

# 연강 판재의 맞대기 용접에서 아크에 작용하는 자기력의 해석

배 강 열\*

\*진주산업대학교 메카트로닉스공학과

## Analysis of Electro-Magnetic Force Acting on Arc Column in Butt-Joint Welding of Mild Steel Plate

Kang-Yul Bae\*

\*Dept. of Mechatronics Engineering, Jinju National University, Jinju 660-758, Korea

### Abstract

Arc blow being occurred by Electro-Magnetic Force(EMF) during the electric arc welding prevents the formation of a sound weldment. In this study, the effects of arc position, groove size, tack weld and base plate on the EMF in a butt-joint welding of mild steel plate are analyzed by a computer simulation based on the finite element method. The EMF can be numerically identified to be caused by a difference of the magnetic flux-density between ahead of and behind the arc in case that the workpiece locates asymmetrically around the arc. When there exists an air gap of groove ahead of the arc in the welding direction, the similar magnetic force has been produced regardless of the arc position and the gap size. The tack weld alleviates the magnetic force to about one fourth at the finish end of the workpiece. The magnetic force can be also significantly reduced with the base plate to about one fifth at the start end of the workpiece containing a tack weld.

\* Corresponding author : kybae@jinju.ac.kr

(Received June 28, 2005)

Key Words : Magnetic-flux density, Electro-magnetic force, Groove size, Base plate, Finite element method, Equivalent external magnetic field, Arc blow

### 1. 서 론

직류(direct current) 아크용접에서는 전극봉(electrode)과 부재(workpiece) 사이에 전류의 흐름인 아크(arc)를 발생시켜 용가재 또는 부재를 용융할 수 있는 열원을 얻게 된다. 전류가 흐르는 도선 주위에 자계(magnetic field)가 발생되듯이, 아크에 의해 용접 부재에는 자계가 형성된다. 용접 도중, 부재의 중앙부에서는 자계에 의한 용접공정상의 문제는 야기되지 않으나, 부재의 시작부나 중단부에서 자계로 인하여 아크가 휘어지는 또는 쏘리는 현상이 발생될 수 있다<sup>1)</sup>. 이와 같은 현상을 아크 쏘림(arc blow)이라 하고, 이로 인하여 용융지가 정확한 위치에 형성되지 않아 양호한 용접부를 얻을 수 없게 되고, 언더컷, 과도한 스파터, 용입부족 등 용접성

을 크게 저하하는 문제로 인식되고 있다<sup>2,3)</sup>. 아크가 휘게 되는 원인은 아크 주위에 형성되는 자속의 불균일 분포로 전자기력(EMF)이 발생하여, 강성이 작은 아크가 변형하기 때문이라는 사실로 주지되고 있다. 특히 강자성체인 용접부재에서 아크의 비대칭적 위치, 접지의 비대칭적 설치 등이 자속의 분포를 불균일하게 하는 주요 요인이 된다<sup>4)</sup>.

아크 쏘림을 저감함으로써 양호한 용접부를 형성하기 위한 다양한 조치들이 보고 되고 있다<sup>1,5)</sup>. 예를 들면, 작업자가 용접도중 토치각도를 적절히 조정할 수 있고, 용접전류와 전압을 낮추거나, AC전원을 사용하거나, 접지를 아크위치로부터 멀리 두는 등의 방법이 적절히 활용되고 있다. 특히 용접공정의 자동화를 실현하기 위해서는 이와 같이 작업자에 의해 판단되고 조정되는 수단을 용접상황에 맞게 자동으로 설정될 수 있어야 하

고, 또한 용접작업 사전에 아크 쏠림의 원인들을 최대한 제거해야 한다. 용접 자동화에서 아크 쏠림을 고려하기 위해서는, 우선 여러 용접작업 상황에서 쏠림의 크기를 정량적으로 산출할 수 있는 해석방법과 또한 저감할 수 있는 정량적 방안의 도출이 요구된다. 한편, 고속의 아크 플라즈마제트는 강성을 가지며 자기력 효과에 의해 힘을 받으면 측방향으로 굽어질 수 있다는 정성적 해석이 보고된 바 있고<sup>3)</sup>, 아크와 용융지에 대한 전자기력의 효과를 수치해석적 방법을 이용하여 연구한 결과는 다수 보고가 되고 있으나<sup>6,7)</sup>, 현재까지 용접과 부재의 조건을 고려하여 정량적으로 아크 쏠림의 크기를 분석한 연구가 시도되지 않고 있다. 우선 아크에 작용하는 자기력의 크기를 규명하면, 아크 플라즈마의 강성을 구하는 등 별도의 모델화를 통해 아크 쏠림의 크기를 구할 수 있을 것이다.

본 연구에서는 아크 쏠림을 야기하는 자계를 해석하여 아크에 미치는 자기력의 정량적 크기를 산출하고, 해석을 통해 용접부재 등의 기하학적 조건과 전류의 크기에 의한 자기력의 크기 변화를 규명하고자 하였다. 나아가 해석 결과를 이용하여 용접과 부재 조건에 의해 아크 쏠림을 저감할 수 있는 방안들을 제시하고자 하였다. 전자계의 해석은 유한요소법을 기반으로 작성된 상용 전자기해석 프로그램<sup>8)</sup>을 이용하여 수행하였다.

## 2. 자기력 해석

용접전류로 인하여 강자성체인 연강에서 발생하는 전자기장은, 자기의 세기인 벡터포텐셜을 사용하고, Maxwell 방정식으로부터 유도한 Poisson 방정식으로 나타낼 수 있다<sup>9)</sup>.

$$-\frac{1}{\mu} \nabla^2 A = J_a \quad (1)$$

여기서,  $\mu$ 는 투자율,  $A$ 는 자기 벡터포텐셜,  $J_a$ 는 아크 기둥을 흐르는 전류의 밀도이다.

본 연구에서는 방정식(1)의 벡터포텐셜과 자속밀도 ( $B = \nabla \times A = \text{curl} A$ )을 산출하는 자체해석을 상용 전자기해석 프로그램인 PC-OPERA<sup>8)</sup>를 활용하여 수치해석적 방법(FEM)으로 수행하였다. 용접 도중 아크주위에 자성체인 부재가 비대칭적으로 위치하게 되어 전자기력이 발생한다고 간주하여, 용접위치, 개선 크기(groove size), 가접(tack weld) 등 비대칭의 기하학적 효과를 2차원과 3차원 해석으로 수행하고, 부재의 하부를 지지하는 받침판(base plate)의 크기 효과는 3차원 해석으로 수행하였다. 용접되는 부재는 강자성체

인 연강(mild steel)을, 용접공정은 아크 쏠림이 문제시되는 가스메탈아크(GMA)용접을 해석의 대상으로 설정하였다. 공기의 투자율은 1, 부재의 투자율은 온도에 의해 변화가 발생하나 해석의 단순화를 위하여, 일정한 크기 2000으로 각각 가정하였다<sup>10)</sup>. 접지 위치에 의한 효과를 배제하기 위하여, 접지는 항상 아크 기둥의 가장 아래 위치의 부재 바닥에 설정하였다. 해석결과에서, 아크 기둥이 받는 용접진행 방향 합력을 아크에 작용하는 자기력으로 취하였다.

### 2.1 2차원 해석

가로와 세로가 각각 10mm인 4각 단면 기둥의 전도체를 아크라고 가정하고, 부재의 두께가 무한대의 크기이고, 아크가 부재의 두께에 걸쳐 균등하게 분포한다고 가정하여, 전류의 흐름에 직각인 단면에 대하여 2차원 해석을 하였다. 부재의 크기는 길이 1000mm, 폭 500mm로 설정하고, 두께 방향의 임의 단면을 해석영역으로 모델화 하였다. 용접부의 개선은 단순히 10mm의 간극(gap)을 가지고 있다고 가정하고, 용접이 수행되지 않은 개선 부분은 빈 공간으로 간주하여, 공기의 성질(공극)을 갖게 하였다. Fig. 1은 2차원 유한요소 해석 모델의 요소분할 형태로, 1080개의 사각형 요소(element)로 구성되어 있다. 간극의 크기를 가변하게 됨에 따라, 간극 및 간극 주위 부재를 나타내는 요소의 크기를 필요에 따라 변화하였다. 부재(workpiece 영역) 주위에는 공기의 제반 성질을 갖는 충분한 크기의 경계영역(air 영역)을 두고, 경계영역의 각 가장자리에서는 경계조건으로 법선방향 자속밀도를 0으로 두었다. 방정식의 해를 구하기 위하여 Newton-Raphson 방법이 활용되는 바, 해석에서는 수렴을 위한 허용치로서  $10^{-4}$ 을 설정하였다. 2차원 해석에서는 용접위치, 간극 크기, 가접길이, 전류 등의 변화를 고려하여 자체를 해석하고 자기력을 산출하였다. 여러 상황의 용접조건을 고려하여, 특히 용접위치는 부재의 시작부(start), 중

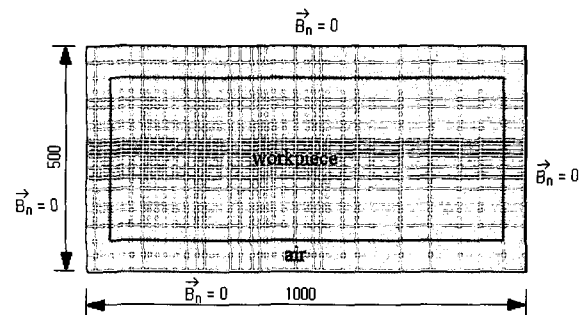


Fig. 1 Mesh division of solution domain for 2-D electro-magnetic analysis

단부(end), 가장자리부(시작부 또는 종단부 근방), 가 접은 0, 10, 20, 30mm, 간극은 0, 2, 4, 6, 8, 10mm, 전류는 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400A에 대하여 각각 해석하였다.

### 2.2 3차원 해석

해석영역은, 부재의 크기를 길이 200mm, 폭 100mm, 두께 10mm로 설정하고, Fig. 2와 같이 부재 상하에 두께 10mm인 4개의 재료 층을 두어, 공기 층, 받침판(base plate) 층을 둘 수 있게 하였고, 1680개의 직육면체 요소로 분할하여 구성하였다.

아크의 형상은 가로, 세로 폭이 각각 10mm이고, 길이가 20mm로, 부재 두께에 걸쳐 10mm 길이, 부재 위 공기 층에 10mm 길이로 형성된 4각 기둥으로 모델화 하였다. 실제 컨택트 팁(contact tip)에서 부재까지 길이는 스틱아웃(stick-out)과 아크의 길이로 구성되나, 해석의 편의상 스틱아웃까지를 포함하여 아크의 길이로 가정하였다. 아크 기둥의 상부에 양의 전압, 하부에 영의 전압을 인가하여 두고, 용접 전류의 가변은 아크 저항을 조정하여 실현하였다. 3차원 해석에서는 아크 주위에 위치한 부재의 기하학적 비대칭 효과를 해석하고, 또한 받침판의 크기를 변화하면서 받침판의 효과를 해석하고자 하였다.

### 3. 결과 및 고찰

부재의 시작부 또는 종단부에서 용접이 진행되면, 용접부 주위의 공기는 투자율이 낮아 자기저항(magnetic resistance)이 크므로 자속밀도(magnetic-flux density)의 크기가 낮게 분포되고, 자기저항이 상대적으로 낮은 부재에는 대부분 자기의 경로가 형성되어, 특히 공기부에 면한 부재에는 자속밀도가 급증하여, 아크 선후의 부재내 자기분포는 비대칭적이 된다. 자속밀도의 비대칭에 의한 효과는, 대칭적 자기분포를 갖는 도체에 상당 외장(equivalent external magnetic field)이 부가적으로 작용하는 것과 동일하다고 간주할 수 있다.

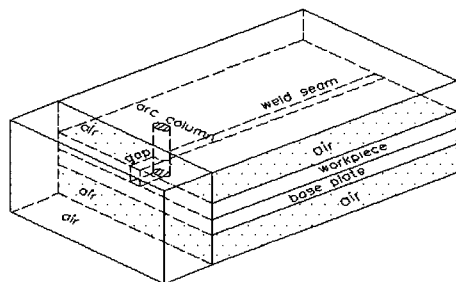


Fig. 2 3-D analysis model with base plate and surrounding air

따라서 용접전류의 흐름인 아크에 의한 내부 자기장에 외부의 자기장(외장)이 벡터적으로 중첩된 형태로서, 비대칭의 기하학적 상황에 놓인 아크 주위에 발생하는 자속밀도 비대칭 현상의 이해가 가능하다<sup>3)</sup>. 이때 외장과 아크 전류에 의해, 각각에 직각 방향으로의 자기력이 아크에 작용하게 되고, 아크의 쓸림을 야기할 수 있게 된다.

해석결과에서는 아크 주위에 형성된 비대칭의 자기장에 의해, 아크에 힘이 작용되는 사실을 보여 주고 있다. Fig. 3은 평균 간극 10mm로 가정한 개선(groove)이 존재하는 부재를 길이 방향으로 용접해 나갈 때, 아크에 가해지는 단위길이당의 자기력을 2차원적으로 해석한 결과를 보여 주고 있다. 자기력은 용접진행과 반대 방향으로 작용할 때 양(positive)의 값을 갖는다고 설정하게 되면, 용접위치에 무관하게 대략 400dyne/mm 정도 크기로 용접진행에 반대 방향의 자기력이 아크에 작용하게 됨을 알 수 있다.

다만 부재 시작부의 용접에서는 자기력이 -400dyne/mm의 크기로 나타나, 자기력이 용접진행방향으로 아크에 작용함으로써 아크가 부재로 쏠리게 됨을 예측할 수 있다. 자속은 자성체를 통과하는 것이 공기보다 매우 용이하기 때문에 대부분의 자력선이 부재를 통과하게 된다. 용접이 시작되는 부재 시작부에서 대부분의 자속이 아크 후단부를 통해 흐르게 되어, 용접진행방향으로 자기력이 나타나게 된다.

한편, 부재 시작부를 지나 용접이 계속되어, 용접 진행방향으로 아크 전방에 공기로 형성된 간극이 존재하게 되면, 아크 선단부에 자기경로가 집중적으로 형성되어 자속밀도가 매우 높게 된다. 이로 인해, 아크의 위치에 관계없이 자속의 분포형태가 동일하게 비대칭성을 유지하게 되어, 용접된 길이에 무관하게 아크는 유사한 크기의 자기력을 용접 진행과 반대방향으로 받게 됨을 알 수 있다.

해석결과와 다음 관계식(2)을 이용하면, 아크 주위

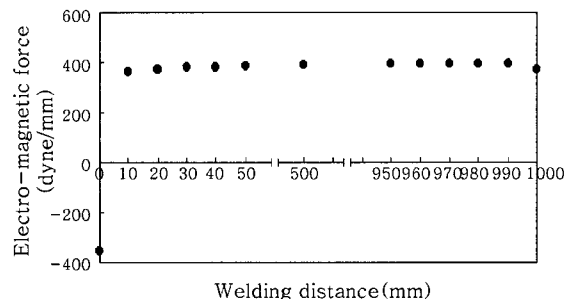


Fig. 3 Calculated electro-magnetic forces acting on arc during welding of workpiece with 10mm gap along with welding distances

자기장의 비대칭성으로 인한 상당 외부자기장의 크기도 간접적으로 산출이 가능하게 된다.

$$F_a = \int_V (J_a \times B_e) dV \quad (2)$$

여기서  $J_a$ 는 아크를 통해 흐르는 전류 밀도,  $B_e$ 는 자기저항의 비대칭분포로 인한 상당 외부 자기장에서 자속밀도,  $V$ 는 아크의 부피,  $F_a$ 는 아크에 가해지는 자기력이다.

Fig. 4는 아크를 중심으로 기하학적으로 비대칭인 부재 위치에서 용접이 진행될 때 아크 주위의 자속밀도 등분포선도(단위: Tesla)를 보이고 있다. Fig. 4(a)는 용접이 종료되기 직전의 시점에서 부재에 더 이상의 개선이 존재하지 않는 경우의 등분포선도로, 아크 선단부에서의 자속밀도가 아크 후단부의 밀도보다 매우 크게 나타나므로, 상당 자력선은 아크 선단부에서 좌측에서 우측(용접진행방향과 직각)으로 작용한다고 판단할 수 있다. 이로써 아크에 가해지는 힘은, 전류가 부재의 위에서 아래 방향으로 흐르므로, 플레밍의 왼손법칙에 의해, 용접 진행과 반대 방향으로 작용됨을 알 수 있다.

2차원 해석의 경우, 높이 방향으로의 조건이 동일함을 가정한 것으로, 전류의 흐름 주위에는 높이 방향으로 무한한 부재가 존재하고 있는 상황을 해석하게 된다. 이때 자속밀도의 해석결과는 다음과 같이 자속밀도의 연속조건, 즉 부재 내와 공기 간극(공극)에서 자속

밀도의 수직성분이 동일하다는 조건(방정식 (3))과 압페어의 주회법칙(방정식 (4))으로부터 단순히 예상한 크기와 유사한 결과를 보이게 된다<sup>11,12)</sup>. 방정식 (5)는 방정식 (4)의 각 자계세기에 방정식 (3)에서 얻어진 자기세기를 대입하여 도출할 수 있다.

$$B = \mu H_s = \mu_0 H_g \quad (3)$$

$$H_s(2\pi r - g) + H_g g = I \quad (4)$$

$$B = I / (2\pi r - g) / \mu + (g / \mu_0) \quad (5)$$

여기서  $B$ 는 자속밀도,  $H_s$ 는 부재 내의 자계세기,  $H_g$ 는 공극 내의 자계세기,  $g$ 는 간극의 크기,  $r$ 는 도선으로부터의 반경방향거리,  $I$ 는 전류,  $\mu_0$ 는 공기의 투자율,  $\mu$ 는 부재의 투자율이다. 방정식 (5)에 의해서, 간극( $g$ )이 존재함에 따라, 부재 내의 자속밀도가 낮게 나타날 수 있음을 간단히 예측할 수 있다.

한편, Fig. 4(b)는 간극이 존재하는 부재의 종단에서 50mm 후방까지 용접이 진행된 상태에서의 자속밀도 분포를 보여주고 있다. 간극이 존재하는 경우는 아크 전후의 비대칭적 밀도 분포를, 즉 아크 선단부에 자속 밀도가 높고 아크 후단부, 즉 용접 완료부에서의 밀도가 낮은 분포를 보여 주고 있다. 따라서 아크 진행방향에서 오른쪽으로 자력선이 작용하고, 이로 인해 아크에 진행방향과 반대방향으로의 힘을 가하게 된다. Fig. 4(c)는 아크가 간극이 존재하는 부재에 용접하기 시작하는 순간의 자속밀도 분포이다. 자속밀도는 아크 후단부가 선단부에 비해 매우 크게 나타나, 아크를 부재 쪽으로 휘게 하는 힘을 작용한다. Fig. 4(d)는 용접이 다소 진행된 상태에서의 자속밀도 분포이다. 아크의 선단부에 자속이 크게 집중됨으로 아크를 용접방향과 반대로 휘게 하는 힘이 작용되고 있다. 힘의 크기는 용접 종단부 근접시와 유사하게 나타나, 간극이 존재하면 아크에 작용하는 힘의 크기는 유사하게 나타남을 알 수 있다.

Fig. 5는 3차원 해석에 의해 구해진 용접부에서의 자속밀도 분포도를 보이고 있다. Fig. 5(a)에서 보인 바와 같이, 용접종료 위치에서는 아크 주위에 밀도가 크게 나타나고 있다.

그림에서는 해석프로그램 특성상 아크(conductor)가 놓인 위치 내의 자속밀도 분포를 보이고 있지 않으나, 간극 주위의 자계가 양쪽 부재에서 연속성을 유지하기 위해서는 부재의 끝에서 공기부에 면한 아크의 선단부에 자속밀도가 집중되었으리라 판단할 수 있다. Fig.

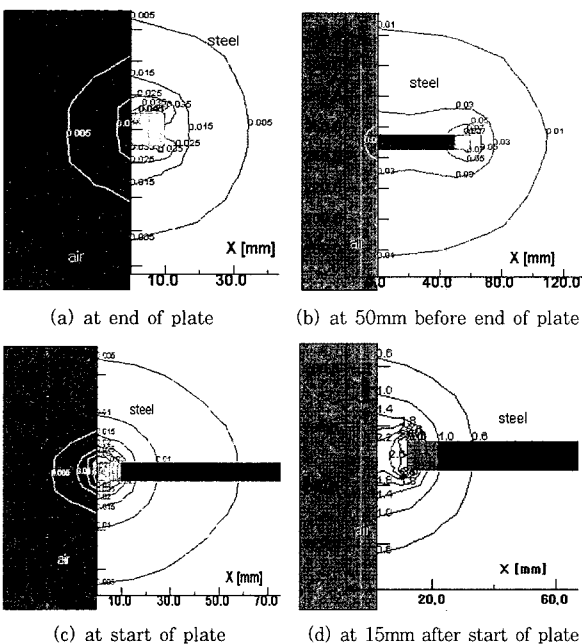


Fig. 4 Contour of magnetic-flux density during welding of butt-joint plate at asymmetric location

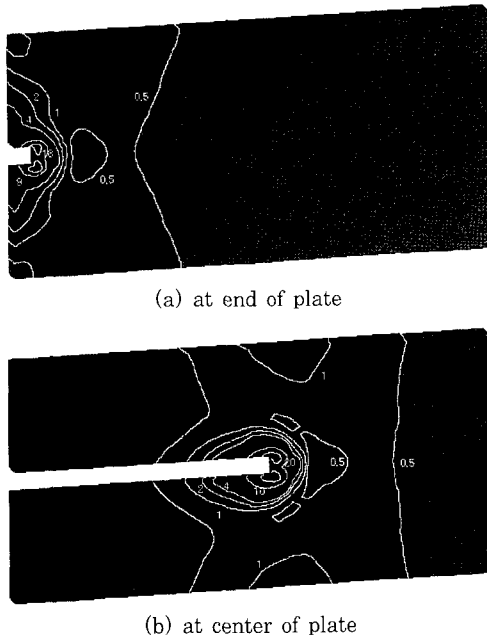
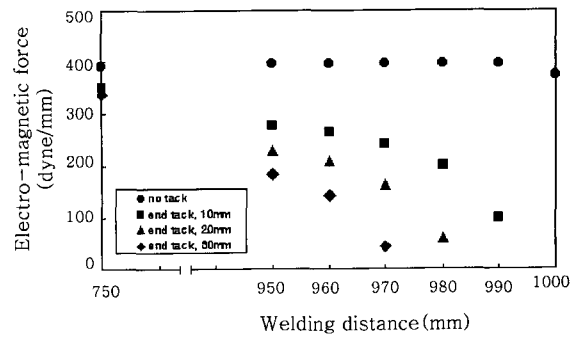


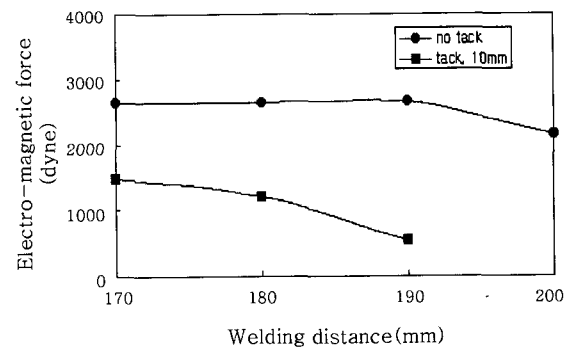
Fig. 5 Contour of magnetic-flux density during welding of butt-joint plate calculated with 3-D analysis

5(b)와 같이 부재 중앙에서의 분포도 유사하게 나타났다. 따라서 3차원 해석에서도, 아크 선단부에 간극이 존재하는 경우, 아크에 가해지는 힘은 용접위치에 무관하게 유사한 크기를 나타내게 됨을 보이고 있다. 3차원 해석결과에서는, 부재에 간극이 존재하여도 자속밀도의 분포는 2차원 해석에 비해 매우 크게 나타나고, 간극의 길이가 자속밀도 분포에 큰 영향을 미치지 않음을 보이고 있다. 이는 3차원 해석에서, 해석영역에 직각방향으로는 자성 부재가 무한대의 크기를 가진다고 가정한 2차원 해석과는 달리, 공기 층 공간 내에 부재가 존재하고 있는 상태를 모델링한 결과로, 부재에서의 자기 저항이 매우 낮아 자속이 대부분 부재내로 흐르기 때문이며, 자기 세기  $H(=I/2\pi r)$ 가 인가된 공기 공간 내에 자성체 부재(투자율  $\mu$ )가 놓여 있는 상황으로 단순하게 대략의 자속밀도 크기를 예상할 수도 있다<sup>13)</sup>.

Fig. 6(a)은 용접부재의 종단부에 가접부(tack weld)를 둔 경우의 2차원 해석결과를 보여주고 있다. 가접부의 크기가 증가할수록 종단부에서의 아크에 작용하는 자기력이 현저히 작아짐을 보이고 있다. 특히, 10mm 가접의 경우, 가접이 없는 경우에 비하여 자기력이 1/4의 크기로 줄어들고 있다. 이는 가접부에서 자기경로를 용이하게 형성하여 아크 전후 자기분포의 비대칭성을 완화하기 때문으로 해석된다. 따라서 가접은 종단부에서 아크쏠림을 크게 줄일 수 있는 대안이 될 수 있을 것으로 판단된다.



(a) calculated with 2-D analysis



(b) calculated with 3-D analysis

Fig. 6 Effect of tack length at end of plate on electro-magnetic force

Fig. 6(b)는 3차원 해석의 결과로, 역시 가접에 의해 자기력이 현저히 줄어드는 효과를 보여 주고 있다. 2차원 해석의 결과는 단위 길이당의 힘을 나타내고, 3차원 해석의 결과는 부재에 걸친 아크(10mm)에 작용하는 자기력을 보이고 있다.

Fig. 7(a)은 용접 종료부에 가접이 존재하고 있을 경우의 자속밀도 분포를 나타낸다. 자속이 가접부에도 분산되어 분포함으로써 아크 전후의 밀도차를 다소 완화하고 있음을 알 수 있다. 따라서 가접으로 인하여 아크에 작용된 상당 외장의 크기는 크게 줄었다고 판단할 수 있다. Fig. 7(b)는 10mm 길이의 가접부를 가진 부재의 종단부 30mm 전방까지 아크가 근접한 경우, 3차원 해석에 의한 자속밀도의 분포를 보여 주고 있다. 가접부가 아크선단의 자속흐름에 부분적으로 자기 경로의 역할을 함으로써 아크 전후의 자속밀도차를 완화하게 됨으로, Fig. 6(b)에서 보인 바와 같이 가접이 없는 경우에 비하여 자기력이 절반이하로 낮게 작용된 결과를 나타내었다고 판단된다. Fig. 7(c)는 가접부가 용접 종료부에 존재하는 경우는 가접위치로의 자력선이 존재함으로써, 간극이 존재하는 경우보다 자속 밀도의 분포가 전체적으로 2배 정도 크게 나타나, 가접 위치에서의 자기 분포로 인하여 아크 전후의 자속밀도의 비대칭성

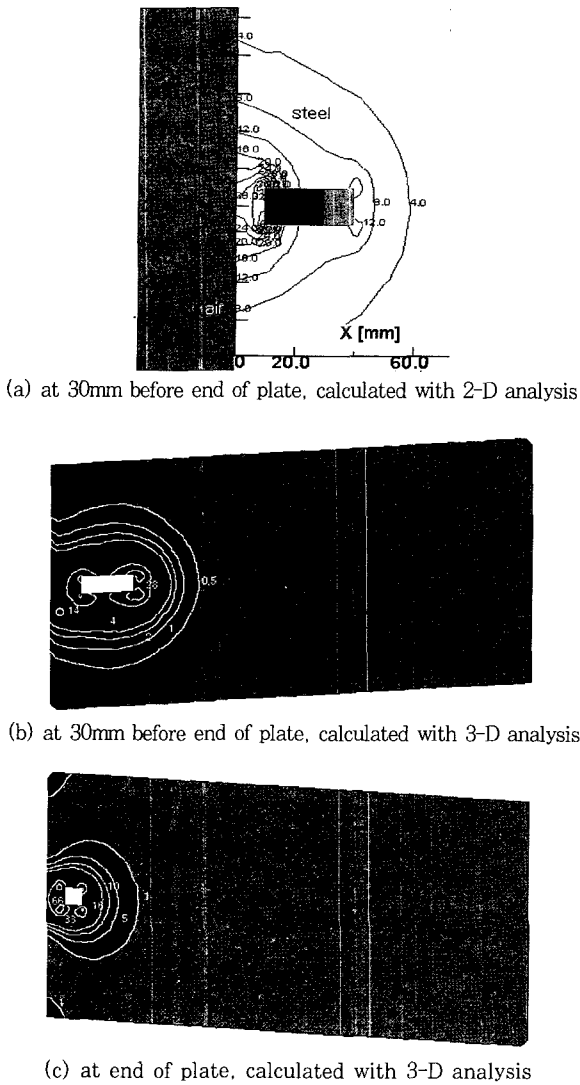


Fig. 7 Contour of magnetic-flux density with tack weld at end of plate during welding at asymmetric locations

을 크게 완화될 수 있음을 나타낸다. 이는 Fig. 6(b)에서 보인 바와 같이 자기력의 크기가 가접이 없는 경우보다 약 1/5 크기로 낮게 나타난 이유로 판단된다.

Fig. 8은 간극이 존재하는 경우와 비드-온-플레이트(bead-on-plate)의 경우, 용접을 시작하는 아크의 위치에 따른 자기력의 크기를 해석하고 비교한 결과이다. 두 가지 해석 부재의 경우 공히 아크가 부재의 중앙에 존재하면 자기력이 발생하지 않는 결과를 보였고, 아크의 위치가 가장자리 방향으로 위치하게 됨에 따라 자기력이 증가되고 특히 간극이 존재하는 경우는 이러한 경향이 현저하였다. 비드-온-플레이트의 경우는 가장자리를 제외하고는 자기력이 매우 낮게 나타났다. 이는 아크 진행방향 전후로 부재 사이에 자기 경로가 형성되어 있어 자기력이 크지 않은 결과이다. 여기서, 실제 용접

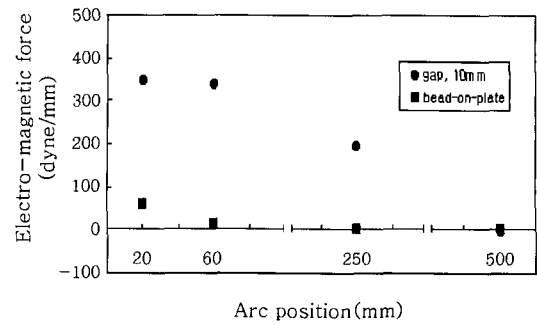


Fig. 8 Comparison of EMFs at welding start position between in bead-on-plate welding and in butt-joint welding

공정에서 가장자리 외의 용접위치에서 아크솔림이 크게 문제가 되지 않는 것은 양 부재 아래 받침판(base plate)이 존재하거나 실링비드(sealing bead)를 두는 등의 이유로 자기경로가 형성되고 있기 때문으로 유추할 수 있다.

Fig. 9는 부재 종단부에서의 자기력 크기를 용접전류의 크기에 따라 해석한 결과이다. 전류의 증가에 따라 2차 함수의 형태로 자기력이 증가하게 됨을 보이고 있다. 이는 자기력의 크기가 전류와 자기장의 곱으로 결정되고, 자기장은 전류에 의해 크기가 결정되기 때문이다.

Fig. 10은 부재 종단부로부터 15mm 후방에 용접이 수행되고 있을 때, 간극의 크기에 따라 자기력을 해석한 결과로, 간극이 존재하는 경우는 크기에 무관하게

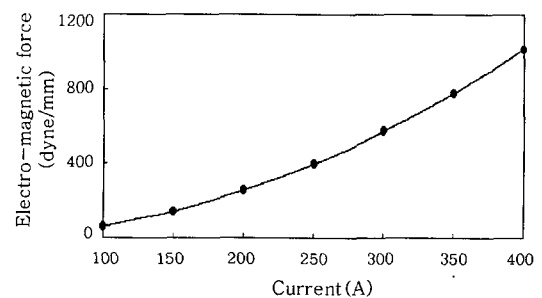


Fig. 9 Effect of welding current on EMF

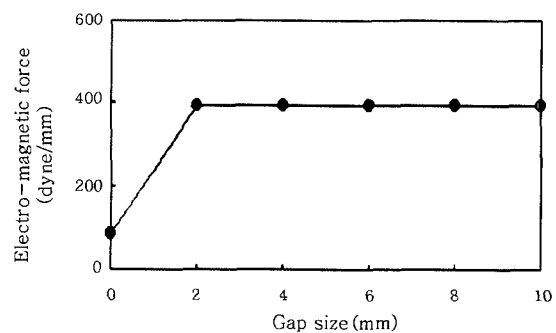


Fig. 10 Effect of gap size on EMF

동일한 크기의 자기력을 받게 됨을 보이고 있고, 간극이 존재하지 않을 경우보다 4배 이상의 자기력을 나타내었다.

Fig. 11은 부재 종단부에서 용접을 수행할 때 받침판의 효과를 보여주고 있다. 특히 가접이 존재하지 않는 경우는 자기력을 크게 줄이는 역할을 하고 있다. 즉 자기경로가 아크 선단부 아래에 위치한 받침판으로 형성됨에 따라 아크 선후의 자속밀도를 줄이게 되고, 따라서 아크에 작용하는 자기력이 축소된다.

Fig. 12는 용접 시작부로부터 10mm 전방의 위치에서 아크가 발생하는 경우에 받침판의 효과를 보인 결과로, 시작부에 가접이 존재하면 진행방향에 반대방향, 즉 가접부 방향으로 약 1000dyne의 자기력이 나타나, 받침판을 뒀으므로 자기력이 현저히 줄어들어 약 200dyne의 크기로 나타나게 됨을 알 수 있다. 즉, 용접 시작부에서는 받침판이 가접에 의한 자속밀도의 비대칭성을 크게 완화하고 있음을 보여 주고 있다. 가접이 없는 경우는 용접진행방향으로 약 800dyne의 자기력이 나타나고 받침판을 뒀으므로 600dyne으로 자기력이 다소 감소하는 결과를 보이고 있다.

Fig. 13은 간극이 존재하는 아래에 받침판을 둔 경우의 해석결과로, 자속밀도의 크기가 받침판이 없는 경

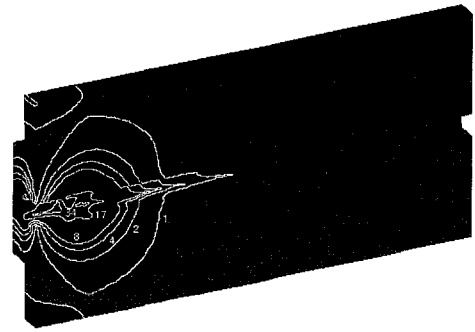


Fig. 13 Contour of magnetic-flux density during welding at start of plate with base plate

우보다 상승하여 나타났으나, 아크 전후의 자속밀도 차이가 크게 완화됨을 보여 준다. 이로 인해 아크에 가해지는 힘은 Fig. 12에 보인 바와 같이 약 600dyne으로 낮아졌다고 판단된다. 실제 용접의 경우 받침판이 용접 부재와 일체는 아니므로 다소의 차이는 존재할 수 있을 것으로 판단되나, 밀착된 경우 자기 저항의 크기가 매우 작아져 일체형의 효과가 기대된다. 실제의 용접부에서 용접도중의 자기력에 의한 아크의 쓸림이 나타나지 않는 것은, 받침판이 존재하거나 루트 간격이 0인 경우가 있고, 실링비드를 가지고 있기에, 용접 부재가 직간 접으로 밀착되어 있어 자기경로를 형성할 수 있기 때문 이라고 판단된다.

아크의 쓸림을 줄이기 위해서는, 자기경로를 확보하기 위한 대책으로, 받침판과 가접을 활용하고, 용접 시 종단부에서 붙임편(run-off tabs)을 활용하는 것이 효과적이라고 판단된다.

#### 4. 결 론

연강 판재의 맞대기 용접에서 용접조건과 부재조건에 따라 변화하는 전자기력과 아크쓸림 현상을 유한요소해석을 통해 정량적으로 규명하고, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 용접의 시작부, 종단부 등에서와 같이 부재가 용접전류의 흐름에 비대칭으로 위치할 때 아크 양단의 자속밀도 차에 의해 아크기둥에 직각방향으로 자기력이 작용함을 수치해석적으로 규명할 수 있었다.
- 2) 용접진행 방향으로 아크 선단부에 개선(간극)이 존재하는 경우는, 아크의 위치와 간극의 크기에 무관하게, 유사한 크기의 자기력이 아크에 가해진다.
- 3) 부재의 가장자리에서, 용접전류의 크기에 따라 아크에 작용하는 힘은 2차 함수적으로 증가하였다.
- 4) 간극이 존재하는 맞대기 용접에서, 가접은 용접 종단부에서 아크에 가해지는 자기력을 크게 낮추어,

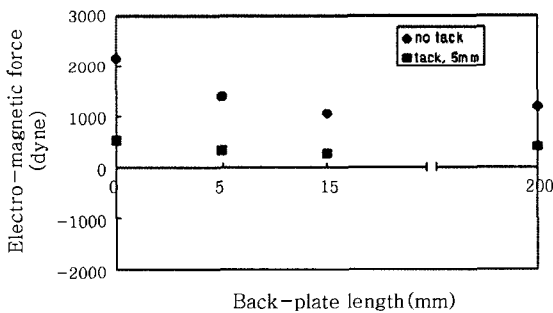


Fig. 11 Effect of back-plate length on EMF during welding at end of plate with or without end tack

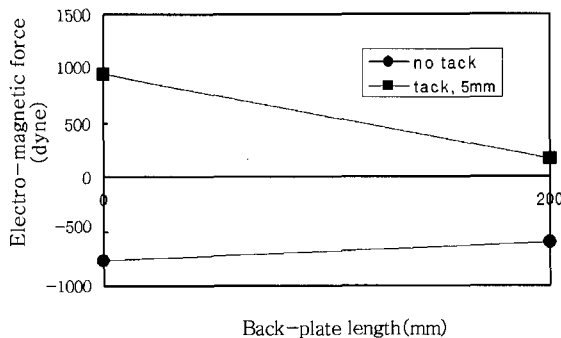


Fig. 12 Effect of back plate on EMF during welding at start of plate with or without tack weld

10mm 가접이 존재하는 경우, 가접이 없는 경우에 대하여 1/4의 크기로 감소하였다.

5) 간극이 존재하고 시작부에 가접이 있는 부재에, 받침판을 부착한 경우, 용접 시작부에서 아크에 가해지는 자기력이 1/5의 크기로 크게 낮아졌다.

## 후 기

전자장 해석프로그램의 사용에 도움을 주신 경성대학교 안진우 교수께 감사를 드립니다.

## 참 고 문 헌

1. Lincoln Electric Co. : Prevent Arc Blow When Welding. Metal Forming-Richmond Heights then Independence, 35-5 (2001), 42-46
2. American Welding Society : Fundamentals of Welding, 1975, 56-59
3. J. F. Lancaster : Metallurgy of Welding (4th Edition), 1980, 31-50
4. E. Halmoy : A Cause of Arc Blow, Welding Journal, 61-9 (1982), 43-47
5. D. Schaffer : Attacking Arc Blow, Welding Journal, 78-4 (1999), 47
6. Y. Wang and H. L. Tsai : Impingement of Filler Droplets and Weld Pool Dynamics during Gas Metal Arc Welding Process, International Journal of Heat and Mass Transfer, 44-11 (2001), 2067-2080
7. I.-S. Kim and A. Basu : A Mathematical Model of Heat Transfer and Fluid Flow in the Gas Metal Arc Welding Process, Journal of Materials Processing Technology, 77-3 (1998), 17-24
8. Vector Field Inc. : PC-OPERA, 2000
9. J. Jianning : The Finite Element Method in Electromagnetics, John Wiley and Sons, 1993
10. J.-G. Kang, J.-H. Lee and J.-G. Shin : Numerical Analysis of Induction Heating for the Application of Line Heating, Journal of the Society of Naval Architects of Korea, 37-3 (2000), 110-121 (in Korean)
11. Y.-K. Kim : Electro-Magnetics, Daeyoung, Seoul, Korea, 1992, 126-134 (in Korean)
12. S.-W. Park and S.-J. Na : A New Current Measurement Method in Resistance Spot Welding, IEEE Trans. on Instrument and Measurement, 39-5 (1990), 767-772
13. S.-Y. Han : Introduction to Electronic and Electric Engineering, Daeyoung, Seoul, Korea, 1996, 275-277 (in Korean)