개질로 반응관의 상시수명 감시 시스템 개발

김동영* · 윤필기* · 윤기봉**
*중앙대학교 대학원
**중앙대학교 기계공학부

Development of On-Line Life Monitoring System for Reformer Tube

D.Y.Kim* · P.K.Yoon* · K.B.Yoon**
* Graduate school of Chung-Ang Univ
** Dept. of Mechanical Eng. Chung-Ang Univ

1.서론

중화학 산업이 시작된 이후 약 30년여 동안 압력용기(pressure vessel), 반응기(reactor), 가열기(heater), 개질로(reformer), 분해로(cracker) 등을 비롯한 중화학 산업설비는 초기 국가경제 건설 및 부흥의 기초가 되어왔다. 그러나 초창기 건설된 대부분의 설비는 가혹한 운전조건에 의한 설비의 노화와 재질의 열화로 인하여 설계 수명을 다하여 교체가 필요한 실정이나 경제적, 환경 요인으로 신규 설비의 건설은 매우 어려운 현실이다. 또한 각종 장치산업에 필수적인 대형, 고가의 설비는 제작이 어렵고 생산단가가 매우 높으며 장시간의 생산과정을 요구하기 때문에 기존 설비의 상태를 감시하고 잔여수명 및 교체시기를 예측하는 것이 필요하다. 기존의 예측방법은 검사를 위한 사용 정지 후 검사에 많은 시간과 경비를 소요하는데 비하여 가동 중에 설비의 상시 감시 시스템은 저가이고 가동중 감시를 통한 설비의 생산성을 높이고 설비의 실제이력을 바탕으로 한 교체주기의 합리적인 예측을 가능하게 한다.

본 연구에서는 중화학 고온 설비인 개질로(reformer)에 대한 손상과 수명소진에 관련된 자료 수집 및 분석을 토대로 실시간 안전 수명 감시 시스템을 개발하고 있다. 센서신호를 이용하여 설비의 가동시 발생하는 열응력을 실시간으로 계산할 수 있는 알고리즘 및 크리프-응력 이완 등에 의한 수명 소비율을 실시간으로 계산하는 알고리즘을 개발하였으며 또한 설비 주요 요소의 누적 손상 및 잔여 수명을 평가하는 상시 안전 수명 감시 시스템의 실기 검증에 관한 연구를 수행 중이다.

2. 이론

2.1 그린함수

플랜트에서 온도변동으로 발생된 열응력은 순간적인 온도함수 와 그이전의 열적 천이 이력의 함수이다. 예를 들어 서로 다른 시점에서 플랜트 설비에 대한 센서의 계측값이 동일하더라도 이전의 온도천이가 다를 경우(기동/정지시) 다른 응력상태를 가질수 있다. 이러한 상황에서 열응력을 계산하기 위해 그린함수의 개념을 도입하였다.

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

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

여기서, $\sigma(t)$는 수명감시 위치에서 총응력, $\sigma_P(t)$는 기계적 하중에 의한 응력, $\sigma_T(t)$는 열적 천이하중에 기인한 응력이다. $\sigma_P(t)$는 관내 압력, 열팽창에 의한 응력으로 감시위치에서의 센서에 의한 계측값으로 계산된다. $\sigma_T(t)$는 급속한 유체온도의 변화에 기인한 벽두께 방향의 열응력 구배로서 이전의 천이 이력에 의존하며 이미 결정된 그린함수와 열적 천이 데이터와의 곱을 시간에 대해 적분하여 계산된다. 이 그린함수 적분의 개념은 잘 알려진 Duhamel이론 개념과 유사하다.

Boley와 Weiner[1]에 의해 각기 달리 제안되었던 준정적 열탄성이론(quasi-static thermoelastic theory)에서 열적천이의 발생으로 인한 변형율은 탄성체에서 응력파의 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 온도를 계산하지 않고도 직접 응력계산에 적용된다. 즉, 열응력은 식(2)와 같이 온도경계조건으로부터 직접 계산될 수 있다.

$$\sigma_T(P,t) = \int_0^t G(P, t-\gamma)\frac{\delta}{\delta\gamma}\Phi(\gamma)d\gamma \tag{2}$$

여기서, $\Phi(t)$는 경계온도, $G(P,t)$는 점 P에서 열응력에 대한 그린함수이다. 물리적으로 식(2)의 $G(P,t)$는 부재의 온도경계조건에서 단위온도변화에 대한 부재

의 열응력분포를 나타낸다.

여기서 그린함수 $G(P,t)$는 주어진 부재와 경계조건에 대해 수치해석적인 방법으로 결정된다. 따라서 수반하는 경계조건 $\Phi(t)$에서의 열응력은 많은 시간이 소요되는 수치해석적 계산에 의하지 않고 단순히 그린함수의 적분으로 계산할수 있다. 서로 다른 열적 천이의 발생이 증가할 때 이 그린함수 접근방법은 효율적이다.

대부분의 부재에서 그린함수가 짧은 감쇠기간(decay period)후에 임의의 상수로 수렴한다는 결과에 의거하여 식(2)의 적분구간은 단축되어 식(3)와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned}\sigma_T(P,t) &= \int_{t-t_d}^{t} G(P,t-\gamma)\frac{\delta}{\delta\gamma}\Phi(\gamma)d\gamma \\ &= G_O(P)\Phi(t)+\sum_{t-t_d}^{t}\hat{G}(P,t-\gamma)\,\Delta\Phi(\gamma)\end{aligned} \tag{3}$$

여기서, t_d는 감쇠기간이다.

3. 연구내용

3.1 상시 수명 감시 시스템의 구성

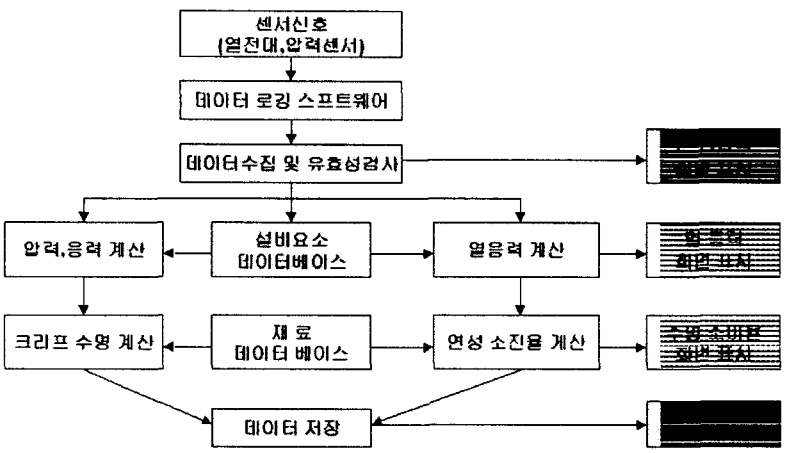

Fig.1 System flowchart for on-line life monitoring system

중화학 플랜트에서 개질로는 현재 가장 사고사례가 많이 보고되고 주요 관심대상이 되고 있는 설비이다. 개질로관의 주요 손상기구는 크리프와 응력이완에

의한 연성 소진이다. 크리프 손상에 주요한 영향을 미치는 요소는 주로 정상 상태에서 압력에 의해 발생되는 응력과 온도이며 작용시간에 따라서 크리프 손상이 누적되고, 기동·정지시에 관벽 두께방향의 온도구배가 발생하고 이 온도구배로 인해 열응력은 시간이 지남에 따라 이완되어 크리프 변형이 누적되고 연성이 소진되어 손상이 발생하는 원인으로 작용 한다. 또한 개질 반응은 튜브의 입구측 1/2부분에서 일어나며 이부분에서 흡열 반응은 현저해지고 따라서 내외면의 온도차에 의한 열응력이 튜브의 손상을 발생시키는 주원인으로 작용된다. 보고된 바에 의한면 이 열응력은 내압에 의한 응력의 약 10배정도로 알려져 있다.

본 상시감시 시스템은 중화학 플랜트의 개질로 반응관에 대한 적용을 목적으로 개발되었으며 기본 구조는 Fig.1과 같다. 소프트웨어에서는 센서측정치, 설비요소 데이터 베이스를 바탕으로 열응력계산, 손상평가, 데이터 처리·저장·출력의 기능을 수행하도록 개발되었다.

3.2 그린함수 계산

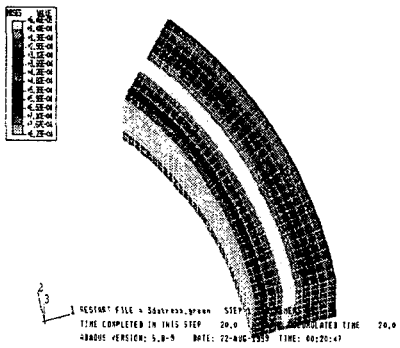

Fig. 2 The result of stress analysis

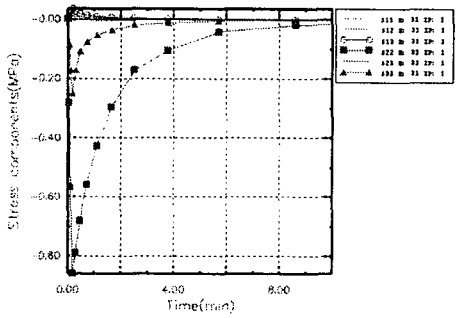

Fig.3 The stress green's function at the inner wall

응력그린함수는 열하중이 단위스텝온도(1℃)로 변화할 경우에 감시위치(응력계산지점)에서의 시간에 따른 응력반응상태를 나타낸다. 그린함수를 계산하기 위한 해석 소프트웨어는 ABAQUS 5.8을 사용하였다. Fig. 2는 관내부에 1℃의 단위온도를, 관외부에 0℃를 작용 시켰을 때 응력장 해석결과이고 Fig. 3은 위의 조건에서의 관내부에서의 6개의 응력성분의 그린함수이다.

개질로관의 경우 관외부의 열원과 내부의 흡열반응에 의한 응열원이 동시에 작용하므로 하나의 열원을 가지는 다수개의 단순 열하중 문제로 분리하여 각각의 열하중에 의한 열응력을 구한후 중첩하면 된다.

3.3 크리프 해석 알고리즘

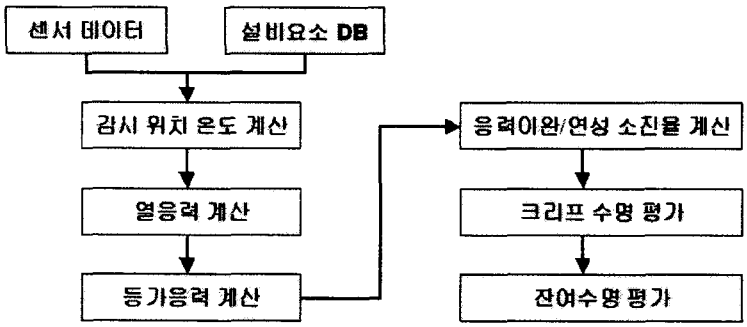

Fig. 4 Analysis flowchart for creep assessment procedure

수명감시 시스템에 적용된 수명평가 알고리즘은 Fig. 4와 같이 구성되었다. 관외표면의 온도 센서 데이터로부터 본 시스템에서 감시부위로 선정한 관내표면의 온도는 식(4)과 같이 유추할수 있다.

$$T_i = T_o - \triangle T_w \tag{4}$$

여기서, T_i는 관내벽의 온도, T_o는 관외벽의 온도, $\triangle T_w$는 관벽에 따른 온도차이이다.

$\triangle T_w$는 식(5)[2]와 같이 나타낼수 있다.

$$\triangle T_w = \frac{q_m t_a}{k_w}\left(\frac{D_o}{D_o - t_a}\right) \tag{5}$$

여기서, q_m은 관외벽의 최대 복사열유속, D_o는 관의 외경, t_a는 평균 관두께, k_w는 관의 열전도율 이다. 감시위치에서의 응력은 내압에 의한 응력과 열응력이다. 열응력은 유한요소해석에 의해 계산된 응력그린함수를 이용하여 구할수 있다.

수명평가에 적용하기 위해 식(6)과 같이 Von-Mises 등가응력을 사용하였다.

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

여기서, σ_{eq}는 Von-Mises 등가응력이다.

손상기구가 크리프-피로인 부재의 크리프 수명평가는 고온 응력조건에서의 크리프 변형에 의해 크리프연성이 소진(creep ductility exhaustion) 되는 개념을 적용하여 식(7)로 계산하였다.

$$D_c = \sum d_c = \sum \int_0^{t_h} \frac{\dot{\varepsilon}_c}{\varepsilon_f(\dot{\varepsilon}_c)} dt \tag{7}$$

여기서, $\dot{\varepsilon}_c$는 평균 크리프변형율속도, ε_f는 파단시 크리프 공칭변형율, t_h는 하중유지시간, d_c는 하중유지시간동안 크리프 손상, D_c는 총 크리프 손상 또는 크리프 수명소비율이다.

크리프 수명예측을 위해 식(8)[3]과 같이 MHP (Manson-Haferd Parameter)를 도입하였다.

$$P = \frac{\log t_R - \log t_a}{(T+273.15) - T_a} \tag{8}$$

여기서, P는 MHP, t_R은 크리프 파단 시간, T는 게이지 온도, t_a와 T_a는 재료상수이다.

MHP와 작용응력과의 관계는 식 (9)과 같다.

$$P = b_0 + b_1 \log S + b_2 (\log S)^2 \tag{9}$$

여기서, S는 응력이고 b_0, b_1 및 b_2는 NRIM data sheet[3]의 재료물성값이다.

크리프 파단수명소비율은 식(10)과 같이 life fraction[4]으로 계산하였다.

$$U = \sum_{r=1}^{k} \left[\frac{t}{t_f(\sigma^R_{ref}, T_{ref})} \right]_r \tag{10}$$

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

잔여수명은 식 (11)과 같이 구할수 있다.

$$\text{잔여수명} = \text{총이력시간} \times \left(\frac{1}{\text{총수명소비율}} - 1 \right) \tag{11}$$

3.5 소프트웨어의 구성

본 연구를 통해 개발중인 수명감시 소프트웨어는 Visual C++기반으로 작성되었으며 MS_ACCESS 데이터베이스를 사용하였다. 소프트웨어는 감시위치의 센서값과 재료 데이터베이스를 읽어들여서 수명 소비율을 계산한다음 잔여수명을 계

산, 저장하는 수명평가 해석모듈이 있는 server와 server에서 수행된 수명평가 결과와 운전정보를 사용자의 요구에 의해 제공하는 기능을 가진 client로 구성된다.

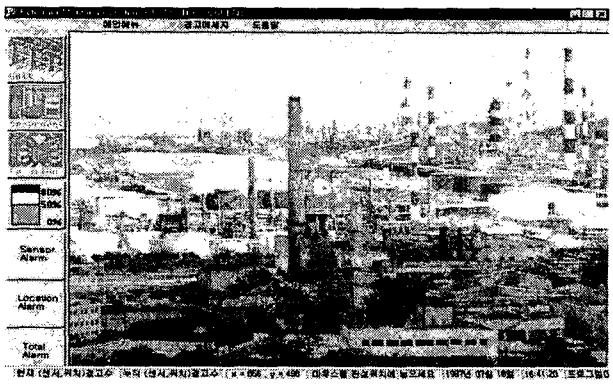

Fig. 5 Starting screen of on-line monitoring software

4. 결론

본 연구에서 개발중인 개질로 반응관에 대한 상시감시 시스템은 개질로관의 주 손상기구인 크리프에 의한 손상을 실시간으로 계산하고 파손 위험이 있는 부위가 있을 경우 사용자에게 이를 위험발생과 동시에 알려준다. 본 시스템을 사용함으로서 중화학 설비의 안전사고를 사전에 예방할 수 있고 보수 및 교환시기의 결정에 활용할수 있으므로 플랜트의 경제적인 운영과 생산성 증대가 가능할 것이다.

후기

본 연구는 KRISS의 "인위재해 방재기술 개발사업"중 "중화학플랜트 고온설비의 상시 안전수명 감시시스템 개발"과제의 연구결과 중 일부로서 관계자 여러분들께 감사드립니다.

참고문헌

(1) Boley, B. A., and Weiner, J. H., "Theory of Thermal Stresses", John Wiley & Sons, New York, New York.(1960)

(2) API-RP530 "Calculation of Heater Tube Thickness in Petroleum Refineries, 4th Ed" (1996)

(3) "NRIM Creep Data Sheet No.3B, "National Research Institute for Metals, Tokyo, Japan.

(4) "Assessment Procedure R5, Issue 2, Vol. 2, Vol. 3", Nuclear Electric Ltd, U.K.