

PGSFR BOP계통 배관 응력평가 적용방안 고찰

오영진[†]·허남수*·장영식**

Considerations of Stress Assessment Methodology for BOP Pipings of PGSFR

Young Jin Oh[†], Nam Su Huh* and Young Sik Chang**

(Received 31 May 2016, Revised 20 June 2016, Accepted 27 June 2016)

ABSTRACT

NSSS (Nuclear Steam Supply System) and BOP (Balance of Plant) design works for PGSFR (Prototype Gen-IV Sodium Fast Reactor) have been conducted in Korea. NSSS major components, e.g. reactor vessel, steam generator and secondary sodium main pipes, are designed according to the rule of ASME boiler and pressure vessel code division 5, in which DBA (Design by Analysis) methods are used in the stress assessments. However, there is little discussions about detail rules for BOP piping design. In this paper, the detail methodologies of BOP piping stress assessment are discussed including safety systems and non-safety system pipings. It is confirmed that KEPIC MGE(ASME B31.1) and ASME BPV code division 5 HCB-3600 can be used in stress assessments of non-safety pipes and class B pipes, respectively. However, class A pipe design according to ASME BPV code division 5 HBB-3200 has many difficulties applying to PGSFR BOP design. Finally, future development plan for class A pipe stress assessment method is proposed in this paper.

Key Words : Sodium fast reactor (소듐고속로), BOP piping (BOP 배관), Stress assessment (응력평가), Design by analysis (해석기반설계)

기호설명

α : 열팽창계수
 α_a : 재료a 및 재료b 불연속부에서 재료a의 열팽창계수
 α_b : 재료a 및 재료b 불연속부에서 재료b의 열팽창계수
 C_3 : 이차응력지수
 D_o : 배관 외경
 E : 탄성계수

E_{ab} : 재료a 및 재료b 불연속부에서 탄성계수 차
 K_3 : 국부응력지수
 M_A : 지속하중에 의해 단면에 작용하는 합성모멘트
 M_B : 일시적하중에 의해 단면에 작용하는 합성모멘트
 M_C : 기준 변위하중범위에 의해 단면에 작용하는 합성모멘트 범위
 N : 등가 기준 변위응력 범위 주기의 총 수
 N_1 : $f=1$ 이 되는 최대 반복회수
 N_E : SE의 주기의 수
 N_i : S_i 에 관련된 주기의 수
 P : 내압
 S_A : 허용응력범위
 S_E : 기준 변위응력범위

[†] 회원, 한국전력기술(주) 미래전력기술연구소
yjoh2@kepco-enc.com
TEL: (054)421-6463 FAX: (054)421-6462

* 서울과학기술대학교

** 한국전력기술(주) 미래전력기술연구소

- S_L : 지속하중에 의한 길이방향 응력합
- S_c : 기준 응력범위 주기동안에 예상되는 최저 금속온도에서의 재료 기본 허용응력
- S_{eff} : 전체 온도변화에 대하여 계산된 열팽창응력
- S_h : 기준 응력범위 주기동안에 예상되는 최고 금속온도에서의 재료 기본 허용응력
- S_i : 변위응력범위 (기준 변위응력범위 이외의 다른 응력범위)
- S_{yc} : 최저온도에서 항복강도
- $T_{a,i}$: 재료a 및 재료b 불연속부에서 재료a의 온도
- $T_{b,i}$: 재료a 및 재료b 불연속부에서 재료b의 온도
- $\Delta T_{1,i}$: 배관의 두께방향 온도차에 대한 선형성분
- $\Delta T_{2,i}$: 배관의 두께방향 온도차에 대한 비선형성분
- ΔT_E : 기준 온도범위
- ΔT_i : 온도범위 (기준 온도범위 이외의 다른 온도 범위)
- Z : 단면계수
- f : N에 대한 주기 응력범위 계수
- i : 응력증대계수
- k : 하중작용시간에 따른 증대계수
- tn : 배관 공칭두께

1. 서 론

1.1 PGSFR 설계 개요

국내에서는 한국원자력연구원을 중심으로 소듐고속로(SFR, Sodium Fast Reactor) 연구가 오랜기간 수행되어 왔으며, 최근에는 PGSFR(Prototype Generation IV Sodium cooled Fast Reactor) 설계개발 연구가 수행되고 있다. PGSFR은 2017년 특정설계인허가 신청을 목표로, 원자력연구원 및 한국전력기술(주)을 중심으로 NSSS(Nuclear Steam Supply System) 및 BOP(Balance of Plant) 설계가 수행되고 있다. PGSFR의 주요 사양을 Table 1에 요약하였다.

PGSFR의 일차냉각재(소듐)는 원자로용기 내에서 순환하며, 원자로용기 내에 설치된 중간열교환기를 통해 중간냉각재(소듐)를 가열한다. 중간냉각재는 증기발생기를 통해 증기를 발생시키며, 이 증기를 통해 발전기가 구동된다. 현재 BOP 계통에서 고려되는 주요 압력경계(소듐, 물, 가스 등) 계통을 Fig. 1에 요약하였으며, 현재 소듐-물반응 압력완화계통 및 잔열제거계통은 NSSS에서 설계되고 있어서 BOP 설계에서 고려하지 않고 있다.

Table 1. PGSFR system design characteristics

NSSS designer	KAERI
Reactor type	Sodium-cooled Reactor
Thermal capacity	150 Mwe
Coolant	Sodium
Primary Circulation	Pool
System Pressure	~1 bar
System Temperature	390~545°C
Fuel Material	U-Zr, U-TRU-Zr
Fuel Cycle	~10 Months
Emergency safety systems	Passive and Active
Residual heat removal systems	Passive and Active
Design Life	60 years
New and Distinguishing Features	Metallic fuel, Pool type reactor, RHRS feature which accommodate SBO

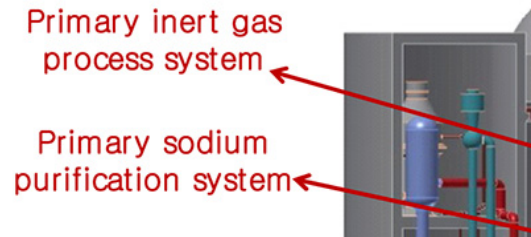


Fig. 1 BOP systems of PGSFR (Draft)

1.2 PGSFR BOP 계통 배관설계 개요

PGSFR은 고온관 출구온도가 500°C를 초과하는 고온상태로 운전되기 때문에, 원자로용기, 배관, 기타 압력용기 등 안전계통 기기의 구조건전성은 ASME Boiler and Pressure Vessel (BPV) Code Divison 5⁽¹⁾에 따라 입증되어야 하는데, 가압경수로형 상용 원전에 적용되고 있는 ASME BPV code Divison 1⁽²⁾과 상당한 차이점을 포함하고 있다. Div.5의 요건에 따르면, A등급 저온배관은 HBA-3600, A등급 고온배관은 HBB-3600 요건을 따라야 하며, B등급 저온배관은 HCA-3600, B등급 고온배관은 HCB-3600에 따라 응력평가가 수행되어야 한다.

일차소듐 및 중간소듐과 연결되는 대부분의 계통은 설계온도가 500°C를 초과할 것으로 예상되며, 3인치

이하의 소형배관으로 설계되고 있다. 현재까지의 설계 초안에서는, 원자로건물 내 일차소듐 관련계통은 안전계통으로서 배관은 A등급 및 B등급으로 분류되고 있으며, 기타 중간소듐 관련계통 등은 비안전계통으로 분류되고 있다.

현재 한국전력기술(주)에서는 PGSFR BOP계통 설계연구의 일환으로서 배관 응력평가를 위한 코드요건 적용 방안 등이 검토되고 있다. 본 논문에서는 현재 진행중인 요건검토 및 응력평가(크립-피로평가 포함) 적용방안에 대한 검토 초안을 소개한다.

2. 비안전계통 배관 응력평가

일반 산업용 발전설비의 배관은 KEPIC MGE (ASME B31.1⁽³⁾) 요건에 따라 설계되며, 현행 상용원전(가압경수로형 원전 등) 비안전계통 배관도 이 요건을 적용하여 설계한다. 현행 상용원전의 경우 약 300°C의 증기온도에 대한 배관설계에 이 요건이 적용되고 있으며, 화력발전소의 경우 500°C 이상의 증기온도에 대한 배관설계 코드로서 KEPIC MGE (ASME B31.1)를 적용하고 있다. B31.1에 제시된 배관응력평가 주요 요건을 아래에 요약하였다.

① Sustained loads :

$$\frac{PD_o}{4t_n} + \frac{0.75iM_A}{Z} \leq 1.0S_h \quad (1)$$

② Occasional loads :

$$\frac{PD_o}{4t_n} + \frac{0.75iM_A}{Z} + \frac{0.75iM_B}{Z} \leq kS_h \quad (2)$$

③ Displacement load ranges :

$$\frac{iM_C}{Z} \leq S_A \quad (3)$$

$$\begin{aligned} S_A &= f(1.25S_c + 0.25S_h) \\ S_A &= f(1.25S_c + 1.25S_h - S_L) \\ 0.15 &\leq f = \frac{6}{N^{0.2}} \leq 1.0 \\ N &= N_E + \sum \left(\left(\frac{S_i}{S_E} \right)^5 N_i \right) \end{aligned}$$

여기에서 허용응력을 결정하는 S_h 및 S_c 는 코드에서 주어지는데, 기본적으로 아래의 기준에 의해 결정되었다.⁽²⁾

① 상온 인장강도의 1/4

② 고온 인장강도의 1/4

③ 고온 항복강도의 2/3

④ 최소크립속도 0.01%/1,000hr에서 평균응력

⑤ 크립과단시간 100,000hr에서 평균응력의 2/3

⑥ 크립과단시간 100,000hr에서 최소응력의 4/5

즉, KEPIC MGE(ASME B31.1)의 배관 응력평가 요건에서는 해당 배관재의 크립변형속도 및 크립과단시간이 고려되어 있다고 볼 수 있다. 이 같은 이유로 국내에서는 증기온도 600°C 이상의 1000MW급 화력발전소 설계에서도 KEPIC MGE 요건이 적용되고 있으며, 따라서 PGSFR의 경우에도 비안전계통 배관의 경우 동일한 요건에 따른 설계가 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

3. B등급 배관 응력평가

ASME BPV Code 최신판에 따르면, 고온배관으로 설계되는 PGSFR B등급 배관은 Div. 5, HCB-3600에 따라 설계되어야 한다.⁽¹⁾ HCB-3600에 따르면, 먼저 Div.1 NC-3600⁽²⁾에 대한 설계요건을 모두 만족시키고, 일부 항목에 대해서는 HCB-3600에서 제시한 수정요건을 만족시켜야 한다. 수정요건은 모두 열응력과 관련된 사항으로서 아래에 설명하였다.

Div.1 NC-3600에서 제시된 <식 10a>는 아래와 같다.

$$\begin{aligned} S_E &= \frac{iM_C}{Z} \leq S_A \\ S_A &= f(1.25S_c + 0.25S_h) \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 f 는 열응력의 반복회수와 관련되는 피로평가 관련 계수로서 아래와 같이 계산된다. 계산 형식은 다소 차이가 있으나, 큰 틀에서는 유사한 의미를 갖는다고 볼 수 있다.

$$\begin{aligned} f &= \text{function of } N \text{ (table)} \\ N &= N_E + \sum \left(\left(\frac{\Delta T_i}{\Delta T_E} \right)^5 N_i \right) \end{aligned} \quad (5)$$

식 (4)는 Div.5 HCB-3600에서도 동일하게 적용되는데, f 및 N 의 계산방법이 제시된 식(5)는 아래와 같이 수정된다.

$$\begin{aligned} f &= \text{function of } N \text{ (table, function of } N_1) \\ N_1 &= \text{function of material and max temperature} \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 N 값에 대한 계산식은 HCB에 대한 부록인 HCB-I-3000에서 아래와 같이 제시하고 있다.

$$N = \sum (r_i^5 N_i) \quad (7)$$

$$r_i = \frac{\Delta T_i (1.25S_c + 0.25S_h) \text{ or } S_{eft}}{\Delta T_E (1.25S_c + 0.25S_h)}$$

$$+ \frac{\text{Max} \left[\left(\frac{K_3 E \alpha |\Delta T_{1,i}|}{4(1-\nu)} + \frac{E \alpha |\Delta T_{2,i}|}{2(1-\nu)} \right), \left(\frac{K_3 C_3 E_{ab} |\alpha_a T_{a,i} - \alpha_b T_{b,i}|}{2} \right) \right]}{(1.25S_c + 0.25S_h)}$$

상기의 식 (6) 및 (7)을 Div.1 NC-3600의 해당 식 (식(5))과 비교하면, 우선 f를 결정하기 위한 기준값을 N_1 으로 정의하고, N_1 을 재료 및 온도의 함수로 정의함으로써, 재료별 고온강도의 영향을 반영하고 있다. 또한, N을 계산하는 과정에서 단순한 평균온도의 범위만을 고려하지 않고, 두께방향 온도구배 및 불연속부 열팽창률의 차이에 의해 발생하는 열응력의 영향을 모두 고려하고 있음을 알 수 있다.

이 밖에, 두께방향 온도구배에 대해서도 아래와 같이 추가요건을 제시하였다.

$$\frac{\Delta T_i}{\Delta T_E} S_{eft} + \frac{E \alpha |\Delta T_{1,i}|}{4(1-\nu)} \leq (0.75S_{yc} + 0.25S_h) \quad (8)$$

현재까지 제시된 HCB-3600 요건은 저온배관에 적용되는 HCA-3600 (또는 NC-3600) 대비 두께방향 온도구배 등 다양한 열응력 영향을 고려하여 변위하중 (열하중) 평가를 수행할 수 있도록 제시되어 있음을 알 수 있다. 설계방법론 면에서는 현행 상용로 설계 방법 대비 다소 복잡해지기는 하였으나, 범요소(파이프요소)를 이용한 유한요소해석과 1차원 열해석으로 설계가 가능할 것으로 보인다. 따라서 적절한 전산화 도구 개발을 통해 HCB-3600에 따른 배관 설계가 가능할 것으로 판단된다.

한편, HCB-3600 평가식은 크립변형률, 크립-피로 상호작용 및 누적변형 등 고온기기에서 발생 가능한 모든 영향인자를 반영하고 있다고 볼 수 있는지에 대해서는 불확실한 면이 있다. 따라서, 우선적으로 현행 평가식을 적용하되, ASME 코드위원회의 코드 개정 상황을 주시하면서 검토를 계속 진행할 필요가 있다.

4. A등급 배관 응력평가

ASME BPV Code 최신판에 따르면, 고온배관으로

설계되는 PGSFR A등급 배관은 Div. 5, HBB-3600절에 따라 설계될 수 있다.⁽²⁾ 하지만 2016년 현재, HBB-3600에서는 배관해석에 대한 별도의 규정이 개발될 때까지는 DBA(design by analysis)에 해당하는 HBB-3200으로 설계하도록 하고 있다. NSSS 배관과는 달리, BOP 배관의 경우 전체적으로 구경이 작고 배관 길이가 긴 경우가 대부분이다. 무엇보다도 BOP 배관은 매 건설호기마다 배치형상이 바뀌고, 심지어 건설 도중에도 배치형상이 변경되는 경우가 많다. 이 같은 특성을 고려할 때, DBA(HBB-3200) 방법으로 BOP 배관을 설계하는 것은 상당한 현실적 어려움이 동반될 것으로 보인다.

한편 Div. 5, HBB-3600절에서는, Div. 1, NB-3600에 따른 응력지수를 고온배관 설계에서도 사용할 수 있음을 제시하고 있는데, 이는 DBR(design by rule)에 대한 적절한 수식을 개발하고 입증함으로써 배관 설계를 할 수 있는 가능성을 열어두고 있음을 의미한다. 하지만 현재 상황에서, 단기간에, 국내 자체적으로 DBR 관련 평가식을 개발하고 모든 평가식에 대한 적절성을 충분한 수준까지 입증하는 것 역시 현실적이지 않다.

4.1 DBA를 이용한 배관 응력평가

우선, HBB-3600에 제시된 바에 따라 HBB-3200 (DBA)을 이용한 배관 응력평가의 현실성을 확인하기 위하여 간략한 형상의 배관에 대한 응력평가를 수행해 보았다. Fig. 2에 나타난 바와 같이 단순한 L-자형 배관을 가정하였으며, 배관 양단은 앵커에 의해 고정된 상황을 고려하였다. 그림에 나타난 바와 같이, 배관 외경은 3.5인치, 두께는 0.216인치이며, 이는 공칭경 3인치 스케줄40 표준배관이다.

평가에 고려된 재료는 페라이트 합금강인 P91 (9Cr-1Mo-IV) 및 오스테나이트 스테인리스강 TP 316이다. 각 재료의 물성치는 ASME BPV Sec. II, Part D5)에 제시되어 있는 값들을 이용하였다. 하중으로는 내압 및 온도를 입력하였다. 내압은 0.0048MPa로 일정하게 유지되며, 온도는 가열 및 냉각운전이 1년에 1회 적용되어 60년간 60회씩 반복된다고 가정하였다. 가열 및 냉각운전 온도이력을 Fig. 3에 나타내었다. 계산의 편의상 자중은 적용하지 않았다.

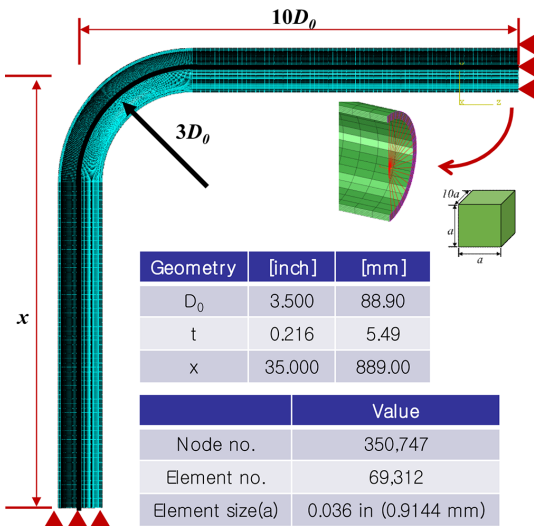


Fig. 2 FEA model summary for sample piping stress assessment using design by analysis

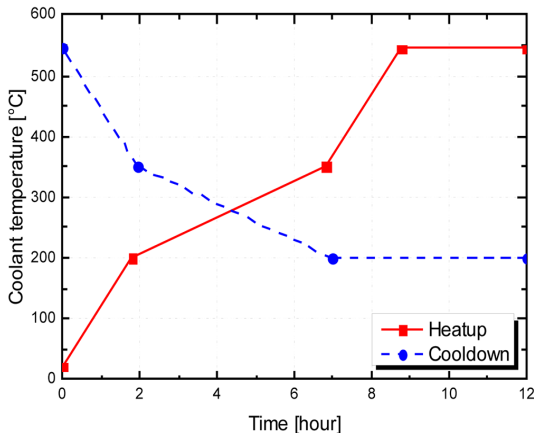


Fig. 3 Heatup and cooldown transients in the piping stress assessment

유한요소해석 결과를 이용하여 1차응력 성분, 2차 응력 성분(최대/최소) 및 변형률 성분을 추출할 수 있었으며, HBB-3200에서 제시된 운전응력 제한평가 (service level A,B,C,D), 비탄성변형 제한평가 및 크리프-피로 평가를 수행할 수 있었다. 평가결과 크리프손상값이 커서 요건을 불만족하는 것으로 나타났으나, 이는 가정된 배관이 지나치게 짧은 상태에서 양단이 구속되어 열하중이 크게 작용했기 때문이다. 따라서 실제 BOP 배관 설계에서는 본 연구에서 가정된 배관에 비해 훨씬 길게 배치될 것이며, 모델의 크기도 훨씬 커질 것임을 짐작할 수 있다.

본 해석에서는 20절점 축약적분요소가 사용되었으며, 두께방향으로 요소망 3개, 전체 약 7만개의 요소 (절점 수 약 35만개)가 사용되었다. 본 모델은 두께방향 및 원주방향의 요소망 형상비를 1로 고정화, 다소 보수적으로 선정된 요소망이다. 하지만, 실제 배관계에 비해 매우 짧은 영역만 모델되었음을 고려할 때, 본 요소망 개수는 실제 배관 설계에서 충분히 나타날 수 있는 개수라고 볼 수 있다.

본 모델을 일반적인 개인용 PC를 이용하여 계산한 결과 60회 가열-냉각 과정 계산에 약 12시간이 소요되었다. 탄성해석에 따른 설계시 동일한 형태의 가열-냉각 과정을 60회 반복할 필요가 없으나, 실제 설계에 적용될 운전곡선은 다양한 형태의 운전곡선이 나타날 것이므로 이를 고려하는 의미에서 60회를 반복하여 계산하였다. 실제의 경우 복잡한 형태의 배관을 솔리드 요소망으로 모델을 구축하고, 위치마다 결과를 확인하는 후처리작업까지 고려하면, 실제 배관설계 과정에서는 훨씬 더 긴 시간과 노력이 요구될 것으로 예상할 수 있다. 이 같은 방법론은 BOP 배관 설계 입장에서 볼 때 효과적인 설계방법론이라고 보기 힘들다. 특히, 건설과 동시에 설계가 진행되고, 건설과정에서 배관 배치가 변경되는 경우 등 보다 현실적인 상황을 고려하면, 본 방법으로 배관 응력평가를 수행하는 것은 매우 비효율적일 것으로 판단된다.

4.2 A등급 고온배관 설계방안 고찰

앞서 언급한 바와 같이, 현행 HBB-3600에서는 기본적으로 HBB-3200(DBA)를 적용하도록 제시하고 있으나, Div. 1, NB-3600에 따른 응력지수를 사용하여 적절히 DBR(design by rule) 평가식을 개발하여 사용할 수 있는 길도 열어두고 있다. 즉, 프랑스의 SFR 원전 설계코드인 RCC-MR의 RB-3600의 평가식을 활용하여 HBB-3600에 적용할 수 있는 평가식을 개발하는 것도 가능할 수 있다. 하지만 이 같은 연구를 통해 평가식을 제시한다고 해도, ASME 설계에도 적합함을 입증하는 것 역시 단기간에 수행하기는 어렵다.

한편, RCC-MR의 RB-3600 평가식을 검토하여 ASME 설계에 활용할 수 있는 평가식을 개발하고 이를 설계참고자료로 사용할 수 있다면, 보다 현실적인 고온배관 설계방법을 도출하는 것이 가능하다.

즉, 먼저 빔요소(파이프 요소)를 이용하여 작용하중을 계산하고 1차원 열전달해석을 통해 배관온도구배를 계산하며, 이를 RCC-MR 기반 평가식에 입력함으로써 응력평가 요건을 바운딩하는 위치를 결정하는 것이다. 그 후 해당 위치에 대한 솔리드요소 상세모델을 작성하고, 이를 통해 HBB-3200 요건의 만족을 입증함으로써, 배관 전체에 대한 솔리드요소 모델을 작성하는 어려움 없이 응력평가를 완료할 수 있다. 제안된 설계 방법론을 Fig. 4에 요약하였다.

본 방법론을 이용한 배관설계를 위해서는 아래와 같이 크게 두 가지 사항에 대한 개발 및 입증 필요할 것으로 예상된다.

- ① 상세평가 수행부위 선별 방법론 개발
 - 고온배관 DBR 관련 해외 평가식(RCC MR, RB-3600 등) 검토
 - 주요 응력성분 및 변형률성분 평가식 개발
 - DBA 대비 평가식 신뢰성 검토
- ② 부분모델을 이용한 상세 응력평가 유효성 검증
 - 빔요소(파이프요소)로부터 계산된 하중 및 기타 성분을 이용한 부분모델 경계조건 입력
 - 부분모델 및 전체모델 평가결과 비교를 통한 신뢰성 검토

상기의 추가적인 기술개발을 통해 A등급 고온배관의 응력평가 세부절차를 도출하고, 이를 PGSFR BOP계통 배관설계에 적용해 나갈 계획이다.

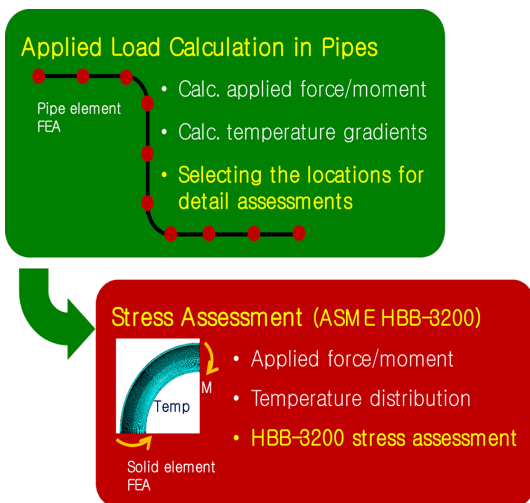


Fig. 4 Proposed stress assessment procedure for class A high temperature piping design

5. 결 론

한국전력기술(주)에서는 PGSFR BOP계통 설계연구의 일환으로서 배관 응력평가를 위한 코드요건 적용 방안을 검토하였다. 안전계통 및 비안전계통 배관에 대한 코드요건 적용방안에 대한 중간결과를 아래에 요약하였다.

- ① 비안전계통 배관은 KEPIC MGE (ASME B31.1)에 따른 설계 적용
- ② 안전계통 B등급 배관은 ASME BPV Div.5 HCB-3600에 따른 설계 적용. 단, ASME 코드 위원회의 코드 개정 상황을 주시하면서 검토 지속 필요
- ③ 안전계통 A등급 배관은 ASME BPV Div.5 HBB-3600 및 3200에 따른 설계 적용
 - HBB-3200 평가를 위한 주요 평가부위를 선별 방법 개발 필요
 - 평가부위 선별방법은 고온배관 DBR 관련 해외 기술기준을 참조하여 개발 예정

후 기

본 연구는 미래창조과학부 원자력연구개발사업의 일환으로 수행된 SFR 원형로 BOP계통 특정설계 연구를 통해 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) ASME, 2015, "High Temperature Reactor," *ASME B&PV Sec. III, Div. 5*, 2015ed.
- (2) ASME, 2015, "Rules for construction of nuclear facility components," *ASME B&PV Sec. III, Div. 1 Sub. NB*, 2015ed.
- (3) ASME, 2012, "Power Piping," *ASME B31.1*.
- (4) ASME, 2009, Companion guide to the ASME Boiler & Pressure Vessel Code, Chapter 16. B31.1, Power piping.
- (5) ASME, 2015, "Materials," *ASME B&PV, Sec. II, Part D*, 2015ed.