

금형수정 GMA 용접에 있어서 용접조건과 비드 형상과의 상관관계에 관한 연구

김자태* · 나석주* · 김덕환** · 서만석**

*한국과학기술원 기계공학과

**현대자동차 금형기술개발팀

A Study on the Relation between Bead Shape and Welding Parameters of GMA Welding for Die Remodeling

Jitae Kim*, Suck-Joo Na*, Duk-Hwan Kim** and Man-Suhk Suh**

*Department of Mechanical Engineering, KAIST, Daejeon 305-701, Korea

**Die Technology Department, Hyundai Motors, Ulsan 681-791, Korea

Abstract

Almost every die for automobiles must be corrected or remodeled for minor geometrical changes or for better hardness characteristics by arc welding process. Although many other kinds of arc welding processes have been automated with robots, this molten metal deposition process for die remodeling still depend entirely on experienced welders.

In this study, the database for bead shapes with respect to welding parameters are constructed by experiments to automate the molten metal deposition by arc welding process. And the changes of welding parameters for inclined base metal are studied to consider the effect of die geometries for the welding process.

(Received October 13, 2001)

Key Words : Die remodeling, GMAW, Molten metal deposition, Experimental design

1. 서 론

자동차 산업의 국제 경쟁이 심해지고 소비자들의 요구가 다양하게 변함에 따라 신제품 개발주기는 계속 짧아지고 있다. 신제품의 개발에 필요한 새로운 금형의 제작시, 비용 절감을 위하여 수정용접을 통해 기존의 금형을 새로운 형상으로 개조하고 있다.

현재 수정용접에서는 기존 금형의 형상과 새로운 금형의 형상을 비교하여 적층이 필요한 부분을 작업자가 수용접을 통해 금속을 적층하고, 기계가공을 통하여 치수 정도를 높여 시작품의 개발에 이용하고 있다. 현장에서 적용하고 있는 수용접의 경우 현장작업자의 기술에 의존하여 용접을 수행하기 때문에, 3차원 도면에 대한 이해도에 따라 적층이 필요한 부분이 미용접 되는 경우가 있고, 적층량이 많은 경우에는 시간과 비용이

많이 들고 용접 품질 또한 작업자에 따라 달라지는 등 여러 가지 어려움이 있는 실정이다. 따라서 이러한 금형의 수정용접 공정을 자동화 한다면, 시간과 비용 절감을 통한 생산성 향상 및 다양한 금형 변화에 대한 적응력을 향상시키고, 수정 후 형상 정보 제공을 통한 후가공과의 연계성을 제공할 수 있는 등의 잇점을 얻을 수 있다³⁾.

본 연구에서는 자동용접에 적절한 GMA용접에서 용접 조건을 구하고, 용접 조건에 따른 용접 비드 형상을 데이터베이스화하여 향후 금형 수정용 자동용접장치 개발에 이용할 수 있는 자료를 제공하고자 한다.

2. 평판 초층 비드의 데이터 베이스화

2.1 실험 계획

평판 초층 비드의 모양이 용접 변수에 따라 어떻게 변

하는지 알기 위하여, 용접 와이어를 선정하고 적합한 용접 조건을 도출해 내었다. 이때 고정 용접 변수와 변동 용접 변수는 Table 1 에 나타나 있다. 여기서 용접 전류와 전압은 일반적으로 선형적인 관계가 유지되기 때문에 전압을 전류에 대한 종속변수로 결정하였다.

Table 1 Fixed and variable welding parameters

Fixed parameters	- Shielding gas (Ar 80% + CO ₂ 20% , flow rate : 18 l/min)
	- Power source (Inverter Type)
	- Torch angle (90°)
	- No additional heat treatment
	- Wire (Ni-Fe, 1.2mm)
Variable parameters	- Welding current (voltage)
	- Welding speed
	- Nozzle-plate distance

위의 변동 용접 변수에 대하여 예비실험을 통해 적절한 변수 범위를 결정하였고, 이를 바탕으로 실험 계획을 수립하였다. 실험 계획은 위의 3가지 변동 용접 변수에 대하여 변수 레벨을 5가지로 나누어 Central composite rotatable factorial design matrix (2³ factorial design + 4 center points + 6 star points)를 구성하였다^{1,7)}. 구성된 설계행렬(design matrix)는 Table 2 와 같다.

2.2 용접 비드 측정 및 결과 분석

용접 비드의 측정은 구조화된 빛(structured light) 방식을 이용한 레이저 시각 센서 (laser vision sensor)를 통해 수행하였다. 레이저 이외에 CCD 카메라와 시각보드(vision board)등으로 구성된 본 시각센서의 렌즈와 구성된 측정 영역 및 분해능은 다음과 같다.

- 초점거리(Focal length) : 15mm
- 측정범위(Field of view) : 94mm × 43mm
- 분해능(Resolution) : 0.192mm × 0.048mm

시각 센서를 통해 들어온 영상 데이터는 세선화를 통해 레이저 중심을 찾게 된다. 이렇게 찾게 된 영상 좌표계에서의 레이저 중심점들은 교정행렬(calibration matrix)를 이용하여 실제 3차원 데이터로 변환되고¹¹⁾, 선형 보간 및 노이즈 제거 알고리즘을 통해 비드 끝단 및 높이를 구할 수 있다¹⁰⁾. 이렇게 구한 비드 폭 및 높이의 한 예가 Fig. 1에 나타나있다.

측정은 한 개 용접 조건에 대해서 30번 수행되었으며, 이를 통해 평균과 표준편차를 계산하였다. 이렇게

Table 2 Factor level and design matrix

(a) Welding parameter factor level

Parameter	Unit	Factor level				
		-2	-1	0	1	2
Voltage/current (V)	V,A	30/250	32/270	34/290	36/310	38/330
Wire feed rate(F)	mm/s	92	143	194	245	296
Welding speed (S)	mm/s	5	6	7	8	9
Nozzle-plate distance (D)	mm	10	12	14	16	18

(b) Design matrix

Experiment No.	Design matrix		
	V/A	Speed	Distance
1	-1	-1	-1
2	1	-1	-1
3	-1	1	-1
4	1	1	-1
5	-1	-1	1
6	1	-1	1
7	-1	1	1
8	1	1	1
9	-2	0	0
10	2	0	0
11	0	-2	0
12	0	-2	0
13	0	0	-2
14	0	0	2
15	0	0	0
16	0	0	0
17	0	0	0
18	0	0	0

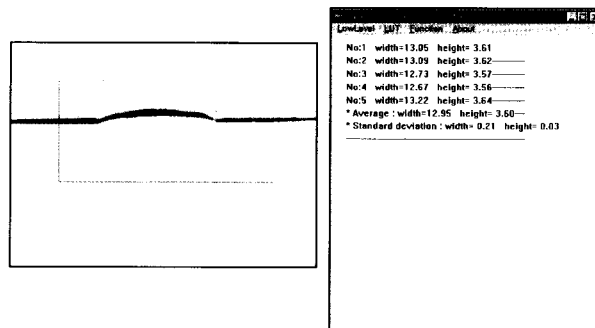


Fig. 1 Measuring of bead shapes by laser vision

측정된 비드폭과 높이에 대한 데이터는 Table 3에 정리되어 있다.

이렇게 얻어진 데이터를 이용해 다중회귀분석을 수행

Table 3 Result of bead shape measurementsensor

Experiment No.	W(Width .mm)		H(Height, mm)		A(Area, mm ²)		Deposition efficiency (%)
	Average	SD	Average	SD	Average	SD	
1	10.16	0.14	3.18	0.02	22.39	0.53	83.23
2	15.93	0.53	3.97	0.06	45.45	0.91	97.41
3	9.52	0.13	3.06	0.02	20.01	0.84	98.11
4	12.62	0.21	3.54	0.03	3.63	0.45	88.43
5	9.55	0.39	3.08	0.06	20.13	0.69	74.68
6	14.89	0.48	3.86	0.05	42.56	0.71	92.15
7	9.16	0.37	3.02	0.04	18.24	0.78	90.22
8	12.94	0.32	3.61	0.05	33.02	0.43	95.33
9	7.88	0.18	2.81	0.02	14.71	0.24	98.62
10	14.72	0.68	3.83	0.08	40.94	0.91	85.60
11	12.66	0.14	3.56	0.02	31.89	0.58	73.26
12	10.62	0.24	3.25	0.04	25.59	0.44	98.56
13	11.92	0.36	3.45	0.04	28.91	0.81	92.25
14	11.16	0.25	3.34	0.03	26.90	0.65	85.21
15	11.16	0.12	3.34	0.02	26.98	0.65	86.09
16	11.52	0.35	3.38	0.05	26.14	0.77	83.35
17	11.53	0.51	3.39	0.06	26.56	0.96	84.73
18	11.63	0.18	3.40	0.03	27.47	0.51	87.64

하였다. 다중회귀분석은 2차 모델로 SAS 를 통해 수행하였다. 사용한 2차 모델은 식(1)에 나타나있고, 비드 폭(W)과 높이(H), 면적(A)에 대한 다중회귀분석 결과는 식(2), (3), (4)에 각각 나타내었다.

$$Y = b_0 + b_1V + b_2S + b_3D + b_{11}V^2 + b_{22}S^2 + b_{33}D^2 + b_{12}VS + b_{13}VD + b_{23}SD \quad (1)$$

$$W = -63.5206 + 2.9891V + 5.8193S - 1.4216D - 0.0047V^2 + 0.0687S^2 + 0.0106D^2 + 0.2594VS + 0.0097VD + 0.0994SD \quad (2)$$

$$H = -8.7718 + 0.5502V + 0.7106S - 0.2458D - 0.0031V^2 + 0.0100S^2 + 0.0016D^2 + 0.0331VS + 0.0028VD + 0.0131SD \quad (3)$$

$$A = -179.3015 + 6.1664V + 29.5298S - 8.0426D + 0.07231V^2 + 0.5179S^2 + 0.0429D^2 - 1.2906VS + 0.12788VD + 0.3256SD \quad (4)$$

위 식을 이용하면 적절한 용접 변수내에서 비드폭과 높이, 면적을 예측할 수 있다. 이렇게 예측된 값들과 실제 측정된 값들을 비교하기 위해 Fig. 2에 나타내었는데, 비교적 잘 맞는 것을 알 수 있었다. Fig. 2에 표

시된 회귀분석에 사용되지 않은 용접 조건은 다음과 같다.

$$-V=31V, S=6mm/s, D=15mm$$

$$-V=34V, S=5.5mm/s, D=14mm$$

$$-V=38V, S=7mm/s, D=13mm$$

3. 기울어진 모재에서의 비드형상 실험

기울어진 모재에서는 그 기울기가 30 이상인 경우, 평판에서의 용접조건 보다 용접 전압이 약간 낮은 상태에서 최적의 용접 품질을 나타낸다고 알려져 있다⁶⁾. 실제로 용접을 했을 경우 평판 용접 조건에 비해 1V 정도 낮은 전압에서 최적의 용접 품질을 나타내는 것을 확인할 수 있었다. 토치의 각도는 중력방향의 반대방향으로 기울일 경우 아크 압력으로 밀어올려주는 효과를 내주는 것이 흘러내림을 방지하는데 효과가 있으나, 그 각도가 너무 클 때에는 스패터가 많이 발생하고 보호가스가 약해지는 단점이 발견되어, 직각에 대해 10도 기울여 용접을 수행하였다.

일반적으로 기울어진 모재에 대하여 용접을 실행하게 되면 Fig. 3과 같이 비드가 중력방향으로 흘러내리게 된다. 이런 비드의 흘러내리는 효과는 그림에서도 나타나듯이 용착량이 클수록 심해진다. 와이어 용착량은 와

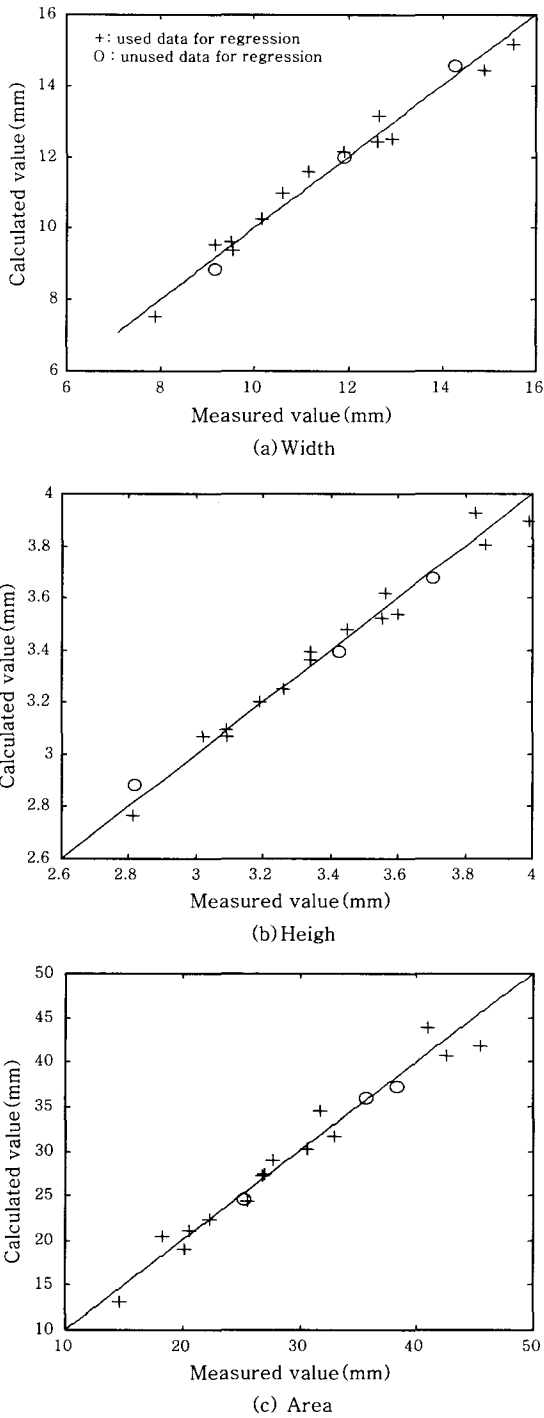


Fig. 2 Comparison between measured and calculated data

이어 용융량에서 스패터로 인한 손실을 뺀 양으로, 적절한 용접조건 하에서 용착량은 용융속도에 비례한다.

따라서 모재의 기울어짐이 심할수록 용착량이 작은 용접 조건으로 하는 것이 유리하므로 이를 정량적으로 분석하기 위해 Fig. 4와 같이 기울어진 모재의 각도를 수평경사각과 수직경사각으로 정의하였다.

30°, 45°, 60° 기울어진 모재에서 기울어진 각도

를 수평경사각과 수직경사각으로 해서 용착 면적별로 용접을 실행하였다. 앞 절에서 만들어진 용착 면적에 대한 데이터베이스를 기초로 하여 Table 4와 같이 7가지 용착 면적을 정의하고 각각의 경우에 대해 실험을 수행하였다.

3.1 수평경사각에 따른 한계용착면적

수평경사각에 대해서는 용접비드가 용접 방향의 수직 방향으로 흘러내리게 되어 이를 시각센서로 측정해 보

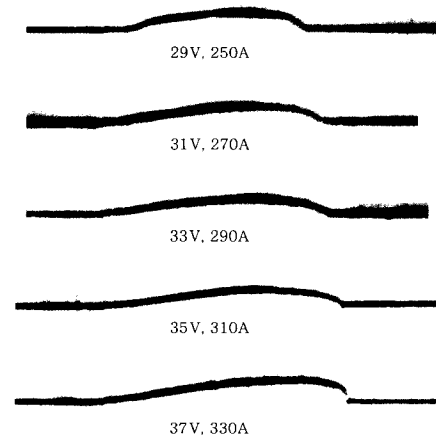


Fig. 3 Bead shapes with 60 inclined base metal

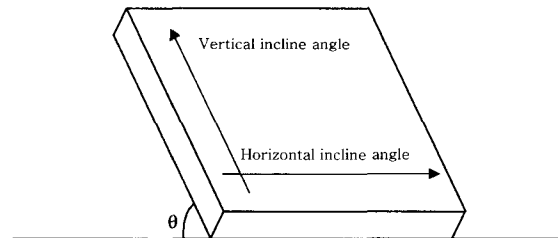


Fig. 4 Definition of incline angles

Table 4 Selected bead areas and corresponding welding parameters

No.	Area(mm ²)	Parameters (voltage/current, speed, nozzle distance)
1	15	30V/250A, 7mm/s, 14mm
2	20	32V/270A, 8mm/s, 12mm
3	25	34V/290A, 9mm/s, 14mm
4	30	36V/310A, 8mm/s, 12mm
5	35	36V/310A, 7mm/s, 16mm
6	40	38V/330A, 7mm/s, 14mm
7	45	36V/310A, 6mm/s, 12mm

면, Fig. 5와 같이 용접비드와 모재사이에서 좌우의 각도가 달라지게 된다. 이렇게 각도차이가 크게 날 경우에는 멀티패스 용접시 용접품질에 영향을 미치기 때문에, 본 실험에서는 각 용접 조건에대해서 좌우의 토우각도(toe angle)를 측정하여 각도차이가 일정치 이상인 것을 용착량 초과라고 생각하고 이를 Table 5에 정리했다. 이때의 토우각도 차이를 한계각도, 용접 용착량을 한계용착량으로 정의하였다.

Table 5에서 음영으로 표시된 부분이 좌우 토우각도의 차이가 10도 이상인 부분으로, 10도 이상 차이가 날 경우 멀티패스 용접시 용접 품질 저하를 가져오기 때문에, 기울어진 모재를 수평경사각으로 용접할 경우, 용착 면적이 한계 용착 면적보다 작은 용접조건으로 용접을 수행해야 적절한 용접 품질을 얻을 수 있게된다.

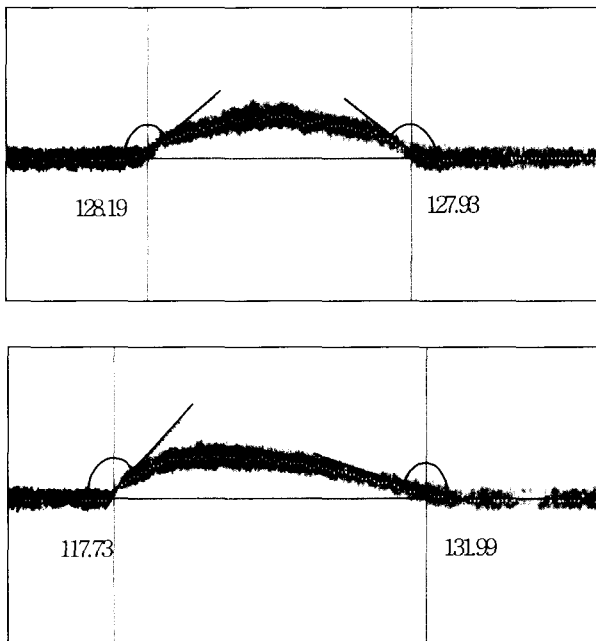


Fig. 5 Measuring of toe angles

3.2 수직경사각에 따른 한계 용착 면적

수직경사각에 대해서 용접을 수행 하게 되면 중력방향이 용접 방향과 일치하기 때문에 비드가 용접 방향으로 흘러 내리게 되어 불균일한 용접 품질을 얻게 된다. 이때, 용접 방향은 입향상진과 입향하진 두 가지가 있을 수 있는데²⁾, 입향하진의 경우 용접 비드가 모재에 붙지 않고 밑으로 떨어져 버리는 현상이 일어나, 입향상진 한가지로 고정하였다.

이렇게 실험을 하면, Fig. 6(a)와 같이 용융 금속이 굳기 전에 흘러내려 전체적으로 비드 모양이 불균일해지고 예측할 수 없는 경우가 생기는 것을 알 수 있었다. 따라서 Table 4의 용접 조건을 수직경사각에 대해서도 적용하여, 비드가 균일하게 되는 한계 용착 면적을 실험을 통하여 구해보았다. Table 6은 이렇게 구한 수직경사각에서의 한계 용착 면적을 나타내고 있다.

위 결과에서 알 수 있듯이 같은 모재 각도에 대해 수직경사각 보다는 수평 경사각으로 용접 하는 것이 한계 용착 면적에서 유리하다. 따라서 기울어진 모재에 대해서는 한계 용착량 이하에서 용접을 수행하되 수평경사각이 되도록 용접방향을 정하는 것이 더 좋은 용접 효율성을 나타냄을 알 수 있다.

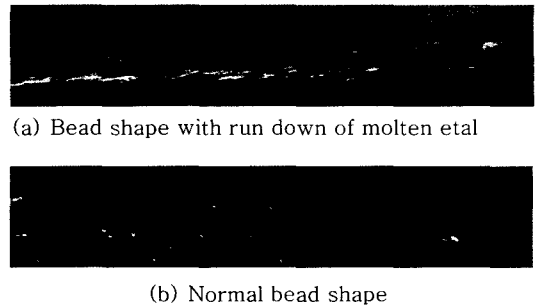


Fig. 6 Bead shapes of vertical up welding

Table 5 Measured toe angles and maximum bead areas with respect to horizontal incline angles

Bead area (mm ²)	30°			45°			60°		
	Toe angles	Difference		Toe angles	Difference		Toe angles	Difference	
15	127.75	129.06	1.31	128.43	129.64	1.21	127.74	129.33	1.59
20	127.49	128.98	1.49	127.89	128.14	0.25	126.64	133.46	6.82
25	126.91	128.33	1.42	125.36	127.72	2.36	119.01	133.49	14.48
30	125.79	127.16	1.37	119.62	130.04	10.42	111.23	140.03	30.80
35	125.80	128.88	3.08	114.65	136.77	23.12	-	-	-
40	117.73	131.99	14.26	109.87	158.92	49.05	-	-	-
45	110.20	139.62	29.42	-	-	-	-	-	-

Table 6 maximum bead areas with respect to vertical incline angles

Angle	Max. Area
30°	25 mm ²
45°	20 mm ²
60°	NA

4. 멀티패스(multi-pass) 및 다층(multi-layer) 용접 실험

멀티패스 용접에서는 기존의 용접조건 외에 패스(pass)간 거리라는 용접변수가 더해지게 된다. 따라서 패스간 거리에 따라서 용접 품질에 어떤 영향을 미치는가를 알아보기 위해서 예비실험을 수행한 결과, Fig. 7(a) 와 같이 비드폭의 절반보다 패스간 거리가 작을 경우, 멀티패스 용접을 수행함에 따라 비드높이가 점점 높아지면서 스패터가 대량으로 발생하는 것을 알 수 있었다. 반면에 비드폭보다 패스간 거리가 클 경우, Fig. 7(b)와 같이 각 패스 사이에 용입 불량이 나타나게 된다. 따라서 멀티패스 용접을 할 경우 기본적으로 패스간 거리는 비드폭의 절반보다는 크고 비드폭보다는 작은 범위에서 용접을 수행하여야 함을 알 수 있다.

따라서 멀티패스 용접시 용접 품질을 보장하는 패스간 거리가 존재함을 알 수 있다. 여기서, 이런 구간 내에서 어떤 패스간 거리를 선택하는 것이 최적인가를 결정할 필요가 있는데, 용접후 적층 높이가 균일할수록 후가공이 용이해지고, 다음층의 적층시에도 적합함을 실험을 통해 알 수 있었다. 따라서, 여러가지 용접조건에서 멀티패스 용접을 했을 경우 비드가 최대한 평평하게 나오는 패스간 거리를 찾기 위해 비드폭이 다른 3가지 용접 조건에 대해 패스간 거리를 달리하면서 실험을 수행하였다.

Table 7은 이렇게 실험했을 때, 평균 높이를 측정하고 표준편차를 계산한 결과이다. 표준편차가 가장 작은



(a) Too close pass distance



(b) Too far pass distance

Fig. 7 Bead shapes with respect to pass distance

Table 7 Average and standard deviation of bead height

(a) Width: 14.89mm, Height : 3.86mm
Parameters : 36V, 310A, 6mm/s, 16mm

No.	Distance between passes	Average	SD
1	7mm	3.84	1.67
2	8mm	3.80	1.23
3	9mm	3.87	0.70
4	10mm	3.59	0.48
5	11mm	3.53	0.81
6	12mm	3.20	1.81
7	13mm	3.12	2.13

(b) Width : 7.88mm, Height : 2.81mm
Parameters : 30V, 250A, 7mm/s, 14mm

No.	Distance between passes	Average	SD
1	4mm	3.05	0.84
2	5mm	2.90	0.71
3	6mm	2.50	0.50
4	7mm	2.24	0.59

(c) Width : 11.16mm, Height : 3.34mm
Parameters : 34V, 290A, 7mm/s, 18mm

No.	Distance between passes	Average	SD
1	5mm	3.61	2.91
2	6mm	3.24	0.75
3	7mm	3.21	0.56
4	8mm	2.95	0.58
5	9mm	2.84	0.95
6	10mm	2.76	1.20

것을 최적 패스 간 거리라고 생각했을 때, 각각 67.16%, 76.14%, 62.72% 에서 가장 고른 비드 높이를 보이는 것을 알 수 있다. 따라서, 멀티패스 용접시 패스간 거리는 현재 용접 조건에서 얻어지는 비드폭의 60 ~ 75% 내에서 선택하는 것이 바람직함을 알 수 있었다.

Fig. 8 은 다층 용접 실험 결과 사진들이다. 사진에서도 알 수 있듯이, 위의 범위에서 멀티패스 용접을 했을 경우, 첫번째 층 비드폭의 100% 이내에서는 아무 문제없이 용접이 가능함을 알 수 있다.

5. 결 론

용접을 통한 금형 수정을 자동화 하기 위해, 실험을

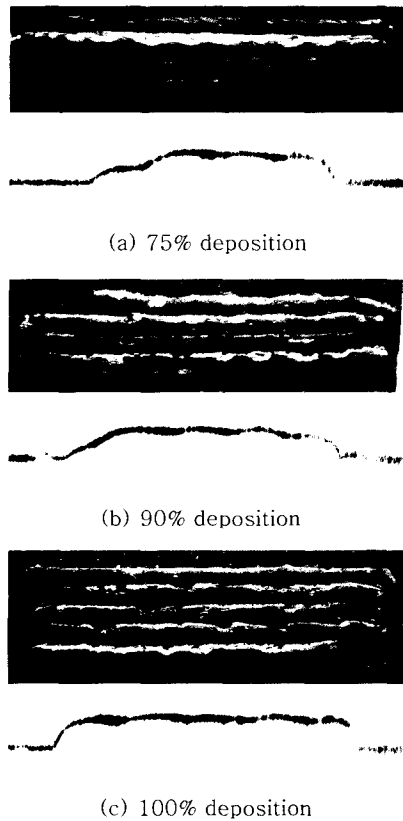


Fig. 8 Result of second layer welding

통해 얻어진 결과는 다음과 같다.

1) 평판 모재에 대해서 용접 조건에 따른 비드 모양을 실험 계획법에 따라 실험을 수행하였으며, 비드 모양을 측정된 후 다중회귀분석을 통해 용접조건에 따른 비드 형상을 예측할 수 있었다.

2) 기울어진 모재에 대해서 용접 방법에 따른 한계 용착 면적을 발견하였다.

3) 멀티패스 용접시 용접 품질을 보장할 수 있는 패스간 거리를 도출하였다.

앞으로 이들 데이터를 활용해, 적층 부위에 대한 3차원 데이터가 존재할 때 금형의 형상과 비교하여 적절한 용접 패스와 변수들을 도출해 낼 수 있는 시스템의 개발과, 실제 공정에서 사용될 때 공정 변수들을 제어할 수 있는 센서의 도입이 필요하다.

후 기

본 연구는 교육인적자원부의 두뇌한국21과 현대자동차의 연구비 지원에 의해 수행되었다. 이에 관계자 여러분에게 감사드린다.

참 고 문 헌

1. 박성현, "현대실험계획법", 대영사, 1982 (in Korean)
2. 대한용접학회, "용접접합 편람", 1998 (in Korean)
3. J.Wu, J.S.Smith and J.Lucas : Weld bead placement system for multipass welding, IEE Proc.-Sci. Meas. Technol., **143-2** (1996) 85-90
4. M.D.Starling, P.V.Marques, P.J.Modenese : Statistical modeling of narrow-gap GTA welding with magnetic arc oscillation, Journal of Materials Processing Tech., **51** (1995) 37-49
5. S.Subramaniam, D.R.White, J.E.Jones and D.W.Lyons : Experimental approach to selection of pulsing parameters in pulsed GMAW, Welding Journal-Welding Research Supplement, May (1999) 166-172
6. J.Y.Park and D.H.Ahn : Research on program for determination of suitable welding condition for the curved block, Proceedings of KWS national meeting, **34** (1999) 87-90 (in Korean)
7. N. Murugan and R.S.Parmar : Effects of MIG process parameters on the geometry of the bead in the automatic surfacing of stainless steel, Journal of Material Processing Tech., **41** (1994) 381-398
8. L.A.Sanders, J.Norrish and M.P.West : Efficient modeling techniques for gas metal arc welding (GMAW), Australasian Welding Journal, **43** (1998) 33-37
9. D.W.Kim and K.Y.Kim : Robot arc welding task sequencing using genetic algorithms, KSPE, **16-1** (1999) 49-60 (in Korean)
10. R.A.White, J.S.Smith, J.Lucas : Vision-based gauge for online weld profile metrology, IEE Proc.-Sci. Meas. Technol., **141-6** (1994) 521-526
11. S.K.Lee, J.D.Yoo and S.J.Na : A Study on Development of Laser Welding System for Bellows Outside Edge Using Vision Sensor, KWS, **17** (1999) 71-78 (in Korean)