

‘95 추계 학술발표회 논문집
한국원자력학회

일체형 신형원자로의 기계구조 예비개념설계

김지호*, 김용완, 김금구, 김종인, 문갑석
한국원자력연구소

요 약

일체형원자로는 노심, 증기발생기, 가압기, 펌프 등 1차측 주기기들을 하나의 압력용기 안에 모두 포함하고 있고 또 1차측 냉각재가 원자로 안에서만 순환하므로 기존의 분리형에 비해 구조특성상 상당히 다른 설계개념이 필요하다. 본 연구에서 개발중에 있는 일체형 열병합원자로에서 채택한 설계개념은, 먼저 증기발생기는 많은 수의 전열관들이 나사선처럼 노심지지원통을 감고 올라가는 일체형 관류식 나선형을 사용하였으며, CEDM은 지진하중과 같은 동적하중에 의한 영향을 최소화하기 위하여 원자로용기 외부로의 돌출부분을 최소화하는 설계개념을 채택하였다. 또한 가압기는 별도의 부품없이 원자로용기 헤드의 빈공간을 활용한 자기가압방식으로 대체하였고 냉각재 펌프는 Canned Motor Pump를 원자로벽에 직접 부착하는 개념을 사용하였다. 본 논문에서는 예비개념설계된 일체형 신형원자로의 기계구조설계상의 특징들을 설명하고 앞으로의 연구방향을 간략히 소개한다.

1. 서 론

일체형원자로는 일반적으로 하나의 원자로용기안에 노심, 증기발생기, 가압기, 펌프 등이 모두 들어가 있는 원자로를 의미하며, 기존의 상용발전소에서 볼 수 있는 주냉각재배관(Reactor Coolant Pipe) 및 밀림관(Surge Line)등 직경이 큰 배관계통이 없으므로 대형 LOCA의 위험이 없을 뿐만 아니라 이들 배관의 파단으로 인한 구조적 영향을 고려할 필요가 없고, 지진해석을 위한 동적 모델도 상대적으로 단순해진다. 또한 기존의 상용발전소에서는 배관의 열팽창으로 인한 효과를 고려해 주기 위해 증기발생기나 냉각재 펌프의 설치시, 상당한 주의를 요하며 또한 많은 설계요건들이 필요하게 되는데 일체형원자로에서는 이러한 고려가 필요 없다. 이외에도 배관내의 열성증현상이나 원자로의 가압열충격 같은 문제들도 일체형원자로에서는 발생하지 않는다. 하지만 일체형원자로는 주요부품들이 모두 하나의 원자로용기 안에 포함되기 때문에 동급의 분리형에 비하여 원자로용기의 크기가 매우 커지게 되므로 설계시 원자로용기의 제작상의 한계, 그리고 수송조건 등을 고려하여야 한다. 참고로 분리형인 1000 MWe급 울진3,4호기용 원자로용기의 헤드를 제외한 쉘부분의 내경이 4.2 m, 높이가 11.7 m, 그리고 무게가 약 350톤인데 비하여 일본에서 개발중에 있는 일체형 원자로인 600 MWe급 SPWR(1) 원자로용기의 내경 및 높이는 각각 6.6 m, 25.0 m 이며 무게는 1256톤으로서 울진 3,4호기 원자로의 3.5배를 상회한다.

러시아, 일본, 미국을 비롯한 대부분의 원자력 선진국에서는 발전용 뿐만아니라 해수담수화용, 지역난방용, 선박의 동력용 등 다양한 목적으로 이용될 수 있으면서 고도의 안전성과

경제성을 가진 일체형원자로에 대한 연구를 활발히 추진하고 있는데(2), 원자로의 용량분포의 예를 살펴보면, 일본에서 상선이나 쇄빙선의 동력원으로 사용할 목적으로 개발중에 있는 100 MWt 용량의 MRX(3)와 같은 소형원자로로부터, 러시아에서 개발중에 있으며, 현재 개념설계가 완료되고 상세설계가 진행중인 1800 MWt/630 MWe 용량의 VPBER-600(4) 과같은 중형 원자로에 이르기까지 다양하다. 우리나라에서는 최근 한국원자력연구소를 중심으로 해수담수화를 위한 일체형 신형원자로의 개발을 위한 연구가 진행중에 있으며, 앞으로는 해상 바지선 위에 설치될 원자로 및 대형 고속 컨테이너선의 동력원으로 사용될 원자로(5)에 대한 연구도 필요할 것으로 사료된다. 본 논문에서는 예비개념설계된 일체형 신형원자로의 기계구조 설계상의 특징들을 설명한다.

2. 일체형 신형원자로의 기계구조설계

현재 개발중에 있는 일체형 신형원자로의 용량은 300 MWt로 잠정 결정하였으며 계통의 주요설계변수는 Table 1과 같다. 이러한 용량을 가진 일체형 신형원자로내의 주요 부품의 크기 및 상대적인 위치등의 배치설계를 수행한 결과가 Figure 1에 주어져 있는데, 1차측 설계압력은 17 MPa이며 원자로의 내경은 5.28 m, 전체 높이는 11.5 m, 상부헤드를 제외한 부분의 높이는 8.68 m 로 잠정 결정하였다. 이하에 주요 부품에 대한 설계개념을 설명한다.

2.1 원자로용기(Reactor Vessel)

원자로용기는 기존의 상용로와 같이 크게 상부헤드와 원통셀로 구성되는데 상부헤드에는 CEDM 이 설치되고 원통셀에는 같은 높이에 4개의 주냉각재펌프와 각각 두개씩의 급수 및 증기헤드가 설치되는데 사고시 노심이 노출되는 것을 방지하고 냉각재의 자연순환 능력을 높이기 위하여 가능한 한 높은 위치에 설치되도록 설계하였다. 증기발생기는 원자로용기에 부착된 4개의 지지대(Support Bracket)에 의하여 지지된다. 원자로용기 상부헤드와 하부셀의 접합면에는 두개의 Metal O-ring을 설치하여 일차적인 밀봉을 하고 접합면의 외부에는 Flexible Seal Welding을 한 후 Stud Bolt로 완전 체결하도록 하였다. 중성자조사에 의한 영향을 줄일 수 있도록 원자로용기 하부 헤드아래와 증기발생기 지지대 아래의 원통형 공간(Annulus Downcommer)에는 열차폐체(Thermal Shield)를 설치하였다.

2.2 증기발생기(Steam Generator)

증기발생기는 관류식 나선형(Once-through Helical Type)으로서 많은 수의 전열관들이 나선처럼 노심지지원통을 감고 올라가는 형상이다. 전열관은 외경이 19mm인 인코넬 690을 사용하며 강성이 큰 4개의 반경방향지지판과 다소 유연한 4개의 반경방향지지판에 의해 지지된다. 두개의 급수헤드 튜브시트에 연결된 전열관은 원자로용기와 증기발생기 외통(Outer Shroud)사이에서 두줄로 아래로 연결되는 Downcommer지역을 통과하여 증기발생기의 하단부에서부터 나선형으로 감기면서 상승하여 두개의 증기헤드 튜브시트에 연결된다. 튜브시트는 Thermal Sleeve 형태로 원자로용기에 용접되고, Downcommer와 전열관의 유효 전열지역을 구분하는 외통은 단지 주냉각재의 흐름 및 전열관사이의 간격을 유지하는 역할만 하며 구조적인 역할은 없다. Downcommer지역에서는 2개의 환형(Annular type)지지판이 전열관을 지지하며 이 지지판은 반경방향지지판에 의해 지지되고 증기발생기 하단부에서 플랜지형태의 지지구조물이 반경방향지지판을 지지하는 형태이다. 증기발생기에 대한 보다 상세한 개념설계 결과는 참고문헌 [6]에 수록되어 있다.

2.3 가압기(Pressurizer)

가압기는 자기가압방식을 채택하여 분리형 원자로와는 달리 별도의 부품이 있지 않고 원자로 내부의 상부 헤드부분에 기체공간을 두어 가압기 역할을 하도록 하였다. 따라서 원자로 내부는 정상운전시 완전히 물로 채워지는 것이 아니고 상부헤드부분이 수증기와 질소가스로 채워진다. 상부노심지지원통의 Flange에는 냉각재 펌프의 배압에 의하여 가압기에 냉각재가 살수될 수 있도록 살수관이 설치되어 있다. 이 살수관은 원자로 Start-up시나 동하중에서 펌프의 흡입구에 갇혀질 수 있는 가압기의 기체(수증기+질소가스)를 추출하는 역할도 수행한다.

2.4 CEDM(Control Element Drive Mechanism)

CEDM은 지진하중과 같은 동적하중에 의한 영향을 최소화 하기 위하여 가능한 한 원자로 용기 외부로의 돌출부분을 최소화하는 설계개념을 채택하였다. CEDM의 구동기구는 부피가 적은 볼너트-나사형을 채택하였으며 원자로 내부의 가압기 자유수면 이하에 설치하도록 설계하여 일차냉각수에 의한 윤활이 가능하도록 하였다.

2.5 냉각재 펌프(Reactor Coolant Pump)

냉각재 펌프는 Canned Motor Pump를 사용한 축류펌프를 사용하며 회전축에 Depleted Uranium이나 납을 Can에 채운 형태의 Fly Wheel을 두어 회전관성이 큰 것을 사용하는 방법을 고려하고 있다. 냉각재 펌프는 증기헤드와 같은 높이에 같은 간격으로 4대를 설치하였는데 Flange를 이용하여 원자로용기에 Bolt로 고정되도록 하였다. 일체형 원자로는 1차측 냉각재의 자연순환능력이 뛰어나므로 작은 용량의 펌프를 사용할 수 있는 장점을 가지고 있다.

2.6 원자로 내부구조물(Reactor Internals)

원자로 내부구조물은 핵연료집합체를 지지, 보호하고 적절한 냉각재 흐름경로를 제공하며, 중성자 제어봉집합체 및 계측장비를 보호하고 안내하는 기능을 수행해야 한다. 원자로 내부구조물의 대부분의 기능은 기존의 분리형원자로와 유사하지만 1차측 냉각재가 원자로내에서만 순환되는 것을 고려하여야 하고 또 증기발생기와 가압기의 설치공간을 확보하여야 하므로 설계개념은 많이 다르다.

예비개념설계된 핵연료집합체는 Figure 2와 같이 육각형단면을 가진다. 노심은 55개의 핵연료집합체로 구성되어 있으며(7), 하부노심지지구조물과 상부노심지지구조물에 의해 지지된다.

하부노심지지구조물(Lower Core Support Structure Assembly)은 300계열의 스텐리스강으로 제작되며 노심보호체(Core Shroud), 노심지지원통(Core Support Barrel), 하부노심지지판(Lower Core Support Structure) 등으로 구성되어 있다. 상부노심지지구조물(Upper Core Support Structure Assembly)는 상부노심지지원통(Upper Core Support Barrel), 중간지지판(Intermediate Support Structure), 제어봉보호관(CEA Shroud), 연장봉안내관(ESA Guide Tube), 상부 열차폐체(Upper Thermal Shield), 가압기 살수관(PZR Spray Tube), Flow Channel Skirt 등으로 구성되어 있다. 상부노심지지원통(Upper Core Support Barrel)은 서로 용접된 상부지지판, 원통부 및 Flange부로 구성되어 있다. 모든 상부 내부구조물은 상부지지판에 매달려 있는 형태로 설계되어 있으며 원통부와 Flange를 통하여 원자로용기에 하중이 전달된다. 상부지지판에는 가압기와 냉각재 사이의 압력변화에 의한 유통경로를 두어야 하고, 하단에는

동하중을 받을 때 가압기내의 기체가 펌프의 흡입구로 유입되지 않도록 원통형의 Flow Channel Skirt를 용접하여 설치한다. 이 Skirt는 노심지지원통의 내면과 함께 CEA Shroud를 통과한 냉각재를 펌프의 흡입구로 안내하는 Flow Channel을 형성한다.

연장봉안내관은 상부지지판에 나사로 체결되어 중간지지판과의 간격을 유지하며, CEA Scram Spring을 Housing하고, 내경에는 세계의 Groove를 형성하여 연장봉에 고정된 원판의 안내경로를 제공한다. 하부에는 CEA Shroud의 상단부에 접시형 스프링을 두어 Scram시 완충 역할을 하고, 상부에는 Scram Spring Locking Disc를 Housing하여 스프링에 선하중을 가한다. 이들 안내관은 상부지지판과 중간지지판 사이에 기계적 하중을 전달한다. 노내감시체나 HJTC를 사용할 경우는 노심보호체의 위치에 해당하는 공간에 이들 감시체의 보호관을 설치한다. 이 보호관들은 원자로 설치시, 운전중, 그리고 재장전시에 감시체를 위한 보호경로를 제공한다.

열차폐체는 원자로용기 하부 헤드에의 중성자조사량을 줄이기 위한 하부 열차폐체와 증기발생기 아래의 원통형 공간(Annulus Downcommer)에 설치된 반경방향 열차폐체(Radial Thermal Shield), 증기발생기를 포함한 상부구조물의 중성자조사량 감소를 위한 상부 열차폐체로 구성되어 있으며 재질은 300계열의 스테인리스강을 사용한다. 하부 열차폐체는 원자로용기에 용접고정된 하부지지구조물에 고정된다. 반경방향 열차폐체는 원자로용기의 중간위치에 증기발생기의 지지대가 용접되어 있기 때문에 단일구조로 위로부터의 삽입하여 설치하는 것이 불가능하다. 따라서 반경방향 열차폐체는 셋 또는 네개의 Sub-assembly로 제작하여 각각 원자로 내에 장착한 후 안쪽에 링을 대고 용접하여 고정하는 방법을 고려하고 있다. 상부 열차폐체는 연장봉안내관에 용접되어 있다.

하부지지구조물은 하부노심지지판 아래에 위치하며 원자로용기에 용접고정하는 구조로 되어 있다. 이 하부지지구조물은 하부 열차폐체를 수용하고, 위로는 반경방향 열차폐체를 지지해야 하며 하부노심지지체의 원자로내 삽입시 노심지지원통의 안내와 동하중하에서의 횡방향 운동을 구속할 수 있는 Snubber 또는 Guide Post의 경로를 제공해야 하고 Downcommer를 통하여 내려오는 냉각수를 적절히 분배할 수 있도록 설계하였다. 하부지지구조물은 또한 만일의 경우 노심지지원통이 정상적인 하중전달 경로를 상실했을 경우(원통 또는 Flange 파단) 이차적인 노심지지 기능을 수행할 수 있도록 하였다.

3. 결 론

현재 개발중에 있는 300MWt 용량의 일체형 신형원자로의 기계구조 예비개념설계 결과 및 그 특징들을 살펴보았다. 증기발생기가 원자로용기 안으로 들어오고 펌프가 원자로 벽에 붙어있으며 가압기는 별도의 부품 없이 원자로용기 헤드부분의 빈 공간을 활용함으로써 1차측 배관계통이 완전히 제거되었다는 점이 기존의 분리형원자로에 비하여 기계구조상 가장 큰 차이점이다. 또한 1차측 냉각재가 원자로 안에서만 순환하므로 냉각재의 유로형성을 위해 내부 구조물의 설계개념도 많이 변경되었음을 알 수 있다. 앞으로는 위의 설계개념을 좀 더 보완, 발전시키는 한편, 새로운 개념이 도입된 증기발생기 및 CEDM 설계개념의 검증을 위해 시제품을 개발하여 관련 성능시험을 수행할 계획이다.

4. 참고문헌

[1] 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.

[2] 김용완외, “신형원자로로서의 일체형 가압경수로 설계특성 분석”, 한국원자력학회 논문집 제 27 권, 제 2 호, pp269-279, 1995.4.

[3] K. Sako, et al., "Advanced Marine Reactor MRX," *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.

[4] *Small and Medium Reactors*, OECD Nuclear Energy Agency, 1991.

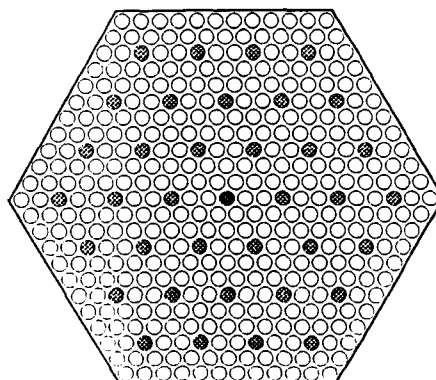
[5] 김훈철외, “21세기를 대비한 초고속 해상수송체계 개발”, 대한조선학회지 제 32 권 제 4 호,1995.8.20.

[6] 김용완외, “일체형 신형원자로 증기발생기 개념설계”, 한국원자력학회 '95 추계학술발표회 논문집, 1995.10.28.

[7] 김궁구외, “육각형 핵연료집합체로 구성된 신형원자로심 개념연구”, 한국원자력학회 '95 추계학술발표회 논문집, 1995.10.28.

Table 1. Basic Design Parameters of Integral Co-generation Reactor

Primary Circuit		Steam Generator		Reactor Coolant Pump	
Nominal Core Power, MWt	300	Steam Temperature, °C	290	Type	Glandless,
Number of FAs	55	Steam Pressure, MPa	4.7		Wet Winding
Design Pressure, MPa	17	Superheat, °C	30		Canned Motor
Operating Pressure, MPa	12.5	Feedwater Temperature, °C	240		
Coolant Inlet Temperature, °C	285	Tube Material	1690 T/T	Number	4
Coolant Outlet Temperature, °C	315	Tube Diameter, mm	19		
Coolant Flow, Kg/sec	1.8×10^3				



Lattice Pitch: 22.9cm
 Rod Pitch: 1.142cm
 Flow Area: 196cm²
 No of Rods: 397
 No of Fuel Rod: 360
 No of GT for CR: 36
 No of GT for Instrument: 1

Figure 2. Hexagonal Fuel Assembly

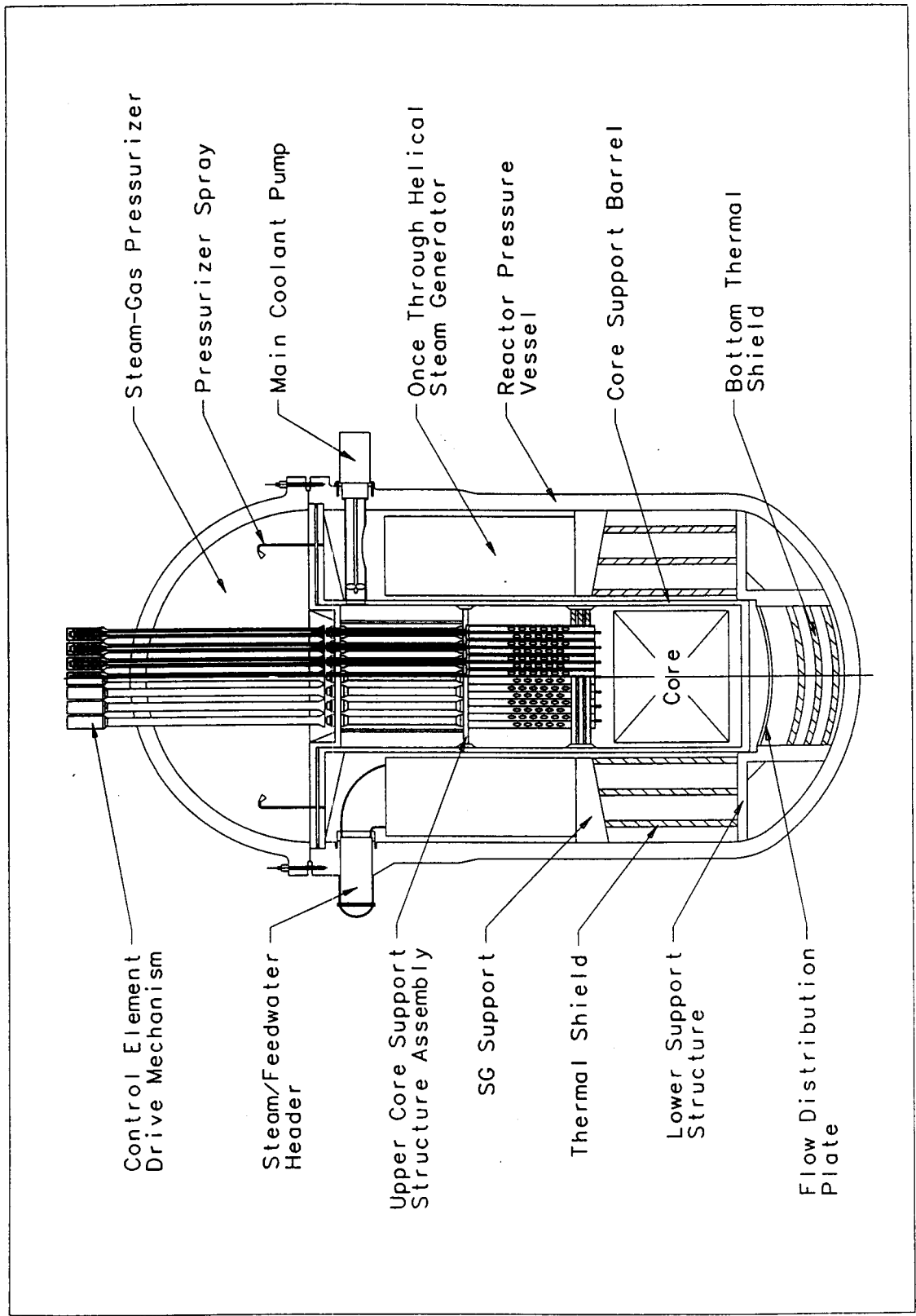


Figure 1. General Arrangement of Reactor Vessel Assembly