

# 고온배관 T-부의 응력해석 및 잔여수명평가

권양미 · 마영화 · 조성욱\* · 윤기봉\*\*

중앙대학교 기계공학부 대학원 · \*중앙대학교 기계공학부  
(2005. 7. 26. 접수 / 2005. 9. 14. 채택)

## Stress Analysis and Residual Life Assessment of T-piece of High Temperature Pipe

Yang Mi Kwon · Young Wha Ma · Seong Wook Cho\* · Kee Bong Yoon\*\*

Graduate School, Department of Mechanical Engineering, Chung Ang University

\*Department of Mechanical Engineering, Chung Ang University

(Received July 26, 2005 / Accepted September 14, 2005)

**Abstract** : For assessing residual life of the steam pipe in fossil power plants, inspections and analysis are usually focused on the critical locations such as butt welds, elbows, Y-piece and T-piece of the steam pipes. In predicting the residual life of T-piece, determination of local stress near welds considering system load as well as internal pressure is not a simple problem.

In this study, stress analysis of a T-piece pipe was conducted using a three-dimensional model which represents the T-piece of a domestic fossil power station. Elastic and elastic-creep analysis showed the maximum stress level and its location. Residual creep rupture life was also calculated using the stress analysis results. It was argued that the calculated life is reasonably same as the measured one. The stress analysis results also support life prediction methodology based on in-field replication technique.

**Key Words** : finite element analysis(FEA), steam pipe t-piece, creep, residual life assessment, replication, manson-harford parameter(MHP)

### 1. 서 론

국내 화력발전설비중 1960년대 후반부터 건설된 초기의 발전플랜트들의 사용수명 평가 및 수명 연장을 위해 1993년부터 노후 화력발전설비의 잔여수명 평가 사업이 수행되었으며<sup>1)</sup>, 이후 현재까지 국내 화력설비의 정밀진단을 수행하고 있다<sup>2)</sup>. 이때 수명진단에 사용되는 기법은 국책연구<sup>3)</sup> 및 산·학·연 공동연구<sup>4)</sup>에 의해 사전에 개발되었으며, 개발된 표면복제법, 경도법, 입계부식법 등을 적용하여 터빈요소, 보일러 요소 및 증기관 요소에 대해 각각 수평평가를 수행하였다. 이중 증기관의 수명평가를 위해서는 주증기관 및 재열증기관의 요소를 분리해 평가하며 직관, 엘보우, T-부 및 Y-부의 용접부가 주요

수명평가 대상이 된다.

특히 고온·고압 하에서 사용되고 있는 증기관 용접부 요소에 대해서 정확한 수명예측을 해야만 한다. 이를 위해서는 용접부의 국부적인 응력해석을 수행해야 한다. 이는 응력해석 결과로부터 크리프 손상이 먼저 발생할 부위를 미리 예측함과 동시에 보다 정확한 수명예측과 보수시기를 결정할 수 있기 때문이다<sup>5)</sup>. 증기배관설비에 사용되고 있는 요소 중 T-부에 대한 수명예측 연구를 살펴보면, Patel은 1/2CrMoV 강으로 된 배관 T-부와 T-형 압력 용기에 대하여 크리프 수명평가 시험을 수행하였으며, R5에서 제시된 간략응력해석 기법을 이용하여 시험 결과와 비교 및 평가하였다<sup>6)</sup>. 이형일 등은 쉘 모델을 이용하여 반타원 표면균열이 존재하는 배관 T-부에 대하여 J-값을 구하였으며, 잔여 수명을 예측하였다<sup>7)</sup>. Wang 등은 T-형, K-형 그리고 KK-형 배관에 대하여 균열 진전

\* To whom correspondence should be addressed.  
kbyoon@cau.ac.kr

력, J값 그리고 소성불안정 하중 등에 대하여 연구하였다<sup>8)</sup>. Miroshnik 등은 주배관 계통에서의 하중과 모멘트의 영향을 살펴보고, 이로부터 배관 T-부에서의 열응력, 압력 등을 고려하여 크리프 및 피로 수명평가를 수행하였다<sup>9)</sup>.

본 연구에서는 해석적 크리프 수명평가 기법을 이용해서 국내 노후 발전소 실기의 증기배관 T-부를<sup>10)</sup> 대상으로 잔여수명평가를 수행하였다. 또한 내압과 시스템 하중을 고려한 용접부의 국부 응력 수준을 평가할 수 있는 응력 데이터베이스의 구축을 위한 해석절차를 보여주었다. 즉, 주증기관의 배관 T-부를 대상으로 3차원 유한요소해석을 수행하였으며, 하중 조건은 배관 내부에 내압만 작용하는 경우와 내압과 일반적인 크기의 시스템 하중이 동시에 작용하는 경우에 대해 선형탄성해석을 수행하였다. 또한 응력집중이 발생하는 용접부를 고려하여 탄성-2차 크리프 해석을 수행하여 정상 상태의 응력수준을 계산하고 이로부터 크리프 파단수명을 NIMS (NRIM) 데이터를 기준으로 하여 크리프 잔여수명평가를 수행하였다.

## 2. 고온배관 T-부의 파손기구

본 논문의 연구 대상은 화력발전설비의 주증기관 중에 보일러를 지나 터빈을 연결하는 배관 T-부이다. 국내 P발전소 배관 T-부의 사진을 Fig. 1에 나타냈다. T-부의 일반적인 파손기구는 용접열영향부에서의 크리프 변형에 의해 Type IV 결함<sup>11)</sup>이 발생되어 요소의 수명이 소진되며, 크리프 변형을 유발하는 응력은 내압 외에도 시스템 하중에 의해 주로 나타난다고 보고되었다<sup>12)</sup>. 따라서 본 논문에서는 국내 P발전소의 배관 T-부를 연구대상으로 하여 응력해석을 수행하였다. 검사 당시 P발전소의 실제 사용이력은 12~14년이며 배관 T-부의 사용온도 및 재질은 538°C, 14MoV63 (0.5Cr-0.5Mo-0.25V)이다.

수명을 결정하는 주요 손상은 용접부에서 나타나며 용접부 수명이 모재의 수명보다 짧은 경우가 많다. 이는 용접재와 모재의 성질이 서로 다르므로 변형에 따른 응력집중이 발생하며, 조직학적으로도 용접열영향부가 모재에 비해 취약하기 때문이다. 용접부의 원주방향 크리프 손상은 주로 열영향부의 ICZ (Intercritical Zone)에서 크리프 기공 또는 크리프 기공연결에 의한 미소 균열 형태의 손상인 Type IV 균열로서 나타나며 이는 증기관의 지지가 적절하지

못해서 굽힘 하중 등의 시스템 응력이 부가되기 때문에 발생하게 된다. 길이 방향 크리프 손상은 내압에 의한 원주방향 응력이 원인이며, 크리프 손상은 종종 인성이 낮은 용접재의 용접 응력 제거시에 발생하기도 한다. Fig. 2는 배관 T-부의 용접부에서 검출된 크리프 손상의 검출 사례를 보여주고 있다.

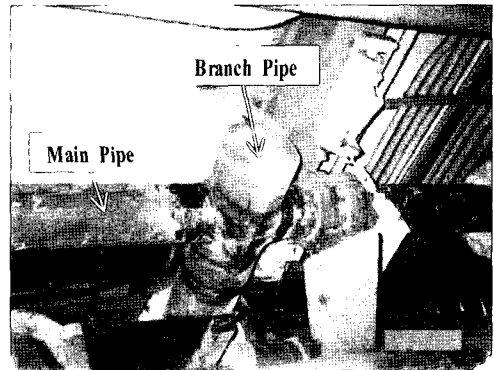
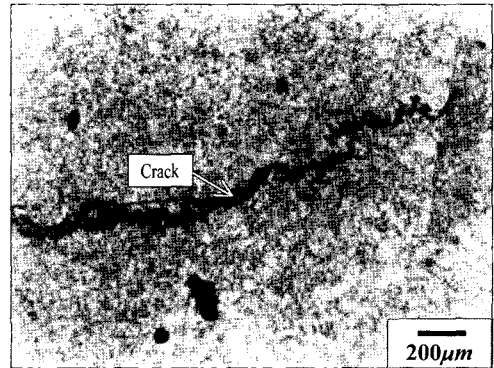
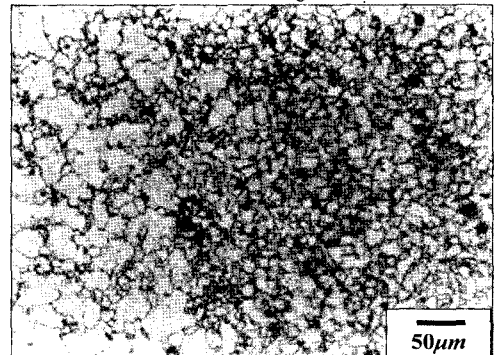


Fig. 1. A photograph of the T-piece pipe of the main steam pipework in a retired domestic power station.



(a) One hundred magnifications



(b) Four hundred magnifications

Fig. 2. Creep damage detected at the T-piece of steam pipes<sup>10)</sup>.

### 3. 유한요소해석 및 결과

#### 3.1. 유한요소해석 모델

본 연구에 사용된 상용 유한요소해석 코드는 ANSYS 9.0이다. 해석 대상 모델은 국내 P발전소 증기관의 실기 배관 T-부로서 배관 소재의 일반적인 기계적 물성을 Table 1에 정리하였다. 유한요소해석 모델의 형상 및 치수는 Fig. 3에 나타내었다. 실제 해석에 사용된 모델은 1/2 모델로서 대칭조건을 고려하여 브랜치 배관의 중심축을 대칭축으로 하여 Fig. 3에서 나타낸 배관 T-부의 우측부 반만 모델링하였다. 주 배관과 브랜치 배관 사이의 용접부는 펠렛 형상으로 모델링 하였다<sup>13)</sup>. 해석에 사용된 모델을 Fig. 4에 나타내었으며, 경계조건 및 부가된 시스템 하중조건을 Fig. 5에 나타냈다. 주 배관은 의

Table 1 Mechanical properties of 0.5Cr-0.5Mo-0.25V

E (GPa)	$\nu$	Creep Constants (538°C)	
		A(MPa <sup>-n</sup> · hr <sup>-1</sup> )	n
170	0.3	8.495 x 10 <sup>-37</sup>	14.45

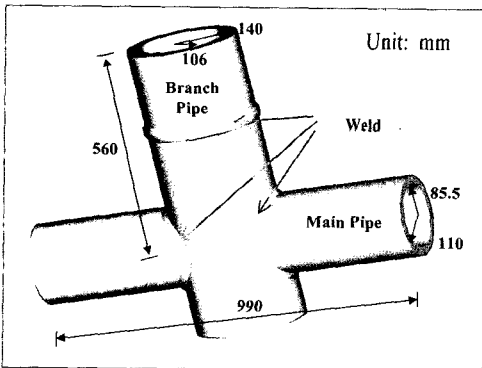


Fig. 3. Finite element model and dimension of the T-piece pipe.

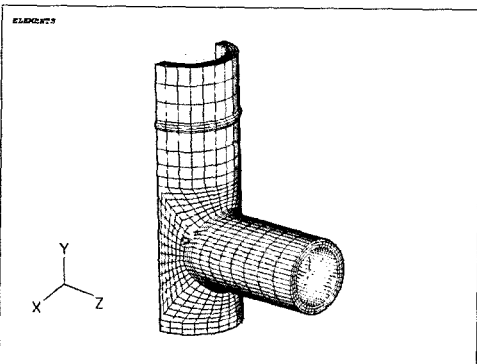


Fig. 4. Finite element analysis model of the T-piece pipe.

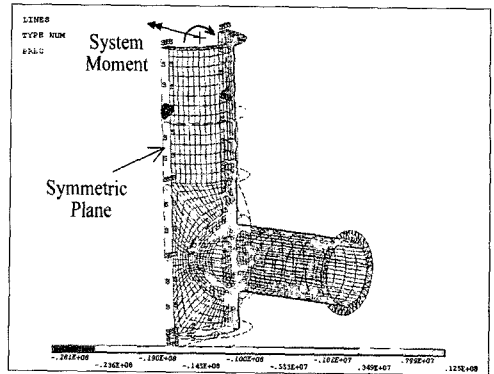


Fig. 5. Boundary conditions for the finite element analysis of the T-piece pipe.

경 220mm, 두께 24.5mm이고, 브랜치 배관은 외경 280mm, 두께 24mm이다. 해석 모델에 사용된 요소는 3차원 20절점 요소인 Solid 186이고, 시스템 하중이 가해지는 부위에는 3차원 빔 요소인 Beam 4를 단면중심과 배관요소 사이에 연결되도록 배열하였다. 빔 요소의 속성은 굽힘과 전단에 대해 높은 강성을 갖게 하였고, 축방향에 대해서는 낮은 강성을 갖도록 하여 원주방향의 팽창을 자유롭게 하면서 배관단면이 평면을 유지하도록 하였다<sup>14)</sup>.

해석은 내압만 작용하는 경우와 내압과 시스템 하중이 동시에 작용하는 2가지 경우에 대하여 탄성 및 탄성-2차 크리프 해석을 수행하였다. 내압은 12.5 MPa이고, 브랜치 배관에 작용하는 시스템 하중은 150 kN · m이다.

#### 3.2. 유한요소해석 결과

##### 3.2.1. 탄성해석

배관 T-부의 탄성 응력해석 결과를 Fig. 6~7에 나타내었다. Fig. 6은 내압만 작용하는 경우이고, Fig. 7은 내압과 시스템 하중이 동시에 작용하는 경우이다. 응력해석 결과 두 경우 모두 주 배관과 브랜치 배관이 연결된 용접부 주위에서 국부적으로 최대응력이 발생하였다. 따라서 응력해석 결과의 주요검토 대상을 용접부위의 내외부 및 경계부로 한정하였다. Fig. 6~7의 탄성 응력해석 결과 나타난 용접부위의 국부 응력을 정량적으로 나타내기 위하여 주 배관 쪽으로 용접부가 접하는 경계 부분, 브랜치 배관 쪽으로 용접부가 접하는 경계 부분으로 구분하여 각각에 대해 MW, BW로 표기하였다. 또한 용접부의 바깥쪽 표면 부위와 안쪽 표면 부위로 다시 구분하여 검토 대상을 MW-IN, MW-OUT, BW-IN, BW-OUT으로 구분하여 표기하였다.

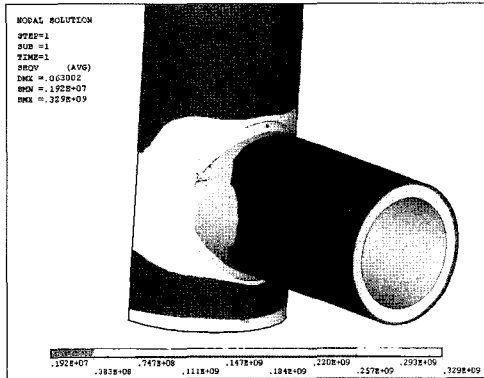


Fig. 6. Stress distribution for internal pressure loading.

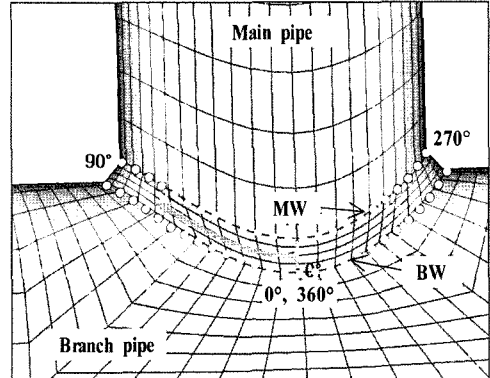


Fig. 8. The path of the sampling stresses.

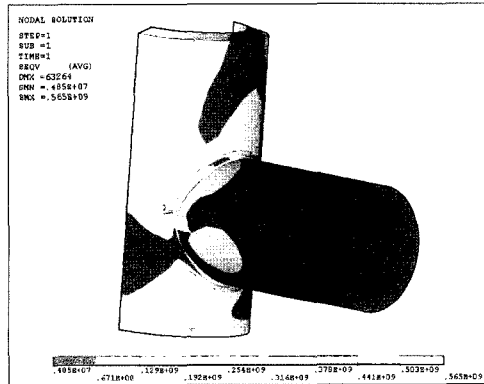


Fig. 7. Stress distribution for internal pressure and system loading.

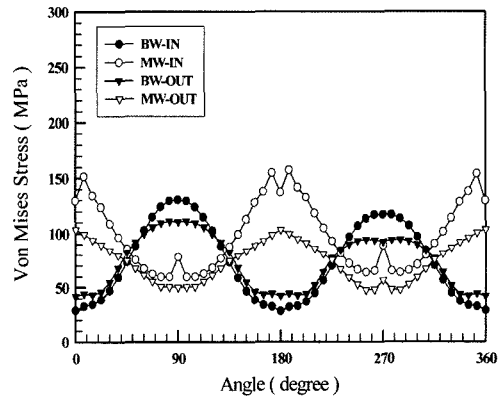


Fig. 9. Stress distribution for internal pressure loading.

네 부분으로 구분된 부위에서의 응력을 나타내기 위해 Fig. 8에 보인 바와 같은 경로를 따라 원점 및 시계 방향으로 360° 위치를 정의하고 각각의 위치에서 Von Mises 등가응력 값을 측정하였다. 결과를 Fig. 9~10에 나타내었다. Fig. 9는 내압 12.5MPa만 부가하였을 때의 응력을 나타내는 경우로서 MW-IN 부위의 0° (또는 360°)와 180°지점에서 가장 높은 153MPa의 최대응력이 발생하였다. MW-OUT 경계 부위에서의 최대응력은 MW-IN 경계에서 발생한 최대응력의 67% 정도의 수준을 보였으며, 최대응력이 발생한 위치는 MW-IN과 동일하였다. BW-IN 경계에서의 최대응력은 90°와 270°지점에서 발생하였으며, 최대 응력값은 135MPa 정도였다. BW-OUT 경계에서는 이 보다 낮은 100MPa 정도의 최대응력이 발생하였다. 따라서 배관 T-부에 내압만 작용하는 경우 최대응력은 주 배관의 모재부와 용접부의 경계에서 발생하며, 특히 배관의 안쪽면 경계의 0°(360°)와 180° 지점에서 발생함을 알 수 있다. 즉, 내압만 작

용하는 경우 고온배관의 크리프 손상은 배관 용접부 내부에서 우선 누적되는 것으로 예측할 수 있다.

Fig. 10은 배관에 12.5MPa의 내압과 브랜치 배관에 시스템 모멘트 150KN·m가 동시에 작용하는 경우의 해석 결과이다. 해석 결과는 Fig. 9의 결과와 다른 양상을 보였으며, 최대응력이 발생하는 경계부위 위치도 다름을 확인할 수 있다. 이때 가장 높은 최대응력은 Fig. 10에 보인 바와 같이 주 배관의 모재부와 용접부의 안쪽 경계인 MW-IN에서 발생하였다. 최대응력 발생 위치는 10° 지점이었고 응력값은 275MPa이었다. 응력의 변화 양상은 약 10° 지점에서 응력이 가장 크게 나타난 후 70° 지점까지 감소하였다가 다시 증가하여 90° 지점에서 또 다시 감소하는 등 복잡한 응력분포를 보였다. 이는 내압과 시스템 하중이 동시에 작용하여 각 하중에 의해 발생하는 응력의 중첩으로 인한 결과로 볼 수 있다. 브랜치 배관의 모재부와 만나는 용접부에서는 반대의 응력변화 양상이 나타났다.

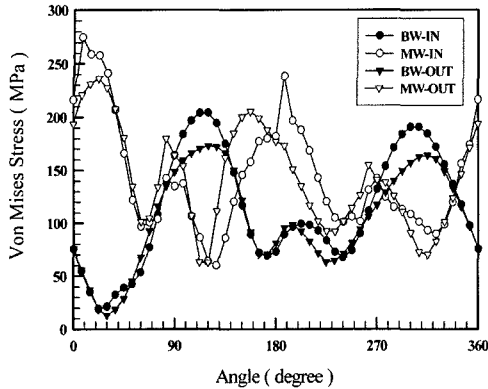


Fig. 10. Stress distribution for internal pressure and system loading.

배관 T-부의 탄성 응력해석 결과 최대응력은 용접부와 주 배관의 경계인 MW에서 발생하였으며, 특히 가장 높은 최대응력은 안쪽 면인 MW-IN에서 발생하였다. 최대 응력 발생 위치는 내압만 작용하는 경우와 내압과 시스템 하중이 동시에 작용하는 경우가 약간 차이가 있으나 0°~10° 지점에서 발생하였다. 이는 Fig. 5에 보인 시스템 굽힘 하중의 방향을 고려해볼 때, 브랜치 배관의 굽힘에 의한 인장 응력이 발생하는 부위에 용접된 주 배관과의 용접 경계에서 최대응력이 발생한 것이므로, 굽힘 응력이 높은 부위의 불연속부임을 고려해보면 타당성 있는 결과로 볼 수 있다.

### 3.2.2. 탄성-2차 크리프 해석

2절에 설명한 바와 같이 배관 T-부와 같은 구조물이 고온 환경에서 장기간 노출되어 사용되면 응력이 높은 부위에서는 크리프 손상이 누적되어 설비 요소의 수명이 단축되게 된다. 고온수명은 탄성응력이 고온 크리프 변형에 의해 완화되어 정상상태에 가까운 응력분포가 되었을 때의 응력수준에 의해 결정되므로 완화된 응력수준 값을 결정하여야 한다. 이에 본 연구에서는 배관 T-부의 탄성-2차 크리프 해석을 수행하여 응력의 완화 현상을 살펴보았다. 하중 경계조건은 탄성해석과 동일하게 내압만 작용하는 경우와 내압과 시스템 하중이 동시에 작용하는 경우에 대해 해석을 수행하였다. 이 해석에 사용된 크리프 물성은 0.5Cr-0.5Mo-0.25V강에 대해 538°C에서의 2차 크리프 변형률 속도와 응력과의 관계가 식 (1)의 노턴 멱급수 법칙(Norton's power law)을 따른다고 가정하였으며, Table 1에 보인 재료물성 값을 사용하였다.

$$\dot{\epsilon}_{cr} = A\sigma^n \quad (1)$$

이 식에서  $\dot{\epsilon}_{cr}$ 은 정상상태의 크리프 변형률 속도,  $A$ 와  $n$ 은 크리프 계수와 크리프 지수,  $\sigma$ 는 등가응력이다. 크리프 해석시 용접부의 모델링 형상이 복잡하고 비선형이므로 수렴성을 개선하기 위해 비선형 해석 기법인 선탐색 기법을 사용하였고, 대변형 이론을 적용하였다. 크리프 해석 시간은 100,000 시간까지로 하여 비교적 충분히 정상상태에 도달하도록 하였으며, 3.2.1절의 탄성해석 결과 얻은 가장 높은 최대응력이 발생한 용접부의 주 배관쪽 경계부에서 내압만 작용하는 경우는 0° 지점, 내압과 시스템 하중이 동시에 작용하는 경우는 10° 지점의 절점(node)에서 시간에 따른 Von Mises 등가응력을 추출하였다. 해석 결과 얻은 Von Mises 등가응력 변화를 Fig. 11~12에 도시하였다. Fig. 11은 내압만 작용하는 경우의 탄성-2차 크리프 해석 결과로서 초기 응력 158

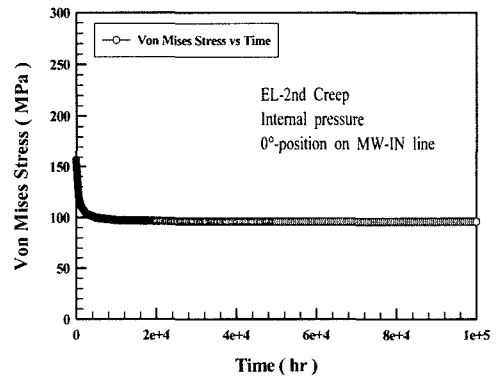


Fig. 11. Result of the elastic-secondary creep analysis according to the flow of time.

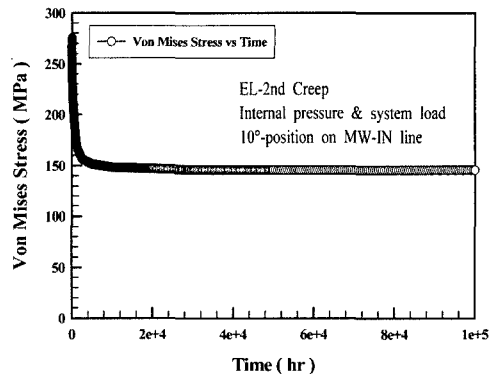


Fig. 12. Result of the elastic-secondary creep analysis according to the flow of time.

MPa의 높은 응력이 20,000시간 이후 비교적 일정한 값의 응력인 96MPa에 도달하였다. Fig. 12는 내압과 시스템 하중이 동시에 작용하는 경우로서 Fig. 11과 마찬가지로 초기의 높은 탄성응력이 시간이 흐름에 따라 점차 완화되는 경향을 보였다. 최대응력은 275MPa이고, 정상상태 응력은 146MPa이었다. 크리프 해석 결과 얻은 정상상태 응력을 3.3절의 고온 크리프 수명평가에 사용하였다.

### 3.3. 고온 크리프 수명평가

탄성-크리프 해석 결과 얻은 정상상태의 응력값을 사용하여 배관 T-부의 고온수명을 예측하기 위해 Manson-Haferd 파라미터(MHP)를 이용한 마스터 곡선을 사용하여 잔여수명을 평가하였다. Fig. 13은 배관 T-부에 사용된 재료와 유사한 1Cr-1Mo-0.25V강의 MHP 마스터 곡선이다. 이 곡선은 시간·온도 파라미터인 MHP를 x-축으로 로그응력을 y-축으로 하여 크리프 수명을 회귀식으로 나타낸 것이므로 모든 온도에 대한 크리프 파단 데이터를 포함하고 있다. NIMS(NRIM) 데이터북의 MHP 회귀식을 식 (2)에 표현하였다<sup>15)</sup>.

$$MHP = \frac{\log t_R - \log t_a}{(T + 273.15) - T_a} = b_0 + b_1(\log S) + b_2(\log S)^2 + b_3(\log S)^3 + b_4(\log S)^4 \quad (2)$$

여기서  $b_0, b_1, b_2, b_3, b_4$ 는 최소자승법에 의해 평가된 계수,  $t_R$ 는 크리프 파단시간,  $t_a$ 와  $T_a$ 는 최적화된 파라미터 상수,  $T$ 는 온도(°C),  $S$ 는 응력(MPa)이다. 식 (2)의 상수 값은 NIMS 크리프 데이터에 주어진 값을 사용하였으며, 각 상수 값들은 다음과 같다<sup>15)</sup>.

$$\begin{cases} T_a = 370 \\ \log t_a = 17.1445 \\ b_0 = -3.272606 \times 10^{-1} \\ b_1 = 6.644210 \times 10^{-1} \\ b_2 = -5.409043 \times 10^{-1} \\ b_3 = 1.945110 \times 10^{-1} \\ b_4 = -2.625728 \times 10^{-2} \end{cases} \quad (3)$$

식 (3)의 상수 값과 탄성-크리프 해석 결과 얻어진 정상상태응력 값을 식 (2)에 대입하여 MHP값을 계산하고, 사용온도 538°C를 대입하면 배관 T-부의 크리프 파단 수명을 예측할 수 있다. 내압만 작용한 경우 얻어진 정상상태 응력 96 MPa을 대입해서 계산하면 배관 T-부의 고온수명  $t_R$ 은 약 60년이였다. 또한 내압과 브랜치 배관에 시스템 하중이 동시에 작용한 경우의 정상상태 응력 146MPa을 대입하여 계산하면 배관 T-부의 고온수명  $t_R$ 은 약 21년으로 계산되었다. 배관 T-부의 고온수명을 예측한 결과 내압만 작용하는 경우에 비해 내압과 시스템 하중이 동시에 작용하는 경우 예측수명이 35% 정도로 단축되었다. 따라서 시스템 하중이 배관 T-부의 잔여수명에 큰 영향을 미침을 알 수 있다.

이상의 수명평가에서 MHP를 이용한 크리프 마스터 곡선을 사용하여 배관 T-부의 수명을 계산하였으나 현재 해석은 모재의 물성으로만 해석하였으므로 용접재의 재료물성 및 용접 열영향부가 수명에 끼치는 효과를 반영하여야 한다. 즉, 용접재와 모재사이의 열영향부에서 Type IV 손상 및 크리프 기공에 의한 균열이 발생하므로 이를 고려하여야 한다. 공학적인 경험에 근거한 근사평가 값으로 모재 수명의 1/5 정도로 용접부 수명을 계산한다<sup>1)</sup>. 따라서 앞 절의 T-부 용접부의 고온 크리프 수명을 다시 평가하면 각각 12년과 4.2년으로 평가됨으로서 내압 및 일부 시스템 하중이 부하된 경우 실제 측정 수명과 계산된 수명이 서로 유사하다고 볼 수 있다. Fig. 9~10의 탄성 응력해석 결과를 보면 BW-IN, BW-OUT의 경우 배관 외부의 응력이 배관 내부의 응력 보다 작음을 알 수 있다. 보통 크리프 기공손상 또는 수명 종료를 나타내는 균열 등의 측정은 배관 외표면에 표면 복제법(레프리카 법)을 적용하여 알아낸다. 따라서 실제 배관 T-부의 수명은 표면 복제로 측정된 것 보다 짧다고 볼 수 있다. 그러나 크리프 기공에 의해 정상상태응력으로 감소하게 되면 배관 외부 응력과 내부 응력의 차이는 줄어들게 되므로 수명에 끼치는 영향은 작아진다. Fig. 14는 내압만 부가된

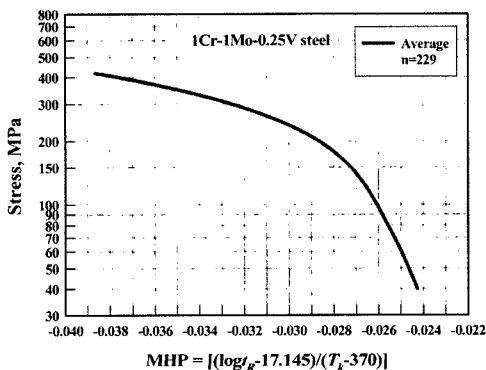


Fig. 13. Master creep rupture curve for 1Cr-1Mo-0.25V steel by Manson-Haferd parameter (MHP)<sup>15)</sup>.

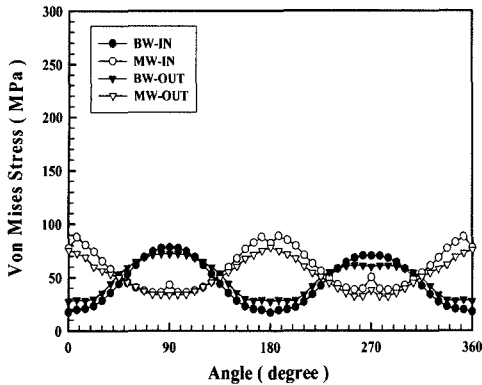


Fig. 14. Stress distribution after creep deformation for internal pressure loading.

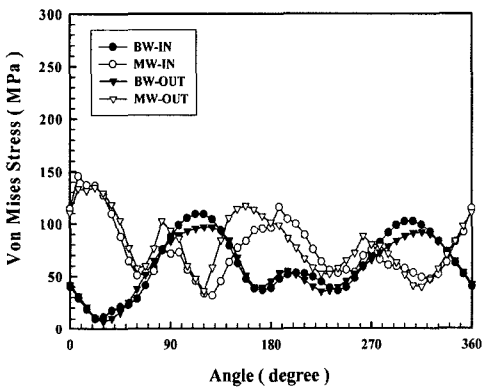


Fig. 15. Stress distribution after creep deformation for internal pressure and system loading.

경우이며 Fig. 15는 내압과 시스템 굽힘 하중도 함께 부가된 경우이다. Fig. 9와 Fig. 14를 비교해 보면 최대응력이 감소한 것을 확인할 수 있으며 특히, 배관 용접부 내부 응력과 외부 응력의 차이가 매우 작아졌음을 확인할 수 있다. 이는 Fig. 10과 Fig. 15를 비교하여도 마찬가지이다. 따라서 외표면의 표면복제에 의해 배관 T-부의 크리프 잔여수명을 평가하는 것은 타당하다.

일반적으로 복잡한 하중을 받는 구조물의 응력 해석은 여러 방향의 시스템 하중을 중첩하여 평가하게 된다. 따라서 용접부의 국부 응력도 중첩법에 의해 계산할 수 있으며, 다양한 하중조건에 대한 용접부 수명평가도 개별 응력해석 결과의 중첩에 의해 평가될 수 있을 것이다. 본 연구에서 보인 바와 같이 배관 T-부에 시스템 하중을 가정하고, 가정된 시스템 하중 조건에서 용접부의 최대응력 발생 부위를 파악함으로써 추후에 검출될 크리프 손상의 위

치를 보면 이를 유발시킨 시스템 하중의 방향과 크기를 역산할 수 있다. 따라서 본 논문의 접근법에 근거하여 체계적인 응력해석을 반복수행하면 수명 평가에 필요한 응력 데이터베이스를 구축할 수 있을 것이며, 본 연구에서는 그 기본 경우에 대해서 해석을 수행하여 제시한 것이다.

#### 4. 결론

1) 화력발전설비 증기배관의 T-부를 모델링하여 3차원 탄성응력해석을 수행한 결과 내압만 작용하는 경우와 내압과 시스템 하중이 동시에 작용하는 경우에 대해 용접부에서 최대응력 발생위치를 설명하였다.

2) 탄성응력해석 결과 내압만 작용하는 경우 주배관과 용접부의 안쪽 경계선의 0°(또는 360°)와 180° 지점에서 158MPa의 최대응력이 발생하였고, 내압과 시스템 하중을 동시에 가한 경우는 주배관과 용접부의 안쪽 경계선의 10° 지점에서 275MPa의 최대응력이 발생하였다.

3) 응력집중이 발생하는 용접부를 고려하여 탄성-2차 크리프 해석을 수행하여 내압만 작용하는 경우 96MPa, 내압과 시스템 하중이 동시에 작용하는 경우 146MPa의 정상상태응력 값을 얻었다. 정상상태응력을 Manson-Harferd 파라미터 회귀식에 대입하여 수명을 예측한 결과 내압만 작용하는 경우 12년, 내압과 시스템 하중이 동시에 작용하는 경우 4.2년의 예측수명이 얻어졌다. 이는 내압 및 일부 시스템 하중이 부가된 경우 실제 측정수명과 유사하다고 볼 수 있다.

4) 배관 T-부의 최대응력이 발생하는 위치에서 탄성응력해석 결과를 보면 배관 내면의 응력이 외면의 응력에 비해 상당히 크지만, 탄성-크리프 응력해석 결과를 보면 크리프 변형후 정상상태응력에 도달했을 때, 이 두 응력 값의 차이는 없어져서 내면과 외면의 응력이 유사하게 된다. 따라서 배관 외표면의 표면복제검사에 의해 잔여수명을 평가하는 것은 타당하다고 볼 수 있다.

**감사의 글 :** 본 연구는 산업자원부의 전력산업 기반기금 전력산업연구개발사업인 “화력발전소 위험도 기반 진단 절차 개발”과제(R-2004-1-134)의 연구비 지원으로 수행되었으며 관계자 제위께 감사드립니다.

참고문헌

- 1) 윤기봉, 이해무, 남승훈, 김시천, 박종서, “영월 화력 정밀진단 및 수명평가 (영월화력1호기, 터빈 및 보조기기)”, KRISS-93-141- IR, 1993.
- 2) 백운봉, 이해무, 박종서, 김시천, “삼천포화력 제 2호기 정밀진단 및 수명평가(터빈 및 보조기기)”, KRISS-99-105-IR, 1999.
- 3) 윤기봉, 이해무, 남승훈, 김시천, 박종서, “고온사용설비 파손방지 기술개발”, 과학기술처 · KRISS-92-088-IR, 1992.
- 4) 문한규, 이해무, 윤기봉, 남승훈, 김시천, 박종서, “고온사용설비의 비파괴 진단기술개발,” KRISS-92-063-IR, 1993.
- 5) 신규인, 권양미, 김윤재, 윤기봉, “T 배관의 고온에서의 건전성 평가”, 산업안전학회 춘계학술발표회, pp. 333~338, 2005.
- 6) Patel, R. D., “Creep Life Assessment of Welded Trunnion and Branch Components Using the R5 Procedure”, *Int. J. Pres. Ves. & Piping*, Vol. 80, pp. 695~704, 2003.
- 7) 이형일, 한태수, 정재현, “반타원 표면균열을 갖는 고온 T-형 배관의 수명평가”, 대한기계학회 재료및과피부분 학술대회논문집, pp. 33~40, 2000.
- 8) Wang, B., Hu, N., Kurobane, Y., Makino Y. and Lie, S.T., “Damage Criterion and Safety Assessment Approach to Tubular Joints”, *Engineering Fracture*, Vol. 22, pp. 424~434, 2000.
- 9) Miroshnik, R., Shaked, Y. and Elmakis, D., “Life Assessment Evaluation of Piping Branch Connection under Creep and Fatigue”, *Int. J. Pres. Ves. & Piping*, Vol. 71, pp. 147~154, 1997.
- 10) 윤기봉, 이해무, “부산화력 3호기 정밀진단 및 수명평가 (터빈 증기관 및 보조기기)”, KRISS-95-128-IR, 1995.
- 11) 백운봉, 이해무, 박종서, 윤기봉, “고온용 압력용기의 크리프 균열성장 잔여수명평가 사례 연구”, 산업안전학회지, Vol. 16, No. 3, pp. 26~30, 2001.
- 12) 백운봉, 윤기봉, 이해무, 서창민, “Cr-Mo강 용접 계면균열의 크리프-피로 균열성장거동”, 대한기계학회 논문집 A, 제24권, 12호, Vol. 24, No. 12, pp. 3088~3095, 2000.
- 13) Shard, P.A., Hurst, A.M. and Jagger, M., “Hartlepool Power Station Defect Assessment of the Hot Reheat Crossover Branch Weld B2C/SR98F”, Task 34627, 1998.
- 14) Laham, S. A., “Large Bore Branch Test Creep Analysis”, EPD/GEN/REP/0371, 1999.
- 15) NRIM CREEP DATA SHEET No. 9B.
- 16) ANSYS User's “Modeling Material Nonlinearities”.