

2004 춘계학술발표회 논문집  
한국원자력학회

원전배관의 환경피로균열성장시험을 위한 ESET 시편의 확장된  
컴플라이언스 해

Extended Compliance Information of an ESET Specimen  
for the Environmental Fatigue Crack Growth Test of Nuclear  
Power Plant Piping

김만원, 이호진, 김기백, 이봉상  
한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

ESET(eccentrically-loaded single edge crack tension) 시편은 확장된 CT 형태의 시편으로 환경피로균열성장시험 시 CT 시편에 비해 장점을 가지고 있는 시편이다. 본 연구에서는 열하중을 고려한 피로균열성장시험을 위해 효과적인 온도제어를 할 수 있는 열피로시험장치를 구성하였고 균열시편으로는 ESET 시편을 사용하였다. ESET 시편의 크기가 작은 경우 COD 게이지를 부착하는데 제약이 있으므로 최적의 위치에서 정확한 컴플라이언스 해를 구하기 위해 돌출된 나이프에지를 가진 ESET 시편 형상을 제시하고 유한요소 해석을 통하여 균열길이와 컴플라이언스 관계식을 구하였다.

Abstract

The eccentrically-loaded single edge crack tension specimen ESET is a kind of extended CT type specimen which can exhibit advantages over other specimen types in the environmental fatigue crack growth rate(FCGR) test for the life assessment or the LBB analysis of nuclear power plant structures. In this study, we constructed an efficient testing system for thermal FCGR test, and also suggested an alternative shape of specimen with integrated knife-edge attached to the front face of the specimen and its compliance solution by using the numerical analysis.

## 1. 서론

원자력 압력경계 배관들의 경우 부식환경, 반복되는 열피로 및 기계적인 피로하중 등의 복합적인 하중을 받고 있는 경우가 대부분이다. 이러한 구조물의 수명평가를 위한 노력으로 유럽의 경우 FFS(fitness for service) 코드에서는 주요 손상 모드인 파괴, 피로, 크리프, 부식의 네 분야에 대해 기술적인 손상평가 방법을 제시하고 있고, 미국의 경우 NRC가 LBB 적용에 대한 기술지침서인 NUREG 1061 Vol.3를 고시하여 원자력발전소 각종 배관에서도 LBB 개념이 적용될 수 있음을 밝힌 이후, LBB를 적용하여 배관의 안전성을 평가하기 위한 많은 연구가 수행되어 왔다. 이러한 방법들에 있어서 필수적인 균열성장해석을 위하여 ASME Boiler and Pressure Vessel Code의 Section XI에서는 Article C-3000에서 결함평가를 위한 방법과 평가 말기에서 결함 크기를 결정하는 방법 즉, 피로 균열성장률 식을 제공하고 있다. 여기서 제공되는 식은 등은 피로시험과 단순한 응력이력에 기초하여 만들어진 모델이며 반복적인 열충격을 받는 구조물에 대한 피로균열성장의 연구에서 ASME 규격은 보수적인 경우도 있음이 알려져 있다[1]. 실제 배관에 작용되는 열적-기계적 피로하중에 의한 균열 해석을 보다 정확하게 수행하기 위해서는 배관재료의 물성치 뿐 만 아니라 균열의 진진거동을 나타내는 정확한 균열성장률식이 필요하다. 일정한 온도에서의 기계적 피로시험 방법에 대하여는 ASTM E647에서 규격화된 시험법을 제시하고 있는 반면, 열적-기계적 피로시험 방법은 정해진 시험 규격이 없을 뿐만 아니라 몇몇 연구[1-6]에서도 연구자가 각자의 필요에 의해 적절한 방법을 사용하였다.

본 연구에서는 열적 피로하중을 받는 원전배관의 보다 정확한 균열해석을 수행하는데 필요한 열적 피로균열성장률의 시험 데이터를 구하기 위하여 Fig. 1 및 Fig. 2와 같은 열피로 시험을 위한 시스템을 구축하였다. 시험에서 구해진 피로균열성장률 데이터는 유한요소해석 등의 수치해석이나 코드를 이용한 균열해석 등에 유용하게 사용될 수 있다.

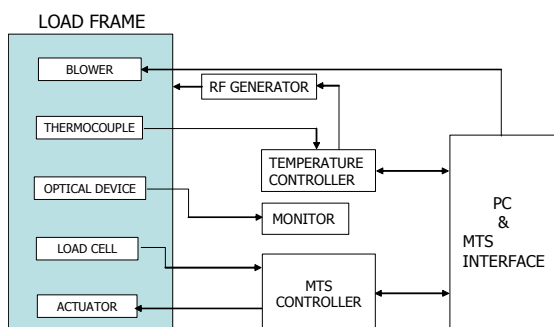


Fig. 1 Block diagram of testing system.



Fig. 2 Full layout of testing system.

한편, 시험에서 반복적인 열피로 하중을 모사하여 효과적으로 균열성장률 시험을 수행하기 위해 ESET 시편을 채택하였다. ESET 시편은 CT 피로시편에 비하여 중앙부가 길어서 환경피로시험 시 측정 장치를 장착할 충분한 여유 공간이 있는 장점을 가지고 있는 표준 시편이다. ESET 시편을 사용한 피로균열성장률 측정에 관한 표준규격은 ASTM E647[7]에 제시되어 있고, Fig. 3과 Fig. 4는 각각 ESET 시편의 형상 및 치수와 노치부를 나타낸 것이다. ESET 시편은 확장된 형태의 CT 시편으로 Richardson과 Goree[8]가 세라믹 재료의 균열성장을 연구하기 위하여 처음으로 사용하였다[9]. 본 연구에서 고려하는 Fig. 3과 같은 규격 시편은 본래 NASA Langley Research Center에서 알루미늄 합금 내에 존재하는 작은 표면균열과 관통균열에 대한 환경피로균열성장률을 구할 목적으로 개발되었다[10]. Piascik 등[9,11]은 Tan[12]등의 body-force법을 이용하여 ESET 시편에서의 응력강도계수(stress intensity factor) 해와 함께 시편 전면의 균열면 개구부 및 시편 후면의 중앙부에서의 컴플라이언스(compliance) 해를 제시하였다. John[13]은 ESET 형상에 대하여 인장 응력과 굽힘응력에 대한 해[14]를 중첩하여 응력강도계수와 균열개구변위를 구하고 이로부터 컴플라이언스식을 제시하였다.

ESET 시편의 크기가 작아질 경우 ASTM E647 규격에 따라 시편을 제작하면 균열성장을 측정하기 위하여 COD 게이지를 부착할 때 제약이 있는 경우가 있다. 따라서 이 경우에 대한 한 가지 대안으로 돌출된 형태의 나이프에지를 시편과 일체형으로 가공한 ESET 시편 형상을 제시하고 유한요소해석을 통하여 나이프에지에서 측정한 컴플라이언스와 균열길이 관계식을 제시하였다.

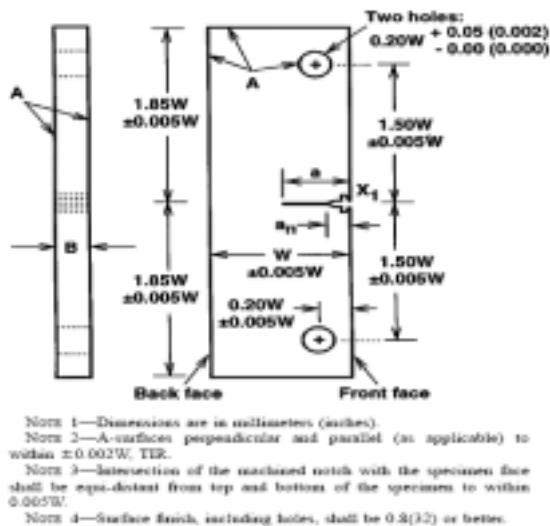


Fig. 3 Standard ESET specimen (ASTM E647)

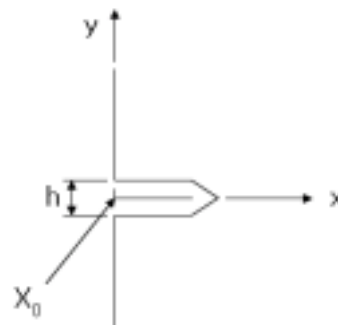


Fig. 4 Notch details of ESET specimen.

## 2. 확장된 ESET 시편의 컴플라이언스 해

### (1) 균열길이와 컴플라이언스 관계식

컴플라이언스를 이용한 피로균열성장률 시험동안 균열 길이의 변화는 컴플라이언스의 변화를 통하여 측정되는데, 컴플라이언스를 작용된 하중으로 무차원화하면 다음과 같다.

$$EBC = EB \frac{V_x}{P} \quad (1)$$

여기서  $E$ 는 탄성계수,  $B$ 는 시편의 두께,  $C$ 는 컴플라이언스로 하중-변위곡선 기울기의 역수이다.  $P$ 와  $V_x$ 는 각각 가해진 하중과 측정위치  $x$ 에서의 변위를 나타낸다. 일반적으로 컴플라이언스와 균열길이 관계식에서는 가장 최적의 곡선적합(curve fitting)을 할 수 있는 형태인 다음 식 (2)와 같은 변수  $U$ 를 사용한다[9,13,15].

$$U = \frac{1}{1 + \sqrt{EBC}} \quad (2)$$

그러면 균열길이와  $U$ 와의 관계는 다항식의 형태로 표현될 수 있다. 각각의 균열길이에 대하여 먼저 해석적인 해나 수치해석으로부터 컴플라이언스를 구한 후,  $a/W$ 와  $U$ 의 관계식을 다항식으로 적합함으로써 다음 식과 같이 주어진다.

$$a/W = \sum_{i=0}^n C_i U^i \quad (3)$$

여기서  $W$ 는 시편의 폭,  $a$ 는 균열길이,  $C_i$ 는 다항식의 계수를 나타내고,  $n$ 은 다항식의 차수로 보통  $n=5$ 가 사용된다.

### (2) 유한요소 해석 및 고찰

컴플라이언스 식을 구하기 위하여 ESET 시편을 모델링하고 범용유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 사용하여 유한요소해석을 수행하였다. Fig. 5는  $a/W=0.5$ ( $W=38\text{mm}$ )인 경우의 2차원 ESET 시편의 유한요소격자를 나타낸 것이다. 균열선단의 요소는 응력 특이성을 고려할 수 있는 1/4 절점-특이요소를 사용하였고, 하중이 가해지는 부분은 핀을 강체로 모델링하여 핀과 시편 구멍의 접촉부분을 접촉요소를 사용하여 모델링하였다. 균열선단에서의 응력강도계수는 탄성 J 적분 값으로부터 구해질 수 있다. 이때 정확한 균열 선단에서의 응력강도계수를 구하기 위하여 균열 선단의 반경방향으로 충분히 작은 크기의 요소 격자를 배치하였고, 균열 선단을 둘러서 11.25°의 각도로 요소격자를 배열하였다.

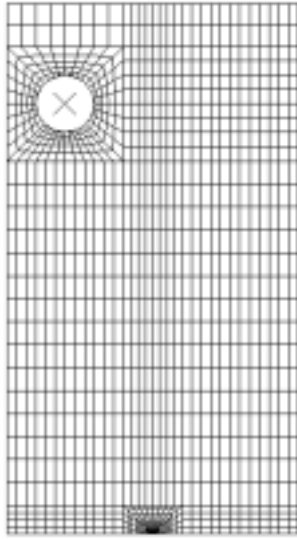


Fig. 5 FE mesh for ESET specimen when  $a/W=0.5$ .

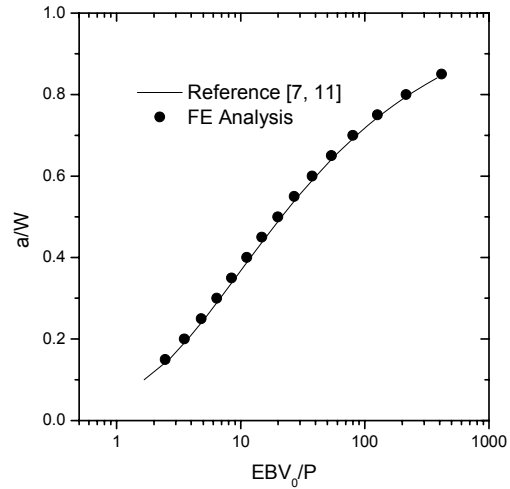


Fig. 6 Crack length and front-face compliance relation.

우선 유한요소해석이 정확하게 이루어졌는지를 판단하기 위하여 균열길이에 따른 응력 강도계수 및 시편 전면부의 중앙(즉, Fig. 2에서  $x=y=0$  인 위치)에서의 컴플라이언스 값을 구하여 참고문헌의 해와 비교하였다. Fig. 6은 컴플라이언스 값을 참고문헌[7,11]의 결과와 비교하여 나타낸 것이다.

Fig. 7은 시편 전면의 모서리를 따라 계산한 컴플라이언스 값을 균열길이에 따라 나타낸 것이다. 가로축은 노치 중앙부에서부터 시편 전면부 모서리를 따라 변형전의  $y$  방향의 좌표를 나타낸 것이다. Fig. 7에서 일반적으로 COD 게이지를 장착하는 범위(약 12.7mm 이내, 시편의 상부만 모델링하였으므로 실제 길이는 25.4mm에 해당함)에서는 각 균열 길이별로 컴플라이언스 값의 차이가 거의 없는 것을 알 수 있다. 균열의 길이가 길어질수록 곡선의 평평한 부분이 길게 나타나는 것은 균열이 길어짐에 따라 시편 전면의 노치부 부분에서  $y$  방향 변형의 차이가 심하지 않게 나타남을 의미하므로 유한요소해석이 적절하게 수행되었음을 알 수 있다.

ESET 규격 시편을 사용할 경우 시편의 폭  $W$ 가 작은 경우 노치의 폭(Fig. 4에서  $h$ )도 작아져서 COD 게이지를 장착할 충분한 노치 폭을 확보할 수 없게 된다. 예를 들면, Piascik 등[9-11]에서 body-force법을 이용하여 ESET 시편을 해석할 때 사용된 시편 폭  $W$ 는 38mm 이었다. 이 경우 ASTM E647[7]에 따르면 노치 폭은 최대  $h=W/16=2.375\text{mm}$ 가 되므로 상용 COD 게이지를 부착할 수 있다. 하지만  $W=25.4\text{mm}$ (1 inch)인 경우 노치 폭은 최대  $h=1.5875\text{mm}$ 가 된다. 이 경우 초기 균열길이에 따라 Fig. 7을 참조하여 컴플라이언스 값이 큰 차이가 없는  $y$  값의 범위를 선정하고, Fig. 8(a)와 같이 시편의 전면부의 모서

리(즉, Fig. 4에서  $x=0$ 인 면)에 나이프 에지(knife edge)를 내서 COD 게이지를 장착하여 컴플라이언스를 측정 후 ASTM E647[7]에서 제시하고 있는 균열길이와 컴플라이언스 관계식을 사용하여 균열의 성장을 측정할 수 있다. 그러나 이 방법은 ESET 시편의 균열면과 하중점 사이의 거리가 길므로 균열길이가 짧은 경우에 상대적으로 노치의 길이에 비하여 나이프 에지의 크기가 커지므로 나이프 에지의 영향이 나타날 수도 있다.

한 가지 대안으로 Fig. 8(b)는 시편의 전면부에 돌출된 나이프에지를 가공하는 방법이다. 그런데 ASTM E647[7]에서는 이 경우에 대한 컴플라이언스 해를 제시하고 있지 않으므로 정확한 균열 성장을 모니터링 하기 위하여 나이프 에지의 특정 위치에 대한 컴플라이언스 해가 필요하다. 따라서 Fig. 8(b)의 돌출된 나이프에지를 가진 시편을 모델링하여 유한요소해석을 수행하였다. 유한요소 해석에서 시편은 ASTM E647[7]의 규격을 따랐으며 이때  $W=25\text{mm}$ 로 하였고 나이프에지는 시편 전면부로부터  $0.06W$  돌출된 위치에 COD 게이지의 게이지길이가  $5\text{mm}$  가 되도록 위치시켰다. Table 1은 유한요소 해석결과를 나타낸 것이다. 나이프에지에서의 컴플라이언스 측정위치를  $x_1$ 이라고 하면,  $x_0$ 과  $x_1$  위치에서의 컴플라이언스는 각각  $EBV_0/P$ 와  $EBV_1/P$  이다. 동일한 균열길이에 대하여 두 위치에서 컴플라이언스가 차이가 남을 알 수 있다. 유한요소해석으로부터 나이프에지에서 식(3)의 계수  $C_i$  ( $i=1,5$ )는 다음과 같다:

$$C_0=1.00284, C_1=-3.625909, C_2=7.411205, \\ C_3=-23.189924, C_4=47.599125, C_5=-33.389966$$

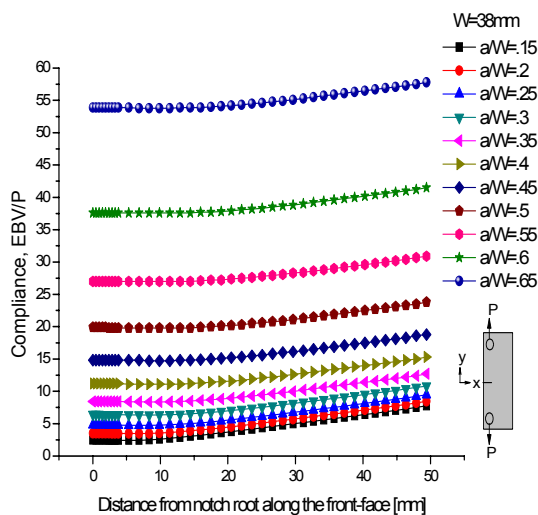


Fig. 7 Compliance along the front-face of ESET specimen.

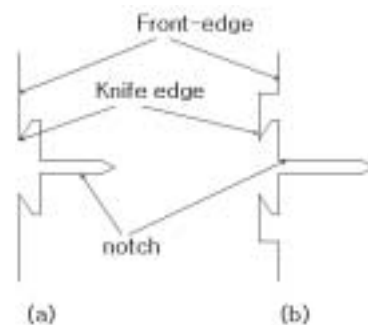


Fig. 8 Knife edge configurations for small ESET specimen.

Table 1 Results of FE Analysis in the ESET specimen attached with knife-edge.

a/W	U <sub>2</sub> at x0	U <sub>2</sub> at x1	P	EBV <sub>0</sub> /P	EPV <sub>1</sub> /P	K <sub>1</sub>	F
0.15	0.010578	0.011394	1808.990	2.46E+00	2.65E+00	595.7	2.02994
0.20	0.014244	0.015299	1709.120	3.51E+00	3.77E+00	674.7	2.433492
0.25	0.018023	0.019312	1586.090	4.79E+00	5.13E+00	737.2	2.865163
0.30	0.021867	0.023360	1442.970	6.38E+00	6.82E+00	784.0	3.349273
0.35	0.025713	0.027378	1283.910	8.44E+00	8.98E+00	815.2	3.914005
0.40	0.029475	0.031284	1114.850	1.11E+01	1.18E+01	830.1	4.589927
0.45	0.033060	0.034990	942.270	1.48E+01	1.56E+01	828.8	5.422083
0.50	0.036375	0.038401	773.027	1.98E+01	2.09E+01	811.4	6.470415
0.55	0.039341	0.041441	613.415	2.70E+01	2.85E+01	779.1	7.829438
0.60	0.041892	0.044041	469.177	3.76E+01	3.95E+01	733.5	9.637296
0.65	0.043992	0.046169	344.010	5.39E+01	5.65E+01	676.9	12.12957
0.70	0.045639	0.047822	239.721	8.02E+01	8.40E+01	611.7	15.72984
0.75	0.046851	0.049022	156.563	1.26E+02	1.32E+02	539.9	21.25769
0.80	0.047664	0.049805	93.545	2.15E+02	2.24E+02	463.1	30.51719
0.85	0.048122	0.050217	48.814	4.15E+02	4.33E+02	381.9	48.22815

### 3. 결 론

본 연구에서는 열피로 하중을 받고 있는 균열이 있는 원전 구조물에서 수명평가 시 필수적으로 사용되는 균열성장시험 데이터를 구하기 위한 측정장치를 구성하였다. 그리고 시험에서 사용되는 ESET 시편의 확장된 컴플라이언스 해를 유한요소법을 사용하여 구하였다. 구해진 균열길이와 컴플라이언스 관계식은 시편 전면부의 노치 부근에서 컴플라이언스값의 변화가 적은 구간 중 0.06W 돌출된 위치에서 사용이 가능하다. 구성된 열피로 시험장비와 구해진 컴플라이언스 해는 향후 수행할 열피로균열성장시험에서 유용하게 사용되어질 것으로 기대된다.

### 후 기

본 연구는 과학기술부 원자력 중장기 사업의 파괴특성평가 및 향상기술개발 과제에 의해 일환으로 수행된 것으로 연구비 지원에 감사드립니다.

### 참고문헌

1. B. B. Kerezi, A. G. Kotousov and J. W. H. Price, 'Experimental apparatus for thermal shock fatigue investigations', *Int. J. Pressure Vessels and Piping* 77, 2000, pp. 425-434.
2. S. Kimura, H. Kogawa, T. Teramoto and M. Saito, 'Crack propagation in first

- wall of fusion reactor by cyclic thermal stress', *Fusion Engineering and Design*, 39&40, 1998, pp. 569–574.
3. K. Kikuchi, K. Ue, Y. Kudo and M. Saito, 'Crack propagation in first wall by thermal fatigue and creep', *Fusion Engng. and Design*, 49&50, 2000, pp. 229–234.
  4. Y. Kudo, K. Kikuchi and M. Saito, 'Thermal fatigue crack propagation behaviour of F82H ferritic steel', *J. of Nuclear Materials*, 307–311, 2002, pp. 471–474.
  5. B. B. Kerezsi B., J. W. H. Price and R. Ibrahim, 'A two-stage model for predicting crack growth due to repeated thermal shock', *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 70, Issue 6, 2003, pp. 721–730.
  6. J. J. Pernot and S. Mall, 'A thermal-mechanical fatigue crack-growth testing system', *Experimental Techniques*, 1989, pp. 24–28.
  7. *Standard test method for measurement of fatigue crack growth rates*, ASTM E647–00, Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA, U.S.A., 2000.
  8. D. E. Richardson and J. G. Goree, 'Experimental verification of a new two-parameter fracture model', *ASTM STP 1189*, pp.738–750, 1993.
  9. R. S. Piascik, and J. C. Newman, Jr., 'An extended compact tension specimen for fatigue crack growth and fracture testing', *Int. J. of Fracture*, Vol.76, R43–R48, 1996.
  10. R. S. Piascik and S. A. Willard, 'The growth of small corrosion fatigue cracks in alloy 2404', *Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct.*, Vol.17, No.11, pp.1247–1259, 1994.
  11. R. S. Piascik, J. C. Newman, Jr. and J. H. Underwood, 'The extended compact tension specimen', *Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct.*, Vol.20, No.4, pp.559–563, 1997.
  12. P. W. Tan, I.S. Raju and J. C. Newman, Jr., 'Boundary force method for analyzing two-dimensional crack plates', *ASTM STP 945*, pp.259–277, 1988.
  13. R. John, 'Stress intensity factor and compliance solution for eccentrically loaded single edge cracked geometry', *Engng. Fract. Mech.*, Vol.58, No.1/2, pp.87–96, 1997.
  14. H. Tada, *The Stress Analysis of Cracks Handbook*, 2nd Ed. Paris Productions, St Louis, MO, U.S.A., 1985.
  15. A. Saxena and S. J. Hudak, Jr., 'Review and extension of compliance information for common crack growth specimens', *Int. J. of Fracture*, Vol.14, No.5, pp.453 –468. 1978.