

압력관형 가압경수로심의 핵적 개념설계

박동환, 김명현
경희대학교

요 약

신형 경수로심의 네가지 개념설계안을 제시하였다. 각 설계안은 압력관내에 농축우라늄 핵연료 다발을 CANDU처럼 장전하고 냉각수를 경수로 바꾼 안으로써 본 연구는 각설계안의 장단점과 타당성을 검토하였다. 가연성 독봉인 IFBA를 사용하여 기존 CANDU 제어 시스템만으로 노심 잉여반응도의 제어가 가능함을 확인하였다.

I. 서론

가압중수로의 장점과 가압경수로의 장점을 채택한 압력관형 가압경수로심의 핵설계를 제안하였다. 이 원자로는 CANDU-6를 기본으로 냉각재를 중수대신 경수(H_2O)로 사용하고 압력관을 경계로 한 감속재의 영역에 1.6cm의 두께에만 중수(D_2O)를 반사체 역할로서 두르고, 핵연료의 농축도를 천연우라늄에서 2.4w/o 정도의 농축우라늄으로 대체한 개념이다. 이 설계안은 농축우라늄을 사용함으로써 보다 높은 연소도를 가능하게 하였고, 냉각재가 경수이기 때문에 냉각수계통에서의 tritium 생성이 없어진다. 종래의 CANDU에서는 calandria tank의 전영역을 중수로 채웠으나, 본 연구에서는 중수의 사용을 감속재관 내부로 한정함으로써 감속재관 외부는 void영역으로 남게되고, 그로인해 중수의 사용을 줄일 뿐 아니라 제어 감시 설비장치의 설치를 용이하게 한다. 위에서 제안한 개념 설계안에 대해 안전성을 검토하기 위해 MTC(Moderator Temperature Coefficient), CTC (Coolant Temperature Coefficient), void coefficient를 계산하여 모두 음의 값을 보임으로써 노심 설계의 안전성을 확인하였다.¹⁾

본 연구에서는 비상사고시 void인 calandria tank영역에 water injection을 했을 경우 노심 정지가 되는지의 여부와 기존 CANDU 시스템하에서 농축우라늄 핵연료 노심의 반응도제어 운전이 가능한 것인가를 확인하였다. 또한 보다 안전한 노심을 설계하고자 몇가지의 다른 핵적 념설계안도 검토하였다. 설계도중 확인된 사실인 핵연료 다발내에서 pin power rate 가 크게 차이가 나는 문제점²⁾도 검토하여 power sharing이 균등한 다발 설계안도 제시하

였다.

II. 노심 정지 기능의 확인

Calandria tank의 모든영역에 중수감속재를 사용하던 CANDU 설계를 밀폐된 감속재관을 사용함으로써 감속재 영역과 void 영역으로 구분하였다. 이 void 영역은 비상사고시 water injection을 통해 long-term cooling을 제공하고자 고안되었는데, 물이 주입될 때 원자로심이 정지되는가의 여부를 주기초와 주기말을 통하여 확인하였다. 그림 1에서는 정상운전 상태와 냉각수가 tank에 주입된 경우의 임계도 값을 비교하였다. 계산결과, Δk 의 값이 0.5~0.6 정도로 void영역으로의 water injection만으로 shutdown이 가능함을 확인하였다.

III. 노심 설계안의 핵적 특성

본 연구에서는 압력관형 가압경수로의 개념설계에 있어서 핵연료의 농축도, 냉각재, 감속재, 핵연료 반경의 변수를 이용하여 네가지의 설계안을 제시하였다. 표 1에서는 각 설계안에 대한 간략한 설명을 하였고 네가지 설계안에 대한 핵연료 다발의 단면도를 그림 2 ~ 5에 나타내었다. 본 연구에서는 농축우라늄을 사용함으로써 중수대신 경수를 냉각재로 사용하였다. 제 3설계안은 감속재도 중수에서 경수로 대체하였다.³⁾ 그림 6은 감속재로서 중수와 경수를 사용할 경우 주기초의 무한증배계수값을 비교하였으며, 약 1.7cm의 두께까지는 경수의 사용이 중수를 사용했을 때보다 감속효과가 오히려 크게 나타났다. 제 4설계안은 핵연료 다발의 pin peaking을 줄이기 위해 중심봉과 내환경의 반경을 제 2설계안의 90%인 0.5469cm, 중환경과 외환경의 반경을 80%인 0.4862cm로 설계하였다. 표 2는 pin peaking을 최소화하는 핵연료 반경을 설정하기위해 계산해 본 설계 안들이다. 100%에서 50%까지 여러가지 경우를 계산하여 pin peaking이 1.2이하가 되는 경우만을 표 2에 제시하였다. 그림 7은 표 2에 제시한 각각의 경우에 대하여 주기초부터 주기말까지의 pin peaking을 나타낸 것이다. 결과적으로 중심봉/내환경, 중환경/외환경의 비율이 9:8인 경우가 pin peaking이 가장 낮고 전 주기를 통하여 가장 평탄함을 알 수 있었다. 그리고 각 설계안에 대하여 Bundle내 출력분포를 그림 8에 나타내었다. 그림 9에서는 각 설계안에 대한 연소에따른 무한증배계수의 값을 비교하였다. 제 1설계안의 경우 고연소도의 측면에서는 장점이 있으나 중수의 많은 사용과 반응도 제어의 어려움이 있다. 제 3설계안은 제 2설계안과 비교하여 비슷한 연소도를 가지고 중수를 사용하지 않는다는 잇점이 있으나, 핵설계의 자유도가 적다. 제 4 설계안의 경우 고연소도의 측면과 pin peaking의 측면에서 보다 우수하지만 핵연료 다발이 서로 다른 핵연료봉으로 구성되어서 성형가공비가 비싸고 설계가 까다롭다는 단점이 있다.

IV. 노심 반응도 제어의 타당성

앞서 제시된 네가지의 설계안은 CANDU의 잉여반응도에 비해 노심에서의 잉여반응도가 훨씬 크다. 이를 제어하기 위해 BP(Burnable Poison)를 사용하여 잉여반응도를 제어해 보았다. 먼저 DUPIC 핵연료에서 적용한대로 Dy_2O_3 를 integral BP의 형태로 정하여 중심봉 하나에 적용하였으나 너무 큰 반응도의 감소로 인해 부적합하였다. 따라서 반응도 세기 조절이 쉬운 IFBA를 사용하였다. 현재 IFBA는 ZrB_2 의 형태로 coating을 하며 두께의 설계제한치는 $0.00254cm$ 이하까지로 되어 있다. 이를 근거로하여 1개의 중심봉에 IFBA를 사용하여 계산을 해보았으나 반응도제어에 효과를 얻는데 어려움이 있었다. 따라서 내환경인 6개의 봉에 대해 IFBA를 사용했다. 그림 10는 잉여반응도 제어를 위해 BP를 이용해 계산한 결과이다. 그림에서 보듯이 주기초의 잉여반응도는 CANDU핵연료 다발과 같으며, 보다 긴 주기길이를 갖고 반응도가 연속적으로 변화함을 확인하였다. 노심 건조의 가능성을 고려해 볼때, 현재 월성에서 가동중인 가압중수로의 경우 핵연료다발의 휨 현상이 문제가 되는데, 본 설계안에서는 냉각재관과 감속재관에 지지대 역할을 하는 보강재를 넣을 수 있기 때문에 강도를 높일 수 있다고 판단한다.

V. 결론 및 향후과제

보다 주기길이가 긴 장전전략을 가능케하는 압력관형 가압중수로의 핵연료 설계안을 보았다. IFBA의 적절한 사용으로 잉여반응도가 CANDU 핵연료와 같아지므로 냉각재를 경수로 바꾸고 감속재관을 추가로 설치한다는 점 이외에는 CANDU 시스템과 운전방법은 같이 할 수 있다. CANDU에 비해서 재장전 횟수가 훨씬 줄어들고 많은 장점이 있는 설계안임을 확인 하였다. 차후 핵연료 주기비용의 정확한 평가를 위해서 노심 전체의 재장전을 모의하는 노심분석이 수행되어야 한다.

참 고 문 헌

1. Myung-Hyun Kim and Jin-Kyoo Yoon "Conceptual Design for a Deuterium Moderated Pressurized Light Water Cooled Reactor," Proceedings of the Topical Meeting on Advances in Nuclear Fuel Management II, Myrtle Beach, South Carolina, U.S.A., March 23-26, 1997.
2. 한국원자력 연구소, "CANFLEX 핵연료 개발," KAERI/RR-1028/91, (1991)
3. Pavel Hejzlar, Neil E. Todreas and Michael J. Driscoll, "passive Pressure Tube Light Water Reactors", Nucl. Tech., VOL. 113, (1996)

4. 한국 전력 기술주식회사, “월성 2,3,4호기 최종안전성 분석보고서,” 1995

표1. 압력관형 가압경수로의 핵설계

	제 1설계안	제 2설계안	제 3설계안	제 4설계안
핵연료 농축도	2.4w/o	2.4w/o	2.4w/o	2.4w/o
냉각재	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O
감속재	D ₂ O (all)	D ₂ O(1.6cm)	H ₂ O(1.6cm)	D ₂ O(1.6cm)
Pellet 반경	0.6077cm	0.6077cm	0.6077cm	0.5469 / 0.4862cm

표2. 제 4설계안의 Pellet radius의 설정을 위한 설계

	중심봉(1)/내환경(6)	중환경(12)/외환경(18)
CASE 1	0.6077cm (0.6077*1.0)	0.5469cm (0.6077*0.9)
CASE 2	0.6077cm (0.6077*1.0)	0.4862cm (0.6077*0.8)
CASE 3	0.5469cm (0.6077*0.9)	0.4862cm (0.6077*0.8)
CASE 4	0.4862cm (0.6077*0.8)	0.4254cm (0.6077*0.7)

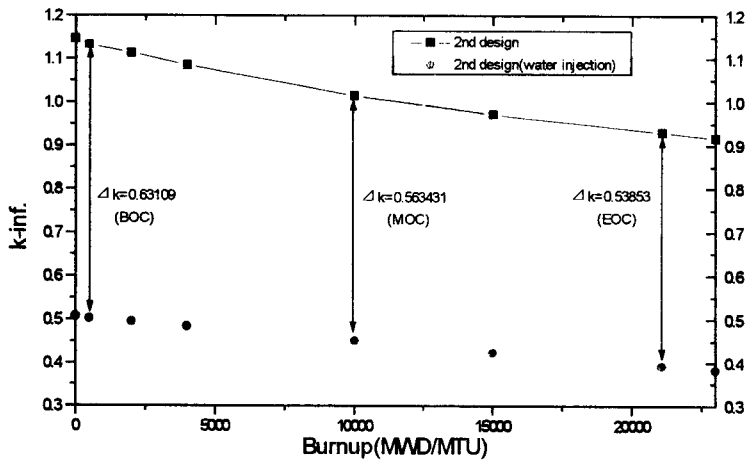


그림 1. Water injection에 따른 원자로 정지 효과 분석

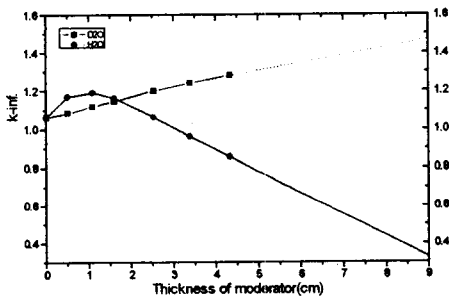
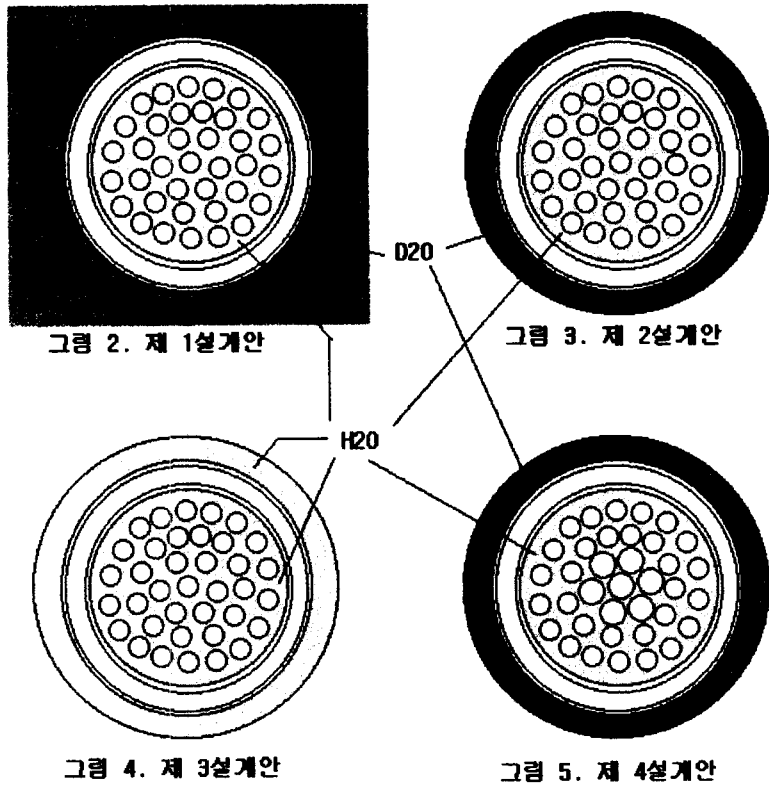


그림 6. 제 2설계안의 감속재로서 중수와 경수의 비교

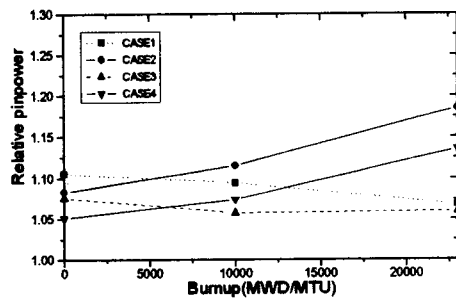


그림 7. 각 CASE 별 pin peaking 계산

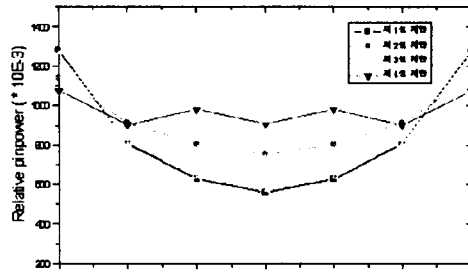


그림 8. 각 CASE별 주기초 Bundle內 출력분포

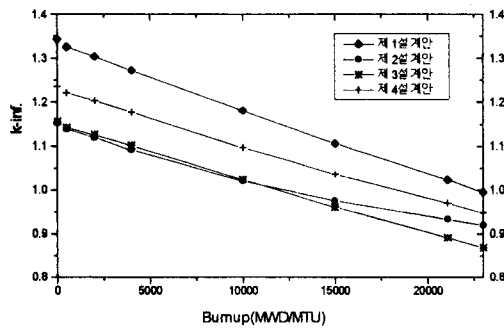


그림 9. 각 설계안에 대한 무한증배계수

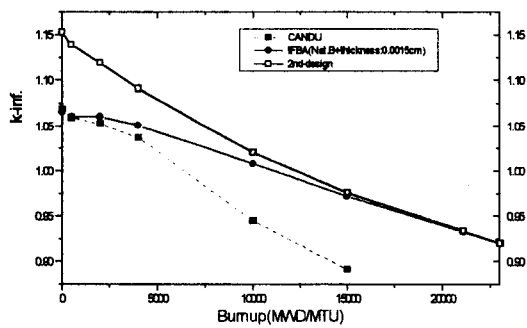


그림 10. IFBA사용시 반응도 제어효과