게 측정되었다. 경도시험결과에서 고찰한 것과 같이 열영향부에서 용접시 발생하는 열에 의해서 경화되었음을 알 수 있었고, TIG 용접시 맞대기 용접부가 모재부의 성질이 변화하여 연화되었음을 알 수 있다. Ti의 기계적 성질은 질소 및 산소의 함량에 의해서 크게 결정된다. 따라서 사용한 용접봉이 질소, 산소 및 탄소함량이 순수 티타늄계보다도 적은 용접봉을 사용하였으므로 용착금속부에서 매우 연화되어 높은 충격값이 측정되었다.

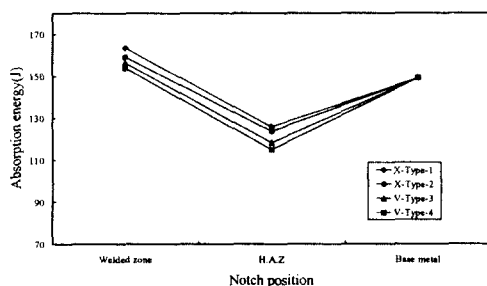


Fig. 4 The impact test results in the notch position of but welded specimen

3.3 용접잔류응력 비교고찰

단면법에 의한 용접잔류응력 측정을 위하여, 맞대기 용접부의 폭 방향으로 용접안정구간인 중앙을 선택하여 측정하였다.

맞대기 용접이음부의 해석은 열분포의 대칭성을 고려하여 반쪽에 대해서 해석을 수행한 결과와 전 모델에 대해 해석한 결과, 용접 후 시간에 따른 온도분포 및 잔류응력의 분포가, 용접부의 중심에 대해 완전대칭을 이루는 형상을 나타내므로 반쪽에 대해서 수행하였다. 강판의 두께를 고려하여 두께 내부의 용접잔류응력의 분포가 온도구배가 급격히 변화하는 지점을 상부에서 두께방향으로 2.0mm 떨어진 지점에서 가장 크게 발생하므로 측정부위를 표면에 2.0mm인 지점을 선정하였다.

Fig. 4.5~8에서 알 수 있듯이 용접잔류응력 값이 용접비이드와 열영향부사이에서 매우 높았음을 알 수 있었다. 용접잔류응력 측정결과 인장잔류응력이 압축잔류응력으로 변화하는 지점이 15 mm~20 mm 사이에서 측정되었으며, σ_y 용접잔류응력 값이 모두 인장잔류응력으로 측정되었다. 수치해석 결과 용접잔류응력 측정방법인 단면법과 비교한 결과 잘 일치하였다.

X자형 용접시험편에서는 X-Type-1에서 σ_x 잔류응력 값이 20~22 kg/mm²이고 X-Type-2에서 24~25kg/mm²로 측정되었다. V자형 용접시험편에서는 V-Type-3에서 σ_x 잔류응력 값이 30~32 kg/mm²이고 V-Type-4에서 33~34kg/mm²로 측정되었다.

V자형은 용접시험편 제작시 시험편 두께가 12mm이므로 용접 비이드부의 용착금속물을 채울려고 전류·전압을 X자형보다 다소 높게 주었다. 경도시험 및 충격 시험결과에서 알 수 있듯이 개선형상에 따라 용접잔류응력이 현저히 높았음을 알 수 있었다.

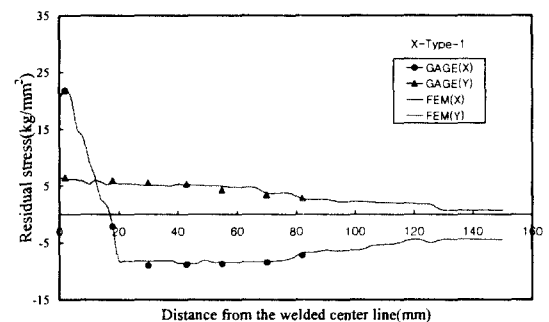


Fig. 5 Comparison the sectioning and finite element method of the welded residual stress for X-Type specimen-1

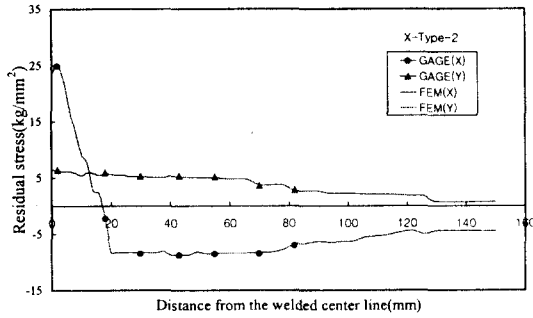


Fig. 6 Comparison the sectioning and finite element method of the welded residual stress for X-Type specimen-2

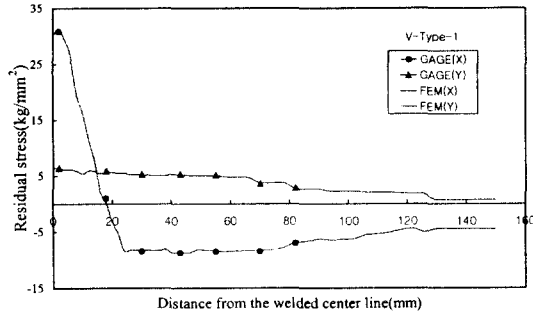


Fig. 7 Comparison the sectioning and finite element method of the welded residual stress for X-Type specimen-3

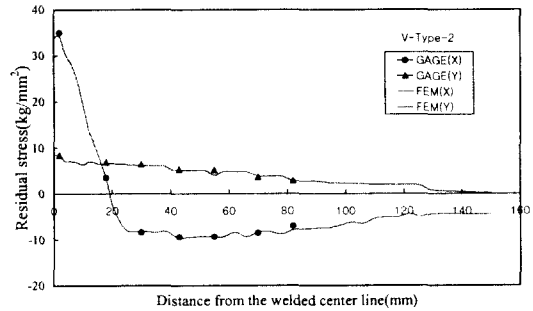


Fig. 8 Comparison the sectioning and finite element method of the welded residual stress for X-Type specimen-4

5. 결론

본 연구에서는 순수티타늄을 TIG 맞대기 용접하여 용접부의 기계적 특성 및 용접잔류응력을 측정하여 얻어진 결과는 다음과 같다.

1. 맞대기 용접시험편에 대한 경도시험결과 용착 금속부에서 가장 낮은 경도 값이 측정 되었으며, 모재부와 열영향부사이에서 경도 값이 매우 높게 측정

되었다.

2. 순수티타늄재 맞대기 용접부에 대한 충격시험 결과 용접비이드, 열영향부, 모재부에 대한 충격값이 많은 차이를 보였으며, 열영향부에서 가장 높은 값으로 측정 되었다.

3. 순수티타늄재의 용접잔류응력 측정 결과 일반 강재보다는 잔류응력값이 작게 측정 되었으며, V자형 맞대기 용접방법이 X자형 맞대기 용접보다 용접잔류응력이 다소 높게 측정 되었다.

4. 수치해석 결과 입열량이 클수록 용접잔류응력이 증가하였으며, 용착금속부 중심으로부터 15~20mm 범위에서 인장잔류응력에서 압축잔류응력으로 급속히 변화하였다.

참고 문헌

1. F. D. Rosi et al. : "Mechanism of Plastic Flow in Titanium : Determination of Slip and Twinning Elements", J. Metals, Feb. 1953, p.257
2. J. C. Chesnutt, C. G. Rhodes, and J. C. Williams : "Relationship between Mechanical Properties, Microstructure, and Fracture Topography in $\alpha + \beta$ Titanium", ASTM Spec. Tech. Publ. 600, 1976.
3. R. I. Jaffee, "The Physical Metallurgy of Titanium Alloys," Progress in Metal Physics., vol. p.109, 1958.
4. Y.H.Cha, D.J.Kim, B.S.Sung, "Analysis of the Residual Stress and Fatigue Strength in Aluminum Alloy Weldments", The Korea Society of Machine Tool Engineers, 1996, pp. 177 - 182.
5. Y.H.Cha, H.S.Bang, D.J.Kim, "Analysis of Fatigue Crack Growth with Thickness Ratio in Weldment", Journal of the Korean Society of Welding, Vol14, No5, 1996, pp. 69 - 77.
6. R. I. Jaffee and H. M. Burte : "Titanium Science and Technology", vols. 1-4, Plenum, New York, 1973
7. S. R. Seagle and L. J. Bartlo: "Physical Metallurgy and Metallography of Titanium Alloys", Met. Eng. Quart., Aug. 8, 1968, p.1
8. F. D. Rosi et al. : "Mechanism of Plastic Flow in Titanium : Determination of Slip and Twinning Elements", J. Metals, Feb. 1953, p.257
9. J. C. Chesnutt, C. G. Rhodes, and J. C. Williams : "Relationship between Mechanical Properties, Microstructure, and Fracture Topography in $\alpha + \beta$ Titanium". ASTM Spec. Tech. Publ. 600, 1976.