

관류식 나선형 증기발생기 노즐헤더의 열전이 거동모사 실험

**An Experimental Simulation for Thermal Transient Behavior of  
Once-Through Helical Steam Generator Nozzle Header**

이환수, 김용원, 김종인  
한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150번지

**요 약**

일체형 원자로에 내장되는 증기발생기의 노즐헤더는 저온의 이차냉각재와 고온의 일차냉각재를 동시에 접하고 있어, 원자로전체에서 가장 크고 빈번한 열하중을 받게된다. 본 연구에서는 원자로 운전모드 중 기동 및 정지모드를 적용한 노즐헤더의 열전이 거동을 실험적인 방법과 해석적인 방법으로 평가하였다. 노즐헤더의 열전이 거동에 대해 실험적인 결과를 얻는 것이 일차적인 목적이며, 해석코드 및 모델과의 차이를 조사하는 것이 본 연구의 이차적인 목표이다. 열전이 실험장치는 일차계통, 이차계통, 순환용수공급 계통, 전기계장제어 계통으로 나뉘며, 설정된 운전모드에 대해 요구되는 일·이차냉각재의 온도와 압력을 조성하도록 하였다. 실험을 위해 노즐헤더에는 스트레인게이지와 열전대가 설치되어 구조물의 온도와 변형율을 측정하고, 실험장치 곳곳에 온도센서를 설치하여 계통의 유체온도를 측정하였다. 해석적인 열전이 거동모사는 상용유한요소 해석코드인 I-DEAS를 사용하였고, 실험에서 얻어진 유체온도와 유체 압력을 입력으로 하여 계산하였다. 실험과 유한요소해석으로 얻어진 결과는 절대값에 다소 차이가 있었으나 경향은 잘 일치하였다.

**Abstract**

Nozzle header of SMART steam generator is subjected to severe thermal transient loading induced by the temperature difference between primary coolant and secondary coolant. In this study, thermo-mechanical analysis of the nozzle header was performed using the experimental method and the finite element method. The thermo-hydraulic parameters of the primary and secondary system were controlled according to the operation mode programmed in the test computer. Strain gages and thermocouples attached at the highly stressed region have monitored the thermo-mechanical behavior of the nozzle header. Also, the transient behavior of nozzle header was simulated utilizing commercial finite element code. The fluid temperature and the pressure obtained from test facility have been used for the input of finite element analysis. Results of finite element analysis have shown a good agreement in trend with those of experiment.

# 1. 서론

SMART 증기발생기는 일차냉각재가 전열관 내부를 흐르고, 일차냉각재가 전열관 외부를 지나가는 방식이다[1, 2]. SMART 증기발생기의 노즐헤더는 노즐급수헤더와 노즐증기헤더의 역할을 동시에 하고 있어, 저온의 일차냉각재가 급수되는 동시에 급수된 냉각재가 전열관을 지나 증기가 되어 다시 노즐헤더를 통해 배출되는 구조를 가지고 있다. 따라서 일체형원자로의 부품 중 가장 큰 열하중을 받게되며, 일차냉각재의 공급압력인 5MPa와 일차냉각재가 원자로 내부로 순환하는 압력인 15MPa 사이의 압력차로 인한 변형이 동시에 진행된다. 따라서 노즐헤더의 운전안정성과 구조적 건전성을 확보하기 위하여 원자로 운전 중 발생하는 모드에 대하여 열전이 거동을 살펴볼 필요가 있다. 노즐헤더와 같이 형상이 기하학적으로 복잡하고 열전이 조건이 극심하여 열적 충격을 가질 가능성이 높은 경우에는 이론적인 해석을 수행하기 어려우므로 실험적인 방법과 수치해석적인 방법을 사용한다. 실험적인 방법의 경우 실제 부하되는 하중조건을 모사하면서 예측하지 못했던 경향이나 문제점을 발견하거나 설계대상에 대한 실제 거동을 평가할 수 있는 반면에 센서에서 노이즈의 간섭, 계획에서 크게 벗어난 실험이 불가능한 점 등의 단점을 가지고 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 인한 오차와 같은 단점을 가지고 있다. 본 연구에서는 증기발생기 노즐헤더의 열전이 거동을 평가하기 위해 두가지 방법을 모두 사용하였으며, 실험적으로 거동해석을 하고 이에 대해 해석코드와 모델을 검증하도록 하였다. 열전이 거동 조건으로 기동 및 정지모드에 대해서 실험과 유한요소해석을 수행하였으며, 각각의 결과를 비교·평가하였다.

## 2. 노즐헤더의 열전이실험

### 1) 실험장치의 구성

실제 노즐헤더에 인가되는 조건을 만족시킬 수 있는 노즐헤더의 열전이 거동을 관찰하기 위하여 열전이 실험장치를 제작하였다[4]. 열전이 실험장치는 각 계통별로 일차계통, 이차계통, 순환용수

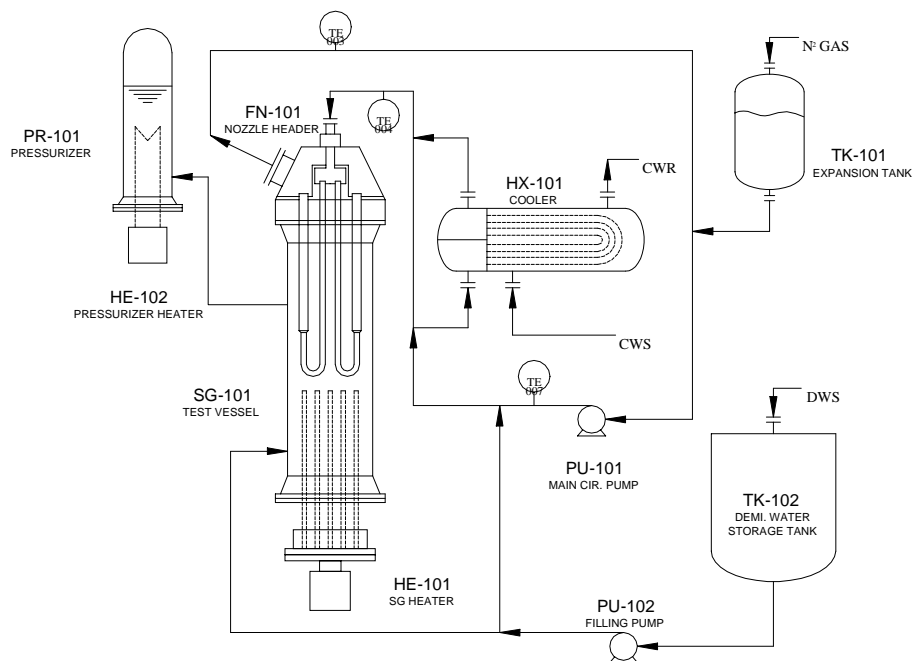


그림 1. 열전이 실험장치의 개요도

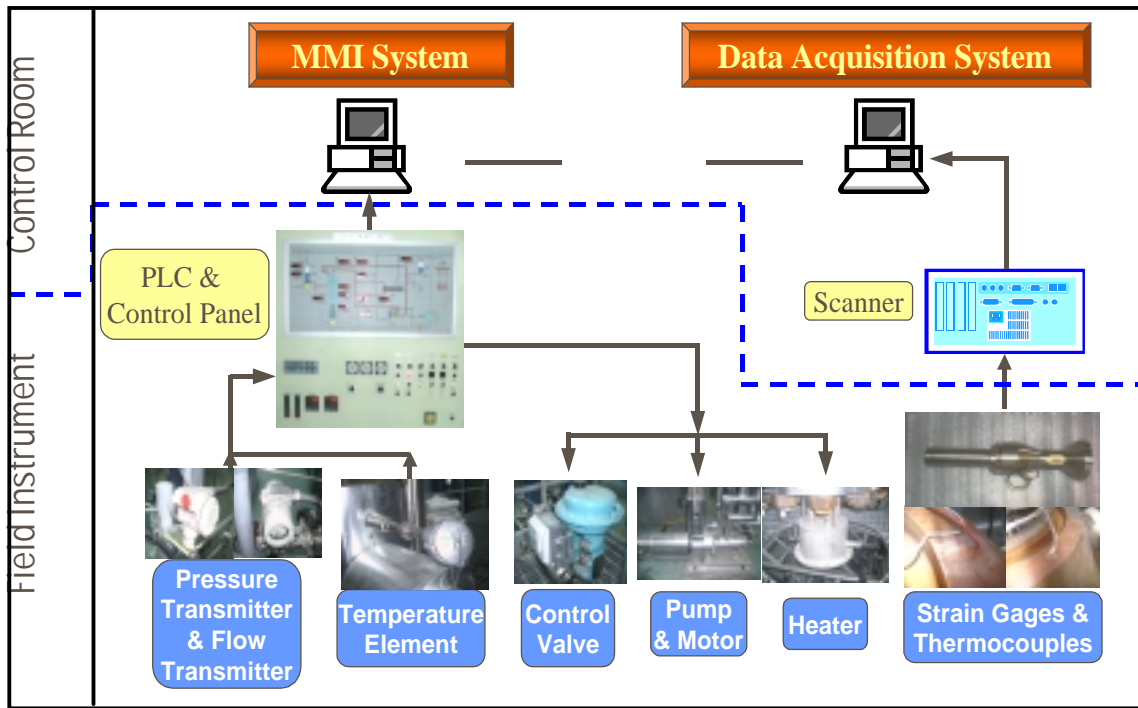


그림 2. 제어계측장비의 구성

계통, 전기계장제어 계통으로 나누어진다. 일차계통은 히터(HE-101, HE-102)와 가압기(PR-101), 그리고 노즐헤더를 포함한 실험용 압력용기(SG-101)로 구성되며, 일차냉각재의 온도와 압력을 조절한다. 이차계통은 노즐헤더(FN-101) 및 급수관, 증기관, 순환펌프(PU-101), 열교환기(HX-101), 그리고 압력조절용 탱크(TK-101)로 이루어져 있다. 이차계통은 일차냉각재의 온도가 일정온도에 다르면 이차냉각재를 순환시켜 급수관과 증기관에서 열교환이 이루어진다. 순환용수공급 계통은 순환용수로 사용되는 순수(demineralized water)를 저장, 공급하는 순수저장탱크(TK-102)와 순수공급펌프(PU-102) 그리고 이차계통의 압력을 유지하기 위해 질소를 팽창탱크(TK-101)에 공급하는 질소공급용기로 구성된다. 전기계장제어 계통은 열천이 실험장치를 구성하고있는 펌프, 히터, 각종 제어장치의 전원공급을 맡는 전기제어 계통과 열천이 실험장치에 장착되어있는 센서와 신호처리를 위한 장비, 그리고 이를 구동하고 통제하는 프로그램으로 구성되어있는 계장제어 계통으로 나눌 수 있다. 열천이 실험장치에 대한 개요를 그림 1에 도시하였다. 본 실험에 사용된 장비는 실험부위만 교체하면 다양한 부품에 대해 열피로시험을 수행할 수 있으므로 일체형원자로에 사용되는 다른 부품에 대한 실험에도 적용할 수 있다.

열천이 실험장치에는 냉각재의 온도, 노즐헤더의 온도와 변형률과 같은 실험 측정치를 얻고 각 장비의 운전상황을 파악하기 위한 센서가 장착된다. 그림 2에 센서로부터 데이터를 얻는 과정과 제어장치에 의한 각종기기의 구동을 개략적으로 나타냈다. 노즐헤더에 부착된 스트레인게이지와 열전대를 제외한 나머지 센서에서 나온 신호는 PLC를 거쳐 모니터링 시스템(MMI System)으로 전송되어 각종 기기의 운전상태 및 데이터를 확인, 저장할 수 있다. 또한 스트레인게이지는 고온·고압용으로 1축방향의 변형율을 측정하며, 노즐헤더 안팎에서 작동상황에 따라 노즐헤더에 걸리는 변형율을 측정하여 신호획득장치에 전송하게 된다. 그림 3은 노즐헤더의 단면도와 실험장비에 장착된 사진이다. 노즐헤더는 STS321로, 압력용기는 SA508-Grade 4로 제작되었다. 그림 3의 단면도에는 스트레인게이지와 열전대가 장착되는 부위를 표시하였으며, 스트레인게이지는 각 부위에 120° 간격으로 3개씩, 열전대는 각 부위에 1개씩 부착된다.

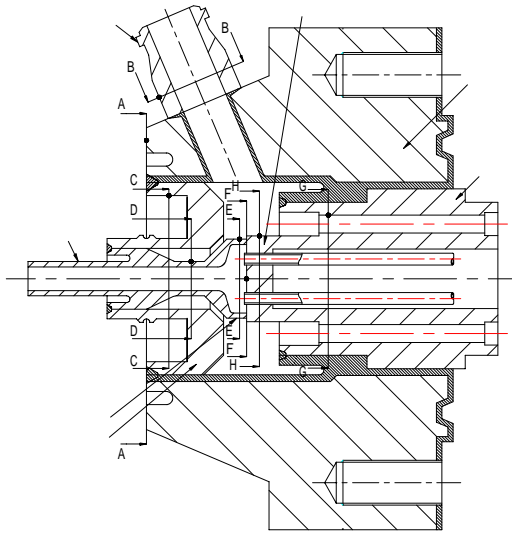
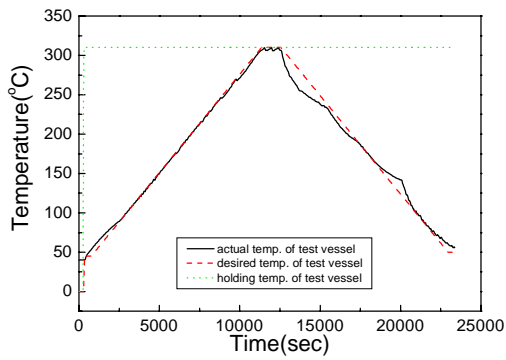


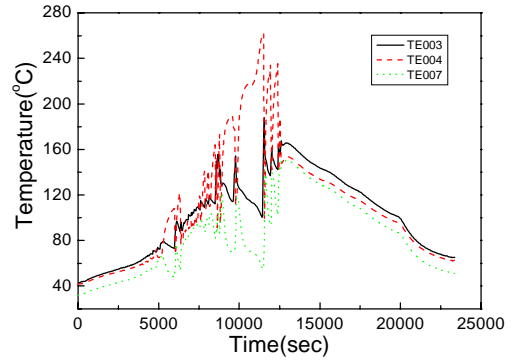
그림 3. 증기발생기 노즐헤더

## 2) 기동 및 정지모드의 열천이 실험

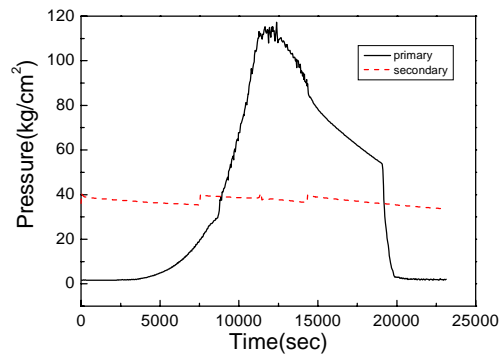
열천이 실험은 상용원자로의 운전전략 중 가장 기본적인 기동 및 정지모드에 대하여 수행하였



(a) Temperature of the primary coolant



(b) Temperature of the secondary coolant



(c) Pressure of the primary and secondary coolant

그림 4. 기동 및 정지모드의 열천이 실험

다. 실험장치는 실험모드에 대한 수치(초기온도, 유지시간, 상승정지온도, 상승·하강 온도구배등)를 입력하면 자동으로 운전된다. 그림 4는 기동 및 정지모드에서 일차측, 이차측의 유체온도변화와 압력변화를 도시한 것이다. 상승정지온도인 310℃에서 온도를 유지하기 위하여 히터와 이차측 순환펌프가 반복적으로 작동하여 일차측에는 5℃정도의 변동이 발생하였으나 이차측에서는 온도변동폭이 크게 작용하였다. 이는 이차측과 접하고있는 열전대에 영향이 그대로 나타난다. 또한 일차냉각재의 온도하강 시 초기에는 자연냉각이 되면서 냉각이 급격하게 진행되다가 점차 안정화되어 정지모드의 설정온도곡선을 따라가게 되며, 120℃부근에 다다르면 외부 및 이차냉각재와의 온도차가 많이 나지 않아 냉각속도가 느려지는 현상이 나타난다. 이때는 일차측에 저온의 순수를 주입하여 온도를 제어하게 된다. 이차냉각재의 온도는 온도센서(TE003, TE004, TE007)에 의해 측정되는데, 각 온도센서의 위치는 그림 1에 표시되어있다. 이차냉각재의 온도는 노즐헤더와 떨어진 거리, 입구와 출구, 순환펌프의 가동여부를 고려하여야 한다. TE004의 경우 노즐헤더의 이차측 입구에 장착되어있고, 거리도 다른 센서에 비해 가깝게 위치한다. 따라서 일차측 온도가 310℃일 경우 순환펌프가 가동되지 않을 땐 240℃까지 올라가지만 순환펌프가 가동됨에 따라 큰 폭의 변화를 갖는다. 일차측 압력은 온도가 올라감에 따라 일차냉각재가 과열증기로 되지 않도록 가압

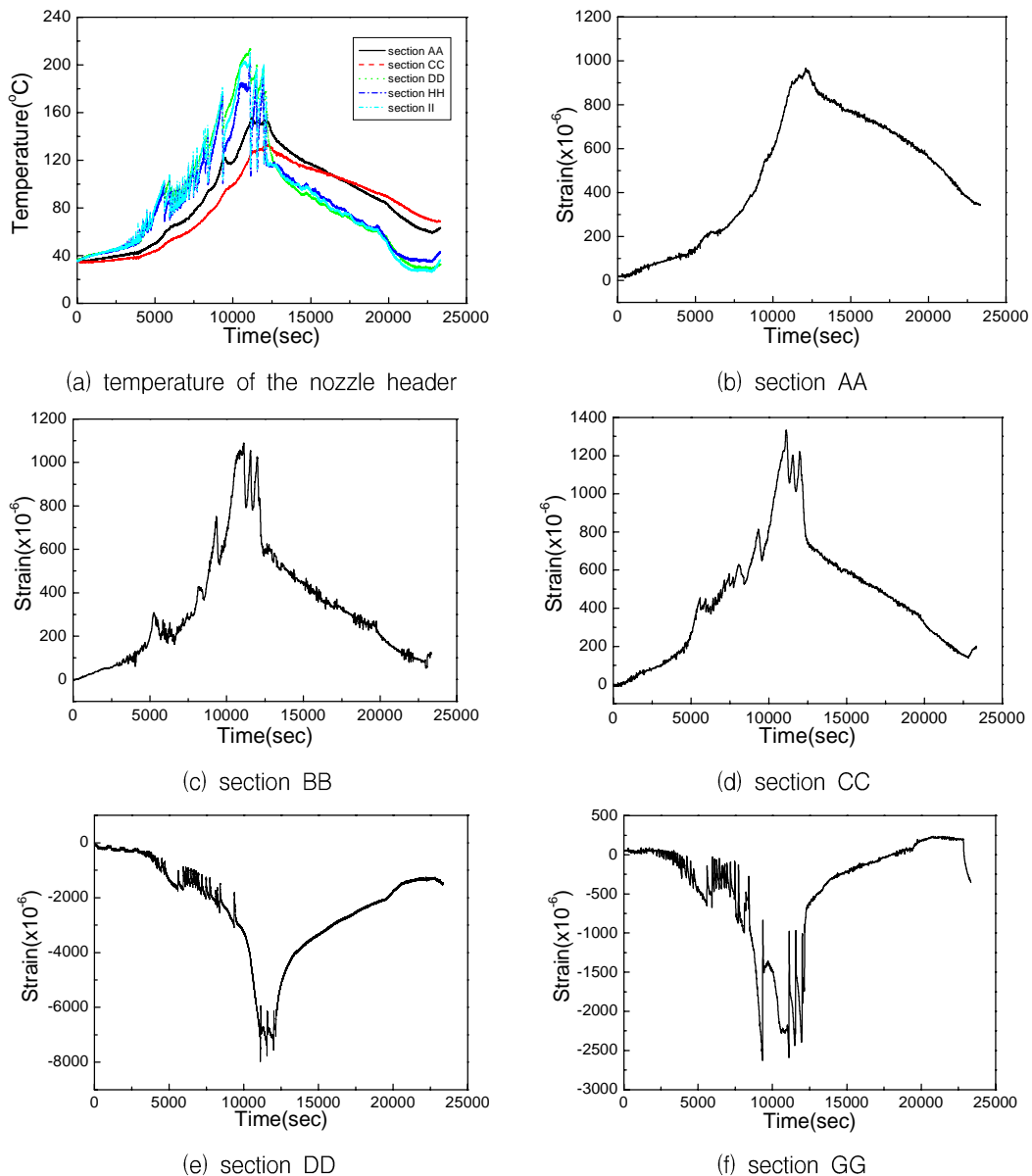


그림 5. 노즐헤더 각 부위의 변형율과 온도

기에서 압력을 조절하고, 이차측은 초기에 질소가스를 충전하여  $40\text{kg}/\text{cm}^2$ 으로 설정한다.

그림 5는 노즐헤더 각 부위에서의 온도와 변형율을 시간에 따라 도시한 것이다. 그림 5(a)는 노즐헤더에서의 온도를 나타내고 있는데 센서가 노즐헤더 외부에 장착된 단면 AA와 단면 CC를 제외하고는 비슷한 거동을 보이고 있으며, 일차냉각재의 온도가  $310^\circ\text{C}$ 일 때 노즐헤더는  $180^\circ\text{C}$ 에서  $230^\circ\text{C}$ 의 온도분포를 나타내며, 순환펌프가 구동될 때의 변화도 이차냉각재의 온도와 마찬가지로 큰 폭으로 변화함을 볼 수 있다. 그림 5(b)~(f)는 노즐헤더에서의 변형율의 변화를 나타내었으며, 각 단면에 장착된 3개의 스트레인게이지 중 1개의 데이터를 도시하였다. 단면 EE, FF, HH는 데이터가 슬립이 일어나 배제하였다. 슬립이 일어나는 원인은 하중의 급격한 변화나 센서부착위치 또는 연결부에서 노이즈가 간섭하여 발생된다. 실험에 의해 얻어진 변형율은 일차냉각재의 온도  $310^\circ\text{C}$ 일 때 노즐헤더 각 부위에서의 인가되는 응력으로 계산하여 표 2에 나타내었다.

### 3. 노즐헤더의 유한요소해석

열침이 실험결과를 검증하기 위해 상용유한요소 해석코드인 I-DEAS Master Series 8을 사용하여 노즐헤더 각 부위에 인가되는 응력을 계산하였다. 유한요소해석을 하기 위해 대칭성을 고려하여 노즐헤더를 1/4모델로 구성하고, 선형사면체 요소를 사용하여 체눈을 형성하였다. 유한요소해석은 열전달 해석, 열응력해석, 압력하중에 의한 해석을 순차적으로 진행하였다. 일반적으로 열응력은 구조물 내에 비 선형적인 온도구배를 갖거나 혹은 변형을 구속하는 외부조건에 의해 발생

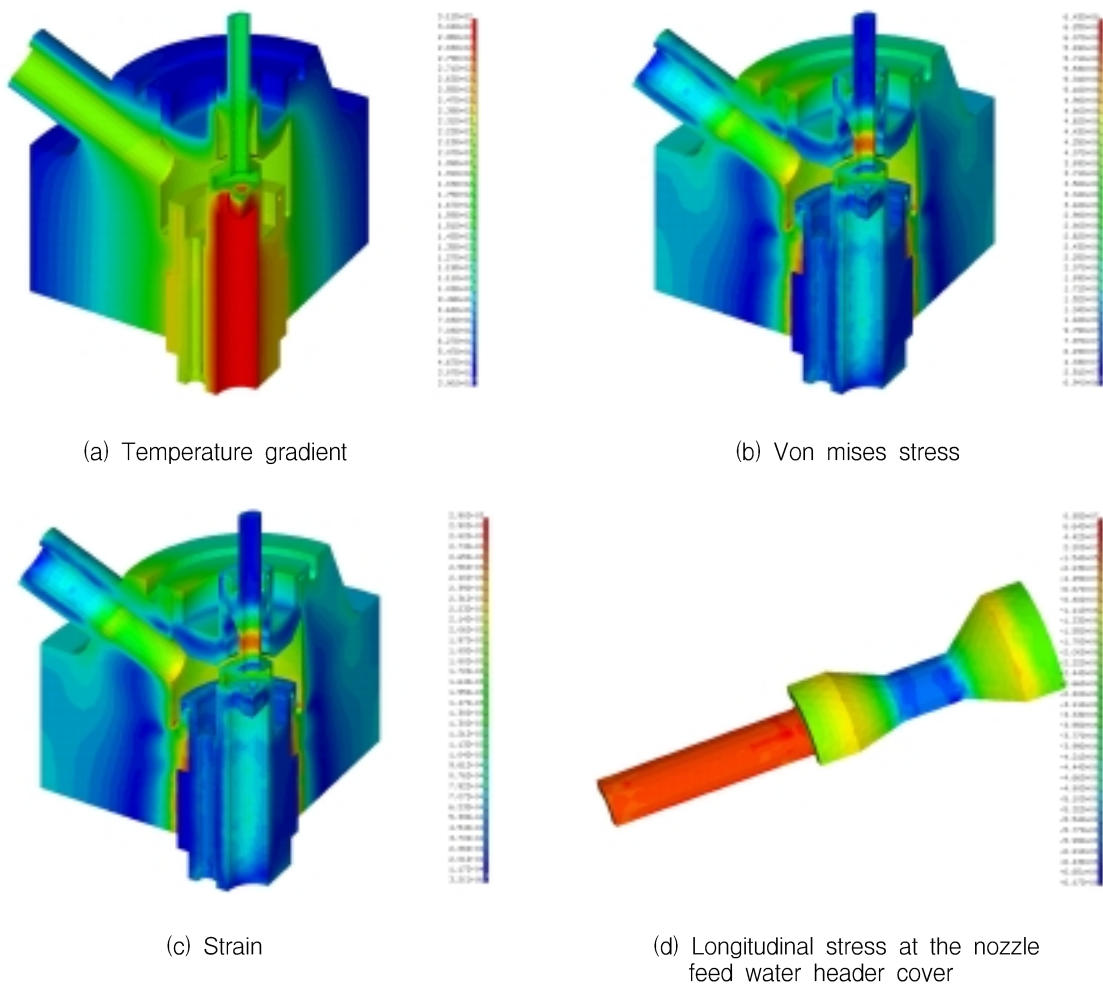


그림 6. 노즐헤더의 수치해석결과

표 1. 유한요소해석 입력값

	일차측	이차측		외부
		입구	출구	
전열계수 ( $W/m^2 \cdot K$ )	15000	7000		1500
온도 (°C)	310	170	220	30
압력 (MPa)	11.5	4		-

한다. 변형과 온도분포는 상호의존적 관계를 갖고 있지만 급속한 급속가공과 같이 변형과 온도분포가 밀접히 연계되는 일부 경우를 제외하고는 열전달 해석과 열응력 해석을 분리하여 수행하여도 공학적으로 큰 오차가 없는 것으로 알려져 있다[3]. 구성된 유한요소모델에 일차냉각재 온도가 310°C일 때, 실험을 통해 얻어진 노즐헤더의 온도와 압력을 입력으로 하여 정적해석한 결과를 그림 6에 도시하였으며, 입력값은 표 1에 정리하였다. 실제 상용로에서는 압력용기 내부에 전열관에서 일차냉각재와 열교환을 통해 증기를 생산하게 되지만, 본 실험장치에서는 전열관대신 급수관과 증기관에서 열교환이 이루어지므로 전열면적이 부족하여 증기가 발생되지 않는다. 따라서 이차측의 전열계수는 급수와 증기쪽을 같게 설정하였다. 열천이 실험결과와 비교하기 위하여 스트레인게이지의 부착방향에 대한 응력값을 수치해석을 통해 얻어내었으며, 이 결과는 표 2에 정리하였다.

표 2는 노즐헤더의 일차측 온도가 310°C일 때의 열천이 실험결과와 수치해석결과를 비교하여 정리한 것이다. 실험결과로 얻은 응력값은 실험온도에서의 탄성계수를 변형율에 곱하여 산술적으로 계산한 값이다. 따라서 스트레인게이지를 붙인 방향을 제외한 방향의 변형율이 반영되지 않았으므로 약간의 오차가 발생할 수 있다. 단면 AA, BB, CC와 같이 스트레인게이지가 외부에 장착되었을 경우 실험결과와 수치해석결과는 크게 차이가 없었다. 그러나 노즐헤더 내부에 장착된 경우에는 실험적 요인으로 스트레인게이지 방수코팅의 불량, 노이즈의 발생, 수치해석에서 전열계수의 오차 등으로 인해 다소 차이가 발생하였다. 특히 단면 EE에서는 3개의 스트레인게이지가 모두 데이터 슬립현상을 보여 정확한 측정치를 얻을 수 없었다. 단면 GG의 경우는 구조적으로 굽힘에 따른 인장응력이 부과되지만, 노이즈의 간섭과 부착상태 불량으로 인해 압축응력이 작용하는 것으로 나왔다. 따라서 단면 EE와 GG의 경우는 신뢰하기 어려운 데이터로 간주된다. 표 2의 결과로부터 단면 DD에서 열하중과 압력하중에 의해 심각한 응력이 부하되고 있음을 알 수 있었다. 따라서 이곳에 구조적으로 부하응력을 해소시켜줄 수 있도록 설계변경이 필요하다. 그에 대한 방

표 2. 실험과 수치해석을 통한 응력계산결과

단면	실험결과(MPa)	수치해석결과(MPa)	스트레인게이지 부착방향	비고
AA	178	209	반경방향	인장
BB	198	164	길이방향	인장
CC	215	211	길이방향	인장
DD	-1220	-687	길이방향	압축
EE	-	-266	길이방향	압축
FF	-155	-230	반경방향	압축
GG	(-425)	52	길이방향	인장
HH	-360	-120	길이방향	압축

안으로 단면 DD부위에 열팽창결합부(expansion joint)를 사용하거나 노즐급수헤더 덮개의 두께를 줄여 노즐급수헤더 덮개의 변형으로 응력을 줄여주는 방안이 강구되고 있다.

#### 4. 결 론

노즐헤더의 열천이 거동을 관찰하기 위하여 원자로 운전모드 중 기동과 정지모드에 대하여 실험을 수행하였다. 실험에 따른 일·이차측 유체온도, 노즐헤더의 온도와 변형율은 각 부위에 설치된 센서에 의해 얻었으며, 노즐헤더의 변형율은 각 부위 온도에 따른 탄성계수값을 곱하여 인가되는 응력값으로 계산하였다. 상용유한요소 해석코드인 I-DEAS를 사용하여 실험에 의해 얻어진 유체온도, 유체 압력과 구조물의 온도를 입력으로 하여 구조물에 인가되는 응력을 계산하였다. 실험적인 방법과 해석적인 방법으로 살펴본 열천이 거동에서 결과가 절대값에는 다소 차이가 생기나 경향은 서로 잘 일치함을 보였다. 향후 증기발생기 노즐헤더의 다양한 열천이 거동에 대해 실험과 유한요소해석을 수행할 것이다. 또한 노즐헤더 피로해석을 통해 피로파괴의 위험이 없는 온도천이횟수와 안전하게 허용할 수 있는 온도변화율을 결정하고 노즐헤더의 피로수명을 평가할 예정이다.

#### 후기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

#### 참고 문헌

1. Kim Yong Wan, et al., Conceptual Design of Once-Through Helical Steam Generator for Integral Reactor SMART, KAERI/TR-1446/99, 1999.
2. Kim Jong In, et al., Development and Verification Test of Integral Reactor Major Components, KAERI/RR-1889/98, 1999.
3. B. A. Boley and J. H. Weiner, Theory of Thermal Stresses, John Wiley and Sons Inc., 1960.
4. 이환수, 외, “관류식 나선형 증기발생기 노즐헤더의 피로수명평가를 위한 열피로시험기의 개발”, 한국원자력학회 2001 춘계학술대회 논문집, 제주, 2001.
5. 김용완, 외, “SMART 증기발생기 모듈급수헤더 피로해석”, 한국원자력학회 2001 춘계학술대회 논문집, 제주, 2001.