

탈설계조건에서 한국표준형 원전 증기발생기에 대한 튜브 마모량의 상대적 변화율 예측

Prediction of Comparative Rate of Wear Volume on KSNP Steam Generator for Off-Design Conditions

부명환*, 박치용*, 김태순*, 박수기*, 유기완**

* 한전전력연구원 대전광역시 유성구 문지동 103-16

** 전북대학교 기계항공시스템공학부 전북 전주시 덕진구 덕진동 664-14

요 약

. 4가 ATHOS3 , ANSYS
PIAT

. ORT, 출력증가 등과 같은 탈설계조건에서의 운전은 증기발생기 튜브 마모측면에서 큰 영향을 미치게 된다. 따라서 각각의 탈설계조건에 따른 마모량의 변화를 충분히 사전에 검토하여야 하며, 증기발생기 튜브의 건전성 확보 측면에서 열수력 평가, 진동해석, 마모량 평가 등 일련의 과정을 통하여 종합적인 검토를 수행하여야 한다.

Abstract

The comparative rate of wear volume under off-design conditions was predicted on KSNP(Korea Standard Nuclear Power plant) steam generator. Thermal hydraulic analysis has been performed using ATHOS3(Thermal-Hydraulic Analysis of Steam Generators) for four off-design conditions. Modal analysis, stability ratio and turbulence excitation were evaluated by using ANSYS code and PIAT(Program for Integrity Assessment of SG Tube). Comparative wear volume rate for steam generator tube was predicted using above described results. Off-design condition such as ORT and the increase of reactor thermal power, were influenced considerably on steam generator tube wear. Thus, a variation of wear volume for respective off-design condition should be investigated in advance. In order to estimate steam generator integrity, a comprehensive investigations are required through series such as thermal hydraulic analysis, modal analysis and wear volume assessment.

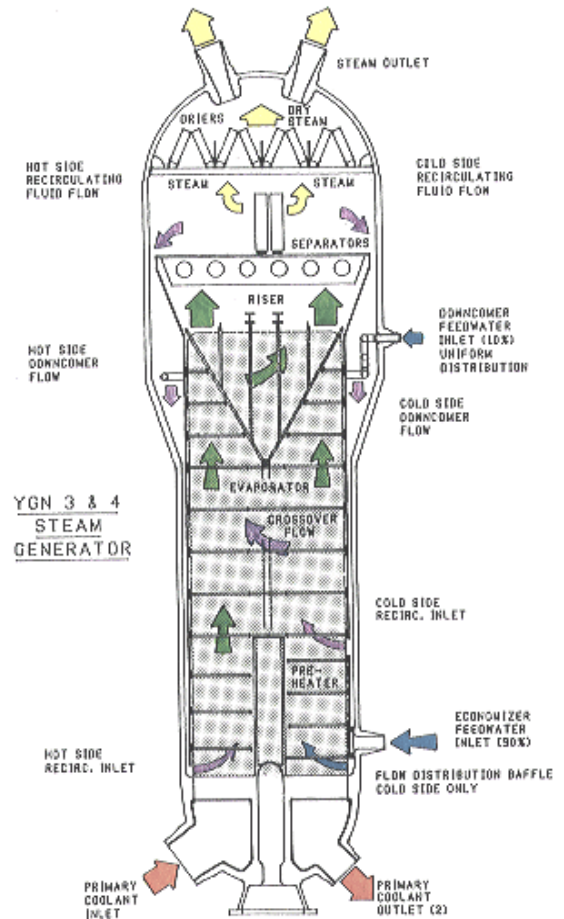
1. 서 론

원자력발전소에 있어서 증기발생기는 원자로의 핵연료 분열반응으로 가열된 고온·고압의 냉각

수와 터빈발전기를 가동시키는 작동유체를 각각 1, 2차측으로 하는 일종의 열교환기로서, 원자로내의 방사성 물질이 포함된 냉각수(1차측)와 원자로 외부의 청정시스템(2차측)의 경계에 위치하는 원전 주요설비 중의 하나이다. 증기발생기에서는 튜브의 손상이 가장 큰 문제점으로 지적되고 있으며, 고온·고압의 냉각수 등과 같은 사용 환경에 의한 1, 2차측의 응력부식균열(stress corrosion cracking, SCC)과 유체유발유동 및 증기발생기의 구조적인 특성 등에 의해 여러 가지 손상이 발생하게 된다. 또한, 이러한 손상은 수화학처리, 열역학적 설계, 재료선택, 제조방법 및 운전방법 등이 복합적으로 작용하여 발생하고 있다. 증기발생기 튜브의 손상 문제를 해결하기 위하여 전 세계적으로 많은 시간과 노력을 투자하여 왔고, 이를 설계에 반영하여 좋은 성과를 얻고 있으며, 증기발생기의 건전성과 사용수명연장에 크게 기여하고 있다.

한편, 증기발생기의 건전성과 사용수명이 증가하게 됨에 따라 유체의 유동유발진동(flow-induced vibration, FIV)에 의한 증기발생기 튜브의 손상이 상대적으로 큰 문제로 부각되기 시작하였다. 유동유발진동의 원인은 크게 세 가지로 구분되며, 유체탄성불안정성(fluid-elastic instability, FEI), 난류의 비정상 압력변동에 의한 가진(turbulence excitation), 그리고 튜브에서 발생하는 와류의 흘림(vortex shedding)에 의한 주기적인 진동으로 분류하고 있다. 증기발생기의 튜브 주위에는 위 세 가지 유동유발진동기구에 의해서 마모(wear) 손상에 차이를 나타내고 있다. FIV에 의해 발생하는 마모를 평가하는 방법으로는 시험을 통한 평가와 해석적인 방법이 있으나, 시험에 의한 가동원전의 증기발생기 튜브 마모평가는 현실적으로 불가능하기 때문에 국부적으로 평가하고 있으며, 대부분 해석적인 방법으로 이 문제에 접근하고 있다.

가동원전에서는 설계당시의 운전조건에서 변화된 운전조건을 적용하는 경우가 종종 발생하게 된다. 이러한 운전조건을 탈설계조건(off-design condition)이라 하며, 탈설계조건에는 ORT (Operation in Reduced Temperature) 운전, 출력증가 등이 행하여지고 있고, 이러한 설계조건 변화는 증기발생기 튜브 건전성에도 영향을 크게 미치고 있다. 본 논문에서는 특히 증기발생기 튜브에 대한 마모적 관점에 제한하여 고찰하였다. 이를 위하여 해석적인 방법으로 마모량을 평가하였으며, Yetisir Pettigrew가 가 [1] 증기발생기 튜브에 대한 각각의 마모량 변화를 탈설계조건과의 상대적인 변화율로서 예측하였다.



1

2. 증기발생기의 개요

(KSNP) ABB-CE
 U- () Alloy 600MA 17
 U , 90°
 가 가 .

(1).

(stay cylinder)

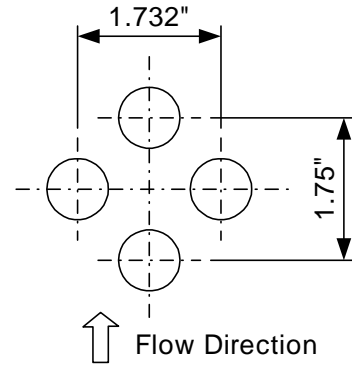
2

가

[2] , 3 KSNP



2



3

3. 탈설계조건과 마모량 변화율 예측절차

가

가

1 Case 1

, Case 2

, Case 3 5%

가

. Case

4 8%

Case 5

가 10

. 1

Case 2가 KSNP

, (1)

$$Comparative\ rate = \frac{Case\ 1,\ 3,\ 4,\ 5\ Parameter - Case\ 2\ Parameter}{Case\ 2\ Parameter} \times 100 \quad (1)$$

1

	원자로출력 (MW)	냉각재 고온관 온도(°F)	관막음률 (%)	급수온도 (°F)	냉각재 유량 (×10 ⁶ lb/hr)	증기압력 (psia)	증기유량 (×10 ⁶ lb/hr)
Case 1	2825	611.0	8	450	61.75	986	6.332
Case 2	2825	621.2	8	450	60.75	1070	6.360
Case 3	2966	611.0	8	450	61.99	959	6.639
Case 4	2825	611.0	0	450	63.20	1014	6.340
Case 5	2825	611.0	8	440	61.75	991	6.241

마모량 변화율 예측 절차는 그림 4에서 나타낸 것 같이 3단계로 나누어진다. 1단계에서 먼저 열수력해석을 수행한다. 증기발생기의 열수력 해석은 EPRI(Electric Power Research Institute)에서 개발한 3차원 2상유동 해석코드인 ATHOS3코드[3]를 이용하였다.

2 ATHOS3

ANSYS

PIAT[4]

ANSYS

ver 5.6

, U-tube

(tube support

plate, TSP) r, θ , x- R41C83
 . PIAT ASME code [5]
 RMS(Root Mean Square)

3 Archard [6] (work-rate) 가 Connors가 [7]

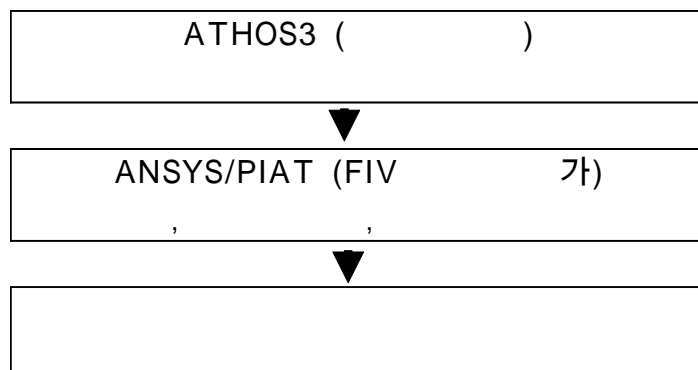
가 (2)

$$\dot{V} = K \cdot \dot{W} \quad (2)$$

, K 가 가 Yetisir Pettigrew가 가
 [1] 가
 가 (3)

$$\dot{W}_N = 8\pi^3 M f^3 Y_{RMS}^2 \xi / \mu \quad (3)$$

, M , f , Y_{RMS} , μ



4. 결과 및 고찰

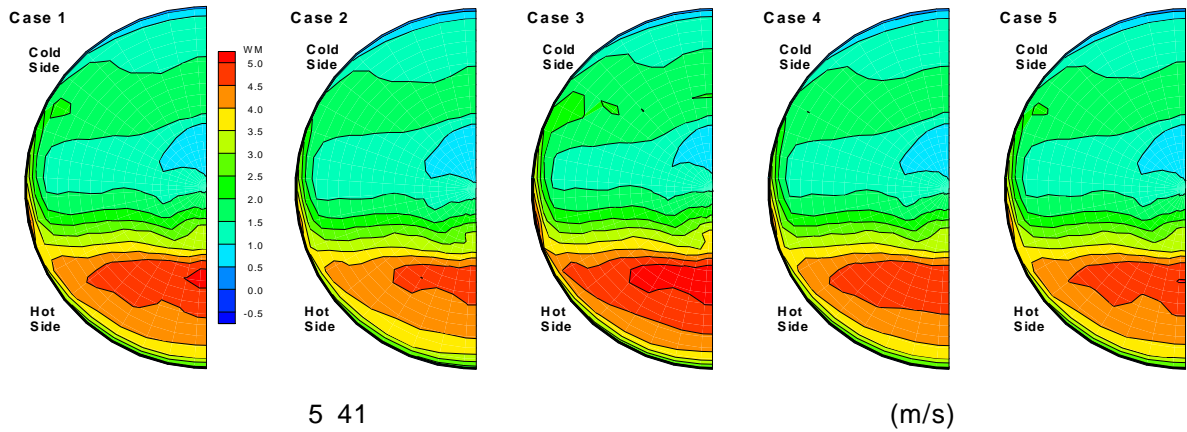
4.1 탈설계조건에 따른 열유동 특성

그림 5는 41 . 41

가 가 , 가
 5

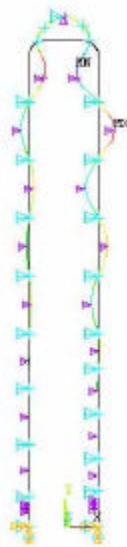
가

가

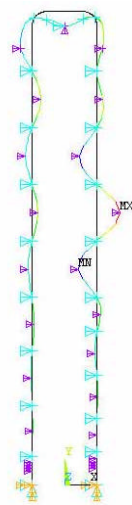


5 41

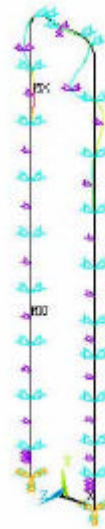
(m/s)



(a) 1 ($f_1=32.748\text{Hz}$)



(b) 2 ($f_2=36.061\text{Hz}$)



(c) 5 ($f_5=44.1501\text{Hz}$)

6 R41C83

(Case 2)

, Case 3 가 가 , Case 2가 가 , Case 1, 5, 4 가 . 가 8 가

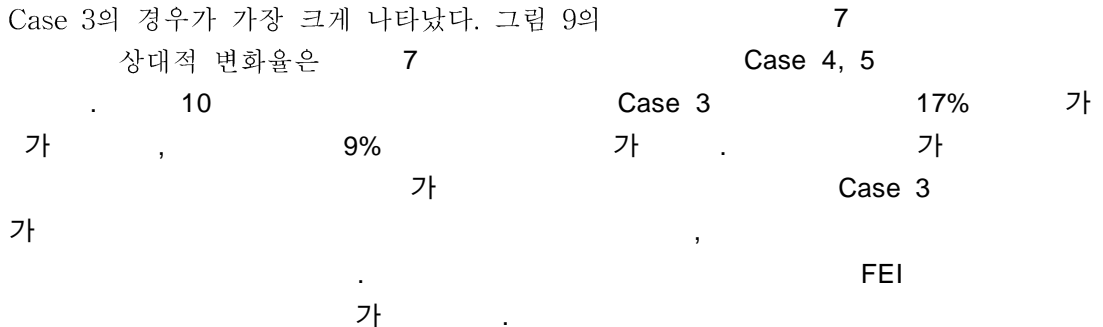
4.2 탈설계조건에 따른 고유진동수 및 상대적인 마모량변화율 예측

탈설계조건 Case2에 대한 증기발생기 R41C83번 튜브의 고유진동 모드해석결과를 그림 6에 나타내었다. 그림 6(a)의 경우 튜브상부에 국부고유진동모드가 집중되어 있는 것으로 나타나고 있으며, 튜브상부의 마모는 1차 진동모드에 의해 지배받는다는 것을 예상할 수 있다. 또한 대부분의 진동모드는 U-자관이 놓여있는 평면 내에서 일어나는 in-plane 모드로 나타나지만, 그림 6(c)와 같이 평면 외에서 일어나는 out-of-plane 모드도 나타나고 있다. 다른 탈설계조건에 대해서도 그림 6과 비슷한 경향을 나타내고 있다.

그림 7에 각 탈설계조건에 대한 상대적인 고유진동수의 변화율을 나타내었다. 고유진동수의 상대적인 변화를 보면, 열출력이 증가(Case 3)한 경우가 가장 크고, 냉각재의 온도를 감소(Case 1) 경우, 급수온도를 감소한 경우(Case 5), 관막음이 없는 경우(Case 4)의 순서로 나타나고 있다. 결국, 유체의 열유속이 빨라짐(그림 5)에 따라 튜브의 고유진동수도 증가하는 것을 알 수 있다. 튜

브의 고유진동수는 임계속도와 난류여기에 의한 진폭에 기여하게 되며 결국 마모에도 영향을 미치게 된다.

유체탄성불안정성에 의한 진동은 안정성비(stability ratio, SR)에 의해 평가되며, 튜브의 고유진동에 의한 진동 형상함수를 고려한 횡유동 유효틈새속도와 임계속도의 비로 정의된다. 이 값이 1을 넘으면 유체탄성불안정성 영역에 들어가게 되어 튜브의 갑작스런 파손이 발생하게 된다. 열수력해석 코드인 ATHOS3은 튜브에 대한 마찰저항을 고려하여 얻어지는 속도를 의미(그림 5)하며, 튜브의 안정성비를 검토하기 위해서는 튜브의 외경, 피치, 다공성 등을 고려한 유효틈새속도를 평가하여야 한다. 그림 8~10에 이들 요소를 고려한 유효틈새속도, 임계속도 및 안정성비의 상대적 변화율을 나타내었다. 그림 8의 유효틈새속도는 그림 5의 열수력 속도와 상관이 있으며, 상대적 변화율은 Case 3의 경우가 가장 크게 나타났다. 그림 9의



난류가진에 의한 진동은 급격한 튜브의 손상을 일으키지는 않지만 증기발생기의 수명동안 지속적인 가진 현상에 의한 fretting wear현상을 일으키게 된다. ASME code에서 난류여기에 의한 응답해석을 규정하고 있다. 따라서 탈설계조건에 따른 난류가진에 의한 응답을 해석하였으며, 그림 11에 탈설계조건에 따른 난류가진에 의한 최대 진폭에 대한 변화율을 나타내었다. 난류가진에 의한 튜브경간에 따른 Y_{RMS_Max} 는 탈설계 조건후 모두 증가하는 경향을 나타내고 있으며, 이는 탈설계조건에 의해 열유속이 증가하는 현상에 기인하고 있다. 또한, 탈설계조건에 따른 증가율은 0.5%이하로 크지는 않은 것으로 나타났으며, 1차 모드에서 가장 큰 증가를 나타내고 있다. 난류여기에 의한 튜브의 진폭이 증가하면 증기발생기내의 튜브 방진봉(Anti Vibration Bar, AVB)과의 마찰이 증가하게 되며 결국 식(3)에 의해 마모량이 증가하게 된다.

그림 12는 Yetisir Pettigrew가 식[1]을 이용해 구한 증기발생기 튜브의 Case 3, Case 2, Case 4, 5의 마모량 변화율을 나타내었다. Case 3은 90%, Case 2는 45%, Case 4, 5는 40%의 증가를 나타내었다. ORT운전, 출력증가 등과 같은 탈설계조건에서의 운전은 증기발생기 튜브의 마모적 측면에서 큰 손상을 초래하므로 각각의 탈설계조건에 따른 마모량의 변화를 충분히 사전 검토하여야 하며, 증기발생기 튜브의 건전성확보측면에서 그림 4와 같은 일련의 과정을 통하여 종합적인 검증을 하여야 한다.

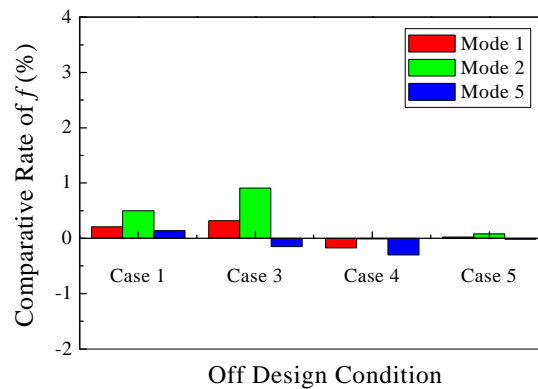
5. 결론

탈설계조건이 가 비교 및 검토하였다. ORT운전, 출력증가 등과 같은 탈설계조건에서의 운전은 증기발생기내의 열수력, 튜브다발의 고유진동수, 유효틈새속도, 임계속도, 안정성비, 진폭 및 마모량에 영향을 미치며, 결과적으로 튜브의 손상을 초래하게 된다. 따라서 탈설계조건에 의해 운전할 경우, 이에 따른 튜브의 손상 평가를 사전에 충분히 검토하여야 한다. 또한, 본 연구결과는 아직 제한적인 조건 및 튜브에 대한 평가이지만, 증기발생기 튜브전체의 건전

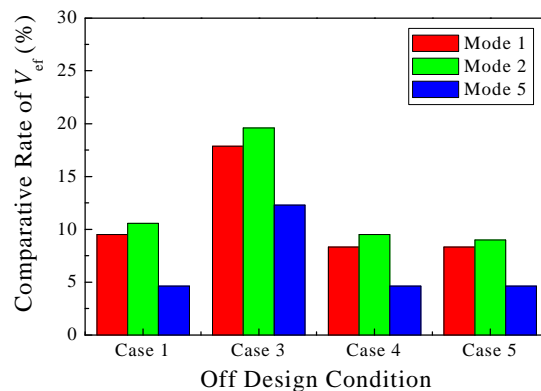
성확보를 위해서는 열수력 해석, FIV에 의한 튜브의 진동해석과 안정성비 평가, 실험에 의한 마모기구 규명과 정확한 마모계수계산 등 각각 독립적인 관점에서의 평가가 아닌 종합적인 관점에서의 증기발생기 튜브의 건전성 평가 및 예측이 이루어져야 할 것이다.

6. 참고문헌

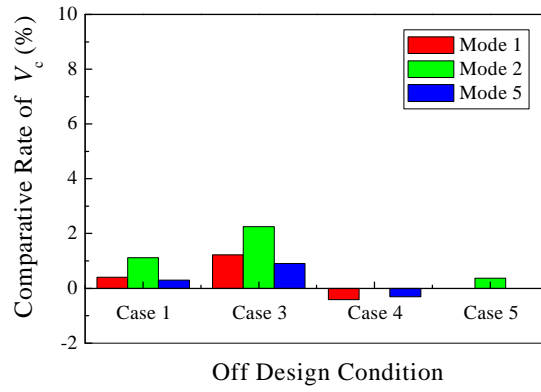
- [1] S. M. Fluit, M. J. Pettigrew, "Simplified method for Predicting Vibration and Fretting-Wear in Nuclear Steam Generators", PVP-Vol.420-1, Cross Flow Heat Exchangers ASME, pp.7-16, 2001.
- [2] M. J. Pettigrew, L. N. Carlucci, C. E. Taylor and N. J. Fisher, "Flow-induced Vibration and Related Technologies in Nuclear Components", Nuclear Eng. Design, Vol. 131, pp.81~100, 1991.
- [3] A. K. Singhal and G. Srikantiah, "A Review of Thermal Hydraulic Analysis Methodology for PWR Steam Generators and ATHOS3 Code Applications", Nuclear Energy, Vol. 25, No. 1, pp. 7-70, 1991.
- [4] , , "CE ", , 12 , 4 , pp.261-271, 2002.
- [5] ASME code section III N-1340
- [6] H. J. Connors, " Fluid Induced Vibration and Wear of Steam Generator Tubes", Nuclear Technology Vol. 55, pp.311-331, 1981.
- [7] T. M. Frick, T. E. Sobek and J. R. Reavis, "Overview on the Development and Implementation of Methodologies to Compute Vibration and Wear of Steam Generator Tubes, Symposium on Flow-Induced Vibrations: Vol.3, ASME Special Publication, pp.149-161, 1984.



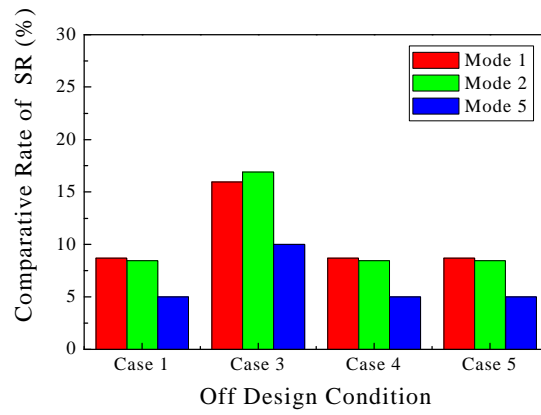
7



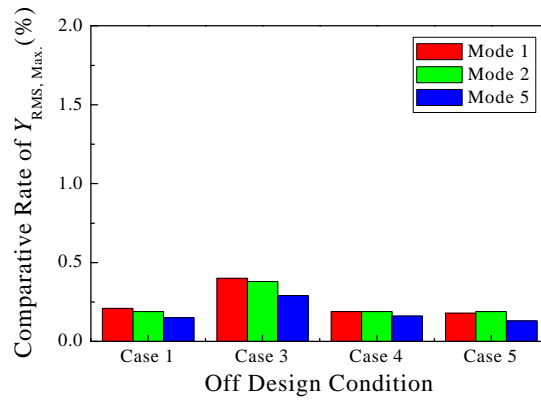
8



9



10



11

