

대형 강괴의 업셋팅공정시 기공압착에 관한 연구

박 치용, 조 종래, 양 동열, 김동진*, 박 일수*

한국과학기술원 생산공학과

* 한국중공업 기술연구소, 주단기술부

대형 강괴의 업셋팅 공정은 주조 조직의 방향성을 없애고, 코깅작업의 효율을 향상시키기 위한 충분한 단조비를 확보하기 위하여 필요한 공정이다. 공정에 영향을 주는 인자로서 상부 금형의 형상을 변화시켜 가면서 해석을 수행하였다. 극단적인 긴 파이프성 기공의 변형거동과 중심부에서 높이에 따른 원형기공의 단힘거동 및 압하율과 기공폐쇄 정도를 관찰하였다. 충분한 단조비를 얻고 기공의 단힘 및 압착을 이루기 위한 적절한 업셋팅 다이의 선택 및 업셋팅 공정을 예측하여 공정개선에 기여하고자 한다.

1. 서론

지난 20 여년 동안 원자력 및 화력발전소의 효율과 신뢰성을 높이기 위하여 로터(rotor)를 대형화하거나 일체형으로 만드는 추세이기 때문에 주조 공장에서는 대형 강괴(steel ingot)의 제도가 요구되고 있고, 단조 공장에서는 대형 강괴의 단조 기술이 필요하게 되었다. 대형강괴의 단조공정에서 자유단조의 역할은 그림 1과 같이 대형 강괴의 제조시에 발생하는 주조 조직을 없애고 주조시 발생하는 기공을 압착시켜 제거하며 편석을 소멸시키면서 최종 제품의 형상에 가깝게 만드는 것이다. 자유단조 중에서 이러한 목적을 달성하기 위한 중요한 작업이 업셋팅(upsetting) 과 코깅(cogging)작업이다. 코깅작업은 강괴의 단면모양을 원형과 사각형 및 팔각형등으로 만들면서 단면을 줄이고, 길이 방향으로 강괴를 늘리는 작업이며, 업셋팅은 강괴의 상부와 하부에 금형을 놓고 축 방향으로 하중을 가하면서 직경을 늘리는 작업이다. 업셋팅은 중심부의 기공을 압착시키고 주조 조직의 방향성을 없애며 물성치를 향상시키고, 코깅작업등 후속 공정에서 원하는 단조비를 얻기 위한 목적으로 하고 있다. 업셋

팅 공정에서 변형 분포와 기공의 압착에 영향을 주는 변수 중에서 상 하 다이의 형상, 강괴의 직경에 대한 높이 비, 압하 깊이, 압하 속도, 온도 분포등이 중요한 요소이다.

대형 강괴의 열간 작업은 주로 현장의 경험에 의존하고 있어, 자체 다이의 설계 및 수정, 공정 변경을 위해서는 이론적 배경 및 자료 축적이 요구되고 있다. 또한 단조 제품들은 크기, 형상 및 재질이 다양하며 단조 공정에는 여러 변수들이 복합적으로 작용하므로 경제적인 최적의 공정 설계가 요구된다. 따라서 공정의 정확한 분석과 이 공정 개선을 위한 체계적

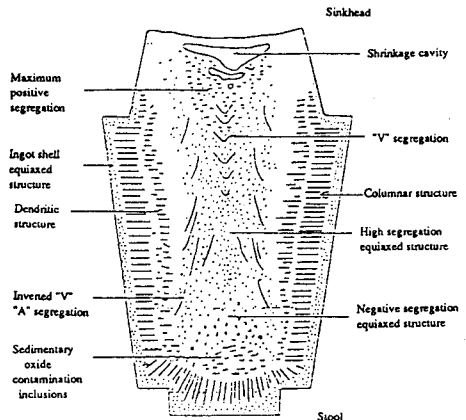


그림1 대형 강괴에서 거시적인 편석의 형태

인 연구가 필요하다. 이러한 연구를 위해서는 실험적인 방법(empirical method)이 가장 정확하지만 그 비용이 엄청나고 현장 작업에 방해 될 뿐이 아니라 인력 및 장비의 낭비가 많아 거의 하지 못하고 있는 실정이다. 또는 플라스틱인(plasticine), 왁스(wax), 납 등의 모델링 재료를 이용하여 실험(physical modeling)하고 있으나 이 방법은 유동현상은 쉽게 볼 수 있지만 정확한 응력 및 변형도를 측정 할 수 없고 크기효과(size effect)가 존재한다. 따라서 최근에는 컴퓨터를 이용한 해석으로 실험과 같은 효과를 거둘수 있으며 또한 단조시의 하중, 금속 유동, 응력 분포, 변형도 분포등을 예측할 수 있다. 컴퓨터 시뮬레이션 방법중에서 유한요소 해석법(finite element method)이 가장 많이 이용되고 있다.

본 연구의 목적은 업세팅의 변형해석 및 온도해석(열전달 해석)을 비연계 방식으로 동시에 해석하여 실제 공정에 가깝게 접근하는 축대칭 열점소성 유한요소 프로그램을 이용하여, 시뮬레이션에 의해 공정을 해석하여 불량 감소 및 원가 절감을 위한 최적의 단조 공정을 제안하고 단조 공정을 개선 하는 것이다. 연구의 첫단계로서 업세팅 해석에 있어서는 대형 강괴의 주 불량 요인인 기공의 소멸을 위한 공정방안을 연구하는데 있다.

Lee와 Kobayashi⁽¹⁾가 FEM해석의 예제로써 등은 업세팅(upsetting)과 사이드 프레스링(side pressing)의 재료유동을 해석한 바 있다. 이 해석에서 그들은 단조하중, 소성변형 영역, 응력 및 변형을 분포를 구할 수 있음을 보였다. 그 이후로 소성변형에 대한 유한요소해석의 발달과 함께 여러 연구가 행하여졌다. Price와 Alexander⁽²⁾는 단조하는 동안 재료유동을 묘사하기 위해 유한요소방법의 수치 모델을 사용하였으며, 실험과 비교해서 상당히 일치함을 보였다.

소성가공 동안 소재에서의 온도구배에 초점을 맞춘 연구가 행해졌는데, Lahoti와 Altan⁽³⁾은 유한차분법을 이용하여 업세팅하는 동안 실린더에서 온도구

배를 계산하였다. 그들은 다이와 공작물 사이의 경계면에서 마찰과 소성변형 때문에 일어나는 열을 포함시켰으며, 온도계산을 위한 반복적 프로그램과 속도장 결정을 위한 상계해법을 사용하였다. Rebelo와 Kobayashi^(4, 5)는 열전달과 변형해석의 연계해석을 도입하여 실린더와 링의 압축을 해석하였고 측정온도와 좋은 일치를 보였다. 또한 조종래와 박치용등^(6, 7)은 비연계된 방법으로 2차원 열간단조의 변형과 온도해석을 동시에 해석하였고, 소재를 돌려가면서 작업하는 열간 반경단조를 해석하였다.

Tanaka등⁽⁸⁾은 업세팅 할 때 기공의 닫힘과 강괴에서의 응력 및 변형을 상태의 관계를 결정하기 위해 실린더에서의 기공 닫힘(void closure)을 해석하여 압착 조건을 수식화 하였다. 또 Dudra와 IM^(9, 10)은 상업용 프로그램인 ALPID⁽¹¹⁾을 이용하여 기공압착 연구를 수행하였다. 이상과 같은 많은 연구들이 2차원적으로 이루어 졌다.

3차원으로의 확장은 Sun, Li와 Kobayashi⁽¹²⁾에 의해, 단순화 시킨 육면체 요소(brick element)를 사용해서 각재 단조를 해석하였다. Tanaka⁽⁸⁾는 평다이로써 실린더의 사이드 프레스링을 3차원적으로 해석하였으며 플라스틱인 모델링으로 얻어진 측정 데이터와 비교하였다. 최근에는 실용적인 3차원 연구가 활발하게 이루어 지고 있다^(13, 14, 15, 16). 이러한 여러가지 연구들은 열간 자유단조 공정을 연구하는데 있어서 유한요소해석에 의한 수치해석 시뮬레이션이 신뢰성이 있고 잘 적용되어질 수 있다는 것을 보이고 있다.

2. 열점소성 유한요소법의 수식화

2.1 변형 해석

단조 공정과 같은 복잡한 경계를 갖는 문제의 근사해를 구하는 효과적인 방법으로 유한요소법이 널리 쓰이고 있다. 단조 공정에 유한 요소법을 사용함

으로써 국부적인 균열이나, 기계적 성질을 예측하는 응력이나 변형율을 정확히 예측할 수 있으며 단조 공정의 개선 및 금형 설계를 위한 자료를 얻을 수 있다.

유한 요소법을 이용한 열간 단조 공정을 해석하는 방법에는 점소성해석(viscoplastic analysis)과 이 점소성 해석에 온도 해석을 목적으로 열역학적 이론을 도입한 열-점소성 해석(thermo-viscoplastic analysis) 방법이 있다^(4, 5).

소성(plasticity)의 영향은 하중의 경로에 따라 달라지는 반면에, 점성(viscosity)의 영향은 시간의 변화율에 따라 달라진다. 점소성 이론은 이러한 점성과 소성의 영향을 동시에 고려함으로써 하중의 내력/loading history)과 시간의 변화율을 고려하는 것이다. 본 논문에서는 열간상태의 재료유동을 해석하기 위해 하중의 내력과 시간의 변화율을 고려한 점소성 이론을 도입하였다. 방정식을 유도하는데 있어서 소재는 강-소성체(rigid-elastic)로 탄성 변형을 무시하며, 등방성이고 von Mises 항복 조건을 따르고, 변형중에 체적 변화는 없다고 가정한다. 또한 금형은 완전강체로서 변형하지 않는다고 가정 하고, 비압축성 조건을 만족하기 위해 벌칙상수(penalty constant) K^* 를 도입한 변분식은 다음과 같이 나타난다⁽⁶⁾.

$$\int_V (\bar{\sigma} + \alpha \Delta t \bar{\epsilon} H') \delta \bar{\epsilon} dV + K^* \int_V \bar{\epsilon}_v \delta \bar{\epsilon}_v dV - \int_{S_f} (f_i + \alpha \Delta t f_i) \delta v_i dS = 0 \quad \text{----- (1)}$$

식(1)에서 $\alpha = 0$ 로 놓으면 시간 t 에 대한 변분 방정식인데 α 및 가공 경화 계수 H' 를 도입한 이유는 Kim과 Yang⁽¹⁷⁾의 제안으로 수치 해석에 해의 수렴성이 좋기 때문이다.

변형도율이 영(zero)이거나 그 근처일때는 수치적으로 불안(numerically ill-conditioned)하므로 유효 변형도율이 $\bar{\epsilon}_0$ (보통 10^{-5} 정도) 보다 작으면 구성방정식을 다음과 같이 수정하여 사용한다⁽¹⁸⁾.

$$\sigma_{ij}' + \alpha \Delta t \sigma_{ij}' = \frac{2}{3} \frac{\bar{\sigma} + \alpha \Delta t \bar{\epsilon} H'}{\bar{\epsilon}_0} \bar{\epsilon}_{ij} \quad (\bar{\epsilon} \leq \bar{\epsilon}_0) \quad \text{----- (2)}$$

금형과 소재의 마찰을 고려할 때는 마찰면에서

상대 운동이 없는 중립점에서의 특이성(singularity)을 피할 목적으로 다음식을 사용한다⁽¹⁹⁾.

$$f = -\frac{2}{\pi} mk \tan^{-1} \frac{|V_s|}{u_0} t \quad \text{----- (3)}$$

여기서 m 은 마찰상수, k 는 전단 항복응력, V_s 는 금형 면에 대한 소재의 상대 속도이고, u_0 는 $|V_s|$ 보다 훨씬 작은 양(positive)의 상수이며, t 는 V_s 방향으로의 단위벡터이다.

식(2), 식(3)을 식(1)에 대입한 변분식을 m 개의 요소와 n 개의 절점으로 요소분할화하여 나타낸뒤, 한 요소내부의 속도장을 보간함수를 이용하여 나타내면 비선형 연립방정식이 되어지는데 이를 Newton-Raphson 반복방법을 이용하여 계산하였다.

2.2 온도 해석

강-열점소성 해석에 있어서 연속체 역학에 몇가지 열역학 이론을 도입하여 사용되어져 왔으나 실제로 일반적인 문제에 적용하고 해석하는데 어려운 점이 있다. 본 논문에서는 열역학 제 1 법칙과, 소성변형으로 발생하는 에너지의 5~15%가 전위 밀도를 증가시키고 나머지가 열로 발생된다는 실험결과⁽²⁰⁾를 이용한 열 평형방정식을 도입하였다.

$$K_i T_{,ii} - \rho c \dot{T} + k^* \bar{\sigma} \dot{\bar{\epsilon}} = 0 \quad \text{----- (4)}$$

여기서, 변형에너지가 열로 변화되는 비율을 나타내는 k^* 값은 0.85 와 0.95 사이에 존재하는데, 본 논문에서는 중간값으로 가정하여 0.9를 사용하였다.

강 - 열점소성에 대한 경계치 문제는 열 평형 방정식으로 부터 다음과 같은 경계 조건을 갖는다.

i) 자유 표면(free surface)에서

$$\text{대류 열 유량 : } q_n^c = h(T_e - T_s) \quad \text{----- (5)}$$

$$\text{복사 열 유량 : } q_n^r = \rho v(T_e^4 - T_s^4) \quad \text{----- (6)}$$

ii) 금형과 소재의 접촉면에서

$$\text{전도 열 유량 : } q_n^d = h_{lub}(T_d - T_w) \quad \text{----- (7)}$$

$$\text{마찰 열 유량 : } q_n^f = mkv_a/J \quad \text{----- (8)}$$

여기서 h_{lub} 는 윤활로 인한 열전달 계수, v_a 는 금형과 소재의 상대속도이고 J 는 열의 일당량이다. 응력 변형율의 관계식에서 유효 응력이 실험적인 자

료로부터 얻어진 변형율, 변형도율, 온도의 함수로 가정하고, 경계조건을 적용하여 변분식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\int_V K_1 T_{,i} \delta T_{,i} dV + \int_V \rho c T \delta T dV - \int_V k^* \epsilon \delta T dV - \int_{S_q} q_n \delta T dS = 0 \quad \text{----- (9)}$$

식(9)의 변분식을 n개의 절점과 m개의 요소로 하여 요소 분할화시킨뒤, 절점의 좌표, 온도, 및 온도의 변화량 등을 보간함수를 이용하여 나타내어 정리하면 다음과 같은 간단한 벡터형으로 나타낼 수 있다.

$$KT + CT - Q - Q_n = 0 \quad \text{----- (10)}$$

여기서, Q_n 은 경계조건을 나타내는 열유동 벡터이며

$$Q_n = \int_{S_i} q_n^i N dS + \int_{S_c} q_n^c N dS + \int_{S_d} q_n^d N dS + \int_{S_f} q_n^f N dS \quad \text{----- (11)}$$

로 나타내어 진다.

비정상 상태의 변형 과정은 어떤 주어진 시간 t에서 강 점소성 방정식으로 부터 얻어진 속도장과 변형도율, 매 변형 단계마다 시간의 미소 증분량인 Δt 동안 속도와 변형도율이 불변이라고 가정하고, 적분함으로써 얻어진다.

반면, 열 평형 방정식으로부터 온도 T를 계산하기 위해서는 시간 t=0의 초기 조건으로 부터 시작하여 원하는 시간에 이르기까지 미소단계를 진행시키면서 계산한다. 매 시간 단계내에서 어떤 증감시간 $t_\theta = t_n + \theta \Delta t$ 에서 T, \dot{T} 를 차분화하여 선형화 하면 다음과 같다.

$$\dot{T}_\theta = \frac{T_{n+1} - T_n}{\Delta t}$$

$$T_\theta = (1-\theta)T_n + \theta T_{n+1}$$

$$Q_\theta = (1-\theta)Q_n + \theta Q_{n+1} \quad \text{---(12)}$$

윗 식을 식(10)에 대입하면 다음과 같다.

$$\left[\theta K + \frac{1}{\Delta t} C \right] T_{n+1} = \left[-(1-\theta)K + \frac{1}{\Delta t} C \right] T_n + (1-\theta)Q_n + \theta Q_{n+1} \quad \text{----- (13)}$$

여기서, θ 는 증분항의 크기를 조절하는 중요한 인자이며 0 과 1 사이에 존재한다. 안정성(Stability)을 만족시키기 위해서는 0.5 이상 이어야 하는데, 본 연

구에서는 진동과 안정성을 고려하여 $\theta = 0.75$ 를 사용했다⁽²¹⁾.

3. 업셋팅 해석

3.1 업셋팅 공정

대형 강괴(steel ingot)를 자유 단조(open die forging)하여 건전한 단조제품을 만들기 위해서는 강괴의 중심부를 따라서 응고시에 발생하는 중심부 결함을 열간 가공으로 압착시켜야 한다. 중심선 압착(center line consolidation)을 위해서 가해지는 소성공정은 코깅과 업셋팅으로 나누어진다. 코깅은 대형의 자유 단조에서 초기 및 최종단계에서 일반적으로 행하여지고 있으며, 강괴 단면중심부에서 균질한 구조의 재질을 얻고 기공 닫힘(void closing)의 효과를 얻을 수 있다. 그러나 코깅으로는 충분한 단조비를 얻을 수 없거나 또는 소재의 지름이 큰 제품을 생산하고자 할 때, 우수한 재질의 제품을 요구할 때 업셋팅 공정이 필요하게 된다. 업셋팅작업을 행함으로써 재료성질의 방향성을 감소시키고 재료의 건전성(soundness)을 증가시키는 효과를 얻을 수가 있다. 업셋팅 작업을 효율적으로 행하기 위해서는 (1) 단조비 및 단조압하량 (2)프레스 허용하중과 가용 행정능력 (3) 작업의 간편화를 위한 단조공정의 단순성 (4) 균일한 가열 (5) 공작물 형상의 균일성 (6) 형상비(aspect ratio)등의 인자들을 고려하여 공정설계를 행해야 한다. 자유로운 공정설계를 하는데 제약조건인 주어진 프레스의 능력과 현장 작업성의 허용 범위내에서 업셋팅 단조작업의 효율성을 높이기 위해서는 재료의 변형 및 성질에 영향을 미치는 공정변수들의 최적화된 작업조건이 필요하여지게 된다.

본 연구에서는 공정변수의 영향들을 파악하고 공정변수의 변화에 의한 기공의 폐쇄 효과를 파악하기 위하여 축대칭에 대한 열간 점소성 유한요소 프로그램으로서 약 160톤인 강괴를 1차 코깅한 후에 업셋

팅하는 공정을 해석하였다. 해석을 위한 다이의 형상은 대형강괴의 코킹 작업시 핸들링(handling)을 위해 설계된 척(chuck)이 있는 하부 다이와 도움(도움)형의 상부 다이를 사용하였다. 또한 상부 다이를 30도의 각도를 가지는 접시형의 다이로 가공한 경우를 비교하였으며(그림 2), 각 경우에 있어서 중심부 기공 폐쇄 및 단조효과를 파악하기 위해서 결함이 없는 경우의 해석, 인위적인 파이프성 기공이 있는 경우의 해석, 그리고 중심부에 있으며 높이가 다른 위치에 존재하는 가상적인 기공을 둔 경우의 해석 등을 수행하였다. 계산시에 사용된 가공온도는 섭씨 1250 °C이며, 상부 다이의 하강 속도는 가공 초기와 마지막의 값을 평균한 50mm/sec로 하였다. 재료의 유동 함수 표현을 위한 재료의 물성치는 로타(rotor)의 화학적 성분과 유사한 AISI 4337의 관계식을 사용하였다.^[23] 유효변형율이 적을 때에는 가공경화의 효과를 무시할 수 없기 때문에 유효응력을 유효변형율, 유효변형율속도 및 온도의 함수로 하였고, 0.7보다 큰 경우에는 유효변형율속도 및 온도의 함수로 하였다.

$$\bar{\sigma} = f(\bar{\epsilon}, \dot{\bar{\epsilon}}, T) = c(T) (\bar{\epsilon})^{n(T)} (\dot{\bar{\epsilon}})^{m(T)} \quad (\bar{\epsilon} < 0.7)$$

$$\bar{\sigma} = f(\bar{\epsilon}, T) = c(T) (\bar{\epsilon})^{m(T)} \quad (\bar{\epsilon} \geq 0.7)$$

(14)

여기서, c, n, m 등은 곡선맞춤(curve fitting)에 의하여 온도의 3차 다항식(polynomial)으로 하였으며 다음과 같이 표현된다.

i) $\bar{\epsilon} < 0.7$ 인 경우

$$c(T) = 179.0964 - 0.2405T + 8.447 \times 10^{-5} T^2$$

$$n(T) = -8.1444 + 0.0247T - 2.448 \times 10^{-5} T^2 + 8.058 \times 10^{-9} T^3$$

$$m(T) = -4.4362 + 0.0128T - 1.222 \times 10^{-5} T^2 + 3.917 \times 10^{-9} T^3$$

ii) $\bar{\epsilon} \geq 0.7$ 인 경우

$$c(T) = 35.3005 + 0.136T - 2.5 \times 10^{-4} T^2 + 10^{-7} T^3$$

$$m(T) = 0.617 - 0.0021T + 2.4 \times 10^{-6} T^2 - 8.333 \times 10^{-10} T^3$$

계산 도중에 강괴의 중심부에서 유효응력과 유효변형율의 관계를 매 단계마다 추적하여 그래프로 나

타내면 그림 3과 같이 나타난다. 이는 측정점에서 온도 및 유효변형율속도의 변화에 따른 효과를 내포하고 있다. 소재와 다이사이의 마찰은 소재표면의 스케일(scale)에 의한 마찰감소 효과를 고려하여 $m = 0.3$ 으로 하였다.

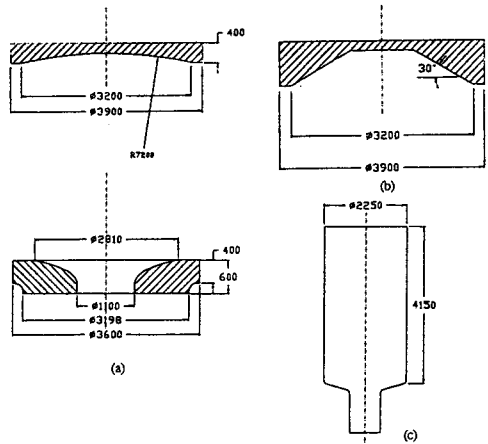


그림2 도움형 다이(a) 및 접시형 다이(b)와 초기소재 형상(c)

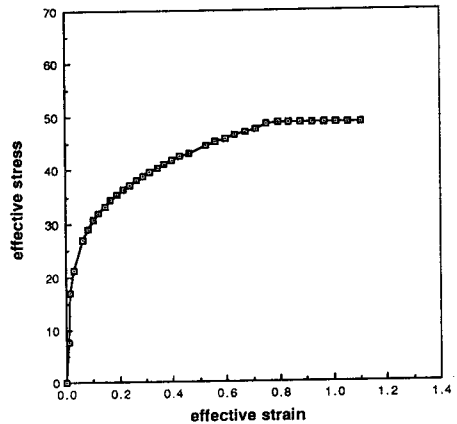


그림3 내부 한점에서 유효응력과 유효변형율의 관계

3.2 상부다이의 형상에 따른 업셋팅 효과

기존의 업셋팅에 다이 형상이 미치는 영향을 조사한 여러 연구들은 상 하부 모두 평다이(flat die)이거

나 또는 V다이인 경우를 해석하거나 실험하였다. V다이를 사용한 경우가 강과 중심부에서 더 큰 변형과 정수압 응력을 받고 있어서 기공폐쇄에 효과적이라고 알려져 있다⁸⁾. 그러나 본 연구에서는 현재 현장에서 작업을 행하고 있는 상부는 도움형의 다이 하부에는 코깅작업시 재료의 핸드링(handling)을 위해 설계되어진 척(chuck)을 가진 다이의 경우(그림 2)를 해석하여, 실제작업에서 일어나는 재료내부의 물리적 현상들을 파악해 보고자 한다. 또한 상부 다이를 접시형으로 하였을 때와 비교 검토하였다. 먼저 내부에 결합이 없는 경우를 해석하여 상부다이의 형상에 따른 업셋팅 효과를 조사하였다. 그림 4는 유효변형율을 비교한 것으로 1200mm(30%), 2000mm(50%) 일때를 보인 것이다. 접시형 다이를 사용한 경우에 있어서 상부다이 아래에 강체영역이 깊게 나타남을 관찰할 수 있으며 비교적 비슷한 값의 분포양상을 보이고 있다. 그림 5는 정수압 응력의 분포를 나타낸 것인데 접시형 다이가 기공 등의 불량요인이 내재되어 있는 중심부에서 더 큰 값을 나타내고 있다.

그림 6은 온도분포를 나타내었는데 다이와 접촉면에서 다이로의 열손실 때문에 일어나는 온도 하강 현상을 볼 수 있다. 접촉된 다이표면의 온도가 700~800 °C까지 상승하였다.

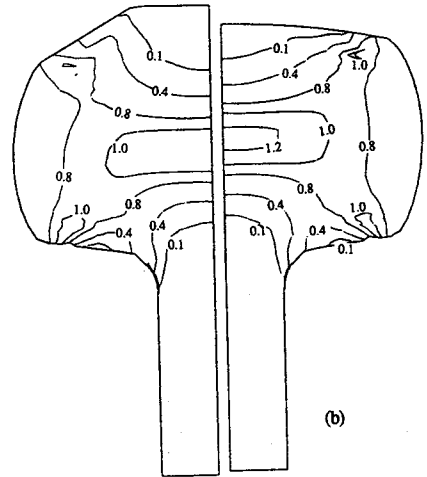


그림4 압하율 30%(a), 50%(b)에서 유효변형률 분포

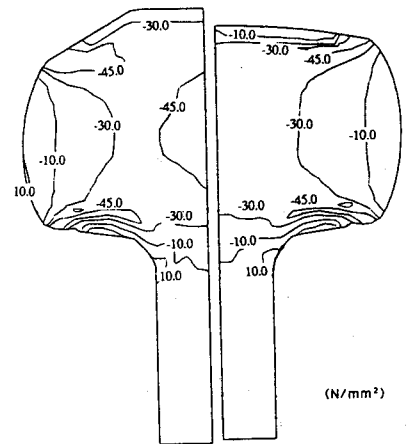


그림5 압하율 50%에서 정수압응력 분포

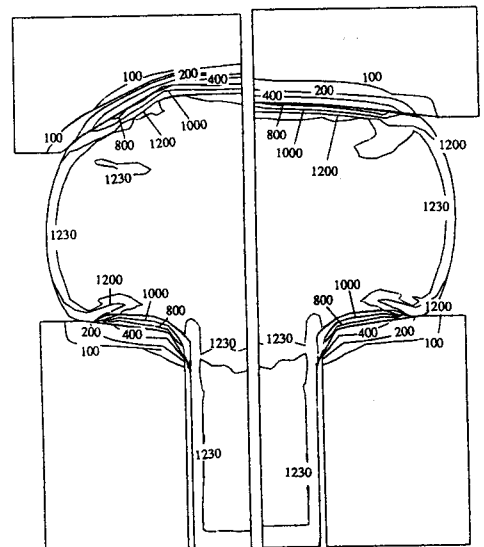
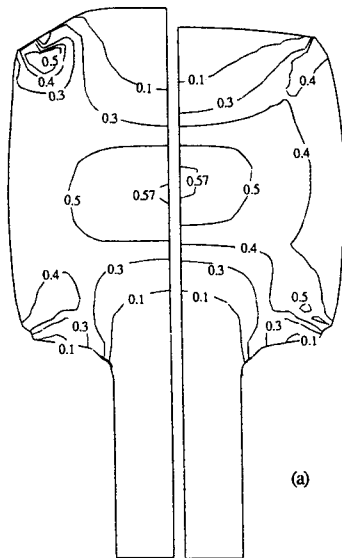
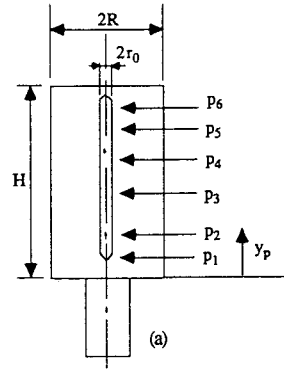


그림6 압하율 50%에서 온도분포

이상의 여러가지 재료 내부의 성질들을 비교하여 보면 뚜렷한 큰 차이를 보이고 있지는 않으나, 응력의 측면에서는 접시형 다이가 조금 우수하며 변형의 측면에서는 도움형의 다이가 우수함을 알 수 있었다. 또한 업셋팅 후에 이루어지는 코깅작업에서는 상부 다이 직하의 강체영역에서 소재의 최종직경이 작기 때문에 코깅 효과를 기대하기 힘들어서 그 영역에 존재하는 결함을 없애기가 어려울 것으로 생각되고, 코깅의 작업성을 고려해볼 때 도움형을 사용하는 것이 바람직하리라 생각된다.



point	P1	P2	P3	P4	P5	P6
y axis position (y _p mm)	516	943	1890	2554	3075	3450
$\frac{y_p}{H}$	0.133	0.243	0.487	0.658	0.793	0.889
2R : 2300 mm		2r ₀ : 115 mm		$\frac{r_0}{R} = 0.05$		
H : 3880 mm						

(b)

그림7 파이프성 기공(a)과 관찰점(b)

3.3 업셋팅에 의한 파이프성 기공의 폐쇄

주조시에 발생하는 중심부 결함을 극대화시켜서 긴 파이프성 기공이 있다고 가정하고서 두 경우에 대해서 계산을 수행하였다. 이에 대한 기공의 형상 및 관찰점의 위치가 그림 7에 나타나 있다. 이는 중심부에 길이 방향으로 파이프성의 긴 결함을 가지고 있을 때 업셋팅으로 인해 어떠한 변화 양상을 보이는가를 알아보기 위해서이다. 기공의 지름은 강괴지름의 5%로 하였으며 기공의 위치를 그림 7에서 보는 바와 같이 여러지점에서 관찰하였다. 가상적인 긴 기공을 가진 경우의 해석에 의한 유효변형을 분포의 결과 및 파이프성 기공의 형상을 그림 8에 나타내었는데 기공이 없는 균일한 강괴를 해석한 결과와 동일한 분포를 얻을 수 있었다. 따라서 기공이 있는 경우에 대한 해석도 균일한 재료에 대한 해석으로 설명할 수 있음을 알 수 있다. 또한 두 형태의 다이를 사용한 경우에 있어서 기공 내경의 변화를 초기 내경과의 비율(r_0/r_0)로하여 나타낸 것이 그림 9(a),(b)에 나타내었다.

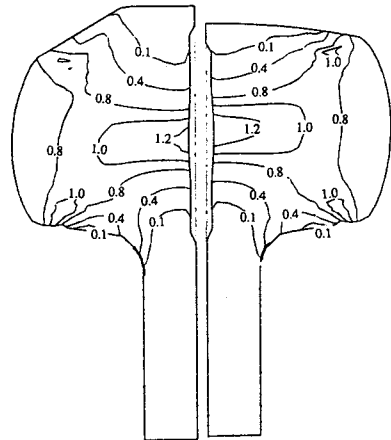


그림8 파이프성 기공이 있는 업셋팅에서 유효변형을 분포

모든 관찰점에서 접시형의 다이를 사용한 경우가 r_0/r_0 의 값이 낮음을 알 수 있고, 특히 p₃점의 경우에는 도움형의 다이를 사용한 경우는 내경이 커졌다가 줄어들거나 접시형의 다이를 사용하면 처음부터 줄어듦을 알 수 있다. 두 경우 모두 중심부에 가까운 관

찰점에서는 반지름 방향의 변형때문에 커지다가 압하율 40%를 지나면서 줄어드는 현상을 보인다. 이의 결과로 부터 파이프성 기공의 압착은 접시형 다이가 우수하다고 볼 수 있으나 전체적으로 업셋팅 공정으로써 압착할 수 없음을 알 수 있으며, 기공의 내부반경은 변형이 큰 중심부위에서 압하율 40%까지는 약간 증가하는 현상마저 보이고 있다.

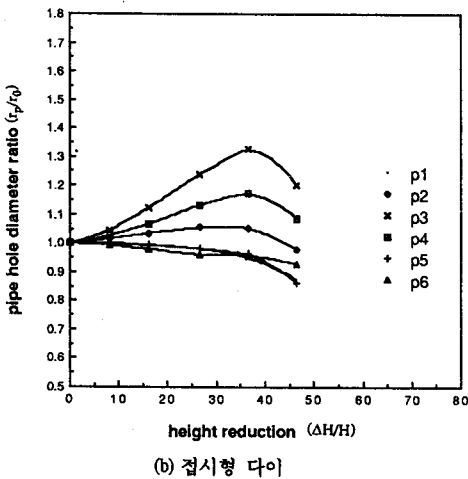
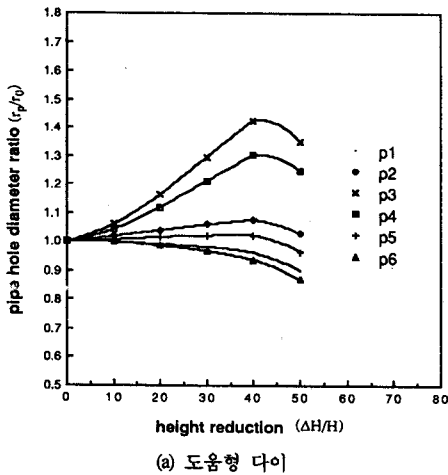


그림9 파이프성 기공지름의 변화

3.4 업셋팅에 의한 미세한 원형 기공의 압착

업셋팅에 의해서 긴 파이프성의 기공을 압착할 수는 없으나, 1차 코킹에 의해서 완전히 압착되어지지 못한 원형의 기공(void)이 중심부위에 있을 때, 또는 파이프성의 기공이 1차 코킹에 의해서 압착되어지다가 부분적으로 기공 형태로 잔존한다고 할 때에 업셋팅에 의한 기공의 압착효과를 보기 위해서 그림 10과 같이 중심부의 네 위치에서 인위적인 기공을 가정하고서 폐쇄과정을 관찰하였다. 또한 각 위치마다 기공의 직경을 달리하면서 해석의 결과가 기

공의 직경에 좌우되는 지를 조사하였다. 또한 결합이 없는 경우의 해석에 의한 응력 및 변형율을 가상적 기공위치 주위에서의 응력과 변형율로 가정하고서 기공의 폐쇄과정을 조사하였다.

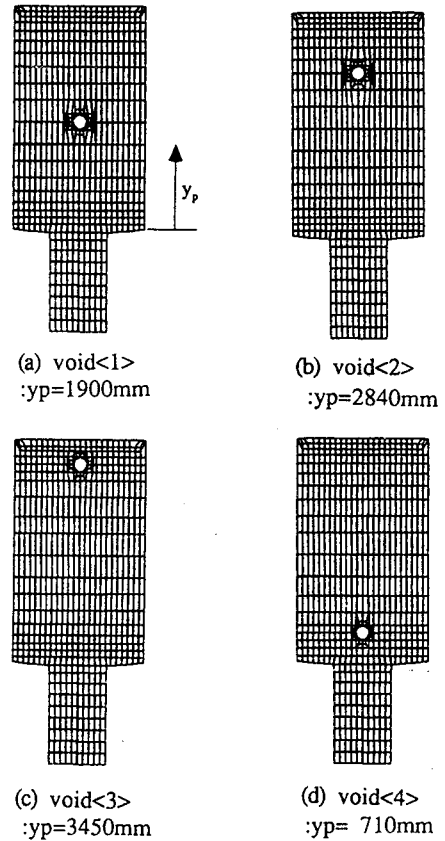


그림10 원형기공 폐쇄의 관찰점 위치

그림 11에서 확인할 수 있듯이 압하율에 따라서 기공의 폐쇄되어지는 효과가 원형기공의 크기에 거의 무관함을 알 수 있다. 따라서 기공폐쇄의 효과를 해석하는데 있어서 기공지름의 효과를 무시하고서 조사할 수 있다. 그림 12는 상부다이가 소재에 접촉되는 순간을 기준으로하여 압하된 양(압하량)을 기준으로 하면 도움형의 다이 사용이 더 큰 효과를 나타내고 있음을 보이고 있다. 또한 두 형태의 상부 다이를 사용한 경우 모두 압하율 약 35% 내에서 기공 폐쇄가 완료되어진다.

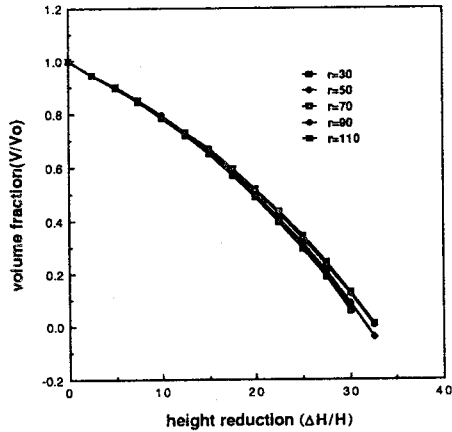


그림11 기공크기의 효과

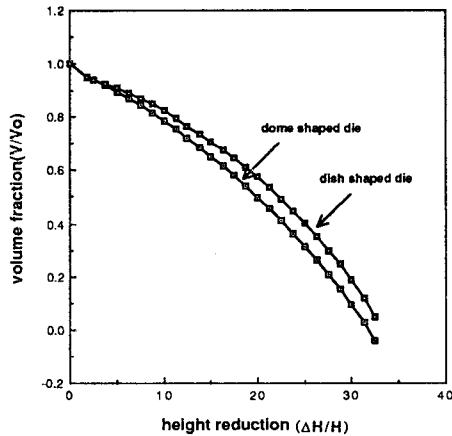


그림12 기공 폐쇄정도의 비교

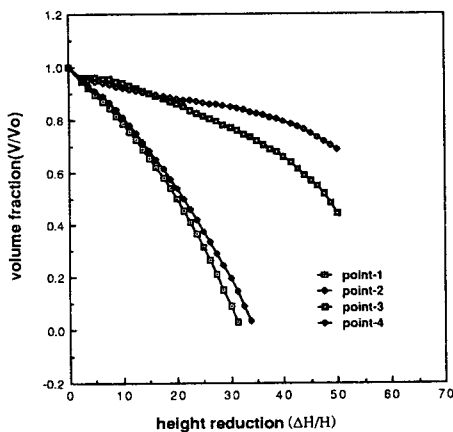


그림13 기공 위치에 따른 기공폐쇄율

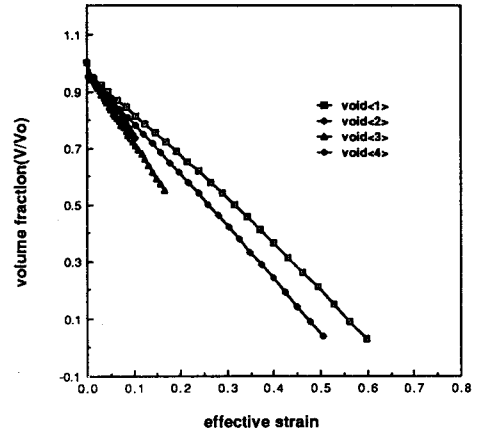
그림 13은 각 관찰점에서 기공의 폐쇄와 압하율과의 관계를 나타낸 것이다. 정리된 결과에서 나타난 바와 같이 압하율이 50%가 되어도 관찰점<3>, <4>에 있는 기공은 폐쇄가 이루어지지 않았음을 보이고 있다. 강제영역 및 그 주위의 변형이 적은 영역에 있는 점<3>, <4>는 현실적으로 기공폐쇄가 불가능하며 변형이 큰 영역에 있는 점<1>, <2>는 압하율 35% 이내에서 기공이 폐쇄되어짐을 알 수 있다.

이렇게 기공이 폐쇄되어지는데 영향을 미치는 인자가 어떠한 것인지를 조사하기 위해서, 결함이 없는 경우의 해석에서 얻어진 유효변형을 및 정수압응력을 기공주위의 유효변형을 및 정수압응력으로 하여 기공폐쇄율과의 관계를 조사하였다. 일반적으로 기공 주위에서의 유효변형을 및 정수압응력이 기공을 폐쇄시키는 중요한 인자로 알려져 오고 있다.

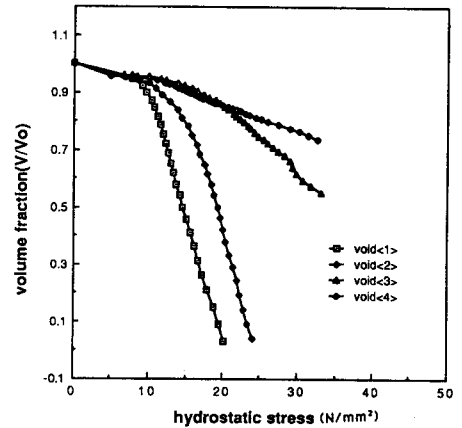
그림 14 (a)는 압하율에 따른 기공의 각 위치에서 정수압응력의 변화인데 위치에 따라서 큰 차이를 나타내고 있지는 않다. 그러나 그림 14 (b)에서 볼 수 있듯이, 또한 그림 4에서도 확인할 수 있듯이 유효변형율은 압하율에 따라 각 위치에서 현격한 차이를 나타내고 있다. 그림 15는 정수압응력과 유효변형율에 따르는 기공 폐쇄율을 나타낸 것이다. 기공 <3>, <4>에서 정수압력이 상당히 높게 걸려도 기공 폐쇄가 이루어지지 않음을 볼 수 있는데 이는 상당히 낮은 유효변형율을 가지고 있기 때문이다. 이를 미루어 정수압응력 보다는 유효변형율이 기공 폐쇄를 일으키는데 지배적임을 알 수 있고, 기공 폐쇄 정도를 추정하는데도 효율적임을 알 수 있다. 그림 15에서 기공<1>의 위치는 강괴의 높이 방향으로 중앙이기 때문에, 기공이 중심선 주위의 여러 곳에 있다고 가정하더라도 유효변형율이 0.6이상이면 기공이 폐쇄되어진다고 할 수가 있다. 그러나, 중심선에서 상당히 떨어지면 3차원적인 영향을 받고 기공 폐쇄의 주 인자가 변할 수 있기 때문에 이를 보장할 수는 없다. 그러나 기공 폐쇄의 주 인자가 일치

한다고 가정한다면 기공폐쇄의 영역을 규정할 수 있을 것이다. 이러한 영역을 압하율 30% 및 압하율 50%에서 나타낸 것이 그림 16에 나타나 있다. 압하율 30%에서는 중심부에서 기공의 폐쇄가 이루어지기 직전의 단계라고 할 수 있으며 50%에서는 상당히 넓은 영역에서 기공폐쇄를 이룰 수 있다. 이로써 알 수 있듯이 업셋팅 압하율을 최소한 35%이상으로 하여야 만이 중심부에 존재하는, 업셋팅으로 폐쇄시킬 수 있는 크기의 기공을 닫히게 할 수가 있을 것이다.

기공폐쇄의 조건을, 기공폐쇄를 위한 재료내부의 물리적인 양들을 함수화 또는 무차원화되어진 값으로 나타내면 효율적인 폐쇄영역을 설정할 수가 있다. 그러나 기공폐쇄를 위한 여러인자들의 복합적 작용과 기공의 위치에 따라서 민감하기 때문에 본 연구에서 완성시키지 못한 것을 향후의 연구과제로 삼아야 할 것이다.

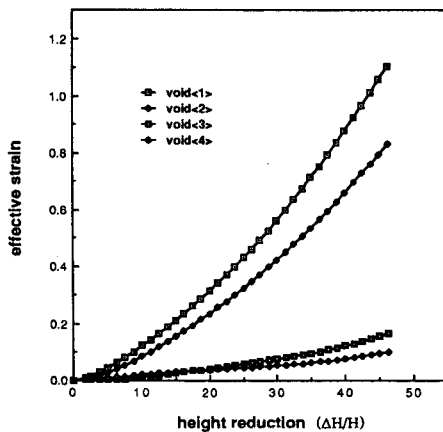


(a)

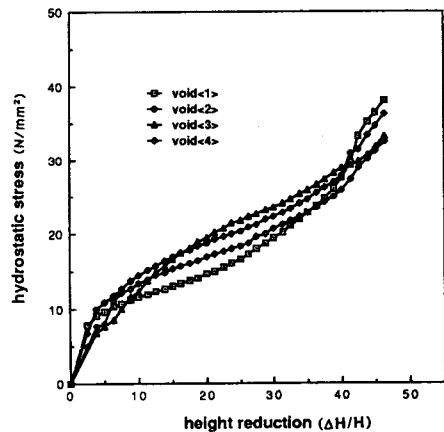


(b)

그림 15 기공의 위치에 따른 유효변형률(a) 및 정수압응력(b)과 기공폐쇄율의 관계



(a)



(b)

그림 14 기공의 위치에 따른 유효변형률(a) 및 정수압응력의 변화(b)

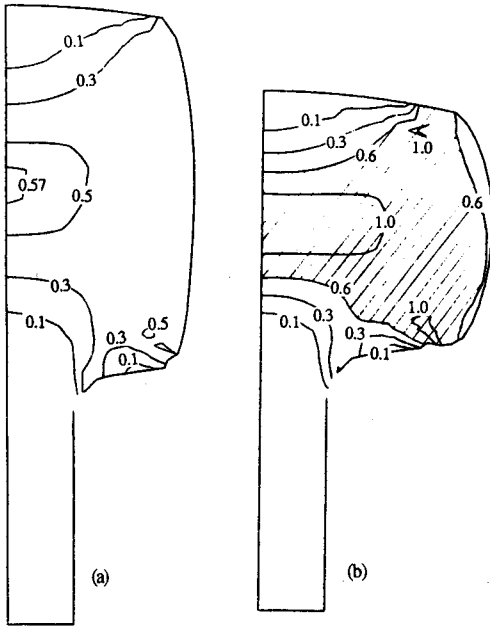


그림16 예상되는 기공폐쇄 영역

4. 결론

- (1) 하부다이에 척(chuck)을 가지고 상부다이가 접시형 및 도움형의 다이에 의한 강괴의 단조효과와 기공폐쇄의 조사에서 큰 차이가 없었다.
- (2) 업셋팅에 의한 파이프성 기공의 압착은 불가능하며 압하율 40%정도 까지는 중심부에서 기공의 반경이 증가 하였다.
- (3) 기공폐쇄 효과를 연구하는데 있어서 원형 기공의 직경에는 거의 무관하며 기공의 위치에 크게 관계한다.
- (4) 중심선상에 있는 원형 기공의 폐쇄는 정수압응력보다는 유효변형률율의 영향을 크게 받는다.
- (5) 유효변형률(effective strain)을 0.6이상에서 기공을 폐쇄시킬 수 있으며 중심부에서 이를 만족시키기 위해서는 35%~40% 이상의 압하율이 요구되어진다.

업셋팅 해석으로써 계속적으로 수행해야 할 과제로는 높이 방향으로 타원형을 가지는 기공의 해석을 덧붙이고, 기공폐쇄 조건 및 압착 조건을 함수나 매계변수에 의해 표현하여 일반적으로 적용시킬 수 있도록 하여야 한다. 또한 온도분포 및 압하속도등에 의한 영향등을 조사하여 모든 공정변수의 최적화된 작업조건을 찾아야 할 것이다.

본 연구과제는 한국중공업(주)의 연구지원비를 받아 수행되었습니다. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고 문헌

1. Lee, C.H. and Kobayashi, S., Analysis of Axisymmetric Upsetting and Plane-Strain Side Pressing of Solid Cylinders by Finite Element Method, J. of Eng. for Industry, ASME, pp. 445, May, 1971.
2. Price, J.W.H. and Alexander, J.M., Specimen Geometries Predicted by Computer Modeling of High Deformation Forging, Int. J. of Mech. Sci., vol. 21, PP. 417, 1979.
3. Lahoti, G.M. and Altan, T., Chapter 3: Prediction of Metal Flow and Temperatures in Axisymmetric Deformation Processes, Advances in Deformation Processing, ed. John J. Burke and Volker Weiss, Plenum Publishing Corp., 1987.
4. Rebelo, N. and Kobayashi, S., A Coupled Analysis of Viscoplastic Deformation and Heat Transfer - I, Int. J. of Mech. Sci., vol. 22, pp. 699, 1980.
5. Rebelo, N. and Kobayashi, S., A Coupled Analysis of Viscoplastic Deformation and Heat Transfer - II, Int. J. of Mech. Sci., vol. 22, pp. 707, 1980.
6. 조 종래, 박 치용, 천 명식, 윤 정호, 양 동열, 2차원 열간단 조에서의 변형과 온도의 연계해석과 비연계해석 비교, 대한기계학회 논문집, 제14권, 제4호, pp.839, 1990.
7. 박 치용, 조 종래, 양 동열, 열간 반경 단조의 2차원 유한요소해석, 대한기계학회 논문집, 제14권, 제5호, pp.1166, 1990.

8. Tanaka, M., Ono, S., Tsuneno, M. and Iwadate, T., An Analysis of Void Crushing during Flat Die Free Forging, Proc. of 2nd Int. Conf. on Advanced Tech. of Plasticity, Stuttgart, August, 1987.
9. Dudra, S.P. and IM, Y.T., Analysis of Void Closure in Open-Die Forging, Int. J. Mach. Tools Manufact., vol. 30, no.1, pp.65, 1990.
10. Dudra, S.P. and IM, Y.T., Investigation of Metal Flow in Open-Die Forging with Different Die and Billet Geometries, J. of Materials Processing Technology, vol. 21, pp. 143, 1990.
11. Battelle Memorial Institute, ALPID: A Finite Element Method Code for the Simulation of Metal Forming Operation, Battelle Research Laboratories, Columbus, Ohio, November, 1985.
12. Sun, J.X., Li, G.J. and Kobayashi, S, Analysis of Spread in Flat-Tool Forging by the Finite Element Method, Proc. of the 11th NAMRC, Madison, WI, pp. 224, May, 1983.
13. Yoon, J.H. and Yang, D.Y., Rigid-Plastic Finite Element Analysis of Three- Dimensional Forging by Considering Friction on Continuous Curved Dies with Initial Guess Generation, Int. J. Mech. Sci., vol. 30, pp. 887, 1988.
14. Yoon, J.H. and Yang, D.Y., Three- Dimensional Rigid-Plastic Finite Element Analysis of Bevel Gear Forging by Using Remeshing Technology, Int. J. Mech. Sci., vol. 32, pp. 277, 1990.
15. Yang, D.Y., Lee, N.K., Yoon, J.H., Chenot, J.L. and Soyris, N., A three-dimensional rigid-plastic finite element analysis of spur gear forging using the modular remeshing technique, Proc. Instn Mech Engrs, Vol. 205, pp. 111-121, 1991.
16. Kiefer, B.V. and Shah, K.N., Three-Dimensional Simulation of Open-Die Press Forging, ASME Trans. J. of Eng. Mat. and Tech., Vol.112, pp. 477-485, 1991.
17. Kim Y.J. and Yang D.Y., A Formulation for Rigid-Plastic Finite Element Method Considering Work-hardening Effect , Int. J. Mech. Sci., vol. 27, pp. 487-495, 1985
18. Osakada, K., Nakano, J. and Mori, K., Finite Element Method for Rigid- Plastic Analysis of Metal Forming Formulation for Finite Deformation, Int. J. Mech. Sci., vol.24, pp.459-468, 1982.
19. Chen C.C. and Kobayashi S., Rigid-Plastic Finite Element Analysis of Ring Compression, Application of Numerical Methods to Forming Processes, ASME, AMD- 28, pp.163-174, 1978.
20. Greenfield P. and Bever M.B., The Evolution of the Energy Stored by a Gold Silver Alloy Cold-Worked at -195 °C and at Room Temperature, ACTA Met., vol.4, pp.433-443, 1956.
21. Heubner, K.H. and Thornton, E.A., The Finite Element Method for Engineers, John Wiley and Sons, New York, 1982.
22. Erman, E., Medei, N.M., Roesch, A.R. And Shah, D.C. , Physical Modeling of Blocking Processes in Open-Die Press Forging, J. of Mech. Working Tech., vol. 19, pp. 165, 1989.
23. Altan, T., Oh, S.I. and Gegel, H.L., Chapter 4: Plastic Deformation, Metal Forming Fundamentals and Application, 1983.