# 터빈 로터 열응력 해석 알고리즘 개발

장성호, 백수곤, 정창기
전력연구원

# Development of a algorithm for thermal stress analysis of turbine rotor

Chang, S. H, Baek, S. K, Chung, C. G.
Korea Electric Power Research Institute

**Abstract** - The Rotor Stress Indicator is an integrated system of hardware and program components which has been designed to read an assortment of turbine temperature and speed input devices, perform an analysis of the temperature induced stresses and output pertinent temperature and stress information to guide the turbine operator during turbine prewarming, start-ups, load changes, and shut-downs.

The purpose of the RSI is to provide guidance to the plant operator during startup, shutdown, loading, and unloading of the turbine. Since the stresses are a function of the temperature changes to which the turbine is exposed, the RSI also provides guidance for operation of the boiler main steam and reheat steam temperatures as they affect the rotor stresses. This may permit more efficient overall boiler turbine start-ups.

In this paper, new rotor stress analysis algorithm for RSI is introduced and compared with present system which has been used in thermal power plant.

## 1. 서 론

국내 화력발전소는 잦은 기동/정지로 인하여 터빈 로터의 손상이 발생하고 수명이 감소하기 때문에 로터의 파손방지와 손상감시를 위한 시스템의 개발이 필요하다. 터빈 가동 및 정지 시에 발생하는 터빈 로터의 열응력을 계산하여 그 수치를 운전원들에게 보여주고 이에 따른 터빈의 피로수명 감소를 예측하는 기능을 수행하는 RSI (Rotor Stress Indicator System)는 터빈의 안전한 운전과 수명관리를 위해서는 필수적인 설비이며, 효율적으로 설비를 운용할 수 있도록 도와주는 장비이다.

그러나, 현재 많은 RSI가 노후화 되어 잦은 고장이 발생하고 있으나 spare part의 확보 불가 등으로 유지보수가 불가능한 상태이다. 따라서 설비의 국산화를 위한 대체 시스템을 설계 검토하게 되었다.

본 논문에서는 터빈 로터의 열응력 해석에 대한 실시간 처리 알고리즘에 대하여 소개하고, 차후 개발될 터빈 로터 열응력 감시 시스템의 적용과 기력발전소 터빈 디지털 제어 시스템에 적용하기 위한 실시간 감시 시스템의 구성방법에 대하여 논하고자한다. 또한, 현재 국산화 개발중인 열응력 해석 알고리즘을 이용한 해석 결과와 비교 검토해 보고자 한다.

## 2. 본 론

### 2.1 설비 개요

Rotor Stress Indicator(이하 RSI)는 발전소 터빈 내부의 회전자(Rotor)에 가해지고 있는 Stress 및 로터가 현재까지 받은 누적 Stress에 기초한, 로터의 잔여 수명에 대한 정보를 제공하는 설비이다. 이를 위하여 터빈 내부에 다수의 Thermocouple (T/C, E-type)을 장착하여 터빈 내부의 온도 분포를 파악하고 이로부터 로터 표면과 로터 Bore의 온도를 추정해낸다. 또한 로터의 현재 회전 속도 및 터빈 내부의 압력 등을 참고하여 현재 로터 표면이 받고 있는 Stress를 계산하고 이를 토대로 로터 Bore가 받는 Stress를 추정한다.

이러한 정보로부터 운전원은 터빈 기동 및 제동, 혹은 부하 변동시 로터에 가해지는 Stress 상태를 파악하여 적정 상태의 Stress하에서 운전이 이루어지도록 할 수 있으며 로터의 열화 상태를 추정하여 발전소 정비 계획 수립에 참고할 수 있다. 이를 통해 궁극적으로는 터빈의 수명을 연장할 수 있다.

개발되는 설비는 현장 인출점으로부터 각종 신호를 입력받아 이를 Panel PC 혹은 Maintenance Terminal로 전송하는 DAS (Data Acquisition System)와 DAS로부터 전송된 신호에 주어진 알고리즘을 적용하여 Stress값들을 운전원에게 알려주는 Panel PC, 주기 점검 및 설정치 조정을 위한 Maintenance Terminal로 구성된다. 기존의 설비는 그림 1과 같다.

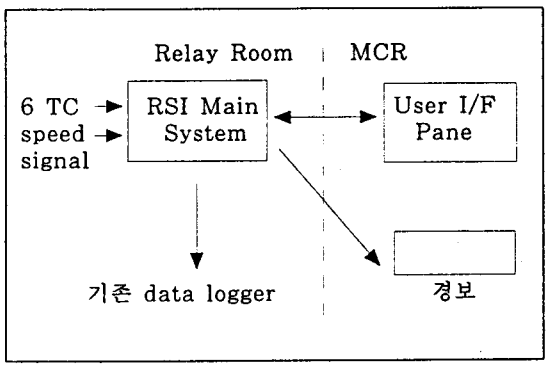


그림 1. 기존 RSI 구성도

### 2.2 개발 방향

기존 설비의 경우 개발된 지 많은 시간이 지나 있어 유지보수에 의한 운영이 한계점에 다다랐으며 Stress의 추정에 필요한 알고리즘 자체도 기존 설비에 비해 상당부분 개선되어 더욱 정교한 알고리즘이 개발된 상태이므로 이의 적용을 위하여 새로운 설비로 교체한다. 교체하는 설비는 각 하드웨어 요소를 모듈화하여 구성함으로써 설비의 유지 보수 및 기능 확장이 용이하도록 하며 데이터 수집 이후의 모든 처리를 디지털화하여 환경 조건에 영향을 받지 않는 정밀도 높은 설비로 구현한다. 또한 Stress계산 알고리즘을 S/W적으로 구현함으로써 알고리즘의 개선시 새로운 알고리즘의 적용이 간단히 이루어질 수 있도록 한다.

### 2.2.1 용어의 정의 및 약어

- RSI : Rotor Stress Indicator
- HP : High Pressure Inlet
- RH : Reheat Bowl
- XO : Reheat Exhaust
- CLE : Cyclic Life Expenditure. 소요 수명.
- FATT : Fracture Appearance Transition Temperature
- °F : Fahrenheit Scale. 화씨 온도. 0℃=32°F, 100℃=212°F
- DAS : Data Acquisition System
- PPC : Panel PC
- MT : Maintenance Terminal
- SCM : Signal Conditioning Module
- AIM : Analog Input Module
- AOM : Analog Output Module
- CPM : Central Processing Module
- DIOM : Digital Input Output Module
- PSM : Power Supply Module

### 2.3. 열응력 해석

### 2.3.1 터빈 운전과 열응력

정지하고 있는 터빈을 기동하여 정격 출력에 이를 때까지 운전하는데는 설비의 온도가 상온에서부터 545℃ 정도의 온도까지 상승하는 주위 증기조건과 함께 변화하게 된다. 터빈은 고온고압에 견디기 위하여 그 두께가 두껍기 때문에 이와 같이 증기의 온도가 변화하면 금속 내 외부에 온도차가 발생하여 그에 해당하는 열응력이 발생된다. 이러한 열응력은 기동 정지시 시간에 따른 온도변화율에 따라 응력이 변화함으로써 터빈을 구성하고 있는 금속에 피로를 유발하여 궁극적으로는 균열을 발생시켜 설비를 파손시키게 된다.

본 열응력 해석 내용은 터빈 로터 표면에 균열을 발생시키는 발전소의 운전형태를 기동전 터빈의 금속온도에 따라 cold, hot, daily load change cycle 및 shutdown의 네 가지 과도상태로 분류한다.

1) Cold start : first-stage shell inner temperature가 300°F미만일 경우로서 일반적으로 5일 이상 터빈이 정지후 기동하는 경우이다.
2) Hot start : first-stage shell inner temperature가 700°F이상으로, 일반적으로 터빈이 1일 이내 정지된 후 기동하는 경우이다.
3) Daily load change cycle : 계통사정에 의하여 매일 발전소를 기동 정지하는 형태이다.
4) Shutdown

그러나 위에 적은 네 가지 외에도 first-stage shell inner temperature가 300°F에서 700°F 사이인 경우로, 일반적으로 터빈이 1일내지 5일 정도 정지된 후 기동하는 Warm start, 주말정지 운전을 하는 발전소에서 채택하는 주말정지 기동 등이 있는데 각 발전소마다 특유한 기동 곡선을 제작하여 사용하고 있다.

수명평가에 필요한 자료를 정확히 얻기 위해서는 적당한 감시시스템을 설치하면 편리하다. 그러나 터빈 로터와 같은 발전설비의 수명평가는 과거의 운전 이력을 현재의 시점에서 소급하여 해석하게 되므로 실제 운전이 되었던 정확한 자료가 필요하지만, 일반적으로 터빈의 수명평가에 필요한 상세한 운전기록을 보유하고 있는 발전소가 많지 않으므로 hot start, warm stat, cold start 등 발전소에서 많이 운용하는 대표적인 기동 사이클과 기동회수 및 총 운전시간 등을 이용한다. 그러므로 수명소비는 단지 현재의 분석방법과 현재 이용할 수 있는 자료에 의존할 수밖에 없으므로 대체적인 결과를 산출한다.

### 2.3.2 터빈 로터 수명예측 프로그램 (RoLPAS)

RoLPAS 프로그램은 유한 요소법을 이용하여 발전소의 기동정지에 따르는 열응력에 기인한 터빈 로터의 수명소비를 계산하는 프로그램이다. 터빈 로터의 열전달은 터빈 로터 주위에서 증기와 접촉하여 이루어지는 열전달(convection)과 로터 내부의 온도구배에 의한 열전도(conduction)로 대별할 수 있다.

열전도 문제는 로터의 재질을 알면 구할 수 있으나 열전달 문제는 증기의 상태와 로터의 기하학적 형상에 따라 달라지므로 열전달 계수를 구하기 위한 기본자료로서 터빈을 로터의 표면에 블레이드가 부착되어 열전도만이 고려되는 root부분, 로터 좌우의 축 밀봉증기가 흐르는 축부분, 터빈으로 도입되는 증기가 접촉되는 디스크 부분, 고정익을 지나면서 상태변화를 일으킨 증기가 접촉되는 디스크 표면, 각 단에서 증기의 손실을 최소화하기 위해 설치한 seal 사이로 누설되는 증기와 만나는 축부분으로 구분하여 실험적으로 구한 열전달 계수를 적용한다.

열응력 계산은 개발한 "터빈 로터 수명예측 프로그램"을 이용하여 해석하고 그 결과를 이용하여 실시간 처리 프로그램을 개발한다. 다음은 RoLPAS의 구성과 처리 절차이다.

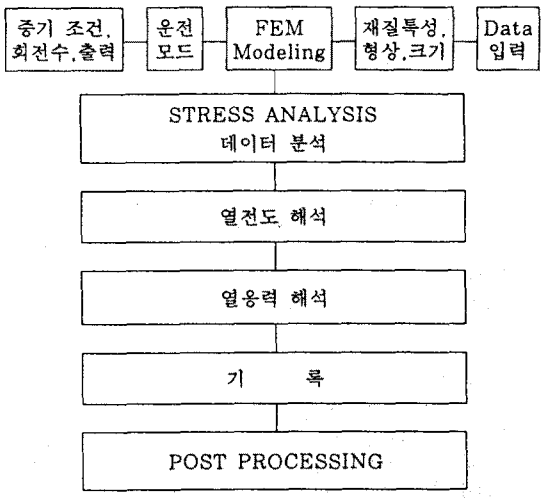


그림 2. RoLPAS 구성 및 처리 절차

위에서 보는 바와 같이 터빈 응력을 해석하기 위해서는 운전중인 설비의 운전변수와 기계설비의 선팽창계수와 형상 등 모델링에 필요한 자료가 필요하다. 또한 터빈 로터의 설계 자료와 재질에 대한 특성 등 여러 가지 데이터가 필요하며, 그 내용은 다음과 같다.

### 2.3.3 RoLPAS 입력 자료 및 출력 결과

1) 설계자료
   - Rotor & Clearance Dimension
   - Diaphragm Seal 간격
   - 디스크와 shroud gap
   - 블레이드 자료 (m)
   - Rotor & Blade 재질
   - 로터 주위의 증기 유출입 지점
   - 주증기 inlet 절점, 출구, 1단 직후 절점
2) 운전자료
   발전소의 기동형태에 따른 데이터
   - cold start-up
   - warm start-up
   - hot start-up
   - 주말 기동 정지
   - 일일 기동 정지

3) RoLPAS 입력자료
- 1st stage lower inner surface
- turbine 1st stage pressure
- cold reheat steam turbine outlet
- cold reheat at turbine outlet
- Turbine Generator seal HDR
- Turbine steam seal HDR
- 터빈 회전 속도
- 발전기 출력

4) 응력 해석 출력 자료 (RoLPAS 해석 결과)
. 터빈 로터 각 부위별 온도 분포
. 터빈 로터 각 부위별 열응력 분포
. 터빈 로터 각 부위별 수명 소비율
. 터빈 로터 각 부위별 원심 응력

### 2.3.4 RSI 응력해석 알고리즘

터빈의 열응력을 해석하기 위한 알고리즘으로 개발된 RoLPAS를 이용하여 RSI에 적용하기 위한 절차는 다음과 같다.

1) 입력 데이터를 가지고 RoLPAS를 이용하여 각 운전모드별 열응력을 해석한다.
2) 각 모드별 열응력을 실시간에 사용할 수 있는 데이터 베이스로 만든다.
3) 실시간 입력자료에 따른 해석 데이터를 1대1 대응시켜 실시간 처리하여 열응력을 표시한다.
4) 일정시간별 터빈 로터에 대한 데이터를 저장하도록 한다.

현재 운용중인 RSI는 데이터를 일정한 주기로 저장하지 않고 있으며, 초단위로 데이터를 표시를 할 수는 있으나 저장은 할 수 없도록 되어있다. 그러나, 새롭게 개발된 알고리즘을 사용한 RSI에서는 일정한 시간단위로 터빈에 대한 데이터를 저장할 수 있는 기능을 설정하여 터빈 로터의 유지관리 사용할 수 있도록 한다.

### 2.4 적용방법

터빈 로터 열응력은 언급한 바와 같이 설계자료와 운전에 따른 운전변수를 입력, 해석하면 되지만, 본 프로그램은 유한 요소법을 이용한 해석 프로그램이어서 한번 해석에 최소한 5분 정도의 해석을 요구하므로 실시간 운전에 적합치 못하다. 따라서, 본 설비에서는 예측되는 다양한 운전 조건에 대하여 사전에 해석하고 이로부터 가장 취약한 부분의 해석 결과만을 재처리하는 프로그램을 설계, 입력함으로서 처리가 가능하도록 한다.

RSI 입력 데이터는 RoLPAS의 해석시 사용된 입력 데이터와 같은 데이터를 사용하며, RSI display panel에 출력되는 데이터는 현재 표시되는 자료와 추가로 운전원이 필요로 하는 사항을 추가하여 display되도록 한다. 기존의 RSI에 display되는 주증기 압력 및 온도 등의 데이터는 기존의 실측 데이터와 같은 것을 사용하도록 한다.

운전 조건에 대한 해석 데이터는 계속해서 업그레이드가 가능하도록 추후 입력 변경이 되게 한다. Off-line으로 작동이 가능하도록 하여 설비의 검증 및 시뮬레이터에 적용이 가능하도록 한다.

### 2.5 터빈 로터 열응력 감시시스템 구성

### 2.5.1 시스템 하드웨어의 구성 및 기능

시스템은 크게 DAS, Panel PC, Maintenance Terminal로 나눌 수 있으며 그 구성은 다음 그림 3과 같다.

1) DAS(Data Acquisition System)
14Ch의 T/C를 통해 전달되는 온도 신호를 Signal Conditioner를 거쳐 AIM으로 받아들인다. CPM은 VMEbus를 통해 AIM이 읽은 신호를 가져 올 수 있다. CPM이 수집한 신호들은 RS422과 RS232케이블을 통해 각각 Panel PC와 Maintenance Terminal로 전달된다.

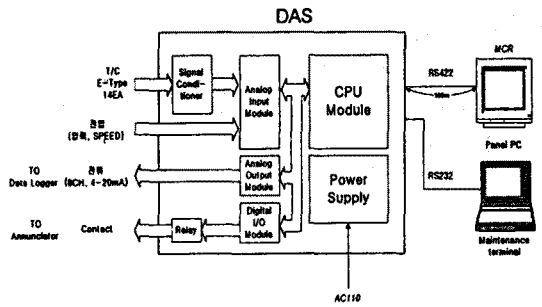


그림 3. RSI 의 전체 시스템 구성도

2) Panel PC
Panel PC는 MCR에 장착되어 운전원에게 터빈의 Rotor Bore 온도, Rotor 표면 스트레스, Rotor Bore Stress 등의 정보를 전달하는 역할을 수행한다.

DAS로부터 RS422 케이블을 통해 터빈 내부 정보를 전송 받은 후 Panel PC에 내부의 'Stress 추정 알고리즘'을 이용하여 Rotor Stress관련 정보를 계산한다. 또한 계산 결과는 운전원이 직관적으로 인지하기 쉽도록 다양한 그래프로 표시해준다.

3) Maintenance Terminal
Maintenance Terminal은 유지 보수 시, 프로그램의 각종 설정 사항의 변경, 자료의 백업 등의 목적으로 사용한다. Panel PC가 가지고 있는 기능을 모두 수행할 수 있으며 그 외에 내부 설정치의 변경, 과거 데이터의 백업 등 Panel PC에서 수행하기 어려운 기능들을 수행한다.

### 2.5.2 소프트웨어 모듈 구성 및 기능

1) DAS
그림 4는 DAS 소프트웨어의 데이터 흐름도를 나타내고 있다.

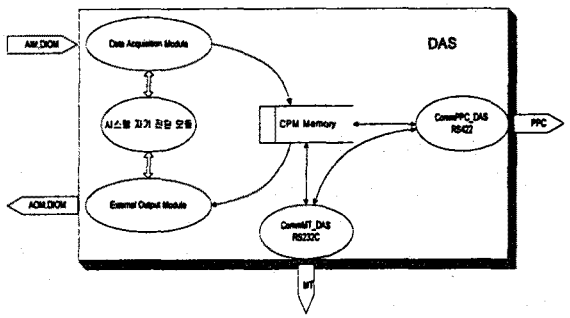


그림 4. DAS S/W 의 데이터 흐름도

- Data Acquisition Module(DAM)
Signal Conditioner를 거쳐 AOM, DIOM이 수집한 신호를 주기적으로 VMEbus를 통해 입력받아 메모리에 저장한다. 여기에는 또한 시스템 자기 진단 (Self Test)을 위한 Redundancy신호가 포함되어 있어 이를 시스템 자기 진단 모듈에 전달한다.

- External Output Module(EOM)
DAM이 수집한 정보 혹은 PPC에서 계산한 Stress 값을 AOM을 통해 외부로 전송한다. 또한 시스템 자기 진단을 위한 Redundancy신호를 AIM에 전송하며 CPM의 정상 동작 여부를 진단한다.

- 시스템 자기 진단 모듈
입출력 신호의 Redundancy 신호를 추가하여 I/O 계통의 건전성을 진단한다. 즉 EOM이 전달한 Redundancy Signal과 DAM으로 받은 Redundancy Signal의 차이가 기준치 이상일 경우 I/O 계통에 이상이 생긴 것으로 판단한다.

- CommPPC_DAS
DAS와 PPC간의 통신을 담당한다. RS422 방식을 통하여 주기적으로 14Ch의 T/C와 속도, 압력 등에 대한 데이터를 전송하며 PPC에서 계산한 Stress값을 되돌려 받는다. 또한 시스템 자기 진단 결과를 전송하여 입력받은 신호의 건전성을 확인할 수 있도록 한다.

- CommMT_DAS
DAS와 Maintenance Terminal과의 통신을 담당한다. RS232C를 이용한 시리얼 통신을 사용하여 MT에서 요청하는 Data를 송수신 한다. CommPPC_DAS를 통하여 PPC와 MT간의 통신을 중계하는 역할도 수행할 수 있다.

2) PPC
PPC S/W의 각 모듈 구성 및 데이터 흐름은 그림 5에 나타나 있으며 전체적인 수행 흐름은 그림 6과 같다.

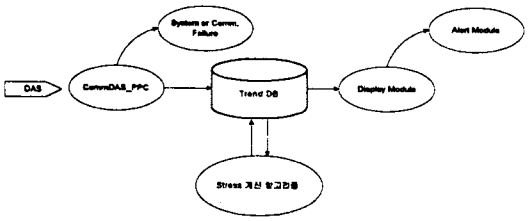


그림 5. PPC SW의 데이터 흐름도(DFD)

- CommDAS_PPC
DAS와 RS422을 통하여 Data를 주고받는다. 주기적으로 DAS가 수집한 정보를 입력받으며 계산 결과를 돌려준다. 만일 Maintenance Terminal로부터의 요청이 있을 경우 Trend DB로부터 과거 정보를 전송한다. 일정 시간 동안 통신 요청에 대한 응답이 없을 경우 'System or Comm. Failure' 모듈을 호출한다.

- Stress 계산 알고리즘
CommDAS_PPC로부터 수집한 데이터를 통하여 HP, RH, XO 등의 Surface Stress, Predicted Bore Stress, Bore Temperature 등을 계산한다. 또한 매주기마다 CLE를 갱신한다.

- Display Module
CommDAS_PPC로부터 수집한 데이터와 Stress 계산 알고리즘의 결과를 종합하여 화면에 표시되는 각 값들을 갱신한다.

- System or Comm. Failure
일정 시간 동안 DAS에서 통신 요청에 대한 응답이 없을 경우 혹은 System이 다운되거나 통신 선로가 끊어진 것으로 간주하고 운전원에게 경보 메시지를 전달한다.

- Alert Module
Stress계산 알고리즘에서 계산한 각 Stress값들이 과도할 경우(High Stress) 경보 메시지를 띄워 운전원이 이를 인지할 수 있도록 한다.

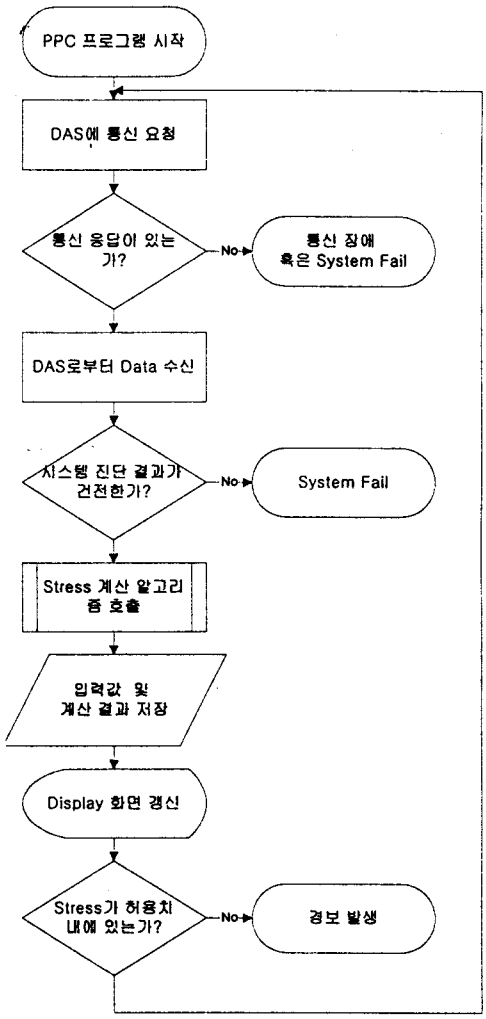


그림 6. PPC의 흐름도(Flow Chart)

3) Maintenance Terminal
기본적인 구조는 PPC와 동일하다. 즉 입력 값의 수신 및 Stress 계산 등을 수행할 수 있으며 시스템의 진단 상태를 열람할 수 있다. 또한 추가로 각종 설정값의 변경 및 과거 Trend의 열람이 가능하다. 통신 방식으로는 RS232를 통한 시리얼 통신을 사용하며 PPC와의 통신은 DAS가 중계해 준다.

### 2.5.3 사용자 인터페이스
운전 모드에서의 전체화면 구성은 다음 그림 7과 같으며 각 부분의 역할은 아래와 같다.

1) Percent Allowable Surface Stress
RSI Panel PC는 Rotor Surface Stress를 표시할 수 있는 지시계를 가지며 표시되는 값은 허용치에 대한 백분율로 나타낸다. HP, RH, XO 중 HP와 RH 부분이 심각한 Surface Stress를 겪게 되므로 이들에 대한 Stress의 차이를 확인할 수 있도록 HP, RH 각각에 대한 지시계를 하나씩 갖는다.

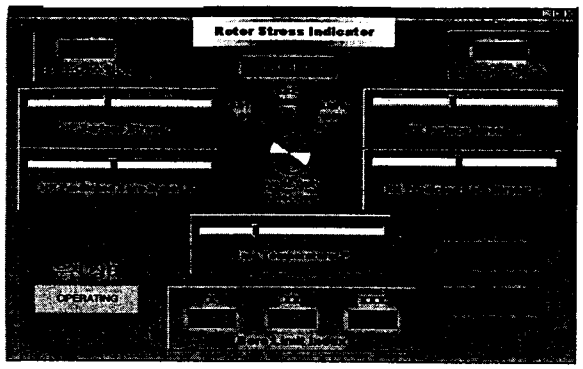


그림 7. User interface of RSI PPC

2) Percent Allowable Predicted Bore Stress

RSI Panel PC는 Rotor Bore Stress를 표시할 수 있는 지시계를 가지며 표시되는 값은 허용치에 대한 백분율로 나타낸다. 한 지시계는 HP의 추정 Bore Stress를 표시하며, 또다른 지시계는 RH의 추정 Bore Stress를 표시한다. RH 추정 Bore Stress 지시계에는 RH 입구측과 RH 출구측의 Data중 큰 값이 나타난다.

3) CYCLIC DUTY SELECTION

운전원은 세 가지 값(0.01, 0.02, 0.05% CLE)의 소요 수명 중 한가지를 선택할 수 있다. 단일 로터에 대한 값 값들은 운전원이 패널에서 선택할 수 있는 '소요 수명'과 관련이 있다. 로터에 대한 이러한 허용치 중의 하나를 사용하여 RSI는 HP 와 RH의 rotor surface stress를 허용치에 대한 백분율로 나타낸다.

4) Cyclic Life Expenditure Counters

본 counter는 Surface Stress가 (-)에서 (+)로 완전히 한 주기를 지났을 때마다 갱신된다. 소요 수명 표시계는 RSI가 작동 중에 있을 때 발생한 수명 단축을 누적하여 소요 수명을 표시해준다. 주기적으로 counter를 관찰함으로써 터빈 기동 및 제동, 주요한 부하 변동 등의 경우에 시간에 대한 함수로서 rotor에 부과되는 하중을 측정할 수 있다. 이것은 또한 rotor에 부과되는 하중이 rotor의 목표 수명에 비해 지나치게 큰 것은 아닌가를 판별해내는 데 사용될 수 있다.

만일 stress cycle 동안 소요 수명이 패널 스위치에 의해 선택한 값을 지나치게 혹은 자주 초과한다면 이것은 surface stress는 해당 주기의 일부분에서 ±100% 한계를 초과했다는 뜻이 된다. 이러한 경우에는 그 원인을 조사하기 위해 터빈과 보일러에 대한 운전 기록을 검토해봐야 한다.

5) Bore Limit Index Counter

Bore Limit Index Counter의 목적은 과도한 Bore Stress를 초래하는 운전 절차에 대해 경고를 발생시키기 위함이다. 과도한 bore stress가 발생한 사건은 총체적으로는 인지되지 않고 지나칠 수 있으나 bore stress 한계치 이상에서의 반복되는 운전은 치명적인 rotor고장에 대한 잠재적인 가능성을 유발한다.

HP 제 1단계에서의 bore stress는 지속적으로 bore stress 허용치와 비교된다. bore stress허용치는 아래와 같이 온도에 종속적이다.

만일 Bore Stress가 Zone I, II, III중 하나에 들어간다면 해당하는 Bore Limit Index Counter가 하나 증가한다. 이 카운트는 별도의 기록 파일에 저장되어 프로그램의 재기동시에도 값이 유지된다.

Zone I, II는 FATT (fracture appearance transition temperature)이하이며 저온 상태에서 Bore가 과중한 스트레스를 받고 있음을 나타낸다. Bore는 저온 상태에서는 내구력이 약하다. 이 지역에서의 운전은 rotor가 깨어지는 고장 (brittle rotor failure)을 초래할 수 있다. Zone III에서의 운전은 고온 상태에서 과중한 스트레스를 받고 있음을 의미한다.(FATT 이상) 이 지역에서 rotor 는 더 큰 인장 강도를 갖기는 하나 Bore에 대한 과도 스트레스는 균열(crack)을 증대시킬 수 있다.

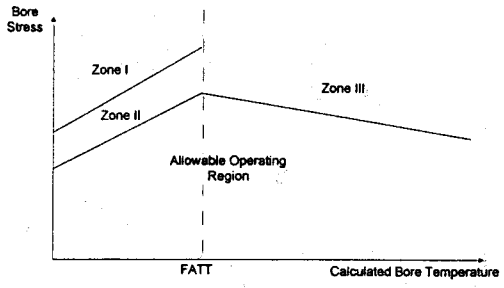


그림 8. Bore Temperature와 Bore Stress의 관계

6) Minimum Bore Temperature

각 rotor에 대해서 한가지 씩 Bore Temperature가 계산된다. rotor 예열시 터빈 운전원을 보조하기 위하여 RSI는 rotor section (HP, RH, XO)중 가장 낮은 온도의 Bore Temperature를 출력해준다.

7) High Stress Alarms

PPC의 각종 지시계에 대한 보완 장치로서 RSI에는 Alarm Lamp와 Plant Annunciator Relay contact가 있다. 이들은 Stress level이 지정치를 초과할 때 활성화된다.

'80% STRESS' 접점은 화면에 표시되는 Stress값 중 하나라도 ±80% 범위를 넘어서면 활성화되며 'HIGH STRESS' 접점은 Stress값이 ±100%를 넘어설 경우 발생하며 이때 PPC에 있는 'HIGH STRESS'가 적색으로 깜박이게 된다.

### 2.5.4 PPC S/W와 Rotor Stress 계산 알고리즘 간의 인터페이스

PPC S/W와 Rotor Stress 계산 알고리즘 간의 인터페이스는 여러 가지 방법을 통하여 구현할 수 있으나 유지 보수의 용이성, 서로 다른 컴파일러간의 호환성 등을 고려할 때 다음과 같은 방법 중 한 가지를 선택하는 것이 적절할 것이다.

1) Dynamic Linking Library를 사용하는 방법

Windows 프로그래밍을 할 때 독립적인 외부 모듈을 사용하는 방법에는 Obj파일을 사용하는 방법과 DLL파일을 사용하는 방법이 있는데 전자는 컴파일 시에 정적으로 연결(link)시켜주며 후자의 경우는 실행 시에 동적(dynamic)으로 연결시켜 준다. 본래 DLL의 경우는 멀티태스킹 환경에서 동일한 라이브러리의 중복 실행을 막아 메모리의 사용을 효율적으로 하기 위해 만들어진 것이므로 여기서는 Obj파일을 이용하는 것이 오히려 효과적일 수 있으나 obj파일의 경우 프로그래밍 언어 및 컴파일러에 다소 종속적인 경향이 있으므로 DLL을 사용하는 것이 적절하다.

2) 알고리즘 Source를 PPC S/W에 내장하는 방법

알고리즘의 Source를 전체 프로그램과 함께 컴파일하는 방법이다. 물론 계산 알고리즘과 전체 프로그램의 개발 언어는 동일해야 한다. Delphi의 경우 Pascal언어를 사용하고 C++Builder의 경우 C++을 사용하므로 계산 알고리즘의 작성 언어에 따라 개발 환경을 선택

할 경우 무리 없이 함께 컴파일 할 수 있을 것이다. 또한 사용 언어가 다르다고 할지라도 계산 알고리즘의 경우 대개 특별히 언어 종속적이거나 기계 종속적인 코드를 사용하지 않으므로 큰 무리 없이 다른 언어로 이식이 가능할 것이다.

한번 통합되고 나면 전체적으로 구조가 간단해지는 장점이 있으나 계산 알고리즘의 변경이 발생할 경우 또 다시 코드의 수정을 가해야 하는 단점이 있을 수 있다.

### 2.6 RoLPAS 열응력 해석 알고리즘의 검증

RoLPAS에 의해 각 운전조건에 따라 구한 온도분포도, 열응력이 어느 정도 신뢰성이 있는가를 알기란 지극히 어려운 실정이다. RoLPAS와 같은 프로그램의 경우 검증이 필요하다. 가장 정확한 검증방법은 사용수명이 다된 폐기 로터를 이용하여 직접 피로 및 여러 실험을 하여 잔여수명을 측정하고 사용기간중 운전 조건에 따른 수명 소비율을 모두 계산한 후 이 두 가지를 직접 비교하는 것이다. 그러나 폐기 로터를 구할 수가 없었으므로 이러한 검증 절차는 불가능하여 다른 검증 수단을 강구하였다.

국내에 도입되어 사용중인 RSI의 결과와 RoLPAS의 결과와 비교하는 방법이 있으며, 두 번째로는 각 터빈 로터 제작자가 제안하고 있는 그래프를 이용하여 수명 소비를 계산하는 방법과의 비교이고, 이외에 국내 발전소의 기동 조건을 터빈 제작자에게 분석하도록 요청한 경우, 그 결과와 RoLPAS의 결과와 비교하는 것이다. 이상의 검증 방법이 모두 어려운 경우 RoLPAS에 의해 구한 터빈 표면의 특정부위(최대 열응력이 걸리는 부위)의 온도 변화 양상과 1단 증기실 내벽 온도의 변화 양상을 비교하는 방법도 있다. 그러나 이 방법은 터빈 표면 온도가 증기실 내벽온도보다 더 빨리 올라가기 때문에 온도의 변화가 심한 기동 초기에는 다소 오차가 있어 검증 방법으로는 그리 바람직하지 못하다.

다음의 표 1과 표 2는 각 수명 예측 기법에 따른 열응력을, 표 3은 각 수명예측 기법에 따른 LCFI (%/1cycle)를 상호 비교한 것이다.

표 1. 각 수명예측 기법에 따른 열응력 비교

| 운전 유형 | RoLPAS | Hitachi | Tochiba |
|---|---|---|---|
| 완전 냉기기동 | 31.4 | 30 | 22 |
| 주말정지후기동 | 21.1 | 22.4 | 19.5 |
| 일일정지후기동 | 15.1 | 14.3 | 15 |
| Very hot start | 14.3 | 10.3 | 10 |
| 통 상 정 지 | 5.6 | 5.9 | 7미만 |

표 2. 각 수명예측 기법에 따른 열응력 비교

| 운전 유형 | 온도 변화폭 | 온도 변화율 |
|---|---|---|
| 완전 냉기기동 | 425℃ | 90℃/hr |
| 주말정지후기동 | 150℃ | 78℃/hr |
| 일일정지후기동 | 85℃ | 105℃/hr |
| Very hot start | 60℃ | 30℃/hr |
| 통 상 정 지 | 40℃ | 26.7℃/hr |

표 3. 각 수명예측 기법에 따른 LCFI(%/1cycle) 비교

| 운전 유형 | RoLPAS | Hitachi | Hitachi의 설계기준LCFI |
|---|---|---|---|
| 완전 냉기기동 | 0.31 | 0.26 | 0.15 |
| 주말정지후기동 | 0.04 | 0.036 | 0.01 |
| 일일정지후기동 | < 0.001 | < 0.001 | 0.01 |
| Very hot start | < 0.001 | < 0.001 | 0.05 |
| 통 상 정 지 | < 0.001 | < 0.001 | |

| 운전 유형 | Mitsubishi | G E | Tochiba |
|---|---|---|---|
| 완전 냉기기동 | 0.08 | 0.065 | 0.04 |
| 주말정지후기동 | 0.0256 | 0.03 | 0.025 |
| 일일정지후기동 | 0.008 | 0.005 | 0.003 |
| Very hot start | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 |
| 통 상 정 지 | < 0.00016 | < 0.001 | < 0.001 |

## 3. 결 론

이상과 같이 본 논문의 열응력 해석 알고리즘의 국산화 개발 내용을 정리해보면 개발된 열응력 해석 알고리즘을 이용한 결과와 현재 사용중인 RSI와 비교해본 결과 RoLPAS로 구한 터빈 로터 표면온도가 실제 터빈 로터 표면 온도를 잘 나타내 주고 있으며, 열응력은 로터의 온도분포에 의해 결정되므로 RoLPAS로 구한 열응력은 실제 터빈 로터에 가해지는 열응력을 제대로 반영한다고 볼 수 있다.

앞으로 보다 정밀하고 정확한 열응력 해석을 위해서는 알고리즘의 수정과 실제 열응력을 비교 검증하는 방법 역시 수정 보완되어야 할 것이다.

### [참 고 문 헌]


[1] 김건영, 박경수, 하정수, "터빈-로터 수명 예측에 관한 연구", 전력연구원, KRC 85F-J02, 1987

[2] 백수곤, 하정수, 송기욱, 장성호, "터빈 케이싱 수명예측 및 정비기술개발", 전력연구원, TR.94YJ08.97.62, 1997

[3] 정창기, 백수곤, "삼천포화력 #1,2 RSI(Rotor Stress Instrument System) 검토 보고서", 전력연구원, TM.97SJ19.E97.201, 1997

[4] 정창기, 백수곤, 장성호, "RSI (Rotor Stress Instrument System) 시스템 설계 요약 기술보고서", 전력연구원, TM.97SJ19.P1998.135, 1998

[5] 송기욱, 장성호, "저압 터빈 블레이드의 수명평가와 파손해석을 위한 기술동향 보고서", 전력연구원, TM.97GS06.H97.1015, 1997

[6] 하정수, 송기욱, Eric Fleury, 신기삼, "영동화력 터빈 주요설비의 건전성 평가 검토 보고서", 전력연구원, TM.G04.P97.716, 1997