한국정밀공학회지 제16권 제11호 (1999년 11월)
Journal of the Korean Society of Precision Engineering Vol. 16, No. 11, November 1999.

Al 합금 정밀단조를 위한 금형설계 및 공정조건의 영향

이영선*, 이정환*

The Effects of the Process and Die Design for Precision Forging of Al Alloys

Young-Seon Lee*, Jung-Hwan Lee*

ABSTRACT

Al forged parts are many cases with rib-web section which is difficult to manufacture precisely. Therefore, process conditions must be optimized for precision forging of Al alloys. In this study, various process parameters such as die design, lubricant, ram speed, forging temperature have been investigated using the experiment, upper bound theory and F.E.M. simulation to develop the precision forging technology for rib-web shape component. When lubricant is applied to both material and die, shear friction factor is 0.1 which shows best effect of lubricant. It is specific corner radius of die that minimized forging load regarding process conditions, especially according to the ratio of the width of rib and web. In conclusion, optimum corner radius is 2~3mm when the width of rib and web is 3mm and 20mm respectively.

Key Words : Al Alloys(Al 합금), Die Design(금형설계), Precision Forging(정밀단조), Lubricant(윤활), Upper Bound Analysis(상계해석), F.E.M.(유한요소해석), Rib-Web Shape Forging(리브-웨브형상단조), Ram Speed(성형속도)

기호설명

Voa, Vob, Vab, Vbc = Velocity Fields
Po = Applied load in steady-state
H = Width of web
h = Width of rib
S = Length of velocity boundary

1. 서론

Al합금 단조품들은 얇은 리브를 갖는 핀(Fin)형상들이 많으며 이들은 일반적으로 단조 후 기계가공을 통하여 최종제품으로 제조된다. 따라서, 제조원가를 절감하기 위해 정밀단조에 의한 정형가공으로 기계가공량을 최소화하려는 많은 노력이 이루어져왔다. 정형가공으로 기계가공량을 감소시키기 위해서는 Al합금의 정밀단조시 성형성과 관계되는 단조 공정 조건들이 가능한 한 최적의 조건으로 선정되어야 한다[1]. 본 고에서는 단조공정 조건 가운데 소재가열온도, 윤활처리, 성형속도, 금형설계 조건에 따른 성형성의 영향을 모델실험과 상계해법 및 유한요소해석을 이용하여 비교 분석하였다[2~4].

* 한국기계연구원 재료공정연구부

사용된 소재는 고강도 합금 가운데 하나인 Al7075합금을 이용하였으며, Rib-Web형태의 정밀 단조실험을 수행하고 상계해법과 유한요소해석 프로그램인DEFORM[5]을이용하여 이론적인 해석을 수행하므로써 공정변수들이 성형성에 미치는 영향을 고찰하였다. 또한, 링압축시험을 통하여 윤활방법에 따른 마찰의 영향을 고찰하므로써 최적 마찰조건을 선정하고자 하였다.

2. 윤활 처리 조건에 따른 마찰 특성

윤활제는 소재와 공구간의 마찰계수를 저하시키고 소재가 공구에 부착되는 현상을 방지하므로써 단조소요력의 저하, 단조결함 방지, 성형성 향상, 제품표면 향상 등의 이점을 가져온다. Al합금의 열간단조용 윤활제로는 주로 흑연계가 많이 사용되며 MoS2도 사용되고 있다. 흑연계 윤활제는 수성과 유성의 두 종류로 분류될 수 있는데 유성흑연계 윤활제는 고온에서 연소되기 때문에 대기오염 및 작업자의 건강에 악 영향을 미치므로 수성 윤활제의 윤활특성에 대하여 중점을 두었다. 실험에 사용한 윤활제는 소재용과 금형용의 2가지로 구분하여 수성흑연계 윤활제와 유성흑연계 윤활재를 비교실험하였다. 윤활제는 흑연의 입자크기와 함유량 및 희석 비율을 조정하여 Table1과 같이 소재용으로 3종류, Table2와 같이 금형용으로 5종류를 선정하여 실험하였다. 또한, 윤활제의 종류별 마찰특성과 함께 윤활피막두께와 금형표면거칠기에 따른 마찰특성 등과 같이 윤활제 사용방법에 따른 마찰특성에 대한 영향을 조사하였다. 실험은 링 압축시험을 이용하였으며 링의 치수는 외경:내경:높이의 비를 6:3:2로 일정하게 하고 외경을 24mm, 48mm, 72mm로 변화시켜 시험편 크기에 따른 영향 또한 조사하였다.

Table 1 Lubricants used for material

Types	Contents of Lubricant	Characteristics	Volume Ratio
A	H_2O+Graphite Powder 20%	Emulsion Type	H_2O:Lubricant = 1:2
B	H_2O+Graphite Powder 20%	for High Temperature	H_2O:Lubricant = 1:2
C	Ethanol+MoS_2 30%+Oil	Good Lubricating Film	Oil:Lubricant = 1:1

Table 2 Lubricants used for die

Types	Contents of Lubricant	Characteristics	Volume Ratio
A	H_2O + Graphite Powder10%	◇ Good for Solution with Water ◇ Good for Emulsion	H_2O : Lubricant = 1:10
B	H_2O + Graphite Powder10%	for High Temperature	H_2O : Lubricant = 1:10
C	H_2O + Graphite Powder10%	Good Lubricating Film	H_2O : Lubricant = 1:10
D	Mineral Oil + Graphite Powder10%	Oil-based Colloidal Graphite (for Dies)	Oil : Lubricant =1:2
E	Mineral Oil + Graphite Powder 10% + MoS_2 30%	For Precision Forging of High Strength Alloys	Oil : Lubricant = 1:2

동마찰계수(Shear Friction Factor, m)의 정량적인 값은 실험에 의해 측정된 높이변형율과 링의 내경 감소량을 보정곡선(Calibration Curve)위에 기록하므로써 결정된다[6-11]. 사용된 보정곡선은 링 압축실험과 동일한 조건하에서 DEFORM을 이용하여 다양한 마찰계수에 대한 링 압축 해석을 통해 얻은 결과를 이용하여 생성하였다. 시험에 사용된 시편의 외경은 24, 48, 72mm의 3종류이며, 실험결과 외경이 24mm인 시편의 동마찰계수가 72mm인 시편보다 0.03 정도 작게 나타나므로써 시편 크기에 따른 영향은 거의 없음을 알 수 있었다. 그러나, 시험편의 크기가 너무 작게되면 치수측정의 오차가 크게 되고, 윤활면적이 작게되어 피막의 불균형이 마찰계수에 영향을 미치므로 주의해야 한다. 또한, 윤활제의 특성을 정확히 비교하는데 변수로 작용할 수 있는 요인을 제거하기 위해 윤활제의 사용량과 금형의 표면상태에 따른 마찰계수의 영향을 조사하였다. 윤활제의 사용량은 윤활제의 피막두께와 마찰계수의 변화를 측정하였는데 Fig. 1에 나타나있는 바와 같이 5㎛이상에서는 일정하지만 그 이하에서는 급격히 증대함을 알 수 있다. 또한, 금형의 표면상태에 따른 영향을 조사하기 위해 금형표면조도와 마찰계수의 관계를 조사하였다. 그 결과는 Fig. 2에 나타내었는데, 10㎛정도의 표면조도가 가

을 알 수 있다. 그 이유는 윤활막 두께보다 금형표면조도가 거칠면 소재와 금형이 표면접촉(skin contact)이 되어 마찰력이 커지며 금형표면의 조도가 너무 좋으면 소재가 변형되는 동안 윤활제가 금형과 소재사이에서 계속 유지되지 않기 때문이다.

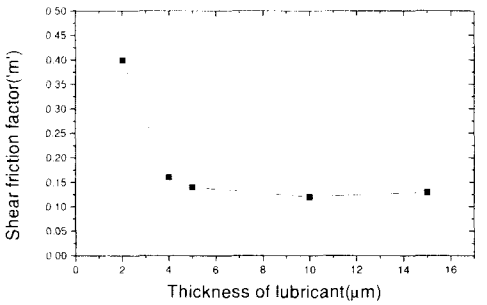


Fig. 1 The variations of shear friction factor with thickness of lubricant layer

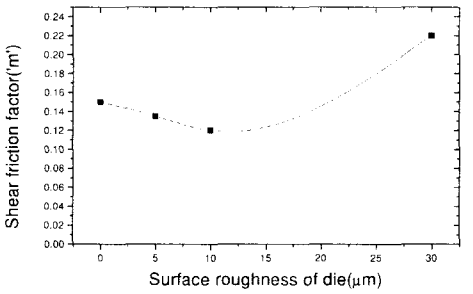


Fig. 2 The variations of shear friction factor with surface roughness of die

윤활특성 실험결과 가장 중요한 것은 열간단조시에 소재와 금형에 동시 윤활을 하는 것이 매우 좋은 특성을 나타낸다는 것이다. 실험결과, 소재에만 윤활을 한 경우는 윤활제 종류에 따라 m = 0.05 ~0.25, 금형에만 윤활처리를 한 경우는 0.05~0.20의 큰 산포를 나타내었으나 금형과 소재에 동시윤활을 한 경우는 0.08~0.17로 작은 산포를 나타내었으며 대부분의 경우에 0.1정도의 낮은 마찰계수를 유지할 수 있었다[12]. 따라서, Rib-Web형상의 정밀단조 실험시에는 금형과 소재 모두 윤활처리를 하므로써 마찰력을 최대한 감소시키도록 하였다.

3. Rib-Web 단조

3.1 Rib-Web 단조실험

Rib-Web형태의 열간정밀단조 실험은 Fig.3과 같은 형태의 금형을 이용하였다. 사용된 소재는 Al7075압출 봉재(지름 20mm, 높이 20mm)이며 금형은 열간금형스강인 SKD61(AISI H-13)종을 사용하였다. 윤활은 링 압축시험을 통해 얻은 결과를 이용하여 전단마찰상수가 0.1이 유지되도록 소재와 금형에 동시 윤활을 하였으며 금형은 200℃로 예열하였다. 가열된 금형과 소재는 가열로에서 유압프레스로 이송되는데 15초, 소재가 금형에 위치하는데 2초가 소요되었으므로 이송시에 발생되는 열손실을 고려하여 목표온도 보다 50℃ 높은 온도에서 가열하였다. 단조시 사용된 유압프레스의 램(Ram) 속도는 1 mm/sec.로 고정하였으며 단조에 소요된 시간은 3초이었다.

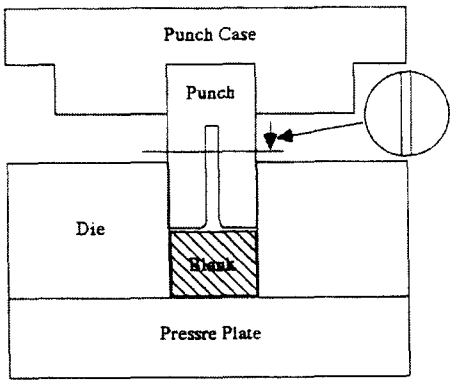


Fig. 3 Schematic view of geometric description for rib-web shape forging

이와같은 조건하에서 공정조건에 따른 성형성의 영향을 조사하기 위해 가압력을 450KN으로 고정시킨 상태에서 Rib의 성형높이를 비교하였다. 비교 실험한 공정변수는 소재의 가열온도와 금형치수로서 소재온도는 350, 450, 500℃로 변화시켰고, 금형치수는 Rib시작부의 코너 반경을 0, 1, 2, 3mm로 변화시켰다. Fig.4는 펀치의 형상과 치수(코너 반경부위)로 Rib와 Web의 폭의 비는 3:20이다.

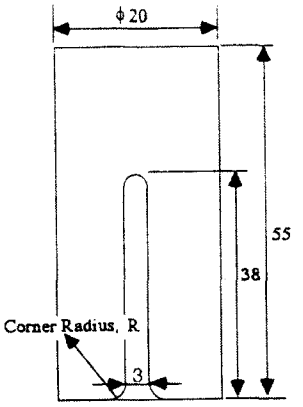


Fig. 4 Dimension of punch used in experiment

3.2 상계해석

본 해석에서는 실험 모델의 특징상 평면 변형(Plane Strain) 하에서 해석하였다. 본 실험 시편의 재료 유동 형상을 볼 때 Fig. 5 a) 와 같은 속도장을 설정할 수 있었으며, 이에따라 설정된 호도그래프는 Fig. 5 b) 에 나타내었다. 한편 본 시료의 단조 모드는 단순 후방 압출 형태와 거의 유사함을 알수 있는데, 단순 후방 압출의 경우, 압출이 시작될 때 압출 하중은 전단 응력 및 금형과의 마찰력을 극복하면서 점차 증가하다가 압출재가 금형밖으로 빠져나오기 시작하는 순간부터는 일정한 하중을 유지하면서 압출이 계속 진행되는 정상 상태(Steady State)를 갖게된다. 상계해석에 있어서의 속도장 선정은 주로 이러한 정상 상태의 경우에 고려된다. Fig. 5 a) 에 표시한 ABC 영역 내의 속도 Vob의 방향은 AB면과 정확히 수평을 이루고 있지 않으나, Fig. 5 a) 에서의 속도장에서는 속도 Vob 의 방향을 AB면과 수평으로 설정하였다. 실제로 Vob 의 방향과 AB면이 수평을 이루지 않는 이유는 속도 Voa 방향과 AB 면이 서로 수직을 이루고 있으므로, AB면에서 매우 큰 마찰 저항력이 작용하기 때문이다. 그러나 이러한 마찰 효과는 모두 동일하여 코너 반경에 따른 단조 압력을 상대 비교하는데는 그 영향이 거의 없을 것으로 판단되었다. 정상상태의 금속유동하에서 상계해석의 기본식은

$$dW/dt = Po\ H\ Voa = \int k\ V^*\ dS \quad (1)$$

로 표현된다. 여기서 Po 는 정상 상태에서의 압출 하중, H 는 Web 의 길이, Vo 는 정상상태에서의 램속도, k 는 Von Mises 조건을 만족하는 등가 전단응력(재료, 온도 및 변형속도가 고정될 경우의 재료 상수), V* 는 각 속도장 경계에서의 속도 불일치량이고 S 는 속도 경계의 길이이다. 한편 Fig. 5 a) 에서 속도장 경계의 길이 [BC], [AB]는 각각 식 2)와 3)과 같다.

$z = h\cot\theta$, $[BC]^2 = z^2 + h^2$ 으로 부터

$$[BC] = h\cot\theta\ (1+\tan^2\theta)^{1/2} \quad (2)$$

$x = H/h$ 로 정의하면

$$[AB] = h\cot\theta\ (1+ x^2\tan^2\theta)^{1/2} \quad (3)$$

한편 속도 불일치량 Vab* , Vbc* 은

$Voc = Voa(H/h) = x\ Voa$, $Vob = Voc\tan\theta$,

$Vab^{*2} = Voa^2 + Vob^2$ 으로부터

$$Vab^* = Voa\ (1+x^2\tan^2\theta)^{1/2} \quad (4)$$

$$Vbc^* = Voa\ x\ (1+\tan^2\theta)^{1/2} \quad (5)$$

로 표현된다.

식 2), 3), 4), 5) 를 식 1) 에 대입하여 계산하면 식 6)과 같이 표현된다.

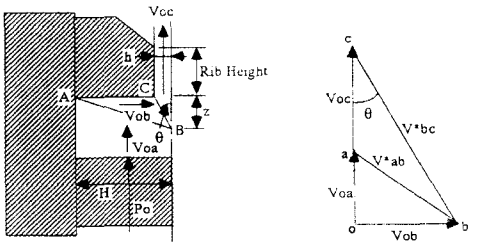
$$Po = \{k/(HVoa)\}\ \{\ [AB]\ Vab^* + [BC]\ Vbc^*\ \}$$
$$= k\{(x+1)/x\}\cot\theta\ (1+ x\tan^2\theta)$$
$$Po/k = \{(x+1)/x\}\cot\theta\ (1+ x\tan^2\theta) \quad (6)$$

한편 Po 를 최소화시키는 임계 θ crit 값은 식 6)을 미분하여 구할수 있다.

$$dPo/d\theta = \{\ (x+1)/x\ \}\ \{\ \sec^2\theta\ (1-x\tan^2\theta)\ /\ \tan^2\theta\ \} = 0$$

$$1 = x\tan^2\theta\ ,\ \theta\ crit = 21.2^\circ$$

즉 주어진 Rib높이를 얻는데 있어서 단조 압력 Po 를 최소화 시킬수 있는 조건은 θ 를 임계값인 21.2° 로 형성되면서 금속이 유동할 경우로 생각할 수 있다.



(a) (b)

Fig. 5 Schematic diagram of selected velocity fields(a) and related hodograph(b) for upper-bound analysis

3.3 유한요소해석

Rib-Web형상의 단조실험은 강점소성 유한요소 해석 프로그램인 DEFORM을 이용하여 그 결과를 검증하였으며 해석은 대칭성을 고려하여 Rib의 중심선을 기준으로 우측단면 1/2을 평면변형률, 비등온(Non-Isothermal)조건으로 해석하였다. Fig. 5은 코너반경이 2mm일때의 변형 후 유한요소모델을 나타내고 있다. 해석은 실험치와 동일한 변수값(코너반경, 소재온도 금형온도, 성형속도, 마찰상수, 등)을 사용하여 실험치와 비교를 한 후 마찰상수의 변화에 따른 영향과 성형속도에 따른 영향을 조사하였다. 해석에 사용한 재료상수들은 Table 3에 나타내었다.

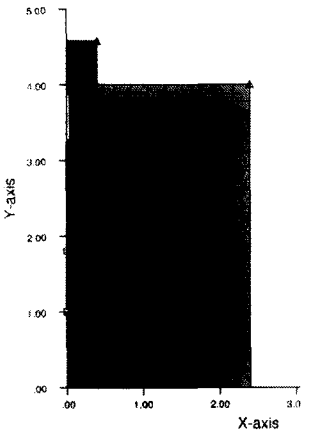


Fig. 6 Deformed mesh system for rib-web shape forging (corner radius = 2mm)

Table 3 Material input data used in the F.E.M. analysis

		Workpiece	Die
Material Name		Al 7075	SKD61 (AISI H-13)
Mechanical Properties	Young's Modulus	72,364Mpa	200,000 ~ 145,000Mpa
	Poisson's Ratio	0.33	0.295
	Flow Stress	DEFORM D.B.[3]	DEFORM D.B.[3]
Thermal Data	Thermal Expansion Co. (/℃)	7.7e-3	14.9e-6
	Thermal Conductivity (N/sec./℃)	129.85	35.06
	Heat Capacity ($N/mm^2/℃$)	2.6913	3.5624
	Emissity	0.6	0.6

3.4 금형코너 반경과 성형성

열간단조시에 재료의 유동성을 향상시키기 위해서는 Rib의 형상이 최종제품과는 달리 빼기구배가 존재해야 하며 Rib시작부의 코너반경이 일정치수 이상이어야 되는 것으로 알려져 있다. 그러나, 기계가공량을 최소화하기 위해서는 가능한 한 빼기구배와 코너반경을 최소화시켜야 유리하다. 따라서, 본 연구에서는 단조실험을 통해 최적의 코너반경을 조사하였으며 이를 상계해석과 유한요소법을 이용하여 해석결과와 비교하였다. 단조실험결과는 Fig. 7과 같이 2R의 코너반경에서 가장 높은 Rib높이를 나타내므로써 코너반경이 일정치 이상으로는 증대되지 않는 것이 오히려 성형성을 증대시킬 수 있음을 알 수 있었다. 이는 코너반경에 따라 유동되는 재료의 흐름(속도 불연속)과 관련된 것으로 상계해법으로 계산된 결과에서도 일정한 임계값이 존재함을 확인하였다. Fig. 8과 Fig. 9는 식 6) 에서 Po/k 와 θ 의 이론적인 관계와 코너 반경과 θ 의 실험적인 관계를 나타내었다. 두 결과를 비교하여 볼 때 단조 압력을 최소화시킬수 있는 펀치의 코너반경은 약 2.4 mm 임을 알 수 있었다. 이러한

상계해석의 결과는, 450KN의 일정한 단조력 하에서 코너반경이 2 mm 인 펀치를 사용할 때 최대의 Rib 높이를 얻은 실험적인 결과와 그 경향이 일치한다.

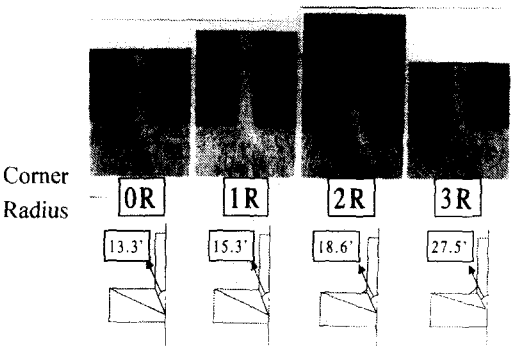


Fig. 7 Metal flows and velocity discontinuities observed in rib-web shape forged parts

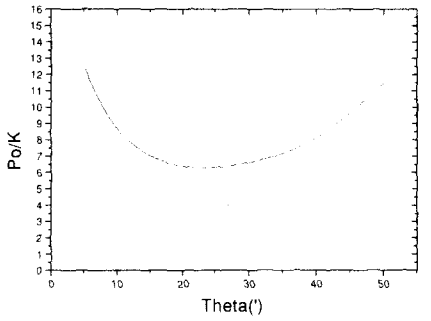


Fig. 8 Variations of Po/k valve with theta calculated by upper-bound analysis

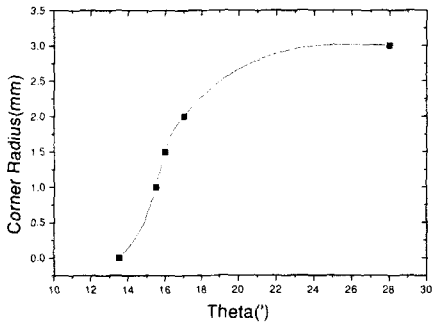


Fig. 9 Variations of corner radius with theta observed in forged part

Fig. 10은 DEFORM 해석프로그램을 이용하여 해석한 유한요소해석 결과로 실험결과와는 달리 3R에서 가장 높은 Rib 높이를 나타내고 있다. 이 차이는 실험시 발생되는 오류와 2차원 평면 변형 해석에 따른 오류에 의한 것으로 생각된다. 그러나, 어느 일정한 값(2R~3R)에서 최적의 코너반경이 존재하고 있음을 확인할 수 있다. 이러한 경향은 Fig. 11의 마찰상수의 변화시에도 동일하게 나타나고 있으며 Fig. 12와 같이 램하강속도를 변화시켜도 동일한 경향을 나타내고 있다.

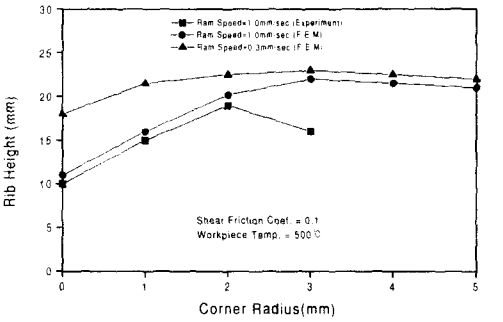


Fig. 10 Rib height and corner radius in constant load

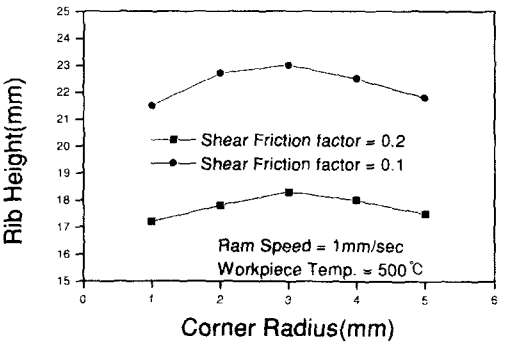


Fig. 11 Comparisons of rib height and friction factor in constant load (F.E.M. results)

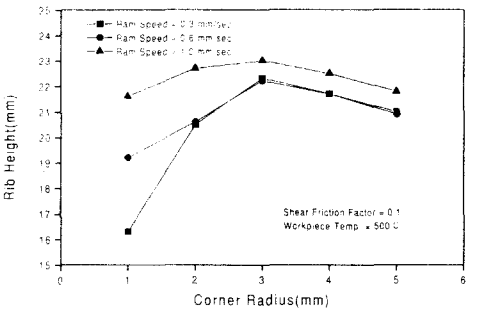


Fig. 12 Rib height vs. ram speed in constant load (F.E.M. results)

3.5 단조조건과 성형성

단조조건에 따른 성형성의 변화는 소재온도와 램하강속도에 따른 영향을 조사하였다. Fig. 13은 소재온도를 350, 450, 500℃로 변화시켜 단조실험한 결과로 소재온도가 증가됨에 따라 변형저항이 감소되어 Rib높이가 증가되고 있으며 Fig. 14와 같이 유한요소해석 결과와도 좋은 일치를 보이고 있다. 그러나, Fig. 15의 유한요소해석 결과는 램하강속도가 0.3mm/sec.로 실제 보다 느린 경우의 결과이며 실제와 동일한 하강속도에서는 Fig. 10과 같이 Rib높이가 다소 높게 나타나고 있다. 이는 해석시의 온도하강속도가 실제 단조시 보다 늦은 이유 때문으로 생각된다.

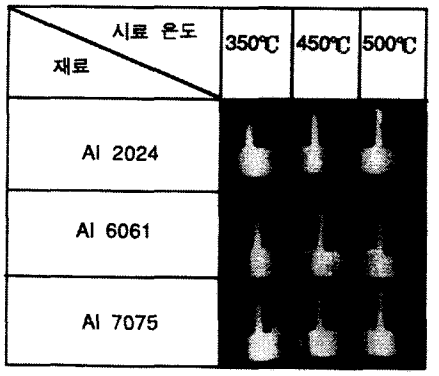


Fig. 13 Relationship of rib height and heating temperature of workpiece in constant load (Experiment results)

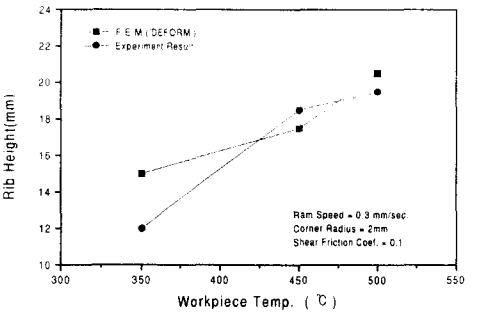


Fig. 14 Rib height and heating temperature of workpiece in constant load(F.E.M. and Experiment results)

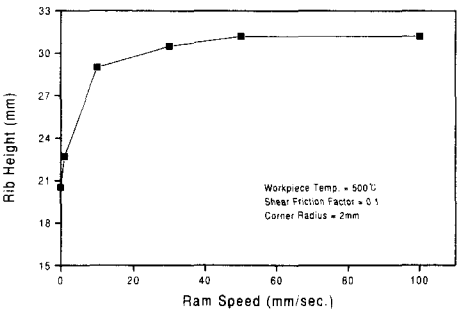


Fig. 15 Rib height and ram speed in constant load (F.E.M. results)

램 하강속도에 따른 Rib의 높이는 유한요소해석결과 Fig. 15와 같이 50 mm/sec.의 속도까지는 속도가 증가됨에 따라 증가하다 그 이상부터는 거의 변화가 없고 오히려 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 일정한 변형속도(약 50mm/sec.)이하에서는 소재의 온도가 저하됨에 따라 변형저항이 증대되며 일정 속도이상에서는 변형속도 증대에 따라 변형저항이 증대되기 때문으로 생각된다.

마찰의 영향에 따른 Rib높이 변화는 Fig. 11과 같이 마찰상수 0.1의 차이에 의해 Rib의 높이가 5mm까지 차이가 발생되고 있으므로 전술한 바와 같이 소재와 금형에 동시 윤활처리를 하는 것이 바람직함을 알 수 있다.

4. 결론

Rib-Web형태의 Al단조시 정밀성형을 위한 공정설계를 위해 실험과 이론해석을 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

1) 윤활처리는 소재와 금형에 모두 윤활처리를 하는 것이 동마찰상수를 0.1로 유지할 수 있고 윤활상태가 안정화되어 바람직하며, 금형표면은 약 10㎛ 정도가 가장 좋은 윤활상태를 나타내었는데 이는 금형의 표면조도가 일정치 이상으로 좋게 되면 윤활제의 유지가 곤란해져 마찰이 증가되기 때문이다.

2) Rib-Web형상의 Al단조시 성형성 향상을 위한 Rib시작부의 코너 반경은 Rib와 Web의 폭에 따라 일정값에서 최적의 상태를 나타낸다. 본 연구에서 사용한 모델의 경우는 Rib폭과 Web폭의 비가 3:20이었으며 2mm와 3mm사이에서 최적의 상태를 나타내고 있음을 실험과 해석을 통해 알 수 있었다.

3) 소재의 가열온도는 350, 450, 500℃로 변화됨에 따라 변형저항의 감소로 Rib의 높이가 증가되었으나 450℃와 500℃는 큰 차이가 없으나 동적재결정 발생에 따른 조직의 조대화가 발생하지 않아야 하므로 적정한 온도가 선정되어야 한다.

4) 램 하강속도에 따른 Rib의 높이는 유한요소 해석결과 50mm/sec.의 속도까지는 속도가 증가됨에 따라 증가되나 그 이상부터는 거의 변화가 없고 오히려 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 일정한 변형속도(약 50mm/sec.)이하에서는 소재의 온도가 저하됨에 따라 변형저항이 증대되며 일정 속도이상에서는 변형속도가 증대됨에 따라 변형저항이 증대되기 때문으로 생각된다.

5) 마찰의 영향에 따른 Rib높이 변화는 마찰상수 0.1의 차이에 의해 Rib의 높이가 5mm까지 차이가 발생되고 있으므로 소재와 금형에 동시 윤활처리를 하는 것이 바람직함을 알 수 있다.

참고문헌

1. 이정환,정형식,이영선,이상용, "항공기용 AL합금의 정밀단조기술," 기계와재료 제6권, 제2호, pp46~59, 1994.
2. 정형식,이정환,한상호, "고강도 Al합금의 단조금형설계기법 및 윤활에 관한연구," 과학기술처 연구보고서, UCN264-1372.C, 1990.
3. 정형식,이정환,이동원,한상호, "고강도 Al합금의 단조금형설계기법 및 윤활에 관한연구(II)," 과학기술처 연구보고서, UCN370-1506.C, 1991.
4. 정형식,이정환,이동원,한상호, "고강도 Al합금의 단조금형설계기법 및 윤활에 관한연구(III)," 과학기술처 연구보고서, UCN456-1693.C, 1992.
5. DEFORM User Manual, V4.1, SFTC.
6. Taylan Altan, Soo-Ik Oh, Harold L.Gegel, "Metal Forming," ASM.
7. Male.A.T and Depierre.V., "The Validity of Mathematical Solutions for Determining Friction from the Ring Compression Test," ASME Paper No. 69-WA/Lub-8.
8. C.H.Lee, T.Altan, "Influence of Flow Stress and Friction upon Metal Flow in Upset Forging of Rings and Cylinders," J. of Engineering for Industry, Trans. of the ASME, Aug. pp. 775~782, 1972.
9. D.Bhattacharyys and R.H.Brown, "Sensitivity of Ring-Compression Test," The International Symposium on Metalworking Lubrication, Aug. pp. 23~30, 1980.
10. Goetz.R.L., Jain.V.K., Morgan.J.T., "Effects of Material and Processing Conditions upon Ring Calibration Curves," Wright-Patterson AFB Wear 1, Mar., pp. 71~86, 1991.
11. 정덕진, 김동진, 김병민, "재료 및 윤활제에 따른 전단마찰 상수값의 평가," 한국소성가공학회, '99춘계학술대회논문집, pp. 119~124, 1999.
12. 이영선,이정환,이상용, "Al7075합금의 정밀단조시 금형설계와 단조조건의 영향(II)," 한국소성가공학회 '96추계학술대회 논문집, pp. 113~121, 1996.
13. 高田與男, 福田 美, "Al합금의 열간단조에 있어서의 가공사례," 프레스기술, p42, 1989.