

저압터빈용 로터강의 이축 피로수명에측법에 관한 연구

현중섭[#], 송기욱^{*}, 이영신^{**}

Study of Axial and Torsional Fatigue Life Prediction Method for Low Pressure Turbine Rotor Steels

Jung Seob Hyun[#], Gee Wook Song^{*} and Young Shin Lee^{**}

ABSTRACT

The rotating components such as turbine rotors in service are generally subjected to multiaxial cyclic loading conditions. The prediction of fatigue life for turbine rotor components under complex multiaxial loading conditions is very important to prevent the fatigue failures in service.

In this paper, axial and torsional low cycle fatigue tests were preformed for 3.5NiCrMo steels serviced low pressure turbine rotor of nuclear power plant. Several methods to predict biaxial fatigue life such as Tresca, von Mises and Brown & Miller's critical plane approach were evaluated to correlate the experimental results for serviced NiCrMoV steel. The fracture mode and fatigue characteristics of NiCrMoV steel were discussed based on the results of fatigue tests performed under the axial and torsional test conditions. In particular, the Brown and Miller's critical plane approach was found to best correlate the experimental data with predictions being within a factor of 2.

Key Words : Biaxial Fatigue(이축피로), Low Pressure Turbine Rotor(저압터빈 로터), Fatigue Life Prediction(피로수명예측), Critical Plane Approach(임계평면법), Maximum Shear Strain Theory(최대전단변형률법)

기호설명

λ_{\max} = maximum shear strain amplitude
 ν_{eff} = effective Poisson's ratio
 ϵ_a = axial strain amplitude
 γ_a = shear strain amplitude
 $\epsilon_t, \epsilon_e, \epsilon_p$ = total, elastic, plastic strain
 ν_e, ν_p = elastic, plastic Poisson's ratio
 $\Delta\gamma_{\max}$ = maximum shear strain range

σ'_f = fatigue strength coefficient
 ϵ'_f = fatigue ductility coefficient
 N_f = cycles to failure
 S = material constants
 ϵ_n = normal strain amplitude in maximum shear strain plane
 C = constants
 $\Delta\epsilon$ = axial strain range
 $\Delta\gamma$ = shear strain range

접수일: 2005년 4월 22일; 게재승인일: 2005년 10월 7일

교신저자: 한국전력공사 전력연구원 수화력발전연구소

E-mail jshyun@kepri.re.kr Tel. (042) 865-5332

* 한국전력공사 전력연구원 수화력발전연구소

** 충남대학교 기계설계공학과

1. 서론

발전소의 고, 저압 로터, 압력용기, 가스터빈, 자동차의 동력전달축 등 대부분의 기계들은 복잡한 형상이나 하중으로 인하여 이축응력 상태에서 운전되고 있으며, 이러한 설비들이 받는 높은 반복하중은 국부적으로 탄성한도를 넘는 높은 변형률을 발생시켜 기계부품들을 파손에 이르게 한다. 따라서 이러한 기계설비의 피로파괴를 방지하기 위해서 국내에서도 저주기피로, 열피로 등 활발한 연구가 진행되고 있으나^{1,2}, 대부분의 경우 일축인장 피로시험자료를 사용하여 피로수명을 계산하고 있어 예측된 피로수명이 정확하지 않은 경우가 많아 이축피로 수명예측에 대한 요구가 증가되고 있다.

이축응력을 받는 기계구조물의 저 사이클 피로 수명예측 방법에 관해서는 1960 년도부터 전단변형 에너지와 최대 전단변형률 이론을 바탕으로 한 등가변형률에 관한 연구가 수행되었으며, 1970 년대에는 Brown 과 Miller⁵ 가 임계평면이론을, Leis 와 Garud⁶ 등이 소성변형률 에너지이론을 각각 제안하여 이들 3 가지 이론을 기초로 발전되었다. 이축응력상태에서의 피로수명을 단축응력 상태에서부터 추정하기 위해서는 해당재료 특성에 맞는 예측모델의 선정이 중요하며, 특히 이러한 피로수명 예측법들은 실 가동설비에 적용되어야 함에도 불구하고 시편채취의 어려움으로 인하여 가동중 열화된 재료에 대하여 피로시험을 실시하고 이축 피로 수명예측법의 타당성을 입증한 연구는 아직 부족한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 발전소에서 19 년간 사용된 저압터빈 로터재인 3.5NiCrMo 강을 대상으로 일축인장 및 비틀림 피로시험을 수행하고 지금까지 제시된 이축피로 수명예측법을 적용, 분석하여 이들 피로수명예측 모델이 실 가동중 열화된 재료에도 적용 가능함을 입증 하였다.

2. 실험방법

2.1 시편 및 실험장치

본 연구에 사용된 3.5NiCrMo 강은 저압터빈 로터(rotor) 재질로서 약 132,000 시간 사용되었으며 재질의 화학 조성 분석과 인장시험을 수행하고 그 결과를 Table 1, 2 에 나타내었다. 시험 재질의 운전

시 사용환경은 Table 3 에 나타내었다. 시편의 형상은 Fig. 1 과 같이 27.4mm 의 평행부에 대해 외경이 13mm, 내경이 10mm, 표점거리가 12mm 인 증공봉상시편(Hollow cylindrical specimen)을 사용하였다. 시편의 내, 외면은 피로수명에 대한 표면의 거칠기의 영향을 줄이기 위하여 #2000 의 연마지로 연마한 후 6 μm 다이아몬드 연마제를 사용하여 마무리 연마를 함으로서 표면의 거칠기를 줄였다. 실험장치는 인장 및 비틀림 하중을 동시에 부과할 수 있는 인장 100kN, 비틀림 1000N-m 용량의 유압식 피로시험기(INSTRON 8521)이다. 변형률 측정은 표점거리 12mm 의 이축신장계(biaxial extensometer)를 사용하여 측정하였다.

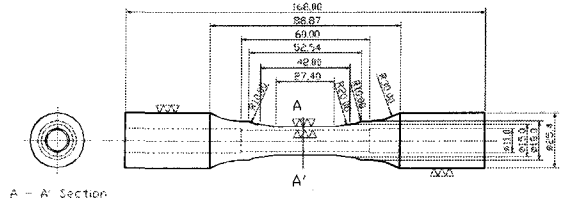


Fig. 1 Thin-walled tube specimen

Table 1 Chemical composition of 3.5NiCrMoV steel

C	Mn	Ni	P	S	Cr	Mo	V
0.23	0.37	3.66	0.01	0.01	1.53	0.32	0.09

Table 2 Mechanical property of 3.5NiCrMoV steel

0.2% Yield strength (MPa)	Ultimate tensile strength (MPa)	Reduction in area (%)	Elongation (%)
550	734	52	18

Table 3 Operating condition

Output (MW)	Steam pressure (Kg/cm ²)	Steam Temperature (°C)	Operating hour (hr)
1,000	11.2	262	132,000

2.2 실험조건

인장 및 비틀림 피로시험은 상온(25℃)에서 sine wave 를 사용하여 변형률제어(strain control)로 수행하였으며, 주파수는 등가 변형률 속도가 0.1%/s 가 되도록 선택하였다. 총 변형률 범위는 인장피로의 경우 0.4% ~ 1.2%, 비틀림 피로의 경우 0.9% ~ 2.1%에서 수행하였다.

파손의 정의는 일정변형률 조건하에서 비틀림 하중을 받는 경우 비틀림 방향의 하중이 15% 감소하였을 경우로 하였고 축 방향의 하중만을 받는 경우는 축방향의 하중이 15% 감소하였을 때로 정의 하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 인장 및 비틀림 피로시험 결과

Fig. 2 는 사용재의 일축 인장 저주기 피로시험에서 얻어진 변형률과 파단반복수의 관계를 제작사에서 시험된 신재에서 얻어진 결과들과 비교한 것으로 사용재의 피로수명이 신재의 피로수명에 비해 크게 감소된 것으로 알 수 있다.

Fig. 3 은 비틀림 피로시험에서 얻어진 변형률과 파단반복수와의 관계를 미국 전력연구소(EPRI)에서 수행한 신재의 비틀림 피로시험 결과와 비교한 것으로 일축 인장피로 결과와 마찬가지로 사용재의 일축 비틀림 피로수명이 신재에 비해 상당히 감소하였음을 알 수 있으며, 이로 인해 실험재료가 19 년간 장기 사용됨으로 인하여 재질열화가 발생되어 일축 인장과 비틀림 피로수명이 신재에 비해 크게 감소했음을 알 수 있다.

Fig. 4 는 일축 인장시험에서 인장 변형률 진폭과 파단 반복수와의 관계를 나타낸 것이다. 히스테리시스 루프에서 구한 탄성변형률과 소성변형률은 대수 좌표계에서 파단반복수와 선형관계를 가지며, 총변형률은 탄성변형률과 소성변형률의 합으로 Coffin-Manson 식을 만족하고 있다.

Fig. 5 는 비틀림 피로에서 전단변형률 진폭과 파단 반복수와의 관계를 나타낸것으로, 일축 인장 피로와 마찬가지로 히스테리시스 루프에서 구한 탄성변형률과 소성변형률은 대수좌표계에서 파단반복수와 선형관계를 가진다. 총변형률은 탄성변형률과 소성변형률의 합으로 일축인장과 같이 Coffin-Manson 식을 만족하고 있다.

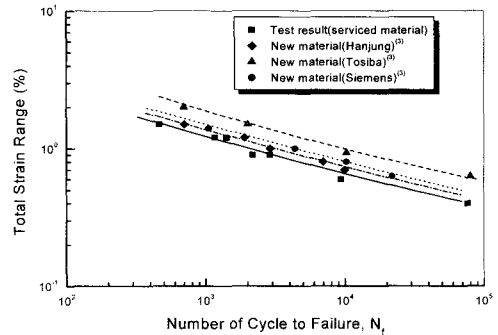


Fig. 2 Comparison of axial fatigue life with new and serviced LP rotor steels

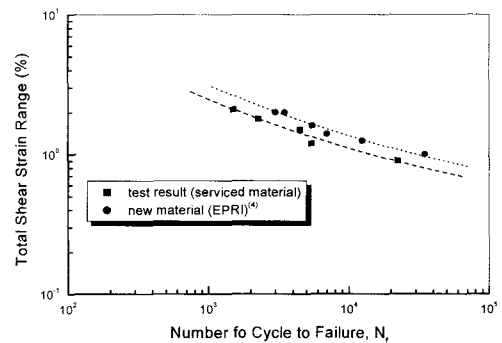


Fig. 3 Comparison of torsional fatigue life with new and serviced LP rotor steels

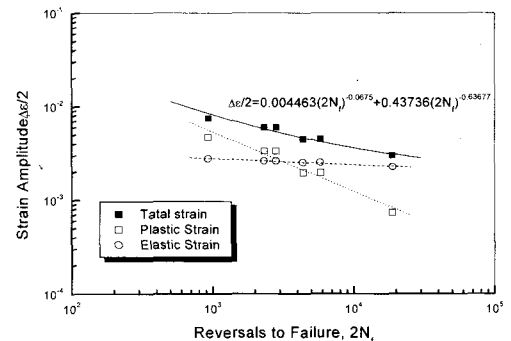


Fig. 4 Axial fatigue life relations for LP rotor steels

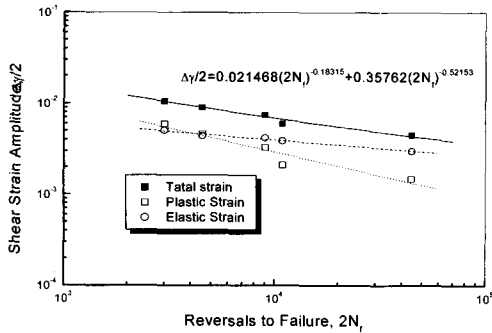


Fig. 5 Torsional fatigue life relations for LP rotor steels

3.2 파괴형태

일축인장 피로의 경우 주변형률 방향이 축 방향과 동일하고, 최대 전단변형률 방향은 축 방향에 45° 기울어져 있으며, 비틀림 피로 시에는 주변형률 방향이 축에서 45° 기울어지고, 최대 전단변형률 방향은 축 방향과 동일하다.

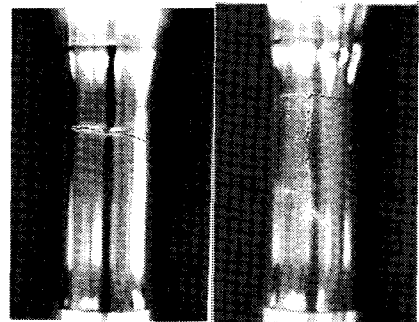
Fig. 6 은 일축인장 및 비틀림 피로에서 발생된 거시균열의 형상을 보여주고 있다. (a)의 일축 인장피로시 균열이 축 방향, 즉 주변형률 방향에 수직으로 성장하였음을 볼 수 있으며, (b)의 비틀림 피로시에는 균열이 축 방향으로 최대 전단 변형률 방향을 따라 성장하였음을 알 수 있다.

Fig. 7 은 일축 인장피로에 의해 파손된 파면을 전자현미경(SEM)을 이용하여 관찰한 사진이다. 인장피로 파면의 경우 스트라이에이션(striation)이 뚜렷이 나타나며, 이로부터 Mode I 균열 성장기구에 의해 균열이 성장하였음을 알 수 있다.

Fig. 8 은 비틀림 피로에 의해 파손된 파면을 전자현미경으로 관찰한 사진으로 전단변형에 의해 발생된 상하면의 슬라이딩에 의해 균열이 전파되므로 파면상, 하면의 반복마찰에 의해 발생된 타이어트랙(tire track)을 화살표 표시와 같이 분명하게 볼 수 있다. 파면위에는 마찰로 인한 러빙(rubbing)흔적과 함께 작은 조각들을 볼 수 있다.

따라서 비틀림 피로의 경우 슬라이딩 형태(sliding mode)의 Mode II 기구에 의해 균열이 성장된다. 따라서 균열은 최대 전단 변형률 방향으로 성장하게 된다. Socie⁷와 Peter⁸ 등은 비틀림 피로의 경우 비교적 단기간의 균열생성후 최대 전단변형률 방향으로 균열이 성장함을 보고하였으며, 상·하면간의 마찰에 의해 균열전단의 응력이 감소하

여 균열 성장률이 저하됨에 따라 일축 인장피로보다 피로수명이 길다고 하였으며, 이러한 현상은 Fig. 4와 Fig. 5의 일축 인장 및 비틀림 피로 시험 결과에서도 같은 진폭에서 비틀림 피로시의 수명이 길게 나타나고 있다.



(a) Uniaxial test (b) Torsional test

Fig. 6 Appearances of macro-cracking in uniaxial and torsional tests



Fig. 7 Typical fracture surface in uniaxial tests

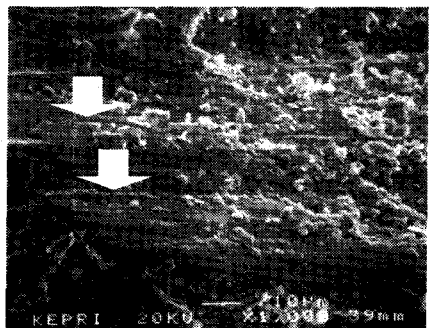


Fig. 8 Typical fracture surface in torsional tests

3.3 수명모델식의 검토

경년열화된 저압터빈로터강의 이축 저 사이클 피로수명의 예측에 적합한 수명모델식을 평가하기 위해 Tresca, von Mises, Critical plane 모델을 비교하고 본 시험결과를 적용하였다.

최대 전단변형률법은 단순 인장시험시 항복이 최대 전단변형률면을 따라 발생한다는 이론으로 최대 전단변형률(Tresca)을 등가변형률로 정의하여 다음과 같은 식으로 나타낸다.

$$\gamma_{max} = \sqrt{(1 + \nu_{eff})^2 \epsilon_a^2 + \gamma_a^2} \quad (1)$$

여기서 $\nu_{eff} \epsilon_a = \nu_e \epsilon_e + \nu_p \epsilon_p = \epsilon_t$ 이다.

Fig. 9 는 인장 및 비틀림 피로시험결과를 식(1)에 따라 최대 전단변형률을 등가변형률로 하여 나타낸 것으로 같은 등가변형률에서는 인장피로 수명이 비틀림 피로수명보다 짧음을 알 수 있다. 최대전단 변형률을 인장피로시험에서 얻어진 Coffin-Manson 식의 형태로 표현하면 식(2)와 같다.

$$\frac{\Delta \gamma_{max}}{2} = 2.09 \frac{\sigma_f'}{E} (2N_f)^{-0.0675} + 1.01 \epsilon_f' (2N_f)^{-0.60677} \quad (2)$$

Fig. 10 은 식(2)에 의해 최대 전단변형률을 등가변형률로 하여 예측된 수명과 실험에서 얻어진 수명과의 관계를 나타낸 것으로 특히 비틀림 피로에서 예측된 수명과 시험결과가 2 배수 범위를 초과하는 오차가 크게 발생되고 있다.

von Mises 법은 단순 인장시험의 경우 등방의 모든 결정에서 항복이 발생한다는 가정하에 출발한 이론으로 von Mises 법은 등가변형률로 ASME Code N-47 의 경우에 주로 사용되며 식(3)과 같다.

$$\epsilon_{eq} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{4(1 + \nu_{eff})^2 \epsilon_a^2 + 3\gamma_a^2} \quad (3)$$

Fig. 11 은 식(3)에 의하여 인장 및 피로수명을 von Mises 등가변형률로 나타낸 것이며 회귀법에 의하여 계산된 등가변형률과 과단 반복수의 관계는 식(4)와 같다.

$$\frac{\Delta \epsilon_{eq}}{2} = 1.68 \frac{\sigma_f'}{E} (2N_f)^{-0.0675} + 1.09 \epsilon_f' (2N_f)^{-0.60677} \quad (4)$$

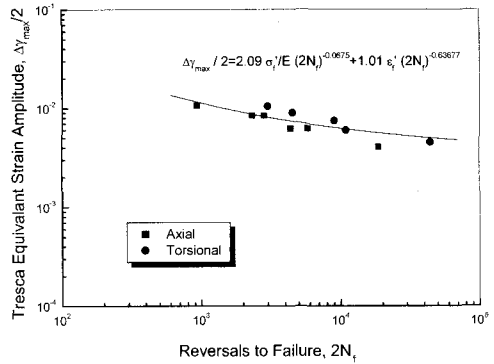


Fig. 9 Fatigue life correlations by the maximum shear strain theory

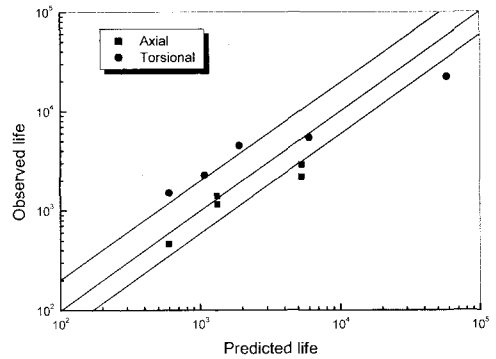


Fig. 10 Fatigue life prediction by the maximum shear strain theory

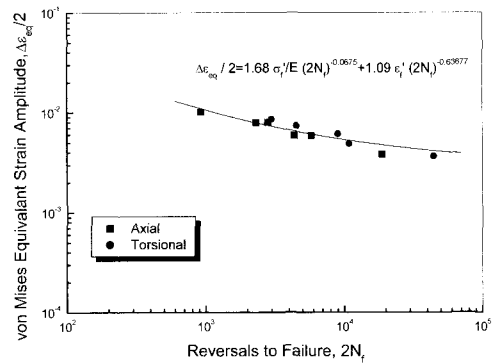


Fig. 11 Fatigue life correlations by the von Mises equivalent strain

Fig. 12 는 식(4)의 von Mises 등가변형률에 의해 예측된 피로수명과 실험에서 얻어진 피로수명과의 관계를 나타낸 것이다. 인장 및 비틀림 피로에서 예측된 수명과 시험결과가 모두 2 배수 범위 이내로서 이축피로 수명을 적합하게 예측할 수 있으나, 수명이 길게 나타나는 저 변형률에서는 높은 오차를 가지고 있는 것으로 분석되었다.

임계평면(critical plane)이론은 피로균열의 발생과 성장과정을 정밀한 관찰을 통해 개발되었다. 최대 전단변형률이 존재하는 면을 임계평면이라고 하고 피로균열의 발생과 성장은 임계평면상에서 이루어지며 균열의 발생은 최대전단변형률의 영향을 받으며 균열의 성장은 임계평면에 수직인 인장 변형률에 의해 지배된다는 가정하에 Brown 과 Miller⁵는 다음과 같은 식(5)를 제안하였다.

$$\frac{\Delta\gamma_{\max}}{2} + S\epsilon_n = C \quad (5)$$

식(5)로부터 임계평면에 수직인 인장변형률과 최대 전단변형률 성분과의 관계를 임계평면에서 나타내어 동일수명선으로 연결했을 때 함수관계가 존재함을 알 수 있다.

Fig. 13 은 인장과 비틀림 피로 수명을 식(5)에서 계산된 최대 전단변형률과 수직 인장변형률의 합으로 나타낸 것으로 관계식은 식(6)과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\Delta\gamma_{\max}}{2} + S\epsilon_n = 2.07 \frac{\sigma_f}{E} (2N_f)^{-0.0675} \\ + 1.54 \epsilon_f (2N_f)^{-0.60677} \end{aligned} \quad (6)$$

Fig. 14 는 식(6)의 임계평면법에 의해 예측된 수명과 실험에서 얻어진 수명과의 관계를 나타낸 것으로 인장 및 비틀림 수명예측결과 모두 2 배수 범위 이내에서 존재하고 있다.

따라서, 기존의 3 가지 피로수명예측방법을 적용한 결과, 최대 전단변형률법은 전체 변형률범위에서 가장 큰 오차가 나타나고 von Mises 법은 저 변형률에서 큰 오차가 나타나나, 임계평면법은 전체 변형률범위에서 오차가 가장 적고 2 배수 범위 이내에 존재함으로써 임계평면법이 이축피로 수명을 가장 정확하게 예측하는 것으로 분석되었다.

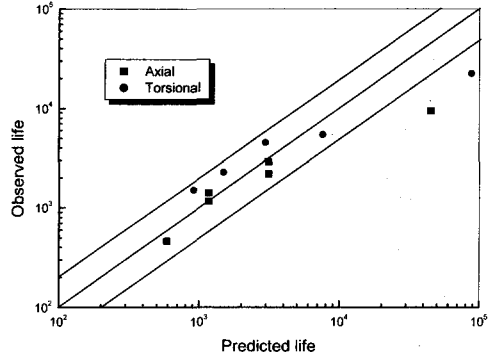


Fig. 12 Fatigue life prediction by the von Mises equivalent strain

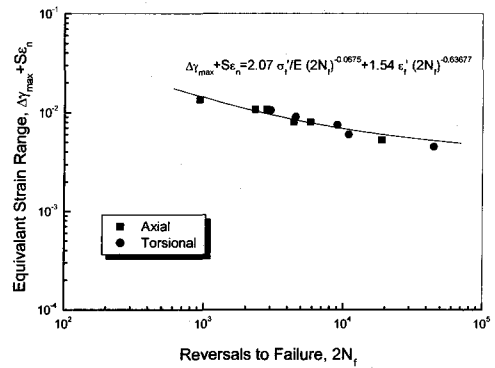


Fig. 13 Fatigue life correlations by the critical plane approach

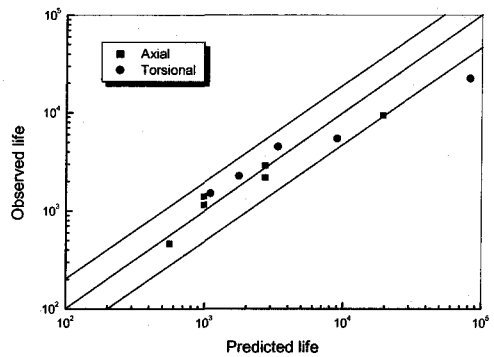


Fig. 14 Fatigue life prediction by the critical plane approach

4. 결론

발전소에서 19 년 동안 저압 터빈로터 강으로 사용된 3.5NiCrMoV 강을 대상으로 인장 및 비틀림 피로시험을 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 저압터빈 로터강으로 19 년 동안 사용된 재료는 재질열화로 인하여 신재에 비하여 일축 인장 및 비틀림 피로수명이 현저하게 저하되었음을 알 수 있었다.
2. 일축인장 피로파면에서는 스트라이에이션을, 비틀림 피로 파면에서는 마찰에 의한 러빙(rubbing)현상을 관찰할 수 있었다. 이로부터 일축 인장 피로의 경우 균열의 열림과 닫힘에 의한 Mode I 형태에 의해 균열이 성장하고, 비틀림 피로시에는 전단변형에 의한 Mode II 형태로 균열이 성장함을 알 수 있다.
3. 저압터빈 로터강의 일축인장 및 비틀림 피로시험을 통해 최대전단변형률법, von Mises 법, 임계평면법 등 이축피로 수명예측법을 평가한 결과 임계평면법에 의한 수명예측법이 가장 정확함을 알 수 있었다.

engineers, vol. 187, IMechE, pp. 745 - 755, 1973.

6. Garud, Y.S., "A New Approach to the Evaluation of Fatigue Under Multiaxial Loadings," *Journal of Engineering Materials and Technology*, ASME Transactions, Vol. 103, pp. 118 - 125, 1981.
7. Socie, D. "Multiaxial Fatigue Damage Models," *Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol. 109, pp. 293 - 298, 1987.
8. Peter, J. B. and Sreeramesh, K. "Elevated Temperature Axial and Torsional Fatigue Behavior of Haynes 188," *Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol. 117, pp. 191 - 198, 1995.

참고문헌

1. Ha, J.S., Kim, K.Y. and Ahn, H.D., "A Study on the Thermal-Mechanical Fatigue Life Prediction of 12Cr Steel," *Journal of KSPE*, Vol. 11, No.4, pp. 114-125, 1994.
2. Kang, M.S., "Low Cycle Fatigue Behavior of 12Cr Steel for Thermal Power Plant Steam Turbine," *Journal of KSPE*, Vol. 19, No.8, pp. 71-76, 2002.
3. Berger, C., "Present Status of Investigations on three Superclean 3.5%NiCrMoV Rotors," *Superclean Rotor Steels workshop Proceedings*, pp. 31 - 48, 1989.
4. Anderson, A.F., Williams, R.A. and Wilkening, W.W., "A Methodology for Predicting Torsional Fatigue Life of Turbine Generator Shafts Using Crack Initiation Plus Propagation," *EPRI Report EL-4333*, 1985.
5. Brown, M.W. and Miller, K.J., "A Theory for Fatigue Under Multiaxial Stress-Strain Conditions," *Proceedings of the Institution of Mechanical*