

## 터빈로터 수명예측 프로그램의 개발 및 민감도 분석

박재실\*, 석창성\*\*, 서명원\*\*, 홍경태\*\*\*  
(2000년 5월 15일 접수)

### Development and Sensitivity Analysis of Life Estimation Program for Turbine Rotors

Jae-Sil Park, Chang-Sung Seok, Myung-Won Suh and Kyung-Tae Hong

**Key Words:** Life Prediction(수명예측), Finite Element Method(유한요소법), Thermal Fatigue(열피로), Operating Condition(운전조건), Residual Life(잔여수명)

#### Abstract

Steam turbine rotors are the most critical and highly stressed components of a steam power plant; therefore, the life expectancy of the turbine rotor is an important consideration for the safety of a steam power plant. The objective of this paper is to develop a life estimation program for turbine rotors for all possible operating conditions. For this purpose, finite element analysis was carried out for four normal operating modes (cold, warm, hot and very hot starts) using ABAQUS codes. The results are made into databases to evaluate the life expenditure for an actual operating condition. For any other possible abnormal operating condition, the operating data are transmitted to the server (workstation) through a network to carry out finite element analysis. Damage estimation is carried out by transmitting the finite element analysis results to the personal computer, and then the life expectancy is calculated.

#### 1. 서론

국가 산업의 급속한 발전과 경제 규모의 확대로 국내 전력 수요량이 급격히 증가하고 전력 소비 형태가 선진국형으로 변화되고 있다. 발전 설비의 규모도 급격히 대형화되고 발전 방식도 다양화되고 있으며, 양질의 전기 생산 및 공급의 필요성과 운전 효율의 향상을 위하여 고도의 운용 기술과 설비의 검사 및 보수 관리 기술이 요구되고 있다. 따라서 화력 발전소의 불시 정지 사고 감소 및 최적 보수 주기 관리 기술 개발을

통한 발전 설비의 운용 효율화와 장주기 운전 기술 및 수명 연장 기술을 개발하여 설비 운영 기간을 극대화 할 필요성이 있다.<sup>(1,2)</sup>

현재 국내 대부분의 화력 발전 설비는 전력 수요 변화에 대응하여 첨두 부하(peak load)용으로 가동되고 있기 때문에 기동-정지 작동수의 증가에 의해 더 많은 부하를 받으며 이로 인한 재료의 열화는 예상치 않은 사고의 원인이 되고 있다.<sup>(3)</sup> 또한 가동 연한이 오래되고 안전성 문제가 대두되면서 가동 중인 발전 설비의 정확한 수명과 임계 수명까지의 연장 운전을 위한 잔여 수명의 산출이 중요시되고 있다. 이러한 이유로 발전 설비의 제작자와 국내외의 많은 연구 기관에서는 고온 환경하의 발전 설비에 대한 많은 연구들을 수행하였고, 수명 예측을 위한 여러 가지 방법들을 제안하고 이를 이용한 수명 예측 프로그램을 개발하였다.<sup>(4,5)</sup>

이에 본 연구에서는 이러한 연구의 일환으로

\* 성균관대학교 대학원 기계공학과

\*\* 회원, 성균관대학교 기계공학부

E-mail : csseok@yurim.skku.ac.kr

TEL : (031)290-7477 FAX : (031)290-7482

\*\*\* 한국과학기술연구원 금속연구부

화력 발전소의 고온 후속부 설비 부품 중 터빈 로터를 대상으로 하는 수명 평가 프로그램을 개발하였다. 현재 가동 중인 4가지 기종(모델 A, B, C, D)의 터빈 로터를 해석 대상으로 하였으며, 발전소 별로 일반적인 4가지 운전 조건(cold start, warm start, hot start, very hot start)에 대한 수명 평가를 수행하였다. 또한 가동 중 발생하는 불시 정지나 부하 변동 등의 상황이나 발전 설비의 정해진 운전 조건을 만족하지 못하였을 경우에 대해서는 네트워크(network)를 통하여 해석 코드(code)가 내장된 서버(server)에 원격 접속하여 해석 코드를 수정하고 유한요소해석을 수행하여, 설비의 수명 평가를 수행할 수 있는 프로그램을 개발하였다.

## 2. 수명 예측

### 2.1 수명 예측 절차

대상 설비의 손상을 평가하고 수명을 예측하는 과정은 Fig. 1의 수명 평가 흐름도와 같으며 수명 예측 과정의 각 단계를 세부적으로 설명하면 다음과 같다.

제 1 단계 : 터빈 로터의 모델(model)에 따른 기하학적 형상, 재료물성치 및 기동 곡선으로부터 구한 증기의 온도, 압력, 유량, 회전 속도, 발전기 출력 등을 바탕으로 각 로터의 모델을 구성한다.

제 2 단계 : 일반적인 4가지 운전 조건에 대해 과도 상태의 열전달 해석을 수행하여 터빈 로터

의 온도 분포를 결정하고, 이를 바탕으로 열응력 해석을 수행하며, 터빈의 회전수 변화에 따른 원심응력 해석을 수행한다.

제 3 단계 : 응력 해석 결과로부터 취약 부위를 선정하고, 이 부위에 작용하는 응력을 각 성분별로 합산하여 조합 응력(combined stress)을 산출한다.

제 4 단계 : 피로 시험 결과와 가동 초기에 발생하는 최대 조합 응력 값으로부터 피로 손상을 산출하고, 크리프 파단 시험 결과와 정상 상태에서의 최대 조합 응력 값으로부터 크리프 손상을 산출한다.

제 5 단계 : 크리프 손상과 피로 손상을 선형 누적 손상법에 적용하여 총 손상을 산출하고 산출된 총 손상으로부터 한 주기 당 수명 소비율을 구하여 설비의 잔여 수명을 산출한다.

### 2.2 해석 모델

본 연구는 실제 10개 발전소에서 가동되는 4가지 기종의 증기 터빈에 대해 수행되었으며 각각의 디스크 단 수, 치수, 형상 등에 따라 해석 모델을 구성하였다. 본 연구에 사용된 터빈은 모두 증동식 터빈이며, 고압부 만을 모델로 해석을 수행하였고 정상 운전시 회전 속도는 3600RPM이다. 모델 A, B는 각각 11단, 8단으로 구성되어 있고 로터 길이는 A가 32.5cm, B는 50.7cm이고, 지름은 20~28cm 정도이다. 디스크의 두께는 1.5~2cm 정도이고 반경 방향 폭은 3~6.5cm 정도로 작은 형태이다. 또한 모델 C, D는 각각 4단, 7단으로 되어있고 로터 길이는 C가 100cm, D는

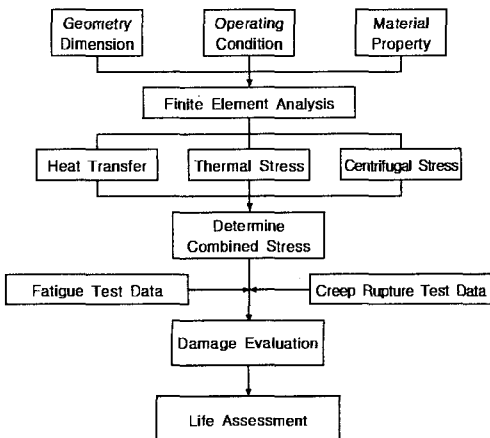


Fig. 1 Residual life prediction procedure

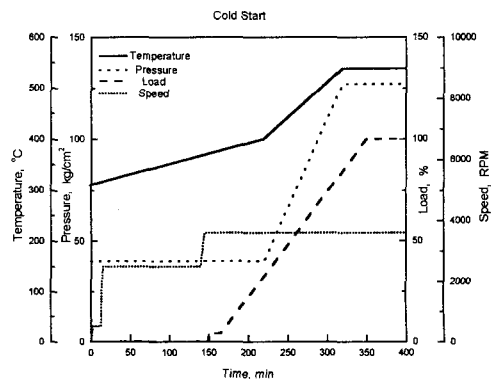


Fig. 2 Operating condition for the cold start of the model D

155.9cm이고, 지름은 모델 C가 40cm 정도이고 D는 25cm 정도이다. 디스크의 두께는 4.5~10cm 정도이고 반경 방향 폭은 17~27cm 정도로 비교적 큰 형태이다.

터빈 고압부에 대한 유한요소 해석을 위하여 4절점 2차원 축 대칭 요소(4-node 2-dimensional axisymmetric solid element)를 사용하였으며, PATRAN을 사용하여 각각의 형상에 따른 절점과 요소망을 구성하였다.

터빈의 일반적인 4가지 운전 조건, 즉 로터의 표면 온도가 150℃ 이하인 상태에서 가동하는 냉기 기동(cold start), 정지 후 24시간이 경과한 후에 재 가동하는 주말 정지 후 기동(warm start), 정지 후 8시간이 경과하여 재 가동하는 심야 정지 후 기동(hot start), 정지 후 2시간 이내에 재 가동하는 정지 직후 기동(very hot start) 조건에 대해서 정상 상태에 이를 때까지 과도 상태의 열전달 해석 및 열응력 해석, 원심응력 해석을 수행하였다. Fig. 2는 본 연구에 사용된 운전 조건 중의 한 예로 모델 D에 대한 냉기 기동시의 운전 조건을 나타낸 것이다.

2.3 열전달 해석

열전달은 로터 주위에서 유입 증기와 접촉하여 이루어지는 대류 열전달과 로터 내부의 온도 구배에 의해 일어나는 열전도로 구분할 수 있다. 터빈 로터는 기하학적 복잡성으로 인하여 각 부

위마다 열전달계수가 다르고, 터빈 내부에서의 증기 온도와 압력의 측정이 불가능하기 때문에 유입 증기의 온도와 압력, 유출 증기의 온도와 압력으로부터 보간법을 사용하여 각 단의 증기 온도와 압력을 구한 후에 각 부위 별로 열전달계수 산출식<sup>(6)</sup>을 이용하여 열전달계수를 산출하였다.

4가지 운전 유형 모두, 가동 초기의 로터 표면 온도는 유입되는 증기 온도에 비해 매우 낮기 때문에 온도 편차가 발생하고, 이로 인한 열전달의 결과로 온도가 상승하게 된다. 특히, 터빈에 부하가 걸리는 시점 이후에는 유입되는 증기의 온도와 압력이 급격히 상승하므로 대류 열전달계수 값이 급격히 증가하게 되고 로터 표면 온도 또한 급격히 상승하게 된다. 이러한 과도 상태가 열전달 계수의 변화 없이 일정 시간 유지되면 열적 평형 상태인 정상 상태에 도달하게 된다. 이 때 로터 1단 부위의 표면 온도는 더 이상 상승하지 않고 유입되는 증기 온도와 비슷한 값을 유지하게 된다. 해석 결과의 한 예로 모델 D에 대하여 각 운전 유형에 따른 고압 터빈 1단 직후 필렛(fillet) 부위의 온도 변화 결과를 Fig. 3에 나타내었다.

2.4 응력 해석

2.4.1 열응력 해석

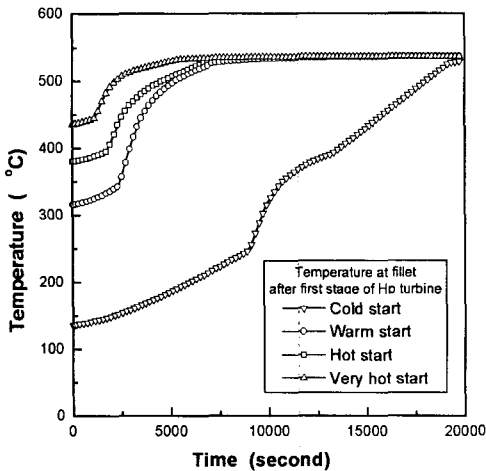


Fig. 3 Heat transfer analysis results of the model D

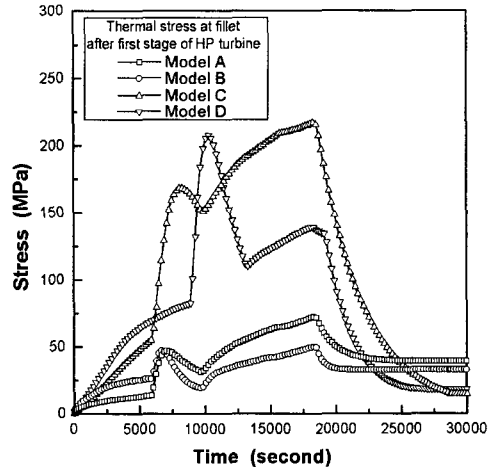


Fig. 4 Von Mises stress analysis results for a cold start

열전달 해석 결과를 입력 자료로 하여 일반적인 4가지 운전 조건에 대해 열응력 해석을 수행하였다. 해석 결과 최대 열응력이 나타나는 취약 부위는 모두 고압 터빈 1단 직후 필렛 부위로 나타났다.

최대 열응력은 유입되는 증기의 온도와 압력이 급상승하여 로터 표면에서 급격한 온도 구배가 일어나는 시점, 즉 부하가 걸리기 시작하는 시점 후에 발생하였고, 시간이 지날수록 열응력 값이 점차 감소하여 정상 상태에서는 매우 작은 값으로 나타났다. 각 모델별 고압 터빈 1단 직후 필렛 부위의 냉기 기동시 Von Mises 응력 변화를 Fig. 4에 나타내었다.

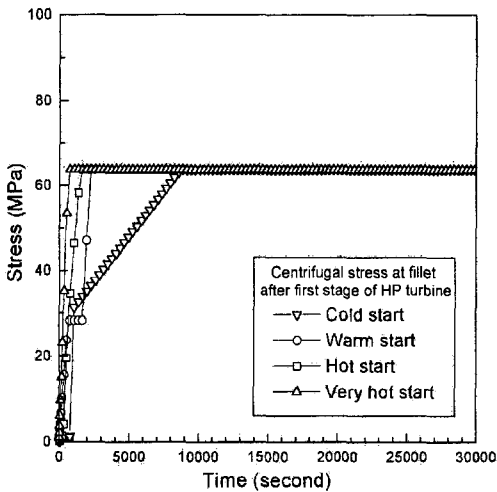


Fig. 5 Von Mises stress analysis results of the model D

2.4.2 원심응력 해석

기동 곡선으로부터 구한 터빈 회전수 변화를 바탕으로 원심응력 해석을 수행하였다. 최대 원심응력은 Fig. 2의 기동 곡선에서 로터가 정상 회전 속도에 이르렀을 때 운전 유형에 관계없이 같은 값으로 나타났으며 응력의 크기는 로터의 크기가 클수록 크게 나타났다. 또한 Fig. 2의 기동 곡선에서 보이는 바와 같이 터빈이 정상 회전 속도에 도달한 후에 터빈에 최대 부하가 걸리게 되며 급격한 온도 구배를 겪게 되는 것으로 나타났다. 모델 D의 운전 유형 별 고압 터빈 1단 직후 필렛 부위의 원심응력 변화는 Fig. 5와 같다.

2.5 손상 평가

2.5.1 조합 응력의 산출

터빈의 한 주기 당 운전 시간을 1080시간(45일)으로 가정하고 터빈 로터가 받는 손상을 피로 손상과 크리프 손상으로 나누어 각각 산출하였다.

터빈 가동 중에는 원심응력과 열응력이 동시에 작용하므로 선형 중첩의 원리를 적용하여 취약 부위에 작용하는 열응력과 원심응력을 각 성분별로 합산함으로써 조합 응력을 산출하였다.

2.5.2 피로 손상 평가

산출된 응력 상태를 바탕으로 과도 상태의 피로 손상을 Miner 법칙을 사용하여 산출하였고, 산출된 조합 응력의 최대치를 피로 시험 결과 도출된 응력-파단 수명 곡선( $\sigma-N_f$  curve)에 대입

Table 1 Fatigue and creep damage analysis results

Model	Operating Condition	Fatigue Damage (%/cycle)	Creep Damage (%/cycle) (1cycle = 1080hours)
A	Cold	0.0010	0.00006
	Warm, Hot, Very Hot	0.0010	0.00005
B	Cold	0.0010	0.00005
	Warm, Hot, Very Hot	0.0010	0.00004
C	Cold	0.0403	0.00009
	Warm	0.0314	0.00010
	Hot	0.0102	0.00009
D	Very hot	0.0027	0.00010
	Cold	0.0310	0.00019
	Warm	0.0380	0.00020
	Hot	0.0150	0.00020
	Very hot	0.0100	0.00020

하여 로터의 파단 수명( $N_f$ )을 산출하였다.

산출된 조합 응력을 이용하여 터빈의 1주기 당 피로 손상을 운전 유형 별로 산출하였고, 그 결과를 Table 1에 정리하였다. 산출된 조합 응력의 값에 따라 피로 손상의 정도가 결정되므로, 응력의 최대치가 가장 큰 냉기 기동의 경우가 가장 큰 피로 손상을 나타내었다. 모델 A, B의 경우, 응력의 수준이 피로 한도보다 낮으므로 10만 사이클을 수명으로 간주하여 운전 유형에 관계없이 적용하였다. 모델 D의 경우 주말 정지 후 기동의 경우가 냉기 기동보다 피로 손상이 크게 나타났는데 이는 Fig. 2의 기동 곡선에서 보는 바와 같이 해석에 적용한 기동 곡선이 완전 냉기 기동의 형태가 아니기 때문에 나타난 결과로 생각된다.

2.5.3 크리프 손상 평가

응력 해석 결과를 가지고 정상 상태의 크리프 손상을 Robinson 법칙을 사용하여 산출하였고, 정상 상태 조합 응력의 최대치를 크리프 파단 시험으로부터 구한 크리프응력-파단 시간 곡선( $\sigma_c - t_R$  curve)에 대입하여 로터의 파단 시간( $t_R$ )을 산출하였다.

산출된 조합 응력을 이용하여 터빈의 1주기 당 크리프 손상을 운전 유형 별로 산출하였고, 그 결과를 Table 1에 정리하였다. 크리프 손상은 해

석 결과 산출된 정상 상태에서의 조합 응력의 값에 따라 결정되는데 모델 별로 차이가 심하지 않은 열응력보다는 로터 및 디스크 형상의 차이로 인한 원심응력의 영향을 많이 받는 것으로 나타났다. 크리프 손상 산출 결과 모델 A, B에 비해 로터와 디스크의 크기가 큰 모델 C, D에서 손상이 크게 나타났다. 모델 D의 경우 크리프 손상이 모델 C의 두 배로 나타났는데 이는 모델 C의 디스크 크기는 모델 D와 비슷하지만 로터 형상에 따른 필렛 부위 반경이 모델 D가 모델 C에 비해 매우 작기 때문이라고 생각된다.<sup>(7)</sup>

운전 유형에 따른 크리프 손상은 원심응력의 크기가 같고 정상 상태에서 발생하는 열응력의 크기가 운전 유형 별로 큰 차이가 나지 않기 때문에 비슷한 값으로 나타났다.

2.6 수명 평가

터빈 로터의 수명 평가를 수행하기 위하여 피로 손상과 크리프 손상의 산출 결과를 선형 누적 손상법칙에 적용하여 한 주기 당 수명 소비율과 잔여 수명을 산출하였다.

터빈의 1회 운전 시간을 1080시간(45일)으로 가정하고 산출한 한 주기 당 크리프 손상과 피로 손상을 비교해 본 결과 Table 1과 같이 크리프 손상은 피로 손상에 비해 아주 작은 값으로 나타났다. 따라서 정상 상태에서의 크리프 손상은 과도 상태의 열피로 손상에 비해 터빈 로터의 수명에 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있었다.

피로 손상의 정도가 아주 작은 모델 A, B의 경우는 응력의 수준이 피로 한도 이하의 값을 나타내기 때문에 10만 사이클 정도의 수명을 나타내었다. 이는 로터의 크기가 작고 가동 온도도 낮으며 온도 변화율이 작기 때문이라고 생각된다.

3. 수명 예측 프로그램의 개발

본 연구에서는 화력 발전소 터빈 로터의 손상 평가를 수행하고 이를 토대로 잔여 수명을 예측하여 설비의 안전성을 평가할 수 있는 PC 기반의 수명 예측 프로그램을 개발하였다. 이 프로그램에서는 가동 중에 발생할 수 있는 불시 정지, 부하 변동 등의 상황이나 발전소의 정해진 운전 조건에 따라 기동하지 못하였을 경우에 대해 네트워크를 통하여 유한요소해석을 수행하고 해석

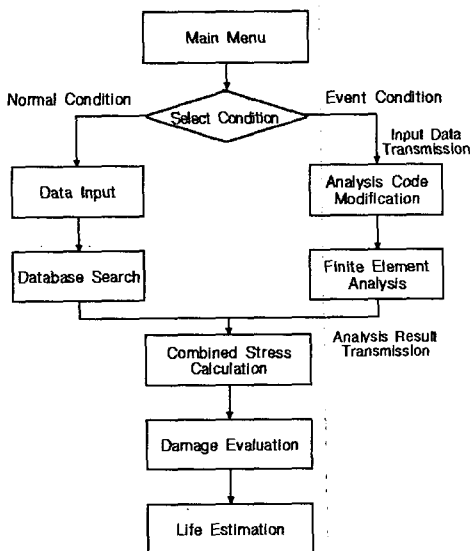


Fig. 6 Design concept of life prediction program

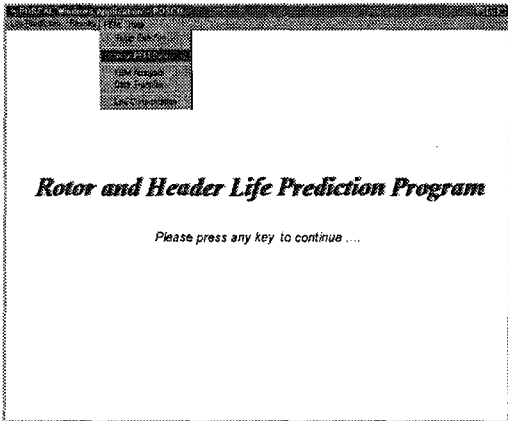


Fig. 7 The screen of a main window

된 결과를 전송 받아 손상 평가와 수명 평가를 수행하여, 터빈 로터의 보다 정확한 잔여 수명을 예측할 수 있도록 하였다.

이 프로그램은 윈도 95 운용 체계에서 프로그램이 구동되도록 하였으며, 비주얼 C++ 언어를 사용하였고 사용자의 편의를 위해 윈도우즈 환경으로 구성하였다. 이 프로그램의 기본적인 설계 개념은 Fig. 6과 같다.

### 3.1 정상 운전 조건에서의 처리 절차

정상 운전 조건이란 발전소의 정해진 운전 조건에 따라 기동 및 정지를 하는 경우로, 기동-정지의 반복에 따라 피로 하중을 받는 경우이다. 이 경우의 해석을 위하여 사용자 인터페이스부, 사용자 입력부, 데이터베이스부, 손상 평가부 및 수명 평가부를 구성하였다.

사용자 인터페이스부는 평가 대상을 선정하고 운전 조건, 운전 이력 등을 입력하며 일반적인 운전 유형에 따른 데이터베이스(database) 검색과 손상 평가, 수명 평가를 통합 관리하기 위한 부분으로, GUI(graphic user interface) 방식으로 구성되어 있다.

사용자 입력부는 설비 운용자가 평가 대상 설비에 대한 자료를 입력하는 부분으로, 대상 설비와 운전 조건에 대한 선택과 가동 시간을 편리하게 입력할 수 있도록 구성되어 있다.

데이터베이스부에는 모델에 대한 형상, 치수, 재료물성치, 운전 조건, 열응력, 원심응력, 피로와 크리프 시험 자료 등을 수록하고 있으며, 이러한 데이터는 손상 평가와 수명 평가를 하기 위한 기

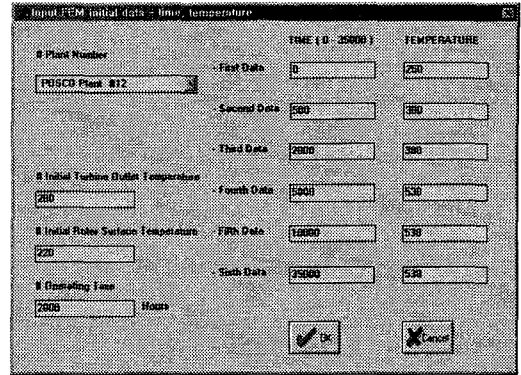


Fig. 8 The screen of a operating condition input module

초 자료로 사용된다. 또한 사용자가 검색 과정을 통하여 수명 예측에 필요한 자료를 참조할 수 있고, 자료의 갱신이나 추가가 가능하도록 구성하였다.

손상 평가부는 데이터베이스를 검색하여 조합 응력을 산출하고 이를 바탕으로 피로 손상과 크리프 손상을 평가하는 부분이다. 여기에서는 조합 응력의 최대치를 사용하여 한 주기 당 과도 상태에서의 피로 손상과 정상 상태에서의 크리프 손상을 평가하고 피로 수명 곡선과 크리프 수명 곡선에 대입하여 파단 수명과 파단 시간을 산출하도록 구성하였다.

수명 평가부는 산출된 피로 손상 및 크리프 손상 결과로부터 한 주기 당 수명 소비율을 계산하는 부분으로, 응력 분포와 취약 부위에 대한 확인이 가능하도록 구성되어 있다. 이 부분에서는 피로 손상 및 크리프 손상 결과를 선형 누적 손상법에 적용하여, 한 주기 당 총 손상을 계산하여 총 수명 소비율을 산출하도록 하였다.

그리고 모델 별로 데이터베이스로 저장된 운전 유형별 가동 횟수와 가동 시간으로부터 총 가동 시간 및 횟수를 계산하고, 이를 토대로 잔여 수명을 산출하여 사용자가 쉽게 알아볼 수 있도록 도식적으로 표현하도록 하였다.

### 3.2 비정상 운전 조건에 대한 수명 평가

비정상 운전 조건이란 발전소의 가동 중 정상 운전에서 벗어나 운전되는 경우로 불시 정지, 갑작스런 부하의 변동 또는 특별한 원인으로 인하여 정해진 운전 조건에서 벗어나 운전되는 경우

를 말한다. 이 경우를 수명 평가에 고려하기 위하여 상용 통신 프로그램 등록부, 비정상 운전조건 입력부, 워크스테이션 연결부 및 해석 결과 전송부를 구성하였다. 비정상 운전 조건에 대한 이 밖의 수명 평가 절차는 정상 운전 조건에 대한 수명 평가 순서와 동일하다. 이러한 과정을 Fig. 7과 같이 주 메뉴의 부속 메뉴를 순서대로 구성하여 사용자가 쉽게 수명 평가를 수행할 수 있도록 구성하였다.

상용 통신 프로그램 등록부는 유한요소해석을 수행하기 위하여 워크스테이션(workstation)에 네트워크를 통하여 접속하여 수정된 해석 코드를 전송하고, 해석된 결과를 전송 받기 위한 상용 통신 프로그램을 등록하는 부분이다.

비정상 운전 조건 입력부는 평가 대상을 선택하고, 비정상 운전 조건에 대한 유입 증기의 온도와 시간을 입력하고, 터빈의 초기 표면 온도 및 배출 증기 온도, 가동 시간을 입력하는 부분으로, Fig. 8과 같이 구성되어 있다. 비정상 운전 조건의 입력을 위해 온도 변화 단계를 시간에 따라 6단계로 나누어서 입력하도록 구성하였고, 해석 코드를 수정하여 워크스테이션으로 전송하기 위한 통신 프로그램을 구동하도록 구성하였다.

워크스테이션 연결부는 유한요소해석을 수행하기 위하여 통신 프로그램을 구동하는 부분으로, 네트워크를 통해 워크스테이션과 접속을 수행하게 된다. 워크스테이션에 접속하여 사용자 확인 과정을 거친 후 모델 별로 정해진 코드를 입력하게 되면 코드에 저장된 순서에 의해 미리 수정되어 전송된 해석 코드를 사용하여 유한요소해석을 수행하게 된다. 해석이 수행된 후 계산된 결과를 수명 평가에 사용하기 위한 형태의 자료로 변환시키는 과정을 거치게 된다.

해석 결과 전송부는 수명 평가를 수행하기 위하여 해석 결과 생성된 결과 파일을 워크스테이션으로부터 전송해 오기 위한 통신 프로그램을 구동하는 부분으로, 이곳에서는 상용 통신 프

그램이 사용되도록 되어 있다.

수명 평가부는 정상 운전 조건에 대한 수명 평가 과정과 동일하며, 조합 응력의 산출부, 피로 및 크리프 손상 평가부, 수명 평가부의 3단계로 구성되어 있다.

## 4. 운전 조건 민감도 분석

### 4.1 수명 예측 결과 분석

터빈의 실제 운전 조건에 대해 산출한 로터의 최대 응력을 터빈 제작사의 설계 응력과 비교하여 그 결과를 Table 2에 정리하였다. 모델 C, D의 경우 일반적인 4가지 운전 유형 대부분에서 실제 운전 조건에 대한 최대 응력이 일반적인 경우에 대한 제작사의 설계 응력보다 10~30%정도 작게 나타났다. 심야 정지 후 기동과 정지 직후 기동의 경우는 거의 비슷한 값을 나타내었으나 냉기 기동의 경우에는 제작자들이 제시한 설계 기준과 차이가 심하게 나타나는데, 이는 제작사가 제시한 그래프를 이용하여 응력을 구할 경우, 온도 증가폭이 크고 온도 변화 시간이 긴 경우에 대한 정확한 값을 구하기 힘들기 때문이라 생각된다.<sup>(6)</sup>

이러한 해석 결과의 차이는 제작사의 설계 운전 조건과 실제 운전 조건과의 차이에서 비롯되었다고 생각된다. 터빈의 설계 시 발생 가능한 모든 운전 유형에 대한 분석을 할 수가 없고 가동 연한의 증가에 따른 설비의 노후화로 인한 가동 조건의 변화도 차이의 원인 중의 하나라 생각된다.<sup>(8)</sup> 또한 기저 부하용으로 설계되었으나 점두 부하용으로의 사용이 잦아지고 역할이 전환된 것도 차이의 원인이라 생각된다.<sup>(7)</sup>

### 4.2 온도 변화폭의 변화가 수명에 미치는 영향

재료의 손상이 가동 온도에 따라 큰 차이를 보인다는 것은 잘 알려진 사실이며 터빈 로터의 경우에도 마찬가지이다. 가동 온도가 높아지게 되

Table 2 Comparison of actual and designed stresses

Operating Mode		Cold Start	Warm Start	Hot Start	Very Hot Start
Designed Stress (MPa)	Hitachi	294.3	219.7	140.3	101.0
	Toshiba	215.8	191.3	147.2	98.1
	KEPCO(ROLPAS)	308.0	207.0	148.1	140.3
Actual Stress (MPa)	Model C	224.5	190.5	125.8	107.1
	Model D	181.1	228.2	142.4	113.8

면 일정한 시간에 더 큰 온도의 변화를 겪게 되고 각 구간마다 온도 변화폭이 달라지게 된다. 가동 온도가 높아지고 온도 변화폭이 커지게 되면 수명 소비율 또한 커지게 될 것이다.

부하 변동(0%~75%)으로 인한 온도의 저하,<sup>(6)</sup> 낮은 출력으로 가동할 경우의 100℃ 이상의 가동 온도 변화(25%~100%),<sup>(9)</sup> 과열로 인한 증기 온도의 비정상적인 상승, 열병합 발전으로의 역할 변화를 위해 정상 운전 온도 이상으로 운전 조건이 변경될 경우<sup>(10)</sup> 등의 온도 변화폭의 변화에 대한 수명 소비율을 계산하기 위해 모델 C의 냉기 기동 조건에서 가동 온도를 465℃에서 570℃까지 15℃씩 변화시키며 해석을 수행하였다. 가동 온도가 높아질수록 즉, 같은 시간 동안의 온도 변화폭이 커질수록 응력은 전체적으로 증가하는 경향으로 나타났고, 가동 온도의 차이가 가장 큰 경우(105℃)인 465℃와 570℃일 때 응력의 차이는 25%정도로 나타났다.

응력 해석 결과, 각각의 가동 온도에서의 최대 응력은 Fig. 9와 같으며 가동 온도가 높아질수록 로터 표면에 걸리는 최대 응력도 증가하는 경향을 보였다. 최대 응력에 도달할 때까지 걸리는 시간은 가동 온도에 관계없이 모두 같았다. 따라서 Fig. 10에 도시한 바와 같이 가동 온도가 높아질수록 열피로 손상에 의한 수명 소비율은 더욱 커지는 것으로 나타났다. 이는 가동 온도의 변화

로 인한 온도 변화폭의 변화가 동일 시점에서의 열전달 조건을 변화시켜 시간에 따른 로터 표면의 열전달계수 값이 변화하여 로터 표면의 온도 구배가 변화하였기 때문이라고 생각된다.

정상 상태의 크리프 응력은 가동 온도가 증가함에 따라 별다른 변화를 보이지 않았는데, 이것은 정상 상태의 크리프 응력이 원심응력의 영향을 주로 받으며 가동 온도의 차이로 인한 온도 변화폭의 영향이 크지 않기 때문이라 생각된다.

따라서 가동 중의 사고로 인하여 터빈이 가동 온도 이상에서 운전되었을 경우나 설비의 가동 온도를 변경하여 사용할 때 이러한 수명 소비율의 변화를 고려하여 터빈 설비의 잔여 수명을 관리해야 할 것으로 생각된다.

4.3 온도 변화율의 변화가 수명에 미치는 영향

화력 발전소는 가동 초기에 기저 부하를 위해 설계되었으나 원자력 발전소가 기저 부하의 많은 부분을 차지하게 되면서 첨두 부하용으로 자주 사용되고 있다. 이에 따라 잦은 기동, 정지를 반복하게 되고, 순간의 부하를 담당하기 위해서 기동 시간을 단축해야 할 필요가 있다. 따라서 정상 상태까지의 온도 변화율의 변화에 따른 응력과 수명 소비율의 변화를 고찰해 볼 필요가 있다.

이를 위하여 발전소의 역할 변화에 따른 순간 부하 담당을 위한 급 기동 시의 수명 소비율을

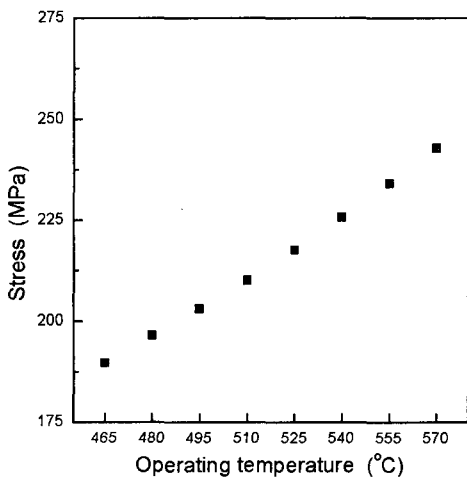


Fig. 9 Comparison of thermal stress analysis results for various operating temperature of model C

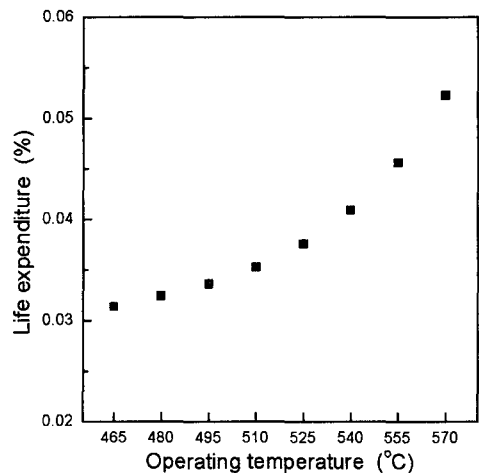


Fig. 10 Comparison of life expenditure evaluation results for various operating temperature of model C



계산하기 위하여 실제 기동 시간의 50%까지 단축된 경우에 대해 해석을 수행하였다. 모델 C, 냉기 기동 운전 조건의 온도 변화율을 0%에서 50%까지 증가시키며 응력해석을 수행하였다. 응력해석 결과 온도 변화율이 변화함에 따라 취약 부위에 걸리는 최대 응력은 Fig. 11과 같이 나타났다. 온도 변화율이 커질수록, 즉, 같은 온도에 도달하는 시간이 짧아질수록 응력은 전체적으로 증가하는 경향을 나타내었고, 최대 응력이 발생하는 시점 또한 온도 변화율에 비례하여 빨라지는 경향을 나타내었다. 온도 변화율이 높아질수록 로터 표면에 걸리는 최대 응력도 증가하는 경향을 보였으며 정상 상태 도달 시간이 냉기 기동에 비해 50%로 짧아진 경우 최대 응력은 100% 정도 증가하였다.

이에 따라 온도 변화율이 증가할수록 열응력에 의한 피로 손상이 증가하였으며, 그 관계를 Fig. 12에 나타내었다. 특히 온도 변화율이 50%인 경우의 취약 부위에 발생하는 최대 응력은 393MPa로 항복 강도인 442MPa에 근접할 정도로 큰 폭으로 상승하였다.

온도 변화율의 변화에 따른 정상 상태의 크리프 응력에는 변화가 없었으며 이로 인한 크리프 손상 또한 같게 나타났다. 이는 정상 상태에서의 응력이 온도 변화폭의 변화에 따른 결과와 마찬가지로 원심응력의 영향을 많이 받기 때문이라

생각된다.

따라서 발전 설비를 첨부 부하용으로 용도 변경할 때 발생할 수 있는 순간 부하를 담당하기 위해 빠른 기동을 했을 경우나 기동 곡선의 변경 시 수명 소비율의 차이가 극심하게 발생하므로 이를 고려한 잔여 수명의 관리가 필요하다고 생각된다.

### 5. 결론

본 연구에서는 가동 중인 4가지 기종의 화력 발전소 증기 터빈 로터에 대하여 일반적인 운전 조건에서의 피로 및 크리프 손상을 평가하고 수명 소비율을 계산하여 잔여 수명을 예측할 수 있는 프로그램을 개발하였다. 특히 터빈 로터의 비정상 운전 조건에 대하여는 실시간으로 네트워크를 통하여 워크스테이션에 접속하여 유한요소해석을 수행하도록 하였으며, 해석된 결과를 이용하여 수명 평가를 수행할 수 있도록 하였다. 이러한 일련의 연구와 본 연구의 프로그램을 이용하여 보다 정확한 수명 소비율을 산출하고 터빈 로터의 잔여 수명 평가에 적용하기 위하여 운전 가능한 범위 내에서 실제 기동 조건을 변화시킨 여러 운전 조건에 대하여 민감도를 분석한 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 정상 상태에서 발생하는 크리프 응력은 터

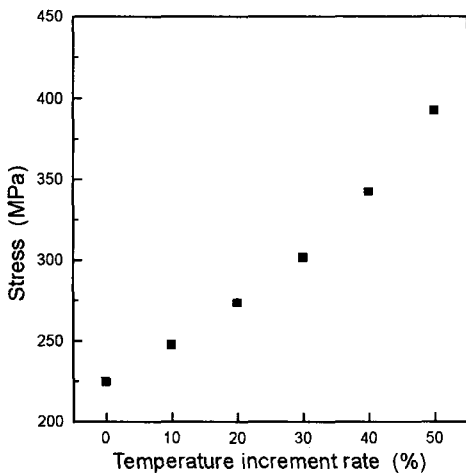


Fig. 11 Comparison of thermal stress analysis results for various temperature increment rate of model C

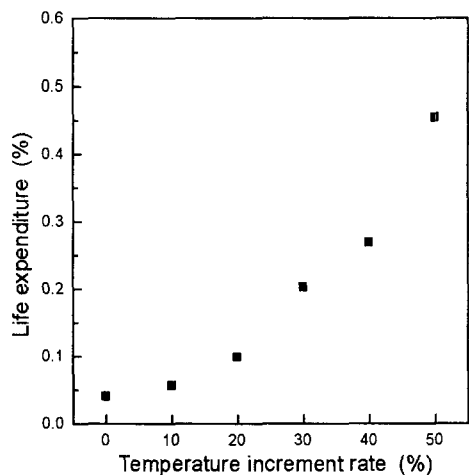


Fig. 12 Comparison of life expenditure evaluation results for various temperature increment rate of model C

빈 로터의 운전 조건에 관계없이 비슷한 값을 나타내었고, 기동 시에 발생하는 열피로 응력은 운전 조건에 따라 크게 변화하였으며 수명에 큰 영향을 미쳤다.

(2) 실제 운전 조건에 대한 터빈 로터의 최대 응력은 제작자에 의한 설계시의 응력보다 10~30% 정도 작게 나타났다. 또한 제작자들 간의 설계 기준 값이 서로 다르기 때문에 냉기 기동의 경우에는 다른 운전 조건에 비해 큰 차이를 보였다.

(3) 온도 변화폭의 변화에 따른 터빈 로터의 취약 부위에 걸리는 최대 응력의 차이는 비교적 크지 않았으나 온도 변화폭이 증가함에 따라 최대 응력이 증가하는 경향을 나타내었고, 이로 인한 손상과 수명 소비율은 온도 변화폭이 커질수록 더욱 증가하였다. 따라서 터빈이 가동 온도 이상에서 운전되었을 경우나 가동 온도의 변경 사용시 잔여 수명 관리를 위해서는 이러한 수명 소비율의 변화를 고려하여야 할 것으로 생각된다.

(4) 온도 변화율의 변화에 따른 터빈 로터의 취약 부위에 걸리는 최대 응력의 차이는 상당히 크게 나타났으며 이로 인해 수명 소비율 또한 큰 차이를 보였고, 온도 변화율이 50%인 경우에는 터빈 로터의 수명에 상당한 영향을 미치는 것으로 나타났다. 따라서 순간 부하를 담당하기 위해 빠른 기동을 했을 경우나 기동 곡선의 변경시 수명 소비율의 변화를 고려한 잔여 수명의 관리가 필요하다고 생각된다.

## 후 기

본 논문은 한국과학재단 산하 성균관대학교 산업설비 안전성평가 연구센터의 연구비 지원으로 이루어진 것으로서, 이에 관계자 여러분들께 감사드립니다.

## 참고문헌

- (1) 김건영, 1995, "발전 설비 수명 예측," 대한기계학회 재료 및 파괴부문 학술강연집, pp. 60~74.
- (2) 권재도, 1992, "장기 사용 Cr-Mo 강 열화재의 파괴인성 평가와 수명예측," 대한기계학회논문집, 제16권, 제8호, pp. 1421~1428.
- (3) 임종순, 허승진 외 3인, 1990, "발전용 터빈 로우터의 수명예측을 위한 열응력 해석," 대한기계학회논문집, 제14권, 제2호, pp. 276~287.
- (4) R. Viswanathan, 1995, "Damage Mechanisms and Life Assessment of High Temperature Components," ASM INTERNATIONAL.
- (5) 백수근, 1997, "화력발전소 정기점검 주기연장 핵심 기술과 개발 전략," 화력발전소 정기점검 주기연장기술 Workshop, pp. 3~34.
- (6) 허성강, 남수우, 유영면, 홍경태, 도정만, 백남익, 류재화, 박찬우, 임종순, 윤영길, 맹선재, 김건영, 박경수, 하정수, 1987, "터빈 로터 수명 예측에 관한 연구," 한전기술연구원, KRC-85G-J02, 한국과학기술연구원.
- (7) 김현수, 김영진, 서명원, 홍경태, 1999, "발전용 고압터빈 로터의 수명예측을 위한 프로그램의 개발," 대한기계학회논문집 A권, 제23권, 제3호, pp. 434~441.
- (8) 홍성호, 1992, "화력 발전 설비의 수명 예측에 재질 열화 및 결정립 크기 변화가 미치는 영향," 전력 기술, 제3권, 제4호, pp. 13~22.
- (9) 전력연구원, 1996, "터빈케이싱의 수명예측 및 정비기술개발," 2차년도 보고서.
- (10) 김형섭, 1997, "소형 열병합 발전설비 설비관리기술," 화력발전소 정기점검 주기연장기술 Workshop, pp. 185~196.