

관류식 나선형 증기발생기 노즐헤더의 피로수명평가를 위한
열피로시험기의 개발

The Development of Thermal Fatigue Test Facility to Evaluate
Fatigue Behavior for Nozzle Header of One-Through Helical Steam Generator

이환수
현대타타늄(주)

김용완, 김종인
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150번지

요 약

SMART 증기발생기 노즐헤더는 안쪽에 저온의 이차냉각재가 흐르고 바깥쪽으로 고온의 일차냉각재와 증기화된 이차냉각재가 접하게 된다. 따라서 원자로의 운행에 따라 급격한 온도구배가 반복적으로 발생하여 큰 열하중을 받게된다. 본 연구에서는 실험을 통한 노즐헤더의 피로해석을 수행하기 위하여 열피로 시험루프를 제작하였다. 열피로시험기는 고온의 일차계통을 모사하기 위하여 가압기와 시험용 압력용기에 히터를 내장하여 일차냉각재의 온도와 압력을 제어하였으며, 이차계통은 질소가스를 사용하는 팽창 탱크로 압력조절을 하고, 노즐헤더와 압력용기를 거쳐 승온된 이차냉각재는 열교환기를 거쳐 온도를 조절하였다. 노즐헤더의 안쪽과 바깥쪽으로 주요한 위치에 스트레인 게이지를 120° 간격으로 부착하고 그 사이에 온도센서를 장착하였으며, 센서에서 나온 신호는 데이터 처리 시스템을 통해 실험진행에 따라 실시간으로 각 위치에서의 변형율과 온도를 확인할 수 있도록 하였다. 피로시험은 상용원자로의 열천이 계획을 모사하여 진행되며, 수치해석을 통한 피로해석과 연계하여 각 단계별로 비교 분석한다.

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, thermal fatigue test facility was developed to characterize the fatigue behavior of the nozzle header. The temperature and the pressure of the primary coolant loop is controlled by the heaters installed in the pressurizer and test vessel. The thermo-hydraulic parameters of the secondary system are adjusted by the expansion tank and the heat exchanger. Strain gages and thermocouples are installed at the high stressed position of nozzle header. In this test facility, real time monitoring of the strain and the temperature of nozzle header is possible utilizing the data acquisition system. Fatigue test plan for the nozzle header has been established based on the operation strategy of the integral reactor SMART.

1. 서론

SMART 증기발생기는 이차측 냉각재가 전열관 내부를 흐르고, 일차측 냉각재가 전열관 외부를 지나는 방식이다. SMART 증기발생기의 노즐헤더는 노즐급수헤더와 노즐증기헤더의 역할에 동시에 하고 있어, 저온의 이차측 냉각재가 급수되는 동시에 급수된 냉각재가 전열관을 지나 증기가 되어 다시 노즐헤더를 통해 배출되는 구조를 가지고 있다. 노즐급수헤더 튜브시트의 경우 한쪽은 저온의 이차측 냉각재가 흐르고 다른 쪽에는 고온의 일차측 냉각재가 접해 있기 때문에 두께를 통한 온도분포의 차이로 인해 발생하는 응력을 받는다. 또한 이차측 냉각재의 공급압력인 5MPa와 일차측 냉각재가 원자로 내부로 순환하는 압력인 17MPa 사이의 압력차로 인한 변형이 동시에 진행된다. 이 경우에 각 하중에 의해 발생된 응력이 재료의 인장강도보다 충분히 작아도 원자로 운전 때 따른 반복응력의 작용으로 재료에 손상을 가져오고 결국 기기를 파손시킨다. 따라서 노즐헤더의 운전안정성과 구조적 건전성을 확보하기 위해 피로해석을 수행하여 피로파괴의 위험이 없는 온도천이횟수와 안전하게 허용할 수 있는 온도변화율을 결정하는 것이 매우 중요하다. 노즐헤더의 경우 형상의 복잡성 때문에 이론적인 피로해석을 수행하기 곤란하므로 수치해석적인 방법과 실험적인 방법이 도입될 수 있다. 최근에 CAE를 이용한 피로해석이 활발히 수행되고 있으나, 수치해석적인 방법만으로 피로해석을 수행할 경우, 계산상에서 수반할 수 있는 미소한 오차는 얻어지는 응력 및 피로수명 등의 결과물에 누적되어 실제와 매우 큰 차이를 보일 수 있으므로 이것을 검증할만한 수단이 강구되어야만 한다. SMART 증기발생기 노즐헤더의 피로해석에서는 수치해석적인 피로해석과 실험을 통한 피로해석을 동시에 수행하여 실제 실험을 통해 얻어지는 실험치와 유한요소해석을 통해 얻은 계산치를 각 단계에서 비교 분석하게 된다. 이를 위해 노즐헤더의 열피로수명을 측정하기 위한 테스트루프를 구성하였다. 여기에서는 증기발생기 노즐헤더의 열피로시험기의 구성, 실험수행계획 그리고 피로해석 절차에 대하여 서술한다.

2. 열피로시험루프의 구성

노즐헤더의 피로시험을 수행하기 위해 실제 노즐헤더에 부하되는 조건을 만족시켜주는 열피로시험루프를 제작하였으며, 열피로시험루프의 개략도를 그림 1에 도시하였다. 또한 그림 2는 열피로

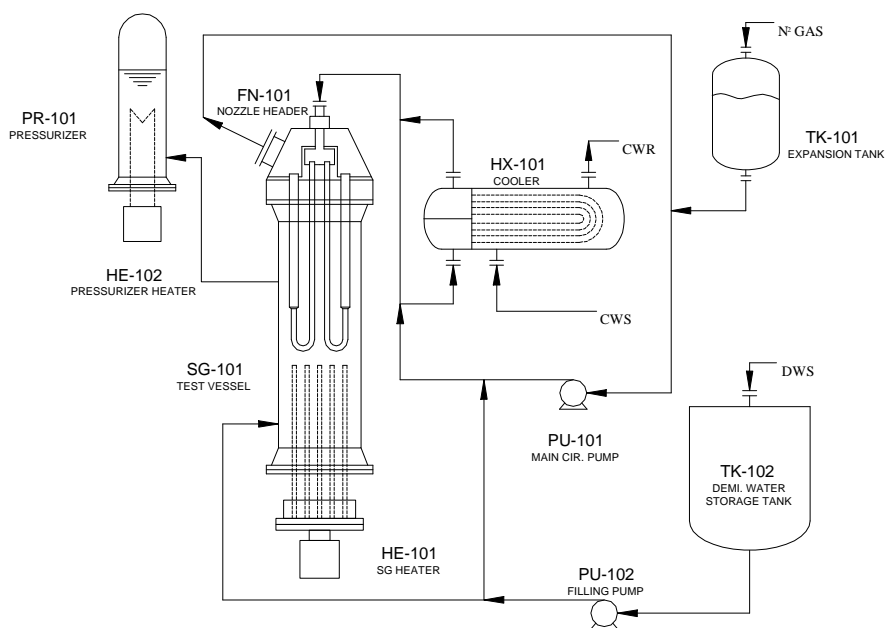


그림 1. 열피로시험루프 개요도

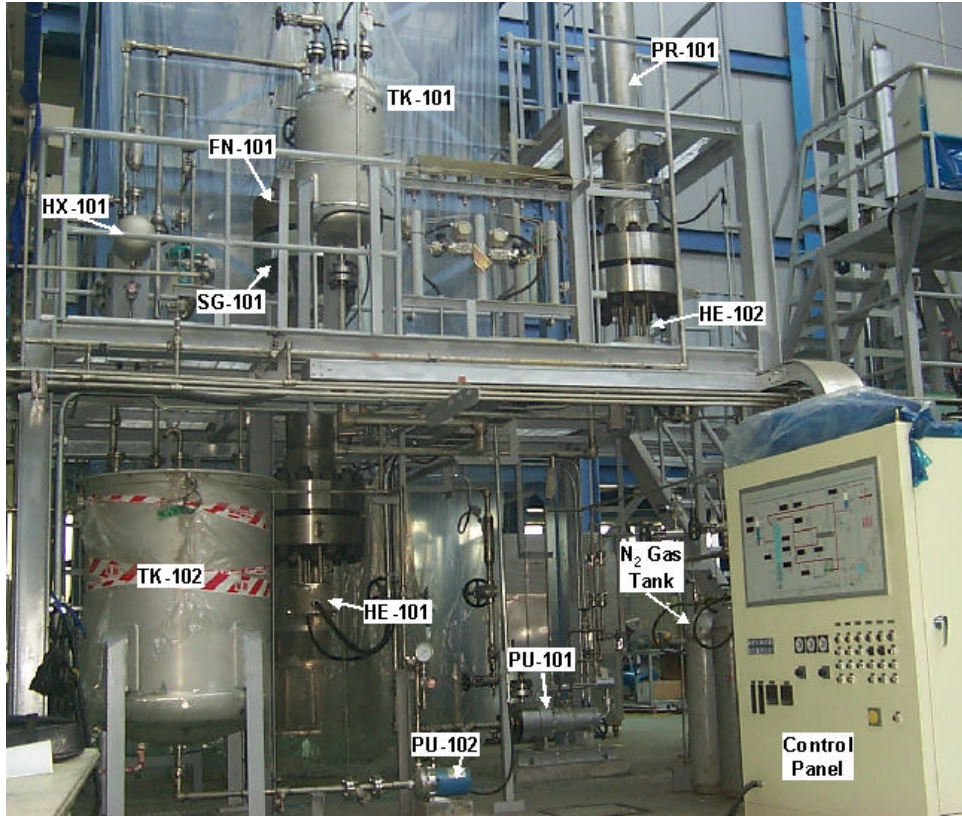


그림 2. 열피로시험루프 장비사진

시험장비의 사진으로 공간의 제약으로 인해 2층으로 장비를 분산하여 배치하였다. 열피로시험기 각 계통별 구성요소는 일차계통, 이차계통, 순환용수공급 계통, 전기계장제어 계통으로 나뉘어진다.

일차계통(Primary System)은 일체형원자로의 일차냉각재가 순환하는 계통을 모사한 것으로 시험용 노즐헤더를 포함한 압력용기(SG-101)와 압력용기의 온도조절을 위한 히터(HE-101) 그리고 가압기(PR-101)와 가압기의 온도와 압력을 조절하기 위한 히터(HE-102)로 구성된다. 일차계통의 운전은 순환용수 공급장치에 의해 증기발생기와 가압기에 20℃의 순수(demineralized water)를 충수한 후, 기기 곳곳에 설치되어 있는 온도센서와 압력센서로부터 신호를 받아 히터의 출력을 조절하여 일차계통의 온도와 압력을 제어하도록 하였다. 일차냉각재의 온도는 시험용 압력용기와 가압기에 각각 장착된 히터에 의해 350℃까지 승온되고, 압력용기 내부를 지나가는 이차냉각재에 의하여 열교환이 이루어져 이차측 열교환기에서 냉각된다. 압력조절의 경우는 일차냉각재의 온도가 올라감에 따라 압력은 17MPa까지 상승하게 되는데 비압축성 유체만으로는 압력조절이 용이하지 못하므로 가압기 내에 일부분의 물을 압축성 유체인 증기로 변환하여 미세한 압력변화를 제어할 수 있도록 하였다. 가압기의 작동은 히터의 출력을 높여 가압하고, 감압시에는 가압기 천장에 장착되어있는 스프링 쿨러(spring cooler)에 의해 증기를 액화시켜 일차계통의 내부 압력을 조절한다.

이차계통(Secondary System)은 노즐헤더(FN-101) 및 급수관, 증기관, 순환펌프(PU-101), 열교환기(HX-101) 및 압력조절용 탱크(TK-101)로 이루어져 있다. 실제 일체형원자로의 이차계통에서는 액상의 냉각재를 압력용기 내부의 열에너지에 의해 증기로 변환시켜 활용 가능한 에너지로 변환하게 되지만, 본 실험장치는 시험용 압력용기에서 전열관부분을 제외하여 제작하였기 때문에 전열면적이 충분하지 않아 증기를 발생시키지 않는다. 하지만 본 실험장치의 목적이 노즐헤더에

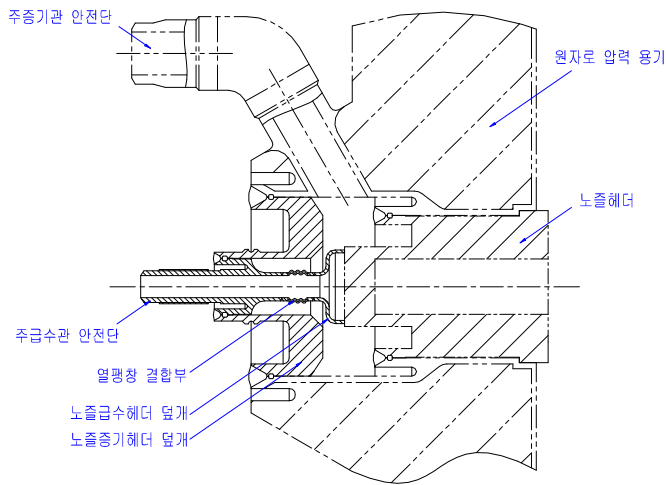


그림 3. 증기발생기 노즐헤더

서의 열피로시험을 위한 것이므로, 증기가 발생되지 않아도 원자로집합체에서 가장 큰 온도차가 발생하는 노즐급수헤더부분의 열응력에 대한 모사가 가능하다. 그림 3은 증기발생기 노즐헤더의 단면도와 열피로시험기에 장착된 사진이다. 이차계통은 일차측 냉각재의 온도가 일정온도에 다다르면 열교환을 위해 약 50℃의 이차측 냉각재가 노즐헤더에 공급되어 전열관 대신에 급수관과 증기관에서 열교환을 하고 방출된다. 방출된 이차냉각재는 노즐헤더에 공급되는 초기 온도로 유지시켜주기 위해 열교환기(HX-101)를 거쳐 냉각된다. 이차계통의 압력은 N₂ Gas를 이용한 팽창탱크를 사용하여 50kg/cm²으로 유지한다.

순환용수공급 계통(Circular Water Supply System)은 순환용수로 순수를 사용하여 순수저장탱크(TK-102)에 저장한 후, 순수공급펌프(PU-102)를 사용해 일차, 이차계통에 공급한다. 또한, 이차계통의 열교환기(HX-101)와 순환펌프(PU-101)의 모터를 냉각시키기 위해 냉각수를 공급한다. 열교환기의 경우 이차계통의 온도변화에 의한 냉각수 공급량이 수시로 변화하므로 과도한 냉각수의 손실과 이차계통의 온도변화에 적절한 냉각수 공급을 위하여 제어밸브를 사용하여 냉각수의 양을 조절한다. 그리고 이차계통의 압력을 상승시키고 일정압력을 유지하도록 하기 위해 팽창탱크를 사용하는데, 팽창탱크에 질소가스를 공급하기 위한 질소공급용기가 순환용수공급 계통에 포함된다. 질소가스의 공급 및 저장은 상용용기를 사용하며 용기 내부의 압력은 최대 130kg/cm²이며, 이것은 압력조절밸브를 통해 이차계통 압력에 맞게 조절하여 팽창탱크에 공급한다.

전기계장제어 계통(Electricity & Instrument Control System)은 열피로시험기를 구성하고있는 펌프, 히터, 각종 제어장치의 전원공급을 맡는 전기제어 계통과 열피로시험기에 장착되어있는 센서와 신호처리를 위한 장비, 그리고 이를 구동하고 통제하는 프로그램으로 구성되어있는 계장제어 계통으로 나눌 수 있다. 열피로시험기에 소요되는 전원용량은 약 65KW이며, 구동방법은 제어패널에서 직접 운전하는 방식과 컴퓨터에서 소프트웨어를 통해 조작하는 방식으로 구동한다. 단, 조작 우선 순위는 제어패널이 가지게 된다.

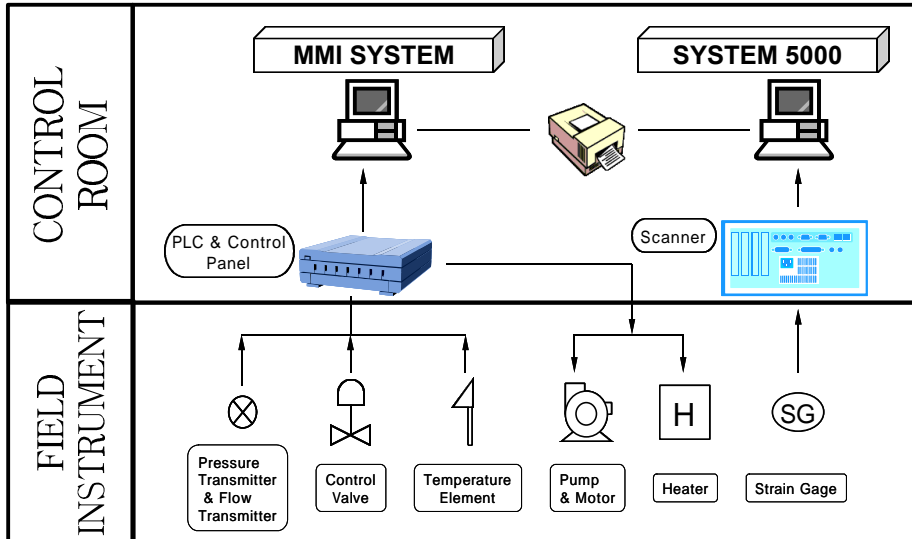


그림 4. 제어계측장비의 구성

열피로시험기에서는 냉각재의 온도, 노즐헤더의 온도와 변형률과 같은 실험 측정치를 얻고 각 장비의 운전상황을 파악하기 위한 센서가 장착된다. 그림 4에 센서로부터 데이터를 얻는 과정과 제어장치에 의한 각종 기기의 구동을 개략적으로 나타냈다. 스트레인 게이지를 제외한 나머지 센서에서 나온 신호는 PLC를 거쳐 모니터링 시스템(MMI System)으로 전송되어 각종 기기의 운전상태 및 데이터를 확인, 저장할 수 있다. 또한 노즐헤더 안쪽과 바깥의 각 부위에 120° 간격으로 장착되어 작동상황에 따라 노즐헤더에서 걸리는 변형율을 측정하는 스트레인 게이지는 고온·고압용으로 1축방향의 변형율을 측정할 수 있다. 변화하는 변형율에 따라 스트레인 게이지에서 나온 신호는 채널당 10Hz의 신호를 받아들일 수 있는 Scanner로 전송되어 증폭 및 편집되며, 이것은 스트레인 지시기로 보내져 구조물의 변형 및 응력을 측정할 수 있다. 그림 5는 노즐헤더부 중 가장 큰 열변형을 받는 노즐급수헤더의 튜브시트에 장착된 스트레인 게이지의 사진과 열팽창 결합부에 장착된 스트레인 게이지의 사진이다. 스트레인 게이지는 사진에서 보는바와 같이 여러 개가 조합되어 사용되고 있음을 나타내는데 이것은 사용된 스트레인 게이지가 1축 방향의 변형율만 측정할 수 있으므로 변형이 가장 심한 방향으로 스트레인 게이지를 부착하고 여러 스트레인

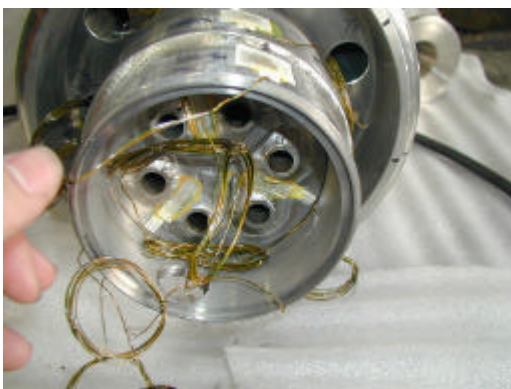


그림 5. 노즐급수헤더에 장착된 스트레인 게이지 사진

게이지에서 나온 신호를 조합하여 구조물의 변형을 측정한다. 본 실험에서 노즐헤더에 부착된 스트레인 게이지는 총 27개이며, 온도센서는 9개가 사용되었다.

3. 열피로 시험계획 및 평가방법

SMART 증기발생기의 노즐헤더는 상용원자로의 운전중 발생할 수 있는 상황에 대하여 수명기간동안 구조적 안정성이 확보되어야 한다. 따라서 본 실험은 상용원자로의 기동운전을 모사한 전체 사이클 축소 실험과 각 모드에 대한 개별실험을 수행하게 된다.

3.1 노즐급수헤더의 구조적 전열특성 평가

가. 전열특성

노즐헤더가 가지고있는 전열특성을 평가하기 위하여 고체표면의 대류열저항에 대한 고체 내부의 전도열저항의 상대적인 크기를 나타내는 Biot 수를 이용한다. 보통 $Bi \ll 1$ 이면, 고체내부의 전도열저항이 유체와 고체경계에서의 대류열저항보다 훨씬 작기 때문에 온도천이과정에서 물체 내부에 고른 온도분포를 갖는 것으로 볼 수 있으며, $Bi \gg 1$ 인 경우는 대류열저항이 전도열저항보다 훨씬 작으므로 온도천이과정에서 열충격에 의한 효과가 나타난다. 노즐급수헤더 튜브시트는 노즐헤더에서 가장 큰 온도천이가 이루어지므로 이것을 기준으로 Biot 수를 식(1)에서 계산하였다. 노즐급수헤더 튜브시트의 재질은 SS321 단조강이며, 두께(W)는 50mm이다. 이에 대한 물성치로 열전달계수와 열전도도는 각각 $h = 15000 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$, $\alpha = 16 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ 이다.

$$Bi = \frac{hW}{\alpha} = \frac{15000 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \times 0.05 \text{ m}}{16 \text{ W/m} \cdot \text{K}} = 46.9 \quad (1)$$

식(1)에 의해 계산된 노즐급수헤더 튜브시트의 Bi 수가 1보다 매우 크기 때문에 온도변화에 따라 재질의 두께방향으로 열이 전달되는데 시간이 걸리게 된다. 따라서 온도구배가 정상상태에 도달할 때까지 소요되는 시간을 구해 실험에 적용하여야 한다.

나. 감쇠시간의 결정

일차, 이차냉각재의 온도 변화에 따라 노즐헤더의 두께 방향으로 온도분포의 천이가 발생하므로 초기온도에서 설정된 온도로 변화할 때 온도구배가 정상상태에 다다르도록 일정시간동안 설정온도를 유지해주어야 한다. 최초로 설정온도로 된 시점에서부터 정상상태까지의 시간을 감쇠시간(t)로 설정하였다. 식(2)는 물체의 크기와 주어진 시간동안 그 물체 안으로 온도변화가 침투된 깊이의 비를 의미하는 시간에 대한 무차원수인 Fourier 수로서 이것이 1이 되는 것을 기준으로 감쇠시간을 구할 수 있다. 식(2)는 사각 파형의 온도변화에서 유효한 것이므로, 사다리꼴 파형을 갖는 본 실험에 적용하여도 무방하다.

$$Fo = \frac{Dt}{W^2} = t^* \quad (2)$$

$$D = \frac{\alpha}{\rho c} \quad (3)$$

여기서 D 는 열확산계수(thermal diffusivity), ρ , c , α 는 각각 재료의 밀도, 비열, 열전도도이며,

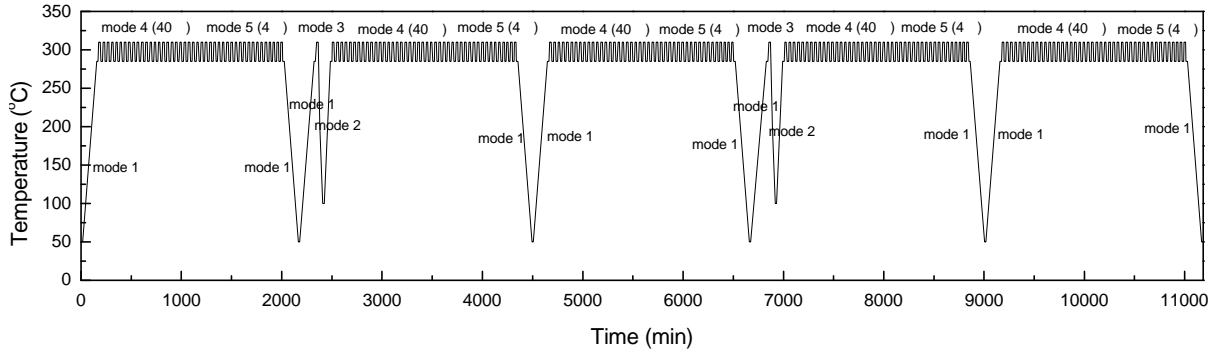


그림 6. 전체 사이클 축소 실험

W 는 관심있는 부분에서의 재료의 두께이다. SS321 단조강에 대한 물성치는 아래와 같다.

$$\rho = 7900 \text{ kg/m}^3, \quad c = 500 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$$

$$D = \frac{16 \text{ W/m} \cdot \text{K}}{7900 \text{ kg/m}^3 \times 500 \text{ J/kg} \cdot \text{K}} = 4.05 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} \quad (4)$$

$$t = \frac{W^2}{D} = \frac{0.0025 \text{ m}^2}{4.05 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}} = 617 \text{ sec} \quad (5)$$

식(5)에서 얻은 결과에 따라 온도변화 후 안정된 상태까지 소요되는 시간은 약 10분 17초이며, 다음 온도변환까지의 시간간격은 충분한 여유를 두어 15분으로 설정한다.

3.2 전체 사이클 축소 실험

피로해석을 위한 실험에서 전체 구동횟수만큼 실험장치를 운전하기에는 소요되는 시간과 비용에 비해 비효율적이다. 따라서 본 실험에서는 실제 상용로의 구동횟수를 1/10로 줄여 구동할 계획이다. 각 모드실험의 수행횟수는 장비의 운전을 고려해 효율적으로 배분하였다. 그림 6은 전체 사이클 축소 실험계획을 시간에 따른 온도변화로 나타낸 것으로 이와 같은 사이클을 5회 수행하게 된다. 5회에 걸친 실험중 한 사이클을 수행하는데 소요되는 시간은 11118분, 즉 7일 17시간 18분이 걸릴 예정이다.

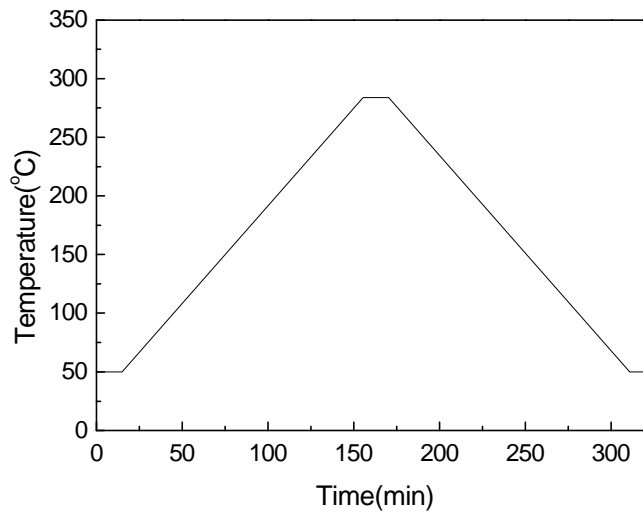


그림 7. 기동 및 정지모드의 열처리 실험

| | 유체 온도 | 노즐헤더온도 | 변형율 | 응력 | 피로수명 |
|----|----------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------------|
| 실험 | 측정 | 측정 | 측정 | 계산 (응력-변형율) | 계산 (Miner's Rule) |
| 해석 | 입력 1. 측정 온도 2. 설계 온도 | 계산 (ABAQUS) | 계산 (ABAQUS) | 계산 (ABAQUS) | 계산 (ABAQUS/Safe) |
| 비교 | | 실험과 해석결과비교 | 실험과 해석결과비교 | 실험과 해석결과비교 | 실험과 해석결과비교 |

표 1. 실험과 수치해석을 통한 피로해석의 결과비교

3.3 개별모드의 열천이 실험

개별모드의 열천이 실험은 전체 사이클 축소 실험을 수행하는 과정에서 각 모드에 대한 데이터만 뽑아내어 결과를 평가한다. 그림 7은 개별모드중 원자로의 기동과 정지모드에서의 시간에 따른 온도변화를 도시한 것이다. 이 실험에서는 각 모드에서 진행되는 열천이에 대해 노즐헤더에서 발생하는 응력값을 계산하여, 유한요소해석 결과와 비교하게 된다.

3.4 실험결과의 평가방법

위 실험으로부터 시간에 대한 일차, 이차측의 유체 온도, 노즐헤더의 온도 그리고 노즐헤더 각 부위의 변형율을 얻을 수 있다. 얻어진 실험치는 상용유한요소해석 소프트웨어인 ABAQUS에 의해 해석된 결과와 표 1에 나타나있는 단계를 거쳐 비교·평가되어 수치해석적인 피로해석의 검증자료로 이용된다.

측정된 일차, 이차측의 유체온도는 계획된 열천이 하중의 타당성에 대한 검증으로 사용되며, 이 값은 수치해석적인 피로해석을 수행할 때 입력으로 사용한다. 구조물의 온도 측정결과는 유한요소방법으로 열해석한 결과와 비교하여 해석의 타당성을 검증하는데 사용한다. 실험에서 측정된 변형율은 응력으로 변환하여 유한요소해석 결과와 비교평가를 수행한다. 피로실험에 인가된 하중의 반복횟수를 구하여 재료시험에서 구한 S-N곡선과 하중의 반복횟수를 Miner's rule에 대입하여 피로수명을 구하며, 수치해석적인 방법으로는 상용 유한요소 소프트웨어인 ABAQUS/Safe를 이용하여 노즐헤더가 수명주기동안 인가된 하중에 대해 견딜 수 있는지 평가하게 된다.

4. 결론

SMART 증기발생기 노즐헤더의 열피로해석을 수행하기 위하여 열피로 시험루프를 구성하였다. 열피로 시험루프는 일차계통, 이차계통, 순환용수공급 계통, 전기계장제어 계통으로 나뉘며, 일차계통의 운전조건인 17MPa, 350℃를 만족하도록 제작하였다. 계통을 구성하는 장비의 곳곳에 센서를 설치하여 제어 패널과 컴퓨터로 시험루프를 구동할 수 있도록 하였다. 노즐헤더에 장착된 온도센서와 스트레인 게이지로부터 일차, 이차냉각재의 온도, 노즐헤더 각 부위의 온도와 변형율에 대한 결과를 시간의 함수로 구할 수 있도록 설계 제작하였다. 일체형원자로의 실제 운전을 고려하여 피로시험계획을 수립하였으며, 향후 상용유한요소해석 소프트웨어를 사용하여 노즐헤더 각 부위에서 측정된 초기온도를 입력으로 해석을 수행하여 얻어지는 결과와 실험결과를 비교·분석하여 수치해석적인 피로해석의 타당성을 검증할 것이다.

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. 김용완, 외, "SMART 증기발생기 모듈급수헤더 피로해석", 한국원자력학회 2001 춘계학술대회 발표예정, 제주, 2001.
3. 김용완, 외, "SMART 증기발생기 치수결정에서 ASME와 러시아 기술기준의 비교", 한국원자력학회 2000 추계 학술대회 논문집, 대전, 2000.
4. G. Sumner, V.B. Liversey, Techniques for High Temperature Fatigue Testing, Elsevier Science Publishing Co., Inc. 1985.
5. 황보곤, 배운호, "ASME Section VIII, Division 2에 의한 압력용기 노즐의 피로해석", Power Engineering, Vol. 8, No. 3, October 1997.