

열처리 공정이 대형 주단조품의 조직변화에 미치는 영향

이명원¹, 이영선[#], 이승욱², 이동희², 김상식³, 문영훈⁴

Microstructure change of large cast-forged product by heat treatment conditions

M. W. Lee¹, Y. S. Lee[#], S. W. Lee², D. H. Lee², S. S. Kim³, Y. H. Moon³

Abstract

Thermal energy control is a important factor in a large size casting and forging. Good control of thermal energy makes characteristics and defect of large cast-forged part, such as large sized forged shell. We have studied about not only large size ring forging process and after heat treatment by FEM simulation. Also, changes of temperature and microstructure for forged shell were predicted. Therefore, we can choose the proper heat treatment condition by FEA. The sectional properties confirmed by practical experiment and evaluation have presented possibilities of process design by computational analysis.

Key words: Heat treatment, Simulation, Ring forging, Different process, Alloyed steel

1. 서 론

선박, 풍력, 발전/플랜트 산업의 성장으로 타워 플랜지(Tower flange), 기어 림(Gear rim), 락 플레이트(Lock plate)등 대형 단조품 특히 링 제품의 수요가 급증하고 있다. 풍력 산업에서는 용량과 타워 크기가 비례적으로 증가하여 링 단조품의 대형화 및 수요 증가를 보이고 있다.

링 단조의 공정의 핵심변수는 스트로크(stroke rate), 회전율(rotation rate), 크기(size) 등이 있으며 링 롤링(Ring rolling) 공정에 비해 상대적으로 높이가 긴 링 제조에 적합하다. 링 단조공정은 소재를 펀치와 맨드릴 사이에서 가압하여 단면 감소시킨 후 반경방향으로 회전시키면서 점진적으로 링 지름 증가와 함께 추가적으로 단면을 감소시

킨다. 본 연구에서는 대형 주단조품의 열처리 시 온도와 유지시간 등의 변수가 조직변화에 미치는 영향을 살펴보기 위해 링 단조품(Forged shell)의 열처리 시뮬레이션을 실시하였다.

열처리 시 선택되는 온도와 온도유지시간의 차이로 인하여 링 단조품의 미세조직, 기계적 특성과 물리적 특성에 차이가 나타난다. 링 단조품의 다양한 열처리 공정의 평가가 필요하게 되며 특히 실제 생산에서의 결함원인에 대한 평가가 수반되어야 한다. 그러나 열처리 공정이 링 단조품의 조직변화에 미치는 영향에 대한 연구는 아직까지 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 링 단조품 소재에 대하여 열처리 공정을 달리하여 FEM 을 실시하여 열처리 공정이 링 단조품 소재의 조직변화에 미치는 영향을 분석하였다.

1. 한국기계연구원 변형제어연구그룹 2. 포스코 특수강
3. 경상대 신소재 공학부 4. 부산대 기계공학부
교신저자: 한국기계연구원 변형제어연구그룹,
E-mail: lys1668@kims.re.kr

2. 유한요소해석

2.1 링 단조품

본 연구에 사용된 소재는 망간 첨가 탄소강으로 포스코 특수강(Poscoss)에서 제공하였다. 링 단조공정 후 세 가지의 다른 열처리 공정을 통하여 열처리가 대형 주단조품에 미치는 영향을 유한요소해석(FEM)으로 분석하였다. 아래의 Table 1은 해석에 사용된 소재 A1520의 화학 조성표이고 Table 2는 링 단조품의 사이즈를 나타내고 있다.

Table 1 Chemical composition of A1520 (wt.%)

강종	C	Si	Mn	P	S
A1520	Max 0.26	0.15 0.35	Max 1.70	Max 0.025	Max 0.025

Table 2 Size of forged shell

ASTM	외경	내경	두께	길이
A694M	Φ1750	Φ1490	130mm	2150mm

Fig.1은 해석에서의 링 단조품과 실제 생산하고 있는 링 단조품의 사진이다.

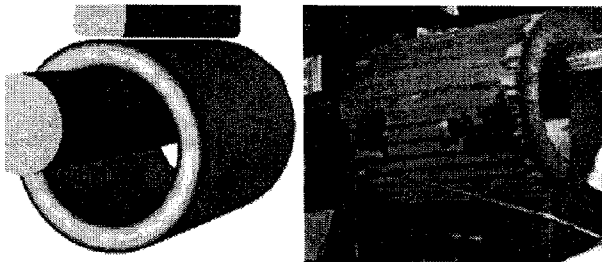


Fig. 1 Drawing of ring forging and photo of ring forging

2.2 링 단조 성형공정해석

링 단조 성형공정 해석은 유한요소해석(FEM) 프로그램 FORGE2008을 이용하였으며 링 단조진행과정은 Fig. 2와 같다. 링 단조 후 열처리 해석을 조건 별로 진행한 후 단조품을 P1L0, P1L1, P2L0, P2L1 4부위별로 점 추적(Point tracking) 하였다. Fig.3에서는 링 단조 후의 결과와 단조품 내 4부위를 그림으로 나타내고 있다.

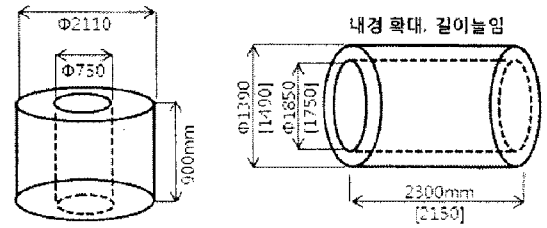


Fig. 2 Conditions of ring forging

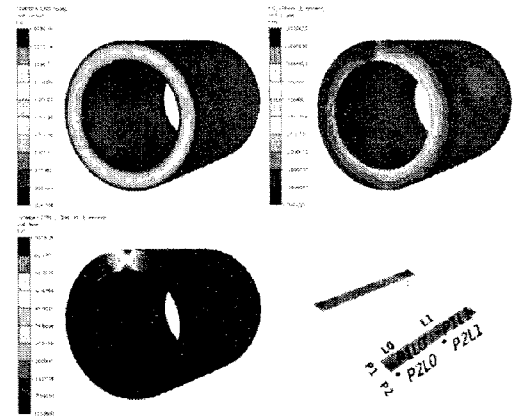


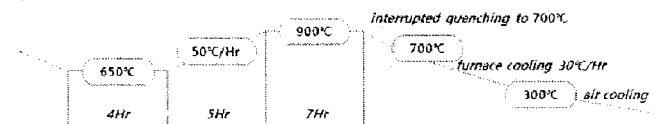
Fig. 3 Result of ring forging simulation and a part of forged shell

2.3 링 단조품의 열처리 시뮬레이션

링 단조품의 시뮬레이션(Simulation)은 유한요소해석(FEM) 프로그램 FORGE2008을 이용하여 쿨링(Cooling)과 퀴칭(Quenching) 해석을 실시하였다.

먼저 링 단조 후 1050℃의 링 단조품을 650℃까지 공냉 후 650℃에서 4시간 동안 어닐링(Annealing) 공정을 거치는 A프로세스(Process), 단조 후 링 단조품을 200℃까지 공냉 후 650℃에서 4시간 동안 어닐링 공정을 거치는 B 프로세스, 단조 후의 링 단조품을 280℃까지 시간당 20℃씩 온도를 하강 시키는 제어냉각 후 650℃에서 15시간 동안 어닐링 공정을 거치는 C 프로세스, 이렇게 링 단조품을 소재에 대하여 세가지 서로 다른 조건으로 열처리 공정을 유한요소해석으로 실시하였다.

아래의 Fig.4는 세가지 열처리공정을 나타낸 것이다.



(a) Process A

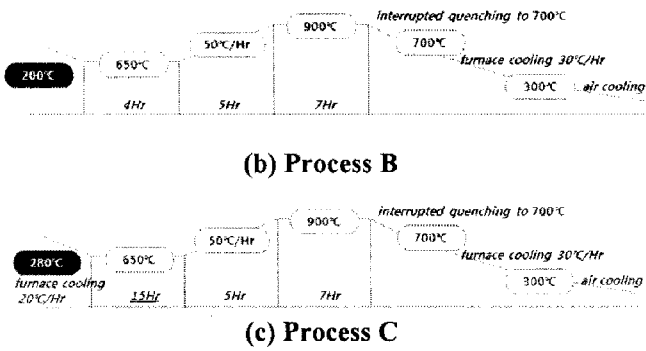


Fig. 4 Heat treatment simulation process A, B, C

3. 결과 및 고찰

3.1 링 단조 성형과정 시 온도변화

링 단조소재의 초기온도는 1249°C이며 링 단조 후 온도는 1182°C~988°C 정도로 부위별로 온도 차를 가지고 있다.

3.2 열처리공정에 따른 조직·경도 변화

링 단조품을 세가지 서로 다른 조건으로 열처리 한 공정을 유한요소해석으로 실시한 후의 결과를 Von Mises 항복 조건식에 의한 유효응력(Von Mises stress)값으로 비교하여 살펴보면 A프로세스에서의 최고(Peak point)의 값은 150.12MPa, B 프로세스는 40.64MPa, C 프로세스는 126.34MPa로 나타났다. A, C 프로세스의 열처리 조건을 가지는 링 단조품이 B 프로세스 열처리 조건의 링 단조품보다 약 3배 정도 높은 유효응력 값을 가지는 것으로 나타나고 있다.

또한 경도를 비교하여 살펴보면 A프로세스 159~347Hv, B프로세스 531~534Hv, C프로세스 150~165Hv로 B프로세스의 링 단조품 열처리 해석에서 A, C 프로세스에 비하여 3배 이상의 경도를 나타내고 있다. Fig.5는 A, B, C프로세스 열처리 해석에서의 유효응력과 경도의 수치를 그림으로 나타낸 것이다.

링 단조품의 열처리에 따른 조직변화를 프로세스 별로 살펴보았다. A, B, C 모두 오스테나이트(Austenite)는 거의 존재하지 않았으며 A와 C 프로세스에서는 페라이트(Ferrite)와 펄라이트(Pearlite), B프로세스에서는 베이나이트(Bainite)와 마르텐사이트(Martensite)가 확인 되었다.

Fig.6에서는 A, B, C process 열처리 해석에서 링 단조품 내 페라이트와 베이나이트를 확인할 수 있다.

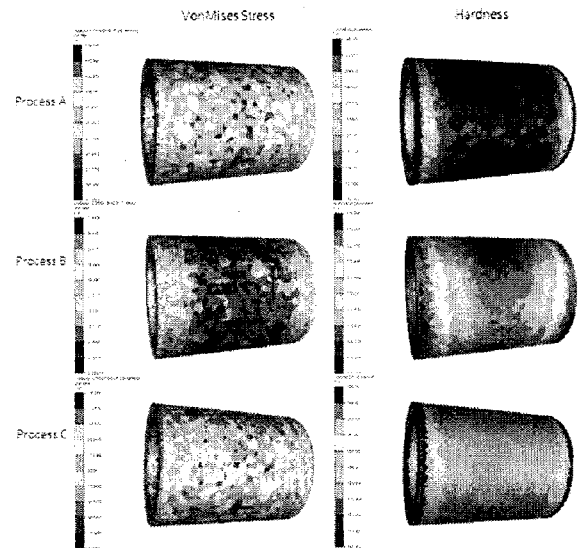


Fig. 5 Deformation after heat treatment simulation - von mises stress and hardness

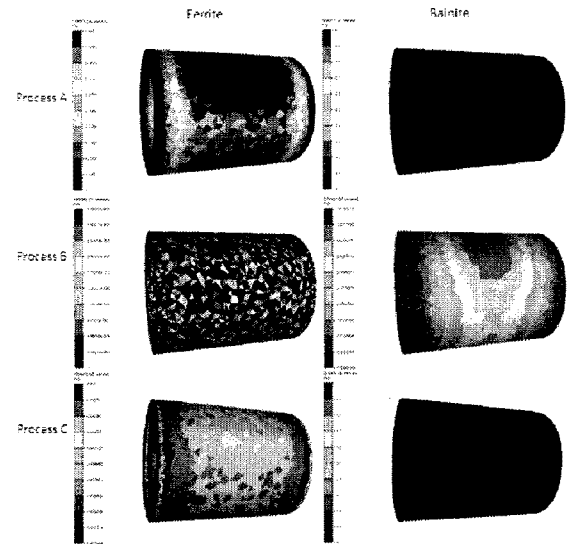


Fig. 6 Microstructure after heat treatment simulation

이렇게 열처리 조건이 다르므로 링 단조품은 열처리 전·후의 온도 변화는 물론 응력변화, 다른 결과상태의 응력분포, 경도, 다른 미세조직을 가진다. 여기서 A1520 소재가 가지는 TTTdiagram과 열처리해석 전과정의 소재 내 온도를 추적하여 두 개의 그래프를 오버랩(Overlap)하여 살펴보았다. 소재 A1520의 TTT diagram은 해석프로그램인 Forge2008 heat treatment simulation내 TTT 데이터베이스모듈을 이용하였다.

아래의 Fig.7은 A1520의 TTT diagram을 Table 3은 TTT diagram의 온도를 나타낸 것이다.

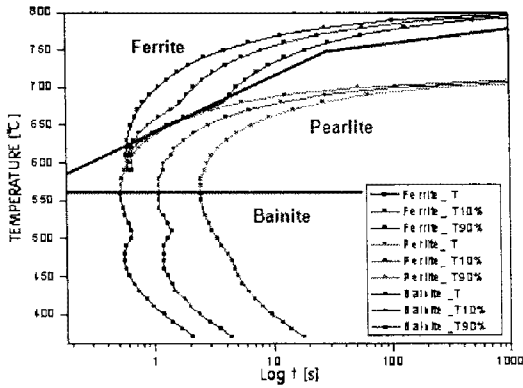


Fig. 7 Drawing of TTT Diagram of A1520
Table 3 Temperature of TTT diagram

A3	A1	BS	BF	MS
806.4°C	715.0°C	555.2°C	486.8°C	379.5°C

두 개의 그래프를 오버랩하여 살펴보면 806.4°C의 A3는 오스테나이트에서 페라이트 변화가 일어나기 시작하는 점으로 A와 C process가 이 온도 구간을 거치고 있다.

715°C의 A1은 페라이트와 펄라이트, 펄라이트 변화가 일어나기 시작하는 점으로 A3와 마찬가지로 A와 C process가 이 온도 구간을 거치고 있다. 555.2°C의 BS는 베이나이트 변화가 일어나기 시작하는 점으로 B process에서 이 온도 구간을 거친다.

486.8°C의 BF는 베이나이트 변화가 끝나는 온도이며 그리고 379.5°C의 MS는 마르텐사이트 변화가 일어나기 시작하는 점으로 B process에서 이 온도 구간을 거치는 것을 알 수 있다.

링 단조품의 열처리 유한요소해석을 진행하면서 B process에서처럼 유지온도가 Ms점 이하로 되면 오스테나이트에서 유지온도까지의 급냉과정에서 생긴 마르텐사이트와 그 후 일정하게 온도를 유지하여 생긴 베이나이트 조직이 생기는 것을 해석결과에서도 확인할 수 있었다.

Fig.8은 베이나이트의 미세조직사진이고 Fig.9와 Fig.10은 A1520의 TTT diagram과 소재 내 온도 그래프를 겹쳐 나타낸 것이다.



Fig. 8 Microstructure of bainite

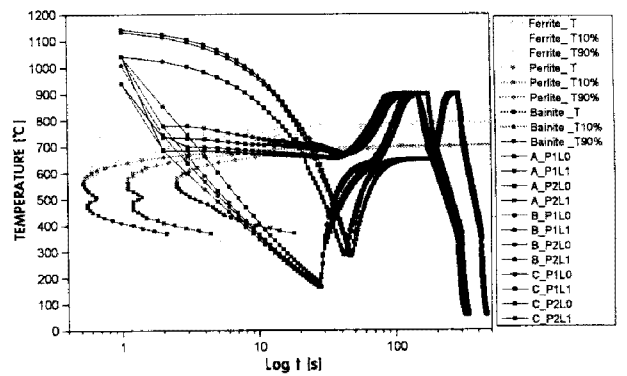


Fig. 9 TTT Diagram of A1520 with temperature on process A, B, C

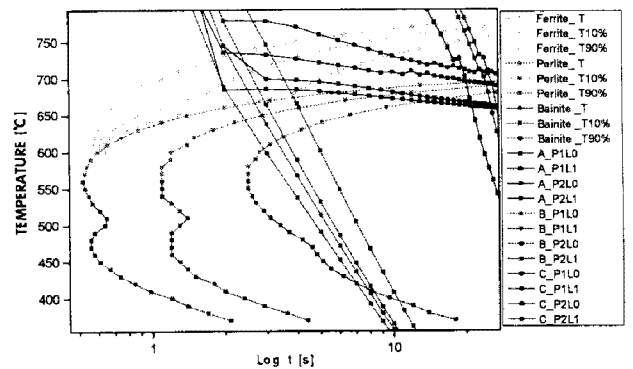


Fig. 10 TTT Diagram of A1520 with temperature on process A, B, C

4. 결론

본 연구에서는 외경 $\Phi 1750$, 길이 2150mm의 대형 링 단조품에 대하여 열처리 공정을 A, B, C 세 가지 프로세스로 유한요소해석을 실시하여 열처리 공정이 링 단조품의 조직변화에 미치는 영향

을 분석하였다. 그 결과는 다음과 같다.

- (1) 대형 링 단조품의 열처리 해석의 가능성을 확인했으며 그에 따른 조직의 변화도 예측 가능했다. 또한 최적열처리 조건의 선정이 가능했다.
- (2) A, C 프로세스의 열처리 조건을 가지는 링 단조품이 B 프로세스보다 약 3배 정도 높은 유효응력 값을 가진다.
- (3) A와 C 프로세스에서는 페라이트와 펄라이트, B 프로세스에서는 베이나이트와 마르텐사이트가 확인되었다.
- (4) 링 단조품의 열처리 시에도 유지온도가 Ms점 이하로 되면 오스테나이트에서 유지온도까지의 급냉과정에서 생긴 마르텐사이트와 이후 일정하게 온도를 유지하며 생긴 베이나이트 조직이 확인된다.

이와 같은 대형 자유 단조품에 대한 연구가 더욱 다양하게 진행되어 대형단조품의 단조조건과 열처리조건을 제어하여 더욱 우수한 강도 및 인성의 품질을 갖는 대형단조품의 생산이 이루어져야 할 것이다.

후 기

본 연구는 청정생산기술개발 사업의 일환으로 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- [1] 최영심, 박시영, 저합금강 소재의 열처리해석 기술개발, 한국소성가공학회지, Vol.14, No.3, 2005
- [2] 김형종, 최선철, 유한요소법을 이용한 SNCM 합금강의 침탄 열처리공정해석, 한국소성가공학회지, Vol.30, No.10, 2006
- [3] 정종구, 이오연, 고Mn계 TWIP강의 미세조직과 기계적 성질, 대한금속재료학회지, Vol.46, No.10, pp.627~633, 2008
- [4] 조경철, 구양모, 보론 첨가강에서 연주 냉각속도가 고온연성에 미치는 영향연구, 대한금속재료학회지, Vol.46, No.6, pp.329~337, 2008
- [5] Myoung-Gyu Lee, Sung-Joon Kim, Implicit finite element formulations for multi-phase transformation in high carbon steel, International Journal of Plasticity, In Press, Corrected Proof, Available online, 24 December 2008
- [6] Andre Pineau, Stephen D. Antolovich, High temperature fatigue of nickel-base superalloys - A review with special emphasis on deformation modes and oxidation, Engineering Failure Analysis, In Press, Corrected Proof, Available online, 31 January 2009
- [7] B.P. DiPaolo, J.G. Tom, Effects of ambient temperature on a quasi-static axial-crush configuration response of thin-wall, steel box components, Thin-Walled Structures, In Press, Corrected Proof, Available online, 1 April 2009