

아크 센서의 실험 모델링과 퍼지 제어기 설계

A Experimental Modeling of Arc Sensor and Fuzzy Controller Design

김용재*, 이세현**

* 한양대학교 정밀기계공학과 대학원

** 한양대학교 정밀기계공학과

1. 서론

위빙 주파수가 1~5Hz의 경우에 아크 전류 값의 동적 거동에 기초한 센싱 방법으로 전류 면적차(current area difference)를 이용하는 방법이 있다^{[1]~[3]}. 전류 면적 차이법이란 기존의 아크 센싱 방법중 하나인 적분법의 일종으로 위빙시 생기는 전류값의 변화 패턴을 비교하여 용접선 정보를 얻는 방법이다. 이 방식을 통해 얻어진 수학 모델은 기존의 정적인 해석을 기초로 한 모델보다는 좀 더 실제적인 아크 센서 모델을 표현하고 있지만, 용접 현상이 갖는 복잡성을 많은 가정을 통해 단순화시키기 때문에 실제 현상과는 차이를 보이는 수학 모델의 한계를 여전히 가지고 있었다. 또한 오프셀 거리와 전류 면적차 사이의 관계를 단순 1차 선형식만으로 나타낸 실험 모델은 실제 현상이 갖고 있는 센서 오차를 나타낼 수 없었고, 따라서 이를 기반으로 설계된 제어기는 추적시 생기는 신호 노이즈 때문에 그 적용 범위가 제한적이었다.^[3] 따라서 정확한 수학 모델이 필요없고, 노이즈가 포함된 정보 신호를 다루는데 유연한 퍼지 제어기를 도입하여 센서 오차에 유연하게 대처하는 용접선 추적 시스템이 제안되었다.^{[4],[5]} 하지만, 작업자의 경험에 바탕을 둔 퍼지 제어기 설계는 제어 변수를 결정함에 있어 많은 실험이 필요하고, 이렇게 구한 퍼지 제어 변수가 최적의 값인지 검증할 수 없었다.

본 연구에서는, 기존의 실험 모델에서는 포함시키지 않았던 노이즈항을 포함하는 아크 센서 실험 모델을 제안하였고, 이를 바탕으로 실제와 가까운 가상 용접선 추적 시스템을 구성하였다. 이 시스템을 사용한 모의 실험(simulation)을 통해 퍼지 제어 성능을 알아 보았고, 퍼지 제어기 설계에 필요한 적절한 계수 인자들(scaling factors)을 구하였다. 이렇게 구성된 용접선 추적 시스템을 실제 용접선 추적 실험에 적용하여 그 결과를 고찰하였다.

2. 아크 센서의 실험 모델링

아크 센서를 모델링함에 있어 수학 모델은 많은 가정을 수반하여 용접 현상이 갖는 비선형성 및 복잡성을 충분히 표현하지 못하는 제약이 있다. 때문에 이를 직접 선형 제어에 사용하였을 때 아크 센서의 추적은 예기치 못한 결과를 가져 올 수 있다. 따라서 실제 실험을 통한 실험 모델이 필요하고, 이 모델을 통해 센서의 기본 노이즈라든가 추적 제어에 사용할 아크 센서의 선형성을 파악하여 용접선 추적 전략을 세워야 한다.

보호 가스로 CO₂를 사용한 탄산 가스 아크 용접에서 그루브 각도 90°의 아래 보기 V 그루브에 대해, -3mm에서 1mm 간격으로 +3mm까지의 오프셀 거리에 따라 위빙하면서 용접을 실시하였다. 1번 실험에 10회 위빙하면서 각각 5회씩 실험하여 전류 값을 얻었고, 이 때의 용접 조건은 표 1과 같다. 전류 신호는 홀소자(hall sensor)를 사용해 얻어 절단 주파수(cut-off frequency)가 6Hz인 저역 통과 필터를 거치게 한 후 400Hz의 샘플링 속도로 처리하였다. 이 때의 오프셀 거리에 대한 전류 면적차의 평균값을 그림 1에 나타내었다. 그림 1에서 은선은 최소 자승 오차 방법을 통해 얻은 1차 선형 회귀식으로서 식 (1)과 같고, 이 때의 결정계수(coefficient of determination)값 r^2 은 0.9590이다. 이를 통해 오프셀 거리와 전류 면적 차이 사이에는 선형 비례 관계가 있음을 알 수 있으나 데이터와 근사식 사이에 오차가 존재하여, 모델을 단순하면서도 잘 표현할 수 있는 고차의 실험식이 필요하였다. 그림 1에서 곡선은 오프셀 거리에 따른 전류 면적 차이의 관계를 3차식으로 근사시킨 것이다. 이 때의 선형 회귀식은 식 (2)와 같고, 결정계수 값은 0.9979이다. 이 값은 1차 회귀식에 대한 결정계수 값인 0.9590보다 큰 값이며, 충분히 1에 가깝다고 할 수 있어, 아크 센서의 실험 모델식을 3차로 정하였다.

$$y_1 = 1.02607x + 0.111143 \quad (1)$$

$$y_3 = 0.0736x^3 + 0.0175x^2 + 0.5108x + 0.0413 \quad (2)$$

실제 용접선 추적에서는 심선 송급 속도의 불균일^[6], 스파터 발생 등의 여러 외란들이 노이즈로 작용하게 된다. 따라서 실제 아크 센서를 대신하는 실험 모델을 식 (2)의 3차 회귀식 하나로 표현하기는 부족하여 여기에 노이즈 항을 첨가하기로 하였다. 통계학에서 오차는 정규 분포 $N(0, \sigma_E^2)$ 으로 부터 확률 추출된 것이라고 가정하므로^[7], 본 연구에서는 표준 편차가 1인 표준 정규 분포를 갖는 랜덤 노이즈에 각 수준의 잔차(residual) 제곱합 평균의 루트값인 1.96 Amp·sec 를 곱하여 센서 노이즈로 가정하였다. 3차 회귀식과 노이즈 항으로 구성된 실험 모델은 이후 제어기 설계의 기준이 된다.

3. 용접선 추적 제어기 설계

3.1 퍼지 제어

퍼지 제어기의 입력 변수로 추적 오차와 추적 오차 변화량을, 출력 변수로 추적 오차 보정량을 사용하였고, 각각에 계수 인자들(Ge, Gde, Gdu)을 적용하였다. 제어 입력 변수와 출력 변수의 소속 함수(membership function)는 7개의 삼각형 형태로 중심값은 -3에서 3까지의 정수값을 사용하였다. 입력 변수와 출력 변수의 언어 변수로 PB(positive big), PM(positive medium), PS(positive small), ZE(zero), NS(negative small), NM(negative medium), NB(negative big)를 사용하여 제어 규칙표(rule table)을 구성하였고, 이 때, 아크 센서의 응답을 기초로 하는 퍼지 제어기는 샘플링 시간이 충분히 길고 제어 관성이 없기 때문에, 추적 오차 변화량 항보다는 추적 오차 항에 가중치를 부여하였다. 퍼지 추론은 Mamdani의 min-max 방법을, 비퍼지화는 가중 평균법(weighted average method)을 사용하였다.

3.2 모의 용접선 추적 시스템

퍼지 제어기의 성능을 알아 보기 위해 구성한 모의 용접선 추적 시스템의 모식도는 그림 2와 같다. 오프셋 오차가 발생하면 3차 회귀식을 통해 전류 면적차가 얻어지고, 여기에 노이즈를 부가하여 실제 실험에 가까운 전류 면적차 값으로 바꾼다. 다음에 이것은 퍼지 제어기를 거쳐 추적 보정량이 되고, 용접 로봇은 이를 받아 용접선을 추적하게 된다. 여기서 회귀 모델과 노이즈는 실제 용접의 아크 센서 플랫폼을 대신하게 되어, 실제 실험을 통하지 않고도 모의 실험상에서 가상 용접선 추적 실험을 할 수 있게 된다.

3.3 계수 인자 결정

퍼지 제어기에 사용 되는 계수 인자를 최적화함에 있어 기존에는 여러 번의 실험을 통해 좋은 성능을 보이는 계수 인자를 사용하였다. 이런 방법은 비효율적일 뿐만 아니라 그 값이 최적이라고 보장할 수 없었다. 본 연구에서는 모의 실험을 통해 각각의 계수 인자 값에 대한 추적 성능을 평가하여 최적의 계수 인자를 결정하였다. 초기 오프셋 각도가 5° 인 경우에 대하여, Ge, Gdu값은 0에서 3.0까지 0.1 간격으로, Gde값은 0에서 0.3까지 0.01간격으로 변화시켜 격자를 형성하고, 각각의 노드에 20가지 다른 종류의 정규 분포 랜덤 노이즈(normal distributed random noise)를 적용시켜 가상 추적 실험하는 격자 추적 법(grid search method)을 사용하였다. 이 때 추적 성능을 평가하기 위한 목적 함수(cost function, ϕ)로는, 용접 길이 1m를 기준으로 250번 위빙하면서 얻어 지는 추적 오차 절대값의 평균을 사용하였다. 식 (3)에서 e_{ij} 는 i 번째 종류의 노이즈를 갖는 j 번째 위빙의 추적 오차이다. 이를 통해 최종적으로 결정한 최적 계수 인자 값을 표 2에 나타내었다.

$$\phi = \frac{\sum_{i=0}^{20} \sum_{j=0}^{250} |e_{ij}|}{20 \times 250} \quad (3)$$

4. 용접선 추적 실험

제안된 최적의 계수 인자를 사용한 아크 센서 시스템의 타당성을 검증하기 위하여, 실제 용접선 추적 실험을 실시하였다. 용접 로봇은 6축 다관절 용접 로봇으로 Nachi N7603을 사용하였고, 용접 조건은 표 1의 값을 사용하였다. 심선으로 직경 1.2mm의 ER70S를 사용하였으며, 시편은 그루브 각도가 90° 인 V그루브를 대신하여 아래 보기 필릿(Flat fillet)을 사용하였다. 초기 오프셀 각도는 5° 로 하였고, 총 용접 길이 100mm의 직선 용접선에 대해 용접선을 추적하였다. 그림 3과 사진 1은 토치 진행 방향에 대해 오른쪽으로 오프셀 각도 5° 을 주어 추적 실험한 결과의 한 예이다. 이 때 퍼지 제어기의 계수 인자로 3장에서 구한 계수 인자 값을 사용하였다. 평균 추적 오차와 최대 추적 오차를 표 3에 나타내었다. 그림 3에서, 추적 초기에 최대 추적 오차가 발생함을 살필 수 있는데, 이는 용접 로봇의 추적 지연에 따른 기본 추적 오차 발생, 초기의 추적 반대 방향의 큰 노이즈 발생 등에 기인하는 것으로 추적 초반부가 갖는 아크 센서의 한계이다. 하지만 추적 후반부에서는 상당히 양호한 추적 성능을 보이고 있다. 따라서 본 연구에서 제안한 아크 센서 모델과 제어기 및 퍼지 계수 인자 값이 적절하였음을 알 수 있었다.

6. 결 론

오프셀 거리와 전류 면적차 사이의 관계를 알아보는 위빙 실험을 통해 전류 면적차 방식의 아크 센서를 표현하는 3차 선형 회귀식을 얻을 수 있었다. 이를 노이즈항과 결합하여 실제 용접 현상에 가까운 가상 용접 플랜트를 설계하였고, 가상 용접선 추적 시스템을 구성하였다. 이를 기초로 계수 인자에 따른 모의 용접선 추적 실험을 하여, 목적 함수를 최소로 하는 계수 인자를 격자 추적 법을 통해 얻을 수 있었다. 이를 통해 최적의 계수 인자를 가진 PI형 퍼지 제어기를 설계하고, 이를 실제 용접선 추적 실험에 적용한 결과, 오프셀 각도가 5° 인 경우 우수한 추적 성능을 보임을 알 수 있었다.

7. 참고 문헌

1. E. Murakami, K. Kugai and H. Yamamoto : Dynamic Analysis of Arc Length and its Application to Arc Sensing , *Sensors and Control Systems in Arc Welding* (1994), pp. 216-226
2. M. Ootoguro : Groove Tracking Control by Arc-Welding Current , *Sensors and Control Systems in Arc Welding*, (1994), pp. 257-265
3. 김용재, 이세현, 엄기원 : 전류 면적차를 이용한 아크 센서의 용접선 추적에 관한 연구 , *대한 용접 학회지*, Vol. 14, No. 6, (1996), pp.131-139
4. S.Murakami, F.Takemoto and H.Fujimura : Weld-Line Tracking Control of Arc Welding Robot Using Fuzzy Logic Controller , *Fuzzy Sets and Systems*, Vol.32, No.9, (1989), pp. 221-237
5. J. -W. Kim and S. -J. Na : A Self-Organizing Fuzzy Control Approach to Arc Sensor for Weld Joint Tracking in Gas Metal Arc Welding of Butt Joints , *Welding Journal*, Vol.72, No.2, (1993), pp. 60s-66s
6. T. Yamada, et al. : Fluctuation of The Wire Feed Rate in Gas Metal Arc Welding , *Welding Journal*, Vol. 66, No. 9 (1987), pp. 35-42
7. D. C. Montgomery : *Design and Analysis of Experiments* , John Wiley & Sons (1996)

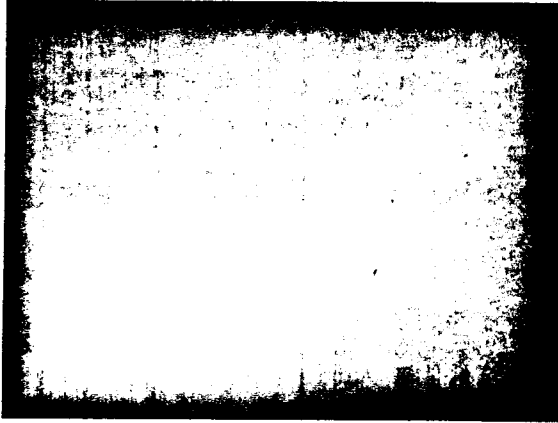


Fig.1 Regression model in experiment

Table1. Welding condition in experiment

심선 송급 속도	5.5 m/min
용접 인가 전압	24 V
보호 가스 유량	100% CO ₂ 20 l/min
그루브 각도	90°
중심 팁-모재간 거리	20mm
위빙 폭	8mm
위빙 주파수	1 Hz

Fig.2 Block diagram of seam tracking simulation system

Table2. Optimal scaling factor

	Ge	Gde	Gdu	목적 함수값
최적 계수 인자	0.4	0.12	1.0	1.1920

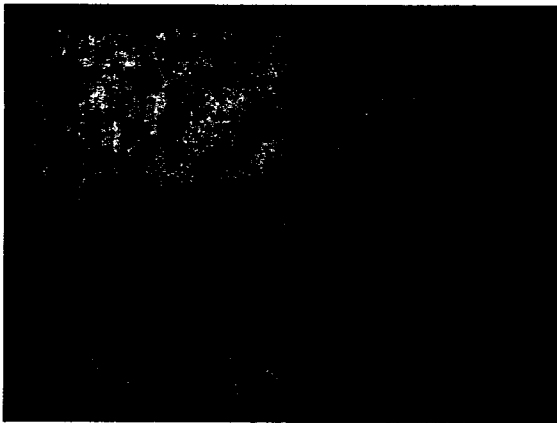


Fig.3 Results of seam tracking experiment

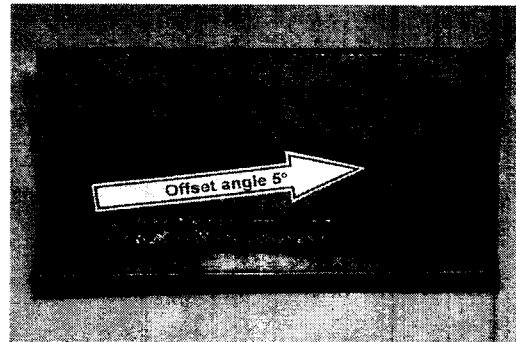


Photo.1 Results of seam tracking experiment with offset angle 5°

Table3. Results of seam tracking experiment with offset angle 5°

Ge	계수 인자		평균 추적 오차	최대 추적 오차
	Gde	Gdu		
0.4	0.12	1.0	0.81 mm	2.37 mm