

## 중탄소강에서 합금원소 및 초석 페라이트가 기계적성질에 미치는 영향

심해정\* · 송형락\* · 남원종\*

(2004년 1월 30일 접수)

### Effects of Alloying Elements and Pro-eutectoid Ferrite on Mechanical Properties in Medium Carbon Steels

H. J. Sim, H. L. Song and W. J. Nam

#### Abstract

The effects of alloying elements on microstructural features and mechanical properties in 0.55%C medium carbon steels were investigated. The samples were austenitized at 1050°C for 30min. followed by quenching in a salt bath in the temperature range of 500 ~ 620°C. The addition of Cr resulted in the decrease of the volume fraction of pro-eutectoid ferrite and interlamellar spacing in pearlite and the increase of strength. However, the addition of B caused the increase of the volume fraction of pro-eutectoid ferrite. Reduction of area and Charpy impact values were influenced by the combined effect of microstructural features, such as the volume fraction of pro-eutectoid ferrite, interlamellar spacing and the thickness of lamellar cementite in pearlite.

**Key Words** : Pro-Eutectoid, Pearlite, Interlamellar Spacing, Strength, Ductility

#### 1. 서론

아공석강(hypo-eutectoid steel)을 오스테나이트 영역으로 가열한 후 극서냉하는 경우 생성되는 평형상태 펄라이트는 함유 탄소량이 공석 조성으로 일정하게 유지된다. 아공석강에서 페라이트 내에 고용되는 탄소량이 없다고 가정하면, 소재의 탄소함량에 따라 펄라이트 분율이 변해도 펄라이트 내의 탄소함량이 일정하게 되며, 상변태 온도가 일정하므로 펄라이트 강도 또한 일정하게 된다. 따라서 페라이트와 펄라이트로 구성된 아공석강의 강도는 소재의 탄소함량에 따라 변하는 펄라이트 분율에 의해 지배 받게 된다. 그러나 산업적

으로 생산되는 경우 비교적 빠른 냉각속도에 의한 상변태가 이루어지므로, 소재가 일정한 탄소함량을 갖는 경우에도 상변태 온도에 따라 생성되는 초석 페라이트 분율이 변화하며 이어서 생성되는 펄라이트의 탄소함량이 공석 조성을 유지하지 못하고 변하게 된다. 따라서 아공석강에서 상변태 온도가 변하면, 펄라이트의 분율이 변하고, 이에 따라 펄라이트 함유 탄소량이 변하게 되며, 결과적으로 펄라이트 층상간격 변화로 펄라이트 강도가 변하게 된다. 즉 아공석강에서 생성된 펄라이트의 층상간격은 소재의 탄소함량과 상변태 온도에 의해 지배되며, 이 두 가지 제조조건에 따라 펄라이트 분율, 펄라이트 함유 탄소량 및 펄

\* 국민대학교 신소재공학부

라이트의 시멘타이트 두께 등이 결정지어진다. 특히 시멘타이트 두께는 펄라이트 층상간격 뿐 아니라 페라이트 생성의 결과로 형성된 펄라이트 내의 탄소함량 변화에도 동시에 의존하게 된다.<sup>(1)</sup> 동일한 펄라이트 층상간격을 갖는 경우에도 펄라이트의 함유 탄소량이 다른 경우 라멜라 페라이트 크기와 시멘타이트 두께가 달라지므로, 펄라이트 층상간격이 더 이상 기계적성질과 상관성을 갖는 유일한 미세조직적 인자가 되지 못한다.

또한 펄라이트 내의 탄소함량이 변하면 시멘타이트 형상도 변화한다. 즉 비교적 낮은 온도에서 상변태시 아공석강에서 형성되는 저탄소 펄라이트는, 공석강의 펄라이트와 방향성 및 계면 특성은 같으나 시멘타이트가 분절된 형태를 갖는 유사 펄라이트(degenerate pearlite)가 되어 공석강의 잘 발달된 시멘타이트와는 구별되어진다.<sup>(1-6)</sup> 이러한 미세조직은 탄소함량이 낮기 때문에 공석강에 비하여 펄라이트 내에 시멘타이트 분율의 감소로 강도 및 가공경화율은 낮으나, 우수한 연성의 확보로 가공 중의 파단 발생이 지연되어 더 많은 가공량의 확보가 가능하다. 이와 같은 장점을 갖는 유사 펄라이트를 아공석강에서 제조하기 위해서는, 연속냉각이나 항온변태에 의해 페라이트나 베이나이트의 생성 없이 모든 미세조직이 펄라이트로 구성되기 위해서는 펄라이트가 형성되는 상변태 온도구간이 넓어야 한다. 따라서 소재의 경화능을 높이기 위해 가열온도를 높여 오스테나이트 입자경을 크게 하거나 합금원소 첨가에 의한 방법을 적용할 필요가 있다.

이러한 아공석강 펄라이트의 미세조직적 특성을 이용하면, 공석강에서 독립적으로 제어할 수 없는 미세조직적 인자들인 시멘타이트 분율, 라멜라 페라이트 두께, 및 시멘타이트 형상 등을 독립적으로 제어하여 각 인자들이 기계적성질에 미치는 영향을 체계적으로 고찰할 수 있는 장점이 있으나 현재까지는 이에 대한 체계적인 연구가 거의 없는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 0.55%C의 탄소함량을 갖는 아공석강을 기본강으로 하여, 합금원소 첨가에 의한 소재의 페라이트 분율, 펄라이트 층상간격 및 유사 펄라이트 발생 등 미세조직 변화를 분석하고, 이들 미세조직이 강도, 연성 및 충격값 등 기계적 성질에 미치는 영향을 고찰하였다.

## 2. 실험방법

본 실험에 사용된 소재는 Table 1과 같은 화학조성을 갖는 소재로, 0.55%C를 함유한 탄소강을 기본재(steel A)로 하고, 합금성분 Cr 및 B를 첨가한 4 가지로 화학성분을 변경시켰다. 진공유도 용해로를 이용하여 제조된 소재를 열간압연, 절단 및 절삭 가공하여 시편을 10mm 직경의 봉상으로 제조하였다. 봉상 시편을 가열온도 1050°C로 30분 가열하였으며 상변태 온도를 500, 540, 580, 620°C로 변경하고 미세조직과 기계적성질의 변화를 측정하였다.

기계적성질을 파악하기 위하여 인장 시험기를 이용하여 상온에서  $3 \times 10^{-3}$ /s의 초기 변형속도로 인장시험을 실시하였다. Charpy impact tester를 이용하여 충격값을 측정하였다. 한편 초석 페라이트 분율은 광학현미경 및 화학분석기를 이용하여 측정하였고, 펄라이트 층상간격은 주사 전자현미경(SEM) 하에서 시멘타이트가 수직으로 배열된 콜로니를 선택하여 관찰한 사진을 이용하여 linear intercept 방법을 사용하여 측정하였으며<sup>(7)</sup> 시멘타이트 두께는 O'Donnelly<sup>(1)</sup> 결과를 이용하여 계산하였다.

$$t_c = (s_p / V_p) [(W_{cem} / \rho_{cem}) / (W_{cem} / \rho_{cem} + W_{fer} / \rho_{fer})] \quad (1)$$

여기서,  $s_p$ 는 펄라이트의 층상간격, C는 소재의 탄소함량,  $V_p$ 는 측정된 펄라이트 분율,  $\rho_{cem}$ 는 시멘타이트 밀도,  $W_{cem}$ 는 시멘타이트의 무게 분율, 0.15(wt%C)이다.

Table 1 Chemical compositions of steels

	(wt.%)					
	C	Mn	Si	Cr	B	Ti
Steel A	0.551	0.500	0.304	-	-	-
Steel B	0.550	0.496	0.303	0.198	-	-
Steel C	0.540	0.485	0.306	-	20ppm	0.010
Steel D	0.542	0.508	0.310	0.199	22ppm	0.010

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 미세 조직

가열조건 1050°C에서 완전히 오스테나이트가 형성되는 조건으로 가열한 후, 염욕에서 500, 540, 580, 620°C의 여러 온도 조건에서 항온변태를 실시한 소재의 미세조직은 소량의 초석 페라이트와 펄라이트로 구성되어 있다. Fig. 1에 측정된 합금원소 첨가에 따른 초석 페라이트 분율의 측정 결과를 나타내었다. 기본강인 steel A에 비하여, 합금원소 B이 첨가된 두 강종(steel C, steel D)이 초석 페라이트 분율이 월등히 높게 관찰되므로, 첨가원소 B가 초석 페라이트 분율을 증가시키는 효과가 있다는 것을 확인할 수 있었다. 한편 합금원소 Cr인 첨가된 강종인 steel B에서는 Cr이 첨가되지 않은 steel A에 비하여 경화능(hardenability)이 높으므로 초석 페라이트 생성을 억제하는 경향이 크다. 이러한 경향은 Fig. 1에서와 같이 상변태 온도가 낮은 경우 현저히 관찰되지 않으나 상변태 온도가 높아지는 경우 뚜렷이 관찰된다.

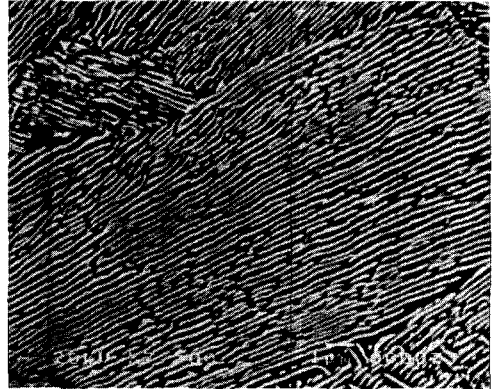


Fig. 2 SEM micrograph of steel B, transformed at 580°C, showing degenerated pearlite

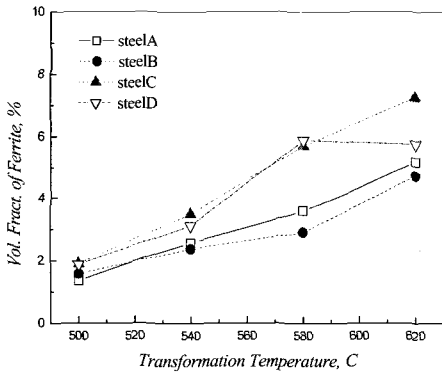


Fig. 1 The variation of the volume fraction of ferrite with transformation temperature

이와 같이 합금원소 첨가 및 상변태 온도의 변화에 따라 초석 페라이트 분율이 변하는 경우, 초석 페라이트에 탄소 고용량이 거의 없다고 보면 잔존하는 펄라이트가 함유한 탄소량은 약 0.56 - 0.59%의 범위를 갖는다. 따라서 오스테나이트로 가열 후 상변태에 의해 형성된 펄라이트의 대부분은 유사 펄라이트의 특성을 갖는다.

Fig. 2에 펄라이트 미세조직의 SEM 사진에서 볼 수 있듯이 일반적으로 잘 발달된 공석간의 펄라이트의 미세조직 사진과 유사한 형태를 가진다. 다만 관찰되는 펄라이트 내의 시멘타이트가 분절된 형태로 존재하는 것이 다를 뿐이다.

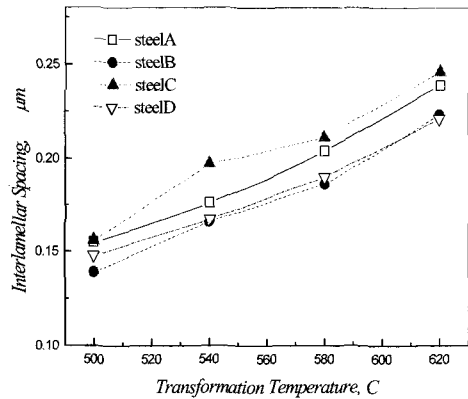


Fig. 3 The variation of interlamellar spacing in pearlite with transformation temperature

Fig. 3에 나타낸 펄라이트 층상간격의 변화는 다음과 같은 현상들을 보여준다. 상변태 온도 증가에 따라 펄라이트 층상간격이 증가하는 현상이다. 이는 상변태 온도 증가에 따라 초석 페라이트 분율이 증가하게 되고 이에 따라 펄라이트 내의 탄소함량이 증가하게 된다. 따라서, 탄소함량 증가에 의한 펄라이트 층상간격 감소효과가 작용할 것을 기대하였으나, 이와는 반대로 상변태 온도 증가에 따른 펄라이트 형성 온도의 증가에 의한 층상간격 조대화 효과가 더 크게 반영된 것으로 보인다. 즉 상변태 온도 상승 효과는, 펄라이트

탄소함량 증가에 의한 층상간격 미세화 효과 보다는 상변태 온도 상승에 의한 층상간격 조대화 효과가 더 크게 작용했다고 할 수 있다. 합금원소 Cr의 첨가는 경화능 향상으로 초석 페라이트 분율을 저하시키므로, 이에 따라 펄라이트 내의 탄소함량이 감소하여 펄라이트 층상간격을 증가시키는 효과를 기대하였으나, 합금원소 Cr의 상변태 지연 효과로 인한 펄라이트의 층상간격 미세화 경향이 매우 강하게 작용한다 하겠다. 한편 합금원소 B가 첨가된 steel C의 경우는, 초석 페라이트 분율이 증가함에 따라 펄라이트 내의 탄소함량을 높이는 효과를 가졌음에도 불구하고 펄라이트 층상간격을 약간 증가시키는 경향을 보였다. 철강재료에서 합금원소 B의 역할은 소재의 경화능을 향상시켜 베이나이트나 마르텐사이트와 같은 경도가 높은 미세조직을 만드는데 효율적인 원소로 알려져 있으나, 이는 대부분 저탄소강인 경우에 적합하며, 펄라이트의 상변태 온도 및 층상간격과 같은 고탄소강에서의 B의 효과에 대해서는 뚜렷하지 않으며 아직도 논란의 여지가 있다. 본 연구에서 관찰된 펄라이트 층상간격에 대한 B 첨가의 효과는 층상간격을 증가시키는 효과가 약간 있음을 확인할 수 있었다.

소재의 미세조직 중 초석 페라이트 분율 및 펄라이트 층상간격 이외에 소재의 기계적성질에 영향을 주는 인자로서 펄라이트의 시멘타이트 두께를 들 수 있다. 시멘타이트 두께는 소재의 연성에 직접적인 영향을 미치는 인자로서, 가끔 펄라이트 층상간격의 영향에 포함되어 표현되는 경우도 있으나, 변형시 시멘타이트의 두께가 두꺼우면 파단이 발생하여 크랙의 생성 기점으로 작용하나, 시멘타이트의 두께가 얇은 경우는 변형시 시멘타이트가 상당히 소성변형하는 경향이 있다. 따라서 본 연구에서는 미세조직 인자 중 하나로서 시멘타이트 두께의 변화를 살펴보고자 한다. 시멘타이트의 두께는 나노급 사이즈로 직접적인 TEM 관찰에 의하여 두께를 측정하기에는 많은 오차가 발생한다. 따라서 시멘타이트의 두께를 얻는 방법으로는, 펄라이트 내의 탄소함량에 따른 시멘타이트와 페라이트 간의 두께 비율을 계산하고, Fig. 3에서 측정된 펄라이트 층상간격 값을 이용하여 식 (1)을 이용하면 펄라이트 내의 시멘타이트 두께를 계산할 수 있다. 이러한 방법으로 얻어진 결과를 Table 2에 나타내었다.

**Table 2** The calculated values of the thickness of lamellar cementite, using the equation <sup>(1)</sup> ( $\mu\text{m}$ )

Trans. Temp. ( $^{\circ}\text{C}$ )	Steel A	Steel B	Steel C	Steel D
500	0.01298	0.01165	0.01287	0.01226
540	0.01492	0.01402	0.01653	0.01401
580	0.01748	0.01580	0.01812	0.01640
620	0.02082	0.01930	0.02147	0.01960

이상과 같은 미세조직 인자들을 분석한 결과, 합금원소인 크롬(Cr)은 초석 페라이트 감소 및 펄라이트 층상간격 감소 효과를 가지며, 합금원소 보론(B)은 크롬과 반대로 초석 페라이트 증가 및 펄라이트 층상간격 조대화 효과를 보였다.

### 3.2 기계적 성질

기계적 성질에 미치는 미세조직 인자의 영향에 대하여 정밀하게 분석하기 위하여, 강도 및 연성 등 기계적 성질과 각각의 미세조직 인자들과의 연관성을 검토하였다. Fig. 4에 나타난 인장강도와 미세조직 인자와의 관계에서는, 상변태 온도의 증가에 따라 초석 페라이트 분율 증가에 따른 연화 효과 및 펄라이트 층상간격의 증가에 의한 강도 저하 효과로 인하여 인장강도가 감소하는 일반적인 경향을 보였다. 한편 강도에 미치는 합금원소의 영향을 고찰하면, 인장강도의 경우 합금원소 크롬 첨가에 의한 펄라이트 층상간격 미세화로 강도 향상 효과가 뚜렷하게 관찰되나, 합금원소 보론 첨가에 의한 펄라이트 층상간격의 증가 효과는 상대적으로 크게 나타나지 않아 합금원소 보론을 첨가하지 않은 경우와 거의 유사하게 관찰된다. 초석 페라이트 함량 변화에 따른 인장강도의 변화로는 초석 페라이트 증가에 의한 연화 효과로 인장강도 저하가 관찰되나, 이는 상변태 온도의 상승에 따른 펄라이트 조대화 효과가 포함되어 있으며, 인장강도 값의 산포(deviation)가 크다. 따라서 미세조직 중 초석 페라이트 분율은 인장강도의 인자로서 적합하지 않다. 펄라이트 층상간격과 인장강도와의 관계는 Hall-

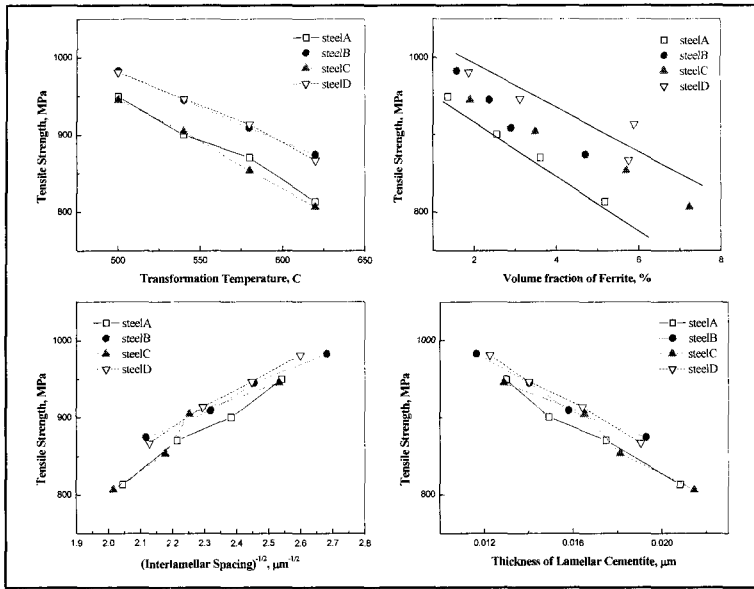


Fig. 4 The relationships between tensile strength and microstructural features in tested steels, such as (a) transformation temperature, (b) pro-eutectoid ferrite, (c) interlamellar spacing of pearlite and (d) the thickness of cementite

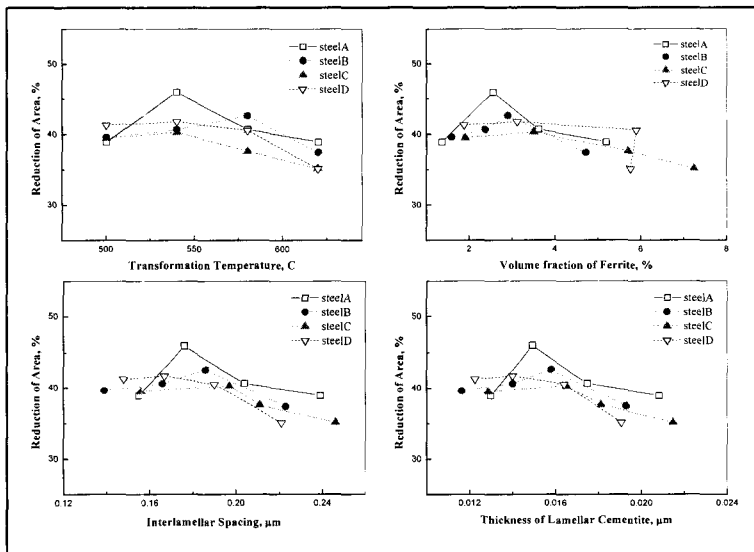


Fig. 5 The relationships between reduction of area and microstructural features in tested steels, such as (a) transformation temperature, (b) pro-eutectoid ferrite, (c) interlamellar spacing of pearlite and (d) the thickness of cementite

Petch식을 펄라이트 미세조직에 맞게 개조한, 소성 변형시 펄라이트 내의 라멜라 페라이트에서 전위의 이동 거리를 의미하는, Embury-Fisher 식을 이용하여 분석하였다. Embury-Fisher 식에서 펄라이트 층상간격의  $1/2$  승한 값을 적용한 경우 강종에 관계없이 산포가 가장 작게 관찰되었다. 이는 본 연구에 사용된 소재의 초석 페라이트 함량이 8% 이하 수준으로 인장강도에 크게 영향을 미치지 못하였으므로, 대부분을 차지하는 펄라이트 강도가 인장강도의 지배요인으로 작용했다고 생각된다. 한편 펄라이트의 시멘타이트 두께는 인장강도와 상관성이 매우 높게 관찰되어 펄라이트 층상간격과 유사한 수준을 보였으나, 시멘타이트 두께에 직접적인 영향을 미치는 펄라이트 층상간격의 효과가 간접적으로 표출된 것으로 생각된다. 따라서, 소재의 인장 강도는 초석 페라이트 분율의 영향 등 다른 미세조직 인자들 보다는 펄라이트 층상간격이 가장 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

Fig. 5의 상변태 온도 변화에 따른 단면감소율의 변화는 특정 온도 범위에서 최대값을 나타내는 현상이 관찰되었다. 상변태 온도의 상승에 따라 단면감소율이 증가하여 특정 온도 구간에서 최대값을 보이며 그 이상의 상변태 온도에서는 단면감소율이 감소하는 특이한 현상이 관찰되었다. 이러한 현상을 미세조직 관점에서 분석하면, 초석 페라이트 분율이 증가하면 소재의 연성이 증가하는 경향을 보이는 반면 펄라이트의 층상간격이 조대화하면 소재의 연성이 감소하는 경향을 보인다. 이는 앞에서 언급한 바와 같이 펄라이트 내의 시멘타이트 두께의 증가로 인한 시멘타이트의 소성가공 능력 저하로 크랙의 발생이 용이해지기 때문이다. 따라서 이 두 가지의 복합 효과로 적정 상변태 온도 범위에서 단면감소율이 최대값을 나타낸다고 하겠다. 이에 비하여 초석 페라이트 분율과 단면감소율과의 관계에서는 합금원소 크롬과 보론이 복합 첨가된 steel D의 경우 산포가 다소 심한 것을 제외하고는 측정값 들이 초석 페라이트 분율 3% 부근에서 최대값을 보이며 이후 초석 페라이트 분율의 증가에 따라 감소하는 경향을 보인다. 이는 측정값 만을 보면 상당히 잘 맞는 경향을 보이나, 일반적으로 알려진 어닐링한 중탄소강에서 관찰되는 연성이 우수한 초석 페라이트 분율의 증가에 따라 단면감소율이 지속적으로 증가하는 현상과는 배치되는 결과이다. 어닐링

한 중탄소강의 경우 평형상태에서 페라이트와 펄라이트가 생성되므로 펄라이트의 특성 및 강도, 연성이 일정하다. 따라서 탄소함량 변화에 의한 페라이트 분율이 단면감소율을 지배하게 된다. 그러나 본 연구에 사용한 소재의 경우 초석 페라이트 분율 변화에 따라 생성된 펄라이트의 특성이 변화하게 되므로 펄라이트 층상간격 및 시멘타이트 두께 등의 미세조직 인자들 또한 단면감소율에 영향을 미치게 된다.

Fig. 5의 펄라이트 층상간격과 단면감소율과의 관계는 시멘타이트의 두께와 단면감소율과의 관계와 매우 유사한 경향을 보이며, 강종 구분 없이 산포가 비교적 작은 것을 알 수 있었다. 이는 펄라이트 변형시 크랙의 생성과 시멘타이트 두께와의 관계를 고려해보면, 층상간격의 경우 시멘타이트의 두께 효과를 반영한 결과로 생각된다. 두꺼운 시멘타이트의 두께에서는 시멘타이트의 소성 변형이 불가능하여 응력이 가해지는 경우 시멘타이트의 분절로 인하여 크랙이 발생하게 된다. 한편 펄라이트 내의 시멘타이트의 두께가 매우 얇은 경우에는 시멘타이트의 소성변형능의 향상으로 단면감소율이 증가하게 된다. 그러나, Fig. 5로부터 시멘타이트의 두께가 매우 작은 경우에는 오히려 단면감소율이 낮으며, 단면감소율이 최대값을 나타내는 적절한 펄라이트 내의 시멘타이트 두께의 구간이 있음을 알 수 있다. 일반적으로 펄라이트 내의 탄소 함유량에 따라 페라이트와 시멘타이트의 두께 비율이 정해지므로, 펄라이트 층상간격이 감소하면 시멘타이트의 두께는 물론 펄라이트 내의 페라이트 두께 또한 얇아지게 된다. 따라서 얇은 두께의 시멘타이트의 소성변형 능력은 향상되나 라멜라 페라이트의 얇은 두께로 소성 변형시 라멜라 페라이트 내 전위의 이동가능 거리가 감소하게 되어 전위의 이동이 곤란하여 소재의 연성이 감소하게 된다. 이로부터 소재의 단면감소율은 펄라이트 층상간격에도 영향을 받을 수 있었다.

한편 상변태 온도 변화에 따른 단면감소율 변화를 합금원소 효과의 관점에서 분석해보면, 합금원소 보론이 첨가된 강 경우 단면감소율이 첨가되지 않은 경우에 비하여 상대적으로 낮은 값을 나타내는데, 이는 합금원소 보론 첨가에 의한 초석 페라이트 함량 증가 보다는 펄라이트 층상간격의 증대 및 시멘타이트 두께의 증가에 의한 영향이 크다 하겠다. 한편 합금원소 크롬이 첨가

된 경우 단면감소율이 첨가되지 않은 경우 보다 낮게 관찰되며 또한 단면감소율이 최대값을 나타내는 상변태 온도가 상승하는 현상이 관찰되는데, 이는 초석 페라이트 분율이 작은 효과도 작용하지만 이외에 합금원소 크롬의 첨가에 의해 시멘타이트의 두께가 감소하는 현상을 고려할 수 있다. 어떤 특정 범위 이상의 시멘타이트 두께에 도달하면 시멘타이트의 소성변형능의 저하가 급격히 이루어진다고 가정하면, 합금원소 크롬의 첨가는 펄라이트에서의 소성변형능의 저하가 급격히 이루어지는 시멘타이트의 두께를 높은 상변태 온도 영역으로 이동시키는 효과를 가지며, 펄라이트 내의 시멘타이트 두께의 변화도 단면감소율에 상당한 영향이 있을 것으로 생각된다.

일반적으로 Charpy impact test에서 얻어진 충격값은, 초석 페라이트와 펄라이트로 구성된 미세조직을 갖는 소재의 경우 초석 페라이트 분율의 영향을 상당히 받는다. 또한 펄라이트만으로 구성된 소재인 경우 충격시험한 소재의 파면을 관찰하면 거의 벽개(cleavage) 형태에 가까운 모양으로 구성되어 있으며, 이 벽개 파면의 크기가 펄라이트의 미세조직 단위인 콜로니(colony) 또는 노듈(nodule)의 크기와는 일치하지 않으나, 결정방위가 비슷한 미세조직 단위의 크기와 유사하여, 상변태 이전 가열상태에서의 구 오스테나이트 결정립의 크기(AGS)에 의해 지배되는 것으로 알려져 있다. 따라서 이러한 미세조직 단위의 크기가 작을수록 충격값이 높게 나타난다.<sup>(8-12)</sup>

충격값에 미치는 미세조직 인자의 영향을 Fig. 6에 나타내었다. 상변태 온도를 기준으로 할 경우, 모든 강종의 충격값이 변화하는 양상이 유사한 경향을 보였다. 초기 상변태 온도의 증가에 따라 충격값이 상승하고 높은 상변태 온도인 620° C에서는 포화된 값을 보여주었으며 상변태 온도 580° C에서 최대값을 보인다. 가장 높은 상변태 온도에서 초석 페라이트의 분율이 증가함에도 불구하고 충격값이 증가하지 않는 특이한 현상은, 높은 상변태 온도에서 형성된 펄라이트의 조대화로 펄라이트 벽개강도(cleavage stress)가 감소하는 효과가 페라이트 분율 증가에 의한 효과를 약화시키기 때문으로 생각된다.

또한 모든 상변태 온도에서 합금원소 보론이 첨가된 경우(steel C, steel D)와 첨가되지 않은 경우(steel A, steel B)의 두 가지 그룹의 충격값 분포가 관찰되었다. 초석 페라이트와 충격값과의 관계를

검토해보면, 모든 강종에서 초석 페라이트 분율의 증가에 따라 충격값이 증가하는 경향을 보이나, 상변태 온도와 유사하게 합금원소 보론이 첨가된 경우 초석 페라이트의 분율 증가 효과에도 불구하고 충격값이 낮게 관찰되었다. 이 현상은 합금원소 보론이 첨가된 경우 오스테나이트로 가열시 충격값에 영향을 주는 인자인 구 오스테나이트 결정립의 크기(80 $\mu$ m)가 합금원소 보론을 첨가하지 않은 경우(40 $\mu$ m)에 비하여 2배 정도 크게 관찰되었으며, 앞에서 언급한 바 있는 AGS 조대화 효과로 모든 상변태 온도에서 충격값이 낮게 관찰되었다. 한편 충격값을 미세조직 인자 중의 펄라이트 층상간격이나 이에 따라 연동하는 펄라이트 내의 시멘타이트의 두께와 관련하여 분석해 보면, 전반적으로 충격값과 층상간격과의 특별한 상관성은 관찰하기 곤란하였다.

다만 합금원소 크롬이 첨가된 경우(steel B, steel D), 최대값을 나타내는 층상간격이 크롬을 첨가하지 않은 경우(steel A, steel C)보다 작게 관찰되었으므로, 합금원소인 크롬의 충격값에 대한 효과가 펄라이트의 층상간격의 변화로서 충격값에 영향을 미쳤음을 확인할 수 있었다. 이 현상은 현재로서는 명확하지 않으나, 합금원소 크롬의 첨가가 펄라이트 벽개강도에 영향을 미치거나, 시멘타이트의 소성변형능에 미치는 영향과 관계가 있을 것으로 생각한다.

따라서 충격값과 관계에 있어서 펄라이트 층상간격과 초석 페라이트 분율 두 가지 미세조직인자에 의해 복합적으로 영향 받음을 알 수 있었으며, 또한 AGS가 충격값에 상당한 영향을 미침을 확인할 수 있었다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 0.55%C의 탄소함량을 갖는 아공석강에서 합금원소 첨가 및 상변태 온도 변화에 의한 미세조직 변화와 이에 따른 기계적성질을 관찰하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

합금원소 크롬이 상변태 지연 효과로 인한 초석 페라이트 분율 감소 및 펄라이트의 층상간격을 미세화시키는 경향을 보였으며, 합금원소 보론은 초석 페라이트 분율을 증가시키는 효과를 보였다.

인장 강도는 펄라이트 층상간격이 가장 큰 영

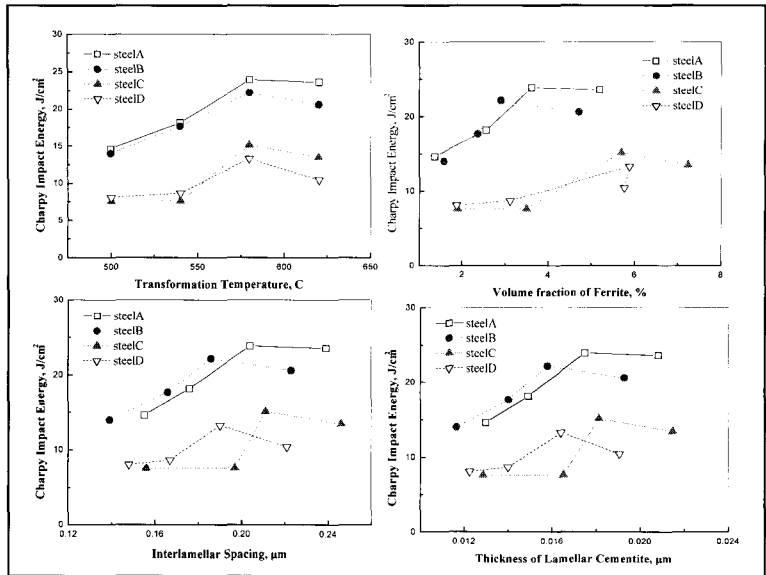


Fig. 6 The relationships between Charpy impact energy and microstructural features in tested steels, such as (a) transformation temperature, (b) pro-eutectoid ferrite, (c) interlamellar spacing of pearlite and (d) the thickness of cementite

향을 미치는 것을 알 수 있었다. 합금원소 크롬은 펄라이트 층상간격 미세화로 강도 향상 효과를 보이는 반면, 합금원소 보론은 펄라이트 층상간격의 증가 효과에도 불구하고 인장강도에 별다른 영향을 미치지 못하였다.

단면감소율은 온도 상승에 따라 증가하여 특정 온도 구간에서 최대값을 보이며 그 이상의 온도에서는 단면감소율이 감소하는 특이한 현상이 관찰되었다. 단면감소율은 초석 페라이트 분율, 펄라이트 층상간격 및 시멘타이트의 두께 등 미세조직 인자의 복합적인 작용에 의해 영향을 받는다는 것을 알 수 있었다.

층격값은 펄라이트 층상간격과 초석 페라이트 분율 두 가지 미세조직인자에 의해 복합적으로 영향을 받음을 알 수 있었다.

### 후 기

본 연구는 에너지 관리공단의 학술진흥사업(2002-E-FM03-P-01)으로 지원되었으며, 관계자 여러분께 깊은 감사를 드립니다.

### 참 고 문 헌

- (1) B. E. O' Donnelly, R. L. Reuben and T. N. Baker., 1984, "Quantitative assessment of strengthening parameters in ferrite-pearlite steels from microstructural measurements", *Met. Tech.*, Vol. 11, p. 45.
- (2) C. M. Bae, C. S. Lee and W. J. Nam., 2002, "Effect of carbon content on mechanical properties of fully pearlitic steels", *Mater. Sci. & Tech.*, Vol. 18, p. 1317.
- (3) E. V. Gregory and B. C. Muddle., 1995, *Pro. Int. Conf. on Phase Transformations during the Thermal/Mechanical Processing of Steel*, Vancouver, Canada, Aug., Canadian Inst. of mining, Metall. and Petroleum, Montreal, Canada, p. 81.
- (4) E. C. Purcino and P. R. Cetlin., 1991, "Fracture mechanism of coarse pearlite/ferrite mixtures", *Scripta Metall. Mater.*, Vol. 25, p. 167.
- (5) T. Inoue and S. Kinoshita., 1977, "Strain partitioning and void formation in ferrite-pearlite steels deformed in tension", *Trans. ISIJ*, Vol. 17, p. 245.



- (6) J. P. Houin, A. Simon and G. Beck., 1981, "Relationship between structure and mechanical properties of pearlite between 0.2% and 0.8%C", Trans. ISIJ, Vol. 21, p. 726.
- (7) J. W. Pilarczyk, H. Dyja, B. Golis and E. Tabuda., 1998, "Effect of roller die drawing on structure, texture and other properties of high carbon steel wires", Metals and Materials, Vol. 4, p. 727.
- (8) J. J. Lewandowski and A. W. Thompson., 1986, " Effects of the prior austenite grain size on the ductility of fully pearlitic eutectoid steel", Metall. Trans., Vol. 17A, p. 462.
- (9) A. R. Rosenfield, G. T. Hahn and J. D. Embury., 1972, "Fracture of steels containing pearlite", Metall. Trans., Vol. 3A, p. 2797.
- (10) M. P. Puls and J. S. Kirkaldy., 1972, "The pearlite reaction", Metall. Trans., Vol. 3A, p. 2777.
- (11) D. J. Alexander and I. M. Bernstein., 1982, "Cleavage fracture in pearlitic eutectoid steel", Metall. Trans., Vol. 13A, p. 1865.
- (12) L. E. Miller and G. C. Smith., 1970, "Tensile fracture in carbon steels", JISI, Vol. 208, p. 998.