

미세조직변화를 고려한 전산모사와 이를 이용한 지능형 단조기술

이유환¹ · 이종수[#]

Intelligent Forging Technology Considering Microstructure Evolution

You Hwan Lee, Chong Soo Lee

1. 서론

단조기술은 금속소재의 소성을 이용한 대표적인 가공방법의 하나로, 요구되는 형상을 얻기 위하여 해머로 두드리거나 프레스로 누르는 성형기술을 총칭한다. 단조기술은 인류 역사와 함께한 가장 오래된 기술 중 하나이며, 우리나라의 경우 Fig. 1과 같은 단원 김홍도의 “대장간”에도 보여지듯이 우리 생활과 매우 밀접한 전통산업 중의 하나이다.

근래에 이르러 세계 각국은 첨단 정보산업을 주축으로 하여 생명·환경·나노·우주항공·정보통신·문화관광 분야, 소위 6T라 일컬어지는 첨단기술의 개발 및 획득에 박차를 가하고 있으며 국가간의 경쟁 역시 치열한 상황이다. 그러나 단조기술은 소재산업과 자동차·기계·조선·우주항공 등 거의 모든 조립산업의 근간이 되는 핵심 기술로서, 매우 중요한 중간자적 위치에 놓여있음을 간과해서는 아니 된다. 이와 더불어 현대 산업사회가 급속도로 발전함에 따라 구조물의 대형화, 고성능화가 요구되고 있으며, 첨단 산업기기는 극소형화가 요구되고 있다. 또한 고강도, 고연성 및 고기능성을 가지는 다양한 합금들이 개발되고 있으며, 최근에는 이러한 다양한 크기와 복잡한 형상의 구조물, 다양한 기계적 물성을 가진 소재에 대하여 결함이 없고 공정단축을 통한 에너지 절감형 단조기술의 개발이 절실히 요구되고 있다. 이에 따라 급변하는 시대의 요구에 대응하여, 단

조기술에 대한 지속적인 연구개발과 더불어 신기술 개발과 관련된 기술의 축적 및 인프라 구축이 매우 시급한 실정이다.

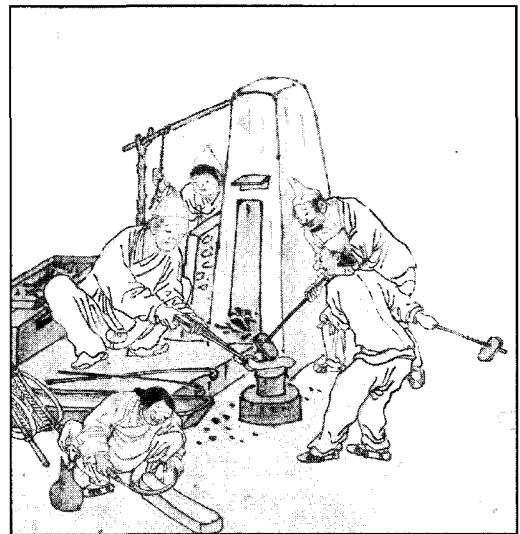


Fig. 1 The ancient painting (Daejang-gan) illustrated by Hong-Do Kim

최근에 발간된 자료에 의하면 국내의 기술수준은 선진국 대비 약 70% 정도에 이른다고 보고하고 있으며, 미국, 일본에 비해 10위 정도로 수요산업인 자동차 산업의 기술수준에 비해 크게 뒤떨어져 있는 상황이다. 그러나, 최근 정부는 부품소재산업의 육성을 위한 요소기술인 단조기술을

1. 포항공과대학교 신소재공학과
교신저자: 포항공과대학교 신소재공학과
E-mail: cslee@postech.ac.kr

발전시키고자 많은 노력을 기울이고 있어 이 분야에 대한 전망이 어두운 것만은 아니다. 하지만 선진국들도 나름대로 첨단 단조기술의 개발에 많은 투자와 노력을 기울이고 있어 기술격차를 좁히기 위해서는 국내의 연구노력이 배가되어야 한다.

따라서 본 기술해설에서는 앞서 언급한 신 단조기술에 대한 연구개발 결과인 지능형 단조기술(Intelligent Forging Technology)의 전반적인 이해와 더불어 국내외 전반적인 단조기술의 동향에 대하여 간략히 서술하고자 한다. 소개될 지능형 단조기술은 본 연구실에서 연구 및 개발 중인 기술로서, 현재 Titanium 합금계를 주축으로, 향후 Aluminum, Magnesium, Nickel-base 초 합금 및 고기능성 철강재료에 까지 적용하고자 하며, 미세조직적 이해를 바탕으로 단조공정을 설계하고 동시에 최종 부품의 미세조직을 예측 및 부품의 신뢰성 확보에까지 이르는 진보된 개념의 기술이다.

2. 국내·외 연구개발 동향

현재 국내에서 연구 및 개발되는 단조기술의 전반적인 동향은 대부분 공정 조건 및 금형 형상 등 기계적 인자를 설계하고 제어하는 기술에 집중되어 있는 실정이다. 그러나 이러한 기계적 인자만을 설계하고 제어하는 것은 최종단조부품의 정밀도 향상 및 가공오차 감소 등에는 효과적이나, 단조품의 건전성평가 즉, 단조결합의 유무, 비균질 변형에 의한 미세균열 등의 존재 등에 대한 정보는 원활하게 제공하지 못하는 단점이 있다. 실제 단조품에 대한 특성평가는 목적하는 형상의 구현 정도와 정밀도에만 국한된 것이 아니라 소재내부를 구성하고 있는 미세조직적 특성 또한 매우 중요한 항목임을 간과해서는 아니 된다.

더불어 FEM (Finite Element Method)을 기반으로 구축된 상용 프로그램을 활용하여 실 단조공정을 모사하고, 이러한 예측을 바탕으로 실제 공정을 설계 및 제어하는 방법이 대다수 적용되고 있으나, 금속학적 요인 때문에 발생하는 재료 내부의 현상들(비정상 결정립 성장, 단열성 전단밴드의 형성, 동적 재결정 및 국부적 소성유동 등)을 고려하지 못하는 단점을 가지고 있다.

국외의 경우 미세조직 최적화 또는 FEM을 이용한 공정설계 기술 분야에서는 최적의 실험조건 설정과 정밀한 데이터 분석을 통하여 금속소재의

변형거동뿐만 아니라 최적의 가공조건을 설정하기 위한 연구도 사실상 완료되어 있는 상태이며, 최근에는 이를 실 단조공정에 적용하고자 하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 항공우주용 소재의 미세조직 최적화에 대한 연구결과의 경우, 해외 우수 과학 잡지에 발표되는 것을 제외하고 대외적으로 데이터베이스가 공표되어 있지 않고 있어, 독자적인 연구에 의한 소재의 미세조직 변화에 대한 데이터베이스 축적이 요구 된다. 특히 타이타늄 합금의 경우 소재의 우수성으로 인하여 미국의 Wright-Patterson Air Force Base를 중심으로 대단위 연구개발이 이루어지고 있으며, 항공우주용 소재에 관해서는 세계 최고의 기술력을 자랑한다고 할 수 있다. 그러나 국내의 경우 고온 성형 중 미세조직의 변화와 모델링에 대한 연구는 한국기계연구원, 한국과학기술연구원 및 국방과학연구소 등의 국립연구소와 포항공대를 비롯한 서울대, 인하대, KAIST 등에서 실험실 수준의 연구가 되고 있을 뿐 현장 적용은 거의 전무한 실정이다. 즉, 국내 단조업체의 경우 미약하나마 전산모사를 활용하여 공정을 설계하고 제어하는데 노력하고 있으나, 미세조직 설계 및 예측과 단조품의 기계적 특성을 예측할 수 있는 수준까지는 이르지 못하고 있다. Table 1에는 앞서 언급한 국내·외 단조기술에 대한 전산모사와 미세조직 제어기술 분야에 대한 연구동향을 간략하게 나타내었으며, 본고에서 서술하고자 하는 지능형 단조기술은 Table 1에 나타난 세계 각국의 단조기술의 현재 동향과 부합되는 형태의 기술이며, 향후 국내 단조기술의 경쟁력을 부여하여 단조 선진국과의 기술 격차를 감소시킬 수 있는 주요 생산 기반기술이다.

3. 지능형 단조기술

3.1 개요

본 연구개발 기술에서 목표로 하고 있는 미세조직 변화를 고려한 전산모사와 이를 이용한 지능형 단조기술은 Fig. 2에 나타난 바와 같이 중요한 소단위 기반기술에 대한 연구개발을 기반으로 구성되며, 이를 효과적으로 융합하고 적용함으로써 이루어진다. 기술의 1단계에는 소재의 고온 가공시 일어나는 미세구조의 변화를 특성화하고 데이터베이스를 구축함으로써 이루어지는데, 주로 항공우주용 소재(Ti 합금계와 Al 합금계)와 고기

Table 1 Recent Research & Development Trend in Forging Technology

구분	대상 기술	연구 그룹	연구 동향 및 수준
국외	미세조직 제어기술	- Wright-Patterson Air Force Base (미)	- Ti합금(Ti-64)의 고온가공성에 대한 활발한 연구 및 데이터 베이스 구축 - 미세조직적 변형거동에 대한 집중적인 연구 - 미세조직을 바탕으로 한 최적의 변형영역 설정 및 활용
	미세조직 제어기술	- Wright State Univ. (미)	- TMP를 이용한 미세조직 변화에 대한 연구 및 체계화
	미세조직 제어기술	- McGill Univ. (캐)	- 철강 및 알루미늄 합금에 대한 변형 기구 확립 및 프로그램화
	미세조직 제어기술	- Carnegie Mellon Univ. (미)	- Monte Carlo 시뮬레이션을 이용한 재결정 거동을 해석 - 고온가공 시 철강재료의 미세조직을 예측
	전산모사 예측기술	- The Univ. of Birmingham (영)	- 내부 상태변수를 이용한 항온단조 공정 해석 수행 및 예측 시스템 구축 - 미세조직 제어 기술과 전산모사 제어 및 예측기술을 접목
	전산모사 예측기술	- Alcoa Co. (미) - Wyman-Gordon Co. (미) - Doncaster Co.(영)	- FEM 코드를 이용한 단조 시뮬레이션을 항온단조 기술에 적용 - 금형 및 공정설계와 더불어 부품의 미세조직 예측기술 보유 - 양산형 단조기술 및 미세조직 예측 기술 보유
	전산모사 예측기술	- Cambridge Univ. (영) - Rolls-Royce (영)	- Neural network process 기법을 이용하여 단조공정 최적화 수행 - Gaussian process를 이용한 미세조직 예측기술 개발 및 보유
국내	미세조직 제어기술	- 포항공대	- Ti 합금(Ti-64 및 TiAl)의 초소성 및 고온가공성에 대한 연구 - 비탄성 변형이론을 이용한 초소성 및 가공성에 대한 연구 - 고강도 항공기용 Al합금의 단조품의 미세조직 예측 및 기계적 특성 평가 - 자동차 볼트용 강에 대한 냉간단조성 평가 및 예측
	미세조직 제어기술	- KIMM, - KAIST	- 니켈기 초내열합금의 미세조직 변화 예측 - Gamma-Ti 합금의 고온 변형거동에 대한 연구
	미세조직 제어기술	- POSCO	- 동적 재결정 거동에 대한 새로운 개념 정립, 주로 철강 재료에 적용
	전산모사 예측기술	- KAIST, 홍익대	- 상용 코드를 다양하게 적용, 자체 코드 개발 및 적용에 주력
	전산모사 예측기술	- 서울대	- 유한요소해석과 결정 변형 이론을 접목하여 미세가공 분야 연구
	전산모사 예측기술	- 포항공대	- 자체 코드 개발에 관한 연구 및 상용 프로그램을 활용하여 단조 및 압연 등 대다수 공정에 적용

능성 철강재에 대하여, 고온 가공 시 미세조직적 변화 즉, 동적 재결정 및 동적 회복 거동과 이에 따른 결정립의 크기 변화, 상분율 및 이차상의 분포 등에 대한 연구결과를 종합하고 체계화 및 정량화 하는 것이 주요 내용이다.

또한, 이를 소재 별로 종합하여 미세조직 모델링 작업과 함께 데이터베이스를 구축하고, 이를 바탕으로 하여 최적의 가공조건을 제안하는 신 개념의 processing map 을 제작하여 적용하는 것이다.

2단계에서는 1단계에서 구축된 미세조직적 변화가 고려된 구성 방정식을 기반으로 FEM 응용 단

조공정 설계 및 미세조직 변화를 예측하는 것이 가장 중요한 기반기술이며, 부가적으로 초기 소재 역추적 선정기술 및 실시간 결함 및 미세구조 탐지기술을 개발하는 것이다. 특히 본 개발기술에서 구축된 FEM 응용 전산모사에는 미세구조의 변화를 반영하고 있기 때문에 가공 소재의 형상, 응력 분포 및 변형을 분포뿐만 아니라, 재료의 내부구조 및 결함발생까지 예측할 수 있다. 따라서 단조 공정 설계 및 최종 미세조직의 특성까지도 설계가 가능하다. 이는 우수한 단조품을 제조하기 위한 시행착오를 줄이고, 생산성을 배가시키는데 매우

효과적인 기술이며, 특히 요구되는 미세조직적 변수의 범위가 제한된 경우, 주어진 형상과 단조설비의 제한을 고려하여 최적의 공정 및 설비에 대한 설계가 가능하다. 또한 이를 역으로 적용하여 설비 및 공정 제한조건에 부합하는 초기 소재의 조건을 예측할 수 있다. 그리고 Laser-ultrasonic을 이용하여 실시간으로 가공 소재 내부의 균열 및 불균일 변형을 감지하여 on-line으로 공정을 제어 및 수정이 가능토록 하는 실시간 결함 및 미세구조 탐지기술 역시 주요한 기반기술로서 구성된다. 주요한 기반기술에 대한 세부 내용을 다음 장에 자세하게 설명하였다.

3.2 기반기술의 내용

3.2.1 미세조직 변화 분석 및 평가 기술

고온에서 가공되는 소재는 열처리 및 변형에 의하여 내부 미세조직이 변화한다. 이 때문에 가공 중 변형하중의 증감 또는 최종 단조품의 기계적 특성이 달라지기 때문에, 고온에서 발생하는 미세조직 변화 및 주된 변형기구를 이해하는 것이 매우 중요하다. 이와 같은 변화로는 열처리 경로 및 가공온도에 따라 변화하는 주로 결정립의 크기, 상분율 및 전위 밀도 등이며, TEM, SEM 및 EBSD 등의 장비를 활용하여 관찰된다.

특히 거시적인 결함 외에 재료내부의 미세조직

적 원인에 의하여 발생하는 결함의 경우, 육안으로 관찰이 어렵기 때문에 이에 대한 발생원인을 규명하고 이를 기반으로 방지대책을 수립하는 것이 가장 중요하다 할 수 있겠다. Fig. 3에는 타이타늄 합금의 고온 변형 시 발생하는 동적 구상화(dynamic globularization)을 나타내었는데, 이 현상은 침상의 α 상이 등방성 조직으로 형태가 변화하는 현상으로 특정 온도 및 변형율 속도 구간에서만 발생한다. 이를 효과적으로 이용하면 변형 하중이 낮고 기계적 특성이 우수한 단조품을 얻을 수 있기 때문에 미세조직 변화를 이해하고 분석하는 것이 매우 중요하다 할 수 있다.

3.2.2 미세조직 모델링 및 D/B 구축

고온 가공 시 발생하는 재료내부의 변화는 거시적으로 유동응력-변형율의 변화로써 나타나며, 외력에 대한 재료의 반응을 표현하게 된다. 이와 같은 이해를 도모하고자 주로 고온 압축 및 인장시험이 실시되며, Fig. 4와 같은 고온 압축 유동응력 곡선의 형태로 얻어진다. 또한 이 결과는 합금계에 따라 모두 다르게 얻어지며, 동일한 합금계에 서조차도 변형 온도, 변형율, 변형율 속도, 초기 미세조직 및 이전 가공 및 열처리 이력에 따라 모두 다르게 나타난다.

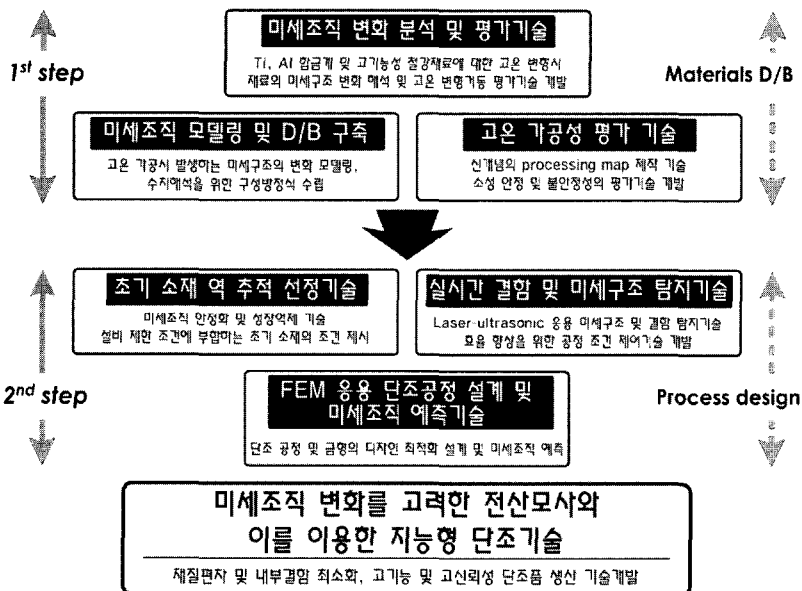


Fig. 2 Research & Development System of Intelligent Forging Technology

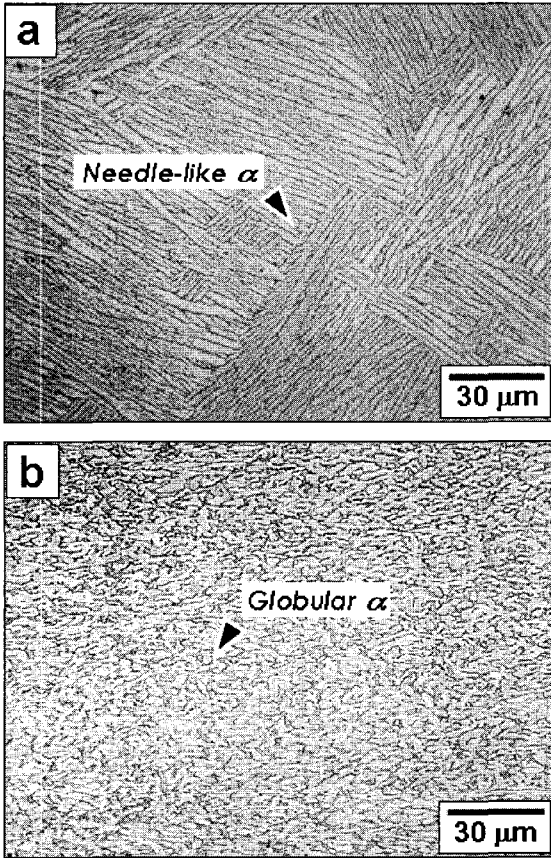


Fig. 3 Optical photographs of microstructure evolution. (a) The initial microstructure with needle-like α and (b) deformed micro-structure with globular α by the dynamic globularization (Ti-6Al-4V alloy)

즉, 합금계 및 가공조건에 따른 고온 유동응력 곡선과 미세조직 변화를 체계적으로 데이터베이스화 하는 것이 매우 중요한데, 이 결과는 다양한 용도(가공 하중의 계산, 전산모사, 미세조직 예측 및 기계적 특성 예측 등)로 사용되기 때문이며, 소재의 특성을 이해하고 단조품의 미세조직 및 공정을 설계하는 밑바탕이 되기 때문이다.

본 기술에서는 이를 프로그래밍하여 각 소재에 대한 데이터를 추출 및 가공하고 타 프로그램에 삽입 가능한 형태로 체계적으로 관리하고자 하며, 이를 기반으로 미세조직 모델링 역시 수행하고 있다. 수행되는 미세조직 모델링은 고온 유동응력 곡선과 미세조직 변화의 상호관계를 수식적으로 정량화하고 체계화하는데 목적을 두고 있으며,

FEM 을 이용한 전산모사의 기본 구성방정식으로써 활용된다.

미세조직 모델링에서는 다양한 방법들이 사용되는데, 이는 주로 소재의 특성과 밀접한 관련이 있다. 즉, 소재의 고온 변형거동 및 기구를 면밀히 고찰하고 이에 따른 적절한 관계를 수립하는 것이 매우 중요하다.

3.2.3 고온 가공성 평가 기술

단조공정을 설계함에 있어 가장 중요한 것은 소재의 고온 가공 조건을 설정하는 것이다. 이는 제품의 생산성과 직결되며, 에너지 효율 및 단조품의 기계적 성능에도 영향을 끼치기 때문이다. 기존에 가공조건에 대한 설정은 주로 유사한 소재에 대한 가공조건을 설정하거나 경험에 의존해 왔었다. 그러나 본 기술에서는 외력과 재료내부의 에너지 분산효과를 고려하는 동적 재료모델 (Dynamic Material Model Theory) 및 불안정성의 원리 (Instability Criterion)에 기반을 둔 변형가공지도를 작성한다. 이것은 변형온도와 변형률 속도를 기준으로 최적의 가공구간을 찾아내고 불안정 영역이 발생하는 구역을 피해 적절한 가공조건을 찾는 데 효과적인 방법이다. Fig. 5에는 Titanium aluminide에 대하여 적용한 결과를 나타내었는데, 적정 가공구간은 950~1,000°C, 10^{-2} ~ 10^{-3} /sec의 구간이었다. 이 조건에서의 균일한 변형이 발생할 뿐만 아니라 변형이 증가할수록 변형저항이 낮아지는 구간이기 때문에 매우 유리하다.

그러나 현재 기존에 사용되어오던 변형지도를

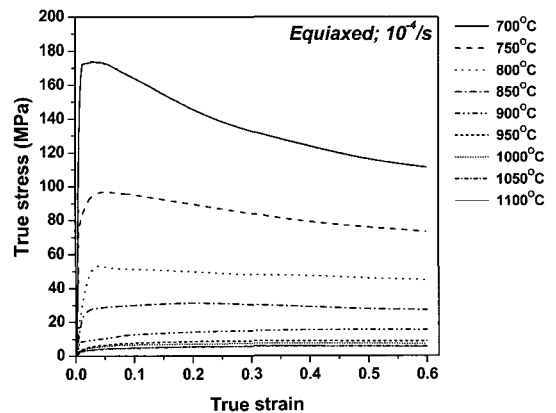


Fig. 4 The flow stress-strain plots with various temperatures (Ti-6Al-4V, equiaxed microstructure)

작성하는 방법은 기본 원리와 적용 측면에서 매우 편리하나, 변형율에 따른 변화를 알 수가 없으며, 전산모사에 직접 이용될 수가 없기 때문에 더욱 개선되어야 한다.

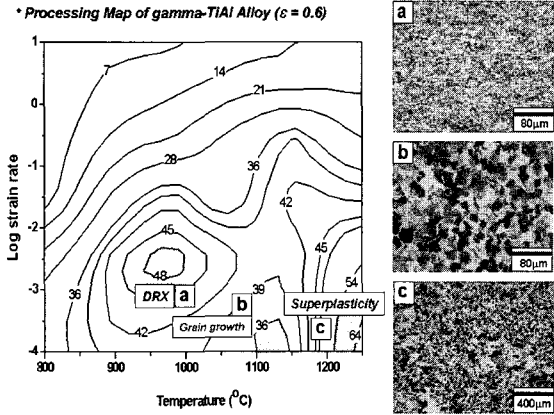


Fig. 5 The processing map of γ -TiAl alloy. And optical photographs of the (a) dynamic recrystallized grains, (b) normal grain growth, and (c) superplastic deformation

3.2.4 FEM 응용 공정 설계 및 미세조직 예측기술

앞서 각 소재에 대하여 구축된 데이터베이스를 활용하여, FEM 응용 전산모사의 근간이 되는 구성방정식을 도출하게 된다. 본 기술에서 개발되는 구성방정식은 일반 적인 유동응력식 또는 구성방정식(식 (1)~(3))과 달리 고온 가공 시 변화하는 미세조직적 변수를 포함하고 있기 때문에 매우 유용하다(식 (4)~(8)).

$$\dot{\epsilon} = A_1 \sigma^n \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (1)$$

$$\dot{\epsilon} = A_2 \sigma^n \exp(\beta\sigma) \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (2)$$

$$\dot{\epsilon} = A_3 [\sinh(\alpha\sigma)]^n \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (3)$$

식 (4), (5) 및 (8)에서 변수 “S”는 내부상태변수 (Internal State Variable)를 의미하며, 재료내부의 변화하는 결정립의 크기, 전위밀도 및 이차상의 변

화 등과 관계한다. 이와 같이 미세조직 변수는 소재의 주된 변형기구 및 미세조직적 변화를 고찰함으로써 설정할 수 있으며, 고온유동응력 곡선 및 변형 후 측정되는 미세조직 변수에 대한 데이터베이스를 통하여 상관관계가 수립된다.

$$\dot{\epsilon}'_y = \frac{3}{2} A \left[\sinh\left(\frac{J_2(\sigma'_{ij}) - k_0}{S}\right) \right]^n \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \frac{\sigma'_{ij}}{J_2(\sigma'_{ij})} \quad (4)$$

$$\dot{S} = b^* (S_M - S) \epsilon^{m^*} \dot{\epsilon} \quad (5)$$

$$\epsilon = \left[\frac{2}{3} \epsilon_{ij} \epsilon_{ij} \right]^{1/2} \quad (6)$$

$$\dot{\epsilon} = \left[\frac{2}{3} \dot{\epsilon}_{ij} \dot{\epsilon}_{ij} \right]^{1/2} \quad (7)$$

$$\sigma = k_0 + S_M \left[1 - \exp(-b\epsilon^m) \right] \sinh^{-1} \left(\frac{Z}{A} \right)^{1/n} \quad (8)$$

이를 이용하면 기존에 수행해 오던 미세조직 예측 및 변화에 대한 비연계 해석 결과에서 벗어나 미세조직과 응력-변형율 간의 연계 해석이 가능하다. 환언하면, 임의의 시간에서 기계적인 조건의 상태와 미세조직의 변화를 선택하여 결과를 출력할 수 있다는 장점이 있다. 이 결과를 간단한 압출공정에 적용한 결과를 Fig. 6에 나타내었는데, 소재의 온도, 응력 및 변형율 분포 외에도 특정상의 상분율 및 결정립 크기의 분포 역시 예측이 가능하다.

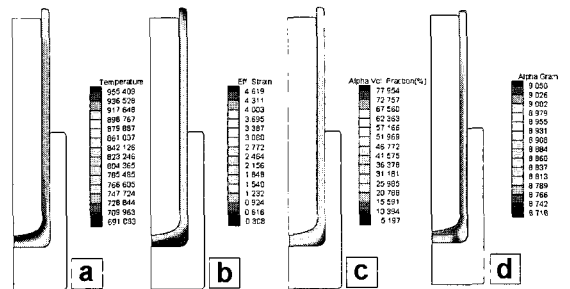


Fig. 6 FEM simulation results of the (a) temperature, (b) effective strain, (c) volume fraction and (d) grain size of a phase

또한 일반 단조공정 설계를 위한 최대 하중 계산, 초기 소재의 부피 계산, 최적의 금형 및 소재의 형상 설계 등 기준에 수행해 오던 단조공정 설계를 위한 일반적인 계산 및 예측 역시 가능하다.

3.2.5 초기 소재 역 추적 선정기술

변형을 받는 소재의 관점에서 보면 소재의 미세조직이 안정한 상태를 유지하면서 가공되는 것이 가장 효율적이다. 즉, 소재가 변형도중 불균질 변형을 받으면 여분의 에너지가 필요하기 때문이다. 그러나 단조설비의 능력 또는 생산속도의 감소에 기인하여 이를 적절하게 수행할 수 없는 경우, 또는 단조품에 요구되는 특성을 만족하는 특정한 미세조직이 공정조건에 제약 때문에 설계가 불가능한 경우가 발생하게 된다. 이를 해결하기 위해 본 연구실에서는 기 언급된 제한조건 하에서, 요구되는 미세조직을 설계하기 위하여 초기에 주어져야 하는 원소재의 미세조직적 특징을 선정하는 기술, 초기 소재 역 추적 선정 기술을 개발하고자 한다.

Fig. 7에는 본 기술의 개략도를 나타내었는데, FEM을 이용한 미세조직 설계를 통하여 원소재가 갖추어야 할 미세조직적 조건을 유추한 후, 열처리 또는 가공 열처리를 통하여 유도된 조건을 획득하여 최종 목표하는 미세조직 설계를 완료하는 것이 본 기술의 핵심이다. 이는 본 제안 기술의 핵심인 미세조직 변화를 모델링 하는 것을 기반으로 적용되며, 제한된 공정조건을 경계조건으로 설정하여 목표 미세조직을 얻어낼 수 있는 초기 미세조직(결정립 및 상분율 등)의 초기 값을 추적하는 것이다. 이 초기 값을 구현함에 있어서, 요구되는 선 가공 및 열처리 등의 방법을 제안할 수 있으며 원소재에 대하여 직접 적용하거나 초기 값과 유사한 원소재를 구매하는데 정보를 제공하고 자 한다.

3.2.6 실시간 결함 및 미세구조 탐지기술

기존 결함 및 미세구조 탐지기술에서는 주로 X-ray, Ultrasonic, Acoustic emission 등을 이용한 비파괴 검사가 주류를 이루었으며, AE 방법을 제외하고는 주로 정적 상태에 적용되었다. 그러나 본 개발기술에서 적용하고자 하는 방법은 Laser ultrasonic 을 기반으로 하는 탐지기술이며, 단조공정 중 발생하는 미세조직적 결함을 실시간으로 측정하고자 한다.

이 방법은 펄스 레이저와 헬륨-네온 레이저 광

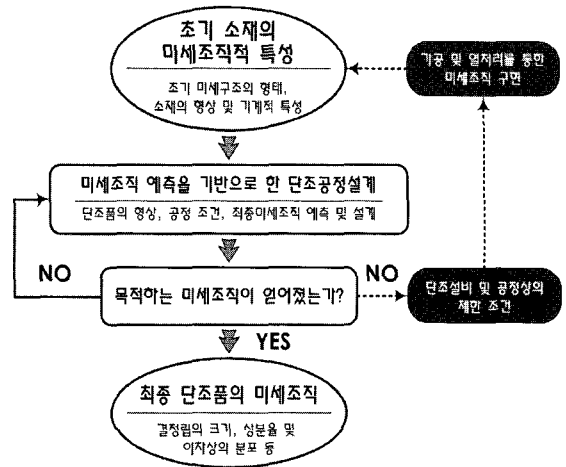


Fig. 7 Schematic diagram of reverse prediction system to obtain initial microstructures

선을 동시에 물체표면에 주사함으로써 초음파 영역의 탄성파가 결함에 의해 산란되는 현상을 간접적으로 탐지하여 측정하는 것이며, 소재에 손상을 입히지 않고 물체결함의 크기와 형태를 손쉽게 용이하게 측정할 수 있는 방법이다. 실제 이 기술은 대형 열연 판재의 경우처럼 비교적 큰 균열 탐지에 적용되고 있으나, 본 기술개발을 통하여 검출 및 분해능을 효과적으로 개선하여 실 단조 공정에 적용하고자 한다. 일반적인 경우 단조품에서 발생하는 결함은 거시적으로 직접 관찰이 가능한 표면 균열, 접힘 및 플래쉬에 발생하는 균열 등이 존재하나, 이와 같은 결함들은 거시적으로 관찰이 가능하며 즉시 공정의 수정이 가능하다. 그러나 재료내부에 발생하는 미세조직적 균열은 육안으로 탐지가 곤란하므로 본 기술을 통하여 효과적으로 개선하고자 하며 상술된 Laser ultrasonic 장치를 Fig. 8에 나타내었다.

4. 적용 사례

앞서 언급한 기반기술들을 Ti-6Al-4V 합금에 적용하고 그 가능성을 검토하였다. 또한 현재까지는 Fig. 2 에 언급한 부분 중 2 단계의 FEM 응용 단조공정 설계 및 미세조직 예측 기술까지 수행되었으며, 향후 실시간 결함탐지 및 초기 소재 역 추적 선정 기술에 까지 개발 완료하고자 한다.

Ti-6Al-4V 합금을 소재로 하여 수행된 단조공정은 후방압출 단조공정이며, 초기 소재의 미세조직

은 Fig. 9와 같은 구형의 α 상과 어둡게 보여지는 β 상으로 구성된 등방성(equiaxed)조직이었다. 이와 같은 초기 미세조직에 대하여 700~1,100°C 온도구간에서 50°C 간격, 10^{-4} ~ 10^2 /sec 변형율 속도 범위에서 10배 간격으로 고온압축시험을 실시하고 고온 유동응력 곡선을 획득하였다.

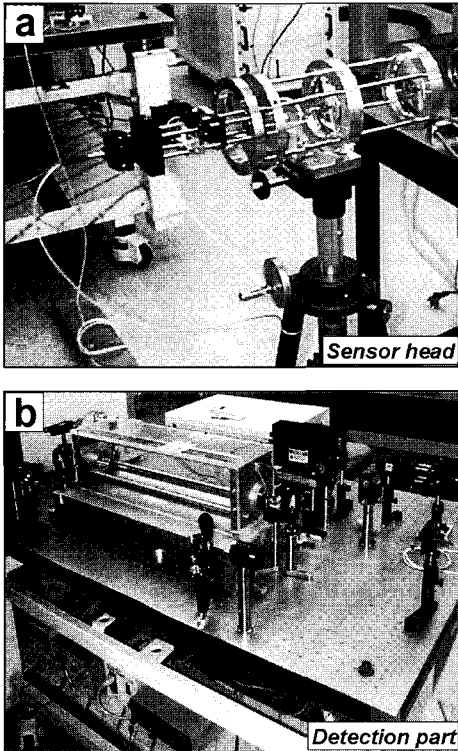


Fig. 8 Photographs of the real-time detection system using laser ultrasonic

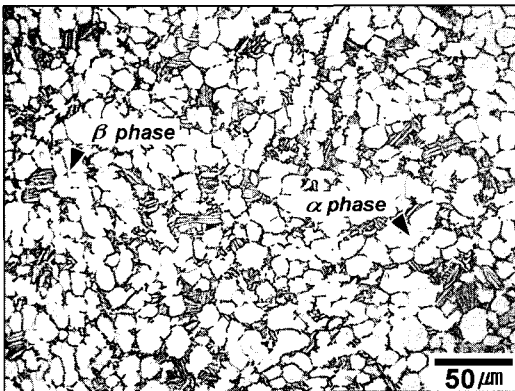


Fig. 9 Optical photograph of the starting microstructure(equiaxed microstructure, Ti-6Al-4V alloy)

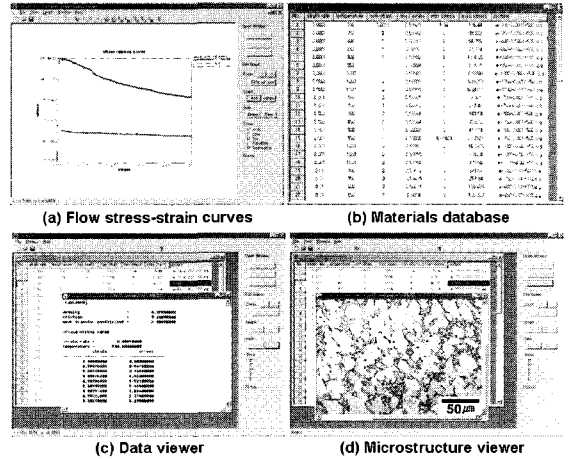
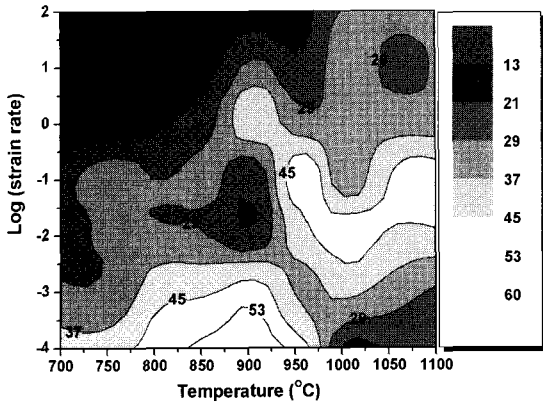


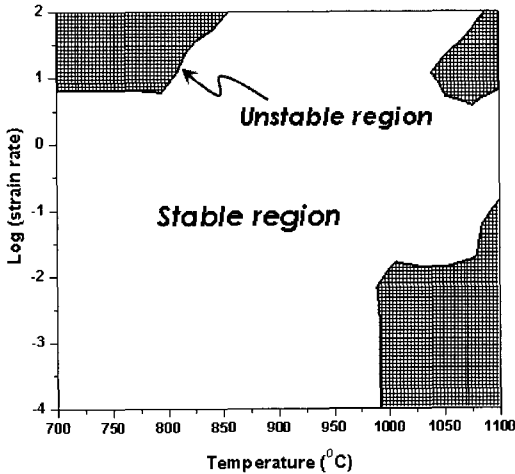
Fig.10 Captured images of database program

그리고 해당 온도-변형율 속도 조건에서 단계적으로 얻어낸 변형 미세조직에 대하여 결정립 크기 상분을 및 기타 미세조직적 인자들을 측정하여 데이터베이스화 하였다. 이와 같은 데이터베이스를 프로그램화 하여 사용이 용이하도록 저장하였고, 기본적인 열역학적 인자, 가령 변형 활성화 에너지, 변형속도 민감도 지수 등 각종 상수들을 직접 연산할 수 있도록 기본 연산 프로그램을 모듈화하여 내장하였다. 개략적인 데이터베이스 관리 프로그램을 Fig. 10에 나타내었다.

또한 특정 구간에서 발생하는 고온 변형기구를 규명하기 위하여 비탄성 변형이론(Inelastic Deformation Theory)에 근거하여 고찰과 분석을 시도한 결과 입계 미끄러짐(Grain boundary Sliding)과 더불어 새로운 변형기구가 작용했음이 밝혀졌다[7]. 이와 같은 결과는 기존에 알려져 있던 변형연화(Flow Softening)의 기구에 대하여 명확한 정의를 내린 것이며, 본 기술을 통하여 적용된 접근방법이 매우 효과적임을 반증하는 것이다. 다양한 조건에서 얻어진 데이터 베이스를 통하여 각종 열역학적 인자와 상수들을 계산하고 이를 이용하여 주어진 소재에 대하여 고온 가공성과 불안정성을 판단하였다. 그 결과 가장 유리한 가공조건은 약 850~950°C, 10^{-4} ~ 10^{-3} /sec 구간이었으며, 저온 고변형율 속도 영역에서는 소재 내부에 단열성 전단밴드가 형성되어 균일한 변형이 발생하지 아니하였다. 수행된 온도 및 변형율 속도구간에서 얻어진 가공지도와 불안정 지도를 Fig. 11에 나타내었다. Fig. 11(a) 및 (b)에 나타난 어두운 부분과 빛금 친 영역은 가급적 피해야 하는 조건을 나타낸다.



(a)



(b)

Fig.11 (a) Processing map and (b) instability map for the equiaxed microstructure at a strain of 0.6

최종적으로 Ti-6Al-4V 합금의 미세조직적 특성을 고려하여 고온가공 시 발생하는 미세조직 변화에 대한 모델링을 시도하였고, 이를 온도, 변형률 및 변형률 속도와 연결하여 구성방정식을 구축하였다. 이와 같은 구성방정식의 형태는 FEM source code에 삽입가능 하도록 변환하여 삽입되었다. 데이터베이스로부터 얻어진 결과와 미세조직 모델링을 통하여 얻어진 구성방정식과 관계식을 아래에 나타내었다.

- 최대응력에 대한 유동응력식 ($\alpha+\beta$ 영역)

$$\dot{\epsilon} = 10^{18.515} \left[\sinh(9.43 \times 10^{-3} \sigma) \right]^{2.985} \exp\left(-\frac{444123}{RT}\right) \quad (9)$$

- 최대응력에 대한 유동응력식 (β 영역)

$$\dot{\epsilon} = 10^{13.684} \left[\sinh(2.34 \times 10^{-2} \sigma) \right]^{4.21} \exp\left(-\frac{361670}{RT}\right) \quad (10)$$

- 정상상태에 대한 유동응력식 ($\alpha+\beta$ 영역)

$$\dot{\epsilon} = 10^{17.135} \left[\sinh(8.8 \times 10^{-3} \sigma) \right]^{3.577} \exp\left(-\frac{406000}{RT}\right) \quad (11)$$

- 정상상태에 대한 유동응력식 (β 영역)

$$\dot{\epsilon} = 10^{11.376} \left[\sinh(1.56 \times 10^{-2} \sigma) \right]^{5.18} \exp\left(-\frac{28000}{RT}\right) \quad (12)$$

- 온도에 따른 각 상의 상분율의 변화

$$\beta \text{ 상: } f_{\beta} = e^{14.407} \exp\left(-\frac{103687}{RT}\right) \quad (13)$$

$$\alpha \text{ 상: } f_{\alpha} = 100(\%) - f_{\beta} \quad (14)$$

- 온도에 따른 α 결정립 크기의 변화

$$d = 15.4 \left(0.011 \left(100 - \exp\left(14.407 - \frac{103687}{RT}\right) \right) \right)^{1/3} \quad (15)$$

- 온도, 변형률에 따른 구성방정식

$$\sigma = k_0 + S_M \left[1 - \exp(-b\epsilon^m) \right] \sinh^{-1} \left(\frac{Z}{A} \right)^{1/n} \quad (16)$$

$$b = \alpha_b Z^{-\beta_b}, \ln \alpha_b = -3.53436, \beta_b = -0.12858 \quad (17)$$

$$m = \alpha_m Z^{-\beta_m}, \ln \alpha_m = -1.84211, \beta_m = -0.05231 \quad (18)$$

- 결정립과 내부상태변수와의 관계

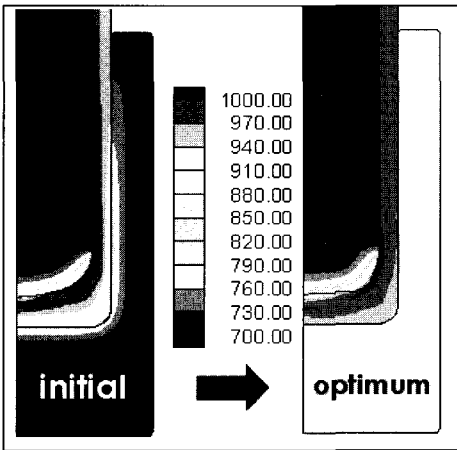
$$\Delta D = -1.65661 - 0.07048 S_M + (5.8291E-4) S_M^2 \quad (19)$$

FEM 응용 전산모사는 실제 후방압출 단조공정과 함께 실시되었는데, 주어진 형상을 성형하는데 있어서 초기 소재 및 금형의 온도, 최적 금형의 형상 및 가공속도 등을 최적화 기법을 사용하여 결정하였다. Fig. 12(a)는 주어진 구성방정식을 이용하고 최적화 기법을 이용하여 얻어낸 최적 공정 설계 결과이다. 온도와 변형률속도의 범위가 제한된 가운데, 최적의 온도 및 펀치의 속도를 유도하여 매우 균일하며 안정적인 변형이 유도될 수 있음을 확인하였다. 또한 Fig. 12(b)는 목적하는 미세조직을 얻기 위한 온도와 변형률속도를 변화하여 최적화한 것인데, Ti-6Al-4V 합금에서 보고된 바에 의하면 약 35% 정도의 α 상분율을 가지는 경우 내 층

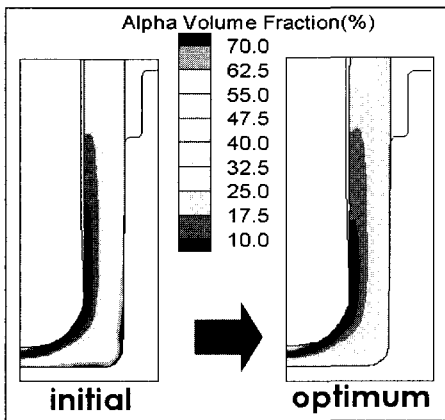
격특성이 매우 우수한 것으로 본 연구실에서 제한한 결과이다.

이를 목표로 전체 부품이 갖는 상분율을 35% 근접하게 얻어질 수 있는 공정을 설계한 결과이며, 초기 조건보다 상분율의 분포가 제한 조건 내에서 비교적 고르게 분포된 것으로 나타났다. Fig. 12(c)와 (d)는 미세구조의 예측 결과를 나타낸 것인데, 실제 단조품에서 얻어낸 미세조직의 결과와 잘 일치하였다(Fig. 12(e)).

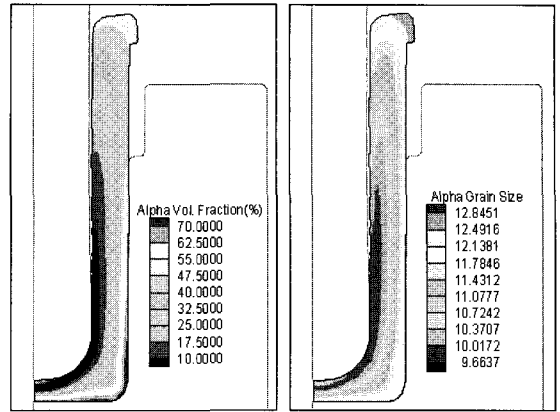
앞서 언급한 바와 같이 본 연구과제에서 개발한 구성방정식은 기계적 인자 및 금속학적 인자 모두 예측이 가능하기 때문에, 기본 금형설계 외에도 최적의 금형 및 공정 조건에 대한 설계도 가능하며, 이와 동시에 발생하는 미세구조의 변화도 예측이 가능하다.



(a)

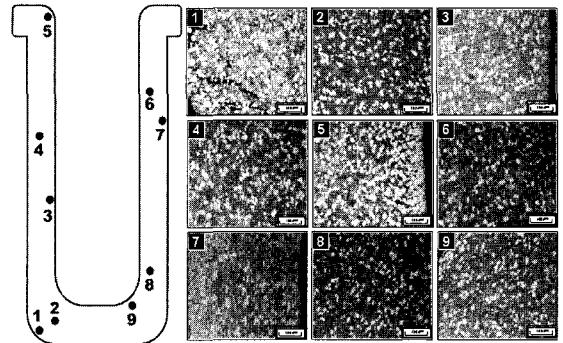


(b)



(c)

(d)



(e)

Fig.12 FEM simulation results of (a) optimized die temperature and ram speed, (b) optimized process condition for the desired volume fraction of α phase (c) prediction of volume fraction and (b) grain size of α phase, and (e) optical photographs of microstructures after hot extrusion

따라서 주어진 제한 조건 내에서 최대한의 효율을 얻는 공정 계획을 수립하는데 매우 용이하다. 또한 특정 미세조직을 얻기 위한 단조공정을 설계하는데 이용하였을 뿐만 아니라 선정된 공정 루트를 따라 얻어지는 최종 미세조직을 예측하였고 이를 실제 결과와 비교하였는데, 매우 잘 일치함을 알 수 있었다.

5. 향후 전망

앞서 상술한 바와 같이 단조기술은 21세기를 이끌어 가는 항공기 자동차 전자산업에 필수인 요소 기술이며 이러한 첨단 단조기술의 발전은 국가의 산업경쟁력을 증가시키므로 꾸준한 연구노력이 필요하다 할 수 있다. 현재 이에 대한 잠재력은 이미 산·학·연을 중심으로 발휘되고 있기 때문에, 향후 고부가가치 단조품의 생산 기반 확보, 무결함 제품 개발 및 품질 향상, 최적화 공정 설계를 위해서는 기계적인 요소와 금속학적 요소들을 효과적으로 융합하고 적용하는 지능형 단조기술이 더욱 중요하며, 본 연구실에서 수행 중인 미세조직 최적화를 이용한 지능형 단조기술이 개발 및 적용될 경우 우리나라의 중소 산업체로의 기술이전 등이 활발히 추진 될 것이며, 건전한 단조품의 제조와 고부가가치 제조기술 확립에 크게 이바지 할 것이다.

후 기

본 연구개발기술에 대한 소개는 2003년 국가지정연구실 사업의 지원에 의하여 수행된 결과이며, 이에 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

- [1] 주단조편, 2001, 철강연감, 통권 10호, 철강신문사.
- [2] 이정환, 2002, 한국소성가공학회지, 제11권 제3호, pp. 201~210.
- [3] 주단조편, 2002, 철강연감, 통권 11호, 철강신문사.
- [4] C. C. Chen, J. E. Coyne, 1976, Metall. Trans., 7A, p. 1931.
- [5] B. J. Lee, S. Ahzi, B. K. Kad, R. J. Asaro, 1993, Scr. Metall. Mater., 29, p. 823.
- [6] G. Lütjering, 1998, Mater. Sci. Eng., A243, p. 32.
- [7] G. K. Turnbull, Microstructure Control of Ti-6Al-4V Forging, Titanium and Titanium alloys-Source book, ASM., p. 265.
- [8] H. Ziegler, 1965, Progress in Solid Mechanics, (ed. I. N. Sneddon and R. Hill), Vol. 4, New York, Wiley, p. 91.
- [9] I. Weiss, F. H. Froes, D. Eylon, G. E. Welsch, 1986, Metal. Trans. A, 17A, November, p. 1935.
- [10] J. C. Malas III, 1991, Methodology for design and control of thermo mechanical processes, Ph.D dissertation, Athens, OH, Ohio University.
- [11] J. J. Jonas, C. M. Sellar, W. J. McG. Tegart, 1969, Metall. Rev., 14, (1) p. 1.
- [12] J. S. Kim, J. H. Kim, Y. T. Lee, C. G. Park, C. S. Lee, 1999, Mater. Sci. Eng., A263, p. 272.
- [13] M. Dao, B. K. Kad, R. J. Asaro, 1996, Philos. Mag. A74, p. 569.
- [14] P. Dadras, J. F. Thomas Jr., 1981, Metall. Trans., A12, p. 1867.
- [15] P. E. Wellstead, 1979, Introduction to physical systems modeling, London, Academic Press.
- [16] R. Raj, 1981, Metall. Trans. A, 12A, p. 1089.
- [17] R. R. Boyer, G. E. Welsch, E. W. Collings (Eds.), 1994, Materials Properties Handbook; Titanium alloys, ASM International, Metal Park, OH, p. 488.
- [18] S. L. Semiatin, G. D. Lahoti, 1981, Metall. Trans., A12, p. 1705.
- [19] S. L. Semiatin, J. J. Jonas, 1984, Formability and Workability of Metals, ASM, Metal Park, OH, p. 52.
- [20] J. H. Kim, S. L. Semiatin, C. S. Lee, 2003, Acta Materialia, Vol. 51, p. 5613.
- [21] Y. V. R. K. Prasad, H. L. Gegel, S. M. Doraivelu, J. C. Malas, J. T. Morgan, K. A. Lark, D. R. Barker, 1984, Metall. Trans. A, Vol. 15A, October, p. 1883.
- [22] Y. V. R. K. Prasad, S. Sasidhara, 1997, Hot Working Guide-A Compendium of Processing Maps, ASM International.
- [23] Y. V. R. K. Prasad, T. Seshacharyulu, 1998, Mater. Sci. Eng., A243, p. 82.
- [24] W. Bang, C. S. Lee, Y. W. Chang, 2003, J. Mater. Proc. Tech., Vol. 134, p. 153.
- [25] M. Zhou, M. P. Clode, 1998, Mechanics of Materials, Vol. 27, p. 63.
- [26] Y. H. Lee, T. J. Shin, J. T. Yeom, N. K. Park, S. S. Hong, I. O. Shim, S. M. Hwang, C. S. Lee, 2004, Materials Science Forum, Vol. 449~452, p. 189.
- [27] 이유환, 신태진, 황상무, 박노광, 심인욱, 이종수, 2003, 한국소성가공학회지, 제12권 제4호, p. 290.