

AL5083의 레이저 용접조건설정을 위한 유한요소해석

FEM analysis for laser welding condition of AL5083

충북대학교 기계공학부 조해용
충북대학교 대학원 김관우
KIMM 레이저응용시스템그룹 이제훈, 서정
(주)성우하이텍 이문용

I. 서론

비강도(specific strength)가 크고 내식성이 우수하여 각종 구조용, 기능성 재료로 널리 사용되고 있는 알루미늄합금의 용접가공에 있어 레이저나 전자빔과 같은 고밀도 에너지빔의 사용이 증가하고 있다. 그 중 레이저용접은 용접속도가 빠르고, 용접 후 소재변형이 적으며, 크기가 작고 좁은 용융부의 급랭으로 인한 조직 미세화효과 등의 큰 장점이 있으며 직선 및 곡선으로 구성되는 복잡한 형상으로서의 용접 및 접합이 어려운 재질 및 이종재질의 용접도 가능하다. 따라서 동종 및 이종재질의 복잡한 용접라인 형상과 용접부의 생산성, 신뢰성이 요구되는 자동차, 항공기, 선박 등의 여러 산업분야에서의 그 적용범위가 확대되고 있다.

알루미늄합금 및 이종재질의 레이저용접에 대하여 연구가 활발히 진행되고 있다¹⁻⁶⁾. Reinhart 등¹⁾과 Ishide 등²⁾은 Diode, Nd:YAG 레이저의 조합형 열원으로 용접 실험하여 용접부의 기계적 특성을 평가하였고, Kojima 등³⁾은 고속카메라를 이용한 촬영기법으로 펄스타입 Nd:YAG 레이저의 스테인레스 재질 용접 시 빔 파워, 빔 초점크기 등에 따른 용접부를 분석하였으며, Picon 등⁴⁾은 일차원 요소모델을 이용한 유한요소해석으로 용접 플레이트의 잔류응력을 예측하였고, Lee 등^{5,6)}은 용착금속의 용고기구, 용접부의 균열과 기공의 형성, 열영향부의 조직 및 강도변화 등에 관해 연구하였다. 이러한 연구들은 주로 실험을 통하여 용접조건을 설정하고자 하였다. 본 연구에서는 상용 유한요소 프로그램인 SYSWELD를 이용해 경로가 직선인 AL5083의 용접시뮬레이션 하여 온도분포, 소재변형, 잔류응력, 상분포 등의 결과분석을 통해 적정 레이저용접조건을 예측하고, Nd:YAG의 큰형과 Nd:YAG+ Diode의 조합형 열원조건에 대해서 용접열원으로써의 적합성을 비교평가 하고자 하였다.

II. 해석방법

금속상변화 해석 및 용접 후 잔류응력과 변형 계산이 가능한 상용의 용접전용 유한요소프로그램인 SYSWELD를 이용하여 레이저용접에 관한 열·기계 연성해석(thermo mechanical coupled analysis) 하였다. 해석에 적용되는 재료 물성치로써 온도에 따른 열적, 기계적 물성 및 용접특성상 상변화에 대한 TTT 선도와 온도에 따른 각 상의 물성이 입력되어야 하며 AL5083의 용접해석에 있어 이런 모든 물성이 적용되었다.

해석모델의 형상은 Fig. 1과 같고 그 크기는 길이40mm, 폭40mm, 두께1mm이다. 온도변화가 급격한

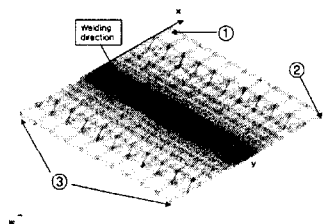


Fig. 1 Finite element modeling

용접부와 열영향부는 주위보다 조밀하게 요소분할 하였으며 빔직경 0.4~1mm인 설계열원이 적용될 수 있도록 용접부 요소크기를 0.1×0.1×0.25mm로 하였다.

해석의 경계조건으로 Fig. 1에서 ①은 x, y, z방향, ②는 x, z방향, ③은 z방향의 절점변위를 고정시켰고 열전달 및 열원에 관한 서브루틴프로그램을 작성하여 해석에 적용시켰다. 레이저 빔의 모재 내 흡수율(%)은 AL1000계열에 대한 Diode 레이저(808nm)와 Nd:YAG 레이저(1.06 μ m)의 레이저파장대별 흡수율을 참고하여 각각 13, 7로 하였다.

각 레이저열원 모델형상은 Fig. 2와 같이 Nd:YAG 레이저의 콘형 가우시안분포 열원과 Diode 레이저의 모자형 열원으로 적용시켰고 열원의 각부 치수는 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Dimensions of heat sources for laser beam

Unit(mm)			
Diode		Nd:YAG	
ze	0	ze	0
zi	-0.2	zi	-1
r	0.5	re	0.2
		ri	0.1

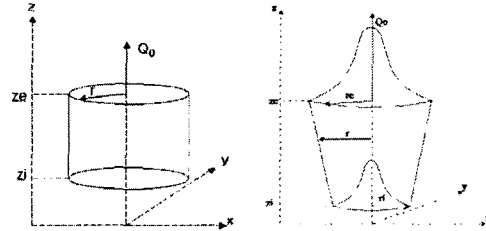


Fig. 2 Heat source of hat type and conical type

AL5083의 레이저 용접조건설정 및 콘형과 열원 중심축이 일치되는 조합형 열원에 대해 용접열원으로써의 적합성 비교평가를 위한 해석조건을 Table 2에 나타내었다. 해석조건 중 열원의 각부치수는 Table 1과 같으며 용접속도는 30mm/sec로 동일하게 적용시켰고 용접변수 중 빔 파워만을 단계별로 조절하면서 용접시뮬레이션 하였다. 해석결과 분석에서는 적정 레이저용접조건으로 생각되는 Table 2에 표시된 Case2와 Case 4조건을 비교분석하였다.

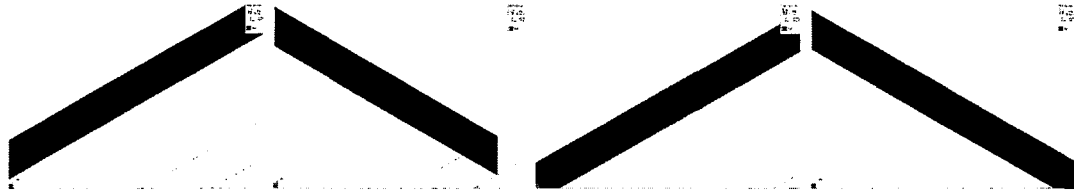
Table 2 Analysis conditions for laser welding of AL5083

Heat Source of laser beam							
Conical type (Nd:YAG laser)			Hybrid type(conical type+hat type)				
Maximum intensity (W/mm^3)	Beam power (W)	Beam diameter (mm)	Nd:YAG laser			Diode laser	
			Maximum intensity (W/mm^3)	Beam power (W)	Beam diameter (mm)	Beam power (W)	Beam diameter (mm)
4500	2872	0.4	4500	2872	0.4	500	1
5000(Case 1)	3191	0.4	5000(Case 3)	3191	0.4	500	1
5500(Case 2)	3510	0.4	5000	3191	0.4	700	1
6000	3830	0.4	5000(Case 4)	3191	0.4	1000	1
7000	4468	0.4	5000	3191	0.4	1200	1
10000	6383	0.4	5500	3510	0.4	1000	1

III. 해석결과 및 고찰

AL5083의 레이저용접을 Table 2의 조건으로 해석하여 가열온도와 용융영역, 용접 후 소재변형, 잔류응력, 상변화 및 상분포를 분석하였다.

Table 2의 두 열원조건에 대한 가열온도 및 용융영역에서 빔파워가 커짐에 따라 용융 영역크기 및 열원 중심부온도는 선형적인 증가를 나타내었다. 그 중 Table 3에서 열원중심부 가열온도가 795 $^{\circ}$ C정도이고 용융영역의 윗면 크기가 약 0.7~0.8mm, 아래면 크기가 약 0.3~0.5mm인 Table 2에 표시된 두 해석조건(콘형, 조합형)이 적당한 레이저용접조건으로 생각되고, 이러한 판단은 Al합금의 레이저용접 시 빔파워가 커질수록 용접부의 기계적 특성은 감소하고 열영향부 크기는 증가하며 용접부 및 열영향부의 강도저하 폭이 커진다는 점이 고려된 용접조건 설정기준에 기초한다. 여기에서 용융부의 크기 및 모재 가열 온도는 열원모델이 실제 용접샘플을 토대로 충분히 검토되지 않았기 때문에 실제와 다를 수 있다. Fig. 3은 열원형태에 따라 AL5083의 용융온도 625 $^{\circ}$ C를 기준으로 모재의 용융범위를 비교하여 나타내고 있는데 Table 3에 표시된 두 열원조건 모두 가열 중심부온도는 약 795 $^{\circ}$ C인 반면, 용융영역은 조합형 열



(a) Section of xz(conical) (b) Section of yz(conical) (c) Section of xz(hybrid) (d) Section of yz(hybrid)

Fig. 3 Fusion zone of xz and yz section for heat sources

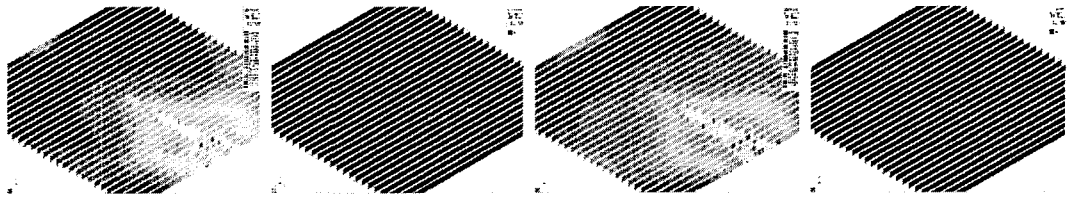
원의 경우가 보다 크게 나타났고, 이러한 결과는 Reinhart의 실험적 연구와도 잘 부합된다. 따라서 AL5083의 레이저용접열원으로 콘형보다 조합형이 유리한 것으로 생각된다.

Table 3 Results of temperature, fusion zone size, displacement and residual stress for analysis conditions

Analysis condition	Fusion zone size(mm)				Temperature of heat source center(°C)	Displacement (mm)	Maximum von Mises stress(Mpa)
	Plane of xz		Plane of yz				
Case 1	Upper	0.52	Upper	0.53	0.52	754	0.009
	Rear	0.09	Rear	0.1			
Case 2	Upper	0.64	Upper	0.69	0.64	795	0.027
	Rear	0.3	Rear	0.32			
Case 3	Upper	0.6	Upper	0.65	0.6	774	0.025
	Rear	0.28	Rear	0.3			
Case 4	Upper	0.69	Upper	0.77	0.69	794	0.035
	Rear	0.44	Rear	0.53			
AL5083의 melting point					625		

용접 후 소재변형 양상 및 변형량에서 두 열원조건(콘형, 조합형) 모두 빔과위가 커짐에 따라 변형량은 점진적인 증가를 나타냈고, 용접 후 가공물이 용접라인을 중심으로 굽어지는 등의 변형문제는 나타나지 않았고, 콘형(Case 2)이 0.027mm, 조합형(Case 4)이 0.035mm로 약 0.008 μ m의 차이를 보였다. 본 용접해석에 있어서 가공물을 고정시켜주는 지그를 고려하지 않았고, 변위구속에 관한 경계조건 설정을 Table 1과 같이 하였기 때문에 최대 변형은 가공물의 용접라인 오른쪽 끝단 모서리에서 발생되는데 모델의 크기가 작고 두께가 얇기 때문에 변형량은 매우 작게 나타났다고 생각된다.

Fig. 4의 (a)와 (c)는 레이저 용접 후 10분경과 시점에서 xz단면 잔류응력분포(von Mises stress)를 나타내고, (b)와 (d)는 용접 후 결정된 상(phase)들 중 weak material의 항복응력(85Mpa)을 기준으로 xz단면 잔류응력을 두 부분으로 나누어 나타내고 있다. 잔류응력 크기는 Table 3에서 열원이 콘형(Case 2)



(a) Section of xz(conical) (b) Distribution based on 85Mpa(conical) (c) Section of xz(hybrid) (d) Distribution based on 85Mpa(hybrid)

Fig. 4 Residual stress of xz section for heat sources(von Mises stress)

2)보다 조합형(Case 4)일 때 7Mpa정도 작게 나타났고, 이것은 가열온도 및 용융영역 분석에서 용접열원으로 조합형이 콘형보다 적합함을 뒷받침해 준다. 잔류응력은 가공물의 전 범위에 걸쳐 존재하나 용접부와 모재(initial material) 사이의 열 영향부에 집중적으로 존재하고, Fig. 4의 (b)와 (d)에서처럼 두 열원 조건 모두 용접 후반부의 열 영향부에서 비교적 큰 값의 잔류응력(85~114Mpa)이 나타났다. AL5083의 항복응력 값이 140Mpa정도임을 감안할 때 특정 하중이 용접 후반부 열 영향부에 가해진다면 잔류응력으로 인한 문제가 발생될 수 있다고 생각되며, 이를 줄일 수 있는 보다 다양한 경계조건 및 용접조건으로의 시뮬레이션을 하고 있다.

Fig. 5는 콘형 및 조합형 열원의 상변화와 상분포를 나타내는데 (a)와 (c)에서 상변화는 순간적인 가열과 빠른 냉각에 의해 진행되며, 상(phase)은 크게 상 1(모재), 상 2(부분용융부), 상 3(용융부)으로 분

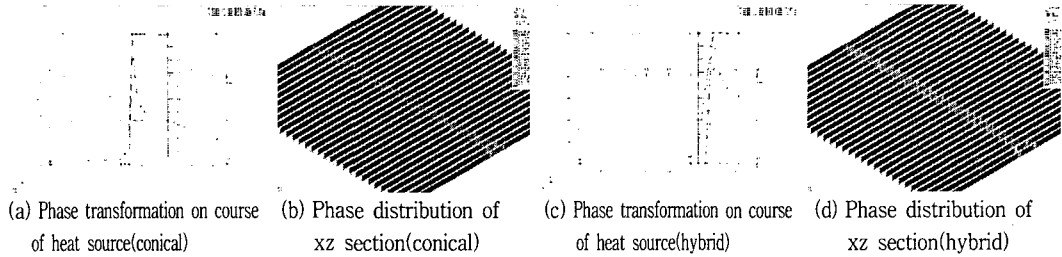


Fig. 5 Phase transformation on course of heat sources and phase distribution of xz section
 류 되는데 열원 이동선상 정점의 상 1에서 상 2, 3으로의 변화는 가열온도가 최고점에 근접하는 사이에 이루어짐을 나타낸다. Fig. 5의 (b)와 (d)에서 용접 후 상분포는 붉은색 영역이 상 3, 파란색 영역이 상 1, 상 3과 상 1 사이가 상 2로 되며, 상 2의 부분용융부는 낮은 강도와 연성을 가지는 부위로서 고온균열, 입계부식 등의 많은 문제가 발생되는 곳이다. 따라서 상 2부분에 존재하는 잔류응력의 크기를 최대한 줄일 수 있는 용접조건설정이 필요하고, 이런 점에서 앞서 서술한 바와 같이 Table 3의 Case 4(조합형 열원)가 Case 2(콘형 열원)보다 유리한 레이저용접조건으로 생각된다. 2차 연구단계에서는 용접실험을 토대로 열원모델을 수정, 보완하여 최적의 레이저용접에 근접되는 조건설정이 가능할 것으로 생각된다.

IV. 결론

상용유한요소 프로그램인 SYSWELD를 이용한 AL5083의 레이저 용접시뮬레이션 결과로써 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 콘형 열원 및 조합형 열원의 단계별 빔과워 조건에 따른 해석 결과분석을 통하여 적정 빔과워를 제시할 수 있었고 실험을 통한 열원모델의 수정으로서 보다 정확한 용접 조건설정이 가능할 것으로 생각된다.
- 2) 콘형 열원보다 조합형 열원이 AL5083 용접의 레이저 빔 조건으로 적합함을 알 수 있었고, 조합형 열원의 다양한 형상 및 배치조건을 해석에 추가하여 용접열원으로 더욱 우수한 열원조합 조건설정이 가능할 것으로 생각된다.

V. 참고문헌

1. G. Reinhart의 2명 “Welding characteristics of a hybrid diode/Nd:YAG-laser system” Lasers in Manufacturing, Proceedings of the First International WLT-Conference on Lasers in manufacturing, München. Stuttgart: AT-Fachverlag, 473~482 (2001)
2. T. Ishide의 4명 “The latest YAG laser welding system development of hybrid YAG laser welding technology” ICALEO sec. A, 149~156 (1997)
3. T. Kojima의 4명 “Analysis of laser welding phenomena based on image processing of high-speed photographs” ICALEO sec. C, 113~121 (1998)
4. R. Picon의 3명 “A one-dimensional model for the prediction of residual stress and its relief in welded plates” Int. J. Mech. Sci. Vol. 38, No. 7, 735~751 (1996)
5. 이창희, 장래웅 “알루미늄 합금의 용접특성(Part I:균열 및 기공)” 대한용접학회지, 제10권, 제3호, (1992)
6. 이창희, 장래웅 “알루미늄 합금의 용접특성(Part II:열영향부의 특성)” 대한용접학회지, 제11권, 제1호, (1993)