

열박음을 고려한 이종재 금형의 피로수명 예측에 관한 연구

여 은 구*, 김 엽 래**

* : 국민대 대학원 , ** : 경민전문대 소방안전관리과

A Study on the Prediction of Fatigue Life in Dissimilar Materials Die Considering the Heat Shrink Fit

E. G. Yoh*, Y. R. Kim**

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 the dissimilar materials die, the stress and strain histories of die can be predicted by the analysis of elasto-plastic finite element method and the elastic analysis of die during the process analysis of workpiece. Using heat shrink fit analysis, initial stress of the insert die is computed. 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 the one material and the dissimilar materials extrusion die.

Key words : Fatigue life(피로수명), Stress-life curve(응력-수명곡선), Extrusion die(압출금형), Heat Shrink Fit (열박음)

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 교체 시기를 예측할 수 있는 금형설계 기법의 개발은 필수적이다. 일반적으로 금형의 수명은 거시적으로 마모로 인해 치수오차가 생겨 수명이 다하거나, 응력집중에 의한 과응력 또는 피로에 의해 발생하는 파괴 등으로 제한된다. 소성가공에서의 금형의 중요성으로 인하여 금형에 관한 많은 연구가 보고되어 왔다.

Park⁽¹⁾은 실험으로 구한 Archard⁽²⁾의 마모모델계수를 이용하여 업셋팅 금형의 최적화를 제안하였다. Shibusawa⁽³⁾는 다이캐스팅 금형의 피로균열 성장률과 열처리, 산화 등의 관련성에 대한 실험적 연구를 하였다. 또한 Yoon⁽⁴⁾, Mori⁽⁵⁾, Rystad⁽⁶⁾은 소재의 해석과 금형의 열탄성해석을 연계하는 유한요소해석을 시도하였다. Reiss⁽⁷⁾는 열처리가 금형 수명에 미치는 효과를 검토하기 위하여 광범위한 실험을 수행하였으며, 균열성장률은 균열길이가 증가함에 따라 감소하며, 반복되는 안정-불안정 특성을 따른다고 제시하였다. Hettig, Lange, Knoerr⁽⁸⁾ 등도 금형 인서트의 표면 거칠기가 균열 형성에 미치는 영향에 대하여 조사하였으며, 공구수명을 증가시킬 수 있는 압출금형의 형상을 제안하였다. Geiger, Hänsel⁽⁹⁾과 Engel, Hänsel⁽¹⁰⁾은 금형에 작용하는 내압을 균일하게 작용하는 것으로 가정하여 압출공정의 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 보강량의 열박음해석을 고려한 이종재 금형의 탄성해석을 통하여 소재의 공정해석 중 발생하는 응력과 변형률이력을 조사하며, 실험을 통하여 금형재의 응력-

수명곡선을 구한다. 위의 두 가지로부터 금형의 피로 수명을 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 일체형 전방압출금형과 이중재 단조금형에 적용하여 금형수명을 예측 고찰한다.

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.

$$\sigma_a' = \left(\frac{1}{2} [(\sigma_{xa} - \sigma_{ya})^2 + (\sigma_{ya} - \sigma_{za})^2 + (\sigma_{za} - \sigma_{xa})^2 + 6(\tau_{xya}^2 + \tau_{yza}^2 + \tau_{zxa}^2)] \right)^{1/2} \quad (1)$$

$$\sigma_m' = \left(\frac{1}{2} [(\sigma_{xm} - \sigma_{ym})^2 + (\sigma_{ym} - \sigma_{zm})^2 + (\sigma_{zm} - \sigma_{xm})^2 + 6(\tau_{xym}^2 + \tau_{yzm}^2 + \tau_{zxm}^2)] \right)^{1/2} \quad (2)$$

이는 Goodman과 Gerber가 각각 제안한 등수명선도식에 따라서 $\sigma_1 \rightarrow N_1$, $\sigma_2 \rightarrow N_2$ 의 수명을 예측할 수 있다. 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 의하여 실제 피로수명은 Goodman과 Gerber의 식 사이에 존재함을 확인할 수 있다.

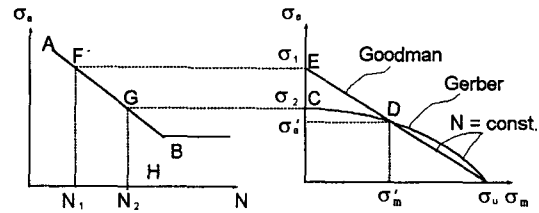


Fig. 1 Linear approximation of a constant life diagram

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

3. 이중재 금형 수명예측모델

본 연구에서는 효과적인 금형해석을 위하여 유한요소해석 시스템을 바탕으로 소재해석과 열박음을 고려한 이중재 금형해석, 수명예측을 결합시킨 새로운 금형 수명예측모델을 제시한다. 소재의 해석은 상용프로그램인 ABAQUS를 사용하여 탄·소성 유한요소해석을 하였고, 해석결과인 금형과의 접촉면에 생긴 표면력⁽³⁾으로부터 금형표면적자의 절점력을 생성하여 이를 바탕으로 초기 열박음 해석을 수행한 금형의 탄성유한요소해석 및 수명예측을 수행한다.

3.1 보강링의 열박음 해석

소재로 인해 반경방향과 원주방향 응력을 받고 있는 금형의 경우 수명연장 등을 목적으로 보강링을

사용한다. 보강링의 내경은 인서트 금형의 외경보다 작은 값을 가지며, 이 차이량을 열박음량이라 하며, 이로 인한 원주방향 변형률은 다음과 같이 계산된다.

$$\varepsilon_{\theta} = \frac{(r+u)d\theta - rd\theta}{rd\theta} = \frac{u}{r} = \alpha \cdot \Delta T \quad (8)$$

여기서 u 는 열박음량, r 은 보강링의 반경, α 는 보강링의 열팽창계수, ΔT 는 열박음 온도차이다. 인서트와 보강링 사이는 고정된 것으로 가정하고 보강링을 가열하여 열팽창시킨 후 인서트와 체결한 상태에서 ΔT 만큼의 열을 감해줌으로써 인서트에 가해지는 보강링의 수축면압에 의한 전체 금형의 초기 압축응력을 계산한다. Fig. 2은 보강링에 의해 열박음된 후 반경방향 응력과 원주방향 응력분포를 나타내었으며, 인서트 금형(WC)의 반경방향 압축응력이 보강링(STD61)에 비하여 크게 나타난 것은 초경합금의 탄성계수가 보강링의 탄성계수보다 훨씬 큰 값을 가지기 때문이다.

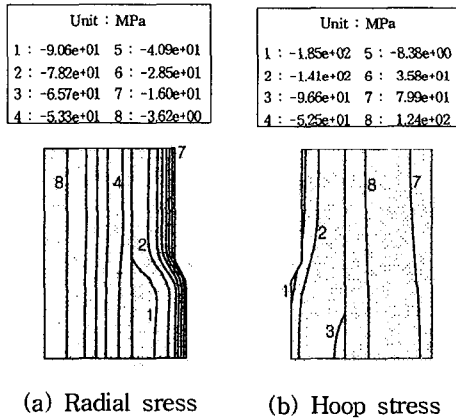


Fig. 2 Stress distribution of Dies after heat shrink fit

3.2 수명예측 수치해석 알고리즘

본 연구의 수명예측방법은 소재의 탄·소성해석을 통해 금형에 접촉력을 계산하고 열박음된 보강링에 의해 원주방향 초기압축상태에 있는 이중재금형을 해석한다. 두가지 해석결과를 기초로 소재의 성형공정을 여러 단계로 나누어 이중재 금형의 탄성해석을 수행한다. 그 결과로부터 얻은 응력경로를 이용하여 각 지점에서의 응력진폭과 평균응력을 계산할 수 있다. 마지막으로 Miner규칙에 의한 누적법을 이용하

여 수명을 예측한다. 여기서 사용되는 응력-수명곡선은 실험과 문헌을 통해서 얻는다.

4. 실험장치 및 방법

4.1 실험장비 및 재료

본 논문의 단축인장시험과 피로시험은 모두 MTS 만능시험기로 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 시편가공후 열처리를 하여 표면경도를 77(HRA)로 맞추었다. 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. 실험결과를 Table 1에 나타내었다.

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	92.0
Ultimate Strength(MPa)	931	415	1906	-
Yield Stress(MPa)	205.8	245		

4.2 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 인장강도값을 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 Sine파

로 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. 3를 얻고, 다축응력 상태의 금형에서 응력집중을 받는 부분의 수명예측을 위한 기초자료로 사용하였다. 실험을 통하여 얻은 값을 Table 2에 나타내었다.

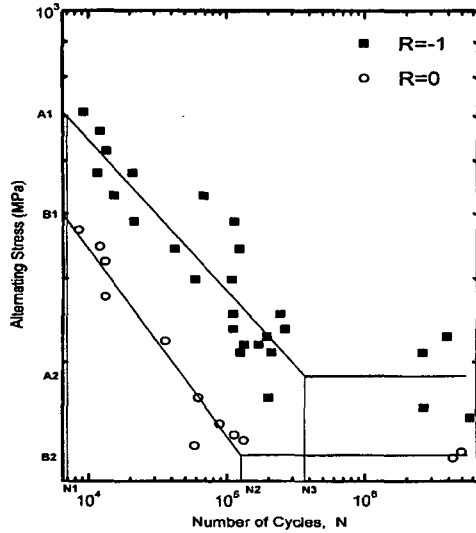


Fig. 3 S-N curve for experimental results to STD61

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	370,000	N2	Number of Cycles	130,000

5. 응용

본 논문의 응용에서는 제시된 이중재 금형피로해석모델을 이용하여 축대칭의 일체형 전방압출금형과 보강링이 있는 이중재 전방압출금형에 대한 피로수명예측을 하고자 한다. 이를 위해 먼저 단축인장실험을 통하여 STD 61 금형재의 S-N곡선을 구하였고, 이것을 기초로 다축하중을 받는 금형의 수명을 예측한다.

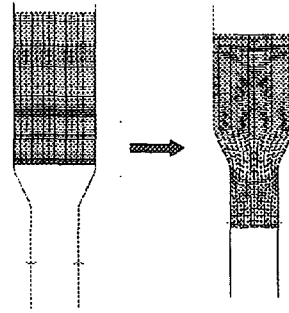


Fig. 4 Initial and final stage of extrusion process

5.1 일체형 전방압출금형의 피로수명 예측

해석에 사용된 전방압출 소재와 금형은 축대칭형상이므로 전체 모델중 1/2단면만을 해석하였다. Fig.4에서는 전방압출금형에 작용하는 분포하중을 구하기 위하여 ABAQUS를 이용한 소재의 탄·소성 변형해석 과정을 보여주고 있다. 램의 속도는 18.5mm/s이고 금형과 소재의 마찰계수는 0.1로 가정하였다. 소재의 유한요소 격자와 금형의 유한요소격자가 경계면에서 일치하지 않기 때문에 본 연구에서는 국부변환에 의해 금형 격자에 작용하는 표면력을 얻으며, 금형의 바닥면은 고정되고 바깥 원주면은 롤리지 상태로 가정하였다. 전방압출공정의 소재는 SCM 435를 사용하였으며, 금형의 재료는 STD 61을 사용하였다. Fig. 5는 Goodman 수식을 이용한 피로수명분포를 표시하며, 가장 수명이 짧은 곳이 초기에 소재와 금형 간에 접촉이 시작되는 부위이고 20000 Cycle을 넘지 못하고 파손에 이르는 것으로 예측되었다. 금형의 경우 취성재이기 때문에 파손의 양상은 국부적 파손이 시작되어 그 성장속도가 매우 빠른 것으로 관측되고 있다.

5.2 이중재 전방압출금형의 피로수명 예측

해석에 사용된 전방압출 소재와 금형은 축대칭

형상이므로 전체 모델중 1/2단면만을 해석하였다. 앞서 해석한 일체형 금형과 소재성형의 조건은 동일하게 하였고, 인서트 금형으로 초경합금 WC(M20)을 사용하였고, 보강링으로 STD61을 사용하였다. 초경합금의 물성치와 응력-수명곡선은 [11]을 참조하였다.

Fig.6는 성형 최종단계에서의 이중재금형에 있어서 반경방향과 원주방향 응력분포를 나타내었다. 성형이 시작되는 곳으로부터 큰 압축하중을 받고 있으며 열응력의 영향으로 컨테이너 부에 변형잔류응력을 볼 수 있다. Fig.7은 이중재금형의 수명예측분포를 나타내었는데 최소수명치가 4백만회를 넘기고 있는 것을 볼 때 무한수명에 들어섰다고 예측할 수 있다.

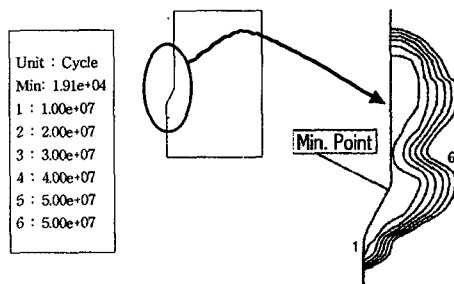


Fig. 5 Fatigue life contours in one material die

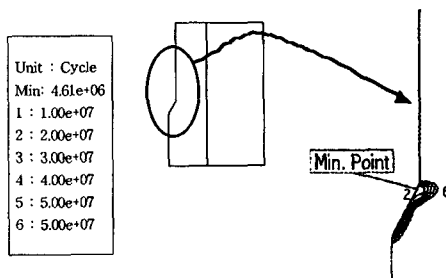


Fig. 6 Fatigue life contours in the dissimilar materials die

5. 결 론

본 연구에서는 소재에 대한 탄·소성해석과 보강링의 열박음해석, 이중재금형의 탄성해석을 통해 얻

은 조합응력값을 von Mises가 제안한 상당응력값으로 변환한 다음 이 값을 Goodman과 Gerber가 각각 제안한 등수명선도식에 대입하였다. 그 후 단축응력 상태의 실험치에 투영하여 피로수명을 계산하였다.

이상의 결과로부터 다음의 결론을 얻었다.

(1) 조합하중을 상당응력으로 변환한 후 단축하중 상태의 실험치로 투영하여 수명을 예측하는 금형피로수명 예측모델을 제시하였다.

(2) 보강링의 열박음해석을 고려한 이중재 금형해석모델을 제시하였다.

(3) 일체형 전방압출금형에 대하여 해석한 결과 곡률이 시작되는 부분에서 피로 파손이 일어남을 예측할 수 있었다.

(4) 보강링에 의해 열박음된 이중재 전방압출금형의 경우 곡률부의 피로수명이 무한수명을 상회하는 것으로 해석되었다.

참 고 문 헌

1. 박종남, 김태형, 강범수, 김병민, 최재찬, 이상용, 이정환, "업셋팅 금형의 마모실험 및 해석", 한국소성가공학회 '96추계학술대회논문집, 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. Gersh S. Kreimer, "Strength of Hard Alloys", *Consultants Bureau. New York*, 1968.