

# 고탄소강의 구상화속도에 미치는 초기 미세조직, 냉간압연 및 온도의 영향

김준호<sup>1</sup> · 하태권<sup>#</sup>

## Effect of Initial Microstructure, Cold Rolling and Temperature on the Spheroidization Rate of Cementite in High Carbon Steel

J. H. Kim, T. K. Ha

(Received April 4, 2013 / Revised May 22, 2013 / Accepted May 23, 2013)

### Abstract

The spheroidization behavior of cementite in a SK85 high carbon steel was investigated in this study. Fine and coarse pearlite microstructures were obtained by appropriate heat treatments according to the TTT diagram of SK85 high carbon steel. Hot rolled plates of SK85 steel were austenitized at 800°C for 2 hrs and then put directly into a salt bath at either 570°C or 670°C to obtain a fine pearlite (FP) structure and a coarse pearlite (CP) structure, respectively. Cold rolling was subsequently conducted on those specimens with reduction ratios from 0.2 to 0.4. Spheroidization heat treatments were conducted at the subcritical temperatures of 600 and 720°C for 1 to 32 hrs to elucidate the effect of initial microstructures, heat treatment temperature, and cold reduction ratios on the cementite spheroidization rate. Spheroidization proceeded with fragmentation of cementite plates, spheroidization of the cementite platelets, and coarsening consecutively. Mechanical fragmentation of cementite by cold rolling expedited the rate of spheroidization. The spheroidization rate of FP was much more rapid than that of CP and the spheroidization rate increased with increases in the cold reduction ratio.

**Key Words** : High Carbon Steel, SK85, Cementite, Spheroidization Rate, Cold Rolling, Annealing Temperature

### 1. 서 론

고탄소 박판강은 자동차, 기계, 공구 등 부품산업의 핵심소재로서 기술경쟁이 치열하고, 성장가능성이 높아 이의 제조기술은 국내 제조업의 경쟁력 강화라는 측면에서 반드시 확보하여야 할 기반기술이다. 고탄소강은 일반적으로 탄소함량이 0.3~1.2% 범위의 강을 말한다. 고탄소강 판재를 이용한 부품의 제조공정을 살펴보면 먼저, 철강업체에서 열연강판을 제조하고 재압연업체에서 산세, 구상화소둔 및 냉간압연을 행한 후 가공업체

에서 블랭킹 등의 방법으로 부품을 가공하여 열처리, 도금 등을 거쳐 최종적인 부품으로 조립하게 된다.

구상화 열처리란 페라이트/펄라이트 조직 혹은 펄라이트 조직의 소재가 장시간의 열처리에 의해 페라이트 기지에 탄소가 확산하여 열역학적으로 가장 안정한 구형의 탄화물로 성장하는 것을 일컫는 용어이다. 이러한 미세조직은 강에서 가장 안정화된 조직이며, 충분한 탄소의 확산반응을 가능하게 하는 높은 온도와 오랜 가열시간에 의해서 생성된다[1~3]. 다시 말해서 페라이트 기지에

1. 강릉원주대 신소재공학과

# Corresponding author : Department of Advanced Metals and Materials Engineering, Gangneung-Wonju National University, E-mail: tkha@gwnu.ac.kr

균일하게 분포된 구상화된 Fe<sub>3</sub>C 입자를 생성하여 연성이 향상된 미세조직으로 바뀌게 되는 것이다. 고탄소강 판재의 경우 최종제품으로 제조하는 과정에서 가공성을 향상시킬 목적으로 펄라이트의 미세화와 함께 미세구상화를 위한 열처리를 행하게 되는 것이다.

한편, 선진국에서는 SK85급의 미세구상화 강을 제조 판매하고 있어 이 분야에 대한 조속한 기술 개발과 함께 미세 구상화를 이용한 신제품 개발이 시급히 이루어져야 할 상황이다. 본 연구에서는 SK85 고탄소강 열연강판의 구상화 속도에 미치는 초기 미세구조와 냉간압하율의 영향에 대하여 체계적으로 규명하고자 하였다. 이를 위하여 SK85 고탄소강 열연판에 대하여 2단 열처리를 통해 미세한 펄라이트와 조대한 펄라이트 조직을 가지도록 하였고, 이어서 압하율을 20~40%로 변화시켜 냉간압연 한 후 600°C와 720°C에서의 구상화 속도를 측정하였다. 구상화 속도는 구상화 열처리 시간에 따른 구상화 분율을 측정함으로써 얻을 수 있었다. 구상화의 진행에 따른 경도의 변화를 측정하였고 인장시험을 통해 얻은 기계적 특성의 변화도 함께 비교하였다.



Fig. 1 Initial microstructure of hot-rolled SK85 sheet used in this study

## 2. 실험 방법

### 2.1 SK85 고탄소강 판재 및 열처리

본 연구에 사용된 고탄소강 판재는 POSCO(주)에서 생산하고 있는 SK85 규격으로 화학적 조성은 Table 1에 정리한 것과 같이 무게분율로 0.83C, 0.2Si, 0.43Mn, 0.008P 그리고 0.001S 였다. 소재는 열간압연된 상태로 제공되었으며 초기 두께는 4mm 이었다. 초기 미세조직은 열간압연 후 냉각에 의해

Table 1 Chemical compositions of SK85 steel used in this study(Wt.%)

C	Si	Mn	P	S	Fe
0.83	0.2	0.43	0.008	0.001	Bal.

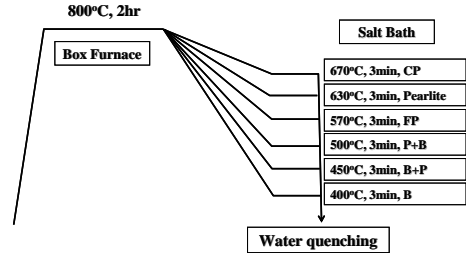


Fig. 2 Schematic illustration of heat treatment for various microstructures

매우 불규칙하였으며 Fig. 1과 같이 대체적으로 베이나이트에 가까운 조직이었다. 이 열연판재를 이용하여 다양한 미세조직을 얻기 위한 열처리를 수행하였다. Fig. 2에 나타낸 것과 같이, 오스테나이트화를 위하여 800°C에서 두 시간 동안 열처리 한 후, 미리 온도를 670, 630, 570, 500, 450, 그리고 400°C로 유지시킨 염욕에 바로 투입하여 3분간 열처리하고 수냉함으로써 조대한 펄라이트, 미세한 펄라이트, 펄라이트와 베이나이트의 혼합조직, 그리고 베이나이트의 다양한 미세조직을 얻을 수 있었다. 이때 사용한 염욕의 조성은 25NaNO<sub>3</sub>+25KCl+50Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>였다.

### 2.2 냉간압연 및 구상화 열처리

본 연구에서는 위의 다양한 미세조직들 중 구상화에 가장 효율적인 것으로 예상되는 미세한 펄라이트 조직을 선택하여 구상화 속도에 미치는 냉간압하율의 효과를 정량적으로 알아보려고 하였고, 초기 미세조직이 구상화에 미치는 영향을 알아보기 위하여 조대한 펄라이트 조직에 대하여도 구상화 속도를 측정하였다.

미세한 펄라이트와 조대한 펄라이트 조직의 판재를 이용하여 냉간압하율이 구상화 속도에 미치는 영향을 정량적으로 조사하기 위하여 열처리를 통해 미세한 펄라이트와 조대한 펄라이트 조직을 가진 판재를 얻고 이를 중탕한 염산수용액에서 산세한 후 상온에서 압하율 20, 30, 40%로 냉간압연을 행하였다.

구상화 속도에 미치는 온도의 영향 또한 매우 중요한 변수 중 하나이므로 본 연구에서는 구상화 온도를 600°C와 720°C로 변화시키고, 판재의 대량생산에 적합한 열처리 방법인  $A_{cm}$  온도 직하에서 행하는 subcritical annealing 방법을 채택하여 진행하였다. 구상화 시간은 1, 2, 4, 8, 16, 32 시간으로 하였으며 각각의 구상화 소둔 처리 후에는 수냉하였고 SEM을 이용하여 미세조직을 관찰하였다. 구상화 열처리 후 미세조직관찰을 위하여 시편 준비를 한 후 나이트알 용액을 이용하여 에칭한 후 광학현미경과 SEM을 이용하여 탄화물의 분포를 관찰하였다.

### 2.3 구상화분율 측정

구상화 분율을 측정하고자 구상화 소둔 후 수냉한 시편에서 얻은 SEM 사진을 이용하여 세멘타이트의 형상비(aspect ratio), 단위면적당의 개수 및 크기를 측정하였다. 이를 위하여 TDI PLUS 5.0 영상분석 프로그램을 이용하였다. 분절된 세멘타이트 입자의 크기 및 형상비는 입자를 타원형으로 가정하여 계산하였다. 본 연구에서는 구상화 분율을 구상화된 세멘타이트의 전체 세멘타이트에 대한 분율로 정의하고[4], 형상비 1:5 이하면 구상화가 완료된 것으로 간주하였다[5, 6]. 본 연구에서는 각각의 구상화 소둔 조건으로 처리한 시편에서 무작위로 5000배의 배율로 10장의 사진을 영상분석 하여 분율 및 입자의 크기, 개수를 각각 측정하였다.

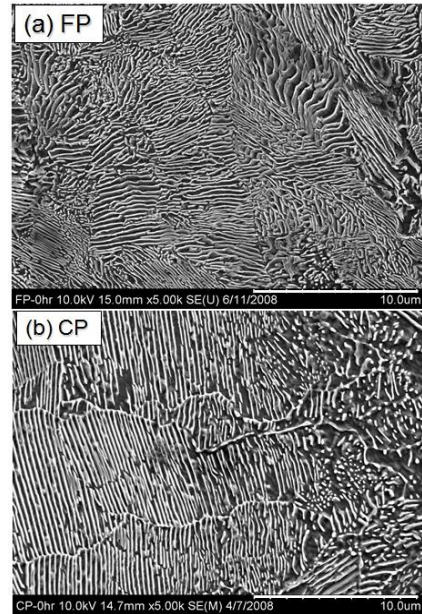
### 2.4 기계적 특성 평가

구상화 열처리 후 구상화가 진행됨에 따른 기계적 성질의 변화를 관찰하고자 경도와 인장시험을 실시하였다. 경도시험의 경우 Vickers 경도시험기를 이용하여 980.7mN의 하중을 부과하여 각각의 구상화 조건에 대하여 10번씩 측정하여 평균치를 계산하였다. 인장시험의 경우에는 미세한 펄라이트 조직을 가진 시편을 구상화 처리한 후 각각의 조건에서 세 개씩의 판상시편을 제작하여 상온에서 수행하였다. 표점거리는 27mm였고 변형 속도는  $10^{-4} s^{-1}$ 로 일정하게 하였다. 인장시험을 통하여 항복강도 및 인장강도를 측정하여 구상화 분율과의 관계를 알아보하고자 하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 열처리 미세조직

Fig. 3은 800°C에서 두 시간 동안 오스테나이트



**Fig. 3** Microstructures obtained by heat treatment for (a) fine pearlite (FP) and coarse pearlite (CP)

화 처리 한 후, 미리 온도를 670와 570°C로 유지시킨 염욕에 바로 투입하여 3분간 열처리하고 수냉한 후 SEM을 이용하여 미세조직을 관찰한 결과를 나타낸 것이다. 열처리 온도가 높을수록 라멜라 colony의 크기가 커지고 층간 간격이 넓어지는 것을 알 수 있다. 미세한 펄라이트 (FP)의 경우 colony 크기가  $8.65 \pm 0.08 \mu m$ , 라멜라 층간간격은  $0.19 \pm 0.05 \mu m$ 인 것으로 나타났고, 조대한 펄라이트 (CP)의 경우에는 각각  $10.58 \pm 0.07 \mu m$ 와  $0.23 \pm 0.02 \mu m$ 로 측정되었다.

이와 함께 오스테나이트화 처리 후 염욕에서의 열처리 온도가 낮아지면서 비평형 상인 베이나이트의 양이 증가하고 있는 것을 확인하였는데, 베이나이트나 마르텐사이트의 양이 많아지면 차후 구상화 소둔에 있어서 탄화물의 석출이 일어나야 하므로 구상화 시간이 급격히 늘어나게 되어 현장에서의 적용은 어려워지므로 펄라이트 상태에서 구상화를 진행하는 것이 바람직하다. 또한 앞서 언급한 바와 같이 구상화는 판상의 세멘타이트에 분절이 일어나서 구형으로 전환되고 이어 구형의 세멘타이트가 조대화되어 가는 과정이므로 펄라이트 내 판상의 세멘타이트에 분절이 활발히 생기는 것이 구상화 속도를 높여주는 결과가 될 것으로 판단된다.

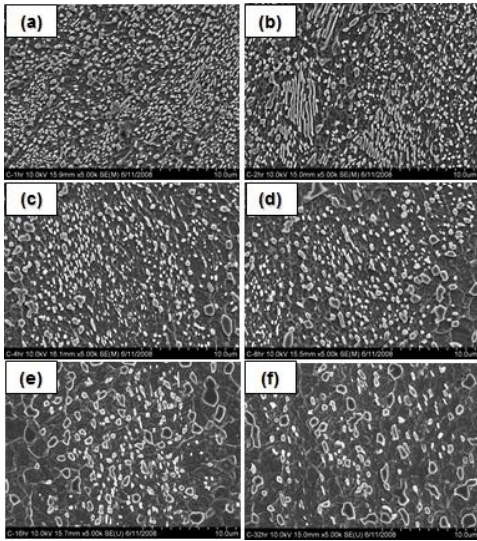


Fig. 4 Evolution of cementites during spheroidization heat treatment conducted on FP specimen at 720°C for (a) 1, (b) 2, (c) 4, (d) 8, (e) 16, and (f) 32 hrs

### 3.2 초기 미세조직에 따른 구상화 거동

Fig. 4는 FP 조직을 가지는 시편의 720°C에서 구상화시간에 따른 세멘타이트 형상변화를 정리한 것이다. 구상화 시간이 길어짐에 따라 세멘타이트 판에 분절이 생기고 형태도 구형으로 바뀌다가 조대화되는 양상을 보인다. 그러나 16시간 동안 구상화 소둔을 한 경우에도 매우 긴 세멘타이트가 그대로 존재하기도 한다. 보다 정량적으로 분석하기 위하여 구상화 시간에 따른 단위면적당 입자의 개수와 평균입자크기 그리고 평균 형상비를 계산한 결과, FP 및 CP 모두 단위면적당 입자의 수가 한 시간에서 최대값을 보인 후 단조감소하는 경향을 보였다. 구상화의 진행이 분절(fragmentation), 구형화, 그리고 조대화로 이어지는 과정에서 비교적 짧은 시간인 한 시간 안에 분절이 일어나서 구형화가 이미 진행되고 있으며 한 시간에서 분절이 일어나 최대값을 보이고 그 이후에 구형화와 조대화가 진행되면서 단위면적당 입자 개수가 급격히 줄어드는 양상을 보였다.

Fig. 5는 미세한 펄라이트와 조대한 펄라이트 조직의 720°C에서의 구상화 시간에 따른 구상화 분율을 표시한 것이다. 기준 형상비는 1:5였고, 전체적으로 미세한 펄라이트의 구상화 속도가 빠른 것으로 나타났다.

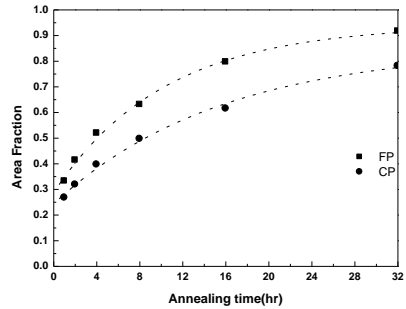


Fig. 5 Fraction of spheroidization as a function of annealing time obtained at 720°C for FP and CP specimens

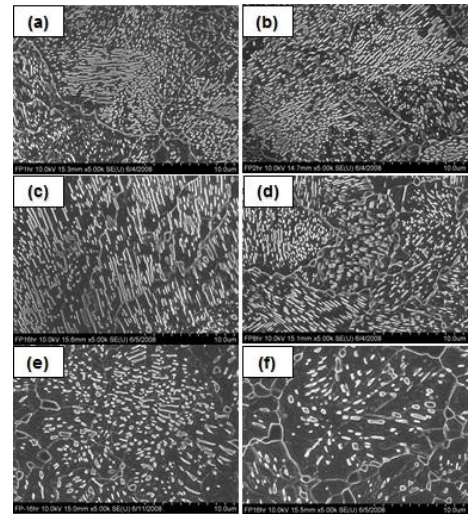


Fig. 6 Evolution of cementites during spheroidization heat treatment conducted at 720°C for (a) 1, (b) 2, (c) 4, (d) 8, (e) 16, and (f) 32 hrs on FP specimens cold-rolled at room temperature by 40% reduction

### 3.3 냉간압연의 영향

Fig. 6에 미세한 펄라이트(FP) 조직의 판재를 40%의 압하율로 냉간압연한 후 720°C에서 1시간에서 36시간까지 구상화 소둔 열처리를 행한 후 미세조직의 변화를 나타내었다. Fig. 4와 비교하면 1시간에서부터 눈에 띄게 구상화가 진행되고 있으며 열처리 시간이 길어짐에 따라 세멘타이트의 조대화가 일어나고 있음을 알 수 있다. 이러한 경향은 냉간압하율이 20%에서 40%로 증가함에 따라 두드러졌으며, FP는 물론 CP의 경우에도 비슷한 경향을 보였다.



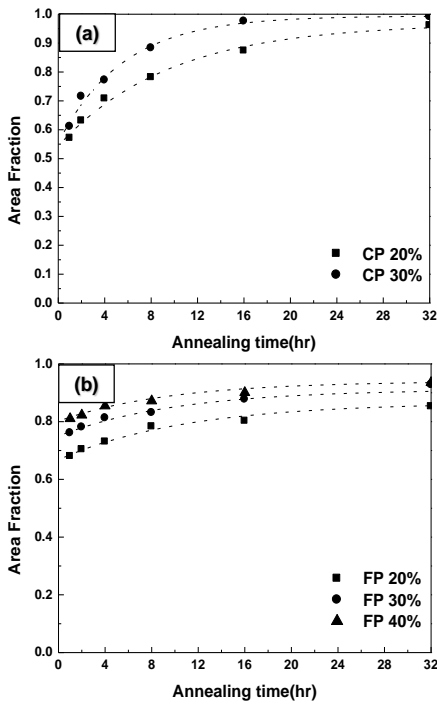


Fig. 7 Fraction of spheroidization as a function of annealing time obtained at 720°C for (a) CP and (b) FP specimens cold-rolled at room temperature by various reduction ratios

Fig. 7은 압하량을 20~40%까지 변화하며 냉간압연한 CP와 FP 시편에 대한 720°C에서의 구상화분율을 측정 한 결과를 나타낸 것이다. 냉간압하율에 상관없이 구상화 소둔 열처리 시간이 길어짐에 따라 입자의 조대화가 관찰되었고 부위별로 아직 분절화가 이루어 지지 않는 탄화물도 일부 관찰되었으나, Fig. 6에서와 같이 냉간압하율이 커질수록 구상화 초기부터 미세한 입자들이 많이 관찰됨을 명확히 알 수 있었고 냉간압하율이 큰 FP 시편의 경우 8시간 정도에서 구상화분율이 포화값에 도달하였고 그 이후에는 조대화가 지배적으로 일어나는 것으로 나타났다. 냉간압연에 의해 관찰의 세멘타이트가 기계적으로 절단되어 구상화 열처리가 진행되는 동안 보다 쉽게 분절화 및 구형화 단계로 진행되고 있음을 쉽게 알 수 있다. 하지만 Fig. 7(a)의 CP 시편의 경우에는 구상화분율이 포화되는 시점이 16시간으로 나타나 초기 미세조직이 냉간압하율과 함께 구상화 속도에 민감하게 영향을 미치는 것으로 나타났다.

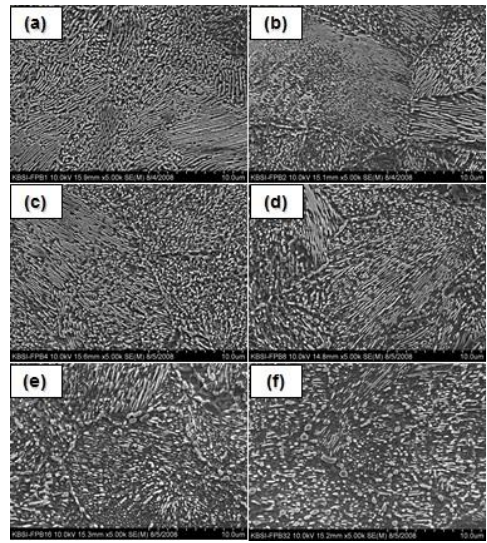


Fig. 8 Evolution of cementites during spheroidization heat treatment conducted at 600°C for (a) 1, (b) 2, (c) 4, (d) 8, (e) 16, and (f) 32 hrs on FP specimens cold-rolled at room temperature by 30% reduction

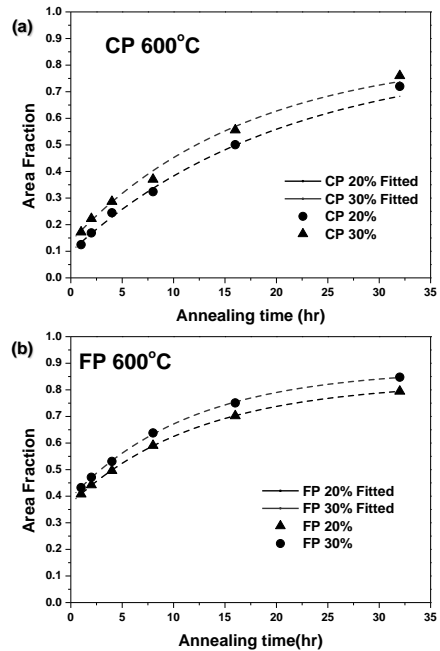
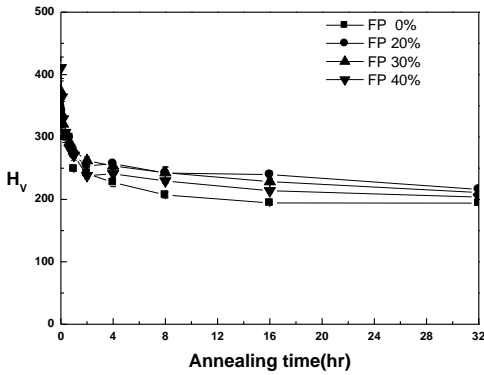


Fig. 9 Fraction of spheroidization as a function of annealing time obtained at 600°C for (a) CP and (b) FP specimens cold-rolled at room temperature by various reduction ratios



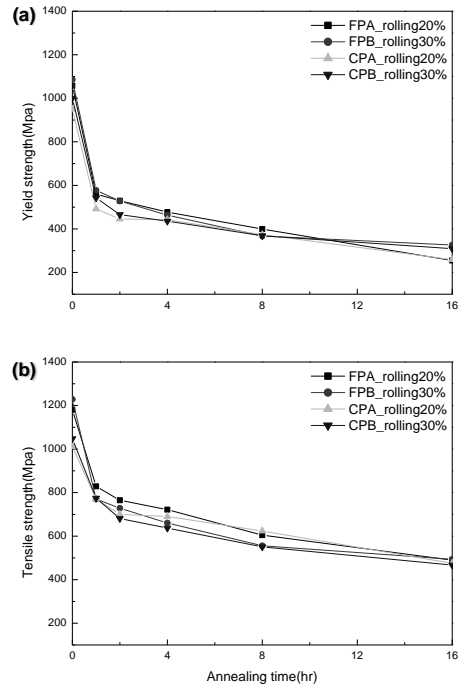
**Fig.10** Effect of annealing time and cold reduction on the hardness of FP specimens obtained from heat treatment at 720°C

### 3.4 구상화 온도의 영향

Fig. 8에 미세한 펄라이트(FP) 조직의 판재를 30%의 압하율로 냉간압연한 후 600°C에서 1시간에서 36시간까지 구상화 소둔 열처리를 행한 후 미세조직의 변화를 나타내었다. Fig. 6과 비교하면 16시간까지도 분절이 일어나지 않은 세멘타이트가 관찰될 정도로 구상화 속도가 느려진 것을 알 수 있다. 이러한 경향은 냉간압하율과 초기 미세조직에 상관없이 관찰되었으며 구상화 분율을 측정 한 결과인 Fig. 9에서도 확인할 수 있었다. Fig. 6의 결과와는 다르게 구상화시간이 증가함에 따라 32시간까지도 지속적으로 구상화 분율이 증가하고 있는 것을 알 수 있고, 그 값도 CP에서는 0.8에 미치지 못하고 FP에서는 0.8 정도로 낮았다. 하지만 냉간압하율이 증가함에 따라 구상화 분율의 증가가 관찰되기는 하였으나 그 차이가 크지 않았다.

### 3.5 구상화재의 기계적 특성

냉간압연한 후 구상화 열처리 한 FP시편의 경도변화를 Fig. 10에 나타내었다. 냉간압연에 의해 초기에 경도가 높게 나타났지만 구상화 열처리가 진행되면서 급격히 낮아져 약 두 시간 이후에는 페라이트 결정립 성장에 의한 것으로 판단되는[8] 경미한 정도의 저하만 관찰되었다. 앞서 구상화 완료시점이 8시간 정도라고 판단한 바 있는데 경도시험결과를 보고 판단하여 보면 2시간이면 냉간압연재의 구상화가 완료된다고 할 수 있다. Fig. 11의 인장시험결과에서 얻은 강도의 경우 경도시험결과와 비슷한 경향을 보이고 있는데, 구상화가



**Fig.11** Effect of annealing time and cold reduction on (a) yield and (b) tensile strength of FP specimens obtained from heat treatment at 720°C

진행됨에 따라 경도도 감소하지만 인장강도의 감소가 더 두드러짐을 알 수 있다.

## 4. 결론

(1) SK85 고탄소강의 TTT diagram을 근거로 800°C에서 두 시간 오스테나이트화 처리 한 후, 670과 570°C로 유지시킨 염욕에 바로 투입하여 3분간 열처리하고 수냉함으로써 각각 조대한 펄라이트와 미세한 펄라이트 조직을 얻었다. 열처리 온도가 높을수록 라멜라 크기가 커지고 층간 간격이 넓어지는 것을 알 수 있었다.

(2) 미세한 펄라이트(FP) 조직과 조대한 펄라이트(CP) 조직을 가지도록 열처리한 SK85 고탄소강에 대하여 600°C와 720°C에서 1시간에서 36시간까지 구상화 소둔 열처리를 진행한 결과 FP의 구상화속도가 CP에 비하여 빠른 것으로 나뉘고, 구상화 시간이 길어짐에 따라 세멘타이트 판에 분절이 생기고 형태도 구형으로 바뀌다가 조대화되는 양상을 보였다.

(3) 냉간압연한 판재에 대한 구상화 소둔 열처

리한 결과 냉간압하율에 상관없이 구상화 소둔 열처리 시간이 길어짐에 따라 입자의 조대화가 관찰되었다. 그러나 냉간압하율이 클수록 구상화 초기부터 미세한 입자들이 많이 관찰되었다.

(4) 냉간압연한 FP 시편의 경우 720°C에서 8시간 정도에서 구상화가 거의 완료되고 그 이후에는 조대화가 지배적으로 일어나는 것으로 나타났다. 한편, CP 시편의 경우 구상화 완료시점이 보다 늦어져 16시간으로 나타났다.

(5) 구상화 온도 및 초기 미세조직과 상관없이 냉간압하율이 증가함에 따라 포화 구상화 분율과 구상화 속도가 증가하는 경향을 보였다. 냉간압연에 의해 판상의 세멘타이트가 기계적으로 절단되어 구상화 열처리가 진행되는 동안 보다 쉽게 분절화 및 구형화 단계로 진행되고 있음을 알 수 있었다.

## 후 기

본 연구는 (주)POSCO의 공모과제를 통한 연구비 지원에 의해 이루어 졌으며 이에 감사드립니다.

## REFERENCES

[1] Y. L. Tian, R. W. Kraft, 1987, Mechanisms of

Pearlite Spheroidization, Metall. Trans. A, Vol. 18, No. 8, pp. 1403~1414.

[2] E. Werner, 1989, The Spheroidization of Thin Plate, Acta Metall., Vol. 37, No. 7, pp. 2047~2053.

[3] S. A. Hackney, 1991, On the Linear Instability of the Rayleigh Spheroidization Process, Scr. Metall., Vol. 25, No. 4, pp. 799~804.

[4] C. Chou, P. W. Kao, G. H. Cheng, 1986, Accelerated Spheroidization of Hypoeutectoid Steel by the Decomposition of Supercooled Austenite, J. Mater. Sci., Vol. 21, No. 9, pp. 3339~3344.

[5] S. Chattopadhyay, C. M. Sellars, 1982, Kinetics of Pearlite Spheroidization during Static Annealing and during Hot Deformation, Acta Mater., Vol. 30, No. 1, pp. 157~170.

[6] U. G. Gang, J. C. Lee, W. J. Nan, 2009, Effect of Prior Microstructures on the Behavior of Cementite Particles during Subcritical Annealing of Medium Carbon Steels, Met. Mater. Int., Vol. 15, No. 5, pp. 719~725.

[7] S. E. Nam, D. Y. Lee, 1987, Accelerated Spheroidization of Cementite in High-carbon Steel Wires by Drawing at Elevated Temperatures, J. Mater. Sci., Vol. 22, No. 7, pp. 2319~2326.