

소형동력로의 초장주기 무붕산 노심 핵설계

Nuclear Design for the Ultra-Long Cycle SBFO Core of Small-Sized Power Reactor

구분승, 김명현

경희대학교
449-701 경기도 용인시 기흥읍

요 약

U-10Zr 금속핵연료를 이용하여 잠수함용 소형동력로의 초장주기 무붕산 노심을 핵설계 하였다. 핵연료집합체 설계에서는 반응도 제어를 담당하는 제어봉에 부과되는 부담을 가능한 줄이기 위하여 가연성 독봉의 개수와 농도를 조절하여 연소에 따른 반응도 변화가 최소가 되는 방향으로 설계하였다. 가연성 독봉의 경우 Gd_2O_3 와 Pyrex glass를 혼합하여 사용하였으며, 제어봉은 잉여반응도 제어용으로는 Ag-In-Cd을 사용하였고 정지제어봉은 B-10의 함량을 90w/o까지 농축한 B_4C 를 사용하였다. 임계제어봉 위치를 탐색한 결과 주기길이 20년을 만족할 수 있었고 첨두출력계수도 안전한계치 이내로 유지됨을 알 수 있었다. 정지여유도를 계산한 결과 무붕산운전 노심의 재장전 조건인 CZP 상태에서 유효증배 계수가 0.95 이하를 만족하였고, 감속제 온도계수 또한 HFP와 HZP 상태에서 모두 음의 값을 보여 안전성을 확인할 수 있었다.

Abstract

A feasibility of nuclear design for the ultra-long cycle core with soluble boron free operation was investigated for a small-sized power reactor for submarine application. U-10Zr metal fuel were tested for the higher discharge burnup fuels. In order to compensate the large excess reactivity, 12w/o enriched Gd_2O_3 and 80w/o enriched Pyrex glass were used as burnable poison rods. For the enhanced shutdown reactivity, B-10 in B_4C shutdown rod was also highly enriched. Ag-In-Cd with standard isotope composition was used for the reactivity control throughout the cycle. Critical control rod positions were found throughout single batch cycle(12.5EFPyr). F_Q were found to be kept within the safety limits and MTC showed negative value at HFP and HZP conditions. Shutdown margin was also preserved at the refueling cold standby condition.

1. 서론

최근의 신형로 개발에서 노심 설계의 특징은 저출력노심, 장주기 장전전략, 저누설 장전 모형, 부하추중운전, 무봉산 운전, MOX나 Thorium 또는 금속핵연료등 신형핵연료의 사용 등이 있다. 무봉산운전[1]은 1차 계통 부식의 주원인인 봉산을 제거함으로써 계통의 건전성이 유지되고 액체폐기물 발생량을 현저하게 줄일 수 있으며, 화학체적제어계통(CVCS)의 제거로 발전 시설을 간단하게 한다는 장점을 가진다. 하지만 기존 가압경수로에서 봉산수가 담당하던 잉여반응도 제어를 가연성 독봉과 제어봉으로 해야 하며, 출력이 노심 하부로 처지는 현상이 발생한다는 단점을 가진다. 장주기 운전전략[2]은 이용율의 향상과 사용후 핵연료 발생량의 감소로 경제성을 향상시킬 수 있다.

무봉산운전 운전과 장주기 노심의 장점을 최대한 활용하기 위한 신형로 설계 방안으로써 뿐만 아니라, 빠른 출력의 증감발과 안전성 그리고 계통의 단순화가 요구되는 잠수함이나 선박용 원자로등 소형동력로의 설계 요건으로써 초장주기 무봉산노심의 적용 가능성에 대한 연구가 외국에서는 오래전부터 수행되어 왔다. 최근에는 지역난방용 원자로, 담수화플랜트용 원자로, 심해저 탐사용 원자로 등으로 활용 범위를 점차 확대하고 있다. 국내의 경우 현재 한국원자력연구소(KAERI)에서 담수화플랜트 노심인 SMART (System Integrated Modular Advanced ReacTor)[3]를 개발 중에 있으며 330MWt의 소형동력로서 무봉산 노심, 1,500EFPD 이상의 주기길이, 1 batch 장전전략 등을 노심 설계의 특징으로 하고 있다. 또한 경희대학교에서는 UO_2 핵연료를 이용하여 선박용(유조선) 소형동력로의 노심 핵설계[4]를 수행한바 있으며 이를 통하여 원자력 활용 가능성을 판단할 수 있었다. 또한 AP-600 원자로를 모델로 하여 600MWe급 가압경수로의 무봉산운전 노심에 대하여 핵설계가 가능함을 확인하였다. 연구는 크게 두 가지 설계 조건에서 타당성이 검토되었는데 첫째로, UO_2 핵연료를 이용하여 3 batch, 18개월 주기길이를 만족함을 확인하였고[5][6] 둘째로, 혼합핵연료(MOX)를 이용한 single batch, 60개월 주기길이를 만족함을 확인한 바 있다.[7]

본 연구에서는 U-10Zr[8] 금속핵연료를 이용하여 가압경수로에서 봉산이 담당하던 반응도를 가연성 독봉과 제어봉만을 사용하여 100MWt 일체형 가압경수로의 무봉산 노심 구성이 가능한지를 확인하고자 한다. 주기길이 20년(12.5EFPyr)을 만족하면서 안전하게 변수 즉, 핵연료 온도계수, 감속재 온도계수, 침투출력계수 그리고 무봉산운전 노심의 재장전 조건인 CZP 상태에서 유효증배계수 0.95 이하를 만족하는지 여부를 확인할 것이다.

2. 일반적인 설계 요구조건

잠수함용 소형동력로의 경우 상업용 원자로에 비해서 장주기로 운전되고 심해에서 운전되기 때문에 안전성과 신뢰성의 향상이 선행되어야만 한다는 설계 특성을 가진다. 그러므로 설계요구조건을 다음과 같이 정하였다.

첫째, 원자로의 형태는 일체형 가압경수로이다. 일체형 원자로는 증기발생기, 가압기, 냉각수 펌프, 제어봉 구동장치가 원자로 용기 내에 존재하도록 설계되어진 형태로서 이는 원자로의 크기와 무게를 현저하게 줄이며, 또한 containment vessel내에 물이 채워져 있어 차폐역할도 함께 수행할 수 있다는 장점을 가진다.

둘째, 열출력은 100MWt이며 단일 batch로써 주기길이 20년을 만족할 수 있도록 결정하였다. 하지만 잠수함의 특성을 고려하여 이용률(Availability Factor) 62%[9]를 적용하였다. 정격출력으로는 12.5EFPyr가 되고 이때의 방출연소도는 50GWD/MTU이다.

셋째, 원자로는 무봉산으로 운전되어 진다. 운전중 봉산수를 사용하지 않으므로, 화학체

적제어계통의 제거로 인한 계통의 단순화와 큰 음의 감속제 온도계수로 원자로의 안전성을 증진시킬 수 있다는 장점을 가진다.

넷째, 원자로의 낮은 열출력으로 운전되어진다. 낮은 선출력밀도로 운전되므로 제어봉의 잦은 움직임으로 인해 발생하는 상대적으로 높은 Peaking Factor를 수용할 수 있고 열적 안전성을 증진시킬 수 있다.

다섯째, 외국의 선박용 원자로 설계에 있어서 안전성과 신뢰성을 증진시키기 위한 목적으로 채택하고 있는 것으로는 피동안전계통과 자연대류에 의한 붕괴열 제거 계통의 도입을 들 수 있다. 그리고 in-vessel control rod driving mechanism의 도입으로 rod ejection accident를 방지하도록 설계하며, 또한 water-filled containment vessel의 도입으로 LOCA사고시 노심내 냉각수의 양을 일정 수준 유지시켜 원자로의 안전성을 증진시킬 수 있도록 설계되어진다.

3. 노심 핵설계 특성

잠수함용 소형동력로의 핵연료로는 U-10Zr 금속핵연료를 사용하였다. 핵연료 재질 설계에 있어서 가장 중요시되어야 할 것으로는 핵연료가 정해진 주기를 만족하면서 과출력시 기계적 건전성을 유지할 수 있을 것인 것이다. 금속핵연료는 UO_2 세라믹 핵연료에 비해서 출력의 급감발시 PCI에 강하고, 단위 부피당 핵분열 물질의 함유량이 높으며 보다 높은 열전도도를 가진다. 그리고 U-10Zr 금속핵연료는 Shippingport 및 외국 잠수함용 원자로의 핵연료로써 사용되어진 경험을 가지고 있으며, 최근의 연구를 통하여 여러 원자로 개발에 사용되고 있다. 그림 1은 U-10Zr 금속핵연료의 연소 특성을 보여주고 있다. 그림에서와 같이 비록 혼합핵연료(MOX)에 비해서는 전환율이 떨어지지만 UO_2 핵연료에 비해서는 다소 큰 전환율을 가지기 때문에 좀더 낮은 농축도로 주기길이를 만족할 수 있어 경제적인 측면에서도 이로운점을 가진다.

핵연료 반경 및 pin pitch size는 V_m/V_f ratio 변화에 따른 핵적특성을 이용하여 결정하였다. 그림 2와 그림 3은 V_m/V_f ratio와 핵연료 반경에 따른 감속제 온도계수(MTC)의 변화, V_m/V_f ratio 변화에 따른 무한증배계수를 보여준다. 그림 2에서와 같이 핵연료 반경이 클수록 less negative한 MTC 값을 보이지만, V_m/V_f ratio가 동일할 경우 반경이 클수록 감속제와 접하는 면적의 증가로 큰 무한증배계수를 보인다. 또한 V_m/V_f ratio가 클수록 less negative한 MTC 값을 갖지만 무한증배계수는 커짐을 알 수 있다. 또한 무방산 운전노심이 매우 큰 음의 MTC 값을 갖음을 고려할 때 핵연료 반경의 증가로 인한 MTC의 less positive화는 큰 문제가 되지 않는다. 이와 같이 핵연료봉의 반경과 V_m/V_f ratio에 따른 핵적특성은 각기 장단점을 가져 어디에 주안점을 두느냐에 따라서 달라지게 된다. 본 연구에서는 가압경수로의 설계안을 최대한 이용하자는 의도 하에 핵연료봉의 반경을 0.45cm로 결정하였으며, 중성자 경제성을 최대한 높이려는 목적으로 V_m/V_f ratio를 크게 하여 pin pitch size를 1.6641cm로 결정하였다. 그림 3은 본 연구의 설계안과 일반 상업로와 선박용 원자로의 single cell에서의 $N_m V_m / N_f V_f$ 비를 보여주고 있다. 그림에서와 같이 Number 비의 증가로 중성자 경제성을 증진시킬 수 있다.

핵연료집합체의 배열 및 개수의 결정에 있어서는 각기 배열의 따른 장단점을 분석하였다. 노심 크기의 최소화 및 낮은 선출력밀도로 운전되며 반응도 제어를 위한 충분한 가연성 독봉과 제어봉집합체의 확보, 그리고 1/4 대칭 노심의 구성가능 등을 고려한 결과 15x15 배열에 총 37개의 핵연료집합체가 가장 적합한 것으로 판명되었다. 낮은 선출력밀도

(7.4815kW/m)로 운전되기 때문에 상대적으로 큰 첨두출력계수($F_Q \leq 6.18$) 제한치를 얻을 수 있었다.

기타 노심 설계에 필요한 설계변수들은 parametric study와 외국의 소형로 노심 설계자료를 바탕으로 본 연구에 적절하도록 결정하였으며 표 1에 나타내었다.

4. 노심 잉여반응도 제어 설계

무봉산 노심에서 잉여반응도의 제어는 가연성 독봉과 제어봉에 의해서 수행되어 진다. 무봉산 노심이기 때문에 가연성 독봉은 전 주기동안의 잉여반응도를 제어해야 하며, 가연성 독봉에 의해서 제어되지 못한 잉여반응도는 제어봉에 의해서 제어된다. 또한 제어봉의 경우 출력조절 및 전출력에서 영출력으로 변할 때 발생하는 reactivity defect를 제어하며 충분한 정지여유도를 확보할 수 있도록 설계되어져야 한다.

가연성 독봉의 특성은 핵연료집합체에 장전되는 독물질의 농축도, 개수, 위치의 함수이다. 일반적으로 상업용 원자로에 사용되어지는 독물질로는 Boron, Gadolinium, Erbium 등이 있다. 그리고 가연성 독봉의 형태는 일체형과 분리형 독봉으로 구별되어지며, 일체형 독봉은 Gd_2O_3 , Er_2O_3 가 있으며 분리형 독봉으로는 Pyrex glass와 WABA가 사용되어 진다. 무봉산 소형동력로의 설계에 적절한 가연성 독봉을 찾기 위해서 독물질과 개수에 대한 민감도 분석을 수행한 결과 Pyrex glass와 Gd_2O_3 가 가장 적절한 것으로 나타났다. Gadolinium의 경우 비록 주기 중반에 독물질의 소진을 변화로 hump 현상이 발생하지만, 중성자 흡수능력이 뛰어나다는 장점을 가진다. 또한 Pyrex glass의 경우는 주기말까지 독물질의 제어효과를 기대할 수 있어 장주기 제어전략에 적절하다고 판단된다.[10][11] Gadolinium을 이용한 가연성 독봉은 현재 PWR을 비롯해서 BWR에도 널리 사용되어지고 있다. 제어봉이 삽입되지 않는 핵연료집합체에는 Pyrex glass와 Gd_2O_3 이 사용되었고, 제어봉이 삽입되는 핵연료집합체에 대해서는 Gd_2O_3 를 사용하였다. 주기초의 큰 잉여반응도를 보상하기 위해서 Pyrex glass의 B-10함량을 80%까지 농축하였으며 Gd_2O_3 은 12%까지 농축하여 사용하였다.

노심에 장전되는 총 핵연료집합체의 수는 37개이며 그중 제어봉이 삽입되는 핵연료집합체의 수는 21개이다. 핵연료집합체의 형태는 U-235의 함량에 따라서 3종류(A, B, C-type)로 나누었으며 농축도는 각각 13, 12, 5w/o로 농축하여 사용하였다. 장전모형의 설계 목표로는 평면출력 분포를 주기말까지 평탄하게 유지시키는 것으로 하였다. 노심의 출력분포를 평탄하게 함으로써 잉여반응도 제어를 효과적으로 할 수 있고 앞서 선택한 핵연료집합체의 설계안으로 노심의 출력분포를 그대로 유지시켜 나아갈 수 있기 때문이다. 따라서 반응도를 제어하는 제어봉들도 노심내에 골고루 분포시켜 제어봉의 삽입과 인출시 평면출력 분포가 가능한 찌그러지지 않도록 골고루 위치시켰다. 그림 4는 장전모형 및 제어봉 위치를 나타내고 있다. RB(Regulating Bank)는 잉여반응도 제어용 제어봉으로 총 9개이며 효율적인 잉여반응도 제어와 평탄한 평면 출력분포를 위하여 RB1과 RB2로 구분하였다. SB(Shutdown Bank)는 원자로 정지용 제어봉으로 사용하였다. 제어봉은 KOFA 설계 자료를 근거로 설계하였으며 Regulating Bank는 Ag-In-Cd을 사용하였고 Shutdown Bank는 B-10을 90w/o 농축한 B₄C를 사용하여 충분한 정지여유도를 확보할 수 있도록 설계하였다.

5. 노심 설계안의 핵특성

본 연구에서는 핵설계 계산을 위하여 CASMO-3/NESTLE[12][13] 전산체계를 이용하였다. 그림 5부터 그림 9까지는 U-10Zr 금속핵연료를 이용한 100MWt 잠수함용 소형동력로

의 초장주기 무봉산 노심 핵설계의 정특성 분석 결과를 각각 보여주고 있다. 그림 5와 그림 6은 ARO 상태에서의 잉여반응도와 임계제어봉 위치를 보여주고 있다. 설계상의 오류를 고려 잉여반응도가 $1\% \Delta \rho$ 에서 $5\% \Delta \rho$ 이내에서 유지되도록 하였으며, 임계제어봉 위치 탐색에 있어서는 가압경수로에서 사용하는 중첩원리가 적용되도록 하였다. 효과적인 잉여반응도 제어를 위하여 RB1과 RB2로 구분하였으며 그림 5에서 보듯이 주기길이를 만족함을 알 수 있다. 그림 6은 첨두출력계수(F_Q)를 보여주고 있는데 핵연료집합체의 최대 첨두봉계수(Pin Peaking)와 3차원 노드별 상대출력분포(Relative Power Distribution)를 고려했음에도 불구하고 F_Q 설계제한치인 Cycle Maximum $F_Q(\leq 6.18)$ 이내로 유지되는 것을 알 수 있었다. 감속재 온도계수를 계산한 결과 HFP 조건과 HZP 조건에서 모두 음의 값을 보여 원자로 안전성 측면을 위배하지 않는 것으로 나타났다. 일반적으로 무봉산으로 노심을 설계할 경우, 감속재 온도계수는 수용성 보론을 사용하는 일반 가압경수로에 비해서 큰 음의 값을 갖는다. 하지만 그림 8은 큰 음의 감속재 온도계수를 가지지 않는데 그 이유로는 설계변수 연구의 pin pitch size 결정에 있어서 V_m/V_f ratio를 크게 하여 큰 무한증배계수를 갖도록 설계하였기 때문이다. 즉 일반 가압경수로에서 채택하는 V_m/V_f ratio에 비해서 큰 V_m/V_f ratio로 결정하였기 때문에 무한증배계수의 변화가 감속재 온도 변화에 대하여 작기 때문에 위와 같이 적은 음의 감속재 온도계수를 보이는 것으로 판단된다. 그림 9는 주기초, 주기중, 주기말의 평면출력 분포를 보여주고 있다. 소형로의 노심 연소특성으로 노심 외각에서 leakage 양의 증가로 노심 중앙과 외각의 큰 출력분포 차를 보여주고 있다. 표 3은 정지여유도 계산 결과를 보여주고 있다. Shutdown Bank에 사용되는 B_4C 의 농도를 90w/o까지 농축함으로써 무봉산운전 노심의 재장전 조건인 유효증배계수가 0.95 이하를 충분히 만족함을 알 수 있었다.

6. 결론

U-10Zr 금속핵연료를 이용하여 가압경수로 노심 설계에서 확립된 핵설계 방법을 바탕으로 CASMO-3/NESTLE 전산체계를 이용하여 100MWt 잠수함용 초장주기 무봉산 노심 핵설계가 가능함을 확인하였다. 잠수함용 원자로에 적합하도록 설계 요구조건을 결정하고 그에 따른 설계변수 연구를 통한 핵설계를 하였다. 가연성 독봉은 Gd_2O_3 와 Pyrex glass를 혼합하여 사용하였는데 제어봉이 삽입되지 않는 핵연료집합체에는 Gd_2O_3 와 Pyrex glass 두 가지를 이용하여 핵연료집합체를 구성하였으며, 제어봉이 삽입되는 핵연료집합체에는 Gd_2O_3 만을 사용하는 방법으로 가연성 독봉의 활용을 극대화하였다. 제어봉 설계에서는 잉여반응도 제어용으로는 Ag-In-Cd을 사용하였으며 정지제어봉은 제어봉가를 높이기 위하여 B-10의 함량을 90w/o까지 농축한 B_4C 를 사용하였다.

노심분석 결과 첨두출력계수(F_Q)를 전 주기동안 설정한 안전한계치인 6.18 이내로 유지시키면서 잉여반응도 제어봉만으로 주기길이 20년(12.5EFPyr, 62% Availability Factor 적용) 동안 반응도 제어가 가능함을 확인할 수 있었다. 또한 정지여유도를 계산한 결과 무봉산운전 노심의 재장전 조건인 CZP 상태에서 유효증배계수가 0.95 이하를 만족하였고, 감속재 온도계수 또한 HFP와 HZP 상태에서 모두 음의 값을 보여 안전성을 확인할 수 있었다.

참고문헌

1. ABB-CE, "Elimination of Soluble Boron for a New PWR Design," EPRI Project RP-2614-24, Final Report (1989).
2. M. V. McMahon, M. J. Driscoll, N. E. Todreas, "Modeling and Design of a Reload PWR Core for a 48 Month Fuel Cycle," Proceedings of the American Nuclear Society Topical Meeting on Advances in Nuclear Fuel Management II, Myrtle Beach, South Carolina, U.S.A., March 23-26, 1997.
3. 박 상운, 이 기복, 지 성균, 장 문희, "Nuclear Design Characteristics of SMART," 한국 원자력학회 춘계학술발표회 논문집, (1998).
4. 최 유선, 김 중채, 김 명현, "선박용 소형동력로의 노심 핵설계," 한국에너지공학회지, 제 5권, 146-152 (1996)
5. 김 중채, 김 명현, 이 은철, 김 영진, "Nuclear Design Feasibility of the Soluble Boron Free PWR Core," 한국원자력학회지, Vol.30, Number 4, pp.342-352, August (1998)
6. Jong-Chae Kim and Myung-Hyun Kim, "Reactor Core Design for the Soluble Boron Free Operation in Medium Size PWR," proceedings of the Topical Meeting on Advances in Nuclear Fuel Management II, Myrtle Beach, South Carolina, U.S.A., March 23-26, 1997.
7. Jong-Chae Kim and Myung-Hyun Kim, "Core Design for the Ultra-Long Cycle Soluble Boron Free Operation in Medium Size PWR," Proceedings of 9th International Conference on Emerging Nuclear Energy Systems, pp.509-516, Tel-Aviv, Israel, June 28 - July 2, 1998.
8. Benjamin M. Ma, "Nuclear Reactor Materials and Application," Van Nostrand Reinhold Company Inc., (1983).
9. 권 재상, "최첨단 무기 시리즈 6," 도서출판 자작나무, (1994).
10. S. H. Lee, et. al., "Optimization of Burnable Poison Application Strategy," KEPRI, KRC-92N-J04, (1993).
11. T. K. Kim, et. al., "A Study on Nuclear Characteristics of Burnable Absorbers in Hexagonal Fuel Assembly," KAERI, KAERI/TR-766/96, (1996).
12. Malte Edenius, Hans Haggblm, and Bengt-Herman Forssen, "CASMO-3, A Fuel Assembly Burnup Program," STUDSVIK/NFA-89/2, Studsvik (1991).
13. P. J. Turinsky, et. al., "NESTLE: A Few-Group Neutron Diffusion Equation Solver Utilizing the Nodal Expansion Method for Eigenvalue, Adjoint, Fixed-Source Steady-State and Transient Problem" INEL EGG-NRE-11406, June(1994).

[표 2] 가연성 독봉 및 제어봉의 설계 제원

	제 원	제어물질	제어물질 농도(w/o)
Gadolinia		Gd ₂ O ₃	Gd - 12
Pyrex glass		B ₂ O ₃	B ¹⁰ - 80
Regulating Bank	KOFA	Ag-In-Cd	85/10/5
Shutdown Bank	KOFA	B ₄ C	B ¹⁰ - 90

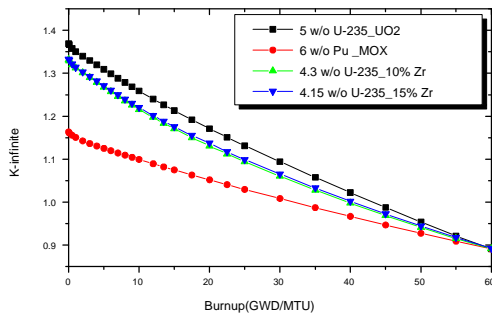
[표 1] 노심 주요 설계변수

Power(MWth)	100
Efficiency(%)	20
Reactor type	Integral type PWR
B_D (GWD/MTU)	50
q' (kW/m)	7.4815
Cycle Length(yr)	20
No. of Fuel assys.	37
Assy. Pitch(cm)	21.0432
No. of rods/assy/array	204/15x15
Rod Pitch(cm)	1.6641
Eff. Core H(cm)/D(cm)	170/171.89
Fuel	U-10%Zr alloy
Enrichment of U-235	15w/o/5w/o
Density(g/cm ³)/%	15.14475/95.25%
Pellet D(cm)	0.9
Gap	Air/0.0093
Material/thick.(cm)	
Cladding	Zry-4/0.0641
Material/thick.(cm)	
CRDM type	In-vessel type
No. of Control Rod assys.	21
BP	Gd ₂ O ₃ , Pyrex glass
Avg. Fuel Temp.(°C)	378.5
Avg. Moderator Temp.(°C)	290
Pressure(MPa)	15.5

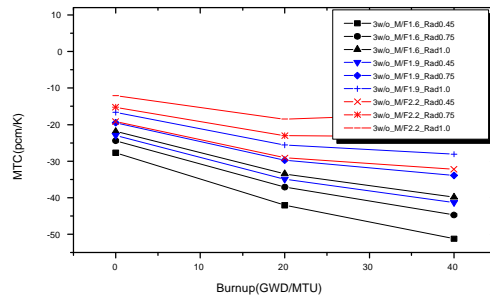
[표 3] Shutdown Margin

	BOC (0 GWD/MTU)	MOC (22GWD/MTU)	EOC (50 GWD/MTU)
(N-1) RCCA Worth	8.38%	9.69%	12.01%
with 10% uncertainty from rodded position	7.54%	8.72%	10.81%
Power Defect(HFP-HZP)	0.49%	0.48%	0.57%
Shutdown Margin	7.05%	8.24%	10.24%
Temp. Defect(HZP-CZP)	2.16%	2.16%	1.65%
Subcriticality at Refueling Standby	0.91617	0.90311	0.87994

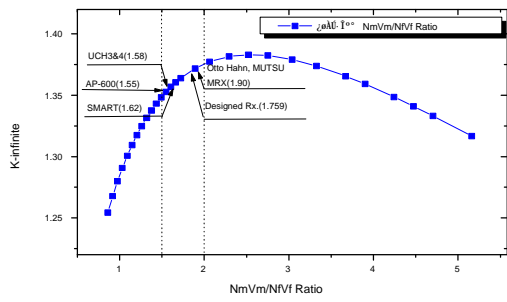
* No Xenon Condition



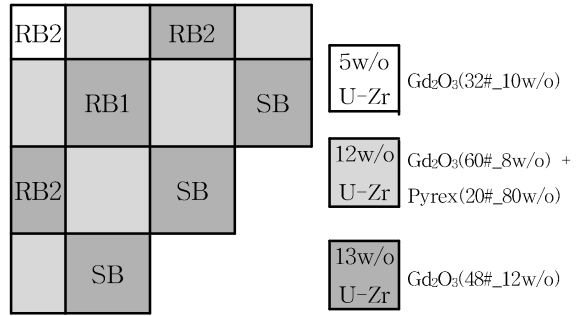
[그림 1] 핵연료 종류별 연소특성



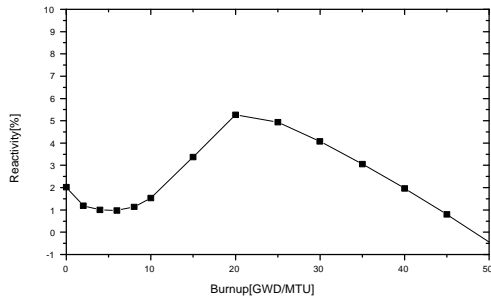
[그림 2] V_m/V_f 와 핵연료 환경에 따른 MTC



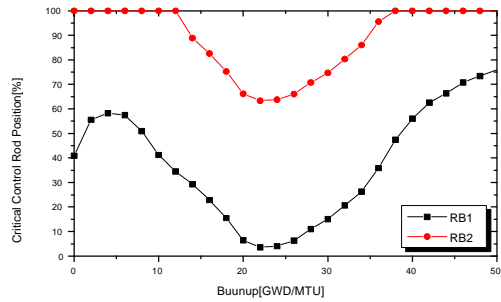
[그림 3] 원자로별 NmVm/NfVf ratio



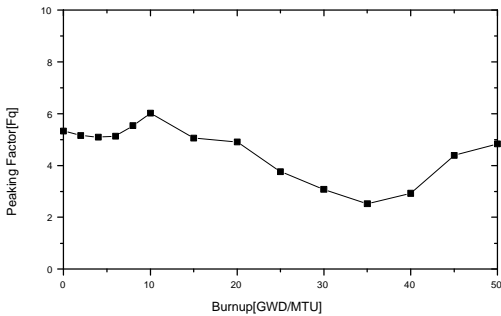
[그림 4] 장전모형 및 제어봉집합체 위치



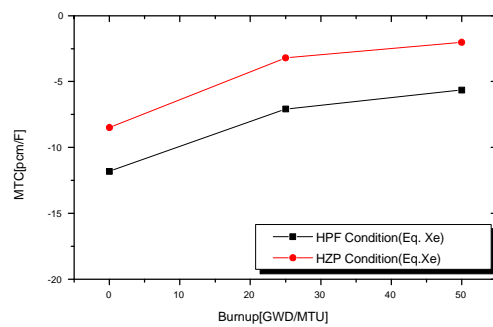
[그림 5] ARO 상태에서의 잉여반응도



[그림 6] 임계 제어봉 위치



[그림 7] Max. Peaking Factor(Fq)



[그림 8] 감속제 온도계수

Y:X	1	2	3	4
1	1.4935	1.3749	1.4684	0.5413
2	1.0943	1.5334	1.4614	0.5209
3	0.5446	0.9622	1.2385	0.8315
4	1.3749	1.7225	0.9472	0.5688
5	1.5334	1.6707	1.0383	0.5093
6	0.9622	1.1018	1.1587	0.8409
7	1.4684	0.9472	0.7371	
8	1.4614	1.0383	0.6943	
9	1.2385	1.1587	0.9801	
10	0.5413	0.5688		BOC
11	0.5209	0.5093		MOC
12	0.8315	0.8409		EOC

[그림 9] 노심 평면 출력분포