

## Ti-6Al-4V 합금의 대형 링 압연공정설계

염종택<sup>1,2</sup>, 김정환<sup>1</sup>, 이동근<sup>1</sup>, 박노광<sup>1</sup>, 최승식<sup>3</sup>, 이종수<sup>2,#</sup>

### Process Design for Large-Scale Ring-Rolling of Ti-6Al-4V Alloy

J. T. Yeom, J. H. Kim, D. G. Lee, N. K. Park, S. S. Choi, C. S. Lee

(Received January 4, 2007)

#### Abstract

The process design for large-scale ring rolling of Ti-6Al-4V alloy was performed by calculation method, processing map approach and FEM simulation. The ring rolling design includes geometry design and optimization of process variables. The calculation method was used to make geometry design such as initial billet and blank sizes, and final rolled ring shape. A commercial FEM code, SHAPE-RR was used to simulate the effect of process variables in ring rolling on the distribution of the internal state variables such as strain, strain rate and temperature. In order to predict the forming defects during ring rolling and the formation of over-heating above  $\beta$ -transus temperature due to deformation heating, the process-map approach based on Ziegler's instability criterion was used with FEM simulation. Finally, an optimum process design to obtain sound Ti-6Al-4V rings without forming defects was suggested through combined approach of Ziegler's instability map and FEM simulation results.

**Key Words** : Ring Rolling Process, Large-Scale Ti-6Al-4V Ring, FEM Simulation, Forming Defects

#### 1. 서 론

링압연공정(ring rolling)은 이음매 없는 링 모양의 제품을 연속적으로 가공하여 원하는 치수의 제품을 제조하는 공정으로, 발전설비, 화학플랜트, 가스터빈 및 제트엔진용 링부품 등 다양한 분야의 링부품 제조에 사용되고 있다. 이러한 링압연공정은 링 단조(ring forging)공정에 비해 작업 속도가 빠르며, 온도유지가 가능하며, 수율향상 등을 꾀할 수 있고, 특히 grain flow line 이 원주방향으로 끊기지 않고 연속적으로 형성되기 때문에 우수한 특성을 발현할 수 있는 장점을 가진다. 과거 링압연공정은 최종 압연 링부품의 형상과 관련된 설계에 국한되었으나, FEM 시뮬레이션[1]과 같은 컴

퓨터 전산모사기술의 발달과 함께 공정중 fishtail, fold 등의 성형결함의 생성과 미세조직의 변화를 고려함으로써 제품의 품질을 향상시키고자 하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 항공기 엔진용 타이타늄합금의 링부품 제조의 경우 통상적으로 링압연공정을 활용하는 것으로 알려져 있다[2].

타이타늄합금의 ring rolling 공정시 두께감소율과 높이 감소율의 불균일로 인해 fishtail 과 같은 성형결함이 자주 발생되어 결국, 최종제품의 표면부 불량을 초래하기 때문에 이러한 성형결함을 최소화하기 위한 노력이 요구된다[3]. 지금까지 알려진 고온성형성 및 성형결함을 평가하기 위한 접근방법들은 동적재료모델(Dynamic Material Model)에 기초한 방법론들, 원자론적 모델, 연성과파개념에

1. 한국기계연구원, 재료기술연구소

2. 포항공과대학교, 신소재공학과

3. (주) 태웅

# 교신저자: 포항공과대학교 신소재공학과,

E-mail: cslee@postech.ac.kr

기초한 접근방법들, 유동불안정 및 인장 불안정 (네킹) 인자를 고려한 방법 등 다양한 방법들이 연구되어 왔으며, Murty 와 공동연구자들[4]은 여러 유동 안정 및 불안정성 인자들에 대한 고찰을 통해 Ziegler 에 의해 제안된 소성 불안정인자가 가장 신뢰할 수 있는 결과를 나타내었음을 증명하였다. 그러나, 이러한 소성 불안정 및 안정기준들을 실제 소성가공공정에 적용하기 위해서는 다양한 공정조건에 대한 신뢰성 입증의 실행되어야 한다.

따라서, 본 연구에서는 대형 Ti-6Al-4V 합금 링 부품의 링압연공정에 대하여 결함억제 및 여러 허용치 등을 고려한 preform, 블랭크(blank) 및 최종 링제품의 크기결정과 관계된 형상 설계방법을 제시하였다. 또한 최적의 공정조건을 도출하는 방법으로, FEM 해석을 활용하여 일차적으로 선정된 몇가지 공정설계 조건에 대해 균일변형, 하중 최소화, 불균일 미세조직 억제 등의 측면에서 최적인 조건을 선정 후 최종적으로 에너지분산효율 및 유동불안정성을 기초한 모델을 활용하여 제시된 변형공정지도와 FEM 해석을 연계한 방법을 활용하여 성형결함 및 불균일 미세조직 등의 발생 여부를 예측 평가함으로써 최적의 성형조건을 제시하였다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 원소재 분석 및 $\beta$ 변태점 측정

본 연구에서 사용된 Ti-6Al-4V 합금 빌렛은 VAR/VAR double 용해된 잉고트로 부터 2 차 코깅 공정에 의해서 제조하였다.

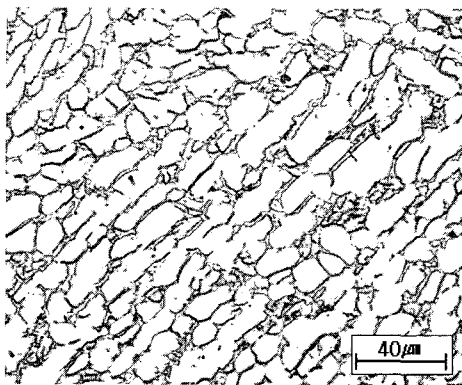


Fig. 1 Microstructure of Ti-6Al-4V alloy

Fig. 1은 Ti-6Al-4V합금 빌렛의 미세조직을 나타낸 것으로, 등축정  $\alpha$ 상, 연신된  $\alpha$ 상과 변태  $\beta$ 상으로 구성된  $\alpha$ - $\beta$  조직임을 관찰할 수 있다.

Ti-6Al-4V합금의 성형조건을 결정하기 위해서는 이 합금의  $\beta$ 변태점을 측정하는 것은 상당히 중요한 일이며, 본 연구에서는 900~1015°C 영역에서 1시간동안 열처리한 후 급냉하는 방법으로  $\beta$ 변태점을 측정하였다. 이러한 실험을 통해 약 990°C가 이 합금의  $\beta$ 변태점 임을 알 수 있었다.

### 2.2 링압연 공정

본 연구의 공정설계 방안에 따라 얻어진 최적화 공정조건을 검증하기 위한 링 압연공정은 최대직경 2,500mm, 높이 600mm를 제조할 수 있는 100톤 용량의 링압연기를 통하여 수행하였고, main roll, 맨드렐(mandrel), 축롤(axial roll) 등 급형의 가열온도는 약 150°C, main roll의 회전속도는 26rpm에서 최적화된 공정조건에 따라 수행하였다.

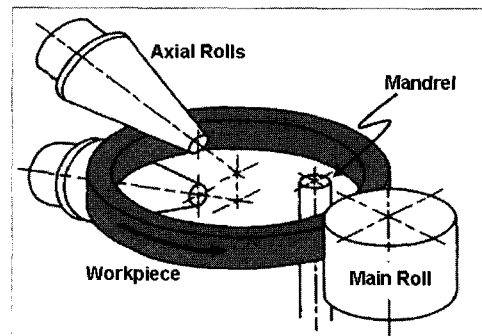


Fig. 2 Schematic Illustration of ring rolling mill

Fig. 2 는 링압연공정 장비를 나타낸 것으로, 장비의 구성은 구동력을 공급하는 회전롤(Main Roll), 공회전을 하면서 소재에 반경방향의 성형하중을 작동하는 맨드렐(Mandrel), 그리고 소재의 축방향 소성변형을 제어하는 축롤(Axial Roll) 등으로 이루어져 있다. 이러한 장비를 활용하여 미리 준비된 링 소재(Blank)는 맨드렐과 회전롤 사이에 놓여지며, 회전롤을 회전시키며 맨드렐로 압축을 가하면서 롤간의 거리를 좁힘에 따라 링의 두께가 얇아지게 된다. 소재의 체적은 변형을 받는 동안 일정하므로, 링의 두께가 얇아지는 것은 링의 직경이 증가됨으로써 보상된다.

### 3. 초기형상 및 블랭크 설계

본 연구에서 링압연품, 초기 빌렛, 블랭크 (Blank) 등의 형상은 Shivpuri [5] 등에 의해서 제안된 계산방법을 기초로 수행되었다. 먼저, 링압연 성형품의 표면부에 대한 허용치는 다음과 같은 세가지 인자를 기준으로 결정하게 된다.

$$TOL = F_1 + F_2 + F_3 \quad (1)$$

여기서,  $F_1$  은 피할수 없는 표면결함( $\approx 2.54\text{mm}$ ),  $F_2$  는 링직경의 팽창( $\approx 0.1\text{mm}$ ),  $F_3$  는 링 높이가 또는 두께의 팽창율( $\approx 0.254\text{mm}$ ) 등과 관련된 허용치를 의미한다. 결국, 링압연 성형품은 최종제품의 치수에 이러한 허용치를 고려하여 얻어질 수 있으며, 921mm(OD) $\times$ 815mm(ID) $\times$ 115mm(H)의 최종 링압연품을 결정하였다.

한편, 타이타늄합금과 같은 난성형재의 경우 링압연공정시 fishtail, fold 등의 표면결합이 자주 발생하는데 이러한 결함을 최소화하기 위한 조건으로 링의 두께와 높이 사이의 관계를 정의하는 다음과 같은 관계식이 활용되었다.

$$h_1^2 - b_1^2 = h_2^2 - b_2^2 \quad (2)$$

여기서,  $h$  는 링의 높이,  $b$  는 링의 두께이며, 아래 첨자 1 과 2 는 각각 블랭크와 최종 링의 치수를 의미한다. 통상적으로, 링압연공정에서 피어싱(piercing)을 위한 펀치가 구비되어 있기 때문에 블랭크의 내경( $d_{1i}$ )은 결정되는 꼴이 된다. 따라서, 블랭크의 크기는 높이( $h_2$ )와 외경( $d_{1o}$ )의 계산을 통하여 얻어질 수 있으며, 식 (2)에 부피분율이 일정하다는 가정과 함께 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$\frac{d_{2o} + d_{2i}}{2(d_{1i} + b_1)} = \frac{b_1}{b_2} \sqrt{1 - \left(\frac{b_2}{h_2}\right)^2 + \left(\frac{b_1}{h_2}\right)^2} \quad (3)$$

여기서, 아래첨자 o 와 i 는 각각 외경과 내경을 의미한다. 결국, 이러한 계산방법과 현장조건 등을 고려하여 최종 블랭크 크기를 결정할 수 있으며, 그 크기는 440mm(OD) $\times$ 220mm(ID) $\times$ 130mm(H)로 얻어졌다.

### 4. 구성방정식 및 성형결함에측 모델링

열간성형시 변형열은 유동응력의 연화(flow softening)에 직접적으로 영향을 미치게 되며, FEM 해석에 고온 압축시험에 의해서 얻어진 유동응력 데이터를 적용하기 위해서는 반드시 변형열을 보정하여야 한다. 온도 증분( $\Delta T$ )의 계산은 식(4)에 표현된 관계식을 이용할 수 있고, 유동응력의 보정은 선형보간법을 활용한 식(5)에 표현된 수식에 따라 얻어질 수 있다.

$$\Delta T = \frac{0.9 \int_0^{\epsilon_p} \sigma d\epsilon}{\rho C} \quad (4)$$

$$\sigma = \sigma_1 + [T_1 - (T_1 + \Delta T_1)] \left\{ \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{T_1 + \Delta T_1 - (T_2 + \Delta T_2)} \right\} \quad (5)$$

여기서,  $\epsilon_p$  는 소성변형량,  $\rho$  는 밀도,  $C$  는 비열이며,  $\Delta T$  는 온도증분을 의미한다. 또한, 아래 첨자 1 과 2 는 선형보간법에서 활용된 근접한 각각의 데이터를 의미한다.

한편, 유동응력은 변형량, 변형속도, 온도 등의 내부상태변수에 의존하며, 이러한 유동응력을 표현하기 위해서 다음과 같은 구성방정식을 활용하였다.

$$\sigma = K_0 (a_0 + a_1 \epsilon)^n (b_0 + b_1 \dot{\epsilon})^m \quad (6)$$

여기서,  $K_0$  는 강도계수,  $n$  은 가공경화지수,  $m$  은 변형속도 민감도계수,  $a_0, a_1, b_0, b_1$  등은 재료상수이다. 이들 재료상수들은 온도에 의존하며, 표 1 에 온도에 따른 재료상수들을 나타내었다.

Table 1 Parameters of the constitutive equation

Temp. (°C)	$K_0$	$a_0$	$a_1$	$n$	$b_0$	$b_1$	$m$
900	122	0.048	1	0	0	1	0.21
950	73	0	1	0	0	1	0.235
1000	51	0	1	0	0	1	0.213

한편, fishtail과 같은 표면결합 이외에 Ti-6Al-4V 합금의 열간성형공정에서 자주 발생하는 전단밴드, 내·외부 균열에 대한 예측을 위해서, 여러 소성안정 및 불안정기준 중 내열소재에 대하여 신뢰성이 입증된 Ziegler[6~7]의 소성불안정기준을 적용하고자 하였다.

$$\xi(\dot{\epsilon}) = \frac{\partial \ln(m/(m+1))}{\partial \ln \dot{\epsilon}} + m < 0 \quad (7)$$

여기서  $\xi(\dot{\epsilon})$  이 음의 값을 나타내는 경우 유동 불안정 구간으로 정의된다. 결국, 이러한 소성불안정 인자와 FEM 해석을 통해 링압연공정의 최적 공정변수가 최종적으로 결정되었다.

### 5. FEM 해석 및 공정최적화 설계

#### 5.1 링압연공정의 FEM 해석

본 연구에서 링압연공정의 FEM해석은 상용코드인 SHAPE-RR에 의해 수행되었다. 이때 마찰계수와 계면 열전달계수는 각각 0.5와  $20\text{kW}/^\circ\text{Km}^2$ 을 이용하였고, 금형의 초기 가열온도는  $150^\circ\text{C}$ , 회전롤의 회전속도는 26rpm으로 가정하였다. 공정설계 조건으로는 소재의 온도, 맨드렐의 압축속도 등을 들 수 있으며, 링압연공정 설비의 성능을 감안하여 소재 온도구간은  $900\sim 970^\circ\text{C}$ , 맨드렐의 압축속도는 0.5, 1mm/s로 변화시켜 FEM해석이 수행되었고, 형상 측면에서의 균일성 여부를 조사함으로써 일차적인 공정조건을 도출하였다. 이때 블랭크의 형상은 앞서 형상설계에서 얻어진 결과를 활용하였다.

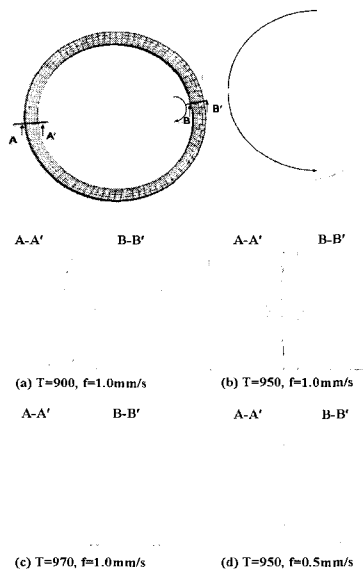


Fig. 3 Ring geometry and deformation results under different simulation conditions for ring rolling; T=temperature, f=feed rate of the mandrel

Fig. 3은 링압연공정의 여러 공정조건에 따라 FEM 해석한 링의 형상변화를 나타낸 것이다. 온도가  $900^\circ\text{C}$ 에서  $970^\circ\text{C}$ 로 상승함에 따라 링의 형상이 균일하게 됨을 알 수 있으며, 같은 소재 가열온도  $950^\circ\text{C}$ 에서 맨드렐의 압축속도가 느린 0.5mm/s 조건에서 보다 균일한 형상을 나타냄을 알 수 있다. 또한  $900^\circ\text{C}$  조건의 경우 불균일 형상이 상당히 크게 발생함을 관찰할 수 있는데, 해석상의 오차를 감안 하더라도 이러한 결과는 온도가 낮은 경우 결합이 쉽게 형성될 수 있음을 간접적으로 나타낸다. 즉, 온도가 낮은 경우 표면과 중심부 사이의 온도 불균일이 더욱 크게 나타나기 때문에 불균일 변형과 결합 등이 쉽게 발생할 수 있는 것으로 판단된다. Fig. 4는 B-B' 단면에서 얻어진 각 조건별 온도와 유효 변형률분포 해석결과를 나타낸 것이다.

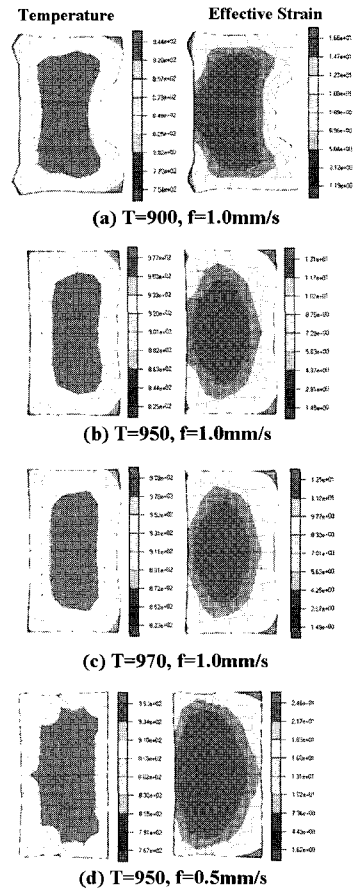
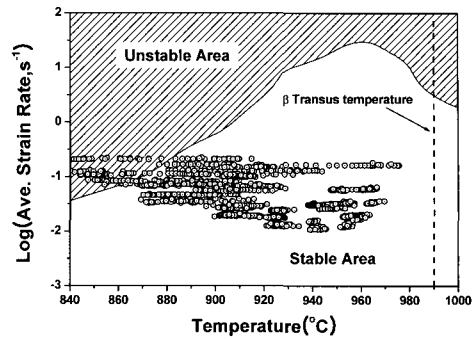


Fig. 4 Effective strain and temperature contours at B-B' cross-section under different simulation conditions for ring rolling

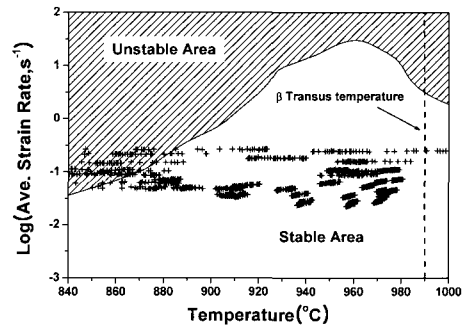
변형량분포의 경우 표면부가 중심부에 비해 변형량이 높게 나타나고 있으며, 특히 모서리 부위에 대해 변형이 집중되고 있음을 알 수 있다. 이러한 현상은 정도의 차이는 있으나, 흔히 링압연공정에서 발생하는 현상으로 압연 패스(Pass)당 링의 높이와 두께의 감소율이 불균일하게 형성됨에 따라 나타나는 것으로 알려져 있다. 결국, 이러한 변형집중이 과도할 경우 그 형상으로 유추된 "fishtail" 결함 발생의 직접적인 요인이 될 수 있다. 온도분포의 경우 변형량분포와 반대로 중심부가 표면부에 비해 온도가 높게 나타났으며, 이는 표면에서 소성변형에 의한 온도상승 효과보다는 금형으로의 열손실로 인한 온도하강이 더욱 크게 발생하고 있음을 짐작할 수 있는 결과이다. 또한, 링압연공정별 온도분포에서 소재가열온도가 970°C 이고, mandrel의 압축속도가 1mm/s 인 경우 중심부의 최대온도가 990°C 로 이는 변형열로 인해 국부적으로 중심부 온도가 β변태온도 이상으로 상승할 수 있음을 나타내는 결과로, 결국 이러한 조건으로 링압연을 수행하는 경우 조직적인 불균일을 초래할 수 있음을 의미한다.

Fig. 5는 Ti-6Al-4V 합금의 소성불안정 공정지도와 함께 형상 측면에서 가장 균일한 조건인 소재가열온도 950°C 와 맨드릴의 압축속도가 1mm/s 와 0.5mm/s 조건에서 FEM 해석된 링압연품의 모든 노드점에서 얻어진 온도와 평균변형속도결과를 mapping 한 결과를 나타낸 것이다. 먼저, 압축속도가 0.5mm/s(Fig. 5(a))인 경우 대부분이 안정조건에 위치하고 있으나, 일부 낮은 온도영역이 소성 불안정영역에 포함되어 있음을 관찰 할 수 있다. 이러한 불안정영역을 확인한 결과 모두 맨드릴 또는 회전롤과 바로 접촉되어 있는 부분으로 확인되었으나, 이러한 부위는 앞서 언급된 피할수 없는 표면결함 허용치( $F_1$ )에 포함되는 영역으로 대부분 가공으로 제거될 부분이기 때문에 실제 공정에서 큰 문제가 없을 것으로 판단된다. 한편, 압축속도가 1.0mm/s 인 경우(Fig. 5(b))는 일부 노드점에서의 FEM 해석결과가 β 변태점을 초과하고 있음을 관찰할 수 있다. 이러한 결과는 결국, 이러한 조건에서 링압연공정을 수행할 경우 불균일 조직분포를 초래할 수 있음을 나타낸다.

따라서, FEM 해석결과와 소성불안정 지도를 활용한 최적화 공정설계를 통해 주어진 현장조건에서 900mm 급 Ti-6Al-4V 합금 링의 최적 링압연공정조건은 가열온도 950°C, 맨드릴의 평균 압축속도 0.5mm/s 로 최종 결정되었다.



(a) 950°C and f=0.5mm/s



(b) 950°C and f=1.0mm/s

Fig. 5 Flow instability maps at a true strain =1.0 to determine the deformation stability; (a) T=950°C and f=0.5mm/s, (b) T=950°C and f=1.0mm/s

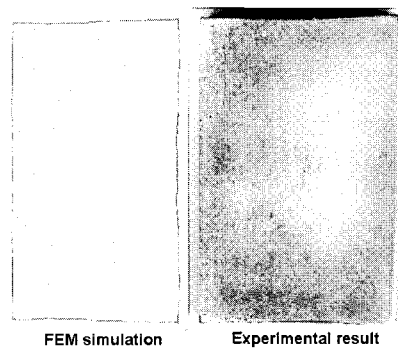


Fig. 6 The comparison of simulated and actual ring rolled shapes at T=950°C and f=0.5mm/s

Fig. 6은 최적 조건으로 선정된 950°C 와 맨드릴의 압축속도가 0.5mm/s 조건에서 링압연공정을 수행한 실제 링제품의 절단면과 FEM 해석결과를 비교한 것이다. 최적조건에서 성형된 링압연품의 경우 성형결함이 없는 건전한 제품임을 관찰할 수

있으며, FEM 해석결과는 실제 링압연품의 형상을 잘 묘사하고 있음을 알 수 있다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 계산방법, 변형공정지도, FEM 해석 등을 통해 외경 900mm급 Ti-6Al-4V합금 링의 공정설계를 수행하고 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 링압연공정시 두께 감소율과 높이 감소율 상호간의 균일변형 이론을 도입하여 fishtail 결함을 최소화 할 수 있는 계산방법을 수립하고, 초기빌렛과 블랭크 등의 최적 형상설계를 얻을 수 있었다.

(2) FEM 해석과 Ziegler의 소성불안정 인자를 이용하여 얻어진 소성불안정 공정지도를 활용하여 900mm 급 대형 Ti-6Al-4V 합금의 최적공정설계가 이루어진 결과, 소재가열온도 950°C와 맨드렐의 압축속도 0.5mm/s를 최적 공정조건으로 결정할 수 있었다.

(3) 본 연구에서 제시된 최적조건에서 실제 링압연을 수행한 결과 성형결함이 없는 건전한 Ti-6Al-4V 합금 링제품이 얻어졌음을 확인하였다.

## 후 기

본 연구는 부품소재기술개발 사업과 2003년 국가 지정연구실사업의 일환으로 수행되었으며, 이에 대한 연구비 지원에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- [1] D. Y. Kim, J. J. Park, 1998, Blocker design for axisymmetric hot steel forging by expert system and FEM, *Metal. Mater. Int.*, Vol. 4, pp. 454~457.
- [2] A. Kluge, Y. H. Lee, H. Wiegels, R. Kopp, 1994, Control of strain and temperature distribution in the ring rolling process, *J. Mater. Proc. Tech.*, Vol. 45, pp. 137~141.
- [3] Z. J. Szabo, E. Bittrich, 1996, Manufacturing systems for the production of seamless-rolled rings, *J. Mater. Proc. Tech.*, Vol. 60, pp. 67~72.
- [4] S. V. S. N. Murty, B. N. Rao, B. P. Kashyap, 2000, Instability criteria for hot deformation of materials, *Int. Mater. Rev.*, Vol. 45, pp. 15~26.
- [5] R. Shivpuri, E. Eruc, 1993, Planning and simulation of the ring rolling process for improved productivity, *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, Vol. 33, pp. 153~173.
- [6] 엄종택, 김두현, 나영상, 박노광, 2001, Ti-6Al-4V 합금의 고온변형거동 규명, *한국소성가공학회지*, 제 10 권, pp. 347~354.
- [7] 엄종택, 박노광, 이유환, 이종수, 2004, Ti-6Al-4V 합금의 열간 후방압출에 대한 성형 안정성 평가모델의 고찰, *한국군사과학기술학회지*, 제 7 권, pp. 84~92.