연구논문

MIAB 용접용 개폐형 자속발생기에 의한 자속밀도분포의 수치해석

구 진 모* · 김 재 웅**

*영남대학교 대학원 기계공학과
**영남대학교 공과대학 기계공학부

Numerical Analysis of Magnetic Flux Density Distribution by an Openable Magnetic Flux Generator for MIAB Welding

Jin-Mo Ku* and Jae-Woong Kim**

*Graduate School of Mechanical Engineering, Yeungnam University, Kyongbuk 712-749, Korea
**School of Mechanical Engineering, Yeungnam University, Kyongsan Kyongbuk 712-749, Korea

Abstract

MIAB(magnetically impelled arc butt) welding is a sort of pressure welding method by melting two pipe sections with high speed rotating arc and upsetting two pipes in the axial direction. The electro-magnetic force, the driving force of the arc rotation, is generated by interaction of arc current and magnetic field induced from the magnetic flux generator in the welding system.

In this study, an openable coil system for the generation of magnetic flux and a 3-dimensional numerical model for analyzing the electro-magnetic field were proposed. Through the fundamental numerical analyses, a magnetic concentrator was adopted for smoothing the magnetic flux density distribution in the circumferential direction. And then a series of numerical analysis were performed for investigating the effect of system parameters on the magnetic flux density distribution in the interested welding area.

Numerical quantitative analyses showed that magnetic flux density distribution generated from the proposed coil system is mainly dependent on the exciting current in the coil and the position of coil or concentrator from the pipe outer surface. And the gap between pipe ends and arc current are also considered as important factors on arc rotating behavior.

* Corresponding author : jaekim@yu.ac.kr (Received August 11, 2004)

Key Words : MIAB welding, 3-D numerical model, Magnetic flux generator, Magnetic flux density, Magnetic flux concentrator, Electro-magnetic force

1. 서 론

각종 구조물의 제조를 위해 용접 자동화가 추진되고 있는 가운데 파이프의 용접에서도 TIG(tungsten inert gas)용접법이나 MAG(metal active gas)용접법을 중심으로 자동화시스템의 연구개발이 활발히 진행되고 있다. 하지만 이 방법들과 달리 MIAB (magnetically impelled arc butt)용접법은 2개의 파이프 틈에 아크를 발생시키고 그곳에 인가한 교차하는 자기장과의 상호작용으로 아크를 고속으로 회전시켜 파이프의 단면을 용융시킨 후 압접하는 방법이다. TIG용접법과 MAG용접법은 파이프 원주 방향의 용접선을 따라 용접하는 방법들이다. 따라서 용접 품질을 보장하기 위해서는 토치(torch) 헤드부의 정밀한 위치제어가 필요하다. 하지만 MIAB용접법은 토치나 모재의 동작이 없어 간단한 시스템의 자동화가 용이할 뿐만 아니라 공정도 신속하게 진행할 수 있다는 장점을 가진다[1,2].

MIAB용접법에 대한 이전 연구에서 파이프 반경방향 자장이 강할수록 아크 회전속도는 증가하고 파이프 끝

Copyright (C) 2005 NuriMedia Co., Ltd.

의 용융이 균일해지며 더 좋은 용접 결과를 얻을 수 있는 것으로 보고되고 있다[3,4] 따라서 자속을 발생시키기 위한 자속발생장치의 설계는 MIAB 용접장치 개발에서 핵심적인 기술이라 할 수 있다 이러한 점을 고려하여 용접에 적합한 자속밀도의 분석을 위해 용접대상인 파이프를 철심으로 간주한 단순한 토로이드(toroid)형 코일에 대한 수치해석 모델을 개발하여 용접시스템 설계에 적용하였으며[5], 각종 공정변수들이 아크의 회전거동에 미치는 영향을 분석하였다[6,7].

그러나 자속발생을 위해 설치한 토로이드형 코일은 용접대상물인 파이프를 장착할 때 반드시 파이프를 통과시켜야하며, 용접 후 접합된 긴 파이프를 탈착할 때 코일을 통과하여 길이방향으로 빼내야하는 불편한 점이 있다 따라서 파이프의 장탈착을 용이하게 하여 생산성을 높이기 위해서는 코일을 개폐형으로 만드는 것이 필요하다 그러나 개폐형으로 코일장치를 만들게 되면 원주방향으로의 자속밀도가 불균일하게 되며, 자속밀도를 평활화 하기 위해서는 자속 집속기(concentrator)를 적용하는 것이 요구된다[8]

본 연구에서는 MIAB용접용 개폐형 자속발생기에 의한 주변의 자속밀도 분포를 분석하기 위해 3차원 수치해석모델을 개발하였으며, 수치해석을 통한 분석결과를 토대로 개폐형 자속발생 코일시스템을 제작하였다 실제 제작한 자속발생기로부터 발생한 자속밀도를 측정하여 수치해석모델을 검증하였다. 수치해석모델을 활용하여 측정이 불가능한 아크 발생부(파이프 틈새)에서의 자속밀도를 예측할 수 있으며, 원주방향 자속밀도분포의 평활화에 미치는 자속집속기의 영향을 확인하였다 개발된 수치해석모델은 향후 MIAB용접공정의 분석은 물론 용접장치의 설계 및 개발에도 적용할 수 있을 것으로 판단된다

2. MIAB용접의 원리

MIAB용접에서 자속발생을 위해 설치한 코일에 전류를 인가해 자기장을 형성시키거나 영구자석으로부터 형성된 자기장을 투자율(permeability)이 높은 2개의 파이프 사이에 노출시킨다. 그런 후 두 개의 파이프 사이에 아크를 발생시키면 아크전류와 자기장의 상호작용으로 발생된 전자기력(electro-magnetic force)에 의해 아크는 파이프의 원주방향으로 회전하면서 파이프 단면을 용융시키게 되며, 적절하게 가열한 후 압접하여 용접을 완료한다

직류전류가 흐르는 코일의 주변에 발생하는 정상상태 자기장 형성의 지배방정식은 다음과 같은 맥스웰 방정식(Maxwell's equation))으로 표현할 수 있다[9]

$$\nabla \times \mathbb{H} = \mathbb{J}$$
$$\nabla \cdot \quad = 0 \qquad (1)$$

여기서, $\mathbb{H}$는 자기장 벡터, $\mathbb{B}$는 자속밀도벡터 그리고 $\mathbb{J}$ 는 전류밀도벡터를 나타내며, 자속밀도벡터와 자기장 벡터는 $\mathbb{B} = \mu_r \mathbb{H}$의 관계를 가지며 μ_r는 투자율(permeability)을 나타낸다.

Fig. 1(a)는 MIAB용접법의 원리를 나타낸다. 우선 여자 코일(exciting coil)에는 마주 놓인 파이프 양단이 같은 극성(polarity)을 가지도록 전류를 인가시키면 자속의 경로는 두 파이프 사이 틈에서 파이프 축에 반경방향으로 된다 그 후 아크를 접합부 틈새에 발생시킨다. 틈새에 발생된 아크는 파이프 길이방향으로 전류가 흐르고 있는 기체로 간주할 수 있으므로 반경방향의 자기장과 교차하여 전자기력을 받게 되어 원주방향으로 회전하기 시작한다.

전자기력에 의해 기동하는 아크의 회전 방향은 플레밍의 왼손 규칙(Fleming's left-hand rule)에 따라 결정된다. 즉 Fig 1(b)와 같이 전류의 방향과 자기장의 방향이 수직인 경우 전자기력(F)의 방향은 원주방향이 된다. 아크는 두 파이프의 틈새에 전도체 조각을 삽입해 양단에 전압을 가함으로서 특정 위치에 발생시킬 수 있다.

Fig. 2에 개념도로 나타낸 개폐형 코일은 기존 토로이드형(도우넛형) 코일에 비해 파이프의 장착 및 탈착이 용이해 생산성을 향상시킬 수 있고 자속 발생장치를 용접부에 근접시킬 수도 있으며, 파이프에 가압력을 주기 위한 클램프로부터의 돌출길이를 짧게 함으로써 용

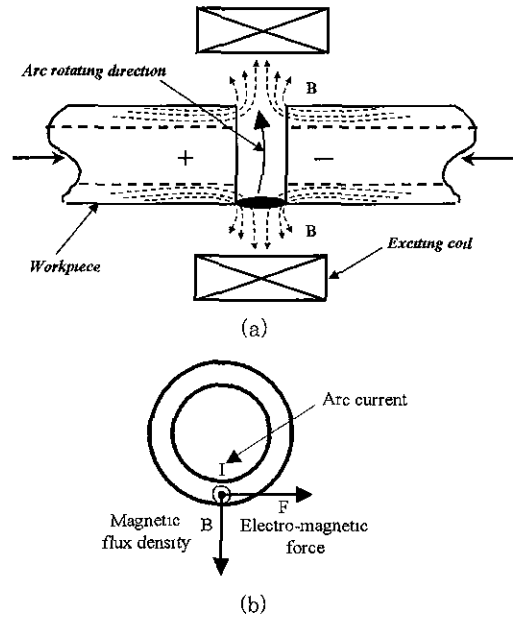


Fig. 1 Schematic diagram of MIAB welding principle and Fleming's left hand rule

Copyright (C) 2005 NuriMedia Co., Ltd.

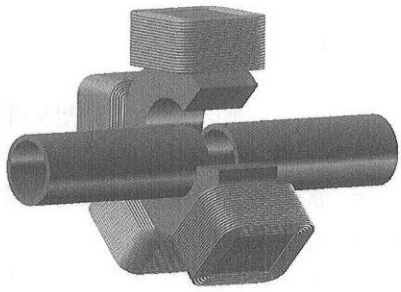


Fig. 2 Schematic diagram of an openable magnetic flux generator

접품질을 향상시킬 수 있다는 특징을 가지고 있다.

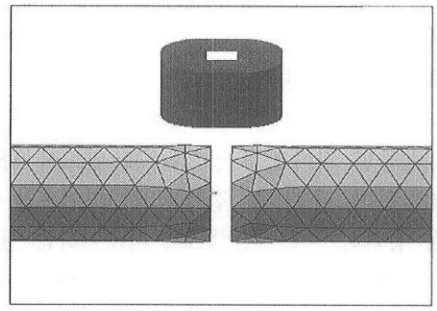
3. 수치해석을 위한 모델링

3.1 개폐형 코일형상의 설계

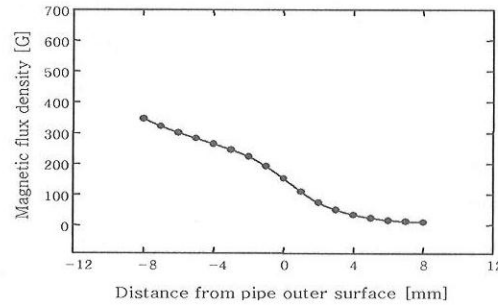
두 파이프의 틈새에서 아크를 회전시키기 위해 필요한 자속밀도를 충분히 발생시킬 수 있는 개폐형 코일을 설계하기 위해 자속밀도분포를 예측할 수 있는 수치해석 모델을 만들고자 한다. 여기서 지배방정식인 식(1)의 미분방정식을 풀기 위한 수치해석에는 상용 유한요소해석 프로그램인 ANSYS를 이용하였으며, 3차원 수치해석 모델링을 위한 코일시스템의 설계변수는 다음과 같이 설정하였다. 본 연구의 수치해석에서 모든 경우 파이프의 길이는 각각 200mm로 하였으며, 물성치로써 강관의 투자율(μ_r)은 1000으로 하였다. 또한 경계조건으로 코일권선부에서의 단면을 통과하는 전류밀도는 균일하며, 수치해석 영역에서의 자속밀도 유출입이 없는 조건을 적용하였다.

개폐형 코일 형상을 설정함에 있어서 개별적인 코일(솔레노이드)은 총 4개로 구성하였고, 원주방향을 따라 90° 간격으로 배치하였다. 따라서 수치해석은 실제 모델의 1/4을 해석영역으로 잡아 수행하였다. 해석 조건은 파이프 사이 틈새 길이를 7mm, 코일에 인가한 여자 전류는 2A로 하였고 코일의 권선수는 1200회로 하였다. 코일에서 철심(코어)의 형상에 따라 3가지의 모델을 대상으로 해석하였다. 즉, 철심이 없는(공심) 경우(case 1), T자형 철심(case 2), 봉형 철심(case 3)의 3가지 코일시스템에 대해 모델링하였으며, 해석결과는 다음과 같다.

첫 번째로 해석모델(numerical model) (case 1)은 Fig. 3(a)에 나타낸 것인데, 철심이 없는 코일을 나타낸다. Fig. 3(b)에 나타낸 것처럼 파이프 틈새에서의 자속밀도가 약 150 gauss로 양호한 용접품질을 얻기 위한 자속밀도에 많이 부족한 것으로 판단된다. 두께 2mm인 용접물에 대해 양호한 용접품질을 얻기 위한 자속밀도는 약 300G 이상이 요구되는 것으로 보고되었다[7]. 두 번째로 해석 모델 (case 2)는 Fig. 4(a)와 같이 코일을 감는 코어부분과 코일의 받침대 부분을 강자성체(T자형)로 하였을 때로 수치해석을 수행하였으며, 그 결과를 Fig. 4(b)에 나타내었다. 이 경우에는 앞의 경우보다도 더욱 작은 자속밀도를 나타내어, 파이

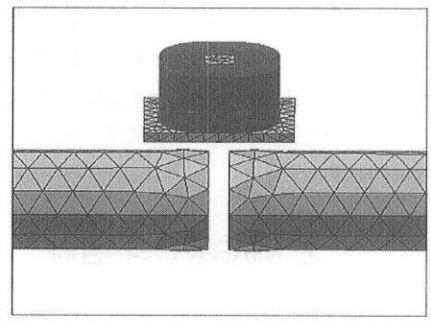


(a)

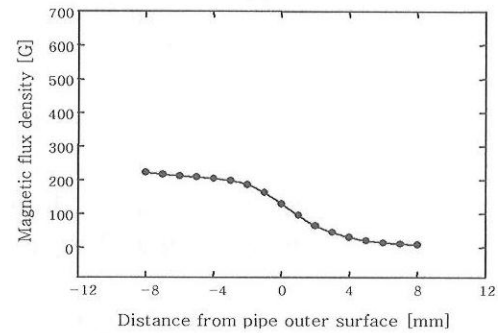


(b)

Fig. 3 Numerical model (case 1) and the magnetic flux density distribution



(a)



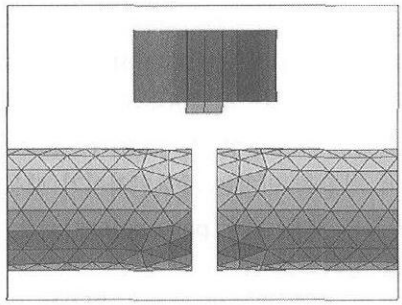
(b)

Fig. 4 Numerical model (case 2) and the magnetic flux density distribution

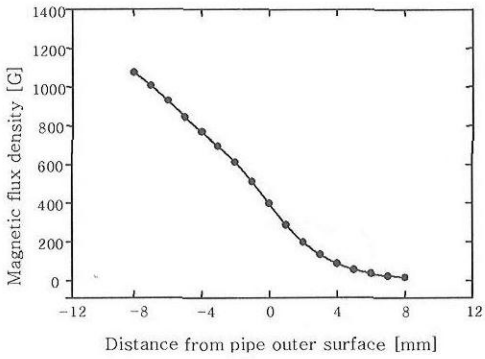
Copyright (C) 2005 NuriMedia Co., Ltd.

프 사이에서의 자속밀도가 양호한 용접품질을 얻기 위한 자속밀도에는 미치지 못함을 알 수 있다. 세 번째로 해석모델 (case 3)은 Fig. 5(a)와 같이 코일의 받침대를 없애고 코일이 감기는 코어부분을 파이프 쪽으로 조금 더 돌출시킨 형상(봉형)으로 하여 해석하였고 그 결과를 Fig. 5(b)에 나타내었다. 결과에서 볼 수 있듯이 파이프 틈새에서의 자속밀도가 양호한 용접품질을 얻기 위해 필요한 자속밀도를 충분히 형성하고 있음을 알 수 있다.

세 번째 해석모델을 이용하여 4개의 코일로 구성된 전체 해석모델을 대상으로 수치해석을 수행하였다. Fig. 6(a)과 같이 코일을 4개로 배치하여 파이프 원주방향의 자속밀도분포를 해석한 결과 Fig. 6(b)와 같이 코일이 상단에 위치한 부분과 코일과 코일 사이 부분과의 자속밀도 차가 심해서 아크가 불안정하게 회전하게 됨을 예측할 수 있다. 따라서 코일에서 발생한 자속을 집속해서 원주방향으로 분포시키게 하는 엽전(ring)형 집속기를 설치하는 것을 검토하였다. 이 링형 집속기의 폭(파이프 길이방향 폭)은 철심의 폭과 동일하게 10mm로 설정하였다. 즉, 최종 개폐형 코일의 형상을 Fig. 7(a)와 같이 설정하여 해석을 수행하였다. 이 때 파이프 틈새에서의 원주방향 자속밀도분포는 Fig. 7(b)과 같이 나타나 링형 집속기가 없는 경우와 비교해서 훨씬 균일한 자속밀도분포가 형성되는 것을 볼 수 있다.

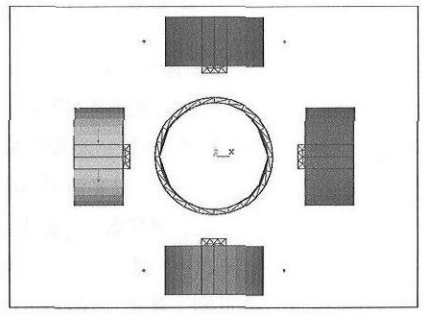


(a)

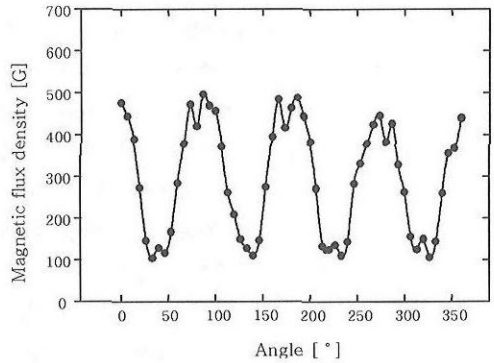


(b)

Fig. 5 Numerical model (case 3) and the magnetic flux density distribution

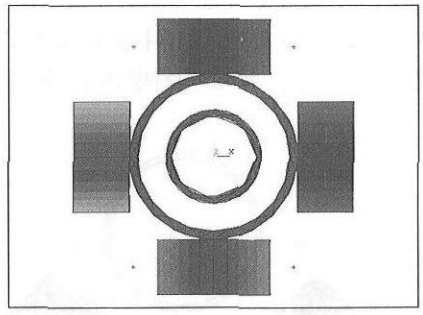


(a)

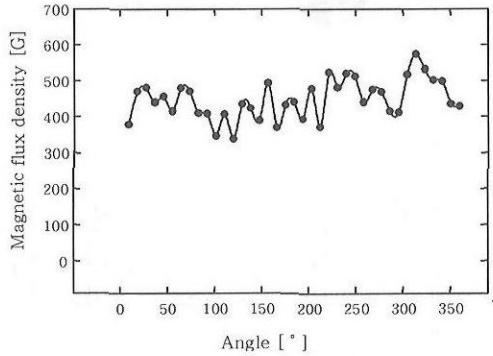


(b)

Fig. 6 Total numerical model and the magnetic flux density distribution along the circumferential direction



(a)



(b)

Fig. 7 Effect of ring type magnetic concentrator on the magnetic flux density distribution along the circumferential direction

Copyright (C) 2005 NuriMedia Co., Ltd.

3.2 수치해석 모델과 실험결과의 비교

실험에서 사용한 파이프들은 강자성 재료인 외경 48.1mm, 두께 2mm의 일반 구조용 탄소강관으로 하였다. 파이프 사이 틈새에 형성되는 자속밀도는 아크회전과 용접품질에 중요한 변수로 작용하기 때문에 자속밀도에 영향을 미치는 주요인자들을 선정해 그 영향을 조사하였다. 실제 용접조건인 파이프간 틈새가 2mm일 때는 자속밀도 측정용 프로브(probe)의 직경이 6.9mm인 관계로 측정이 불가능해 틈새가 7mm 일 때의 측정치와 해석결과를 비교하였다. Fig. 8은 측정치와 비교하기 위한 해석모델과 측정방법을 나타낸다. 그림에서 볼 수 있듯이 가우스메타(Gauss meter)의 프로브를 이용해 파이프 두께 상하 방향의 자속밀도를 측정하였다. 측정 위치의 좌표는 그림과 같이 파이프 두께 바깥쪽 표면을 중심으로 위쪽을 양의 방향 아래쪽을 음의 방향으로 하였으며, 개폐형 코일의 형상 특성상 파이프 하단 쪽에서만 측정이 가능하므로 개폐형 코일을 열은 상태에서 파이프 하단 쪽에서 측정하였다. 실험조건으로 자속밀도에 영향을 미치는 인자들 중 여자전류(I_e)를 변화시키면서 자속밀도분포를 측정하였다. 측정시 코일을 열고 측정을 하여야 하기 때문에 해석모델에서도 파이프의 상부 코일을 없애버리고 하부 코일만을 적용하여 해석을 수행하였다. Fig. 9는 각각의 여자전류의 수준에 따라서 나타나는 아크가 존재하는 파이프 틈새와 파이프 두께 상하방향의 자속밀도 분포와

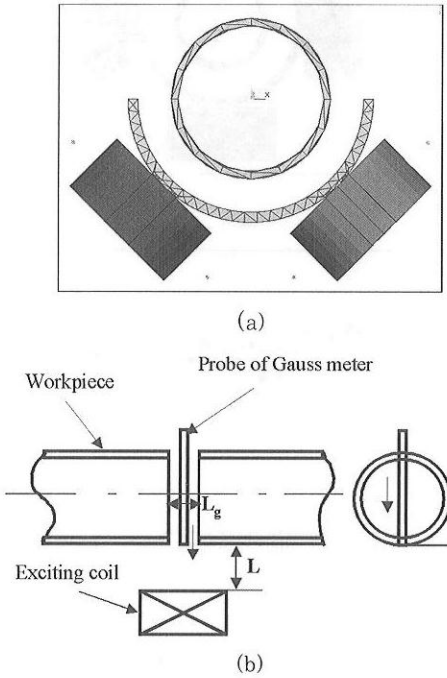


Fig. 8 Numerical model and experimental setup for the comparison

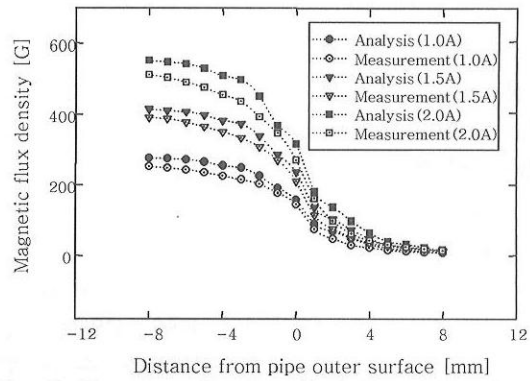


Fig. 9 The comparison results between experiment and numerical analysis

특성을 측정치와 비교해 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 여자전류가 증가함에 따라 자속밀도의 최대치와 파이프 두께 외연부와 내연부의 자속밀도차는 해석치와 측정치 모두가 커지고 해석치와 측정치의 값은 비교적 잘 일치하는 것을 볼 수 있다.

4. 자속밀도 분포의 수치해석

강관의 MIAB 용접에 대한 이전 연구들에서 반경방향의 자속이 강할수록 아크 회전속도는 증가하고 파이프 단면이 더 균일하게 가열, 용융되어 좋은 용접결과를 얻을 수 있는 것으로 보고되었다[3,4]. 따라서 양호한 용접품질을 내기 위해서 파이프 틈새에서 형성되는 자속은 가능한 크게 하는 것이 바람직하며, 큰 자속밀도를 형성하기 위해서는 코일의 권선수와 여자전류를 크게 하여야 하므로 이들 설계변수에 대한 상세한 분석이 필요하다. 특히 반경방향 자속밀도가 아크 회전거동과 용접품질에 영향을 미치는 주요인자이기 때문에 이것에 영향을 미치는 주요 변수(parameters)들을 선정해 그 상관관계를 살펴보았다.

자속밀도의 수준 변화에 영향을 미치는 인자들로 코일에 흐르는 여자전류(I_e), 파이프로부터 코일까지의 수직거리(L), 파이프 틈새(L_g)를 선정했다. 각각의 인자들과 해석 조건은 각각 Fig. 10과 Table 1에 나타내

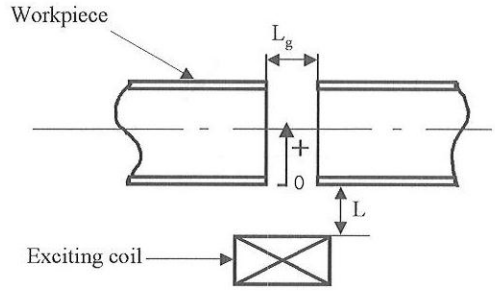


Fig. 10 Experimental parameters and the coordinate

Copyright (C) 2005 NuriMedia Co., Ltd.

Table 1 Experimental parameters and its values for numerical analysis

Exciting current I_e (A)	Coil position L (mm)	Gap Lg (mm)
1.0	10	2.0
1.5	20	3.0
2.0	30	4.0
	40	5.0
	50	6.0
		7.0

었다. 해석에서 좌표는 파이프의 하단 두께 바깥 표면을 중심으로 위쪽을 양의 방향 아래쪽을 음의 방향으로 하였다.

4.1 여자전류에 따른 자속밀도

Fig. 11은 코일에 흐르는 여자전류와 자속밀도분포의 상관관계를 나타낸 것으로 파이프 두께 상하 방향의 자속밀도분포를 나타내고 있다. 코일에 인가한 여자전류(I_e)에 따라서 발생되는 자속밀도는 달라지고 파이프 틈새로 유기되는 자속은 영향을 받는다. 그림에서 알 수 있듯이 여자전류가 증가할수록 자속밀도의 값이 높게 나타나는 것을 볼 수 있다. 여자전류에 따른 파이프 두께 부분의 자속밀도를 보면 내연부가 최소이고 외연부가 최대이며 그 비율은 약 4배에 도달한다. 수치해석시 파이프 사이 틈새는 2 mm로 하였고, 파이프 바깥 표면에서 코일까지의 거리는 10 mm로 하였다. 여기서 두께 2mm인 파이프를 용접하는데 파이프간 간격은 2mm 내외가 적합한 것으로 제시되었다[7].

4.2 코일-파이프간 거리에 따른 자속밀도

파이프 바깥 표면으로부터 코일까지의 거리도 자속밀도의 값에 영향을 미칠 수 있다. Fig. 12는 그 결과를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 파이프 바깥 표면으로부터 코일까지의 거리가 가까울수록 파이프 틈새 부분의 자속밀도 값이 커지는 것을 볼 수 있다. 반면 거리가 증가할수록 자속밀도의 최대값은 감소한다. 코일까지의 거리가 10mm를 넘어서게 되면 자속밀도의 차가 확연히 나타남을 알 수 있고, 여기서 코일까지의 거리를 10mm로 결정하였다. 해석의 수행시 코일에 인가한 여자전류는 2 A로 하였고, 파이프 사이 틈새는 2 mm로 하였다.

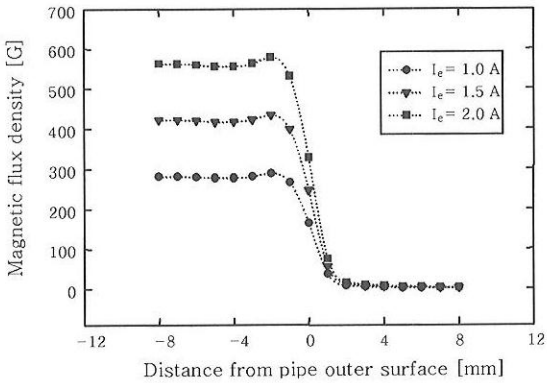


Fig. 11 Magnetic flux density distribution according to the exciting current (L_g= 2mm, L=10mm)

4.3 파이프 틈새에 따른 자속밀도

파이프간 틈새(L_g)가 변할 때 아크를 회전시키는 전자기력은 달라지며 자속밀도에도 영향을 미치는 중요한 인자로 작용한다. 따라서 실제 용접시 파이프 틈새 수준과 더불어 다양한 틈새 크기에 따라 나타나는 자속밀도의 특성을 파악하기 위하여 해석을 수행하였다. Fig. 13은 그 결과를 나타낸다. 파이프 사이 틈새가 좁을수록 자속밀도의 최대값이 증가하는 것을 볼 수 있다. 또 파이프 두께 외연부 근처에서 자속밀도 값은 파이프 틈

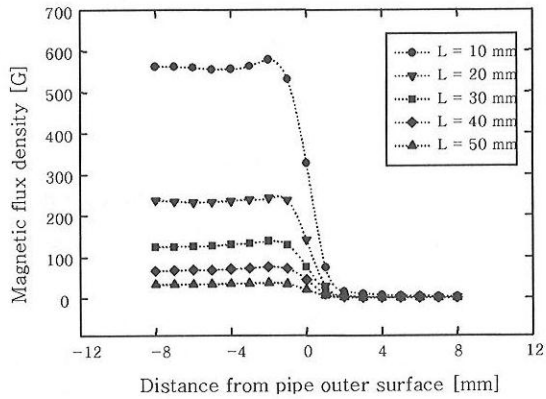


Fig. 12 Magnetic flux density distribution according to the distance between coil and pipe (I_e=2A, L_g=2mm)

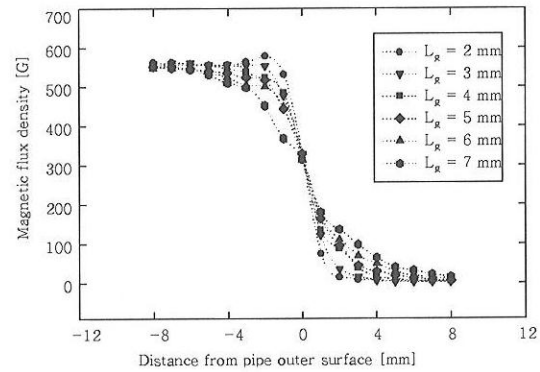


Fig. 13 Magnetic flux density distribution according to the gap between pipes (I_e=2A, L=10mm)

Copyright (C) 2005 NuriMedia Co., Ltd.

새에 따라 차이를 보이나 파이프 두께 바깥표면으로부터 거리가 멀어질수록 그리고 파이프에 가까워질수록 자속밀도 값의 차이는 감소하는 경향을 나타내고 있다. 이것은 코어를 서로 연결해 주는 링형 집속기에 의해서 파이프 사이 틈새가 달라져도 집속기가 있는 근처 영역에서는 자속들이 집속기로 집속되기 때문인 것으로 사료된다.

5. 결 론

MIAB 용접법의 특성상 아크회전에 필요한 자속밀도는 매우 중요한 변수이다. 따라서 본 연구에서는 용접대상물인 파이프의 장탈착에 유리한 개폐형 자속발생장치를 설계하며, 장치의 설계변수들이 자속밀도분포에 미치는 영향을 분석하기 위한 수치해석 모델을 개발하였다 수치해석 모델에 의한 해석결과를 활용하여 실제 자속발생기를 제작하여 측정한 자속밀도를 비교함으로써 모델을 검증하였다 연구결과를 요약하면 다음과 같다

1) 실제 모델을 대변할 수 있는 MIAB 용접용 3차원 유한요소 해석모델을 구축해 실제 용접조건에서 측정 불가능한 자속밀도에 대한 주요 변수들의 영향을 파악하였다

2) 해석의 신뢰성 검증을 위해 자속밀도에 영향을 미치는 주요 인자인 여자전류의 변화에 따른 자속밀도의 변화를 실제 측정치와 비교하였고, 그 결과 잘 일치하는 것을 볼 수 있었다

3) 여자전류와 파이프 사이 틈새 중심으로부터 코일까지의 거리, 그리고 파이프 사이 틈새는 아크를 회전시키는 자속밀도 변화에 중요한 인자들로 작용하는 것을 확인하였다. 즉 여자전류가 증가할수록, 파이프 사이 틈새가 감소할수록 파이프 사이 틈새에 형성되는 반경방향 자속밀도는 증가하였다. 특히 파이프 바깥 표면에서 코일까지의 거리가 가까울수록 자속밀도는 증가하고, 파이프 두께 외연부와 내연부의 자속밀도 차는 커지는 것을 확인 할 수 있었다

후 기

본 논문은 2003년도 두뇌한국 21사업에 의하여 지원되었음

참 고 문 헌

1 K I Johnson, R C Crafer and D A Edison Advances In Laser and MIAB Welding Technique, Welding Journal, **62-2** (1983), 15-20

2 K I Johnson, A W Carter, W O Dinsdale, P L Threadgill and J A Wright The Magnetically Impelled Arc Butt Welding of Mild Steel Tubing, Welding Journal, **59-11** (1979), 17-27

3 K Tagaki, F Arakida, H Miyamori and M Ozawa Arc Rotating Phenomena in Rotating Arc Butt Welding of Steel Pipes, Journal of JWS , **4-2** (1986), 305-311 (in Japanese)

4 S Mori and K Yasuda Magnetically Impelled Arc Butt Welding of Aluminum Pipes, Transactions of JWS **21-1** (1990), 3-10

5 D-H Choi and J-W Kim A Study on the Numerical Analysis of Magnetic Flux Density by a Solenoid for MIAB Welding, Journal of the Korean Society of Precision Engineering, **18-12** (2001), 73-81 (in Korean)

6 T Satoh, J Katayama, S Ioka and M Otani An Experimental Study on Rotating Behavior of Arc during Magnetically Impelled Arc Butt Welding, Journal of JWS , **8-1** (1990), 71-77 (in Japanese)

7 D-H Choi and J-W Kim A Study on an Electro-Magnetic System for Arc Rotating in MIAB Welding, Journal of KWS, **19-4** (2001), 29-36 (in Korean)

8 K Mazać Coil Systems for Welding with a Magnetically Rotated Arc, Schweißen und Schneiden, Nr 4, 1984

9 J D Jackson, Classical Electrodynamics, John Wiley & Sons, New York, 1975, 175

Copyright (C) 2005 NuriMedia Co., Ltd.