반응표면분석법을 이용한 박판 알루미늄 합금의 저입열 Pulse MIG 용접 변수 최적화에 관한 연구

Study on the Optimization of Low Heat-Input Pluse MIG Welding Process for Aluminum Alloy sheets using the response surface methodology(RSM)

김 재 성* • 황 지 혜** • 최 동 순** • 이 보 영***
Kim, Kae-Seong • Hwang, Ji-Hye • Choi, Dong-Sun • Lee, Bo-Yong

요 약

최근 자동차 업계서는 차량의 온실가스 배출량을 줄이고 연비를 개선시킬 수 있는 방법 중의 하나로 경량화 소재를 사용하여 차체의 중량을 줄이는 연구가 활발히 진행 중에 있다. 특히 알루미늄 합금의 경우 기존 강재에 비해 비중이 낮아 가볍고 부식에 대한 저항성이 높아 많이 사용되어지고 있는 추세이다. 본 연구에서는 먼저, 저입열 용접공정을 적용하여 용접 변수와 토치의 각도에 따른 인장강도 특성을 비교하여 적정 용접 범위를 산정하였으며, 인장강도와 비드형상의 관계를 다중 회귀 분석을 이용하여 비드 예측 회귀 모델을 제시하였다. 또한 호감도 함수를 적용한 반응표면분석법을 이용하여 자동차 생산 현장에서 겹치기 용접 이음부의 강건한 용접 품질을 가질 수 있는 최적용접 공정 조건을 도출할 수 있는 효과적인 방법을 제안하고자 한다.

keywords : 차체 경량화, 저입열 용접공정, 회귀분석, 반응표면분석법, 호감도 함수

1. 서 론

최근 온실가스로 인한 폭우, 태풍, 가뭄 등의 자연재해가 증가하고 있으며, 온난화에 대한 문제가 본격적으로 거론됨에 따라 선진국을 중심으로 CO2 규제가 강화되고 있다. 특히 자동차로 인해 배출되는 이산화탄소량은 전체 온실가스 배출량의 20%를 차지하고 있어 이를 줄이기 위한 방법으로 자동차 중량의 25%를 차지하는 차체 경량화가 중요한 기술과제로 대두되고 있다. 최근 Jaguar社에서는 구조적인 면을 보강하여 신형 차량 중량의 10% 경량화로 10%의 연비향상을 달성한 것으로 발표되어져, 차체 경량화 연구가 더욱더 가속화 되고 있다. 차체 경량화 방법으로는 구조변경 및 재료변경으로 크게 나눌 수 있으며, 구조 최적화에 의한 중량 감소는 연구에 많은 시간과 비용을 수반하는 단점이 있다. 반면에 재료변경은 기존 강재에 비해 비중이 낮으면서도 유사한 강도를 갖는 비철금속 소재의 차체 적용에 대한 연구가 활발하게 이뤄지고 있다. 특히 알루미늄은 철의 1/3 수준의 비중 대비 90%의 강성을 가지고 있어 경량화 재료로서 가장 활발하게 연구되고 있다. 그러나, 알루미늄 합금은 비열 및 열전도도가 높아서 용접 시 고온의 열원이 필요하며, 성형 및 용접 공정 변수에 대한 조절이 어렵고 균열 발생이 쉬워, 양호한 용접부를 얻을 수 있는 최적 용접 공정 변수를

* 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과 박사과정 kim0961@kau.ac.kr
** 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과 석사과정
*** 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부 교수 bylee@kau.ac.kr

도출할 필요가 있다.

현재 알루미늄 합금의 용융 용접 방법으로는 GMA, GTA 및 LASER 용접 등이 사용되고 있다. 이중 LASER 용접의 경우 초기 설비 투자비가 고가인 단점이 있으며, GTAW의 경우는 생산성이 매우 낮다는 단점이 있어 제품의 경쟁력이 근본적으로 저하된다. 불활성 보호가스를 사용하는 MIG(Metal inert gas) 용접의 경우, 후판에서는 우수한 용접성 및 고속 용접이 가능하지만, 박판 용접에서는 용접입열에 따른 변형과 용락이 큰 문제로 대두되고 있다. 또한 용융 후 부피 변화가 매우 크기 때문에 양호한 품질을 얻기 위해 저입열 프로세서를 이용한 아크 용접 공정이 요구되고 있다.

이에 본 연구에서는 Austria Fronius 사의 CMT 프로세서를 이용하여 저입열 Pulse MIG 용접의 적용가능성을 확인하고, 용접부 품질 기준에 적합한 적정 용접 범위를 선정하고 사용자가 원하는 용접 품질을 효과적으로 예측할 수 있는 비드 예측 회귀 모델과 자동차 생산 현장에 적용 가능한 갭 발생에 대해 강건한 용접 품질을 갖는 최적 용접 공정 변수 값을 결정하는 효과적인 방법을 제안하고자 한다.

2. Al 용접 실험 방법

박판 알루미늄 합금의 저입열 Pulse MIG 용접에서 대표적인 아크 용접 공정 변수인 용접전류, 용접속도, 갭, 토치각도 변화에 따른 인장강도와 비드형상 특성을 파악하고, 냉접(cold weld), 이면비드(back bead) 및 용락(burn through)이 존재하지 않는 적정 용접 범위를 도출하기 위해 실제 현장에서 많이 사용되는 용접 이음형상인 겹치기 용접을 실시하였다. 실험에 사용된 모재는 두께 1.5mm인 Al 5052로 Al-Mg계 합금이다. 용가재의 경우 5.0% Mg을 표준조성으로 하는 합금으로 Al-Mg계 등의 용접에 일반적으로 사용되고 있는 직경 1.0mm의 ER 5356을 사용하였다. 용접전류는 80, 100, 120, 140A로 용접속도는 0.6, 0.9, 1.2, 1.5, 1.8 m/min 로 갭은 0, 0.5, 1mm로 토치각도는 50°, 60°로 각각 변화시키며 실험하였다. 그림 1은 실험을 통해 얻어진 Al 5052 겹치기 용접의 적정 용접 범위를 보여주고 있다.

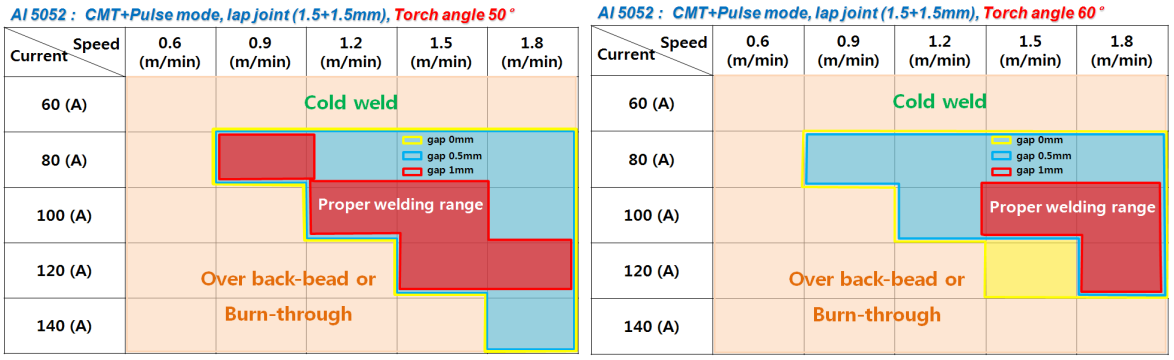

그림 1 Al 5052 겹치기 용접의 적정 용접 범위

3. 용접변수 최적화

3.1. 용접변수 선정

박판 알루미늄 합금의 겹치기 용접을 통해 얻어진 적정 용접범위에서 용접 공정 변수 중 용접전류, 용접속도, 갭의 3 인자(factor)를 각각 3 수준(level)으로 한 삼원배치법을 이용하여 총 27번의 용접을 수행하였다.

용접 후 각 용접 공정 변수 변화에 따른 각 조건별 인장강도와 비드형상을 측정하여 목적함수의 값을 구하였으며, 구해진 목적함수의 평균값을 그 용접조건에 대한 적합도 함수 값으로 사용하였다. 표 1은 적정용접 범위에서 선정된 용접공정 변수를 보여주고 있다.

표 1 용접조건 최적화를 위한 관심실험 영역의 용접 변수

Factor	Factor name	-1 level	0 level	1 level
ξ_1	Welding current [A]	110	115	120
ξ_2	Welding speed [m/min]	1.4	1.6	1.8
ξ_3	Gap [mm]	0	0.5	1

3.2. 용접 조건 최적화

실험을 통해 얻어진 결과값을 사용하여 입력변수인 용접전류, 용접속도, 갭의 크기에 따른 반응변수 인장강도, 볼록도와 용입깊이의 2차 회귀 모델을 식 (1), (2), (3)과 같이 표현하였으며, T_s는 인장강도, C_r는 볼록도, P_d는 용입깊이, X_1은 용접전류, X_2는 용접속도, X_3는 갭의 크기이다.

$$T_s = 903.55 - 9.407X_1 - 42.917X_2 - 75.067X_3 + 0.035X_1^2 - 8.333X_2^2 - 19.533X_3^2 + 0.65X_1X_2 + 0.687X_1X_3 - 2.333X_2X_3 \quad (1)$$

$$C_r = -1.17148 + 0.02333X_1 + 0.23333X_2 - 0.82444X_3 - 0.00009X_1^2 + 0.06944X_2^2 - 0.06222X_3^2 - 0.00417X_1X_2 + 0.00667X_1X_3 + 0.04167X_2X_3 \quad (2)$$

$$P_d = 30.7545 - 0.6674X_1 + 7.9875X_2 + 1.5050X_3 + 0.0048X_1^2 + 5.4722X_2^2 + 0.5556X_3^2 - 0.235X_1X_2 + 0.001X_1X_3 - 1.125X_2X_3 \quad (3)$$

회귀모델 식 (1), (2), (3)을 통해 최적 조건을 구하고자 하는 관심 실험 영역에서의 각 입력변수에 대한 응답을 예측하였으며, 호감도 함수(desirability function)를 사용하여 용접부의 인장강도와 용접 비드형상인 볼록도와 용입깊이를 정의하였다. 여기서, $d(T_s(x))$는 인장강도의, $d(C_r(x))$는 볼록도, $d(P_d(x))$는 용입깊이를 나타내는 각각의 호감도 함수이다. 각 응답에 대한 호감도 함수의 기하학적 평균으로 정의된 복합 호감도 함수를 식 (7)과 같이 나타내었다.

$$(4)\quad d(T_s(x)) = \begin{cases} \left(\frac{T_s - 0}{3600 - 0}\right) & 0 \le T_s \le 3600 \\ 0 & otherwise \end{cases} \qquad (5)\quad d(C_r(x)) = \begin{cases} \left(\frac{1 - C_r}{1 - 0}\right) & 0 \le C_r \le 1 \\ 0 & otherwise \end{cases}$$

$$(6)\quad d(P_d(x)) = \begin{cases} \left(\frac{P_d - 0}{1 - 0}\right) & 0 \le P_d \le 1 \\ \left(\frac{1.5 - P_d}{1.5 - 1}\right) & 1 \le P_d \le 1.5 \\ 0 & otherwise \end{cases}$$

$$D(x) = \left[d(T_s(x)) \cdot d(C_r(x)) \cdot d(P_d(x)\right]^{1/3} \quad (7)$$

3.3. 최적 용접 조건 결과

통계프로그램인 MINITAB 14를 이용하여 구한 입력변수의 최적 자연 변수 값은 다음과 같이 $(\zeta_1, \zeta_2, \zeta_3) = (120, 1.59, 0)$이며 복합 호감도 함수는 0.8757이다. 이 최적 조건에서 예측된 출력변수는 $(T_s, C_r, P_d) = (318.3, 0.10, 0.84)$이고 실험의 결과와 비교해 보면 비교적 잘 일치함을 알 수 있다. 이 호감도 함수를 검증하기 위해 호감도 함수의 자연 변수 값들 중 갭의 크기를 0, 0.5, 1mm로 각각 고정시킨

후 출력변수를 예측한 값과 실제 검증 실험에서 나타난 출력변수 값의 비교를 표 2에 나타내었다. 표 2에 나타낸 것과 같이 반응표면분석법으로부터 나타낸 호감도 함수와 실제 검증 실험의 출력변수 값의 적합률이 약 94.4~100% 로 매우 유의함을 알 수 있다.

표 2 호감도 함수와 실제 검증 실험의 출력변수 값의 적합률 비교

No	Desirability function			Output variable						Fittness rate (%)
	Current (A)	Speed (m/min)	Gap (mm)	Tensile strength (MPa)		Convexity ratio		Penetration depth (mm)		
				estimation	real	estimation	real	estimation	real	
1	120	1.59	0	318.3	319	0.10	0.10	0.84	0.85	100
2	115	1.40	0.5	312.7	314	0.11	0.09	1.13	1.14	94.4
3	110	1.43	1	297.8	295	0.05	0.05	1.08	1.06	99.1

4. 결론

본 연구에서는 용접공정의 입력변수는 용접전류, 용접속도, 갭의 크기와 출력변수는 인장강도, 볼록도, 용입깊이를 이용하였으며, 용접 실험을 수행한 후 얻어진 데이터를 사용하여 회귀 모델을 얻었다. 최적 용접 조건을 얻고자 하는 세 가지 반응 표면의 출력값을 모두 만족시키고자 복합 호감도 함수를 적용함으로써 저입열 Pulse MIG 용접에서의 최적 용접 공정 조건을 도출하였다. 또한 반응표면분석법으로부터 나타낸 호감도 함수와 검증 실험 결과의 비교를 통해 94.4~100%의 높은 수준의 적합률를 보이며 그 값이 매우 유의함을 확인할 수 있었다. 이 결과로부터, 도출된 최적 용접 공정 조건 및 호감도 함수가 박판 알루미늄 합금의 저입열 Pulse MIG 용접을 표현해주는 모델로 적합하다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 교육과학기술부의 지원에 의한 국가지정연구실 (No.M20604005402-06B0400-40210) 사업의 일환으로 수행되었기에 이에 감사드립니다.

참고문헌

H. S. Park, T. H. Kim, S. H. Rhee, (2003), Optimization of Welding Parameters for Resistance Spot Welding of TRIP Steel Using Response Surface Methodology, *Journal of KWJS*, 21(2), pp. 76~81

L.A.Guitterez. G Neye and E.Zschech, (1996) Microstructure, hardness profile and tensile strength in welds of AA6013 T6 extrusion, *Welding Journal*, 75(4), pp. 115~121

Jicai Feng, Hongtao Zhang and Peng He, (1995) The CMT short-circuiting metal transfer process and its use in thin aluminium sheets welding, *Materials and Design*, 30, pp. 1850~1852.

R. H. Myers and D. C. Montgomery, (1995) Response Surface Methodology, Process and Product Optimization Using Designed Experiments, *John wiley & Sons, inc*, pp. 208~278

G. Derringer and R.Suich. (1980) Simultaneous Optimization of Several Response Variables, *Journal of Quality Technology*, 12, pp. 214~219.

E. D. Casttilo, D. C. Montgomery and D. R. Mccarville, (1996) Modified Desirability Functions for Multiple Response ptimization, *Journal of Quality Technology*, 28(3), pp. 337~345

J. B. Lee, Y. W. Bang, S. W. Oh and H. S. Changm, (1997) Control of bead geometry in GMAW, *Journal of KWJS*, 15(6), pp. 116~123