

# 일체형원자로 SMART 주기기 설계 및 검증기술

이 글에서는 지난 10여 년 간 개념개발과 기본설계를 거쳐 현재 대형 국가연구개발 실용화 사업으로 추진되고 있는 해수담수화용 일체형원자로 SMART 및 그 연구로에 대해 소개하고 증기발생기, 주냉각재펌프 및 제어봉구동장치로 구성되는 원자로 주기기의 개발 실태 및 검증시험에 대하여 소개한다.

전세계적으로 동력로(power Reactor)는 전력생산 목적의 대용량 규모의 원자로가 대부분이며 개발 및 기술개선도 대용량 원자로 중심으로 이루어져 왔다. 소형 원자로는 전력생산 관점에서 경제성이 대용량에 비해 떨어지므로 발전용으로는 관심을 끌지 못하였다. 그러나 전세계적으로 원자력 에너지의 다목적 활용에 대한 관심이 증가하면서 열병합, 해수담수화 에너지원, 지역난방, 선박추진 동력원 등에 사용을 위한 소형 원자로 개발 노력이 증가하고 있으며 중소형 규모의 원자로 시장형성에 대한 긍정적

전망에 따라 국제적인 개발 경쟁도 점차 치열해지고 있는 추세이다. 한국원자력연구소는 일찍 원자력 에너지 활용의 다변화에 관심을 가지고 소규모 전력생산과 해수담수화에 에너지를 공급할 수 있으며 안전성이 획기적으로 제고되고 경제성이 향상된 소형 일체형 원자로 SMART 설계개발을 추진해왔다.

SMART는 소형 일체형 원자로로 열출력 330MW급의 동력로이다. 개발의 목적은 소규모 전력생산과 아울러 생산된 에너지를 바닷물 담수화에 이용하는 것이다. SMART로부터 에너지(증기)

를 공급받는 담수계통에서는 하루 약 4만 톤의 담수를 생산하도록 설계되었으며 해수 담수화와 함께 전력계통에서는 약 90MW 정도의 전력을 생산할 수 있다.

열용량이 330MW인 SMART는 1997년부터 개념설계를 수행하여 원자로계통 및 주요기기의 기본설계를 대부분 완성하였다. 이렇게 개념 및 기본설계가 수행된 일체형원자로 SMART는 상용로로서의 기술검증을 위하여 2002년부터 원자력연구개발사업으로 전환하여 65MW급의 연구로인 SMART 연구로 기본설계를 수행하였으며 2006년부터는 대

원자력 에너지를 다목적으로 활용하려는 국제적 관심의 증가에 따라 해수담수화 등을 위한 소형 일체형원자로인 SMART의 개발이 추진되고 있다.

형 국가연구개발실용화사업으로 선정되어 추진되고 있다.

### SMART 원자로의 특성

SMART는 일체형 원자로로 기존의 분리형(loop type) 원자로와는 달리 노심, 증기발생기, 가압기, 주냉각재 펌프 등이 배관 연결 없이 한 개의 압력용기 안에 내장된 원자로이다. 따라서 분리형 원자로의 주요한 설계기준 사고인 대형 냉각재상실사고(LBLOCA)를 근본적으로 배제하였다.

SMART 설계개발에는 기본적

으로 입증된 경수로 설계기술을 이용하고 안전성을 획기적으로 제고시키기 위해 고유안전성 개념 및 피동안전 개념 등의 혁신적인 안전개념을 도입하였으며 신기술은 개별 실험 또는 시험을 통해 입증된다. 또한 소형 원자로가 가지는 경제성 약점을 보완하며 경제성을 향상하기 위한 설계개념이 도입되었다.

안전성 제고를 위한 설계특성은 고유안전성, 피동안전성, 계통 단순화, 첨단 인간공학 연계설계 등으로 요약할 수 있다.

SMART의 용량은 대형 원자로 용량에 비해 1/10 이상으로 작다. 즉 단위 출력당 경제성이 매

우 낮다. 이는 경제성 측면에서 소형 원자로가 가지는 원천적인 단점이다. 이러한 경제성 단점을 보완하기 위하여 피동계통의 접목과 무봉산 운전개념을 통하여 계통을 단순화하였으며, 일체형 기기의 모듈화, 표준화로 건설공기를 단축하였다. 또한 디지털 감시 및 보호계통 등 제어기술을 향상하므로 원전의 가동률을 증가시킬 수 있다.

### SMART 원자로계통 설명

#### 원자로계통

SMART 원자로는 일반적인 가압경수로형 원자로와는 달리 일차냉각재계통 및 주기가 연결 배관 없이 한 개의 압력용기 내에 배치되어 일차계통 유로를 형성하는 일체형원자로(integral reactor)이다. 즉, 핵연료 및 노심, 12개의 증기발생기, 1개의 저온 자기가압기, 12개의 제어봉구동장치와 4개의 주냉각재펌프가 한 개의 원자로 압력용기 내에 설치함으로써 기존의 Loop형 원자로가 가지는 대형 냉각재상실사고를 원천적으로 배제하는 특성을 가지고 있다.

SMART의 일차 냉각계통은 증기발생기

표 1 SMART의 설계특성 및 기대효과

설계 목표	적용기술 및 기대효과
고유안전성	<ul style="list-style-type: none"> <li>일체형 개념에 따른 대형 냉각재 상실사고 배제</li> <li>무봉산 노심설계에 따른 음의 감속재 온도계수</li> <li>낮은 노심출력밀도에 따른 큰 열적 여유도</li> <li>냉각재 부피 증가로 열적 저항성, 과도상태 여유도 증가</li> </ul>
피동안전성	<ul style="list-style-type: none"> <li>피동안전 개념의 공학적 안전설비</li> <li>원자로 안전보호 용기에 의한 방사성 물질 누출 배제</li> </ul>
계통 단순화	<ul style="list-style-type: none"> <li>피동안전 개념을 도입</li> <li>계통의 운전 불확실성을 제거하여 안전성 제고</li> </ul>
첨단 인간기계 연계설계	<ul style="list-style-type: none"> <li>디지털 기술, 인간-기계연계기술 접목</li> <li>제어기능 향상에 따른 계통 안전성 제고</li> </ul>

가 노심상단의 노심지지통과 원자로 용기 사이의 환형공간에 위치하고 있으며, 가압기는 원자로 용기 상단의 돔 부위에 위치하고 있고, 원자로 냉각재 펌프는 원자로 용기의 원주방향으로 부착된 일체형 원자로의 구조를 가지고 있다. 따라서 주냉각재가 순환되는 회로는 노심에서 가열된 주냉각재가 노심지지통을 따라서 상승한 후에 원자로의 반경 방향으로 퍼지게 되며, 다시 원자로 냉각재 펌프에 의해 주냉각수는 증기발생기의 상단으로 들어가게 되어 튜브를 따라서 하강하게 된다. 증기발생기 하단부에서 나온 주냉각재는 다시 노심의 하단으로 들어가게 되어 전체 순환회로를 형성하게 된다. 따라서 주냉각재의 순환회로가 매우 짧으며, 또한 일차냉각수가 원자로 외부로 순환되지 않으므로 별도의 주냉각재 배관이 없는 특징을 갖게 된다. 일차냉각재계통의 유로는 원자로 압력용기 내에서만 형성되고 압력용기 내에 설치되어 있는 증기발생기 세관 내부를 흐르는 이차계통 급수에 열을 전달하게 된다. 원자로 계통 구성은 일차계통 유로가 형성되는 원자로 집합체를 포함한 원자로냉각재계통, 잔열제거계통, 비상노심냉각계통, 비상방산수주입계통, 충수계통, 정화계통, 기기냉각계통 및 안전보호용기로 이루어진다. 잔열제거계통은 증기 추출, 급수공급

중단사고, 전원공급 상실사고 등의 경우에 원자로 노심붕괴열을 제거한다. 비상방산수주입계통은 제어봉에 의한 원자로 운전 정지불능 시 원자로 정지를 위한 계통이며 충수계통과 연결되어 있다. 비상노심냉각계통은 소형 냉각재상실사고 등의 경우에 노심의 안전성 확보를 위해 냉각수 주입을 통한 노심 냉각기능을 수행하며, 충수계통과 연결되어 있다. 충수계통은 운전 초기의 일차 냉각재 및 운전 중 일차 냉각재의 누설량을 보충하는 주기기능을 가진다. 원자로가 계획정지 또는 보수를 위한 정지 운전 시 원자로 냉각재의 수질을 제어하고 정화하기 위한 정화계통은 off-line으로 연결되어 있다. 또한 원자로의 정상 운전 중 주냉각재펌프, 제어봉구동장치, 가압기, 내부차폐구조의 냉각기 등에 냉각수를 공급하여 기기에서 발생하는 열을 제거하는 기기냉각계통이 있다. 안전보호용기는 사고 시 노심손상을 방지하고 방사능 물질의 외부 노출을 억제하는 기능을 수행하며 대부분의 원자로 계통을 그 내부에 포함하고 있다.

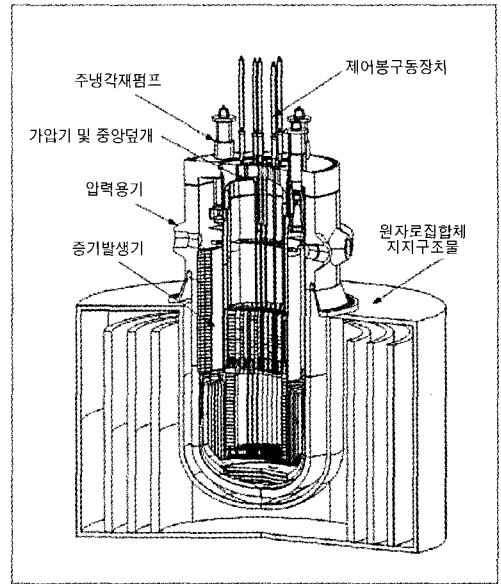


그림 1 SMART 원자로 집합체

### 안전성 향상 및 안전계통

SMART 원자로 개발과 같은 소형 원자로의 안전성 향상을 위하여 원자로 설계개선을 통한 고유 안전성 확보와 안전계통 설계에 피동 안전개념의 도입 등이 국제적인 기술개발의 추세이다. 원자력 기술개발을 통한 원자로의 안전성 향상은 따라서 환경친화적인 원자력에너지에 대한 국민적 신뢰의 확보에 필수적인 요소이다.

SMART는 주기를 원자로 용기 내에 설치함에 따라 원자로 용기로 연결되는 대형 배관을 제거하여 분리형 대형 가압경수로의 설계기준사고 중 가장 심각한 사고인 대형 냉각재상실사고를 근본적으로 제거하여 원자로 안전

표 2 SMART 및 연구로의 주요 설계변수

항 목	SMART(330MW)	SMART 연구로(65MW)
원자로심 출력	330MWt	65.5MWt
설계수명	60년	30년
재장전 주기	36개월	약 24개월
평균 이용률	90%	-
일차계통 설계압력	17MPa	17MPa
일차계통 운전압력	15MPa	14.7 MPa
원자로심 입구온도	270°C	272°C
원자로심 출구온도	310°C	310°C
주증기 온도	274°C 이상	282°C 이상
주증기 압력	3.0MPa	3.45MPa

성을 향상시켰다. 또한, 원자로 주냉각재펌프로 캔드 모터 펌프를 사용함으로써 펌프밀봉을 제거하여 펌프 씬(seal) 고장의 사고 위험을 제거하였다. 원자로 운전 중 붕산수를 사용하지 않고, 원자로 출력밀도가 낮으며, 가압기가 상대적으로 크게 설계되어서 자체적으로 사고에 대응하는 능력을 획기적으로 향상시켰다. 이러한 고유안전성과 더불어 안전계통 설계는 피동작동 개념을 도입함으로써 기존의 대용량 가압경수로의 능동작동 안전계통설계 개념에 비하여 안전성이 획기적으로 향상되었다. 원자로 안전계통의 피동작동 개념은 압력과 중력 및 자연대류 등의 자연적 현상을 이용하여 피동적으로 작동하도록 설계되어 있다. 또한, 원자로의 가상적 사고를 예방하고 사고 시 핵연료 파손이나 노심 손상 및 이에 따른 방사능 누

출을 방지하여 사고영향을 완화하기 위하여 디지털 원자로감시 및 보호계통, 원자로 안전계통 및 공학적 안전 설비계통을 갖추고 있다.

피동 안전계통은 소형 냉각재 상실사고 시 냉각수를 노심에 주입하는 비상노심 냉각계통, 원자로 과압방지를 위한 원자로 및 격납건물 과압보호계통, 방사능 누출을 방지하기 위한 원자로 보호용기, 그리고 원자로 사고 시 노심의 핵붕괴열을 제거하여 노심손상을 방지하는 원자로 노심장기냉각 기능을 수행하는 피동 잔열제거계통이 자연대류 열전달을 이용하여 피동적으로 작동하도록 되어 있다.

### SMART 연구로 주기기의 개발과 검증

#### 주기기 개발의 역사

원자로 일차계통의 주요 구성품에는 핵연료, 원자로용기, 가압기, 증기발생기, 주냉각재펌프 및 배관이 있다. 또한 원자로용기의 상단에는 핵연료를 제거하기 위한 제어봉구동장치기 설치되는데 일체형 원자로는 이들 중 배관을 생략하여 냉각재상실사고를 원천적으로 제거하므로 안전성을 개선한 개념이다. 원자로의 구성 부품 및 기기 중 주로 기능과 성능의 요건을 만족하는 기기인 증기발생기, 주냉각재펌프 및 제어봉구동장치를 '주기기' 라고 부른다.

원자력발전소에 공급되는 원자력급의 기기는 성능과 안전에 대한 확실함을 요구하고 있으므로 재료 및 설계와 제작에서의 품질관리 및 기기의 검증 등에 까다로운 요건과 절차가 적용되고 있다. 1990년 초까지 국내 원전건설에서 압력용기를 제외한 주기기의 국산화가 시도되지 못했으나 현재는 한국형 원자로를 통한 기술자립의 일환으로 상용로서 사용하는 증기발생기 및 제어봉구동장치를 두산중공업에서 제작하여 납품하고 있으며, 주냉각재펌프의 경우 그 설계 및 제작에 외국기술을 이용하고 있다.

일체형 원자로의 개발에서 주기기는 원자로 전체 개념의 성패를 좌우하는 중요한 위치에 있다. 즉, 설계개념을 만족하는 하드웨어의 존재 유무가 중요한 의미를 가지는 것이다. SMART 연구로

의 주기기는 이러한 배경 아래 일찍부터 개발을 서둘러 2001년에는 개념 및 기본설계를 1차 완료하고 각 부분품을 시제작하여 부분품에 대한 기능검사를 마치게 되었다. 또한 시제 제작된 1조의 주기기 - 증기발생기, 주냉각재펌프 및 제어봉구동장치에 대하여 조립된 전체 어셈블리로서의 기능과 성능 및 수명, 건전성 등을 평가하기 위한 검증시험 계획을 2002년부터 수립, 시행하고 있다. 이 검증시험은 요건 및 절차개발과 기술지원은 한국원자력연구소가, 검증시험의 총괄적 수행은 두산중공업이, 제어봉구동장치 및 주냉각재펌프의 검증시험은 한국기계연구원이, 증기발생기의 검증시험은 러시아가 수행하는 종합적인 프로그램이다.

**주기기 특징**

SMART 연구로의 주기기는 원자로의 사양과 노심의 특성에 따라 성능 및 운전하중이 결정되며 모든 기능요건을 만족하면서 구조적 건전성과 수명을 갖도록 설계되어야 한다.

**• 증기발생기카세트(SGC)**

증기발생기카세트는 관류식 나선형으로 원자로에 12개의 카세트를 장착하도록 설계되었다. 96개의 전열관을 카세트당 6개의 모듈로 나누어 배치하며 전열관 외부로는 노심을 통과한 310도의

SMART 연구로의 주기기인 증기발생기, 주냉각재펌프 및 제어봉구동장치는 일체형원자로의 장점을 살릴 수 있도록 고유한 설계와 기술로 개발되었으며 안전성 및 건전성을 검증하기 위한 종합적인 검증프로그램에 따라 검증되고 있다.

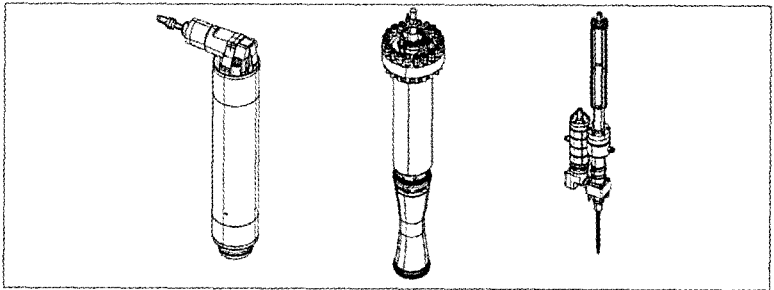


그림 2 SMART 주기기 3종(SGC, MCP, CEDM)

표 3 주기기 검증시험 상세

주기기명	기능 및 성능시험	내구성 시험
증기발생기카세트	Thermal-hydraulic test	Thermal cyclic test
주냉각재펌프	기능시험 - 가스제거 유로의 기능 확인 - 자연순환 운전가능시간 측정 - 냉각기 성능확인 - 전동기 특성시험 특성시험 - 성능곡선 생산 - Coast-down 시험 - 흡입구/토출구 압력진동 측정 - NPSHR 측정 - 자연순환운전 모사시험 - 역유동시 펌프의 압력강하 측정	내구성시험 - 2,000시간 연속운전시험, 기동 및 정지시험 - 기기 냉각수 상실사고 모사 시험 수명한계시험
제어봉구동장치	기능시험 - 해제스프링 기능시험 - 위치지시기 기능시험 - 한계스위치 기능시험 전자석 기능시험 - 스텝모터 기능시험 - 초음파센서 기능시험 - 냉각기 기능시험 낙하시험	수명시험 내구한도시험

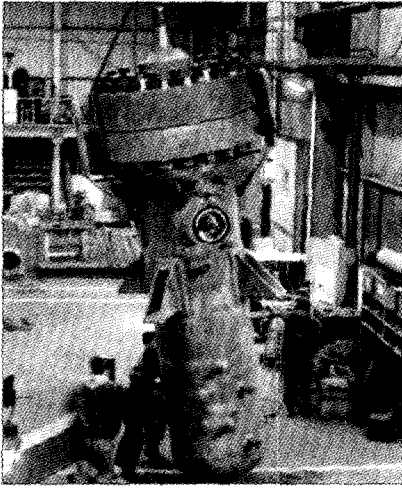


그림 3 처구에 장착된 증기발생기

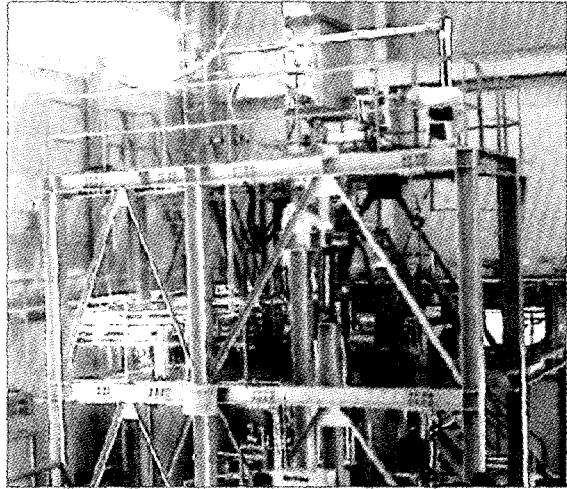


그림 4 제어봉구동장치 검증시험 시설

일차 냉각수가 순환하고 내부로 2차 급수를 공급하여 282도의 과열증기를 생산하게 된다.

• 주냉각재 펌프(MCP)

주냉각재펌프는 농형유도전동기를 사용하여 축류펌프를 구동하여 고온, 고압의 냉각수를 노심과 원자로용기 내에서 순환시키는 기능을 수행한다. 회전축과 펌프축이 일체로 설계되고 전동기가 캔으로 일차 냉각수와 격리되어 밀봉이 필요없는 구조이다.

• 제어봉구동장치(CEDM)

SMART 연구로의 제어봉구동장치는 0.25mm의 아주 미세한 스텝으로 제어봉을 구동하여 노심반응도를 제어하는 기능을 한

다. 또한 제어봉을 긴급 낙하시켜 원자로를 단시간 내에 정지시킬 수 있어야 한다. 이를 위해 스텝 모터와 베벨기어 및 볼스크류를 사용한 구동기구를 채택하여 요건을 만족하도록 설계되었다.

주기기 검증시험 내용

SMART 연구로의 주기기는 일체형원자로 고유의 설계로 진행 되었으므로, 개념의 적합성과 prototype의 성능보완사항을 도출하고 그 기능, 성능 및 신뢰도를 확인하기 위한 목적으로 성능 검증프로그램이 수립되어 시행되었다. 주기기에 대한 성능검증은 우선 시제품 제작을 통한 제작성 검토, 개별부품의 기능 확인에 이어 고온고압(17MPa, 310°C)의

시험시설을 사용하여 실제 운전 조건하에서 기능과 성능을 검증하고, 수명한계까지의 운전을 통해 수명을 예측하고 신뢰도를 검증하는 방법으로 진행되었다.

검증시험 결과

주기기 3종은 첫 시제품치고는 성공적인 기능, 성능 및 건전성을 확인시켜 주었다. 주냉각재펌프 및 제어봉구동장치의 성능시험결과는 안전해석의 입력 자료로 활용되며, 증기발생기의 성능시험결과는 유체계통설계의 연계자료로 사용된다. 성능검증프로그램의 결과로 주기기 대부분 원하는 성능을 발휘하는 것으로 확인되었으나 일부 설계인자에서의 보완 사항도 발견할 수 있었다.