

## 화력발전소 보일러 고온헤더의 실시간 수명 감시시스템 개발

윤필기 · 정동관\* · 윤기봉\*\*

중앙대학교 대학원, \*삼성중공업 기전연구소, \*\*중앙대학교 기계공학부

### Development of On-Line Life Monitoring System for High-Temperature Header of Fossil Power Plant Boiler

Pil Kee Yoon, Dong Gwan Jeong\* and Kee Bong Yoon\*\*

Graduate School, Chung-Ang University

\*Samsung Heavy Industry

\*\*Department of Mechanical Engineering, Chung-Ang University

#### 요 약

화력발전설비 고온요소의 잔여수명평가는 주로 비파괴검사 및 검사결과의 파괴역학적 해석 등으로 행해졌다. 그러나 기존 방법은 가동 중에는 적용되기 어렵고 급작스런 운전이력에 대한 정량적인 손상을 평가할 수 없었다. 따라서 구조물의 형상, 운전이력 및 재료물성에 근거하여 실시간 수명소비율 및 잔여수명을 평가하는 기술의 개발이 요구되고 있다. 본 연구에서는 고온 증기헤더의 수명을 실시간으로 평가하는 감시시스템 소프트웨어를 개발하였다. 고온헤더에 대하여 해석된 온도, 응력 그린함수를 이용하여 취약부위의 실시간 응력을 계산하고 천이 사이클을 카운트하여 크리프 및 피로수명을 계산하였다. 본 소프트웨어를 개발함으로써 운전이력에 따른 소비수명을 실시간으로 평가하고 운전정보를 기록하여 향후 운전계획, 보수주기 및 교체시기를 결정하는데 지침이 되도록 하였다.

**Abstract** — Conventional methods for assessing remaining life of critical high temperature components in fossil power plants rely on nondestructive inspection practices and accompanying life analysis based on fracture mechanics. By using these conventional methods, it has been difficult to perform uninterrupted in-service inspection for life prediction. Thus, efforts have been made for developing on-line remaining life monitoring systems employing information on the shape of structures, operating variables and material properties. In this study, a software for on-line life monitoring system which performs real-time life evaluation of a high temperature steam headers was developed. The software is capable of evaluating creep and fatigue life usage from the real-time stress data calculated by using temperature/stress transfer Green functions derived in advance for the specific headers. The major benefits of the developed software lie in determining future operating schedule, inspection interval, and replacement plan by monitoring real-time life usage based on prior operating history.

#### 1. 서 론

화력발전소 고온요소의 잔여수명평가는 주로 정기점검 기간 중에 발전소를 정지시키고 균열발생 예상부위를 대상으로 비파괴 검사를 실시하고 검사결과 균열이 발견되면 파괴역학적 해석을 수행함으로써 행해졌다. 그러나 이와 같은 방법은 발전소 운전 중에는 적용이 제한되는 단점이 있으며, 차기검사 시까지는 수명평가가 예

측에 의존하게 된다. 국내의 화력발전 설비의 경우 변동 부하의 역할을 담당하여 잦은 기동정지를 반복하게 되는데 이 때 설계 시 반영되지 않았던 열적 천이가 자주 발생하여 설비의 운전수명을 단축시키는 원인이 되고 있다. 기존에는 차기검사 시까지의 운전이력을 미리 가정하여 고온요소의 손상 및 잔여수명을 예측하였으나 이와 같은 방법으로는 실제 운전 중에 발생하는 예기치 못한 운전에 의한 손상을 정량적으로 평가할 수 없다. 따

라서 주요요소의 형상 및 재료물성에 근거하고, 열 및 기계적 하중 이력을 실시간으로 감시하여 이로부터 수명소비율 및 잔여수명을 관리하는 기술이 요구되고 있다.

본 논문에서는 지금까지 국내외에서 수행되고 있는 실시간 수명감시 시스템 기술개발현황을 소개함과 동시에 본 연구를 통해 현재 개발된 보일러 고온요소와 실시간 수명감시시스템 소프트웨어에 대해 설명하였다. 본 실시간 수명 감시 시스템(on-line life monitoring system)은 설비의 운전 상태 파악을 위해 감시 대상의 주요 부위에 설치한 온도 센서, 압력 센서 등의 출력 신호를 계측한 뒤, 중앙 관제 컴퓨터로 데이터를 수집하고, 전송된 센서 신호를 분석하여 설비의 가동 시 발생하는 열응력의 계산, 내압에 의한 기계적 응력의 계산, 크리프, 피로 및 크리프피로 등에 의해 누적된 손상 및 수명 소비율의 계산을 수행하고, 이에 따른 잔여 수명을 평가한다. 수명이 소진된 경우에는 경보기능을 제시하도록 하며 또한, 정상가동 상태, 이상상태 발생 여부 등도 판단하는 기능을 갖도록 하였다.

## 2. 연구 배경

### 2-1. 국내외 연구현황

현재 국내외에서 개발된 실시간 수명감시시스템은 대상설비의 종류와 주요 손상기구에 따라 분류될 수 있다. 즉, 감시대상설비가 원자력 발전설비인지 화력발전설비인지에 따라 분류되거나 또는 사용온도, 부하 및 사용 환경에 따라 손상기구가 크리프, 피로, 부식 등으로 변하므로 이러한 손상기구별 감시시스템으로 분류할 수 있다. 원자력 발전설비에 적용되는 손상기구는 중성자 조사취화, 피로, 침식 및 부식을 들 수 있다. 위의 손상기구 중에서 피로손상을 평가하는 감시시스템이 가장 일반적으로 개발되어 있다 대부분의 원전 기기 및 배관에는 온도변화에 의한 열응력과 내압을 비롯한 기계적 응력이 반복적으로 가해지므로 수명감시시스템에서는 피

로손상을 반드시 고려해야 한다. 원전설비의 상시 피로 수명감시 시스템은 미국을 비롯한 각국에서 1980년대 중반부터 개발·적용되어 왔는데, EPRI(Electric Power Research Institute)는 BWR(Boiling Water Reactor) 및 PWR(Pressurized Water Reactor)의 위험부위에 적용하기 위한 피로 수명감시 시스템을 개발하였다. "FatiguePro"<sup>1)</sup>라 명명된 이 시스템은 입력데이터를 얻기 위해 기존에 설치된 측정센서를 이용하였다 또한, 온도·응력 그린함수(Green function)를 사용하였고 방대한 온도·하중 이력을 처리하고 피로사이클을 추출하기 위해 OOR(Ordered Overall Range counting) 방법을 이용하여 응력/주기 스펙트럼을 결정했다. 이 스펙트럼과 ASME(American Society of Mechanical Engineers) 코드의 S-N 곡선을 이용하여 피로 수명을 평가하였다. "FatiguePro"의 피로수명해석 과정을 Fig. 1과 같이 모식도로 나타내었다. 이밖에도 프랑스의 "SYSEFAC", 독일의 "FAMOS", 일본의 "OPDAS" 등이 원전설비의 실시간 피로수명 감시시스템으로 개발되어 알려져 있다.

화력 발전설비는 원자력 발전설비보다 고온(약 530°C)에서 운전된다. 따라서 열피로 뿐만 아니라 크리프가 총 손상을 결정하는 중요한 손상원인이 된다. 기존의 파손 사례와 균열발생경험을 통해 조기손상발생이 심각하여 우선 감시 대상으로 알려진 설비로는 과열증기헤더, 제열증기헤더등의 고온헤더, 주증기관 및 재열증기관, 질탄기 등이 알려져 있다. 대표적인 시스템으로 미국 EPRI의 "Creep-fatiguePro"<sup>2)</sup>와 영국 ERA Tech.의 "Boiler-PLUS"<sup>3)</sup>를 들 수 있다. 위의 시스템에서는 보일러 감시 대상의 주요위치에 부착된 센서로부터 일정시간 간격으로 수집된 실시간 온도 및 압력데이터는 유한요소해석으로 결정된 그린함수를 이용하여 응력으로 변환시킨다. 또한 크리프, 피로손상해석을 수행하고 크리프피로의 상승효과를 선형손상누적법칙으로 평가하였다. "Creep-fatiguePro"의 경우 사전에 가정되거나 탐지된 균열의 균열성장모델을 가정하여 크리프피로 균열발생 수명외에

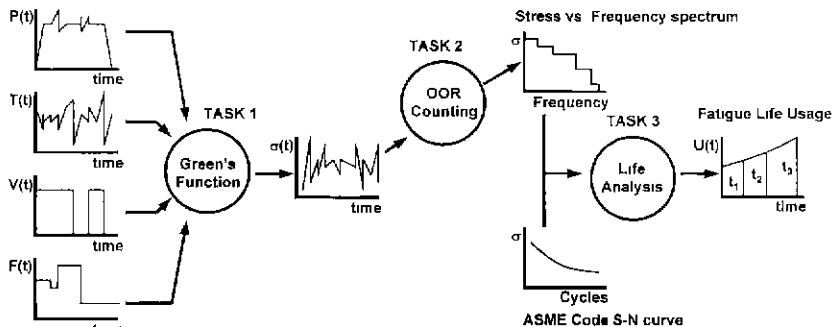


Fig. 1. Schematic diagram of fatigue life evaluation procedures employed in FatiguePro.

Table 1. On-line life monitoring systems developed for fossil power plants.

명 칭	Creep-FatiguePro	Boiler-PLUS	LMS	LENA
개발자	EPRl, 미국	ERA, 영국	AEA, 영국	TUV, 독일
주 요 감시위치	Main steam pipe Equalizer Hot reheat pipe	Steam header	Superheater header Main steam line	Straight pipes Junctions Formed pieces
손상기구	Creep, Fatigue, Crack growth	Creep, Fatigue	Creep, Fatigue	Creep, Fatigue
수명해석 알고리즘	ASME Section III, VIII, XI ASME CC N-47	R5 Issue 1	R5 Issue 2 BS Code	TRD 301, 302

균열성장해석도 수행하고 잔여수명을 계산하였다. 이밖에도 영국 AEA Tech의 "LMS", 독일 TUV의 "LENA"<sup>11)</sup> 또한 상시 크리프-피로 수명감시 시스템으로 잘 알려져 있으며, 이들의 특징을 Table 1에 비교하였다.

2-2. 그린함수의 이론적 배경

열응력에 의한 피로손상은 원자력 및 화력 발전설비 모두의 주요요소 파손의 원인으로 작용한다. 온도변동으로 발생된 열응력은 설비의 어떤 순간에서의 온도의 함수일 뿐만 아니라 그 순간이전의 열적 천이 이력의 함수이기도 하다 예를 들어 서로 다른 순간의 두 시점에서 플랜트 설비의 온도센서 측정값이 서로 일치하더라도 측정시점 이전의 온도천이가 서로 다를 경우(예를 들어 가열 또는 냉각 시 서로 다를 수 있다.) 열응력의 크기가 서로 다를 수 있다. 다음에 설명할 그린함수 접근은 이러한 상황을 고려하여 보다 정확한 열응력을 계산하기 위해 개발되었다.

실시간 천이응력은 다음과 같이 두 부분으로 나뉘어 해석된다. 첫째는 관내 압력에 의한 기계적 응력으로 압력센서의 순간적인 측정값에 의존하며 특정 감시위치에서의 모든 압력센서의 측정값을 포함하는 벡터에 재료 물성의 함수와 감시요소의 기하학적 형상과 관련된 두 개의 변형행렬을 곱함으로써 계산된다. 둘째는 유체온도의 급속한 변화와 이에 따른 관벽두께 방향의 온도구배에 기인한 열응력으로 과거의 천이 이력에 의존하며 이미 결정된 그린함수와 열적 천이 데이터와의 곱을 시간에 대해 적분하여 계산된다. 이 그린함수 적분의 개념은 구조동역학에 사용되어 잘 알려진 Duhamel 이론<sup>12)</sup>과 유사하다. 따라서, 대상요소의 감시위치에 대한 응력은 다음의 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma(t) = \sigma_p(t) + \sigma_T(t) \tag{1}$$

Boley & Weiner<sup>13)</sup>와 Carslaw & Yeager<sup>14)</sup>는 시간에 따른 열적 경계조건의 변화에 관련된 부재의 천이온도분포가 다음의 식(2)와 같이 표현됨을 보였다.

$$T(k, t) = \int_0^t E(k, t-\gamma) \frac{\delta}{\delta \gamma} \Phi(\gamma) d\gamma \tag{2}$$

T(k, t)와 E(k, t)는 다음의 식(3)과 같은 형태의 열전도 방정식을 만족한다.

$$\lambda \nabla^2 T(k, t) = \frac{\delta}{\delta t} T(k, t) \tag{3}$$

Boley와 Weiner에 의해 각각 제안되었던 준정적 열탄성이론<sup>15)</sup>(quasi-static thermoelastic theory)을 바탕으로 탄성체의 응력분포는 온도분포의 유일한 함수로 정의된다.

이 때문에 Duhamel 이론의 개념은 대상요소 전영역에서의 온도를 계산하지 않고도 직접 관심대상위치만의 응력계산에 적용될 수 있다. 즉, 열응력은 온도분포에 관한 식(2)를 결정하는 중간과정을 생략하고도 식(4)와 같이 온도경계조건으로부터 직접 계산될 수 있다는 장점이 있다.

$$\sigma_T(k, t) = \int_0^t G(k, t-\gamma) \frac{\delta}{\delta \gamma} \Phi(\gamma) d\gamma \tag{4}$$

물리적으로 식(4)의 G(k, t)는 부재의 온도경계조건이 단위온도만큼 변화할 때 부재의 시간에 따른 열응력분포변화를 나타낸다. 이 그린함수를 사용한 응력계산방법은 다음과 같은 이유로 유한요소해석과 같은 수치해석 방법 보다 상당한 이점을 갖는다. 그린함수 G(k, t)는 주어진 형상의 요소를 모델링한 후 온도경계조건에 대해 수치해석방법을 수행하여 미리 결정된다. 따라서 실시간 수명감시 중에 수반하는 경계조건  $\Phi(t)$ 에 기인한 열응력은 해석에 많은 시간이 소요되는 수치해석 계산에 의하지 않고, 단순히 그린함수의 시간에 따른 적분을 통해 계산될 수 있다. 다양한 열적 천이조건의 발생이 증가할 때 이 그린함수를 이용한 응력계산방법은 실시간으로 응력을 계산하는데 매우 효율적이다.

대부분의 경우에서 그린함수가 상대적으로 짧은 감쇠기간(decay period) 후에 임의의 상수로 수렴한다는 결과에 의거하여 식(4)의 적분구간은 단축되어 다음의 식

(5)와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \sigma_T(k, t) &= \int_{t-t_k}^t G(k, t-\gamma) \frac{\delta}{\delta \gamma} \Phi(\gamma) d\gamma \\ &= G_0(k) \Phi(t) + \sum_{t-t_k}^t \hat{G}(k, t-\gamma) \Delta \Phi(\gamma) \end{aligned} \quad (5)$$

### 3. 연구 내용

#### 3-1. 감시 시스템의 구성

본 실시간 수명감시 시스템은 화력발전용 보일러 고온헤더에 적용을 목적으로 개발되었으며 시스템의 기본 체계는 Fig. 2와 같다. 센서 및 센서로깅 시스템의 하드웨어를 제어하고 또한 수명평가 해석을 담당할 소프트웨어는 Window NT 환경에서 구동하는 실시간 시스템(real time system)으로서 보일러 운전상태 데이터의 자동 수집, 데이터의 유효성 검토, 실시간 응력계산 및 손상평가, 잔여수명 계산, 데이터의 자동처리 및 저장, 데이터 처리 결과의 실시간 화면출력 및 수명평가 해석결과

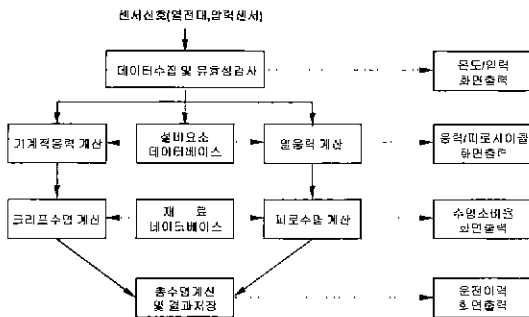


Fig. 2. System flowchart for boiler on-line life monitoring system.

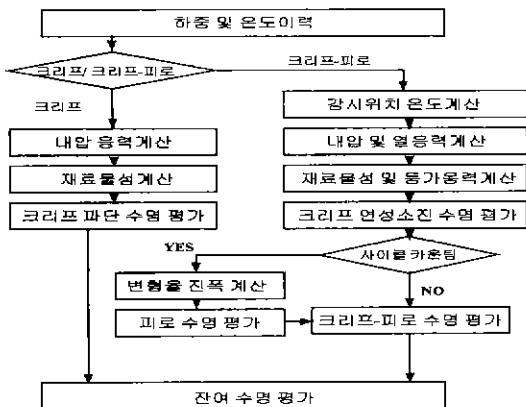


Fig. 3. Flowchart for creep-fatigue life assessment.

과의 주기적 업그레이드 등의 기능을 갖도록 개발되었다.

#### 3-2. 크리프-피로 해석 알고리즘

본 수명감시 시스템에 적용된 수명해석 알고리즘은 Fig. 3과 같이 구성하였으며 1분마다 주기적으로 반복 실행하도록 구현하였다.

온도 및 압력 센서데이터의 수집과 수집된 데이터의 유효성 검토를 수행한 후 수명평가 해석을 시작한다. 우선 실시간 온도 데이터는 대상요소 외부에 부착된 센서에서 측정하고 수명감시가 필요한 위치는 대상요소 내부면인 헤더 튜브구멍사이의 리가먼트(ligament)에 존재하므로 외부센서의 측정온도를 이용하여 내부감시부위의 온도를 유추하였다. 이를 위해 요소의 다양한 열원이 가해진 경우에 대하여 유한요소해석을 수행하고 감시부위의 온도를 해석하여 이 결과로부터 온도그린함수<sup>7)</sup>를 도출한다. 감시위치의 열응력은 도출한 응력그린함수<sup>7)</sup>를 이용하여 계산되며 6개의 응력성분으로 구성되어 있다. 그러나 수명해석에 사용되는 인장 또는 크리프 상수들의 대부분의 재료물성은 일축응력실험을 통해 얻은 것이므로 열응력의 6가지 성분을 식(6)의 Von-Mises 등가응력으로 변환하여 일축응력실험결과와 비교하면서 수명해석하였다.

$$\begin{aligned} \sigma_{eq} &= \frac{1}{\sqrt{2}} \{ (\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 \\ &+ (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + 6(\sigma_{12}^2 + \sigma_{23}^2 + \sigma_{31}^2) \}^{1/2} \end{aligned} \quad (6)$$

크리프 수명예측을 위해 식(7)과 같이 MHP<sup>8)</sup> (Manson-Haferd Parameter)를 도입하였다.

$$MHP = \frac{\log t_R - \log t_a}{(T + 273.15) - T_a} \quad (7)$$

MHP와 작용응력과의 관계는 식(8)과 같다.

$$MHP = b_0 + b_1 \log \sigma_p + b_2 (\log \sigma_p)^2 \quad (8)$$

크리프 파단수명소비율은 식(9)으로 계산하였다<sup>9)</sup>.

$$U = \sum_{i=1}^k \left[ \frac{1}{L_R(\sigma_p, T)} \right] \quad (9)$$

피로수명을 계산하기 위해서는 우선 사이클 카운팅을 수행하여야 하는데 수정된 simple range counting<sup>10)</sup>법을 사용하여 등가응력을 대상으로 피로사이클의 범위와 횟수를 사이클을 카운트하였다. 이 방법에서 범위(range)는 하나의 reversal의 크기로 정의한다. 이 때 범위의 부호는 valley에서 peak로 끝나는 범위는 양(+)으로, 반대로 peak에서 valley로 끝나는 범위는 음(-)으로 규정하였

다. 각 reversal은 1/2 사이클로 취급하였다. 피로수명에 미치는 영향이 거의 없는 작은 범위를 설정하여 이 보다 작은 범위는 피로사이클로 카운트하지 않았다. 하나의 범위가 카운트되면 피로해석을 수행하고, 이외는 독립적으로 주기적인 크리프해석을 수행하여 하나의 완전한 범위가 카운트될 때 수행된 피로해석결과에 포함되도록 하였다

사이클 카운팅이 수행된 후 peak와 valley. 이 두 점의 각 응력성분 차이의 등가응력인 탄성등가응력범위를 계산하였다. 보일러 헤더의 리가멘트는 주로 저주기 피로를 경험하므로 피로수명을 계산하기 위해서는 Coffin-Manson<sup>[9]</sup>식이 적합하다. 따라서 탄성 등가응력범위로부터 탄성 및 소성변형율범위를 구하였다. 즉, 식(10)과 같은 Neuber rule<sup>[10]</sup>을 도입하여 탄성등가응력범위로부터 탄소성등가응력범위 및 탄소성변형율범위를 구하였다.

$$\Delta\sigma_e \Delta\epsilon_{ci} = \Delta\sigma_{pi} \Delta\epsilon_{pi} \tag{10}$$

식(11)에서 응력 변형률 주기선도와 위의 식(10)을 연결하여 cyclic deformation stress-strain loop<sup>[11]</sup>를 구성하여 탄성 및 소성변형율범위를 계산하였다.

$$\Delta\epsilon = \frac{\Delta\sigma}{E} + \left(\frac{\Delta\sigma}{A}\right)^{1/\beta} \tag{11}$$

총 변형율범위는 다음의 식(12)을 이용하여 계산하였다.

$$\Delta\epsilon_t = \Delta\epsilon_{ci} + \Delta\epsilon_{pi} + \Delta\epsilon_{si} + \Delta\epsilon_{cr} \tag{12}$$

피로손상평가는 식(13)과 같이 Coffin-Manson 일반식을 이용하여 계산하고, 피로손상 또는 피로수명소비율은 식(14)와 같은 Miner's rule을 적용하여 계산하였다.

$$\Delta\epsilon = \frac{3.5}{E} U_i N_i^{-0.12} + D^{0.6} N_i^{-0.6} \tag{13}$$

$$D_t = \sum d_i = \sum \frac{n_i}{N_i} \tag{14}$$

손상기구가 크리프피로인 부재의 크리프 수명평가는 고온 응력조건에서의 크리프 변형에 의해 크리프연성이 소진(creep ductility exhaustion) 되는 개념을 적용하여 식(15)를 이용하여 계산하였다.

$$D_c = \sum d_c = \sum \int_0^t \frac{\dot{\epsilon}_c}{\epsilon_c(\dot{\epsilon}_c)} dt \tag{15}$$

이상을 종합하여 크리프와 피로의 상승효과를 고려할 때는 선형 누적손상의 법칙을 적용하여 계산하였으며 다음의 식(16)에 보인 바와 같다.

$$D_t = D_t + D_c \tag{16}$$

3.3. 소프트웨어 구성

보일러 수명감시 소프트웨어는 Visual C++로 작성하였으며, 데이터베이스로는 MS-Access를 사용하였고, ODBC (Open DataBase Connectivity)를 이용하여 client-server 환경을 구축하였다. 여기서 server 프로그램에서는 수명 해석 및 데이터베이스 입출력을 담당하며 client 프로그램은 사용자 인터페이스를 지원하여 실시간 수명소비율 및 운전인자(온도, 압력, 응력) 등을 그래픽으로 보여준다. 소프트웨어의 기본구조 및 흐름도는 Fig. 4와 같다.

Server 프로그램은 가동하면 데이터베이스에 저장되어 있는 센서, 환경설정, 과거이력, 재료물성, 온도 및 응력 그린함수 등의 데이터를 메모리에 불러들이며 프로그램 변수에 할당하여 초기화된다. 이후 1분 간격의 주기로 실시간 센서데이터를 수집하여 유효성 검토를 거친 후 내압응력 계산, 열응력 계산 및 크리프피로해석을 수행하여, 그 결과를 데이터베이스에 저장한다. 수명평가용 컴퓨터로 Pentium-II 233을 사용했을 때 1분간격의 주기적인 평가 실행시 server 프로그램의 실행속도는 280여개의 부착센서를 감지하고 350여 위험위치의 수명을 평가하는데 약 3~4초가 소요되었다. 이는 실제 유한요소해석과 off-line 해석에 소요되는 시간과 비교할 때 실

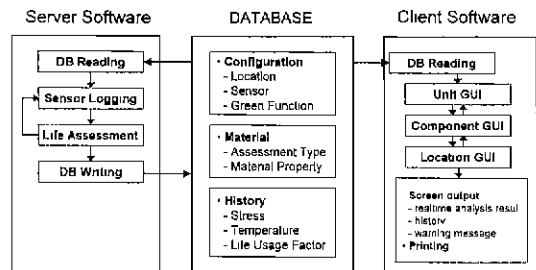


Fig. 4. Functional flow of developed on-line life monitoring software.

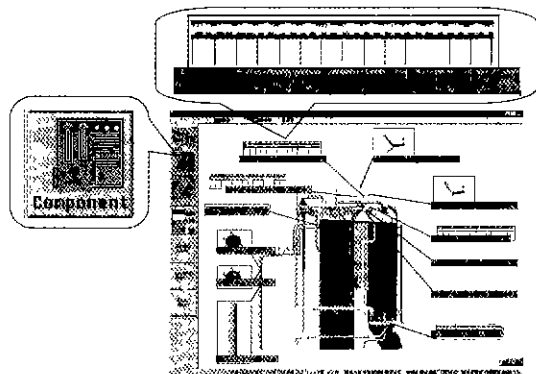


Fig. 5. Life result screen for critical components in power boiler.

행시간이 짧아서 실시간 감시시스템의 목적에 부합함을 알 수 있다 Server 프로그램은 해석 후 결과를 주기적으로 관련 데이터베이스에 저장한다

Client 프로그램은 데이터베이스에 저장된 해석결과를 불러들여 화면상에 출력하는 사용자 인터페이스 기능을 갖추었다. 기본적으로 보일러, 보일러의 각 설비, 설비의 각 감시위치에 대한 수명소비율을 실시간으로 화면 출력한다. 감시중인 보일러의 취약설비에 대한 수명소비율은 Fig. 5와 같이 보일러 화면에 각 설비들이 배열되어있고 설비의 이름과 설비내의 감시위치 중 최고수명소비율을 출력한다.

각 취약설비에 대한 세부적인 감시위치는 해당 설비의 이름을 클릭하면 된다. 예를 들어 Fig. 5의 상단, 좌측에 위치한 과열증기헤더의 경우를 클릭하면 Fig. 6과 같이 헤더 내부의 감시위치들에서의 수명소비율을 볼 수 있다. 또한 해당 감시위치를 클릭하면 Fig. 7과 같이 각 감시위치의 운전이력(온도, 압력, 응력, 수명소비율 등)을 실시간으로 화면출력하며, 임의의 기간동안 과거이력

도 검색하여 화면으로 볼 수 있다. 이러한 기능은 그래픽 화면 뿐 아니라 텍스트로도 출력이 가능하며, 운전인자 및 수명소비율에 대한 경고를 제시하고, 실시간으로 출력하도록 구성되었다.

### 4. 결 론

본 연구에서 개발된 화력발전설비 보일러 고온헤더요소의 실시간 크리프피로 수명감시 시스템은 기존의 설비 센서에서 데이터를 수집하여 실시간으로 설비 내 위험위치의 국부 탄성응력을 얻고, 응력사이클 카운팅 절차를 통해 정기적으로 중요한 응력수준(peaks and valleys)을 계산하여 적절한 재료 피로수명선도와 비교함으로써 선택된 요소의 위치에서 피로손상을 구할 수 있다. 이와 유사하게 크리프 기준응력도 계산하고, 크리프 수명소비율을 연속적으로 갱신하여 구하도록 하였다. 이에 따라 헤더의 크리프 및 피로손상누적은 실시간으로 직접 모니터 되고 지속적으로 갱신될 수 있다.

본 소프트웨어는 기존의 설비제어시스템과 병용하여 사용될 수 있으며 다량의 데이터를 축소시키는 장점을 가지고 있다. 또한 가상 천이데이터에 대한 시뮬레이션 모듈을 가지고 있기 때문에 플랜트 엔지니어가 off-line으로 다양한 플랜트 운전의 영향을 평가할 수 있다. 이 소프트웨어를 응용하면 운전이력에 따른 소비수명을 실시간으로 평가하고 운전이력의 기록이 가능하며, 이후의 운전계획, 보수주기 및 교체시기를 결정하는 데 필요한 자료를 얻을 수 있다.

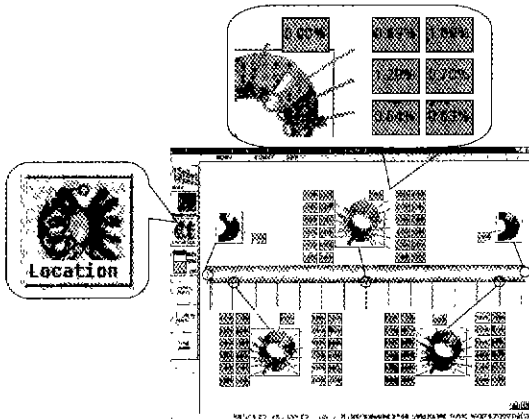


Fig. 6. Life usage result screen for critical locations in superheater header.

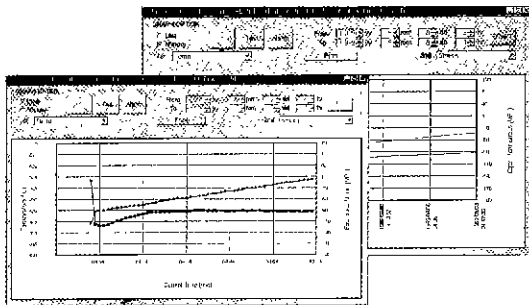


Fig. 7. Real-time operating history screen for critical location.

### 사용기호

- $b_1, b_2$ : NRRM data sheet<sup>®</sup>의 MHP곡선 회귀선 상수
- $d_c$ : 하중유지시간동안 크리프 손상
- $d_r$ : 특정범위의 피로수명소비율
- $k$ : 부재 내부의 한 점
- $n$ : 특정범위의 사이클 수
- $t$ : 시간
- $t_1$ : MHP식에 사용되는 재료상수
- $t_d$ : 열응력의 감쇠기간
- $t_h$ : 하중유지시간
- $t_R$ : 크리프 파단 수명
- $A$ : 재료의 소성상수
- $D$ : 단면감소율의 함수인 상수
- $D_c$ : 총 크리프 손상 또는 크리프 수명소비율
- $D_f$ : 총 피로수명소비율
- $D_n$ : 총 누적손상
- $E$ : 탄성계수

$E(k, t)$  : 시간  $t$ 에서 경계조건  $\Phi$ 의 단위온도변화에  
 기인한 물체 내부의 온도분포  
 $F(t)$  : 증기압력을 제외한 외력  
 $G(k, t)$  : 점  $k$ 에서 열응력에 대한 그린함수  
 $MHP$  : Manson-Haferd Parameter  
 $N_f$  : 특정범위의 피로수명  
 $N_i$  : 피로수명  
 $P(t)$  : 증기압력  
 $T$  : 온도( $^{\circ}C$ )  
 $T(k, t)$  : 온도분포  
 $T(t)$  : 온도분포  
 $T_a$  : MHP식에 사용되는 재료상수  
 $U$  : 크리프 파단수명소비율  
 $U_i$  : 인장강도  
 $V(t)$  : 증기유동속도  
 $\beta$  : 재료의 소성상수  
 $\gamma$  : 시간  
 $\sigma_{eq}$  : Von-Mises 등가응력  
 $\sigma(t)$  : 수명감시 위치에서 총응력  
 $\sigma_p(t)$  : 내압에 의한 기계적 응력  
 $\sigma_r(t)$  : 열적 천이에 의한 열응력  
 $\epsilon_c$  : 평균 크리프변형률속도  
 $\epsilon_i$  : 파단시 크리프 공칭변형률  
 $\Delta\sigma$  : 응력범위  
 $\Delta\sigma_{cl}$  : 탄성응력범위  
 $\Delta\sigma_{pl}$  : 소성응력범위  
 $\Delta\epsilon$  : 변형률범위  
 $\Delta\epsilon_{cr}$  : 크리프 변형률범위  
 $\Delta\epsilon_{cl}$  : 탄성변형률범위  
 $\Delta\epsilon_{pl}$  : 소성변형률범위  
 $\Delta\epsilon_{tot}$  : 탄성과 소성거동의 차이를 보정하는 변형  
 율범위  
 $\Phi(\gamma)$  : 시간에 따라 변하는 온도경계조건  
**하첨자**  
 $r$  : 하중유지기간의 횟수

트 고온설비의 상시 안전수명 감시 시스템 개발) 및 엔지니어링 핵심공통 기반기술개발사업 (98-NE-05-08-A-01)의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 관계자에게 감사드립니다.

**참고문헌**

1. Riccardella, P.C. and *et al.*: "FatiguePro: On-Line Fatigue Usage Transient Monitoring System". EPRI NP-5835M (1988)
2. Copeland, J.F. and *et al.*: "Creep-FatiguePro: On-Line Creep-Fatigue Damage and Crack Growth Monitoring System", EPRI TR-1000907 (1992).
3. Cane, B.J.: "Surveillance and Control of Damage in Elevated Temperature Pressure Parts in Power and Process Plants", ERA Technology Limited, Leatherhead, UK. IMECHE Sixth International Conference on CREEP and FATIGUE, pp 473-490 (1996)
4. Ausfelder, U. and Eckel, M.: "Lifetime Monitoring System LENA in Fossil Power Plants of the Bayernwerk AG", SMIRT Post Conference No. 13, Paris, France, August 25-27 (1997).
5. Boley, B.A. and Weiner, J.H.: "Theory of Thermal Stresses", John Wiley & Sons, New York, New York (1960).
6. Carslaw, H.S. and Jaeger, J.C.: "Conduction of Heat Transfer", Second Ed., Oxford University Press, London, U.K. (1959).
7. 정동관, 노승일, 윤기봉, 나창근: "고온요소들의 실시간 수명 감시를 위한 열응력 계산 알고리즘 개발", 대한기계학회 논문집 A권 제23권 제8호, pp. 1338-1345 (1998)
8. "NRRIM Creep Data Sheet No. 3B". National Research Institute for Metals, Tokyo, Japan (1986).
9. "Assessment Procedure R5, Issuc 2, Vol. 2 and Vol. 3", Nuclear Electric Ltd. U.K. (1996).
10. "Standard Practice for Cycle Counting in Fatigue Analysis", ASTM, Vol 3 01. E1049-85 (1985).

**후 기**

본 연구는 '98 인위재해 방재기술개발사업(중화학플랜