

TR 단조를 위한 유도 가열 공정의 전력제어

송민철* · 주성호**

Power Control of Induction Heating Process for TR forging

M. C. Song and S. H. Ju

Abstract

The purpose of this study is to establish the optimal induction heating conditions of various preform types used for TR forging. The finite element model coupled electro-magnetic and transient heat transfer was employed to evaluate the distribution of temperature at the billet. Power control method was applied to control temperature of preform in induction heating because TR forging is not a continuous process. Power schedule that consists of heating and holding stage was suggested. In heating stage, power is inversely proportional to diameter of preform but the time of heating stage is directly proportional to the diameter of preform. But, in holding stage, the required power for thermal equilibrium per unit volume of the billet decreases with an increase in a diameter of billet due to the increase of efficiency.

Key Words : Induction Heating, TR forging, Power Control, Electro-magnetic Analysis

1. 서론

TR 단조는 선박용 중형 엔진의 크랭크 샤프트를 연속 단류선을 갖도록 단조하는 방법이다. TR 단조를 위한 예비성형체는 SCM440 급의 탄소강으로 ring groove 를 가지는 환봉 형태이며, 단조 작업을 위해 슬레노이드 형 코일에 의해 유도가열 방식으로 부분 가열된다.

단조를 위한 유도가열시스템은 전력제어 방식에 따라 크게 일정한 입력전력으로 가열시간을 조절하는 time-control 방식과 시간에 따라 전력을 달리하는 power-control 방식으로 나눌 수 있다. Time-control 방식은 주로 동일한 제품을 연속적으로 작업하는 자동화 공정에 적합하므로 본 연구 대상인 중형 엔진 크랭크샤프트의 작업 방법을 고려하면 power-control 방식이 더 효과적이

다.⁽¹⁾

단조를 위한 유도가열은 원하는 부분의 소재를 단시간에 가열할 수 있다는 점에서 효율적이지만, 소재 표면부근에 집중된 가열에너지와 대기와 직접 접촉하며 가열되는 유도 가열 공정 특성은 소재의 내외부 온도 구배를 유발시켜, 일반적인 밀폐형 가열로와 같은 feedback control 에 의한 온도 제어가 어렵다. 또한 유도가열 공정의 효율은 코일 및 소재 직경, 코일 턴(turn)수 및 소재 온도등에 의해 영향을 받기 때문에 입열량 제어를 통한 적정 유도 가열 조건의 선정은 매우 어렵다.

따라서, 본 연구에서는 실험 및 해석을 통하여 유도가열 시 소재의 가열 특성을 규명함으로써, 다양한 직경의 예비성형체에 대하여 적정 유도 가열을 위한 전력 제어 방안을 제시하고자 하였다.

* 현대중공업 기술개발본부 산업기술연구소

** 현대중공업 엔진기계사업본부

2. 실험 및 해석

2.1 실험

유도가열시스템의 가열 특성을 파악하고 유한요소해석 시 필요한 코일의 전류밀도 값을 결정하기 위해서 Fig. 1 과 같이 예비성형체 내부에 구멍을 뚫고 열전대를 삽입하여 유도가열 시 내부의 온도변화를 측정하였다. 이때, 입력전력에 해당하는 코일의 전류밀도 값을 결정하기 위해 입력과위를 달리하여 2 회에 걸쳐 Part A 부분에 대하여 Table 1 과 같은 조건으로 유도 가열 실험을 수행하였다.

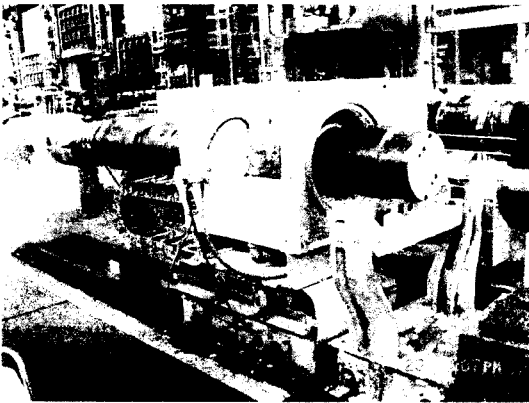
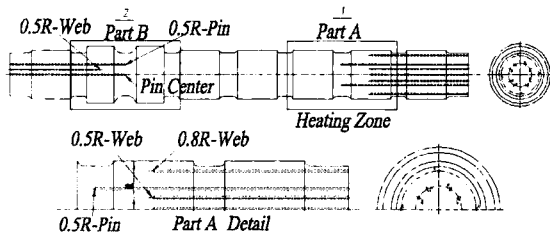


Fig. 1 Preform and experimental setup for induction heating

Table 1 Power condition used for experiments

Title	Heating Stage	Input Power(kw)	Duration Time(min)
Test1	Heating	420	40
	Holding	240	42
Test2	Heating	480	28
	Holding	180	75

2.2 실험 결과 및 해석모델 개발

Fig. 2(a), (b)는 Fig. 1 의 Part A 부분의 유도가열 시 실험과 유한요소 해석을 이용하여 예측 및 평가된 온도 거동을 도시한 것이다. Fig. 2 와 같이 실험 및 해석결과가 매우 잘 일치함을 알 수 있다.

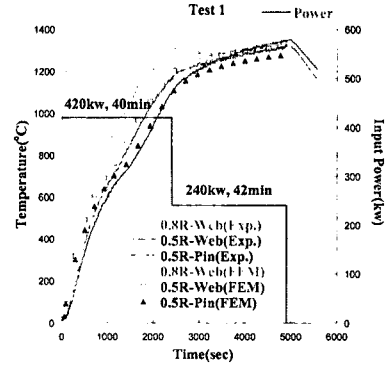


Fig. 2(a) Comparison results of temperature history at part A heated by test1 condition obtained by both experiment and FEM

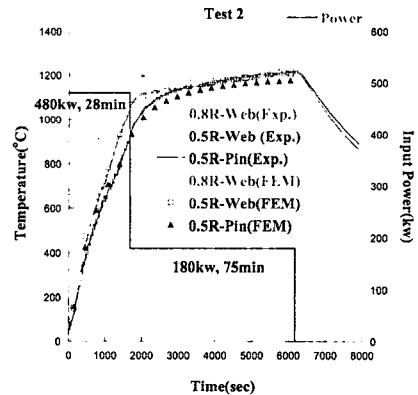


Fig. 2(b) Comparison results of temperature history at part A heated by test2 condition obtained by both experiment and FEM

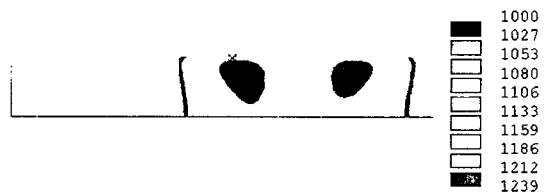


Fig. 3 Temperature distribution after induction heating by test2 condition

Fig. 3은 Test2의 가열 종료 직후 온도분포를 나타낸 것으로 최대 온도 발생지점이 표면에서 약간 내부에 위치한 지점임을 알 수 있다. 이러한 현상은 표면에 와전류는 집중되지만, 표면은 대기와 직접 접촉하기 때문에 냉각되어 오히려 최대 온도 지점은 Fig. 3과 같이 표면 아래에 위치하게 된다.

유도 가열 시 입력 전력대비 소재에 유도된 전력의 비율인 효율은 코일과 소재의 직경, 코일의 turn 수, 소재의 물성등에 의해서 영향을 받는다. 따라서 같은 코일과 입력전력에 대해서도 소재의 크기가 달라지면 소재에 유도되는 전력의 크기도 달라진다. 이는 소재의 형태가 다양할 경우 경험적으로 적정 가열 조건을 선정하는 것이 매우 어렵다는 것을 의미한다. 즉, 입력 전력에 상응하는 코일의 전류밀도는 상기한 공정 변수들에 의존하므로, 유도가열 공정에 대한 피가열재의 온도 이력을 평가하기 위해 유한요소해석을 적용하는 경우 유도 가열 공정 변수에 따른 효율을 계산하여 코일의 전류밀도에 대한 평가가 선행되어야 한다. 따라서, 본 연구에서는 Carslaw가 제시한 유도 가열 효율에 관한 이론에 따라 효율을 계산하여 실험에서 구한 전류밀도 값을 소재의 형태가 다른 경우에도 적용할 수 있도록 하였다.

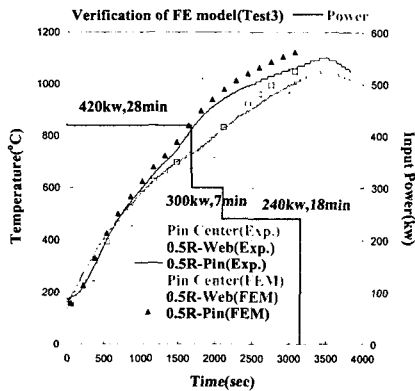


Fig. 4 Comparison results of temperature history at part B obtained by both experiment and FEM

Fig. 4는 Fig. 1에서 Part A와 직경 및 코일의 turn 수가 다른 Part B부분의 유도가열에 대한 측정결과와 유한요소해석 결과를 비교한 것으로 해석 및 측정결과가 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 이는 본 고에서 정의한 유도 가열 공정

변수의 특성이 타당함을 의미한다. Fig. 4에서 pin center 위치의 온도 변화를 살펴보면 큐리점인 약 720°C 부근에서 변곡점이 나타나는 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 변태과정에서 발생하는 열적, 전자기적 물성 변화와 원형 단면의 중심이라는 기하학적 위치로부터 설명할 수 있다. 큐리점에서 탄소강은 전자기적 측면에서 자성을 잃게 되며, 그 결과 유도 가열 효율이 급격히 떨어진다. 그리고, 열적인 측면에서 탄소강의 변태과정에서 잠열 (latent heat)의 효과에 기인한다. 따라서, 본 연구에서 제안하는 전력 제어 방법은 승온 단계의 입력 전력 결정시 이러한 가열 특성을 고려하였다.

3. 탄소강 단조를 위한 유도 가열 공정의 전력 제어

본 연구에서 선박용 중형 엔진 크랭크샤프트의 유도 가열 시 전력 제어 방식으로써 승온과 유지 단계로 이루어지는 2 단계의 전력 일정을 제시하였다. Fig. 5는 cylinder 형태의 소재에 대해 2 단계 전력 일정을 적용한 유도 가열 해석 결과로서 표면과 중심부의 온도차를 기준으로 4 구간으로 구분할 수 있다.

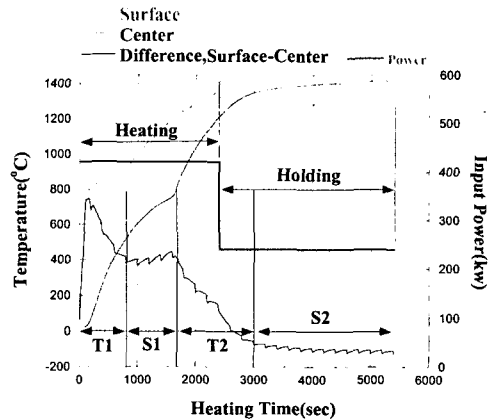


Fig. 5 Typical temperature histories at the surface and center of billet using induction heating

3.1 승온 단계

승온 단계의 가열 목표는 소재의 온도를 원하는 단조 온도까지 단시간에 가열하는 것이나, 표면 용융이 발생하지 않아야 한다. 그리고, 중심부의 변태 과정에 많은 에너지가 요구되기 때문에 중심부의 변태가 완료되기까지 큰 입력 전력이 유지

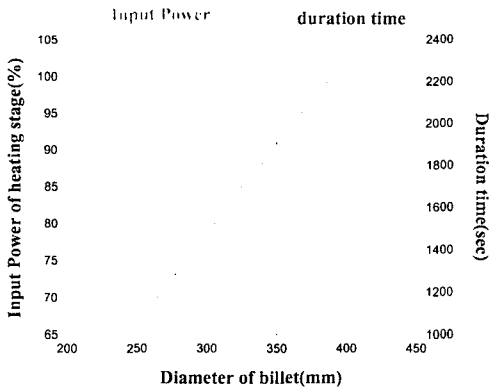


Fig. 6 Change of input power and duration time with billet diameter at the heating stage

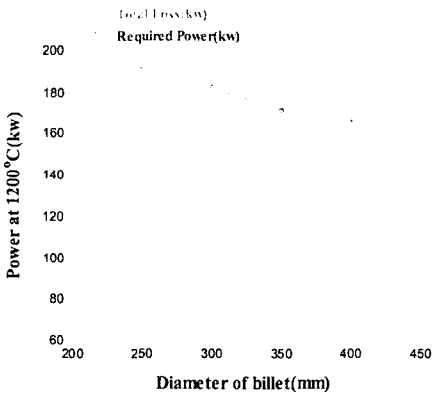


Fig. 7 Changes of the required power and thermal loss for thermal equilibrium at 1200 °C with a diameter of billet

되어야 한다. 따라서 승온단계 입력 전력의 유지 시간은 Fig. 5의 T1, S1 구간에 해당하며, 동시에 표면에서 과열로 인한 결함이 발생하지 않도록 입력과위의 크기는 제어되어야 한다. T1, S1 구간에서 소재 내부의 온도를 고려하면, 소재 직경 변화에 따라 승온단계의 입력 전력과 유지시간은 Fig. 6과 같이 정의 할 수 있다. Fig. 6은 표면에 에너지가 집중된 경우 표면에서는 용융이 발생하지 않고 중심부가 변태가 완료되기까지의 입

력 전력과 유지시간을 계산한 것으로 직경이 커질수록 입력전력은 감소하지만 유지시간은 늘어나서, 결과적으로 전체 전력량(electric energy)은 직경에 비례하여 증가한다.

3.2 유지단계

유지단계의 목적은 소재의 내외부 온도차를 줄이고, 원하는 단조 온도로 소재를 유지시키는 것이다. 다양한 크기의 소재에 대하여 이러한 목적을 달성하기 위해서는 각 경우에 대해 효율을 계산해서 원하는 온도에서 코일로부터 소재로 유입되는 에너지와 소재에서 대기로 빠져나가는 에너지가 열평형이 이루어지도록 해야 한다. 본 연구에서는 다양한 직경의 소재에 대하여 1200°C에서 열평형이 이루어지도록 하여 열손실과 효율에 따른 입력 전력을 계산한 결과 Fig. 7과 같은 결과를 얻었다. 열손실은 소재의 직경에 비례하였으나, 직경이 커지면 효율이 증가하므로 소요 전력은 감소하였다.

4. 결론

TR 단조를 위한 적정 유도가열 공정 조건을 선정하기 위해 승온단계와 유지 단계로 이루어진 전력제어 방식에 대해 유한요소해석과 실험을 수행하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 승온단계의 전력은 중심부의 변태완료까지 유지되어야 하며, 동시에 표면에 과열결함이 발생하지 않도록 해야 한다. 이러한 조건을 달성할 수 있는 전력의 크기 및 유지시간은 소재의 직경에 의존한다.
- (2) 열적 평형을 유지하기 위한 billet의 단위체 적당 소요 전력은 billet의 직경이 증가함에 따라 열손실이 증가하지만, 효율의 증가에 기인하여 오히려 감소한다.

참고 문헌

- (1) P. G. simpson, 1960, "Induction heating coil and system design", McGraw-Hill International edition.