韓國精密工學會 '96年度 秋季學術大會論文集 pp.964~968

대형 단조품 담금질 과정의 조직 및 응력분포 해석
Analysis of Heat Treatment Process for Large Forgings Considering Phase Transformation

이정호*, 이부윤, 전제영, 이명렬(한국중공업), 조종래(한국해양대)
Jung-Ho Lee, Boo-Youn Lee, Jei-Yeong Jeon, Myung-Reyl Lee
Korea Heavy Industries & Construction Co., Ltd.
Jong-Rae Cho
Korea Maritime University

ABSTRACT

The demands of size and quality of large steel shaft forgings for ship building, power plant, steel plant, etc. are rapidly increasing, and some of these productions are manufactured from ingot weighing more than 300 tons. For use as rotating components, shafts require toughness, strength and homogeneity, and therefore are produced through a variety of heat treatments. According to the increase of ingot size, micro- and macrosegregation and also mass effect of the product increase. Thus, special care should be paid to the heat treatment of such large shaft forgings.

In this paper, the heat treatment of large shaft forgings such as rotor and back-up roll is calculated using the commercial finite element code SYSWELD. Calculated distributions of temperature and phase are compared with experimental data. The continuous cooling transformation diagram, thermal and mechenical properites of each phase are used. The phase proportion, hardness and residual stress during water quenching are discussed.

Key Words : Heat Treatment(열처리), Large Forgings(대형단조품), Phase Transformation(상변태), Quenching(담금질), Phase Distribution(상분포), Back-up Roll(백업롤)

1. 서 론

열처리 작업은 최종제품의 품질을 결정하는 중요한 공정이나, 상변태를 수반하는 매우 복잡한 형상이므로 정량적인 해석에는 많은 어려움이 있다. 로터와 같은 대형 축류와 금형강과 같은 평판류는 인성, 강성 및 균질성 등이 요구되기 때문에 다양한 열처리 방법을 통해 제조되고 있다. 그러나, 이러한 대형제품의 경우는 잔류응력, 열처리 변형등의 문제가 있고, 특히 담금질 중의 과도한 응력은 온도차와 상변태에 기인한다. 열처리가 진행되는 동안 상의 비율, 상의 크기, 냉각속도의 영향을 평가하는 실험적인 방법은 많은 제약이 있기 때문에 수치해석을 이용하는 연구가 진행되고 있다. 상변태가 진행되는 동안의 온도 및 응력해석 방법의 개요는 Fig. 1과 같다.

본 연구에서는 상변태를 고려하는 유한요소 해석 프로그램인 SYSWELD를 이용하여 열처리 공정을 규명하고, 냉각속도와 열처리 후의 조직변화, 경도, 변형 및 잔류응력을 예측하고, 이를 통하여 불량 원인 분석 및 불량 감소의 효과를 얻을 수 있다. 따라서, 본 연구를 통하여 열처리 작업 후의 최종제품의 품질을 향상시킬 수 있으며 조직 및 물성치 예측이 가능하게 된다.

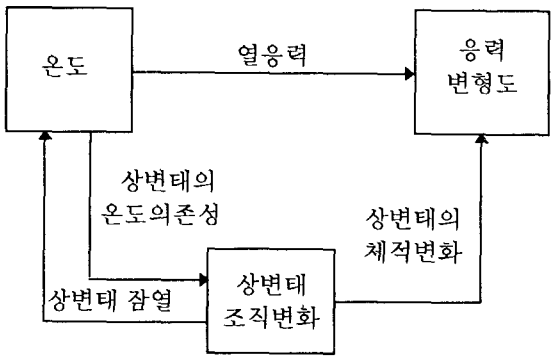

Fig. 1 담금질과 관련된 물리적 성질의 연관관계

2. 두 가지 상의 일방향 변태

2. 1 가열의 경우

먼저 간단한 경우로써 (ferrite+pearlite)→(austenite)로의 변태를 살펴보기로 하고, 각각 Phase 1과 Phase 2라고 하며 austenite의 비율을 z라고 정의하자. z를 구하는 방법으로는 $\dot{z}$가 z와 T에 의해서 결정된다고 가정하고 다음과 같이 표현한다.

$$\dot{z} = f(T,z)$$

위의 식이 각 온도 T에 대해서 아래의 조건을 만족함을 입증한다면, 평형비율(equilibrium proportion) $z_{eq}(T)$의 존재성을 확인하는데 적합하다.

$$f[T, z_{eq}(T)] = 0$$

일정온도 T에서 $z = z_{eq}(T)$가 안정해(stationary solution)가 되도록한다. 이것은 z가 $z_{eq}(T)$로 부터 멀지 않다고 가정함으로서 얻어진다.

$$\begin{aligned}\dot{z} &= f(T,z) \\ &\cong f[T,z_{eq}(T)] + \frac{\partial f}{\partial z}[(T,z_{eq}(T)][z - z_{eq}(T)] \\ &= \frac{z_{eq}(T) - z}{\tau(T)} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, $\tau(T)$는 변태의 특성시간(characteristic time)이다. 위의 식을 Fig. 2에서 정성적으로 나타내었다. 아주 느린 가열속도에서 z는 각 온도 T에서 $z_{eq}(T)$에 도달하기 위한 시간을 가진다. 가열속도가 증가하면 z가 지연효과를 가지고 $z_{eq}(T)$를 따르므로 더욱 어긋나게 된다.

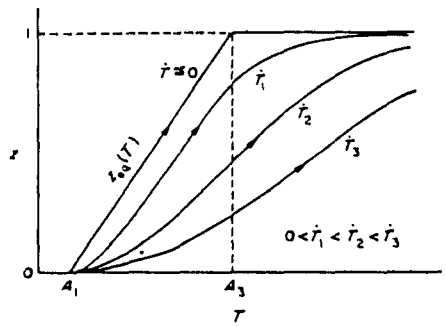

Fig. 2 제안된 모델의 정성적 지연효과

2. 2 냉각의 경우(2상의 비대칭성 변태)

(austenite)→(ferrite+pearlite)변태를 살펴보기로 하고, Phase 1과 Phase 2는 각각 austenite와 ferrite+pearlite를 나타낸다. z는 ferrite+pearlite의 비율이고, $z_{eq}(T)$는 ferrite+pearlite의 평형비율이다. 일반적으로 ferrite + pearlite 변태의 시작온도는 Ac_1과 Ac_3 보다는 $\dot{T}$에 훨씬 민감한 것으로 알려져 있다. 즉, austenite변태에서 보다 훨씬 큰 τ 값을 갖는 것을 의미한다. ferrite+pearlite 변태는 탄소의 확산 변태이기 때문에 매우 느리다. 제안된 모델의 식(1)은 (austenite)→(martensite) 변태에도 쉽게 적용될 수 있다. 대부분의 강의 경우 martensite 변태 비율은 Koistinen-Marburger 식에 따르고, 단지 온도의 함수이다.

냉각에서도 가열과 동일한 관계식을 사용한다.

$$\dot{z} = \frac{z_{eq}(T) - z}{\tau(T)}$$

두 상의 비대칭성 변태를 생각하면, P_1과 P_2를 Phase 1과 Phase 2의 비율이라고 하면 위의 식은 다음의 식과 동등하다.

$$\dot{p}_1 = -k(T)p_1 + l(T)p_2$$
$$\dot{p}_2 = k(T)p_1 - l(T)p_2$$

따라서, $z_{eq}(T)$와 $\tau(T)$를 결정하는 것은 $k(T)$와 $l(T)$를 결정하는 것과 동일하다. 또한, 1→2와 2→1로의 변태가 둘다 발생한다면, 1→2로의 변태에 대해서는 $k_{12}(T)$와 $l_{12}(T)$로 정의하고, 1→2로의 변태에 대해서는 $k_{21}(T)$와 $l_{21}(T)$로 정의하자. 즉

$$k_{12}(T) = p_{2eq}^{12}(T) / \tau^{12}(T)$$
$$k_{21}(T) = p_{1eq}^{21}(T) / \tau^{21}(T)$$
$$l_{12}(T) = [1 - p_{2eq}^{12}(T) / \tau^{12}(T)]$$
$$l_{21}(T) = [1 - p_{1eq}^{21}(T) / \tau^{21}(T)]$$

3. 유한요소해석 및 결과

3. 1 Back-up Roll 해석

Back-up Roll이 구비해야할 중요한 기계적 성질의 특성은 Roll의 표면층은 내마모성을 유지하고, 내부는 높은 인성을 유지하여야 한다. 그러므로 적정 합금 배합과 표면 경화 열처리가 중요하며 정해진 합금성분에 대하여 Roll의 사용 조건에 부합하는 목표 경화 깊이과 목표 경도 분포를 얻을 수 있도록 하는 표면 경화 열처리 과정이 필요하다.

Back-up Roll은 경화층 깊이 조절을 위한 Mist Quenching 이전에도 여러 단계의 열처리 과정을 거친다. Fig. 3은 해석에 포함된 열처리 과정의 개략도이다. 해석에 이용된 Roll의 반경은 635mm이고 초기 온도 조건은

940 °C이며 초기조직은 100% Austenite인 상태이다. 경화층 깊이를 알아보려는 해석의 성격에 맞게 1차원적으로 모델링하였다. Fig. 3에서 나타낸 개략도에서 Split Furnace에서의 유지시간을 각각 1, 1.5, 2시간으로 했을 때의 깊이별 경도분포 및 조직분포를 비교하였다.

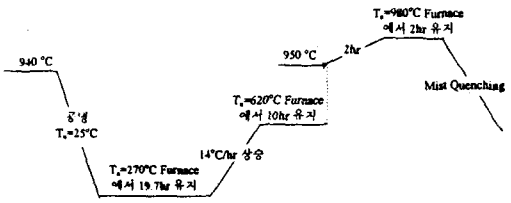

Fig. 3 Back-up Roll 열처리 개략도

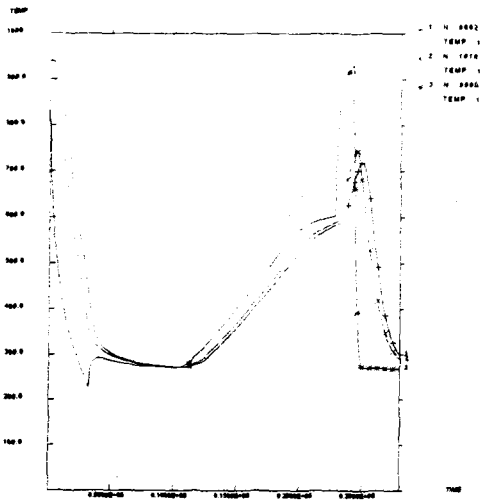

Fig. 4 Back-up Roll 온도분포

전체 열처리 과정 동안의 시간에 따른 온도 분포를 Fig. 4에 나타내었고 Split Furnace에서 2시간 유지했을 때이며 그 위치는 표면, R/2, 중심이다. Fig. 5에는 표면과 중심에서의 시간에 따른 조직 분포의 변화를 나타내었는데 표면에서는 Split Furnace에 들어가기 이전에 존재하였던 Pearlite와 Bainite조직은 Austenite조직으로 변화하였다가 Mist Quenching에 의해 Bainite조직으로 바뀌고, 중심에서는 Split Furnace의 유지시간으로는 영향을 받지 않아 조직이 변화하지 않음을 알 수 있다. Fig. 6에서는 Split Furnace에서의 유지시간에 따른 Bainite 조직 분포를 나타내었는데 표면에서는 거의 Bainite조직이며, 중심에서 약 30% 정도의 Pearlite가 생성됨을 알 수 있다. Fig. 7에서는 담금질 후의 경도 분포를 나타내었는데 1, 1.5, 2 시간 유

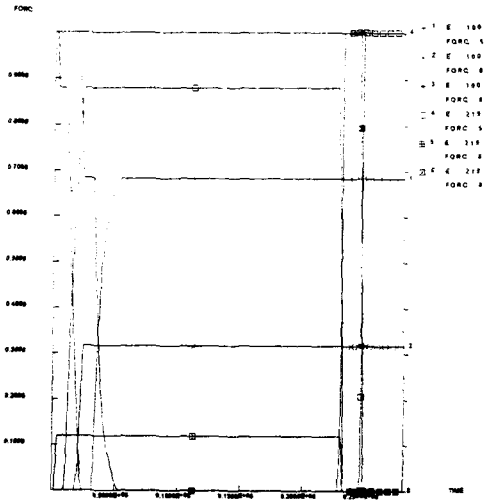

Fig. 5 Back-up Roll의 시간에 따른 조직변화

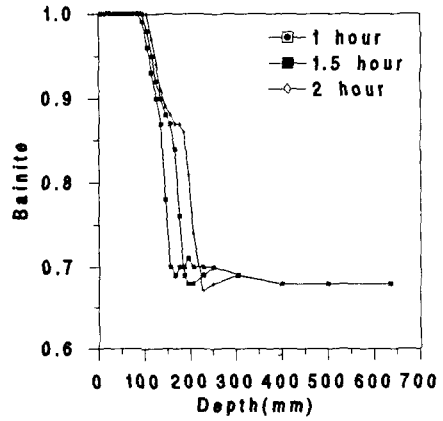

Fig. 6 Back-up Roll의 깊이별 Bainite 조직분포

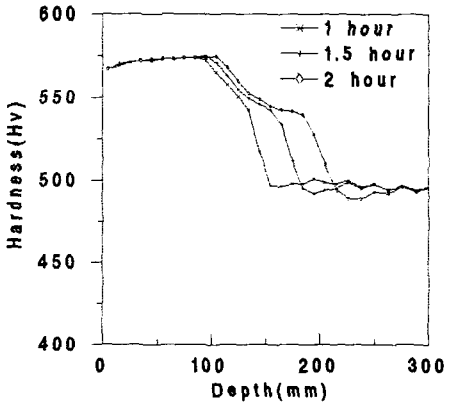

Fig. 7 Split Furnace 유지시간에 따른 경도분포

지에 따라 각각 표면 경화층 깊이가 140 mm, 165mm, 190 mm 정도임을 알 수 있고, Fig. 6과 비교해 보면 Pearlite의 비율이 증가 함에 따라 경도가 작아지고 있는데 이는 경도가 Bainite경도 보다 작기 때문이다.

3. 2 Rotor 해석

대형 저합금강인 Rotor와 같은 축류는 인성, 강성 및 균질성을 요구한다. 대형 Rotor를 수냉했을 때의 내부의 조직분포, 온도분포 및 잔류응력을 계산하였다. Fig. 8에는 Rotor의 유한요소 격자망을 나타내었다. 초기온도 조건은 843 °C이고, 100% Austenite인 상태이며 물의 온도는 25 °C이다.

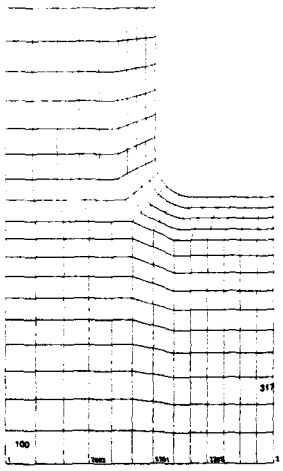

Fig. 8 Rotor의 유한요소 격자망

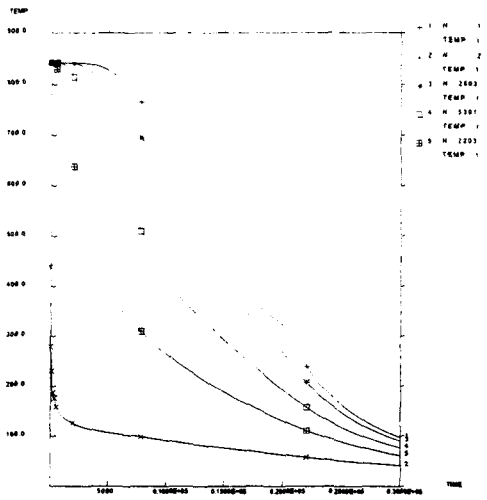

Fig. 9 Rotor의 온도분포

Fig. 9에는 담금질 동안의 온도 분포를 나타내었고 Rotor 내부의 온도 분포에서는 변태 잠열의 영향으로 볼록한 부분이 나타남을 알 수 있다. Fig. 10에서는 Bainite 분포를 나타내었는데 Rotor의 경우 표면에서 약간의 Martensite 조직이 생성되고 나머지 부분은 거의 Bainite 조직으로 현재의 열처리 방법을 통해 균일한 조직분포를 얻을 수 있음을 알 수 있다. Fig. 11에는 열처리 후의 변위를 보여주고 있고, Fig. 12에서는 열처리 후의 후프응력(Hoop Stress)을 나타내었다.

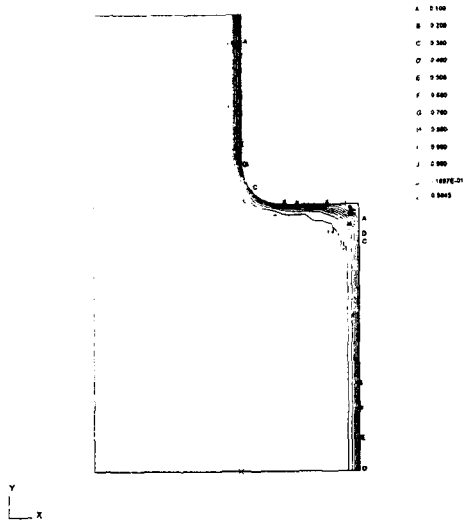

Fig. 10 Rotor의 Bainite 조직분포

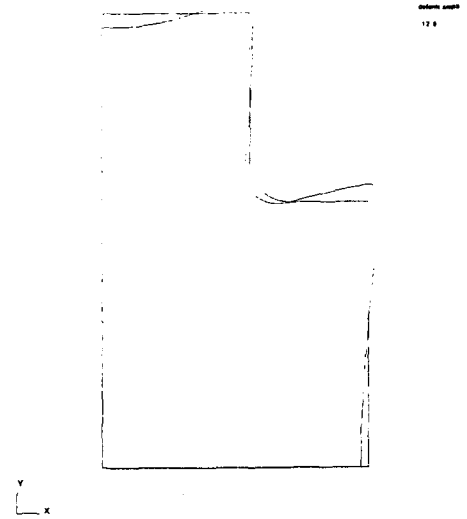

Fig. 11 열처리 후의 변위

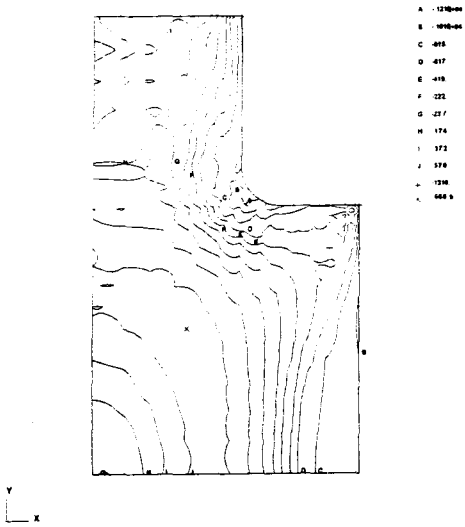

Fig. 12 열처리 후의 Hoop Stress

4. 결 론

대형 단조품의 열처리공정 해석을 통해 조직분포 및 경도분포를 예측 할 수 있고, 열처리 공정의 변화에 대한 조직분포 및 경도 분포를 예측할 수 있게 되었다. 또한, 이를 바탕으로 최적의 열처리 공정을 제안할 수 있다.

참 고 문 헌

1. J.B. Leblond and Devaux, "A New Kinematic Model for Anisothermal Metallurgical Transformation in Steels Including Effect of Austenite Grain Size", Actametall. Vol.32, No.1, pp.137-146, 1984
2. K. Tashiro, Y. Ono and E. Fukuda, "On the Heat Treatment and Properties of Large Shaft Forgings", 철과강, 제 13호, pp. 1734-1743, 1976
3. SYSWELD User's Manual