보일러 헤더 기동시의 탄성 크리프 해석에 의한 열응력 평가

신규인† · 윤기봉*
고려대학교 기계공학부 · *중앙대학교 기계공학부
(2008. 12. 13. 접수 / 2009. 4. 7. 채택)

Thermal Stress Evaluation by Elastic-Creep Analysis during Start-up of Boiler Header

Kyu In Shin† · Kee Bong Yoon*
Department of Mechanical Engineering, Korea University
*Department of Mechanical Engineering, Chung Ang University
(Received December 13, 2008 / Accepted April 7, 2009)

Abstract : Thermal stress and elastic creeping stress analysis was conducted by finite element method to simulate start-up process of a boiler header of 500MW standard fossil power plant. Start-up temperature and operating pressure history were simplified from the real field data and they were used for the thermal stress analysis. Two kinds of thermal stress analysis were considered. In the first case only temperature increase was considered and in the second case both of temperature and operating pressure histories were considered. In the first analysis peak stress was occurred during the temperature increase from the room temperature. Hence cracking or fracture may occur at the temperature far below the operating maximum temperature. In the results of the second analysis von Mises stress appeared to be higher after the second temperature increase. This is due to internal pressure increase not due to the thermal stress. When the stress components of radial(r), hoop(θ) and longitudinal(z) stress were investigated, compression hoop stress was occurred at inner surface of the stub tube when the temperature increased from room temperature to elevated temperature. Then it was changed to tension hoop stress and increased because of the operating pressure. It was expected that frequent start-up and shut-down operations could cause thermal fatigue damage and cracking at the stub tube hole in the header. Elastic-creeping analysis was also carried out to investigate the stress relaxation due to creep and stabilized stress after considerable elapsed time. The results could be used for assessing the creep damage and the residual life of the boiler header during the long-term service.
Key Words : boiler header, elastic creep analysis, stress relaxation, thermal stress analysis, stub tube

1. 서 론

발전소의 보일러 헤더는 기동시 고온 증기의 빠른 유입으로 비교적 큰 열응력이 발생되게 되어 열피로와 크리프에 의한 손상이 누적되어 수명이 소진되게 된다. 이러한 손상을 최소화하기 위해서는 가동시 온도 증가속도를 완화시켜 열응력의 크기를 작게 하여야 하지만, 전체 플랜트의 기동 조건은 제작사에 의해 정해지므로 헤더의 온도 증가속도 조절에는 한계가 있다. 따라서 헤더 설비에 대한 안전성 및 수명을 정확하게 예측하기 위해서는 응력 해석이 매우 중요하다. 또한 응력해석 결과로부터 구조물의 파손 경향과 정확한 잔여수명과 보수시기를 결정할 수 있다.

엄달선[1]은 중/고압 터빈 케이싱을 대상으로 열전달계수를 달리한 열응력해석을 통하여 열변형량을 살펴보았으며, 이진상 등[2]은 소형 기력발전용 터빈 로터를 대상으로 설비의 기하학적 형상, 증기 온도와 압력의 기동변화, 로터 재료의 온도에 따른 물리적 특성값 등을 고려하여 유한요소법을 이용하여 열해석을 수행하였다. Bryan 등[3]은 화력발전소 헤더를 대상으로 발생된 균열을 시간에 따라 탐지할 수 있는 AE(acoustic emission) 모니터링기법을 개발하여, 응력해석 결과와 함께 비교 및 검증하였다. Nonaka[4]는 일본 발전소에서 운용되는 헤더의 크리프-피로 손상과 Type IV 균열 등에 대한 손상

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

Table 1. Material properties used for thermal stress analysis for boiler header

Temperature (℃)	Yield Strength (MPa)	Young's Modulus (GPa)	Poisson's ratio	Density (kg/m^3)	Conductivity (W/m · ℃)	Thermal Expansion Coff.	Specific Heat (cal/kg · ℃)
25	628	210	0.3	7880	26.0	11.15e-6	402
100	598				26.4	11.30e-6	427
200	578				26.8	11.6e-6	461
400	549				27.6	12.1e-6	528
600	325				26.8	12.65e-6	595

원인 및 경향과 이에 대한 잔여수명평가 기술과 보수 방법 등에 대하여 보고하였다.

본 연구에서는 손상예측을 위한 헤더 주요부위의 응력을 계산하기 위하여, 국내 표준 석탄화력 발전소에서 운용되는 보일러 헤더를 대상으로 기동시의 시간에 따른 온도와 가동압력 조건을 고려한 헤더의 응력 변화를 열응력해석을 통하여 평가하였다. 또한 정상 운전시의 내압 24.5MPa을 고려한 경우의 탄성해석과 탄성-크리프해석을 통하여 크리프 응력이완(stress relaxation)에 의한 응력의 변화를 살펴보았다.

2. 헤더의 해석 모델

본 연구에 이용된 보일러 헤더는 국내 표준 석탄화력발전소의 요소로 헤더의 형상은 Fig. 1에 보인 바와 같이 외경은 381mm, 두께는 49.5mm이고, 헤더와 연결된 스텁튜브(stub tube)의 외경은 45mm, 두께는 6.7mm이다. 총 12개의 튜브가 헤더에 용접으로 연결되어있다. 열응력해석을 위한 금속 재료의 물리적 성질은 참고문헌[2]의 데이터를 이용하여 해석을 수행하였다. 헤더재료는 SA335 P91강이며 온도별 강도값은 Table 1에 나타내었다.

헤더의 유한요소해석 모델은 상용 프로그램인

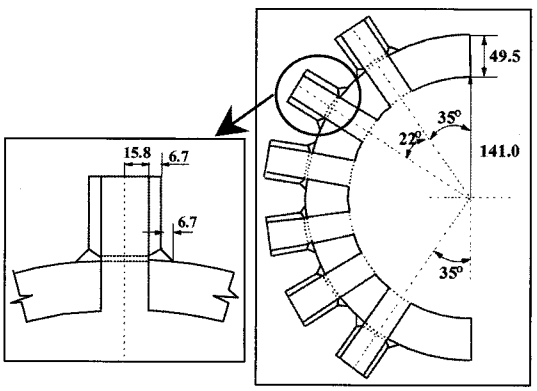


Fig. 1. Schematic diagram of boiler header.

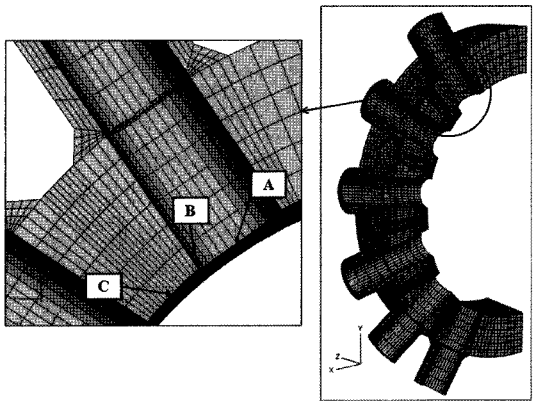


Fig. 2. Finite element model of boiler header.

ABAQUS[5]를 이용하여 3차원 20절점 요소를 사용하였으며, 유한요소 모델 형상은 Fig. 2에 나타내었다. 헤더의 유한요소 모델 형상은 헤더의 두께방향으로 반복되는 주기적 튜브열의 1/4을 모델링 하였고, 스텁튜브의 경우 두께방향으로 4개의 요소가 형성되도록 하였으며, 모델 형성 시 헤더와 스텁튜브는 용접으로 연결되어 있는 것으로 하였다. 스텁튜브의 용접부는 Fig. 2(a)에 보인 바와 같이 용접조건을 따른 형상을 현실적으로 구현할 수 있도록 하였으며 용접부의 요소도 두께방향 4단계로 모델링하였다.

국내 표준 석탄화력 발전소에서 운용되는 보일러의 기동시의의 온도, 가동압력 조건을 Fig. 3과 같이 입력하여 열응력 해석을 수행하였다. Fig. 2와 같이 첫 번째 스텁튜브에서 헤더 내면과 스텁튜브 내면이 만나는 부위에 A지점, B지점에서 열응력을 조사했으며 스텁튜브 사이의 중간지점인 C지점에서 시간에 따른 열응력 변화를 조사하였다.

Fig. 3(a)의 온도-시간 곡선을 보면 초기 상온에서 400℃까지 급격히 온도를 증가시킨 후 일정하게 유지하다가 다시 증가시켜서 정상 가동 온도인 540℃에 도달시킴을 알 수 있다. 이때 헤더의 내압 또한 Fig. 3(b)에 보인 바와 같이 온도-시간 곡선에 상응

되도록 증가시키는 것을 알 수 있다. 탄성-크리프 해석은 다음과 같이 멱급수(power-law)로 표현되는 크리프 식을 이용하여 해석을 수행하였다.

$$\varepsilon_{cr} = D\sigma^n t^m \quad (1)$$

여기서 ε_{cr}은 크리프 변형률(creep strain), t는 시간, D, n 그리고 m은 크리프 변형거동을 설명하는 재료 상수이다.

일반적으로 크리프에 의한 손상 평가를 행하는 경우 탄성해석으로부터 구한 응력은 탄성-크리프 해석 시 탄성응력 재배치 현상에 의해 초기 탄성해석으로부터 얻은 응력분포에서 안정적인 응력 평형상태에 도달하게 된다.

본 논문에서는 탄성-크리프해석 시 기존의 데이터[6]로부터 SA335 P91 강에 대하여 D는 2.51×10^{-28} MPa^{-n}, n은 9.1 그리고 m은 1을 이용하였으며, 응력은 초기 탄성응력 재배치가 이루어진 후에 안정된 상태에 도달하도록 하여, 이로부터 시간에 따른 응력을 구하였다.

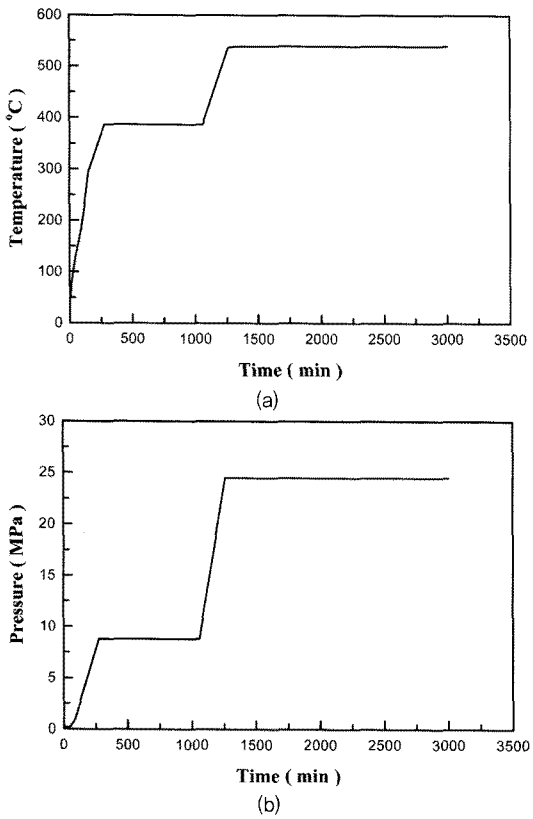


Fig. 3. Start-up operating condition in boiler header.

3. 헤더의 응력해석 결과

Fig. 4는 열응력해석 결과로 A점, B점 그리고 C점에서의 von Mises 응력 분포를 나타낸 그림이다. Fig. 4(a)는 Fig. 3(a)만 고려한 경우이고 Fig. 4(b)는 Fig. 3(a)와 (b)를 함께 고려한 경우를 나타낸 그림이다. 열응력해석 시 보일러 헤더 내부 표면과 스팀 튜브 내부 표면의 온도 조건은 같고, 시간에 따라서 같이 증가한다고 가정하였다.

Fig. 4(a)의 열응력을 Fig. 3(a)의 시간에 따른 온도 곡선과 함께 살펴보면 세 부위 중에서 A부위에서의 응력이 가장 크게 발생됨을 알 수 있다. A부위에서의 시간에 따른 응력 상태를 살펴보면, 초기 상온에서 온도가 증가할 때(Peak I)와 고온에서 정상 운전 상태의 온도로 증가 할 때(Peak II)에 응력이 급격히 증가한 후에 두께 방향으로 온도 분포가 일정해지면 열응력은 없어져서 매우 작은 응력의 상태에 도달하는 것을 알 수 있다. 그리고 그 크기는 초기 상온에서 증가 할 때가 응력 변화가 더

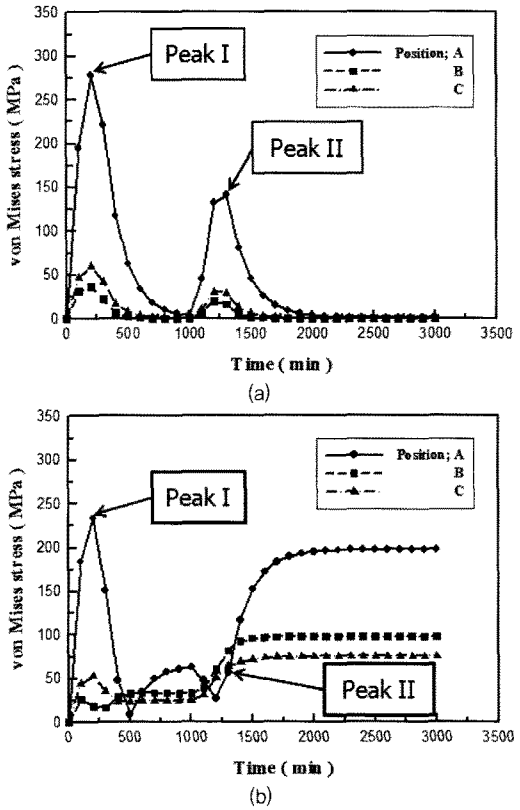


Fig. 4. Von Mises stress distribution obtained by thermal stress analysis (a) without considering internal pressure (b) with pressure.

크다. 이는 초기에는 상온에서의 온도 증가 크기가 고온에서의 온도 증가 크기보다 크기 때문이다.

그러나 Fig. 4(b)에 보인 바와 같이 온도-시간 가동압력-시간을 함께 고려한 해석결과를 보면 온도-시간만을 고려한 열응력 해석 결과와 마찬가지로 A지점에서의 Peak I의 열응력은 가장 크게 발생되었지만, 시간이 지남에 따라 가동압력에 의한 응력이 중첩되어, Peak II의 응력 변화는 없어지고 응력이 감소되었다가 다시 증가하여 내압에 의한 응력만 작용하게 되는 것을 알 수 있다.

응력 변화를 자세히 살펴보기 위하여 Fig. 5에 보인 바와 같이 Fig. 4(b)의 결과로부터 반경(r) 방향, 원주(θ) 방향 그리고 길이(z) 방향의 응력 성분들을 분리하여 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5 (a)의 r-방향의 응력 상태를 살펴보면 A, B 그리고 C의 세 지점 모두 응력변화가 거의 없다. 그러나 Fig. 5(b)의 θ-방향의 응력을 살펴보면 B지점에서는 응력 변화는 크게 나타나지 않으며, C지점은 초기에 압축응력이 발생된 후에 압축응력이 사라짐을 알 수 있다. 그러나 A지점에서의 응력 상태는 초기에 -270 MPa 정도의 급격한 압축응력이 발생한 후에 시간에 따라 가동 압력에 의해 인장응력으로 바뀌어지는 것을 볼 수 있다.

Fig. 5(c)의 z-방향의 응력 상태를 살펴보면 세 지점 모두 초기에 작은 압축응력이 발생된 후에 시간이 지나면서 인장 응력으로 바뀌지만 A지점에서의 θ-방향의 응력 변화가 더 크게 작용한다는 것을 알 수 있다. 이러한 결과로부터 발전소에서의 빈번한 기동/정지 운전은 보일러 헤더에서 반복적인 압축과 인장 응력을 야기해 피로 손상이 누적될 수 있는데, A지점의 경우 그 크기가 상당하여 피로 균열의 발생이 우려된다.

Fig. 6은 시간에 따른 온도와 가동압력을 함께 고려한 경우에 대하여 초기 상온에서 온도가 증가할 때(Peak I) 그리고 Fig. 7은 고온에서 정상 운전 상태의 온도로 증가 할 때(Peak II)의 von Mises 응력 분포와 헤더의 온도 상태를 나타낸 그림이다. 두 그림을 함께 비교해 보면 Peak I과 II에서의 헤

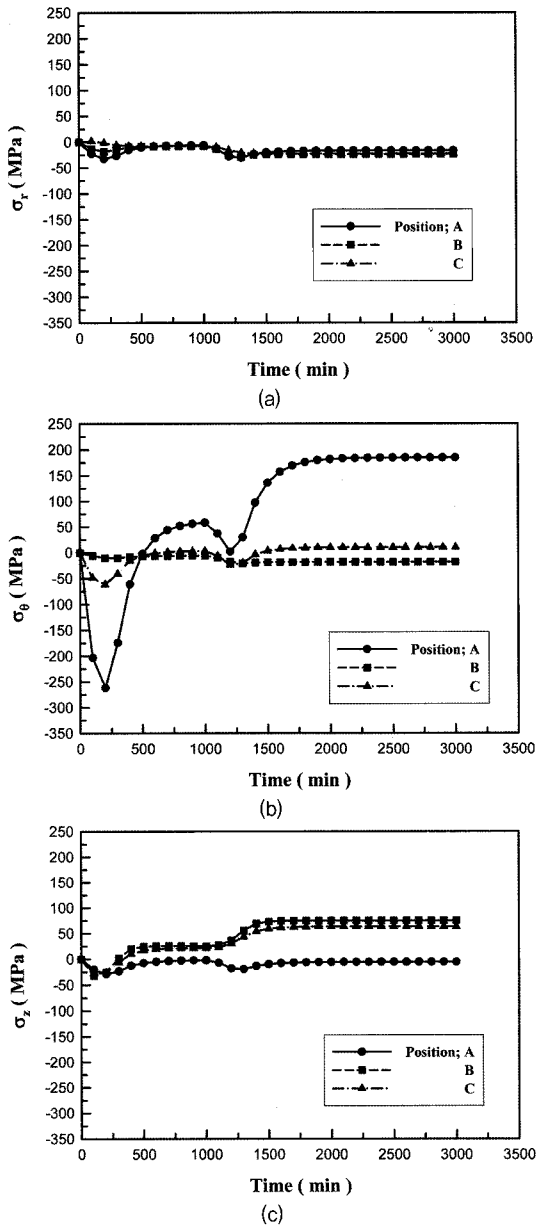


Fig. 5. Stress distribution from thermal stress analysis considered time-operating pressure in boiler header.

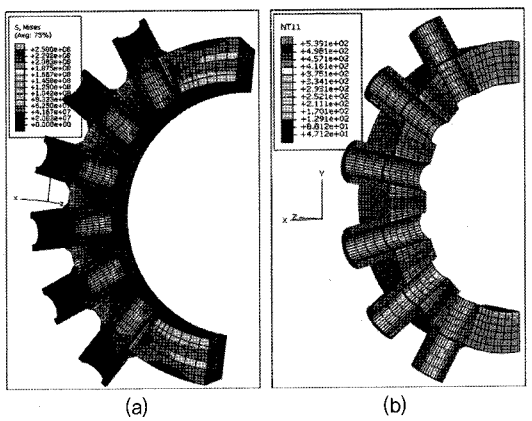
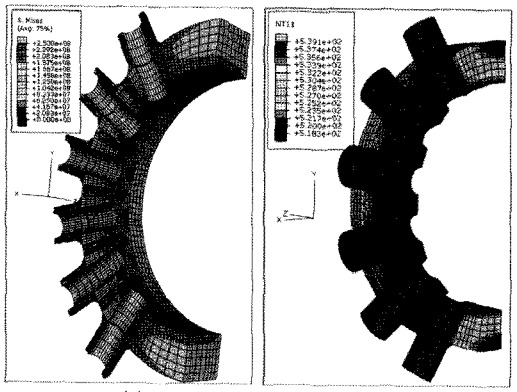


Fig. 6. (a) Von Mises thermal stress and (b) temperature distribution at Peak I obtained from the analysis simulating start-up procedure.



(a) (b)

Fig. 7. (a) Von Mises and (b) temperature distribution at Peak II from thermal stress analysis during start-up operation.

더 표면의 온도 분포는 온도 증가로 인하여 뒤의 경우 온도가 훨씬 높지만, 앞의 경우가 두께 방향의 온도 차이가 더 크므로, 각각에서의 von Mises 응력분포를 비교해 보면 Peak I에서의 응력 상태가 Peak II에서의 응력 상태보다 높게 나타남을 알 수 있다.

정상가동 상태에서 장시간 사용할 경우에 발생되는 크리프에 의한 영향을 살펴보기 위해서 탄성-크리프해석을 수행하였다.

Fig. 8은 탄성-크리프해석을 수행한 결과로써 초기 상태에서 시간에 따라 크리프 변형 발생으로 응력이 현저하게 저하될 때까지의 응력을 나타낸 그림이다. 그림에서 A지점에서의 크리프 응력은 초기에 응력이 급격히 감소 하지만 시간이 흐를수록 응력 감소 크기는 줄어드는 것을 알 수 있다.

Table 2는 세 지점에서의 탄성해석 결과와 Fig. 8의 탄성-크리프해석 결과로부터 얻은 1,000,000

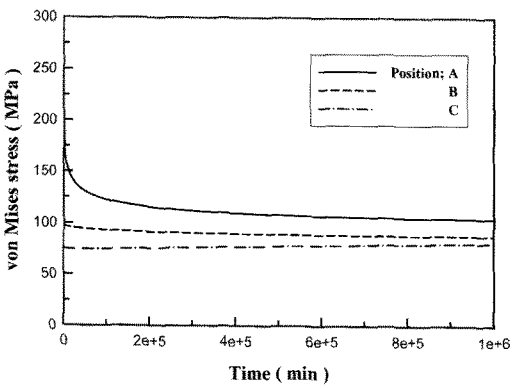


Fig. 8. Stress variation for elastic-creep analysis in boiler header.

Table 2. Results of von Mises stress from elastic and elastic-creep analysis in boiler header

	Position		
	A (MPa)	B (MPa)	C (MPa)
Elastic	197.8	97.5	75.3
Elastic-Creep	100.9	87.6	85.1

min후의 응력을 비교한 것이다. Table 2에서 보면 A지점에서의 응력은 크리프에 의한 응력이완으로 인하여 급격히 떨어지고, B지점에서는 낮은 응력으로 인하여 약간 떨어지나, C지점에서는 응력이 약간 증가함을 알 수 있다.

4. 결 론

열피로 또는 크리프 손상예측을 위한 고온에서의 헤더 응력데이터 해석을 위하여 국내 표준 석탄화력발전소의 보일러 헤더를 대상으로 기동 시의 시간에 따른 온도 상승과 가압 절차를 고려하여 응력해석을 실시하였다. 해석 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 기동 중에 시간에 따른 온도 증가만을 고려한 열응력해석 결과, 초기 온도가 상온에서 증가할 때와 고온에서 정상 운전 상태의 온도로 증가 할 때 헤더 내부 표면에 압축응력이 급격히 증가하였다. 이 중 초기 상온에서 온도가 증가 할 때의 압축응력이 더 크게 나타났다. 따라서 최대 응력에 의한 결함발생 또는 파단은 최고 온도가 아닌 상온에서 1단계 상승 온도 사이의 상대적으로 낮은 온도에서 발생하게 된다.

2) 기동 조건에 해당하는 시간-온도-가동압력을 모두 고려한 해석결과, 초기 상온에서 온도가 상승할 때 생성된 압축응력이 가동 압력에 의해서 인장응력으로 바뀌어 지는 것을 알 수 있다. 따라서 빈번한 기동 및 정지는 보일러 헤더 스텁튜브 연결부에 압축응력과 인장응력을 반복시켜 열피로에 의한 균열을 발생시킬 수 있다.

3) 탄성-크리프해석 결과를 보면 응력 이완현상에 의해서 탄성응력보다 낮게 떨어지며 이를 이용하여 장시간 사용 시 크리프에 의한 수명을 평가할 수 있다.

감사의 글 : 본 과제는 지식경제부의 지원으로 수행한 "에너지자원인력양성사업"의 연구 결과입니다. 또한 이 논문의 일부는 2009년도 중앙대학교 우수연구자 연구비 지원에 의한 것입니다.

참고문헌

1) 엄달선, "열전달계수에 대한 새로운 고찰 및 고-중압 터빈 케이싱 모형의 열응력해석", 대한기계학회 추계학술대회 논문집, pp. 425~429, 2004.
2) 이진상, 백운봉, 윤기봉, "소형 기력발전용 터빈 로터의 수명평가를 위한 열응력해석", 한국에너지공학회지, Vol. 9, No. 3, pp. 184~191, 2000.
3) C.M. Bryan and T. Richard, "Inspection of Power Plant Headers Utilizing Acoustic Emission Monitoring", NDT & E International Journal, Vol. 32, No. 3, pp. 167~175, 1999.
4) I. Nonaka, "Residual Life Evaluation and Repair Procedure for High Temperature Boiler Piping", OMMI, Vol. 2, No. 1, pp. 1~14, 2003.
5) ABAQUS Version 6.5, Hibbitt, Karlsson & Sorensen Inc., 2005.
6) P. Chellapandi and S.C. Chetal, "Influence of Mismatch of Weld and Base Material Creep Properties on Elevated Temperature Design of Pressure Vessels and Piping", Nuclear Engineering and Design, Vol. 195, pp. 189~196, 2000.