

재결정과 결정성장 유기 소성현상의 해석

김세종¹, 서동우², 김성준², 한흥남[#]

Analysis of Recrystallization and Grain Growth Induced Plasticity

Se-Jong Kim, Dong-Woo Suh, Sung-Jun Kim and Heung Nam Han

Abstract

It has been reported that the permanent strain could happen during recrystallization and grain growth even under the externally applied stress which is much lower than yield stress. In this study, we performed dilatometry experiments under the various compressive stresses and measured the amount of recrystallization and grain growth induced permanent strain. A new constitutive equation based on the concept of boundary migration induced plasticity was suggested to describe the recrystallization and grain growth induced plasticity. This equation was verified by comparing the calculated values with dilatometric experimental data under the various compressive stresses.

Key Words : Recrystallization and growth induced plasticity (ReGIP), Boundary migration, Dilatometry, Applied stress;

1. 서론

일반적으로 재료에 항복응력 이상의 외부 응력이 가해지면 소성변형이 발생한다. 그러나 상변태 과정에서 외부 응력이 가해지면, 가해진 응력이 항복응력에 비해 매우 작을 경우에도 영구변형이 발생하게 된다[1-8]. 변태유기소성이라 불리는 이러한 현상은 열연 관재의 뒤틀림[9]이나 열처리 후의 변형과 같은 다양한 산업적 문제의 원인이 된다.

변태유기소성 현상을 설명하기 위한 시도의 일환으로 몇몇 연구자들에 의해 상변태 변형의 비등방성을 기반으로 한 모델이 제시된 바 있다. Magee[10]는 외부 응력 하에서 마르텐사이트 변태가 일어날 때 특정 variant가 선호되어 선택된다는 이론을 제안하였다. 이를 바탕으로 Han 등[11]은 외부 응력 하에서 에너지적으로 선호되는 variant

를 계산하였다. 이 모델은 오스테나이트-베이나이 트 또는 오스테나이트-마르텐사이트 변태와 같이 상대적으로 낮은 온도에서 일어나는 무확산 변태에서의 변태유기소성을 잘 설명한다. 그러나 확산 변태가 주를 이루는 높은 온도에서의 변태유기소성을 설명하는 데에는 적합하지 않았다. 고온에서의 변태유기소성을 설명하기 위해 Han 등은 모델을 바탕으로, 움직이는 입계에서의 확산에 미치는 외부 응력의 영향을 고려한 모델을 제시하였다 [12].

또한, 최근 Han 등은 이러한 소성 변형이 상변태 과정뿐만 아니라 재결정 및 결정성장 과정에서도 발생할 수 있음을 보고하였다[13]. 본 연구에서는 입계 확산 기구를 바탕으로 재결정 및 결정성장 유기소성(ReGIP)을 설명하기 위한 새로운 모델을 제안하고, 이를 확인하기 위해 다양한 외부 응력 하에서 dilatometry 실험결과를 계산결과와 비교하였다.

1. Seoul National University

2. Korea Institute of Machinery and Materials

Seoul National University, hnhan@snu.ac.kr

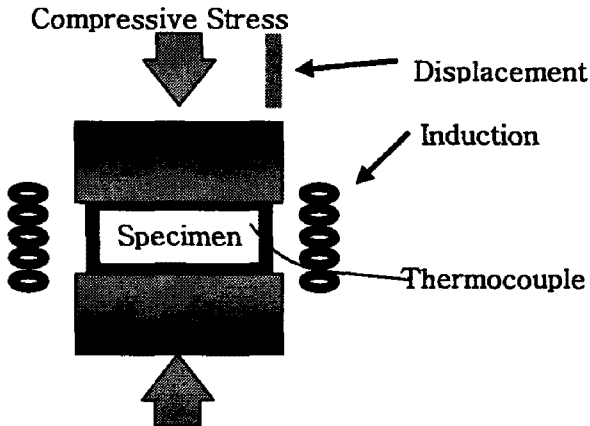


Fig. 1 Schematic diagram of experimental arrangement for dilatometric measurement under applied compressive stress

2. 실험 방법

65% 냉간 압연한 극저탄소강(표 1)을 길이 6mm, 폭 2mm, 두께 0.8mm 의 각형 시편으로 가공하였다. 각각 0, 1.63, 3.25MPa의 압축응력 하에서 1°C/sec의 속도로 900°C까지 가열한 후 다시 1°C/sec의 속도로 상온까지 냉각하는 과정을 2회 반복하며 압축 응력 방향으로의 dilatation을 측정하였다. 실험에 사용된 dilatometer를 그림 1에 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

항복 응력보다 작은 외부 응력 하에서의 dilatometry 실험 결과는 그림 2(a)와 같다. 점선으로 표시한 그래프는 65% 냉간 압연한 조직에 대해 첫 번째 가열 후 냉각 곡선을 나타내며, 실선은 2 번째 가열 후 냉각 곡선을 나타낸다. 열팽창 계수는 온도와 상관없이 일정하기 때문에 일반적으로 온도와 변형율이 선형 관계를 이뤄야 한다. 그러나 점선 그래프 (첫 번째 열처리 과정)의 경우

Table 1 Chemical composition of the investigated steel specimen for dilatometric test (unit : wt %)

C	Mn	P	Al	Nb	N	B
0.0022	0.5	0.032	0.035	0.008	0.0018	0.0008

온도와 변형율이 서로 선형 관계를 이루다 650°C 부근에서 선형 관계를 벗어나기 시작했다. 온도가 높아짐에 따라 선형 관계를 벗어난 정도도 증가하였다. 이에 반해 직선 그래프(2 번째 열처리 과정)의 경우 900°C 까지 온도에 대한 변형율이 선형 관계를 유지 하는 것을 관찰할 수 있었다. 따라서 상기의 결과를 통해 점선 그래프에서 온도와 변형율이 선형관계를 벗어나는 현상은 첫 번째 열처리 과정에서 발생한 재결정 및 결정성장에서 기인하는 것으로 생각할 수 있다. 또 온도에 따른 조직 사진을 통해 650°C 에서 부분적으로 재결정화된 결정을 발견할 수 있었으며 700°C 에서는 완전히 재결정된 결정을 관찰하였다. 온도에 따른 결정립 크기를 정리하여 그림 3 에 나타내었다. 그림 3 에서 온도가 증가할수록 결정립 크기가 증가한다는 것을 확인할 수 있었는데 이는 결정립계가 계속 이동한다는 것을 의미한다. 위의 관찰로부터 그림 2 의 점선 그래프에서 온도에 대한

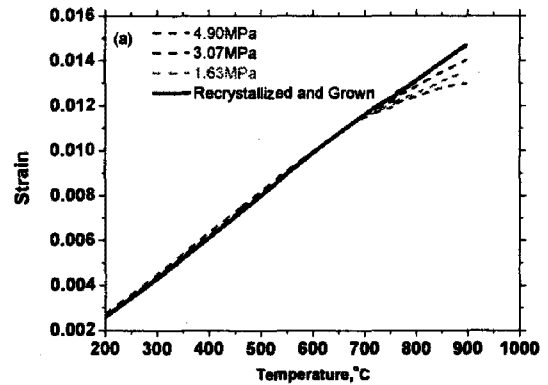


Fig. 2 Experimental curves for the 1st heating and the 2nd heating for low carbon steel under the various compressive stresses of 1.63, 3.25 and 4.90MPa

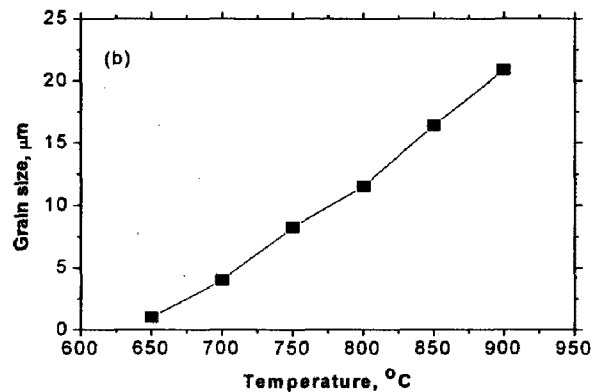


Fig. 3 Measured recrystallized grain size with temperature

변형율의 관계가 선형을 벗어나는 현상이 재결정 및 결정성장 유기 소성변형에서 기인한다고 추정할 수 있다[13].

재결정 및 결정 성장 유기 소성 변형은 외부 응력 하에서 입계가 이동할 때 발생하기 때문에 이러한 소성 변형을 설명하기 위해서는 결정립계의 이동을 고려해야 한다. Han 등은 외부에서 가해진 아주 작은 외부 응력 하에서 계면이 이동할 때 발생하는 변태 유기 소성을 설명하기 위해 외부 응력이 주어질 때 움직이는 계면에서의 확산을 고려한 모델을 제시하였다[12]. 이와 유사한 접근 방법으로 재결정 및 결정 성장 유기 소성 변형을 설명하기 위해 다음과 같은 새로운 구성식을 제안한다.

$$\dot{\epsilon} = B \frac{\sigma \Omega}{K_b T} \frac{\dot{d}_r}{d_r} \ln \left(\frac{1}{d_r} \right) \exp \left(- \frac{Q}{K_b T} \right) \quad (1)$$

이 식에서 σ 는 외부응력, d_r 는 재결정된 결정크기, B 는 상수를 나타낸다. 단위 공공당 부피, Ω 와 공공 생성 엔탈피, Q 는 각각 $1.21 \times 10^{-29} \text{m}^3$ 와 80KJ/mol 이다[12]. 식 (1)에서 상수 B 는 비선형 방법을 이용해 최적화 하여 2.1938×10^7 을 얻었다. 그림 4는 다양한 압축 응력에 하에서 실제 실험을 통해 측정된 재결정 및 결정성장 유기 소성변형과 식 (1)을 통해 얻은 계산결과를 나타낸 그래프이다. 이 그림에서 실선은 계산 결과를 나타내며 기호는 실제 실험 결과를 나타낸다.

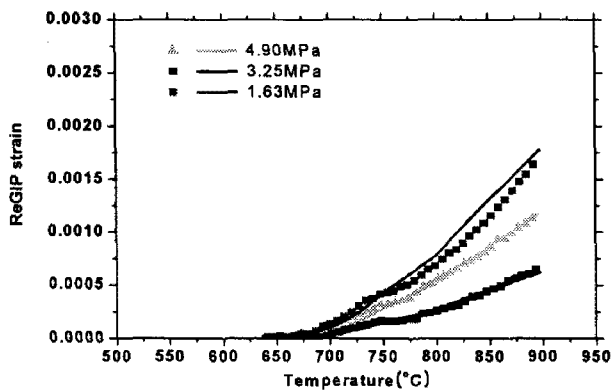


Fig. 4 Measured and calculated recrystallization and grain growth induced strain with temperature for three different compressive stresses, 1.63, 3.25 and 4.90Mpa

이 그림을 통해 계산 결과가 실제 측정값과 잘 맞는다는 것을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

이번 연구에서는 저자들이 제안한 재결정 및 결정 성장 유기 변형을 설명할 수 있는 수학적 구성식을 제시하였다. 그리고 극저탄소강을 이용한 dilatometry 실험을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 재결정 및 결정 성장이 일어날 때 외부에서 가해진 응력이 항복 응력보다도 훨씬 작더라도 영구변형이 일어날 수 있다는 것을 확인하였다..
- (2) 외부 응력이 주어질 때 움직이는 입계에서의 확산을 고려한 모델은 실험 결과와 잘 일치하였다. 이를 통해 이번 연구에서 제안한 모델이 재결정 및 결정 성장 유기 소성 변형을 잘 설명한다는 것을 확인할 수 있었다.

후 기

이번 연구는 포스코 연구 기금과 BK21 재료분과의 지원으로 이루어 졌습니다. 이에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- [1] G.W. Greenwood and R.H. Johnson, Proc. R. Soc. A (London) 283 403 (1965)
- [2] H. Takei and K. Nakasa, J. Jpn. Inst. Met. 35 1063 (1971)
- [3] N. Nojaki, Y. Uesugi, Y. Nishikawa and I. Tamura, J. Jpn. Inst. Met. 49 260 (1985)
- [4] E. Gautier, A. Simon and G. Beck, Acta metall. 35 1367 (1987)
- [5] P. Zwigg and D.C. Dunand, Acta mater. 45 5285 (1997)
- [6] H.N. Han and J.K. Lee, ISIJ Int. 42 200 (2002)
- [7] H.N. Han and D.-W. Suh, Acta mater. 51 4907 (2003)
- [8] H.N. Han, C.G. Lee, C.-S. Oh, T.-H Lee and S.-J.

- Kim, *Acta mater.* 52 5203 (2004)
- [9] H.N. Han, J.K. Lee, H.J. Kim and Y.S. Jin, *J. Mater. Process. Tech.* 128 216 (2002)
- [10] C.L. Magee, Ph.D. thesis of Carnegie Institute of Technology, Pittsburgh 1966
- [11] S.H. Lee, J.-Y. Kang, H.N. Han, K.H Oh, H.-C. Lee, D.-W. Suh and S.-J. Kim, *ISIJ Int.* 45 1217 (2005)
- [12] H.N. Han, D.-W. Suh, J.K. Lee and S.-J. Kim, *Philos. Mag* 87, 159 (2007)
- [13] H.N. Han, J.K. Lee and S.-J. Kim, *Mater. Lett.* 59 158 (2005)