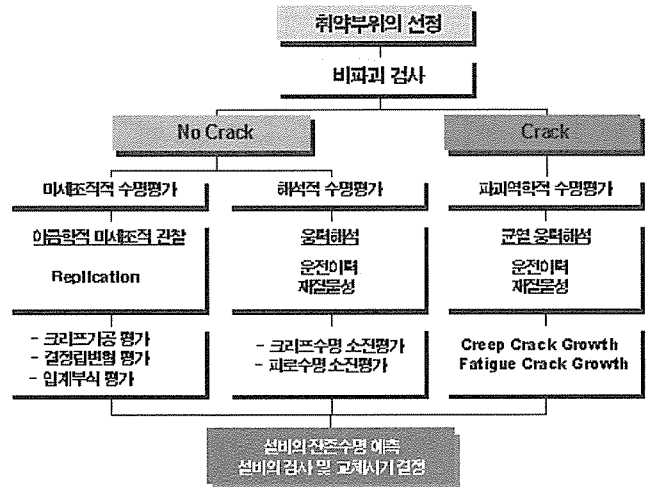


# 증기터빈 로타 수명평가

두산중공업(주) 기술연구원  
 선임연구원 강용호/정용근  
 전화 : (055)278-3694

그림 1 터빈 로타 수명평가법 분류



## 1. 서론

장기간 고온에서 가동된 터빈은 재질열화 등으로 인해 수명이 소진 되는데, 최근 국내에서 20년 이상 사용되어 노후 된 발전소가 증가함에 따라 향후 운전 에 필요한 설비의 잔여 수명을 산출하는 연구가 중요한 분야로 대두되고 있다. 터빈 로타의 경우 정확한 수명 평가는 로타의 조기 폐기를 피할 수 있고, 개보 수에 필요한 비용을 절감 할 수 있기 때문에 경제적으로 큰 가치가 있으므로, 로타 수명평가에 관련된 많은 연구가 진행되어 오고 있다.

로타의 수명평가 방법은 결함의 존재 여부에 따라 두 가지로 분류할 수 있다. 결함의 존재 여부는 비파괴 검사를 통하여 판명되며, 결함이 존재할 경우 응력해석과 균열진전해석 방법을 적용하여 평가를 수행한다. 결함이 존재하지 않은 경우에는 저주기 피로곡선을 이용한 해석적 수명평가법과 미세조직적 수명평가법을 적용한다. 해석적 수명평가법의 경우 기동 조건에 따른 응력해석과 운전이력을 바탕으로 잔여수명을 계산하는 수명소진율 방법이 가장 일반적으로 적용되고 있다. 미세조직적 수명평가는 재료의 미세조직을 복제한 후 재료의 열화도 곡선에 대비시켜 수명을 예측하고 있다. 그림 1에는 터빈 로타의 수명평가 방법이 요약되어 있다. 본 보고서에서는 터빈 로타의 수명평가 방법 중 해석적 수명평가에 적용되는 파괴역학적 수명평가 방법과 수명소진율 평가법을 설명하고자 한다.

## 2. 터빈 로타 응력해석

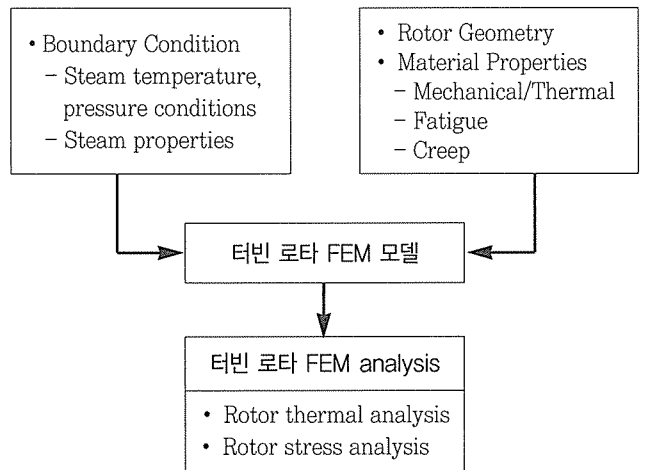


그림2 유한요소 해석을 이용한 로타 응력 해석 절차

터빈 로타의 응력해석은 로타 수명평가의 첫 단계로서 해석 결과는 수명소비율 평가법과 파괴역학적 평가법에 모두 적용된다. 로타의 응력해석은 유한요소해석을 이용한 상세 해석으로서 열응력해석과 원심

응력해석으로 나누어 진다. 해석 모델은 3차원 축대칭 모델을 이용하며, 로타 각단의 형상과 inter-stage seal의 형상을 이용하여 생성한다. 경계조건에는 로타 재료의 재질 물성치와 증기 물성치, 기동/정지시 터빈 입출구에서의 온도/압력 변화가 입력된다. 해석 절차는 그림 2와 같다.

### 2.1 해석 모델 생성

해석 모델을 생성하기 위해서는 도면을 이용하여 로타를 구성하고 있는 디스크의 형상과 디스크 사이의 inter-stage seal의 형상을 결정한다. 디스크는 로타와 일체형을 이루는 integral disk와 조립된 shrunk-on disk로 나누어지고, 디스크 형상은 일자형과 taper형으로 구분 되어 진다. 증기의 누설을 방지하는 seal의 형상은 증기의 inlet부와 outlet부, inter-stage 부로 나누어 진다. 그림 3과 4에는 디스크 모델과 inter-stage seal 모델을 보여주고 있다.

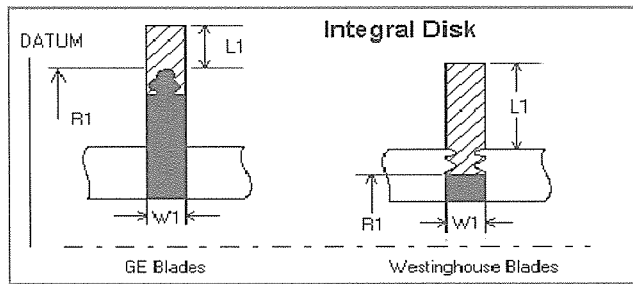


그림 3 Integral Disk 형상

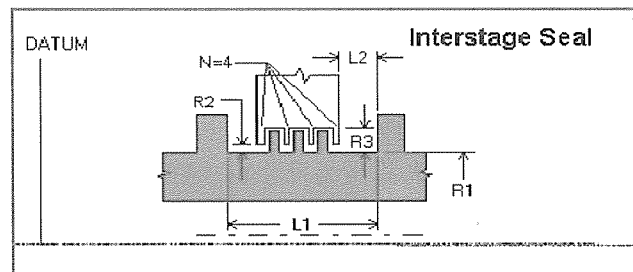


그림 4 Interstage seal 형상

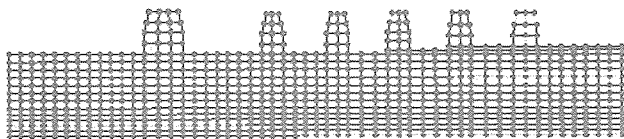


그림 5 화력 고압단 터빈 로타의 유한요소 해석 모델

디스크와 Seal의 형상을 입력하고 로타 각 부위 치수를 입력하면 원하는 형상의 해석 모델을 만들어 낼 수 있다. 그림 5에는 위의 과정을 거쳐 만들어진 화력 고압 증기터빈 로타의 해석 모델을 보여주고 있다.

### 2.2 Boundary Condition 및 Material Property 입력

열응력 해석을 위한 경계조건은 터빈 기동시 터빈에 유입되는 증기의 온도와 압력이다. 이 값을 터빈의 inlet부와 outlet부, inlet과 outlet seal부로 나누어 입력한다. 또한 이에 상응하는 로타의 속도를 입력한다. 입력 값들은 과도(transient) 상태를 표시하기 위하여 시간의 함수로 입력된다. 응력해석에 필요한 물성치는 재료의 기계적 물성치와 증기의 특성을 나타내는 물성치이다.

### 2.3 로타 응력해석

응력해석 과정은 과도상태의 열전도(conduction) 해석과정과 응력해석 과정으로 나누어 진다. 응력해석 과정은 열전도 해석결과를 이용하여 해석이 수행되기 때문에 열전도 해석이 먼저 수행되어야 한다. 열전도 해석을 수행하면 기동 시간에 따라 로타의 각 위치에서 온도 분포가 계산된다. 그림 6에 열전도 해석 결과를 보여주고 있다.

표 1 재료를성치 및 증기물성치 입력 data

Rotor Material Properties		
Elastic Modulus	Heat Capacity	Fatigue Crack Growth Rate
Poisson's Ratio	Creep Rupture Strength	
Yield Strength	Power-Law Hardening parameter	Creep Crack Growth
Density	FATT	Larson-Miller Parameters
Thermal Conductivity		
Steam Properties		
Thermal Conductivity	Heat Capacity	Viscosity

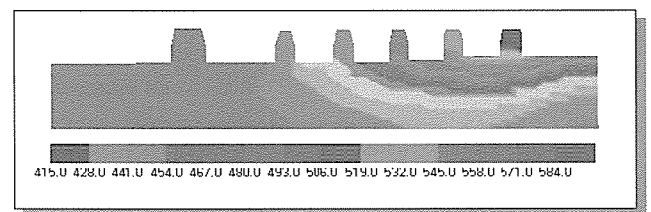


그림 6 터빈 로타 열전도 해석 결과

로타의 열전도 해석이 완료되면, 해석 결과를 이용하여 열응력을 계산한다. 계산된 열응력은 로타 기동시 각 위치에서 발생하는 응력을 보여주며, 이러한 응력이 로타의 수명평가에 적용된다. 그림 7에 로타 응력해석 결과를 보여주고 있다.

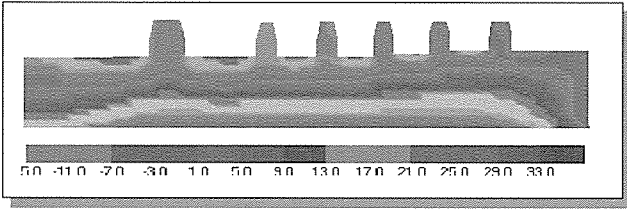


그림 7 터빈 로타 응력 해석 결과

### 3. 터빈 로타의 파괴역학 해석

터빈 로타의 파괴역학적 해석과정은 로타 Bore 내부 표면의 초음파 탐상 등을 통한 비파괴적 검사에 의해 로타 내부에 존재하는 결함을 검출한다. 검출된 결함을 linkup analysis를 통하여 정량화 한 후 이를 해석하여 로타의 잔여수명 및 파단 가능성을 예측한다. 결함해석 방법은 피로에 의한 손상과 크리프에 의한 손상, 크리프-피로에 의한 손상으로 분류하여 수행한다. Shrunken-on disk의 keyway에 대한 결함 해석은 부식의 영향을 고려한 SCC(Stress Corrosion Cracking) 이론을 이용하여 해석된다. 결함해석 결과를 이용하여 터빈의 파단 가능성을 예측하는 방법은 결정론적 방법과 확률론적 방법을 이용한다. 파괴역학적 해석은 터빈 로타의 Bore부와 shrunken-on 디스크 keyway로 나누어 해석한다.

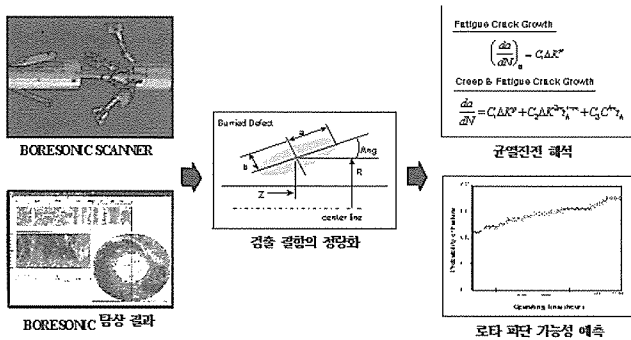


그림 8. 로타의 파괴역학적 해석 과정

#### 3.1 균열해석 이론

3가지의 균열진전 모델이 로타 파괴역학 해석에 사용된다. 첫번째는 피로 균열진전 모델이고 두번째는 피로-크리프 연관 관계가 포함된 형태로서 Bore 근처와 로타의 표면의 균열에 적용하며, 세번째는 응력부식 균열 모델로서 shrunken-on 디스크의 Keyway 균열진전 해석에 사용된다.

#### 1) Fatigue Crack Growth Model

유지 시간이 없는 열/기계적 주기에서 낮은 온도나 높은 사이클의 경우 균열의 진전은 일반적으로 피로에 의존한다. 이 경우 균열진전은 stress intensity의 최대 범위에 의하여 결정되며, Paris law로 표현된다.

$$\left(\frac{da}{dN}\right)_0 = C_1 \Delta K^p \quad (1)$$

$\Delta K$ 는 균열이 시작되는 곳에서 의 최대값이다. 일반적으로 모든 경우 최소값은 0이다. CrMoV, NiMoV, NiCrMoV 재료의 실험 결과로 부터 상온과 200-500 °F 영역에서  $\Delta K$ 의 값은 12 ksi-in<sup>2</sup> 보다 크다는 결과를 얻었고, 피로균열 진전시 온도의 영향도 없다는 것을 알 수 있었다. 하지만 550 °F 이상의 온도에서는 온도에 대한 영향이 조금 나타난다. 70-550 °F 영역의 데이터를 조합하여 기울기 p를 구하고, 계산된 p값을 이용하여 각 온도에서  $C_1$  값을 계산할 수 있다.

#### 2) Creep-Fatigue Crack Growth Model

고압터빈의 경우 고온에서 장시간 사용하기 때문에 기동/정지시의 피로 손상과 더불어 크리프 손상을 받게 된다. 따라서 고압 터빈의 파괴역학 해석에는 Creep-Fatigue Crack Growth 모델이 적용된다. 일반적으로 크리프 손상을 받는 경우 균열 선단에서의 응력은  $C^*$ 값과  $C_t$  파라메타에 의하여 결정된다.  $C^*$  파라메타는 정상상태의 크리프 손상에 적용되며,  $C^*$  파라메타의 물리적인 의미는 단위 균열의 성장에 따른 에너지 방출율이다. 반면  $C_t$  파라메타는 transient creep 상태를 고려한 값으로 균열확장시 에너지 방출의 순간적인 속도를 포함하고 있다. 따라서 정상상태 크리프 변형에 도달하였을 때  $C_t$ 는  $C^*$ 에 접근하게 된다. 크리프 손상이 포함된 터빈의 수명평가는  $C_t$ 파라메타를 적용한다. 고압 터빈의 수명평가에 적용되는 Creep-Fatigue Crack Growth 모델은 다음과 같이 정의 된다.

$$\frac{da}{dN} = C_1 \Delta K^p + C_3 \left[ \int_0^{t_h} C_t(t) dt \right]^m \quad (2)$$

식(2)에서  $C_t$  파라메타는 재질의 고유값으로 실험을 통하여 산출 할 수 있다.

### 3) Keyway Crack Growth Model

Shrunk-on disk는 주로 원자력 저압 터빈의 끝단 부위에 사용하기 때문에 운전 중 부식환경에 놓이게 된다. 따라서 shrunk-on disk의 keyway는 SCC(Stress Corrosion Cracking) 균열 평가법을 적용한다. Shrunk-on disk의 균열 해석에 사용되는 Stress Intensity Factor는 그림 9와 같은 반타원 형태를 가지는 표면 균열을 가정하여 수행한다.

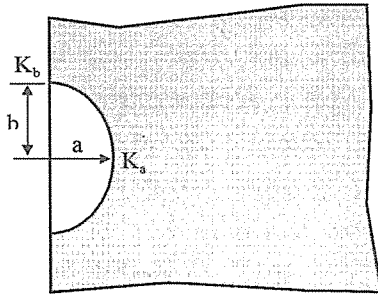


그림 9 Keyway 균열 해석에 적용되는 균열 형상

SCC에 의한 균열진전은 크게 4가지 인자 (tempering 온도, Mn의 양, 항복강도, 사용온도)에 지배를 받기 때문에 keyway 균열진전 모델은 다음과 같이 정의된다.

$$\ln \frac{a}{t} = 7.01 - \frac{9270}{T} + 0.0337\sigma_y + 4.53Mn - 0.01277T_T \quad (3)$$

- 위식에서  $a/t$  = 균열진전율(in/hour)
- $T$  = 절대온도(oR)
- $\sigma_y$  = 항복강도
- $Mn$  = Mn의 함량(질량비)
- $T_T$  = Tempering 온도

식(3)를 이용하여 과도 상태의 시간 사이에서 균열진전량은 다음과 같이 계산 된다.

$$\delta a = \frac{a}{t} \delta t \quad (4)$$

### 3.2 해석방법

로타의 파괴역학 해석은 크게 결정론적 파괴역학 모델과 확률론적 파괴역학 모델로 나누어 진다. 결정론적 방법은 임의의 변수가 임계값에 도달할 때 로타가 파괴된다는 이론으로 임계값에 도달할 때까지의 시간을 계산하여 잔여수명을 산출한다. 확률론적 방법은 운전 시간에 따른 파단 확률을 산출하는 것으로,

크게 두 가지로 나누어 진다. 첫번째는 Monte Carlo 모델로서 임의의 변수(FATT,  $K_{IC}$ ,  $C_1$  등) 값에서 이들이 파단에 이르는 시간을 계산하는 것과 이들 변수 각각이 통계학적으로 어떻게 분포되어 있는지를 유출하는 것이다. 이런 작업을 반복함으로써 time-to-failure 즉  $t_f$ 에 대한 histogram을 작성할 수 있다. 이렇게 작성된 histogram으로부터 time-to-failure의 통계학적 분포를 알 수 있고, 로타의 신뢰성을 예측할 수 있다. 두번째는 Fast Probability Integral (FPI)로서, 주어진 파단시간에 대한 임의의 변수는 큰 조합 형태로 나타나고, 이 조합은 똑같은 파단시간의 결과를 가져다 준다. 이런 조합에서 Most Probable Failure Point(MPFP)를 찾는 것이 FPI 방법이다. MPFP를 찾는 algorithm에서 lifetime은 input변수의 함수로 구성되고, 임의의 input 변수 ( $X_i$ )는 다음과 같이 단위 변수로 변환된다.

$$u_i = (X_i - \bar{X}) / \sigma_i \quad (5)$$

계산과정은 MPFP의 위치를 추측하고, 지속적인 반복 수행을 통하여 더 이상 추측값이 변하지 않을 때까지 계산하는 것으로 구성되어 있다.

그림 10는 Monte Carlo 모델을 이용하여 계산한 터빈 로타의 파단 확률을 보여준다.

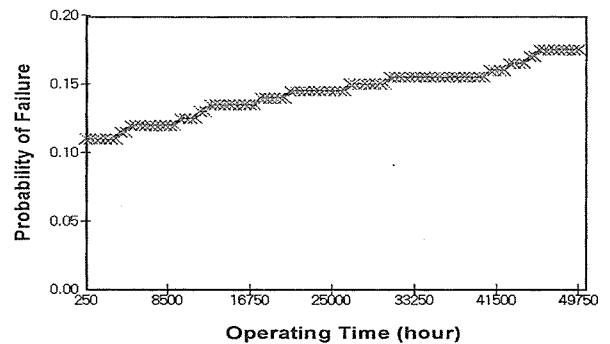


그림 10 Monte-Carlo 방법을 이용한 터빈 로타의 파단예측 결과

## 4. 로타 수명소진을 계산

터빈 로타의 수명소진을 계산 방법은 균열발생 전까지의 수명을 예측하는 방법으로 운전 중 발생하는 피로손상을 누적하여 계산한다. 터빈 로타는 기동/정지시 증기의 열전도에 의하여 열응력이 발생 되고, 이때 표면이나 중심부의 열응력이 소성변형 영역에 도

달하게 되면, 로타가 정상상태에 도달할 때 잔류응력이 남게된다. 이 응력은 고온에서의 크리프(creep) 특성에 의해 해소된다. 하지만 정지시 로타는 기동시와 반대방향으로 열응력을 받는다. 따라서 터빈이 완전히 기동과 정지의 한 주기를 마쳤을 때 터빈 로타 역시 소성 영역에서 완전한 인장-압축의 한 주기를 마치게 된다. 그림 11에는 터빈 기동 정지시 로타의 온도분포와 응력 주기를 보이고 있다. 기동과 정지를 수시로 반복해야하는 발전소의 특성상 터빈 로타는 열응력에 의한 저주기피로(Low Cycle Fatigue) 손상을 입게 되고, 이는 터빈의 수명에 치명적인 영향을 미치게 된다. 이와 같은 저주기 피로에 의한 손상을 예측하기 위하여 많은 방법들이 개발되어 졌고, 이 방법들중의 하나가 수명소진율(Cyclic Life Expenditure)이다. 수명소진율은 표면에 균열이 발생하는 반복수(cycle)에 대한 전체 반복수의 퍼센트로 표현된다.

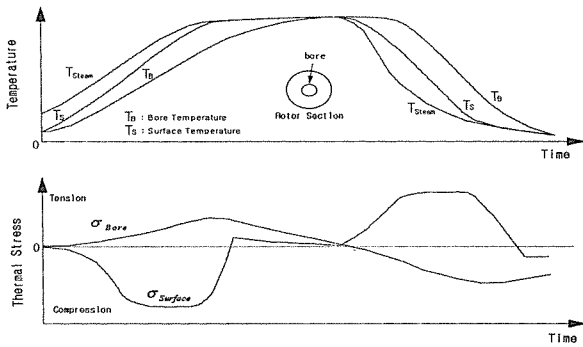


그림 11 기동/정지 시 로타의 온도분포 및 응력주기

로타의 수명소진율은 온도변화와 온도변화율(ramp rate)의 관계로 산출되어지는 CLE 선도에 의하여 계산되어진다. CLE 선도는 균열 발생 전까지의 로타 수명을 평가하는데 적용되어진다. 로타의 수명소진율을 계산 과정은 응력 해석 결과를 실험으로 얻어진 로타 재료의 저주기 피로 곡선에 적용하여 계산한다. 실험으로 얻어지는 로타 재료의 저주기 피로 곡선은 Total Strain Range( $\Delta \epsilon_T$ )로 표시되어진다.  $\Delta \epsilon_T$ 는 다음식으로 표현된다.

$$\Delta \epsilon_T = \frac{1/2 \ln \left( \frac{100}{100 - \%RA} \right)}{\sqrt{N}} + \Delta \epsilon_c \quad (6)$$

위식에서

$\Delta \epsilon_T$  = total strain range (elastic plus plastic strain range)

$\Delta \epsilon_c$  = TS/E = high cycle fatigue strain range

응력해석에서 얻어진 결과는 응력집중영역과 Nominal 영역으로 분리하여 Total Strain Range 산출에 적용된다. 터빈 로타 Bore의 경우 응력집중이 없는 Nominal 영역이므로 Total Strain Range는 다음과 같다.

$$\Delta \epsilon_t = \frac{(1-\nu)}{E} \cdot \Delta \sigma_{eff} \quad (7)$$

위 식에서 는 기동과 냉각을 대칭 주기로 가정하기 때문에  $2\sigma_{eff}$ 가 된다. Effective Stress를 식(7)에 대입하여 Total Strain Range를 계산한 후 이를 저주기피로 곡선에 대입하여 이에 상응하는 균열 발생 Cycle을 계산한다. 균열 발생 Cycle이 계산되면 이를 이용하여 기동조건에 대한 수명소진율을 계산하고, 계산된 수명소진율을 선형 중첩하여 전체적인 로타의 수명소진율을 식(8)과 같이 계산한다.

$$\text{Total 수명소진율} = \frac{\sum n_{cold}}{N_{cold}} + \frac{\sum n_{warm}}{N_{warm}} + \frac{\sum n_{hot}}{N_{hot}} \quad (8)$$

위 식에서 N은 특정 기동조건에서의 균열생성 Cycle 이고 n은 기동/정지 횟수이다.

## 5. 결론

터빈 로타는 터빈의 수명평가에 있어 가장 중요한 설비이므로 정기적인 평가는 필수적이다. 정확한 평가는 로타의 파손으로 인한 피해를 예방 할 수 있고, 조기 폐기에 의한 경제적인 손실을 줄일 수 있다. 터빈 로타의 수명평가는 결함의 발생 유무에 따라 달라지며, 비파괴 검사 결과를 바탕으로 적절한 평가법을 적용하여야 한다. 비파괴 검사 결과 결함이 존재하지 않을 경우에는 수명소진율 평가 방법을 적용하여 현재까지 기동/정지 회수가 수명에 미치는 영향을 분석하고, 향후 최소 몇회의 기동/정지가 가능한지를 계산한다. 반면 결함이 존재할 경우에는 결함의 형태와 위치를 이용하여 현재의 결함이 진전하여 최종 파단이 발생할 때까지의 시간을 산출하여 로타의 운전 수명을 예측한다.

터빈 로타의 해석적 수명평가 방법은 터빈의 운전 이력과 운전 조건을 이용하기 때문에 정확한 운전 데이터를 확보하여야만 신뢰성 있는 결과를 산출 할 수 있다. 또한 계산 된 잔여 수명 역시 정상적인 기동/정지를 기준으로 하기 때문에 운전 조건이 변화하면 계산된 수명과 실제 수명은 차이가 발생 할 수 있다.