

## 용접 와이어를 사용한 A15052 CO<sub>2</sub> 레이저 용접

박 기영, 이 경돈, 김 주관

(사)고등기술연구원 시스템제어/레이저응용센터

### A15052 Welding by CO<sub>2</sub> Laser using Filler Wire

Ki-Young Park, Kyoung-Don Lee and Ju-Gwan Kim

Center for System Control and Laser Applications,

Institute for Advanced Engineering, Yongin Kyunggi-Do, Korea

#### ABSTRACT

Compared to conventional welding process, laser welding does not use additional filler wire generally. However, if laser welding uses the filler wire, the applicability of the method can be broadened. When laser welding uses the filler wire, it is possible to enhance gap bridging ability and to prevent cracking in weld pool by metallurgical control.

In this study, we had optimal condition and experimented gap bridging capability for butt welding with 2mm A15052 alloys using the filler wire feeder. As the experimental parameters, wire feed rate and wire diameter are considered and then the performance of wire feed is evaluated under various filler wire welding conditions.

Key Words: CO<sub>2</sub> laser welding, Aluminum, A15052, Filler wire, Wire feed rate, Butt joint

#### 1. 서 론

알루미늄 합금은 경량화, 높은 내식성, 우수한 작업성을 가지고 있는 반면 레이저 용접시 표면에서의 높은 반사율과 기공 및 결함발생이 쉬워 산업분야에 적용하는데 어려움이 있다. 모재에 함유되어 있는 Mg과 Zn 증기의 발생으로 인한 결함은 해결에 어려움을 가지고 있으며<sup>(1)</sup> 기공발생은 수소, 금속증

기 그리고 보호가스가 주원인이라 보고되었으나<sup>(2)</sup> 이러한 문제점이 있음에도 불구하고 알루미늄에의 적용을 위해 많은 시도를 하고 있다. 특히 성형성이 좋은 5000 계열의 알루미늄은 레이저 용접시 합금 내에 다량의 Mg 성분 기화로 인한 스파터(splatter)가 많이 발

생하여 표면이 거칠고 underfill이 많이 발생한다.<sup>(3)</sup>

이러한 레이저 용접의 대부분은 모재 용융에 의한 용접으로 용접전 판재의 전단과 정렬이 중요한 변수로 되고 있으며 또한 알루미늄 합금의 레이저 용접에서는 강도 저하, 기공 및 균열 발생 등으로 그 적용에 많은 제약을 가지고 있다.

일반적으로 레이저 용접은 아크 용접 프로세스와는 달리 별도의 용접 와이어(filler wire)를 사용하지 않는다. 최근들어 용접 와이어의 사용은 레이저 용접의 여러 응용분야에서 폭 넓게 고려되고 있다. 레이저 용접에 있어 용접 와이어를 사용할 경우 가장 큰 장점은 판재 이음부의 허용 갭(gap) 확장과 용착부의 금속학적인 조절에 의한 크랙(crack) 방지가 가능하다는 점이다.<sup>(4)</sup>

대개 레이저 용접에서는 갭이 모재 두께의 1/10 정도만 되어도 용접성이 나쁘다. 그러나 용접 와이어를 사용하면 그 이상의 갭에 대하여도 이것을 용접이 가능하게 하여 용접품질 향상에 크게 기여할 것이다. 와이어 송급속도, 직경, 송급방향 등 여러 용접조건에 따라 허용 갭의 한계가 있다.

또한 용접 와이어의 적용은 용착부에서의 금속학적인 영향을 줄 수가 있는데, 용착 가능한 용접 와이어의 양은 모재 두께와 갭의 관계에 따라 최대 40~50% 정도이며<sup>(5)</sup>, 최적의 용접결과를 위한 용착부의 연성을 얻기 위해 충분한 용접 와이어가 용해되어야 하고 좁은 열영향부를 얻을 수 있도록 가능한 작은 입열이 필요하다.

용접 와이어 공급에 있어 용접공정은 전진, 후진 등이 모두 가능하다. 후진법은 와이어가 용융풀로의 용해가 잘 되며 갭이 있는 경우 와이어에 의한 안정된 용접공정을 줄 수 있다. 반면 전진법에서는 와이어가 응고되고 있는 용융풀로 밀어 넣게 된다. 그러나 만

일 leading 센서에 의한 갭을 측정한다면 갭 변화에 따른 와이어의 송급속도가 조절 가능하다. 또한 용접인자만 적절히 조절한다면 와이어의 용융풀로의 완전한 용융과 용착금속에 영향을 줄 수가 있다.<sup>(6)</sup>

와이어 송급시 주요 변수로는 레이저 출력, 초점 위치, 용접속도, 와이어 송급속도, 와이어 송급방향이 중요한 인자로서 본 연구에서는 알루미늄 레이저 용접시 적용 가능한 와이어 송급장치를 제작하고 이 시스템으로 2mm 두께의 A15052 판재를 맞대기 용접시험을 하였다. 여기에 와이어 송급에 따른 평가를 위해 레이저 용접속도에 따른 와이어 송급속도, 와이어 직경을 변수로 실험을 진행하여 용접 와이어 조건에 따른 영향을 분석하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1 사용재료 및 장비

본 연구에 사용된 레이저 발전기는 빔 직경이 0.453mm인 Rofin-Sinar의 4kW CW CO<sub>2</sub> 발전기이며 발전기의 최대 출력인 4kW로 고정하여 실험하였으며, 와이어 송급장치는 Fronius 사의 MIG 용접용 와이어 송급장치를 개조하여 사용하였다.

실험에 사용한 알루미늄 합금은 두께 2mm의 A15052 판재를 이용하였으며, 용접 와이어로는 모재 조합에 따른 용접 와이어의 선정에 따라 직경 1.0, 1.2mm의 A15183을 적용하였다. 이의 주요 성분을 Table 1에 실었다.

Photo 1은 본 실험에 적용된 와이어 송급장치로서 왼쪽이 보호가스 장치이며, 오른쪽이 와이어 송급장치로 와이어 입사각을 45°로 고정하여 실험하였다.

Table 1. Chemical composition of Al5052 and 5183

Component		Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
Material	Al5052	0.25	0.40	0.10	0.10	2.80	0.35	0.10	-
	Al5183	0.07	0.17	0.006	0.69	4.62	0.07	0.01	0.09

(unit: weight %)

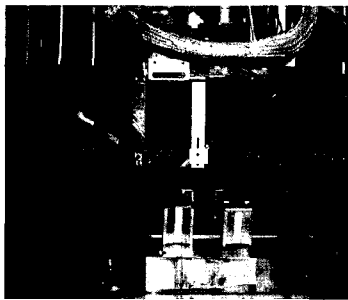


Photo 1. Set-up for wire feed CO<sub>2</sub> laser welding

2.2 실험조건

시편은 가로150mm×세로300mm의 크기이며 용접선 길이를 200mm로 하여 맞대기 용접을 하였다. 여기서 각 용접 시편에 대한 단면은 용접선 양끝 50mm를 제외하고 2~3개씩 채취하여 분석에 이용하였다.

먼저 용접조건을 설정은 두께 2mm의 Al5052 판재를 맞대기 용접하여 양호한 비드형상과 단면이 나오는 조건을 최적조건으로 정하고 이 조건을 기준으로 하여 용접 와이어 송급실험을 행하였다. 최적조건 설정을 위한 예비실험에서는 용접속도 5m/min에서 범 초점이 판재 표면에 조사되고 보호가스로는 He 40CFH 일 경우 가장 양호한 용접조건을 얻었다. 또한 이면 보호가스 공급실험을 통하여 Fig. 1과 같은 결과를 얻었는데, 이면 보호가스가 없을 경우 하부 비드에 거친 비드형성과 용융이 과대하게 처지게 되어 상부 비드 함몰을 촉진시키는 결과를 얻었다.

따라서 이면 비드에 He 15CFH를 공급한 결과 함몰 현상을 보인 상부 비드에 비드가 형성되었고 하부 비드는 양호한 비드를 형성시킴에 따라 이면 보호가스 공급을 본 실험에 적용하였다. 이와 같은 이유는 이면 보호가스가 하부 비드면으로 흘러내리는 용융금속을 보호가스에 의한 가스압의 작용과 함께 대기와의 접촉을 차단시키는 작용을 하기 때문이라 사료된다. 그리고 실험은 각 용접조건에 대해 2~3회의 반복 실험을 하였다. 본 예비실험에서 얻어진 맞대기 용접의 최적조건을 Table 2에 나타내었다.

	No backing gas	Backing gas
Al5052		
Al6061		

Fig. 1 Cross section of Al5052/6061 alloys with/without backing gas (welding speed 5m/min, He 40CFH top bead shielding, He 15CFH under bead shielding)

Table 2. Optimal welding condition for 2mm Al5052/6061 butt joint

Power	Defocus	Shielding gas	Backing gas	Welding speed
4kW	0mm	He 40CFH	He 15CFH	5m/min

본 실험은 용접속도 5m/min에서는 용접 와이어를 용융시키지 못하여 Table 1의 최적 용접조건에서 용접속도 이외의 조건을 사용하였으며 용접 와이어 송급실험에서의 용접속도는 Table 2와 같이 2~4m/min로 하고 용접 와이어 송급속도를 2~8m/min까지 1m

/min씩 증가시켰으며 또한 이음 겹을 0.0~0.6mm로 0.2 mm씩 증가시켜 겹의 영향을 파악하였다. 겹 크기에 대한 와이어 직경의 영향을 파악하기 위해 직경 1.0, 1.2mm의 와이어를 사용하여 그 영향을 평가하였다. 그리고 용접공정은 Fig. 2에서와 같이 전진법과 후진법을 각각 실험하였으며 또한 후진법에서 와이어의 초점 위치를 용접진행 방향쪽으로 1mm 전진시켜 용접 와이어의 입사 위치에 대한 영향을 검토하였다. 본 실험에 적용된 용접조건을 Table 3에 나타내었다.

Table 3. Wire feed laser welding parameters

Parameter	Value
Power(kW)	4
Welding speed(m/min)	2, 3, 4
Wire feed rate(m/min)	2~8( $\Delta v=1$ )
Joint gap(mm)	0.0~0.6( $\Delta l=0.2$ )
Wire dia.(mm)	1.0, 1.2
Shielding gas(CFH)	
Nozzle	He 40
Under bead	He 15
Welding Process	Backward Forward Different wire position

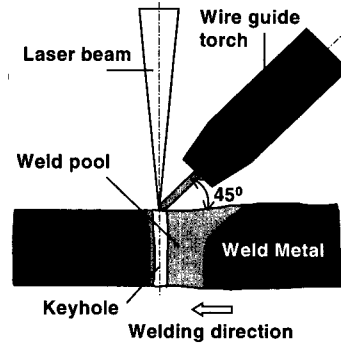
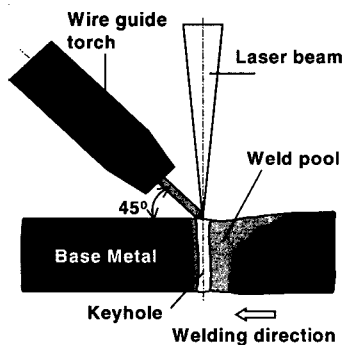


Fig. 2 Principle of backward(left) and forward(right) wire feeding during laser welding with filler wire

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 와이어 송급속도에 따른 영향

용접속도 2~4m/min에서 와이어 송급속도를 0~8m/min로 변화시켰을 때 각 와이어 송급속도에 따른 영향을 평가하기 위해 용접부 단면형상의 변화를 비교하였으며 단위 부피당 입력에너지와 모재에 용융되어지는 용접 와이어의 한계 용착율을 검토하였다. Fig. 3에서 용접속도 2, 3m/min에서 용접 와이어가 공급되지 않은 경우 모재의 과다 용융으로 인해 비드의 함몰이 발생하였으며 와이어가 송급됨에 따라 균일한 상하비드가 형성되는 것을 알 수 있다. 그리고 용접속도가 2, 3m/min 정도로 저속일 경우는 용접 와이어가 고속으로 입사되어도 충분히 용융시켜 상하비드에 충분한 용착부를 형성하는 반면 용접속도가 4m/min에서는 와이어 송급속도 5m/min부터는 모재와 용접 와이어 모두를 용융시키지 못하여 부분용융의 용착부를 형성하게 된다. 따라서 적절한 상하비드를 형성하기 위해서는 용접속도에 따른 적절한 용접



와이어 송급속도가 필요하게 된다.

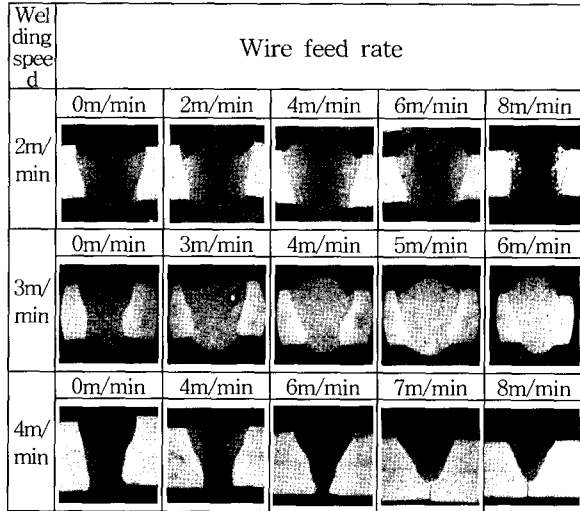


Fig. 3 Cross section of the weld beads with different wire feed rates

Fig. 4는 용착된 단면을 기준으로 용접 와이어의 송급속도별 입력에너지를 비교한 것으로 여기서 입력에너지는 레이저 출력을 용접속도와 용착된 시편의 단면적으로 나눈 값이며 단위 부피당 입력에너지를 의미한다. 용접속도에 따른 용접 와이어 송급속도별 입력에너지를 보면 용접속도가 2~3m/min에서는 용접 와이어의 송급속도가 증가함에 따라 이와 반비례하게 입력에너지가 줄어들고 있으나, 4m/min에서는 처음에는 입력에너지가 줄어들다가 용접 와이어 속도가 5m/min 이상이 되면서부터 다시 증가하고 있다. 이와 같은 현상은 용접속도가 2~3m/min에서는 용접 와이어가 많이 공급되어도 충분히 용융시켜 주어 용융 면적이 넓어지나 용접속도가 4m/min에서는 용접 와이어가 어느 속도 이상이 되면 모재와 용접 와이어를 충분히 용융시키지 못하여 부분용입이 일어나게 되는 것을 보여준다.

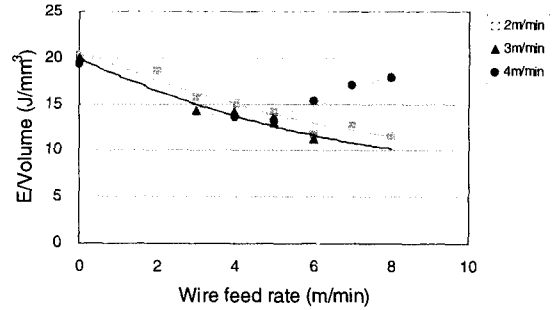


Fig. 4 Input energy per unit volume

Fig. 5는 모재와 용접 와이어가 용융된 용착부 단면에서 용접 와이어의 송급에 의해 형성된 면적만을 나타낸 것으로 이것을 여기서 용접 와이어의 용착율이라 표현한다. 위에서 언급하였듯이 용접속도 2, 3m/min에서는 와이어 송급속도가 증가하여도 충분한 용융이 되어 상하 비드를 형성하지만 용접속도 4m/min에서는 와이어 송급속도가 5m/min가 넘어서부터는 모재에 비해 와이어의 용착율이 급격히 증가한다. 이와 함께 모재의 용착율이 떨어지며 부분용입이 형성된다. 따라서 용접 와이어를 공급하는 레이저 용접에서는 용접 와이어의 용착율이 모재 대비 30% 이내가 되어야 완전용입의 용접조건을 얻을 수 있다.

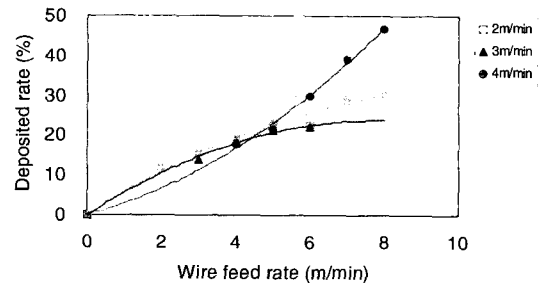


Fig. 5 Amount of deposited filler metal

### 3.2 용접공정에 따른 영향

용접속도 3m/min에서 와이어 송급속도를 3~6m/min로 변화시켰을 때의 각 용접법에 따른 영향을 비교하였다. Fig. 6에서 보는 바와 같이 전진법이 후진법에 비해 상부비드가 작고하부로 용융이 처짐을 알 수 있다. 이러한 현상은 서론에서 언급한 바와 같이 전진법의 특성상 송급된 와이어가 후진법에 비해 이미 용융된 용융풀로 공급되기 때문에 용착부가 적어지는 원인이라 생각된다. 반면 후진법에서는 와이어 송급속도가 증가할지라도 뒤따라오는 레이저 빔에 의해 충분히 용융되기 때문에 상대적으로 전진법에 비해 상하비드가 크고 넓은 용착부를 형성하게 된다. 그리고 후진법에서 와이어 초점을 약 1mm 가량 용접 진행방향 쪽으로 공급한 경우와 와이어를 빔 초점에 맞춘 경우와 나타난 현상은 거의 동일하다. 이것은 와이어가 1mm 앞으로 공급될지라도 레이저 빔에 의해 용융된 와이어가 빔 초점부로 용융되어 들어가기 때문이다.

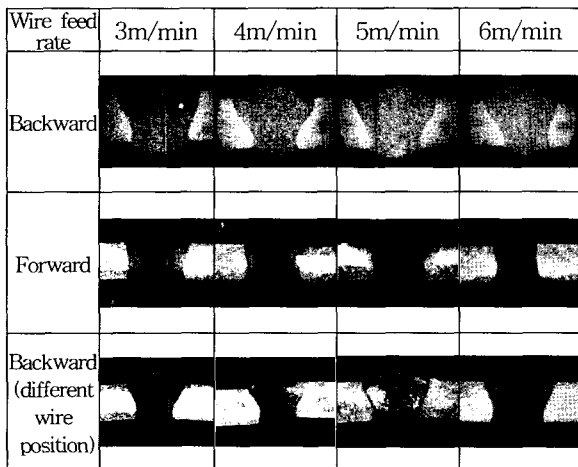


Fig. 6 Cross section of the weld beads obtained for the different welding process

단위 부피당 입력에너지를 보면 후진법과 와이어 위치를 변경한 것은 와이어 송급속도가 증가함에 따라 입력에너지가 감소하지만 전진법에서는 5m/min 이상의 와이어 송급속도에서는 입력에너지가 증가하는 것을 볼 수 있다. 이러한 현상 역시 위에서 언급한 바와 같이 레이저 빔 뒤에서 공급되어지는 와이어를 일정 속도 이상에서는 용융을 시키지 못하여 나타난 현상이라 생각된다.

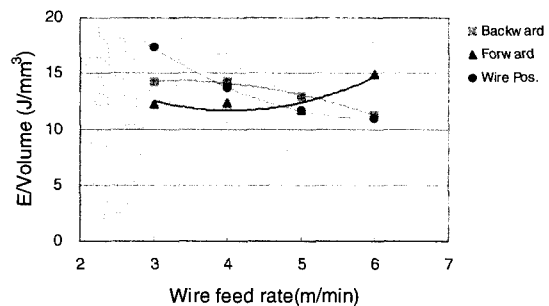


Fig. 7 Input energy per unit volume

### 3.3 갭과 와이어 직경에 따른 영향

용접속도 3m/min에서 와이어 송급속도를 5m/min으로 공급했을 때 갭에 따른 와이어 직경의 영향을 관찰하였다. 실험결과 와이어 직경이 1.0mm인 경우 갭 크기가 0.4mm까지는 양호한 상하비드가 나오나 0.6mm 이상부터는 상부비드가 함몰되어 더 많은 와이어의 공급이 필요한 것을 알 수 있었으며 여기서 직경 1.2mm 와이어를 공급한 경우 갭 크기가 0.6 mm인 경우에도 양호한 상하비드를 얻을 수 있었다. 따라서 갭이 있는 판재를 용접할 때 적절한 직경의 와이어를 선택하므로서 양호한 비드를 얻을 수 있음을 확인했다.

Wire dia. (mm)	Gap size(mm)			
	0.0	0.2	0.4	0.6
d=1.0				
d=1.2				

Fig. 8 Cross section of the weld beads obtained for the different wire diameter and gap size

3.4 인장강도에 미치는 영향

인장시험은 KSB 0801 규격에 따라 Fig. 9와 같이 시편을 제작하여 시험하였으며, 시험조건은 최대하중 150KN, Cross head speed는 2mm/min으로 실험하였다. 인장시험은 용접조건에 따른 비드 단면적의 변화로 용접부에서의 정확한 인장강도 값을 얻을 수가 없다. 따라서 본 실험에서는 시험결과에서 나온 최대하중 값을 시편 폭으로 나눈 단위 길이당 최대하중 값으로 하여 계산하였다. 시험은 모재, 용접 와이어 없는 맞대기 시편 그리고 용접 와이어 송급속도에 대한 인장하중 값을 Fig. 10에 나타냈는데, 모재에서의 인장하중 값이 가장 크게 나왔으며 용접 와이어 없는 맞대기 용접시편에서 모재 대비 약 83%로 가장 낮은 값을 나타내었다. 그리고 용접 와이어가 공급된 시편은 모재대비 약 89~92%의 인장하중 값을 가진다. 또한 용접 와이어가 공급됨에 따라 약 8~11% 정도의 인장하중 값의 증가를 가져왔다. 여기서 보면 알루미늄 합금에서는 용접 와이어가 공급되어 지더라도 모재와 동일한 수준의 인장강도 값을 얻을 수가 없었으며, 모재 수준의 강도를 얻기 위해서는 후열처리 등의 추가공정을 필요로 한다.<sup>(7)</sup>

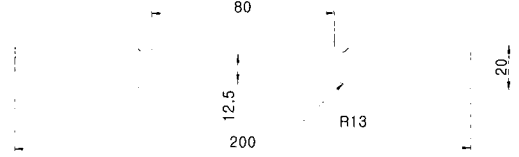


Fig. 9 Tensile specimen

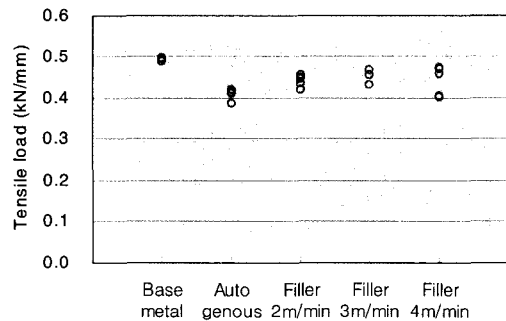


Fig. 10 Tensile load per unit length

3.5 경도 특성

본 실험에 사용된 경도시험 조건은 시험하중 1kgf를 적용하여 용접 중심부로부터 모재부분까지 0.2mm 간격으로 측정하였다. 알루미늄 합금의 레이저 용접부 경도 특성은 열영향부와 용착부에서 모재 대비 감소하며, 이와 같은 이유는 스트레인 경화효과의 감소가 원인이며, 적절한 용접 와이어의 선택으로 경도 값을 높일 수 있으나 열영향부에서는 여전히 연화가 발생한다고 보고되었다.<sup>(8)</sup>

그러나 본 실험에서는 모재용접의 경우 용융부와 열영향부에서 모재보다 약간 높은 값을 나타내고 있으며, 용접 와이어를 공급한 경우도 모재와 용착부 그리고 열영향부 모두 유사한 경향을 나타내고 있다.

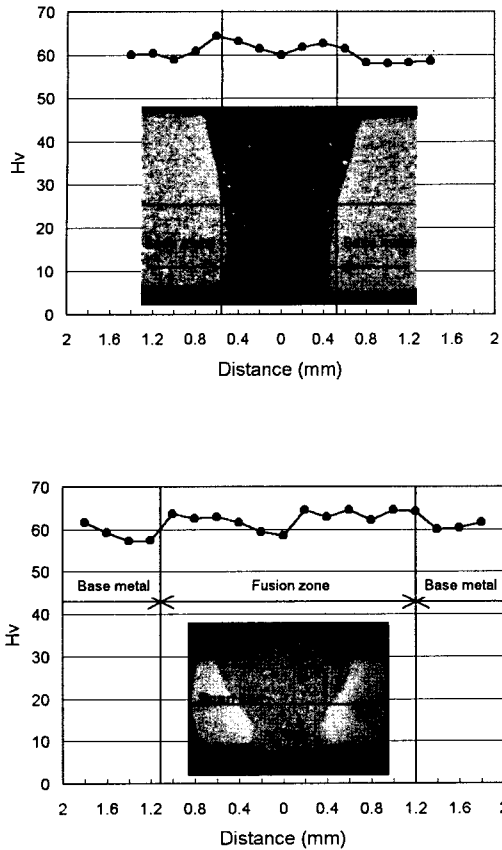


Fig. 11 Micro Vickers hardness

- (a) Autogeneous (welding speed 4m/min),  
 (b) Filler (welding speed 3m/min, wire  
 feed rate 4m/min)

#### 4. 결 론

Al5052 합금에 용접 와이어를 공급하여 CO<sub>2</sub> 레이저 용접을 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 용접 와이어를 공급하는 레이저 용접에서는 용접 와이어의 용착율이 모재 대비 30% 이내가 되어야 완전용입의 용접조건을 얻을 수 있다.

2) 전진법은 이미 용융된 용융풀로 와이어가 공급되기 때문에 후진법에 비해 용착부가 작아지는 반면 후진법에서는 와이어 송급속도가 증가할지라도 뒤따라오는 레이저 빔에 의해 충분히 용융되기 때문에 상대적으로 넓은 용착부를 형성하게 된다.

3) 와이어 직경이 1.2mm인 경우 갭 크기가 0.6mm인 경우에도 양호한 상하비드를 얻을 수 있었다.

4) 인장하중 값은 모재에서 가장 크게 나왔으며 용접 와이어가 없는 맞대기 용접시편에서 모재 대비 약 83%로 가장 낮은 값을 나타내었다. 그리고 용접 와이어가 공급된 시편은 모재 대비 약 89~92%의 인장하중 값을 가진다. 또한 용접 와이어가 공급됨에 따라 약 8~11% 정도의 인장하중 값의 증가를 가져왔다.

5) 용착부에서의 경도값은 모재용접과 용접 와이어를 공급한 용접 모두 모재와 유사하거나 약간 높은 값을 가졌다.

#### 후 기

본 연구는 과학기술부의 '국가지정연구실 사업'과 고등기술연구원의 연구비 지원에 의해 수행되었다. 관계자 여러분께 깊은 감사를 드린다.

#### 참고문헌

1. S.Katayama and C.D.Lundin : Laser welding of commercial aluminum alloys. Laser weldability of aluminum alloys, Journal of Light Metal Welding and Construction, 1991, v29 n8, 349-360
2. M.J.Cieslak and P.W.Fuerschbach : On



- the weldability, composition, and hardness of pulsed and continuous Nd:YAG laser welds in aluminum alloys 6061, 5456, and 5086, Metallurgical Transactions B, 1988, v19 n2, 319-329
3. H.Kanazawa : Welding performance of high power YAG lasers with aluminum alloys, Journal of Light Metal, 35(7), 1997, 341-346
  4. Yamaoka : Aluminum alloy laser welding, Light Metal Welding & Construction, 1995, 95-103
  5. U.Dilthey, H.Keller and A.Ghandehari : Laser beam welding with filler metal, steel research 70 (1999) No4+5, 198-202
  6. U.Dilthey : Laser beam welding with wire feed-Management of variable weld gaps and influence of the weld pool metallurgy, 2nd International Conf. on Power Beam Technology, 1990, 23-26
  7. J.A.Clarke : Laser welding aluminum alloys, Industrial Laser Solutions, June 2000, 17-22
  8. I.A.Jones, S.T.Riches, J.W.Yoon and E.R.Wallach : Laser welding of aluminum alloys, TWI, 517/1995, Oct 1995