

## 한국 화력 발전설비의 수명평가기준 개발 및 활용<sup>§</sup>

최우성\*<sup>†</sup> · 송기욱\* · 김범신\* · 현중섭\* · 허재실\*

\* 한국전력공사 연구원 수화력발전연구소

### Development and Application of Life-Assessment Guidelines for Fossil-Fuel Power Plant Facilities in Korea

Woosung Choi\*<sup>†</sup>, Geewook Song\*, Bumshin Kim\*, Jungseob Hyun\* and Jaesil Heo\*

\* Power Generation Laboratory, KEPSCO Research Institute

(Received May 7, 2010 ; Revised July 20, 2010 ; Accepted July 22, 2010)

**Key Words:** Plant Facilities(화력발전설비), Life Assessment Guideline(수명평가기준), Creep(크리프), Low Cycle Fatigue(저주기 피로)

**초록:** 최근 들어 화력발전소는 잦은 기동과 부하 변동 하에서 안정적인 운전 및 관리에 대한 요구가 높아지고 있다. 특히 터빈, 보일러와 같이 고온 고압의 조건에서 운전되는 발전 설비의 경우 크리프 및 피로 손상의 영향으로 설비의 수명이 감소하게 된다. 보다 안전한 발전소 운영을 위해 설비의 정확한 수명평가가 중요하며 현재까지 다양한 방법이 개발되어 적용되고 있다. 그러나 현재까지는 표준화된 가이드라인이나 절차 없이 정성적/준정량적 분석에 의해 주요 설비의 수명을 평가하고 있다. 본 연구에서는 크리프 및 피로 손상기구에 근거하여 국내 화력발전 주요 설비의 수명 소비율을 평가하는 표준화된 기준을 개발하였고 실제 설비에 적용하여 평가 기준의 활용성을 검증하였다. 본 기준은 2010 전력기술기준에 수록될 예정으로 수명평가의 정확성 향상과 수명관리 표준화에 기여할 것이다.

**Abstract:** In view of the frequent start-ups and load changes in the recent past, there is a need for fossil-fuel power plants to be more efficient and reliable for long-term operation. Under high-temperature and high-pressure conditions, severe creep and fatigue damages can occur in major plant facilities, particularly, turbines and boilers. For highly stable operation and better maintenance, various techniques that facilitate a systematic assessment of the service life of critical facilities have been developed. However, to date, in Korea, to evaluate the remaining life of major facilities of fossil power plant, qualitative or semiquantitative analyses are carried out without following any standard guidelines or procedure. In this study, a standard code for assessing the remaining life of major plant facilities is proposed. This code takes into account creep and fatigue damage, which are generally accepted as dominant causes of damage to facilities. KEPIC (Korea Electric Power Industry code) is scheduled to include this guideline in 2010.

- 기호설명 -

$P$  : Larson-Miller parameter

$T$  : 온도 ( $^{\circ}C$ )

$C$  : 크리프 고정변수

$t_r$  : 크리프 수명 (hour)

$\phi_{creep}$  : 크리프 수명 소비율 (%)

$t$  : 현재까지 운전시간 (hour)

$\Delta\epsilon_t$  : 변형률 변화율

$\alpha$  : 열팽창계수

$\Delta T$  : 온도차

$\sigma_s$  : 실제 응력 (MPa)

$E$  : 탄성계수 (GPa)

$\nu$  : 푸아송의 비

$\epsilon_{nominal}$  : 공칭 변형률

$K_T$  : 탄성응력집중계수

$K_{\epsilon}$  : 소성변형률집중계수

$\epsilon_t$  : 탄소성 변형률 (%)

$C_e, C_p, \alpha_e, \alpha_p$  : 재료 상관계수

$N_f$  : 피로 수명 (cycle)

§ 이 논문은 2010년도 대한기계학회 재료 및 파괴부문 춘계학술대회(2010. 4. 22.-23., 라테나콘도) 발표논문임.

† Corresponding Author, woosung@kepri.re.kr

© 2010 The Korean Society of Mechanical Engineers

- $\phi_{fatigue}$  : 피로 수명 소비율 (%)
- $N$  : 현재까지 기동횟수 (cycle)
- $D$  : 총 수명소비율 (%)
- $D_c$  : 크리프 수명소비율(%)
- $D_f$  : 피로 수명소비율(%)

### 1. 서 론

국내 대표적인 화력발전소는 500MW 급 표준 석탄화력발전소로, 발전용량이 14,240MW 에 달하며, 국내 총 발전용량의 25%를 차지하고 있다. 2011년부터 2018 년 까지 이들 대부분의 설비가 성능 개선의 필요성에 직면하게 되어, 타당성 평가를 수행할 것으로 예측된다. 타당성 평가는 핵심 설비의 수명예측과 중요 설비의 신뢰성평가를 통해 설비의 교체시기와 범위를 결정하고 성능개선 목표와 방안을 제시하여 성능 개선시 경제적 효과를 결정하는 것이다. 따라서 타당성 평가의 신뢰도를 향상시키기 위해 설비 수명평가의 정확도를 높이는 것이 필요하다. 현재까지는 국내 화력 발전설비 수명 평가 방법 및 절차에 대한 표준 가이드라인 없이 제작사나 해외 연구기관이 제시한 방법들을 따르거나 전문가의 판단에 따라 정성적인 방법과 준정량적인 방법이 사용되고 있다.<sup>(1-3)</sup> 본 연구에서는 이에 대한 대안으로 한국 화력 발전소 주요 설비에 대해 손상기구를 고려하여 표준화된 수명 평가 기준을 제안하고자 한다. 본 수명평가기준은 2010 년도 전력산업기술기준에 새롭게 수록될 예정이며 이 기준에서 제시하는 수명평가 지침 및 수행 방법은 보일러, 터빈 등 고온 고압에서 사용되는 화력 발전설비의 주요 기기에 적용하는 것으로 한정하여 개발되었다. 한편 평가기준의 활용성을 보기 위하여 실제 운전중인 터빈 설비에 대해서 수명평가를 수행하였다.

### 2. 수명평가방법

#### 2.1 개요

화력발전설비를 비롯한 고온 설비의 수명을 평가하는 방법에는 설비에서 미세조직을 직접 복제하는 표면복제법, 설비 표면의 강도를 측정하는 경도 측정법, 탄화물 추출복제법 및 크리프와 피로 수명에 대한 해석적 평가법이 있다. 저합금강에서

파괴를 일으킬 수 있는 크리프 손상의 원인으로 장시간 사용에 따른 연속적인 크리프 강도 감소, 미세구조 열화와 결정립계의 크리프 기공을 들 수 있다. 이러한 현상들은 보통 동시에 일어나며, 어떤 원인이 우세한지는 초기의 구조적 상태, 순도, 응력 및 온도 조건에 의해 결정된다. 미세구조 열화와 이에 따른 모재의 열적인 연화는 다양한 강종에서 탄화물간의 간격, 크기, 구조, 페라이트 조성, 고용 강도, 격자 상수 변화와 같은 미세구조의 변화를 수반한다. 따라서, 설비 수명평가를 위한 금속학적 방법들은 위 현상들에 대한 열화정보를 도출하기 위해 개발되었다. 한편 추출복제를 통해 분석되는 탄화물은 고온에 민감한 대표적인 열화 정도를 나타내지만 결정립 방향의 변화를 예측하는데 어려움이 있어서 아직까지 수명 평가에 범용으로 적용되지는 못한다.

#### 2.2 표면복제

표면복제법은 크리프 손상을 분석할 때 사용하는 보편적인 비파괴적 방법으로 접근 가능한 어떤 지점에서든 가능하지만, 설비의 표면에 대한 정보만을 제공하는 한계가 있다. 정성적 또는 정량적 평가법으로 설비 열화나 손상 정보를 얻을 수 있는데 석출물 성장과 구상화 정도에 따라 열화상태를 평가할 수 있고, 크리프 기공 및 균열 정도를 통해 손상상태를 평가할 수 있다. 표면 복제에 대한 표준 절차 및 해석 지침은 다양한 연구<sup>(1)</sup>에 기술되어 있다.

조직학적 결정립계와 결정립계 경계를 세분화하기 위해 저합금강 모재부 및 열영향부에 대해서는 A-F 까지 등급에 따라 정성적으로 평가할 수 있다. Table 1 은 열화와 크리프 기공에 따른 저합금강 열영향부의 수명소비율을 나타낸다.

**Table 1** Life consumption relationship of low alloy steel

열화등급	열화등급	수명소비율
1	A	< 20%
	B	20-30%
2	C	30-40%
	D	40-60%
3	E/F	60-75%
4		75-80%
5		> 80%

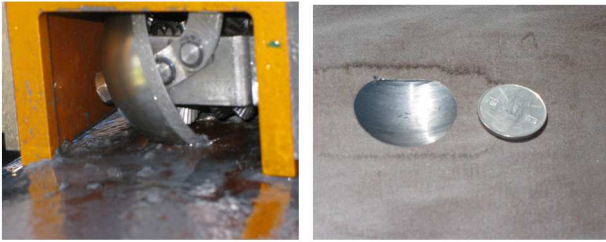


Fig. 1 Specimen extraction and extracted area

한편 크리프 기공들을 정량적으로 평가하는 방법에는 조대한 결정립을 갖는 열영향부 및 용접부에 사용되는 A parameter 법과 단위 면적당 기공 수를 분석하는 기공밀도분석법이 있다. 손상 정도가 결정이 되면 각각의 실험식들을 통해서 손상 정도에 따른 크리프 수명을 보수적으로 예측할 수 있다.

### 2.3 경도측정

페라이트 강의 크리프 강도, 조직의 강도 및 경도는 동일한 미세구조에 의해 좌우되기 때문에 설비에서 경도를 측정하면 설비의 열화상태를 알 수 있으며, 접근이 가능한 설비 표면의 어떤 지점에서든 비파괴적으로 데이터를 취득할 수 있다. 또한, 시료를 설비로부터 채취할 경우, 시료로부터 전체 두께에 대한 경도 데이터를 얻을 수 있으며, 크리프 강도를 간접적으로 측정할 수 있다. 한편 측정된 경도값들을 통해서 표면에서의 운전온도, 용접 손상위치 및 정성적인 수명을 예측할 수 있다.

Fig. 1 은 시편 채취기를 이용하여 실제 설비에서 시편을 채취하는 순간과 시편이 채취된 후의 형상을 보여준다.

### 2.4 탄화물 추출복제

추출복제는 표면복제법과 유사한 방식을 이용하여 설비로부터 미소 시료를 추출하는 방법으로 다음과 같은 탄화물 석출 입자 특성들의 정보를 얻는다.

- 탄화물 사이 간격
- 탄화물 크기, 형상, 조성

신재 및 열화재에 대하여 탄화물을 추출복제하고 투과전자현미경을 이용하여 결정 구조 및 성분 분석을 하면 표면 운전온도, 정성적 또는 정량적 수명을 예측할 수 있다. Fig. 2 는 1Cr1Mo1/4V 재질 터빈 로터의 열화영역에서 채취한 시편에 대해 탄화물 분석을 하기 위한 TEM 사진이다. 열화가

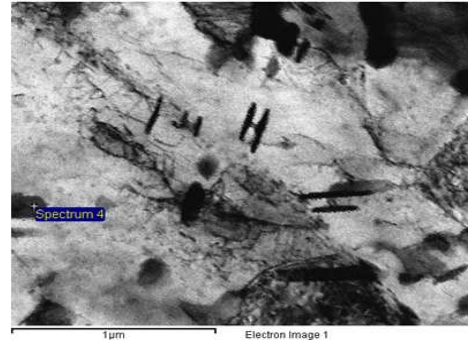


Fig. 2 TEM image of 1Cr1Mo1/4V aged material

진행됨에 따라 Fig. 2 에서처럼 H 형상의 미세조직이 형성되는 것을 확인할 수 있다. 이에 따라 H 형상 변화 정도를 분석하여 열화 정도를 평가할 수 있다.

### 2.5 크리프 및 피로 수명평가

크리프 및 피로 수명평가는 응력에 따른 재료들의 크리프 및 피로 강도 특성 정보를 제공하며, 구체적으로는 다음과 같다.

- 크리프 손상
- 저주기 피로 손상
- 크리프/피로 복합 손상

본 절차에서 크리프 및 피로 수명평가는 주요 터빈 설비인 고압터빈 로터 및 케이싱을 대상으로 해석적인 방법을 이용하여 수명소비율을 계산하는 절차를 따른다.

#### 2.5.1 간략 크리프 및 피로 수명평가

크리프와 저주기 피로가 주로 발생하는 위치가 다르고, 손상 기구에 영향을 주는 응력이나 변형률의 특성이 다르기 때문에 크리프 수명평가와 저주기 피로 수명평가는 기본적으로 다른 절차를 갖는다. 크리프 수명 평가 관점에서 형상 정보 및 회전속도를 고려한 관계식을 이용해 터빈 로터 중공축에서의 원심응력, 케이싱 플랜지 부와 케이싱 볼트의 응력을 계산한다.<sup>(4)</sup> 저주기피로 수명 평가 관점에서는 무차원 변형률 곡선 및 무차원 응력 곡선을 이용해서 터빈 로터와 케이싱 1 단 groove 에서의 열응력 또는 열변형량을 계산한다.<sup>(4-7)</sup>

Fig. 3 은 크리프 및 저주기 피로수명을 평가하기 위한 간략 수명평가 절차를 나타내는 것으로 절차에 따라 응력 또는 변형률을 구할 수 있으며 최종적으로 크리프 수명 소비율 및 저주기피로 수명 소비율을 계산할 수 있다.

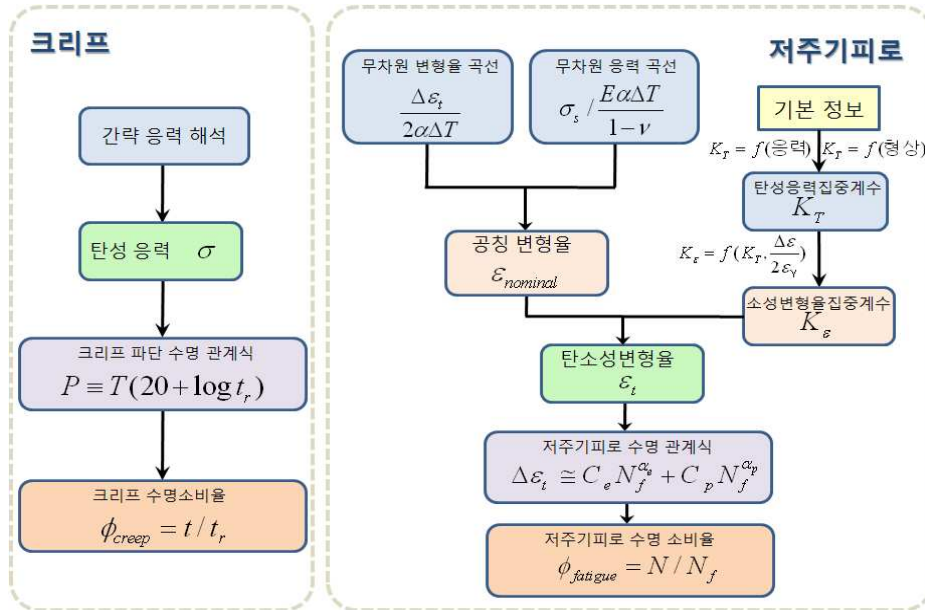


Fig. 3 Simple creep-fatigue life assessment procedure

에 의한 설비의 수명소비율을 구할 수 있다.

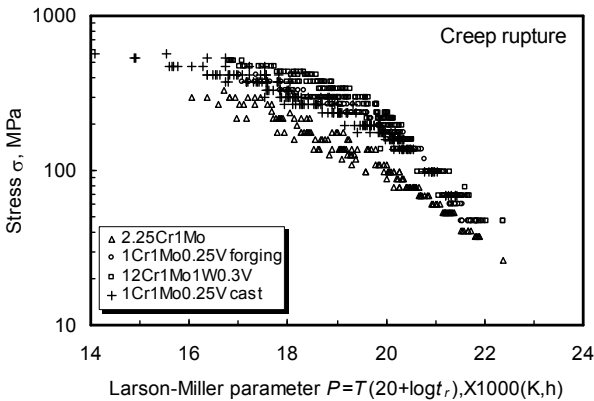


Fig. 4 Creep rupture curves of low alloy steel

(a) 크리프 수명평가

일반적으로 탄성해석을 통해 응력을 계산하면 계산된 응력과 운전 온도를 재료에 따라 변수가 결정되는 Larson-Miller Parameter 관계식에 적용해 수명 소비율을 계산한다.

$$P = T(C + \log t_r) \tag{1}$$

T 는 절대온도,  $t_r$  은 크리프 파단시간이며 고정 변수 C 의 경우 저합금강은 20, 고합금강은 25 이다. Fig. 4 는 로터 및 케이싱에 사용되는 1Cr1Mo1/4V 재료의 Larson-Miller parameter 곡선을 나타낸다.

Fig. 3 절차에 따라 크리프 파단 시간을 구하면 현재까지의 운전시간을 이용해 최종적으로 크리프

(b) 저주기 피로 수명평가

저주기 피로의 경우 크리프와 다르게 응력보다 변형률이 수명을 결정하는 중요 요소이다. 저주기 피로 손상이 주로 발생하는 부위는 대상 설비의 노치부이다. Fig. 3 의 절차에 따라 무차원 변형률 곡선 및 무차원 응력 곡선으로부터 계산된 변형률은 순수한 탄성 범위에서의 공칭응력, 공칭변형률이기 때문에 노치로 볼 수 있는 groove 에서의 국부적인 소성거동을 고려하기 위해서 탄성응력집중계수  $K_T$  와 소성 변형률 집중계수  $K_\epsilon$  를 고려하는 절차가 필요하다.<sup>(4-7)</sup>

최종적으로 탄소성변형률  $\epsilon_t$  을 구하면 대표적인 피로 수명 관계식인 Manson-Coffin 식을 이용해 수명을 평가한다.

$$\Delta\epsilon_t \equiv C_e N_f^{\alpha_e} + C_p N_f^{\alpha_p} \tag{2}$$

여기에서  $N_f$  는 저주기 피로 수명,  $\Delta\epsilon_t$  는 변형률 범위이며  $C_e, \alpha_e, C_p$  그리고  $\alpha_p$  는 재료에 따라 결정되는 변수이다. 저합금강에 대한 저주기 피로 수명 곡선은 Fig. 5 와 같고 총변형률을 구하면 해당 재료에 대한 피로 수명을 구할 수 있다.<sup>(9)</sup> 크리프 수명 평가와 마찬가지로 Fig. 3 의 절차에 따라 저주기 피로 사이클  $N_f$  를 구하면 현재까지의 기동횟수 N 를 이용해 최종적으로 피로에 의한 설비의 수명소비율  $\phi$  를 구할 수 있다.

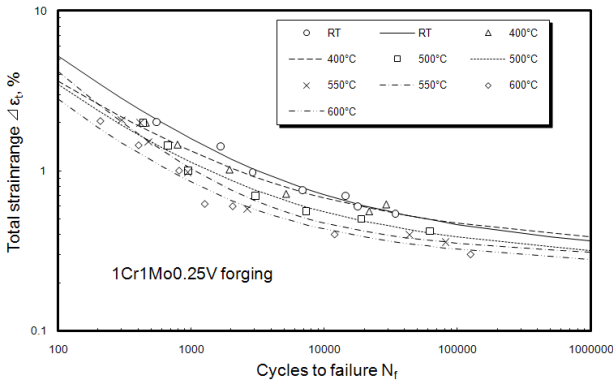


Fig. 5 LCF curve of low alloy steel<sup>(9)</sup>

한편 크리프 수명 평가의 경우에는 정상 상태에서의 응력을 사용하지만 저주기피로 수명 평가의 경우에는 천이상태에서의 열응력을 이용하기 때문에 냉간, 온간, 열간 기동으로 분류되는 기동모드를 모두 고려해야 한다. 기동 모드에 따른 피로 수명이 결정되면 기동횟수를 고려해 기동 모드별로 수명 소비율을 계산하고 선형합산을 해서 최종적인 저주기 피로수명을 결정한다.

(c) 크리프-피로 수명평가

잔여수명을 계산하기 위해서는 Fig. 3 에 제시된 방법에 따라 계산된 크리프 수명소비율과 저주기 피로 수명소비율을 각각 계산하고 합산하는 방법을 취한다. 최종적으로 저합금강에 대한 비선형 손상합산법에 의해 식 (3)와 같이 크리프 수명소비율과 저주기 피로 수명소비율을 합산하여 총 수명소비율을 계산한다.<sup>(10)</sup>

$$D = D_c + D_f + 0.75 \cdot (D_c \cdot D_f)^{1/2} \quad (3)$$

여기에서  $D_c$  는 크리프 수명소비율,  $D_f$  는 저주기 피로 수명소비율이다. 총 수명소비율이 결정되면 식(4)과 같이 현재까지의 운전시간  $t$  를 이용하여 잔여수명  $t_r$  을 계산할 수 있다.

$$t_r = \left(\frac{1}{D} - 1\right) \cdot t \quad (4)$$

이 때 총 수명소비율  $D$  는 0 보다 크고 1 보다 작은 값을 갖는다.

2.5.2 고급 크리프 및 피로 수명평가

터빈 설비에 대한 크리프 및 피로 수명을 정확하게 평가하기 위해서는 설비에서 발생하는 최대 응력과 변형률을 평가 위치에 따라 정확하게 계산해야 한다. 이를 위해 설비의 기하학적 형상

Table 2 Comparison of metallurgical methods

기술	정확도	비용	선호도
표면복제	3-4	1-2	5
경도	2	1	2-3
탄화물	3-4	4-5	0-1
결정 방향	1-2	4	0-1

\* 최대값 = 5

정보를 바탕으로 실제 설비와 동일하게 모델링하고, 운전조건과 재료의 거동 특성을 고려한 유한요소 해석을 수행해야 한다. 유한요소해석을 통해 최대 응력 및 변형률을 구하면 손상특성을 고려하여 설비의 수명을 계산한다. 재료의 거동에 대한 수학 모델과 사용자정의 함수가 정의된다면 유한요소해석 프로그램을 이용해 점소성 해석을 수행할 수 있다. 이 때 얻어진 응력과 변형률은 소성 거동이 고려된 해당 위치에서의 실제 응력과 변형률이 되므로 곧바로 수명 관계식에 적용해서 수명을 결정할 수 있다. 그러나 탄성 해석과 비교할 때 모델 형상에 따라 계산시간이 과도하게 걸리고 계산시 수렴성에 제한이 있어 케이싱이나 밸브와 같이 복잡한 형상의 설비를 해석하는 데에는 한계가 있다. 이에 대한 대안으로 탄성해석을 수행하고 해당 결과에 탄소성 거동을 고려하는 방법을 사용할 수 있다.<sup>(5,6)</sup>

2.6 허용 및 제한

설비의 금속학적인 손상평가 개념은 보편화되어 손상평가를 위한 다양한 기술들이 폭넓게 사용되고 있으며 기술에 따른 선호도가 있다. 특히, 표면복제는 손상을 정성적으로 평가하는 가장 일반적인 방법이다. 경도평가는 응력 완화와 같은 열처리 등의 품질관리에 적용되지만, 정확한 수명 예측을 위해서 신뢰성을 보다 높여야 한다. 수명예측과 온도평가를 위해 탄화물 추출 복제에 의한 기법이 연구되었으나, 시편 채취의 제약 및 비용 부담이 큰 편이며, 결정 방향 분석을 통한 손상평가는 아직 연구단계에 있다. 대표적인 금속학적 손상평가 기술들을 정확도, 비용 그리고 선호도 측면에서 비교하면 Table 2 와 같다.

현재 금속학적 손상평가 기술의 대부분은 터빈 설비의 주 재료인 저합금강에 집중되어 있기 때문에 다른 재료에 적용할 때는 세심한 주의가 필요하다. 또한 이 기술들은 크리프 손상을 고려한 수명평가와 관련되어 있으며, 피로 손상에 대한 수명 평가는 각각 분리해서 이루어져야 한다. 본 수명평가 기준에서는

Fig. 6 과 같이 고장이력 및 운전자료를 조사한 후 설비 특성과 손상기구를 고려하여 진단계획을 수립하고 평가 방법에 따라 검사 및 평가를 각각 수행한다. 표면복제나 탄화물 추출을 통해서는 크리프 수명소비율을 계산할 수 있고, 재료 강도 측정시험을 통해서는 열화에 의한 복합적인 수명 소비율을 계산할 수 있다. 해석적 평가를 통해서는 위치에 따른 크리프 및 저주기 피로 수명소비율을 구할 수 있다. 현재까지 최종적인 설비의 수명평가는 동일 설비에서 가장 보수적인 평가 결과를 따르지만 향후에는 평가 결과 및 설비 수명의 상관관계를 분석하여 평가 방법 별 가중치를 적용하고자 한다.

### 3. 설비별 평가기준

서로 다른 운전 조건에서 사용되는 설비에 대한 수명평가는 설비별로 비파괴적 방법을 통한 현장진단 및 이론적인 수명평가에 의한 얻어진 해석적 결과를 종합적으로 고려하여 이루어진다. Table 3 은 보일러, 터빈을 비롯한 화력발전 주요 설비의 세부 부품 및 관련 손상기구, 평가 시 필요한 정보 등을 나타낸 표이다. 주요 손상 기구인 크리프 및 피로 손상이 동시에 발생할 경우에는 Table 3 에 제시한 수명소비율 기준을 참고하여 설비별로 구분하여 수명을 평가한다.<sup>(4)</sup>

Table 3 Guideline for components

설비	손상기구	필요정보	수명소비율 기준
보일러	헤더 피로	형상	$D=0.75$
	튜브 크리프	운전조건	$D_c=1$
	파이프 크리프	운전이력	$D_c=1$
터빈	로터 피로	재료물성 검사결과	$D=0.75$
	케이싱 크리프 피로		$D=0.75$
복수기	튜브 부식	형상 운전조건	Plugging rate = Limit value

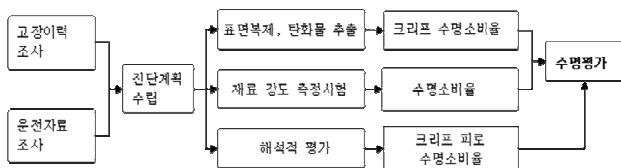


Fig. 6 Life assessment process including individual assessment method

#### 3.1 보일러 튜브

보일러 튜브의 경우 표면복제, 스케일측정에 의해 사용온도를 예측하고 이를 통하여 튜브의 크리프 수명을 예측하는 방법을 제공한다. 주요 평가 대상은 보일러의 주증기 및 재열증기 튜브이며 튜브 및 산화스케일의 두께 변화와 미세조직에서 탄화물 분포 변화를 분석한다.

#### 3.2 고온헤더

고온에서 장시간 운전되는 보일러 헤더가 받게 되는 손상을 평가하기 위해서 정상상태에서의 응력과 천이상태에서의 열응력을 계산하여 크리프 및 피로수명을 예측한다. 이때 고온헤더가 파손할 때까지의 수명을 기준으로 평가하며 튜브와 마찬가지로 고온에서 장기간 사용한 고온 헤더의 경우 이미 균열이 발생되었을 수 있으므로 별도로 비파괴검사를 병행하여 균열의 유무를 탐지한다.

#### 3.3 고온배관

고온배관의 직관 및 곡관부에 작용하는 정상상태와 천이상태에서의 열응력을 계산하여 크리프 및 피로수명을 예측하는 방법을 제공한다. 실제 현장에서는 Hanger 설치 상태 및 지침 상태를 점검하고 오동작 Hanger 에 대한 정비 대책을 세우는 과정을 포함한다.

#### 3.4 터빈 로터

고압에서의 장시간 운전으로 인해 터빈 로터에 균열이 발생되기 전까지 터빈 로터가 받게 되는 손상을 평가한다. 터빈 로터의 주요 손상기구는 저주기 피로 및 크리프이며 Fig. 3 의 절차에 따라 해석적인 방법으로 정상상태와 천이상태에서의 열응력 및 원심응력을 계산하여 수명을 예측한다. 추가적으로 경도 및 손상변수측정치를 이용하여 수명평가의 정확도를 높일 수 있다.

#### 3.5 터빈 내부 케이싱

터빈 로터와 마찬가지로 터빈 내부 케이싱에 작용하는 정상응력과 천이상태에서의 열응력을 계산하여 크리프 및 피로수명을 예측하는 방법을 따른다. 기동시 온도조건을 반영하여 열응력을 계산하고 Fig. 3 의 절차에 따라 수명을 평가한다. 이때 열응력 집중계수의 경우 로터와 다르게 유도된 관계식을 이용하여 계산한다.<sup>(11,12)</sup>

## 4. 적용사례

한국 화력 발전설비의 수명평가 기준에 따라 주요 발전 설비 중에서 터빈 로터의 수명소비율을 평가하



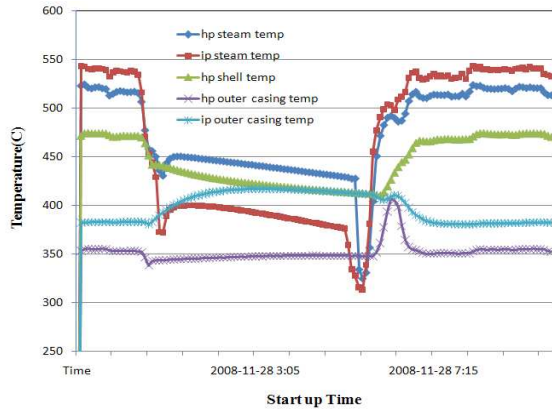


Fig. 7 Start-up curves of "U" plant unit 3 turbine<sup>(13)</sup>

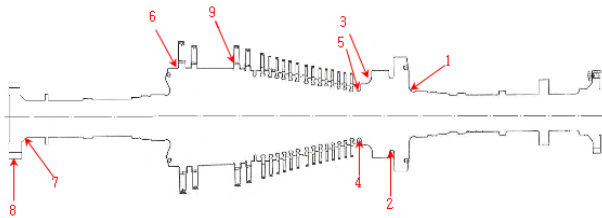


Fig. 8 Section view of HIP rotor

였다. 대상 설비는 1997 년에 준공되어 10 년 정도 운전된 국내 "U"복합 발전소의 증기터빈 3 호기이며 시간 경과에 따른 전형적인 기동 곡선은 Fig. 7 과 같다. Fig. 7 에서와 같이 고압 및 중압부 에서의 증기온도, 케이싱 표면의 단위 시간당 온도 상승률을 알 수 있으며 온도 상승률은 터빈 로터 및 케이싱을 수명평가 할 때 크리프 및 저주기 피로 수명을 계산하는데 사용된다.

한편 중압부로 유입되는 재열증기의 온도가 고압부로 유입되는 주증기의 온도보다 높음을 확인할 수 있다. 대용량 터빈 로터에 비해 중압부의 체적이 크지 않고 재열증기의 압력이 높지 않지만 기동시나 정지시 순간적인 온도변화가 크기 때문에 중압부 증기 유입부에 대한 손상을 추가적으로 고려할 수 있다.

일반적으로 증기터빈 로터에서 증기가 유입되는 1 단부에서 크리프 및 피로 손상이 주요한 것으로 알려져 있기 때문에 본 평가에서도 Fig. 8 과 같이 고중압부 터빈 로터의 1 단 groove 영역 및 중심축을 기준으로 수명을 평가하였다. Fig. 8 에서 1~9 는 터빈 로터에서 경도를 측정하고 표면복제를 수행한 위치를 나타낸다.

노후 터빈 로터에 대한 정확한 형상 정보 취득이 쉽지 않아서 Fig. 3 에서 제시한 간략 수명평가 절차에 따라 수명평가를 수행하였다. 원심응력은 3600 RPM 의 고속 회전에 의해서 발생

Table 4 Life assessment results

손상위치	크리프 (tr/tr <sub>0</sub> )	저주기피로 (N/N <sub>0</sub> )	수명소비율 (%)
고압 1 단 groove	0.0246	23.299	23.89
중심축	32.16	-	32.16

하고 크리프 수명을 결정하는 주요 인자로 사용된다. 반면 기동시 온도 구배에 의해 발생하는 변형률은 저주기피로 수명을 결정하는 핵심 인자로 반영된다.

Table 4 는 고압 1 단 groove 및 중심축 영역에 대해 해석적인 방법으로 계산된 크리프 및 저주기피로 수명소비율을 나타낸다. 해당 설비는 운전시간이 약 10.6 년이 기 때문에 제작사 권고 수명 30 년임을 고려해 볼 때 평가 결과의 신뢰성을 간접적으로 확인해 볼 수 있다.

일반적으로 로터 고압부의 표면에서는 저주기 피로, 중심축에서는 크리프가 지배적인 손상 기구로 알려져 있다. 저주기 피로 수명은 실제 현장으로부터 측정된 경도값을 활용하여 정확도를 향상시킬 수 있다. 크리프 수명의 경우에는 로터 회전에 의해 원심응력이 발생하는 중심축에 대해 크리프 물성 데이터를 이용해 평가하였다. 터빈의 실제 형상을 정확하게 모델링하고 시간에 따른 운전조건 및 경계조건을 고려하여 유한요소해석을 수행한다면 보다 정확한 수명평가 결과를 얻을 수 있다.

### 5. 결론

혹독한 운전조건에서 사용되는 발전설비의 수명평가를 위한 다양한 평가 기술들이 개발되어 있으나, 제작사의 보수적인 기준을 따르는 것이 일반적이다. 또한 전문가들에 따라 다양한 기술이 사용되어 평가에 일관성이 부족하고 현장 적용시 제약 조건이 많다.

본 연구에서는 한국 화력발전 설비의 신뢰성 있는 수명 평가를 위해 표준화된 평가 기준을 제안하였다. 설비의 크리프 및 피로 수명 평가를 평가하기 위해 단순 계산법을 사용해서 응력 및 변형률을 구하는 해석적 방법과 미세조직의 특성을 분석하는 금속학적 방법이 제안되었다. 또한 실제 설비에 대해 해석적인 방법으로 수명평가를 수행함으로써 평가 기준의 활용성 및 신뢰성을 확인하였다. 화력 발전설비 수명평가 절차가 KEPIC 에 제정되는 2010 년 이후에는 보다 많은 활용 사례 분석과 지속적인 유지

관리를 통해 발전설비 수명 평가의 정확성 향상과 수명관리의 표준화에 기여할 것으로 예상된다.

### 후 기

본 연구는 2006 년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. R.2006-1-240-3)

### 참고문헌

- (1) SPRINT Project SPI 249.
- (2) NT MAT 002, 2001, "Metallographic Assessment of the Temperature History and Remanent Life of Power Plant Components," NORDTEST Method.
- (3) TRD-Codes 300/301.
- (4) Song, G., Choi, W., Kim, B., Hyun, J. and Heo, J., 2010, "Life Assessment Procedure for Fossil Power Plant," KEPIC 2010, submitted.
- (5) Choi, W., Fleury, E., Kim, B. and Hyun, J., 2008, "JSME Int. J.A-Solid M. 2, pp. 478-486.
- (6) Choi, W. and Hyun, J., 2008, "A Life Assessment for Steam Turbine Casing Using Inelastic Analysis," *Modern Physics Letter B*, Vol 22, Issue 11, pp. 1141~1146.
- (7) Viswanathan, R., 1989, "Damage Mechanisms and Life Assessment of High-Temperature Components," *ASM Int.*, pp. 265~328.
- (8) Choi, W., Kim, B., Kim, B. and Song, G., 2009, "A Life Assessment Procedure for Turbine Facilities of Korea Standard Fossil Power Plant," *ICPVT-12*.
- (9) Fujiyama, K., 2007, "Development of Risk-Based Maintenance Planning Program for Power Plant Steam Turbine," Joint Project Final report.
- (10) Rusin, A. M., 2007 "Technical Risk Involved in Long-Term Operation of Steam Turbines, Reliability Engineering & System safety," 92, pp. 1242~1249.
- (11) Gonyea, D.C., 1976, "Thermal Stress Concentration Factors in Large Shaft," *Thermal Fatigue of Materials and Components, ASTM STP612*, pp. 30~37.
- (12) Choi, W. and Fujiyama, K. and Kim, B., 2010, "Thermal Stress Concentration Factors(TSCFS) in Turbine Casing and Valves for Life Assessment," *International Journal of Pressure Vessel and Piping*, submitted.
- (13) Choi, W., 2008, "Life Assessment for Ulsan Steam Turbine Rotor," KEPRI report TM.T07.1243.