

모델 재료를 이용한 대형 개방형 단조품의 성형에 관한 연구

이 근안*, 임 용택*, 이 종수**, 홍 성석**, 조 남춘**

*:한국과학기술원

**:국방과학연구소

본 연구에서는 모델재료를 이용한 모사실험을 통하여 고온의 강을 단조하였을 때의 유동과 변형 그리고 하중을 검토하고, 이어 성형에 관한 연구를 하였다. 모델재료인 플라스틱은 고온의 강을 모사하는데 많이 쓰이는데, 실험을 통하여 플라스틱과 강과의 변형저항식을 비교 검토하였다. 이 실험결과 상사성이 어느정도 일치함을 알았고, 이 상사성 결과를 이용하여 실제와 모델사이의 하중과 응력비를 검출하였다. 이로써 플라스틱을 이용한 단조 압축 실험을 통하여 실제의 하중을 예측하였다. 또한 예비 성형체를 설계하기 위하여 앞서 실험한 결과들을 이용하여 초기의 실린더의 체적과 치수를 결정하고 이에 단계에 따른 성형과정을 통하여 예비 성형체를 만들었는데, 이는 제한된 용량으로 성형하여야 하는 문제를 해결하기 위함이었다. 실험 결과 8단계에 따른 성형과정에 의해 우리가 원하는 대형 단조품을 성형할 수 있음을 알았다.

1. 서론

소성가공은 소재의 손실을 최소로 줄이면서 어떤 원하는 형상의 제품을 가공하는 방식이다. 소성가공의 일종인 단조 공정은 간단한 형상의 소재를 금형을 통하여 복잡한 형상의 부품으로 만들어 주는 생산 공정이다. 특히 열간 단조작업은 가장 오래된 소성가공 방법중의 하나로써 일반 기계 가공품들에 비해 기계적 성질의 향상, 재료 절감 및 생산성 향상을 꾀할 수 있어 현재에도 많이 응용되고 있으며 특히 단조 작업이 진행됨에 따라 소재는 금형형상에 따라 재료유동이 생기면서 섬유상 조직의 유동선이 생기게되어 인장강도나 연신율 등의 기계적 성질을 향상 시키게 된다. 그러나 단조 공정에서 보통 사용되는 경험 법칙에 의한 단조 공정 설계가 제품의 결함을 유발한다든지 프레스에 손상을 입히거나, 또는 부품의 최종 형상 및 치수가 원하는 값들과 맞지 않을 경우에 소모되는 재설계 및 이에따른 새로운 공구

들의 조합등은 막대한 손실을 초래하게 된다. 따라서 단조공정에 관한 실험은 비용때문에 실제의 규모로 수행하기 어렵고 결과로 공정에 대한 체계적인 이해가 없이는 현존하는 단조 공정 방안에 의존하는 보수적인 방법에 의존하는 수 밖에 없을 것이다. 따라서 단조 공정 중에 일어나는 재료들의 유동을 관찰하기 위해 실제의 강소재를 사용하는 대신 상온에서 열간 상태의 금속유동을 잘 나타내주는 모델링 재료를 이용한 실험이 많은 주목을 받아 왔다.

모델링 재료를 이용한 실험은 공작물과 기하학적으로 상사성을 가진 재료를 사용하여 단조 공정을 모사하는 방법으로 재료비가 싸고 아르킬등을 이용한 실험장치를 이용할 수 있기 때문에 비교적 정확한 자료들을 저렴하게 얻을 수 있는 장점이 있다. 지금까지 주로 사용된 모델링 재료들은 왁스, 탄소강, 진흙, 또는 납등으로 지난 반세기 동안 이들에 대한 많은 탐구가 진행 되어왔다. 이에 본 연구에서는 모델링 재료의 일종인 Van Aken International사 제품의 Modeling Clay

(Plastalina)를 이용하여 실험을 하였다. 모델링 재료의 특성을 알아보기 위하여 압축실험을 하였고, 금형과 공작물사이의 마찰력을 알아보기 위하여 링 압축실험을 하였다. 이로부터 강과 플라스틱인의 응력-변형률-변형률 속도 관계를 알아보고 이들의 상사성을 유출하였다. 그리고 아크릴을 이용하여 실제모양과 같은 금형을 만들어 재료의 유동 양상을 관찰하고, 단조시의 플래쉬부의 영향을 검토하였을 뿐만 아니라 이로부터 단조 작업에 영향을 주는 시편의 치수결정, 하중 예측, 적절한 작업조건을 찾아 내었다. 이와 같은 실험들을 통하여 요구하는 성형력과 유동형태를 알아 봄으로써 제한된 프레스를 이용하여 단조품 성형을 하고자 했을 때, 단조에 필요한 최대하중을 고려하여 원하는 단조품의 성형이 가능한지 알아보기 위하여 단조품 성형을 여러 단계로 함으로써 성형이 가능한 지 여부를 판단하고, 성형이 가능한 방법을 알아내고자 하였다. 또한 해석적인 방법으로 슬랩 방법을 써서 개략적인 하중을 구하여 실험에 의한 하중과 비교하여 보았다.

2. 압축 실험 및 링 실험

플라스틱인은 미국의 Van Aken International 사에서 만들었으며, 기름과 혼합된 점토의 일종으로, 그의 동적인 특징은 고온의 강을 모사하는데 가장 유용하기 때문에 많이 사용되어져 왔고, 또한 어떤 형태로든 만들기 쉽고, 내부 변형을 쉽게 볼수 있도록 색깔이 다양하며, 실험장비의 용량이 작아도 되며, 실험하는 동안에 증발에 의한 재료의 경화가 무시되어질수 있다는 것이 모사실험에 많이 사용하게 된 주된 요인이다. 플라스틱인은 탄산칼슘을 주성분으로 광물류, 탄산 마그네슘, 염료 등을 섞어서 만든 점토 계통의 물질로써 물에 불용성이며 온도에 큰 영향을 받고 있다. 일반적으로는 실제 재료와의 상사성을 이루기 위해 플라스틱인에 바셀린(Vaseline), 라노린(lanolin)과 레진(resin)등을 배합하는데 본 실험에서는 우선 플라스타리나 원재료만을 이용하여 응력-변형률-변형률 속도 관계를 알아보고, 특성을 검토하고자 시도하였다. 재료의 항복 특성을 알아 보

기 위해 압축 실험이 많이 이용되는데 이는 압축 실험이 다른 시험에 비해 높은 변형률까지 압축이 가능하기 때문인데 시험도중 다이와 시편사이에 마찰력을 최소로 줄여야 하므로 본 실험에서는 바셀린, 휴지, 베이비 파우더, 랩핑 페이퍼(wrapping paper)등을 이용하여 실험을 수행하였다. 시편은 직경과 높이가 22.5mm인 원통형으로 만들었으며, 만들어진 시편은 냉동실에 11시간 정도 보관했다가 꺼내어 2시간 후에 사용하였다. 실험에 의해 구한 하중-변위선도로부터 얻어진 진응력과 진변형률의 관계가 Fig.1에 주어져 있다. 이 그림에 의하면 휴지 또는 베이비 파우더를 윤활제로 사용했을 때 비슷한 결과를 얻을 수 있었으며 진변형률이 0.2 이상일 때 유동 응력(flow stress)이 약 0.016 kg/mm²였다. 이는 휴지와 베이비 파우더들의 경우 비슷한 마찰 조건을 나타내준다는 것을 의미한다. 테프론과 바셀린을 이용한 경우에는 유동응력이 진변형률이 0.25일 때 0.0145 kg/mm²임을 알 수 있다.

Fig.2에는 윤활제를 테프론과 바셀린으로 사용했을 때 압축 속도의 변화에 따른 유동응력의 변화를 나타내었다. 실험에 사용되었던 압축 속도는 50과 100 그리고 500 mm/min이었다. 이들 그림을 살펴보면 속도가 빠를수록 유동응력이 커지는 것을 알 수 있었으며 변형률이 0.4 이상인 경우 이들의 차는 0.0015에서 0.002 kg/mm² 정도인 것으로 나타났다. 또한 테프론과 바셀린을 이용한 실험치를 보면 초기에는 속도가 낮은 경우 유동 응력의 차이가 거의 없게 나타났으나 이는 아마도 실험시의 오차로 인한 결과로 기인된 것 같다.

Fig.3에는 램 속도에 따른 유동응력의 변화 정도를 강과 비교하여 나타낸 것이다. 이 그림을 보면 증가하는 기울기의 상대차가 강과 플라스틱인에 대해 약 10% 정도이므로 속도에 따른 응력의 변화율은 거의 비슷하다고 볼수 있다. 다음은 플라스틱인의 응력-변형률-변형률 속도 관계식을 알아보기 위하여 그것의 변형저항을 다음과 같이 나타내었다.[1]

$$\sigma = A \epsilon^n \dot{\epsilon}^m \quad (1)$$

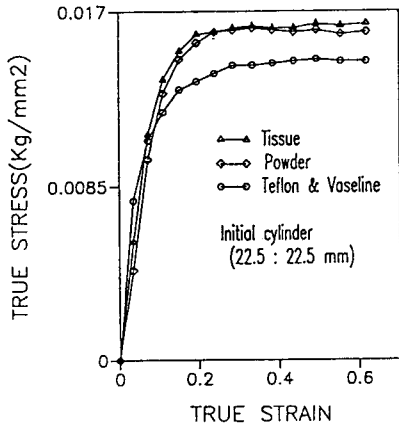


Fig.1 True stress-strain curves to various lubricants. (Ram velocity 100mm/min)

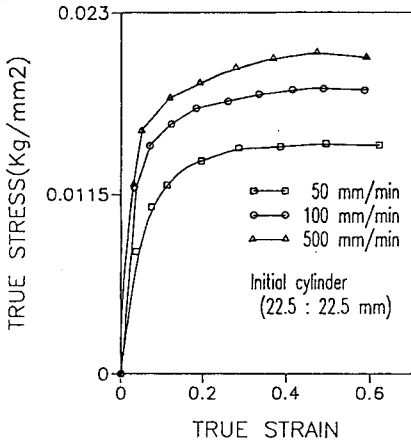


Fig.2 True stress-strain curves obtained from the compression test using ram velocity. (Lubricant : powder)

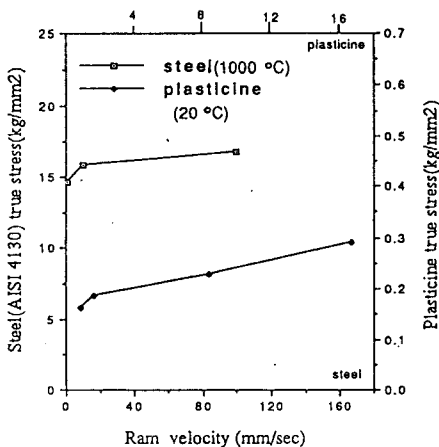


Fig.3 Relationship between true stress and ram velocity.

- σ : 유동 응력
- ϵ : 변형률
- $\dot{\epsilon}$: 변형률 속도
- n : 가공경화 지수
- m : 변형률 속도 지수
- A : 재료 상수

Fig.4는 응력과 변형률을 로그스케일로 나타낸 그림인데, 변형이 0.005~0.3까지는 유동응력의 변화가 변형률속도에 따라 증가하면서 거의 직선이고 평행함을 볼수 있지만 0.3이상 부터는 유동응력이 거의 변화가 없었다. 이그림으로 부터 $\epsilon=0.005\sim0.3$, 그리고 $\dot{\epsilon} = 0.001\sim 1$ 에서 가공경화 지수 n 값을 구하는데, 이 범위에서 변형률 속도는 매개변수이다. 이와같은 관계에 의해서 이 직선들의 평균 경사를 구하면 n 값이 구해진다.

$$\sigma \propto \epsilon^n \quad n=0.19\sim0.27 \quad (2)$$

Fig.5로부터는 응력과 변형률속도의 관계가 구해질 수있다.

$\epsilon = 0.02\sim0.5$, $\dot{\epsilon}=0.001\sim 1$ 영역에서 평균적인 기틀 기틀 구하여보면,

$$\sigma \propto \dot{\epsilon}^m \quad m=0.062\sim0.063 \quad (3)$$

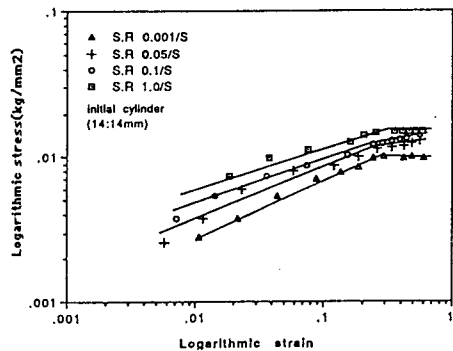


Fig.4 Relationship between logarithmic strain and stress of plasticine.

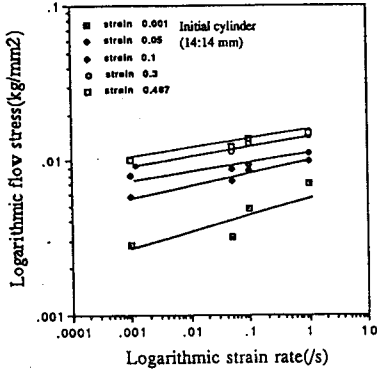


Fig.5 Relationship between logarithmic strain rate and stress of plasticine

Fig.6는 변형률 속도가 일정한 상태에서 실험한 결과를 나타내고 있으며 $\epsilon = 0.2 \sim 0.5$, $\dot{\epsilon} = 0.1$ 일때 $\sigma = 0.013 \sim 0.014$ kg/mm² 이다. 식(2), (3)과 위의 값을 식(1)에 대입하면 $A = 0.0195 \sim 0.022$ 이구해진다. 결국 식(1)은 다음과 같이 표시된다.

$$\sigma_p = 2.16 \times 10^{-2} \epsilon^{0.23} \dot{\epsilon}^{0.062} \quad (4)$$

Temp.: 19 °C ~ 21 °C
 $\epsilon : 0.02 \sim 0.5$ $\dot{\epsilon} = 0.001 \sim 1$

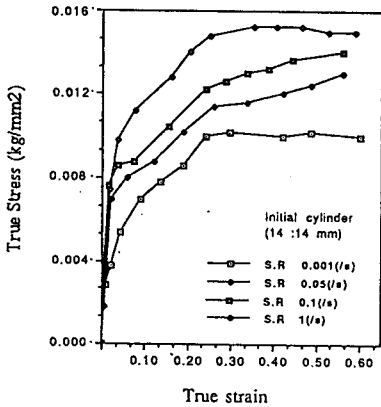


Fig.6 True stress-strain curves obtained from compression test of plasticine using various strain rate.

단조 공정에 있어 다이와 공작물 사이에는 마찰력이 존재한다. 일반적으로 이는 μp 또는 mk 로 표시되고 이때 μ 는 마찰계수, m 은 전단 마찰계수라 불리우며, p 는 수직력, k 는 전단 유동응력을 나타낸다. 본 연구에서는 마찰력을 알아 내기 위해서 링 실험을 수행하였다. 링 실험에 의하면 링의 내경이 마찰조건(즉 전

단마찰계수)에 따라 변화하므로 링의 내경의 변화를 측정하여 상계요소법이나 유한요소법에서 구한 보정(calibration)선도와 비교하여 전단 마찰계수를 구한다 [2]. 실험에 사용된 링의 규격은 외경:내경:두께=6:3:2 (45x22.5x15 mm)였으며, 윤활제로는 압축 실험에 사용되었던 테프론, 바셀린, 휴지, 베이비 파우더, 그리고 랩핑 페이퍼(wrapping paper)등을 이용하였다. 압축시 내경의 변화는 높이가 약 10%씩 감소될 때 마다 링의 중심 선상 부분 내부의 배부름 현상이 일어난 곳을 측정하였으며 보정선도에 측정값들을 그렸는데 Fig.7를보면 테프론과 바셀린을 이용했을 경우 전단 마찰계수는 약 0.08에서 0.15정도이며, 휴지를 이용한 경우에는 약 0.2에서 0.35, 랩핑 페이퍼를 이용한 경우에는 약 0.1에서 0.17 그리고 베이비 파우더를 이용할 경우에는 약 0.5에서 0.75정도였다. 압축실험과 링 실험을 한 결과 모델링 진흙을 이용한 압축 실험이 원만히 이루어졌으며 이를 실제 고강도강의 열간 공정을 모사하는데 응용할 수 있음을 알 수 있었다. 또한 링 실험이 재료를 가공할 때 작용하는 마찰력을 측정하는데 성공적으로 이용될 수 있음을 확인하였다.

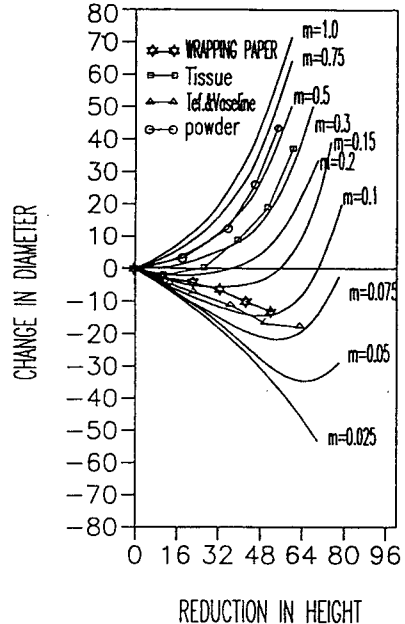


Fig.7 Calibration curves for ring compression test with OD:ID:H=6:3:2.

3. 상온의 플라스틱신과 고온의 합금강(AISI 4130) 사이의 상사성.

실제 단조가공과 모델링 시험의 상사성이 보장되 기 위해서는 다음의 사항들이 보장되어야 하는데 응력과 변형률, 소성영역에서 응력과 변형률 속도 사이의 관계들이 서로 상사성을 이루어져야 한다[3-7]. 또한 재료와 금형사이의 마찰계수의 조건이 거의 같아야 한다.

AISI4130 합금강의 $\sigma-\epsilon-\dot{\epsilon}$ 관계식을 알아보면 Fig.8 에서 $\epsilon=0.05-0.4$, $\dot{\epsilon}=1-10$, Fig.9에서 $\epsilon=0.05-0.2$, $\dot{\epsilon}=0.1-1$ 구간에서 평균기울기를 구하여 n, m값을 결정 한다.

$$n=0.195, m=0.068 \quad (5)$$

이때 합금강의 변형 저항 관계식은 플라스틱신에 서와 같이

$$\sigma_s = B\epsilon^n \dot{\epsilon}^m \quad \text{으로 표현되고} \quad (6)$$

(5)식을(6)식에 대입하면

$$\sigma_s = B\epsilon^{0.195} \dot{\epsilon}^{0.068} \quad (7)$$

상수B의 값은 $\epsilon=0.2-0.5$, $\dot{\epsilon}=0.1$ 일때

$\sigma_s=12.8-13.5 \text{ kg/mm}^2$ 이므로 상수 B의 값은 20.4~

21.6 이다. 그러므로 강 of 변형 저항식은

$$\sigma_s = 21\epsilon^{0.195} \dot{\epsilon}^{0.068} \quad \text{이다} \quad (8)$$

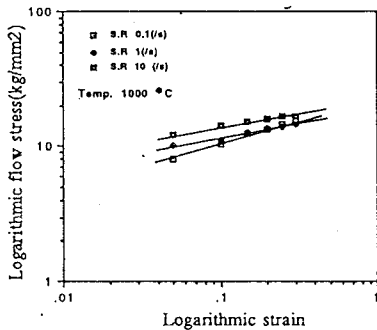


Fig. 8 Relationship between logarithmic strain and stress of steel(AISI4130)

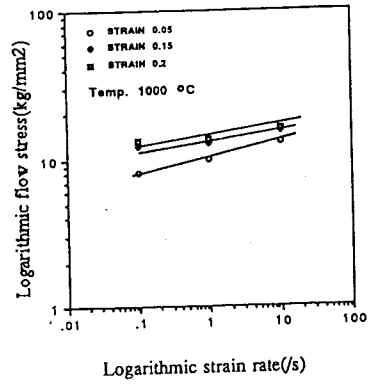


Fig.9 Relationship between logarithmic strain rate and stress of steel(AISI4130)

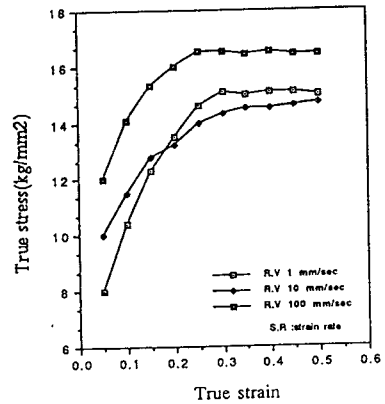


Fig.10 True stress-strain curves to ram velocity of steel (AISI4130)

Fig.10에는 강의 램 속도에 따라 유동응력의 변화가 증가하고 있음을 보여주고 있는데 속도가 1mm/sec 일 경우를 보면 변형률이 0.25 이상부터는 10mm/sec 보다 유동응력이 커지고 있는데 이는 실험시 속도가 낮을 경우에 시간이 많이 걸리고 이에 시편의 온도가 실험 도중에 감소하여 유동응력이 반대로 증가할 수도 있을 것이라 생각한다. 실제 현상을 플라스틱신 실험에 적용하기 위하여, 상온의 플라스틱신과 고온의 합금강 사이의 상사성에 관한 기초적인 분석을 하여야 한다. 따라서 두 개 사이의 척도값(scale factor)을 구하여 보기로 한다. 기초적인 물리적인 양으로 길이, 시간, 힘을 고려하고, 이들로부터 영향을 받은 물리적인 양으로 응력, 변형률, 변형률 속도를 고려하였다. 방정식 (4)는 플라스틱신에 대한 실험식으로

$$\sigma_p = 2.16 \times 10^{-2} \epsilon_s^{0.23} \dot{\epsilon}_s^{0.062} \quad (4)$$

여기서 상온의 플라스틱인의 변형저항이 고온의 강과 유사하다면 그들의 물리적인 양은 위의 Table 1 과 같은 관계가 있고, (4) 식에 Table 1에 주어진 관계를 대입하면,

$$\frac{l^*{}^2}{F^*} \sigma_s = 2.16 \times 10^{-2} \epsilon_s^{0.23} (\dot{\epsilon}_s^*)^{0.062}$$

$$\sigma_s = 2.16 \times 10^{-2} \frac{F^*}{l^*{}^2} t^{*0.062} \epsilon_s^{0.23} \dot{\epsilon}_s^{0.062} \quad (9)$$

위의 방정식 (9)는 방정식(8)과 같아야 한다. 결국

$$2.16 \times 10^{-2} \frac{F^*}{l^*{}^2} t^{*0.062} = 21 \quad (10)$$

$$\epsilon_s^{0.23} = \dot{\epsilon}_s^{0.195} \quad (11)$$

$$\dot{\epsilon}_s^{0.062} = \dot{\epsilon}^{0.068} \quad (12)$$

위의 (11), (12) 식을 보면 지수들의 차이가 플라스틱인과 강의 응력-변형률, 응력-변형률 속도의 곡선 형태에 차이를 주게된다. 그러나 가공경화 지수의 차이가 ϵ 이 작을 경우 즉 $\epsilon = 0.01$ 일 경우 약 15%, $\epsilon = 0.1$ 일때 5.7%, $\epsilon = 0.5$ 일때 2.4%, $\epsilon > 1$ 일때 0.1% ~ 2.3%의 차이가 나는데 실제 큰 변형이 일어나는 금속 가공의 모델 실험에서는 방정식 (11)과 (12)는 응력-변형률 관계식을 유도하는데 있어서의 오류와, 실험상의 오류로 생각할수 있음을 고려해 볼 때 같은 것으로 여길 수 있을 것이다.

방정식 (10) 으로부터 힘 척도값을 구해보면

$$F^* = \frac{21}{2.16 \times 10^{-2}} \frac{l^*{}^2}{t^{*0.062}} \quad (13)$$

$$\frac{F^*}{l^*{}^2} = \frac{21}{2.16 \times 10^{-2}} \frac{1}{t^{*0.062}} \quad (14)$$

이다.

그러므로 식 (13)과 (14)가 힘과 응력에 대해서 타당하다면 우리는 플라스틱인의 변형저항은 합금강의

변형저항과 유사하므로 플라스틱인에 대한 실험값으로부터 실제의 힘과 응력을 구할 수 있을 것이다.

Table 2는 실험에 사용된 수치와 실제의 크기와 조건들을 나타내고, Table 3에는 척도값들이 나타나 있다.

Table 1. 고온의 강(AISI4130)과 상온의 플라스틱인의 유사성

| | 물리적인양 | plasticine | 관계식 | 고온의 강 |
|------------|-------|--------------------|---|--------------------|
| 기초 물리량 | 길이 | l_p | $l_s = l^* l_p$ | l_s |
| | 시간 | t_p | $t_s = t^* t_p$ | t_s |
| | 힘 | F_p | $F_s = F^* F_p$ | F_s |
| 영향을 받은 물리량 | 응력 | σ_p | $\sigma_s = \frac{F^*}{l^*{}^2} \sigma_p$ | σ_s |
| | 변형률 | ϵ_p | $\epsilon_s = \epsilon_p$ | ϵ_s |
| | 변형률도 | $\dot{\epsilon}_p$ | $\dot{\epsilon}_s = \frac{1}{t^*} \dot{\epsilon}_p$ | $\dot{\epsilon}_s$ |

Table 2. 실험적인 조건들과 실제의 조건 비교

| | Model | Actual object | 결정할 척도값 |
|----------|--|----------------------|-----------|
| Length | 1 mm | 10mm | l^* |
| Velocity | $V_p = 0.83$ mm/s | $V_s = 1$ mm/s | l^*/t^* |
| Temp. | $20^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ | 1000°C | |

Table 3. 척도값의 결과

| 물리적 양 | 척도값 |
|-------|-----------------------------|
| 길이 | $l^* = 10$ |
| 시간 | $t^* = 8.333$ |
| 힘 | $F^* = 94426$ |
| 응력 | $\frac{F^*}{l^*{}^2} = 944$ |

4. 단조 압축 실험

Fig.11에는 윤활제로 wrapping paper를 사용하고, 램 속도가 50 mm/min이고 플래쉬 두께는 5mm, 폭은 12mm일 때의 하중-변위선도를 나타내고 있다. 위의 조건으로 실험한 결과 단조품이 만들어졌을 때의 하중은 약 1.34톤정도에 있음을 알수있다. 위 그림은 시편의 높이 감소율에 따른 재료 내부의 유동 상태를 보여주고 있고 그때의 하중들이 그래프에 표시되어 있다. 이 실험 결과로부터, 실제 열간 단조시의 하중을 예측 할수 있는데, 실제 하중은 앞의 유사성에서 구한 관계식에 의하면 약 100000 ton이상까지 이르고 있음을 알수 있었고, 이는 제한된 프레스 용량(만톤) 으로는 성형이 불가능하

며, 이에 중간 예비 성형단계를 통하여 단조품이 만들어지는 방법이 모색되어야 하는 것을 알수 있었다. 결국 만톤프레스를 이용하여 성형이 가능한 하중의 상태는 실험시 약 100kg정도의 하중 범위까지 제한되어야 함으로 실험을 하는 동안 중간 급형의 설계시 100kg이하의 하중으로 성형이 되도록 하여야 한다.

Fig.12는 플래쉬의 두께에 대한 폭의 변화에 따른 하중-변위선도를 나타내고 있는데, 그림을 보면 플래쉬 폭이 클수록, 두께가 작을수록 하중이 커짐을 알 수 있으며, Fig.13은 같은 체적을 가지고 있지만 D/H가 서로 다른 초기 실린더로 실험을 하였을 경우의 하중의 변화를 나타내고 있으며, D/H가 클수록 하중이 커지고 있음을 나타내고 있다. Fig.14는 서로 다른 체적을 가지고 있는 경우의 하중의 변화를 나타내고 있는데 이 실험에서는 플래쉬가 없는 경우의 단조하중 580kg과 플래쉬 생성시의 하중 1000~1400kg으로 매우 큰 차이를 보여주고 있다. Fig.15는 T/W(W=10mm 일정)에 대한 초과 체적, 하중, 에너지에 따른 변화를 나타내고 있는데 이 그림은 급형의 플래쉬부 설계를 하는데 중요한 정보를 제공해 주고 있다[8~11]. 즉 우리가 예비 성형체 설계를 하는데 하중을 제한 조건으로 두고 예비 성형체 설계를 한다면, 플래쉬 두께가 클수록 하중은 감소하지만 초과 체적이 증가하여야 함을 알수 있다.

위의 단조 압축 실험을 수행한 결과 초기 실린더의 체적과 치수를 예측할 수 있었는데 본 연구에서는 하중이 일정값보다는 작아야 하므로 앞의 실험 결과로부터 플래쉬 두께가 크고, 폭은 작으며, 같은 체적에서 D/H가 작을수록, 다른 체적에서 D/H(D=일정)가 클수록 하중이 감소하고 있음을 알았다. 그리고 위의 조건들을 예비 형상을 설계하는데 기초 정보로 사용하여 예비 성형에 관한 방법을 연구하였다.

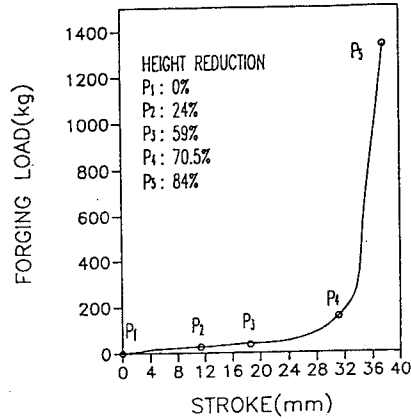
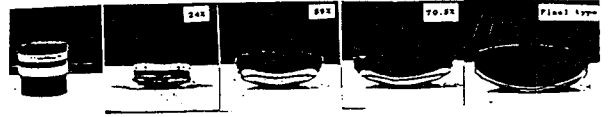


Fig.11 Forging load-stroke curves for open-die forging of the Dome. (Ram vel.:50mm/min, flash width:12mm, thickness:5mm)

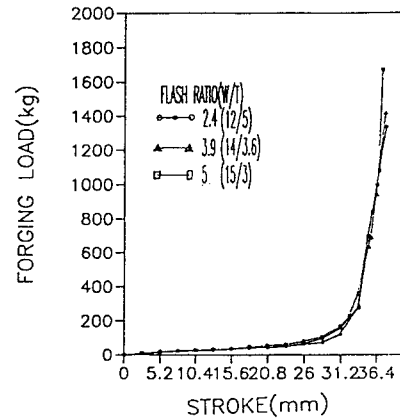


Fig.12 Forging load-stroke curves to W/T. (Ram velocity 50 mm/min D:H=43:40)

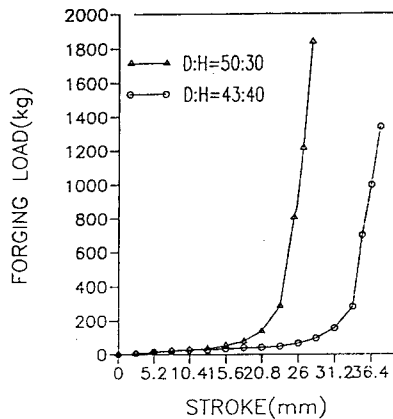


Fig.13 Forging load-stroke curves to D/H with the same volumes. (Ram vel.:50mm/min, flash width:10mm, thickness:3.2mm)

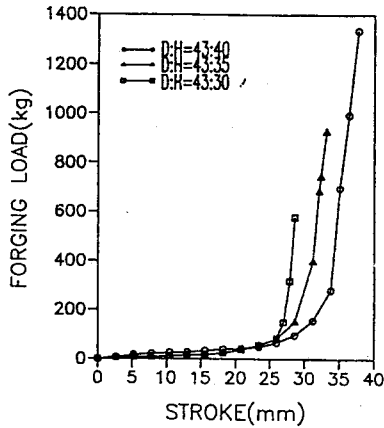


Fig.14 FORGING LOAD-STROKE CURVES WITH DIFFERENT VOLUMES.
(Ram velocity:50mm/min,flash width:12mm,thickness:5mm)

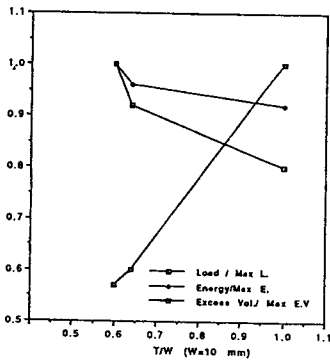


Fig.15 Relation among excess stock volume, forging load, and energy for various flash width/thickness ratios with constant flash width W of 10 mm

5.예비 가공형 설계

5-1 예비 가공형 설계에 관한 연구

형단조를 수행함에 있어서 예비 형상 설계는 금형내의 소재를 적절히 배분하는데 가장 중요한 부분 중의 하나이다. 이러한 적절한 예비형상이 가능했을 때에는 다음과 같은 잇점이 있다.

첫째, 결함이 없는 소재의 유동

둘째, 금형내에 소재의 완전한 채움이 가능하고

셋째, 플래쉬의 감소로 재료 손실을 최소화 할수있고

네째, 단조시의 소요 성형력을 감소시킬수 있는 잇점이 있다

예비 형상 설계를 하는데는 금속 유동을 완전히 이해하고, 많은 경험이 필요하게 된다. 예비형상 설계를 하는 경험적인 방법으로는 처음 예비형상의 기하학적 모형을 추측하여 반복 실험함으로써 적절한 상태에 도달할 때까지 시행착오에 의해 최종 예비형상을 결정하는 데, 이는 모델 실험을 통하여 거동을 모사하는 방법이다. 본 논문에서는 예비형상 설계를 하는데 다음의 요소들을 고려하여 단조품을 성형하고자 한다.

- (1) 초기 잉곳의 체적
- (2) 예비형상 단계와 예비형상의 형태
- (3) 예비형상을 위한 금형
- (4) 각 단계별 단조시의 하중

실제로 우리는 한정된 장비를 이용하여 요구하는 제품을 제작할 경우에 생기는 문제점을 해결하고자 이와같은 단계가 필연적으로 필요하다. 이에 한번의 단조로 성형이 불가능한 문제점을 예비 성형 설계를 함으로써 성형을 가능하게 만들어야 한다. 따라서 단계에 따른 금형설계와 성형력이 고려된 공정 설계를 연구할 필요가 있고, 이에 우리는 다음과 같이 공정 설계를 하였다[12~19]. 예비형상 설계를 위해서는 몇단계를 거쳐 하중 100kg으로 제한하여 성형하도록 하였으며 마지막 단계는 굽힘에 의해서 성형이 되도록 하였다.

5-2 실험적 방법과 이론 해석 방법

5-2-1 실험적 방법

(1) 1차 단조품 성형 실험

Table 4. 1차 단조성형 실험에 사용된 조건.

| | |
|--------|----------------|
| 초기 시편 | ∅ 43 : 42(mm) |
| 플래쉬 크기 | T:50mm,W:12mm |
| 운 활 | Wrapping paper |
| 램 속도 | 20 mm/min |

5 단계에 따른 성형과정

- 1단계 → 압축
- 2단계 → 늘이기
- 3단계 → 링 압축
- 4단계 → 늘이기
- 5단계 → 굽힘 과 압축

(2) 2 차 단조품 성형 실험

Table 5. 2차 단조성형 실험에 사용된 조건.

| | |
|--------|----------------|
| 초기 시편 | ∅ 40 :30 (mm) |
| 플래쉬 크기 | no |
| 운 활 | Wrapping paper |
| 램 속도 | 20 mm/min |

Table 6. 8단계에 따른 성형 과정

| | Case1 | Case2 | Case3 | Case4 |
|------|------------------|---------------------------|------------------|------------------|
| 1 단계 | Compression | Compression | Compression | Compression |
| 2 단계 | Spreading | Spreading | Spreading | Spreading |
| 3 단계 | Ring compression | Ring compression | Ring compression | Compression |
| 4 단계 | Compression | Compression | Compression | Spreading |
| 5 단계 | Spreading | Spreading OD:60, ID:30 | Spreading | Ring compression |
| 6 단계 | Ring compression | Ring compression | Compression | Spreading |
| 7 단계 | ∅50 Compression | Spreading | Spreading | ∅50 Compression |
| 8 단계 | Bending | Bending | Bending | Bending |

5-2-2. 이론적 방법

하중을 예측하는 이론적인 해석방법[20-22]으로 가장 쉽게 쓰이는 슬랩방법을 이용하여 각단계별 하중을 구하여 보았다.

슬랩방법을 적용시킬때 다음의 가정을 한다.

1. 재료는 등방성이고 비압축성이다.
2. 탄성변형을 무시한다.
3. 관성력은 무시한다.
4. 평면은 변형중에도 평면을 유지한다.
5. 유동응력은 특정한 변형영역내에서 일정하다.
6. 마찰전단응력 $\tau = fk$, $\tau = \frac{f}{\sqrt{3}}\bar{\sigma}$

7. 재료유동은 von Mises 유동법칙을 따른다.

$$\sigma_r - \sigma_z = \bar{\sigma}$$

각 단계에 따른 하중을 슬랩 방법으로 적용시킬때 아래의 세가지 형태로 나누어서 각 부분들의 하중을 구하고 이를 합하여 개략적인 하중을 구하여 보았다. 각각의 경우의 하중은 다음과 같다.

압축 과정시 성형압력과 하중

$$\frac{P_1}{\sigma_0} = 1 + \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{m}{h} (R_0 - r)$$

$$\text{Load} = \int_0^{R_0} 2\pi r dr$$

$$= \pi R_0^2 \sigma_0 \left[1 + \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{m}{h} \frac{R_0}{H} \right]$$

경사진 경우의 압축과정시 성형압력과 하중

$$P_2 = \frac{K_2}{K_1} \ln \left(\frac{h_e}{K_3 + K_1 r} \right) \sigma_0$$

$$\text{Load} = \frac{2\pi K_2}{K_1^3} \left[\frac{h_c^2}{2} \left(\ln h_c - \frac{1}{2} \right) - \frac{h_b^2}{2} \left(\ln h_b - \frac{1}{2} \right) - K_3 h_c (\ln h_c - 1) \right.$$

$$\left. + K_3 h_b (\ln h_b - 1) \right] + \pi \left(\sigma_0 + \frac{K_2}{K_1} \ln h_c \right) (r_e^2 - r_b^2)$$

$$K_2 = \sigma_0 \left(\frac{3}{\sqrt{3}} m - 1 \right)$$

$$K_3 = h_b - r_b$$

링 압축시 하중

$$\text{Load} = 2\pi \left[\frac{\tau (r_e^2 - r_b^2)}{h} + \left(\frac{2\tau r_e}{h} + \sigma_0 \right) \frac{(r_e^2 - r_b^2)}{2} \right]$$

5-4. 결과 및 고찰

5단계에 의한 성형 실험했을때 조건이 Table 4.에 나타나 있고, 실험 결과 1단계에서 4단계까지는 100kg의 하중으로 성형이 가능했지만 5단계에서는 하중이 100kg보다 훨씬 큰하중에 의해서 성형이 되었다. 이는 예비 성형체의 치수가 원하는 단조품 치수까지 4단계를 통해서 도달하지 못함으로 인해 5단계에서 공작물과 금형사이의 접촉부분이 넓어지면서 하중이 100 kg이상이므로 성형이 되었다. 결국 이 방법으로는 원하는 성형을

하지 못했고 이로부터 두번째 실험에서는 단조품치수에 거의 가깝게 예비 성형체를 설계해야만 함을 알 수 있었다. 이에 2차 단조품 성형실험을 8단계에 의해 예비 성형체와 최종 단조품의 성형을 Table 5.의 조건으로 실험하였다. 2차 예비 성형체 실험 결과를 보면 Table 6.에 나타난 바와같이 Case1과 2와 같은 성형 방법으로는 단조품 치수에까지 도달하지 못했으며 Case3과 4의 경우에는 예비성형체 성형이 가능하게 되었다.

그리고 이론해석에 의한 하중과 실험치의 하중을 비교한 그래프가 Fig.16에 나타나 있다. 이 그림을 보면 이론해석에 의한 예측하중이 약 1%~18%정도 차이가 났으나, 실험시의 시편들의 치수측정을 좀더 정확히 한다면 슬랩 방법에 의한 하중계산값이 실험시의 하중과 일치할 수 있을 것이라 생각된다. 이로써 이러한 슬랩 해석방법에 의해 다른 종류의 단조품 성형시 하중을 예측할 수 있고 이에 적절한 예비 성형체를 예상할 수 있을 것이다.

[6] 결론

대형 단조품을 성형하는데 모델링 재료를 이용하여 실험한 결과 다음의 결론을 얻을 수 있다.

첫째, 모델링 재료가 고온의 강(AISI4130)과 상사성을 비교한 결과 모사 실험을 하는데 큰 어려움이 없었으며, 둘째로 성형에 관한 연구를 모델재료의 실험을 통해 유동과 하중을 예측할 수 있었고 그로부터 예비 성형체를 제안할 수 있었으며 성형가능성을 찾아낼 수 있었다.

셋째, 실험 결과를 슬랩 방법에 의한 하중과 비교 검토하여 보았으나 오차가 발생하였다. 이에 우리는 좀더 정확한 실험을 통하여 이론해석과 비교했을 때 좀더 실험치에 접근할 수 있는 이론 해석방법을 연구함으로써 다른 형태의 단조품 성형시에도, 이론에 의한 예비성형을 예측할 수 있음을 알았다.

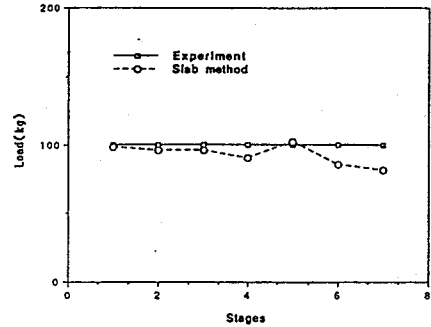


Fig.16 The comparison of experiment with slab method

* 참고 문헌

- [1] Kenji Chijiwa, Yotaro Hatamuro, Nobuki Hasegawa
"Characteristics of Plasticine Used in the Simulation of Slab in Rolling and Continuous Casting"
Transactions ISIJ, Vol21, 1981
- [2] Hedeihiko, T., Taura, Y. and Ibushi, J.
"Prediction of Transient Friction in Upsetting Forging of Rings with New Calibration Curves"
Advanced Technology of Plasticity. Vol.I, p77, 1990.
- [3] A. Azushima and H. Kuto
"Physical Modeling (Simulation) for Metal Forming with Strain rate Sensitive Model Material"
Advanced Tech. of Plasticity. Vol2, pp1221~1227, 1987.
- [4] Hedeihiko, T., Taura, Y. and Ibushi, J.
"Simulation of Hot Steel in Plastic Working with Plasticine and Lead", Advanced Technology of Plasticity. VolII p1003, 1984.
- [5] Hedeihiko, T., Taura, Y. and Ibushi, J.
"Analysis on Distribution of Deformation during Hot Forging", Advanced Technology of Plasticity. VolII, p997, 1984.
- [6] S.Y. AKU, R.A.C Slater and W. Jonson
"The Use Plasticine To Simulate The Dynamic Compression of Prismatic Block of Hot Metal"
In. J. Mech. Sci. Vol 19 . pp405~525, 1967
- [7] Hiroshi Yaguchi and Devendra Rusia
"Verification of Osakada's Method to calculate stress-strain curves from upset test Load-Stroke Curves under Various Work Hardening Conditions"
J. Master. Straping Technol. vol8 :159~165 , 1990
- [8] T.A. Dean
"Die Technology : The feasibility of flashless forging" Drop Forging Research Association Conference, Leicester, 20~21 May, 1977
- [9] HANS KEIFE and ULF STAHLBERG
"The Influence of Flash Design on Material Flow and Tool Pressure in Closed-Die Forging : Practical Example"
J. Mech. Work. techno. , Vol 9, pp 35~52, 1984
- [10] Y. Van Hoenacker and T.A. Dean
"The Application of Upper Bound Analysis to Real Situation a Comparison of Flash and Flashless Forging"
Int. J. Mech. Tool Des. Res. Vol. 18 pp81~93

- [11] Serge Tichkiewitch, Jean Francois Boujut.
"Fast Quotation of Three-Dimensional Stamped Part Using CAD System"
J. Material Processing Technology. 24(1990)127~135
- [12] Kopp, R., Schaeffer, L. and Schuler, G.
"Incremental Forging with Integrated Open-Die Pressed"
Metallurgical Plant Technology. p76. June 1982.
- [13] Sun, J.X.
"Analysis of Special Forging Processes for Heavy Ingots by Finite Element Method"
Int. J. Mech. Tools & Manufacture. Vol28. no.2 p173. 1988.
- [14] CH. Krummel and O.N. Thompson
"Space Shuttle Solid Rocket Motor Metal Case Component"
AIAA/SAE 14Th Joint Propulsion Conference, Las Vegas, Nev./July 25-27, 1978.
- [15] J.R. Kapp
"Design, Fabrication and Test of the Space Shuttle Solid Rocket Booster Motor Case"
AIAA/SAE 14Th Joint Propulsion Conference, Las Vegas, Nev./July 25-27, 1978.
- [16] Ravikiran Duggirala and Aly Badawy
"Finite Element Method Approach to Forging Process Design"
J. Master. s. japping Technol. (1988) 6:81~89.
- [17] S.H. Choi, and T.A. Dean
"Computer Aided Design and Machining of Roller Dies for Forging Hammers" Int. J. Mech. Tool Des. Res. Vol24. No2, pp121~131, 1984.
- [18] S.H. Choi, and T.A. Dean
"Computer Aided Design and Machining of Roller Dies", Int. J. Mech. Tool Des. Res. Vol24. No3. pp181~194, 1984.
- [19] N. Akgerman, JR. Becker and T. Altan
"Preform Design in Closed-Die Forging"
Battelle Memorial Institute.
- [20] F.H. OSMAN, A.N. BRAMLEY AND M.I. GHOBRIAL, "Forging and Preform Design Using UBET"
J. Material Processing Tech. Vol.24, p127~135, 1990
- [21] T. Altan, R.J. Fiorentino
"Prediction of Loads and Stresses in Closed-Die Forging",
Journal of Engineering for Industry May 1971.
- [22] Taylan Altan
Metal Forming : Interrelation Between Theory and Practice. "Computer Simulation to Predict Load, Stress, and Metal Flow in an Axisymmetric Closed-Die Forging"