



특징영역별 분산분석에 의한 이종두께 겹치기 CO₂ 레이저 용접에 대한 연구

이 경 돈*

*고등기술연구원 시스템제어/레이저응용 센터

A Study on the Lap Joint CO₂ Laser Welding of Different Gauge Sheets Using ANOVA in Characteristic Zones

Kyoung Don Lee*

*Center for System Control and Laser Applications, Institute for Advanced Engineering,
Yongin 449-863, Korea

Abstract

The laser welding in the automotive industries has been used widely for the butt joint of blank sheets rather than the lap joint of automotive body panels. But as a substitute for the spot welding of automotive body panels, the so called three dimensional laser welding will be important for the body panel engineers. Specially the laser welding of body panels with a smooth weld line is applied increasingly, for example, to the side panels.

So far, some criteria of the laser weld quality was suggested by in-house regulations or national standards from experiences and/or rule of thumbs. In the manufacturing places, a go or no-go criterion is adopted because of the simplicity or a lack of rational criteria. It is true specially for the selection of the process parameters, which gives the basic causes for the good quality of laser welds.

In this study, the effects of joint combination, gap and welding speed on the lap joint CO₂ laser welding of two mild steel sheets with different thicknesses are obtained through a 2×3×7 factorial experiment. The results of the weld quality are statistically analysed using analysis of variance (ANOVA) and compared between two characteristic zones, which are separated by the type of sectional shapes and the level of input energy per volume. The thickness combinations are 0.8mm/1.2mm, 1.2mm/0.8mm of mild steel sheets. The welding speed covers from the deep penetration to the partial penetration. The gap size has three levels of no-gap, 0.16mm, and 0.26mm. The bead width, penetration depth and input energy per volume are measured and used as the weld quality criteria.

(Received March 6, 2002)

Key Words : Different gauge lap joint, CO₂ laser welding, Analysis of variance(ANOVA), Joint combination effect, Gap effect, Welding speed effect, Automotive steel sheets

1. 서 론

자동차 차체에 적용되는 레이저 용접은 지금까지 블랭크 소재의 맞대기 용접이 주를 이루었으나 최근 들어 점용접을 대체하기 위한 차체 패널의 겹치기 레이저 용접이 점차 증가하고 있다^{1,2)}. 철강 차체 패널의 레이저 용접은 완전한 3차원의 곡선을 갖는 것이 특징으로 주로 2겹 또는 3겹의 겹치기 용접이 대부분이다.

레이저 용접에 대한 품질기준은 각 자동차 회사의 내부 규정이나 각 나라의 국내표준에 의하여 제시되어 있으며 그 기준은 기존의 아크 용접에 대한 기준과 레이저 용접의 특징을 함께 고려한 것이다^{3,4)}. 그러나 레이저 용접의 품질과 중요한 공정조건은 장비와 대상에 따라 결과가 달라 그 사이의 인과 관계를 정확히 파악하기가 힘들다. 또한 품질을 감시하는 장치의 불완전함과 기준의 모호함 때문에 실제 산업 현장에서 선택되는 품질 기준과 공정 조건은 대부분의 경우에 시행착오로 결

정되는 것이 보통이다. 그 중에도 레이저용접 중에 발생하는 플라즈마, 적외선, 자외선, 음향방사, 가청음과 등의 신호를 계측하여 용접불량과의 상호 관계를 규명하고자 하는 노력이 많이 진행되었으며 김종도⁵⁾, 이경돈⁶⁾, Sun⁷⁾ 등에 의하여 정리 발표되었다. 국내에서 최근에 손중수⁸⁾, 박현성⁹⁾ 등이 품질과 신호의 상호 관계를 정량적으로 나타내는 방법으로 통계적 방법이나 신경회로망 등의 인공지능의 방법을 적용하기도 하였다. 그러나 이와 같은 노력은 불량 감시에 초점이 주어져 있으며 용접비드 형상의 분석이나 품질기준을 규명하고자 하는 노력과는 거리가 있었다. 더구나 불량이 검출되었을 때 어떤 공정을 선택하여야 하는지 판단하는 공정제어에 대한 연구는 현재까지 드물다.

자동차 차체의 겹치기 용접의 품질기준에 맞는 공정 조건을 적절히 선택하기 위해서는 대상 패널의 두께나 간격을 포괄하는 기준 공정조건을 선정하고 공정조건의 변화에 따라 그 품질이 어떻게 변화하는지 관찰하여 전체적인 경향을 미리 파악하는 것이 중요하며 실제 공정 조건과 품질 기준을 정확히 예측, 조정하기 위해서는 이들을 특성별로 세밀히 분류하고 분석하는 방법이 필요하다. 이와 같은 접근법은 레이저 용접 지식의 정보화에 중요하며 더 나아가 지능형 레이저 용접 제어를 개발하는 기초가 될 것이다.

본 논문에서는 두께가 0.8mm와 1.2mm의 이중두께의 판재 두 장의 겹치기 용접에 대하여 그 품질을 관찰하여 공정조건과 그 품질의 인과 관계를 체계적으로 파악하고자 하였다. 일반적으로 완전용입과 부분용입으로 구분되던 것을 비드 단면의 특성과 단위부피당 입력에너지의 경향에 따라 특징영역으로 세분화하였으며 특징영역별로 통계적 실험계획과 분산분석법을 적용하여¹⁰⁾ 주요 인자를 검출하고 공정조건과 단면형상간의 정량적인 관계를 도출하였다. 주요인자인 판재 두께의 결합순서에 따른 조합과 용접속도와 판재간격(gap)의 변화에 대한 겹치기 용접의 특성을 분석하였다.

2. 실험방법

2.1 사용재료 및 공통조건

본 논문에서 사용한 재료는 0.8mm, 1.2mm 두께의 표면 처리되지 않은 저탄소강이다. 이의 화학적성분과 기계적 성질을 Table 1과 2에 실었다. 판재의 크기는 가로150mm×세로300mm로 용접선 길이 200mm이다. 용접시험에 사용된 장치는 4kW CW CO₂ 발전기와 4축 NC로 이루어진 레이저 용접기이다. 레이저 용접 할 때 발전기의 출력을 최대 4kW로 설정하였다. 차폐가스(shield gas)로 아르곤(Ar) 가스를 사용하고 가

Table 1 Chemical composition of mild steel used (wt.%)

C	Mn	P	Si	S	S-Al
<0.0025	<0.15	<0.013	<0.02	0.013	0.035

Table 2 Mechanical properties of mild steel used

Young's modulus	Poisson's ratio	Uniform elongation	Tensile strength
210GPa	0.3	40%	299MPa

스 유량은 28.3l/min로 고정하였다. 가스노즐은 용접 진행방향에 위치하며 약 45도의 경사각을 갖는다.

2.2 시험방법

2.2.1 목적

용접속도와 판재간격에 따른 이중두께 겹치기 용접 시험을 실시하여 이중두께의 조합에 따른 용접특성을 분석하고 유사성과 차이점을 비교하여 그 영향을 파악하였다. 이중 두께의 겹치기 용접시험은 두께 0.8mm의 판재가 위에 두께 1.2mm의 판재가 아래에 있을 때를 C1조합이라 하였다. C2 조합은 C1조합과는 상하의 판재가 바뀐 것으로 상부에 두꺼운 1.2mm판재가 있는 조합이다.

2.2.2 요인배치법

이중 두께의 판재에 대하여 2×3×7의 요인배치법(factorial design)으로 용접실험을 행하였다. 세 개의 인자는 두께조합(C), 판재간격(G), 용접속도(V)로서 각각 2수준, 3수준, 7수준을 갖는다. 판재간격의 평균 크기는 0.0mm(이후 G1), 0.16mm(이후 G2), 0.26mm(이후 G3)이다. 용접속도는 2.7m/min부터 0.3m/min씩 증가하여 4.5m/min까지 변화시켰으며 시험방법을 정리하여 실험번호를 붙이면 Table 3과 같다. 실험은 총 42회이고 각 실험조건마다 단면을 3개씩 채취하여 관찰하여 3회의 반복 실험값을 얻었다.

2.2.3 측정 및 계산

1) 단면 형상 및 특징

각 실험번호에서의 용접부 단면형상을 파악하기 위하여 한 용접조건에서 3개의 단면을 진단하여 단면의 형상을 광학현미경으로 관찰하여 사진을 찍고 단면형상에서 상부의 비드폭(w_t), 결합부 비드폭(w_i), 하부 비드폭(w_b), 용입깊이(P) 등을 측정하였다.

2) 단위부피당 입력에너지

용접속도(V)와 비드단면적(A_c)으로부터 단위부피당

Table 3 Experimental number of lap joint welding conditions

Combination Gap Speed	C1			C2		
	G1	G2	G3	G1	G2	G3
2.7	1	8	15	22	29	36
3.0	2	9	16	23	30	37
3.3	3	10	17	24	31	38
3.6	4	11	18	25	32	39
3.9	5	12	19	26	33	40
4.2	6	13	20	27	34	41
4.5	7	14	21	28	35	42

입력에너지(E_v)를 계산하여 실험조건에 따른 변화를 관찰하였다. 비드단면적은 레이저에 의하여 용융된 금속의 양을 대표할 수 있으나 본 논문의 시험에서는 레이저 출력을 최대로 고정하고 흡수된 에너지를 용접속도로 결정한 것으로 용접속도가 변화하면 용접시편의 단위부피당 입력되는 에너지의 양이 변화한다. 입력되는 에너지가 크면 용융된 금속의 부피, 즉 비드단면적이 증가하므로 서로 다른 속도에서의 비드단면적을 비교하여 금속의 양을 계산하고 에너지 효율을 비교하는 것은 정확하지 않다. 따라서 비드단면적 대신에 단위부피당 입력에너지를 사용하여 용접속도가 다른 조건에서의 에너지 효율을 비교한 것이다. 단위부피당 입력에너지는 다음의 식에 의하여 계산된다.

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

금속에 대한 CO₂ 레이저의 흡수율에 대하여 언급한 문헌들이 있으나 이것은 본 연구의 범위를 벗어난다. 더구나 용융된 강철에 흡수된 레이저 에너지를 정확히 측정하는 것도 어려움이 있고 판재 주위로 없어지는 열손실을 용입깊이에 따라 정확히 측정, 추측하는 것도 어렵다¹¹⁾. 따라서 본 논문에서는 용융금속에 흡수된 에너지 대신에 레이저 출력을 사용하여 모든 열손실을 포함한 단순 입력에너지를 사용하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 단면 특징별 영역 구분

3.1.1 단면모양

각 실험번호 1부터 42까지의 대표적인 단면 형상을 Fig. 1에 실었다. 판재간격의 크기는 실제 단면형상에

서 측정된 판재간격의 평균을 나타낸다. Fig. 1의 단면 형상은 크게 3 종류의 모양으로 분류할 수 있다. 첫째는 완전용입의 대표적으로 관찰할 수 있는 모양으로 허리부분이 잘록한 장구 모양의 단면형상(이후 S1)으로 용접속도 3.3m/min 이하에서 관찰된다. 둘째는 완전용입에서 부분용입으로 전환하는 경계점에서 관찰되어지는 배불뚝이 절구통 모양의 단면형상(이후 S2)으로 C1조합의 용접속도 3.9m/min 등에서 관찰된다. 셋째는 부분용입의 대표적 단면 형상인 위가 넓고 아래가 좁은 사발모양의 단면형상(이후 S3)이다.

용접속도가 충분히 작을 때 S1의 단면형상이고 용접속도가 높아지면 S2를 거쳐 S3의 단면형상을 보이나 단면형상이 변화하는 시점은 각 조합과 용접 조건에 따라 다르다. C1조합에서는 판재간격 G1, G2, G3에서 S1은 용접속도 3.6m/min까지 관찰되고 S2는 용접속도 3.9m/min에서 S3는 그 이상의 용접속도에서 관찰된다. C2조합의 판재간격 G1에서는 C1조합과 마찬가지로 용접속도 3.6m/min까지 S1이고 용접속도 3.9m/min에서 S2, 그 이상의 속도에서 S3이다. 판재간격 G2에서는 S1은 용접속도 3.3m/min 까지 관찰되고 3.6, 3.9m/min 속도에서는 S2가 관찰되며 4.2m/min 이상의 속도에서는 S3이 관찰된다. 판재간격 G3에서는 S1은 용접속도 3.3m/min 까지 관찰되

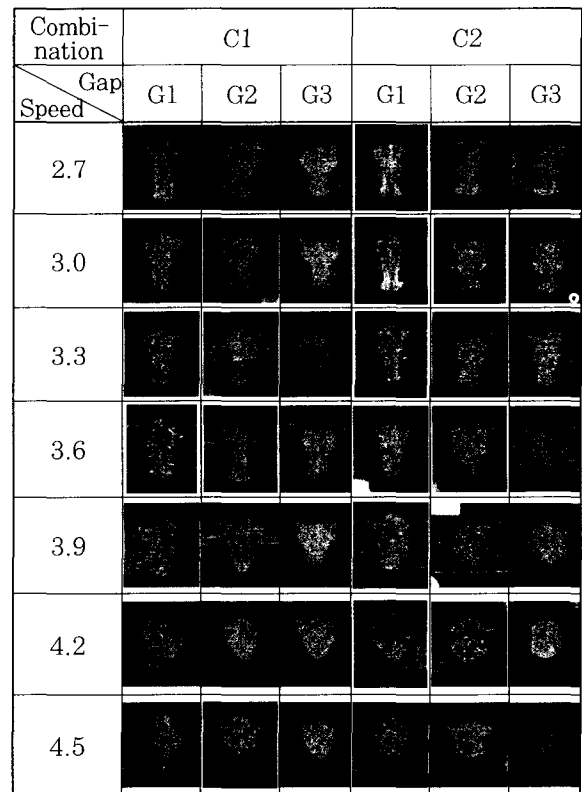


Fig. 1 Sectional geometry due to thickness combination, welding speed and gap

고 3.6m/min 속도에서는 S2가 관찰되며 3.9m/min 이상의 속도에서는 S3이 관찰된다.

3.1.2 결합부 비드폭

비드폭은 단면의 모양에 직접적으로 영향을 받는 특성치이다. 상부비드폭, 결합부비드폭 및 하부비드폭의 상대적인 크기는 3개의 단면 모양의 차이를 잘 반영하며 이중 결합부 비드폭은 겹치기 판재의 결합력을 주는 결합부의 전단력에 중요한 영향을 준다.

C1 조합의 결합부 비드폭의 용접속도와 판재간격에 따른 변화를 Fig. 2에 실었다. 낮은 용접속도에서 결합부 비드폭은 판재간격에 따라 1.1mm에서 1.4mm 사이에서 서서히 감소하다가 용접속도 3.6m/min 이후에서 급격한 증가를 보여 1.4mm부터 다시 서서히 감소한다. 결합부 비드폭의 변화는 위에서 언급한 단면 모양의 변화와 일치하며 크게 두 그룹으로 나눌 수 있다. 즉, 단면 모양이 S1인 경우의 그룹과 단면 모양이 S2, S3, S4인 경우의 그룹이다.

3.1.3 용입깊이

Fig. 3의 용입깊이는 완전용입에서는 두 판재 두께의 합인 2mm가 되고 부분용입에서는 판재 윗 표면에서부터 용입된 깊이를 나타낸다. 이 때 비드 표면의 요철은 고려하지 않았고 판재 간격 또한 제외된 값이다. Fig. 3에서 C2조합의 용입깊이의 변화를 살펴보면 G1에서

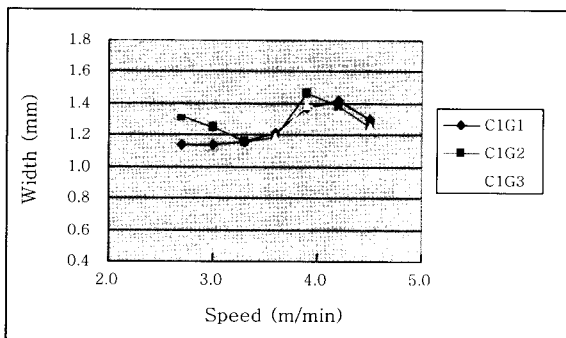


Fig. 2 Interface bead width of combination C1

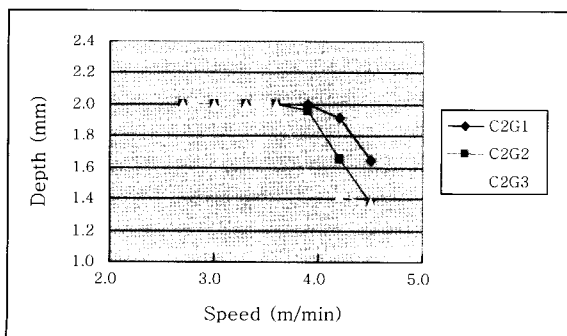


Fig. 3 Penetration depth of combination C1

용접속도 3.9m/min까지 완전용입이고 그 이상의 속도에서는 용입깊이가 점차 일정하게 감소한다. 용입깊이가 2.0mm인 경계로 하여 완전용입영역과 부분용입영역의 두 영역으로 구별되나 세 개의 단면모양 S1, S2, S3의 경계와는 정확히 일치하지 않는다.

3.1.4 단위부피당 입력에너지

단위부피당 입력에너지의 그래프를 Fig. 4에 실었다. 단위부피당 입력에너지의 용접속도에 따른 경향을 살펴보면 위의 특성들과 마찬가지로 두 영역으로 나눌 수 있으나 위의 용입깊이의 경계와는 또 다른 경계를 갖는다. 완전용입에서의 단위 부피당 입력에너지는 최대 35J/mm³의 값을 가지며 용접속도가 증가하면서 적은 에너지가 입력될수록 그 값은 감소한다. G1, G2 조건에서 부분용입의 경계인 용접속도 3.9m/min에서 단위 부피당 입력에너지가 약 22J/mm³으로 최소가 되며 이는 동일한 에너지에 대하여 많은 금속이 용융됨을 의미한다. 금속 용융 부피를 고려하면 최대의 에너지 효율을 내며 이 지점에서 결합부 비드폭이 최대가 되나 판재간격이 큰 G3에서는 다른 경계를 갖는다.

3.2 특징영역

지금까지 용접속도에 따른 단면형상 특징들의 결과를

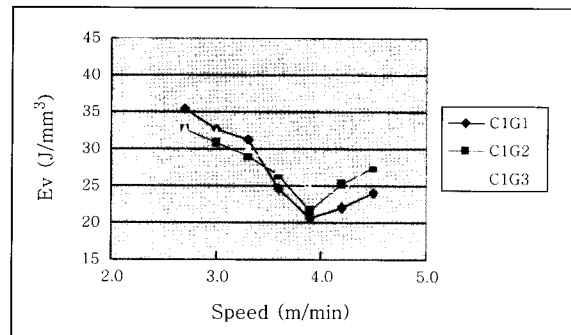


Fig. 4 Input energy per volume of combination C1

Table 4 Welding zones characterized by sectional features and input energy per volume

Speed	V1	V2	V3	V4	V5
Type of Shape					
Penetration	P1		P2		
Ev	EV1		EV2		
Zone	Z1	Z2	Z3	Z4	
Border line	T1		T2	T3	

살펴보면 단면모양(shape), 용입깊이와 단위부피당 입력에너지(Ev)의 영역과 경계가 그 성격에 따라 차이가 있음을 알 수 있다. 이들의 특징별 영역을 정리하여 Table 4에 실었다. 용접 속도는 단면형상 특징들에 따라 4개의 영역(이후 특징영역, characteristic zone, Z1~Z4)으로 구분할 수 있으며 영역간의 경계(border line)를 T로 표시하였다. 용접속도 V1부터 V5까지 용접실험을 하였을 때 단면이 장구모양(S1)의 형상을 관찰한 용접속도가 V1, V2이고 배불뚝이 모양(S2)의 형상(S2)을 관찰한 것이 V3이고 V4, V5에서는 사발모양(S3)의 형상을 관찰하였다면 Table 4의 단면 모양의 3개의 영역이 화살표와 같이 표시될 것이다. Fig. 1의 C1G1의 경우 S1, S2, S3의 각각의 경계가 V2=3.6m/min, V3=3.9m/min, V4=4.2 m/min이다. 마찬가지로 용입깊이도 완전용입(P1)과 부분용입(P2)의 두 개의 영역으로 구분되고 Ev의 영역도 각 조합의 경우에 두 개의 영역으로 구분할 수 있음을 Fig. 4에서 살펴보았다.

Z1영역은 가운데가 잘룩한 단면의 모양(S1)을 가지고 완전용입(P1)이며 키홀(keyhole)이 주도적으로 활동하여 Ev 값이 상대적으로 높은 영역(EV1) 등의 특징을 가지고 있다. Z2영역은 상대적으로 좁은 영역으로 배불뚝이 형상(S2)이고 완전용입(P1)이며 키홀의 활발한 활동이 줄어들고 열전도에 의한 부분용입으로 전환하기 전에 관찰되는 영역으로 Ev값이 상대적으로 급격히 낮아지는 최저점을 보이는 EV2의 초기영역의 특징을 보인다. Z3 영역은 실제 실험에서는 속도의 수준을 크게 하면 관찰하기 어려운 영역으로 Fig. 1의 C1G2 조건의 3.9m/min에서 부분용입의 특징인 사발모양의 단면(S3)을 가지고 완전용입(P1)이 관찰되는 최대의 용접속도 근처에서 관찰될 수 있다. 또한 Ev값은 상대적으로 낮은 EV2의 초기영역에 있다. Z4영역은 일반적으로 알려진 부분용입 영역으로 위가 넓은 사발모양(S3)이고 부분용입(P2)이며 EV2에 속하나 용접속도가 증가하면서 Ev 값이 증가한다. 각 영역의 경계를

T1, T2, T3로 나타냈다.

3.3 특징영역별 주요인자

3.3.1 특징영역별 요인분석

특징영역별로 각 특성에 대한 요인분석을 실시하였다. 용접실험은 2수준의 조합과 3수준의 판재간격과 7수준의 속도에 대하여 실시하였으나 앞에서 용접특징에 따라 네 영역으로 나누어짐을 알았으므로 요인분석도 영역별로 실시하고자 하였다. Z1영역은 용접속도 2.7m/min에서 3.3m/min의 범위이고 Z2는 과도기적 영역으로 구간이 짧고 해당용접속도도 3.6m/min로 볼 수 있다. Z3는 단면모양이 이미 S3이므로 모든 특성이 Z4와 동일하다고 할 수 있어 함께 고려하며 해당되는 용접속도는 3.9m/min 이상이다. 따라서 Z1영역과 Z3, Z4 통합 영역(이후 편리를 위하여 Z4영역으로 부른다.)은 각각 2×3^2 의 요인실험으로 볼 수 있으며 Z2는 해당 용접속도 3.6m/min에 대한 2×3 의 요인실험이다. 각 특성치에 대한 요인분석을 위의 세 개의 영역에 대하여 수행한 결과 Z2 영역에서는 과도기적 변화로 인하여 각 특성에 대한 유의한 인자를 발견하지 못하였다. 따라서 Z1영역과 Z4영역에 대한 유의한 인자를 도출한 결과와 실시한 분산분석결과를 중심으로 설명한다.

Z1, Z4 영역에 대한 분산분석을 하였다. 인자의 수는 C, G, V 3개이고 3수준의 인자 G와 V에 대하여는 1차변동과 2차변동으로 변동의 분해가 가능하므로 G의 변동 Sg를 Sg1과 Sgq로 분해하고 V의 변동 Sv를 Sv1과 Svq로 분해하여 그 유의함을 검증하였다. 각 특성에 대하여 영역별로 유의한 인자를 정리하여 Table 5와 6에 실었다. 괄호 안의 숫자는 오차분산에 대한 인자의 분산의 비인 Fo값을 95% 신뢰도(confidence)에서의 F분포표의 F값(F ratio)인 F(0.05)로 나눈 값이다. 이는 각 인자의 유의한 정도를 나타내고 있으며 일반적으로 숫자가 클수록 더 큰 영향을 미친다고 할 수 있다.

단면형상에 관한 특성인 비드폭은 Z1영역이나 Z4영역

Table 5 Border lines due to combination and gap

	T1	T2	T3
C1G1	3.6 ≤, <3.9	3.9 <, ≤4.2	. ≤4.2
C1G2	3.6 ≤, ≤3.9	3.9	3.9 ≤, <4.2
C1G3	3.9 ≤, <4.2	-	. <4.2
C2G1	3.6 ≤, <3.9	3.9 <, ≤4.2	4.2 ≤, <4.5
C2G2	3.6 ≤, <3.9	-	3.9 ≤, <4.2
C2G3	3.6 ≤, <3.9	-	. <3.9

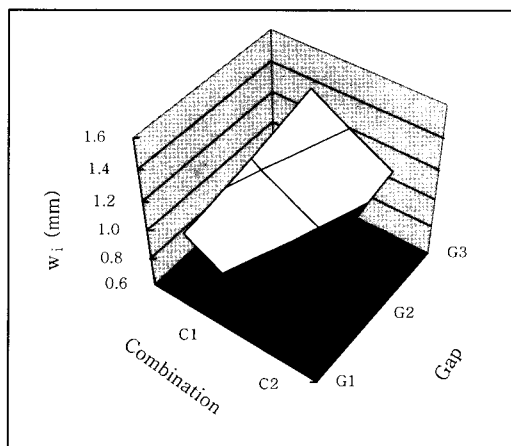
Table 6 Significant factors influencing characteristics of weld quality in each zone

rank	Zone Z1		Zone Z4		
	wi	Ev	wi	P	Ev
1st	C(51)	V1(20)	C(12)	V1(39)	G1(22)
2nd	G1(17)	G1(12) Gq(5.1)	V1(7) Vq(1.2)	G1(13)	V1(8.7)
3rd	V1(1.3)	C(1.4)		C(1.3)	

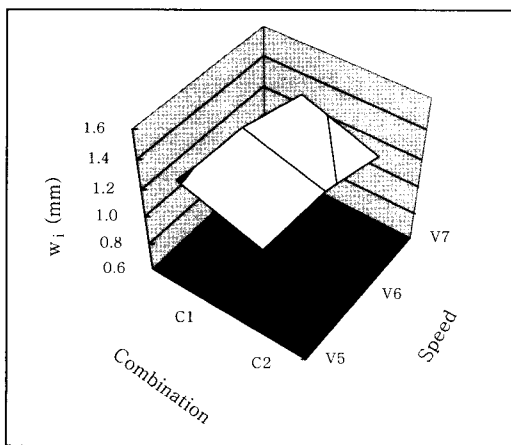
역 모두에서 C, G, V 인자의 주효과에 영향을 받는다. 용입깊이는 Z1영역에서는 모두 완전용입이므로 변화가 없어 제외하였다. Z1영역에서 w_i 에 가장 큰 영향을 주는 인자는 C와 G의 1차 효과이다. Z1영역의 E_v 에 가장 큰 영향을 주는 것은 V의 1차 효과이며 다음으로 G의 1차 및 2차 효과이다. Z4 영역에서 w_i 에 가장 큰 영향을 주는 것은 C이고 다음으로 V의 1차 효과이다. Z4의 용입깊이에 가장 큰 영향을 주는 것은 V의 1차 효과이며 다음으로 G의 1차 효과이다. Z4 영역의 E_v 에 가장 큰 영향을 주는 것은 G의 1차 효과이며 다음으로 V의 1차 효과이다. 이의 결과로부터 가장 큰 영향을 주는 2 개의 인자에 대하여 각 특성의 영역별 3 차원 그래프를 그렸다.

3.3.2 특징영역별 주요 인자에 대한 영향

단면형상에 대한 특성별로 Table 6에서 영향력이 가장 낮은 인자와 3번의 반복 값에 대하여 평균하여 주요한 2개의 인자에 대한 영향을 그래프로 나타냈다. Fig.



(a)



(b)

Fig. 5 Interface bead width (a) Z1 (b) Z4

5에 결합부 비드폭에 대한 그래프를 실었다. Fig. 5 (a)에는 Z1 영역에서 판재 조합과 판재간격에 따른 결합부 비드폭의 변화를 보여준다. 위의 분석 결과와 동일하게 선형적인 관계를 보여준다. Z1 영역이 Z4 영역보다 조합의 영향이 더 크다. Z1 영역에서의 결합부 비드폭은 C2, G1에서 0.8mm 정도로 제일 작고 G가 증가할수록 커지며 C1조합이 더 크다. Z4영역에서는 결합부비드폭에 미치는 판재간격의 영향은 크지 않으며 C2, V7에서 최소로 1.1mm를 가지며 용접속도가 작을수록 커지며 C1이 일반적으로 더 크다.

Fig. 6에 용입깊이에 대한 그래프를 실었다. 용접속도가 증가할수록 용입깊이는 일정하게 감소하며 V5, G1의 조건에서 완전용입으로 최대이고 판재간격이 커질수록 용접속도가 증가할수록 감소하여 V7속도 G2, G3에서 약 1.4mm로 최소가 된다.

Fig. 7에 단위부피당 입력에너지의 주요인자에 대한 변화를 영역별로 그래프를 실었다. Z1 영역과 Z4 영역은 그 경향이 완전히 다르다. 시험결과에 의하면 Z1영역에서는 C2의 E_v 값이 C1 보다 약간 큰 것으로 나타났으나 그 차이가 작아 평균값으로 $1J/mm^3$ 정도로 미미하다. 따라서 여기서는 G와 V에 대한 영향만을 살펴보기로 한다. Z1영역에서는 에너지의 최대가 G1, V1에서 $36.4J/mm^3$ 이고 최소값이 G2, V3와 G3, V3 조건에서 약 $29J/mm^3$ 정도이다. 그러나 부분용입 영역인 Z4에서는 G1, V5가 최소로 약 $20.8J/mm^3$ 이고 G3, V7이 최대로 $27.7J/mm^3$ 이다. 그리고 전반적으로 Z1영역보다 Z4영역이 낮은 값을 가져 에너지 효율이 Z4 영역이 좋다.

4. 결 론

용접속도와 판재간격에 따른 자동차 차체용 저탄소 강판의 이중두께 겹치기 CO₂ 레이저 용접에 대하여 본

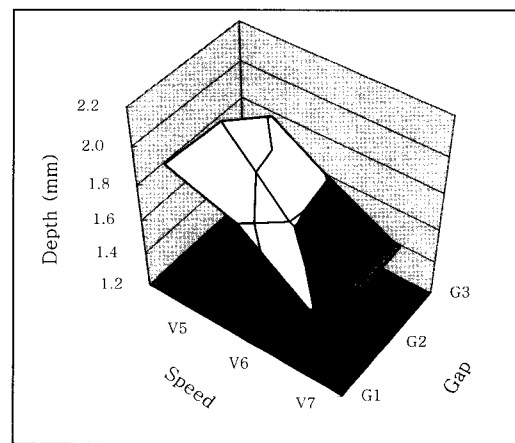
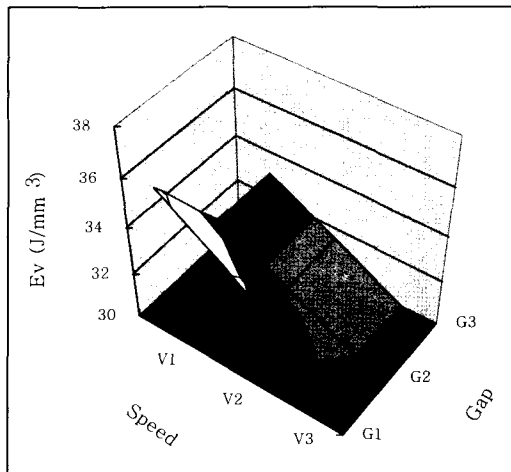
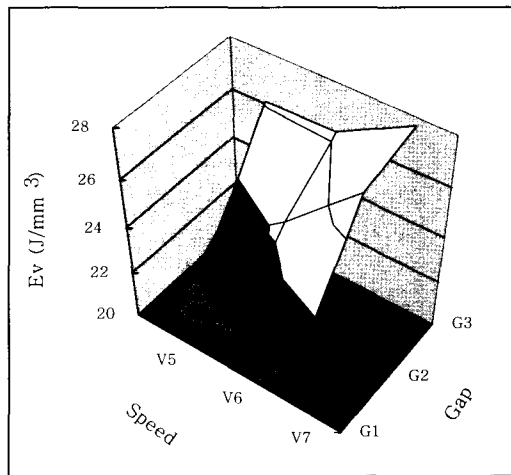


Fig. 6 Penetration depth in Z4



(a)



(b)

Fig. 7 Input energy per volume (a) Z1 (b) Z4

연구에서 얻어진 주요한 결론은 다음과 같다.

1) 이중두께의 겹치기 CO₂ 레이저 용접에서 단면모양, 용입깊이, 단위부피당 입력에너지의 특징에 따라 용접결과를 크게 4개의 특징영역으로 구분할 수 있다.

2) 용접품질의 기준인 단면형상, 용입깊이, 단위부피당 입력에너지에 대한 판재조합, 판재간격, 용접속도의 영향에 대하여 특징별 2개의 영역으로 구분하여 분산분석을 수행한 결과 3개의 인자에 대하여 모두 유의하였으나 유의한 정도가 단면 특성과 특징영역에 따라 크게 다르다.

3) 각 단면 특징에 대하여 특징영역별로 유의한 인자들에 대하여 3차원 그래프와 평균값에 대한 관계를 얻을 수 있으며 이는 용접품질의 정량적 기준을 제시하고 용접품질의 감시 자동화를 가능하게 하며 공정조건 선정에 중요한 정보를 제공한다.

4) 판재간격이 커지면서 C1조합과 C2조합의 용접 비드의 단면 모양이 차이가 있으며 특히 결합부비드폭에 큰 차이가 있고 용입깊이와 단위부피당 입력에너지에도 영향을 준다.

후 기

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

참 고 문 헌

1. Robert Mueller : Laser welding of hem flange joints, Proceedings of the 19th International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics, (2000), F11-F20
2. K.D. Lee, K.Y. Park, J.G. Kim : A study on the feasibility of partial penetration laser welding for the lap joint of 390MPa high strength steel sheets, J. of the Korean Welding Society **20-2** (2002), 76-82 (in Korean)
3. ISO 13919-1 : Laser welding-electron and electron-beam welded joints- guidance on quality levels for imperfections- Part 1: Steel
4. ISO 5817-1992(E) Arc-welded joints in steel- guidance on quality levels for imperfections
5. J.D. Kim, Y.S. Kim : The State of In-Process Quality Monitoring Technology in Laser Welding, J. of the Korean Welding Society, **18-4**(2000) 433-440
6. K.D. Lee : Quality Monitoring System for Tailored Blank Welding, J. of the Korean Welding Society, **18-3** (2000) 32-40
7. A. Sun, E. Kannatey-Asibu, M. Gartner : Sensor systems for real time monitoring of laser weld quality, J. of Laser Applications, **11-4** (1999) 153-168
8. J.S. Son, K.D. Lee, S.B. Park : Monitoring Scheme of Laser Welding Internal Defects Using Neural Network, J. of Korean Society of Laser Processing, **2-3** (1999) 19-31
9. H.S. Park, S. Rhee : Weld Quality Monitoring in CO₂ Laser Welding, J. of the Korean Welding Society, **18-2** (2000) 170-174
10. S.-H. Park : Modern experimental design, Minyung-sa, (Sept, 1993) 379-420 (in Korean)
11. 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