

내압을 받는 Y 배관의 크리프 수명 평가를 위한 3차원 응력해석

신규인[†] · 이진상^{*} · 윤기봉^{*}

중앙대학교 미래신기술연구소 · ^{*}중앙대학교 기계공학부
(2007. 1. 3. 접수 / 2007. 4. 6. 채택)

3-Dimensional Stress Analysis for Creep Life Assessment of Y-Piece Under Inner Pressure

Kyu In Shin[†] · Jin Sang Lee^{*} · Kee Bong Yoon^{*}

Frontier Technology Innovation Center, Chung Ang University

^{*}Department of Mechanical Engineering, Chung Ang University

(Received January 3, 2007 / Accepted April 6, 2007)

Abstract : To assess a creep life of elevated temperature plant components, inspections and analysis are usually focused on the critical locations. In this study, stress analysis of a weld region in branch part of Y-piece was conducted by using a three-dimensional finite element analysis. The stresses at the inner and outer surface in the weld part were estimated by using elastic and elastic-creep analysis. For the elastic-creep analysis two kinds of elastic-creep analysis was conducted. The one was assumed that base and weld material properties were same and the other was that material properties were different between base and weld metal. The material properties of base and weld metal were used from reference data. The results showed the stress relaxation level and its location. The result stresses are also compared with elastic stresses.

Key Words : elastic-creep analysis, remaining life assessment, stress relaxation, Y-pipe

1. 서 론

대부분의 화력 발전설비들은 사용기간이 오래되어 안전성 있게 사용하기 위해 주증기 파이프, 보일러, 터빈 등의 주요 요소들에 대한 잔여수명평가 기술(remaining life assessment technology)이 관심사가 되고 있다. 특히 고온·고압에 운용되는 설비에 대한 정확한 수명예측을 하기 위해서는 응력해석이 매우 중요하며, 응력해석 결과로부터 파손 부위를 미리 예측함과 동시에 보다 정확한 수명예측 수행과 보수시기를 결정할 수 있다.

일반적으로 용접으로 연결되어있는 배관의 잔여 수명평가 및 건전성 평가를 수행하기 위해서는 용접부의 국부응력수준을 평가할 수 있는 응력 데이터베이스가 필요하며 이를 위해서는 3차원 유한 요소 해석을 수행하여 용접부의 취약부위의 응력수준

평가 데이터를 확보하여야한다.

파손 원인이 크리프에 의한 손상원인이 아닌 경우에는 탄성응력해석을 수행하여 구조물의 안전성을 평가하게 되지만, 크리프의 영향이 클 경우에는 장기간 사용됨에 따라 응력완화(stress relaxation) 현상이 발생되고 탄성응력이 크리프에 의해 재분배되어, 탄성응력을 사용하여 크리프 파단해석(creep rupture analysis)을 수행하면 매우 보수적인 결과를 얻게 된다¹⁾.

윤기봉²⁾은 주증기관의 취약부인 용접부와 Y부 및 T부 등을 대상으로 표면 복제법(replica method), 경도측정법을 사용하여 수명평가를 하였으며, 균열이 존재하는 경우에 대하여 수명평가 컴퓨터 코드를 사용하여 균열성장에 대한 잔여수명을 계산하였다. 박종서 등³⁾은 열화된 설비의 손상 평가 방법 중 하나인 표면 복제법에 대하여 장단점을 파악하고, 표면 복제에 필요한 최적 조건을 제시하였다. Colombo 등⁴⁾은 보일러 튜브에 연결된 T-배관에 대하여 유한요소 해석과 실험 결과를 통하여 크리프에 의한 응력이완

[†] To whom correspondence should be addressed.
kyuinshin@hanmail.net

현상을 살펴보고, 파손 분석을 수행하였다. 김건영 등⁵⁾은 보일러 헤더의 손상유형을 살펴보고, 헤더에 존재하는 리가먼트 균열에 대하여 수명예측을 수행하였다.

본 논문에서는 국내 표준석탄화력발전소에서 운용되는 Y-배관에 대하여 탄성 및 탄성-크리프 응력 해석을 수행하였다. 탄성해석 시 내압만 고려한 경우에 대해서 Y-배관에서 응력집중이 발생하는 부위와 용접부의 응력변화를 살펴보았다.

또한 탄성해석 결과로부터 용접부에서 응력이 높은 지점으로부터 탄성-크리프해석을 수행하여 정상상태에서의 응력값을 결정하였으며, 용접부에서의 탄성해석 결과와 탄성-크리프해석 결과와 비교하여 용접부의 국부응력 수준을 평가할 수 있는 응력 데이터베이스의 구축을 위한 기초 데이터를 구축하였으며, 이로부터 크리프 손상예측을 이용해서 발전플랜트 및 구조물 유지보수 계획에 활용하도록 하였다.

2. 탄성-크리프 해석

고온에서 운용되는 구조물의 경우에는 일정한 하중 하에서 시간이 경과함에 따라 소성변형 즉 크리프가 발생한다. 일반적으로 고온에서 사용되는 재료의 멱급수(power-law) 크리프 식은 다음과 같이 제안된다.

$$\epsilon_{cr} = A\sigma^n t^m \quad (1)$$

여기서 ϵ_{cr} 은 크리프 변형률(creep strain rate), t 는 시간, A , n 그리고 m 은 크리프 재료 상수이다.

본 연구에서는 탄성-크리프해석 시 두 가지 경우에 대하여 해석을 수행하였다. 첫 번째는 Y-배관의 용접부 물성치가 모재부와 같다고 가정한 경우이고, 두 번째는 용접부의 물성치는 모재부와 다르다고 가정한 경우이다. 해석 시 두 경우 모두 기존의 데이터⁶⁾를 이용하여 해석을 수행하였으며, 해석에 이용된 모재부와 용접부의 크리프 물성치는 Table 1에 나타내었다. 이때 크리프 기간은 27,000h 정도로 충분히 크리프 평형 상태에 도달하도록 하여 이로부터 시간에 따른 크리프 응력을 구하였다.

Table 1. Creep properties of Y-pipe

	A (MPa ⁻ⁿ)	n	m
Base metal	6.44e-34	12.3	1
Weld metal	1.91e-57	21.6	1

3. Y-배관 해석 모델

본 연구에 이용된 Y-배관은 500 MW급 표준석탄 화력발전소 주증기관(main steam line)에 연결된 배관으로 재질은 X20C CrMoV 121강이며 Y-배관의 형상은 Fig. 1에서와 같이 주 배관(main pipe)의 외경은 420mm, 두께는 75mm이고, 브랜치 배관(branch pipe)의 외경은 310mm, 두께는 70mm이며, 브랜치 배관은 용접으로 연결되어있다. X20C CrMoV 121 강 재료의 기계적 성질은 Table 2에 나타내었다.

일반적으로 고온에서 운용되는 배관계통의 수명을 결정하는 주요 손상은 주로 용접부에서 나타나며 용접부 수명이 모재의 수명보다 짧은 경우가 많다. 이는 용접부마다 성질이 불균일하고 응력집중이 일어나는 경우가 많으며, 열영향부(HAZ)가 취약하기 때문이다. 또한 용접부의 원주방향 크리프 손상은 주로 열영향부의 ICZ(intercritical zone)에서 크리프 기공 또는 크리프 기공연결에 의한 미소 균열 형태의 손상이 성장하여 TypeIV 균열로 발전하는 것으로 알려져 있으며, 길이방향 크리프손상은 내압에 의한 원주방향 응력이 원인으로 발생하는 것으로 알려져 있다²⁾. 이러한 크리프 손상은 종종 인성이 낮은 용접재의 용접 응력 제거 시에 발생되기도 한다. 이에 본 연구에서는 Y-배관에서 브랜치 배관의 용접부를 대상으로 탄성해석 및 탄성-크리프 해석을 수행하였다.

Y-배관의 유한요소 모델은 유한요소 상용프로그램인 ABAQUS⁷⁾를 이용하여 3차원 20절점 요소를 사용하였으며, 유한요소 모델 형상은 Fig. 2에 나타내었다. Y-배관의 유한요소 모델 형상을 살펴보면

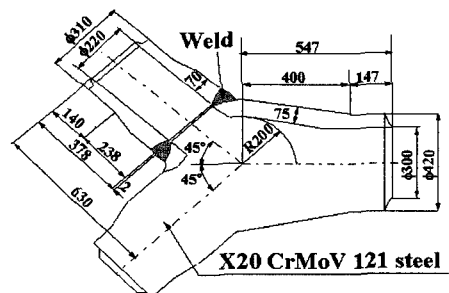


Fig. 1. Schematic diagram of Y-pipe.

Table 2. Mechanical properties of Y-pipe

Temperature (°C)	(X20C CrMoV 121 steel)			
	σ_{ys} (MPa)	σ_{ut} (MPa)	E (GPa)	ν
545	385	461	132	0.3

Fig. 2(a)에서와 같이 전체의 1/2를 모델링 하였고, 두께방향으로 4개의 요소가 형성되도록 하였으며, 모델 형성 시 Y-배관의 메인 부분과 좌·우측의 브랜치 부분은 일반 배관과 연결되어 있는 것으로 하였다. 브랜치 배관의 용접부는 Fig. 2(b)에서와 같이 용접조건을 따른 형상을 구현하였으며 용접부의 요소는 4개로 이루어지도록 하였다.

해석 시 Fig. 2(b)에서와 같이 브랜치 배관의 용접부에서 일반 배관으로 향한 부위를 상단 부위(upper part), 용접부 중간부위(middle part) 그리고 Y 배관으로 향하는 부위를 하단부위(lower part)의 세 부분으로 나누고, Y-배관에서 브랜치 배관의 안쪽 A점부터 브랜치 배관의 표면 중심인 B점 그리고 바깥쪽의 C점을 따라서 브랜치 배관의 용접부의 내부와 외부에서의 응력변화를 살펴보았다. 내압은 가동압력으로 24.13MPa를 가하였으며, 배관 두께에 작용하는 축방향 하중 또한 함께 고려하였다.

Y-배관의 경계조건은 y-축 대칭 조건을 이용하였으며, 메인 배관 외경 끝 부위에서 중간에 위치한 절점에 x-방향의 변위를 고정시켰고, Y-배관의 중심 절점에 z-방향의 변위를 고정시켰다.

Fig. 3은 Y-배관의 경계조건이 올바르게 구성되었는지 알아보기 위하여 브랜치 배관의 좌·우측 용

접부에서 상단 부위 내부와 외부표면에서의 Von Mises 응력을 비교한 그림이다. 그림에서 보면 브랜치 배관의 좌·우측 용접부의 응력이 같게 나타남을 알 수 있었다. 이에 본 연구에서는 탄성 및 탄성-크리프 해석 시 브랜치 배관의 우측 용접부에서의 응력을 살펴보았다.

4. Y-배관 해석 결과

4.1. 탄성해석 결과

Y-배관과 Y-배관 용접부에서의 탄성응력해석 결과를 살펴보았다. Fig. 4는 내압(P, 24.13MPa)만을 고려한 경우로써 Y-배관의 내부 표면에서 가장 응력이 높은 부위로부터의 응력 분포와 그에 대응하는 외부 표면에서의 응력 분포를 나타낸 그림이다. 그림에서 보면 Y-배관의 안쪽 A지점에서의 응력이 가장 높게 나타났지만 45° 정도까지 급격히 떨어진 후 B, C로 가면서 조금씩 응력이 올라감을 알 수 있었다. 외부에서는 내부와는 반대로 A에서의 응력이 가장 낮게 나타났고 B, C로 가면서 응력이 조금씩 증가함을 알 수 있었다.

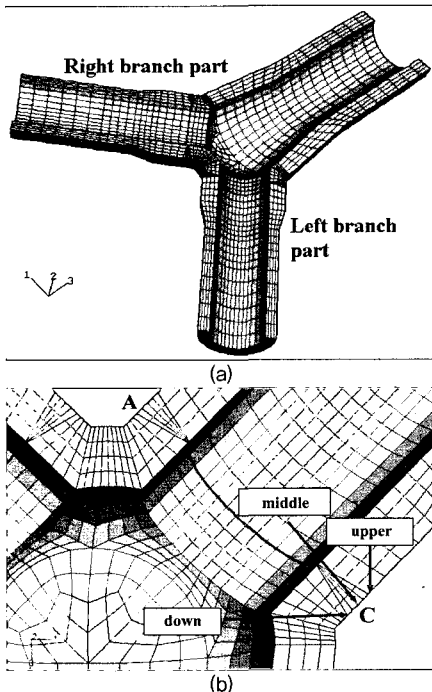


Fig. 2. Finite element model of a Y-pipe.

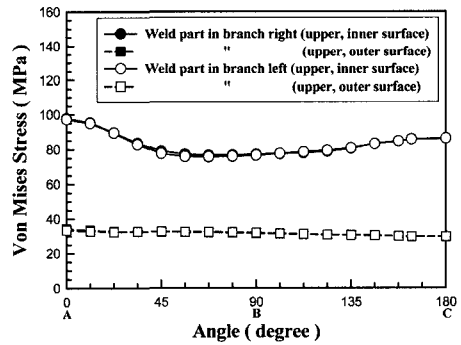


Fig. 3. Comparison of stress between left and right weld part of branch weld part in Y-pipe.

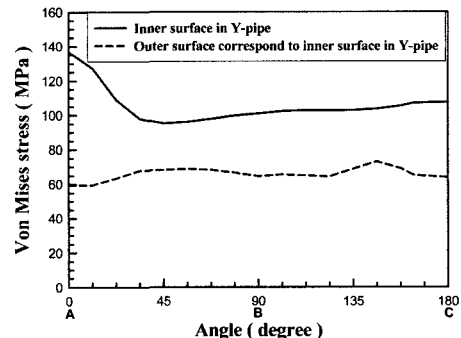


Fig. 4. Stress distribution from elastic analysis in Y-pipe.

Fig. 5는 Y-배관 용접부에서의 내부와 외부를 상단, 중간 그리고 하단으로 나누어 비교한 응력분포이다. 그림에서 보면 용접부의 내부에서는 Fig. 4의 결과보다는 낮게 나타났고 상단, 중간 그리고 하단 세 부위 모두 응력이 같게 나타났으나, 브랜치 배관의 안쪽 A에서의 응력이 가장 높게 나타났고 B, C로 가면서 응력이 떨어진 후 다시 올라갔다. 외부에서는 하단 즉, Y-배관으로 향하는 부위에서 응력이 가장 높게 나타났고 브랜치 배관의 안쪽 A에서의 응력이 약간 높게 나타났으나 B, C로 가면서 응력의 차이가 거의 없음을 알 수 있었고, 그 경향은 세 부위 모두 같게 나타남을 알 수 있었다.

Fig. 6은 Y-배관 용접부에서 가장 응력이 높게 나타난 하단 내부 표면으로부터 외부 표면까지의 두 계방향으로의 응력 분포를 나타낸 그림으로, 하단 내부 표면에서 외부 표면까지 응력이 단계적으로 떨어짐을 알 수 있었다.

4.2. 탄성-크리프해석 결과

본 연구에서는 탄성-크리프해석 시 두 가지 경우에 대하여 해석을 수행하였다. 첫 번째는 Y-배관의 용접부 물성치가 모재부와 같다고 가정한 조건이고, 두 번째는 용접부와 모재부의 크리프 물성치를 다르게 한 조건으로 두 경우 모두 충분히 크리프 평형 상태에 도달하도록 하여, 이로부터 시간에 따른 크리프 응력을 구하였다.

Fig. 7은 첫 번째와 두 번째 경우의 탄성-크리프 해석을 수행한 결과로써 Fig. 5의 탄성해석 결과로부터 가장 응력이 높은 지점에서의 초기상태에서 평형상태에 도달할 때까지의 시간에 따른 응력을 나

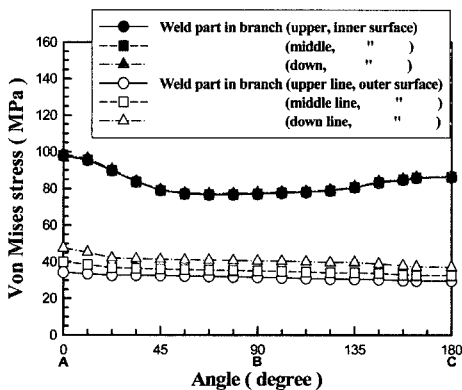


Fig. 5. Stress distribution from elastic analysis in weld part of Y-pipe.

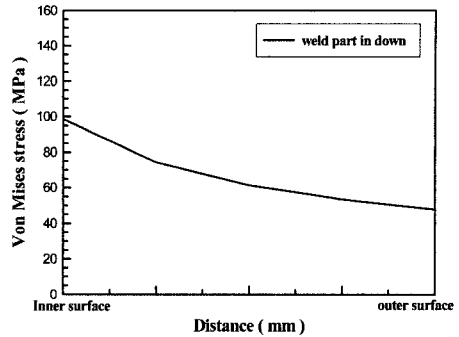


Fig. 6. Stress distribution through thickness from inner to outer surface at maximum stress position in weld part Y-pipe.

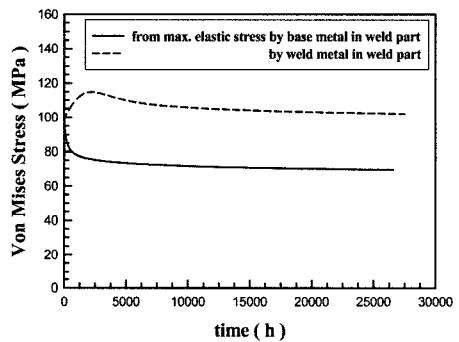


Fig. 7. Von Mises stress histories for elastic-creep analysis in weld part of Y-pipe.

타낸 그림이다. 그림에서 보면 첫 번째 경우의 모재부 크리프 물성치를 이용한 경우 초기에는 응력이 급격히 감소한 후에 시간이 흐를수록 평형 상태에 이르는 것을 알 수 있었으며, 두 번째 경우의 용접부 물성치를 모재부와 다르게 고려한 경우에는 2,800h 정도부터 응력이 재분배되어 시간이 흐를수록 평형 상태에 이르는 것을 알 수 있었다.

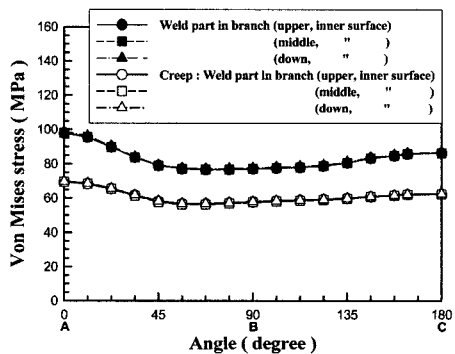


Fig. 8. Comparison of stress distribution for elastic and elastic-creep analysis along inner surface by using base metal properties.

Fig. 8은 첫 번째 경우의 모재부 크리프 물성치를 이용하여 브랜치 용접부 내부 표면을 대상으로 탄성-크리프해석을 수행한 결과로써 평형상태에 도달한 후의 크리프 응력을 Fig. 5의 탄성해석 결과와 함께 비교한 그림이다. 그림에서 보면 크리프 영향에 의하여 응력 완화현상이 발생되어 용접부 내부의 응력이 크게 떨어졌지만, 그 경향은 탄성해석 결과와 비슷한 경향을 가짐을 알 수 있었다.

Fig. 9는 첫 번째 경우의 브랜치 용접부의 내부와 외부 표면을 대상으로 탄성-크리프해석 결과를 비교한 그림으로, 크리프 영향에 의하여 용접부 내부와 외부의 응력 차이가 거의 없어짐을 알 수 있었다.

Fig. 10은 두 번째 경우의 용접부 물성치를 모재부와 다르게 고려하여 브랜치 용접부의 내부 표면을 대상으로 탄성-크리프해석을 수행한 결과로써 평형상태에 도달한 후의 크리프 응력을 Fig. 8의 첫 번째 경우의 탄성-크리프해석 결과와 함께 비교한 그림이다. 그림에서 보면 용접부 물성치를 다르게 고려한 경우 모재부와 용접부의 경계부 즉, 상단과 하단은 모재부 크리프 물성치 영향에 의하여 중간부위의 응력보다 떨어짐을 알 수 있었으며, Y-배관 안쪽인 A 지점에서 가장 높게 나타났고 B로 가면서 급격히 떨어진 후 C 지점 즉, Y-배관 바깥쪽으로 가면서 응력이 다시 올라감을 알 수 있었으며, 그 경향은 세 부위 모두 같게 나타났고, 첫 번째 경우의 탄성-크리프 해석 결과보다는 높게 나타남을 알 수 있었다.

Fig. 11은 두 번째 경우의 용접부 물성치를 다르게 고려하여 브랜치 용접부의 외부 표면을 대상으로 Fig. 9의 첫 번째 경우의 탄성-크리프해석 결과와 함

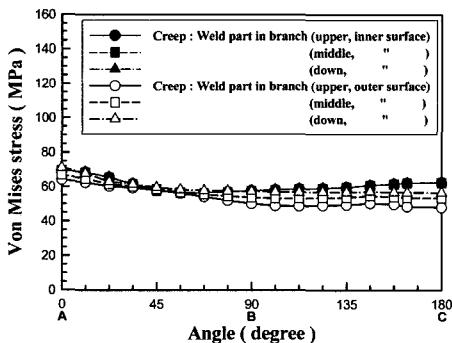


Fig. 9. Comparison of stress distribution for elastic and elastic-creep analysis along inner and outer surface in weld part by using base metal properties.

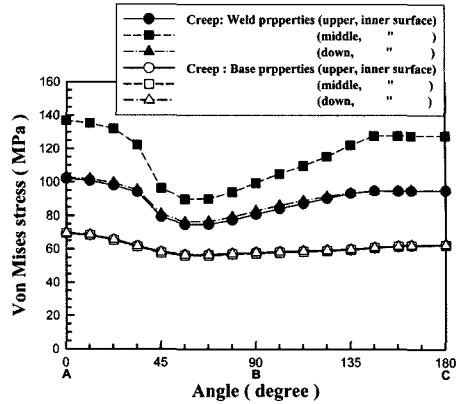


Fig. 10. Comparison of stress distribution between base and weld metal properties on weld part inner surface in Y-pipe for elastic-creep analysis.

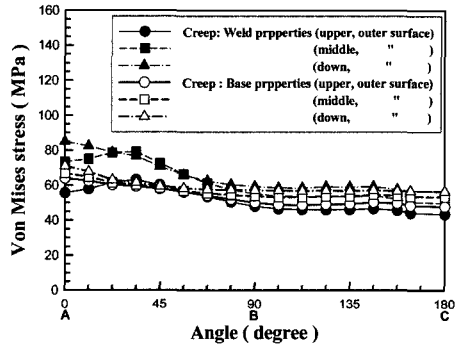


Fig. 11. Comparison of stress distribution between base and weld metal properties on weld part outer surface in Y-pipe for elastic-creep analysis.

게 비교한 그림이다. 그림에서 보면 Y-배관의 안쪽 즉, A 지점으로부터 45°부근은 용접부의 크리프 물성치로 인하여 첫 번째 경우보다는 약간 높게 나타났지만 그 이후부터는 전체적으로 외부 표면은 모재부의 크리프 물성치를 이용한 결과와 차이가 거의 없음을 알 수 있었다.

5. 결론

국내 표준석탄화력발전소에서 운용중인 Y-배관 용접부를 대상으로 국부응력 수준을 평가할 수 있는 응력 데이터베이스의 구축을 위한 해석법 확립을 위하여 탄성응력해석과 탄성-크리프해석을 수행하였다. 탄성-크리프해석 시 Y-배관 용접부를 대상으로 모재부 크리프 물성치와 같게 한 경우와 용접부 크리프 물성치를 다르게 고려한 경우의 두 가지 경우에 대하여 해석을 수행하였다.

또한 탄성해석 결과로부터 용접부에서 가장 응력이 높은 지점을 대상으로 탄성-크리프 해석을 통하여 정상 상태의 응력수준을 계산하고, 용접부의 안쪽과 바깥쪽 표면에서의 탄성-크리프 해석 결과를 비교하여, 국내 표준석탄화력발전소에서 운용중인 Y-배관 용접부의 유지보수 계획에 활용하도록 하였다. 본 연구로부터 해석결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 탄성응력해석 결과 내압으로 인하여 용접부 내부 표면에서의 응력이 외부 표면 보다 높게 나타남을 알 수 있었고, 내부 표면에서는 상단, 중간 그리고 하단 부위 모두 응력이 같게 나타났으나, 외부 표면은 하단 부위 즉, Y-배관으로 향하는 부위에서 응력이 가장 높게 나타남을 알 수 있었다.
- 2) 탄성-크리프해석 시 브랜치 용접부의 내부 표면을 대상으로 모재부 크리프 물성치로 탄성-크리프해석을 수행한 결과 크리프 영향에 의하여 응력 완화현상이 발생되어 용접부 내부에서는 응력이 크게 떨어짐을 알 수 있었으며, 용접부 내부와 외부의 응력 차이는 거의 없어짐을 알 수 있었다.
- 3) 탄성-크리프해석 시 용접부 물성치를 모재부로 다르게 고려한 경우 브랜치 용접부의 내부 표면을 대상으로 모재부와 용접부의 경계부 즉, 상단 부위 과 하단 부위는 모재부 크리프 물성치 영향에 의하여 중간 부위의 응력보다 떨어졌으나 그 경향은 같게 나타났고, 모재부의 크리프 물성치를 이용한 경우보다 높게 나타남을 알 수 있었다. 그리고 브랜치 용접부의 외부 표면을 살펴본 결과 Y-배관의 안쪽은 용접부의 크리프 물성치로 인하여 약간 높게 나타났지만, 전체적으로 외부 표면은 모재부의 크리프 물성치를 이용한 결과와 응력 차이가 거의 없음을 알 수 있었다.

감사의 글 : 본 연구는 2006년도 중앙대학교 박사후연수과정(Post-Doc)지원사업과 전력연구원 전력산업연구개발사업의 위탁 연구인 화력발전소 위험도 기반 진단 절차 개발 과제에 연구비 지원으로 수행되었으며 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- 1) 신규인, 김윤재, 윤기봉, “참조응력법에 입각한 T-배관 국부 크리프 파단 평가를 위한 응력해석 사례연구”, 대한기계학회논문집 A권, 제30권, 제8호, pp. 873~879, 2006.
- 2) 윤기봉, “고온 증기 파이프의 잔여수명 평가”, 대한용접학회지, 제13권, 제2호, pp. 12~24, 1995.
- 3) 박중서, 이해무, 백운봉, “고온설비 수명평가를 위한 표면복제 절차의 표준화”, 대한기계학회논문집 A, 제24권, 제9호, pp. 2381~2386, 2000.
- 4) Colombo, P.P., Garzillo, A., Meriggi, M., Ponzoni, C. and Sampietri, C., “Creep and Damage Analysis of a Serviced Tee Intersection in a Boiler Header: Comparison between Numerical and Experimental Results”, Int. J. Pres. Ves. & Piping, Vol. 66, pp. 243~251, 1996.
- 5) 김건영, 송기욱, “보일러 고온부 헤더의 균열수명 평가”, 대한용접학회지, 제13권, 제2호, pp. 25~31, 1995.
- 6) Park, Y.K., Kim, K.S., Chung, Y.K. and Park, J.J., “Creep Crack Growth in X20CrMoV 121 Steel and Its Weld Joint”, J. of Pressure Vessel Tech., Vol. 123, pp. 191~196, 2001.
- 7) ABAQUS Version 6.5, Hibbit, Karlsson & Sorensen Inc., 2005.