

레이저 용접부의 적외선 정보를 이용한 품질 예측 기술

이 목 영

Quality Monitoring Techniques Using Thermal Radiation in Laser Welding Process

Mok-Young Lee

1. 서 언

레이저를 이용한 용접은 종래의 아크에 비하여 에너지 집중도가 높기 때문에 철강, 알루미늄합금 등 다양한 재료에 널리 사용되고 있다. 그러나, 레이저의 우수한 용접 수행능력에도 불구하고 대부분의 산업체에서는 적용을 고민하고 있는 실정이다. 대표적인 이유로는 높은 초기 투자비 및 운용비이며, 다른 한편으로는 용접부 품질에 대한 신뢰도 문제이다. 실제로 레이저 용접부는 용입깊이 증가 대비 비드폭의 변화가 적기 때문에 비드 외관상태로부터 용접부 내부의 정보를 유추하기가 쉽지 않다.

용접부 외관 혹은 용접중의 정보로부터 용접부 품질을 예측하기 위한 많은 연구가 시도되었다. 레이저 용접 공정을 감시하기 위한 대상은 플라즈마발광, 적외선 방사, 음향방출 및 비드표면형상 등이다¹⁻⁴⁾. 본 논문에서는 용접부로부터 방사되는 적외선을 이용하여 용접부 품질을 감시하는 기술에 대한 연구현황 및 상업제품에 대하여 조사하였다.

2. 적외선 온도 측정

레이저 에너지를 흡수하여 고온으로 가열된 용접부에서 전자들은 보다 안정한 에너지 준위를 유지하기 위하여 빛을 방출한다. 이때 물체에서 방사하는 에너지는 파장과 온도의 함수이며, 다음 식과 같이 Planck의 방사 법칙을 따르게 된다.

$$W_\lambda = C_1 \epsilon_\lambda [\lambda^5 (\exp(C_2/\lambda T) - 1)]^{-1}$$

여기서 W_λ : spectral radiant intensity
 [W/(cm² · μm)]

C_1 : 34,413 [W · μm⁴/cm²]

C_2 : 14,388 [μm · K]

ϵ_λ : emissivity

λ : wavelength [μm]

T : temperature [K]

흑체의 경우 상기 식에 의하여 빛을 방사($\epsilon_\lambda = 1$) 하지만 대부분의 재료는 이보다 방사율이 낮다. 철강재료의 경우 대기중에서 200 ~ 300°C 이상이 되면 표면에 산화물이 형성된다. 이 산화층은 방사율을 감소시키며 대략 0.8 가량인 것으로 알려졌다. 그림 1에 방사율 0.8일 경우 몇몇 온도에서 파장에 따른 방사에너지의 강도를 나타내었다. 물체의 온도가 증가함에 따라 방사광의 강도는 급격히 증가하며, 임의의 온도에서 방사광의 강도는 특정파장에서 최대치를 나타낸다. 이 분포곡선에서 방사광의 침투치는 물체의 온도에 반비례, 즉 물체의 온도가 증가함에 따라 짧은 파장범위의 빛이 주로 방사된다.

레이저 용접에서 용융지의 온도 및 크기를 계측하고자 하는 경우, 용융지의 온도가 1800K 가량이므로 파장 1-2μm 범위의 적외선을 측정하는 것이 바람직하다. 용접부 주위 혹은 비드 표면의 온도를 측정하고자 하는 경우에는 표면온도가 700-1800K이므로 1-5μm 범위의 적외선을 측정하는 것이 바람직하다.

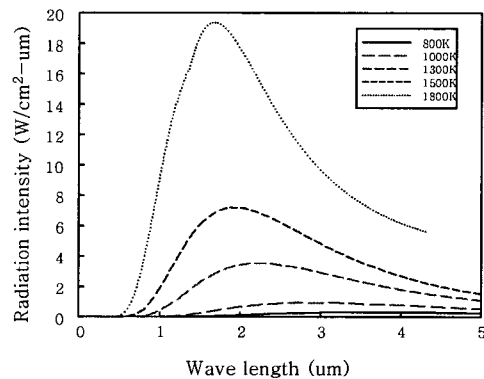


Fig. 1 Spectral radiation intensity of typical steels at $\epsilon=0.8$

용접부에서 방사되는 광량을 측정하기 위해서는 적외선 검출센서가 주로 사용된다. 적외선 센서는 크게 열적 특성을 이용한 열감지센서와 광특성을 이용한 광센서로 구분된다. 열감지센서는 비용이 저렴하고 측정가능한 파장의 범위가 넓은 장점이 있으나, 응답속도가 느리고 광 검출특성이 낮기 때문에 용접부 온도측정에는 거의 사용되지 않는다. 이에 반하여 광센서는 광 검출특성이 우수하고 응답성이 빠르다. 광센서에는 운반체(carrier)의 특성에 따라 진성(intrinsic type)과 불순물형(extrinsic type)으로 분류된다.

표 1에 적외선센서의 종류 및 대표적인 특성을 나타

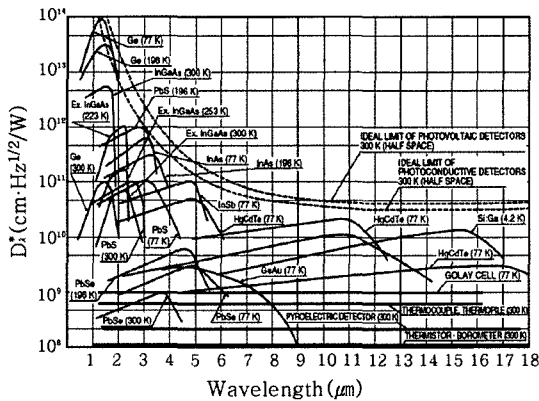


Fig. 2 Spectral response characteristics of various infrared detectors

내었다. 그림 2에는 다양한 적외선센서를 사용 가능한 파장범위 및 검출도(Detectability, D^*)에 따라 나타내었다. 용접부 온도인 700-1800K에서 방출되는 적외선 파장범위의 센서는 PbS, PbSe, Ge, InGaAs 등이 있으나, 낮은 온도에서 작동하는 센서는 별도의 냉각장치를 사용해야 한다.

한편, 레이저 용접에서는 레이저빔에 의한 소재의 증발 혹은 해리에 의하여 레이저 유기 플라즈마가 발생한다. 그림 3에 철강의 레이저용접시 발생하는 플라즈마의 분광특성을 나타내었다. 용접부 온도측정에서는 이러한 플라즈마는 심각한 외란요인으로 작용하므로 이를 차단하여야 한다. 레이저 유기 플라즈마는 광학필터를

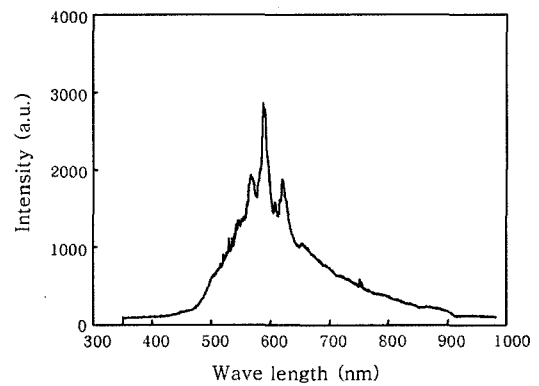


Fig. 3 Intensity profile of laser induced plasma

Table 1 Types of infrared detectors and their characteristics

| Type | | Detector | Spectral response (μm) | Operating temperature (K) | D^* (cm · Hz ^{1/2} /W) | |
|--------------|-------------------------|------------------------------|----------------------------|---------------------------|--|--|
| Thermal type | Thermocouple/Thermopile | | Depends on window material | 300 | $D^*(\lambda, 10, 1) = 6 \times 10^8$ | |
| | Bolometer | | | 300 | $D^*(\lambda, 10, 1) = 1 \times 10^8$ | |
| | Pyroelectric detector | PZT, TGS, LiTaO ₃ | | 300 | $D^*(\lambda, 10, 1) = 2 \times 10^8$ | |
| Quantum type | Photo-conductive type | PbS | 1~3.6 | 300 | $D^*(500, 600, 1) = 1 \times 10^9$ | |
| | | PbSe | 1.5~5.8 | 300 | $D^*(500, 600, 1) = 1 \times 10^9$ | |
| | | InSb | 2~6 | 213 | $D^*(500, 1200, 1) = 2 \times 10^9$ | |
| | | HgCdTe | 2~16 | 77 | $D^*(500, 1000, 1) = 2 \times 10^{10}$ | |
| | Intrinsic type | Photo-voltaic type | Ge | 0.8~1.8 | 300 | $D^*(\lambda_p) = 1 \times 10^{11}$ |
| | | | InGaAs | 0.7~1.7 | 300 | $D^*(\lambda_p) = 5 \times 10^{12}$ |
| | | | Ex. InGaAs | 1.2~2.55 | 253 | $D^*(\lambda_p) = 2 \times 10^{11}$ |
| | | | InAs | 1~3.1 | 77 | $D^*(500, 1200, 1) = 1 \times 10^{10}$ |
| | Extrinsic type | | InSb | 1~5.5 | 77 | $D^*(500, 1200, 1) = 2 \times 10^{10}$ |
| | | | HgCdTe | 2~16 | 77 | $D^*(500, 1000, 1) = 1 \times 10^{10}$ |
| | | | Ge:Au | 1~10 | 77 | $D^*(500, 900, 1) = 1 \times 10^{11}$ |
| | | | Ge:Hg | 2~14 | 4.2 | $D^*(500, 900, 1) = 8 \times 10^9$ |
| | | | Ge:Cu | 2~30 | 4.2 | $D^*(500, 900, 1) = 5 \times 10^9$ |
| | | | Ge:Zn | 2~40 | 4.2 | $D^*(500, 900, 1) = 5 \times 10^9$ |
| | | Si:Ga | 1~17 | 4.2 | $D^*(500, 900, 1) = 5 \times 10^9$ | |
| | | Si:As | 1~23 | 4.2 | $D^*(500, 900, 1) = 5 \times 10^9$ | |

이용하여 차단하고, 플라즈마의 주 파장범위인 700nm 이하의 파장에서는 감응이 작은 센서를 사용해야 한다. 따라서 용접부 온도측정에는 Ge, InGaAs, PbS 등이 적합하다^{5,6)}.

3. 단일 센서를 이용한 공정감시

레이저 용접에서 용접부의 온도는 재료에 흡수된 레이저빔의 에너지 량에 직접 관련이 있으므로 용접품질의 예측에 유용한 인자이다. 단일 센서를 이용하여 특정지점의 용접부 표면온도를 측정하여 용입깊이 혹은 비드폭과 같은 용접부 품질을 예측하기 위한 연구는 여러 연구자들에 의하여 수행되었다. 용접에서 적외선 신호계측을 이용한 공정감시에 대한 연구는 Ramsey⁽⁷⁾에 의하여 시도되었다. 그는 알루미늄합금의 GTA 용접에서 PbS 센서를 이용하여 아크 중심으로부터 7-12mm 후방의 표면온도를 측정하여 용접부 품질을 예측하고자 하였다(그림 4). Boo⁽⁸⁾는 GMA 용접에서 적외선 온도 측정에 의한 공정감시를 위한 최적 측정위치 선정에 관한 연구를 수행하였다. 그는 용접공정의 열전달해석을 통하여 최적 온도 측정위치를 선정하고 실험을 통하여 검증하였다. Doong⁽⁹⁾은 레이저용접에서 저온(0.9-1.9 μ m, 250-850 $^{\circ}$ C) 및 고온(0.75-1.05 μ m, 600-2,000 $^{\circ}$ C) 영역의 온도를 계측하기 위한 2개의 Si 적외선 센서를 이용하여 용융지 근처의 온도를 측정하여 비드폭을 예측하였다. 용입부족과 같은 결함은 저온영역의 온도와 관련이 깊었으며, 비드폭은 용융지 온도와 직접관련이 있는 것으로 보고하였다.

4. 1차원 배열센서를 이용한 공정감시

단일 센서를 이용하여 용접부 표면에서 방사되는 적외선을 측정하는 방법은 측정이 간단하고 비용이 저렴하다는 장점이 있으나, 특정 지점의 정보만을 얻을 수 있으므로 용접부 품질의 예측이 제한적이다. 가령 동일한 입열량으로 용접하는 경우, 열전달의 차이에 의해 용접부에서 방사되는 적외선 량에 차이가 발생할 수 있다. 또한 이 적외선 량은 용접부로부터 거리에 비례하

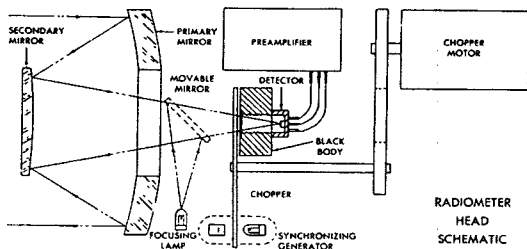


Fig. 4 Schematic drawing of radiometer head

여 로그함수적으로 감소하므로 특정지점에서 측정하는 경우 측정가능한 입열량의 영역이 협소하다. 이러한 단점을 극복하기 위한 방법이 복수개의 단일센서를 배열한 센서를 사용하는 방법이다. 배열센서에는 단일 센서를 선형으로 배열한 1차원 배열센서 및 행렬형태로 배열한 2차원 배열센서가 있다. 배열센서를 사용하는 경우

- 소재의 두께에 따른 제약이 적다.
- 이음부 형상에 대한 제약이 적다.
- 측정가능한 입열량 영역이 매우 넓다.
- 잡음의 영향이 적다.

는 장점이 있다. 단점으로는 단일센서에 비하여 가격이 높고, 사용이 까다롭다는 것이다. 1차원 배열센서는 2차원 배열센서에 비하여 비용이 저렴하고, 측정 가능한 광량의 범위가 넓다.

1차원 배열센서를 사용하여 용접부 온도분포를 측정하기 위해서는 플라즈마에 의한 외란을 방지하여야 하며, 우수한 측정정밀도를 유지하여야 한다. 그림 5에 레이저 용접에서 1차원 배열센서를 이용한 온도측정장치의 예를 나타내었다. 폭이 좁고 길이가 긴 반사 거울을 사용하여 측정지점 이외에서 방출되는 적외선을 차단하였으며, 레이저 헤드와 물리적 간섭을 배제하여 용융지 근처의 온도를 측정할 수 있도록 하였다. 또한 슬릿과 광학필터를 사용하여 외란을 방지하였다. 그림 6에 자동차용 강판의 CO₂ 레이저 용접에서 1차원 적외

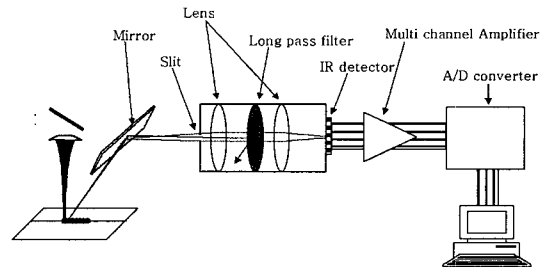


Fig. 5 Sketch of the surface temperature measurement system

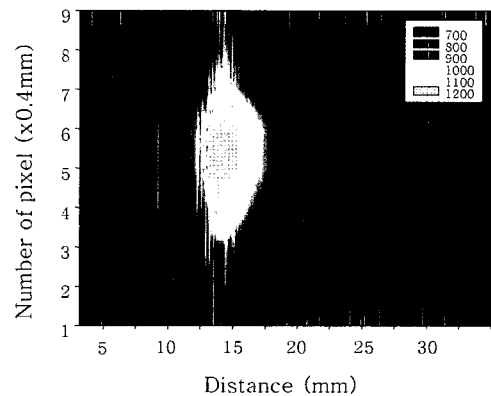


Fig. 6 Surface temperature profile

선배열센서를 이용하여 용접선 길이방향으로 스캐닝한 경우, 용융지 및 용접부의 온도분포 측정결과를 나타내었다. 키흔 부근에서 플라즈마에 의한 외란이 발생하였으나, 용융지 후방에서는 외란이 적은 비교적 안정된 온도 측정이 가능하였다. 그림 7은 용융지 후방 용접부 표면의 최대온도와 용입깊이의 관계를 나타낸 것이다. 1차원 배열센서를 이용한 공정감시기술은 레이저 용접에서 유용한 것으로 판단된다¹⁰⁻¹²⁾.

5. 2차원 CCD를 이용한 공정 감시

적외선 영역의 감응특성을 갖는 2차원 배열센서는 가격이 매우 고가이지만 용접부의 2차원 정보를 얻을 수 있으므로 많은 연구자들에 의하여 연구가 수행되었다. 용접부 2차원 영상을 이용하여 용접공정을 예측하기 위한 연구는 McCullough & Green⁽¹³⁾에 의하여 처음 시도되었다. Lukens⁽¹⁴⁾는 HY-130 강의 GTA 용접에서 InSb 적외선 카메라를 이용하여 냉각속도를 측정하였다. Chen⁽¹⁵⁾은 파장영역 8-12 μ m의 감응특성을 갖는 HgCdTe형 적외선 카메라를 이용하여 GMA 용접 공정감시에 관한 연구를 수행하였다.

한편 적외선 카메라에 비하여 가격이 상대적으로 저렴한 CCD를 이용하여 용접공정을 감시하기 위한 연구가 시도되었다. Denney⁽¹⁶⁾는 파장 337nm의 질소레이저 조명과 CCD 카메라를 동기화시켜 용융지 거동을 관찰하였다. 이 장치를 이용하여 두께 6.35mm의 HY-80강에 Stellite 6 레이저 클래딩 공정에서 내부 결함을 예측하였다. Mohanty⁽¹⁷⁾는 파장 514nm의 아르곤 이온 레이저 조명과 고속카메라를 이용하여 HSLA-100 강재의 레이저 용접공정에 대한 연구를 수행하였다. 이 연구에서 레이저 용접공정변수의 조건에 따른 키흔의 평균열림시간을 측정하여 레이저 용접 공정을 해석하였다.

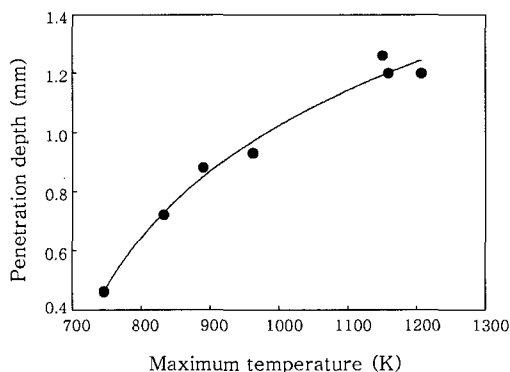


Fig. 7 Relationship between maximum temperature and penetration depth

6. 결 론

레이저 용접에서 용접부 주위의 온도와 용접품질의 관련성이 크다. 따라서 적외선 센서를 이용한 용접부 주위의 온도측정은 레이저 용접공정감시를 위한 유용한 수단이다. 특히 이 기술은 실시간 및 비접촉 측정이 가능하므로 레이저 용접공정의 자동화에 유용하다. 가격이 저렴하고 성능이 우수한 적외선 센서의 개발 추세에 따라 향후 산업현장 적용이 증가할 것으로 전망된다.

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 CO₂ laser radiation, Journal of Physics, D-Applied Physics, **27-7** (1994), 1379-1383
5. 2004 Hamamatsu Catalog, Infrared detector
6. 2004 PerkinElmer Catalog, Sensor
7. P.W.Ramsey, J.J.Chyle, J.N.Kuhr, P.S.Myers, M.Weiss & W.Groth : Infrared Temperature Sensing Systems for Automatic Fusion Welding, Welding Journal, **8** (1963) 337-346s
8. K.S.Boo & H.S.Cho : Determination of a Temperature Sensor Location for Monitoring Weld Pool Sizes in GMAW, Welding Journal, **11** (1994) 265-271s
9. 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
10. M.Y.Lee & J.W.Kim : A study of the Infrared Temperature Sensing System for Surface Temperature Measurement in Laser Welding(I): Surface temperature profile according to bead shape, Korean Welding Journal, **20-1**, 62-68 (2002), (in Korean)
11. M.Y.Lee & J.W.Kim : A study of the Infrared Temperature Sensing System for Surface Temperature Measurement in Laser Welding(II): Effect of the system parameter on infrared temperature measurement, Korean Welding Journal, **20-1**, 69-75 (2002), (in Korean)
12. M.Y.Lee & J.W.Kim : ON-LINE PENETRATION DEPTH MEASUREMENT SYSTEM USING INFRARED TEMPERATURE SENSING ON CO₂ LASER WELDING, KEY Engineering materials, **Vol.270-273**, (2004) 2308-2314
13. L.McCullough & D.Green : Electrothermal Nondestructive Testing of Metal Structures, Materials Evaluation, **4** (1972) 87-91

14. W.Lukens & R.Morris : Infrared Temperature Sensing of Cooling Rates for Arc Welding Control, *Welding Journal*, 1 (1982) 27-33s
15. W.Chen & B.A.Chin : Monitoring Joint Penetration Using Infrared Sensing Techniques, *Welding Journal*, 4 (1990) 181-185s
16. P.E.Denney & E.A.Metzbower : Synchronized Laser-Video Camera System Study of High Power Laser Material Interactions, *ICALEO*, 1991 84-93
17. P.S.Monhanty, T.Asghari & J.Mazumder : Experimental Study on Keyhole and Melt Pool Dynamics in Laser Welding, *ICALEO section G*, 1997 200-209



- 이목영 (李穆泳)
- 1965년생
- 포항산업과학연구원 용접센터
- 하이브리드용접, 레이저용접, 아크용접
- e-mail: accelee@rist.re.kr