

Ti 鎔接材의 機械的 特性 및 殘留應力の 分布에 關한 研究

최병기 · 장경천* · 국중민* · 정장만** · 구남열***

조선대학교 기계공학과 · *한국생산기술연구원 · **성화대학 항공/자동차정비과

***경남대학교 대학원 기계공학과

(2001. 11. 7. 접수 / 2003. 2. 25. 채택)

A Study on the Mechanical Properties and Residual Stress Distribution of Ti Welding Material

Byung-Ki Choi · Kyeong-Cheun Jang* · Jung-Min Kuk* · Jang-Man Jung**
Nam-Year Koo***

Department of Mechanical Engineering, Chosun University · *Korea Institute of Industrial Technology

**Department of Aircraft-Automobile Maintenance, Sunghwa College

***Department of Mechanical Engineering, Graduate School of Kyungnam University

(Received November 7, 2001 / Accepted February 25, 2003)

Abstract : The objective of this paper was to investigate the welding characteristics according to the restraint condition, the pass number, and the shield gas quantity with titanium commonly using in power stations, aircrafts, ships, and so forth.

The residual stress distribution was measured under restraint and nonrestraint welding conditions.

The tensile strength and elongation of the 4 pass welded specimen were shown higher about 10% and 30% than those of the 7 pass welded specimen at the same welding conditions respectively. Also, the more shield gas quantity and the shorter natural cooling time, the higher tensile strength and the lower elongation.

Key Words : residual stress distribution, mechanical properties, restraint welding, nonrestraint welding

1. 서 론

현재 자동차에 쓰이고 있는 소재는 경제성 때문에 주로 일반 탄소강이 많이 이용되나, 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⁾. 티타늄 합금은 고온에서도 피로강도가 인장강도의 0.55~0.65 정도를 유지하기 때문에 기존 철강재료의 0.35~0.50 정도에 비하여 월등히 높다²⁾. 따라서 고온에서 내피로성이 요구되는 엔진부품의 대체 소재로서 유망하다 하겠으며, 이러한 티타늄 합금을 사

용함으로써 인해 자동차의 경량화 및 엔진성능의 향상을 기대할 수 있으리라 생각된다.

그러나, 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 실딩해야 하는 어려움이 있으며, 인장강도 및 내력은 온도에 의한 변화가 200~300℃정도까지 상승하고, 이 이상 400℃까지는 그다지 변화가 없으나, 고온으로 되면 급격히 저하하며, 높은 항복응력을 가지고 있어 냉간가공이 어려워 구조물 제작에도 쉽지 않기 때문에 실험하기가 쉽지 않아 티타늄에 대한 연구는 미흡한 실정이다³⁾.

용접작업시 단시간에 높은 열을 발생하여 모재를 가열시키기 때문에 모재의 열팽창 및 냉각시의 수

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

축 등이 짧은 순간의 온도 변화로 인하여 국부적으로 굽힘이나 뒤틀림 등의 열소성변형을 발생시킨다.

용접할 때 발생하는 열에 의하여 조직의 결정립이 성장되며⁴⁾, 가열온도의 냉각조건에 따라 조직이 달라져서 열처리에 기계적 성질이 크게 달라진다고 보고하였다⁵⁾.

따라서 본 연구에서는 용접조건에 따른 순수 티타늄의 용접성에 대한 평가를 통하여 최적의 용접조건을 제시하고 용접조건에 따른 용접잔류응력을 측정하고자 한다.

2. 실험

2.1. 시험편 및 시험기기

본 실험에 사용한 재료는 티타늄(ASM B265, Grade2)이며, Table 2-1은 실험에 사용된 티타늄의 화학적 성분이며, Table 2-2는 기계적 성질을 나타내었다.

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 따라 5분 경과 후 다음 층의 용접이 이루어진 시험편을 C1, 층간별로 3분 경과 후 용접된 시험편을 C2, 층간별로 1분 경과 후 용접된 시험편을 C3라 칭하였다.

Ti의 모재 이음 홈 형상은 X형으로 용접을 하였고, TIG 용접하는데 사용된 용접봉은 모재와 같은 성분의 재질로 AWS ER Ti-1a를 사용하였다. 용접봉의 화학성분은 Table 2-3과 같다

Table 2-1. 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 2-2. Mechanical properties of ASTM B265 GR2

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

Table 2-3. Chemical composition of welding wire (Wt.%)

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

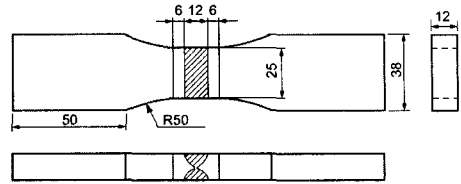


Fig. 2-1. Geometry of tensile test specimen

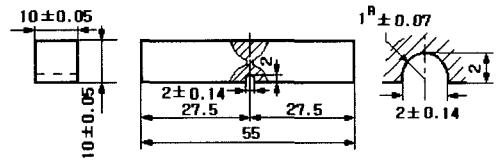


Fig. 2-2. Geometry of impact test specimen

Fig. 2-1, 2-2는 실험에 사용된 인장 시험편과 충격 시험편의 형상을 나타내고 있다. 인장 시험편은 두께 12mm의 판재를 X형 맞대기 용접한 후 와이어 커터에 의하여 가공한 후 덧살은 판의 면까지 밀링 가공하였으며⁶⁾, 연삭기로 표면을 연마하였다. 충격 시험편은 KS B 0822에 의해 샤르피 충격시험의 3호 시험편으로 제작하였으며⁷⁾, 노치는 $\phi 2\text{mm}$ 의 와이어에 의해 노치 깊이 2mm가 되도록 가공하였다.

또한, 순수 티타늄의 용접조건에 따른 잔류응력을 측정하기 위하여 용접 후 잔류응력을 측정하였는데, 일반적으로 용접 실험의 경우 비구속 용접조건(Fig. 2-4)과 같은 방법으로 용접하여 실험에 사용하고 있지만, 실제 산업현장에서 사용하고 있는 구조물에 있어서의 용접조건은 구속형 용접조건에 의하여 사용하고 있다.

따라서 본 실험에서는 실제 산업현장에서의 구조물 용접조건과 같은 효과를 내기 위하여 자체 제작한 구속 조건(Fig. 2-3)에 의하여 용접하여 변형을 구속하는 형태의 구조물의 실질적인 용접 잔류응력을 측정하여 비구속 용접조건과 구속 용접조건의 잔류응력치를 비교·검토하였다.

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

Fig. 2-3과 2-4는 잔류응력을 측정하기 위한 용접 시험편의 형상이며, 용접조건은 5패스, 용접전류는

130~140A, 아크전압은 14.5~16V, 용접 속도는 5.5~7.9cm/min, 루트 간격은 3~3.5mm, 비드 폭은 11.2mm, 실딩가스는 20~25 ℓ/min으로 용접하였다.

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 σ_x , σ_y 의 잔류응력값을 측정하였다.

스트레인 게이지는 KFG-2-120-D 16-11 Type의 게이지(Gage Length : 1 mm, Gage Factor : 2.10, Gage Resistance : $120.2 \pm 0.3 \Omega$)를 사용하였다.

Photo. 2-1은 시험편에 스트레인 게이지를 부착한 사진이다.

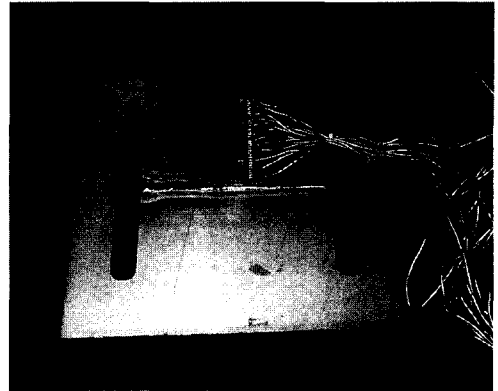


Photo 2-1. Configuration of strain gage attached position

2.2. 실험방법

본 연구에서는 용접조건에 따른 기계적 성질을 평가하기 위하여 인장시험, 충격시험, 경도시험을 행하였다.

인장시험은 항복전 인장속도는 5mm/min으로 하였고, 항복 이후의 인장속도는 10mm/min의 속도로 인장하였다. 충격시험은 샤르피 충격시험기로 해머의 타격속도는 약 5m/sec의 속도로 타격하여 실험하였다. 경도시험은 시험편의 표면을 연마지 #2,000와 킴파운드(cp1000)를 같이 사용하여 연마한 후 산화알루미나(Al_2O_3 , $0.3 \mu m$)로 래핑 가공하였으며, 실험에 사용한 하중은 500g, 하중작용시간 30sec의 조건 하에서 용착부에서부터 본드부, HAZ, TAZ까지 2mm 간격으로 각각 측정하였다.

또한, 비구속 용접조건과 구속 용접조건의 잔류응력치를 비교하기 위하여 단면법에 의하여 잔류응력을 측정하였는데, 게이지의 부착은 부착 위치를 선정한 다음 세척제를 이용하여 시료의 표면에 붙어 있는 오염물질을 제거하였으며, 컨디셔너를 몇 방울 뿌린 다음 샌드페이퍼 #200~1500으로 연마한 후 표면이 매끄럽게 되도록 연마를 하였다. 다음은 중화제를 이용하여 다시 한번 부드러운 연마를 한 뒤 표면을 거즈로 깨끗이 닦아냈다.

게이지의 부착은 게이지에 손상이 가지 않게 조심하여 본딩하였으며, 이물질로 인한 데이터의 오차를 최소화하기 위하여 코팅제로 도포하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 인장시험

Fig. 3-1을 보면 용접 패스수에 따른 인장시험 결

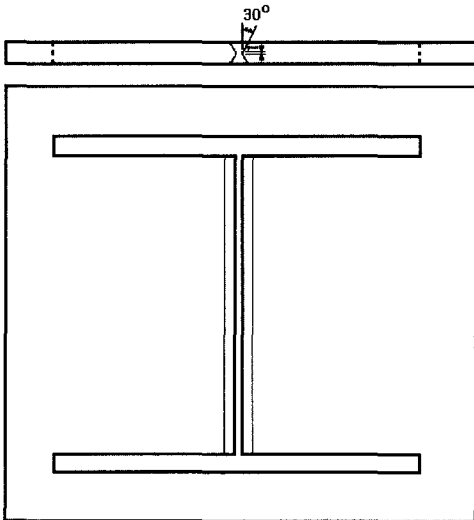


Fig. 2-3. Restraint welding condition (SPC-1, 2)

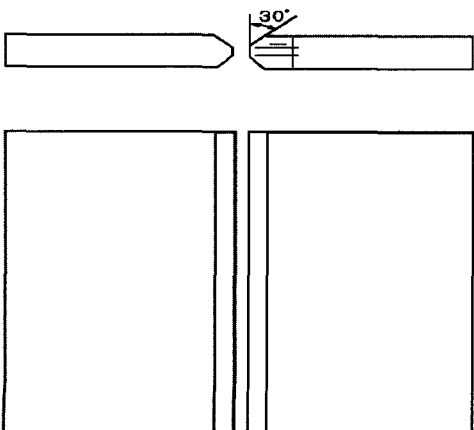


Fig. 2-4. Nonrestraint welding condition (SPC-3, 4)

과를 나타낸 것으로서, 용접 패스수가 적은 A1 시험편이 연신율은 적은 반면 인장강도는 가장 높게 나타났다.

또한, Fig. 3-2는 실딩가스의 양에 따른 용접방법으로서 실딩가스의 양이 25 l/min의 용접조건에 의하여 용접한 B3 시험편이 인장강도와 연신율이 가장 높게 가장 높게 나타났다.

Fig. 3-3은 층간 용접시간에 의한 용접방법으로서 그다지 인장강도나 연신율에 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

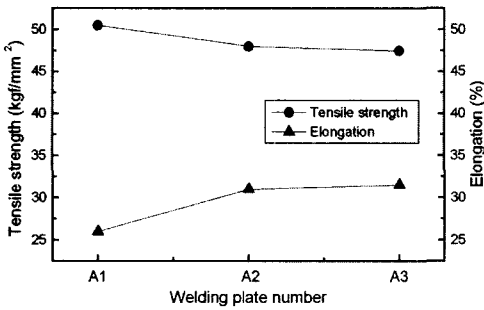


Fig. 3-1. Result of tensile test according to welding pass condition

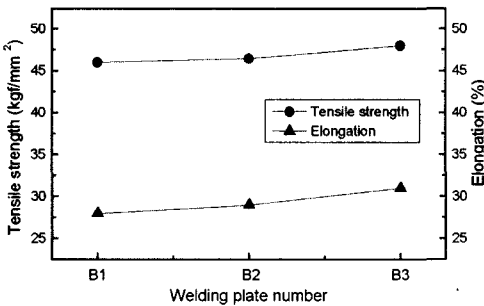


Fig. 3-2. Result of tensile test according to shielding gas amounts

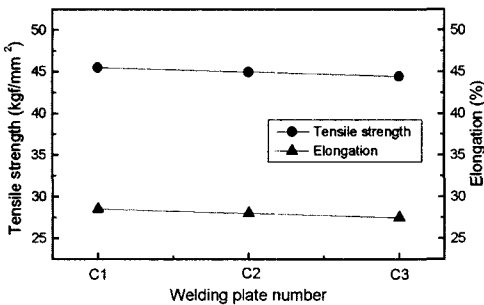


Fig. 3-3. Result of tensile test according to welding time interval

3.2. 경도시험

시험편의 용접선 가로 방향으로 용접부의 각 부위(Weld Metal Zone, Bond Zone, HAZ, Temperature Affected Zone)를 마이크로 비커스 경도계로 측정하였고, 그 실험 결과는 Figs. 3-4~3-6에 나타내었다.

Fig. 3-4는 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. 3-5는 실딩가스량에 따른 용접의 경도분포를 나타낸 것으로서 B1이 경도값이 가장 높게 나타났고, B2, B3는 거의 비슷한 양상으로 나타났다.

Fig. 3-6은 용접 패스의 시간 간격에 의한 것으로서 경도분포도 열영향부가 높은 경도분포를 나타내고 있으며, C3가 조금 높은 경도값을 나타내고 있지만 C1, C2와 거의 비슷하게 나타났다.

3.3. 충격시험

본 실험에서는 용량 30kgf·m의 샤르피 충격시험기를 사용하였다.

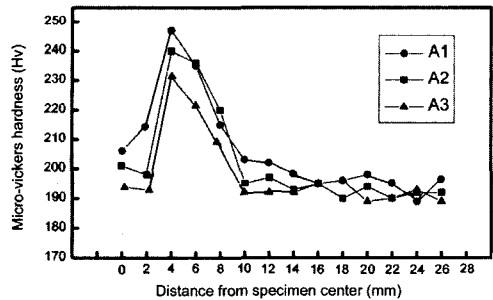


Fig. 3-4. Hardness distribution in welding according to welding pass condition

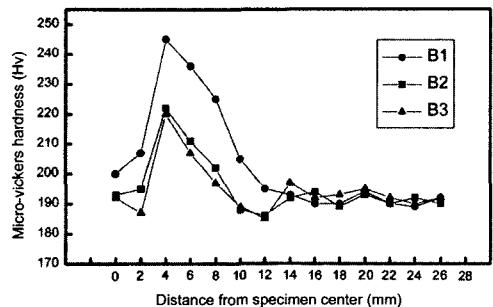


Fig. 3-5. Hardness distribution in welding according to shielding gas amounts

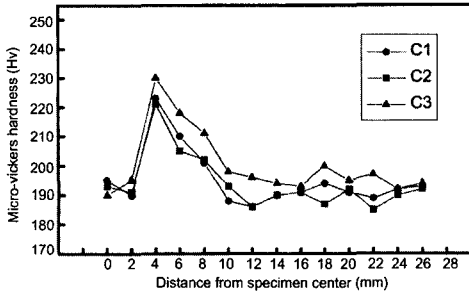


Fig. 3-6. Hardness distribution in welding according to welding time interval

Figs. 3-7~3-9는 본 실험에 의하여 구해진 시험편들의 흡수 에너지값을 나타내고 있다.

Fig. 3-7에서 7패스의 A3가 흡수에너지가 가장 높게 나타났으며, 패스 수가 증가함에 따라 흡수에너지가 높아지는 경향을 나타내었다.

Fig. 3-8은 실딩가스량에 의한 용접조건으로서 B3 시험편이 가장 흡수에너지가 높은 것으로 나타났으며, 실딩가스가 적은 시험편일수록 흡수에너지가 다소 떨어지는 것으로 나타났다.

Fig. 3-9는 층간 용접시간에 따른 흡수에너지값을 나타낸 것으로서, 다소 차이가 있지만 거의 비슷한 흡수에너지를 나타내고 있으므로 층간 용접시간 간격에 따른 충격 흡수에너지의 값에서는 거의 영향을 받지 않는 것으로 나타났다.

3.4. 단면법에 의한 용접잔류응력 분포

Figs. 3-10~3-13은 단면법에 의한 용접 잔류응력을 측정된 실험결과를 나타내었다.

본 연구에 사용한 티타늄 재질에서는 용접잔류응력의 크기는 σ_x 및 σ_y 성분 모두 다소 작게 측정되었으며, Figs. 3-10~3-13에서 볼 수 있다. 또한, 용접선 길이방향으로 잔류응력의 분포양상을 보면, 용접 시간부와 종단부의 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. 3-10~3-13에서 알 수 있듯이 열영향부 근방에서 길이방향의 잔류응력이 폭 방향의 잔류응력에 비해 높게 나타났다. 이것은 폭 방향의 경우가 길이 방향의 경우에 비해 용접열의 냉각속도가 빠르기 때문으로 생각된다. 잔류응력값이 최대로 보이고 있는 지점이 열영향부 및 그 근방임을 알 수 있었다.

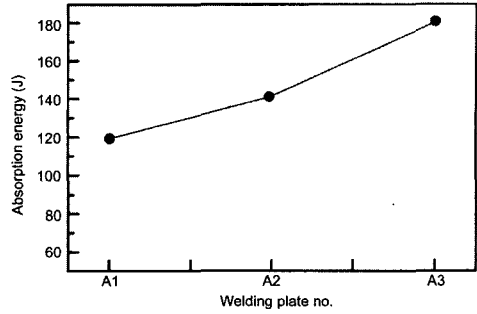


Fig. 3-7. Result of impact test according to welding pass condition

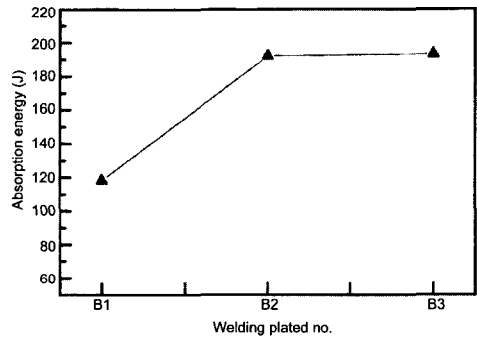


Fig. 3-8. Result of impact test according to shielding gas amounts

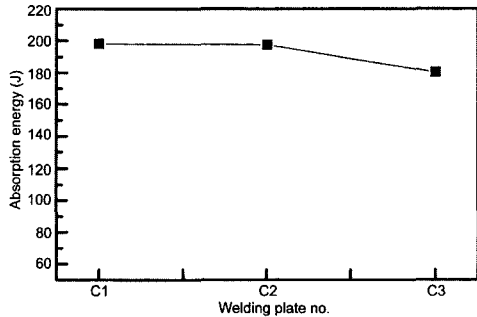


Fig. 3-9. Result of impact test according to welding time interval

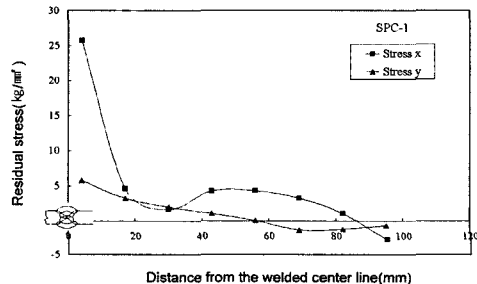


Fig. 3-10. Distribution of the welded residual stress for SPC-1

Fig. 3-10과 3-11은 시험편 자체에서 구속한 형태로 용접한 이음부의 용접잔류응력을 측정된 결과인데, 용접과정에서 용접잔류응력이 높아졌음을 알 수 있었다. 용접잔류응력의 분포상태를 보면 전형적인 외적 구속방법과 같은 형태로 나타났으나, σ_x 방향 성분 용접잔류응력이 모두 인장잔류응력으로 측정되었다. 용접중심선으로부터 5~20mm사이에서 급속도로 작아졌으며, 20~40mm사이에서 가장 작은 용접잔류응력이 측정되었다. 또한 σ_y 방향의 용접잔류응력은 용접 중심선으로부터 60mm 거리에서 인장잔류응력이 압축잔류응력으로 변화하였다.

Fig. 3-12와 3-13은 비구속 상태에서 용접한 이음부의 용접잔류응력을 측정된 결과이다. 시험편의 일반적인 형태로 용접중심선 근방의 열영향부에서 σ_x 방향 성분은 인장잔류응력이 측정되었으며 용

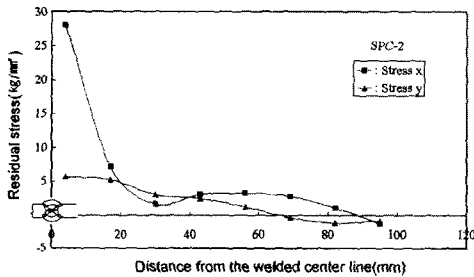


Fig. 3-11. Distribution of the welded residual stress for SPC-2

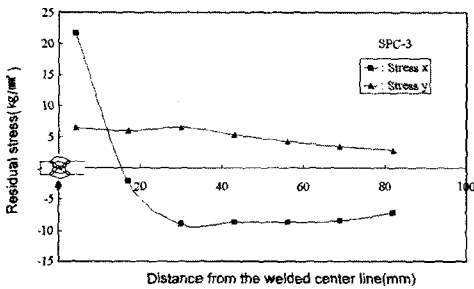


Fig. 3-12. Distribution of the welded residual stress for SPC-3

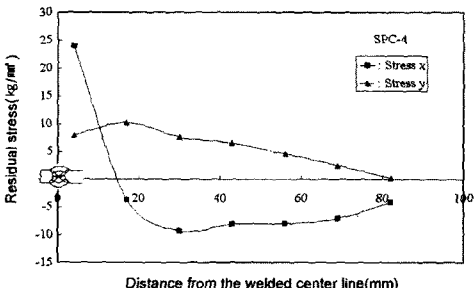


Fig. 3-13. Distribution of the welded residual stress for SPC-4

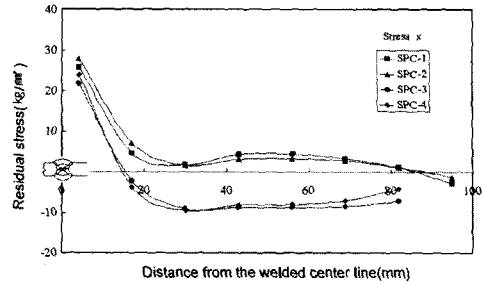


Fig. 3-14. Distribution of the welded residual stress in the σ_x

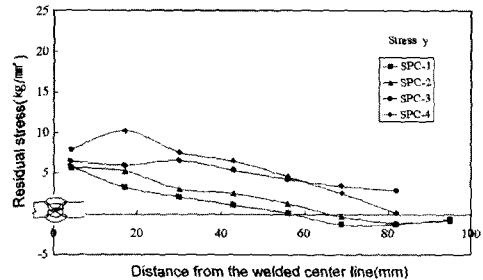


Fig. 3-15. Distribution of the welded residual stress in the σ_y

접 중심선으로부터 15~18mm 거리에서 급속도로 압축잔류응력으로 변화하였다. 또한 Fig. 3-10과 3-11에서 보다 σ_x 방향성분 잔류응력이 낮게 측정되었다. 이것은 구속조건의 차이인 것으로 사료되며 σ_y 방향의 용접잔류응력은 모두 인장 잔류응력으로 측정되었다. 용접중심선으로부터 멀어질수록 잔류응력값이 미소하게 작아짐을 알 수 있었다.

Fig. 3-14에서는 σ_x 방향의 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. 3-15에서는 σ_y 방향의 용접잔류응력에 대한 시험편 자체 구속한 시험편과 비구속 방법에 의하여 제작된 시험편에 대하여 도표화 한 것이다. 비구속 방법이 시험편 자체 구속한 시험편에서 보다 다소 높게 측정되었으며, 이것은 σ_x 방향의 측정결과에서 알 수 있듯이 시험편 자체 구속한 상태가 상대적으로 큰 것은 σ_y 방향의 용접잔류응력을 감소시켰던 것으로 생각된다.

4. 결론

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

1) 동일한 용접조건에서 패스 수에 따라 4패스는 7패스와 비교하였을 경우 인장강도가 10%정도 높게 나타났고, 연신율은 30%정도 감소함을 알 수 있었다. 또한 실딩가스량이 많고, 용접 후 자연냉각 시간간격이 길수록 인장강도는 높게 나타났고, 연신율은 감소하였다.

2) 충격 흡수에너지값은 4패스는 7패스에 비해 50%정도 감소하였으나, 실딩가스량이 많을수록 높게 나타났으며, 용접 후 자연냉각 시간간격에는 비슷하였으나 용접 후 자연냉각 시간간격이 적은 것은 조금 감소하였다.

3) 용접잔류응력은 구속용접의 경우가 비구속용접일 때보다 훨씬 높게 나타났고, 구속 용접의 경우 σ_x 방향의 용접잔류응력은 모두 인장잔류응력으로 측정되었고, 비구속용접의 경우 σ_x 방향의 용접잔류응력은 용접 중심선으로부터 약 15~20mm에서 인장잔류응력이 급속도로 압축잔류응력으로 변화하였다.

4) 구속 용접의 경우 σ_y 방향의 용접잔류응력은 용접 중심선으로부터 약 60mm에서 인장잔류응력이 압축잔류응력으로 변화하였고, 비구속용접의 경우 σ_y 방향의 잔류응력은 모두 인장잔류응력으로 측정되었다.

감사의 글 : 이 논문은 2001년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었음

참고문헌

- 1) 최병기, 국중민, 티타늄 용접재의 피로크랙 성장 거동에 관한 연구, 한국산업안전학회지, 16권, 3호, pp. 7-11, 2001.
- 2) W. A. Blaeslack and C.M. Banas, 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 Collocated 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) 徐昌敏, 金楨圭, “破而解析과 그 應用(III)”, 大韓機械學會誌, 24-3, pp. 193-202, 1982.
- 5) Shin., 鋼 鎔接後 鎔接部가 機械的 性質에 미치는 영향에 關한 研究, 공학석사학위논문, 청주대학교 산업 경영대학원 공업재료공학과, 1989.
- 6) 선급 및 강선규칙, 제 2편 재료 및 용접, 한국선급, Vol. 2, pp. 58-59, 1998.
- 7) 최병기의 3명, 개정재료시험입문, 원창출판사, Vol. 1, pp. 121-147, 2000.