다중회귀분석을 이용한 페라이트-펄라이트 조직 아공석강의 충격인성에 미치는 미세조직적 인자의 민감도 해석

이승용·이상인·황병철*

서울과학기술대학교 신소재공학과

Sensitivity of Microstructural Factors Influencing the Impact Toughness of Hypoeutectoid Steels with Ferrite-Pearlite Structure using Multiple Regression Analysis

Seung-Yong Lee, Sang-In Lee, and Byoungchul Hwang*

Department of Materials Science and Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Seoul 02792, Republic of Korea

Abstract: In this study, the effect of microstructural factors on the impact toughness of hypoeutectoid steels with ferrite-pearlite structure was quantitatively investigated using multiple regression analysis. Microstructural analysis results showed that the pearlite fraction increased with increasing austenitizing temperature and decreasing transformation temperature which substantially decreased the pearlite interlamellar spacing and cementite thickness depending on carbon content. The impact toughness of hypoeutectoid steels usually increased as interlamellar spacing or cementite thickness decreased, although the impact toughness was largely associated with pearlite fraction. Based on these results, multiple regression analysis was performed to understand the individual effect of pearlite fraction, interlamellar spacing, and cementite thickness on the impact toughness. The regression analysis results revealed that pearlite fraction significantly affected impact toughness at room temperature, while cementite thickness did at low temperature.

(Received March 2, 2016; Accepted April 8, 2016)

Keywords: impact toughness, microstructural factor, multiple regression analysis, ferrite-pearlite structure, hypoeutectoid steel

1. 서 론

저온 연화(low-temperature annealing), 구상화(spheroidizing), 조질 처리(quenching and tempering, Q&T) 등을 생략한 비조질강은 개발 초기 원가 절감과 강도 향상이 주된 목표였으나 최근 들어 자동차 회전부품 및 산업기계 분야로 그 적용 범위가 확대되면서 강도와 함께 상온 및 저온 충격인성 향상에 대한 요구가 커지고 있다. 특히 CHQ(cold-heading quality)용 비조질강은 베이나이트 또는 마르텐사이트 등의 저온변태 조직을 주로 가져 충격인성이 낮기 때문에 페라이트-펄라이트 조직을 통해 이를 극복하고자 하는 방안이 제시되고 있다 [1-5]. 그러나 아공석(hypoeutectoid) 범위에서 얻어지는 페라

이트-펄라이트 조직은 합금원소나 미세조직에 따라 연성-취성 전이 거동이 달라져 상온 및 저온에서의 충격인성이 민감하게 변하는 문제점이 있다 [6-9]. 실제로 페라이트-펄라이트 조직은 페라이트/펄라이트 부피분율 및 결정립 크기, 펄라이트 층상간격(interlamellar spacing), 시멘타이트 두께 등의 다양한 미세조직적 인자로 구성되며, 열처리 조건에 따라 이들이 상호의존적으로 변하기 때문에 충격인성에 미치는 각 인자들의 독립적인 영향을 이해하기 매우 어렵다 [10-13].

미세조직적 인자가 충격인성에 미치는 이전의 연구결과들을 보면 [6-9], 탄소 함량 증가에 따른 펄라이트 분율의 증가는 연성-취성 전이 온도를 높이고, 상부 흡수엔지를 크게 감소시키는 것으로 알려져 있다. 이에 반해 오스테나이트나 페라이트의 결정립 크기, 펄라이트 콜로니(colony) 크기, 펄라이트 층상간격이나 시멘타이트 두께 등은 그 영향이 미미

*Corresponding Author: Byoungchul Hwang

[Tel: +82-2-970-6638, E-mail: bhwang@seoultech.ac.kr]

Copyright © The Korean Institute of Metals and Materials

Table 1. Chemical composition of the hypoeutectoid steels with ferrite-pearlite structure.

Specimen	Chemical composition (wt%)						Fe
	C	Mn	Si	Al	Ti	V	
0.20 C	0.20	0.40	0.05	0.03	-	-	Bal.
0.30 C	0.30	1.40	0.20	0.03	0.01	-	
0.45 C	0.45	1.20	0.20	0.03	0.01	0.05	

하거나 상반되는 모습을 나타내어 충격인성에 미치는 각 미세조직적 인자의 영향이 불명확한 실정이다 [9,14-19]. 이는 오스테나이트화 온도(austenitizing temperature, AT)나 등온 변태온도(transformation temperature, TT) 등의 열처리 조건에 따라 페라이트나 펄라이트 부피분율이 변화될 때 각 미세조직의 크기나 층상간격, 시멘타이트 두께 등이 동시에 변화되어 충격인성에 서로 다른 영향을 주기 때문이다.

본 연구에서는 탄소 함량, 오스테나이트화 온도, 등온 변태 온도의 조절을 통해 다양한 페라이트-펄라이트 조직을 갖는 아공석강 시편을 제조한 후 미세조직을 정량적으로 분석하여 충격인성에 미치는 미세조직적 인자의 영향을 체계적으로 분석하였다. 또한 각 미세조직적 인자들이 충격인성에 미치는 독립적인 영향을 이해하기 위하여 다중회귀분석(multiple regression analysis)을 실시함으로써 페라이트-펄라이트 조직 아공석강의 충격인성에 미치는 각 미세조직적 인자들의 민감도를 비교하였다.

2. 실험 방법

본 연구에서 사용된 재료는 탄소 함량이 다른 3 종류의 ‘0.20 C’, ‘0.30 C’, ‘0.45 C’ 아공석강 시편으로 이들의 자세한 화학조성을 표 1에 나타내었다. 먼저 이들 소재는 50 kg단위로 진공용해한 후 950 °C 이상에서 열간 압연하여 15 mm 두께의 판재로 제조되었다. 이들 판재에서 다양한 페라이트-펄라이트 조직을 얻기 위하여 950 ~ 1,150 °C 온도에서 10 분간 오스테나이트화 처리하고, 550 °C, 600 °C, 650 °C 에서 10 분간 등온 변태하여 시편들을 제조하였다. 이들 시편들의 미세조직은 L-S(longitudinal-short transverse) 면에 대하여 2% 나이탈 용액으로 에칭하여 광학현미경으로 관찰한 후 결정립 크기를 ASTM E122의 선형 교차법(linear intercept procedure)에 따라 측정하고, 영상분석기를 이용하여 부피분율을 구하였다. 결정립 크기 측정은 또한 주사전자현미경(scanning electron microscopy, 이하 SEM)으로 펄라이트 층상간격을 측정한 후 시멘타이트 두께를 아래 식으로부터 계산하였다. O’Donnelly 등 [20]에 의해 제안된 아래 식은 페라이트-펄라이트 강에서 펄라이트 분율이 변할 경우 1) 페라이트 내 탄소 용해도가 매우 낮기 때문에 강의 탄소가 전부 시멘타이트 형성에 기여하며, 2) 페라이트와 세멘타이트 밀도는 같다고 가정하여 wt%의 탄소강에서의 펄라이트 층상간격과 세멘타이트 두께의 상관관계로부터 도출되었다.

Fig. 1. Optical and SEM micrographs showing the microstructures of the 0.45C steel specimens isothermally transformed at (a) and (b) 550 °C, (c) 600 °C, and (d) 650 °C after austenitizing at 950 °C.

Table 2. Pearlite volume fraction, interlamellar spacing, and cementite thickness of the hypoeutectoid steel specimens with varying austenitizing and transformation temperature.

Specimen	Austenitizing temperature (°C)	Transformation temperature (°C)	Pearlite fraction	Interlamellar spacing (μm)	Cementite thickness* (μm)
0.20 C	950	550	0.221	0.226	0.0307
		600	0.226	0.246	0.0327
		650	0.167	0.265	0.0476
	1,100	550	0.240	0.220	0.0275
		600	0.201	0.218	0.0325
		650	0.201	0.300	0.0448
0.30 C	950	550	0.586	0.192	0.0147
		600	0.568	0.220	0.0174
		650	0.425	0.250	0.0265
	1,100	550	0.698	0.203	0.0131
		600	0.598	0.209	0.0157
		650	0.497	0.306	0.0277
0.45 C	950	550	0.945	0.176	0.0126
		600	0.823	0.194	0.0159
		650	0.793	0.211	0.0180
	1,100	550	0.980	0.195	0.0134
		600	0.954	0.208	0.0147
		650	0.848	0.246	0.0196

* calculated value

$$t_c = \frac{S_0 \cdot 0.15(\text{wt}\% \text{C})}{V_P}$$

여기서 t_c 는 시멘타이트 두께, S_0 는 층상간격, V_P 는 측정된 펄라이트 분율, (wt% C)는 시편의 탄소 함량을 의미한다. 0.45 C 시편의 경우 등온 변태온도에 따라 변화된 광학현미경과 SEM 미세조직 사진을 그림 1에 나타내고, 정량적으로 측정된 미세조직적 인자의 모든 값들을 표 2에 정리하였다. 950 °C에서 오스테나이트화 처리 후 550 °C, 600 °C, 650 °C에서 등온변태를 실시한 시편들의 미세조직은 모두 페라이트-펄라이트 조직으로 압연 방향에 따라 다소 연신된 층상구조를 나타내며, 변태온도가 낮아질수록 펄라이트 층상간격이 감소하는 모습을 나타낸다. 한편 충격 시험은 ASTM E23 시험법에 따라 L-T(longitudinal-transverse) 방향의 10 x 10 x 55 mm의 표준 샤르피 충격(Charpy V-notch) 시편으로 가공한 후 상온(+20 °C)과 저온(-20 °C)에서 실시하여 흡수에너지로 충격인성을 평가하였다.

3. 실험 결과

3.1 미세조직적 인자의 변화

그림 2에 오스테나이트화 온도에 따른 오스테나이트 결정립 크기와 펄라이트 분율의 변화를 나타내었다 [7,17,21]. 오스테나이트화 온도가 높아짐에 따라 오스테나이트 결정립 크기가 증가하는 모습을 나타낸다. 오스테나이트 결정립 크기는 950 ~ 1,050 °C 사이에서 50 ~ 70 μm로 큰 차이가 없지만, 1,100 °C 이상에서 크게 증가한다. 이로부터 충격인성에 미치는 결정립 크기의 영향을 알아보기 위하여 충격시편의 열처리 조건을 950 °C와 1,100 °C의 두 가지 오스테나이트화 온도로 설정하였다. 한편 펄라이트 분율은 오스테나이트화 온도가 높을수록 증가하며, 0.45 C 시편의 경우 1100 °C에서 95% 이상의 펄라이트 분율을 가진다(그림 2(b)).

변태온도에 따른 페라이트 결정립 크기와 펄라이트 분율의 변화를 그림 3에 나타내었다. 페라이트 결정립 크기는 약 20 μm (± 5 μm)로 같은 오스테나이트화 온도에서 변태온도에 따른 크기 변화가 크지 않았다. 변태온도에 따른 펄라이트 분율의 변화를 살펴보면(그림 3(b)), 변태온도가 낮을수록 펄라이트 분율이 조금씩 증가하는데, 이는 탄소 함량이 많을수록 보다 뚜렷하게 나타난다. 또한 높은 오스테나이트화 온도의 경우 펄라이트 분율이 대체로 높다. 탄소 함량에 따른 펄

Fig. 2. (a) Prior austenite grain size and (b) pearlite fraction plotted as a function of austenitizing temperature (AT).

Fig. 3. (a) Ferrite grain size and (b) pearlite fraction plotted as a function of transformation temperature (TT).

Fig. 4. (a) Interlamellar spacing and (b) cementite thickness plotted as a function of transformation temperature.

Fig. 5. Impact energy plotted as a function of pearlite fraction for the steel specimens tested at (a) room temperature (RT, +20 $^{\circ}\text{C}$) and (b) low temperature (-20 $^{\circ}\text{C}$).

라이트 분율을 보면, 0.20 C 시편의 경우 20% 내외로 비교적 큰 차이를 나타내지 않지만, 0.30 C 시편과 0.45 C 시편의 경우 오스테나이트화 및 등온 변태온도에 따라 펄라이트 분율이 각각 40 ~ 70%, 80 ~ 100%로 탄소 함량에 비례하여 증가한다.

한편 변태온도에 따른 펄라이트 층상간격과 시멘타이트 두께 변화를 그림 4에 나타내었다. Bae의 실험 결과 [21]와

같이 펄라이트 층상간격과 시멘타이트 두께는 변태온도가 낮아짐에 따라 모두 감소하며, 그 범위는 각각 0.176 ~ 0.265 μm , 0.0126 ~ 0.0476 μm 이다. 탄소 함량이 높을수록 펄라이트 층상간격이나 시멘타이트 두께는 모두 커지지만, 탄소 함량에 따른 펄라이트 층상간격이나 시멘타이트의 변태온도 의존성이 변한다 [22]. 또한 높은 오스테나이트화 온도에서는 펄라이트 분율이 증가하여 같은 변태온도에서 펄라이트

Fig. 6. Impact energy plotted as a function of interlamellar spacing for the steel specimens tested at (a) room temperature (RT, +20 °C) and (b) low temperature (-20 °C).

Fig. 7. Impact energy plotted as a function of cementite thickness for the steel specimens tested at (a) room temperature (RT, +20 °C) and (b) low temperature (-20 °C).

층상간격이 보다 커지나 시멘타이트 두께는 작아지는 경향을 나타낸다(표 2).

3.2 충격인성에 미치는 미세조직적 인자의 영향

펄라이트 분율에 따른 상온 및 저온 충격에너지 변화를 그림 5에 나타내었다. 상온 충격에너지는 펄라이트 분율의 증가에 따라 대체로 감소되는데, 특히 950 °C의 오스테나이트화 온도에서 비교적 뚜렷하게 나타난다. 0.20 C 시편의 경우 거의 같은 펄라이트 분율에서 충격에너지가 크게 변하는데 이는 펄라이트 분율 이외에 다른 미세조직적 인자가 충격인성에 큰 영향을 주는 것으로 생각된다. 또한 80% 이상의 높은 펄라이트 분율을 갖는 0.45 C 시편은 상온과 저온에서 모두 25 J 이하의 매우 낮은 충격에너지를 나타낸다. 반면 낮은 펄라이트 분율을 갖는 0.20 C 시편은 상온에서, 50 ~ 70%의 펄라이트 분율을 갖는 0.30 C 시편은 저온에서 가장 높은 충격에너지를 나타낸다. 따라서 상온과 저온에서의 충격에너지에 미치는 펄라이트 분율의 영향을 이해하기 위해서는 탄

소 함량과 펄라이트 분율 변화 외에 다른 미세조직적 인자의 영향이 더 고려되어야 함을 알 수 있다.

상온 및 저온 충격에너지에 미치는 펄라이트 층상간격과 시멘타이트 두께의 영향을 그림 6과 그림 7에 각각 나타내었다. 상온과 저온의 충격에너지 모두 펄라이트 층상간격이나 시멘타이트 두께가 감소함에 따라 충격에너지가 대체로 높아지며, 이는 낮은 오스테나이트화 온도에서 보다 뚜렷하다. 탄소 함량이 낮을수록 충격에너지에 미치는 펄라이트 층상간격이나 시멘타이트 두께의 영향이 상대적으로 크다. 특히 0.20 C 시편은 펄라이트 분율의 변화가 거의 없기 때문에 펄라이트 층상간격이나 시멘타이트 두께가 충격에너지에 큰 영향을 미치는 인자로 볼 수 있다. 0.30 C 시편이나 0.45 C 시편의 경우에는 층상간격이나 시멘타이트 두께가 작아질 때 충격에너지의 변화가 크지 않는데, 이는 변태온도의 감소에 따라 층상간격이나 시멘타이트 두께가 감소하지만 펄라이트의 분율이 동시에 높아져 충격에너지를 감소시키기 때문이다.

한편 상온과 저온의 충격에너지를 비교해 보면, 0.30 C 시

Table 3. Regression analysis results based on equation A and B for the steel specimens tested at room temperature (RT, +20 °C) and low temperature (-20 °C).

		Room temperature (+ 20 °C)				Lower temperature (- 20 °C)			
		a	b	c	d	a	b	c	d
Equation A	Coefficient	-292	-505	-2525	405	-110	493	-4016	76.7
	Microstructure factor range	0.778	0.089	0.035	-	0.778	0.089	0.035	-
	Sensitivity coefficient	-227	-45	-88	-	-86	44	-141	-
Equation B	Coefficient	-296	100	-2686	84	-110	-74	-3712	337
	Microstructure factor range	0.778	0.576	0.035	-	0.778	0.576	0.035	-
	Sensitivity coefficient	-230	58	-94	-	-86	-43	-130	-

Fig. 8. Comparison of measured and predicted impact energy obtained from equation (a) A and (b) B for the steel specimens tested at room and low temperatures.

편의 경우 충상간격이나 시멘타이트 두께 변화가 상온 충격 에너지에는 큰 영향을 미치지 않지만, 저온 충격에너지에 영향을 주어 가장 높은 흡수에너지를 나타낸다. 특히 0.30 C 시편은 펄라이트 분율 변화에 따라 시멘타이트 두께가 충상간격보다 크게 감소되는데(그림 4(b)), 이러한 시멘타이트 두께의 감소는 0.20 C 시편에 비해 높은 펄라이트 분율을 고려하더라도 상대적으로 저온에서의 충격에너지를 높이는데 큰 역할을 한 것으로 생각된다.

4. 결과 고찰

앞의 실험결과를 보면(그림 5, 그림 6, 그림 7), 충격인성에는 펄라이트 분율, 충상간격, 시멘타이트 두께 등의 다양한 미세조직적 인자들이 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 그러나 이들 미세조직적 인자들은 그들의 상관관계에 의해 동시에 변하기 때문에 특정한 하나의 인자에 대한 영향을 개별적으로 분석하는 것이 매우 어렵다. 예를 들어 같은 화학조성에서 충격인성에 미치는 결정립 크기의 영향을 이해하기 위하여 오스테나이트화 온도를 변화시키고 변태온도를 고정할 경우 펄라이트 충상간격은 고정될 수 있지만, 펄라이트 분율이 변

화되어 시멘타이트 두께가 달라진다. 또한 충격인성에 미치는 펄라이트 충상간격의 영향을 이해하기 위하여 오스테나이트화 온도를 고정시키고 변태온도를 변화시킬 경우 결정립 크기는 고정될 수 있지만 변태온도에 따라 펄라이트 분율이 변화되어 시멘타이트 두께나 콜로니 크기가 변하게 된다 [23]. 따라서 본 연구에서는 각 미세조직적 인자가 충격인성에 미치는 독립적인 영향과 민감도를 이해하기 위하여 모든 실험결과에 대해 다중회귀분석(multiple regression analysis)을 실시하였다.

여기서 충격인성은 여러 미세조직적 인자의 영향을 받는 하나의 방정식으로 표현될 수 있다고 가정한다. 따라서 각각의 미세조직적 인자에 곱해진 계수를 미지수로 둘 때 미지수의 개수 이상의 방정식이 있을 경우 다중회귀분석으로 각각의 계수(각 미세조직적 인자의 민감도; a, b, c)를 구할 수 있다. 본 연구에서는 충격인성(E_i)에 미치는 주요한 미세조직적 인자를 펄라이트 분율(P), 충상간격(S), 시멘타이트(t_c) 두께의 세 가지로 가정하여 아래의 두 가지 식으로 표현되었다.

$$E_i = a \cdot P + b \cdot S + c \cdot t_c + d \quad \dots\dots (Equation A)$$

Fig. 9. Sensitivity coefficient of pearlite fraction, interlamellar spacing, and cementite thickness obtained from the regression analysis based on equation A and B for the steel specimens tested (a) room temperature (RT, +20 °C) and (b) low temperature (-20 °C).

$$E_v = a \cdot P + b \cdot S^{-1/2} + c \cdot t_c + d \quad \dots\dots \quad (\text{Equation B})$$

이들 식으로부터 탄소 함량이나 오스테나이트화 온도, 변태온도 등에 관계없이 앞의 실험결과에서 얻어진 값들에 대하여 다중회귀분석을 실시하여 각 미세조직적 인자들의 계수를 구하였다(표 3). 계산된 식으로부터 실제 미세조직적 인자 값을 대입하여 충격인성을 다시 계산하였다. 측정된 충격인성과 다중회귀분석을 통해 계산된 충격인성을 비교하여 그림 8에 나타내었다. 분석결과를 보면, 상온 충격인성의 경우 약 97%의 높은 신뢰성 있는 관계를 나타낸 반면, 저온 충격인성의 경우 30% 대로 신뢰도가 상대적으로 낮았다. 이는 저온 충격인성의 경우 대부분 연성-취성 전이 온도 이하의 하부 선단 영역(low-shelf region)에 해당되어 흡수에너지가 모두 낮아 미세조직적 인자에 따른 차이가 크지 않기 때문이다.

실제로 각 미세조직적 인자가 충격인성에 미치는 민감도를 정량적으로 비교하기 위하여 앞에서 구한 미세조직적 인자의 계수에 각 미세조직적 인자의 범위를 곱하여 민감도 계수(sensitivity coefficient)를 구하였다. 상온과 저온의 충격인성에 미치는 미세조직적 인자의 민감도 계수를 계산하여 그림 9에 나타내었다. 각 미세조직적 인자의 민감도 계수를 비교해 보면, 방정식 형태에 따라 다중회귀분석 결과로 얻어진 계수 값은 약간의 차이가 있지만 각 미세조직적 인자가 충격인성에 미치는 경향은 같게 나타난다. 즉, 상온 충격인성의 경우 펄라이트 분율, 시멘타이트 두께, 층상간격 순으로 민감도 계수가 작아지며, 저온 충격인성의 경우 시멘타이트 두께, 펄라이트 분율, 층상간격 순으로 민감도 계수가 작아진다. 이는 상온 충격인성의 경우 대부분 연성파괴 형태를 나타내기 때문에 공동의 생성과 성장에 주요한 역할을 하는 페라이트나 펄라이트 등의 미세조직 상분율이 가장 큰 영향을 미치며,

저온 충격인성의 경우 취성파괴 균열의 주된 개시점으로 작용하는 시멘타이트가 큰 영향을 주기 때문으로 볼 수 있다 [24-26]. 펄라이트 층상간격은 열처리 조건에 의존하여 펄라이트 분율이나 시멘타이트 두께와 동시에 변하기 때문에 충격인성에 서로 상반된 영향을 미치므로, 상온 및 저온 충격인성 모두에서 가장 낮은 민감도를 나타낸다. 이를 통해 표현된 방정식의 형태에 관계없이 충격인성에 미치는 미세조직적 인자의 민감도를 정량적으로 계산하여 각 미세조직적 인자의 상대적인 영향을 비교할 수 있었다.

5. 결 론

페라이트-펄라이트 조직 아공석강에 대하여 오스테나이트화 온도와 등온 변태온도를 변화시킨 후 미세조직적 인자와 충격인성을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

같은 화학조성에서 펄라이트 분율은 오스테나이트화 온도가 높아짐에 따라 또는 등온 변태온도가 낮아짐에 따라 증가하였고, 이에 따라 펄라이트 층상간격과 시멘타이트가 동시에 변하고, 서로 다른 범위로 나타났다.

등온 변태온도가 낮아짐에 따라 펄라이트 분율이 높아지면서 펄라이트 층상간격과 시멘타이트 두께가 모두 감소하며, 탄소 함량이 높을수록 펄라이트 층상간격과 시멘타이트 두께가 상대적으로 작아졌다.

상온과 저온 충격인성 모두 펄라이트 층상간격이나 시멘타이트 두께가 감소함에 따라 충격인성이 대체로 증가하며, 탄소 함량이 낮을수록 충격인성에 미치는 펄라이트 층상간격이나 시멘타이트 두께의 영향이 비교적 뚜렷하게 나타났다.

충격인성에 미치는 펄라이트 분율, 층상간격, 시멘타이트 두께의 개별적인 영향을 이해하기 위하여 다중회귀분석을

실시한 결과 각 미세조직적 인자에 대한 민감도 계수와 이로 부터 계산된 충격인성은 신뢰성 있는 범위로 나타났다.

다중회귀분석을 통해 충격인성에 미치는 미세조직적 인자의 민감도를 계산하여 비교한 결과 상온 충격인성의 경우 펄라이트 분율, 시멘타이트 두께, 층상간격 순으로, 저온 충격인성의 경우 시멘타이트 두께, 펄라이트 분율, 층상간격 순으로 민감도가 감소하였다.

REFERENCES

1. H. Kim, M. Kang, C. M. Bae, H. S. Kim and S. Lee, *Metall. Mater. Trans. A* **45**, 1294 (2014).
2. M. Kang, J. Park, S. S. Sohn, H. Kim, K. H. Kim and S. Lee, *Met. Mater. Int.* **21**, 991 (2015).
3. H. Kim, M. Kang, H. J. Jung, H. S. Kim, C. M. Bae and S. Lee, *Mat. Sci. Eng. A* **571**, 38 (2013).
4. B. K. Hwang, T. W. Jung, Y. S. Lee, J. M. Choi and Y. H. Moon, *Trans. Mater. Process* **19**, 210 (2010).
5. S. K. Hwang, H. M. Baek, H. S. Joo and Y. T. Im, *Met. Mater. Int.* **21**, 391 (2015).
6. J. A. Rinebolt and W. J. Harris, *Trans. Am. Soc. Met.* **43**, 1175 (1951).
7. K. W. Burns and F. B. Pickering, *J. Iron Steel Inst.* **202**, 899 (1964).
8. F. B. Pickering, *Microalloying* 75. Ed. M. Korchynsky (Union Carbide Corp., New York, 1977) p.9.
9. T. Gladman, I. D. McIvor, and F. B. Pickering, *J. Iron Steel Inst.* **210**, 916 (1972).
10. J. P. Houin, A. Simon and G. Beck, *Trans. ISIJ.* **21**, 726 (1981).
11. P. R. Howell, *Mater. Charact.* **40**, 227 (1998).
12. D. A. Porter, K. E. Easterling and M. Sherif, *Phase Transformations in Metals and Alloys*, p.333, CRC press, Boca Raton, FL 33487 (2009).
13. J. W. Christian, *The Theory of Transformations in Metals and Alloys*, Newnes (2002).
14. J. J. Lewandowski and A.W. Thompson, *Metall. Trans. A* **17**, 461 (1986).
15. J. M. Hyzak and I. M. Bernstein, *Metall. Trans. A* **7**, 1217 (1976).
16. K. Nakase and I. M. Bernstein, *Metall. Trans. A* **19**, 2819 (1988).
17. F. P. L. Kavishe and T. J. Baker, *Mater. Sci. Tech.* **2**, 816 (1986).
18. O. P. Modi, N. Deshmukh, D. P. Mondal, A. K. Jha, A. H. Yegneswaran and H. K. Khaira, *Mater. Charact.* **46**, 347 (2001).
19. W. J. Nam, H. R. Song and C. M. Bae, *ISIJ Int.* **45**, 1205 (2005).
20. B. E. Q'Donnely, R. L. Reuben and T. N. Baker, *Met. Technol.* **11**, 45 (1984).
21. C. M. Bae, Ph. D. Dissertation, POSTECH (1999).
22. D. Cheetham and N. Ridley, *Met. Sci.* **9**, 411 (1975).
23. F. B. Pickering and B. Garbarz, *Scr. Metall.* **21**, 249 (1987).
24. L. E. Miller and G. C. Smith, *J. Iron Steel Inst.* **208**, 998 (1970).
25. S. Y. Ahn, M. Lee, K. M. Cho and N. H. Kang, *Korean J. Met. Mater.* **53**, 785 (2015).
26. M. G. Park, J. Moon, T. H. Lee, N. H. Kang, H. C. Kim and C. H. Lee, *Korean J. Met. Mater.* **53**, 312 (2015).