

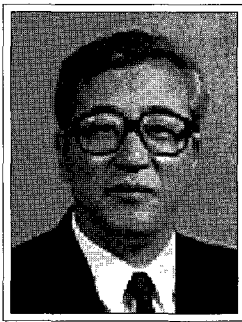


# 원전 증기발생기 연구협의회

## 운영 및 과제 수행 현황

김 효 정

한국원자력안전기술원 규제기술연구부장



**국** 내 가동중인 원전의 기수와 운전 연수가 증가함에 따라 증기발생기 전열관의 건전성 문제가 중요 사안으로 부각되고 있다. 특히 2002년 4월 울진 4호기에서 발생한 증기발생기 전열관 파단 사고(SGTR)시 원자로 냉각수가 2차측으로 누설되었으며, 사고의 조치 과정 중에 많은 문제점들이 노출되어 사회적으로 문제화된 바 있다.

이와 관련하여 과학기술부는 「증기발생기 안전성 향상 종합 대책」

을 발표하였고, 이의 일환으로 국내 증기발생기 관련 연구의 연계성 강화를 위해 증기발생기 연구 협의체를 구성·운영할 것을 요구한 바 있다. 이에 따라 한국원자력안전기술원에서는 9개 증기발생기 유관 기관으로 「원전 증기발생기 연구협의회」를 구성하였다.

여기에서는 연구협의회의 구성 및 운영 현황을 살펴보고, 지금까지 연구협의회에서 수행한 울진 4호기 SGTR 원인 분석을 포함한 단기 과제와 증기발생기 기술 수목도 및 데이터 베이스 구축 등의 중장기 과제 수행 현황을 소개하고자 한다.

### 증기발생기 연구협의회 운영

#### 1. 기능 및 구성

2002년 4월 5일 국내에서 최초로 발생한 울진 4호기 '증기발생기 전열관 파단 사고'는 원자력계뿐만 아니라 사회적으로도 원전 안전성에 대한 큰 관심과 우려를 야기한

사고였다. 비록 외부로의 방사능 유출이 최소화 되었지만 국내 원전 안전성에 대한 인식을 제고하는 계기가 되었다.

울진 4호기 SGTR과 관련하여 과학기술부는 2002년 7월 30일 「증기발생기 안전성 향상 종합 대책」을 발표하였으며, 이를 통해 증기발생기 전열관의 제작, 검사, 운전 및 보수 등 각 단계별로 현행 제도의 문제점을 도출하고 그 해결 방안을 제시·이행함으로써 증기발생기 전반에 걸친 안전성을 향상시키고자 하였다.

또한 증기발생기 관련 연구에 대한 많은 투자에도 불구하고 SGTR이 발생한 것과 관련하여, 과학기술부는 국내 증기발생기 관련 연구의 연계성 강화를 위해 증기발생기 연구협의체를 구성·운영할 것을 요구하였다.

이에 따라 2002년 9월 16일 「증기발생기 연구협의회」가 한국원자력안전기술원 주관하에 한국수력원

자력(주)·한전전력연구원·한국원자력연구소·한국전력기술(주)·두산중공업(주)·카이텍·한전기공(주)·성균관대학교 SAFE연구센터 등 9개 기관으로 구성되었다.

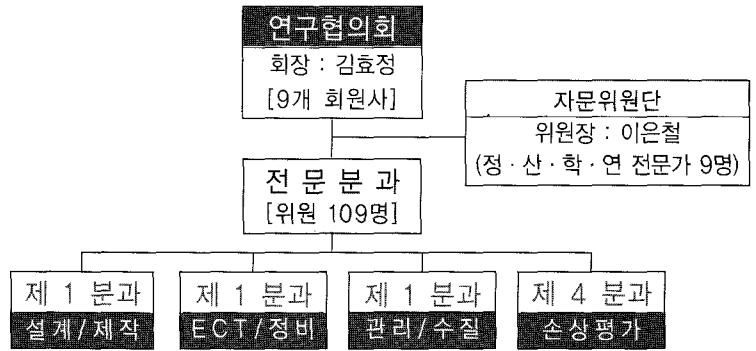
증기발생기 연구협회의회의 목적은 울진(주)4호기 증기발생기 전열관 파단 사고를 포함한 국내외 증기발생기 사고 사례와 연구 현황의 종합적인 분석을 통하여 증기발생기 안전성 확보를 위한 실질적이고 체계적인 연구 수행 방안을 설정하고, 기관간 역할 분담을 통한 연구 효율화를 도모하여 궁극적으로 증기발생기 안전성 증진에 기여하는 데에 있다.

증기발생기 연구협회의회는 9개 회원사로 구성된 협의회와 각계의 전문가로 구성된 자문위원단 그리고 4개의 전문 분과로 구성되어 있다 <그림 1>.

전문 분과는 설계 및 제작 분과(1분과), 와전류 탐상(ECT) 및 정비 분과(2분과), 관리 및 수질 분과(3분과), 그리고 손상 평가 분과(4분과)로 구성되어 있으며, 총 109명의 관련 전문가가 참여하고 있다.

## 2. 운영 현황

증기발생기 연구협회의에서는 협의회 운영에 대한 전반적인 사항에 대한 회원사간 협의를 위해 정례 회의를 1년에 4회 이상 개최하고 있으며, 각 회원사가 순번을 정해 주



<그림 1> 증기발생기 연구협의회 구성도

최하고 있다.

정례 회의에는 각 회원사의 회원 및 자문위원장이 참석하며, 필요시에는 자문위원단 회의와 함께 개최하고 있다. 또한 전문가의 자문이 필요한 경우에는 전문 분과 위원이나 각계의 전문가가 참석하고 있다. 증기발생기 연구협회의 1차년도에는 발족 회의를 포함하여 총 7차례에 걸친 정례 회의가 개최되었다.

한편 증기발생기 안전성과 관련된 연구·운영·규제 등에 대한 정보 교환 및 토론을 위해 「증기발생기 안전성 심포지엄」을 개최하고 있다. 심포지엄에서는 단순한 논문 발표를 지양하고, 선정된 주제를 중심으로 주제 발표와 패널 토론의 형식으로 진행함으로써 증기발생기 안전성에 실질적으로 기여할 수 있는 최적의 방안을 도출하는 데 초점을 두고 있다.

2002년 9월 한국원자력안전기술원에서 「증기발생기 안전성, 그 도전과 대응」이란 주제로 열린 제1차 심포지엄은 100여명이 참석하여 4편의 주제 발표와 각 기관의 연구

현황 발표에 이어 종합 토론으로 진행되었다.

2003년 5월 제주도에서 열린 제 2차 심포지엄은 35개 기관에서 200여명이 참가하여 10편의 주제 발표와 32편의 논문이 발표되었으며, 종합 토론에서는 증기발생기 설계·제작·검사·보수·관리 및 규제 분야에 대한 많은 질의와 활발한 토론이 있었다.

특히 증기발생기 전열관 파손 방지를 위한 횡방향 지지대의 설치에 대한 제안이 있는 등 증기발생기 안전성 향상 대책에 대한 공감대를 모을 수 있는 열린 토론의 장이 되었다.

## 3. 주요 활동 및 계획

지난 1년간 증기발생기 연구협회의에서는 단기 과제로서 용어 정의, 울진 4호기 SGTR 원인 분석, 해외 SGTR 사례 분석 및 Davis-Besse 원전 원자로 헤드 손상 사고 벤치마킹 등을 수행하였다.

한편 중장기 과제로서 증기발생기 기술 수목도 구축 및 국내외 기



술 현황 분석, 증기발생기 데이터 베이스 구축, 웹 기반의 증기발생기 네트워크 구축과 연구 수요의 도출 등을 수행중이다.

연구 결과 등에 대한 의견 수렴 및 공개를 위하여 분기별로 1회 이상의 정례 회의와 매년 심포지엄을 개최할 예정이며, 협의회 산하 전문분과의 활동을 강화하여 연구 수행의 전문성 및 효율성을 제고하고 연구 결과의 객관성을 도모할 예정이다.

**단기 과제 수행 현황**

**1. 용어의 정의**

올진 4호기 SGTR에 대한 처리 과정 및 언론 보도와 관련하여 전열관 손상과 관련된 용어의 혼란이 있었으며, 이로 인해 불필요한 오해가 야기된 바 있다.

SGTR 중에 나타나는 증기발생기 전열관의 복잡한 기계적·금속학적 현상으로 인해 SGTR의 모든 과정을 파단·손상·파손 혹은 누설 등의 어느 특정 용어만으로 표현하기는 매우 어렵다. 따라서 연구협의회에서는 SGTR 관련 용어를 새롭게 정의하고자 전열관의 손상 상태를 결함, 누설 및 운전 등의 여러 측면에서 검토하였다.

증기발생기 전열관이 파단에 이르기까지는 기본적으로 결함의 발생 및 성장이 전제되므로 이러한 관점에서 증기발생기 전열관 손상을



증기발생기 안전성 심포지엄

정의할 수 있다.

결함 성장과 관련하여 공학적으로 의미있는 시점은 누설을 야기하는 관통시점과 불안정 파괴가 시작되는 시점이다.

결함 관점에서는 전열관 두께 20%까지의 성장 기간은 결점(imperfection), 전열관 두께 20~40%의 성장 기간은 열화(degradation)로 나타내며, 관두께 40%를 초과할 경우에는 관막음을 하기 때문에 이를 관막음 기준치로 규정하고 있다.

결함이 벽을 관통할 경우에는 누설이 시작되며, 관통 결함은 일정 부분 안정적인 균열 성장 후에 불안정 파괴를 유발하고, 최종적으로 전열관의 파단을 초래한다.

또한 누설 관점에서 전열관 거동을 살펴보면, N-16 누설 감시기에 의한 누설 탐지 한계, 증기발생기 통합 관리 프로그램에 의한 가동중 누

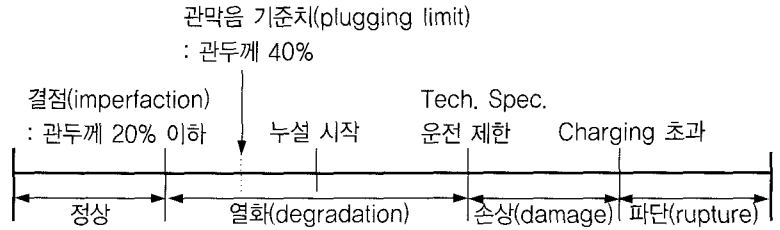
설 기준, 운영기술지침서 누설기준, 그리고 충전(charging) 초과 누설로 구분될 수 있다. 충전 초과 누설이 유발되는 경우, 결함은 이미 불안정 파괴 거동을 하고 있는 것으로 추정된다.

한편 누설 관점에서 증기발생기 운전은 정상 운전, 누설 발생에 따른 감시 강화 운전, 운영기술지침서 누설 제한치 초과에 따른 운전 제한, 충전 초과 누설시의 비상 운전 등으로 구분할 수 있다.

미국의 경우 충전 초과 누설이 발생할 경우를 전열관 파단으로 정의하고, 그 이전에 대해서는 초기 파단(incipient rupture)으로 정의하고 있다.

이상과 같이 증기발생기 전열관의 결함 거동 및 누설 상태 그리고 운전 상태 등에 따라 전열관 손상에 대한 다양한 양상을 보여주고 있기 때문에 이를 하나로 정의하는 것은

공학적으로 매우 어려우며, 전열관의 상태에 따라 분류·정의하는 것이 최선의 방안으로 사료된다. 따라서 증기발생기 전열관 상태, 누설 및 누설 상태에 따라 다음과 같이 정의하였다(그림 2).



〈그림 2〉 증기발생기 손상 상태 정의

- ① 정상 상태(Normal) : 무결점에서 관두께 20% 이하의 결점까지의 상태로서 정상 운전 절차에 따른 운전이 가능함.
- ② 열화 상태(Degradation) : 관두께 20% 초과 결점부터 운영기술 지침서 누설 제한치(1 gpm)까지의 상태로서 정상 운전 또는 누설 감시 강화 운전이 요구되며 관막음 기준치 초과시 정기 보수 기간 중 관막음이 수행되어야 함.
- ③ 손상 상태(Damage) : 운영기술 지침서 누설 제한치부터 충전이내 누설까지의 상태로서 운영기술지침서 운전 제한 조건에 따른 운전이 요구됨.
- ④ 파단 상태(Rupture) : 충전 초과 누설 이후 완전 파단까지의 상태로서 비상운전절차서에 따른 운전이 요구됨.

## 2. 해외 SGTR 사례 분석

〈표 1〉에서는 해외에서 발생한 주요 SGTR 사례 12건에 대하여 사고 당시 운전 상태 및 파단을 유발하였던 손상 기구 등을 나타내고 있다. 특기할 사항은 SGTR이 발생한 모든 경우에 방사선 피해를 최소로

제어할 수 있었으며, 규제 기준 이상의 방사성 물질 유출로 인한 피해가 발생한 사례는 없었다. 해외 사례에서 SGTR을 유발한 손상 기구는 화학적 용해 부식, 이물질에 의한 마모, 고주기 피로 균열 및 응력 부식 균열 등 4가지로 구분된다. 가. 화학적 용해 부식

Point Beach 1호기의 SGTR은 전열관의 화학적 용해에 의한 두께 감소가 원인이었다.

원자력 발전 초창기에 이차 계통 수질 관리는 인산염을 기반으로 하였다. 인산은 완전한 휘발 성분이 아니므로 증기발생기 내부에 농축되면서 산성 환경을 형성하여 Alloy 600 전열관을 화학적으로 용해 부식시키는 손상을 초래하게 한다.

인산염 농축에 의한 용해 부식을 예방하고자 1970년대 말부터 인산염 대신 암모니아를 주입하여 산성도를 제어하는 완전 휘발성 수질 관리 방법이 채택되고 있다. 암모니아는 열분해에 의한 생성물이 발생하지 않고 휘발성이 높으므로 증기발생기 내부에 농축되지 않는다.

나. 잔류 물질에 의한 마모

Prairie Island 1호기, Ginna 1호기, 그리고 Tihange 3호기에서 발생하였던 SGTR은 잔류 물질에 의한 전열관의 마모가 원인이었다. 전열관이 잔류 물질과 접촉하는 경우 접촉면에서 마모가 발생하고 이것이 진행되어 SGTR을 유발할 수 있다.

증기발생기 통합 관리 프로그램에서는 잔류 물질 마모에 의한 SGTR을 예방하기 위하여 잔류 물질의 확인을 위한 2차측 육안 검사 수행, 증기발생기 개봉시 잔류 물질 유입 방지, 잔류 물질 제거 및 감시 계통의 경보에 대한 대응 절차 등에 대한 방법 및 절차를 제시하고 있다.

### 다. 고주기 피로 균열 손상

North Anna 1호기와 Mihama 2호기에서 발생한 SGTR은 고주기 피로 균열 전파가 원인이었다.

고주기 피로 균열은 낮은 응력 범위에서 빠른 진동수로 반복 하중이 작동되는 경우에 발생하고, 주로 진동을 억제하는 반진동봉의 설치가 불량하기 때문에 나타난다.

최근에는 반진동봉의 설치 불량 사례가 반복될 가능성은 매우 낮으며 따라서 전열관 지지판에서 텐트



〈표 1〉 해외 SGTR 주요 사례

사고 일자	발전소명	사고 전 운전 상태	손상 기구
1975.2.26	Point Beach 1	전출력 운전중	화학적 용해 부식
1976.9.15	Surry 2	전출력 운전중	응력 부식 균열
1979.6.25	Doel 2	가열중 미임계	응력 부식 균열
1979.10.2	Prairie Is. 1	전출력 운전중	이물질로 인한 마모
1982.1.25	Ginna 1	전출력 운전중	이물질로 인한 마모
1984.5.16	Fort Calhoun	가동중	응력 부식 균열
1987.7.15	North Anna 1	전출력 도달 즉시	고주기 피로 균열
1989.3.7	McGuire 1	전출력 운전중	응력 부식 균열
1991.2.9	Mihama 2	전출력 운전중	고주기 피로 균열
1993.3.14	Palo Verde 2	98% 출력 운전중	응력 부식 균열
1996.7.23	Tihange 3	전출력 운전중	이물질로 인한 마모
2000.2.15	Indian Point 2	전출력 운전중	응력 부식 균열

터 약 75mm 지점까지 상부 원주 방향 균열 부위와 연결된 축방향 균열이 확인되었으며, 관판 상단 약 3mm 지점과 약 10mm 지점에 축방향 균열과 연결된 원주 방향 균열 전파가 있음이 관찰되었다(그림 3).  
가. 누설과 전열관 파단의 관계

N-16 누설 감지기가 가동되었던 15%의 출력 감소까지는 누설이 되었다더라도 측정 허용 범위 이내의 극미량이었을 것으로 판단된다.

그리고 응력 부식 균열 형상비가 대부분 10 이하인 것과 균열면이 서로 다른 층을 이룬 것으로 미루어 파단 전열관에서는 패인 홈을 따라 다중 균열이 생성되었을 것으로 판단된다.

즉 균열 길이 약 72mm는 여러 균열이 합쳐진 것으로 이 균열은 거의 관통균열에 도달해 있었던 것으로 판단된다. 약 72mm 균열에서는 가동중 압력차에 의해 전열관의 파열이 일어날 수 있다.

그리고 이 균열이 합쳐져서 파열된 시점은 1차와 2차 계통 압력차의 변화를 추적하여 보면 4월 5일 3시 10분으로 추정된다. 4월 5일 0시 20분에 발전 정지를 하였고, 동일 18시 20분경 전열관 절단이 발생한 것으로 추정된다. 따라서 4월 5일 3시 10분경부터 18시 20분까지 누설이 되었고, 18시 20분에 전열관이 절단되는 동안 누설에 의한 피로를 받은 것으로 보인다.

(dent)가 발생할 가능성도 거의 없다.  
라. 응력 부식 균열

Fort Calhoun, McGuire 1호기 및 Palo Verde 2호기에서 발생한 SGTR은 응력 부식 균열이 원인이었다.

응력 부식 균열은 인장 응력에 의해 있는 재료에 부식 환경이 조성될 경우 취성 파괴되는 현상으로, SGTR을 유발할 수 있는 제반 손상 기구 중에서 가장 위협적인 현상이다.

앞서 언급한 세 가지 손상기구가 향후 SGTR을 유발할 수 있는 가능성이 매우 제한적임을 감안할 때, SGTR을 억제하기 위해서는 응력 부식 균열에 대한 철저한 감시와 대책이 필요하다.

### 3. 울진 4호기 SGTR 원인 분석

울진 4호기는 2개의 증기발생기로 구성되어 있으며, 증기발생기 1

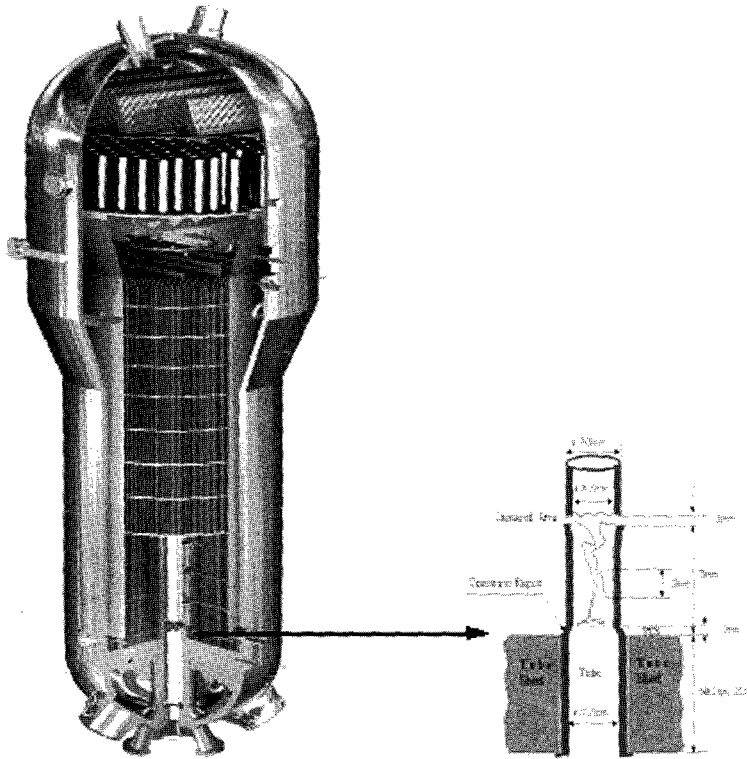
개당 8,214개의 전열관이 설치되어 있다. 전열관의 재료는 Alloy 600으로 외경은 19.05mm이고 두께는 1.067mm이다.

2002년 4월 5일 제3차 계획 예방 정비를 하기 위하여 원자로를 정지하고 냉각하던 중 18시 46분경에 증기발생기 #2에서 전열관 누설이 인지되었다.

4월 8일 증기발생기 #2의 전열관 R14C38에서 누설이 현장 확인되어 임시 관막음을 수행하였으며, 누설로 인하여 오염된 2차 계통을 정화하였다.

누설된 전열관의 내부를 관찰한 결과, 관판 상단 약 75mm 지점에서 원주 방향의 균열이 확인되었으며, 손상관의 양쪽으로 약 10mm 이격이 있었다.

또한 관판 상단 약 3mm 지점부



〈그림 3〉 손상 전열관 위치 및 형상

원자력연구소에서 수행한 누설 실험 결과에 따르면 균열 길이가 23mm인 응력 부식 균열이 있는 전열관이 280°C, 17.2MPa의 내부 압력하에서도 2시간 15분 동안 아무런 누설 징후를 보이지 않았다. 이러한 실험 결과로부터 길이가 72mm인 관통 결함을 가진 전열관이라 하더라도 감지할 만한 누설을 보이지 않았을 수도 있음을 알 수 있다.

울진 4호기에서 가동중 누설이 발생하지 않았던 것은 전열관에 있던 균열의 특징, 즉 다중 균열이 놓린 자국을 통해 있었고, 이 균열이

성장하면서 합체되었으나 발전 정지까지는 관통 균열로 성장하지 못했기 때문에 판단되며 발전 정지 이후 남아 있는 부분이 1차 및 2차 측 압력차에 의해 파괴되면서 누설이 발생한 것으로 추정된다.

#### 나. 원인 분석 결과

누설과 전열관 파단의 관찰을 토대로 전열관에서의 결함 성장 모드는 놓린 자국 및 스크래치 위치에서 여러 균열의 생성, 이러한 균열의 성장 및 합체, 합체된 균열의 전열관 관통, 관통된 전열관의 누수에 따른 전열관 진동, 피로 균열의 생성 및 전파로 진행되었을 것으로 예

측된다.

또한 파열에 의해서 원주 방향 균열이 생성되었으며, 누설에 의한 진동에 의해 원주 방향 균열이 성장하여 최종적으로 리가먼트(ligament)의 길이가 임계 길이가 되어 네킹(necking)에 의해서 최종 파단이 일어났을 것으로 예측되며, 원주 방향 균열 성장시 응력 부식 균열의 성장은 이미 종료된 상태로 판단된다.

결론적으로 울진 4호기 SGTR 원인 분석 결과는 다음과 같다.

① 관판 상단부터 약 80mm 지점까지 극부적인 벌지(bulge)와 내면의 스크래치가 존재하는 것이 인출 검사로부터 확인되었으며 이에 의한 과도한 인장 잔류 응력이 존재하였다.

② Bulge에 대한 사용전 검사와 가동중검사의 와전류 탐상 검사(ECT) 신호 분석 미비로 bulge 탐지를 간과하였다.

③ 전열관 재료는 전형적인 Alloy 600으로 재료 조직 자체의 이상은 없었으며 또한 가동중 1차 계통 수처리 이상은 없었다.

#### 다. 울진 5호기 검사 결과

울진 4호기와 동일 원자로인 울진 5호기에 대한 사용전검사의 일환으로 와전류 탐상 검사가 2003년 2월과 3월 사이에 수행되었다. 검사에 사용된 장비와 절차는 울진 4호기에 적용한 것과 거의 동일하다.



전체 전열관을 Bobbin으로 검사하였으며 전열관 고정판 상단에 대하여 고온관에서 전체 전열관을 검사하고 저온관에서 20% 전열관을 표본 선택하여 MRPC 검사하였다.

Bobbin 검사 결과 울진 4호기의 SGTR에 이르게 한 경우와 유사한 신호가 관판 상단에서 상당히 떨어진 위치에서 검출된 전열관이 있었고, 직관 상부 위치에서 전열관 접촉에 의한 것으로 판단되는 신호(free span bulge)가 검출되었다.

이들은 두께 감소 기준에 근거한 보수 대상으로 분류할 수는 없으나, 운전 도중에 결함을 발생시키거나 결함으로 성장할 가능성이 있으므로 향후 지속적인 감시가 필요한 것으로 판단된다.

또한 free span bulge의 발생 원인과 영향에 대해서는 보다 심층적인 연구가 필요하며, 그 결과는 울진 4호기 SGTR의 원인 분석에 유용한 정보를 제공할 수 있을 것이다.

#### 4. Davis-Besse 원자로 헤드 손상 사고 벤치마킹

2002년 3월 7일 미국 Davis-Besse 원전에서 원자로 헤드가 심각하게 손상된 것이 발견되었다. 손상 부위는 원자로 헤드 관통부 제어 봉 구동 장치 노즐 주변으로 원자로 냉각재 압력 경계를 이루는 부위이다.

손상의 크기는 폭이 100~125mm이고 깊이는 약 150mm로서 원자로 내부 클래딩 부위를 제외하고는 원자로 헤드 벽이 모두 관통된 상태였다.

비록 원자로 헤드에 큰 손상이 있었지만 원자로 파손이나 냉각재 누설 사고는 발생하지 않았다. 그러나 원자로 냉각재 압력 경계 건전성이 상실되고 또한 냉각재 상실 사고가 가능하였다는 측면에서 안전 현안으로 대두되었으며, 손상의 다양한 징후에도 불구하고 사전에 예방하지 못한 원인 분석에 관심이 집중되었다.

Davis-Besse 원자로 헤드 손상 사고는 울진 4호기 SGTR 사고와는 그 형태와 성격이 판이하게 다르나 사고를 사전에 예방할 수 있었다는 점에서 상호 공통점이 있다.

미국의 규제 기관이나 사업자가 이 사건을 처리하는 과정을 검토함으로써, 우리 나라에서 주요 사고 발생시 처리 방법 및 절차에 대하여 적절한 방향을 제시하고자 한다.

##### 가. 테스크포스의 구성 및 활동

미국의 규제 기관인 원자력규제위원회(USNRC)는 2002년 5월 15일 본부 및 지역 사무소 요원 10여명으로 교훈 평가(lesson-learned) 테스크포스를 구성하였다.

테스크포스의 주요 목적은 USNRC 또는 원전 사업자에게 적용될 수 있는 개선 사항을 도출 및

권고하고 독립적으로 원자로 헤드 건전성 확인과 관련된 규제 행위를 평가하는 데에 있다.

평가 활동은 사실 확인, 검사, 시정 조치, 산업체 운전 경험 반영 등에 대한 규제 행위 및 이행 절차를 위한 그룹과 규제 요건, 인허가 검토 절차, 이행 약속 사항 변경과 관련 사업자 행위 및 기술지침, 국제적인 경험 및 관행을 평가하는 그룹으로 나누어 수행되었다.

또한 USNRC 지역 사무소 및 본부의 활동에 대한 검토를 병행하였으며 유관 기관의 전문가와 회의를 개최하기도 하였다.

준비 단계에서 2회에 걸쳐 공청회를 열어 활동 범위에 대한 조언을 반영하였으며 USNRC 사무소별 회의도 개최하였고 Davis-Besse 원전이 위치한 주 정부와 회의를 거쳐 비공식적인 협정을 설정하기도 하였다.

검토 단계에서는 3차에 걸쳐 Davis-Besse 원전을 방문하여 현장 기록을 확인하고 관계자들을 면담하였다. 주 정부 관계자는 옵서버로 함께 참여하였다.

이와는 별도로 USNRC 사무소에서 Davis-Besse 원전 인허가 기록 및 문서, 절차, 검사 결과 등 관련 규제 자료를 검토하였다.

##### 나. 테스크포스의 검토 결과

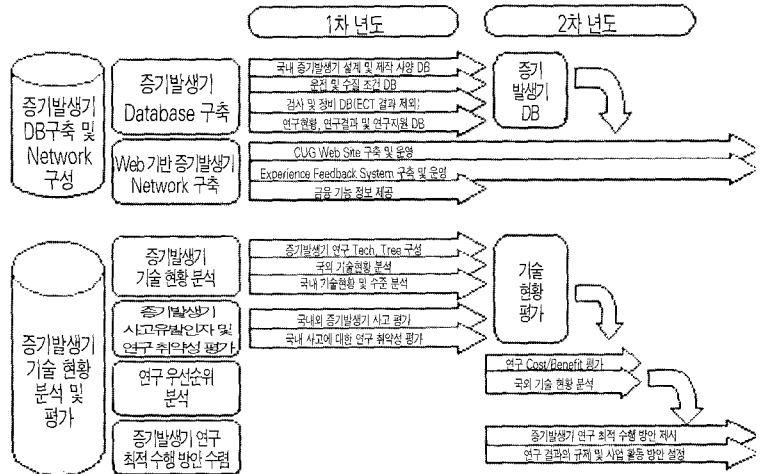
1993년 원자로 헤드 두께 감소 발생 가능성이 제시되었으나 안전

현안으로 반영하지 않았고, 누설 감지가 심층 방호를 제공하는 수단이 될 것으로 고려되었으나 관통부 누설을 감지하기 위한 개선된 누설 감지 계통을 설치하지 않았으며, 또한 수많은 봉산수 부식 관련 손상과 관련된 정보에도 불구하고 봉산 누설에 대한 부식 진행 속도가 심각하게 저평가되었음을 지적하였다.

최종적으로 테스트포스는 다음 3가지 이유를 들어 원자로 헤드 관통부 노즐 누설 및 원자로 헤드 손상은 예방할 수 있었을 것으로 결론지었다.

- ① USNRC 및 Davis-Besse 원전 측은 최근의 운전 경험에 대한 충분한 검토, 평가 및 후속 조치를 적절히 이행하지 않았다.
- ② Davis-Besse 원전측은 발전소 현안을 적절하게 관리하지 않았다.
- ③ USNRC는 Davis-Besse 원전의 안전 성능을 평가하는 데 기존의 또는 활용 가능한 정보를 통합하여 평가하지 못하였다.

USNRC는 테스트포스에 의한 Davis-Besse 사고의 평가를 통하여 교훈 평가 보고서(Lesson-Learned Report)를 발간하였고 사업자뿐만 아니라 규제자에 대한 미비점을 도출하였으며, 사고 예방을 위한 제반 조치에 대하여 동형의 전 원전에 시정 조치를 명하는 등 운전 경험의 반영에 적극적이었다.



〈그림 4〉 증기발생기 증장기 연구 추진 체계

### 5. 단기 과제 수행 결과 및 제언

증기발생기 연구협의회는 단기 과제로서 용어 정의, 울진 4호기 SGTR 원인 분석, 국외 SGTR 사례 분석 및 해외 사고 처리에 대한 벤치마킹을 수행하였다.

이에 대하여 연구협의회에서 3회에 걸친 발표와 토론이 있었으며, 이를 근거로 증기발생기 유사 사고 방지 대책에 대한 다음 4가지 권고 사항을 도출하였다.

- ① 원전 사건/사고에 대한 적절한 조치 및 종합적인 관리를 위해 운전 경험 반영 및 소급 적용 제도가 도입되어야 한다.
- ② 원전 사건/사고에 대한 종합적인 평가를 통해 유사 사고 방지 및 대처능력의 제고를 위해 교훈 평가 보고서의 발행을 의무화하고, 여기에는 규제 기관의 활동에 대한 평가 및 안전 문화에 대한 평가가 포함되어야 한다.
- ③ 울진 5호기 증기발생기 전열관

검사에서 나타난 bulge로 추정되는 이상 신호는 울진 4호기 SGTR의 중요한 근본 원인 중의 하나로 추정되므로 울진 5호기 전열관 이상 신호에 대한 상세 평가가 필요하다.

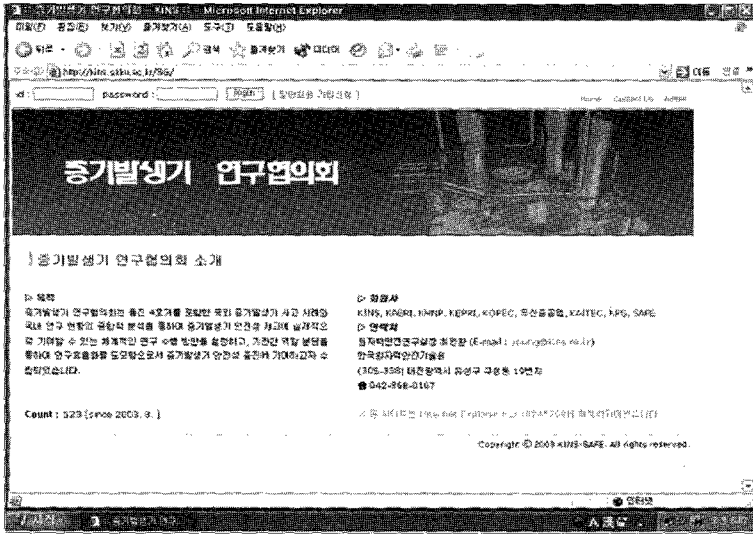
- ④ 증기발생기 와전류 탐상 이상 신호의 사전 발견 및 조치를 통한 SGTR 재발 방지를 위해 와전류 탐상 신호 평가 분야에 대한 연구 투자가 확대되어야 한다.

### 증장기 과제 수행 현황

#### 1. 기술 수목도 구축 및 기술 현황 분석

증기발생기 기술 현황에 대한 분석을 위하여 우선적으로 증기발생기에 대한 기술 수목도를 구축중에 있으며, 설계, 제작, 검사, 정비, 운전 및 감시, 수화학/수질, 손상 평가, 규제 등 8개 분야로 나누어 26개의 중분류(2 digit)와 87개의 소분류(3 digit)로 구성하고 있다.





〈그림 6〉 증기발생기 연구협의회 홈페이지 초기 화면  
(<http://kins.skku.ac.kr/SG>)

함이나 정상 전열관 주변 이물질 혹은 가동중 발생 결함을 사용 전 혹은 가동중 검사에서 탐지하지 못하거나 신호를 제대로 평가하지 못하는 경우이며, 세 번째는 전열관 주변의 냉각수가 결함 성장을 심각하게 촉진하는 경우이다.

SGTR의 재발을 방지하기 위해서는 결함 생성의 근본 원인을 제작 단계에서 제거하거나, 사용 전 혹은 초기 가동중 검사 단계에서 결함 및 근본 원인을 비파괴 검사 방법으로 도출 및 확인해야 한다. 이를 위하여 필요한 연구 수요를 다음과 같이 도출하였다.

가. 제작 결함 비파괴 탐지 기술

제작 중 발생 가능한 제작 결함의 종류와 제작 결함의 크기를 변화시킨 시편을 제작하여 비파괴 검사 탐지 한계와 탐지 확률을 평가할 수 있는 기술의 개발이 필요하다.

또한 제작 결함과 가동 결함의 중첩에 대해 비파괴 검사로 각 결함의 크기와 형태를 분리하는 기술이 개발되어야 한다.

나. 제작 결함 허용 기준 정립

제작 결함은 주위에 인장 응력을 발생하며 이 인장 응력에 의해 가동 결함이 생성되어 성장한다.

응력 부식 균열인 경우 성장 속도는 인장 응력의 4~6제곱에 비례하므로 인장 응력의 평가가 중요하다. 따라서 제작 결함의 종류 및 크기별로 잔류 응력을 측정하고 1차측 및

또한 증기발생기에 대한 국내의 기술 수준을 파악하기 위하여 기술 수목도의 소분류(일부는 중분류)를 기준으로 회원사의 역할 분담을 통하여 기술 현황 분석 보고서를 작성 중이다. 기술현황 분석 결과는 향후 연구 수요의 도출 및 우선 순위 부여 등에 활용되어질 것이다(그림 4).

2. 데이터 베이스 구축

효율적인 증기발생기 관련 연구 수행을 위해서는 각 회원사가 보유한 증기발생기 관련 데이터 베이스의 공개 및 공유가 필수적이다.

데이터 베이스는 설계, 제작, 검사, 정비, 운전 및 감시, 수화확/수질, 손 상평가, 규제, 일반 자료, 연구 자료, 일반 현황 등 11개 분야로 구성하였다.

현재 11개 분야에 대한 61개 개별 데이터 베이스를 확정하고 이에

대한 데이터 범주를 구축중이며, 일반 자료, 연구 자료 및 일반 현황 등 3개 분야에 대한 자료 입력을 마친 상태이다.

데이터 베이스를 포함하는 지식 정보의 공유를 위하여 운전 경험 반영시스템 개념의 웹 사이트를 구축하여 운영하고 있으며, 데이터 베이스 중 일반 자료는 웹 사이트에 공개하고 있다(그림 5).

각 회원사가 보유하고 있는 자료는 전자 파일 문서로 변환하여 지속적으로 웹 사이트에 공개할 예정이다.

3. 연구 수요의 도출

증기발생기 전열관 파단 사고의 발생 원인은 크게 세 가지 관점에서 볼 수 있다. 첫 번째는 전열관용 주괴(ingot)의 불량, 전열관 제조 공정 혹은 증기발생기 제작 공정상의 제작 결함이고, 두 번째는 제작 결

2차측 냉각수하에서 응력 부식 균열 성장 속도를 평가할 필요가 있다.

또한 제작 결함의 종류에 따라 결함 성장이 단일 결함으로 성장하는지 아니면 다중 결함으로 성장하는지 평가하고 결함의 성장 모드를 평가하는 기술이 개발되어야 한다.

#### 다. ECT 신호 평가 기술 개발

울진 4호기의 증기발생기 파단 전열관에 대한 가동중 검사시 수행된 와전류 탐상 검사에서 이상 신호가 검출되었으나 당시에는 이를 전열관의 투사율 변화로 판단하였다.

파단 사고가 발생한 후에 분석된 결과로는 전열관의 내부가 국부적으로 확장된 bulge인 것으로 판명되었다.

또한 신호 판독이 숙련된 검사자에 의해 이루어지고 있지만 짧은 검사 기간 동안 집중적으로 수행되는 일정으로 인한 검사자의 피로로 인적 실수가 발생할 수 있다.

따라서 와전류 신호 해석의 객관적인 신뢰도 향상이 요구되고 있으며 이에 대한 연구 투자가 확대되어야 한다.

구체적으로는 증기발생기 전열관에 예상되는 결함에 대한 표본 검사 수량의 합리적 증가와 고속 신호 수집 장비의 확보 및 활용, 신호 평가 절차의 강화, 제3자 평가 물량 확대를 위해서 와전류 탐상 신호를 자동으로 판정하는 지능형 신호 분석 기술의 개발이 필요하다.

#### 라. 울진 4호기 근본 원인 분석을 위한 추가 연구

울진 4호기 전열관 파단부에 존재했던 bulge 신호 및 울진 5호기에 존재하는 이상 신호들의 발생 원인은 현재까지 정확히 규명되지 않은 상태이다.

이러한 원인 불명의 신호들은 전열관 건전성에 대한 위험도를 측정할 기준이나 조치 근거가 부족하여 적절한 시기에 필요한 조치를 취하지 못할 수도 있다.

따라서 사용전 검사 이전의 전열관 제작 검사시 검출된 이상 신호를 분석하여 미리 결함이 있는 관으로 분류하여 사용하지 못하도록 기준을 강화할 필요성이 있다.

또한 전열관 제작 공정에서 bulge 신호를 야기할 수 있는 부분을 상세히 검토하여 사전에 이상 지시들이 발생하지 않도록 하는 노력이 필요하다.

이미 존재하는 bulge 신호들에 대해서는 매 검사마다 신호 형상의 변화를 면밀히 관찰하여 특이한 점이 있는지를 확인하고, 필요하다고 판단되는 경우 와전류 검사 이외의 다른 기법을 사용한 추가 검사나 공학적 평가를 수행하여 전열관 건전성을 확인하는 것이 바람직하다.

'전열관 bulge'는 현재 울진 4호기 SGTR의 근본 원인 중의 하나로 추정되고 있기 때문에 울진 5호기 전열관 이상 신호에 대한 상세 평가

가 필요하며, 이를 위해 울진 5호기 'bulge 전열관'과 유사한 시편을 사용하여 종합적으로 그 발생 원인을 분석하여야 한다.

#### 맺음말

과학기술부의 증기발생기 안전성 향상 종합 대책의 일환으로 운영되고 있는 「증기발생기 연구협의회」는 회원사 각 기관이 수행하는 증기발생기 관련 연구에 대한 정보 교환, 데이터 베이스 구축, 네트워크 구성, 심포지엄 등을 통해 상호 이해의 폭을 넓히기 위하여 지속적으로 노력할 것이다.

또한 증기발생기 안전성 관련 현황 파악 및 필요한 연구 항목을 도출하고, 공통 관심 사항에 대하여 공동 연구를 수행해 나갈 것이다.

궁극적으로는 연구 결과를 규제 및 사업 현장에 활용함으로써 증기발생기 안전성을 증진하는 데 크게 기여하도록 노력할 것이다.

앞으로도 본 연구협회의 발전을 위하여 관계자들의 협조와 조언을 부탁드립니다. 협의회 회원, 전문가 및 자문단 여러분께 다시 한번 감사의 말씀을 드리고자 한다.

참고로, 여기에 소개한 내용들은 KINS/RR-203(울진 4호기 증기발생기 전열관 파단 사고 원인 분석 및 대책, 2003년 10월)보고서에 상세히 기술되어 있다. ☞