

## 자동차용 강판의 겹치기 CO<sub>2</sub> 레이저 용접에서 용접속도와 판재간격에 따른 용접특성 연구

이 경 돈\* · 박 기 영\* · 김 주 관\*

\*고등기술연구원 시스템제어/레이저응용 센터

### Effects of the Gap and the Speed on the Lap-Joint CO<sub>2</sub> Laser Welding of Automotive Steel Sheets

Kyoung Don Lee\*, Ki Young Park\* and Ju Gwan Kim\*

\*Center for System Control and Laser Applications, Institute for Advanced Engineering, Yongin 449-863, Korea

#### Abstract

Recently the laser welding technology has been applied increasingly for the automotive bodies. But the lap joint laser welding for 3 dimensional automotive body is new while the butt joint laser welding is well known as the tailored blank technology. In this study, the process window was found for the full penetration welding of the lap joint of the 1mm-thick high strength steel sheets. The limit curves and characteristic curves were suggested to define the boundaries and the contour lines in a space of the welding speed and the gap size. The characteristics of the weld sectional geometry were used to determine the limit curves. They are bead width, penetration depth and sectional area. After the observed data was analysed carefully, it was noticed that there was a transition point at which the sectional shape was changed and the bead area jumped as the welding speed was increased. Also a new concept of 'input energy per volume' was suggested to distinguish the difference at the transition point. The difference of sectional areas at the transition point can be related to the dynamic keyhole phenomena.

(Received December 17, 2001)

Key Words : CO<sub>2</sub> Laser welding, Lap joint, High strength steel sheets, Gap, Speed, Deep penetration welding, Limit curves, Input energy per volume

#### 1. 서 론

최근 들어 자동차에 테일러드블랭크 레이저 용접이 본격적으로 사용된 이후 자동차 차체의 겹치기 용접(lap welding)에도 레이저가 확대 적용되는 추세에 있다. 기존의 테일러드블랭크 용접이 맞대기 용접(butt welding)인 것과는 달리 차체용접은 겹치기 용접이 주로 고려되고 있다. 테일러드 블랭크의 맞대기 레이저 용접에 대하여는 많은 연구가 진행되었고 용접품질에 대한 결과도 비교적 잘 알려져 있다.<sup>1-4)</sup> 그러나 겹치기 용접의 용접 품질에 대하여는 아직 많은 연구가 발표되지 않고 있다. 겹치기 레이저 용접에서 여러 조건에 따

른 용접품질의 특징은 몇 몇 문헌에서 연구 발표되어졌으며<sup>5-8)</sup> 특히 Zn 코팅된 자동차용 강판에 대하여 일반적으로 두 판재사이의 간격(gap, 이후 판재간격)이 용접 결과에 중요한 영향을 준다고 알려져 있다.<sup>9)</sup> 그러나 일반 자동차용 저탄소강판이나 고장력강 등에 대한 겹치기 용접 품질에 대하여는 발표된 문헌이 적다. 레이저 용접장치가 고가인 점과 용접 대상물이 일반 시중에서는 구하기 힘든 자동차용 고장력 강판인 점으로 인하여 현장에서 작업자가 확보할 수 있는 용접 데이터의 다양성이 제한되어 있다. 특히 레이저 용접은 기존의 아크용접이나 저항용접과는 달리 공정의 범위가 좁아 적절한 조건의 선정이 까다로와 현장에서 용접품질의 기준을 설정할 때 작업자의 숙련도와 판단에 따라 임의

로 선택되기 쉽다. 더욱이 용접현장에서 적절한 공정 조건을 신속히 결정하기 위해서는 다양한 재료와 두께의 경우에 대하여 시험 데이터를 확보하고 있어야 하며 쉽게 판단할 수 있는 정량적 데이터가 준비되어야 한다.

본 논문에서는 자동차용으로 많이 사용하는 1mm 두께의 390MPa 급의 고장력 강판에 대한 겹치기 CO<sub>2</sub> 레이저 용접특성을 판재간격과 용접속도에 따라 살펴보았다. 용접비드의 형상을 관찰하고 형상 치수와 경도 등을 측정하고 분석하여 완전용입(full penetration)을 위한 적절한 공정조건을 설정하는 데에 비드특성을 기준으로 하는 방법을 제안하였다. 또한 판재간격과 용접속도를 두 축으로 하는 평면상에서 완전용입 조건의 한계를 표시하는 완전용입 한계곡선을 정의하고 동일한 비드특성을 갖는 등고선(이후 특성곡선)의 활용을 제안하였다. 또한 겹치기 용접의 조건의 기준으로 동일 두께의 bead-on-plate (이후 BOP) 용접 조건을 활용할 수 있음을 보였다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 사용재료 및 장비

본 연구에서 겹치기 용접용으로 사용한 고장력강은 자동차의 차체에 많이 쓰이는 저탄소강의 390MPa 급으로서 APFC390이며 두께 1mm의 판재이고 BOP 용접 대상 재료는 두께 2mm의 SPEN 이다. 판재의 크기는 가로150mm×세로300mm로 용접선 길이는 200mm이다.

용접시험에 사용된 장치는 4kW CW CO<sub>2</sub> 발전기와 4축 NC로 이루어진 레이저 용접기이다. 보호가스(shielding gas)는 아르곤가스를 사용하였으며 가스노즐은 용접 진행방향에 위치하며 약 45도의 경사각을 갖는다. 가스 유량은 28.3liter/min로 고정하였다. 겹치기 용접시편은 두 판재 시편을 겹쳐서 용접선 좌우로

두 개의 고정구를 사용하여 고정하였으며 고정구 사이의 간격은 4mm 이다. 용접시험 장치와 시편이 장착된 고정구의 모습을 Photo 1에 나타냈다.

### 2.2 실험 방법

#### 2.2.1 용접조건

레이저 용접을 시행 할 때 발전기를 경제적으로 사용하기 위하여 보통 출력을 최대로 사용하고 적절한 용접 속도를 선택하는 것이 일반적이다. 따라서 본 시험에서도 레이저 출력을 4.0kW로 설정하고 용접변수로 판재간격과 용접속도를 선택하였다. 겹치기 시편의 총 두께에 해당하는 2mm의 단일 판재로 BOP용접을 실시하여 3.0m/min의 적정 용접속도를 구하였다. 용접속도는 3.0m/min를 중심으로 2.7m/min와 3.3m/min로 변화를 주었으며 판재간격은 용접판재 사이에 얇은 스페이서(spacer)를 삽입하여 0mm, 0.2mm, 0.4mm로 변화하여 시험하였다. 용접 후 단면 형상을 관찰할 때 실제 판재간격을 측정하여 확인하였고 다른 경우 분석에서는 실제 측정값을 사용하였다. 초점의 위치는 시편의 윗면에 놓이도록 조정하여 이를 기준으로 하였다. 실험은 총 12회이며 각 용접조건에서 2회 반복하여 용접을 실시하고 각 각에서 2~3 개의 단면을 채취하였고 결과 관찰 및 분석에서는 이들의 평균을 사용하였다.

#### 2.2.2 비드특성 측정

겹치기 레이저용접의 용접부 특성을 파악하기 위하여 각 실험조건에 따른 비드 단면을 에칭을 하여 관찰하고 상부비드폭( $w_t$ ), 결합부비드폭( $w_i$ ), 하부비드폭( $w_b$ ), 용입깊이( $d$ ), 비드단면적( $A_c$ )을 측정하였다. 또한 용융부와 열영향부의 금속학적 특징을 판단하기 위하여 마이크로 경도를 측정하였다. 에칭은 단면부를 #2000의 사포를 사용하여 연마하고 에타놀 100ml에 질산 10ml를 혼합한 용액을 사용하였다.

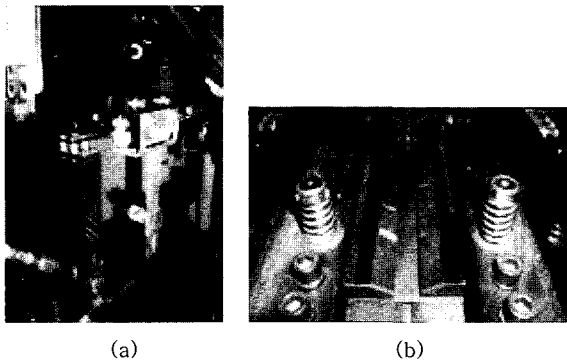


Photo 1 Equipment and jig for the experiment  
(a) Welder (b) Jig

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 실험결과

#### 3.1.1 단면모양

용접비드의 단면모양을 용접 변수인 용접속도와 판재간격에 따라 Fig. 1에 정리하였다. 단면모양(shape)은 대표적으로 두 경우로 나눌 수 있다. 완전용입이 되어 장구모양의 비드가 형성된 경우와 부분용입이 되어 사발모양의 비드가 형성된 경우이다. 장구모양 비드는 용접속도 2.7과 3.0m/min이고 BOP, 판재간격 0과

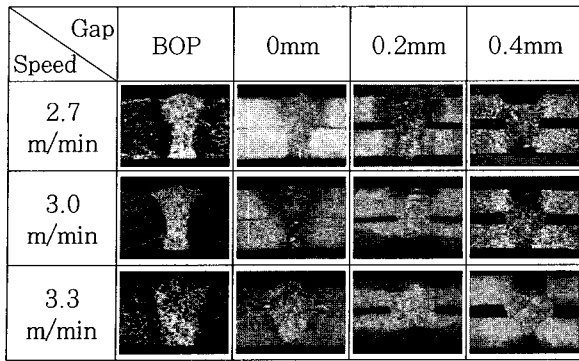


Fig. 1 Bead sections due to welding speed and gap

0.2mm의 경우에 관찰 할 수 있다. 사발모양의 비드는 용접속도 3.3m/min, 판재간격 0mm에서 관찰 할 수 있다.

Fig. 1에서 보여주는 판재간격이 0.4mm이고 용접속도 3.0과 3.3m/min의 경우에 용입깊이로 판단하면 완전용입이나 비드의 단면모양은 상부의 용융 금속의 함몰이 크고 중앙이 불룩하고 끝이 뾰족한 모양을 갖고 있다. 이는 상판이 완전용입된 후 용융부의 함몰이 일어나 판재간격 사이로 용융 금속이 흘러들어 가고 이와 함께 레이저광이 하부의 판재 깊숙이 조사되어 하부까지 용입되어 나타난 모양이라 판단된다.

Fig. 1의 BOP 결과에서 용접속도 3.3m/min의 단면형상은 완전용입 상태에서 부분용입 상태로 변하는 과도기적 형상을 보여준다. 이때는 완전용입 상태에 비하여 비드폭, 비드단면적 등이 급격히 증가하였다.

3.1.2 용입깊이

용입깊이는 완전용입과 부분용입을 구분 지어주는 확실한 변수이다. 각 경우의 용입깊이를 관찰한 결과는 다음과 같다.

BOP용접에서 용접속도 3.3m/min까지는 완전용입이 일어나나 3.3m/min에서는 부분용입으로 가는 과도기적 현상이 관찰된다. 판재간격이 0인 겹치기 용접에서 3.0m/min의 용접속도에서는 완전용입이 일어나나 3.3m/min에서는 부분용입이 일어난다. 판재간격 0.2mm인 겹치기 용접에서 3.0m/min의 용접속도에서는 완전용입이 일어나나 3.3m/min에서는 부분용입과 완전용입이 모두 관찰되었다.

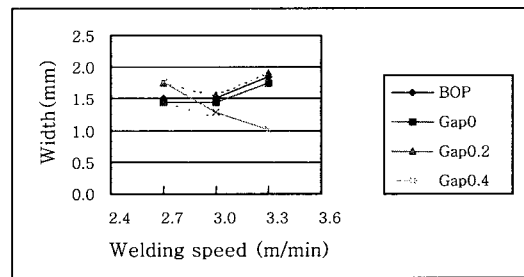
판재간격 0.4mm인 겹치기 용접에서는 용접속도 2.7m/min, 3.0m/min 및 3.3m/min 모두에서 완전용입을 얻을 수 있었다. 3.3m/min의 용접속도에서 판재간격 0.41mm에서는 하부비드까지 관통이 되며 판재간격을 메꿈으로 인한 상부 비드의 함몰이 0.4mm 깊

이까지 관찰된다. 이는 3.1.1에서 설명한 것과 같은 함몰과 레이저의 깊은 입사가 주는 효과일 것이다.

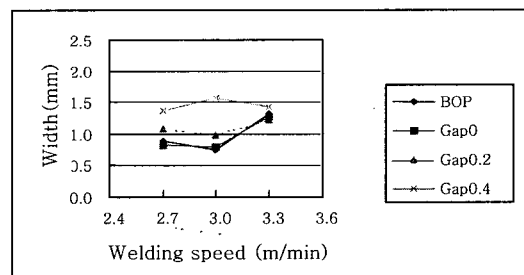
3.1.3 비드폭

단면의 비드폭을 측정 정리하여  $w_t$ ,  $w_i$ ,  $w_b$ 를 각각 Fig. 2 (a~c)에 나타내었다. BOP에서  $w_i$ 는 중앙에서의 값을 취하였다.

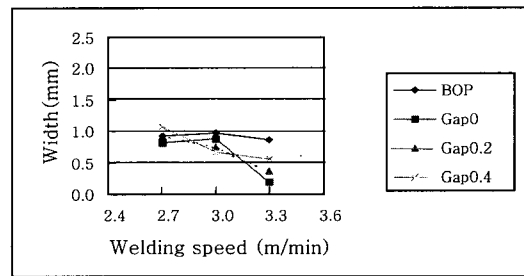
Fig. 2의 (a)의 비드폭의 변화에 대한 실험 결과를 살펴보면 상부비드폭은 완전용입내에서는 1.5mm 정도에서 거의 일정하며 부분용입시 1.8mm로 큰 차이를 보인다. (b)의 하부비드폭은 완전용입 조건내에서 0.8~0.9mm이고 부분용입시 0가 된다. (c)의 결합부비드폭은 완전용입시 0.7~0.8mm 이나 부분용입으로 가면서 1.3mm 이상으로 큰 변화를 보인다. 일반적으로 용접 조건의 품질 검사에서 하부비드폭은 완전용입 영역내에서의 공정조건의 변화를 관찰하고 관리하며 부분용입으로의 변화를 가장 쉽고 확실히 알 수 있는 방법



(a)



(b)



(c)

Fig. 2 Bead width due to welding speed and gap (a) Bead width at top, (b) Bead width at interface, (c) Bead width at bottom

이다. 판재간격이 0.4mm일 때 상부비드폭은 1.0~1.2mm로 줄어들고 결합부비드폭은 1.5mm로 크며 하부비드폭은 0.5mm로 뾰족한 형상이다.

### 3.1.4 비드단면적

비드단면적도 중요한 용접특성의 하나이나 정량적으로 관찰하기가 용이하지 않으므로 용접품질의 기준으로 사용한 예는 찾기 힘들다. 여기서는 용접 품질의 특성을 좀 더 정확히 연구하기 위하여 관찰의 대상에 포함하였다. 비드단면적은 Fig. 3에 나타내었다. 완전용입의 경우 2.0mm<sup>2</sup>의 값을 갖고 부분용입의 경계에서 최대 3.0mm<sup>2</sup>로 이후 용접속도가 증가하면 용입깊이가 줄면서 비드단면적은 감소한다.

용접속도 3.3m/min에서 비드 단면적이 훨씬 큰 것은 일반적으로 관찰하기 어려운 현상으로 BOP용접에서 뚜렷이 관찰 할 수 있었다. 이는 완전용입이 발생하면 키홀(keyhole)의 강한 운동 때문에 불안정하게 되며 또한 강한 대류열손실을 일으켜서 더 많은 에너지가 필요하다는 기존의 관찰과도 일치한다<sup>10)</sup>.

이 차이는 용접속도를 고려하면 더 크게 나타나는 데 3.2.3절에서 단위부피당 입력에너지에 대한 그래프인 Fig. 7을 보면 좀 더 분명해진다.

### 3.1.5 마이크로 경도

각 실험조건에 따른 단면부의 모재, 열영향부 및 용융부의 마이크로 경도를 측정하였다. 마이크로 경도는 1kgf의 힘으로 10초 동안 하중을 가하여 각 단면에서 비드 중앙을 중심으로 좌우로 모재의 경도 값이 나오는 범위까지 0.2mm 간격으로 측정하였다. 이를 그래프로 그려 Fig. 4에 나타내었다. 판재간격 0mm의 겹치기 용접 후 APFC390 모재의 경도는 약 155H<sub>v</sub>이며 용접 후 열영향부와 용융부가 약 300H<sub>v</sub> 정도의 경도를 갖는다. BOP SPCEN의 용접용융부의 경도는 약 200H<sub>v</sub>이고 그때의 모재의 경도는 100H<sub>v</sub>이다.

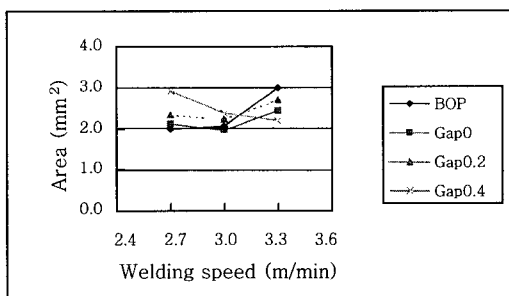
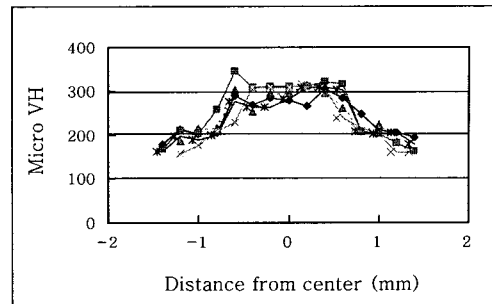
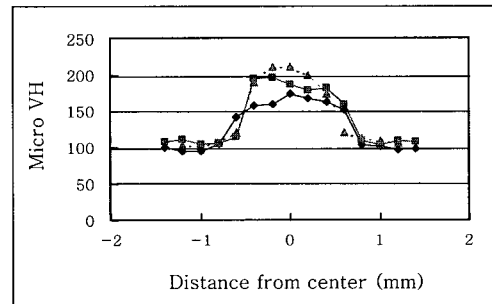


Fig. 3 Sectional area (Ac) due to welding speed and gap



(a)



(b)

Fig. 4 Micro Vickers hardness (a) VH of APFC390 and weld (b) VH of SPCEN and weld

## 3.2 고찰

### 3.2.1 완전용입 한계곡선

겹치기 레이저 용접의 단면형상을 기준으로 완전용입 상태를 주는 용접속도와 판재간격의 범위를 얻을 수 있다. 이 범위의 경계는 완전용입의 한계를 규정지어 주며 그래프 상에 이 곡선을 그릴 수 있다. 이를 본 논문에서는 완전용입 한계곡선이라 부르기로 한다. 부분용입이 나타나는 용접속도인 3.3m/min에서의 현상을 분명히 평가하기 위해 용접속도 3.15m/min에서의 용접을 추가로 시행하고 그 단면형상의 데이터를 얻었다.

BOP 상에서 완전용입을 위한 용접속도의 한계는 3.3m/min이고 1mm/1mm 겹치기 용접의 판재간격 0mm의 조건에서 완전용입을 위한 용접속도의 한계는 3.15m/min과 3.3m/min 사이에 있다. 이 두 점이 각 조건에서의 완전용입 한계점이 되며 이 두 점을 잇는 선이 완전용입 한계곡선의 일부가 된다. 마찬가지로 판재간격에 따른 용접속도의 한계는 하나의 궤적을 그리게 되고 이를 용접속도와 판재간격을 좌표축으로 하는 평면상에서 등고선으로 그릴 수 있다. 이 한계 곡선을 Fig. 5에 나타내었다. 그래프의 각 점은 실험조건을 표시하며 수치 2.0, 1.9는 판재간격을 무시한 용입깊이를 나타낸다. 즉 판재간격에 상관없이 2.0은 완전용입된 것을 나타낸다.

용접속도 3.3m/min, 판재간격 0.2mm 부근에서 한

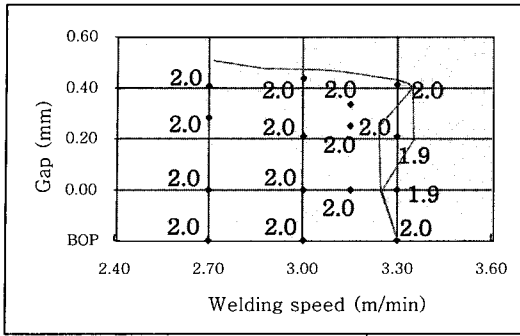


Fig. 5 Limit curve for full penetration of APFC390 lap

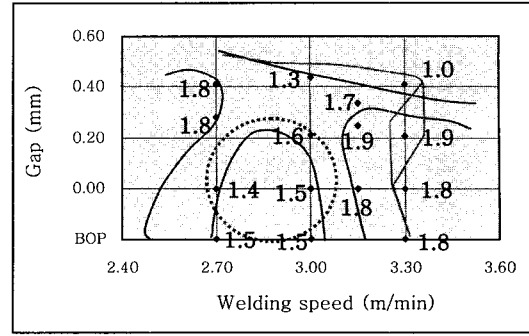


Fig. 6 Characteristic curve for top bead width of 1.5mm and 1.8mm

계곡선이 두 갈래로 된 것은 한 조건에서 완전용입과 부분용입의 두 가지 결과를 시험에서 얻었기 때문으로 불안정한 영역을 나타낸다.

용접속도 3.0m/min에 대하여 판재간격 0.41mm 이상에서 한계를 갖는다고 할 수 있고 용접속도가 줄어들수록 한계속도는 증가할 것이나 기울기는 크지 않을 것으로 추측된다.

판재간격 0인 겹치기 용접일 때 완전용입 한계를 BOP 일 때의 완전용입 한계와 비교하면 용접속도 0.15m/min의 반에 해당하는 값만큼 작아 짐을 알 수 있다. 그러나 겹치기 용접에서는 판재간격이 0.4mm로 커질수록 완전용입을 주는 용접속도의 한계가 같거나 오히려 증가한다는 것이다. 이는 판재간격이 열손실과 관련이 있음을 보여주며 이 현상은 3.2.3 항에서 단위 부피당 입력에너지를 기준으로 고찰해 보면 좀 더 명확해진다. 추후 용접부의 온도분포 등에 대한 상세한 분석이 필요하나 본 논문에서는 다루지 않는다.

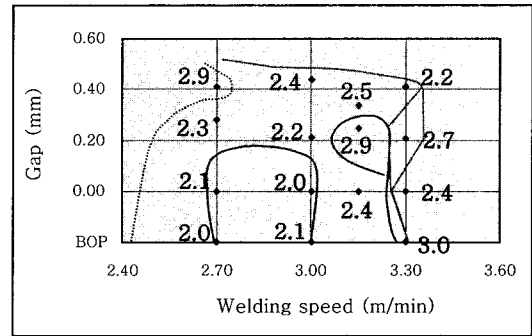


Fig. 7 Characteristic curves for Ac

3.2.2 비드특성의 변화와 특성곡선

용접속도, 판재간격을 직교 좌표축으로 한 평면상에서 완전용입 한계곡선을 경계로 비드특성의 등고선을 도시해 변화를 살펴보았다.

(1) 상부비드폭 특성곡선

상부비드폭 1.5mm, 1.8mm 등에 대한 특성곡선을 Fig. 6에 실었다. 완전용입의 경우 상부비드폭 1.5mm의 영역은 넓으며 좌우로 상부비드폭 1.8mm의 특성곡선이 표시되어 있다. 또 상부비드폭 1.3mm의 특성곡선을 위쪽에 표시하였다.

(2) 비드단면적 특성곡선

Fig. 7에  $A_c$ 가 2.0mm<sup>2</sup>, 2.8mm<sup>2</sup>인 경우의 특성곡선을 도시하였다. 비드단면적 2.8mm<sup>2</sup>인 최대인 언덕이 한계곡선 부근에 존재하며 실선으로 표시되어 있다.

3.2.3 단위부피당 입력에너지와 완전용입의 한계  
일반적으로 키홀용접(keyhole welding)을 위한 한계값은 CO<sub>2</sub> 레이저 용접에서  $1\sim 2 \times 10^6$  W/cm<sup>2</sup> 이라고 알려져 있다. 현재 4kW CO<sub>2</sub> 레이저 용접기의 초점 크기(spot size)는 계산상으로 0.453mm의 지름을 갖는다. 실제 용접시편에서의 출력을 측정하면 3.8kW 정도이고 이를 초점의 면적으로 나누어 에너지 밀도를 구하면  $2.62 \times 10^6$  W/cm<sup>2</sup>로 한계값 이상인 것을 알 수 있다. 그러나 이는 정적인 빔 초점에 의한 한계값이고 용접과 같이 레이저 초점이 움직이는 경우에 따른 속도의 개념은 포함되어 있지 않다.<sup>10)</sup>

레이저 빔 초점의 이동 속도를 고려하기 위하여 좀 더 실용적인 관점에서 쉽게 생각할 수 있는 것은 단위 부피당 조사된 에너지의 양이다. 이를 본 논문에서는 단위부피당 입력 에너지( $E_v$ )라 부르기로 한다. 이는 다음의 식을 통하여 계산된다.

$$E_v = \text{출력}(W) / \text{용접속도}(v) / \text{비드단면적}(A_c)$$

여기서 계산된 단위부피당 입력 에너지 값을 판재간격과 용접속도에 따라 구하여 그래프를 그리면 Fig. 8과 같다.

판재간격 0.4mm인 경우를 제외하면 용접속도가 증가함에 따라 단위부피당 입력에너지는 점차 감소한다.

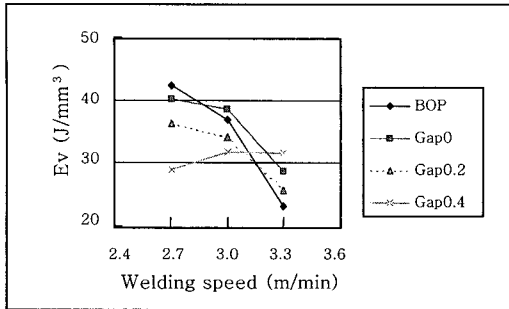


Fig. 8 Input energy per unit volume

BOP의 경우, 용접속도 2.7m/min에서 약 42 J/mm<sup>3</sup> 이고 용접속도 3.3m/min에서 약 22J/mm<sup>3</sup>까지 감소한다. 판재간격 0.4mm는 기타의 경우와 그 경향이 다르다. 이 때 단위부피당 입력에너지는 큰 변화가 없으며 속도가 증가할수록 오히려 약간 증가함을 관찰할 수 있다. 용접속도 2.7m/min에서 판재 간격에 따른 부피당 입력에너지를 관찰하면 판재 간격이 커질수록 부피당 입력에너지는 감소하는 경향이 뚜렷하며 용접속도 3.0m/min에서도 동일한 경향을 갖는다. 이는 판재 간격 0.4mm는 지금의 조건에서 열 손실이 가장 작은 조건임을 간접적으로 보여주는 것이다.

3.2.4 겹치기 용접과 BOP용접

지금까지 관찰한 결과에서 판재간격이 0.4mm인 경우를 제외하고 겹치기 용접의 결과와 BOP 결과는 상당히 유사한 경향을 보임을 알 수 있다. 특히 판재간격 0인 경우와 BOP는 부분용입의 경계에서 단면적의 크기와 부분용입이 시작되는 용접속도에서 약간의 차이가 관찰되었을 뿐이다. 따라서 BOP용접의 결과는 겹치기 레이저 용접의 기준 데이터로 충분히 활용될 수 있다고 판단된다.

4. 결 론

자동차용 강판의 겹치기 및 BOP CO<sub>2</sub> 레이저 용접에 대한 본 연구에서 얻어진 주요한 결론은 다음과 같다.

- 1) 용접속도와 판재간격을 변수로 한 겹치기 용접과 BOP용접을 실시하여 단면모양과 비드폭, 비드단면적을 측정하고 마이크로 경도의 결과를 얻었다.
- 2) BOP용접 결과는 겹치기 레이저 용접 결과를 잘 반영하는 기준이 될 수 있다.
- 3) 완전용입을 위한 공정조건의 한계를 규정짓는 완전용입 한계곡선을 제안하였다.
- 4) 용접속도와 판재간격을 두 축으로 하는 평면상에서 동일한 용접 특징을 보이는 특성곡선을 표시하고 특성치의 경향을 분석하였다. 특성곡선을 이용하면 원하

는 용접속도와 판재간격에 대한 용접 품질을 쉽고 빠르게 구할 뿐만 아니라 역으로 품질의 변화를 관찰하여 공정조건의 변화량도 쉽게 예측할 수 있다.

5) 완전용입에서 부분용입으로 변화하는 과도기 상태에서 비드의 단면적이 최대가 되는 조건이 있음을 관찰하였다.

6) 공정조건에 따른 용접품질을 판단하는 또 하나의 기준으로 단위부피당 입력에너지를 제안하였다. 이는 5)의 결과를 정량적으로 뒷받침한다.

7) 동일한 용접속도에서 판재간격에 따른 단위부피당 입력에너지를 비교하면 판재간격이 클수록 적당한 판재간격이 열 손실을 크게 감소시킴을 알 수 있다. 이는 어느 한계 이내의 판재 간격에서는 판재간격이 클수록 열전달 차단등의 이유로 에너지 손실이 최소가 된다고 생각할 수 있다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 '국가지정연구실 사업'에 의한 연구비 지원과 고등기술연구원의 후원에 의하여 수행되었다. 관계자 여러분에게 깊은 감사를 드린다.

참 고 문 헌

1. Daniel Wildmann : Laser Welded Blanks - Innovative Edge Preparation Method Improves Process Reliability and Economy, Proceedings of the International Body Engineering Conference on Materials & Body Testing (IBEC), (1995), 132-136
2. B. K. Yoo, K. D. Lee : A study on mechanical shearing process for tailored blank welding, J. of Korean Welding Society 17-2 (1999), 128-137 (in Korean)
3. K. D. Lee, et al. : Manufacturing Technology for an Application of Tailored Blank, KSAE '99 Structural Strength Conference Proceeding (1999) (in Korean)
4. C. S. Hwang, T. H. Kim, B. K. Yoo, K. D. Lee : A study of tailored blank welding between dissimilar materials and different thickness sheets by CO<sub>2</sub> Laser beam, J. of Korean Society of Laser Processing 2-3 (1999), 42-51 (in Korean)
5. Hans Josef Haepf : LASER Application in Automotive Production, Proceedings of the 19th International Congress on Applications of lasers and electro-optics (ICALEO), (2000), F1-F10
6. Robert Mueller : Laser Welding of Hem Flange Joints, Proceedings of the 19th International Congress on Applications of lasers and electro-optics (ICALEO), (2000), F11-F20
7. Heinz W. Walther : Laser Welding in the Body Shop, Proceedings of the International Body Engineering Conference on Advanced Technologies &

- Processes (IBEC), (1994), 92-96
8. Jerry N. Koons and David M. Roessler : Body Sheet metal Applications of Laser Welding, Proceedings of the International Body Engineering Conference on Advanced Technologies & Processes (IBEC), (1994), 97-100
  9. Paul Denney and Jian Xie : The Welding of Galvanized Steel, Proceedings of the 19th International Congress on Applications of lasers and electro-optics (ICALEO), (2000), A1-A9
  10. Walter W. Duley : Laser Welding, Wiley Inter-Science (1999), 71-97