스틸과 알루미늄의 이종재 레이저 용접특성

김 용^{*,†}

*고등기술연구원 로봇생산기술센터

Laser Welding Characteristic of Dissimilar Metal for Aluminum to Steel

Yong Kim^{*,†}

*Center for Robot & Manufacturing, Institute for Advanced Eng., Yongin, 449-863, Korea

†Corresponding author : welding@iae.re.kr

(Received September 18, 2017 ; Revised October 11, 2017 ; Accepted October 17, 2017)

Abstract

By reducing vehicle weight, a significant increase in fuel efficiency and consequently a reduction in CO₂ emissions can be achieved. Currently a high interest in the production of hybrid weld seams between steel and aluminum exists. So in this paper work has been focused on lap joints laser welding of dissimilar metallic materials by welding steel to aluminum. Materials used one of the car body steel (DP590) and aluminum alloy (Al5052) and both of the material thickness are 1.2mm. Steel sheet is positioned on the top of the aluminum sheet with overlap length of 25mm. Also, multiple laser welding have been achieved and distance of bead is changed to investigate the influence on tensile shear strength. As the results, there exist a certain condition of penetration (about 0.3 to 0.4mm) to show a maximum tensile strength. Also, the joint strength is increased by multiple laser welding. In this case bead distance is more important factor than bead path number.

Key Words : Multiple laser welding, Lap joint, Dissimilar metal, Intermetallic compound, Tensile-shear strength

1. 서 론

자동차산업에서는 CO₂ 감축과 연비 향상이라는 목표 아래 오래전부터 다양한 요소기술 접목을 통한 경량화에 대해 고민하였으며, 이종재의 용접기술 또한 그 중 하나이다. 특히 기존의 스틸기반 차체가 알루미늄으로 일부 치환됨에 따라 이종재에 대한 가장 효율적인 용접, 접합 및 체결방법을 도출하고자 많은 연구자들이 노력을 기울이고 있다. 그러나 일반적으로 알루미늄과 스틸을 열로써 접합하기에는 많은 문제점이 있다¹⁻²⁾. 알루미늄과 스틸은 서로 용해되지 않는 불용해성이 있으며 화학적/물리적 특성(용융점, 열팽창계수, 열전도도 등)이 다르기 때문에 용접부의 경계에 취약한 금속간화합물(Intermetallic compound, IMC)이 형성되고 이로 인해 급격한 강도저하 현상이 나타나므로 그

성장을 억제하기 위한 기술이 요구된다. 일반적으로 스틸과 알루미늄의 이종접합에서는 금속간화합물의 형성 정도가 용접부의 강도를 결정한다. 이와 같은 금속간화합물의 형성은 확산에 의하며 확산은 온도와 시간의 함수로서 최종적으로 입열량에 따라 결정된다.

이에 레이저 용접은 에너지밀도가 높고 열원에 대한 정밀한 제어가 가능하다는 특징 때문에 이종접합에 매우 유리한 것으로 판단되어 이를 이용한 연구 결과들이 많이 발표되었다. 초창기의 연구에서는 본 논문과 마찬가지로 겹치기 용접 구조에서 제살용접(Autogenous) 방식으로 부분 용입을 통해 입열량 및 금속간화합물의 생성을 최소화하여 레이저 이종접합을 시도하였다³⁻⁴⁾. 이에 나아가 금속간화합물의 생성을 더욱 줄이기 위해 일부 연구자들은 레이저 전도용접(Conduction)에 대해 연구하였다⁵⁻⁶⁾. 이 방법은 스틸을 상판으로 놓고 레이저빔을 디포커싱(Defocusing)하여 스틸을 가열시키

고 그 전도열로 인해 알루미늄과 확산접합을 유도하는 방법이다. 그러나 이 방법은 강건한 클램프 설계 및 열 전달이 정확하게 제어되어야 하므로 한계가 존재한다. 이러한 한계를 극복하고 보다 효율적으로 열전도에 의한 확산접합을 가능하게 하기 위해 Kutsuna⁷⁾는 레이저 물 용접 방법을 제안하였다. 이 방법은 레이저 가열 부를 따라 롤러로 압력을 가하여 전도 열전달을 용이하게 하면서도 금속간화합물의 성장을 최소화시키는 방법으로 가압력과 레이저 출력, 속도, 빔 조사위치 등이 적절한 조합으로 설정될 경우 모재강도 이상의 접합강도를 나타낼 수 있다는 사실을 발표하였다. 이 외에 레이저 열원에 용가재를 투입하여 전통적인 레이저 브레이징 형태의 접합공정을 응용한 이중접합 연구 및 복합 열원을 사용한 하이브리드 형태의 접합공정도 다수 보고되었다. Mathieu⁸⁾는 알루미늄에 15% 함유된 Zinc 계열의 용가재를 사용하여 레이저빔의 직경, 형상, 송급속도 및 이송속도 등 다양한 변수를 조절하여 양호한 브레이징 접합부를 얻었다고 발표하였다. 나아가 Sun⁹⁾의 경우 AlSi5 용가재를 이용해 2.5mm 두께의 맞대기 용접을 실시하고 그 특성을 평가하였다. 특히 맞대기 용접 시 시편의 개선각을 30도 및 45도로 각각 달리한 후 접합하고 인장강도를 측정한 결과 30도 개선각에서 최대 150MPa 수준의 강도를 얻을 수 있었다고 발표하였다. 한편 Jia¹⁰⁾는 마치 클래딩 공정과 유사하게 파우더 형태로 용가재를 공급하여 이중접합을 시도하였으며, Vollertsen¹¹⁾은 레이저 아크 하이브리드 시스템에서 레이저 열원을 알루미늄 쪽에 치우치고 스틸에는 플럭스를 도포하여 이중소재에 맞대기 용접 후 180MPa의 접합강도를 얻었다고 발표하였다.

이와 같이 다양한 방법으로 레이저 열원을 이용한 이중접합이 시도되었지만 금속간화합물의 생성 정도에 따른 강도저하와 파단 모드에 대한 연구는 거의 없었다. 이에 본 연구에서는 겹치기 구조에서의 제살용접 방식을 기본으로 하여 레이저 공정변수를 도출하고, 강도저하의 원인에 대해 분석하였다. 이후 비드 중첩을 통한 강도 향상과 관련된 연구를 통해 실제 제살용접 시 강도 향상 방안을 제시하였다.

2. 실험방법

본 연구에 사용된 레이저 용접 장치는 3.3kW급 디스크레이저로 초점 위치에서의 빔 크기는 600 μ m이다. 실험 소재는 기본적으로 DP590강과 Al5052로 하였으며, 소재 크기는 100×200×1.2mm로 통일하였다. Table 1 및 2에는 각각 DP590과 Al5052 소재의 기계적 성질과 화학조성을 나타내었다. 실험에 사용된 소재는 레

Table 1 Chemical compositions and mechanical properties of DP590 steel

Chemical composition (wt.%)				
C	Si	Mn	P	S
0.09	0.28	1.01	0.012	0.005
Mechanical properties				
Young's Modulus	Y.S	T.S	Elongation	Poisson ratio
210GPa	420MPa	620MPa	27%	0.3

Table 2 Chemical compositions and mechanical properties of Al5052-H32

Chemical composition (wt.%)					
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ti
0.088	0.311	0.015	0.057	2.33	0.022
Mechanical properties					
Young's Modulus	Y.S	T.S	Elongation	Poisson ratio	
72GPa	185MPa	230MPa	14%	0.33	

이저빔의 반사율을 고려하여 스틸을 상판에 배치시키고 하판을 알루미늄으로 하였다. 빔 조사 시 전진 방향으로 3도 기울여 용접하였으며, 초점위치는 스틸 상판 표면을 기준으로 설정하였다. 이 때 별도의 보호 가스는 사용하지 않았다.

주요 시험으로 우선 동종 소재 접합에서의 강도를 비교하였다. 이후 이중소재 용접에서 레이저 출력을 최대로 고정하고 속도에 따른 입열 제어를 통해 입열량에 따른 강도 및 용접성을 확인하였다. 인장전단강도 비교를 위해 시험편은 폭과 중첩길이를 모두 25mm로 가공하였으며, 갭에 의한 영향을 최소화하기 위해 강인한 클램핑 지그를 사용하여 소재를 고정하였다. 용접부의 금속학적 특성평가를 위해 마크로 단면, 비커스 경도 및 파단면의 SEM, EDS 등의 분석이 수행되었으며 에칭은 켈러 용액(Keller's reagent)을 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 레이저 용접공정변수와 접합강도

이중소재의 레이저용접에 앞서 우선적으로 동종소재에서 각각 완전용입과 부분용입 조건에서의 강도 차이 및 파단특성을 확인하였다. 부분 용입의 경우 하판의 약 1/2 이하로 용입되는 조건을 적용하여 시편을 제작하였으며 폭 25mm로 가공 후 인장전단시험을 실시하였다. 이에 따른 시험 결과는 Fig. 1에 제시된 바와 같이 알루미늄과 스틸소재의 파단 형태는 달리 나타났다.

알루미늄의 경우 부분용입 시 10% 이상 강도저하가 발생하였으며, 파단은 모두 HAZ구역에서 일어났다. 반면 스틸의 경우 계면에서 파단이 일어났으며 부분용입과 완전용입에 의한 강도차는 5% 이내로 매우 미미하였다. 이와 같이 소재에 따른 파단 모드의 변화 및 강도차가 발생하는 이유는 용접 후 소재 고유의 물성에 기인한다. 우선 본 실험에 사용된 알루미늄의 경우 가공경화형 비열처리 합금으로 레이저 조사에 따른 재용융에 의해 용접부 및 HAZ의 기계적 물성은 가공경화 효과의 소멸로 인해 물성이 모재에 비해 저하된다. 또한 완전용입이 아닌 부분용입 시 키홀의 불안정으로 인해 언더컷 등의 결함이 보다 많이 발생하여 강도 저하 폭이 크기 때문에 Fig. 1(a)와 같이 HAZ 파단이 발생한다. 반면 스틸의 경우 일반적으로 레이저의 빠른 용융/냉각 사이클에 따라 용접부는 마르텐사이트 조직으로 변태되어 모재에 비해 경화된다. 이 경우 겹치기 용접부의 인장전단강도는 비드 폭에 의해 결정되며 그 폭은 모재의 단면적보다 작기 때문에 Fig. 1(b)와 같이 계면파단이 발생된다. 그러나 완전용입과 부분용입에 따른 비드 폭 차이가 크지 않기 때문에 강도 감소폭은 알루미늄 용접 시보다 적게 나타나게 된다.

다음으로 스틸과 알루미늄의 이종접합에서 용접 이음부 강도에 미치는 용접속도의 영향을 확인하기 위해 출

Fig. 1 Comparison of tensile-shear strength and fracture mode variation at laser lap joint welding of similar material

Fig. 2 Longitudinal crack observed in laser welding of (upper) steel to aluminum at full penetration condition

Fig. 3 Figure of cross section depend on laser welding conditions (variation of welding speed)

력은 최대고 고정하고 속도를 조절하며 실험하였다. 우선 완전용입 조건에서는 용접 후 열팽창계수 차이에 의해 Fig. 2와 같이 종균열이 발생되었다. 이후 용접속도를 점차 높여가며 용접할수록 용접 중 스파터 발생 및 비드 함몰현상 등이 억제되었으며, 이는 단면의 언더필 정도를 통해 확인 가능하다. Fig. 3 및 Fig. 4는 용접

Fig. 4 Variation of tensile-shear strength depend on heat input energy (welding speed)

Fig. 5 Microstructure of various region about laser welding of steel to aluminum

속도 5.0~6.5m/min 범위에서 0.5m/min 단위로 용접 후 단면 및 인장전단강도를 측정한 결과이다. 시험 결과 입열량이 감소되어 부분용입 깊이가 작아질수록 강도는 증가되는 것을 볼 수 있는데, 이는 입열량의 증가에 따라 알루미늄과 스틸 간 금속간화합물이 더욱 많이 형성된 결과이다. 그러나 그 깊이가 너무 작을 경우에는 일부 상하판 분리현상이 나타날 정도로 강도가 낮게 측정되었다. 이상의 본 실험결과를 통해 적절한 부분용입 깊이는 0.3~0.4mm 정도로 나타났으며, 적절한 용입깊이 확보(용입깊이 제어)가 무엇보다 중요한 요소이다. 강도저하에 대한 보다 세부적인 메커니즘은 뒤에 다시 설명하도록 한다.

3.2 접합부의 미세조직 특성

앞선 실험을 통해 용입깊이가 약 0.3mm 정도에서 강도가 가장 우수하게 나오는 것을 확인하였으며 이를 대상으로 미세조직을 200배의 배율로 관찰하였다. 그 결과는 Fig. 5에 제시하였다. 우선 상판 DP590강의 모재 조직은 미세 페라이트 기지에 마르텐사이트가 혼재되어 있는 조직을 기본으로 한다. 또한 스틸과 알루미늄이 만나는 계면부에서는 금속간화합물층으로 추정되는 혼재조직이 관찰된다. 한편 상판 스틸의 용접금속 조직은 일반적으로 강의 레이저 용접 후 나타나는 마르텐사이트 조직이 아닌 매우 조대한 페라이트 조직이 발견되었다. 이와 같이 특이 조직이 형성된 이유를 보다 세부적으로 확인하기 위해 SEM 및 EDS 분석을 실시하였다. 분석 결과 Fig. 6에 제시된 바와 같이 스틸 용

Fig. 6 SEM and EDS results for weldment and inter-metallic region

접부 내 Al이 약 3wt% 정도 고용되어 있는 것으로 확인되었다. 일반적으로 알루미늄과 같은 추가적인 합금 원소는 Fe-C 상태도에 변화를 줄 수 있으며 이중 알루미늄은 Closed γ -field 범주에 속하는 원소로 상태도의 γ 영역을 감마 루프 형태로 수축시킴으로써 오스테나이트의 형성을 제한하고, 결과적으로 페라이트의 형성을 돕는 페라이트 안정화 원소이다¹²⁾. 그러나 과도한 Al의 첨가는 결정조직 조대화 및 Fe 결정립계에 고용되어 강을 취약하게 만든다.

이러한 이론적 근거를 바탕으로 실제 강도 저하 정도를 비교하기 위해 DP590강 동종소재 용접시편과 이종접합 시편의 경도를 각각 측정하여 비교하였으며, 그 결과는 Fig. 7에 제시하였다. 여기서 Al이 희석되지 않은 DP590 레이저 용접금속의 경우 약 320Hv 정도이나 이종재 용접부는 280Hv 수준으로 급격히 감소된

Fig. 7 Comparison of vickers hardness between homogeneous DP590 and dissimilar joint

Fig. 8 Location of initial fracture depend on heat input energy

결과를 보였다.

한편 인장전단 시험한 용접부의 파단은 Fig. 8에서와 같이 크게 두 가지 경우로 구분되었다. 대체로 과입열 용접조건에서는 스틸의 용융선(Fusion line)을 따라 균열이 진전되어 파단이 발생하였으며, 적정 입열조건에서는 부분용입부 계면파단이 발생되었다. 금속간화합물의 성장은 온도와 시간의 증가에 따라 결정되는데, 임계 조건 이상의 금속간화합물 형성이 인장 시 응력집중을 받게 되어 파단이 시작되는 것으로 사료된다. 보다 정확한 파단 메커니즘을 밝히기 위해 적정 입열조건에서 파단된 시편에서의 파단면 분석을 실시하였으며 그 결과는 Fig. 9에 제시하였다. 전체적인 파단면을 실체현미경 및 SEM으로 관찰한 결과 균열의 시작부는 부분용입부 계면으로 나타났다. 또한 대부분의 파단면은 벽개파단(Cleavage fracture) 형태를 보였으며, 균열은 부분용입부의 계면에서 시작 및 성장되어 파단면 전체에서 급격한 취성파단이 발생된 것으로 나타났다.

Fig. 9 Fractography for laser welded steel to aluminum

3.3 강도 확보를 위한 레이저 중첩용접

레이저 용접부의 강도 증가를 위해 용입깊이 0.3~0.4mm 범위에서 다양한 비드 중첩 형태에 따른 강도를 비교하였으며, 이러한 시도는 이전에 발표된 Joo³⁾의 연구 결과를 참고하였다.

시험은 중첩길이 25mm 내에서 총 6가지 케이스로 1~4회까지 비드 간 거리와 횡수 등을 달리하여 제작하였다. 시편 제작 및 단면에 관한 세부 내용은 Fig. 10 및 Fig. 11과 같다. 인장전단시험 결과 그 강도는 비드 중첩 횡수 보다는 비드 간 거리(중첩 길이)에 더욱 영향을 받는 것으로 나타났다. 일단 비드 사이 간격을 6mm 이상 두고 2path 이상 용접을 하게 되면 파단은 Fig. 8에 제시한 계면파단이 아닌 모두 하판의 알루미늄 모재에서 파단이 발생하였으며 최종적인 파단 강도는 비드 간 거리가 넓을수록 더 크게 나타났다. 동

Fig. 10 Laser lap welding condition and strength with variable bead to bead distance

Fig. 11 Cross section of the specimen number from 1 to 4

Fig. 12 Variation of tensile shear strength depend on bead distance and path number

일한 비드 거리(Fig. 9의 ②, ③, ④)에서 빔 중첩횟수에 따라서는 오히려 ④번 결과와 같이 강도가 저하되는 경우가 발생하였는데 이는 국소면적에의 입열 집중으로 인해 나타난 결과로 사료된다.

마지막으로 비드 중첩 횟수와 간격에 대한 관계를 보다 명확하게 확인하기 위해 각각 1mm와 5mm 간격으로 3path까지 용접을 실시한 후 인장전단강도 및 파단 모드를 확인하였다. 그 결과는 Fig. 12와 같이 1mm 간격으로 비드 중첩 시에는 3path까지 모두 스틸 상판의 HAZ 부분에서 파단되었으며, 오히려 중첩횟수가 늘어남에도 불구하고 앞서 언급된 바와 같이 입열 집중으로 인해 강도가 저하되었다. 반면 5mm 간격으로 중첩 시에는 2path 시 1mm 간격으로 접합된 시편과 유사한 강도를 나타내며 파단도 동일하게 스틸 HAZ에서 발생하였으나 3path 용접 시에는 Fig. 13과 같이 알루미늄에서 파단되며 강도가 급격히 상승하였다.

이와 같이 일정 넓이 이상의 중첩은 알루미늄 모재의

Fig. 13 Variation of fracture location depend on path number at same bead distance

파단으로 유도되었다. 그러나 무한한 중첩 길이의 증대는 경량화에 반하기 때문에 설계자는 레이저용접 적용 시 강도향상을 위해 비드 중첩 및 적절한 중첩 길이를 제시해야 할 것이다. 또한 용입을 정확하게 제어할 수 있는 시스템 및 클램프의 설계가 필연적으로 요구된다.

4. 결 론

본 연구에서는 겹치기 구조에서의 제살용접 방식을 기본으로 하여 레이저 공정변수를 도출하고, 강도저하의 원인에 대해 분석하였다. 이후 비드 중첩을 통한 강도 향상과 관련된 연구를 진행하였으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) Fe/Al 이종금속의 레이저 용접에서 접합강도에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 입열량으로 나타났으며, 본 연구에서는 0.3~0.4mm 수준의 용입 깊이에서 약 89.4MPa의 강도를 나타내었다.

2) 이종 용접부의 미세조직은 조대한 페라이트 조직으로 형성되었는데, 이는 용융 과정에서 Fe에 과도로 고용된 Al의 영향 때문이다. 이 결과로 동종 소재 용접부에 비해 경도값이 최대 40Hv 정도 저하되었다. 파단면 또한 벽개파단 형태가 관찰됨에 따라 균열은 부분용입부의 계면에서 시작 및 성장되어 파단면 전체에서 급격한 취성파단이 발생되었음을 확인하였다.

3) 레이저 용접비드를 2path 이상 중첩함으로써 접합강도를 170MPa 이상으로 향상시킬 수 있었으며, 이때 중첩 횟수보다는 중첩된 비드 간 간격이 강도에 더 큰 영향을 미친다.

Reference

1. Y. Kim, K.Y. Park and K.D. Lee, Steel to aluminum joining by arc process, *Journal of KWJS*, 28(5) (2010), 493-495 (in Korean)
2. H.S. Park, W.Y. Kim and C.Y. Kang, Welding and bonding of dissimilar metal steel & non-ferrous metal, *Journal of KWS*, 14(6) (1996), 1-7 (in Korean)

3. S.M. Joo, A study on the dissimilar materials welding of steel and aluminum alloys by Nd:YAG laser, Doctor's thesis by Chosun Univ, (2005)
4. M. Schimek, et., al., Laser welded dissimilar steel aluminum seams for automotive lightweight construction, *Physics Procedia*, 39 (2012), 43-50
5. K.J. Lee, S. Kumai and T. Arai, Interfacial microstructure and strength of steel to aluminum alloy lap joints welded by a defocused laser beam, *Materials Transactions*, 46(8) (2005), 1,847-1,856
6. S. Mecco et., al., Application of laser in seam welding of dissimilar steel to aluminum joints for thick structural components, *Optics and Lasers in Eng.*, 67 (2015), 22-30
7. M.J. Rathod and M. Kutsuna, Joining of aluminum alloy 5052 and low-carbon steel by laser roll welding, *Welding Journal*, 83 (2004), 16-26
8. A. Mathieu, et., al., Dissimilar material joining using laser (aluminum to steel using zinc-based filler wire), *Optics & Laser Tech.* 39 (2007), 652-661
9. J. Sun, et., al., Effect of bevel angle on microstructure and mechanical property of Al/steel butt joint using laser welding-brazing method, *Materials and Design*, 90 (2016), 468-477
10. L. Jia, et., al., Effects of zinc on the laser welding of an aluminum alloy and galvanized steel, *J. of Material Processing Tech.*, 224 (2015), 49-59
11. C. Thomy and F. Vollertsen, Effect of process parameters on joint properties in laser MIG hybrid welding of aluminum to steel, *Proceedings of 5th Int. WLT-Conf. on LIM* (2009), 59-64
12. U. Roesler, Study of Ferrous Ternary Diagrams in Relation to Magnetic Interactions: Fe-Ni-Al System, *JOM*, 8(10) (1956), 1,285-1,289