

저탄소 박판 강재의 Nd:YAG 레이저 용접부 형성에 미치는 공정변수의 영향

김기철* · 허재협**

*포항산업과학연구원 설비용접연구팀

**한국냉각캔주식회사

Effect of Process Parameters on Bead Formation in Nd:YAG Laser Welding of Thin Steels

Ki Chol Kim* and Jae Hyoub Heo**

*Welding & Structural Integrity Research Team, RIST, Pohang 790-600, Korea

**Korea Self-Cooling Can, Inc., Seoul 135-010, Korea

Abstract

This study deals with high power Nd:YAG laser welding of thin steels for small pressure vessels. Full penetration welding at the overlap joint was performed so as to assure sufficient weld strength. Results showed that mid-depth weld size reduced drastically with increasing the travel speed. Position of focus had little effect on the bead formation even though short focal system was used. However, the shape factor and the bead width had closely related with the position of focus.

Based on the microstructural inspection, acceptable weld was obtained when the overlap clearance was controlled up to 20% of the base metal thickness. In the case that the joint contained more clearance than the critical value, both the tensile shear strength and the tear strength were reduced. Results also demonstrated that shielding gases were proved to play a key role as far as the bead formation characteristics was taken into consideration. Blowing dry air through 5mm in diameter nozzle produced narrower bead cross-section than that of argon or nitrogen shielding.

(Received February 14, 2001)

Key Words : Nd:YAG laser welding, CW laser, Thin gage steel, Weldability

1. 서 론

고출력 Nd:YAG 레이저 가공은 산업적으로 매우 중요하며 제조업, 특히 자동차 공업을 중심으로 생산라인에서 결코 제외될 수 없는 위치를 차지하고 있다^{1,13)}. 최근에는 성능면에서 높은 신뢰도를 가진 대출력 레이저 가공기가 매우 다양한 기능을 제공하고 있고, 장치 규모의 소형화와 주변기기의 고급화가 이루어지고 있으며 설비 및 소모품의 공급여건도 대폭 향상되어 최종 생산제품에 대한 소비자의 까다로운 요구와 생산성에 대응하고 있다. 이러한 환경은 대출력 레이저 가공

기가 종래의 가공기와 비교하여 초기 투자비와 운전비가 높음에도 불구하고 도입하는 원인이 되고 있다.

한편, 각종 용기로 사용되는 박판강재는 냉간압연재에서 도금강재에 이르기까지 용도와 목적에 따라 매우 다양하다. 이러한 강재를 이용하여 용기를 만들 때에는 어떠한 방법이든 접합기술이 동원되어야 하며 용기의 몸체는 대부분의 경우 고속 저항용접기술^{14,16)} 등을 쓰고 있다. 종래의 용접기술은 용기의 크기가 비교적 커서 용접장치를 통한 에너지 공급의 용이성 확보는 물론 용접선의 형태도 단조로워야하는 제한점을 가지고 있다.

그러나, 특수목적용 소형용기 중에서 열교환 효율을

중요시하는 경우에는 용기의 표면적 확보를 위하여 필연적으로 냉각핀 또는 플랜지 구조로 제작되어야한다. 또 용기의 직경이 작아서 용접 헤드의 접근이 곤란하거나 하나의 연속된 접합선에 직선과 비직선 용접을 동시에 실시하여야 하는 경우에는 종래의 용접법 적용이 불가능하다. 이와 같은 용기의 제작에 관한 지금까지의 문헌¹⁷⁻¹⁸⁾들은 용접기법을 사용하지 않는 방향으로 연구를 진행하여왔으나, 그 경우 용기의 형태가 필요 이상으로 커지거나 복잡하게 될 뿐만 아니라 변형된 구조는 원래 목표로 하는 성능을 발휘하는데 한계가 있었다.

본 연구는 이상과 같은 점을 감안하여 상업생산된 저탄소 박판 강재로 소형압력용기를 제조할 때 고효율 Nd:YAG레이저 용접기술을 이용함으로써 용기의 기능과 기계적 성능 등 요구조건을 확보할 수 있는 방안을 제시하는데 목표를 둔 것이다.

2. 실험방법

2.1 실험용 강재

실험용 강재는 제철라인에서 상업적으로 생산된 저탄소 냉간압연재였으며 모재의 공칭 두께는 0.32mm였다. 이러한 강재는 소형 용기의 제조에 사용되는 중요 소재이며 모재의 화학적 성질을 Table 1에 제시하였다.

Table 1 Chemical compositions of base metal(wt%)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Al	Cu
0.060	0.002	0.289	0.013	0.009	0.013	0.011	0.051	0.012

2.2 레이저 용접성 평가

판재 형태로 제조된 시험재는 실험에 필요한 크기인 50mm×100mm로 절단한 다음 고효율 Nd:YAG 용접장치를 이용하여 용접을 실시하였다. 용접 이음부의 형태는 높은 열교환 성능을 가진 소형용기의 제조를 목표로 하였기 때문에 겹치기 이음이었으며 통상의 절단면과 압연 표면 그대로의 조건을 이용하였다. 준비된 시험재는 레이저 출력 0.5~3kW 범위에서 용접속도를 가변 하였으며 최고 150mm/s까지의 범위에서 실시하였다.

레이저 출력과 용접속도 이외에 초점 위치와 이음부 간극 및 보호가스의 종류와 유량 등을 실험의 변수로 사용하였다. 박판재료의 용접에서 이음부의 간극을 재현성 있게 부여하는 것이 매우 어렵기 때문에 본 연구에서는 소정의 삽입재를 사용하여 용접을 실시하되 용

접부 단면조직 검사를 거쳐 시행착오법으로 한계 간극을 도출하였다.

Fig. 1은 실험에 사용된 강재의 겹치기 용접부 형성에 미치는 용접조건에 미치는 영향을 알아보기 위한 비드 단면 형태 모식도이다. 본 실험에서는 그림에 표시된 형태변수를 용접조건과 대응시키면서 적정 용접조건 범위를 설정하였다. 한편, 용접부의 기계적 특성은 Fig. 2와 같은 형상과 크기의 시험편을 사용하여 용접부 전단인장 강도와 파열강도를 측정함으로써 용기를 제조하였을 때 가져야할 내압성능을 간접적으로 평가하고자 하였다¹⁹⁾. 그밖에 용접부 단면의 미소경도 분포는 0.98N의 하중 조건에서 0.5mm간격으로 측정하였다.

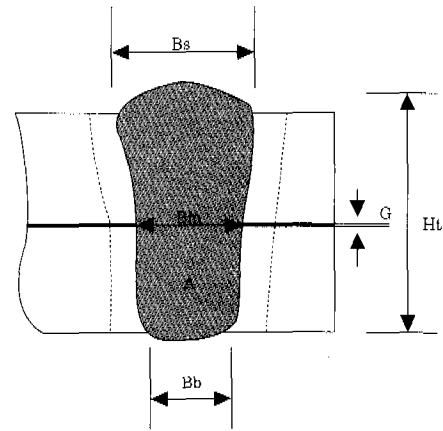


Fig. 1 Schematic diagram of bead shape parameters used in this study

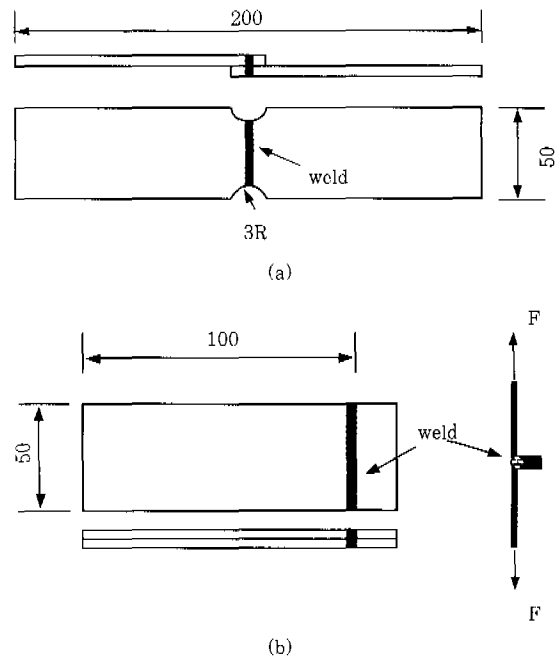


Fig. 2 Specimens for tensile shear test(a) and tear test(b)

3. 실험결과 및 고찰

3.1 용접부 형성에 미치는 공정 변수의 영향

3.1.1 용접속도 및 레이저 출력

Fig. 3은 비드의 형성에 미치는 용접속도와 레이저 출력의 상관성을 나타낸 것이다. 이 실험에서 사용한 보조가스는 고순도 질소였고 5mm 직경의 노즐을 통하여 196kPa의 압력으로 취입하였으며 레이저 집속광의 위치는 시료 표면에 두었다. 실험 결과에 의하면 완전용입 조건에서 레이저 출력 1kW로 용접이 실시된 경우, 표면 비드의 폭(B_s)이 겹치기 두께 보다 약간 크며 안정적인 형태를 이루고 있다. 즉 용접속도 실험 영역인 50~120mm/s 범위에서 $0.62\text{mm} \leq B_s \leq 0.69\text{mm}$ 를 보이고 있다. 그러나 출력이 증가하면서 B_s 값은 갑자기 증가하여 주어진 용접속도에 거의 관계없이 0.85mm 정도의 과대한 비드폭을 형성하고 있다. 따라서 본 실험과 같은 박판강재로 소형 용기를 제작하는 겹치기 이음의 경우 레이저 출력은 1kW 내외가 바람직한 것으로 생각된다.

겹치기 이음부의 접합폭(B_m)은 용접에 의하여 용기를 만들었을 때 용기의 기계적 강도와 안전성 확보를

위하여 중요한 요소이다. Fig. 3의 아래 부분은 용접조건과 B_m 과의 관계를 알아 본 것으로 레이저 출력이 1kW로 낮은 경우 용접속도의 증가에 따라 B_m 값의 급격한 하락이 관찰되고 있다. 실험 결과의 아래 그림에서는 B_m 이 모재두께(T_{BM})와 같은 값이 되는 위치를 표기하고 있는데 이것은 B_m 값이 적어도 T_{BM} 과 같거나 그 이상 되어야 용접부의 기계적 강도가 만족될 것이라는 가정을 나타내는 한계선이다. 레이저 출력을 높인 조건으로 용접이 이루어지면 용접속도에 무관하게 $B_m \geq T_{BM}$ 이 만족되고 있다. 그러나 그 조건에서는 B_s 의 지나친 성장을 일으키기 때문에 출력 1kW에서 용접속도 100mm/s 미만으로 제어하는 것이 적절함을 알 수 있다.

Fig. 4는 레이저 출력과 용접속도가 비드 형상에 미치는 영향을 확인하기 위한 용접부 단면조직 사진이다. 사진 a는 출력 1kW에서 용접속도 50mm/s인 경우이며, b는 3kW에서 150mm/s였다. 사진에서 알 수 있듯이 적정용접 조건으로 생각되는 a 조건에서는 직사각형의 바람직한 용접부가 얻어졌으나 속도가 150mm/s인 경우는 출력을 높였으나 비드 단면형태가 불안정하였다.

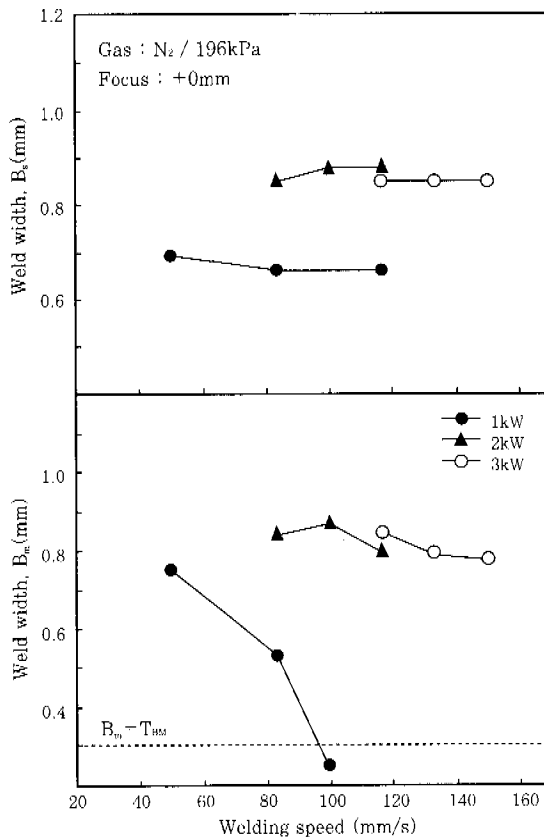


Fig. 3 Effects of welding speed and applied power on weld formation

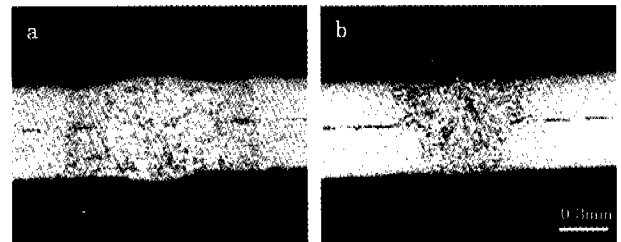


Fig. 4 Weld cross-section showing the effects of speed and applied power
a: P=1kW, v=50mm/s
b: P=3kW, v=150mm/s

3.1.2 용접속도 및 초점 설정위치

Fig. 5는 레이저 출력 1kW에서 질소를 보조가스로 사용하였을 때 용접속도 25~50mm/s 범위에서 집속광의 초점 위치가 용입깊이(H_i)에 미치는 영향을 조사한 것이다. 초점 위치 설정 범위는 재료표면의 상부 3mm에서 하부 4mm까지 전체 거리 7mm를 변화시켰으나 실험 결과에서 알 수 있는 바와 같이 모든 속도 영역과 초점위치에 H_i 값은 그다지 큰 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 본 연구에서 사용된 용접 광학계의 초점거리는 75mm로 짧았기 때문에 기하학적 초점심도 또한 작다는 점을 감안할 때 이 실험의 초점위치 설정 범위는 상대적으로 매우 큰 값이다. 이와 같은 결

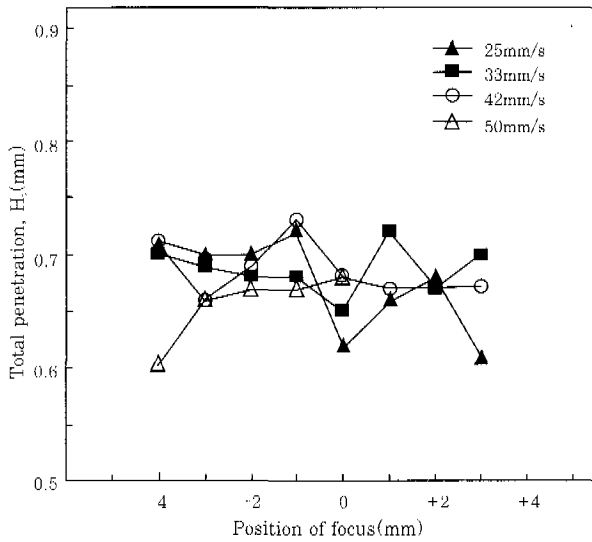


Fig. 5 Effects of position of focus and welding speed on total penetration

과가 얻어진 이유는 기본적으로 완전용입을 충족하는 용접조건 범위에서 실험이 실시되었기 때문으로 생각된다. 이러한 조건에서는 레이저 용접에서 나타나는 이른바 비드첸이 효과에 둔감하거나 거의 나타나지 않는다는 보고¹⁸⁾와도 일치하는 것이다.

한편 Fig. 6은 앞서의 실험과 동일한 용접 조건에서 얻어진 용접비드의 형상계수 즉 표면 비드폭(B_s)과 이면 비드폭(B_b)의 비 및 겹치기 이음부의 접합폭(B_m)을 초점위치에 대하여 정리한 것이다. 이 실험 결과를 살펴보면 Fig. 5의 결과와 분명한 차이가 나타나 있다. 즉, 비드의 형상계수와 초점위치와의 관계에서는 집속광의 초점이 재료의 표면에 있을 때 $0.9 \leq B_s/B_b \leq 1.2$ 로 다른 조건에 비하여 작은 값을 나타내고 있다. 이와 같이 B_s/B_b 값이 1.0에 근접하여 있다는 것은 비드의 상부폭과 하부폭이 유사하여 사각형을 만들었다는 의미가 되어 내압을 필요로 하는 용기용 박판의 겹치기 이음에서는 바람직한 형태이며 그 범위를 허용범위(AR_1)로 표기하였다. 그러나, 이 경우 용접속도가 지나치게 낮으면 입열량이 과대하게 증가하는 것과 같은 효과가 있으므로 주의가 필요하다.

또 Fig. 6의 아래 그림에서는 B_m 이 초점위치와 어떠한 상관관계가 있는지를 조사한 것이다. 이 실험 결과에서도 앞서의 결과와 유사하게 재료의 표면 근처에 초점이 있을 때 가장 넓은 B_m 값을 나타내고 있다. 이 그림에서는 상대적으로 큰 B_m 값을 보이는 구간을 허용범위로 정의하고 AR_2 로 표기하였는데 그 영역은 AR_1 보다 다소 넓게 나타났다. 이상의 결과를 정리하면, 박판 강재를 완전 용입조건으로 용접할 때 초점 위치는 용입특성에 영향을 미치지 않으나 비드의 형상계

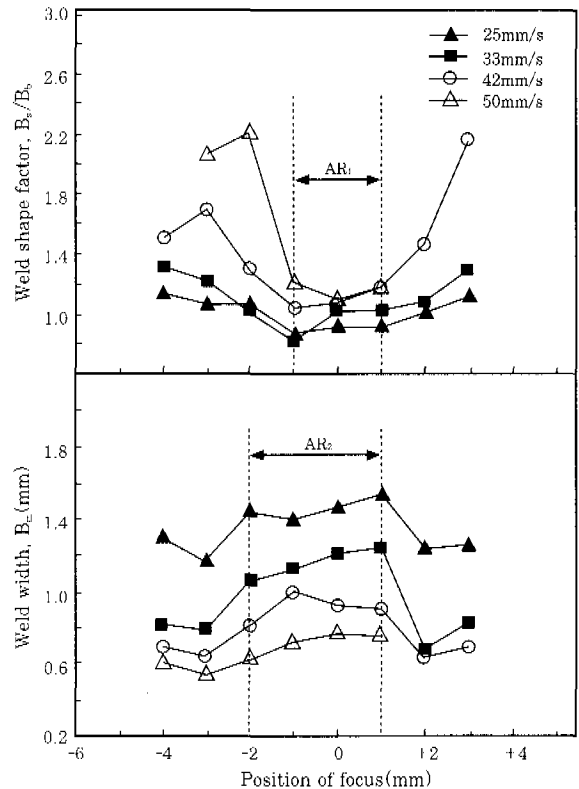


Fig. 6 Effects of position of focus and welding speed on bead formation

수와 접합부 폭에는 비교적 예민하게 작용하고 있으므로 용접부 신뢰도 확보를 위하여 적정 작업영역의 설정이 필요하였다.

3.1.3 겹치기 간극

Fig. 7은 겹치기 간극이 용입특성에 미치는 영향을 조사한 것이다. 간극의 부여량은 소재 두께를 기준으로 최대 40%(실제 간극량: 최대 0.13mm)였으며 각각에 대하여 용접속도 33~67mm/s 조건 범위에서 출력 1kW로 용접을 실시하였다. 실험 결과 거의 모든 간극 영역에서 모재의 겹치기 두께(T_{BM})와 동등 또는 그 이상의 용입을 이루고 있다. 그러나 간극량이 큰 조건에서는 용접속도에 따라서 용입깊이의 산포도가 증가하는 경향을 보인다. 그림에서 흰 점들은 용접 후 판벌어짐이 발생하여 적절한 용접부라고 보기 어려운 결과를 나타내고 있는 것들이다. 한편, 용접속도가 높은 실험조건(67mm/s)에서는 접합부 간극이 20% 이상인 경우에 H_t 의 부족이 관측되었다. 따라서 용접속도가 높을수록 접합부 간극의 관리가 중요하다는 것을 알 수 있었다.

Fig. 8은 접합부 간극이 B_m 에 미치는 영향을 측정하는 것이다. 이 실험에서는 Fig. 7의 결과와 다르게 간극이 증가할수록 B_m 도 비례하여 커지고 있음을 볼 수 있다.

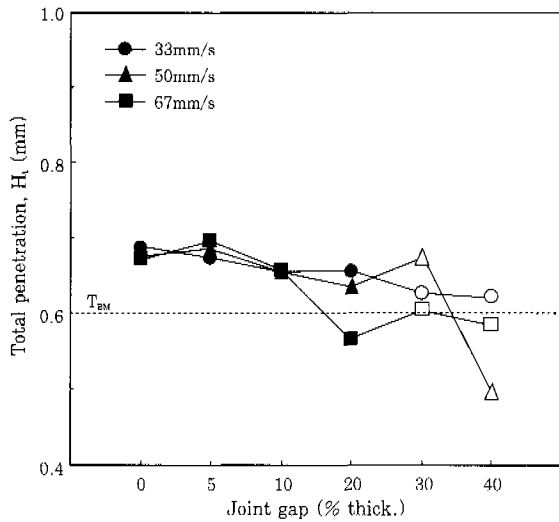


Fig. 7 Effects of joint gap and welding speed on total penetration

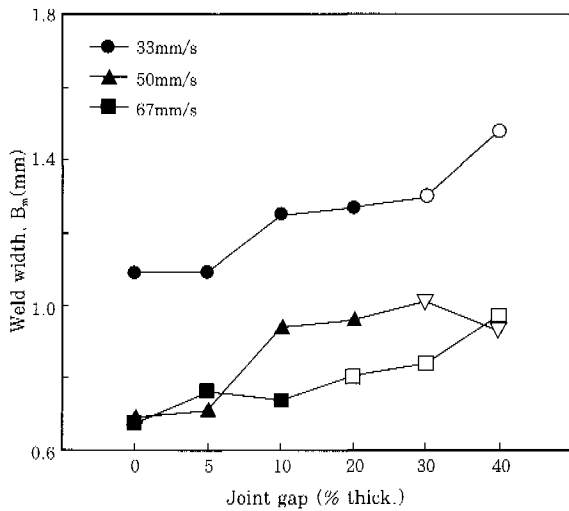


Fig. 8 Effects of joint gap and welding speed on bead penetration

모든 용접조건에서 수치의 차이는 있으나, 접합부 간극증가에 따른 B_m 증가율은 비슷하였으나 용접속도가 가장 낮은 조건에서는 다른 결과에 비하여 B_m 값이 월등하게 크게 나타났다.

이 실험 결과는 일견하여 간극의 증가가 접합부의 크기를 증가시키므로 바람직한 것으로 생각할 수 있겠으나 그림에서도 흰 점들로 표기된 영역에서는 조직시험에서 접합부 크기의 비정상적 성장이 확인된 것들이다¹⁹⁾. 따라서 용접속도를 낮춘 조건으로 용접이 실시되면 간극의 허용범위를 모재 두께의 20%까지 적용 가능하였으나 속도가 증가된 용접조건에서는 그보다 좁은 범위로 간극을 제어하여야 양호한 겹치기 용접부를 얻을 수 있음을 확인할 수 있었다.

겹치기 용접부의 비드 단면 형상은 Fig. 9에 제시하였다. 사진에서 a와 b는 겹치기 간극 20%에서 속도

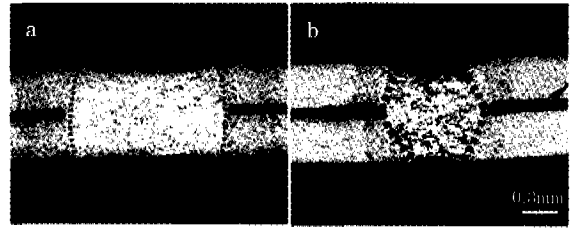


Fig. 9 Weld cross-section showing effects of joint gap and welding speed
 a: $G=20\%$, $v=33\text{mm/s}$
 b: $G=20\%$, $v=67\text{mm/s}$

를 각각 33mm/s와 67mm/s로 용접한 결과를 나타내고 있다 이 때의 레이저 출력은 동일하게 1kW를 사용하였는데 사진에서 알 수 있듯이 속도가 낮은 경우에는 간극이 증가하였음에도 불구하고 비드의 단면이 거의 직사각형을 이루고 있다. 그러나 용접속도가 빠른 실험에서는 비드의 단면 형태가 배부른 모양을 보이고 있으며 간극이 미소하게 증가됨에 따라 상부 비드의 함몰이 뚜렷하게 나타나 있다. 이러한 결과로부터 알 수 있는 것은 고속 용접시 간극의 제어범위를 조금만 벗어나면 모재와 용접부 경계면에서 꺾임이 발생하고 심할 경우에는 이 부분의 단면적 감소를 유발할 수 있다.

3.1.4 보조가스의 종류와 취입압력

용접부 단면형상이 보조가스의 종류 또는 취입 압력에 어떻게 영향을 받는지에 대한 조사 결과는 Fig. 10과 Fig. 11에 제시하였다. 이 실험에서도 레이저 출력 1kW에서 중간 정도의 용접속도인 50mm/s를 적용하였다. Fig. 10은 보조가스 조건이 B_m 과 A에 미치는 영향을 보인 것이다. B_m 과 A는 다같이 보조가스의 종류에 따라 차이를 보이고 있으나 취입압력에는 거의 영향을 받지 않음을 이 그림에서는 알 수 있다. 즉, Ar을 사용한 경우에는 N_2 를 사용하였을 때 보다 B_m 과 A가 다같이 조금 큰 값을 나타내고 있으나 건조공기를 보조가스로 사용하였을 때는 다른 경우의 약 50%를 보이고 있다. 건조공기의 경우 왜 이러한 현상이 일어났지는 본 실험에서 분명히 밝히지 못하였으나 완전용입 조건의 용접임을 감안할 때 비드 단면의 폭이 $Ar \gg N_2 \gg$ 건조공기의 순으로 좁아지고 있으며 건조공기의 경우에도 $B_m \geq T_{pw}$ 이므로 기계적 특성에 큰 영향을 주지는 않을 것으로 사료되었다.

한편 Fig. 11은 용입비 즉 H_t/B_s 를 보조가스 조건에 대하여 정리한 것이다. 여기에서 H_t/B_s 값이 1.0에 근접한다는 것은 비드 단면형상이 정사각형에 가깝다는 의미가 되는데 건조공기의 경우는 $H_t/B_s \approx 1.2$ 정도

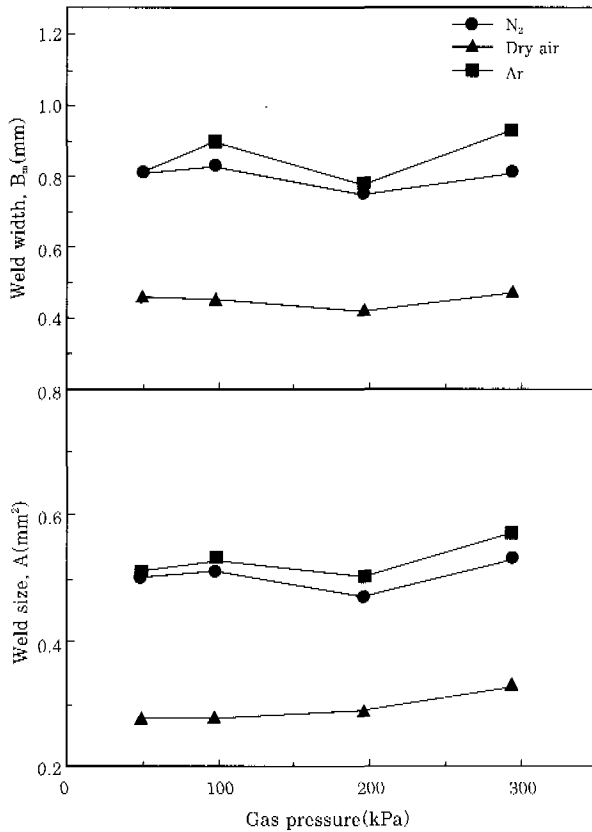


Fig. 10 Effect of shield gas on bead formation

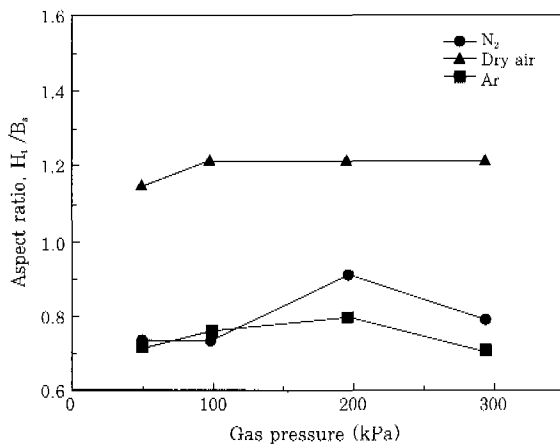


Fig. 11 Effect of shield gas on bead shape

로서 상하로 긴 직사각형 비드단면을 나타내며 Ar과 N₂의 경우는 H_w/B_w≒0.8 정도이므로 좌우가 더 긴 직사각형임을 의미한다.

3.2 용접부의 기계적 성질

Fig. 12는 용접부 경도에 미치는 레이저 출력과 용접 속도와의 관계를 나타낸 것이다. 실험 결과를 보면 용접속도 증가에 따라 미소경도값은 상승하지만 낮은 출력의 경우 그 경향이 심하였다. 한편 레이저 출력을 증가시킨 조건에서는 속도에 따른 미소경도의 상승폭이

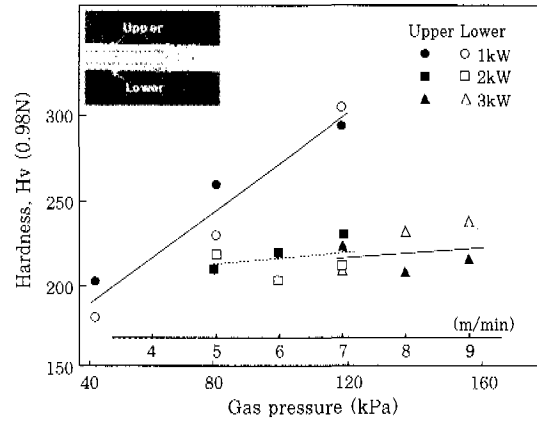


Fig. 12 Effects of applied laser power and welding speed on weld hardness

낮을 뿐만 아니라 입열에너지의 차이가 미소경도의 변화에 거의 영향을 주지 않았다. 이러한 현상은 저탄소 박판재료의 용접에서 재료가 갖는 열전달 특성과 열용량의 한계가 함께 작용하였던 것이 원인으로 생각된다.

한편, 출력 1kW로 용접이 실시된 경우 고속용접 조건에서는 300Hv 근처의 높은 값을 보였으나 용접속도를 낮춘 경우에는 Hv≤200으로 다른 어떠한 조건보다도 낮은 경도값을 나타내고 있으며 이것은 모재의 경도값과 유사한 수준이다. 본 실험에 사용된 등급의 강재를 이용하여 용기를 제조할 때 이러한 특성은 매우 중요한 의미가 있는 것이며 용접조건외의 제어로 접합부 경도 상승에 의한 인성의 저하 또는 국부적 연성 불균일로 인한 내입특성 저하를 막을 수 있는 가능성을 보여주는 것이다.

접이기 용접부의 기계적 특성을 나타내는 방법으로는 용접부 미소경도 이외에 용접부 전단인장강도와 파열강도가 있으며 Fig. 13과 Fig. 14는 그러한 실험 결과들이다. 이 그림에서도 흰 점으로 표기된 측정값은 앞서의 경우와 같이 용접부 단면조직 관찰에서 바람직하지 않은 형태를 보인 것들이다. Fig. 13은 용접속도와 접이기 간극이 용접부 전단인장강도에 미치는 영향을 보인 것이다. 이 결과에서는 간극이 증가할 때 전단인장강도가 하락하는 경향을 보이고 있는데 간극이 커짐에 따라 측정값의 산포 또한 커지고 있다. 즉, 간극이 없을 때는 측정치의 산포값이 용접속도에 따라 약 0.07kN 정도였으나 40%의 간극이 주어졌을 경우에는 0.15kN으로 증가하였다. 그러나, 용접속도는 전단인장강도와 상관성을 가지고 있지 않았다. 참고로 그림의 왼쪽 아래에 표시된 것은 모재강도(4.2kN)로서 본 실험의 측정치가 훨씬 높은 값을 알 수 있다.

Fig. 14는 용접부의 파열강도에 대하여 조사한 실험 결과이다. 이 실험에서는 용접부 전단인장강도와 다르

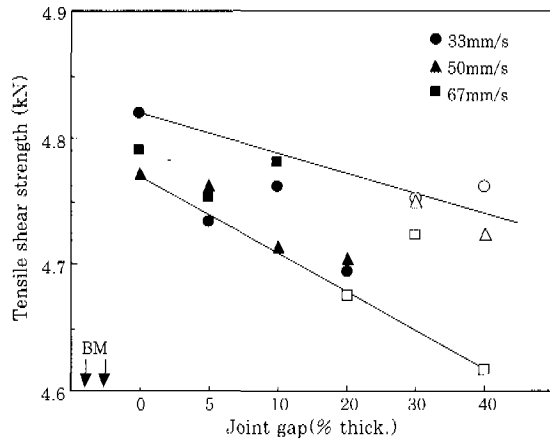


Fig. 13 Effects of joint gap and welding speed on tensile shear strength

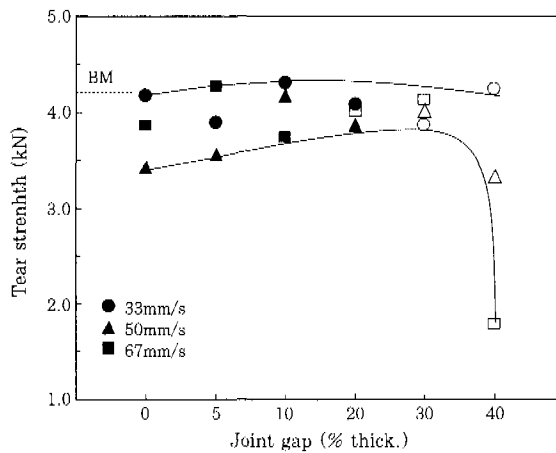


Fig. 14 Effects of joint gap and welding speed on tear strength

게 겹치기 간극 30%까지의 범위에서 거의 변함없는 값을 보이고 있었다. 이 실험에서도 용접속도가 용접부 파열강도에 영향을 미치는 증거를 찾을 수 없었다. 그러나 용접속도에 따른 측정치의 산포도는 앞의 결과에 비하여 훨씬 커서 간극 30%까지에서 약 0.9kN의 범위였으며 간극 40%에서는 약 2kN의 강도차를 보이고 있다. 한편 전술한 바와 같은 모재의 강도는 실험에서 실제로 측정된 값의 상한선과 유사한 수준이었으므로 용기 제조시에는 전단인장강도 보다도 파열강도를 좀 중요하게 다루어야 할 것으로 생각되었다.

4. 결 론

1) 판두께 0.32mm의 용기용 박판강재를 레이저 겹치기용접할 때 소정의 출력범위에서 비드폭이 안정적이지만 출력의 증가는 과도한 표면비드를 형성한다. 그러나 겹치기이음의 접합폭은 출력이 낮을 경우 용접속도에 민감하게 영향을 받으므로 레이저 출력적용에

세심한 배려가 필요하다. 즉, 레이저 출력이 높으면 용접속도에 무관하게 접합부폭이 모재 두께와 유사한 용접부를 얻을 수 있지만 표면비드의 지나친 성장을 일으키기 때문에 출력 1kW에서 용접속도 100mm/s미만이 적정한 것으로 생각되었다.

2) 완전용입 조건에서 초점위치와 용접속도는 용입특성에 거의 영향을 미치지 않는 것으로 나타났으며, 이러한 현상은 집속광학계의 초점 심도가 작은 경우에도 적용되어 레이저 용접에서 나타나는 비드천이 효과가 거의 없음을 확인할 수 있었다. 그러나 용접비드의 형상계수와 접합폭은 용접조건과 깊은 관계가 있었으며 용접속도가 증가할수록 그 영향이 뚜렷하므로 용접부 신뢰도 확보를 위한 적정영역의 설정이 필요하다.

3) 겹치기 간극의 영향을 조사한 실험에서 용접속도가 낮을 경우에는 간극량이 모재 두께의 20%까지 양호한 용접부가 얻어졌다. 그러나 간극이 큰 상태에서 용접속도가 증가하면 용입부족 또는 비드 함몰 등을 일으키는 경우가 많으며 비드 단면형태도 중앙부가 확장된 모양을 보였다. 고속 용접시에는 간극의 제어범위를 벗어나면 모재와 용접부 경계면에서 꺾임이 발생하고 심할 경우에는 이 부분의 단면적 감소를 유발하므로 기계적 특성을 손상시킬 가능성이 컸다.

4) 용접 후 비드의 단면형태는 보조가스의 종류에 따라 변화하지만 가스의 취입압력에는 거의 영향을 받지 않았다. 비드폭은 Ar>N₂>건조공기의 순으로 좁아지지만 특히 건조공기를 보조가스로 사용하였을 때 비드폭이 월등히 좁아 매우 높은 용입비를 보였다.

5) 동일한 레이저출력에서 용접속도의 증가는 미소경도값을 상승시키며 낮은 출력에서는 그 경향이 심하였고 출력을 증가시키면 용접속도에 따라 미소경도의 변화량이 낮게 나타났다. 또 용접부의 전단인장강도는 간극의 증가에 따라 하락하며 측정값의 산포도 커지나 용접속도는 전단인장강도와 상관성을 보이지 않았다. 한편 용접부 파열강도는 간극이 모재 두께의 30%까지 거의 변함없는 값을 보이며 용접속도의 영향도 불분명하였다. 그러나 용접속도에 따른 측정치의 산포도는 전단인장시험치에 비하여 상대적으로 큰 값을 보였다.

참 고 문 헌

1. F. Natsumi, K. Ikemoto, H. Sugiura, T. Tanagisawa: Laser Welding Technology for Joining Different Sheet Metals for One-Piece Stamping, JSAE Review, 12-3 (1991), 58
2. J. K. Baysore: Laser Blank Welding, IBEC 94 (1994), 60

3. M. Yoshida, Y. Yamasaki, K. Shinji, M. Ono: Formability of Laser-Welded Steel Sheets, NKK Technical Review, No.72 (1995), 25
4. J. K. Baysore, M. S. Williamson, Y. Adonyi, J. L. Milian: Laser Beam Welding and Formability of Tailored Blanks, Welding J. 74-10 (1995), 345s
5. H. Matsui: State of the Art and Subjects of Reducing Automobile Weight, 6th International Welding Symposium of JWS (1996), 287
6. 서 정, 한유희, 윤충섭, 방세운: 아연도금 강판의 CW CO₂ 레이저 용접 및 성형성, 대한용접학회지, 13-1 (1995), 577
7. 정우장: 자동차용 냉연강판의 개발 현황과 동향, 자동차공학회지, 18-5 (1996), 12
8. 김기철, 이기호, 이목영: 테일러드블랭크용 박판강재의 레이저 용접성(I), 대한용접학회지 16-1 (1998), 77
9. 김기철, 이기호, 이목영: 테일러드블랭크용 박판강재의 레이저 용접성(II), 대한용접학회지 16-2 (1998), 143
10. 이경돈: Tailored Blank에서 절단어 용접 품질에 미치는 영향, 자동차산업과 용접기술 Workshop, 대한용접학회 (1998), 46
11. 최이천, 오영근: 레이저를 이용한 Tailored Blank 차체부품 개발, 제1회 고에너지연구위원회 자료 (2000), 28
12. 이종봉, 박희동: Tailored Blank의 적용 현황과 전망, 대한용접학회지, 18-3 (2000), 5
13. 이경돈: 테일러드 블랭크 공정의 품질관리와 감시 시스템, 대한용접학회지, 18-3 (2000), 32
14. M. Sodeik, Rasselstein, Neuwied: Influences of Material Properties on Side Seam Welding of Cans made of Tinplate, Proc. of 2nd International Tinplate Conference (1982), 112
15. 小野守章, 樺澤眞事, 田中甚吉: 薄めきぶりきのシム溶接性, 鐵と鋼, 68-12 (1982), s1170
16. 田中甚吉, 樺澤眞事: 薄めきぶりきの抵抗シム溶接性, 日本鋼管技報, No. 98 (1983), 1
17. US Pat. No. 5 555 741: Self-cooling fluid container with integral refrigerant chamber
18. US Pat. No. 5 214 933: Self-cooling fluid container
19. 김기철, 허재협, 김재웅: 자가냉각캔용 Cylinder의 CW Nd:YAG 레이저 용접기술, 제2회 고에너지 연구위원회 자료 (2000), 93