

보스-리브 시험 시 마찰보정선도에 대한 펀치형상 및 유동응력의 영향

윤여웅¹ · 강성훈[#] · 이영선² · 김병민³

Effect of Punch Design and Flow Stress on Frictional Calibration Curve in Boss and Rib Test

Y. W. Yun, S. H. Kang, Y. S. Lee, B. M. Kim

(Received October 23, 2009 / Revised November 9, 2009 / Accepted November 26, 2009)

Abstract

Recently, boss and rib test based on backward extrusion process was proposed to quantitatively evaluate the interfacial friction condition in bulk forming process. In this test, the tube-shaped punch with hole pressurizes the workpiece so that the boss and rib are formed along the hole and outer surface of the punch. It was experimentally and numerically revealed that the height of boss is higher than that of the rib under the severe friction condition. This work is focused on the effect of the punch design and flow stress on deformation pattern in boss and rib test. From the boss and rib test simulations, it was found that there is slight variation in both the heights of boss and rib according to the length of punch land, nose radius, and face angle. However the hole diameter of the punch and the clearance between the punch and die have a significant influence on the calibration curves showing the heights of the boss and rib. In addition, the effect of flow stress on the calibration curves was investigated through FE simulations. It was found that there is no effect of strength coefficient of the workpiece on the calibration curves for estimation of friction condition. On the other hand, the strain-hardening exponent of the workpiece has a significant influence on the calibration curve.

Key Words : Boss and Rib Test, Backward Extrusion, Friction Condition, Tool Design, Flow Stress, FE Analysis

1. 서론

단조공정에서 금형과 소재의 접촉면에서의 마찰조건은 소재유동, 성형하중, 금형의 응력 및 수명 등에 직접적인 영향을 미치게 된다. 마찰조건은 성형과정에서의 금형형상, 금형속도, 성형온도, 소재 및 윤활제의 종류 등의 다양한 변수들의 영향을 받으므로 이를 실험적으로 정확히 측정하는데 한계가 있다. 현재까지 금형과 소재의 접촉면

에서의 마찰조건을 정량적으로 측정하기 위한 방법으로, 유한요소해석을 이용하여 다양한 윤활제에서의 마찰상수 또는 마찰계수를 측정하는 방법을 사용하고 있다[1].

마찰조건을 정량적으로 예측하기 위한 시험법으로는 링 압축 시험법[2]을 비롯하여 스파이크 시험법[3], 버켈 시험법[4], 인젝션 업셋팅 시험법[5], 전후방 압출 시험법[6] 팁 시험법[7, 8]등이 있다. 이중 링 압축 시험법은 가장 간단하게 마찰조

1. 한국기계연구원 부설 재료연구소 산업기술지원본부
2. 한국기계연구원 부설 재료연구소 융합공정연구본부
3. 부산대학교 기계공학부
교신저자: 한국기계연구원 부설 재료연구소 융합공정연구본부,
E-mail: kangsh@kims.re.kr

긴을 정량적으로 측정할 수 있는 방법이나, 표면 팽창율이 작은 단점이 있다. 이외의 시험법들은 펀치 형상이나 소재 형상, 또는 금형 내에서 소재의 위치에 따라 마찰조건이 일정하지 않은 단점이 있다.

따라서 본 연구에서는 이들 시험법의 문제점들을 보완하고, 일반적인 단조공정에 적용 가능하도록 보스-리브 시험법(boss and rib test)[9]을 제안하였다. 이 시험법은 후방 압출공정을 이용한 시험법으로서, 중공형 펀치를 이용하여 소재를 가압하였을 때 펀치의 내부와 외부에 생기는 보스와 리브의 높이 차를 이용하여 마찰인자를 측정하는 방법이다. 본 연구에서는 보스-리브 시험 시 펀치형상 및 유동응력에 따른 소재의 변형양상과 마찰보정선도에 미치는 영향에 대하여 연구를 수행하였다.

2. 실험

2.1 실험

실험에 사용된 금형 형상을 Fig. 1에 도시하였으며, 펀치와 금형의 주요치수는 Table. 1에 정리하였다. 실험에 사용된 소재는 Al6061-O이며, 소둔처리를 위해 415°C에서 8시간 가열 후 12시간 동안 노냉하였다. 성형해석에 필요한 유동응력을 얻기 위하여 200Ton 유압식 프레스에서 10mm/s의 속도로 압축실험을 수행하였으며, 도출된 유동응력식은 식 (1)과 같다.

$$\bar{\sigma} = 186.9 \bar{\epsilon}^{0.426} \text{ MPa} \quad (1)$$

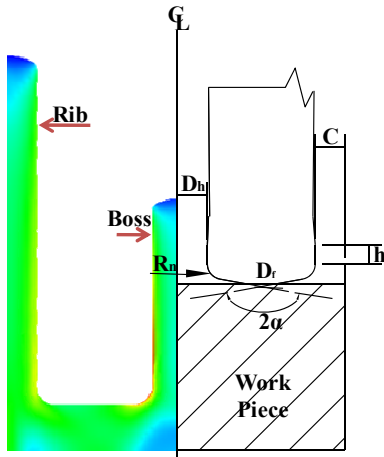


Fig. 1 Shapes of punch and die used in simulation and experiment

Punch	Land (h, mm)	1.9
Nose Radius (R _n , mm)		1.6
Punch face angle (2α, °)		180
Punch face diameter (D _p , mm)		3.3
Punch hole diameter (D _h , mm)		3.0
Clearance (C, mm)		3.0

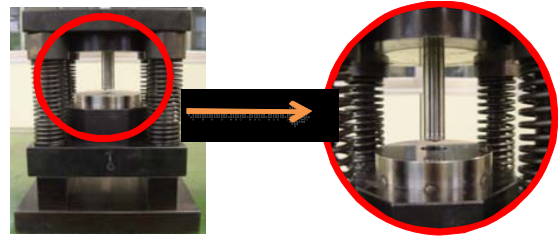


Fig. 2 Experimental set-up for boss and rib test

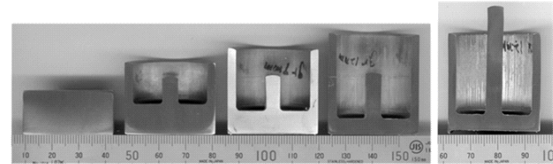


Fig. 3 Deformed shapes according to the punch stroke (a) when the grease was applied and (b) under the dry condition

실험에 사용된 시편의 형상은 $\phi 34.0\text{mm}$, 높이 17.0mm이며, 그리스(grease)와 무윤활 조건(dry condition)에서 실험을 수행하였다. 보스-리브 시험에 사용된 다이셀을 Fig. 2에 도시하였다. Fig. 3은 각 윤활제에서 펀치의 스트로크에 따른 소재의 변형양상을 나타낸 그림이다. 그림에서 알 수 있듯이 윤활제로 그리스를 사용한 경우 펀치 스트로크가 증가함에 따라 보스와 리브가 후방으로 동시에 압출되지만 보스 높이가 리브보다 낮게 형성되는 것을 알 수 있다. 반면, 무윤활 조건에서는 보스의 높이가 크게 형성되었다. 그러나 무윤활 조건에서는 소재 표면에서의 스크래치(scratch)와 골링(galling)과 같은 결함이 발생하였고, 금형 손상이 예상되어 추가 실험은 수행하지 못하였다.

Fig. 2의 소재의 변형양상으로부터 윤활조건 또는 마찰조건에 따라 보스와 리브의 높이에 차이가 발생하는 것을 알 수 있다. 이러한 소재의 변형 특성을 이용하여 사용된 윤활제에서의 마찰조

건을 정량적으로 측정할 수 있다.

3. 유한요소해석

3.1 마찰조건에의 영향

실험을 통해 윤활상태에 따라 형성된 보스와 리브의 높이차가 발생함을 확인하였다. 마찰조건에 따른 변형양상을 고찰하기 위해 단조해석 프로그램인 CAMPform-2D[10]를 이용하여 성형해석을 수행하였다.

성형해석은 마찰상수 m_f 를 0.1~0.9까지 변경하여 수행하였다. 마찰상수가 각각 0.1과 0.9에서의 소재의 변형양상을 Fig. 4에 나타내었다. 실험과 마찬가지로 마찰조건에 따라 보스와 리브의 높이가 서로 다르게 나타나고 있음을 유한요소해석을 통해 확인하였다. Fig. 5는 유한요소해석으로부터 도출된 마찰상수에 따른 보정선도를 나타낸다. 펀치의 스트로크가 증가함에 따라 보스와 리브의

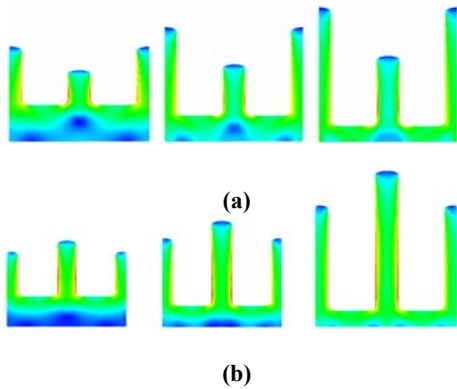


Fig. 4 Deformed shapes according to the punch strokes when the shear friction factors of (a) 0.1 and (b) 0.9 were applied

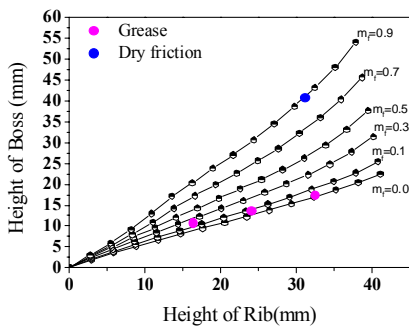


Fig. 5 Calibration curve for estimation of friction condition

Table 2 Change in length of punch land, nose radius and face angle

Punch Land (h, mm)	0.995	1.68	1.90
Nose Radius (R_n , mm)	0.77	1.10	1.60
Punch face angle (2α , °)	160	170	180

높이가 선형적으로 증가하며, 특히 마찰상수가 커짐에 따라 보스의 높이가 급속히 증가하는 것을 확인할 수 있다. 또한, 실험에서 측정된 보스와 리브의 높이를 Fig. 5의 마찰 보정선도에 도시한 결과 마찰상수는 각각 0.1(그리스)과 0.9(무윤활)로 예측되었다.

3.2 펀치형상의 영향

보스와 리브의 높이는 마찰조건뿐만 아니라 펀치와 금형의 형상에 따라 영향을 받는다. 따라서 본 연구에서는 펀치의 형상에 따른 소재의 변형양상을 유한요소해석을 통해 고찰하였다.

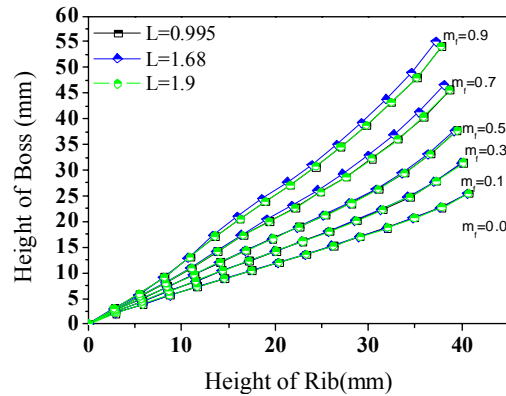


Fig. 6 Effect of the punch land length

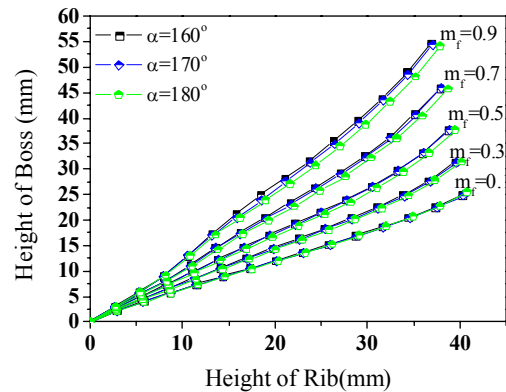


Fig. 7 Effect of the punch face angle

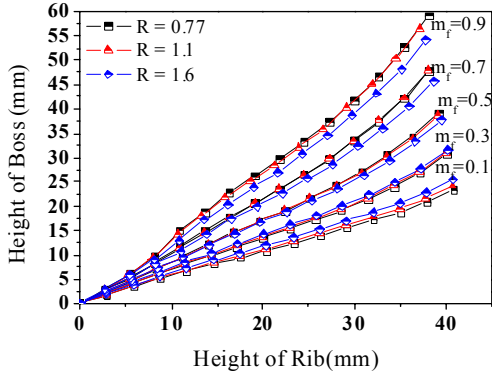


Fig. 8 Effect of the punch corner radius

먼저 펀치 랜드부의 길이(h) 따른 소재의 변형 양상을 살펴보기 위해, Table 1에서 펀치 랜드부의 길이만(Table 2)을 변경하여 성형해석을 수행하였으며, 그 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 펀치 랜드부의 길이에 따라 마찰보정선도의 변화는 크지 않으나, 전단마찰상수가 0.7~0.9에서는 펀치 랜드부의 길이가 커질수록 보스부의 높이는 다소 감소하는 것을 확인하였다.

다음으로 펀치면의 각도만(Table 2)을 변경하여 성형해석을 수행하였다. Fig. 7에 도시한 바와 같이 전체적으로 마찰보정선도의 변화는 크지 않지만, 펀치면의 각도와 전단마찰상수가 클수록 보스부의 높이는 다소 작아지는 경향을 볼 수 있다.

Fig. 8에 펀치 코너 반경이 증가할 때의 마찰보정선도 변화를 도시하였다. 특이한 점은 전단마찰상수가 0.3이하에서는 펀치 코너 반경이 증가할수록 보스부의 높이가 증가하며, 반대로 0.3 이상에서는 보스부의 높이가 감소하는 경향을 보인다. 그러나 유한요소해석 결과로부터 마찰보정선도에 미치는 펀치 형상의 영향은 매우 작은 것으로 판단된다.

3.3 펀치 내경과 펀치와 금형 간극의 영향

펀치의 형상을 결정하는 주요부 치수인 h, R, 2α 를 변경하여 성형해석을 수행하였을 때, 치수변경에 따른 영향이 크지 않음을 확인하였다. 본 절에서는 보스와 리브의 두께를 결정하는 펀치 내경(D_h)과 펀치와 금형 사이의 간극(C)을 변경하여 성형해석을 수행하였다. 성형해석 시 펀치 주요부의 치수는 Table 1의 값을 적용하였고, 변경된 펀치 내경 및 간극은 Table 3에 정리하였다.

펀치 내경과 간극에 대한 영향을 보기 위한 성

Table 3 Change in diameter of punch hole and clearance between the punch and die

hole diameter of punch (D_h , mm)	3	4	5
Clearance (C, mm)	3	4	5

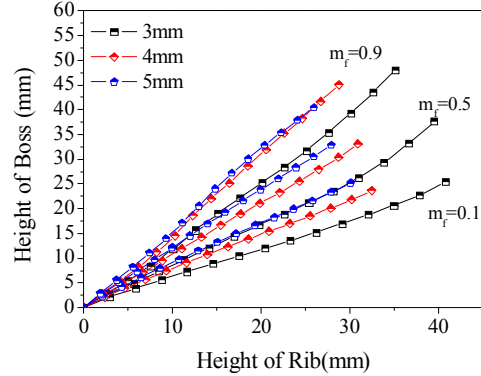


Fig. 9 Effect of hole diameter of the punch

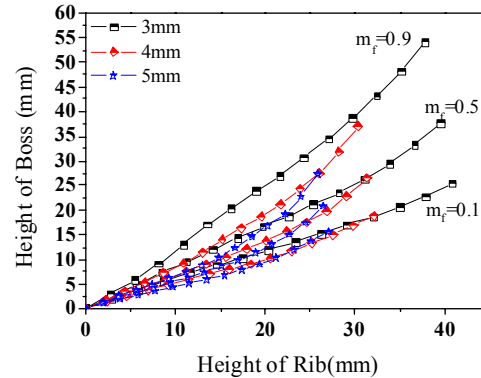


Fig.10 Effect of strength coefficient and strain-hardening exponent

형해석결과를 각각 Fig. 9과 10에 나타내었다. 내경의 크기가 증가하면 그래프의 기울기가 증가한다. 즉, 보스의 높이는 증가하는 반면 리브의 높이는 감소한다. 펀치 내경이 증가하면 보스의 직경이 커지게 되며 펀치 내경 부위로 유입되는 소재유입량은 상대적으로 많아지므로 전체적인 보스의 높이는 높아지게 되며 리브의 전체적인 높이도 감소하는 것을 확인 할 수 있다. 그러나 동일한 리브높이에 대한 보스 높이는 펀치 내경이 증가할수록 커지며 이로 인해 그래프의 기울기는 증가하였다. 또한, 펀치 내경이 커질수록 보스와 리브의 높이가 변화하지만, 전단마찰상수에 따른 민감도에는 큰 영향을 주지 않는 것으로 판단된다.

Fig. 10은 펀치와 금형 사이의 간극에 따른 마찰보정선도의 영향을 도시한 그래프로서, 간극이 증가할수록 보스와 리브의 높이가 비선형적으로 증가하고 있으며, 마찰상수에 대한 민감도도 감소하는 것을 확인 할 수 있다. 따라서 간극이 3mm일 때 그래프의 형상이 가장 선형적이며, 마찰상수에 대한 민감도가 높아 적절한 간극이라 판단된다. 그러나 향후 펀치의 내경과 펀치와 금형사이의 간극을 3mm 이하로 변경하였을 때의 영향도 분석할 필요가 있다.

Table 4 Summarized K and n values

K (MPa)	n		
	0	0.2	0.426
186.9	0	0.2	0.426
700	0	0.2	0.426
1200	0	0.2	0.426

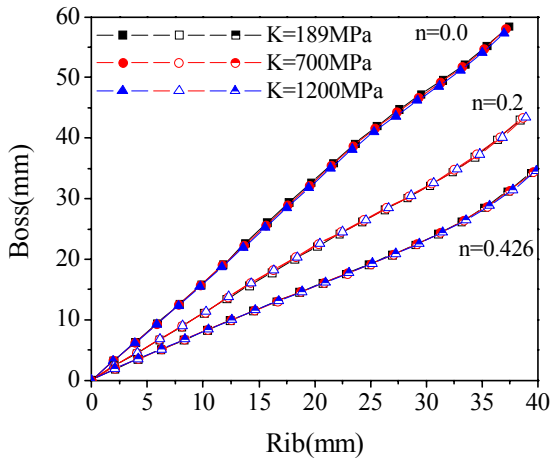


Fig.11 Effect of strength coefficient and strain-hardening exponent

3.4 소재 유동응력의 영향

지금까지 마찰상수, 펀치형상, 펀치 내경 및 간극에 따른 소재의 변형양상에 대한 영향을 분석하였다. 그러나 소재의 유동응력이 달라지면 변형양상에 큰 영향을 미치므로, 본 연구에서는 이러한 유동응력에 따른 소재의 변형양상을 고찰해보았다. 일반적으로 체적성형공정(상온)에서의 유동응력식은 식 (2)와 같은 power law로 표현된다.

$$\bar{\sigma} = K \bar{\epsilon}^n \quad (2)$$

여기에서 $\bar{\sigma}$, $\bar{\epsilon}$, K, n은 각각 유효응력, 유효변형률, 강도계수, 가공경화지수를 의미한다.

본 연구에서 적용된 강도계수와 가공경화지수는 Table 4에 정리하였으며, 각 경우에 대한 해석결과를 Fig. 11에 비교하였다. 그림에서 확인할 수 있듯이 강도계수에 따른 보스와 리브의 높이 차는 발생하지 않으며, 반면 가공경화지수가 증가함에 따라 보스의 높이는 감소하였다. 따라서, 보스와 리브의 높이변화는 강도계수에 대하여 독립적이나, 가공경화 지수에 대한 의존성이 높은 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구는 보스-리브 시험법에서 펀치 형상과 유동응력에 따른 소재의 변형양상을 고찰하였고, 펀치 형상을 표준화하기 위한 성형해석을 수행하였다. 유한요소해석으로부터 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 펀치의 형상은 마찰보정선도에 큰 영향을 미치지 않는다.
- (2) 펀치의 내경은 마찰보정선도 변화에 영향을 미치나 마찰상수에 대한 민감도는 크게 변하지 않는다.
- (3) 펀치와 금형 사이의 간극은 마찰보정선도에 큰 영향을 미치며, 마찰상수에 대한 민감도도 낮아진다. 특히 보스와 리브의 선형적인 관계는 유지되지 않으므로 적절한 간극 선정이 중요하다.
- (4) 보스와 리브의 높이는 강도계수의 영향은 거의 받지 않으나 가공경화지수에 민감하게 반응한다.

후 기

본 연구는 한국기계연구원 부설 재료연구소의 국제협력사업의 일환으로 수행되었으며, 이에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

[1] G. Liu, S. M. Mahdavian, 1998, Application of Computer Aided Upper Bound Method in Forging and Extrusion Processes, Met. Mater., Vol. 4, No. 4, pp. 956~960.

- [2] P. Hartley, C. T. N. Sturges, G. W. Rowe, 1979, friction in finite-element analyses of metal forming Processes, Int. J. Mech. Sci., Vol. 21, pp. 301~311.
- [3] W. L. Xu, K. P. Rao, 1997, Analysis of the deformation characteristics of spike-forging process through FE simulations and experiments, J. Mater. Process. Technol., Vol. 70, pp. 122~128.
- [4] G. Shen, A. Vedhanayagam, E. Kropp, T. Altan, 1992, A method for evaluating friction using backward extrusion-type forming, J. Mater. Process. Technol., Vol. 33, pp. 109~123.
- [5] T. Nishimura, T. Sato, Y. Tada, 1995, A method for the evaluation of lubrication using injection upsetting, J. Mater. Process. Technol., Vol. 53, pp. 712~725.
- [6] T. Schrader, M. Shirgaokar, T. Altan, 2007, Acritical evaluation of the double cup extrusion test for selection of cold forging lubricants, J. Mater. Process. Technol., Vol. 189, pp. 36~44.
- [7] S. H. Kang, Y. T. Im, 2002, Finite Element Analysis of the Effect of Centering Groove on Tip Test, Trans. Kor. Soc. Mech. Eng. A, Vol. 26, No. 7, pp. 1340~1347.
- [8] S. H. Kang, J.H. Lee, J.S. Cheon, Y.T. Im, 2004, The effect of strain-hardening on frictional behavior in tip test, Int. J. Mech. Sci, vol. 46, pp. 855~869.
- [9] S. H. Kang, Y. W. Yun, Y. S. Lee, 2009, Proc. Kor. Soc. Tech. Plast. Conf.(eds, Y. S. Lee, S. W. Choi), Songdo, Incheon, pp.445~449.
- [10] Y. T. Im, 2009, Computer aided materials processing lab., <http://camp.kaist.ac.kr/campseries>.