2001 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

한국 표준원전 증기발생기 유동유발진동 메커니즘 분석

Analysis of Flow-Induced Vibration Mechanism in the KSNP Steam Generator

김상녕, 조연식

경희대학교
경기도 용인시 기흥읍 서천리 449-840

요약

최근 한국표준원전 증기발생기(영광3,4호기 및 울진3,4호기)에서 다수의 전열관이 진동마모에 의한 마모가 발견되었다. 이들 발전소들은 각각 5,4,2,1주기로 운전되었다. 특히, 진동마모는 중앙 공동지역 내의 U-bend상부에 집중적으로 발생하고 있다. 이는 이 지역이 유속과 기공율이 높고 지지되지 않는 부분이 상당히 길기 때문이다. 진동마모의 원인으로는 많은 메커니즘에 의해 발생되는 유동유발진동으로 추정되어진다. 이러한 유동유발진동의 원인으로는 난류여기진동, 유체탄성진동, 주기적 와류진동, 음향공명진동 등이 있다. 그러나, 주기적 와류진동은 증기발생기 전열관이 밀집되어 있기 때문에, 유동유발진동의 원인으로 보기에는 무리가 있고, 음향공명진동 역시, 펌프로부터 멀리 떨어져 있기 때문에 유동유발진동의 원인이 될 가능성이 매우 낮다. 한편, 진폭이 작아 뚜렷한 마모가 일어나기 까지 오랜 시간이 걸리는 난류여기진동은 KSNP 증기발생기가 보여주는 마모율을 보면, 유동유발진동의 원인에서 제외될 수 있다. 본 연구에서는 한국표준원전 증기발생기에서 일어나고 있는 유동유발진동의 원인을 분석하기 위해 최근 이들 발전소에서 수행된 ECT자료를 수집하였고, ATHOS3 Code를 사용하여 유동변수를 계산하였다. 그 계산결과를 Pettigrew가 작성한 유체탄성진동 실험결과에 적용해 본 결과, 한국표준원전 증기발생기에서 유체탄성불안정의 가능성을 확인할 수 있었다.

Abstract

Recently, there found that the KSNP Steam Generators(Youngkwang Unit 3, 4 and Ulchin Unit 3 and 4) have experienced a severe fretting wear on the tube. These plants are now 5, 4, 2, 1 cycle operation, respectively. In particular, the wears were localized and concentrated in the upper part of U-bend of the Central Cavity area. Where the velocity and void fraction are

high and unsupported span is long. The cause of the fretting wear is assumed Flow-Induced Vibration (F.I.V)which can occur by many mechanisms. These are such as turbulent excitation, Fluid-elastic instability, Vortex shedding, and acoustic resonance. However, the last two mechanisms can be dropped as candidate of the FIV cause, since the steam generator tube are arranged to close that there is no vortex shedding and are too far from the pump to cause acoustic resonance. Also, the fretting wear by turbulent excitation takes long time to wear the tube thickness significantly. However the wear data from KSNP plants show that the wear rates are very fast enough to exclude the turbulent excitation as a vibration cause. Even though the fretting wear of the tube does not threaten the safety of nuclear power plant, economic burden and pubic interest may be serious. Therefore the Flow-Induced Vibration mechanism and remedy for KSNP steam generators should be taken. To do this jobs recent ECT data of four plants were collected and analysised. Also the flow conditions in the area were calculated by ATHOS-3 code. Finally a calculation result was plotted in a Fluid-Elastic Instability criteria diagram by Pettigrew. The plotted result confirms the possibility of Fluid-elastic Instability of KSNP steam generator.

1. 서론

가압 경수형 원자력발전소에서 핵분열에 의해 발생한 열은 핵연료를 거쳐 1차 냉각수에 전달되며 이 열은 증기발생기(열 교환기)를 거쳐 2차 계통으로 전달된다. 원자력발전소에 사용되는 증기발생기는 고온고압의 1차 계통 냉각수가 관 내부측에 흐르고 2차측의 냉각수는 외각측에 흐르는 형태를 갖는다. 따라서 증기발생기는 원자력 발전소 운전상의 열 교환기로서의 역할 뿐만 아니라 1차 계통의 압력경계로서의 역할도 갖게 되며 이로 인해 원자력 발전소의 안전성 측면에서도 매우 중요하다. 원자력발전소 증기발생기 세관의 손상은 안전성 측면에서 크게 2가지 중요성을 갖는다. 하나는 압력경계의 파손으로 방사능에 오염된 1차 냉각수가 2차측으로 직접 누출되므로 2차측의 유체를 오염시키며 이는 증기발생기 방출밸브를 통해 곧바로 대기로 방사능이 누출된다. 즉, 방사능의 대기방출을 의미한다. 또 다른 하나는 증기발생기 세관 파손 시 1차측과 2차측의 압력차로 인해 1차측의 냉각수가 2차측으로 유실되므로 1차측 냉각재량이 감소(또는 고갈)되는 소위 LOCA사고를 유발시킬 수 있다. 물론 1개의 세관 손상은 원전의 여유설계로 문제가 없으나 다수의 세관이 손상될 경우에는 매우 심각한 상황으로 전개될 수 있다. 비록 안전의 문제까지는 아니더라도 세관의 과다한 마모는 원전의 불시 정지 및 보다 철저하고 잦은 세관검사가 필요하고, 세관의 Plugging과 Sleeving에 따른 인건비와 작업인력의 피폭 및 장기간의 운전정지 등 여러 경제적 손실도 엄청나게 된다. 이와 같이 증기발생기의 건전성은 안전성 측면에서 뿐만 아니라 경제성 측면에서도 매우 중요하다. 하지만 원자력발전소의 증기발생기의 수명은 설계수명 30~40년 보다는 훨씬 짧은 20년 안팎이다. 어떤 경우는 이보다 훨씬 짧은 경우도 있다. 이렇게 수명이 짧아지는 이유는 증기발생기에서 일어나는 수많은 열화원인 뿐만 아니라 증기발생기에 주어진 운전성능 조건과 제약 때문이다. 주로 크게 문제가 되는 열화원인으로는 Stress Corrosion Cracking, Primary Water Stress Corrosion Cracking, Denting, Fretting Wear등이 있다. 이러한 열화원인 중 현재 국내 원전에서 주로 발생하는 것은 PWSCC와 Fretting Wear, Denting 등 이다. 특히 Fretting Wear는 KSNP발전소에서 공통적으로 문제가 되고 있으며, 이는 FIV(Flow-Induced

Vibration)가 주 원인으로 지목되고 있으며, U-Tube상단의 중앙공동부위에서 주로 발생하고 있다. 이 지역은 ABB-CENP증기발생기의 특징 중에 하나인 Stay cylinder의 상부로 전열관의 수직부분이 없고 수평 부분만이 지나가게 되며, 유동저항이 작아 유속이 빠르다. 또한, 지지간격이 넓어서 고유진동수가 낮다. 이 지역에는 167개의 전열관이 배치되어 있으며 보수적으로 177개까지 고려하기도 한다. 이 지역에서 일어날 수 있는 유동유발진동 요인으로 난류여기와 유체탄성진동이 예상된다.

2. FIV 일반 특성

원자력 발전소의 여러 부품들은 관 또는 봉의 다발로 구성되어 있으며, 이들은 다양한 유동조건에 노출되어 있다. 유동조건과 봉 다발들의 기하학적 구조, 재료의 물성치 등에 따라 이러한 봉 다발들은 유동유발진동을 하게 된다. 유동유발진동은 크게 난류여기진동, Vortex Shedding, 유체탄성진동 등이 있다. 이러한 유동유발진동은 각기 일어나기 쉬운 유동조건 및 기하학적인 구조와 진동 강도, 마모율 등 고유의 특성을 갖고 있으며, 요약하면 아래 표1. 과 같다.

Flow Situation	Fluidelastic vibration	Vortex Shedding	Turbulence Excitation	Acoustic Resonance
Axial-Flow				
<Internal>				
Liquid	H	H	2	7
Gas	H	H	7	2
Two Phase Flow	H	H	2	H
<External>				
Liquid	H	H	2	H
Gas	H	H	7	7
Two Phase Flow	H	H	2	H
Cross-Flow				
<1-Cylinder>				
Liquid	H	2	2	H
Gas	H	7	7	H
Two Phase Flow	H	H	2	H
<Tube Bundle>				
Liquid	2	7	7	H
Gas	2	H	7	2
Two Phase Flow	2	H	2	H
마모진행율	**급진전**	**보통**	**완만**	**급진전**

2;매우 중요, 7;중요, H;중요하지 않음

<표1. 유동형태에 따라 예상되는 유동유발진동 메커니즘>

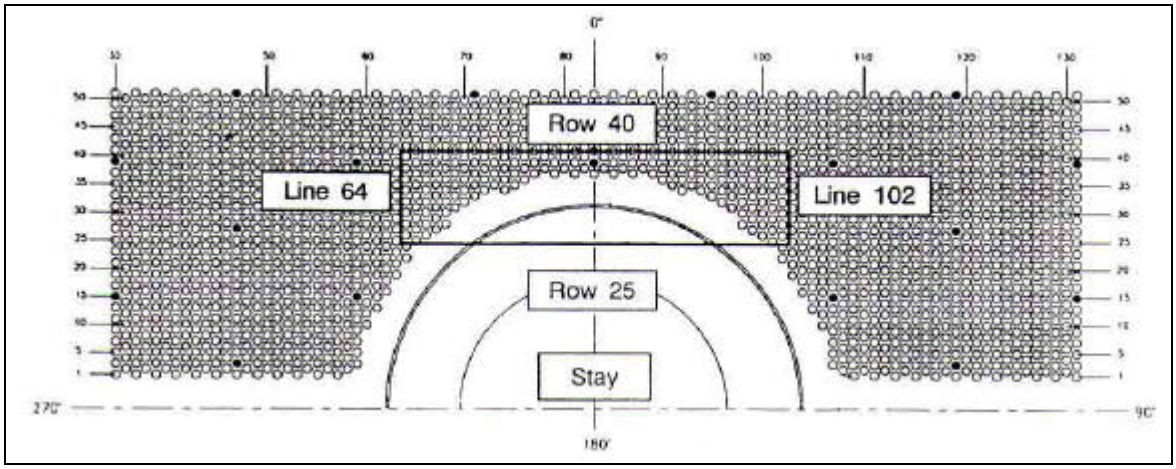
앞에서 언급한 유동유발진동 중 Vortex Shedding은 증기발생기의 유동상태가 액체와 기체가 혼합된 이상류 상태이고 봉들이 밀집해 있으므로 증기발생기에서의 FIV의 원인에서 제외될 수 있다. 또한 난류여기에 의한 진동은 유동 상류에서의 강력한 난동이나 세관영역 근처에서의 난류 발생원인이 있을 때만 가능하다. U-Bend 상부의 안쪽(짧은 세관)은 Central Cavity영역이므로 다른 영역에 비해 외부요인에 의한 난류는 약하나 유동자체의 난류강도는 오히려 매우 크다. 따라서 난류여기진동 가능성이 높은 영역이다. 한편, 난류여기에 의한 진동은 진폭이 크지 않으므로 서서히 오랜 운전기간동안에 걸쳐 마모가 진행된다. 따라서, 심각한 마모에 이르기까지는 상당한 시간이 필요하다. KSNP의 증기발생기는 세관마모 자료가 보여주듯이 1~2주기 동안에 40%이상의 마모를 일으키는 관이 다수 발견되었다. 그러므로 이들 관의 마모는 난류여기에 의한 진동마모로 보기는 어렵다. 마지막으로 유체탄성진동 또는 유체탄성 불안정(Fluidelastic Instability)은 횡류 유동(Cross Flow)이 지배하는 유동조건에서 쉽게 일어날 수 있으며, 특히 봉간의 상호작용에 의해 비선형적인 특성을 갖고 있으며, 봉이 밀

집한 공간에서 더욱 일어날 가능성이 높다. 또한, 이상류 상태에서 기공율(α)이 높으면 봉 집합체 내의 전반적인 유동 조건이 간헐적으로 변하므로 유체탄성진동의 가능성이 매우 높다. 특히 유체탄성진동은 발생시 진폭이 크므로 마모율이 단기간에 상당한 수준에 이르며, 따라서 단시간에 세관의 파손을 야기할 수 있으며, 유동과 맞부딪히는 전열관의 첫째 열과 둘째 열에서 진동이 가장 크게 나타나는 특성을 갖고 있다. 이러한 FIV가 발생하는 유동 조건과 KSNP의 증기발생기에서의 유동조건, 마모 발생 위치 및 분포, 마모율 등을 고려할 때 마모원인으로 유체탄성진동 일 가능성도 매우 높다고 판단된다. 하지만 유체탄성진동이라고 확언하기에는 마모 진행율 및 전반적인 마모율 분포가 낮다. 이를 확인하기 위해서는 보다 정확한 정량적 분석이 필요하다. 한편, 증기발생기 내에서 유체탄성진동이 일어날 가능성이 있는 지역은 Economizer입구와 재순환수 입구영역 및 U-Tube상단으로 전열관과 유체사이에 횡류가 발생하는 곳이다.

3. KSNP S/G의 마모현황

3.1 마모위치

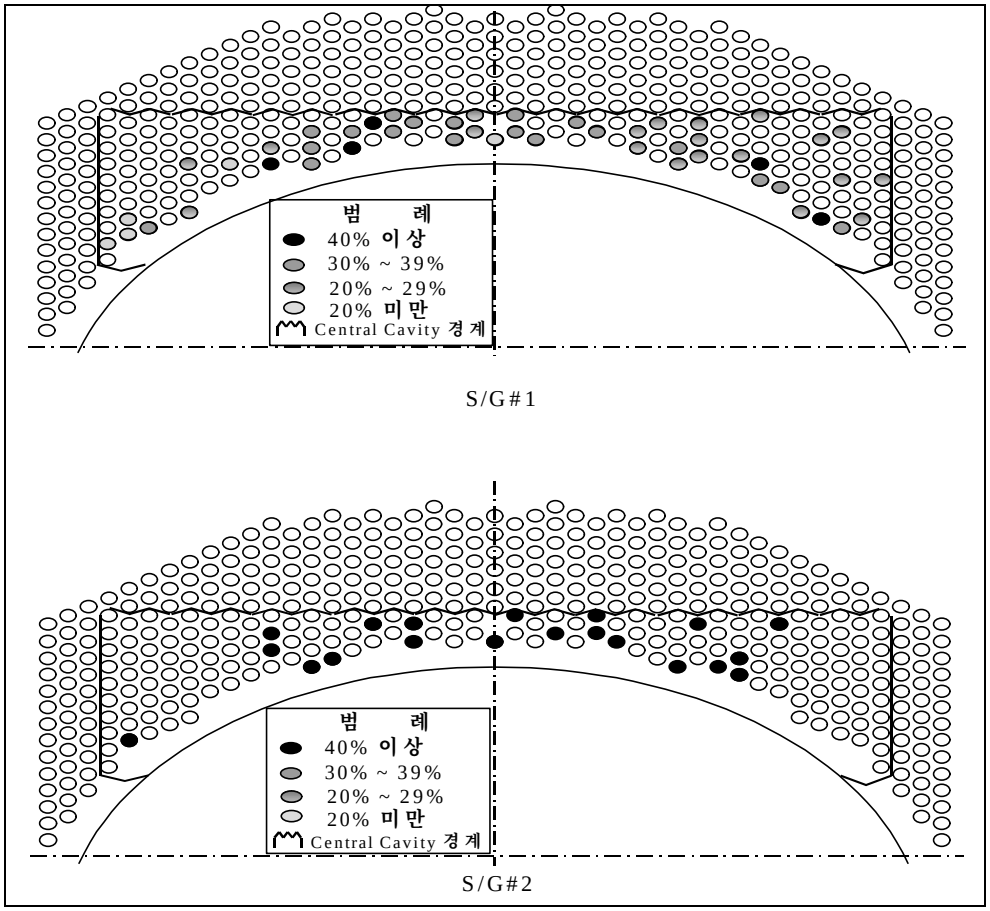
KSNP(영광3,4호기 및 울진3,4호기)에서 발생한 Fretting Wear는 거의 대부분 Central Cavity상단의 U-Bend영역에 집중되어 있음을 알 수 있다(그림1 . 참조). 또한 이 영역에 있는 이들 세관 중, 맨 안쪽 중앙의 세관에 더욱 많이 발생하는 뚜렷한 경향을 보이고 있다. 이 영역은 세관이 존재하지 않으므로 유동의 유속이 높을 것으로 예상된다. 뿐만 아니라 KSNP에서는 25 Row에서부터 40 Row 및 64~102 Line사이의 세관은 Horizontal strip과 1번째 Partial Eggcrate의 지지가 되지 않는 영역에 속한다. 따라서, 저항이 적으므로 기공율이 높고 기체의 빠른 흐름에 의해 액체의 유속이 더욱 가속될 가능성이 높으므로 유체가 갖는 운동에너지가 타 영역에 비해 높을 것으로 예상된다. 따라서, 유체 탄성진동이 야기될 가능성이 매우 높다고 판단된다.



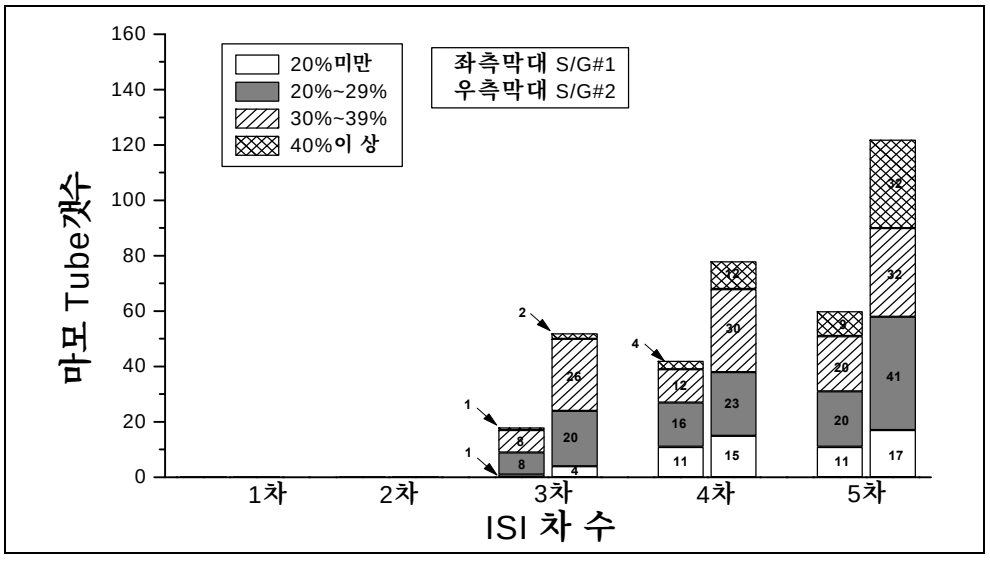
<그림1. KSNP 증기발생기 전열관 마모 분포 지역>

3.2 마모분포 및 마모추이

1) 영광3호기

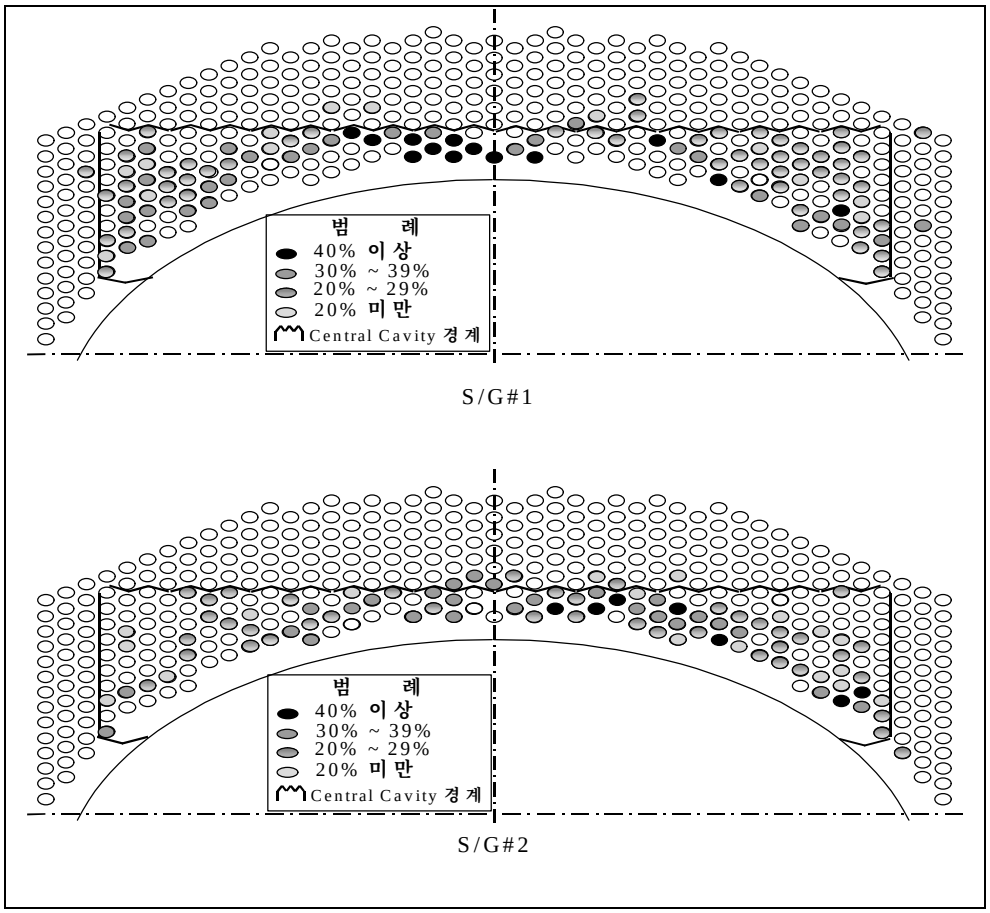


<그림2. 영광3호기 Wear Map (5차 ISI결과 중 중앙공동 지역) >

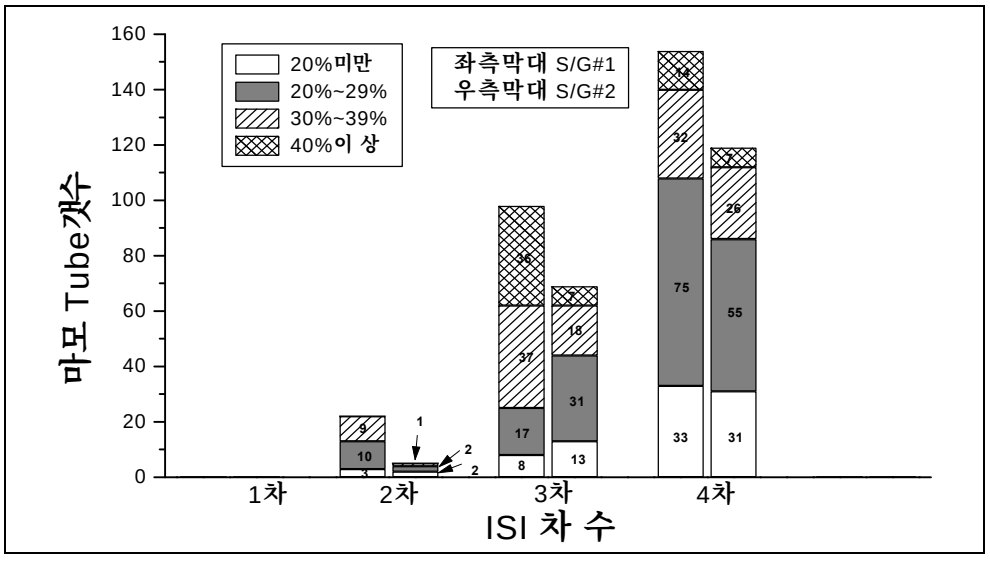


<그림3. 영광3호기 ISI차수별 마모추이>

2)영광4호기

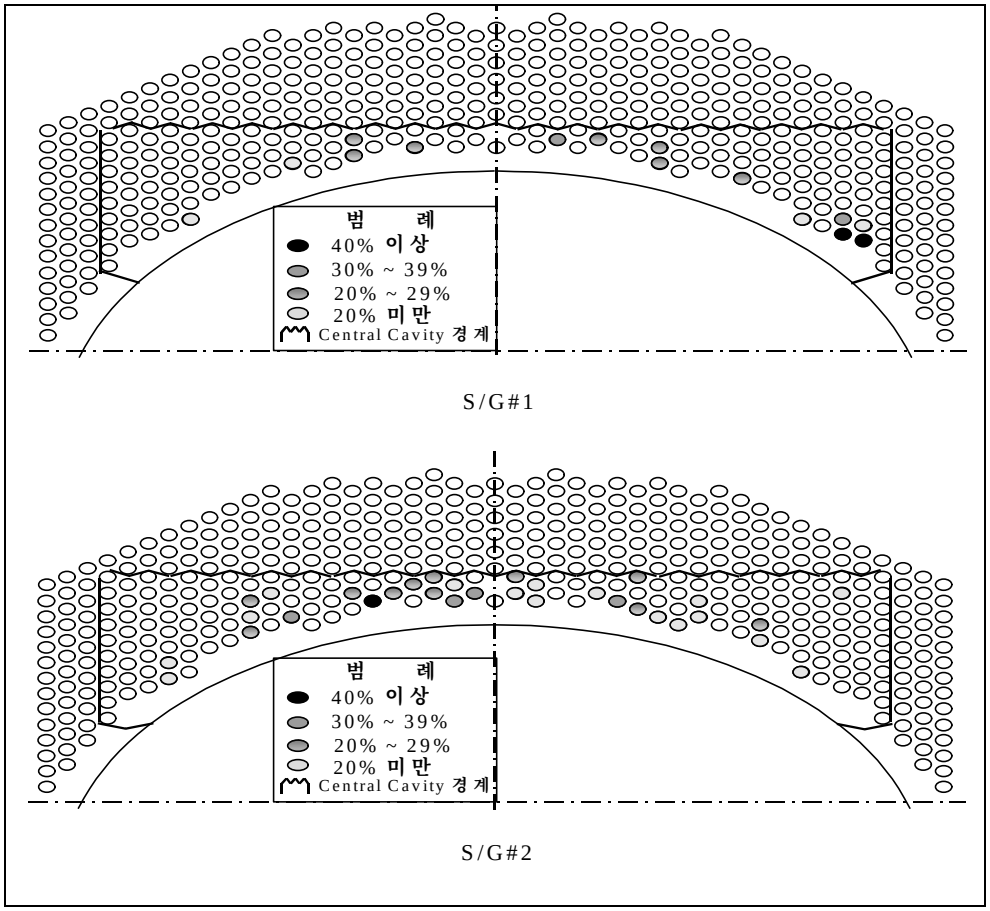


<그림4. 영광4호기 Wear Map (4차 ISI결과 중 중앙공동 지역) >



<그림5. 영광4호기 ISI차수별 마모추이>

3)울진3호기



<그림6. 울진3호기 Wear Map (1차 ISI결과 중 중앙공동 지역) >

오류! 참조 범위가 지정되어 있지 않습니다.
<그림7. 울진3호기 ISI차수별 마모추이>

4)울진4호기

오류! 참조 범위가 지정되어 있지 않습니다.
<그림8. 울진4호기 ISI차수별 마모추이>

4. 마모원인규명

문제가 되고 있는 KSNP 증기발생기의 U-Tube상단은 이상류 상태이므로 이상류의 상관식이 적용되어야 한다. 증기발생기의 이상류 관련 유체탄성진동 상관식은 이상류라는 유동 특성상의 어려움 뿐만 아니라 유체탄성진동 관련 변수(감쇠변수)의 측정 어려움 등으로 매우 제한적이고 적용이 까다롭다. 특히 정확한 적용을 위해서는 정확한 유동관련변수가 필요하며 증기발생기 특유의 불확실성(Tube지지 상태 등)도 적용에 장애가 되고 있다. 따라서 본 연구에서는 현재 입수 가능한 자료를 근거로 가장 널리 검증된 상관식을 근거로 증기발생기 U-Tube의 유체탄성진동을 평가하고자 한다. 최근 연구에서 관심을 끈 것은 공기와 물을 사용한 이상류 실험에서 기공율(α)가 0.9이상이면 단상류나 α=0.8~0.9이하에서의 이상류 경향과 상당히 다른 특이한 현상이 관찰된다는 것이다. 즉 α=0.9이상

이 되면 앞의 단상류 상관식과는 전혀 다른 n=0.1 정도가 된다는 것이다. 특히 Freon의 실험(rotated triangular tube, P/D=1.5)에서의 결과는 α=0.65 이하에서는 물과 공기의 실험과 유사하였으나 그 이상의 기공율에서는 경향이 급격히 달라졌으며 임계속도도 예상보다 훨씬 낮음이 발견되었다. 이와 같이 임계속도가 급변하는 이유로 Pettigrew와 여러 관련 연구자들은 단상류에서와 달리 기공율(α)가 일정값 이상인 이상류에서는 관다발 사이에서 일어나는 이상류의 유동형태가 연속유동에서 간헐유동으로 변하며, 이 유동 형태의 변화로 관도 함께 진동한다고 보고 있다. 이러한 관점은 상당히 새로운 것으로 주목할 필요가 있다. 여기서, 간헐유동이란 튜브간의 유로 각각에서 일어나는 것이 아니고, 증기발생기 전반에서 일어나며 액체와 기체가 함께 흐르지 못하고 액체가(밀도가 커서 중력을 크게 받으므로) 관 사이에 정체되므로 기체도 일시적으로 함께 정체되며 이로 인해 유로에 압력이 증가하여, 증가된 압력에 의해 액체가 전부 밀려 나가고 이후 압력이 원상을 회복하고 다시 액체가 정체되어 앞의 과정을 주기적으로 반복하는 관다발 사이에서 발생하는 이상류의 한 유동형태를 말한다. 즉, 주기적인 이상류의 CCFL(Counter Current Flow Limit or Flooding)형태이다. 특히, Pettigrew는 증기발생기 설계 시 관다발 내에서 간헐유동 발생을 방지함으로써 이상류 횡유동에서의 유체탄성진동을 예방할 수 있음을 강조하고 있다. 그는 P/D>1.4이고 이상류에서의 감쇠값의 자료입수가 가능한 경우에 대해 실험결과를 그림16.과 같이 요약하였으며 K=3.0을 설계 시의 일반기준으로 권장하고 있다. 본 연구에서는 KSNP의 자료들을 Pettigrew의 유체탄성진동 기준에 적용하기 위해, 아래의 변수들을 계산하였으며, 이를 그림9.에 그려보면 KSNP의 증기발생기 내 유동 조건이 유체탄성진동의 가능성이 있음을 보여준다.

위에서 언급한 기준에 적용하기 위해 $2pxm/rD^2$ 와 u_p/fD 를 계산하면 다음과 같다.

$$2pxm/rD^2 = \frac{0.119 \times 0.431 lbm/in}{0.0074 lbm/in^3 \times (0.75 in)^2} = 1.232$$

$$u_p/fD = \frac{11.6 ft/sec}{(33/sec) \times (0.75/12) ft} = 5.62$$

계산에 사용된 변수의 값들은 아래와 같다.

$m = 0.0431 lbm/in$

$r = 0.0074 lbm/in^3$

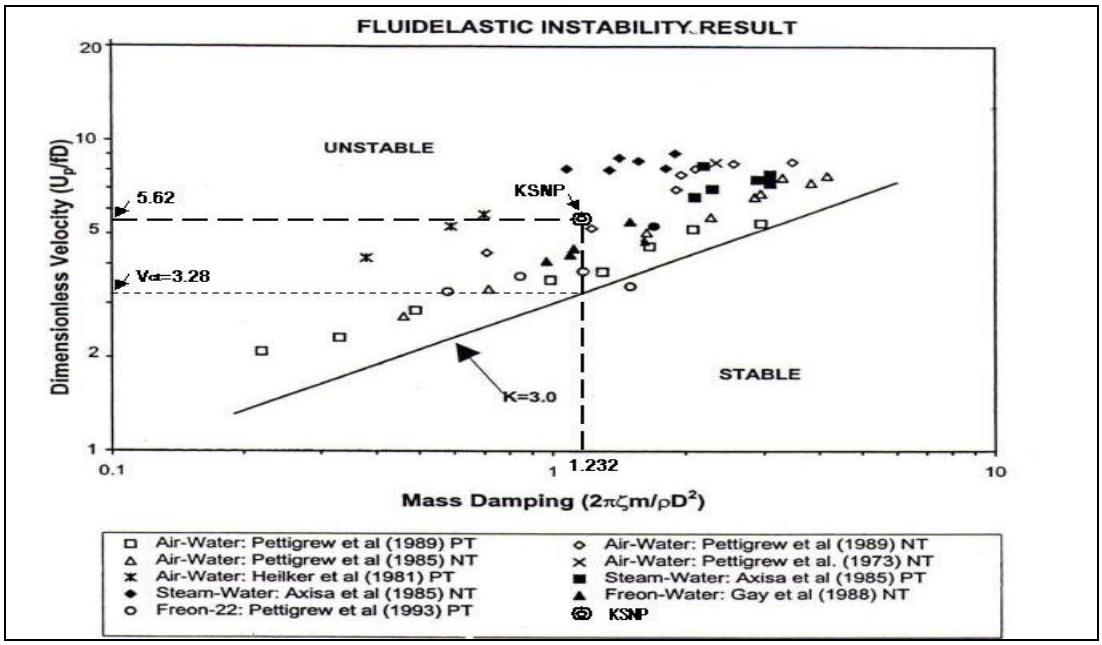
$f = 33 Hz$

$2px = d_0 = 0.119$

$u_p = 11.6 ft/sec$

$D = 0.75 inch$

한편, KSNP발전소의 증기발생기에서 유체 탄성 진동 예방을 위해서는 그림9.에서 보듯이 무차원 속도를 5.62에서 임계유속인 3.28정도로 낮추어야 함을 알 수 있다. 이는 곧 다른 변수를 고정하였다고 가정 시 유속을 종전 속도의 $\left(\frac{3.28}{5.62} = 0.582\right)$60%이하로 낮추어야 함을 의미한다.



<그림9. 이상류에서 유체탄성진동 실험결과>

5. 결론

현재 입수 가능한 자료들을 분석한 결과, 한국 표준원전(영광3,4호기 및 울진3,4호기) 증기발생기에서 일어나고 있는 진동마모에 의한 전열관 손상의 원인으로는 유체탄성불안정(Fluidelastic Instability)이 가장 유력한 원인으로 판단되며, 정확한 마모원인 분석은 모델실험과 보다 정밀한 2차측 유동해석이 필요하다. 또한, Pettigrew의 주장대로 증기발생기 설계 시 관다발 내에서 간헐유동 발생을 방지함으로써 이상류 횡유동에서의 유체탄성진동을 예방할 수 있다고 판단된다.

6. 참고문헌

[1]. Nuclear Engineering and Design 185, "Flow-induced vibration: recent findings and open questions", M.J. Pettigrew, C.E. Taylor, N.J. Fisher, M. Yetisir, B.A.W. Smith, 1998.

[2]."VIBRATION & STRUCTURAL ANALYSIS OF THE TUBES & TUBE SUPPORTS(10287-SS-302)", ABB-CENP, 이창희, 1991. 10. 14.

[3]. "봉 집합체내의 유체탄성진동(최종보고서)", 과학기술부, 김상녕, 1998.

[4]."증기발생기 열수력 및 유동유발진동 해석에 관한 연구",한국원자력 안전기술원, 조종철 외 5명, 1992. 12.

[5]. "Palo Verde Steam Generator Tube Degradation and YGN3 and 4 Steam Generator Design", ABB-CENP Report

[6]. "Flow-Induced Vibration", Robert D. Blevins, 1998

[7]. "Two-Phase Flow-Induced Vibration", M. J. Pettigrew, C. E. Taylor, Transactions of the ASEM Vol. 116, 1994.

[8]. Steam Generator Tube Failures, NUREG/CR-6365, INEL-95/0383, 1996.