

〈論 文〉

모델링재료를 이용한 축대칭형 돔형상의 폐쇄단조 성형 연구(I)

이근안* · 임용택* · 이종수** · 홍성석**
(1992년 5월 25일 접수)

An Experimental Study on Forming an Axi-Symmetric Dome Type Closed-Die Forging Product Using Modeling Material(I)

Geun-An Lee, Yong-Taek Im, Jong-Soo Lee and Sung-Suk Hong

Key Words : Similarity(상사성), Closed-Die Forging with Flash(플래쉬부를 가진 폐쇄단조),
Flash Width to Thickness Ratio(플래쉬부의 폭대 두께비)

Abstract

An experimental study on forging an axi-symmetric dome type of AISI4130 was carried out using modeling material. In order to verify the validity of the experimental data, a similarity study between plasticine and AISI4130 has been made. Friction conditions were characterized by ring test for the various lubricants. For the closed-die forging experiments of an axi-symmetric dome type of AISI4130 using the plasticine, various cylindrical billets with different aspect ratios were forged and different flash width to thickness(W/T) ratios were used in order to determine the optimum forging conditions. As W/T ratios decrease forging loads decrease while excess volumes increase. It was found out that the experimental results reproduce the similar results available in the literature. As a result of these experiments, it was construed physical modeling is an excellent tool for forging process simulation at a practical level.

기 호 설 명

A : 재료상수
 k_s : 재료의 전단유동응력
m : 전단마찰계수
mf : 변형률도지수
n : 가공경화지수
 σ : 유동응력
 ϵ : 변형률
 $\dot{\epsilon}$: 변형률도

1. 서 론

소성가공은 소재의 손실을 최소로 줄이면서 원하는 형상의 제품을 가공하는 방식이다. 소성가공의 일종인 단조 공정은 간단한 형상의 소재를 금형을 통하여 복잡한 형상의 부품으로 만들어주는 생산공정으로 대량생산을 가능케 하고 또한 비교적 높은 강도를 가진 부품을 만들어 주기 때문에 자동차, 트럭, 항공기, 철도차량 등의 부품 생산에 적합하다. 그러나 복잡한 형상의 제품을 결함이 없이 만들거나 부수적인 기계가공 공정을 없애기 위한 공정설계를 위해서는 생산공정에 대한 보다 많은 이

*정회원, 한국과학기술원 정밀공학과

**정회원, 국방과학연구소

해가 필요하다.

따라서 단조 공정에서 보통 사용되는 경험법칙에 의한 단조 공정 설계가 제품의 결함을 유발한다든지 프레스에 손상을 입히거나, 또는 부품의 최종형상 및 치수가 원하는 값들과 맞지 않을 경우에 소모되는 재설계 및 이에 따른 새로운 공구들의 조합 등은 막대한 손실을 초래하게 된다. 또한, 단조공정에 관한 실험은 규모 및 비용때문에 실제의 규모로 수행하기 어렵고 결과로 공정에 대한 체계적인 이해가 없이는 현존하는 경험 법칙에 의존하는 수밖에 없을 것이다. 이와 더불어 최근 국제시장에서 경쟁력을 확보하기 위해서는 싼값에 고품질의 제품을 생산해야만 한다. 결국 이러한 요구사항들을 충족시키기 위해서는 보다 정밀하고 능률적인 단조 공정 설계방안이 필요하다.

단조 공정 중에 일어나는 재료들의 유동을 알아보기 위한 모델링 재료를 이용한 실험과 상계법, 수치해석 프로그램의 개발들은 많은 주목을 받아왔다. 모델링 재료를 이용한 실험은 공작물과 기하학적으로 상사성을 가진 재료를 사용하여 단조공정을 모사하는 방법으로 재료비가 싸고 아크릴 등을 이용한 실험장치를 이용할 수 있기 때문에 비교적 유용한 자료들을 저렴하게 얻을 수 있는 장점이 있다. 지금까지 주로 사용된 모델링 재료들은 왁스, 탄소강, 진흙 또는 납 등으로 이들에 대한 많은 연구가 진행되어왔다^(1~14).

본 논문에서는 모델링재료를 이용한 AISI4130 축대칭 도움형상의 열간 단조 공정 설계 방안을 이룩하기 위한 실험을 수행하였다. 본 실험에 사용된 모델링 재료는 Van Akan International사 제품의 Plastalina를 이용하였다. 모델링재료와 실제 재료 사이의 상사성을 검토하기 위해 압축실험을 수행하였는데 압축 실험시 모델링재료와 평다이 사이의 마찰력을 줄이기 위해 베이비파우더, 휴지, 바셀린, 테프론테잎 등을 이용하였으며 램 속도, 온도, 그리고 변형률도에 따른 응력 변화를 검토해 보았다. 열간 공정시에 수반되는 금형과 공작물 사이의 마찰력을 알아보기 위해 앞에 열거한 윤활제를 이용한 링실험을 수행하여 전단마찰계수(m) 값의 변화를 알아보고 폐쇄단조 시 주요한 설계방안을 검토하기 위해 플래쉬를 갖는 폐쇄단조 실험을 수행하였다. 이 실험에서는 폐쇄단조시 중요한 설계변수 중의 하나인 플래쉬 두께 대 폭비, 플래쉬부를 통한 체적손실, 그리고 원기둥모양의 초기 단조 시

편 형상비 등에 따른 설계방안을 검토하여 기존 참고문헌에 나와 있는 결과들과 유사성을 검토하였다. 이와같은 실험 결과를 통하여 고강도강 열간 단조 공정을 모사하는 실험 기법을 체계적으로 확립하고 고강도강 대형 단조품생산에 필요한 단조 하중 예측, 예비성형체 설계, 성형성 연구 등에 대한 응용성을 검토하고자 한다.

2. 플라스틱인의 압축 및 링 압축실험

재료의 항복 특성을 알아보기 위해서는 압축실험이 많이 이용되는데, 이는 압축실험이 다른 재료시험에 비해 높은 변형률까지 압축이 가능하기 때문이다. 올바른 유동 응력을 구하기 위해서는 압축 실험 도중 다이와 시편사이의 마찰력을 최소로 줄여야 하므로 본 실험에서는 바셀린, 휴지, 베이비 파우더, 랩핑 페이퍼(wrapping paper) 등을 이용하여 마찰을 줄이려 노력하였다. 시편은 직경과 높이가 같은 원통형으로 만들어 실험하였다.

플라스틱인은 미국의 Van Aken International사에서 만들었으며, 기름과 혼합된 점토의 일종으로, 그의 동적인 특징은 고온의 강을 모사하는데 가장 유용하기 때문에 많이 사용되어져 왔다. 또한 어떤 형태로는 만들기 쉽고, 내부 변형을 쉽게 볼 수 있도록 다양한 색깔을 이용할 수 있는 장점이 있다. 유동응력 또한 작아서 실험장치의 용량이 작아도 되며, 실험하는 동안에 증발에 의한 재료의 경화가 무시되어질 수 있다는 것이 모사실험에 많이 사용하게된 주된 요인이다. 플라스틱인의 주성분은 탄산칼슘, 광물류, 탄산 마그네슘, 염료 등으로 물에 불용성이며 온도에 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 일반적으로는 실제 재료와의 상사성을 이루기 위해 플라스틱인에 바셀린(vaseline), 라노린(lanolin)과 레진(resin) 등을 배합하여 사용하는 데 본 실험에서는 우선 플라스틱리나 원재료만을 이용하여 응력-변형률-변형률도-온도 관계를 알아보고자 시도하였다.

시편은 플라스틱인을 1시간 정도 고무망치로 두들겨서 내부에 기포가 남아 있지 않도록 만든 후 손으로 개략적인 실린더 형상으로 만든 후 강관안으로 시편을 넣고 펀치로 압축을 가한 후 압축을 드릴링 머신에서 시행하여 직경과 높이가 22.5 mm 또는 14 mm인 원통형으로 만들었다. 만들어진 시편은 냉동실에 11시간 정도 보관했다가 상온에서

약 2시간 방치한 후에 사용하였다. 실험 장비로는 한국표준과학연구원 재료 특성 실험실이 보유하고 있는 500 kg 로드셀(load cell)을 이용한 Instron으로 50, 100, 500 mm/min의 램속도를 유지하여 압축실험을 수행하였다. 또한 재료의 유동응력의 변형율도에 따른 변화를 검토하기 위해 변형률을 0.001, 0.05, 0.1, 1.0(/sec)로 유지하여 한국과학기술연구원의 Thermecmaster를 이용한 압축실험을 수행하였다. 유동응력의 온도변화에 따른 변화도 -20°C, 0°C, 19°C의 경우에 압축실험을 수행하여 검토하였다.

단조공정 해석에서 흔히 이용되는 전단 마찰력 ($m k_s$; m =전단 마찰계수, k_s =재료의 전단유동응력)을 알아내기 위해 링 실험을 수행하였다. 링 실험에 의하면 링의 내경이 전단 마찰계수에 따라 변화하므로 링 내경의 변화를 측정하여 상계법이나 유한요소법에서 구한 보정선도와 비교하여 전단마찰계수를 구한다. 실험에 사용된 링의 규격은 외경 : 내경 : 높이 = 6 : 3 : 2 (45×22.5×15 mm)였으며 윤활제로는 테프론 테잎, 바셀린, 휴지, 베이비파우더, 그리고 램핑 페이퍼 등을 이용하였다. 실험 장비로는 한국표준과학연구원의 500 kg 로드셀을 이용한 Instron을 사용하였다.

실험에 의해 구한 하중-변위선도로부터 얻어진 진응력과 진변형률 관계가 Fig. 1에 주어져 있다. 이 그림에 의하면 휴지 또는 베이비파우더를 윤활제로 사용했을 때 비슷한 결과를 얻을 수 있었으며 진변형률이 0.2 이상일 때 플라스틱리나의 유동응

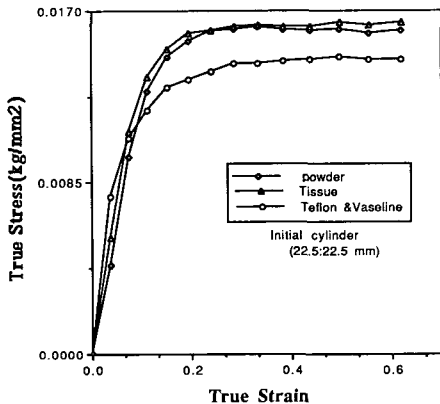


Fig. 1 Measured stress-strain curves obtained from compression test of plasticine using various lubricants under ram velocity of 100 mm/min

력(flow stress)이 약 0.016 kg/mm²였다. 이는 휴지와 베이비파우더들의 경우 비슷한 마찰조건을 나타내준다는 것을 의미한다. 테프론과 바셀린을 이용한 경우에는 유동응력이 진변형률이 0.25일 때 0.0145 kg/mm²임을 알 수 있다.

Fig. 2에는 윤활제를 테프론과 바셀린을 사용했을 때 램 속도의 변화에 따른 유동응력의 변화를 나타내었다. 실험에 사용되었던 램 속도는 50과 100, 그리고 500 mm/min이었다. 이 그림을 살펴보면 램 속도가 빠를수록 유동응력이 커지는 것을 알 수 있었으며, 변형률이 0.4이상인 경우 이들의 차는 0.0015에서 0.002 kg/mm²정도인 것으로 나타났

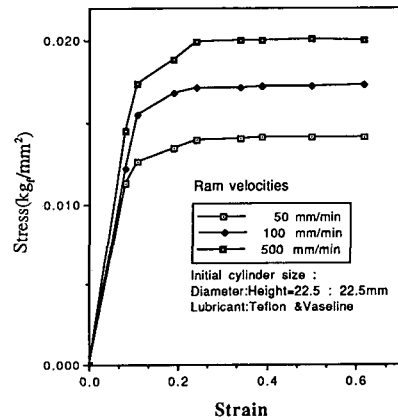


Fig. 2 Measured stress-strain curves obtained from compression test of plasticine using Teflon & Vaseline as a lubricant under various ram velocities

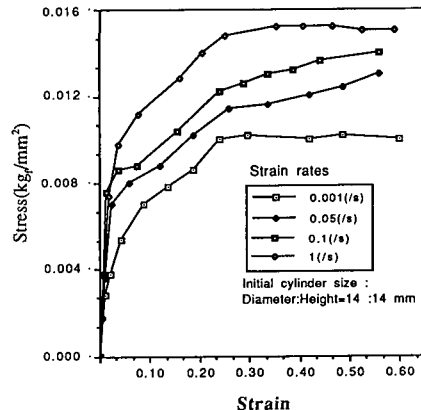


Fig. 3 Measured stress-strain curves obtained from compression test of plasticine using vaseline as a lubricant under various strain rates

다. Fig. 3에는 변형률도에 따른 유동응력의 변화를 보여주고 있는데 이 그림에 의하면 변형률이 커질수록 유동응력이 커지고 있음을 알 수 있다.

Fig. 4는 온도의 변화에 따른 플라스틱인의 유동응력의 변화를 나타내고 있다. 이 그림을 보면 온도가 낮을 수록 유동응력이 높아지는 것을 알 수 있다.

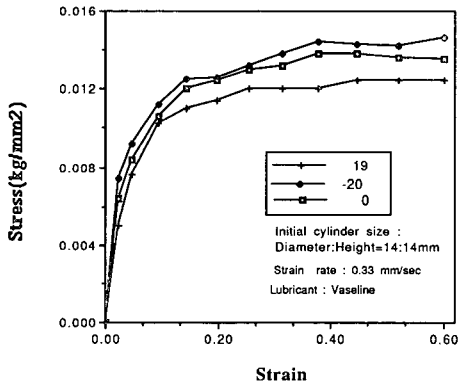


Fig. 4 Measured stress-strain curves of plasticine at various temperatures

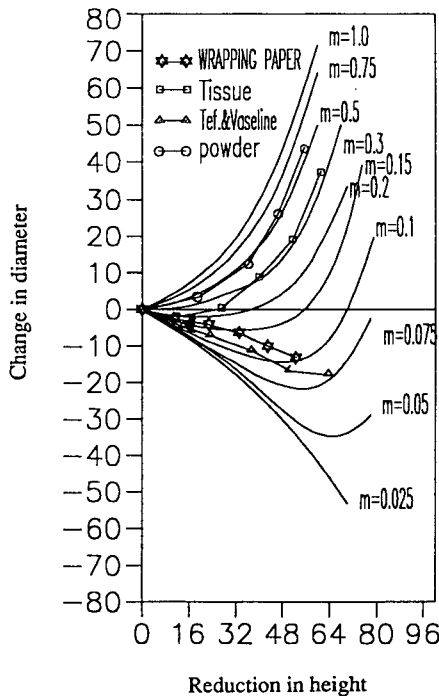


Fig. 5 Calibration curves and measured data from ring compression test of various lubricants with a ring of OD:ID:H=6:3:2

마찰력을 알아내기 위한 링 압축실험에서 링 압축시 내경의 변화를 링높이가 약 10%씩 감소될 때마다 링의 중심선상 부분 내부의 배부름 현상이 일어난 곳에서 측정하여 이 값들을 보정선도에 Fig. 5와 같이 나타내었다. 이 그림에 의하면 테프론과 바셀린 테잎을 이용했을 경우 전단 마찰계수는 약 0.08에서 0.15정도이며, 휴지를 이용한 경우에는 약 0.2에서 0.35, 랩핑페이퍼를 이용할 경우에는 약 0.1에서 0.17, 그리고 베이비파우더를 이용할 경우에는 약 0.5에서 0.75정도였다. 이는 보통 열간 단조시 m값이 0.1에서 0.4까지 이므로 앞의 윤활제 중 베이비파우더만을 제외하면 실제 공정을 잘 모사할 수 있다는 것을 알았다. 이와같은 압축실험과 링 실험의 결과를 검토해 보면 모델링 재료를 이용한 실험들이 원만히 이루어진 것을 알 수 있었다.

3. 합금강(AISI4130)과 플라스틱인의 상사성

실제 단조 공정과 모델링 실험의 상사성이 보장되기 위해서는 소성영역에서 응력과 변형률, 응력과 변형률도사이의 관계들이 서로 상사성을 이루어야 한다. 또한 재료와 금형사이의 마찰 조건이 거의 같아야 한다. 플라스틱인을 이용한 단조공정모사 실험의 타당성을 검토하기 위하여, 상온의 플라스틱인과 고온의 합금강 사이의 상사성을 검토하였다.

플라스틱인의 응력-변형률-변형률도 관계식을 알아보기 위하여 재료의 유동응력을 다음과 같이 나타내었다.

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

여기서 σ = 유동응력, ϵ = 변형률, $\dot{\epsilon}$ = 변형률도, n = 가공경화 지수, m' = 변형률도지수, 그리고 A = 재료상수로 A, n, m' 값은 실험치로부터 다음과 같이 구했다.

Fig. 6은 응력과 변형률을 대수값(log scale)으로 나타낸 그림인데, 변형률이 0.005~0.3까지는 유동응력의 변화가 변형률에 따라 거의 직선적으로 증가하면서 평행함을 볼 수 있지만 0.3 이상부터는 유동응력이 임의의 변형률도에서 변형률에 대해서는 거의 변화가 없었다. 이 그림으로부터 $\epsilon =$

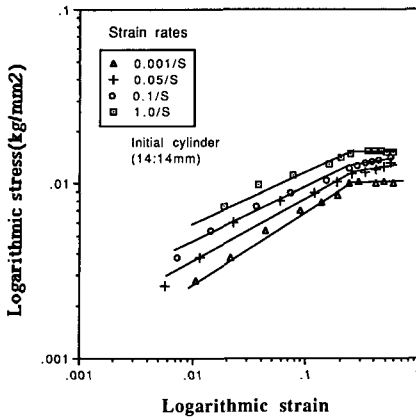


Fig. 6 Relationship between logarithmic strain and stress of plasticine

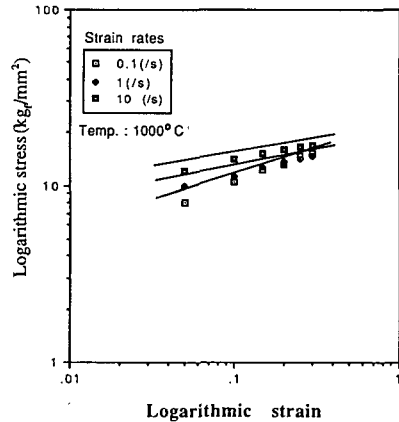


Fig. 8 Relationship between logarithmic strain and stress of steel (AISI4130)

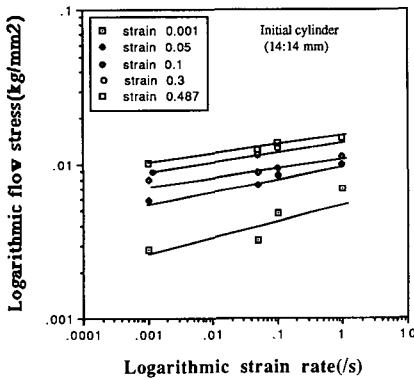


Fig. 7 Relationship between logarithmic strain rate and stress of plasticine

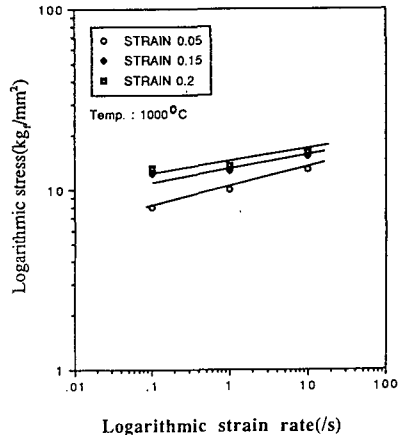


Fig. 9 Relationship between logarithmic strain rate and stress of steel (AISI4130)

0.005~0.3, 그리고 $\dot{\epsilon}=0.001\sim 1$ 에서 가공경화 지수 n 값은 기울기로부터 변형률도를 매개변수로 구해진다. Fig. 6에서 직선들의 평균 경사를 구하면 n 값은 대략 0.19에서 0.27인 것을 알 수 있었다.

Fig. 7로부터는 응력과 변형률도의 관계가 구해질 수 있다. $\dot{\epsilon}=0.001\sim 0.1$, $\epsilon=0.001\sim 1$ 영역에서 평균적인 기울기를 구하여보면 m' 값은 대략 0.062인 것을 알 수 있었다.

A 값은 $\epsilon=0.2\sim 0.5$, $\dot{\epsilon}=0.1$ 일때 $\sigma = 0.013\sim 0.014 \text{ kg/mm}^2$ 이므로 앞에서 구한 m' 값과 n 값을 식 (1)에 대입하면 $A=0.0195\sim 0.022$ 로 구해진다. 결국 식(1)은 플라스틱인에 대해 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\sigma_p = 2.16 \times 10^{-2} \epsilon^{0.23} \dot{\epsilon}^{0.026} \quad (2)$$

마찬가지 방법으로 AISI4130 합금강의 $\sigma-\epsilon-\dot{\epsilon}$ 관계식을 알아보기 위해 Fig. 8에서 $\epsilon=0.05\sim 0.4$, $\dot{\epsilon}=1\sim 10$, Fig. 9로부터 $\epsilon=0.05\sim 0.2$, $\dot{\epsilon}=0.1\sim 1.0$ 인 구간의 평균기울기를 구하여 $n=0.195$, $m'=0.068$ 을 구하였다. 상수 A의 값은 $\epsilon=0.2\sim 0.5$, $\dot{\epsilon}=0.1$ 일때 $\sigma_s=12.8\sim 13.5 \text{ kg/mm}^2$ 이므로 20.4~21.6이다. 그러므로 강역의 유동응력식은

$$\sigma_s = 21 \epsilon^{0.195} \dot{\epsilon}^{0.068} \quad (3)$$

으로 나타낼 수 있었다.

앞에서 구한 유동응력식을 비교해 보면 지수들의 차이가 플라스틱인과 강사이에 존재한다. 그러나

가공경화 지수의 차이는 ϵ 이 작을 경우 즉 $\epsilon = 0.01$ 일 경우 약 15%, $\epsilon = 0.1$ 일 때 5.7%, $\epsilon = 0.5$ 일 때 2.4%, $\epsilon > 1$ 일 때 0.1%~2.3%의 차이가 나므로 실제 큰 변형이 일어나는 소성가공의 모델 실험에서 이들의 차는 응력-변형률 관계식을 유도하는 데 있어서의 오차와, 실험상의 오차를 고려해볼 때 같다고 생각할 수 있다. 따라서 우리는 플라스틱인의 변형저항은 합금강의 변형저항과 상사하다고 간주할 수 있으며 플라스틱인에 대한 실험값으로부터 실제 필요로하는 힘과 응력을 구할 수 있을 것이다. 본 실험에서 구한 응력의 척도값은 대략 944였다.

4. 축대칭 Dome형상에 관한 폐쇄 단조 실험

앞절에서 밝혀진 플라스틱인과 합금강(AISI4130)사이의 재료의 상사성을 이용하여 플래쉬부를 갖는 폐쇄단조 실험을 수행하였는데 이 실험을 통하여 재료의 유동에 관한 상사성을 관찰해보고 여러가지 성형변수들, 즉 빌렛의 초기 체적, 빌렛의 형상비, 폐쇄단조 금형의 플래쉬 크기들에 따른 하중의 변화, 단조 에너지 및 재료손실을 검토함으로써 문헌에 나와 있는 결과들과 비교, 검토하고자 하였다.

Fig. 10에 주어진 형상의 단조 실험을 플라스틱인을 이용하여 램 속도를 50 mm/min에서, 윤활조건은 금형과 공작물사이의 분리가 용이하도록 램핑

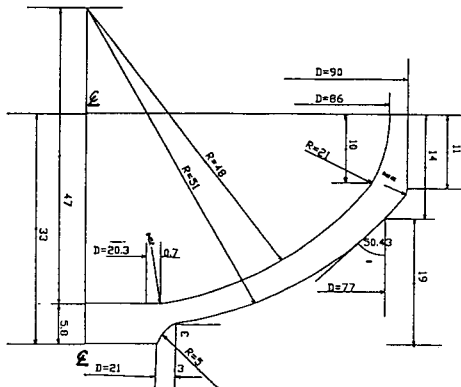


Fig. 10 Cross-sectional dimensions of forging products of axisymmetric Dome Type made of AISI4130 in mm

페이퍼를 이용하여 15톤 로드 셀이 부착된 Instron에서 하중 범위를 3톤으로 하여 단조실험을 수행하였다. 앞에서 검토한 바에 의하면 램핑 페이퍼를 이용하였을 때 전단마찰계수값(m)이 0.1에서 0.17 정도에 이르므로 실제의 경우보다는 약간 작으리라고 생각되지만 단조 중간에 성형성을 검토하기 위해 램핑 페이퍼를 선택하여 이용하였다. Fig. 11에는 윤활제로 램핑 페이퍼를 사용하며, 램 속도가

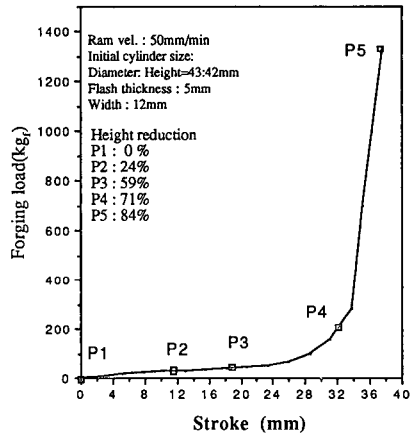


Fig. 11 Load-stroke curve obtained from closed-die forging of Dome Type with flash

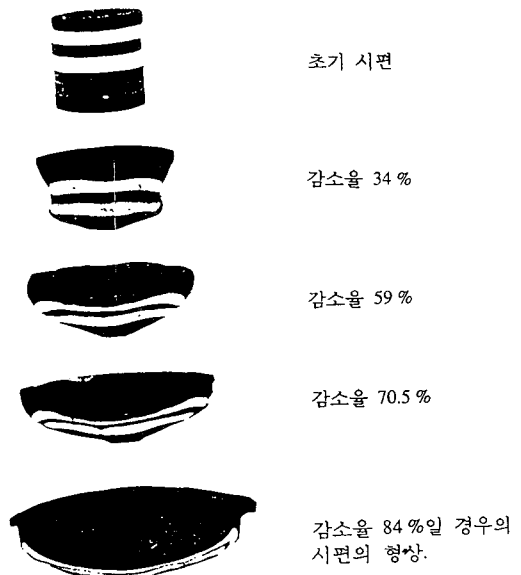


Fig. 12 Deformed shape of closed-die forging experiments of plasticine at various forging stages

50 mm/min이고 플래쉬 두께는 5 mm, 폭은 12 mm일 때의 하중-변위선도를 나타내었다. 위의 조건으로 실험한 결과 단조품이 만들어졌을 때의 하중은 약 1.34톤 정도 사이에 있음을 알 수 있다.

Fig. 12는 시편의 높이 감소율에 따른 재료 내부의 유동 상태를 보여주고 있다. 유동이 이루어지는 양상을 보면 초기에는 전반적으로 반경 방향으로 비교적 낮은 하중에서 압축이 이루어지다 플래쉬의 형성과 함께 하중이 급격히 증가하며 유동이 용기의 끝 부분에서만 이루어지면서 모든 부분에서 접촉이 이루어지는 것을 볼 수 있다. 이 실험 결과로부터, 실제 열간 단조시의 하중을 예측할 수 있는데, 실제 하중은 앞의 상사성에서 구한 척도값을 이용하면 약 100,000톤 이상까지 이르고 있음을 알 수 있었다.

Fig. 13은 단조에 이용된 금형 플래쉬부의 두께/폭비(T/W, W=10 mm일정)에 대한 초과 체적, 단조하중, 단조에너지에 따른 변화를 나타내고 있는데 이 그림은 플래쉬를 가진 폐쇄단조시 초기 금형의 플래쉬부 설계를 하는데 중요한 정보를 제공해 주고 있다. 이 그림에 의하면 플래쉬 두께가 작을수록 하중이 증가하고 에너지도 증가하지만 초과 체적은 감소함을 볼 수 있는 반면 플래쉬 두께가 두꺼울 경우에는 이와는 반대현상을 보여주고 있다. 하지만 두께가 더욱 커져서 10이상인 경우에는 하중은 감소하고 초과체적과 에너지는 증가하고 있

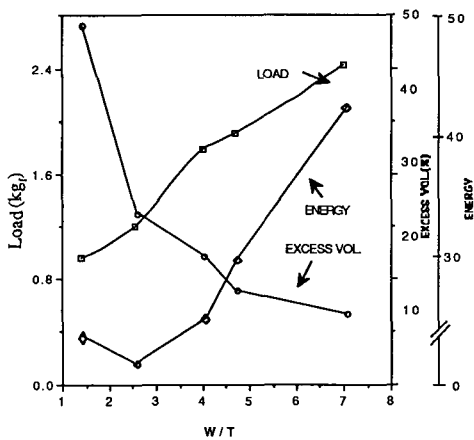


Fig. 13 Relationship among excess stock material, forging load, and energy for various flash width/thickness ratios with constant flash width W of 10 mm

음을 알 수 있다. 이같은 결과는 Vieregge⁽⁷⁾에 의해서 실험적으로 얻어진 결과와 유사하였다. 따라서 본 폐쇄단조 실험을 통한 유동의 상사성도 동시에 이루어지는 것을 간접적으로 검증할 수 있었다.

서로 다른 체적을 가진 빌렛을 성형하였을 때의 하중을 비교해보면 예상했던대로 플래쉬가 생기지 않은 경우(D/H=43 : 30) 단조하중이 580 kg였고 플래쉬 생성시(43/35와 43/40)의 하중이 각각 1000에서 1400 kg으로 매우 큰 차이를 보여주고 있음을 알았다. 또한 플래쉬가 생기지 않도록 초기 빌렛을 선정하여 성형할 경우에는 하중은 초기에는 접촉면적이 넓은(즉 형상비(D/H)가 커질수록) 큰 하중이 작용하지만 최종상태에서 금형의 완전 채움이 이루어졌을 경우에는 형상비에 무관함을 알 수 있었다.

5. 결 론

대형 단조품을 성형하는 데 모델링 재료인 플라스타리나를 이용하여 실험을 수행한 결과 본 실험에서 사용된 플라스타리나와 AISI4130 합금강 사이의 재료 및 유동의 상사성이 이루어짐을 알 수 있었으며 상온의 플라스타리나와 100°C의 AISI4130 합금강 사이의 응력의 척도값은 약 944임을 알아내었다. 또한 링 실험을 통한 마찰상태를 보면 다음과 같았다; 베이비파우더를 이용할 경우의 전단 마찰 계수값: 0.5~0.75, 휴지의 경우: 0.2~0.35, 랩핑 페이퍼의 경우: 0.1~0.17, 테프론 테이프와 바셀린의 경우: 0.08~0.15. 이 값들은 실제 열간 단조 공정시에 일어나는 마찰 조건들과 유사한 것을 알았다.

플래쉬를 갖는 축대칭형 도음 형상의 폐쇄단조 실험을 통하여 성형에 필요한 하중, 에너지 및 재료 손실을 감안한 경제적인 플래쉬부의 폭과 두께비는 2.5인 것을 알 수 있었으며 이와같은 자료는 유사한 축대칭형 열간 폐쇄단조시 플래쉬부를 설계하는 데 매우 유용할 것이다.

후 기

본 연구는 국방과학기술연구소의 위탁과제로 수행 되었으며 실험을 수행하는 데 많은 도움을 준 한국표준과학연구원의 방건웅 실장님들과 관계자분들께 깊은 감사를 드리며 아울러 원고를 준비하는데 많은 도움을 준 정종엽군께 감사를 드린다.

참고문헌

- (1) Kobayshi S., 1982, "A Review on the Finite-Element Method and Metal-Forming Process Modeling," J.Appl. Metalworking, Vol. 2, p. 163.
- (2) 박치용, 조종래, 양동열, 1990, "열간 반경 단조의 2차원 유한 요소 해석," 대한기계학회논문집, 제14권, 제5호, p. 1166.
- (3) Wanheim, T., Maegaard, V. and Danckert, J., 1984, "The Physical Modeling of Plastic Working Processes," Advanced Technology Plasticity, Vol. 1, p. 984.
- (4) Azushima, A. and Kudo, H., 1987, "Physical Modeling(Simulation) for Metal Forming with Strain Rate Sensitive Model Material," Advanced Technology Plasticity, Vol.2. p. 1221.
- (5) Hidehiko, T., Taura, Y. and Ibushi, J., 1984, "Simulation of Hot Steel in Plastic Working with Plasticine and Lead." Advanced Technology Plasticity. Vol. 2, p. 1003.
- (6) Aku, S.Y., Slater, R.A.C. and Johnson, W., 1967, "The Use of Plasticine to Simulate The Dynamic Compression of Prismatic Block of Hot Metal," Int. J.Mech. Sci., Vol. 9, p. 495.
- (7) Vieregge, K., 1968. Contribution to Flash Design in Closed Die Forging, Doctoral Dissertation, Technical University Hannover,
- (8) Keife, H. and Stahlberg, U., 1984, "The Influence of Flash Design on Material Flow and Tool Pressure in Closed-Die Forging: A Practical Example," J.Mech. Work. Techno., Vol. 9, p. 37.
- (9) Hoenacker, Y.V. and Dean, T.A., 1978, "The Application of Upper Bound Analysis to Real Situation a Comparison of Flash and Flashless Forging," Int. J.Mach. Tool Des. Res. Vol. 18, pp. 81~93.
- (10) 김현영, 1990 "UBET를 이용한 형단조 예비가공형 설계," 박사학위논문, 서울대학교.
- (11) Sun, J.X., 1988, "Analysis of Special Forging Processes for Heavy Ingots by Finite Element Method," Int. J.Mach. Tools Manufact. Vol. 28. No. 2, p. 173.
- (12) Krummel, C.H. and Thompson, O.N., 1978, "Space Shuttle Solid Rocket Motor Metal Case Component Fabrication," AIAA/SAE 14th. Joint Propulsion Conference, Las Vegas, Nev./July 25~27, pp. 1~11.
- (13) Erman, E., Medei, W.M., Roesch, A.R. and Shah, D.C., 1989, "Physical Modeling of Blocking Processes in Open-Die Press Forging," J. Mech. Working Tech., Vol. 19, p. 165.
- (14) 유요한, 홍성석, 이종수, 1991, "대형 도움 단조 공정 개발에 관한 연구," 단조심포지엄'91, p. 75.