

## 반복 하중에 의한 곡관의 피로 균열 해석

장형운<sup>1</sup> · 정재욱<sup>1</sup> · 홍정욱<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>한국과학기술원 건설 및 환경공학과

## Fatigue Fracture Analysis of Curved Pipes Under Cyclic Loading

Heung Woon Jang<sup>1</sup>, Jae-Wook Jung<sup>1</sup> and Jung-Wuk Hong<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Civil and Environmental Engineering, KAIST, Daejeon, 34141, Korea

### Abstract

In this study, we numerically analyze fatigue cracks of curved pipes under cyclic loadings. Numerical models of the curved pipes are developed. The models are verified with the experimental results in terms of fatigue lives and development process of the fatigue cracks. Erosion technique is applied to the solid elements in order to describe shapes of the fatigue cracks and estimate the fatigue lives. Also, development of the fatigue cracks is described by allocating sufficient number of solid elements in the radial direction. Fatigue lives and shapes of the crack resulting from numerical analyses show good agreement with those of the experiment considering  $\pm 100\text{mm}$  displacement. In addition, estimation of the fatigue life caused by displacement with different magnitude is conducted. We expect that the model can be applied to understand the relation between fatigue lives and characteristics of pipes or loadings.

**Keywords** : curved pipe, fatigue crack, cyclic loading, finite element method

### 1. 서 론

2011년도에 발생한 후쿠시마 원전 사고로 인해 원전 구조물의 지진에 대한 안정성이 점차 중요해지고 있다. 원자력 발전소에 지진과 같은 재해가 발생할 경우, 발전기능을 안전하게 정지하기 위해서는 원자로의 냉각에 필요한 냉각수가 지속적으로 보급되어야 하며, 냉각시스템이 작동하지 않으면 후쿠시마에서 발생한 원전사고와 같은 재앙이 발생할 수 있다(Lee *et al.*, 2014). 원전 사고는 수많은 인명피해와 재산피해를 야기하며, 특히 방사능 유출로 인해 오랜 기간 회복할 수 없는 피해를 발생시킨다. 따라서, 지진 발생시 냉각수 보급을 위한 주요 배관의 안전 여부는 원자력발전소 설계에 있어 매우 중요하다.

현재 원자력발전소의 주요 배관에 대한 안전성을 확보하기 위하여 많은 실험들이 진행되고 있다. 그러나 실제 원자력 발전소에 설치되는 배관의 크기로 이를 진행하기에는 시간적,

경제적으로 무리가 따른다. 이에 따라 배관의 균열 형성 여부를 파악하기 위하여 여러 선행 연구들이 진행되어 왔다. Axial strain range (Takahashi *et al.*, 2009)와 equivalent plastic strain (Takahashi *et al.*, 2010), ratcheting strain(Gupta *et al.*, 2009)과 같은 수치들이 배관의 균열 형성을 예측하는데 사용되었다. 그러나 위의 연구들은 균열의 형성 과정을 예측

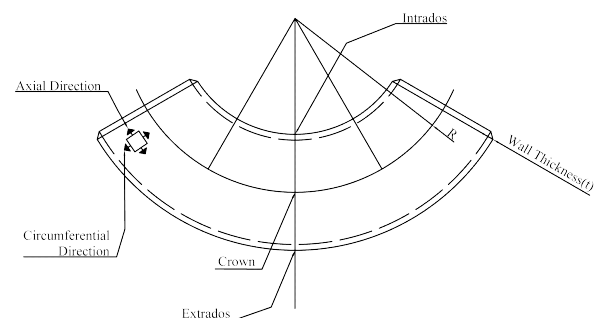


Fig. 1 Notations for curved pipes(Yahiaoui *et al.*, 2000)

\* Corresponding author:

Tel: +82-42-350-3616; E-mail: j.hong@kaist.ac.kr  
Received June 27 2016; Revised August 16 2016;  
Accepted August 18 2016

© 2016 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

하는 데는 한계가 있었다. 본 연구에서는 균열이 형성되어가는 형상까지 파악이 가능한 수치해석 모델을 개발하였으며, 실험 결과와의 비교 분석을 통해 모델의 타당성을 검증하였다.

일반적으로 곡관의 균열에 대하여 다룰 때, Fig. 1과 같은 표기법이 사용된다. 곡률 반경의 중심으로부터 가까운 쪽을 intrados라 명하며, 먼 쪽을 extrados라 명한다. 그리고 가운데 부분을 crown이라 명한다.

## 2. 본 론

### 2.1 실험

Fig. 2는 한국원자력연구원에서 수행한 반복 하중이 가해진 배관의 피로 균열에 대한 실험을 위한 실험체 제원의 도면이다. 실험은 명지대학교의 하이브리드구조실험센터에서 진행되었다. 실험체는 American Society of Mechanical Engineers code(ASME, 2004)에 맞춰서 설계되었으며, 외경 88.90 mm, 두께 5.486mm, 곡률반경 114.3mm로 설계되었다.

실험체는 Fig. 3과 같이 설치하였다. 실험체의 양측은 모두 힌지로 고정되었다. 실험체 좌측의 힌지는 dynamic actuator와 연결되어 변위를 입력할 수 있도록 설치되었으며, 실험체

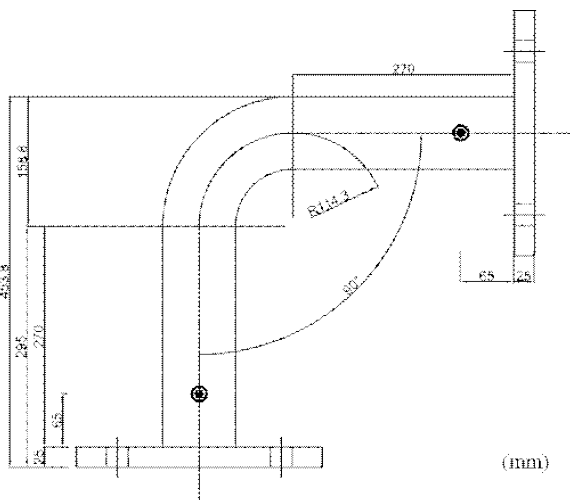


Fig. 2 Drawing of a curved pipe



Fig. 3. Specimen installation

우측의 힌지는 바닥에 고정된 삼각 블록에 연결되었다. 또한 곡관 내부에 물을 채우고, booster pump를 사용하여 2MPa의 압력을 지속적으로 가해주었다. Dynamic actuator를 사용하여 2초의 주기와 사인파 형태를 가진 ±100mm의 변위를 입력하였으며, 그 결과 7.9회에서 9.4회의 반복 횟수 사이에서 관통균열이 형성되었으며, 평균적으로 8.4회에서 관통균열이 형성되었다. 실험에서는 Fig. 4와 같이 crown 지점에서 축방향(axial direction)으로 관통균열이 형성되었다.



Fig. 4 Fatigue crack on specimen

### 2.2 수치해석

본 연구에서는 반복 하중이 가해진 배관의 피로 균열에 대한 수치 해석을 위해 외연적 해석프로그램인 LS-DYNA(ver. 971)를 사용하였다. 상기의 파이프 도면을 참고하여 Fig. 5와 같은 수치해석 모델을 작성하였다. 배관에 대한 모델링은 8-node hexahedron solid element로 작성하였으며, 배관과 힌지를 연결하는 연결부는 beam element로 모델링하였다. 해석시간을 줄이기 위하여 균열이 형성되는 곡관부는 요소의 크기를 작게 하되(요소 크기: 4.76mm×1.10mm×1.29mm), 균열에 영향을 거의 미치지 않는 직관부는 순차적으로 요소의 크기가 커지도록 하였다(element size of straight part (1): 9.00mm×1.13mm×1.10mm, element size of straight part (2): 9.00mm×4.53mm×2.75mm). 곡관부는 안쪽부터 바깥쪽으로 총 5개의 층을 가지도록 Fig. 6과 같이 작성하였다. Straight part (1)과 straight part (2)는 Fig. 7과

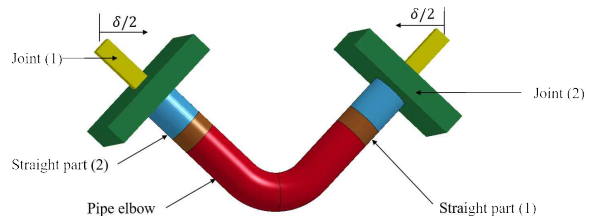


Fig. 5 Notation of numerical model of curved pipe

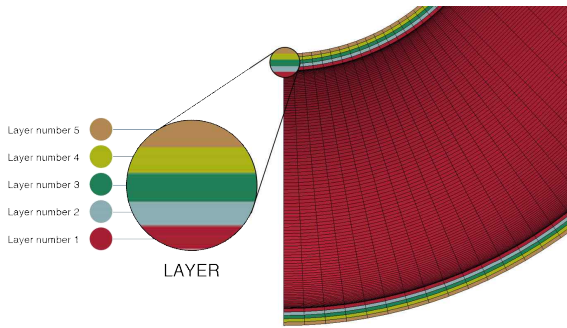


Fig. 6 Layer numbers

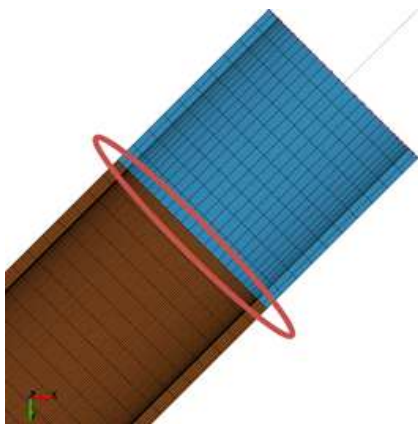


Fig. 7 Location at which CONTACT\_TIED\_SURFACE\_TO\_SURFACE is applied

같이 CONTACT\_TIED\_SURFACE\_TO\_SURFACE를 사용하여 요소의 크기가 다른 두 개의 파트를 연결해 주었다.

실제 수치해석에서는 수치해석에 소요되는 시간을 최소한으로 하기 위하여 Fig. 8과 같은 1/4 모델을 사용하였다.

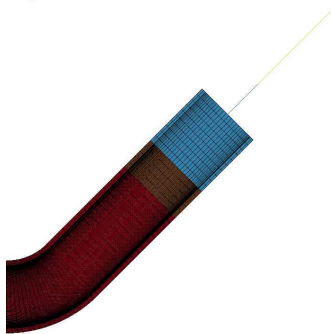


Fig. 8 Quarter model of pipe elbow with fatigue crack

1/4 모델로 작성된 수치해석모델에 수행되었던 실험과 같은 조건을 적용하기 위한 경계조건을 입력하였다. 힌지 경계 조건을 주기 위해서 beam 요소로 구성된 연결부의 끝부분의  $x$  축 변위와  $z$  축 회전을 제외한 모든 변위와 회전을 고정하였다. 1/4모델에 대칭 조건을 적용하기 위하여  $y-z$  평면 위에 놓여있는 절점들을  $y$  축 변위 외의 모든 움직임에 대하여

고정하여서 roller의 역할을 하도록 설정하였다. 또한  $x-y$  평면위에 놓여있는 절점들은  $z$  축 변위를 고정하여 1/4 모델의 대칭 조건을 적용하였다.

BOUNDARY\_PRESCRIBED\_MOTION\_NODE를 사용하여 연결부의 끝단의 변위를 제어했다. 실제 실험에서는 실험체의 좌측의 힌지를  $\pm 100\text{mm}$ 의 사인과 형태의 변위로 움직였지만 수치해석에서는 1/4 모델을 사용하였기 때문에 절반의 변위를 입력하였다. 내부의 수압을 위해 LOAD\_SEGMENT\_SET을 사용하였다.

피로 균열이 형성된 곡관부는 MAT\_PLASTIC\_KINEMATIC(MAT\_003) 재료 모델을 사용하였으며, 균열 형성에 큰 영향을 미치지 않았을 것으로 예상한 직관부는 MAT\_ELASTIC(MAT\_001) 재료 모델을 사용하였다. MAT\_PLASTIC\_KINEMATIC 재료 모델은 재료의 elastic-plastic 한 성질을 bilinear하게 표현할 수 있으며, isotropic과 kinematic hardening 성질을 포함하고 있다(Öchsner *et al.*, 2013). 본 재료 모델은 eroding(요소의 effective plastic strain이 failure strain for eroding element 값 이상이 될 경우 요소를 삭제한다.) 특성을 포함하고 있어 피로 균열의 형성 과정을 모사할 수 있을 것으로 고려되었다.

각 재료 모델의 입력 값은 Table 1과 같은 시험성적서를 따라서 설정하였으며, failure strain for eroding element 값은 parametric study를 통해서 선정하였다. 각 재료 모델의 입력 값을 Table 2에 나타냈다. 본 연구에서 사용한 PLASTIC\_KINEMATIC 모델은 stress-strain 곡선을 bilinear로 모사하는 모델이므로, 이를 고려하여 tangent modulus를 계산하여 입력하였다.

Table 1 Properties of material used in experiments

Spec. for Material	SA234
Yield stress(Pa)	3.18E8
Ultimate tensile stress(Pa)	4.84E8
Elongation	0.42

Table 2 Properties of material models for numerical analysis

Properties of material model	PLASTIC_KINEMATIC	ELASTIC
Mass density( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	7860	7860
Young's modulus(Pa)	2.00E11	2.00E11
Poisson ratio	0.3	0.3
Yield stress(Pa)	3.18E8	-
Tangent modulus(Pa)	3.97E8	-
Failure strain for eroding elements	1.7~2.3	-

또한 본 연구에서 작성한 곡관 유한요소 모델의 요소 타입, 재료모델, 요소 크기, 요소 개수와 같은 기본적인 특성을 Table 3에 나타냈다.

**Table 3** General characteristics of the FE model of the curved pipes

Properties of material model	Element type, Material model	Element size(mm), Element number
Curved part	3D-SOLID, PLASTIC KINEMATIC	3.14×1.29×1.10, 12420
Straight part (1)	3D-SOLID, ELASTIC	9.00×1.13×1.10, 8100
Straight part (2)	3D-SOLID, ELASTIC	9.00×4.53×2.75, 540
Joint	BEAM, ELASTIC	53 and 125, 2
Total	-	21062(element number)

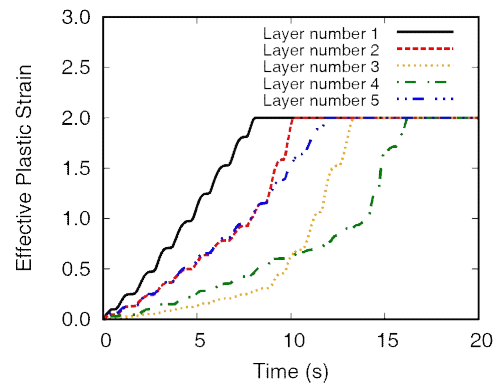
위에서 언급한 바와 같이 failure strain for eroding element 값은 parametric study를 통해서 선정하였다. 본 연구에서는 ±100mm의 사인과 형태의 변위를 가해준 실험의 결과와 유사한 시점에 관통 균열이 형성되도록 하는 것을 목표로 parametric study를 진행하였다.

Table 4에 parametric study의 결과를 정리하여 나타냈다.

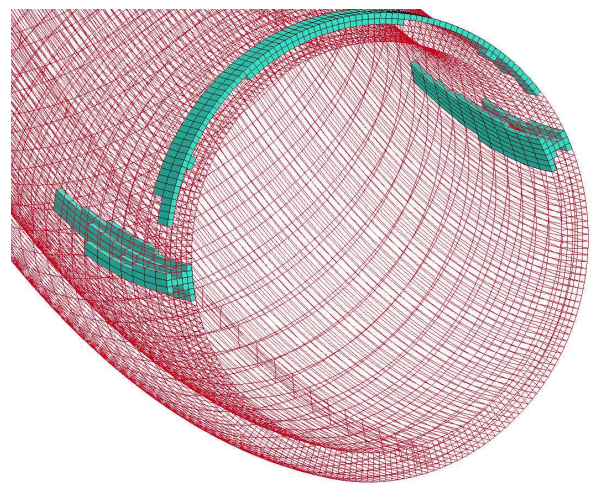
**Table 4** Results of parametric study

Failure strain for eroding element	Fatigue life(cycle)	
	(numerical analysis)	(experimental)
1.7	7.05 cycles	8.44 cycles
2.0	8.10 cycles	
2.3	8.95 cycles	

위의 parametric study 결과를 바탕으로 failure strain for eroding element 값을 2.0으로 설정하였다. 또한 이때의 해석 결과를 분석해본 결과, Takahashi(2009, 2010)의 논문과 같은 여러 연구에서 예상한 바와 같이 균열이 곡관의 안쪽 면에서부터 형성되는 것을 확인하였다. 그러나 해석 결과, 관통 균열은 안쪽에서부터 순차적으로 생성되는 것이 아니라, 안쪽에서 시작된 균열과 바깥쪽에서 시작된 균열이 서로 연결되면서 형성되는 것으로 분석되었다. Fig. 9와 같이 내부에 위치한 요소에서 피로가 누적되면서 항복이 일어나고, 이로 인해 외부의 피로 누적이 가속화되며, 결과적으로 안쪽에서 시작된 피로 균열과 바깥쪽에서 시작된 피로 균열이 연결되면서 관통 균열을 이루는 것으로 파악된다. Fig. 6과 같이 가장 안쪽 층을 1번 층으로, 가장 바깥쪽 층을 5번 층으로 정의할 경우, 균열은 1번, 2번, 5번, 3번, 4번 층



**Fig. 9** Effective plastic strain of each layer according to time



**Fig. 10** Fatigue crack of FE model

순으로 형성되었다.

수치해석 결과 피로로 인한 관통 균열은 crown 지점에서 축 방향(axial direction)으로 형성되어 실험 결과와 같은 결과를 보였다. Fig. 10은 피로 균열의 형상을 나타낸 것으로, 초록색으로 표현된 요소들이 eroding이 일어난 요소, 즉 피로 균열 부분이라 할 수 있다.

본 연구에서는 parametric study를 통해서 검증된 모델을 통해 보다 큰(±120mm)의 사인과 형태의 변위를 가했을 경우의 관통 균열 형성시점을 예측하였다. 해석 결과, 6.35 번째의 반복 횟수에서 관통 균열이 형성되는 것을 확인하였다. 관통 균열의 위치와 모양은 ±100mm 변위를 가했을 경우와 같았다. Fig. 11에 ±100mm의 변위를 가했을 경우와 ±120mm 변위를 가한 경우의 균열 형성 과정을 나타냈다. 이를 통해 각 경우의 effective plastic strain의 집중되는 형상을 파악할 수 있으며, ±120mm의 경우에는 관통 균열의 형상 또한 파악할 수 있다. Fig. 12에는 각각의 경우에 관통 균열 형성 지점에 위치한 요소들의 effective plastic strain 평균값을 나타냈다. 이때, eroding이 일어난 요소의 effective



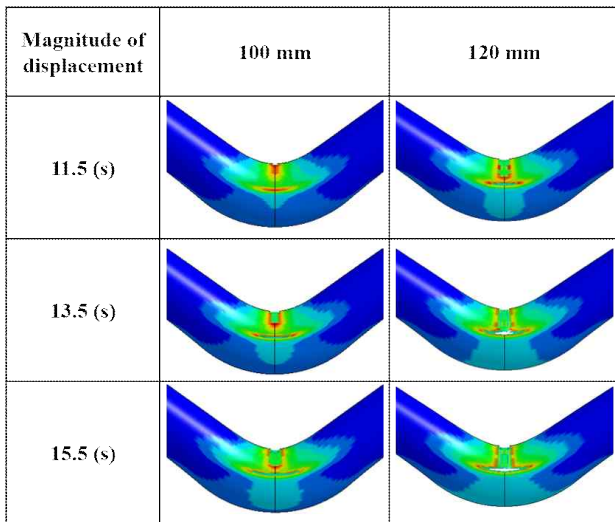


Fig. 11 Focusing of effective plastic strain in case of 100 mm and 120 mm displacement loading according to time.

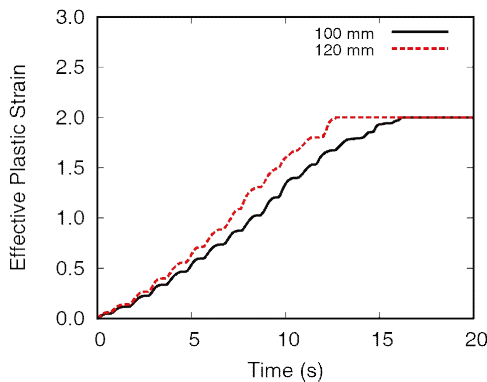


Fig. 12 Average of effective plastic strain-time curve according to magnitude of displacement

plastic strain 값을 유지하도록 하여 평균값을 계산하였다. 균열이 형성되는 속도의 차이를 확인할 수 있으며, 전체적인 양상은 비슷하나 최종적으로 관통균열이 형성되는 과정에서 차이를 보임을 확인할 수 있다.

### 3. 결 론

본 연구에서는 반복하중으로 인한 곡관의 피로 균열에 대한 수치 해석을 수행하였다. 재료 모델의 기본 물성치는 시험 성적서를 통해 선정하였으며, failure strain for eroding element 값은 ±100mm의 사인파 형태의 변위를 가한 실험에 대한 파라메트릭 스터디를 통하여 선정하였다. 실험 결과와 수치 해석에서 보인 균열의 형상과 위치를 비교하여 유사성을 확인하였으며, 본 모델을 활용하여 ±120mm의

사인파 형태의 변위가 가해질 경우의 균열 형성 시점을 예측해 보았다. 이와 같은 방법으로 여러 크기의 변위에 대해 해석을 수행한다면 곡관의 형태, 특성에 따른 변위의 크기와 균열 형성시점의 관계를 파악할 수 있을 것으로 예상된다.

### 감사의 글

본 연구는 2015년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제이며 (No. 2011T100200080), 국토교통부의 U-City 석·박사과정 지원사업으로 지원되었습니다.

### References

American Society of Mechanical Engineers (2004) B36. 10M Welded and Seamless Wrought Steel Pipe.

Gupta, S.K., Goyal, S., Bhasin, V., Vaze, K.K., Ghosh, A.K., Kushwaha, H.S. (2009) Ratcheting-Fatigue Failure of Pressurized Elbows Made of Carbon Steel ERT-2. *React. Technol.* pp.1~10.

Lee, J.H., Song, J.-K., Lee, E.-H. (2014) Multi-Step Analysis of Seismically Isolated NPP Containment Structures with Lead-Rubber Bearings. *J. Earthq. Eng. Soc. Korea.* 18(6), pp.261~269.

Öchsner, A., Holm, A., eds (2013) Experimental and Numerical Investigation of Advanced Materials and Structures. Switzerland. *Springer*.

Takahashi, K., Ando, K., Urabe, Y., Watanabe, S., Hisatsune, M., Hidaka, A. (2009) Low Cycle Fatigue behaviors of Elbow Pipe with Local Wall Thinning. *Int. Congr. Adv. Nucl. Power Plants.* pp.2073~2080.

Takahashi, K., Tsunoi, S., Hara, T., Ueno, T., Mikami, A., Takada, H., Ando, K., Shiratori, M. (2010) Experimental Study of Low-Cycle Fatigue of Pipe Elbows with Local Wall Thinning and Life Estimation using Finite Element Analysis. *Int. J. Press. Vessel. Pip.* 87, pp.211~219.

Yahiaoui, K., Moffat, D.G., Moreton, D.N. (2000) Piping Elbows with Cracks Part 2: Global Finite Element and Experimental Plastic Loads under Opening Bending. *J. Strain Anal. Eng. Des.* 35, pp.47~57.

---

## 요 지

본 연구에서는 수치해석을 통하여 반복하중으로 인해 곡관에 형성되는 피로균열에 대한 분석을 수행하였다. 곡관의 수치해석 모델을 개발하였으며, 균열 형성 시점과 형성 과정에 기초하여 수치해석 모델을 검증하였다. 요소에 erosion 기능을 적용하여 피로균열을 표현하고 형성 시점을 추정하고자 하였으며, 두께방향으로 다수의 요소를 배치하여 균열의 형성 과정 또한 모사하고자 하였다. 100 mm 변위에 대한 실험결과와 비교하여 균열의 형성 시점 및 형상이 잘 일치하는 것을 확인하였으며, 추가적인 다른 변위에 대한 균열의 형성 시점 또한 예측하였다. 본 모델을 사용하여 다양한 형태의 하중에 대해 해석을 수행한다면 곡관의 형상 및 특성에 따른 하중과 균열 형성시점의 관계를 예측할 수 있을 것으로 기대된다.

**핵심용어** : 곡관, 피로 균열, 반복 하중, finite element method