

研究論文

물체의 반사성질이 용접자동화용 시각센서의 아크노이즈에 미치는 영향에 관한 연구

이 철 원* · 나 석 주**

The Influence of the Reflected Arc Light on Vision Sensors for Welding Process Automation

C. W. Lee and S. J. Na

Key Words : Vision Sensor(시각센서), Arc Welding(아크용접), Noise(노이즈), Arc Light(아크광), Reflection(반사), Welding Automation(용접자동화)

Abstract

Vision sensors using the optical triangulation have been widely used for automatic welding systems in various ways, but their reliability is seriously affected by presence of the arc noise. The reliability of vision sensors was analyzed with variation of the arc noise by considering the reflectance of the base metal. First, the properties of the base metal's reflection were modelled by using the Bidirectional Reflectance-Distribution Function(BRDF), and then the variation of the reflected arc intensity was formulated for various configurations of the torch, base metal, and sensor. The experimental data of the gray level of the reflected arc light were obtained for two materials, mild steel and stainless steel. It was found that the results calculated from the proposed model were in good agreement with the experimental data.

* 비회원, 한국과학기술연구원 기전연구부

** 정회원, 한국과학기술원 정밀공학과

1. 서론

용접공정은 아크빛, 고열, 스패터 및 용접 매연(fume)의 발생 등 작업조건이 열악하기 때문에 공장자동화 최우선 과제 중의 하나이다. 그러나, 대형 구조물의 특성상 치수 오차가 존재하고 용접시 재료의 국부적인 가열이 열변형을 유발하기 때문에 용접공정의 자동화에는 용접선의 자동추적과 용접변수의 적응제어가 요구된다. 이와 같은 용접선의 자동추적용 센서로 레이저 빔을 이용한 능동형 시각센서가 널리 이용되고 있고 거의 모두 광삼각법(optical triangulation)의 원리를 응용하고 있다.

광삼각법을 이용한 능동형 시각센서는 광원의 형태에 따라 투영된 패턴을 이용하는 방식과 점 형태의 빛을 이용하는 주사 빔(scanning beam)을 이용한 방식으로 구분할 수 있다¹⁾. 투영된 패턴을 이용하는 방식은 레이저 빔이 평면으로 모재에 조사되므로, 용접시 아크등의 노이즈의 영향을 많이 받고 전처리(preprocessing)시간이 많이 걸리는 단점이 있으나 구조가 간단하고 저렴한 가격으로 시스템을 꾸밀 수 있어 현재 가장 널리 쓰이고 있다²⁻⁸⁾. 주사 빔을 이용한 센서는 구조가 복잡하고 시스템이 고가이나 투영된 패턴을 이용하는 방식에 비해 아크에 의한 영향을 덜 받고 전처리지 시간을 줄일 수 있어 점차 그 사용이 늘어나고 있다⁹⁻¹¹⁾. 이 밖에 두 가지 방식의 절충형으로 주사한 레이저 빔을 2차원 이미지 센서로 감지하는 방식이 있으며, 투영된 패턴을 이용하는 방식에 비해 노이즈에 의한 영향을 덜 받는 것으로 알려져 있다^{12, 13)}.

1980년대 이후 용접자동화에 시각센서를 개발하여 적용하려는 움직임이 활발히 이루어져 왔다. 그러나, 아직까지 센서의 설계에 있어 분해능(resolution), 측정 범위(field of view)등의 기능만을 고려할 뿐 센서의 신뢰도를 고려한 기준이 없었다. Lenef등은 아크의 스펙트럼을 측정하여 아크의 영향이 최소가 되는 다이오드 레이저의 파장 범위를 찾아 내었으나, 모재의 형상은 고려하지 않았고 모재의 반사를 난반사(diffuse reflection)로 가정하였다¹⁴⁾. Nakata등은 열연강판에 대해 광원과 카메라의 위치, 분해능, 카메라의 노출등의 인자를 변화시켜 실험적으로 광학기구의 최적의 기하학적 배치를 얻어내려 하였다. 그러나 아크의 영향을 고려하지 않았고, 실험 결과에

대한 이론적 해석이 부족하여 다른 모재에의 적용에는 제한점을 가지고 있다¹⁵⁾. Nakata등은 또한 He-Ne 레이저를 사용하여 대역 필터(band pass filter)의 FWHM(Full Width at Half Maximum)을 바꿔가며 레이저 강도에 대한 아크 노이즈의 비는 대역폭이 작을수록 작아짐을 알아내었다¹⁶⁾.

용접공정에서 시각센서에 노이즈가 될 수 있는 인자로는 아크광, 용접 스패터, 가열된 보호가스 등을 들 수 있다. 용접선 추적용 센서 설계시 아크광을 카메라로 직접 보는 경우는 거의 없으므로 아크광은 모재에 반사된 후 센서에 영향을 미친다. 가열된 보호가스는 온도가 거의 6000 K에 달하나 방사율(emissivity)이 0.001 정도로 낮아 영향이 작다¹⁴⁾. 또한 스패터는 시각센서의 주요 노이즈 인자가 될 수 있으나⁷⁾ MAG(Metal Active Gas)용접에서 주로 발생하며 아크에 비해 온도가 매우 낮아 대부분의 에너지를 1.0 μ m 이상의 적외선 영역에서 복사한다. 따라서, 모재에 반사된 아크광이 모든 용접공정에서 시각센서의 신뢰도에 영향을 미치는 주요 인자라고 할 수 있다.

Fig. 1은 시각센서를 이용한 용접시스템의 전형적인 배치를 나타낸다. 용접 토치 앞의 모재에 레이저 빔을 투사하여 카메라 이미지 상에 나타나는 레이저의 패턴으로부터 조명되는 용접부의 단면 형상을 얻고, 카메라 앞에 간섭 필터(interference filter)를 부착하여 레이저 파장을 중심으로 한 좁은 영역의 파장대의 빛만을 통과시켜 아크 노이즈등의 영향을

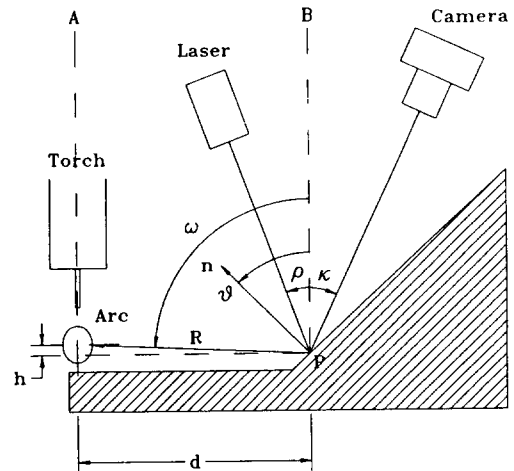


Fig. 1 Diagram of typical welding vision system and weld arc

최소화시킨다. 한편, 아크광도 모재에 반사된 후 레이저 파장대의 영역만 간섭필터를 통과하여 이미지 센서에 영상으로 맺힌다. 일반적인 용접시스템에서는 모재가 평평하므로 센서의 배치에 따라 아크 노이즈의 크기가 달라지고, 컨테이너 사이드 판넬이나 LNG 탱크 내벽과 같이 굴곡(corrugation)이 있을 경우에는 처음 센서 배치뿐만 아니라 용접선을 추적하는 경로에 따라서도 아크 노이즈 크기가 달라질 것으로 예상된다. 따라서, 용접 공정을 자동화하기 위해 시각센서를 적용할 경우 센서의 신뢰도를 높이기 위해서는 아크 노이즈의 크기가 최소화되는 센서의 배치와 이동 경로를 결정해야 한다.

본 연구에서는 용접공정에 시각센서를 적용할 경우 센서의 신뢰도를 높이기 위한 기본 정보를 제공하기 위해 모재의 반사 성질을 고려하여 센서와 아크의 기하학적 배치에 따른 아크 노이즈의 크기에 대해 연구하였다. 이론을 통해 2차원 상에서 모재의 반사 모델을 세운 후 아크를 점광원으로 가정하여 반사된 아크의 이미지 강도를 수식화하였으며 실험을 통해 이 모델의 적용 가능성을 확인해 보았다.

2. 아크 노이즈 모델링

2장에서는 카메라에 맺히는 모재에서 반사된 아크광의 상의 밝기를 아크와 모재, 그리고 카메라의 2차원 배치에 대해 수식화하였다.

2.1 반사모델

물체의 반사성질을 일반적으로 표현하기 위해 Fig. 2와 같이 국지좌표계(local coordinate system)를 사용하였는데, 임의의 방향은 국지좌표계에서 (ϕ, θ) 에 의해 표시된다. 이 좌표계에서 반사도의 일반적인 표기를 위해 BRDF (Bidirectional Reflectance-Distribution Function), f_r 을 다음과 같이 정의하였다¹⁷⁾.

$$f_r(\theta_r, \phi_r; \theta_i, \phi_i) = \frac{dL_r(\theta_r, \phi_r; \theta_i, \phi_i; E_i)}{dE_i(\theta_i, \phi_i)} \quad (1)$$

여기서 $L_r(\theta_r, \phi_r)$ 은 (θ_r, ϕ_r) 방향으로의 복사도(radiance)를 뜻하고, $E_i(\theta_i, \phi_i)$ 는 (θ_i, ϕ_i) 방향으로의 조사도(irradiance)를 나타낸다. E_i 는 입사되는 복사도(incident radiance) L_i 에 의해 결정되고 다음과 같은

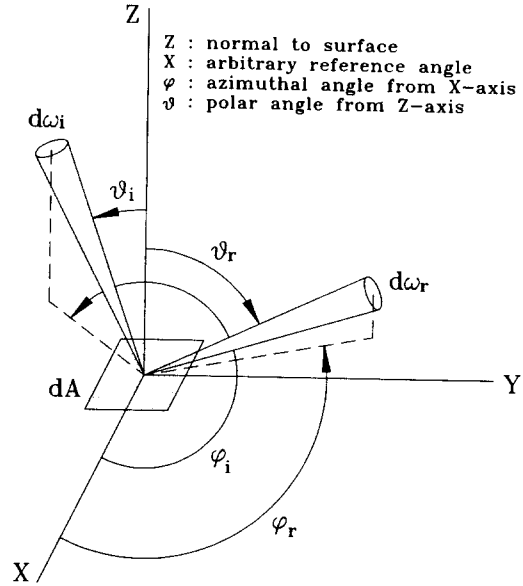


Fig. 2 Local geometry for defining BRDF¹⁷⁾

관계를 가진다.

$$dE_i(\theta_i, \phi_i) = L_i(\theta_i, \phi_i) \cos\theta_i d\omega_i \quad (2)$$

여기서 $d\omega = \sin\theta \, d\theta d\phi$ 로 미소 솔리드각(solid angle)이다. 식(2)를 표면반구상의 모든 방향에 대해 적분하면 그 점에서의 조사도를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$E_i = \int_{\omega} L_i \cos\theta_i d\omega_i \quad (3)$$

마찬가지로 식(1), (2)로부터 복사도 L_r 을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$L_r = \int_{\omega} f_r L_i \cos\theta_i d\omega_i \quad (4)$$

지금까지 물체표면의 반사를 모델링하기 위해 많은 연구가 이루어졌으나 너무 복잡하여 수치해석에 의한 값만 얻을 수 있거나 혹은 너무 간단하여 실제와 일치하지 않는 경우가 많았다¹⁸⁾. 따라서 본 연구의 해석을 위해서는 대부분의 물체반사에 대한 BRDF f_r 이 크게 난반사성분 f_{rd} 과 경면반사성분 f_{rs} 로 나누어 질 수 있음을 고려하였다.

$$f_r = f_{rd} + f_{rs} \quad (5)$$

여기서 난반사 성분은 보통 모든 방향으로의 복사가 일정한 Lambertian 모델로 표현되고 실제와 잘 일치하는 것으로 알려져 있다¹⁹⁾. 이 경우 BRDF는 일정하므로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$f_{rd} = a (= \text{constant}) \quad (6)$$

여기서 a는 난반사의 정도를 나타내는 상수이다. Lambert의 cosine 법칙(Lambert's cosine law)에 의해 난반사에 의한 복사도 L_d 를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$L_d = a f_{\omega} L_r \cos \theta_r d\omega_r \quad (7)$$

따라서 난반사에 의한 복사도는 입사되는 에너지의 양에 비례함을 알 수 있다.

경면반사성분은 표면거칠기(surface roughness)에 따라 변하는데, 이는 보통 표면거칠기 R_q (rms value)와 빛의 파장의 λ 비에 따라 다음과 같이 모델링된다²⁰⁾.

1) $R_q/\lambda > 1.5$ 인 경우

Torrance 등은 거친 물체의 표면이 임의로 배열된 경면요소들로 구성된 것으로 가정하여 그의 모델이 실제 실험치와 잘 일치됨을 보였으며, 실험치와의 비교를 통해 물체의 프레즈넬반사(Fresnel reflecta-

nce)가 BRDF의 형상에 큰 영향을 미치지 않음을 보였다^{21,22)}. 각도 변화에 따른 프레즈넬반사의 변화를 무시하고, 표면법선과 입사, 반사가 같은 평면에서 이루어질 경우, 즉 $\phi_i - \phi_r$ 이 $180^\circ, 0^\circ$ 일 때 Torrance-Sparrrow 모델은 다음과 같이 표현될 수 있다²¹⁾.

$$f_{rs} = b \left[\frac{G(\theta_n, \theta_r)}{\cos \theta_r} \right] \exp(-c^2 \alpha^2) / \cos \theta_r \quad (8)$$

여기서 α 는 입사방향과 복사방향을 이등분하는 선이 표면법선과 이루는 각으로 $\alpha = (\theta_n - \theta_r) / 2$ 이다. b는 식(6)의 난반사성분 a에 대한 경면반사성분의 크기를 나타내고, c는 경면요소 방향의 확률적 분포를 나타내며, $G(\theta_n, \theta_r)$ 은 인근의 경면요소에 의한 영향을 고려한 항으로 Table 1에 이를 정리하였다.

2) $R_q/\lambda < 1$ 인 경우

거울과 같은 반사형태를 나타내고, $\phi_i - \phi_r = 180^\circ, 0^\circ$ 인 경우 경면반사성분은 다음과 같이 모델링된다.

$$f_{rs} = \frac{b \delta(\theta_n - \theta_r)}{(\sin \theta_r, \cos \theta_r)} \quad (9)$$

여기서 b는 식(8)에서와 같이 난반사성분 a에 대한 경면반사성분의 크기를 나타낸다.

3) $R_q/\lambda \approx 1$ 인 경우

파동광학을 사용한 광학모델을 적용해야 하며 위와 같이 간단한 수식으로 표현하기가 어렵다. 거울에서

Table 1. Calculation formulas for $G(\theta_n, \theta_r)$ in (8)

$0^\circ \leq \theta_r \leq 45^\circ$		$45^\circ \leq \theta_r \leq 90^\circ$	
θ_r	$G(\theta_n, \theta_r)$	θ_r	$G(\theta_n, \theta_r)$
$-90^\circ \leq \theta_n \leq \frac{\theta_r - 180^\circ}{3}$	Eq.(a)	$-90^\circ \leq \theta_n \leq -\theta_r$	Eq.(a)
$\frac{\theta_r - 180^\circ}{3} \leq \theta_n \leq \frac{\theta_r + 180^\circ}{3}$	1	$-\theta_r \leq \theta_n \leq 3\theta_r - 180^\circ$	Eq.(a) with θ_n, θ_r interchanged
$\frac{\theta_r + 180^\circ}{3} \leq \theta_n \leq 90^\circ$	Eq.(a)	$3\theta_r - 180^\circ \leq \theta_n \leq \frac{\theta_r + 180^\circ}{3}$	1
		$\frac{\theta_r + 180^\circ}{3} \leq \theta_n \leq 90^\circ$	Eq.(a)

나타나는 경면반사에 의한 피크치가 나타나기 시작하며 이를 Torrance-Sparrow 모델로 표현할 경우 큰 오차가 발생할 수 있으나, 피크치가 나타나지 않는 범위($\theta \approx \theta_0$)에서는 식(8)의 Torrance-Sparrow 모델이 어느정도 실제와 일치하는 것으로 알려져 있다.

2.2 아크 노이즈 모델링

아크에서 복사되는 에너지의 스펙트럼은 플라즈마를 이루는 원소와 이온의 특성분광선(characteristic spectral line)과 연속적인 흑체복사(black body emission)로 구성되어 있다^{14,23,24}. 특성분광선의 위치와 강도는 용접조건, 모재재질 및 보호가스재질등에 의해 크게 영향받는 것으로 알려져 있고 흑체복사성분은 플랑크의 법칙(Planck's law)으로 나타낼 수 있다.

아크에서 복사된 에너지는 모재에 반사된 후 카메라에 입사되는데 본 연구에서는 Fig. 3에서 보는 바와 같이 우리가 관심을 갖게 되는 모재 부위에서 아크 중앙까지의 거리가 R이고 입사각과 반사각이 각각 θ_{io} , θ_{ro} 일때 반사된 복사도를 모델링하였다. Fig. 3에서 아크가 부피를 가지므로 가까운 거리에서는 아크광이 확장된 광원으로 역할을 할 것으로 예상된다. 그러나, Fig. 1에서 보는 바와 같이 아크와 카메라로 관측하는 지점사이에는 선행거리(preview distance)가 존재하고 이 거리는 토치와 센서의 물리적 부피 때문에 보통 2cm 이상이다. 따라서, Fig. 3에서 R이 3cm이고 아크광을 발하는 영역인 A_{eff} 가 $0.5cm^2$ 라면 아크광을 발하는 영역이 P점에 대해 차지하는 솔리드각은 $0.5/3^2$ 으로 0.17로서 P점을 둘러싼 반구의 전체 솔리드각

2π 의 2.7%이다. 따라서, 대부분의 시각센서 배치에 대해 아크광을 점광원으로 볼 수 있고 점광원에 의한 조사도는 다음과 같이 표현된다.

$$E_i(\lambda) = I_i(\lambda) \frac{\cos\theta_{io}}{R^2} \quad (10)$$

여기서 $I_i(\lambda)$ 는 아크의 분광 복사 밀도(spectral radiant intensity, W/sr/A)를 나타낸다. 모재에 반사된 아크광의 복사도 $L_r(\lambda)$ 도 마찬가지로 구해지며 다음과 같다.

$$L_r(\lambda) = f(\theta_{io}, \theta_{ro}) I_i(\lambda) \frac{\cos\theta_{ro}}{R^2} \quad (11)$$

$A_{eff}/R^2 \ll 1$ 의 가정은 보통 10000 K 정도의 온도를 갖는 아크상의 면적이 $0.5 cm^2$ 정도이고, 아크로부터 센서가 감지하는 부위까지의 거리가 2 cm 이상이므로 타당하다고 할 수 있다.

2.3 영상화 모델링

아크광은 모재에 반사된 후 간섭 필터(interference filter)를 통과하여 카메라 렌즈에 의해 집광되어 영상면에 상을 이루게 된다(Fig. 4). 물체의 한 점에서 반사에 의한 분광복사도 $L_r(\lambda)$ 와 영상 평면(image plane)상의 대응되는 점의 입사 E의 관계는, 간섭 필터의 통과 영역(passband)를 고려할 경우, 다음과 같이 모델링할 수 있다^{14,18}.

$$E(\lambda_c) = \left[\frac{\pi}{4} \cos^2 \zeta / (f/d)^2 \right] \int_0^\infty L_r(\lambda) F_C(\lambda - \lambda_c) d\lambda \quad (12)$$

여기서 λ_c 는 필터의 중심파장이며, ζ 는 렌즈의 광축(optical axis)이 렌즈 중심과 대응되는 물체의 점을 잇는 선과 이루는 각이고, f는 카메라의 초점들

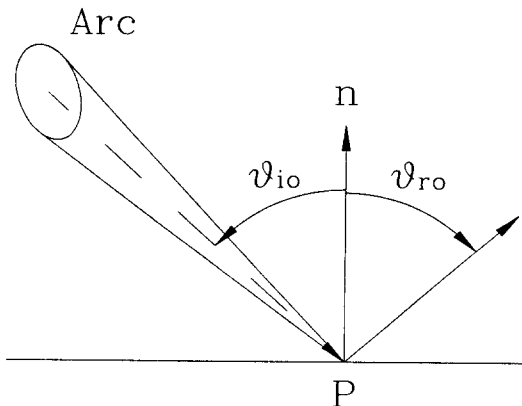


Fig. 3 Geometry of arc reflection modeling

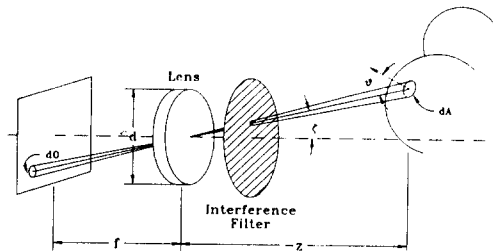


Fig. 4 Image forming system

맞출 경우 렌즈 센터에서 영상면까지의 거리로 유효 초점거리이고, (f/d) 는 카메라의 유효 노출(F number)이다. 레이저를 이용한 시각센서에서 카메라가 보는 범위가 매우 작으므로 ζ 의 변화에 의한 항은 거의 무시할 만하다. 따라서 간섭필터를 투과한 물체의 복사도와 영상의 조사도 E 는 서로 정비례하는 관계임을 알 수 있다. $F_c(\lambda)$ 는 간섭 필터의 분광 응답(spectral response)으로 Gaussian 분포 함수에 의해 식(13)와 같이 나타낼 수 있다¹⁴⁾.

$$F_c(\lambda) = t_r \exp(-\lambda^2/2\sigma^2) \quad (13)$$

여기서 $\sigma = B_w/(2\sqrt{2\ln 2})$ 이고, t_r 은 최고투과율(peak transmittance), B_w 는 필터의 FWHM이다.

이미지 센서는 이렇게 센서에 입사된 조사도를 영상 신호로 바꿔 주는데 이 영상 신호를 G_i 라면,

$$G_i = pE' \quad (14)$$

의 관계가 있다. 여기서 p 는 비례상수이고 γ 를 γ 특성이라 부르며 계측용으로는 이 값을 1로 설정하고 있다. 이 경우 센서에 입사된 조사도 E 와 영상 레벨(gray level)이 선형적으로 비례한다.

2.4 아크 노이즈의 영상 밝기

모재에 반사된 아크에 의한 영상 밝기를 $G_a(\lambda_c)$ 라 하면 식 (11), (12), (14)를 조합하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$G_a(\lambda_c) = K [H(\lambda_c) f_r(\theta_w, \theta_w) \frac{\cos\theta_w}{R^2}]^r \quad (15)$$

여기서 K 는 상수이고, $H(\lambda_c)$ 는 중심 파장이 λ_c 로 최고 투과치가 1인 간섭필터를 통과한 아크의 복사 밀도이며 각각 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$K = pI t_r [\frac{\pi}{4} \cos^4 \zeta / (f/d)^2]^r \quad (16(a))$$

$$H(\lambda_c) = \frac{1}{t_r} \int_0^\infty I_s(\lambda) F_c(\lambda - \lambda_c) d\lambda \quad (16(b))$$

식(15)에서 보는 바와 같이 모재에 반사된 아크의 밝기는 CCD카메라의 γ 특성이 1일 경우 복사되는 에너지의 양에 정비례한다. 한편 아크광의 강도가 일

정할 경우 반사된 아크광의 밝기는 모재의 BRDF와 입사각의 cosine항 및 카메라로 관측하는 모재 부위에서 아크까지의 거리에 의해 결정됨을 알 수 있다. 따라서 2.1의 기하광학을 이용한 반사모델을 적용할 경우 토치와 센서 및 측정물의 배치에 따라 물체에 반사된 아크의 상대적인 영상밝기를 예측할 수 있음을 알 수 있다.

3. 아크광의 반사실험

이 장에서는 2장에서 세운 반사모델이 실제로 용접에 쓰이는 모재에 적용이 가능한지 확인하고 아크를 점광원으로 본 가정이 어느 정도 신빙성을 갖는지 알아 보기 위해 실험을 하였는데, 반사성질이 Torrance-Sparrow모델에 의해 표현될 것으로 예상되는 R_s/λ 가 1.5보다 큰 거친 재료와 거울반사형태를 보일 것으로 예상되는 R_s/λ 가 작은 매끄러운 재료를 실험 대상으로 하였고 TIG(Tungsten Inert Gas)용접 아크와 MAG용접 아크에 대해 모재의 위치와 각도를 변화시키면서 반사된 아크광의 밝기를 측정하였다.

3.1 실험 방법

Fig. 5의 배치에 대해 실험하였는데, γ 특성이 0.45인 CCD카메라를 사용하였고 일반적으로 사용되는 시각센서에서 레이저 파장과 일치하는 중심파장을 갖는 간섭필터를 사용하므로 본 실험에서도 중심파장 λ_c 가 690nm이고 FWHM B_w 가 11nm인 간섭필터를 카메라 앞에 부착시켰다. 점광원으로 본 아크광의 위치는

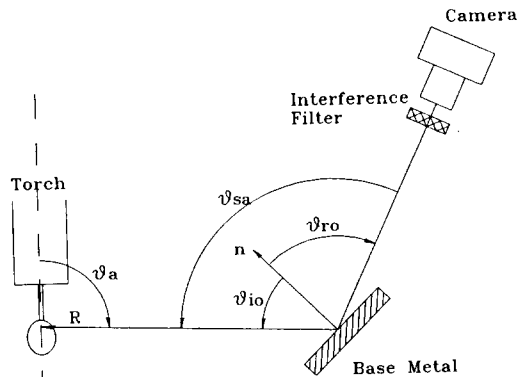


Fig. 5 Configuration of arc reflection experiment

TIG용접 아크에 대해서는 전극봉 밑 1mm로 하였고 MAG용접의 경우는 아크길이를 4mm로 가정하여 전극봉끝에서 역시 1mm 밑의 지점으로 하였다. 이 위치로 결정한 이유는 이 지점에서의 아크복사가 가장 높을 것으로 추정되었기 때문이다. 정확성을 기하기 위해서는 아크의 유효 면적에 대해 적분을 하여 그 중앙점을 찾아야 하나 실험시 아크에서 모재사이의 거리가 45 mm 이상이므로 이 위치 선정에 의한 오차는 크지 않을 것으로 예상된다.

아크를 on시킨 상태에서 CCD 카메라로 반사된 아크광의 크기를 약 0.2초 간격으로 20번 받아들여 이것의 평균을 반사된 아크광의 크기로 하였다. Fig. 6은 0.2초 간격으로 구한 반사된 아크광 밝기의 시간에 따른 변화를 그린 예이다. TIG용접 아크광의 밝기가 MAG용접 아크에 비해 훨씬 안정함을 알 수 있다. 실험시편으로는 식(8)의 반사모델로 반사형태가 설명되는 R_q/λ 가 큰 열연강판과 식(9)의 반사모델로 설명되는 R_q/λ 가 작은 스테인리스강을 사용하였고 Table 2에 이를 정리하였다.

식(15)에서 보는 바와 같이 아크광의 강도가 일정할 경우 모재에 반사된 아크광의 영상밝기는 모재의 BRDF와 아크로부터 측정부위까지의 거리 R, 그리고

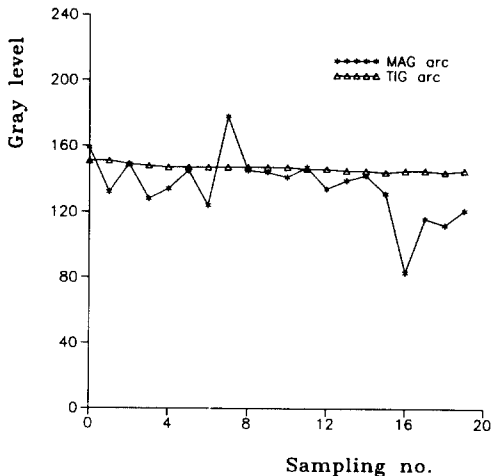


Fig. 6 Variation of reflected arc intensity with time

Table 2. Specimens for experiment

	Mild steel	SUS304
$R_q(\mu\text{m})$	1.44	0.16
R_q/λ	2.1	0.23
Processing	Hot Rolled	Cold Rolled

입사각의 cosine항에 의해 결정된다. 이중 $1/R^2$ 의 항은 모재의 반사성질에 상관없이 아크광을 점광원으로 가정한 결과에 의한 항이므로, 아크를 점광원으로 본 가정의 타당성을 검증하기 위해 입사각과 반사각을 고정시킨 상태에서 R만을 변화시키면서 반사된 아크광의 밝기 변화를 측정하여 이를 이론치와 비교하였다. 다음에는 고정된 R과 분리각 θ_{sa} 에 대해 반사각을 변화시키면서 반사된 아크광의 밝기를 구하였다. 이 경우 입사각과 반사각의 관계는 다음과 같다.

$$\theta_{sa} = \theta_{ri} + \theta_{ro} \quad (17)$$

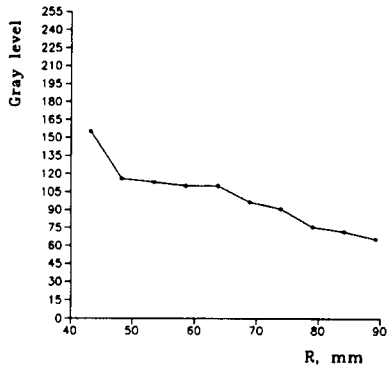
반사각을 변화시킨 실험은 물체의 반사성질과 관계되는 실험이므로, 이 실험결과와 이론치를 비교하기 위해서는 두 모재에 적용되는 반사모델 BRDF의 매개변수를 구해야 한다. 즉, 거친 물체에 대해 Torrance-Sparrow모델을 적용하기 위해서는 난반사성분 a에 대한 경면반사성분의 크기를 나타내는 상수 b와 경면요소의 확률적 분포를 나타내는 c의 크기를 알아야 하고, 아주 매끄러운 물체에 대해서는 난반사성분에 대한 경면피크치(specular peak)의 크기를 나타내는 b의 크기를 구해야 한다. 이를 위해 아크광 반사 실험시 사용한 간섭필터의 중심파장과 일치하는 파장대의 레이저를 이용하여 본 연구와 병행하여 반사실험을 수행하여 열연 강판에 대해 식(8)의 매개변수를 구하였고, 이를 Table 3에 정리하였다²⁵⁾. 스테인리스강에 대해서는 경면반사 성질이 심하여 식(9)의 매개변수를 구하지 못하여 본 실험결과와 이론치를 비교할 수 없었다.

Table 3. Results of nonlinear regression for mild steel using Gauss-Newton method²⁵⁾

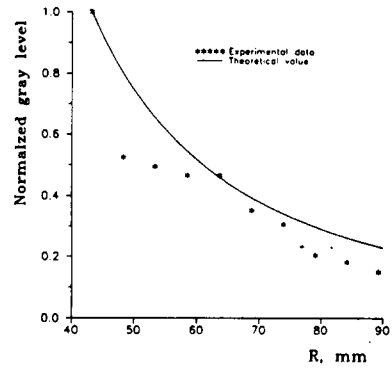
	b/a	c ²
Obtained value	1.87	51.4
Asymptotic standard error	1.80	19.8

3.2 실험결과

Fig. 7과 Fig. 8 및 Fig. 9는 아크를 점광원으로 가정하는 것이 타당한지 확인해 보기 위해 행한 실험의 결과이다. Fig. 7과 Fig. 8은 열연강판에 반사된 MAG용접 아크와 TIG용접 아크의 밝기를 고정된 입사각과 반사각에 대해 R을 변화시키면서 얻은 결과이다. Fig. 7(a)와 Fig. 8(a)는 CCD카메라로 얻은 영상

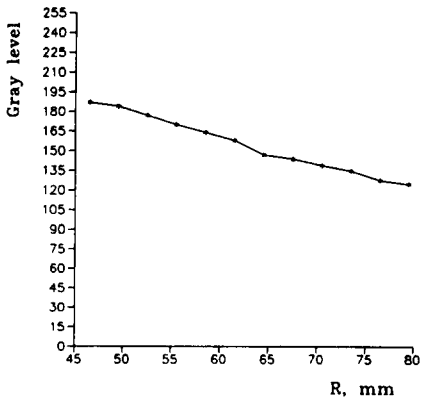


(a) Raw data

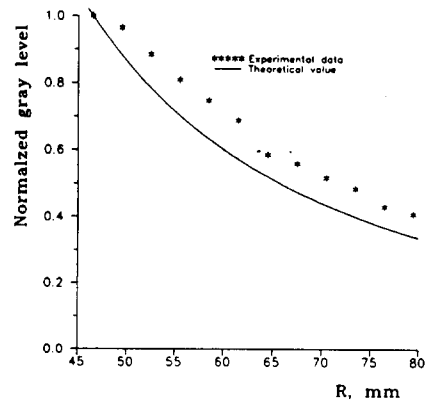


(b) Experimental data and theoretical value

Fig. 7 MAG arc reflected from mild steel with varying R

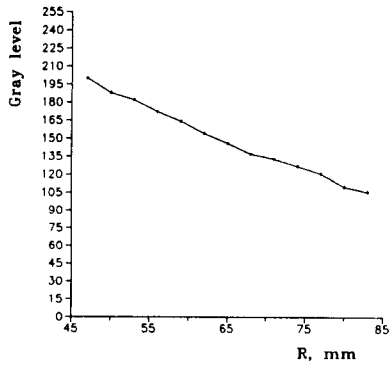


(a) Raw data

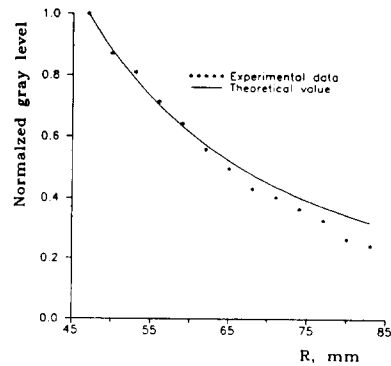


(b) Experimental data and theoretical value

Fig. 8 TIG arc reflected from mild steel with varying R



(a) Raw data



(b) Experimental data and theoretical value

Fig. 9 TIG arc reflected from stainless steel with varying R

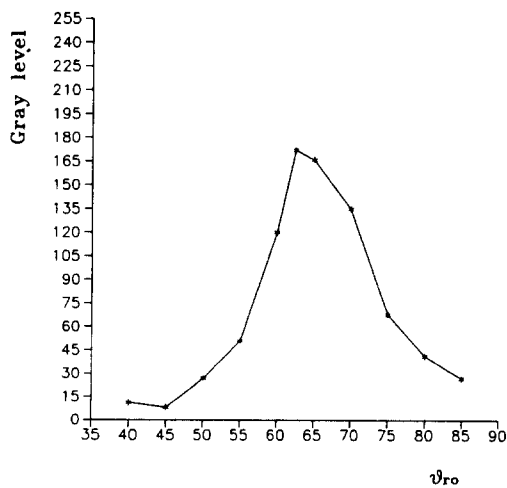
밝기이고 Fig. 7(b)와 Fig. 8(b)는 CCD카메라의 γ 특성을 보정하여 R이 제일 작은 경우에 대해 표준화한 것이다. 아크를 점광원으로 가정할 경우 식(15)로부터 반사된 아크 밝기가 R의 제곱에 반비례함을 알 수 있다. 같은 용접 전류에 대해서는 TIG용접 아크의 크기가 MAG용접 아크에 비해 작은 것으로 알려져 있다. Fig. 7(b)와 Fig. 8(b)로부터 TIG용접 아크가 MAG용접 아크에 비해 점광원으로 가정한 이론치 결과에 근접하고 아크로부터의 거리가 멀어질수록 실험치가 이론치에 근접함을 알 수 있는데, 이는 아크의 크기가 작고 아크로부터의 거리가 멀어질수록 아크를 점광원으로 가정하게 된 조건인 $A_{eff}/R^2 < 1$ 을 더욱 만족시키기 때문으로 사료된다. Fig. 9는 스테

인리스강에 반사된 TIG용접 아크의 R에 따른 밝기 변화를 구한 결과인데 실험한 R의 범위에 대해 점광원으로 가정한 이론식 결과와 실험 결과가 거의 일치함을 알 수 있다. 위의 실험 결과로부터 아크의 크기가 작고 아크로부터의 거리가 멀수록 아크가 점광원으로써 영향을 미치고, TIG용접 아크에 대해서는 R이 45mm 이상일 경우 아크를 점광원으로 가정하는데 전혀 무리가 없음을 알 수 있다.

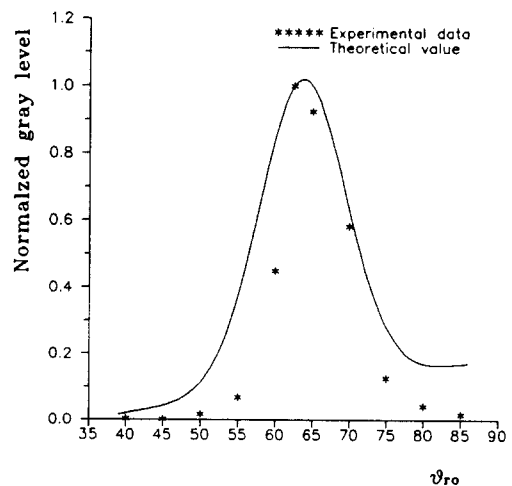
Fig. 10과 Fig. 11은 고정된 R과 θ_{sa} 에 대해 열연강판에 반사된 MAG용접 아크와 TIG용접 아크의 밝기 변화를 반사각을 변화시키면서 구한 결과로 θ_{sa} 는 각각 125°, 90°이다. 실험 결과와 Torrance-Sparrow모델에 의한 이론치를 비교하였는데, 두 경우 모두 이론치와

Table 4. Conditions for arc noise experiment

	Fig. 7	Fig. 8	Fig. 9	Fig. 10	Fig. 11	Fig. 12
Specimen	Mild Steel	Mild Steel	Stainless Steel	Mild Steel	Mild Steel	Stainless Steel
Welding Current(A)	MAG 115	TIG 120	TIG 100	MAG 115	TIG 120	TIG 100
Welding Speed(mm/s)	9	0	0	9	0	0
R(mm)	"	"	"	72	62.5	50 80
$\theta_{in} (^{\circ})$	63	55	70	"	"	"
$\theta_{ro} (^{\circ})$	55	35	20	"	"	"
$\theta_{sa} (^{\circ})$	118	90	90	125	90	90

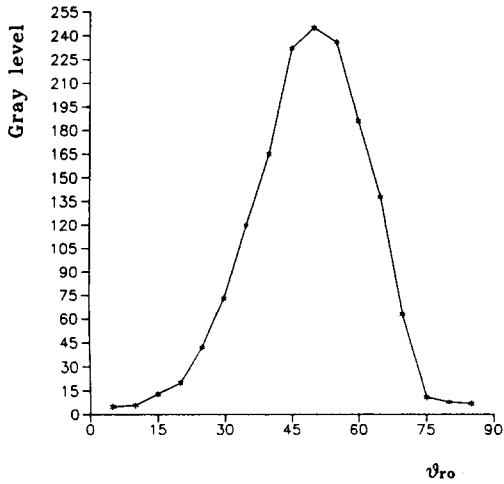


(a) Raw data

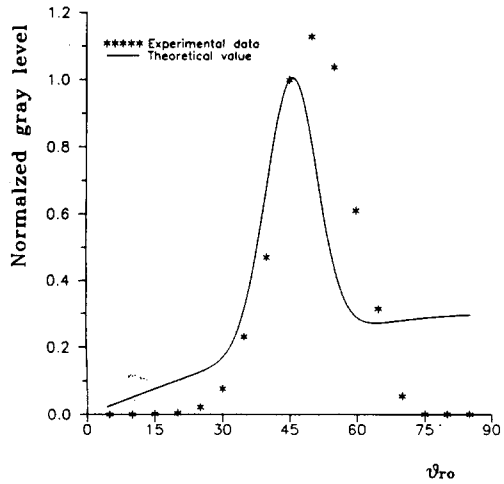


(b) Experimental data and theoretical value

Fig. 10 MAG arc reflected from mild steel with varying incident angle



(a) Raw data



(b) Experimental data and theoretical value

Fig. 11 TIG arc reflected from mild steel with varying incident angle

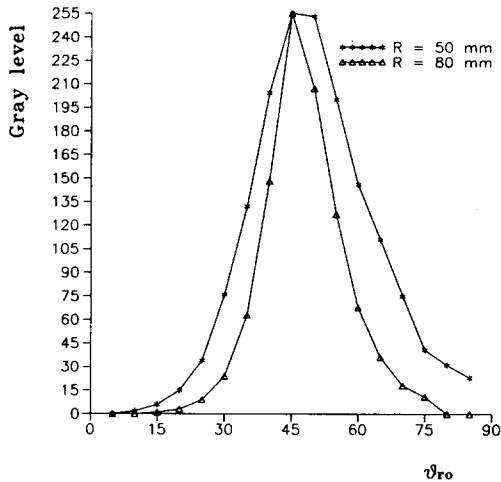


Fig. 12 TIG arc reflected from stainless steel with varying incident angle

어느 정도 일치함을 알 수 있다.

Fig. 12는 θ_{in} 가 90°인 경우 스테인리스강에 반사된 TIG용접 아크의 반사각에 따른 밝기변화를 구한 결과이다. 식(9)의 매개변수를 구할 수 없어 이론치와 비교할 수는 없었다. 모재로부터의 거리 R이 각각 50 mm, 80 mm인 경우에 대해 실험하였는데 두 경우 모두 Fig. 11에 비해 밝기가 반사각에 따라 급격히 변함을 알 수 있고, 아크로부터의 거리가 50mm인 경우의

밝기변화가 80mm인 경우에 비해 더 완만함을 알 수 있다. 이는 아크까지의 거리가 가까울수록 아크광이 본 연구에서 가정한 점광원의 형태에서 벗어나 확장 광원으로써 작용하여 나타난 실험결과로 사료된다.

4. 결론

용접공정에서 레이저 등을 이용한 시각센서가 개발되어 활발히 이용되고 있지만, 아크 등의 노이즈에 의해 신뢰도가 저하되는 단점이 있다. 여러 인자가 시각센서의 신뢰도에 영향을 미치지만 그중 모재에 반사된 아크광이 센서의 신뢰도를 가장 크게 저하시키므로, 반사된 아크광의 밝기를 최소한으로 할 수 있는 센서의 배치와 모재상에서의 센서 이동 경로를 결정해야 한다. 본 연구에서는 이를 위해 모재의 반사 모델을 세워 센서와 모재 및 아크의 기하학적 배치에 따른 아크 노이즈의 크기를 간단한 수식으로 표현하였고, 센서의 배치를 바꿔가며 반사된 아크광의 밝기를 측정하여 이론치와 비교하였다. 그 결과 아크로부터의 거리가 45 mm 이상일 때는 아크를 점광원으로 보는 가정을 적용할 수 있으며 열연강판에 대해 본 연구에서 응용한 Torrance-sparrow 모델을 적용할 수 있다고 판단되었다.

시각센서를 설계할 때 본 연구결과를 이용하여 모재의 형상에 따라 센서의 배치와 이동경로를 결정하여

아크 노이즈의 크기를 감소시킴으로써 시각센서의 신뢰도를 크게 높일 수 있을 것으로 기대된다. 제안된 모델의 효율도를 높이기 위해서는 아크를 점광원으로 가정할 수 있는 한계를 실험과 해석을 통해 결정해야 할 것이다. 또한 본 연구 결과를 이용하여 센서의 배치와 이동경로를 최적으로 결정할 수 있는 기법의 개발에 대한 연구가 이루어져야 할 것이다.

후 기

본 연구는 1993년도 국민은행 기술개발지원사업의 연구비지원에 의한 결과의 일부로서 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 이철원의: 용접 자동화를 위한 시각센서, 대한 용접학회지, 제11권, 제3호, 1993, pp.10-21
- W. F. Clocksin, et al: "An Implementation of Model-Based Visual Feedback for Robot Arc Welding of Thin Sheet Steel", The International Journal of Robotics Research, Vol.4, No.1, 1985, pp.13-26
- R. W. Richardson: "Robotic Weld Joint Tracking Systems-Theory and Implementation Methods", Welding Journal, Vol.65, No.11, 1986, pp.43-51
- J. E. Agapakis, et al: "Joint Tracking and Adaptive Robotic Welding Using Vision Sensing of the Weld Joint Geometry", Welding Journal, Vol.65, No.11, 1986, pp.33-41
- R. Niepold, et al: "PASS-A Visual Sensor for Seam Tracking and On-Line Process Parameter Control in Arc Welding Applications", Robotic Welding, IFS Ltd, UK, 1987, pp.129-140
- R. J. Beattie, et al: "The Use of Vision Sensors in Multipass Welding Applications", Welding Journal, Vol.67, No.11, 1988, pp.28-33
- 신정식: "겹치기이음에서의 용접선 추적과 아크 데이터 모니터링 시스템에 관한 연구", 한국 과학기술원 석사학위논문, 1991
- J. P. Huissoon, et al: "Dynamic Seam Tracking for Weld Process Control", Proceed. Int. Conf. on Computerization of Welding Information 4, November 3-6, 1992, Orlando, Florida, pp.226-239
- G. L. Oomen, et al: "A Real-Time Optical Profile Sensor for Robot Arc Welding", Robotic Welding, IFS Ltd, UK, 1987, pp.117-128
- M. Bjorkelund: "A True Seam-Tracker for Arc Welding", Robotic Welding, IFS Ltd, UK, 1987, pp. 167-177
- D. Nitzan: "Three-Dimensional Vision Structure for Robot Applications", IEEE Trans. on PAMI, Vol.10, No.3, 1988, pp.291-309
- S. Nakata, et al: "Construction of a Visual Sensing System for In-Process Control of Arc Welding and Its Application in Automatic Weld Line Tracking-Study on Visual Sensing Systems for In-Process Control of Arc Welding(4th Report)", Welding International, Vol.4, No.11, 1990, pp.845-850
- J. E. Agapakis, et al: "Vision-Aided Robotic Welding: An Approach and a Flexible Implementation", Int. Journal of Robotics Research, Vol.9, No.5, 1990, pp.17-33
- L. Lenef, et al: "Optical Emissions from Weld Arcs and Their Effects on the Performance of Welding Robot Vision Systems", Applied Optics, Vol.24, No. 16, pp.2587-2595
- S. Nakata, et al: "Visual Sensing System for In-Process Control of Arc Welding Process", Welding International, Vol.2, No.12, 1988, pp.1086-1090
- S. Nakata, et al: "Determination on Geometrical Arrangement of Optical Equipments and Photographic Parameters for Construction of Visual Sensing System", JWS, Vol.7, No.3, 1989, pp.358-362
- F.E. Nicodemus, et al: "Geometrical Considerations and Nomenclature for Reflectance", NBS Monograph 160, Nat. Bureau Standards, Boulder, CO, 1977
- B.K.P. Horn: Robot Vision, MIT Press, U.S.A., 1986
- J.H. Lambert: Photometria Sive de Mensura de Gratibus Luminis, Colorum et Umbrae, Augsburg, Eberhard Klett, 1760
- S. K. Nayar, et al: "Determining Shape and Reflectance of Hybrid Surfaces by Photometric Sampling", IEEE Trans. on Robotics and Automation, Vol.6, No.4, 1990, pp.418-431

21. K. E. Torrance, et al : "Theory for Off-Specular Reflection from Roughened Surfaces", Journal of the Optical Society of America, Vol.57, No.9, 1967, pp.1105-1114
22. K. E. Torrance, et al : "Off-Specular Peaks in the Directional Distribution of Reflected Thermal Radiation", Journal of Heat Transfer-Trans. of ASME (C), Vol.88, No.2, 1966, pp.223-230
23. K. Inoue : "Image Processing for On-Line Detection of Welding Process (Rep.3)-Improvement of Image Quality by Incorporation of Spectrum of Arc", Trans. of JWRI, Vol.10, No.1, 1981, pp.13-18
24. E.W. Kim, et al : "Visible Light Emissions during GTAW and Its Application to Weld Image Improvement", Welding Journal, Vol.66, No.12, 1987, pp.369-s-377-s
25. 이철원 : 높이 변화가 있는 직선용접부의 자동용접을 위한 시각센서에 관한 연구 , 한국과학기술원 석사학위논문, 1994