

Al7075합금의 정밀단조시 금형설계와 단조조건의 영향(II)

- 유한요소해석을 중심으로 -

이영선, 이정환, 이상용
한국기계연구원

The Effect of Die Design and Process Condition in Precision Forging for Al7075 Alloy (II)

Y.S.Lee, J.H.Lee, S.Y.Lee
Korea Institute of Machinery & Materials

ABSTRACT

Al7075 alloy has been used for aircraft components since it has the advantage of high strength, high toughness, and high corrosion resistance. Many airframe components consist of various combinations of rib-web structure. In this study, various process parameters such as die design, lubricant, ram speed, forging temperature have been investigated using the experiment and F.E.M. simulation to develop the precision forging technology for Al7075. 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 : Al7075, Die Design, Precision Forging, Lubricant, F.E.M., Rib-Web Shape Forging, Ram Speed

1. 서론

Al7xxx계열과 같은 고강도 Al합금은 높은 비강도와 내식성 때문에 항공기용 구조 부재로 널리 이용되고 있으며 이 가운데 Al7075-T6합금이 가장 대표적으로 알려져 있다. 항공기용 Al단조품은 그림1과[1] 같이 대부분 얇고 정밀한 Rib-Web형태이므로 일반적으로 단조 후 기계가공을 통하여 최종제품을 제조한다. 따라서, 제조원가를 절감하기 위해 정밀단조에 의한 정형가공으로 기계가공량을 최소화하려는 많은 노력이 이루어져왔다. 그러나, Al7xxx계열 합금은 고강도 합금이기 때문에 다른 계열의 Al합금 보다 성형성이 좋지 않아 Rib-Web형태의 단조품을 정형가공하는 데는 많은 어려움이 존재한다. Al합금의 정밀단조시 성형성과 관계되는 단조공정조건에는 금형설계와

소재가열온도, 윤활조건, 성형속도 등이 있으며 기계가공량을 최소화하기 위해서는 이들 변수들이 가능한 한 최적의 조건으로 선정되어야 한다. 본 고에서는 링압축시험을 통하여 윤활방법에 따른 마찰의 영향을 고찰하고자 하였으며, Al7075합금을 소재로 Rib-Web형태의 정밀단조실험을 수행하고 유한요소해석 프로그램인 DEFORM을 이용하여 이론적인 해석을 수행하므로써 공정변수들이 성형성에 미치는 영향을 고찰하였다.

2. 윤활조건에 따른 마찰특성 실험

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 연소되어 대기오염 및 작업자의 건강에 악 영향을 미치므로 수성 윤활제의 윤활특성에 대하여 중점을 두었다. 실험에 사용한 윤활제는 소재용과 금형용의 2가지로 구분하여 수성흑연계 윤활제와 유성흑연계 윤활제를 비교 실험하였다. 윤활제는 흑연의 입자크기와 함유량 및 희석 비율을 조정하여 표1과 같이 소재용으로 3종류, 표2와 같이 금형용으로 5종류를 선정하여 실험하였다. 또한, 윤활제의 종류별 마찰특성과 함께 윤활피막두께와 다이표면거칠기에 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.

3. Rib-Web 형상의 정밀단조시 성형성 향상을 위한 공정설계

3.1 단조실험

Rib-Web형태의 열간정밀단조 실험은 그림2와 같은 형태의 금형을 이용하였다. 사용된 소재는 Al7075압출 봉재(지름 20mm, 높이 20mm)이며 금형은 열간다이스강인 SKD61종을 사용하였다. 윤활은 링 압축시험을 통해 얻은 결과를 이용하여 전단마찰계수가 0.1이 유지되도록 소재와 다이에 동시 윤활을 하였으며 금형은 200℃로 예열하였다. 가열된 다이와 소재는 가열로에서 유압프레스로 이송되는데 15초, 소재가 다이에 위치하는데 2초가 소요되었으므로 이송시에 발생하는 열손실을 고려하여 목표온도 보다 50℃ 높은 온도에서 가열하였다. 단조시 사용된 유압프레스의 램(Ram) 속도는 1 mm/sec.로 고정하였으며 단조에 소요된 시간은 3초이었다.

이와같은 조건하에서 공정조건에 따른 성형성의 영향을 조사하기 위해 가압력을 450KN으로 고정시킨 상태에서 Rib의 성형높이를 비교하였다. 비교 실험한 공정 변수는 소재의 가열온도와 금형치수로서 소재온도는 350, 450, 500℃로 변화시켰고, 금형치수는 Rib시작부의 코너 반경을 0, 1, 2, 3mm로 변화시켰다. 그림3은 편치의 형상과 치수(코너 반경부위)로 Rib와 Web의 폭의 비는 3:20이다.

3.2 유한요소모델링

Rib-Web형상의 단조실험은 강점소성 유한요소해석 프로그램인 DEFORM을 이용하여 그 결과를 검증하였으며 해석은 대칭성을 고려하여 Rib의 중심선을 기준으로

1/2을 평면변형률, 비등온(Non-Isothermal)조건으로 해석하였다. 해석에 사용된 유한 요소 모델은 그림4와 같다. 해석은 실험치와 동일한 변수값(코너반경, 소재온도 금형 온도, 성형속도, 마찰계수, 등)을 사용하여 실험치와 비교를 한 후 마찰계수의 변화에 따른 영향과 성형속도에 따른 영향을 조사하였다. 해석에 사용한 재료상수들은 참고 문헌[2]의 데이터들을 사용하였으며 소성변형시 소재와 다이간 접촉열전달계수는 30N/sec.mm.℃를 사용하였다.[3]

4. 결과 및 고찰

4.1 윤활조건과 마찰특성

링 압축시험을 통하여 수행한 마찰특성은 시험편의 적절한 크기를 선정하기 위해 시험편의 크기에 따른 마찰계수를 측정하였다. 실험에 사용된 시험편의 외경은 24, 48, 72mm의 3종류이며, 실험결과 외경이 24mm인 시험편의 동마찰계수(m)가 72mm인 시험편보다 0.03 정도 작게 나타나므로써 시험편 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 그림5에 나타나있는 바와 같이 5 μ m 이상에서는 일정하지만 그 이하에서는 급격히 증대함을 알 수 있다. 또한, 금형의 표면상태에 따른 영향을 조사하기 위해 금형표면조도와 마찰계수의 관계를 조사하였다. 그 결과는 그림6에 나타내었는데, 10 μ m 정도의 표면조도가 가장 적절함을 알 수 있다. 만일 윤활막 두께 보다 금형표면조도가 거칠면 소재와 금형이 표면접촉이 되어 마찰력이 커지며 금형표면의 조도가 너무 좋으면 소재가 유동되는 동안 윤활제가 금형과 소재사이에서 유지 못하기 때문이다.

윤활제의 특성실험에서 가장 특이한 것은 열간단조시에 소재와 다이에 동시 윤활을 하는 것이 매우 좋은 특성을 나타낸다는 것이다. 그림7은 소재에만 윤활처리를 한 경우 그림8은 다이에만 윤활처리를 한 경우이며 그림9는 소재와 다이에 동시 윤활했을 경우의 각 윤활제별 마찰계수를 나타내고 있는데, 소재에만 윤활을 한 경우는 윤활제 종류에 따라 0.05~0.25, 다이에만 윤활처리를 한 경우는 0.05~0.20의 큰 산포를 나타내었으나 다이와 소재에 동시윤활을 한 경우는 0.08~0.17로 작은 산포를 나타내었으며 대부분의 경우에 0.1 정도의 낮은 마찰계수를 유지할 수 있었다. 따라서, Rib-Web형상의 정밀단조 실험시에는 다이와 소재 모두 윤활처리를 하므로써 마찰력을 최대한 감소시키도록 하였다.

4.2 다이코너 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 유한요소법을 이용하여 해석결과와 비교하였다. 단조실험결과는 그림10과 같이 2R의 코너반경에서 가장 높은 Rib높이를 나타내므로

써 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 임계값(약 2.4mm)이 존재함을 확인하였다.

그림11은 DEFORM 해석프로그램을 이용하여 해석한 유한요소해석 결과로 실험결과와는 달리 3R에서 가장 높은 Rib 높이를 나타내고 있다. 이 차이는 금형가공시 코너반경의 정확성에 문제가 남아 있기 때문에 발생한 것으로 생각된다. 그러나, 어느 일정한 값(2R~3R)에서 최적의 코너반경이 존재하고 있음을 확인할 수 있다. 이러한 경향은 그림12의 마찰계수의 변화시에도 동일하게 나타나고 있으며 그림13과 같이 램하강속도를 변화시켜도 동일한 경향을 나타내고 있다.

4.3 단조조건과 성형성

단조조건에 따른 성형성의 변화는 소재온도와 램하강속도에 따른 영향을 조사하였다. 그림14는 소재온도를 350, 450, 500℃로 변화시켜 단조실험한 결과로 소재온도가 증가됨에 따라 변형저항이 감소되어 Rib높이가 증가되고 있으며 그림15와 같이 유한요소해석 결과와도 좋은 일치를 보이고 있다. 그러나, 그림15의 유한요소해석 결과는 램하강속도가 0.3mm/sec.로 실제 보다 느린 경우의 결과이며 실제와 동일한 하강속도에서는 그림11과 같이 Rib높이가 다소 높게 나타나고 있다. 이는 해석시의 온도하강속도가 실제 단조시 보다 늦은 이유 때문으로 생각된다.

램 하강속도에 따른 Rib의 높이는 유한요소해석결과 그림16과 같이 50mm/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 그림12와 같이 마찰계수 0.1의 차이에 의해 Rib의 높이가 5mm까지 차이가 발생되고 있으므로 전술한 바와 같이 소재와 다이에 동시 윤활처리를 하는 바람직함을 알 수 있다.

5. 결 론

Rib-Web형태의 AI단조시 정밀성형을 위한 공정설계를 위해 실험과 유한요소해석을 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 윤활처리는 소재와 다이에 모두 윤활 처리를 하는 것이 동마찰계수를 0.1로 유지할 수 있고 윤활상태가 안정화되어 바람직하며, 다이표면은 약 10 μ m 정도가 가장 좋은 윤활상태를 나타내었는데 이는 다이의 표면조도가 일정치 이상으로 좋게 되면 윤활제의 유지가 곤란해져 마찰이 증가되기 때문이다.
- 2) Rib-Web 형상의 AI단조시 성형성 향상을 위한 Rib 시작부의 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 가열 온도는 350, 450, 500℃로 변화됨에 따라 변형저항의 감소로 Rib의

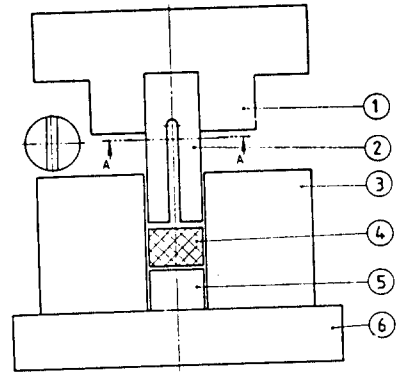
- 높이가 증가되었으나 450℃와 500℃는 큰 차이가 없으며 항공기용 Al 단조품의 경우는 동적재결정 발생에 따른 조직의 조대화가 발생하지 않아야 하므로 적절한 온도는 동적재결정이 발생되지 않는 조건하에서 선정되어야 한다. 따라서, 이를 위해서는 각 공정조건에 따른 최적온도 선정을 위한 체계적인 연구가 필요하다.
- 4) 램 하강속도에 따른 Rib의 높이는 유한요소해석결과 50mm/sec.의 속도까지는 속도가 증가됨에 따라 증가되나 그 이상부터는 거의 변화가 없고 오히려 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 일정한 변형속도(약 50mm/sec.)이하에서는 소재의 온도가 저하됨에 따라 변형저항이 증대되며 일정 속도이상에서는 변형속도가 증대됨에 따라 변형저항이 증대되기 때문으로 생각된다.
 - 5) 마찰의 영향에 따른 Rib높이 변화는 마찰계수 0.1의 차이에 의해 Rib의 높이가 5mm까지 차이가 발생되고 있으므로 소재와 다이에 동시 윤활처리를 하는 것이 바람직함을 알 수 있다.

참 고 문 헌

- 1) 이정환,정형식,이영선,이상용, “항공기용 AL합금의 정밀단조기술”, 기계와재료 제6권, 제2호, pp46~59, 1994
- 2) Taylan Altan, Soo-Ik Oh, Harold L.Gegel, “Metal Forming”, ASM
- 3) DEFORM User Manual, V4.1, SFTC
- 4) 정형식,이정환,한상호, “고강도 Al합금의 단조금형설계기법 및 윤활에 관한연구”, 과학기술처 연구보고서
- 5) 정형식,이정환,이동원,한상호, “고강도 Al합금의 단조금형설계기법 및 윤활에 관한연구(Ⅱ)“, 과학기술처 연구보고서
- 6) 정형식,이정환,이동원,한상호, “고강도 Al합금의 단조금형설계기법 및 윤활에 관한연구(Ⅲ)“, 과학기술처 연구보고서
- 7) 高田與男, 福田 美, “Al합금의 열간단조에 있어서의 가공사례”, 프레스기술, p42, 1989
- 8) 이정환,김대용,김재곤,이상용,이영선,전승문,이명건, “Al7050 단조품의 국부적 불균일 조직형성에 관한 연구”, 단조기술의 진보, p81, 1995

Table 1. Lubricants for Material

기호	윤활제 내용	특성	희석비
A	물+초미립자 흑연 20%	유성 윤활제의 작업이 점과 수용성 윤활제의 안정성을 병합한 Emulsion Type 윤 활제	1:2
B	물+초미립자 내열흑연 20%	고내열성 윤활에 적절	1:2
C	에탄올+미립자 MoS ₂ 30%+ 불연성용제	윤활 피막의 정착성 및 내구성이 뛰어남	1:1



No	Name	Material
1	Punch Case	SKD 61
2	Punch	·
3	Die	·
4	Work Piece	Al - Alloy
5	Spacer	SKD 61
6	Pressure Plate	·

Fig.2 Schematic diagram of forging experiment

Table 2. Lubricants for Die

기호	윤활제 내용	특성	희석비
A	물+초미립자 흑연 10%	◇ 낮은 원액점도에 의해 물에 희석이 용이 ◇ 우수한 분산안정성 과 고온의 금형에 밀착효율이 높음.	1:10
B	물+미립자 흑연 20%	우수한 윤활성과 고온 금형에 대해 효율이 높은 습윤성을 가지며 가격이 저렴	1:10
C	물+초미립자 흑연 20%	유성과 수용윤활제의 장점만을 병합한 윤활 제	1:10
D	광유+초미립자 흑연10%	유성 Colloidal상 흑 연으로 금형윤활에 효 과적임.	1:2
E	광유+초미립자 흑연10% +MoS ₂ 30%	고강도 정밀단조용 윤활제	1:2

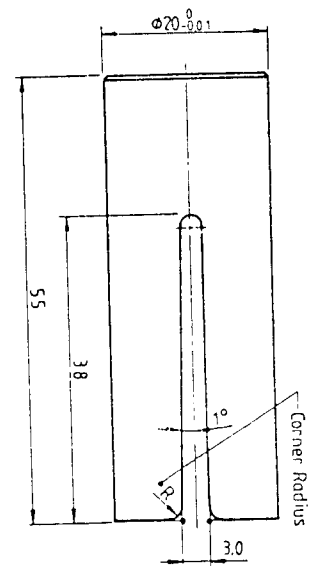


Fig.3 Shape and dimension of punch

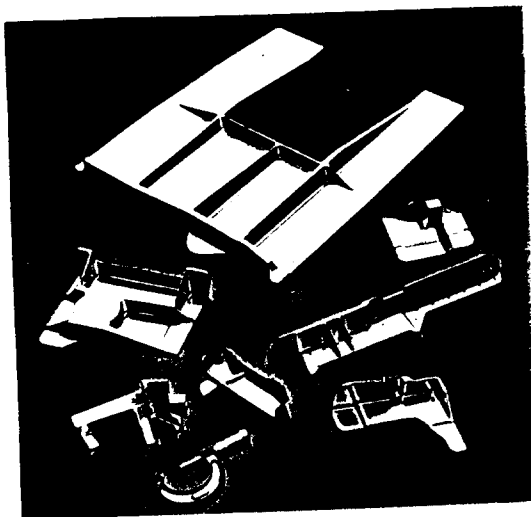


Fig.1 Various aircraft components in Al alloys

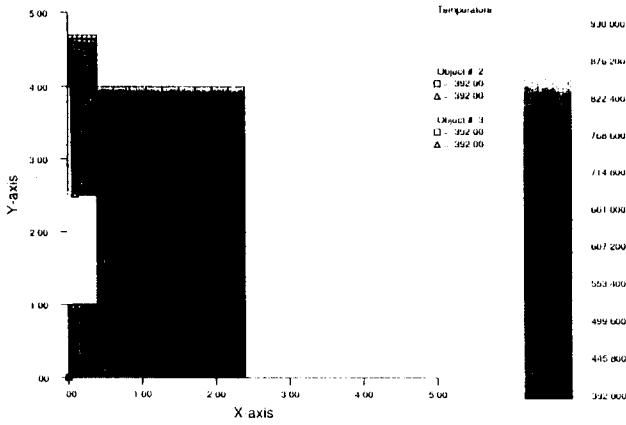


Fig.4 DEFORM model of Rib-Web forging

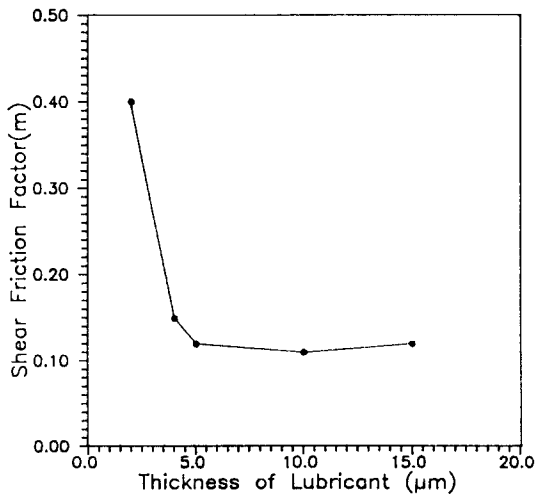


Fig.5 The thickness of lubricant film vs. shear friction factor

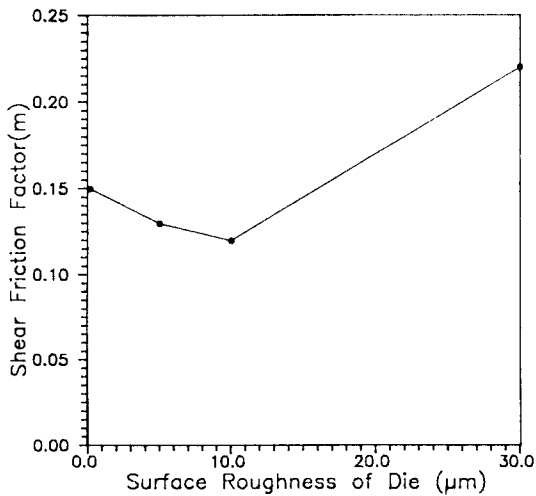


Fig.6 The surface roughness of die vs. shear friction factor

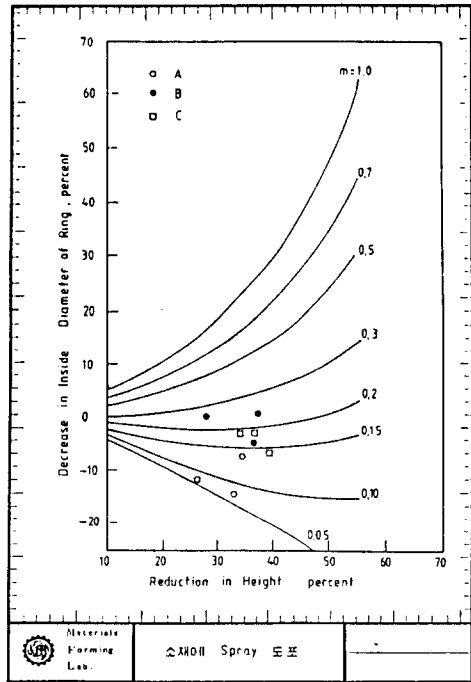


Fig.7 Shear friction factor in lubricating material alone

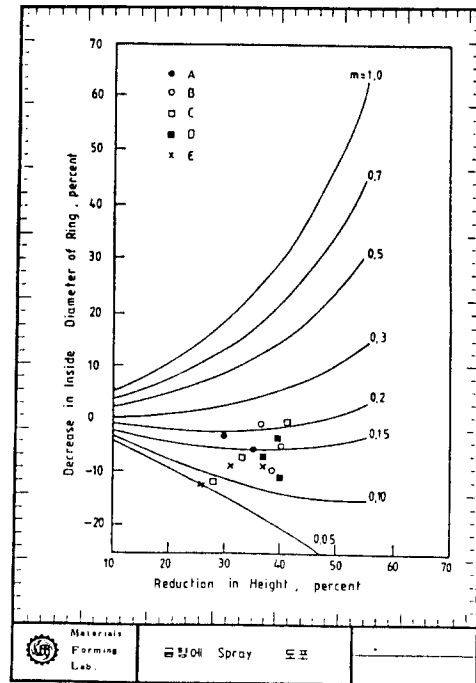


Fig.8 Shear friction factor in lubricating die alone

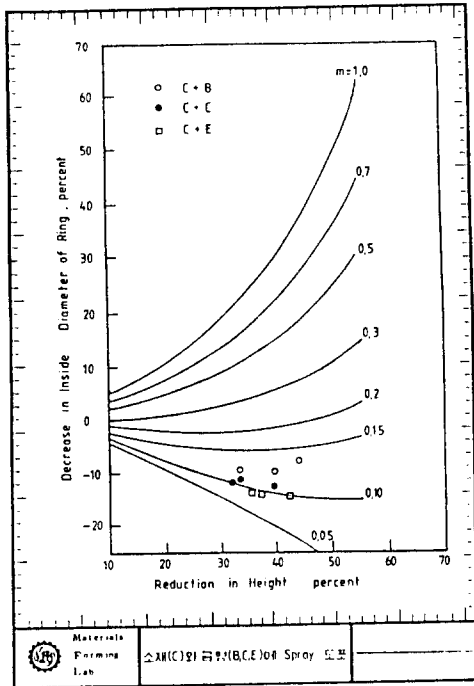


Fig.9 Shear friction factor in lubricating both material and die

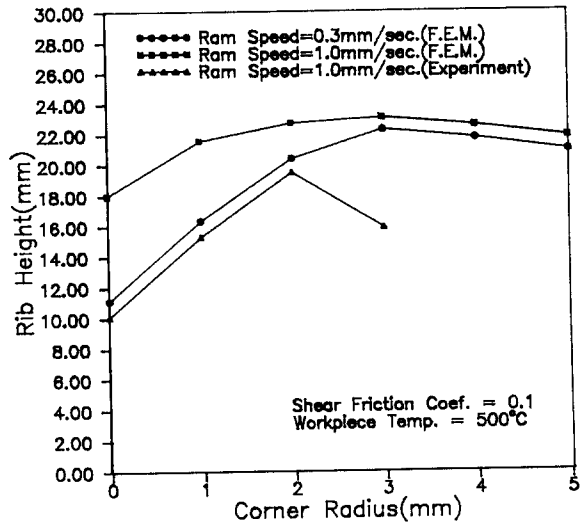


Fig.11 The F.E.M. result of rib height according to the corner radius

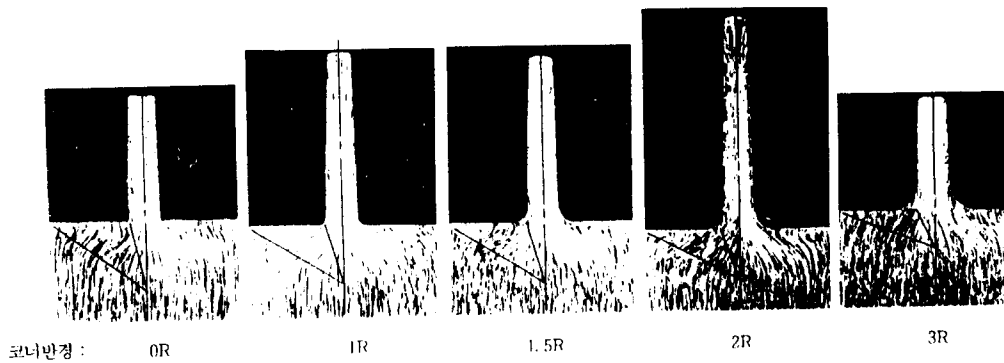


Fig.10 The experimental result of rib height according to the corner radius

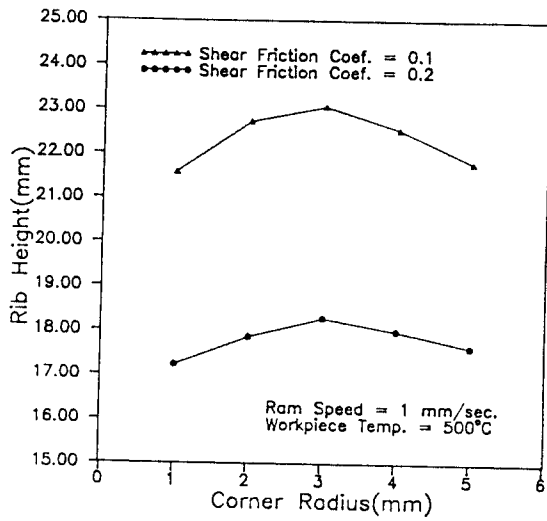


Fig.12 Friction factor vs. Rib height (F.E.M.)

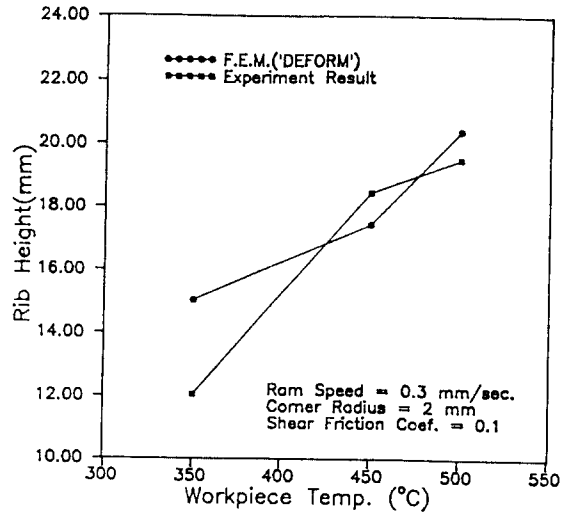


Fig.15 Forging temperature vs. Rib height (Experiment and F.E.M.)

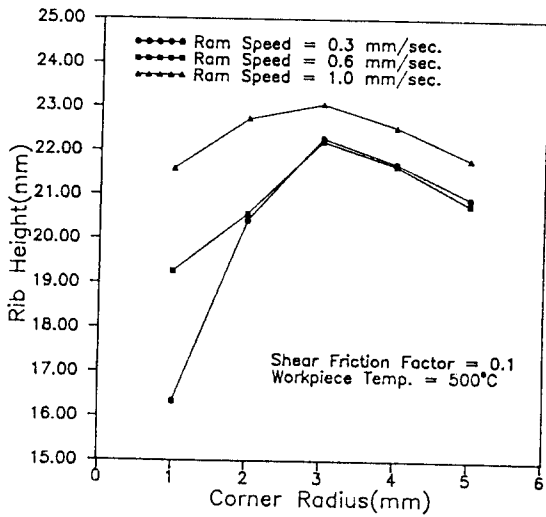


Fig.13 Corner radius, Ram speed vs. Rib height (F.E.M.)

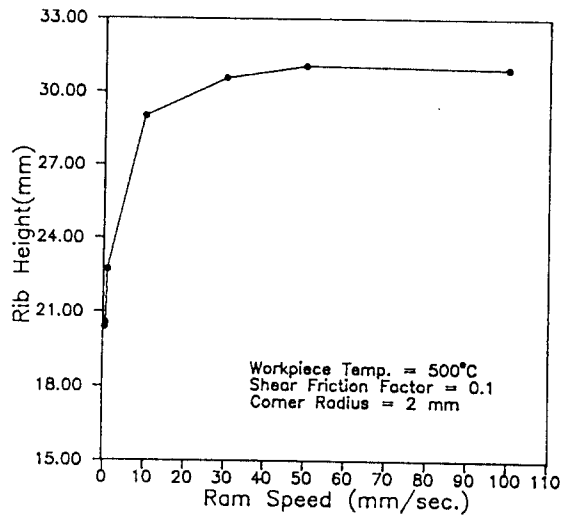


Fig.16 Ram speed vs. Rib height (F.E.M.)

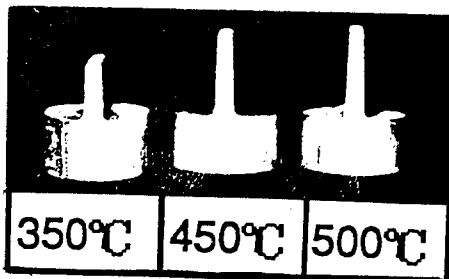


Fig.14 Forging Temperature vs. Rib height (Experiment)