

선박용 과급기 타이타늄합금 압축기휠의 열간단조 공정설계

염종택[#] · 나영상¹ · 임정숙¹ · 김정한¹ · 홍재근¹ · 박노광¹

Hot Forging Design of Titanium Compressor Wheel for a Marine Turbocharger

J. T. Yeom, Y. S. Na, J. S. Lim, J. H. Kim, J. K. Hong, N. K. Park

(Received May 22, 2009)

Abstract

Hot-forging process and die design were made for a large-scale compressor wheel of Ti-6Al-4V alloy by using the results of 2-D FEM simulation. The design integrated the geometry-controlled approach and the processing contour map based on the dynamic materials model and the flow stability criteria. In order to obtain the processing contour map of Ti-6Al-4V alloy, compression tests were carried out in the temperature range of 915°C to 1015°C and the strain rate range of 10^{-3}s^{-1} to 10s^{-1} . In the die design of the compressor wheel using the rigid-plastic FEM simulation, forging dimensional accuracy, the capacity of the forging machine and defect-free forging were considered as main design factors. The microstructure of hot forged wheel using the designed die showed a typical alpha-beta structure without forging-defects.

Key Words : A Large-Scale Compression Wheel, Ti-6Al-4V, Hot Forging, Dynamic Materials Model(DMM), Forging-Defects, FEM Simulation

1. 서 론

타이타늄합금은 고온강도가 우수하고 비강도가 크기 때문에 가스터빈 압축기, 팬디스크 또는 팬 블레이드 등 수명이 제한된 고에너지 부품에 많이 사용되어 왔으며[1], 타이타늄합금 중 가장 널리 알려지고 보편적으로 사용되고 있는 합금으로 대표적인 $\alpha+\beta$ 형 타이타늄합금인 Ti-6Al-4V 합금을 들 수 있다. 본 연구에서 개발하고자 하는 선박용 과급기의 압축기 휠은 1 차 성능 해석 및 공력해석결과, 압축기의 온도는 240°C 전후로 해석되었으며 이러한 해석결과를 바탕으로 기존에 사용되어 오던 고강도 알루미늄합금 소재를 Ti-6Al-4V 합금 소재로 변경하고자 하며, 이에 대한 연구를 수행하였다.

타이타늄 합금의 기계적 특성에 주된 영향을 미치는 인자는 α 상과 β 상간의 상분포와 함께 미세조직으로써 일반적으로 등축정 조직, 층상조직 및 이들이 공존하는 혼합조직 등 크게 세가지의 조직으로 구분된다. 등축정 조직은 강도, 연성, 피로균열생성에 대한 저항성 등이 우수한 반면, 층상조직은 크리프 저항성, 피로균열전파에 대한 저항성 등이 우수한 것으로 알려져 있다. 한편 혼합조직의 경우 이들 각 미세조직 형상들이 지닌 장점을 골고루 지님으로써 전반적으로 우수한 기계적 특성을 나타낸다[2].

이러한 타이타늄합금의 미세조직 형상의 제어는 일반적으로 가공열처리를 통하여 이루어진다. 일례로, 층상(lamellar)조직은 단순한 열처리로 등축정 조직을 얻을 수 없으며, $\alpha+\beta$ 영역의 온도에

1. 한국기계연구원 부설 재료연구소
교신저자 : 한국기계연구원 부설 재료연구소,
E-mail: yjt96@kims.re.kr

서 열간가공을 통해 층상(lamellar) 조직의 국부적인 전단에 기인한 구상화거동에 의해 등축정이 생성되는 것으로 알려져 있다[3]. 따라서 가공열처리에 의해 등축정 조직, 층상조직 및 혼합조직 등으로 다양하게 미세조직의 제어가 가능한 것이 타이타늄합금의 특징이라 할 수 있으며, 결국, 미세조직의 변화에 따라 기계적 특성의 현저한 변화가 발생하므로 적절한 가공열처리 조건의 선정이 최종적인 부품의 기계적 특성을 결정한다고 할 수 있다.

본 연구에서는 대형 압축기 휠의 제조에 앞서, 열간 단조시 Ti-6Al-4V 합금의 재료거동을 이해하고, 동적재료모델과 성형안정성 평가기준에 따라 변형공정지도를 작성하였다. 또한 변형공정지도를 기초로 안정영역에서 소재의 변형을 제어함과 동시에, 금형 충전 여부와 성형결함 최소화 등을 고려하여 압축기 휠 단조 금형을 설계하였으며, 실제 단조 작업을 통하여 이러한 설계의 신뢰성을 검증하고자 하였다.

2. Ti-6Al-4V 합금의 고온 성형성 평가

2.1 고온압축거동

Ti-6Al-4V 합금의 고온 성형성을 이해하고 이에 따른 미세조직의 변화를 조사하기 위하여 열간가공성 시험장치(TherMacMaster-Z)를 이용하여 고온 압축시험을 수행하였다. 시험에 사용된 압축시험편의 형상은 지름 8mm, 길이 12mm 인 원통형 시험편이고, 10^{-2} torr 이상의 진공분위기 하에서 Si_3N_4 블록사이에 시험편을 위치시킨 후 일정 변형속도로 압축시험을 수행하였다. 이때 시험온도는 주요 성형공정온도인 915~1015°C 사이의 온도구간에서, 변형속도는 10^{-3} ~ 10s^{-1} 범위에서 진변형량 0.6 까지 압축하였다. 이때 Si_3N_4 블록과 시험편 사이에는 열전달 및 마모를 최소화하기 위해 운모판을 삽입하였다. 시험온도에 도달하기 위한 가열속도는 5°C/sec 이고, 시험온도에 도달한 후 시험편 전체의 온도를 균일하게 하기 위해 5 분간 유지한 후 압축하였고, 압축 직후의 미세조직을 관찰하기 위해 질소 급냉하였다.

Fig. 1 은 압축시험으로부터 얻어진 대표적인 유동응력곡선을 나타낸 것으로, 일정한 변형속도조건에서 낮은 시험온도조건인 경우 가공 연화현상이 뚜렷이 관찰되나 β 변태점(약 996°C) 보다 높은 온도에서의 변형시 가공연화는 거의

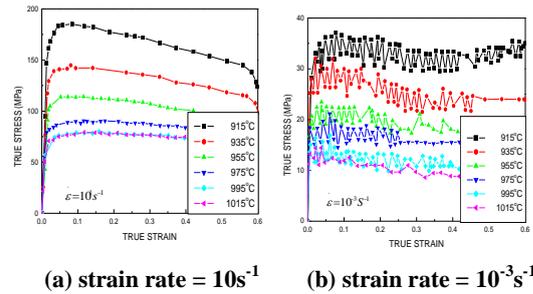


Fig. 1 Flow stress vs. true strain curves of Ti-6Al-4V

관찰되지 않는 것을 알 수 있으며, 이는 온도가 낮은 경우 일부 판상의 α 상이 구상화되는 것을 의미한다. 한편, 변형속도가 낮은 경우 톱니 모양의 유동곡선(serration)이 나타나고 이러한 경향은 시험온도가 낮을수록 더욱 강하게 나타나고 있다. 이러한 Serration 은 변형 중에 고용원소와 전위 또는 쌍정의 상호작용에 의해 연화와 경화가 반복되면서 발생하는 동적변형시효에 기인한 것으로 보고되었다[4]. 본 연구에서 얻어진 유동응력곡선을 살펴본 결과, 변형속도가 증가할수록 serration 의 폭과 빈도가 줄어들고 있음을 알 수 있었으며, 이는 용질 원자와 전위 또는 쌍정과 상호작용이 줄기 때문인 것으로 판단된다.

2.2 변형공정지도

압축실험으로부터 얻어진 유동곡선과 조직분석결과를 Prasad[5]의 동적재료모델과 Malas Seetharaman [6]에 의해 제시된 4 가지 성형안정기준들에 기초하여 분석함으로써 Fig. 2 와 같은 변형공정지도(deformation processing map)를 작성하였으며, 자세한 동적재료모델의 내용은 이전에 보고한 문헌 [5]에서 얻을 수 있다.

이때, contour 지도상에 나타난 값은 에너지분산 효율치(η)를 나타낸 것으로, 이 값이 클수록 고온 성형에 유리한 구간임을 의미한다.

$$\eta = 2m/(m+1) \quad (1)$$

여기서, m 은 변형속도 민감도지수를 의미한다. 또한, 음영(Shadow)으로 표시된 부분은 성형안정기준을 벗어난 영역인 성형 불안정영역으로 이 구간을 피하여 성형을 하여야 건전한 성형품을 제조할 수 있음을 나타낸다.

$$0 < m \leq 1, \quad m' = [\partial m / \partial(\log \dot{\epsilon})] < 0,$$

$$s = [(1/T) \cdot \{\partial(\log \sigma) / \partial(1/T)\}] \quad (2)$$

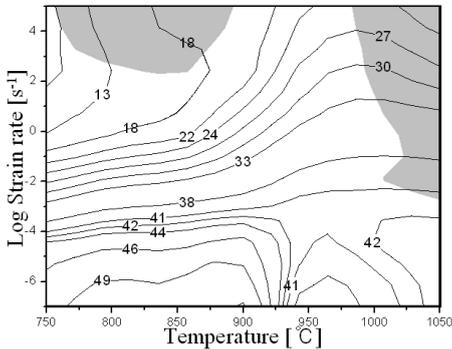


Fig. 2 Deformation processing map of Ti-6Al-4V

본 선박용 과급기에 적용하고자 하는 타이타늄 압축기 휠은 해머단조에 의해 생산제조하는 것을 계획하였으며, 이에 따라 변형공정지도상에 변형 속도가 빠른 10s⁻¹ 이상영역에서 성형불안정영역에 속하지 않은 구간을 최적의 성형온도구간으로 선정하게 되었다. 즉, 최적 성형온도는 970~980°C 영역임을 알 수 있다.

3. 정밀 단조 공정설계 및 검증

3.1 압축기 휠의 단조공정 설계

최종 압축기 휠 가공품의 예상 도면과 원심 압축기에 대한 공력설계로부터 얻은 주요 치수를 바탕으로 단조품의 기본단조형상을 도출하고, 열간 단조 공정에 관한 유한요소해석을 통해 정밀단조 공정설계를 수행하였다. 또한 Thermo-mechanical processing에 따른 Ti-6Al-4V 합금의 미세조직 변화 및 이에 따른 기계적 특성 변화에 관한 연구 경험을 바탕으로 Ti-6Al-4V 합금 열간 단조 공정 조건을 설정하고자 하였다. Table 1은 공력설계로부터 얻어진 압축기 휠의 주요 치수를 나타낸 것이고, Fig. 3은 예상되는 압축기 휠의 최종 가공형상 및 일차적으로 얻은 기본단조형상을 나타낸 것이다.

공력설계로부터 얻은 압축기 휠의 주요 치수를 바탕으로 Fig. 3(b) 형상과 같은 단조품 형상을 일차적으로 도출하였다. 단조품 형상 도출은 고온 가열 및 열간 단조 중 발생할 수 있는 합금 표면의 산화, die chilling에 의한 표면 dead zone 발생

Table 1 Dimension of forged part for compressor wheel

Max. wheel dia. (mm)	Upper wing dia. (mm)	Height (mm)
φ 353	φ259	205.5

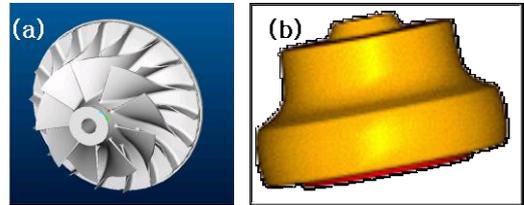


Fig. 3 Three dimension modeling of (a) Compressor wheel and (b) forged part of compressor wheel

등을 고려하여 수행하였으며 이를 바탕으로 열간 단조 공정에 관한 유한요소해석을 통해 단조품 형상의 정밀 공정 및 금형 설계를 수행하였다. 이때 단조품의 초기 원통형 형상은 지름φ 232mm×높이 325mm로 결정되었다. 이러한 초기 빌렛 및 최종 단조품 형상을 바탕으로 정밀공정설계를 수행하였다.

정밀단조 공정해석은 상용 단조해석 프로그램인 DEFORM 코드를 활용하였으며 단조품이 축대칭 형상이기 때문에 대칭면에 대한 2 차원 해석만 수행하였다. FE 단조해석은 비등온, 강소성 조건으로 해석을 수행하였고, 금형(H11)의 초기 온도는 300°C으로 가정하였다. 해석에 필요한 주요 물리적 특성 등은 문헌에 수록된 내용[7]을 활용하였으며, 실험적인 측정이 힘든 계면마찰계수와 계면 열전달계수는 열간단조해석에서 통상적으로 사용되는 0.3 및 20 N/sec/mm²/°C를 각각 사용하였다. 성형할 단조장비는 해머 단조기로서, 해석과정에서의 ram speed는 해머단조기의 통상적인 ram speed인 1,200mm/sec로 가정하여 해석하였다.

한편 Ti-6Al-4V 합금의 미세조직은 등축정조직, 층상조직, 혼합조직 등 크게 세 가지로 구분되며, 본 연구에서는 thermo-mechanical process를 통해 강도측면에서 유리한 등축정 또는 혼합조직의 Ti-6Al-4V 압축기 휠 제조를 목표로 하였다. 등축정 또는 혼합조직의 합금 부품을 제조하기 위해서는 Ti-6Al-4V 합금의 β transus 온도(통상적으로 약 990°C) 이하에서 단조를 수행해야 하기 때문에 변형공정지도상에서 최적의 성형온도구간 970~980°C 중 변형열에 의한 β상 변태온도이상으로 상승되

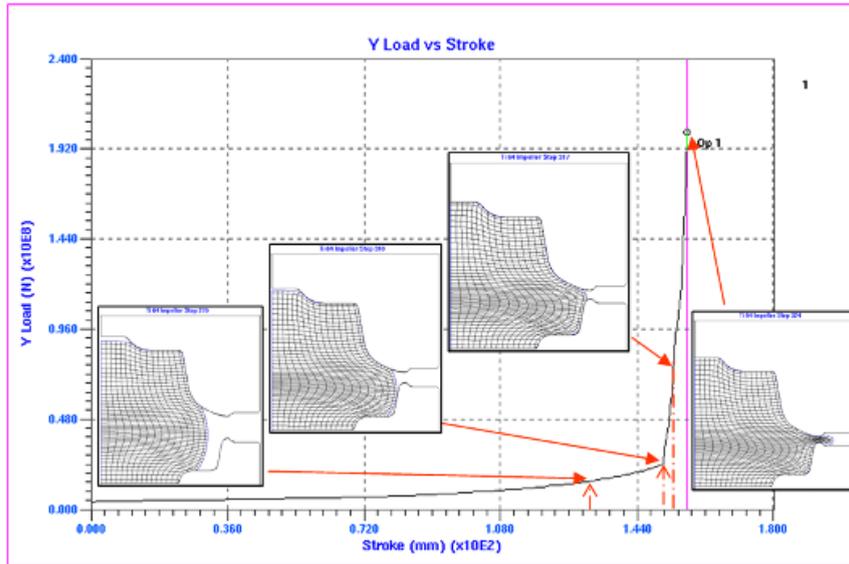
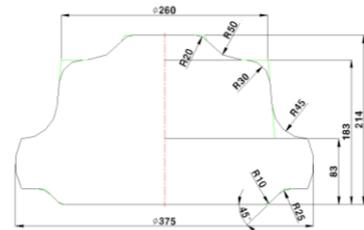


Fig. 6 Deformed shape and load obtained from FE simulation results of hot-forging process using the modified die design

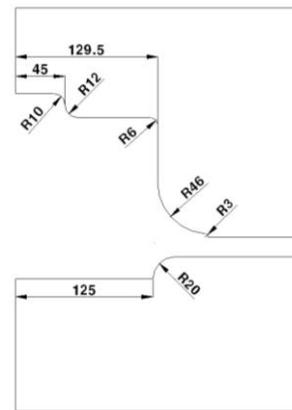
여러 차례에 걸쳐 변화시키면서 정밀 금형설계를 수행하였다. Fig. 5 는 개선된 금형설계를 나타낸 것이고, 개선된 금형에 따라 수행한 유한요소해석 결과 중 하중과 변형양상 등을 Fig. 6 에 나타내었다. 이때 설계변경은 하부금형 및 상부금형의 draft angle 을 10° 정도 적용하고, 플래쉬 랜드 폭 (width of flash land)을 2step 으로 설계하여 초기 58.2mm 에서 1 단계 6.2mm, 2 단계 18.2 가 되도록 변경 설계하였다. 그러나, Fig. 6 에서 볼 수 있는 바와 같이 비록 단조하중이 많이 감소하였으나, 플래쉬가 과도하게 형성되는 것을 관찰 할 수 있으며, 이는 금형 수명 감소의 원인이 될 수 있다. 따라서, 이를 해결하기 위하여 플래쉬가 형성되는 부위의 치수변경이 이루어 졌으며, 2 단계 플래쉬 금형설계를 1 단계로 변경하여 플래쉬 랜드 폭을 18.2mm 로 하였다. Fig. 7 은 최종적으로 얻어진 압축기 휠의 단조품형상 및 금형설계를 나타낸 것으로, 플래쉬가 과도하게 형성되는 것을 방지 하였다.

3.2 성형결함예측

본 연구에서 제시된 압축기 휠의 단조품 형상 및 금형설계가 실제 압축기휠의 열간단조에 앞서 성형결함 발생 여부 및 조직학적 안정성 등을 예측하기 위하여 Fig. 2 에 제시된 변형공정지도



(a)



(b)

Fig. 7 (a) Forged part and (b) die drawing for final hot forging process design of the compressor wheel

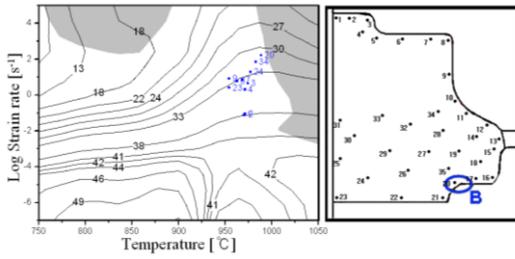


Fig. 8 Simulation to estimate instability of hot-forged Ti-6Al-4V compressor wheel

를 활용하여 조사하였다. 전에 설명한 바와 같이 음영(shadow)으로 표시된 부분은 소성불안정영역을 나타내며, 이 영역에 속하는 부위가 발생할 경우 소성가공시 불안정영역이 형성될 수 있음을 나타낸다. 본 연구에서 제시된 최적 금형설계 조건에 따라 유한요소해석을 수행한 결과에서 각 부위별 유효변형률, 평균 변형속도, 온도 등을 변형공정지도상에 mapping 하였으며, 이때 평균변형속도의 경우 전체 축적변형량(total accumulated strain)을 현시간(current time)으로 나눈값을 활용하였다.

Fig. 8 은 압축기 휠 단조품의 주요 위치에서 얻어진 공정변수값들(온도, 평균변형속도, 변형량)을 변형공정지도상에 mapping 한 결과를 나타낸 것이다. 대부분이 소성안정영역에 속하는 것을 알 수 있으나, 일부 하부 금형(Fig. 8 에서 “B”로 표시된 영역)과 접한 표면부 코너부위에서 소성불안정영역에 근접한 부분이 관찰되며, 이러한 부위는 결국 타이타늄합금의 β상 변태온도이상으로 상승하여 조직 불균일을 초래할 수 있는 가능성이 높은 부위로 판단된다. 그러나, 이러한 단조품의 불안정 가능영역은 단조후 기계가공을 위한 여유 표면부에 속하며, 실제 압축기 휠의 제조상에 큰 문제는 없는 것으로 판단된다. 따라서, 본 연구에서 제시된 단조품 및 금형설계는 대부분의 영역이 소성불안정 구간에 포함되지 않았으며, 금형의 충진률이 우수한 단조 형상과 금형 설계인 것으로 평가되었다.

3.3 열간단조 및 설계검증

본 연구에서 제시된 최종 단조형상 및 금형설계를 바탕으로 실제 단조작업이 수행되었고, 970°C 의 소재 가열온도와 해머단조기를 이용한 압축기 휠의 열간단조가 수행되었다. Fig. 9 은 성형된 제품의

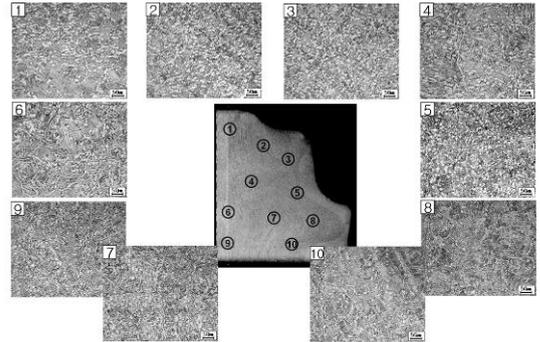


Fig. 9 Macro- and micro-structures of the forged Ti-6Al-4V part

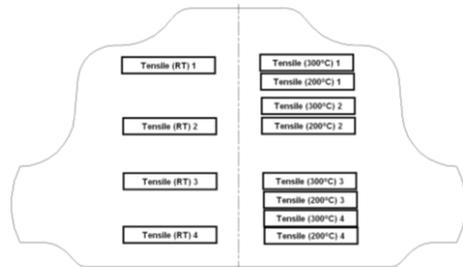


Fig.10 Cut-up diagram of the forged part

Table 2 Tensile properties of the forged part

No.	Temp.(°C)	YS(MPa)	UTS(MPa)	EL(%)
1	RT	875.1	950.7	17.4
2	RT	865.8	939.1	26.1
3	RT	856.6	935.6	22.6
4	RT	856.4	934.1	28.7
1	200	613.6	734.6	20.6
2	200	606.8	723.6	22.5
3	200	606.8	728.9	24.3
4	200	606.6	728.9	21.5
1	300	513.7	660.6	20.0
2	300	510.2	651.3	22.2
3	300	497.7	644.6	23.6
4	300	505.8	646.9	21.7

마크로 및 마이크로 조직분석결과를 나타낸 것이다. 전체적으로 metal flow 는 접혀짐이 없이 금형라인을 따라 연속적으로 형성된 것을 확인할 수 있고, 미세조직은 전체적으로 성형결함이 없는 전형적인 (α+β) 혼합 조직(bimodal structure)

임을 관찰할 수 있다.

Fig. 10 은 열간 단조된 Ti-6Al-4V 합금 단조품의 부위별 인장특성을 평가하기 위한 시험편 채취도를 나타낸 것이고, Table 2 는 부위별 인장시험결과를 나타낸 것이다. 전체적으로 metal flow 가 단조 방향으로 균일하게 형성된 상부에서 채취된 시험편의 강도가 다소 높은 것을 관찰할 수 있으나, 그 차이는 거의 없으며 전반적으로 비슷한 강도를 나타내고 있다.

결국, 이러한 결과는 본 연구에서 제시된 압축기 휠의 공정설계가 성공적으로 이루어졌음을 증명하는 결과이다.

4. 결론

본 연구에서는 Ti-6Al-4V 합금의 압축기 휠을 제조하기 위한 열간단조 공정 및 금형설계를 유한요소해석과 변형공정지도 접근방법을 통해 수행하였으며, 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) Ti-6Al-4V 합금의 열간 단조공정에 대한 유한요소해석을 통해 정밀단조 공정설계 및 금형설계를 수행하였으며, 금형의 draft angle, 플래쉬 치수, 금형 곡면의 곡률 반경 등을 여러 차례 변경하여 유한요소해석 검증을 통해 최적의 단조 금형을 도출하였다.

(2) 단조품의 조직적 안정성을 평가하기 위해 Ti-6Al-4V 의 압축시험을 활용하여 재료거동을 이해하고 동적재료모델을 이용하여 안전영역에서의 소재의 변형을 제어하였고, 소재의 충전, 금속 유동, 단조품 재질 측면에서 최적화된 단조 형상의 금형을 설계할 수 있었다.

(3) 실제 해머단조기를 활용하여 970°C 성형온도에서 열간단조 후 단조품의 조직관찰과 인장시

험을 수행한 결과 성형결함이 발생하지 않은 건전한 ($\alpha+\beta$) 혼합조직과 부위별 균일한 인장특성을 얻었으며, 결국 본 연구에서 제시된 공정 및 금형설계가 성공적으로 이루어졌음을 입증하였다.

후 기

본 연구는 기본 연구사업과 함께 녹산 클러스터 특성화사업의 일환으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다. 또한, 제품 성형에 수고해 주신 한일 단조 관계자 여러분들께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] G. Lutjering, J. C. Williams, 2007, Titanium 2nd edition, Springer, pp. 1~14.
- [2] M. J. Donarchie Jr., 2000, Titanium-A Technical Guide 2nd edition, ASM International, pp. 14~24.
- [3] S. L. Semiatin, V. Seetharaman and I. Weiss, 1997, JOM, June, pp. 33~39.
- [4] L. H. De Almeida, I. Le May, P. R. O. Emygdio, 1998, Mechanistic Modeling of Dynamic Strain Aging in Austenitic Stainless Steels, Mater. Characterization, Vol. 41, pp. 137~150.
- [5] Y. V. R. K. Prasad, et al., 1984, Modeling of Dynamic Material Behavior in Hot Deformation: Forging of Ti-6242, Metall. Trans. A, Vol. 15A, pp. 1883~1892.
- [6] J. C. Malas, V. Seetharaman, 1992, Using Material Behavior Models to Develop Process Control Strategies, JOM, June, pp. 8~13.
- [7] Harold J. Hucek, 1985, Aerospace Structural Metals Handbook, Publication No.4, Columbus, Ohio 43201.