

## 온도 의존적 재료물성치를 고려한 개선된 그린함수 기반 열응력 계산

한태송<sup>a</sup>, 허남수<sup>a\*</sup>, 전현익<sup>b</sup>, 하승우<sup>b</sup>, 조선영<sup>b</sup>

## Thermal Stress Calculations Using Enhanced Green's Function Considering Temperature-dependent Material Properties

Tae-Song Han<sup>a</sup>, Nam-Su Huh<sup>a\*</sup>, Hyun-Ik Jeon<sup>b</sup>, Seung-Woo Ha<sup>b</sup>, Sun-Young Cho<sup>b</sup><sup>a</sup> Dept. of Mechanical System Design Engineering, Seoul Nat'l Univ. of Science and Technology,  
232, Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul 01811, Korea<sup>b</sup> KLES Inc.,  
40, Techno3-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34015, Korea

## ARTICLE INFO

## Article history:

|          |    |           |      |
|----------|----|-----------|------|
| Received | 4  | August    | 2015 |
| Revised  | 24 | September | 2015 |
| Accepted | 6  | October   | 2015 |

## Keywords:

Green's function  
Fatigue damage  
Temperature-dependent material property  
Thermal stress analysis

## ABSTRACT

We propose an enhanced Green's function approach to predict thermal stresses by considering temperature-dependent material properties. We introduce three correction factors for the maximum stress, the time taken to reach maximum stress, and the time required to attain steady state based on the Green's function results for each temperature. The proposed approach considers temperature-dependent material properties using correction factors, which are defined as polynomial expressions with respect to temperatures based on Green's functions, that we obtain from finite-element (FE) analyses at each temperature. We verify the proposed approach by performing detailed FE analyses on thermal transients. The Green's functions predicted by the proposed approach are in good agreement with those obtained from FE analyses for all temperatures. Moreover, the thermal stresses predicted using the proposed approach are also in good agreement with the FE results, and the proposed approach provides better predictions than the conventional Green's function approach using constant, time-independent material properties.

## 1. 서론

발전 플랜트 배관 계통은 일반적으로 고온 및 고압환경과 같은 특수한 가동조건에 놓여있기 때문에 경년열화 현상이 발생한다. 발전 플랜트에 사용되는 배관 계통의 경우 경년열화 현상을 고려하여 초기 설계 시 충분한 여유도를 가정하여 설계가 이루어지나, 장기간 운전을 통해 배관 계통이 설계 수명에 다다름에 따라 발전 플랜트의

안전성 유지를 위해 지속적인 수명 감시가 필요한 실정이다<sup>1-4)</sup>.

발전 플랜트에서 발생하는 경년열화 현상은 대부분 기계적 하중과 열하중에 의해 발생하며, 이러한 하중이 반복적으로 작용할 경우 피로 손상을 유발한다. 이와 같은 운전 중 발생하는 피로 손상을 정확하게 평가하기 위해서는 실측 데이터 기반의 응력 해석이 수행되어야 한다. 만약 실측 데이터 기반의 응력을 유한요소(FE: finite element)해석으로 구할 경우에는 해석 대상 모델링, 경계조건 및

\* Corresponding author. Tel.: +82-2-970-6317

Fax: +82-2-974-8270

E-mail address: nam-su.huh@seoultech.ac.kr (Nam-Su Huh).

하중조건 입력, 수치해석 등이 수행되어야 하며, 이는 긴 시간이 소요되기 때문에 실시간 모니터링에는 적합하지 않다. 따라서 보다 빠른 시간에 응력 값을 구하기 위해 일반적으로 실측 데이터 기반 피로 평가 시스템에서는 응력전달함수 개념을 이용하여 응력 값을 계산하게 된다. 기계적 하중의 경우에는 응력전달함수를 단위 하중에 대한 응력 응답으로 정의하여 실제 발생하는 하중 값을 곱하여 최종 실측 데이터 기반 응력 값을 계산하게 되며 열하중의 경우에는 그린함수 접근법(GFM: Green's function method)을 사용하여 응력 값을 계산한다.

열응력 계산에 있어 그린함수는 단위 온도 증가에 따른 열응력 응답으로 정의되며, 이를 Duhamel 적분식에 적용하면 취약부의 열응력 값을 쉽게 얻어낼 수 있다<sup>5)</sup>. 그러나 기존 그린함수 접근법의 경우 그린함수를 구하기 위해 특정 온도에서의 단위 온도 증가를 고려하기에 해당 특정 온도에서의 고정된 재료물성치 값을 이용하여 열응력 해석을 수행하여 피로 수명을 예측하므로 온도에 따른 재료물성치 변화를 반영하지 못한다는 단점이 있다. 이로 인해 그린함수 접근법으로 예측한 응력 결과는 실제 응력 상태를 정확하게 예측하지 못하는 것으로 알려져 있다<sup>5,6)</sup>.

이를 보완하기 위해 온도 의존적인 재료물성치를 반영하여 그린함수를 정의하려는 연구가 다수 수행된 바 있다. 일례로 구경희 등<sup>6)</sup>이 제안한 그린함수 접근법은 그린함수를 과도 구간과 정상 상태 구간으로 나눈 뒤, 각 구간에 온도에 따른 가중함수를 적용하여 온도 의존적인 재료물성치를 반영하였으며, 고한옥 등<sup>7)</sup>이 제안한 그린함수 접근법은 다수의 온도에 대해 그린함수 해석을 수행한 뒤, 이를 선형보간하여 온도 의존적인 재료물성치를 반영하였다. 그러나 전자의 방법은 과도 상태의 가중 함수를 상수 형태로 고려하여 경우에 따라 그린함수를 정확하게 예측하지 못할 수 있다는 단점이 있으며, 후자의 방법은 온도 의존적인 재료물성치를 반영한 그린함수를 선형 보간법으로 제시하였기에 정확한 결과를 얻어내기 위해서는 다수의 그린함수 해석이 수반되어야 한다는 단점이 있다.

따라서 본 연구에서는 기존 연구에 비해 보다 적은 수의 그린함수 해석으로도 온도 의존적인 재료물성치를 정확히 반영할 수 있는 보정계수 개념을 도입한 개선된 그린함수 접근법을 새로이 제시하였다. 이를 위해 피크 응력 비, 피크 응력 및 정상상태에 도달하는 시간 비를 체계적으로 반영하여 보정계수를 결정하였다. 이를 검증하기 위해 본 연구에서는 기존 그린함수 접근법과 본 연구에서 새롭게 제시한 개선된 그린함수 접근법을 이용하여 구한 결과 값을 서로 비교하였으며, 추가적으로 3차원 유한요소해석 결과와도 비교하였다. 이를 통해 본 연구에서 제안한 개선된 그린함수 접근법이 기존의 그린함수 접근법보다 정확하게 열응력을 예측하는 것을 확인하였다.

## 2. 기존 그린함수 접근법

일반적으로 발전 플랜트 배관의 온도는 경계면의 온도가 시간에 따라 변화할 때 이전 시간의 온도 분포에 영향을 받는다. 따라서 단위 온도에 대한 열응력 응답인 그린함수는 시간의 함수로 표현되며 이에 Duhamel 개념을 적용하면 다음 식을 통해 열응력 분포의 직접적인 계산이 가능하다.

$$\sigma(t) = \int_0^t G(t-\tau) \frac{\partial}{\partial \tau} \phi(\tau) d\tau \quad (1)$$

여기서,  $\sigma(t)$ 는 임의 지점에서 시간에 따른 열응력을 의미하며,  $G(t-\tau)$ 는 임의 지점에서의 단위 온도 상승에 대한 열응력 응답인 그린함수를 의미한다. 그리고  $\phi(\tau)$ 는 유체가 접하는 부위의 경계면의 온도를 의미한다.

진술한 바와 같이 그린함수는 경계면의 온도가 단위 온도만큼 변화할 때의 열응력 응답으로 정의되며, 이는 일반적으로 유한요소 해석을 통해 계산된다.

실측 데이터 기반 피로 손상 평가 시스템에 그린함수 접근법을 적용하기 위해서는 식 (1)의 그린함수 식을 수치적분 형태로 변환해야 한다. 이에 따라 식 (1)을  $n$ 개의 구간으로 이산화된 수치적분 식으로 변형하면 다음과 같이 표현된다.

$$\sigma(t) = \sum_{i=1}^n G(t-\tau_i) \Delta\phi(\tau_i) d\tau \quad (2)$$

여기서,  $n$ 은 수치적분을 수행하기 위한 적분 구간의 개수를 의미하며,  $\tau_i$ 는 0부터  $t$ 시간까지의 적분 구간에서  $i$ 번째 시간을,  $\Delta\phi(\tau_i)$ 는  $\tau_i$  시간에서의 온도 증분 값을 의미한다.

기존 그린함수 접근법에서는 온도 변화에 따른 재료물성치 변화를 고려하지 못하며 특정 온도에서의 고정된 재료물성치만 고려하

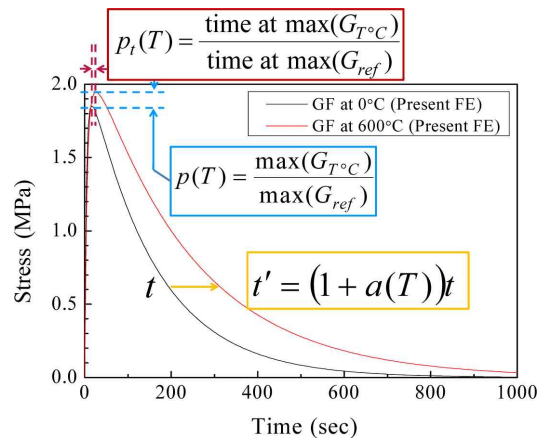


Fig. 1 Generic idea of the enhanced Green's function proposed in the present study

여 유한요소해석을 통해 결과를 도출한다.

### 3. 개선된 그린함수 접근법

전술한 바와 같이 본 연구에서는 온도 의존적인 재료물성치를 반영한 보정계수 기반의 개선된 그린함수 접근법을 새로이 제시하였다. 일반적으로 온도 의존적인 재료물성치를 반영하여 그린함수를 구하면 Fig. 1과 같은 응력응답 결과를 나타내며 그림에 나타난 바와 같이 온도에 따른 재료물성치의 변화에 따라 각 온도에 해당하는 그린함수의 피크 응력, 피크 응력에 도달하는 시간 및 응력이 정상상태에 도달하는데 걸리는 시간이 변하게 된다. 이에 따라 본 연구에서는 이 세 가지 요소를 각각의 보정계수로 고려하였으며 이는 다음과 같이 표현된다.

$$G_{TC}(t') = G_{ref}(t) \times p(T) \quad (3)$$

여기서,  $G_{TC}(t)$ 은 임의 지점의 특정 온도( $T^\circ\text{C}$ )에서의 그린함수를 의미하며,  $G_{ref}(t)$ 는 보정계수를 적용하기 위한 기준 온도에서의 그린함수를 의미한다. 또한  $p(T)$ 는 임의의 온도와 기준 온도에서 그린함수의 피크 응력 비를 의미한다 (Fig. 1 참고). 이 때  $t'$ 은 시간에 따른 응력 감소를 보정하기 위해 조정된 시간을 의미하며, 이는 다

음과 같이 표현된다.

$$t' = \begin{cases} t \times p_t(T) & t < t_{peak} \\ (1+a(T))t & t \geq t_{peak} \end{cases} \quad (4)$$

여기서,  $p_t(T)$ 는 임의의 온도와 기준 온도의 그린함수에서 피크 응력에 도달하는데 걸리는 시간의 비를 의미하며,  $a(T)$ 는 Fig. 1에 나타난 바와 같이 피크 응력 이후 기준 그린함수와 임의의 온도의 그린함수에서 동일한 응력을 갖는 시간의 비를 의미한다. 일반적으로  $a(T)$ 의 경우 시간에 따라 그 값이 서로 다르나  $a(T)$ 를 온도의 다항식의 형태로 표현하기 위해 본 연구에서는  $a(T)$  값이 특정 온도에서 단일 값을 갖도록 전 구간의  $a(T)$  값의 평균값을 사용하였다. 이에 따라  $p(T)$ ,  $p_t(T)$ ,  $a(T)$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$p(T) = \frac{\max(G_{TC})}{\max(G_{ref})} \quad (5)$$

$$p_t(T) = \frac{\text{time at } \max(G_{TC})}{\text{time at } \max(G_{ref})} \quad (6)$$

$$a(T) = \text{avg}\left(\frac{t' - t}{t}\right) \quad (7)$$

Fig. 2는 열응력 해석을 위해 본 연구에서 고려한 단위 온도 증가 함수와 과도 상태를 나타낸 것이고, Fig. 3은 본 연구에서 정의한 세 가지의 보정계수 계산 결과의 예를 나타낸 것으로 보정계수 중 하나인  $p(T)$ 를 온도의 함수로 나타낸 것이다. 본 연구에서는 온도 의존적인 재료물성치를 반영하기 위해 Fig. 2(b)의 최저 온도( $0^\circ\text{C}$ )와 최고 온도( $600^\circ\text{C}$ )를 포함하는 5개의 온도구간( $0^\circ\text{C}$ ,  $150^\circ\text{C}$ ,  $300^\circ\text{C}$ ,  $450^\circ\text{C}$ ,  $600^\circ\text{C}$ )에 대해 그린함수 해석을 수행하였으며, 식 (5)~(7)의 보정계수를 정의하기 위한 기준 그린함수를 최저 온도 ( $0^\circ\text{C}$ )에서의 그린함수로 정의하였다. 이를 통해 과도상태 전 구간에 대해 온도변화에 따른 재료물성치 변화를 고려할 수 있도록 하

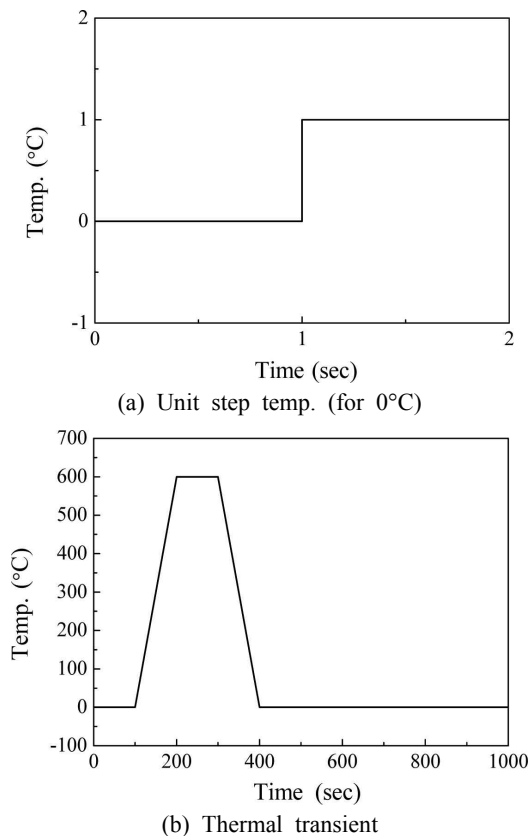


Fig. 2 The unit step temperature and thermal transient

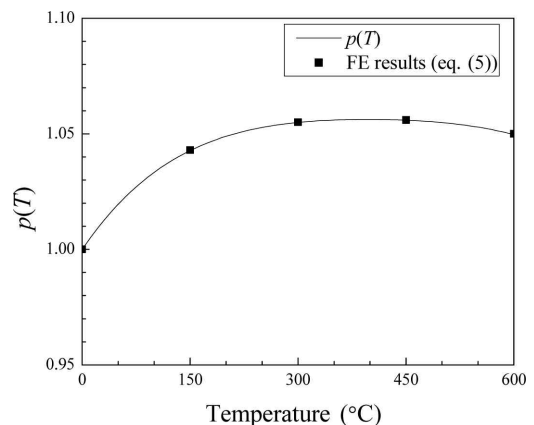


Fig. 3 The resulting values of  $p(T)$  according to temperatures for the enhanced Green's function proposed in the present work

였다.

전술한 바와 같이 Fig. 3은 각 온도에 대한 유한요소 그린함수 해석 결과와 식 (5)의 정의에 따른 보정계수  $p(T)$  값을 나타낸 것이다. 이 때 앞서 언급한 바와 같이 본 연구에서는 기준 그린함수로 0°C에서의 그린함수로 정의하였기에 식 (5)의  $max(G_{ref})$ 는 0°C에 대해 구한 그린함수의 피크 응력 값을 의미한다. 이와 같이 구한 각 보정계수를 온도에 대해 다항식의 형태로 표현하였으며,  $p(T)$ 는 온도의 4차 함수로 나타냈으며,  $p(T)$ 와  $a(T)$ 는 온도의 2차 함수로 나타내었다. 온도에 대해 4차 함수 형태로 나타낸  $p(T)$  결과도 Fig. 3에 함께 나타내었다.

온도 의존적인 재료물성치를 반영한 개선된 그린함수 접근법을 사용하여 열응력을 계산할 경우 기존의 그린함수 접근법과 달리 그린함수가 온도의 함수로 표현되므로 이에 Duhamel 개념을 적용하면 열응력은 다음과 같이 계산된다.

$$\sigma(t) = \int_0^t G(t-\tau, \phi(\tau)) \frac{\partial}{\partial \tau} \phi(\tau) d\tau \quad (8)$$

여기서, 기존 그린함수 접근법과 달리 그린함수가 유체 경계면의 온도의 함수로 표현되며, 이를 수치적분 식으로 변형하면 다음과 같다.

$$\sigma(t) = \sum_{i=1}^n G(t-\tau_i, \phi(\tau_i)) \Delta\phi(\tau_i) d\tau \quad (9)$$

## 4. 개선된 그린함수 접근법 검증

### 4.1 유한요소해석

Fig. 4는 본 연구에서 제시한 개선된 그린함수 접근법을 검증하기 위해 사용한 3차원 유한요소해석 모델을 나타낸 것으로, 본 연구에서는 배관 형상의 대칭성을 고려하여 1/4 모델을 고려하였으

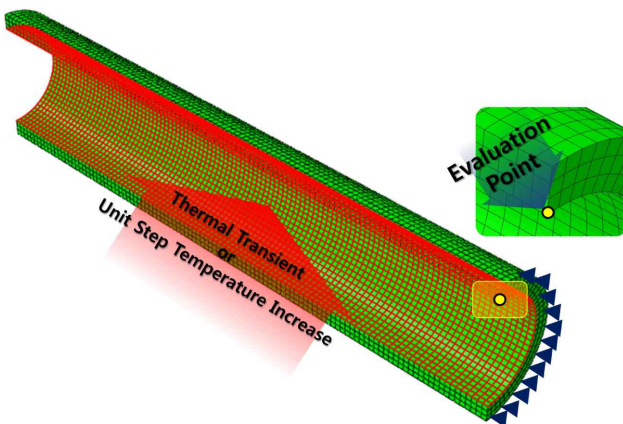


Fig. 4 FE model employed in the present study

며, 해석에는 범용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS<sup>[8]</sup>를 사용하였다. 배관의 측면과 한 쪽 끝단을 구속하였으며, 다른 쪽 끝단을 길이방향으로 동일하게 변형되도록 ABAQUS의 equation 옵션을 사용하였다.

본 연구에서는 Fig. 4의 유한요소모델을 이용하여 그린함수 해석과 이를 검증하기 위한 열응력 해석을 각각 수행하였다. 그린함수 해석을 위해서는 배관 내면에 Fig. 2(a)와 같이 해당 온도에서 단위 계단 함수로 증가하는 온도를 부가하였으며, 과도 상태를 고려한 열응력 해석을 위해서는 Fig. 2(b)의 과도 조건을 배관 내면에 직접 온도 조건으로 부가하였다. 열응력은 배관의 취약부로 판단되는 배관 내면에서 취득하였으며 이 위치를 Fig. 4에 나타내었다.

재료 물성으로는 9Cr강인 P92 재료를 고려하였으며, 이에 대한 재료물성치는 ASME Code Sec.II Part D<sup>[9]</sup>의 값을 사용하였다.

열팽창 계수를 적용함에 있어서 그린함수 해석의 경우에는 단위 온도상승에 의한 열응력 해석을 수행하므로 임의의 온도에서의 순간 열팽창계수(instantaneous coefficient of thermal expansion) 값을 적용하였다. 반면 과도 상태의 열응력 해석에서는 특정 구간에 대해 열응력 해석을 수행하므로 상온과 임의의 온도 사이의 열팽창량의 평균 기울기로 정의되는 평균 열팽창계수(mean coefficient of thermal expansion) 값을 적용하였다.

### 4.2 온도에 따른 그린함수 예측 결과

본 연구에서는 전술한 5개의 온도구간(0°C, 150°C, 300°C, 450°C, 600°C)에 대해 3차원 유한요소해석을 수행하여 개선된 그린함수법을 제시하였다. 또한 기존 그린함수 접근법과의 비교를 위해 과도 구간의 평균 온도(300°C)와 최대 온도(600°C)에서의 재료물성치를 적용한 기존 그린함수 접근법으로 구한 결과와도 비교하였다.

Fig. 5는 온도 의존적 재료물성치를 고려할 수 있는 보정계수 기반의 개선된 그린함수 접근법(enhanced GFM), 평균 온도와 최대 온도에서의 재료물성치를 이용한 기존 그린함수 접근법(conventional GFM), 그리고 해당 온도의 재료물성치를 적용하여 3차원 유한요소해석(FE)을 수행한 결과를 비교하여 나타낸 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 기존 그린함수 접근법은 단일 온도에서의 재료물성치만을 고려하기 때문에 해당 온도에서 계산한 그린함수 해석 결과와 정확하게 일치하였다. 그러나 그 외 온도에서 유한요소해석을 기반으로 구한 그린함수와 기존 그린함수 접근법을 비교할 경우, 재료물성치의 변화로 인해 낮은 온도 영역에서는 응력이 더 빠르게 감소하였으며, 이와는 대조적으로 높은 온도 영역에서는 응력이 더 느리게 감소하는 경향을 보였다. 즉, 기존 그린함수 접근법을 이용한 열응력 평가 시 고온 상태의 재료물성치를 고려할 경우, 시간

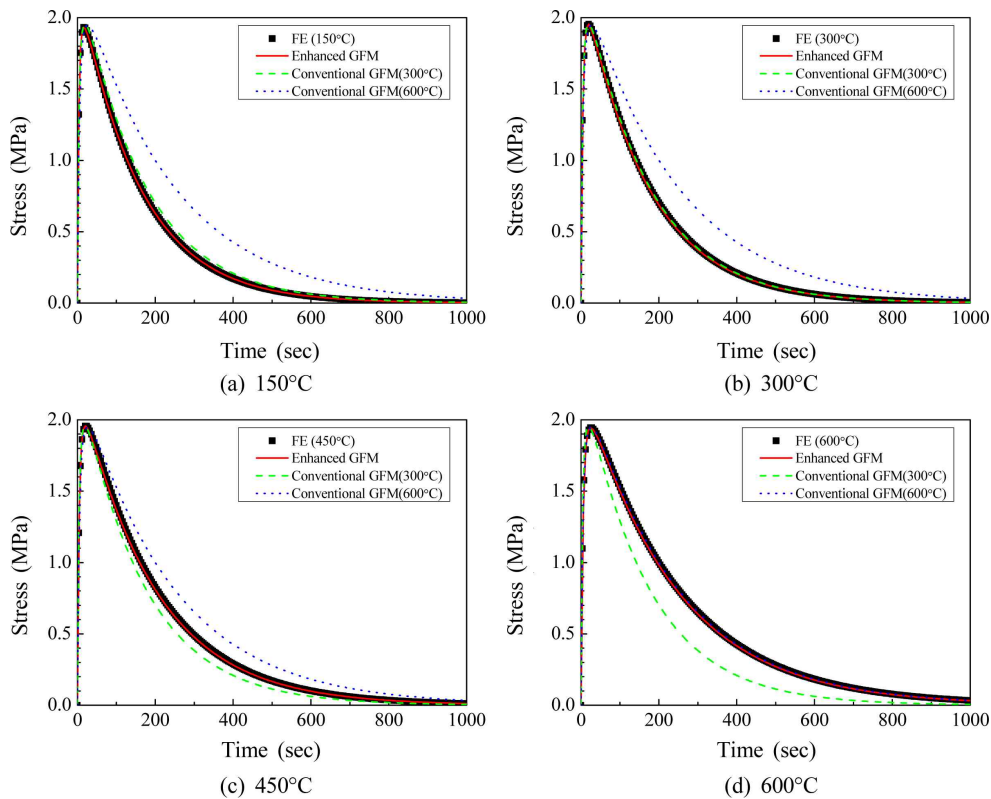


Fig. 5 Comparisons of the FE Green's functions with predictions either using the conventional Green's function approach or using the enhanced Green's function at the each temperature

경과에 따라 감소되는 응력이 줄어들고 이 차이가 누적되어 유한요소해석을 통한 열응력 평가 결과보다 더 큰 응력을 예측할 것으로 판단된다.

반면 본 연구에서 제시한 개선된 그린함수 접근법의 경우, 피크 응력과 피크 응력에 도달하는 시간 및 정상상태에 도달하는 시간이 모든 온도에 대해 유한요소해석 결과와 거의 일치하는 것을 확인하였다. 따라서 본 연구에서 제시한 개선된 그린함수 접근법을 적용하면 온도 변화에 따른 재료물성치를 고려하여 각 온도에서의 그린함수를 정확하게 예측할 수 있으며 이에 따라 과도 상태를 고려한 열응력도 정확하게 예측할 수 있을 것으로 생각된다.

### 4.3 과도 열응력 해석 결과

Fig. 6은 Fig. 4에 주어진 과도 상태에 대해 본 연구에서 새롭게 제시한 보정계수 개념 기반의 그린함수법(Enhanced GFM)과 기존의 그린함수법(Conventional GFM, 평균온도 및 최대온도 적용), 그리고 온도에 따른 재료물성치를 고려한 유한요소 열응력 해석 결과를 비교하여 나타낸 것이다.

Fig. 6에 나타난 바와 같이 기존 그린함수 해석 결과는 평균 온도의 재료물성치를 고려하는 것이 최대 온도의 재료물성치를 고려하는 것보다 유한요소해석 결과와 잘 일치하는 것으로 나타났다. 평균 온도의 재료물성치를 고려한 기존 그린함수 접근법 결과의 최대

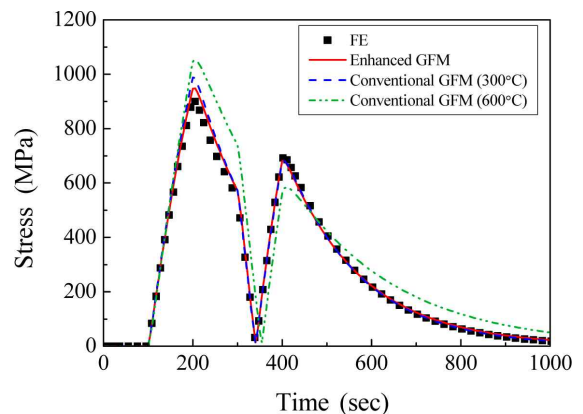


Fig. 6 Comparisons of the FE thermal stresses with predictions using conventional and proposed Green's function approaches

응력은 유한요소해석 결과와 9.9%의 차이를 나타냈으며, 최대 온도의 재료물성치를 고려한 기존 그린함수 접근법 결과는 유한요소해석 결과와 17.2%의 차이를 나타내었다.

반면 본 연구에서 제시한 개선된 그린함수법을 적용할 경우 유한요소해석 결과와 열응력 결과가 거의 일치하였으며 최대 응력이 5.4% 이내로 유한요소해석 결과와 일치하였다. 이를 통해 본 연구에서 제시한 개선된 그린함수 모델이 가장 정확하게 과도 열응력을 예측함을 확인하였다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 과도 열응력 해석 시 온도에 따른 재료물성치 변화를 보다 쉽게 고려하여 열응력을 계산할 수 있는 보정계수 개념 기반의 개선된 그린함수 접근법을 새롭게 제시하였다. 본 연구에서 제시한 개선된 그린함수 접근법에서는 기존 그린함수와 임의의 온도에서의 그린함수의 피크 응력 비, 피크 응력 및 정상상태에 도달하는 시간 비를 보정계수 형태로 고려하였으며, 각 보정계수는 온도의 함수로 정의된다.

본 연구에서 제시된 개선된 그린함수 접근법으로 예측한 각 온도에서의 그린함수와 과도 열응력 해석결과는 온도의존적 재료물성치를 고려한 3차원 유한요소해석 결과와 잘 일치하였으며, 기존 그린함수 접근법에 비해 정확한 결과를 나타냄을 확인하였다. 이에 따라 본 연구에서 제시한 개선된 그린함수법을 적용할 경우 적은 수의 그린함수 해석만으로도 정확한 열응력 평가가 가능하며 이를 통해 보다 정확한 피로 수명 평가가 가능할 것으로 예측된다.

## 후 기

본 연구는 2013년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다(No. 20135020920020).

## References

- [1] Griesbach, T. J., Riccardella, P. C., Gosselin, S. R., 1991, Application of Fatigue Monitoring to the Evaluation of Pressurizer Surge Lines, *Nuclear Engineering and Design*, 129:2 163-176.
- [2] Aufort, P., Bimont, G., Chau, T. H., Fournier, I., Morilhat, P., Souchois, T., Cordier, G., 1991, On Line Fatiguemeter: A Large Experiment in French Nuclear Plants, *Nuclear Engineering and Design*, 129:2 177-184.
- [3] Heliot, J., Fritz, R., 1989, Framatome Operating Transients Monitoring System Used for Equipment Mechanical Surveillance, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 40:3 247-258.
- [4] Gilman, T., Gray, M., Rudolph, J., Heinz, B., 2015, Fatigue Monitoring and Assessment: Different Approaches Combined for Lifetime Extension Challenges, *Proceedings of the ASME Pressure Vessels and Piping Conference*, PVP2015-45659.
- [5] Koo, G. H., Kwon, J. J., Kim W. J., 2009, Green's Function Method with Consideration of Temperature Dependent Material Properties for Fatigue Monitoring of Nuclear Power Plants, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 86:2 187-195.
- [6] Zhang, H., Xiong, Y., Nie, C., Xie, D., Sun, K., 2012, A Methodology for Online Fatigue Monitoring with Consideration of Temperature-Dependent Material Properties using Artificial Parameter Method, *ASME Journal of Pressure Vessel Technology*, 134:1 011201-1-6.
- [7] Ko, H. O., Jhung, M. J., Choi, J. B., 2014, Development of Green's Function Approach Considering Temperature-Dependent Material Properties and Its Application, *Nuclear Engineering and Technology*, 46:1 101-108.
- [8] ABAQUS, 2011, ABAQUS/Standard User's Manual Version 6.11-1, Dassault Systemes.
- [9] ASME, 2007, ASME Boiler & Pressure Vessel Code, Section II, Part D, American Society of Mechanical Engineers, U.S.A.