

금형면에 마찰조건을 달리한 Spline 단조의 유한요소 해석 Finite Element Analysis for Cold Forging of Spline with Different Friction Factor on Die Surface

*#조혜용¹, 이인환², 이석진³, 김관우⁴, 조성열⁵, 김종원⁶, 한기범⁷

*H. Y. Cho¹, I. H. Lee², S. J. Lee³, K. W. Kim⁴, S. Y. Cho⁵, J. W. Kim⁶, K. B. Han⁷

^{1,2}충북대학교 기계공학부, ³제주항공 정비본부, ⁴⁻⁷충북대학원 정밀기계공학과

Key words : Cold Forging, Finite Element Analysis, Friction Factor, Spline

1. 서론

스플라인은 치형에 따라 각형 스플라인, 인벌류우트 스플라인 및 세레이션 등이 있으며, 가공법은 호빙, 웨이빙 등의 절삭가공법이 많이 사용된다. 그러나 최근 제품의 정밀성과 대량생산화를 지향함에 따라 소성가공에 의한 성형법 개발과, 성형공정의 문제해결에 대한 실험과 해석적 방법의 연구가 활발하게 진행되고 있다¹⁻⁷.

그러나 지금까지의 연구는 성형성을 향상시키기 위해 열처리 조건을 찾거나 제품성형 시 금형의 치형 정밀도에 대한 연구가 대부분이었다. 특히 금형의 마찰에 관한 연구는 마찰력을 금형전체에 동일하게 적용시킨 것이 대부분이었으며, 금형의 일부분에 마찰력을 다르게 적용하여 소재의 유동을 제어함으로써 성형성을 향상시키는 연구는 아직 미비한 상태이다. 따라서 본 연구에서는 강소성 유한요소해석 프로그램인 DEFORM-3D를 이용하여 금형의 마찰상수 차등적용과 형상변경 방법으로 소재의 유동을 제어함으로써 치수정밀도 향상 및 불필요한 버의 성장을 억제하고자 하였다.

2. 유한요소 해석 및 실험

양단에 스플라인 형상을 갖는 축의 단조에 관한 유한요소해석을 위해 3차원 CAD 프로그램인 Pro/ENGINEER를 이용, 축대칭 형상과 해석시간을 감안하여 금형과 펀치에 대해 1/4 해석 모델을 설계하였다.

Fig.1은 총 5단계로 설계된 단조공정을 도식적으로 나타낸 것으로 1, 2단계에서 상부펀치와 하부펀치에 의한 밀폐단조 성형, 3단계에서 스플라인부의 예비성형, 4, 5단계에서 스플라인 성형이 완료된다.

Fig.2는 차등 마찰조건을 적용하기 위한 분할 모델링을 나타낸 것으로 Fig.3과 같이 스플라인 형상의 금형면에 마찰계수를 0.08~0.2로 차등 적용하였고, Fig.4에 펀치 아래 접촉면양각의 돌기 개수와 형상에 따른 마찰조건 변화를 해석에 고려하였다.

Table 1에 해석 초기조건, 경계조건, 모델정보를 간단히 정리하였다. 가공 전 펀치와 금형사이 간격은 200mm

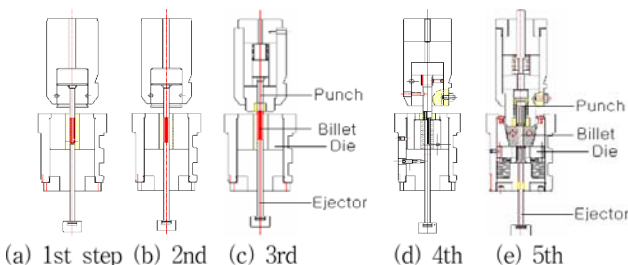


Fig. 1 Schematic description of a forging process

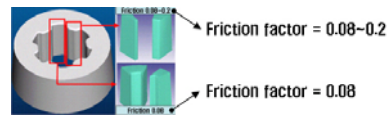


Fig. 2 Modeling of die to apply different friction factor

Table 1 Initial condition, boundary condition and information of model

Analysis condition	values
Working temperature	70°C
Friction factors of cast and punch	0.08, 0.1, 0.12, 0.20
Ram speed of punch	600 mm/s
Number of Elements	80,000
Simulation steps	100 step
Modeling	1/4(symmetry)

Table 2 Mechanical properties of AISI 1006

Properties	Values
Hardness(HV)	98
Ultimate tensile strength	330 MPa
Modulus of elasticity	205 GPa
Density	7.872 g/cc
Yield tensile strength	285 MPa
Poisson's ratio	0.29
Shear modulus	80 GPa

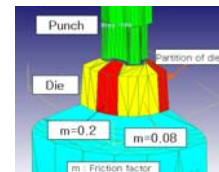


Fig.3 Applications of different friction factors

이고 0.6m/s의 펀치속도로 성형되며 표에서와 같이 마찰조건을 차등 적용하였을 때 해석결과를 통해 제품 성형성 및 품질을 비교분석하였다. Table 2는 소재의 기계적 물성이고, 금형 및 펀치는 강체로 해석에 적용시켰다.

3. 해석 및 실험 결과

강소성 유한요소 해석 프로그램인 DEFORM-3D를 활용하여 스플라인의 각 성형단계별 성형성을 예측하였다. 예측된 스플라인 성형결과 중 불필요한 버의 발생과 하단부 성형성 불만족 문제는 금형과 펀치가 소재와 접촉되는 부분의 마찰상수 차등적용 및 펀치의 형상을 변경을 통해 성형성을 향상시키고자 하였다. 신뢰성을 검증하기 위하여 해석과 동일조건인 단조실험을 수행하고 그 결과를 유한요소 해석결과와 비교, 분석하였다.

시뮬레이션을 통한 성형과정에서 스플라인의 기초원부분이 금형과 먼저 접촉되어 하단부가 미 성형된 상태에서 상단부의 압력은 증가한다. 이에 따라 상대적으로 압력이 낮은 금형과 펀치사이에서 버가 발생하였다.

Fig. 4(a)~(d)는 Fig.2와 같이 금형면 마찰상수 차등 적용에 따른 스플라인 끝단의 버 생성 및 크기 결과를 나타낸 것이다. 그림을 보면 알 수 있듯이 Fig 7(d)의 마찰상수 0.2일 때 0.12로 적용하였을 때보다 버의 성장량이 보다 감소하였다. 마찰상수 0.12때부터 확인된 하단부의 성형성 향상 정도는 더욱 뚜렷이 확인되었고 버의 발생시점이 마찰상수 0.12일 때 보다 하단부 성형성 또한 향상되었다. 특히, 마찰상수 0.2일 때 스플라인의 기초원 부분과 치형의 끝단모두 균형적으로 성장함을 확인 할 수 있었다.

Fig. 5는 펀치형상변경에 따른 성형성 분석결과를 나타낸 것으로, 성형성이 가장 많이 향상된 것은 돌기가 1개일 때이다. 돌기가 2개 이상일 때에는 과도한 마찰력으로 성형성이 저하되었다. 따라서 과도한 마찰력은 성형성이 저하된다는 것을 확인하였다.

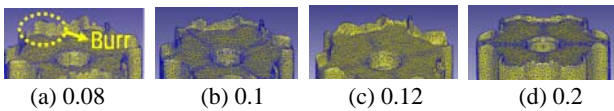


Fig. 4 Results according to friction factors on die surface

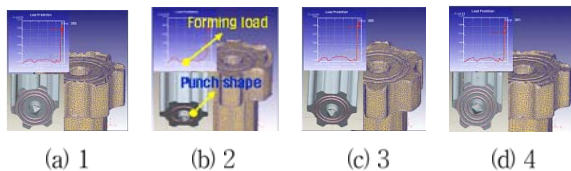


Fig. 5 Results according to number of projection on punch surface

실험결과에 대한 데이터를 Table 3에 나타내었다. 버의 성장이 가장 많이 억제된 방법은 금형 및 펀치의 마찰상수를 0.2로 적용하고 펀치 형상을 돌기 1개가 제작된 형상으로 변경하여 실험한 경우이다. 실험결과에 대한 분석내용은 다음과 같다.

1) Fig. 6(a)는 금형면 전체에 마찰계수 0.08을 적용한 실험결과이다. 스플라인의 치형 끝부분에서는 버가 전혀 발생하지 않은 것에 비해 기초원 부분에서의 버 성장량은 0.59mm, 0.57mm, 0.56mm로 평균 0.57mm 성장하였다. 해석결과에서 볼 수 있듯이 금형전체에 일률적으로 적용된 마찰상수는 소재의 유동을 전혀 제어하지 못하여 버가 발생함을 알 수 있다.

2) Fig. 6(b)는 금형의 일부분에 마찰상수를 차등 적용하여 실험한 결과이다. 유한요소 해석은 마찰상수를 0.1~0.2까지 차등적용이 가능하였으나, 실제 금형에서

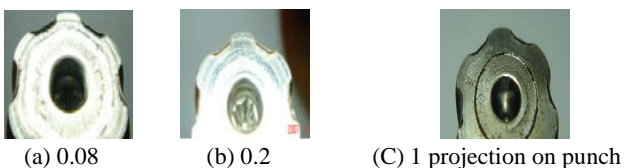


Fig.6 Results of experiments with different friction factor of die surface and punch shape

Table 3 Result of experiments

Friction factor	No. of Projection	1st	2nd	3rd	4th	5th	6th	ave
0.08	0	0.65	0.55	0.51	0.60	0.60	0.65	0.59
0.2	0	0.31	0.25	0.25	0.26	0.24	0.27	0.26
0.08	1	0.18	0.14	0.16	0.15	0.18	0.13	0.15
0.2	1	0.13	0.15	0.15	0.14	0.14	0.15	0.14

는 마찰상수 측정이 불가능하여 표면조도를 변경하는 한 가지 방법만을 적용하였다. 버의 성장량은 0.26mm, 0.25mm, 0.25mm로 평균 0.25mm 성장하여 1)항 대비 평균 성장량이 0.32mm감소하였다.

3) Fig. 6(c)는 펀치 형상변경을 변경하여 실험한 형상이다. 성형성이 가장 많이 향상된 돌기 1개 때의 결과를 확인해 보면 버의 성장량은 0.15mm, 0.16mm, 0.15mm로 평균 0.15mm 성장하여 2)항 대비 평균성장량이 0.1mm 감소하였다. 실험결과와 해석결과의 비교결과 버의 성장량과 하단부 성형성에서 동일한 결과를 확인 할 수 있다.

4. 결론

1. 스플라인 단조성형에 대한 유한요소해석 과정에서 소재와 접촉되는 금형면의 일부분에 마찰상수를 0.08부터 0.2까지 차등 적용한 결과, 금형전체에 대하여 마찰상수가 0.08로 동일하게 적용되었을 때보다 불필요한 버의 발생시기가 지연되었다. 특히 마찰상수가 0.2로 적용되었을 때에는 버의 성장량이 현저히 감소함을 확인 할 수 있었다. 이러한 결과는 실험결과에서도 동일하게 확인되었으며, 단조공정에 적용한다면 단조품의 성형정밀도 향상이 가능할 것으로 생각한다.
2. 소재와 펀치의 접촉면에서 펀치의 형상을 변경하여 마찰력을 증가시킨 결과 금형면에 마찰상수를 차등적용했을 때와 유사하게 버의 성장이 억제되고 스플라인 하단부 성형성이 향상됨을 확인 할 수 있었다.
3. 단조순간의 금형 마찰상수는 측정이 불가능하여 실 금형의 마찰상수 변경 적용 시 표면 거칠기를 변화시키는 한 가지 방법만을 적용하였으나, 해석과 실험에서 마찰상수가 소재의 유동속도에 큰 영향을 미치는 것을 확인 할 수 있었다.

후기

본 논문은 산업자원부의 지원으로 수행한 에너지자원인력양성사업의 연구결과입니다.

참고문헌

1. H. Y. Cho, "Study on the Forging of Splines with Hollow and Solid Billets", Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 13, No. 1, pp. 108-115, 1996
2. D. H. Jang, "Finite Element Analysis for Frictional Contact Problem of Axisymmetric Deforming Bodies" Transactions of Materials Processing, Vol. 12, No. 1, pp. 26-33, 2003
3. J. H. Lee, "Dimensional Accuracies of Cold-Forged Spur Gear" Transactions of Materials Processing, Vol. 5, No. 2, pp. 115-121, 1996
4. J. C. Choi, "A Study of Automated Process Planning and Die Design for Multi Former-Bolt Products", Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 20, No. 4, pp. 29-38, 2002
5. H. Y. Cho. "A Study on the Forging of Gear-Like Components", KSME International Journal. Vol. 12, No. 4. pp. 615-623, 1998