

원전 주요기기의 피로 손상 평가를 위한 그린함수 개발

Development of Green Functions for Estimating the Fatigue Damage of Major Components of Nuclear Power plant

*양상모¹, 김익홍¹, 김복순¹, 김영진¹, #최재봉¹, 김홍기², 최영환²

*S. M. Yang¹, I. J. Kim¹, B. S. Kim¹, Y. J. Kim¹, #J. B. Choi¹(boong33@skku.edu), H. G. Kim², Y. H. Choi²

¹성균관대학교 기계공학과, ²한국원자력안전기술원

Key words : Green's Function, Aging Monitor, Steam Generator, FEM(Finite Element Method), Nuclear Power Plant

1. 서론

원전의 가동시간이 경과함에 따라 증성자조사, 반복적 과도상태, 고온 및 고압 또는 부식환경등과 같은 특수한 가동조건의 영향을 받아 원전의 기기, 계통 및 구조물에서는 성능저하와 물성변화 현상이 나타난다. 원전 주요기기의 경우 초기 설계시에 이러한 경년열화 현상에 대비한 설계여유가 반영되어 있으나 운전년수가 증가함에 따라 경년열화 현상이 가속화되는 경우 설계여유가 감소하여 원전의 안전성 및 운전성에 영향을 미칠 수 있다. 따라서 주요기기의 건전성을 보장하기 위하여 이에 대한 지속적인 감시가 필요하다.[1, 2] 원전에서 발생하는 경년열화 손상 중에서 피로 손상은 기계적 하중 또는 열하중에 의해 유발되는 구조물의 손상이다. 피로손상에 영향을 미치는 가장 중요한 인자는 반복적으로 작용하는 하중이며, 이로 인해 균열이 발생하고 점차 성장하여 최종적으로는 파단으로 이르게 된다. 피로손상을 평가하기 위해서는 일차적으로 하중변화로 인한 응력해석을 수행하여야 하며, 이를 위해 유한요소법(FEM)이 가장 광범위하게 사용된다. 그러나 FEM을 수행하기 위해서는 많은 시간이 필요하기 때문에 실시간 온도/압력 데이터를 처리하여 응력값을 계산하는 것이 어렵다. 따라서, 원전 주요기기에 대한 실시간 피로손상 모니터링 시스템을 개발하기 위하여 그린함수를 개발하였으며, 개발된 그린함수의 계산결과를 FEM결과와 비교하여 타당성을 입증하였다.

2. 응력전달함수

임의 계통 및 부품의 열적 경계위치에서 발생하는 과도 상태에서의 응력 $\sigma(t)$ 는 다음과 같이 두개의 성분으로 표현할 수 있다.

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

위의 식에서 $\sigma(t)$ 는 부품과 연결된 배관 계통에서 오는 자중, 압력, 열팽창, 열팽창지체물 등의 외부하중에 의해 발생하는 응력벡터 $\sigma_p(t)$ 와 부품내의 열 기울기에 의해 발생하는 응력벡터 $\sigma_T(t)$ 의 합이다. 전자는 현재의 감시 변수에 대한 응력전달함수로 직접 계산할 수 있는 반면 후자는 일정기간 동안의 경계변수 변화이력에 의해 영향을 받으므로 이를 고려한 응력전달함수(Green's function)로 계산하여야 한다.

탄성체의 열응력 분포는 온도분포의 유일함수가 되어 Duhamel Theory개념을 사용할 경우 시간에 따른 온도 분포를 계산하지 않고 바로 열응력 분포를 식 (2)에 의해 구할 수 있다[3].

$$\sigma(t) = \int_0^t G(p, t - \tau) \frac{\partial}{\partial \tau} \varphi(\tau) d\tau \quad (2)$$

여기서 $\ell(\tau)$ 는 유체가 접하는 경계온도를 포함하는 함수이며, $G(p, t)$ 는 경계의 단위온도 변화시 점 P에서의 열응력에 대한 응력 전달함수(Green's function)로 정의된다. 어느 한 점에서 응력전달함수 $G(p, t)$ 와 경계온도함수 $\ell(\tau)$ 가 주어질 때 그 점에서 이전의 경계온도에 따른 영향을 고려하여 응력이력을 구하는 Duhamel 적분식은 다음과 같이 유도할 수 있다. 주어진 시간 τ 에서 온도함수 $\ell(\tau)$ 의 함수값을 갖고, 이로부터 증분시간을 $\Delta\ell(\tau)$ 라 하면 $t(>\tau)$ 시간에서 발생하는 응력변화량은 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta\sigma(t - \tau) &= G(t - \tau) \Delta\varphi(\tau) \\ &= G(t - \tau) \frac{\Delta\varphi(\tau)}{\Delta\tau} \Delta\tau \quad (0 < \tau < t) \end{aligned} \quad (3)$$

이때 $\ell(\tau)$ 가 $t=0$ 에서 적용된 단위함수라면 시간 t에서의 응력은 식 (4)와 같다.

$$\sigma(t) = \varphi(0)G(t) + \sum G(t - \tau) \frac{\Delta\varphi(\tau)}{\Delta\tau} \Delta\tau \quad (4)$$

상기의 관계식에서 $\Delta\tau$ 가 0에 접근함에 따라 식 (5)와 같이 Duhamel적분이 구성된다.

$$\sigma(t) = \varphi(0)G(t) + \int_0^t G(t - \tau) \frac{d}{d\tau} \varphi(\tau) d\tau \quad (5)$$

여기서 $\ell(\tau)$ 는 경계온도이고, $G(p, t, \tau)$ 는 임의 점 P에서 응력전달함수이다. 위 식에서 t가 매우 클 경우 효율적인 적분을 수행하기 위하여 $G(t)$ 가 일정하게 수렴하는 시간을 t_d 라 하고 응력변화의 영향이 작은 이후 시간의 영향을 무시하면 식 (5)는 아래와 같이 쓸 수 있다.

$$\sigma(t) = \int_{t-t_d}^t G\left(t - \tau \left(\frac{d}{d\tau} \varphi(\tau) d\tau + G(t_d) \varphi(t - t_d) \right)\right) \quad (6)$$

식 (6)을 수렴시간에 대해 n개의 구간으로 나누어 수치적분형태로 나타내면 아래와 같다.

$$\begin{aligned} \sigma(t) &= \sum_{i=1}^n G(t_d - \tau_i) \frac{\varphi(\tau_i) - \varphi(\tau_i - \Delta\tau)}{\Delta\tau} \Delta\tau + G(t_d) \varphi(t - t_d) \quad (7) \\ &= \sum_{i=1}^n G_{n-1}(\varphi_i - \varphi_{i-1}) + G_n \varphi_0 \\ &= G_n \varphi_0 + G_{n-1}(\varphi_1 - \varphi_0) + \dots + G_{n-i}(\varphi_i - \varphi_{i-1}) \\ &\quad + \dots + G_0(\varphi_n - \varphi_{n-1}) \end{aligned}$$

따라서 식 (7)로부터 경계온도 함수가 주어질 때, 온도경계조건에 대한 응력발생 특성을 나타내는 응력전달함수가 주어지므로 한 점에서의 응력이력을 계산할 수 있다.

3. 응력전달함수 개발을 위한 유한요소모델

본 논문에서는 고리 3호기 원전의 증기발생기에 대한 그린함수를 개발하기 위해 이에 대한 유한요소모델을 작성하였다. Fig.1은 고리 3호기에 설치되어 있는 증기발생기의 3차원 형상이며, Fig.2는 주요 관심부위와 경계조건을 나타낸다. 관심부위는 설계응력 보고서를 참고하여 CUF(Cumulative Usage Factor)가 높은 세 부위를 선정하였으며, 경계조건은 증기발생기 서포트의 위치를 고려하여 용기하단의 네 부위를 접선방향으로 고정하였다.[4] 유한요소(FE)모델은 약 174,000개의 절점과 87,000개의 요소로 구성되어 있으며, 상용 프로그램인 HyperMesh를 사용하여 작성하였다.

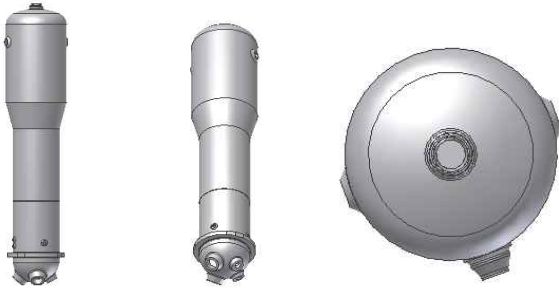


Fig. 1 3-D model of steam generator

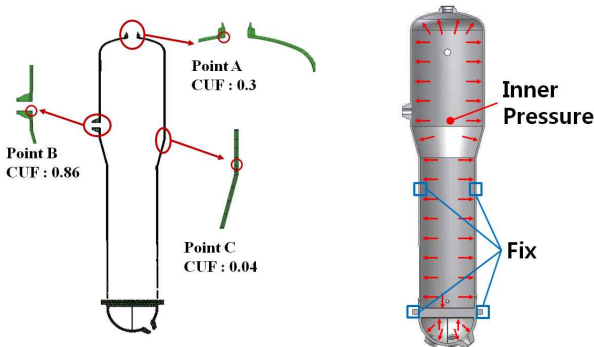


Fig. 2 Critical point and Boundary condition of steam generator

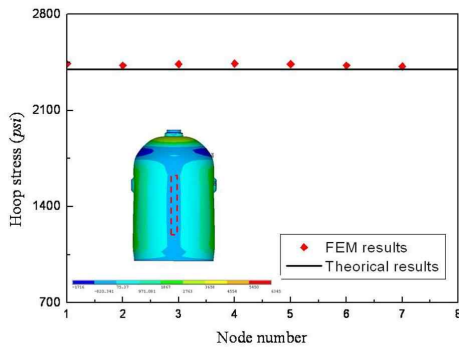


Fig. 3 Verification of FE model

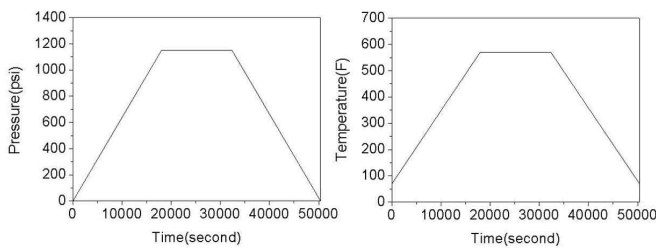


Fig. 4 Design transient of Steam generator

4. 해석결과

그린함수 개발에 앞서 작성한 FE 모델의 타당성을 검증하기 위해 Fig.3과 같이 용기상단 부위의 원주방향 응력을 식 (8)의 이론값과 비교하였으며, 비교 결과 이론값과 해석값은 약 1.8% 이내의 오차에서 잘 일치하였다.[5]

$$\sigma = \frac{P \cdot r}{t} \quad (8)$$

본 논문에서는 설계 과도상태 중에서 Fig.4와 같이 온도변화가 큰 heat and cool-down에 대한 그린함수를 개발하였으며, 개발한 그린함수의 타당성을 입증하기 위하여 ANSYS를 이용한 해석결과와 비교하였다.[6] 비교결과 Figs. 5~7과 같이 Steam Outlet Nozzle에서는 2ksi, Feed Water Nozzle과 Transition Cone에서는 0.4ksi 이내에서 그린함수 결과와 해석결과가 잘 일치하였다.

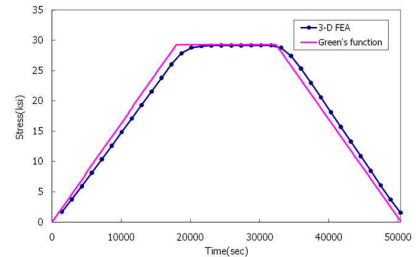


Fig. 5 Verification of green's function(steam outlet nozzle)

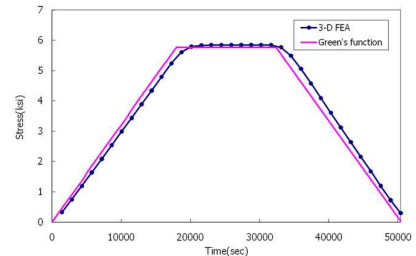


Fig. 6 Verification of green's function(feed water nozzle)

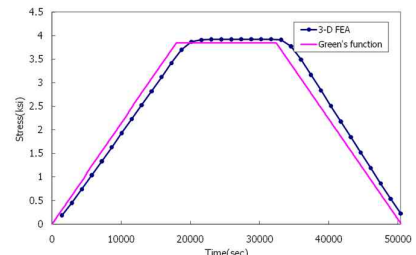


Fig. 7 Verification of green's function(transition cone)

5. 결론

본 논문에서는 그린함수를 이용한 원전 주요기기에 대한 실시간 피로손상 모니터링 시스템 개발이 최종목표이며, 이에 대한 선행연구로 고리 3호기 원전의 증기발생기 주요부위의 그린함수를 개발하였다. 개발한 그린함수의 타당성을 입증하기 위하여 ANSYS를 이용한 해석결과와 비교하였다. 비교결과 Steam Outlet Nozzle에서는 2ksi, Feed Water Nozzle과 Transition Cone에서는 0.4ksi 이내에서 그린함수에 의한 결과와 해석결과가 잘 일치하였으며, 이를 통하여 개발된 그린함수의 타당성을 입증하였다.

후기

본 논문은 지식경제부의 원자력연구개발 중장기 계획사업중 가동중 원전 기기의 장수명 안전성 감시시스템(Aging Monitor)개발의 일환으로 수행된 것으로서, 이에 관계자 여러분들께 감사드립니다.

참고문헌

1. 박윤원, "산업설비의 수명평가기술, II. 원자력 설비 분야", 기술 분석보고서, 산업설비 안전성평가 연구센터, 1997.
2. Yang, B., Liaw, P. K., Wang, H., Jiang, L., Huang, J. Y., Kuo, R. C. and Huang, J. G., 2001, "Thermographic Investigation of the Fatigue Behavior of Reactor Pressure Vessel Steels," Materials Science and Engineering, A314, pp. 131 ~ 133.
3. S.B. Choi, S.W. Woo, Y.S. Chang, J.B. Choi, Y.J. Kim, M.J. Jung and Y.H. Choi, "Development of Green Function of Steam Generator Shells using Real Operating Data,"
4. "Optimized Model F Steam Generator Stress Report for KOREA Electric Company KO-RI Unit No.5," WESTINGHOUSE ELECTRIC CORPORATION.
5. R.C. Hibbler, "Mechanics of Materials", fifth edition, Prentice Hall Inc, pp.409-412, 2002.
6. ANSYS, "Introduction of ANSYS", ANSYS Inc, 2004.