

웨스팅 하우스 모델 F형 증기발생기 1차 습분분리기 손상 사례 연구

An Overview on Degradation of Primary Moisture Separator in Westinghouse Model F Steam Generator

제갈성, 정한섭
한국전력공사 전력연구원
대전시 유성구 문지동 103-16

요 약

웨스팅하우스 모델 F형 증기발생기 1차 습분분리기의 swirl vane 손상을 조사하고 원인분석 및 종합대책을 검토하였다. 해외 원전에서의 증기발생기 swirl vane 손상사례를 조사하고, 손상된 vane의 성분 및 퇴적 sludge 성분을 분석하고, FAC(Flow Accelerated Corrosion, 유동가속부식) 가능성 분석을 위해 CHECWORKS code를 이용해 FAC 해석도 수행하였다. 이 결과, 저 Cr 농도 및 저강도의 탄소강 사용으로 인한 FAC 또는 습분충격침식이 주요 손상원인인 것으로 분석되었고, 이외에 FAC 발생을 증가시킬 수 있는 pH 조절물질의 사용도 한 요인이 될 수 있음을 확인하였다. 즉각적인 대처방안은 손상된 swirl vane을 교체하는 것으로, 고 Cr 농도 및 고강도의 탄소강 재질로 만든 swirl vane으로 교체하는 것이 FAC에 의한 손상발생을 줄일 수 있다. 대체아민에 의한 pH 조절운전으로 FAC 발생을 줄일 수도 있다.

Abstract

The cause of damage of the swirl vanes at primary moisture separator of Westinghouse model F steam generator (SG) has been investigated, and overall countermeasures are reviewed. A case study on degradation of SG swirl vane in foreign plants was performed, the chemical composition of the damaged swirl vanes was analyzed, and cause of damage was investigated by analysis using CHECWORKS code. The cause of damage is analyzed as the FAC (Flow Accelerated Corrosion) or Liquid Droplet Impingement Erosion due to use of carbon steel with low Cr content and low strength. Use of pH control chemicals potential to FAC increase is analyzed as another cause for FAC. The immediate countermeasure is replacement of damaged swirl vanes. It is recommended to reduce FAC that the swirl vane of high Cr content and high strength material be used as replacement swirl vane. The pH control operation by alternative amine can be a method of FAC decrease.

1. 서 론

국내 웨스팅하우스 type의 원자력발전소에서 계획예방정비기간중 증기발생기 2차측 내장품 육안점검결과 1차 습분분리기에 손상이 진행중인 것이 발견되었다. 비디오 카메라 녹화에 의한 육안점검과 UT 방법을 이용한 두께 측정 검사를 수행하였다. 이 발전소의 2개 증기발생기는 웨스팅하우스 모델 F 형으로, 개괄적인 형태는 그림 1과 같다. 이에는 2개의 습분분리기가 있는데 이번에 손상이 발생한 것은 1차 습분분리기로 Swirl vane 형이다. 증기발생기 1개에는 16개의 swirl vane

이 있고, 각 swirl vane은 4개의 blade로 구성되어 있다. 그 다음번 계획예방정비기간중 손상부위를 검사한 결과, 증기발생기 A에는 16개 swirl vane중 10개가 부분적으로 손상되어 두께가 감육되었고, 증기발생기 B는 swirl vane 16개 모두에 날개와 Barrel 용접부 주변에서의 원주방향 손상 및 두께 감육이 발생한 것으로 나타났다. 손상정도가 이전 주기에 측정한 결과에 비해 상당히 심각하게 진행되어 이에 대한 보수가 필요한 상황이다.

이 일차 습분분리기 swirl vane의 손상원인을 분석하고 정비대책을 수립하기 위하여 해외 원전에서의 증기발생기 swirl vane 손상사례를 조사하고, 손상 vane의 화학조성 분석과 경도 측정 및 CHECWORKS Code를 이용한 FAC (Flow Accelerated Corrosion) 분석 등을 수행하였다.

가. 습분분리기 현황

이 손상된 증기발생기의 일반적인 사양은 다음과 같다. 2개의 웨스팅하우스 모델 F 형 증기발생기로, 1차 습분분리기는 Swirl vane type으로 tube bundle 상부에 16개의 직경 20인치 swirl vane separator가 설치되어 있고, 각 vane은 4개의 blade로 구성되어 있고 이 blade는 중앙 hub와 swirl vane barrel의 내경부에 용접되어 있다. (그림 1 참조) Swirl vane은 물-증기 혼합체에 회전력을 주어 원심력에 의해 무거운 물이 외부로 떨어지게 한다. 이 분리된 물은 downcomer를 통해 재순환된다. 2차 습분분리기는 moisture separator housing내에 hook-and-pocket type의 vane으로 구성되어 있다. 이 vane에 의해 수직 상승중인 물-증기는 지그재그 운동을 하게 되어, 보다 무거운 물이 vane내 pocket에 갇히게 되고 이 물은 재순환된다.

1차 습분분리기의 재료는 탄소강으로 ASME SA285 Gr.C이고, barrel은 SA106 Gr.B이다. 이는 모두 저 Cr 농도 탄소강으로 FAC에 취약한 재질중의 하나이고, SA285 Gr.C의 yield strength가 30 ksi로 적은 편이어서 침식에 의한 손상일 가능성도 배제할 수 없다.

이 원자력발전소의 2차측 설계 운전조건은 다음과 같다.

- Design Condition : 1186 psig, 600 °F
- Feedwater & steam flow rate : 515 kg/sec
- Steam temperature : 534.5 °F (279 °C)
- Steam Pressure : 920 psia (6.34 MPa)
- Steam Quality : 99.75%

나. 육안 및 UT 검사 결과

상기의 두번째 계획예방정비기간중에 실시한 검사 결과, 증기발생기 A에서는 16개 swirl vane중 10개가 손상되었으며 손상발생 부위는 vane의 원주방향 가장자리 및 인접한 barrel 부위였다. Vane과 barrel의 기준두께는 각각 8mm와 6.4mm로 상태가 양호한 6개의 vane에서도 6.6mm 정도의 두께를 보였다. 손상이 심한 14번 및 16번 vane에는 직경 5mm정도의 구멍이 발생하여 있었다. 전체 swirl vane의 손상부위 잔여두께는 0 ~ 6.5mm(정상: 8mm)이었고, swirl vane barrel의 손상부위 잔여두께는 2.0 ~ 5.4mm(정상: 6.4mm)이었다.

증기발생기 B에서는 16개 모든 vane의 원주 가장자리와 인접 barrel 용접부에 손상이 있었다. 증기발생기 A에 비해 심한 손상을 보였으며 vane 가장자리부 잔여두께가 0 ~ 3mm(정상: 8mm)이었다. 상태가 심한 vane의 경우 vane 가장자리 부에 큰 구멍이 발생되어 있었다. Swirl vane barrel부에서도 심한 손상이 존재하였다. (그림 2, 참조)

이상과 같은 육안 및 UT 검사 결과에 따라, 이 원전의 증기발생기 습분분리기 손상은 280℃ 이상의 고온에서 물-증기 혼합유체의 격렬한 유동에 의한 두께감육 현상인 것으로 추정된다. 구체적인 손상 mechanism은 FAC 또는 습분충격 침식(liquid droplet impingement erosion)인 것으로 추정되며, 보다 정확한 조사를 위해 성분분석 및 FAC 발생 가능성 분석을 수행하였다.

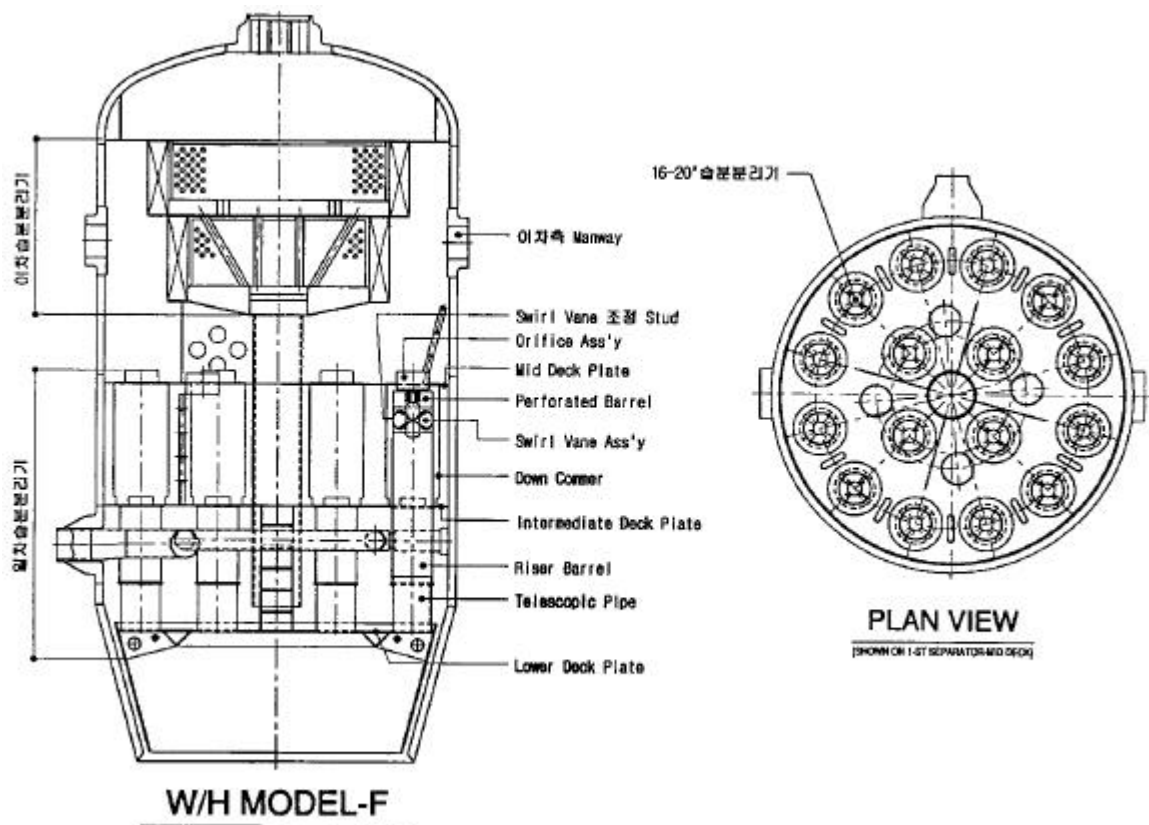
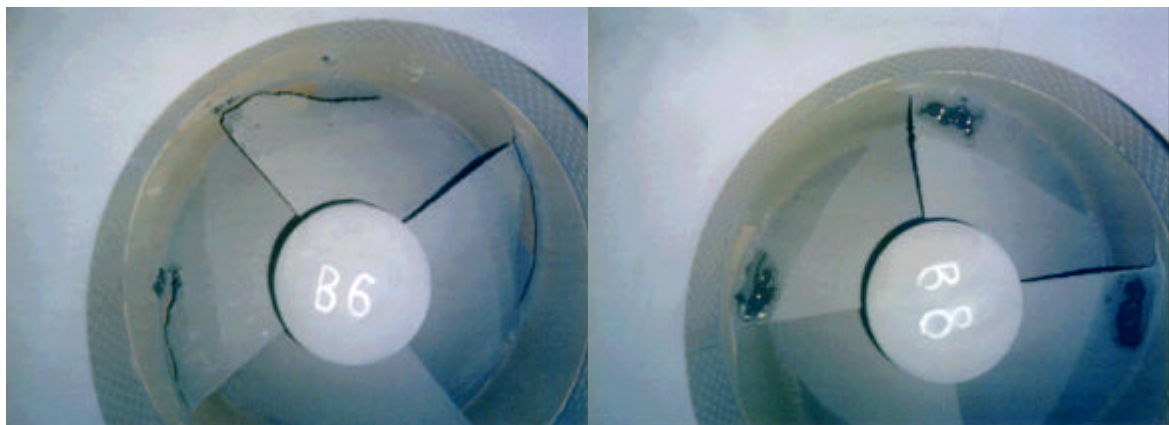


그림 1 웨스팅하우스 모델 F 증기발생기 습분분리기 개략도



(a)

(b)

그림 2. 손상된 증기발생기 swirl vane : S/G "B", #6 vane (a) & #* vane (b)

2 이론적 배경

가. FAC (Flow Accelerated Corrosion)

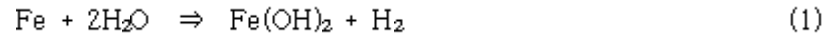
1) FAC 개요

FAC는 전기화학적인 부식과정과 용해된 금속이온의 유체에 의한 이동으로 부식 환경의 재생성 과정으로 대별될 수 있다. 그리고 이로 인해 wear rate가 안정되지 못하고 지속적인 경향을 보

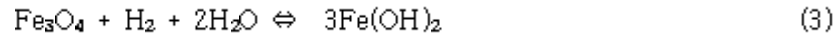
이게 된다.

첫번째 과정은 산화피막층과 물과의 접촉면에서 수용성 제1철(ferrous) ion이 생성되는 과정으로 이는 다음의 3가지 과정으로 세분된다. (그림 3 참조)

- ① 산화피막층을 구성하고 있는 다공질 (porous) magnetite를 통과한 물과 철 금속이 반응하여 금속이 다음의 반응에 의해 산화된다.



- ② 생성된 수소에 의해 환원성 분위기가 증가하고 이에 의해 금속표면에 존재하는 magnetite 산화피막층이 환원과정을 거쳐 용해된다.



- ③ 수용성 이온들이 금속표면에서 다공질의 산화층을 통과하여 유체부로 농도차에 의해 확산된다.

두번째 과정은 제1철 이온을 포함한 수용성 이온들이 유체부의 확산경계를 지나 유체의 본류(bulk water)로 확산되어 간다. 이 역시 농도차에 의한 확산으로 bulk water에서의 수용성 이온의 농도(C_∞)와 산화피막층과 유체의 접촉부에서의 농도(C_s)와의 차에 의해서 확산 정도가 결정되며, 이에 따라 산화층의 용해 정도 및 부식율이 정해진다. 즉, 일반적으로 C_s 가 C_∞ 보다 상당히 크게 되는데($C_s \gg C_\infty$), 유속이 증가하면 이 차이는 더욱 커지게 되어 부식율이 증가하게 된다. 이것이 유체유동에 의한 부식가속 현상(FAC, Flow Accelerated Corrosion)이다.

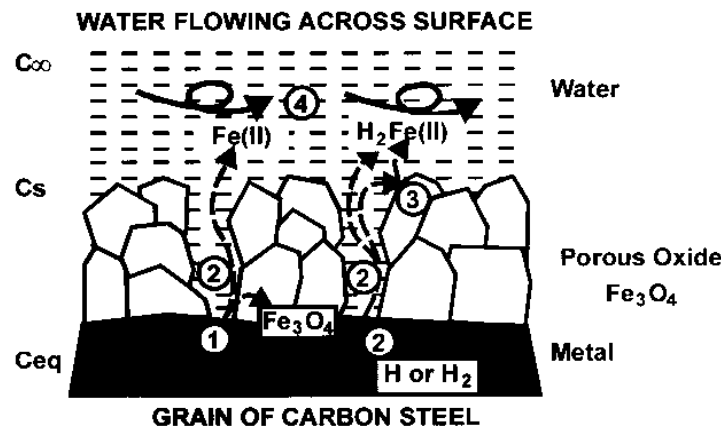


그림 3. FAC 과정의 개략도

2) FAC에 의한 두께감소 발생 요건 및 영향

EPRI에서 개발한 CHECWORKS code의 FAC 예측 model인 Chexal-Horowitz model에는 pH, 용존산소농도 및 pH 조절방법 등의 수화학적 변수, 유속, 온도, 건도(steam quality), pipe 크기 및 geometry 등을 포함한 수력학적 변수와, pipe 재료의 Cr, Mo 및 Cu 함유율의 재료적 변수를 두께감소가 발생하게 되는 요건으로 고려하고 있다.

이 변수들을 고려한 Chexal-Horowitz model의 FAC 일반식은 다음과 같다.

$$\text{CR} = F_1(T) \cdot F_2(\text{AC}) \cdot F_3(\text{MT}) \cdot F_4(\text{O}_2) \cdot F_5(\text{pH}) \cdot F_6(G) \cdot F_7(\alpha) \quad (4)$$

여기서, CR은 FAC 부식율, $F_1(T)$ 는 온도 효과 factor, $F_2(\text{AC})$ 는 합금원소 함량 factor, $F_3(\text{MT})$ 는 질량전달 factor, $F_4(\text{O}_2)$ 는 용존산소농도 factor, $F_5(\text{pH})$ 는 운전온도에서의 pH 영향 factor, $F_6(G)$ 는 pipe geometry factor, $F_7(\alpha)$ 는 유체내의 void fraction factor이다.

이중에서 material content의 차이에 의한 영향과 유속에 의한 영향에 관해서만 자세히 설명하면 다음과 같다.

가) Material 함량 차이에 의한 효과

FAC rate는 크롬(Cr), 몰리브덴(Mo) 및 구리(Cu) 원소 함량에 큰 영향을 받는다. 특히 Cr의 영향은 매우 커 Ducreux의 연구결과에 의하면, 0.5w/o 이상의 Cr 농도에서는 FAC는 거의 무시할 정도이다. (그림. 4) 이는 아주 적은 Cr 함량으로도 산화피막층의 안정성이 매우 증가하기 때문으로 분석된다. 이 이유는 금속층/산화물층 접촉부와 산화물층/water층 접촉부의 두 부분에서의 철의 용해도 차이에 의해, 0.5 w/o 정도의 아주 적은 Cr 함량으로도 산화피막층의 안정성이 매우 증가하기 때문으로 분석된다. 그림 5에서 보는 바와 같이 435°F(225℃)에서 철의 용해과정에 의해서 생성된 산화물층의 porosity(多孔性) 정도가 0.025w/o Cr 농도를 가진 저합금강에서는 커지는 반면, 1.54w/o Cr 농도를 가진 고합금강에서는 적어지는 것을 확인할 수 있었고, 이에 따라 FAC에 의한 wear rate에 차이를 보이는 것을 알 수 있다. Mo에 의한 효과도 Cr에 의한 효과와 비슷하다.

원소함량 효과를 보여주는 Ducreux 관계식은 다음과 같다.

$$\text{FAC rate}/\text{FAC rate max} = (83 \cdot [\text{Cr}\%]^{0.89} \cdot [\text{Cu}\%]^{0.25} \cdot [\text{Mo}\%]^{0.20})^{-1} \quad (5)$$

여기서 [Cr%], [Cu%], [Mo%]는 각 원소의 질량비를 나타낸다.

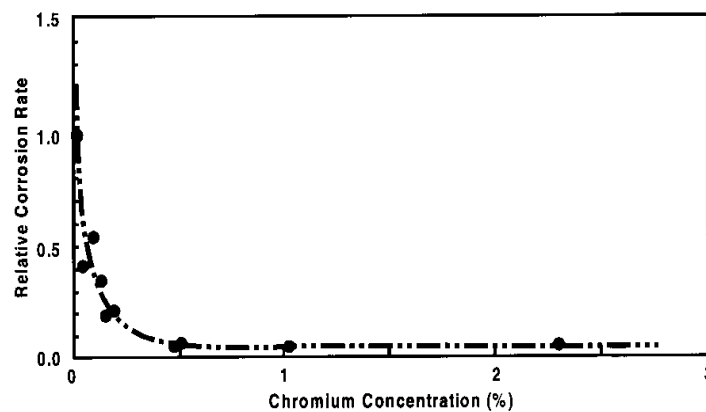


그림 4. Cr 원소 함량비에 따른 FAC 발생 비율

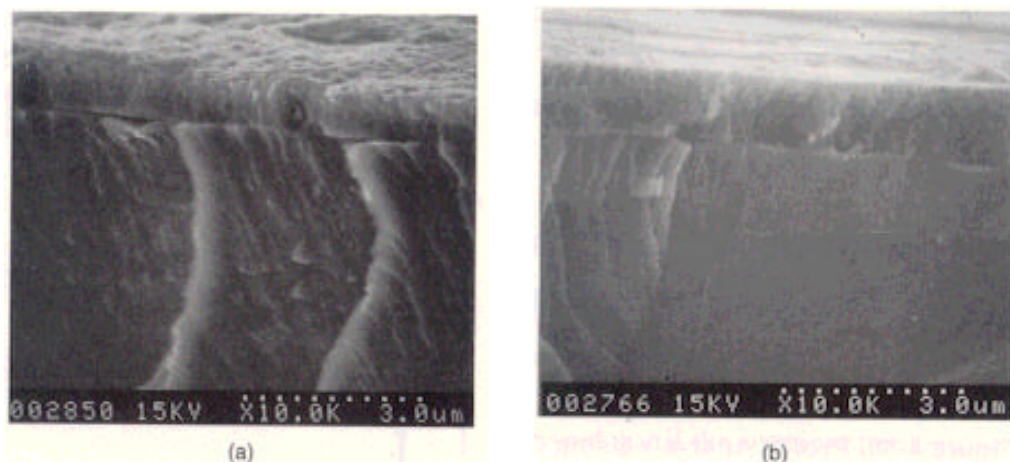


그림 5. 435°F(225℃)에서 Magnetite 층의 porosity에 미치는 재질성분 효과를 보여주는 SEM 사진 [(a)는 0.025w/o Cr 농도의 재질, (b)는 1.54w/o Cr 농도의 재질]

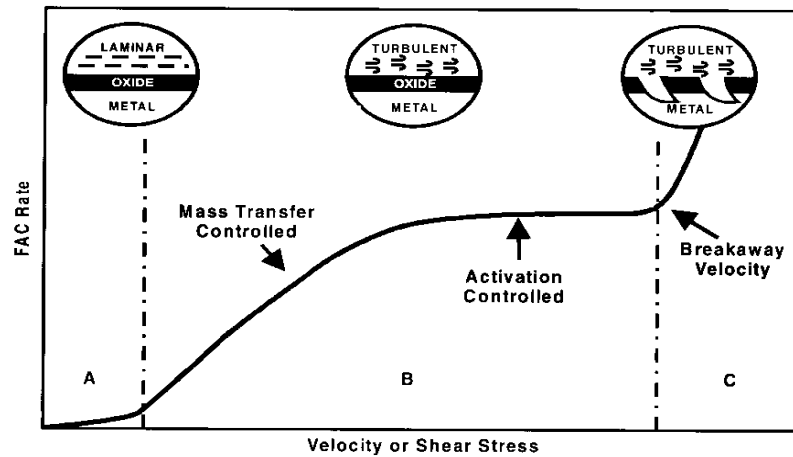


그림 6. 유체의 속도에 따른 FAC 발생 mechanism 변화

나) 유체 속도의 효과

FAC는 유체의 속도에 의해서도 크게 영향을 받는다. 하지만 이는 유체의 bulk velocity나 bulk 유량보다는 부식이 발생하는 국소적 부분에서의 local velocity에 영향을 주는 배관표면의 거칠정도(roughness), 유로 형태 및 단면의 크기 등에 영향을 받는다. FAC의 경향은 유속에 따라 그림 6과 같이 3가지의 형태를 보인다. 저유속에서는 부식은 산화층과 유체 본류간의 이온 전달과정에 의하므로 부식율이 크지 않다. 하지만 고유속에서는 유체 본류에서의 물질전달이 유속에 달려 있으므로 유속이 반응의 활성화에너지원으로 작용하여 부식이 속도증가에 비례하여 증가한다. 하지만 보다 큰 유속에서는 오히려 반응의 기회 상실 및 시간의 감소에 따라 부식율이 둔감하기도 한다. 임계속도 이상의 유속에서는 금속표면에서의 전단응력(shear stress)이 커져 표면의 산화 피막층을 깎아내는 침식과정이 발생하여 마모율은 급격히 증가하게 된다.

나. 습분충격 침식 (Liquid Droplet Impingement Erosion)

습분충격 침식은 터빈의 마지막 단 blade에서 많이 발생하는, 고 유속의 증기와 함께 이동하는 물방울이 기기와 부딪히면서 발생하는 현상으로, 이러한 충격에 의한 지속적인 변형의 결과로 나타나는데 있다. 이러한 지속적 충격에 의한 침식을 그 손상 mechanism에 의해 저주기 피로 (low-cycle fatigue) 현상으로 해석한다. [3] 이러한 형태의 침식에 대한 가장 중요한 결정요인은 각 재료의 피로강도 계수(fatigue strength coefficient)이다. Fatigue strength가, 지속적 변형에 대한 저항력의 척도로 사용되는 cyclic strain hardening에 큰 영향을 받기 때문에 각 material의 침식 저항력은 stress와 strain의 복합적인 반응의 결과로 나타나게 된다.

일반적으로 정상상태의 cyclic 변형 저항력은 cyclic stress-strain curve에 의해 잘 표현된다. 응력의 크기(σ_a)와 소성 변형의 크기($\Delta \epsilon_p/2$)와의 관계는 일반적으로 다음과 같이 표현되어진다.

$$\sigma_a = K' \cdot \left(\frac{\Delta \epsilon_p}{2} \right)^{n'} \quad (7)$$

여기서, K' 은 cyclic strength coefficient이고, n' 은 cyclic yield strength hardening 지수이다. 침식에 대한 저항도를 나타내는, 파괴까지의 총 cycle 수와 총 변형 정도와의 관계는 탄성 및 소성 변형 저항도에 의해 식 (8)과 같이 표현된다.

$$\frac{\Delta \epsilon_T}{2} = \frac{\Delta \epsilon_e}{2} + \frac{\Delta \epsilon_p}{2} = \frac{\sigma_f'}{E} \cdot (2 N_f)^b + \epsilon_f' \cdot (2 N_f)^c \quad (8)$$

여기서, 4가지 변위 기준의 재료성질을 정의하게 되는데, σ_f' 은 피로강도 계수 (fatigue strength

coefficient), ϵ_f' 은 피로 연성 계수 (fatigue ductility coefficient), b 는 피로 강도 지수, 그리고 c 는 피로 연성 지수이다. 이 관계는 그림 15에 나타나 있다. 그런데 지수 b 와 c 는 변위 경화 지수 (strain-hardening exponent)인 n' 과 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$n' = \frac{b}{c} \quad (9)$$

이 결과에 의해 fatigue에 의한 material의 수명을 평가할 수 있다.

하지만 일반적으로 strain 저항도에 대한 실험보다는 stress 저항도에 대한 실험을 많이 하였고 이에 대한 결과인 applied stress-number of cycles to failure (S-N) curve를 많이 이용한다. Engineering stress(S)와 파괴까지의 cycle 수(N) -다른 의미로의 수명-과의 관계는 그림 16과 같다. 이러한 결과에 따라 해당 유속등 외부 응력에 따른 각 재질의 피로강도에 따른 저항도 및 수명을 알 수 있다.

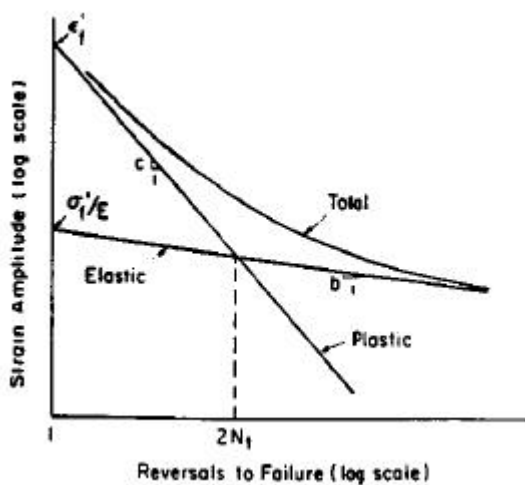


그림 7. 변위 크기와 피로 수명과의 관계도

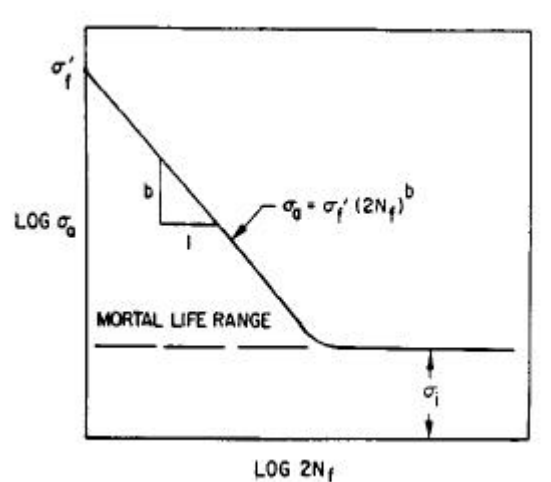


그림 8. 응력-수명 관계도

3. 조사 및 분석 결과

가. 해외 유사 사례 조사

해외에서 가동중인 웨스팅하우스의 증기발생기에서 유사 손상사례가 발생하였는지에 대한 조사를 EPR의 용역기관인 Dominion Engineering, Inc.에 의뢰하여 실시하였다. 조사결과는 표 1과 같다.

이 조사결과 웨스팅하우스 모델 F 증기발생기를 사용하고 있는 해외 원전인 Callaway 원전, Wolf Creek 원전, Vogtle 1호기와 2호기 및 Seabrook 원전에서 증기발생기 습분분리기에 대한 점검을 실시하였으나 손상사례는 없었다. Millstone 3호기 및 Vandellos 2호기는 습분분리기에 대한 점검조차 실시하고 있지 않았다. 그리고 구형 모델 44F 및 51F를 사용했던 원전인 Surry 1, 2호기, Turkey Point 3, 4호기, Point Beach 1호기 및 Robinson 원전에 대해서도 조사를 실시하였다. 이 중에서 단지 Surry 1, 2호기에서 '89 - '90년에 swirl vane과 barrel에 손상이 발견되었고, 발전소 출력개선과 관련하여 '91년, '92년에 각각 증기발생기를 교체한 경험이 있었다. 손상이 진행되었을 '80 - '90년까지의 기간동안 암모니아와 hydrazine(약 20ppb의 농도)을 이용해 8.8 - 9.0의 급수 pH_T(상온으로 냉각후 pH)를 유지하는 운전을 하였다. 하지만 이때에 정확한 vane 손상원인 조사는 이루어지지 않았다.

표 1. 모델 F 증기발생기 습분분리기의 FAC에 의한 손상여부 조사 사례

Plant 명	상업운전일 및 교체일	소 유 자	조 사 결 과
미국내 모델 F형 S/G를 가진 원전			
Callaway	'85. 4.	Union Electric	육안점검 실시하였지만 손상없었음.
Wolf Creek	'85. 9.	Wolf Creek Nuclear Operating Co.	육안점검 실시하였지만 손상없었음.
Millstone 3	'86. 4.	Northeast Utilities	증기발생기의 swirl vane에 대한 점검을 실시 한 적 없음.
Vogtle 1 & 2	'87. 5. '89. 5.	Georgia Power	육안점검 실시하였지만 손상없었음.
Seabrook	'90. 7.	North Atlantic Energy Service Co.	육안점검 실시하였지만 손상없었음.
미국내의 구형 44F 및 51F형 S/G를 가진 원전			
Surry 1 & 2	'81. 7. '80. 9.	Virginia Power	1990년, Surry 1호기 및 2호기에서 습분분리기 의 손상을 경험하였고, 다음 2년동안 교체함. 원인분석은 하지 않음.
Turkey Point 3 & 4	'82. 4. '83. 5	Florida Power & Light	육안점검 실시하였지만 손상없었음.
Point Beach 1	'84. 3.	Wisconsin Electric Power	육안점검 실시하였지만 손상없었음.
Robinson	'84.10.	Carolina Power & Light	육안점검 실시하였지만 손상없었음.
기타 모델 F형 S/G를 가진 원전			
Vandellos 2	'88. 3.	Endesa-Iberdrola	습분분리기 점검한 적 없음.

ABB/CE형 원전에 대한 유사사례 조사를 위해 Main Yankee 원전 및 San Onofre 원전에 대해 조사하였다. CE형 원전에서도 비슷한 손상이 발생하여 spinner blades(W 모델 F형의 swirl vane과 비슷)와 can(W 모델 F형의 barrel과 비슷)의 벽에서 손상이 발견되었다. Main Yankee 원전에서는 3개 증기발생기에 있는 294개 모든 습분분리기를 기존의 탄소강 대신 2.25%Cr-1%Mo 강으로 교체하였다. San Onofre 2호기와 3호기에서는 4개 증기발생기의 400개 습분분리기 중에서 80개가 손상되어 교체되었다. 이들은 주로 증기발생기의 가장자리에 위치한 것들이었다. ABB/CE형 증기발생기의 습분분리기는 웨스팅하우스형에 비해 상대적으로 작고 교체하기 쉽다는 특징이 있다.

미국의 원자력사업 규제기관인 NRC(Nuclear Regulatory Commission)에서는 증기발생기 습분분리기와 관련된 문제를 다룬 이력이 없었다. 이는 이 습분분리기가 원자력안전 관련 기기로 분류되어 있지 않기에 문제발생시에 NRC에 보고할 필요가 없기 때문인 것으로 여겨진다.

FAC를 유발시키는 주요 변수로 온도, 유속, pH, 환원성 수화학 분위기 및 alloy 성분 (특히 Cr 농도) 등을 들 수 있다. 또한 습분충격 침식을 일으키는 변수로는 유속, 재질의 강도 및 습분의 크기를 들 수 있다. 손상이 발생한 국내 W 모델 F형 증기발생기내 유속은 다른 모델 F 발전소와 비슷하다고 가정할 수 있다. 그러므로 이 원전 증기발생기에서 나타난, 높은 감속속도는 고유속에 의해 발생되었다고 보기 힘들 것 같다. 하지만 중심에서 먼 쪽의 swirl vane에서 손상이 더 심한

것은, 유체의 회전에 따라 중심에서 먼 쪽의 유속이 더 높기 때문으로 볼 수 있다.

Surry 1, 2호기는 8.8 ~ 9.0, Main Yankee 원전은 9.0, 그리고 San Onofre 2, 3호기는 9.0 ~ 9.2의 다소 낮은 pH로 운전되고 있다. pH가 낮을 경우 FAC는 증가하게 된다. 그런데 대부분의 미국내 모델 F 증기발생기 사용 원전은 ETA와 같은 대체 아민을 사용하고 있고, 이러한 운전은 암모니아를 운전할 경우와 비교해서 고온에서의 pH를 상대적으로 높게 한다. 이것이 여타의 다른 모델 F 원전에서 손상이 발견되지 않은 이유로 설명될 수 있다. Vogtle 1, 2호기는 암모니아-hydrazine 운전을 하고 있어 예외이지만, pH가 9.8 ~ 9.9로 높게 운전되고 있어 손상을 줄이는 효과를 준 것으로 이해된다.

강한 환원성 분위기는 FAC를 심하게 만드는 한 요인이다. 그 예로 용존산소의 감소를 들 수 있다. 수 내지 수십 ppb의 용존산소 농도에서 FAC는 약간의 용존산소 농도변화에 의해 크게 변화된다. Hydrazine 사용은 환원성 분위기를 만들고 산소농도를 감소시켜 FAC를 증가시키는 요인으로 작용하기도 한다. Gravelines 2,3,4호기에서 오래동안 hydrazine-암모니아 운전을 한 이후 tube support plate 상부에서 FAC가 발생한 것으로 관측된 것도 이러한 원인으로 해석될 수 있다. 국내의 이 발전소에서도 '90년부터 120 ~ 130 ppb 농도에서 hydrazine 운전을 하고 있다. 그리고 반대로, 급수내에 산화구리(CuO)의 존재는 용존산소 농도의 증가와 같은 효과를 주어 ECP (Electrochemical Potential)을 증가시키고 FAC를 감소시키는 효과를 준다. 이것이 구리합금 열교환기를 사용하는 일본의 원전에서 500ppb 이상의 고농도 hydrazine 운전에서도 증기발생기 내부에서 FAC가 발생하지 않은 이유로서 설명될 수 있다. 그러므로 일본의 원전과, Robinson 및 Vogtle 원전의 예로써, 고농도 hydrazine 운전만으로 FAC 증가 여부를 판단할 수는 없고, 다른 조건과의 복합적인 영향을 고려하여야 한다는 결론을 얻을 수 있었다.

FAC 및 습분충격 침식의 가장 중요한 요인으로 들 수 있는 것이 재료의 합금성분이다. 특히 Cr 농도는 중요한 요인으로 분석되고 있다. 하지만 탄소강의 Cr 및 기타 성분의 농도는 금속을 만들 당시의 여러 조건, 원광, 용융금속 덩이 및 완성금속 조각 등에 따라서 달라지게 된다. 그러므로 습분분리기에 사용된 탄소강의 Cr 농도는 제작사 및 제작 국가에 따라서 달라질 수 있다. 습분분리기 또는 증기발생기 자체를 교체한 몇몇 ABB-CE형 원전 및 Surry 원전처럼 손상된 국내 발전소의 swirl vane을 2.25% Cr 강과 같은 고 Cr 농도의 합금강으로 교체하는 것이 습분분리기 손상방지를 위한 효과적인 방법일 것이다.

나. 증기발생기 채취 시편 성분 분석

앞서도 언급한 것과 같이 같은 모델 F 발전소라 하더라도 습분분리기의 화학성분은 제작자 등의 조건에 따라 달라질 수 있고 이에 따라 FAC의 진행정도가 달라질 수 있다. 그리하여 손상된 1차 습분분리기 swirl vane의 화학성분을 보다 정확히 파악하기 위해 시편을 채취하여 화학성분을 분석하였고 그 결과는 표 2와 같다. 시편의 재질은 ASTM A285 Gr.C와 유사하였으나, Cu의 함량이 약간 적은 것으로 나타났다. 다른 모델 F 원전의 증기발생기 습분분리기와의 성분 비교를 할 수는 없었지만, FAC에 특히 영향을 미치는 Cr의 농도 측면에서 볼 때, 손상된 국내 원전 swirl vane의 Cr 농도가 상당히 낮아 FAC 발생에 영향을 주었다는 예측을 할 수 있다.

다. Swirl Vane 슬러지 성분 분석

습분분리기 swirl vane에는 많은 양의 슬러지가 퇴적되어 있었는데, 이 슬러지가 손상에 미칠 가능성을 확인해 보기 위해 퇴적되어 있는 슬러지의 조성을 분석하였고 그 결과는 표 3과 같다. 슬러지의 주성분은 산화철로 일반적인 부식생성물이었으며, FAC에 영향을 줄 수 있는 구리산화물등이 영향을 미칠 수 없을 정도로 적은 양이어서 swirl vane에 퇴적된 슬러지에 의해 손상의 속도가 영향을 받을 만한 특징적인 것은 없었다.

표 2. 습분분리기 채취 시편 성분 분석 결과 (단위: Wt. %)

시료명 분석 항목	ASTM A285Gr.C	채취 시편	비 고
Mn	0,980 이하	0,409	
P	0,035 이하	0,015	
Cu	0,180 ~ 0,370	0,015	
Cr	0,001 ~ 0,200	0,009	
Mo	0,000 ~ 0,200	0,005	
Fe	Balance	나머지	
C	0,280 이하	0,205	
S	0,040 이하	0,021	

표 3. 증기발생기 슬러지 화학성분 분석 결과

순번	분석 항목	단위	화학성분량	비 고
1	Si as SiO ₂	Wt. %	0,02	
2	Al as Al ₂ O ₃	"	0,03	
3	Na as Na ₂ O	"	0,08	
4	Ca as CaO	"	0,04	
5	Cr as Cr ₂ O ₃	"	0,11	
6	Cu as CuO	"	0,01	
7	Mg as MgO	"	0,03	
8	Mn as MnO	"	0,33	
9	Fe as Fe ₃ O ₄	"	98,20	
10	Ni as NiO	"	0,75	
11	Zn as ZnO	"	0,05	
12	P as P ₂ O ₅	"	0,02	
13	V as V ₂ O ₅	"	0,01	
14	Mo as Mo ₃ O ₄	"	0,01	
15	Ti as TiO ₂	"	0,20	
16	Pb as PbO ₂	"	0,02	
17	C	"	0,09	

라. CHECWORKS code를 이용한 FAC 가능성 분석

EPRI에서 개발된 FAC 해석 코드인 CHECWORKS code를 이용하여 이번 swirl vane의 손상이 FAC에 의해서 발생할 수 있는지의 가능성을 점검해 보았다. 일반적으로 FAC가 심하게 발생하는 온도조건은 150℃ 근처인데, 손상된 국내 원전 증기발생기의 2차측 출구측 증기 온도는 약 280℃로 FAC 발생이 적은 온도 구역에 속한다. CHECWORKS code의 입력조건은 표 4와 같으며, 실제 운전조건을 이용하였으며 실제조건을 알 수 없는, 유량과 같은 조건은 합리적인 가정하에 계산하여 입력하였다. 유량이 실제로 통과하는 부분은 blade와 blade 사이로, 이는 사다리꼴 형태를 보이는데, 이를 CHECWORKS code로 분석하기 위해 동일한 면적의 원형 단면적을 가지는 elbow로

변형하여 분석하였다. 정량적인 손상조건 및 손상정도를 정확히 알 수는 없었으나, 모든 운전조건을 실제 조건과 동일하게 설정하고 최대의 wear rate가 발생한다고 가정하여 code로 해석한 결과 최대 wear rate는 104mils/yr로 계산되었다. 이 발전소가 현재까지 약 10 EFPY(Effective Full Power Year)동안 운전되었다고 가정하면 FAC에 의한 총 마모정도는 다음과 같이 계산된다.

$$104 \text{ mils/yr} \times 10^{-3} \text{ in/mil} \times 25.4 \text{ mm/in} \times 10 \text{ EFPY} = 26.4 \text{ mm}$$

이 값은 swirl vane의 normal thickness 인 8 mm보다 커, FAC에 의해 swirl vane에 구멍이 날 정도의 손상이 발생할 수 있다는 가능성을 확인하였다.

pH 조절물질의 차이에 따른 FAC에의 영향을 code를 이용해 분석하였다. 현재 대부분의 국내 원전에서 암모니아에 의한 pH 조절 운전중으로 CHECWORKS code에 의한 분석 결과에 의하면 암모니아로 급수의 cold pH를 9.4로 유지할 때 최대 wear rate가 104 mils/yr가 되나, 이를 ETA나 Morpholine으로 변경하여 동일한 pH를 유지하는 운전할 경우에는 최대 wear rate가 각각 63 mils/yr, 61 mils/yr가 되어 FAC가 각각 39%, 41% 감소하는 것으로 나타났다. 그러므로 이에 의한 영향을 줄이기 위해 현재 pH 조절물질로 사용중인 암모니아를 ETA나 Morpholine 등의 대체 아민으로 교체하여 사용하는 것이 효과적인 것으로 분석되었다.

Swirl vane 재질중 Cr 농도의 변화에 따른 FAC 영향을 CHECWORKS code를 이용해 분석해 본 결과, pH 조절물질을 암모니아로 사용하는 등 현재와 동일한 운전조건에서 단지 swirl vane 재질을 Cr 농도가 0.009w/o인 재질에서 0.4w/o인 재질로 변경할 경우, 최대 wear rate가 12.5mils/yr로 FAC가 88% 감소하는 효과를 보이는 것으로 분석되었다. (현재 교체된 새로운 swirl vane 재질은 Cr 농도가 0.4w/o인 A517 Gr.B 탄소강임.)

표 4. CHECWORKS code 분석을 위한 입력 조건

항 목	입력값	비 고
온도	280 °C (535 °F)	
압력	6.34 MPa (920 psia)	
steam quality	최대 FAC 발생 조건	
유량	31,953 lbm/hr	- 총유량 : 4.09×10^6 lbm/hr - swirl vane의 blade당 통과유량 : 4.09×10^6 lbm/hr $\div$ 2 SG $\div$ 16 vanes $\div$ 4 blades/1 vane = 31,953 lbm/hr
pH	급수 cold pH 9.4	
재질	분석된 시편의 성분 농도	Cr : 0.009w/o

4 결 론

가. 손상 원인

국내 특정 원전 증기발생기의 1차 습분분리기 swirl vane이 극심하게 손상된 이유는 여러 가지 분석결과에 의해 다음과 같이 추정한다.

가장 큰 손상 원인으로 swirl vane 재질을 들 수 있다. 현재 사용중인 재질은 탄소강 A285 Gr.C로 저 Cr 농도 (대개 0.009 w/o) 및 저 강도 (Hv = 144) 재료이다. (항복강도 : 30 ksi) CHECWORKS code의 FAC 가능성 분석 결과에 따라 저 Cr 농도 재질 사용으로 습분을 함유한 증기에 의한 FAC 발생가능성이 충분하며, 저 강도 재료에 따라 침식, 특히 습분충격에 의한 침식 (liquid droplet impingement erosion)에 의해서도 손상이 발생할 수 있다는 결론에 도달하였다. 이

에 따라 보다 정확한 손상원인 결정을 위해서는 손상재질의 표면조직검사를 수행해야 할 것이다. 현재 해당 손상 부분에서 검사 시편을 확보하였고 검사 예정이다.

FAC를 발생시키는 원인으로 저 Cr 농도 재료 사용 외에 FAC를 증가시킬 수 있는 pH 조절물질 사용을 들 수 있다. 앞서의 CHECWORKS code 분석결과와 같이, 현재 pH 조절물질로 사용중인 암모니아를 ETA나 Morpholine 등의 대체아민으로 교체하여 사용하는 것이 FAC 감소를 위해 효과적일 것이다. 이에 대한 연구과제가 진행되었고, 고리1호기에서 '98년 9월부터 ETA로 대체되어 운전되고 있다.

또다른 FAC 발생 원인으로 고농도 Hydrazine 운전을 들 수 있다. 최근의 발표 논문에 의하면 130 ppb에서의 FAC에 의한 재질의 감속속도가 20 ~ 30 ppb일 때에 비해 두배이상 증가한다고 한다. [4] 하지만 이에 대한 연구결과가 아직은 부족하며, 일본에서는 500 ppb 정도의 hydrazine농도에서 운전을 하고 있음에도 증기발생기 습분분리기의 손상에 대한 보고는 없었다. 이러한 결과를 바탕으로 증기발생기 튜브 보호를 위한 고농도 hydrazine 운전은 현재와 같이 계속되어져야 할 것이다.

나. 보수 및 손상완화 방안

가장 먼저 생각할 수 있는 방법으로 고 Cr 농도 또는 고 강도 재질의 swirl vane으로 교체하는 것이다. 실제 이 발전소 증기발생기 1차 습분분리기 손상에 대한 보수 방법으로 교체가 제시되었고, 한국중공업에서 제작한 A517 Gr. B 탄소강 재질의 swirl vane으로 교체되었다. 이 재료는 0.40% Cr을 함유한 high strength steel로, (항복강도 : 100ksi) 앞서의 CHECWORKS code에 의한 분석 결과에서 보는 바와 같이 FAC 발생을 줄이는데 효과적인 것으로 판정되었다.

또 다른 방법으로, 앞서도 언급한 것과 같이 pH 조절물질을 현재의 암모니아에서 ETA나 Morpholine 등과 같은 대체 아민으로 교체하는 것도 swirl vane 손상완화를 위한 한 방법이다.

이 발전소 swirl vane의 손상원인을 감안할 때, 다른 모델 F 증기발생기에서도 유사한 손상이 발생할 가능성이 있으므로 검사를 수행하여야 하며, 다른 원전에서 swirl vane 손상이 초기에 탐지되었을 경우 swirl vane을 교체하는 대신, 고 강도 재료를 swirl vane 표면에 coating하는 보수 기술 적용도 고려할 수 있을 것이다.

IV 참고 도서

1. B. Chexal, et. al., "Flow-Accelerated Corrosion in power plants", EPRI TR-106611 (1996).
2. J. Ducreux, "Theoretical and experimental investigation of the effect of chemical composition of steels on their erosion-corrosion resistance", Paper 19 presented to the Specialists Meeting on "Corrosion-Erosion of Steels in High Temperature Water and Wet Steam", Les Renardières (May 1982).
3. R.H. Richman and W.P. McNaughton, " Correlation of cavitation behavior with mechanical properties of metals", Wear, Vol. 140, pp. 63-82 (1990).
4. P. Berge and M. Bouchacourt (EDF), "Flow Accelerated Corrosion and hydrazine", Eskom International Conference on Process Water Treatment and Power Plant Chemistry, Midland, South Africa (Nov. 25-28, 1997).