

자동차용 강판 SAPH의 고출력 파이버 레이저에 의한 T형상 용접특성에 관한 연구

오 용 석¹⁾ · 유 영 태^{*2)} · 신 호 준³⁾

조선대학교 첨단부품 소재공학과¹⁾ · 조선대학교 메카트로닉스공학과²⁾ · 조선대학교 정밀기계공학과³⁾

A Study on T-Joint Welding by High Power Fiber Laser of SAPH Steel Plate for Automobile

Yong-seok Oh¹⁾ · Young-tae Yoo^{*2)} · Ho-jun Shin³⁾

¹⁾Department of Advanced Parts and Materials Engineering, Chosun University, Gwangju 501-759, Korea

²⁾Department of Mechatronics Engineering, Chosun University, Gwangju 501-759, Korea

³⁾Department of Precision Mechanical Engineering, Chosun University, Gwangju 501-759, Korea

(Received 11 August 2008 / Accepted 11 December 2008)

Abstract : The purpose of this paper is to describe experimental results about the T-joint welding of the high power continuous wave (CW) fiber laser for SAPH steel plate for seat frame of car.

The seat rail is a part of seat frame of cars. The assembling method is mostly fix up using a bolt and nut. But this assembling method has many demerits in productivity such as increasing work process and material cost. This paper presents an experimental study about Laser T-Joint weldability of seat rail. Laser welding has many advantages in lightness and saving material costs of seat frame. The laser beam was moved along the work pieces by six axis robot with process optical fiber. The laser beam is focused with a welding head within incident angle 15~45° for the purpose of the T-joint welding through two side full penetration. The range of the root gap size is less than $\leq 0.4\text{mm}$. Optical microscopy SEM were performed to observe the micro structures and determine the structures of welded zone.

Key words : Fiber laser(파이버 레이저), Laser welding(레이저 용접), T-Joint welding(T-형상 용접), Seat frame(시트 프레임), Seat rail(시트 레일) Gap size(허용간격)

1. 서 론

레이저 용접은 고밀도 에너지빔을 이용하는 용접방법으로 레이저빔을 재료표면에 조사하면 매우 빠른 시간 내에 에너지가 재료에 흡수되어 용융열로 변환된다. 에너지밀도가 높은 레이저빔을 작은 초점으로 집속시켜 재료표면에 조사하기 때문에 재용융과 재응고가 매우 빠르게 진행되는 용접방법이다.

레이저 용접은 기존 용접 방식에 비해 용접속도가 빠르며, 집속된 빔을 이용하여 용입깊이(Penetration depth)가 깊고, 열영향부(Heat Affect Zone: HAZ)가 작아 열에 의한 변형이 거의 없는 특징이 있다. 뿐만 아니라 과학기술이 진보됨에 따라 레이저의 종류와 특성이 다양해지고 에너지 발전 효율이 높은 고출력의 레이저 발전기가 출현 되고 있다.¹⁾

그중 고출력 파이버(Fiber) 레이저는 파이버를 이용하여 발전하기 때문에 고출력 Nd: YAG 레이저나 CO₂ 레이저에 비해 소형이고 레이저빔 품질이 좋을

*Corresponding author, E-mail: ytyou@chosun.ac.kr

뿐만 아니라 낮은 전력 소모로 레이저빔을 발진하고 있어 산업계에서 많은 관심을 받고 있다.²⁾

파이버를 이용하여 레이저빔을 전송하기 때문에 기존 CO₂레이저 방식에 비해 공작물에 접근하여 활용하는 데 유리한 점이 많다. 산업현장에서 유연생산과 고품질의 제품 요구가 높아짐에 따라 독일, 미국, 일본 등에서 레이저용접이 자동차 관련 산업뿐만 아니라 조선, 항공 산업까지 다양하게 적용되고 있다.³⁾

자동차 산업에서의 레이저용접 분야는 대략적으로 부품용접, 차체용 강판 용접, 이중두께(Tailored Blank) 용접 등으로 분류할 수 있다.

본 연구는 부품용접에서 T형상 용접의 공정변수를 실험적으로 연구하였다. 특히 시트레일(Seat rail) 부분의 레이저용접 공정을 개발하여 현장에 적용하기 위한 기초연구이다. 현장에서 시트레일을 조립할 때 볼트로 체결하는 시트레일 조립 공정에 본 연구의 결과를 적용하여 공정을 단축시키고자한다. 뿐만 아니라 볼트 체결을 위한 소재의 중복요소를 차단하여 재료비를 절감하고, 자동차의 연비 향상을 위한 경량화 등에 장점이 있을 것으로 생각된다. 이와 같은 이유로 생산성 향상에 높은 관심을 가지고 있는 독일, 미국, 일본 등에서는 다양한 부분에 사용하고 있는 볼트조립 방식에서 레이저용접으로 작업공정을 적용하는 사례가 증가하고 있다.⁴⁾

레이저용접을 산업현장 생산 라인에 적용시 고려해야 할 부분 중 가장 중요한 요소 중 하나는 용접부의 간격을 유지하는 것이다. 레이저용접의 경우 집중된 레이저빔의 직경이 매우 작아 용접부 사이의 간격이 넓게 되면, 레이저빔이 모재를 용융시키지 못하고 맞대기 용접의 모재 간격 사이를 통과하거나, 용접부의 용입열량 부족으로 용접결함이 발생하게 된다. 이 경우 용가재(Filler wire)를 사용하여 이러한 문제를 해결할 수 있지만, 용가재를 사용할 경우 추가비용 뿐만 아니라 경화된 용접부가 증가하여 취성부분이 늘어질 우려가 있다.

따라서 본 연구에서는 자동차용 강판의 T형상 레이저용접에 관한 연구를 위해 T형상의 최대 허용간격에 관하여 중점을 두었다. 비파괴 검사인 3차원 x-ray 검사를 통해 용접부 건전성 평가하였고, 용접부 단면 비드 분석을 통해 레이저빔 이송속도에 따

른 단위면적당 입열량과 용입량 및 용접부 결함 여부를 확인했다. 용접부 간격에 따른 용접부의 기계적 특성 평가를 위해 인장실험(Tensile test)을 실시하여 용접성을 평가했다.

2. 실험

2.1 실험재료

본 연구에서 사용된 시편은 자동차에 주로 사용되는 강판이며, 제품명은 SAPH 강판으로 구조용 고장력강의 화학조성분과 기계적 성질은 Table 1과 같다. SAPH 강판은 차체 프레임(Frame) 및 의자구조물(Seat Structure) 등 국부적 하중이 편중되는 부분을 보강하기 위한 보강재로 주로 사용된다.

용접시편은 300mm(L) × 50mm(W) × 2mm(T)의 크기로 레이저를 이용하여 절단하여 제작하였다. T형상의 시편은 Fig. 1과 같다.

용접 전 시편 표면의 이물질을 제거하기 위해 아세톤으로 세척 한 후, 레이저빔의 출력, 레이저빔의 이송속도, 레이저빔의 조사 각도, 용접시편 갭(Gap) 등의 용접공정변수를 변화시키면서 실험하였다.

Table 1 Mechanical property and chemical compositions of specimens(wt%)

	C	Mn	S	P	Ti	Fe
	0.145	0.828	≤0.0108	0.0131	0.009	Bal.
SAPH 400	Tensile strength (MPa)		Yield strength (MPa)		Elongation %	
	400		255		31	

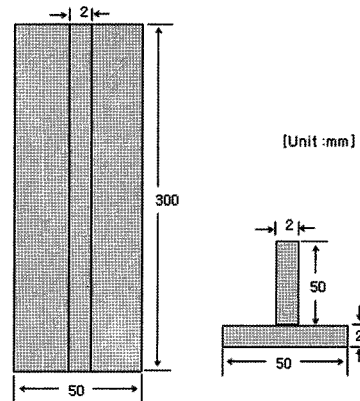


Fig. 1 Dimension of T-joint welding sample (a: plane b: front view)

2.2 실험 장치 및 조건

본 연구에 사용된 레이저는 최대출력이 5kW인 연속파형(Continuous wave ; CW) 파이버 레이저이며, 파이버의 직경 300 μ m인 광섬유를 통해 시편에 전달된다. 레이저 용접헤드의 광학계는 콜리(Collimator) 렌즈 초점거리 F=160mm이고, 포커싱(Focusing) 렌즈의 초점거리 F=300mm인 레이저 용접헤드를 사용하였다. Fig. 2는 초점 크기 및 빔 특성을 Focus monitor로 측정된 결과를 나타내었다. 초점 반경은 0.292mm, BPP(Beam Parameter Product) 11, Ray length는 7.743mm이다.

실험 장치에 사용한 로봇은 Nachi社 6축 다관절 로봇을 사용하였으며, 용접 실험에 사용된 JIG 및 레이저 용접 장치는 Photo. 1에 나타내었다. T형상 용접시 다양한 각도로 레이저빔을 조사할 수 있도록 로봇을 운용하였다.

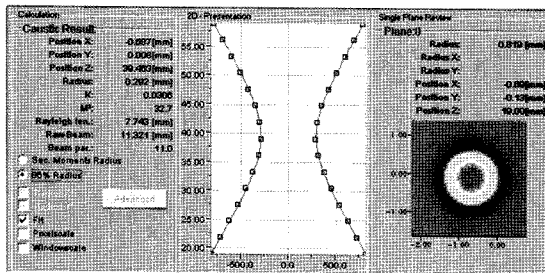


Fig. 2 Fiber laser beam profile col: 160mm/ focus: 300mm primes focus monitor

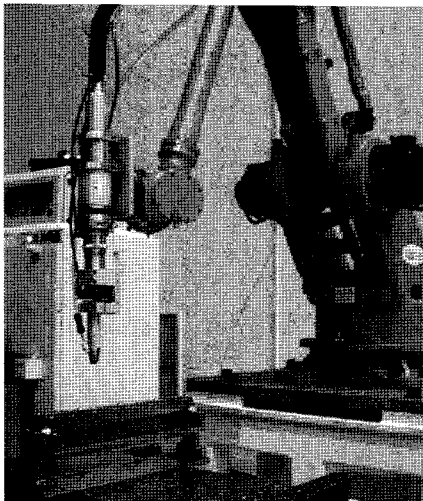


Photo. 1 T-joint welding for laser robot test

용접 비드의 균일성과 용접 분위기 안정을 위해 동축 노즐을 제작하였으며, 용접에 사용한 보호 가스는 아르곤 가스를 15 l/min로 흘려보내 주위 공기와의 접촉을 방지했다.

레이저빔의 용접 각도에 따른 T형상 용접특성을 확인하기 위해 용접 각도를 15°, 30°, 45°로 변화시키면서 용접을 실시하였다. 레이저출력은 2~3kW, 레이저빔 이송속도는 40~120mm/sec까지 20mm/sec씩 증가시키면서 레이저용접을 하였다. 용접부 사이의 허용 간격을 확인하기 위해 밀착한 용접조건과 0.2mm와 0.4mm의 갭 게이지(Gap gauge)를 사용하여 용접부 사이의 간격이 있을 때 용접부의 상태를 확인하였다. Table 2는 T-형상 레이저 용접에 대한 공정변수들을 나타내었다.

Table 2 Parameter of T-joint laser welding

Laser power (kW)	2.0, 2.5, 3.0
Welding speed(m/min)	40, 60, 80, 100, 120
Beam incident angle	15°, 30°, 45°
Welding gap (mm)	0, 0.2, 0.4
Focal position(mm)	-1
Shielding gas	Ar 15 l/min

이와 같이 레이저출력 변화에 따른 용접 속도와 레이저빔 조사각도를 변화시켜 변형이나 뒤틀림이 최소화 되면서 관통용접이 용이한 가공영역을 확인하였다. 용접시 발생할 수 있는 기공이나 고온균열 및 저온균열 등의 결함을 최소화 할 수 있는 최적의 용접조건을 규명하기 위해 실험하였다.

2.3 용접단면 분석 및 평가

레이저용접 후 각 시편의 용접단면의 비드 모양과 단면의 조직을 관찰하기 위해 와이어 커팅으로 용접시편을 절단하고, 채취된 시료를 사포로 연마 및 폴리싱 후 5% 나이탈(Nital) 용액(5% 질산 + 95% 메틸알콜)을 사용하여 에칭하였다. 각 조건별 용접 단면에서 균열, 기공 등과 같은 내부결함 유무를 검토하기 위해 광학현미경(Olympus QX-51, 배율×25~×120)을 사용하여 관찰하였다.

기계적 하중이 T형상 용접시편의 용접부와 모재에 동시에 가해지도록 인장시편을 제작하여 시험

하였다. 인장시험 할 때 소성 변형이 일어나게 되고 표면 결함(균열, 용입부족, 언더컷 등)이 존재하는 용접부는 결함부위에 응력이 집중되어 파단이 발생하게 된다. 이와 같은 용접부의 인장시험 결과를 통해 레이저용접부의 건전성 및 T형상부의 기계적 특성을 볼트 조립 방식과 비교하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 공정 변수에 따른 실험 결과

자동차 구조용 고장력강 SAPH T형상 레이저용접 공정변수는 레이저빔출력, 레이저빔 이송속도, 레이저빔의 초점거리, 보호가스 등 레이저용접에서 요구하는 일반적인 공정변수에 형상에서 요구되는 레이저빔의 입사각에 대한 부분이 추가 된다. 레이저빔의 입사각이 변화되면 재료의 표면에서 레이저빔의 반사에 따른 흡수율이 다르게 되어 용접성이 변화하게 된다.

자동화 공정에서 요구되는 T형상 지그(JIG)의 기구적 유연성을 증대시키기 위해 레이저빔의 입사각이 클수록 용이하지만, 레이저빔 입사각이 클수록 용융된 용접 비드가 서로 관통용접을 하기 위한 구간이 길어지게 된다. 이럴 경우 최적용접을 위해 출력을 증가시키거나, 용접속도를 줄여 입열량을 증가시키면 용접물의 변형 등 많은 문제가 발생할 수

도 있다.

레이저빔이 시편에 조사되는 각도에 따라 레이저빔이 재료에 흡수되는 강도가 달라지기 때문에 지그 설치 편리성과 함께 최적의 조사각도를 결정하는 것은 효율적인 용접조건과 자동화용접기 설치에 중요한 변수가 된다. 또 한편으로는 수직으로 레이저빔을 시편에 조사하면 반사되는 레이저빔이 파이버에 되돌아와 심각한 손상을 입힐 수 있어 레이저빔이 파이버에 다시 반사 되어 들어오지 않고 최적의 용접열이 발생할 수 있도록 조사각도를 결정해야 한다.

레이저빔 이송속도는 자동화 공정의 생산성을 고려하여 80mm/sec와 100mm/sec(4.8~6.0m/min)로 레이저빔 이송속도를 변화시켰다. 용접에 대한 예비 실험 후 용접단면 분석결과 레이저 출력 2.5kW, 레이저빔 이송속도 80 mm/sec일 때와 레이저 출력 3.0kW, 레이저빔 이송속도 100mm/sec일 때 충분한 관통용접이 이루어 졌다.

Fig. 3은 출력 2.5kW, 입사각 15°, Ar 15 l/min에서 레이저빔 이송속도 80mm/sec와 100 mm/sec를 사용하여 실험한 용접부 단면에 대해 광학현미경으로 확대하여 나타내었다. Fig. 3에 배율 x20 부분은 용접부에서 발생된 균열 및 기공을 나타내었다.

80mm/sec에서는 고온균열이 발생하였고, 100mm/sec

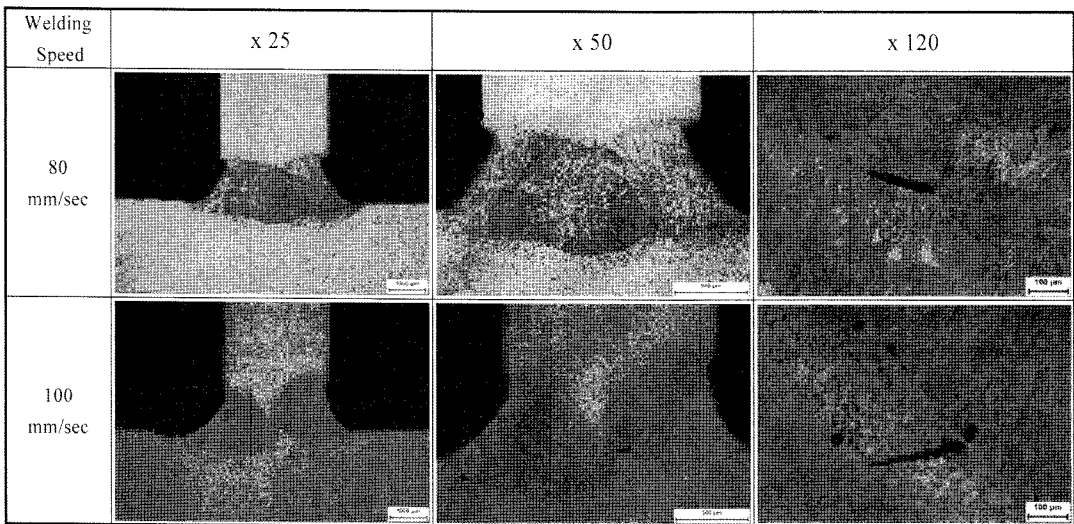


Fig. 3 Cross section of T-joint laser welding (2.5kW, 15°, speed: 80mm/sec and 100mm/sec)

에서는 비드의 열영향부를 따라 기공이 발생되었다. 균열이 발생하는 이유는 레이저용융 열에 용융된 용접부가 응고할 때 모재로 매우 빠르게 열전달되면서 냉각 되어 모재로부터 응고가 시작된다. 모재경계부분부터 응고되면서 발생하는 인장응력에 의해 용접부 내부에 균열이 발생하였다.

레이저 용접은 에너지밀도가 높은 레이저빔이 시편표면에 조사되면 용융과 기화가 진행되면서 금속 입자가 증발되는 반발력의 크기만큼(Scattering) 표면이 열림과 동시에 깊이방향으로 에너지가 전달되면서 키홀(Key hole)이 형성된다. 키홀이 형성된 용융풀은 모재로의 열전달로 인하여 재응고되면서 키홀이 닫히게 되는데, 레이저빔이 빠르게 용접방향으로 진행하면서 키홀이 닫히게 된다. 이때 레이저빔이 빠르게 진행하면서 키홀 주위의 용융금속이 채워지면서 재응고된다. 재응고 될 때 키홀 내부에서 발생한 기포가 대기로 방출되기 전에 키홀이 닫히면서 외적으로 발생한 기포와 용융점이 낮은 금속이 기화된 기포가 포획된 내부결함이 Fig. 3에 제시한 것과 같이 발생되었다.

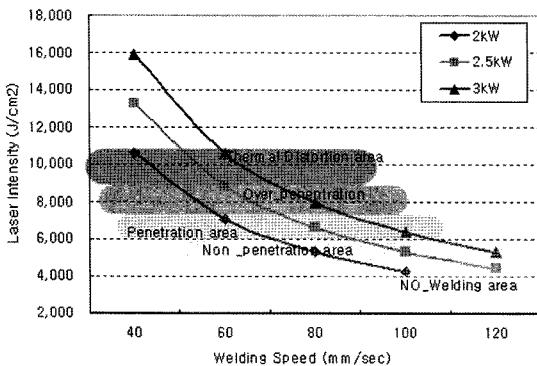


Fig. 4 T-joint welding laser condition

Fig. 4는 T_형상 용접시 입열량에 따른 용접결과이다. 출력 2.5kW에서 용접속도에 대한 T 형상 관통용접의 임계치에 해당하는 100mm/sec와 충분한 관통용접이 이루어진 80mm/sec에서의 레이저빔 이송속도에 따른 단위면적당 에너지 밀도 E (J/cm²)는 다음 식으로 계산하였다.

$$E = \frac{A \cdot D}{\pi r^2} \times \frac{P}{v} \quad (1)$$

A는 금속의 레이저빔 흡수율(%), D는 레이저빔이 시편표면에 조사된 초점직경, P는 레이저빔 출력, r은 레이저빔 조사반경, v는 레이저빔 이송속도이다.⁹⁾

레이저빔 흡수율을 고려하지 않는 상태(A=100%)에서의 출력 2.5kW, 레이저빔 이송속도 100mm/sec일 때 단위면적당 에너지밀도는 5,308J/cm²이고, 출력 2.5kW, 레이저빔 이송속도 80mm/sec일 때 에너지밀도는 6,635J/cm²이다. 레이저빔의 이송속도가 100mm/sec로 빠를 경우 시편에 흡수되는 에너지가 작아 레이저빔의 이송속도가 80mm/sec일 때보다 레이저빔과 시편이 상호작용하는 시간이 작기 때문에 단위면적당 흡수되는 에너지가 작았다. T형상의 충분한 관통 용접을 위해서는 임계치에 해당하는 단위면적당 에너지 보다 약 1,000J/cm²정도 작아 출력은 2.5kW이고 레이저빔 이송속도 100mm/sec에서의 입열량으로는 적당하지 않음을 나타낸다. 레이저의 출력과 조사각도가 같을 지라도 레이저빔의 이송속도가 빨라지면 레이저빔과 시편과의 상호작용하는 시간이 작아 충분한 관통용접이 이루어지지 않기 때문이다. 레이저빔의 이송속도가 20%가 감소하면 입열량은 25% 증가하였다.

Fig. 4에서와 같이 단위면적당 에너지가 5,000~6,000J/cm²에서 관통용접이 이루어지지 않았으며, 6,000~7,500J/cm² 관통용접이 진행되었고, 7,500~9,000J/cm² 충분한 관통용접이 이루어졌으나 용접 후 소재에 열변형이 발생되었다.

레이저용접 생산라인에서 요구되는 Tack time을 고려하여 용접속도 100mm/sec에서 관통용접이 가능한 용접 입열량을 산출하여 레이저출력을 3kW로 T형상 용접을 진행하였다. 단위면적당 에너지 밀도가 6,369J/cm²에서는 충분한 관통용접이 이루어지므로 이때의 레이저빔의 이송속도와 출력을 기준으로 용접조건을 조절하였다. 레이저빔 이송속도와 레이저빔 조사각도를 일정하게 하고 출력을 3.5kW로 20% 증가시키면 입열량은 약 19.23% 증가하였다.

이 두 결과로부터 입열량을 증가시키기 위해서는 출력을 증가시키는 것보다 레이저빔의 이송속도를 낮추는 것이 효과적임을 나타내고 있다. 그러나 레

이저빔의 이송속도를 낮추면 레이저빔과 재료와의 상호작용하는 시간이 증가하게 된다. 이는 용접부 주위에 열량 누적으로 인한 용접부의 변형이 발생할 수 있어, 출력과 레이저빔의 이송속도를 증가시키는 것이 고품질의 용접결과를 얻을 수 있다.

Fig. 5는 출력 3kW, 용접속도 100mm/sec에서 입사각 15°, 30°, 45°에서의 용접단면 결과를 나타내었다. 용가재를 사용하지 않는 T 형상 용접부의 경우 입열량이 지나치게 크면 언더컷(Under cut)이 발생할 수 있다. 이는 레이저빔이 조사되는 동안에 키홀 내부에서 과열된 금속증기의 압력으로 용융금속을 표면 밖으로 밀어내고, 레이저빔이 옆으로 이동되면 용융금속의 중력, 점성 및 표면장력 등과 같은 복잡한 작용에 의해 비드가 형성되면서 언더컷이 발생한다. 언더컷 발생부는 피로하중이 가중될 경우 노치부에서 응력이 집중되어 균열 발생을 야기 시킨다. 이는 용접 구조물의 불량 원인이 된다. 용가재를 사용하지 않는 레이저빔 입사각에 따른 T 형상 상부 언더컷의 형성 크기는 본 실험조건에서는 입

사각이 클수록 감소하였다.

Fig. 5에 $\times 120$ 은 용접비드에서 발생된 기공 및 균열 등 용접부 내부결함을 나타낸 부분이다. 레이저빔 용접각도 15°, 배율 $\times 120$ 의 미세조직 결과와 같이 용접비드의 중심부를 중심으로 용융단면 양쪽 모재방향으로 열이 급냉각하면서 선명하게 용접부의 중앙부에서 모재방향 양쪽으로 수직상조직 나타났으며, 용접 단면에 고온균열이 발생하였다. 용접 금속에 발생한 고온균열은 용접금속의 응고 직후에 발생한 것이다. 입계가 열적평형상태를 유지하지 않은 상태에서 고상화 되지 못한 조건에서 용융물의 금속 응고시 용접부의 자기수축과 외부수축 등에 의한 응력이 작용하여 발생한 균열로 판단된다.

레이저빔 용접각도를 30°와 45°로 해서 조사했을 때 용접 비드의 열영향부에서는 기공이 발생하였다. 이 기공은 용접시 키홀 내부에 생성된 금속증기가 밖으로 분출 되기전 키홀이 닫히면서 응고가 진행되어 발생한 현상으로 판단된다. 이와 같은 현상을 보완하기 위해 용접부위를 디포커싱(De-focus-

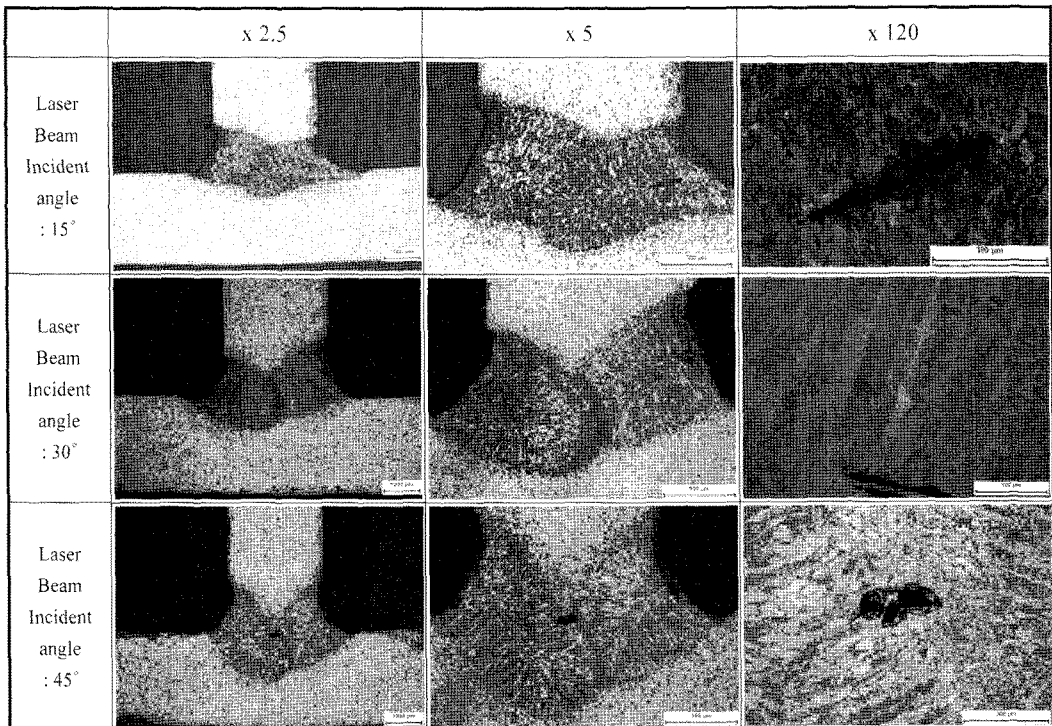


Fig. 5 Cross section of T-joint laser welding (3kW, speed: 100mm/sec, beam incident angle: 15°, 30°, 45°)

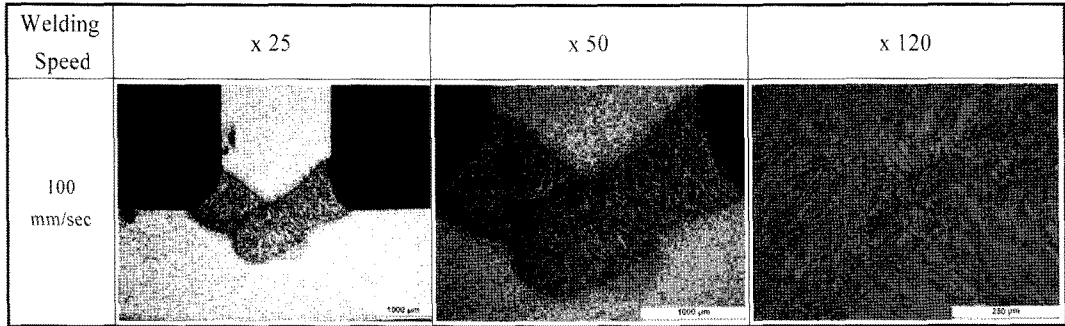


Fig. 6 Cross section of T-joint laser 2step welding (1st_defocus: z+20mm, 900W, speed: 200mm/sec, 2nd_3kW, Speed: 100mm/sec, beam incident angle: 30°)

ing)하는 방법으로 예열한 후 용접초점을 조절하여 용접하여 내부결합이 제거된 실험결과를 Fig. 6에 나타냈다.

이때 용접조건은 Fig. 5의 입사각 30°의 공정조건과 같고, 다만 용접하기 전에 예열 처리를 위해 디포커싱한 조건만 다르다. 디포커싱하여 예열처리 한 다음 용접했을 때 용접부 내부 결합이 개선되는 이유는 응고시 모재의 열 때문에 급속하게 냉각하지 않아 응고시 응력이 비교적 평형상태와 가까워져 급냉각에 의한 응력불균형이 해소되기 때문이다.

3.2 용접부 간격에 따른 용접 결과

레이저 용접을 실제 생산 라인에 적용시 고려해야 할 부분 중 가장 중요한 요소 중 하나는 용접 접합부의 간격을 유지하는 것이다. 이를 통해 레이저용접에 적용할 부품의 용접부 허용 간격 유지를 위해 원재료의 형상 가공을 프레스 절단으로 진행할지, 레이저 절단으로 작업할 것인지 판단을 해야 한다.

레이저를 이용한 원재료의 형상 절단이 추가로 요구 되는지에 따라 전체 공정의 생산단가에 영향을 미치게 된다. 프레스 절단면의 가공정도는 0.2~0.4mm, 레이저절단의 경우 0.05~0.1mm의 절단 공정 방식에 따라 절단면의 가공정밀도 오차가 발생한다.⁶⁾

T형상 레이저용접부의 허용 간격에 대해서는 일반적인 경우 판재에 수직으로 용접되는 판재 두께의 0.05배 까지를 최대 허용치 이내로 적용한다.⁷⁾

T형상 용접에 사용한 SAPH 판재 두께가 2.0t이므로 용접부 간격을 판재두께의 0.05 배인 0.1mm까지가 레이저 용접이 용이한 최대 허용 간격이 된다.

용가재를 사용하지 않는 레이저 용접시 용접부 간격에 따른 레이저용접 특성을 확인하기 위해 레이저로 절단한 소재를 출력 3kW, 용접속도 100mm/sec, 입사각 30°에서 일정한 용접부 간격을 유지시키기 위해 갭 게이지(Gap Gage)를 이용하여 0.2mm, 0.4mm로 변화시켰으며, 용접시 지그를 이용하여 소

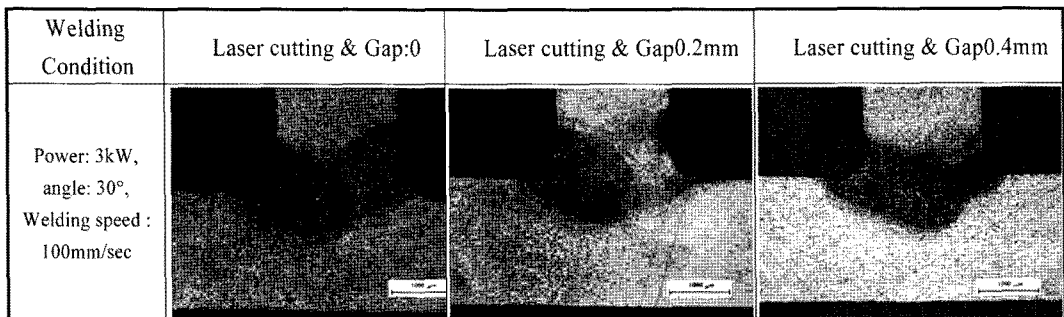


Fig. 7 Cross section of T-joint laser welding gap (Gap: 0mm, 0.2mm, 0.4mm)

재에 일정한 압력을 가하였다.

Fig. 7은 용접부 간격에 따른 용접부 단면을 나타내었다. 겹 케이지를 사용하지 않는 레이저 절단 시편의 절단면 조도는 0.02~0.05mm이고, 레이저 절단에 의한 시편의 절단면 경화가 용접에 미치는 영향을 확인하기 위해 용접 단면을 확인한 결과 건전한 용접비드를 확인하였다. 용접부 간격이 0.2mm, 0.4mm로 증가 될수록 용가재를 사용하지 않고 모재만의 용융으로 용접이 이루어져 용입부족 현상이 증가되었다. 용접 간격을 0.4mm로 유지한 경우 집중된 레이저빔에 의해 용융된 용접면의 간격이 넓어 용융물 표면장력과 모재와의 경계면에서 점성에 의한 부착력에 의해 완전히 용접되지 않았다.

3.3 용접부 X-Ray 비파괴 검사 결과

T형상 용접부의 용접 결함 및 용접부의 건전성 확인을 위해 x-ray 비파괴 검사를 실시하였다. Fig. 8은 출력 3kW, 레이저빔 이송속도 100mm/sec, 입사각도 30°, Gap 0.2mm 조건에서의 T형상 용접시편의 x-ray 비파괴 검사 결과이다. x-ray 비파괴 검사를 통해 T형상 용접부의 육안 검사에서 확인할 수 없었던, 일정한 주기를 갖는 용접부의 특성을 확인할 수 있었다. 이러한 현상은 고속의 레이저 용접시 레이저빔의 높은 에너지 밀도로 인해 고온의 금속증기가 형성되며, 이때 발생한 압력과 열유동은 키흐의 동적거동을 일으킨다.

이러한 키흐의 동적거동이 x-ray 비파괴 검사 결과 5mm 간격으로 규칙적으로 반복되었으며, 이것은 용접속도 100mm/sec 에서 키흐의 붕괴와 재생성이 진행되는데 50ms가 소요 되고, 20Hz 주기로 키흐의 생성과 붕괴가 진행되었기 때문이다.

이러한 키흐의 붕괴와 재생성의 과정은 재료의 점성유동으로 점성이 작은 기포가 밀리고, 이 밀린

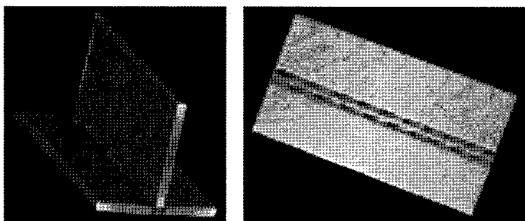


Fig. 8 X-ray 3D image of T-joint laser welding

기포의 압력이 높아지면 짧은 시간에 순간적으로 팽창하면서 주기적으로 기포가 분출되면서 발생하는 현상으로 판단된다.

이러한 x-ray 상의 주기적 기공 발생의 현상들은 레이저파장이 파이버 레이저(1070~1080nm)에 비해 파장이 10배 정도 긴 CO₂ (파장 10.6 μm) 레이저로 용접할 경우 발생하는 플라즈마 생성에 의한 레이저빔 흡수로 에너지 손실이 용접결과에 기공을 발생시킨 것으로 예상할 수 있겠지만, 파이버 레이저의 경우 CO₂ 레이저 파장의 1/10 정도로 짧아 레이저빔이 용접시 발생하는 플라즈마에 흡수되는 양이 적어 에너지손실 없이 투과된다.⁸⁾

레이저 파장이 근적외선 영역인 Nd: YAG 및 Fiber 레이저를 사용하면 보호가스의 종류에 상관없이 레이저 빛이 플라즈마에 흡수 되어 에너지가 손실되는 양이 매우 미비하므로 플라즈마에 의한 영향으로 발생된 현상으로는 판단되지 않는다.

3.4 용접부 인장실험 결과

볼트로 체결한 시편과 레이저 용접한 T형상 용접부의 기계적 특성 평가를 비교하기 위해 인장실험(Tensile test)하였다. 인장시험을 통해 기계적 하중이 T형상 용접시편의 용접부와 볼트로 체결한 모재부위에 동시에 가해지게 되도록 시편을 제작하였다. 이 기계적 하중으로 인해 시편에 소성변형이 일어나게 되고 표면 결함(크랙, 용입부족, 언더컷 등)이 존재하는 용접부는 결함부위에 응력이 집중되어 파단이 발생하게 된다. 용접부 사이의 간격(Gap)에 따른 용접부의 기계적 특성을 확인하기 위해 출력 3kW, 용접속도 100mm/sec, 입사각 30°의 동일한 용접조건에서 용접부 간격을 0, 0.2, 0.4mm인 T형상 용접 인장시험편을 제작하였다.

T형상 용접부의 인장실험을 위해 용접 시편의 연장선상에서 인장시험기의 클램프에 고정할 수 있도록, T형상 용접 시험편과 동축상에 플랜지를 가공하여 시편에 부착하였다. 플랜지에는 레이저용접한 부분과 볼트 체결한 부위와의 인장력을 비교할 수 있도록 시편을 제작하였다. 여기에 사용한 볼트 및 너트의 규격은 M5(SUS)이며, SAPH 2.0t 모재의 인장강도는 550Mpa이다. T형상 인장시험편은 Fig. 9와 같다.

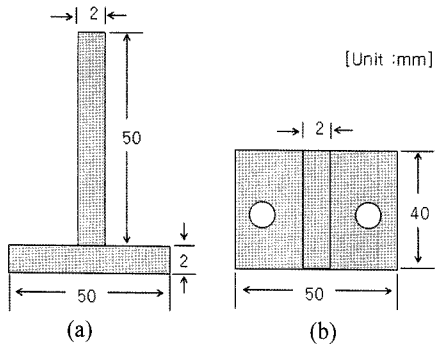


Fig. 9 Tensile test for T-joint welding sample (a: front view b: plane view)

인장시험은 T형상 용접부에 대한 건전성 평가 기준으로, 자동차 시트 구조적 강도에 대한 법규 규정은 FMVSS(Federal Motor Vehicle Safety Standard)에서 정한 법규를 기준으로 하였으며, 특히 시트 구조물에 대한 강도 평가에 대한 법규인 FMVSS 207에서 나타난 것과 같이 시트 중량의 20배의 전방 하중인 373kN/mm²에서 과도한 변형이 발생해서는 안 되며, Slider Rail에 사용된 취부 볼트 인장응력은 981N이다.^{9,10} 그러므로 용접부 간격 0, 0.2, 0.4mm에 따른 레이저 용접 조건에서 허용되는 용접부 간격에 대한 평가는 용접부의 인장응력이 상기 볼트 인장응력 값보다 높은 경우를 적합한 용접결과로 기준을 설정하였다.

Table 2는 용접부 간격에 따른 인장시험 결과를 나타내었다. 용접부 간격이 0mm, 0.2mm, 0.4mm인 모든 조건에서 최대 인장 하중이 볼트 인장응력 값 981N보다 10배 이상 높았다. 인장시험 결과 인장시험편 모두 T-형상 레이저 용접부가 아닌 볼트 연결부 구멍에서 모재를 뚫고 파단 되었다. Table 1에 나타난 결과는 용접부의 인장응력 값이 아닌 볼트 연결부의 모재에서 파단 되면서 발생한 응력결과 값이다. 인장시험 전후의 결과는 Photo. 2와 같다.

프레스 절단면의 가공 정도가 0.2~0.4mm이므로 용접부 간격 0.4mm인 조건에서도 레이저 용접부 보

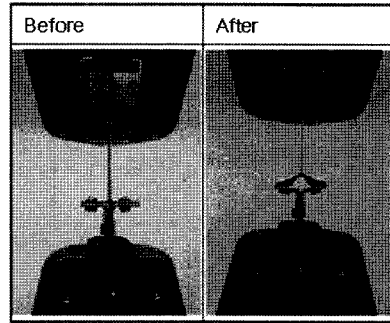


Photo. 2 Image tensile test of T-joint welding

다 볼트 연결부 구멍에서 먼저 파단되었으므로, Seat rail 레이저 용접시 용접을 위한 절단면은 프레스 절단면을 사용하여도 볼트 연결부 보다 높은 용접 강도가 유지되었음을 나타내고 있다.

4. 결론

T형상 SAPH 2.0T를 파이버 레이저로 공정변수를 변화시키면서 용접한 결과 아래와 같은 결론을 얻었다.

- 1) T형상 SAPH 2.0T의 관통용접을 위해서는 필요한 단위면적당 에너지밀도는 약 6,000J/cm² 이었다.
- 2) T형상 SAPH 2.0T의 관통용접은 출력 3kW, 레이저빔 이송속도 100mm/sec, 입사각 30도, Ar Gas 15 l/min에서 안정된 용접결과를 얻었다.
- 3) 용접부 간격이 0.4mm인 조건에서도 볼트 연결부 인장력보다 레이저 용접부의 인장 강도가 높게 유지되었다.
- 4) 시트레일 부품의 레이저 용접을 적용하여 기존 볼트 체결 방식에 비해 볼트 조립강도 이상의 용접 강도를 확인하였으며, 레이저 용접의 적용으로 생산성 향상과 재료비 절감 및 시트 경량화 등 많은 이점이 있을 것으로 예측할 수 있었다.

향후 seat rail을 대상으로 한 기존방식의 볼트 결합 방식과 레이저용접 방식과의 피로시험 및 충돌시험, 등 다양한 방식의 분석시험 연구를 통한 검증은 추후 연구과제에서 보고할 예정이다.

References

- 1) O. Svelto, Principles of Lasers, Springer, pp.365-

Table 2 Result of tensile test

Welding Gap	Load at Max. Load	Stress at Max. Load
0 mm	10,268 N	124.941 MPa
0.2 mm	10,111 N	123.032 MPa
0.4 mm	9,043 N	110.037 MPa

- 415, 1998.
- 2) B. Wedel, "Laser Processing Heads for Fiber Lasers Recent Developments for 10kW Laser power and Diffraction limited Beam Quality," 2nd International Workshop on Fiber Laser, 2006.
 - 3) F. Bachmann and P. Soldan, "Status der BMBF joint Research Projects in the Field of Fiber Lasers," 2nd International Workshop on Fiber Laser, 2006.
 - 4) Brose GmbH, Brochure for Japanese Market, www.brose.de, 2006.
 - 5) D. H. Kim, Laser Manufacturing Technology, Kyungmoon, p.245, 1992.
 - 6) 中井貞雄, Power Laser Technology, Ohmsha, p.92, 1999.
 - 7) J. F. Ready, LIA Hand Book of Laser Materials Processing, LIA-Magnolia Publishing Inc., p.319, 2001.
 - 8) Y. T. Cho, S. J. Na, A Study on Analysis of Laser ARC Hybrid Plasma in Helium Gas, KWS, 2004.
 - 9) J. M. Lim and I. Jang, "The Strength Analysis of Passenger Car Seat Frame," Transactions of KSAE, Vol.11, No.6, pp.205-212, 2003.
 - 10) S. U. Yu, E. M. Jung, C. H. Jeong and W. K. Na, "A Study on the Optimization of Aluminum Seat Slider Rail," Fall Conference Proceedings, KSAE, pp.962-966, 2004.