

Grey relational analysis를 이용한 알루미늄 합금의 레이저-아크 하이브리드 용접조건 최적화

Optimizing welding parameters of laser-arc hybrid welding onto aluminum alloy via grey relational analysis

김 항 래*, 박 영 우*, 이 강 용*

이 명 호**, 정 우 영**, 김 선 현**

* 연세대학교 기계공학과

** 자동차부품연구원 금속소재 연구팀

ABSTRACT

Grey relational analysis has been carried out to develop a new approach for optimization of Nd:YAG laser and MIG hybrid welding parameters. The quality of welded material depends on welding parameters. The parameters chosen for current study include wire type, shielding gas, laser energy, laser focus, traveling speed, and wire feed rate. The welding experiments were performed on 6K21-T4 aluminum alloy sheet. Functional demands on products may vary widely depending on their use. The ultimate tensile stress, width, and penetration were chosen as the optimization criterion. Practice based on an orthogonal array which is following Taguchi's method has been progressed. Base on the results of grey relational analysis, the optimal process parameters were obtained. This integrated work was judged and it is observed that the results obtained by using the optimal parameters are much improved compared to those obtained through initial setting.

1. 서 론

최근 산업현장에서 널리 사용되고 있는 소재들을 대상으로 최적설계이론을 적용한 용접변수최적화에 대한 관심이 집중되고 있다. 회귀분석법과 Taguchi 실험계획법 등 다양한 분석 방법을 이용하여 우수한 용접 물성을 얻기 위한 최적의 용접 변수를 찾고자 국내외적으로 활발한 연구가 진행되고 있다¹⁻³⁾.

아크 용접, 레이저 용접에서 용접 변수 최적화에 대한 연구 보고는 있으나 두 용접법을 접목한 하이브리드 용접에 대한 연구 보고가 미흡하다. 또한 지속적인 자동차의 경량 및 저연비의 성능이 요구됨에 따라 종래재료를 대체할 수 있는 경량화 재료로서 알루미늄 합금 사용의 중요성은 매우 높다. 본 연구는 이러한 배경아래, 분석방법 중 Grey relational analysis를 이용하여 두께 1mm의 알루미늄 합금 박판 6K21-T4에 대해서 최적화된 하이브리드 용접공정 변수를 찾는 연구를 수행하였다.

2. 실험재료와 실험방법

본 연구에서 사용된 모재는 Kobe Alcoa에서 개발한 Al-Mg-Si 합금계열인 6K21-T4로써, 강도 및 내식성이 우수하고 성형가공성이 뛰어나 자동차의 트렁크 리드 제작에 주로 사용되는 합금이다. Table 1은 6K21-T4 합금의 화학성분과 기계적 특성을 보여주고 있다.

	Chemical composition (wt)(%)								
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
1	0.16	0.01	0.07	0.55	0.02	0.01	0.01	remainder	
6K21-T4	Mechanical properties								
	Tensile Strength (MPa)			Yield Strength (MPa)			Elongation (%)		
	226			128			25		

Table 1 Chemical composition and mechanical properties of Al 6K21-T4

본 연구에서 사용된 하이브리드 용접시스템은 Rofin 사에서 제작된 최대출력 4.4kW Nd:YAG Diode 레이저 용접기 시스템과 Best-FA 사에서 제작된 MIG/MAG 자동용접기 시스템으로 구성되어 있다.

하이브리드 용접 실험에서의 주요 변수는 크게 6가지로 나누어지며, 용접 와이어의 종류, 보호가스 종류, 레이저 에너지, 레이저 초점, 용접 속도

및 와이어 송급 비율이다. 이러한 변수들에 대해 용접편람, 용접확회규격 및 시스템에서 제시하는 기준값을 적용하고 시행착오를 거쳐 물성을 만족하는 용접변수를 선정할 수 있었다.(Table 2)

Welding parameter	Initial setting
[A] Wire type	ER 4043
[B] Shielding gas	He
[C] Laser energy [kW]	2.5
[D] Laser focus [mm]	0
[E] Traveling speed [mm/s]	150
[F] Wire feed rate [m/min]	5.7
UTS (Mpa)	197
Width [mm]	3.3
Penetration [mm]	0.98

Table 2 initial setting and result

보다 우수한 최적의 용접변수를 찾기위하여 용접변수(Table 2)에서 수준(level)을 변화시킨 용접조건의 적용이 필요하다. 각 변수의 변화수준은 3개, 용접와이어의 종류는 2개로 선정하였다.(Table 3)

	Parameters	Level 1	Level 2	Level 3
A	Wire Type	ER 5356	ER 4043	
B	Shielding Gas Type	None	Ar	He
C	Laser Energy [W]	2	2.5	3
D	Laser Focus [mm]	0	-0.5	-1
E	Traveling Speed [mm/s]	120	150	180
F	Wire Feed Rate [m/min]	5.2	5.7	6.5

Table 3 welding parameters with 2 & 3 levels

Table 3과 같이 선정된 수준에 따라 모든 경우의 실험횟수를 고려하였을 때, 총 486회(2¹×3⁵)의 실험수가 예상되었다. 따라서 불필요한 실험 횟수를 줄임과 동시에 각각의 변수에 대해서 최대의 정보를 얻기 위해 Taguchi가 제안한 혼합 직교배열표^{4,5)}를 이용하여 총 18번의 실험으로 감소가 가능하여 효율적인 연구를 진행할 수 있었다. Table 4은 Taguchi의 혼합 직교배열표로서, 2수준의 인자 1개와 3수준 인자 7개 이하(2¹×3⁷)인 경우에 사용할 수 있는 장점이 있다.

Group No	Wire Type (ER 5356, ER 4043)	Shielding Gas (None, Ar, He)	Laser Energy [kW]	Laser Focus [mm]	Traveling Speed [mm/s]	Wire Feed Rate [m/min]
1	ER 5356	None	2	0	120	5.2
2	ER 5356	None	2.5	-0.5	150	5.7
3	ER 5356	None	3	-1	180	6.5
4	ER 5356	Ar	2	0	150	5.7
5	ER 5356	Ar	2.5	-0.5	180	6.5
6	ER 5356	Ar	3	-1	120	5.2
7	ER 5356	He	2	-0.5	120	6.5
8	ER 5356	He	2.5	-1	150	5.2
9	ER 5356	He	3	0	180	5.7
10	ER 4043	None	2	-1	180	5.7
11	ER 4043	None	2.5	0	120	6.5
12	ER 4043	None	3	-0.5	150	5.2
13	ER 4043	Ar	2	-0.5	180	5.2
14	ER 4043	Ar	2.5	-1	120	5.7
15	ER 4043	Ar	3	0	150	6.5
16	ER 4043	He	2	-1	150	6.5
17	ER 4043	He	2.5	0	180	5.2
18	ER 4043	He	3	-0.5	120	5.7

Table 4 orthogonal arrays of 18 different groups following Taguchi's suggestion

용접시험편은 150 x 300 x 1 mm³ 로 제작하였으며 맞대기(Butt joint)용접을 수행하였다.

3. Grey relational analysis

Grey system 이론에서는 존재하는 시스템을 White, Black, Grey system의 3가지로 분류하고 있으며, Grey system은 시스템의 정보가 불명확한 시스템을 의미한다. Grey relational analysis는 1982년 Deng⁶⁾에 의해 처음 소개되었던 Grey system 이론에서 파생된 것으로 목표치에 근거한 실험 결과의 경향을 예측하기 위한 새로운 분석법이다. 이 분석법은 통계상의 두 개 이상의 연속물에 대한 수치상의 상관관계를 파악하는 것이다. 측정된 결과(original sequence)에 대한 경향을 정량화시키기 위해 0과 1사이의 값(decimal sequence)을 갖는 Coefficient로 계산하고, Grade를 결정하여 최적 용접조건을 획득할 수 있는 효과적인 분석법이다. 용접 후 측정될 용접 물성의 특성에 따라 크게 3가지 형태의 변환값(Coefficient)를 구하게 된다. 실험계획법의 손실함수 특성에 따라 용접 인장강도는 망대특성, 상부 비드의 폭은 망소특성 그리고 용입 깊이는 모재두께(1mm)를 목표값으로 선정하기 때문에 망목특성을 갖는다. 손실함수에 관련된 수식은 Grey relational analysis를 고려하였을때, Table 5와 같이 나타낼 수 있다. 수식에서 $x_i^o(k)$ 는 측정된 용접 물성의 고유값(original sequence)을 의미하고, $x_i^*(k)$ 는 손실함수 수식에 따라 계산된 변환값(converted sequence)을 의미한다. 망목특성에서 x^o 는 목표치이며 이는 모재두께인 1mm를 의미하게 된다.

손실함수특성	수식
망대특성	$x_i^*(k) = \frac{x_i^o(k) - \min x_i^o(k)}{\max x_i^o(k) - \min x_i^o(k)}$
망소특성	$x_i^*(k) = \frac{\max x_i^o(k) - x_i^o(k)}{\max x_i^o(k) - \min x_i^o(k)}$
망목특성	$x_i^*(k) = 1 - \frac{ x_i^o(k) - x^o }{\max\{\max x_i^o(k) - x^o, x^o - \min x_i^o(k)\}}$

Table 5 Formulae for converted sequences according to the loss function's characteristic

또한, 변환값과 용접물성 3가지에 대해서 가중 함수를 고려하게 되면, Grey relational grade를 취득할 수 있다.

Table 6는 Grey relational grade를 구하기 위한 수식을 나타내고 있으며, Grade를 획득하기 위하여 가중치가 적용된 용접물성의 변환값과 그 편차에 대한 계산이 요구된다.

	수식
편차의 합계	$\Delta_{oi}^* = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \Delta_{oi}(k)$
Grey relational grade	$\gamma(x_0^*, x_0^* w_i) = (\Gamma_i) = \frac{\Delta_{\min} + \Delta_{\max}}{\Delta_{oi}^* + \Delta_{\max}}$ $0 < \gamma(x_0^*, x_0^* w_i) < 1$

Table 6 Formulae for the grey relational grade

Table 7은 측정된 용접물성의 고유값, 수식계산에 의해 구해진 변환값(Grey relational coefficients) 및 Grade들이다.

Group no.	Experimental result			Grey Relational Coefficient			Grade	Rank
	UTS (MPa)	Width [mm]	Depth [mm]	UTS	Width	Depth		
1	155.325	1.95	1	0.5088	0.5976	1	0.7728	3
2	73.175	2.549	1	0	0.4544	1	0.6623	14
3	118.5	2.355	1	0.2807	0.5008	1	0.7136	9
4	137.65	2.046	0.824	0.3993	0.5746	0.7715	0.7083	11
5	89.95	1.677	1	0.1039	0.6627	1	0.7103	10
6	187.96	2.67	0.229	0.7109	0.4254	0	0.6227	17
7	158.31	0.265	1	0.5272	1	1	0.8639	2
8	133.12	2.082	1	0.3712	0.5659	1	0.7407	5
9	234.645	2.101	1	1	0.5615	1	0.8758	1
10	129.49	2.229	1	0.3488	0.5309	1	0.7305	6
11	152.38	3.447	1	0.4905	0.2398	1	0.7063	12
12	141.28	2.785	1	0.4218	0.3979	1	0.7207	8
13	73.515	2.804	1	0.0021	0.3936	1	0.6541	16
14	142.525	2.695	1	0.4295	0.4196	1	0.7257	7
15	140.03	4.451	1	0.414	0	1	0.6584	15
16	131.08	3.633	0.582	0.3586	0.1955	0.4577	0.6062	18
17	74.42	1.429	1	0.0077	0.722	1	0.7039	13
18	189.775	3.2	1	0.7221	0.2989	1	0.7579	4

Table 7 Experimental results, evaluated grey relational coefficients and grades

Grey relational grade 중, 9번째 실험의 용접변수에 따른 변환값이 가장 높으며, 이는 고려된 용접 변수의 조건이 최적화된 용접 변수임을 의미한다. Table 8은 용접편라프와 용접시스템에서 제시했던 용접조건 및 용접물성과 Grey relational analysis를 이용하여 도출한 최적 용접조건 및 용접 물성을 나타내고 있다.

Welding parameter	Optimised setting
[A] Wire type	ER 5356
[B] Shielding gas	He
[C] Laser energy [kW]	3
[D] Laser focus [mm]	0
[E] Traveling speed [mm/s]	180
[F] Wire feed rate [m/min]	5.7
UTS ,Mpa	234.645

Width [mm]	2.101
Penetration [mm]	1

Table 8 Optimal setting and results

따라서, 초기에 시스템에서 적용한 실험조건을 이용한 용접부의 물성평가 결과(Table 2)보다 분석법을 이용하여 도출된 최적조건에서의 용접물성평가 결과(Table 8)가 향상되었음을 확인하였다.

결론

- 1) Taguchi 혼합 직교배열표에 따라 486회에 이르는 불필요한 실험횟수를 18회로 감소시켜 효율적인 실험을 진행하였다.
- 2) Grey relational analysis를 이용하여 각각의 실험에서 측정된 용접물성의 고유값을 손실함수의 특성에 의해 수식계산을 하여 변환값(Grey relational coefficient)를 구할 수 있었다.
- 3) 변환값을 이용하여 Grade를 획득할 수 있었으며 가장 우수한 물성을 갖는 최적의 용접변수를 도출하였다.

후기

본 연구는 산업자원부 차세대 신기술 개발사업(과제번호:10024116-2005-11)의 지원하에 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 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 Materials Processing Technology, Vol.41, Issue 4 (1994), 381-398
2. Lung Kwang Pan, Che Chung Wang : Optimization of Nd:YAG laser welding onto magnesium alloy via Taguchi analysis, Optics & Laser Technology, Vol. 37, Issue 1, (2005), 33-42
3. K.Y. Benyounis, A.G. Olabi and M.S.J. Hashmi : Effect of laser welding parameters on the heat input and weld-bead profile. Journal of Materials Processing Technology, Vol. 164-165 (2005), 978-985
4. G. Taguchi : Introduction to Quality Engineering, Asian Productivity, Organization, (1990)
5. 박성현 : 현대실험계획법(개정판), 민영사, (2003)
6. Deng, J. L.: Introduction to Grey System Theory, The Journal of Grey System, Vol. 1 (1989), 1-24