

평다이를 이용한 대형로타의 자유단조에 관한 연구

이경호* · 조종래** · 배원병***

(1997년 1월 28일 접수)

A Study on the Hot Free Forging of Heavy Rotors Using Conventional Dies

Kyoung-Ho Lee, Jong-Rae Cho and Won-Byong Bae

Abstract

In this research, to obtain the optimal die width of CV die(conventional die), which replaces FM die in free forging of large scale rotor using the flat die, the model material experiments and theoretical analysis using three dimensional FEM are performed. The FM die, which was designed to remove Mannesmann's effect at the central part of the ingot, has very bad workability in real field, therefore on the empirical base they use the CV die of wide width in actual working field. In this study, the excellency of CV die is proved quantitatively, and the optimal die width of CV die is determined through the model material experiments and theoretical analysis using FEM in the point of effective strain, stresses, and load.

Key Words : Optimal Die Width, Conventional Die, Free From Mannesmann's Effect Die, Effective Strain, Mean Stress, Rotor Forging

1. 서론

지난 수십년 동안 화력 및 원자력 발전소의 터빈 및 발전기의 로타의 설계자들은 발전소의 효율과 신뢰성을 높이기 위하여 로타를 대형화하거나 일체형으로 만들고 있는 추세이다. 따라서, 주조공장에서는 대형강괴(steel ingot)의 제조가 요구되고 있으며, 단조공장에서는 고품질의 내부조직을 가지는 단조기술이 필요하게 되었다.

대형강괴의 단조공정에서 자유단조의 역할은 강괴의 주조조직을 없애고 주조시 발생하는 기공을 압착 제거하며 편석을 소멸시키면서 최종제품의 형상에 가깝게 만드는 것이다. 따라서 단조시의 잉곳 축심부의 변형률과 압축

력이 양호한 내부조직을 얻기 위한 중요한 인자로 작용하게 된다. 이러한 연구를 위해서는 실 제품의 실험 방법이 가장 정확하지만 단조설비의 제한과 인력의 낭비가 많아 거의 하지 못하고 있는 것이 실정이다. 따라서, 플라스티신(plasticine), 왁스(wax), 납 등의 모델링 재료를 이용하여 실험하거나, 최근에 널리 이용되고 있는 이론해석 방법인 유한요소법이 이용되고 있다.

먼저, 모델실험은 실제 공작물과 기하학적으로 유사한 모델을 사용하는 실험적 연구로서 1950년대 Green⁽¹⁾에 의해서 시작되었는데 평다리로 사각 각재를 만들 때 다이 폭이 강괴의 중심부 변형에 미치는 효과를 해석하였다. Erman^(2,3) 등은 블로킹(blocking)공정에서 다이형상, 다

* 부산대학교 대학원 기계설계공학과

** 한국해양대학교 기계냉동자동차공학부

*** 부산대학교 기계설계공학과, 정밀정형 및 금형가공 연구센터

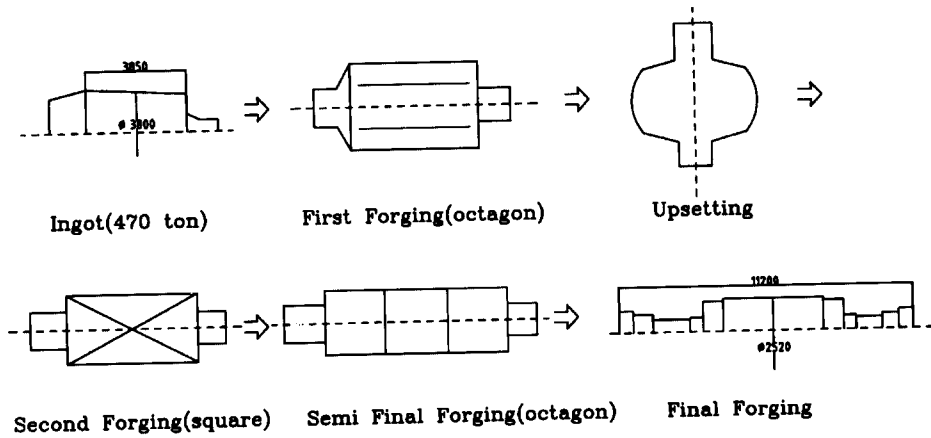


Fig. 1 Forging process of monoblock rotor

이폭, 강괴형상, 다이겹침(overlapping), 온도구배, 압하깊이 등의 공정 변수의 영향을 연구하였고, 업셋팅 공정에서도 여러 공정변수의 영향을 광범위하게 연구하였다. 특히, Nakajima^(4,5) 등은 플라스틱인 잉곳에 압전센서를 삽입하여 내부응력에 영향을 미치는 단조방법과 공정변수의 관계를 연구하였다.

한편, 자유단조의 단조성을 해석하기 위한 이론적 연구도 활발히 이루어져 왔는데 Lee와 Kobayashi⁽⁶⁾ 등은 업셋팅과 측면압하의 재료유동을 해석하여 단조하중, 소성변형영역, 응력 및 변형률 분포를 이론해석을 통하여 구할 수 있음을 보였다. Shah⁽⁷⁾ 등은 강괴의 중심영역에서 기공압착(void consolidation)을 모델링하기 위해 접촉면의 간섭조건을 사용하여 기공의 닫혀진 경계조건을 나타내었다. 최근에 국내에서도 자유단조에 관련된 연구가 활발하게 진행되고 있는데 Yoon과 Yang⁽⁸⁾ 은 초기속도장의 생성과 금형에서의 접촉문제를 처리하는 방법을 개발하였고, Cho와 Yang⁽⁹⁾ 등은 열점소성 유한요소프로그램을 개발하여 대형 원형 강괴의 코깅작업시 공정변수인 다이형상, 다이폭비, 온도구배 및 압하량 등의 영향을 분석하고 적정 단조조건을 제시하였다.

이와 같이 모델실험, 이론해석의 결과로 실제현장에서 많은 적용이 이루어져 왔는데 대용량 프레스를 사용하고 금형폭을 소재높이의 0.8이상의 큰 평금형을 사용하는 광폭평금형법, 잉곳내부의 만네스만 효과(Mannesmann's effect)를 배제하기 위해서 상 다이보다 하 다이폭이 더 큰 비대칭 평금형으로 압하하는 FM(Free from Mannesmann's effect)단조법, 원형축재의 단조에 사용이 제한되는 V자형 다이에 의한 단조법 등이 쓰이고 있다. 그

러나, 다이폭이 커질수록 프레스의 고 용량화를 요구하고 FM단조법은 단조시 하부 금형으로의 빠른 열전달로 작업성이 떨어지는 약점을 지니고 있다. 따라서, 실제 생산 작업에서는 상하 다이폭이 같은 평금형을 사용하는 CV(Conventional die)단조법을 쓰고 있는 추세인데, 과도한 단조하중을 요구하지 않으며 FM법의 효과를 동시에 갖는 CV단조의 적정 다이폭에 관련된 연구가 미약한 실정이다. 또한, 국내에서 로타단조는 V-다이를 사용하여 단면을 원형으로 유지하면서 코깅작업을 하고 있는데 일체형 로타(monoblock)는 하중 때문에 V-다이작업이 불가능하다. 따라서, 평다이를 사용하는 사각단조에 대한 연구가 필요하다. Fig. 1은 일체형로타의 단조공정을 개략적으로 나타낸 것으로 1차와 2차 단조 작업에서 평다이를 사용하여 4각과 8각 단조를 하고 있다.

본 연구에서는 평다이를 사용하는 CV와 FM단조공정에 대해서 다이폭, 압하깊이의 영향을 파악하기 위하여 유한요소 해석을 수행하고, 이 해석 결과를 모델재료인 프라스티신 실험으로 검증한 후, 이 해석 프로그램을 활용하여 실제 재료인 강괴 중앙부의 유효변형률과 평균응력의 관점에서 FM다이의 효과를 가지는 CV의 적정 다이폭을 구하고자 한다.

2. 이론적 배경

2.1 강소성 유한요소해석

본 연구에서는 3차원 강소성 유한요소법을 사용하였다. 벌칙상수(penalty constant)를 도입하여 비압축성조건을 만족시키면 강소성재료에 대한 변분은 다음과 같이 주

어진다.

$$\int_V \bar{\sigma} \delta \dot{\epsilon} dV + K \int_V \dot{\epsilon}_v \delta \dot{\epsilon}_v dV - \int_{S_f} f_i \delta v_i dS = 0 \quad (1)$$

여기서

$$\bar{\sigma} = \sqrt{3/2}(\sigma'_{ij}\sigma'_{ij})^{1/2}, \quad \dot{\epsilon} = \sqrt{2/3}(\dot{\epsilon}_{ij} \dot{\epsilon}_{ij})^{1/2}, \quad \dot{\epsilon}_v = \dot{\epsilon}_{ii}$$

평다이어에서의 금형과 소재의 마찰조건을 처리하는 데 있어서 중립점으로 인한 특이성의 발생을 없애고 수치해의 안정성을 도모하기 위해서 다음 식을 사용한다.

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

여기서, m은 마찰상수, k는 전단유동응력, u_0 는 $|V_s|$ 에 비해 아주 작은 양수, V_s 는 다이에 대한 재료의 상대 속도 벡터, t는 V_s 방향의 단위벡터이다.

2.2 단조비와 겹보기 유효변형률

소재가 단축 변형을 받고 있을 때, 변형률은 다음과 같이 대수변형률(logarithmic strain)로 표시된다.

$$\epsilon = \int_0^\epsilon d\epsilon = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l} = \ln\left(\frac{l}{l_0}\right) \quad (3)$$

일반적인 경우 유효변형률은 다음과 같다.

$$\bar{\epsilon} = \frac{\sqrt{2}}{3} [(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2 + (\epsilon_3 - \epsilon_1)^2]^{1/2} \quad (4)$$

자유단조 작업을 하고 있는 현장에서 많이 사용되고 있는 단조비의 의미는 초기 단면적(A_0)에 대한 단조 후 단면적(A)의 비(A_0/A)를 의미한다. 따라서, 본 연구에서는 자유단조의 단조성을 평가하는 척도로서 겹보기 유효변형률의 개념을 도입하여 단조비와의 연관성을 나타낸다.⁽¹⁰⁾ 단면을 줄여 가는 단조과정에서 관계없이 단조전과 단조후의 단면적 변화만 고려할 겹보기 유효변형률은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\bar{\epsilon} = \frac{\sqrt{2}}{3} \epsilon_1 = \frac{\sqrt{2}}{3} \ln\left(\frac{A_0}{A}\right) \quad (5)$$

2.3 모델과 실제재료와의 상사식

강의 열간단조공정의 경우 변형률에 따른 응력의 변화 보다는 변형률 속도에 따른 응력의 변화가 지배적이며 모

델링 실험시 사용되는 플라스틱인은 변형률이 큰 소성영역의 경우 응력에 대한 변형률의 영향은 작아지므로 강 및 플라스틱인에 대한 구성방정식은 (6), (7)식으로 가정할 수 있다.

$$\sigma_s = A \dot{\epsilon}_s^m \quad (6)$$

$$\sigma_p = B \dot{\epsilon}_p^n \quad (7)$$

고온에서의 강과 상온에서의 플라스틱인이 상사성을 만족할 때, 그 관계식은 Table 1에서와 같이 나타낼 수 있다.

Table 1 Correlation of parameters between steel and plasticine

	Parameter	Steel	Correlation	Plasticine
First value	length	l_s	$l_s = l^* l_p$	l_p
	time	t_s	$t_s = t^* t_p$	t_p
	force	F_s	$F_s = F^* F_p$	F_p
Second value	stress	σ_s	$\sigma_s = \frac{F^*}{l^{*2}} \sigma_p$	σ_p
	strain rate	$\dot{\epsilon}_s$	$\dot{\epsilon}_s = \frac{1}{t^*} \dot{\epsilon}_p$	$\dot{\epsilon}_p$

이 관계식을 (7)식에 대입하면 σ_s 는 다음과 같이 나타내어진다.

$$\sigma_s = B \frac{F^*}{l^{*2}} t^{*n} \dot{\epsilon}_s^n \quad (8)$$

(8)식은 (6)식과 같으므로 정리하여 하중척도 (F^*)에 대해서 나타낼 수 있다.

$$F^* = \left(\frac{A}{B}\right) l^{*2} \frac{(\dot{\epsilon}_s)^m}{(\dot{\epsilon}_s)^n} \quad (9)$$

3. 모델재료 실험 및 해석

모델시험재료로 이용한 플라스틱인 재료의 응력과 변형률 속도와의 관계를 결정하기 위해 환주압축시험을 통하여 다음과 같은 식을 얻었다.

$$\bar{\sigma} = 0.28013 \dot{\epsilon}^{0.01811} \text{ (MPa)} \quad (10)$$

소재내의 유동형태를 관찰하기 위해 시편은 흑색과 백

색의 두가지 종류의 플라스틱인을 각각 같은 두께의 판재형상으로 만들어 교대로 적층하여 사용하였다. 실제 작업 현장에서 쓰이는 잉곳 및 금형의 1/40의 축척으로 모델 시편(88^W×88^H×110^L mm) 및 금형(다이폭 35, 50mm)을 제작하였는데, 시편내부의 단조압력을 측정하기 위해 5 kgf/cm² 용량의 압전센서(KYOWA PS-5KA, 두께 5 mm, 지름 6 mm)를 시편높이의 2/4 h와 3/4 h에 놓고 적층하였다.

CV35, CV50은 각각 상하 다이폭이 동일한 35, 50mm이고, FM35와 FM50은 상부다이는 CV다이와 같고 하부다이는 가로 125 mm, 세로 125 mm이다. 실험은 25톤 용량인 만능시험기에서 압하속도 0.5 mm/sec로 하였고 실험하는 동안 시편을 일정온도로 유지하기 위하여 시편과 다이를 오븐(mechanical circulation oven)속에서 24시간 동안 보관하여 사용하였으며, 항온항습기를 사용하여 실내온도를 상온으로 일정하게 유지하였다. 그리고, 압하율에 따른 단조하중은 만능시험기와 연결된 PC에서 읽을 수 있도록 하였다. 시편 내부의 압력의 변화를 측정하기 위해서 삽입된 스트레인 게이지 타입의 압력 센서에서 나오는 신호는 동적 변형률 증폭기와 AD 변환기를 통해서 PC상에서 읽을 수 있도록 하였다(Fig. 2).

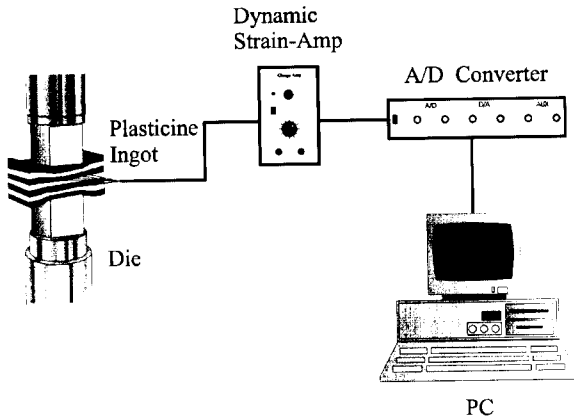


Fig. 2 Experimental setup for measuring the pressure in a plasticine billet

실제 자유단조공정에서는 다이는 고정시키고 잉곳을 길이방향으로 움직이면서 단조방향의 단면적을 넓혀가는 작업을 하고 있으나, 본 연구에서는 중앙부의 한 부분만을 일정량(높이 감소율 15%)으로 압축한 후 중앙부의 압력 및 하중을 비교하였다. 편의상 같은 폭의 평다이가 상, 하부 다리로 사용되어질 때를 CV단조로, 상다이는 평다이

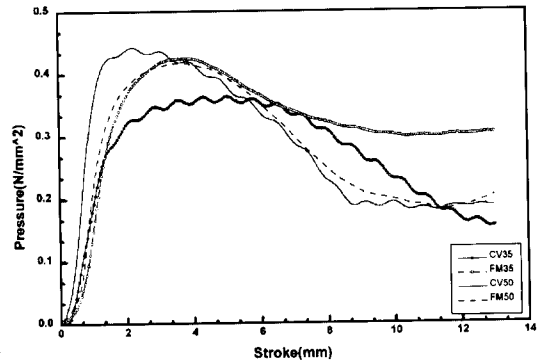


Fig. 3 Comparison of pressures between CV and FM dies at 2/4 height of plasticine billets

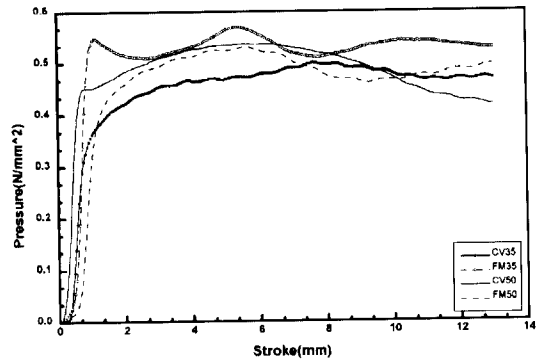


Fig. 4 Comparison of pressures between CV and FM dies at 3/4 height of plasticine billets

로 하다이는 광폭다이를 사용할 때를 FM단조로 칭하였다.

Fig. 3은 15% 압하 때까지의 시편높이 2/4 h에서의 압력값을 압전센서를 통하여 읽은 것이다. 대체로 압하율 2~5%내외에서 최대압력값을 보이고 있으며 CV50, FM35, FM50, CV35의 크기순서를 나타내고 있다.

통상의 단조의 경우에 압하가 진행됨에 따라 압하방향의 응력은 비례하여 증가하나 최대압력을 지나서는 모두 감소하는 경향을 보이고 있다. 이것은 본 실험에서 설정한 다이의 속도가 비교적 낮고 변형률 속도가 큰 중심부에서는 플라스틱인이 연화(softening)되기 때문이다. 이것은 Nakajima의 연구^(4,5)의 결과와 같은 경향을 나타내고 있다.

그런데, CV50의 압력값이 가장 큰 수치를 보이고 있어 폭이 넓은 상하 평다이를 쓰는 것이 중앙부의 단조에 가장 효과적임을 알 수 있다.

Fig. 4는 시편높이 3/4 h에서의 압력값으로서 압하율 약 6%에서 최대 값을 보이며 FM35, CV50, FM50, CV35의 크기순서를 보였다. 전반적으로 압력값이 최고점에서 일정하게 유지되는 것은 압전센서가 소성변형이 없는 비유동영역(dead metal zone)의 근처에 위치했기 때문이다.

Fig. 5는 15%압하 때까지 각 경우의 하중값을 비교하고 CV35에 대해서 이론값과 비교하였다. 전반적으로 FM단조가 CV단조보다 하중이 크게 작용함을 알 수 있는데 제한된 프레스의 용량의 측면에서 하중을 줄이기 위해서는 FM다이보다는 CV다이를 채택하는 것이 유리함을 알 수 있다. 또한, CV35경우에 이론해석을 통한 하중값을 실험값에 비교해보면 그것들의 경향과 크기가 대체로 잘 일치하고 있다.

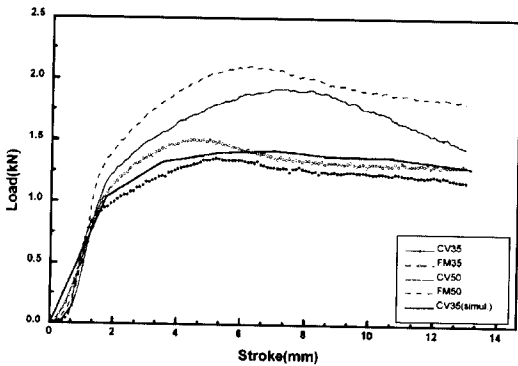


Fig. 5 Comparison of loads between CV and FM dies of plasticine

4. 로타의 사각단조해석

4.1 해석모델

해석의 대상은 3500^{mm} × 3500^{mm} × 4430^{mm}의 크기의 사각형 단면 강괴로 하였다. 계산에 사용된 다이는 모두 6가지로, CV다이는 상하 대칭인 3가지(다이폭 W=1400, 1700, 2000 mm)와 FM다이는 상부다이는 CV와 같고 하부다이는 5000 × 5000 mm인 3가지이다. 또한, 각 다이는 단조진행 때 소재의 접힘을 방지하기 위해 다이의 양끝에 반경 100 mm의 둥근 모서리를 두었다.

본 연구의 해석에 사용된 잉곳의 재질은, 전형적인 로타축의 재료로 쓰이는 3.5% NiCrMoV강으로 하였다. 실제 단조 작업 중에는 소재에서 외부로의 열전달이 존재하지

만 작업시간이 방열시간보다 짧아 1200℃등으로 가정하였다. 소재의 변형저항식은 Ono와 Minami⁽¹¹⁾에 의해 시험된 열간환주 압축시험에 의해 구해진 (11)식을 사용하였다.

$$\bar{\sigma} = 61.919 \bar{\epsilon}^{0.2437} \text{ (MPa)} \quad (11)$$

자유단조공정은 일정량의 압하깊이로 여러 패스에 걸쳐서 작업을 수행하기 때문에 연속적인 시물레이션을 해야 한다. 그러나, 이것은 계산시간이 많이 소요될 뿐만 아니라 전체를 모델링해야 하기 때문에 어려움이 많다. 따라서, 본 연구에서도 앞 절의 모델해석때와 같이 한 방향으로 압하한 후 해석결과를 서로 비교하고자 한다. 또한 해석 결과는 압하깊이(ΔH/H)가 각각 8, 12, 16, 20%일 때를 기준으로 정리하였다.

4.2 해석결과 및 고찰

4.2.1 다이폭비에 따른 강괴 중심부의 유효변형률 비교

Fig. 6은 2000mm의 다이폭을 사용하여 20% 압하한 변형형상을 비교한 것이다. 계산에서 사용한 좌표축은 Fig. 6에 나타나 있듯이 x축과 y축의 원점은 각각의 대칭면이며 z축의 원점은 변형전 소재의 바닥면이다.

본 연구에서는 2.2절에서와 같이 좌우 대칭인 xy평면(x=0)의 초기의 면적과 변형 후의 면적으로 계산된 결과기 유효변형률을 단조성을 평가하는 척도로 삼았다. Fig. 7(a)는 CV다이에서 잉곳의 중앙부지점에서 다이폭비에 따른 유효변형률을 비교하고 있다. 다이폭비가 증가할수록 유효변형률의 크기는 커져가고, 압하율이 커질수록 유효변형률은 비례하여 증가한다. 또한, 각 다이폭과 각 압하율에 해당하는 결과기 유효변형률보다 실제의 유효변형

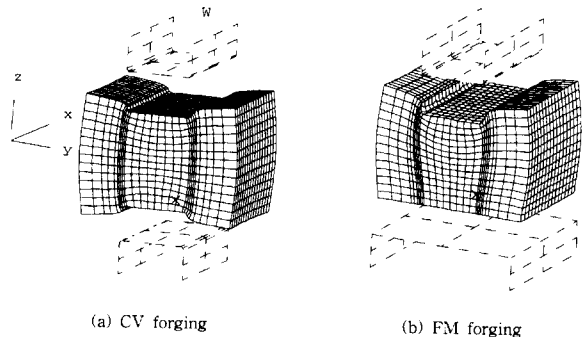
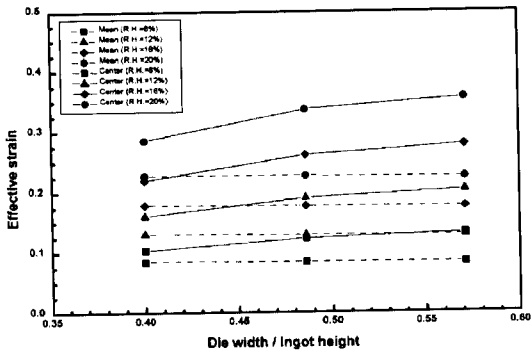
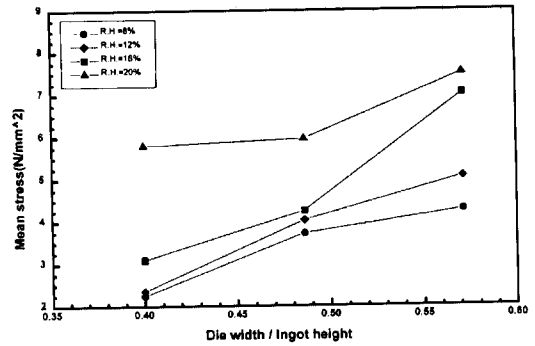


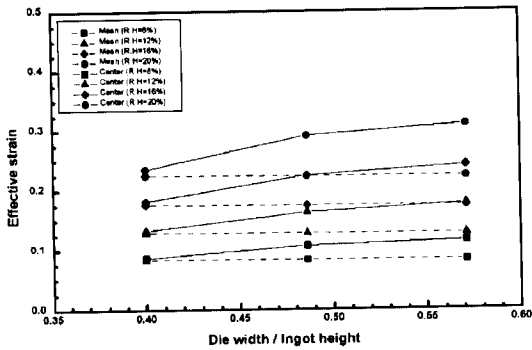
Fig. 6 Deformed shapes of CV and FM forging processes (die width 2000 mm, reduction of height 20%)



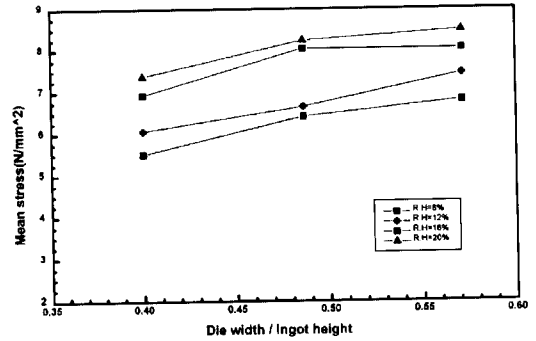
(a) CV-Dies



(a) CV-Dies



(b) FM-Dies



(b) FM-Dies

Fig. 7 Comparison of effective strains for die width at the central position of steel ingots

Fig. 8 Comparison of effective strains for die width at the central position of steel ingots

를 깊어 커서 양호한 단조가 이루어짐을 볼 수 있다. 동일한 압하 깊이에서 길보기 변형률이 비슷한 것은 다이폭에 상관 없이 줄어든 면적이 비슷하다는 것을 알 수 있다.

Fig. 7(b)는 FM단조일 때의 다이폭비에 따른 유효변형률 값을 비교하고 있다. 전체적으로 CV다이와 비슷한 경향을 보이고 있으나 다이폭비가 0.4, 즉 다이폭이 1400 mm일 때는 거의 길보기 유효변형률 값과 일치하여 비교적 CV보다는 단조성이 떨어진다. 그러나, 대체로 FM단조에서도 CV단조처럼 양호한 단조가 이루어진다고 볼 수 있다.

4.2.2 다이폭비에 따른 강괴 중심부의 평균응력 비교

열간단조에서 유효변형률과 평균응력은 주조공정에서 발생하는 내부 기공(void)의 닫힘과 압착에 큰 영향이 있는 것으로 알려져 있으며, 그 값이 클수록 효과적이다.^{9), 10)}

Fig. 8에서는 CV, FM단조에서 다이폭비에 따른 중앙부에 미치는 평균응력값을 비교하고 있다. CV와 FM단조 모두 다이폭비가 증가할수록 압하량이 커질수록 평균응력이 증가하는 모습을 볼 수 있다.

4.2.3 다이형상 및 폭에 따른 유효변형률분포 비교

Fig. 9는 잉곳의 중간 높이에서 다이폭 방향에 따른 유효변형률 값을 비교하였다. 유효변형률은 중앙부와 자유면에서 극대치를 보이며, 전체적으로는 CV2000, CV1700, FM2000, FM1700, CV1400, FM1400 크기 순서로 유효변형률을 보이고 있다. 대체적으로 잉곳 중앙부의 변형에 관계한 유효변형률값은 CV다이가 FM다이보다 우세함을 알 수 있다. 따라서, 다이폭이 클수록, 다이형상이 FM보다는 CV면 중앙부에서의 양호한 단조성을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

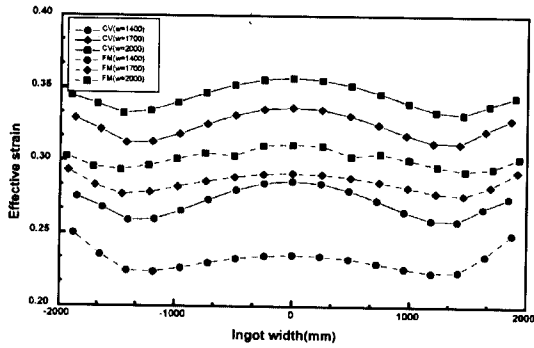


Fig. 9 Comparison of effective strains for die width in the x direction (20% reduction of height)

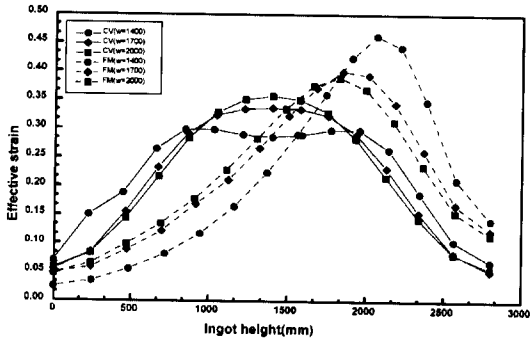


Fig. 10 Comparison of effective strains for die width in the z direction (20% reduction of height)

Fig. 10은 잉곳의 중앙지점에서의 잉곳의 높이 방향에 따른 유효변형률 값을 비교하고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 CV는 다이폭이 커질수록 FM은 다이폭이 작아질수록 높은 변형률 값을 보이고 있으나, CV는 잉곳의 중앙높이에서 FM은 잉곳의 3/4 h지점에서 최대값을 보이고 있다.

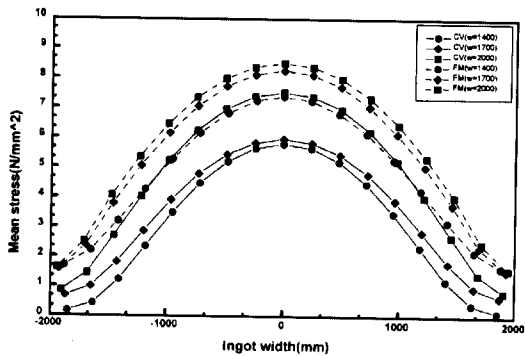


Fig. 11 Comparison of effective strains for die width in the x direction (20% reduction of height)

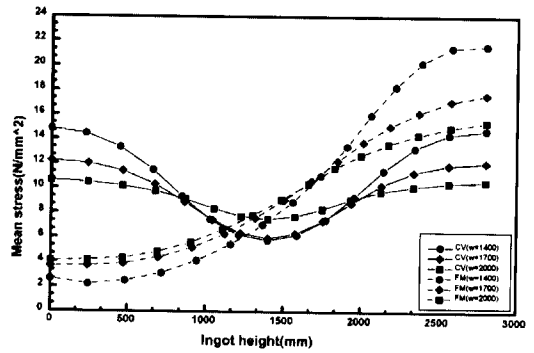


Fig. 12 Comparison of effective strains for die width in the z direction (20% reduction of height)

다. FM다이는 CV다이와는 다르게 상하 다이가 비대칭이므로 비대칭 유효변형률 분포를 보이고 있다.

4.2.4 다이형상 및 폭에 따른 평균응력분포 비교

Fig. 11은 최종 압하율(20%)에서의 다이폭 방향에 따른 평균응력 값을 비교한 것이다. 평균응력은 잉곳 폭의 중앙부에서 최대치를 보이고 FM2000, FM1700, CV2000, FM1400, CV1700, CV1400 크기순서로 작아진다. 대체적으로는 잉곳 중앙부에 미치는 평균응력값은 FM다이가 CV다이보다 큰 것을 알 수 있다.

Fig. 12는 평균응력값을 압하방향에 따라서 비교한 것이다. CV다이는 상하다이의 접촉면에서 최대값을 보이고 FM다이는 상부다이에서 최대, 반면 하부다이에서는 최소값을 보이고 있다.

4.2.5 단조하중 비교 및 모델재료와의 하중 상사

Fig. 13은 CV1400다이가 압하량 20%일 때의 하중을

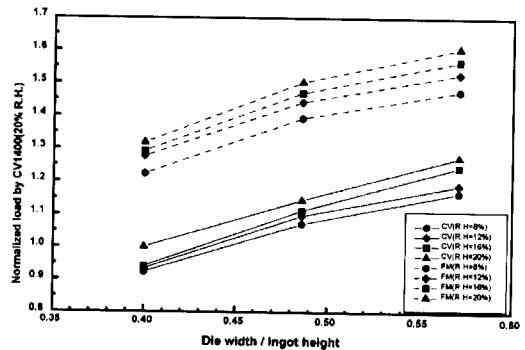


Fig. 13 Comparison of steel ingots for rate between CV and FM dies

기준으로 CV다이 및 FM다이의 하중값을 다이폭비와 압하율에 따라 비교한 것이다. 하중의 증가는 압하율보다는 다이폭비 증가에 더 상관관계를 가지고 있는 것으로 나타났다. 즉, 하중은 CV 및 FM 단조의 경우에 모두 다이폭이 증가하는 비율의 0.95배로 증가한다.

단조 하중은 CV단조보다는 FM단조가 약 1.3배 정도로 크므로 FM단조는 대용량의 프레스 장치가 요구되며 현장의 작업성 또한 떨어지는 문제점을 갖고 있어 제한된 단조설비아래에서는 FM단조가 경제적이지 못함이 사료된다.

Table 2 Determination of load-scale factor

	Plasticine	Steel	Load-scale factor (F*)
Length (mm)	110	4400	
Velocity (mm/s)	0.5	10	
Plastic coefficient	0.28013	61.919	
Strain-hardening exponent	0.01811	0.2437	
Temperature (°C)	20	1200	

Table 3 Comparison of loads between Model Material Test & FE< (at 15% reduction of height)

	Load(ton)		Error rate (%)
	Derived from MMT	Predicted by FEM	
CV 1400	12725.6	12005.4	5.7
CV 2000	15039.8	15854.8	-5.43
FM 1400	13672.9	16453.7	20.3
FM 2000	18931.4	19855.1	-4.9

Table 2에서는 2.3절에서 설명된 실제강괴에 대한 모델재료의 상사값을 얻기 위하여 실험 및 이론해석조건을 비교하고 있고 자유단조공정에서 중요변수중의 하나인 하중에 대한 척도값을 나타내었다. 이 하중척도값을 이용하여 구한 상사값과 이론하중값을 Table 3에서 비교하고 있는데 오차율이 약 5~20%로 나타났다. FM1400의 경우 20%의 오차는 모델재료의 실험에서 발생한 오차로 판단된다. 그런데, 여기서 상사법칙의 오차성을 감안하면 상사값이 비교적 높은 정도(accuracy)로 해석값에 접근해 있음을 볼 수 있다. 따라서, 방대한 해석시간 및 한정된 프레스 용량의 측면을 고려할 때, 모델재료를 이용한 하중예

측 방법이 상당히 효과적임을 입증한다.

4.2.6 압하율과 다이폭비에 따른 응력 비교

단조중에 x, y방향으로 큰 인장력이 발생하면 소재에 기공이 확장되거나 결함이 발생할 수 있다. 따라서, 양질의 단조품을 얻기 위해서는 x, y방향으로 압축응력이 발생하도록 하는 것이 중요하다. 이러한 관점에서 Fig. 14 ~16은 압하율에 따른 잉곳의 x, y, z 방향의 응력을 다이폭과 단조방법에 따라 비교한 것이다.

먼저, Fig. 14는 x방향을 서로 비교하였는데, FM단조일 때는 전 다이폭에 걸쳐 양호한 값의 압축응력을 보이고 있으며, 다이폭이 클수록 높은 수치를 나타내고 있다. 그러나, CV단조일 때는 대체적으로 FM단조보다 작은 압축응력을 보이고 있는데, CV1400을 제외하고는 모든 경우에 압축응력이 작용하고 있음을 알 수 있다.

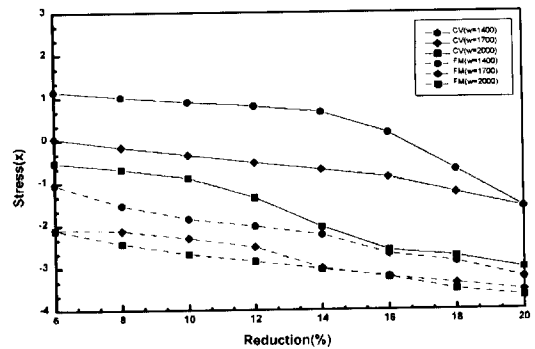


Fig. 14 Comparison of σ_x of steel ingots for die width between CV and FM dies

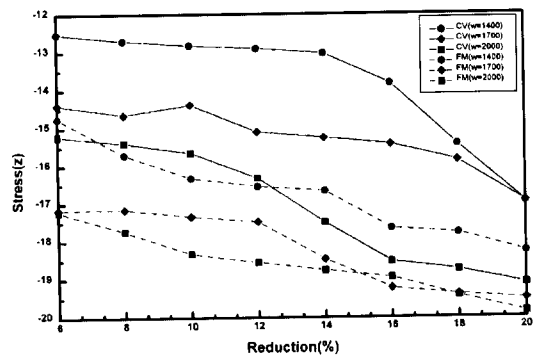


Fig. 15 Comparison of σ_z of steel ingots for die width between CV and FM dies

Fig. 15는 Fig. 14와 동일한 방법으로 잉곳의 y방향에 작용한 압축응력을 비교한 그림이다. CV1400일때는 압하율이 16%일때까지 y방향으로 비교적 큰 인장을 받고 있다. 그런데, CV2000일 때는 인장력이 낮고 압하율 16%이상에는 압축력이 작용하여 만네스만 효과가 없어진다. 그리고, Fig. 14와 Fig. 15에서 나타났듯이 만네스만 효과가 나타나지 않고, 양호한 단조성을 얻기 위해서는 CV다이의 경우에 압하율을 증가시키는 방법을 쓰거나 다이폭비를 증가시키는 것이 필요함을 알 수 있다. 따라서, 일정한 압하율 아래에서는 CV의 다이폭비를 적정하게 증가시킴으로써 FM단조를 대체하는 가능성을 생각해 볼 수가 있다.

위의 4.2.5절의 하중의 관점에서 CV와 FM단조를 비교한 바와 같이 CV보다 FM단조가 훨씬 단조하중을 많이 받기 때문에 적정 다이폭을 가지는 CV다이가 FM다이를 대체할 수 있는 가능성을 보게 한다. 즉 Fig. 13처럼 CV2000이 압하율 20%일 때의 단조하중이 FM1400과 거의 비슷한 값을 보여주고 있어, 단조하중과 현장 작업성 관점에서 CV2000의 단조의 경우가 효과적임을 알 수 있다.

Fig. 16은 다이의 압하방향과 일치하는 압축응력인 σ_z 를 다이형상과 다이폭에 대하여 비교한 그림이다. 모든 다이에 걸쳐서 압하율에 따라 압축응력을 받고 있으며 전반적으로는 CV단조보다 FM단조가 큰 압축응력을 보이고 있다.

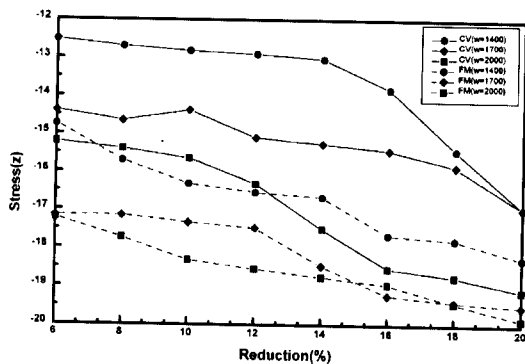


Fig. 16 Comparison of σ_z of steel ingots for die width between CV and FM dies

4.3 FM단조를 대체하는 CV단조의 적정 다이폭
실제 자유단조 작업현장에서는 앞서 밝힌 바와 같이

CV다이의 취약점인 만네스만 효과를 없애기 위한 FM다이를 사용하는데는 많은 문제점이 있다. 그것은 가공하중이 높고 하부다이스로 열이 많이 방출되므로 현장의 작업성이 떨어지며 잉곳의 변형이 균일하지 않기 때문이다. 따라서, 앞의 해석결과로부터 FM다이의 효과를 살리며 현장 작업성이 좋은 CV다이의 적정 다이폭을 유효변형률과 응력의 관점에서 찾아보고자 한다.

앞절의 결과와 같이 CV단조의 해석대상으로 선택한 다이폭의 영역에서의 유효변형률은 모두 겉보기 유효변형률보다 커서 양호한 결과를 보였다. Fig. 7에서와 같이 중심부의 유효변형률이 겉보기 유효변형률보다 커야 하기 때문에 최소한의 다이폭비는 CV의 경우 0.35, FM의 경우 0.4 정도로 나타나 있다. 그러나 다이폭비에 따른 유효변형률의 증가 경향이 다이폭비가 일정값에 도달하게 되면 거의 일정하게 된다는 것이다. Cho와 Yang(9)는 다이폭이 약 0.8 이상일 때 유효변형률의 증가경향이 둔화됨을 보고하고 있는데 그것을 고려한 유효변형률의 관점에서의 적정 다이폭비는 0.4에서 0.8 정도의 값이면 높은 단조성을 갖는 소재를 얻을 수 있을 것으로 사료로 판단된다.

한편, 응력의 관점에서는 4.2.6절에서 언급한 바와 같이 다이폭비 0.4, 0.49일 때는 최종압하에서도 y방향의 인장응력이 계속 작용하나 0.57일 때는 압하율 16% 지점에서 인장응력이 압축응력으로 바뀌고 있음을 볼 수 있다. 따라서, 잉곳의 중앙부에 압축응력을 작용시키기 위해서는 적절한 다이폭비가 0.6 정도에서 압하율 16% 이상 단조해야함을 알 수 있다.

결론적으로, 유효변형률과 응력의 관점에서 FM다이의 효과를 충분히 가지며 양호한 단조성을 얻는 CV다이의 다이폭은 다이폭비가 0.6~0.8 사이이며 압하율은 16% 이상 되어야 한다.

5. 결론

원자력 및 화력발전소의 발전기에 쓰이는 로타를 제작하는 대형자유단조공정에서 다이형상에 따른 단조성을 평가하기 위해, 플라스틱인 모델실험을 행하였고 3차원 유한요소 프로그램을 이용하여 실제크기의 강괴의 이론해석을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 잉곳중앙부에 미치는 유효변형률과 평균응력의 크기는 CV단조와 FM단조에 있어 다이폭비, 압하율이 커질수록 증가하는 경향을 보였다.

(2) FM단조가 CV단조에 비해 1.3배 정도로 하중이 크게 작용하며 제한된 설비와 작업성을 고려할 때 광폭의 CV단조가 효과적인 공정으로 판단된다.

(3) 하중은 압하깊이에 따라선 큰 차이가 없지만 다이폭이 증가하는 비율에 따라서는 크게 증가하는 경향을 보이는데 CV 및 FM단조에서 모두 다이폭의 증가비율에 따라 하중은 비례하여 증가한다.

(4) 모델재료의 상사를 통해 얻은 하중이 실제단조 공정의 그것을 잘 예측하고 있다.

(5) 결보기유효변형률과 응력을 사용한 단조성평가에 따른 CV다이의 적정다이폭비는 0.6~0.8, 압하율 16% 이상에서는 FM단조의 효과를 충분히 가지며 결함발생이 없는 양호한 단조성을 가질 수 있다.

참고문헌

- (1) Green, A.P., "The Use of Plasticine models to Simulate the Plastic Flow of Metals", *Phil.Mag.*, pp.365~371, 1951.
- (2) 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.165~181, 1989.
- (3) Erman, E., Medei, N.M., Roesch, A.R. And Shah, D.C., "Physical Modeling of Upsetting Processes in Open-Die Press Forging", *J. of Mech. Working Tech.*, vol. 19, pp.1195~1211, 1989.
- (4) 中島浩衛, 渡邊和夫, 渡邊司郎, 田村 至, 中田和廣, "大型熱間自由鍛造 時の内部應力の特性", *塑性と加工*, 第22巻, 第249號, pp.1035~1042, 1981.
- (5) 中島浩衛, 渡邊和夫, 渡邊司郎, 田村 至, 中田和廣, "内部空隙の變形に 及ぼす鍛造條件および應力ひずみ條件の影響", *塑性と加工*, 第22巻, 第 251號, pp.1230~1235, 1981.
- (6) 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.445~451, 1971.
- (7) Shah, K.N., Kiefer, B.V. and Gavigan, J.J., "Finite Element Simulation of Internal Void Closure in Open-Die Press Forging", *J. of Advanced Manufacturing Processing*, vol. 1, no. s-4, pp.501~509, 1986.
- (8) 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.887~894, 1988.
- (9) Cho, J.R., Park, C.Y. and Yang, D.Y., "Investigation of the Cogging Processes by Three-Dimensional Thermo-Viscoplastic Finite Element Analysis", *Proc Instn Mesh Engrs*, vol. 206, pp.277~286, 1992.
- (10) 조종래, 김동권, 이부운, 양동열, "평다이를 사용하는 자유단조 공정의 최적단조 조건에 관한 연구", *한국소성가공학지*, 제4권, 제2호, pp.141~150, 1995.
- (11) 小野信市, 南克之, 村井悦夫, 岩 忠雄, "温間鍛鍊法における空隙壓搾 効果-3次元有限要素法による解析-", *日本製鋼所技報*, 第48號, pp.43~47, 1993.