

## 벨로우즈의 표면 균열 진전 거동

### Surface Crack Propagation of Metal Bellows

맹완영, 강영환  
한국원자력연구소

조대희, 김재훈, 이현철  
충남대학교

#### 요약

금속 벨로우즈의 피로 균열 성장 거동을 파악하는 것은 벨로우즈의 건전성 및 파단전 누설 해석에 매우 중요하다. 타원형 표면 노치를 갖는 SUS 316L 금속 벨로우즈의 피로균열진전 특성을 파악하고자 노치의 길이 및 깊이가 다른 단일 피치 모델 벨로우즈 시편을 이용하여 피로균열진전시험을 수행하였다. 인장방향으로 주파수 1Hz를 갖는 삼각파형의 변위 제어를 통하여 실험하였다. 균열 길이는 피로 파면에 형성되는 beach mark를 이용하여 측정하였다. Newman & Raju 이론식의 응력확대계수를 검증하기 위하여 상용 FEM 프로그램인 ANSYS를 이용하여 3차원 유한요소해석을 하였다. 응력확대계수는 표면 부위를 제외하고 최대 7%의 오차를 보였다. 실제실험과 해석에서의 동일 변위에 대한 하중의 차이는 5%만큼 실험치가 높게 나왔다. 단일 피치 모델 벨로우즈 시편의 피로균열진전 거동은 초기 균열의 형태, 크기 및 진폭에 따라 변화되어 벨로우즈의 수명에 큰 영향을 주는 것으로 확인되었다.

#### Abstract

It is essential to investigate the fatigue crack propagation behaviors of metal bellows for the analysis of its structural integrity and leak before break condition. One-pitch model bellows specimens which have surface notches of different length and depth were used to analyse the behaviors of fatigue propagation of surface crack of the bellows. These tests were performed by the displacement controlled conditions using a triangular wave form in tension side having a frequency of 1 Hz. Crack length were obtained by measuring the beach mark's distance. Three dimensional finite element analysis are performed using commercial FEM program ANSYS to verify the calculated stress intensity factor based on the Newman & Raju equation. The results showed that the calculated stress intensity factor at crack tip had the maximum 7% error except surface region. It is confirmed that the size and shape of initial surface notch and the fatigue displacement amplitude affected the fatigue behavior and the fatigue life of metal bellows.

## 1. 서론

금속 벨로우즈는 스테인레스 강재, 인코넬 합금강재등으로 제조되는데 독특한 주름관 형태의 구조를 가지고 있으므로 높은 신축 특성을 가진다. 이와 같은 신축 특성 때문에 금속 벨로우즈는 연구용 원자로의 in-situ 조사 크립 캡슐(irradiation creep capsule)의 응력부과용 주름관[1] 및 액체금속로에서 열 응력을 완화하기 위한 이음관[2]등 원자력 관련 요소 부품으로 다양하게 사용된다. 조사 크립 캡슐의 응력부과용 금속 벨로우즈는 중성자 조사 환경에서 탄성을 유지하고 높은 내부 압력을 견디어야 하므로 부품의 건전성을 확보하기 위해서는 벨로우즈의 거동[3~6]에 대한 이해가 필수적이다. 액체금속로에 사용되는 이음관용 금속 벨로우즈도 원자로 본체와 외부 관 사이의 높은 온도 편차를 완화해야 하므로 열 피로에 대한 이해가 선행되어야 한다.

또한 이들 원자력 관련 부품의 파단전 누설 분석은 장치의 안전성 관점에서 중요하다. 부품 재료의 피로균열진전 거동은 파단전 누설 개념에 따라 원자력 관련 부품 설계시 부품의 수명을 평가하는데 필수적인 자료이다. 본 연구에서는 표면균열인 단일 피치 모델 벨로우즈의 응력확대계수를 계산할 때 Newman & Raju식[7]에 적용할 수 있는지를 검증하기 위해 유한 요소 해석을 하였다. SUS 316L 벨로우즈의 피로균열진전특성을 파악하고자 단일 피치 모델 벨로우즈 시편을 사용하여 피로균열진전 시험을 수행하였다. 단일 피치 모델 벨로우즈 시편의 중앙에 폭(2c)이 9mm, 깊이가 0.75mm와 1mm인 타원형의 노치를 주고 각 노치에 따른 피로균열진전과 진폭변화에 따른 피로균열진전 특성을 파악하고자 진폭을 다르게 하여 실험하였다.

## 2. 관련 이론

### 2.1 반타원 표면균열에 대한 응력확대계수 해석

벨로우즈는 구부러진 형태로써 하중이나 압력이 작용할 때 인장 응력과 굽힘 응력을 동시에 받게 된다. 본연구의 단일 피치 모델 벨로우즈의 응력확대계수는 노치가 있는 무한 평판에 대한 계산식인 Newman & Raju식을 적용하여 구하였고 이 값은 유한요소법에 의해 검증하였다. 표면 균열은 반 타원형으로 볼 수 있고 균열에 작용하는 응력확대계수는 다음 식으로 표현된다.

$$K_I = (\sigma_m + H \sigma_b) \sqrt{\frac{\pi a}{Q}} F\left(\frac{a}{t}, \frac{a}{c}, \frac{c}{W}, \phi\right) \quad (1)$$

여기서  $K_I$ 는 응력확대계수,  $\sigma_m$ 은 인장 응력,  $\sigma_b$ 는 굽힘 응력,  $\phi$ 는 타원의 매개각, a는 균열의 깊이이다. Q, H, F는 균열의 크기, 시편의 크기 및 균열선단에서  $\phi$ 에 의존하는 함수이다. 벨로우즈 시편에 작용하는 인장 응력과 굽힘 응력은 다음식으로 계산되어진다.

$$\sigma_m = \frac{F}{Bt}, \quad \sigma_b = \frac{3HF}{Bt^2} \quad (2)$$

여기서 F, B, H 및 t는 각각 작용하는 힘, 시편의 폭, 봉우리의 높이 및 시편의 두께이다.

사용한 벨로우즈 시편에서 초기 균열은 균열 선단에 응력이 작용하면 노치의 양단에서 생성되어 시편의 좌우 양단 쪽으로 진전한다. 한편, 시편 봉우리의 안쪽 표면에서도 균열이 생성되어 진전하는데 이것은 내측에 걸리는 인장력에 기인한다. 균열이 최종적으로 진행된 뒤 형성되는 파단면은, 단일 피치 모델 시편의 봉우리의 바깥 표면 및 안쪽 표면에 생성된 균열이 각각 성장하여 시편 두께의 중간 부근에서 만나서 두 개의 피로 균열 파단 영역으로 구성되는 형태를 가진다.

## 2.2 $\Delta K$ 에 의한 피로균열진전속도 평가

Paris는 균열진전속도( $\frac{da}{dN}$ )를 응력확대계수 ( $\Delta K$ )의 함수로 다음과 같이 제안하였다.

피로 크랙 성장 거동은 깊이방향으로 타원의 매개각  $\phi = 90^\circ$  인 최심점과  $\phi = 0^\circ$  인 표면점에서 다음의 식으로 계산된다.

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (3)$$

여기서 C 및 m은 재료 및 하중조건에 의한 상수이며  $C = 10^{-5} \sim 10^{-12}$ ,  $m = 0.5 \sim 8.0$  정도의 값을 갖는 것으로 알려져 있다.

표면균열의 깊이방향( $\phi = 90^\circ$ ) 및 표면방향( $\phi = 0^\circ$ )의 균열진전속도( $\frac{da}{dN}$ ,  $\frac{dc}{dN}$ )는

$$\begin{aligned} \frac{da}{dN} &= C_a(\Delta K)^m \\ \frac{dc}{dN} &= C_c(\Delta K)^m \end{aligned} \quad (4)$$

과 같다.

## 3. 유한 요소 해석

ANSYS를 사용하여 응력확대계수  $K_I$  을 구하고, 이를 Newman & Raju 식에서 구한  $K_I$  값과 비교하여, 벨로우즈시편의  $\Delta K$  를 구하기 위한 식으로 Newman & Raju 식을 사용할수 있는지를 검증하였다. 이 때 표면균열의 a/c 가 0.167 인 경우의 시편을 모델에 적용하였고, 시편 형상이 대칭이기 때문에 1/4 모델링하였다. 선형으로 해석을 하였고, 실제 실험으로 구한 변위값과 해석으로 구한 변위값을 비교 검토하였다. 해석에 사용된 유한요소는 전체적으로 20개의 결점을 갖는 2차 등계수 요소(quadratic iso-parametric element)를 사용하였다. 총 요소수는 3784개이며, 크랙선단부위를  $11.25^\circ$  간격으로 8등분하여 K 값을 얻었다.

Fig. 4는 해석에 사용된 모델의 전체적인 유한요소를 보여주고 있으며, Fig. 5는 크랙선단부위에서의 유한요소형상을 나타내고 있다. 크랙선단부에서 변형과 응력이  $r^{-1/2}$ 의 특이성을 갖게하기 위하여, 첫 번째 반경요소의 중간 결점들을 크랙선단부로 1/4이동시킨 특이요소로 모델링하였다.

## 4. 실험

단일 피치 모델 벨로우즈 시험편은 SUS 316L을 사용하였고 재료의 화학적 성분 및 기계적 성질은 Table 1, 2와 같다. 피로균열진전 거동을 분석하기 위해서 두께가 3mm인 Fig. 1과 같은 시험편을 사용하였다. 금속 벨로우즈 하나의 피치에 해당하는 부분과 유사한 형태(one pitch model)를 가지는 시험편으로 표면에 노치를 방전 가공 방법으로 형성시켰다. 표면 노치는 폭(2c)이 9mm, 깊이(a)가 0.75mm, 1mm의 크기인 타원 노치로 시험편의 볼록한 부분 중심부의 내부 표면에 형성시켰다. Fig. 2와 같은 CT(Compact Tension) 시험편을 사용한 피로균열진전 시험을 병행하여 수행하였다. 단일 피치 모델의 표면 노치 형상과 진폭에 따른 시험편 분류와 시험조건은 Table 3에 나타내고 있다.

피로 시험은 100kN 용량의 Instron 8516 시험기를 사용하였다. 피로 주파수가 1Hz이고 파형은 삼각파형으로 실험을 하였고 변위가 일정한 진폭을 가지도록 조절하면서 시험편에 피로하중을 부과하였다. 변위 진폭은 시험편에 따라 인장방향으로 4.65mm, 5.8 mm을 주어 수행하였다. 벨로우즈의 균열 진전 길이는 피로시험 도중 비치 마크를 형성 시켜서 측정하였다. 비치 마크는 시험 도중 진폭을 초기값의 2/3로 변화시켜 일정 길이가 성장하도록 조절하면서 형성시켰다. 피로균열진전 시험 후 파단면에 형성된 비치 마크는 입체 현미경을 사용하여 관찰하였다.

## 5. 결과 및 고찰

### 5.1 유한요소해석 결과

유한요소법에 의해 균열선단에 작용하는 응력확대계수를 계산한 결과를 Fig. 6에 보였다. Fig. 6은 유한요소해석과 표면 크랙을 갖는 평판에 대한 Newman & Raju 식에서 얻어낸  $K_I$  값을 각각의 크랙선단위치에 따라 비교한 그림이다. 이 모델의 경우 Newman & Raju의 이론식과 유한요소법에 의해 계산된 응력확대계수값은 표면부위를 제외하고는 최대 7%의 오차를 보였다. 동일 변위에 대한 하중의 차이는 실험치가 5% 정도 해석값보다 높게 나왔다.

### 5.2 비치마크 형성 거동

벨로우즈 시험편에 형성되는 비치 마크를 분석하기 위한 예비 시험으로서 CT시험편을 이용하여 비치마크 형성거동 시험을 수행하였다. 시험 도중 피로균열 길이는 DCPD 방법을 사용하여 측정하였다. 피로 시험 조건은 1Hz, 하중비 0.2로 하였다. 파면에 여러 개의 비치 마크가 형성된 것을 확인할 수 있었다. 비치 마크를 형성시키기 위해 20번 피로 하중 진폭을 감소시켰으나 14개 정도의 비치마크가 관찰되고 몇 개는 입체 현미경 사진으로 관찰되지 않는다. 육안으로 판별할 수 있는 비치 마크를 형성하려면 측정 가능할 만큼 균열이 진전해야 하는 것으로 판단된다.

피로파면에 비치마크가 형성되어 거시적으로 분별할 수 있으려면 하중 진폭을 바꾼 조건에서 관측할 수 있을 만큼 균열이 성장해야한다. 그러나 비치 마크 영역이 너무 넓어지면 전체 시험 결과에 영향을 준다. 따라서 비치마크로 구분될 수 있을 만큼 최소한의 폭을 가지도록 하여야한다. Fig. 3은 파면에서의 전형적인 비치 마크를 보인다. 피로 크랙의 깊이와 길이는 이 비치 마크로 측정된다.

### 5.3 벨로우즈 피로 균열 진전 거동

표면 균열은 초기에는 깊이 방향의 균열 최심점에서 균열이 개시하여 반원형의 형상으로 성장하다가 균열이 진전하면서 점차 반타원형으로 변화된다. 응력확대계수와 피로 균열진전속도의 관계에 대한 그림을 Fig. 7에 보였다. 벨로우즈의 표면 균열의 깊이가 0.75mm이고 4.65mm의 피로변위 진폭이 부과되면 응력확대계수범위가 20MPa  $m^{1/2}$ 의 영역에서 피로균열진전속도가  $1 \times 10^{-4}$ mm/cycle 정도이고 균열깊이가 1mm이고 변위 진폭이 4.65mm일 경우 동일 응력확대계수범위에서 피로균열진전속도는  $3 \times 10^{-5}$ mm/cycle 정도의 값을 가졌다. 표면 균열의 깊이가 0.75mm이고 5.8mm의 피로변위 진폭이 부과되면 응력확대계수범위가 30MPa  $m^{1/2}$ 의 영역에서 피로균열진전속도가  $1 \times 10^{-4}$ mm/cycle 정도이고, 균열깊이가 1mm이고 변위 진폭이 5.8mm일 경우 동일 응력확대계수범위에서 피로균열진전속도는  $1 \times 10^{-4}$ mm/cycle 정도의 값을 가졌다.

벨로우즈 표면 피로 균열 진전 거동은 피로 변위 진폭, 균열의 깊이에 의해 영향을 받는 것으로 보였다. 피로 변위 진폭이 동일할 때 균열의 깊이가 증가하면 균열 진전 속도가 감소하는 경향을 보였다. 균열의 깊이가 동일하고 피로 변위 진폭이 증가하면, 변위 진폭이 작은 경우는 균열진전속도가 감소하는 경향을 보이거나 변위 진폭이 커지면 감소경향이 둔해진다. 벨로우즈 표면에 형성되는 균열의 피로균열진전속도는 균열의 깊이, 변위 진폭에 큰 영향을 받으며 벨로우즈의 수명 설계시 이러한 인자의 영향을 평가하는 것이 필수적이라 사료된다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 벨로우즈의 응력확대계수를 계산할 때 Newman & Raju식에 적용할 수 있는지를 검증하기 위해 3차원 유한 요소 해석을 하였다. 그리고 SUS 316L 벨로우즈의 피로 균열진전특성을 파악하고자 단일 피치 모델 벨로우즈 시편으로 피로균열진전 시험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 벨로우즈에 대한 유한요소해석 값이 평판에 대한 Newman & Raju식과 거의 일치함을 볼 수 있고 벨로우즈 시편에 식을 적용할수 있을 것으로 판단된다.
- 2) 피로 변위 진폭이 동일할 때 균열의 깊이가 증가하면 균열 진전 속도가 감소하는 경향을 보였다. 균열의 깊이가 동일하고 피로 변위 진폭이 증가할 경우도 균열진전속도가 감소하는 경향을 보였는데 변위진폭이 커질수록 감소경향은 둔화되었다. 벨로우즈 표면에 형성되는 균열의 피로균열진전속도는 균열의 깊이, 변위 진폭에 영향을 받으며 벨로우즈의 수명 설계시 이러한 인자의 영향을 평가하는 것이 필수적이라 사료된다.

### Acknowledgement

본 연구는 1999년도 과학기술부의 원자력연구개발 사업의 일환으로 수행되었습니다.

## 참고 문헌

- [1] D. R. Harries, Irradiation Creep in Non-Fissile Metals and Alloys, J. of Nucl. Mater., 65, 1977, pp.157 -173.
- [2] M. Takenaka, Surface Crack Propagation and Stability of Through-Wall Crack of Bellows, ASME/JSME PVP Conference, 1989.
- [3] Standards of the Expansion Joint Manufacturers Association, Inc., 1980.
- [4] K. Tsukimori et al., Fatigue And Creep-Fatigue Life Prediction of Bellows, ASME/JSME PVP Conference, 1989.
- [5] K. Tsukimori et al., Buckling of Bellows Subjected to Pressure Loadings, ASME/JSME PVP Conference, 1989.
- [6] E. A. Merrick et al., Replacement Options for Damaged Bellows, ASME PVP-Vol. 83, 1984, pp. 85-133.
- [7] J.C. Newman, Jr. and I.S. Raju, Analyses of Surface Cracks in Finite Plate Under Tension or Bending Loads, NASA Technical Paper 1578, 1979.
- [8] K. Walker, The Effect of Stress Ratio During Crack Propagation and Fatigue for 2024-T3 and 7075-T6 Aluminum, ASTM STP462, American Society for Testing and Materials, 1970, pp.1-14.

Table 1 Chemical Composition of SUS316L

C	Ni	Cr	Mn	P	S	Si	Mo	N
0,02	11,21	17,38	1,86	0,027	0,0054	0,51	2,36	0,038

Table 2 Mechanical Property of SUS 316L

Tensile Stress(MPa)	Modulus of Elasticity (GPa)	Poisson's Ratio
537	193	0,3

Table 3 Test Conditions of One-Pitch-Models

Type of Specimen	Surface Notch [mm]		Displacement [mm]	Shape	Frequency (Hz)
	Length	Depth			
BF-C1	9	0,75	4,65	triangle	1
BF-C2			5,8		
BF-D1		1	4,65		
BF-D2			5,8		

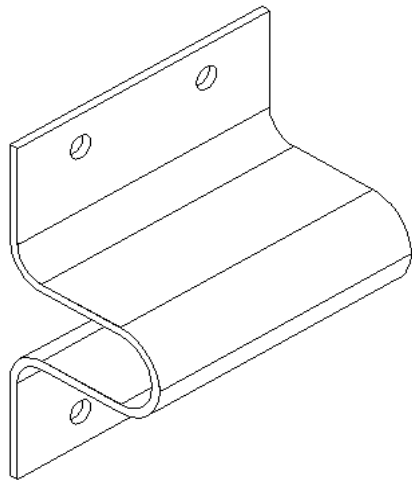


Fig. 1 Shape of Metal Bellows

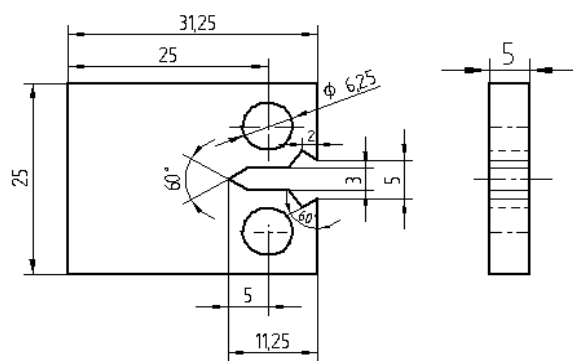


Fig. 2 Dimension of CT Specimen



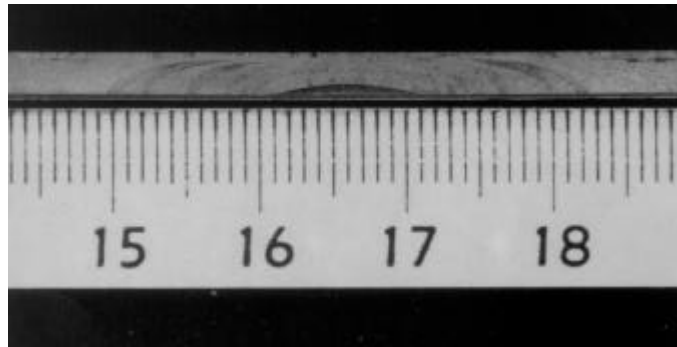


Fig. 3 Fracture Surface Appearance of BF-D1 Specimen with Beach Marks (Thickness is 3mm)

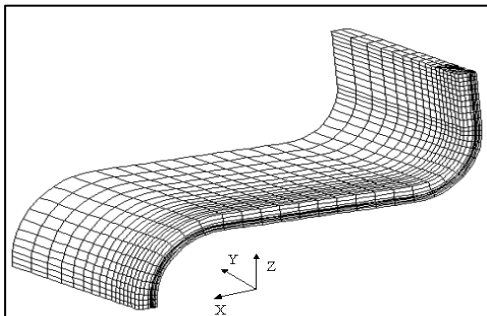


Fig. 4 One-quarter Finite Element Model of One-pitch Bellows

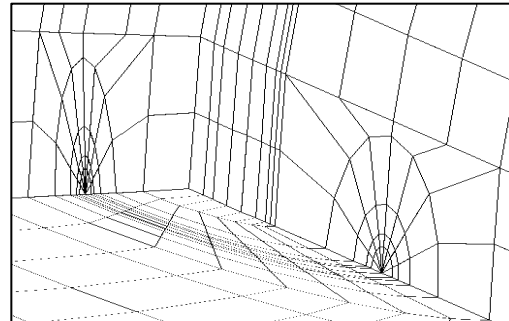


Fig. 5 Finite Element Model of Crack Front Region

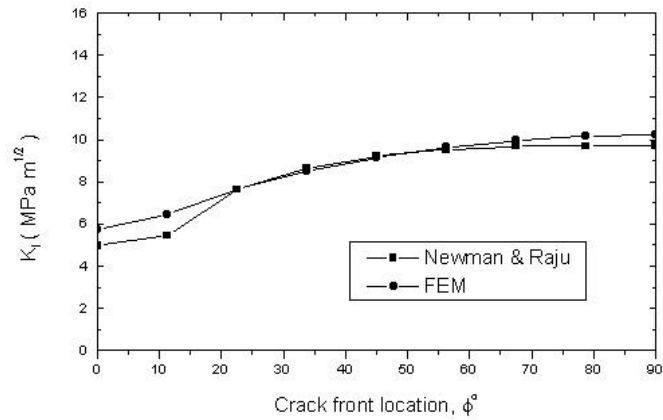


Fig. 6 Comparison of Stress Intensity Factor between Newman & Raju Equation and FEM

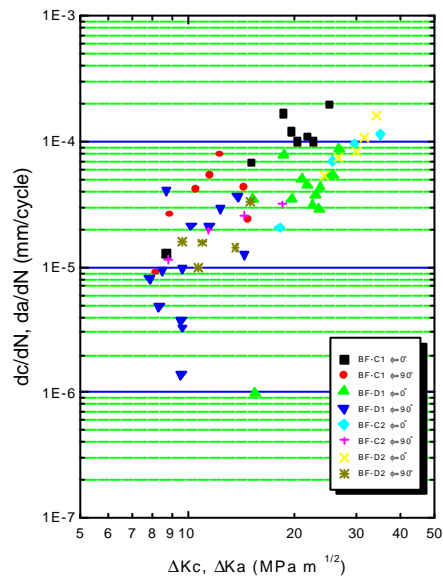


Fig. 7 Relation between Fatigue Crack Growth Rate and Stress Intensity Factor