

# 금형의 피로수명 예측에 관한 연구

송영철\*\*, 여은구\*\*, 이용신\*

## A Study on the Prediction of Fatigue Life in Die

Y. C. Song\*\*, E. G. Yoh\*\*, Y. S. Lee\*

### Abstract

Generally, the life of die is limited by fatigue fracture or dimensional inaccuracy originated from wear. In this paper, to predict the fatigue life of die, the stress and strain histories of die can be predicted by the analysis of elastic-plastic finite element method and the elastic analysis of die during the process analysis of workpiece. Also, the stress-life curve of die material can be obtained through experiment. With the above two facts, we propose the analysis method of predicting fatigue life in die. In the proposed model, the analysis of elastic-plastic finite element method for material is carried out by using ABAQUS. Surface force resulted from the contacting border of the die and workpiece is transformed into the nodal force of die to implement elastic analysis. Besides, the proposed analysis model of die is applied to extrusion die and forging die.

Keywords : Fatigue life(피로수명), Stress-life curve(응력-수명곡선), Extrusion die(압출금형), Forging die(단조금형)

### 1. 서론

자동차나 공작기계 및 일반 기계류에 사용되는 많은 부품들은 여러 단계의 세부공정을 거쳐서 원하는 완제품이 된다. 이들 중 소성가공을 이용하여 만들어지는 부품들은 공정조건과 금형에 의해 성공적 성형여부가 결정된다. 금형의 수명은 제품의 정밀도나 경제성에 큰 영향을 미치므로 적절한 금형 교체시기를 예측할 수 있는 금형설계 기법의 개발은 필수적이다. 일반적으로 금형의 수명은 거시적으로 마모로 인해 치수오차가 생겨 수명이 다하거나, 응력 집중에 의한 과응력 또는 피로에 의해 발생하는 파괴 등으로 제한된다. 소성가공에서의 금형의 중요성으로 인하여 금형에 관한 많은 연구가 보고되어 왔다.

Park<sup>(1)</sup>은 실험으로 구한 Archard<sup>(2)</sup>의 마모모델계수를 이용하여 업셋팅 금형의 최적화를 제안하였다. Shibusawa<sup>(3)</sup>는 다이캐스팅 금형의 피로균열 성장률과 열처리, 산화 등의 관련성에 대한 실험적 연구를 하였다. 또한 Yoon<sup>(4)</sup>, Mori<sup>(5)</sup>, Rystad<sup>(6)</sup>은 소재의 해석과 금형의 열탄성해석을 연계하는 유한요소해석을 시도하였다. Reiss<sup>(7)</sup>는 열처리가 금형 수명에 미치는 효과를 검토하기 위하여 광범위한 실험을 수행하였으며, 균열성장률은 균열 길이가 증가함에 따라 감소하며, 반복되는 안정-불안정 특성을 따른다고 제시하였다.

Hettig, Lange, Knoerr<sup>(8)</sup> 등도 금형 인서트의 표면 거칠기가 균열 형성에 미치는 영향에 대하여 조사하였으며, 공구수명을 증가시킬 수 있는 압출금형의 형상을 제안하였다. Geiger, Hänsel<sup>(9)</sup>과 Engel, Hänsel<sup>(10)</sup>은 금형에

\* 국민대 기계·자동차 공학부

\*\* 국민대 대학원 기계설계학과

작용하는 내압을 균일하게 작용하는 것으로 가정하여 압출 공정의 피로파괴를 수치적으로 해석하였다. 이처럼 금형 해석에 관한 연구가 여러 연구자들에 의해 진행되었음에도 불구하고 금형의 탄성해석과 피로실험을 연계한 체계적 연구는 찾아보기 힘들다.

본 연구에서는 소재에 대한 탄·소성해석과 금형의 탄성 해석을 통하여 소재의 공정해석 중 금형에 일어나는 응력과 변형률이력을 조사하며, 실험을 통하여 금형재의 응력-수명곡선을 구한다. 위의 두 가지로부터 금형의 피로수명을 예측하는 설계기법을 제안한다. 제시된 모델에서 소재에 대한 탄·소성해석은 상용 프로그램인 ABAQUS를 이용하며, 소재에 발생하는 표면력을 국부변환에 의해 금형의 절점력으로 변환하여 탄성해석을 수행한다. 아울러, 얻어진 조합응력값을 단축하중 상태의 실험결과와 비교하기 위해 von Mises가 제안한 수식을 이용하여 상당응력값으로 변환하여, Goodman과 Gerber의 등수명식에 대입한다. 그 후 단축응력상태의 실험치인 S-N선도에 투사하여 수명을 예측한다. 또한 제시된 금형해석모델을 축대칭의 전방압출금형과 단조금형에 적용하여 금형수명을 예측한다. 이때 전방압출금형은 초기형상을 모따기의 유무로 나누어 해석결과를 비교한다.

## 2. 조합응력상태의 피로수명 예측법

실제 작동중인 기계부품은 조합하중을 받고 있다. 피로수명예측을 위한 실험에 의해 구할 수 있는 것은 단축하중상태의 결과이므로 이러한 단축하중상태의 실험치로부터 조합하중상태의 결과를 비교하기 위하여 상당응력진폭(Equivalent Stress Amplitude)과 상당평균응력(Equivalent Mean Stress)을 von Mises가 제안한 수식을 사용하여 계산하였다. 조합하중을 받는 기계부품의 수명예측을 위하여 다음의 (1), (2)식을 통하여 Fig. 1의 교점(D)을 찾아낸 후 등수명선도를 통하여 단축응력상태의 실험치에 투영시키므로 수명을 예측할 수 있다.

$$\sigma_a' = \left( \frac{1}{2} [(\sigma_{xa} - \sigma_{ya})^2 + (\sigma_{ya} - \sigma_{za})^2] \right)^{1/2} \quad (1)$$

$$+ (\sigma_{za} - \sigma_{xa})^2 + 6(\tau_{xya}^2 + \tau_{yza}^2 + \tau_{zxa}^2) ]^{1/2}$$

$$\sigma_m' = \left( \frac{1}{2} [(\sigma_{xm} - \sigma_{ym})^2 + (\sigma_{ym} - \sigma_{zm})^2] \right)^{1/2} \quad (2)$$

$$+ (\sigma_{zm} - \sigma_{xm})^2 + 6(\tau_{xym}^2 + \tau_{yzm}^2 + \tau_{zxm}^2) ]^{1/2}$$

이는 Goodman과 Gerber가 각각 제안한 등수명선도에 따라서  $\sigma_1 \rightarrow N_1$ ,  $\sigma_2 \rightarrow N_2$ 의 수명을 예측할 수 있다.

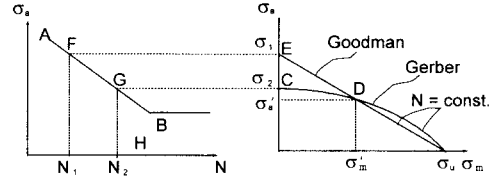


Fig. 1 Linear approximation of a constant life diagram

조합응력상태에서 Goodman과 Gerber의 등수명식은 각각 다음과 같다.

$$\frac{\sigma_a'}{\sigma_1} + \frac{\sigma_m'}{\sigma_u} = 1 \quad (3)$$

$$\frac{\sigma_a'}{\sigma_2} + \left( \frac{\sigma_m'}{\sigma_u} \right)^2 = 1 \quad (4)$$

여기서, 조합평균응력( $\sigma_{ij,m}$ )과 조합응력진폭( $\sigma_{ij,a}$ )은 다음 식과 같다.

$$\sigma_{ij,m} = \frac{\sigma_{ij,max} + \sigma_{ij,min}}{2} \quad (5)$$

$$\sigma_{ij,a} = \frac{\sigma_{ij,max} - \sigma_{ij,min}}{2} \quad (6)$$

실험에<sup>(11)</sup> 의하여 실제 피로수명은 Goodman과 Gerber의 식 사이에 존재함을 확인할 수 있다.

$$N_{Goodman} < N_{Real} < N_{Gerber} \quad (7)$$

## 3. 실험장치 및 방법

### 3.1 실험장비 및 재료

본 논문의 단축인장시험과 피로시험은 모두 MTS 만능시

험기로 수행되었다. 실험에 사용된 시편은 금형재료로 많이 사용되는 STD 61이며, ASTM규격에 맞추어 인장(E 8M-94a), 피로(E 606-92)시편을 제작하였다. 금형의 경도값과 동일하게 하기 위하여 STD 61 재료를 시편가공 후 열처리를 하여 표면경도를 77(HRA)로 맞추었다.

**3.2 인장시험**

피로실험을 통하여 S-N선도를 얻게되는데 이때 적절한 응력값부터 실험을 시작해야 시간과 시편의 낭비를 막을 수 있다. 적절한 응력값의 기준은 시편 인장강도값의 1/2의 값이 될 수 있다. 피로실험에 들어가기에 앞서 필요한 재료 물성치인 인장강도값과 탄성계수값을 구하였다. 실험 결과는 Table 1에 나타내었다.

**인장시험과정**

1. 열처리된 시편을 MTS 장비와 TestWorks II Application software를 이용하여 실험하였다.
2. 인장시편에 단축신장계(Extensometer)를 부착하였으며 변위 제어모드를 사용하여 재료가 파손될 때까지 인장하였다.
3. 일정변형률비(Constant Strain Rate)방법으로 인장강도를 측정하였다.(0.5mm/mm/min)
4. 일정응력비(Constant Stress Rate)방법으로 탄성계수를 구하였다. (2.38kN/sec)

**3.3 피로시험**

실험에 사용된 시편은 STD 61로 인장시편과 동일한 열처리로 담금질과 뜨임을 수행하여 경도를 실제 금형재와 동일하게 하였다. 시편은 ASTM E 606-92 규격에 따라 CNC선반가공을 통하여 제작하였으며 표면연삭은 하지 않았다. 열처리한 시편의 인장강도 값을 구한 후 그 값의 1/2전후의 상이한 응력진폭에서 피로시험을 행하여 파괴되기까지의 반복 수를 구했다.

실험의 제어는 일정하중 값을 주어 파손이 일어날 때까지 응력비( $R = \sigma_{min} / \sigma_{max}$ )가 -1과 0인 조건하에서 피로시험을 수행하였다. 하중의 파형은 Sine파로 주었고, 하중속도는 16Hz에서 27Hz사이에서 조절하였다.

실험 중 응력과 변형률은 단축신장계와 하중계(Load Cell)로부터 계산되어진다. 모든 피로실험은 상온에서 총 39개가 수행되었으며, 응력비 조건상 R=-1인 27개와

R=0인 12개의 그룹으로 구분하였다. 피로실험을 통하여 단축응력 상태에서의 S-N 곡선 Fig. 2를 얻고, 다축응력 상태의 금형에서 응력집중을 받는 부분의 수명예측을 위한 기초자료로 사용하였다. 실험을 통하여 얻은 값을 Table 2에 나타내었다.

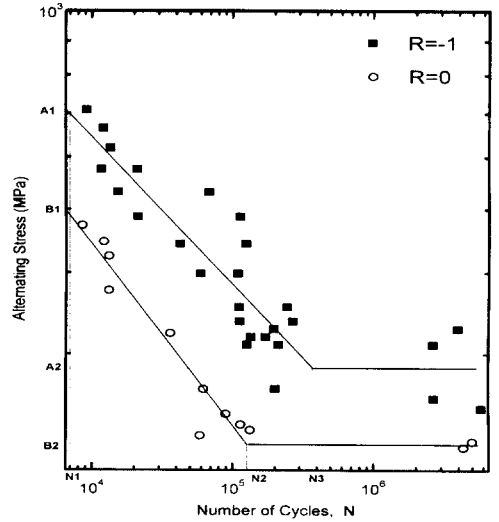


Fig. 2 S-N curve for experimental results to STD61

Table 1 Mechanical properties of the workpiece and die

	SCM 435	SS 41	STD 61	WC
Modulus of Elasticity(GPa)	200	200	197.8	549
Poisson's Ratio	0.3	0.3	0.3	0.24
Hardness (HRA)	-	-	77.0	≥2.0
Ultimate Strength(MPa)	931	415	1906	-
Yield Stress(MPa)	205.8	245		

Table 2 Data of fatigue test for stress ratio R=0 and R=-1

$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} = -1$			$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} = 0$		
A1	Stress Amplitude (MPa)	700	B1	Stress Amplitude (MPa)	492
A2	Endurance Limit (MPa)	285.15	B2	Endurance Limit (MPa)	218.84
N1	Number of Cycles	7,000	N1	Number of Cycles	7,000
N3	Number of Cycles	370.00 0	N2	Number of Cycles	130.00 0

### 4. 응용

본 논문의 응용에서는 제시된 금형피로해석모델을 이용하여 축대칭의 전방압출금형과 단조금형에 대한 피로수명 예측을 하고자 한다. 이를 위해 먼저 단축인장실험을 통하여 STD 61 금형재의 S-N곡선을 구하였고, 이것을 기초로 다축하중을 받는 금형의 수명을 예측한다.

#### 4.1 전방압출 금형의 피로수명 예측

해석에 사용된 전방압출 소재와 금형은 축대칭 형상이므로 전체 모델중 1/2단면만을 해석하였다. 사용된 소재는 SCM 435를 사용하였으며, 금형의 재료는 STD 61을 사용하였다. 초기형상으로는 가공하지 않은 소재와 모따기(Beveling)를 한 소재를 사용하였다. 램의 속도는 18.5mm/s이고 금형과 소재의 마찰계수는 0.1로 가정하였으며, 금형의 바닥면은 고정되고 바깥 원주면은 롤러지지 상태로 가정하였다. Fig. 3에서는 전방압출금형에 작용하는 분포하중을 구하기 위하여 ABAQUS를 이용한 소재의 탄·소성 변형해석 과정을 보여주고 있다. 소재의 유한요소 격자와 금형의 유한요소격자가 경계면에서 일치하지 않기 때문에 본 연구에서 국부변환에 의해 금형 격자에

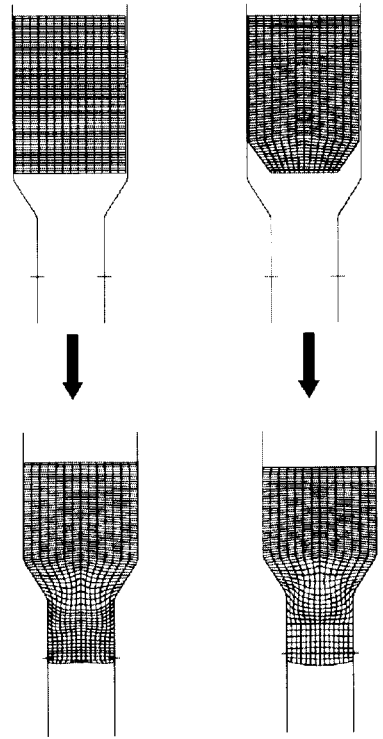


Fig. 3 Initial and final stage of extrusion process

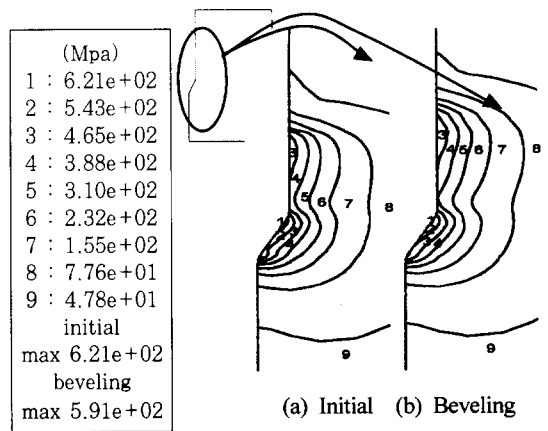
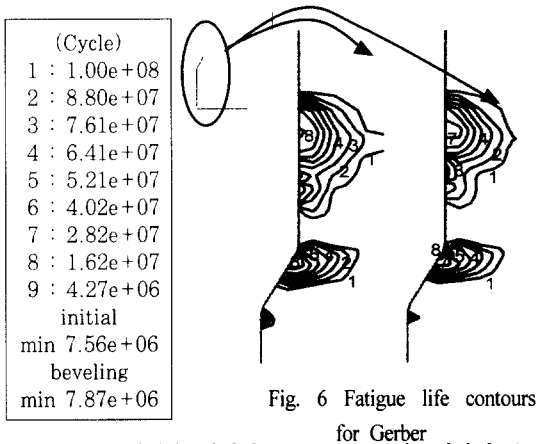
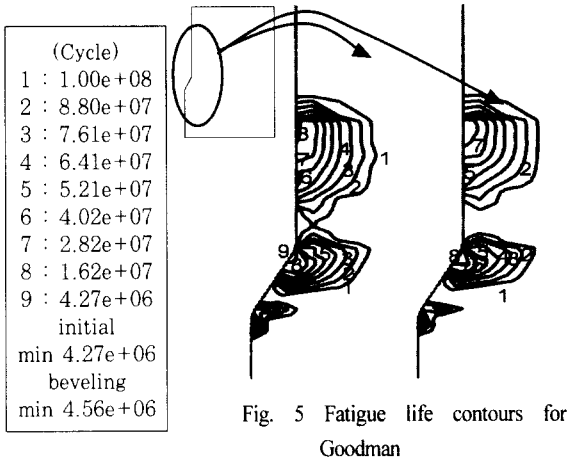


Fig. 4 The effective stress



작용하는 표면력을 얻었다. Fig. 4는 최종형상의 유효응력분포를 보여주며, 모따기를 하지 않은 소재의 집중된 유효응력값이 약간 크다는 것을 나타내고 있다. Fig. 5와 6은 각각 Goodman과 Gerber의 수식을 이용한 피로수명 분포를 나타 내었으며, 가장 수명이 짧은 곳이 초기에 소재와 금형 간에 접촉이 시작되는 부위이고 가장 수명이 짧아도 무한 수명을 넘기는 것으로 예측되고 있다.

#### 4.2 단조금형해석

본 연구의 두 번째 예제인 패드단조의 금형해석 또한 축대칭 형상이므로 전체모델 중에서 1/2단면만 해석하였

다. 단조공정의 소재는 SS 41이고, 금형의 재료는 초경합금 WC(M20)이 이용되었다. 각 소재의 물성치는 Table 2에 주어졌다. Fig. 7에서는 단조금형에 작용하는 분포하중을 구하기 위하여 ABAQUS를 이용한 탄·소성해석과정을 보여주고 있고, 상부편치의 하강속도는 25mm/s이며, 금형과 소재의 마찰계수는 0.1로 가정하였다. Fig. 8은 최종단계에서의 유효응력분포를 보여주고 있는데 중심부의 위쪽부터 그 크기 분포가 고르게 나타나기 때문에 실제 이러한 탄성해석만을 가지고는 파손예측이 쉽지 않음을 알 수 있다. 피로해석 결과로 Fig. 9에서 보여주듯이 유효응력분포와 거의 유사하게 나오는 것을 볼 수 있다.

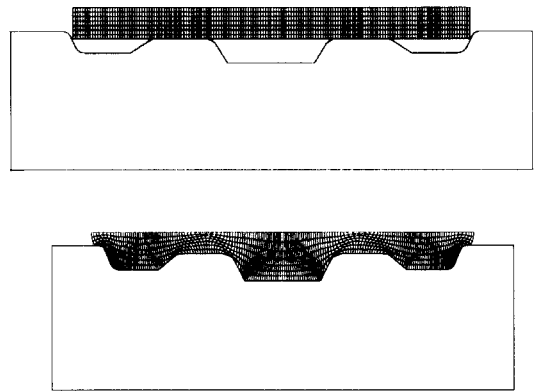
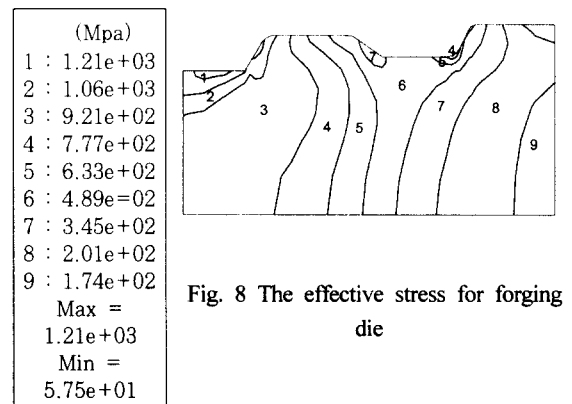


Fig. 7 Initial and final stage of pad forging process



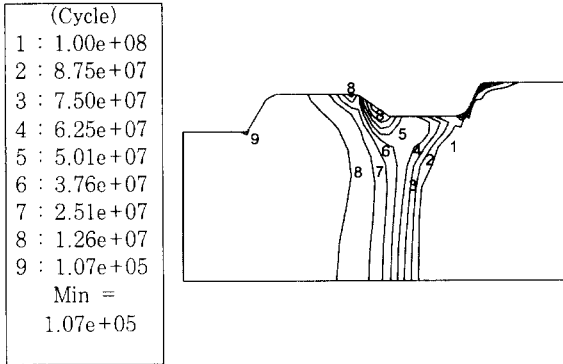


Fig. 9 Fatigue life contours by Goodman

### 5. 결론

본 연구에서는 소재에 대한 탄·소성해석과 금형의 탄성 해석을 통해 얻은 조합응력값을 von Mises가 제안한 상당응력값으로 변환한 다음 이 값을 Goodman과 Gerber가 각각 제안한 등수명선도식에 대입하였다. 그후 단축응력상태의 실험치에 투영하여 피로수명을 계산하였다.

이상의 결과로부터 다음의 결론을 얻었다.

- (1) 조합하중을 상당응력으로 변환한 후 단축하중상태의 실험치로 투영하여 수명을 예측하는 금형피로수명 예측모델을 제시하였다.
- (2) 전방압출 금형에 대하여 해석한 결과 곡률이 시작되는 부분에서 피로 파손이 일어남을 예측할 수 있었다.
- (3) 단조금형의 경우 거의 모든 부분이 압축하중상태에 놓이게 됨으로 피로파손의 영향이 크지 않음을 예측할 수 있었다.

### 참고 문헌

1. 박종남, 김태형, 강범수, 김병민, 최재찬, 이상용, 이정환, "업셋팅 금형의 마모실험 및 해석", 한국소성가공학회 '96추계학술대회 논문집, pp. 122-128, 1996.

2. Archard, J. F., "Contacts and rubbing of flat surfaces", *J. of Appl. Phys.*, Vol. 24, pp. 981-988, 1953.
3. Shibusawa, T., Kobayashi, Y., Ishikawa, K., "Fatigue crack propagation in die-cast AZ91D magnesium alloy", *Journal of the Japan Institute of Metals*, Vol. 61, pp. 101-105, 1997.
4. Yoon, J. H., Lee, N. K., Yang, D. Y., "Treatment of contact traction at the die-workpiece interface for the elastic analysis of die deformation", *Int. J. Mech.Sci.* Vol. 34, pp. 689-72, 1992.
5. Mori, K., Nakadoi, K. and Fukuda, M., "Coupled analysis of steady state forming process with elastic tools", *Proc. NUMIFORM '86 Conf.*, Gothenburg, pp. 237-242, 1986.
6. Rystad, H. and Boer, C. R., "Forging of an axisymmetrical shape-modelling of material flow, die loads and die stresses using FEM", *Proc. NUMIFORM '86 Conf.*, Gothenburg, pp. 283-286, 1986.
7. Reiss, W., "Untersuchung des Werkzeugbruches beim Voll-Vorwärts Fließpressen", *Springer-Verlag*, Berlin, 1987.
8. Hettig, A., Lange, K., Knoerr, M., "Increasing Tool Life in Cold Forging through Advanced Design and Tool Manufacturing Technique", *J. Mat. Pro. Tech.*, Vol. 35, pp. 495-513, 1992.
9. Geiger, M., Hänsel, M., FE-Simulation des Werkzeugversagens von Fließpreßmatrizen, VDI-Berichte Nr. 810, VDI-Verlag, Düsseldorf, pp. 349-376, 1990.
10. Engel, U., Hänsel, M., "FEM-Simulation of Fatigue Crack Growth in Cold Forging Dies", *Advanced Technology of Plasticity*, Vol. 1, pp. 355-360, 1990.
11. P. G. Forrest, *Fatigue of Metals*, Pergamon Press, London, 1962