



소성가공공정에서의 미세조직 예측기술

이호원 | 막스플랑크 철연구소

강성훈 | 재료연구소

[요약문]

기존의 소성가공공정에서의 미세조직 예측 기술은 온도 및 외력에 의한 금속학적 변화를 모사하기 위해 다수의 실험에 기반한 경험적 모델링 작업이 요구되고 이를 구현할 수 있는 기계 및 재료적 지식 기반이 동시에 요구되기 때문에, 현재까지는 신뢰성을 갖는 모델 및 수치해석기술은 충분히 확보되지 못한 상태이다. 이러한 미세조직 예측기술의 정확도를 향상시키고자 하는 일환으로, 최근에는 매크로 스케일의 FE 해석과의 결합을 통해 소성가공공정과 이후의 열처리 공정에서의 정적 재결정 · 동적 재결정 · 상변태 · 변형유기변태 등 복잡한 미세조직 현상을 그 변화가 일어나는 실제 메조 스케일에서 예측하고자 하는 연구가 시도되고 있다. 본고에서는 그 중에서도 소성가공에서 발생하는 재결정 거동 예측에 주로 적용되고 있는 메조스케일 해석 기법과 매크로-메조 다단위 스케일 해석 기법의 국내외 연구 현황에 대해 알아보고자 한다. 또한, 이를 이용한 소성가공공정에서의 미세조직 예측 사례와 미세조직 예측기술의 전망에 대해 기술하고자 한다.

1. 서 론

소성가공 분야에서의 수치해석기술은 공정설계, 원소재 및 부품의 형상 설계, 결합 예측, 프레스 용량 결정, 단류선 분석 등 거시적인 측면에서 기존의 실험과 경험을 대체할 수 있는 수준까지 급속히 발전되었다. 이와 더불어 최근에는 새로운 소재 및 부품 개발에 대한 요구가 증대됨에 따라, 재료 내부에서 발생하는 미세조직의 변화를 제어 또는 예측하여 이에 활용하고자 하는 연구가 점진적으로 증가하고 있는 추세이다.

최근 다양한 산업군에서 요구되는 부품 · 소재의 개발 경향은 고강도화 및 경량화의 실현일 것이다. 부품 · 소재의 고강도화는 비단 새로운 합금 설계를 통해서도 가능하지만, 기존 소재의 공정 설계를 변경하거나 공정 조건을 변화시켜 소재 내부의 미세조직을 제어함으로써 소재의 고강도화를 달성할 수도 있다. 이와 같은 소성가공공정 중의 미세조직 변화는 그림 1에 도시된 바와 같이 성형속도, 온도, 변형률속도, 유동응력, 원소재 형상, 금형 형상 등 다양한 인자에 의해 영향을 받기 때문에 이를 종합적으로 고려해야만 원하는 미세조직과 형상을 갖는 부품으로 성형이 가능하다.

소성가공공정 중에 발생하는 대표적인 미세조직 변화는 동적 재결정, 정적 재결정, 결정립 성장, 상변태, 집합조직 등이 있다. 이 중 동적 재결정은 열간공정 중에 발생하고 정적 재결정과 결정립 성장은 냉간공정이나 열간공정 이후의 열처리 공정에서 발생한다. 이러한 재결정 현상은 초기 미세조직과 완전히 다른 미세조직을 형성하기 때문에, 소성가공공정 중의 미세조직 변화 기구에 대한 이해가 필수적이다.

본고에서는 소성가공과 이후의 열처리 공정에서 발생하는 동적 · 정적 재결정 미세조직 예측기술의 연구 동향을 메조스케일 모델, 다단위 스케일 모델을 중심으로 살펴보고, 그 중 동적 재결정 미세조직 예측기술의 적용 예제들을 간단히 소개하고자 한다.

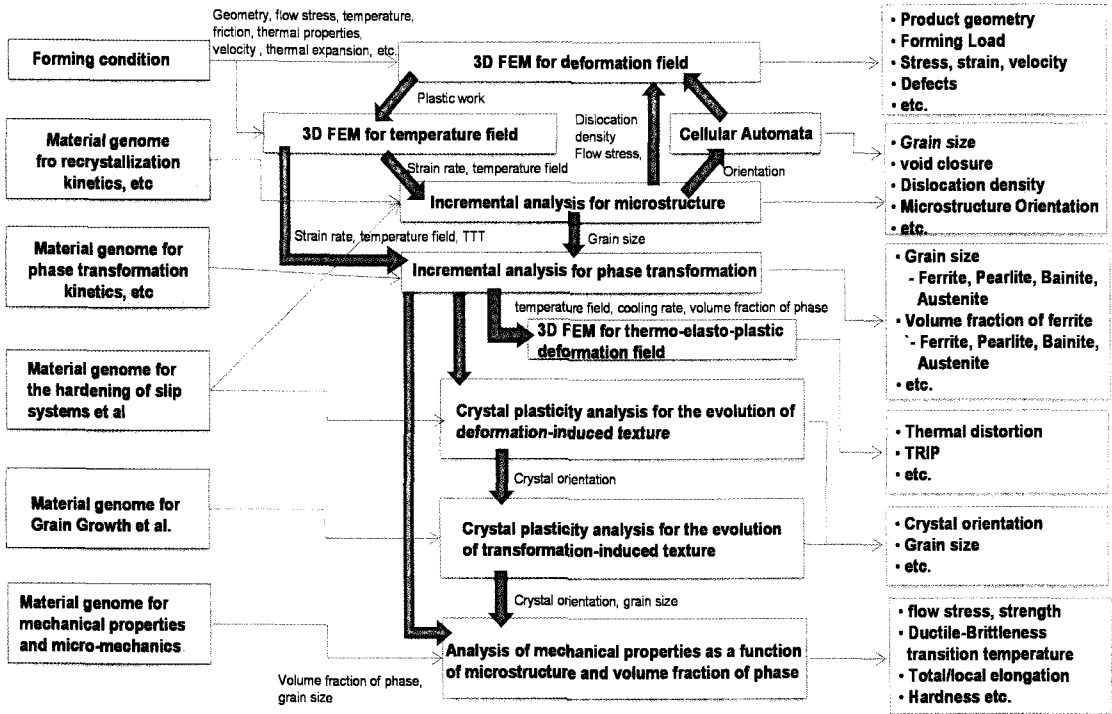


그림 1. 소성가공공정에서의 수치해석기술

2. 연구 동향

초기의 결정립 변화에 관한 미세조직 예측 연구는 대부분 많은 수의 실험을 필요로 하는 JMAK식 형태의 경험적 수식 모델이었다. 경험적 JMAK 식은 다양한 공정 조건에서 열간 비틀림시험이나 압축시험으로부터 도출되며, 판재 압연과 같이 비교적 간단한 상태의 변형 및 온도 이력을 가지는 공정에 비교적 성공적으로 적용되었다. 하지만 이 방법은 물리적 기반이 미약하기 때문에 실험식이 도출된 공정 범위 이외의 조건에서는 예측의 정확도가 낮고, 판재압연이 아닌 형상압연이나 열간공정 등의 복잡한 3차원 공정의 경우 정확한 공정조건 제산이 어렵기 때문에 적용이 어려운 단점이 있다.

때문에 다수의 연구자들은 이런 복잡한 공정의 미세조직 예측을 위하여 경험적 수식 모델을 FE(Finite Element) 해석과 결합하는 방법을 통하여 열간공정 및 열간 형상압연에 적용하였다. 하지만 경험적 수식 모델이 가지는 근본적인 한계 때문에 복잡한 미세조직 변화를 동반하는 공정이나 불균질한 미세조직을 가지는 공정에 적용이 어렵다는 단점을 가지고 있다. 또한 경험적 수식 모델에서는 결정립 크기만을 예측하기 때문에 최근 그 수요가 증가하고 있는 집합조직 최적화 및 예측은 불가능하다.

이러한 단점을 극복하기 위하여 실제 미세조직 변화를 모사하는 물리적 기반의 메조스케일(Mesoscale) 모델들이 1980년대의 Multistate Kinetics Potts Monte Carlo(MC) 모델을 이용한 결정립 성장 모사^[1] 이후로 꾸준히 개발되어 다양한 공정의 미세조직 예측에 사용되었다. 이러한 메조스케일 방법은 넓은 범위의 물성을 가지는 많은 수의 결정립을 직접적으로 해석하기 때문에, 다양한 미세조직 변화 메커니즘의 Kinetics나 Dynamics에 나타나는 비균질성을 표현하고 이해하기에 적합하다는 점에서 큰 의의를 가진다. 메조스케일 모델에는 MC, Phase Field(PF), Cellular Automata(CA), Component, Vertex 모델 등의 다양한 해석 방법이 있다. 특히 이 중에서 MC와 CA모델은 표 1에

기술된 바와 같이 정적 재결정(Primary Static Recrystallization), 동적 재결정(Dynamic recrystallization), 상변태(Phase Transformation), 결정립 성장(Grain Growth), 응고(Solidification), 고용(Precipitation) 등의 다양한 미세조직 변화 메커니즘에 적용되어 왔다.

표 1. 소성가공공정 미세조직 예측기술의 국내외 개발현황

	MC		CA	
	국내	국외	국내	국외
Static Recrystallization	●	●	●	●
Dynamic Recrystallization		●	●	●
Phase Transformation		●		●
Grain Growth	●	●		●
Dynamic StrainInduced Transformation		●		●
Solidification		●		●
Precipitation		●		●

하지만 MC 모델의 경우 미세조직 성장 속도를 구현하는데 있어 시스템의 Hamiltonian에 기초한 확률에 의존하기 때문에 실제 시간 및 공간과의 보정이 불가능하다는 태생적 한계를 가지고 있다. 반면 CA 모델은 MC 모델과 달리 시간과 길이를 자유롭게 기술할 수 있기 때문에 유한요소해석 등의 다른 스케일의 해석방법과 결합이 용이하며, 따라서 실질적인 공정 모사를 위한 해석에 적합하다는 장점을 가지고 있다. 따라서 본고에서는 소성가공공정의 미세조직 예측을 위해 FE 모델과의 결합이 용이한 CA 모델 위주로 재결정 미세조직 예측기술 연구동향을 살펴보고자 한다.

CA모델을 이용한 정적 재결정의 해석은 1991년 Hesselbarth와 Gobel^[2]에 의해서 처음으로 제안되었다. 이 연구에서는 결정론적 CA모델의 타당성을 검증하기 위하여 기존의 JMAK이론과 동일한 가정하에 균질한(Homogeneous) 재결정에 대한 해석을 수행하였으며, 그 결과 JAMK 이론과 동일한 결과를 얻을 수 있었다. 또한 JAMK 이론과 다른 특징을 보이는 기존의 실험들이 불균질한 재결정의 특성에서 나오는 것임을 CA 모델을 통해서 증명하였다. 하지만 최초의 모델은 정확한 재결정 Kinetics를 동반하지 않고 있기 때문에 실제 공정의 미세조직 예측보다는 정성적인 분석에 사용되었다. 예를 들어 재결정 중 제 2상(Second Phase) 입자가 있을 경우 Avrami 지수와 완전재결정을 위한 시간이 증가한다는 사실을 CA 해석을 통해서 알 수 있었다^[3]. 하지만 이러한 연구들은 실제 미세조직에 기반한 해석이 아니었고 재결정 Kinetics가 시간과 보정된 것이 아니기 때문에 한계를 가지고 있었다. 이러한 한계를 극복하기 위하여 독일의 Raabe는 고전 입계 이동 이론에 기반한 확률론적인 3차원 CA 모델을 개발하였다^[4]. 이 모델의 경우 현상학적인 상수를 이용하지 않기 때문에 완전한 의미의 물리학 기반 CA해석을 가능하게 하였고 시간 및 공간과의 보정이 가능하기 때문에 실제 공정의 미세조직 예측이 가능해졌다. 또한 기존의 CA 모델이 가지는 한계를 극복하기 위하여 MC모델과 CA모델을 결합하려는 시도가 이루어 졌으며^[5], 기존 CA 모델의 격자를 제거한 랜덤 격자 CA 모델을 개발하여 격자의 의존성을 제거하려는 연구가 수행되었다^[6].

이후 물리학 기반의 CA 해석들은 EBSD의 발달과 더불어 실제 미세조직 예측에 적극 활용되었다. 기존의 연구는 가상의 조직을 기반으로 수행되었기 때문에 해석 결과는 주로 재결정 속도 및 결정립 크기의 예측에 국한되었다. 하지만 이러한 단점을 극복하고자 최근에는 EBSD에서 측정된 미세조직을 직접 해석의 초기 조건으로 사용하기 위한 모델을 개발하고^[7], 이를 실제 공정에서 적용하여 집합조직 변화까지도 모사가 가능한 실정이다. 또한 지금까지 정확히 모사하기 어려웠던 재결정 중의 핵생성^[8] 및 Zener Pinning^[9]에 대해서도 활발한 연구가 진행되고 있다. 국내의 경우, CA 모델을 이용한 미세조직 예측은 거의 연구가 되고 있지 않으며, MC 모델을 이용한 정적 재결정 연구는 일부의 연구 그룹에서 활발히 이루어 지고 있다.

CA모형을 이용한 정적 재결정 미세조직 예측 연구가 매우 활발했던 반면, CA 모형을 이용한 동적 재결정 연구는 동적 재결정 현상의 복잡성 때문에 상대적으로 활발하지 못하였다. 최초의 동적 재결정 예측 모델은 기존의 정적 재결정 모델에 동적 회복을 도입하여 개발되었고, 동적 재결정의 유동응력 곡선이 공정 조건에 따라 하나의 피크를 가지는 곡선 형태에서 여러 개의 피크를 가지는 곡선 형태로 변화하는 현상을 성공적으로 예측되었다^[10]. 이 때까지의 연구는 아직까지 정성적인 특성만을 예측할 수 있었으며, 정량적인 미세조직 예측기술은 런던대학의 Guo와 동료들이 기존의 결정론적 CA 모델과 핵생성, 가공 경화, 결정립 성장 모델 등을 결합하여 동적 재결정을 예측하면서 활발하게 이루어 졌다^[11]. 이후 유럽 및 미국 등지에서 확률론적인 CA모델^[12], 자유 격자 (Random Grid) 모델^[13] 등의 개발되어 더욱 발전되었다. 반면 국내에서는 Lee와 Im이 결정론적 CA 모델을 이용하여 순수 구리의 동적 재결정 시의 유동응력 및 미세조직 변화를 예측한 것이 유일한 연구이다^[14].

최근에는 메조스케일 모델과 매크로스케일의 유한요소해석을 결합한 다단위 스케일 모델을 이용한 예측방법이 독일을 중심으로 다양하게 개발되고 있다. 독일 아헨공대의 Gottstein교수의 경우, 유럽연합의 프로젝트를 통하여 유한요소해석, CA 모델, 변형 집합조직 예측 모델을 적절히 조합하여 알루미늄의 생산 전 과정 동안의 미세조직 변화를 예측하고자 하는 Through Process Model (TPM)을 개발하였다^[15]. 독일 막스플랑크 철연구소(Max-Planck-Institut für Eisenforschung, MPIE)의 경우, Crystal Plasticity FEM(CPFEM)과 CA방법을 결합하여 알루미늄, 니켈 합금 등의 냉간 변형과 이후의 열처리공정 동안의 정적 재결정 현상을 예측하였으며^[16], 최근에는 CPFEM, CA, 분자동역학, 전위동역학 등 나노, 마이크로, 메조, 매크로 스케일의 해석 방법을 적절히 조합하여 다양한 공정에서의 미세조직 변화를 예측하고 있다. 이 밖에 인도의 타타 스틸과 영국의 연구진이 CAFE 모델을 이용한 동적 재결정 예측 프로그램을 개발한 바 있으며^[17], 미국의 단조 해석 프로그램인 DEFORM^[18]의 경우 CA를 이용한 미세조직 예측 서브루틴이 최근 개발되어 상용화 되었다. 반면, 국내의 경우 아직까지 실험적 수식 모델과 유한요소해석의 결합을 이용한 연구가 주를 이루고 있으며 각 길이 단위의 다양한 해석 기법을 통합한 다단위 스케일 해석 기법은 본고에 소개된 연구 외에는 보고된 예가 없다.

3. 미세조직 예측 사례

3.1. 메조스케일 CA모형을 이용한 동적 재결정 미세조직 예측

CA 모델은 해석하고자 하는 영역을 미세한 셀로 나누고 각각의 셀에 해석하고자 하는 상태 변수를 설정하여 이 셀들의 상태변수의 변화를 추적하는 예측 방법이다. 이 때 셀의 다음 상태는 일정한 전이 법칙에 따라 자신과 주변 셀의 현재 및 과거 상태에 따라 결정된다. 동적 재결정 예측의 경우, 이러한 상태 변수로 재결정 여부, 전위 밀도, 결정의 방위(Orientation) 등을 설정할 수 있고, 표 2에 제시된 바와 같이 전위 진화, 핵생성, 결정립 성장에 관한 물리 식들을 전이 법칙으로 설정할 수 있다.

그림 2는 CA모형을 이용하여 동적 재결정 미세조직 변화를 예측한 결과이다^[14]. 그림에서 흰색의 미세조직은 초기조직이며, 이 초기조직이 변형이 진행됨에 따라 초기조직의 결정입계(Grain boundary)에서 새로운 결정이 생성되고, 이 재결정 핵들이 주변으로 성장하는 과정을 자세히 살펴볼 수 있다. 이와 같이 기존의 경험적 수식 모델이 평균 결정립 크기만을 예측할 수 있는 것에 비해, CA해석은 미세조직의 실제 모습과 집합조직(Texture)까지도 예측이 가능하기 때문에 훨씬 상세한 해석 결과를 얻을 수 있다.

그림 3은 CA모형을 이용한 동적 재결정 예측 결과로 다양한 공정 조건에서 CA 해석을 수행하고 이때 얻어진 평균 결정립 크기와 유동응력의 형태를 실험과 비교한 것이다^[14]. CA 해석결과가 평균 결정립 크기를 전반적으로 잘 예측하고 있지만, 결정립 크기가 작은 영역에서 해석 결과가 실험 결과에 비해 다소 크게 예측 되는 것을 알 수 있다. 반면 유동응력의 경우는 실험과 해석이 잘 일치하며 유동응력 곡선의 형태가 공정조건에 따라 다중 최고점(Multi-Peak) 곡선에서 단일 최고점(Single-Peak) 곡선의 형태로 바뀌는 것까지도 정확하게 모사하고 있는 것을 알 수 있

다. 이러한 유동응력 예측 결과는 FE해석에 사용되던 기존의 유동응력 모델이 온도 및 변형 이력에 무관한 것에 비해 온도 및 변형 이력과 상관 관계를 가지고 계산이 이루어지기 때문에 높은 정확성을 가지고 있으며, FE모델과 완전하게 연계시켜 해석을 수행할 경우 열간공정 특히 다단 열간공정 시의 하중을 정확히 예측 할 수 있다.

표 2. CA해석을 위한 동적 재결정 물리 모델^[14]

전위 진화	Kinetic Equation	$\sigma = \alpha Gb\sqrt{\rho}$
	Evolution Equation	$\frac{d\rho}{d\varepsilon} = \kappa_3 - \kappa_4 \rho$
재결정 핵 생성	Nucleation rate	$n(\varepsilon, T) = C\varepsilon^m \exp\left(-\frac{Q_{act}}{RT}\right)$
	Critical dislocation density	$\rho_c = \left(\frac{20\gamma\varepsilon}{3blMt^2}\right)$
결정립 성장	Rate equation	$\nu = MP, P = \tau \cdot \Delta\rho$

σ : stress, $\alpha, k_3, k_4, Q_{act}, m$: numerical constant, G : shear modulus, b : Burger's vector, ρ : dislocation density, ε : strain, n : nucleation rate, T : temperature, ε : strainrate, R : gas constant, ρ_c : critical dislocation density, γ : grain boundary energy, l : subgrain size, M : grain boundary mobility, τ : dislocation line energy, ν : velocity, P : driving pressure

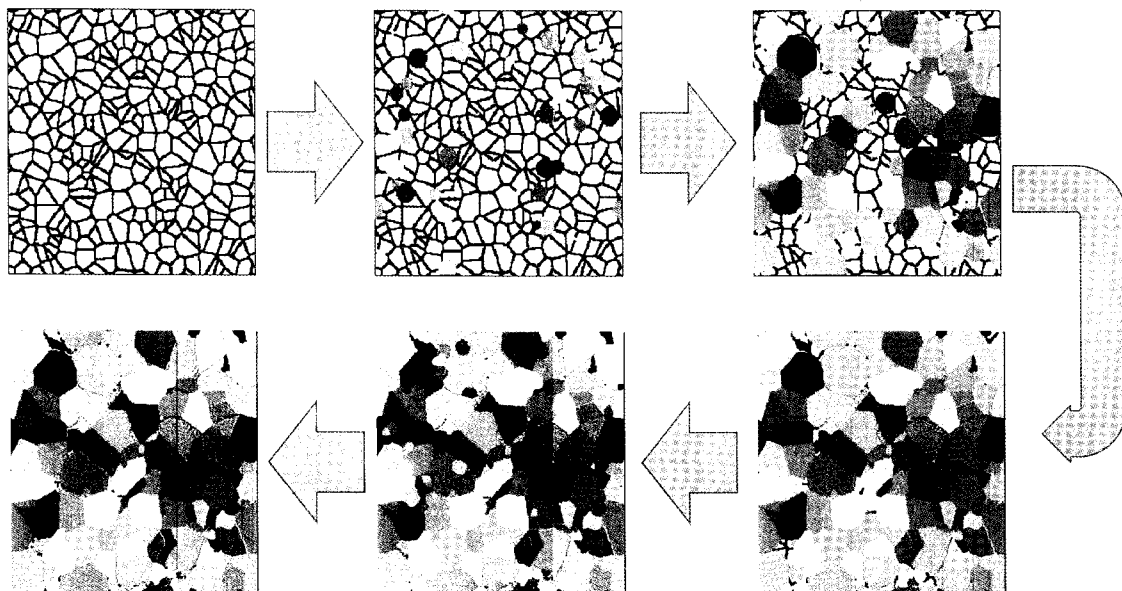


그림 2. CA 모델을 이용한 동적 재결정 미세조직 해석

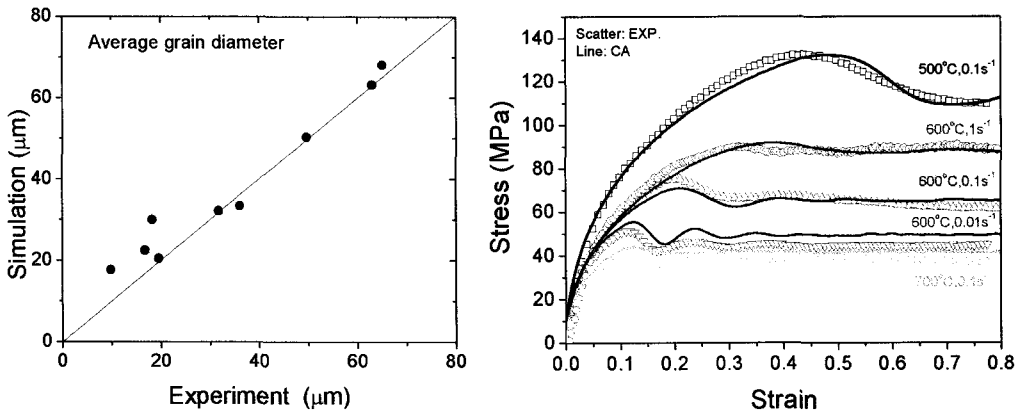


그림 3. CA 모델 해석 결과와 등온 압축시험 결과 비교 (결정립 크기, 유동응력)

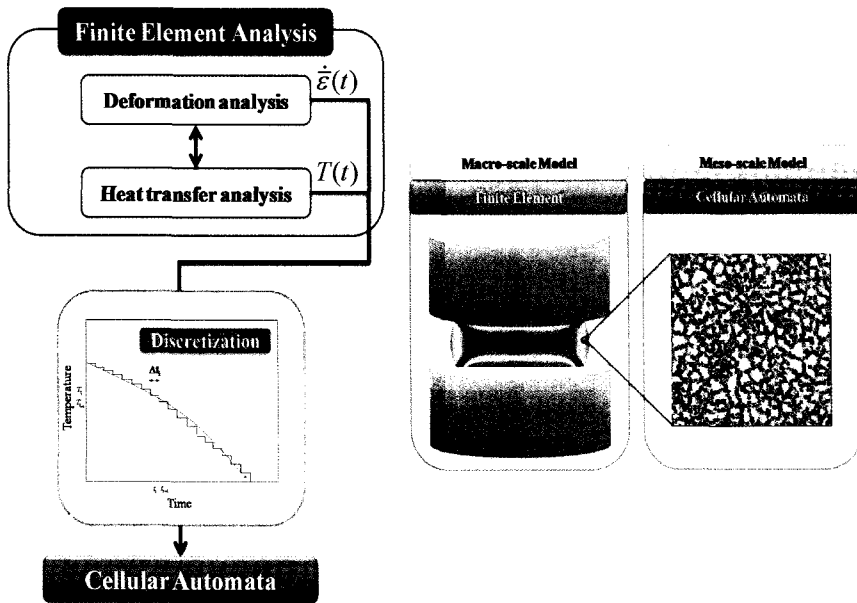


그림 4. 매크로-메조 다단위 스케일 모델의 개략도

3.2 매크로-메조다단위 스케일 모델을 이용한 열간공정의 미세조직 예측

일반적인 열간공정은 변형 중의 온도와 변형 속도가 일정하지 않기 때문에 CA 모델만을 이용한 미세조직 예측은 불가능하다. 따라서 최근에는 매크로 스케일의 FE 해석과 메조스케일의 CA 모델을 결합한 매크로-메조 다단위 스케일 모델이 사용되고 있다. 두 모델의 결합은 그림 4에 도시된 바와 같이 유한요소해석의 변형 해석과 열전달 해석을 통하여 특정 부위의 온도, 유효 변형률속도, 유효변형률 등의 값을 계산하고, 이를 CA 모델에 적용하여 그 부위의 동적 재결정 중의 미세조직 변화를 예측하는 방법으로 수행된다^[19]. 현재 개발된 방법은 CA 계산결과를 유한요소 해석에 다시 반영하지 않는 디커플링 형태의 결합이며, CA해석 결과에서 계산된 유동응력을 다시 FEM에 반영한 커플링 모델의 경우 좀더 정확한 유동응력 모사가 가능하다. 하지만 커플링 모델의 경우 방대한 계산량 때문에 병렬계산이 필수적이며, 미세조직 예측의 경우 그 영향은 무시할 만한 수준으로 가정하기도 한다.

그림 6은디스크 열간 단조 공정의 2차원 축 대칭 해석의 FE mesh와 이를 이용한 다단위 스케일 해석 결과를 보여 주고 있다^[19]. 그림 6(b)의 해석 결과를 살펴보면 대칭축 주변의 상부와 하부가 낮은 유효변형률 값에 기인하여 낮은 재결정 분율을 보여주고 있으며, 결과적으로 결정립 크기가 상대적으로 큰 것을 볼 수 있다. 이 부분을 제외한 나머지 부분에서는 재결정분율이 0.9 이상의 값을 보여서 완전 재결정이 일어났음을 알 수 있다. 이 완전 재결정 영역에서는 상이한 유효변형률 값에도 불구하고 그림 6(b)의 화살표로 표시된 부분을 제외하고 거의 동일한 재결정립 크기를 보여주고 있다. 그림 6(c)에 제시된 해석 미세조직을 살펴보면 위에서 서술한 바와 같이 1과 3의 위치에서는 완전 재결정이 일어나고 2의 위치에서는 재결정이 거의 일어나지 않을 것을 알 수 있다. 또한 위치 1의 재결정립 크기는 작고 균일한 반면, 위치 3의 재결정립 크기는 상대적으로 크기가 크고 균일하지 않은 것을 볼 수 있다. 이는 공정중의 유효변형률과 온도 이력이 상이하기 때문이다. 본 예제에서 살펴본 바와 같이 열간 단조 공정 중의 미세조직 변화는 같은 제품이라 할지라도 공정 중의 유효변형률과 온도 이력에 따라 위치 별로 상이하다. 때문에 다단위 스케일 미세조직 예측 방법은 결정립 미세화를 통한 최적 단조 공정 방안 확립에 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 판단 된다.

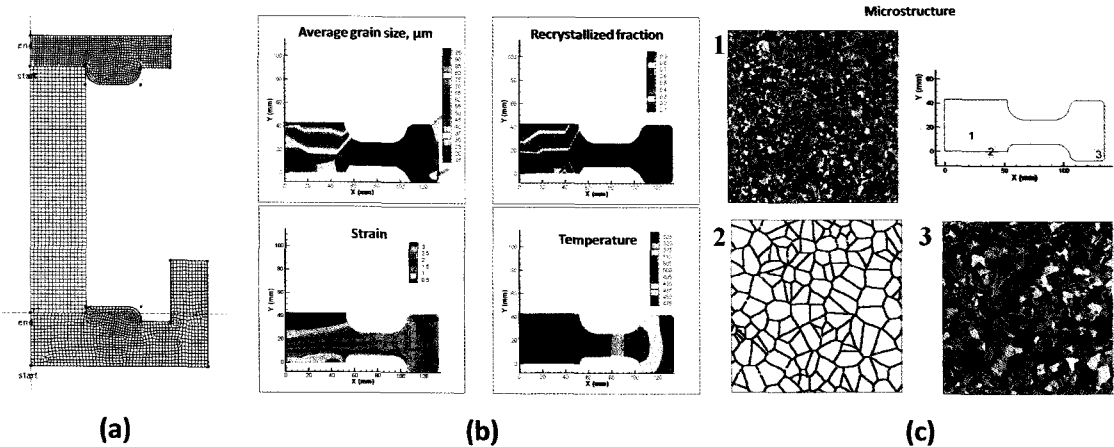


그림 6. (a) 디스크 열간 단조 공정 FE mesh, (b)~(c) 다단위 스케일결과해석

4. 맺음말

본고에서 살펴본 바와 같이 소성가공공정의 미세조직 예측 기술은 그 복잡성에도 불구하고 여러 분야에서 활용의 여지가 다양하다. 특히 최근의 컴퓨터 기술의 발전은 방대한 양의 계산을 가능하게 하여 미세조직 예측 기술의 발전을 더욱 가속화하고 있는 실정이다. 이러한 발전에 힘입어 유럽과 미국을 중심으로 하는 선진국에서는 최근 나노, 마이크로, 메조, 매크로 스케일의 해석을 다양한 방법으로 결합하여 다양한 공정의 미세조직을 예측하는 다단위 스케일 해석 방법을 다각도로 개발하고 있으며 이를 공정 최적화에 이용하려는 시도를 끊임없이 하고 있다. 이에 반해 국내의 소성가공공정 미세조직 예측 기술은 아직까지 경험식에 의존한 고전적인 방법이 주를 이루고 있으며, 극히 일부의 연구 그룹에서만 메조스케일, 나노 스케일 예측 방법을 도입하여 연구를 수행하는 실정이다. 따라서 앞으로는 다양한 스케일의 해석 기법을 하나로 통합하여 주조-열간압연-냉간압연-냉간단조-열처리에 이르는 부품 생산 전 과정을 해석할 수 있는 다단위 스케일 해석 기술 개발이 필수적이라고 할 수 있다.

❁ 참고 문헌

- [1] D.J. Srolovitz, G.S. Grest, M.P. Anderson, Acta Metall., 33 (1985) 2233-2247.
- [2] H.W. Hesselbarth, I.R. Gobel, Acta Metall. Mater., 39 (1991) 2135-2143.
- [3] C.F. Pezzee, D.C. Dunand, Acta Metall. Mater., 42 (1994) 1509-1524.
- [4] D. Raabe, Philos. Mag. A, 79 (1999) 2339-2358.
- [5] A.D. Rollett, D. Raabe, Comp. Mater. Sci., 21 (2001) 69-78.
- [6] K.G.F. Janssens, Model. Simul. Mater. Sci., 11 (2003) 157-171.
- [7] S.H. Choi, Acta Mater., 51 (2003) 1775-1788.
- [8] P. Mukhopadhyay, M. Loeck, G. Gottstein, Acta Mater., 55 (2007) 551-564.
- [9] D. Raabe, L. Hantcherli, Comp. Mater. Sci., 34 (2005) 299-313.
- [10] R.L. Goetz, V. Seetharaman, Scripta Mater., 38 (1998) 405-413.
- [11] R. Ding, Z.X. Guo, Acta Mater., 49 (2001) 3163-3175.
- [12] J. Kroc, Lect. Notes Comput. Sci., 2329 (2002) 773-782.
- [13] N. Yazdipour, C.H.J. Davies, P.D. Hodgson, Comp. Mater. Sci., 44 (2008) 566-576.
- [14] H.W. Lee, Y.T. Im, Mater. Trans., 51 (2010) 1614-1620.
- [15] H. Aretz, et al., Model. Simul. Mater. Sci., 8 (2000) 881-891.
- [16] D. Raabe, R.C. Becker, Model. Simul. Mater. Sci., 8 (2000) 445-462.
- [17] S. Das, E.J. Palmiere, I.C. Howard, Mater. Sci. Forum, 467-470 (2004) 623-628.
- [18] Available from: <http://www.deform.com>.
- [19] H.W. Lee, Y.T. Im, Int. J. Mech. Sci., 52 (2010) 1277-1289.



이 호 원

· 막스플랑크 철연구소 박사후연구원
· 관심분야 : 소성가공공정 해석 및 설계, 다단위 스케일 모델을 이용한 미세조직 예측, 유동응력 모델 개발
· E-mail : h.lee@mpie.de



강 성 훈

· 재료연구소 변형제어연구그룹 선임연구원
· 관심분야 : 소성가공공정 해석 및 설계, 변형 연계 미세조직 예측, 열처리 변형 해석
· E-mail : kangsh@kims.re.kr