

저온의 이차측 급수에 의한 SMART 증기발생기 노즐헤더 열충격 연구

A Study on the Thermal Shock of SMART Nozzle Header by Low Temperature FeedWater

김용완, 이환수, 김종인, 장문희

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150번지

요 약

일체형원자로에서 증기발생기는 고온의 원자로에 내장되므로 이차측 급수에 의해 열충격 하중을 받을 수 있다. SMART의 증기발생기는 12개의 카세트로 구성되어 있으며 3개의 카세트가 합쳐서 하나의 섹션을 형성하는 구조로 설계되어 있다. 이차측 섹션은 각각 격리될 수 있도록 독립적인 밸브가 있다. 이차측이 격리되어 있다가 순간적으로 저온의 이차측 급수가 공급되면 증기발생기가 높은 열충격을 받게된다. 증기발생기의 노즐헤더에 대한 열과도응답을 조사하기 위해 구성된 열피로시험루프에서 실험을 이차냉각재를 순간적으로 순환시키는 실험을 수행하였다. 이차측밸브를 격리한 상태에서 밸브를 열고 저온의 급수를 공급하여 온도와 스트레인을 측정하였다. 또한, 상용유한요소해석프로그램인 ABAQUS를 사용하여 과도를 모사하는 수치적인 해석을 병행하였다. 이차측에 저온의 급수를 갑자기 주입하는 열충격에 대해 증기발생기 노즐헤더는 해석결과 안전함을 보였으며 실험결과에서도 구조적인 손상을 야기하지 않았다.

Abstract

The steam generator to be installed in the integral reactor may be subjected to secondary side thermal shock. The steam generator of SMART is composed of 12 steam generator cassettes. These cassettes are grouped into 4 independent sections. A section can be isolated depending on the reactor operation strategy. An instantaneous supply of low temperature feedwater into the isolated section may introduce a thermal shock to the steam generator structural elements. These effects on the SMART steam generator nozzle have been studied using the experimental method and the finite element simulation. The results show that the secondary side thermal shock does not cause any structural damage on the steam generator cassette from the experiment. Also, it has been shown that the stress state is within the allowable range.

1. 서론

일체형원자로 SMART는 증기발생기는 치수가 결정되고 형상설계가 수행되었다. 그 과정에서 주요 부위에 대한 열해석, 응력해석을 수행함으로써 상세 설계단계에서의 과도한 치수변경을 미연에 방지하고자 하는 연구가 수행되었거나 진행되고 있다[1-4]. 그 중에서 노즐헤더와 같이 형상이 기하학적으로 복잡하고 열전이 조건이 극심하여 열적 충격을 가질 가능성이 높은 경우에는 이론적인 해석을 수행하기 어렵다. 따라서 통상적으로 실험적인 방법과 수치해석적인 방법을 사용하게 되는데, 실험적인 방법의 경우 실제 부하되는 하중조건을 모사하면서 예측하지 못했던 경향이나 문제점을 발견하거나 설계대상에 대한 실제 거동을 평가할 수 있는 반면에 실험은 여러 가지 제약조건이 있다. 이에 비해 수치해석적 방법은 해석의 재현성이 뛰어나며, 여러 가지 조건에 대해 쉽게 접근할 수 있으나 요소종류와 사용하는 코드에 따라 결과에 차이를 보일 수 있으며, 해석모델의 단순화로 인하여 오차가 발생할 수 있다. 이러한 측면을 고려하여 해석에서 접근 할 수 없는 부분을 연구하기 위해서 노즐급수헤더부위에 대해 설계와 동일하게 제작하여 실험을 수행하였다. 실험루프를 설계하고 제작하였으며, 이를 이용하여 기동 및 정지 운전을 모사한 실험을 수행하여 이미 발표하였다[5].

원자로에 내장되는 일체형원자로에서 증기발생기는 일차측에 의한 열충격 뿐 만 아니라 이차측 급수에 의해 심한 열충격을 받을 수 있다. SMART의 증기발생기는 12개의 카세트로 구성되며 3개의 카세트가 합쳐져서 하나의 섹션을 구성한다[6]. 운전 중에 전열관의 누설이 있을 때 하나의 섹션을 격리하여 운전 할 수 있다. 격리된 섹션에서 이차측 급수를 순환시키지 않고 있는 상황에서 갑자기 저온의 이차측 급수를 공급하면 매우 큰 열 충격을 받게된다. 이러한 상황은 증기발생기 노즐헤더가 받게되는 가장 큰 열충격이며 기존의 분리형원자로에서는 볼 수 없는 현상이다.

본 연구에서는 이러한 거동을 실험적으로 모사하여 증기발생기 이차측을 격리하고 있다가 순간적으로 이차측 급수를 설계속도로 순환시켰을 때의 증기발생기 거동을 조사하고 실험 후의 건전성을 조사하였다. 현재까지 노즐급수헤더의 열거동을 조사하고 피로해석을 수행한 연구는 주로 일차측의 과도를 중심으로 연구한 것인데 반해 이 연구는 증기발생기가 원자로에 내장되어 있음으로 인해 그 효과가 크게 나타날 수 있는 이차측의 열충격을 모사한 연구에 초점을 맞추었다. 또한, 유한요소해석 방법으로 상용프로그램인 ABAQUS를 사용하여 동일한 상황을 모사하여 해석을 수행하였다[7]. 그러나 3차원 해석결과는 ASME에 바로 적용할 수가 없으므로 ASME기준에 따르지는 않았다[8,9].

2. 저온 급수 주입 실험

가

[5].

가

가

280

가

가 180

30

30

30

AA

HH

8

120°

3

가

1

2

가

24

8 가

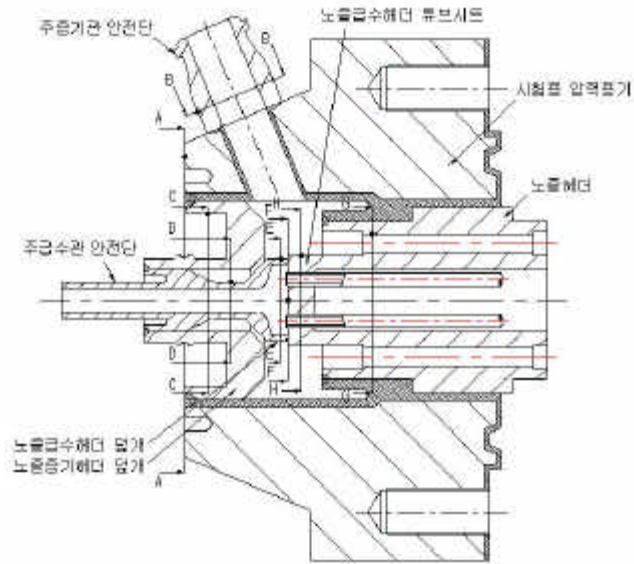


그림 1 노즐헤더부위 설명



그림 2 노즐헤더 실험장치

3

280

280

가

가

3(b)

TE003 TE004

가 160

가

가

가

가

가

TE003, TE004

가

가

가

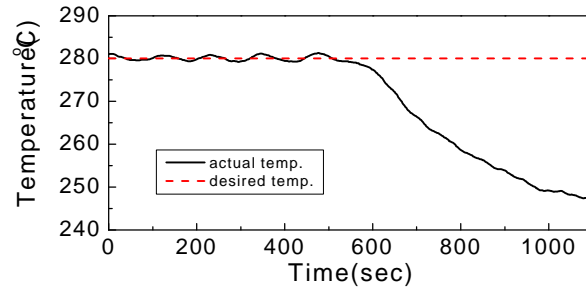
3(a)

30

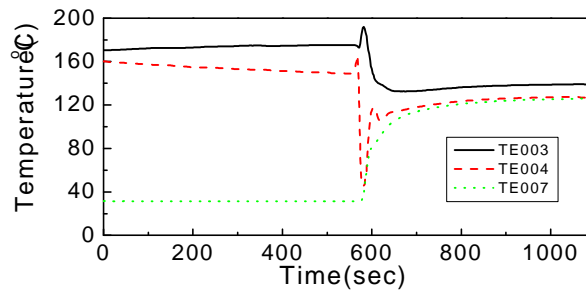
270 /hr

250

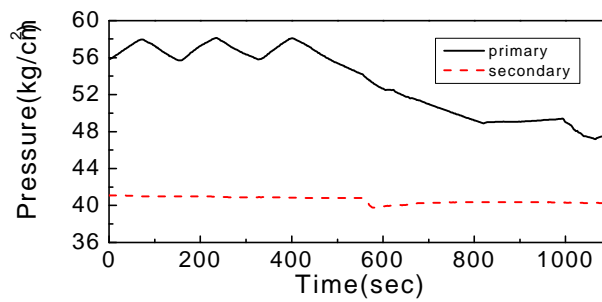
가



(a) Temperature of the primary coolant



(b) Temperature of the secondary coolant



(c) Pressure of the primary and secondary coolant

3

4
T-6 T-9
가
130
가 AA
CC 가 400 ~ 500 $\mu\epsilon$, BB 가
900 $\mu\epsilon$ 가
가 .

123MPa 3Sm 339MPa

AA

82MPa, BB

267MPa, CC

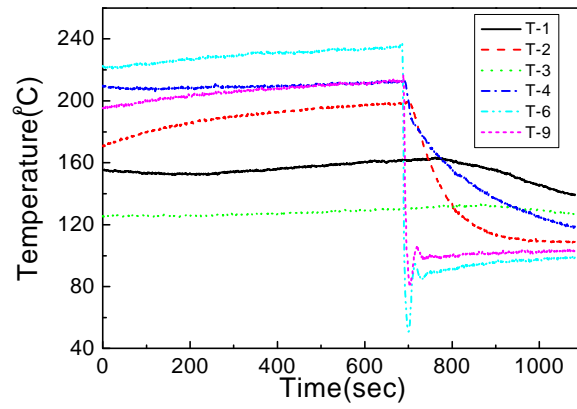


그림 4 구조물의 온도변화

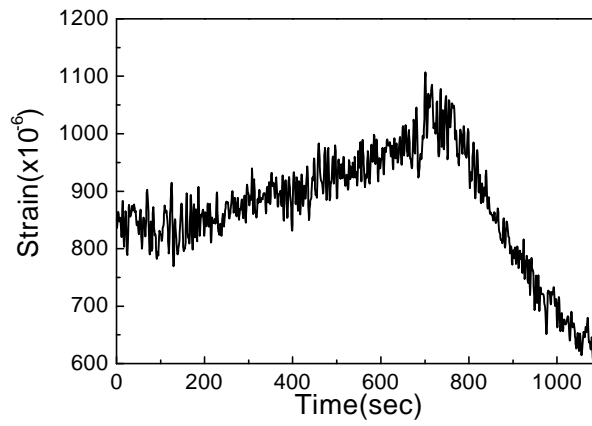


그림 5 AA위치의 스트레인 변화

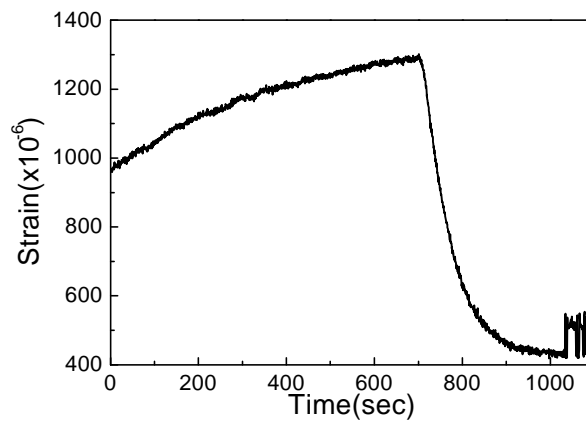


그림 6 BB 위치에서의 스트레인변화

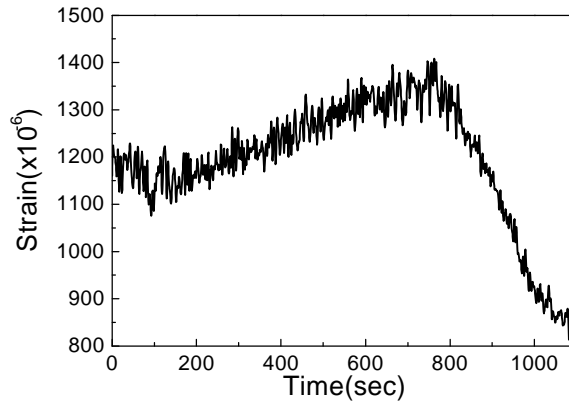
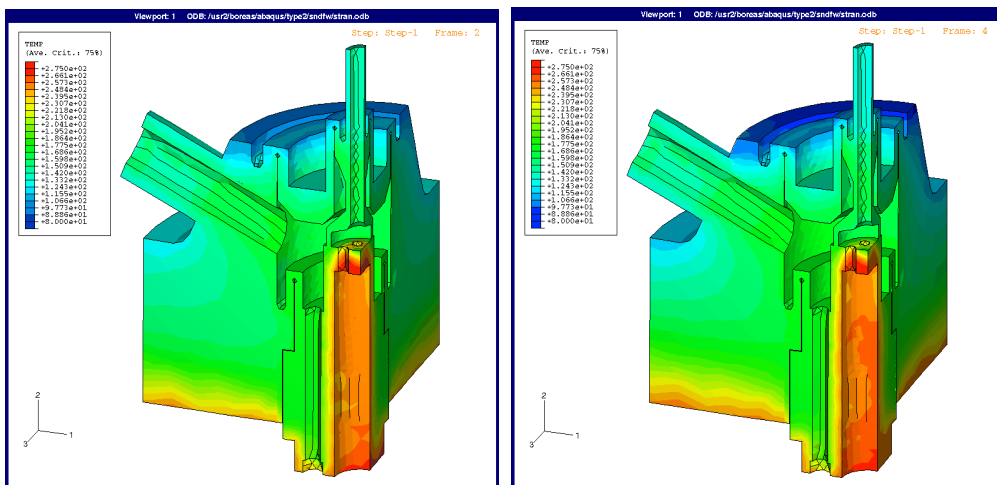


그림 7 CC 위치에서의 스트레인 변화

3회에 걸친 실험도중과 실험을 수행 한 후에 육안으로 감지할 수 있는 누설은 없었으며 실험후에 다시 가압을 했을 때에도 누설이 없었다. 이로부터 현재 SMART 증기발생기의 노즐헤더는 이차측 열충격을 받아도 구조적인 건전성을 유지함을 알 수 있었다.

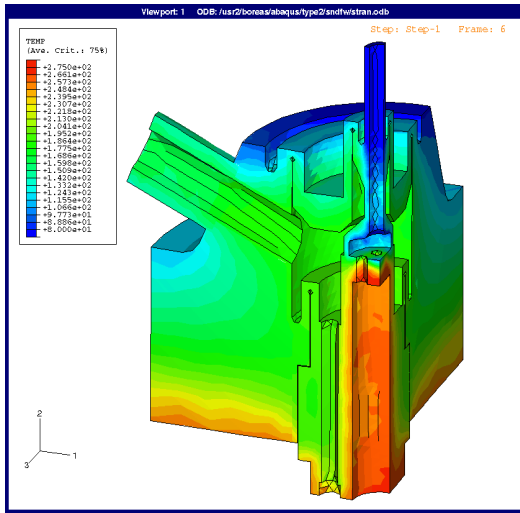
3. 유한요소해석

노즐헤더를 사분의 일로 모델링한 후 ABAQUS를 사용하여 과도 천이 해석을 수행하였다. 노즐헤더에서 원자로의 노즐부위를 제외한 나머지 부분은 전부 STS321로 설계되어 있다. 요소의 수는 169723이며 절점의 수는 35089이다. 여러 가지 모델링을 한 후 해석에 사용한 워크스테이션의 용량이 허용하는 최대의 모델링을 사용하였다.

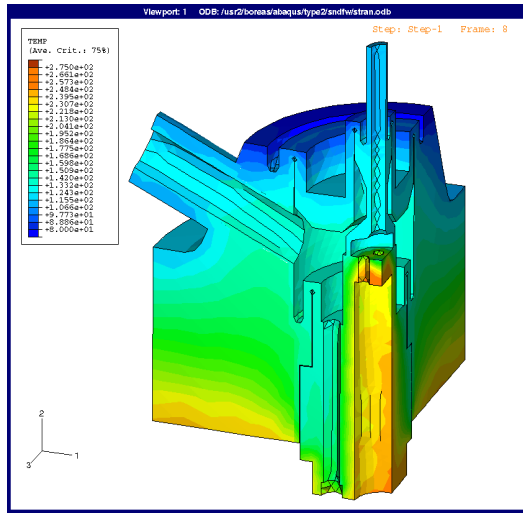


(a) t=200sec

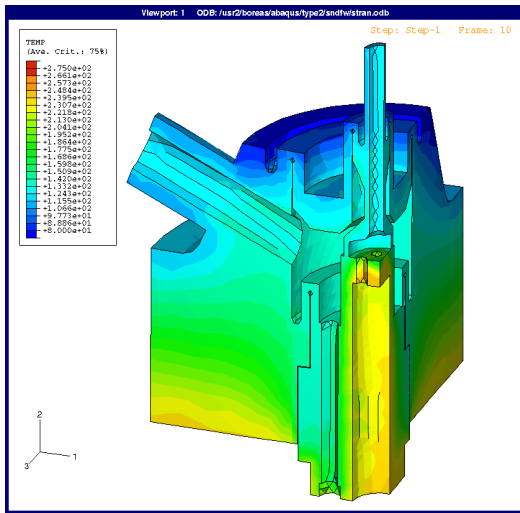
(b) t=400sec



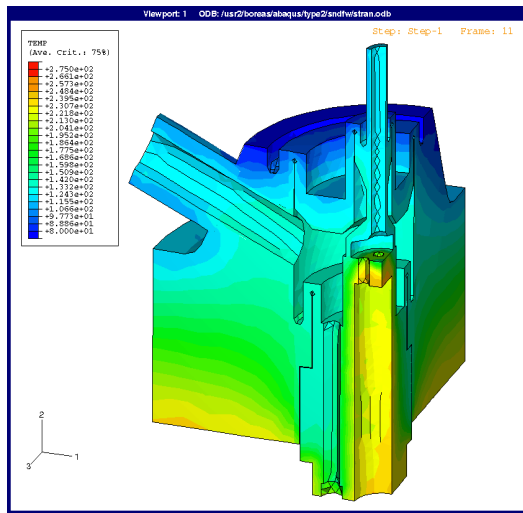
(c) t=600sec



(d) t=800sec



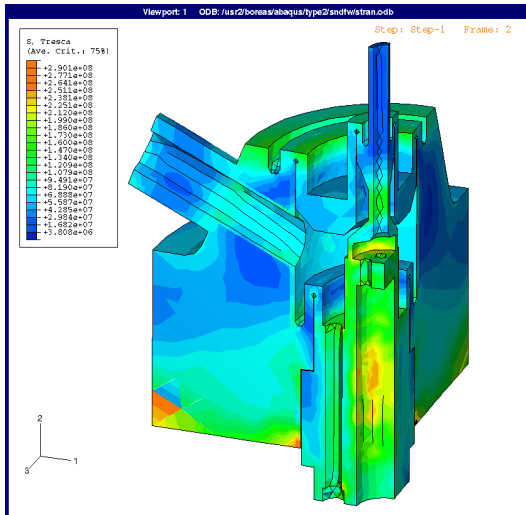
(e) t=1000sec



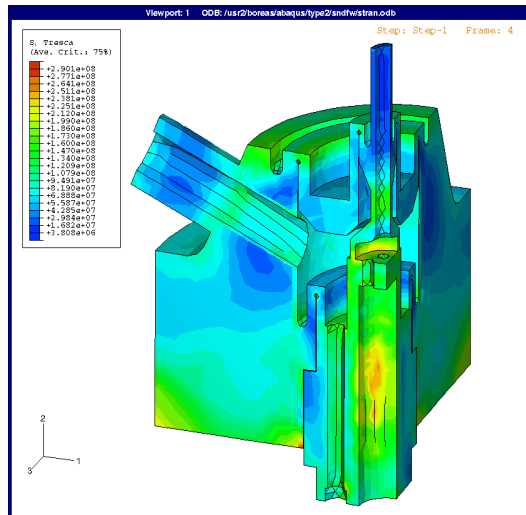
(f) t=1088sec

그림 8 이차축 급수를 주입했을 때 각 부위의 온도분포

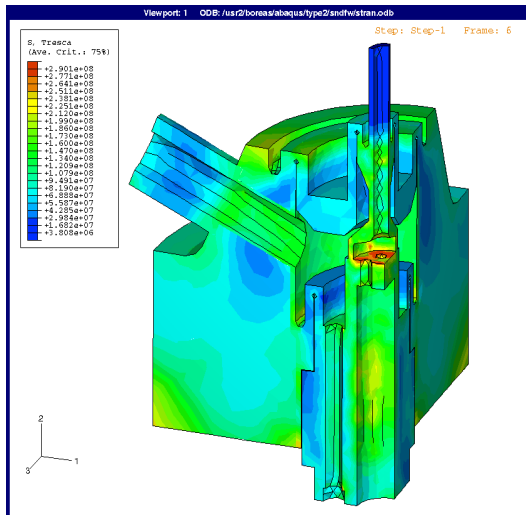
0 , 280 , 600 , 3
 가 , 가 , 가 , 3
 , 4 , 9
 Tresca ,
 600 가 가
 268MPa , 가



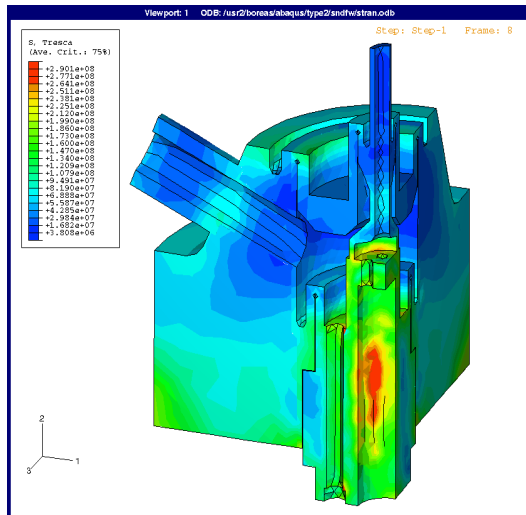
(a) t=200sec



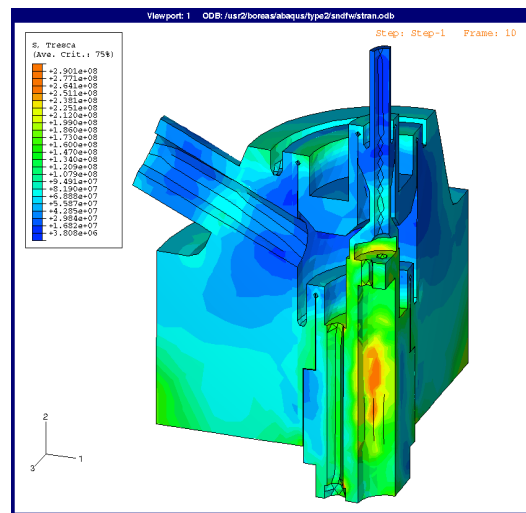
(b) t=400sec



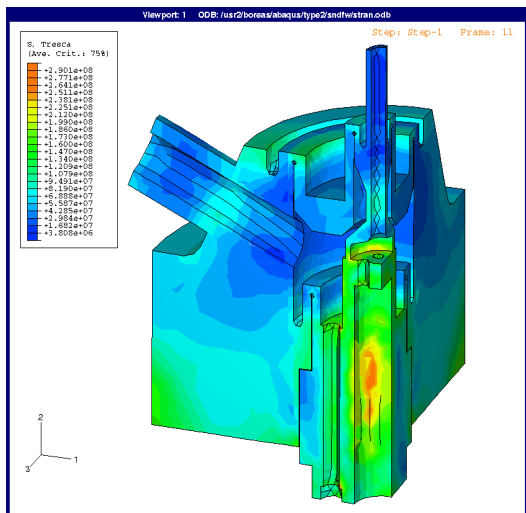
(c) t=600sec



(d) t=800sec



(e) t=1000sec



(f) t=1088sec

그림 9 이차축 급수를 주입했을 때 각 부위의 Tresca 응력

가 . 가 ,

4. 결론

일체형원자로 SMART의 증기발생기에 대해 이차측 열충격하중을 가하고 노즐헤더에 대한 열응답을 열피로시험루프에서 실험하였다. 이차측밸브를 격리한 상태에서 밸브를 열고 저온의 급수를 공급하여 온도와 스트레인을 측정하였다. 또한, 상용유한요소해석프로그램인 ABAQUS를 사용하여 과도를 모사하는 수치적인 해석을 수행하여 비교하였다. 실험 및 해석을 통해 이차측 열충격시 증기발생기 노즐헤더에 생성되는 응력은 허용범위내임을 보였다. 설계조건보다 저온의 이차측 열충격실험에 대해서 노즐헤더가 구조적 건전성을 유지함을 보였다.

후기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. 김용완 외, A Comparative Study for SMART Steam Generator Sizing Based on ASME and Russian Standard, 2000 한국원자력학회 추계학술발표회, 2000.10.27.
2. 김용완 외, CAE를 활용한 증기발생기 부품 피로해석, 2002 한국원자력학회 춘계학술대회, 2002.5.23
3. 김종인 외, 일체형원자로 주기기 설계기술개발, KAERI/RR-2200/2001.
4. 김용완 외, 증기발생기 기본설계보고서, KAERI/TR-2127/2002.
5. 이환수 외, "The Development of Thermal Fatigue Test Facility to Evaluate Fatigue Behavior for Nozzle Header of Once-Through Helical Steam Generator," 2001 한국원자력학회 춘계학술대회, 2001.5.25
6. 김용완 외, "SMART 증기발생기 카세트 설계," 2001 한국원자력학회 추계학술대회, 2001.10.26.
7. ABAQUS/Standard User's Manual, Version 6.1, HKS
8. I. G. Hollinger and J. Hechmer, "Three Dimensional Stress Criteria-Summary PVRC Project," *Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol.122, 2000.
9. T.P. Paster and J. Hechmer, "ASME Task Group Report in the Primary Stress," *Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol.119, 1997.