

<응용논문>

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-A.2014.38.4.437>

ISSN 1226-4873(Print)  
2288-5226(Online)

## 회전체 스트레스 정보를 이용한 터빈 축 피로수명 평가

진병규\*† · 박기범\* · 채장범\*\*

\* (주) 엠앤디, \*\* 아주대학교 기계공학부

### Fatigue Life Evaluation of Turbine Shaft Using Applied Shaft Stress

Byeong Kyou Jin\*†, Ki Beom Park\* and JangBom Chai\*\*

\* M & D Corp.,

\*\* Dept. of Mechanical Engineering, Ajou Univ.

(Received August 19, 2013 ; Revised November 5, 2013 ; Accepted November 5, 2013)

**Key Words:** Turbine Shaft Failure(터빈 축 파괴), Fatigue Life(피로수명), Shaft Stress(축 응력), Torsional Vibration(비틀림 진동), Stress-Life Curve(응력-수명 선도), Crack Growth(균열 성장)

**초록:** 원자력 발전소의 터빈-발전기 시스템과 같이 일정한 토크와 함께 축 진동에 의한 가변 응력이 인가되는 부재의 경우 비틀림 응력에 의한 피로 파괴 거동을 보인다. 따라서 본 연구에서는 터빈-발전기의 터빈 축에 인가하는 비틀림 응력을 측정하고 응력에 의해 발생하는 피로 파괴 거동을 분석하는 것을 목적으로 하였다. 이를 위해 터빈-발전기 시스템과 같은 실험 장치를 제작하고 임의의 부하를 인가하여 다양한 비틀림 응력에 대한 피로 파괴 거동을 평가하였다. 특히 기존의 알려진 피로 거동 평가 방법인 응력-수명, 변형률-수명, 균열성장 평가 방법을 동시에 적용하여 평가를 진행하였다. 부하의 크기가 증가하면서 평가 방법과 무관하게 피로 수명이 감소하는 경향이 확인하였으며 5 kV 부하 인가 시 최대 10배의 피로 수명의 감소가 발생하였다.

**Abstract:** The equipment or with a constant torque and a variable stress due to axial vibration such as the turbine-generator system in nuclear power plant show the fatigue fracture behavior. Thus this study whoul aim to measure the torsional stress and analyze the fatigue fracture behavior. To achieve this, we manufactured the equipment similar with turbine-generator system and applied various torsional vibration stress due to external load. In particular, the evaluation was conducted with the existing evaluation methods of the fatigue behavior of known stress-life, strain-life, crack growth assessment methods. With increasing the external load and independent methods tends to decrease the fatigue life was confirmed up to 10 times in 5 kV external load compared to without external load.

- 기호설명 -

$\tau$  : 비틀림응력 (MPa)  
 $N_f$  : 피로수명 (cycle)  
 $K$  : 응력확대계수 ( $MPa\sqrt{m}$ )  
 $F$  : 형상함수  
 $a$  : 균열길이 (m)  
 $a_i$  : 초기균열길이 (m)  
 $a_f$  : 임계균열길이 (m)

$m$  : Paris 식 재료상수  
 $C$  : Paris 식 재료상수  
 $da/dN$  : 균열성장속도 (m/cycles)  
 $A$  : Basquin-Coffin-Manson 식 재료상수  
 $B$  : Basquin-Coffin-Manson 식 재료상수  
 $\alpha$  : Basquin-Coffin-Manson 식 재료상수  
 $\beta$  : Basquin-Coffin-Manson 식 재료상수  
 $\sigma_a$  : 응력 진폭 (MPa)  
 $\sigma_m$  : 평균 응력 (MPa)  
 $\sigma_u$  : 최대 응력 (MPa)  
 $\sigma_{eq}$  : 등가 응력 (MPa)

† Corresponding Author, [bkjin@e-mnd.com](mailto:bkjin@e-mnd.com)

## 1. 서론

원자력 발전에 사용되는 터빈-발전기는 일정한 토크와 함께 지속적으로 축 진동에 의한 응력 변화가 발생한다. 특히 운전 조건의 변화 및 단락 등의 갑작스러운 변화에 의해 터빈 축에 과도한 비틀림 응력이 인가되고 이러한 과도 비틀림 응력에 의해 터빈 축에 손상이 발생하며, 지속적으로 손상이 발생하는 경우 손상이 누적되어 파괴가 발생하게 된다.<sup>(1)</sup> 하지만 이러한 비틀림 응력은 매우 일시적으로 산발적이며, 이로 인한 손상 역시 원자력 발전소 계획 예방 정비(Over Holl) 기간에 확인하는데 어려움이 있다. 따라서 운전 중 부하의 크기에 따라 발생하는 응력의 변화를 지속적으로 감시하고 터빈 축에 인가되는 비틀림 응력에 따른 피로 거동을 평가함으로써 터빈 축의 파손에 따라 발생하는 문제 미연에 방지하고 정비를 위해 소요되는 인력 및 시간을 절약하는 것이 매우 중요하다.

하지만 일반 산업기자재 및 부재에 대한 피로 거동 연구가 다양한 반면 원자력 발전에 사용되는 터빈 축의 피로 거동에 대한 연구가 미비한 것이 사실이다. 세계적인 원자력 발전 연구소인 EPRI(Electric Power Research Institute)를 중심으로 일부 연구가 진행되었다. 1984년 보고한 보고서에서 스팀터빈 발전기 축계 주요 재료인 NiMoV, CrMoV, NiCrMoV를 대상으로 15가지 열처리를 진행하고 500회 이상의 피로 시험을 진행하여 피로 거동을 연구하는데 필요한 다양한 물성을 보고하였다.<sup>(2)</sup> 2005년 보고서에서는 드레스덴원자력 발전소(Dresden Nuclear Station)의 2, 3호기 9번과 10번 저널 베어링 부근 터빈 축에 균열이 발생한 것을 분석하였다. 터빈 재질인 NiMoV에 대해 기계적 물성을 확인하였고 인가하는 응력의 진폭이 다양한 조건에서의 균열 성장 속도를 확인하여 Fig. 1과 같이 실험 결과와 기존 문헌의 데이터를 비교하여 응력확대계수( $\Delta K$ , stress intensity factor)가 2.2 - 4.4 MPa $\sqrt{m}$  범위에 있을 때 균열 성장 조건이 됨을 확인하였다.<sup>(3)</sup> 국내의 경우 터빈 축계의 피로 거동 연구에 대한 필요성이 요구되고 있으나 원자력 발전소 현장 접근성의 문제 및 규모의 문제 등으로 인해 연구가 미비한 실정이다. 이에 본 연구에서는 터빈-발전기를 축소화하고 임의 값의 부하를 인가할 수 있는 실험장치를 제작하였다. 실험 장치에 인가하는 비틀림 응력에

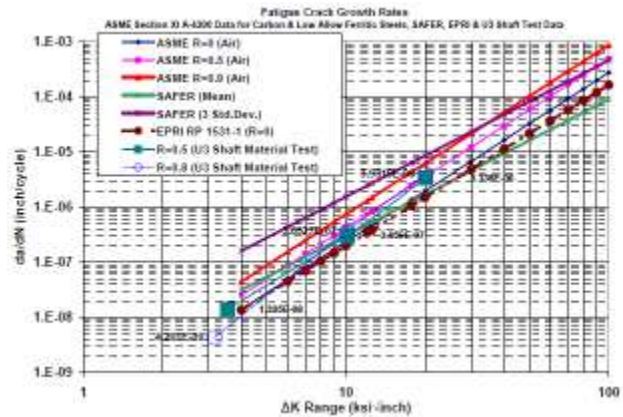


Fig. 1 Comparing the fatigue crack growth and reference data

대해 응력-수명 평가법(Stress-Life method), 균열성장 평가법(Crack growth method), 변형률-수명 평가법(Strain-Life method) 등 세 가지 피로 수명 평가 방법을 활용하여 피로수명을 평가함으로써 다양한 관점에서 부하 여부에 따른 피로수명의 변화를 확인하고자 하였다.

## 2. 실험 방법

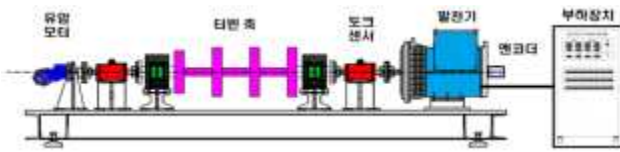
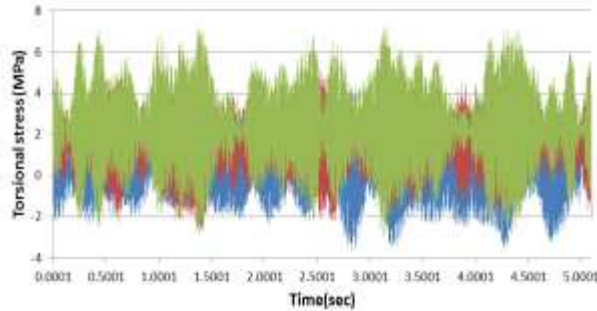
Fig. 2에 터빈-발전기 실험 장치를 나타내었다. 실제 원자력 발전과 같이 스팀으로 터빈 축을 회전시키는 것이 어렵기 때문에 유압 모터를 이용하여 터빈을 회전시켜 발전하는 형태를 취하였다. 이때 토크센서, 마그네틱 센서를 부착하여 터빈 축에 인가되는 비틀림 응력을 측정하였다. 토크센서는 터빈 축에 발생하는 정적인 비틀림 응력, 즉 평균 응력을 산출하며, 마그네틱 센서는 축 진동에 따른 비틀림 응력, 즉 응력 진폭을 측정하게 된다. 부하장치를 통해 부하를 인가하면 터빈축의 비틀림 응력이 커지도록 하여 비틀림 응력에 따른 피로 파괴 거동을 확인하였다.

터빈 축 재질은 탄소강 SM45C이며, 원자력 발전소와 동일하게 중공축의 형태로 제작하였다. 터빈 축의 외경, 내경, 길이는 각각 0.048, 0.020, 1.004 m이다.<sup>(4)</sup> 터빈 축에 대한 피로수명 평가에 앞서 균열은 확인되지 않았기 때문에 비파괴검사로 검출할 수 있는 최소 균열 길이인 0.001524 m를 초기 균열 길이로 산정하였다.

피로수명 평가에 필요한 Basquin-Coffin-Manson 식과 Paris 식의 재료상수와 SM 45C의 여타 기계적 물성은 Table 1과 같다.<sup>(2,5~7)</sup>

**Table 1** Mechanical properties of SM45C and material constant of Paris Eq. and Basquin-Coffin-Manson Eq.

Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Shear modulus (MPa)	Constant of Paris Eq. ( $da/dN = C(\Delta K)^m$ )		Constant of Basquin-Coffin-Manson Eq. ( $\gamma = A(2N_f)^\alpha + B(2N_f)^\beta$ )			
			C	m	A	B	$\alpha$	$\beta$
280	484	80,000	$6 \times 10^{-12}$	3	0.008	1.22	-0.0802	-0.564

**Fig. 2** Experimental schematic diagram**Fig. 3** The torsional vibration stress on turbine shaft without load(blue) and with 3 kV(red), 5 kV(green) load

1800 rpm으로 승속시킨 후 0, 3, 5 kV의 부하를 인가하였다. 10 kHz 샘플링으로 5초간 데이터를 취득하여 피로수명 평가를 진행하였다. 모든 계산 과정은 MicroSoft사의 Excel과 Mathworks사의 Matlab으로 진행하였다.

### 3. 결과

#### 3.1 비틀림응력 평가

1800 rpm의 회전 및 추가적인 부하 여부에 따라 획득한 토크 데이터를 식 (1)에 대입하여 비틀림 응력을 산출하였고 이를 Fig. 3에 나타내었다.

$$\tau = \frac{32}{\pi} \times \frac{TR}{(D^4 - d^4)} \quad (1)$$

여기서  $T$ 는 토크,  $R$ 은 축의 반지름,  $D$ 와  $d$ 는 각각 중공축의 외경과 내경이다. 인가 부하의 크기가 증가하면서 뚜렷하게 비틀림 응력의 평균 및 진폭이 증가하였다. 부하 크기에 따른 비틀림 응

력의 평균 및 진폭이 증가함을 알 수 있다. 5 kV의 부하가 인가되는 경우 부하가 없는 경우에 비해 평균 응력은 약 6배, 응력 진폭은 1.3배 증가하였다.

외부에서 추가적인 부하를 인가하여 터빈 축에 인가하는 비틀림 응력을 변경하고자 하였고 성공적으로 비틀림 응력의 변화가 발생한 것을 확인하였다.

#### 3.2 피로수명 평가

##### 3.2.1 응력-수명 평가 방법

가변 응력에 대한 응력-수명 평가를 진행하기 위해서는 인가되는 가변 응력을 식 (2)의 Modified Goodman식을 이용하여 등가응력으로 변환한다.<sup>(8)</sup>

$$\sigma_{eq} = \frac{\sigma_a}{(1 - \sigma_m/\sigma_u)} \quad (2)$$

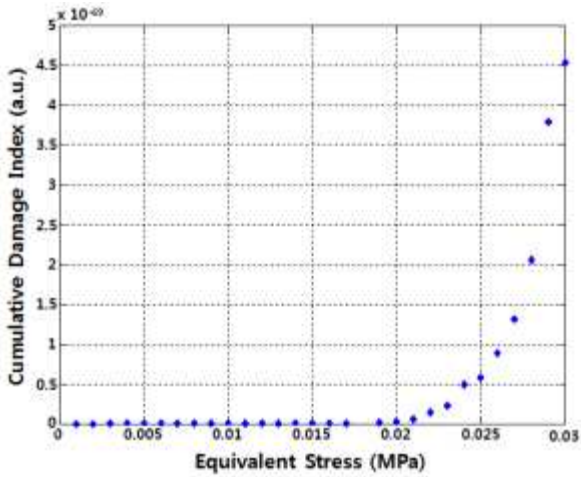
여기서  $\sigma_a$ 는 응력 진폭,  $\sigma_m$ 은 평균응력,  $\sigma_u$ 는 재료의 최대응력이며,  $\sigma_{eq}$ 는 등가응력이다.

측정 데이터에 대해 등가응력으로 변환하고 각 응력이 인가된 횟수를 평가하기 위하여 Rainflow counting 기법을 활용하였다.

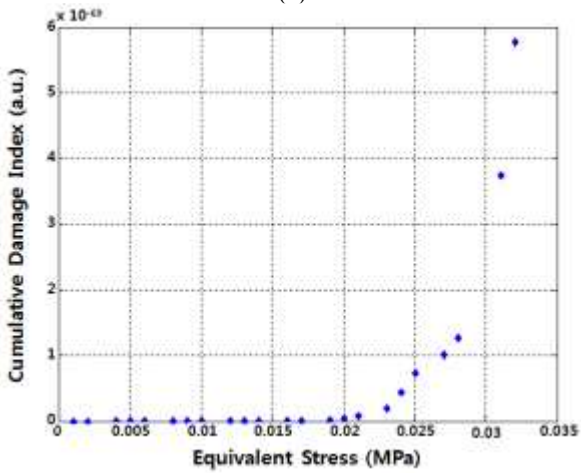
터빈 축 재질인 SM45C의 응력-수명 선도(S-N curve)로부터 각 등가응력에서의 이론적 수명을 확인하고 이론적 수명과 실제 인가 횟수의 비를 합산하여 평가하는 누적손상지수를 확인하고 Fig. 4에 나타내었다.<sup>(4,9,10)</sup> 부하가 없는 경우 0.03 MPa의 최대 등가 응력에서 약  $4.54 \times 10^{-69}$ 의 누적손상지수를 보이는 반면 3 kV의 부하가 인가되는 경우 0.032 MPa의 최대 등가 응력에서  $5.76 \times 10^{-69}$ 의 누적손상지수를 보이며, 5 kV 부하에서는 0.034 MPa의 최대 등가 응력에서  $4.19 \times 10^{-68}$ 의 누적손상지수를 보이고 있다. 등가 응력이 증가함에 따라 누적손상지수 역시 증가하고 있다. 한

편, 부하 크기와 무관하게 증가 응력에 대해 누적손상지수가 지수적인 의존성을 보이고 있다. 이는 누적손상지수를 산출하는 Miner 식의 이론

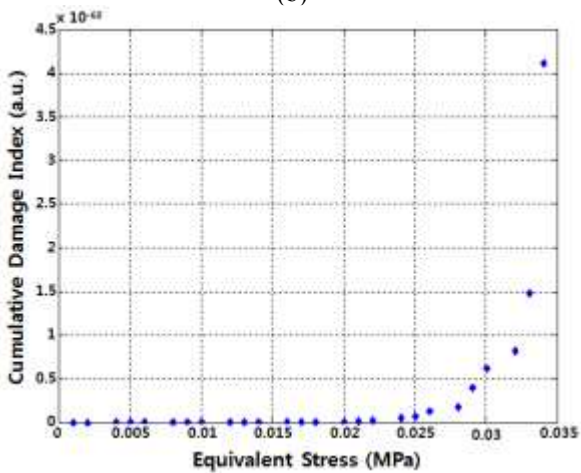
적 피로수명이 응력-수명 선도(S-N curve)로부터 도출되기 때문이며, 응력 변화에 대해 수명의 지수적인 의존성을 보이기 때문에 증가 응력 증가에 따라 누적손상지수 역시 지수적으로 증가하는 경향성을 보인다.



(a)

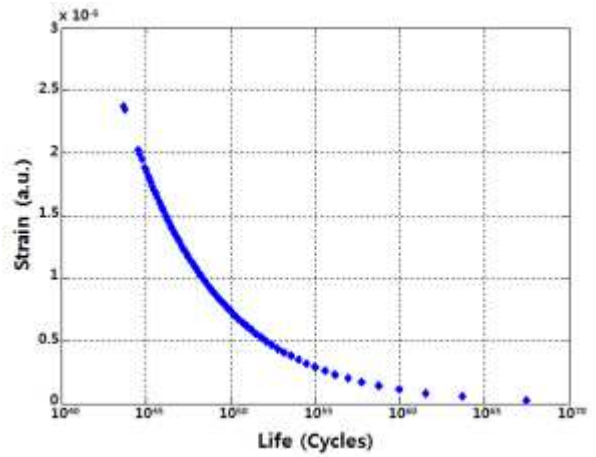


(b)

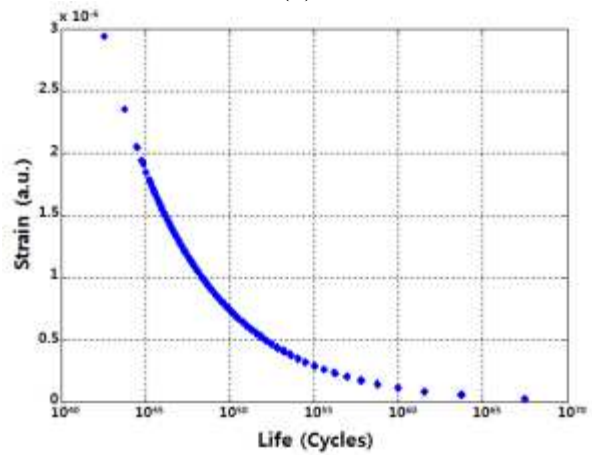


(c)

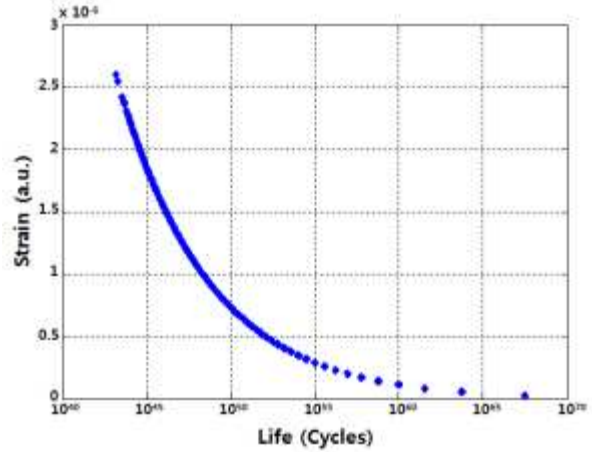
Fig. 4 Cumulative damage index as a function of equivalent stress without load(a) and with 3 kV(b), 5 kV(c) load



(a)



(b)



(c)

Fig. 5 Strain as a function of life without load(a) and with 3 kV(b), 5 kV(c) load

### 3.2.2 변형률-수명 평가 방법

응력-수명 평가는 재료의 탄성 변형과 소성변형에 대해 고려하지 않고 응력이 개별적으로 파손에 미치는 영향을 평가한다. 이에 반해 식 (3)의 Basquin-Coffin-Manson 식은 탄성변형과 함께 소성변형에 의한 수명 감소를 고려한다. 등가 응력에 따른 변형률 Basquin-Coffin-Manson 식에 대입하여 해당 수명을 산출하였다.<sup>(1,9)</sup>

$$\gamma = A(2N_f)^\alpha + B(2N_f)^\beta \quad (3)$$

Fig. 5에 나타난 변형률-수명 그래프에서와 같이 변형률이 증가하면 수명의 지수적인 감소가 발생하는 것을 알 수 있다. 부하가 인가되는 경우 부하가 인가되지 않는 경우에 비해 변형률 크고 그에 따라 미세하지만 변형률-수명 그래프가 전반적으로 왼쪽으로 이동하는 것을 알 수 있다. 부하가 인가되지 않은 경우의 최대 변형률은  $2.4 \times 10^{-6}$  이며 피로수명은  $9.2 \times 10^{44}$  (cycles)이다. 3 kV와 5 kV의 부하가 인가되는 경우의 최대 변형률은 각각  $2.95 \times 10^{-6}$ 과  $2.65 \times 10^{-6}$  이며, 이때 피로수명은 각각  $3.5 \times 10^{43}$  (cycles)과  $8.7 \times 10^{43}$  (cycles)이다. 부하가 인가되는 경우 최대 변형률의 값이 부하의 크기와 반대를 보이는 것은 측정에서 발생한 오차이며, Fig. 5에서 볼 수 있듯이 5 kV 부하가 인가되는 경우 높은 변형률에 전반적으로 데이터가 위치하고 있는 것을 알 수 있다.

### 3.2.3 균열 성장 평가 방법

응력-수명, 변형률-수명은 균열을 고려하지 않는 방법이며, 균열의 생성과 관계된 수식이다. 따라서 보다 정확한 피로 파괴 거동을 평가하기 위해서는 균열의 성장을 고려해야 한다. Paris law은 재료가 파손되는 균열길이까지 균열이 성장하는 것을 나타낸 식으로 식 (4)와 같다.

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (4)$$

여기서  $da/dN$ 은 균열 성장속도,  $C$ 와  $m$ 은 재료상수이고  $K$ 는 응력확대계수로 식 (5)와 같이 나타낸다.

$$\Delta K = F\Delta\sigma\sqrt{\pi a} \quad (5)$$

여기서  $\sigma$ 는 인가응력,  $a$ 는 균열의 크기,  $F$ 는 형상함수이다. 형상함수는 구조의 형상 및 균열의

크기에 의해 결정된다.<sup>(11)</sup> 실험장치 터빈 축에 대한 형상함수는 0.8985이다.<sup>(4)</sup> Fig. 6에 응력확대계수에 따른 균열성장속도를 나타내었다. 부하 여

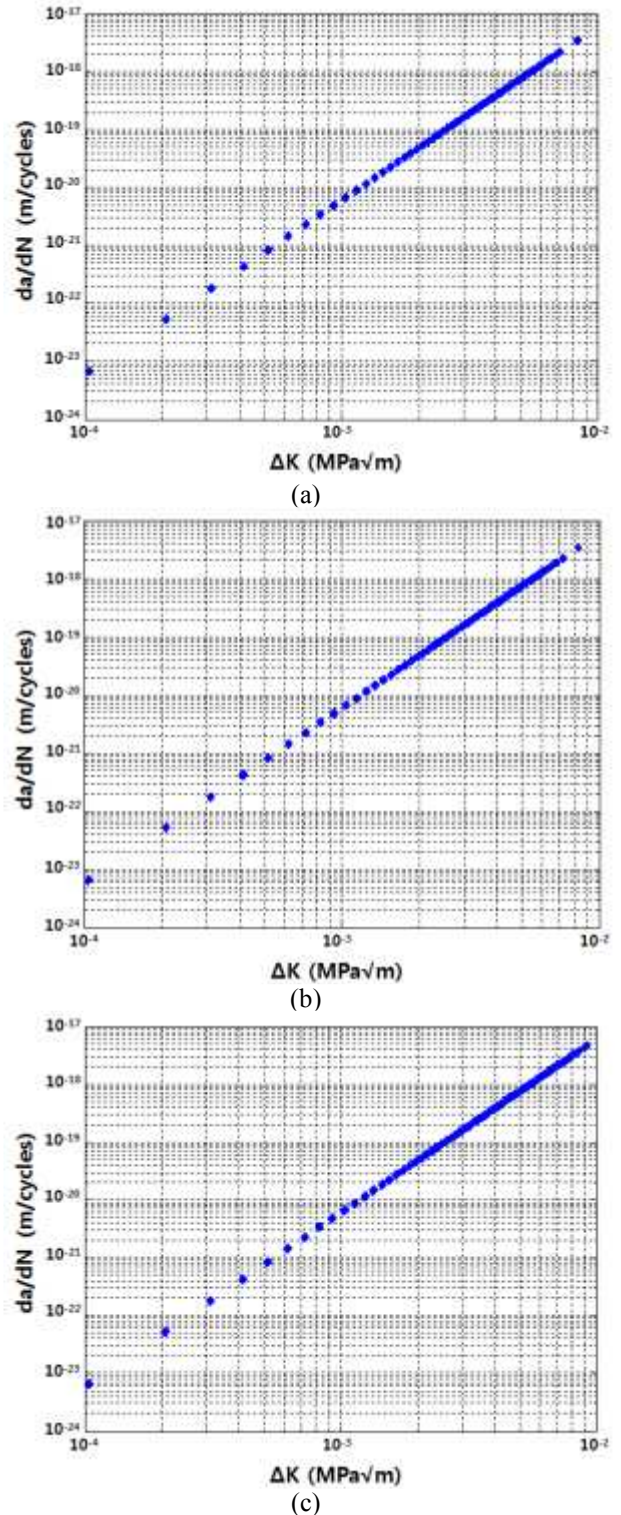


Fig. 6 Crack growth rate as a function of stress intensity factor( $\Delta k$ ) without load(a) and with 3 kV(b), 5 kV(c) load

부와 무관하게 선형적으로 증가하는 전형적인 Paris law의 경향성을 보이고 있으며, 부하의 크기가 증가하면서 응력의 증가로 인해 보다 높은 응력확대계수를 보인다. 하지만 균열성장속도에는 영향이 크지 않다. 이는 서론에서 언급하였듯이 균열이 생성되기 위해서는 최소의 응력확대계수 값이 2.2~4.4(MPa√m) 내에 있어야 하지만 이번 연구에서의 응력확대계수는  $10^2 \sim 10^4$  (MPa√m) 정도로 매우 작기 때문에 균열 생성 조건을 만족하지 못한다.

#### 4. 결 론

(1) 원자력 발전에 사용되는 터빈-발전기의 축에 인가되는 비틀림 응력이 피로수명에 미치는 영향을 확인하기 위하여 터빈-발전기 시스템을 제작하였고 임의의 부하를 인가하면서 비틀림 응력의 크기에 따른 피로 파괴 거동의 변화를 확인하였다.

(2) 세 가지 피로 수명 평가 방법으로 평가한 결과 평가 방법과 무관하게 부하의 크기가 증가하면서 수명이 감소하였다. 무부하에 비해 5 kV 부하가 인가되는 경우 약 10배의 피로수명 감소가 발생함을 확인하였다.

(3) 이번 연구에서 인가한 비틀림 응력이 뚜렷한 피로 파괴를 유발할 수 있는 크기가 아니기 때문에 파괴를 확인하지 못하였지만 원자력 발전의 터빈-발전기 터빈 축에 발생하는 피로 파괴 거동을 평가하는 일련의 기술을 확립하였다.

#### 후 기

본 연구는 지식경제부가 지원하는 원자력연구개발사업으로 한국수력원자력(주)이 주관한 “원전 터빈의 고신뢰 장주기 운전을 위한 감시 및 예측 진단 기술개발” 과제로 진행되었습니다. 관계자 여러분의 협조에 감사드립니다.

#### 참고문헌

(1) Grigsby, L. L., 2007, Power System Stability and Control, CRC Press, pp. 16-18~16-19.  
 (2) Placek R. J., Williams R. A., Adams S. L. and Klufas, O., 1984, "Determination of Torsional

Fatigue Life of Large Turbine Generator Shafts," EPRI Report EL-3083, USA.

- (3) Rosario D. A. and Khalid T., 2005, "Generator Shaft Keyway Cracking Failure Investigation," Proc. 9th EPRI Steam Turbine-Generator Workshop, Denver, Colorado, pp. 1~10.  
 (3) Raju I. S. and Newman J. C., 1984, "Stress-Intensity Factors for Circumferential Surface Cracks in Pipes and Rods Under Tension and Bending Loads," Fracture Mechanics Vol.17, pp. 1~36.  
 (4) Nakada M., Noda J. and Miyano Y., 2007, "Fatigue Life Prediction of CFRP Laminates Under Variable Stress Amplitude and Frequency," Key Engineering Material, Vol. 334-335, pp. 445~448.  
 (5) [http://www.steel0.com/JIS\\_S45C.htm](http://www.steel0.com/JIS_S45C.htm).  
 (6) Kim K. S., Chen X., Han C. and Lee H. W., 2002, "Estimation Methods for Fatigue Properties of Steels Under Axial and Torsional Loading," International Journal of Fatigue, Vol. 24, pp. 783~793.  
 (7) Park U. H., Lee H. W., Kim S. J., Lee C. R. and Kim J. H., 2007, "Stochastic Characteristics of Fatigue Crack Growth Resistance of SM45C Steel," International Journal of Automotive Technology, Vol. 8, pp. 623~628.  
 (8) Bannantine J. A., Comer J. J. and Handrock J. L., 1989, Fundamentals of Metal Fatigue Analysis, Prentice Hall, pp. 189~192.  
 (9) Tsai J. I., 2008, "Long-Term Fatigue Life Expenditure of Turbine Shafts Owing to Noncharacteristic Harmonics Produced by Slip Energy Recovery Induction Motor Drives," Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering, Vol. 2, No. 8, pp. 1146~1160.  
 (10) McKelvey S. A., Lee Y. L. and Barkey M. E., 2012, "Stress-Based Uniaxial Fatigue Analysis Using Methods Described in FKM-Guideline," Journal of Failure Analysis and Prevention, Vol. 12, pp. 445~484.  
 (11) Grigsby L. L., 2007, Power System Stability and Control, CRC Press, pp. 16-18~16-19.