

# 단조/열처리 공정이 대형 주단조품의 조직변화에 미치는 영향

이명원<sup>1</sup>· 이영선<sup>#</sup>· 이승욱<sup>2</sup>· 이동희<sup>2</sup>· 김상식<sup>3</sup>· 문영훈<sup>4</sup>

## Microstructure Change of Large Cast-forged Product by Forging and Heat Treatment Conditions

M. W. Lee, Y. S. Lee, S. W. Lee, D. H. Lee, S. S. Kim, Y. H. Moon  
(Received June 23, 2009 / Revised July 13, 2009 / Accepted July 15, 2009)

### Abstract

Thermal energy control is a important factor to control properties of large sized product in ingot-forging. Good control of thermal energy helps to increase characteristics and eliminate defects 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 process by FEM simulation. Changes of temperature and microstructure for forged shell were predicted according to different heat treatment conditions. 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, FEM Analysis, Ring Forging, Defect, Microstructure

### 1. 서 론

선박, 풍력, 발전/플랜트 산업의 성장으로 타워 플랜지(Tower flange), 기어 림(Gear rim), 락 플레이트(Lock plate), 대형 링(Forged ring)등과 같은 대형 단조품의 수요가 급증하고 있다. 풍력 산업에서는 용량과 타워크기가 비례적으로 증가하여 링 단조품의 대형화 및 수요 증가를 보이고 있다.

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

감소시켜 원하는 대형 링을 제조하게 된다. 따라서, 점진적 소성변형과 후 열처리 공정에 의한 조직제어가 중요한 기술에 해당된다.

단조 후 열처리 공정 시 조직과 물성의 변화는 소재의 특성 및 결합에 영향을 미치므로 금속학적 많은 선행연구들이 존재하고 있다[1~7].

본 연구에서는 대형 주단조품의 열처리 시 온도 유지시간 등의 변수가 조직변화에 미치는 영향을 살펴보기 위해 링 단조품(Forged shell)의 열처리공정에 대한 해석을 실시하였다. 열처리 해석 시 대형 단조품으로 인해 발생하는 단조 공정 중 온도편차를 고려하기 위해 단조공정에 대한 해석을 통해 부위별 온도차이를 분석하고 열처리 공정 해석 시 이를 고려하였다.

열처리 시 사용되는 온도와 온도유지시간의 공정

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

조건은 링 단조품의 미세조직, 기계적 특성과 물리적 특성에 차이를 발생시키는 원인이다. 따라서, 현재 링 단조품에 적용하고 있는 다양한 열처리 공정의 평가가 필요하게 되며 특히 실제 생산에서의 결합 원인에 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 달리한 유한요소해석(FEM)을 실시하여 열처리 공정이 링 단조품 소재의 조직변화와 결합발생에 미치는 영향을 분석하였다.

## 2. 유한요소해석

### 2.1 링 단조품

본 연구에 사용된 소재는 망간 첨가 탄소강으로 AISI-A1520으로 불리고 있다. 링 단조공정 후 세 가지의 다른 열처리 공정을 통하여 열처리가 대형 주·단조품에 미치는 영향을 유한요소해석(FEM)으로 분석하였다. 아래의 Table 1은 A1520의 화학 조성표이고 Table 2는 링 단조 후 제품의 사이즈를 나타내고 있다.

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

Table 1 Chemical composition of A1520 (wt.%)

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

Table 2 Size of forged shell

ASTM	Out Dia.	Inner Dia.	Thick-ness	Length
A694M	Φ1750	Φ1490	130mm	2150mm

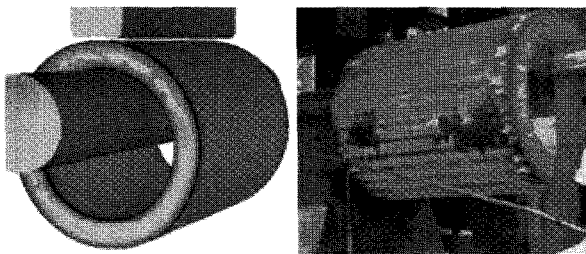


Fig. 1 Drawing of ring forging and photo of ring forging

### 2.2 링 단조 성형공정해석

링 단조 공정은 제강에서 주조하여 응고시킨 후 강괴의 표면온도가 500℃~700℃정도가 될 때, 강괴 가열과정(Pre-heat process)을 거친 후 링 소재를 편치(Anvil)와 맨드릴(Mandrel) 사이에서 가압하여 링 단면을 감소시킨다. 동시에 맨드릴(Mandrel)을 반경 방향으로 회전시키면서 점진적으로 링 지름 증가시키고 추가적으로 단면을 연속으로 감소시킨다.

링 단조 성형공정 해석은 유한요소해석(FEM) 프로그램 FORGE2008을 이용하였으며 링 단조 성형공정 해석에서 링의 요소(Mesh)수는 50647개이며 해석 시 조건들은 아래의 Table 3에 나타내었다.

Fig. 2는 단조 전 강괴 가열공정(Pre-heat process) 조건이며 Fig. 3은 링 단조 후 링 사이즈의 변화를 그림으로 나타낸 것이다.

Table 3 Analysis Condition of ring forging

Ring Forging	Condition
Anvil Direction	Value = -Z
Anvil Velocity	10 mm/s
Anvil Height	30 mm (×2), 5 mm (×2)
Anvil Type	Float
Friction coefficient	High (0.3~0.6)
Ring mesh number	50647 ea

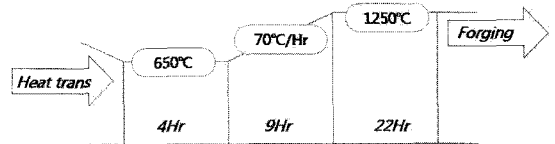


Fig. 2 Pre-heat process

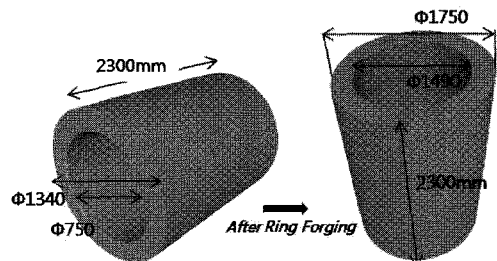


Fig. 3 Size effect after ring forging

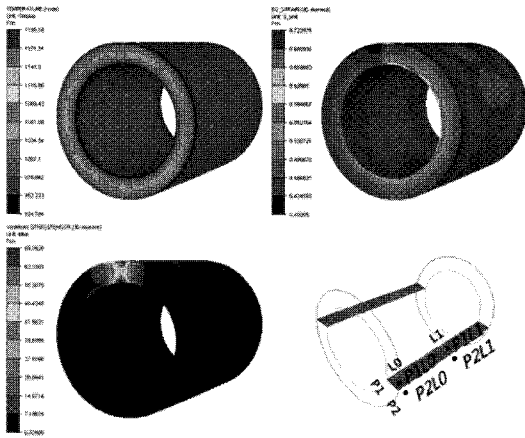
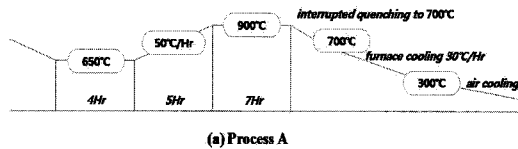


Fig. 4 Result of ring forging simulation and part of forged shell

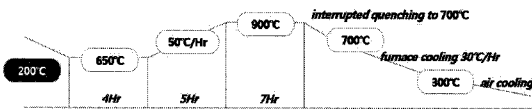
Fig. 4에서는 링 단조해석 후의 결과와 링 단조해석 후 열처리 해석을 조건 별로 수행한 후 링 단조품 내부를 P1L0, P1L1, P2L0, P2L1 부위별로 나누어 점 추적 한 단조품 내 4부위를 그림으로 나타내고 있다.

### 2.3 링 단조품의 열처리 시뮬레이션

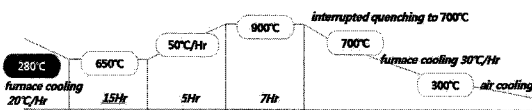
링 단조품의 시뮬레이션(Simulation)은 유한요소 해석(FEM) 프로그램 FORGE2008을 이용하여 가열과 냉각 순으로 이루어진 열처리 공정 해석을 실시하였다. Fig. 5는 세가지 열처리공정을 나타내고 있다.



(a) Process A



(b) Process B



(c) Process C

Fig. 5 Heat treatment simulation process A, B, C

먼저 링 단조 후 1050°C의 링 단조품을 650°C까지 공냉 후 650°C에서 4시간 동안 어닐링(Annealing) 공정을 거치는 A 프로세스(Process), 단조 후 링 단조품을 200°C까지 공냉 후 650°C에서 4시간 동안 어닐링 공정을 거치는 B 프로세스, 단조 후의 링 단조품을 280°C까지 시간당 20°C씩 온도를 하강시키는 제어냉각 후 650°C에서 15시간 동안 어닐링 공정을 거치는 C 프로세스, 이렇게 링 단조품을 소재에 대하여 세가지 서로 다른 조건으로 열처리 공정을 유한요소해석으로 실시하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 링 단조 성형공정 시 온도변화

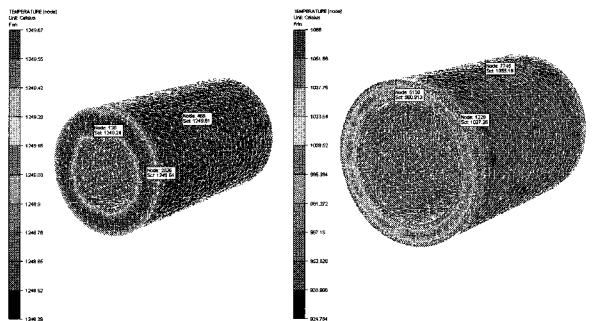
링 단조소재의 단조시작 초기온도는 1249°C로 부위별로 차이가 거의 없었으나 링 단조 후 단조품의 온도는 부위별로 1182°C~988°C정도의 온도차를 가지고 있다.

Fig. 6은 단조 전·후의 온도차이를 비교하고 있으며 Fig. 7은 FEM에서의 링 단조 세트이다. Table 4는 단조 전·후의 사이즈 변화를 표로 비교한 것이다.

링 단조해석 후 열처리 해석을 프로세스 A, B, C 조건 별로 수행한 후 대형단조품 내 P1L0, P1L1, P2L0, P2L1 4부분별로 점 추적(Point tracking) 하였다.

Fig. 8은 단조 후의 단조품 내 P1L0, P1L1, P2L0, P2L1 4부분의 온도 차이를 그래프로 나타낸 것이다(열처리해석 시의 초기온도).

대형단조품의 특성상 단조품의 두께로 인해 링 단조 해석 후 부분별 온도의 차 생기는 것을 확인할 수 있었다. 단조시작 초기온도에 비하여 약 80°C~300°C까지 온도가 감소되었다.



(a) Before ring forging (b) After ring forging

Fig. 6 Compare temperature of forged shell

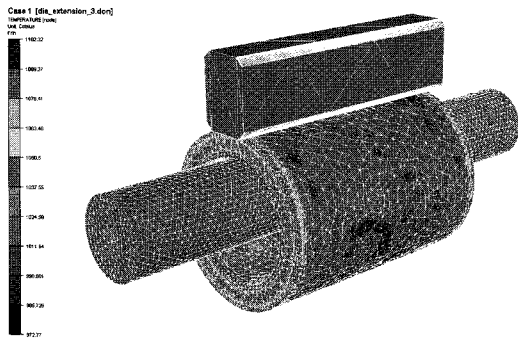
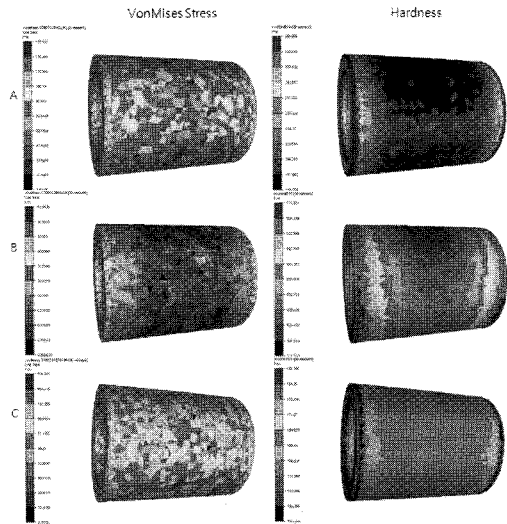


Fig. 7 Ring forging simulation

Table 4 Compare size of forged shell

ASTM	Out Dia.	Inner Dia.	Thickness
Before forging	Φ1340	Φ750	300mm
After Forging	Φ1750	Φ1490	130mm



(a) von Mises Stress (b) Hardness

Fig. 9 Deformation after heat treatment simulation- von mises stress and hardness

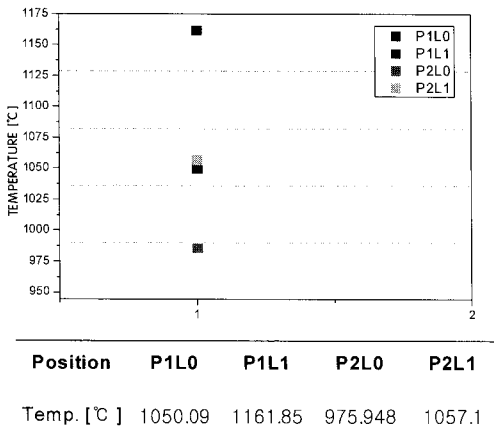


Fig. 8 Initial temperature before heat treatment

### 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) 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 단조품 보다 약 3배 정도 높은 유효응력 값을 가지는 것으로 나타나고 있다.

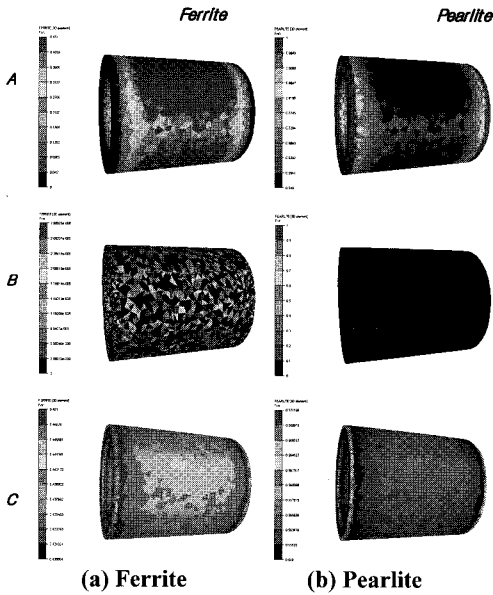
또한 경도를 비교하여 살펴보면 A프로세스 159~347Hv, B프로세스 531~534Hv, C프로세스 150~165Hv로 B프로세스의 링 단조품 열처리 해석에서 A, C 프로세스에 비하여 3배 이상의 경도를 나타내고 있다. Fig.9는 A, B, C프로세스 열처리 해석에서의 유효응력과 경도의 수치를 그림으로 나타낸 것이다.

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.

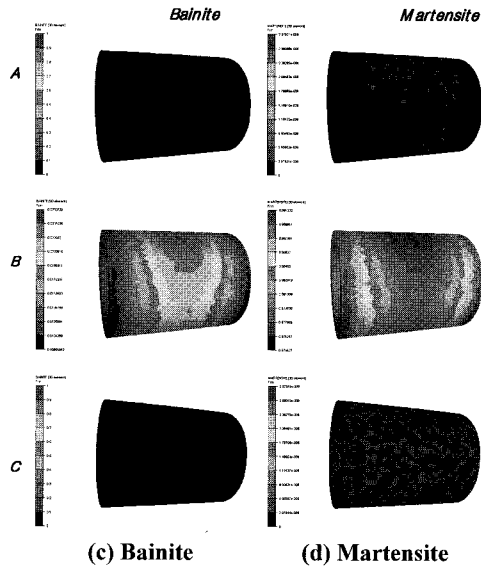
Fig.10에서는 A, B, C process의 열처리 해석 후 링 단조품 내 변화된 조직인 페라이트와 펄라이트, 베이나이트와 마르텐사이트를 나타내고 있다.

이렇게 열처리 조건이 다르므로 링 단조품은 열처리 전·후의 온도 변화는 물론 응력변화, 다른 결과상태의 응력분포, 경도, 다른 미세조직을 가진다.

여기서 A1520소재가 가지는 TTT diagram과 열처리해석 전과정의 소재 내 온도를 추적하여 두 개의 그래프를 오버랩(Overlap)하여 살펴보았다. 소재 A1520의 TTT diagram은 해석프로그램인 Forge2008 heat treatment simulation내 TTT 데이터 베이스(Data Base) 모듈(Module)을 이용하였다.



(a) Ferrite (b) Pearlite



(c) Bainite (d) Martensite

Fig.10 Microstructure after heat treatment simulation

아래의 Fig.11은 A1520의 TTT diagram을 Table 5는 TTT diagram의 온도를 나타낸 것이다. 두 개의 그래프를 오버랩하여 살펴보면 806.4°C의 A3는 오스테나이트에서 페라이트 변태가 일어나기 시작하는 점으로 A와 C process가 이 온도 구간을 거치고 있다.

715°C의A1은 페라이트와 펄라이트, 펄라이트 변태가 일어나기 시작하는 점으로 A3와 마찬가지로 A와 C process가 이 온도 구간을 거치고 있다.

Table 5 Temperature of TTT diagram

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

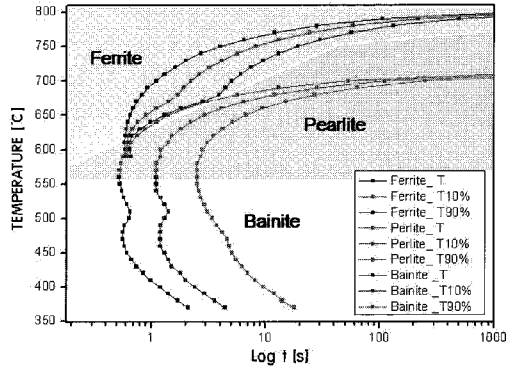


Fig.11 Drawing of TTT Diagram of A1520

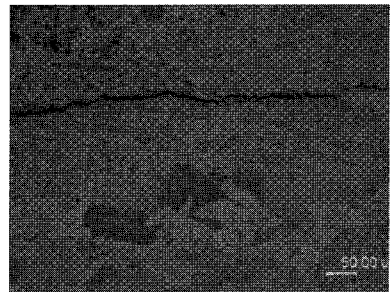


Fig. 12 Microstructure structure distribution at crack occurrence(bainite)

555.2°C의BS는 베이나이트 변태가 일어나기 시작하는 점으로 B process에서 이 온도 구간을 거친다. 486.8°C의BF는 베이나이트 변태가 끝나는 온도이며 그리고 379.5°C의MS는 마르텐사이트 변태가 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.12는 베이나이트의 미세조직 사진이고 Fig.13과 Fig.14는 A1520의 TTT diagram과 소재 내 온도 폭선을 겹쳐 나타낸 것이다.

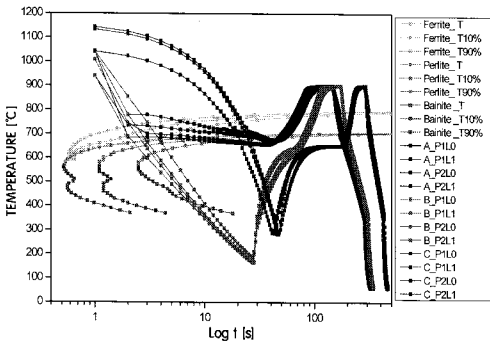


Fig.13 TTT Diagram of A1520 with temperature on process A, B, C

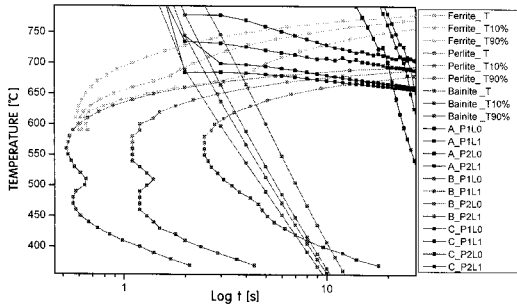


Fig.14 TTT Diagram of A1520 with temperature on process A, B, C

#### 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 영향을 분석하였다. 그 결과는 다음과 같다.

(1) 대형 링 단조품의 열처리 해석의 가능성을 확인했으며 그에 따른 조직의 변화도 예측 가능했다. 또한 최적열처리 조건 선정의 가능성을 확인하였다.

(2) A, C 프로세스의 열처리 조건을 가지는 링 단조품이 B 프로세스보다 약 3배 정도 높은 유효응력 값을 가진다.

(3) 대형 자유단조품의 경우는 단조 후 열처리 공정 동안 소재 내·외부에 온도편차가 발생할 가능성이 높고 이는 결국 조직변화에도 크게 영향을 미치게 되는데 단조와 열처리공정을 연계 해석하여 이에 대한 예측을 보다 개선할 수 있다.

(4) 단조 - 열처리공정의 연계 해석을 통해 결국, 동일한 열처리공정조건이라 하더라도 대형단조품의 단조공정 후 열관리 체계에 의해 내·외부 조직변화가 발생됨을 확인하였다.

(5) A와 C 프로세스에서는 페라이트와 펄라이트, B프로세스에서는 베이나이트와 마르텐사이트가 확인되었다.

(6) 링 단조품의 열처리 시에도 유지온도가 Ms 점 이하로 되면 오스테나이트에서 유지온도까지의 급냉 과정에서 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 가능하도록 단조 및 열처리 연계해석과 물성치 보완에 의한 예측정밀도 향상이 필요하며 이에 대한 연구가 계속 되어야 한다.

#### 후 기

본 연구는 청정생산기술개발 사업 “친환경 고형 정 잉곳제조 및 Near Net Shape 성형기술”의 일환으로 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

- [1] J. T. Kim, Y. S. Choi, 2005, Heat Treatment Analysis on Low-Alloy Steel, Trans. Mater. Process., Vol. 14, No. 3, pp. 215~223.
- [2] H. J. Kim, D. J. Lee, H. Y. Kim, S. C. Choi, 2006, Analysis of the Carburizing Heat Treatment Process for SNCM Alloy Steel Using the Finite Element Method, Trans. Kor. Soc. Mech. Eng., Vol. 30, No. 10, pp. 1284~1292.
- [3] J. K. Jung, O. Y. Lee, 2008, Microstructure and Mechanical Properties of High Mn TWIP Steel, J. Kor. Inst. Met. Mater., Vol. 46, No. 10, pp. 627~633.
- [4] J. S. Kim, Y. H. Lee, 2007, Effect of Intergranular Ferrite on the Hydrogen Delayed Fracture Resistance of High Strength Boron-added Steel, Int. J. Plast., Vol. 45, No. 9, pp. 506~513.

- [5] M. G. Lee, S. J. Kim, H. N. Han, W. C. Jeong, 2008, Implicit Finite Element Formulations for Multi-Phase Transformation in High Carbon Steel, *Int. J. Plast.*, Vol. 25, pp. 1726~1758.
- [6] A. Pineau, S. D. Antolovich, 2009, High Temperature Fatigue of Nickel-Base Superalloys-A Review with Special Emphasis on Deformation Modes and Oxidation, *Eng. Fail. Anal.*, Vol. 16, No. 8, pp. 2668~2697.
- [7] B. P. DiPaolo, J. G. Tom, 2009, Effects of Ambient Temperature on a Quasi-Static Axial-Crush Configuration Response of Thin-Wall, Steel Box Components, *Thin-Walled Struct.*, Vol. 47, No. 8-9, pp. 984~997.