

중수감속 가압경수로의 개념설계

김 명현, 윤 진규

경 회 대 학 교

요 약

신형경수로의 대안으로서 가압경수로의 단점을 보완하고, 가압중수로의 장점을 채택한 중수감속 경수로의 핵적 개념설계를 제안하였다. 냉각재와 감속재가 서로 다른 채널을 통해 흐르는 기존 가압중수로의 Pressure-Tube 설계의 장점을 채택하여, 냉각재는 경수를 감속재는 중수를 사용하는 중수감속 가압중수로(DPWR, Deuterium-moderated PWR)의 설계 타당성을 검토하였다. 기본적으로 CANDU의 system설계를 Proven Technology로서 가능한 많이 채택하고, CANFLEX 핵연료 설계도 기존 연구 결과로서 최대한 활용하였다.

월성 2,3,4호기 FSAR의 사양을 그대로 사용하여 기존 중수로의 37봉 핵연료 다발을 6×6 직각 배열 등가 핵연료집합체로 재구성한 후, SEU UO₂ 핵연료에 대해 HELIOS코드를 사용하여 핵적 특성을 검토하였다. 냉각재 온도계수가 음의 안전성을 갖고 있으며, 기존 중수로보다 연소도가 훨씬 큰 원자로가 설계될 수 있음을 확인하였다. 또한 발전소 이용률의 증대, 사용후 핵연료 발생량의 감소를 기대할 수 있었다.

1. 서 론

신형로의 개발 목표는 안전성의 증진과 장주기 운전 및 발전소 이용률 증대, 수명연장 등을 통한 경제성 향상이다. 현재 신형로의 개발은 가압경수로를 중심으로 많은 진전이 있어 왔다. 우선 가압경수로의 설계 개선측면을 살펴보자. 첫째, 경제성을 위해 정격 출력은 증대시키면서 안전여유도 확보를 위해 출력 밀도를 낮추게 설계된다. 따라서 노심의 크기는 커지며 이로 인해 원자로 용기의 두께는 두꺼워져야 한다. 수명연장을 위해서는 더욱 1차 압력경계면의 기계적 건전성이 중시되는데, 고온 고압 상태의 원자로 용기가 크고 두꺼우면 재료적 측면에서 안전성의 증진은 불리해 진다. 둘째, 저출력밀도의 경제성 손실을 보충하기 위해 장주기 운전을 목표로 하는데 이로 인해 핵연료의 농축도는 높아 진다. 이에 따라 초기 잉여 반응도를 조절하기 위한 수단으로 가연성 독봉과 봉산의 사용 요구가 많아진다. 그러나 충분한 잉여 반응도를 제어할 제어봉의 사용은 극히 제한되고 있으며, 현재 추가적인 운전 정지 계통을 설치할 공간이 없다. 그 이유는 가

압경수로의 좁은 노심 격자구조때문에 핵연료 집합체 사이에 추가적인 설비가 들어갈 공간이 없기 때문이다. 셋째, 차세대 원전이 갖추어야 할 설계 목표로서 자동 제어와 가동중 디지털 로심감시장치가 필요하다. 이 항목의 기술적 어려움은 없으나, 가압경수로가 근본적으로 로내 계측기 사용이 어려운 구조로 되어있고, 제어봉의 사용이 국부적인 출력 분포를 왜곡시키기 때문에 국부 출력분포 제어의 역할을 감당하지 못하고 전체 출력 준위 조절에만 사용되게 된다. 위에서 언급한 세 가지 문제는 CANDU처럼 냉각재 수로를 따로 격리시켜 Pressure-Tube를 설치하면 쉽게 해결되는 문제점들이다. 격리된 냉각수로 사이의 공간은 이때 많은 잇점을 제공한다. 즉, 직경이 작은 핵연료채널은 가압경수로의 압력용기처럼 두껍지 않아도 되며, CANDU처럼 다양한 제어봉과 반응도 제어장치를 핵연료채널 사이에 설치할 수 있으며, 또한 로내 계측기를 용이하게 설치할 수 있어서 수시로 이동, 계측할 수 있다. 이런 장점들은 이미 CANDU 설계 및 운전에서 입증되었다. 마지막으로 가압경수로는 가동중 재장전이 불가능하므로 장주기 운전에 따른 재장전 운전정지 기간동안 수행되는 많은 안전점검이 발전소의 이용률 및 안전성에 매우 큰 비중을 갖는다. 이는 근본적으로 경제성과 안전성을 증대시키는데 있어서 기기/설비의 설치 및 보수에 대한 신뢰성이 걸림돌이 된다는 것을 의미하며, 획기적인 안전성과 경제성 증진이 어려운 것을 의미한다. 이 문제는 CANDU처럼 핵연료채널과 냉각재채널을 감속재와 분리시키고 수평으로 설치함으로써 가동중 재장전을 가능케 할 수 있다.

가압중수로의 개발 방향을 보면, 첫째, CANDU는 이용률이 높고 자동제어가 쉬운 장점이 있는 대신, 천연우라늄을 핵연료로 사용하므로 사용후 핵연료 발생량이 많고 핵연료의 교체 작업이 매우 번거로운 단점이 있다. 이 단점을 해결하고 LOCA에 대한 안전성을 증진시키기 위해 CANFLEX 연료가 설계되고 있으며, NU 뿐만 아니라 RU, SEU, DUPIC등의 사용에 대해서도 연구중이다. 그러나 이 개발 방향은 핵연료의 개선 연구이며 원자로의 개선이나 개발은 아니므로 Canada의 원자로를 계속 구입해야 한다는 기술 종속을 벗어날 수 없다. 둘째, 중수를 냉각재로 사용하면 방사화가 많이 되어 Tritium의 생성이 많다. 이는 증기발생기 및 1차 계통기기에 방사화 준위를 높여 유지 보수를 어렵게 한다. 이 점은 가동중 재장전에서 얻은 장점을 최대로 살리지 못하고 가동중 유지 보수를 어렵게 하는 이유가 된다. 위의 두가지 문제는 가압경수로처럼 냉각재를 경수로 사용하면 해결되는 문제점들이다. 그러나 냉각재를 경수로 사용하면 핵연료의 농축도를 높여 주어야 하는 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 이러한 문제점을 극복할 수 있는 신형 원자로를 제안하고, 핵적인 측면에서 설계가능 여부를 핵연료 집합체에 대해 일차적으로 검토하고자 하였다.

2. 신형로 모델 및 기대 효과

본 연구에서 개발하고자 하는 중수감속 가압경수로(DPWR)의 NSSS는 기존 중수로를 기본으로 하고 핵연료 집합체 설계를 변경함으로써 가능하다. 우선 핵연료는 SEU UO₂를 사용하고, 냉각재(H₂O)와 감속재(D₂O)는 분리하여 Calandria내에는 중수를 CANDU와 동일하게 설치하고, 1차계통 냉각수를 경수로 교체한다. 이는 서론에서 언급한 두가지의 원자로의 장점을 채택하기 위함이다.

그리고 로심냉각계통과 안전설비는 기존 CANDU 설비의 개선이 요구되며, 제어설비와 감시보호 계통은 새로운 형태로 설계를 할 예정이다. 이러한 특징을 갖는 신형 원자로는 기존 가압경수로 보다 가동중 핵연료 교체를 통해 이용률이 증대되고 Incore Monitoring이 가능해진다. 또한 방사화 Tritium이 없어지고, 사용후핵연료의 발생량을 대폭 감소시키는 효과를 가져온다. 핵연료의 농축에 의한 핵연료주기비가 증가하겠으나, 사용후 핵연료 발생량의 감소와 중수 사용량 감소가 충분히 상쇄할 수 있다고 판단된다. 이로써 중수로의 Canada에 대한 기술종속에서 벗어날 수 있으며, 이미 개발된 국내기술에 의존한 신형 대용량 원자로의 개발이 가능해진다.

3. 핵적 개념설계 방법

3.1 HELIOS 계산 코드

현재 중수로 핵연료다발 핵계산 코드로는 WIMS-AECL이 주로 사용되는데, 핵자료가 부족하며 정방형 집합체를 묘사하는데 있어 제한이 있다. 따라서 본 연구에서는 복잡한 기하학적 구조를 자유롭게 묘사하는 HELIOS코드를 채택하였다. 코드의 특성을 살펴보면, 입출력 처리 프로그램인 AURORA, ZENITH, 그리고 주프로그램인 HELIOS로 구성되어 있다. HELIOS코드는 2차원 집합체 균정수 생산코드로서 충돌확률법(Collision Probability Method)을 적용한 수송방정식을 사용하며, 중성자와 감마 각각에 대해 연소 이력 계산이 가능하다. 또한 Restart 계산도 가능하며 일부에서는 노심분석용으로도 사용하고 있다. 중성자 핵자료는 34그룹과 89그룹이 있으며, 본 연구에서는 34그룹 핵자료를 사용하였다.

3.2 핵설계 변수 영향 조사

제1단계로서 장주기운전을 고려하여 핵연료를 선정하였다. 천연 우라늄을 사용하는 기존 CANDU Standard Fuel Bundle(그림 1)과는 달리 UO_2 의 농축도를 증대시키면서 연소도가 증진되는지 여부를 점검하였다. 그림 3에서는 천연 우라늄을 제외하고 저농축 우라늄의 농축도를 증가 시킴에 따라 연소도도 증가함을 알 수 있었다. 2.4w/o 농축도의 경우, PWR보다는 주기 길이가 짧아졌지만 기존 중수로보다는 훨씬 오래 태울 수 있음을 확인하였다. 제2단계로서 기존 중수로에서는 평형노심에서 냉각재 온도계수와 감속재 온도계수가 양의 반응도 계수로서 운전된다. 따라서 제안하는 중수감속 신형 원자로의 안전성을 확보하기 위해 반응도 온도계수가 음의 값을 갖는 rod pitch와 assembly pitch를 조사하였다. 먼저 핵연료/감속재 비율과 핵연료/냉각재 비율을 유지시키면서 CANDU 핵연료다발과 등가(equivalent)의 6×6 직각배열 핵연료 집합체를 결정하였다. 그림 2는 등가 핵연료 다발의 모양을 보여준다. 음의 반응도 온도계수를 갖도록 하기 위해서는 노심내 핵연료/감속재(냉각재 포함) 비율을 설계 제한치이내로 증가시켜야 하는데, rod pitch를 1.35cm로 최대한으로 줄였을 때에도 냉각재 온도계수는 음의 값을 나타냈지만 감속재 온도계수는 주기초에 양의 반응도 계수(0.8pcm/°C)를 보였다. 따라서 가능한 기존 중수로의 사양을 그대로 채택하기 위하여 CANDU의 rod pitch와 같다고 가정하고 assembly pitch를 28.332cm에서 14.394cm까지 변화시키면서 가능한 감속재 온도계수도 작은 값을 갖는 조건을 찾아보았다. 표1에

나타난 바와 같이 최적 조건으로 rod pitch와 assembly pitch를 선택한 경우, 주기 초에 냉각재 온도계수와 감속재 온도계수는 각각 $-1.2\text{pcm}/^{\circ}\text{C}$, $-0.1\text{pcm}/^{\circ}\text{C}$ 를 보였다.

4. 핵심계 결과 검토

이상의 연소도와 부의 반응도 계수를 만족하는 핵심계 결과는 아래의 표1과 같다.

표 1. 설계 자료

	CANDU	DPWR
Enrichment(UO_2)	0.711w/o	2.4w/o
Coolant	D_2O	H_2O
Moderator	D_2O	D_2O
Fuel to Coolant Ratio	1.269	1.269
Rod Pitch	1.506cm	1.506cm
Fuel to Moderator Ratio	1.065	0.283
Bundle Pitch	28.575cm	17.016cm

표2에서와 같이 설계된 등가 집합체의 경우, 핵연료 다발에 대한 냉각재 온도계수는 주기초에서 주기말까지 음의 반응도 계수를 갖으므로 고유 안전성이 있음을 알 수 있었다. 또한 표3에서 나타난 바와같이 연소도에 따른 감속재 온도계수도 주기초에서 주기말까지 음의 반응도 계수를 갖는다. 따라서 본 연구를 통해 기존 CANDU 원자로의 형태를 크게 바꾸지 않고 농축도와 냉각재만 변화시켜 고연소도, 장주기 운전과 안전성이 증대된 PWR형태의 원자로 핵심계가 가능함을 확인할 수 있었다.

표 2. 등가 집합체의 연소도에 따른 냉각재 온도계수의 변화

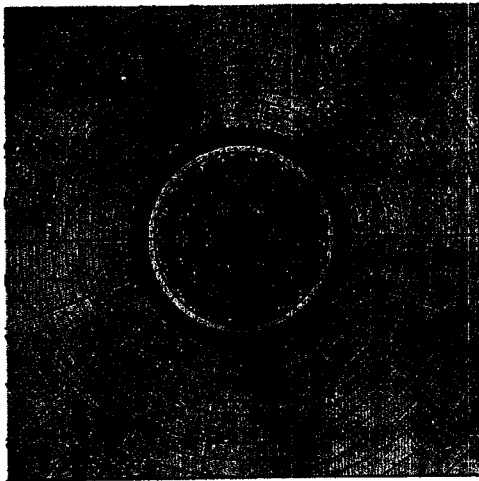
연소도(MWD/MTU)	냉각재 온도계수(pcm/ $^{\circ}\text{C}$)
0	-1.2
5500	-2.4
14500	-3.8
21000	-6.0

표 3. 등가 집합체의 연소도에 따른 감속재 온도계수의 변화

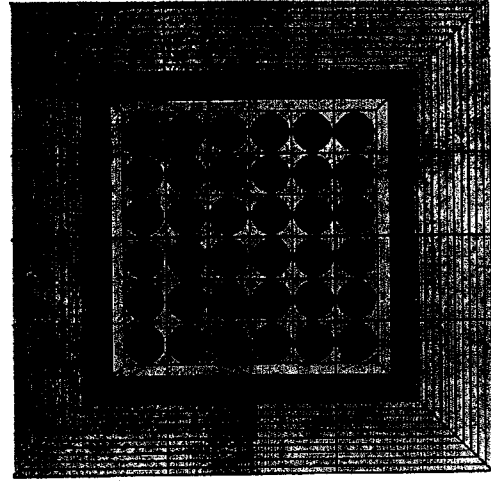
연소도(MWD/MTU)	감속재 온도계수(pcm/ $^{\circ}\text{C}$)
0	-0.1
5500	-0.5
14500	-2.2
21000	-6.4

참 고 문 헌

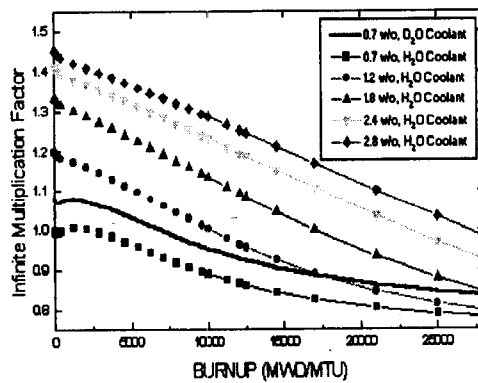
1. AECL, Design Manual DM-59-01100 : CANDU 600 Generating Station Physics Design Manual, Revision 0 (1980)
2. 과학기술처 원자력 연구소, "CANFLEX 핵연료 개발," KAERI/RR-1028/91, 1991,12
3. 한국 전력 기술 주식회사, "월성 2,3,4호기 최종안전성 분석보고서," 1995
4. 한국 전력 공사 원자력 연수원, "중수로 개요(I,II)," 1989
5. Scanpower, HELIOS-Technical Note TN1/41.96.01, HELIOS Program Description, 199



[그림 1] 37 Rod CANDU Fuel Bundle



[그림 2] KDP 6x6 Equivalent Fuel Assembly



[그림 3] 연소도에 따른 잉여 반응도의 변화