

자동차용 강판의 MAG 용접시 최적용접조건 선정에 관한 연구

방한서* · 방희선*† · 주성민** · 노찬승*** · 정보람**** · 석한길*****

*조선대학교 공과대학 선박해양공학과

**포항산업과학연구원 용접센터

***조선이공대학 선박해양기계과

****한국선급 선체기술팀

*****삼척대학교 공과대학 재료금속공학과

A Study on the Prediction of the Optimal Welding Condition for Automotive Steel Sheets in MAG Welding Process

Han-Sur Bang*, Hee-Seon Bang*†, Sung-Min Joo**, Chan-Seung Ro***, Bo-Ram Sung**** and Han-Gil Suk*****

*Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Chosun Univ., Gwangju 501-759, Korea

**Weldingcenter, RIST, Pohang 790-330, Korea

***Dept. of Naval Architecture and Mechanics, Chosun College Univ. of Science and Technology, Gwangju 501-744, Korea

****Hull Team, Korean Register of Shipping, Daejeon 305-343, Korea

*****Dept. of materials and metallurgical engineering Samcheok National Univ., Samcheok 245-711, Korea

†Corresponding author : banghs@chosun.ac.kr

(Received April 25, 2008 ; Revised May 23, 2008 ; Accepted May 26, 2009)

Abstract

The optimization of the welding parameters was studied to maximize the weldability and minimize the amount of spatter in the MAG welding of automotive steel sheets under different shielding gas composition ratio. JS-EFSC, JS-SPHC steel plates and Ar mixture gases were used as a substrate and shielding gas for welding respectively. The five welding parameters were selected through preliminary experiments and their effects on the weldability were analyzed. Experiments were performed using the Taguchi experimental method.

As results, appropriate range for welding could be achieved. Amount of spatter in 80%Ar+20%CO₂ shielding gas was 20% of that of CO₂ welding. Therefore, in terms of high productivity and welding cost, Ar mixture gas(80%Ar+20%CO₂) was recommended as a shielding gas for application of MAG process, indicating the low spatter and good weld quality.

Key Words : High productivity, Welding cost, Spatter, Ar mixture gas, CO₂ gas, MAG welding, Automotive steel sheets

1. 서 론

자동차 산업에서 적용되고 있는 탄산가스용접은 다량의 스패터가 발생하고 비드 외관이 다소 불량하나 용착

속도가 빠르고 깊은 용입의 장점 및 탄산가스의 저렴한 가격 때문에 확대 적용되어 왔다. 그러나 모재표면에 부착된 다량의 스패터 발생의 문제는 스패터 제거를 위한 후처리 공정이 요구되므로 그로 인한 작업공수 증가로 생산속도의 저하 및 추가비용이 소요된다. 또한 용접

중에 발생하는 탄산가스에 의한 열악한 작업환경으로 작업자의 작업 기피현상이 매우 심각하며, 아울러 인건비 상승과 용접사의 부족으로 탄산가스 사용의 경제성은 의문시 되고 있다. 이와 같이 상기 용접법의 저스패터화는 국내 자동차 산업을 비롯하여 박판을 사용하는 산업에서는 피할 수 없는 문제점¹⁻⁴⁾으로 이에 대한 개선 방안을 모색하는 것이 필요한 실정이다.

유럽이나 일본 등의 선진국에서는 저스패터화의 방안으로 차폐가스로 탄산가스 대신 혼합가스를 적절히 사용하여, 소위 MAG용접의 채용으로 용적이행을 정확히 제어하여 만족스러운 성과⁵⁾를 거두고 있다. 따라서 앞서 언급한 문제점 즉, 생산성향상 및 저스패터화 요구에 대한 문제점을 개선하기 위한 방법으로, 상대적으로 스패터 발생량이 적은 MAG 용접의 채용(차폐가스를 탄산가스 대신 혼합가스로 사용하는 방법), 인버터용접기 및 적절한 와이어 채용 등 고능률 용접공정기술 적용이 절실히 요구되어진다⁶⁾.

이에 본 연구에서는 현장에서 사용하고 있는 차량용 강판에 대하여 MAG 용접공정 실용화 기술을 산업현장에 보급⁷⁾을 목적으로, 기존에 사용 중인 탄산가스 대신 혼합가스를 사용하여 Ar 혼합가스 조성비에 따른 스패터 발생 및 용접성에 미치는 영향에 대하여 고찰하였다. 아울러 도출된 최적의 혼합가스 조성비를 토대로 공정 주요변수에 따른 용접특성을 비교·평가하고, 용접품질과 생산성 측면에 주안점을 두어 두께별 적합한 용접조건을 제시⁸⁾하고자 하였다.

2. 실험 방법

2.1 사용 재료

본 실험에 사용된 재료는 현장에서 사용하고 있는 자동차용 고강도 강판 JS-EFSC, JS-SPHC(시편의 두께 1.2, 2.0mm 2종)이고 화학적 조성비는 Table 1에 나타내었다.

사용된 와이어는 높은 용착효율을 목적으로 콘택트 탭과 전기적 접촉을 좋게 하고 산화방지를 위하여 표면에 구리 도금한 고장력강용 KC-28 Solid wire Ø0.9mm를

Table 1 Chemical compositions of materials

No.	Materials	t (mm)	Chemical compositions (wt%)				
			C (10 ⁻⁴)	Si (10 ⁻³)	Mn (10 ⁻³)	P (10 ⁻⁴)	S (10 ⁻⁴)
1	JS-EFSC	1.2	14~31	4~12	97~107	72~156	30~88
2	JS-SPHC	2.0	332	8	198	172	39

Table 2 Chemical compositions and mechanical properties of solid wire

Solid wire	Chemical compositions(wt%)				
	C	Si	Mn	P	S
KC-28	0.08	0.05	1.05	0.0014	0.010
	Mechanical Properties				
	Yield Strength (kg/mm ²)	Tensile Strength (kg/mm ²)		Elongation (%)	
	46	56		30	

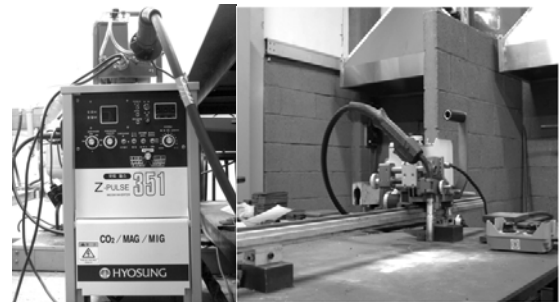


Fig. 1 A welding machine for the experiment employed

선택 사용하였다. 와이어의 화학적 조성비 및 기계적 성질은 Table 2에 나타내었다.

2.2 실험 장치

Fig. 1은 사용된 펄스 CO₂/MAG 용접기와 가스 혼합기 및 용접이송시스템으로, 박판 용접을 위해 정격출력 전류가 350A인 용접기를 사용하였으며 이때 사용한 Feeder는 모토용량 130W, 출력전압 24V로 고속송급 30m/min이 가능하다.

두께별 적정 용접조건 및 각 조건에 대한 특성을 고찰하기 위하여, 용접이송시스템을 사용하여 아래보기 자세로 용접을 행한 후 보호가스의 변화와 용접성에 미치는 제 조건에 대한 평가를 실시하였다.

2.3 용접 변수 및 범위

Fig. 2은 MAG 용접의 모식도이고, 용접공정의 최적화 방법으로 용접변수들의 영향을 적은 실험으로 체계적분석이 가능한 다꾸찌(Taguchi) 실험계획법을 사용하였다. 그리고 변수들간의 교호작용(interaction) 및 축차 실험(sequentialexperiment)이 불가능 문제점을 해결하기 위해 반응표면분석법(response surface method)을 이용하여

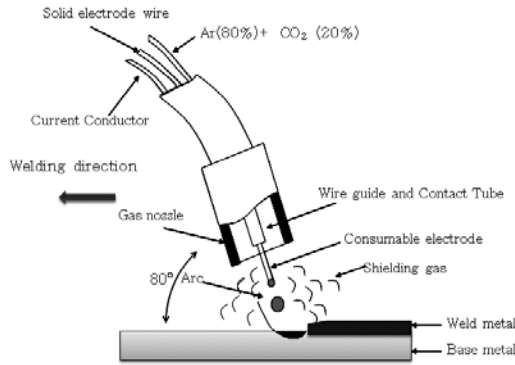


Fig. 2 Schematic diagram of MAG welding

Table 3 Welding condition for experiment

T (mm)	Current (A)	Voltage (V)	Welding Speed (cm/min)	Gas Flow Rate (ℓ/min)	Shielding Gas Composition Ratio (CO ₂ : Ar)
1.2	50~120	16~19	44~99	15~21	100 : 0 80 : 20 60 : 40 40 : 60 20 : 80 0 : 100
2.0	120~180	17~21	44~88	15~21	

다구찌 방법의 목적을 포함하는 방법을 이용하고, 호감도함수(desirability function)를 사용하여 최적용접조건을 선정하였다. 용접변수들은 예비실험을 통해 스패터 발생 및 용접성에 영향을 미치는 주요변수로 보호가스 혼합조성비, 전류, 전압, 용접속도, 보호가스 유량의 5종류를 선택하였으며, 각 용접변수들에 대한 실험범위는 예비실험을 통해 범위를 결정하였으며 실험에 사용된 보호가스의 조성비는 Table 3에 나타내었다.

용접공정은 실내(공장내)에서 이루어지기 때문에 유량은 일반적인 15~21 ℓ/min로 선정하였고, 토치의 각은 80°로 하였다. 또한 3mm이하의 판재 용접 경우이므로 Ø0.9의 Solid wire를 사용하였다. 실험에 적용된 Stick-out (Contact Tip-to-Workpiece Distance)은 와이어 직경과 판의 두께에 따라 변화되나 Ø0.9 Solid wire를 사용한 경우 용접비드가 파형을 형성하기 때문에 1.0mm로 하였다. 또한 각 가스에 대한 스패터 발생량을 조사하기 위하여 1분 동안 용접한후 측정하였다.

따라서 본 연구에서는 혼합가스조성이 용접특성 및 생산성 향상에 미치는 영향을 고찰하기 위해, 먼저 보호가스 조성변화에 따른 비드 외관용입, 스패터 발생량, 기계적 성질의 용접특성을 파악하고 용접생산성 향상조사를 위하여 고속용접실험을 실시하였다.

3. 반응표면분석과 호감도 함수

3.1 반응표면분석법

반응표면분석법은 여러 개의 입력변수(설명변수) $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k$ 가 복합적인 작용을 함으로써 어떤 출력변수(반응변수) η 를 최적화시키기 위한 반응표면 모형은 회귀분석(regression analysis)방법에 의해 반응표면이 추정되었으므로 2차 회귀모형을 식(1)과 같이 설정하였다.

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i \chi_i + \sum_{i \leq j}^k \beta_{ij} \chi_i \chi_j + \epsilon \quad (1)$$

이 2차 회귀모형은 최소제곱법에 의해 반응표면은 식(2)와 같이 표현된다.

$$\hat{y} = \hat{\beta}_0 + \sum_{i=1}^k \hat{\beta}_i \chi_i + \sum_{i \leq j}^k \hat{\beta}_{ij} \chi_i \chi_j \quad (2)$$

이 식에서 입력변수의 수가 3개(k=3) 이면 식(2)는 식(3)과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \hat{y} = & \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x_1 + \hat{\beta}_2 x_2 \\ & + \hat{\beta}_3 x_3 + \hat{\beta}_{11} x_1^2 + \hat{\beta}_{22} x_2^2 + \hat{\beta}_{33} x_3^2 \\ & + \hat{\beta}_{12} x_1 x_2 + \hat{\beta}_{13} x_1 x_3 + \hat{\beta}_{23} x_2 x_3 \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 \hat{y} 는 η 의 추정량이고, χ_i 는 입력변수들의 coded unit이며, $\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_i, \hat{\beta}_{ij}$ 는 각각 $\beta_0, \beta_i, \beta_{ij}$ 의 최소제곱량을 나타낸다.

$\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k$ 의 최소제곱 추정값은 식(4)부터 구한다.

$$\hat{\beta} = \begin{bmatrix} \hat{\beta}_0 \\ \hat{\beta}_1 \\ \hat{\beta}_2 \\ \hat{\beta}_3 \\ \hat{\beta}_{12} \\ \hat{\beta}_{13} \\ \hat{\beta}_{23} \end{bmatrix} = (X'X)^{-1} X'y \quad (4)$$

여기서 X와 y는 각각 식 (5)와 같다.

$$X = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{21} & x_{31} & x_{11}^2 & x_{21}^2 & x_{31}^2 & x_{11}x_{21} & x_{11}x_{31} & x_{21}x_{31} \\ 1 & x_{12} & x_{22} & x_{32} & x_{12}^2 & x_{22}^2 & x_{32}^2 & x_{12}x_{22} & x_{12}x_{32} & x_{22}x_{32} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_{1n} & x_{2n} & x_{3n} & x_{1n}^2 & x_{2n}^2 & x_{3n}^2 & x_{1n}x_{2n} & x_{1n}x_{3n} & x_{2n}x_{3n} \end{bmatrix}$$

$$y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_{n-1} \\ y_n \end{bmatrix} \tag{5}$$

$$d_i = \begin{cases} 0 & \hat{y}_i < A \\ \left[\frac{\hat{y}_i - A}{B - A} \right]^r & A \leq \hat{y}_i \leq B \\ \left[\frac{\hat{y}_i - C}{B - C} \right]^t & B \leq \hat{y}_i \leq C \\ 0 & \hat{y}_i > C \end{cases} \tag{6}$$

위 회귀모델(regression model) 식(2)를 구하기 위해 서는 많은 실험을 통해 관련 데이터를 얻어야한다. 이와 같이 실험을 통해 관련 데이터를 얻으려고 한다면, 수많은 시행착오와 경제적인 손실이 발생할 수 있으므로, 이러한 손실을 줄이고자 2차 회귀모델을 잘 반영하는 반응표면 실험계획법 중의 하나인 중심합성계획법(central composite design, CCD)을 사용하였다.

3.2 호감도 함수

호감도함수는 다중 응답에 대한 최적 입력값을 찾아 주는 효과적인 방법으로 회귀분석을 통해 얻은 회귀모델을 사용하여 각 응답에 대한 호감도함수를 정의한다.

호감도 함수의 범위를 (0~1)로 정의하면, 응답에 대한 만족도가 클수록 “1”에 접근하고 만족도가 작을수록 “0”에 접근한다. 응답이 목표값을 가질 때에는 식(6)과 같은 호감도 함수(desirability function)를 이용한다. 이때 만족도 분포는 Fig. 3에 나타난 바와 같다.

식(6)과 Fig. 3에서 A, B, C, r, t는 사용자가 결정하며, B는 목적값에 대한 기울기를 나타낸다. 다중응답에 대한 각각의 호감도함수를 이용하여 단일 목적함수(single objective function)를 만들기 위해 복합 호감도 함수(overall desirability function)를 다음과 같이 정의할 수 있다.

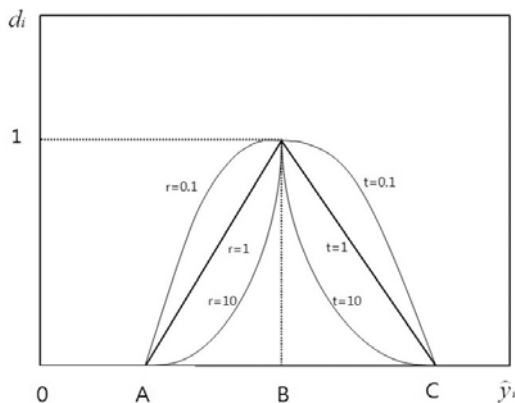


Fig. 3 Desirability function

$$D = (d_1 * d_2 \cdots d_m)^{\frac{1}{m}} \tag{7}$$

여기에서 m은 응답(response)의 개수이다. 식(7)을 통해 정의된 복합호감도 함수를 최대로 만족하는 최적조건을 구하여 그 때의 입력변수 값을 구할 수 있다.

4. 실험결과 및 고찰

각 공정의 주요변수(보호가스 혼합조성비, 유량, 전압, 전류, 용접속도 등)에 대한 Bead on Plate 및 맞대기용접을 실시하고, 실험 후 비드표면, 단면형상 관찰 및 경도 테스트를 통하여 적합한 용접조건을 선정하여 그 결과를 바탕으로 생산성 측면에 주안점을 두어 최적의 조건을 검토하였다.

먼저 최적의 혼합가스조성비를 도출하기 위해, 보호가스의 혼합조성비에 따른 스파터 발생량 및 용접부의 기계적 성질(경도)을 평가하였다. 이때 용접시에 사용된 강재는 두께 1.2mm이며 Table 4와 같은 용접조건으로 용접 실험을 수행하였다. Table 4는 두께 1.2mm 강재에 대해 유량 15ℓ/min, 전류 90A, 용접속도 44cm/min 조건에서 혼합가스조성비 변화에 대한 경도값으로, Ar 조성비가 증가할수록 용착금속의 경도값도 다소 증가함을 알 수 있었다. 그리고 혼합가스 조성비에 따른 스파터 발생량은 Fig. 4에 도시한바와 같이 Ar 조성비가 증가할수록 감소하다가 80%Ar 조성비에서 약 3g/min로 수렴

Table 4 Hardness of weldments with shielding gas composition ratio

NO.	Shielding Gas Composition Ratio (CO ₂ : Ar)	WeldMetal Hardness
1	100 : 0	194Hv
2	80 : 20	196Hv
3	60 : 40	203Hv
4	40 : 60	206Hv
5	20 : 80	209Hv
6	0 : 100	211Hv

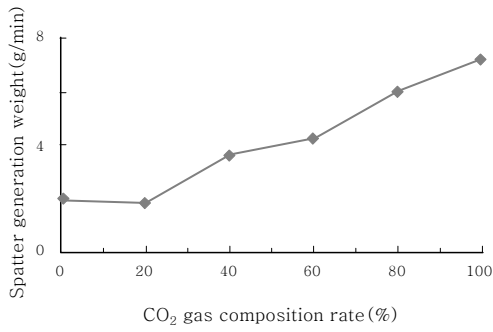


Fig. 4 Effect of CO₂ gas composition ratio on spatter generation weight

하는 경향을 보였으며, 기존의 100%CO₂ 보호가스를 이용시 스패터 발생량에 비해 보호가스 혼합조성비를 80%Ar 조성비로 변화시킨 경우 스패터 발생량이 75% 정도 감소함을 확인할 수 있었다. 따라서 보호가스로는 혼합조성비 80%Ar+ 20%CO₂가 스패터 발생 저감 및 용접성 측면에서 효과적이라고 사료된다.

이상의 결과로부터 도출된 혼합가스 조성비를 토대로, Table 3의 공정주요변수에 따른 비드형상과 오버랩, 언더컷, 스패터를 포함한 용접부의 외관상 결함 관찰 및

Table 6 Factors and levels for the experimental design

t (mm)	Factor	Factor name	Coded value (level)		
			-1	0	1
1.2	1	Current (A)	90	90	110
	2	Voltage (V)	16	17	18
	3	Welding speed (cm/min)	44	55	88
2.0	4	Current (A)	130	140	150
	5	Voltage (V)	18	18	18
	6	Welding speed (cm/min)	55	66	77

경도 테스트를 통하여 선정한 두께별 적정용접조건과 실

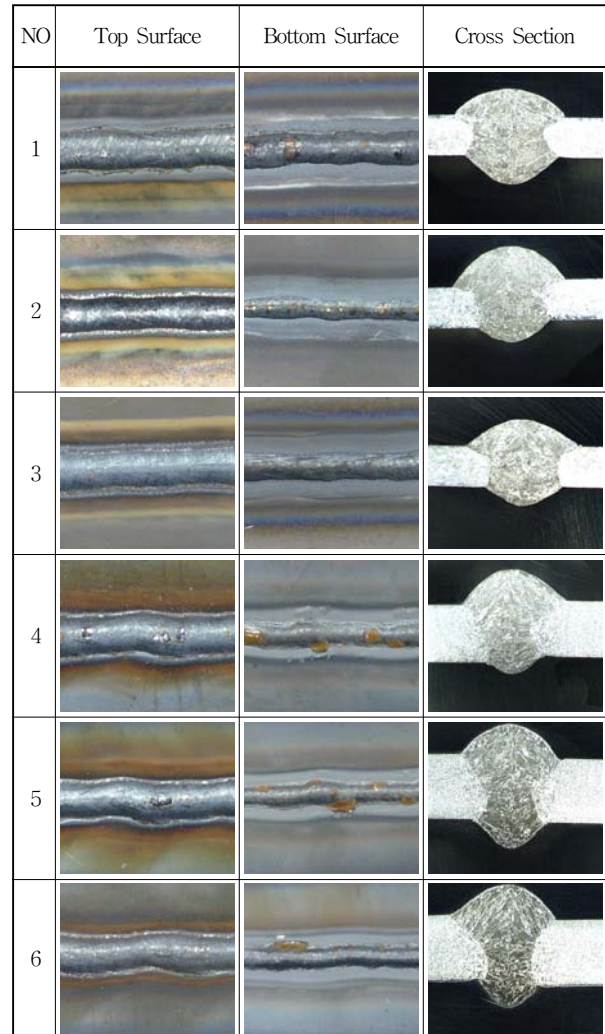
Table 5 The optimum welding conditions

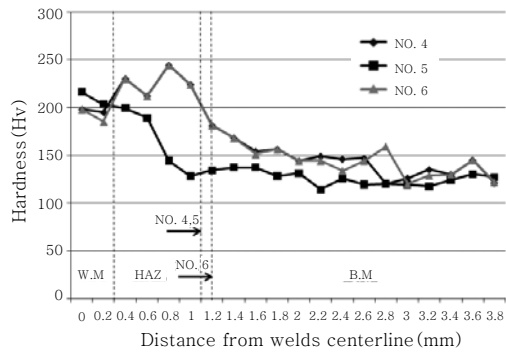
NO	T (mm)	Gap (mm)	Current (A)	Voltage (V)	Welding Speed (cm/min)	Gas Flow Rate (ℓ/min)	Shielding Gas Composition Ratio (CO ₂ : Ar)
1	1.2	0	90	16	44	21	20:80
2		0	90	17	55	21	20:80
3		0	110	18	88	21	20:80
4	2.0	0.4	130	18	55	21	20:80
5		0.4	140	18	66	21	20:80
6		0.4	150	18	77	21	20:80

험계획 factor와 level을 Table 5, 6에 나타내었다.

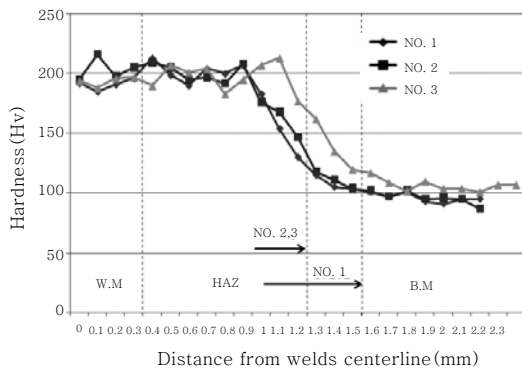
Fig. 5, 6는 Table 5의 두께별 적정용접조건으로 얻어진 용접부의 비드표면과 단면사진 및 경도값으로, 경도 분포를 살펴보면 Vickers 경도로 용착금속은 약 210Hv 정도이고 열영향부는 240Hv 정도로 다소 높게 나타나

Fig. 5 Bead shape and cross section of the welded joints with the optimized condition





(a)



(b)

Fig. 6 Hardness distribution of the welded joints with the optimized condition (a) 1.2mm(t), (b) 2.0mm(t)

고 있으나 전체적으로 정상적인 용접부의 경도분포를 나타내고 있음을 알 수 있다.

본 연구에서 원하는 최적의 용접조건은 현장에서 요구하는 생산성 향상 및 품질 확보가 가능한 조건이어야 한다. 즉, 시편 두께 1.2t는 용접속도 88cm/min일 때, 시편두께 2.0t는 용접속도 77cm/min으로 설정하는 것이 바람직하다.

5. 결 론

현장에서 사용하고 있는 차량용 강판에 대한 품질향상 목적과 스파터 제거 등의 후처리 생략을 통한 생산성 향상을 위해, 자동차 차체 용접시 상대적으로 스파터 발생량이 적은 MAG 용접을 적용한 용접공정 기술 개발 및 최적의 용접조건을 도출하고자 하였다.

1) 보호가스로는 혼합조성비 80%Ar+20%CO₂가 스파터 발생 저감 및 용접성 측면에서 효과적임을 확인할 수 있었다.

2) 유량은 실외에서는 풍속에 의해 21 l/min 이상을 유지해야하나 실내에서는 15 l/min도 무방하다고 사료된다.

3) 현장에서 요구하는 생산성 향상 및 품질 확보가 가능한 두께별 최적의 용접조건 즉, 두께가 1.2t는 88cm/min일 때, 두께가 2.0t 77cm/min일 때의 조건을 도출하였다.

후 기

이 논문은 2007년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었습니다. (This study was supported by research funds from Chosun University, 2007).

참 고 문 헌

- (社)日本溶接協會 編 : 炭酸가스半自動アーク溶接, 産報出版, (1996) (in Japanese)
- H.Ushio et al : Effect of Shielding Gas Composition on Metal Transfer Phenomena in High Current GMA Welding, Trans. JWRI, 22 (1993) 7
- U.Dilthey and R.Killing : Calculating heat input with shielded metal pulsed arc welding, The Fabricator, (1989) 11
- Takeshi SHINODA : Recent Trend of Research Activities of MAG Welding in Japan, The Korean Welding Society, (1994) 21
- J. H. Kim et al : Current Waveform Control of Pulse MAG Welding Power Source for High Speed Welding of Thin Plates, The Korean Institute of Electrical Engineers, (1999) 571-578
- T. W. Jang et al : No Root Cap Horizontal Butt-welding with MAG Process, International Journal of Korean Welding Society, (2003) 34-38
- 대한용접학회 용접편람 편찬위원회 편 : 용접/접합 편람 I,II, 대한용접학회(in Korean)
- 방한서 : 자동차 고품질을 위한 용접 매뉴얼 작성, 보고서 (in Korean)