

## 울진 5,6호기 증기발생기 설계개선에 따른 유동유발진동 분석

### Analysis of Flow-Induced Vibration by Improvement of Design in UCN 5,6 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. 특히, 진동마모는 중앙공동지역 내의 U-bend상부에 집중적으로 발생하고 있다. 이 지역은 2차측으로의 높은 열전달로 인하여 많은 양의 증기가 만들어지며, 이로 인해 유체체적이 증가하여 유속과 기공율이 높다. 또한 이 지역은 지지대에 의해 지지되는 간격이 타 지역의 전열관에 비해 상당히 길기 때문에 진동마모에 취약한 지역이다. 진동마모의 원인은 많은 메커니즘에 의해 발생하는 유동유발진동이 유력하다.

증기발생기 설계사인 WEC LLC와 제작사인 두산중공업은 유동유발진동에 의한 전열관 마모의 예방책으로 유동분배판(Eddy Flow Distribution Plate)을 설계, 제작하여 울진 5,6호기 증기발생기에 설치하였다. 본 연구에서는 유동유발진동에 의한 증기발생기 전열관 마모의 예방책으로 설계되어 설치된 유동분배판(EFDP)의 실효성과 타당성을 연구하기 위하여 유한요소 해석코드인 ANSYS와 3차원 열유동해석 코드인 ATHOS-3코드의 해석결과를 분석하였다.

그 결과, 유동분배판의 설치로 중앙공동지역 상부에서의 2차측 밀도와 유속의 감소를 확인할 수 있었으며, Pettigrew가 작성한 유체탄성불안정성 실험결과에 적용해 본 결과, 유체탄성 안정성비가 향상됨을 확인하였다. 이에, 유동분배판(EFDP)의 설치는 전열관에서의 유동유발진동 마모책으로 타당하다고 판단된다.

#### Abstract

Youngkwang Unit 3, 4 and Ulchin Unit 3 and 4 have had problem of the KSNP Steam Generator due to a severe fretting wear on the tube. In particular, the wears were localized and concentrated in the upper part of U-bend of the Central Cavity region. At the upper tube

bundle Central Cavity, the fluid flow velocities and void fraction are very high, because the steam is made by high heat transfer at secondary region. Also, this region is affected easily by fretting wear due to it's unsupported span is longer than another regions. The fretting wear is assumed to be result of Flow-Induced Vibration (F.I.V), which can occur by many mechanisms. EFDP was added to UCN 5,6 for prevent fretting wear by the WEC LLC and DSHIC, a company of design and manufacture of the steam generator, respectively. In order to evaluate the efficacy of EFDP, ANSYS and ATHOS-3 Code were used. From sensitivity analysis and calculation results, Density and Velocity into the Central Cavity are reduced after the EFDPs are installed. Also, a calculation result was plotted in a Fluid Elastic Instability criteria -diagram by Pettigrew. The plotted result shows that Fluid Elastic Instability is considerable. Finally, installing EFDP is considerable for preventing fretting wear by FIV in the KSNP Steam Generators.

## 1. 서론

증기발생기 전열관의 손상은 안정성 측면에서 크게 2가지 중용성을 갖는다. 하나는 1차측과 2차측의 압력경계의 파손으로 방사능에 오염된 1차 냉각수가 2차측으로 유입되어 증기발생기 방출 밸브를 통하여 대기로 방사능이 유출될 수 있다. 다른 하나는 증기발생기 전열관 파손 시, 1차측과 2차측의 압력차로 인하여 1차측의 냉각수가 2차측으로 유실되어 1차측 냉각재가 감소되는 소위 LOCA사고를 유발 시킬 수 있다. 또한 안전의 문제뿐만 아니라, 전열관의 과도한 마모는 원전의 불시정지 및 잦은 세관검사를 필요로 하고, 세관의 관막음과 검사에 따른 인건비와 작업인력의 피폭 및 장기간의 운전정지 등 여러 경제적 손실도 초래한다. 현재 한국표준원전 증기발생기에서는 공통적으로 유동유발진동에 의한 진동마모가 발생하고 있으며, 특히 U-Bend상단의 중앙공동부위에서 주로 발생하고 있다. 이 지역은 WEC LLC. 증기발생기의 특징 중에 하나인 Stay Cylinder의 상부로 전열관의 수직부분이 없고 수평부분만이 지나게 되며, 유동저항이 작아 유속이 매우 빠르다. 이에 울진 5,6호기에는 이 지역의 밀도와 유속을 감소시켜 유동유발진동을 예방하기 위하여 중앙공동지역 내에 두 개의 유동분배판(EFDP)이 설치되었다.

## 2. 설계개선사항

울진 5, 6호기에 진동마모의 예방책으로 설치된 유동분배판(EFDP)은 중앙공동부의 빠른 유속이 이상유동(Two Phase Flow)을 분산시켜 상부 전열관의 수평부분에 직접 충격을 가하는 것을 예방하기 위해 Full Eggcrate #4, 5에 설치되었고, 재질은 Full Eggcrate(SA176, Type 409)와 열팽창계수가 같은 SA240, Type 405가 사용되어 열팽창에 의한 문제점은 사전에 제거하였다. 또한 고정방법의 선택에 있어서 용접이 아닌 볼트체결방법을 사용하였고, 볼트 풀림방지를 위하여 볼트를 체결 후, 직접 용접이 아닌 잠금 암나사(Lock Washer)를 부착하여 대신 용접하였다. 유동분배판이 설치된 울진 5,6호기의 형태는 아래 그림1.과 같다.

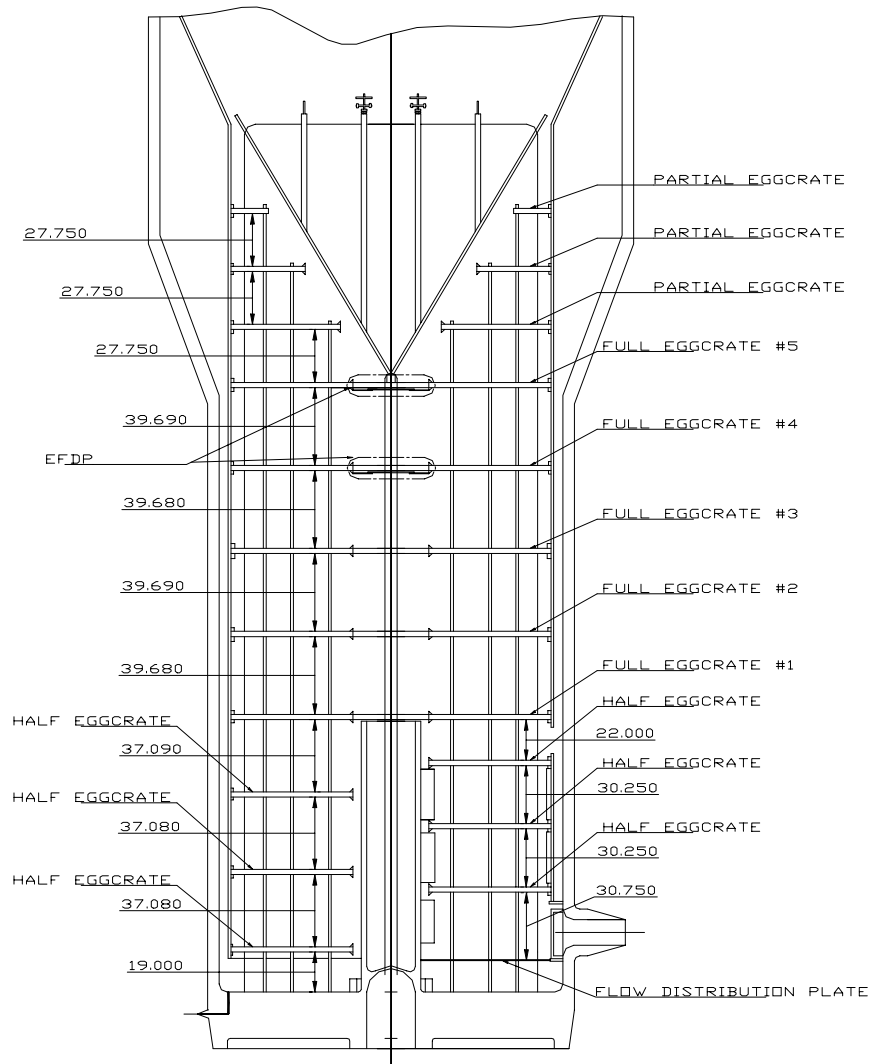


그림1. 올진 5,6호기 증기발생기의 형태 및 치수

### 3. 유동분배판 설치에 대한 2차측 유동영향

#### 3.1 중앙공동지역 내에서 축방향 유속

증기발생기 고온측 상단지역은 2차측으로의 높은 열전달로 인하여 많은 양의 증기가 만들어지는 영역으로, 이 지역에서 유체체적의 증가로 인하여 유동저항이 상대적으로 적은 중앙공동지역으로 많은 양의 유체의 유입이 예상된다.

중앙공동지역 상단인 전열관40열(IZ=31)의 위치에서, ATHOS-3코드에 의한 EFDP 설치 전, 후의 축방향 유속 분석결과를 보면 EFDP설치 후, 중앙공동지역 내의 고온측에서 축방향 유속이 현저히 감소함을 보였다(그림1. 참고). 따라서, 중앙공동지역 상단에 유동분배판의 설치는 이 지역의 전열관의 마모와 진동에 영향을 미치는 축방향 유속을 4.5 ft/sec에서 3.67 ft/sec로 감속시켰고, 밀도는 22.44 lb/ft<sup>3</sup> 에서 18.70 lb/ft<sup>3</sup> 로 감소되었다. 유동분배판 설치 전, 후의 중앙공동지역에서의 유체동압, 질량유속, 축방향유속의 해석결과는 다음 그림2와 같으며, 표1에 이를 정리하였다.

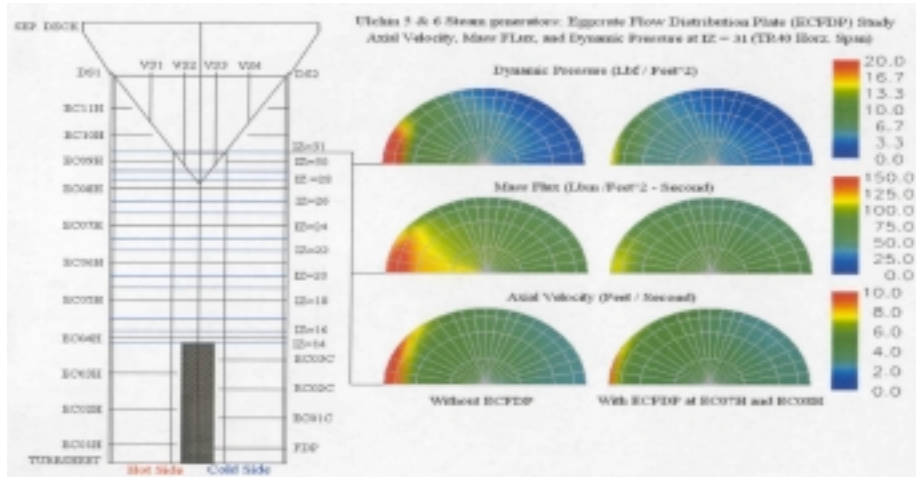


그림2. 유동분배판 설치전, 후의 유체동압, 질량유속, 축방향유속 해석결과

구분	설계개선 전	설계개선 후	증감율(%)
밀도(lb/ft <sup>3</sup> )	22.44	18.70	-12.8
축방향 유속(ft/sec)	4.50	3.67	-18.4
질량유속(lbm/ft <sup>2</sup> -sec)	96.59	68.54	-29.0
유체동압(psi)	0.0469	0.0272	-42.0

표1. 유동분배판 설치전, 후의 밀도, 축방향유속, 질량유속, 유체동압 비교

### 3.2 중앙공동지역 내에서 반경방향 유속

유동분배판 설치전, 후의 중앙공동지역 내에서의 반경방향 유속의 변화분석은 IZ=19(Central Cylinder 의 상부 끝에서 2번째 지지대의 위치)로부터 중앙공동지역 상단인 IZ=32위치(중앙공동부 상단의 내부영역)까지 실시되었다. 그 결과, Full Eggcrate #5의 상단지역인 IZ=28, 29, 30의 위치를 제외한 대부분의 위치에서 중앙공동지역으로 유입, 유출되는 반경방향의 유속이 감소되었다. 하지만, 반경방향 유속이 증가한 지역은 중앙공동지역 내의 다른 전열관에 비해 높은 강성과 전열관 사이의 간격이 좁기 때문에 반경방향 유속의 증가에 따른 영향은 거의 받지 않을 것으로 예상된다.

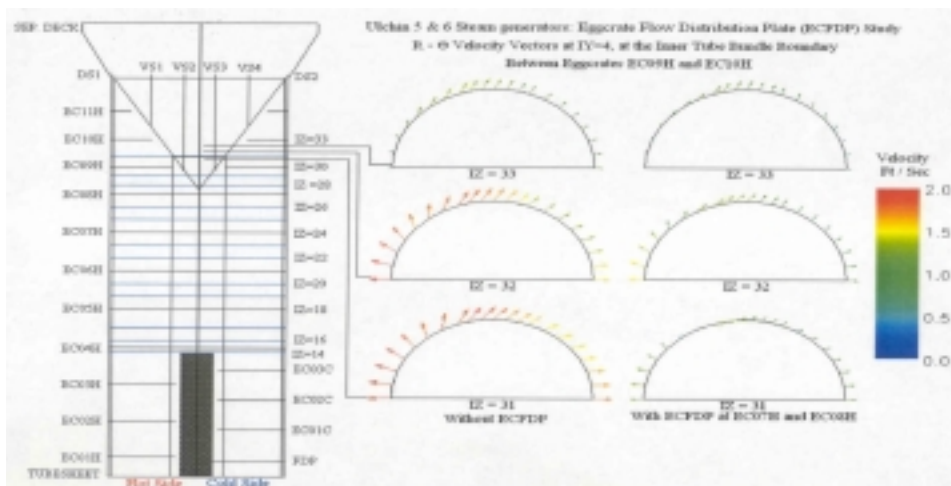


그림3. 유동분배판 설치전, 후의 반경방향 유속 분석결과

### 3.3 전열관 다발에서의 건도 및 기공율

유동분배판(EFDP)의 설치로 인한 중앙공동 인접지역에 대한 영향분석을 위해 ATHOS-3코드를

사용하여 건도와 기공율 분석한 결과, 유동분배판 설치 전에는 최대 기공율이 0.9269, 최대 건도가 0.4082이고, 설치 후에는 최대 기공율이 0.9355, 최대 건도가 0.4412로 설치 전보다 설치 후에 약간 높게 나왔다(표2. 참고). 건도와 기공율은 유체의 평균속도와 밀도에 영향을 주며, 결국 이상류에서의 유체동압에 영향을 준다. 하지만, 이 지역에서 일어나고 있는 유동유발진동의 관점에서 볼 때, 중앙공동지역 상부로 상승하는 유속이 더욱 중요하므로 건도와 기공율의 미소한 변화는 전열관의 마모와 진동문제에 그리 중요하지는 않다.

구분	설계개선 전	설계개선 후	증감율(%)
최대 기공율	0.9269	0.9355	0.93
최대 건도	0.4082	0.4412	8.08

표2. 유동분배판 설치전, 후의 최대 기공율 및 건도 비교

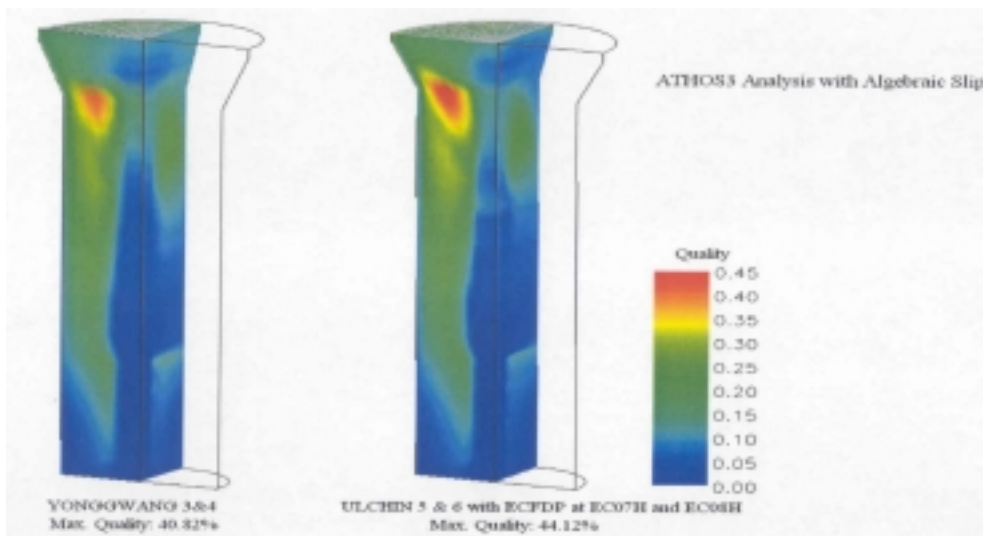


그림4. 유동분배판 설치전, 후의 건도 해석결과

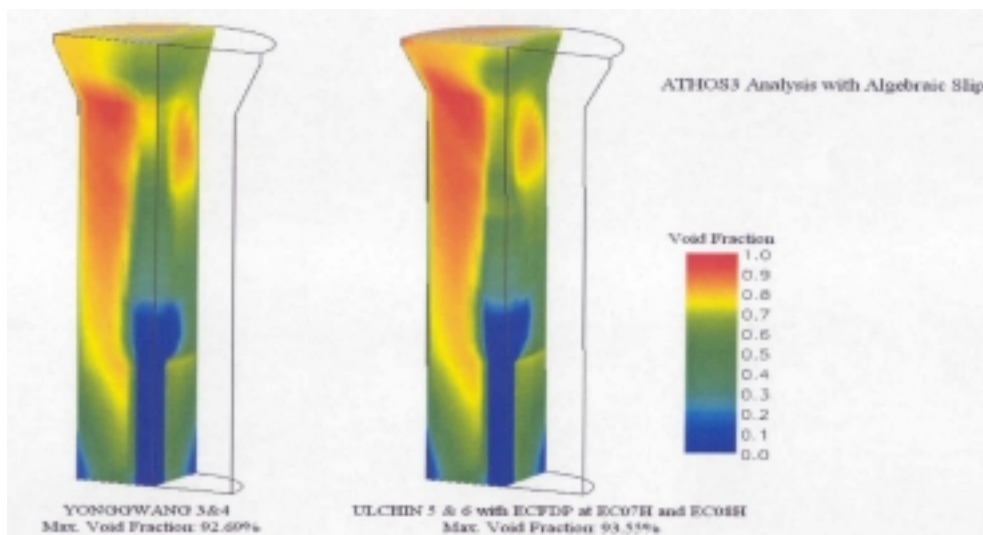
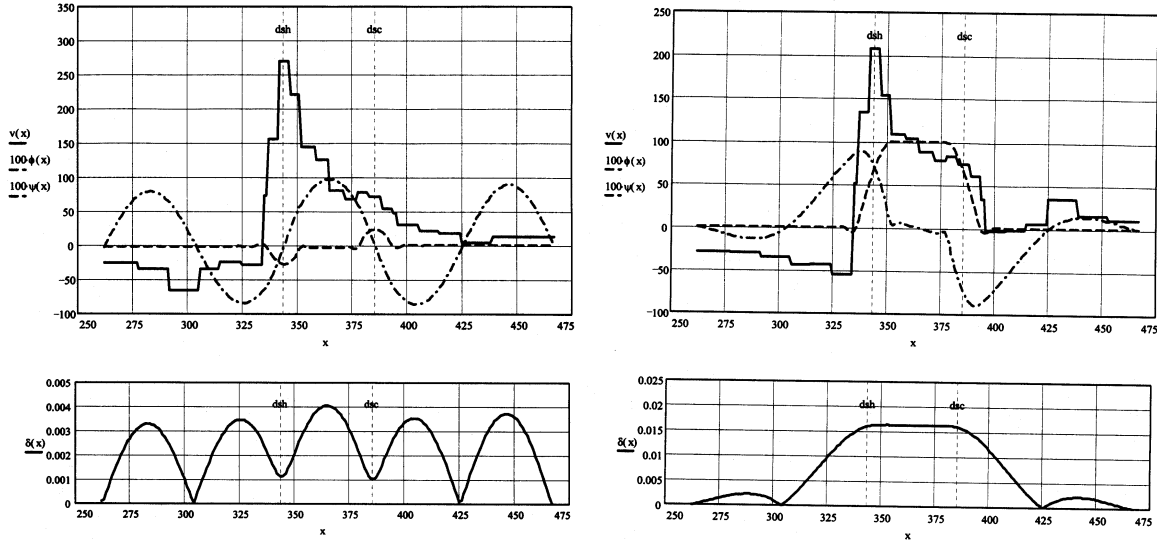


그림5. 유동분배판 설치전, 후의 기공율 분석결과

#### 4. 유동유발진동 분석

EFDP설치 전, 후의 유동유발진동 분석은 중앙공동지역 내에 있는 40열의 전열관에서 실행되었다. 그 이유는 40열의 전열관이 수직지지대와 첫번째 Partial Eggcrate로부터 지지되지 않는 전열

관들 중에서 수평관이 가장 길어 유동유발진동의 영향을 가장 많이 받을 것으로 예상되기 때문이다. 이 열에서의 유동형태해석은 유한요소 해석 코드인 ANSYS가 사용되었으며, 유동유발진동의 원인 중에 하나인 유체탄성 안정비를 계산하기 위해 고유진동수 31.07Hz에서 틸새유속과 수직변위의 해석결과는 아래 그림6.과 같다.



<EFDP 설치 전>

<EFDP 설치 후>

그림6. 유동분배판 설치전, 후의 틸새유속과 수직변위 해석결과

위의 그림6.의 해석결과를 이용하여 유체탄성 안정비(Stability Ratio ;SR =  $V_{eff}/V_{crit}$ )계산을 위한 계산식은 아래와 같다.

<임계유속계산식>

< 유효유속계산식>

$$V_{crit} = f_n K \sqrt{\frac{M_0 \delta_0}{\rho_0}}$$

$$V_{eff}^2 = \frac{\frac{\rho(x)}{\rho_0} V(x)^2 \phi(x)^2 dx}{\frac{m(x)}{m_0} \phi(x)^2 dx}$$

위의 계산식을 사용하여 유동분배판 설치전, 후의 임계유속과 유효유속을 계산하면 다음과 같다.

구 분	임계유속	유효유속	안정비
유동분배판 설치전	$V_{crit}=143.6$ in/sec	$V_{eff}=57.3$ in/sec	SR=0.399
유동분배판 설치후	$V_{crit}=143.6$ in/sec	$V_{eff}=44.1$ in/sec	SR=0.31

유동분배판의 설치전, 후의 안정비는 0.399에서 0.31로 향상되었고, WEC LLC의 유체탄성안정비 기준인 0.75에 비해 충분한 보수성을 갖는다.

구 분	EFDP 설치전	EFDP 설치후
평가 전열관	전열관 40열	전열관 40열
고유진동수	f=31.1 Hz	f=31.1 Hz
전열관 위치	Central Cavity (Line 83 or 85)	Central Cavity (Line 83 or 85)
EFDP설치 유무	No	Yes
임계유속 (Critical Velocity)	$V_{crit} = f_n K \sqrt{\frac{M_0 \delta_0}{\rho_0}}$	
	$V_{crit} = 143.6 \text{ in/sec}$	$V_{crit} = 143.6 \text{ in/sec}$
횡유속 (Crossflow Velocity)	$V_{cross} = 22.5 \text{ ft/sec}$ $= 270.0 \text{ in/sec}$	$V_{cross} = 17.3 \text{ ft/sec}$ $= 207.6 \text{ in/sec}$
	$V_{eff}^2 = \frac{\frac{\rho(x)}{\rho_0} V(x)^2 \phi(x)^2 dx}{\frac{m(x)}{m_0} \phi(x)^2 dx}$	
유효유속 (Effective Velocity)	$V_{eff} = 57.3 \text{ in/sec}$	$V_{eff} = 44.1 \text{ in/sec}$
	$SR = V_{eff} / V_{crit}$	
안정비	SR=0.399	SR=0.31

표3. 유동분배판 설치전, 후의 유동유발진동 분석 요약

또한, Pettigrew의 유체탄성불안정 실험결과에 적용하기 위하여  $2\pi\zeta m_0 / \rho D^2$  와  $V_{eff} / fD$  를 계산하면 다음과 같다.

$$2\pi\zeta m_0 / \rho D^2 = \frac{0.126 \times 0.047 \text{ lbm / in}}{0.012 \text{ lbm / in}^3 \times (0.75 \text{ in})^2} = 0.88$$

$$V_{eff} / fD = \frac{54.0 \text{ in / sec}}{(31.07 \text{ / sec}) \times (0.75 \text{ in})} = 2.32$$

위의 계산에서 사용된 변수들은 참고문헌8의 울진 5,6호기 전열관 진동 및 구조해석 보고서(UE-211SS-302)에 근거한 자료들이며 아래와 같다.

$$m_0 = 0.047 \text{ lbm/in}, \rho = 0.012 \text{ lbm/in}^3, f = 31.07\text{Hz}, 2\pi\zeta = \delta_0 = 0.126$$

$$V_{eff} = 54.0 \text{ in/sec}, D = 0.75 \text{ inch}$$

계산결과를 Pettigrew실험결과에 적용하면 그림7.과 같으며, 유체탄성안정비가 더욱 보수적으로 낮아짐을 보여준다.

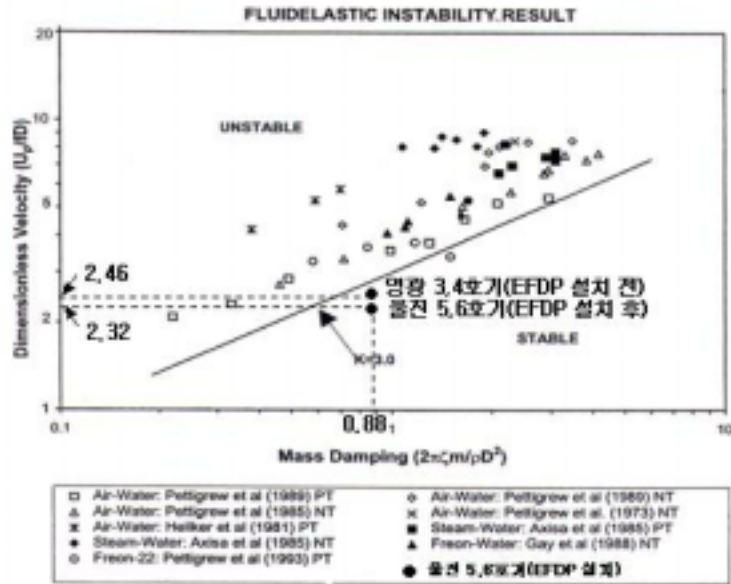


그림7. 유동분배판 설치전, 후의 유체탄성불안정성 비교

## 5. 결론 및 제언

한국표준원전(영광3,4호기 및 울진3,4호기) 증기발생기 전열관에서 발생하고 있는 유동유발진동에 의한 진동마모의 예방책으로 울진5,6호기에 설치된 유동분배판(EFDP)의 실효성과 타당성에 대한 분석결과, 다음과 같은 결론이 도출되었다.

- ① 유동분배판(EFDP) 설치 전(영광 및 울진3,4호기), 유체탄성진동에 대한 안정비(SR)가 0.399였는데 비해, 유동분배판 설치 후에는 안정비가 0.31로 개선되었다.
- ② 유동분배판의 설치 후, 유속은 외국전문가인 Pettigrew가 주장하는 임계속도에 대해서도 충분히 안정성을 갖는다.
- ③ 유동분배판의 설치로 인한 중앙공동지역 인근 외곽지역의 전열관의 유체탄성 안정비는 중앙공동지역 내에 비해 유속은 약 20%, 유체동압은 약59%가 작게 나왔기 때문에 중앙공동지역의 안정비보다 충분히 작게 나온다고 판단된다.

유동분배판의 설치는 중앙공동지역 상단부의 유속을 감소시켜 유동유발진동에 의한 전열관 진동마모는 개선된다고 판단되나, 2차측 유동에 의해 유동분배판의 자체진동 가능성 여부와 중앙공동부 U-Bend 상단의 유동이 기존과 달라지므로 열전달 특성변화 및 응력부식의 가능성 여부에 대해 추가적인 분석이 필요하다고 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]. "VIBRATION AND STRUCTURAL ANALYSIS OF THE TUBES AND TUBE SUPPORTS (UE-211SS-302)", WEC LLC, 2001. 3