한국정밀공학회지 제16권 제1호 (1999년 1월)
Journal of the Korean Society of Precision Engineering Vol. 16, No. 1, January 1999.

적외선 감지 센서를 이용한 점 용접부의 검사

임대철*, 박인태**, 강형식**, 권대갑*

Inspection of the spot welding using IR sensor

Dae-Cheol Lim*, In-Tae Park**, Hyoung-Shik Kang**and Dae-Gab Gweon*

ABSTRACT

This paper suggests a monitoring method for the pulsed laser spot welding of the thin metal sheets using a point IR(InfraRed) sensor. A new criterion was introduced and the experimental results guaranteed the efficiency. The ideal radiation feature was derived from the mathematical model and was simulated. The radiation feature is robust to withstand the change of measuring condition and can be used to detect the absorbed laser energy. In an experiment, the radiation feature was examined for the different laser energy. The pulse width and the laser power was variated and the radiation feature was examined. In the other experiment, the relationship between the weld strength and radiation feature was examined. Artificial Neural Network(ANN) was employed to find out the relationship. The correlation coefficient between the real strength and the estimated strength is high as 0.94 and the mean square error is low as 0.64 kgf learned parts. Another group of the welds was used to appraise the learning efficiency. The correlation coefficient between the measured and the estimated weld strength is high as 0.91.

Key Words : Infrared sensor(적외선 센서), Spot welding(점 용접), Nondestructive inspection(비파괴 검사), Artificial Neural Network,ANN(인공신경망), Nd:YAG laser(Nd:YAG 레이저)

기호설명

h_s = Specimen thickness

t = Time

$C_{A,B}$ = Correlation coefficient between set $\{A\}$ and set $\{B\}$

E = Incident laser energy to weldment. $[J]$.

Q = Incident laser energy per unit thickness of specimen as a line source. $Q \equiv E/h_s$ $[J/m]$

$Q^* = Q/(\rho c_p)$

ρ : Density $[kg/m^3]$

c_p: Specific Heat $[J/(kg\,^oK)]$

P = Thermal radiation from a weld surface.

P_o = Thermal radiation before laser shot.

P_s = Relative radiation power, $P_s = P - P_o$

S_M = Measured weld strength.

$S_{N.N}$ = Estimated weld strength, Output of ANN

* 한국과학기술원 기계공학과
** LG 전자 생산 기술 센터

T = Temperature of weld surface. [$^{\circ}K$]
T_{∞} = Room temperature [$^{\circ}K$]
α = Thermal diffusivity [m^2/s]
η = Absorbed energy per incident laser energy
σ = Stefan-Boltzmann constant
ξ = Variable. *Def.* $\xi \equiv \ln t \quad (t>0)$
Λ = Logarithmic value of P_s, $\Lambda = \ln(P_s)$
$\dot{\Lambda}$ = Derivative of Λ. Radiation feature.
ξ_m =Shifting of radiation feature along ξ-axis.

1. 서론

용접기에서 발생되는 레이저의 파워는 주로 내부의 기기에 의해 정밀하게 제어되지만, 용접물 표면에서 흡수되는 에너지량은 그보다 많은 변수에 의해 영향을 받는다. 레이저가 방출되는 창의 오염은 작업이 반복되면서 가중되고, 용접물의 표면은 항상 일정한 거칠기를 유지하기 어렵다. 몇몇 연구자들은 이러한 흡수 에너지의 변화를 관측하기 위한 방법들은 제안하고 있다.[1,2] 또 다른 연구결과들로서 레이저의 초점거리의 변화를 간파하는 방법에 관한 연구[3,4]등이 있다.

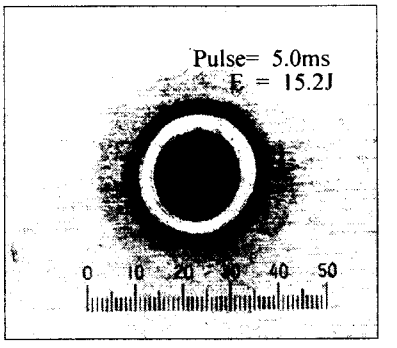
점 용접은 다양한 제조 상품들에서 부품 결합의 방법으로 사용되고 있으므로, 실 시간 내에 비 파괴적인 방법으로 점 용접 품질을 검사하는 것은 유용한 가치를 지닌다. 열 방사는 표면 방사율과 표면 온도의 함수이다. 일반적으로 표면의 온도를 측정하여 용접 품질을 예측하려는 시도는 많이 이뤄지고 있으나, 방사량의 측정치는 다양한 조건에 따라 매우 심각한 영향을 받는다.[3,4,5,6,7] 따라서 센서가 보정된 이후, 새로운 측정 조건에 대해 보정된 값을 적용하는데는 많은 어려움이 따른다. 몇몇 연구자들은 이러한 문제를 극복하기 위한 방법을 제시하고 있다. Miyamoto[3,4]는 표면의 열 방사를 각 파장별로 관측하여 파장별 상대값로서 온도를 측정하였다. Ohji[5]는 자외선 센서를 이용하여 온도를 측정하여 온도 측정의 신뢰성을 높이는 연구결과를 제시하고 있다.

그럼에도 불구하고 측정 조건을 일정하게 유지하는데는 많은 어려움이 있고 검사 대상물이 많아지는 경우에 센서의 보정 및 자세 조정은 부담이 된다. 본 연구에 앞서 몇몇 연구에서 센서의 자세와 반복적인 작업 시에 발생하는 오염의 문제를 극복하는 감시 방법을 제시하였다.[6,7] 제안되었던 감시 방법은 용접물 표면에서 특정 방향으로 방출되는 열량을 한 개의 점 센서로 시준(collimate)하여 측정하고, 조건에 따라 변화되는 측정치를 대수변환을 통해 일정한 방사 파워 패턴으로 인식할 수 있었다. 제안되었던 방법은 다양한 측정 조건의 변화에 둔감하게 감시 할 수 있는 장점이 있다.

본 논문에서는 이러한 측정 방법을 이용하여 점 용접부의 품질 변화를 예측할 수 있는 기준을 제안하고 그 기준의 유용성을 보였다. 본문에서는 이론적인 모델로부터 방사 특징이 도출되었고, 다양한 용접 조건에 대해 방사 특징의 변화가 조사되었다.

2. 열 방사 특징의 수학적 모델링

본 연구에서는 레이저가 가해진 이후에 시편 표면에서 발생하는 열적 변화를 이용하여 감시하는 방법을 모색하고 있다. 펄스식 레이저 용접은 수 ms의 단 시간 내에 레이저 빔과 재료사이에 복잡한 상호작용이 발생하므로 이러한 상호 작용을 고려한 모의 실험은 매우 어렵다. Fig. 1은 전형적인 용접점의 표면을 보이고 있다.



(Stereoscope x100)

Fig. 1 Typical weld surface

본 장에서는 열 전달식에 근간한 열 방사 모델로부터 방사특징(radiation feature)을 도출하였다. 재료의 물성치와 T_{∞}은 상수로 가정한다.

극히 얇고 넓은 금속에 순간 선 열원

(instantaneous line source)이 가해질 때, 금속 표면의 온도는 다음의 식 (1)과 같이 2차원 온도 분포식으로 나타낼 수 있다. 식 (1)에서 $q[J/m]$는 모재의 단위 두께당 가해지는 선 열량, ρ $[kg/m^3]$는 모재의 밀도 그리고 c_p $[J/(kg^oK)]$는 모재의 비열 (specific heat)이다.

$$T(x,y,t)-T_\infty=\frac{q/\rho c_p}{4\pi\alpha t}\,e^{-(x^2+y^2)/4\alpha t} \tag{1}$$

박판상에 레이저가 가해진 이후, 표면의 온도 분포는 식 (1)의 컨볼루션(convolution)합으로 나타난다. 그럼에도 불구하고, 입사 면적이 극히 작고 가열 시간이 짧은 경우의 표면 온도는 선 열원 $Q[J/m]$에 대해 식 (2)와 같이 근사할 수 있다.

$$T(r,t)-T_\infty\approx\frac{\eta Q^*}{4\pi\alpha t}\,e^{-r^2/4\alpha t} \tag{2}$$

식에서 $Q^*\equiv Q/(\rho c_p)$ 그리고 η는 모재의 레이저 흡수율이다. 선 열량 $Q[J/m]$는 레이저 입사 에너지 $E[J]$를 모재의 두께 $h_s[m]$로 나눈 값이다. 흡수율 η가 1인 경우에 한하여, 식 (2)의 우항을 무한 영역에 대해 적분한 결과는 좌항의 그것과 같다.

용접물의 열 방사 파워 $P(t)$는 방사강도의 표면에 대한 적분의 식으로 나타난다. 원형의 제한된 범위 R내에서 측정된 열 방사 파워 $P(t)$는 방사율 (thermal emissivity)이 1인 경우에 대해 Stefan-Boltzmann의 법칙에 의해 다음의 식 (3)와 같이 표현된다. 식에서 σ는 Stefan-Boltzmann 상수이다.

$$P(t)\approx 2\pi\sigma\int_0^R\left[\Phi(\eta Q^*,r,t)+T_\infty\right]^4\cdot r\,dr \tag{3}$$

식에서 $\Phi(\eta Q^*,r,t)=\frac{\eta Q^*}{4\pi\alpha t}\,e^{-r^2/4\alpha t}$ 이다.

α의 값은 $\sim 10^{-6}$ 정도로 매우 작은 이유로, $\Phi^k(\eta Q^*,r,t)$은 변수 r의 증가에 따라 매우 급격하게 감소한다. 따라서 적분구간 R의 값이 상대적으로 큰 경우에 대한 $\Phi^k(\eta Q^*,r,t)$의 적분 결과는 무한 영역에서의 적분결과로 근사 가능하다.[6,7]

$$P(t)\approx\sigma\left[c_0+\sum_{n=1}^{4}\left\{c_n\left(\frac{\eta Q^*}{4\pi\alpha t}\right)^n\frac{4\pi\alpha t}{n}\right\}\right] \tag{4}$$

식 에 서

$c_0=\pi T_\infty^4R^2,\ c_1=4T_\infty^3,\ c_2=6T_\infty^2,\ c_3=4T_\infty,\ c_4=1$

이다.

레이저에 의한 점 용접은 매우 빠르게 진행되므로 한 개의 용접물에 대해서 측정 조건은 일정하다고 볼 수 있다. 검출 가능한 열 방사 파워, $P(t)$는 각 용접물에 대해 식 (5)로 기술할 수 있다.

$$P(t)\approx K_m\left[c_0+H(\eta Q^*,t)\right] \tag{5}$$

식에서 $H(\eta Q^*,t)=4\pi\alpha\sum_{n=1}^{4}\left\{c_n\left(\frac{\eta Q^*}{4\pi\alpha}\right)^n\frac{1}{nt^{n-1}}\right\}$

이다.

K_m은 m번째 펄스가 발생할 때의 측정조건에 따라 결정되는 상수이다. 측정 조건의 변화는 센서로 유입되는 열 방사 파워를 변화시키므로 특징 (feature)은 열 방사 량과 무관하여야 한다.

이론적으로 방사특징은 식 (5)에서 K_m과 R에 무관해야한다. 레이저가 가해지기 전에 측정한 열 방사 파워를 P_o라 하면 $P_o=K_mc_o$의 관계를 알 수 있다. 상대적 열 방사 파워 $P_s(t)$는 식 (5)의 좌항과 우항에서 P_o를 공제한 후 얻을 수 있다. $P_s(t)$는 식 (6)과 같이 표현된다.

$$P_s(t)\approx K_mH(\eta Q^*,t) \tag{6}$$

식에서 $H(\eta Q^*,t)=\eta Q^*\sum_{n=1}^{4}\left\{\frac{c_n}{n}\left(\frac{\eta Q^*}{4\pi\alpha t}\right)^{n-1}\right\}$

이다.

식의 전개를 잠시 유보하고, 새로운 변수 ξ를 다음과 같이 정의한다.

$$\xi\equiv\ln t\quad(t>0) \tag{7}$$

정의된 새로운 변수 ξ를 이용하여 P_s는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$P_s(\xi) \approx K_m H(\eta Q^*, \xi) \tag{8}$$

식에서 $H(\eta Q^*, \xi) = \eta Q^* \sum_{n=1}^{4} \left[\frac{c_n}{n} \left\{ \frac{\eta Q^*}{4\pi\alpha \exp(\xi)} \right\}^{n-1} \right]$

이다.

P_s는 R과 무관하게 기술되므로 다음으로 비례 상수 K_m에 무관한 값을 취할 수 있는 방법이 필요하다. 곱으로 표현된 식 (8)은 대수변환을 이용하여 덧셈으로 표현되고, 그 도함수는 상수값이 제거되어 나타난다.

P_s의 대수를 취한 값을 Λ로 표기하고 그 미분치를 $\dot{\Lambda}$로 표기한다. $\dot{\Lambda}$는 식 (9)에 보이고 있다. 이후로 $\dot{\Lambda}$를 방사 특징이라 부른다.

$$\dot{\Lambda}(\xi) \equiv \frac{1}{P_s(\xi)} \frac{\partial P_s(\xi)}{\partial \xi} \approx \frac{1}{H(\eta Q^*, \xi)} \frac{\partial H(\eta Q^*, \xi)}{\partial \xi} \tag{9}$$

식에서

$$H(\eta Q^*, \xi) = \eta Q^* \sum_{m=1}^{4} \left\{ \frac{c_m}{m} \left(\frac{\eta Q^* e^{-\xi}}{4\pi\alpha} \right)^{m-1} \right\}$$

$$\frac{\partial H(\eta Q^*, \xi)}{\partial \xi} = -\eta Q^* \sum_{m=2}^{4} \left\{ c_m \frac{m-1}{m} \left(\frac{\eta Q^* e^{-\xi}}{4\pi\alpha} \right)^{m-1} \right\}$$

이다.

방사 특징 $\dot{\Lambda}(\xi)$은 대수적 방사 파워의 변수 ξ에 대한 미분치이다. $\dot{\Lambda}(\xi)$는 무 차원이므로 방사 파워 량에 무관하고 또한 흡수 열량 ηQ^*에 대한 함수이다. 방사 특징의 중요한 성질은 다음과 같다. 흡수된 열량 ηQ^*이 변화하면 방사 특징 $\dot{\Lambda}(\xi)$은 ξ 축을 따라서 이동하고 같은 식으로 ξ축 상에서 $\dot{\Lambda}$가 이동한 량을 측정하면 흡수된 에너지의 상대적 변화를 알 수 있다. Fig. 2는 입사 에너지 E에 따라 변화되는 $\dot{\Lambda}(\xi)$ 의 모의 실험 결과를 보이고 있다. 흡수율 η는 1.0으로 고정하였고, 모재의 두께 h_s는 0.0001 [m]로 지정하였다. 모재에 가해지는 선 열량 Q는 입사에너지 E를 모재의 두께로 나눈 값. E/h_s 이다. 부록1에는 $\dot{\Lambda}$의 ξ축 상에서의 이동량과 흡수 에너지량의 관계를 살피고 있다. 이후로 이동량은 ξ_m으로 표기한다.

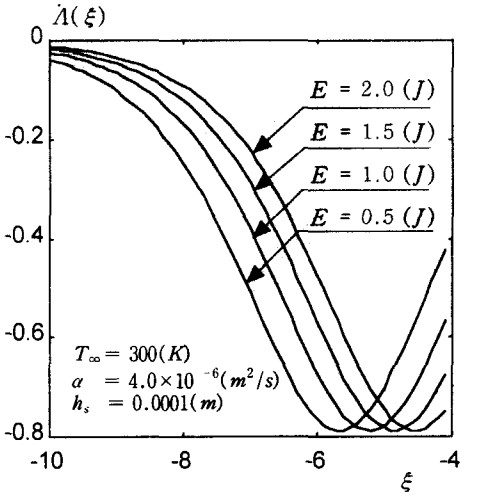


Fig. 2 Simulation results of radiation feature, $\dot{\Lambda}(\xi)$

3. 실험 및 고찰

3.1 장치 구성 및 실험방법

실험을 위하여 Nd:YAG 레이저가 사용되었다. 시편은 스테인레스강을 이용하였고, 두께 h_s는 200 μm 이다. Fig. 3은 실험 장치의 구성을 보이고 있다.

용접부를 포함하여 상대적으로 넓은 재료의 표면에서 방출되는 광을 일정한 각도로 시준하여 좁은 각도내로 유입되는 적외선을 검출한다. 재료의 표면에서 반사되어 유입되는 레이저의 경우, 시준된 광이 광학 필터를 통과하며 제거된다. 레이저의 파장부를 제외한 적외선 파장의 광이 검출 머리를 통과하면서 광섬유로 유입되고, 광섬유는 적외선 센서부와 연결되어 있다.센서에서 전기적 신호로 바뀐 시그날은 고속 A/D 컨버터를 이용하여 디지털화 한다.

레이저 시스템은 일반적으로 고출력으로 시스템에 근처에 센서가 놓이면 높은 파워의 전기적인 외란이 신호에 혼입되므로, 광섬유를 통해 멀리 떨어져 있는 적외선 센서로 광원을 이동하여 측정하는 방법은 외란의 영향을 줄일 수 있는 좋은 방법 중 하나이다.

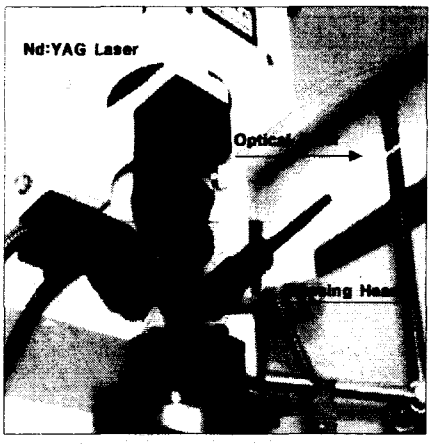


Fig. 3 Experimental setup

3.2 실험적 방사특징

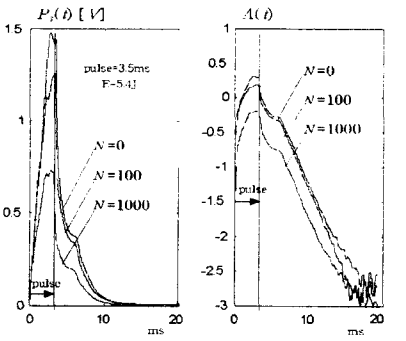
실제 데이터는 일정 시간 간격으로 획득되게 되므로 직접적인 방법으로 방사 특징 $\dot{\Lambda}(\xi)$ 를 구하기는 어렵다.

그럼에도 불구하고 간단한 수학적 변환을 이용하면 식 (9)은 다음과 같이 식 (10)으로 표현될 수 있다. 일반적인 경우에 대한 변환의 방법이 부록2 에 제시되고 있다.

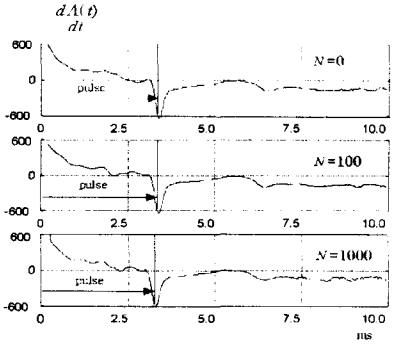
$$\dot{\Lambda}(\xi) \equiv \left[t \frac{d\Lambda(t)}{dt} \right]_{t = \exp(\xi)} \quad (\text{for } t>0) \qquad (10)$$

방사 파워는 레이저가 가해지기 직전, 도중 그리고 레이저가 가해진 이후의 짧은 시간동안 측정된다.

방사 특징의 유도 과정은 다음과 같이 쓸 수 있다. 레이저가 가해지기 시작한 시점부터 상대적 방사 파워 $P_s(t)$를 이용하여 대수적 방사 파워, $\Lambda(t)$를 얻는다. 다음으로 $\Lambda(t)$는 미분하여 시간에 대한 미분치, $d\Lambda(t)/dt$를 얻는다. 방사 특징은 레이저가 가해진 이후의 시간에 대해 유효하므로 레이저가 가해진 직후의 시간을 원점으로 하고 식 (10)의 관계를 이용하여 방사 특징을 계산한다. Fig. 4는 동일한 용접 조건에서 반복적으로 측정된 방사 파워와 그 변환 과정의 일부를 보이고 있다.



a. Radiation $P_s(t)$ and Logarithmic radiation $\Lambda(t)$



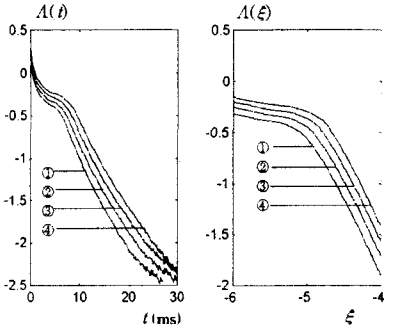
b. Derivative of logarithmic radiation

Fig. 4 Experimental results for contamination of sensing window.

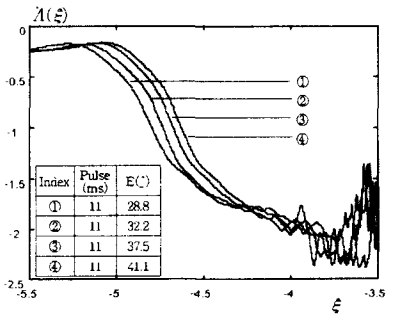
일반적으로, 레이저 점 용접은 짧은 주기로 반복되는 이유로 측정 조건의 변화를 매시간 조정하거나 보상하기에 부적합하다. 센서가 용접기에 고정된 경우에 검사에 가장 심각한 영향을 끼치는 측정 조건은 반복 작업시에 발생하는 플룸(plume)에 의한 검출부 창의 오염이다. 각 실험 결과는 청정한 상태로 유지한 경우(N=0), 100회의 용접 이후 측정한 결과(N=100) 그리고 점 용접을 1000회 반복한 이후에 측정한 결과(N=1000) 이다. Fig. 4a는 레이저가 가해지기 시작한 시점부터 측정된 방사 파워량을 보이고 있고, Fig. 4b는 대수적 방사 파워의 시간에 대한 미분치 $d\Lambda(t)/dt$를 보이고 있다. 방사 특징은 레이저가 가해진 직후의 시간을 원점으로 하여 $d\Lambda(t)/dt$를 변형한 결과이다. Fig. 4b에서 각 $d\Lambda(t)/dt$의 서로 다른 방사 파워에 대한 상관 계수(correlation coefficient)가 0.98 이상으로 나타나고 있으므로 방사 특징의 파워에 대한

영향이 거의 없음을 알 수 있다.

다음으로 용접 조건의 변화에 따른 방사 특징의 변화를 살펴볼 필요가 있다. 편의상 이후의 모든 시그날은 레이저가 가해진 직후를 원점으로 하여 표기한다. Fig. 5는 레이저 파워 밀도에 따라 입사 에너지량이 변할 때에 발생하는 방사 특징의 변화를 보이고 있다.



a. Radiation after the laser shot

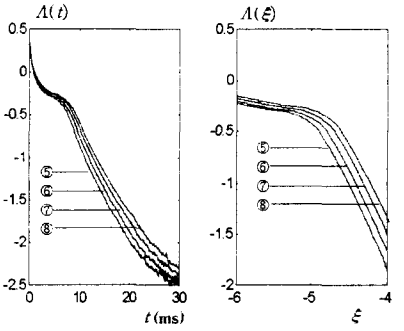


b. Radiation feature

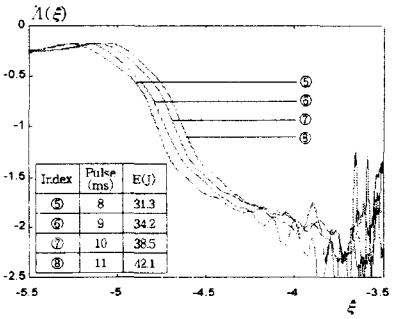
Fig. 5 Experimental results for the change of laser power

Fig. 5a는 레이저가 가해진 직후부터 발생하는 방사 파워의 대수치를 시간, t 축과 시간 축에 대해 대수 변환한 변수, ξ 축상에서 살펴보고 있다. Fig. 5b는 동일한 실험 결과에 대한 방사 특징의 변화를 살피고 있다. 실제적인 방사 특징은 이상적인 것과 다소 차이가 있으나, 레이저 입사파워가 증가하면서 ξ축을 따라 이동하는 방사 특징의 중요 성질을 살필 수 있다.

유사한 실험으로서 레이저의 펄스 폭이 변화할 때에 방사 특징의 변화가 조사되었다. Fig. 6 실험 결과를 보이고 있다. 앞선 실험의 결과와 마찬가지로, 펄스 폭이 증가하면서 방사 특징이 ξ축의 우측으로 이동하는 결과를 살필 수 있다. 방사 특징은 흡수된 에너지의 함수로 표현되고 흡수 에너지량의 상대적 변화는 방사 특징의 ξ축 상의 이동으로부터 예측할 수 있다.



a. Radiation after the laser shot



b. Radiation feature

Fig. 6 Experimental results for the change of pulse width.

3.3 방사 특징의 응용 및 신경망

3.2절의 실험에서 방사 특징 이동량은 흡수된 에너지량과 밀접한 관련을 맺고 있음이 확실하다. 그럼에도 불구하고, 흡수된 에너지량을 직접 측정하여 그 결과를 증명하는 작업은 그다지 쉬운 일이 아니다. 따라서 간접적인 방법을 이용하여 그들의 관계를 살펴 볼 필요가 있다. 흡수 에너지량은 용융지(Fusion Zone)의 크기와 밀접한 관련을 맺고 있다. 용융지의 크기는 응고 후 용접부 면적과 직

접적인 관련을 맺고 있으며 같은 식으로 용접부의 면적 변화는 용접 강도를 결정한다.

마지막 실험은 용접 강도와 방사 특징의 변화 관계를 정량적으로 살펴보았다. 제품을 제작할 때, 부품 접합부의 용접 강도가 점진적으로 혹은 급격하게 하강하는 경우에는 이후 제조 공정상의 심각한 불량을 야기하는 이유로 용접 강도는 관리를 요하는 용접 품질중 하나이다.

용접 강도와 방사특징의 상관 관계가 높다는 것을 인지하고 있지만 일반적인 함수 관계를 도출하기 힘들다. 용접 강도와 방사특징의 상관관계는 일반적으로 비선형이고, 그 상관 관계를 알아내기 위하여 인공 신경망(Artificial Neural Network)이 사용되었다.

신경망의 입력은 방사 특징의 ξ축상의 이동량을 채용하였다. 방사 특징의 이동량은 상대적인 값이므로 다양한 용접 조건 중에서 한개를 선정하여 기준 방사 특징 $\Lambda_0(\xi)$을 정하였다. 이후로 기준 방사 특징은 $\Lambda_0(\xi)$로 표기 한다. 이상적인 경우, 임의의 방사 특징 $\Lambda(\xi)$은 기준 방사 특징 $\Lambda_0(\xi)$을 이용하여 아래의 식(11) 처럼 나타낼 수 있다.

$$\Lambda(\xi) = \Lambda_0(\xi - \xi_m) \tag{11}$$

식 (11)에서 ξ_m은 두개의 방사 특징간에 결정되는 상수로서 방사 특징의 이동량(shifting)이다.수치적인 방법으로 방사 특징의 이동량을 결정하기 위하여 방사 특징간의 상관 계수를 이용하였다. 기준 방사 특징을 ξ 축상에서 이동하면서 새로이 측정된 방사 특징과의 상관 계수가 1에 가장 가까운 경우를 이동량으로 선택하였다.

신경망의 학습을 위하여 16개의 실험 조건으로부터 320 개의 용접점에 대한 방사 특징과 용접 강도가 조사되었다. Table 1에는 학습을 위해 획득된 용접물의 용접 조건을 보이고 있다.

신경망은 일반적인 두개의 은익층을 갖는 다층 퍼셉트론을 이용하여 구성하였다. 각 은익층은 8개의 뉴론들을 지니고 있으며, 학습 도중 가지치기(weight pruning) 기법을 이용하여 최적화 하였다. 학습된 결과가 Fig. 7에서 보이고 있다. 학습에 사용된 용접부에 대한 측정 강도 S_M와 예측강도 $S_{N.N}$의 상관계수는 0.94로 매우 높게 나타나고 있고, 평균적인 예측오차는 0.64 kgf로 낮다.

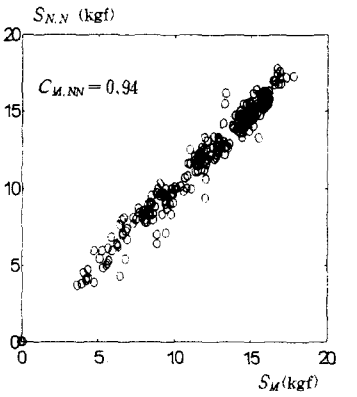


Fig. 7 Correlation between the measured, $\{S_M\}$ and the estimated strength, $\{S_{N.N}\}$

신경망 학습의 결과는 학습되지 않은 데이터를 이용하여 검증의 과정을 거치는 것이 일반적이다. 검증을 위하여 외부적으로 조절된 8개의 용접 조건에서 얻어진 160개의 데이터를 사용하였다. Table 2에는 검증시에 사용된 용접물의 용접조건을 보이고 있다. Fig. 8은 학습되지 않은 용접물에 대해 측정된 강도와 예측된 강도를 개별적으로 보이고 있다.

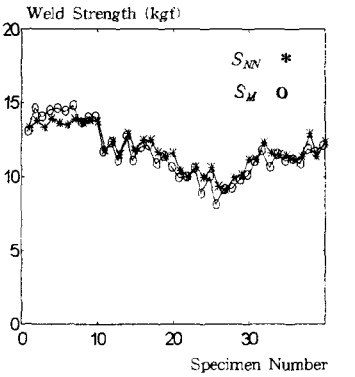


Fig. 8 Estimation of the weld strength for the unstudied welds.

학습되지 않은 시편에 대한 예측 강도, $S_{N.N}$과 실 측정 강도 S_M의 상관계수는 0.91로서 높은 편이고 평균적인 예측 오차는 0.75 kgf로 상대적으로 낮다. 결론적으로 방사 특징은 용접 강도의 변화를 예측하기에 적절한 기준으로 볼 수 있다.

Table 1 Experiments for the learning of Artificial Neural Network

Test step	Pulse (ms)	E (J)	Specimen (EA)
1	10.0	40.0	20
2	10.0	35.8	20
3	10.0	31.8	20
4	10.0	27.7	20
5	11.0	42.1	20
6	11.0	37.5	20
7	11.0	33.2	20
8	11.0	28.8	20
9	12.0	40.8	20
10	12.0	36.4	20
11	12.0	31.7	20
12	12.0	27.9	20
13	13.0	42.0	20
14	13.0	37.1	20
15	13.0	32.5	20
16	13.0	28.3	20

Table 2 Experiments for the appraisal of learned Artificial Neural Network.

Test step	Pulse (ms)	E (J)	Specimen (EA)
1	12.7	40.0	20
2	12.7	38.1	20
3	11.7	36.1	20
4	11.7	34.1	20
5	10.8	32.1	20
6	10.8	37.8	20
7	9.3	35.8	20
8	9.3	33.9	20

4. 결론

본 논문은 박판의 펄스식 점 용접부의 검사를 위한 기준을 제안하고 있다. 검사의 기준으로 사용되는 방사특징(radiation feature)은 열전달 모델에서 추출되었고 그 성질이 조사되었다. 방사특징은 흡수에너지량과 밀접한 관련을 맺고 있으며 같은 식으로 용접의 강도와 관련을 갖는다. 연구 결과는 다음과 같다.

(1) 열 전달 모델로부터 방사특징이 추출되었으며 실험을 통하여 방사특징의 성질을 평가하였다.
(2) 레이저 파워 및 펄스 폭에 따른 방사특징의 변화가 조사되었다. 실제적인 방사특징은 이상적인 방사특징에서 살필 수 있는 성질과 동일하였다.
(3) 방사 특징과 용접 강도의 관계가 정량적으로 조사되었다. 상관 관계는 비 선형성이 높기 때문에 신경망을 이용하여 방사특징으로부터 용접강도를 예측하였다. 학습의 결과 측정강도와 예측강도사이의 상관계수는 0.94로 매우 높게 나타났다.
(4) 학습되지 않은 용접물에 대한 용접강도를 예측하는 실험을 통해 학습결과를 검증하였다. 학습되지 않은 용접물의 실측강도와 신경망의 예측강도사이의 상관계수는 0.91로 높았고 평균 오차는 0.75 kgf로 상대적으로 낮게 나타나고 있다.

참고문헌

1. D.A.J. Stegner, S.M. Wu and N.R. Braton., "Prediction of Heat Input for Welding," Welding Journal, vol.46, No.3, pp. 122s-128s ,1967.
2. D.A.Cremers, G.K.Lewis and D.R.Korzekwa., "Measurement of Energy Deposition during Pulsed Laser Welding," Welding Journal, July, pp.159-167, 1991.
3. I. Miyamoto. K.Mori and H.Maruo., "Properties of the plasma plume in CO_2 laser welding of thin sheets,"Welding International, 9(11) pp. 863-869, 1995.
4. I. Miyamoto and H.Maruo., "Spatial and temporal Characteristics of Laser-Induced Plasma in CO_2 laser welding," Proc. of LAMP, pp. 311-316, 1992.
5. T. Ohji N.Yoshioka, T.Shiwaku and A.Okubo. "Temperature measurement by UV thermal radiation," Welding International, 9(3), pp. 185-190, 1995.
6. D.C.Lim, Y.B.Cho and D.G.Gweon, "A nondestructive inspection of laser spot welding using IR sensor," Pacific Conference on Manufacturing, vol.II, pp. 617-622, 1996.
7. D.C.Lim, Y.B.Cho and D.G.Gweon. "A robust in-process monitoring of pulsed laser spot welding using a point IR sensor," Proceedings of the

Institute of Mechanical Engineers - Part B. Journal of Engineering Manufacture, Vol.212, pp241-250, 1998.

부록1. 방사 특징 $\Lambda(\xi)$의 중요성질

ξ에 대해 미분 가능하고 미분치가 상수가 아닌 $H(\rho Q^*, \xi)$에서 다음과 같은 등식이 성립한다고 하면

$$\frac{1}{H(\eta_1 Q_1^*, \xi)} \frac{\partial H(\eta_1 Q_1^*, \xi)}{\partial \xi} = \frac{1}{H(\eta_2 Q_2^*, \xi+\xi_{12})} \frac{\partial H(\eta_2 Q_2^*, \xi+\xi_{12})}{\partial \xi} \quad (A1)$$

식 (A2)과 같은 제한조건이 필요하다.

$$\eta_1 Q_1^* \exp(\xi) = \eta_2 Q_2^* \exp(\xi+\xi_{12}) \quad (A2)$$

식에서 상수 ξ_{12}는 $\eta_1 Q_1^*$과 $\eta_2 Q_2^*$ 만을 이용하여 아래의 식 (A3)과 같이 쓸 수 있다.

$$\xi_{12} = \ln\left(\frac{\eta_1 Q_1^*}{\eta_2 Q_2^*}\right) \quad (A3)$$

부록2. ξ 축상의 도함수를 구하는 방법

함수 f가 제한 범위 내에서 0보다 크고 아래와 같이 쓸 수 있다고 하면

$$f = f(t^{-1}) \qquad (t>0) \quad (A4)$$

함수 f의 도함수는 아래의 식 (A5)과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{df}{dt} = \frac{\partial f}{\partial(t^{-1})} \frac{d(t^{-1})}{dt} = (-1)\frac{\partial f}{\partial(t^{-1})} \cdot \frac{1}{t^2} \quad (A5)$$

새로운 변수 ξ를 $\exp(\xi) \equiv t$ 로서 정의하고, 함수 f를 ξ에 대해 표현한 식을 $F(\xi)$라고 하면 아래와 같이 쓸 수 있다.

$$F(\xi) = f(t^{-1})|_{t=\exp(\xi)} \quad (A6)$$

함수 F의 ξ에 대한 도함수는 식 (A7)과같다.

$$\frac{dF}{d\xi} = \frac{\partial f(e^{-\xi})}{\partial e^{-\xi}} \frac{d(e^{-\xi})}{d\xi} = (-)\frac{\partial f(e^{-\xi})}{\partial e^{-\xi}} \cdot e^{-\xi} \quad (A7)$$

마지막으로, 식 (A5)과 식 (A7)에서 다음의 관계가 도출된다.

$$\frac{dF}{d\xi} = t \cdot \frac{df}{dt}\Big|_{t=\exp(\xi)} \quad (A8)$$