

동적재료모델을 활용한 S355NL강의 열간 변형거동 분석

이성호¹ · 박동준² · 송종한² · 이채훈³ · 이진모⁴ · 이태경^{5, #}

Hot Deformation Behavior of S355NL Steel Based on Dynamic Material Model

S.H. Lee, D.J. Park, J.H. Song, C.H. Lee, J.M. Lee, and T. Lee

(Received September 3, 2024 / Revised September 12, 2024 / Accepted September 12, 2024)

Abstract

The S355NL steel has garnered attention as a structural material for applications in extremely challenging environments owing to its excellent mechanical properties. This study investigated the hot deformation behavior of S355NL steel through compression tests conducted in a temperature range of 900–1200°C and a strain rate range of 10^{-3} – 1 s⁻¹ to explore the optimal processing parameters. The flow behaviors consisted of an initial rapid increase and subsequent plateau with a marginal decrease in stress. This phenomenon was interpreted in terms of microstructural evolution, such as dislocation density and dynamic recrystallization. The efficiency of power dissipation and instability domains were derived using the dynamic material model based on the compression test dataset, providing a series of processing maps. In contrast to conventional processing maps plotted for a single strain value, this study has established ten maps at a strain interval of 0.1. This approach allowed for the consideration of continuously variable strain parameters, which is inherent to an actual metal-forming process. The efficiency of power dissipation was strongly governed by the high temperatures ($\geq 1100^\circ\text{C}$). The strain rates barely affected the efficiency, but it primarily contributed to the instability domains. The application of high strain rates ($\geq 10^{-1}$ s⁻¹) generated a region of negative instability due to the absence of dynamic recrystallization and the presence of cracks at grain boundaries.

Keywords : S355NL, Hot deformation, Dynamic material model, Processing map

1. 서 론

최근 수년간 국제사회는 탄소 배출량 증가에 따른 지구 온난화 가속화 현상에 의해 심각한 생태적 위기에 직면하고 있다. 해상풍력발전기는 고청정 재생에너지원으로 석유 및 가스 에너지 공급의 일부를 대체하여 탄소 배출을 저감함으로써 이와 같은 환경 문제를 완화할 수 있다. 이러한 견지에서 해상

풍력발전은 에너지 산업 체계 내에서 중요한 역할을 할 것으로 기대된다. 그럼에도 불구하고 해상풍력발전소의 설치, 운영 및 가동은 여전히 극한 환경의 여러 제한 요소를 맞닥뜨리고 있다. 특히 해상 난기류, 파도, 바람, 해류로 인해 발생하는 주기적인 반복 하중은 해상 구조물에 심각한 손상을 초래할 수 있기 때문에 해당 부품에 사용되는 소재는 높은 안전성과 신뢰성을 유지해야 한다. 그러므로 해상 구조물 제조 시에는 무거운 하중 및 부식과 같은 극한 환경 속에서도 소재의 강건함을 유지할 수 있는 구조용 소재가 요구된다.

S355NL강은 355 MPa 이상의 항복강도를 지닌 저합금강으로 저온 환경에서도 고강도 및 우수한 충격 인성을 지니며, 용접성과 가공성 또한 뛰어나

1. 부산대학교 기계공학부, 박사과정

2. 부산대학교 기계공학부, 석사과정

3. 태웅 기업부설연구소, 차장

4. 태웅 기업부설연구소, 연구소장

5. 부산대학교 기계공학부, 부교수

#Corresponding Author: School of Mechanical Engineering, Pusan

National University, E-mail: taeklee@pnu.edu,

ORCID: 0000-0002-1589-3900

대형 구조물 제작에 유리한 특성이 있어 해양 구조용 소재로 꾸준히 사용되어 오고 있다. 최근에는 풍력발전기의 초대형화 및 수명 연장을 위해 내마모성, 피로 거동 등 다양한 기계적 물성을 개선하려는 시도가 이어져 오고 있다[1, 2]. S355NL강을 포함한 금속 소재는 가공 온도 및 변형 속도(strain rate)와 같은 가공 조건이 적절하지 않을 경우 내외부 균열, 수소취성, 미세조직 불균일성과 같은 결함이 발생할 수 있으며, 이는 최종 부품의 물성 저하로 이어질 수 있다[3]. 특히 구조용 소재에서 이와 같은 결함은 심각한 사고로도 이어질 수 있기 때문에 최적 성형 조건을 탐색하기 위한 다양한 연구가 활발히 수행되어 왔다[4]. 그러나 trial and error 기반 접근 전략의 경우 성형 조건과 소재 성능 간 데이터 베이스를 구축하기 위해 막대한 비용과 시간이 요구되는 탓에, 더욱 효과적인 최적화 방안에 대한 수요가 지속적으로 제기되고 있다.

지난 40년 동안 금속 소재의 고온 가공성을 효과적으로 예측하고 평가하기 위해 변형공정지도 이론이 널리 활용되어 왔다[5]. 변형공정지도란 동적 재료 모델(dynamic materials model, DMM)을 기반으로 가공 온도와 변형 속도에 따른 에너지 분산 효율(efficiency of power dissipation) 및 소성 불안정 인자(instability factor)를 계산 후, 두 수치를 중첩하여 시각화한 자료를 의미한다. 에너지 분산 효율은 미세조직 변화에 따른 최적 가공 조건을 수치화한 것이며, 소성 불안정 인자는 가공 결함과 같은 불안정한 미세조직 영역을 나타내는 기준이다. 변형공정지도를 활용하면 금속 소재의 고온 가공성 평가 및 공정 설계를 효율적으로 최적화할 수 있는 것으로 알려져 있다. 예를 들어 Zhao 등[6]은 Q345 구조용 소재에 대해 고온변형거동 조사 후 변형공정지도를 작성하였다. 해당 연구는 Johnson-Cook, Modified Johnson-Cook, strain-compensated Arrhenius의 세 가지 구성 모델을 활용하여 유동응력 곡선을 보정, 이를 통해 예측 정확도가 높은 변형공정지도 제작을 시도하였다. Jia 등[7]은 40Cr/Q345B 이종소재로 대형 링을 제작하기 위해 두 소재의 변형공정지도를 비교하였다. 이를 통해 변형 속도를 제어함으로써 이종소재 대형 링 제작에 대한 최적 매개변수를 성공적으로 도출하였다. S355NL강 또한 널리 활용되는 구조용 소재이므로 최적 가공 조건을 찾기 위한 과정은 필수적이나, 이에 대한 DMM 관점의 연구는

여전히 부족한 실정이다.

본 연구는 S355NL강에 대해 다양한 조건에서 고온 압축 시험을 수행하여 데이터베이스를 구축하였다. 이를 바탕으로 해당 소재에 대한 변형공정지도를 작성하고 이를 공유한다. 특히, 기존 변형공정지도가 특정 단일 변형률(strain)에서의 가공 조건만 고려했던 것과 달리, 본 연구에서는 폭넓은 변형률 범위에서 다수의 변형공정지도를 작성하여 연속적으로 변화하는 변형률 범위 내에서 최적 공정 조건을 탐색하고자 하였다. 실제 공정에서 변형률이 연속적으로 변화하는 점을 상기하면 이러한 접근법은 유의미하다고 판단된다[8]. 본 연구는 해당 전략을 통해 다수의 변형공정지도를 확보 후 변형률 축에 따른 소성 불안정 영역을 파악함으로써 열간 가공 공정 중 결함 발생을 방지하기 위한 최적 조건을 제안하였다.

2. 실험 방법

본 연구에 사용된 소재는 slab 형태로 제작된 산업용 S355NL강 주조재이다. 해당 소재의 고온 변형거동을 해석하기 위해 Gleeble 시험기를 활용하여 일축 압축 시험을 수행하였다. 이를 위해 주조재의 동일 위치로부터 직경 10 mm, 높이 12 mm의 원통형 시험편을 가공하였다. 각 시험편은 높이 기준 진변형률 1.0까지 압축되었다. 일축 압축 시험에 사용된 온도 조건은 각각 900°C, 1000°C, 1100°C, 1200°C이며, 변형 속도 조건은 각각 10^{-3} s^{-1} , 10^{-2} s^{-1} , 10^{-1} s^{-1} , 1 s^{-1} 이다. 최고 온도(1200°C) 및 최저 변형 속도(10^{-3} s^{-1})가 동시에 적용될 경우 장비 한계로 인해 실험 데이터가 불안정하게 확보되는 것을 확인하였으므로, DMM 기반 해석 시에는 해당 조건의 유동응력 데이터를 배제하였다. 유효한 유동응력곡선을 DMM 기반 해석에 적용하고 변형공정지도를 확보하는 방법 및 그 결과에 대해서는 3.2절에서 보다 상세히 설명하였다. 최종적으로 진변형률 1 이하 범위에서 진변형률 0.1 간격으로 총 10장의 변형공정지도를 작성 및 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 고온 압축 변형 거동

각 온도 및 변형 속도 조건에서 S355NL강의 고온

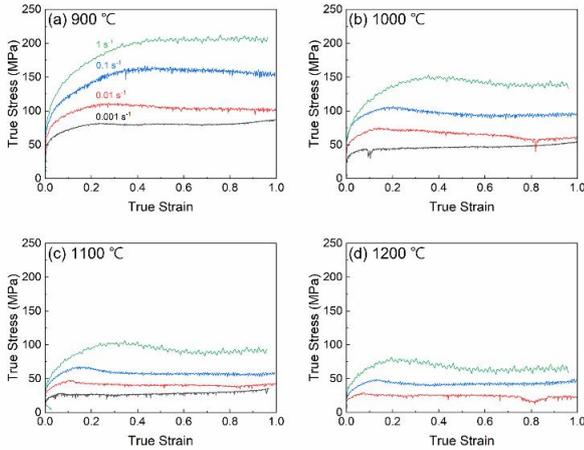


Fig. 1 True stress-strain curves of S355NL steels obtained at the temperatures of (a) 900°C; (b) 1000°C; (c) 1100°C; (d) 1200°C. The applied strain rates ranged from 10^{-3} to 1 s^{-1} , as indicated by the color of the flow curves. Please refer to Fig. 1(a) for details.

압축시험을 통해 확보한 유동응력곡선을 Fig. 1에 정리하였다. 공정 조건과 무관하게, 변형 초기 단계에서 응력이 급증하며 가공 경화 현상을 보였다. 이후 응력이 안정화되며 평탄해지거나 완만히 감소하여 정상상태에 도달하는 경향이 일관적으로 관측되었다. 이는 금속의 전형적인 3단계 변형 과정으로 해석할 수 있다[9]. 첫 번째 단계에서는 변형률 증가로 전위 밀도(dislocation density)가 상승하며 가공 경화(work hardening)를 야기한다. 두 번째 단계에서는 동적 재결정(dynamic recrystallization)에 따른 연화 효과가 발생하며 앞선 가공 경화와 경쟁하게 된다. 이에 따라 유동응력이 최고점에 도달할 때까지 그 상승 속도가 둔화된다. 마지막 단계에서는 동적 재결정이 더욱 진행되면서 응력 곡선이 약간의 감소 후 평탄화되는 정상 상태에 도달하게 된다. 이는 특정 변형률 이상에서 동적 회복 및 재결정에 따른 동적 연화 효과가 가공 경화 효과를 압도하면서 발생하는 현상이다. Fig. 1에 도시된 일부 유동응력곡선은 불안정한 요동(serration)을 보이며 특정 구간에서는 응력이 급감하는 듯한 모습도 보인다. 이는 소재 자체의 특성이라기보다는 Gleeble 시험 중 금형과 시편 간 마찰이 일시적으로 응력곡선에 간섭하기 때문인 것으로 판단된다.

한편, 고온에서의 전위 및 원자 이동은 공정 시간에도 밀접하게 영향받는다. 특히 높은 변형 속도,

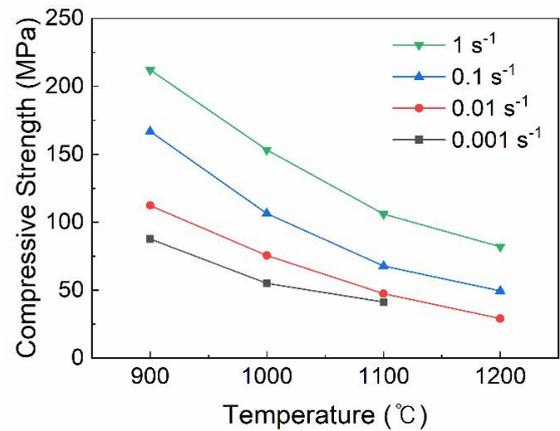


Fig. 2 Variation of compressive strengths depending on the temperature and strain rate conditions

낮은 변형률 조건에서는 동적 재결정을 위한 구동력 및 시간이 충분하지 않아 가공 경화를 완료하기 위한 최저 변형률 조건이 더 높게 형성된다[6, 10]. 실제로 1200°C의 변형 속도 10^{-2} s^{-1} , 10^{-1} s^{-1} , 1 s^{-1} 에서 가공 경화가 완료되는 변형률은 각 0.08, 0.14, 0.20으로 큰 차이를 보인 반면, 가공 경화에 소요되는 시간은 306, 304, 303초로 유사하였다. 이는 선행연구 결과와도 부합한다[6].

Fig. 2는 변형 조건에 따른 압축강도의 변화를 나타낸다. 동일 변형 속도에서 최대 유동응력은 변형 온도와 반비례하여 단조 감소하였다. 이는 금속 소재 고온변형거동의 일반적인 특징으로 온도가 증가할수록 금속 원자의 진동이 강화되며 전위, 공공, 결정립계와 같은 원자 재배열에 필요한 모든 움직임을 촉진하기 때문이다. 원자의 이동이 가속화됨에 따라 전위 소멸 및 회복 속도가 향상되어 미세조직 내 저장된 에너지를 감소시키고 동적 연화를 유발한다. 한편, 동일 온도 조건에서 최대 유동응력은 변형 속도에 비례하여 단조 증가하였다. 이는 변형 속도가 증가함에 따라 변형 도중 동적 회복 및 재결정 발생이 둔화됨을 의미한다. 높은 변형 속도에서는 원자가 확산할 시간이 충분하지 않기 때문에 동적 재결정을 유발하기 위한 에너지 축적이 완벽히 이루어지지 않는다. 또한 높은 변형 속도에서의 전위 증식은 낮은 변형 속도보다 빠르기 때문에 더 큰 가공 경화를 초래한 것으로 판단된다.

3.2 변형공정지도 작성 및 해석

본 연구에서는 3.1절에서 확보한 고온 변형 거동

을 DMM 이론에 적용하여 S355NL강의 변형공정지도를 작성하였다[5]. DMM 이론에 따르면 열간 변형 중 재료가 축적한 총 에너지(P)는 다음과 같이 두 에너지(G, J)의 합으로 표현할 수 있다:

$$P = \sigma \dot{\epsilon} = G + J = \int_0^{\dot{\epsilon}} \sigma d\dot{\epsilon} + \int_0^{\sigma} \dot{\epsilon} d\sigma \quad (1)$$

G 는 탄성 영역에서 온도 상승 및 변형 속도 증가에 따라 소모되는 에너지, J 는 소성 영역에서 전단 밴드, 균열, 동적 회복 및 재결정과 같은 미세조직 변화를 유발하는 에너지로 간주한다. 일정한 변형 온도 및 속도에서 재료의 유동응력과 변형 속도는 다음과 같이 표현된다:

$$\sigma = K\dot{\epsilon}^m \quad (2)$$

K 는 재료 상수, m 은 변형률 속도 민감 계수를 의미한다. 에너지 분산 효율(η)은 열간 변형 중 미세조직 변화와 관련된 엔트로피 발생률로, 미세조직 변화에 의해 소산되는 에너지 효율을 의미한다. 이 값은 변형률 속도 민감 계수와 연관하여 다음과 같이 표현된다:

$$\eta = \frac{J}{J_{max}} = \frac{2m}{m+1} \quad (3)$$

상기 식을 통해 미세조직 변화는 에너지 분산 효율이 최대인 경우 가장 활발함을 알 수 있다. 한편, 열간 변형 시 생성되는 엔트로피 비율이 실제 엔트로피 비율과 일치하지 않을 때 불안정성이 발생하며, 이는 미세조직 내부의 전단 밴드 및 국부 변형 등의 결함을 유발할 수 있다[9]. 이러한 유동 불안정성을 평가하고자 Ziegler는 소성 불안정 인자(ξ)를 다음과 같이 제안하였다:

$$\xi(\dot{\epsilon}) = \frac{\partial \ln\left(\frac{m}{m+1}\right)}{\partial \ln \dot{\epsilon}} + m < 0 \quad (4)$$

상기 식에 표현된 바와 같이 ξ 값이 음수인 구간을 소성불안정 영역으로 정의한다.

Fig. 3는 여러 변형률에서 각 조건에 따른 에너지

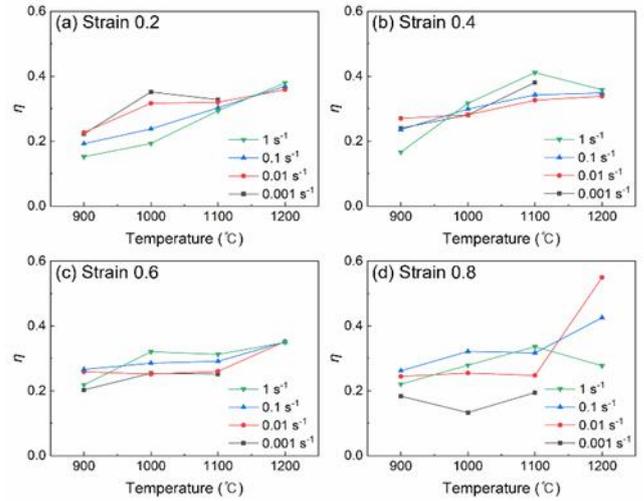


Fig. 3 Efficiency of power dissipation at the different strains: (a) 0.2; (b) 0.4; (c) 0.6; (d) 0.8

분산 효율의 변화를 나타낸다. 변형률과 무관하게 대부분의 구간에서 온도와 에너지 분산 효율이 비례하였다. 일부 영역에서 확인되는 반비례 관계는 Fig. 1에 드러나는 불안정한 유동응력곡선의 편차에 기인하는 것으로 판단된다. 이와 같은 편차를 보정하기 위해 구성방정식이나 기계학습 등을 도입하는 방안이 보고된 바 있다[6, 11]. 상술한 온도-에너지 분산 효율 간 비례 관계는 앞서 도시한 온도별 강도 변화와 유사한 경향으로, 고온에서의 원자 재배열에 의해 미세조직 변화가 가속되었음을 간접적으로 확인 가능하다. 이와 대조적으로, 변형 속도는 에너지 분산 효율과 뚜렷한 경향성을 구축하지 않았다. 다시 말해 변형 속도는 온도 대비 에너지 분산 효율에 상대적으로 미미한 영향을 미쳤음을 알 수 있다.

Fig. 4에 진변형률 1 이하 범위에서 S355NL강의 변형공정지도를 연속적으로 작성하여 나타내었다. 상대적으로 변형 초기라 할 수 있는 0.1-0.5 변형률 범위에서는 온도가 낮고 변형 속도가 빠른 구간에서 소성 불안정 영역이 나타난다. 또한, 해당 구간 내에서는 변형률에 비례하여 소성 불안정 영역이 현저히 감소하였다. 반대로 변형 중기 이후의 1.0 변형률에서는 온도가 높고 변형 속도가 빠른 구간에서 소성 불안정 영역이 발생하였다.

변형 속도 측면에서 보다 면밀히 살펴보면, 본 연구에서 관측된 모든 소성 불안정 영역은 10^{-1} - 1 s^{-1} 의 범위로 제한된다. 이는 에너지 분산 효율과 달리

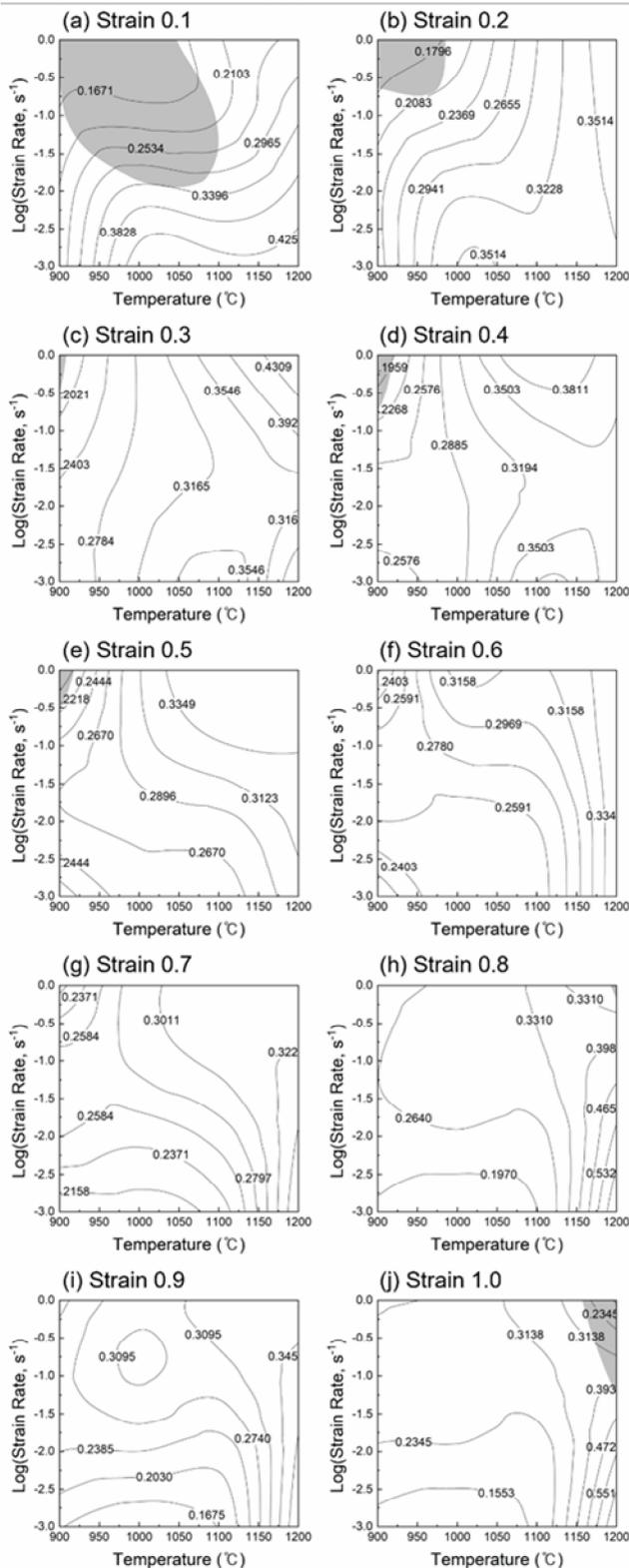


Fig. 4 Processing maps of S355NL steel at the different strains: (a) 0.1; (b) 0.2; (c) 0.3; (d) 0.4; (e) 0.5; (f) 0.6; (g) 0.7; (h) 0.8; (i) 0.9; (j) 1.0

소성 불안정 영역이 높은 변형 속도에 지배됨을 의미한다. 모든 변형률 구간에서 소성 불안정 영역을 제외하면서 평균적으로 가장 높은 에너지 분산 효율을 나타내는 영역은 변형 온도 1100–1200°C 및 변형 속도 10^{-3} – 10^{-2} s^{-1} 구간이다. 이는 미세조직 내 동적 회복 및 재결정 현상과 매우 연관성이 깊다. Zhou 등[12]은 가공 온도가 감소할수록 동적 재결정 현상이 억제되어 에너지 분산 효율이 낮아지며, 심지어 해당 구간에서 변형 속도가 높아질 경우 결정립계의 균열 발생 때문에 소성 불안정 영역까지 형성될 수 있다고 주장하였다. Chen 등[13] 또한 소성 불안정 영역의 주요 원인은 동적 재결정의 부재라 주장하며 추가로 고온, 고속 변형 시 페라이트/오스테나이트 계면(ferrite/austenite interface)에서 썩기 균열(wedge crack)이 발생하며 소성 불안정 영역을 형성함을 확인하였다. 상기 문헌들의 결론은 본 연구 결과와 유사한 경향성을 나타낸다. 본 연구에서 연속적으로 확보한 변형공정지도를 활용할 경우, 보다 정교한 공정변수 최적화가 가능할 것으로 기대된다.

4. 결론

본 연구는 해양구조물에 널리 사용되는 S355NL 강 구조재에 대해 고온 압축 시험을 수행하여 열간 변형거동을 탐색하고, 다양한 변형률에서의 변형공정지도를 작성하였다. 고온압축 시 변형 초기 단계에서는 가공 경화 현상이 관측되었으나, 변형이 지속됨에 따라 동적 회복 및 재결정에 따른 연화 현상으로 인해 유동응력이 정상상태에 이르렀다. 변형 온도가 증가할수록 원자 확산 가속화에 따라 동적 재결정이 더욱 활발히 진행되어 압축 응력이 감소하였다. 변형 속도 증가는 전위 밀도 증가를 초래하여 압축 응력을 증진하였다. 확보된 고온변형거동 데이터를 활용, DMM 이론을 기반으로 S355NL 소재의 변형공정 지도를 작성하였다. 1100–1200°C의 고온 영역에서 높은 에너지 분산 효율이 관측되는 반면 변형 속도의 역할은 상대적으로 제한되었다. 이는 고온 영역에서 원자 재배열 가속화에 따른 미세조직 변화가 우세하기 때문으로 판단된다. 한편, 변형 공정지도 분석상 10^{-1} – 1 s^{-1} 의 높은 변형 속도 영역에서 소성 불안정 영역이 나타날 확률이 높아지는 것을 확인하였다. 본 연구에서 연속적으로 확보한 변형공정지도를 활용할 경우, 보다 정교한 공정

변수 최적화가 가능할 것으로 기대된다.

사 사

본 연구는 2024년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. RS-2023-00301857).

REFERENCES

- [1] V. Igwemezie, A. Mehmanparast, A. Kolios, 2018, Materials Selection for XL Wind Turbine Support Structures: A Corrosion-Fatigue Perspective. *Mar. Struct.* Vol. 61, pp. 381-397.
<https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2018.06.008>
- [2] A. Jacob, A. Mehmanparast, R. D'Urzo, J. Kelleher, 2019, Experimental and Numerical Investigation of Residual Stress Effects on Fatigue Crack Growth Behaviour of S355 Steel Weldments. *Int. J. Fatigue.* vol. 128, p. 105196.
<https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2019.105196>
- [3] G. Krauss, 2015, *Steels: Processing, Structure, and Performance.* ASM International.
- [4] H. Y. Ban, G. Shi, Y. J. Shi, Y. Q. Wang, 2011, Research Progress on the Mechanical Property of High Strength Structural Steels. *Adv. Mater. Res.* Vol. 250~253, pp. 640-648.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.250-253.640>
- [5] Y. V. R. K. Prasad, 2003, Processing Maps: A Status Report. *J. Mater. Eng. Perform.* Vol. 12, No. 6, pp. 638-645.
<https://doi.org/10.1361/105994903322692420>
- [6] G. Zhao, Y. Tian, Y. Song, J. Li, H. Li, J. Zhang, 2022, A Comparative Study of Three Constitutive Models Concerning Thermo-Mechanical Behavior of Q345 Steel during Hot Deformation. *Crystals.* Vol. 12, No. 9, p. 1262. <https://doi.org/10.3390/cryst12091262>
- [7] Y. Jia, H. Qi, M. Pei, Z. Li, F. Qin, L. Jia, 2022, Hot Deformation Behavior Coordination and Processing Maps of 40Cr/Q345B Bimetallic Blank by Centrifugal Casting. *Metals.* Vol. 12, No. 8, p. 1281.
<https://doi.org/10.3390/met12081281>
- [8] J.H. Park, D.H. Park, S.Y. Shin, N. Kim, 2022, Temperature and Strain Rate Controls of AISI 4340 Based on a 3D Processing Map in a Hot Forging Process. *J. Korean Soc. Precis. Eng.* Vol. 39, No. 9, pp. 691-700. <http://doi.org/10.7736/JKSPE.022.071>
- [9] X. Zhang, G. Zhou, H. Zhang, S. Zhang, X. Ma, B. Gan, L. Chen, 2024, Study of Processing Map of GH4079 Alloy Based on Different Instability Criteria. *JOM.* Vol. 76, No. 7, pp. 3872-3887.
<https://doi.org/10.1007/s11837-024-06588-1>
- [10] M. Shaban, B. Eghbali, 2010, Determination of Critical Conditions for Dynamic Recrystallization of a Microalloyed Steel. *Mater. Sci. Eng. A.* Vol. 527, No. 16~17, pp. 4320-4325.
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.03.086>
- [11] M. H. Bae, M. Kim, J. Yu, M. S. Lee, S. W. Lee, T. Lee, 2022, Enhanced processing map of Ti-6Al-2Sn-2Zr-2Mo-2Cr-0.15Si aided by extreme gradient boosting. *Heliyon.* Vol. 8, No. 10, p. e10991.
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e10991>
- [12] G. Zhou, H. Ding, F. Cao, B. Zhang, 2014, A Comparative Study of Various Flow Instability Criteria in Processing Map of Superalloy GH4742. *J. Mater. Sci. Technol.* Vol. 30, No. 3, pp. 217-222.
<https://doi.org/10.1016/j.jmst.2013.07.008>
- [13] L. Chen, X. Ma, X. Liu, L. Wang, 2011, Processing Map for Hot Working Characteristics of a Wrought 2205 Duplex Stainless Steel. *Mater. Des.* Vol. 32, No. 3, pp. 1292-1297.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.09.030>