

## 페라이트-펄라이트 조직 아공석강의 강도와 연성에 미치는 미세조직적 인자의 영향

이상인\* · 강준영\* · 이상윤\*\* · 황병철\*<sup>†</sup>

\*서울과학기술대학교 신소재공학과, \*\*포스코 기술연구원 포항연구소

### Effect of Microstructural Factors on Strength and Ductility in Hypoeutectoid Steels with Ferrite-Pearlite Structure

Sang-In Lee\*, Jun-Young Kang\*, Sang-Yoon Lee\*\*, Byoungchul Hwang\*<sup>†</sup>

Department of Materials Science and Engineering

\*Seoul National University of Science and Technology, Seoul 139-743, Korea

\*\*Pohang Research Lab, Technical Research Laboratories, POSCO, Pohang 790-785, Korea

**Abstract** This article presents a study on the tensile properties of hypoeutectoid steels with different ferrite-pearlite microstructures. Nine kinds of hypoeutectoid steel specimens were fabricated by varying carbon content and isothermal transformation temperature. The microstructural factors such as ferrite & pearlite fraction, interlamellar spacing, and cementite thickness were quantitatively measured and then tensile tests were carried out on the specimens in order to investigate the correlation of the microstructural factors with strength and ductility. The pearlite volume fraction usually increased with decreasing transformation temperature, while the pearlite interlamellar spacing and cementite thickness decreased mostly with decreasing transformation temperature, irrespective of carbon content. The tensile test results showed that the yield and tensile strengths of all the steel specimens increased and their ductility was also improved as the transformation temperature decreased. For the steel specimens investigated, the difference in the transformation temperature dependence of strength and ductility could be explained by the fact that the variation in pearlite fraction with transformation temperature noticeably affected various microstructural factors such as pearlite interlamellar spacing and cementite thickness associated with pearlite fracture mechanism such as void initiation, cementite necking, and cracking.

(Received December 17, 2015; Revised December 24, 2015; Accepted December 30, 2015)

**Key words** : Hypoeutectoid steels, Ferrite-pearlite structure, Microstructural factor, Strength, Ductility

### 1. 서 론

과거 수십 년 동안 많은 연구자들에 의해 아공석 범위의 탄소강의 기계적 성질에 미치는 미세조직적 인자의 영향에 대한 연구가 이루어져 왔다[1-13]. 초석 페라이트와 펄라이트의 미세조직을 갖는 탄소강의 경우 탄소 및 기타 합금원소와 더불어 결정립 크기, 펄라이트 층상간격(interlamellar spacing), 시멘타이트 두께(cementite thickness), 펄라이트 노듈 및 콜로니(nodule and colony) 크기 등의 미세조직적 인자가 인장 성질에 큰 영향을 준다. 위의 미세조직적 인자들은 열처리 조건에 의해 변화될 수 있는데,

일반적으로 오스테나이트화 온도를 변화시키면 오스테나이트 결정립 크기, 초석 페라이트 분율 등이 동시에 변화되며, 변태온도를 변화시키면 펄라이트 층상간격 및 시멘타이트 두께가 변화되면서 펄라이트 분율과 콜로니 크기가 동시에 변화되어 이들 간의 상호적인 영향을 이해하는 것이 중요하다.

Bae는[10] 열처리 및 신선 가공에 따른 미세조직적 인자의 변화를 분석하여 인장 성질에 미치는 영향을 보고하였고, Nakase 등은[3] 다양한 합금원소를 가진 탄소강에 대해 열처리 조건을 달리하여 기계적 성질에 미치는 미세조직적 인자의 영향을 분석하였다. 그 결과 펄라이트 층상간격의 미세화는 항복

<sup>†</sup>Corresponding author. E-mail : bhwang@seoultech.ac.kr  
Copyright © The Korean Society for Heat Treatment

강도 및 인장 강도를 향상시키며, 동시에 연성도 증가시키는 것으로 나타났다. 한편 Sim 등[8]은 페라이트-펄라이트의 미세조직을 갖는 아공석강의 연성에 미치는 펄라이트 층상간격 및 시멘타이트 두께에 대한 영향을 연구하였는데, 이들 연구에 의하면 특정 펄라이트 층상간격 및 시멘타이트 두께에서 최대 연성이 나타났다. 그러나 다른 연구 결과[14]에 의하면 펄라이트 층상간격의 감소는 미세 펄라이트가 소성변형을 저지하는 경향이 크기 때문에 강도는 증가되지만 반대로 연성이 감소된다. 아직까지 아공석강의 인장 특성에 미치는 미세조직적 인자의 영향에 대해서는 모호한 점이 많으며, 인장 특성과의 상관관계에 대한 체계적인 연구는 다소 부족한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 아공석 범위에 있는 3 종류의 탄소강에 대하여 변태온도를 변화시켜 다양한 크기의 층상간격, 시멘타이트 두께 및 펄라이트 분율을 갖는 시편들을 먼저 제조한 후 미세조직을 정량적으로 분석하고, 인장 시험을 실시하여 페라이트-펄라이트 조직을 갖는 아공석강의 강도 및 연성에 미치는 미세조직적 인자의 영향에 대해 구체적으로 분석하였다.

## 2. 실험 방법

본 연구에서 사용된 강재의 화학조성을 Table 1에 나타내었으며, 탄소 함량에 따라 편의상 ‘20C’, ‘30C’, 그리고 ‘45C’로 표기하였다. 이들 강재는 50 kg 단위로 진공용해한 후 1,200°C에서 오스테나이트화 처리 후 900°C 이상에서 15 mm로 열간 압연한 판재이다. 이 판재들을 950°C에서 10분간 오스테나이트화 처리 후 550°C, 600°C, 650°C에서 10분간 등온 변태(isothermal transformation)를 실시하여 각 강재 별로 층상간격이 다른 3종류의 시편을 제조하였다. 제조된 시편의 미세조직은 압연 판재의 옆면을 연마하고 4% 나이탈 용액으로 에칭한 후 광학현미경과 주사전자현미경(SEM, scanning

electron microscope)으로 관찰하였다. 또한 영상분석기(image analyzer)를 사용하여 미세조직 내에 형성된 초석 페라이트와 펄라이트의 분율을 측정하였다. 시멘타이트 두께는 측정된 펄라이트 분율과 층상간격을 아래 식 (1)에 대입하여 계산하였다[2].

$$t_c = \frac{S_o \cdot 0.15(\text{wt.}\%C)}{V_p} \quad (1)$$

여기서  $t_c$ 는 시멘타이트 두께,  $S_o$ 는 펄라이트 층상간격,  $V_p$ 는 측정된 펄라이트 분율, (wt.%C)는 시편의 탄소 함량을 의미한다.

인장 시험은 ASTM E8 표준시험법에 따라 시편의 압연 방향(longitudinal direction)으로 표점거리 25 mm, 직경 6.25 mm의 subsize 판상 시편으로 가공하고, 10톤 용량의 Instron 시험기를 사용하여 1.5 mm/min의 cross-head 속도로 상온에서 인장 시험 하였다. 인장 시험시 불연속 항복 거동을 나타내는 시편들의 경우 하부 항복점을 항복 강도로 사용하였고, 연속 항복 거동을 나타내는 시편들의 경우 응력-변형을 곡선으로부터 0.2% offset한 유동응력을 항복 강도로 하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 미세조직

본 연구에서 오스테나이트화 처리 후 다른 등온 변태온도(550°C, 600°C, 650°C)에서 열처리된 시편들의 광학현미경 및 SEM 조직 사진들을 Fig. 1과 2에 각각 나타내었다. Fig. 1은 변태온도에 따른 각 시편들의 미세조직 사진을 나타내고 있는데, 탄소 함량에 관계없이 모든 시편의 미세조직은 초석 페라이트-펄라이트 조직이며 압연 방향에 따라 다소 연신된 층상구조를 나타내었다. 또한 변태온도에 관계없이 탄소 함량이 높을수록 펄라이트 분율이 증가하며, 같은 탄소 함량에서 변태온도가 낮아질수록 펄라이트

Table 1. Chemical composition of the hypoeutectoid steels (wt. %)

| Steel | C    | Mn   | Si   | Al   | Ti   | V    | Fe   |
|-------|------|------|------|------|------|------|------|
| 20C   | 0.20 | 0.40 | 0.05 | 0.03 | -    | -    | Bal. |
| 30C   | 0.30 | 1.40 | 0.20 | 0.03 | 0.01 | -    | Bal. |
| 45C   | 0.45 | 1.20 | 0.20 | 0.03 | 0.01 | 0.05 | Bal. |

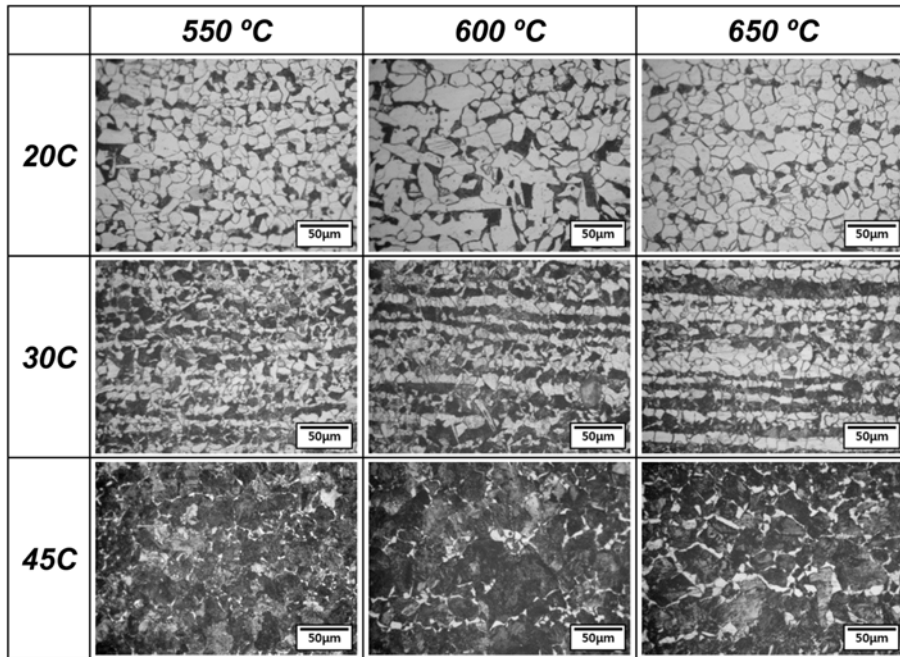


Fig. 1. Optical micrographs of the 20C, 30C, and 45C steel specimens isothermally transformed at 550°C, 600°C, and 650°C after austenitization heat treatment at 950°C.

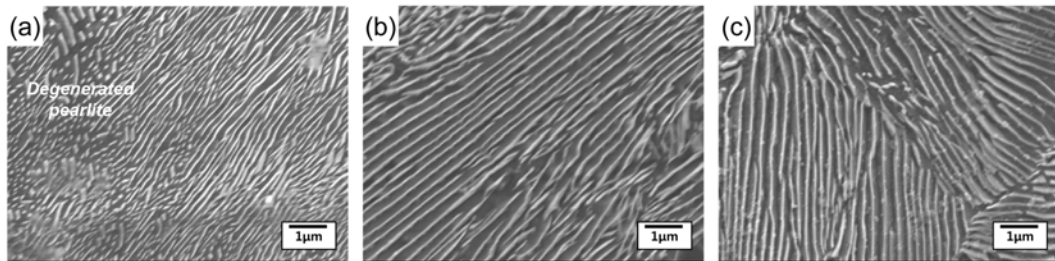


Fig. 2. SEM micrographs showing pearlite interlamellar spacing in the 45C steel specimens isothermally transformed at (a) 550°C, (b) 600°C, and (c) 650°C after austenitization heat treatment at 950°C.

분율이 다소 증가하였다[1,2,7,9,10,15]. Fig. 2는 변태온도에 따른 펄라이트 층상간격의 변화를 나타내고 있는데 변태온도가 낮아질수록 펄라이트 층상간격이 미세해지며, 낮은 변태온도에서 펄라이트 내에 일부 시멘타이트가 분절된 형태로 존재하였다[1,3,5,8-10,13,16-19].

변태온도에 따른 미세조직적 인자들의 정량적인 변화를 Fig. 3과 Table 2에 나타내었다. 탄소 함량에 관계없이 모든 시편에서 펄라이트 층상간격과 시멘타이트 두께 모두 변태온도가 낮아짐에 따라 감소하였다. 이는 펄라이트 성장 속도와 층상 간격이 일정한

정상상태에서 Zener-Hillert 모델을 기초로 펄라이트 층상간격의 변태온도 의존성에 대해 설명할 수 있다 [20-22]. Zener-Hillert 모델에 의하면, 펄라이트의 성장 속도는 식 (2)과 같이 나타낼 수 있다.

$$v = \frac{D}{a} \cdot \frac{\lambda^2}{\lambda^\alpha \lambda^c} \cdot \frac{C_e^{\gamma\alpha} - C_e^{\gamma c}}{C^c - C^\alpha} \cdot \frac{1}{\lambda} \left[ 1 - \frac{\lambda^c}{\lambda} \right] \quad (2)$$

여기서  $D$ 는 오스테나이트에서 탄소의 체적 확산 계수,  $a$ 는 0.72값의 기하학적 상수,  $\lambda$ 는 펄라이트 층상간격,  $\lambda^\alpha$ ,  $\lambda^c$ 는 페라이트와 시멘타이트의 두께,  $C_e^{\gamma\alpha}$ ,  $C_e^{\gamma c}$ 는 페라이트와 시멘타이트의 앞 부분에

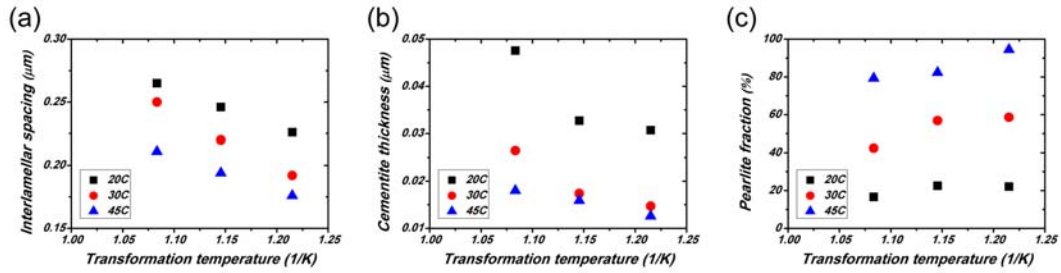


Fig. 3. Variation of (a) interlamellar spacing, (b) cementite thickness, and (c) pearlite volume fraction with transformation temperature in the 20C, 30C, and 45C steel specimens.

Table 2. Microstructural factors of the hypoeutectoid steel specimens

| Specimen | Transformation temperature, °C | Interlamellar spacing, μm | Cementite thickness, μm | Pearlite fraction, % |
|----------|--------------------------------|---------------------------|-------------------------|----------------------|
| 20C      | 550                            | 0.226                     | 0.0307                  | 22.1                 |
|          | 600                            | 0.246                     | 0.0327                  | 22.6                 |
|          | 650                            | 0.256                     | 0.0476                  | 16.7                 |
| 30C      | 550                            | 0.192                     | 0.0147                  | 58.6                 |
|          | 600                            | 0.220                     | 0.0174                  | 56.8                 |
|          | 650                            | 0.250                     | 0.0265                  | 42.5                 |
| 45C      | 550                            | 0.176                     | 0.0126                  | 94.5                 |
|          | 600                            | 0.194                     | 0.0159                  | 82.3                 |
|          | 650                            | 0.211                     | 0.0180                  | 79.3                 |

존재하는 오스테나이트 내의 평형 탄소 농도,  $C^\alpha$ ,  $C^c$ 는 각각 페라이트와 시멘타이트 내의 탄소 농도, 그리고  $\lambda_c$ 은 성장 속도가 0일 때의 임계 층상간격이다. 위의 펄라이트 성장 속도 식의 고유해는 존재하지 않기 때문에 Zener [21]는 펄라이트 성장 속도가 최대일 때 펄라이트 층상간격이 안정화된다는 최대 속도 기준에 따라 식 (3) 및 (4)와 같이 임계 냉각속도,  $\lambda_c$ 와 과냉도의 관계식을 이용하여 식 (5)와 같은 관계식을 구하였다.

$$\lambda = 2\lambda_c \tag{3}$$

$$\lambda_c = \frac{2\sigma^{ac}T_E}{\Delta H_V \Delta T} \tag{4}$$

$$\lambda = 2\lambda_c = \frac{4\sigma^{ac}T_E}{\Delta H_V \Delta T} \tag{5}$$

여기서  $T_E$ 는 공석 온도,  $\Delta H_V$ 는 모상과 생성 상의 엔탈피 변화,  $\sigma^{ac}$ 는 페라이트와 시멘타이트 계면에서의 표면 에너지이다. 이때  $\Delta H_V$ 와  $\sigma^{ac}$ 는 비교

적 온도에 독립적이기 때문에, 식 (5)를 통해 펄라이트 층상간격과 과냉도는 반비례 관계임을 확인할 수 있다. 즉, 변태온도가 낮아짐에 따라 과냉도가 증가하기 때문에 펄라이트 층상간격이 작아지는 결과가 나타난다.

그러나 펄라이트 층상간격과 시멘타이트 두께의 변태온도 의존성은 시편에 따라 일부 차이를 나타낸다 (Fig. 3(a), (b)). 이는 펄라이트 성장 속도가 빠를수록 펄라이트 층상간격이 작아지는데, 탄소 함량이 증가하면 펄라이트 성장 속도가 빨라지기 때문에 동일한 변태온도에서 펄라이트 층상간격이 미세해진다. 또한 변태온도에 따른 펄라이트 분율의 변화를 보면 (Fig. 3(c)), 변태온도가 낮아질수록 펄라이트 분율이 증가하는 경향을 나타냈다. 이는 변태온도 변화에 따른 과냉도 차이에 의한 비평형적 펄라이트 변태로 설명될 수 있다. 일반적으로 이공석강이나 과공석강에서 오스테나이트가  $A_1$  온도 이하에서 등온 변태할 때, 일반적으로 펄라이트가 형성되기 전에 초석 페라이트나 초석 시멘타이트가 먼저 석출된다. 그러나 공

석 조성으로부터 벗어난 정도가 크지 않고 과냉도가 충분히 클 경우 비공석 조성의 오스테나이트가 직접 펄라이트로 변태하는 것도 가능하다[15]. 즉, 변태온도가 감소될수록 과냉도가 증가하여 초석 페라이트의 변태 없이 비공석 조성의 오스테나이트가 펄라이트로 변태되어 펄라이트 분율이 증가하게 된다. 이때 펄라이트 내의 탄소 함량은 Hultgren[23]의 외삽법에 의해 유추되는 결과와는 다르게 펄라이트 분율이 증가하면 펄라이트 내의 탄소 함량이 감소한다. 펄라이트 내의 탄소가 모두 시멘타이트 형성에 기여한다고 가정하면, 변태온도가 낮아서 펄라이트 분율이 증가되어 펄라이트 내의 탄소 함량이 감소될 경우 시멘타이트 분율이 감소하며, 이는 Fig. 2(a)에서 보듯이 분절된 형태의 시멘타이트로 나타난다. 이러한 분절된 시멘타이트를 가진 펄라이트를 불완전 펄라이트(degenerated pearlite)라 하며 일반적으로 연속적인 층상형 펄라이트와 상부 베이나이트 상의 중간 단계에서 형성되는 변태조직으로 보고되어 있다[24].

또한 변태온도에 따른 분율 변화 정도는 탄소 함량에 따라 차이를 나타내는데(Fig. 3(c), Table 2), 이는 본 연구에서 사용된 시편의 경우 탄소 함량 이외에 Mn, Si, Ti, V 등의 다른 합금 원소의 함량이 달라져 이들 전체 합금 원소에 의한 복합적인 영향으로 인해 변태온도 변화에 따른 펄라이트의 분율 변화 정도가 차이를 나타내기 때문이다.

### 3.2 인장 특성

본 연구에서 변태온도에 따라 제조된 다양한 시편들의 인장 시험 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 변태온도에 따른 항복 및 인장 강도의 결과를 보면(Fig. 4(a), (b)), 탄소 함량이 증가할수록 항복 및 인장

강도가 모두 증가하였지만 변태온도에 따른 각 시편의 강도 변화는 차이를 나타내었다. 20C 및 30C 시편의 경우 변태온도가 감소함에 따라 항복 및 인장 강도가 다소 증가하지만 그 변화가 작았다[3,6-8, 10,13,14,16,17,19]. 반면 45C 시편은 20C 및 30C 시편과 달리 변태온도가 감소함에 따라 항복 및 인장 강도가 뚜렷하게 증가하였다. 한편 변태온도에 따른 연성 변화를 보면(Fig. 4(c)), 모든 시편에서 변태온도가 낮아질수록 연성이 증가하는 동일한 결과를 나타내었지만[3,7,9,10,13,16,17,19], 탄소 함량에 따라 연성의 변화 정도가 약간의 차이를 보였다. 이러한 강도 및 연성 변화에 미치는 미세조직적 인자의 영향을 보다 구체적으로 알아보기 위해 펄라이트 층상간격, 시멘타이트 두께 및 펄라이트 분율에 따른 강도 및 연성의 변화를 Fig. 5와 6에 각각 나타내었다.

강도에 미치는 미세조직적 인자의 영향을 보면(Fig. 5), 20C와 30C 시편의 경우 45C 시편과는 달리 변태온도에 따른 미세조직적 인자의 변화에도 불구하고 강도의 변화가 상대적으로 작다. 이는 아공석강의 강도가 펄라이트 분율에 크게 의존하며, 이때 펄라이트 및 페라이트의 강도는 각각의 펄라이트 층상간격 또는 결정립 크기에 의해 결정되기 때문이다. 본 연구에서는 변태온도를 감소시켜 미세한 펄라이트 층상간격을 얻어 강도가 크게 향상될 것으로 기대하였으나 펄라이트 분율이 20C와 30C 시편의 경우 변태온도에 따라 18~23%, 43~59%로 45C에 비해 상대적으로 작기 때문에 강도에 미치는 펄라이트 층상간격 및 시멘타이트 두께의 영향이 적게 나타난 것으로 판단된다. 반면 45C 시편의 경우 80% 이상의 높은 펄라이트 분율로 인해 펄라이트 층상간격 및 시멘타이트 두께의 변화가 강도에 큰 영향을 주었다.

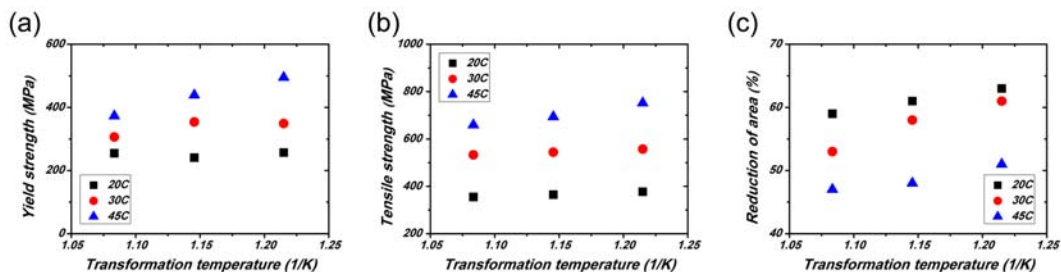


Fig. 4. (a) Yield strength, (b) tensile strength, and (c) reduction of area of the 20C, 30C, and 45C steel specimens as a function of transformation temperature.

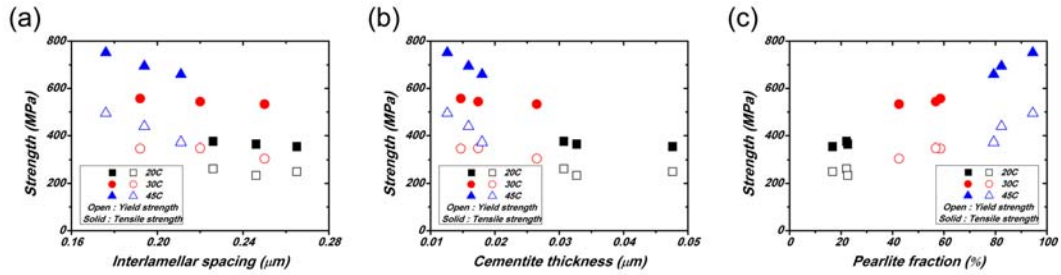


Fig. 5. Variation of yield and tensile strengths with (a) interlamellar spacing, (b) cementite thickness, and (c) pearlite fraction in the 20C, 30C, and 45C steel specimens. Open symbols indicate yield strength, and solid ones tensile strength.

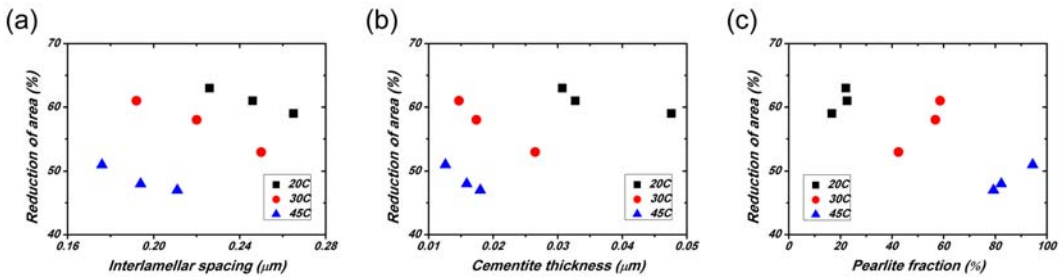


Fig. 6. Variation of reduction of area with (a) interlamellar spacing, (b) cementite thickness, and (c) pearlite fraction.

한편 강도의 연성(ductility)을 평가하는 방법은 인장 시험 시 파단까지의 연신율(elongation) 또는 단면감소율(reduction of area)이 주로 사용되고 있으나 연신율의 경우 인장 시험편의 형상, 치수, 두께에 의해 큰 영향을 받아 결과값의 신뢰성이 단면감소율에 비해 떨어지기 때문에 본 연구에서는 단면감소율을 통해 연성을 평가하였다. 일반적으로 연성은 균열의 생성과 전파 측면에서 생각할 수 있는데, 본 연구에서 사용된 시험편은 모두 초석 페라이트-펄라이트의 조직을 가지고 있으므로 이들 미세조직적 인자가 균열의 생성 및 전파에 큰 영향을 끼치기 때문에 연성과 미세조직적 인자에 대한 상관관계를 분석하는 것이 중요하다.

Miller 등은[13] 조대한 펄라이트 층상간격의 경우 전단(shear)에 의해 공동(void)이 형성되나, 미세한 펄라이트 층상간격은 펄라이트 내의 시멘타이트의 네킹(necking)에 의한 공동의 형성으로 연성이 크게 향상된다고 보고하였다. 또한 동일한 탄소 함량에서 변태온도 변화에 의해 펄라이트 분율이 변화되면 펄라이트 내의 탄소 함량이 달라져 시멘타이트의 두께 및 형상에 영향을 준다. 일반적으로 펄라이트에서 파괴시 시멘타이트에서 균열이 발생하여 파괴가 진행된다고 알려져 있다. 펄라이트 내의 탄소 함량이 모두

시멘타이트를 형성 하는데 기여한다고 가정하면, 펄라이트 내의 탄소 함량이 감소하여 시멘타이트 두께가 미세해질 경우 균열의 발생이 감소되어 연성이 증가될 수 있다.

본 연구에서 제조된 시험편들의 연성 결과에 대한 미세조직적 인자의 영향에 대해 살펴보면(Fig. 6), 변태온도에 따른 강도의 변화와 달리 연성의 경우 미세조직적 인자에 의한 뚜렷한 변화를 나타내었다. 먼저 펄라이트 분율이 높아짐에 따라 연성이 대체로 감소하는 경향을 나타낸다. 보다 구체적으로 20C 시험편은 낮은 펄라이트 분율을 나타내고 있음에도 불구하고 강도와 달리 상대적으로 조대한 시멘타이트 두께의 영향으로 인해 연성의 변화가 나타났다. 즉 변태온도가 감소할 때 연성이 증가하는 것은 시멘타이트 두께의 미세화에 의한 균열 발생 감소 때문으로 생각할 수 있다. 30C 시험편의 경우 변태온도가 감소할 때 펄라이트 분율이 증가하여 연성이 감소되는 효과가 나타나며, 그와 반대로 펄라이트 층상간격 및 시멘타이트 두께의 미세화에 의한 연성의 증가 효과가 동시에 존재한다. 따라서 변태온도가 감소함에 따라 연성이 증가하는 것은 펄라이트 층상간격 미세화와 시멘타이트 두께의 감소에 의한 연성의 증가가

더욱 크게 작용한 것으로 판단된다. 또한 45C 시편은 변태온도가 감소함에 따라 연성이 증가하지만 큰 증가를 보이지 않았다(Fig. 3(c)). 이는 80% 이상의 펄라이트 분율로 인해 펄라이트 층상간격 및 시멘타이트 두께의 미세화가 연성에 지배적인 역할을 할 것으로 판단되며, 특히 시멘타이트 두께의 미세화에 의해 발생한 네킹으로 인해 공동이 형성되어 연성이 증가된 것으로 생각된다. 또한 낮은 변태온도에서 형성되는 불완전 펄라이트의 경우 분절된 시멘타이트의 존재와 동시에 시멘타이트의 두께가 연속적인 층상형 펄라이트에 비해 미세하기 때문에 균열의 생성 및 전파가 억제되어 연성이 증가될 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 페라이트-펄라이트 조직의 가공석강에 대하여 변태온도에 따른 미세조직적 인자의 변화를 정량적으로 측정하고, 강도와 연성에 미치는 미세조직적 인자들의 영향에 대해 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다. 변태온도가 낮아짐에 따라 탄소 함량에 관계없이 모든 시편에서 펄라이트 분율은 증가하였지만, 펄라이트 층상간격과 시멘타이트 두께는 감소하는 경향을 나타내었다. 인장 시험 결과 탄소 함량에 관계없이 변태온도가 낮아질수록 항복 및 인장 강도가 증가하고, 연성이 향상되는 동일한 경향을 나타내었다. 그러나 강도 및 연성의 변화 정도가 탄소 함량에 따라 시편마다 차이를 나타내었는데 이는 변태온도 변화에 따라 펄라이트 분율이 변화되면서 펄라이트 층상간격과 시멘타이트 두께 등의 다양한 미세조직적 인자들에 영향을 주었기 때문이다. 앞으로 가공석강에서 강도 및 연성에 미치는 미세조직적 인자의 영향을 보다 정량적으로 이해하기 위해서는 보다 넓은 범위의 펄라이트 분율 및 층상간격, 시멘타이트 두께, 합금원소 등을 갖는 시편들에 대한 광범위한 연구가 필요할 것으로 생각된다.

#### 후 기

이 연구는 서울과학기술대학교 교내연구비의 지원으로 수행되었습니다.

#### References

1. D. Cheetham and N. Ridley : Metal Science, **9** (1975) 411.
2. B. E. O'Donnely, R. L. Reuben and T. N. Baker : Metals Technology, **11** (1984) 45.
3. K. Nakase and I. M. Bernstein : Metallurgical Transactions A, **19A** (1988) 2819.
4. O. P. Modi, N. Deshmukh, D. P. Mondal, A. K. Jha, A. H. Yegneswaran and H. K. Khaira : Materials Characterization, **46** (2001) 347.
5. K. K. Ray and D. Mondal : Acta metallurgica et materialia, **39** (1991) 2201.
6. T. Gladman, I. D. Mcivor and F. B. Pickering : Journal of The Iron and Steel Institute, **210** (1972) 916.
7. J. P. Houin, A. Simon and G. Beck : Transactions ISIJ, **21** (1981) 726.
8. C. M. Bae and W. J. Nam : Scripta Materialia, **41** (1999) 605.
9. H. J. Sim, Y. B. Lee and W. J. Nam : Journal of Materials Science, **39** (2004) 1849.
10. C. M. Bae, C. S. Lee and W. J. Nam : Materials Science and Technology, **18** (2002) 1317.
11. K. W. Burns and F. B. Pickering : Journal of The Iron and Steel Institute, **202** (1964) 899.
12. A. R. Rosenfield, G. T. Hahn and J. D. Embury : Metallurgical Transactions, **3** (1972) 2797.
13. L. E. Miller and G. C. Smith : Journal of The Iron and Steel Institute, **208** (1970) 998.
14. W. D. Callister and D. G. Rethwisch : Materials science and engineering: an introduction, Wiley, New York, 2007.
15. D. A. Porter, K. E. Easterling and M. Sherif : Phase Transformations in Metals and Alloys, (Revised Reprint). CRC press, 2009.
16. F. P. L. Kavishe and T. J. Baker : Materials Science and Technology, **2** (1986) 816.
17. J. M. Hyzak and I. M. Bernstein : Metallurgical Transactions A, **7A** (1976) 1217.
18. F. B. Pickering and B. Garbarz : Scripta Metallurgica, **21** (1987) 249.
19. A. R. Marder and B. L. Bramfitt : Metallurgical Transactions A, **7A** (1975) 365.
20. N. Ridley : Metallurgical Transactions A, **15** (1984) 1019.
21. C. Zener : Trans. AIME, **167** (1946) 550.
22. M. Hiller : Jernkont. Ann., **141** (1957) 757.
23. A. Hultgren : Trans ASM., **39** (1947) 915.
24. Y. Ohmori and R. W. K. Honeycombe : Trans. ISIJ, **11** (1971) 1160.