'99 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

원자력 증기발생기 습분 분리기 Swirl Vane 보수기술

The Repair Technology for Moisture Separator in Nuclear Steam Generator

배강국, 김인수

한국중공업주식회사
경남 창원시 귀곡동 555 번지

요약

원자력 증기발생기 전열관에서 생성된 증기의 습분을 제거 시켜주는 1 차 습분 분리기는 운전 중 여러 가지 원인으로 날개(Swirl Vane) 부분에 손상이 발생하며, 이 경우 발전 효율 저하나 원전의 안정적 가동에 문제를 초래할 수 있다. 특히, W/H F-Type 증기 발생기 1 차 습분 분리기에 손상이 발생하면 Secondary Man-way 로의 자유로운 교체가 불가능 하므로 보수기술 개발은 W/H F-Type 원자력 발전소의 수명 연장을 위해 필수적이다. 고리 # 2 증기발생기 습분 분리기 검사를 통해 여러 형태의 날개 부분 손상을 확인할 수 있었고, 손상이 발생된 위치와 증기발생기 운전 조건 등에 비추어 Vane 가장자리로의 습분 흐름에 의한 Steam Erosion 이 주된 손상 원인이었으며, Swirl Vane 의 손상 정도나 운전 중 안전 문제 등에 따라 적용 가능한 3 가지의 보수 방법과 실 보수 작업 시 적용할 수 있는 기본적인 보수 절차를 확립하였다.

Abstract

The moisture separator eliminating moisture in steam generator of nuclear power plant, can be damaged by several causes. Especially, the swirl vane which is an important part of it is vulnerable to the damage. As the moisture separator of Westinghouse "F" model is designed not to be replaced by new one, the development of repair technology is mandatory for the sake of life extension in nuclear power plant. Through the inspection of swirl vane in Kori#2 steam generator, we found there were various failures which were mainly caused by steam erosion. In this paper, we present the repair procedure and three different repair methods according to the degree of failure.

1. 서 론

가압 경수로형(PWR) 원자력 발전소에 있어 방사능을 포함하는 1 차 계통수(냉각수)와 터빈을 돌리는 2 차 계통수 사이에 열 교환을 일으키며, 1 차 계통과 2 차 계통을 분리시켜주는 역할을 하는 원자력 증기발생기의 상부에는 열 교환으로 생성된 증기에 함유된 습분을 제거 시켜주는 습분 분리기(Moisture Separator)가 설치되어 있다. 이 습분 분리기는 장시간 운전 중, 습분의 흐름에 따른

침식(Erosion), 부식(Corrosion) 등 여러 가지 원인으로 날개(Swirl Vane) 부분에 손상이 발생하면 증기의 습분 제거 효율이 감소하는 문제가 발생하고, 날개 부분의 두께 감소와 천공 등에 의해 생성된 각종 이 물질이 2 차 계통수의 오염을 가중시키며, 또한 생성된 이 물질이 유체와 동반 이동하여 2 차측의 각종 파손에 중요한 원인이 되기도 한다.

이와 같이 원자력 증기발생기 습분 분리기 Swirl Vane 의 손상은 발전효율이나 2 차측 오염 및 원전의 안전성 등 여러 가지 면에서 매우 중요하며, 특히 W/H F-Type 증기 발생기 1 차 습분 분리기의 경우 손상이 발생했을 때 Secondary Man-way 로의 자유로운 교체가 불가능 하므로 이의 보수기술 개발은 W/H F-Type 원자력 발전소의 수명 연장을 위해 필수적이다. 따라서 고리 #2 증기발생기 검사를[1] 통해 W/H F-Type 1차 습분 분리기 Swirl Vane 손상 원인을 분석하고, 적용 가능한 보수 방법에 대해 품질평가 및 작업 난이도 등을 체계적으로 고려한 최적의 보수공정 기술개발과 습분 분리기의 손상 상태에 따라 적용 가능한 보수 방안과 보수 절차 등을 확립하여 W/H F-Type 증기발생기 실 보수 작업에 적용하고자 하였다.

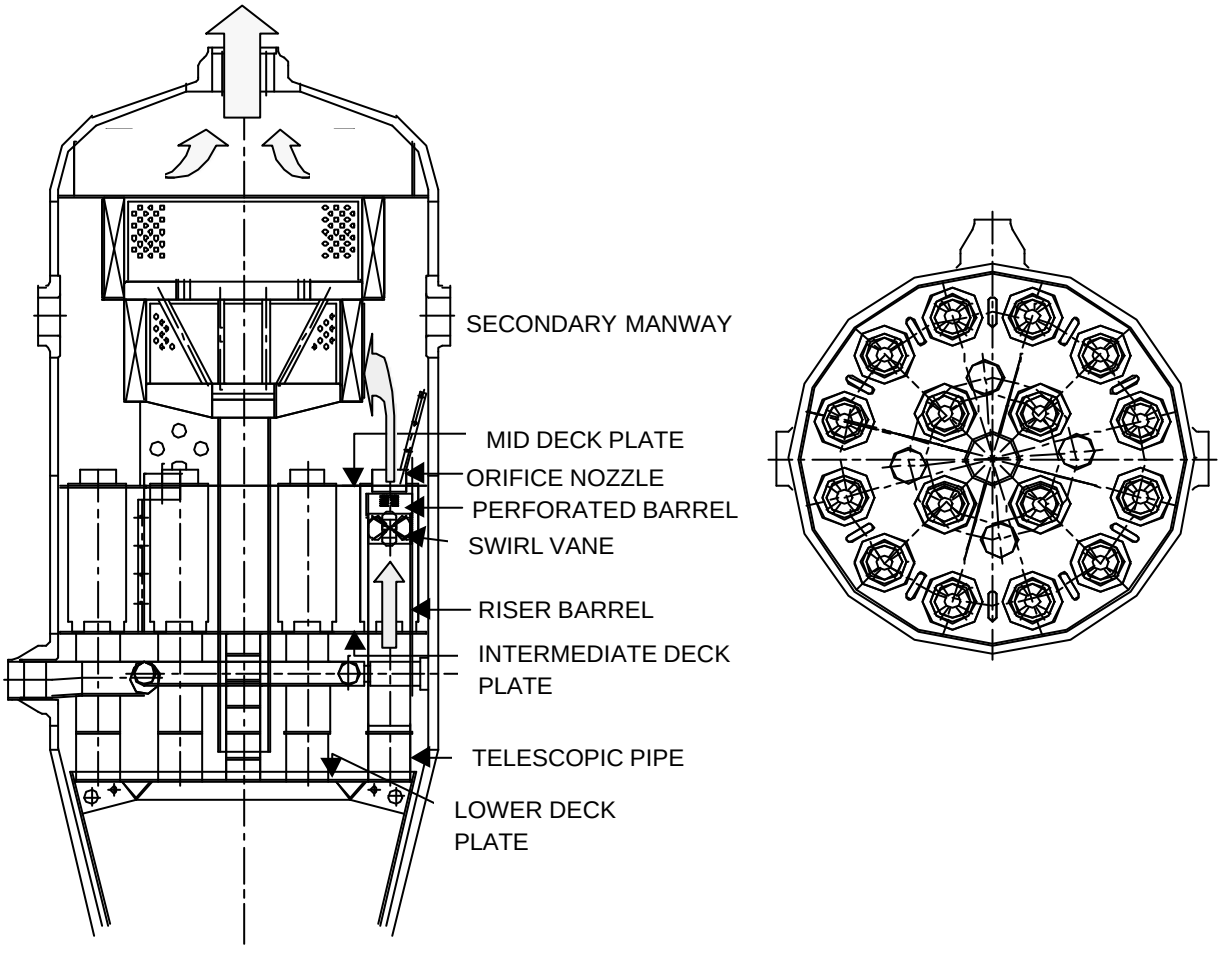

그림 1 W/H F-Type 원자력 증기발생기 상부 개략도

2. 손상 원인 분석

표 1 은 고리 # 2 원전의 증기발생기 습분 분리기 Swirl Vane 에 대한 설비사양, 운전 조건 및 검사결과 등을 요약한 표이며 사진 1 은 Vane 의 주요 손상 부위와 손상 부위의 표면 상태를 보여주

는 사진이다.

표 1 고리 #2 원전 증기발생기 습분 분리기 검사 결과 요약

항 목	내 용	비 고
설비 사양	● 모델 : W/H F-Type 증기발생기 ● 제품 : 16-20“ Swirl Vane Separator(4-Blade/Vane) ● 재질 : Carbon Steel(SA 36)	고리 #2,3,4 영광 #1,2
운전 조건	● Steam Flow Rate : 4.09 x 10^6 lbm/hr(5.15 x 10^2 kg/s) ● Steam Temperature : 534.6°F(278.2°C) ● Steam Pressure : 920psia(6.34Mpa) ● Steam Quality : 99.75%(운전 Data : 0.0625% MOC) ● Steam pH : 9.2 ~ 9.3	
검사 결과	● 증기발생기 A - 10EA Swirl Vane 부분적 침식 및 두께 감육 - Vane 가장자리 깃털형상의 침식 - Vane 침식부 잔여두께 : 1.2 ~ 5.5mm ● 증기발생기 B - 16EA Swirl Vane 전체가 부분적 침식 및 두께 감육 - #8 습분 분리기 Swirl Vane에 직경 2mm 정도의 천공 - Vane 침식부 잔여두께 : 1.3 ~ 3.0mm	

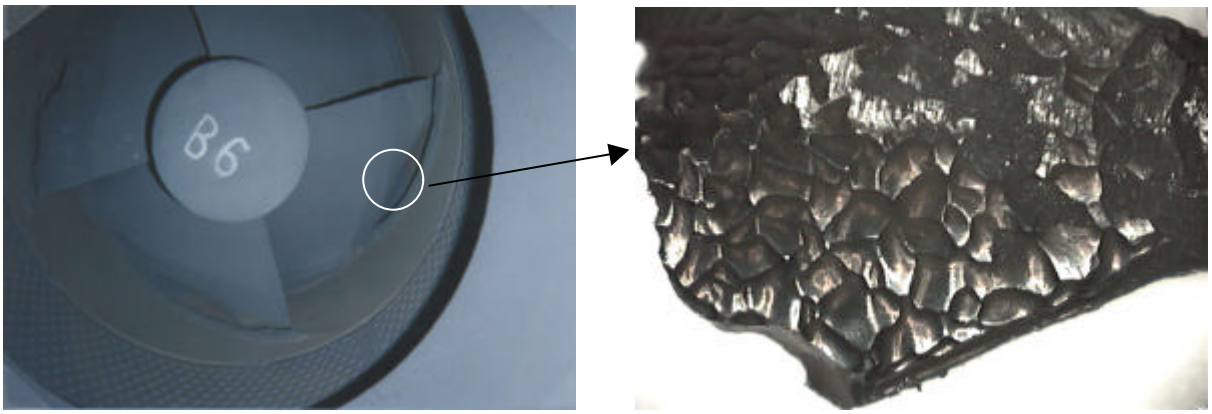

사진 1 Swirl Vane 손상부위와 손상부위 표면상태

먼저, 표 1에서 알 수 있듯이 온도나 pH 등은 W/H F-Type 증기발생기 습분 분리기 Swirl Vane 소재인 탄소강(SA 36)의 General Corrosion은 발생하기 어려운 조건이다. 그러나 Swirl Vane에서의 액적 분포 상태나 손상이 발생한 위치(그림 2) 등을[2] 고려할 때 Riser Barrel과 인접한 Vane의 가장자리 표면에는 증기가 대부분 물의 형태로 존재하고, 이 유체가 빠른 속도로 Vane 표면을 따라 흐르면서 Riser Barrel과 만나는 지점에서의 난류 형성과 높은 유체 압력에 따라 탄소강의 보호성 산화 피막인 Fe_3O_4의 파괴가[3] 지속적으로 발생하는 Steam Erosion이 주된 원인으로 판단된다. 또한 Swirl Vane에 사용된 소재 측면에서 살펴보면, 크롬(Chromium) 등을 전혀 함유하고 있지 않은 보통 탄소강의 경우 크롬이 0.5%이상 함유된 저 합금강에 비해 Steam Erosion 저항성이

현저히 감소한다는 각종 보고[4] 등에 비추어 기존의 W/H F-Type 증기발생기 습분 분리기 Swirl Vane의 소재가 크롬을 전혀 포함하고 있지 않은 일반 탄소강 소재였기 때문으로 사료된다.

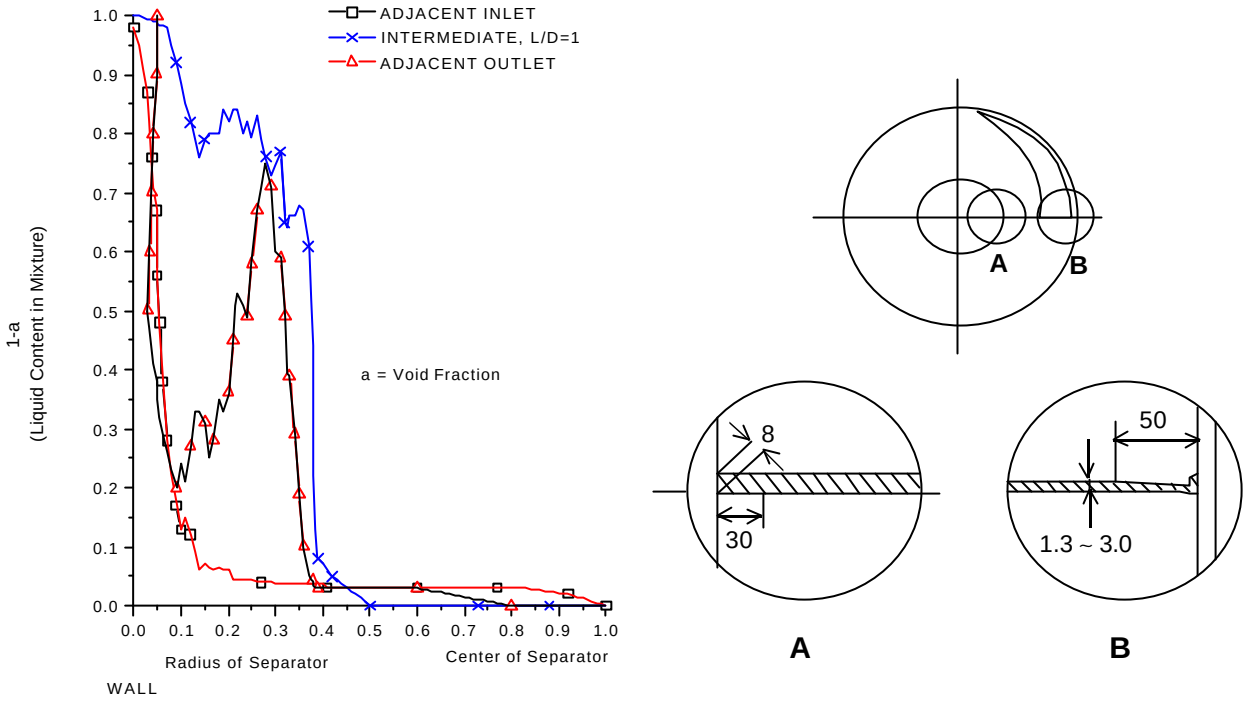

그림 2 Swirl Vane 위치에 따른 증기의 액적 농도와 손상부위 개략도

3. 보수 방법

Swirl Vane 손상 정도나 보수 공정 작업성 및 보수 후 안전성 등에 따라 3 가지 보수 방법을 개발하였으며, W/H F-Type 증기발생기 상부 모형을 제작하여 실 보수 작업 시 적용 가능하도록 기본적인 보수작업 절차를 확립하였다.

3. 1 Swirl Vane 전체 교체 방법

Swirl Vane을 증기발생기 외부에서 제작한 다음 Secondary Man-way를 통해 반입해 손상된 Swirl Vane과 교체하는 방안으로 다음의 부분 교체 방법이나 표면처리 보수방법에 비해 상대적으로 간편한 방법이나, Secondary Man-way Opening의 확대, 복구가 주요 제약 요소이다. 손상 Swirl Vane의 잔여 두께가 4mm 이하이거나 천공 등이 발생한 경우 적용 가능하도록 개발한 보수 방법이다.

3. 2 Swirl Vane 부분 교체 방법

Swirl Vane 조각을 증기발생기 외부에서 준비한 다음 Secondary Man-way를 통해 반입하고 증기발생기 내부에서 완제품으로 제작해 손상된 Swirl Vane과 교체하는 방안으로 전체 교체 방법의 주요 제약 요소인 Secondary Man-way Opening의 확대, 복구가 필요 없는 방법이나 Swirl Vane

조각을 좁은 공간의 증기발생기 내부에서 용접, 조립하는 것이 주요 제약 요소이다. 앞의 전체 교체 방법과 마찬가지로 손상 Swirl Vane의 잔여 두께가 4mm 이하이거나 천공 등이 발생한 경우 적용하며, Secondary Man-way Opening의 확대, 복구 문제를 극복하기 위해 제안, 개발한 보수 방법이라 할 수 있다.

3. 3 Swirl Vane 표면처리 보수 방안

이상의 2 가지 Swirl Vane 교체 방법과는 달리 손상된 Swirl Vane이 일정한 두께를 유지하고 있는 경우 표면처리(용사) 공정을 이용하여 손상 발생한 부위에 침식 저항성이 큰 분말을 코팅시켜 원래의 Swirl Vane을 계속 사용할 수 있게 하는 보수 방법이다. Secondary Man-way를 통해 용사 장비를 반입하고 증기발생기 내부에서 손상된 Swirl Vane 부분에 용사하는 방법으로 Secondary Man-way Opening의 확대, 복구는 필요 없으나 좁은 공간에서의 작업, 용사 전/ 후 처리 및 용사 분말의 비산 등이 주요 제약 요소이다. 손상 Swirl Vane의 잔여 두께가 최소 4mm 이상이거나 천공 등이 발생하지 않은 경우 적용 가능하도록 개발한 보수 방법이다. 한편, 여러 용사 방법 중 소재의 종류나 크기에 제약이 거의 없으며, 다양한 분말을 용이하게 코팅할 수 있고 대기중에서 양질의 코팅 층을 얻을 수 있다는 특성과 코팅 층의 형성 속도가 빠르며, 비교적 두껍게 코팅할 수가 있고 코팅 층의 두께 선택을 다양하게 할 수 있다는 장점을 가진 분말 분사 용사(HVOF : High Velocity Oxygen Fuel) 법이 채택되었다.

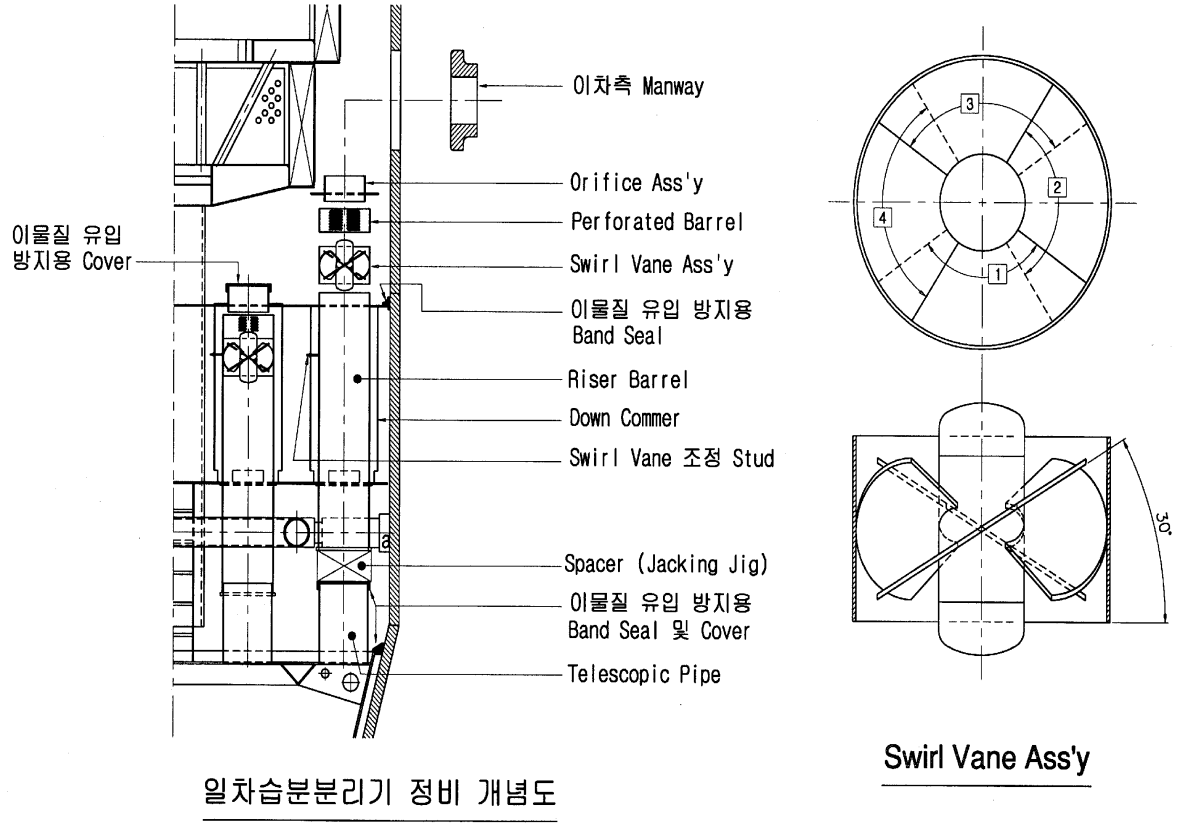

그림 3 Swirl Vane 교체/ 보수 방안 개념도

4. 결 론

W/H F-Type 증기발생기 습분 분리기 Swirl Vane은 가장자리 부분에서 주로 손상이 발생하였으며, 가장자리에서의 액적 증가와 난류 형성에 다른 Steam Erosion이 중요한 손상 원인이었다. 또한 Swirl Vane의 손상 정도 등에 따라 잔여 두께가 4mm 이하의 경우나 천공 등이 발생한 경우는 교체(전체, 부분 교체) 방안이, 잔여 두께가 4mm 이상인 경우는 표면처리 공정에 의한 국부 보수 방안이 적용 가능한 것으로 나타났다. 한편, 보다 완벽한 보수 공정 기술을 확립하기 위해서는 향후 실 보수 작업에 필요한 각종 보조 장비의 개발이 필수적으로 요구되며, 보수 기술에 대한 신뢰성을 확보하기 위한 실증실험 및 완벽한 방사능 방호를 위한 작업 조건 등의 고려가 필요할 것으로 사료된다.

5. 참고문헌

[1] "고리 #2 증기발생기 1차 습분 분리기 점검결과 보고서" 고리 원자력 본부, 1997. 3.

[2] Joseph D. Roarty, et al., "Apparatus and Method for Drying Steam" US Patent No. 4,783,204., 1998. 8.

[3] Huijbregts, W. M. M. "Erosion-Corrosion of Carbon Steel in Wet Steam" National Association of Corrosion Engineers, Oct., 1984.

[4] Bindi Chexal, et al., "Predicting the Impact of Chromium on Flow –Accelerated Coorosion" PVP-Vol. 338, Pressure Vessels and Piping Codes and Standards Vol. 1, ASME 1996.