

390MPa급 고장력강판의 겹치기 레이저 용접에서 부분용입 용접의 적용 가능성에 대한 연구

이 경 돈* · 박 기 영* · 김 주 관*

*고등기술연구원 시스템제어/레이저응용 센터

A Study on the Feasibility of Partial Penetration Laser Welding for the Lap Joint of 390MPa High Strength Steel Sheets

Kyoung Don Lee*, Ki Young Park* and Ju Gwan Kim*

*Center for System Control and Laser Applications, Institute for Advanced Engineering,
Yongin Kyunggi-Do, Korea

Abstract

After high power lasers are available in the commercial market, the number of applications of the laser welding has been increased in manufacturing industries. Although the tailored blank laser welding of butt jointed steel sheets is well known recently in the automotive industries, the lap joint laser welding is a new technology to the automotive manufacturing people as well as the design people. But the deep penetration laser welding seems to be preferred to the partial penetration welding for the lap joint welding in the automotive manufacturers because the partial penetration is a serious defect for the butt joint.

In this study, the feasibility of partial penetration welding for the lap joint CO₂ laser welding was studied for the 1mm thick 390MPa high strength steel sheets for automotive bodies. The process window of the lap joint partial penetration welding was obtained from experiments with the gap size and the welding speed as process parameters. The partial penetration welding was found excellent on the basis of the tensile shear strength and sectional geometry. The bead width, input energy per volume, tensile-shear strength, deformation energy and the sectional geometries after tensile-shear tests of partial penetration welded specimens are compared with those of full penetration welded specimens with a series of gaps and welding speeds.

(Received February 1, 2002)

Key Words : Partial penetration laser welding, Lap joint, Tensile-shear Strength, CO₂ Laser welding, High strength steel sheets of 390MPa, Gap effect, Welding speed effect

1. 서 론

최근 들어 고출력 레이저가 등장한 이래 이를 응용한 공정기술이 점차 확산되고 있으며 기존의 저항용접이나 아크 용접을 대체해 가고자 활발히 연구되고 있다. 특히 자동차 산업에서 고출력 레이저를 이용한 용접은 새로운 가공 기술에 속한다¹⁻³⁾. 테일러드블랭크 레이저 용접 기술이 자동차에 도입되어 보편화 되었으나 아직도 많은 생산 및 설계 기술자들에게 레이저 용접은 익

숙하지 않은 공정임에는 틀림이 없다. 특히 자동차의 점용접을 대체하고자 하는 노력의 하나로 겹치기(lap joint) 레이저 용접이 도입되기 시작하고 있으며 국내에서도 극히 일부의 품목에 제한적으로 사용하고 있다⁴⁾. 더욱이 겹치기 레이저 용접의 자료는 주로 외국 장비업체에 의존하는 실정이고 자체적으로 공정이나 품질에 대한 데이터가 부족한 실정이다. 기존의 테일러드블랭크 용접이 1차원의 맞대기 용접으로 현재 어느 정도 데이터가 축적된 것과는 달리 겹치기 상태의 차체용접은 3차원의 용접선을 가지며 가장 간단한 형상이라 하더라도

도 3차원의 완만한 곡선의 형태를 갖는다. 또한 지금까지의 논문들은 대부분 완전용입 조건을 전제로 기술한 것들이며 가전용품에 사용되는 박판에 대하여 부분용입의 조건과 효용에 대하여 탐구한 문헌이 있으니⁵⁾ 자동차용 강판의 겹치기 용접에 대하여 부분용입과 완전용입에 대한 공정 기준이나 선택에 대하여 비교한 연구 결과는 아직 드물다.

본 논문에서는 3차원 차체의 겹치기 레이저 용접에서 부분용입 용접을 적용하기 위한 기초 자료를 얻고자 하였다. 부분용입 용접의 품질을 완전용입 용접의 것과 비교하여 부분용접의 적용 가능성을 검토하였다. 이를 위하여 자동차용 고장력 강판의 평면 시편에 대한 겹치기 레이저 용접 시험을 실시하였으며 완전용입과 부분용입의 최적 공정 조건을 찾기 위하여 부분용입과 완전용입의 용접특성을 비교하였다.

2. 실험방법

2.1 사용재료 및 장비

본 연구에서 겹치기 용접용으로 사용한 판재는 자동차의 차체에 많이 쓰이는 390MPa급의 고장력강으로 두께 1mm의 판재이다. 이의 성분과 기계적 성질은 Table 1과 2에 실었다. 용접시험에 사용된 장치는 4kW CW CO₂ 발전기와 4축 NC로 이루어진 레이저 용접기이다. 차폐가스(shield gas)로 아르곤(Ar) 가스를 사용하고 가스 유량은 28.3/min로 고정하였다. 가스노즐은 용접 진행방향에 위치하며 약 45도의 경사각을 갖는다. 겹치기 용접시편은 두 개의 판재를 겹쳐서 용접선 좌우로 두 개의 고정구를 사용하여 고정하였으며 고정구 사이의 간격은 4mm 이다. 용접시험 장치의 모습을 Photo. 1에 실었다.

2.2 겹치기 레이저용접 시험

2.2.1 시험목적

용접속도와 판재간격에 따른 부분용입 용접 시험을

Table 1 Chemical composition of APFC390

C	Mn	P	Si	S	S-Al
0.026	0.50	0.08	0.03	0.020	0.035

Table 2 Mechanical properties of APFC390

Young's modulus	Total Elongation	Yield strength	Tensile strength
210 GPa	38.0%	270MPa	389MPa

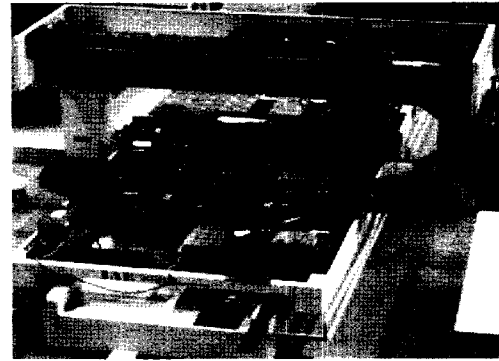


Photo. 1 Laser welding machine

실시하여 부분용입 용접특성을 분석하고 완전용입의 용접특성과 비교하여 차체의 겹치기 용접에서 부분용입을 적용한 레이저 용접의 타당성을 제시하고자 한다. 이를 위하여 평면 시편에 대한 1차원의 겹치기 레이저 용접 시험을 실시하였으며 부분용입 용접의 단면형상과 인장-전단 강도의 관점에서 완전용입 용접과 비교하여 그 효용성을 입증한다.

2.2.2 시험방법 및 조건

두께 1mm의 APFC390 판재를 두 장 겹쳐서 겹치기 레이저 용접 시험을 행하였다. 판재의 크기는 가로 150mm×세로300mm로 용접선 길이 200mm이다. 공정변수로는 용접속도와 판재간격으로 용접속도는 3.0m/min부터 0.3m/min씩 증가하여 4.5m/min까지 변화시켰으며 판재간격의 크기는 0.0mm, 0.2mm, 0.4mm로 하였다. 시험방법을 정리하면 Table 3과 같다. 실험은 총 18회로 각 실험번호마다 2~3회의 반복을 실시하였다.

레이저 용접을 시행 할 때 발전기의 효율을 최대로 내기 위하여 보통 출력을 최고로 사용하고 적절한 용접속도를 선택하는 것이 일반적이다. 따라서 본 시험에서도 레이저 출력을 4.0kW로 설정하고 용접변수로 용접

Table 3 Experimental number of welding speed and gap size conditions for lap joint welding

Speed \ Gap	0.0	0.2	0.4
3.0	1	7	13
3.3	2	8	14
3.6	3	9	15
3.9	4	10	16
4.2	5	11	17
4.5	6	12	18

속도를 선택하였다. 용접 대상물에서의 실제 레이저 출력을 측정된 결과 약 3.8kW이다. 완전용입 용접은 속도 3.0m/min에서 모든 판재간격에 대하여 얻었다. 부분용접을 얻기 위한 최소 용접속도는 판재간격에 따라 다르다. 판재간격이 없는 겹치기 용접에서 부분용입은 용접속도 3.3m/min에서 관찰된다.

겹치기 레이저용접의 용접부 특성을 파악하기 위하여 각 실험조건에 따른 용접부 단면형상을 예칭을 하여 관찰하고 상부 비드폭(w_t), 결합부 폭(w_i), 하부 비드폭(w_b) 용입깊이(d), 비드 단면적(A_c) 등을 측정하였다.

겹치기 용접에서의 결합력을 시험하는 방법으로 인장-전단 시험을 행하였다. 점 용접에 대하여 시편의 크기와 형태의 영향을 연구한 문헌이 있으나⁵⁾ 규격이나 시험목적에 따라 크게 차이가 난다. 본 논문에서 수행한 레이저 용접은 비드폭이 좁고 연속비드를 형성하므로 위의 규격을 따르지 않고 Zhou⁶⁾의 박판의 겹치기 레이저 용접에서 사용한 인장-전단 시편을 참고하였다. 시편의 하중 방향과 용접선은 서로 수직이고 용접부에서 파단이 일어나도록 시편은 용접부 양끝에 반지름 4mm의 반원형의 노치를 주었으며 노치부의 폭은 12mm로 하였다. 여기에서 사용한 인장-전단시험 시편의 형상은 Fig. 1과 같다. 이 결과로부터 최대 인장하중과 이 때의 변위와 최대하중까지의 변형에너지를 측정하였고 이를 노치부의 폭으로 나누어 단위길이 당 값을 계산하여 비교하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 단면형상

3.1.1 시험결과

각 실험조건에 따른 단면형상은 대표적으로 두 경우로 나눌 수 있다. 완전용입이 되어 장구모양의 비드가 형성된 경우와 부분용입이 되어 사발모양의 비드가 형성된 경우이다. 이와 같이 용접비드의 단면 형상을 용접시험 변수인 용접속도와 판재간격의 크기에 따라 Fig. 2에 정리하였다. 판재간격 0.4mm의 경우에 상부 비드폭은 합몰부위 표면의 폭을 잴 것으로 실제 비드의 폭과는 다르다.

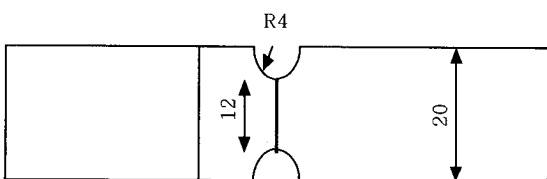


Fig. 1 Tensile-shear specimen

속도 3.3m/min이상에서 부분용입 조건을 보인다. 판재간격 0.4mm에서는 용접속도 3.3m/min 이상에서도 불안정하기는 하나 완전용입을 관찰할 수 있다. Fig. 3에서 알 수 있듯이 판재간격 0.06mm의 조그만 차이로 완전용입에서 부분용입으로 확연히 다른 결과가 관찰된다. 판재간격 0.43mm 이상에서는 급격히 부분용입 현상이 발생할 것으로 판단된다. 적절한 판재간격에서는 용접속도 3.9m/min이 되어야 부분용입이 된다.

3.1.2 단면형상의 특징

각 실험조건에 따른 단면형상에서 추출한 특징들로서는 상부 비드폭, 결합부 비드폭, 용입깊이, 비드 단면적 등이 있다. Fig. 2에서 알 수 있듯이 상부 비드폭은 판재간격 0.0mm와 0.2mm에서는 용접속도에 무관하게 거의 유사한 경향을 가지며 1.5에서 2.0mm 사이로 관찰된다. 판재간격 0.4mm에서는 낮은 속도에서 완전용입이 일어날 경우에도 상부판재의 상부 비드폭은 급격

Speed \ Gap	0.0	0.2	0.4
3.0			
3.3			
3.6			
3.9			
4.2			
4.5			not welded

Fig. 2 Sectional geometry due to welding speed and gap

Speed	Penetration	
	Deep	Partial
3.3	(Gap 0.41) 	(Gap 0.47)

Fig. 3 Sensitivity of penetration above the gap size 0.4mm

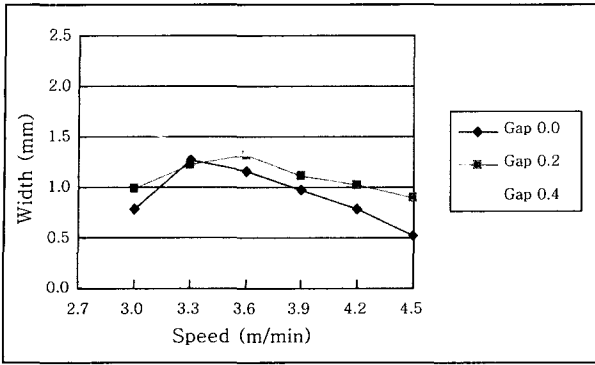


Fig. 4 Interface bead width

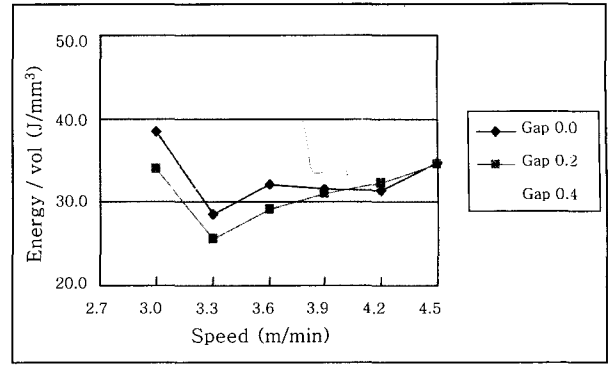


Fig. 5 Input energy per volume

히 좁아지고 오히려 결합부 비드폭이 넓어지며 하부 판재의 비드폭이 급격히 좁아지는 배불뚝이 형상이 된다. 이때 상부 비드폭은 1.2mm 정도로 큰 차이를 보이나 결합부 비드폭은 Fig. 4에서 보듯이 판재간격 0.4mm에서 1.3mm 정도로 판재간격 0.0mm 나 0.2mm의 경우에 비하여 오히려 크다. 이는 판재간격이 클 때에는 상부 판재의 용융금속이 함몰되어 판재간격을 메우고 그 사이로 일부 유출되며 함몰에 따른 레이저광의 깊은 입사로 인하여 상부 판재의 용입과 하부 판재의 용입이 단계적으로 발생하는 것에 기인한다고 판단된다.

완전용입과 부분용입을 판단하기 위한 기준은 용입깊이이다. 판재간격 0.0mm와 0.2mm에서의 경향은 유사하며 용접속도 3.0m/min에서는 완전용입 그 이상에서는 부분용입 현상을 보인다. 그러나 비드폭과 마찬가지로 판재간격 0.4mm에서는 배불뚝이 형상이지만 3.6m/min까지 완전용입을 보인다.

3.2 단위부피당 입력에너지

용입은 입력에너지의 양에 따라 직접적으로 결정되어 지므로 비드 단면적을 계산하여 입력에너지에 의하여 용융된 양을 더 정확히 파악 수 있을 것이다. 그러나 비드 단면적은 입력된 에너지의 양에 의하여 영향을 받고 입력 에너지는 용접속도에 의하여 결정된다. 따라서 비드 단면적을 비교하는 대신 단위부피당 입력에너지를 관찰하였다⁷⁾. 단위부피당 입력에너지는 다음의 식에 의하여 계산된다.

$$\text{단위부피당 입력에너지}(E_v) = \frac{\text{레이저출력}(W)}{\text{용접속도}(v) / \text{비드단면적}(A_c)}$$

여기서 레이저 출력 대신에 용융금속에 흡수된 에너지를 사용하여 E_v 를 계산할 수 있으나 용융된 강철에 흡수된 레이저 에너지를 정확히 측정하는 것도 어려움

이 있고 판재 주위로 없어지는 열손실을 용입깊이에 따라 정확히 측정, 추측하는 것도 어렵다⁸⁾. 따라서 본 논문에서는 용융금속에 흡수된 에너지 대신에 레이저 출력을 사용하여 모든 열손실을 포함한 단순 입력에너지를 사용하였다. 용접속도에 따른 E_v 를 Fig. 5에 실었다. 판재간격 0.0mm와 0.2mm의 경우는 용접속도 3.0m/min에서 완전용입으로 E_v 가 34~38 J/mm³의 값을 가진다. 용접속도 3.3m/min 이상에서는 E_v 가 26J/mm³에서 서서히 증가하는 부분용입의 경우로 앞의 완전용입의 값과 확연히 구별되며 이는 Fig. 2의 단면형상의 관찰 결과를 잘 대변하여 준다. 판재간격 0.4mm의 경우에는 용접속도 3.0m/min에서 E_v 가 약 32J/mm³에서 서서히 증가하다 용접속도 4.2m/min에서 급격히 증가한다. 이는 용접속도 3.9m/min까지는 완전용입이 일어나기 때문으로 생각된다.

3.3 인장-전단 시험

3.3.1 하중-변위 곡선

인장 전단 시험 중에 용접부위는 찌름을 받아 일정한 각도로 회전한다. Table 2의 판재간격과 용접속도에 따른 용접시험 조건에 대하여 각각 인장-전단 시험을 실시하고 최대 하중을 측정하였다. 이 때 전형적으로 관찰되는 두 개의 인장-전단하중-변위 곡선을 Fig. 6에 실었다. 곡선 A는 강도가 모재보다 높은 용접부를 갖는 시편에서 나타나는 곡선으로 열영향부에 가까운 모재에서 파단된다. 곡선 B는 모재보다 약한 용접부를 갖는 시편에서 나타나는 곡선으로 주로 4m/min 이상의 높은 용접속도나 판재간격 0.4mm의 경우에 관찰된다. 또한 인장-전단 시험에서 파단의 형태는 두 가지로 나타나며 파단후의 시편의 모습을 Fig. 7에 실었다. Fig. 7의 (a)는 두 판재 결합부의 비드에서 판재방향으로 파단되는 경우이고 (b)는 상부판재의 노치부 모재에서 두께 방향으로 파단되는 형태이다.

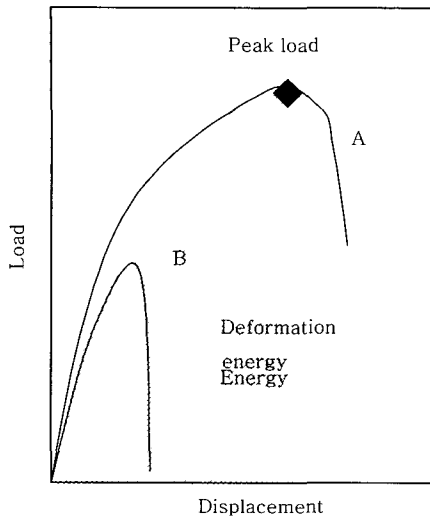


Fig. 6 Load-displacement curves (A : tough weld, B: weak weld)

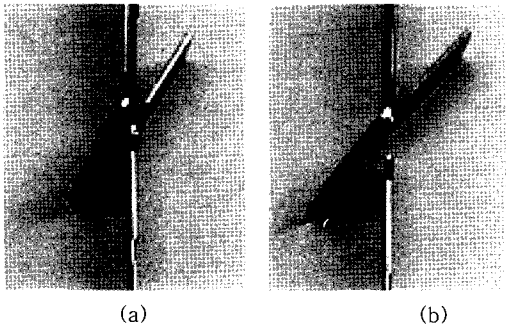


Fig. 7 Two types of failure mode for the tensile-shear test (a) Failure in the direction of sheet plane at the interface of lap joint (b) Failure in the direction of thickness through the top sheet

3.3.2 인장-전단 강도

인장-전단 시험 결과로부터 단위길이당 최대하중을 계산하였다. 용접속도에 따른 단위길이당 최대하중을 판재간격 별로 Fig. 8에 실었다. 판재간격 0.0mm와 0.2mm의 대부분의 인장-전단 강도는 4.5m/min의 높은 용접속도를 제외하면 0.5kN/mm 정도의 값을 갖는다. 판재간격 0.0mm, 용접속도 4.5m/min의 경우와 판재간격 0.4mm의 경우에 인장-전단 강도 0.4kN/mm의 값을 갖는다. 이를 위 Fig. 2의 단면형상 사진을 참고하여 분석하여 보면 다음과 같다. 대부분의 조건에서 인장-전단 강도 0.35~0.5kN/mm를 전후한 두께방향의 파단이 관찰되며 결합부에서의 파단은 완전용입 조건의 일부와 부분용입으로 용입깊이가 1.0mm에 아주 가까운 경우에 관찰되며 이때의 인장-전단 강도 값은 0.35~0.4kN/mm 정도이다. 용접속도 3.0m/min, 판재간격 0.0mm의 완전용입 조건에서 결합부에서 파

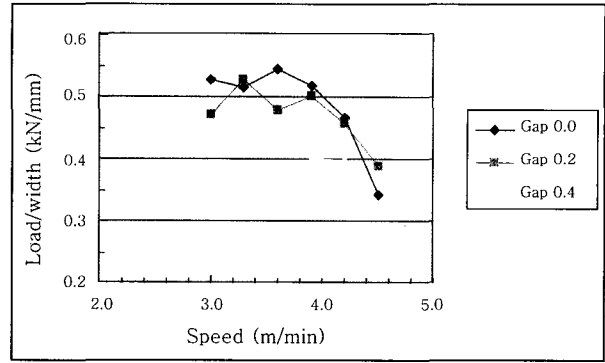


Fig. 8 Tensile-shear strength

단되는 경우 Fig. 4의 결합부 비드폭이 0.8mm로 최소인 경우이다. 일반적인 부분용입 조건의 결합부 비드폭은 1.0mm~1.3mm이다. 기계적 강도의 유지가 필요한 겹치기 용접에서 결합부 비드폭이 작은 완전용입보다 부분용입이 좋다.

3.3.3 변형 에너지

인장-전단 시험 결과로부터 얻어지는 하중-변위 곡선에서 최대하중까지의 변형에너지를 계산할 수 있다. 최대하중까지의 변형에너지를 단위 시편 폭으로 나누어 단위 시편 폭 당의 변형에너지(이후 편의상 변형에너지라 부른다)를 용접부의 강인성의 기준으로 선택하였다. 판재간격 0.0, 0.2mm, 0.4mm 경우의 변형에너지를 용접속도에 따라 그래프를 그리면 Fig. 9와 같다. 최대하중의 경우와 달리 변형에너지는 거의 모든 용접속도에서 판재간격이 커질수록 작아진다. 또한 용접속도 3.9m/min까지 완전용입 조건에서의 변형에너지보다 부분용입 조건에서의 변형에너지가 동등 이상의 값을 가지므로 자동차용 차체의 레이저 용접에 충분히 부분용입 용접을 적용할 수 있다.

3.3.4 파단된 시편의 단면 형상

용접속도와 판재간격에 따른 파단의 단면형태를 Fig.

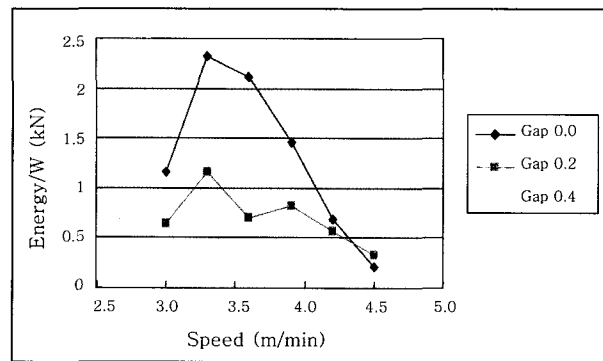


Fig. 9 Deformation energy per width

10에 실었다. 판재간격 0.0mm와 0.2mm에서는 대부분 하부판재의 열영향부위(HAZ)의 모재에서 파단되었다. 판재간격 0.4mm에서의 파단은 상부판재의 합몰 때문에 주로 상부판재의 합몰부위에서 파단되었다.

Fig. 11은 판재간격 0.0, 용접속도 3.0m/min의 완전용입에서 결합부비드의 파단과 하부판재의 모재에서의 파단이 동시에 관찰되었음을 보여준다. 이 때의 결합부의 파단은 완전용입으로 결합부의 폭이 최소가 되는 경우에 발생한다고 생각할 수 있으며, 판재간격 0.0mm, 0.2mm 각각의 용접속도 4.5m/min 조건에서 관찰되는 용입깊이 1mm 근방의 파단은 결합부 비드의 폭과 깊이가 작은 데에 기인한다. 그 외 대부분의 파단은 두께 방향으로의 파단으로 이는 용입깊이의 정도, 즉 부분용입이나 완전용입에 상관없이 두 판재의 결합력은 충분함을 보여준다. 종합하면, 테일러드 블랭

크 등에서 품질기준으로 제시된 완전용입 조건은 맞대기 용접에 국한되며 오히려 겹치기 용접에서는 결합부 비드의 폭이 더 중요하며 이의 관점에서 부분용접이 더 안정적이라 말할 수 있다.

판재간격 0.4mm에서는 용접속도 3.6m/min의 일부 경우를 제외하고는 용입깊이가 아주 얇은 용접속도 4.2m/min에서도 두께방향의 파단이 발생하였다. 단, 이 때의 인장-전단 강도는 판재간격 0.0mm와 0.2mm에서의 0.5kN/mm의 값보다 훨씬 작은 0.35~0.4 kN/mm이다. 이는 Fig. 2의 단면 사진에서 보는 바와 같이 상부 판재의 비드의 합몰이 거의 0.4mm에 가까워서 두께 방향의 파단이 쉽게 일어났음을 알 수 있다. 판재간격 0.0mm와 0.2mm의 경우와 마찬가지로 적절한 용입깊이는 강도에 큰 영향을 주지 않으며 판재간격이 클수록 상부의 합몰을 제거하는 것이 결합력을 유지하는 길이다. 따라서 판재간격이 큰 겹치기 용접에는 용접와이어(filler wire) 등을 사용하여 합몰의 영향을 최소화하는 것이 중요하다.

3.4 부분용입 용접의 타당성

지금까지 용접속도와 판재간격에 따른 완전용입 조건과 부분용입 조건을 비교 검토하였다. 판재간격 0.0mm와 0.2mm에서는 비드 단면의 형상이나 인장전단 강도의 면에서 부분용입 조건이 동등의 결과를 보여주며 특히 인장-전단 강도에 있어서는 오히려 더 안정적 결과를 주기도 한다. 더구나 용접속도 3.0m/min의 완전용입 용접과 동일한 인장-전단 강도를 갖는 부분용입 용접의 용접속도를 비교한다면 Fig. 8에서 3.9m/min가 가능할 것이고 용접속도의 측면에서 볼 때 30%의 향상을 가져온 것이다. 단위부피당 입력에너지를 비교할 때도 20% 이상의 감소효과가 있어 부분용입 용접의 선택은 생산성 향상과 직결된다.

공정의 안정성과 관련하여서는 부분용입 조건도 상당히 넓은 범위를 제공하며 판재간격이 0.4mm의 경우에는 오히려 폭이 좁으나 Fig. 2와 Fig. 3에서와 같이 완전용입에 가까운 단면형상을 보여준다. 단 판재간격 0.4mm의 파단후 단면의 경우에서 알 수 있듯이 판재간격이 커지면 상부의 합몰로 인한 인장전단 강도가 0.4kN/mm 이하로 감소하므로 용접와이어 등을 사용하여 합몰부위를 매우면 인장전단 강도의 유지가 가능할 것이다.

4. 결 론

용접속도와 판재간격에 따른 390MPa급 고장력강판

Gap Speed	0.0	0.2	0.4
3.0			
3.3			
3.6			
3.9			
4.2			
4.5			not welded

Fig. 10 Bead sections after tensile-shear test

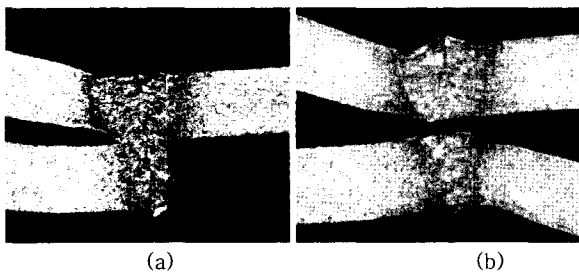


Fig. 11 Two types of failure at gap size 0.0mm and welding speed 3.0m/min (a) Failure through the thickness near HAZ (b) Failure through an interface

의 겹치기 CO₂ 레이저 용접에 대하여 본 연구에서 얻어진 주요한 결론은 다음과 같다.

1) 용접속도와 판재간격을 용접변수로 한 겹치기 용접시험의 결과 부분용입의 정도와 거의 무관하게 인장-전단 강도는 0.5kN/mm로 모재와 거의 동일하고 완전용입에서의 인장-전단 강도와 동일하다.

2) 결합부 비드폭과 최대 인장-전단 하중 값은 부분용입의 경우 완전용입보다 동등 이상이다.

3) 단위부피당 입력에너지는 부분용입의 조건에서 최소이며 이는 부분용입의 용접을 적용할 경우 20% 이상의 생산성을 기대할 수 있다. 또한 동일한 인장-전단 강도를 가지는 조건을 비교하면 3.0m/min의 완전용입 조건과 3.9m/min의 부분용입의 경우 30%의 생산성이 증가한다.

4) 판재간격 0.4mm에서 상대적으로 높은 속도까지 완전용입이 관찰되고 용접비드의 단면형상도 가운데가 볼록한 모양으로 판재간격 0.0, 0.2mm의 경우와 다르다.

5) 변형에너지는 판재간격이 클수록 감소하나 이는 완전용입이나 부분용입 모두 동일하다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 '국가지정연구실 사업'과 고등기술연구원의 연구비 지원에 의하여 수행되었다. 관계자 여러분에게 깊은 감사를 드린다.

참 고 문 헌

1. Paul Denney and Jian Xie : The Welding of Galvanized Steel, Proceedings of the 19th International Congress on Applications of Lasers and Electro-optics (ICALEO), (2000), A1-A9
2. Robert Mueller : Laser Welding of Hem Flange Joints, Proceedings of the 19th International Congress on Applications of Lasers and Electro-optics (ICALEO), (2000), F11-F20
3. B. K. Yoo, K. D. Lee : A Study on Mechanical Shearing Process for Tailored Blank Welding, J. of the Korean Welding Society 17-2 (1999), 128-137 (in Korean)
4. In-Sung Chang : Nd:YAG Laser Welding for Side Panel, J. of the Korean Welding Society 19-4 (2001) 371-374 (in Korean)
5. J. Du, J. Longobardi, W. P. Latham, A. Kar : Weld Strength and Process Controllability for Laser Welding of Thin Metals, J. of Laser Applications 12-6 (Dec. 2000) 239-244
6. M. Zhou, S. J. Hu and H. Zhang : Critical Specimen Sizes for Tensile-Shear Testing of Steel Sheets, Welding Research Supplement (Sept. 1999) 305s-313s
7. K. D. Lee, K. Y. Park : Effects of the Gap and the Speed on the Lap-joint CO₂ Laser Welding of Automotive Steel Sheets, IAE report, 2060-MP -01.01 (2001.12.) (in Korean)
8. T. H. Kim, K. C. Chong, B. Y. Yoo, J. S. Lee, K. H. Whang : Calculation of CO₂ Laser Beam Absorptance as a Function of Temperature for Steels by the Numerical Method, J. of Material Science 30 (1995) 784-792