

변태소성을 고려한 저탄소강 상변태의 Dilatometry 해석

서동우¹*, 오창석¹, 김성준¹

Dilatometry Analysis of Low Carbon Steel considering Transformation Mismatch Plasticity

D.W.Suh, C.S.Oh, S.J.Kim

Abstract

A model is developed to quantitatively analyze the dilatometry curve of carbon steel for the evaluation of phase fraction during transformation. The effect of anisotropic volume change due to transformation mismatch plasticity as well as carbon enrichment in austenite during the transformation is considered in the developed model. The developed model is applied for the analysis of dilatometry curves of carbon steels. The result shows that considering the anisotropic dilatation is very essential to quantitatively evaluate the phase fraction from the dilatation curve.

Key Words : Dilatometry analysis, Low carbon steel, Transformation mismatch plasticity

1. 서론

선팽창 분석(Dilatometry analysis)은 철강재료 및 기타 부피변화를 수반하는 재료의 상변태 분석에 있어서 매우 유용한 방법이다.[1-3] 모상(parent phase)과 신상(new phase)간에 밀도차이가 있으면 상변태가 진행되는 동안 그림 1에 나타낸 것과 같이 dilatometry 곡선에 변화가 생기게 되며 이로부터 상변태개시온도, 종료온도 또는 상변태중의 각 상의 분율을 정량적으로 분석할 수 있다. Dilatometry 분석으로부터 상분율을 계산하는 일반적인 방법은 그림 1에 나타낸 것과 같은 지렛대 원리(lever rule)으로 알려져 있다. 그러나 저탄소강과 같이 탄소의 확산이 동반되는 상변태의 경우, 지렛대법칙은 변태되지 않은 오스테나이트로의 탄소농축과 이에 따른 오스테나이트의 밀도변화를 고려할 수 없다. 이러한 문제점을 해결하기 위

하여 Kop 등은 페라이트와 오스테나이트의 격자상수변화를 이용함으로써 상변태중 탄소확산에 따른 오스테나이트의 밀도변화를 고려하여 상분율을 계산할 수 있는 모델들을 제시하였다.[2,3]

지금까지 제안된 dilatometry 분석을 이용한 상분율 해석 모델은 상변태시 등방성(isotropic) 부피변화를 기본가정으로 하고 있다. 즉 상변태하는 동안의 길이변화는 모든 방향에 있어 같은 비율로 일어나는 것으로 가정한다. 그러나 일반적으로 상변태 중의 부피변화는 등방성이 아니다. 그림 2에 dilatometry 분석의 열사이클에 의한 시편의 dilatometry 곡선을 나타내었다. 열사이클중의 상변태에 의해 시편에 영구변형이 발생하는 것을 알 수 있으며 이러한 변형은 상변태중의 부피변화가 이방성이며 길이변화량도 각 방향에 따라 달라짐을 의미한다. 따라서 dilatometry 분석에 의해서 상분율을 정량적으로 계산하기 위해서는 상변태 중 발생하는 이방성 부피변화가 선팽창 특성에 미치

1. 한국기계연구원 환경재료연구소
dongwoo@kmail.kimm.re.kr

는 영향을 고려하여야 한다.

이 연구에서는 상변태시, 시편에 발생하는 이방성 부피변화에 대해서 고찰하고 이를 고려하여 상분율을 정량적으로 계산할 수 있는 dilatometry 분석모델을 제시하였다. 제안된 분석모델을 통하여 실측된 dilatometry 곡선으로부터 상분율을 계산하고 이를 이방성 부피변화를 고려하지 않은 분석결과와 비교하여 제시된 모델의 타당성을 검토하였다.

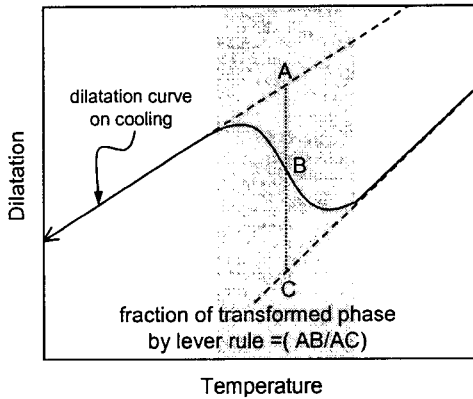


Fig. 1 Calculation of phase fraction by lever rule

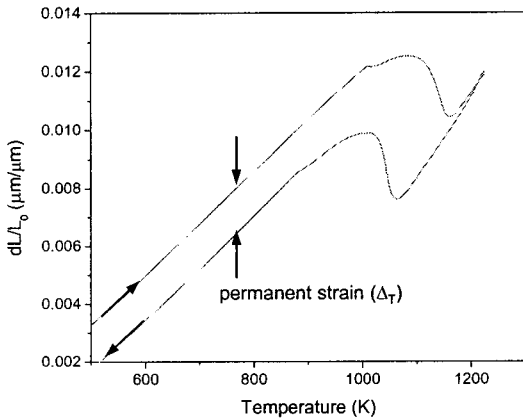


Fig. 2 Dilatometry curve of low carbon steel showing permanent strain after thermal cycle

2. Dilatometry 분석 모델

오스테나이트가 냉각중에 순차적으로 페라이트와 펄라이트로 변태된다면 상변태중 각상의 분율은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$f^{\alpha} = \frac{V - V^{\gamma}}{V^{\alpha} - V^{\gamma}} \quad (1)$$

$$f^{\beta} = \frac{V - V^{\gamma} + f^{\alpha} \cdot (V^{\gamma} - V^{\alpha})}{V^{\beta} - V^{\gamma}} \quad (2)$$

V 는 시편의 원자당부피 (atomic volume) 이고 f_i 와 V_i 는 i -상의 원자당부피를 나타낸다. 상변태중의 부피변화가 등방성이라면 시편의 원자당부피는 시편의 길이변화와 다음과 같은 관계가 있다.

$$V = a \cdot V_0 \cdot \left(\frac{3\Delta L}{L_0} + 1 \right) \quad (3)$$

여기에서 V_0 와 L_0 는 기준점(reference state)에서의 시편의 원자당부피와 길이이며, a 는 dilatometry 측정의 오차를 보정하기 위한 상수이다. Kop 등은 dilatometry 분석에 의해서 실험적으로 측정된 시편길이변화를 ΔL 로 가정하고 식(1), (2), (3)을 연립하여 해석함으로써 변태중의 상분율을 해석할 수 있는 모델을 제시한 바 있다. 그러나 앞서 언급한 바와 같이 상변태중의 부피변화는 일반적으로 등방성이 아니므로 식(3)을 적용하기 위해서는 이방성 부피변화가 실험적으로 측정되는 시편길이변화에 미치는 영향을 수식화함으로써 등방성 부피변화조건하에서의 길이변화를 고려하여야 한다. 상변태중 시편의 이방성 부피변화가 dilatometry 곡선에 미치는 영향에 대해서 그림 3에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 이방성 부피변화에 의해서 1회의 열사이클 동안 발생하는 총 이방성 길이변화는 가열구간에 발생하는 변화(Δ_1)와 냉각구간에서 발생하는 변화(Δ_2)로 나눌 수 있고 각각의 이방성 길이변화는 각 상의 원자당부피 자료와 실측된 dilatometry 곡선의 비교에 의해 구할 수 있다. 특히 Δ_2 는 냉각중의 이방성 길이변화를 나타내므로 오스테나이트로부터 페라이트-펄라이트 변태에 있어 상분율 해석에는 이를 고려하여야 한다. 그림 3에서 냉각중 등방성 길이변화와 실험적으로 측정된 시편의 길이변화의 차이가 이방성 길이변화로 정의되었으므로

$$\Delta L_{iso} = \Delta L_{exp} + \Delta L_{aniso} \quad (4)$$

따라서 상변태 중의 ΔL_{aniso} 가 주어지면 이에 해당되는 ΔL_{iso} 를 결정할 수 있고 식(3)과 식(1), (2)를 이용하여 상분율을 결정할 수 있다.

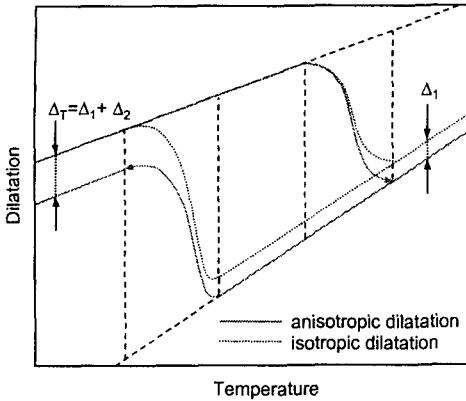


Fig. 3 Hypothetical dilatometry curve representing isotropic and anisotropic feature of dilatation during thermal cycle

상변태의 진행에 따른 ΔL_{aniso} 의 변화를 수식화하기 위해서는 변태중 이방성 부피변화가 나타나는 원인을 살펴볼 필요가 있다. 열사이클에 의해서 나타나는 시편의 형상변화에 대한 여러 연구결과들은 이방성 부피변화의 주요한 원인이 변태소성 (Transformation mismatch plasticity or Transformation superplasticity)에 기인한다고 보고하고 있다.[4,5] 원래 변태소성은 원자당부피가 서로 다른 상들의 변태가 진행되는 경우에 재료의 항복응력보다 낮은 응력값에서도 상당한 양의 소성변형이 진행되는 현상을 의미한다. Dilatometry 분석의 경우 열사이클이 진행되는 동안 외부응력이 부가되지 않지만 시편내의 온도구배에 따른 열응력과 상변태에 따른 내부응력의 불균일성에 의해서 변태소성이 발생할 수 있다고 알려져 있다. 변태소성이 진행될 때의 변형량은 새로운 상의 분율과 거의 직선적으로 비례한다고 보고되고 있으므로 상변태중 ΔL_{aniso} 의 변화는 다음과 같이 나타낼 수 있고

$$\Delta L_{\text{aniso}} = (f^{\alpha} + f^{\beta}) \cdot \Delta_2 \quad (5)$$

따라서 주어진 dilatometry 곡선으로부터 식 (1)~(5)에 의해 상변태 중의 이방성 부피변화를 고려하여 상분율을 정량적으로 계산할 수 있다.

3. 실험 방법

0.055C-1.3Mn-0.3Si (steel A)강재와 0.22C-.089Mn-0.24Si (steel B) 강재에 대해 dilatometry 곡선을 측정하였다. 3mm(ϕ)× 10mm(L)의 시편에 대하여 상온에서 1223K 까지 1K/s 으로 가열하고 1분 유지한 후 다시 상온까지 1K/s 으로 냉각하는 열사이클을 3회 실시하였으며 각 열사이클 전후의 시편의 길이를 마이크로미터로 측정하였다.

4. 결과 및 고찰

그림 4는 3회의 열사이클 동안 steel A와 B에 대해서 측정된 dilatometry 곡선이다. Steel A와 B는 3회의 열사이클 동안 거의 유사한 dilatometry 곡선을 나타내었다. Dilatometry 곡선으로부터 steel A와 B의 페라이트 변태개시 온도가 약 1063K와 1023K임을 확인할 수 있다.

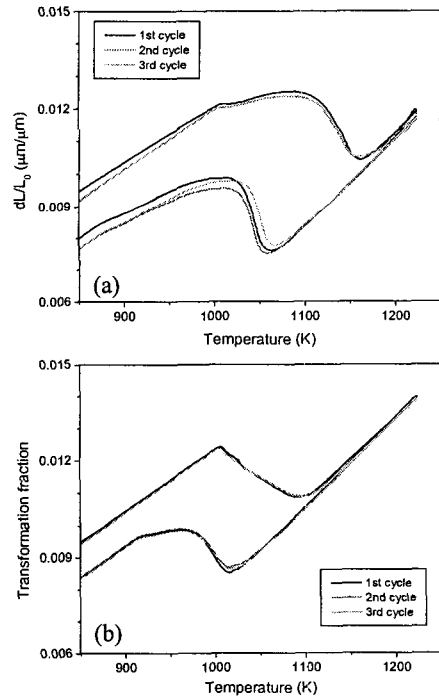


Fig. 4 Measured dilatometry curves during thermal cycle (a) steel A (b) steel B

그림 5는 steel B에 대해 3회의 열사이클 전후의 시편길이변화를 나타낸다. 시편의 길이는 각각의 열사이클 후에 감소하였으며 측정된 시편길이의 감소량은 평균 약 8 μ m 정도로 평가되었다. 이

러한 시편길이의 감소는 상변태중 부피변화의 이방성에 의해서 나타나게 된다. 시편의 길이가 10mm 인 경우 상변태 중 나타나는 총 시편길이변화가 약 50 μ m 정도임을 고려할 때 8 μ m 정도의 이방성 길이변화는 무시할 수 없는 수준이며 따라서 dilatometry 분석에 있어서 이러한 이방성 길이변화를 반드시 고려하여야 정량적인 상분율 해석이 가능할 것이다.

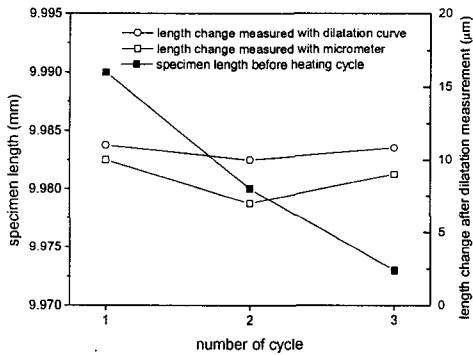


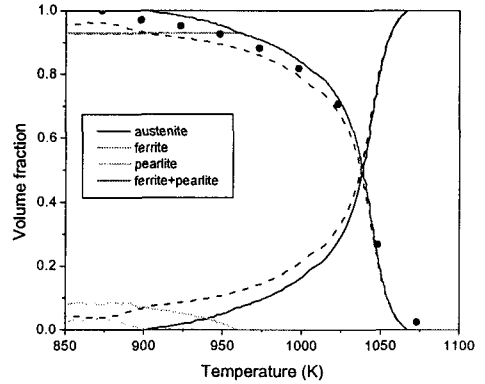
Fig. 5 Change of specimen length of steel B after dilatometry measurement cycle

그림 6 에 dilatometry 곡선으로부터 분석된 상분율을 나타내었다. 실선은 이 연구에서 제안된 모델에 의한 분석결과이며 점선은 이방성 길이변화를 고려하지 않았을 경우의 분석결과, 그리고 symbol 은 지렛대원리에 의한 결과이다. 이방성 길이변화를 고려한 모델의 분석결과와 비교하여 이방성 길이변화를 고려하지 않았을 경우에는 상변태가 완전히 종료된 저온영역에서도 신상(페라이트+펄라이트)의 상분율이 1 에 미치지 못하고 있음을 알 수 있다. 이러한 결과는 dilatometry 분석에 의한 상분율 해석에 있어 상변태 중의 이방성 길이변화의 반영여부가 매우 큰 영향을 미치고 있음을 나타내며 따라서 정량적인 상분율 해석을 위해서는 이 연구에서 제시된 바와 같이 이방성 길이 변화를 반드시 고려하여야 함을 의미한다.

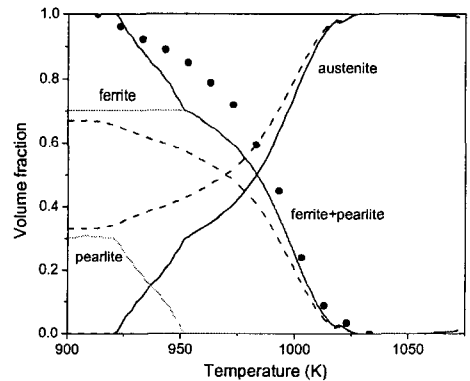
5. 결론

Dilatometry 분석에 있어서 변태소성에 의한 이방성 길이변화를 고려할 수 있는 상분율 해석 모델을 제시하였다. 두종류의 저탄소강에 대해서 dilatometry 곡선을 측정하고 분석 모델로부터 상변태 중의 상분율을 해석하였다. 이방성 길이변화의 반영여부에 따라서 상분율 해석 결과는 상당

한 차이를 나타내었으며 정량적인 상분율 해석을 위해서는 변태소성에 기인한 이방성 길이변화를 반드시 고려하여야 함을 확인하였다.



(a) steel A



(b) steel B

Fig. 6 Calculated volume fractions of ferrite, pearlite and austenite from various analysis methods

참고 문헌

- [1] J.Zhao, C.Mesplont, B.C.De Cooman,2001, ISIJ International, Vol.41, pp.492
- [2] T.A.Kop, J.Sietsma, S.J.Van der Zwaag, 2001. J. Mat. Sci., Vol.36, pp.519
- [3] J.Zhao, C.Mesplont, B.C.De Cooman,2001, Mater. Sci.&Eng., Vol.A332, pp.110
- [4] R.A.Jaramillo, M.T.Lusk, 2004. Acta Mater., Vol.52, pp.859
- [5] C.Schuh, D.C.Dunand, 2001, Acta Mater., Vol.49, pp.199