研究論文

다구찌 방법을 이용한 AISI 4130재료에서 EBW공정의 용접 변수 영향

김 원 훈*

Effect of Welding Variables for EBW Process in AISI 4130 by Taguchi Method

Won-Hoon Kim*

Key Words : Adjustment Parameter(조정 변수), AISI 4130, Analysis of Variance(분산 분석) EBW, Interaction(교호 작용), L_8 Orthogonal Array(L_8 직교 배열), Quenching and Tempering(담금질 및 뜨임), Stress Relief Annealing(응력제거 풀림 처리), Taguchi Method(다구찌 방법) Abstract

In the present work, Taguchi method for electron beam welding(EBW) process in AISI 4130 steel plate has been adopted for investigating the contribution of effect of welding variables.

A $L_8(2^7)$ orthogonal array is adopted to obtain the effect of adjustment parameters. The adjustment parameters consist of accelerating voltage, beam current, travel speed and focus current. And the quality features selected for the EBW process are bead width of weldment, reinforcement, penetration depth, undercut and area of weld metal. Variance analysis is performed in order to check the effect of adjustment parameters on EBW. The mechanical properties of electron beam welded joints for each heat treatment conditions are investigated in comparison with those of base metal, especially from the view point of tensile and impact properties.

1. 서 론

2차 세계 대전 이후에 로켓, 유도탄, 항공기 및 핵 반응 용기 등에 관한 기술 분야는 매우 빠른 속도로 발전이 진행되고 있다. 이러한 분야에 사용되는 대부분 금속 재료들은 고 융점 재료가 사용되고 있으며, 이 재료들은 고온, 용융 및 고온 성형 공정 과정 중에 대기 중에 산소와 쉽게 반응을 일으키기 때문에 제작 공정은 주로 불활성 분위기 또

※ 1997년 5월 28일 접수

* 정회원, 국방과학연구소

는 진공 상태에서 제작 공정이 진행되고 있다[1~3]. 이에 따라 용접 공정 분야에서도 기존 사용되고 있는 각종 전기 아크 용접 공정으로는 접합에 많은 어려움이 제기되었다. 따라서, 더 고품질의 용접부를 얻기 위해 고 에너지밀도 용접법인 전자 비임 용접(electron beam welding, 이하 EBW) 공정이 개발되어 사용되고 있으며, 점점 그 적용 범위가 넓어지고 있는 추세를 보이고 있다[4,5].

EBW 공정은 보통 고 진공속에서 필라멘트(cathode)를 가열하여 열전자를 방출하며, 이를 고전압 양극에 의해 가속시키고, 이 가속된 열전자를 모재에 충돌시켜 그 발열 작용에 의해 재료를 용접하는 방법으로 용접부의 기계적 성질을 향상시키며 또 변형량을 최소로 줄일수 있기 때문에 일반 전기 아크 용접에 비해 여러 가지 측면에서 매우 우수하다고 알려져 있다[1,4,5]. 그러나 이 분야에 관련한 공정 변수의 영향, 용접 공정에 대한 세부 절차 및 조건 등에 대해서는 정량적이고 체계적으로 발표된 세부 자료는 부족한 실정이다.

본 연구에서는 우주 항공용 구조체 분야에 고온 내부식성 재료로 비교적 널리 사용되고 있는 AISI 4130 재료에 대해서 EBW 공정을 적용하여 최근에 실험 계획법으로 널리 쓰이고 있는 다구찌 방법(Taguchi method)을 이용하였다. 공정에 적용된 직교 좌표계는 용접 조정 변수가 4개, 수준수가 2인 경우에 이용되는 $L_8(2^7)$로 하였으며, 용접 조정 변수의 영향력을 평가하기 위해서 용접 비드 형상을 측정하여 그 결과를 분산 분석하였다. 사용된 AISI 4130 재료는 우주 항공 분야에 사용될 때에는 강도 대 무게 비를 증가 시키기 위해서 대개의 경우 용접 완료 후 최종 열처리를 실시하여 기계적 성질을 향상 시킨다. 따라서, 본 연구에서는 열처리 공정 단계별로 용접부의 기계적 성질을 측정하였으며 모재의 그것과도 비교하였다. 특히, 실험에 사용된 재료의 제품 제작을 기존에는 가스 텅스텐 아크 용접(gas tungsten arc welding) 공정으로 수행하여 왔으나, 용접부에 발생하는 결함(주로 균열, 기공) 및 용접 변형의 최소화 등의 고품질의 제품 개발이 요구되었기 때문에 본 EBW 공정을 제품 용접에 적용하게되었으며, 이에따른 용접 조건 설정 및 공정 절차의 개발을 위해 본 연구가 수행되었다.

2. 실 험

2.1 재료 및 용접 장비

본 실험에 사용된 재료는 Cr-Mo 저 합금강인 AISI 4130 이며, 두께 5mm, 폭 200mm, 길이 180mm의 판재를 사용하였다. 용접전에 재료는 풀림 열처리 상태로써, 용접부는 압연 방향에 수직인 부위에 위치하도록 준비 하였다. Table 1은 본 실험에 사용된 모재 금속의 화학 성분을 나타내고 있다. 표에서 알수 있듯이 사용된 재료는 탄소 함량이 0.3%의 저 합금강이며, 용접성의 척도가 되는 탄소 당량은 0.62%로 용접시 예열 및 후열이 요구되는 재료이다. 또 용접 완료후에는 주로 담금질 및 뜨임(quenching and tempering, Q/T) 열처리하여 기계적 성질을 향상시켜 사용되는 재료이다.

EBW 공정에 적용한 용접 설계를 살펴보면 실제 제품에 있어서는 두 개의 원통형 실린더를 용접하도록 되어 있기 때문에, 루트 간격이 없고 또 개선각이 없는 형태로 설계되어 있다. 따라서 시편에서는 이와 유사한 비드 온 플레이트(bead-on-plate) 용접 설계로 하여 시편 제작 및 용접이 수행되었다.

사용된 EBW 장비는 150kV-200mA 용접기(Messer Griesheim, 독일)를 사용하였다.

Table 1. Chemical compositions of the AISI 4130 base metal

Compssition / Type	C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo	C_{eq}*
Base metal	0.31	0.48	0.003	0.001	0.29	-	0.88	0.19	0.62

Note : $C_{eq} = C + \frac{M_n}{6} + \frac{N_i}{15} + \frac{C_r}{5} + \frac{C_u}{13} + \frac{M_0}{4}(W_t\%)$

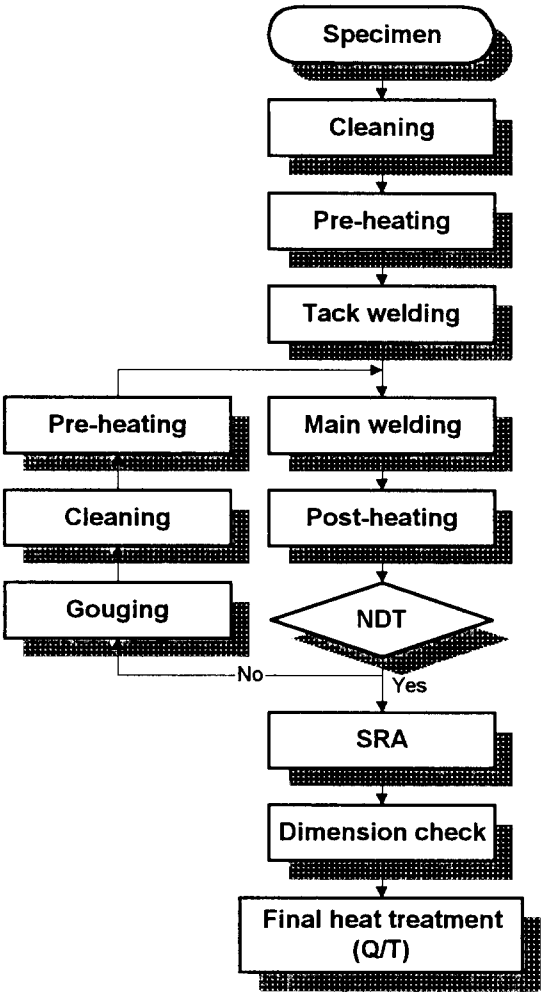


Fig 1. Welding flow chart

2.2 용접 공정 및 절차

모든 용접 시편은 용접 전에 그라인더로 표면을 연마한 후 아세톤으로 세척하여 표면에 있는 불순물을 완전히 제거하였다. 세척된 시편은 용접기에 설치한 후에도 다시 표면을 아세톤으로 세척하였다. 다음에는 시편을 200℃로 예열한 다음에 실제 제품의 경우에는 용접시 두 시편 사이의 어긋남과 벌어짐을 방지하기 위해 가접한 후에 본 용접을 실시하였다. 그러나 시편의 경우에는 예열을 한후에 가접없이 본 용접을 실시하였다. 본 용접을 완료한 다음에는 200℃로 후열을 실시하여 냉각 속도를 최소화 하였다. 다음에는 시편을 용접기로부터 제거하고 육안 및 방사선 투과 검사를 실시하여 결함 유무를 확인하였다. 또, 용접부에 생성된 잔류응력을 제거하기 위해서 잔류 응력 제거 열처리(stress relief annealing, SRA)를 실시하였으며, 마지막으로 실제 구조물에서 요구되는 기계적 성질을 얻기 위해 최종 열처리를 실시하였다. 이상의 용접 및 열처리 공정 절차를 Fig. 1에 제시하였다.

2.3 다구찌 방법 및 용접 조건

제품 및 공정의 설계와 개선을 위한 다구찌 방법은 제품 품질 향상을 위한 획기적인 방법으로 최근 많은 관심의 대상이 되고 있다. 즉 최소한의 실험 횟수를 통하여 변수들의 영향력을 고찰할 수 있는 실험 방법이다.

본 연구에서 적용된 직교 좌표계는 Table 2에 제시된 바와 같이 용접 조정 변수가 4개, 수준수가

Table 2. L_8 (2^7) Orthogonal array

Expt. No.	A	B	AB	C	e	BC	D
	1	2	3	4	5	6	7
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	2
3	1	2	2	1	1	2	2
4	1	2	2	2	2	1	1
5	2	1	2	1	2	1	2
6	2	1	2	2	1	2	1
7	2	2	1	1	2	2	1
8	2	2	1	2	1	1	2

Table 3. Factors and their levels

Factors		Levels		
		1 (Low level)	0	2 (High level)
A	Accelerating voltage (kV)	108	120	132
B	Beam current (mA)	40.5	45	49.5
C	Travel speed (mm/s)	22.5	25	27.5
D	Surface focus current (mA)	1673	1770	1865
	Weld focus current (mA)	1653 (-20mA at -108kV)	1800	1885 (+20mA at +132kV)
		1845 (-20mA at -132kV)		1693 (+20mA at +108kV)

2인 경우에 적용되는 $L_8(2^7)$를 적용하였다. 4개의 조정 변수에 대한 영향력를 보기 위해서는 16회의 실험이 요구되지만 본 실험 방법에의거 8회의 실험만을 수행하므로써 각 변수의 영향력을 확인할 수 있다. Table 2에서 하나의 열은 하나의 자유도를 갖는다. 즉, 하나의 열은 하나의 효과(주 효과 또는 교호 작용)에 해당된다[6~8]. 용접 조정 변수로는 용접 공정에서 중요하다고 판단되는 가속 전압(A), 빔 전류(B), 용접 이송 속도(C) 및 초점 전류(D)등 4 변수를 주 인자로 채택하였으며, 교호 작용 AB, BC에 대한 정보를 얻기 위한 실험이 수행되었다.

Table 3은 각 요인별 수준을 제시하고 있다. 여기서 각 인자의 설정 기준은 용접 기준 조건(Table 3에서 0)을 기준으로 약 ±10% 변화 시켰다. 추천할 만한 EB 용접 조건을 도출하기 위해 본 용접, 후열처리, 육안 및 방사선 투과 검사, 그리고 SRA 공정을 거친 다음에 용접 변수의 영향력을 평가하였다. 용접 완료후에 용접부 비드 폭, 덧살 높이, 용입 깊이, 언더컷 및 용접 금속 단면적을 측정하였다.

2.4 실험 내용 및 방법

2.4.1 시편 준비 및 용접부 형상 측정

용접 완료 후 준비된 시편의 용접부 중앙면을 절단하여 단면을 관찰하였으며, 정밀 측정을 위해 단면은 연마한 후 메타놀액에 4% 질산을 혼합한 액으로 부식시켰다. 용접 단면의 부위별 크기를 측정하기 위해 확대경(Pika Seiko, 일본)과 면적계

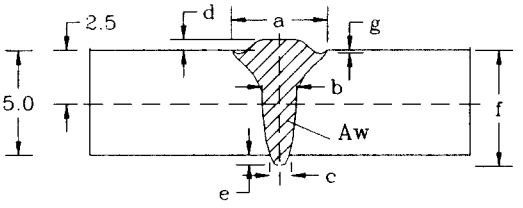


Fig 2. Weld configuration of EBW

(Ushikata, 일본)를 사용하여 3회 관찰하여 그 평균값을 취하였다. 측정한 용접부의 각 부위별 형상에 대한 부호를 Fig. 2에 제시하였다.

용접부 거시 조직은 부식시킨 다음에 접사 카메라(Carl Zeiss, 독일)로, 미시 조직은 광학 현미경(Nikon, 일본)을 사용해서 사진 촬영하였다.

2.4.2 용접부 기계적 성질 측정

다구찌 방법에 의해 도출된 결과를 통해 추천할 만 한 용접 조건을 적용하여 Fig. 1에 제시된 용접 공정 및 열처리를 실시한 후 각 열처리 공정 단계별로 기계적 성질 값을 모재 금속의 그것과 비교하였다. 인장 시험(규격 : ASTM-E 8M "sheet-type specimen")과 충격 시험(Charpy-V)을 아래의 공정 단계별에 따라 각각 구분하여 실시하였다.

① 본 용접된 상태

② SRA된 상태(본 용접 + 600℃에서 1시간 유지 후 400℃까지 노냉후 공냉)

③ 최종 열처리된 상태(본 용접 + SRA + 870℃에서 3시간 오스테나이징 후 유 냉 및 450℃에서 3시간 뜨임 후 공냉)

SRA 처리 후에 최종 열처리 단계별 세부 온도

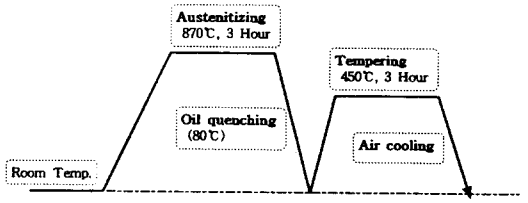


Fig 3. Final heat treatment

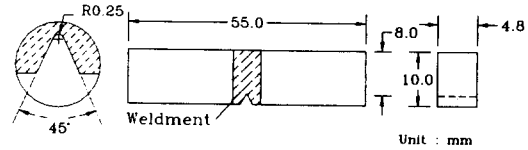


Fig 4. Charpy V impact specimen

및 시간에 대한 조건을 Fig. 3에 제시하였다. 특히 충격 시험에 사용된 시편은 용접부 중앙에 노치가 위치하도록 가공하였으며, 시편 두께가 얇기 때문에 Fig. 4에 제시된 축소 시편을 제작하여 시험 하였다[9].

3. 결과 및 고찰

3.1 다구찌 방법에의한 용접 변수의 영향력

Table 4는 각 실험 번호에 따라 용접부의 부위별 크기와 용접 금속 면적을 측정하여 제시한 표이다. 시험 번호 1, 2, 4, 6의 경우는 용접부가 완전한 용입이 일어나지 않은 부분 용입된 경우를 보이고 있으며, 시험 번호 7의 경우는 8종류의 시료 중 용접 입열((heat input : 가속 전압×비임 전류/용접 이송속도)이 상대적으로 제일 크며 이에따라 내부 비드 폭과 용접 금속 면적이 제일 크게 나타났다. 특히, Table 4에서 용접 입열의 크기가 거의 같은 시험 번호 4, 6, 8의 경우 용접부 비드 형상은 차이를 나타내고 있다. 이것은 Table 3에서 조정 변수 A, B, C에의한 용접 입열의 크기는 비록 같다고 하여도 용접 비드 형상은 각 조정 변수에 따라 차이를 나타낼수 있으며, 또 초점 전류에 의해서도 비드 형상은 영향을 받음을 확인 할수 있다[10]. 특히 EBW 공정에서 용접부 형상은 빔 전류에 의해 결정되는 초점 전류의 크기 및 위치 조정에 따라 매우 민감하다[10,11]. 본 실험에서 초점 전류는 가능한 완전 용입이 발생될 수 있는 조건으로 수행되었다. Table 4의 실험 결과를 기준으로 다구찌 방법에 의해 ANOVA 프로그램[12]을 이용하여 분산 분석표를 작성한후 그 결과를 Table 5에 나타내었다. Table 5에서 S는 변동, Df는 자유도, V는 분산, F는 검정, S 는 순변동, $\rho(\%)$는 기여율을 나타낸다.

또, Table 5의 분산 분석표의 점 추정값으로부터 각 조정 변수에 따른 기여 효과를 Fig. 5에 제시하였다. 각각 비대한 용접부 형상의 특성에 미치는 변수들의 영향력을 살펴보면 다음과 같다.

Table 4. Average dimensions of weldment

Unit : mm

Expt. No	Bead width of weldment			Reinforcement		Penetration depth	Undercut	Area of weld metal (mm2)	Heat input (J/mm)
	a (Face)	b (Center)	c (Root)	d (Face)	e (Root)	f	g	A_w	
1	4.67	2.02	0	0.24	0	4.11	0.07	9.6	196.8
2	4.46	1.49	0	0.18	0	3.33	0.10	9.1	161.0
3	4.68	2.25	0.74	0.25	0.35	5.60	0.02	12.4	196.8
4	4.60	1.92	0	0.29	0	4.39	0.13	10.3	240.0
5	4.76	2.41	0.76	0.34	0.04	5.38	0.01	13.3	196.8
6	4.70	2.10	0	0.29	0	4.32	0.16	11.3	240.5
7	4.55	2.80	1.92	0.24	0.22	5.46	0	15.6	293.3
8	4.36	2.78	1.34	0.26	0.25	5.51	0.08	14.0	240.0

Table 5의 (a)는 용접부의 표면 비드 폭에 대한 분산 분석표를 나타낸 표이며, 변동이 제일 적은 교호 작용 BC 변수를 오차에 풀(pool)하였다. 또, Fig. 5의 (a)는 조정 변수의 레벨 평균에 대한 변수의 영향력을 그림으로 제시하고 있다. 표면 비드 폭에 대한 조정 변수의 영향력 순서는 AB > C > B > D > ... 등으로 나타났다. 즉, 가속 전압과 빔 전류의 교호 작용에 의한 변수(AB)가 제일 큰 영향력을 보였으며, 빔 전류와 용접 속도의 교호 작용(BC)및 가속 전압(A)의 영향력은 무시할 정도로 적게 나타났다. 즉, 변수 A, B, C가 서로 복잡한 교호 작용에 의한 효과로 나타났다. 또, 용접 시험 조건 구간내에서 각 변수의 값이 증가함에 따라 표면 비드 폭은 감소함을 알 수 있었다.

Table 5의 (b)는 용접부 단면 중앙부의 비드 폭에 대한 분산 분석표를 나타낸 표이며, 변동이 제일 적은 D 변수를 오차에 풀하였다. 또, Fig. 5의 (b)는 조정 변수의 레벨 평균에 대한 변수의 영향력을 그림으로 제시하고 있다. 용접부 단면 중앙부의 비드 폭에 대한 조정 변수의 영향력 순서는 A > B > C > BC > ... 등으로 나타났다. 용접부의 표면 비드 폭의 경우 가속 전압(A)의 영향은 거의 무시할 정도로 영향력이 없었는데 비해서, 용접부 단면 중앙부의 비드 폭은 가속 전압이 제일 큰 영향력을 보이는 변수로 나타났다. 초점 전류(D)는 그 영향력을 무시할 정도의 결과를 보여 주었다. 가속 전압과 빔 전류는 그 값이 증가함에 따라 비드 폭이 증가함을 알 수 있었다. 또, 용접 속도가 증가함에 따라 비드 폭이 감소함을 알 수 있었다. 이것은 세 종류의 변수가 용접 입열에 직접적인 영향을 주기 때문이다.

Table 5의 (c)는 표면에서의 덧살 높이에 대한 분산 분석표를 나타낸 표이며, 변동이 제일 적은 B 변수를 오차에 풀하였다. 또, Fig. 5의 (c)는 조정 변수의 레벨 평균에 대한 변수의 영향력을 그림으로 제시하고 있다. 표면의 덧살 높이에 대한 조정 변수의 영향력 순서는 AB > A > BC > C > ... 등으로 나타났다. 가속 전압과 빔 전류의 교호 작용(AB)에 의한 변수가 제일 큰 영향력을 보이는 변수로 나타났으며, 용접 속도(C)와 초점 전류(D)는 그 영향력을 무시할 정도의 결과를 보여 주었다. 가속 전압이 증가함에 따라 표면의 덧살 높이가 증가함을 알 수 있었다.

Table 5의 (d)는 용입 깊이에 대한 분산 분석표를 나타낸 표이며, 변동이 제일 적은 BC 변수를 오차에 풀하였다. 또, Fig. 5의 (d)는 조정 변수의 레벨 평균에 대한 변수의 영향력을 그림으로 제시하고 있다. 용입 깊이에 대한 조정 변수의 영향력 순서는 B > A > C > D > ... 등으로 나타났다. 빔 전류(B)가 제일 큰 영향력을 보이는 변수로 나타났으며, 교호 작용에 의한 AB, BC의 변수는 그 영향력을 무시할 정도의 결과를 보여 주었다. 빔 전류와 가속 전압은 그 값이 증가함에 따라 용입 깊이가 증가함을 알 수 있으며, U. Dilthey등 [10]의 연구 결과와 부합됨을 확인 할 수 있었으며, 또 용접 이송 속도의 증가에 따라 용입 깊이의 감소는

Table 5. Analysis of variance sheet

(a) Face bead width of variance sheet

Source	Pool	Df	S	V	F	S	ρ(%)
A	N	1	0.00020	0.00020	7.04×10^{9}	0.00020	0.16
B	N	1	0.02000	0.02000	7.04×10^{11}	0.02000	80
AB	N	1	0.06125	0.06125	2.16×10^{12}	0.06125	48.40
C	N	1	0.03645	0.03645	1.28×10^{12}	0.03645	28.80
e	N	1	0.00020	0.0002	7.04×10^{9}	0.00020	0.16
BC	Y	1	2.84×10^{-14}	2.84×10^{-14}	-	-	-
D	N	1	0.00845	0.00845	2.97×10^{11}	0.00845	6.68
Total		7	0.12655				100

(b) Center bead width of weldment

Source	Pool	Df	S	V	F	S	p(%)
A	N	1	0.72601	0.72601	717.045	0.72500	53.14
B	N	1	0.37411	0.37411	369.492	0.37310	27.35
AB	N	1	0.02101	0.02101	20.753	0.02000	1.47
C	N	1	0.17701	0.17701	174.826	0.17600	12.90
e	N	1	0.03511	0.03511	34.679	0.03410	2.50
BC	N	1	0.03001	0.03001	29.642	0.02900	2.13
D	Y	1	0.00101	0.00101	-	-	-
Total		7	1.36429				100

(c) Face reinforcement

Source	Pool	Df	S	V	F	S	p(%)
A	N	1	0.00361	0.00361	288.999	0.00360	23.24
B	Y	1	0.00001	0.00001	-	-	-
AB	N	1	0.00781	0.00781	624.997	0.00780	50.36
C	N	1	0.00031	0.00031	25.000	0.00030	1.94
e	N	1	0.00001	0.00001	1.000	0.00000	0
BC	0	1	0.00361	0.00361	288.999	0.00360	23.24
D	N	1	0.00011	0.00011	9.000	0.00010	0.65
Total		7	0.01549				100

(d) Penetration depth

Source	Pool	Df	S	V	F	S	p(%)
A	N	1	1.31220	1.31220	22.70241	1.25440	25.39
B	N	1	1.82405	1.82405	31.55793	1.76625	35.75
AB	N	1	0.20480	0.20480	3.54325	0.14700	2.98
C	N	1	0.12500	0.12500	19.46365	1.06720	21.60
e	N	1	0.12005	0.12005	2.07699	0.06225	1.26
BC	Y	1	0.05780	0.05780	-	-	-
D	N	1	0.29645	0.29645	5.12889	0.23865	4.83
Total		7	4.94035				

(e) Undercut

Source	Pool	Df	S	V	F	S	ρ(%)
A	N	1	0.00061	0.00061	49.00004	0.00061	2.53
B	N	1	0.00151	0.00151	121.00011	0.00150	6.33
AB	N	1	0.00061	0.00061	49.00003	0.00060	2.53
C	N	1	0.01711	0.01711	1369.00102	0.01710	72.19
e	N	1	0.00101	0.00101	81.00006	0.00100	4.22
BC	Y	1	0.00001	0.00001	-	-	-
D	N	1	0.00281	0.00281	225.00016	0.00280	11.82
Total		7	0.02369				100

(f) Area of weld metal

Source	Pool	Df	S	V	F	S	ρ(%)
A	N	1	20.48000	20.48000	163.83969	20.35500	56.01
B	N	1	10.12500	10.12500	80.99983	10.00000	27.52
AB	N	1	0.12500	0.12500	1.00000	0.00000	0
C	N	1	4.80500	4.80500	38.43992	4.68000	12.88
e	Y	1	0.12500	0.12500	-	-	-
BC	N	1	0.18000	0.18000	1.44000	0.05500	0.15
D	N	1	0.50000	0.50000	3.99999	0.37500	1.03
Total		7	36.34000				100

A. Sanderson 등[13]의 연구 결과와 일치함을 확인할 수 있었다.

Table 5의 (e)는 언더컷에 대한 분산 분석표를 나타낸 표이며, 변동이 제일적은 BC 변수를 오차에 풀하였다. 또, Fig. 5의 (e)는 조정 변수의 레벨 평균에 대한 변수의 영향력을 그림으로 제시하고 있다. 언더컷의 영향력 순서는 C > D > B > A > ...등으로 나타났다. 용접 속도(C)가 제일 큰 영향력을 보이는 변수로 나타났고, 그 영향력이 다른 변수에 비해 월등히 크게 나타났으며, 가속 전압(A)은 그 영향력이 별로 크지 않았다. 용접 속도가 증가함에 따라 언더컷은 급격히 증가함을 알 수 있다. 따라서 용접시 결함인 언더컷의 발생 방지를 위해 용접 속도 조정이 매우 중요한 변수임을 알 수 있었다.

Table 5의 (f)는 용접 금속 단면적에 대한 분산 분석표를 나타낸 표이며, 에러(error) 항을 오차에 풀하였다. 또, Fig. 5의 (f)는 조정 변수의 레벨 평균에 대한 변수의 영향력을 그림으로 제시하고 있다. 용접 금속 단면적의 영향력 순서는 A > B > C > D > ...등으로 나타났다. 가속 전압(A)이 제일 큰 영향력을 보이는 변수로 나타났으며, 초점 전류(D)와 교호 작용 AB, BC는 그 영향력을 무시할 정도의 결과를 보여 주었다. 가속 전압과 빔 전류는 그 값이 증가함에 따라 용입 깊이가 증가함을 알 수 있다. 특히 용접 금속 단면적에 대한 분산 분석 결과와 용입 깊이에 대한 그 결과는 단지 조정 변수의 순서에만 다소 차이가 있었지만 그 경향은 매우 유사한 결과를 보여 주었다.

이상의 결과를 종합해보면 용접부의 형상에 제일 큰 영향을 끼치는 변수는 다음과 같으며, 이미 앞에서 지적하였듯이 초점 전류는 가능한 용접부의 완전 용입이 일어날 수 있도록 조정되었기 때문에 용접부 형상 변화에 큰 기여를 하지 않음을 알 수 있다.

표면 비드 폭 : 가속 전압과 빔 전류의 교호 작

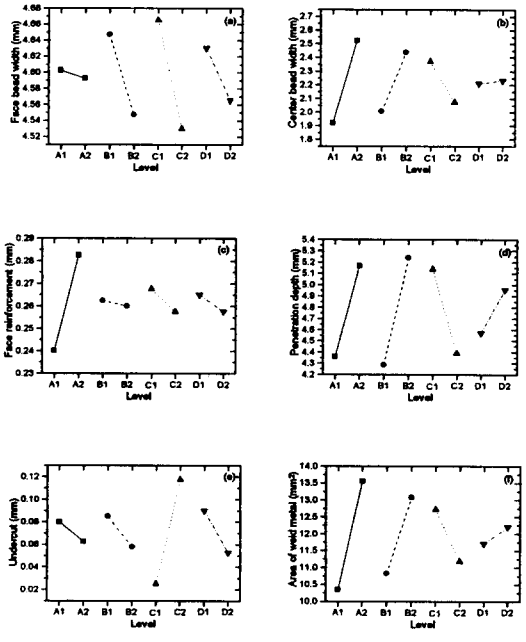


Fig 5. Change in average values of quality features due to adjustment parameters changes

용(AB)

용접부 단면 중앙부의 비드 폭 : 가속 전압(A)

표면 덧살 높이 : 가속 전압과 빔 전류의 교호작용(AB)

용입 깊이 : 빔 전류(B)

언더컷 : 용접 속도(C)

용접 금속 단면적 : 가속 전압(A)

3.2 EBW 공정에서 추천할 만한 용접 조건 및 제품 용접 결과

본 연구에서 EBW 공정으로 두께 5mm의 AISI 4130 재료를 다구찌 방법에 의한 실험 계획법을 도입하여 용접부 형상 및 비파괴 검사를 통해 도출된 추천할 만한 용접 조건을 Table 6에 제시하였다. 입열 100J/mm에서 가접한 후에 60J/mm로 4 패스의 예열을 수행한다. 이어서 본 용접은 가속 전압은 120kV, 빔 전류는 45mA로 조정후 이 조건에 가장 잘 부합되는 초점 전류인 1780mA로 조정하였으며, 용접 속도는 25mm/s로 하였다. 또 본 용접

Table 6. Welding parameters of EBW process

Classification	Voltage (kV)	Beam current (mA)	Travel speed (mm/s)	Focus current (mA)	No. of pass	Heat input (J/mm)	Remarks
Tack welding	120	15	18	1783	1	100.0	Working distance : 719mm Vacuum : 0.13 Pa
Pre-heating	120	15	30	2000	4	60.0	
Main welding	120	45	25	1780	1	216.0	
Post-heating	120	15	30	2000	4	60.0	

Table 7. Average dimensions of production weldment at the working conditions

Process	Spec. No.	Bead width of weldment			Reinforcement		Penetration depth	Undercut	Area of weld metal (mm^2)
		a	b	c	d	e	f	g	A_w
EBW	11	3.65	1.1	1.22	0.05	0.64	5.69	0.08	7.8
	12	3.30	0.97	1.25	0.01	0.45	5.46	0.08	7.7
	13	3.27	1.04	1.2	0	0.7	5.70	0.13	7.5
	Avg.	3.40	1.04	1.22	0.02	0.60	5.62	0.10	7.67

을 실시한 다음에 후열을 실시하였다. 다구찌 방법에 의해 도출된 이상의 용접 조건과 절차를 적용하여 실제 제품에 용접한후 용접부 형상 측정 결과를 Table 7에 제시하였다. 이 표에서 제품의 용접 비드 폭(평균 3.4mm)은 시편에 비해 좁게 나타났으며, 또 덧살 높이(내 외부 각각 0.02mm와 0.6mm)와 언더컷(평균 0.1mm)도 적은 값을 보여주었다. 그러나 용접부의 형상 결과는 전통적으로 고진공 상태에서 얻어 질수 있는 결과와 비교해서는 다소 차이가 있음을 확인할 수 있었다. 이것은 용접 장비의 진공도가 용접부 형상에 매우 큰 영향을 끼치기 때문이며, 고 진공 일수록 비드 폭은 좁고 용입 깊이는 증가되는 경향을 보이기 때문이다. 그러나 본 시험에 사용된 장비의 가능한 최대 진공도는 0.13Pa 정도를 유지할 수 있는 장비이다.

용접 완료후 제품은 용접부 비파괴 판정 기준 규격[14]을 만족하는 품질 수준을 얻을수 있었으며, 규격에 벗어나는 어떤 특별한 결함도 검출되지 않았다. 또, 최종 열처리(Q/T)후에는 규격에 부합되는 기계적 물성치를 얻을 수 있었다.

3.3 거시 및 미시 조직 사진

Fig. 6은 EBW 공정에 의한 용접부를 거시 촬영한 사진으로 EBW 공정의 경우 전형적으로 나타나는 용접부 형상인 "wine glass" 형태를 볼 수 있으며, 즉 용접 비드 폭이 매우 좁고 용입이 깊은 형상을 관찰 할 수 있다. 또 EBW 시편에 대해서 후열처리 완료 후에 미시 조직 사진으로 모재와 열 영향부 및 용접 금속을 제시하였는데, 용접 금속의 응고 조직에서는 매우 빠른 냉각 속도에 의해 담금질 마르텐사이트 조직을 관찰 할 수 있으며, 열영향 부위에서는 용접부 최고 온도 및 오스테나이트 영역에서 유지 시간에 따라 구분되는 두 종류의 조직인 미세 금속 조직과 거친 금속 조직의 마르텐사이트 조직을 관찰 할 수 있다[15].

3.4 용접부 기계적 성질

본 시험 결과 도출된 조건(Table 6)을 적용하여 용접한 후에 열처리 단계별로 각 시편에 대한 인장 및 충격 시험 결과와 모재의 시험 결과를 Table 8에 제시하였다. 각 열처리 조건에 따라 시편은 3개씩

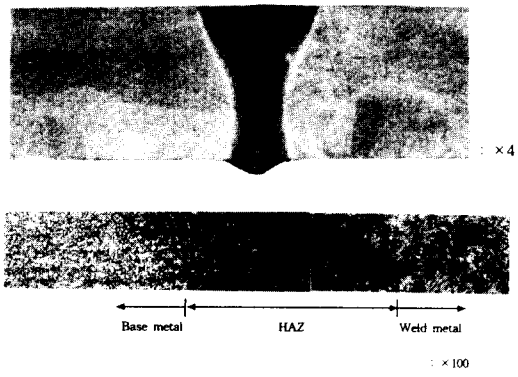


Fig 6. Microstructures of weld metals

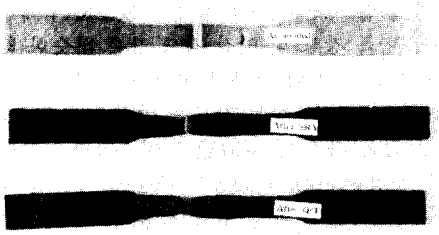
제작하여 시험하였으며, 제시된 값은 그 평균치이다. 용접부 인장 시편의 경우 용접부는 시편의 중앙에 횡방향으로 위치하도록 제작하였다. 인장 시험 결과 용접 시편의 경우 용접후 및 SRA후에서는 연신율, 항복 강도 및 인장 강도 값은 비슷한 값을 나타내었다. 모재의 결과와 비교하면 연신율은 적은 값을 보였으며, 항복 강도는 비슷한 값을 또 인장 강도 값은 다소 큰 결과를 보여주었다. 특히 본 시험에 사용된 AISI 4130강이 제품에 사용될 경우에는 용접후 Q/T 후에 주로 사용되기 때문에 이 조건에서는 오히려 용접 시편에서 모재에 비해 연신율은 다소 떨어졌으나, 항복 강도와 인장 강도는 오히려 다소 높은 값을 보여 주었다. 모든 인장 시험 시편에서 파단면은 통상적으로 나타나듯이 용접부 금속이 아닌 모재에서 파단이 발생 되었는데, 이것은 용접 입열에 의해서 용융 및 응고에 따른 국부적인 용접부 경도 증가가 주 원인이기 때문이며, 순수한 용접 금속 자체의 시험과는 차이가 있다고 판단된다. 인장 시험 후의 시편 형상을 Fig. 7의 (a)에 제시하였다.

충격시험 결과는 용접된 후의 시편과 SRA된 후의 시편에서 비슷한 값을 나타내었으나, Q/T 열처리 후에는 약 1/3로 떨어진 결과를 알수 있는데, 이것은 Q/T후에 나타나는 재료의 취성 때문에 발생한 결과로 볼 수 있다. 충격 시편 제작시 노치부가 용접부 중앙에 위치하도록 하기위해 매우 세심한 주의를 기울였으나, 용접부 단면 중앙부위와 용접 루트부의 폭은 매우 좁기 때문에 파단면의 일부는 모재쪽으로도 진행된 점을 감안한다면 순수한 용접 금속에서의 충격치로 보기에는 다소 무리

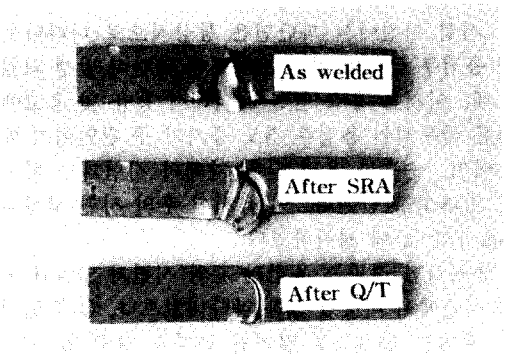
Table 8. Tensile and Charpy V impact test results of welded joint

Test temperature : 20℃

TProcess	Heat-treatment conditions	Tensile test			Charpy-V impact (kg · m)
		Elongation %	(%) Y. S. (kg/mm²)	T. S. (kg/mm²)	
EBW	As welded	17.3	36	55.3	11.4
	After SRA	20.3	36	55	10.7
	After Q/T	7.1	123.5	133.5	3.4
Base plate	Annealed cond.	34.2	36.8	50.2	-
	After SRA	32.4	39	49.1	-
	After Q/T	8.9	118.3	130.0	-



(a) Tensile test



(b) Impact test

Fig 7. Results of test specimens

가 있다고 판단된다. 충격 시편의 파단 형상은 Fig. 7의 (b)에 제시하였으며, 용접된 후 및 SRA 된 후의 파단 시편의 형상은 연성 재료의 파단 모양을 보여주고 있으며, Q/T 열처리 된 후의 시편에서는 취성 재료의 파단 거동을 보여 주었다.

4. 결 론

두께 5.0mm의 AISI 4130 저합금강 재료에 EBW 공정을 적용하여 추천할만한 용접 조건과 절차를 도출하기 위해 다구찌 방법으로 실험을 실시한 후 그 결과를 분석하였다. 최소한의 실험 횟수로 용접 조정 변수에 따른 용접부 형상 특성에 영향을 끼치는 변수의 효과를 파악하는데 매우 유용한 실험 계획법임을 입증할 수 있었다.

또 열처리 공정 단계별로 기계적 성질을 모재 시편에 대한 값과 비교하였다. 본 연구를 통해 얻어진 주요 결론은 다음과 같다.

(1) 다구찌 방법을 적용하여 EBW 공정에서 용접 조정 변수에 따라 용접부 형상에 영향을 끼치는 용접 변수들의 영향력을 정량적으로 확인하였으며, 그 형상에 가장 큰 영향력을 주는 변수는 다음과 같았다.

- 표면 비드 폭 : 가속 전압과 빔 전류의 교호 작용
- 용접부 단면 중앙부의 비드 폭 : 가속 전압
- 표면 덧살 높이 : 가속 전압과 빔 전류의 교호작용
- 용입 깊이 : 빔 전류
- 언더컷 : 용접 속도
- 용접 금속 단면적 : 가속 전압

(2) 인장시험 결과 용접 시편은 모재 시편과 비

교하여 연신율은 떨어졌지만, 항복 및 인장 강도 값은 비슷한 수준이거나 다소 큰 값을 보여 주었다. 이것은 용접 입열에 의해서 국부적인 용접부 경도 증가가 주 원인이기 때문이며, 순수한 용접 금속 자체의 시험과는 차이가 있다고 판단된다. 충격 시험 결과 Q/T후의 충격치는 용접 및 SRA 후의 값에 비해서 약 1/3정도의 크기를 보여 주었다.

참 고 문 헌

1. G. Burton, L. Frankhouser : "Electron Beam Welding", Welding Journal, Welding Research Supplement, October (1959), pp. 401s~409s.
2. H. A. Hokanson and J. W. Meier: "Electron Beam Welding of Aircraft Materials and Components", Welding Journal, Nov. (1962), pp. 999~1008.
3. B. E. Paton, et al. : "Trends in the Development of Electron-Beam Welding", Automatic Welding, Vol. 29, No. 10 (1976), pp. 57~62.
4. D. E. Powers and G. R. Laflamme: "EBW vs. LBW- A Comparative Look at the Cost and Performance Traits of Both Processes", Welding Journal, Mar. (1988), pp. 25~31.
5. T. W. Eagar : "Electron Beam and Laser Beam Materials Processing in Japan", Welding Journal, July (1986), pp. 19~31.
6. Madhav S. Phadke : "Quality Engineering Using Robust Design", Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey (1989).
7. 염봉진, 고선우, 김성준 : "제품 및 공정 설계를 위한 다구찌 방법", 한국과학기술원 경영과학, 제 7 권 제 2 호, 12월 (1990).
8. 김병희, 서동수 : "실험 계획법에의한 Cr3C2-7wt%NiCr 용사 분말의 HVOF 용사 변수 최적화", 대한용접학회지, 제15권, 제1호 (1997), pp. 80~89.
9. L. Towers : "Testing Sub-Size Charpy Specimens, Part 1 - The Influence of Thickness on the Ductile/Brittle Transition", Metal Construction, Mar. (1986), pp. 171R~176R.
10. U. Dilthey and J. Weiser : "Investigations of EB Characteristics and Their Influences on the Weld Shape", Welding in the World, Vol. 39, No. 2 (1997), pp. 89~98.
11. W. J. Farrell and J. D. Ferrario : "A Computer-Controlled, Wide-Bandwidth Deflection System for Electron Beam Welding and Heat Treating", Welding Journal, October (1987), pp. 41~49.
12. ASD Advanced Systems and Designs, Inc. : "ANOVA-TM 2.20" (1987).
13. A. Sanderson and K. R. Nightingale : "High-Power EBW Equipment and Process Trends", Welding Journal, Apr. (1990), pp. 45~57.
14. NAS 1514 : "Radiographic Strandard for Classification of Fusion Weld Discontinuities", Aerospace Industries Association of America, Inc. (1972).
15. Ji-Liang Doong, Jing-Ming Chi and Yen-Hung Tan : "Fracture Toughness Behaviour in AISI 4130 Steel of Electron Beam Welding", Engineering Fracture Mechanics, Vol. 36, No. 6 (1990), pp. 999~1006.