

스틸과 알루미늄의 하이브리드 구조를 만들기 위한 레이저 접합에 관한 연구

A study on laser beam joining of low carbon steel and aluminum alloy for a hybrid structure

박태완*, 나석주*

* 한국과학기술원 기계공학과

1. 서 론

스틸은 기계적 성질이 좋고 용접성이 우수한 재료로서, 자동차 산업에서 가장 주된 자동차의 소재로 사용되어 왔다. 하지만 최근에는 에너지 문제, 환경문제 등으로 자동차의 무게를 줄이기 위한 연구가 활발하게 진행되고 있으며, 그 대안으로 알루미늄의 사용이 급증하고 있다. 자동차에서 가장 많은 무게 비중을 차지하는 것은 차체이며, 기존의 스틸 차체(body-in-white, BIW)를 알루미늄으로 대체하였을 경우에는 차체 무게를 50% 까지 감소시킬 수 있다. 최근에는 안전등의 이유로, 스틸-알루미늄 하이브리드 구조의 차체를 사용하는 자동차도 제조, 판매되고 있다.[1]

스틸과 알루미늄의 접합에 있어 가장 문제가 되는 것은, 두 금속의 상호작용에 의한 금속간화합물이다. 스틸과 알루미늄의 상호작용으로 주로 발생하는 금속간 화합물에는 Fig.1에서 볼 수 있듯이 Fe_3Al , $FeAl$, $FeAl_2$, Fe_2Al_5 , $FeAl_3$ 가 있다. 두 금속의 접합에서 기계적 성질을 향상시키기 위해서는 이러한 금속간 화합물의 발생을 억제시킬 필요가 있다. 일반적으로 접합 계면에서의 금속간 화합물의 두께가 $10\mu m$ 이하의 경우에는 접합부의 기계적 성질이 우수하게 유지되는 것으로 알려져 있다.[2]

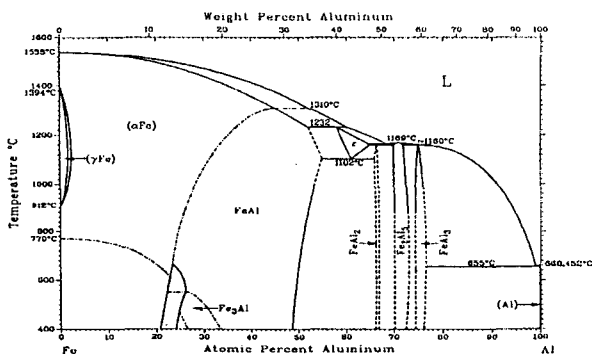


Fig.1 Phase diagram of Iron-Aluminum

본 연구에서는 접합부에 발생하는 금속간 화합물을 $10\mu m$ 이하로 유지하는 접합 공정에 대한 연구를 논의하고, 실험을 통하여 그 가능성을 확인하였다.[3]

2. 본 론

2.1 공정 개요

접합 공정의 개요를 보면, Fig.2와 같이 0.6t의 스틸위에 0.6mm의 알루미늄을 겹쳐 놓고, 그 접합선 위에 레이저를 조사한다. 레이저 빔에 의해 알루미늄은 용융되며, 스틸 표면에 젖음을 발생시켜 Fig.3와 같은 접합부를 형성시킨다. 두 금속의 용융은 많은 양의 금속간 화합물을 발생시키므로, 알루미늄만을 용융시켜 스틸에 젖음을 발생시켜 접합이 이루어지도록 하였다.[4]

알루미늄과 스틸의 접합 계면에서는 Fig.4와 같이 금속간 화합물이 발생하였다. 금속간화합물층의 두께는 접합 공정의 조건에 따라, 접합부의 위치에 따라 변화하였다. EDX 분석 결과 본 연구에서 주로 발생하는 금속간 화합물은 Fe_2Al_5 이며 $FeAl_3$ 도 알루미늄 쪽에서 약간 발생하였다. 두 금속간 화합물은 매우 취성을 가지고 있으며, 따라서 접합부의 기계적 성질에 좋지 못한 영향을 미친다.

금속간 화합물의 성장은 온도와 시간의 함수로, 시간에 따라 linear, parabolic low 등을 따르는 것으로 알려져 있다. 따라서 낮은 온도에서 짧은 시간동안 접합이 이루어질수록, 금속간화합물의 발생은 억제된다. 레이저를 이용한 접합에 의해 국부적인 빠른 가열과 냉각이 가능하며, 금속간 화합물의 성장은 억제될 것이다.

Pulsed Nd:YAG 레이저를 사용하였으며, 평균출력 780W, 15Hz, 7ms pulse width의 공정변수를 선택하였다. 접합부에는 paste형 알루미늄 flux를 도포하여 산화막을 제거하며, 재산화를 방지하였다. Argon shielding gas는 25 l/min의 유량으로 공급하여 flux의 증발 등에 의한 레이저 빔의 산란 등을 방지하였다.

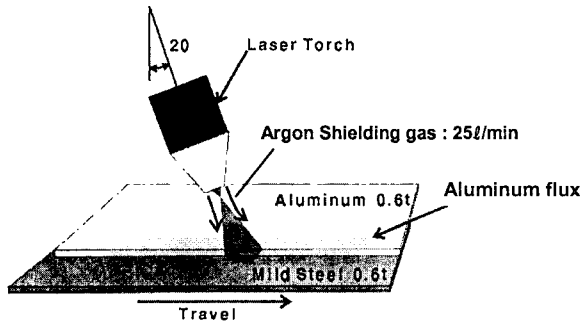


Fig.2 Schematic diagram of the process

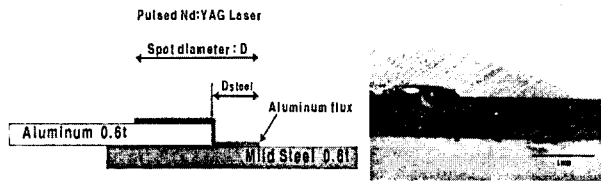


Fig.3 Joint section (left: before joining, right: after joining)

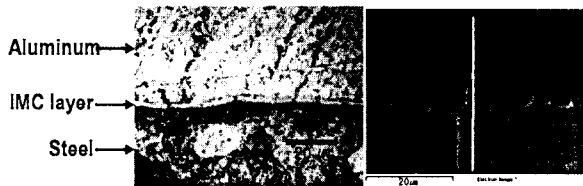


Fig.4 Intermetallic compound(IMC) layer at interface (right : EDX analysis, line scan)

2.2 공정 변수의 선정

레이저 빔의 spot diameter는 3.5mm, 4.0mm, 4.5mm의 세 가지 경우에 대해서 실험을 수행하였다. 레이저 빔은 defocusing 시켜 사용하였으며, Fig.3(left)와 같이 레이저 빔은 스틸 표면과 알루미늄 표면 모두에 조사하였다. 알루미늄 표면에 조사된 레이저 빔은 알루미늄의 용융을 위한 열원으로 사용되며, 스틸 표면에 조사되는 레이저 빔은 표면의 온도를 상승시켜 용융된 알루미늄이

젖음을 발생할 수 있도록 도와준다.

스틸 표면에 조사되는 레이저 빔의 양이 많으면, 즉 Dsteel 값이 크면, 상대적으로 알루미늄에 조사되는 에너지의 양이 줄어 알루미늄의 용융에 많은 시간이 소요되고, 이는 작업속도의 측면에서 바람직하지 못하다. 또한 스틸 표면에 너무 많은 레이저 에너지가 직접적으로 전달되면, 스틸의 용융이 발생하여 많은 양의 금속간 화합물을 발생시킨다.

반면 스틸에 조사되는 레이저 빔의 에너지가 적으면, 알루미늄의 용융에는 유리하나 스틸 표면의 온도가 알루미늄의 젖음을 발생시킬 만큼 올라가지 못하게 되며, 이는 접합이 발생하지 않는 조건이다. 따라서 적절한 Dsteel 값을 찾는 것은 중요하며, 최적의 Dsteel 값은 알루미늄의 용융에 유리하면서, 젖음이 일어날 수 있는 값이다.

따라서 레이저 빔의 spot diameter에 따라 접합이 일어나는 최소의 Dsteel 값을 최적의 Dsteel 값으로 정의하였고, 이 값을 실험적 방법을 통하여 측정하였다. Dsteel 값을 작은 값에서부터 점점 늘려가며 실험하였고, 실험 결과 각 조건에 따른 최적값은 Table.1과 같다.

Spot diameter 4.0mm 의 조건에 대해서는 최적의 Dsteel 값이 1.5mm로 측정되었으며, 2.0mm, 2.5mm 의 Dsteel 값의 조건에서 실험한 결과와 비교하였다. Fig.5와 같이 Dsteel 값이 1.5mm 인 경우보다 2.0mm 인 경우가 접합면에서의 금속간화합물의 두께가 크게 증가함을 알 수 있으며, 2.5mm 인 경우에는 Fig.6과 같이 스틸의 용융이 발생하며 금속간화합물의 양이 크게 증가한다. 스틸의 용융이 발생한 경우에는 크랙도 관찰되었으며, Fig.7과 같이 본 연구에서 주로 발생하는 금속간 화합물은 모재보다 매우 높은 경도를 가짐을 알 수 있었다.

Spot diameter	Optimal Dsteel
3.5 mm	0.8 mm
4.0 mm	1.5 mm
4.5 mm	2.0 mm

Table.1 Optimal Dsteel

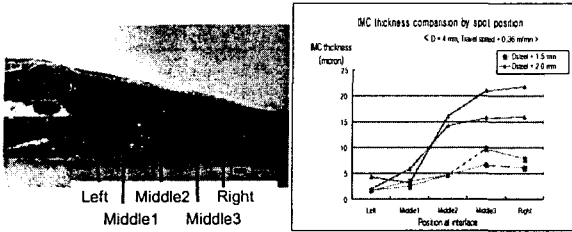


Fig.5 Comparison of IMC thickness

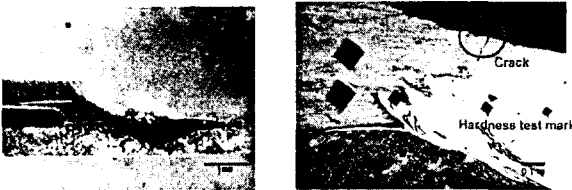


Fig.6 Joint section with Dsteel=2.5mm

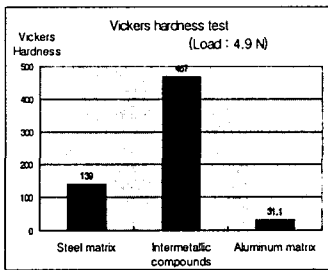


Fig.7 Micro-Vickers hardness test

2.3 실험 결과

각 spot diameter 조건에서 이송속도를 변화시키며 접합을 시도하였다. 각 조건별로 실험한 구간은 Fig.8과 같으며, 최고 이송속도는 spot diameter 가 감소하면서 증가함을 알 수 있다.

접합 계면의 5개의 지점에서 금속간 화합물의 두께를 측정하였다. Fig.9와 같이 금속간 화합물의 두께는 이송속도가 증가함에 따라 감소하는 경향을 보였다..

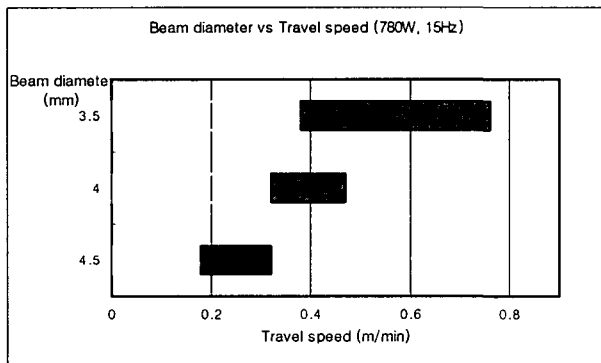


Fig.8 Process window

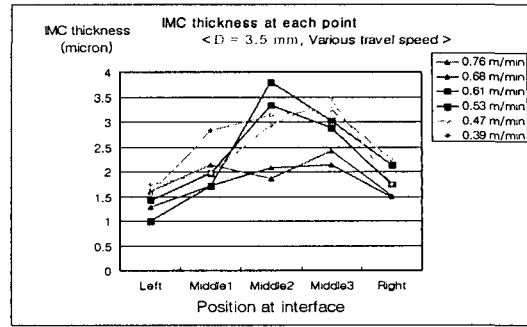


Fig.9 IMC thickness for 3.5mm spot diameter

3. 결 론

알루미늄과 스틸의 직접적인 접합에서 금속간 화합물의 성장을 억제시키는 접합 방법에 대하여 연구하였다.

금속간화합물은 접합부의 기계적 성질을 저하시키므로 10 μ m 이하로 조절되어야 하며, 그 가능성을 확인하였다. 금속간화합물의 두께는 이송속도의 증가에 따라 감소하였다.

참고문헌

1. W. Miller et al. : Recent development in aluminium alloys for the automotive industry, Materials Science and Engineering A280 (2000) 37-49
2. Bouayad et al. :Kinetic interactions between solid iron and molten aluminum, Materials Science and Engineering A363 (2003) 53-61
3. M. Kutsuna et al. :Parametric study in laser roll bonding of low carbon steel and aluminum alloys, AWS conference (2003)
4. E. Schubert et al. : Light-weight structures produced by laser beam joining for future applications in automobile and aerospace industry, Journal of Materials Processing Technology 115 (2001) 2-8