

보일러 고온요소의 수명 감시시스템 소프트웨어 개발

윤필기 · 정동관* · 윤기봉**
중앙대원, 삼성중공업 기전연구소*, 중앙대학교**

Development of On-line Life Monitoring System Software for High-temperature Components of Power Boilers

Pil Kee Yoon · Dong Gwan Jeong* · Kee Bong Yoon**
Chung-Ang Univ., Samsung Heavy Industry*, Chung-Ang Univ.**

Abstract

Nondestructive inspection and accompanying life analysis based on fracture mechanics were the major conventional methods for evaluating remaining life of critical high temperature components in power plants. By using these conventional methods, it has been difficult to perform in-service inspection for life prediction. Also, quantitative damage evaluation due to unexpected abrupt changes in operating temperature was almost impossible. Thus, many efforts have been made for evaluating remaining life during operation of the plants and predicting real-time life usage values based on the shape of structures, operating history, and material properties. In this study, a core software for on-line life monitoring system which carries out real-time life evaluation of a critical component in power boiler (high temperature steam headers) is 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 for the specific headers and by counting transient cycles. 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. 서론

고온, 고압에서 운전되는 대부분의 발전설비 요소는 설계단계에서 설계 코드(ASME, BS 코드 등)에 따라 설계수명이 결정된다. 또한 발전 플랜트용 고온설비의 잔여수명평가는 기존에는 주로 비파괴 검사 및 검사결과의 파괴역학적 해석 등으로 행해졌다. 그러나 이와 같은 방법은 운전 중에는 적용이 제한되는 단점이 있다. 국내의 화력발전 설비의 경우 변동부하의 담당으로 잦은 기동정지로 인하여 설계시 반영되지 않았던 열적 천이가 자주 발생하여 설비의 운전수명을 단축시키고 있다. 가정된 운전이력으로부터는 이와 같은 급작스런 운전이력에 의한 정량적인 손상을 평가할 수 없다. 따라서 주요요소의 부재형상 및 재료물성에 근거하고, 열 및 하중 이력을 실시간으로 감시하여 이로부터 수명 소비율 및 잔여수명을 평가하는 기술이 요구되

고 있다. 본 논문에서는 지금까지 국내외에서 수행되고 있는 실시간 수명감시 시스템 관련 기술현황을 소개함과 동시에 현재 연구중인 보일러 고온요소의 상시 수명감시시스템 소프트웨어에 대해 설명한다. 본 상시 수명 감시 시스템(on-line life monitoring system)은 설비의 운전 상태 파악을 위해 설치한 압력 센서, 온도 센서 등의 출력 신호를 계측한 뒤, 중앙 관계 컴퓨터로 데이터를 수집하고, 컴퓨터는 전송된 센서 신호를 분석하여 설비의 가동시 발생하는 열응력의 계산, 내압에 의한 기계적 응력의 계산, 크리프, 피로 및 크리프-피로 등에 의해 누적된 손상 및 수명 소비율의 계산을 수행하고, 이에 따른 잔여 수명을 평가한다. 수명이 소진된 경우에는 경보기능 또는 조치사항을 제시하도록 하며 또한, 정상가동 상태, 이상상태 발생 여부 등도 판단하는 기능을 갖도록 하였다.

2. 연구 배경

2.1 국내외 연구현황

현재 국내외에서 개발된 수명감시시스템은 설비의 손상기구에 따라 분류된다. 즉, 적용대상의 운전온도, 하중 및 환경적 요인에 따라 크리프, 피로, 부식 또는 이들이 상호 조합된 발생된 손상이 발생된다.

화력 발전설비는 고온(약 530℃)에서 운전된다. 따라서 열피로 뿐만 아니라 크리프가 총 손상을 결정하는 중요한 손상기구가 된다. 기존 사례와 경험을 통해 손상이 심각한 설비로는 과열증기헤더, 재열증기헤더, 주증기관, 절탄기 등으로 알려져 있다. 대표적인 시스템으로 EPRI의 "Creep-fatiguePro"⁽¹⁾와 영국 ERA의 "Boiler-PLUS"⁽²⁾를 들 수 있다. 보일러의 위험위치에 부착된 센서로부터 일정시간 간격으로 수집된 실시간 데이터는 코드 또는 유한요소해석으로 결정된 상관함수를 통하여 응력으로 변환된다. 크리프, 피로 해석을 수행하고 크리프-피로의 상승효과를 선형손상누적법칙으로 평가하였다. "Creep-fatiguePro"의 경우는 사전에 가정되거나 탐지된 균열의 성장모델을 가정하여 크리프-피로 균열발생 수명 및 균열성장해석을 수행하고 잔여수명을 계산하였다. 이 밖에도 영국 AEA의 "LMS", TÜV의 "LENA"⁽³⁾ 또한 상시 크리프-피로 수명감시 시스템으로 잘 알려져 있다.

2.2 그린함수의 이론적 배경

열피로는 원자력 화력 요소 모두의 경우에 기계요소 파손의 중요원인으로 작용한다. 온도변동으로 발생된 열응력은 플랜트의 순간적인 온도상태의 함수일 뿐만 아니라 그이전의 열적 천이 이력의 함수이기도 하다. 다음에 설명할 그린함수 접근은 그러한 상황에서 열응력을 계산하기 위해 개발되었으며 이 그린함수 적분의 개념은 구조동역학에 사용되어 알려진 Duhamel 이론⁽¹⁾과 유사하다.

발전 플랜트에서의 감시위치에 대한 응력은 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma(t) = \sigma_P(t) + \sigma_T(t) \quad (1)$$

여기서, $\sigma(t)$ 는 수명감시 위치에서 총응력, $\sigma_P(t)$ 는 기계적 하중에 의한 응력, $\sigma_T(t)$ 는 열적 천이하중에 기인한 응력이다.

Boley & Weiner⁽⁴⁾와 Carslaw & Yeager⁽⁵⁾는 시간에 따른 열적 경계조건의 변화에 관련한 부재의 천이온도분포는 다음과 같이 식(2)로 표현됨을 보였다.

$$T(P, t) = \int_0^t E(P, t-\gamma) \frac{\delta}{\delta \gamma} \phi(\gamma) d\gamma \quad (2)$$

여기서, P 는 부재 내부의 한 점, γ 와 t 는 시간, $\phi(\gamma)$ 는 시간에 따라 변하는 온도경계조건, $E(P, t)$ 는 시간 γ 에서 경계조건 ϕ 의 단위온도변화에 기인한 물체 내부의 온도분포이며 초기값은 0℃이다.

$T(P, t)$ 와 $E(P, t)$ 는 식(3)과 같은 형태의 대표적인 열전도 방정식을 만족한다.

$$\lambda \nabla T(P, t) = \frac{\delta}{\delta t} T(P, t) \quad (3)$$

여기서, λ 는 $k/(\rho \cdot Cp)$, k 는 열전도도, ρ 는 밀도, Cp 는 재료의 비열이다. Boley와 Weiner에 의해 각기 달리 제안되었던 준정적 열탄성이론⁽⁴⁾(quasi-static thermoelastic theory)에서 열적 천이의 발생으로 인한 변형율은 탄성체에서 응력과 전파에 의해 유발되는 변형율보다 훨씬 작기 때문에 해석과정에 적용이 가능하다. 이러한 준정적 열탄성 이론하에서 탄성체의 응력분포는 온도분포의 유일한 함수로 정의된다.

이 때문에 Duhamel 이론의 개념은 광범위하게 온도를 계산하지 않고도 직접 응력계산에 적용된다. 즉, 열응력은 온도분포에 관한 식(2)의 중간과정을 생략하고 식(4)와 같이 온도경계조건으로부터 직접 계산될 수 있다는 장점이 있다

$$\sigma_T(P, t) = \int_0^t G(P, t-\gamma) \frac{\delta}{\delta \gamma} \phi(\gamma) d\gamma \quad (4)$$

여기서, $\phi(t)$ 는 경계온도, $G(P, t)$ 는 점 P 에서 열응력에 대한 그린함수이다. 물리적으로 식(4)의 $G(P, t)$ 는 부재의 온도경계조건에서 단위온도 변화에 대한 부재의 열응력분포를 나타낸다.

위의 접근방법은 다음과 같은 이유로 유한요소해석과 같은 다른 수치해석적 방법 보다도 상당한 이점을 갖는다. 그린함수 $G(P,t)$ 는 주어진 부재와 경계조건에 대해 전통적인 수치해석적인 방법으로 단 한번 결정된다. 따라서 수반하는 경계조건 $\phi(t)$ 에 기인한 열응력은 시간이 소요되는 다른 수치해석적 계산에 의하지 않고 단순히 그린함수의 적분을 통해 계산될 수 있다. 서로 다른 열적 천이의 발생이 증가할 때 이 그린함수 접근방법은 효율적이다.

대부분의 부재에서 그린함수가 상대적으로 짧은 감쇠기간(decay period) 후에 임의의 상수로 수렴한다는 결과에 의거하여 식(4)의 적분구간은 단축되어 식(5)와 같이 표현된다.

$$\sigma_T(P,t) = \int_{t-t_d}^t G(P,t-\tau) \frac{\delta}{\delta \tau} \phi(\tau) d\tau \quad (5)$$

$$= G_0(P)\phi(t) + \sum_{t_d}^t \dot{G}(P,t-\tau) \Delta\phi(\tau)$$

여기서, t_d 는 감쇠기간이다.

3. 연구 내용

3.1 감시 시스템의 구성

본 상시 수명감시 시스템은 화력발전용 보일러 고온설비(과열증기헤더 등)에 적용을 목적으로 개발되었으며 기본 체계는 Fig. 1과 같다. 센서 및 센서로깅 시스템의 하드웨어를 제어하고 또한 수명평가 해석을 담당할 소프트웨어는 Window NT 환경에서 작동되는 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 해석결과의 주기적 업그라이드 등의 기능을 갖도록 개발되었다.

3.2 크리프-피로 해석 알고리즘

본 수명감시 시스템에 적용된 수명평가 해석 알고리즘은 다음의 Fig. 2와 같이 구성하였으며 1분마다 주기적으로 반복 실행하도록 구현하였다.

온도 및 압력 센서데이터의 수집과 수집된 데이터의 유효성 검토를 마치면 수명평가 해석을

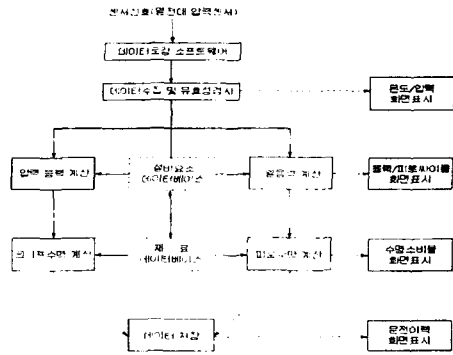


Fig. 1 System flowchart for boiler on-line life monitoring system.

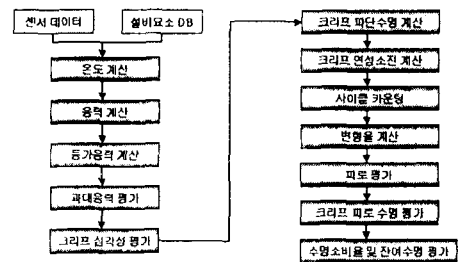


Fig. 2 Analysis flowchart for creep-fatigue assessment procedures.

시작한다. 우선 실시간 센서 데이터는 주로 부재 외부에서 측정하였고 수명감시가 필요한 위치는 주로 부재 내부에 존재하므로 외부의 온도를 이용하여 내부의 온도를 유추하였다. 이 때 부재에 대해 다양한 경우의 유한요소해석 결과로부터 얻은 온도상관함수⁽⁶⁾가 사용된다. 감시 위치의 응력은 유한요소해석으로 생성된 응력상관함수⁽⁶⁾를 이용하여 계산되었으며 6개의 방향 성분으로 구성되어 있다. 그러나 수명해석에 사용되는 대부분의 재료물성은 단축응력실험을 통하여 생성된 것이므로 식(6)과 같이 Von-Mises 등가응력을 계산하여 적용하였다.

$$\sigma_{eq} = \frac{1}{\sqrt{2}} \left\{ (\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + 6(\sigma_{12}^2 + \sigma_{23}^2 + \sigma_{31}^2) \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

여기서, σ_{eq} 는 Von-Mises 등가응력이며 크리프 파단수명을 계산에 적용할 응력으로 이를 수정하여 기준응력(reference stress)을 계산하였다

다. 크리프 수명예측을 위해 식(7)과 같이 MHP⁽⁷⁾ (Manson-Haferd Parameter)를 도입하였다.

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

여기서, P는 MHP, t_R 은 크리프 파단 시간, T는 게이지 온도 (°C), t_a 와 T_a 는 재료상수이다.

MHP와 작용응력과의 관계는 식 (8)과 같다.

$$P = b_0 + b_1 \log S + b_2 (\log S)^2 \quad (8)$$

여기서, S는 응력이고 b_0 , b_1 및 b_2 는 NRRM data sheet⁽⁷⁾의 재료물성값이다.

크리프 파단수명소비율은 식(9)과 같이 life fraction⁽⁸⁾으로 계산하였다.

$$U = \sum_{i=1}^r \left[\frac{t}{t_f(\sigma_{ref}, T_{ref})} \right] \quad (9)$$

여기서, U는 크리프 파단수명소비율, t는 시간, t_f 는 기준 온도·응력상태에서 재료의 크리프 파단시간이며 r은 하중유지기간의 횟수를 나타낸다.

피로수명을 계산하고 데이터의 필터링 처리를 위해 사이클 카운팅을 수행하는데 등가응력을 기준으로 simple range counting⁽⁹⁾법을 사용하였다.

사이클 카운팅이 수행된 후 peak와 valley, 두 점의 응력 차이인 탄성등가응력범위를 계산하였다. 보일러의 고온설비는 주로 저주기 피로를 경험하므로 피로수명을 계산하기 위해서는 식 (13)과 같은 Coffin-Manson⁽⁸⁾식이 적합하다. 따라서 탄성 등가응력범위로부터 변형율범위를 구한다. 이 때 식(10)과 같이 Neuber rule⁽⁸⁾을 통하여 탄성등가응력범위로부터 탄소성등가응력범위 및 탄소성 변형율범위를 구하였다.

$$\Delta \sigma_{el} \Delta \epsilon_{el} = \Delta \sigma_{pl} \Delta \epsilon_{pl} \quad (10)$$

식(11)의 주기 응력-변형율 선도와 식(10)을 연립하여 cyclic deformation stress-strain

loop⁽⁸⁾를 구성하여 총 변형율범위를 계산하였다.

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

총 변형율범위는 다음의 식(12)을 이용하여 계산하였다.

$$\Delta \epsilon_t = \Delta \epsilon_{el} + \Delta \epsilon_{pl} + \Delta \epsilon_{vol} + \Delta \epsilon_{cr} \quad (12)$$

식(10)-(12)에서, 첨자 el은 탄성성분, 첨자 pl은 소성성분, 첨자 vol은 탄성과 소성거동의 차이를 보정하며 첨자 cr는 크리프 변형율범위 성분임을 표시하고, Δ 는 범위를 나타낸다.

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

$$\Delta \epsilon = \frac{3.5}{E} U_i N_f^{0.12} + D^{0.6} N_f^{0.6} \quad (13)$$

여기서, E는 탄성계수, N_f 는 피로수명(사이클), U_i 는 인장강도, D는 $\log(100/(100-RA))$ 이며 RA는 단면감소율을 나타낸다. 또한,

$$D_f = \sum d_f = \sum \frac{n}{N_i} \quad (14)$$

식에서, n은 특정범위의 사이클 수, N_i 는 특정범위의 피로수명, d_f 는 특정범위의 피로수명소비율, D_f 는 총 피로수명소비율을 나타낸다.

손상기구가 크리프-피로인 부재의 크리프 수명평가는 고온 응력조건에서의 크리프 변형에 의해 크리프연성이 소진(creep ductility exhaustion) 되는 개념을 적용하여 식(15)로 계산하였다.

$$D_c = \sum d_c = \sum \int_0^{t_n} \frac{\dot{\epsilon}_c}{\epsilon_f(\dot{\epsilon}_c)} dt \quad (15)$$

여기서, $\dot{\epsilon}_c$ 는 평균 크리프변형율속도, ϵ_f 는 파단시 크리프 공칭변형율, t_n 는 하중유지시간, d_c 는 하중유지시간동안 크리프 손상, D_c 는 총 크리프 손상 또는 크리프 수명소비율이다.

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

$$D_t = D_f + D_c \quad (16)$$

여기서, D_t 는 총 누적손상, D_f 는 피로 누적손상, D_c 는 크리프 누적손상 또는 수명소비율을 의미한다.

3.3 소프트웨어 구성

보일러 수명감시 소프트웨어는 Visual C++로 작성하였으며, 데이터베이스로는 MS-Access를 사용하였고, ODBC를 이용하여 client-server 환경을 구축하였다. 여기서 server 프로그램에서는 수명평가 해석 및 데이터베이스 입출력을 담당하며 client 프로그램은 사용자 인터페이스를 지원하여 실시간 수명소비율 및 운전인자(온도, 압력, 응력)등을 그래픽으로 보여준다. 소프트웨

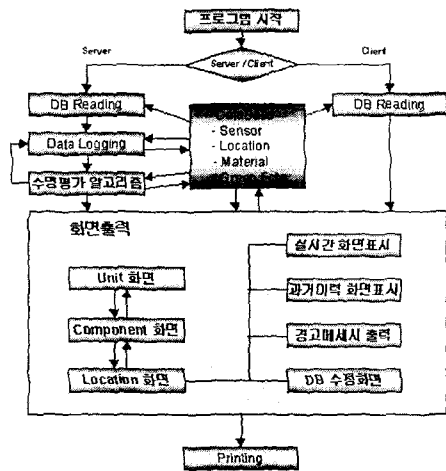


Fig. 3 Functional flow of developed on-line life monitoring software.

어의 기본 구조는 Fig. 3와 같다.

Server 프로그램을 기동하면 데이터베이스에 저장되어 있는 센서, 환경설정, 과거이력, 재료 물성, 온도 및 응력상관합수 등의 데이터를 메모리에 불러들이며 프로그램 변수에 할당하여 초기화된다. 이후 1분 간격의 주기로 실시간 센서데이터를 수집하여 유효성 검토를 거친 후 내압응력 계산, 열응력 계산 및 크리프-피로해

석을 수행하여, 그 결과를 데이터베이스에 저장한다. 수명평가용 컴퓨터로 Pentium-II 233을 사용했을 때 1분간격의 주기적인 평가 실행시 server 프로그램의 실행속도는 280여개의 부착 센서를 감지하고 350여 위험위치의 수명을 평가하는데 약 3~4초가 소요되었다. 이는 실제 유한요소해석과 off-line 해석에 소요되는 시간과 비교할 때 실행시간이 거의 소요되지 않아 실시간 감시로 볼 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 화면출력한다. 감시중인 보일러의 취약설비에 대한 수명소비율은 Fig. 4와 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. 4의 상단, 좌측에 위치한 과열증기헤더의 경우를 클릭하면 Fig. 5과 같이 헤더 내부의 감시위치들에서의 수명소비율을 볼 수 있다. 또한 해당 감시위치를 클릭하면 Fig. 6과 같이 각 감시위치의 운전이력(온도, 압력, 응력, 수명소비율 등)을 실시간으로 화면출력하며, 임의의 기간동안 과거이력도 검색하여 화면으로 볼 수 있다. 이러한 기능은 그래픽 화면 뿐 아니라 텍스트로도 지원이 가능하며, 운전인자 및 수명소비율에 대한 경고를 제시하고, 실시간으로 출력하도록 구성되었다.

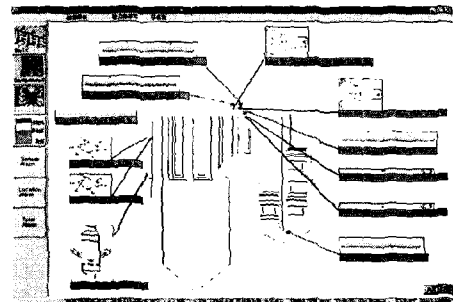


Fig. 4 Life usage result screen for critical components in power boiler.

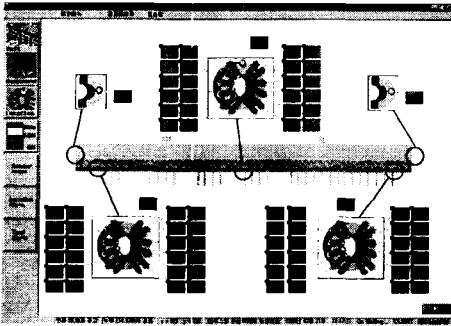


Fig. 5 Life usage result screen for critical locations in superheater header.

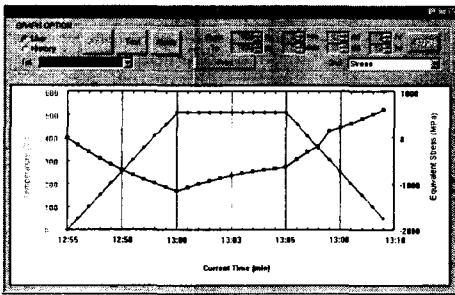


Fig. 6 Real-time operating history screen for critical location.

4. 결론 및 요약

본 연구에서 개발된 고온 발전설비 요소의 상시 크리프-피로 수명감시 시스템은 기존의 설비 센서에서 데이터를 수집하여 실시간으로 설비 내 위험위치의 국부 탄성응력을 얻고, 응력-사이클 카운팅 절차를 통해 정기적으로 중요한 응력수준(peaks and valleys)을 계산하여 적절한 재료 피로선도와 비교함으로써 선택된 요소의 위치에서 피로손상을 구할수 있다. 이와 유사하게 크리프 응력을 계산하고, 연속적으로 갱신하여 크리프 손상을 구하도록 하였다. 이에 따라 크리프 및 피로손상누적은 실시간으로 직접 모니터 되고 지속적으로 갱신될 수 있다.

본 소프트웨어 개발에 따른 효과는 기존의 플랜트 감시 시스템과 병용하여 사용될 수 있으며 다량의 데이터를 축소시키는 기능을 가지고 있다. 또한 가상 천이데이터에 대한 시뮬레이션모듈을 가지고 있기 때문에 플랜트 엔지니어가

off-line으로 다양한 플랜트 운전의 영향을 평가할 수 있게 하였다. 이 시스템은 운전이력에 따른 소비수명을 실시간으로 평가하고 운전이력을 기록함으로써 향후 운전계획, 보수주기 및 교체시기를 결정하는 데 지침으로 활용될 수 있을 것이다.

5. 참고문헌

- (1) Copeland, J. F., et al: "Creep-FatiguePro : On-Line Creep-Fatigue Damage and Crack Growth Monitoring System", EPRI TR-1000907 (1992).
- (2) B. J. Cane: "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, p473-490 (1996).
- (3) U. Ausfelder, M. Eckel: "Life Time Monitoring System LENA in Fossil Power Plants of the Bayernwerk AG", SMiRT Post Conference No. 13, Paris, France, August 25-27 (1997).
- (4) Boley, B. A., and Weiner, J. H.: "Theory of Thermal Stresses", John Wiley & Sons, New York, New York (1960).
- (5) Carslaw, H. S., and Jaeger, J. C.: "Conduction of Heat Transfer", Second Ed., Oxford University Press, London, U.K. (1959).
- (6) 정동관, 노승일, 윤기봉: "발전설비의 수명을 감시하기 위한 실시간 열응력 계산 알고리즘 개발", 대한기계학회 투고중 (1998).
- (7) "NRIM Creep Data Sheet No.3B", National Research Institute for Metals, Tokyo, Japan.
- (8) "Assessment Procedure R5, Issue 2, vol. 2, vol. 3", Nuclear Electric Ltd, U.K.
- (9) "Standard Practice for Cycle Counting in Fatigue Analysis", ASTM, Vol 3.01, E1049-85