

## GMA 용접 시스템의 시뮬레이션

유 중 돈

### Simulation of GMAW System

Choong Don Yoo

#### 1. 서 론

아크용접은 고온의 아크를 열원으로 이용하여 모재를 용융시키고, GMA(Gas Metal Arc) 용접의 경우에는 아크에 의해 모재 뿐만 아니라 용접 와이어도 용융하여 용융풀로 이행함으로써 용접부를 형성한다. GMA 용접 공정에서 모재에 가해지는 열입력은 공정변수에 의해 결정되며, 공정변수로 용접전류와 전압, 용접속도, 와이어 송급속도, 분위기 가스, 팁(contact tip)에서 모재까지의 거리(contact tip to workpiece distance, CTWD) 등을 들 수 있다. 적절한 공정변수를 결정하기 위하여 실험적인 방법이나 시뮬레이션을 이용하는 방법을 사용할 수 있다. 실험을 통한 방법은 널리 사용되고 있고 확실한 결과를 얻을 수 있지만, 공정변수를 결정하는데 많은 실험 횟수가 필요하다는 단점이 있다. 시뮬레이션을 이용하는 방법은 공정변수의 개략적인 범위를 미리 예측할 수 있기 때문에 실험 횟수를 줄일 수 있지만, 정확한 결과를 알 수 없다는 단점이 있다.

대표적인 시뮬레이션 소프트웨어로 독일에서 개발된 MAGSIM와 미국 EWI(Edison Welding Inst.)의 ArcWise를 들 수 있다. ArcWise는 주로 데이터베이스에 기반한 프로그램이며, MAGSIM은 모델링을 기반으로 실험 데이터를 이용하므로 ArcWise 보다 유연하다고 판단된다. MAGSIM 프로그램은 공정변수를 예측하거나 열해석을 통한 모재의 온도 계산에 사용할 수 있다. 또한, 열원에 대한 정보를 상용 유한요소 프로그램에 사용할 수 있도록 적합한 형태로 제공하는 기능을 가지고 있다.

GMA 용접에 사용되는 시뮬레이션 프로그램은 크게 2개의 모듈로 구성된다. 첫번째 모듈은 와이어 송급속도, 분위기 가스, CTWD 등의 입력이 주어지면 아크 길이와 용접전류와 전압 등의 공정변수를 계산하며, 두

번째 모듈은 계산된 공정변수를 이용하여 아크 열의 분포를 계산한다. 아크 열의 분포는 모재의 온도 분포와 용접부에서 발생하는 잔류응력과 열변형을 해석하기 위하여 사용한다.

이와 같이 시뮬레이션을 이용하면 GMA 용접에 필요한 공정변수의 범위와 구조해석에 필요한 열원을 구할 수 있지만, 세부적인 사항으로 들어가면 시뮬레이션의 적용 가능한 분야가 제한적이고 정확도에 있어서 개선할 점이 많은 실정이다. 여기에서는 시뮬레이션을 이용하여 GMA 용접의 공정변수를 결정하는 방법과 이를 이용한 열원 모델링에 대한 기존의 연구에 대하여 설명한다.

#### 2. GMA 용접 시스템의 모델링

GMA 용접 시스템을 시뮬레이션하려면 우선 시스템을 구성하고 있는 요소들을 모델링하여야 하며, 이와 같은 구성 요소는 용접기, 와이어 용융 및 아크를 포함한다. 일반적으로 아크 용접기의 전기 회로는 Fig. 1에 보인 바와 같이 저항(R)과 인덕턴스(L)로 구성된 RL 회로로 나타낼 수 있다.

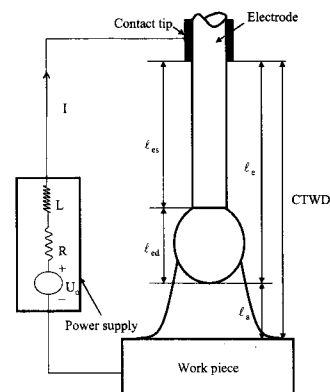


Fig. 1 Schematic of GMAW system

$$L \frac{dl}{dt} + I = U_o - U_a \tag{1}$$

위의 식에서  $U_o$ 는 용접기의 개방전압,  $U_a$ 는 아크 전압을 나타낸다. 아크 전압은 용접전류와 아크 길이의 함수이고 아크 길이는 와이어 송급속도와 용융속도에 의해 결정되며, 아크 전압과 아크 길이는 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$U_a = k_1 + k_2 I + (k_3 + k_4 I) l_a \tag{2}$$

$$\frac{dl_e}{dt} = v_f - v_m, \quad v_m = a I + b l_e I^2 \tag{3}$$

위의 식에서  $l_a$ 와  $l_e$ 는 아크 길이와 와이어 돌출 길이(extension)를 나타내고, 상수  $k_1 \sim k_4$ ,  $a$ 와  $b$ 는 실험으로 구한다.

와이어 송급속도와 CTWD가 입력으로 주어지면, 위의 식으로부터 용접전류와 전압, 아크 길이 등을 계산할 수 있지만, 정확한 시뮬레이션 결과를 얻으려면 정확한 아크의 특성식과 와이어 용융식을 사용해야 한다. 아크 특성식과 와이어 용융식에 보인 바와 같이 여러 개의 상수를 포함하고 있으며, 이들 상수값은 와이어 종류와 분위기 가스와 같은 용접조건에 따라 변화하므로 실험을 통해 구해야 한다. 그러므로 정확한 상수값을 측정하여 시뮬레이션에 적용해야 하지만, 이는 쉽지 않고 특히 CO<sub>2</sub> 가스를 사용하는 조건에서 아크 특성식과 와이어 용융식의 상수값은 찾기 어려운 실정이다.

Fig. 2는 와이어 송급속도가 입력으로 주어지는 경우에 시뮬레이션으로 계산한 단락 이행 모드의 용접전류

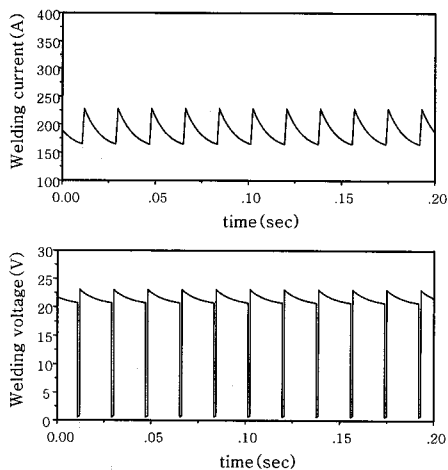


Fig. 2 Simulated current and voltage waveforms of short circuit mode

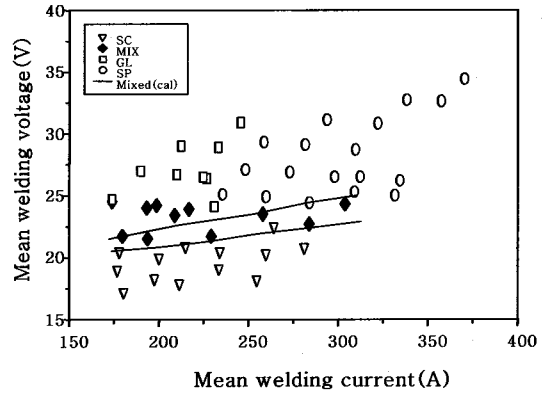


Fig. 3 Comparison between simulated and measured transfer modes

와 전압 파형을 나타낸다. Fig. 3은 시뮬레이션을 통해 예측한 용적이행 모드를 실험결과와 비교한 것이다. 이와 같은 결과로부터 모델을 이용한 시뮬레이션을 통하여 GMA 용접 시스템을 해석할 수 있음을 알 수 있다. 앞에서 언급한 바와 같이 정확한 결과를 얻으려면 시뮬레이션에 사용되는 식의 상수들의 값을 정확하게 알고 있어야 하며, 현재 국내에서 이에 대한 기초 연구나 자료는 많지 않은 실정이다.

### 3. 아크 열원의 모델링

MAGSIM 프로그램의 경우에도 용접 시스템에 대한 해석 결과를 이용하여 열원을 모델링하여 모재의 온도 분포를 계산하는 열해석을 수행한다. GMA 용접에서 발생하는 아크 열원은 다양한 함수를 이용하여 모델링하고 있으며, 대표적으로 사용되는 함수는 아래 식과 같은 Gaussian 함수이다.

$$q = \frac{3\eta_a U_w I}{\pi R_e^2} \exp\left(-\frac{3r^2}{R_e^2}\right) \tag{4}$$

위의 식을 사용하려면 아크 효율(arc efficiency)과 유효 반경, 용접전류와 전압을 결정해야 한다. 용접전류와 전압은 GMA 용접 시스템의 시뮬레이션 결과로서 구할 수 있다. 아크 효율은 시뮬레이션에서 구한 아크 길이와 연관되며, 아크 길이가 짧으면 효율이 증가한다. 용접공정에 따른 아크 효율의 개략적인 범위는 알려져 있지만, 이를 정량적으로 정확하게 계산하기 어렵다. 아크 기둥(arc column)에서 발생하는 열이 외부로 손실된다고 가정하면, 개략적인 아크 효율을 다음의 식으로 추정할 수 있다.

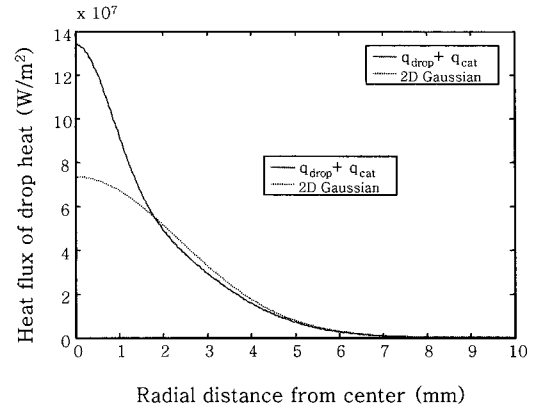
$$\eta_a = 1 - \frac{U_{col}}{U_w} = 1 - \frac{(k_3 + k_4 I) L_a}{U_w} \quad (5)$$

아크의 유효 반경은 주로 용접전류에 의해 결정되며, 전류가 증가하면 유효 반경이 증가한다. 유효 반경에 대한 식도 많지 않으며, 많은 경우에 실험으로 구한다.

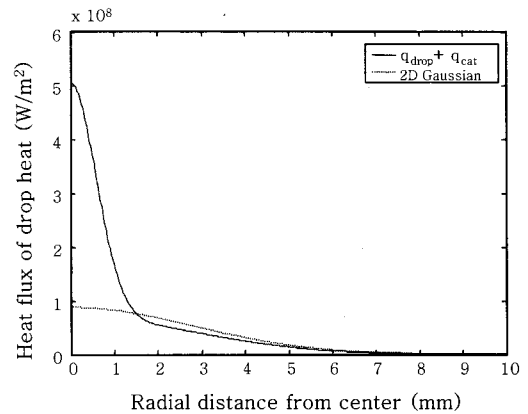
위와 같이 하나의 Gaussian 함수를 이용하여 아크 용접과 레이저 용접의 열원을 모델링할 수 있다. 그러나 하나의 열원이 존재하는 GTA 용접이나 레이저 용접의 열원과 달리, GMA 용접에서는 아크와 함께 용적에 의해 열이 모재로 전달된다. 그러므로 GMA 용접에서는 아크열(arc heat)과 용적열(drop heat)을 표현하는 2개의 Gaussian 함수의 합으로 열원을 모델링하는 것이 타당하다 (즉,  $q = q_{arc} + q_{drop}$ ).

Fig. 4는 2개의 Gaussian 함수를 이용하여 GMA 용접열원을 모델링한 결과를 기존의 1개의 Gaussian 함수를 이용한 결과와 비교한 것이다. GMA 용접에서 아크열과 용적열로 구분하면 아크열은 위의 Gaussian 함수인 식(4)를 사용하면 되고, 용적열의 유효 반경은 용적의 직경에 비례하므로 용적이행 모드와 연관이 있다. 전류가 증가하면 용적의 직경이 감소하여 자유이행 모드에서 용적열이 아크의 중심에 집중되는 현상을 표현할 수 있으며, 이와 같은 함수를 이용하면 비드 형상을 보다 정확하게 계산할 수 있다. 즉, 스프레이 모드에서 용입이 증가하는 현상을 묘사할 수 있고, 이는 스프레이 모드에서는 작은 용적이 용융풀의 중심부에 집중되기 때문이다. 또한, 단락이행 모드에서 용입이 감소하고 비드 폭이 증가하는 현상을 용적열의 유효 반경을 증가시켜 묘사할 수 있다. 이는 용적이 용융풀과 접촉하여 이행되므로 자유이행 모드에 비해 용적이 용융풀에 가해지는 열이 집중되지 않기 때문이다.

열원을 묘사하는 함수의 수가 증가하면 열 분포를 정확하게 예측할 수 있는 장점이 있지만, 결정해야 하는 상수가 많아지므로 사용하기 불편하거나 적용이 어려운 단점이 있다. 또한, 열원을 이용한 열해석은 주로 비드 용접에 대해 수행되었지만, 향후 맞대기 용접이나 필릿 용접의 간극이나 용접 자세 등의 다양한 조건에 적용할 수 있는 열원 모델이 필요하다고 생각한다.



(a) I = 160A

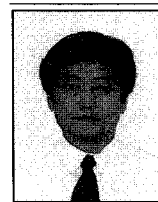


(b) I = 260A

Fig. 4 Comparison between single and double Gaussian heat sources

#### 4. 요약

GMA 용접 시스템을 시뮬레이션 하기 위한 요소 기술과 문제점에 대하여 간단하게 설명하였다. 현재까지의 연구 결과로부터 GMA 용접 시스템을 해석하는데 필요한 원리 및 기본 방정식은 거의 알려진 상태이지만, 이와 같은 시뮬레이션은 이상적인 조건에서 계산한 결과로서 실제와는 차이가 발생한다. 이와 같은 오차는 실험을 통하여 지속적으로 수정 및 보완되어야 시뮬레이션의 정확도를 향상시킬 수 있으며, 향후 시뮬레이션이 용접 생산성과 품질을 향상시키는 도구로 활용될 수 있기를 기대한다.



- 유중돈 (兪仲敦)
- 1956년생
- KAIST 기계공학과
- 용접/접합공정, 마이크로 접합공정
- e-mail: cdyoo@kaist.ac.kr