

개질로 반응관의 상시수명 감시 소프트웨어 개발

김동영* · 윤필기* · 윤기봉**

*중앙대학교 대학원

**중앙대학교 기계공학부

Development of On-Line Life Monitoring Software 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

상시감시 기술은 대상 구조물의 운전 조건, 환경 및 위험성에 따라 다양하게 적용되는데 특히 고온 고압하에서 가동되는 중화학 설비의 평가는 일반적인 감시방법의 접근이 용이하지 않고 변수가 다양하기 때문에 구조물의 건전성 평가에 문제점으로 대두되고 있다. 현재 중화학 설비를 검사하는 방법으로는 음향방출법, 초음파법, 적외선 카메라법, 방사선 투과 시험법 등이 있으나 실제 현장에서는 단순한 육안 검사법, 온도 측정법 및 압력 측정법 등을 사용하고 있으며 정기적인 수리나 교환을 통하여 예방보전하고 있다. 기존의 예측방법은 검사를 위한 사용 정지 후 검사에 많은 시간과 경비를 소요하며 평가결과가 작업자의 주관적인 경험과 판단에 크게 좌우되므로 일관성을 유지하기 어렵고 신뢰성을 확보하기가 어렵다. 반면 가동 중 설비의 상시 감시 시스템은 저가이고 가동중 감시를 통한 설비의 생산성을 높이고 설비의 실제이력을 바탕으로 한 교체주기의 합리적인 예측을 가능하며 신뢰성을 높일수 있다. 특히 개질로(reformer)의 경우 사용환경이 가혹하고 사고의 위험이 높기 때문에 상시감시 시스템 기술이 절실히 요구되고 있다.

본 연구에서는 중화학 고온 설비인 개질로의 적용을 목적으로 센서데이터를 이용한 개질로 튜브 내벽의 온도계산 알고리즘의 수정 및 보완, 설비의 가동시 발생하는 열응력 계산 알고리즘 및 크리프-응력 이완 등에 의한 수명 소비율을 실시간으로 계산하는 알고리즘을 개발하였다. 또한 본 알고리즘을 토대로 설비 주요 요소의 누적 손상 및 잔여 수명을 평가하는 상시 수명 감시 소프트웨어를 개

발하였다.

2. 이론

개질로 튜브의 손상을 평가하기 위해서는 관심부위의 온도를 계산하는 과정이 반드시 선행되어야 하며 온도 계산을 위해 필요한 튜브 내부 반응유체의 열전달 계수식 및 온도 평가식⁽¹⁾은 다음과 같다.

2.1 대류 열전달 계수

최대 튜브 금속 온도를 계산하는데 필요한 값은 튜브 내벽의 유체의 열전달 계수이다. 식 (1)의 열전달 계수 관계식이 널리 사용되고 가열기 설계에 적용되고 있지만 복잡한 관계식을 간략화된 관계식으로 표현하기 때문에 약간의 부정확성을 가지고 있다. 단상 유체 유동(single phase fluids)에서 열전달 계수는 다음과 같이 계산되어진다.

기상 유동인 경우($Re \geq 15000$ ⁽²⁾) 열전달 계수식은 식(1)과 같다.

$$h_v = 0.021 \left(\frac{k}{D_i} \right) Re^{0.8} Pr^{0.4} \left(\frac{T_b}{T_w} \right)^{0.5} \quad (1)$$

여기서, h_v 는 기상 유동인 경우의 열전달계수, T_b 는 혼합유체 평균온도, T_w 는 튜브 내표면 온도이다.

2.2 최대튜브 금속온도 평가

튜브 내부에서의 혼합 유체 평균 온도가 알려지면 최대 튜브 금속온도는 식 (2)-(5)⁽¹⁾와 같이 계산될 수 있다.

$$T_m = T_b + \Delta T_f + \Delta T_c + \Delta T_w \quad (2)$$

$$\Delta T_f = \frac{q_m}{h} \left(\frac{D_o}{D_i - 2t_c} \right) \quad (3)$$

$$\Delta T_c = \frac{q_m t_c}{k_c} \left(\frac{D_o}{D_i - t_c} \right) \quad (4)$$

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

여기서, T_m 는 최대 튜브 금속 온도, T_b 는 혼합 유체 평균 온도, ΔT_f 는 유체 필름에 따른 온도 차이, ΔT_c 는 코크나 스케일에 따른 온도 차이, ΔT_w 는 튜브 벽에 따른 온도 차이, q_m 는 외표면에서의 최대 복사 열유속, h 는 유체 필름 열전달 계수, D_o 는 튜브의 외경, D_i 는 튜브의 내경, t_c 는 코크나 스케일의 두께, k_c 는 코크나 스케일의 열전도도, t_a 는 평균 튜브 두께, k_w 는 튜브 금속의 열전도도이다.

3. 연구내용

3.1 상시 수명 감시 시스템의 구성

개질로관의 주요 손상기구는 크리프와 응력이완에 의한 연성 소진이다. 크리프

손상에 주요한 영향을 미치는 요소는 주로 정상 상태에서 압력에 의해 발생하는 응력과 운전 및 기동·정지시에 발생하는 관벽 두께방향의 온도구배로 인한 열응력이다. 개질 반응은 튜브의 입구측 1/2부분에서 일어나며 이 부분에서 흡열 반응은 현저해지고 따라서 내외면의 온도차에 의한 열응력이 튜브의 손상을 발생시키는 주원인으로 작용된다. 보고된 바에 의한면 이 열응력은 내압에 의한 응력의 약 10배 정도로 알려져 있다. 이러한 요인으로 인해 시간이 지남에 따라 크리프 변형이 누적되고 연성이 소진되어 손상이 발생하는 원인으로 작용 한다.

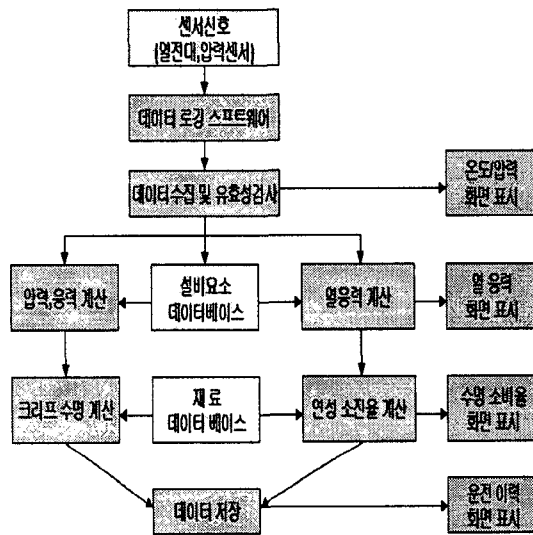


Fig.1 System flowchart for reformer on-line life monitoring system

본 상시감시 시스템은 중화학 플랜트의 개질로 반응관에 대한 적용을 목적으로 개발되었으며 기본 구조는 Fig. 1과 같이 온도, 압력 센서 데이터를 수집하여 유효성 검사를 실시한 후에 감시 부위의 온도, 압력을 계산하고 크리프 및 연성소진율을 구하여 최종적으로 수명 소비율을 계산하는 구조를 가지고 있다.

3.2 개질로 내부 온도 계산 알고리즘

개질로 튜브에 대한 수명을 평가하기 위해서는 개질로 튜브내벽의 온도를 측정하는 것이 중요하다. 튜브 상단의 내부 유체 온도(T_p) 및 튜브 하부 외표면의 열전대 온도(T_{so})를 이용하여 튜브 상단의 내표면 온도(T_{ti}), 외표면 온도(T_{to}), 튜브 하단 외표면 온도(T_{bo}) 및 감시 부위의 외표면 온도(T_o)를 구한다음 최종적으로 감시부위의 내표면 온도(T_i)를 계산할 수 있다. 온도를 계산하는 위치는 Fig. 2에서 보는 바와 같다.

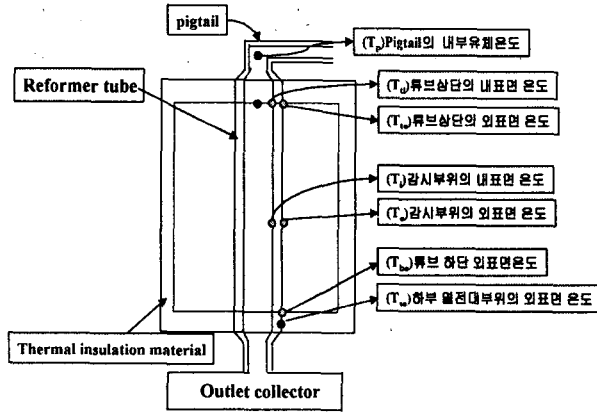


Fig. 2 Schematic diagram of location for temperature calculation

열전대로부터 측정된 T_p 로부터 T_{ii} 는 식(6)을 이용하여 계산하였다.

$$T_{ii} = T_p + \frac{q \left(\frac{D_o}{D_i} \right)}{h} \quad (6)$$

$$q = q' \times \frac{\text{대상 가열기의 평균열유속}}{\text{설계 평균열유속}} \quad (7)$$

$$h = 0.021 \left(\frac{k_p}{D_i} \right) Re^{0.8} Pr^{0.4} \left(\frac{T_p}{T_{ii}} \right)^{0.5} \quad (8)$$

여기서, T_{ii} 는 튜브상단 내표면 온도, T_p 는 튜브상단 내부유체온도, D_o 는 외경, D_i 는 내경, q 는 복사열유속, q' 는 설계 열유속 profile로 구한 감시위치에서의 열유속, h 는 대류 열전달계수, k_p 는 유체의 열전도도, Re 는 Reynold Number, Pr 는 Prantle Number이다.

T_{io} 는 식 (9)을 이용하여 계산하였다.

$$T_{io} = T_{ii} + \frac{q t_a}{k_w} \left(\frac{D_o}{D_o - t_a} \right) \quad (9)$$

여기서, T_{io} 는 튜브상단 외표면 온도, T_{ii} 는 튜브상단 내표면 온도, q 는 복사열유속, t_a 는 튜브 평균두께, D_o 는 외경, k_w 는 튜브 금속의 열전도도이다.

T_{bo} 는 가열기벽이 단열 조건임을 이용하여 T_{so} 에 과거이력을 바탕으로 한 온도차의 평균값을 산술적으로 더한다.

T_o 는 T_{io} 와 T_{bo} 를 기준으로 외표면 온도 profile을 이용하여 구할 수 있다. 본 연구에서의 외표면 온도 profile은 튜브 상단온도를 기준으로 615°C~645°C의 6개 대역, 튜브 하단온도를 기준으로 940°C~985°C의 9개 대역으로 분할함으로써 총 54개의 profile을 작성하였다. 또한 이 profile은 과거 운전 이력의 데이터를 바탕

으로 T_{bo} 및 T_{to} 를 기준으로 데이터를 정리한 결과 온도 대역별로 profile의 일정한 패턴을 확인하였고 데이터의 편차가 약 $5^{\circ}\text{C} \sim 8^{\circ}\text{C}$ 이므로 적용 가능하다. 따라서 T_o 는 외표면 온도 profile과 온도 보정상수 β 를 이용하여 식 (10)으로 계산하였다.

$$T_o = T_{to} + \beta(T_{bo} - T_{to}) \quad (10)$$

$$\beta = \frac{T_o' - T_{to}'}{T_{bo}' - T_{to}'} \quad (11)$$

여기서, T_o 는 튜브 감시위치에서의 외표면 온도, T_{to} 는 튜브 상단의 외표면온도, T_{bo} 는 튜브 하단의 외표면 온도, β 는 온도 보정상수, T_o' 는 해당 온도 profile을 사용하여 계산된 외표면온도, T_{to}' 는 해당 온도 profile의 튜브상단 온도대역, T_{bo}' 는 해당 온도 profile의 튜브하단 온도대역이다.

T_i 는 식 (9)을 이용하여 같은 방법으로 구할 수 있다.

3.3 크리프 수명평가 알고리즘

튜브의 내압에 의한 응력을 평가하기 위해서는 박육튜브 기준인 두께와 외경의 비가 $0.15^{(1)}$ 가 초과될시 다음의 식 (12)을 사용하여 계산하였다.

$$\sigma_{\theta} = \frac{P_i[(r_o/r)^2 + 1]}{(r_o/r)^2 - 1} \quad (12)$$

여기서, σ_{θ} 는 hoop stress, P_i 는 내압, r_o 는 외반경, r_i 는 내반경이다.

튜브의 열응력은 감시위치의 개질로관 내외벽의 온도로서 유한요소해석으로 구한 응력상관함수를 이용하여 구할 수 있으며 또한 다음의 식 (13)⁽³⁾을 사용하여 평가할 수도 있다.

$$S_{th} = X \left[\frac{2Y^2}{Y^2 - 1} \ln Y - 1 \right] \quad (13)$$

$$X = \left[\frac{aE}{2(1-\nu)} \right] \left[\frac{\Delta T}{\ln Y} \right] \times \left[\frac{aE}{4(1-\nu)} \right] \left[\frac{q_o D_o}{k} \right] \quad (14)$$

여기서, S_{th} 는 열응력, a 는 열팽창 계수, E 는 탄성 계수, ν 는 프와송 비, ΔT 는 튜브 내표면과 외표면의 온도차, Y 는 D_o/D_i , q_o 는 튜브 외표면에서의 열유속, k 는 금속의 열전도율이다.

응력상관함수를 이용하여 구한 열응력의 경우는 6개성분의 응력을 수명평가식에 적용하기 위해 식(15)과 같이 Von-Mises 등가응력으로 변환시켜 사용한다.

$$\sigma_{eq} = \frac{1}{\sqrt{2}} \{ (\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + 6(\sigma_{12}^2 + \sigma_{23}^2 + \sigma_{31}^2) \}^{\frac{1}{2}} \quad (15)$$

여기서, σ_{eq} 는 Von-Mises 등가응력이다.

크리프 수명예측을 위해 식(16)과 같이 LMP⁽⁴⁾ (Larson-Miller Parameter)를 도입하였다.

$$P = (T + 273.15)(C + \log t_R) \quad (16)$$

여기서, P 는 LMP, t_R 은 크리프 파단 시간, T 는 게이지 온도, C 는 재료상수이다. LMP와 작용 응력과의 관계는 식 (17)과 같다.

$$P = b_0 + b_1 \log S + b_2 (\log S)^2 \quad (17)$$

여기서, S 는 응력이고 b_0 , b_1 및 b_2 는 NRIM data sheet⁽⁴⁾의 재료물성값이다. 크리프 파단 수명소비율은 식(18)과 같이 life fraction⁽⁵⁾으로 계산하였다.

$$U = \sum_{r=1}^k \left[\frac{t}{t_f \left(\frac{\sigma_r}{\sigma_{ref}}, \frac{T}{T_{ref}} \right)} \right]_r \quad (18)$$

여기서, U 는 크리프 파단 수명소비율, t 는 시간, t_f 는 기준 온도·응력상태에서 재료의 크리프 파단시간이며 r 은 하중유지기간의 횟수를 나타낸다.

또한 손상기구가 크리프-피로인 부재의 크리프 수명평가는 고온 응력조건에서의 크리프 변형에 의해 크리프 연성이 소진(creep ductility exhaustion) 되는 개념을 적용하여 식 (19)로 계산하였다.

$$D_c = \sum d_c = \sum \int_0^{t_h} \frac{\dot{\epsilon}_c}{\epsilon_f(\dot{\epsilon}_c)} dt \quad (19)$$

여기서, $\dot{\epsilon}_c$ 는 평균 크리프 변형율속도, ϵ_f 는 파단시 크리프 공칭 변형율, t_h 는 하중 유지시간, d_c 는 하중 유지 시간동안 크리프 손상, D_c 는 총 크리프 손상 또는 크리프 수명 소비율이다.

잔여수명은 식 (20)과 같이 계산한다.

$$T_{life} = T_{his} \times \left(\frac{1}{T_{con}} - 1 \right) \quad (20)$$

여기서, T_{life} 는 잔여수명, T_{his} 는 총 이력시간, T_{con} 는 총 수명소비율이다.

3.4 소프트웨어 구성

본 연구를 통해 개발된 수명감시 소프트웨어의 구조는 Fig. 3과 같으며 Visual Basic기반으로 작성되었으며 MS_Access를 사용하였다. 소프트웨어는 감시위치의

센서값과 재료 데이터베이스를 읽어들여서 수명 소비율을 계산한 다음 잔여수명을 계산, 저장하는 on-line 수명평가 해석모듈과 기존의 플랜트 이력 또는 임의의 이력을 입력 값으로 하여 수명을 계산하는 off-line 수명평가 해석모듈을 포함하는 server와 server에서 수행된 수명평가 결과와 운전정보를 사용자의 요구에 맞게 제공하는 기능을 가진 client로 구성된다. Fig. 4는 Location 출력화면이다. 현재 선택된 정보(온도)를 감시위치별로 간략한 정보를 보여주며 좌측의 그래프로 이력의 추이를 보여준다. Fig. 5는 Location의 상세 정보화면이다. 해당 Location의 모든 정보를 총괄적으로 보여주며 상위 단계의 정보를 동시에 보여줌으로서 사용자의 편의를 도모한다. Fig. 6은 실시간 정보의 그래프 출력화면이다. 감시위치의 정보종류 및 출력기간을 조정할 수 있도록 구성하였다.

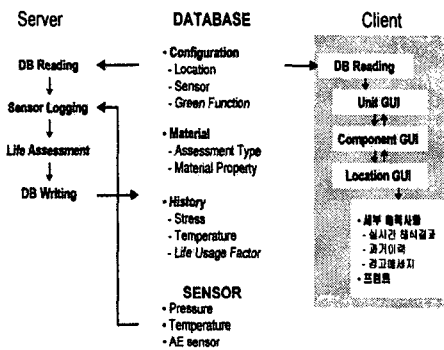


Fig. 3 System flowchart for reformer on-line life monitoring software

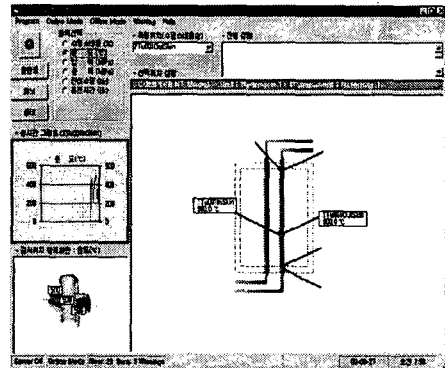


Fig. 4 Screen for location in reformer tube

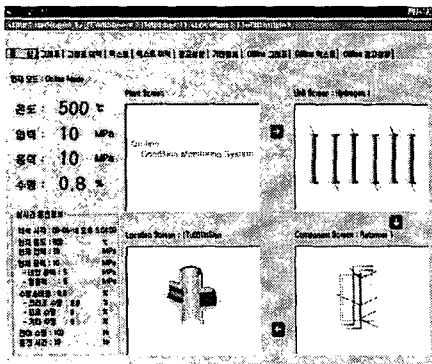


Fig. 5 Screen for location in reformer tube(detail-mode)

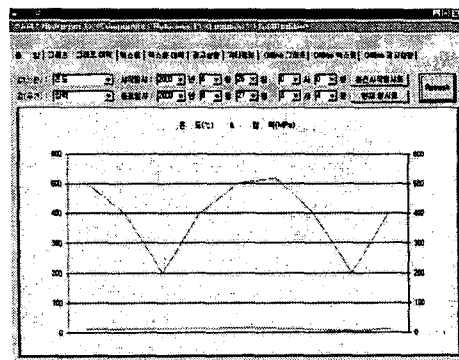


Fig. 6 Real-time operating history screen for location

4. 결론

본 연구에서 개발된 개질로 반응관에 대한 상시감시 소프트웨어는 센서 데이터를 이용하여 개질로 튜브 내표면의 온도를 실시간으로 계산하고 이에 따른 내압에 의한 기계적 응력과 온도구배에 의한 열응력을 평가함으로써 크리프 손상 및 연성소진에 의한 손상을 구하도록 하였다. 이 손상 누적분을 실시간으로 모니터링함으로써 파손 위험이 있는 부위가 있을 경우 사용자에게 이를 위험발생과 동시에 알려준다. 또한 본 시스템의 off-line 모듈을 이용한다면 기존의 이력데이터로서 대상 플랜트의 잔여수명 및 위치별 손상정도를 파악하는데 많은 도움을 줄 수 있을 것이다. 결과적으로 대상 플랜트의 향후 운전계획, 보수주기 및 교체시기를 결정하는 지침으로 활용이 가능할 것이다.

5. 후기

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

6. 참고문헌

- (1) API-RP530 “Calculation of Heater Tube Thickness in Petroleum Refineries”, 4th Ed, 1996
- (2) McEligot, D. M., Magee, P. M., and Leppart, G., “Effect of Large Temperature Gradients on Convective Heat Transfer: The Downstream Region,” Transactions of the American Society of Mechanical Engineers, Series C: Journal of Heat Transfer, Vol. 87, pp. 67-76, February 1965
- (3) ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section VIII, “Rules for Construction of Pressure Vessels,” Division 2, “Alternative Rules,” American Society of Mechanical Engineers, New York.
- (4) “NRIM Creep Data Sheet No.3B,” National Research Institute for Metals, Tokyo, Japan. 1989
- (5) “Assessment Procedure R5, Issue 2, Vol. 2, Vol. 3”, Nuclear Electric Ltd, U.K. 1996