

**IH밥솥의 유도 가열 코일 손실 계산 및 Cost 예측에 관한 연구**

유 승희, 박 병욱  
(LG전자 디지털 어플라이언스 연구소)

**A Study on the Loss calculation and Cost Prediction for Induction Heating Coil of IH Jar**

Seung Hee Ryu, Byeong Wook Park  
(LG Electronics Inc. Digital Appliance Lab.)

**Abstract** - 가전산업과 연계하여 유도가열 기술을 응용한 대표적인 시스템으로 IH압력밥솥을 예로 들 수 있다. 유도가열 코일에서 고주파 자속의 의해 발생된 와전류가 결합된 밥솥을 가열하기 때문에 유도가열 코일에는 고주파 손실을 줄이기 위해 Litz wire가 사용된다. 이에 본 논문은 특히 IH압력밥솥에 사용되는 Litz wire를 선정하는 데 있어 중요한 요소가 되는 소선경, 가닥수별 AC·DC 저항 및 손실계산 그리고 Cost 예측 방법을 제안한다.

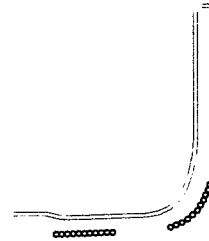


그림 1. IH 밥솥 가열시스템 구조(2D 축대칭)

**1. 서 론**

유도가열(IH, Induction Heating)기술은 1831년 패러데이의 의해 전자기유도현상이 발견된 이래, 산업전반에 걸쳐 아주 폭 넓게 사용되고 있고, 특히 국내 가전 부분에서는 압력밥솥이 이 기술이 응용된 대표적인 사례로써 보급이 점차로 확대되는 중이다.

유도가열 원리는 코일에 교류전류를 흘려주면 이 코일 안에 있거나 근처에 있는 금속체에 와전류(Eddy Current)가 유도되어 금속체가 가열되는 현상을 이용하는 것으로서, 최근은 제품의 소형·경량화와 함께 반도체 소자 및 인버터 회로의 발전으로 점차 고주파화로 진행되고 있어, 이와 관련된 부품들의 저손실화는 주요 과제가 되고 있다.

특히 유도가열 코일은 핵심부품으로서 저손실을 위해 큰 선경의 wire 대신 작은 선경의 wire를 여러 가닥 twist하는 Litz wire를 일반적으로 사용하여 AC(고주파) 손실을 줄이고 있다. AC손실은 작은 선경의 소선을 가능한 많이 사용하여 제작하면 충분히 줄일 수 있지만, 유도가열 시스템 제작비용이 상승하는 문제가 발생하여 손실과 가격에 대한 최적화가 요구되고 있다.

이에 본 논문에서는 IH밥솥의 유도가열 코일구조에 있어서, Litz wire의 선경, 가닥수 별 AC·DC 저항 및 손실을 계산하는 방법과 이 Litz wire로 제작된 유도 가열 코일의 가격을 예측하는 방법을 제안하여 선경, 가닥수 별 손실 및 가격 특성을 도출하였다.

**2. 본 론**

**2.1 IH 밥솥 가열 시스템 구조**

IH 밥솥 가열 시스템 구조는 간략하게 그림1에 나타난 바와 같이 와전류에 의해 발열하는 밥솥과 유도가열 코일로 구성된다.

유도가열 코일은 균일한 가열을 위해 밥솥의 밀면과 측면에 각각 배치하고 서로 직렬로 연결된 형태로 제작된다. 이 때 밀면 코일은 평면 형태로 제작하고, 측면 코일은 밥솥의 곡면을 따라 배치되도록 하는 것이 일반적이다.

유도 가열을 발생시키기 위해 코일에 입력되는 전류는 일반적으로 IH용 인버터 회로를 이용하여 20~40kHz 범위의 AC전류가 되도록 동작시킨다.

**2.2 유도가열 코일의 손실**

유도가열 코일에서의 손실은 인덕터나 트랜스포머와 달리 코어 손실을 주요 열원으로서는 이용하므로, 코일의 winding 손실이 주요 원인이 된다.

전체 winding 손실은 기본적인 DC저항에 의한 손실과 고주파 전류에 의한 표피 및 근접효과에 의한 와전류 손실이 더해져 나타나며, 이 고주파 전류에 의한 증가된 저항 성분을 AC저항이라 한다. 일반적으로 총 손실은 DC저항에 대한 AC저항의 비로써 결정된다.

**2.2.1 DC저항에 의한 손실**

구리 단위 부피당 소비되는 전력은

$$P_{Cu,sp} = \rho_{Cu} (J_{rms})^2 \tag{1}$$

로서 정의되며, 여기에서  $J_{rms} = I_{rms}/A_{Cu}$ 로서 구리선에서의 전류밀도이며,  $I_{rms}$ 는 구리선에서의 전류,  $A_{Cu}$ 는 구리의 단면적이다. 총 손실은 (1)식에 구리의 전체 부피  $V_{Cu}$ 를 곱함으로써 구해진다.

**2.2.2 AC저항에 의한 손실**

표피효과는 고주파 전류가 구리선의 표면으로 흐르는 현상이고, 근접효과는 근처의 다른 구리선의 영향으로 전류가 흐르는 패턴이 불규칙해지는 현상이다.

현재 유도가열 코일의 Litz wire는 일반적으로 0.5mm이하의 소선경이 주로 사용되고, 전류의 주파수는 20~40kHz 범위이므로 소선경 d가 skin depth  $\delta$ 의 2배보다 작으므로 일반적으로 표피효과는 무시할 수 있고, 주로 근접효과에 의해 손실이 발생한다.

**2.2.3 총손실**

winding에서 소비되는 전체 전력은

$$P_w = P_{dc} + P_{ec} = (I_{rms})^2 R_{dc} + (I_{rms})^2 R_{ec} \tag{2}$$

$$= (I_{rms})^2 R_{ac}$$

이며, 여기에서  $R_{ec}$ 는 근접효과에 의한 저항이다.

따라서 전체 저항  $R_{ac}$ 는 식(3)으로 표현된다.

$$R_{ac} = F_R R_{dc} = \left(1 + \frac{R_{ec}}{R_{dc}}\right) R_{dc} \tag{3}$$

### 2.3 유도가열 코일의 손실 계산

유도가열 코일의 손실 계산은 코일이 위치한 부분에 대하여 winding 영역을 가정하여 계산한다.

#### 2.3.1 밀면 코일의 손실 계산

밀면 코일은 평면 형태이므로 그림 2와 같이 전체 턴수(N1)에 대하여 winding 영역을 설정하여 계산한다. winding 영역은 높이 h, 폭 b=N(턴수)h 이다.

$$1) \text{winding 영역 단면적: } A_w = h \times N1 \times h = N1h^2 (4)$$

$$2) \text{구리 단면적: } A_{Cu} = \pi \times (d/2)^2 \times n = \frac{\pi}{4} nd^2 (5)$$

d : 소선경, n : 가닥수

$$3) \text{구리 Fill Factor: } k_{Cu} = \frac{N1 \times A_{Cu}}{A_w} = \frac{\pi nd^2}{4h^2} (6)$$

$$4) \text{단위체적당 손실: } P_{sp1} = \rho J_{rms}^2 = \rho \times k_{Cu} \times J_{rms}^2 (7)$$

$$5) \text{DC 손실: } P_{dc1} = P_{sp1} \times V_{w1} (8)$$

$V_{w1}$ 는 내경 r1과 폭 Nh를 갖는 도너츠 형태이므로

$$V_{w1} = \pi \times ((r1 + Nh)^2 - r1^2) (9)$$

$$6) \text{DC 저항: } R_{dc1} = P_{dc1} / I_{rms}^2 (10)$$

$$7) \text{AC 저항: } R_{ac1} = F_R R_{dc1} (11)$$

$$\text{여기서 } F_R = 1 + \frac{\pi^2 w^2 \mu_0^2 N^2 n^2 d^6}{768 \rho^2 b^2} (1)$$

$$8) \text{총손실: } P_{loss1} = R_{ac1} \times I_{rms}^2 (12)$$

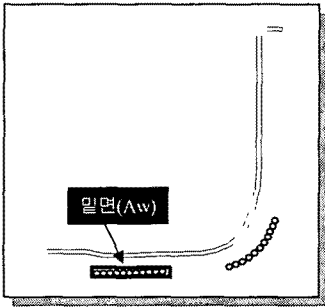


그림 2. 밀면 코일의 winding 영역

#### 2.3.2 측면 코일의 손실 계산

측면 코일은 곡면 형태이므로 그림 3과 같이 각각 턴수(N2)에 대하여 winding 영역을 설정하여 계산한다. 각 턴별 winding 영역은 높이 h, 폭 b=h 이다.

$$1) \text{winding 영역 단면적: } A_w = N2 \times h \times h = N2h^2 (13)$$

2) 구리 단면적, 구리 Fill Factor 및 단위체적당 손실은 식 (5), (6), (7)과 동일

$$3) \text{DC 손실: } P_{dc2} = P_{sp1} \times V_w (14)$$

$V_w$ 는 내경  $r_n$ 과 폭 h를 갖는 도너츠 형태를 N2개 합한 것이므로, 수식을 정리하면

$$V_w = 2\pi h^2 \sum_{n=1}^{N2} r_n (15)$$

$$4) \text{DC 저항: } R_{dc2} = P_{dc2} / I_{rms}^2 (16)$$

$$5) \text{AC 저항: } R_{ac2} = F_R R_{dc2} (17)$$

$$6) \text{총손실: } P_{loss2} = R_{ac2} \times I_{rms}^2 (18)$$

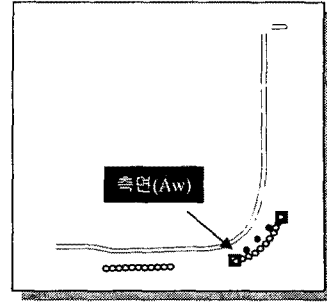


그림 3. 측면 코일의 winding 영역

#### 2.3.3 선경/가닥수에 대한 손실 특성

총 손실은 각 부분 코일을 합한 것이므로 영역별 유도한 식을 이용하여 선경 d와 가닥수 n에 대해서 정리하면 선경 및 가닥수에 대한 관계식을 도출할 수 있고, 이 식에서 또 하나의 변수 총 손실  $P_{loss}$ 는 기준이 되는 유도 가열 코일의 손실에 대하여 정규화 할 수 있고, 이를 통해 그림 4와 같이 현재의 유도 가열 코일에 대한 손실 저감 혹은 동등의 Litz wire를 선정할 수 있는 Contour Plot을 도출할 수 있다.

$$1) R_{dc1} = \rho \times k_{Cu} \times J_{rms}^2 \times V_{w1} = \frac{k_1}{d^2 n} (19)$$

$$k_1 = 4\rho N(Nh + 2r1)$$

$$2) R_{dc2} = \rho \times k_{Cu} \times J_{rms}^2 \times V_{w2} = \frac{k_2}{d^2 n} (20)$$

$$k_2 = \frac{4\rho V_{w2}}{\pi h^2}$$

$$3) F_R = 1 + k_3 n^2 d^6 (21)$$

$$k_3 = \frac{\pi^2 w^2 \mu_0^2 N^2}{768 \rho^2 b^2}$$

$$4) P_{loss} = P_{loss1} + P_{loss2} = I_{rms}^2 F_R (R_{dc1} + R_{dc2}) (22)$$

식 (22)에 식 (19), (20), (21)을 대입하고 정리하면

$$(k_1 k_3 + k_2 k_3) d^6 n^2 - \frac{P_{loss}}{I_{rms}^2} d^2 n + (k_1 + k_2) (23)$$

n에 대한 이차방정식이 되고, 이 식의 해를 구하면

$$n = \frac{(\frac{P_{loss}}{I_{rms}^2} d^2) \pm \sqrt{(\frac{P_{loss}}{I_{rms}^2} d^2)^2 - 4(k_1 k_3 + k_2 k_3)(k_1 + k_2) d^6}}{2(k_1 k_3 + k_2 k_3) d^6} (24)$$

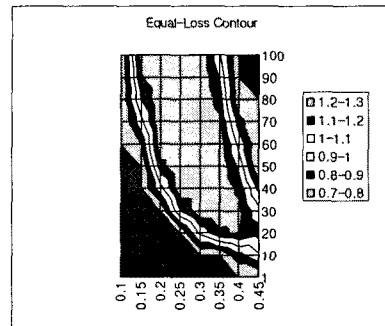


그림 4. 선경/가닥수에 대한 손실 특성

## 2.4 유도가열 코일의 가격 예측

유도가열 코일의 가격은 제작 코일의 무게 계산 및 Litz wire에 대한 Cost Function을 도출함으로써 예측을 할 수 있다.

### 2.4.1 유도가열 코일의 무게 계산

밀면 및 측면 코일의 제작은 winding 영역의 채적을 이용하여 도출하며, 구해진 채적에 비중을 곱하여 코일의 무게를 계산한다.

1) 코일 채적 :

$$V_{Cu} = V_w \times k_{Cu} = V_w \times \frac{NA_{Cu}}{A_w} \quad (25)$$

$$= \frac{V_w \pi d^2 n}{4h^2} = \frac{(V_{w1} + V_{w2}) \pi d^2 n}{4h^2}$$

2) 코일 무게 = 구리 비중  $\times V_{Cu}$  (26)

### 2.4.2 Litz wire의 Cost Function

가격을 정량적으로 제시한다는 것은 학술적인 면에서는 문제가 있다. 이것은 제작 업체별 상황에 따라 가공비 설정이 다르기 때문이다. 그러나 대부분의 Litz wire 업체의 가격 설정은 일반적으로 1kg을 기준으로 하여, 월별 결정되는 시장에서의 구리가격 및 magnetic wire 소선경별 표준화된 제작비용을 기준으로 가공비가 설정되므로 두 조건을 기준으로 Cost Function을 도출할 수 있다. 두 변수 중 특히 가격에 영향을 주는 변수는 소선경으로써 일반적으로 소선경이 0.2mm 이하로 작아질수록 가격이 급격히 증가하는 경향을 보이고 있다. 그리고 가닥수에 대한 변수는 대부분 업체가 100가닥이하라면 추가 Cost가 없으므로 이 부분은 제작무게의 부분으로서 반영된다.

본 논문에서는 일정시점의 구리 가격 및 소선경별 업체의 magnetic wire 가공비를 재료비 기준으로 하여 Litz wire 업체의 일반적인 가공비 비율을 적용한 데이터를 이용하여 소선경별 2차 다항식 회귀분석을 하여 그림 5와 같은 Cost Function을 도출하였다.

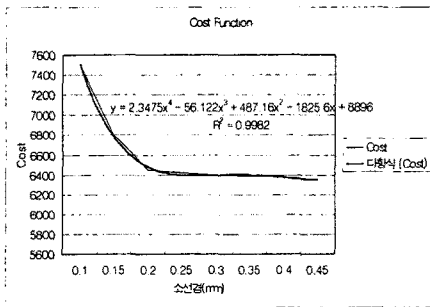


그림 5. 소선경별 Cost Function

식 (26)과 그림 5의 Cost Function을 이용하고, Cost를 기준 코일에 대해서 정규화하면 그림 6과 같은 가격 Contour를 얻을 수 있다.

## 2.5 유도가열 코일 제작 및 실험

유도가열 코일을 동일한 손실로 계산되는  $\phi 0.4/12$  가닥 및  $\phi 0.3/20$  가닥의 Litz wire를 이용하여 밀면 25턴, 측면 18턴으로 제작하고, 무게를 측정하고, 수부하에 대한 가열실험을 하여 계산 결과와 측정치와의 정도를 비교하였다.

손실에 대한 예측치는 표 1에 나타난 바와 같이 온도상승으로 가격에 대한 예측치는 표 2에 나타난 바와

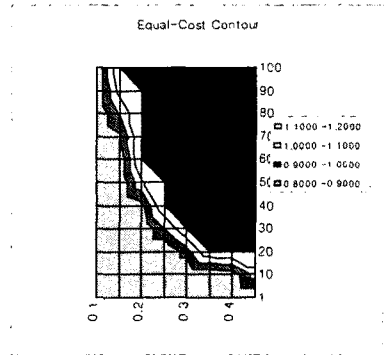


그림 6. 선경/가닥수에 대한 가격 특성

같이 제작 무게로서, 측정치에 거의 일치하는 결과를 얻었다.

표 1. 손실 예측치 및 온도상승 실험 결과

	$\phi 0.4/12$ 가닥	$\phi 0.3/20$ 가닥
DC 손실(W)	117	125
와전류 손실(W)	25	13
총손실(W)	142	138
온도상승( $^{\circ}C$ )	90.1	85.5

표 2. 무게 예측치 및 측정 결과

	$\phi 0.4/12$ 가닥	$\phi 0.3/20$ 가닥
계산(g)	286.7	264
측정(g)	287	261

## 3. 결 론

본 논문에서는 IH발열에 적용되는 유도가열 코일의 손실계산 및 Cost 예측 방법을 제안하였다. 또한 이 방법을 통해 동일한 손실로 계산된 소선경/가닥수가 다른 Litz wire를 제작하여 예측치의 유용성을 검증하였다.

따라서 본 제안 방법을 통해 손실은 물론 가격까지 예측할 수 있으므로, 유도가열 코일의 Litz wire에 대한 최적 설계 시 적용 가능하리라 사료된다.

### (참 고 문 헌)

- [1] Charles R. Sullivan, "Optimal Choice for Number of Strands in Litz-wire Transformer Winding", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol14, No 2, p283-291, March 1999
- [2] Charles R. Sullivan, "Cost-Constrained Selection of Strand Diameter and Number in a Litz-wire Transformer Winding", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol16, No 2, p281-288, March 2001
- [3] Ned Mohan 외, Power Electronics, John Wiley & Sons Inc., p744-790.