

T 배관의 고온에서의 건전성 평가

신규인 · 권양미* · 김윤재** · 윤기봉***

중앙대학교 미래신기술연구소 · *중앙대학교 대학원

고려대학교 기계공학과 · *중앙대학교 기계공학부

1. 서 론

1960년대 이후 건설된 화력발전소는 오랜 시간 동안 장기사용으로 인하여 설비가 노후화 되고 있으나 최근 우리나라의 전력수요가 급증함에 따라 수시로 변하는 전력수요를 충족하기 위하여 발전설비들의 기동, 정지 횟수가 점차 빈번해지고 있다. 이러한 빈번한 기동, 정지 및 빠른 부하변동의 반복은 설비 내에 크리프 손상과 피로 손상 등이 누적되어 수명이 단축되게 되며 이러한 노후화력발전소의 수명연장을 위해선 발전설비 부품에 대한 수명예측이 이루어져야한다. 특히 고온·고압에 운용되는 설비에 대한 정확한 수명예측을 하기 위해서는 응력해석이 매우 중요하며, 응력해석 결과로부터 파손 부위를 미리 예측함과 동시에 보다 정확한 수명예측 수행과 보수 시기를 결정할 수 있다. 일반적으로 파손 원인이 크리프에 의한 손상원인이 아닌 경우에는 탄성응력해석을 수행하여 구조물의 피로 수명을 평가하게 된다. 그러나 고온에서 사용되는 구조물의 파손 원인 중에서 크리프의 영향이 클 경우에는 장기간 사용됨에 따라 응력이완이 발생되고, 탄성응력이 크리프에 의해 재분배되어, 탄성응력을 사용하여 크리프 파단(rupture) 해석을 수행하면 상당히 보수적인 결과를 얻게 된다. 또한 탄성-크리프 또는 탄소성-크리프 파단 해석은 시간이 많이 들고, 재료 특성의 영향을 받기 때문에 해석에 어려운 단점이 있어 이를 보완하기 위하여 간략응력해석 기법이 필요하며 R5에서는 참조응력(reference stress)기반의 간략응력해석 기법을 제시하고있다.

이에 본 논문에서는 R5에서 제시된 간략응력해석 기법의 타당성을 검증하기 위하여 T-배관의 응력해석을 수행하였다. 해석 시 내압만 고려한 경우와 내압과 시스템하중 즉 설비의 자중, 열확산계수 등을 함께 고려한 경우의 두 가지 경우에 대하여 탄성해석을 하였으며, 탄성해석 결과로부터 응력이 높은 지점에서의 탄성-크리프 파단 해석을 수행하여 간략응력해석 기법과 비교하였다.

2. T 배관 모델

본 논문에 이용된 T 배관은 화력발전소 재열 보일러(hot reheat boiler)에 연결된 배관으로 재질은 1/2CrMoV 강이며 T 배관의 기계적 성질은 Table 1에 나타내었다. T 배관

의 형상을 살펴보면 메인 배관(main pipe)과 브랜치 배관(branch pipe)은 용접으로 연결되어 있으며, 메인 배관의 외경은 522.7 mm, 두께는 31.75 mm이고, 브랜치 배관의 외경은 323.85 mm, 두께는 15.875 mm으로 T-배관의 개략도는 Fig. 1 (a)에 나타내었다.

일반적으로 발전소의 배관 계통은 가동압력 뿐만이 아니라 시스템 하중 즉 배관의 자중, 배관온도의 증가에 따른 열팽창, 배관 지지장치로 인한 구속조건 그리고 진동 등을 받게 되며, T 배관에서의 파손 부위는 주로 메인 배관과 브랜치 배관의 연결부분인 용접부에서 발생되는 것으로 알려져 있다.

이에 본 논문에서는 가동압력 만을 고려한 경우와 시스템하중을 함께 고려한 경우에 대하여 탄성해석을 통하여 용접부의 응력상태를 살펴보았다. 가동압력만을 고려한 경우는 내압으로 3.59 MPa이 작용하였으며, 배관 두께에 작용하는 축방향 하중 또한 함께 고려하였다. 내압과 시스템 하중을 함께 고려한 경우는 Fig. 1 (b)에서와 같이 브랜치 배관에서 30.4 kN·m의 시스템 하중이 작용하였다. 이때 시스템 하중은 모멘트로 표현되며 브랜치 배관 중심에 참조 절점(reference node)을 형성시킨 후 브랜치 배관의 두께 방향 요소들(elements)과 연결하여 참조 절점에서 시스템 하중을 가하면 브랜치 배관에서 시스템 하중을 받는 것과 같은 효과가 되도록 하였다.

본 해석에서는 유한요소 상용프로그램(ABAQUS V. 6.3)을 이용하여 해석을 수행하였으며 20 절점, 3 차원 구조용 요소를 사용하였다. Fig. 2는 T 배관의 유한요소 모델이다. 해석 모델은 축방향의 대칭(symmetric) 조건을 이용하여 전체의 1/2를 모델링 하였으며 두께를 따라 4개의 요소를 형성시켰다. 또한 용접부의 요소는 Fig. 2 (b)에서와 같이 4개로 이루어지도록 하였으며, 해석 후 메인 배관과 접하는 부분 즉 하단부분(lower

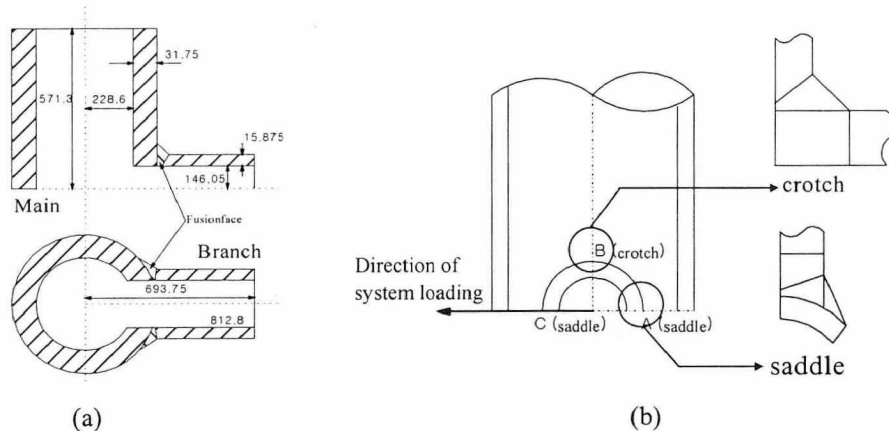


Fig. 1 Schematic diagram of T pipe and considered system loading in branch pipe

Table 1 Material properties of T pipe(1/2CrMov steel)

Temperature (°C)	σ_{ys} (MPa)	σ_{ut} (MPa)	E (GPa)	ν
538	175.7	351.25	170	0.3

part), 용접부 중간 부분(middle part) 그리고 브랜치 배관과 접하는 부분(upper part)의 세 부분으로 나누어 응력변화를 살펴보고, Fig. 1 (b)에서와 같이 A점인 새들(saddle) 부터 메인 배관과 브랜치 배관이 직각을 이루는 크리치(crotch) 부위(B점) 그리고 C점을 따라서 응력변화를 살펴보았다.

3. 응력 해석

고온에서 사용되는 구조물은 장기간 사용됨에 따라 설비 내에 크리프 손상이 누적되어 수명이 단축되게 된다. 이에 본 해석에서는 탄성-크리프 해석을 이용하여 T 배관에서의 응력 이완을 살펴보고, R5에서 제시하는 참조응력법을 이용하여 탄성-크리프 해석 결과와 비교 및 평가하였다.

일반적으로 고온에서 사용되는 재료의 power law 2차 크리프 파단식은 다음과 같이 제안된다.

$$\dot{\epsilon} = A\sigma^n t^m \quad (1)$$

여기서 $\dot{\epsilon}$ 은 크리프 변형률(creep strain rate), t 는 시간, A , n 그리고 m 은 크리프 재료 상수로써 1/2CrMoV강의 경우에는 3.2×10^{-15} , 4 그리고 1이다. 해석 시 크리프 기간은 150,000 sec으로 하여 충분히 크리프 평형 상태에 도달하도록 하였으며, 이로부터 시간에 따른 크리프 응력을 구하였다.

R5에서 제시하는 참조응력법을 통한 한계하중(limit pressure)은 소성불안정 해석을 통하여 구하게 된다. 본 논문에서는 소규모 변형(small deformation), 탄성 완전소성 모델(elastic perfectly plastic analysis)을 이용하여 참조응력(reference stress)을 구하였으며, ABAQUS에서 RIKS 옵션을 사용하였다. 참조응력은 다음 식으로 정의된다.

$$\sigma_{ref} = \frac{P}{P_L} \sigma_{ys} \quad (2)$$

여기서 P_L 은 소성불안정 한계하중이다.

2차 크리프 응력 지수가 7보다 작은 연성 재료의 경우에서의 국부 참조응력(rupture reference stress)은 다음의 식 (3)으로부터 구해진다.

$$\sigma_{ref}^R = [1 + 0.13(\chi - 1)]\sigma_{ref} \quad (3)$$

여기서 σ_{ref} 는 식 (2)로부터 구한 참조응력이고 χ 는 응력 집중계수(stress concentration factor)로써 다음과 같이 정의된다.

$$\chi = \frac{\overline{\sigma}_{E, \max}}{\sigma_{ref}} \quad (4)$$

여기서 $\overline{\sigma}_{E, \max}$ 는 탄성적으로 계산된 최대 등가응력(maximum equivalent stress)이다.

4. T 배관 해석 결과

T 배관에서 메인 배관과 브랜치 배관과의 사이인 용접부에서의 탄성응력해석 결과를 살펴보았다. Fig. 3 (a)는 내압만 고려한 경우로써 두께의 안쪽과 바깥쪽 표면의 응력분포를 용접부의 상부, 중간부 그리고 하부의 세 부분으로 나누어 나타낸 응력분포이다. 그림에서 보면 안쪽 표면에서의 응력이 가장 높게 나타났고, 세 부위 중 하부의 응력이 높게 나타났으며, 메인 배관과 브랜치 배관이 직각인 크러치 부위에서 응력이 가장 높게 나타남을 알 수 있다. 바깥쪽 표면에서의 응력분포를 살펴보면 이와는 반대로 크러치 부위보다는 새들 부위에서 응력이 높게 나타남을 알 수 있다.

Fig. 3 (b)는 내압과 시스템 하중을 함께 고려한 경우로써, Fig. 3 (a)의 경우와 마찬가지로 두께의 안쪽과 바깥쪽 표면의 응력분포를 용접부의 상부, 중간부 그리고 하부의 세 부분으로 나누어 나타낸 그림이다. 그림에서 바깥쪽 표면에서의 응력분포를 살펴보면 시스템 하중에 의하여 새들(A 지점)에서의 응력이 가장 높게 나가고 B, C로 가면서 응력이 급격히 떨어진 후 다시 올라감을 알 수 있다. 중간 부와 하부의 응력 또한 상부와 같은 경향이 보이지만 상부보다는 응력이 낮음을 알 수 있다. 두께의 안쪽 표면은 바깥쪽 표면과는 다르게 새들 A지점과 크러치 B 지점 사이인 56.25°되는 지점에서 세 부위 모두 응력이 높게 나타남을 알 수 있다.

Fig. 4는 탄성-크리프 파단해석을 수행한 결과로써 시간에 따른 크리프 파단응력을

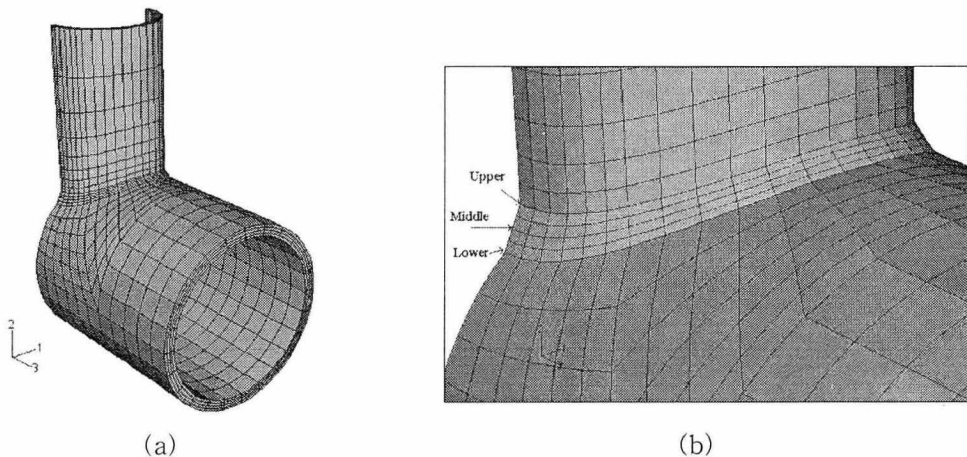


Fig. 2 Finite element model of a T pipe

나타낸 그림이다. Fig. 4 (a)는 탄성 해석에서 내압만 고려한 경우에 가장 높은 응력을 나타낸 크리치 지점에서의 탄성-크리프 파단해석 결과이다. 그림에서 보면 초기에는 응력이 급격히 감소하지만 시간이 흐를수록 평형 상태에 이르는 것을 알 수 있다. Fig. 4 (b)는 내압과 시스템 하중을 고려한 경우에 가장 높은 응력을 나타낸 상부 새들 A 지점에서의 탄성-크리프 파단해석 결과로 Fig. 4 (a)와 같은 경향을 보이는 것을 알 수 있다.

탄성 해석에서 고려된 용접부에서 최대 응력과 식 (2)의 참조응력, 식 (3)의 국부 참조응력 그리고 탄성-크리프 파단해석으로부터 구한 결과를 Table 2에 나타내었다. Table 2에서 보면 탄성 해석 결과가 가장 높고, 국부참조응력 결과는 탄성응력보다는 낮고 탄성-크리프 파단응력보다는 높은 것을 알 수 있다. 이러한 결과로부터 탄성-크리프 파단해석 결과가 과도하게 보수적임을 알 수 있으며, 본 논문에서 제시된 간략응력해석 기법은 이러한 과도한 보수성과 시간을 줄일 수 있으며 비선형해석 없이 크리프 파단응력을 계산하는데 유용함을 알 수 있다.

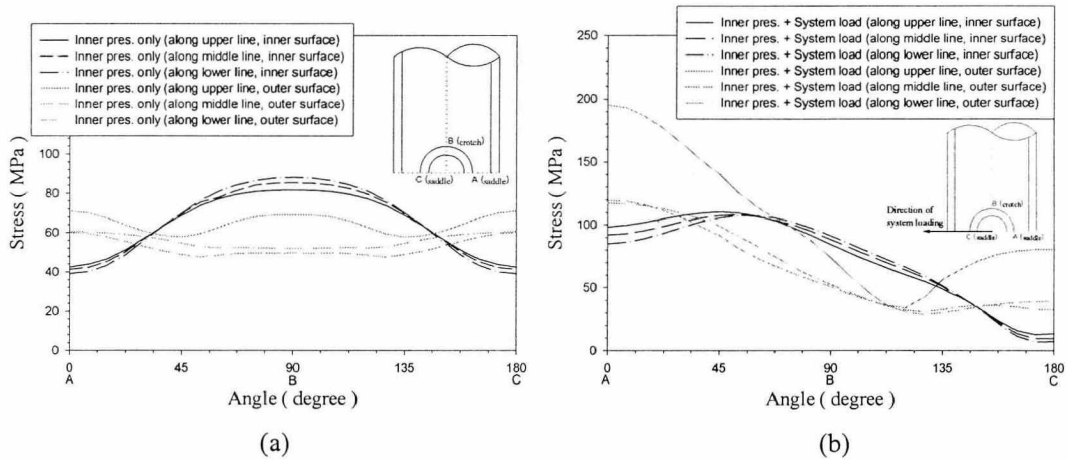


Fig. 3 Stress distribution from elastic analysis in T pipe

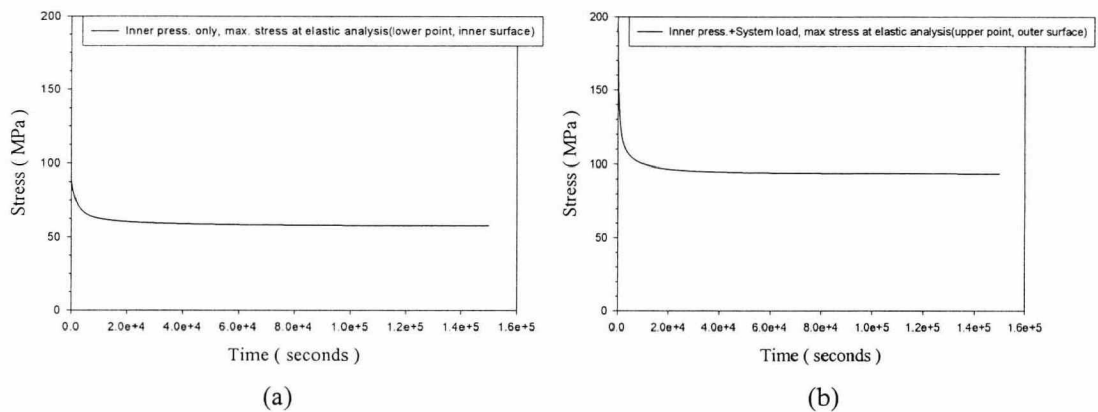


Fig. 4 Stress variation for elastic-creep analysis in T pipe

Table 2 Results of stress analysis

	σ_{max} (MPa) from Elastic analysis	σ_{ref} (MPa)	σ_{ref}^R (MPa)	σ_{max} (MPa) from elastic creep analysis
Inner press. only	88.2	54.9	59.23	57.9
Inner Press. + System loading	195.2	82.80	100.94	93.8

5. 결 론

T-배관의 탄성응력해석을 수행하였으며, 해석 시 내압만 고려한 경우와 내압과 시스템하중을 함께 고려한 경우의 두 가지 경우에 대하여 해석을 수행하였다. 또한 탄성-크리프 파단해석을 수행하여 R5에서 제시된 간략응력해석 기법의 타당성을 검증하였다.

1. 탄성응력 해석 결과 내압만을 고려한 경우에는 메인 배관과 브랜치 배관이 직각을 이루는 크리치 부위에서 응력이 가장 높게 나타났지만, 시스템 하중을 함께 고려한 경우에는 새들과 크리치 사이의 56.25°되는 부위에서 응력이 높게 나타났다. 이에 파손 부위 예측과 정확한 수명 평가를 수행하기 위해서는 단순히 내압만을 고려하여 해석을 수행하는 것보다는 시스템 하중을 함께 고려해야 한다.

2. 탄성응력 해석 결과로부터 가장 높은 응력 지점에서의 탄성-크리프 파단해석을 수행하였으며 크리프 파단응력과 간략응력 해석법과 비교한 결과 간략응력해석 기법은 과도한 보수성과 시간을 줄일 수 있으며, 비선형해석 없이 크리프 파단응력을 계산하는데 유용하였다.

참고문헌

1. S. Al Laham, "Large Bore Branch test Creep Analysis", EPD/GEN/REP/0371/98, 1999
2. P. a. Shard, A. M. Hurst and M. Jagger, "Hartlepool Power Station Defect Assessment of the Hot Reheat Crossover Branch Weld B2C/SR98F," Task 34627, 1998.
3. 송기욱, 유근봉, 현중섭, 장성호, 하정수, "14MoV63 강을 사용한 주증기관의 손상 평가 기술," 대한기계학회 재료 및 파괴부분 학술대회논문집, pp. 146-151, 2001.
4. 이형일, 한태수, 정재현, "반타원 표면균열을 갖는 고온 T-형 배관의 수명평가," 대한기계학회 재료 및 파괴부분 학술대회논문집, pp. 33-40, 2000.
5. R. D. Patel, "Creep Life Assessment of Welded Trunnion and Branch Components Using the R5 Procedure," International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 80, pp. 695-704, 2003.
6. P. J. Budden, "Validation of the High-Temperature Structural Integrity Procedure R6 by Component Testing," International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 80, pp. 517-526, 2003.