

축대칭 압출금형의 피로수명예측에 관한 연구

(A Study on the Prediction of Fatigue Life in the Axi-symmetric Extrusion Die)

안 수 흥*, 김 태 형*, 김 병 민**, 최 재 찬**, 조 해 용***

* 부산대 대학원

** 부산대 정밀정형 및 금형가공 연구센터

*** 충북대 정밀기계공학과

ABSTRACT

In this paper, the fatigue behaviour of typical axisymmetric forward extrusion die is investigated and extrusion process is analyzed by the rigid-plastic finite element method and elasto-plastic finite element method. To approach the crack problem involving crack initiation and propagation in extrusion die, LEFM(Linear Elastic Fracture Mechanics) is introduced and singular element which models stress/strain singularity in the crack tip vicinity has been used to obtain an accurate stress intensity factor values and other results. From the displacement around the crack tip the stress intensity factor and the effective stress intensity factor at the beginning of the die inlet radius has been calculated. Applying proper fatigue crack propagation criterion such as Paris/Erdogan fatigue law to this data the angle and direction of fatigue crack growth has been simulated and these are compared with some experimental results. Using the computed crack growth rate, fatigue life of the extrusion die has been evaluated.

Key words : LEFM(선형파괴역학), Singular Element(특이요소), Crack Tip(균열 선단), Stress Intensity Factor(응력확대계수), Fatigue Life(피로수명), Fatigue Crack Growth(피로균열 성장)

1. 서론

방간 압출공정은 기본적인 소성가공방법 중의 하나로 비교적 장비가 간단하고 제품의 표면정도가 우수하므로 차수가 작은 장면 부품생산에 많이 응용되고 있다. 현재의 방간 압출공정에 있어서, 금형의 비용은 총생산비용의 약 5%-15%정도를 차지하고 있으며[1] 현장에서 발생하는 금형의 조기파손과 더불어 기인한 기계의 미친다운타임 등은 생산비용을 줄이기 위해서 반드시 개선되어야 할 사항이다.

방간단조 공구의 수명은 마모와 금형의 파괴에 의해 크게 제한받는다[2, 3]. 즉, 압출금형의 수명을 제한하는 요인은 금형마모에 의해 발생하는 금형의 치수오차로 인한 파손과 피로균열의 상장으로 발생하는 피로파괴로 구분할 수 있다. 마모에 산 진단은 공구 재료는 경도가 높고 연성이 낮기 때문에 순간적인 파괴나 피로파괴에 매우 취약하다. 그럼에도 불구하고 지금까지 공구 파괴 특히 파괴거동에 대한 연구는 간단한 실험만이 수행되고 있는 실정[2, 4]이며, 체계적인 조사는 거의 수행되지 않았다.

일반적으로 압출금형의 경우는 축방향으로 균열이 발생하는 Rupture와 반경방향으로 발생하는 피로파괴의 경향이 차별적이나, 이 중에서, Rupture에 대한 연구는 선형단조론에 기초한 해석적, 수치적 방법뿐만 아니라 선형파괴역학

도 잘 확립되어 있어서 이를 맹신하는데 효과적으로 활용할 수 있으나, 피로파괴에 대한 체계적인 연구는 찾아보기 힘들다.

피로파괴에 대한 연구는 최근에 Reiss[2]에 의해서 최초로 진행되었다. 그는 이 연구에서 광범위한 실험을 통하여 균열성장을 균열길이가 증가함에 따라 감소하고, 피로균열 성장기동은 반복되는 안정불안정 국면을 따른다고 제시하였다. 한편, 압출공정동안의 피로파괴에 대한 해석적, 수치적 연구는 균열의 성장을 시뮬레이션한 Geiger et al.의 연구[5] 및 몇몇의 연구만이 알려져 있다.

본 연구에서는 압출공정을 유한요소해석하여 여기서 얻은 결과로부터 압출금형에서 발생하는 균열 성장기동을 설명하고, 위의 균열길이에 대한 금형수명을 예측하는 것을 목표로 하고 있다.

2. 축대칭 압출공정 및 금형의 유한요소해석

2.1 축대칭 압출공정의 유한요소해석

압출공정은 강소성 유한요소법을 이용하여 해석하였다. 사용된 소재는 SM10C로써 응력-변형률 관계는 Table 1에 나타내었다. 조기소재와 조사한 압출금형의 치수는 Fig.1에 주어진다. 소재와 압출금형은 축대칭 형상이므로 전체 모

밸중의 1/2만 해석하였다. 소재의 유한요소 격자와 금형의 격자가 일치하지 않기 때문에 압출공정 해석 결과로 얻은 소재의 절점력(nodal force)은 이후의 금형의 탄소성 변형 해석을 위하여 소재와 접촉되는 금형의 절점에 mapping된다.

Table 1 Stress-strain relationships for SM10C

Material	Stress-strain relation	Initial yield stress
SM10C	$\sigma = 715.96 \varepsilon^{0.22}$	$Y_0 = 226.5 \text{ N/mm}^2$

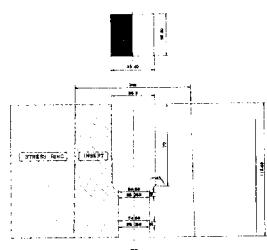


Fig.1 Schematic diagram of workpiece and axisymmetric extrusion die

2.2 축대칭 압출금형의 탄소성 유한요소해석

탄소성 해석은 금형의 인서트만 해석하였다. 조사한 금형의 인서트의 재료는 STD11이고, 보강링은 STD61을 사용하였다. 금형 재료의 물성자는 Table 2에 나타내었다.

Table 2 Mechanical properties for die material

Materials	Young's modulus	Hardness [HRC]	Yield strength [N/mm ²]
STD11	208000 N/mm ²	60	$S_y = 2150$
STD61	212000 N/mm ²	54	$S_y = 1500$

먼저, 금형에 작용하는 내압은 소재의 절점력을 압력값으로 mapping하여 구하였으며 보강링의 shrink-fit으로 인하여 금형에 발생하는 압력은 Lamé의 수식으로부터 구하였다[6, 7]. 이상에서 구한 압력 데이터를 이용하여 금형의 탄소성 변형해석을 수행한 후의 응력상태는 Fig.2와 같다. Fig.2에서 나타난 바와 같이 금형의 곡률이 시작되는 영역에서 응력이 집중됨을 알 수 있다.

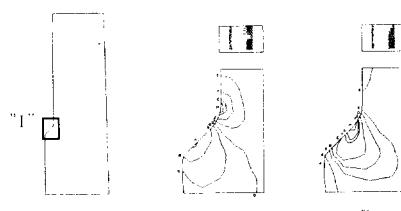


Fig.2 Stress distribution for interesting "I" region

(a) axial stress (b) shear stress

3. 금형의 피로수명예측 기법

압출금형의 피로수명을 계산하기 위하여 강소성 유한요소법과 탄소성 유한요소법 이외에 선형파괴역학(LEFM)을 도입하였다.

압출금형의 수명예측은 다음 절차를 기초로 하고 있다.

(1) 압출공정이 진행되는 동안 증가되는 균열길이에 대하여 수치해석으로 유효응력화재계수 K_e 및 사이클 수 ΔK_e 을 구한다.

압출공정은 축대칭이므로 유효응력화재계수는 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$K_e = \sqrt{K_I^2 + K_{II}^2} \quad (1)$$

K_e 를 얻기 위해서 먼저 파괴모드 I과 II의 응력화재계수 K_I 과 K_{II} 를 구해야 한다. 이 값은 변위로부터 최종적으로 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$K_I = \begin{bmatrix} (2x-1)\cos\theta/2 - \cos 3\theta/2 \\ (2x+1)\sin\theta/2 - \sin 3\theta/2 \end{bmatrix}$$

$$= 4\mu\sqrt{\frac{2\pi}{L}} \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix}$$

$$K_{II} = \begin{bmatrix} (2x+3)\sin\theta/2 + \sin 3\theta/2 \\ -(2x-3)\cos\theta/2 - \cos 3\theta/2 \end{bmatrix}$$

(2)

$$= 4\mu\sqrt{\frac{2\pi}{L}} \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix}$$

(2) 유효응력화재계수를 사용하여 Paris/Erdogan 법칙[8]에 의한 균열성장률을 결정한다.

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K_e)^n \quad (3)$$

여기서 a 는 균열길이, N 은 사이클수, C 와 n 은 재료상수이다.

(3) 균열성장각도는 Erdogan, Sih[9]등이 개발한 최대 주응력 이론을 도입한다.

$$K_I \sin\theta_0 + K_{II} (3 \cos\theta_0 - 1) = 0 \quad (4)$$

여기서 K_I 와 K_{II} 은 각각 파괴모드 I과 II의 응력화재계수이고, θ_0 은 균열성장방향이다.

(4) 주어진 균열성장길이 $\Delta a = a_f - a_i$ 에 대하여 기대되는 사이클 회수 N_f 를 결정하기 위하여 식 (3)를 적용한다. 여기서, a_i 는 초기균열길이, a_f 는 최종균열길이를 나타낸다.

$$N_f = N_i + \int_{a_i}^{a_f} \frac{da}{C (\Delta K_e)^n} \quad (5)$$

적분은 Gauss-Legendre 과정과 같이 수치적으로 수행할 수 있다.

4. 개발된 기법의 적용 및 고찰

개발된 기법의 적용은 유한요소해석과 다음의 기본 과정에 의해서 수행된다.

- (1) 선형파괴역학 이론이 적용된다.
- (2) 사이클값 ΔK_e 는 임의의 스트로크에서 최대 전재 K_e 와 같다고 가정한다.

압출공정은 원래 반복되는 다축 하중 조건과 계속되는 복잡한 혼합 모드 하중 때문에 매우 미묘한 파괴역학적 문제를 구성한다. 그러나, 단순화를 위하여 공정속도가 느리다고 가정하면 이 문제는 다소 간단한 정적 유한요소해석으로 변형될 수 있다.

압출금형의 피로수명을 계산하기 위하여 개발한 기법의 해석과정을 Fig.3에 나타내었으며, 이를 위해 강소성 유한요소해석과 탄소성 유한요소해석을 수행하였다.

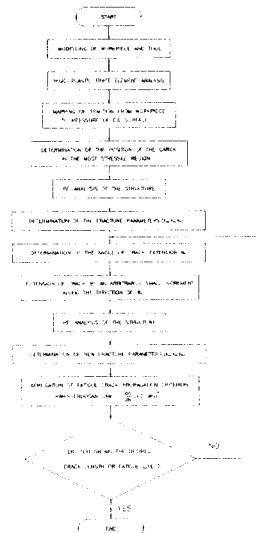


Fig. 3 Flowchart for the fatigue crack propagation and life prediction during the forming process

금형 인서트의 파괴인성은 $K_{lc} = 532 \text{ N/mm}^{3/2}$ 이며,

식 (3)의 재료상수는 $C = 3.4 \times 10^{-14}$, $n = 3.7$ 이다[1].

편지의 위치에 따라서 금형에 작용하는 내압의 분포가 변화하기 때문에 압출공정을 편지의 행정별로 관심있는 11개의 단계로 나누어서 각 단계들을 차례로 해석하였다 (Fig.4).

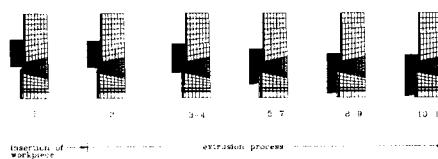


Fig. 4 The most interesting stages of forming to calculate stress intensity factor

피로균열이 시작되는 위치는 여러 연구[1, 2, 10]에서 세시한 바와 같이 최대 응력이 작용하는 영역으로 가정하였다. 균열의 시작은 기존의 표면균열에서부터 출발하는 한변의 해석을 수행하여 계산할 수 있는 반면에, 균열 전파는 충분과정으로 서술해야 한다.

현재까지 유한요소법은 피로균열 전파 해석에 적용한 많은 연구가 수행되었다. 이들 연구의 주안점은 응력화대계수값의 결정이다. 균열 전단 균치의 응력과 변형률의 특이성을 고려하기 위하여 특별한 요소를 도입하면 보다 정밀한 해를 얻을 수 있다. 이를 위하여 본 연구에서는 quarter point technique이라고 불리는 법을 사용하였다. 이방법을 따라서 균열 전단에서 중간 전점을 가지는 등매개요소(isoparametric element)를 사용시키면, 요소의 중간 전점을 균열 전단 앞의 1/4점으로 이동시킴으로써 L/a에서 발견되는 특이성을 쉽게 모델링할 수 있고, 비교적 성진격자를 사용하더라도 정확한 응력화대계수값을 얻을 수 있다[10~13]. 응력화대계수값을 구하는 방법에는 여러가지가 있을 수 있으나, 균열 전단 균치의 변위장을 이용하는 방법(변위법 혹은 변위상관법)이 비교적 좋은 결과를 얻을 수 있다고 알려져 있다[13, 14]. 따라서, 본 연구에서 응력화대계수는 균열 전단 균치의 변위장으로부터 계산하였다.

균열 전단의 거동은 균열 전단의 특이 요소에 의해 모델링되기 때문에 이 요소의 길이는 정확한 응력화대계수를 구하기 위하여 매우 중요하다[15, 16]. 본 연구에서는 L/a의 비율 1/10에서 1사이에서 선택하였다[15]. 여기서 a는 균열길이, L은 균열 전단 요소의 길이를 나타낸다.

해석에 사용된 균열을 포함하는 금형의 격자 시스템이 Fig.5에 보이진다.

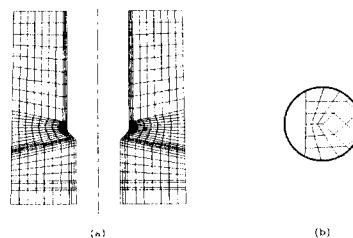


Fig. 5 Mesh system for the fracture analysis by the FEM

- (a) total mesh system(left side added)
- (b) mesh system for the crack vicinity

균열의 길이가 0.1mm인 경우, 균열 선단 균처와 이에 반경축으로 평행한 지점들에 대한 응력분포를 Fig.6에 나타내었다. 균열 선단 주위의 응력값이 다른 지점들보다 매우 높은 것을 알 수 있다.

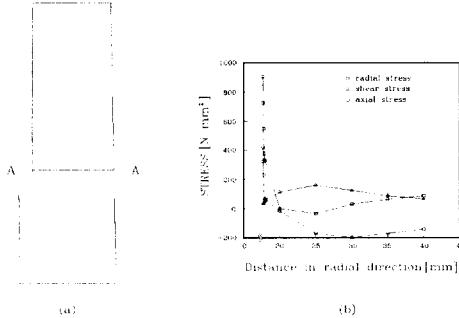


Fig.6 Stress distribution in crack tip vicinity and other places for 0.1mm crack

- (a) visualization of places for stress distribution calculation
- (b) stress distribution in radial direction

Fig.7에 표현한 그래프는 균열 길이의 함수인 응력화대계수를 균열 선단에서 계산한 것이다. 이 그래프는 Fig.4를 따라서 조사된 공정단계를 보간하여 얻을 수 있으며, 한 번의 하중주기 동안에 공정시간의 합으로서 K_1 , K_{II} 를 보여준다. 이 그래프에서 나타나듯이 균열의 길이가 길어짐에 따라서 K_1 보다 K_{II} 의 영향이 커짐을 알 수 있다.

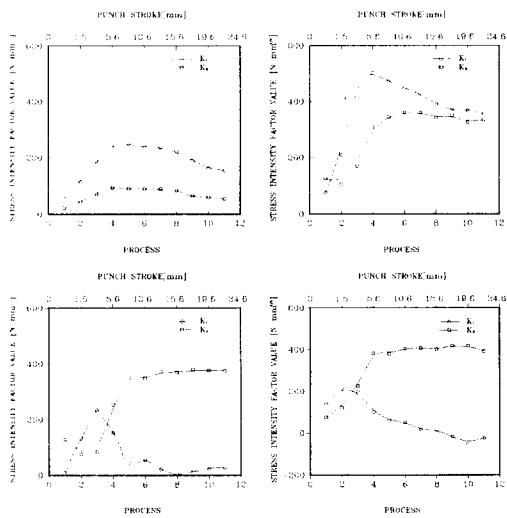


Fig.7 Stress intensity factor for different crack length

- (a) stress intsy factor for 0.1mm crack
- (b) stress intsy factor for 0.6mm crack
- (c) stress intsy factor for 1.1mm crack
- (d) stress intsy factor for 2.0mm crack

파로수명을 구하기 위하여 먼저 유효응력화대계수를 계산하여야 하는데 이것은 Fig.7의 결과물을 식 (1)에 사용함으로써 구할 수 있다. 계산된 유효응력화대계수가 Fig.8에 주어진다. 유효응력화대계수들은 초기에는 K_{Ic} 값을 뛰어서다가 균열이 증가함에 따라 K_{Ic} 의 아래로 떨어지는 경향을 보았다.

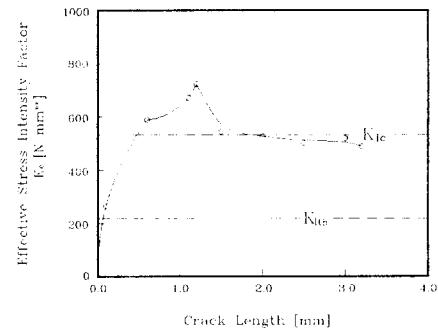


Fig.8 Effective stress intensity factor for increasing crack length

단일의 균열길이에 대한 응력화대계수 및 유효응력화대계수를 이용하여 구한 수명은 전체 금형수명의 일부분만을 나타낸다. 그러므로 원하는 금형수명은 식 (5)와 같이 이들을 전부 총합함으로써 구해진다. 실제의 제조공정에서 관찰되는 금형의 표면파손 깊이는 0.01~0.1mm 정도이다[1]. 이에 따라 첫번째 균열증분을 $\Delta a = 0.1\text{mm}$ 로 선택하였다. Fig.7의 응력화대계수 및 Fig.8의 유효응력화대계수의 분포를 사용하여 식 (5)에 따라서 압출금형의 파로수명이 계산된다. 그 결과를 Fig.9에 제시하였다. 균열의 길이가 약 3.5mm까지 전파되는데 필요한 사이클 수는 10000~12000번임을 알 수 있다.

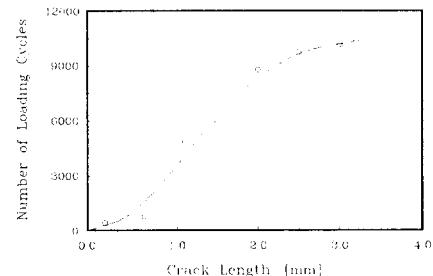


Fig.9 Computed fatigue life in the extrusion die

이상의 결과로부터 얻은 균열성장정보의 예가 Fig.10에 주어진다.

반경축과 균열방향 사이의 각도는 30~40도 정도이다. 균열은 반경축을 따라서 시그재 1의 경로로 성장함은 암

수 있다.

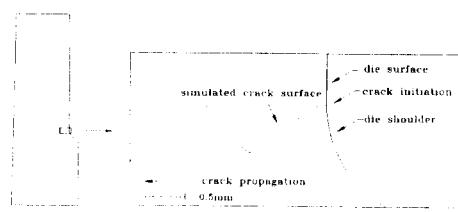


Fig.10 Visualization of simulated fatigue crack propagation in the extrusion die

반경축과 균열방향 사이의 각도는 30~40도 정도이다. 균열은 반경축을 따라서 지그재그의 경로로 성장함을 알 수 있다.

본 연구에서는 초기의 균열성장 충분에 대한 가정의 어려움과 소재와 유휴재가 균열 내부로 파고드는 웨지(wedge)효과를 고려하지 않았지만 Fig.10의 결과는 일반적인 압출금형에서 발생하는 퍼로균열 성장거동에 대한 실증결과[1, 2]와 비교적 잘 일치하였다.

5. 결론

유한요소 공정시뮬레이션은 성형 공구의 응력과 변형률 등을 계산하는 적절한 방법이다. 본 논문에서 소재와 금형의 변형해석을 위하여 강소성 유한요소해석과 탄소성 유한요소해석을 수행하였다. 또한 선형파괴역학(LEFM)의 이론들을 도입하여 균열의 퍼로거동을 조사하였으며, 압출금형의 퍼로수명을 계산하였다. 이상의 결과들로부터 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 압출공정 수행시 균형의 꼭들이 시작되는 영역이 응력과 변형률을 가장 심하게 받는 영역임을 알 수 있고, 퍼로균열이 이 위치에서 시작될을 알 수 있었다.
- (2) 균열을 포함하는 균형의 응력을 계산한 결과 균열 근처에서는 응력값이 다른 부분에 비하여 매우 높다는 것을 알 수 있었다.
- (3) 균열의 길이가 증가함에 따라 K_I 의 영향보다 K_{II} 의 영향이 커짐을 알 수 있었다.
- (4) 압출금형에서 발생하는 퍼로균열은 반경축을 따라 설 합에서의 경향과 유사한 지그재그 형태의 경로를 가짐을 확인하였다.
- (5) 유한요소법에 선형파괴역학 이론을 도입하여 압출금형의 퍼로수명을 결정하는 기법을 제시하였다.
- (6) 최초의 균열성장 충분에 대한 연구가 보완되고 웨지(wedge)효과를 고려한다면 더 좋은 결과를 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

참고 문헌

1. Tekkaya, A. E., Sonsöz, A., "Life Estimation of Extrusion Dies", Annals of the CIRP, Vol. 44, No. 1, pp. 231~234, 1995
2. Reiss, W., Untersuchung des Werkzeugbruches beim Voll-Vorwärts Fließpressen, Springer-Verlag, Berlin, 1987
3. Lange, K., Reiss, W., Arndt, H., "A Study of Tool Fracture in Cold Extrusion", Proc. 17th North-American Manufac. Res. Conf., Columbus, Ohio, USA, 1989
4. 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
5. Geiger, M., Hänsel, M., FE-Simulation des Werkzeugversagens von Fließpreß-matrizen, VDI-Berichte Nr. 810, VDI-Verlag, Düsseldorf, pp. 349~376, 1990
6. 김형섭, 퍼스널컴퓨터를 이용한 맹간단조 공정설계 및 금형설계의 자동화에 관한 연구, 부산대학교 박사학위논문, 1990
7. 김태형, 김동진, 김병민, 최재찬, "맹간단조품의 정밀도 향상을 위한 금형해석 기법", 한국정밀공학회 주제학술대회논문집, pp. 189~193, 1994
8. Rossmannith, H. P., "Finite Element in der Bruchmechanik", Springer-Verlag, Wien, 1982
9. Erdogan, F., Sih, G. C., "On The Crack extension in Plates under Plane Loading and Transverse Shear", J. Basic Eng., Vol. 85, pp. 519~527, 1963
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. Barsoum, R. S., "On The Use of Isoparametric Finite Elements in Linear Fracture Mechanics", Int. J. Num. Meth. Engng. 10, No. 1, pp. 25~37, 1976
12. Henshell, R. D., Shaw, K. G., "Crack Tip Elements are Unnecessary", Int. J. Num. Meth. Engng. 10, No. 9, pp. 495~509, 1975
13. Owen, D. R. J., Fawkes, A. J., Engineering Fracture Mechanics : Numerical Methods and Application, Pineridge Press Ltd, Swansea UK, 1983
14. 장동일, 정경섭, 한민구, 파괴역학:이론 해석에서 공학적 응용까지, 원창출판사, 1992
15. Saouma, V. E., Zatz, I. J., "An Automated Finite Element Procedure for Fatigue Crack Propagation Analysis", Engng. Fract. Mech., Vol. 20, pp. 321~333, 1984
16. Smith, R. N. L., Basic Fracture Mechanics : Including an Introduction to Fatigue, Butterworth-Heinemann Ltd., 1991