

< 논문 >

## 고주파 유도용접 현상의 3 차원 해석

김 현 중<sup>†</sup> · 윤 성 기<sup>\*</sup>

(2006년 3월 6일 접수, 2006년 4월 7일 심사완료)

### Three Dimensional Analysis of High Frequency Induction Welding Phenomena

Hyun-Jung Kim and Sung-Kie Youn

**Key Words :** High Frequency Induction Welding(고주파 유도용접), Electromagnetic Analysis(전자기장 해석), Welding Variables(용접변수), Eddy Current(와전류), Impeder(임피더)

#### Abstract

High frequency induction welding is widely employed for longitudinal seam welding of small scale tubes and pipes because of its relatively high processing speed and efficiency. This research is aimed at understanding the variables that affect the quality of the high frequency induction welding. The welding variables include the welding frequency, weld speed, V-angle and tube thickness. Temperature distribution of the tube is calculated through three dimensional coupled electromagnetic and thermal FE analysis. The skin and proximity effects are considered in the electromagnetic analysis. The influence of the impeder is also analyzed. The effects of the operating welding variables on the temperature distribution are investigated quantitatively by exhibiting the heat affected zone (HAZ). The results explain the mechanism of significant enhancement of welding efficiency when the impeder is used. The proper welding conditions without the overheated edge are obtained through FE analysis.

#### 1. 서론

고주파 유도 용접법(High frequency induction welding)은 유도 코일을 이용하여 고주파 전류를 피용접재에 유도시켜, 이 때 발생하는 저항열을 이용하여 피용접재를 용융시킨 후, 압착롤(squeeze roll)의 압착력에 의해 양 대강면(skelp)을 접합시키는 용접법이다. 이 용접법은 고주파에 의해 전류가 표면에 집중하는 표피효과(skin effect)와 두 도체 사이에 반대방향으로 흐르는 전류사이에서 작용하는 인력으로 인해 발생하는 근접효과(proximity effect)에 의해 용접하고자 하는 부분의 표피만을 가열하는 방식이기 때문에 소모되는 전력량이 작아 효율이 높고, 빠른 속도의

용접이 가능하다. 강관의 품질은 용접부(weld vee)의 특성에 의해 좌우되는데, 이에 영향을 미치는 변수에 대한 체계적인 연구는 아직 미흡한 상태이다. 강관은 실험데이터와 현장에서의 경험에 크게 의존하여 제조되고 있으며, 용접의 품질은 작업자의 숙련도에 의해 많이 좌우되는 실정이다

Scott<sup>(1,2)</sup>은 고주파 용접법을 용접속도, 용접주파수, V-길이에 따라 전력모드(electric mode)와 열모드(thermal mode)로 분류하였고, 2 차원 수학 모델로부터 대강면의 상대적인 온도분포와 전력분포를 계산하였다.<sup>(3,4)</sup> Asperheim<sup>(5-7)</sup>은 V-각(V-angle), 스프링백(springback), 용접속도, 주파수에 따라 대강면의 상대적인 온도분포를 2 차원 계산하여 각 변수가 온도분포에 미치는 영향을 조사하였다

와전류(eddy current)는 대강면 뿐만 아니라, 튜브 내외벽에도 흐르게 된다. 이러한 전류는 용접부를 가열하는데 직접적으로 기여하지 않기 때문에 효율을 저하시키는 요인이 된다. 임피더(impeder)는 강관 내벽을 따라 흐르는 전류의 리

† 책임저자, 회원, 한국과학기술원 기계공학과  
E-mail : kim1392@kaist.ac.kr  
TEL : (042)869-3074 FAX: (042)869-3095

\* 회원, 한국과학기술원 기계공학과

액틴스를 증가시켜 전류 손실을 억제하여 용접기의 효율을 높이는 역할을 한다.

고주파 유도용접법은 지금까지 많은 연구가 진행되어 왔으나 모두 임피더의 영향을 고려하지 않은 2차원 해석이었다. 본 연구에서는 전자기장 해석(electromagnetic analysis)과 열 해석(thermal analysis)을 연계한 3차원 해석을 통해 피용접재의 와전류와 온도 분포를 계산하여, 임피더가 온도분포에 미치는 영향을 조사한다. 용접부에 영향을 미치는 용접변수(welding variables)를 정의하여, 각 변수에 따른 해석 결과를 비교하여 용접 품질을 향상시키기 위한 방향을 모색한다.

HAZ(heat affected zone)는 용접부의 팽창, 수축 및 상 변태 등에 의하여 항복응력에 가까운 잔류응력을 발생시킨다. 이와 같은 잔류응력은 용접부를 재가열할 때 용접부의 금속학적인 반응에 크게 영향을 미치게 되며, 구조물로서 사용 중 문제를 일으킨다. 따라서 본 연구에서는 최대 온도, 대강면의 온도분포, HAZ 크기에 주안점을 두어 용접부의 특성을 고찰하고자 한다.

## 2. 해석 과정

튜브의 재질은 연강 (AISI 1008 강)을 사용하였고, 임피더의 재질은 전기 전도계수가 매우 낮은

페라이트(ferrite)를 사용하였으며 해석에 사용된 물성치는 Table 1과 같다. 페라이트의 온도는 임피더의 수명을 좌우하는 요인이 되므로, 일반적으로 임피더는 큐리 온도 이하로 유지하기 위해 수냉시킨다.<sup>(8)</sup>

고주파 전류에 의해 튜브모양의 피용접재에 유도된 와전류는 줄 열을 발생하고, 이에 의해 튜브는 가열된다. 온도변화에 의해 물성이 다시 변하기 때문에 고주파 유도 용접법 해석은 전자기장 해석과 열 해석이 연계되어야 한다. 본 연구에서는 온도변화에 따른 물성치는 일정하다고 가정하였고, 수행한 해석 과정을 Fig. 1에 도시하였다. 상용프로그램 EM STUDIO<sup>(17)</sup>를 이용하여 도체 표면의 와전류를 계산하고, ABAQUS<sup>(18)</sup>를 이용하여 튜브의 이동속도를 고려하여 열 해석을 수행한다. 표면효과와 근접효과를 고려하여 전자기장 해석을 수행하고, 열은 전도에 의한 발산뿐 아니라 튜브 이동에 의한 대류도 발생하므로 과도 열 해석(transient thermal analysis)을 수행하여 요소 내 열의 이동을 고려한다.

두 해석 과정에서의 모델은 절점 정보가 서로 다르다. 이러한 격자의 불일치로 인해 열 해석 모델에서의 절점의 와전류는 전자기장 해석 모델에서의 와전류 값을 3차원 형상함수를 이용하여 보간하여 계산한다. 열 해석 모델에서의 요소의 와전류는 아래와 같이 계산한다.

$$U_{ed} = \frac{1}{V_{ed}} \int u_{node} \cdot dV_{ed} \tag{1}$$

$$= \frac{1}{V_{ed}} \sum_{i=1}^8 \left( \sum_{j=1}^{in} N_i(\xi_j, \eta_j, \zeta_j) |J| \cdot w_j \right) \cdot u_i$$

여기서  $u_i$ 는 절점에서의 와전류 값,  $N_i$ 는 형상함수,  $U_{ed}$ 은 요소에서의 와전류 값이다. 고주파 교류의 경우 전기적 에너지( $P_e$ )는 아래와 같이 계산된다.

Table 1 Material property

Material property		
Electromagnetic analysis		
Tube (mild steel)	Density ( $kg / m^3$ )	7872
	Electrical conductivity ( $S / m$ )	850000
	Relative permeability ( $H / m$ )	1
Impeder (ferrite)	Density ( $kg / m^3$ )	5000
	Electrical conductivity ( $S / m$ )	1
	Relative permeability ( $H / m$ )	2000
Thermal analysis		
Room temperature ( $^{\circ}C$ )		27
Thermal conductivity ( $W / m \cdot ^{\circ}C$ )		27
Specific heat ( $J / kg \cdot ^{\circ}C$ )		708
Convection coefficient ( $W / m^2 \cdot ^{\circ}C$ )	inner surface of tube	5.0
	outer surface of tube	4.5

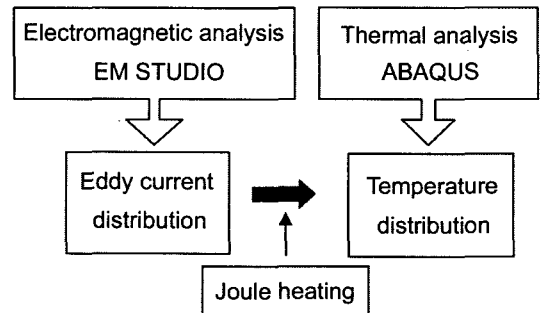


Fig. 1 Flow chart of the analysis procedure

$$P_{\alpha} = \frac{1}{2} \text{Re}(\mathbf{J}^* \cdot \mathbf{E}) = \frac{1}{2} \left( \frac{\mathbf{J}^* \cdot \mathbf{J}}{\sigma_{\alpha}} \right) \quad (2)$$

여기서  $\mathbf{J}$ 는 와전류 밀도 (Eddy current density),  $*$ 는 공액(conjugate)연산자이다. 전기적 에너지의 일정비( $\eta$ )만이 열에너지( $q$ )로 발생한다고 가정한다.

$$q = \eta P_{\alpha} \quad (3)$$

열 해석의 지배방정식인 Biot-Fourier 방정식은 아래와 같다.

$$K \nabla^2 T - \rho C_p \frac{dT}{dt} + q = 0 \quad (4)$$

여기서  $K$ 는 열전도계수,  $\rho$ 는 재료밀도,  $C_p$ 는 비열(specific heat)을 나타낸다. 이동속도를 고려하기 위해서는 튜브 요소에 대한 좌표계(Lagrangian 좌표계)를 용접기에 대한 좌표계(Eulerian 좌표계)로 변환하여야 한다. 따라서 온도의 시간에 대한 미분항은 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{dT(t, x, y, z)}{dt} = \frac{\partial T}{\partial t} + v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} \quad (5)$$

튜브는  $z$  축 방향으로 이동하므로 식(4)와 식(5)로부터 수정된 지배방정식은 다음과 같다

$$K \nabla^2 T - \rho C_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q = 0 \quad (6)$$

모든 절점에서의 온도 변화율이 초당  $0.5^{\circ}\text{C}$  이하 일 때를 수렴조건으로 하였다. 고주파 유도용접법

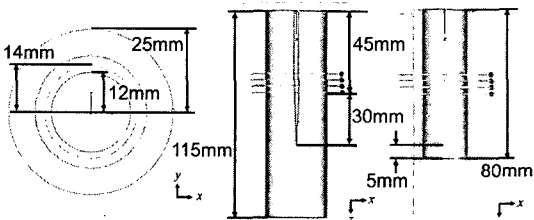


Fig. 2 Geometric information of tube and impeder

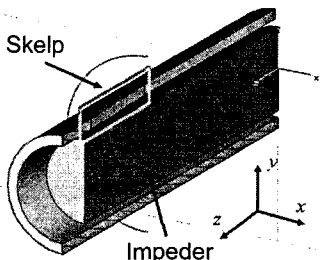


Fig. 3 Cross-section of skelp with impeder

에서 제조 가능한 튜브 직경이 13mm에서 305mm 이므로<sup>(9)</sup> 본 연구에서는 직경 34mm의 튜브를 사용하였다. Fig. 2에 모델의 치수정보를 나타내었다. 튜브의 이동속도와 용접이 이루어지는 속도가 같고, 코일 끝에서 V-수렴점까지의 거리는 일정하다고 가정하였다. 튜브 내외벽에서 외부와의 온도차에 의한 대류가 발생하며 일정비는 1, 용융온도는  $1500^{\circ}\text{C}$ 로 가정하였다.

3. 해석결과 및 고찰

V-각이  $4^{\circ}$ , 전류의 주파수가 400kHz 일 때 전자기장 해석과 열 해석 한 후의 와전류 분포와 온도 분포를 Fig. 4에 나타내었다. 고주파 전류에 의해 발생하는 와전류는 표피효과와 근접효과에 의해

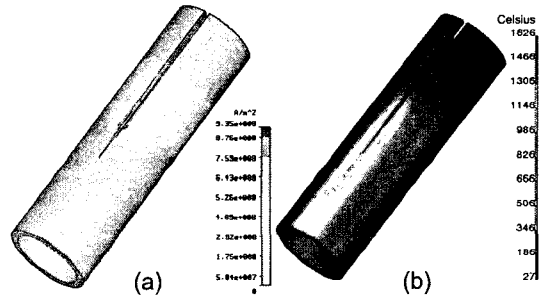


Fig. 4 Results of electromagnetic and thermal analysis : (a) eddy current distribution; (b) temperature distribution

Table 2 Comparison of results

	Without impeder	With impeder
Max. Eddy current	$8.405 \times 10^8 \text{ A/m}^2$	$1.175 \times 10^9 \text{ A/m}^2$
Max. Temp.	$779^{\circ}\text{C}$	$1627^{\circ}\text{C}$

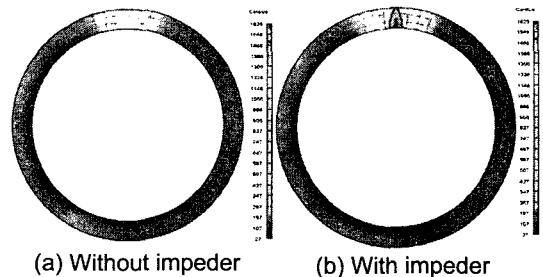


Fig. 5 Comparison of temperature distribution at weld point between tube without impeder and tube with impeder

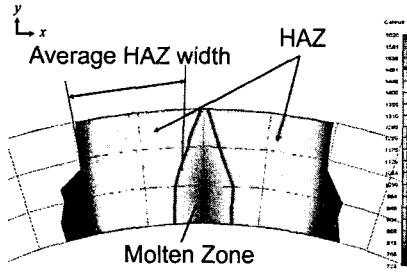


Fig. 6 Temperature distribution of HAZ and molten zone at weld point

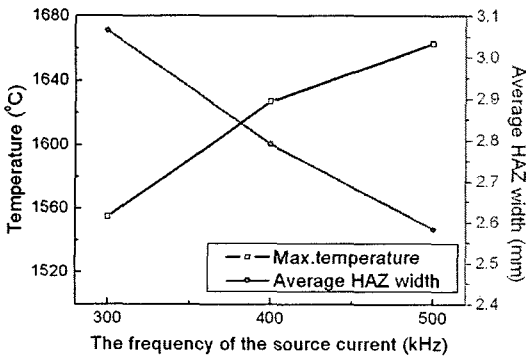


Fig. 7 Maximum temperature and average HAZ width with respect to frequency (weld speed : 18mpm)

Fig. 4에 보인 바와 같이 대강면(skelp)에 집중이 된다. 열원의 이동에 의해 온도는 용접점(weld point)에서 최대값을 갖는다.

Fig. 5는 임피더를 위치시켰을 때와 그렇지 않은 경우에 대해 용접점에서 온도분포를 나타낸 그림이다. 임피더를 위치시켜 해석한 결과, 와전류와 온도의 최대값이 현저히 증가하였음을 Table 2에서 확인할 수 있다. 그러므로 임피더를 사용하면 전력을 추가적으로 증가시키지 않고도 최대 온도를 증가시킬 수가 있어 용접기의 효율을 상승시킬 수 있다. Fig. 6에 임피더를 위치시켰을 때 용접점에서의 용융부(molten zone)와 HAZ의 온도분포를 나타내었다.

#### 4. 용접변수의 영향

용접변수는 용접부의 품질에 영향을 미치는 주요 변수를 지칭한다. 본 연구에서는 원전류의 주파수, 용접속도(weld speed), V-각, 튜브의 두께에 따른 용접부의 특성변화를 살펴보았다.

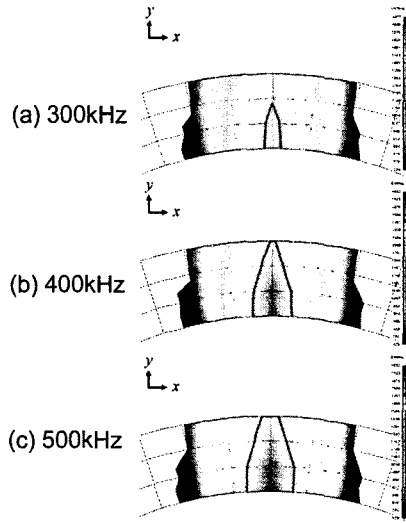


Fig. 8 Temperature distribution of HAZ and melted zone at weld point with respect to frequency (723°C to 1670°C)

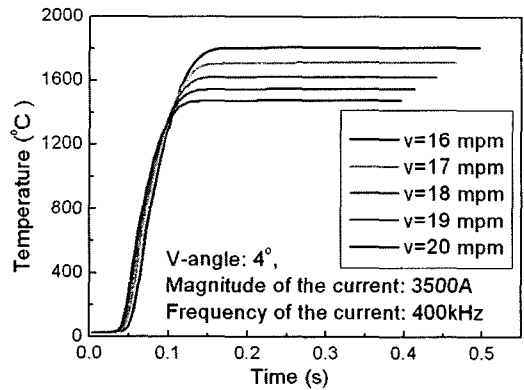


Fig. 9 Result of thermal transient analysis with respect to weld speed

##### 4.1 원전류의 주파수에 따른 해석 결과

전류의 주파수를 300kHz에서 500kHz로 증가시켜 해석한 결과, Fig. 7과 Fig. 8에 보인 바와 같이 주파수가 높을수록 최대 온도가 증가하여 용융부 면적이 증가하고 HAZ의 폭이 감소하였다. 일반적으로 표피 깊이는 주파수의 제곱에 반비례하는데, 주파수가 높을수록 표피 깊이가 짧아져 와전류가 표면에 집중하게 된다. 따라서 주파수를 증가시키면 두께 방향으로 용융량을 증가시키고, HAZ가 감소하여 양질의 용접부를 얻을 수 있다.

##### 4.2 용접속도에 따른 해석 결과

용접속도에 따라 온도 값도 변화한다. 용접속도

를 16mpm 에서 20mpm 까지 증가시키며 해석을 수행하였다. Fig. 9는 과도 해석시 시간에 따른 용접점의 온도변화를 나타낸다. 용접속도가 증가할수록 줄 열에 의해 용접부를 가열하는 시간이 짧기 때문에 정상상태에 도달하는 시간이 짧고 최대 온도 값도 감소한다.

4.3 V-각에 따른 해석 결과

고주파 유도용접의 경우 원형으로 성형된 대강면이 용접점에서 만나 V-각을 이루며, V-각은 용접 품질에 큰 영향을 미친다. V-각이 용접부에 미치는 영향을 조사하기 위해 3°에서 5.5°까지 V-각을 증가시켜 해석을 수행하였다. Fig. 10에 보인 바와 같이 3°에서 5°범위내에서는 V-각이 증가함에 따라 최대 와전류 값과 최대 온도 값은 점차

감소한다. 이는 V-각이 증가할수록 마주보는 대강면 사이의 거리가 증가하여 근접 효과의 영향이 감소하기 때문이다. 그러나 V-각이 5.5°일 때 와전류와 온도의 최대값이 급격히 상승한다.

Fig. 11에 V-각의 변화에 따른 대강면의 와전류 분포를 나타내었다. 3°에서 5°범위에서의 와전류 밀도는 유사한 경향을 보이며 감소하는 반면, V-각이 5.5°일 때는 대강면 안쪽에 와전류가 국부적으로 집중하는 현상이 발생한다. 이와 같은 현상이 발생하는 이유는 다음과 같다. 도체표면에 생성되는 와전류의 세기는 도체표면과 수직 방향으로 작용하는 자기장의 크기에 비례한다.<sup>(10)</sup> 따라서 와전류의 세기는 자기장 벡터  $\vec{B}$ 와 대강면의 법선 벡터  $\vec{n}$ 의 내적에 비례한다(Fig. 12). V-각이 증가하

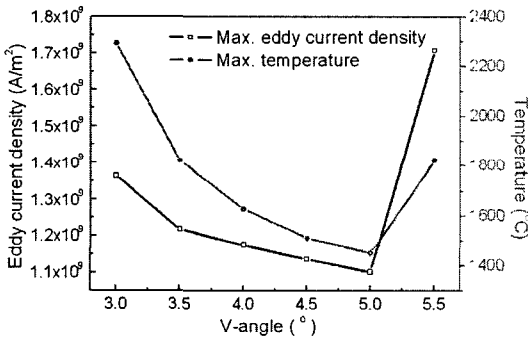


Fig. 10 Maximum eddy current density and temperature with respect to V-angle (weld speed : 18mpm)

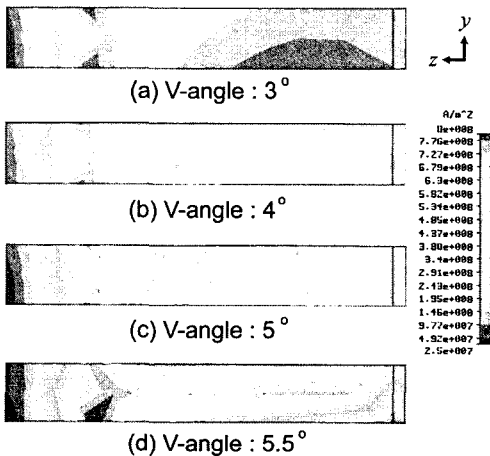


Fig. 11 Eddy current distribution at skelp with respect to V-angle

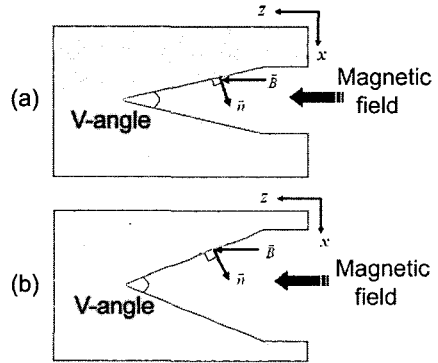


Fig. 12 Simplicity of weld vee : (a) small V-angle ; (b) large V-angle

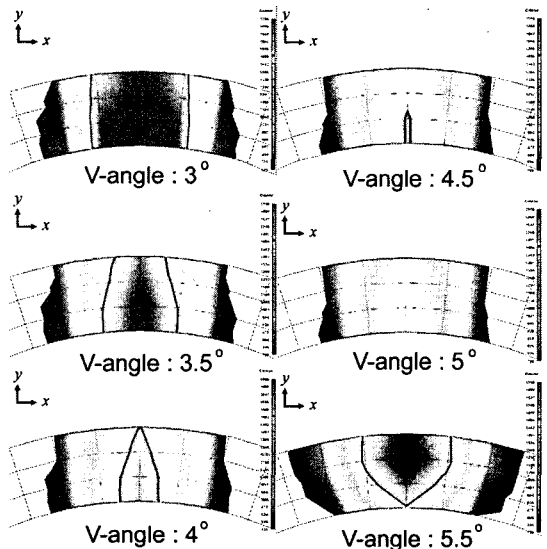


Fig. 13 Temperature distribution of HAZ and melted zone with respect to V-angle (723°C to 1750°C)

면 대강면과 수직인 자기장 벡터 값의 크기가 증가하므로 와전류는 증가한다.

V-각에 따른 용접부의 온도 분포를 Fig. 13에 나타내었다. V-각이 특정한 각 이상이 되면 근접효과 감소에 의한 와전류 감소의 영향보다, 대강면과 수직으로 작용하는 자기장 벡터 값 증가의 영향이 더 우세해진다. 그러므로 대강면의 전체 와전류 세기는 증가하게 되어 이 경우에는 판이한 온도 분포를 얻게 된다. V-각이 5.5° 일 때 등온선이 다른 경우에 비해 대강면과 많이 기울어져 있는데, 이는 대강면이 불균일하게 가열되어 모서리가 과열됨을 의미한다. 대강면 바깥쪽에서 용융이 시작되면 먼저 용융된 금속이 임피더로 떨어지게 되어 임피더의 수명을 단축시키고, 임피더의 성능을 떨어뜨리는 문제점이 발생한다.

본 연구에서는 위와 같이 해가 급격히 변하기 시작하는 V-각을 임계각(critical V-angle)이라고 정의하였다. 해석을 통해 임계각은 튜브의 외경과 V-길이와 관련이 있음을 알 수 있고(Fig. 14), 이를

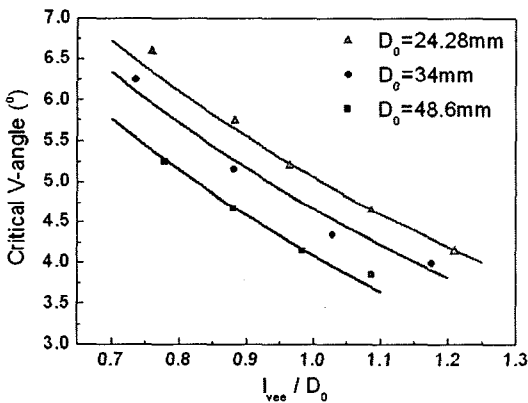


Fig. 14 Nondimensionalization of critical V-angle

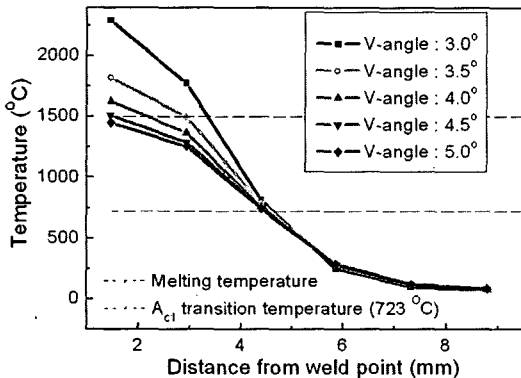


Fig. 15 Temperature towards to circumferential direction

곡선 맞춤하여 실험식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\theta_{V-angle} = \frac{0.27 - 0.06 \times (I_{ave} / D_o)}{(I_{ave} / D_o) + 1} - 0.69 D_o \quad (7)$$

여기서  $I_{ave}$ 는 V-길이(m),  $D_o$ 는 튜브의 외경(m),  $\theta_{V-angle}$ 는 임계각(rad)을 의미한다. 따라서 식(7)을 이용하여 튜브의 외경과 V-길이를 설계하면 불균일하게 가열되는 대강면을 피할 수 있고, 이로 인해 발생하는 용접 결함을 최소화할 수 있다. Fig. 15와 Fig. 16은 각각 용접점에서 원주방향으로 온도분포와 HAZ의 평균 폭을 나타낸다. V-각이 작을수록 용융되는 면적이 증가하고 HAZ가 감소하는 것을 알 수 있다. V-각을 가능한한 작게 하면, 같은 전력으로 많은 양을 용융시킬 수 있고 HAZ를 감소시킬 수 있어 양질의 용접부를 얻을 수 있다.

4.4 튜브의 두께에 따른 해석 결과

두께에 따른 와전류와 온도분포 변화를 조사하

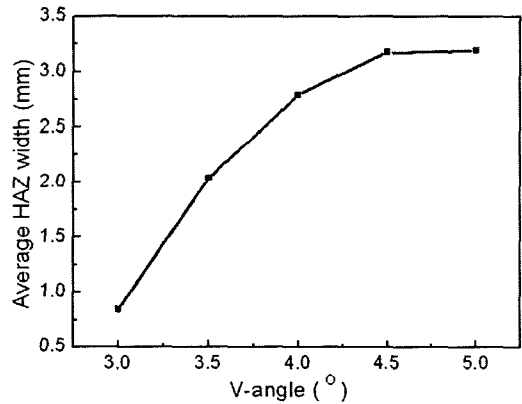


Fig. 16 Average HAZ width with respect to V-angle

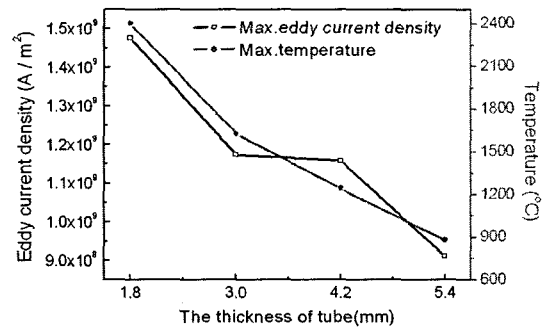


Fig. 17 Maximum eddy current density and temperature with respect to thickness (weld speed : 18mpm)

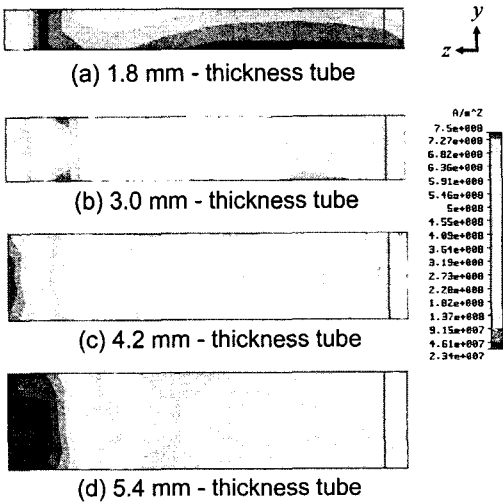


Fig. 18 Eddy current distribution at skelp with respect to thickness

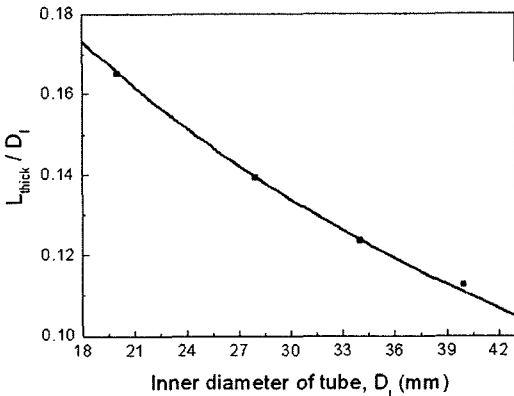


Fig. 19 Nondimensionalization of critical thickness

기 위해 1.8mm, 3.0mm, 4.2mm, 5.4mm의 두께의 튜브에 대해 해석을 수행하였다. Fig. 17에 보인 바와 같이 두께가 두꺼울수록 최대 와전류와 최대 온도가 감소한다. Fig. 18은 두께에 따라 대강면의 와전류 분포형상을 도시한 그림이다. 4.2mm, 5.4mm 두께의 튜브에서 와전류의 최대값이 대강면 중앙에서 나타난다. 이것은 튜브의 두께가 클수록 마주보는 대강면의 면적이 증가하여 근접효과영향의 영향이 증가하기 때문이다. 4.2mm 두께 튜브의 최대 와전류 값이 3.0mm 두께 튜브와 비슷한 값을 갖는 것도 위와 같은 이유에서이다. 근접효과에 의해 대강면 중앙에서 와전류가 최대 값을 갖기 시작하는 두께를 본 연구에서 임계두께(critical thickness)라고 정의하였다. Fig. 19의 해석 결과를 통해 임계두께는 튜브외경과 관련 있음을 알 수 있고, 이를 곡선 맞추하여 식으로 표현하면

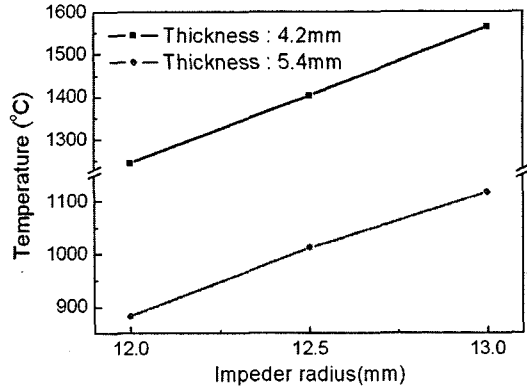


Fig. 20 Maximum temperature with respect to impeder radius

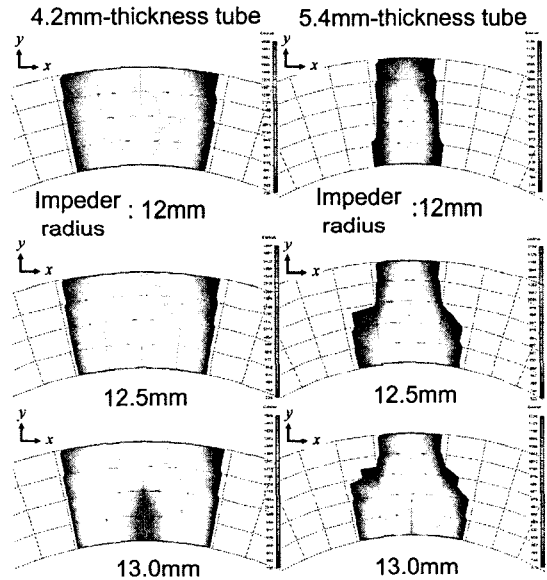


Fig. 21 Temperature distribution of 4.2mm and 5.4mm-thickness tube with respect to impeder radius

다음과 같다.

$$\frac{L_{thick}}{D_i} = \frac{11}{D_i + 34.2} - 0.0375 \quad (8)$$

여기서  $D_i$ 는 튜브의 내경(mm),  $L_{thick}$ 는 임계두께(mm)를 의미한다.

4.2mm와 5.4mm 두께의 튜브와 같이 두꺼운 튜브의 경우 최대 온도가 용융온도보다 낮아 용융이 발생하지 않는다. 용융온도에 도달하지 못한 튜브를 임피더의 반지름을 증가시켜 해석한 결과, Fig. 20에 보인 바와 같이 4.2mm 두께 튜브는 용융온도에 도달하고, 5.4mm 두께 튜브 역시 최대 온도가 점차 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이는 임피더가 튜브 내외벽의 와전류를 억제시켜 용접기

효율을 높이는 역할을 할 뿐 아니라, 코일에서 발생한 자기장을 용접점까지 유지시키는 역할도 하기 때문이다. Fig. 21 에 임피더의 반지름 증가에 따른 4.2mm 와 5.4mm 두께의 튜브의 온도 단면을 도시하였다. 임피더 반경을 증가시킬수록 와전류가 표면에 집중하여 온도가 상승함을 확인할 수 있다. 따라서 두꺼운 튜브 제조시 임피더의 반지름을 증가시키면 같은 전력으로 온도를 증가시킬 수 있다. 하지만 임피더의 반지름을 과도하게 증가시키면, 임피더와 튜브 사이의 간격이 좁아 떨어져 나온 용융금속이 임피더와의 접촉이 용이해 임피더의 수명을 단축시킨다.

## 5. 결 론

용접부 품질에 영향을 미치는 용접변수의 특성을 이해하면 용접결함을 최소화할 수 있고, 양질의 용접부를 얻을 수 있다.

본 연구에서는 표피효과, 근접효과를 고려한 고주파 유도용접의 3 차원 해석에 관한 연구를 수행하였다. 전자기장 해석을 수행하여 튜브모양의 피용접재의 와전류를 계산하고, 과도 열 해석을 통해 튜브의 이동속도를 고려하여 온도분포를 계산하였다.

해석을 통해 임피더를 위치시키면 동일한 전력으로 더 높은 온도를 얻을 수 있고 고효율의 용접이 가능함을 보였다. 원전류의 주파수가 높을수록 온도가 상승하고 용접이음부 성능면에서 큰 문제를 일으킬 수 있는 HAZ 가 감소하여 양질의 용접부를 얻을 수 있다. 용접속도가 증가할수록 와전류에 의한 줄 열이 빠른 속도로 용접부를 가열하고 이동하기 때문에 정상상태 도달시간이 짧고, 최대 온도 값이 감소한다. V-각을 작게 하면 많은 양의 피용접재를 용융시킬 수 있고, HAZ 가 감소하여 양질의 용접부를 얻을 수 있다. 하지만, V-각을 임계각이상 증가시키면 대강면은 불균일하게 가열되어, 이로 인한 용접 결함이 발생할 수 있다. 식(7)을 이용하여 용접기를 설계하면 임계각을 예측할 수 있어 대강면이 불균일하게 가열됨을 최소화시킬 수 있다. 두꺼운 튜브 제조시 용융온도에 도달하지 못한 튜브는 임피더의 반지름을 증가시킴으로써 보정이 가능하다.

## 후 기

본 연구에 귀중한 조언을 해주신 KAIST 유중돈

교수님께 감사의 말씀을 전합니다.

## 참고문헌

- (1) Scott, P. F., and Smith, W., 1995, "A Study of the Key Parameters of High Frequency Welding," *Tube China '95*, pp. 161~181.
- (2) Scott, P. F., 1996, "The Effects of Frequency in High Frequency Welding," *Transactions of Tube 2000*, Toronto, ITA Conference.
- (3) Scott, P. F., 1996, "High Frequency Welding of Low Carbon steel Tube," *Technical Papers of Thermatool Corp.*
- (4) Scott, P. F., "Modern Methods of High Frequency Welding used to Produce Consistent Quality," *Technical Papers of Thermatool Corp.*
- (5) Asperheim, J. I., Grande, B., Markegaard, L., Induksjon, E., Buser, J. E. and Lombard, P., 1998, "Temperature Distribution in the Weld Vee Cross Section," *Tube International*, Vol. 17, No. 90, pp. 563~567.
- (6) Asperheim, J. I. and Grande, B., 2000, "Temperature Evaluation of Weld Vee Geometry and Performance," *Tube International*, Vol. 19, No. 110, pp. 497~502.
- (7) Asperheim, J. I. and Grande, B., "Factors Influencing Heavy Wall Tube Welding," *Technical Papers of TubeNet.*
- (8) Scott, P.F., 1997, "Weld Area Design for High Frequency Induction Welding pipe and tube," *Tube International*, Vol. 16, No. 78, pp. 185~190.
- (9) ASM Handbook, Vol.6, Welding, Brazing and Soldering
- (10) Cheng, David K., 1992, "Field and Wave Electromagnetics," 2nd Edition, Addison Wesley.
- (11) Tegopoulos, J.A. and Kriezis, E.E., 1985, "Eddy currents in Linear Conducting Media."
- (12) O'Brien, R. L., 1991, "Welding handbook," 8th edition, The American Welding Society.
- (13) Holman, J. P., 2000, "Heat transfer," 8th edition.
- (14) Brandes, E. A. and Brook, G.B., 1992, "Smithells Metal Reference Book," 7th edition, Butterworth-Heinemann.
- (15) Haga, H., Aoki, K. and Sato, T., 1981, "The Mechanism of Formation of Weld Defects in High Frequency Electric Resistance Welding," *Welding Journal*, Vol. 60, No. 6, pp. 104s~109s.
- (16) Haga, H., Aoki, K. and Sato, T., 1980, "Welding Phenomena and Welding Mechanism in High Frequency Electric Resistance Welding," *Welding Journal*, Vol. 59, No. 7, pp. 208s~212s.
- (17) CST EM STUDIO Manual, Version 1.3
- (18) Hibbitt, K. and Sorensen, Inc., 1998, "ABAQUS Theory Manual," Version 5.8