

고온 성형에 있어서 재결정 거동 예측 프로그램 개발 및 적용

이광오* · 강종훈* · 강성수**

Development of a Program to Predict Recrystallization Behavior in the Hot Forming Process and Its Application

K. O. Lee, J. H. Kang, and S. S. Kang

Abstract

Recently, a much amount of attention has been paid not only to produce products with precise dimensional accuracy, but also to predict and control the microstructural evolution and mechanical properties of parts. Especially, to do the latter through computer simulation, the history of states factors influencing on these evolution such as temperature, strain, strain rate etc., should be calculated and appropriate mathematical models for the prediction of microstructural evolution must be developed. Thus, in this study thermo-viscoplastic finite element program including the model for predicting microstructural has been developed. Also for the verification of developed program warm forging process for the rotor pole was simulated and the comparison between the results calculated and ones in the literature was made.

Key Words : Microstructural Evolution, Thermo-Viscoplastic Finite Element Program, Dynamic Recrystallization, Grain Size, Mechanical Properties

1. 서 론

금속 소성 가공 공정은 다른 공정에 비해 한번에 많은 양을 성형할 수 있을 뿐 아니라 재료 손실도 적어 제품 성형에 많이 적용되고 있다. 특히 열간 성형 공정은 일반적으로 1000℃~1200℃ 온도 범위에서 수행되기 때문

에 유동 저항이 작고 성형 한계가 증가한다. 이러한 이유 때문에 열간 성형 공정은 대변형을 포함해야 하는 제품 성형에 폭넓게 적용되어 왔다. 하지만 이러한 온-열간 공정은 표면 상태, 기계적 성질, 기하학적 정밀도 측면에서 여타의 공정에 비해 좋지 않다는 결점이 있었다. 이를 개선하기 위해 많은 연구들이 수행되었고, 그

* 부산대학교 정밀기계공학과 대학원
** 부산대학교 기계공학부

결과 기하학적 측면에서는 정형 혹은 정형에 가까운 제품을 생산할 수 있는 단계에 이르렀다.

한편, 최근에는 높은 치수 정밀도 뿐만 아니라 공정중의 미세조직적 변화⁽³⁻¹⁰⁾와 기계적 성질⁽¹¹⁻¹³⁾의 예측에 관한 많은 연구들이 행해지고 있고, 물리 야금학과 컴퓨터 엔지니어링의 비약적 발전에 힘입어 성형 공정중의 미세조직적 변화를 예측할 수 있게 되었다. 따라서 본 연구에서는 열-점소성 유한 요소 프로그램에 미세조직적 변화를 예측할 수 있는 프로그램을 개발하였고, 개발된 프로그램의 타당성 검증을 위해 로터 풀 공정에 대해 시뮬레이션을 수행하였고, 문헌으로부터의 결과와 비교했다.

2. 열-점소성 유한요소법

2.1 점소성 유한요소법

점소성 유한 요소법의 수학적 표현 및 해석기법은 이미 잘 알려진 사실이며⁽¹⁻²⁾ 여기서는 간략히 소개만 한다. 변분이론으로부터 강-점소성 재료에 대한 범함수(functional, π)는 다음과 같이 쓰여질 수 있다⁽¹⁾.

$$\pi = \int_V E(\dot{\epsilon}_{ij}) dV - \int_{S_f} F_i u_i dS \quad (1)$$

여기서 $E(\dot{\epsilon}_{ij})$ 는 일함수이며 F_i 는 표면력을 나타낸다. 고유 경계치 문제에 대한 해는 이중 범함수 문제(dual functional problem)의 해로부터 얻어진다. 이러한 문제에서는 1차 미분은 사라지게 되면 다음과 같은 형태로 쓸 수 있다.

$$\delta\pi = \int_V \bar{\sigma} \delta\bar{\epsilon} dV - \int_{S_f} F_i \delta u_i dS = 0 \quad (2)$$

허용 속도장에 대한 비압축성 구속조건은 비압축성에 대해 벌칙형태를 사용해 제거될 수 있으며⁽²⁾ 다음과 같은 형태로 바뀐다.

$$\delta\pi = \int_V \bar{\sigma} \delta\bar{\epsilon} dV + K \int_V \dot{\epsilon}_v \delta\dot{\epsilon}_v dV - \int_{S_f} F_i \delta u_i dS = 0 \quad (3)$$

여기서, K 는 벌칙상수로 대단히 큰 양의 상수값이다.

2.2 열전달 문제에 대한 유한요소 해석

위에서는 성형 해석에 대한 기본 지배방정식과 그에 상당하는 유한 요소 구성식에 대해서 논의했다. 열전달

해석에 대해서는 다이나 소재의 온도분포는 아래와 같이 표현되는 에너지 평형 방정식을 적용함으로써 얻어질 수 있다.

$$k_1 T_{,ii} + \dot{T} - \rho c \dot{T} = 0 \quad (4)$$

여기서, $k_1 T_{,ii}$ 는 열전달율이고, k_1 은 열전도계수, \dot{T} 은 열발생율, $\rho c \dot{T}$ 은 내부 에너지 변화율이다. 변형체내에서의 열발생은 소성변형에 의해서만 발생한다고 생각하면 열발생율은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\dot{T} = \chi \sigma_{ij} \dot{\epsilon}_{ij} \quad (5)$$

여기서, χ 는 열발생 효율로 기계적 에너지가 열에너지로 변환되는 비를 나타낸다.

변형체로의 경계를 따라서 온도(T)가 정의되어 있거나 열유속이 정의되어 있다. 위의 에너지 평형식은 임의의 온도 변화량 δT 에 대해서 아래와 같은 형태로 다시 쓰여질 수 있다.

$$\int_V k_1 T_{,ii} \delta T dV - \int_V \rho c \dot{T} \delta T dV + \int_V \chi \sigma_{ij} \dot{\epsilon}_{ij} \delta T dV = 0 \quad (6)$$

위의 식에 발산 정리를 적용하면

$$\int_V k_1 T_{,ii} dV + \int_V \rho c \dot{T} \delta T dV - \int_V \chi \sigma_{ij} \dot{\epsilon}_{ij} \delta T dV - \int_{S_q} q_n \delta T dS = 0 \quad (7)$$

여기서, $q_n = k_1 T_{,n}$ 은 경계면 S_q 을 따른 열 유속이고, n 은 경계면에 수직인 단위벡터이다.

3. 미세 조직 변화 모델

3.1 열간 성형중 미세 조직 변화

재료가 변형을 받게 되면 열역학적으로 불안정한 상태가 되고, 변형 에너지가 재료 내부에 축적된다. 이러한 불안정한 상태는 낮은 온도 범위에서는 지속되지만 충분한 에너지를 받으면 에너지 장벽(energy barrier)을 넘어 이동하게 된다. 열적으로 활성화된 상태는 회복, 재결정, 입자 성장이라는 일련의 과정을 거치게 되며 내부적으로

미세조직적 변화를 야기시키게 된다. 변형으로 인한 불안정 상태의 내부에너지가 새로운 결정립을 생성함으로써 안정된 상태로 변이하는 상변화를 재결정이라고 한다. 재결정은 주로 변형이 심한 입계에서 일어나며 새로 생성되는 재결정핵은 무변형 상태로서 전위밀도가 낮은 상태이다. 따라서 주위의 결정립들에 대한 전위밀도차가 발생하게 되고 전체적으로 계의 자유에너지를 낮추려는 경향으로 인해 전위밀도가 큰 쪽으로 입계가 이동하는 재결정핵의 성장이 발생하게 된다.

3.2 동적 재결정과 입자 성장

고온에서 변형이 진행되면 전위밀도 증가에 의한 경화가 발생한다. 하지만 변형량이 ϵ_c (동적 재결정이 발생하기 위한 임계 변형량) 보다 커지면 가공경화지수 ($n = \partial\sigma / \partial\epsilon$)가 감소하고 σ_p (최대 응력)에서는 가공경화지수가 0이 된다. 이러한 기율기의 변화가 가공경화 단계에서 동적 재결정 핵의 생성 및 동적 재결정에 의한 유동응력의 감소등에 영향을 미친다는 것을 의미한다.

동적 재결정이 계속되어 $\epsilon \geq \epsilon_p$ (ϵ_p : 최대 응력일때의 변형률)일 때는 가공경화에 의한 응력증가보다는 동적 재결정에 의한 연화 효과가 더 커서 응력이 감소하게 된다. 일반적으로 ϵ_c 와 ϵ_p 값은 온도가 낮고 변형속도가 빠를수록 크게 나타난다. 즉, 재결정은 온도, 변형률, 변형률 속도에 영향을 받는다.

동적 재결정을 결정짓는 또 하나의 중요한 인자는 결정립 크기이다. 결정립의 크기가 작을수록 전체 결정경계면적이 커진다. 재결정은 결정립 내부보다 상대적으로 불안정한 상태에 있는 입계에서 주로 발생되기 때문에 같은 조건(동일한 온도, 변형률, 변형률 속도)에서는 결정립 크기가 작을수록 핵생성 속도가 빨라진다. 따라서 재결정을 결정하는 주요변수는 결정립 크기, 온도, 변형률, 변형률 속도라 할 수 있다⁽³⁾. 동적 재결정은 조직의 재배열, 열간 변형 저항, 입계분할의 억제를 통한 변형능의 향상과 같은 열간 성형 공정과 깊은 관련은 가지기 때문에 활발히 연구되어 왔다⁽³⁻¹⁰⁾. Yada & Senuma⁽⁴⁾는 C-Mn 평강(plain steel)에 대한 동적 재결정, 정적 재결정 뿐만 아니라 입자 성장을 고려한 미세 조직 변화 모델을 제안했다.

변형이 시작되면서 겪는 최초의 야금학적 현상은 동적 회복이며 이는 전위 밀도를 낮추지만 입자의 크기는 바꾸지는 않는다. 그러나 축적된 변형량이 입계변형량에 이르면 동적 재결정이 시작된다. 아주 짧은 시간안에 충

분한 동적 재결정이 일어난다.

$$\epsilon_c = 4.76 \cdot 10^{-4} \exp\left(\frac{8000}{T}\right) \quad (8)$$

여기서, T는 절대온도이다.

하나의 피크 유동응력 곡선을 가지는 재료에 대한 동적 재결정 거동을 기술하는 데에는 일반적으로 Avrami 표현식이 이용된다. 동적 재결정 분율은 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$X_{dyn} = 1 - \exp\left[-0.693\left(\frac{\epsilon - \epsilon_c}{\epsilon_{0.5}}\right)^2\right] \quad (9)$$

여기서, $\epsilon_{0.5}$ 는 동적 재결정 분율이 50%일때의 변형률로 다음과 같이 표시된다.

$$\epsilon_{0.5} = 1.144 \times 10^{-3} d_0^{0.28} \dot{\epsilon}^{0.5} \times \exp\left(\frac{6240}{T}\right) \quad (10)$$

동적 재결정된 입자 크기는 단지 Zener-Hollomon 인자 $Z = \dot{\epsilon} \exp(Q/RT)$ 만의 함수로 아래와 같이 주어진다.

$$d_{dyn} = 22600 Z^{-0.27} \quad (\mu m) \quad (11)$$

재결정이 완료되었을 때 생성되는 구조는 여전히 준안정상이기 때문에 단위 체적당 입계 면적을 줄이기 위해 입자 성장이 일어나게 된다. 입자 성장은 다음식으로 나타낼 수 있다.

$$d = d_{dyn} + 1.1y(d_{pd} - d_{dyn}) \quad (12)$$

여기서,

$$y = 1 - \exp\left[-295 \epsilon^{0.1} \exp\left(-\frac{8000}{T} \times t\right)\right]$$

$$d_{pd} = 5380 \exp(-6840/T) \quad (13)$$

이다.

3.3 미세조직 변화 예측

소성변형 이력과 온도가 재료의 재결정 거동에 영향을 미치기 때문에 재료의 미세조직적 변화를 예측하기 위해

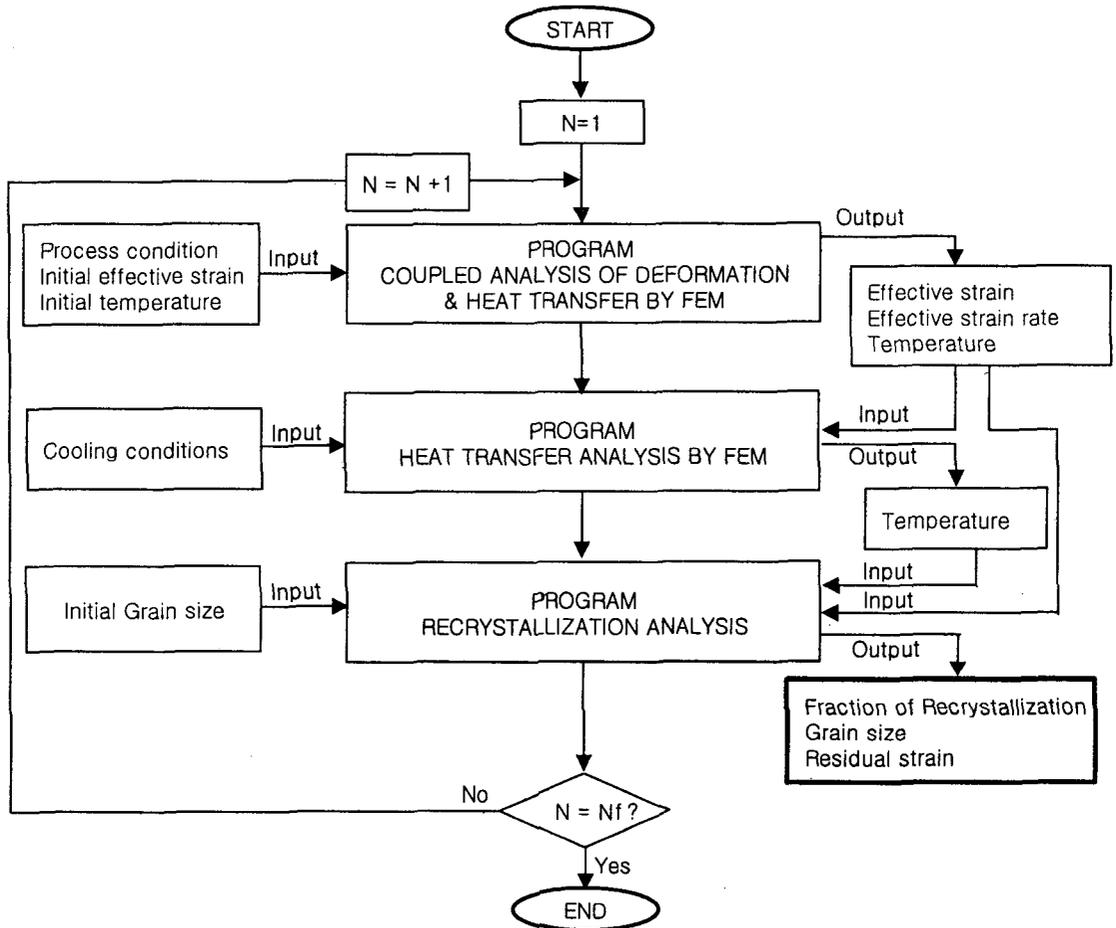


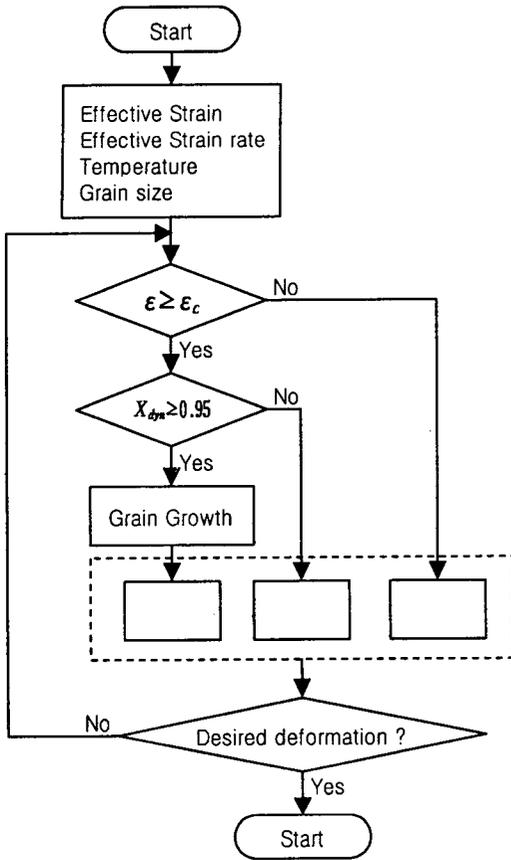
Fig. 1 Analysis procedure to predict the microstructural evolution in hot forming

서는 재료 물성치에 대한 야금학적, 열적-기계적 변수들의 영향을 조사해야만 한다. 그러므로 강-열점소성 유한요소법과 미세조직을 예측할 수 있는 모델의 연계해석이 이루어져야 한다. 위의 Fig. 1은 열간 성형공정에서의 미세조직변화의 해석 과정을 보여준다. Fig. 1에서 알 수 있는 것처럼 성형중의 동적 재결정 거동을 해석하기 위해 연계해석이 수행되었다. 미세조직 변화는 변형의 증분계산과 일치하게 스텝단위로 계산되었다. Fig. 2는 각 단계에서의 계산과정을 보여준다. 축적된 유효변형률값이 임계변형률(ϵ_c)보다 커지면 동적 재결정이 일어난다. 그리고 동적 재결정 분율(DRX : dynamic recrystallization fraction)값이 0.95보다 커지면 완전 동적 재결정이 일어나고 입자 성장이 뒤따르게 된다(Fig. 2의 ①의 경우). 그러나 DRX가 0.95보다 작을 때에는 부분적 재결

정이 발생한다(Fig. 2의 ②). 부분 재결정이 발생 할 경우, 미세조직은 2개의 다른 조직이 섞여있다고 있다고 생각한다. 새로이 생성된 조직은 완전히 변형률이 없다고 가정된다.

4. 결과 및 고찰

미세 조직 변화를 예측하기 위한 모델이 개발된 열-점소성 유한요소 프로그램에 추가되었다. 개발된 모듈의 타당성을 검증하기 위해 온간 로터 폴 공정에 대한 시뮬레이션이 수행되었다. 개발된 프로그램에 의해 계산된 결과와 문헌에서의 실험결과⁽⁶⁾와 비교되었다(Fig. 5). 온간 로터 폴 공정은 전체 4단으로 이루어져 있는데 시뮬레이션은 많은 변형을 받는 첫 번째와 두 번째 공정에



- ① $d_i = d_{i-1} * X_n + d_{gd} * X_{dyn}$
- ② $d_i = d_{dyn} * X_{dyn} + d_{i-1} * X_n$
- ③ $d_i = d_{i-1}$

d_{gd} : grain size of the dynamically recrystallized after grain growth
 d_{i-1} : grain size of previous step
 d_i : grain size of previous step
 $X_n = (1 - X_{dyn})$

Fig. 2 Analysis procedures for calculating recrystallization

대해서만 수행하였다(Fig. 3). 2번째 공정과 3번째 공정에 의해 만들어진 중간생산품의 조직사진이 문헌⁽⁶⁾에 주어져 있다. 8개의 입자 크기 측정점이 Fig. 3(b)에 나타나 있고 각 점에서의 조직 사진이 아래의 Fig. 4에 나타나 있다. 각 측정점에서의 ASTM입자크기가 계산되었

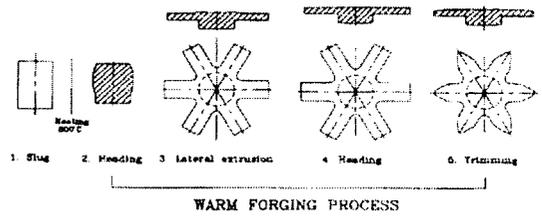


Fig. 3 (a) Total processes of rotor pole

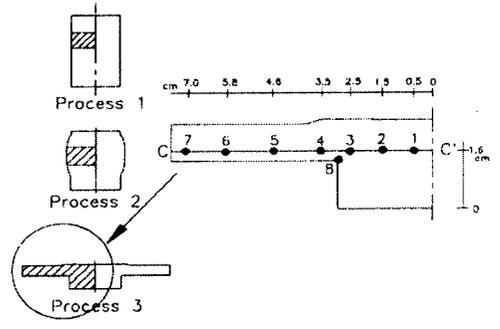


Fig. 3 (b) Two simulated processes of rotor pole

고, 같은 Fig. 4에 표기되었다. ASTM입자크기 및 입자 크기 분포에 대한 예측 결과가 Fig. 5에 나타나 있는데 이는 변형률이나 온도의 분포와 비슷하다. 이와 같은 유사성은 특정 변형률이 동적 재결정에 큰 영향을 미치고 온도이력이 재결정후의 입자 성장에 지대한 영향을 미치기 때문이다. 그러므로 미세한 입자는 높은 온도와 많은 변형을 받는 필렛부분에서 발생할 것으로 예상되며 이러한 사실이 예측 시뮬레이션에서 잘 나타난다. 각 측정점에서 예측된 ASTM 입자크기와 문헌에서 얻어진 결과를 비교해보면 전자가 후자보다 전체적으로 큰 값을 보인다. 이는 시뮬레이션상에서는 동적 재결정이 임계 변형률을 넘지만 하면 시간에 관계없이 이루어진다고 가정한 사실과 실제로 아주 복잡한 변태의 과정을 거시적인 상태변수들(온도, 변형률, 변형률 속도등)로만 표현하는데에 기인하는 것으로 판단된다. 따라서 향후 보다 정밀하게 미세 조직을 예측하고 제어하기 위해서는 이러한 복잡 다단한 미세조직적 변화를 보다 잘 표현할 수 있는 물리금속학적 모델의 개발이 필요할 것으로 판단된다. 또한 가공중의 상변태도 반드시 고려되어야할 사항인 것으로 판단된다.

5. 결론

금속 성형 공정에 있어서, 치수 정밀도뿐만 아니라 뒤

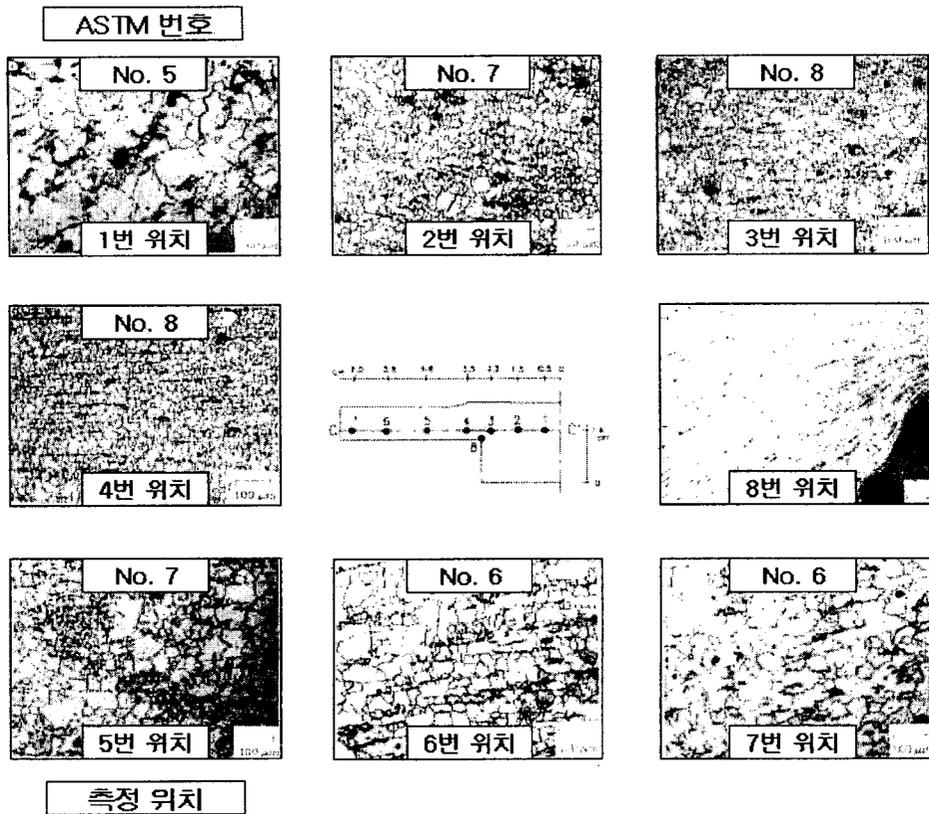


Fig. 4 Microstructure at each 8 points

어난 기계적 성질을 가지는 제품을 생산하기 위한 최적의 공정 조건을 찾는 것이 무엇보다 중요하다. 특히, 변형이력, 온도 및 미세조직 변화는 최종 제품의 기계적 성질에 영향을 미치기 때문에 변형 공정중의 미세조직 변화를 예측하고 제어함에 의해 제품의 기계적 성질을 제어하는 것이 가능해진다. 이것을 위해서는 열-점소성 유한요소 프로그램을 개발하여 공정중의 변형률, 변형률 속도, 온도와 같은 여러 가지 상대변수들을 예측하고, 이 결과들을 미세조직 모델과 결합해야만 한다. 본 연구에서 위와 같은 작업을 통해 얻어진 결론은 다음과 같다.

(1) 냉간, 온열간 금속 성형공정을 해석할 수 있는 열-점소성 유한 요소 프로그램이 개발되었다.

(2) 미세조직 모델이 제품의 미세조직 예측을 위해 개발된 열-점소성 유한요소 프로그램에 추가되었다.

(3) 미세 조직 예측 연계 열-점소성 유한 요소 프로그램이 온간 로터폴 공정에 대해 적용되었고, 문헌에 제시된 데이터와 비교되었다.

(4) 실험치와 예측치와는 전체적인 경향은 일치하고 있으나 그 절대값에서는 상당한 차이를 보이고 있다. 이는 미세조직 예측의 수학적 모델과정에서의 가정과 단순화에 기인한다고 생각된다.

(5) 공정중의 미세조직 예측을 통해 원하는 기계적 성질을 가진 제품을 생산할 수 있을 것으로 생각되며 이에 대한 연구가 앞으로 더욱 활발히 진행될 것이다.

(6) 좀 더 정도 있는 예측값을 얻기 위해서는 더욱 정확한 수학적 모델을 만들어내야 하고 변형으로 인한 상변태(phase transformation)를 고려해야만 할 것으로 생각되며 상변태에 대해서는 현재 연구중에 있다.

참 고 문 헌

- (1) S.Kobayashi, S.I.Oh, T.Altan,1989, "Metal forming and the finite element method", Oxford Univeristy Press.

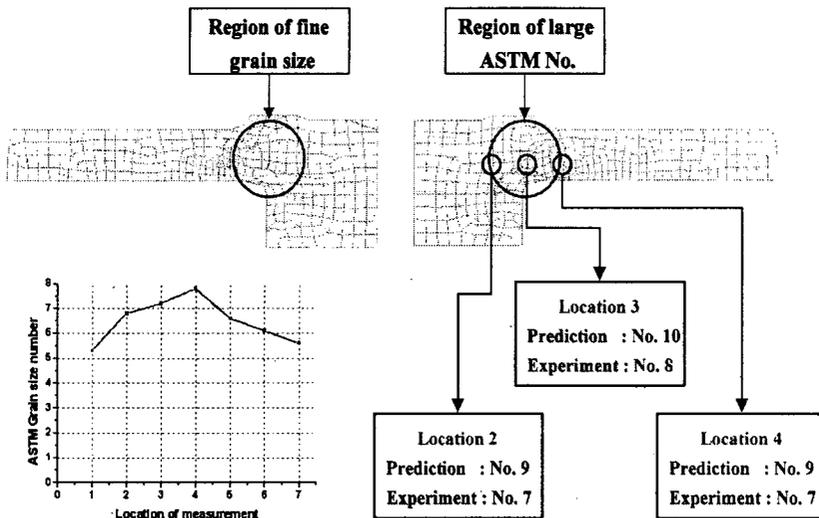


Fig. 5 Comparison between results of predictions and ones from the literature

- (2) O.C. Zienkiewicz, 1977, "The finite element Method, 3rd Edition".McGraw-Hill, Maidenhead, UK
- (3) 박우진, 이경중, 권오준, 황상무, 1996, "열간 단조 공정중 개질정 거동의 유한 요소 해석", 제 2회 압연 심포지움, p. 37.
- (4) H.Yada, T.Senuma, 1986, "Resistance to Hot Deformation of Steels", J.Jpn. Soc. Technol. Plasticity Vol. 27 No. 300, p. 34.
- (5) C.M.Sellars, 1990, "Modelling microstructural development during hot rolling", Material science and technology, Vol. 6.
- (6) J.H.Kim, 1995, "온간 단조에서의 소성변형과 결정입자 변화와의 관계", 석사 학위 논문(부산대학교).
- (7) Y. S. Jang, D.C.Ko, B.M. Kim, 2000, "Application of the finite element method to predict microstructural evolution in the hot forging steel", J.Mater. Proc. Technol., Vol 101, p. 85.
- (8) W. Liansheng, C. Qixiang, L.Zhuang, M.Tajima, "Multistage compression of microalloyed steels - FE simulation and measurement of grain size", J. Mater. Proc. Technol., Vol. 45, p. 331.
- (9) S.G.Xu, K.J.Weinmann and S.A.Majlessi, 1995, "Computer modeling of microstructural evolution in the block upsetting of hot steel", Trans. NAMRI/SME, Vol. 23, p. 91.
- (10) M. Pietrzyk, M.Glowacki, J.G. Lenard, 1994, "Numerical simulation of the evolution of the microstructure in closed-die forging", J. Mater. Proc. Technol., Vol. 42, p. 217.
- (11) A.Vedhanayagam, 1993, "Investigation of Products -Process Relationships in the Forging of Microalloyed Steels", PhD thesis, The Ohio State University.
- (12) T. Ishikawa, 1995, "Modelling the Microstructure Evolution and Mechanical Properties of Forged Parts", Casting Forging and Heat Treatment, p. 29
- (13) J. Majta et. al, 1996, "Use of the computer simulation to predict mechanical properties of C-Mn steel, after thermomechanical processing", J.Mater.Process.Technol., Vol. 60, p. 581.