

CO₂ 레이저빔에 의한 이종재질 및 이종두께의 Tailored Blank 용접에 관한 연구

A study of Tailored Blank Welding between dissimilar materials and different thickness sheets by CO² Laser Beam

황창선, 김도훈, 유병길*, 이경돈*

Chang-Sun Hwang, To-Hoon Kim, Byung-Kil Yu*, Kyung-Don Lee*
연세대학교 공과대학 금속공학과, *대우고등기술연구원 및 아주대학교 시스템공학과

Key Words : Tailored blank welding, Laser welding, Taguchi method, Elimination of Zn-coating, Optimum condition, Formability.

ABSTRACT

This research was conducted as a fundamental study to apply tailored blank welding technique into automotive production process. The materials used in this study were 2.0mm thickness low carbon steel sheets and 1.2mm Zn-coated low carbon steel sheets. To ensure the reproducibility and to consider various factors, experiments were conducted by applying Taguchi experimental method with 6 factors. Every welding process was repeated 3 times to offset the effect of uncontrolled factors. Elongation and LDH(Limited Dome Height) were measured to evaluate formability of specimens and Optical microscopy, XRD, SEM, and EDS analysis were performed to observe the microstructures and to determine the solidification mode in the weld. The elongation of specimen welded with optimum condition was 83% of base metal, and LDH was 84% of base metal. In case of laser treated specimen where Zn coating was removed, elongation was 85% of base metal, and LDH was 85% of base metal. In fusion zone, phases were consisted of quasi-polygonal ferrite, bainitic ferrite, and martensite.

1. 서 론

자동차의 차체는 공학적으로 매우 복잡한 설계를 필요로 한다. 내식성, 중량감소, 부품

의 정확도, scrap 활용, 생산성 등을 모두 만족시켜야 하고 또한 적절한 가격과 안정성도 확보되어야 한다. 이러한 요건들을 충족시키기 위하여 두께, 재질, 강도등이 다른 두 종류 이상의 판재를 원하는 모양으로 절단하고 최종적인 프레스 성형전에 이들을 용접하는 Tailored Blank Welding 기법이 전 세계적으로 관심의 대상이 되고 있다. 이 공정이 자동차의 사이드 패널에 적용된 예를 보면 문짝(door)이 부착되는 부분에는 자동차문의 무게를 지지하기에 충분한 강도를 가져야만 하고 아랫부분은 부식에 대비하여 내식성을 가져야 한다. 따라서 종전의 방법으로는 이러한 요구를 만족시키기 어려웠으나 Tailored Blank Welding 기법을 사용하면 고강도나 내식성이 필요한 부분에 적절한 재료의 Tailored Blank를 용접하여 사용함으로써 우수한 재료를 얻을 수 있다.

본 연구실에서는 과거 동종, 이중두께와 이중재질간의 용접에 관한 연구를 수년간 수행해 온 바 있다. 이번 연구는 이중재질·이중두께의 용접으로서 Tailored Blank Laser Welding을 산업현장에 적용하기 위해 1.2mm 두께의 아연도금강판과 2.0mm의 비도금강판 사이의 레이저 용접을 실시하였고 Taguchi 실험계획법을 이용하여 최적의 레이저용접 공정조건을 도출하였다. 또한 얻어진 조건에 대해 가장 중요시되는 성형성 평가를 수행하였으며 아연도금제거를 위한 레이저 열처리의 영향을 조사하였다. 그리고 급속학적인 측면에서 용접부의 상을 예측하였다.

2. 실험방법

2.1 시편의 준비 및 레이저 용접

본 실험에 사용된 시편은 자동차용 극저탄소강판으로서 표면에 아연이 45g/m²(6.3

μm)로 도금된 1.2mm 두께의 강판과 도금되지 않은 2.0mm 강판을 사용하였다. 시편은 용접후 제작될 시험시편의 규격을 고려하여 300mm×80mm의 크기로 절단한 후, 용접되는 면을 연마하여 맞대기 용접간격의 오차를 줄였다. 시편의 화학조성은 Table. 1에 나타내었다.

Table. 1 Chemical composition of base metal

	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Al	Fe
아연도금 강판 (1.2mm)	0.011	0.006	0.148	0.018	0.012	0.027	0.027	0.023	0.091	bal.
저탄소 강판 (2.0mm)	0.05	0.0017	0.279	0.010	0.012	0.013	0.015	0.025	0.026	bal.

용접은 맞대기 용접을 수행하였으며 본 실험에 쓰인 레이저는 고등기술연구원의 4KW급 연속파(Continuous wave) CO₂레이저를 사용하였다. 용접시 시편의 장착과 변형방지를 위하여 공기압력에 의해 작동되는 JIG를 사용하였으며, 생성되는 플라즈마와 증발기체를 제거하고 용접부의 산화를 방지하기 위해 보조가스를 side-shielding 방식으로 시편과 약 45° 정도의 각도로 불어 주었다. 또한 두 시편간의 맞대기 용접간격을 조정하기 위하여 두 개의 Gap gauge를 사용하였다. 전체적인 시편배치의 모식도는 Fig. 1과 같다.

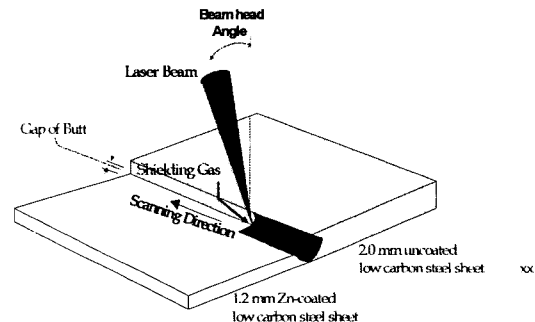


Fig. 1 Schematic illustration of laser welding

2.2 다구찌 실험계획법

공정의 최적화를 위한 레이저용접의 최적 조건을 구하기 위해서는 여러가지의 변수를 복합적으로 고려해야 하며, 이 기법이 산업 현장에 도입되기 위해서는 레이저용접의 재현성이 확보되어야 한다. 이를 고려하여 본 연구에서는 여러 변수를 효과적으로 조절하면서 실험의 양을 줄이고 동시에 실험의 재현성도 얻을 수 있는 다구찌 실험계획법을 도입하였다. 용접변수로는 레이저출력, 주사 속도, 맞대기 용접간격, 초점위치, 보조가스의 유속, 헤드의 각도를 선택하여 가능한 모든 인자를 3수준으로 사용하였으며, 이들을 L27313직교배열표에 배치하여 이 조합에 따라 각 3회의 반복실험을 수행하였다.

2.3 성형성 평가

성형성(formability)이란 재료가 파단없이 소성변형될 수 있는 능력, 또는 재료가 상대적으로 소성변형되기 쉬운 정도를 말하며, 자동차의 생산공정에 적용하기 위해 실시되는 tailored blank laser welding은 일단 용접된 후에 금형에 의해 원하는 모양으로 변형시키는 press공정을 거치게 되므로 용접선을 포함한 판재에 대한 성형성의 고려가 매우 중요하다. 따라서 본 실험에서는 미소경도시험, 인장시험과 dome height 시험으로 성형성을 비교하였다.

용접된 시편에서 모재와 열영향부 및 용접부의 경도 변화를 알아보기 위하여 모재에서 열영향부와 용접부를 지나면서 0.1mm 간격으로 Vickers 경도를 측정하였다. 측정 조건은 100g의 하중과 5초의 loading time을 주었다. 또한 용접부 내에서 급냉으로 형성된 고경도상을 확인하기 위하여 25g의 하중, 10초의 loading time으로 미소경도를 측정하였다.

인장시편은 ASTM subsize type E8-78 규격에 따라 소형판상으로 제작하였으며 용접된 시편과 연신율을 비교하기 위하여 모재에 대해서도 같은 시험을 실시하였다. 특성치로 얻은 연신율을 최적조건도출에 사용하였다. 최적조건을 얻기 위한 시험에서는 용접부와 인장방향이 서로 평행을 이루게 하여 각 시편 용접부의 인장특성을 비교할 수 있게 하였다. 최적조건 확인시험에는 용접부가 인장방향에 평행한 경우와 수직인 경우 모두를 시험하여 각각 성형성을 확인함과 동시에 용접이 건전하게 이루어졌음을 확인하였다.

stretching mode의 dome height 시험은 성형할 판재를 고정시킨후 아래에서 일정한 속도로 볼을 올리며 판재가 변형되다가 파단될 때까지의 높이(LDH, limited dome height)를 구하는 실험이다. 역시 비교를 위해 모재와 용접시편 각각에 대해 실시하였다.

2.4 레이저에 의한 표면의 아연도금제거

아연도금강판은 우수한 내식성과 저렴한 가격을 가지고 있으나 저탄소강판의 도금층을 구성하는 아연은 비등점이 906℃로 철의 녹는점인 1539℃보다 훨씬 낮은 온도에서 증발하게 된다. 이에 의해 아연증기가 용접부내에 trap되어 pore를 형성하거나 플라즈마를 형성하여 레이저빔을 차장한다. 따라서 본 연구에서는 이러한 악영향을 미치는 아연도금의 영향을 제거하기 위하여 최적조건에 대하여 레이저빔에 의해 용접시킬 구역 표면의 아연도금을 제거한 후 용접하고 이를 제거하지 않은 경우와 비교해 보았다. 제거방법은 레이저빔을 이용하여 용접될 아연도금강판의 표면을 906~1539℃사이로 가열하였으며 이때의 조건은 레이저출력 500W, 주사속도 7m/min이었다.

2.5 미세조직관찰 및 상분석

건전한 용접부의 bead모양을 확인하고 기계적 특성평가의 결과와 미세조직과의 연관성을 밝히기 위하여 용접된 시편의 조직관찰을 수행하였다. 용접부 비드의 거시적인 형상을 살펴보고, 용접부에 형성된 상을 평가하기 위하여 광학현미경을 사용한 조직관찰을 실시하였다. 용접된 시편에서 용접부 단면을 취하여 기계적인 연마과정을 거친 후, Nital etchant나 Marshall etchant, SASPA-Nansa SS.60으로 에칭하여 광학현미경으로 관찰하였다.

용융부의 응고시 상변화를 확인하기 위하여 XRD분석을 행하였으며, 비교를 위해 모재와 용접부 각각에 대해 분석하였다. 사용장비는 Rigaku사 D/MAX-RC 였으며, beam power는 30kV, 20mA의 조건에서 Cu target을 이용하여 2θ를 30° 에서 100° 까지 0.02° 씩 변화시키면서 분석하였다.

용접부 내에 모재의 성분이외에 Zn등이 포함된 계재물이 생성되었는지 조사하기 위해 EDS분석을 하였으며, 기계적인 Test를 거친 후 파단면을 관찰하기 위하여 주사전자현미경에 의한 분석을 수행하였다. 주사전자현미경은 JEOL사의 JSM-6400 model을 사용하였으며, 파단부의 관찰은 2000배로 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 다구찌 실험계획법에 의한 최적조건의 도출

S/N(Signal/Noise)비를 사용한 다구찌 실험계획법의 적용과정은 다음과 같다. 먼저 실험에서 고려하여야 할 실험변수(인자, factor)를 설정하고 각 변수들에 대하여 그 범위(수준, level)를 설정한다. 이렇게 설정된 실

험의 변수와 그 수준에 대해서 적절한 직교배열표(Orthogonal Array)를 선택하여 특성치를 얻는다. 이렇게 얻어진 인장시험과 dome height 시험의 특성치는 Table. 2와 같다. 여기서 A,B,C,D,F,G인자는 각각 레이저출력, 주사속도, 초점위치, 보조가스의 유속, 맞대기 용접간격, 헤드의 각도를 나타낸다. 이렇게 구해진 연신율과 LDH의 S/N비는 망대특성, 즉 가장 큰 값이 최적일 때의 공식인 $S/N \text{ Ratio} = -10 \log\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2}\right)$ 에 특성치를 대입하여 얻고 분산분석(ANOVA)과 평균분석(ANOM)을 하여 최적조건을 얻는다.

Table. 2 Formability value of welded specimen on optimum condition

	Elongation(%)				LDH(mm)				
	1회	2회	3회	average	1회	2회	3회	average	
모재 (1.2t)	45.2	46.1	44.8	45.37	23.1	22.4	22.3	22.6	
모재 (2.0t)	49.2	48.2	49.6	49.0	25.4	26.2	25.7	25.7	
최적 조건	수평	38.8	38	36.4	37.7	19.5	18.7	18.9	19.03
	수직	24.1	23	21.8	22.97				
모재(1.2mm)대비 연신율은 수평83.09% / 수직50.63%					모재(1.2mm)대비 LDH는 84.2%				

분산분석은 어떠한 인자가 각 특성치의 값에 어느정도 영향을 미치는 지를 알 수 있게 해준다. 분산분석시 시행된 F-검정에서는 F₀가 F(005)보다 큰 경우에 95%의 유의수준에서 그 인자가 특성치에 영향력이 있다고 하며, 통상 2이상의 F₀값을 가지는 인자는 그 유의성이 인정된다. 연신율과 LDH값의 분산분석 결과 두 경우 주사속도

가 가장 유의한 인자로 판명되었으며 맞대기 용접간격의 유의성도 F_0 의 값이 2이상이므로 유의한 인자로 생각할 수 있다. 또한 연신율의 분석 결과 레이저출력도 2에 가까운 값을 나타내므로 유의하다고 할 수 있고 LDH값의 분석결과에서는 맞대기 용접간격과 헤드의 각도도 유의함을 알 수 있었다. 평균분석은 각각의 실험인자들이 어떠한 수준에서 가장 좋은 특성치를 보여주는지를 알 수 있게 해준다. 분산분석결과 유의하다고 판단되는 인자에 대해 평균분석한 결과 연신율의 경우 레이저 출력의 경우에는 3KW, 주사속도의 경우에는 6m/min, 맞대기 용접의 간격은 0.1mm가 가장 바람직한 수준인 것을 알 수 있었다.

같은 방식으로 Dome Height Test를 평균 분석한 결과 주사속도는 4m/min, 맞대기 용접간격은 0.1mm 그리고 헤드의 각도와 보조가스 유속은 각각 2° 와 55CFH에서 S/N 비를 가장 크게 하는 수준들이었음을 알 수 있었다. 이중 주사속도는 연신율과 LDH의 평균분석결과 그 최적치가 다르나 용접부의 성질이 연신율에 더 큰 영향을 끼치므로 6m/min을 최적으로 얻었다. 초점위치는 분산분석의 결과로 보아 특성치에 큰 영향을 미치지 못하므로 일반적인 수준인 -0.3mm 를 얻었다.

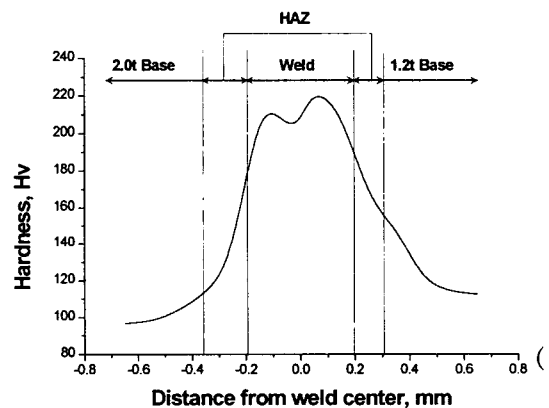
이상의 실험과 S/N ratio분석을 통하여 도출된 최적의 용접조건은 레이저 출력 3KW, 주사속도 6m/min, 맞대기 용접간격 0.1mm, 보조가스유속 55CFH, 초점위치 -0.3mm , 헤드의 각도는 2° 였다.

3.2 성형성 평가와 레이저 열처리의 영향 관찰

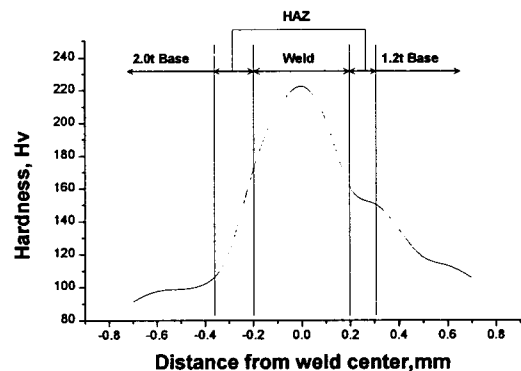
본 실험에서 설정된 최적조건이 Tailored blank welding의 적용에 필요한 성형성을 확보했는지를 확인하고 이 조건에 대해 레이저에 의해 표면의 아연도금을 제거한 후

용접하여 두 시편간의 비교를 실시하였다.

일반적으로 경도가 높은 재료는 낮은 성형성을 가진다. 최적조건으로 용접된 시편과 레이저로 열처리한 후 용접한 시편을 가지고 모재에서 HAZ부, 용접부, 다시 HAZ부, 모재에 이르기까지의 Vickers 경도를 찍어 용접부의 경화정도를 조사해 보았으며 이 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 용접부의 경도는 두 시편 모두 약 230Hv정도로 모재보다 크게 증가되어 있으며 서로 비슷한 분포를 가지고 있었다. 이러한 경화는 레이저용접시의 급속냉각에 의한 용접부의 결정립 미세화와 고경도상의 형성, 그리고 용접 후 남은 잔류응력의 영향으로 생각된다.



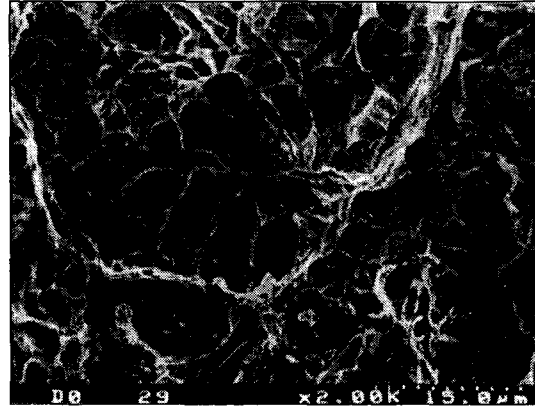
a) Optimum condition



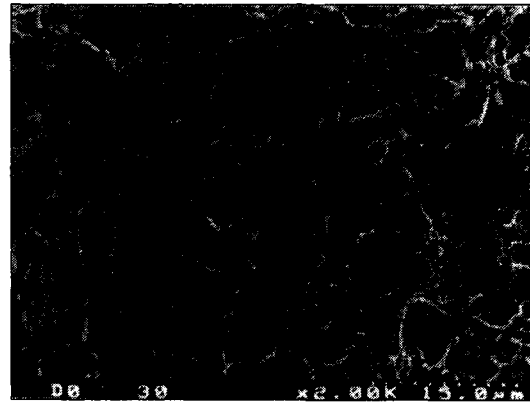
(b) Optimum (Zn제거)

Fig. 2 Microhardness distribution in Optimum & Laser treatment weld

도출된 최적조건으로 용접된 시편과 레이저로 열처리한 후 용접한 시편을 가지고 연신율을 비교하여 보았다. 시편은 주응력 방향이 용접선에 평행한 시편과 수직인 시편, 두 종류를 모두 시험하였다. 일반적으로 일축인장시험에서 용접선에 평행한 방향으로의 인장시험은 용접부의 연신율을, 용접선에 수직인 방향으로의 인장결과는 용접이 잘 되었는지를 평가하는 기준으로 사용된다. 성형성을 가장 잘 대표하는 연신율의 경우, 최적조건의 경우 모재는 Table. 3과 같이 45.37%, 용접선에 평행하게 인장한 시편은 37.7%, 레이저 열처리한 시편은 38.6%로서 이는 tailored blank의 적용에 필요한 기준인 모재대비 80%를 상회하는 만족할만한 성형성을 보여 주었으며 레이저 열처리 결과 더 높은 연신율을 얻을 수 있었다. 또한 용접선에 수직인 방향으로 인장한 경우에는 각각 모재에 비해 50.63%, 51.2%의 연신율로서 수평인장의 경우보다 성형성은 떨어지거나 약한쪽 모재인 1.2mm 아연도금강판쪽에서 파단이 일어나므로 용접이 잘 수행되어 접합의 정도가 양호함을 보여주고 있다.



(a) Base metal



(b) Weld on the optimum condition

Fig. 3 SEM fractograph

Table. 3 Results of tensile test

	인장방향	Elongation(%)				Average
		38.8	38	36.4	37.7	
Optimum	Parallel	38.8	38	36.4	37.7	
	Vertical	24.1	23	21.8	22.97	
Optimum (Zn 제거)	Parallel	37.3	40.2	38.5	38.6	
	Vertical	22.6	22.9	24.2	23.23	

인장시험 후 파단면의 주사전자현미경 사진은 Fig. 3과 같다. 모재 최적 조건의 용접부 모두 연성파괴에서 보여지는 dimple 파괴 양상을 보여주고 있으며 용접부에서 얻은 사진은 급속냉각에 의해서 dimple이 좀더 미세함을 확인할 수 있었다.

성형성 평가방법의 다른 하나로 stretching mode의 Erichsen test를 수행하여 판재의 성형성을 대표하는 LDH를 측정하였다. 최적조건과 레이저로 열처리한 시편 모두 1.2t 아연도금강판에서 파단이 일어났다. 이는 에릭슨 시험시 주변형 방향은 용접부에 수직인 방향이 되어 변형이 시작됨에 따라 두꺼운 쪽보다는 얇은 쪽에서 변형이 집중되어 용접선이 2.0t 모재 쪽으로 이동하여 1.2t 모재에서 파단이 일어나기 때문이다.

최적조건의 용접시편에서는 Table. 4와 같이 19.03mm, 레이저 열처리한 시편에서는 19.23mm의 LDH값을 얻을 수 있었으며 이는 각각 모재 성형성의 84.27%와 85%에 해당하는 높은 값이다.

Table. 4 Results of dome height test

	LDH(mm)			Average
Optimum	19.5	18.7	18.9	19.03
Optimum (Zn 제거)	18.9	19.4	19.4	19.23

3.3 레이저 용접부의 형상

본 실험을 통해 결정된 최적조건과 레이저 열처리한 시편의 용접부 형상을 50배의 광학현미경으로 Fig. 4와 5에 나타내었다.

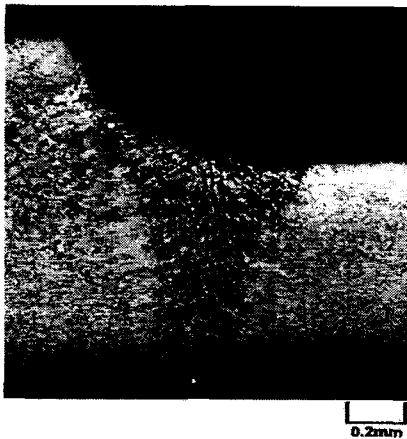


Fig. 4 Optical microstructure of optimum specimen

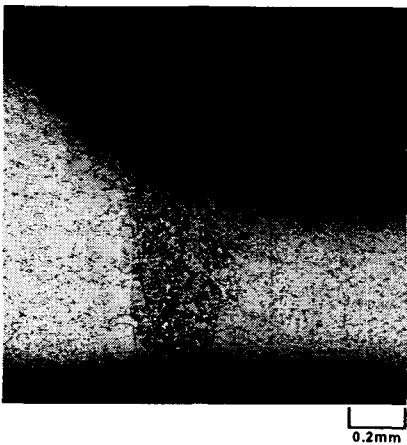


Fig. 5 Optical microstructure of laser treated specimen

Tailored blank welding의 기계적 성질에 크게 영향을 끼치는 용접부의 폭은 약 $400\mu\text{m} \sim 800\mu\text{m}$, HAZ부가 2.0mm 저탄소강판쪽은 약 $150\mu\text{m}$, 1.2mm 아연도금강판쪽은 약 $100\mu\text{m}$ 로 레이저용접의 장점인 좁은 용접부와 열영향부로 우수한 성형성을 나타낼 것이라 예측할 수 있었다. 또한 pore나 crack이 없는 건전한 용접이 수행되었음을 확인할 수 있었다. 좀더 명확한 용접부와 모재의 관찰을 위하여 200배의 광학현미경으로 찍은 Fig. 6을 보면 모재는 α -ferrite의 전형적인 모습을 보여주고 있으며 HAZ는 입자가 조대화된 모습을, 그리고 용접부에서는 급냉에 의해 미세화된 입자를 볼 수 있다. 용접부의 결정립 미세화는 경도분포양상과도 부합되며 이러한 미세화 기구는 용접부의 경도와 연신율을 모두 향상시켜 본 실험에서 용접된 시편의 성형성이 모재에 근접하게 해주는 주요한 원인으로 생각할 수 있다.

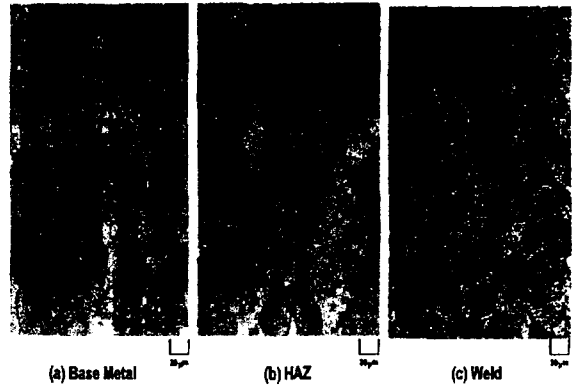


Fig. 6 Microstructure of base metal, HAZ and weld zone

본 실험에는 아연도금강판이 사용되어 최적화된 용접부의 내부에 용접시 발생한 아

분석결과, 용접부내에서는 Fe의 peak만이 발견되고 아연과 그 외의 어떤 계재물의 peak도 관찰할 수 없었다. 따라서 본 최적 조건의 용접시편에서는 아연증기가 적절히 제거되고 건전한 용접이 이루어졌음을 알 수 있었다.

3.4 용접부내 상의 분석

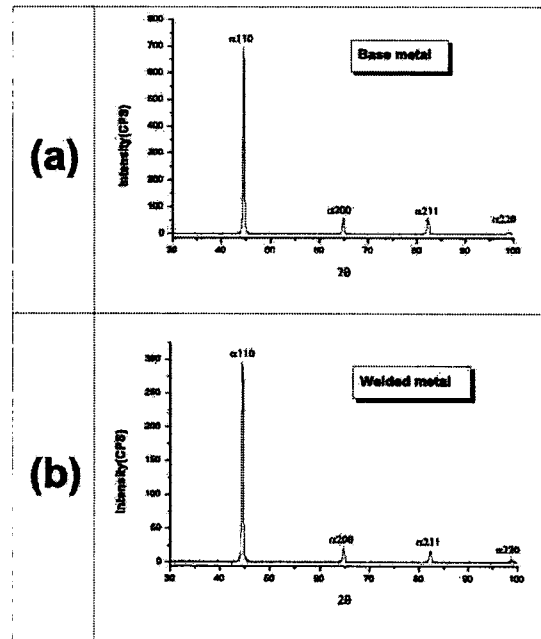
레이저빔에 의한 용접시 용접부는 급속응고로 인하여 입자의 성장이 억제되고 이로 인한 미세조직으로 기계적 성질이 우수한 용접부를 얻게 된다. 본 연구에서는 급속응고에 의해 생성된 상의 예측을 하기 위하여 Katayama와 Matsunawa⁹⁾의 primary dendrite arm spacing과 냉각속도와의 관계식을 사용하였다. 통계적인 방법인 교선법으로 primary dendrite arm spacing을 측정된 결과 DAS는 대략 3.5 μm 정도였으며 이 값을 식에 대입한 결과 1.2×10^4 K/s 정도의 냉각속도를 예측할 수 있었다.

용접부에 존재하는 상을 조사하기 위해 XRD(X-ray Diffraction Analysis)분석을 실시하였다. Fig. 7은 모재와 용접부의 XRD분석 결과를 보여주고 있다. 용접부는 레이저 용접에 의해 급속응고와 빠른 냉각속도를 가지므로 상온에서도 γ -오스테나이트 조직이 잔류할 가능성이 있으나, XRD분석 결과에서는 모재와 용접부 모두에서 bcc 결정구조인 α -페라이트 peak만을 관찰할 수 있었다. 또한 광학현미경으로 용접부를 관찰한 결과 용접부는 morphology가 다른 여러 상이한 상들로 이루어져 있음을 알 수 있었다. 따라서 용접부에는 잔류 오스테나이트는 없으며 bcc 결정구조를 가지는 페라이트의 여러상들이 혼재하고 있을 것으로 생각되었다.

앞에서 DAS로 추정해 본 레이저 용접시의 냉각속도는 104 K/sec 정도로 계산되었고 이렇게 큰 냉각속도로 오스테나이트에서

페라이트로 변태할 때는 Fig. 8에서 알 수 있듯이 polygonal 페라이트, quasi-polygonal 페라이트, bainitic 페라이트, 마르텐사이트 등이 형성될 수 있다.

위 상들의 생성을 확인하기 위하여 용접부내에서 조직에 따른 미세경도를 측정해보았다. Fig. 9은 0.002%의 탄소함량을 가지는 극저탄소강에서 냉각속도에 따른 상의 경도를 보여주는데, 이 경도치를 Fig. 10의 (d),(e),(f)의 경도치와 비교해 본 결과 각각 quasi-polygonal ferrite, bainitic ferrite, martensite의 경도치와 유사함을 확인할 수 있었다. 따라서 용접부의 상은 Quasi-polygonal ferrite, bainitic ferrite 및 미량의 martensite 등의 혼합조직으로 형성되어 있다고 사료된다.



(a) Base metal (b) Welded zone

Fig. 7 X-ray diffraction pattern

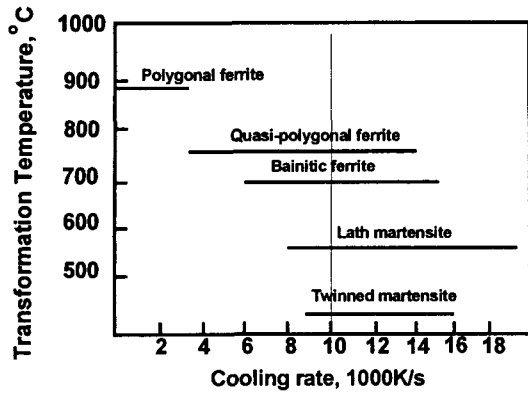


Fig. 8 Variation of transformation temperature with cooling rate

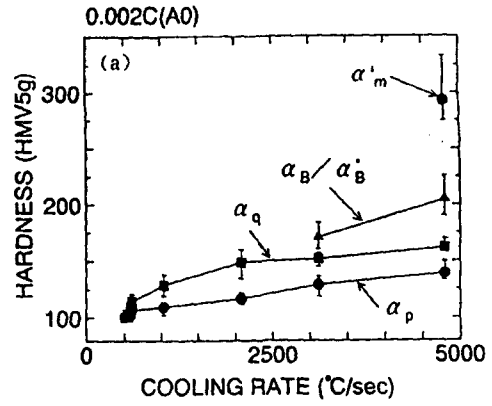
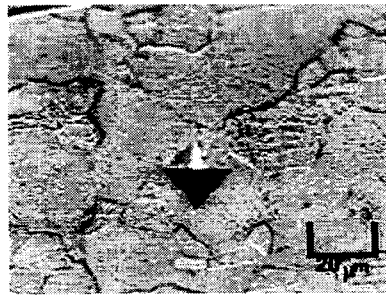
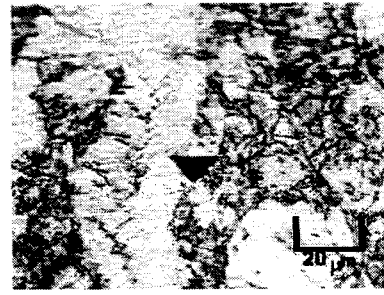


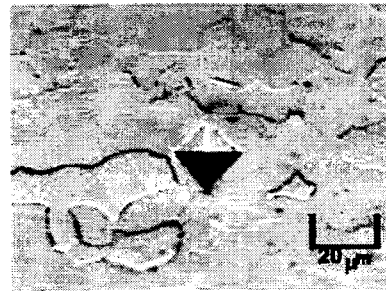
Fig. 9 Effect of cooling rate on microstructure and hardness



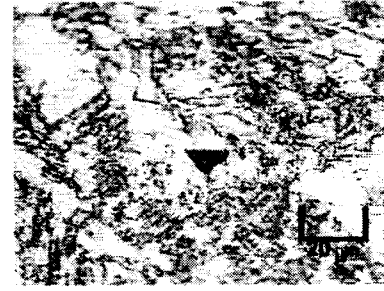
(a) 2.0t base metal, 97.9Hv



(d) Welded zone, 201.9Hv



(b) 1.2t base metal, 105.6Hv



(e) Welded zone, 231.5Hv



(c) HAZ, 138.4Hv



(f) Welded zone, 285.1Hv

Fig. 10 Vickers microhardness

4. 결 론

Taiored Blank Laser Welding을 산업현장에 적용하기 위한 기초실험으로 1.2mm 아연도금된 저탄소강과 2.0mm비도금된 저탄소강 사이의 레이저빔 용접은 수행하여 최적의 용접조건을 설정하고 최적의 용접시편에 대해 열처리를 수행한 경우와 그렇지 않은 경우의 성형성을 비교하였다. 그리고 금속학적 특성을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

다구찌 실험계획법을 통하여 우수한 성형성과 재현성을 가지는 최적의 조건을 도출할 수 있었으며 이 조건은 레이저 출력 3KW, 주사속도 6m/min, 맞대기 용접간격 0.1mm, 보조가스유속 55CFH, 초점위치 -0.3mm, 헤드의 각도는 2° 였다. 이렇게 얻어진 최적의 용접시편에 대하여 성형성 평가를 실시한 결과 연신율은 모재대비 83.09% (평행인장의 경우), 50.62%(수직인장의 경우)였으며 LDH는 모재의 84.2%로 모두 80%이상의 우수한 성형성을 얻을 수 있었다.

레이저 열처리에 의해 용접시킬 구역 표면의 아연도금을 제거할 수 있었으며 이 방법을 최적조건으로 용접에 도입하여 더욱 우수한 성형성을 얻을 수 있었다. 그리고 용접부의 조직은 레이저빔의 급속응고에 의해서 미세화 되었으며, 큰 냉각속도와 급속응고시 잔류응력의 도입으로 용접부의 상은 Quasi-polygonal ferrite, bainitic ferrite 및 미량의 martensite등의 혼합조직으로 형성되어 있다고 사료된다.

5. 참고문헌

1. 김도훈 : "레이저 가공학", 경문사, pp.272~

- 281, 1990
2. M. Bass : "Laser Materials Processing", pp.120~123, 1983
3. 박성현 : "응용실험계획법", 영지문화사, pp.175~195, 1990
4. 서종현, 김도훈, 유병길, 이경돈 : "CO₂ 레이저빔에 의한 저탄소강판과 아연도금강판의 Tailored Blank 용접에 관한 연구", 한국레이저가공학회지 제 1권 제 1호, pp.6~7, 1998
5. Symposium Book, New Aspects of Microstructures in Modern Low Carbon High Strength Steel, ISIJ, Tokyo, 1994
6. 박성현 : "품질공학", 민영사, pp.191~192, 1993
7. 정재훈, 김도훈, 유병길, 이경돈, 장낙영 : "다구찌방법을 적용한 자동차용 저탄소강판의 레이저 용접성 평가 (I)", 대한금속학회지 제35권 제 5호, pp.598~600, 1997
8. 정재훈, 김도훈, 유병길, 이경돈 : "다구찌방법을 적용한 자동차용 저탄소 강판의 레이저 용접성 평가 (II)", 대한금속학회지 제35권 제 5호, pp.604~605, 1997
9. S. Ktayama and A. Matsunawa : Proc. ICALEO, pp.60~67, 1984
10. W. Kurz, D. J. Fisher : "Fundamentals of Solidification", TRANS TECHPUBLITIONS, pp.240~242, 1986