

경수로, 중수로 및 고온가스로의 특성비교

〈 中 〉

차 종 회

한국원자력연구소 열유동연구실장

3-3. 고온가스 냉각로의 핵 및 열공학특성

노심은 전체 연료요소에 걸쳐 균일하게 분포된 여러개의 제어봉이 삽입, 발출에 의하여 출력, 원자로트립, 셧다운이 제어된다. 셧다운은 전 제어봉이 노심속에 저속 또는 고속으로 삽입하여 이루어진다. 해석결과에 의하면 제어봉의 발출시 반응도변화율은 최대 0.00015 Δ K/sec 이라고 한다. 원자로는 정상운전시 평균반응 worth는 약 0.5% Δ K이고 최대반응 worth는 약 1.6% Δ K로 제어된다. 토륨연료로부터 증발 Doppler 계수는 음이며 전 온도 반응도계수 및 출력계수도 음이다. He 냉각재로 인한 노심의 핵적영향은 거의 무시할 수 있다.

열설계에 있어서 냉각재가 단상류(單相流)이기 때문에 특별한 문제는 없다. 다만 연료의 온도를 낮게 억제하기 위하여 축방향으로 지수형의 출력분포가 되도록 연료장진이 필요하다.

또 반경방향으로는 냉각재의 연료조절이 필요

하며 가동 오리피스가 이를 위하여 사용된다. He 냉각재는 기체 순환기(circu later)에 의하여 노심을 강제순환에 의하여 냉각시키는 이 원자로에서는 4개의 루우프가 마련된다. 순환기는 단단축류(單段軸流)의 히리움 압축기와 단단 증기 터빈 구동장치로서 구성된다.

이 원자로는 2000MWt 열출력으로 설계되며 전기출력이 770MWe라면 38.5%의 열효율을 가져온다. 1차냉각재의 운전압력은 725 Psia이며 냉각재의 유입온도는 760°F, 유출온도는 1430°F이며 냉각재 유량은 7,550,000 lb/hr 이다. 그리고 2차계통의 증기조건은 온도가 1000°F 압력이 2400 Psia 이며 288°F의 과열도를 갖는다.

연료의 출력밀도는 평균 8.4 kW/l가 예상된다

3-4. 각형의 핵 및 열공학특성비교

가압형 경수로(PWR), 가압형 중수로(PHWR) 및 고온가스로(HTGR)의 핵공학특성 주요 특성을 비교하면 다음 표와 같다.

표 3 핵공학특성비교

특 성	PWR	PHWR	HTGR
열 출 력, MW	1882	2180	2000
전 기 출 력, MW	626	620	770
냉 각 재	경 수	중 수	He
감 속 재	경 수	중 수	흑 연

반 사 체	경 수	중 수	혹 연
핵 연 료	저 능 축 우 라늄	천 연 우 라늄	고 능 축 우 라늄 및 토리움
핵 전 료 중 량, t	50	86	U : 1, 2 Th : 25
핵 연 료 교 환 방 식	정 지 교 환	운 전 중 교 환	정 지 교 환
제 어 방 식	제 어 봉 및 화 학 제 어	경 수 수 위 및 제 어 봉	제 어 봉
반 응 도 은 도 계 수	negative	negative	negative
반 응 도 출 력 계 수	negative	negative	negative
평 균 burnup, MWD/MTU	7500	33000	95000
제 사 이 클	Pu	Once-thru	U 233

각형의 원자로에 대한 열공학적 주요특성을 비교하면 다음표와 같다.

표 4 열공학적 특성

특 성	PWR	PHWR	HTGR
열 출 력, MW	1882	2180	2000
전 기 출 력, MW	626	620	770
방 열 량, MW	1256	1560	1230
열 효 율, %	33.4	28	38.5
1 차 계 통 압 력 Psia	2250	1623	725
1 차 계 통 최 고 온 도, °F	616	590	1430
1 차 계 통 유 량, lb/hr	32.2×10^6	26.8×10^6	7.55×10^6
2 차 계 통 압 력, Psia	920	681	2,400
2 차 계 출 온 도, °F	535	500	1000
2 차 계 통 유 량, lb/hr	8.2×10^6	7.6×10^6	5.35×10^6
열 전 달 방 식	액 체 강 제 대 류	액 체 강 제 대 류	기 체 강 제 대 류
열 설 계 기 준 치	DNBR Mn, 1.30	C P R 1.56	—
루 우 프 수	2	2	4
증 기 발 생 기 수	2	4	4
냉 각 제 펌 프 또는 순 환 기	2	4	4
" " 용 량 마 력	7000	9000	14500

4. 구조의 특성

4-1. 가압형 경수로의 구조개요

가압경수로 본체는 노심, 감속 냉각재 열차폐

(thermal shield), 제어봉 Cluster, 제어봉 구동 장치 및 이들을 받치는 구조물 등으로 구성된다. 노심은 대략 원주형으로서 내부에는 핵분열물질로 된 연료집합체(fuel assembly)가 들어있다. 연료 집합체는 저능축 UO₂펠레트를 Zircaloy-4

피복판에 밀봉한 연료봉을 여러개 4각형 격자로 배열 집합시킨 것이다. 가압된 경수는 노심의 열차폐와 원자로 용기 사이를 통하여 아래로 흘러내려 다시 노심을 통하여 상부로 흐르게 되는데, 이 경수는 원자로의 감속재 및 냉각재로 사용 될뿐 아니라 붕산(boric acid)의 용매로도 사용된다.

원자로 내부에서 노심을 지지하는 지지물은 노심 상부지지 구조물(upper core support structure)과 core barrel assembly로 되어 있다.

노심 상부지지 구조물은 제어봉 guide tube, guide tube 지지판 및 노심 상부지지판으로 이루어진다.

노심 barrel assembly의 주요부분은 노심 하부판을 지지하는 기둥, 노심 지지판, 노심 barrel, 노심 baffle 및 상부지지 barrel로 이루어진다.

제어봉 cluster는 상부에 spider 모양의 bracket가 있는 원주형 제어봉의 집합체로 구성된다. 원자로에는 두가지형의 제어봉 cluster를 사용하는데 하나는 full length cluster이고 다른 하나는 part length cluster이다.

part length control rod cluster는 외관은 full length와 같으나 제어봉은 하부 1/4만 중성자 흡수재를 채우고 나머지 부분에는 산화알루미늄을 채워서 제작한다.

full length control rod cluster와 part length control rod cluster의 수량과 위치 배열은 원자로 노심의 반응도와 출력분포를 조정하기 위한 조건에 의하여 설계시에 결정된다.

각 제어봉 cluster는 원자로 상부에 있는 전자(電磁) 구동식 구동장치에 의하여 독립적으로 조정되는데 노심의 반응도는 cluster를 상부로 인출 할때 증가하고 하부로 삽입할 때 감소된다

Guide thimble은 연료집합체내에 대칭적으로 배치된다.

노냉각재 계통은 원자로 압력용기, 가압기(pressurizer) 그리고 각각 하나의 증기발생기와 냉각재 순환펌프(coolant pump)를 갖고 있는 2개의 폐회로 구성되어 있다.

원자로용기는 대체로 원통형으로서 그 아래부

분은 반원형 bottom head 로, 윗부분은 분리할 수 있게된 upper head로 되어있다. 이 용기안에 원자로심, 노심 지지용구조물, 제어봉 cluster, 열차폐 및 노심과 관계되는 기타 부분품들이 사용되게 된다.

냉각재의 입구 노즐과 출구 노즐은 upper head 플랜지와 노심 중간에 위치하게 된다. 노냉각기의 통체는 저탄소강으로 되어있으며 냉각재와 접촉되는 용기 내면은 부식을 최소한으로 하기 위하여 최소 1/8in의 austemtic 스테인리스 강으로 피복한다.

용기의 전체의 길이는 39ft 1in이고 외각의 내경은 132in, 피복재 두께는 7/32in, 냉각재 부피는 2,408ft³, 설계 압력은 2,500psia, 설계온도는 650°F, 냉각재의 유량은 71.110⁶ lbs/hr이다.

각 1차 루우프는 고온, 고압에서 대량의 냉각재를 순환시키도록 설계된 냉각재 순환펌프를 갖고 있는데 이 펌프는 단단축류식원심펌프로써 특히 냉각재의 누설을 제어할 수 있도록 되어 있다. 설계 용량은 94,500gpm, 설계 수두(水頭)는 298ft이다.

냉각재 순환펌프구동용 전동기는 수직축, 정속, 공냉식 3상 유도 전동기로서 thermalastic epoxy insulation 계통을 갖고 있다. 노냉각재 계통의 각 루우프에는 하나의 증기 발생기가 있는데 증기발생기는 증기발생기 부분과 드럼부분에는 수분분리기(moisture separator)가 들어 있다. 증기발생기는 외각 상부에 위치하는 수분분리기와 함께 수직으로 설치된다.

고온고압의 원자로 노냉각재는 채널헤드에 유입되며 다시 U자형 튜브를 통하여 채널 헤드의 출구부에 돌아오게 된다. 이 과정에서 2차측 급수를가열하여 증기를 발생시킴으로서 열교환이 이루어진다.

이 중에 증기발생기의 칫수는 전체높이가 67ft 8in이고, upper shell의 외경은 약 14ft 8in, low shell의 외경은 약 11ft 3in이며 튜브측 설계 압력은 2,500psia, 튜브측 설계 온도는 650°F이고, 노냉각재 유량은 35.55×10⁶ lbs/hr이다. 그리고 외각은 Mn-Mb Steel로 구성되고 있고 튜브는

Inconel로 되어 있다. 튜브의경은 7/8in의 크기이다.

냉각재 계통배관은 스테인리스 강이거나 스테인리스 강으로 피복한 탄소강이다.

원자로 냉각재와 접촉되는 모든 밸브는 원칙적으로 austenitic 스테인리스 강이나, 경고하게 표면처리한 내부식성의 특수재질로 제조한다.

일차계통에는 가압기가 있어 정상운전중 노냉각재계통의 압력을 어느 일정치에 유지하고 과도상태에 있어서의 압력변화를 제한 한다. 일차계통의 압력제어를 위하여 가압기에는 대체할 수 있는 전열이 가압기하부 물속에 설치되며, 또한 분무노즐이 있어서 가압기내에 물을 스프레이 하거나 일차계통압력이 어느 미리 설정된 값 이상으로 상승하여 과도상태로 될 경우 relief 밸브가 동작하여 pressurizer relief tank에 압력을 방출 하도록 되어 있다.

가압기는 액체용적 600ft³이. 증기용적은 400 ft³이다.

노냉각재의 화학적인 요건을 충족시키고 일차 폐회로내의 냉각재 체적을 제어하기 위한 화학 및 체적제어계통은 가압수형 원자로 특유의 계통이다.

이 계통의 역할은 노냉각재 계통의 냉각재를 채우고 노냉각재 내에 있는 부식성 생성물이나, 핵분열 생성물의 농도를 감소시키고, Chemical shim 제어를 위한 봉산 농도를 조절하며 냉각재 순환 펌프의 축의실장치에 고압의 축실 용수를 공급하므로써 축을 통한 냉각재의 외부 누설을 제어한다.

이 계통은 각종 열교환기, 펌프, 탱크, 관련 배관 및 밸브 그리고 제어계통으로 구성된다.

안전주입계통은 원자로의 냉각재상실 사고 발생시에 원자로 내에 봉산수를 주입시켜 연료의 과도한 온도 상승으로 인한 연료손상 및 연료피복재(Zircaloy-4)와 냉각재사이의 반응을 방지하는 기능을 가지고 있다.

격납설비는 철강계의 격납용기와 이를 둘러싸고 있는 철근 콘크리트 차폐 구조물로 구성된다 격납용기내에는 원자로, 원자로 냉각설비 및

연료취 급기기의 일부를 포함하는 보조 설비들이 들어있다. 또한 본설비에는 냉각, 가열, 조명 및 환기장치가 되어있다.

또한 가상 냉각재 상실사고 발생후 격납설비내의 압력, 온도 및 공기 오염도 등을 허용가능한 수준까지 감소시키기 위한 격납설비 스프레이 계통과 사고 후의 냉각 설비등도 격납설비 구조물내에 수용된다. 격납용기는 반구형 돔과 torispherical bottom을 가진 하나의 원주형 용기로서 대체적인 치수는 원주형 용기높이가 207ft 원주형용기 내경이 105ft이고 전용적은 1,400,000ft³이다. 철강관의 두께는 반구형 돔이 0.75in, 원주형부분은 1.5in, 용기저부는 1.5in가 된다.

4-2. 가압형 중수로의 구조 개요

가압형 중수로 시설은 원자로아셈블리, 감속재계통, 열수송계통, 연료공급장치, 보일러증기계통 및 급수계통과 그밖의 중수처리, 화학처리 차폐냉각등 부속장치로 구성된다.

원자로 아셈블리는 내부가 물로 차있고 강으로 라이닝된 콘크리트 보일트(Vault) 내에 있는 튜브형의 원통형구조를 즉 Calandria 아셈블리와 이를 수평으로 관통하고 있는 연료채널(Channel) 인 압력관, Calandria 관 및 반응도 제어기구로 되어 있다.

Calandria 아셈블리는 Calandria 용기와 2개의 end shield로 되어 있으며 이것이 연료채널과 반응도제어기구등 노심내 콘포넌트들을 지지하고 중수감속재, 반사재를 그안에 보유하고 있다.

Calandria 외각(shell)은 수평 단일벽의 오스터나이트 스테인 레스 강제(鋼製)의 원통형 용기로서 중수 감속재 반사체를 포함하고, 핵반응기구의 여러가지 노심부품을 지지하는 일차기능을 갖고있다.

Calandria 외각은 주 외각과 2개의 부속외각과 2개의 더 작은 환상관과 핵반응기구 및 파이프 연결을 위한 노즐등의 부품으로 구성된다.

Calandria 관(管)은 총 380개가 있고 11.25in의 간격으로 Calandria내에 수평으로 걸쳐 있어 원형 격자 배열을 이룬다. <다음호에 계속>