

Success Run Test for Reliability Demonstration of 1100°C Gas Turbine Blades

1100°C급 가스터빈 동익의 무고장시험을 통한 HCF 신뢰성 평가

Dooyoung Lee†, Jaeryang Goo, Doosoo Kim, Donghwan Kim
이두영†, 구재량, 김두수, 김동환

KEPCO Research Institute, Korea Electric Power Corporation, 105 Munji-ro Yuseong-gu, Daejeon 34056, Republic of Korea
† dooyoung.lee@kepcoco.kr

Abstract

The reliability on high cycle fatigue damage mechanism for new blades manufactured by reverse-engineering is demonstrated by success-run test. Turbine blades always experience various dynamic loads in turbine operation, as well as being in resonance condition and forced by fluid-induced vibrations mostly during run-up/down, which may accumulate high cycle damage to the blades. The accidents caused by blade failure especially incur not only a lot of troubles to the machinery but also huge financial losses. Therefore it is necessary to verify the reliability of blades in advance for the safe use. The success run test for the reliability demonstration is designed and performed for the new blades using the technique known as resonant high cycle fatigue testing.

1100°C급 가스터빈 동익의 국산화 개발품에 대한 신뢰성을 무고장시험법에 의해 평가하였다. 터빈 동익은 기동, 정지 중에 발생하는 공진 또는 유체유발진동을 겪는 등 터빈 운전 중 상시 다양한 동하중에 노출되어 있으며, 이러한 변동하중은 터빈 동익에 고주기피로손상을 초래한다. 특히 동익의 파손에 의한 사고는 타 설비로의 파급이 크고, 막대한 경제적 피해를 야기하기 때문에, 발전소의 안정적인 운전을 위해 동익의 신뢰성이 우선 검증되어야 한다. 동익에 균열을 일으키기 위해서 전자식 가진기를 이용하여 공진에 의한 증폭된 동하중을 부과하였다. 가스터빈 동익의 수명분포를 와이블 분포로 가정하여 시험 시간을 계산하고, 시료 1개의 고장을 허용하는 조건으로 총 5개의 개발품을 대상으로 시험을 수행하여, 개발품 동익의 목표 수명을 90% 신뢰도로 보증할 수 있다는 것을 90% 신뢰수준에서 확인하였다.

Keywords : Turbine Blade, High Cycle Fatigue, Resonance, Reliability, Success Run Test, Electrodynamic Shaker

I. 서론

가스터빈 동익은 발전용 터빈의 핵심 부품으로, 신규 설비 또는 교체에 많은 비용이 소요되지만, 국내 발전사는 거의 가스터빈 동익 전량을 수입에 의존하고 있다. 국내에서도 발전기술 확보와 운영비용절감을 위한 정책의 일환으로 일부 동익에 대해서는 지속적인 연구 개발을 통해 역설계에 기반한 국산화를 추진하고 있다. 한편 제품의 치수를 비롯한 금속학적 성질, 기계적 강도 등의 소재 특성에 기초하여 원제작사의 제품 대비 동격 이상의 품질을 확보했음에도 불구하고, 발전사에서는 국산화 제품의 사용으로 인한 만일의 사고 발생시 초래되는 막대한 손실을 감수하고 터빈에 장착하기에는 여전히 경제적, 정책적인 제약이 존재하고 있다. 이러한 현실적 우려는 근본적으로 국산화된 동익의 신뢰성과 관계되어 있기 때문에, 제품의 신뢰도를 제고하는 것이 가장 효과적인 해결책이 될 것이다.

가스터빈 동익의 파손을 일으키는 주요 손상 기구 중 하나는 고주기피로이며, 터빈 운전시 다양한 동하중에 의해 상시 가진되는 동익의 진동과 기동 정지 중에 발생 가능한 공진 또는 유체유발진동 등에 의해 유발되

는데, 동익은 이러한 동하중에 충분한 내구성을 갖도록 설계, 제작되어야 한다 [1].

본 논문은 국산화 개발을 통해 제작된 동익이 고주기피로 손상기구 측면에서 요구되는 신뢰성을 갖는지를 무고장시험법을 통해 입증하는 것을 목적으로, 이를 위해 수행된 공진형 가진시험, 유한요소해석, 무고장시험 설계 및 평가 등 시험평가 전반에 대해 기술하였다.

II. 가진 시험 방법 및 설정

A. 공진형 가진시험 개요

공진형 가진시험은 일반적으로 외팔보 또는 판형 구조를 갖는 시편의 일단을 진동가진기의 진동부에 고정하고, 시편의 특정 고유진동수로 가진하여 공진시키는 기법으로, 시편은 공진으로 인해 관성력이 증폭되어 큰 동하중이 시편에 가해진다. 이러한 동하중 조건에서 부과된 응력과 균열 발생 시점까지의 시간 또는 주기(cycle)를 측정함으로써, 응력과 수명의 관계를 도출할 수 있다. 공진형 가진시험법은 일반적으로 수행되는 시

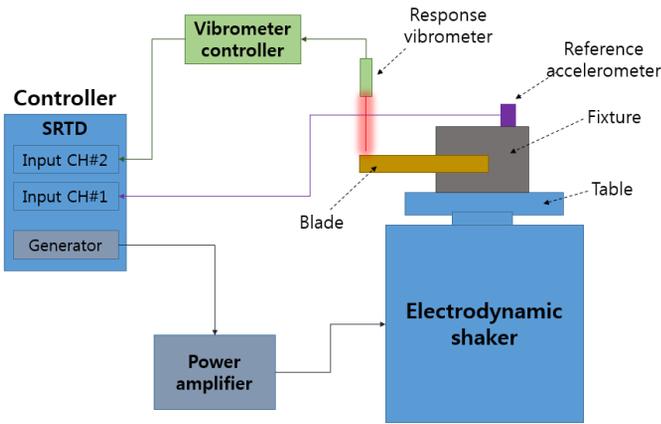


Fig. 1. Resonant HCF testing set-up.

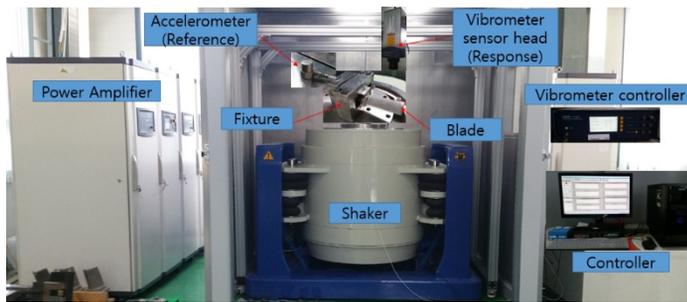


Fig. 2. Photograph of test setup.

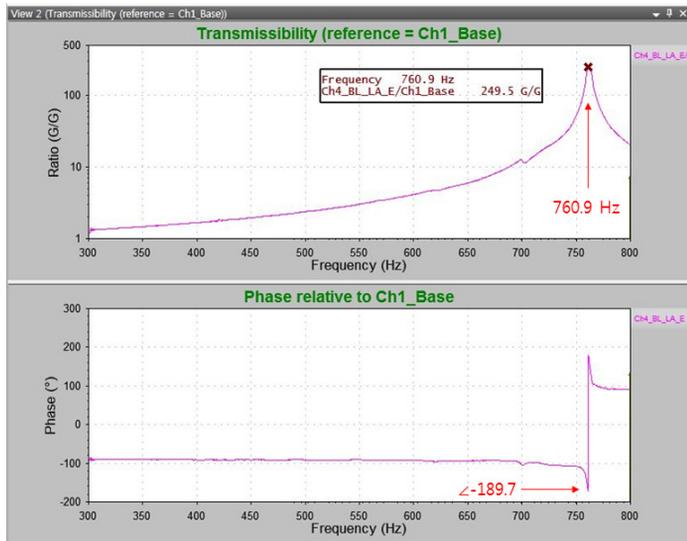


Fig. 3. Sine sweep test result.

험편의 인장, 압축에 의한 피로시험법이나 회전 피로시험방법과 같이 소재의 피로수명을 측정하기 위한 다양한 시험 중 하나이며, 시간적, 경제적으로 유리한 장점이 있다 [2].

동익의 고유진동수는 시험 중에 지그 자체의 느슨해짐, 온도 변화 등에 의해 변동할 수 있는데, 그 변화량이 매우 적다고 하더라도, 낮은 감쇠로 인해 응답의 크기는 초기 설정된 진동값(변위, 속도 또는 가속도)을 크게 벗어날 수 있다는 점에 유의해야 하며, 한편 가진기 제어에 사용되는 다수의 최신 상용프로그램은 위상 제어를 통한 공진점 추적 가진 (sine resonance track-and-

dwel) 기능을 갖추어 있어, 변동하는 고유진동수를 연속적으로 추적하여 공진점에서 정확히 가진할 뿐만 아니라, 진동 응답을 직접 제어함으로써 일정한 진동 시험 환경을 만들 수 있는 등 피로시험을 안정적으로 용이하게 수행할 수 있다.

Fig. 1은 가스터빈 동익에 대한 공진형 가진시험의 구성을 보여준다. 시험 동익은 루트부가 고정지그를 통해 가진기 테이블에 단단히 고정된다. 기준 가속도계는 가진기 테이블 또는 고정 지그에 부착되어 가진주파수와 입력 하중의 제어에 사용되며, 이에 따른 동익 끝단 (tip)에서의 응답은 일반적으로 비접촉식 진동계로 계측된다.

B. 고유진동수 측정

공진형 가진시험을 수행하기 위해 필요한 동익의 고유진동수를 정현파와 스위프(sine sweep) 기법으로 측정하였다. Fig. 2는 고유진동수 측정과 가진시험을 위한 준비된 설비 사진으로, 본 가진기는 정현파 가진 최대하중은 160 kN, 최대가속도 100 g이며, 주파수 범위는 5~2000 Hz이다.

압전식 가속도계를 고정지그에 부착하여 가진 신호의 주파수와 크기를 제어하고, 비접촉식 레이저 변위계가 사용하여 동익 끝단에서의 공진 응답을 계측하였다. 동익 끝단의 진동응답이 중력가속도의 수백 배에 이르고, 부가질량으로 인한 특성 변화를 피하기 위해 비접촉식 센서를 사용할 필요가 있다.

동익의 루트부는 진동가진기의 상부 진동판에 지그를 사용해 단단히 고정되어 수평으로 설치된다. 실제 터빈 디스크에 장착되어 고정되는 방식과 동일하게 동익 플랫폼의 양측이 접촉하도록 고정하였다.

Fig. 3에 나타난 바와 같이 국산화 동익의 1차 굽힘 모드에 해당하는 고유진동수는 760 Hz 근방이며, 개별 블레이드의 제작 오차 및 동익 루트의 고정상태의 변화에 따라 약간의 차이가 존재한다. 공진형 가진시험에서는 시험 대상 동익에 대해서 시험 전 매번 새로 측정된 고유진동수로 가진한다. 여기서 측정된 고유진동수와 위상은 공진점 추적 가진 기능(SRTD)의 초기 설정값으로 이용된다.

C. 진동 및 응력 계측

동익에 대한 신뢰성 시험은 설정된 응력 조건에서 수행하게 되는데, 시험 중에 동익에 부과하는 응력은 공진변위를 통해 간접적으로 제어하는 것이 용이하다. 공진변위의 변화에 따른 발생 응력을 측정하여 두 변수간의 선형 관계식을 세우고, 이로부터 시험 중에는 공진변위를 제어함으로써 목표하는 응력을 시험 동익에 정확히 부과할 수 있다.

동하중에서의 변형율을 측정하기 위해 Fig. 4와 같이 스트레인게이지를 사용하였다. 세 개의 스트레인게이지는 흡입면(suction side) 에어포일과 플랫폼 사이의 필렛부분(①), 에어포일 중간부분(②), 에어포일 전단(leading edge) 중간부분(③)에 동익의 길이방향으로 부착되었다. Fig. 4의 하단 사진은 비접촉식 변위계의 레이저가 지시

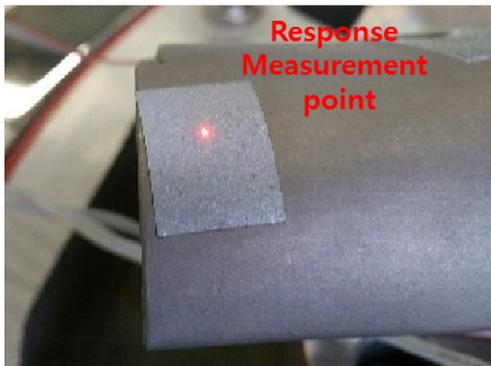
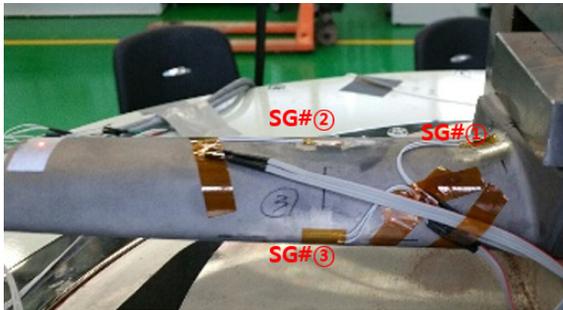
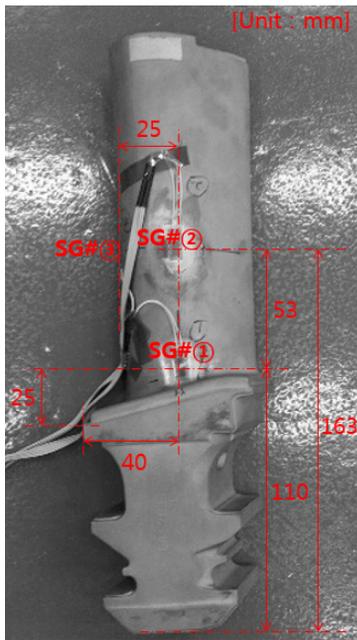


Fig. 4. Strain gage attachment.

하는 응답 측정 지점을 보여주고 있다.

Fig. 5의 그래프는 레이저 변위계로 측정한 공진 변위를 증가시키면서 측정한 변형율(strain)을 나타낸 것으로, 두 변수간의 선형 관계를 잘 보여주고 있다.

동익의 응력분포를 계산하기 위하여 유한요소해석을 수행하였다. 진동 분석을 포함하여 동익의 기계적 특성을 평가하기 위해서는 시험과 전산해석을 상호 보완적으로 활용하는 것이 효과적이며, 시험 결과를 기초로 해석 모델을 개선하는 것이 필요하다 [3]. 유한요소해석은 Fig. 6과 같이 경계조건을 시험 조건과 동일하게 플랫폼 양면을 구속하였으며, 사면체요소를 이용하였고, 실

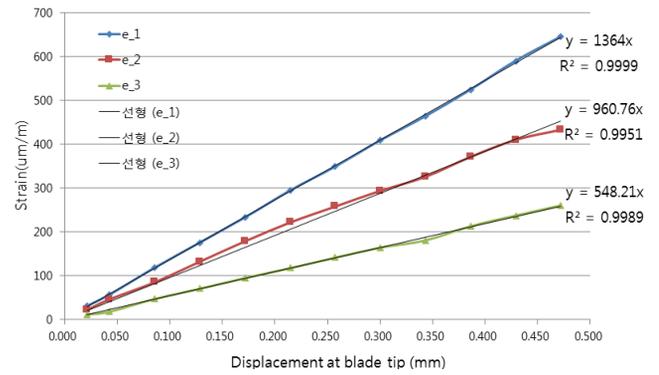
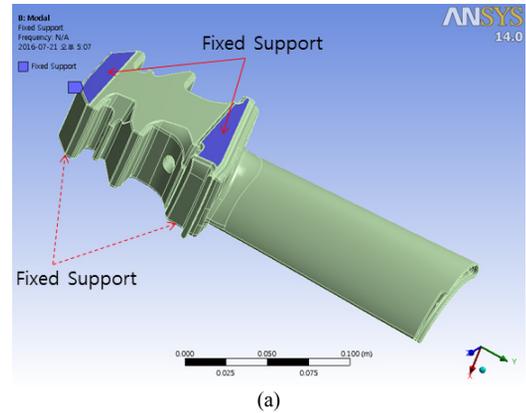
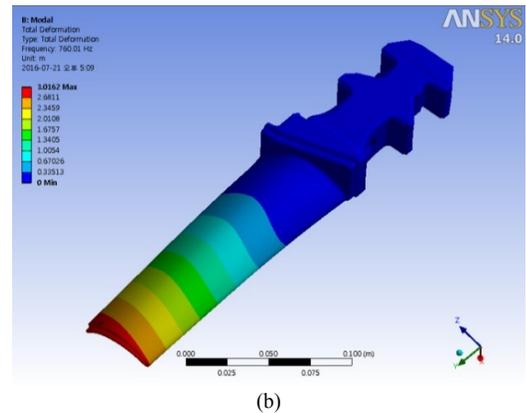


Fig. 5. Relationship between tip displacement and strain.



(a)



(b)

Fig. 6. FE model and natural mode shape. (a) Fixed support B.C. (b) 1st bending mode.

제품의 평균 무게와 동일하도록 밀도를 조정하였다. 1차 굽힘모드의 고유진동수가 측정값과 동일하도록 탄성계수를 설정하였다.

상기와 같이 완성된 유한요소모델을 이용하여 응력 해석을 수행하였다. 하중 조건으로 레이저 변위계가 지시하는 동익 끝단의 진동응답 측정점에 해당하는 유한요소모델의 절점에 강제 변위 0.429 mm를 부과하였다.

Fig. 7에 나타낸 바와 같이, 최대 응력은 에어포일 흡입면에 설치된 스트레인게이지 부착점(1)에서 동익 루트부 방향으로 필렛부에서 118 MPa (Von-Mises equivalent stress)로 계산되었다.

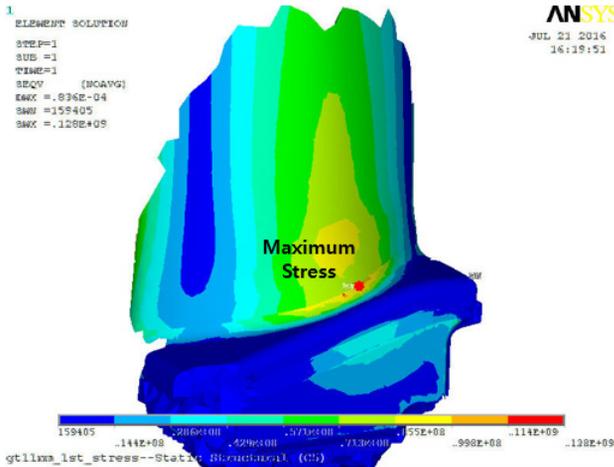


Fig. 7. Stress contour.

III. 무고장시험을 통한 신뢰성 입증

A. 무고장 시험 계획

신뢰도(Reliability)란 어떤 재료, 부품, 제품, 시스템 등이 규정된 조건에서 정해진 기간 동안 의도한 기능을 고장 없이 만족스럽게 수행할 수 있는 확률(Probability)을 말한다. 신뢰성 시험 종류의 하나인 수명시험은 제품의 사용수명을 정량적인 확률로 평가하는 시험으로, 제품이 고장 나는 시점까지 수행해야하기 때문에 비교적 오랜 시간이 걸릴 수 밖에 없다. 무고장 시험방법은 수명시험 시간을 단축할 수 있는 방안으로 대상 제품에 설정된 일정시간까지 시험하여 고장이 발생하지 않으면 제품이 요구되는 신뢰성을 만족하는 것으로 판정하는 시험법이며, 다음의 Eq. 1~3과 같이 무고장시험에 필요한 변수를 계산할 수 있다 [4].

신뢰성 시험 중에 기대하지 않은 고장이 발생할 수 있는데, 일반적으로 이항분포(Binomial distribution)가 신뢰수준(C), 신뢰도(R), 시료개수(n), 관측된 고장수(x) 사이의 관계를 아래와 같이 설명한다.

$$1 - CL = \sum_{i=1}^x \binom{n}{i} (1 - R)^i R^{n-i} \quad (1)$$

위 식에서 $x=0$ 이면 하나의 고장도 허용하지 않는 무고장시험에 해당한다.

일반적으로 기계류 부품의 고장이 와이블 분포를 따르는 것을 고려하여, 동익의 고장분포를 형상모수 β 를 갖는 와이블 분포로 가정하면 신뢰도는 다음과 같다. 여기서 η 는 척도모수이다.

$$R = e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad (2)$$

신뢰성 입증을 위한 무고장시험시간(t_n)은 보증수명(B_{100p}), 신뢰수준, 시료개수, 형상모수로부터 다음과 같이 계산된다.

Reliability parameter	Set point
Target life(B_{100p})	2×10^7 cycles
Reliability(R)	90%
Confidence level(C)	90%
Number of samples(n)	5
Number of allowable failure(x)	1
Weibull shape parameter(β)	2.0

Vibration parameter	Set point
Excitation frequency	760±10 Hz
Mode	1st bending
Blade tip displacement	0.508 mm
Test length	5.77×10^7 cycles

$$t_n = B_{100p} \left[\frac{\ln(1 - C)}{n \times \ln(1 - p)} \right]^{\frac{1}{\beta}} \quad (3)$$

여기서, p 는 불신뢰도(1-R)이다.

터빈 동익의 고주기피로 수명에 대해서, 부과 하중의 크기, 시료 개수, 보증수명 등의 신뢰성 시험 기준은 공개된 표준이나 규약 등에서 명확히 기술되어 있지 않고, 터빈 제작사에서 내부 시험 및 평가 기준을 대외적으로 공개하지는 않기 때문에, 자체적인 시험 평가 기준을 Table 1과 같이 수립하였다. 동익의 수명이 통상 기계류 부품과 같이 와이블 분포를 따르고, 형상모수 β 는 동일 제품이나 유사 품목의 값과 유사하다는 가정하에, 본 시험에서는 일반적으로 알려진 터빈과 압축기의 형상모수를 참조하여 형상모수를 2.0으로 적용하였다 [5].

동익의 연구 개발 단계이기 때문에 제작 수량이 한정되어 많은 수의 시료를 사용할 수 없는 상황으로, 총 시료개수가 5개, 이 중에서 1개만의 고장을 허용하는 조건으로, 90% 신뢰수준에서의 목표 수명을 90% 신뢰도로 보증할 수 있는지를 시험하였다. 목표 수명과 시험 하중 조건은 국내 동익 제작사에서 고주기피로 강도 요구 조건으로 알려진 140 MPa에서의 2×10^7 사이클을 기준으로 적용하였다.

상기 식에 의해 계산된 무고장시험 시간은 5.77×10^7 사이클로 760 Hz로 가진시 약 21.1시간에 해당한다.

B. 공진형 가진시험 및 결과

공진형 가진시험은 시험 기간 동안 고유진동수가 변동하더라도 공진이 일어나도록 고유진동수를 추적하여 가진하여야 한다. 고유진동수는 시험 직후 약간 떨어지는 경향을 보이고, 이후부터는 그 변화가 크지 않다. 시험에 사용된 모든 동익은 1차 굽힘 고유진동수가 760 Hz 근방이고, 가진주파수는 공진 시험 전에 정현파 스위프에 의해 찾은 고유진동수와 동일하게 설정된다. 일정한 하중을 동익에 부과하기 위해 동익 끝단을 제어하는데, 760 Hz로 가진 시에 508 μ m이다. 이때 변위는 가진주파수에 따라 계산되어 설정되어야 한다.

총 5개의 동익 중 4개는 무고장시험 시간 동안 이상이 발생하지 않았으며, 1개의 시료가 시험 중 Fig. 9와

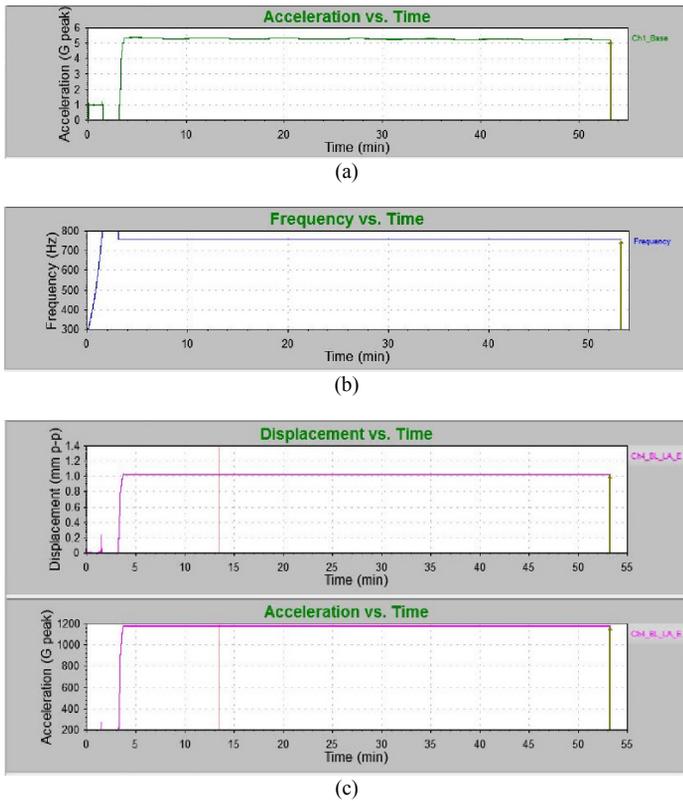


Fig. 8. Sine resonance track and dwell test results. (a) Excitation acceleration variation. (b) Excitation frequency variation. (c) Response at blade tip.

같이 에어포일 흡입면에서 균열이 발생하였다. 진동가진기는 균열 발생 시점에서 지속적인 공진과 공진변위를 유지하기 위해 입력전압이 매우 높아지고, 응답변위가 매우 불규칙하게 반응하며, 또한 고유진동수가 급격히 떨어지는 것으로부터 동익에 이상이 발생하였다는 것을 인지할 수 있다. 동익에 균열이 시작하는 것으로 판단되는 이상 신호가 발생한 시점은 시험 후 약 17시간이 지난 시점이었다.

IV. 결론

역설계에 기반한 국산화를 통해 제작된 1100°C급 가스터빈 동익의 고주기피로손상에 대한 내구성을 검증하기 위해 무고장시험법에 의한 신뢰도 시험을 설계하였다. 전자식 진동 가진기를 활용한 공진형 가진시험을 수행하여, 공진에 의한 동하중을 부과하여 동익에 피로손상을 누적시켰다. 동익 개발품 1개의 고장을 허용하는 조건으로, 총 5개의 시료를 대상으로 시험을 수행하여, 개발품 동익이 2×10^7 사이클의 목표 수명을 90% 신뢰도

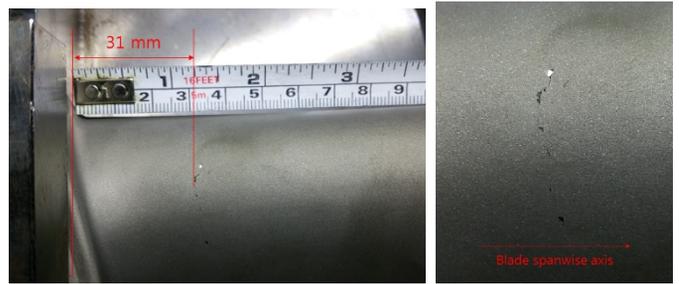


Fig. 9. Shape and location of the crack.

로 보증할 수 있다는 것을 90% 신뢰수준에서 확인하였다.

가스터빈 동익, 정익 등의 고온부품에 대한 국산화 개발 요구는 지속적으로 증가하고 있지만, 개발품에 대한 신뢰성 입증의 어려움으로 최종사용자의 활용이 극히 제한되어 있다. 향후 국산화 개발품의 실제적인 활용을 제고하기 위해서는 동익에 대한 신뢰성 시험 방법, 기준에 대한 객관적인 자료가 마련되어야 하고, 아울러 충분한 시료에 대해 체계적인 시험을 지속적으로 수행하여 제품의 신뢰도를 증대시키는 것이 필요하다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 산업통상자원부의 재원으로 전력기반센터(ETEP)의 지원을 받아 수행한 것임. (과제번호 : I-2013-003-T0)

This research was supported by Electric Power Public Tasks, Evaluation & Planning Center through Ministry of Trade, Industry and Energy of Korea. (grant number : I-2013-003-T0)

REFERENCES

- [1] J. S. Rao, "Turbomachine Blade Vibration", New Age International (P) Limited. 1997.
- [2] D. Y. Lee, B. S. Kim, Y. H. Kim, C. H. Cho and J. R. Goo, "Resonant HCF Testing for Determination of Fatigue Strength", Proceedings of the KSNV Annual spring conference, 2014, pp240-241.
- [3] D. Y. Lee, Y. C. Bae, H. S. Kim, Y. R. Lee, and D. Y. Kim, "Vibration Analysis for the L-1 Stage Bladed-disk of a LP Steam Turbine", Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 20, No. 1, 2010, pp. 29-35.
- [4] A. Gerokostopoulos, H. Guo, and E. Pohl, "Determining the Right Sample Size for Your Test: Theory and Application", 2015 Annual Reliability and Maintainability Symposium, 2015, Tutorial Notes.
- [5] Barringer & Associates, "Weibull Database", <http://www.barringer1.com>, 2015.