

## 강과 알루미늄의 레이저 접합에 관한 연구

## Part 1 : 접합 변수의 최적 조건에 관한 연구

박 태 완\* · 조 정 호\*\* · 나 석 주\*\*

\*(주)현대자동차 플랫폼 개발팀

\*\*한국과학기술원 기계공학과

## A Study on Laser Joining of Low Carbon Steel and Aluminum Alloy

## Part 1 : Process Parameters

Tae-Wan Park\*, Jung-Ho Cho\*\* and Suck-Joo Na\*\*

\*Hyundai Motor Company, Platform Development Team, Seoul 137-938, Korea

\*\*Dept. of M.E., KAIST, Daejeon 305-701, Korea

## Abstract

Steel has been mainly used in the automotive industry, because of good mechanical properties, weldability and so on. However, there has been increase in using aluminum to reduce the weight of vehicle. This leads to improve fuel efficiency and to reduce air pollution. A steel-aluminum hybrid body structure is recently used not only to reduce the weight of vehicle but also to increase safety. In this paper, the laser beam joining method is suggested to join steel and aluminum. To avoid making brittle intermetallic compounds(IMC) that reduce mechanical properties of the joint area, only aluminum is melted by laser irradiation and wetted on the steel surface. The brittle IMC layer is formed with small thickness at the interface between steel and aluminum. By controlling the process parameters, brittle IMC layer thickness is suppressed under 10 micrometers which is a criterion to maintain good mechanical properties.

\* Corresponding author : sjna@kaist.ac.kr

(Received August 5, 2005)

Key Words : Laser joining, IMC, Steel-Aluminum joining, FEA, Automobile industry

## 1. 서 론

운송 수단의 대표적인 자동차의 경우, 1920년대 본격적으로 자동차가 생산되기 시작한 이래로 강은 가장 주된 자동차의 소재였다. 강은 기계적 성질이 우수하고, 용접성이 좋은 재료로서, 자동차의 안전성과 성능을 뒷받침하기 위한 자동차 제조사들이 선택할 수 있는 가장 좋은 재료중의 하나이다.

1974년 중동 사태로 인한 석유파동은 자동차 산업에서 알루미늄 사용을 증대 시키는데 큰 계기가 되어 1970년대 초까지 사용이 제한적이던 알루미늄이 1970

년대 중반 이후부터 그 사용량이 꾸준히 증가함을 볼 수 있다. 또한 최근에는 알루미늄이 자동차의 동력 전달 장치, 차대, 차체 구조, 공기 조화 장치 등 다양한 부품에 사용되어, 지난 5년간 자동차 산업에서의 알루미늄 사용량은 80% 이상의 증가율을 보이고 있다<sup>1)</sup>.

현재 알루미늄을 접합하는 기술로는 리벳 등을 이용하는 기계적 체결, 레이저 용접, 브레이징, 레이저 롤본딩<sup>2,3)</sup> 등이 사용되고 있으며, 알루미늄을 강 등의 다른 재료와 접합하기 위해서는 기계적 체결과 브레이징 등이 주로 사용된다. 알루미늄 판에 사용되는 일반적인 브레이징 방법 중의 하나는 알루미늄 판의 양면에 낮은 용융점을 가지는 알루미늄 실리콘 합금으로 클래드 레

이어를 만들어 브레이징 하는 것이다<sup>4,5,6)</sup>.

하지만 브레이징은 공정의 제한성, 복잡성, 강도의 측면에서 단점을 가지며, 기계적 체결의 경우에도 공정의 제한성, 재료 사용의 증가, 제조 가격의 상승을 가져오는 단점이 있다. 따라서 알루미늄과 강 접합에 있어, 용접과 같이 간단한 공정을 거치면서도 기계적으로 우수한 접합부를 만들 수 있는 접합 기술이 요구되고 있다.

## 2. 공정변수의 선정과 실험

본 연구에서는 Fig. 1과 같이 강판 위에 알루미늄 판을 겹쳐 겹치기 이음을 만들고, 용접선 위에 펄스 Nd:YAG 레이저 빔을 조사하며 모재를 이송시켰다. 모재는 0.6t의 순수 알루미늄과 0.6t의 저탄소강을 사용하였다. 알루미늄을 용융시키며, 강 표면은 용융된 알루미늄의 젖음이 발생할 수 있도록 예열시킨다. 금속 표면에서는 레이저 빔의 흡수율이 낮으므로, 반사하는 레이저 빔에 의한 레이저 시스템의 영향을 없애기 위해 레이저 토치를 20° 기울였다. 레이저가 조사되는 겹치기 이음의 용접선 위에는 알루미늄계 플럭스를 사용하여 두 금속의 산화막을 제거하며 재산화를 방지하였다. 플럭스는 반죽 형태의 것을 사용하였다.

본 실험에서는 공정 변수로 레이저의 발진 전압, 펄스 빈도수, 펄스의 폭과 초점 직경 크기, 이송 속도, 용접선에서의 빔의 위치로 선정하였다.

그러나, 세 가지 공정 변수의 조절을 통한 레이저의 평균 출력을 비례적으로 조절하는 것에는 어려움이 있었다. 따라서 본 연구에서는 레이저 출력을 고정시키고, 그 외 다른 공정변수인 초점 직경, 이송 속도, 용접선에서의 빔의 위치를 조절하며 실험을 수행하였다. 레이저 출력은 780W의 조건에서 실험을 수행하였고, 이때 350V 발진 전압, 15Hz 펄스 빈도수, 7ms 펄스 폭을 사용하였다.

그 외의 공정변수들 중 용접선에서의 빔의 위치는

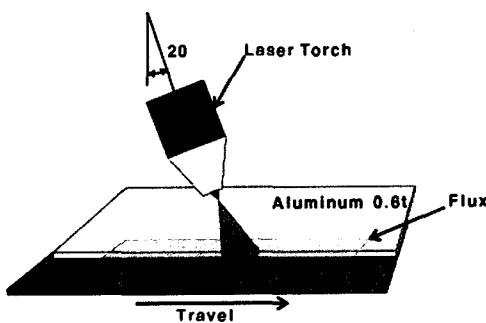


Fig. 1 Schematic diagram of the laser joining process

Fig. 2와 같이 강과 알루미늄의 겹치기 접합에 의해 생성되는 용접선에 대한 레이저 빔의 위치이다. 레이저를 알루미늄 위에만 조사할 경우 알루미늄의 용융에는 유리하나, 강 표면에서 알루미늄의 젖음이 발생하는데 어려움이 따른다. 따라서 효과적인 접합을 위해서는 레이저 빔의 일부를 강 표면에 직접 조사하여 강 표면을 예열시켜 주어야 한다. 강 표면에서의 온도 상승은 용융된 알루미늄의 젖음을 유리하게 한다.

알루미늄의 용융에 유리하면서도, 강판 표면에서의 용융이 없고, 알루미늄의 젖음이 원활하게 일어날 수 있도록 하기 위하여, 적절한  $D_s$  값의 선정이 필요하다.

본 연구에서  $D_s$ 의 선정은 실험적 방법을 통하여 결정하였다. 공정 속도와 가장 관련이 깊은 요소는 알루미늄의 용융이므로,  $D_s$  값으로 최대한 작은 값을 선정하여 공정 속도에 유리하도록 하였다.  $D_s$ 의 값을 작은 값에서부터 실험하여 접합 공정이 안정적으로 일어나는  $D_s$  값을 선정하였다.  $D_s$  값은 레이저 빔의 초점 직경에 따라서 달라졌으며, 실험에 의하여 선정된 최적  $D_s$ 의 값은 Table 1과 같다. 따라서 강판 표면에서의 레이저 빔 조사량을 결정짓는  $D_s$ 의 값은 레이저 초점 직경의 크기에 따라 결정되는 종속 변수로 볼 수 있다.

만일 최적  $D_s$  값보다 작은  $D_s$  값을 선정할 경우에는 알루미늄의 용융은 발생하나 강판 표면에서의 젖음이 발생하지 않아, 결과적으로 접합이 일어나지 않는다. 최적  $D_s$  값보다 큰  $D_s$ 를 선정한 경우에는 강판 표면에서 접합을 위한 예열이 과다하게 일어나기 때문에, 접합의 발생에는 유리하나 접합 계면에서의 금속간 화합물의 성장이 빠르게 일어난다.

$D_s$ 의 변화에 따른 접합부의 영향을 확인하기 위해,  $D_s$ 를 조절하며 실험을 수행하였다. 초점 직경의 크기가 4.0mm ( $D=4.0$ mm)인 경우에 대하여 실험을 하였고, Fig. 3과 같이 접합 계면의 5개 지점에서 금속간 화합물의 두께를 측정하였다.  $D_s$  값이 최적  $D_s$  보

Table 1 Optimal  $D_s$  by experiments

Spot size (D)	Optimal $D_s$
3.5 mm	0.8 mm
4.0 mm	1.5 mm
4.5 mm	2.0 mm

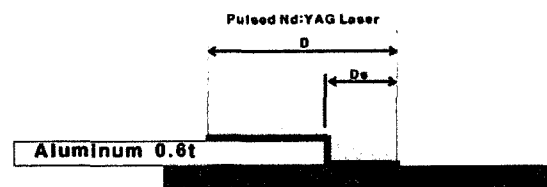


Fig. 2 Cross section of the laser joining process

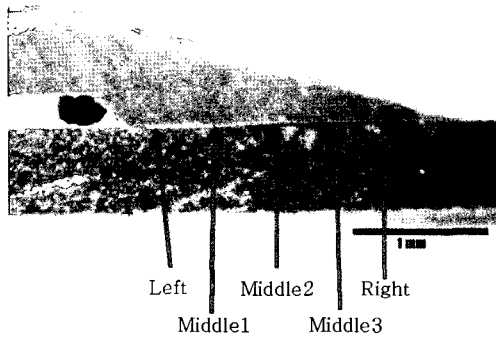


Fig. 3 Notation for five different check positions at the Fe-Al interface

다 작은 경우에는 접합이 일어나지 않으므로,  $D_s$  값으로 최적  $D_s$  값( $D_s=1.5\text{mm}$ )과, 최적  $D_s$  값보다 큰 값들( $D_s=2.0\text{mm}$ ,  $2.5\text{mm}$ )을 선정하였다. Fig. 4와 같이  $D_s=2.0\text{mm}$ 의 조건에서 금속간 화합물의 두께가 증가함을 실험적으로 알 수 있었다. 특히 금속간 화합물은 알루미늄의 젖음을 발생시키기 위해 강판을 예열시켰던 부분에서 크게 증가함을 알 수 있다.

$D_s=2.5\text{mm}$ 인 경우에는 레이저 빔이 알루미늄 보다는 강판에 더 많이 조사되어, 강판 표면의 용융을 발생시킨다. 액상의 강판은 용융 알루미늄과 반응하여 Fig. 5와 과 같이 많은 양의 금속간 화합물을 발생시킨다.

이상에서 설명한  $D_s$  선정에 관한 실험적 연구와 더불어 해석적으로도  $D_s$  선정을 위한 조건에 대해 고려

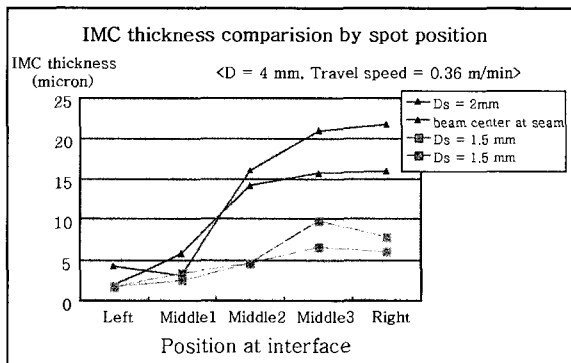


Fig. 4 IMC Thickness vs.  $D_s$

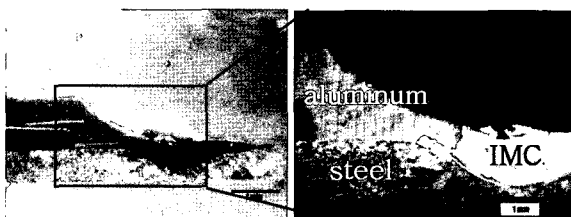


Fig. 5 A large amount of IMC for  $D_s=2.5\text{mm}$ ,  $D=4\text{mm}$

하였다. FEM 열 해석을 통하여 용융된 알루미늄이 강판 표면에 젖음을 발생시킬 수 있는 조건을 조사하였다. 해석에 있어서의 모델링에 대한 자세한 내용은 part 2에서 다룰 것이며, 여기서는 결과만을 언급한다.

본 장에서 설정한 공정 변수의 조절을 통하여 실험을 수행하였다. 실험 조건의 변화를 위한 조절 가능한 공정 변수는 레이저 빔의 초점 직경의 크기와 이송 속도이다. 초점 직경의 크기는  $3.5\text{mm}$ ,  $4.0\text{mm}$ ,  $4.5\text{mm}$ 를 선정하였고, 이송 속도는  $0.18\text{m/min}$ 부터  $0.78\text{m/min}$ 의 조건에서 실험을 수행하였다. 각 초점 직경의 크기에 대한 접합 실험을 수행한 구간은 Fig. 6 과 같다.

Fig. 6 에서 접합 가능한 최고 이송 속도는 실험적으로 구해진 값이지만, 최저 속도는 결정하지 않았다. 이송 속도가 작아질수록 레이저의 에너지 밀도는 증가하기 때문에 금속간 화합물의 빠른 성장을 유도하며, 아주 작은 이송 속도에서는 모재의 증발을 일으킨다. 따라서 선행 실험의 결과를 통해서 최적의 이송 속도는 각 초점 직경의 크기 조건에서의 최고 속도에 가까울 것이라는 가정을 하였다.

각 실험 조건에서 수행한 실험을 바탕으로, 접합부의 단면을 관찰하였다. 일반적으로 취성의 금속간 화합물층 (Inter-Metallic Compounds Layer, IMC)은 그 두께가  $10\mu\text{m}$ 이하로 조절되었을 때, 접합부는 우수한 기계적 성질을 유지할 수 있다고 알려져 있다<sup>7)</sup>. 알루미늄과 강판의 접합 계면에서는 Fig. 7과 같이 두께  $10\mu\text{m}$

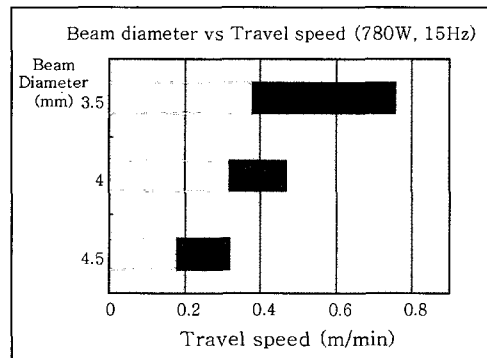


Fig. 6 Process window of the laser joining process

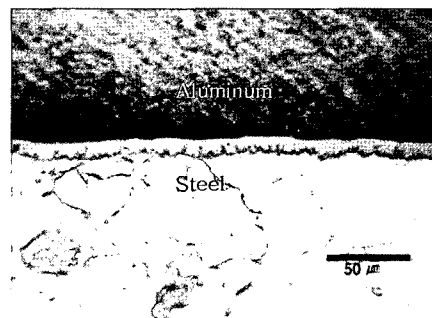


Fig. 7 IMC layer at the interface

이하의 금속간 화합물층이 관찰되었다. 접합부의 금속간 화합물을 확인하기 위하여 EDX (Energy Dispersive X-ray spectroscopy) 분석하였다. Fig. 8은 접합부를 EDX line scan한 사진이며, 금속간 화합물 층에서는 Al과 Fe의 일정한 성분비를 가짐을 알 수 있다. 금속간 화합물 층의 가운데 부분에서 분석 결과, Fe는 72.2%, Al은 27.8%라는 금속간 화합물의 성분을 얻을 수 있었다. 가장 주된 금속간 화합물은 Fig. 9에서 볼 수 있듯이  $Fe_2Al_5$  이다.

금속간 화합물의 기계적 성질을 알아보기 위해 마이크로 Vickers 경도 테스트를 수행하였다. Fig. 10과 같이 금속간 화합물에서의 높은 경도 값을 확인하였고, 금속간 화합물이 많이 발생하는 경우에는 균열도 관찰되었다.

각 실험 조건별로, 그리고 같은 실험 조건에서도 접합부의 위치에 따라 금속간 화합물의 두께는 다르게 측정되었다. 각각의 초점 직경의 크기에 대하여 이송 속도의 변화에 따른 금속간 화합물의 두께는 Fig. 11과 같다.

모든 실험 조건에 대해 접합강도는 800N 이상으로 나타났으며, 폭이 20mm 인 시편을 이용해 인장 실험을 실시했을 때, 파단은 모두 Fig. 12와 같이 알루미늄 층 모재의 용융부 부근에서 발생하였다. 이로써 접합강도는 충분한 것으로 판단할 수 있다.

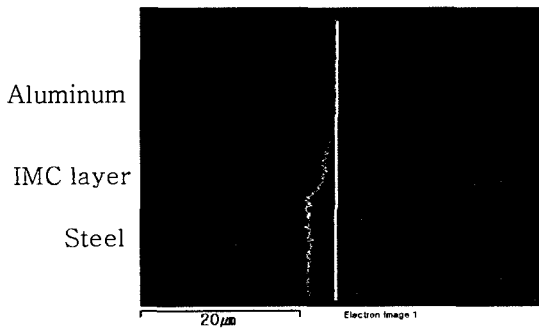


Fig. 8 EDX analysis (line scan)

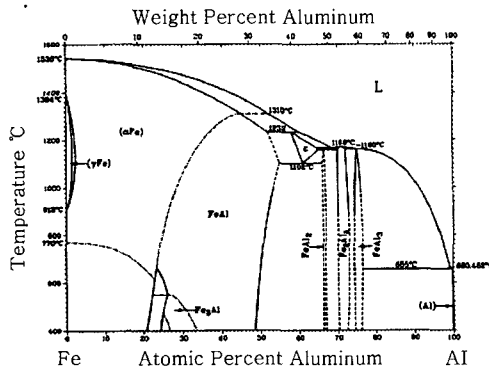


Fig. 9 Fe-Al phase diagram

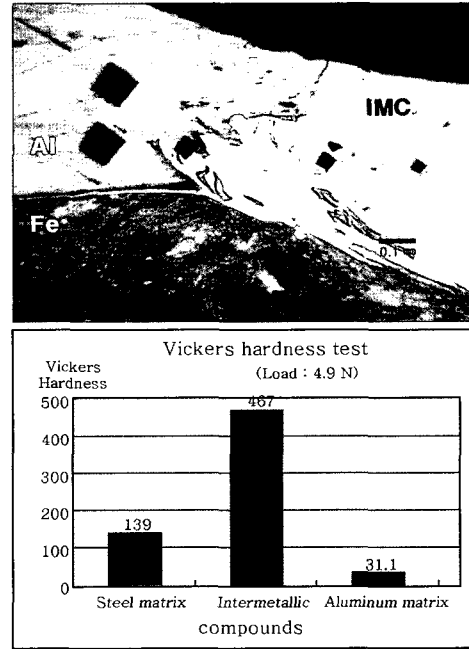


Fig. 10 Micro-Vickers hardness tests for joined area

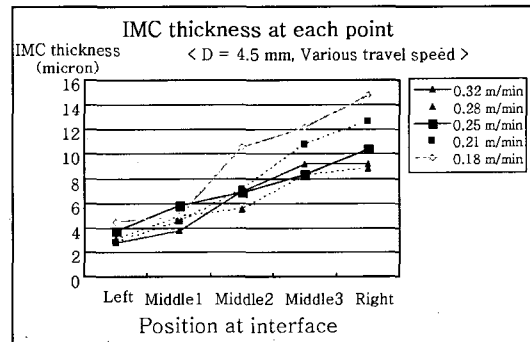
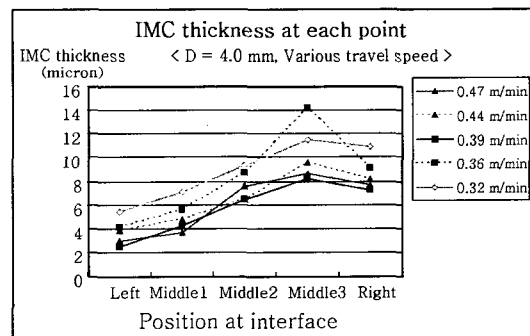
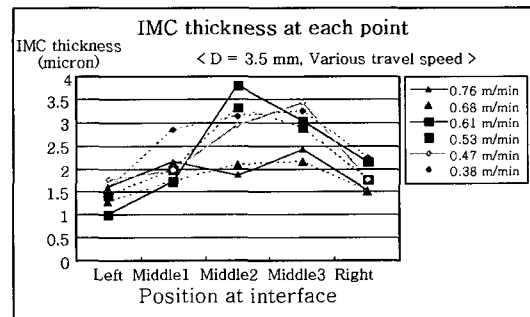


Fig. 11 IMC thickness at each point through various laser spot diameter and travel speed

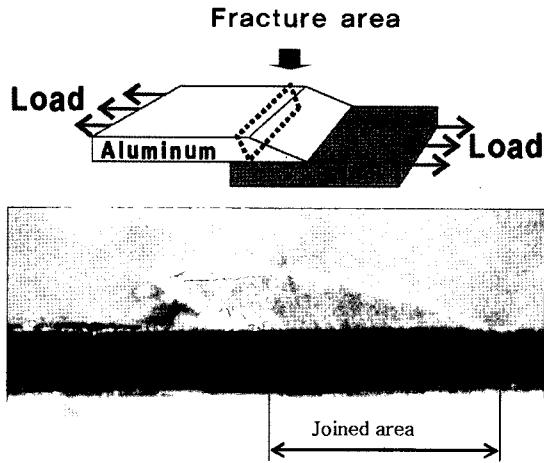


Fig. 12 Tensile test and its fracture position at aluminum side

### 3. 결 론

본 연구에서는 알루미늄과 강판, 이중 금속간 접합 방법에 대해 연구하였으며, 그 방법으로 반죽 형태의 알루미늄계 플럭스를 이용하여, 레이저로 알루미늄만 용융시키는 방법을 제시하였다. 조사된 레이저는 알루미늄만을 용융시켜 온도가 상승된 강판 표면에 젖음을 발생시켜 두 금속의 접합을 만들어 낸다. 또한 이 방법에서 적절한 두께의 IMC를 발생시키기 위한 접합 조건을 실험을 통해 도출, 제시하였고 인장 실험을 통해 충분한 접합강도를 보임을 확인하였다.

### 후 기

본 연구는 BK21 사업의 연구비 지원에 의해서 수행되었습니다.

### 참 고 문 헌

1. W.S. Miller et al., "Recent development in aluminum alloys for automotive industry", *Materials Science and Engineering*, A280 (2000), 37-49
2. M.J. Rathod et al., "Joining of aluminum alloy 5052 and low-carbon steel by laser roll welding", *Welding Journal*, 83 (2004), 16s - 26s
3. M. Kutsuna et al., "Laser roll bonding of low carbon steel and aluminum alloys for a hybrid structure", *7th Inter-University Research Seminar* (2002), 30-36
4. T. Markovits et al., "Laser brazing of aluminum", *Journal of Materials Processing Technology*, 143-144 (2003), 651-655
5. T.A. Barnes et al., "Joining techniques for aluminum space frames used in automobiles. Part I-solid and liquid phase welding", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol 99 (2000), 62-71
6. T.A. Barnes et al., "Joining techniques for aluminum spaceframes used in automobiles Part II-adhesive bonding and mechanical fasteners", *Journal of Materials Processing Technology*, 99 (2000), 72-79
7. 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