

(論 文)

열피로해석시 응력전달함수에 미치는 열적 재료성질의 영향

김영진* · 석창성** · 박종주***

(1995년 7월 24일 접수)

Effect of Thermophysical Properties on Stress Transfer Function for Thermal Fatigue Analysis

Y. J. Kim, C. S. Seok and J. J. Park

Key Words : Stress Transfer Function(응력 전달함수), Finite Element Method(유한요소법), On-Line Monitoring(실시간 감시), Thermal Stress(열응력)

Abstract

For mechanical systems operating at high temperature, thermal fatigue phenomenon has been recognized as a major cause of mechanical component failures. To evaluate cumulative fatigue damage as a consequence of thermal fatigue on real time, the stress transfer function(Green's function) approach is popularly used. The objective of this paper is to investigate the effect of thermophysical properties on the stress transfer function. For this purpose a modified Green's function approach considering temperature-dependent thermophysical properties is proposed. Two case studies were performed and the proposed approach agrees well with full finite element analysis.

기 호 설 명

- t, τ : 시간
- p : 해석대상의 임의위치
- $T(p,t)$: 임의위치, 임의시간에서의 온도
- $\phi(t)$: 경계온도(bulk temperature)
- n : 경계면의 수직방향
- $X(p,t)$: 탄성체내의 온도분포
- h : 열전달계수(heat convection coefficient)
- k : 열전도계수(heat conduction coefficient)
- $G(p,t)$: 위치 p 에서 탄성체의 응력그린함수
- $\sigma(p,t)$: 위치 p , 시간 t 에서 탄성체의 응력

1. 서 론

가스터빈과 같이 고온에서 가동되는 설비들은 반복되는 기동, 정지운전에 의해 피로손상이 누적된다. 설계단계에서 이와 같은 피로의 영향을 고려하더라도 실제 가동중에 일어나는 모든 과도운전조건을 고려하기는 매우 어렵다. 그러므로 여러 운전변수들을 측정, 분석하고 각 부품의 실시간 소비수명 및 안전 여유도를 자동적으로 평가하는 실시간 감시시스템(on-line monitoring system)을 개발하여 발전소 운전에 이용하는 것이 필요하다. 실시간 감시시스템은 발전소 운전시에 이를 보조수단으로 사용할 수 있으며, 발전소 운전에 대한 자료를 저장하고, 운전중의 손상량 계산 및 관련 부품의 보수, 교체시기를 결정할 수 있다.

*회원, 성균관대학교 기계설계학과

**회원, 성균관대학교 기계공학과

***회원, 성균관대학교 대학원

Fig. 1은 실시간 감시시스템의 구성도를 나타낸 것이다. 현재 많은 나라에서 실시간 감시시스템을 개발하여 운전중인 발전소의 건전성 평가에 활용하고 발전소 수명연장에도 이용하려는 단계에 와 있다. 미국에서는 EPRI를 중심으로 한 일련의 연구에 의해 FatiguePro 시스템⁽¹⁾을 개발하고 기존 발전소의 보일러 헤드, 증기라인, 터빈 케이싱 등에 설치하여 피로감시에 적용한 바 있다. 독일에서는 Siemens/KWU가 피로감시 목적으로 FAMOS 시스템⁽²⁾을 개발한 바 있으며, 진동감시, 음향방출 누설감시, 균열감시 시스템 등을 개발하였다. 프랑스에서는 Framatome에서 피로감시뿐만 아니라 구조물에 존재하는 균열의 성장감시에도 적용할 수 있는 OTMS 시스템^(3,4)을 개발하였다. 국내에서는 한국원자력연구소를 중심으로 원자력 발전설비의 피로감시를 수행할 수 있는 K-FAMS시스템⁽⁵⁾을 개발하고 있다.

실시간 감시 시스템은 다음 3단계로 이루어져 있다. 제1단계에서는 발전소 주요 부위에 설치된 센서로부터 온도, 압력, 유량 등과 같은 자료를 획득한다. 제2단계에서는 획득된 데이터를 이용하여 실시간(real time)으로 자료평가를 수행하여 피로해석에 사용할 수 있는 응력이력 데이터로 변환하며, 제3단계에서는 사용회수 계수 및 피로해석을 수행하여 손상수명을 평가한다. 여기서 가장 중요한 단계는 획득한 운전이력(operating history) 데이터로부터 응력전달함수(stress transfer function)를 이용하여 피로해석에 사용할 수 있는 응력이력(stress history) 데이터로 변환하는 작업이다. 응

력전달함수는 기계적인 하중이력(load history) 데이터와 열피로를 야기시키는 온도이력(temperature history) 데이터의 변환에 사용되고 있다. 기계적인 하중이력 데이터는 탄성범위내에서 사용된다는 가정하에 Neuber 법칙⁽⁶⁾과 같은 응력지시(stress indicate)법을 사용하고 있다. 또한 온도이력 데이터의 응력이력 데이터로의 변환에는 Ricadella⁽¹⁾가 제안한 그린함수(Green's function) 접근법이 이용되고 있다.

그린함수 접근법은 발전소 가동중에서 경계온도가 가장 높은 경우의 열적 재료성질에 대해 열응력 해석을 수행하므로 경계온도의 변화에 따른 열적 재료성질을 고려할 수 없다. 일반적으로 온도가 높을수록 열전도계수, k 나 열전달계수, h 와 같은 열적 재료성질은 높아지므로 가장 높은 온도에 대한 열응력 해석결과는 지나치게 보수적일 수 있다. 따라서 좀 더 정확한 열응력 해석을 수행하기 위해서는 경계온도에 의존하는 열적 재료성질이 응력전달함수에 미치는 영향을 고려하여야 한다. 이를 위하여 본 논문에서는 열적 재료성질의 변화를 고려한 수정그린함수(modified Green's function)를 제안하고 타당성을 검토하고자 한다.

2. 이론적 배경

이 절에서는 Ricadella 등⁽¹⁾이 제안한 그린함수 접근법에 대해 설명하고, 본 연구에서 제안하는 수정그린함수 접근법에 의한 해석과정을 설명하고자 한다.

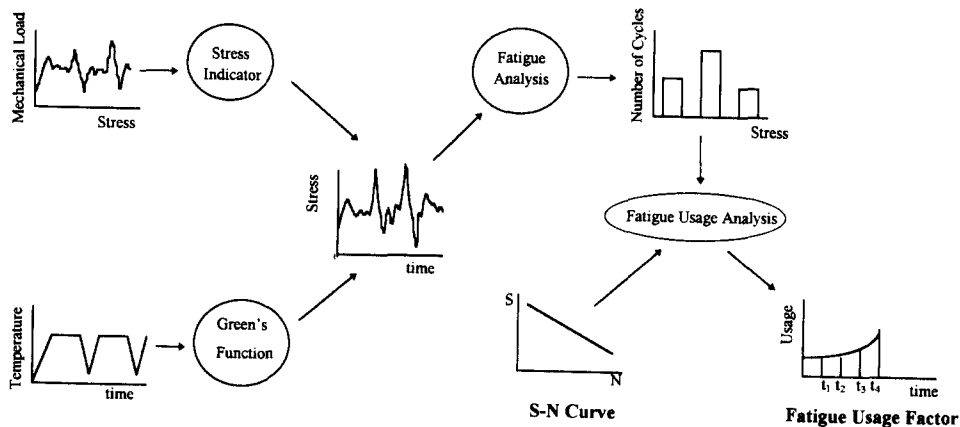


Fig. 1 Schematic of fatigue life prediction methodology

2.1 그린함수의 기본개념

고온에서 가동되는 기계시스템의 열적 경계부위에서 경계온도(bulk temperature)가 시간에 따라 변하면 계통 및 부품에서의 온도분포는 현재 및 이전시간의 열적 과도에 따라 결정된다.

열적 경계조건이 시간에 따라 변하는 탄성체내의 임의위치 p 에서의 과도 온도분포, $T(p, t)$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$T(p, t) = \int_0^t X(p, t-\tau) \frac{\partial}{\partial \tau} \phi(\tau) d\tau \quad (1)$$

여기서, p 는 탄성체내의 임의의 점, t 와 τ 는 시간, ϕ 는 시간에 따라 변하는 경계온도 그리고 $X(p, t)$ 는 탄성체내의 온도분포를 의미한다.

Boley와 Weiner⁽⁷⁾는 열적과도에 의한 변형속도는 탄성체에서 응력과 전파로 발생하는 변형속도에 비하여 무시할 정도로 작다고 하였다. 이로부터, 준정적 열탄성이론에 의해 탄성체내의 열응력은 Duhamel 이론을 적용하여 온도경계조건으로부터 직접계산할 수 있다. 경계의 단위 온도변화시 해석하고자 하는 위치에서 그린함수, $G(t)$ 와 경계온도 함수, $\phi(t)$ 가 주어질 때 이전의 경계온도에 따른 영향을 고려하여 응력이력을 구하는 식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \Delta\sigma(t, \tau) &= G(t-\tau) \cdot \Delta\phi(\tau), \quad (0 < \tau < t) \\ &= G(t-\tau) \left(\frac{\Delta\phi(\tau)}{\Delta\tau} \right) \Delta\tau \end{aligned} \quad (2)$$

식 (2)에서 $\Delta\tau$ 가 0에 접근함에 따라 위치 p 에서의 열응력이력은 다음과 같은 Duhamel 적분식을 이용하여 표현할 수 있다.

$$\sigma(p, t) = \int_0^t G(p, t-\tau) \frac{\partial}{\partial \tau} \phi(\tau) d\tau \quad (3)$$

여기서, $G(p, t)$ 는 위치 p 에서 탄성체의 온도분포 $X(p, t)$ 에 의한 열응력으로서 응력그린함수로 정의되며, 유한요소법과 같은 수치해석을 이용하여 구할 수 있다. 식 (3)에서 그린함수 $G(p, t)$ 가 일정한 값에 도달하는 시간을 지연시간, t_d 라 하면, 식 (3)은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \sigma(p, t) &= \int_{t-t_d}^t G(t-\tau) \frac{d\phi(\tau)}{d\tau} d\tau \\ &+ G(t_d) \{ \phi(t-t_d) - \phi(0) \} \end{aligned} \quad (4)$$

이로부터 해석대상 부품에 대해 미리 계산된 그

린함수를 이용하여 p 점에서의 응력은 단순한 수치적분을 이용하여 계산할 수 있다. 이와 같은 방법으로 과도조건전에 따른 해석대상의 열응력이력을 예측하는 방법을 그린함수 접근법이라 한다.

Ricadella 등⁽¹⁾에 의해서 제안된 그린함수 접근법은 발전소 가동중에 경계온도가 가장 높은 경우의 열적 재료성질에 대해 열응력해석을 수행하므로 경계온도의 변화에 따른 열적재료 성질을 고려할 수 없다. 이를 보완하기 위하여 본 논문에서는 경계온도에 의존하는 열적 재료성질의 변화를 고려할 수 있는 수정그린함수를 제안하였다. 수정그린함수는 열적 재료성질의 변화에 대해 경계에서의 단위 온도 변화에 따른 응력전달함수를 구하고, 이를 이용하여 열응력이력 해석시 같은 경계조건별로 정리한 후에 각 경우의 응력전달함수를 이용하여 열응력이력을 다음과 같이 계산한다.

$$\begin{aligned} \sigma(p, t) &= \int_{t-t_d}^{t_1} G_0(t-\tau) \frac{d\phi(\tau)}{d\tau} d\tau \\ &+ \int_{t_1}^{t_2} G_1(t-t_1-\tau) \frac{d\phi(\tau)}{d\tau} d\tau \\ &+ \dots + \int_{t_n}^t G_n(t-t_n-\tau) \frac{d\phi(\tau)}{d\tau} d\tau \\ &+ G(t_d) \{ \phi(t-t_d) - \phi(0) \} \end{aligned} \quad (5)$$

2.3 수치해석 순서

수정그린함수를 이용한 열응력이력 해석절차는 다음과 같다.

1단계 : 온도경계에서의 단위 온도변화에 대한 온도분포 및 열응력을 유한요소법과 같은 수치해석을 통해 구하며, 이때 얻어진 열응력이 정상상태에 도달하기까지 각 시간별로 열응력을 정리한다.

2단계 : 열피로해석을 수행하고자 하는 위치에서 $\Delta\phi$ (경계온도의 변화)가 단위스텝의 값이므로 이때의 열응력이력을 그린함수로 정의한다.

3단계 : 경계온도변화에 따라 변하는 열적 재료성질에 대해 1단계와 2단계를 반복 수행하여 각 경우에 대한 그린함수를 구한다.

4단계 : 운전이력 데이터로부터 같은 경계조건을 가지는 데이터를 시간별로 정리한다.

5단계 : 식 (6)을 이용하여 열응력이력을 구한다.

3. 그린함수의 계산

3.1 문제정의

Fig. 2는 그린함수를 구하기 위한 해석모델로서

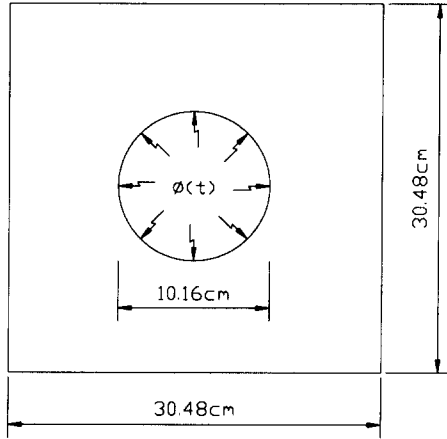


Fig. 2 Geometry for case study

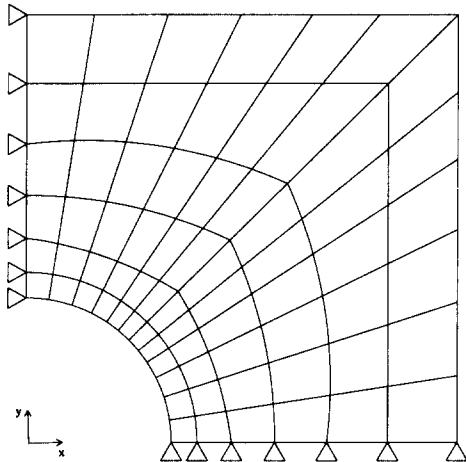


Fig. 3 Finite element mesh for case study

4각판(30.48×30.48 cm)에 원형구멍이 존재하고 구멍 속으로 유체가 흐르는 경우로 가정하였다. 유체로부터 내부경계로의 열전달은 강제대류상태와 자연대류상태의 2가지 경우로 가정하였다. 4각판의 외부경계는 단열되어 있고 열전달은 내부경계에서만 이루어지며 초기의 온도구배는 존재하지 않는 것으로 가정하고 경계에서는 유체의 온도가 단위스텝(1°K)의 온도변화가 이루어지는 경우이다.

열전달해석 및 열응력해석을 위하여 범용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 사용하였다. Fig. 3은 해석에 사용된 유한요소모델로서 대칭성을 이용하여 판의 1/4 만을 모델링하였다. 열전달해석에는 8-절점 열전달요소(DC2D8)를 사용하였고, 열

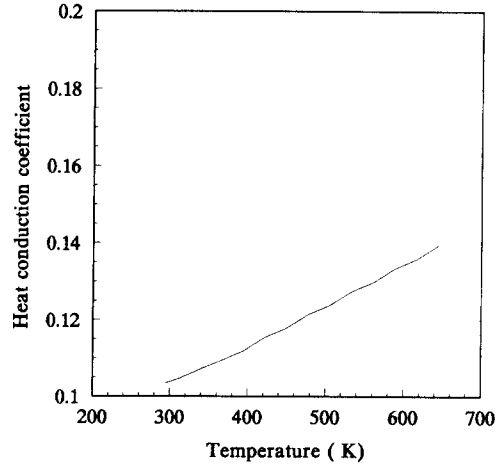


Fig. 4 Heat conduction coefficient as a function of temperature

응력해석에는 8-절점 평면변형률요소(CPE8R)를 사용하였다. 모두 72개의 요소와 253개의 절점을 사용하였다.

유한요소해석에는 가스터빈 부품용으로 사용되는 Ni-Fe계 초내열합금인 Inconel-718합금의 열적재료성질을 사용하였다. Fig. 4는 온도의 함수인 열전도계수, k 의 변화를 보여주고 있다. 열전달계수, h 는 강제대류인 경우에 0.153 W/m²K를 사용하였으며 자연대류인 경우에 0.011 W/m²K를 사용하였다.

3.2 그린함수의 결정

그린함수는 내부경계에서 유체의 온도변화가 단위스텝으로 이루어지는 경우에 해석대상 부위의 열응력이력을 의미한다. 본 연구에서는 Fig. 3과 같은 해석모델에 대해 경계온도가 단위스텝(1°K)만큼 증가함에 따른 유한요소해석을 수행하여 열응력이 정상상태에 도달하기까지 열응력이력을 구하고 이를 그린함수로 정의하였다. Table 1과 같이 열전도계수의 변화 및 열전달계수의 변화를 조합하여 총 10가지 입력조건에 대해 해석하였다.

그린함수를 구하기 위해 유체와 직접 접촉하는 내부경계에 위치한 1번 요소의 x , y 방향의 응력성분 σ_x , σ_y 에 대해 해석을 수행하였다. Fig. 5는 시간에 따른 1번 요소의 응력값의 변화를 비교한 것으로 σ_x 가 σ_y 보다 약 60% 작았다. 본 연구에서는 균열발생에 직접적인 영향을 미치는 σ_y 값의 변화이

Table 1 Input condition

Cases	Heat convection		Heat conduction	
	Mode	h (W/m ² K)	Temp. (°K)	k (W/m ² °K)
1	Natural	0, 011	294	0, 103
2	Natural	0, 011	311	0, 105
3	Natural	0, 011	394	0, 112
4	Natural	0, 011	533	0, 127
5	Natural	0, 011	644	0, 139
6	Forced	0, 153	294	0, 103
7	Forced	0, 153	311	0, 105
8	Forced	0, 153	394	0, 112
9	Forced	0, 153	533	0, 127
10	Forced	0, 153	644	0, 139

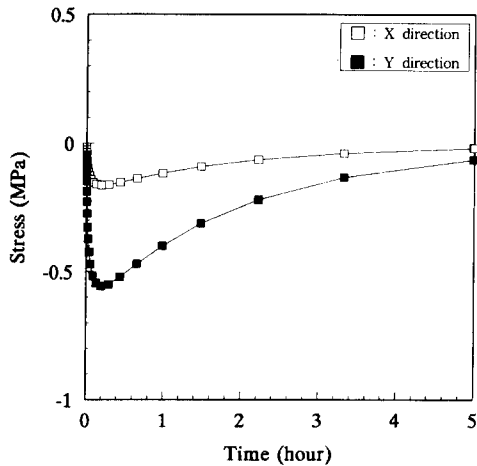


Fig. 5 Thermal stress-time history for two different direction

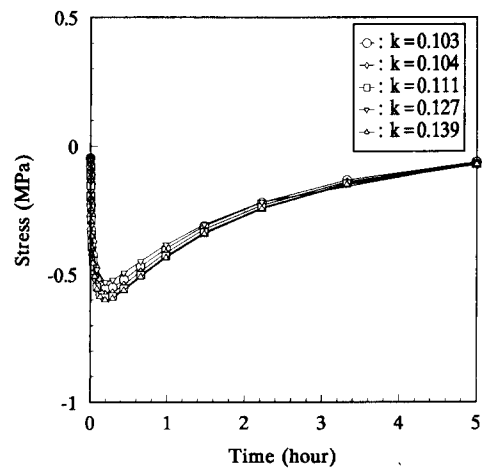


Fig. 6 Green's function for natural convection mode

력을 그린함수로 사용하였다.

Fig. 6은 자연대류인 경우에 열전도계수, k 의 변화에 따른 열응력이력의 변화를 나타낸 것으로, 응력값은 불과 12분만에 최대치에 도달한 후 서서히 감소하여 5시간 지난 후에 정상상태에 도달하였다. $k=0, 139 \text{ W/m}^2\text{K}$ 인 경우의 최대 응력값은 $-0, 53 \text{ MPa}$ 이었으며, 열응력이력에 미치는 k 값의 영향은 무시할 정도로 작았다. 따라서 수정그린함수 접근법에서는 열전도계수의 변화를 고려하지 않고 해석

을 수행해도 무방하다고 생각된다.

Fig. 7은 강제대류인 경우에 k 값 변화에 따른 열응력이력의 변화로서 자연대류인 경우와 대체로 비슷한 경향을 나타냈다. 응력값이 약 3분만에 최대치에 도달한 후 서서히 감소하여 2시간이 지난 후에 정상상태에 도달하였다. $k=0, 139 \text{ W/m}^2\text{K}$ 인 경우의 최대 응력값은 $-1, 5 \text{ MPa}$ 이었으며, 자연대류상태에서와 마찬가지로 k 값의 변화가 열응력이력에 미치는 영향은 무시할 정도로 작았다.

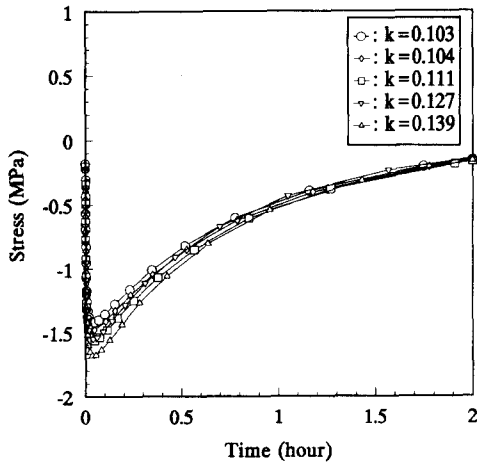


Fig. 7 Green's function for forced convection mode

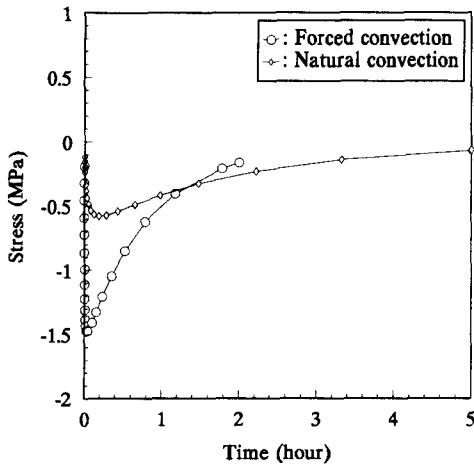


Fig. 8 Green's function for $k=0.139(W/m^2 \cdot K)$ under two different convection mode

Fig. 8은 $k=0.139 W/m^2 \cdot K$ 인 경우의 자연대류와 강제대류에 대한 열응력이력의 변화를 비교한 것이다. 최대 응력값에 도달하는 시간과 정상상태에 도달하는 시간이 자연대류인 경우에 비해 강제대류인 경우가 더 짧았다. 또한 강제대류인 경우의 최대 응력값은 자연대류인 경우의 최대 응력값과 비교하여 약 3배정도 증가하였다. 이는 두 열전달계수의 차이에 의한 경제로의 열흐름 차이에 기인한 것으로 생각된다. 식 (4)에서 한점의 시간별 응력변화는 그린함수의 영향을 받는다. 이와 같이 그린함수는 열적 재료성질의 변화에 따라 큰 차이를 나타내므로 이를 열응력이력 해석에 적용하면 해석의 정

확도를 높일 수 있다고 생각된다.

4. 사례 연구

본 연구에서 제안한 수정그린함수 접근법의 타당성 검토를 위해 2가지 온도이력 데이터에 대해 사례연구를 수행하였다. Ricadella 등이 제안한 그린함수 접근법과 본 연구에서 제안한 수정그린함수 접근법을 이용하여 열응력이력을 구하였으며, 또한 전체 유한요소해석을 수행하여 그린함수 접근법의 타당성을 검토하였다.

4.1 문제정의

사례연구에 사용된 해석모델은 그린함수를 구하기 위한 해석모델과 동일하다. Fig. 9는 사례연구를 수행하기 위한 내부경계에서의 2가지 Case의 온도이력을 나타낸 것이다. Case 1(Fig. 9(a))은 경계온도의 변화가 급격한 경우로 경계온도가 30분 동안 311°K로 유지되고 이후 30분 동안 533°K로

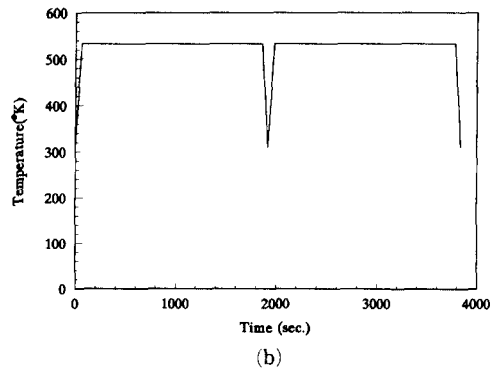
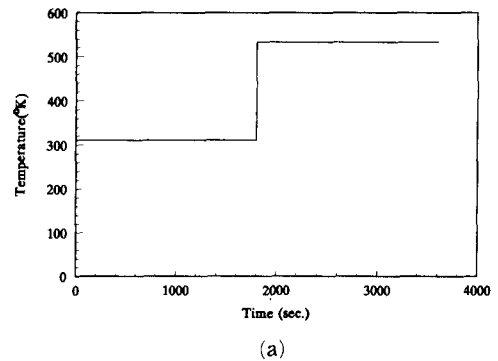


Fig. 9 Temperature-time history at the inner boundary

유지되는 경우이고, Case 2(Fig. 9(b))는 경계온도의 변화가 점진적인 경우로 경계온도가 초기 311°K에서 1분 동안 533°K로 증가하여 이후 60분 동안 533°K로 유지되다가 다시 311°K로 감소하는 경우이다. 2가지 Case에서 경계온도가 311°K인 경우는 자연대류상태로 가정하였고, 경계온도가 533°K인 경우는 강제대류상태로 가정하였다.

4.2 열응력이력의 예측

4.2.1 Case 1 해석결과

종전의 그린함수 접근법에서는 경계조건중에서 경계온도가 가장 높은 경우의 열적재료 성질을 이용하여 단순히 계산하기 때문에 강제대류조건을 사용하여 Case 1과 같은 경계온도 이력에 대응하는 열응력이력을 식 (5)로부터 얻는다. 한편 수정 그린함수 접근법에서는 그린함수가 열전달계수와 열전도계수의 함수로 계산되므로 Case 1과 같은 경계온도 이력에 대응하는 열응력이력을 식 (6)로부터 얻는다.

Fig. 10은 Case 1의 경계온도 이력에 대한 수치 해석결과를 보여주고 있다. 3가지 수치해석결과는 시간에 따른 응력이력의 변화 경향이 비슷하게 나타났다. 전체 유한요소해석에 의한 최대 응력값은 각각 -20 MPa, -580 MPa이었으며, 종전의 그린함수 접근법에 의한 최대 응력값은 각각 -96 MPa, -660 MPa이었다. 즉, 그린함수 접근법으로 구한 첫번째 최대 응력값은 전체 유한요소해석으로 구한 값보다 약 4배 커졌으며, 두번째 최대 응력값은 약 14% 커졌다. 한편 수정그린함수 접근법으로 구한 최대 응력값은 각각 -53 MPa, -605 MPa이었다. 즉, 수정그린함수 접근법으로 구한 첫번째 최대 응력값은 전체 유한요소해석으로 구한 값보다 약 1.6배 커졌으며, 두번째 최대 응력값은 약 4% 커졌다.

종전의 그린함수 접근법에 의한 해석결과는 전체 유한요소해석에 의한 결과와 많은 차이를 보이지만 수정그린함수 접근법을 이용하면 이 차이를 대폭 줄일 수 있다. 또한 시간에 따른 응력값의 변화를 보면 초기 30분동안의 응력값의 차이가 이후 응력값의 차이보다 크게 나타났다.

4.2.2 Case 2 해석결과

Fig. 11은 Case 2의 경계온도 이력에 대한 수치

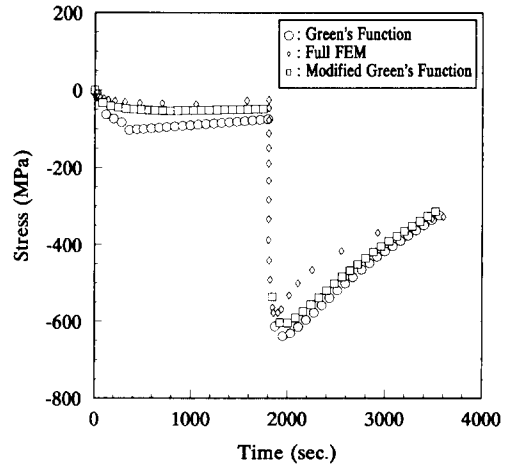


Fig. 10 Thermal stress-time history for case 1

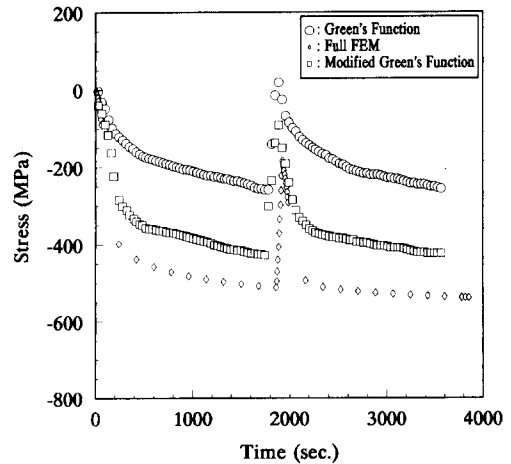


Fig. 11 Thermal stress-time history for case 2

해석결과를 보여주고 있다. 3가지 수치해석결과는 시간에 따른 응력이력의 변화경향이 비슷하게 나타났지만 전체 유한요소해석에 의한 최대 응력값은 -510 MPa로 나타났고, 종전의 그린함수 접근법에 의한 최대 응력값과 수정그린함수 접근법에 의한 최대 응력값은 각각 -240 MPa, -420 MPa로 나타났다. 종전의 그린함수 접근법에 의한 해석결과가 가장 낮게 평가되었고, 전체 유한요소해석 결과가 가장 높게 평가되었다. 수정그린함수 접근법과 전체 유한요소해석에 의한 최대 응력값은 약 20% 차이를 나타내었다.

4.3 토의

Case 1과 같은 경계온도조건에서 초기 30분동안의 응력값의 차이가 이후 응력값의 차이보다 크게 나타난 이유는 2가지 접근법에서 사용한 열전달계수가 다르기 때문이라고 생각된다. 경계온도가 311°K로 유지되는 초기 30분 동안에 대해 종전의 그린함수 접근법에서는 강제대류상태로 해석을 수행하기 때문에 자연대류상태로 해석을 수행한 수정 그린함수 접근법의 해석결과보다 응력값이 높게 나타났다. 이같은 차이가 이후에도 계속 누적되므로 전체 열응력이력 해석결과가 과대평가되게 된다.

Case 2와 같은 경계온도조건에서는 열전달계수의 변화가 뚜렷하지 않으므로 수정그린함수법에 의한 해석결과와 전체 유한요소해석 결과와의 차이가 커지는 것으로 평가되었다. 이상과 같은 결과가 나타난 이유는 경계온도가 갑자기 증가하는 경우에 경계에서의 열전달계수가 증가함으로써 생기는 열흐름의 반전때문으로 생각된다. 즉, 내부 표면온도가 경계온도보다 낮은 상태로 있다가 갑자기 열전달계수가 커지면서 열의 흐름이 증가되었다가 다시 경계온도가 표면온도보다 낮아지면서 열의 흐름이 반전되는 구간이 생기게 된다. 결과적으로 전체 유한요소해석에서는 이와 같은 현상을 잘 고려할 수 있지만 그린함수 접근법에서는 이를 고려하기 어렵기 때문이다. 그러나 열전달계수의 변화를 고려하지 못한 종전의 그린함수 접근법보다는 이를 고려해주는 수정그린함수 접근법을 사용하면 전체 유한요소해석 결과에 더 접근한다. 한편 Case 1과 같은 경계온도조건에서는 열전달계수의 변화가 뚜렷하기 때문에 수정그린함수 접근법에 의한 해석결과와 전체 유한요소해석 결과의 차이가 별로 크지 않은 것으로 평가되었다.

5. 결 론

경계온도에 의존하는 열적재료 성질들이 그린함수에 미치는 영향을 검토하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 그린함수 계산과정에서 강제대류인 경우의 최대응력값이 자연대류인 경우에 비해 약 3배정도 커졌다.

(2) 열전도계수의 변화가 그린함수에 미치는 영향은 미미하였다.

(3) 경계온도의 변화가 급격한 경우에는 수정그린함수 접근법에 의한 열응력이력이 전체 유한요소해석에 의한 결과와 잘 일치하였다.

(4) 경계온도의 변화가 점진적인 경우에는 수정그린함수 접근법에 의한 열응력이력이 전체 유한요소해석에 의한 결과와 대체로 일치하였으며 최대 응력값은 약 20% 차이를 보였다.

후 기

본 논문은 한국과학재단 산하 터보동력기계연구센터의 연구비 지원으로 이루어진 것으로써, 이에 관계자 여러분들께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Riccardella P. C., Deardorff, A. F. and Griesbach T. J., 1992, "Fatigue Lifetime Monitoring in Power Plants," *Advances in Fatigue Lifetime Predictive Techniques, ASTM STP 1122*, pp. 460~473.
- (2) Miksch, M. and Schucktzanz G., 1990, "Evaluation of Fatigue of Reactor Components by On-Line Monitoring of Transients," *Siemens AG, UBKWU, Erlangen, Fed. Rep. Germany, Nuclear Engineering and Design 119*, pp. 237~247.
- (3) Heliot, J. and Fritz, R., 1989, "Framatome Operating Transients Monitoring System Used for Equipment Mechanical Surveillance," *Int. J. Press, Ves. & Piping 40*, pp. 247~258.
- (4) Bimont, G. and Aufort, P., 1987, "Fatigue Monitoring In Nuclear Power Plants" *Transactions of the 9th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology*, pp. 133~140.
- (5)곽은호, 서욱환 등, 1991, "원전 1차계통 부품의 기계공학적 감시시스템 개발," 한국원자력연구소.
- (6) Neuber, H., 1961, "Theory of Stress Concentration for Shear-Strained Prismatical Bodies with Arbitrary Nonlinear Stress-Strain Laws," *J. Appl. Mech., Trans. ASME*, Vol. E28, p. 544.
- (7) Boley, B. A. and Weiner, J. H., 1960, *Theory of Thermal Stresses*, John Wiley and Sons, New York.