

## 레이저용접부 온도측정을 위한 적외선 온도측정장치의 개발에 관한 연구(I) -용융부 형상에 따른 표면온도분포-

이 목 영\* · 김 재 웅\*\*

\*포항산업과학연구원 용접연구센터

\*\*영남대학교 기계공학부

### A Study of the Infrared Temperature Sensing System for Surface Temperature Measurement in Laser Welding(I) - Surface Temperature Profile According to Bead Shape -

Mok-Young Lee\* and Jae-Woong Kim\*\*

\*Welding Research Center, RIST, Pohang 790-330, Korea

\*\*School of mechanical engineering, Yeungnam University, Kyongsan 712-749, Korea

#### Abstract

This study investigated the feasibility of penetration depth measurement using infrared temperature sensing on the weld surface. The detection point was optimized by FEM analysis in the laser keyhole welding. The profile of the weld surface temperature was measured using infrared detector array. Surface temperature behind the weld pool is proportional or exponentially proportional to penetration depth and bead width. From the results, the monitoring device of surface temperature using infrared detector array was applicable for real time penetration depth control.

(Received September 4, 2001)

Key Words : Laser welding, Penetration depth, Surface temperature profile, Infrared temperature sensing, Photo diod array, Steel sheet

#### 1. 서 론

레이저 키 홀 용접에서 용접품질은 빔의 집속직경이 매우 작기 때문에 피용접재의 이음부 상태에 크게 영향을 받는다. 레이저용접은 대부분의 소재를 고품질로 접합하는 것이 가능하지만, 단위 용접길이당 비용이 매우 높은 고비용 용접공정이다. 따라서 레이저용접에서는 고비용의 단점을 상쇄시킬 수 있을 정도의 우수한 용접 품질이 유지되어야 하므로 용접부 품질의 관리가 무엇보다도 중요하다.

레이저용접에서 레이저 공정에 관련 있는 모니터링대상은 플라즈마발광, 용융지온도, 레이저빔의 반사 및 음향방출신호 등이다. Miymoto and Mori는 포토다이오드를 사용하여 플라즈마 플룸의 상태를 측정하여 완전용입을 판정<sup>1)</sup>하였다. Houlot은 weld pool에서 방사되는 적외선을 측정하여 용접부 결합발생과의 관련성<sup>2)</sup>

을 밝혔다. Chang은 재료의 표면에서 반사되는 레이저빔을 측정하여 용접상태를 판정<sup>3)</sup>하였다. Duley and Mao는 재료의 표면상태에 따른 acoustic emission의 특성<sup>4)</sup>을 조사하였다. 상기의 방법들은 주위의 환경에 영향을 많이 받거나, 용접부품질과의 상관성이 제한적이다.

레이저 용접부 품질을 판정하는 다른 방법으로는 레이저와는 직접적인 관련성이 없는 변수를 측정하는 것이다. Abel은 CCD를 사용하여 용접부 표면을 관찰하여 용접부기공, undercut 등을 검출<sup>5)</sup>하였으며, Wildmann은 이중두께 용접에서 용접부 외관불량을 판정<sup>6)</sup>하였다. 용접부 외관형상을 측정하여 용접품질을 판정하는 방법은 소재의 종류에 무관하며 레이저용접에 영향을 받지 않는다. 그러나 측정정밀도가 CCD의 분해능에 좌우되며, 데이터처리에 시간이 소요되며, 내부의 결함은 판별하기가 곤란하다. Doong은 냉각단계 용접부 표면 2지점의 온도에 의한 냉각속도를 측정하여 용

접촉질을 판정<sup>7)</sup>하였다. 이 방법은 측정결과가 측정위치 및 거리의 변화에 민감하게 영향을 받기 때문에 재현성에 문제가 있다.

본 논문은 레이저 용접에서 용입 깊이를 실시간으로 예측하기 위하여 용접부 표면의 온도분포를 측정하는 장치의 개발에 관하여 연구하였다.

## 2. 용입깊이 예측모델

레이저 용접은 고밀도로 집속된 레이저빔에 의한 재료의 가열/용융에 따른 키홀 형성에 의하여 이루어지며 아크용접에 비하여 용접부 폭의 변화가 작다. 그러나 용입깊이는 소재에 가해지는 입열량 혹은 초점위치 등의 용접조건에 따라 큰 차이를 나타내는데, 이러한 레이저 용접부의 특성은 비드외관 검사에 의한 품질관리에 어려움을 초래한다.

레이저용접부는 레이저빔의 흡수에 의하여 용융지가 형성되고 용융지에서 모재로 열전달되어 용융지 중심이 가장 온도가 높고 모재쪽으로 갈수록 연속적으로 감소하는 형태를 나타낸다. Fig. 1은 레이저 용접부의 비드 형상에 따른 표면온도분포에 대한 모델을 도시한 것이다. 레이저출력이 낮거나 소재의 이송속도가 지나치게 빠른 경우 부분 용입이 형성된다. 이 경우 레이저빔과 수직인 방향으로 열전달이 이루어질 뿐만 아니라 레이저빔과 평행한 소재의 두께방향으로도 열이 전달된다. 또한 용접 비드표면에서는 복사에 의해 열손실되어 그림의 온도분포 그래프에 나타낸 것과 같이 용접선 중앙에서는 온도가 높고 모재로 갈수록 온도가 감소하는 정규분포형태를 보일 것이다. 적정 용접조건에 의하여 입열량이 충분한 완전용입의 경우는 그림에서 보는 바와 같이 레이저빔에 수직인 소재의 폭방향의 열손실이 주로 발생하며, 레이저빔에 평행한 소재의 두께방향은 복사에 의하여 열손실되므로 용접선 중앙에서의 최고온도

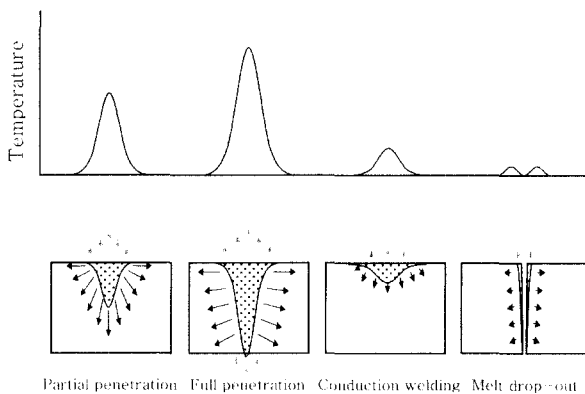


Fig. 1 Model of surface temperature in laser welding

는 부분 용입보다 높을 것이다. 한편 레이저 출력이 낮거나 초점거리가 부적합한 경우에는 용융은 거의 이루어지지 않으므로 최고 온도가 매우 낮고 온도분포의 폭은 오히려 넓을 것이다. 반대로 레이저출력이 지나치게 높은 경우에는 용융이 발생하며 이 경우에는 용접선 중앙에서는 온도가 검출되지 않고 주위만 다소 가열될 것이다.

레이저 용접에서 용입깊이에 따른 용접부 표면온도분포의 상관성을 알아보기 위하여 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS (version 5.7)를 이용하여 용접부 온도 해석을 하였다. 해석조건은 실린더형의 키홀을 가정한 준정상상태에 대한 2차원 해석을 하였다. 경계조건은 표면에서의 자연대류를 적용하였으며 키홀의 깊이는 실험적으로 측정된 용입깊이를 기준으로 하였다<sup>8)</sup>. Fig. 2는 두께 1.0mm 냉연강판을 레이저출력 720W, 속도 1m/min로 용접했을 때, 용접부 표면온도분포를 나타낸 것이다. 용접시작점은 레이저 빔이 조사되기 시작하여 소재의 온도상승이 없었으며, 조사시간이 증가함에 따라 소재의 최고 가열온도가 급격히 상승하였다. 최고 온도는 레이저빔 중앙으로부터 후방 즉, Y축 방향으로 0.1883mm 지점이며, 이때의 최고가열 온도는 2903 °C이었다. 레이저빔이 조사되고 난 후 최고온도로 가열되기까지의 시간은 빔의 유효반경을 고려하면 약 20 msec 가량인데, 이것은 Li 등이 plasma charge sensor를 사용하여 측정한 시간 (7msec)<sup>9)</sup> 보다 다소 길었다. 한편 레이저빔이 조사되기 시작하는 지점 전방은 가열되지 않는 것으로 나타났는데, 이것은 해석단계

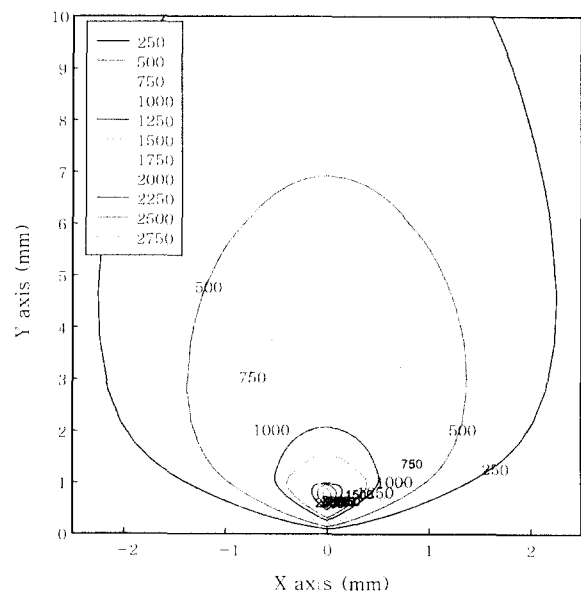


Fig. 2 Profile of surface temperature in 2D

에서 레이저빔이 소재에 흡수되어 가열되는 것을 가정하였기 때문이다. 실제의 용접에서 정상상태의 조건에서는 용접열의 전도에 의하여 레이저빔이 조사되는 지점 전방도 가열될 것이다. 한편, Semak 등은 레이저 용접에서 용융지는 심하게 유동<sup>10)</sup>하는 것으로 보고하고 있는데, 이러한 용융지 유동은 적외선 온도측정에서 외란의 요인으로 작용할 것으로 보인다. 따라서 용접부 품질을 보다 정밀하게 관리하기 위하여는 용접이하의 온도 즉, 고상상태의 온도를 측정하는 것이 필요하다. Fig. 2의 조건에서 온도측정 지점은 레이저빔의 중심에서 1.0~2.0mm (Y=1.3~2.3mm) 후방의 온도를 측정하는 것이 바람직하다.

Fig. 3은 Fig. 2에서 레이저빔 중심으로부터 거리에 따른 폭방향 온도분포를 나타낸 것이다. 레이저빔 중심으로부터 0.1mm 지점은 계속적인 레이저빔의 흡수를 증가에 의하여 급격한 온도구배를 나타내었다. 그러나 레이저빔 중심으로부터 0.5mm 후방의 온도는 모재로의 전도 열전달에 의하여 정규분포 형태를 나타내었으며, 2.1mm 후방의 온도는 완만한 변화를 보였다.

Fig. 4는 Y 방향으로 1.5mm 거리에서 레이저 출력에 따른 폭방향 온도분포를 나타낸 것이다. 그림에서 대략 600°C이하의 온도범위에서 동일온도 영역의 폭은 변화가 적은 반면, 고온영역에서는 동일한 온도를 나타내는 폭이 레이저 출력에 비례하여 증가하였으며, 최고 온도 또한 레이저 출력에 비례하여 증가하였다.

레이저 용접에서 용접비드 표면의 온도분포에 대한 정보를 정확하게 획득하게 되면 레이저 용접부 품질의 정확한 판정 및 실시간 제어가 가능할 것으로 판단되었다.

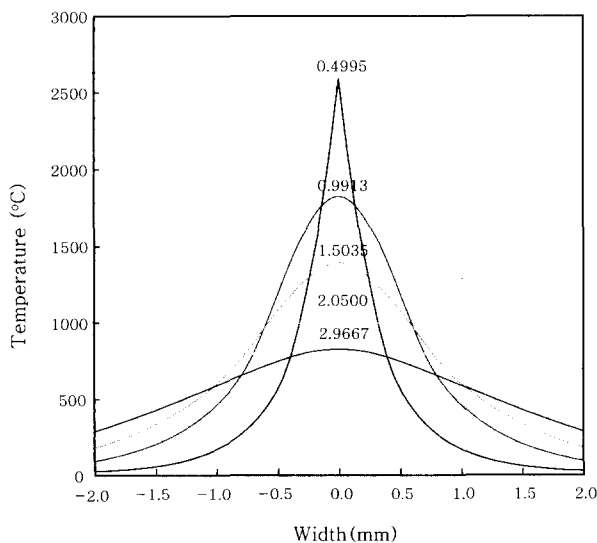


Fig. 3 Profile of surface temperature for various distances from beam center

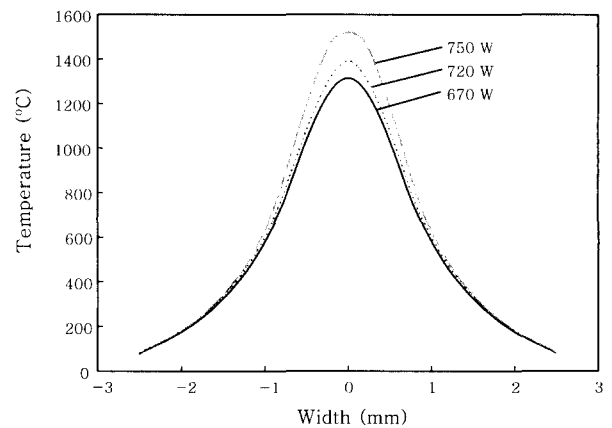


Fig. 4 Profile of surface temperature for various incident laser powers(Y=1.5mm)

### 3. 실험방법

레이저 용접부 표면온도분포는 적외선 감지장치를 이용하여 측정하였다. 사용된 적외선 감지장치의 분광학적 특성은 900~1,700nm 파장범위의 근적외선에 대해 반응하는 InGeAs PIN 배열센서를 사용하였다.

온도측정장치의 구성은 Fig. 5에 나타난 것과 같이 Cu 반사경으로 빛을 굴절시켜 레이저헤드와 온도측정장치의 간섭을 방지하였으며, 렌즈의 앞부분에 slit을 설치하여 측정영역 이외의 부분에서 방사되는 빛을 차단하였다. 이러한 빛을 렌즈로 집속시켜 적외선 센서에 조사되게 하였다. 렌즈 사이에 850nm 이상의 장파장 빛만을 통과시키는 필터를 사용하여 레이저플라즈마에 의한 영향을 방지하였다. 적외선 센서의 신호는 Pre-amplifier로 증폭시킨후, A/D 변환하여 컴퓨터로 측정하였다.

적외선 온도측정장치는 폭 5mm 및 길이 100mm의 강판 중앙에 thermocouple을 부착한 후, 양단에 전류를 공급하여 저항가열시켜 온도를 보정하였다

용접부 표면온도측정에 사용된 소재는 0.002%C가 함유된 두께 0.8mm의 냉연강판이었다. 시험에 사용된

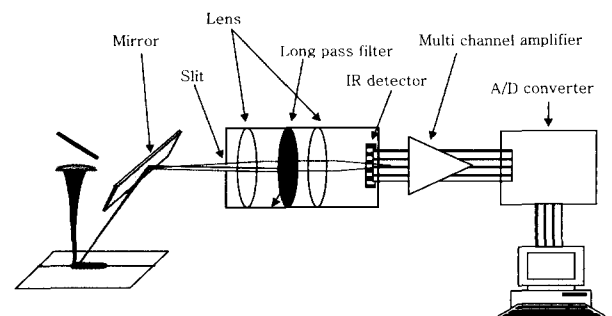


Fig. 5 Sketch of the surface temperature measurement system

레이저는 미국PRC 사의 3kW급 CO<sub>2</sub>레이저이었다. 레이저의 제원은 집속위치에서 빔직경이 0.3mm이었으며, 집속광학계는 초점거리 5"인 parabolic mirror를 사용하였다. 온도측정은 BOP용접에서 레이저빔을 중심으로 후방 2mm 지점에서 측정하였다.

## 4. 실험결과 및 고찰

### 4.1 적외선 온도측정장치의 온도보정

적외선 온도측정은 시편표면으로부터 센서까지의 거리변화에 따라 센서출력이 변화하며, 이러한 센서출력은 실제의 온도에 맞게 보정하여야 한다. 적외선 온도측정장치의 보정에는 보정용 램프를 사용하기도 하지만, 본 연구에서는 소재를 일정한 온도로 저항가열시킨 후 열전대를 사용하여 비교 측정하였다. Fig. 6은 적외선 온도측정장치의 온도보정결과를 나타낸 것이다. 그림에서 온도가 낮은 600°C의 경우 15픽셀 이하 혹은 22픽셀 이상의 기저수준은 센서의 출력이 0에 가까웠으며, 적외선이 방사되는 16~20픽셀의 출력전압은 0.2볼트 가량이었다. 온도가 증가할수록 센서의 출력은 증가하였으나, 온도곡선의 형태는 장방형과 유사한 형태를 보였다. 소재강관의 가열온도 1100°C에서 적외선 온도측정장치의 출력전압은 10볼트로 포화되어 보다 낮은 온도에서 측정된 결과와 다른 양상을 보였다. 적외선 온도측정장치로 측정된 결과가 정규분포 형태의 온도해석결과와 차이를 보이는 이유는 해석에서는 무한평판에 용접이 수행되어 모재방향으로 전도열전달이 이루어졌으나 온도보정에서는 5mm의 전폭이 가열되었기 때문이다. 한편 소재의 가열온도가 증가할수록 기저온도가 증가하였는데, 이러한 이유는 정도의 차이는 있지만 모든 방향으로 복사열전달이 이루어졌기 때문이다.

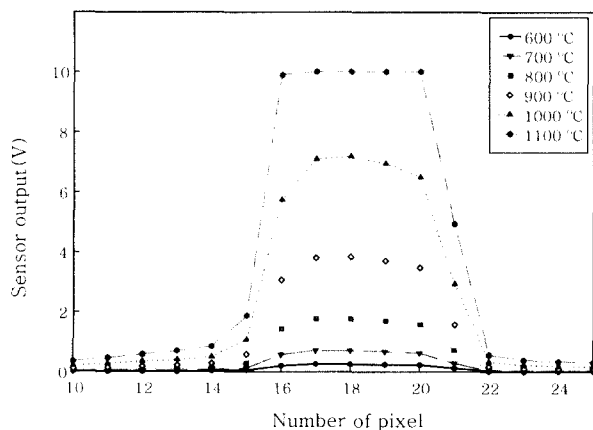


Fig. 6 Profile of surface temperature of resistance heated steel sheet

소재강관의 가열온도 600°C 이하에서는 적외선 센서의 출력이 0.2볼트 이하로 측정가능한 최대범위의 2% 이내이므로 본 온도측정장치의 유효범위를 600°C 이상으로 한정하였다.

Fig. 7은 여러 온도에서 적외선 온도측정장치의 출력전압의 최고치를 나타낸 것이다. 그림에서 심볼은 실제 측정점이며, 실선은 측정데이터를 근거로 회귀분석한 결과이다. 회귀분석시의 함수는 복사열전달에서 복사에너지의 양이 온도의 4제곱에 비례한다는 점에 근거하였다. 두께 0.6mm의 냉연강관을 저항가열하는 경우 적외선 온도측정장치의 출력전압과 온도는  $Temp. = 833.6754 \times V^{0.1632}$ 의 관계이었으며, 신뢰도는 99.9%이상이었다. 적외선온도측정장치의 출력전압은 대략 온도의 6제곱에 비례하였다. 이러한 차이는 복사대상이 흑체가 아니며, 센서의 출력이 입력에너지와 선형적인 비례관계를 갖고 있지 않았다는 점등 여

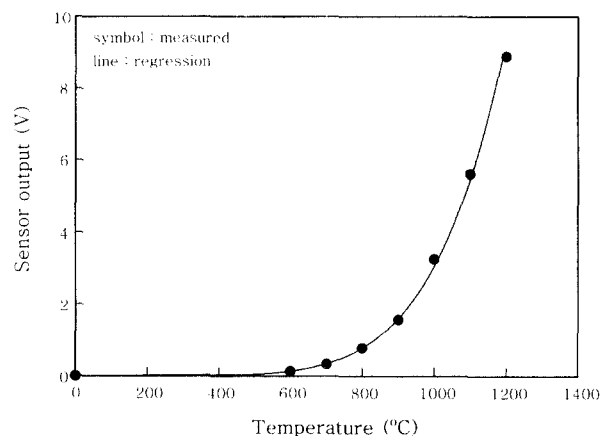


Fig. 7 Relationship between temperature and sensor output

러 가지 외란요인이 작용하였기 때문으로 판단된다.

Fig. 8은 각각의 온도에서 적외선 온도측정장치의 출력전압에 미치는 측정대상과 센서 거리의 영향을 나타낸 것이다. 센서출력전압의 차이는 적외선 온도측정장치의 정초점위치에서 센서의 출력값과 초점이 어긋난 지점에서 센서출력값의 비( $dV = V/V_0$ )를 나타내었다. 센서의 출력전압은 온도측정장치의 정초점위치에서 가장 높았으며, 초점위치에서 멀어질수록 즉, 초점어긋남이 심할수록 감소하였다. 대상 소재의 온도에 따라서는 온도가 낮은 경우 센서 출력의 변화가 심하여 실제의 용접에서는 가급적 고온영역 즉, 용융지 인접의 온도를 측정하는 것이 필요하였다. 오차허용률 1%를 기준으로 할때, 적외선 온도측정장치의 초점거리에 대한 여유는 온도 700°C, 900°C 및 1100°C에 대하여 각각 4.1, 3.6 및 5.2mm 이었다. 이러한 값은 두께 1mm

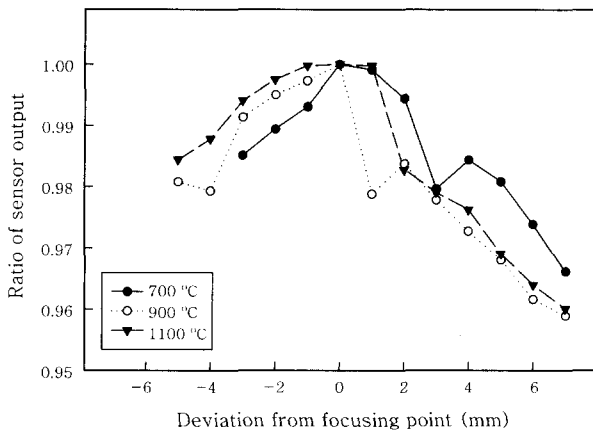


Fig. 8 Effect of sensor defocusing in various temperatures

가량 박강판의 레이저용접시 초점위치에 대한 여유와 유사한 수준으로 본 온도측정장치는 레이저헤드에 장착하여 용접부 온도를 계측하는 것이 가능하리라는 것을 보여준다.

#### 4.2 레이저 용접부 표면의 적외선 온도측정

Fig. 9~12는 적외선 온도측정장치를 이용하여 계측한 용접부 표면온도분포를 비드의 단면형상과 비교하여 나타낸 것이다. Fig. 9는 레이저 출력 820W, 이송속도 3m/min 및 초점위치 시편표면의 용접조건에서 두께 1.0mm의 극저탄소 냉연강판을 BOP 용접한 결과를 나타낸 것이다. 상부의 사진은 용접비드의 단면형상

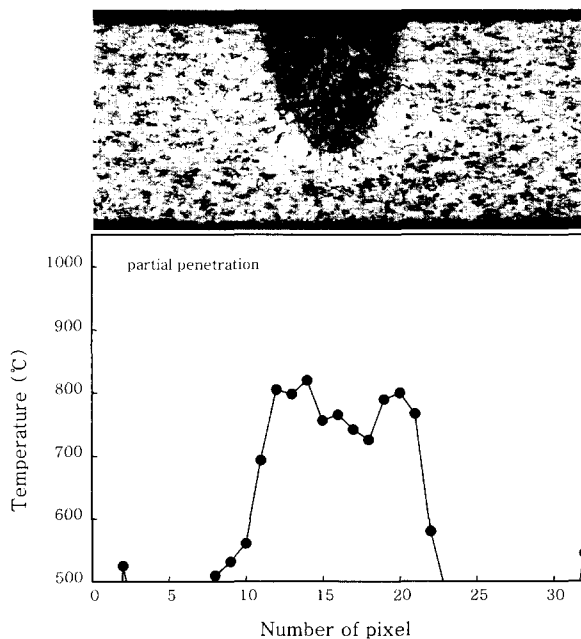


Fig. 9 Relationship between bead shape and surface temperature profile at partial penetration

을 나타낸 것으로 입열량이 부족하여 완전용입이 이루어지지 않았으며, 소재강판 두께의 65% 가량 용입되었다. 사진 아래의 비드표면 온도분포 그래프에서 온도분포는 비드의 형상과 유사한 분포를 나타내었으나, 비드 중심에 해당하는 14~18 픽셀 구간은 오히려 온도가 감소하였다. 이러한 원인은 열전도도가 극히 낮은 용접 비드 표면의 산화물층에 기인하는 것으로 적외선 온도 측정시 비드 인접한 열영향부의 온도가 비드표면의 산화물층 보다 높게 측정되기 때문이다. 또 다른 이유는 용접부 표면에서 방사되는 적외선을 집속하기 위하여 광학 렌즈를 사용하였는데, 이때 용접비드쪽에 대한 측정정밀도를 향상시키기 위하여 적외선센서를 집속렌즈의 초점거리보다 짧은 위치에 배치하였기 때문이다.

Fig. 10은 레이저출력 1500W, 이송속도 3m/min 및 초점위치 시편표면의 조건에서 BOP 용접한 결과를 나타낸 것이다. 상부의 단면조직사진에서 충분한 입열에 의하여 완전한 용입이 이루어졌다. 하부의 용접부 표면 온도분포 그래프는 Fig. 9의 부분용입의 경우와 유사한 경향을 보인다. 그러나 용접부 온도가 부분용입에 비하여 높았으며 가열폭 또한 부분용입에 비하여 넓었다.

Fig. 11은 Fig. 10과 동일한 용접조건에서 레이저 빔의 초점위치를 시편표면의 위쪽으로 5.5mm 지점에 위치시킨 것이다. 상부의 단면 조직사진에서 시편 표면의 일부만이 용융되었다. 하부의 용접부 표면 온도분포 형상은 Fig. 9의 부분용입의 경우와 유사하였으며, 측정온도가 다소 낮았다. Fig. 1의 용접부 표면온도 모델

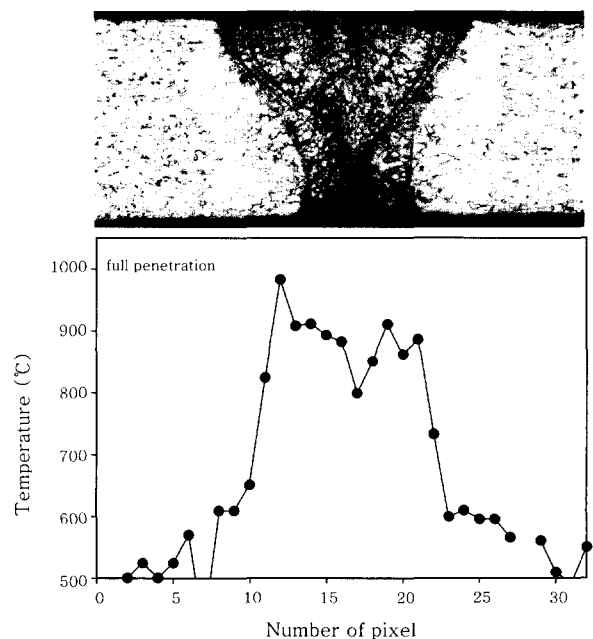


Fig. 10 Relationship between bead shape and surface temperature profile at full penetration

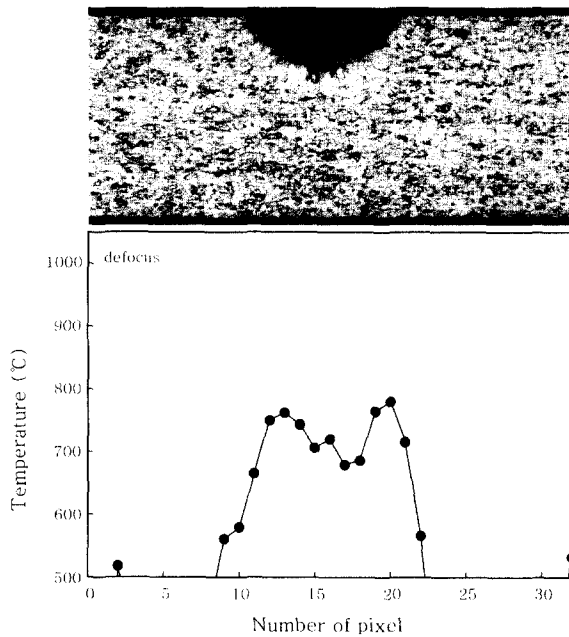


Fig. 11 Relationship between bead shape and surface temperature profile at partial penetration

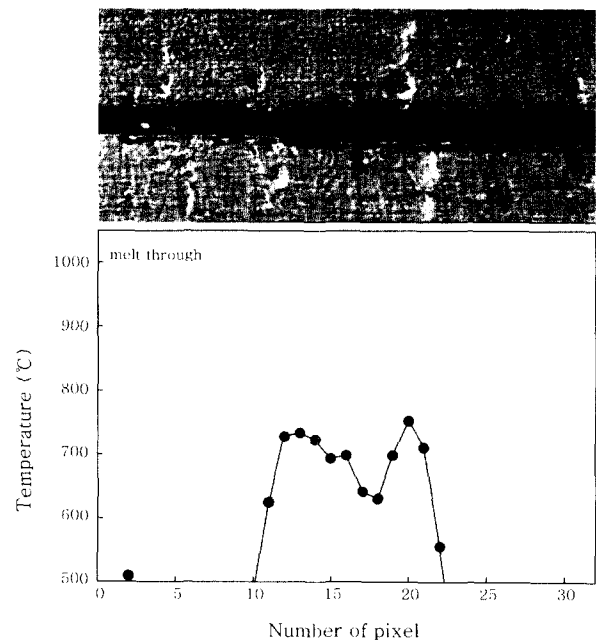


Fig. 12 Relationship between bead shape and surface temperature profile at melt-through

에서 레이저빔의 초점이 어긋나는 경우 최고 가열온도가 낮고 가열폭은 넓을 것으로 예상되었는데, 온도측정 결과는 다소 다른 양상 즉, 가열폭의 변화가 없는 형태를 보였다. 이러한 원인은 적외선 온도측정에서 측정결과와 신뢰도를 고려하여 유효 측정온도의 한계를 500°C 이상으로 한정하였기 때문이며, 500°C 이하의 온도를 정확하게 계측하면 Fig. 1과 유사한 경향을 나타낼 것으로 판단된다.

Fig. 12는 레이저출력 1000W, 이송속도 3.5m/min 및 초점위치 시편표면의 조건에서 맞대기이음부를 용접한 결과를 나타낸 것이다. 상부의 용접부 표면사진은 강판사이의 간격이 벌어져서 용락이 발생한 것을 보여주며, 아래의 그래프는 화살표 지점의 온도를 측정한 것이다. 전체적인 형태는 부분용입의 경우와 유사하였으나, 용융경계부의 온도변화가 급격히 증가하였다. 또한 용접부 중심의 용락으로 인하여 용접부 중심의 온도저하가 부분용입(90°C가량)에 비하여 증가(123°C가량)하였다. Fig. 1의 용접부 표면온도모델과는 다소 다른 경향을 보였는데, 그 이유는 비록 용락에 의하여 용접비드가 형성되지 않는 경우나 용융된 소재강판의 모서리에서 방사된 적외선이 검출되었기 때문이다. 강판사이의 간격이 보다 크게 벌어지는 경우 Fig. 1의 용접부 표면온도모델과 유사한 경향을 보일 것으로 사료된다.

## 5. 결 론

두께 1.0mm 자동차용 냉연강판을 대상으로 용접부

표면온도와 용접부형상의 관련성을 알아보았다. 용접부 표면온도와 용접부 형상은 연관성이 매우 큰 것으로 보여 레이저 용접에서 용접품질관리에 유용하며, 용입깊이를 일정하게 유지하기 위한 제어인자로 활용이 가능할 것으로 판단되었다.

## 참 고 문 헌

1. Miyamoto and K. Mori: Development of in-process monitoring system for laser welding, ICALEO '95 Proceedings, 759-767
2. Maurice Houlot and Enrique Nava-Rdiger: Integration of real time quality control systems in a welding process, ICALEO '95 Proceedings, 563-572
3. Dale U. Chang: Real-Time laser weld quality monitoring system, ICALEO '95 Proceedings, 1128-1137
4. Duley, W.W., and Mao, Y.L.: Effect of surface condition on acoustic emission during welding of aluminium with CO<sub>2</sub> laser radiation, Journal of Physics, D-Applied Physics, **27-7** (1994), 1379-1383
5. P. Abels, S. Kaierle, E.W. Kreutz and R. Proprawe: Failure recognition in tailored blank welding by image processing, ICALEO '98 Proceedings, Section C, 103-112
6. Daniel Wildmann: On-line quality system assures highest production reliability of laser welded blanks, ICALEO '98 Proceedings, Section C, 198-207
7. Ji-Lian Doong, Ching-Shang Wu and Jiun-Ren Hwang: Infrared temperature sensing of laser welding, Int. J. Mach. Tools Manufact. **31-4**(1991),

- 607-616
8. Sang-Kuk Park, Jae-Woong Kim and Ki-Chol Kim: Analysis of heat flow and deformation in laser welding of small gas pressure vessel, *Journal of KWS*, **19-1**(2001), 104-111 (in Korea)
  9. L. Li, D.J. Brookfield and W.M. Steen: Plasma-charge sensor for in-process, non-contact monitoring of the laser welding process, *Meas. Sci. Technol.*, **7** (1996), 615-626
  10. V.V.Semak, J.A. Hopkins, M.H. McCay, T.D. McCay: Weld pool oscillations in laser welding, *ICALEO '95 Proceedings*, 739-748