

열피로 균열성장시험을 위한 ESET 시편의 확장된 컴플라이언스 해

이호진[†] · 김만원 · 이봉상

한국원자력연구소 원자력재료기술개발부
(2005. 1. 3. 접수 / 2005. 2. 28. 채택)

Extended Compliance Solution of ESET Specimen for Thermal Fatigue Crack Growth Test

Ho Jin Lee[†] · Maan Won Kim · Bong Sang Lee

Division of Nuclear Material Technology Development, Korea Atomic Energy Research Institute
(Received January 3, 2005 / Accepted February 28, 2005)

Abstract : An eccentrically-loaded single edge crack tension specimen (ESET) is similar to a compact tension(CT) specimen loaded in tension-tension. The standard ESET specimen exhibits advantages over other types of cracked specimen, such as CT, single-edge crack, and middle-crack tension specimen. The details of ESET specimen configuration, test procedure, and calculations are described in ASTM E647 standard. However, a difficulty in attaching COD gage to the knife-edge on the front face of the specimen can be found when the size of ESET specimen is small for rapid cooling and heating in thermal fatigue testing. The finite element analysis is performed for the ESET specimen with projected knife-edge on the front face and a crack-length-compliance equation is suggested for the new specimen configuration. Calibration test are conducted with 347 stainless steel to compare the measured crack length with the calculated crack length from the suggested compliance expression. The test results showed good agreements with those of analysis.

Key Words : fatigue crack growth rate test, ESET specimen, stress intensity factor, finite element method, compliance, projected knife-edge

1. 서 론

구조물의 내부에 균열과 같은 결함이 있는 경우 파괴역학 해석을 수행하여 피로균열의 성장을 계산함으로써 구조물의 안전을 확보하고 사용수명을 예측하여왔다. 피로균열성장률식의 계수들은 시험에 의하여 구해지는 값으로서 정확한 시험을 위하여 ASTM E647¹⁾과 같이 표준규격으로 시편의 형상 및 시험방법이 정해져 있다.

ASTM E647에서는 피로균열성장률시험을 위한 시편으로 CT(Compact Tension), MT(Middle-crack Tension) 및 ESET(Eccentrically-loaded Single Edge Crack Tension) 시편에 대하여 기술하고 있다. 이중 ESET 시편은 CT 시편에 비하여 중앙부가 길어서 측정장치를 장착할 충분한 여유 공간이 있는 장점을 가지

고 있으며, MT 시편에 비하여 낮은 시험하중으로도 동일한 응력강도계수(stress intensity factor)를 구할 수 있는 장점이 있다. 또한 시편의 형상이 균열면에 평행한 응력을 줄여주도록 되어있어 균열의 성장 방향이 CT 시편에 비하여 균열 초기방향에서 벗어남이 적다. Fig. 1에 ESET 시편의 형상 및 치수를 나타냈고, Fig. 2에서는 Fig. 1의 원형점선으로 표시한 노치부를 확대하여 나타내었다.

ESET 시편은 Richardson과 Goree²⁾가 세라믹 재료의 균열성장을 연구하기 위하여 처음으로 사용하였다³⁾. 본 연구에서 고려하는 Fig. 1과 같은 규격 시편은 본래 NASA Langley Research Center에서 알루미늄 합금 내에 존재하는 작은 표면균열과 관통균열에 대한 환경피로균열성장률을 구할 목적으로 개발되었다⁴⁾.

Piasek 등^{3,5)}은 체적력법(body-force method)을 이용하여 ESET 시편에서의 응력강도계수 해와 함께

[†]To whom correspondence should be addressed.
hjlee1@kaeri.re.kr

시편 전면의 균열면 개구부 및 시편 후면의 중앙부에서의 컴플라이언스(compliance) 해를 제시하였다. John⁶⁾은 ESET 형상에 대하여 인장응력과 굽힘응력에 대한 해를 중첩하여 응력강도계수와 균열개구변위를 구하고 이로부터 컴플라이언스식을 제시하였다.

열피로 시험의 경우 시편을 급격히 가열·냉각하기 위해서는 시편 크기와 두께가 작은 시편이 필요하다. 시편의 크기와 두께가 작아지는 경우 시편 전면부에 폭 h의 나이프에지를 가공하여 COD 게이지를 부착하기 곤란하다. 폭과 두께가 작은 시편을 사용하여 피로균열성장률 시험을 수행할 때 컴플라이언스를 이용하여 균열 길이를 측정하기 위해서는 시편 전면의 균열면 개구부위에 다른 위치에서의 컴플라이언스 해가 필요하다.

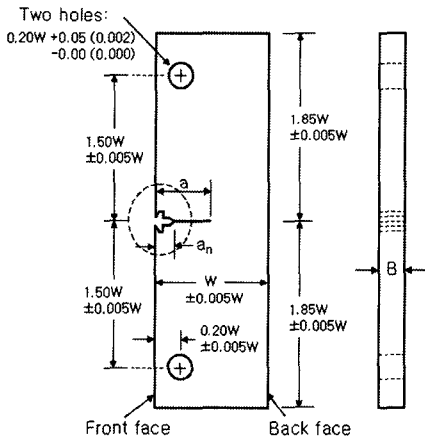


Fig. 1. Standard Eccentrically-loaded Single Edge Crack Tension Specimen (ASTM E647)

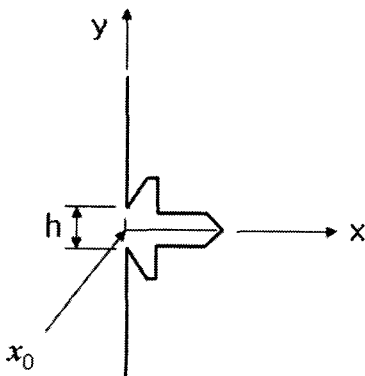


Fig. 2. Configuration of notch details encircled by dotted line in figure 1

본 연구에서는 시편 전면부의 여러 위치에서 컴플라이언스를 계산하고, 돌출된 나이프에지를 가진 ESET 시편에 대하여 유한요소 해석을 수행하여 균열길이-컴플라이언스 관계식을 제시한 후 시험을 통하여 이를 검증하였다.

2. 균열길이와 컴플라이언스

피로균열성장률시험에서 균열길이를 측정하기 위하여 많이 쓰이는 방법으로는 광학현미경을 이용한 육안관찰, 컴플라이언스 측정법, 적류 혹은 교류전위차를 이용한 측정법 등이 있다. 이중 컴플라이언스 측정법은 광학현미경을 이용한 방법에 비하면 시험을 자동화 할 수 있고, 전위차를 이용하는 방법에 비하면 장비의 설치가 간단하여 부가적인 장치가 필요 없으므로 일반적으로 사용되는 방법으로 컴플라이언스 측정을 위한 여러 종류의 상용 게이지가 제작하여 판매되고 있다.

컴플라이언스를 이용한 피로균열성장률시험 동안 균열길이의 변화는 컴플라이언스의 변화를 통하여 측정되는데, 컴플라이언스를 작용된 하중으로 무차원화하면 다음과 같다.

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

여기서 E는 탄성계수(elastic modulus), B는 시편의 두께, C는 컴플라이언스로 하중-변위곡선 기울기의 역수이다. P와 V_x 는 각각 가해진 하중과 측정위치 x에서의 y축 방향의 변위를 나타낸다. 일반적으로 균열면 개구부에서의 컴플라이언스와 균열길이 관계식에서는 가장 최적의 곡선적합(curve fitting)을 할 수 있는 형태인 다음 식 (2)와 같은 변수 U를 사용한다^{3,6,7)}.

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

그러면 균열길이와 U와의 관계는 다항식의 형태로 표현될 수 있다. 임의의 균열길이에 대하여 먼저 해석적인 해나 수치해석으로부터 컴플라이언스를 구한 후, a/W 와 U의 관계를 곡선으로 근사하여 다음 관계식을 얻는다.

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

여기서 W 는 시편의 폭, a 는 균열길이, C_n 는 다항식의 계수를 나타내고, n 은 다항식의 차수로 보통 $n=5$ 가 사용된다^{1,3,5-7)}.

3. 유한요소해석 및 시험

3.1. ESET 시편의 컴플라이언스 고찰

ASTM E647에서는 Fig. 2의 x_0 위치에서 변위 측정에 의한 균열길이-컴플라이언스 관계식을 제시하고 있다. 본 연구에서는 시편 전면부의 임의 위치에서 컴플라이언스를 계산할 수 있도록 ESET 시편을 모델링하여 유한요소해석을 수행하였다.

유한요소해석은 비선형 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 이용하여 수행하였다. Fig. 3은 $a/W=0.5(W=38\text{mm})$ 인 경우의 2차원 ESET 시편의 유한요소격자를 나타낸 것이다. 모든 요소는 단위두께의 평면응력 8-절점 등매개변수 요소를 사용하였다. 균열선단의 요소는 응력 특이성을 고려할 수 있는 1/4 절점-특이요소를 사용하였다. 하중이 가해지는 부분을 모델링하기 위하여 핀을 강체로 모델링하였고 핀과 시편 구멍의 접촉부분은 접촉요소를 사용하였다. 균열선단에서의 응력강도계수는 탄성 J 적분 값으로부터 구해질 수 있다. 이때 정확한 균열선단에서의 응력강도계수를 구하기 위하여 균열선단의 반경방향으로 충분히 작은 크기의 요소격자를 배치하였고, 균열 선단을 둘러서 11.25° 의 각도로 요소격자를 배열하였다. 균열길이가 $0.15 \leq a/W \leq 0.85$ 인 경우에 대하여 a/W 를 0.05 간격으로 하여 유한요소해석을 수행하였다.

우선 해석이 정확하게 이루어졌는지를 판단하기 위하여 균열길이에 따른 응력강도계수 및 시편 전면의 노치 중앙(Fig. 2의 x_0)에서의 컴플라이언스 값을 구하였다. ESET 시편의 응력강도계수는 다음 식으로 계산하였다.

$$K = [P/(B\sqrt{W})]F \quad (4)$$

여기서

$$F = \alpha^{1/2} [1.4 + a][1 - \alpha]^{-3/2} G$$

$$G = 3.97 - 10.88\alpha + 26.25\alpha^2 - 38.9\alpha^3 + 30.15\alpha^4 - 9.27\alpha^5 \quad (5)$$

$$\alpha = a/W$$

이다.

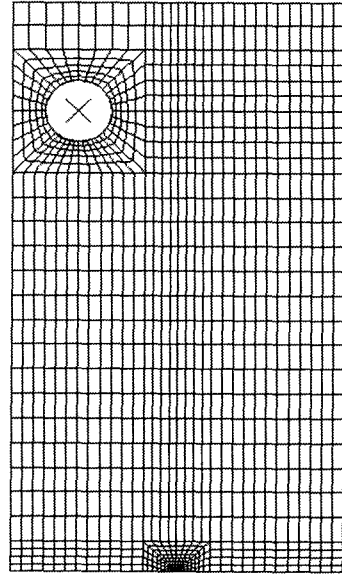


Fig. 3. FE mesh for ESET specimen when $a/W=0.5$

Fig. 4와 Fig. 5는 각각 $P/B\sqrt{W}$ 로 무차원화한 응력강도계수와 컴플라이언스 값을 참고문헌 1 및 6의 결과와 비교하여 나타낸 것이다.

Fig. 6은 시편 전면의 모서리를 따라 계산한 컴플라이언스 값을 균열길이에 따라 나타낸 것이다. 가로축은 노치 중앙부에서부터 시편 전면의 모서리를 따라 변형전의 y 방향의 좌표를 나타낸 것이다. Fig. 6에서 균열길이가 가장 짧은 경우인 $a/W=0.15$ 일 때 대략 10mm 위치까지는 컴플라이언스의 크기의 변화가 거의 없었다. 균열의 길이가 길어질수록 컴플

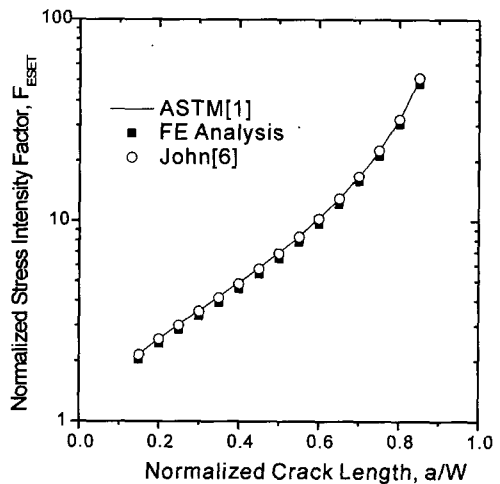


Fig. 4. Normalized stress intensity factors for ESET specimen

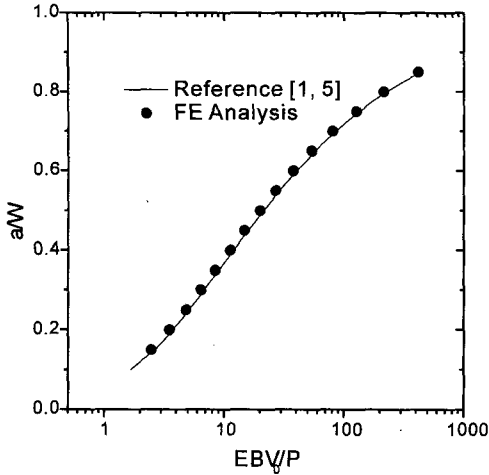


Fig. 5. Crack length and front-face compliance relation

라이언스의 크기가 변화가 없는 길이가 길어짐을 볼 수 있다. 노치부에서 하중점까지 y 방향의 길이는 57mm이므로 컴플라이언스가 변하지 않는 위치까지의 거리의 비는 약 17% 정도이다.

따라서 ESET 시편의 경우 ASTM E647에서 명시하지는 않았으나 이 범위 내에서 시편 전면에 나이프에지를 가공하면 ASTM E647에서 제시하는 컴플라이언스 식을 사용하여 균열길이를 계산할 수 있음을 의미한다.

Fig. 6에서 균열의 길이가 커질수록 곡선의 평평한 부분이 길게 나타나는 것은 균열이 길어짐에 따라 시편 전면의 노치부에서 y 방향 변형의 차이가 심하지 않게 나타남을 의미하므로 유한요소해석이 적절하게 수행되었음을 알 수 있다.

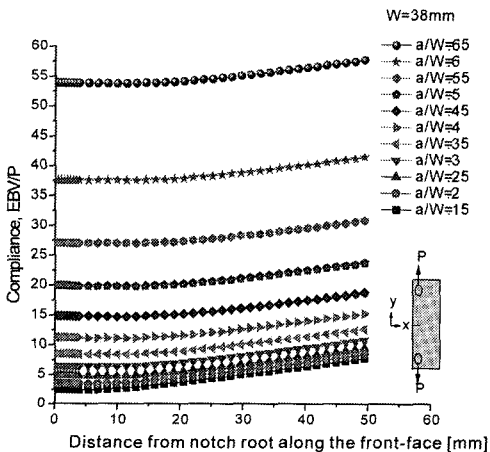


Fig. 6. Compliance along the front-face of ESET specimen

3.2. 돌출된 나이프에지형 ESET 시편

시편의 크기가 작은 경우, 예를 들어 $W = 25.4\text{mm}$ 인 경우 ASTM E647 규격에 따르면 최대 노치 폭은 $h = 1.5875\text{mm}$ 가 된다. 이 경우 Fig. 6에서 고찰하였듯이 노치부에서 하중점까지 길이의 17% 이내에 Fig. 7(a)와 같이 나이프에지를 가공하여 균열길이를 측정할 수 있다. 그러나 이 방법은 노치의 길이에 비하여 나이프에지의 크기가 커지면 시편에 나이프에지의 영향이 나타날 것으로 예상된다.

한 가지 대안은 Fig. 7(b)와 같이 시편의 전면부에 돌출된 나이프에지를 가공하는 방법이다. x_0 는 노치부의 위치를, x_1 은 돌출형 나이프에지의 게이지 부착점의 위치이다. 그런데 ASTM E647에서는 이 경우에 대한 컴플라이언스 해를 제시하고 있지 않으므로 정확한 균열 성장을 모니터링 하기 위하여 돌출된 나이프 에지의 COD 게이지 부착점에서의 컴플라이언스 해가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 돌출된 나이프에지를 가진 시편을 모델링하여 유한요소해석을 수행하였다.

유한요소해석에서 시편은 ASTM E647의 규격을 따랐으며 이때 $W = 25\text{mm}$ 로 하였고 나이프에지는 시편 전면부로부터 $0.06W$ 돌출되는 위치에 COD 게이지 부착점이 위치하도록 하였다. 유한요소 모델의 선정과 해석은 앞 절에서와 동일하게 하였다. 탄성계수는 210.6GPa , 푸아송비는 0.3 으로 하였고 단위 두께의 평면응력으로 가정하였다.

Table 1은 유한요소 해석결과를 나타낸 것이다. EBV_0/P 와 EBV_1/P 는 각각 x_0 와 x_1 위치에서의 컴플라이언스이다. F는 무차원화한 응력강도계수를 나타낸다. 동일한 균열길이에 대하여 두 위치에서 컴플라이언스가 차이가 나는 것을 알 수 있다.

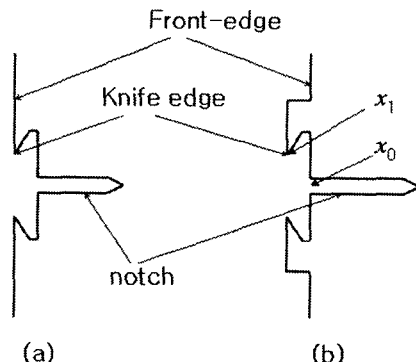


Fig. 7. Knife edge configurations on the notch root for small ESET specimen

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

a/W	EBV ₀ /P	EPV ₁ /P	F
0.15	2.4634	2.6534	2.03328
0.20	3.5109	3.7708	2.42851
0.25	4.7868	5.1293	2.85764
0.30	6.3840	6.8197	3.34091
0.35	8.4368	8.9830	3.90729
0.40	11.1375	11.8213	4.58143
0.45	14.7805	15.6431	5.41678
0.50	19.8230	20.9270	6.47382
0.55	27.0178	28.4602	7.83578
0.60	37.6144	39.5441	9.64508
0.65	53.8717	56.5373	12.14068
0.70	80.2019	84.0385	15.74376
0.75	126.0634	131.9036	21.27995
0.80	214.6494	224.2888	30.55064
0.85	415.2967	433.3821	48.30042

유한요소해석으로부터 구한 x_1 에서의 a/W 와 EBV_1/P 를 5차 다항식으로 근사한 균열길이-컴플라이언스 관계식을 식 (3)의 형태로 나타내면 다음과 같다.

$$a/W = 0.99986 - 3.54212U + 5.90497U^2 - 14.79162U^3 + 30.09209U^4 - 22.63378U^5 \quad (6)$$

제시된 관계식의 유효범위는 $0.15 \leq a/W \leq 0.85$ 이다.

한편, 식 (6)의 균열길이-컴플라이언스 관계식의 정확성을 검증하기 위하여 피로균열성장률 시험을 수행하였다. 시편의 규격과 형상은 유한요소해석에서 사용한 것과 동일하며 시편의 두께는 5mm이고 시험은 ASTM E647의 방법을 따랐다. 균열길이는 1/100mm까지 측정할 수 있는 이동식 광학현미경을 사용하여 측정하고 동시에 COD 게이지를 나이프에지에 부착하여 컴플라이언스 데이터를 획득하였다.

Fig. 8은 측정된 컴플라이언스를 이용하여 식 (6)으로부터 구한 균열길이와 측정된 균열길이를 비교한 것으로 두 결과가 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

3.3. 회전축을 이용한 컴플라이언스 계산

Saxena와 Hudak⁷⁾은 CT 시편과 WOL 시편에 대하여 Boundary Collocation Technique로 해석한 결과에 기초하여 균열면상의 두 지점의 변위로부터 시편의 회전축을 구하고, 선형근사법으로 임의 위치에서의

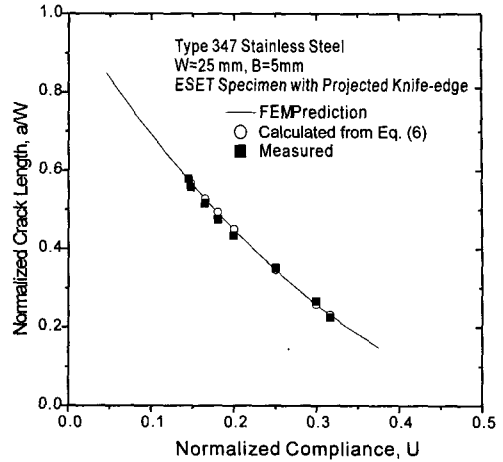


Fig. 8. Normalized compliance and crack length

컴플라이언스를 계산하였다. 본 논문에서는 고려하는 ESET 시편에 대하여 다음과 같이 유한요소해석 결과로부터 선형근사법을 이용하여 시편 전면부에서 $0.06W$ 돌출된 위치에서의 컴플라이언스를 계산하였다.

Fig. 9와 같이 시편의 하중선(loading line)의 위치를 핀 구멍의 중앙으로 하고 하중선으로부터 시편 전면부 방향으로 각각 $0.1W$ 와 $0.2W$ 떨어진 위치에서의 변위 V_1 과 V_0 를 이용하여 회전축 X_0 를 계산할 수 있다.

$$\frac{X_0}{W} = \frac{0.1}{1 - V_1/V_0} - 0.2 \quad (7)$$

여기서 V_0 는 시편 전면부의 노치에서의 변위가 된다. 이 식은 $0.2 \leq a/W \leq 0.8$ 에서 유효하다. 또한 이로부터 임의 위치 X 에서의 변위 V_X 를 이용한 컴플라이언스는 다음 식과 같다.

$$\frac{EBV_X}{P} = \left(\frac{X_0/W - X/W}{X_0/W + 0.2} \right) \frac{EBV_0}{P} \quad (8)$$

시편 전면부의 돌출된 나이프에지의 위치는 시편 전면부로부터 $-0.06W$ 즉, 하중선으로부터 $-0.26W$ 이므로 식 (8)에 $X = -0.26W$ 를 대입하면 해당 위치의 컴플라이언스를 구할 수 있다.

Fig. 10은 식 (8)로부터 계산된 균열길이에 따른 컴플라이언스를 유한요소해석 결과와 함께 나타낸 것이다. 여기서 X/W 는 Fig. 9에서 정한 하중선으로

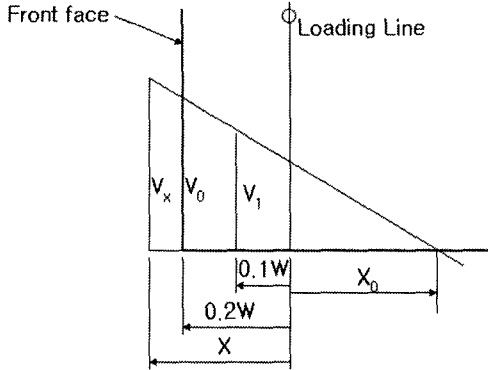


Fig. 9. Geometry of ESET specimen showing the various locations for the calculation of the axis of rotation

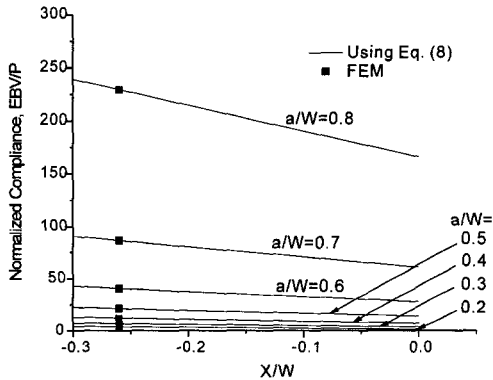


Fig. 10. Normalized compliance as a function of measurement point location for various crack length in a ESET specimen

부터의 거리와 시편 폭의 비이다. 두 결과가 잘 일치함을 볼 수 있는데 돌출된 나이프에지의 경우도 시편의 내부에서와 같이 선형근사법의 이론을 잘 만족하는 것을 확인할 수 있다.

4. 결론

ASTM E647의 ESET 시편 및 돌출형 나이프에지를 가공한 ESET 시편에 대한 유한요소해석과 시험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 시편 전면부에서 컴플라이언스가 변하지 않는 위치까지의 거리는 노치로부터 하중점까지의 길이에 비하여 약 17% 정도이다. 이 범위 내에서 나이프

에지를 가공하면 ASTM E647에서 제시하는 균열길이-컴플라이언스 관계식을 사용할 수 있다.

2) 시편 전면부에서 0.06W 만큼 돌출한 나이프에지를 가진 시편의 유한요소해석 결과 균열길이-컴플라이언스 관계식을 제시하였다. 제시된 관계식에서 계산한 균열길이는 시험으로부터 측정된 균열길이와 잘 일치하였으며, 회전축을 이용한 선형근사해와도 잘 일치하였다.

감사의 글 : 본 연구는 과학기술부 원자력중장기 계획사업의 파괴특성평가 및 향상기술개발 과제에 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 1) 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.
- 2) D. E. Richardson and J. G. Goree, "Experimental verification of a new two-parameter fracture model", ASTM STP 1189, pp. 738~750, 1993.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 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.