

## 《기술보고》

# 신형원자로로서의 일체형 가압경수로 설계특성 분석

김용완 · 이두정 · 장문희

한국원자력연구소

(1994. 11. 22 접수)

## 요 약

가압경수로에서 증기발생기와 같은 주기기를 원자로 내부에 위치하도록 설계한 원자로를 일체형 원자로라고 분류하며, 기존 상용원자로와 같이 모든 주기기가 별도의 압력용기로 설계되어 배관계통에 의해 원자로 외부에 순환회로를 갖는 형태의 원자로를 분리형원자로라고 한다. 최근에 개발되고 있는 한 부류의 신형원자로에서는 원자로 및 계통의 단순성 추구와 계통의 높은 신뢰성으로 안전성 향상을 위해 동력원 사용 등의 능동적 안전개념 보다는 자연현상을 이용하는 피동안전개념이 널리 도입되고 있다. 본 보고서에서는 이러한 신형원자로의 노형으로서 일체형원자로의 특성을 전통적인 분리형원자로와 비교, 분석, 평가하였다.

일체형원자로의 가장 큰 장점은 모든 주기기가 단일 압력용기 내에 위치하므로 일차계통이 매우 단순하고 대규격 배관이 없기때문에 대형 냉각재 상실사고가 근본적으로 방지되어 안전계통이 매우 단순하다는 것이다. 이 외에도 일체형원자로는 대단히 많은 일차냉각재 용량, 매우 큰 가압기 용량 및 긴 운전원 조치시간등의 설계특성을 보유하고 있어 안전성이 탁월하다는 장점을 지니고 있다. 그러나, 일체형원자로에는 모든 주기기가 단일 압력용기 내에 설치되므로 대형 원자로 용기가 요구되며, 원자로 압력용기의 제작성 및 운송 능력이 원자로의 용량을 제한하는 주된 요인이 된다. 일체형원자로의 활용으로 열병합 발전, 지역난방 및 선박용 원자로등의 중소형 원자로에 매우 적합하다고 판단되며, 뛰어난 안전성으로 인하여 사회적 수용성이 강조되는 상용발전로로서도 적합한 노형이 될 수 있을 것으로 분석되었다.

## 1. 서 론

원자력선진국들은 원자로 사고 방지 능력을 제고하고 원자력의 사회적 수용을 고려한 안전성과 경제성이 보다 향상된 새로운 개념의 원자로 개발을 적극적으로 추진해 오고 있다. 이들 원자로에는 능동적 안전개념(active safety concept)을 중력, 자연대류, 기체압력등을 이용한 피동적 안전개념(passive safety concept)으로 전환하여 안전계통의 신뢰성을 확보하고 노심손상 확률을 대폭 감소시키며 경제성을 향상시키기 위하여 계통의 단순화, 모듈화, 표준화 및 건설기간의 단축 등을 추구하고 있다. 중소형원자로에는 대용량원자로에 비해 이러한 새로운 개념을 접목시키기에 보다 더 적합하

므로 원자력선진국들은 대용량원자로 개발과 병행하여 신개념의 중소형원자로를 최근 활발히 개발하고 있다. 중소형원자로에는 전기를 생산하는 목적외에 해수의 담수화, 지역난방, 열병합 발전 및 선박용 원자로등의 목적으로 개발되고 있으며, 이들 원자로의 특징은 전기를 생산하는 목적으로 사용되고 있는 대용량 경수로의 형태가 대부분 원자로, 증기발생기, 가압기 및 원자로냉각재 펌프등의 주기기들이 배관계통에 의하여 연결된 분리형 원자로(loop type reactor)인데 반하여 계통의 안전성과 신뢰성을 강조하고 공간확보에 유리한 일체형 원자로(integral type reactor)가 주류이다.

일체형 원자로에는 원자로용기안에 증기발생기를 비롯한 주기기가 설치된 형태의 원자로를 의미하며, 분리형

원자로로는 증기발생기, 가압기 등의 주기가 별개의 압력용기안에 위치하며 이들 사이를 배관으로 연결한 형태가 된다. 지역난방로에서 주로 대기압으로 운전되는 형태로서 수조형 원자로(pool type reactor)가 있으며, 혼하지는 않지만 PIUS처럼 발전로 중에서도 원자로를 수조에 담근 형태의 수조형(혹은 수장형)이 있다. 여기서는 수조형을 별도로 분류하지 않고, 주기의 설치위치에 따라서 엄밀한 의미에 따라 분리형 혹은 일체형으로 분류하였다.

현재 발전 목적으로 개발중이거나 개발을 추진했던 중소형 경수로로는 미국의 AP-600[1], 영국의 SIR[2,3]을 비롯, 스웨덴의 PIUS[4], 러시아의 VVER-500/600 [5], VBER600[6] 일본의 MS 300/600[6], SPWR(System-integrated PWR) [7~9] 등이 있으며, 이 밖에 지역난방로 및 열병합발전 혹은 선박용 원자로 목적으로 개발중인 중소형 경수로로는 러시아의 ABV-6[10], ATS-150[11], AST-500 [12], RUTA[13], UNITHERM [14], 일본의 MRX, DRX[15, 16], 중국의 NHR-5/200 [17, 18], 아르헨티나의 CAREM[19], 캐나다의 SES 10[20], 프랑스의 Thermos[21] 등이 있다. 이 중에서 미국의 AP-600, 러시아의 VVER-500/600, 그리고 일본의

JPSR과 MS 300/600, 스웨덴의 PIUS 등은 분리형이며, 이들을 제외하고는 전부 일체형이다. 대표적으로 알려진 중소형 발전로 및 지역난방로에 대하여 용량과 노형을 표 1에서 비교하였다. 그러나 같은 일체형 원자로도 사용 목적에 따라 그 특성이 달라질 수 있으며, 장점으로 간주되던 사항이 오히려 단점이 될 수도 있다. 본문에서 보다 상세히 기술되었지만 일체형 원자로로는 600MWe이상으로 제작하는 것이 현재로는 불가능하다. 그러므로 본 기술보고에서는 600MWe이하의 발전용 원자로에 대해서 주된 관점을 두고 분석하고자 한다.

일체형원자로로는 모든 주기가 원자로압력용기 내부에 위치하고 있기 때문에 설계개념이 분리형과 명확히 구분되며, 계통의 구성과 기기의 설계개념 및 형태도 분리형원자로에서 사용되는 것과 많은 것이 다르다. 일체로 분리형에서는 주로 U 튜브 증기발생기를 사용하는 반면에 일체형에서는 관류형 증기발생기(once-through steam generator)를 사용하며, 별도의 압력용기에 가압기를 설치하는 분리형과는 달리 원자로용기 상단의 빈 공간을 가압기로 이용한다. 일체형원자로로는 상기에서 언급한 고유의 장점인 단순성, 신뢰성, 안전성, 경제성 및 유리한 사회적 수용성등으로 인하여 피동 안전개념을 접목시켜 현재 세계각국에서 상용 발전용 원자로,

표 1. 대표적인 중소형 일체형 및 분리형 가압경수로

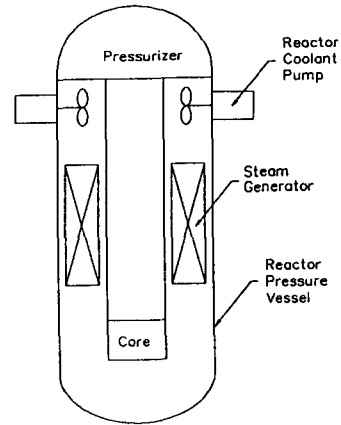
원자로 명	원자로 형태	출 력	개 발 국	용 도	비 고
PIUS	분리형	640 MWe	Sweden	발전로	개발 중
MS-300/600	분리형	300/600 MWe	Japan	발전로	개발 중
JPSR	분리형	600 MWe	Japan	발전로	개발 중
AP600	분리형	600 MWe	USA	발전로	개발 중
VVER500/600	분리형	600 MWe	Russia	발전로	개발 중
SIR	일체형	320 MWe	UK	발전로	개발 중
VPBER-600	일체형	600 MWe	Russia	발전로	개발 중
SPWR	일체형	600 MWe	Japan	발전로	개발 중
UNITHERM	일체형	1.5~6.5 MWe	Russia	소형발전로	개발 중
CAREM	일체형	27 MWe	Argentina	소형발전로	개발 중
ABV-6	일체형	6 MWe	Russia	열병합발전	개발 중
ATS-150	일체형	180 MWe	Russia	열병합발전	개발 중
MRX	일체형	100~300 MWth	Japan	선박로	개발 중
NHR-200	일체형	200 MWth	China	난방로	개발 중
AST-500	일체형	500 MWth	Russia	난방로	건설완료

인구밀집지역과 가까운 곳에 위치해야하는 지역난방로 및 적은 공간의 활용을 요하는 선박용 원자로등에 다각적으로 개발이 추진되고 있다[22, 23]. 따라서 본 기술 보고서에서는 일체형원자로를 전통적인 분리형원자로와 비교, 분석함으로써 그 설계 특성을 파악함과 동시에 일체형원자로에 대한 기본적인 평가를 할 수 있는 하나의 자료로 제시하고자 한다.

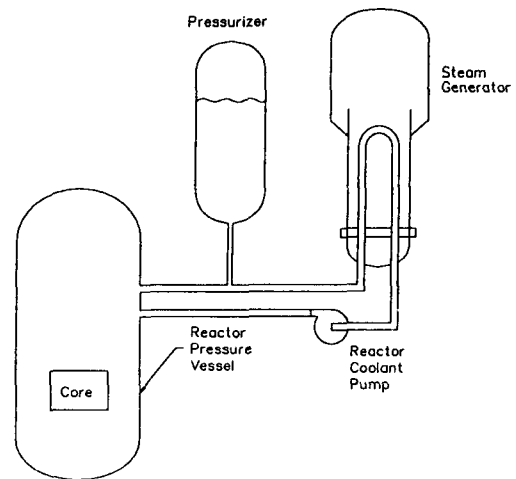
## 2. 일체형원자로 계통 구성

분리형원자로는 원자로용기, 증기발생기, 가압기, 그리고 주냉각재펌프가 별개의 압력용기에 위치하며 그 사이를 고온관(hot leg), 저온관(cold leg), 그리고 밀림관(surge line) 등으로 연결시킨 형태로 구성되어 있으며 각 증기발생기에 대해 독립된 순환회로를 갖는다. 이러한 분리형원자로와 일체형원자로의 계통을 개념적으로 비교한 것이 그림 1인데, 일체형에서는 증기발생기가 노심 상단의 노심지지통(core support barrel)과 원자로 용기 사이의 환형 공간(annular space)에 위치하고 있으며, 가압기는 원자로 본체와 증기발생기사이의 주냉각재회로에 밀림관으로 접속되어 있는 분리형과는 달리 원자로용기 상단의 돔부위에 위치하고 있고, 주냉각재펌프는 주로 원자로용기의 원주 방향으로 몇개가 부착되어 있다. 따라서 일차냉각수가 원자로 외부로 순환되지 않으므로 주냉각재 배관이 없고, 원자로 용기에 연결된 가장 큰 배관이 주증기 배관과 주급수 배관이다.

주냉각재가 순환되는 회로를 보면 분리형에서는 원자로에서 나온 주냉각재가 고온관을 지나서 증기발생기로 들어가게 되며, 증기발생기에서 나온 주냉각재는 주냉각재펌프에 의해 저온관으로 토출되어 다시 원자로로 들어오게 됨으로서 긴 순환회로를 형성하고 있다. 반면에 일체형에서는 노심에서 가열된 주냉각재가 노심지지통을 따라서 상승한 후에 원자로의 반경 방향으로 퍼지게 된다. 일반적으로 이 위치에서 주냉각재펌프에 의해 주냉각수는 증기발생기의 상단으로 들어가게 되어 튜브를 따라서 하강하게 된다. 증기발생기 하단부에서 나온 주냉각재는 다시 노심의 하단으로 들어가게 되어 전체 순환회로를 형성한다. 따라서 분리형에서 처럼 순환회로의 수에 대한 개념이 없거나 명확하지 않으며 주냉각재의 순환회로가 매우 짧게 형성되어 있다. 그리고 원자로의 특성에 따라서는 주냉각재펌프를 증기발생기 하단에 설치하여 증기발생기에서 나온 주냉각재가 주냉각재



(a) Integral type reactor



(b) Loop type reactor

그림 1. 일체형원자로와 분리형원자로 계통구성 비교

펌프를 통과하여 노심의 하단으로 유입되는 형태도 있는데 러시아의 VPBER같은 경우가 대표적이다. 그리고 일체형원자로에서는 주냉각재 배관이 없고 증기발생기, 가압기, 그리고 주냉각재펌프가 원자로에 내장되어 있거나 부착되어 있으므로 엄밀한 의미에서는 모두 노내 구조물로 분류되어야 하며 원자로가 분리형에서와는 달리 하나의 원자로집합체(reactor assembly)로 정의되는 것이 타당하다.

### 3. 계통 및 기기의 설계 특성

#### 3.1. 원자로 용기

분리형에서는 일차계통배관, 증기발생기, 가압기 원자로냉각재펌프, 등으로 인해 일차측 압력경계가 원자로 밖에 존재하지만 일체형원자로에서는 모든 주기가 단일 원자로압력용기내에 위치하고 있기 때문에 원자로 용기 밖의 일차압력경계가 없다. 따라서 대형냉각재상실사고가 설계기준사고로 부터 근본적으로 제거되고 이로 인하여 안전주입탱크 및 저압안전주입계통등의 대형 냉각재상실사고에 대비한 비상노심냉각계통이 필요치 않다. 이러한 일체형원자로의 설계특성으로 인하여 일체형원자로에서는 같은 용량의 분리형원자로에 비해 플랜트 전체의 크기는 작지만 주기가 원자로용기에 내장되므로 대형 원자로용기가 필요하다. 일체형원자로에서는 원자로용기를 제작함에 있어서 경제적인 면과 기술적인 면에서의 한계가 전체 원자로의 용량을 제약하는 원인이 되었다. 원자로용기가 커지면 제작상에서는 단조 혹은 주조를 할 때 균일한 화학적 성분의 분포와 재료적 성질의 균일성을 확보하는데 어려움이 있다. 그리고 제작된 압력용기를 운반하는 방법이 원자로용기의 크기를 제약하는 한가지 요인이 되는데 예를 들면 선박을 이용하는 것이 다른 수송수단에 비해 큰 원자로를 운반할 수 있으므로 제작장소 및 입지선정시에 이를 고려해야 한다. SIR는 발전용량이 320 MWe으로 설계되었는데 그 주된 이유가 원자로용기의 크기 때문이며 크기는 제작 및 운송능력이 입증된 ABB-CE의 System80 증기발생기의 크기와 거의 일치한다.

상용 발전로의 경우 원자로의 용량이 발전단가에 미치는 영향은 다른 어떤 경제 요인들을 능가 하므로 원자로압력용기의 제작성 및 운반가능성으로 인한 일체형원자로의 한정된 용량은 경제성 측면에서 일체형원자로의 큰 단점이 된다. 최근 일본 원자력연구소에서 개발중인 SPWR에서는 일체형원자로의 용량 증대를 목적으로 관류식 나선형 증기발생기를 사용하고 제어봉을 없앤 설계를 채택하여 용량을 600 MWe 까지 격상시켰다.

그림 2에서는 분리형이며 600MWe급인 AP600과 일체형이면서 320MWe급인 SIR와 600MWe급인 VPBER, SPWR의 원자로용기의 크기를 실제의 비율로서 비교하였는데 일체형원자로가 분리형원자로에 비해 매

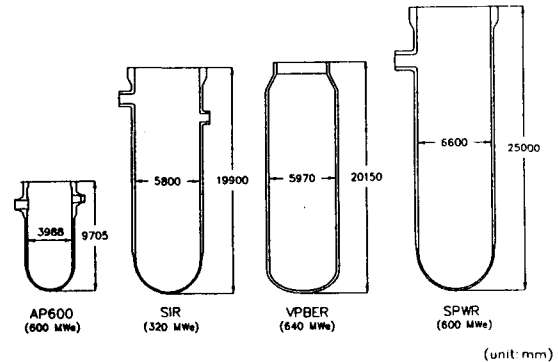


그림 2. 원자로의 크기 비교

우 큰 것을 알 수 있다. 발전용량이 AP600의 절반정도인 SIR의 원자로 높이는 AP600 원자로 높이의 약 2배에 달하며, AP600과 용량이 유사한 SPWR 원자로의 높이는 AP600 원자로 높이의 약 2.5배에 달하며, 원자로의 무게비도 이와 유사한 경향을 보인다.

#### 3.2. 증기 발생기

일체형원자로에서는 튜브가 직관으로 구성된 관류식 직관형 증기발생기와 튜브가 나선상으로 감긴 형태의 관류식 나선형 증기발생기가 주로 사용된다. SIR에서는 관류식 직관형 증기발생기가 사용되었고, SPWR에서는 관류식 나선형 증기발생기가 사용되었다. 예외적으로, 분리형원자로인 PIUS에서 관류식 직관형 증기발생기로 설계되었으며, 일체형인 NHR에서는 U 튜브를 사용한 설계가 채택되었다. 그리고 발전이 아닌 지역난방의 목적을 위한 일체형원자로에서는 직관 혹은 판형(plate type)의 관류 열교환기(once-through heat exchanger)를 사용한 설계를 많이 채택하고 있다. U 튜브형 증기발생기와 관류식 직관형 및 나선형 증기발생기의 설계특성이 그림 3에서 도식적으로 설명되어 있으며, 설계상의 특징이 표 2에서 비교되었다.

관류식 증기발생기는 과열증기를 생산할 수 있어 발전소 효율을 증가시킬 수 있으나 증기부위에서의 열전달 특성이 나빠 열전달 면적이 커지며 전체적으로 전열면적이 U 튜브에 비해 크다[24]. 표 3에서는 여러 형태의 증기발생기를 사용하는 원자로에 대해 증기발생기의 전열면적을 비교하였는데, 단위발전량당 필요한 전열면

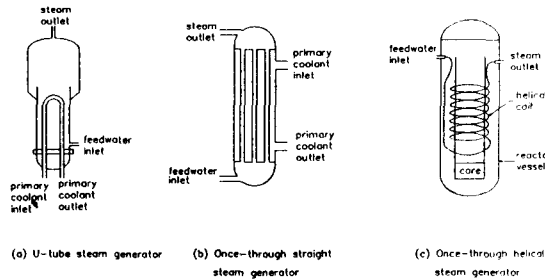


그림 3. 분리형과 일체형원자로에 사용되는 증기발생기 개념도

적을 비교하면 U 튜브를 사용하고 있는 AP600의 증기 발생기가 가장 작은 전열면적으로 설계되었다. 관류식 직관형 증기발생기에서 튜브의 길이가 너무 길어져서 공간적인 제약이 문제가 되는 경우에는 전체 높이를 줄일 수 있도록 튜브를 나선형태로 감은 관류식 나선형 증기발생기를 채택해야 된다[14].

관류식 증기 발생기는 축방향 열팽창을 대비한 설계가 필요하며, 관류식 나선형 증기발생기는 튜브와 지지구조물의 열팽창 차이와 유체기인진동에 대비한 설계를 필요로 한다. 그리고 튜브안에서 급수가 모두 증기화하므로 이차측 급수에 대해 정교한 화학적 제어가 필요하다

표 2. 증기발생기 설계특성의 상대적인 비교

증기발생기	U 튜브식 (U-TUBE)	관류식 직관형 ONCE-THROUGH : STRAIGHT	관류식 나선형 ONCE-THROUGH : HELICAL
비교 항목			
시스템 구성	분리형에 주로 사용 습분분리기 증기건조기	일체형에 주로 사용	나선 코일이 CSB를 감는 형태로 노심상단에 위치하며 주로 일체형에 사용
증기	건조포화증기	과열증기	과열증기
부하변화 대응	증기압의 변화 큼	과열도변화로 일부 하부 변화 대응	과열도 변화로 일부 부하변화 대응
동일출력시의 전열면적	상대적으로 작음	상대적으로 큼	상대적으로 큼
부식	불리 튜브에 일, 이차측의 압력차에 의한 인장응력	유리 이차측이 튜브안에 위치하므로 튜브에 압축응력이 작용	유리 이차측이 튜브안에 위치하므로 튜브에 압축응력이 작용
튜브의 열팽창에 의한 구조적 건전성	튜브 축방향 열팽창이 비교적 자유로움	튜브의 축방향 열팽창이 어려움	튜브와 지지구조물과의 열팽창 차이
보수 및 검사	보수 및 검사가 상대적으로 쉬움. U-튜브의 교체와 청소가 곤란.	일체형에서 모듈형태로 보수하는 경우가 많음.	교체가 어려우므로 구조적인 면에서 매우 보수적으로 설계.
급수성분 및 제어	습분분리기와 증기 건조기가 있으므로 급수의 순수성 요구가 엄격하지 않음.	세관에서 증기화하므로 급수의 순도가 높아야 됨. 급수량의 변화에 따라 발생증기량의 변화가 크므로 정교한 급수제어 필요.	세관에서 증기화 하므로 급수의 순도가 높아야 됨. 급수량의 변화에 따라 발생증기량의 변화가 크므로 정교한 급수제어 필요.
유체기인진동	주냉각재가 튜브안에 존재하므로 상대적으로 문제 적음.	질량이 많은 주 냉각재가 튜브외부에 유입될 때 유체기인 진동 문제점.	코일 전체가 RV안에서 주냉각재에 거의 수평으로 잠겨 있으므로 횡류에 의한 유체기인 진동 문제점 큼.

표 3. 증기발생기의 전열면적 비교

원자로	AP 600	SIR	SPWR
용량 (MEe)	600	320	600
증기발생기 종류	U 튜브	관류식 직관형	관류식 나선형
전열면적(m <sup>2</sup> )	13790	11140	17000
전열면적 / 용량 (m <sup>2</sup> /MWe)	23	35	28

다. 관류식 증기발생기에서는 주로 일차측 냉각재가 튜브의 밖을 흐르도록 설계를 한다. 일반적으로 일차측의 압력이 이차측의 압력보다 높기 때문에 튜브에는 자연히 압축응력이 작용하게 되어서 응력부식(stress corrosion)으로 인한 균열의 생성과 전파를 억제하는 효과가 있으므로 유리하다. SIR에서와 같이 모듈로 구성된 증기발생기는 교체 측면에서 문제점이 없지만 SPWR과 같이 나선형 증기발생기를 사용하는 경우에는 교체가 어려우므로 튜브의 파손이 생기지 않도록 튼튼하게 설계해야 하는 어려움이 있다. 튜브의 재질은 인코넬 600, 690, 그리고 인콜로이800, 티타늄이 주로 사용되는데 일본의 SPWR에서는 나선코일형태의 증기발생기가 모두 인콜로이800으로 설계되었으며, 러시아에서는 내식성이 큰 티타늄이 많이 사용되고 있다.

### 3.3. 가압기

일체형원자로에서는 분리형원자로와 같이 가압기 가별도의 압력용기에 설치되지 않고 원자로 압력용기 상단에 내장되는 경우가 대부분이다. SIR의 경우에는 기존 상용 원자로와 같이 전열기와 살수계통에 의해 압력을 조절하는데, 특이사항으로서는 가압기와 원자로 용기가 유체 다이오드(fluidic diode)로 연결되어 있으며 살수배관이 고온관에 부착되어 계통 압력에 의해 피동적으로 작동한다는 것이다. 그러나 SIR을 제외한 대부분의 일체형원자로에서는 자기가압방식(self-pressurizing method)을 많이 사용하는데 원자로 압력용기 상단에 증기돔(steam dome)부가 설치되어 냉각재 온도 변화에 의한 포화증기압의 변화로서 압력을 조절한다. 일체형원자로에서 자기가압 방식을 사용할 수 있는 이유는 일차계통의 냉각수 용량이 대단히 많아 발전소 이상상태시 계통변화가 느리고 가압기 용량이 매우 크기 때문이다. 표 4와 표 5에서는 대표적인 분리형 및 일체형원자로에 대해 가압기의 크기 및 일차냉각수의 체적

을 비교하였는데 일체형원자로인 SPWR의 가압기 크기 및 일차냉각수 체적이 유사한 용량인 AP600에 비해 각각 약 4배가 됨을 알 수 있다. 이러한 설계특성으로 인하여 자기가압방식을 채택한 일체형원자로에서는 플랜트 이상상태시 가압기 조절계통의 작동없이 압력 및 수위 조절이 가능하고 전열기나 살수계통이 없기 때문에 가압기 유지 및 보수가 거의 필요없다.

### 3.4. 원자로 냉각재 펌프

일체형원자로에서는 노심에서 가열되어 뜨거워진 주냉각재는 상승하여 원자로 상부에서 증기발생기 상단으로 유입된 후 증기발생기의 튜브를 따라 내려와 다시 노심의 아래쪽 부분으로 유입되는 형태의 순환회로를 갖는데 그림 4에서 도식적으로 설명하고 있다. 주냉각수의 자연순환능력은 일체형원자로가 갖는 고유의 특성이 라고 할 수 있는데, 일체형원자로는 주냉각재 순환회로의 구성이 단순하고 짧으며, 유체 저항이 작으므로 큰 자연순환력을 갖을 수 있기 때문이다. 따라서 일체형원자로에서는 원자로 냉각재 펌프 및 관련기기를 완전히 제거하거나 작은 용량의 원자로 냉각재 펌프를 사용할 수 있다. 지역난방이나 열병합발전용 등의 소용량 원자로인 경우에는 자연순환력만으로도 정격유량을 유지할 수 있어 원자로 냉각재 펌프를 사용하지 않는 경우가 많다. 분리형원자로인 AP600은 약 3000마력의 구동력을 갖는 네대의 캔드모터펌프(canned motor pump)로써 주냉각재가 순환되고 있으나 일체형인 SPWR에서는 약 4900마력의 구동력을 갖는 한대의 캔드모터펌프로써 주냉각재가 순환된다. 주냉각재 펌프의 위치는 원자로의 설계특징에 따라서 제어봉구동장치가 없는 SPWR에서는 원자로 상단에 위치하고 있으며, SIR은 약 950마력인 6대의 소형 주냉각재펌프가 원자로 용기에 원주방향으로 부착되어 있으며, VPBER에서는 원자로 하단에 설치되어 있다. 일체형원자로에서는 작은 용량의

표 4. 가압기의 크기 비교

항 목	SIR	SPWR	AP600	YGN 3/4
노형 (출력 MWe)	일체형(320)	일체형(600)	분리형(600)	분리형(1000)
가압기 위치	원자로 상단	원자로 상단	별개의 용기	별개의 용기
가압기 지름×높이(m)	5.8×4.3	—	2.3×9.5*	2.7×9.6*
가압기 체적(m³)	80	160	36.8	49.5
단위 출력당 가압기 체적(m³/MWe)	0.250	0.270	0.061	0.050

\* : 원통부의 높이임

표 5. 일차냉각수 체적 비교

원자로	SIR	SPWR	AP 600	YGN 3/4
전체냉각수 체적(m³)	402.0	720.0	206.2	335.0
단위발전량당 체적(m³/MWe)	1.256	1.200	0.344	0.349

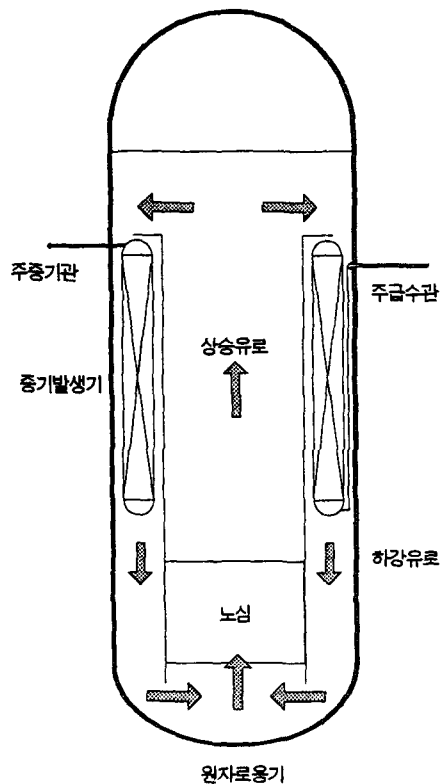


그림 4. 일체형원자로의 자연순환

주냉각재펌프를 사용함으로써 소음이 감소되고, 원자로를 가동시키는데 필요한 전력이 감소하는 장점이 있으나 펌프의 용량이 작음으로 인하여 발전소의 가동시 냉각재 예열에 다른 조치가 필요하다.

### 3.5. 잔열제거

일체형원자로에서는 일체형원자로의 설계 특성상 모듈화된 여러대의 직관형 증기발생기를 사용하고 뛰어난 일차냉각수 자연순환 능력을 가지고 있으므로 분리형원자로에서와 같이 별도의 잔열제거용 열교환기를 설치하지 않고 일부 증기발생기 모듈을 잔열제거 목적으로 사용할 수 있다. 따라서 분리형원자로의 경우 일차계통 배관에 잔열제거계통이 연결되나 일체형원자로의 경우에는 이차계통의 배관에 잔열제거계통이 연결된다. 일례로 320MWe급인 SIR에서는 12개의 증기발생기 모듈을 사용하고 있는데 이 중에서 4개의 모듈은 잔열제거 목적으로도 사용된다. 이러한 설계특성은 최근 안전성 논점중의 하나인 연계 계통의 냉각수상실사고(Interfacing System LOCA)를 근본적으로 방지가능케 한다. 또한 일체형원자로에서는 이차계통을 이용하여 잔열제거 루프가 형성되고 일차냉각수의 자연순환 능력이 뛰어나므로 피동잔열제거계통의 점유이 분리형에 비해 손쉽다는 장점도 있다.

### 3.6. 비상노심냉각

일체형원자로에서는 원자로 압력용기 내에 모든 주기가 내장되므로 대구경 배관이 없고 이에 따라 대형 냉각재 상실사고는 근본적으로 발생하지 않는다. 따라서 분리형원자로에서 대형 냉각재 상실사고의 완화를 위해 설치되는 안전주입탱크 및 저압안전주입계통이 필요치 않고 소형 냉각수 상실사고의 완화를 위한 고압안전주입계통만이 필요하다.

## 4. 안전성 및 일반 특성

### 4.1. 안전성

일체형원자로의 가장 큰 장점은 안전성 측면에서 일체형이 갖는 고유 설계특성으로 인하여 분리형에 비해 대단히 유리하다는 것이다. 일체형원자로가 분리형원자로에 비해 안전성측면에서 유리한 점은 다음과 같다.

#### 매우 많은 일차냉각수 용량

일체형원자로는 분리형에 비해 상대적으로 일차냉각수량이 대단히 많다. 표 5에서 일체형원자로인 SIR와 SPWR의 주냉각수량을 비교하였듯이 일체형의 경우에는 단위 발전용량당 일차냉각수량의 비율이 기존 상용원자로의 약 4배 이다. 이로 인하여 일체형원자로는 원자로 이상상태시 변화가 매우 느려 발전소 제어가 용이할 뿐만 아니라 비상상태시 운전원 조치 여유시간(grace period)이 길다.

#### 계통의 단순성

일체형원자로는 일차계통 및 안전계통이 단순하여 인간공학적 측면에서 분리형에 비해 유리하여 운전원이 실수할 확률이 적다.

#### 매우 큰 가압기 물용량

표 4에서 보여 주었듯이 일체형원자로는 분리형원자로에 비해 상대적으로 큰 가압기 물용량으로 인하여 원자로 이상상태시 가압기 압력 및 수위를 제어하기 위한 화학 및 체적제어계통을 비롯한 보조계통의 능동기기 작동횟수가 최소화되며, 궁극적으로는 가압기 안전밸브의 작동 횟수를 최소화한다.

### 뛰어난 일차냉각수의 자연순환 능력

그림 4에 도식적으로 나타나 있듯이 일체형원자로는 주냉각재가 노심에서 가열되어 상부의 증기발생기로 유입된후 증기발생기 튜브를 따라 내려온 후에 다시 노심의 아래쪽 부분으로 유입되는 순환회로를 갖는다. 자연순환은 일체형원자로가 갖는 고유의 특성이라고 할 수 있는데, 일체형원자로의 주냉각재 순환회로의 구성이 단순하고 짧은 유체저항이 작으므로 큰 자연순환력을 갖을 수 있기 때문이다. 이러한 설계특성은 소외전원 상실사고와 같이 강제순환이 불가능한 사고 발생시에 노심냉각을 할 수 있으며 피동잔열제거계통을 용이하게 접목시킬 수 있게 한다.

### 노심과 원자로압력용기 사이의 매우 많은 물용량

일체형원자로에서는 증기발생기가 환형 공간에 위치하는 관제로 노심과 원자로 압력용기 사이에 많은 물용량을 확보하고 있다. 이러한 설계특성은 원자로 압력용기에 조사되는 방사능량을 적게 하여 방사능 조사로 인한 원자로 압력용기 금속성질의 저하 문제가 최소화된다. 이 특성은 파괴역학적인 측면에서 원자로 수명을 증가시키며, 압력/온도 제한 곡선상의 발전소 운전범위를 넓혀준다.

### 대형냉각재 상실사고 제거

일체형원자로에서는 큰 배관이 없기 때문에 대형냉각재 상실사고가 근본적으로 존재하지 않는다. 이러한 설계특성은 비상노심냉각계통의 설계를 단순화 할 뿐만 아니라 대형냉각재 상실사고를 완화하기 위해 비상노심냉각수가 주입될시 열충격으로 인한 원자로압력용기의 파손 위험을 제거해 준다.

### 4.2. 운전, 유지, 검사 및 보수 용이성

운전의 용이성은 계통의 단순화 정도에 따라 결정된다. 즉 정상 및 비상운전시 계통 상태 감시용의 열수력 변수 숫자가 줄어들고 기기의 상태 (밸브의 개폐 정도 및 여부, 펌프의 작동 여부 등)을 감시할 필요성이 계통이 단순할수록 적어진다. 이러한 측면에서 일차계통 및 안전계통이 단순한 일체형원자로가 분리형원자로에 비해 유리하다. 유지 및 보수의 용이성도 마찬가지로 계통의 단순화 정도에 따라 좌우된다. 즉 계통이 단순할수록 유지 및 보수를 해야할 기기의 숫자가 줄어드는 측면에



서도 일체형이 분리형에 비해 유리하다. 다만, 일체형원자로에서는 관류식 나선형 증기발생기 사용하는 경우에는 이 증기발생기의 특성상 유지, 검사 및 보수가 매우 어렵다. 따라서 나선형 증기발생기 설계시 근본적으로 증기발생기의 유지, 검사 및 보수가 최소화되도록 설계를 수행해야 하며, 또한 일체형에서는 모든 주기가 압력용기내에 위치하므로 분리형에 비해 상대적으로 노심에 가까운 지역에서 유지, 검사 및 보수를 해야 하는 어려움이 있으므로 일차계통을 설계할 때 이를 세심히 고려해야 된다.

#### 4.3. 경제성

상용 발전소에서 발전단가를 결정하는 요인은 크게 건설비, 핵연료비, 이자(특히 건설중에 발생하는 이자) 등의 3가지로 분류된다. 이중 건설비와 이자로 인한 경비가 차지하는 비중이 매우 크기 때문에 용량이 커질수록 발전단가는 감소 하게 된다. 이러한 측면에서 일체형원자로는 원자로 압력용기의 제작성 및 운송능력등의 제약조건으로 인하여 용량 증대에 제한을 받음으로 경제성 측면에서는 불리하다. 그러나 일체형원자로는 압력용기의 숫자가 적을뿐만 아니라 일차계통 및 안전계통의 단순화로 인하여 기기비가 적다는 장점이있다. 또한 일체형원자로는 원자로 압력용기, 원자로내부구조물, 증기발생기, 가압기, 원자로 냉각재 펌프등의 주기기들을 모듈화 하여 건설 현장에서 단순 조립할 수 있어 건설공기를 매우 단축 시킬 수 있다. 건설공기의 단축은 이자 비용을 감소 시키므로 일체형원자로의 경제성을 향상 시킬것이다. 중소형 원자로를 건설할 경우 참고로 SIR는 약 320MWe 두개로 640MWe의 발전소를 건설하는데 1989년 기준으로 약 10억불정도가 소요된다고 하였으며[3], AP600의 경우는 1993년 기준으로 한 지역 내에 2기를 건설하는 경우에 대해 약 19억불 가까이 소요될 것으로 예상되고 있다. 일체형과 분리형의 경제성은 긍정적인 측면과 부정적인 측면이 양립하므로 한마디로 비교 평가하기는 어려우나 600 MWe급 이하에서 소형으로 될 수록 일체형원자로가 경제적인 측면에서 분리형에 비해 유리하다고 예측된다.

### 5. 결 론

일체형원자로는 일차냉각재의 높은 자연 순환력, 대

구경 배관 제거에 따른 대형냉각재 상실사고의 근본적인 방지, 대단히 많은 일차냉각재 용량, 매우 큰 가압기 용량 및 매우 긴 운전원 조치시간등의 설계특성을 보유하고 있어 분리형원자로에 비해 안전성이 탁월하다. 또한 일차계통 및 안전계통의 단순성으로 인하여 운전, 유지, 검사 및 보수 측면에서도 일체형원자로가 분리형원자로에 비해 유리하다. 이러한 일체형원자로의 설계특성은 사회적 수용성이 강조되는 상용 발전로로서 적합한 노형이 될 수 있을 것으로 판단된다.

일체형원자로는 모든 주기가 단일 압력용기 내에 설치되므로 대형 원자로 용기가 요구되며, 원자로 압력용기의 제작성 및 운송 능력이 원자로의 용량을 제한하는 주된 요인이 된다. 일체형원자로에 관류식 나선형 증기발생기를 사용하면 현재의 원자로 압력용기 제작 능력 및 수송 능력 범주 내에서 최대 600 MWe급 까지 설계 /제작이 가능 하리라 평가된다.

경제성 측면에서는 600 MWe급 이하인 경우에는 적은 기기 비용 및 주기기의 모듈화에 따른 짧은 건설공기 등으로 인하여 일체형원자로가 분리형원자로에 비해 유리하다고 평가된다. 대용량 원자로로서 일체형원자로와 분리형원자로의 경제성은 두 노형이 지니고 있는 양면성 때문에 단순평가는 불가능 하며, 사회적 수용성 측면이 강조되는 신형원자로에서는, 일반 대중의 수용성과 관련된 인허가의 불확실성이 경제성에 영향을 미치는 변수임을 감안할 때, 소형으로 갈수록 일체형원자로가 다소 유리하리라 분석되었다.

#### 참고문헌

1. AP600 설계특성 분석, KAERI /TR-416 /94, 1994.
2. R. Bradbury, J. Longo, R. Strong, M. Hayns, "1The Design Goals and Significant Features of the Safe Integral Reactor," *ANS '89 Annual Meeting*, Atlanta, Georgia, June 4~8, 1989.
3. *Simplified Passive Advanced Light Water Reactor Plant Program: Safe Integral Reactor Technology Assessment*, Report to the Committee on Future U.S. Nuclear Power Development, Combustion Engineering
4. *PIUS*, Preliminary Safety Information Document, ABB Atom, 1989.

5. A.Y. Gagarinski, V.V. Ignatiev, V.M. Novikov, S.A. Subbotin, *Advanced LWRs : Analysis of New Approaches and Ideas*, Nuclear Society International, Moscow, pp. 82~104.
6. *Small and Medium Reactors*, OECD Nuclear Energy Agency, 1991.
7. K. Sako, T. Oikawa, and J. Oda, "SPWR (System-integrated PWR)," *IAEA Technical Committee Meeting on Integral Reactor Design Concept*, Obninsk, Russia, May 16-20, 1994.
8. K. Sako, T. Oikawa, H. Iida, J. Oda, M. Togasaki, K. Kato, Y. Kawauchi, "Concept of Highly Passive Safe Reactors SPWR : 1. Reactor System Design," *Proceedings of the International Specialists' Meeting on Potential of Small Nuclear Reactors for Future Clean and Safe Energy Sources*, SR/TIT, Tokyo, Japan, 23-25 October, pp. 167~175, 1991.
9. F. Araya, K. Sako, Y. Kim and K. Kaneko, "Concept of Highly Passive Safe Reactor SPWR : 2. Dynamic Analysis," *Proceedings of the International specialists' Meeting on Potential of Small Nuclear Reactors for Future Clean and Safe Energy Sources*, SR/TIT, Tokyo, Japan, 23-25 October, pp. 177~186, 1991.
10. F.M. Mitenkov, O.B. Samoylov, Y.K. Panov, Y.P. Fadeyev, B.A. Averbakh, Y.A. Sergeyev, O.A. Morozov, "ABV-6 Small Power Reactor Plant," *IAEA Technical Committee Meeting on Integral Reactor Design Concept*, Obninsk, Russia, May 16-20, 1994.
11. Experimental Machine Building Design Bureau, "ATS-150 Nuclear Co-generation Plant," *IAEA Technical Committee Meeting on Integral Reactor Design Concept*, Obninsk, Russia, May 16-20, 1994.
12. L.V. Gurejeva, V.V. Egorov, V.A. Malamud, O.B. Samoilov, "AST-500 Reactor Plant with Low-Potential Integral Reactor, Development and Creation Experience," *IAEA Technical Committee Meeting on Integral Reactor Design Concept*, Obninsk, Russia, May 16-20, 1994.
13. F.M. Mitenkov, N.N. Ponomarev-Stepnoy, M. Antonovskiy, V.S. Kuul, N.E. Kukharkin, Y.G. Nikiporets, Y.K. panov, O.B. Samoylov, L.N. Flerov, "VPBER-600 Passive Safety Reactor Plant for Medium PPS of New Generation," *IAEA Technical Committee Meeting on Integral Reactor Design Concept*, Obninsk, Russia, May 16-20, 1994.
14. L.A. Adamovich, G.I. Grechko, V.V. Rumyantsev, V. K. Ulasevich, V.A. Shishkin, "Autonomous Nuclear Power Plant with Integrated Nuclear Steam Supply System Designed for Power and Heat of Remote Difficult-to-get Areas," *IAEA Technical Committee Meeting on Integral Reactor Design Concept*, Obninsk, Russia, May 16-20, 1994.
15. K. Sako, etc., "Advanced Marine Reactor M-RX," *International Conference on Design and Safety of Advanced Nuclear Power Plants Proceedings*, October 25-25, Tokyo, Japan, Vol. I, pp. 6.5-1~6.5-7, 1992.
16. H. Iida, etc., "Design Study of Deep-Sea Reactor DRX," *International Conference on Design and Safety of Advanced Nuclear Power Plants Proceedings*, October 25-25, Tokyo, Japan, Vol. I, pp. 6.6-1~6.6-7, 1992.
17. Z. Dafang, D. Duo, S. Qingshan, "5MW Nuclear Heating Reactor," *IAEA Technical Committee Meeting on Integral Reactor Design Concept*, Obninsk, Russia, May 16-20, 1994.
18. Xue Dazhi, Li Jicai, and Chang Dafeng, "An Integral Design of NHR-200," *IAEA Technical Committee Meeting on Integral Reactor Design Concept*, Obninsk, Russia, May 16-20, 1994.
19. J.P. Ordonez, "CAREM : Operational Aspects, Major Components, Maintainability," *IAEA Technical Committee Meeting on Integral Reactor Design Concept*, Obninsk, Russia, May 16-20, 1994.

20. J. W. Hilbon and G. F. Lynch, SLOWPOKE-Heating Reactors in the Urban Environment, AECL-9736, 1988.
21. G. Drevon, LES REACTEURS NUCLEAIRES A EAU ORDINAIRE, pp. 496~498, 1983.
22. 지역난방원자로개발, KAERI /RR-1063 /91, 1991
23. 신형안전로개발, KAERI /RR-1109 /91, 1991
24. Steam/its generation and use, Babcock & Wilcox, 1978.