

MIAB용접에서 코일에 의한 자속밀도 분포의 수치적 해석에 관한 연구

최동혁*, 김재웅**

A Study on the Numerical Analysis of Magnetic Flux Density by a Solenoid for MIAB Welding

Dong-Hyeok Choi*, Jae-Woong Kim**

ABSTRACT

The MIAB welding uses a rotating arc as its heat source and is known as an efficient method for pipe butt welding. The arc is rotated around the weld line by the electro-magnetic force resulting from the interaction of arc current and magnetic field. The electro-magnetic force is affected by magnetic flux density, arc current, and arc length. Especially, the magnetic flux density is an important factor on arc rotation and weld quality.

This paper presents a 2D finite element model for the analysis of magnetic flux density in the actual welding conditions. The magnetic flux density is mainly dependent on gap between two pipes, the position of coil from gap center, exciting current, and relative permeability. Thus, the relations between magnetic flux density and main factors were investigated through experiment and analysis. Experiments were performed for the steel pipes(48.1mm O.D and 2.0mm thickness). The analysis results of magnetic flux density reveal that it increases with increasing exciting current, increasing relative permeability, decreasing distance from gap center to coil, and decreasing gap size.

It is considered that the results of this study can be used as important data on the design of coil system and MIAB welding system.

Key Words : MIAB Welding(자기구동아크 맞대기용접), FEM(유한요소법), Electro-magnetic force(전자기력), Magnetic flux density(자속밀도), Relative permeability(비투자율)

1. 서론

용접 자동화가 추진되고 있는 가운데 파이프의 용접에서도 TIG(tungsten inert gas)용접법이나 MAG(metal active gas)용접법을 중심으로 자동화 연구 개발이 활발

히 진행되고 있다. TIG용접법과 MAG용접법은 용접선을 따라 파이프 주위를 토치 헤드부가 이동하면서 용접하는 방법이다. 이런 방법들에서 용접부 품질을 보장하기 위해서는 토치 헤드부의 정밀한 위치 제어가 필요하다.

2001년 4월 6일 접수

* 영남대학교 대학원 기계공학과

** 영남대학교 공과대학 기계공학부

MIAB(magnetically impelled arc butt welding)용 접법은 맞대 놓은 두 파이프 단면 사이에 아크를 발생시켜 이것을 전자기력으로 회전시킴으로써 단 면부를 용융시키고 파이프를 축방향으로 가압하여 접합하는 방법이다. 따라서 MIAB용접법은 용접토치나 모재의 동작이 없어 간단한 시스템으로도 자동화가 용이 하고 파이프가 전극이 되어 대전류 사용이 가능하여 고 능률적이다¹⁾. 그리고 파이프 사이에 아크가 존재하므로 전력 손실을 줄일 수 있으며 특히, 짧은 용접시간으로 생산성 향상에 기여할 수 있다. 또한 MIAB용접법은 스패 터가 적기 때문에 상대적으로 깨끗한 용접부를 얻을 수 있으며 재료 소모량도 적다²⁾. 그리고 플래쉬 용접과 비교해 전력 요구량이 적고 정렬오차 (mismatch)가 있는 파이프간의 맞대기 용접도 가능하다는 장점이 있다³⁾.

MIAB용접법에 대한 기존 연구들은 피용접재의 두께에 따라서 나타나는 자속밀도 분포특성과 아크 회전거동 특히, 아크회전의 위치변화에 대한 원인을 실험적으로 규명하고자 하였다. 자속밀도는 용접품질과 아크회전거동(arc rotating behavior)에 영향을 미치는 중요한 인자이며 효과적인 자속발생 및 집속에 유리한 코일시스템도 MIAB용접에서 매우 중요한 요소이다. 즉, 강관의 MIAB용접에 대한 이전 연구들에서 반경방향의 자속이 강할수록 아크 회전 속도는 증가하고 파이프 끝면이 더 균일하게 가열, 용융되며 더 좋은 용접결과를 얻을 수 있다고 한다⁴⁾. 그러나 기존의 연구들에서는 코일의 위치 및 파이프 사이 틈새 크기에 따른 자속밀도 분포특성에 대한 보다 세밀한 연구가 미흡하다. 또한 실제 용접 시 파이프 사이 틈새의 크기는 1.5~2.0 mm로 파이프 단면부의 반경방향 자속에 대한 측정 은 쉽지 않기 때문에, 실제 용접조건에서 자속밀도의 특성을 파악하기 위해서는 수치적 해석방법이 요구된다. 기존 연구들은 자속밀도에 대한 수치해 석적 접근방법은 시도되지 않았다. 따라서 본 연구 에서는 효과적인 자속발생 및 집속에 유리한 코일 시스템과 MIAB용접장치의 설계에 필요한 자료를 얻기 위해 두 파이프 사이 틈새에 형성되는 자속에 영향을 미치는 주요 인자들을 선정해 자속밀도에 대한 영향을 보다 면밀히 조사하였으며, 실제모델 을 충분히 대변할 수 있는 2차원 유한요소 해석모 델을 구축해 실제 용접조건에서 측정 불가능한 자 속밀도의 분포와 특성을 파악하였다. 또 해석한 결 과의 신뢰성을 검증하기 위해 실제 측정치와 비교

하였다.

2. MIAB용접원리 및 해석모델

2.1 MIAB용접의 원리

MIAB용접법은 회전하는 아크를 열원(heat source)으로 사용하며 파이프의 맞대기 용접에 효과적인 방법으 로 Fig. 1에 MIAB용접법의 원리를 나타내었다.

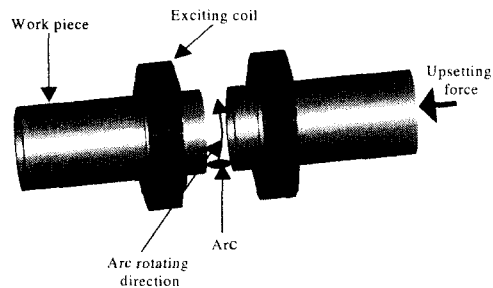


Fig. 1 Principle of MIAB welding

우선 여자코일(exciting coil)은 각각의 파이프 끝에서 같은 자기적 극성(polarity)을 가지는 방법으로 자화되고 자속의 경로는 두 파이프 사이 틈새에서 파이프의 반 경 방향으로 된다. 그 후 아크를 접합부 틈새에 발생시 키면 아크는 반경방향 자속과 교차하기 때문에 Fig. 2 와 같이 플레밍의 왼손법칙(Fleming's left-hand law)에 따라 전자기력을 받고 파이프 틈새에서 원주 방향으로 회전하기 시작한다.

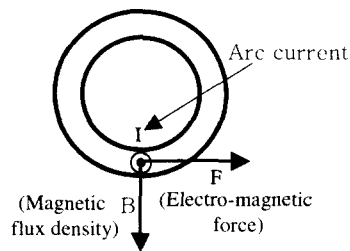


Fig. 2 Fleming's left-hand law

그 결과 파이프 끝면은 가열되고 용융된다. 접합부가 적절한 용접온도에 도달하는 순간에 파이프를 축방향으로 가압하여 접합한다.

아크를 회전시키는 전자기력(electro-magnetic force)은 아크내의 각각의 전하가 외부 자기장으로부터 받는 로렌츠 힘(Lorentz force)의 합으로 생각할 수 있다. 즉, 아크를 회전시키는 전자기력의 분포는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\vec{F} = \vec{J} \times \vec{B} \quad (1)$$

\vec{F} : Density of force propelling arc

\vec{J} : Current density

\vec{B} : Magnetic flux density

결국 이 전자기력의 합은 아크의 길이에 따라 달라지기 때문에 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$F \propto B \cdot I \cdot L_a \quad (2)$$

F : Force propelling arc

B : Magnetic flux density

I : Arc current

L_a : Arc length

식 (2)에서 알 수 있듯이 자속밀도, 아크전류 그리고 아크길이는 아크를 회전시키는 전자기력에 영향을 미치는 중요한 변수로 작용한다.

2.2 해석모델 및 경계조건

파이프 사이 틈새에 형성되는 자속밀도는 아크회전과 용접품질에 중요한 변수로 작용하기 때문에 자속밀도에 영향을 미치는 주요 인자들을 선정해 그 영향을 조사하였다. 그러나 실제 용접조건에서 자속밀도는 측정장치의 기하학적 형상의 제약으로 인해 측정 불가능하기 때문에 실제 용접조건에서 아크를 회전시키는 전자기력에 영향을 미치는 파이프 틈새와 상하방향 자속밀도의 분포와 특성을 파악하기 위해 Fig. 3과 같이 실제모델을 대변할 수 있는 2차원 유한요소 해석모델을 구축해 수치적으로 해석을 수행하였다. 실제 해석모델은 파이프 전체 길이를 모두 포함하나, 그림에서는 코일근처의

유한 요소들을 나타내었다. 그림에서 보는 것처럼 아크회전거동에 영향을 미치며 관심영역인 파이프와 코일주변의 상하 방향, 그리고 파이프 틈새 부분은 조밀한 영역으로 나누어 다른 부분들과 구분하였다. 또한 y축을 대칭축으로 하는 축대칭(axisymmetric)조건으로 실제모델을 충분히 대변할 수 있도록 해석을 수행하였다. 해석영역(analysis domain)은 관심영역의 자속밀도가 변하지 않을 때까지 확장하여 실제모델을 좀더 잘 대변할 수 있게 설정하였다. 사용된 해석모델의 절점은 34631개로 구성하였다.

자속밀도 해석 시 여자코일에 흐르는 전류는 코일의 단면적(cross-section area)당 전류밀도로 주어지고 경계조건(boundary condition)은 전체 해석모델에서 해석영역 외부로 누설되는 자속이 없는 것으로 가정하여 수행하였다. 이것은 여자코일로부터 발생된 대부분의 자속이 투자율이 매우 높은 파이프로 집중되어 흐르기 때문에 외부로의 누설자속은 거의 발생하지 않기 때문이다. 본 해석의 계산과정에는 범용 유한요소해석 프로그램인 'ANSYS'를 이용하였다.

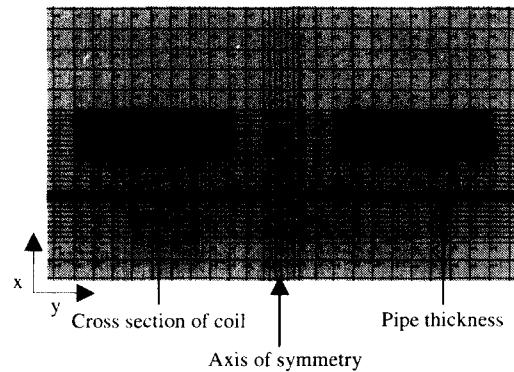


Fig. 3 Analysis model

3. 실험방법 및 장치

3.1 실험방법

Fig. 3의 해석모델을 이용해 수치 해석한 결과의 신뢰성 검증을 위해 실제 자속밀도의 측정치와 비

교를 목적으로 주요 변수들에 따라서 나타나는 자속밀도를 측정하였다. 자속밀도는 가우스 메타(Gauss meter)의 프로브(probe)를 이용해 Fig. 4와 같은 방법으로 파이프 단면 바깥표면을 영점으로 하여 위쪽을 양의 방향, 아래쪽을 음의 방향으로 설정해 측정하였다. 측정장치의 프로브는 원형의 형상이며 직경은 6.9mm이다.

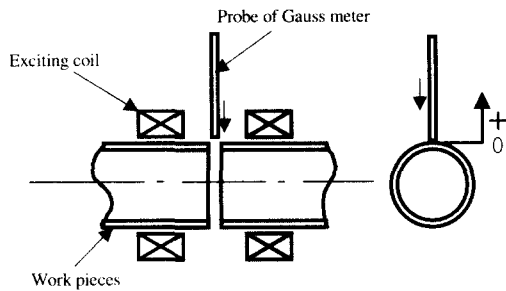


Fig. 4 Measuring method of magnetic flux density

자속밀도의 실제 측정과 해석에 사용된 주요 인자들은 Fig. 5에서 볼 수 있듯이 파이프 사이 틈새(L_g), 파이프 사이 틈새 중심으로부터 코일까지 거리(L), 그리고 코일에 흐르는 여자전류(I_0)로 하였다.

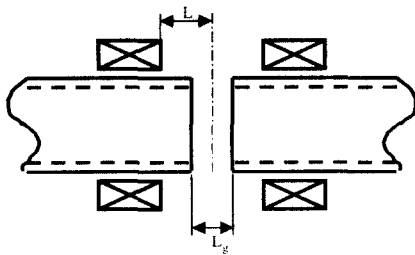


Fig. 5 Main factors in the measurement and analysis of magnetic flux density

그리고 자속밀도 측정과 해석에 사용한 각 변수들의 조건은 Table. 1에 나타내었다.

Table 1 Experiment and analysis conditions of the main factors

Exciting current I_0 (A)	Interval L(mm)	Gap L_g (mm)
1.0	10	1.5
1.5	20	2.0
2.0	30	3.0
	40	4.0
	50	5.0
		6.0
		7.0

3.2 실험장치 및 구성

실험과 해석에 사용한 피용접재는 외경 48.1 mm, 두께 2.0mm의 탄소 강관으로 하였다. 파이프 사이 틈새에 반경방향 자속을 형성시키기 위해 자속발생용 코일시스템을 설계, 제작하였다. 우선 코일에 인가할 전류범위에 따라 적절한 코일선을 선정하였으며, 자속발생용 여자코일은 960회(turn)의 것을 2개 사용하였다⁵⁾. 또 코일에 전류를 공급하기 위해 10A, 50V규격의 정전류(constant-current) 특성의 직류(D.C) 전원장치(power supply)를 이용하였다. 그리고 자속밀도 측정을 위한 장치는 Fig. 6과 같이 두 파이프의 고정(clamping)장치, 코일을 고정할 별도의 장치, 그리고 파이프 사이 틈새를 조절할 수 있는 이동(sliding)장치로 구성하였다.

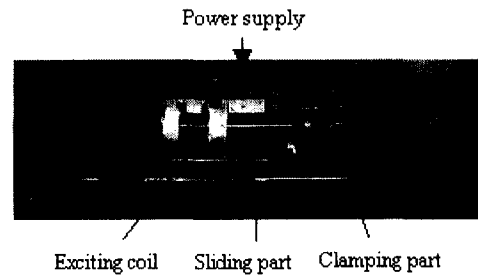


Fig. 6 Configuration of experiment equipment

4. 결과 및 고찰

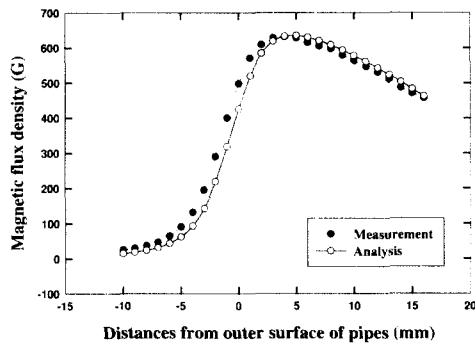
수치 해석한 결과의 신뢰성 검증을 위해 주요

변수들에 따른 자속밀도의 해석치와 측정치를 비교하였다. 또 아크를 회전시키는 파이프 사이 틈새의 자속밀도에 대한 변수들의 영향을 해석과 실험을 통해 조사하였다.

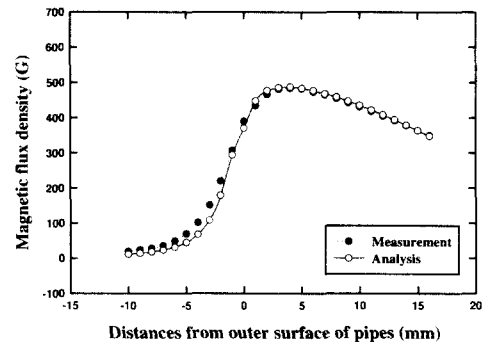
4.1 여자전류에 따른 자속밀도

코일에 인가할 여자전류(I_c)에 따라서 발생하는 자속밀도는 달라지고 파이프 사이 틈새로 유기되는 자속은 영향을 받는다. 따라서 이러한 영향들을 파악하기 위해 Fig. 7에 각각의 여자전류의 수준에 따라서 나타나는 아크가 존재하는 파이프 틈새와 파이프 두께 상하방향의 자속밀도 분포와 특성을 측정치와 계산치를 비교해 나타내었다. Fig. 7(a)의 경우 자속밀도의 최대값은 약 650 Gauss로 (c)의 경우와 비교해 그 값의 비율은 거의 2배에 도달한다. 즉, 여자전류가 증가함에 따라 자속밀도의 최대치와 파이프 두께 외연부와 내연부의 자속밀도 차는 해석치와 측정치 모두가 커지고 해석치와 측정치의 값은 비교적 잘 일치하는 것을 볼 수 있다.

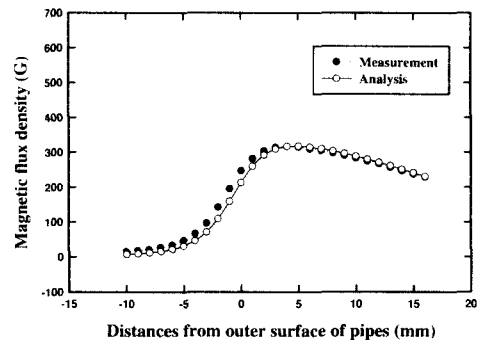
균일한 용접품질을 얻기 위해서는 파이프 사이 틈새에 가능한 많은 자속을 형성시키는 것이 필요하다. 따라서 가능한 여자전류를 증가시킴으로써 파이프 사이 틈새로 많은 자속을 집중시킬 수 있다.



(a) $I_c = 2.0 \text{ A}$



(b) $I_c = 1.5 \text{ A}$

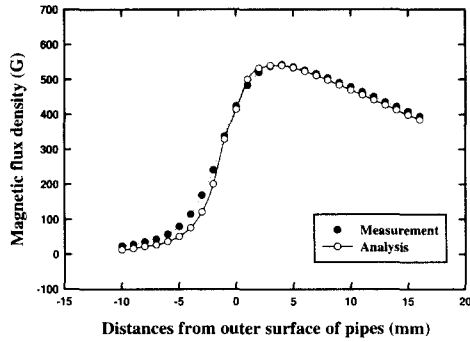


(c) $I_c = 1.0 \text{ A}$

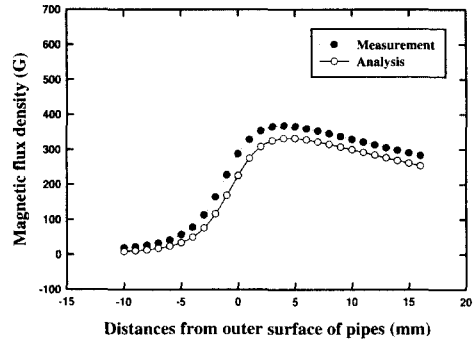
Fig. 7 Comparison between measurement and analysis corresponding to the exciting current($L=10\text{mm}$, $L_e=7.0\text{mm}$)

4.2 코일위치에 따른 자속밀도

여자전류와 같이 파이프 사이 틈새 중심으로부터 코일까지 거리(L)도 자속밀도에 영향을 미치는 인자이다. 또 그것에 따라 실제 용접시 코일의 위치를 결정할 수 있다. 따라서 Fig. 8에 파이프 사이 틈새 중심으로부터 코일까지 거리가 변할 때 나타나는 자속밀도 변화의 경향을 측정치와 해석치를 비교해 나타내었다.

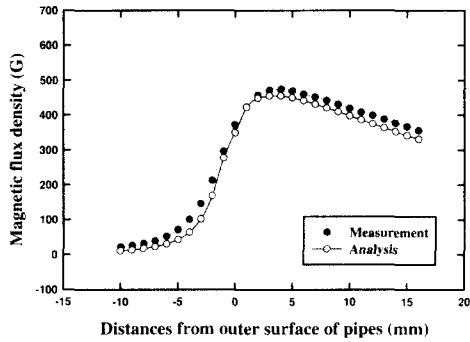


(a) $L = 20$ mm

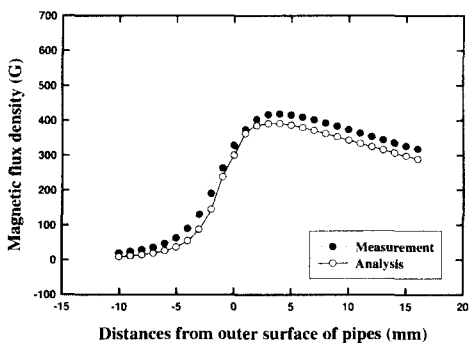


(d) $L = 50$ mm

Fig. 8 Comparison between analysis and measurement corresponding to the interval($I_c=2.0$ A, $L_s=7.0$ mm)



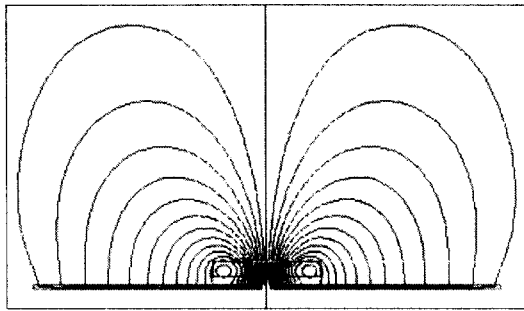
(b) $L = 30$ mm



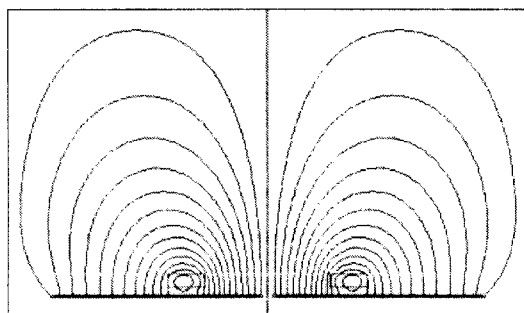
(c) $L = 40$ mm

그림에서 알 수 있듯이 파이프 틈새 중심으로부터 코일까지 거리가 가까울수록 파이프 틈새 부분의 자속밀도 값과 최대치는 증가하는 것을 볼 수 있다. 반면 거리가 멀어질수록 자속밀도의 최대값은 감소하고, 일부 부분에서 측정치와 해석치의 차가 증가하는 것을 볼 수 있으나 자속밀도 분포의 경향은 전체적으로 잘 일치한다. 또 코일의 위치에 따라서 파이프 사이 틈새와 그 주변의 자기력선(flux line) 분포를 해석한 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 해석 시 비투자율(relative permeability)의 적용은 강자성체인 강관은 1000, 비자성체인 구리는 공기와 같은 1로 하여 해석을 수행하였다. 그림에서 알 수 있듯이 (b)와 비교해 (a)의 경우 파이프 사이 틈새와 그 주변의 자기력선 분포가 조밀한 것을 볼 수 있다. 이것은 파이프 사이 틈새 중심으로부터 코일까지 거리가 가까울수록 누설자속이 감소하여 파이프 사이 틈새로 유기되는 자속이 많아지기 때문이다. 따라서 균일한 용접품질을 얻기 위해 자속 발생용 여자코일을 용접부 가까이에 위치시킴으로써 누설자속을 감소시켜 파이프 사이 틈새에 많은 자속을 집중시킬 수 있다.

지금까지의 수치 해석한 결과와 실험치를 비교해 본 결과 두 값이 비교적 잘 일치함을 볼 수 있다. 따라서 본 2차원 유한요소 해석모델은 실제적 현상을 잘 대변할 수 있는 것으로 판단된다.



(a) L = 10 mm



(b) L = 50 mm

Fig. 9 Magnetic flux line according to the interval ($I_c=2.0$ A, $L_g=7.0$ mm)

4.3 파이프 사이 틈새에 따른 자속밀도

식(2)에서 알 수 있듯이 파이프 사이 틈새(L_g)가 변할 때 아크를 회전시키는 전자기력은 달라지며 자속밀도에도 영향을 미치는 중요한 인자로 작용한다. 따라서 실제 용접시 파이프 사이 틈새 수준과 더불어 다양한 틈새 크기에 따라 나타나는 자속밀도의 특성을 파악하기 위해 측정장치를 이용해 측정하였다. Fig. 10은 그 결과를 보여준다.

파이프 사이 틈새가 좁을수록 자속밀도의 최대값이 증가하는 것을 볼 수 있다. 또 파이프 두께 외연부 근처에서 자속밀도 값은 파이프 틈새에 따라 상대적으로 큰 차이를 보이나 파이프 두께 바깥표면으로부터 거리가 멀어질수록 자속밀도 값의 차이는 감소하는 경향을 나타내고 있다.

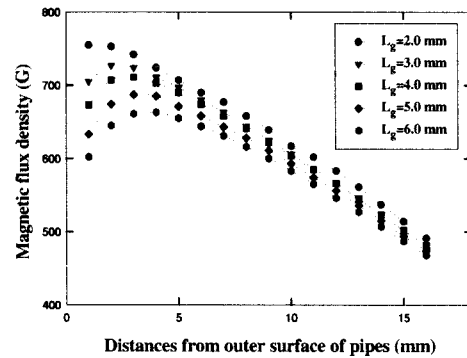


Fig. 10 Magnetic flux density distribution according to the gap($I_c=2.0$ A, $L=10$ mm)

파이프 두께 아래방향의 자속밀도 측정은 측정장치 프로브의 크기보다 파이프 사이 틈새가 좁은 관계로 측정이 불가능하였다. 실제 용접시 틈새 수준은 1.5-2.0mm이다. 따라서 이때 아크가 존재하는 파이프 두께와 파이프 두께 상하방향 부분의 측정 불가능한 자속밀도 값과 또 파이프 두께 바깥표면으로부터 거리에 따른 자속밀도 변화를 수치적 해석모델을 이용해 시뮬레이션(simulation)하였다. Fig. 11, 12는 틈새가 각각 1.5, 2.0mm 일때 해석한 결과로 그림에서 알 수 있듯이 자속밀도의 최대치와 파이프 두께 외연부와 내연부의 자속밀도 차는 여자전류에 따라 차이는 존재하지만, 파이프 사이 틈새가 큰 경우 즉, 앞의 결과들과 비교해 그 값은 상당히 큰 것을 볼 수 있다. 이것은 실제 아크회전에 영향을 미칠 것으로 사료된다.

Fig. 13은 다양한 파이프 사이 틈새 크기에 따라서 파이프 두께부분과 그 주변의 자속밀도의 분포특성을 나타낸다. 파이프 두께 부분에 자속밀도 변화의 기울기와 자속밀도의 최대값은 파이프 사이 틈새가 좁을수록 증가하는 것을 확인할 수 있다.

4.4 비투자율에 따른 자속밀도

앞의 변수들 뿐만 아니라 강관의 비투자율도 아

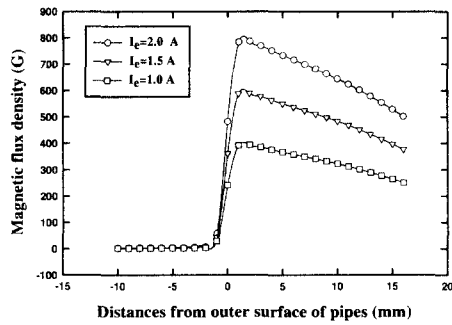


Fig. 11 Result of analysis according to the exciting current($L_g=1.5$ mm, $L=10$ mm)

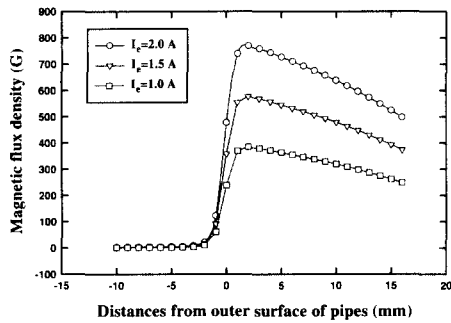


Fig. 12 Result of analysis according to the exciting current($L_g=2.0$ mm, $L=10$ mm)

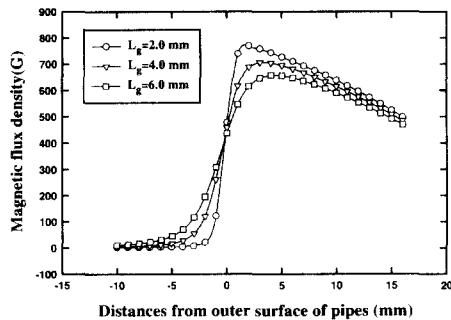


Fig. 13 Result of analysis according to the gap ($I_c=2.0$ A, $L=10$ mm)

크회전에 필요한 자속밀도에 영향을 미치는 인자이다. 즉, 강관의 비투자율(relative permeability)이 클수록 여자코일에서 발생된 자속이 파이프로 집중되어 더 많은 자속이 파이프 사이 틈새에 형성된다. 따라서 파이프 사이 틈새로 집중되는 자속밀도에 대한 비투자율의 영향을 파악하기 위해 수치적 해석모델을 이용해 해석을 수행하였다. 그 결과를 Fig. 14에 나타내었다.

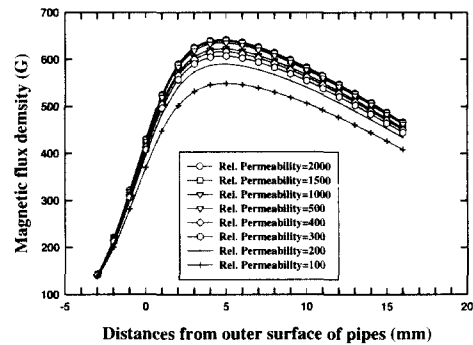


Fig. 14 Magnetic flux density according to the relative permeability($I_c=2.0$ A, $L=10$ mm, $L_g=7.0$ mm)

그림에서 알 수 있듯이 비투자율이 2000에서 200까지 범위인 경우 파이프 사이 틈새에 형성되는 자속밀도에 대한 비투자율의 큰 영향은 볼 수 없고, 비투자율이 100인 경우, 200과 비교해 상대적으로 자속밀도 값이 많이 감소한 것을 볼 수 있다. 그러나 자속밀도에 대한 비투자율의 영향은 상대적으로 앞의 주요 변수들 보다 적은 것을 알 수 있다.

5. 결론

MIAB용접법의 특성상 아크회전에 필요한 자속밀도는 매우 중요한 변수이다. 특히 효과적인 자속 발생 및 집속에 유리한 코일시스템은 MIAB용접에서 매우 중요한 요소이다. 따라서 본 연구에서는 외경 48.1mm, 두께 2mm의 탄소 강관을 대상으로 두 파이프 사이 틈새에 형성되는 자속밀도에 대한 주요 인자들의 영향을 해석과 실험을 통해 조사하

었다. 그 결과들은 다음과 같다.

- 1) 실제모델을 대변할 수 있는 MIAB용접용 2차원 유한요소 해석모델을 구축하였다. 해석모델의 신뢰성 검증을 위해 자속밀도에 영향을 미치는 주요 인자들을 선정해 실제 측정치와 비교하였으며, 그 결과 잘 일치하는 것을 볼 수 있었다.
- 2) 유한요소 해석모델을 이용함으로써 실제 용접조건에서 측정 불가능한 자속밀도에 대한 주요 변수들의 영향을 파악하였다.
- 3) 여자전류와 파이프 사이 틈새 중심으로부터 코일까지 거리 그리고 파이프 사이 틈새는 아크를 회전시키는 자속밀도 변화에 중요한 인자들로 작용했으며 즉, 여자전류가 증가할수록 파이프 사이 틈새중심으로 부터 코일까지 거리가 가까울수록 파이프 사이 틈새에 형성되는 반경방향 자속밀도는 증가하였다. 특히 파이프 사이 틈새가 감소할수록 자속밀도는 증가하고, 파이프 두께 외연부와 내연부의 자속밀도 차는 매우 커지는 것을 확인할 수 있었다.
- 4) 강관의 투자율에 따라서 자속밀도가 달라졌으나 그 차이는 앞에 선정한 주요 변수들의 영향보다 적은 것을 볼 수 있었다.
- 5) 아크회전과 효과적인 자속발생 및 집속에 유리한 코일시스템 그리고 MIAB용접장치 설계에 필요한 기초 자료를 제시하였다.

후 기

이 논문은 2000년도 두뇌 한국 21사업에 의하여 지원되었음.

참고문헌

1. Kenji Tagaki, Fumiho Arakida, Hideaki Miyamori and Mikio Ozawa, "Arc Rotating Phenomena in Rotating Arc Butt Welding of Steel Pipes," Journal of J.W.S., Vol. 4, No. 2, pp. 305-311, 1986.
2. K.I. Johnson, R.C. Crafer and D.A. Edson., "Advances in Laser and MIAB Welding Technique," Welding Journal, Vol. 62, No. 2, pp. 15-20, 1983.
3. K.I. Johnson, A.W. Carter, W.O. Dinsdale, P.L.

Threadgill and J.A. Wright, "The Magnetically Impelled Arc Butt Welding," Welding Journal, Vol. 58, No. 11, pp. 17-27, 1979.

4. Shuzo MORI and Katsuhiko YASUDA, "Magnetically Impelled Arc Butt Welding of Aluminum Pipes," Transaction of J.W.S, Vol. 21, No. 1, pp. 3-10, 1990.
5. Tsugihiko Satoh, Joichi Katayama, Seiji Ioka and Masahiro Otani, "An Experimental Study on Rotating Behavior of Arc during Magnetically Impelled Arc Butt Welding," Journal of J.W.S., Vol. 8, No. 1, pp. 71-77, 1990.