

국내 원전 RCS 분기배관에 대한 열피로 선정기준

박정순[†] · 최영환^{*} · 임국희^{*} · 김선혜^{**}

Thermal Cycling Screening Criteria to RCS Branch Lines in Domestic Nuclear Power Plant

Jeong Soon Park[†], Young Hwan Choi^{*}, Kuk Hee Lim^{*} and Sun Hye Kim^{**}

ABSTRACT

Piping failures due to thermal fatigue have been widely reported in normally stagnant non-isolable reactor coolant branch lines. Since the thermal fatigue due to thermal stratification was not considered in the piping fatigue design in old NPPs, it is important to evaluate the effect of thermal stratification on the integrity of branch lines. In this study, geometrical screening criteria for Up-horizontal branch lines in MRP-132 were applied to SI(Safety Injection) lines of KSNP 2-loop and WH 3-loop. Some computational fluid dynamic(CFD) analyses on the Reactor Coolant System(RCS) branch lines were also performed to develop the regulatory guidelines for screening criteria. As a result of applying MRP-132 screening criteria, KSNP 2-loop and WH 3-loop SI lines are determined to need further detailed evaluation. Results of CFD analyses show that both valve isolation and amount of leakage through valve can be used as technical bases for the screening criteria on the thermal fatigue analysis.

Key Words : Branch lines(분기배관), Thermal fatigue(열피로), Thermal stratification(열성층)

1. 서론

원자력발전소 원자로냉각재계통(Reactor Coolant System, RCS)에 연결된 분기배관(Branch line)에서의 손상 사례가 전 세계 여러 원전에서 지속적으로 보고되고 있다^{1,2)}. RCS 분기배관의 손상은 고온 선회류 침입(Hot swirl penetration) 및 차단밸브에서의 누설 등으로 인해 발생하는 열성층(Thermal stratification) 및 열피로가 주된 원인으로 알려져 있다. 특히, 1990년대 이전에 설계된 원전의 경우, 열성층 현상이 분기배관 설계에 반영되어 있지 않기 때문에 배관의 건전성을 저해할 가능성이 있다. 따라서 열성층 현상이 배관 건전성에 미치는 영향을 평가하여 이에

대한 관리 대책을 수립하는 것이 원전의 안전성 확보에 중요하다.

미국 규제기관(NRC)에서는 Farley 2 호기에서 발생한 열피로 손상 사례를 계기로 전체 가동 원전에 대해 RCS 분기배관에서의 열피로 가능성을 확인하고, 이에 대한 강화검사를 수행하도록 요구한 바 있다¹⁾.

이에 따라 미국 원자력 산업계에서는 미국 전력연구원(EPRI)을 중심으로 열피로 평가방법 및 검사방안을 마련하고 이를 시행하고 있다. 국내의 경우에도 규제기관과 산업계에서 설계에 반영되지 않은 분기배관에서의 열피로 현상에 대한 평가 및 종합적인 관리 방안을 마련중이다³⁾. 분기배관 열피로 평가결과와 신뢰성을 확보하기 위해서는 열피로 평가대상 선정기준 및 평가방법의 적합성이 보장되어야 하며, 이에 대한 지침을 산업계에 주기 위한 분기배관 열피로 규제지침(Regulatory guide)이 개발되어야 한다. 특히, 열피로 규제지침에 포함될 선정기준(Screening

[†] 책임저자, 회원, 한국원자력안전기술원 공학연구소

E-mail : k651pjs@kins.re.kr

TEL : (042)868-0778 FAX : (042)868-0168

^{*} 한국원자력안전기술원

^{**} 성균관대학교 기계공학부

criteria)은 열피로 발생 가능성이 없는 배관을 상세 평가 대상에서 제외함으로써 계산 소요 시간 및 비용을 절감할 수 있는 중요한 항목이다.

본 연구에서는 분기배관 열피로에 대한 선정기준 관련 규제지침을 개발하기 위하여 미국의 열피로 선정기준^{4,6)}을 검토하고 이를 한국표준형 원전 2루프(KSNP 2-loop) 안전주입(Safety Injection, SI)배관 및 웨스팅하우스형 3루프(WH 3-loop) 안전주입 배관에 적용하여 열성층 발생 가능성을 평가하였다. 또한, KSNP 2-loop를 대상으로 열유동 해석을 수행하여 차단밸브를 통한 누설 여부와 누설량이 열피로에 미치는 영향을 평가하여 규제지침 선정기준으로써의 타당성을 검토하였다. 이러한 평가 결과들은 추후 개발될 국내 열피로 규제지침의 기술배경자료로 활용될 예정이다.

2. RCS 분기배관의 열피로 현상 및 선정기준

2.1 RCS 분기배관의 열피로 현상

분기배관에서의 열피로 현상은 Fig. 1과 같이 분기배관 연결 형상에 따라 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 첫 번째 발생 원리는 RCS 배관으로부터 침투한 고온의 선회류(Swirl flow)와 격리밸브 누설로 인한 저온의 물이 만나 형성되는 열성층이 주기적으로

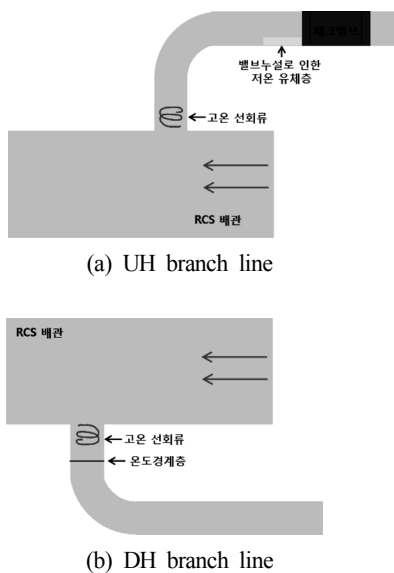


Fig. 1 Thermal fatigue in the branch line connected to RCS piping

로 변동함으로써 열피로를 발생시키는 것이다. 이러한 원리로 발생하는 열피로는 주로 RCS 배관 상부 및 수평부(Up-Horizontal&Horizontal, UH/H)에 연결된 분기배관에서 발생하며, 대표적인 열피로 손상 사례로는 미국 원전 Farley 2호기의 안전주입배관 손상 사례가 있다. 두 번째 발생 원리는 밸브 누설 없이 RCS 배관으로부터 침투한 고온의 선회류가 분기배관 수평 부위까지 침입하여 열성층을 형성, 전진 및 후퇴를 반복할 때 발생하는 열피로로써 주로 RCS 배관 하부(Down-Horizontal, DH)에 연결된 분기배관에서 발생한다. 대표적인 사례로는 미국 원전 Three Mile Island 1호기 배수배관의 손상 사례가 있다.

본 연구에서 평가한 KSNP 2-loop 및 WH 3-loop의 안전주입배관은 RCS 배관 상부로 분기되는 UH형 분기배관이다.

2.2 열피로 평가 선정기준

RCS에 연결된 분기배관은 ASME Code Class 1 배관으로 ASME Code Sec. III NB에 따른 응력/열피로 해석을 수행하여야 한다. 분기배관에 대한 응력/열피로 해석을 수행하기 위해서는 열성층으로 인한 온도 분포가 입력되어야 하며, 이를 위해서는 열유동 해석이 선행되어야 한다. 그러나 국내 가동원전(20기) RCS 분기배관의 개수는 약 588개소(가압경수로형: 346개, CANDU형 242개)로 상당하고, 각 분기배관의 형상이 발전소별로 상이하며, 직경 또한 1/2 인치에서 16 인치까지 다양하므로 국내 모든 분기배관에 대한 열유동 해석을 수행하기 위해서는 상당한 계산시간 및 비용이 소요될 것이다. 이와 같이 분기배관에서의 복잡한 열유동 현상과 열유동 해석에 소요되는 비용으로 인해 분기배관에 대한 열피로 평가는 해석 대상을 선별하는 선정기준을 설정하여 평가 대상을 줄이는 방식을 주로 채택하여 수행된다. 미국 EPRI는 MRP-146/146S 및 MRP-132를 통해 공칭직경이 1인치(0.025m) 이하인 배관, 밸브 누설(In-leakage) 가능성이 없는 배관(밸브 누설조건은 UH/H 배관에만 적용) 등은 평가대상에서 제외하는 선정기준을 제시한 바 있다^{4,6)}. 특히, MRP-132에는 고온 선회류의 침입이 수평 배관까지 도달하지 않으면 수평 배관 위치에서의 열성층 발생 가능성이 없다는 가정하에 Fig. 2와 같이 수직배관 길이를 사용한 형상학적 선정기준(Geometrical screening criteria)이 제시

되어 있다. 분기배관의 수직부분 길이(L_v)를 분기배관 내경(D)으로 나눈 값(L_v/D)이 Fig. 2의 그래프 상부에 해당될 경우, 열성층 발생가능성이 없으므로 상세 열피로 평가대상에서 제외할 수 있다. Fig. 2의 선정기준은 다음 운전조건을 만족할 때 적용가능하다.

- | | |
|------------------|------------------|
| RCS 고온관: | RCS 저온관: |
| - 내경 > 29 in. | - 내경 > 27.5 in. |
| - 온도 > 600 °F | - 온도 > 540 °F |
| - 속도 < 55 ft/sec | - 속도 < 55 ft/sec |

2.3 MRP-132 선정기준 적용

본 연구에서는 Fig. 2의 선정기준을 사용하여 KSNP 2-loop SI 배관 및 WH 3-loop SI 배관의 열성층 발생 여부를 평가해보았다. KSNP 2-loop 및 WH 3-loop의 SI 배관은 모두 저온관에 연결되어 있으며, 유형별 저온관의 운전조건을 검토한 결과, MRP-132⁶⁾ 선정기준의 적용 조건을 만족하였다.

- | | |
|-------------------|-------------------|
| KSNP 2-loop: | WH 3-loop: |
| - 내경: 30 in. | - 내경: 27.5 in. |
| - 온도: 562 °F | - 온도: 556.2 °F |
| - 속도: 37.4 ft/sec | - 속도: 44.5 ft/sec |

UH형 분기배관의 경우, 수직 배관 길이 L_v 및 수평배관 길이 L_h 는 곡관을 고려하여 다음과 같이 계산한다⁵⁾.

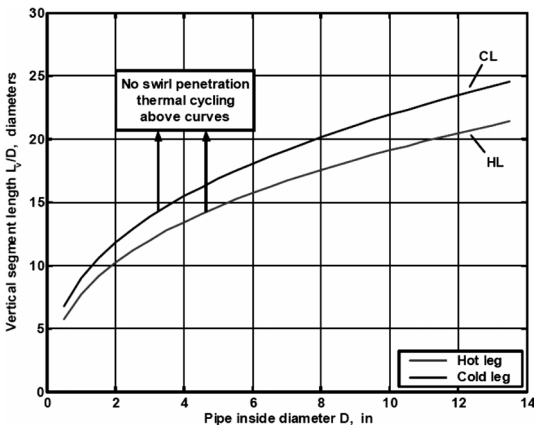


Fig. 2 Geometric screening criteria for UH piping configuration

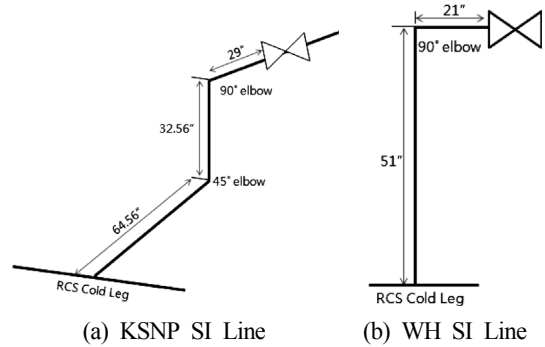


Fig. 3 SI Lines connected to RCS cold leg

$$L_h = L_{h,drw} - R_B \tan\left(\frac{\theta_b}{2}\right) + \left(R_B - \frac{D}{2}\right) \alpha \quad (1)$$

$$L_v = L_{h,drw} + L_{v,drw} - 2R_B \tan\left(\frac{\theta_b}{2}\right) + R_B \theta_b - L_h \quad (2)$$

여기서, $L_{h,drw}$ 은 밸브로부터 수직 분기배관 중심부까지 도면에 표시된 수평배관 길이이며, $L_{h,drw}$ 은 저온관 내면에서부터 수평 분기배관 중심부까지 도면에 표시된 수직배관 길이이다. R_B 와 θ_b 는 곡관의 곡률 및 각도이며, D 는 분기배관의 내경을 의미한다. α 는 열피로 영향을 받는 곡관부의 각도를 의미하며 항상 30°로 가정한다⁵⁾.

식(1) 및(2)에 따라 평가한 KSNP 2-loop 및 WH 3-loop SI 배관의 L_v/D 는 각각 8.33 및 9.54로 계산되었다. 두 값은 Fig. 2 그래프 하부 영역에 위치하며, 이는 수평 분기배관까지 고온 선회류가 침입하여 열성층 현상이 발생 가능함을 의미한다. 따라서, KSNP 2-loop 및 WH 3-loop SI배관에 대해서는 상세 평가를 수행하여 열성층/열피로가 건전성에 미치는 영향을 평가할 필요가 있다.

3. 국내 원전 분기배관의 열유동 해석

3.1 차단된 분기배관의 열유동 해석

2.1절에 설명한 바와 같이, UH/H형 분기배관의 열성층 형성 원인에는 밸브를 통한 저온수 누설이 포함되어 있다. 본 절에서는 KSNP 2-loop SI 배관(14 in. SCH. 160)에 대한 열유동해석을 수행함으로써 밸브 누설 유무 및 누설양이 열성층 형성에 미치는 영향을 평가하였다.

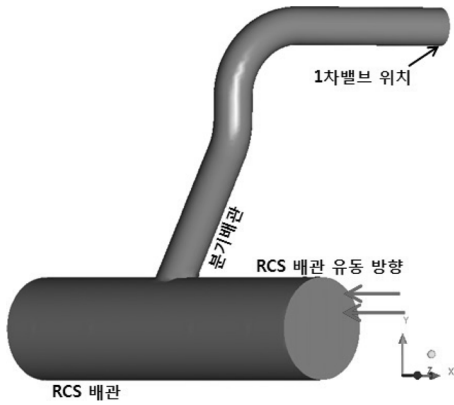


Fig. 4 CFD modeling of RCS piping and SI line

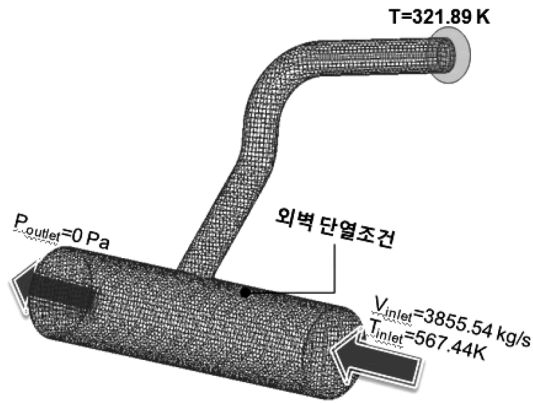


Fig. 5 Boundary condition of RCS piping and SI line

분기배관의 열유동 해석은 상용 CFD(Computational Fluid Dynamics) 소프트웨어인 ANSYS CFX-Ver. 12를 사용하여 수행하였다. 해석 모델은 민감도 분석을 통하여 약 10만개의 요소망으로 분할하였으며, CFD 해석 모델을 Fig. 4에 나타내었다. 배관 내 유동은 RCS 배관으로부터 침투하는 고온 선회류를 고려하기 위하여 Shear Stress Transport(SST) 난류 모델을 적용하였다. 이 모델은 난류의 평균 유동 속도를 구하는 RANS(Reynolds-averaged Navier-Stokes) 모델 중 하나로 Standard K- ω model 모델에 비해 벽면 근처의 유동과 Re 수가 큰 유동의 경우 해석 정확도가 좋은 것으로 알려져 있다. 분기배관의 열성층은 RCS 배관으로부터의 고온 선회류 침입의 영향으로 발생하기 때문에 부력 효과가 중요하다고 할 수 있다. 부력 효과를 고려하기 위한 방법으로는 온도에 따른 실제 밀도를 고려하는 방법(Full Buoyancy 방법)과 온도에 따른 밀도를 선형·단순화하여 적용

Table 1 Initial & boundary conditions for CFD analysis

Initial condition	<u>Branch line</u> - Temperature: 321.89K - Velocity: 0 m/s(stagnant) - Pressure: 0 MPa
Boundary condition	<u>RCS cold leg</u> - Inlet: 567.44K, 3855.54 kg/sec - Outlet: 3855.54 kg/sec

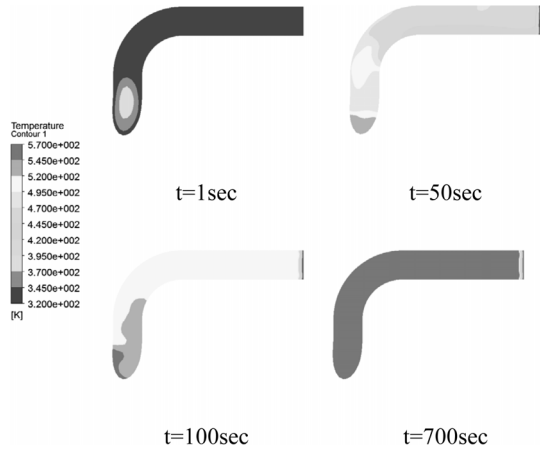


Fig. 6 Variation of temperature distribution in SI line (Non-leakage case)

하는 방법(Boussinesq Approximation 방법)이 있다. Boussinesq Approximation 방법은 유체의 온도에 따른 밀도차가 클 경우 적용하기에 적합하지 않으므로⁷⁾, 본 연구에서는 Full Buoyancy 방법을 적용하였다.

분기배관 내 열성층 현상에 대한 수렴된 해를 얻기 위하여 시간 간격(time step)을 0.5초로 설정하였으며, 각 시간간격에 대하여 50회의 반복계산을 수행하였다. 초기조건 및 경계조건은 Table 1 및 Fig. 5와 같다. 1차 밸브에 의해 차단된 모델의 경우, Fig. 6과 같이 해석초기에 RCS 배관의 고온 냉각수가 분기배관으로 침투함에 따라 분기 위치 주변에서 온도 차이가 발생하나, 시간이 지남에 따라 온도 차이가 감소하고 결국 RCS 배관 유체의 온도로 수렴하여 열성층 현상이 나타나지 않았다.

UH/H형 분기배관의 손상사례가 밸브 누설이 있는 경우에만 발생한 운전경험으로 볼 때 밸브를 통한 저온 누설이 없는 경우는 열성층/열피로 상세 평가대상에서 제외할 수 있으며, 밸브 누설 여부는 열성층/열피로 평가의 선정기준으로 사용가능하다.

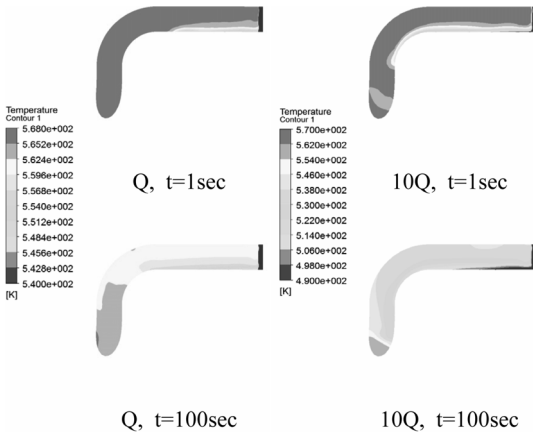


Fig. 7 Variation of temperature distribution in SI line (Valve leakage case)

3.2 밸브 누설을 고려한 열유동 해석

밸브 누설을 고려한 열유동 해석 대상은 3.1절과 같이 KSNP 2-loop SI 배관이며, SI 계통으로부터 RCS로의 누설이 발생한 경우(In-leakage)를 고려하였다. 누설율(Q)은 밸브 설계 사양서에 제시된 안전등급 밸브 허용 누설율 7.5D ft³/day(D는 밸브 공칭 크기, inch 단위)를 기준으로, $Q(2.97 \text{ m}^3/\text{day})$, 10Q ($29.7 \text{ m}^3/\text{day}$)를 고려하여 해석하였다.

Q 누설을 고려한 경우 수평 분기배관에서는 최대 15K의 유체 온도차가 발생하였으며, 10Q 누설의 경우에는 약 80K의 유체 온도차가 발생하였다(Fig. 7). 밸브로 차단된 분기배관의 경우 분기배관의 온도가 RCS 저온관 유체의 온도로 수렴된 반면 밸브 누설을 고려한 분기배관의 경우에는 수평 분기배관에서 열성층 현상이 지속되었으며, 온도차의 정도는 밸브 누설이 커질수록 증가함을 확인할 수 있다. 그러나, Q의 밸브 누설을 고려하였을 경우 발생하는 최대 유체 온도차(15K)는 EPRI 평가방법⁴⁾에서 제시하는 온도차 기준(48K) 미만이므로 미미하다고 할 수 있다.

EPRI 평가방법⁶⁾은 시험결과에 기반하여 열성층을 발생시킬 수 있는 최소 누설율을 식(3)과 같이 제시하고 있다.

$$\frac{Q_l}{\left(g \frac{\rho_c - \rho_o}{\rho_c} D^5\right)^{1/2}} > 0.0005 \quad (3)$$

여기서, Q_l 은 누설율, g 는 중력가속도, D 는 분기

배관 내경이며 ρ_c 및 ρ_o 는 각각 누설온도 및 RCS 배관 온도에서의 유체 밀도를 의미한다.

밸브 누설율 $Q = Q_l$ 때 식(3)에 따라 계산한 값은 0.00049로 평가되어 EPRI 평가방법의 최소 누설율을 만족하지 않는다. 열성층 발생 여부는 밸브 누설율 정도에 따라 결정되므로 밸브 누설율 결정이 중요하다고 할 수 있다. 따라서, 밸브 누설가능성이 있는 배관에 대한 열유동 해석을 위해서는 식(3) 등을 활용하여 열성층을 발생시킬 수 있는 밸브 누설율을 먼저 결정하여야 한다.

3.3 배관 벽두께를 고려한 열유동 해석

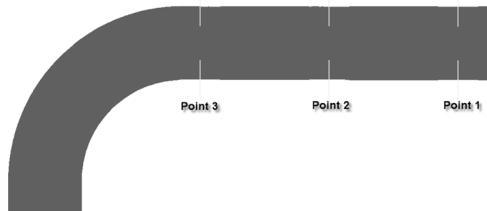
배관 벽두께의 영향을 파악하기 위하여 3.1절 및 3.2절의 해석 대상에 배관을 함께 고려하여 열유동 해석을 수행하였다. 배관은 고체 요소로 모델링되었고 유체와 고체 경계면 간에는 Conjugate heat transfer를 통하여 열교환이 이루어지도록 모델링하였다. 배관 재질인 304 스테인리스강의 열적 물성은 관심 온도 영역에서 큰 변화가 없으므로 Table 2에 제시한 상수값을 사용하였다.

밸브로 차단되어 있는 모델에 대하여 해석한 결과, 유체 영역에서의 열전달은 부력에 의한 유체의 대류에 의해 빨리 이루어지는 반면 RCS 배관-분기배관으로의 길이 방향 전도 열전달과 유체-배관 경계면에서의 대류 열전달은 상대적으로 천천히 이루어짐을 확인할 수 있었다. 이에 따라 배관의 온도는 내부 유체의 온도에 비하여 천천히 상승하였다. 또한, 배관을 고려한 모델은 유체-배관간 열평형을 이루기 위해 경계면에서의 열전달이 지속적으로 이루어지기 때문에 정상상태에 도달하는데 걸리는 시간이 배관을 고려하지 않았을 때보다 길어진다.

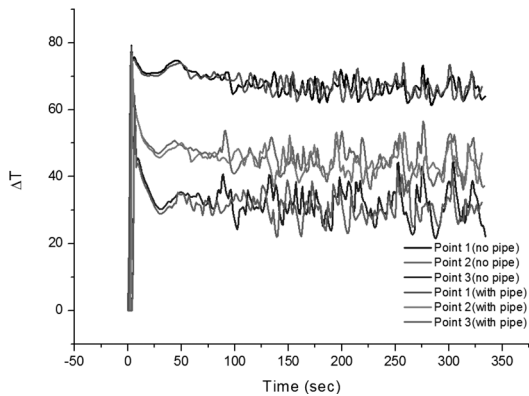
배관 고려 여부에 따른 유체 온도차를 확인하기 위하여 Fig. 8(a)와 같은 유체영역의 세 지점에서 상·하부 온도를 추출하여 그 차이를 계산하였다. 이때, 해석 모델은 10Q의 밸브 누설을 고려한 모델을 사용하였다. 유체 온도차는 배관 고려 여부에 따라 큰 차이를 나타낸다는 연구결과가 있으나⁷⁾, Fig. 8(b)에서 나타난 것과 같이 배관을 고려한 모델과 고려하지 않은 모델에서의 유체 온도차는 거의 유사하게 변동하였다. 이는 밸브 누설을 고려한 모델의 초기 온도를 RCS 배관온도로 수렴하였다고 가정할 것에 기인한 것으로 보이며, 초기 조건을 분기배관의 온도로 적용하고 RCS 고온 선회로의 침투로 인한

Table 2 Material properties of 304 stainless steel

Density [kg/m ³]	Specific Heat [K/kg · K]	Thermal Conductivity [W/m · K]
7900	905	21.2



(a) Locations of temperature monitoring points (Fluid domain)



(b) Temperature difference between top and bottom of fluid domain

Fig. 8 Comparison of temperature difference between model with pipe and model without pipe(Valve leakage=10Q case)

열전달부터 고려하기 시작한다면 배관 고려 여부에 따라 온도 변화 양상의 차이가 날 것으로 예상된다.

4. 결론

본 연구에서는 분기배관 열피로에 대한 선정기준 관련 규제지침 개발을 위해 미국의 열피로 선정기준(분기배관의 수직부 길이 평가)을 검토하고 이를 적용하여 KSNP 2-loop 및 WH 3-loop SI 배관의 열성층 발생 여부를 평가하였다. 미국의 분기배관 수직부에 대한 열피로 선정기준을 적용한 결과, KSNP 2-loop 및 WH 3-loop SI 배관은 선정기준을 통과하

지 못해 상세한 평가가 필요한 것으로 평가되었다. 국내에서도 추후 추가적인 열유동해석을 통해 분기배관 수직부 길이에 대한 선정기준을 개발할 예정이다.

분기배관 차단밸브를 통한 누설여부와 누설량이 열피로에 미치는 영향을 평가하고 선정기준으로서의 타당성을 검토하고자 KSNP 2-loop SI를 대상으로 열유동 해석을 수행하였다. KSNP 2-loop SI배관에 대한 열유동해석 결과, 차단밸브를 통한 누설여부와 누설율에 대한 특정 기준은 분기배관 열피로 해석에 대한 선정기준으로 사용할 수 있음이 확인되었다. 밸브 누설율은 열성층 발생 정도에 영향을 미치는 인자이므로 열성층을 발생시킬 수 있는 누설율을 결정하고 이를 건전성 평가에 활용해야 한다. 또한 적절한 열유동 해석결과를 얻기 위해서는 난류 모델, 부력모델, 그리고 배관 벽두께 등이 적절하게 고려되어야 한다. 밸브 누설량 결정, 배관 벽두께의 영향에 대해서는 추후 연구를 수행할 예정이다.

후 기

본 연구는 교육과학기술부 중장기연구 사업(원전 PWSCC 및 열피로 규제지침 및 경년열화 종합관리 방안 개발)의 일환으로 수행되었습니다. 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. USNRC, 1988, "Thermal Stresses in Piping Connected to Reactor Coolant Systems", Bulletin 88-08
2. EPRI, 2000, "Operating Experience Regarding Thermal Fatigue of Unisolable Piping Connected to PWR Reactor Coolant Systems", MRP-25
3. 최영환, 박정순, 김진수, 정연기, 2010, "국내 원전 열피로 평가 및 검사 규제 방안", KPVP 2010년도 연차학술대회, pp.143-144
4. EPRI, 2005, "Material Reliability Program: Management of Thermal Fatigue in Normally Stagnant Non-Isolable Reactor Coolant System Branch Lines", MRP-146
5. EPRI, 2009, "Material Reliability Program: Management of Thermal Fatigue in Normally Stagnant Non-Isolable Reactor Coolant System Branch Lines-Supplemental Guidance", MRP-146S

6. EPRI, 2004, "Material Reliability Program: Thermal Cycling Screening and Evaluation Model for Normally Stagnant Non-Isolable Reactor Coolant Branch Line Piping With a Generic Application Assessment", MRP-132
7. KINS, 2007, "고리 1호기 밀림관 및 분기배관의 피로수명 검증해석", KINS/HR-827
8. KHNP, 2003, "가압기 밀림관 열성층 영향 평가 및 열성층 배관 정밀검사 부위 선정"