

TR단조를 위한 환봉의 유도가열 해석에 관한 연구

송민철[#], 박덕수¹, 이명규¹, 이광학²

A Study on the Induction Heating Analysis of Round bar for TR forging

M. C. Song, D. S. Park, M. G. Lee, K. H. Lee

Abstract

The TR forging is a kind of continuous grain flow forging. The preform of crank shaft for TR forging process was a round bar with a ring groove. In the first stage, the preform was partly heated by induction heating and then forged by vertical and horizontal force in sequence. In this study, the simulation process of induction heating was proposed to evaluate the temperature distribution of preform for TR forging. The equivalent circuit method was adopted to find coil current of the preform with a various dimensions and power levels. With these results, the coupled electromagnetic and transient thermal analysis for induction heating was performed to evaluate the temperature distribution at the preform of crank shaft during induction heating process. This FE analysis technique with equivalent circuit method was verified by comparing the analysis results with the experimental results.

Key Words : Induction Heating, TR Forging, Coupled Electromagnetic-Thermal Analysis, Equivalent Circuit Method

1. 서론

TR단조는 선박용 4-stroke엔진의 크랭크 샤프트를 연속 단류선을 갖도록 단조하는 방법이다. 폴란드의 공학자 T. Rut가 고안하였기 때문에 TR단조라고 불린다. TR단조 공정의 예비성형체는 ring groove를 가지는 환봉 형태로 유도가열 또는 화염가열 방식으로 가열된다.

유도가열은 전자기유도법칙에 의하여 도체인 피가열체에 전류를 유도하여 가열하는 방식이다. 기존의 화염가열에 비하여 가열시간이 짧고 원하는 부분만 국부적으로 가열 할 수 있기 때문에 TR단조를 위한 가열 방식으로 적합하다. 이러한 유도가열은 선상가열(line heating), 표면 열처리, 용해로 등에 다양하게 적용되고 있다[1~3].

그러나 현재 다양한 방면에 적용되고 있는 유도가열 공정과 TR단조를 위한 유도가열 공정에는 많은 차이가 있다. 선상 가열이나 표면 열처리의

경우 가열 부위가 제한적이고 수십초 정도의 짧은 가열시간으로 인하여 가열 온도가 높지 않아 온도제어가 용이하다. 가열온도가 높은 용해 공정의 경우 피가열체의 온도 제어보다는 가열로의 효율에 초점이 맞추어져 있어 단조 공정을 위한 유도가열과는 관점이 다르다.

반면에 TR단조를 위한 예비성형체는 직경이 400mm, 길이 800mm로 대형이며 평균 가열 온도는 1,200℃정도로 매우 높기 때문에 가열시간이 길며 피가열체의 온도 편차또한 매우 크다.

따라서 본 연구에서는 TR단조를 위한 환봉의 유도가열시 적정 가열 고전을 선정하기 위하여 온도 분포 평가를 위한 해석 기법을 제안하였다. 이를 위하여 소재의 형상에 따른 가열 코일의 전류를 구하기 위하여 등가회로이론을 적용하였다. 이 결과는 전자기장과 열전달 해석이 연계된 유도가열 해석에 입력되어 피가열체의 온도 평가를 위한 부하조건으로 적용되었으며 실험결과와 비교하여 해석기법의 타당성을 확인하였다.

1. 현대중공업 엔진기계사업본부
2. 울산대학교 첨단소재공학부
교신저자: 현대중공업 기술개발본부 산업기술연구소,
E-mail: kalsong@hhi.co.kr

2. 등가 회로 이론

범용 유한요소해석 프로그램을 이용하여 유도 가열 해석을 수행하는 경우 입력 데이터로 인덕터인 코일의 전류밀도와 주파수가 요구된다. 주파수는 장비 판넬에 바로 출력이 되기 때문에 쉽게 알 수 있다. 그러나 코일의 전류밀도 즉 전류값은 입력전력으로부터 별도의 계산이 요구된다. 이때 중요한 점은 입력 전력이 동일하더라도 피가열재의 직경 및 길이에 따라 코일의 전류 값이 달라진다는 점이다. 이는 유도가열시 가열 코일과 피가열재인 소재가 전자기적 측면에서 하나의 회로를 형성하기 때문이다.

본 연구에서는 입력 전력에 따른 코일의 전류 밀도를 계산하기 위하여 변압기의 원리를 이용한 등가회로이론을 적용하였다[4]. 등가회로이론은 가열 코일을 변압기의 1 차 측으로, 피가열재를 2 차 측으로 가정하여 이를 하나의 저항과 인덕턴스(inductance)로 단순화시키는 것이다. 이러한 접근 방법은 일반화 된 것으로 전기공학 분야에서 적정 유도가열 시스템을 설계하기 위하여 적용되고 있는 방법이다[5]. Fig. 1(b)은 변압기의 원리를 이용하여 가열 코일 및 피가열재의 전체 회로를 하나의 인덕턴스(X_o)와 저항(R_o)으로 단순화시킨 등가 회로를 나타낸 것이다.

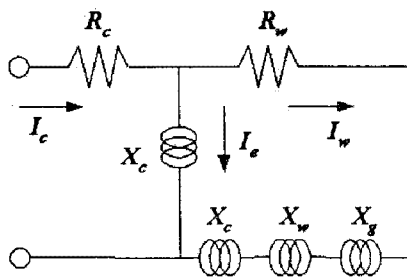


Fig. 1(a) Full circuit of induction heating

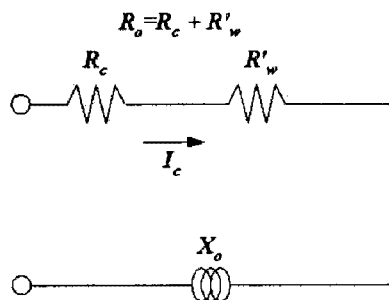


Fig. 1(b) Equivalent circuit of induction heating

Fig. 1(b)의 등가 인덕턴스(X_o)는 식(1)과 같이 표현된다.

$$\frac{X_o}{N_c^2} = \frac{(X_g/N_c^2)}{(R_w/N_c^2)^2 + (X_1/N_c^2 + X_g/N_c^2)^2} \times [(R_w/N_c^2)^2 + (X_1/N_c^2)^2 + (X_g/N_c^2)(X_1/N_c^2)] \quad (1)$$

여기서,

$$\frac{X_1}{N_c^2} = \frac{X_w}{N_c^2} + \frac{X_c}{N_c^2} + \frac{X_g}{N_c^2}$$

R_w : 피가열재의 resistance[Ω]

X_w : 피가열재의 reactance[Ω]

R_c : 가열 코일의 resistance[Ω]

X_c : 가열 코일의 reactance[Ω]

X_g : 코일과 피가열재 사이 공기층의 reactance[Ω]

X_e : 외부 자속의 reactance[Ω]

N_c : 코일의 턴수[turn]

Fig. 1(b)의 등가 저항(R_o)은 식(2)과 같이 표현된다.

$$\frac{R_o}{N_c^2} = \frac{R'_w}{N_c^2} + \frac{X_c}{N_c^2} \quad (2)$$

여기서,

$$\frac{R'_w}{N_c^2} = \frac{(R_w/N_c^2)(X_g/N_c^2)}{(R_w/N_c^2)^2 + (X_1/N_c^2 + X_g/N_c^2)^2}$$

가열코일에 대한 투입전력 대비 실제 피가열재에서 발생하는 전력의 비인 효율(η)은 식(3)로부터 다음과 같은 식으로 계산된다.

$$\eta = \frac{R'_w}{R_o} \quad (3)$$

Fig. 1(b)는 직렬회로로서 이 회로의 역률(power factor)은 식(4)과 같다.

$$\cos \phi = \frac{R_o}{Z_o} \quad (4)$$

여기서, Z_o 는 Fig. 1(b) 회로의 임피던스(impedance)로 다음과 같이 정의된다.

$$\frac{Z_o}{N_c^2} = [(\frac{R_o}{N_c^2})^2 + (\frac{X_o}{N_c^2})^2]^{0.5} \quad (5)$$

소재에 투입되는 전력(P_w)에 대한 코일의 전류밀도(I_{cd})는 식(3) ~ 식(5)를 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$I_{cd} = \left(\frac{P_w}{\eta \cos \phi \times Z_o} \times 1000 \right)^{0.5} \times \frac{1}{A_c} \text{ [A/m}^2\text{]} \quad (6)$$

여기서,

A_c : 코일의 단면적[m²]

본 연구에서는 유한요소해석시 입력 전력에 대한 코일의 전류밀도 값으로 식(6)의 값을 사용하였다. Fig. 2 는 직경 330mm 인 경우 입력 전력에 따라 식(6)의 이론값과 측정 전류밀도 값을 비교한 것으로 입력 전력이 작은 경우 다소 오차가 발생하기는 하지만 전반적인 경향은 잘 일치함을 알 수 있다.

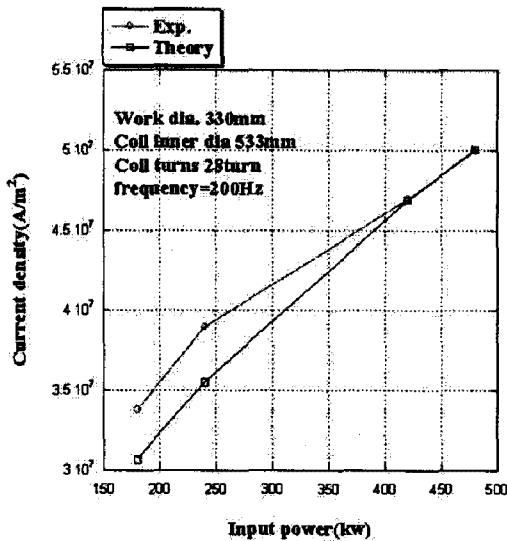


Fig. 2 Comparison between theoretical current density and experimental result

그러나 다양한 직경에 대한 유한요소해석과 실제 유도가열 실험결과를 비교한 결과 직경에 따라 일정한 편차가 있음을 발견하였다. 즉 직경이 작은 경우에는 실제값보다 높게 예측되었으며, 직경이 큰 경우에는 작게 예측되었다. 따라서 본 연구에서는 변수별 해석을 통하여 직경에 따른 보정계수를 도입하였다. Fig. 3 은 본 연구에서 제안한 피가열체의 직경에 따른 보정계수의 변화를 나타낸 것이다.

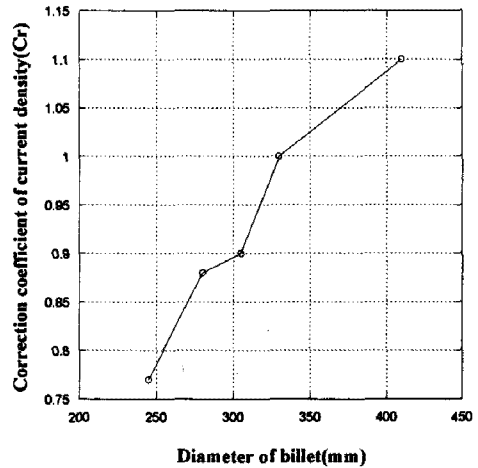


Fig. 3 Correction factor variation of current density with diameter of preform

3. 실험

실험은 4 가지 종류의 실제 TR 단조용 예비성형체를 대상으로 이루어졌다. 실험에 사용된 예비성형체의 직경은 245mm 에서 412mm 까지이며 길이 또한 서로 다르다. Fig. 4 는 실험에 사용된 직경 335mm 의 TR 단조용 예비성형체 및 온도 측정 위치이다. 온도 측정은 K 타입 열전대를 사용했으며, Fig. 4 와 같이 웹의 끝단부 모서리에서 10mm 떨어진 면의 중심(C8)과 0.5R 지점의 온도(M8)를 측정하였다. 가열시 온도 구배의 대칭성을 확인하기 위하여 추가적으로 M1 과 C1 지점의 온도도 측정하였다. Fig. 5 는 유도가열 실험 사진이다.

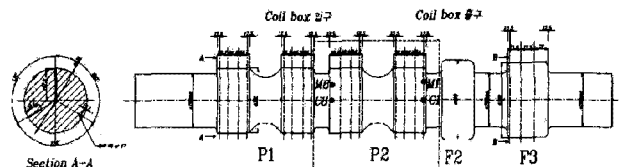


Fig. 4 Measuring position and preform for induction heating test

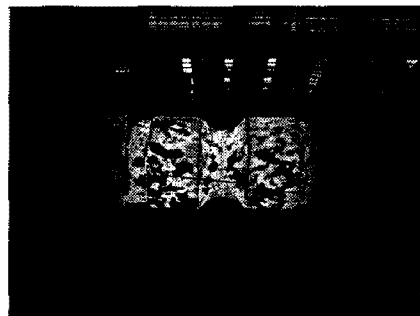


Fig. 5 Photograph of induction heating test

4. 유도가열해석 및 고찰

본 연구에서 사용된 유도가열 해석은 전자기장과 열전달 연성해석으로 우선 전자기장 해석을 통하여 피가열재에 발생하는 와전류(eddy current)를 구하고 와전류에 의해서 발생하는 주울열(joule heat)에 대한 열전달 해석을 순차적으로 수행하는 방식이다. 이러한 전자기장과 열전달 해석과정은 가열시간동안 계속 반복하여 수행된다. Fig. 6 은 이러한 유도가열해석으로부터 얻어진 온도 분포 결과의 한 예로서 약 20 분간의 소킹 시간을 거친 상태에서 성형부에서 최대 200℃의 온도 편차가 발생하고 있음을 알 수 있다.

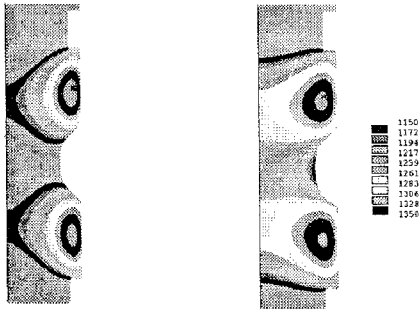


Fig. 6 Temperature distribution of induction heating analysis

Fig. 7은 실험에 사용된 4가지 예비성형체 중 가장 작은 직경과 가장 큰 직경에 대한 실험결과와 해석결과를 비교한 것으로 최종 단계에서 해석결과와 실험결과의 오차는 약 30℃정도이다. 최종 단계의 온도 수준이 1,200℃의 고온임을 고려하면 이는 매우 잘 일치하는 결과로서 본 연구에서 제시한 유도가열 해석기법이 타당함을 알 수 있다.

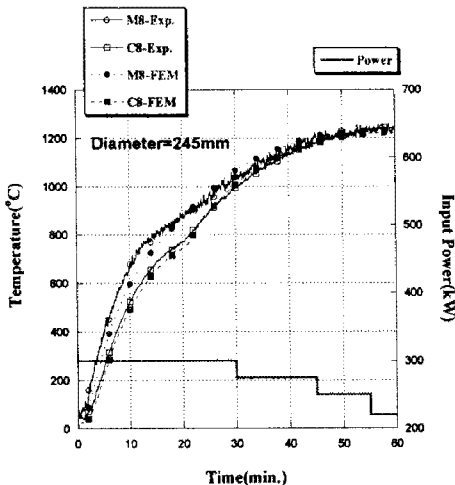


Fig. 7(a) Comparison between experimental and FE analysis result : diameter 245mm

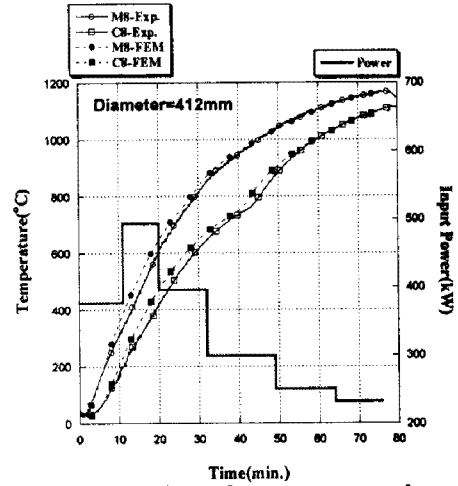


Fig. 7(b) Comparison between experimental and FE analysis result : diameter 412mm

5. 결론

TR단조를 위한 환봉 형태의 예비성형체에 대한 유도가열 공정시 환봉의 온도 분포에 대한 해석 기법을 제시하고자 유한요소해석과 실험을 수행하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 동일한 입력 전력하에서 피가열재의 형태에 따라 달라지는 유도가열 특성을 고려하기 위하여 등가회로이론과 전자기장-열전달 연성 해석이 결합된 해석방법을 제시하였다.

(2) 다양한 직경과 길이를 가지는 예비성형체에 대한 해석결과와 측정결과를 비교한 결과 최대 오차가 30℃이하로 본 연구에서 제안한 해석 기법의 타당성을 확인하였다.

참고 문헌

- [1] 강중규, 이장현, 신종계, 2000, 선상가열을 위한 고주파 유도가열의 수치해석, 대한조선학회지, 제37권, 제3호, pp.110~121.
- [2] I. Magnabosco, P. Ferro, A. Tiziani, F. Bonollo, 2006, Induction heat treatment of a ISO C45 steel bar: Experimental and numerical analysis, Vol.35, pp.98~106.
- [3] 김지호, 유효열, 강호현, 전희종, 2005, FEM을 이용한 유도가열로의 열분포 특성, 전력전자학술대회 논문집, pp.156~158.
- [4] P.G. Simpson, 1960, Induction heating coil and system design, McGraw-Hill
- [5] 유재훈, 신대철, 2008, 공진형 인버터를 이용한 2단 유도가열 시스템의 주파수제어에 관한 연구, 조명-전기설비학회지, 제22권, 제1호, pp.95~103