

정밀단조 금형의 수명 평가에 관한 연구

최창혁*, 이선홍, 정경빈(경남대 대학원 기계설계학과), 김용조(경남대 기계자동화공학부)

A Study on Life Estimation of a Precision Forging Die

C. H. Choi*, S. H. Lee, K. B. Jung(Machine Design Dept., KU), Y. J. Kim(Mech. Eng. Dept., KU)

ABSTRACT

A rigid-plastic finite element analysis for the die forging process of a socket ball joint, which is used in the transportation system, was carried out. And also with the results, the elastic stress analysis for the forging die was performed in order to get basic data for the die life prediction. The die fatigue life prediction was simulated using Goodman's and Gerber's equation. The prediction technique for the fatigue life of a forged product, the socket ball joint, using DEFORM-3D is presented and the results are commented upon. Archard's wear model was used for the wear simulation and then the wear quantity was evaluated using wear volume. In order to prove the wear simulation results to be reliable, wear quantity of the real forging die set in used a forging factory was measured using a 3-dimensional measurement apparatus. The simulation results were relatively in good agreement with the experimental measurements.

Key Words : Hot forging (열간단조), Wear (마멸), Finite element analysis (유한요소해석), 3-dimensional measurement (3차원 측정), Stress-life curve (응력-수명곡선), Goodman's and Gerber's equation (피로수명 등수명식)

1. 서론

자동차나 공작기계 및 일반 기계류에 사용되는 많은 부품들은 일반적으로 여러 단계의 제작공정을 거쳐서 원하는 제품이 된다. 이들 중 소성가공에 의해 만들어지는 부품들은 공정 및 금형의 조건에 의해 성공적인 성형여부가 결정된다. 특히 금형은 제품의 정밀도나 경제성에 큰 영향을 미치므로 적절한 금형 교체시기를 예측할 수 있는 금형설계 기법의 개발과 금형수명의 예측은 필수적이다. 일반적으로 금형의 수명은 거시적인 마모로 인해 치수오차가 생겨 수명이 다하거나, 응력집중에 의한 과응력 또는 피로에 의해 발생하는 파괴 등으로 제한시킬 수 있다. 산업현장에서 금형수명의 중요성을 인식하고 있음에도 불구하고 이에 관한 연구는 활발하지 않은 실정이다.

본 연구에서는 차량 부품인 Socket ball joint의 정밀단조를 위한 Blocker와 Finisher 공정에 대해 유한요소 해석하였으며, 금형의 수명예측 해석을 위해 공정 해석결과를 기초로 하여 금형의 탄성 해석을 수행하였다. 이를 바탕으로 금형 소재의 응력-수명

곡선을 이용하고 Goodman과 Gerber^[1]의 식을 적용하여 금형의 피로수명을 평가하였다. 또한 금형에서의 마면부위 및 마멸량을 해석하였고, 특히 해석결과 신뢰성을 얻기 위하여 3차원 형상측정기^[2]를 이용하여 실제 금형의 마멸량과 해석결과에서의 마멸량을 비교하였다. 그 결과 반복 하중으로 인한 금형의 피로수명과 마멸로 인한 금형의 파손 수명을 예측하였고 금형 수명에 큰 영향을 미치는 인자를 파악하여 정확한 수명을 평가하였다.

2. 단조시 금형 수명평가 방법

금형의 수명을 저하시키는 주 요인으로는 파단, 소성변형, 마멸, 기계적 및 열적피로, 표면용착 등의 원인이 있으며 냉간단조에서는 파괴나 소성변형에 의한 금형의 수명 저하가 현저하고 열간단조 및 온간단조에서는 금형의 마멸에 의한 수명저하가 70%를 초과하는 것으로 알려져 있다.^[3] 수명 평가 방법으로는 피로에 의한 표면에서의 균열 발생까지의 수명과 마멸로 인한 치수정밀도가 제품의 기준에 미달될 때까지 마멸 따른 수명 평가 방법을 제시하였다.

2.1 금형의 피로수명 평가 방법

금형의 피로수명 예측을 위해 응력-수명 방법을 적용하였다. S-N 선도는 다음의 관계식이 사용된다.

$$S = 10^c N^b \quad (10^3 \leq N \leq 10^6) \quad (2-1)$$

여기서 지수 C와 b는 재료상수이다. 평균응력이 적용된 경우 교번응력 대 평균응력의 관계식 중 가장 많이 사용되고 있는 Goodman과 Gerber의 식은 다음과 같다.

$$\text{Goodman} : \frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_u} = 1 \quad (2-2)$$

$$\text{Gerber} : \frac{\sigma_a}{S_e} + \left(\frac{\sigma_m}{S_u} \right)^2 = 1 \quad (2-3)$$

여기서, S_e 는 피로한도이다. 실제 피로수명은 Goodman과 Gerber의 식 사이에 존재한다.¹⁴⁾

본 연구에서는 다축피로이론 중 상당응력 변형률 방법¹⁵⁾의 최대응력을 이용하여 조합응력상태의 피로수명을 해석하였다.

2.2 금형의 마멸량 평가 방법

마멸량 평가에서는 이론 해석이 간단하면서 실제 마멸 메커니즘에 널리 적용되고 있는 Archard 마멸 모델을 적용하였다. Archard의 마멸식은 다음과 같다.

$$V = \frac{kFL}{3H} \quad (2-4)$$

여기서 V는 마멸체적[mm³]이며 k는 마멸계수, P는 수직압력[N/mm], L은 미끄럼길이[mm], H는 금형의 경도[HRC]이다. 일반적으로 금속형공정에서 금형에 작용하는 압력은 공정의 진행과 함께 변하므로 위 식을 마멸계수와 금형의 경도가 일정하다고 가정하고 증분해석에 적용하기 위한 적분 형태로 표현하여 마멸깊이를 나타내면 2-5식과 같다.

$$\dot{w} = \frac{k}{3H} \sum_{i=1}^N (\sigma_n v_s \Delta t) \quad (2-5)$$

여기서 \dot{w} 는 마멸깊이, σ_n 은 금형 면에 작용하는 수직응력, v_s 는 금형과 소재간의 접촉면적에서 미끄럼속도이며 Δt 는 증분시간을 나타낸다.

3. 마멸량 측정 방법

본 해석에서 구해진 마멸량의 신뢰성을 확보하기 위하여 열간단조 공정을 거친 실제 금형의 마멸량을 측정하였다.

실제 7,000회 정도의 열간단조 공정을 거친 후 마멸된 금형을 접촉식 3차원 형상측정기를 사용하여 측정하였다. 데이터는 금형의 표면에서 1mm 간격으로 얻어내었다. 형상측정시의 마멸량을 계산하기 위하여 3차원 측정량의 비교 프로그램인 Rapidform

2004¹⁶⁾를 사용하였으며 접촉식 3차원 형상 측정기에 서의 금형의 표면에 관한 데이터를 해석에 사용된 금형 모델링 형상, 즉 초기형상의 표면데이터와 결합시켜 두 데이터의 변위를 측정하였다.

4. 금형 수명 해석 및 결과

4.1 금형의 피로수명 해석

상용프로그램인 MSC. Fatigue를 사용하여 피로수명을 평가하였다. 피로수명은 조합응력상태를 고려한 von Mises응력을 이용하고 평균응력의 영향을 고려한 Goodman과 Gerber식을 사용하여 2종류의 피로수명을 해석하였다.

4.1.1 금형의 피로수명 해석 조건

S-N 곡선을 그리기 위하여 문헌¹⁶⁾에서 STD61의 피로시험 결과를 적용하였으며, Fig.4-1와 Table 4-1에 나타내었다. 또한 금형의 물성치는 Table 4-2에 나타내었다.

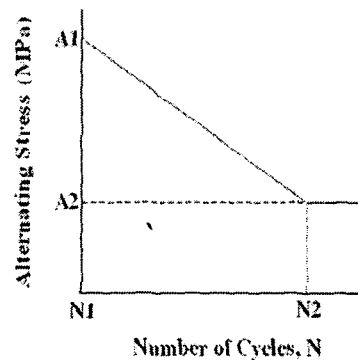


Fig.4-1 S-N curve by experimental results to STD61

Table 4-1 Data of fatigue test for stress ratio R=-1

Stress Amplitude(MPa)	Number of Cycles
A1=700	N1=7,000
A2=285.15	N2=370,000

Table 4-2 Mechanical properties of STD61

Properties	Values
Yield Strength (MPa)	1250
Tensile Strength (MPa)	1906
Modulus of Elasticity (GPa)	197.8
Poisson's Ratio	0.3

금형에 작용하는 하중 상태는 DEFORM-3DTM에 의한 단조공정해석의 결과에서 얻을 수 있다. 하중은 상부 금형이 소재와 접촉하기 시작한 시점부터 소재를 완전한 형상으로 만들 때까지 작용하는 하중의 크기가 계속 증가하므로 최종 변형 단계에서의 금형의 응력해석 결과를 적용하였다.

Fig. 4-2은 상부 및 하부 금형의 응력해석에서 얻은 von Mises응력 분포를 나타낸 것이다. 상부 금형의 von Mises응력의 최대값은 844MPa이었으며 하부 금형의 최대값은 911MPa으로 나타났다.

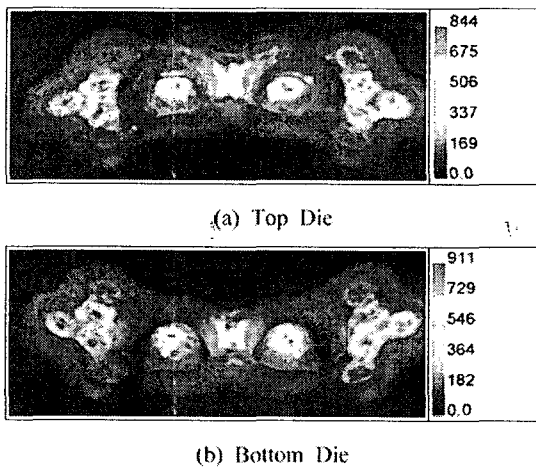


Fig. 4-2 Comparison of von Mises stress distributions

4.1.2 금형의 피로수명 평가

평균응력의 영향을 고려한 Goodman과 Gerber의 식을 적용하여 MSC. Fatigue를 사용하여 피로수명을 해석하였다. Fig.4-3과 Fig.4-4는 해석한 수명의 분포를 나타낸 것이다. 또한, Table 4-3에는 가장 적은 수명을 가지는 요소에서의 수명을 나타내었다.

Table 4-3 Results data by Goodman's and Gerber's equation

	Goodman's eq Life (cycle)	Gerber's eq Life (cycle)
Top Die	23854	53031
Bottom Die	10828	24780

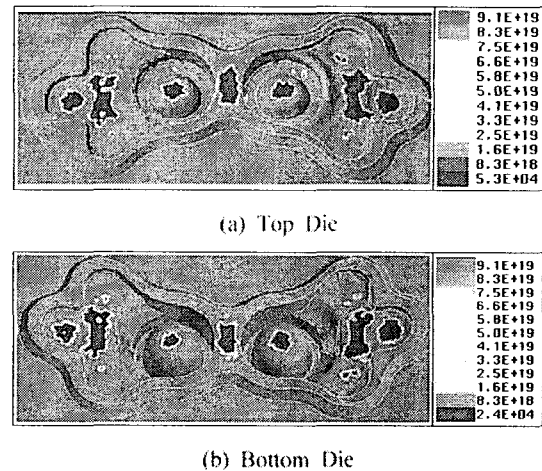


Fig. 4-3 Distribution of fatigue life predicted using Goodman's equation

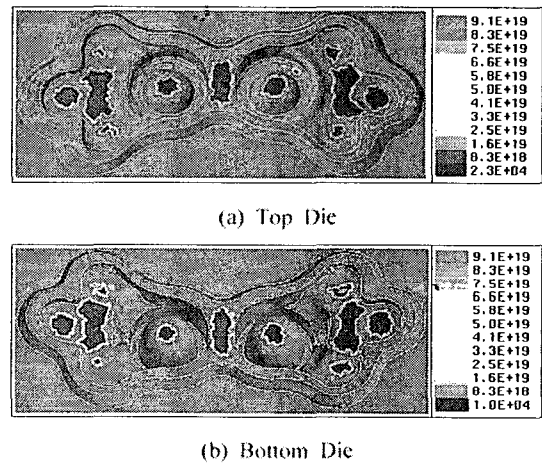


Fig. 4-4 Distribution of fatigue life predicted using Gerber's equation

4.2 금형의 마멸량에 따른 수명 평가

Socket ball joint의 금형 마멸 해석에 필요한 수직 하중과 미끄럼 속도 등을 구하기 위하여 DEFORM-3D를 사용하여 응력해석을 수행하였다.

4.2.1 해석조건

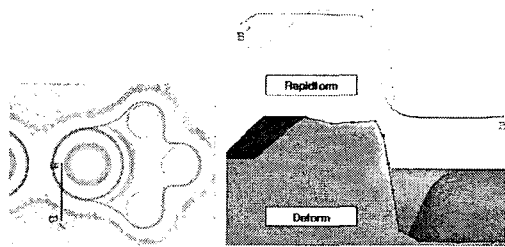
본 연구에서는 기존의 마멸에 관한 연구에서 구해진 동일한 계수에 대한 마멸계수를 사용하여 마멸량을 계산하였으며, 이때의 마멸계수 k 의 값은 1.37×10^{-6} 을 적용하였다.^[8] 마멸 해석을 위하여 단조성형 1회 수행시의 변형 해석과 열전달 해석을 수행하였다. 유한요소해석에 사용된 물성치는 Table 4-4에 나타내었다.

Table 4-4 Wear simulation conditions

Operation variables	Movement	Sliding
	Velocity (mm/sec)	300
System structure	Billet	SM45C
	Die	STD61
	Atmosphere	Air
	Billet temperature (°C)	1200
	Die temperature (°C)	105
	Friction factor (<i>m</i>)	0.3

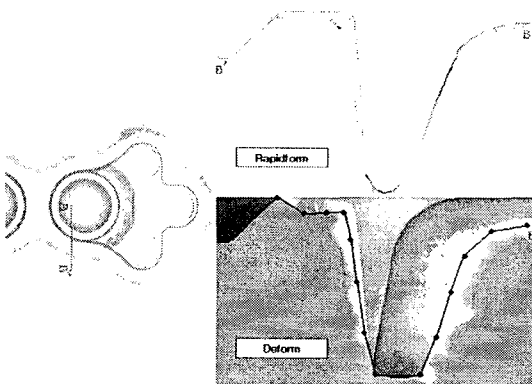
4.2.2 형상측정 및 해석결과

상부와 하부 금형에 대한 해석결과와 형상측정 결과에 대해 비교하였다. 금형의 수명을 예측하기 위하여 시뮬레이션에서 마멸량이 가장 많은 Fig.4-5의 B-B' 부위인 하부 금형의 가장자리 부분을 고려하였으며, 제품의 치수공차를 한계 마멸범위로 설정하여 치수공차 범위에서의 마멸량을 계산하였다. 실제 제품에서 외형의 공차가 1.0mm이기 때문에 이를 상한계로 하여 금형수명을 계산하였으며, 마멸로 인한 Socket ball joint의 Finisher 금형의 일간단조 수명은 10,542회로 예측되어졌다. Table 4-5는 그 결과이다.



Section B - B'

Fig. 4-5 Wear comparison by form measurement and FE simulation for the top die



Section B - B'

Fig. 4-6 Wear comparison by form measurement and FE simulation for the bottom die

Table 4-5. Predicted life of the die according to simulation results

	Simulation wear (mm)	Life of die (The number of times to forging)
Top die	0.631	11093
Bottom die	0.664	10542

5. 결론

본 연구에서는 Socket ball joint 형상품의 일간단조에 관한 강소성유한요소해석을 수행하였으며 그 결과를 토대로 피로수명을 해석하였다. 또한 Archard 마멸모델을 적용하여 일간단조 금형의 마멸량을 계산하였다. 그리고 실제 금형의 형상측정 결과와의 비교를 통하여 시뮬레이션 결과의 신뢰성을 입증하였다.

1. 탄성해석 결과 하부 금형에 응력이 높게 집중되었고, 따라서 수명도 낮게 평가되었다.
2. 하부 금형의 피로수명은 Goodman과 Gerber의 수명 사이 $10828 \leq N \leq 24780$ cycle로 평가되었다.
3. 하부 금형의 마멸로 인한 치수공차의 범위를 초과하는 수명은 10542 cycle로 평가되었다.
4. Socket ball joint의 정밀단조시 금형의 마멸에 의한 수명저하가 피로파괴에 의한 수명저하의 영향보다 클 것으로 예측되었다.

참고문헌

1. Julie A. Bannantine, Jess J. Comer and James L. Handrock, "Fundamentals of Metal Fatigue Analysis", pp.239~260, 1990
2. RapidForm 2004 Tutorial, INUS Technology . Inc., 2003.
3. Cser L., Geiger M. and Lange K., "Tool Life and tool quality in bulk metal forming", Proc. Instn. Mech. Engrs., Vol. 207, pp.223~239., 1993.
4. Forrest, P. G., *Fatigue of Metals*, Pergamon Press, London, 1962
5. Archard J. F., "Contacts and Rubbing of Flat Surfaces", Journal of Applied Physics, Vol. 24, pp.981~988, 1953.
6. 송영철, 여은구, 이용신, "금형의 피로수명에 관한 연구", 한국공작기계학회지, 제8권, 제4호, pp. 87-92.
7. Deform-3D User Manual, V5.0, SFTC.
8. Kang J. H., Park I. W., Jae J. S. and Kang S. S., "A Study on Prediction of Die Life of Warm Forging by wear", J. of the Korean Society for Technology of plasticity Vol. 7, No. 3, pp. 274~290., 1998.