

가스 메탈 아크 용접에서 다중 회귀 분석을 이용한 아크 센서 모델링에 관한 연구

A Study of Arc Sensor Modeling using Multiple Regression Analysis in Gas Metal Arc Welding

김용재*, 이세현**, 강문진***

* 한양대학교 정밀기계공학과 대학원

** 한양대학교 기계공학부

*** 포항산업과학연구소

1. 서론

아크 센서는, 좌우 토치 위빙 끝단의 전류 값을 비교하는 방식[1], 위빙 반주기마다 전류 값을 적분하여 비교하는 방식[2], 위빙 1/4 주기 별로 전류 값을 적분하여 생기는 전류 면적의 비대칭성을 이용한 방식[3] 등을 사용한 연구가 수행되었다. 이들 각각의 수학 모델 및 실험 모델은 용접 조건과 공정별 특징을 고려하여 개별적으로 발전되어 왔다. 하지만, 결국 이러한 아크 센서 방식들 모두는 용접 중 발생하는 오프셀 거리(토치 중심선이 용접선에서 벗어난 거리)를 효과적으로 인식하여 벗어난 용접선을 추적하는 ‘용접선 추적’이라는 하나의 목적을 가지고 있다. 따라서 각 방식별 특징을 모두 가지며, 보다 나은 용접선 추적 성능을 가진 아크 센서 방식을 개발한다는 것은 여러 용접 조건에서 범용적으로 적용할 수 있다는 점에서 중요하다고 할 수 있다.

본 연구에서는, 아크 센서 방식으로 가장 많이 사용되는 위빙 끝단 전류 비교법(WED, Weaving End current Difference method), 전류 면적 차이법(CAD, Current Area Difference method)과 전류 적분 차이법(CID, Current Integration Difference method)을 통합한 새로운 아크 센서 방식을 개발하고자 하였다. 이를 위해 우선 단순회귀분석을 이용하여 각 방식별로 아크 센서를 모델링하고, 그들의 특징을 살펴 보았다. 그 후 각 방식을 설명 변수로 하는 다중 회귀 분석을 통해 새로운 회귀 모델을 유도하였으며, 이를 통해 얻은 새로운 아크 센서 모델을 가상 용접선 추적 실험을 통해 기존 방식과 비교 분석하였다.

2. 단순회귀 분석을 이용한 아크 센서 방식별 모델링

아크 센서 방식으로 가장 많이 사용되는 위빙 끝단 전류 비교법, 전류 면적 차이법 그리고, 전류 적분 차이법을 통한 아크 센서 모델을 각각 구하였다. 이를 위해 우선 3에서 3mm의 오프셀 거리에 따른 전류값을 얻는 위빙 실험을 실시하였다. 심선 송급 속도는 5.5 m/min, 용접인가전압 22V, 보호가스 CO₂ 100%, 그루브 각도는 90°, 중간 틱-모재간 거리는 20mm, 위빙 폭 8mm, 위빙 주파수 1Hz의 용접 조건을 사용하였다.

전류 면적 차이법은 적분법의 일종으로, 위빙 1/4 주기마다 전류 값을 적분하여 좌우 위빙 주기동안의 전류 비대칭을 사용하는 방식이다. 이 방식에 대해 전류 면적 차이값과 오프셀 거리에 대한 선형 단순회귀분석을 실시하였다. 이 때의 수정된 결정계수()는 0.731 이었으며, 회귀식을 통해 오프셀 거리를 추정할 때의 표준 오차는 1.040mm로 나타났다. 그림 1은 추정한 오프셀 거리를 실제 오프셀 거리에 대해 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 전류 면적 차이법은 오프셀 거리가 비교적 큰 경우에서, 오프셀 거리가 작은 경우보다는 용접선 정보를 보다 정확하게 표현하고 있다. 이는 오프셀 거리가 작은 경우(-1mm~1mm)에는 작은 추적 오차들이 계속 발생하고 큰 외란이 생겼을 때는 곧바로 용접선을 인식하여 추적할 수 있음을 의미한다. 이 점이 전류 면적 차이법의 특징이라

고 할 수 있다. 따라서 Kim 과 Rhee [4]는 회귀 모델을 3 차 이상의 고차식으로 가정하고, 외란에 강한 제어를 설계하여 추적 오차를 줄이는 연구를 수행한 바 있다.

전류 적분 차이법은 위빙 1/2 주기마다 전류 값을 적분하여 그 값의 차이로 오프셀 거리를 알아 내는 방법이다. 선형 단순회귀분석을 통해 얻은 수정된 결정계수는 0.887 로서, 전류 면적 차이법의 경우(0.731)보다 큰 값을 가졌다. 이는 해당 회귀식이 오프셀 거리를 추정하는데 전류 면적 차이법 보다 더 유리하다는 것을 의미한다. 그러나 이 값은 여전히 0.9 이하의 값으로서 해당 회귀식으로 오프셀 거리의 변동을 설명하기에 부족하다고 할 수 있다. 오프셀 거리를 추정할 때의 표준 오차는 0.674mm 로 나타났다. 이 표준 오차도 전류 면적 차이법의 경우보다 작은 값으로서 좀 더 나은 결과라고 할 수 있다. 그림 2 는 추정한 오프셀 거리를 실제 오프셀 거리에 대해 나타낸 것이다. 추정 값의 흩어진 정도도 전류 면적 차이법의 경우보다 적음을 알 수 있다. 하지만, 그림에서 오프셀 거리가 작은 경우(-2mm~2mm)에서는 용접선 정보를 충실히 표현하고 있지만, 큰 경우에는 용접선 정보가 다소 약해지는 경향을 보이고 있다. 따라서 전류 적분 차이법은, 오프셀 거리가 작은 경우에는 추적 성능이 우수하지만, 큰 외란이 생겼을 때는 다시 용접선으로 용접 토치가 돌아오는데 시간이 많이 걸릴 가능성이 있다고 판단할 수 있었다.

위빙 끝단 전류 비교법은 토치의 좌우 위빙 끝단에서 전류값을 비교하여 오프셀 거리를 추정하는 방법으로, 원리가 간단하고 모델링이 쉬워 많이 사용되는 방법이다. 선형 단순회귀분석을 통해 얻은 수정된 결정계수는 0.340 의 매우 작은 값으로, 3 가지 모델 중 가장 작은 값이었다. 오프셀 거리를 추정할 때의 표준 오차는 1.6273mm 로 나타났다. 이 값은 아크 센서의 일반적인 허용 추적 오차인 1.2mm 를 넘는 값으로, 이 방식을 그대로 제어 시스템에 적용하기에는 무리가 있다고 생각할 수 있다. 따라서 위빙 반주기 동안의 데이터를 2 차 최소 자승법을 통해 디지털 필터링하는[1] 등의 데이터 처리가 필요하게 된다. 그림 3 은 추정한 오프셀 거리를 실제 오프셀 거리에 대해 나타낸 것이다. 데이터가 넓게 퍼져 분포하고 있음을 볼 수 있다.

이상의 아크 센서 방식들 모두는 결정 계수가 0.9 미만의 값으로, 해당 모델을 잘 설명할 수 있는 회귀 모델이라고 말하기 어렵다. 또한 이상의 방식들을 모두 1 차로 모델링하면, 각 방식이 갖는 특징을 살릴 수 없다. 따라서 모델을 잘 설명할 수 있는 새로운 인자 도입이 필요하게 된다. 결론적으로, 각 방식별 특징을 모두 가지며, 보다 나은 용접선 추적 성능을 가지는 새로운 아크 센서 방식의 개발이 필요하다고 할 수 있다.

3. 다중회귀분석을 통한 아크 센서 모델링

기존의 방식을 통합한 새로운 아크 센서 모델을 얻고자, 전류 면적 차이, 전류 적분 차이와 위빙 끝단 전류 차이의 3 가지 인자를 설명 변수로, 오프셀 거리를 목적 변수로 하는 선형 다중회귀분석을 실시하고, 회귀식을 유도하였다. 이렇게 해서 얻은 선형 회귀식(LMR, Linear Multiple Regression)을 식 (1)에 나타냈다.

$$y = 0.259x_{CAD} + 0.400x_{CID} + 0.01131x_{WED} - 0.34 \quad (1)$$

이 때, 2 중 수정된 결정계수는 0.925 의 값으로 나타났다. 이 값은 기존 방식보다 더욱 1 에 가까운 값으로서, 이는 식 1 의 LMR 모델이 충분히 해당 모델을 나타내고 있다는 것을 의미한다. 추정 값의 표준 오차도 0.5422 으로 나타나 LMR 모델이 기존 방식보다 우수한 예측 성능을 보임을 알 수

있었다. 그림 4 는 오프셀 거리와 추정된 오프셀 거리와의 관계를 나타낸다. 오프셀 거리의 대소에 관계없이 어느 구간에서나 일정한 예측 성능을 보임을 볼 수 있고, 각 수준의 잔차 값도 일정하게 나타남을 알 수 있다. 이상의 결과를 종합적으로 표 1 에 나타내었다. 다중 회귀 분석을 통해 얻은 회귀 모델이, 아크 센서 플랫폼을 나타내는 결정계수 측면에서나 추정 값의 표준오차 면에서나 가장 우수함을 알 수 있다.

4. 가상 용접선 추적 실험

가상 용접선 추적 실험을 통해 기존 방식과 회귀식을 사용한 방식의 용접선 추적 성능을 비교하였다. 25 스텝의 용접선 추적 구간을 가정하고, 오프셀 각도를 5°로, 용접선 총 길이는 100mm, 용접 속도는 4mm/s 로 하였다. 이 때 외란에 대한 강인도를 알아보기 위해 정규 분포를 갖는 랜덤 노이즈를 외란으로 가정하였다. 제어기로는 퍼지 제어기[4]를 사용하였다. 이 때, 4 가지 방식의 모델이 각각 다르므로 동일한 계수 인자를 사용할 수 없다. 따라서 우선 방식별로 각각의 최적 계수 인자를 구하였다. 이렇게 구한 최적 계수 인자값들을 사용하여 가상 용접선 추적 실험을 실시하였다. 동일한 형태의 외란에 대한, 3 가지 기존 방식의 추적 결과와 회귀 모델을 사용한 방식의 추적 결과의 한 전형적인 예를 그림 5 에 비교하여 도시하였다. LMR 모델이 가장 우수한 성능을 보였고, 다음으로 CID 모델이 전체적으로 만족할 만한 결과를 보였다. 상대적으로 CAD 와 WED 모델은 외란에 약한 것으로 나타났다. 이 두 모델의 경우에, 처음으로 큰 외란이 발생한 2 번째 스텝에서 3 번째 스텝으로 이동하면서 발생한 추적 오차가 2 번째 큰 외란이 발생한 6 번째 스텝에서 더욱 커져서 전체적으로 용접선을 많이 이탈하는 추적 결과를 보였다. 결론적으로, LMR 모델의 경우가 평균 추적 오차와 외란에 대한 추적 오차면 모두에서 가장 우수한 성능을 보임을 시각적으로 확인할 수 있었다.

5. 결론

아크 센서 방식별로 단순회귀분석을 실시한 결과, 전류 면적 차이법은 오프셀 거리가 큰 경우의 용접선 정보를 잘 표현하며, 전류 적분 차이법은 3 가지 기존 방식 중에 가장 예측 성능이 뛰어나고 오프셀 거리가 비교적 작은 경우에 용접선 추적 성능이 우수하다는 것을 알 수 있었다. 또한 위빙 끝단 전류 비교법은 원리가 쉽고 모델링이 간단하지만, 결정 계수면에서나 추정값의 평균 오차면에서 모두 가장 추적 성능이 떨어지는 결과를 보였다. 3 가지 방식을 혼합한 새로운 방식의 아크 센서를 모델링하기 위해 다중회귀분석을 실시하여, 전류 면적 차이, 전류 적분 차이, 위빙 끝단 전류 비교법의 3 가지 설명 변수로 오프셀 거리의 목적 변수를 표현하는 선형 회귀식을 얻을 수 있었다. 이상에서 얻은 선형 회귀식이 결정 계수면에서나 추정값의 평균 오차면에서 가장 우수한 성능을 가짐을 알 수 있었으며, 가상 용접선 추적 실험을 통해, 본 연구에서 제안한 선형 회귀식을 이용한 아크 센서 방식이 우수한 추적 성능을 보임을 검증할 수 있었다.

참고 문헌

- [1] J. W. Kim and S. J. Na A Study on and Arc Sensor for Gas Metal Arc Welding of Horizontal Fillets *Welding Journal* Vol. 70, No. 8 1991 216s-221s
- [2] S. Iwaki Application of Arc Sensors to Robotic Seam Tracking *Sensors and Control Systems in Arc Welding* (Chapman & Hall) 1994 209-215
- [3] Y. Kim, S. Rhee and K. W. Um A Study of Seam Tracking by Arc Sensor Using Current Area Difference

[4] Y. Kim and S. Rhee Development of Arc Sensor Model Using Fuzzy Controller in Gas Metal Arc Welding
Measurement Science and Technology, To be published

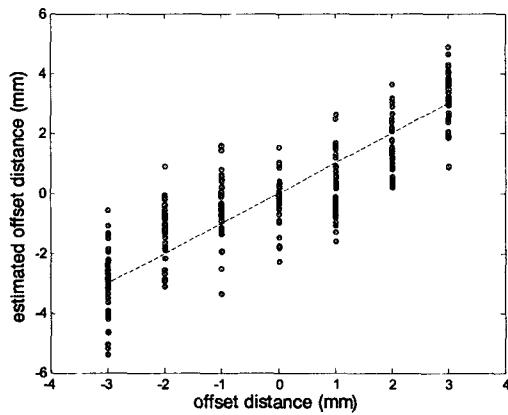


Fig. 1 Estimated offset distance using CAD

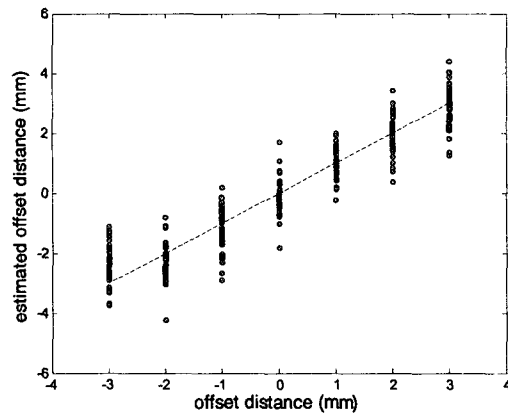


Fig. 2 Estimated offset distance using CID

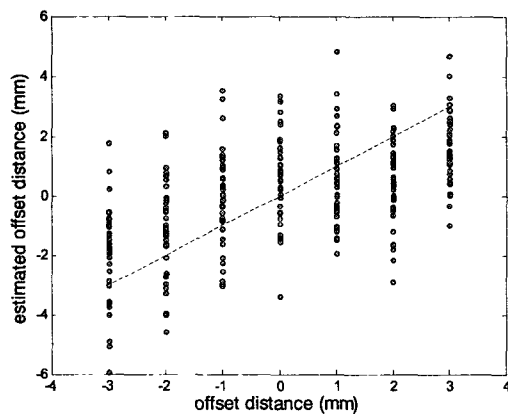


Fig. 3 Estimated offset distance using WED

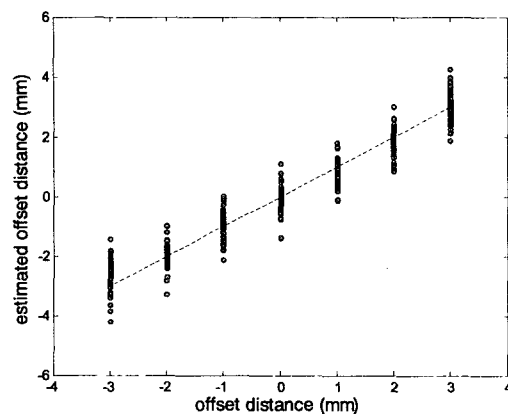


Fig. 4 Estimated offset distance using LMR

Table 1. Performance comparison between CAD, CID, WED and LMR method

Model	$R^2(R^{**2})$	Std. Error of the Estimate
CAD	0.731	1.0400
CID	0.887	0.6740
WED	0.340	1.6273
LMR	0.925	0.5422

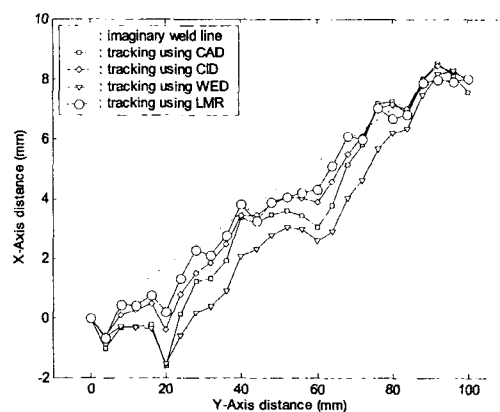


Fig. 5 Results of seam tracking simulation using CAD, CID, WED and LMR method