

본 연구는 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구센터의 지원에 의해 연구되었으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

축대칭 압출금형의 피로수명예측에 관한 연구

안 수 흥*, 김 태 형*, 김 병 민**, 최 재 찬**

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

S. H. Ahn*, T. H. Kim*, B. M. Kim**, J. C. Choi**

ABSTRACT

The present paper will give some results of the fatigue behavior of typical axi-symmetric forward extrusion die. The extrusion process is analyzed by rigid-plastic FEM and the deformation analysis of extrusion die is conducted by elasto-plastic FEM. To approach the crack problem LEFM (Linear Elastic Fracture Mechanics) is introduced. Using special element in order to consider the singularity of stress/strain in the vicinity of the crack tip, stress intensity factor and the effective stress intensity factor is calculated. Applying proper fatigue crack propagation criterion such as Paris/Erdogan fatigue law and maximum principal criterion to these data, then, the angle and the direction of fatigue crack propagation is simulated. In result, it is proved that the simulated fatigue crack propagates in the zigzag path along the radial direction and fatigue life of the extrusion die is evaluated by using the computed crack growth rate.

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

1. 서 론

냉간 압출공정은 기본적인 소성가공방법 중의 하나로 비교적 장비가 간단하고 제품의 표면정도가 우수하므로 치수가 작은 정밀 부품생산에 많이 응용되고 있다. 현재의 냉간 압출공정에 있어서, 금형의 비용은 총생산비용의 약 5%-15%정도를 차지하고 있으며⁽¹⁾ 현장에서 발생하는 금형의 조기파손과 그에 기인한 고가장비의 다운타임

(downtime) 등은 생산비용을 줄이기 위해서 반드시 개선되어야 할 사항이다.

냉간단조 공구의 수명은 마멸과 금형의 파괴에 의해 크게 제한받는다^(2,3). 즉, 압출금형의 수명을 제한하는 요인은 금형마멸에 의해 발생하는 금형의 치수오차로 인하여 수명이 다하는 경우와 피로균열의 성장으로 발생하는 피로파괴로 구분할 수 있다. 마멸에 잘 견디는 공구 재료는 경도가 높고 연성이 낮기 때문에 순간적인 파괴나 파

* 부산대학교 대학원

** 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구센터

로 파괴에 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 파열(Rupture)과 반경방향으로 발생하는 피로파괴의 경향이 지배적이다. 이 중에서, 파열에 대한 연구는 선형탄성론에 기초한 해석적, 수치적 방법뿐만 아니라 선형 파괴역학도 잘 확립되어 있어서 이를 방지하는데 효과적으로 응용할 수 있으나, 피로파괴에 대한 체계적인 연구는 찾아보기 힘들다.

피로파괴에 대한 연구는 최근에 Reiss⁽²⁾에 의해서 최초로 진행되었다. 그는 이 연구에서 광범위한 실험을 통하여 균열성장률은 균열길이가 증가함에 따라 감소하고, 피로균열 성장거동은 반복되는 안정-불안정 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 성장거동을 설명하고, 임의의 균열길이에 대한 금형수명을 예측하는 것을 목표로 하고 있다.

2. 축대칭 압출공정 및 금형의 유한요소해석

2.1 축대칭 압출공정의 유한요소해석

지금까지 피로파괴에 대한 연구들은 내압을 등분포로 가정하였다. 이렇게 가정된 내압은 일반적인 압출금형을 해석하기에는 충분하나, 결과적인 피로파괴 거동에 대한 정확한 해석을 수행하기에는 다소 무리가 있다. 이러한 관점에서, 금형에 작용하는 압력을 정확하게 계산하기 위하여 소재의 변형해석은 강소성 유한요소법을 이용하였다. 사용된 소재는 AISI 1010이며 응력-변형을 관계는 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Stress-strain relationship for AISI 1010

Material	Stress-strain relation	Yield stress
AISI 1010	$\bar{\sigma} = 715.95 \bar{\epsilon}^{0.22} \text{ N/mm}^2$	$Y_0 = 226.5 \text{ N/mm}^2$

해석에 이용된 초기소재와 압출금형의 치수를 Fig.1에 나타내었다. 소재와 압출금형은 축대칭 형상이므로 전체

모델 중의 1/2만 해석하였다. 일반적으로 소재의 유한요소 격자와 금형격자의 경계절점은 일치하지 않는다. 따라서, 정확한 파괴해석을 위하여 압출공정의 해석 결과로 얻은 소재의 절점력은 이후의 금형의 탄소성 변형해석을 위하여 소재와 접촉되는 금형의 절점에서의 압력으로 변환된다.

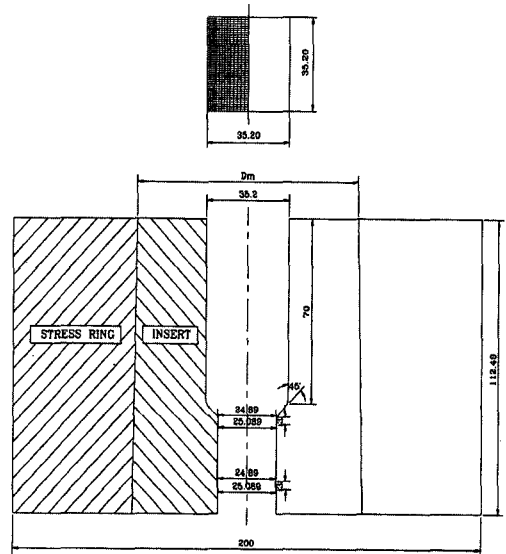


Fig. 1 Schematic diagram of workpiece and axis-symmetric extrusion die

2.2 축대칭 압출금형의 탄소성 유한요소해석

금형의 변위장 및 응력해석을 위하여 금형의 인서트를 탄소성 유한요소해석하였다. 해석에 사용된 금형 인서트의 재료는 AISI D2이고, 보강링은 AISI H13이며 각각의 금형재료의 물성치를 Table 2에 나타내었다.

Table 2. Mechanical properties for die materials

Materials	Young's modulus [N/mm ²]	Hardness [HRC]	Yield strength [N/mm ²]
AISI D2	208000	60	$S_Y = 2150$
AISI H13	212000	54	$S_Y = 1500$

먼저, Fig.2에 나타낸 바와 같이 금형에 작용하는 내압을 소재의 절점력으로부터 구하였으며 보강링의 역치기 위박음으로 인하여 인서트에 작용하는 압력은 Lamé의

수식으로부터 구하였다^(6,7).

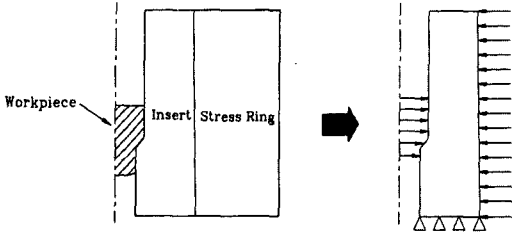


Fig. 2 Modelling of deformation analysis of extrusion die

이상에서 구한 압력 정보를 이용하여 금형의 탄소성 변형해석을 수행한 후의 응력상태는 Fig. 3과 같다. Fig. 3에서 나타난 바와 같이 금형의 꼭틀이 시작되는 영역에서 응력이 집중됨을 알 수 있다.

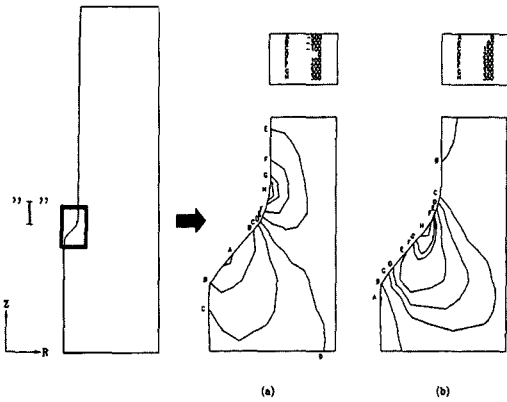


Fig. 3 Stress distribution for interesting "I" region
(a) axial stress σ_z (b) shear stress τ_{rz}

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 유효응력확대계수 K_e 및 사이클 값 ΔK_e 을 구한다.

일반적으로, 균열의 변형양식은 Fig. 4와 같이 세 가지 형태가 있으나, 본 연구에서의 압출공정은 축대칭이므로 mode III의 경우는 해당되지 않는다. 따라서, 유효응력확

대계수는 다음과 같이 계산될 수 있다⁽¹⁾.

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

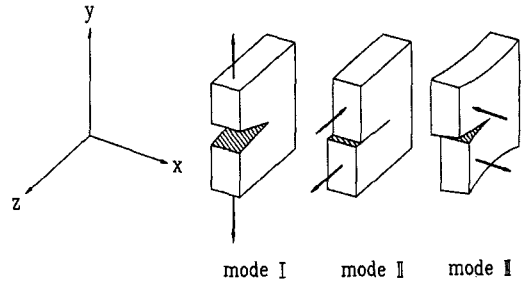


Fig. 4 The three modes of loading

K_e 를 얻기 위해서는 먼저 파괴모드 I과 II의 응력확대계수 K_I 와 K_{II} 를 구해야 한다. 이 값은 Fig. 5와 같은 좌표계에서의 변위로부터 최종적으로 다음과 같이 계산될 수 있다^(14,19).

$$K_I \begin{bmatrix} (2x-1)\cos\theta/2 - \cos 3\theta/2 \\ (2x+1)\sin\theta/2 - \sin 3\theta/2 \end{bmatrix} = 4\mu\sqrt{\frac{2\pi}{L}} \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix}$$

$$K_{II} \begin{bmatrix} (2x+3)\sin\theta/2 + \sin 3\theta/2 \\ -(2x-3)\cos\theta/2 - \cos 3\theta/2 \end{bmatrix} = 4\mu\sqrt{\frac{2\pi}{L}} \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} \quad (2)$$

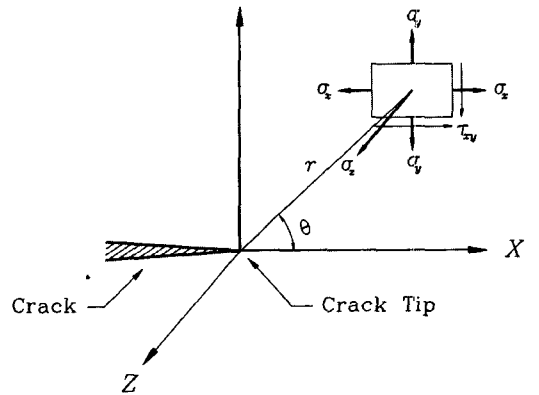


Fig. 5 Stress components in the vicinity of the crack

(2) 유효응력확대계수를 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.

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

여기서 K_I 과 K_{II} 은 각각 파괴모드 I과 II의 응력확대 계수이고, θ_o 은 균열성장방향이다.

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

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

식 (5)의 적분은 Gauss-Legendre방법을 이용하여 수치 적분하였다.

4. 개발된 기법의 적용 및 고찰

개발된 기법의 적용은 유한요소해석과 다음의 기본 가정에 의해서 수행된다.

- (1) 선형파괴역학 이론이 적용된다.
- (2) 사이클값 ΔK_e 는 임의의 편치행정에서 최대 전체 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 유한요소 해석으로 변형될 수 있다.

압출금형의 피로수명을 계산하기 위하여 개발한 기법의 해석과정을 Fig.6에 나타내었으며, 이를 위해 강소성 유한요소해석과 탄소성 유한요소해석을 수행하였다.

금형 인서트의 재료인 AISI D2의 파괴인성치는 $K_{Ic} = 532N/mm^{3/2}$ 이며, 식 (3)의 재료상수는 $C = 3.4 \times 10^{-14}$, $n = 3.7$ 이다⁽¹⁾.

편치의 위치에 따라서 금형에 작용하는 내압의 분포가 변화하며 압출공정을 편치의 행정별로 11개 단계로 나누어서 Fig.7과 같이 나타내었다.

최초의 피로균열이 시작되는 위치는 여러 연구^(1,2,10)에서 제시된 바와 같이 압출공정이 진행되는 동안에 최대

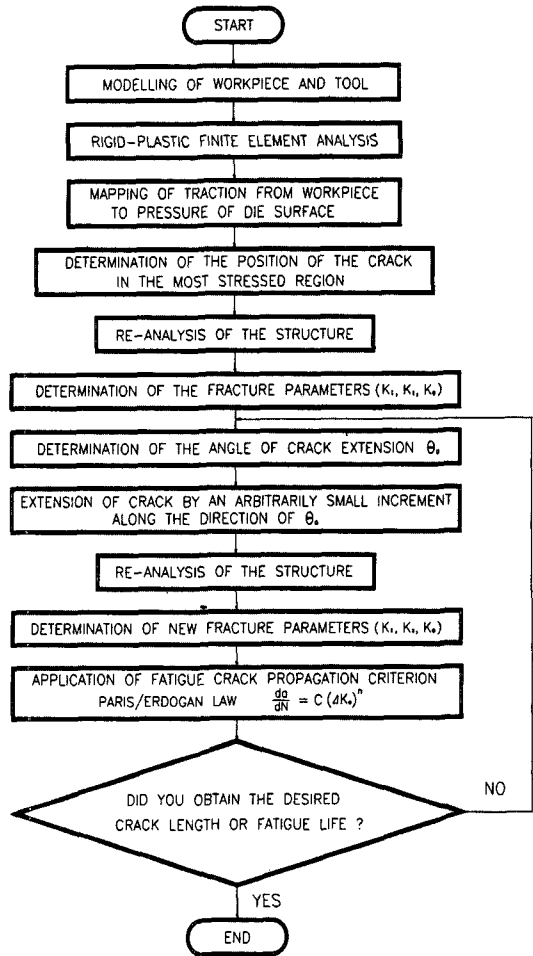


Fig. 6 Flowchart for the fatigue crack propagation and life prediction of die.

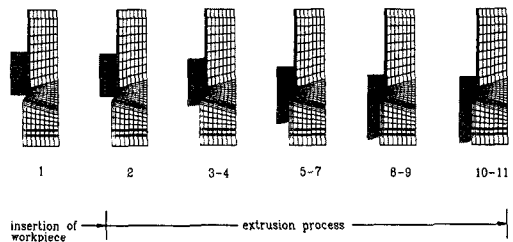


Fig. 7 The most interesting stages of forming to calculate stress intensity factor

응력이 작용하는 영역으로 가정하였다. 균열의 시작은 기존의 표면균열에서부터 출발하는 한 번의 해석을 수행하여 계산할 수 있는 반면에, 균열 전파는 증분과정으로서

술해야 한다.

현재까지 유한요소법을 피로균열 전파 해석에 적용한 많은 연구가 수행되었다^(11, 14). 이들 연구의 주안점은 응력 확대계수의 결정이다. 균열 선단 근처의 응력과 변형률의 특이성을 고려하고 보다 정밀한 해를 얻기 위하여 본 연구에서는 quarter point technique^(10, 15, 17)이라고 불리는 방법을 사용하였다. 이 방법은 균열 선단에서 중간 절점을 가지는 등대개요소를 적용시키는 방법으로, 요소의 중간 절점을 균열 선단 앞의 1/4점으로 이동시킴으로써 그곳에서 발생하는 특이성을 쉽게 모델링할 수 있다. 또한 비교적 성긴 격자를 사용하더라도 정확한 응력확대계수를 구할 수 있다.

응력확대계수를 구하는 방법에는 여러가지가 있을 수 있으나, 균열 선단 근처의 변위장을 이용하는 방법(변위법 혹은 변위상관법)이 비교적 좋은 결과를 얻을 수 있다고 알려져 있다^(17, 18). 따라서, 본 연구에서 응력확대계수는 균열 선단 근처의 변위장으로부터 계산하였다.

균열 선단의 거동은 균열 선단의 특이 요소에 의해 모델링되기 때문에 이 요소의 길이는 정확한 응력확대계수를 구하기 위하여 매우 중요하다^(19, 20). 본 연구에서는 L/a 의 비를 1/10에서 1사이에서 선택하였다⁽¹⁹⁾. 여기서 a 는 균열길이, L 은 균열 선단 요소의 길이를 나타낸다.

해석에 사용된 균열을 포함하는 금형의 격자 시스템을 Fig.8에 나타내었다. 해석의 정확성을 높이기 위하여 균열이 존재하는 영역에 집중적으로 많은 요소를 구성하였다. Fig.8(b)는 균열을 유한요소 모델링한 예를 나타내었다.

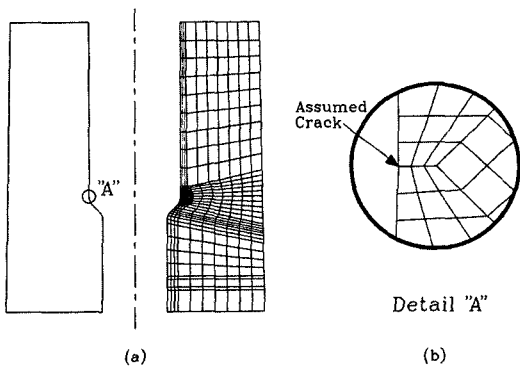


Fig. 8 Mesh system for the fracture analysis by the FEM
(a) total mesh system(left side added)
(b) mesh system for the vicinity of the crack

일반적으로 구조물에 균열이 있으면 이 부분에 응력이 집중되는 현상이 발생하는데 이를 확인하기 위하여 균열의 길이가 0.1mm인 금형의 경우에 대하여 균열 선단 근처와 이에 반경축으로 평행한 지점들에 대한 응력분포를 Fig.9에 나타내었다. Fig.9(a)에는 응력분포가 계산된 위치를 표현하였으며 Fig.9(b)에 계산된 응력값을 그래프로 나타내었다. 균열 선단 주위의 응력값이 다른 지점들보다 매우 높은 것을 알 수 있다.

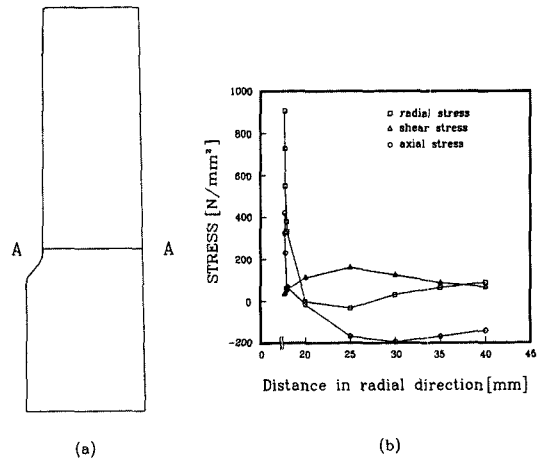


Fig. 9 Stress distributions in the vicinity of the crack tip and other places for 0.1mm crack

Fig.10에 표현한 그래프는 균열 길이의 함수인 응력확대계수를 균열 선단에서 계산한 예이다. 이 그래프는 Fig.7의 각각의 편지행정에 대한 결과를 보간하여 얻을 수 있으며, 한 번의 하중 주기 동안에 공정시간의 함수로서 K_{I1} , K_{I2} 를 보여준다. 이 그래프에서 균열의 길이가 길어짐에 따라서 파괴모드 I의 영향이 감소한다는 것을 알 수 있다.

피로수명을 구하기 위하여 먼저 유효응력확대계수를 계산해야되며 이것은 Fig.10의 결과들을 식 (1)에 적용함으로써 구할 수 있다. 계산된 유효응력확대계수는 Fig.11에 나타내었다. 유효응력확대계수는 초기에는 K_{Ic} 값을 초과하지만 균열이 증가함에 따라 K_{Ic} 이하로 감소함을 볼 수 있었다. 이 결과로부터 균열성장률 뿐만 아니라, 이어지는 균열성장을 제시하는 균열성장방향을 계산할 수 있다. 따라서, 균열성장길이와 균열성장방향으로부터 새로운 균열선단의 좌표를 계산할 수 있다. 그 결과, 다음 단계의 해석을 위해 금형의 격자를 재구성하게 된다.

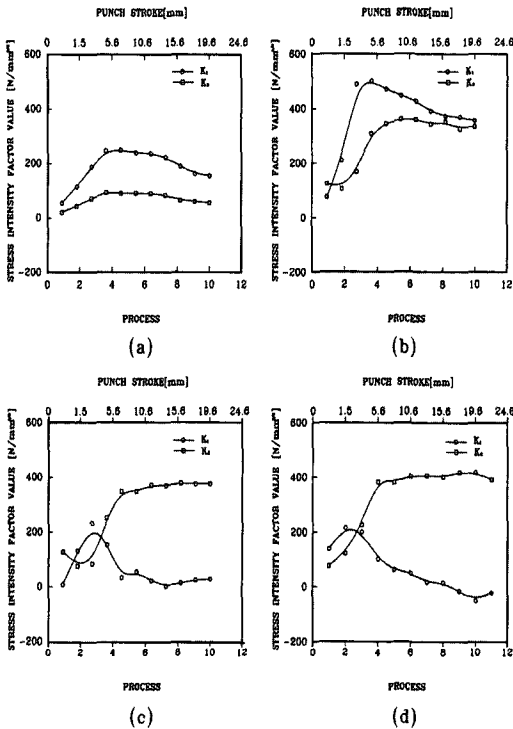


Fig.10 Stress intensity factors for different crack length
 (a) for 0.1mm crack (b) for 0.6mm crack
 (c) for 1.1mm crack (d) for 2.0mm crack

번째 균열증분을 $\Delta a = 0.1\text{mm}$ 로 선택하였다. Fig.10의 응력확대계수 및 Fig.11의 유효응력확대계수의 분포와 식 (5)를 이용하여 압출금형의 피로수명을 계산하였으며 그 결과를 Fig.12에 나타내었다. 균열의 길이가 약 3.5mm까지 진파되는데 필요한 사이클 수는 10000 ~ 12000정도임을 알 수 있다.

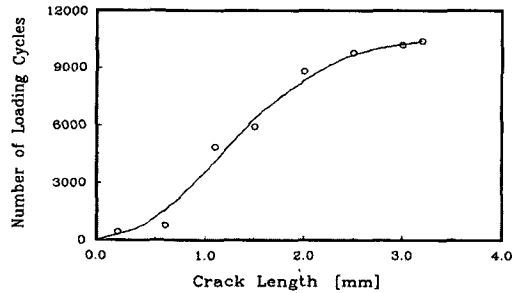


Fig.12 Computed fatigue life in the extrusion die

Fig.13은 시뮬레이션한 결과로부터 얻은 균열성장 경로를 나타낸 것이다. 금형 표면의 균열은 사이클이 진행됨에 따라서 금형 내부로 전파되며 그림과 같이 균열성장 방향과 반경축 사이의 각도 범위는 $\pm 30 \sim 40$ 이다. 또한 균열은 반경축을 따라서 지그재그의 경로로 성장함을 보여준다.

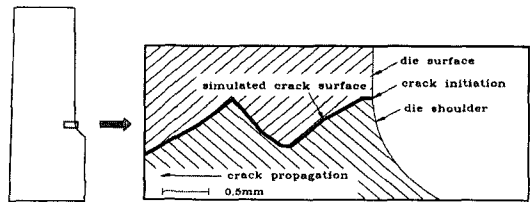


Fig.13 Visualization of simulated fatigue crack propagation in the extrusion die

본 연구에서는 초기의 균열성장 증분에 대한 가정의 어려움과 소재와 윤활제가 균열 내부로 파고드는 웨지(wedge)효과를 고려하지 않았지만 Fig.13의 결과는 일반적인 압출금형에서 발생하는 피로균열 성장거동에 대한 실험결과^(1,2)와 비교적 잘 일치하였다.

5. 결 론

유한요소 공정시뮬레이션은 성형 공구의 응력과 변형을 등을 계산하는 적절한 방법이다. 소재와 금형의 변형

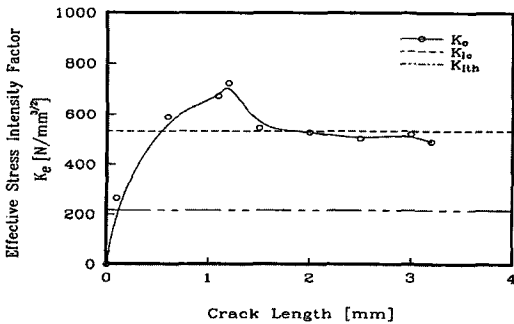


Fig.11 Effective stress intensity factor for increasing crack length

단일의 균열길이에 대한 응력확대계수 및 유효응력확대계수를 이용하여 구한 수명은 전체 금형수명의 일부분만을 나타낸다. 그러므로 원하는 금형수명은 식 (5)로 구한 각각의 수명을 전부 총합함으로써 구해진다.

실제의 제조공정에서 관찰되는 금형의 표면 파손 깊이는 약 0.01~0.1mm 정도이다⁽¹⁾. 이 사실을 고려하여 첫

해석을 위하여 강소성 유한요소해석과 탄소성 유한요소 해석을 수행하였다. 선형파괴역학(LEFM)의 이론을 도입하여 균열의 피로거동을 조사하였으며, 압출금형의 피로수명을 계산하였다. 이상에서 아래와 같은 결론을 얻었다.

1) 압출공정중 금형에서 응력과 변형을 가장 심하게 받는 위치는 금형의 곡률이 시작되는 영역이므로, 이 위치에서 피로균열이 시작된다고 가정하는 것이 타당함을 보였다.

2) 압출금형에서 발생하는 피로균열은 반경축을 따라 지그재그의 경로로 성장한다는 사실이 증명되었으며 이것은 이전의 실험결과와 매우 유사한 경향이다.

3) 기존의 유한요소법과 선형파괴역학 이론을 연계하여 압출금형의 피로수명을 예측할 수 있는 기법을 제시하였다.

균열성장 증분에 관한 연구가 계속 수행되고, 웨지 효과 등이 고려된다면 보다 좋은 결과를 얻을 수 있으며, 개발된 기법은 여러가지 냉간단조금형의 피로수명을 예측하는 데 유용하게 사용될 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. Tekkaya, A. E., Sons z. 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", Pro. 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., H nsel, M., FE-Simulation des Werkzeugversagens von Flie pre -matrizen, VDI-Berichte Nr. 810, VDI-Verlag, D ssel-dorf, pp. 349 376, 1990.
6. 김형섭, 퍼스널컴퓨터를 이용한 냉간단조 공정설계

및 금형설계의 자동화에 관한 연구, 부산대학교 박사학위 논문, 1990.

7. 김태형, 김병민, 최재찬, "냉간단조품의 정밀도 향상을 위한 금형해석 기법", 한국정밀공학회, Vol. 12, No. 1, pp. 29 37, 1995.
8. Rossmannith, H. P., "Finite Element in der Bruch-mechanik", 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., H nsel, M., "FEM-Simulation of Fatigue Crack Growth in Cold Forging Dies", Advanced Technology of Plasticity, Vol. 1, pp. 355 360, 1990.
11. Gallagher, R. H., "Survey and Evaluation of the Finite Element Method in Linear Fracture Mechanics Analysis", 1st Conference on Structural Mech. in Reactor Technol., Berlin, 1971.
12. Hellen, T. K., "on the Method of Virtual Crack Extensions", Int. J. Num. Meth. Engng., Vol. 9, pp. 187 207, 1975.
13. Schijve, J., Hoeymakers, A. H. W., "Fatigue Crack Growth in Lugs", Fatigue of Engineering Materials and Structures, Vol. 1, pp. 185 201, 1979.
14. Shih, C. F., de Lorenzi, H. G., German, M. O., "Crack Extension Modeling with Singular Quadratic Isoparametric Elements", Int. J. Fracture, Vol. 12, 1976.
15. 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.
16. Henshell, R. D., Shaw, K. G., "Crack Tip Elements are Unnecessary", Int. J. Num. Meth. Engng. 10, No. 9, pp. 495 509, 1975.
17. Owen, D. R. J., Fawkes, A. J., Engineering Fracture Mechanics : Numerical Methods and Application, Pineridge Press Ltd,

- Swansea UK, 1983.
18. 장동일, 정경섭, 한민구, 파괴역학:이론 해석에서 공학적 응용까지, 원창출판사, 1992.
19. 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.
20. Smith, R. N. L., Basic Fracture Mechanics : Including an Introduction to Fatigue, Butterworth-Heinemann Ltd, 1991.