

순수티타늄 용접재의 잔류응력분포에 관한 연구

최병기[†] · 장경천^{*}

조선대학교 공과대학 기계공학과 · *한국생산기술연구원
(2004. 2. 4. 접수 / 2004. 11. 12. 채택)

A Study on the Residual Stress Distribution of Pure Titanium Welding Material

Byung-ki Choi[†] · Kyung-chun Chang^{*}

Department of Mechanical Engineering, Chosun University

*Korea Institute of Industrial Technology

(Received February 4, 2004 / Accepted November 12, 2004)

Abstract : The purpose of this paper is to investigate the welding residual stress distribution according to the constraint or non-constraint welding condition with titanium commonly using power station, aircraft, and ship. The measuring method of the residual stress was applied stress release rating method with strain gages and a portable strain meter. The x direction residual stress generally showed the tensile residual stress in case of restraint welding. On the other hand, the x direction residual stress under non-restraint welding were changed tensile stress into compressive stress on 15mm away from welding bead center. Also, the y direction residual stress generally showed the tensile residual stress in case of non-restraint welding and the y direction residual stress under restraint welding were changed tensile stress into compressive stress about 60mm away from welding bead center.

Key Words : residual stress, restraint welding, non-restraint welding

1. 서 론

티타늄은 용점이 약 1,670℃로 매우 높아 완전한 강괴의 제작이 곤란하나, 상온에서 안정된 산화피막이 생성되며 스테인리스강보다 응력부식이나 피팅(pitting) 및 입계부식을 일으키지 않으므로 향후 스테인리스강보다 더 많이 내식재료로 활용될 전망이다.

특히, 현재 자동차에 사용되고 있는 소재는 경계성 때문에 주로 일반 탄소강이 많이 사용되고 있으나, 티타늄 합금은 실온에서의 비피로강도(피로강도/밀도)가 월등히 높고, 우수하기 때문에 고가임에도 불구하고 반복적인 하중이 걸리는 자동차 부품에 자동차의 경량화를 위하여 오래 전부터 주목받아 오고 있다¹⁾.

또한 티타늄 합금은 고온에서도 피로강도가 인장 강도의 0.55~0.65 정도를 유지하기 때문에 철강재료의 0.35~0.50 정도에 비하여 월등히 높다²⁾. 따라서 고온에서 내피로성이 요구되는 엔진부품의 대체 소재로서 유망하다.

그러나, 티타늄은 고온에서 가스와의 친화력이 강하고, 다른 원소나 화합물과 활발하게 반응하여 산화되므로 용접 중에는 공기 중의 산소, 질소가 침투되면 용접부의 금속은 현저하게 경도가 증가하고, 연신율은 떨어지기 때문에 용접시공에서 완전 가스 실당하여야 하는 등 구조물 제작 및 실험이 까다롭기 때문에 현재까지의 티타늄에 대한 연구는 미흡한 실정이다³⁾.

용접작업시 단시간에 5,000~6,000℃ 정도의 높은 열을 발생하여 모재를 가열시키기 때문에 열팽창 및 냉각시의 수축 등에 의해 국부적인 굽힘이나 뒤틀림 등의 열소성 변형을 발생시킨다. 그 결과 용접부는 모재의 항복강도에 가까운 높은 잔류응력⁴⁾

[†]To whom correspondence should be addressed.
bkchoi@chosun.ac.kr

이 존재하여 파괴 및 피로 강도를 크게 저하시키는 요인이 되기도 한다.

일반적으로 인장잔류응력은 크랙전파를 촉진시키고, 압축잔류응력은 크랙전파를 지연시킨다고 알려져 있다.

따라서 기계나 구조물 제작시 용접부의 피로강도를 감소시키는 균열이나 잔류응력을 파악하는 것은 매우 중요하다 하겠으며, 산업현장에서 구조물의 제작시 적용되는 용접조건은 구속조건인 용접을 행하고 있다. 그러나, 일반적으로 실험에 적용되는 용접조건은 이러한 실질적인 구조물의 용접에 사용되는 구속용접이 아닌 비구속 상태에서 용접을 행하여 실험에 적용하고 있기 때문에 구조물의 용접잔류응력분포와 실험에 사용되는 잔류응력은 차이가 있을 것이라 사료된다.

따라서 본 연구에서는 산업현장에서 적용되는 구속상태의 용접조건을 적용하고자 자체 제작한 구속상태의 용접 시험편과 비구속 상태의 용접 시험편을 제작하여 용접조건에 따른 순수 티타늄의 용접 잔류분포를 비교·검토하고자 한다.

2. 시험편 및 실험방법

2.1. 시험편

항공기, 배, 자동차 등 구조물 재료로 사용되는 티타늄의 제품별 규격에서 ASTM B265의 등급(grade)은 1, 2, 3, 4등급이 있는데, 1등급에서 4등급으로 갈수록 인장강도는 높고, 연신율은 낮다.

본 연구에서는 티타늄의 용접특성을 평가하기 위하여 ASTM B265 grade 2의 제품을 선정하였는데, grade 2는 연강과 거의 유사한 기계적 특성을 가지고 있으며, 구조용 재료로 많이 사용되고 있다.

먼저 모재의 기계적 성질을 알아보기 위하여 인장시험 및 경도시험을 행하였다. 인장시험⁵⁾은 KSB 0801에 따라 시행하였으며, 경도시험은 마이크로 비커스경도기를 사용하였다.

경도측정용 시험편의 표면을 연마지 #2,000와 컴파운드(cp1000)를 같이 사용하여 연마한 후 산화알루미나(Al₂O₃, 0.3 μ m)로 래핑 가공하였으며, 실험에 사용한 하중은 500g, 하중작용시간 30sec의 조건하에서 60회 측정하였다.

Table 1은 실험에 사용된 순수티타늄의 화학적 성분을 나타냈으며, Table 2는 기계적 성질을 나타내었다.

Table 1. Chemical compositions of ASTM B265 GR2 (wt.%)

N	C	H	Fe	O	Ti
0.006	0.002	0.002	0.03	0.144	BAL

Table 2. Mechanical properties of ASTM B265 GR2

Yield Stress (Kgf/mm ²)	Tensile Stress (Kgf/mm ²)	Elongation (%)	Young's Modulus (Kgf/mm ²)	Hardness (Hv)
40	49	28	10,850	0.3

Table 3. Chemical compositions of welded wire (wt.%)

N	C	H	Fe	O	Ti
0.012	0.03	0.005	0.10	0.10	BAL

티타늄의 용접 이음홈 형상은 맞대기 이음을 할 때 두께 1.5~16mm는 V형상을, 두께 12~38mm는 X형상이나 U형상을 선택하도록 되어 있으나⁶⁾ V형상으로 용접하면 한면용접을 하여야 하기 때문에 변형 발생과 비드 폭의 증대로 비드표면의 완전 실딩을 하기가 어렵고, 또한 용착량이 증대되어 용접 입열도 많아져 기계적 성질의 저하가 우려되므로 본 실험에서는 X형 이음홈 형상으로 용접을 하였으며, TIG 용접기를 사용하였다.

용접봉은 모재와 같은 성분의 재질로 AWS ER Ti-1^a를 사용하였으며, 직경 2.4mm로 릴형태의 와이어를 사용하였다. TIG용 순수 티타늄 용접봉의 화학성분은 Table 3과 같다.

일반적인 실험의 경우 비구속 용접조건(Fig. 2)으로 용접하여 실험에 사용하고 있지만, 실제 현장에서 적용되고 있는 구조물의 용접조건은 구속형 용접조건에 의하여 행하여지고 있다.

따라서 본 연구에서는 실제 현장에서의 구조물 용접조건과 같은 효과를 내기 위하여 자체 제작한 구속 조건(Fig. 1)에 의하여 용접하여 변형을 구속하는 형태로 구조물의 실질적인 용접 잔류응력을 측정하여 비구속 용접조건과 구속 용접 조건의 잔류응력치를 비교·검토하였다.

본 연구에서는 구속용접에 의해 제작된 두 개의 시험편은 각각 SPC-1, 2라 정의하였고 비구속용접에 의해 제작된 두 개의 시험편은 각각 SPC-3, 4라 정의하였다.

Fig. 1과 2는 잔류응력을 측정하기 위한 용접 시험편의 형상이며, 용접조건은 5 패스, 용접전류는 130~140A, 아크 전압은 14.5~16V, 용접 속도는 5.5~7.9cm/min, 루트 간격은 3~3.5mm, 비드 폭은 11.2mm, 실딩가스는 20~25L/min으로 용접하였다.

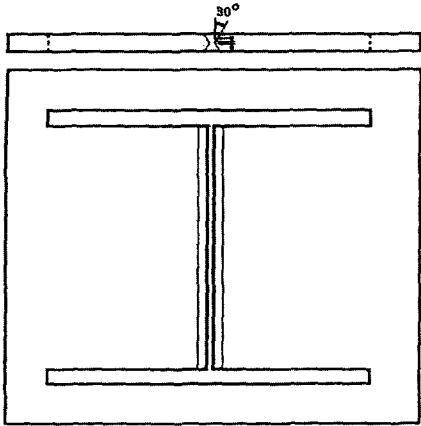


Fig. 1. Restraint welding condition(SPC-1, 2)

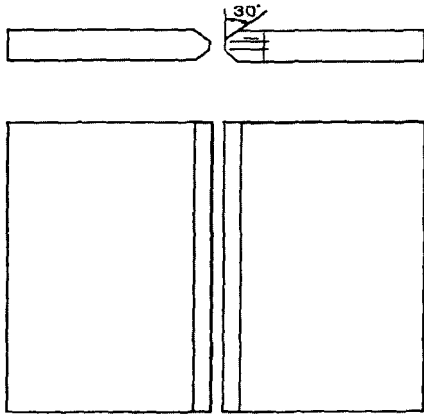


Fig. 2. Nonrestraint welding condition(SPC-3, 4)

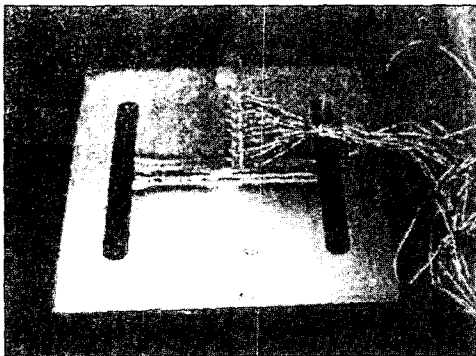


Photo. 1. Configuration of strain gage attached position

Photo. 1은 시험편에 스트레인 게이지를 부착한 사진이다.

2.2. 실험방법

스트레인 게이지의 응용은 게이지의 부착으로부

터 시작되며 정확한 데이터 측정으로 신뢰도가 향상된다.

따라서 게이지의 부착은 부착 위치를 선정하는 다음 부착할 곳의 표면처리 시작으로 보호제의 사용까지의 다섯 단계를 거쳐 완료하였다.

우선 세척제를 이용하여 시료의 표면에 붙어 있는 오염물질을 제거하였으며 컨디셔너를 몇 방울 뿌린 다음 샌드페이퍼 #800~1500으로 연마한 후 표면이 매끄럽게 되도록 연마를 하였다.

이러한 동작을 3회 반복하여 표면이 부드러워지면 거즈로 깨끗이 닦아냈다.

다음은 중화제를 이용하여 다시 한번 부드러운 연마를 한 뒤 표면을 거즈로 깨끗이 닦았다. 이것은 약 염기성 물질로 연마시 표면의 윤활 작용 및 산성으로 변화된 시료를 중화시켜 주는 역할을 하게 된다.

이렇게 하여 게이지의 부착 위치를 연필로 표시한 다음, 셀로판 테이프 등을 이용하여 정해진 위치에 옮긴 다음 접착제로 붙였다.

다음은 셀로판 테이프의 이용시 게이지가 꺾이지 않도록 앞부분을 당기면서 위로 들어 주게 되면 게이지에 손상이 가지 않게 조심하여 본딩을 하는데 약 1~2분 가량 손으로 눌러 압착을 한 다음 스트레인 게이지를 부착하여 스트레인 게이지 연결선을 고정하였다. 또한, 이물질로 인한 데이터의 오차를 최소화 하기 위하여 코팅제로 도포하였다.

스트레인 게이지를 사용하여 스트레인을 측정시 대개 측정하고자 하는 스트레인에 의한 저항의 변화분은 비교적 적다.

휘스톤 브리지는 전기측정법상에서 미소저항 측정회로일 뿐만 아니라, 스트레인 게이지가 가진 온도계수에 의한 오차를 없애주는 역할도 함으로 스트레인 측정뿐만 아니라 변환기도 회로적으로 휘스톤 브리지를 형성시켜서 측정하게 되어 있다.

또한 휘스톤 브리지는 게이지의 온도계수보정을 할뿐만 아니라, 제조상 피할 수 없는 게이지 하나 하나의 저항값의 차로 인해서 생기는 출력, 또는 일정한 스트레인 기준으로 그 기준 이상의 스트레인을 측정할 경우에도 비교적 쉽게 회로적으로 실현 가능한 이점을 가지고 있다.

휘스톤 브리지는 저항측정을 위하여 저항으로 구성된 회로이며, 이 자체에서는 전력이 발생하지 않는다.

따라서 이것에 대해서 전원과 출력을 검출하는 측정기를 필요로 한다.

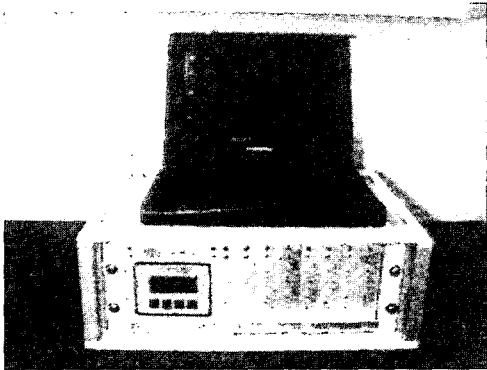


Photo. 2. Strain meter of MT-16

측정에 사용한 시험기는 포터블식인 MT-16A이며, 데이터 획득을 위하여 노트북에 SAS 98 잔류응력 해석 프로그램을 설치하고, 데이터 획득 카드 Ni-DAQ Capabilities인 PCMCIA를 장착하여, 인터페이스 한 다음 x 및 y방향 잔류응력 값을 측정하였다.

이 때 사용된 잔류응력 측정방법은 단면법 또는 응력이완법(stress release rating method)으로서 시험체에 부착된 스트레인게이지가 포함되도록 시험체의 이부분을 절단하여 시험체로부터 제거함으로써 이완된 변형률을 측정하여 잔류응력을 측정하는 방법을 사용하였다.

스트레인 게이지는 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.

Photo. 2는 본 실험에 사용된 포터블식 MT-16A를 나타내었다.

3. 실험결과 및 고찰

Figs. 3~6은 단면법에 의한 용접 잔류응력을 측정 한 실험결과를 나타내었다.

본 연구에 사용한 티타늄 재질에서는 용접잔류응력의 크기는 x 및 y방향 성분 모두 다소 작게 측정되었으며, Figs. 3~6에서 볼 수 있다. 또한, 용접선 길이방향으로 잔류응력의 분포양상을 보면, 용접시 단부와 중단부의 미소영역에서 용접잔류응력 성분(σ_x, σ_y)이 크게 측정되었으며, 그 외의 영역에서는 일정하게 나타남을 보이고 있다. 이러한 분석 결과로 용접이 시작되는 지점과 끝나는 지점의 일정영역을 제외하고는 동일한 열적 특성을 받기 때문이라 생각된다.

Figs. 3~6에서 알 수 있듯이 열영향부 근방에서

길이방향의 잔류응력이 폭 방향의 잔류응력에 비해 높게 나타났다. 이것은 폭 방향의 경우가 길이방향의 경우에 비해 용접열의 냉각속도가 빠르기 때문으로 생각된다. 잔류응력값이 최대로 보이고 있는 지점이 열영향부 및 그 근방임을 알 수 있었다.

Figs. 3과 6은 시험편 자체에서 구속한 형태로 용접한 이음부의 용접잔류응력을 측정 한 결과인데, 용접과정에서 용접잔류응력이 높아졌음을 알 수 있었다. 용접잔류응력의 분포상태를 보면 전형적인 외적 구속방법과 같은 형태로 나타났으나, x방향성분 용접잔류응력이 모두 인장잔류응력으로 측정되었다. 용접중심선으로부터 5~20mm사이에서 급속도로 작아졌으며, 20~40mm사이에서 가장 작은 용접잔류응력이 측정되었다. 또한 y방향의 용접잔류응력은 용접 중심선으로부터 60mm 거리에서 인장잔류응력이 압축잔류응력으로 변화하였다.

Figs. 5와 6은 비구속 상태하에서 용접한 이음부의 용접잔류응력을 측정 한 결과이다. 시험편의 일반적인 형태로 용접중심선 근방의 열영향부에서 x방향 성분은 인장잔류응력이 측정되었으며 용접 중심선으로부터 15~18mm 거리에서 급속도로 압축잔류응력으로 변화하였다. 또한 Figs. 3과 4에서 보다 x방향성분 잔류응력이 낮게 측정되었다. 이것은 구속

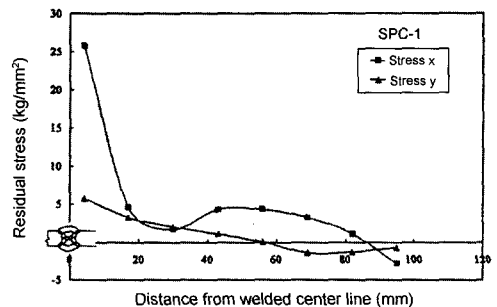


Fig. 3. Distribution of the welded residual stress for SPC-1

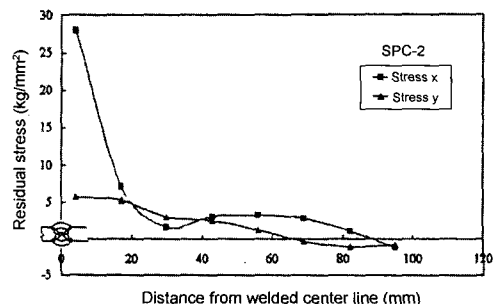


Fig. 4. Distribution of the welded residual stress for SPC-2

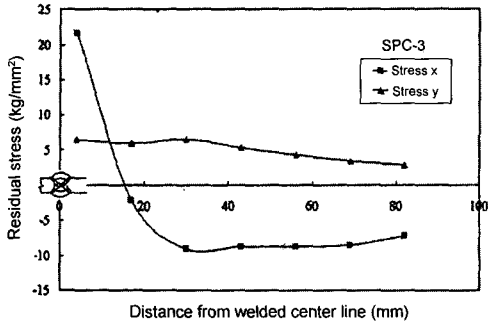


Fig. 5. Distribution of the welded residual stress for SPC-3

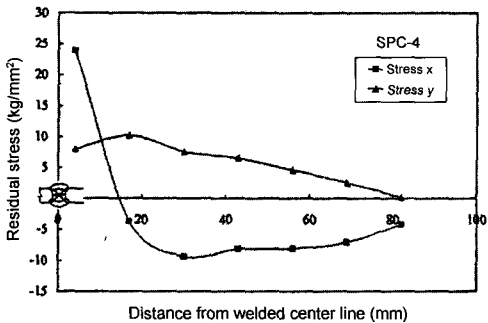


Fig. 6. Distribution of the welded residual stress for SPC-4

조건의 차이인 것으로 사료되며 y방향의 용접잔류응력은 모두 인장 잔류응력으로 측정되었다. 용접중심선으로부터 멀어질수록 잔류응력값이 미소하게 작아짐을 알 수 있었다.

Fig. 7에서는 x방향의 용접잔류응력에 대한 시험편 자체 구속한 시험편과 비구속 방법에 의하여 제작된 시험편에 대하여 도표화 한 것이다. 시험편 자체에서 구속한 방법이 비구속 방법보다 용접잔류응력이 높게 측정되었음을 알 수 있었다.

Fig. 8에서는 x방향의 용접잔류응력에 대한 시험편 자체 구속한 시험편과 비구속 방법에 의하여 제

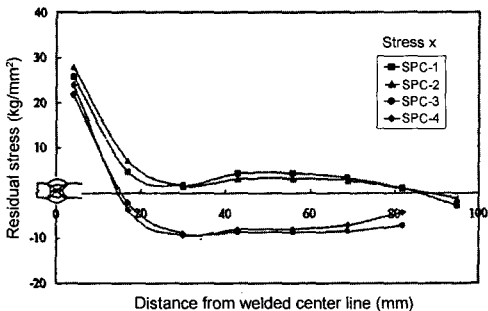


Fig. 7. Distribution of the welded residual stress in the σ_x

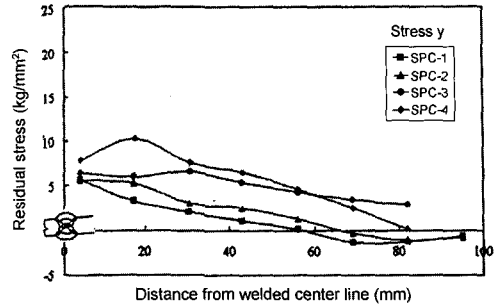


Fig. 8. Distribution of the welded residual stress in the σ_y

작된 시험편에 대하여 도표화 한 것이다. 비구속 방법이 시험편 자체 구속한 시험편에서 보다 다소 높게 측정되었으며, 이것은 x방향의 측정결과에서 알 수 있듯이 시험편 자체 구속한 상태가 상대적으로 큰 것은 y방향의 용접잔류응력을 감소시켰던 것으로 생각된다.

4. 결론

티타늄 용접재 시험편을 통하여 기계적 특성 및 잔류 응력을 측정해 본 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 용접잔류응력은 구속용접의 경우가 비구속용접일 때보다 훨씬 높게 나타났고, 구속 용접의 경우 x방향의 용접잔류응력은 모두 인장잔류응력으로 측정되었고, 비구속용접의 경우 y방향의 용접잔류응력은 용접 중심선으로부터 약 15~20mm에서 인장잔류응력이 급속도로 압축잔류응력으로 변화하였다.
- 2) 구속 용접의 경우 y방향의 용접잔류응력은 용접 중심선으로부터 약 60mm에서 인장잔류응력이 압축잔류응력으로 변화하였고, 비구속 용접의 경우 y방향의 잔류응력은 모두 인장잔류응력으로 측정되었다.

감사의 글 : 이 논문은 2003년도 조선대학교 교내 학술 연구비의 지원을 받아 연구되었음.

참고문헌

- 1) 최병기, 국중민, "티타늄 용접재의 피로크랙 성장거동에 관한 연구", 한국산업안전학회지, 16권, 3호, pp. 7~11, 2001.

- 2) 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, pp. 121~130, 1981.
- 3) Schönherr, W. W., "Analysis Based on Cases of Damage Involving Brittle Fracture Collocates by the SC XD of the IIW", *Proceedings of the First International Symposium on the Precution of Cracking in Welded Structures Based on Recent Theoretical and Practical Knowledge in Tokyo*, The Japan Welding Society, pp. IA1.5~IA1.11, 1971.
- 4) 차용훈외 6명, "신경회로망을 이용한 용접잔류응력 예측에 관한 연구", *한국공작기계학회지*, 제9권, 제6호, pp. 89~95, 2000.
- 5) 최병기외 3명, "개정 재료시험입문", 원창출판사, Vol. 1, pp. 121~147, 2000.
- 6) Kim, "반자동용접재료의 선택법과 사용법", *기전연구사*, 1.20, pp. 99~300, 1990.