

대형 주·단조품의 온도 및 조직변화 예측에 관한 연구

이명원¹, 이영선[#], 이승욱², 김상식³, 문영훈⁴

On prediction temperature and microstructure change in large cast-forged product

M. W. Lee¹, Y. S. Lee[#], S. W. Lee², S. S. Kim³, Y. H. Moon⁴

Abstract

Good control of thermal energy helps to increase characteristics and eliminate defects of large cast-forged part, such as large sized forged shell. Thermal energy control is a important factor. We have studied about forging process and after heat treatment process by FEM simulation. There are three ways of process. Changes of temperature and microstructure for forged shell were predicted according to temperature declination in large cast-forged product. So we will be able to choose the proper time from heat treatment conditions by FEM simulation.

Key Words : Large cast-forging, Ring forging , Microstructure, Temperature declination, Normalizing, FEM simulation.

1. 서 론

금속의 열처리는 ‘가열과 냉각을 적절히 조절하여 금속의 성질을 개선하는 것’ 이라 한다.

열처리 공정에서 발생할 수 있는 문제점은 소재의 크랙(Crack) 및 결정립의 조대화 등 충분한 경험과 밑바탕이 되는 지식 없이 해결하기 어렵다. 잘못된 열처리 공정은 그 공정으로 인해 발생하는 소재 내 불필요한 미세조직, 크랙 등의 문제점으로 많은 비용과 시간을 들여 만든 제품을 버려야 하는 상황을 만든다. 따라서 제품의 기계적 성질을 저하시키고 마모 나 파괴의 원인이 되는 문제를 예방하기 위해서 먼저 열처리 공정 시 발생할 수 있는 문제점에 대한 원인을 미리 아는 것이 중요하며 또한 열처리 공정 변수들의 최적제어로 잘못된 공정으로 인한 비용과 시간을 단축 시킬 필요가 있다.

최근 링 단조품은 대형화와 함께 그린산업의 성장으로 풍력 산업에서 그 수요가 증가 하고 있으며 풍력발전의 용량과 타워크기가 비례적으로 증가하고 있다.

이전의 연구에서는 선박, 풍력, 발전/플랜트 산업에서 쓰이는 타워 플랜지(Tower flange), 기어 림(Gear rim), 락 플레이트(Lock plate)등의 대형 주단조품의 열처리 시 열처리 공정의 온도와 유지시간 등의 변수가 소재의 조직변화에 미치는 영향을 살펴보기 위해 링 단조품(Forged shell)의 열처리 공정에 대해 해석을 실시하였다. 본 연구에서는 링 단조 후 단조품에 대해 실제 열처리를 프로세스(Process) 별로 실시하고 그와 동시에 열처리 시뮬레이션(Simulation)을 실시하여 열처리 시 발생하는 대형 주·단조품의 온도 및 조직변화를 예측하고자 한다.

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

2. 실험방법과 유한요소해석

본 연구에서의 소재는 탄소 0.2%의 탄소강으로 이전 대형 링 단조품과 동일한 AISI-A1520을 사용하였다.

우리는 대형 링 단조공정 후 세 가지의 다른 열처리 공정을 통하여 열처리가 대형 주·단조품에 미치는 영향을 유한요소해석(FEM)으로 분석하였다. 단조품의 두께로 인한 링 단조 해석 후 부분별 온도의 차, 열처리에 따른 조직변화, 그리고 링 단조품 소재 내부 포인트(Point)를 열처리해석 모든 과정에서 추적하여 TTT diagram과 겹쳐 살펴 보았다.

아래의 Table 1은 A1520의 화학 조성표이고 Table 2는 링 단조품의 단조 후 제품의 사이즈를 Table 3에서는 실제열처리 실험과 시뮬레이션에 사용한 소재(이하 내용 P로 표시)의 사이즈를 나타내고 있다.

Fig.1은 실험과 시뮬레이션에서의 사용한 두 가지 열처리 공정을 개략적으로 나타낸 그림이다. 프로세스 A(Process A)는 링 단조 후 소재가 약 1100℃ 정도에서 650℃가 될 때까지 공랭 (Air-cooling)하여 식힌 다음 650℃의 가열로(Furnace)에서 가열한다. 프로세스 B는 소재가 200℃가 될 때까지 식힌 후 프로세스 A와 동일하게 650℃ 온도의 가열로에서 가열한다.

열처리 시뮬레이션은 실험과 동일한 조건으로 단조 후의 Forged shell(이하 내용 S로 표시)의 물성을 가져온 조건에서 프로세스 A와 B의 열처리 공정을 유한요소해석으로 진행하였다.

Table 1 Chemical composition of A1520 (wt.%)

Type	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

Type	Out Dia.	Inner Dia.	Thickness	Length
A1520	Φ1750	Φ1490	130mm	2150mm

Table 3 Size of large forged shell

Type	Out Dia.	Length
A1520	60mm	70mm

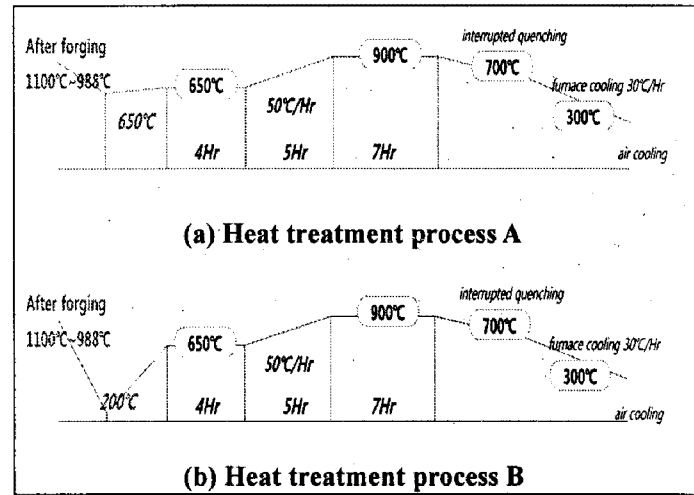
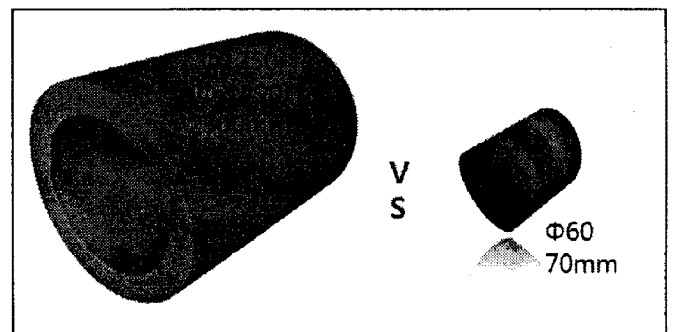


Fig.1 Heat treatment simulation process A, B by FEM simulation

Fig. 2(a)는 링 단조품(Forged shell)의 열처리 공정 해석에서의 모델(Model)이고 Fig. 2(b)는 본 연구에서의 해석모델을 나타내고 있다.



(a) Forged shell [S] (b) New shell [P6]

Fig.2 Size of forged shell and new shell

3. 결과 및 고찰

3.1 열처리공정에 따른 조직 변화

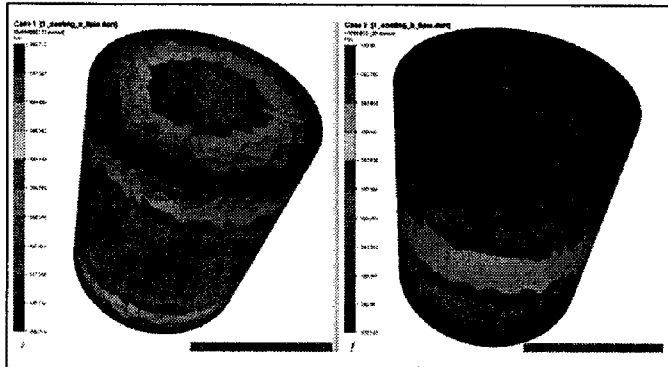
AISI-A1520의 소재 P를 각각의 프로세스 별 온도까지 공랭한 후 650℃ 가열로에서 4시간 동안 어닐링(Annealing) 공정을 거치는 열처리 공정일정(Schedule)에 의해 시뮬레이션을 실시하였다.

아래의 Table 4에는 열처리 시뮬레이션의 조건들을 나타내었다.

Table 4 Condition of heat treatment analysis

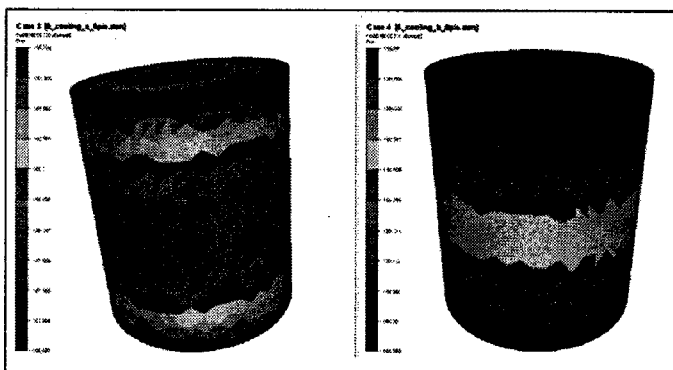
Analysis Condition	
Billet material	A1520
Billet mesh number	22355ea
Thermal exchange Transfert coefficient	10
Emissivity	0.8

링 단조 후 첫 단계로 프로세스 A와 B의 열처리 공정에 따라 각각 650℃와 200℃까지 공랭 시킨 후의 경도 값을 아래의 Fig. 3 에서 비교하였다. Table 5 에서 정리하여 살펴보면 단조 직후 온도가 하강했을 때 650℃에서 바로 가열에 들어간 프로세스 A와 200℃까지 온도를 하강시킨 프로세스 B의 경도에는 큰 차이가 없음을 보였다.



(a) Process A-First

(b) Process B-First



(c) Process A-Final

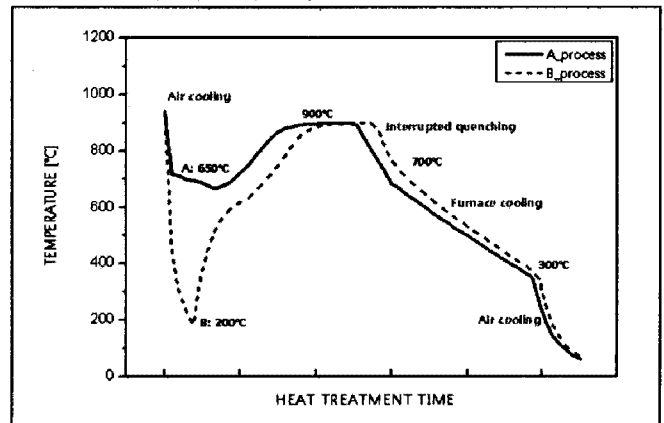
(d) Process B-Final

Fig.3 Hardness distribution by heat treatment - solid specimen

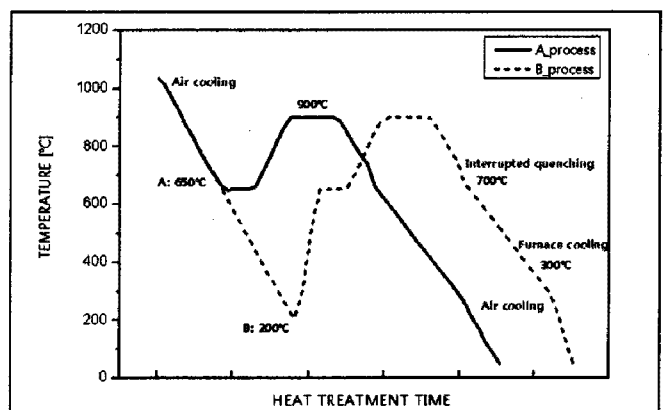
Table 5 Hardness of solid specimen

Hardness [Hv]	[A] 650℃	[B] 200℃
First cooling	190.713 186.814	190.88 189.769
Final cooling	190.704 186.693	190.88 189.769

이전의 연구과정에서 대형 소재를 링 단조해석 후 열처리 해석을 조건 별로 수행한 후 링 단조품 내부를 점 추적 하여 소재 내 온도를 곡선으로 나타내었다. Fig. 4 (a)는 대형 링 단조품의 소재 내 온도 곡선을 A 와 B로 비교하고 있고 Fig.4 (b)는 대형 소재를 Size-down 하여 실제실험과 열처리 시뮬레이션으로 해석적 신뢰도를 검증하고자 한 중실 시편, P 의 소재 내 온도 곡선을 프로세스 A 와 B로 비교하여 나타내었다.



(a) Forged shell - temperature on process A, B



(b) New shell - temperature on process A, B

Fig.4 Temperature on process A, B
프로세스 A와 B의 열처리 시뮬레이션을 실시한

소재 P 내부를 점 추적 한 위치를 Fig. 5 에 나타내었다.

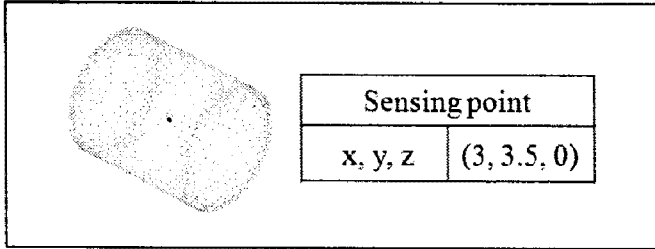


Fig.5 Sensor point of heat treatment simulation

아래의 Fig. 6 는 대형 링 단조품의 소재 내 온도 곡선과 대형 소재를 Size-down 한 소재 P 의 소재 내 온도 곡선을 비교한 그래프(Graph)이며 Fig. 7 은 Fig. 6 의 온도그래프를 A1520 의 TTT diagram 과 오버랩(Overlap)하여 소재가 어떤 조직을 가지게 되는지 쉽게 예측할 수 있게 했다. Fig. 7 을 살펴보면 B 프로세스의 열처리 공정을 거치는 온도곡선이 555.2℃의 베이나이트(BS) 변태점을 지나는 것을 쉽게 알 수 있다.

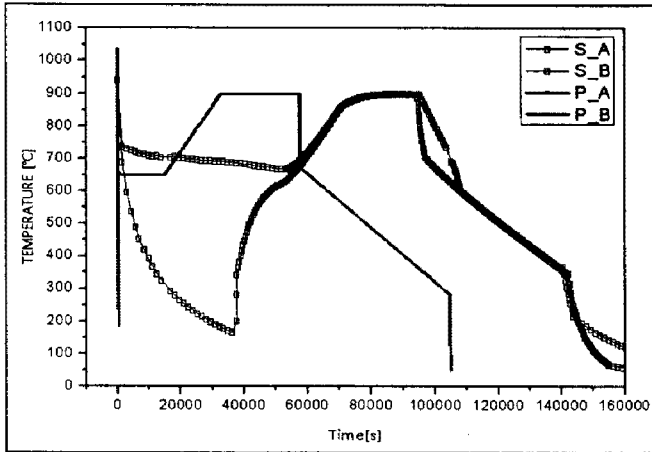


Fig.6 Temperature on process A, B

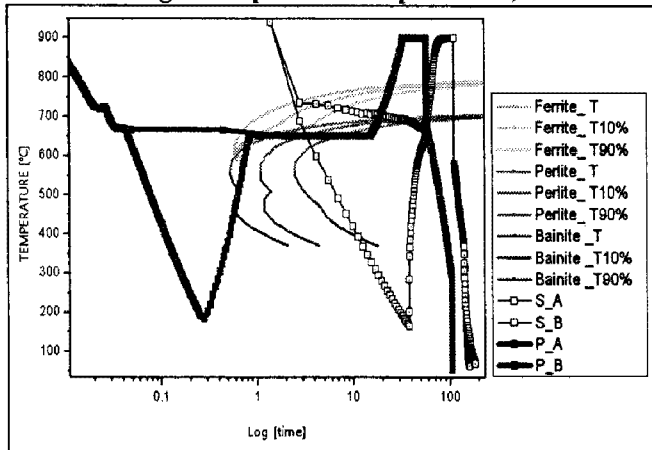


Fig.7 TTT of A1520 with temperature graph

Fig.8 은 A1520 의 TTT diagram 을 Table 6 은 TTT diagram 에서의 조직변태 온도를 나타내었다.

소재 A1520 의 TTT diagram 은 해석프로그램인 Forge2008 heat treatment simulation 의 TTT 데이터베이스모듈을 이용하였다.

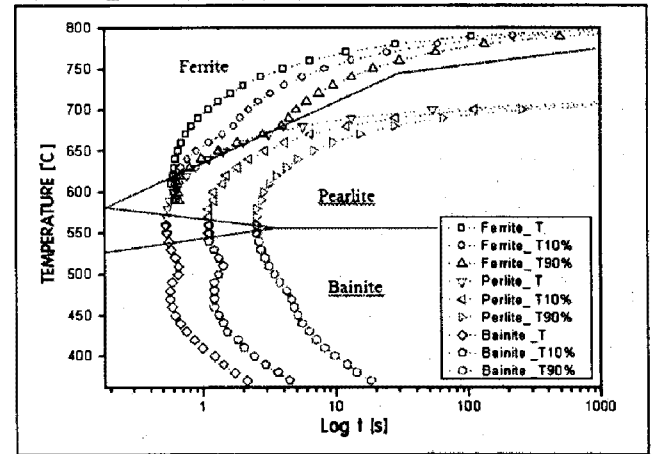
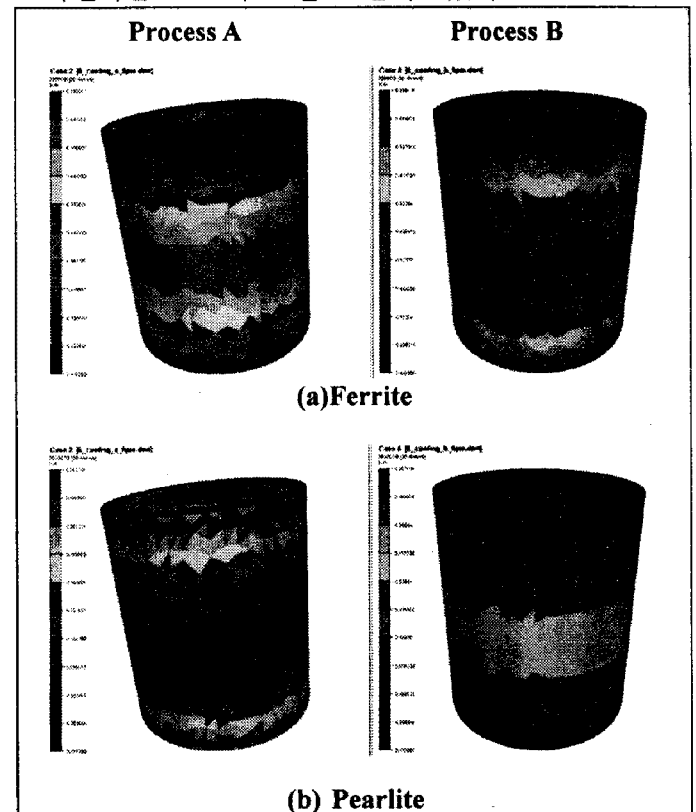


Fig.8 Drawing of TTT Diagram of A1520

Table 6 Abnormal temperature of microstructure

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

Fig. 9 에서는 소재 P (New shell)의 열처리에 따른 조직변화를 프로세스 별로 살펴보았다.



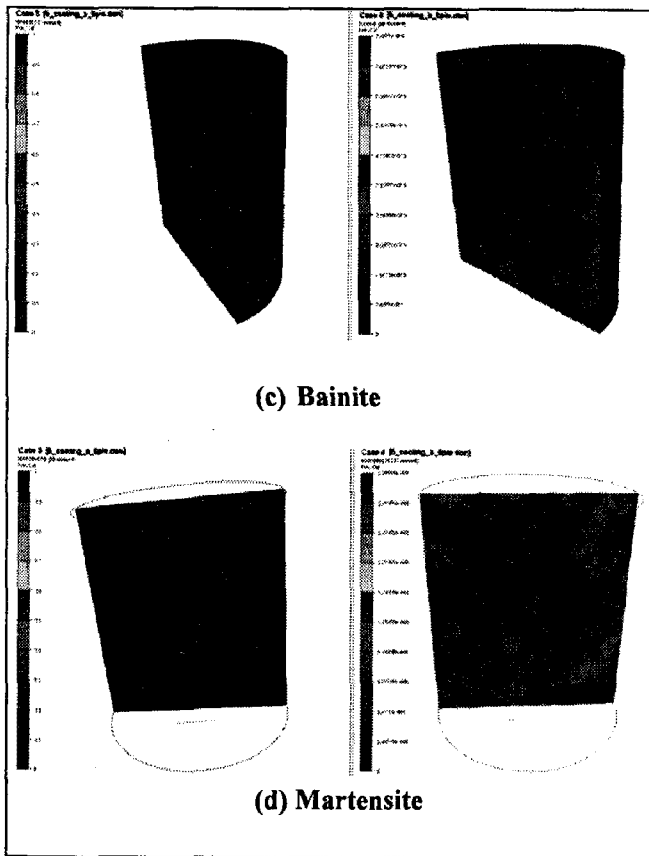


Fig.9 Microstructure distribution by heat treatment simulation

Fig.9에서는 A,와 B 프로세스의 열처리 해석 후 소재 내부의 변화된 조직인 페라이트(Ferrite)와 펄라이트(Pearlite), 특히 B 프로세스에서는 베이나이트(Bainite)와 마르텐사이트(Martensite)가 확인되었다.

대형 단조품을 Size-down하여 대형 단조품과 같은 열처리 공정으로 실시하였기 때문에 치수의 영향(Size-effect)에 따른 차이가 있었다.

여기서의 열처리 공정은 대형 링 단조품의 공정 일정(Schedule)임을 밝혀둔다.

미세조직의 베이나이트 변태과정은 오스테나이트가 펄라이트 변태곡선의 최대 성장속도(nose)에 해당하는 온도 이하의 과포화상태로 냉각될 때 베이나이트가 생성된다. 탄소강에서는 TTT선도에서 베이나이트의 C곡선이 펄라이트의 C곡선과 겹쳐지는 부분이 있다. Fig.10의 TTT diagram 에서도 살펴볼 수 있다. 500℃ 부근의 비교적 높은 온도에서는 펄라이트와 베이나이트가 경쟁적으로 형성되고 있음을 알 수 있다.

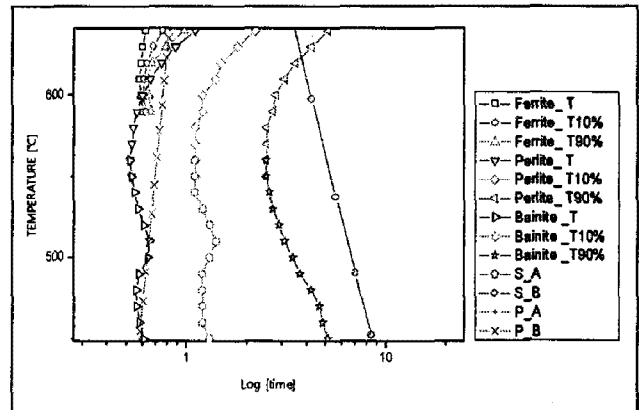
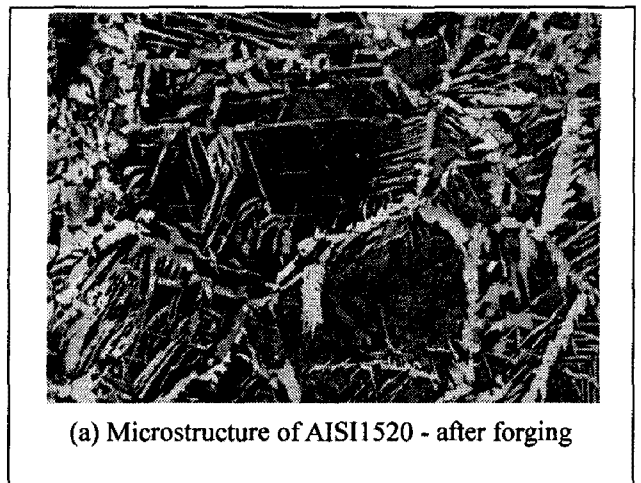


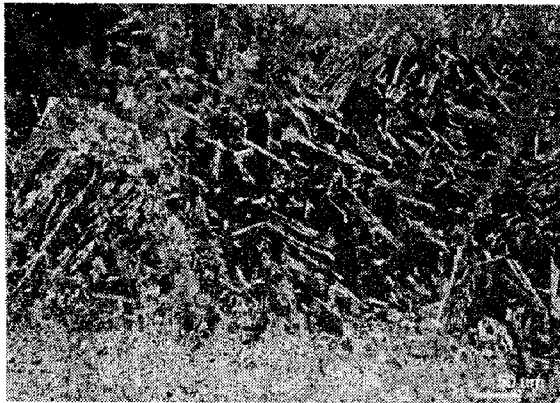
Fig.10 TTT Diagram of A1520 with temperature on process A, B

고온, 일반적으로 400℃~550℃ 사이에서 생성된 베이나이트는 침상조직과 래스(Lath)형 페라이트, 그리고 침상 사이에서 석출된 시멘타이트(Fe_3C)로 구성되어 있다.

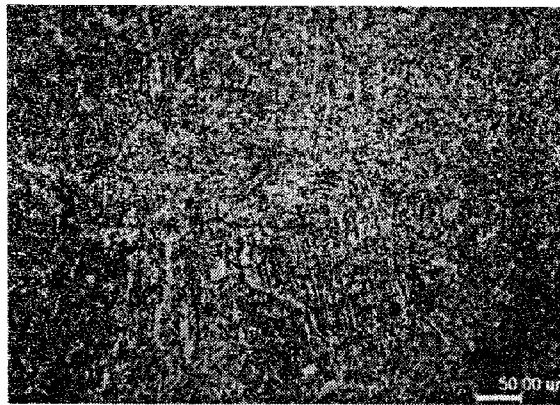
온도가 높은 경우 펄라이트와 베이나이트가 서로 경쟁적으로 성장하여 이들이 동시에 형성된 경우에는 펄라이트와 베이나이트의 조직을 구별하기가 힘들다. 베이나이트의 조직이 탄화물의 불연속적인 특성이 있지만 펄라이트 조직에서도 끊어진 층상형태로 나타날 수 있다. 두 조직이 페라이트 내 시멘타이트 층을 가지는 구조이기 때문이다. 하지만 두 조직의 미세조직을 살펴보면 펄라이트는 오스테나이트 결정립과 어떠한 방위관계도 가지지 않으나 베이나이트의 경우에는 오스테나이트 안으로 성장하여 입계에서 방위관계를 가지며 성장한다. Fig.11은 열처리 전·후의 조직 사진이다.



(a) Microstructure of AISI1520 - after forging



(b) Microstructure of AISI1520 – HT A process



(c) Microstructure of AISI1520 – HT B process

Fig.11 Microstructure of AISI-1520

4. 결론

본 연구에서는 대형 소재를 Size-down 하여 열처리 시뮬레이션의 해석적 신뢰도를 검증하고자 열처리 실험과 열처리 시뮬레이션을 동일한 조건으로 수행하였다. Size-down 한 소재 P(중실시편)의 열처리 해석을 A, B 조건 별로 수행한 후 소재내부를 점 추적 하여 소재 내 온도를 공정과 시간의 흐름에 따라 살펴볼 수 있었다. 또한 시간에 따른 온도변화의 곡선을 TTT diagram 과 오버랩(Overlap)하여 소재가 어떤 조직을 가지게 되는지 쉽게 예측할 수 있게 했으며 열처리 실험에서 도출한 조직과의 연계성도 확인 할 수 있었다.

열처리 시 공정조건 별로 다르게 존재하는 소재 내부의 특이조직제어와 최적의 온도제어, 형상사이즈 제어 등 열처리 FEM 해석으로 원하는

조건의 열처리 공정설계가 가능해지고 미리 예측해 볼 수 있는 자료가 되어 전체적인 공정의 단축으로 시간과 비용을 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 청정생산기술개발 사업 “친환경 고청정 잉곳제조 및 Near Net Shape 성형기술”의 일환으로 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

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, 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.
- [3] J. K. Jung, O. Y. Lee, 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] Myoung-Gyu Lee, Sung-Joon Kim, 2008, Implicit finite element formulations for multi-phase transformation in high carbon steel, Int. J. Plast., 24 December 2008.
- [6] Andre Pineau, Stephen D. Antolovich, 2009, High temperature fatigue of nickel-base superalloys - A review with special emphasis on deformation modes and oxidation, Eng. Fail. Anal., 31 January 2009.
- [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., 1 April 2009.