

중공 T 형상의 형단조에 관한 연구

김현수*, 김용조#

A Study on Die Forging of a Hollow T-shaped Part

Hyun Soo Kim*, Yohng Jo Kim#

ABSTRACT

Traditional forging of a hollow T-shaped part has been applied to forge a solid T-shaped product from a solid billet and then to machine the hollow in that. In a case, a hollow T-shaped part can be forged by backward-extruding from a solid billet. In this study, four types of forging were suggested for manufacture of hollow T-shaped parts. Forging simulations for each of these forging methods were carried out to investigate folding defect, metal flow pattern, effective strain, and forging loads. Experimental works were carried out to be compared with the simulation results. Here, the ratio of the thickness of the hollow tube to that of the flange was selected to investigate a forging defect like folding.

Key Words : Forging simulation(단조 시뮬레이션), Hollow T- shaped part(중공 T-형상 부품), Backward extrusion forging(후방압출단조), Upset forging(엷셋단조), Injection forging(압조 단조), Injection-extruding forging(압조-압출 단조)

1. 서론

동력전달용 구동부품에 있어서 중공 T 형상의 부품은 흔히 찾아 볼 수 있으며, 이는 높은 강도를 요구하기 때문에 강도향상을 위하여 단조에 의한 제품의 성형 방법이 많이 연구되고 있다. 중공 T형상을 갖는 제품의 제조 방법으로는 중실 T형상으로 단조하여 내경부를 절삭가공하는 방법, 중실 소재를 후방압출하여 중공 T형상으로 단조하는 방법, 또는 중공의 초기소재를 사용하여 중공 T형상으로 단조하는 방법이 일반적이다. 최근 최적의 성형공정 및 금형 설계를 달성하기 위하여 강소성 유한요소법(Rigid- Plastic Finite Element Method)^{1,2}을 이용한 단

조공정해석을 수행함으로써 재료의 유동(metal flow), 단조하중, 소성 변형을 및 구석부 충전현상 등을 예측할 수 있기 때문에, 공정 설계 및 금형 설계³에 많이 이용되고 있다.

Balendra^{4,6} 등은 압조법(injection forging method)을 이용한 중실 T형상의 단조에 있어서 다이 캐비티(die cavity) 형상 비에 따른 결함 발생 조건, 마찰계수의 영향 및 소성유동형태에 대해 연구하였고, Colla⁷⁻⁹ 등은 압조법을 이용하여 얇은 두께를 갖는 관의 중간부에 플랜지 형상을 폴딩결함 없이 단조하기 위해, 예비성형체의 형상을 제시하고, 시뮬레이션과 해석을 통하여 이를 검증하였다.

접수일: 2003년 4월 10일; 게재승인일: 2003년 11월 14일

* 경남대학교 기계설계학과 대학원

교신저자, 경남대학교 기계자동화공학부

Email yohngjo@kyungnam.ac.kr Tel. (055) 249-2619

Bae¹⁰ 등은 중공 플랜지 형상의 후방압출 방법에 의한 단조에 있어서 결함 발생 조건에 관해 연구하였다. 또한 중실 T형상의 단조품에 대한 모델재료를 사용한 실험을 통해 급형 형상에 따라 싱크마크(sink mark)와 같은 결함발생 등의 영향을 고찰한 연구¹¹를 찾아 볼 수 있다. 이 외에도 중실 및 중공 소재를 이용한 단조 방법에 관한 연구¹²⁻¹⁴들을 찾아 볼 수 있다. 그러나 중공 T형상의 단조에 있어서 중실 및 중공 소재를 사용하여 단조 방법에 따라 제품에 미치는 영향에 대한 연구는 아직 찾아 볼 수가 없다.

본 연구에서는 중공 T형상을 갖는 기계 부품의 단조방법에 대해 연구하였으며, 중실 소재를 이용한 단조방법과 중공 소재를 이용한 단조 방법 등의 4가지 단조법을 제시하였다. 또한, 각각의 단조 방법에 대해 모델 재료인 납(lead)에 대한 유한요소해석을 수행하여 단조 공정에서 생길 수 있는 소재의 접침(folding) 결함에 대해 검토하고, 실험을 통하여 이를 검증하였다. 이를 바탕으로 산업현장에서 경험에 의존하였던 공정 설계를 보다 효과적으로 개선하기 위한 단조법을 제시하고자 하였다.

2. 중공 T형상의 제작 공정

본 연구에서는 중실 및 중공 소재를 이용하여 중공 T형상으로 단조하는 방법에 대해 연구하였으며, 중공 T형상은 Fig. 1에 나타낸 것과 같다. 중공 관의 내경을 d_1 , 외경을 d_2 , 플랜지부의 외경을 D_0 , 중공 관의 두께를 t , 플랜지부의 두께를 T 로 정의하였다. 중공 T형상에 있어서 공정 설계의 변수는 다양하겠으나, 본 연구에서는 중공관의 외경과 내경의 형상비 $\alpha(=d_2/d_1)=1.5$, 플랜지의 폭과 중공관의 두께비 $\beta(=B/t)=1$, 중공관의 길이 $h=30\text{ mm}$ 로 고정하고, 중공관의 두께와 플랜지의 두께비 $\gamma(=T/t)$ 의 변화에 따른 성형조건에 관해 고찰하였다.

중실 및 중공 소재를 이용한 중공 T형상의 단조에 있어서 4가지 단조방법을 제시하였으며, 그림2-그림5에 간략히 나타내었다. 본 연구에서 제시한 단조방법은, 첫째, Fig. 2와 같이 중실소재를 이용하여 후방압출법에 의해 중공 T형상으로 단조한 후 피어싱하는 방법(방법1), 둘째, Fig. 3과 같이 중공 초기 소재를 이용해서 엷셋단조법으로 T형상을 단조하는 방법(방법2),

셋째, Fig. 4에 표시된 바와 같이 중공 초기소재를 이용해 압조법으로 T형상을 성형하는 방법(방법3),

넷째, Fig. 5와 같이 압조법(injection forging method)과 후방압출(backward extrusion)에 의한 성형이 동시에 이루어 질 수 있도록 한 방법(방법4) 등이다.

본 연구에서는 방법1, 방법4의 T형상으로 단조한 후 피어싱하는 공정과, 방법2, 3의 중공 초기소재를 성형하는 공정에 관한 연구는 생략하고, 중공 T형상으로 단조하는 공정에 관해서만 연구하였다.

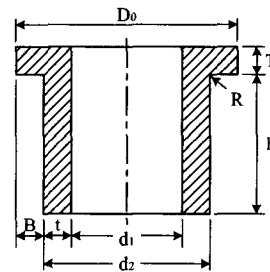


Fig. 1 Geometry of a hollow T-shaped part

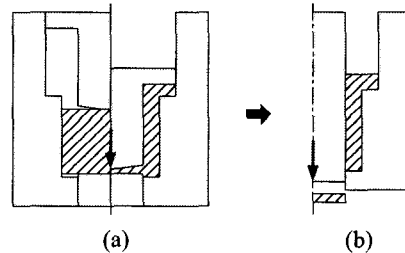


Fig. 2 Forming process of a hollow T-shaped part using a solid initial billet (method-1), (a) backward extruding process and (b) piercing process

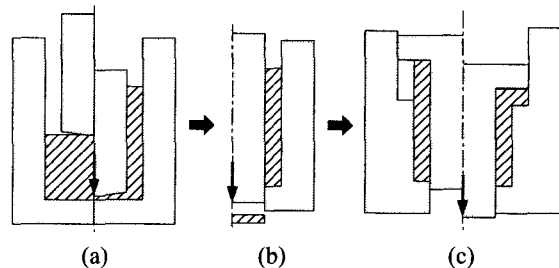


Fig. 3 Forming process of a hollow T-shaped part using a hollow initial billet (method-2), (a) backward extruding, (b) piercing, and (c) upsetting process

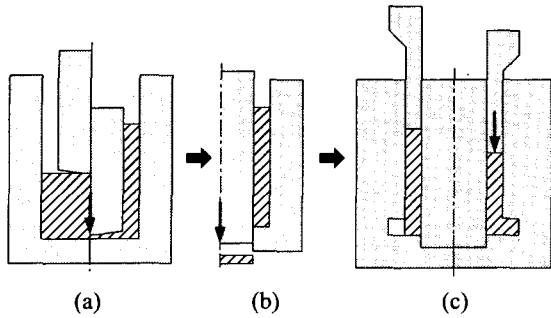


Fig. 4 Forming process of a hollow T-shaped part using a hollow initial billet (method-4), (a) backward extruding, (b) piercing, and (c) injection forging process

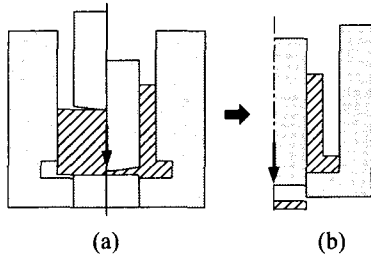


Fig. 5 Forming process of a hollow T-shaped part using a solid initial billet (method-3), (a) backward extruding and injection forging process and (b) piercing process

3. 중공 T형상의 단조공정에 대한 유한요소해석

단조에 의한 제품의 성형에 있어서 단조방법에 따라 소성류(metal flow)의 형태(pattern)는 다양하게 나타나며, 제품의 강도에 큰 영향을 미친다. 또한, 최종 단계에서 과중한 단조하중과 소재와의 마찰에 의해 금형이 손상될 수 있으므로 냉간단조에서 소성류의 제어는 매우 중요하다.

본 연구에서는 중공 T형상의 성형에 이용될 수 있는 4가지의 단조 방법을 제시하고, 각각의 단조법에 대해 강-소성 유한요소해석을 수행하여 최종 형상의 소성류를 검토하고, 유효변형률 분포 및 단조하중을 비교함으로써 중공 T형상의 성형에 가장 적절한 단조법을 예측하고자 하였다. 본 연구에서 사용한 강소성 유한요소법(rigid-plastic finite element method)의 수식화 과정은 문헌^{1,2}에 상세하게 소개되어 있으

로 생략하였다.

중공 T형상은 축대칭 형상(axisymmetric shape)이므로 2차원 해석을 수행하였으며, 비압축성 처리기법으로는 벌칙기법(penalty method)을 사용하였다. 시뮬레이션에 사용된 모델 재료는 납(lead)이며 단순압축시험을 통하여 구한 유효응력식은 다음과 같다.

$$\bar{\sigma} = 29 \bar{\epsilon}^{0.19} MPa$$

여기서, $\bar{\sigma}$ 는 유효응력, $\bar{\epsilon}$ 은 유효변형률이다.

금형과 소재의 접촉면에 발생하는 마찰은 일정전단마찰(constant shear friction)이 작용하는 것으로 하였으며, 링 압축시험(ring compression test)¹⁵⁻¹⁷을 통하여 구한 마찰계수는 $m = 0.14$ 이다.

중공 T형상의 단조 공정에서 최종 단조품의 품질에 영향을 미칠 수 있는 공정 변수들은 다양하나 본 연구에서는 중공관의 외경과 내경의 비를 $\alpha = 1.5$, 플랜지의 외경과 중공관 내경의 비를 $\beta = 2$ 로 일정하게 하고, 중공관의 두께와 플랜지의 두께비 $\gamma = T/t$ 의 성형조건을 변화시켜 해석을 수행하였으며, 소성류의 형태와 유효변형률 분포, 단조하중을 고찰하여, 각각의 단조법에 대한 타당성을 검토하였다.

4. 실험

시뮬레이션 결과를 검증하기 위해 앞 절에서 제시한 4가지 방법에 대한 실험을 수행하였다. 본 실험에서 사용된 재료는 납이며, 시험편은 시뮬레이션에 사용된 것과 같은 치수로 기계가공하여 제작하였다. 시험편의 단면 형상을 Fig. 6에 나타내었다.

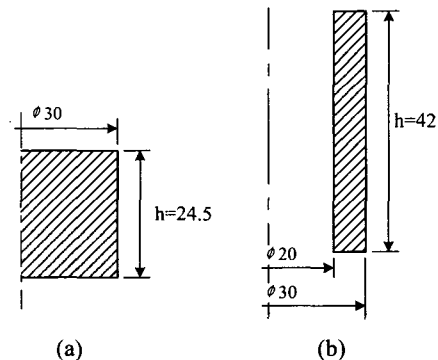


Fig. 6 Dimension of the initial billet for (a) method-1 and -4 and (b) method-2 and -3

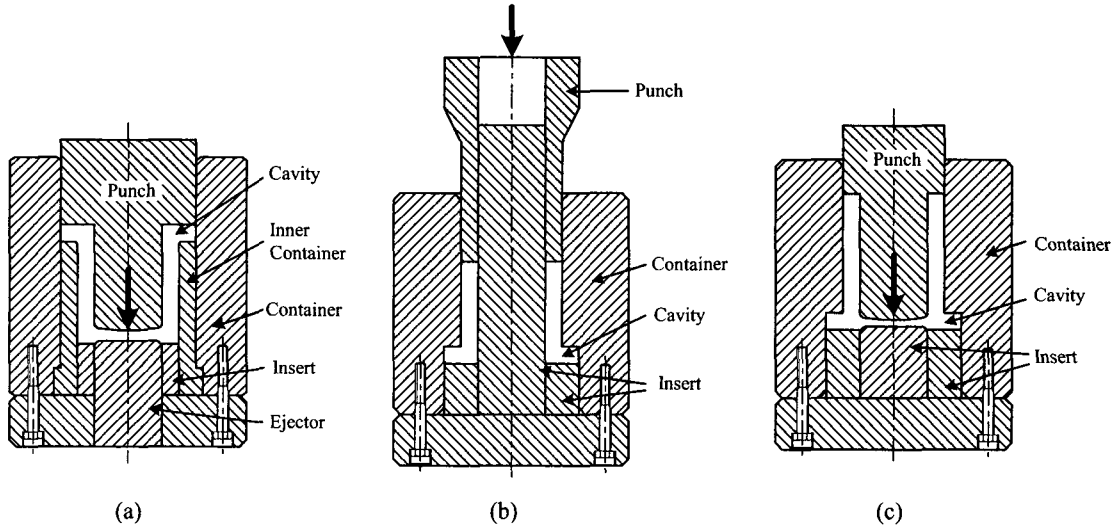


Fig. 7 Experimental equipments for closed-die forging of a hollow-T shaped part, (a) method-1 and method-2, (b) method-3, and (c) method-4

Fig. 7은 실험에 사용된 금형세트의 단면형상을 나타낸 것이다. Fig. 7(a)는 방법 1과 방법 2에서의 금형세트로서 중실소재를 캐비티(cavity)에 넣고 펀치를 이동시킬 경우 후방압출(방법1)에 의해 성형되고, 중공 소재를 사용할 경우 옆셋법(방법2)에 의해 제품이 성형되도록 하였다. Fig. 7(b)는 방법 3에서의 금형세트로서 중공소재를 금형의 캐비티에 넣고 펀치로 누를 경우 소재가 캐비티 내로 압조되면서 성형되도록 설계 제작하였다. Fig. 7(c)는 중실 소재를 사용하여 압조-후방압출법으로 성형하는 방법 4의 금형세트이며, 캐비티 내로 T형상이 완전히 압조 성형된 후에도 후방 압출이 계속 이루어 질 수 있도록 중공관 부분을 충분히 길게 여유를 주었다.

본 실험은 Instron 재료시험기에 금형세트를 장착하여 실시하였고, 크로스헤드(cross head)의 이동속도를 모든 방법에 대해 5mm/min로 일정하게 이동되도록 하였으며, 펀치의 행정(stroke) 및 하중의 실험결과 데이터를 파일로 얻어내었다. 윤활재로는 그리스(grease)를 사용하였다.

5. 해석결과 및 고찰

5.1 유동 형태

Fig. 8은 제1 단조법(방법1)의 후방압출법으로 중실 초기 소재를 중공 T형상으로 성형하는 경우, 중공

관의 두께와 플랜지부의 두께 비(γ)에 따른 충전 형태와 소성류 형태를 나타낸 것이며, Fig. 8(a)에 유동 형태를 Fig. 8(b)에 시뮬레이션 결과를 나타내었고 Fig. 8(c), (d)에 플랜지부 확대형상을 시뮬레이션 결과(좌측)와 실험 결과(우측)를 비교하여 나타내었다.

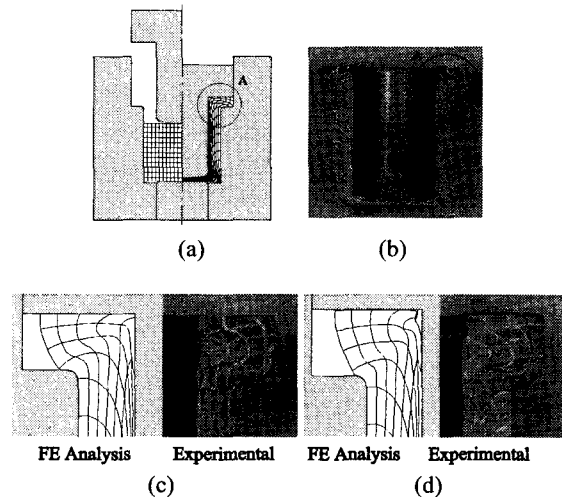


Fig. 8 Metal flow patterns according to the thickness ratio γ (method-1), (a) the corresponding forging process, (b) experimental result, (c) cavity filling pattern for $\gamma \leq 0.8$ and (d) for $\gamma \geq 0.9$

Fig. 8(c)는 후방 압출에 의한 중공 T형상의 단조 시 중공관의 두께와 플랜지부의 두께 비가 0.8보다 작을 경우($\gamma \leq 0.8$)에 대한 결합부분 확대형상을 나타낸 것이다. 시뮬레이션 결과와 실험 결과에서 확인할 수 있듯이 중공 플랜지부에서 소성류의 형상이 적절히 형성되며 겹침 결함 없이 단조할 수 있음을 알 수 있다. Fig. 8(c)는 γ 값이 0.9 이상일 경우에 대한 결과로서, 중공 플랜지부의 상단 펀치와 접촉되는 면의 부근에서 소성류의 형상이 심하게 찌그러지며 겹침 결함(folding defect)이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 시뮬레이션 및 실험에 의한 소성 유동형태가 거의 일치함을 알 수 있으며, 방법 1로서 단조할 경우 중공관의 두께와 플랜지부의 두께 비 $\gamma \leq 0.8$ 의 범위에서 적용할 수 있다는 것을 알 수 있다.

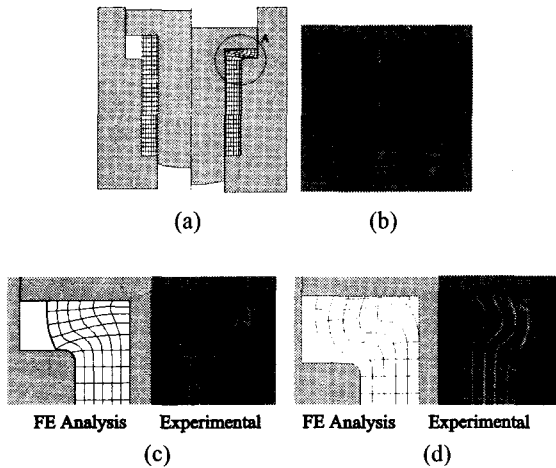


Fig. 9 Metal flow patterns according to the thickness ratio γ (method-2), (a) the corresponding forging process, (b) experimental result, (c) cavity filling pattern for $\gamma \leq 0.6$, and (d) for $\gamma \geq 0.7$

Fig. 9는 중공소재를 초기 소재로 하여 옆셋단조법을 적용한 제2 단조법(방법2)의 경우 γ 값의 변화에 따른 충전형태와 소성류 형태를 나타낸 것이다. 제2 단조법에 있어서 γ 값이 0.6 이하이면 펀치와 접촉되는 면의 유동속도와 내부 소재의 외경 방향으로 유동 속도가 비슷하여 겹침 결함 없이 단조할 수 있음을 알 수 있다[Fig. 9(c)]. 그러나 γ 값이 0.7 이상일 때는 중공 플랜지부의 상단

에서 펀치와 접촉되는 면의 유동속도보다 소재내부의 유동속도가 빨라 이 부분에서 형상이 심하게 찌그러지며 겹침결함이 발생하게 된다.

시뮬레이션 및 실험 결과로부터, 방법 2로서 단조할 경우 γ 값이 0.6 이하에서 적용할 수 있다는 것을 알 수 있다.

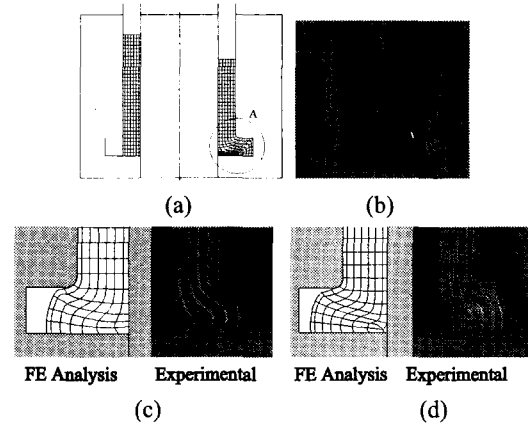


Fig. 10 Metal flow patterns according to the thickness ratio γ (method-3), (a) the corresponding forging process, (b) experimental result, (c) filling pattern for $\gamma \leq 0.9$, and (d) for $\gamma \geq 1$

Fig. 10은 중공 소재를 사용하여 제3 단조법(방법3)의 압조공정으로 성형하는 경우 γ 값의 변화에 따른 충전형태와 소성류 형태를 나타낸 것이다. 중공소재를 사용하여 성형하는 것은 옆셋법(방법2)과 유사하나 옆셋법에서는 펀치가 이동하면서 캐비티가 낮아지지만 압조법에서는 금형내의 캐비티가 일정한 형태로 유지되어 있는 상태에서 소재가 충전 되므로 유동형태가 다르게 나타난다.

제3 단조법에 있어서 γ 값이 0.9이하일 때는 소재의 유동이 적절하여 겹침 결함 없이 중공 T형상으로 성형되어 지고[Fig. 10(c)], γ 값이 1이상이 되면 플랜지부 다이와 접촉되는 면에서의 유동 속도보다 내부 소재의 반경방향으로 유동속도가 빨라져 중공 플랜지부에서 겹침결함이 발생하게 된다[Fig. 10(d)].

Fig. 10(c), (d)에서 나타난 바와 같이 압조법에 의한 중공 T형상의 단조에 있어서 γ 값이 0.9 이하일 경우에 적용할 수 있다는 것을 알 수 있다. 또한, 중공 소재를 이용한 중공 T형상의 단조 방법에 있어서 제2

단조법(앞셋법)보다 제3 단조법(압조법)으로 단조 하는 것이 형상한계(γ)를 더 넓게 적용할 수 있다는 것을 알 수 있다.

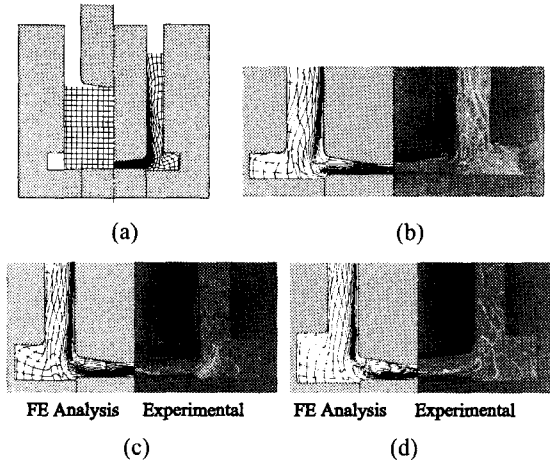


Fig. 11 Metal flow patterns according to the thickness ratio γ (method-4), (a) the corresponding forging process, (b) filling pattern for $\gamma = 0.6$, (c) for $\gamma = 1$, and (d) for $\gamma = 1.4$

Fig. 11은 압조-후방압출법의 제4 단조법(방법 4)을 적용한 경우 γ 값의 변화에 따라 충전형태와 소성류 형태를 나타낸 것이다. 중실 소재를 사용하여 압조(injection forging)법으로 T형상을 성형함과 동시에 후방 압출에 의해 중공 관을 성형하도록 하였다. 이 단조법에서는 γ 값이 변하더라도 겹침결함 등의 단조 결함은 발견할 수 없으며, γ 값이 변화됨에 따라 소성류의 형태에 약간의 차이가 있다. 플랜지의 두께가 얇아질수록 플랜지 목부근에서 소성류의 흐름이 많이 찌그러지는 현상을 확인할 수 있다.

5.2 유효변형률 분포

Fig. 12는 각각 제1 단조법, 제2 단조법 및 제3 단조법에서 겹침 결함 없이 최종 형상 성형시의 유효 변형률 분포를 나타낸 것이다.

중실 소재를 사용한 제1 단조법의 경우[Fig. 12(a)], 후방 압출되면서 중공관이 성형되고 이후 편치의 상단부와 접촉하면서 중공 T형상이 성형되므로, 변형이 가장 심하게 발생하는 중공관 내경부와 편치 상단

과의 접촉 부분에서 유효변형률이 가장 크게 난다. 중공관 내경부의 길이방향으로 유효변형률 분포는 거의 균일하게 나타나며, 플랜지 바깥쪽으로 갈수록 그 값이 작아진다.

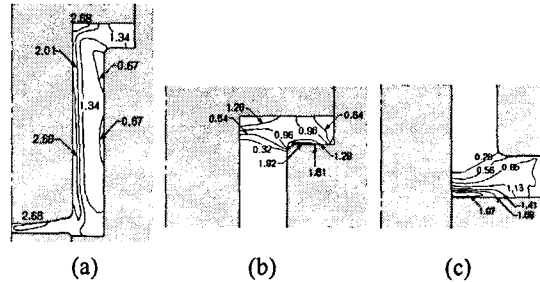


Fig. 12 Effective strains (a) for method-1, (b) for method-2, and (c) for method-3

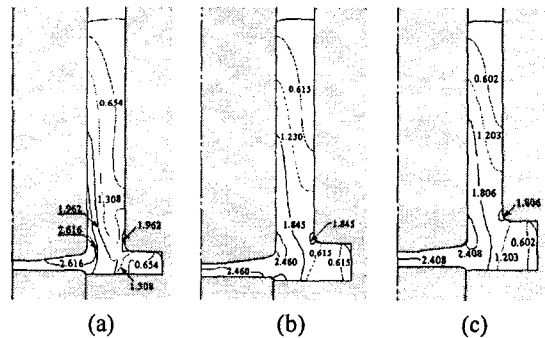


Fig. 13 Effective strains (for method-4), (a) $\gamma = 0.6$, (b) $\gamma = 1$, and (c) $\gamma = 1.4$

제2 단조법[Fig. 12(b)]에서는 중공소재를 초기 소재로 하여 앞셋하므로 중공관부에서는 변형이 거의 일어나지 않고 플랜지 성형부에만 변형이 일어난다. 편치와 접촉되는 플랜지 안쪽 부분과 플랜지 코너부에서의 유효변형률이 가장 크게 나타났으며, 특히 플랜지 코너부에서는 국부적인 변형이 심하게 발생하여 이 부분이 강도상 취약할 것으로 예상된다.

제3 단조법[Fig. 12(c)]에서는 제2 단조법과 마찬가지로 중공소재를 이용하여 압조하므로 중공관부의 변형은 거의 나타나지 않고 주로 플랜지 성형부에만 변형이 일어난다. 이 때 다이와 접촉되는 하단부에서 변형률이 가장 크게 나타나고 플랜지 코너부 및 플랜지 가장자리부로 갈수록 유효변형률 값이 작아지며, 특정한 부분에서의 국부변형 없이 플랜지부의 전구

간에 걸쳐 변형이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이는 제2 단조법의 엷셋 방법에서 볼 수 있었던 현상과는 대조되는 현상으로 중공 플랜지 성형시 제2 단조법보다 안정된 변형이 발생함을 알 수 있다.

Fig. 13은 제4 단조법에서 γ 값의 변화에 따른 최종형상의 유효변형률 분포를 나타낸 것이다. 펀치와 접촉되는 아래쪽 모서리 부분의 유효 변형률 값이 가장 크게 나타났으며, 플랜지 가장자리부 및 중공관부의 바깥쪽일수록 변형이 적게 일어났음을 알 수 있다. 또한, γ 값이 커질수록 변형률 분포가 작은 값으로 나타나고 γ 값이 작아질수록 변형률 분포가 큰 값을 나타낸다. 따라서 γ 값이 작아질수록 플랜지부에서의 단조효과는 더 클 것으로 예측할 수 있다.

Fig. 12(a)와 Fig. 13의 해석 결과로부터 중실 소재를 사용하여 단조할 경우, 제1 단조법의 후방압출에 의한 단조방법에 비해 제4 단조법의 압조-후방압출에 의한 단조방법이 더 안정적인 유효변형률 분포를 나타내며, 플랜지부에서의 단조효과가 더 클 것으로 예측된다.

5.3 단조하중

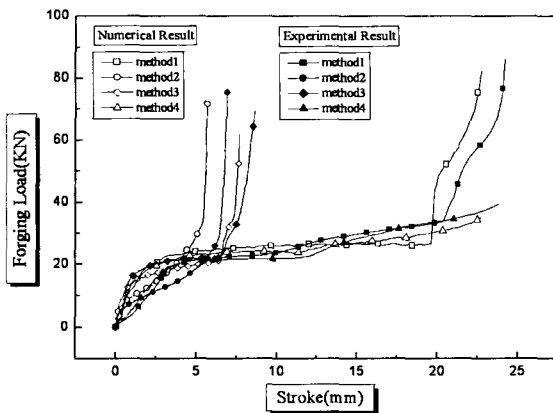


Fig. 14 Forging loads for each of forging methods by FE simulation & experimental results

Fig. 14는 결함이 발생하지 않는 경계 γ 값에서의 각각의 단조법에 대한 단조하중을 비교하여 도시하여 나타낸 것이다. 단조 하중에 대한 시뮬레이션 결과와 실험 결과가 거의 비슷한 양상을 나타내며, 실험의 경우 단조 초기의 하중이 조금더 완만하게 나타나는

것은 다이와 소재 사이의 클리어런스의 영향인 것으로 판단된다.

제1 단조법에서는 후방압출에 의해 유동되던 소재가 펀치 상단부와 접촉이 되면서 하중이 급격히 증가하며, 플랜지의 구석부 충전단계에서 다시 급격한 증가곡선을 나타낸다. 제2 단조법의 경우 처음부터 펀치의 상단부와 소재가 접촉되어 성형되므로 급격히 하중이 증가하며, 플랜지 외경부의 구석부 충전시에는 더욱 급격히 증가한다. 제1 및 2 단조법의 경우 플랜지 외경부가 정밀한 치수를 요구하지 않을 경우에는 개방형 단조로 하여 단조하중을 낮출 수 있다.

제3 단조법에서는 중공관부가 이미 성형되어 있고 플랜지부만 성형하므로 구석부 충전이 시작될 때 하중이 급격히 증가한다. 제4 단조법에서 중공 T형상의 플랜지부는 압조법(injection method)에 의해 성형하기 때문에 밀폐형으로 단조되고 중공관부는 후방 압출에 의해 성형되기 때문에, 플랜지의 외경부 구석부 충전이 완전히 이루어지더라도 하중이 급격히 증가하지 않고 완만한 곡선을 나타내므로 급형에 큰 무리가 발생하지 않게 되어 적절한 단조 방법이라 할 수 있다.

6. 결론

본 연구에서는 중공 T형상의 성형방법으로 ①중실 소재를 이용한 후방압출방법, ②중공 소재를 이용한 엷셋방법, ③중공 소재를 이용한 압조법, ④중실소재를 이용한 압조-후방압출법의 4가지의 단조 방법을 제시하였다. 또한, 유한요소해석을 수행하여 소성유동 형태, 유효변형률, 단조하중을 검토하고, 모델재료인 납을 이용한 실험을 통하여 이를 검증하였다. 이 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 각각의 단조법에 대해 중공관 두께와 플랜지의 두께비(γ)에 따라 성형할 수 있는 형상 한계비를 조사하였으며, 제1 단조법에서는 $\gamma \leq 0.8$, 제2 단조법은 $\gamma \leq 0.6$, 제3 단조법은 $\gamma \leq 0.9$ 까지 폴딩 결함 없이 성형이 가능하였다. 그러나 제4 단조법으로는 γ 의 값과 상관없이 모든 형상을 단조할 수 있다는 것을 알 수 있었다.
- (2) 유효변형률과 소성류의 형태를 비교하였을 때 중공 소재를 사용할 경우에는 제3 단조법이, 중실 소

재를 사용할 경우에는 제4 단조법이 중공 T형상을 단조하는데 가장 적절한 성형법이라는 결론을 얻을 수 있었다.

- (3) 각 단조법에 대한 단조하중은 제4 단조법과 같이 후방압출과 압조에 의한 성형이 동시에 이루어지도록 하는 것이 가장 낮은 단조하중으로 제품을 성형할 수 있으며, 중공 T형상의 단조에 있어서 4 가지 단조방법 중 제4 단조법을 채택하는 것이 가장 적합한 단조방법이라는 결론을 얻을 수 있었다.

감사의글

이 논문은 2003년도 경남대학교 학술연구조성비에 의하여 연구된 것임을 밝히며, 연구비 지원에 감사 드립니다.

참고문헌

1. Kobayashi, S., Oh, S. I., and Altan, T., "Metal Forming and the Finite-Element Method," New York, Oxford University Press, 1989.
2. Zienkiewicz, O. C., "The Finite Element Method," 4th Ed. McGraw-Hill, New York, 1977.
3. Avizur, B., "Handbook of Metal Forming Processes," Wiley, New York, 1983.
4. Balendra, R., and Qin, Y., "Material-flow Considerations for the Design of Injection Forging," *int. J. Manufacturing Science and Engineering*, 1997, Vol. 119, pp.350-357, 1997.
5. Balendra, R., and Qin, Y., "FE Simulation of the Development of Flaws During Injection Forging," *Int. J. Tools Manufact.* Vol. 34, pp.1091-1101, 1994
6. Balendra, R., "Injection-Chamber to Die-Cavity Interface for Injection Forming," *Int. J. Tools Manufact.* Vol. 33, No.6, pp. 753-760, 1993.
7. Colla, D., Patersen, S. B., Balendra, R., and Martins, P. A. F., "Injection Forging of Industrial Components from Thick-Walled Tubes," *int. J. Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 119, pp. 537-541, 1997.
8. Balendra, R., Patersen, S. B., and Colla, D., "Prefforming Considerations for the Injection Forging of Tubes," 11th, *Int. Conf. Computer-Aided Prod. Eng.*, U. K., 1995.
9. Arentoft, M., Patersen, S. B., Rodrigues, J.M.C., Martins, P. A. F., Balendra, R., and Wanheim, T., "Review of Research into the Injection Forging of Tubular Materials," *J. Mat. Proc. Tech.*, Vol. 52, pp.460.
10. Bae, S. W., Kim, Y. J., "Rigid-Plastic Finite Element Analysis for Extrusion-Forging Process Design of a Hollow Flange-Shaped Part," *Proceedings of ISIM2000*, Oct. 4-7, pp.449-452
11. Son, K. H., Kim Y. H., Suh Y. S., "A Study on the Defect of T type Forging Products," *Proceedings of KSPE*, pp.952-956, 1997.
12. Kiuchi, M., Chung, H.K. & Yanagimoto, J. "Analysis of Upsetting of Hollow Billets with Square and Gear-Type Dies," *J. JSTP*, Vol.31, pp.907-912, 1990.
13. Cho, H. Y., Choi, J. U., Min, K. S., "Study on the Forging of Splines with Hollow and Solid Billets," *J. KSPE*, Vol. 13, No.1, pp.108-115, 1996.
14. Park, C., Choi, H. J., Hwang, B. B., "A Process Sequence Design of the Multi-Step Cold Extrusion using Thick-Wall Pipes," *J. KSTP*, Vol. 5, No. 3, pp.219-231, 1996.
15. Lee, C. H., and Altan, T., "Influence of Flow Stress and Friction Upon Metal Flow in Upset Forging of Rings and Cylinders," *ASME J. Eng. Ind.*, pp. 775-782, 1972.
16. Rao, K. P., and Sivaram, K., "A Review of Ring-Compression Testing and Applicability of the Calibration Curves," *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 37, pp.295-318, 1993.
17. Lin, Y. T., and Wang, J. P., "An Investigation into the constant Friction Factor with the Upper-Bound Flow Function Elemental Technique," *J. Mater. Porcess. Technol.*, Vol.36, pp. 57-68, 1992.