

蒸氣發生器 壽命延長 對策

加壓輕水爐(PWR) 증기발생기의 튜브집합체는 全世界的으로 여러 발전소에서 부식에 의한 영향을 받고 있다. 다음은 Nuclear Europe誌에 발표된 튜브집합체에 영향을 미치는 일반적인 증상, 특히 PWSCC문제점에 대해 대처함으로써 증기발생기의 수명을 연장시키는 대책이다.

벨기에에서는 주요 문제점으로 1차 냉각수에 의한 응력부식균열(Primary Water Stress Corrosion Cracking : PWSCC)로서 Mill Annealed(MA)인코넬 600 튜브의 기계적으로 확장 처리된 구역(Roll Transition)부분에서 발생되며, 튜브썬트의 끝부분(Doel-2 발전소)이거나 튜브의 모든 부분(Doel-3,4, Tihange-2,3 발전소)에서 경험하였다.

蒸氣發生器問題의 일반적 접근방법

튜브집합체의 일부분 또는 모든 부분에 영향을 미치는 중요한 일반적 문제는 다음과 같은 순서로 발생된다.

1. 문제발견

누설을 발견하거나 와전류탐상시험의 "Bobbin Coil"방법에 의한 일상적인 샘플검사를 통해서 문제가 발견된다.

일단 발견되면 문제의 형태(결함의 모양과 크기), 범위(일반적 성격이나), 원인(유발요인은 무엇이나) 등에 관해서 더 자세히 특성화될

필요가 있다.

이러한 경우에 검사샘플을 늘린다거나, 다른 검사방법(파괴검사 또는 비파괴검사)의 사용을 더 요구하게 될 것이다.

2. 정밀샘플검사

일단 발견된 후에는 정밀샘플검사에 의하여 문제점이 검사될 필요성이 있는데, 이 검사방법은 일반적으로 정해진 기본 검사에 추가하여 실시한다.

이 정밀검사는 특별한 검사방법의 사용을 요구하고 있으며 샘플크기는 관련 결함크기 및 결함성장률에 대해 통계상 의미가 있는 분포곡선을 그릴 수 있도록 충분하여야 한다.

시험은 안전 및 운전측면에서 영향을 야기시키거나 영향을 받기 쉬운 튜브썬트부분과 튜브 길이부분에 국한될 것이다.

3. 예방방법의 시행

문제의 일반적 성격이 파악된 후에는 위에서 언급한 정밀샘플검사와 병행하여 가능한 예방방법의 비교분석을 실시하는 것이 좋

으며, 또한 시간이 허락하면 적절한 공업과정을 연구개발하는 것이 바람직하다.

예방방법은 증상을 더 확대시키지 않는데 목적이 있다. 즉 손상영향을 예방하거나 또는 이미 영향을 받은 튜브에 대해 손상이 확대되는 것을 방지하는 것이다. 그러므로 예방방법은 효율측면에서 가능한 한 빨리 시행되어야 한다.

4. 특별 관막음기준 개발

일반적인 관막음기준은 발전소 기술사양서에 정의된 것에 의하면 반드시 모든 결함 형태나 위치에 적절하게 된 것이 아니다.

또한 매우 보수적인 관막음 제한치가 적용된다면 위에서 언급한 정밀샘플검사 및 예방방법의 시행은 허용되지 않을 것이다.

5. 정밀 100% 검사

만약 결함크기를 나타내주는 분포곡선으로 판단하여 관막음 제한치를 초과할 염려가 있으면, 허용되는 결함크기에 대하여 동일한 방법을 사용하여 정밀검사를 100%검사로 전환할 필요가 있다.

이러한 제약으로 발전정지를 피하기 위하여 검사방법을 시간적 효율측면에서 개선해야 할 것이다.

6. 보수방법의 선택 또는 개발

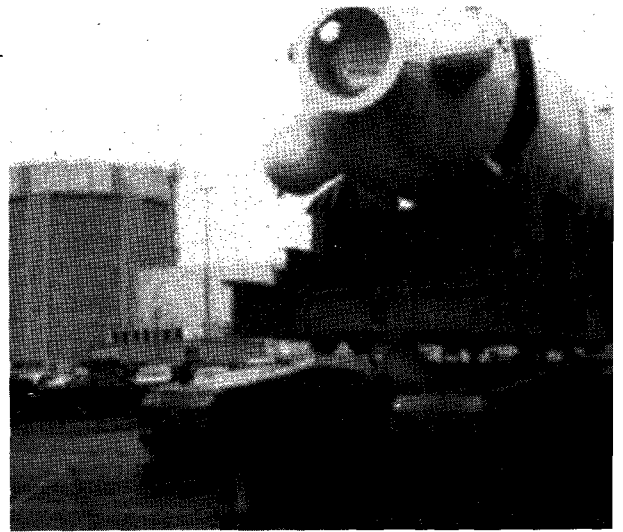
실시한 예방조치가 성공적이지 못할 때 보수방법의 선택 또는 개발이 필요하다. 슬리빙(Sleeving)과 같은 보수방법은 관막음의 대행 작업이다.

슬리빙 보수방법은 관막음 제한치에 이를 때 실시되나, 경제적 측면에서 선호되고 있다.

7. 보수/ 교체 전략

보수적용범위에 따라서는 증기발생기 교체에 대한 보수측면에서의 접근을 시도해 볼 만하다. 기술적이고 경제적 측면에서 최선의 전략이 검토될 필요가 있다.

의사결정을 돕기 위하여 성능저하과정을 시



간진전에 따른 변화를 예측할 필요가 있다.

PWSCC問題 적용

앞에서 언급된 모든 과정은 벨기에産 증기발생기 튜브의 Roll Transition에 영향을 미치는 PWSCC문제에 적용되었다. 이로 인해 다음과 같은 면에서 기술개발되었다.

- 관막음 대안 기준(미 NRC규제지침 1.121의 정신에 부합되는 것)
- 신속하고 정확한 RPC(Rotating Pancake Coil)와전류탐상시험방법
 - 증기발생기당 약 2일동안 Roll Transition부분에 100%검사 가능
- 증기발생기 손상예측모형
 - 현장 검사로 얻은 자료에 입각하여 개발

PWSCC問題 조치

다음은 지금까지 벨기에에서 고려되거나 적용되었던 기술의 요약이다.

1. 예방방법

Hog Leg(고온관) 온도감소는 균열발생 및 확대를 더디게 하는데, 이는 터빈성능에 따른 출력감발이 만족스러울 때에 한한다.

튜브 Peening기술이 현장에서 4기의 벨기에 원자력발전소의 증기발생기 고온관부분에 적용되었으며, 1기의 증기발생기 저온관부분에 적용되었다. 이는 대대적인 연구실험후에 공급자

인 웨스팅하우스 및 프라마톰 그리고 Lab-orelec와 공동 개발되었다.

- Doel-4 및 Tihange-3 발전소의 상업운전에 Roto-peening
- Doel-3, Tihange-2 및 Doel-4(저온관) 발전소에 대해서는 3주기후에 Shot peening

2. 보수방법

Sleeving 또는 니켈 Electroplating은 Roll Transition부분 또는 더 높은 위치에서 PWS-CC에 의해 영향을 받은 튜브에 예견되는 해결 방안이다. 넓은 부분에 적용될 때에는 보수비용에 큰 영향을 주며, 관련 튜브수가 많아 핵연료재장전 기간이상으로 보수하게 되면 발전소 가동율에 악영향을 미친다.

Sleeving은 장기해결방안으로 고려된다. 그러나 Sleeving 용접의 응력경감열처리(Stress Relieving)를 해야한다. 열처리하면 레이저용접 Sleeving기술은 1988년에 Doel-3발전소에서 웨스팅하우스에 의하여 실시된다.

일명 Kiss Sleeving이라 불리는 Nickel Plating은 Laborelec와 프라마톰 공동으로 개발되었다. 이는 부식물로 부터 민감한 영역을 격리시켜 부식과정을 억제시킨다.

원래 보수과정은 균열된 튜브부분에 얇은 니켈층의 Electro Deposition을 이루고 있는데 발전소 현장에서 인정되었으며, 지금은 유망한 공업기술로 고려되고 있다. 이는 Doel-2(1985년 이후) 및 Doel-3(1988년)에 적용되었다. 더 보수작업을 하기 위하여 Plugging이 제거할 수 있는 마개로 덮어씌워져있다.

補修 / 交替戰略

오늘날 증기발생기의 대대적인 보수 또는 교체작업없이 설계기간동안에 발전소를 운전하는 것은 점점 어려워지고 있다. 기술적이고 경제적인 요인이 평가되어 장기전략이 수립될 필요가 있다. 그러나 만약 증기발생기 교체가 결정되면 발전소 수명기간 동안 단 한번 이 작업을 하는 것이 중요하다.

앞에서 언급된 여러 보수조치들이 현재의 증기발

생기의 수명을 연장하기 위하여 수행된다. 이러한 보수방법들의 수행 여부 결정은 발전소 가동성 및 안전성에 근거하여 모두 고려하여야 한다.

오늘날 두가지 유형의 전략이 벨기에에서 분석되어 왔다. 즉, 보수비용을 최소화하든가 가능한 한 빨리 증기발생기를 교체하는 전략 또는 최소 20년까지 증기발생기 수명을 연장하기 위한 예방조치 또는 시정조치를 하는 전략이다.

이자율 및 발전소 가동율과 함께, 고려되어야 할 비용은 새로운 증기발생기 구매 및 설치비용 그리고 보수비용이다. 결정적인 요인은 증기발생기 교체의 경우에는 발전소 성능향상이며, 보수하는 경우에는 출력감말로 인한 잠재적 부족 요인이다.

그러나 양측 전략에서 신규 증기발생기 구매 및 보수기술 모두에 발전 수명기간동안 어떻게 될지 모두 알려지지 않은 것이 있다.

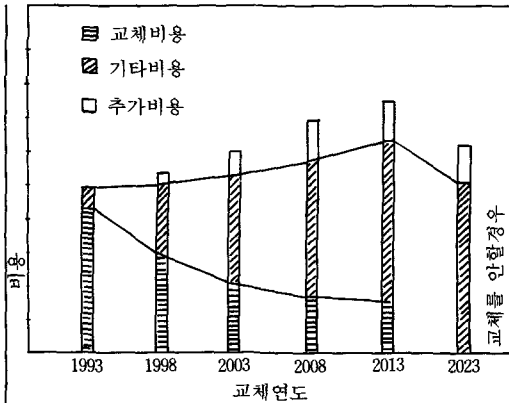
Doel-3발전소에서 의사결정하기 위하여 유지보수 활동에 관련된 실제 비용이 균열의 여러 성장율 및 새로운 惡化模型의 발생가능성에 따른 시나리오에 대하여 평가되었고, 이들 비용은 낮게 교체될 때의 비용에 추가되는데, 이는 3.4 Billion벨기에프랑에서 시작하여 발전소 수명이 다되어도 교체하지 않을 경우 0에 이르도록 되어있다.

전체 결과는 이론의 논란이 있는 많은 수의 가정(假定)에 달려있기는 하지만 교체 비용은 개선되어 왔다. 이러한 분석의 결과로 증기발생기를 교체기로 결정되었다.

프랑스 Dampierre-1호기 증기발생기 교체

프랑스 900MWe 원자력발전소에서 최초의 증기발생기 교체는 Dampierre-1 발전소에서 지난 2월에 시작하여 여름에 끝났다. 이 교체는 10년차 계획 발전정지 기간동안에 수행되고 있어, 발전소 가동율은 실질적으로 절약하게 되었다. Dampierre-1호기 증기발생기는 처음 24기 900MWe 가압경수로 발전소에 설치된 것과 비슷하다.

이들은 발전소당 3개의 증기발생기가 있는 각각 3400U-튜브를 갖고있다. 부식에 의



〈그림〉 Doel-3호기 증기발생기 보수/ 교체 비교

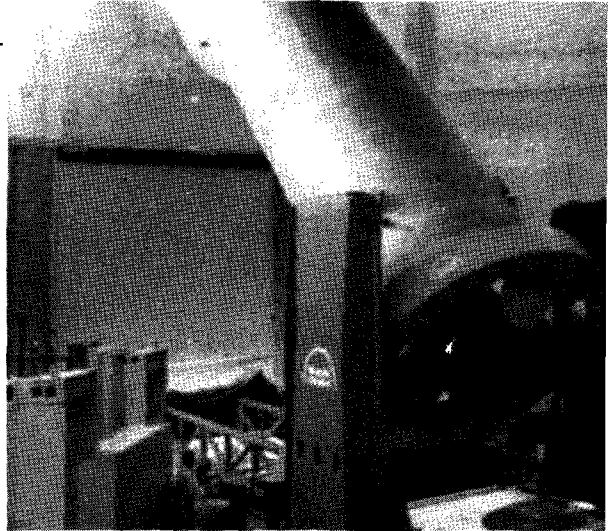
하여 영향을 받은 튜브는 plugging되어야 할 정도의 균열을 나타내고 있으며, 방사성 원자로냉각재를 비방사성 2차측 냉각수로 누설되는 것을 막아야 한다. 보통 Plugging 된 튜브의 약 15%에 이르면 증기발생기는 교체되어야 한다.

프랑스의 모든 900MWe가압경수로 발전소중에서 오직 Dampierre-1호기 증기발생기가 특이한 균열현상 즉 미세균열을 나타냈다. 단지 10%에서 12%가 튜브가 폐쇄되었으나 이러한 부식형태에 대한 점검계획은 아주 광범위하게 실시되었으며, 점검결과 악화되는 상황을 나타내었다.

그리하여 증기발생기를 교체할 결정이 경제적, 기술적 면에서 이루어졌다. 이 작업비용은 거의 600백만 프랑프랑이며, 이 수치에는 3대의 증기발생기 구매비용(200백만 프랑), EDF 및 외부기관의 용역비 및 이러한 보수작업에 요구되는 예비작업비용들이 포함되어 있다.

이러한 전형적인 작업으로 다른 발전소에서 비슷한 작업이 수행될 경우 많은 유용한 정보를 제공하여 주며, 프랑스 산업능력을 보여주고 또한 프라마툼이 국제적 규모로서의 역할을 할 것이다. EDF의 엔지니어링 및 건설 사업단은 Dampierre 원자력발전소 관리의 주계약자로 선정되었다.

프라마툼은 이 원자로핵증기공급계통 제작 및 용역제공자로 이 작업에 참여하였다.



이 증기발생기 교체작업의 예외적 양태로는

- 6개월간 현장준비, 3개월간 증기발생기 교체의 실제 작업 및 2개월간의 발전소 운전재개에 따른 시험
- 100,000 시간의 엔지니어링 시간(계획의 최적화, 방사선 파괴폭에 대비한 안전인명보호, 품질증 및 전체 비용)
- 350,000 시간의 현장 작업, 그중 프라마툼에 의해 2/3이 수행됨

3월 19~27일

배관 절단, 원자로건물내 3개의 구형 증기발생기 제거

4월 2~12일

3개 신형 증기발생기 반입 및 설치

5월 17일

신형 증기발생기로의 원자로냉각재 배관의 용접 완료

5월말

증기발생기 2차측 수압시험

6월초

원자로냉각재계통의 수압시험

6~7월

시험 및 Requalification

8월

핵연료재장전

9월초

시운전 및 계통 재병입