

유한요소법을 이용한 자기펄스용접의 전자기력 분포에 관한 연구

A Study on Electromagnetic Force Distributions in Magnetic Pulse Welding Using a Finite Element Method

심지연\*, 김학형\*, 김일수\*\*, 강봉용\*\*\*, 박동환\*\*\*\*

\* 목포대학교 대학원 기계공학과

\*\* 목포대학교 기계·선박해양공학부

\*\*\* 한국생산기술연구원 정밀접합·용접팀

\*\*\*\* 웰메이트(주)

1. 서 론

자기펄스용접(Magnetic Pulse Welding) 공정은 전류가 코일로 유입되면 전류가 도체내로 유입되어 자기장을 형성하고 이 자기장이 모재의 변형을 유도하여 발생하는 전자기력을 이용하여 접합하는 기술이다. 이러한 용접방법은 용해금속과 직접 접촉하지 않은 상태에서 힘을 가하기 때문에 제품의 품질향상, 표면결함 감소 기계적 성질을 개선하는 등 많은 특성을 가지고 있다. 특히 전기전도성이 높은 금속을 처리하는 제련 및 주조 등과 같은 야금공정 및 연속주조를 포함한 많은 단위공정에서 전자기장의 적용범위가 확대되고 있으며 이에 대한 연구도 활발하게 진행되고 있다.<sup>1-6)</sup> 그러나 국내의 경우 이러한 접합기법을 산업현장에 적용한 예는 전무한 실정이다.

또한 전자기펄스용접의 접합공정을 시스템적으로 이해하기 위해서는 전기, 자기, 재료공학의 상호작용에 대한 이해가 요구되며 이러한 분야의 연구를 실험으로 연구하기에는 많은 한계가 있다.

따라서, 본 연구에서는 자기 펄스용접의 전자기력 분포를 분석하기 위하여 FEM(Finite Element Method)를 이용한 수치해석용 시스템을 개발하여 전자기력 분포를 확인한 후 실제 코일 설계 제작을 위한 기본 자료를 확보하고자 한다.

2. 수치해석 모델 개발

2.1 지배방정식

Fig. 1은 시뮬레이션에 사용된 부재 및 코일의 형상으로 2차원 축대칭 모델을 구성하여 해석을 단순화시켰다. 해석에 사용된 지배방정식은 아래와 같이 맥스웰 방정식(Maxwell equation)를 사용하였다.

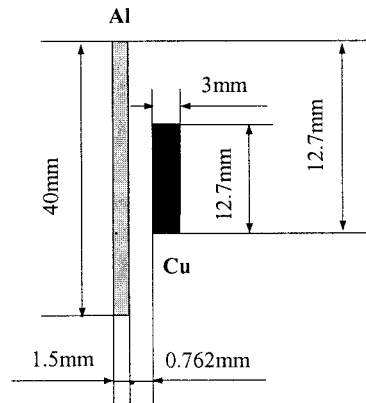


Fig. 1 A schematic diagram for simulation in magnetic pulse welding

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \tag{1}$$

$$\nabla \times \vec{D} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \tag{2}$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \tag{3}$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \tag{4}$$

여기서  $E$ 는 전기의 세기( $V/m^2$ ),  $H$ 는 자계의 세기( $A/m^2$ ),  $D$ 는 전속밀도( $Coul/m^2$ ),  $B$ 는 자속 밀도( $Wb/m^2$ ),  $J$ 는 전류밀도( $A/m^2$ )이다.

매질내에서 이러한 맥스웰 방정식과 관련된 전

자기학적인 물성을 연관시키기 위하여 다음 방정식을 사용하였다. 즉 자속밀도  $D$ 는 전기장의 세기  $E$ 와 관련이 되며, 동일한 방법을  $B, H, J, E$  등에 적용하였다.

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \tag{4}$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \tag{5}$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \tag{6}$$

여기서  $\epsilon$ 는 유전률( $F/m$ ),  $\sigma$ 는 도전률( $S/m$ ),  $\mu$ 는 투자율( $H/m$ )이다.

Table 1은 해석에 사용된 모재(Tungsten K1700) 및 접합재(Aluminum 6061)의 재질을 나타낸다.

Table 1 Material properties for analysis

Material	Electrical Resistivity (ohm-cm)	Magnetic Susceptibility	Relative permeability ( $\mu$ )	Poisson's ratio
Aluminum	2.7e-006	6e-007	1	0.33
Copper	1.7e-006	8e-008	1	0.343

### 2.2 경계조건

경계조건은 지정한 면의 자속이 면에 수직인 방향으로 생성되는 조건인 자속 수직조건(절대좌표계에서  $\vec{E}$ 는  $y = 0$ )과 지정한 면에서는 자속이 면에 평행인 방향으로 생성되는 조건인 자속 평형조건( $AZ = 0$ )을 이용하였다. 자유도는 유한요소 모델이 만들어진  $x-y$  평면의 수직인 방향( $z$ 방향)의 자기벡터로 2차원 해석에서는 다음과 같이 나타난다.

$$B = \left(\frac{\partial AZ}{\partial y}\right)u_x - \left(\frac{\partial AZ}{\partial x}\right)u_y \tag{7}$$

### 2.3 해석 방법 및 절차

본 연구에서는 전자기장 수치해석 프로그램인 ANSYS Emag를 사용하여 coil의 전자기력 분포에 관한 연구를 수행하였다. 메쉬 생성은 Quad 형태인 mapped mesh를 사용하였으며, 해석의 펄스파는 고주파성분을 포함하고 있기 때문에 이

와 같이 높은 주파수 대역의 전자기 해석 모델의 구성시 반드시 표피효과를 고려해야 하므로 더 정확한 해석결과를 얻기 위하여 표피효과를 고려한 도체의 안 영역으로 들어갈수록 깊이방향으로 길이가 짧아지도록 메쉬를 생성하였다.<sup>7)</sup> 100kA, 10kHz의 전류를 입력하여 sin주기를 갖는 시간이력해석을 실행하였으며 총 노드수는 43,71, 요소의 개수는 15,052이다.

### 3. 해석 결과 및 고찰

본 연구를 통해 개발된 시스템을 이용하여 coil의 전자기력 분포 분석을 위하여 coil에 인가되는 전류 및 주파수 및 부재와 코일 사이의 간격을 입력조건으로 수치해석을 수행하였다.

Table 2는 전류를 변수로 선정한 실험 입력조건을 나타낸다.

Table 2 Input conditions employed in simulation for MPW

Case	Input current(kA)	Frequency (kHz)	The gap between tube and coil(mm)
I	100	10	0.762
II	150	10	0.762
III	200	10	0.762

Fig. 2는 입력전류가 각각 100kA, 150kA, 200kA일 때의 전자기력 분포를 나타내며 주파수가 100kA일 때 전자기력은 코일의 중심에서 -40Mpa, 150kA일 때 -90Mpa, 200kA일 때 전자기력은 -160Mpa를 나타낸다. 따라서 입력전류가 증가할수록 전자기력은 증가함을 확인할 수 있었다.

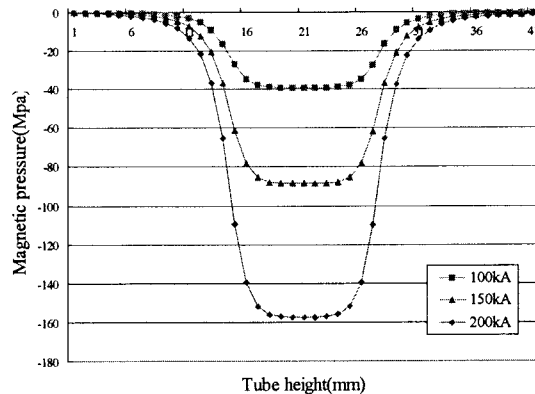


Fig. 2 Distribution of electromagnetic pressure at different input current

Table 3은 주파수를 변수로 가정한 실험 입력조건을 나타내며 Fig. 3은 입력전류와 코일과 튜

브사이의 간격이 일정하며 입력 주파수가 각각 10kHz, 15kHz, 20kHz으로 증가할 때 시뮬레이션 결과이다. 코일의 중심에서 전자기력은 각각 -40Mpa, -43Mpa, -45Mpa으로 주파수가 증가할 수록 전자기력은 증가함을 Fig. 3에서 확인하였다.

Table 3 Input conditions employed in simulation for MPW

Case	Input current(kA)	Frequency (kHz)	The gap between tube and coil(mm)
I	100	10	0.762
II	100	15	0.762
III	100	20	0.762

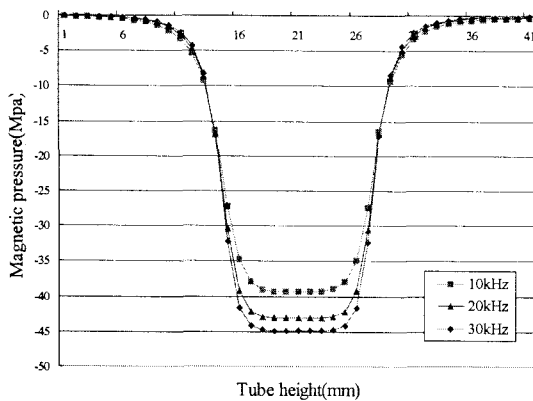


Fig. 3 Distribution of electromagnetic pressure at different input frequency

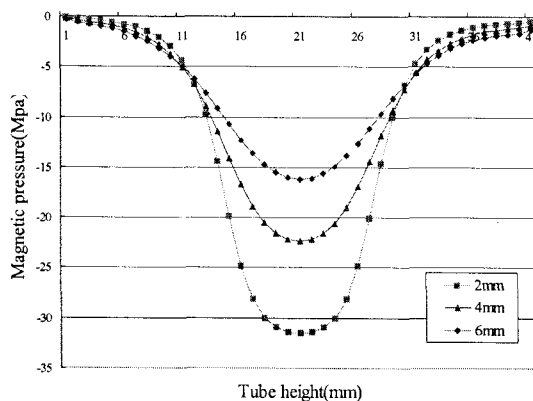


Fig. 4 Distribution of electromagnetic pressure at different input gap between tube and coil

Fig. 4는 부재와 코일 사이의 간격이 각각 2mm, 4mm, 6mm일 때의 전자기력 분포를 나타낸다. 간격이 2mm일 때 전자기력은 코일의 중심에서 -32Mpa이며 4mm일 때 전자기력은 -23Mpa, 6mm일 때 전자기력은 -16Mpa이다. 따라서 부재와 코일 사이의 간격이 증가할수록 전자기력은 증가함을 알 수 있었다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 MPW의 전자기력 분포를 분석하기 위하여 FEM을 이용한 2차원 전자기장 수치해석모델을 개발하였다. 개발된 모델에 다양한 입력변수를 설정하여 전자기력 분포의 특성을 분석하였으며 전류 및 주파수의 입력값이 증가할수록 전자기력의 분포는 균일하지 않으나, 전자기력은 증가함을 확인 할 수 있었다. 또한 코일과 튜브사이의 간격이 증가할수록 전자기력이 분포하는 면적은 증가하지만 작용하는 전자기력은 감소함을 할 수 있었다.

#### 참 고 문 헌

1. S. H. Lee, D. N. Lee : Estimation of the magnetic pressure in tube expansion by electromagnetic forming, J. Mater. Process. Technol. 57(1996) 311-315
2. S. Mahanian and D.B. Blackwell : Finite element analysis of electromagnetic forming of tubes with fittings, Manufacturing Science and Engineering, MD-vol. 4, ASME, New York, (1996), 323-329
3. S. Golovashchenko : Impulsive electromagnetic tubes shearing process, Advanced Technology of Plasticity, Proceeding of the fifth international Conference on Technology of Plasticity, columbus, OH, 1996, pp. 939-942
4. B. Bendjima, M. Feliachi : Finite element analysis of transient phenomena in electromagnetic forming system, in: Computation in Electromagnetic, IEE Conference Publication 420, April 10-12, (1996) 113-116
5. H. Zhang, M. Murata and H. Suzuki : Effects of various working conditions on tube bulging by electromagnetic forming, J. Mater Process. Technol. 48 (1995) 113-121
6. N. T. M. Kato and K. Sato : High-speed forming of metal sheets by electromagnetic force, JSME Int. J. 31 (1998) 142-148
7. D. Jianghua , L. Chunfeng , Z. Zhiheng, T. Fang, Y. Haiping : Numerical simulation of magnetic flux and force in electromagnetic forming with attractive force, Journal of Materials Processing Technology, 184(2007), 190-194