

# 가스터빈 블레이드 고온부품 내구성능 시험절차 표준(안) 개발

---

2023. 09. 07(목)

# 목 차

**1. 수행 개요**

**2. 시험절차 표준(안)**

## ▣ 수행 개요

- 사업명 : F(1,350 °C)급 이상 가스터빈 블레이드 시제품 성능검증 기술 개발
- 총 사업기간 : 2019.10.01 ~ 2024.09.30 (협회 사업기간 : ~ 2023.12.31)
- 협회 사업목표 : 가스터빈 블레이드 성능검증 절차 표준화

## ▣ 수행 실적

- 실무위원회 구성 및 운영
  - 시험절차 표준개발 실무위원회
  - 시험기관 지정/수립 방안 검토 실무위원회
- 가스터빈 블레이드 시험절차 표준(안) 개발
- 가스터빈 블레이드 시험기관 지정/수립 방안 작성

# 1. 수행 개요 : 2023년도 일정



공정명	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월
실무위원회 운영	→			→			→					
KEPIC 위원회 운영 및 공청회 개최							→ (가스 터빈)		→ (공청회)		→ (화력발전기계)	
가스터빈 블레이드 시험절차 표준 KEPIC 개발	→											
가스터빈 블레이드 성능검증 절차 표준화	→											
가스터빈 블레이드 시험기관 지정/ 수립 방안 도출	→											

## 최종(안) 도출을 위한 업무 프로세스

1. 실무위원회 표준(안) 도출
2. KEPIC 가스터빈 분과위원회 표준(안) 기술심의 및 개발작업
3. 산업계 의견수렴(KEPIC-Week 공청회, KEPIC 홈페이지)
3. KEPIC 화력발전기계 전문위원회 최종(안) 심의
4. 2023년 표준 신규 발행

# 2. 시험절차 표준(안)



## 1. 목적 및 적용범위

### 1.1 목적

- ✓ 복합화력 터빈부 고온부품의 내구성능 시험의 기본 원칙 제시 (재료시험, 실기장착시험의 대안)
- ✓ 수명이나 운전조건이 규정된 고온부품이 파손없이 안전하게 기능 수행함을 입증하기 위한 대안적 방법 제공
- ✓ 충분한 여유를 가져도 규정된 운전조건 범위를 초과해서 적합성을 보증하는 것은 아님

### 1.2 적용범위

- ✓ 적용 대상 : 터빈부 고온 회전익, 그와 연계된 고온부품 (GT 제작사, 모델에 따른 적용제한 없음)
- ✓ 시제품·신품·재생품, 부품의 개조, 신규설계·설계변경 후 내구성능 확인
- ✓ 이 표준의 검증방법 외에 다른 방법을 통한 시험/검증을 배제하지 않음.
- ✓ (예측 가능함 범위의) 정상운전, DSS 이외의 변칙적 운전조건에 대한 내구성능요건 제외

## 2. 시험절차 표준(안)

### 2. 용어의 정의

**가스터빈** : 고온 고압 상태인 연소가스의 열에너지를 이용하여 터빈을 가동시키는 회전형 내연기관으로 압축기, 연소기, 터빈으로 구성

**터빈부 고온부품** : 터빈의 케이싱 내부로 유입된 작동유체인 연소가스의 열에너지를 기계적 에너지(회전력)로 변환시키는 부품으로써 연소가스 유동을 특정 각도로 유도하는 고정익(vane, nozzle)과 연소가스에 의해 터빈 로터를 회전시키는 회전익(blade, bucket), 그리고 공기와 연료가 혼합되어 연소하는 연소실로 구성

**경년열화** : 시간의 경과 또는 사용에 따라 구조물, 기기 등의 손상을 가져오는 물리적 또는 화학적 과정

**고속회전시험기** : 원통, 원판 등의 형태를 갖는 회전체를 고속으로 회전시켜 시편에 원심 응력을 인가하기 위한 시험 장비이다. 회전체를 전동기나 공기터빈으로 구동하며, 풍손을 피하고 구동 전력의 한계를 극복하기 위해 진공으로 유지되는 폐쇄된 공간에서 설치되어 회전된다. 원심응력과 함께 고온 환경을 함께 인가하기 위한 전열 히터가 설치되기도 한다

**고주기피로** : 재질에 항복점 이하의 반복적인 하중(Cycle load)이 인가될 때 일어나는 손상을 뜻한다. 보통  $10^5$  회 이상의 반복 변동하중을 받을 때 발생하며 소성 변형은 수반하지 않는다

**수명** : 수리 가능 아이템이 고장날 때까지의 시간 또는 수리가능아이템이 수리할 수 없는 고장이 발생할 때까지의 기간

**설계수명(design life)** : 정상 운전조건에서 만족할 만한 성능수행이 예상되는 기간(실시간, 운전주기 횟수 또는 성능수행주기 등으로 규정됨)

**성능** : 어떤 제품, 부품 또는 시스템이 주어진 조건에서 고장없이 요구되는 기간 동안 요구되는 품질 및 기능을 유지하는 것

**열피로(Thermo fatigue, TF)** : 주기적인 온도 및 하중(기계)부하가 동시에 인가되어 재료의 변형을 일으키는 현상

## 2. 시험절차 표준(안)

### 2. 용어의 정의

**진동시험기** : 진동 시험을 위하여 필요한 진동을 만들기 위한 장치로써 Vibration exciter 또는 Shaker 라고도 한다. 전자식과 유압식이 있으며 전자식은 스피커와 같은 원리로 작동되며 다양한 형태의 광대역 진동을 일으킬 수 있으나 큰 힘을 요구하는 경우에는 유압식이 쓰인다

**파괴시험** : 시편의 파괴강도를 측정하기 위한 시험으로 초기 제품의 내구도를 평가하거나 한계 내구 사양을 측정하기 위해 수행한다

**피로시험** : 재료의 인장강도 또는 탄성한도 이하의 외력이 장시간 주기적으로 가해지면 재료가 파괴되는 특성을 파악하기 위한 시험

**운전조건** : 정상운전요건, 운전요건에 있어서 예상되는 극한 상황 및 발전소의 적절한 가상적 조건의 결과로서 예상되는 환경, 부하, 동력 및 신호 조건

**고유진동수(natural frequency)** : 어떤 물체나 역학구조물이 외력의 영향없이 자유롭게 진동할 때의 진동수이며, 고유진동수는 물체의 모양과 탄성 등의 고유한 성질에 영향을 받는다. 모든 물체는 각각 고유한 고유진동수를 가지고 있으며, 물체의 강성과 질량의 비례관계에 따라 주파수가 결정된다

**목표 고유진동수(Target natural frequency)** : 외부 가진원과의 공진 현상을 회피하기 위해 튜닝되어 있는 어떤 물체의 고유진동수의 목표값

**추적성(Traceability)** : 특정 대상이 갖고 있는 이력, 적용 현황 또는 적용 위치를 추적하기 위한 능력. 일반적으로 추적성은 소재 및 부품의 출처, 프로세스 이력, 인도 후 제품의 분포 및 위치와 관련된다

## 2. 시험절차 표준(안)



### 3. 적용원칙

#### 3.1 일반사항

- ✓ 검증수명이나 검증 조건이 설정된 기기가 요구하는 기능을 수행할 수 있다는 것을 합리적인 방법으로 입증

#### 3.2 검증 수명 및 검증 조건

- ✓ 손상 메커니즘의 확인, 검증수명의 설정
- ✓ 가스터빈의 검증수명 결정: 기기 운전 전/동안에 그 기기가 가지고 있는 수행 능력의 저하 고려

#### 3.3 검증 방법

- ✓ 일반적으로 시험, 해석, 운전경험, 상사성 분석 혹은 이들의 조합 등의 방법으로 수행
- ✓ 이 표준에서는 가스터빈 회전익과 기타 교체부품을 대상으로 실기 장착시험의 대안으로 수행하는 성능검증 시험에 대한 권장 시험법을 제시

#### 3.4 성능검증 프로그램 일반사항 : 사양, 허용기준, 적용될 설계/사용조건, 검증계획, 검증프로세스, 문서화

#### 3.5 시험 전 준비 사항 및 3.6 시험 전 합의사항

- ✓ 시험 준비, 시험 순서, 시작 및 중단 절차, 시험 참여자 선정 및 자격, 시험품 관리와 폐기, 예비시험 여부, 시험조건 변경, 시험 재연성 확보 등



## 2. 시험절차 표준(안)

### 4. 내구성능 검증 방안

#### 4.1 일반사항

##### (1) 시험품 및 관련정보의 제공

- ✓ 시험품의 공급과 관련된 모든 사항은 공급자 책임사항.
  - ✓ 제공 시험품이 실제 공급되는 것, 또는 시험 목적에 의해 제공되는 것과 동일하다는 것을 입증, 보증
  - ✓ (필요시, 설계문서, 재료시험성적서 등의 확인)
- \* 일반적인 재료 정보는 EPRI 구매지침 등에서 확인. 고온 인장강도는 EPRI 구매지침 값의 최소값 이상 권장

##### (2) 시험품의 관리

- ✓ 별도의 합의가 없으면, 시험 동안 시험품의 관리는 시험기관의 책임.
- ✓ 시험품 변경시 이해관계자 합의 필요. 시험 완료 후 시험품은 식별, 관리, 보관, 폐기 절차 수립

#### 4.2 샘플링검사와 시험품의 선정

- ✓ 시험품을 선정하기 위한 샘플링 방법과 절차는 KS Q ISO 2859-1 참고 가능
- ✓ 수량을 포함하여 시험품 선정은 협의에 따름
- ✓ 선정된 시험품은 식별/관리, 추적성 확보 필요
- ✓ 시험품을 인수한 후 검증시험을 수행하면서 검사자는 항목별로 검사 성적서를 작성하고 보관

### 4. 내구성능 검증 방안

#### 4.3 내구성능 평가방안

##### (1) 시험조건의 설정

- ✓ 내구성능을 시험하기 위해서는 실제 운전 및 환경적 부하의 영향이 모사될 수 있도록 시험조건을 구성.
- ✓ 시험의 목적과 응용에 따라 시험의 구성과 순서의 변경 가능. 시험 순서의 선택에 대한 원칙은 KS C IEC 60068-1를 참조할 수 있음
- ✓ 시험조건은 예상되는 환경에 의한 누적적인 영향과 비정상 상황시 발생할 수 있는 이상 상태를 고려할 수 있도록 구성하여야 함
- ✓ 시험방법은 시험의 목적에 따라, 관계자들의 합의에 의해 수정, 보류, 면제 가능
- ✓ 수행된 시험절차와 그 결과는 정확히 기록되어야 하며, 필요시 쉽게 확인할 수 있는 형태로 보관

## 2. 시험절차 표준(안)

### 4. 내구성능 검증 방안

#### (2) 시험의 구성과 순서 : (a) 일련시험 방식의 예

시험품의 선정	재질 검사, 치수검사, 고유진동수 검사, 비파괴검사, 냉각공기 유량검사, 내산화 및 열차폐코팅 검사를 완료한 제품 중에서 선정
과속도 회전시험	시험 대상 회전익의 비파괴검사 기록 확인후, 회전익을 고속회전시험기에 장착하여 정격속도 120%까지 승속하여 강도 확인
고온 저주기피로시험	고속 회전시험 완료후 동일한 방식으로 회전익을 장착하고, 고온상태에서 정격속도까지 승속하였다가 감속하는 시험을 반복적으로 실시
열피로시험	고온 가속 시험이 완료된 회전익을 열피로 시험기에 장착하여 열피로 시험 실시
진동 가진시험 (고주기피로)	열피로시험 완료후 비파괴검사를 실시하고 이상없음이 확인되면, 회전익의 고유진동수로 가진하여 고주기피로 시험 실시

## 2. 시험절차 표준(안)

### 4. 내구성능 검증 방안

#### (2) 시험의 구성과 순서 : (b) 병렬시험 방식의 예

##### 시험품의 선정

재질 검사, 치수검사, 비파괴검사, 냉각공기 유량검사, 내산화 및 열차폐코팅 시험을 완료한 제품 중에서 선정

##### 과속도 회전시험

시험 대상 회전익의 비파괴검사 기록 확인후, 회전익을 고속회전시험기에 장착하여 정격속도 120%까지 승속하여 강도 확인

##### 고온 저주기피로시험

고속 회전시험 완료후 동일한 방식으로 회전익을 장착하고, 고온에서 정격속도까지 승속하였다가 감속하는 시험을 반복적으로 실시

##### 열피로시험

과속도시험이 완료된 회전익을 열피로 시험기에 장착하여 열피로 시험 실시

##### 진동가진시험

Airfoil부에 일정 하중을 반복적으로 가하여 건전성을 평가하는 고주기피로시험

##### 비파괴검사

각 시험 완료후 비파괴검사를 실시하고 이상 유무 판정

### 5. 내구성능 검증시험 절차

#### 5.1 고유진동수 측정

(1) 목적 : 시험 대상 회전익과 목표 고유진동수를 측정 비교하여 고유의 진동특성 일치여부 확인, 진동가진시험 수행전 실시

(1) 샘플링 : 선정된 회전익의 고유진동수 측정. 제공된 목표 고유진동수와 비교

#### (2) 고유진동수 측정 방법

- 가진시험방법 : sine sweep, random, burst 등
- 공진에 의한 영향이 없도록 최대한 작은 입력신호로 가진
- 실제 장착방식과 동일하게 장착
- 주요 시험 수행 전후 공진주파수 변화 측정 권장
- 공진주파수 탐색 범위 : 3<sup>rd</sup> mode를 확인하기 충분한 범위 또는 5 Hz ~ 2,000 Hz 이상 권장

#### (4) 허용 조건

- 고유진동수 범위는 제작사 기준을 따름
- 명확한 기준이 없으면 EPRI의 Guidelines 참조 : 1, 2차 공진주파수가 목표값의  $\pm 3\%$  이내

### 5. 내구성능 검증시험 절차

#### 5.2 과속도 회전시험

##### (1) 개요

- 정격 회전속도 이상으로 일정시간 유지하다 정지하여, 과속도 원심력에 대한 강도를 확인
- 루트 부위를 냉각시키는 수단이 없는 경우 상온에서 실시
- RPM 120% 초과는 권장치 않음, 최고 속도 유지 시간은 5분 초과 금지

##### (2) 시험설비의 요건

- 회전익 파손시 관통파괴 방지 대책
- 회전체 파손시 금속 먼지나 유분에 의한 연무의 폭발위험을 감소를 위한 진공유지

##### (3) 권장 시험절차

- 연속 시험 : 속도 상승률이 안정적이어야 하며, 속도가 초과하거나 Swing하지 않도록 제어
- 단계적 시험 : 승속율, 감속율 등을 조정하여 단계적으로 120%로 상승
- 설치 반경이 실제와 다를 경우에는 그 차이에 비례하여 시험 회전속도를 변경

##### (4) 시험 후 평가

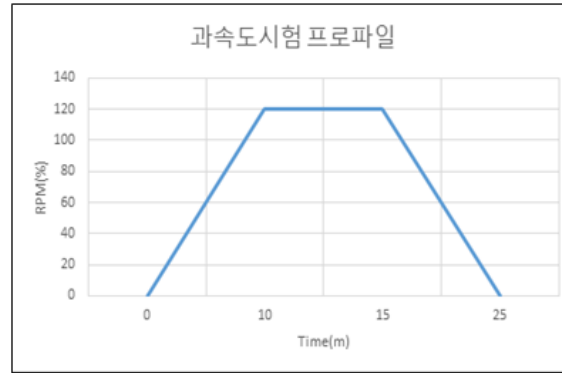
- 비파괴검사를 통해 내외부 상태 확인. 변형이나 결함은 허용되지 않음

# 2. 시험절차 표준(안)



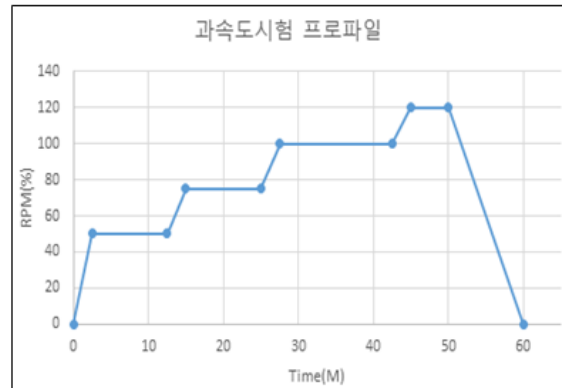
## 5. 내구성능 검증시험 절차

단계	누적시간(분)	RPM(%)	특기사항
1	무관	0	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 챔버 진공유지</li> <li>· 단계별 운전상태 확인</li> </ul>
2	5분 유지	120	
3	무관	0	



연속적 과속도 시험 조건의 예

단계	누적시간(분)	RPM(%)	특기사항
1	2.5	50	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 챔버 진공유지</li> <li>· 단계별 운전상태 확인</li> </ul>
	12.5	50	
2	15	75	
	25	75	
3	27.5	100	
	42.5	100	
4	45	120	
	50	120	



단계적 과속도 시험 조건의 예

### 5. 내구성능 검증시험 절차

#### 5.3 고온 저주기피로시험

##### (1) 개요

- 기동-운전-정지 형태를 모사하여 교번 응력과 열응력에 의한 손상 여부를 평가
- 최소 RPM에서 정격 RPM까지 규정 승속율 범위에 따라 승속 및 운전, 감속후 재기동을 반복

##### (2) 권장 시험절차

- 무고장시험법을 활용하는 방식만 기술
- 고온 고속회전 시험설비를 사용하여 고온고속회전 시험을 하는 경우에는 고속회전시험절차서를 참조하여 안전성 확보 후 실험
- 가스터빈 기동 모사할 때는 최소 RPM(25%)에서 정격(100%)까지 승속
- 가스터빈 정지 모사할 때는 정격(100%)에서 최소 RPM(25%)까지 감속

##### (3) 시험 후 평가

- 육안 및 비파괴검사를 통해 시험전, 시험중, 시험후에 내외부 균열이나 변형 발생유무 확인

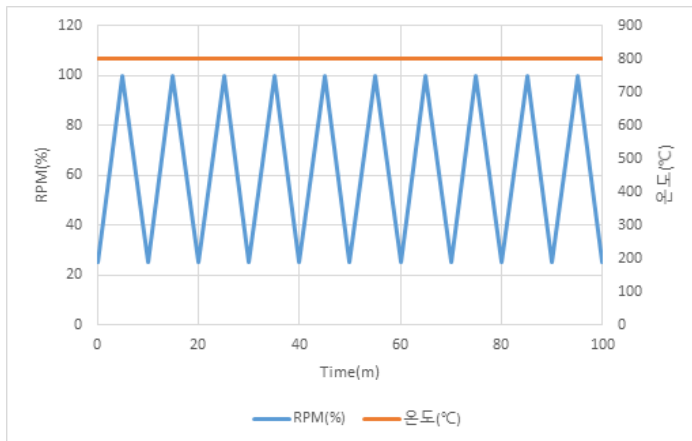


## 2. 시험절차 표준(안)

### 5. 내구성능 검증시험 절차

#### 5.3 고온 저주기피로시험

[고온저주기피로시험 예시]



[무고장시험법에 따른 시험 횟수 산출 예시]

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

산출식은 위와 같고, 제작사에서 제시한 부품에 대한 보증수명이 800ES(등가기동정지횟수) 라면, 목표수명  $B_p$ 는 800주기(cycle)s가 된다. 시험대상 블레이드가 4개이면  $n$ 은 4가 되고, 형상모수는 가스터빈 회전익의 경우 2, 신뢰수준 90%, 목표 신뢰도 90%를 가정한 무고장시험 시간은 아래와 같다.

$$t_n = B_p \left[ \frac{\ln(1-C)}{n \times \ln(1-p)} \right]^{\frac{1}{\beta}} = 800 \left[ \frac{\ln(1-0.9)}{4 \times \ln(0.9)} \right]^{\frac{1}{2}} = 1,870 \text{ cycles}$$

### 5. 내구성능 검증시험 절차

#### 5.4 열피로 시험

##### (1) 개요

- TF 환경을 모사하여, 온도 변화에 따른 열응력을 반복적으로 가해 열피로 내구성을 평가

##### (2) 시험설비의 요건

- 운전환경과 유사한 고온/고압 가스를 연속적으로 공급

##### (3) 권장 시험절차

- 열 피로 성능평가를 위한 열 부하 사이클 구성은 승온, 승온 후 유지, 냉각, 냉각 후 유지로 구성
- 각 단계의 설정 온도와 시간에 맞게 연료 공급량, 블레이드 냉각 공기량, 주 유동 등의 변수를 설정하여 시험을 진행
- 가속열화시험으로 진행할 수 있음

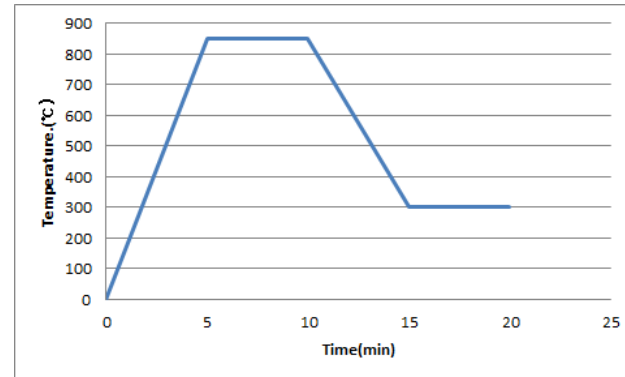
##### (4) 시험 후 평가

- 열차폐 코팅을 모두 제거하여 비파괴검사 수행
- 표면, 냉각 유로, 냉각 홀의 열피로 균열 발생여부 확인

## 5. 내구성능 검증시험 절차

### 5.4 열피로 시험

Step	Process	Time (min)
1	Ramp up to 850°C	5
2	Dwell at 850°C	5
3	Ramp down to 300°C	5
4	Dwell at 300°C	5



열피로 시험을 위한 열부하 사이클 구성의 예

### 5. 내구성능 검증시험 절차

#### 5.5 진동가진 시험

##### (1) 개요

- 인위적인 진동에 의한 반복하중을 인가하여 고주기피로 특성을 평가
- 요구되는 주파수와 가진력으로 목표수명 동안의 주기로 진동가진 수행하여 공진시 손상여부 확인

##### (2) 시험설비의 요건

- 시험품+지그 조건에서 가진기가 낼 수 있는 최대 성능을 주파수별로 확인
- 고주기피로에 의한 균열 발생 시점을 알아낼 수 있는 장치 구비

##### (3) 시험방법

- 피로한도 측정시험은 측정된 회전익의 고유진동수를 시험 목표에 맞는 응력의 크기로 가진하여 피로한도를 평가할 수 있는 데이터가 얻어질 때까지 반복적으로 시행
- 목표수명 :  $2 \times 10^7$  주기 이상 권장

##### (4) 시험결과 분석

- 내외면에 비파괴검사 수행하여 균열 발생 위치와 크기, 양상 분석

# 표준(안) 공개 일정 : 2023.9.11~10.10



## 전기협회 KEPIC 홈페이지 [열람 → 제·개정 초안 → 의견제출하기]

HOME BOOKMARK KEA 대한전기협회 KOREA ELECTRIC ASSOCIATION LOGOUT MYP



소개 인증 교육 구입 **열람** 질의응답 위원회

**열람**

- e-Book
  - 유료열람
  - 공개열람
- 적용사례/해석서/정오표
  - 적용사례
  - 해석서
  - 정오표
- 제·개정 초안**



소개 인증 교육 구입 **열람** 질의응답 위원회 정보센터 행사

### 예시

GGN-2(배연탈질설비 성능진단 권장지침) 2023년 추록 초안 공개

🕒 작성일 : 2023-07-26

분류	GGN-2	발행(예정)년도	2023	공개기간	2023-07-26 ~ 2023-08-23
담당자명	김상우	E-mail	ksw@kea.kr	의견제출	<b>의견제출하기 →</b>

📄 KEPIC-GGN-2 개정비교표(산업계 검토용).pdf [168 kb]

**Thank You!**