

研究論文

이종두께 강판의 CO₂ 레이저 용접 및 성형성

서 정* · 한 유 희* · 김 정 오* · 이 영 신**

CO₂ Laser Beam Welding and Formability of Steel Plates with Different Thicknesses

J. Suh*, Y.H. Han*, J.O. Kim* and Y.S. Lee**

Key Words : Laser beam welding (레이저 용접), Bending formability (굽힘성형성)
Butt-joint gap (맞대기 이음부 간격), Different thickness (이종두께)

Abstract

The maximum butt-joint gap size in CO₂ laser beam welding of SAPH steel plates with different thicknesses and its bending formability were studied. In the range of the gap size ≥ 0.1 mm, the optimal butt welding speed was faster than that of no gap (air gap) condition. This behaviour was independent on the difference of thickness at any combination. Also, the allowable gap size in steel plates with different thicknesses was larger than with same thicknesses. In the range of T/T₀ (bead shape) ≥ 0.8 , good bending formability was obtained at any combination of thickness. The formability was improved by reducing the hardness in weld bead using pre-heating process. Finally, FEM result of the laser beam welded underframe with different thicknesses was compared to that of the conventional spot welded underframe.

1. 서 론

레이저 용접은 용접속도가 빠르며, 용입깊이가 깊고, 열에 의한 변형이 작으며, 어느 분위기에서도 용접이 가능하므로 유연성을 갖고 있을 뿐만 아니라,¹⁾ 같은 장비로 절단 및 표면처리 등을 할 수

있다는 특성으로 인해 산업고도화에 따라 점차 그 중요성이 확대되고 있다. 현재 자동차 생산기술의 선진화 대열에 있는 일본, 미국 등에서 레이저 용접을 많이 응용하고 있으므로 한국의 자동차 업계에서도 레이저의 도입 및 그 응용기술에 대한 많은 관심을 보여야 할 것이다.²⁾

자동차 산업에서의 레이저 용접 응용분야는 대략적으로 부품용접,^{3,4)} 차체용 강판용접 (body

* 정희원, 한국기계연구원 레이저가공연구그룹

** 정희원, 충남대학교 기계설계공학과

sheet metal welding),⁵⁻¹³⁾ tailored blank 용접^{14, 15)}으로 분류할 수 있다. 본 연구는 tailored blank 용접 분야에 관한 것이며, 특히 레이저 용접후 프레스 성형의 복합공정 개발을 위한 기초연구이다. 실제로 프레스 성형된 자동차 부품들을 용접하여 조립하는 자동차 차체 (body panel) 제조 공정에 있어서들 이상의 부품들을 일체화 (one sheet type) 하여 프레스 작업을 하는 것이 생산성 및 정밀도 향상을 위해서 유효한 방법으로 알려져 있다.^{14, 15)} 또한, 일체화된 형태로서 용접할 경우, 강도, 강성, 내부식성 등의 차체 각 부의 요구성능에 따라 판 두께, 재질 등의 변경요구 조건에 대응할 수 있으므로 원료에 대한 제품의 비율이 증가되고 생산공정을 줄일 수 있다.

이상과 같은 레이저 용접의 장점에도 불구하고 아직도 실제 생산라인에 적용하기에 어려움을 겪고 있으며, 그 중 하나는 까다로운 이음부 (joint)의 간격조건에 관한 것이다. 이음부는 일반적으로 겹치기 이음부 (lap joint) 와 맞대기 이음부 (butt joint)로 구분될 수 있다. 겹치기 이음부의 간격의 중요성은 부식을 방지하기 위해 아연도금강판을 사용할 때 나타나게 된다. 아연도금강판의 겹치기 용접시에는 아연증기가 발생하므로 위판과 아래판 사이에 아연증기가 빠져나갈 수 있는 간격이 있어야 하며, 최근 이에 대한 연구결과가 보고되어 있다.¹⁶⁾ 레이저 용접에서는 좁고 깊은 용접부와 최소한의 열영향부를 만들 수 있으나, 집중된 레이저 빔의 직경은 매우 작으므로 맞대기 용접시 이음부 간격이 크게 되면 레이저 빔이 모재를 녹이지 못하고 간격사이로 그냥 통과할 수 있다. 이 경우 용가재 (filler wire)를 사용하여야 하나, 실제 생산라인에서는 용접이전에 용가재의 사용 유무를 결정해야 하므로 용가재를 사용하지 않아도 되는 허용 간격 크기를 우선 알아야 한다.

따라서, 본 연구에서는 이종두께 SAPH 강판의 맞대기 용접시 이음부의 최대 허용간격에 관하여 조사하였다. 또한, 레이저 용접된 이종두께 강판의 굽힘 성형성을 평가하였다. 끝으로, 레이저 용접된 이종두께 프레임과 보강재를 사용하는 기존의 점용접 프레임의 유한요소해석 결과를 비교하였다.

Table 1. Chemical composition of specimen (wt%)

Component Material	C	Mn	P	S	Ti	Fe
SAPH	0.145	0.828	0.0131	<0.0108	0.009	the rest

2. 실험

2.1 실험재료

실험에 사용된 재료는 SAPH 강판이며 재료의 화학적 조성은 Table 1과 같다. SAPH 강판은 차체 하부 프레임 (frame)으로 사용되는 재료이다. 프레임에서는 국부적으로 하중이 편중되는 부분을 보강하기 위해 보강재를 대고 저항 점용접하는 것이 일반적이나, (Fig. 10 참조) 본 실험에서는 이종두께 재료를 사용하여 레이저 용접함으로써 보강재 사용을 대체하고자 하였으며 (Fig. 11 참조), 두께 2mm, 3.2mm, 4mm의 3종류의 강판을 사용하였다. 용접시편의 규격은 굽힘 성형 실험, 용접용 jig의 크기를 고려하여 50mm×100mm 으로 하였다.

2.2 레이저 용접장치 및 실험방법

실험에 사용한 CO₂ 레이저 발전기는 연속출력파이며 정격출력 4kW의 횡여기 방식 (transverse flow type)으로서 빔 모드는 multi-mode이다. Fig. 1은 레이저 용접 실험과정의 개략적인 도면이다. 모든 용접실험에서 레이저 출력은 4kW로 고정하였으며, 보조가스로는 Ar gas (30 l/min)를 사용

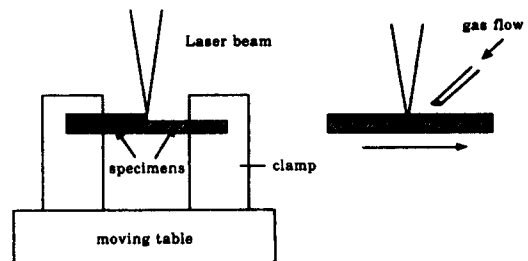


Fig. 1 Schematic illustration of laser welding of plates with different thicknesses

Table 2. Joint gap size and combination of steel plates with different thicknesses

	without gap	0.1mm	0.2mm	0.3mm	0.4mm
SAPH 2mm+2mm	○	○	○	○	○
SAPH 2mm+3.2mm	○	○	○	○	○
SAPH 2mm+4mm	○	○	○	○	○

하였다.

이종두께 재료의 맞대기 용접시의 간격의 영향을 조사하기 위해서 두께 2mm의 강판을 기준으로 하여 동종두께인 2mm와 이종두께인 3.2mm, 4mm를 조합하였으며, 간격 크기는 간격이 없는 것부터 0.4mm까지 변화시키면서 실험하였다. (Table 2 참조) 초점위치는 기초실험을 통하여 2mm+2mm 두께의 용접시편조합에서는 시편 표면에서 0.5mm 아래, 2mm+3.2mm의 조합에서는 두꺼운 시편 표면에서 1.7mm 아래, 2mm+4mm의 조합에서는 두꺼운 시편 표면에서 2.0mm 아래에 각각 위치시킨 후 실험하였다. 용접속도는 2.0 m/min 에서 부터 6.0 m/min까지로 변화시켰다.

레이저 용접후 각 시편의 단면을 채취하여 polishing 한 후 2%-nital 용액으로 약 10초간 에칭(etching) 하였다. 단면 조직은 결함(crack, porosity) 유무를 검토하기 위하여 금속광학현미경을 사용하여 200배 확대하여 조사하였으며, 각 조건별 단면의 형상을 비교 검토하기 위해서는 Stereo Microscope를 사용하여 10배로 사진을 촬영하였다. 경도값은 Micro Vickers 경도계로 측정하였으며, 측정간격 0.1mm, 측정하중 200g을 적용하여 용접비드를 중심으로 하는 횡 단면의 경도를 측정하였다.

굽힘 성형 실험에서 용접비드에 평행하게 굽힘 실험을 하는 경우, 용접부와 모재는 동일한 힘을 받는다. 용접부는 탄성 범위에 있는데 반해 모재는 이미 소성변형이 일어나게 된다. 한편, 용접비드에 수직하게 굽힘실험을 하는 경우, 용접부는 모재와 동일한 변형을 하게 되고 동시에 소성변형이 일어나기 위해서는 용접부에 걸리는 응력은 크고 모재의 응력은 작게 된다. 이때, 소성변형이 일어나는 용접부는 큰 응력을 받게 되고 이때 표면의 결함(ripple, crack, under-cut 등)이 있을 경우 응력집중에 의해 파괴에 이르게 된다. 따라서 굽힘

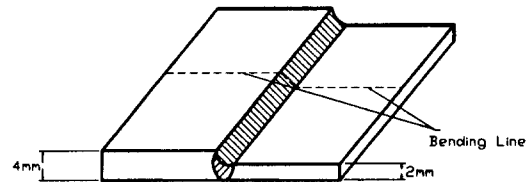
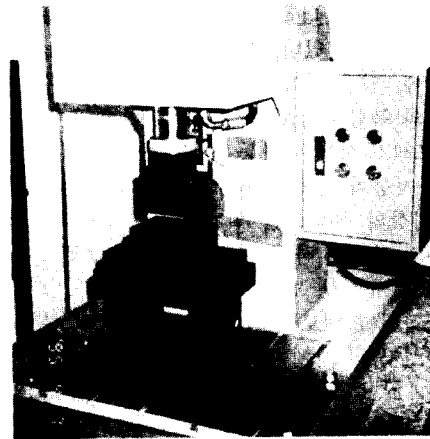


Fig. 2 (a) Bending press (5 ton) and bending jig apparatus.

(b) Schematic illustration of bending test.

성형성 실험에서는 용접부의 특성이 성형성에 민감하다고 할 수 있는 용접부에 수직한 굽힘 시험을 수행하였다. 굽힘성형 실험장치와 굽힘실험조건이 Fig. 2(a) 와 2(b)에 나타나 있다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 용접시편의 미세조직

레이저 용접시에 집중된 빔 에너지는 재료의 표면에서 용융을 거쳐 급속히 비등점 이상의 온도까지 상승하게 된다. 그 결과, 용융된 물질이 제거되어 더욱 깊은 곳까지 재료가 용융 및 기화되면서 이른바 key-hole을 형성하여 깊은 구멍이 뚫리게 된다. 이것이 key-hole 용접의 기본이며, 이 key-hole이 용접진행 방향으로 움직이게 되면서 용융되어 있는 금속이 뒤쪽의 빈곳을 계속 채우는 과정을 반복하면서 용접비드가 형성된다.

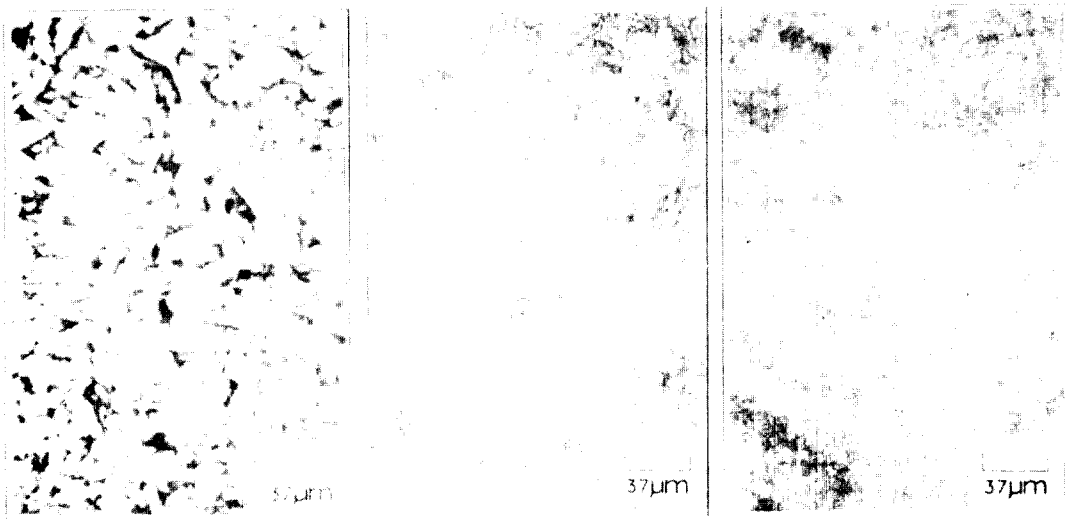


Fig. 3 Micrographs of bead cross section obtained from SAPH specimens
(a) Base Material, (b) Heat Affected Zone, (c) Welded Material

Fig. 3은 SAPH강의 용접시편의 미세조직을 나타내고 있으며, 금속 광학현미경을 사용하여 200배로 촬영한 용접부(Welded Material or W. M) 및 열영향부(Heat Affected Zone or HAZ), 모재부(Base Material or B. M)를 촬영한 사진이다. 용접선을 중심으로 용접부의 주상정이 그리고 열영향부와 모재부가 대칭적으로 얻어지는 레이저 용접의 전형적인 단면조직을 나타내고 있고, 용접비드를 중심으로 주조 조직이 표면비드의 정점을 향하여 형성되어 있음을 볼 수 있으며, 하부에서도 상부와 비슷한 용접 열영향부를 형성함으로써 레이저 빔 에너지가 하부까지 충분히 도달하여 전체적으로 양호하게 접합된 것을 알 수 있다. 그러나, 주상정의 W. M부와 HAZ의 경계에서 검은점으로 나타나는 결함이 일부 발견되는 것은 레이저 용접의 특성상 key-hole의 형성을 비롯하여 초급속 가열, 냉각으로 인하여 용체에 격심한 유동이 생기고, 용융금속의 산화방지 및 프라즈마(plasma) 제거를 위해 분사되는 보호가스의 깊고 빠른속도 때문으로 생긴 미세기공(micro-void)이라고 판단된다.

3.2 이음부의 허용간격

Fig. 4(a)-(c)는 SAPH강을 동종두께 (2mm+

2mm)와 이종두께 (3.2mm+2mm), (4mm+2mm)로 조합하여 레이저 출력 4kW, 보조가스로 Ar-gas (30 l/min)을 사용하여 실험한 용접단면부의 육안조직을 나타내었다. 양호한 용접비드의 판단 기준은 내부에 결함이 없고 용접비드의 깊이가 시편 두께의 0.8이상의 경우로 규정하였다. 단 이종두께 시편의 경우는 두께가 적은 쪽을 기준으로 하였다.

Fig. 4(a)는 동종두께 (2mm+2mm)일때 초점위치를 시편 표면에서 0.5mm 아래에 두고 실험한 용접 단면 비드의 결과이다. 시편에 간격이 없을 때는 양호한 용접부의 비드를 얻을 수 있는 최대 용접속도는 3.5m/min 이고, 간격이 0.1mm 일때는 5.5m/min 까지 증가하였으며, 간격이 0.2mm 일때는 용접부에 함몰현상이 나타났고, 간격이 0.3mm이상 일때는 용접이 어려웠다.

Fig. 4(b)는 이종두께 (3.2mm+2mm)의 시편에서, 초점위치를 두꺼운 쪽의 시편 표면에서 1.7mm 아래에 두고 실험한 용접 단면 비드의 결과이다. 시편의 간격이 없을때는 양호한 용접부의 비드를 얻을 수 있는 최대용접속도는 3.0m/min 이었고, 간격이 0.1mm 일때는 4.5m/min 까지 증가하였으며, 간격이 0.2mm 일때 3.5m/min 까지 용접이 가능하였으나, 간격이 0.3mm이상 일때에는 용접이 되지 않았다.

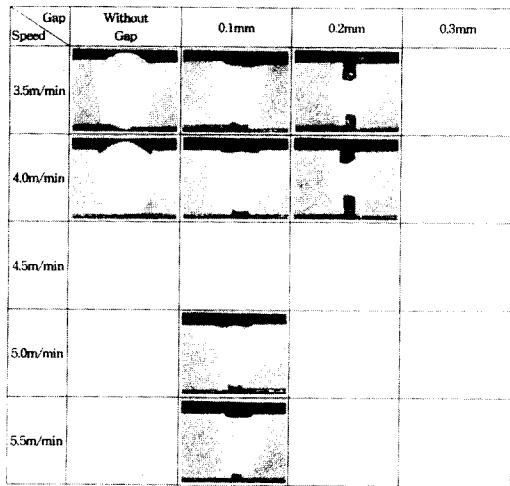


Fig. 4(a) Macrographs of cross-sectioned weld beads with different welding speed in case of 2mm+2mm combination

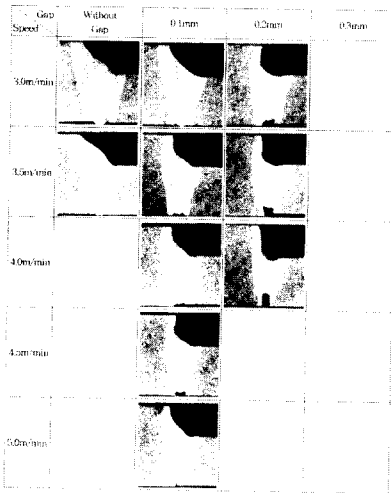


Fig. 4(b) Macrographs of cross-sectioned weld beads with different welding speed in case of 3.2mm+2mm combination

Fig. 4(c)는 이중두께 (4mm+2mm)의 시편에서 초점위치를 두꺼운 쪽의 시편 표면에서 2.0mm 아래에 두고 실험한 용접 단면 비드의 결과이다. 시편의 간격이 없을 때는 양호한 용접부의 비드를 얻을 수 있는 최대 용접속도는 2.5m/min 이었고, 간격이 0.1mm 일때는 3.5m/min 까지 증가하였으며, 간격이 0.2mm 일때 3.5m/min의 용접속도까지는 비교적 용접이 가능하였으며, 간격이 0.

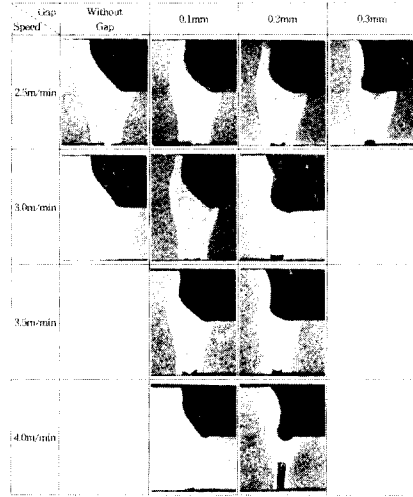


Fig. 4(c) Macrographs of cross-sectioned weld beads with different welding speed in case of 4mm+2mm combination

3mm 일때까지 용접 결과가 양호하였으나, 간격이 0.4mm에서는 용접이 되지 않았다.

Fig. 4(a)-(c)의 결과로부터, 두께 차이에 무관하게 간격이 없을 때 보다 간격이 0.1mm일 때가 용접부의 열영향부가 적을 뿐 아니라, 양호한 용

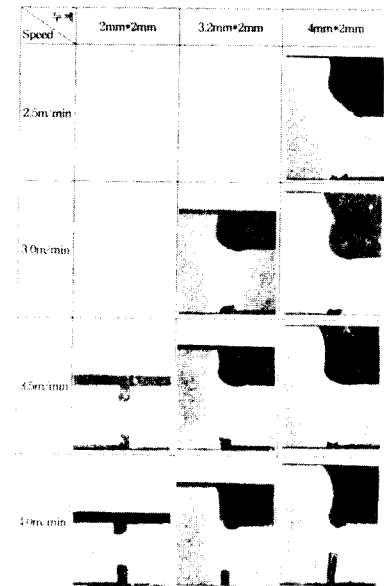


Fig. 5 Macrographs of cross sectioned weld beads as a function of thickness combination and welding speed at gap size = 0.2mm

접 비드를 얻을 수 있는 최대 용접속도를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 5는 SAPH강의 동종 및 이종두께 시편을 사용하여 간격이 0.2mm 로 일정할 때 용접부의 단면비드 형상을 나타내고 있다. 동종두께 경우를 살펴보면 용입부의 용융 상태가 불안정하여 부분적으로 용접이 이루어지므로 맞대기 용접의 한계 조건을 나타내고 있다. 이종두께의 경우, 일정 속도 이상에서는 동종두께의 경우에 비해서 양호한 용접이 이루어지고 있으며, 용접 속도의 차이에 따라 용입의 상태가 달라짐을 알 수 있다. 또한, 동종두께일 때는 용융금속의 양이 충분히 공급되지 못하여 용입불량이 나타날 수 있으나, 이종두께일 때는 두꺼운 쪽의 모재가 녹아 흘러 들어감으로서 양호한 용접금속부를 얻을 수 있다고 할 수 있다. 한편, 용융금속의 양이 부족하여 용입부족 현상이 나타날 때는 용가재 (filler wire)를 사용할 수도 있으나 용가재를 사용하는 것은 용접속도에 따른 한계성을 가지므로, 가능한 용가재를 사용하지 않는 최적의 용접조건을 얻을 수 있도록 하는 것이 바람직할 것이다.

3.3 굽힘 성형성 시험

동종두께의 굽힘성형시편에서 용접부의 형상을 규정하기 위해 Fig. 6(a)와 같이 정의하였다. 즉, 시편에서 모재의 두께를 T₀라 할때 용접부의 비드 단면의 최대 높이를 T라 정의하였다. 굽힘 성형

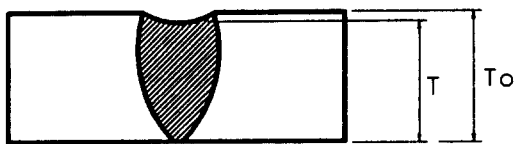


Fig. 6(a) Schematic diagram of weld bead

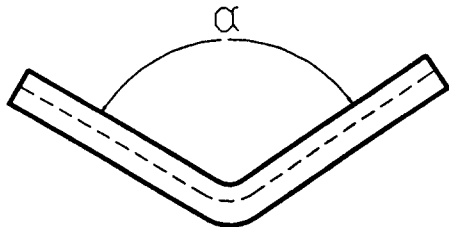


Fig. 6 (b) Bending fracture angle

실험시에 균열이 최초로 발생할 때의 내부 각도를 α로 정의하였다. (Fig. 6(b) 참조) 즉, α의 값이 작을수록 굽힘성형성이 양호하다고 할 수 있다.

Fig. 7(a) - (c)은 SAPH강의 굽힘 성형 실험의 결과를 나타내고 있다. Fig. 7(a)에서 굽힘 각도가 동종두께일 때 (2mm+2mm), 전·후면 모두 α = 110° 부근에서 균열이 발생하였으며, 이 범위를 실선으로 표시하였다. 실선과 실험데이터를 비교한 결과 용접단면 비드형상에서 T/T₀ ≥ 0.8 인 경우, 모두 α = 110° 부근에서 균열이 발생함을 알 수 있다.

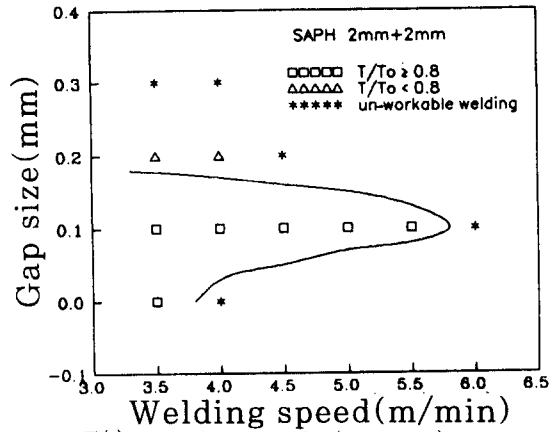


Fig. 7(a) Excellent condition (symbol, □) of butt-welded SAPH specimen as a function of gap size and welding speed in case of 2mm+2mm combination

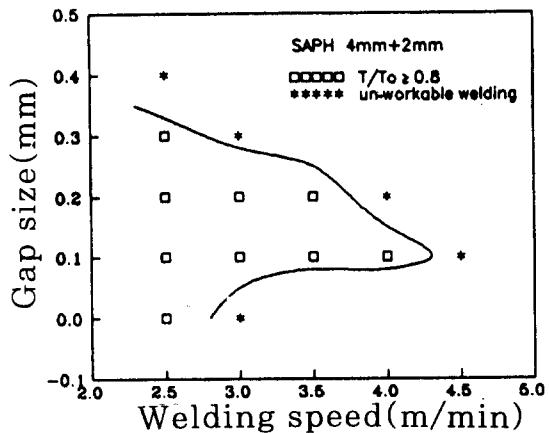


Fig. 7 (b) Excellent condition (symbol, □) of butt-welded SAPH specimen as a function of gap size and welding speed in case of 3.2mm+2mm combination

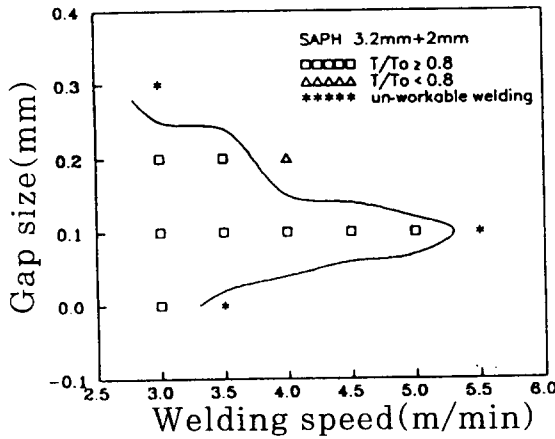


Fig. 7 (c) Excellent condition (symbol, □) of butt-welded SAPH specimen as a function of gap size and welding speed in case of 4mm+2mm combination

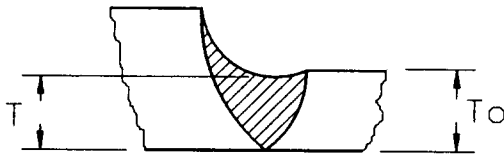


Fig. 8 Schematic diagram of weld bead in different thickness welding

이종두께의 경우 T와 T₀의 정의는 Fig. 8에 근거하고 있으며, Fig. 7(b)와 (c)로부터 (3.2mm+2mm)의 조합에서는 $\alpha = 140^\circ$ 부근에서 균열이 발생하였으며, (4mm+2mm)의 조합에서는 $\alpha = 110^\circ$ 부근에서 균열이 발생하였으며, 이 범위를 실선으로 각각 표시하였다. 실선과 실험데이터를 비교한 결과, 이종두께의 경우에서도 $T/T_0 \geq 0.8$ 인 경우 동일한 α 의 각도에서 균열이 발생하였음을 알 수 있다. 따라서, Fig. 7(a)-(c)로부터 동종두께 및 이종두께의 용접시편에서는 간격의 크기 및 두께차이에 무관하게 $T/T_0 \geq 0.8$ 인 경우 굽힘성형성이 동일함을 알 수 있다.

한편, 굽힘성형성은 용접부 경도와 밀접한 관계를 가질 수 있으므로 성형각도를 좀 더 향상시키기 위해 레이저 용접전에 예열처리를 하여 굽힘성형성을 높이고자 하였다. 레이저 용접시에는 타 용접법에 비해 냉각속도가 빠르므로 경도의 상승을 초래할 수 있다. 따라서 예열한 후 용접함으로써

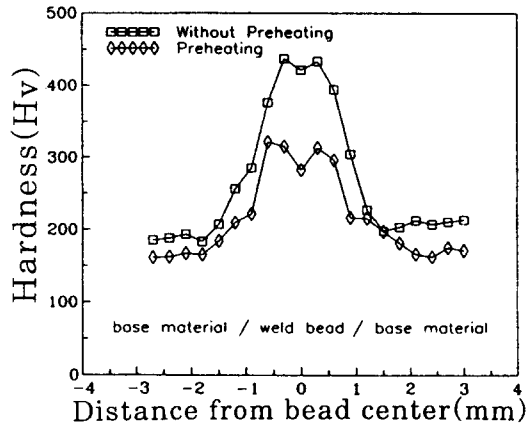


Fig. 9 Comparison of hardness distribution between preheating and without preheating

냉각속도를 완화시켜 경도의 상승을 억제하도록 하였다. Fig. 9에서는 예열처리를 하지 않고 용접한 시료와 예열처리한 후 용접한 시료의 경도분포의 비교를 나타내고 있다. 예열처리한 시료의 경우가 예열처리를 하지 않은 시료에 비해 경도가 100 Hv정도 낮아짐을 알 수 있다. 예열온도는 수치해석방법으로 구한값으로 약 200℃가 적정 온도였다. 동종두께 (2mm+2mm)의 경우, $\alpha = 110^\circ$ 에서 $\alpha = 90^\circ$ 로 굽힘 성형성이 증가 하였으며, 이종두께 (3.2mm+4mm)의 경우, $\alpha = 140^\circ$ 에서 $\alpha = 110^\circ$ 로 굽힘 성형성이 증가 하였다.

3.4 점용접과 레이저 용접 구조의 비교

Fig. 10은 점용접된 차체프레임의 주요형상이다. 전체 프레임은 상판(top cover)과 측면프레임(rear frame)과 보강프레임(reinforcing frame)으로 구성되어 있다. 보강 점용접된 차체 프레임은 이종두께로 레이저 용접된 프레임으로 대체할 수 있다. Fig. 11은 이종두께로 레이저 용접된 차체프레임의 형상 및 치수를 나타내고 있으며, 이종두께로 제작되는 측면프레임 부분은 $x=1060\text{mm}$ 에서 $x=1850\text{mm}$ 까지이다. 이 부분의 두께를 t_1 으로 하고 1.9mm~3.8mm 까지 변화시켰다.

구조해석을 수행하기 위해 상용유한요소 프로그램인 ANSYS Code를 사용하였으며, 하중조건은 6000N 이 629개의 절점에 균일분포하중으로 작용하는 경우에 대해서 고려하였다. 따라서, 굽힘에

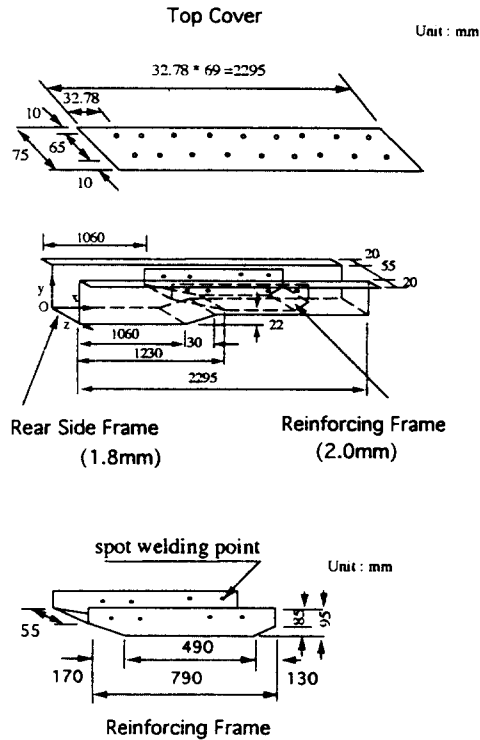


Fig. 10 Geometry and dimensions of the reinforced spot welded underframe.

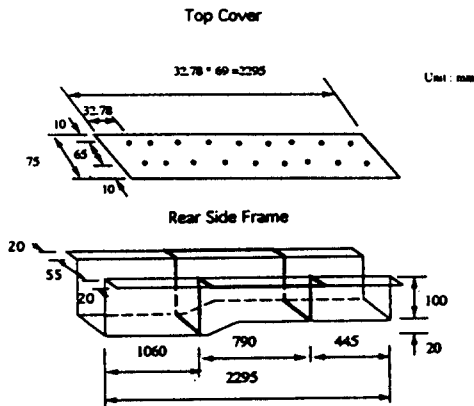


Fig. 11 Geometry and dimensions of the laser welded underframe with different thicknesses.

의한 응력이 주로 고려되었으며 충격과 비틀림시 받을 수 있는 압축하중과 비틀림은 고려하지 않았다. 경계조건은 자동차 프레임이 x=0 mm 인 밑부분에서 y, z 방향의 변위가 구속되었으며, x=2295

Table 3. Maximum stress, strain, weight and displacement of the reinforced spot welded underframe

Method	thickness * (mm)	maximum stress (MPa)	displacement (mm)	strain (μ)	weight (kgf)
spot welding	3.8	113	3.06	699	16.18

* thickness = rear side frame (1.8mm) + reinforcing frame (2.0mm)

Table 4. Maximum stress, displacement, strain and weight of the laser welded underframe with different thicknesses

Method	thickness, t ₁ (mm)	maximum stress (MPa)	displacement (mm)	strain (μ)	weight (kgf)
Laser welding	1.9	136	3.59	840	13.48
	2.3	109	3.24	673	14.22
	2.5	98.9	3.10	607	14.60
	3.8	73	2.55	452	17.00

mm 인 밑부분에서는 x, y 의 방향의 변위가 구속되었다. 각 용접점은 절점을 공유시켜 변위와 회전 이 함께 움직이도록 모델링하였다.

Table 3은 보강 점용접 프레임의 해석 결과이다. 최대응력은 $\sigma_{max}=113MPa$ 이며, 이 값과 동일한 수준의 최대응력이 발생하는 레이저 용접프레임에서 이종두께 부분의 두께는 t₁ = 2.3mm 가 됨을 Table 4에서 알 수 있다. 이때 중량은 16.2 kgf 에서 14.22 kgf 으로 감소됨을 알 수 있으나, 변형률과 변위값은 약간 상승되고 있다.

보강 점용접 프레임의 해석결과와 레이저 용접 프레임의 해석결과와의 비교로 부터 보강 점용접 프레임에서의 응력, 변형률, 변위 등이 충분히 만족되기 위해서는 t₁ = 2.5mm 정도로 선택하면 충분하다. 이때 중량은 16.2 kgf 에서 14.6 kgf 로 약 10%의 중량 감소를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

이종두께 레이저 용접기술은 보강 점용접에서의 보강재를 대는 공정을 생략할 수 있으므로 생산공정의 단순화와 재료절감 및 차체의 경량화를 꾀할 수 있는 생산기술이라고 할 수 있다. 따라서, 이종두께 레이저 용접기술을 자동차 생산공정에 적용하기 위해 많은 연구가 앞으로 수행되어야 할 것이다.

4. 결 론

본 논문에서는 SAPH 강판의 레이저 용접성 및 성형성에 관하여 연구하였다. 기초실험에 의해 최적용접 조건을 도출하고 이에 근거하여 용접시편을 제작하여 굽힘성형성 평가하였으며, 이중두께 레이저 용접 프레임과 보강 점용접 프레임의 유한요소해석 결과를 비교하였다. 그 결과들은 다음과 같이 요약될 수 있다.

1) 두께차이에 무관하게 간격크기가 0.1mm인 경우, 간격이 없는 경우보다 빠른 용접속도를 얻을 수 있었다. 이중두께의 경우, 동종두께의 경우보다 간격 허용량이 크며 간격이 0.2mm이상에서는 용가재를 필요로 함을 알 수 있었다.

2) 굽힘 성형 실험결과 두께차이에 무관하게 용접부 형상 즉, $T/T_0 \geq 0.8$ 인 경우 굽힘 성형성이 양호 하였다. 또한, 예열처리를 통하여 경도를 낮출 수 있었으며 이에 따라 굽힘 성형성이 개선되었다.

3) 차체 프레임의 유한요소 해석결과로부터 이중두께 레이저 용접으로 프레임은 제작한다면 생산공정이 단순화될 수 있으며, 재료절감 및 차체의 경량화가 가능해 짐을 예측할 수 있었다.

참 고 문 헌

1. C. M. Banas : The Industrial Laser Annual Handbook, Tulsa, Pennwell Pub. Co., (1986), pp. 69-86.
2. 서 정, 한유희 : "자동차 산업에서의 레이저 용접," 대한용접학회지, 제12권, 제2호, (1994), pp. 49-63
3. Anon., : "Ford Buys Laser System for Transmission Welding," *Industrial Laser Review* 6, #1 (June 1991), p. 24
4. E. DElord and G. Sayegh : "Laser Welding Production of Transmission Shafts for the Automobile Industry," *25th ISATA Symposium*, No. 921004, Florence Italy, (June, 1992)
5. N.T. Williams and W. Waddell : "High Speed Resistance Seam Welding of Uncoated and Coated Steels," *Technical Steel Research Commission of the European Communications*, Report No. EUR 1150 EN, (1988)
6. E.A. Anderau and J. Opprecht : "Resistance Seam Welding of Coated Steel Sheets," *Proc Conf. Sheet Metal Welding, Detroit, Michigan USA. American Welding Society* 2501 N.W. 7th St. Miami, Florida 33125 USA. Paper No. 18 (Oct. Nov. 1984), pp. 1-20
7. E.N. Gregory, "Arc Welding of Galvanized Steel," *Sheet Metal Industries*, Vol. 45, No. 495, (July 1968), pp. 501-507
8. J. Heyden, K. Nisson, and C. Magnusson : "Laser Welding of Zinc Coated Steel," *Industrial Laser Annual Handbook*, (1990) pp. 161-167
9. R. Akhter, W.M. Steen, and K.G. Watkins : "Welding of Zinc-Coated Steel with a Laser and Properties of the Weldment," *J. of Laser Appl.*, Vol. 3, No. 2, (1991), pp. 9-20
10. C. Bagger, I. Miyamoto, F. Olsen, and H. Maruo : "Process Behaviour during High Power CO₂ Laser Welding of Zinc Coated Steel," *Proc. LAMP 92*, Nagnoka, (June 1992), pp. 553-558.
11. Z. Abermen : "Doors and Hoods Laser Welding Replace Gluing or Spot Welding," *25th ISATA Symposium*, No. 921025, Florence Italy, (June 1992)
12. F.A. DiPietro : "Robotic Laser Welding System," *Proc. 21st ISATA Symposium*, No. 89504, Wiesbaden, (Nov. 1989)
13. N.M. Uddin, E. Berardi, R.C. Ducharme, D.A. Salada and J.J. Speranza : "A Five-Axis Robotic Laser and Vision Integrated On-

- Line Welding System," *Proc. SPIE Conf. on Laser Processing*, Quebec City, Canada, (June 1986), pp. 260-264
14. K. Ikemoto, Y. Niimi, and T. Iwai, "Application of Laser Welding for Automatic Body Panels," *Journal of JWS*, Vol. 10, No. 1, (1962), pp. 196-201
15. K. Ikemoto, H. Sugiura, K. Arima, and T. Takasago : Press Forming of Laser Welded Blank, *Journal of JSTP*, Vol. 32, No. 370, (1991), pp. 1383-1390
16. 서 정, 한유희, 윤충섭, 방세윤 : "아연도금 강판의 CW CO₂ 레이저 용접 및 성형성," *대한용접학회지*, 제13권, 제1호 (1995) pp. 145-155