

## 페라이트 내에 고용된 미량의 탄소가 오스테나이트화 거동 및 페라이트와 오스테나이트의 열팽창 계수에 미치는 영향

문유미 · 박지혜 · 강신곤 · 정재길 · 이상민 · 이영국<sup>†</sup>  
연세대학교 공과대학 신소재공학과

### The Effects of Solute Carbon Atoms in Ferrite on Austenitization and the Thermal Expansion Coefficients of Ferrite and Austenite

Yumi Mun, Jihye Park, Singon Kang, Jae-Gil Jung, Sangmin Lee, Young-Kook Lee<sup>†</sup>  
Department of Materials Science and Engineering, Yonsei University, Seoul, 120-749, Korea

**Abstract** The effects of solute carbon atoms on the thermal expansion coefficients of ferrite and austenite as well as austenitization behavior were investigated by comparing carbon-free ferrite and carbon-containing ferrite. The thermal expansion coefficients and austenitization start and finish temperatures were measured using a dilatometer. Solute carbon atoms at elevated temperatures above the cementite dissolution temperature (650 K) decreased the thermal expansion coefficients of both ferrite and austenite. In addition, minute amount of carbon atoms dissolved in ferrite stimulated austenite nucleation during continuous heating, resulting in the lower starting temperature of austenitization.

(Received September 13, 2013; Revised September 23, 2013; Accepted September 30, 2013)

**Keywords** : thermal expansion coefficient, ferrite, solute carbon atoms, austenitization, dilatometry

#### 1. 서 론

철강 기술이 발전함에 따라 철강 소재의 고품질화, 고기능화가 이루어지고 있으며 요구 성능을 구현하기 위하여 가공 열처리 공정을 정교하게 제어하고 미세 조직을 정확하게 예측하는 것이 더욱 중요해졌다. 철강의 최종 미세조직과 기계적 성질을 제어하고 예측하기 위해서는 기본적으로 오스테나이트화(Austenitization) 거동을 이해하는 것이 중요하다. 특히 다상복합조직강의 다양한 미세조직을 제어하기 위해서는 오스테나이트화 개시, 종료 온도의 정확한 측정 뿐 아니라 가열 혹은 등온 유지 열처리 공정 중 오스테나이트 분율의 예측이 필수적이다 [1].

지금까지 많은 연구자들에 의해 오스테나이트화 거동을 이해하기 위한 연구가 이루어져 왔다[2-5]. 저탄소강의 오스테나이트화는 펄라이트나 구상화 시멘타이트 부분이 먼저 용해되면서 오스테나이트가 형성되기 시작하고, 시멘타이트 혹은 펄라이트 부분이 모

두 소진된 이후 오스테나이트가 페라이트 내로 성장하는 두 단계로 구분된다 [2, 3]. 기존의 연구에서는 고온에서의 오스테나이트화 거동이나 미세조직 변화를 관찰하기 위하여 주로 열처리 중 급랭(Quenching)한 조직을 현미경으로 관찰하는 간접적인 방법이 적용되었다.

최근에는 오스테나이트화 거동이나 미세조직 변화를 연구하기 위해 등온 유지, 혹은 가열 중의 시편 길이의 변화를 실시간으로 측정할 수 있는 dilatometer 장비가 유용하게 사용되고 있다. dilatometer로 측정한 시편 길이 변화율로부터 오스테나이트화 개시, 종료 온도 뿐 아니라 오스테나이트화가 진행되고 있는 동안의 각 온도별 상분율도 예측 가능하다[6-8]. 그 중에서도 페라이트-펄라이트 혼합 조직에서의 오스테나이트화 거동에 대한 연구가 활발하게 이루어져 왔는데, 그 중에서도 페라이트-펄라이트 혼합 조직에서의 오스테나이트화 거동에 대한 연구가 활발하게 이루어져 왔는데, Caballero 등은[4, 5] dilatometer

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

를 이용하여 100% 페라이트 초기 조직을 갖는 극저탄소강과 100% 펄라이트 초기 조직을 갖는 공석강의 오스테나이트화 거동을 각각 분석하고 두 모델을 접목시켜 저탄소강의 페라이트-펄라이트 혼합 조직에서의 오스테나이트화 예측 모델을 제안하였다. Caballero 등이 [4, 5] 제안한 오스테나이트화 모델은 실험으로 측정된 오스테나이트화 개시, 종료 온도와 비교적 잘 일치하였으나, 오스테나이트 분율을 예측하는 데에 필수적인 오스테나이트화 진행 구간에서의 시편 길이 변화율 곡선에 대해서는 오스테나이트화 예측 모델로 계산한 결과와 실험으로 측정된 결과 사이에 차이를 보였다.

달라토미터를 이용한 오스테나이트화 모델은 각 상의 격자상수와 열팽창계수를 바탕으로 한 부피 변화의 계산에 기반하고 있으므로 [6-8], 정교하게 상분율을 제어하기 위해서는 무엇보다도 각 상의 격자상수와 열팽창계수 값이 중요하다. 따라서, 많은 연구자들이 X선 회절법, 중성자 회절법 등의 방법을 이용하여 페라이트, 시멘타이트, 오스테나이트의 격자상수와 열팽창계수를 측정하였다. Mittemeijer 등은 [9] 탄소 함량에 따른 페라이트와 오스테나이트의 격자상수와 열팽창계수를 중성자 회절법으로 측정하여, 탄소 함량이 증가할수록 오스테나이트의 격자상수가 증가하고 열팽창계수는 감소함을 확인하였다. 반면, 페라이트는 탄소 고용도가 매우 낮기 때문에 페라이트 격자상수나 열팽창계수에 미치는 탄소의 영향은 무시되었다.

비록 미량이라는 하지만 온도를 높일수록 페라이트 내에 고용될 수 있는 탄소의 함량이 증가하기 때문에 [10], 페라이트의 격자 팽창 거동에 미치는 탄소의 영향이 무시될만 한 정도인지에 대해서는 확인해 볼 필요가 있다. 뿐만 아니라, 페라이트-펄라이트 초기조직의 오스테나이트화 거동에 대한 최근 연구에서 시멘타이트가 분해될 때 펄라이트 뿐 아니라 페라이트로도 탄소가 확산되어 페라이트 입계에도 오스테나이트가 생성된다고 보고된 바 있다 [11]. 따라서 페라이트 입계에 오스테나이트 핵을 형성시킬 만큼 다량의 탄소가 펄라이트로부터 확산되어 페라이트 쪽으로 빠져나가기 때문에 페라이트 내에 어느 정도 탄소가 고용되어 존재할 수 있음을 유추할 수 있다. 지금까지는 고용된 탄소가 없는 100% 페라이트 초

기 조직의 강종과 100% 펄라이트 초기 조직의 강종을 각각 연구하여 둘을 접목시키는 형태로 페라이트-펄라이트 혼합조직에서의 오스테나이트화 모델을 개발해 왔으나, 오스테나이트화 온도 근방의 고온 영역에서의 페라이트는 인접한 펄라이트에서 분해된 탄소 원자들이 유입된 상태이기 때문에 엄밀하게는 모델에 사용된 극저탄소강의 100% 페라이트 초기조직에서 오스테나이트가 형성되는 메커니즘과는 차이가 있다고 볼 수 있다. 고온에서 페라이트 기지 내로 유입된 미량의 탄소가 페라이트의 열팽창 거동에 영향을 준다면, 페라이트의 열팽창계수에서 기인된 오차가 기존 오스테나이트화 모델에서 예측한 오스테나이트 분율과 실험으로 측정된 값 사이의 불일치를 유발하는 요인이 될 수도 있을 것이다.

따라서, 본 연구에서는 페라이트 내에 미량 고용된 탄소가 페라이트와 오스테나이트 열팽창계수, 그리고 페라이트에서 오스테나이트로의 역변태 거동에 미치는 영향에 대해 알아보고자 하였다.

## 2. 실험 방법

페라이트에서 오스테나이트로의 역변태 거동에 미치는 탄소의 영향을 확인하기 위하여 탄소를 제외한 모든 합금원소의 함량이 동일하고 100% 페라이트 조직을 갖는 두 강종을 비교하였다. Table 1에 표기한 바와 같이, A 강종은 Ti 탄질화물을 석출시켜 기지 내에 고용되어 있는 탄소 및 질소를 제거하기 위해 Ti를 첨가한 상용 극저탄소강(IF steel)이다. B 강종은 탄소를 제외한 모든 합금원소의 함량이 A 강종과 동일하도록 설계되었다. 페라이트 기지 내에 고용된 미량의 탄소에 의한 영향을 알아보기 위하여 B 강종의 탄소 함량은 Ti 탄질화물로 석출되는데 소모되는 탄소량 이상, 페라이트 내의 최대 고용한 0.02% 이하가 되도록 결정하였다. 가열 중의 페라이트에서 오스테나이트로의 역변태 거동은 페라이트 초기 결정립 형상 및 크기, 입내 결합의 존재여부에 의존하는 것으로 알려져 있다 [12]. 따라서, A, B 두 강종 모두 진공 상태의 1373 K에서 10분간 유지한 뒤 노냉(Furnace cooling)하여 기지 내의 결합을 최소화하고, Ti 탄질화물이 충분히 석출될 수 있도록 하였다. 시편의 페라이트 결정립 크기는 약

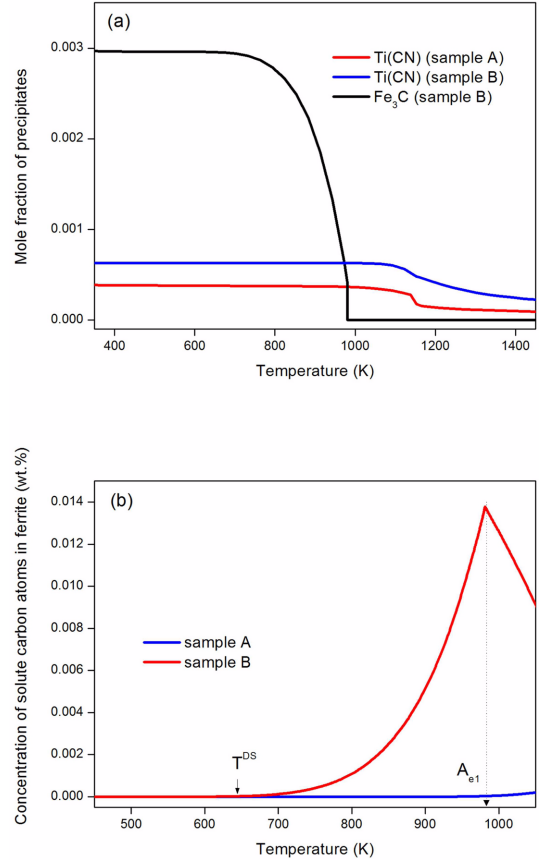
**Table 1.** Chemical composition of the samples used in the present study (wt.%)

Sample	C	Si	Mn	Al	Cr	Ni	Cu	P	S	N	B	Sn	Ti	Fe
A	0.003	0.004	0.53	0.036	0.06	0.02	0.002	0.001	0.001	0.001	0.002	0.002	0.025	Balance
B	0.021	0.004	0.54	0.035	0.06	0.019	0.0008	0.002	0.0018	0.002	0.0016	0.003	0.027	Balance

160  $\mu\text{m}$ 였고, 두 시편 간의 결정립 크기 차이는 5  $\mu\text{m}$  이하로 유사하였다. 미세조직은 주사전자현미경(SEM)으로 관찰하였으며, 에너지분산형 원소분석기(EDS)로 탄화물의 성분을 확인하였다. 열팽창계수를 측정하기 위하여  $1 \times 3 \times 10 \text{ mm}$  크기를 갖는 시편으로 딜라토미터(Theta, Dilatronic III) 실험을 수행하였다. 두 시편 모두 1 K/s의 동일한 속도로 가열하였고, 산화를 방지하기 위해 가열하는 동안 약  $1 \times 10^{-5} \text{ Torr}$ 의 진공 상태를 유지하였다.

### 3. 결과 및 고찰

두 강종의 조성을 바탕으로 TCFE 5.8 기반의 Thermo-Calc [13]를 이용하여 평형 석출물 함량을 계산하였다. Fig. 1(a)에 나타낸 바와 같이 상온에서 A 강종은 0.038%의 Ti 탄질화물 ( $\text{Ti}(\text{C}_{0.4}\text{N}_{0.1})$ )이 석출되고 시멘타이트( $\text{Fe}_3\text{C}$ )는 석출되지 않는 반면, B 강종의 경우 0.062%의 Ti 탄질화물 ( $\text{Ti}(\text{C}_{0.4}\text{N}_{0.1})$ )과 0.298%의 시멘타이트가 석출된다. Fig. 1(b)에는 페라이트 기지 내에 용해되어 있는 탄소의 함량을 나타내었다. 상온에서는 두 강종 모두 석출로 인해 기지 내에 고용된 탄소가 거의 없는 상태임을 알 수 있다. 온도를 올려서 약 650 K( $T^{\text{DS}}$ )이 되면 B 강종의 시멘타이트가 분해되면서 페라이트 기지 내로 용질 탄소 원자가 유입되기 시작하여 1000 K 근방에서 모두 페라이트 내에 고용된다. 시멘타이트가 석출되지 않는 A 강종의 경우 약 950 K 온도까지 용질 탄소 원자의 함량이 거의 변화하지 않았다. 두 강종 모두 Ti 탄질화물은 오스테나이트화가 진행될 때까지 용해되지 않았기 때문에, A 강종은 탄소가 전혀 고용되지 않은 페라이트에서 오스테나이트가 생성되고, B 강종은 650 K 온도 이상에서 탄소가 고용된 페라이트에서 오스테나이트가 생성되었다. 따라서, 두 강종을 비교하여 페라이트 내에 고용된 탄소의 영향을 확인하기에 적합하다고 볼 수 있다. 비록 두 강종 모두 미량의 질소가 포함되어 있긴 하지만 대부분의



**Fig. 1.** (a) The mole fraction of Ti (CN) and  $\text{Fe}_3\text{C}$  precipitates in the samples A and B. (b) Concentration of solute carbon atoms in ferrite as a function of temperature calculated by Thermo-Calc [13]. The  $T^{\text{DS}}$  indicates the temperature at which cementite starts to dissolve in the sample B giving rise to the concentration of solute carbon atoms. The  $A_{e1}$  indicates the equilibrium temperature at which ferrite to austenite transformation occurs in the sample B.

질소는 Ti 탄질화물 형태로 석출되기 때문에 페라이트에 용해된 질소의 함량은 무시될 만 하다.

두 강종의 초기 조직이 이러한 평형 상태와 유사함을 확인하기 위해 SEM으로 미세 조직을 관찰하였다. Fig. 2(a)에 보이는 바와 같이, A 강종에서는 시멘타이트가 관찰되지 않았으며, 미세한 Ti 탄화물

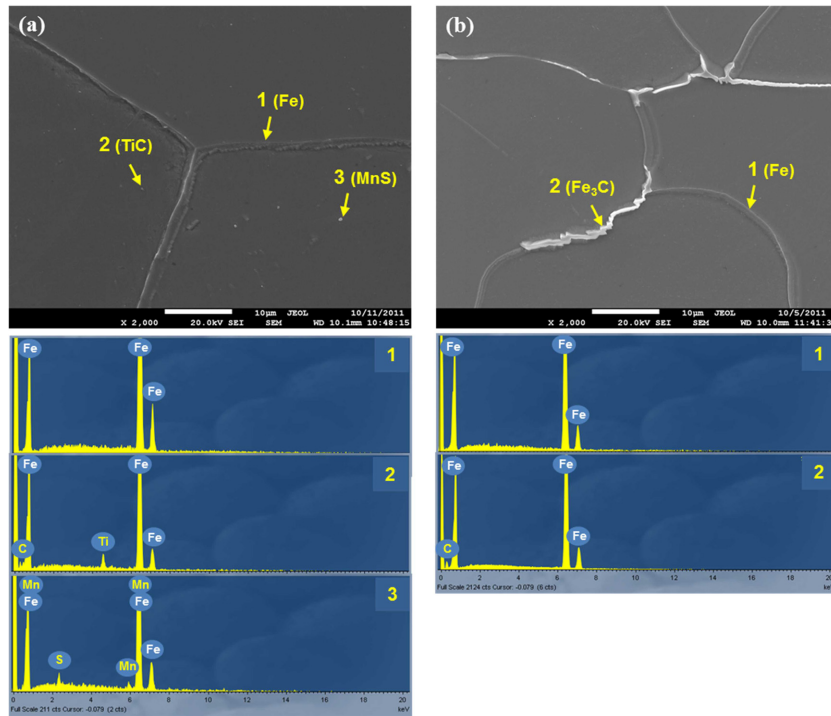


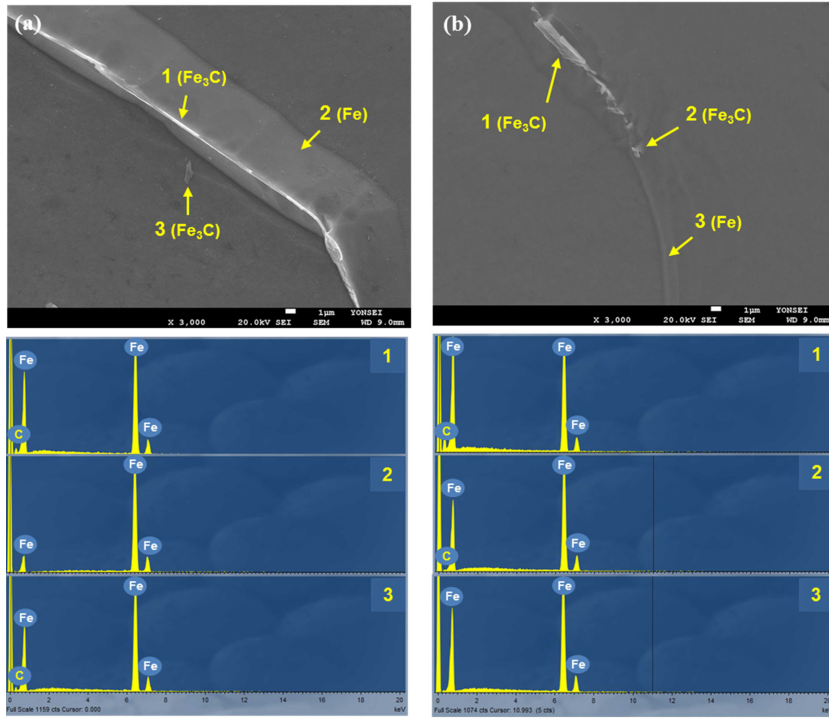
Fig. 2. SEM image and EDS spectrum of the initial microstructures of the samples (a) A and (b) B.

과 일부 개재물이 관찰되었다. B 강종에서는 페라이트 결정립계를 따라 시멘타이트가 석출되었음을 분명히 보이고 있다.

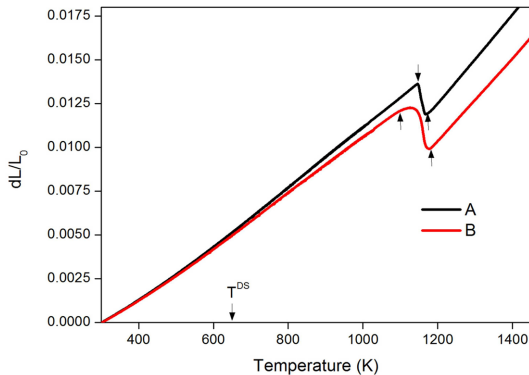
B 강종의 초기 조직에서 보이는 시멘타이트가  $T^{DS}$  온도에서 분해되고 페라이트 기지 내에 탄소가 고용되는지 확하기 위하여, B 강종의  $T^{DS}$  온도 직상의 700 K와  $A_{c1}$  이하 950 K 두 온도까지 딜라토미터를 이용하여 1 K/s의 가열 속도로 가열하다가 급랭한 조직을 얻었다. Fig. 3(a)에서 확인할 수 있듯이 700 K에서 이미 시멘타이트의 상당 부분이 분해되었다. 950 K에서 급랭한 조직(Fig. 3(b))에서는 초기 페라이트 입계에 석출되어 있던 시멘타이트가 거의 분해되어 얼마 남아 있지 않음을 확인할 수 있었다.

두 강종의 열팽창 거동을 비교하기 위하여 딜라토미터를 이용하여 1 K/s로 가열하여 Fig. 4의 결과를 얻었다. 상온에서부터 열역학적으로 B 강종의 시멘타이트 용해가 시작되는 온도인  $T^{DS}$ 까지의 온도 구간에서는 두 강종 모두 동일한 열팽창 거동을 보였다. 엄밀하게는 페라이트와 시멘타이트의 열팽창 계수 값이 다르기 때문에 시멘타이트의 유무에 따라 두 강

종 간의 열팽창 계수에 차이가 보여야 한다. 그러나  $T^{DS}$  이하의 온도 구간에서 딜라토미터 곡선 상의 차이가 거의 없는 것을 보면, 본 연구에 사용된 강종의 조성에서 페라이트 내에 미량 석출된 시멘타이트는 열팽창 계수에 거의 영향을 미치지 않는다는 것을 알 수 있다. 하지만 동일한 가열 속도로 가열했음에도 불구하고  $T^{DS}$  이상의 온도 구간에서는 B 강종의 페라이트 열팽창계수가 A 강종보다 더 작은 값을 보였다. B 강종에서 페라이트 내에 고용된 탄소가 열팽창계수를 감소시키는 역할을 하는 것을 알 수 있다. 온도를 더 높이면, 오스테나이트 안정화 원소인 탄소에 의해 B 강종에서 먼저 페라이트에서 오스테나이트로의 역변태가 일어나기 시작한다. 딜라토미터 곡선의 기울기가 변화하는 지점을 기준으로 측정 한 결과, A, B 강종의  $A_{c1}$  온도는 각각 1145 K, 1100 K,  $A_{c3}$  온도는 각각 1176 K, 1180 K 이었고, 그래프 상에 화살표로 표기하였다. B 강종에서 오스테나이트 변태가 45 K 낮은 온도에서 먼저 시작된 것을 보면, 페라이트 내에 미량 고용된 탄소가 오스테나이트 핵생성을 촉진시키는 역할을 한다는



**Fig. 3.** SEM image and EDS spectrum of interruptedly quenched microstructures of the sample B. The samples were heated at a rate of 1 K/s by using dilatometer and quenched at (a) 700 K and (b) 950 K which were temperatures immediately above the  $T^{DS}$  and below the  $A_{c1}$ , respectively.

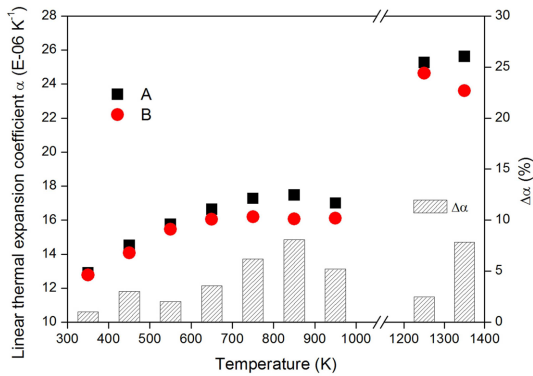


**Fig. 4.** The strain change ( $dL/L_0$ ) of samples A and B measured from 300 K to 1450 K during continuous heating at a rate of 1 K/s. The cementite dissolution temperature of the sample B (650 K) was indicated as  $T^{DS}$ . The  $A_{c1}$  and  $A_{c3}$  temperatures of the samples A and B were marked with arrows.

것을 알 수 있다. 오스테나이트화 종료 온도는 두 강종 간의 차이가 매우 작았다. 오스테나이트의 열팽창계수가 탄소 함량이 증가함에 따라 감소한다는 것은 이미 잘 알려져 있다. 본 연구에서도 마찬가지로

역변태 종료 이후 100% 오스테나이트 온도 구간에서 B 강종의 열팽창계수가 A 강종보다 더 작음을 확인할 수 있다.

미량의 탄소 함량에도 불구하고 페라이트와 오스테나이트의 열팽창계수에 차이를 보이기 때문에 Fig. 5에 두 강종의 페라이트와 오스테나이트 구간에서의 온도별 열팽창계수를 비교하였다. 열팽창계수는 100 K 간격으로 선형 추세선을 긋고, 그 기울기로부터 구하였다. 통상적으로 800-1200 K 온도 구간에서 페라이트의 열팽창계수는 Onink 등이[4] 제안한  $17.5 \times 10^{-6} K^{-1}$  값을 사용해 왔는데, 800-900 K 온도 구간에서는 본 연구에서 측정된 A 강종의 열팽창계수 값과 거의 일치한다. 하지만 오스테나이트화 온도에 근접한 900-1000 K 온도 구간에서의 열팽창계수는 약  $17.0 \times 10^{-6} K^{-1}$ 로 약간 줄었으며, 탄소가 고용된 B 강종의 경우 열팽창계수가  $16.0 \times 10^{-6} K^{-1}$ 로 훨씬 작은 값을 갖는다는 것을 알 수 있다. A 강종에 대한 B 강종의 상대적인 열팽창계수 차이를



**Fig. 5.** Linear thermal expansion coefficients ( $\alpha$ ) of the samples A and B were measured for every 100 K, which were marked as black square and red circle, respectively. The  $\Delta\alpha$  indicates relative difference of  $\alpha$  between the two samples at each temperature.

백분율( $\Delta\alpha$ )로 변환하여 온도별로 비교한 결과, 온도가 증가할수록 기지 내에 고용된 탄소원자들에 의한 페라이트 열팽창계수 감소가 더 심해지고, 역변태 온도 근방에서는 페라이트의 열팽창계수가 5-8%까지 감소함을 알 수 있다. 따라서 페라이트-펄라이트 초기 조직에서의 오스테나이트화 모델에 사용된 페라이트의 열팽창계수는 실제 값보다 높게 추정되었고, 기존의 모델과 실험 결과 사이에 보이는 오차 역시 페라이트 열팽창계수의 과평가에 의한 것임을 유추해 볼 수 있다. 오스테나이트 영역에서의 열팽창계수 역시 100 K 온도 단위로 비교해 보았다. 역변태 종료 직후의 오스테나이트 영역에서는 두 강종 간의 열팽창계수 차이가 크지 않았으나, 1300 K 이상의 온도에서는 B 강종의 열팽창계수 값이 A 강종의 8% 정도로 줄었다. 이는 1300 K 이상의 온도 구간에서 Ti 탄질화물이 분해되면서 오스테나이트 기지로 유입된 탄소의 함량이 더욱 증가했기 때문에 추가적인 오스테나이트 열팽창계수의 차이를 유발한 것으로 생각된다.

#### 4. 결 론

열역학적인 계산과 미세 조직 관찰을 통해, A 강종은 탄소가 모두 Ti 탄질화물로 석출되어 페라이트 내에 고용된 탄소의 함량이 거의 없는 반면, 탄소

함량 0.02%인 B 강종의 경우 페라이트 결정립계에 석출되어 있던 시멘타이트가 650 K 온도 근방에서 분해되기 시작하여 약 1000 K 온도에서는 최대 0.014%까지 페라이트 기지 내에 탄소가 고용될 수 있음을 확인하였다. 상온에서 오스테나이트 단상 영역의 온도까지 가열하면서 dilatometer 실험을 수행하여 두 강종을 비교한 결과, 페라이트 내에 고용된 탄소에 의해 페라이트와 오스테나이트의 열팽창 계수가 감소됨을 알 수 있었다. 따라서 페라이트-펄라이트 혼합 조직에서의 오스테나이트화 모델에 적용되는 페라이트의 열팽창계수는 탄소가 고용되지 않은 페라이트로부터 측정한 값보다 5-8% 작은 값을 사용하여 더욱 정확한 오스테나이트 분율을 예측할 수 있을 것이다. 또한 페라이트 내에 고용된 미량의 탄소에 의해 오스테나이트 핵생성이 촉진되고 오스테나이트화 개시 온도가 낮아짐을 확인하였다.

#### References

1. C. -S. Oh, H. N. Han, S. -J. Park and S. -J. Kim : 재료마당, **22** (2009) 4.
2. G. R. Speich and A. Szirmai : Trans. AIME **245** (1969) 1063.
3. C. I. Garcia and A. J. DeArdo : Met. Trans. **12A** (1981) 521.
4. F. G. Caballero, C. Capdevila and C. Garcia de Andres : J. Mater. Sci. **37** (2002) 3533.
5. F. G. Caballero, C. Capdevila and C. Garcia de Andres : ISIJ Int. **41** (2001) 1093.
6. M. Onink, F. D. Tichelaar, C. M. Brakman, E. J. Mittemeijer and S. van der Zwaag : Z. Metallkd. **87** (1996) 24.
7. J. Z. Zhao, C. Mesplont and B. C. De Cooman : ISIJ Int. **41** (2001) 492.
8. S. -J. Lee, M. T. Lusk and Y. -K. Lee : Acta Mater. **55** (2007) 875.
9. M. Onink, C. M. Brakman, F. D. Tichelaar, E. J. Mittemeijer, S. van der Zwaag, J. H. Root and N. B. Konyer : Scripta Metall. Mater. **29** (1993) 1011.
10. M. Hillert : Acta Metall. **2** (1954) 11.
11. V. I. Savran, Y. Van Leeuwen, D. N. Hanlon, C. Kwakernaak, W. G. Sloof and J. Sietsma : Metal. Mater. Trans. **38A** (2007) 946.
12. J. -H. Park and Y. -K. Lee : Scripta Materialia **58** (2008) 602.
13. Thermo-Calc Software, <http://www.thermocalc.se/>.