

대형 Ingot의 Upset 단조기술에 관한 연구

박승희* · 윤성만* · 신상엽*

(1998년 10월 23일 접수)

A Parametric Study for the Upset Forging of Large Ingot

S. H. Park, S. M. Yoon and S. Y. Synn

Abstract

The upset forging stage is the initial work in the forging process. It is used to remove the segregation and cavities of the ingot. Specially in handling large sized ingot, an improper upset forging can cause serious surface tearing. However, there is no detail reference for stable upset forging work. To resolve this difficulty, we studied several factors such as upset forging time, temperature variation of ingot, damage, load and strain rate etc., by using the rigid-plastic finite element approach available in the DEFORM code. Numerical simulation results indicates that: the load value of upset forging works shows severe decreasing trend at a certain point, same as strain rate. Also defects were found to be concentrated around the upper and lower portions of the ingot. With these results, we can estimate a guideline for stable upset forging work.

Key Words : Ingot, Upset Forging, Stress, Strain, Strain Rate, Finite Element Method

1. 서론

거의 모든 단조품을 제작하는 공정에 있어서 upset 단조는 가장 우선되는 공정으로 ingot 내부의 강괴 편석 및 기공의 제거를 위해서 일반적으로 실시되고 있다. 그러나, upset 단조공정에 사용되는 ingot의 온도는 일반적으로 1250℃이상의 고온이기 때문에 upset 단조공정중의 ingot에 대한 분석은 매우 어렵다.

일반 탄소강의 경우, 소형의 ingot은 upset 단조공정에 있어서 upset 시간이 짧고, ingot의 체적이 작기 때문에 공정상의 어려움이 거의 없다. 그러나, 대형의 ingot에 대한 upset 단조에 있어서는 공정 시간이 길기 때문에 upset 단조공정이 적합하지 못할 경우에는 ingot 표면 결

함이 발생될 우려가 있으며, 최종 단조품에 치명적인 결함을 유발시킬 수 있다.

따라서, 본 연구에서는 upset 단조공정에 대한 간략한 소개와 강소성 유한요소해석 전용 DEFORM Software를 활용하여 2가지 TYPE의 upset 단조용 금형에 적용하여 약 20~65ton정도의 대형 ingot의 upset 단조공정에 대한 이론해석을 수행하였다. 이론해석의 결과들을 통해서, upset 단조시간에 따른 ingot의 응력 분포, 변형률속도 분포와 upset 단조작업에 따른 하중변화 및 upset 단조 대기시간에 따른 ingot의 온도변화에 대한 경향을 이론적으로 분석함으로써, 보다 안정성 있는 upset 단조공정에 대한 데이터를 마련한 내용에 대해서 소개하고자 한다.

* 현대중공업(주) 기술개발본부 마북리연구소

2. 일반적인 upset 단조공정

일반적으로 ingot 내부의 강괴 편석 및 기공의 제거하기 위한 upset 단조공정은 ingot 초기 높이에 비해서 상대적으로 낮은 높이로 단조가 수행되어야 하기 때문에 상당히 큰 변형을 요구하므로, upset 단조에는 큰 단조하중이 필요하다.

따라서, upset 단조작업에 있어서는 여러 가지 특성들인 ingot의 온도, 단조비, 응력 분포, 변형률 분포 및 upset 단조 하중과 같은 인자들에 대한 사전 검토가 매우 중요하다. 특히, upset 단조공정은 거의 모든 단조품을 제작하는데 있어서 가장 먼저 수행되는 공정으로 개략적인 단조공정은 아래의 Fig. 1과 같다. upset 단조공정은 크게 두가지의 방법으로 수행한다. 즉 grip 단조후 연속적인 upset 단조공정으로 이루어지는 것과 grip 단조공정후 재가열을 통하여 ingot의 온도를 충분히 유지하고 upset 단조하는 방법을 일반적으로 사용하고 있다. 실제 upset 단조작업에 대한 모습은 Fig. 2와 같다.

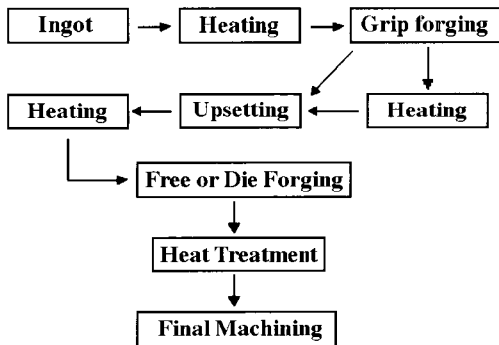


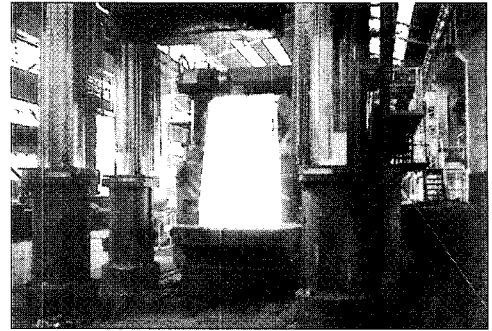
Fig. 1 Typical bulk forging procedure

3. upset 단조공정의 이론해석

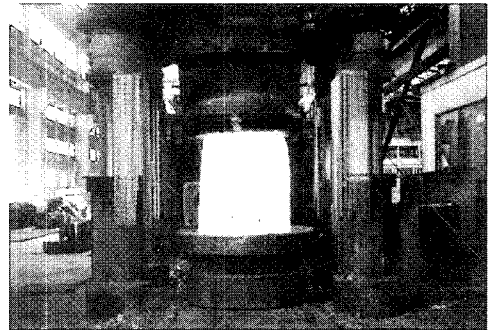
3.1 DEFORM S/W의 적용 이론식

단조공법에 대한 유한요소해석을 이용한 이론해석을 수행하기 위해서 소성가공 전용컴퓨터 시뮬레이션 프로그램인 DEFORM Software를 사용하였다.

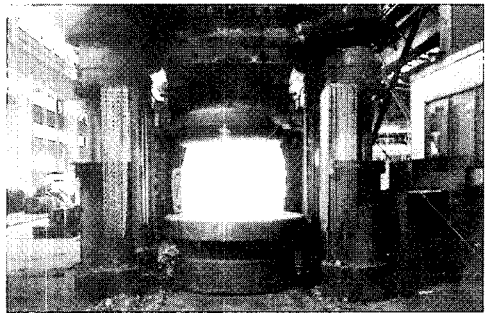
특히, 소성가공 전용 컴퓨터 시뮬레이션 프로그램인 DEFORM Software는 단조용 금형의 설계시 금형의 적합성을 파악할 수 있게 구성하였을 뿐만 아니라, 소재의 형상변화와 열손실에 의한 단조하중 및 응력분포 변화 등



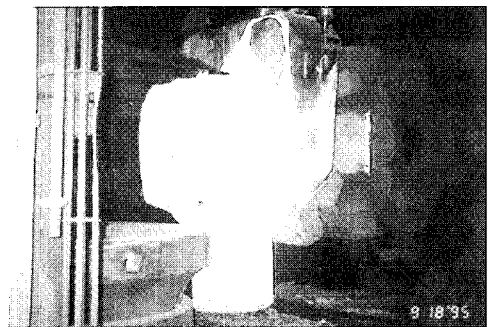
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 2 Actual upset forging works

에 대한 파악을 용이하게 수행될 수 있게 되어 있다.

소성가공 전용 컴퓨터 시뮬레이션 프로그램인 DEFORM software는 다음과 같은 강점소성식을 사용하고 있다.

$$\text{평형 방정식 : } \sigma_{ij,j} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{적합 방정식 : } \dot{\epsilon}_{ij} &= \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}) \\ \dot{\epsilon}_v &= u_{i,j} = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

$$\text{구성 방정식 : } \sigma'_{ij} = \frac{2\bar{\sigma}}{3\bar{\epsilon}} \dot{\epsilon}_{ij} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \text{경계조건 : } \sigma_{ij}n_i &= F_j \quad \text{on } S_F \\ u_i &= U_i \quad \text{on } S_U \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 σ_{ij} 와 $\dot{\epsilon}_{ij}$ 는 각각 변형재료의 응력과 변형률 속도를 나타내고 $\bar{\sigma}$ 와 $\bar{\epsilon}$ 는 각각 재료의 유효응력과 유효변형률 속도를 나타내고 있는데 각각 $\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{3}{2}(\sigma'_{ij}\sigma'_{ij})}$

와 $\bar{\epsilon} = \sqrt{\frac{2}{3}(\dot{\epsilon}_{ij}\dot{\epsilon}_{ij})}$ 로 정의되며, F_j 는 재료의 경계면에 걸리는 힘을, U_i 는 경계에서의 변형속도를 나타내고 있다.

(1)~(4)식에 변분법을 적용하여 다음과 같은 약형(weak form)을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \int_V \left(\frac{2\bar{\sigma}}{3\bar{\epsilon}} \right) \delta\dot{\epsilon}_{ij} dV + \int_V K \dot{\epsilon}_{kk} \delta\dot{\epsilon}_{ii} dV \\ - \int_{S_F} t_i \delta u_i dS = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

V 와 S 는 각각 체적과 표면적을 나타내고, K 는 페널티 상수를 나타낸다.

DEFORM software에서 사용하는 열전달 관계식은 다음과 같다.

$$(kT_{,j})_{,i} + r - \rho c \dot{T} = 0 \quad (6)$$

여기서 T 는 온도이며, r 는 열발생률, ρ 는 밀도, c 는 비열이다. 변형체의 열발생은 소성변형에 의해서이다. 열발생률 r 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$r = \overline{\alpha\sigma\dot{\epsilon}} \quad (7)$$

여기서, 열 발생효율 α 는 기계적 에너지가 열로 변형되는 비로서 0.9정도이다.

에너지 평형식 (6)식은 weighted residual 방법을 사

용하여 다음과 같이 나타낸다.

$$\begin{aligned} \int_V kT_{,j} \delta T_{,i} dV + \int_V \rho c \dot{T} \delta T dV \\ - \int_V \overline{\alpha\sigma\dot{\epsilon}} \delta T dV - \int_S q_n \delta T dS = 0 \end{aligned} \quad (8)$$

여기서 q_n 은 열유속으로 경계면에 수직이다.

FEM의 절차를 적용하여 (8)식은 다음과 같이 표현된다.

$$CT + \mathbf{K}T = Q \quad (9)$$

$$\left(\frac{C}{\Delta t} + \mathbf{K}\beta \right) T_{n+1} + \left(-\frac{C}{\Delta t} + \mathbf{K}(1-\beta) \right) T_n = \bar{Q} \quad (10)$$

단 $\bar{Q} = \beta Q_{n+1} + (1-\beta)Q_n$ 이며 β 는 0과 1사이의 양수이다.

DEFORM software에서 사용하는 접촉조건은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$[v] \cdot n = 0, [t] = 0 \quad (11)$$

여기서 v 와 t 는 속도와 트렉션 벡터이며 n 은 접촉면에 수직인 단위벡터이다. 접선방향의 트렉션은 마찰법칙을 만족하여야 한다.

(11)식을 변분법으로 나타내면

$$\int_S K_i \Delta v_n \delta \Delta v_n dS + \int_S t_s \delta \Delta v_s dS = 0 \quad (12)$$

여기서 Δv_n 은 수직방향으로 들어가는 속도이고, Δv_s 는 접선방향으로 미끄러지는 속도이며 t_s 는 마찰응력이다.

소성가공중의 Damage의 관계식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

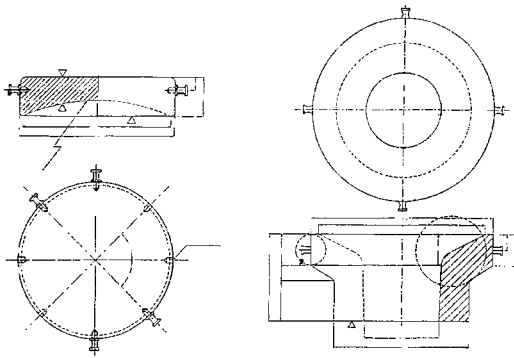
$$Df = \int (\sigma^* / \sigma) d\epsilon$$

여기서, σ^* 는 최대 인장 주응력, σ 는 유효응력, $d\epsilon$ 은 유효 변형률 증분이다

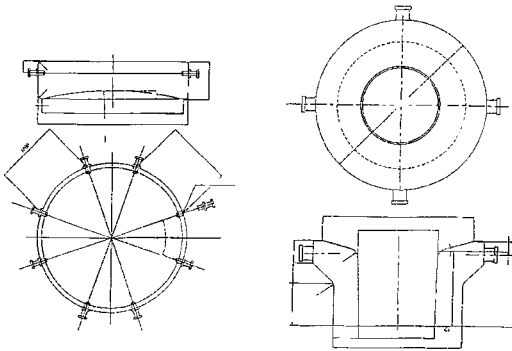
3.2 이론해석을 위한 ingot 형상 및 금형 모델

아래의 Fig. 3은 TYPE 1과 TYPE 2의 금형에 대한 upset 단조작업에서 사용되는 상·하의 upset 단조용 금형들의 모습을 나타낸 것이다.

이론해석에서는 ingot의 중량에 따라 약 20~65ton의 실제 사용중인 모델을 사용하였다. 아래의 Fig. 4에서는



(a) TYPE 1 die



(b) TYPE 2 die

Fig. 3 Shapes of upset forging die

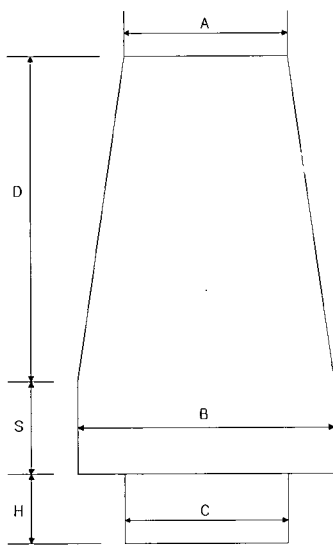


Fig. 4 Ingot shape

upset 단조작업에서 사용되는 대표적인 ingot의 형상을 나타내었다.

3.3. 해석 조건 및 방법

이론해석은 upset 단조공정이 축대칭의 형상으로 구성되어 축의 단면을 해석대상으로 하였다. ingot은 AISI 1045강으로 하였으며, 변형률 속도는 0.1~100, 변형률은 0.1, 온도 1100℃에서의 고온 유동응력 $\bar{\sigma} = 93.015 \dot{\epsilon}^{0.125} MPa$ 로 가정하였다. 소재와 금형 사이에는 일정마찰(constant shear friction)이 작용한다는 일반 조건을 적용하여 해석하였다.

또한, upset 단조공정은 ingot의 단조 대기시간 동안에 외부와의 열전달에 의한 온도변화가 발생하기 때문에 열전달 해석을 수행한 후에 upset 단조공정을 수행하였다.

upset 대기시간에 따라서 ingot의 내부와 외부에 온도변화가 발생됨으로 upset 단조공정에서는 실제 작업에서 가장 많이 수행되는 조건을 이용하였다. upset 단조공정은 ingot의 중량과 upset 단조공정 시간에 따라서 구분하였다.

또한, TYPE 1과 TYPE 2의 upset 단조용 금형의 모델이 다르기 때문에 각각을 구분하여 해석하였다. Table 1에 TYPE 1과 2의 upset 단조 금형을 이용한 upset 단조공정에 대한 이론해석 조건을 표시하였다.

Table 1 Time bounds of upset forging simulation

(a) TYPE 1 die		(b) TYPE 2 die	
ingot 중량 (ton)	upset 단조 시간(sec)	ingot 중량 (ton)	upset 단조 시간(sec)
20	20	40	20 60 160 600
30	60	50	
40	160	57	
50	600	59	
65		62	
		65	

TYPE 1과 TYPE 2에 대한 ingot의 upset 공정을 이론적으로 해석하기 위한 모델은 Fig. 5에 나타내었다. 그리고, upset 공정전에 ingot에 대한 grip 단조작업이 있기 때문에 가열후 곧 upset 공정을 수행하는 경우와 grip 단조후에 다시 가열로에서 가열한 경우로 나누어 수행되고 있다.

본 해석에서는 grip 단조후에 가열을 하지않고 연속적으로 upset 공정을 수행하는 경우에는 ingot의 내·외부



Fig. 5 Finite element model

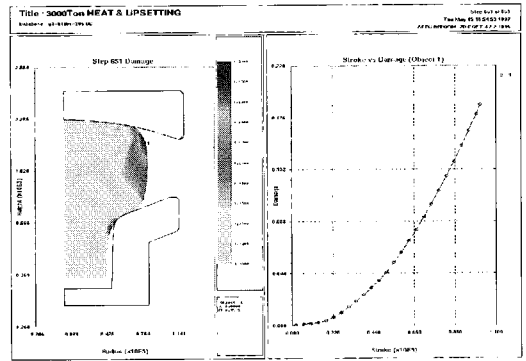


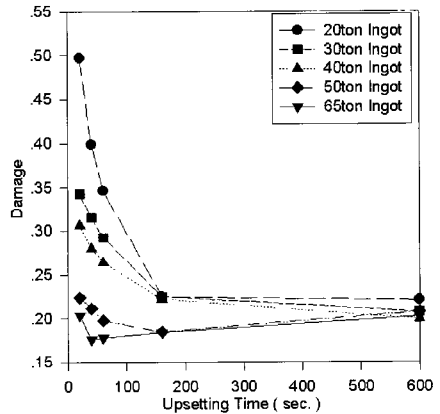
Fig. 7 An example of predicted damage pattern

에 온도차가 크게 발생되기 때문에 grip 단조후에 가열없이 upset 공정이 연속되는 경우에 대해서 이론해석을 수행하였다.

3.4 이론해석 결과 및 고찰

Fig. 6과 7의 이론해석 결과로부터 upset 단조공정에서 ingot의 damage, 유효응력, 유효변형률, 온도 분포현상 및 upset 단조 진행에 따라 ingot의 상부 위치에서 가장 집중적으로 발생하는 damage의 변화과정을 예측하였다.

Fig. 8에서와 같이 upset 단조시간이 약 3분을 중심으로 upset 단조시간이 짧으면 damage 변화가 급격히 커지며, upset 단조시간이 길어지면 Damage 변화가 거의 없음을 알 수 있었다. 각각의 TYPE별 10분동안 grip 단조상태에서의 이론해석 결과 ingot의 평균적인 표면온도는 1100℃로 나타났으며, upset 단조시간에 대한 ingot의 온도변화는 Fig. 9와 같음을 알 수 있었다.



(a) TYPE 1 die

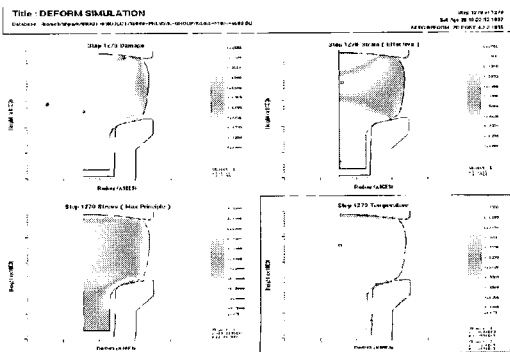
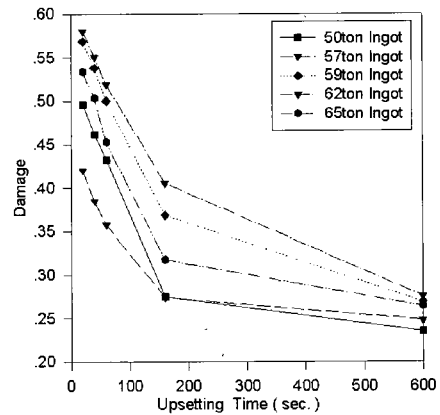
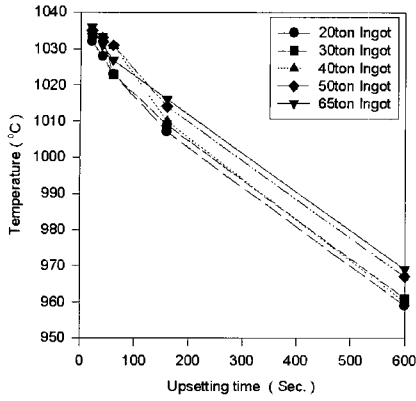


Fig. 6 An example of simulation results

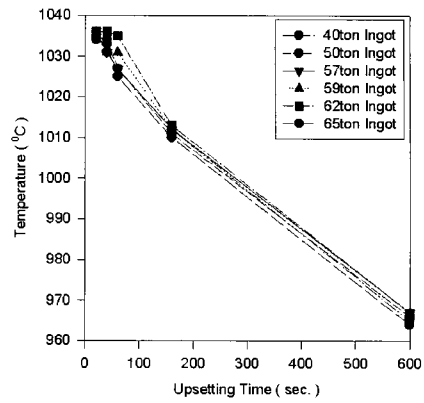


(b) TYPE 2 die

Fig. 8 Predicted temporal damage patterns at each die

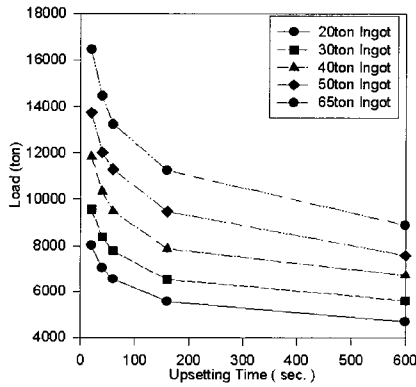


(a) TYPE 1 die

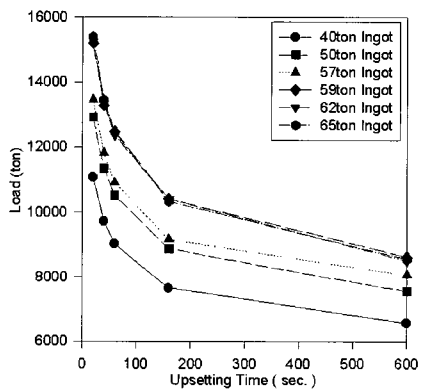


(a) TYPE 2 die

Fig. 9 Predicted temporal temperature patterns at each die

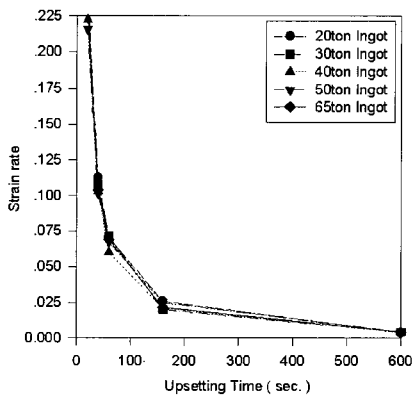


(a) TYPE 1 die

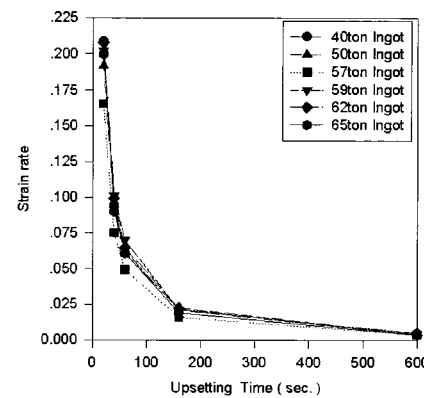


(a) TYPE 2 die

Fig. 10 Predicted temporal load patterns at each die



(a) TYPE 1 die



(a) TYPE 2 die

Fig. 11 Predicted temporal strain rate patterns at each die

Fig. 10은 각각의 TYPE에 대한 upset 단조공정에 필요한 단조하중을 파악하기 위해서 이론해석을 수행한 결과로 대형 ingot의 upset 단조에 필요한 단조하중을 예측할 수 있었다.

Fig. 11은 각각의 TYPE에 대한 upset 단조시 발생되는 ingot의 변형률 속도를 분석한 것으로 upset 단조시간에 상당히 밀접한 관계가 있음을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

본 연구를 통하여 TYPE 1 및 TYPE 2 금형을 이용하여 upset 단조공정에 대한 이론해석 연구를 수행함으로써, 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

(1) ingot의 upset 단조공정에서 단조시간을 짧게 할 경우에 큰 하중이 발생되며, 또한 ingot의 상부와 하부의 표면부위에 Damage가 집중되는 현상이 발생된다는 것을 예측할 수 있었다.

(2) 여러 종류의 중량에 대한 ingot의 이론해석 결과, upset 단조공정에서의 단조하중은 단조시간이 20초~180초 사이에서 급격히 감소함을 예측할 수 있었다.

이상의 결과로부터 1250℃이상의 고온에서 upset 단조 작업중 20~65ton 대형 ingot의 변화률 예측함으로써 보다 안정적인 upset 단조 공정을 제시할 수 있는 데이터를 마련하였다.

참고문헌

- (1) Shiro Kobayashi, Soo-Ik Oh, Taylan Altan, Metal Forming and the Finite-Element Method (New York; Oxford University Press, 1989), pp 92~93, pp.121~122.
- (2) Paul R. Burte, "Measurement and Analysis of Heat Transfer and Friction During Hot Forging", (The Ohio State University, 1989).
- (3) T. Altan, S. I. Oh and H. L. Gegel, "Metal Forming Fundamentals and Applications", 85~87.
- (4) J. R Douglas and T. Altan, "Flow Stress Determination for Metals at Forging Rates and Temperatures", Trans. ASME, J. Engr Industry (Feb 1975): 66.
- (5) ASM International. "Forming and Forging" Vol 14 of Metals Handbook. 9th ed. Metals Park, OH: ASM International, 1988.
- (6) A. Tomlinson, A. Met., A.I.M., and J. D. Stringer, "The Closing of Internal Cavities in Forgings by Upset". Journal of the Iron and Steel Institute 1958. pp. 209~217.
- (7) Jenkins, B. "Investigation of Defect Formation in a 3-Station Closed Die Forging Process". M.S. thesis, The Ohio State University, 1989.