

기·술·세·선

증기발생기 화학 세정

Steam Generator Chemical Cleaning

Filippo D'Annunci

Westinghouse Electric Germany GmbH

Bernard Mutius

Westinghouse Electric France

증기발생기 2차측 상태는 발전소 운영에 있어 중요한 역할을 수행한다. 기기, 배관 및 열교환기에서 발생되는 침적물은 증기발생기 튜브의 부식 원인이 될 수 있으며, 튜브와 튜브 지지판 사이의 공간을 차단한다. 2차측 침적물에 의한 튜브 파손으로 인해 일부 발전소에서는 강제적으로 발전을 정지하는 사례가 발생하였다. 또한 튜브 지지판의 침적물 축적으로 인해 정상 운전 동안 전력 생산을 감소하게 되는 결과를 초래한 발전소도 있었다. 따라서 증기발생기 2차측 상태 감시와 더불어 증기발생기 부품의 청결 유지는 필수 항목이라 할 수 있다. 웨스팅하우스에서는 증기발생기를 초기 제작 상태로 복구하고 2차측 침적물을 제거하기 위해 EPRI SGOG 증기발생기 화학 세정을 수 년간 이용하고 있다. 본고는 35개 이상의 발전소에서 성공적으로 이용하고 있는 화학 세정 프로세스 개요 및 프로세스를 적용하면서 취득한 경험을 요약한 것이다.

서론

가압경수로형 원자로(PWR) 증기발생기 2차측 내부의 침적물 축적은 튜브 성능 저하의 가속화 가능성을 증대시킨다. 침적물이 굳어지고 조직의 틈새 부위로 인해 운영에 문제를 발생시킬 수 있는 튜브 부식 조건을 야기할 수 있다.

증기발생기 침적물을 제거하기 위해 이용할 수 있는 다양한 기계적, 화학적인 세정 수단이 있다. 이러한 수단 중 하나인 증기발생기 화학 세정은 침적물을 용해시키기 위해 화학 약품의 도입을 수반하게 된다.

상당한 양의 침적물이 축적되어 있는 발전소에 있

어서 증기발생기 화학 세정은 침적물 제거를 위한 최적의 방법이다(약 3,000파운드 이상의 침적물 축적/증기발생기 1대).

1980년대 초 웨스팅하우스는 증기발생기 건전성을 고려하지 않은 채, 산화철과 구리 부식 생성물을 제거할 목적으로 용매와 적용 수단을 개발하기 위해 미국전력연구원(EPRI) 프로젝트에 참가하였다.

미국과 전 세계에서는 성공적인 증기발생기 화학 세정을 수행하기 위해 'EPRI/증기발생기소유주그룹(SGOG)' 프로세스를 사용하고 있다.

웨스팅하우스는 발전사별로 특수한 요구 사항을 충족시킬 수 있도록 특성화된 증기발생기 화학 세정

프로세스 제공이 가능하다.

이러한 적용 수단은 압력 펄싱을 결합한 저온 공정 및 배기 작업을 동반한 고온 공정을 포함할 수 있다.

가열, 냉각 및 펌핑이 필요한 세정 작업에 있어서 외부 화학 세정 기기로 수행되는 장소에서는 외부의 열을 이용하여 증기발생기 화학 세정 프로세스를 적용할 수 있다.

현장에서 입증된 기기와 더불어 자격 요건을 갖춘 EPRI/SGOG 프로세스는 외부 재순환과 가열을 위해 경험이 있는 직원에 의해 수행된다.

이러한 기법은 증기발생기 전체 다발, 일부 다발 및/또는 튜브 시트 화학 세정을 수행하기 위해 개별 특성화가 가능하다.

본고에서는 EPRI/SGOG 프로세스를 고려할 것이다. 웨스팅하우스 프로세스는 유럽에서 유일하게 인증된 프로세스이며, 지난 2년간 7개 발전소에서 적용되었다.

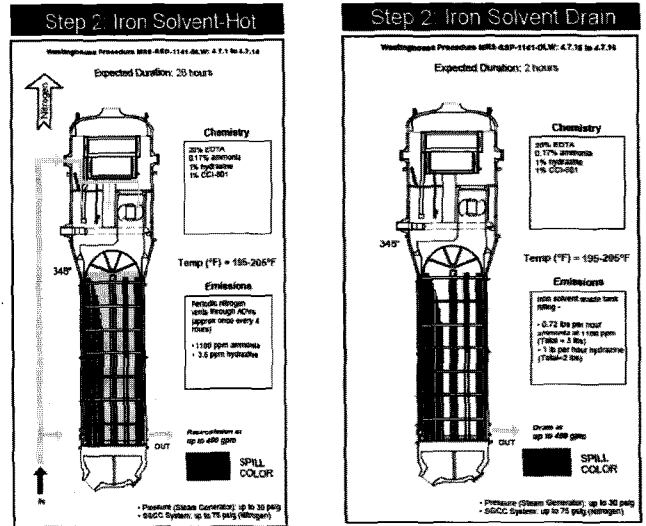
역사적 배경

1980년대 초, EPRI와 SGOG는 가압경수로형 원자로의 증기발생기 2차측 침적물을 제거하기 위해 일반적인 프로세스 개발을 지원하였다. 프로세스는 증기발생기의 다량 침적물 제거와 튜브 지지판의 틈새 부위 세정에 중점을 두었다. 웨스팅하우스는 프로세스 개발에 참가하는 주축 회사였다.

프로세스는 다량의 침적물 제거용 용매, 구리 제거용 용매, 틈새 부위 세정 용매와 같은 독특한 3가지 세정 용매를 포함한다. 3가지 용매를 만드는 주요 세정 약제는 에틸렌디아민 사초산(EDTA)이다. 프로세스는 외부 순환, 가열 및 프로세스 제어 계통을 사용하는 off-line 적용을 위해 개발되었다.

EPRI/SGOG 프로세스는 초기 개발 이후로 유럽과 미국에서 35회 이상 웨스팅하우스에 의해 적용되고 있으며, 세정 효율 성과 증기발생기 구성품의 저부식률을 기반으로 현재 프랑스에서 유일하게 자격을 부여받은 프로세스이다.

웨스팅하우스는 EPRI/SGOG 프로세스를 이용하여 독립적으로 화학 세정을 수행하고 있으며, 기초



〈그림 1〉 산화철 제거

화학 및 응용 방법론의 변화를 포함하여 기초 프로세스의 변종을 개발하고 있다.

EPRI/SGOG 프로세스

EPRI/SGOG 프로세스는 발전소 정지 후 수행되는 off-line 저온 화학 세정 프로세스로서 외부 가열기는 프로세스 온도를 유지하기 위해 사용된다.

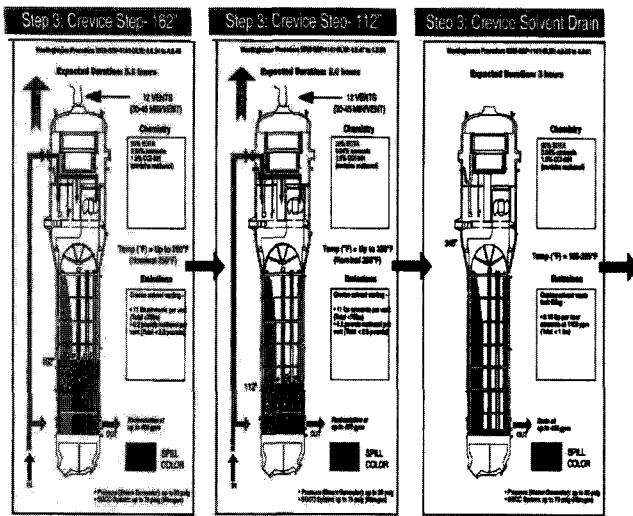
외부 순환과 가열 시스템의 이용은 다른 상업적인 세정 프로세스와 대비하여 EPRI/SGOG의 큰 장점 중 하나이다.

가열과 세정 용매의 순환을 위한 외부 시스템의 이용은 신속하고 실시간 프로세스 제어를 가능하게 한다. 이는 pH, EDTA와 같은 주요 화학 변수의 제어 및 약제(하이드라진) 농축도 감소, 프로세스 온도 제어, 비상시 신속한 프로세스 종결을 포함한다.

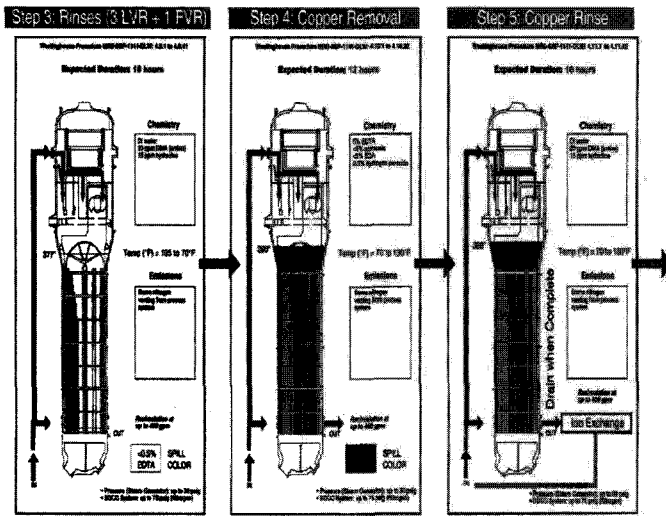
EPRI/SGOG에서 승인, 사용되는 3가지 용매는 다음과 같다.

- 산화철 제거용 마그네타이트 용매(EDTA-based)
- 구리 금속 제거용 구리 용매(EDTA-, EDA- and H₂O₂-based)
- 튜브 지지 틈새 부위 침적물 제거용 틈새 부위 세정 용매(EDTA-based)

산화철 제거 단계는 일반적으로 88°C~98°C에서 적용된다. 다량의 산화철 제거 이후 튜브 지지판의



〈그림 2〉 틈새 부위 세정 단계



〈그림 3〉 구리 금속 제거

틈새 부위 세정이 프로세스의 목적이라면 배기 프로세스를 포함하는 전용 틈새 부위 세정 단계가 수행될 수도 있다. 틈새 부위 세정은 115°C~138°C의 온도에서 적용된다.

구리 제거 단계는 일반적으로 산화철 제거 단계 완료 후 과산화수소 산화제와 함께 21°C~43°C의 저온에서 적용된다. 또한, 구리 제거 단계는 비교적 고하중의 구리를 보유한 증기발생기의 산화철 제거 단계 이전에 수행될 수도 있다.

튜브 시트 상부의 슬러지 제거 단계는 용매제 높이를 튜브 시트로부터 40~60cm 정도 낮춘 위치에서 배기를 수행하며 다량의 산화철 제거 단계 이전이나 이후에 수행될 수도 있다.

선세정 확인 세척은 증기발생기의 적절한 화학적 기기 운전을 입증하기 위해 모든 호스의 확실한 접속 상태 여부를 확인하며, 제어실과 화학 세정을 수행하는 직원 사이의 긴밀한 협업을 필요로 하는 배기 작업과 같은 중요한 세정 작업의 진전을 위해 조정과 목표 달성을 실천할 기회를 제공할 목적으로 수행된다.

세척은 프로세스의 각 단계 사이에서도 수행된다. 세척을 위해 증기발생기 내부는 DMA를 포함한 pH>10의 탈이온화된 물과 15ppm의 하이드라진으로 채워진다.

우선 용액은 기기 점검을 위해 약 95°C까지 가열되고, 기기 확인과 배기 확인을 위해 120°C까지 가

열된다. 또 다른 세척을 위해 온도는 특수한 단계 중 하나이다.

산화철 제거 단계

산화철 제거 단계는 튜브 다발과 튜브 시트 상부 내 다량의 증기발생기 침적물을 제거하기 위함이다. 다량의 마그네타이트를 제거하는 것은 필수적이다.

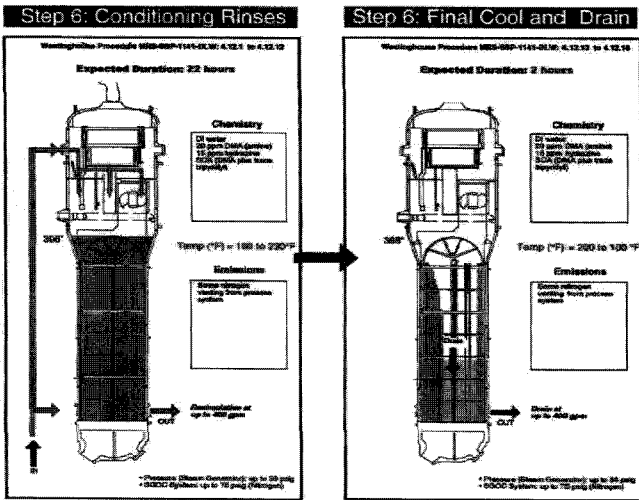
EPRI/SGOG 자격 프로그램에서 볼 수 있듯이 틈새 부위에 대한 적절한 세정을 위해 산화철 제거 단계가 반드시 필요하다.

산화철 제거 단계에 대한 용액의 특징은 다음과 같다. <그림 1>은 산화철 제거용 단계를 요약한 것이다.

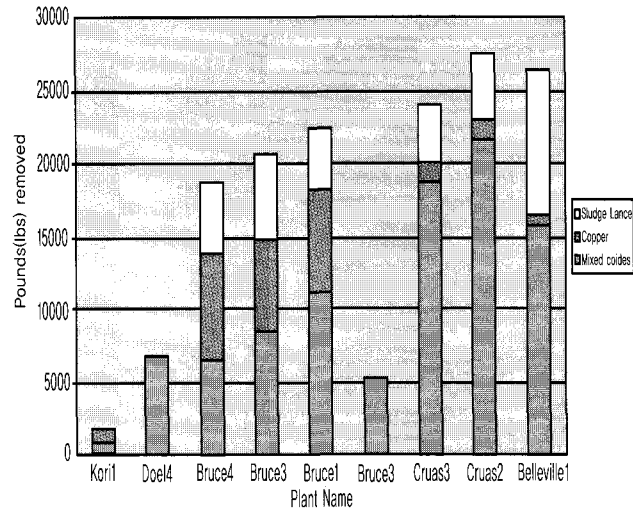
- 15~25% EDTA
- 1% 하이드라진
- 1% CCI-801
- 암모니아 → pH 7
- 88°C~98°C 온도
- 평균 기간 40~50시간

틈새 부위 세정 단계

다량의 침적물 제거 용매와 더불어 틈새 부위 세정은 탄소/저합금의 부식을 제어하기 위해 부식 억제제



〈그림 4〉 최종 세척 단계



〈그림 5〉 제거된 침적물의 양

를 포함한다. 이 억제제는 비정상적인 상황에서의 경험뿐만 아니라 예측되었던 용매 조건에서도 방호가 가능하다.

추가로, 세정 용매는 충분한 용매 능력을 보증하고, 튜브 시트 상부와 튜브 지지판과 같이 특수한 다량의 침적물 지역이나 막힌 지역의 국부적인 용매 소모를 방지하기 위해 잉여분의 EDTA를 포함한다.

뜸새부위 세정 단계의 특징은 다음과 같다.

- 1% 부식 억제제를 함유한 10~25% EDTA
- 115°C~138°C 온도
- 비등이 뜸새 부위 용매 변화의 촉진을 가능하게 하기 위해 주기적으로 감압
- 24~100시간의 기간
- 각 튜브 지지판별로 4~6시간의 기간

프로세스 인증은 뜸새 부위 랜드 영역을 적절하게 세정하기 위해 배기 작업이 필수적이라는 것을 보여주고 있다. 〈그림 2〉는 뜸새 부위 세정 단계를 요약한 것이다.

구리 금속 제거 단계

구리 용매의 목적은 증기발생기로부터 구리를 제거하는 것이다. 구리 용매의 최초 주입에서는 재순환

이 실시될 때까지 과산화수소가 없는 상태이다. 구리 용해가 시작되어 구리 축적물이 산화될 때 과산화수소가 주입되기 시작한다.

구리 금속 제거 단계의 조건은 다음과 같다.

- EDTA가 5% 함유된 용액, 암모니아수, pH 9.5 인 EDA
- 1~3% 과산화수소
- 21°C~43°C 온도
- 12시간의 기간

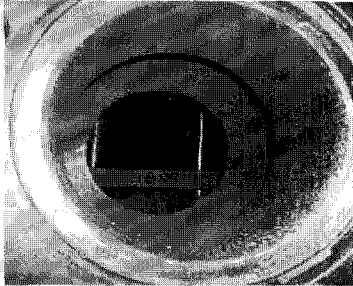
과산화수소와 EDTA간의 반응 상태가 발열성이므로 지정된 범위의 온도를 유지하기 위해서는 이 단계가 수행되는 동안 냉각이 필수적이다. 〈그림 3〉은 구리 금속 제거 단계의 개요를 제공한다.

최종 세척 단계

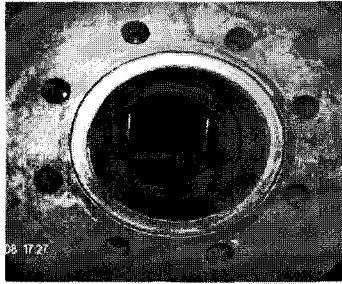
모든 세정 단계가 완료된 후, 증기발생기 최종 정화를 위해 마지막 세척을 수행하게 된다. 증기발생기 전체에 세정이 완료된 후, 개별 지지판까지 수위가 낮아지고 뜸새 부위로부터 침적물을 세척하기 위해 배기된다. 이 때 용액이 냉각되고 최종 배수 전 이온 교환에 의해 정화된다. 최종 세척 기간은 약 12시간이다. 〈그림 4〉는 최종 세척 단계를 요약한 것이다.

Cruas 3- Before / During / After

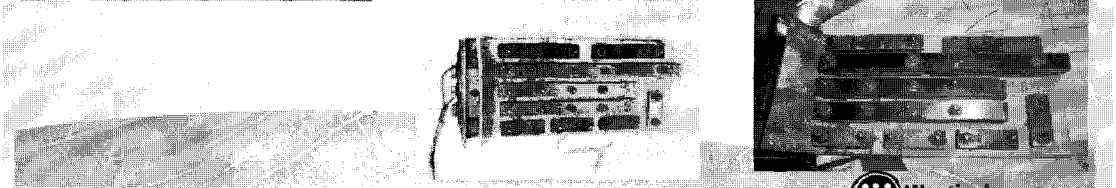
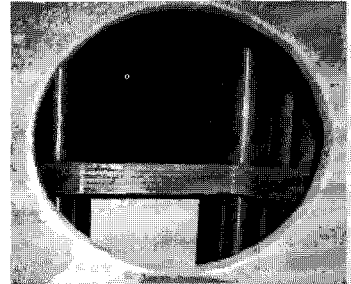
Pre-Cleaning



Intermediate



Post Cleaning



경험 사례

EPRI/SGOG 프로세스는 웨스팅하우스에 의해 35회 이상 성공적으로 적용되었다. 본고에 서술되어 있는 바와 같이 프로세스는 항상 외부 순환, 가열 및 프로세스 제어를 이용하였다. 주요 특징으로는 프로세스를 발전소 가열 프로세스보다 더욱 신뢰성 있게 제어할 수 있도록 만들어 준다.

이것은 웨스팅하우스에 의해 자격을 취득한 프로세스가 2008년 이래로 프랑스에서 유일하게 사용 가능하게 된 주요 이유이다(2008년 최초 적용 이래로 7개의 세정 작업이 수행되었음).

일정과 요구되는 발전소 조건이 더욱 유연해짐에 따라, 계획 예방 정비 주요 경로에 영향을 덜 미치도록 하고, 발전소 운영 직원과의 연관성을 감소하게 한다.

외부 가열과 순환 계통 이용은 튜브 시트 상단과 하부 튜브 지지판을 포함하여 낮은 위치에서 목표포 한 세정을 가능하도록 하는 것이 주 요인이다.

외부 시스템을 이용하는 웨스팅하우스 프로세스는 전기화학적 기법과 부식 쿠폰을 사용하여 실시간으로 발전기 내부의 부식 감시를 가능하게 한다. 이러한 접근 방식은 프로세스 제어 수단이 증기발생기로의 유해한 영향을 빠르게 막을 수 있도록 잠재적인 부식 문제를 즉시 확인 가능하도록 한다.

웨스팅하우스 화학 세정 프로세스를 프랑스에서 적용함에 있어서 부식은 언제나 매우 낮은 값을 상징하는 75 μ m 이하였다. 제거된 침적물의 양은 증기발

생기 상태에 따라 좌우된다. <그림 5>는 다른 발전소 프로세스의 수행 능력을 나타내고 있다.

화학 세정 이후 증기발생기가 운영 이전의 초기 체결 상태로 복구되었음을 육안 점검을 통해 확인할 수 있다.

마지막이기는 하나 연관성이 가장 적지 않은 웨스팅하우스 프로세스는 세정 기간 동안 발전소 운전원 개입의 필요성을 최소화한다. 그러한 단계가 화학 세정 수행에 포함된다면 운전원 개입은 틈새 부위 세정 단계에서만 유일하게 필요하다.

결론

EPRI/SGOG 화학 세정 프로세스는 증기발생기 2차측 침적물 제거를 위한 신뢰할 수 있는 기법을 대표한다. 35회 이상의 세정 작업이 전기 출력, 광역 수위와 같이 즉각적이고 장기적인 증기발생기 성능 회복을 유도하는 웨스팅하우스에 의해 전 세계적으로 적용되어 왔다. 외부 열원과 가동중 부식 감시를 토대로 웨스팅하우스에 의해 활용된 프로세스는 신뢰성, 안전성 및 효율성에서 상당한 장점을 보유하고 있다.

웨스팅하우스 프로세스는 유럽에서 자격을 취득한 유일한 프로세스이며, 지난 2년간 7회의 세정 작업을 수행하였고 2011년 말까지 3회 이상의 작업이 계획되어 있다. 