creative commons
COMMONS DEED

저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.

변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

공학석사 학위논문

저농축 우라늄 합금 연료를 이용한 잠수함용 무붕산 경수로 노심 설계

Nuclear Core Design of Soluble Boron Free Water-cooled Reactor for Submarines Using Low Enriched Uranium Alloy Fuel

2019 년 12 월

서울대학교 대학원

원자핵공학과

김 성 배

저농축 우라늄 합금 연료를 이용한 잠수함용 무붕산 경수로 노심 설계

Nuclear Core Design of Soluble Boron Free Water-cooled Reactor for Submarines Using Low Enriched Uranium Alloy Fuel

지도교수 주 한 규

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함
2019 년 12 월

서울대학교 대학원
원자핵공학과
김 성 배

김성배의 공학석사 학위논문을 인준함
2019 년 12 월

위 원 장 심 형 진 (인)

부위원장 주 한 규 (인)

위 원 김 응 수 (인)

초 록

한국형 원자력 추진 잠수함에 탑재하기 위한 소형 원자로 노심을 설계하고, 성능과 안전성을 검증하였다. 노심의 출력은 7,000톤급 원자력 추진 잠수함이 수중 최대 속력 35 kts까지 기동하는 것을 목표로 하여 150 MWt로 설정하였으며, 저농축 우라늄을 핵연료를 사용하여 함정 수명 30년을 초과하는 핵연료 교체 주기를 달성하는 데 주안점을 두었다. 이를 위하여 저농축 고밀도 금속 합금 핵연료인 U−$10_{wt\%}$Mo을 사용하였으며, 결과적으로 전체 함정 운용기간 동안 핵연료의 재장전이 필요 없는 노심을 설계할 수 있었다.

노심 설계를 위하여 서울대학교 원자로물리 연구실에서 개발한 직접 전노심 수송계산 코드인 nTRACER를 이용하였으며, 핵연료의 재료 결정부터 핵연료봉과 핵연료 집합체 설계, 전체 노심의 배열 결정, 제어봉 집합체 배치의 순서로 노심 설계를 진행하였다.

설계된 노심은 총 332개 핵연료 집합체로 구성된다. 핵연료 집합체는 가로, 세로 길이 5 cm, 높이 1 m로 상용 핵연료 집합체의 1/16 수준으로 크기를 줄임으로써 노심 내 공간활용도를 높였다. 하나의 핵연료 집합체는 6x6 배열로 20%로 농축된 핵연료에 최적화 되도록 설계 하였으며 32개의 핵연료봉과 1개의 안내관으로 구성된다.

노심의 높은 잉여반응도를 통제하기 위하여 ZrB_2을 핵연료봉에 직접 코팅하는 일체형 가연성 독물질(IFBA, Integral Fuel Burnable Absorber)을 사용하였고, 그 결과 초기 노심의 높은 잉여 반응도를 상당히 조절하여 제어봉으로 통제 가능한 수준까지 낮출 수 있었다.

설계된 노심의 성능과 안전성 분석을 위하여 설계와 마찬가지로 nTRACER를 이용하였으며, 결과적으로 설계 노심이 충분한 주기길이과 안전성을 달성하였음을 확인하였다. 설계 노심의 유효 전출력 가동년수(EFPY)는 4.54년이었으나, 잠수함의 가동률과 운용특성을 고려하여 요구되는 에너지량 보다 약 5% 가량 더 많은 에너지를 생산할 수 있었고, 결과적으로 노심의 핵연료 교체 주기는 설계 목표를 만족하는 35년으로 산출되었다. 또한 전체 연소 주기동안 산출된 노심의 첨두출력계수(F_q)는 2.01546으로 첨두출력계수 제한치($F_{q.limit}$)인 3.34545와 비교하면 충분한 열적 여유도를 가짐을 알 수 있었다.

잠수함용 원자로는 잉여반응도를 제어하기 위하여 붕산을 사용하지 않으므로 제어봉의 충분한 제어능은 매우 중요한 안전 요건이다. 본 연구에서 설계한 원자로는 고온전출력(HFP)과 고온영출력(HZP) 그리고 저온영출력(CZP)의 모든 운전 조건에서 제어봉 삽입만으로 충분히 비상정지가 가능하였다. 또한, 노심이 운전 중인 고온전출력 조건에서는 4개의 제어봉 집합체 중 2개 집합체를 사용하지 못하더라도 노심을 비상정지 하는 것이 충분히 가능했다.

본 연구에서는 일련의 과정을 통하여 35년의 핵연료 교체 주기를 가지는 150 MWt의 잠수함용 원자로를 설계하였으며, 해당 원자로가 목표한 설계 기준을 달성하였을 뿐만 아니라 충분한 안전성을 가짐을 검증 하였다.

주요어 : 잠수함용 원자로
저농축 고밀도 핵연료
금속 합금 핵연료
nTRACER

학 번 : 2018-25185

목 차

제 1 장 서 론 1
제 1 절 연구의 배경 및 목적 1
제 2 절 연구 범위 5
제 3 절 논문의 구성 6

제 2 장 HEU vs LEU 7
제 1 절 고농축 우라늄 사용의 원인 7
제 2 절 저농축 우라늄 사용의 한계점 10
제 3 절 고밀도 우라늄 핵연료 적용 13

제 3 장 원자로 설계기준 및 재료 결정 15
제 1 절 원자로 설계기준 15
제 2 절 핵연료 재료 선정 25

제 4 장 잠수함용 원자로 설계 34
제 1 절 핵연료 집합체 설계 34
제 2 절 노심 설계 45

제 5 장 원자로 성능 및 안정성 분석 50
제 1 절 초기노심의 반응도와 출력분포 51
제 2 절 연소에 따른 노심의 반응도와 연소주기 54
제 3 절 첨두출력계수(F_q) 59
제 4 절 반응도 계수 61
제 5 절 제어봉 제어능 63

제 6 장 결 론 71

참고문헌 75

Abstract 77

표 목차

[표 1] 우라늄 농축도에 따른 동일 질량의 U^{235}를 포함하는 핵연료 부피 10

[표 2] 우라늄 농축도에 따른 노심의 연소주기 비교 11

[표 3] 우라늄 농축도에 따른 선체 크기 변화 비교 12

[표 4] 핵연료 재료에 따른 우라늄 밀도 비교 14

[표 5] 주요 원자력 추진 잠수함의 배수량 및 탑재 원자로의 출력 16

[표 6] 주요 잠수함의 선체 제원 18

[표 7] 주요 핵연료 재료의 특성 29

[표 8] 핵연료 재료에 따른 주기길이 변화 비교 31

[표 9] U−10$_{wt\%}$ Mo 합금의 열전도율 측정값 33

[표 10] 핵연료 집합체 크기에 따른 노심내 핵연료 적재량 비교 35

[표 11] 핵연료 집합체 설계안 별 선출력 밀도 37

[표 12] 핵연료 집합체에 따른 노심 연소 계산 결과 비교 40

[표 13] 일체형 가연성 독물질 제원 42

[표 14] 새롭게 설계된 잠수함용 원자로 세부 제원 50

[표 15] 운전조건에 따른 초기노심의 유효증배계수 비교 52

[표 16] 반응도 계수 측정 결과 62

[표 17] 운전조건별 제어봉 제어능 측정결과 63

[표 18] 고온전출력(HFP) 조건에서 제어봉 집합체별 제어봉가 65

[표 19] 초기 노심 임계상태 유지를 위한 제어봉 집합체 운용 현황 66

[표 20] 최대 반응도 시점에서 임계상태 유지를 위한 제어봉 집합체 운용 현황 68

그림 목차

[그림 1] 잠수함의 원자력 추진 계통 구성 5

[그림 2] Xe^{135}의 생성 및 소멸 경로 24

[그림 3] 온도에 따른 금속우라늄의 결정 변화..... 28

[그림 4] 핵연료 집합체 크기에 따른 노심내 연료 배치 35

[그림 5] 핵연료 집합체 설계안 36

[그림 6] 농축도에 따른 저감속 상태 영역의 차이 비교 38

[그림 7] 핵연료 집합체 및 핵연료봉 단면도 41

[그림 8] IFBA 코팅 핵연료봉이 적용된 핵연료 집합체 설계 단면도..... 43

[그림 9] IFBA 코팅 적용에 따른 잉여반응도 차이 비교 44

[그림 10] 개선 전 노심 배치도 및 반경방향 출력분포..... 46

[그림 11] 최종 원자로 설계 단면도 및 반경방향, 축방향 출력 분포..... 47

[그림 12] 제어봉 집합체 배치도 49

[그림 13] 운전상태별 초기노심의 반경방향 출력분포 53

[그림 14] 노심의 연소기간에 따른 유효증배계수 변화..... 55

[그림 15] 노심의 연소도에 따른 유효증배계수 변화..... 56

[그림 16] 연소시점별 반경방향 출력분포..... 58

[그림 17] 연소시점별 축방향 상대 평균출력분포..... 59

[그림 18] 연소에 따른 출력계수 변화.....61

[그림 19] 초기노심(HFP)에서 전 제어봉 삽입 시 반경방향 출력 분포.....64

[그림 20] 초기 노심 제어봉 삽입에 따른 반경방향 출력분포 67

[그림 21] 최대 반응도 시점에서 제어봉 삽입에 따른 반경방향 출력분포(1/2).....69

[그림 22] 최대 반응도 시점에서 제어봉 삽입에 따른 반경방향 출력분포(2/2).....70

제 1 장 서 론

제 1 절 연구의 배경 및 목적

축전지를 충전하기 위하여 주기적으로 스노클을 해야하는 디젤 잠수함과 달리 에너지 사용의 제약없이 무제한적 수중 임무를 수행하는 원자력 추진 잠수함은 디젤 잠수함 승조원에게 항상 동경의 대상이었다. 이는 25년 이상 디젤 잠수함을 운용하고 있는 대한민국 해군에 있어서도 예외라 할 수 없다. 21세기 유일한 분단국가이면서 국토의 3면이 바다로 둘러싸인 대한민국의 상황을 고려하면 확고한 해양통제권 장악은 국가의 번영과 안전을 보장하는 필수 요건이며, 원자력 추진 잠수함은 가장 은밀하고 강력한 해양 수호의 핵심 전력이기 때문이다.

이러한 현실을 반영하듯 최근 대한민국 해군은 원자력 잠수함 도입을 위한 TF를 창설하는 등 새로운 도약에 박차를 가하고 있다. 대한민국 해군은 25년의 긴 잠수함 운용기간 동안 단 한차례의 대형 인명사고도 허용하지 않을만큼 우수한 잠수함 운용 노하우를 보유하고 있으며, 이를 바탕으로 2013년 이후 해외 잠수함 승조원을 대상으로 '국제 잠수함' 교육과정을 운용 하고 있다. 이미 태국, 인도네시아, 싱가포르 등 총 7개국 50여명의 잠수함 승조원들이 우리 해군의 교육을 수료하였으며, 이는 앞으로도 계속 증가할 것이다. 우리의 강점은 비단 승조원의 잠수함 운용 능력에만 국한되는 것이 아니다.

지난해 9월 3,000톤급 국산 잠수함이 진수되면서 우리나라는 잠수함을 자체 설계하고 건조할 수 있는 몇 안되는 세계적 조선 선진국의

반열에 올랐으며, 원자력 분야의 기술력 역시 한국형 원자력 발전소를 해외에 수출할 만큼 우수한 수준에 도달하였다. 이러한 시대적 요구와 기술적 성숙도를 고려하면 대한민국 해군의 첫번째 원자력 추진 잠수함이 우리의 바다를 누비는 순간은 그리 멀지 않을 것으로 보인다.

이처럼 한국형 원자력 추진 잠수함 도입을 향한 움직임이 더욱 가시화 되는 현 상황에서 원자력 추진 잠수함에 대한 새로운 패러다임이 일고 있는데, 이는 바로 잠수함용 원자로에 사용되는 핵연료의 농축도에 대한 인식변화이다. 일반적으로 원자력 추진 잠수함은 90%이상의 고농축 우라늄[1)]을 연료로 사용하는 경우가 대부분이다. 실제로 미 해군의 모든 원자력 추진 군함은 93~99%의 고농축 우라늄을 연료로 사용하고 있다. 물론, 저농축 우라늄[2)]을 연료로 사용하는 대표적인 잠수함으로 프랑스의 바라쿠다급 잠수함이 있지만, 최신 잠수함인 바라쿠다급 잠수함조차 핵연료의 낮은 농축도로 인하여 함정의 수명기간 중 3~4차례의 핵연료 재장전을 피할 수 없다. 결국 함정 운용기간 30여년동안 연료의 재보급이 필요없는 잠수함은 고농축 우라늄을 연료로 하는 잠수함 뿐인 것이다. 이러한 사실은 긴 시간동안 상식으로 여겨졌으며, 20%미만의 저농축 우라늄을 연료로 사용하는 원자로가 함정의 작전운용 요구사항을 충족하면서 30년 이상의 주기길이를

---

1) 고농축 우라늄(HEU, Highly Enriched Uranium)은 핵연료나 핵무기로 사용하기 위하여 천연 우라늄을 농축시킨 것으로 U^{235}의 농축도가 20%를 초과하는 우라늄을 의미한다. 무기급으로 사용하기 위한 고농축 우라늄은 90% 이상의 농축도를 가져야 하며, 본 논문에서 가리키는 고농축 우라늄은 특별한 언급이 없는 한 93~99%의 농축도를 가지는 잠수함용 핵연료를 뜻한다.

2) 저농축 우라늄(LEU, Low Enriched Uranium)은 U^{235}의 농축도가 20%미만인 우라늄을 의미한다. 일반적으로 원자력 발전소에서 연료로 사용되는 저농축 우라늄의 농축도는 5% 미만이나, 본 논문에서 의미하는 저농축 우라늄은 특별한 언급이 없는 한 20% 농축도를 가지는 잠수함용 핵연료를 뜻한다.

가지는 것은 “경제성과 실효성이 없다”는 것이 정설이었다.

그러나 최근 원자력 추진 잠수함의 기술 동향은 전통적인 개념과는 조금 다른 모습을 보인다. 핵확산 방지에 대한 관심과 테러집단에 의한 고농축 우라늄의 비정상적 사용에 대한 우려가 고조되면서 고농축 우라늄 사용에 반대하는 여론이 본격적으로 일기 시작하였으며, 이러한 흐름은 고농축 우라늄의 주요 사용처인 해군 함정용 원자로에도 영향을 미쳤다. 결국, 1995년 의회제출 보고서를 통하여 “저농축 우라늄을 연료로 사용하는 것이 경제적, 실질적 이득이 없다”[3]고 결론 내렸던 미해군은 2014년과 2016년 보고서를 통하여 “해군 원자로에서 사용되는 고농축 우라늄 핵연료를 저농축 우라늄 핵연료로 전환하더라도 함정의 작전 요구능력과 핵연료 교체주기를 모두 만족시키는 것이 가능하며, 새로운 핵연료 재료에 대한 기술 개발은 결과적으로 국가적 이익이 될 것”이라는 새로운 의견을 제출하였다.

이러한 시대적 배경을 고려하여 본 연구는 저농축 우라늄을 연료로 하는 잠수함용 소형 원자로를 설계하는 것을 주 목적으로 한다. 이 연구에서는 향후 한국형 원자력 추진 잠수함의 만재톤수를 고려하여 원자로의 출력을 150MWt로 설정하였으며, 함정 운용기간 동안 핵연료의 재장전이 필요 없도록 충분한 핵연료 교체 주기를 가지는 원자로 설계에 주안점을 두었다. 연료물질의 개선과 개선된 연료물질에 최적화된 핵연료 집합체 및 노심 설계를 통하여 설계기준을 충족하면서

3) 1995년 미해군은 의회제출 보고서를 통하여 現 기술력으로도 저농축 우라늄을 연료로 사용하는 해군용 원자로를 개발하고 생산하는 것이 가능하지만, 이를 위하여 지나치게 많은 비용과 시간이 소모될 뿐만 아니라 과도하게 증가하는 선체의 배수량을 고려하면 고농축 우라늄 핵연료를 저농축 우라늄 핵연료로 전환하는 것이 경제적, 군사적 이점이 없다고 결론내렸다.

동시에 충분한 안전성을 갖춘 노심을 완성하였다. 노심의 설계와 검증에는 서울대학교 원자로물리 연구실에서 개발한 직접 전노심 수송계산 코드인 nTRACER[4)]를 사용하였다.

4) nTRACER는 서울대학교 원자로 물리 연구실에서 독자적으로 개발한 직접 전노심 수송계산 코드로서, 47개의 에너지 그룹으로 이루어진 핵종별 미시적 반응단면적을 기반으로 하여 2차원 평면계산에는 특성곡선법(MOC), 축방향 계산에는 노달법을 적용, 중성자 수송방정식과 확산방정식을 계산하여 노심을 해석하는 코드이다. nTRACER 코드의 계산결과에 대한 신뢰성은 이미 학계에서 충분히 입증되어 왔다.

제 2 절 연구 범위

그림 1에서 볼 수 있듯이 원자력 추진 잠수함의 추진계통은 크게 2가지로 구분된다. 일반적으로 핵분열이 발생하는 노심과 노심내부의 압력을 유지하는 가압기, 노심에서 발생한 고온의 냉각재를 이용하여 증기를 발생시키는 증기발생기 부분을 통틀어 원자로 계통이라 하고, 증기발생기에서 생산된 고압 증기를 이용하여 추진 터빈과 발전기 터빈을 작동하여 추진력을 얻고 전기를 생산하는 계통을 2차 계통이라 한다. 중소형 원자로에서 종종 고려되는 일체형 원자로의 경우 증기발생기와 가압기가 원자로의 압력용기 내에 위치하기도 하지만 크게 원자로 계통과 2차 계통으로 구분되는 점은 차이가 없다.

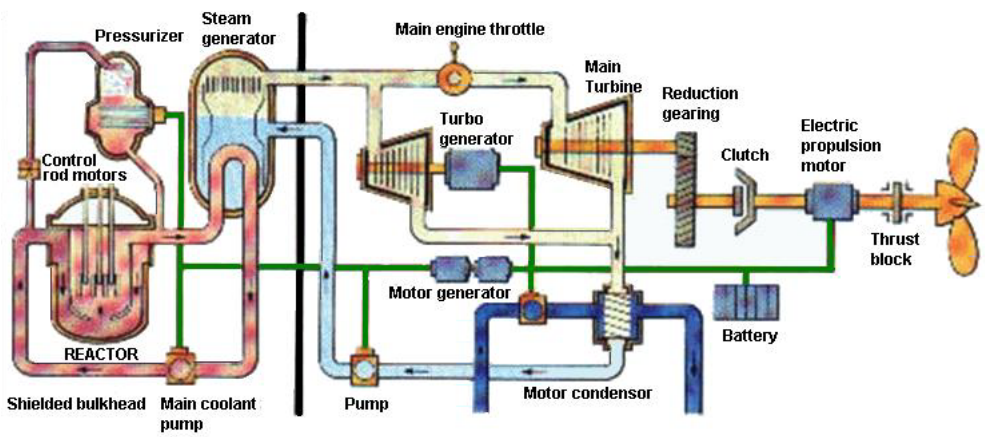


그림 1. 잠수함의 원자력 추진 계통 구성[1]

이 연구에서는 이러한 원자력 추진 잠수함의 추진계통 중 노심에 국한하여 설계를 수행하였다. 잠수함용 원자로의 특수성을 고려하여 작전운용 성능을 충족하기 위한 설계기준을 설정하였으며, 특히 저농축 핵연료 사용으로 인한 노심의 연소주기 감소를 극복하는데 집중하였다.

제 3 절 논문의 구성

이 논문의 제 2장에서는 전통적인 원자력 추진 잠수함에서 고농축 우라늄이 사용될 수밖에 없었던 이유를 살펴보고, 이를 바탕으로 저농축 우라늄이 가지는 한계점과 이를 극복할 수 있는 해결책을 소개한다. 제 3장에서는 실제적인 한국형 원자력 추진 잠수함의 설계에 앞서 한국형 원자력 추진 잠수함에 적합한 원자로의 설계기준을 설정하고, 저농축 우라늄 원자로의 핵심이 되는 고밀도 저농축 우라늄 핵연료 선정에 대하여 설명한다. 제 4장에서는 nTRACER를 이용하여 실제 한국형 원자력 추진 잠수함의 노심을 핵연료봉과 핵연료 집합체 단계부터 전체 노심에 이르기까지 단계적으로 설계하고, 설계된 노심의 안전성 개선 과정을 설명한다. 마지막으로 제 5장에서는 설계된 노심의 성능과 안전성을 확인하기 위하여 연소에 따른 노심의 반응도와 출력분포, 첨두출력계수(F_q)를 확인하고 노심의 반응도 계수, 제어봉 제어능 등을 중심으로 nTRACER 계산결과를 제시하여 안전성을 입증한다.

제 2 장 HEU vs LEU

제 1 절 고농축 우라늄 사용의 원인

군사적 목적으로 사용되는 해상용 원자로에서 고농축 우라늄을 사용하는 것은 당연한 상식으로 받아들여졌다. 1948년 미 해군의 원자력 추진 잠수함 프로젝트가 시작된 이후 거의 70여년이 흘렀고, 현재 미해군은 40%이상의 군함에 원자력 추진체계를 적용하고 있지만 이들 중 저농축 우라늄을 연료로 사용하는 군함은 한 척도 존재하지 않는다. 이는 군사적 목적으로 사용되는 해상용 원자로에 있어서 고농축 우라늄이 가지는 위상을 단적으로 보여주는 좋은 예시라 할 수 있다.

1983년 프랑스에서는 저농축 우라늄을 연료로 사용하는 루비급 잠수함을 진수하였으나 저농축 우라늄 연료가 가지는 한계를 극복할 수는 없었다. 7년의 재장전 주기를 가지는 루비급 잠수함은 디젤 잠수함에 비해서는 매우 우수한 능력을 보유하였지만, 무한에 가까운 에너지원을 기반으로 압도적인 수중 작전능력을 자랑하는 고농축 우라늄 원자력 추진 잠수함에 비할바는 아니었다.

미군이 최근까지도 핵연료로써 저농축 우라늄 사용에 회의적이었던 이유는 과거 그들이 작성한 보고서를 통해서 살펴볼 수 있다. 미해군의 보고서에 따르면 잠수함용 원자로가 가져야할 필수적인 요구사항은 크게 다음 8가지로 정리된다.[2]

1) 소형 원자로 : 잠수함용 원자로는 전술적 목적을 달성할 수 있는

충분한 출력을 가져야 하며, 그와 동시에 잠수함의 제한적 공간과 무게를 충족할 수 있을 만큼 소형이어야 한다.

2) 승조원 방호능력 : 잠수함 승조원은 원자로와 인접한 좁은 공간에서 수개월간 거주하며 임무를 수행하게 되므로 원자로는 승조원을 위한 충분한 방호능력을 갖추어야 한다.

3) 대중에 대한 안전성 : 원자력 잠수함은 군사적, 정치적 목적에 따라 전 세계 항구를 이동하게 되므로 대중의 안전을 보장하기 위해서 가장 보수적으로 운용, 유지 및 보수되어야 한다.

4) 신뢰성 : 잠수함은 대체로 가혹한 환경(심해, 악천후, 극지방)에서 임무(정찰 및 전투)를 수행하므로 원자로는 주변 환경과 관계없이 요구 성능을 발휘할 수 있는 신뢰성이 보장되어야 한다.

5) 내구성 : 잠수함용 원자로는 상용 원자로와는 달리 운용 기간 중 지속적인 진동과 충격에 노출된다. 특히 전투 상황에서는 일상 수준 이상의 큰 충격에 노출되므로 잠수함용 원자로는 충분한 내구성을 갖추어야 한다.

6) 조작성 : 잠수함은 전술적 목적과 상황에 따라 다양한 기동이 요구된다. 따라서 잠수함용 원자로는 빈번하고 신속한 출력 변화에 대응할 수 있는 편리한 조작성을 충족할 수 있어야 한다.

7) 정숙성 : 수중에서 활동하는 잠수함의 특성상 적의 탐지 위협을 최소화하고, 표적의 탐지 확률을 증가시키기 위한 소음 통제는 매우

중요하다. 따라서 잠수함용 원자로는 높은 수준의 정숙성이 요구된다.

8) 충분한 원자로 수명 : 핵연료 재장전 시에는 안전한 재장전을 위한 별도의 인프라가 요구된다. 뿐만 아니라 재장전으로 인하여 함정의 가동률이 낮아지고, 핵연료 재장전 작업자에 대한 방사선 피폭 문제가 발생하는 등 다양한 측면에서 비용과 손실이 발생한다. 이러한 문제를 해결하기 위한 가장 이상적인 방법은 함정의 수명을 초과하는 핵연료 교체주기를 가지는 원자로를 탑재하여 핵연료 재장전 소요를 없애는 것이다.

고농축 우라늄을 사용하면 잠수함의 전술적 목적을 달성할 수 있는 충분한 성능(출력, 재장전 주기)의 원자로를 소형으로 제작하는 것이 가능해진다. 원자로의 소형화는 선체 내부에 충분한 여유공간을 확보할 수 있도록 하여, 승조원 방호와 사고방지를 위하여 필요한 추가적인 설계가 반영되는 것을 가능케한다. 이는 결과적으로 원자로의 안전성과 신뢰성 향상에 큰 영향을 미친다. 또한 과도한 부피를 차지하지 않는 소형 원자로는 잠수함의 크기와 형상에 큰 영향을 미치지 않으므로 결과적으로 잠수함이 최적의 기동성과 정숙성을 유지하는데 도움을 준다. 결국 원자력 추진 잠수함이 우수한 성능을 유지할 수 있는 기반이 고농축 우라늄 사용이라 하여도 과언이 아닌 것이다.

그러나 고농축 우라늄은 연소 주기가 종료된 사용후 핵연료 조차 충분한 핵분열 물질을 포함하고 있으므로, 핵연료가 테러집단에 의해서 유출되는 경우 손쉽게 핵무기로 사용될 수 있다는 치명적인 문제를 안고

있다. 이런 이유로 고농축 우라늄을 저농축 우라늄으로 대체하기 위한 움직임은 지속적으로 확대되고 있다.

제 2 절 저농축 우라늄 사용의 한계점

2019년 7월 프랑스는 저농축 우라늄을 연료로 사용하는 새로운 원자력 추진 잠수함(Barracuda-class)을 진수하였다. 바라쿠다급 잠수함은 저농축 우라늄을 연료로 사용하는 150 MWt 출력의 원자로가 탑재되었으며, 기존의 루비급 잠수함보다 개선된 10년의 재장전 주기를 가진다.[3] 그러나 이 역시도 고농축 핵연료를 사용하는 원자력 추진 잠수함의 재장전주기(33년)와 비교하면 매우 짧은 편인데, 이는 저농축 우라늄에 포함된 U^{235}의 양이 고농축 우라늄에 비해 부족하기 때문에 나타나는 당연한 결과이다. 표 1은 고농축 우라늄 1 cc에 포함된 U^{235}와 동일한 양의 U^{235}를 포함하기 위해서 필요한 저농축 우라늄의 부피를 정리한 것이다. 저농축 우라늄이 고농축 우라늄과 동일한 양의 핵분열 물질을 포함하기 위해서는 고농축 우라늄의 5배에 가까운 부피가 필요한데, 이것이 바로 저농축 우라늄이 가지는 가장 큰 한계점이다.

표 1. 우라늄 농축도에 따른 동일 질량의 U^{235}를 포함하는 핵연료 부피

구 분	고농축 우라늄	저농축 우라늄		천연 우라늄
농축도(%)	93	20	5	0.72
U^{235} 질량(g)	17.763			
필요 부피(cc)	1	4.7	18.6	129.2

1995년, 미해군은 현재 사용중인 93% 고농축 우라늄 연료를 20% 저농축 우라늄 연료로 대체하는 것에 대한 의회보고서를 제출하였다. 보고서에서는 2가지가 방법이 제시되었는데 첫번째는 기존의 원자로와 선체 설계를 유지하면서 핵연료만을 저농축 우라늄으로 교체하는 것이며 두번째는 저농축 우라늄을 연료로 사용하는 원자로와 선체를 새롭게 설계하는 것이다. [2]

표 2는 우라늄 농축도의 변화에 따른 원자로의 연소주기를 비교한 것이다. 첫번째 방법을 적용할 경우 원자로의 연소주기가 기존의 1/4로 단축되므로 함정 운용기간 중 최소 3번의 핵연료 재장전이 필요하다. 이로 인하여 함정의 가동률이 낮아지고 원자로의 유지보수 비용이 크게 증가하게 된다. 또한 잦은 핵연료 재장전은 작업 인원들에 대한 방사선 노출 위험을 증가시킬 뿐만 아니라 과도한 사용후 핵연료 발생으로 인한 핵 폐기물 증가의 문제도 수반한다.

표 2. 우라늄 농축도에 따른 노심의 연소주기 비교

구 분	고농축 우라늄		저농축 우라늄	
	SSN[5]	SSBN[6]	SSN	SSBN
연소주기(년)	33	45	7.5	10.5
재장전 횟수	0	0	3	3

5) SSN은 대륙간 탄도미사일을 탑재하지 않는 공격형 원자력 추진 잠수함(attack submarine)을 의미한다. LA급, 시울프급, 버지니아급 잠수함이 여기에 포함되며 탄도유도탄 잠수함에 비하여 배수량이 작다.

6) SSBN은 대륙간 탄도미사일을 탑재된 탄도유도탄 원자력 추진 잠수함(Ballistic missile submarine)을 의미한다. 오하이오급 잠수함이 SSBN으로 분류되며 공격형 원자력 추진 잠수함에 비하여 배수량이 크다.

두번째 방법은 저농축 우라늄으로 충분한 연소주기를 가질 수 있도록 선체와 원자로를 재설계 하는 것이다. 그러나 저농축 우라늄을 연료로 사용하는 원자로가 고농축 우라늄을 연료로 사용하는 원자로와 동일한 성능(최대출력, 연소주기)을 갖기 위해서는 노심의 부피가 약 3배 이상 증가하여야 하며, 노심의 부피 증가는 결국 선체 크기의 증가로 이어진다. 표 3은 고농축 우라늄 원자로를 탑재한 공격 잠수함을 기준으로 노심에 사용되는 우라늄의 농축도가 달라짐에 따라 동일한 성능을 유지하기 위해서 필요한 선체의 변화를 비교한 것이다. 연료로 사용되는 우라늄의 농축도를 20%로 낮추면 93%로 농축된 우라늄을 사용하는 경우에 비하여 선체의 배수량이 12% 증가하게 되며, 우라늄의 농축도를 상용원자로 수준인 5%로 더욱 낮추면 선체의 배수량은 70%까지 증가하여 현실적으로 공격잠수함으로서 임무수행이 제한되는 수준에 이르게 된다.

표 3. 우라늄 농축도에 따른 선체 크기 변화 비교

구 분	고농축 우라늄	저농축 우라늄	
	93%	20%	5%
배수량(ton)	7,800	8,736	13,260
선체 직경(m)	10.37	11.28	12.19
선체 전장(m)	114.60	111.56	131.06

앞에서 설명한 두가지 방법은 공통적으로 핵연료 재장전 또는 원자로 및 선체의 재설계를 위한 과도한 시간[7)]과 비용을 요구할 뿐만

7) 미 해군은 저농축 우라늄을 연료로 사용하는 새로운 원자로를 설계하는데 최소 10년이 필요하며, 이를 제작하고 새로운 함정에서 운용하기 위해서는 총 15년의 기간이 소요될 것으로 예상하였다.[2]

아니라 고농축 연료에 비하여 3~4배까지 증가하는 사용후 핵연료 적체 문제까지 안고 있다. 이러한 이유로 잠수함용 원자로에 저농축 우라늄을 적용하는 것은 군사적, 경제적으로 기대되는 이익이 미미한, "기술적으로 가능하지만 실효성이 없는 것" 으로 간주되어 왔다.

제 3 절 고밀도 우라늄 핵연료 적용

그러나 최근 미 해군은 저농축 우라늄이 가지는 문제점을 개선하고 이를 군사 목적의 해상 원자로에 적용하기 위한 연구를 진행 중이다.[4] 기존 고농축 우라늄을 저농축 우라늄으로 대체하면서 대두되는 문제들의 본질적인 원인은 저농축 우라늄에 함유된 U^{235}의 양이 고농축 우라늄에 비하여 절대적으로 부족하기 때문이다. 이러한 문제는 우라늄 밀도가 높은 핵연료 재료를 개발함으로써 해결할 수 있는데 대표적인 방법이 기존 핵연료에 비하여 밀도가 높은 합금 연료를 사용하는 방법이다.

과거부터 주로 이용된 고농축 우라늄 핵연료의 우라늄의 밀도는 0.5 ~ 1.7 g/cm^{3}로 낮은 편이었다. 그러나 핵연료 제조 기술의 발달로 동일한 핵연료 재료에서도 우라늄 밀도를 2.3 ~ 3.7 g/cm^{3}까지 증가시킬 수 있게 되었으며, 분산형 금속연료[8]의 경우 4.8 g/cm^{3}의 높은 우라늄 밀도까지 도달하게 되었다. [5] 이러한 핵연료 내 우라늄 밀도의 증가는 농축도 감소로 인한 U^{235}의 결핍을 보상하여 저농축 우라늄 핵연료의

8) 분산형 금속 연료는 열전도성, 내부식성이 우수한 Al 금속에 UAl_2, UAl_3, UAl_4, U_3Si_2-Al 등의 미세한 금속 화합물 입자를 분산시킨 연료이다. Al과 U의 중량비가 9배 이상 차이나므로 연료의 대부분을 Al이 차지하는데, 이로 인하여 연료의 성질이 안정적이며 핵분열 생성물의 영향을 완화시킬 수 있다.

단점을 극복하는데 중요한 역할을 하였다. 특히 몰리브덴(Mo) 합금의 경우 합금에 포함되는 몰리브덴(Mo)의 양을 10%이내까지 줄이면서도 핵연료의 안정적인 성질을 보장할 수 있었으며, 그 결과 U-Mo 합금 연료는 기존 핵연료에 비하여 10배 가까이 증가된 약 16 g/cm^3의 우라늄 밀도에 도달할 수 있었다. 이 연구에서는 높은 우라늄 함량을 가지는 금속 합금 핵연료를 사용하여 잠수함 운용기간 동안 핵연료 재장전이 필요없는 저농축 핵연료 탑재 원자로를 설계하였다.

표 4. 핵연료 재료에 따른 우라늄 밀도 비교[5] [6]

구 분		우라늄 밀도(g/cm^3)
고농축 우라늄 핵연료	UAl_x-Al	1.7
	U_3O_8-Al	1.3
	$UZrH_x$	0.5
저농축 우라늄 핵연료	UAl_x-Al	2.3
	U_3O_8-Al	3.2
	$UZrH_x$	3.7
	U_3Si_2-Al	4.8
	U-$10_{wt\%}$Mo	15.32
	U-$8_{wt\%}$Mo	15.97
	U-$6_{wt\%}$Mo	16.66

제 3 장 원자로 설계기준 및 재료 결정

2장에서는 원자로를 설계하기에 앞서 잠수함에서 요구되는 성능을 충족하기 위한 설계기준을 설정하고, 이를 달성할 수 있는 핵심 요인인 저농축 고밀도 합금 핵연료를 결정한다.

제 1 절 원자로 설계기준

원자로를 설계하기 위한 첫번째 단계는 잠수함의 작전 성능을 충족하기 위한 설계기준을 결정하는 것이다. 설계 기준으로 선체의 크기와 수중 중량을 고려한 원자로의 크기와 출력, 핵연료 교체주기, 노심의 한계 연소도, 반응도 등을 설정하였다.

1. 원자로 출력

원자로에서 발생하는 출력의 대부분은 잠수함 추진을 위하여 사용된다. 따라서 선박의 배수량, 형상, 중량 및 최대 속력은 원자로의 요구 출력을 결정하는데 매우 직접적인 영향을 미친다. 그러나 대다수 잠수함은 형상[9]과 장폭비[10]가 유사하기 때문에 추진을 위하여

9) 잠수함 선체의 형상은 눈물방울형, 시가형, 고래형 등으로 구분할 수 있으나 소음과 마찰 등 수중환경의 제한으로 인하여 대동소이한 차이를 보인다.

10) 잠수함 선체의 직경과 길이의 비를 장폭비라 하며, 이는 수중에서 기동하는 잠수함의 유체저항에 큰 영향을 미친다. 대부분 9:1 ~ 11:1의 수준이다.

요구되는 출력을 결정하는 주요 요인을 선박의 배수량과 최대 속력으로 한정하는 것이 가능하므로 애드미럴티 계수(Admiralty coefficient)를 이용하여 노심의 요구 출력을 계산할 수 있다. 애드미럴티 계수는 배수량과 속력이 주어졌을 때 추진에 필요한 계획 출력을 선정하기 위하여 사용되는 계수로서 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.[7]

$$C_{ad} = \frac{\Delta^{\frac{2}{3}} V^3}{\mathrm{P}} \quad (1)$$

식 (1)에서 C_{ad} 는 애드미럴티 계수, Δ 는 선박의 배수량, V 는 선박의 속력, P는 해당 속력으로 기동하기 위한 축마력을 의미한다.

선박의 배수량이 달라지더라도 최대 속력과 형상이 같으면 유사한 애드미럴티 계수를 가진다. 이를 이용하면 한국형 잠수함에 탑재하기 위한 원자로의 출력을 계산할 수 있는데, 계산에 사용한 주요 잠수함의 제원은 표 5와 같다.

표 5. 주요 원자력 추진 잠수함의 배수량 및 탑재 원자로의 출력

국 가	종 류	배수량 (ton)	수중최대 속력(kts)	출력 (MWt)	축마력 (SHP)	장폭비
미 국	Virginia	7,700	35	150	40,000	11.09
	Ohio	18,750	25	220	60,000	13.34
	Seawolf	9,137	35	220	57,000	8.81
	LA	6,927	33	130	35,000	11.00
영 국	Vanguard	15,900	25	130	27,500	11.62
	Trafalgar	5,208	32	70	15,000	8.71
프랑스	Rubis	2,670	25	48	9,500	9.68

최근 건조된 도산 안창호급 잠수함은 수중 배수량이 3,700톤이며, 장폭비는 8.69로 비교적 선체의 길이가 짧은 편에 속한다. 그러나 안창호급 잠수함은 공기 불요 추진체계(AIP)[11]가 적용된 디젤 잠수함이므로 원자력 추진체계가 설계의 반영될 경우 선체의 배수량과 전장이 더 증가될 것이다.[12][8] 이 연구에서는 한국형 원자력 추진 잠수함의 배수량을 7,000톤, 최대속력을 35 kts, 장폭비를 11로 설정하였다. 이는 미 해군의 최신 원자력 추진 잠수함인 버지니아급과 유사한 수준이므로 선체의 형상 역시 버지니아급과 유사할 것으로 가정하여 버지니아급 잠수함의 애드미럴티 계수를 적용하였다. 식 (2)를 이용하여 한국형 원자력 잠수함의 요구출력을 계산한 결과, 작전 운용 성능을 달성하기 위한 한국형 원자력 추진 잠수함의 원자로 출력은 약 140MWt로 산출되었으나, 설계 여유도를 감안하여 목표 출력을 150 MWt로 결정하였다.

$$\text{버지니아급 잠수함의 애드미럴티 계수} = \frac{7{,}700^{\frac{2}{3}} \cdot 35^3}{40{,}000} = 417.963 \quad (2)$$

$$\text{버지니아급 잠수함의 원자로 출력} = 40{,}000\ \text{SHP} = 150\ \text{MWt}$$

$$\text{한국형 원자력 잠수함의 요구 출력} = \frac{7{,}000^{\frac{2}{3}} \cdot 35^3}{417.963} = 37{,}537\ \text{SHP} = 139.42\ \text{MWt}$$

11) 공기 불요 추진체계(Air Independent Propulsion System), 일반적인 디젤 잠수함이 축전지 충전을 위하여 산소를 필요로 하는 것과 달리 수중에서 외부공기의 흡입 없이 전기를 발생시켜 추진하는 체계. 선체에 저장된 산소 등을 이용하여 전기를 생산하며, 방사선 차폐 등 안전 설비가 요구되는 원자로 계통에 비하여 선체에서 차지하는 부피와 무게가 적다.

12) 미해군 잠수함에 탑재되는 원자력 추진 체계는 원자로 계통만 고려할 때 직경 약 33피트, 높이 약 40피트이며, 무게 약 1,130 ~ 1,680톤이다.

2. 원자로 크기

수중에서 활동하는 잠수함의 경우 기동성과 탐지 가능성을 고려하여 선체의 형상이 제한되므로, 대부분의 잠수함은 선체의 전장은 차이가 있더라도 직경은 배수량과 관계없이 약 10m 수준을 보인다.

표 6. 주요 잠수함의 선체 제원

국 가	종 류	배수량(ton)	전 장(m)	선 폭(m)
미 국	Virginia	7,700	114.9	10.36
	Ohio	18,750	170.7	12.8
	Seawolf	9,137	107.6	12.2
	LA	6,927	110	10
영 국	Vanguard	15,900	149.9	12.9
	Trafalgar	5,208	85.4	9.8
프랑스	Rubis	2,670	73.6	7.6
한 국	안창호급	3705	83.5	9.6

선체의 직경은 선체에 탑재되는 원자로의 크기에 직접적인 제한이 되는 요인이므로 노심의 크기를 결정할 때에는 반드시 이를 고려하여야 한다. 미해군 잠수함의 원자로 및 관련 계통의 구획은 직경이 약 10 m인데, 향후 우리나라의 원자력 추진 잠수함의 경우에도 큰 차이가 없을 것으로 가정하였다. 따라서 버지니아급 잠수함의 압력용기의 직경 66인치를 고려, 한국형 잠수함용 원자로의 설계목표는 유효 노심의 높이를 1m, 직경을 약 1.1m로 설정하였다.

3. 온도 및 유량

잠수함용 원자로는 그 출력과 크기가 상용 원자로와 다르므로 운전을 위한 적정 온도와 노심을 지나는 냉각재의 유량을 그에 맞게 다시 결정하여야 한다. 일반적인 상용 원자로의 경우 냉각재의 입구측 온도는 약 290℃, 출구측 온도는 약 320℃에서 운전되므로 잠수함용 원자로에도 동일 수준을 적용하였다. 잠수함용 원자로는 상용 원자로에 비하여 유효 노심높이가 낮지만[13], 한국형 중소형 원자로(SMART, System-Integrated Modular Advancde ReacTor)가 유효 노심높이 2m, 입구측 온도 295℃, 출구측 온도 323℃ 임을 고려하여 잠수함용 원자로에서도 유사한 수준의 온도차를 적용하는 것이 타당할 것으로 판단하였다. 이 때 필요한 냉각재의 유량은 다음 식으로 계산할 수 있다.

$$Q = \dot{m}\Delta h \tag{3}$$

위 식에서 $\dot{m}$은 노심을 지나는 냉각재의 질량유속, Δh는 노심의 입구측과 출구측의 온도 차이로 인하여 발생하는 엔탈피 차이를 의미한다. 원자로 내부의 압력을 15.5 MPa로 가정하고, 식 (3)에 잠수함용 원자로의 최대 요구 출력 150 MWt를 적용하면 최대 속력에서의 질량유속을 885.51 kg/s로 산출할 수 있다.

13) 유효 노심높이(Active Core Height) : 핵연료봉 상단에서 하단까지의 높이, 우리나라에서 운전중인 상용 가압경수로의 유효 노심높이는 약 3.8m 이다.

4. 원자로 수명

제 2장에서 설명했듯이 노심의 핵연료 재장전은 잠수함 전력의 공백을 발생시킬 뿐만 아니라 재장전을 위한 기반시설 건설에 필요한 시간과 비용 발생, 핵연료 재장전 작업자에 대한 방사선 피폭 가능성 등 여러가지 문제점을 동반한다. 이러한 이유로 오랜 시간 동안 잠수함의 핵연료는 고농축 우라늄이 고집되어 왔으나 고밀도 우라늄 핵연료의 등장으로 저농축 우라늄으로도 잠수함의 수명을 감당할 수 있는 원자로의 개발이 가능해졌다. 따라서 본 연구에서 설계할 원자로는 핵연료 교체주기를 33년으로 설정하여 잠수함 운용기간 중 핵연료의 재장전이 불필요 하도록 목표를 설정하였다.

그러나 잠수함의 원자로는 취역부터 퇴역시까지 100% 가동되는 것이 아니므로 이로인해 나타나는 차이를 고려하는 것이 매우 중요하다. 원자력 추진 잠수함의 원자로는 상용 원자로와는 달리 정박 또는 유지보수 등을 이유로 운용하지 않는 기간이 발생하는데, 이러한 운용 특성을 고려하면 잠수함용 원자로의 실제 핵연료 교체주기는 유효 전출력 가동년수(EFPY)에 비하여 매우 길게 나타날 것을 예상할 수 있다. 따라서 목표 핵연료 교체주기를 달성하였는지 확인하기 위해서는 단순히 유효 전출력 가동년수(EFPY)를 계산하는 것 보다는 잠수함의 운용특성을 고려한 요구 에너지량을 산출하여 비교할 필요가 있다.

원자력 추진 잠수함에 탑재되는 원자로의 가동율은 함정의 연간 해상작전일의 비율과 같다고 할 수 있다. 일반적으로 원자력 추진 잠수함의 연간 운용기간은 6개월이며, 이는 원자로의 연간 가동률이 약 50%임을 의미한다. [9]

잠수함 원자로의 운영에 있어서 고려해야할 또 다른 요소는 평균 운용 출력이다. 수중에서 높은 속력으로 기동하는 것은 잠수함의 정숙성을 훼손시켜 피탐 가능성을 높일 뿐만 아니라, 잠수함 스스로의 표적 소음 탐지 능력까지 저하시켜 안전에 치명적인 영향을 미친다. 따라서 감시 및 정찰작전(SRO)[14]이 주 임무인 원자력 추진 잠수함은 수상 항해 또는 전투와 같은 특별한 상황을 제외하면 대부분의 경우 저속으로 운용되므로 평균 운용 출력률을 약 30%로 가정하였다.[15]

언급된 요소들을 고려하면 잠수함용 원자로를 33년간 운용하기 위하여 요구되는 총 에너지량은 식 (4)와 같이 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{총 에너지량} &= \text{노심출력} \times \text{노심수명} \times \text{가동률} \times \text{평균출력} \quad (4) \\ &= 150\ \text{MWt} \times 33 \times 0.5 \times 0.3 \\ &= 742.5\ \text{MWt·year} = 271{,}012.5\ \text{MWd} \end{aligned}$$

즉, 150 MWt의 한국형 잠수함용 원자로를 33년간 운용하기 위해서 필요한 총 에너지량은 271,012.5 MWd이며, 설계 노심의 총 생산가능 에너지량이 이를 초과한다면 목표 핵연료 교체주기를 달성하였다 판단할 수 있다.

---

14) 감시 및 정찰작전(SRO, Surveillance and Reconnaissance Operations), 적의 기습을 방지하고 전장의 불확실성을 최소화할 목적으로 지상, 해상 감시장치 및 유·무인 항공기, 우주 비행체 등을 이용하여 적의 의도와 능력을 파악하고 필요한 정보를 제공하기 위하여 수행하는 작전

15) 잠수함과 함께 대표적인 원자력 추진 군함으로 꼽히는 항공모함의 경우 평균 운용 출력은 최대 출력의 15%에 불과하다.

5. 한계 연소도

노심의 연소 주기를 결정하는 중요한 요인 중 하나로 노심에 장전된 핵연료가 연소된 정도를 나타내는 연소도가 있다. 핵연료는 핵분열 과정에서 지속적인 고온 노출, 핵분열 기체 발생 등으로 인한 팽창, 균열 등의 문제가 발생할 수 있으므로 적정 수준의 연소도 제한을 설정하여 핵연료와 클래딩이 과도한 스트레스에 노출되는 것을 방지할 필요가 있다.

이러한 한계 연소도는 연료 및 클래딩의 재료, 원자로의 종류 등 여러가지 요인에 따라서 매우 다양한 값을 가지는데, 일반적인 상용 경수로의 한계 연소도는 50 ~ 60 MWd/kg, 고속로는 이보다 높은 100 ~ 150 MWd/kg 를 가진다. 이 연구에서 사용된 U-$10_{wt\%}$Mo 연료의 경우 아직까지 실제 해상용 원자로에 탑재되어 검증받은 사례는 없으나, 실험을 통하여 150 ~ 200 MWd/kg까지 연소가 가능함을 확인하였다.[10][11] 따라서 본 연구에서는 보다 보수적인 기준을 적용하여 노심의 한계 연소도를 100 MWd/kg로 설정하였다.

6. 반응도

일반적으로 원자로의 임계 여부를 확인하는 지표로 증배계수와 반응도가 사용된다. 증배계수는 핵분열 반응으로 인하여 원자로 내에 새롭게 생성되는 중성자의 수와 흡수 및 누설로 인하여 원자로에서 사라지는 이전세대의 중성자 수의 비를 의미한다. 증배계수가 1보다 큰

경우를 중성자의 생성량이 소멸량보다 많기 때문에 급격하게 출력이 증가하는 초임계 상태라 하고, 증배계수가 1보다 작은 경우를 중성자의 소멸량이 더 많기 때문에 점차 출력이 줄어드는 미임계 상태라 한다. 원자로가 안전하게 지속적으로 에너지를 생산하기 위해서는 소멸되는 중성자와 생성되는 중성자의 수가 같은 임계상태를 유지하여야 한다.

$$k_{eff} = \frac{\text{생성된 중성자 수}}{\text{이전 세대의 중성자 수}} \tag{5}$$

반응도는 증배계수와 마찬가지로 원자로 내 중성자 수의 증감을 확인할 수 있는 지표로 원자로가 임계상태로부터 얼마나 떨어져 있는지를 나타내는 척도이다. 반응도가 0인 경우가 임계상태로 중성자의 수가 일정하게 유지되는 상태를 뜻하며, 반응도가 0보다 크면 중성자 수가 증가하고 0보다 작으면 중성자의 수가 감소함을 의미한다. 증배계수와 반응도의 관계는 식 (6)과 같이 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned} \rho &= \frac{k_{eff} - 1}{k_{eff}} \\ &\approx k_{eff} - 1 \end{aligned} \tag{6}$$

원자로가 정상적으로 운전되기 위해서는 적정수준의 잉여반응도를 가져야 한다. 이때 임계치를 초과하는 잉여 반응도를 가연성 독물질 또는 제어봉으로 조절하여 노심의 임계상태를 유지하게 되는데, 이와 같이 반응도를 제어함에 있어서 매우 중요한 영향을 미치는 물질로 Xe^{135}가 있다.

Xe^{135}는 U^{235}의 핵분열로 인하여 생성되는 물질로서 매우 큰 흡수 반응단면적을 가진다. Xe^{135}는 그림 2와 같이 두가지 경로를 통하여 원자로 내에 축적되는데, 핵분열에 의하여 직접 생성되는 양에 비하여 I^{135}의 β붕괴로 인하여 생성되는 양이 더욱 지배적이다. Xe^{135}는 상당히 큰 흡수 반응단면적을 가짐에도 원자로가 정상적인 운전 중에는 원자로의 반응도에 큰 영향을 미치지는 않는데, 이는 핵분열 및 I^{135}의 β붕괴로 인하여 생성되는 Xe^{135}의 양과 핵분열 및 Cs^{135}로 붕괴되어 사라지는 Xe^{135}의 양이 평형을 유지하기 때문이다.

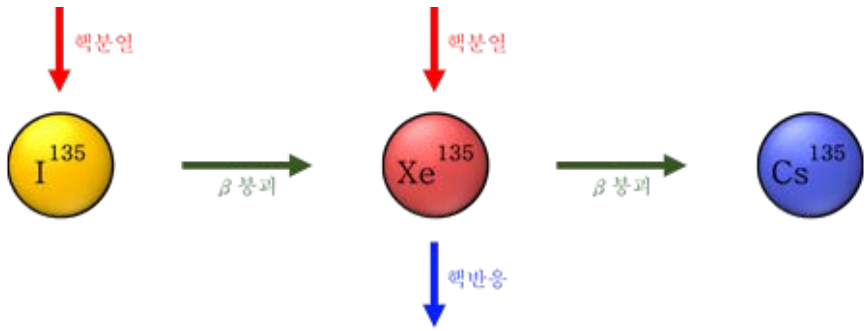


그림 2. Xe^{135}의 생성 및 소멸 경로

그러나 정상 가동중이던 노심이 갑자기 정지하게 되면 Xe^{135}의 균형상태에 변화가 생긴다. 핵분열이 중단되면 Xe^{135}의 생성과 소멸은 전적으로 β붕괴에만 의존하게 되는데, Xe^{135}의 반감기에 비하여 I^{135}의 반감기가 짧기 때문에 I^{135}가 특정 수준 이하로 감소할 때까지 Xe^{135}는 계속해서 증가하고 결과적으로 반응도의 감소가 나타난다. 이때 Xe^{135}로 인하여 감소되는 반응도가 원자로의 잉여반응도보다 클 경우, 원자로는 미임계 상태가 되고 Xe^{135}가 일정농도 이하까지 붕괴되어 반응도가 회복될 때까지 재시동이 불가능한 상황에 처하게 된다.

어떠한 경우에도 즉각적인 재시동이 가능해야 하는 잠수함용 원자로를 설계함에 있어서 Xe^{135}의 축적으로 인한 원자로 불감시간

발생은 매우 중요한 문제이므로 노심이 연소주기의 후반부에도 충분한 반응도를 가질 수 있도록 설계하였다.

제 2 절 핵연료 재료 선정

1. 핵연료 재료 선정 고려 사항

핵연료의 재료는 원자로의 성능에 직접적인 영향을 미치므로 신중하게 결정되어야 하며 대표적인 고려요소는 아래와 같다.[12]

1) 높은 용융점: 원자로의 노심을 지나는 냉각재는 증기 생산을 위해서 300도 이상의 고온으로 가열되어야 하므로 운전중인 핵연료는 매우 높은 온도에 지속적으로 노출된다. 따라서 노심의 안전성을 보장하기 위해서 핵연료 재료는 노심의 정상적 운전 온도보다 충분히 높은 용융점을 가져야 한다.

2) 안정적인 결정구조 : 원자로 내의 연료는 상온에서 최대 운전 온도까지 매우 넓은 범위의 온도변화에 노출된다. 광범위하게 변화하는 온도에 따라 핵연료의 결정변화가 일어날 경우 연료봉의 손상이 발생할 수 있으므로 재료의 결정구조가 안정적 이어야 한다.

3) 재료의 안정성 : 핵연료는 고온의 냉각재가 흐르는 원자로 내에 위치하므로 화학적으로 높은 안정성을 가져야 한다.

4) 안정적 조사거동 : 핵분열 결과 다양한 핵분열 생성물이 발생하는데 Xe, Kr과 같은 핵분열 기체도 여기에 포함된다. 이러한 핵분열 기체는 연료를 둘러싸고 있는 클래딩에 압력을 가하여 파손을 유발할 수 있다. 따라서 이상적인 연료 재료는 핵분열 기체의 방출이 적고, 팽창에 대한 내구성이 높아야 한다.

5) 낮은 흡수 단면적 : 화학적, 물리적 성질을 개선하기 위해서 연료에는 우라늄 외에 비 핵분열 물질이 포함된다. 이때 비 핵분열성 물질의 흡수 단면적이 지나치게 크면 핵연료의 반응도를 감소시키므로 핵연료 재료에 포함되는 비 핵분열 물질은 흡수 단면적이 작아야 한다.

6) 높은 우라늄 함량 : 연료에 포함된 핵분열성 물질의 함량이 높아짐은 곧 핵연료 집합체에 적재되는 연료량의 증가를 의미하며 결과적으로 연소주기를 길어지게 한다.

위의 요소들을 종합적으로 고려할 때 상용 원자로에서 가장 흔하게 사용되는 연료는 UO_2 세라믹 연료이다. UO_2 세라믹 연료는 $10.3g/cm^3$의 연료 밀도 중 $9.1g/cm^3$을 우라늄이 차지하고 있을 정도로 높은 우라늄 함량을 가지며 연료내에 포함된 산소의 거시 흡수단면적이 $0.00054cm^{-1}$로 매우 낮은 편이다. 뿐만 아니라 화학적으로 안정적이고, 고온 고압의 냉각재에 대한 부식저항성이 큰 UO_2 세라믹 연료의 성질은 사고에 대한 안전성 확보도 용이한 장점이 있다. 단, UO_2 세라믹 연료는 열전도율이 낮아 연료의 최대 운전온도가 높아지는

단점이 있으나 연료의 녹는점이 2,875℃로 매우 높으므로 정상적인 운전상황에서 연료의 용융이 발생할 위험은 희박하다. 이와 같은 이유로 UO_2 세라믹 연료는 가장 흔하게 사용되는 핵연료 재료가 되었으나, UO_2의 우라늄 함량은 잠수함용 핵연료로 사용하기에는 낮으므로 적합하지 않다.

2. 우라늄 합금 연료

재료 자체의 높은 밀도와 우라늄 함량만을 고려한다면 가장 이상적인 핵연료 재료는 우라늄 금속 자체이다. 우라늄 금속 연료는 세라믹 연료와 기타 합금 연료에 비하여 매우 높은 밀도(18.9 g/cm^3)를 가질 뿐만 아니라 열전도율도 우수(35.0 W/m·K)하므로 연료의 온도를 낮추는 데에도 유리하다.

그러나 우라늄 금속 연료는 온도에 따라서 결정구조가 변하는 치명적인 단점을 가지고 있다. 핵연료는 상온에서 1000℃에 가까운 고온까지 매우 넓은 범위의 온도에서 운전되므로 온도와 관계없이 안정적인 결정구조를 가지는 것이 중요한데, 금속 우라늄은 온도의 변화에 따라서 그림 3과 같은 세가지 형태의 결정구조를 보인다.

상온에서 사방정계[16] 구조를 가지는 알파우라늄은 661℃에서는 정방정계[17] 구조의 베타우라늄으로 변화하고, 온도가 769℃ 이상으로

16) 사방정계(Orthorhombic system), 광물 결정계의 하나로 길이가 서로 다른 3개의 직교하는 결정축을 가진다.

17) 정방정계(Tetragonal system), 서로 직교하는 같은 길이의 수평 결정축 2개, 길이가 다른 수직 결정축을 가진 결정계를 뜻한다.

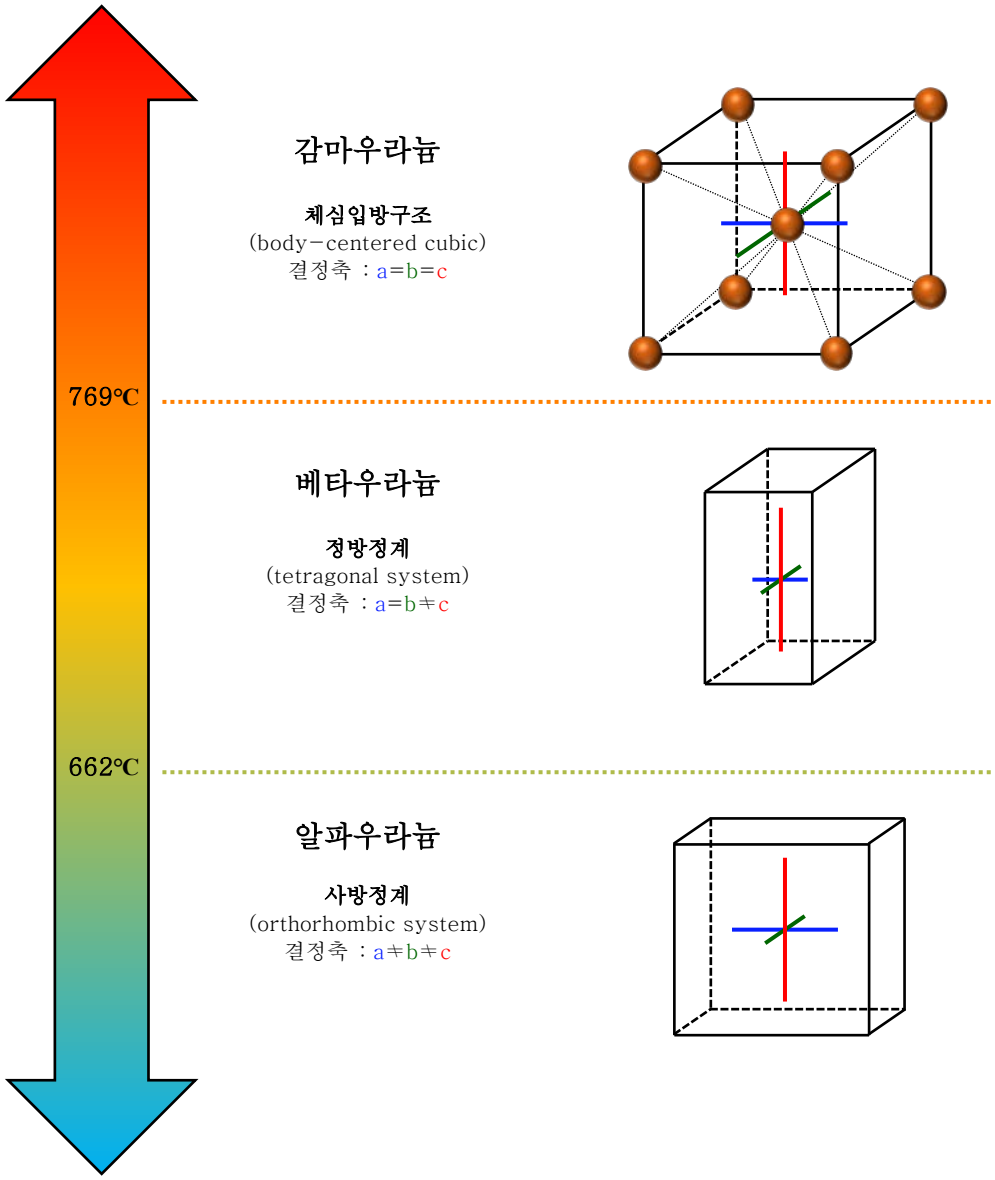


그림 3. 온도에 따른 금속우라늄의 결정 변화

증가하면 베타우라늄은 체심 입방 구조[18)]를 갖는 감마우라늄으로 다시 변화한다. 사방정계 구조를 가지는 알파우라늄은 결정의 축방향에 따라 온도증가에 대한 팽창률이 다를 뿐만 아니라 알파우라늄에서 베타 우라늄으로 변화하는 과정에서 약 1%의 부피 증가까지 나타나는데[13] 이는 핵연료의 변형과 파손을 유발할 수 있는 중대한 결함이다.

따라서 금속 우라늄을 핵연료로 사용하기 위해서는 다른 금속을 배합하여 연료의 특성을 개선하는데, 본 연구에서는 지르코늄과 몰리브덴 합금을 잠수함용 핵연료로 고려하였다. 표 7에서 볼 수 있듯이 지르코늄과 몰리브덴은 우라늄에 비하여 녹는점이 높기 때문에 U-$10_{wt\%}$Mo 및 U-$10_{wt\%}$Zr 합금은 순수한 금속 우라늄에 비하여 녹는점이 높다. 뿐만 아니라 몰리브덴과 지르코늄은 각각 체심 입방 구조와 조밀 육방격자의 안정적인 결정구조를 가지므로 이들이 포함된 합금연료 역시 온도에 대하여 안정적인 결정구조를 보인다.

표 7. 주요 핵연료 재료의 특성[5]

핵연료 재료	녹는점 (℃)	밀도 (g/cm^3)	우라늄 함량 (wt%)	열전도율 (W/m·K)	비핵분열 물질의 거시 흡수단면적, Σ_a (cm^{-1})
U	1,133	18.9	100	35.0	-
Mo	2,622	10.2	-	138	160.0
Zr	1,854	6.44	-	22.6	9.8
UO_2	2,875	10.96	88.2	3.5	0.0001
U-$10_{wt\%}$Mo	1,150	17.33	90	-	0.257
U-$10_{wt\%}$Zr	1,135	15.76	90	-	0.027

18) 체심 입방 구조(Body-centered cubic lattice), 결정을 구성하는 최소단위가 정육면체이며, 정육면체의 8개의 꼭지점과 무게중심에 원자가 자리잡은 형태를 말한다. 안정적인 성질을 가진다.

재료에 포함된 우라늄의 함량 측면에서 살펴보면, 합금연료의 경우 순수한 금속 우라늄에 비해서는 낮지만 UO_2 세라믹 연료에 비하여 높은 밀도와 우라늄 함량을 갖는다. 앞서 간단히 언급하였듯이 저농축 우라늄을 연료로 사용할 때 직면하는 가장 문제점이 핵연료에 포함된 핵분열 물질의 부족임을 고려하면, 합금연료의 높은 우라늄 밀도는 매우 중요한 장점이라 할 수 있다. 표 7에 정리된 각 핵연료 재료의 밀도와 우라늄 함량을 바탕으로 UO_2 세라믹 연료 및 합금연료의 우라늄 밀도를 계산하면 아래와 같이 나타나는데, 이는 동일한 농축도의 우라늄을 사용하면서 핵연료의 재료만 바꾸더라도 핵연료에 포함되는 핵분열 물질의 양이 1.5배 이상 증가할 수 있음을 의미한다.

$$UO_2 \text{ 세라믹 연료의 우라늄 밀도} = 10.96\ g/cm^3 \times 88.2\% = 9.667\ g/cm^3 \quad (7)$$

$$U\text{-}10_{wt\%}Mo \text{ 합금 연료의 우라늄 밀도} = 17.33\ g/cm^3 \times 90\% = 15.597\ g/cm^3 \quad (8)$$

$$U\text{-}10_{wt\%}Zr \text{ 합금 연료의 우라늄 밀도} = 15.76\ g/cm^3 \times 90\% = 14.184\ g/cm^3 \quad (9)$$

그러나 핵연료에 포함된 몰리브덴과 지르코늄은 산소에 비하여 월등하게 큰 흡수단면적을 갖는데, 이는 UO_2 세라믹 연료와 달리 합금연료에서 나타나는 중요한 단점이라 할 수 있다. 따라서 합금연료의 높은 우라늄 밀도가 실제로 핵연료의 주기길이 변화에 미치는 영향을

확인하기 위하여 동일한 구조를 가지는 핵연료봉을 설계하여 각 핵연료 재료에 따라서 나타나는 주기길이의 차이를 비교하였다. 비교를 위하여 사용한 핵연료봉의 물리적 제원과 운전특성은 우리나라의 상용원자로 중 하나인 APR 1400의 집합체를 기준으로 하였으며, 핵연료의 우라늄 농축도는 20%로 설정하였다.

표 8은 각 핵연료 재료에 따른 초기 무한증배계수와 한계 연소도 및 유효 전출력 가동일수를 나타낸 것이다. 앞서 한계 연소도 설정 과정에서 설명하였듯 합금연료는 UO_2 세라믹 연료에 비하여 높은 한계 연소도를 가지므로 동일한 핵분열 물질을 함유하고 있더라도 UO_2 세라믹 연료에 비하여 훨씬 많은 에너지를 생산할 수 있다. 결과적으로 우라늄 밀도 뿐만 아니라 한계 연소도까지 높은 합금연료가 UO_2 세라믹 연료에 비하여 2배 이상 긴 주기길이를 가짐을 확인 할 수 있었다. 특히 $U-10_{wt\%}Mo$ 합금연료가 $U-10_{wt\%}Zr$ 합금연료보다 약 10% 가량 증가된 주기길이를 보였는데, 이는 합금연료에 포함된 비핵분열 물질의 중성자 흡수단면적의 크기보다 핵분열 물질(U^{235})의 질량이 주기길이에 더 큰 영향을 미치는 것을 의미한다.

표 8. 핵연료 재료에 따른 주기길이 변화 비교

	UO_2	$U-10_{wt\%}Zr$	$U-10_{wt\%}Mo$
k_{inf}	1.567	1.537	1.484
Burnup limit (MWd/kg)	60	100	100
EFPD (day)	1,694	4,067	4,472

비단 연소주기 측면만이 아니라 안전성 향상 측면에서도 금속 합금연료가 세라믹 연료에 비하여 우수하다. 금속 합금연료는 세라믹

연료에 비하여 매우 높은 열전도율을 가진다. 여러 실험들을 통하여 측정된 U−$10_{wt\%}$Mo 합금연료의 열전도율은 표 9와 같다. 이는 UO_2 세라믹 연료의 열전도율에 비하여 약 7배 가량 높은 수준인데, 결과적으로 핵연료의 최고 온도를 낮추고 과도한 온도상승으로 인한 클래딩 파손 위험을 감소시킬 수 있는 중요한 재료 특성이라 할 수 있다. 실험으로 산출된 U−$10_{wt\%}$Mo의 열전도율을 온도 T에 대한 함수로 정리하면 k_{U-10Mo}는 식(10)과 같다.[14]

$$k_{U-10Mo} = (10.2 \pm 0.688) + (3.51 \times 10^{-2} \pm 1.61 \times 10^{-3}) \cdot T \quad (10)$$

이러한 여러가지 측면을 고려할 때 잠수함용 원자로에서 고농축 우라늄 연료를 대체하기 위해서는 금속 합금연료를 사용하는 것이 타당하다는 결론을 내릴 수 있었으며, 가장 적합한 핵연료 재료로 U−$10_{wt\%}$Mo 합금을 선택하였다.

표 9. U−10$_{wt\%}$Mo 합금의 열전도율 측정값

온도(℃)	열전도율(W/m·K)				
	burkes	Klein	McGeary	Touloukian	Average
20		12.1	9.7	12.1	11.3±1.4
100		14.2	1.7	13.8	13.2±1.3
200	20.0	17.2	14.0	17.3	17.1±2.4
300	23.9	20.1	17.2	20.1	20.3±2.7
400	27.1	23.0	21.6	23.3	23.7±2.3
500	31.2	26.4	25.7	27.2	27.6±2.5
600	35.5	30.1		30.1	31.9±3.1
700	36.9	33.9			35.4±2.1
800	37.4	37.7			37.5±0.2

제 4 장 잠수함용 원자로 설계

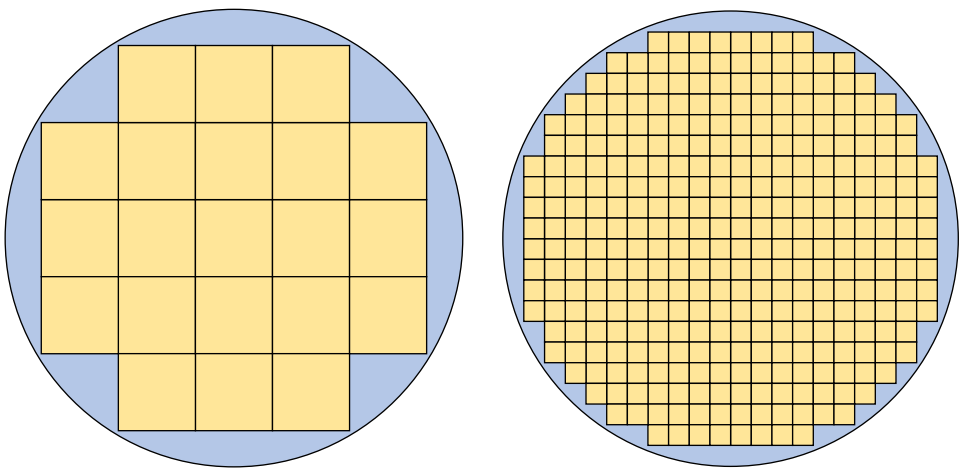
제 3장에서는 잠수함의 특성을 고려한 잠수함용 원자로의 설계 기준을 결정하고 이를 달성하기 위하여 적정 핵연료 재료를 선정하는 과정을 설명하였다. 이 장에서는 원자로를 설계하기 위한 일반적인 절차와 고려사항을 살펴보고 직접 전노심 수송코드인 nTRACER를 이용하여 한국형 원자력 추진 잠수함에 적합한 원자로를 핵연료 집합체 단계에서부터 설계한다.

제 1 절 핵연료 집합체 설계

1. 핵연료 집합체 크기와 핵연료봉 배열

본격적으로 잠수함용 원자로를 설계하기에 앞서 원자로에 장전되는 핵연료 집합체의 크기를 결정하였다. 우리나라에서 사용되고 있는 상용 원자로의 핵연료 집합체는 한 변의 길이가 약 20 cm이므로 전체 노심의 직경이 약 1.1 m인 한국형 원자로에 사용하기에는 지나치게 크다. 그림 4에서 확인할 수 있듯이 동일한 크기의 원자로에서는 핵연료 집합체의 크기가 작아질수록 노심내에 핵연료가 장전되는 유효 공간이 증가하게 된다. 다시 말하자면 핵연료 집합체의 크기가 작아지면 더 많은 핵연료를 탑재할 수 있고, 결과적으로 노심의 주기길이도 더 길어지는 것이다. 표 10은 앞서 결정한 설계목표인 한국형 원자로의 직경 1.1m를 기준으로 핵연료 집합체의 크기에 따라 변화하는 핵연료 적재량 변화를

나타낸 것이다. 집합체의 크기를 20 cm에서 5 cm으로 축소시키게 되면 노심 내에서 핵연료 집합체가 차지하는 면적이 76.8%에서 87.3%까지 증가하게 된다. 이를 통하여 잠수함용 원자로의 중요한 목적인 충분한 출력과 주기길이 확보를 위해서는 핵연료 집합체의 크기를 기존 상용 원자로에 비하여 크게 감소시킬 필요가 있음을 확인하였으며, 새로운 핵연료 집합체의 각 변의 길이를 5cm로 결정하였다.



① 20cm 핵연료 집합체 ② 5cm 핵연료 집합체

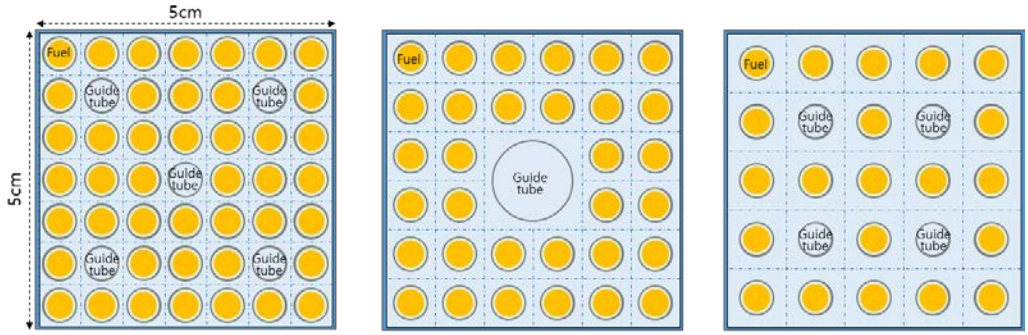
그림 4. 핵연료 집합체 크기에 따른 노심내 연료 배치

표 10. 핵연료 집합체 크기에 따른 노심내 핵연료 적재량 비교

원자로 직경(m)	핵연료 집합체 크기(cm)	노심내 집합체 장전수량 (개)	노심내 핵연료 집합체 면적비 (%)
1.18	20	21	76.8
1.10	10	76	79.9
1.10	5	332	87.3

핵연료 집합체의 크기를 결정한 후, 다음으로 설계 할 요소는 집합체를 구성하는 핵연료봉의 개수이다. 노심에 사용되는 핵연료봉의

개수는 노심의 선출력밀도에 직접적인 영향을 미치는 요인이다. 핵연료 집합체를 구성하는 핵연료봉의 개수가 줄어드는 것은 결국 노심의 총 핵연료봉 개수가 줄어드는 것을 의미하므로 결과적으로 노심의 선출력 밀도가 증가하여 노심의 안전성을 저하시킨다. 그림 5는 최적 핵연료 집합체 설계를 위하여 고려되었던 3종류의 핵연료봉 배열 단면도를 나타낸 것이다.



① 7x7 배열 ② 6x6 배열 ③ 5x5 배열

그림 5. 핵연료 집합체 설계안

핵연료 집합체의 크기와 핵연료봉의 직경을 고려하면 물리적으로 적절한 핵연료봉 배열은 그림 5에 정리된 3가지 종류이다. 앞에서 설명하였듯 핵연료봉의 개수는 노심의 선출력 밀도에 직접적인 영향을 미치게 되는데, 3가지 설계안에 대한 선출력 밀도를 각각 산출한 결과 5x5 배열의 핵연료 집합체의 선출력 밀도는 20.96 kW/m였다. 이는 한국형 중소형 원자로(SMART)의 선출력 밀도인 10.97 kW/m의 2배에 가까운 수준이며, 상용 원자로의 선출력 밀도인 17.92kW/m 보다 더 크므로 5x5 핵연료봉 배열은 잠수함용 노심설계에 적합치 않음을 알 수 있다. 표 11은 최대 열출력 150 MWt, 총 집합체 개수 332개인 노심을 기준으로 각 핵연료 집합체 설계안의 선출력 밀도를 계산한 결과이다.

표 11. 핵연료 집합체 설계안 별 선출력 밀도

핵연료봉 배열	7x7	6x6	5x5
집합체 당 안내관 수	5	1	4
집합체 당 핵연료봉 수	44	32	21
선출력 밀도	10.00 kW/m	13.75 kW/m	20.96 kW/m

2. 감속재 대 핵연료비와 핵연료봉 직경

핵연료 집합체의 크기를 결정한 후 실행되는 중요한 단계는 핵연료봉의 직경을 결정하는 것이다. 핵연료봉의 직경은 원자로의 감속재 대 핵연료비를 결정하는 중요한 요인이며 결과적으로 원자로의 안전성에 큰 영향을 미친다. 특히, 감속재 대 핵연료비는 감속재 온도 계수에 지배적인 영향을 미치는데 노심의 반응도를 조정하는 방법으로 붕산을 사용하지 않는 잠수함용 원자로의 경우, 핵연료봉의 직경은 원자로를 저감속 상태(under moderated state)로 유지시키기 위한 중요한 고려사항이라 할 수 있다.

이 연구에서는 최적의 핵연료봉 직경을 산출하기 위하여 크게 3가지 지표를 설정하였다. 첫번째는 원자로의 안전성 확보를 위하여 원자로가 저감속 상태를 유지토록 하는 것이고, 두번째는 잠수함의 수명을 초과하는 충분한 핵연료 교체주기를 보장하는 것이며 마지막 세번째는 운전 중 발생할 수 있는 불감시간을 극복하기 위하여 충분한 반응도를 확보하는 것이다. 이를 만족하는 최적값을 산출하기 위하여 먼저 핵연료봉의 직경 변화에 따른 무한증배계수를 산출하고 저감속 상태 영역을 확인 하였다. 그림 6은 핵연료봉의 직경 및 감속재 대

핵연료비에 따른 핵연료집합체의 무한증배계수 변화와 저감속 상태 영역을 그래프로 나타낸 것이다.

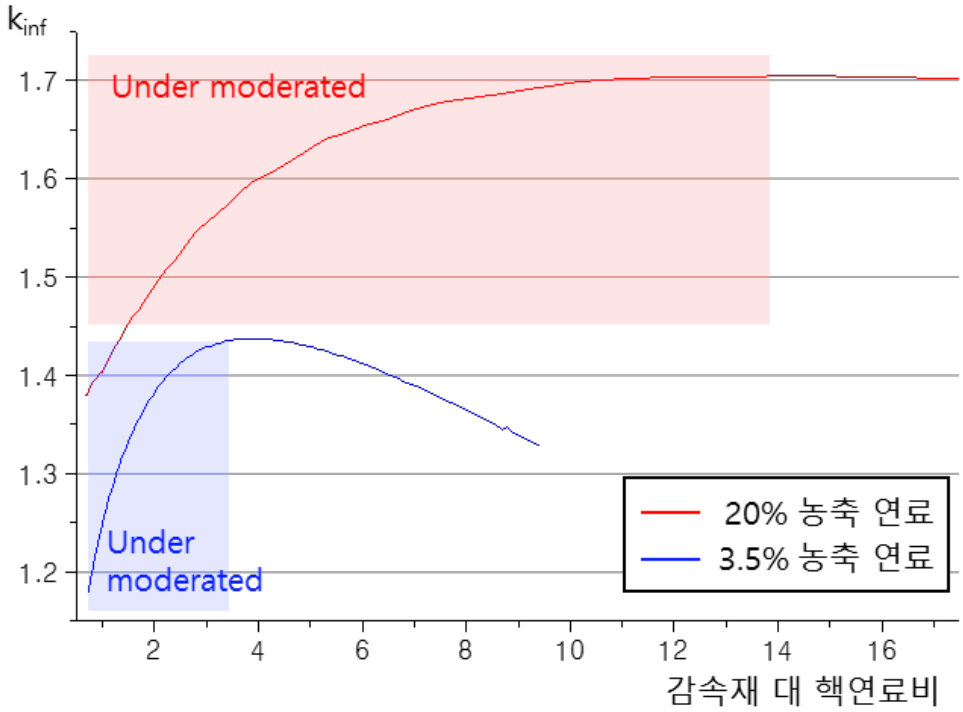


그림 6. 농축도에 따른 저감속 상태 영역의 차이 비교

그림 6을 통해서 농축도가 높은 합금연료의 경우 농축도가 낮은 UO_2 연료에 비하여 원자로의 저감속 상태를 유지할 수 있는 감속재 대 핵연료비가 월등히 높음을 확인 할 수 있다. 3.5% 농축 우라늄 핵연료의 경우 감속재 대 핵연료 비가 3.8이 될 때까지 원자로의 저감속 상태가 유지되었으나, 20%로 농축된 우라늄 핵연료의 경우 감속재 대 핵연료 비가 14.4에 이를 때 까지 원자로가 저감속 상태를 유지할 수 있었다.

이는 농축도가 높은 핵연료에 더 많은 핵분열성 물질이 존재하기 때문이다. 3.5% 농축 핵연료에 비해 상대적으로 더 많은 핵분열성 물질을 포함하는 20% 농축 핵연료는 핵연료 집합체 내에서 감속재의 비율이 매우 커진 상태에서도 저감속 상태를 유지할 뿐만 아니라 충분한

잉여 반응도를 가질 수 있었다.

즉, 20% 농축 핵연료를 사용하는 잠수함용 원자로는 비교적 수월하게 노심의 저감속 상태 유지하면서, 동시에 충분한 잉여반응도를 달성할 수 있다. 다시 말하면, 20% 농축 핵연료를 사용하는 잠수함용 원자로에서 최적의 핵연료봉 직경을 결정하는 우선 요소는 잉여반응도 또는 저감속 상태 만족이 아니라 설계목표를 만족하는 핵연료 교체주기라 할 수 있다.

따라서, 핵연료봉 직경에 따른 핵연료 교체주기 변화를 확인하기 위하여 저감속 영역에 속하는 핵연료봉 집합체를 이용하여 잠수함용 노심을 구성하고 연소 계산을 실시하였다. 연소 계산에 사용된 핵연료 집합체는 2 종류(7x7, 6x6)이며, 5x5 배열은 선출력 밀도가 과도하게 높아 안전성을 보장할 수 없으므로 제외하였다.

계산결과 잠수함용 원자로에 적합한 집합체내 핵연료봉 배열과 직경은 6x6배열에 직경 5.2 mm임을 알 수 있었다. 7x7 배열의 핵연료 집합체는 6x6 배열 핵연료 집합체에 비하여 연료봉의 개수가 많기 때문에 더 많은 핵연료를 탑재하는 것이 가능하다. 따라서 노심의 크기가 1.1 m로 동일한 경우, 7x7 배열 핵연료 집합체의 총 생산 가능 에너지량은 323,096.7 MWd로 6x6 배열 핵연료 집합체의 총 생산 가능 에너지량인 293,254.5 MWd에 비하여 10% 이상 많은 에너지를 생산할 수 있다. 그러나 잠수함 운용에 필요한 총 에너지량은 271,012.5 MWd 이므로 7x7 배열의 핵연료 집합체는 설계기준을 과도하게 초과하는 것이다.

이를 적정 수준으로 조정하기 위해서는 핵연료봉의 직경을 줄이거나 노심의 크기를 줄이는 방법을 적용할 수 있다. 하지만 연소

계산에 사용된 7x7 배열 집합체의 핵연료봉 직경은 5 mm로 이미 충분이 작기 때문에 핵연료봉의 직경을 더 감소 시키는 것은 불가능하다. 따라서 노심을 1 m로 줄이는 방법을 고려할 수 있는데, 노심의 크기가 줄어들면서 과도한 중성자 누설이 발생하여 노심의 평균 연소도가 크게 감소하였고, 그 결과 7x7 핵연료 집합체를 사용한 직격 1 m의 노심에서 생산 가능한 총 에너지량은 설계기준보다 적은 245,884.6 MWd로 나타났다. 연소 계산을 통하여 저감속 상태를 충족하면서 충분한 반응도와 핵연료 교체주기를 가지는 핵연료봉 배열은 6x6이며, 이때의 핵연료봉 직경은 5.2 mm임을 확인할 수 있었다. 표 12는 연소 계산에 사용된 각 핵연료 집합체 및 노심의 제원과 계산결과를 정리한 것이다.

표 12. 핵연료 집합체에 따른 노심 연소 계산 결과 비교

핵연료봉 배열	7x7		6x6
노심 직경	1.1 m	1.0 m	1.1 m
핵연료 집합체 수	332	256	332
집합체 크기	5 cm	5 cm	5 cm
집합체 당 연료봉 수	45	45	32
선출력 밀도	10.00 kW/m	12.97 kW/m	13.75 kW/m
초기 증배계수	1.27536	1.22680	1.34062
핵연료 질량	4,970.72 kg	4470.63 kg	3910.06 kg
평균 연소도	65 MWd/kg	55 MWd/kg	75 MWd/kg
총 생산 가능 에너지	323,097 MWd	245,885 MWd	293,255 MWd

3. 가연성 독물질 결정

앞선 과정을 통하여 설계된 핵연료 집합체는 그림 7과 같다. 핵연료 집합체의 가로, 세로 길이는 5 cm이며, 하나의 핵연료 집합체는 32개의 핵연료봉과 1개의 가이드 튜브로 구성된다.

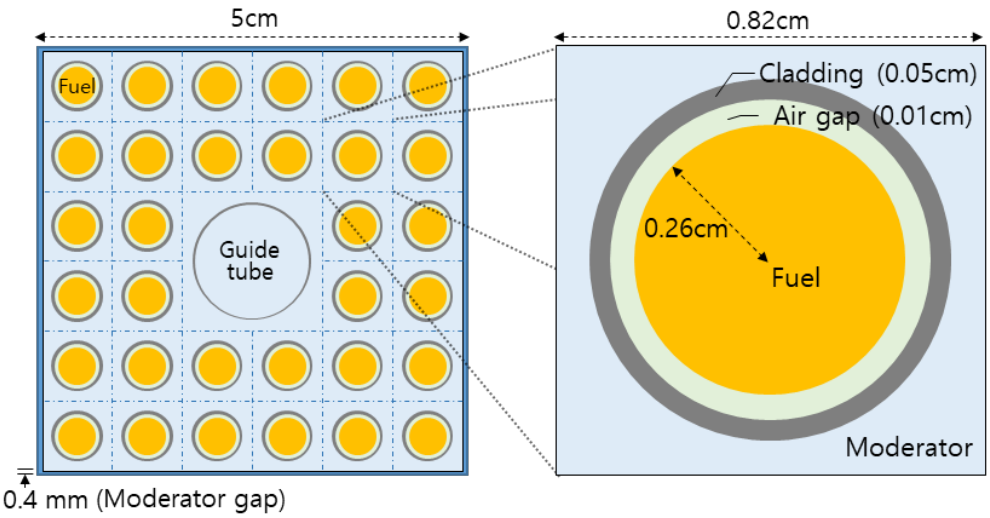


그림 7. 핵연료 집합체 및 핵연료봉 단면도

새롭게 설계된 핵연료 집합체를 이용하여 노심을 구성할 경우 초기 증배계수는 1.34062로 나타나는데, 이는 지나치게 높은 수준의 초기 잉여반응도를 가지는 상태이므로 노심이 임계상태를 유지할 수 있는 적정 수준으로 잉여반응도를 낮추어 줄 필요가 있다. 일반적인 상용 원자로의 경우 잉여반응도를 제어하기 위하여 높은 중성자 흡수 반응 단면적을 가지는 붕소를 감속재에 용해 시키고 이 농도를 조절하는 방식을 사용한다. 그러나 잠수함용 원자로는 구조의 단순화를 위하여 붕소를 이용한 잉여반응도 제어를 하지 않으므로 상대적으로 더 많은 가연성 독물질이 필요하다.

일반적으로 사용되는 가연성 독물질인 가돌리니아는 핵연료와

혼입하여 핵연료봉의 형태로 사용된다. 그러나 가돌리니아 독봉은 독물질이 포함되는 만큼 핵연료의 적재량이 줄어드는 단점을 가진다. 따라서 잠수함용 핵연료 집합체와 같이 잉여반응도가 큰 경우, 반응도 제어를 위하여 필요한 독물질의 양이 많아지게 되면 결과적으로 적재되는 연료의 양이 줄어들어 노심의 핵연료 교체주기가 짧아지는 문제가 발생할 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 본 연구에서는 핵연료 펠릿에 독물질을 코팅을 하는 방식인 일체형 가연성 독물질(IFBA, Intetral Fuel Burnable Absorber)을 사용하였다.

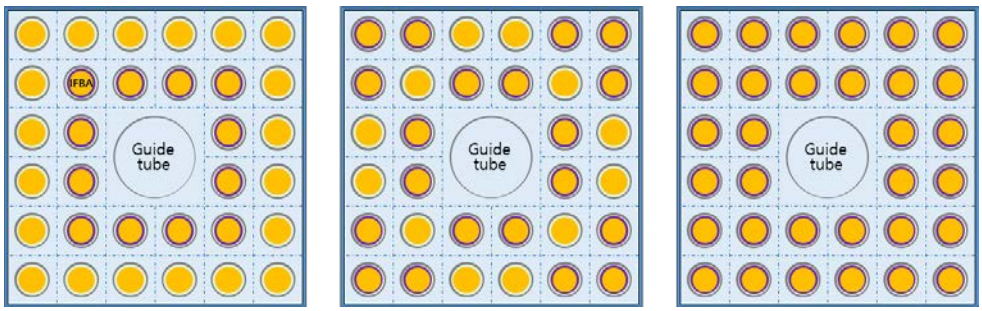
표 13은 본 연구에서 설계한 잠수함용 핵연료 집합체의 잉여반응도 제어를 위하여 사용한 일체형 가연성 독물질의 제원을 정리한 것이다.[15] 일체형 가연성 독물질은 핵연료의 잉여반응도를 조정하고 집합체 및 원자로의 출력분포를 관리하기 위한 목적으로 사용되는데, 연료에 혼입하여 사용하는 가돌리니아와는 달리 핵연료 펠릿을 가연성 독물질로 코팅하는 방식을 사용한다.

표 13. 일체형 가연성 독물질 제원[15]

가연성 독물질		ZrB_2
B_{10} 함유량		2.355 mg/in
B_{10} 농축도		50%
독물질 코팅 두께		10 μm
가연성 독물질 밀도		3.85 g/cc
동위원소 수밀도	B_{10}	2.16410E-02
	B_{11}	1.96824E-02
	Zr	2.06617E-02

이러한 방식은 독물질인 붕소가 더 빠르고 완전하게 연소되도록 할 뿐만 아니라 노심내의 핵연료 적재 공간을 낭비하지도 않는다. 또한 독물질의 잔여 반응도로 인한 주기길이의 손해도 가돌리니아 독봉에 비하여 무시할 수 있을 정도로 적다.

해당 독물질을 이용하여 노심의 잉여반응도를 제어하기 위한 최적 설계안을 도출하기 위하여 일체형 가연성 독물질이 10 μm 두께로 코팅된 핵연료봉을 설계하고, 핵연료 집합체 내에서 코팅된 핵연료봉의 위치를 달리하며 무한증배계수 변화를 살펴보았다. 앞서 설계한 핵연료 집합체(그림 7)를 기준으로 일체형 가연성 독물질이 코팅된 핵연료봉의 수량과 배치가 서로 다른 3개의 핵연료 집합체를 그림 8과 같이 추가로 설계하였으며, 일체형 가연성 독물질 코팅을 하지 않은 핵연료 집합체와 연소계산 결과를 비교하였다.



① GT 주변 ② GT 주변 및 모서리 ③ 전체 핵연료 집합체

그림 8. IFBA 코팅 핵연료봉이 적용된 핵연료 집합체 설계 단면도

일반적으로 감속재의 양이 많을수록 중성자의 반응도가 증가하게 되므로 안내관 주변과 핵연료 집합체의 모서리에 위치한 핵연료봉에서 상대적으로 높은 출력이 나타난다. 따라서 일체형 가연성 독물질이 코팅된 핵연료봉을 안내관과 핵연료 집합체의 모서리에 우선 배치하여 ① 안내관 주변의 핵연료봉에만 일체형 가연성 독물질 코팅을 적용한

경우와 ② 안내관 주변과 핵연료 집합체의 모서리에 일체형 가연성 독물질 코팅을 적용한 경우, ③ 전체 핵연료 집합체에 일체형 가연성 독물질 코팅을 적용한 경우의 잉여반응도를 확인하였다.

각 핵연료 집합체의 잉여반응도 계산 결과, 일체형 가연성 독물질이 코팅된 핵연료봉의 수가 증가 할수록 핵연료 집합체의 잉여반응도가 감소하는 것을 뚜렷이 확인 할 수 있었다. 그림 9를 보면, 일체형 가연성 독물질이 코팅된 핵연료봉을 사용하지 않은 핵연료 집합체의 초기 잉여반응도는 약 32,000 pcm으로 매우 높은 수준이었으나, 일체형 가연성 독물질이 코팅된 핵연료봉의 수가 증가함에 따라 점차 반응도가 감소하여 핵연료 집합체의 전체 핵연료봉에 일체형 가연성 독물질 코팅을 적용한 경우에는 초기 노심의 반응도가 미임계 상태까지 낮아짐을 알 수 있다. 이는 일체형 가연성 독물질 코팅만으로도 노심의 초기 잉여반응도 제어가 충분히 가능함을 의미한다.

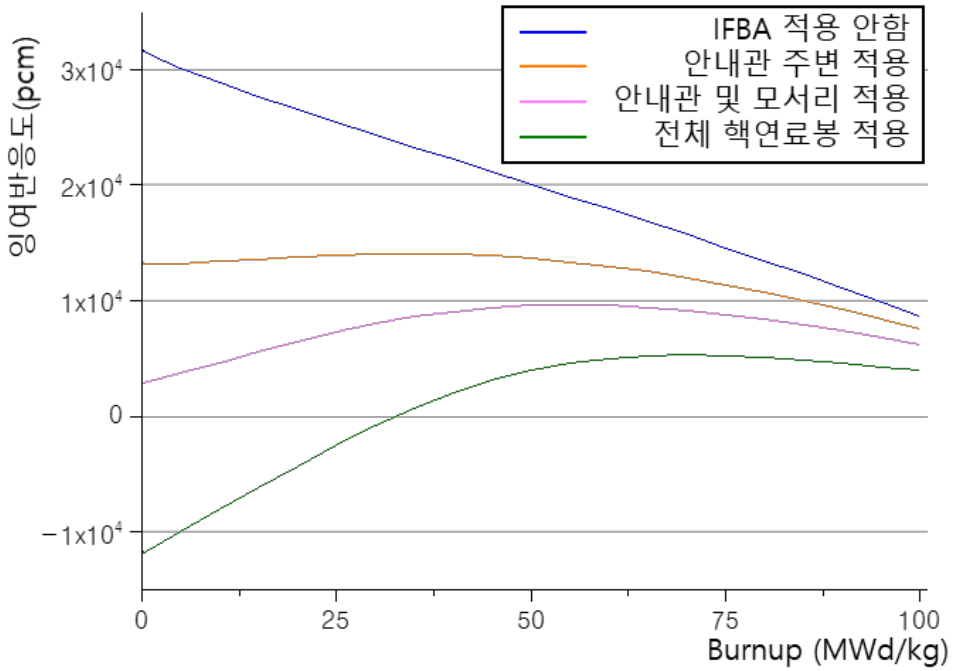


그림 9. IFBA 코팅 적용에 따른 잉여반응도 차이 비교

제 2 절 노심 설계

1. 노심 내 집합체 배열

초기 노심의 출력분포를 확인하기 위해서 IFBA를 적용하지 않은 핵연료 집합체만으로 그림 10과 같이 노심을 구성하였다. 총 332개의 핵연료 집합체를 이용하여 직경 1.1 m, 출력 150 MWt의 원자로를 설계하였는데, 잠수함용 원자로와 같이 노심의 크기가 작을 경우 노심의 외곽과 상·하부로의 중성자 누설량이 더욱 증가하므로 연소주기가 짧아지고 출력분포가 더욱 불안정해지는 경향이 나타난다.

따라서 소형 원자로 일수록 반사체의 선정이 중요하다. 여러 연구에 따르면 중성자의 누설을 최소화시키는 효과는 베릴륨이 가장 뛰어나지만 경제성과 안전성 등을 복합적으로 고려하면 스테인레스강(SS304)이 가장 효율적이다. 따라서 잠수함용 노심의 반사체로 5 cm 두께의 스테인레스강을 사용 하였으며[16], 노심 상·하부에는 20cm 두께의 감속재를 배치하였다.

그러나 그림 10에서 볼 수 있듯이 단일 핵연료 집합체로 구성된 노심은 초기 유효증배계수(k_{eff})가 1.34로 과도하게 높을 뿐만 아니라 노심의 반경방향 출력분포 또한 안정적이지 못하다. 이처럼 과도하게 높은 잉여반응도는 안정적인 임계상태 유지를 어렵게하고, 출력분포 불균형은 노심의 첨두출력을 증가시켜 안전성을 감소시키고 방출 연소도를 낮춰 경제성까지 저하시킨다.

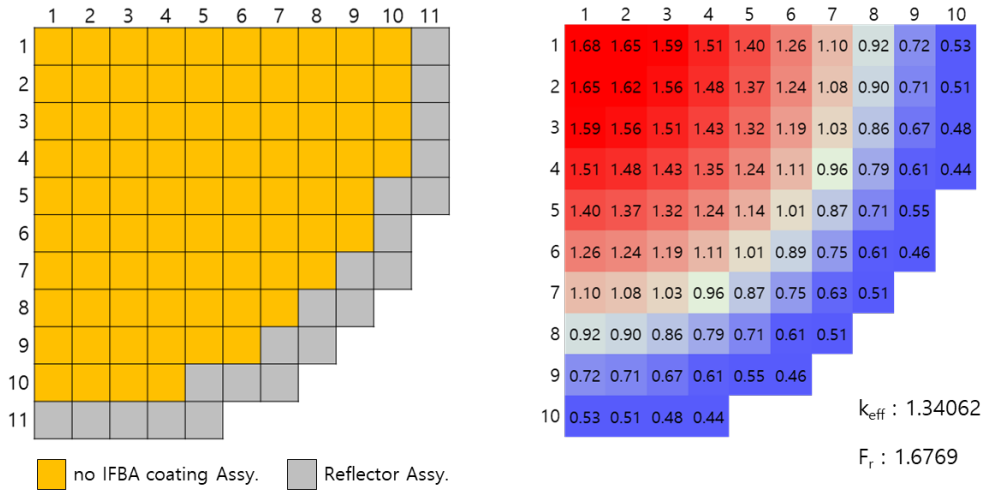
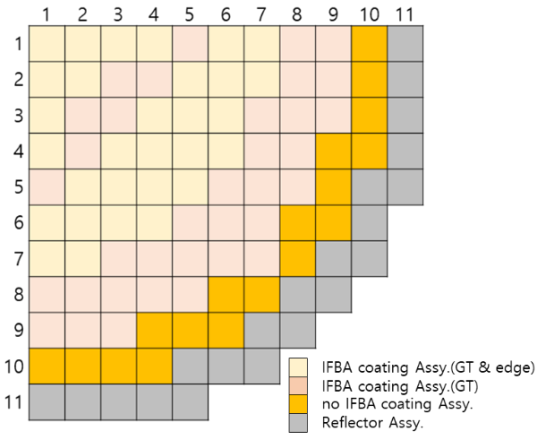


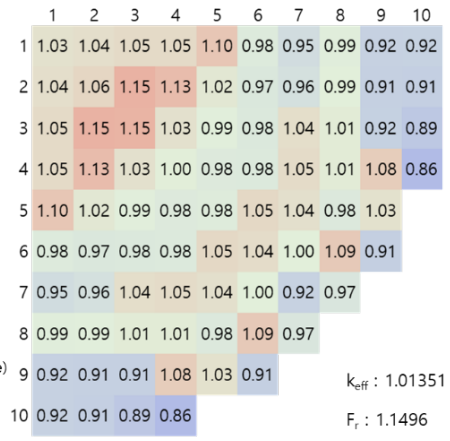
그림 10. 개선 전 노심 배치도 및 반경방향 출력분포

따라서 핵연료 집합체를 배치하여 노심을 구성할 때는 몇가지 종류의 핵연료 집합체를 적절히 배열하여 노심의 첨두출력을 낮출 필요가 있다. 본 연구에서는 노심의 반경방향 출력분포를 평탄화 하기 위하여 일체형 가연성 독물질을 코팅한 핵연료봉의 수를 달리한 3종류의 핵연료 집합체를 사용하였다. 노심의 중심부에는 가장 많은 일체형 가연성 독물질 코팅 핵연료봉이 포함된 핵연료 집합체(핵연료 집합체의 모서리와 안내관 주변에 IFBA 코팅 핵연료봉 배치)를 배치하여 국부출력을 낮추었으며, 노심의 외곽에는 일체형 가연성 독물질 코팅을 하지 않은 핵연료 집합체를 배치하여 중성자 누설로 인한 출력감소를 보상하였다. 그리고 노심의 중심부와 외곽부의 급격한 출력 차이를 완화시키기 위해서 일체형 가연성 독물질 코팅 핵연료봉이 상대적으로 적게 포함된(안내관 주변에 IFBA 코팅 핵연료봉 배치) 핵연료 집합체를 노심 중심부와 외곽부의 사이에 배치하였다. 이러한 과정을 통해서 원자로의 초기 유효증배계수를 1.01까지 낮추어 잉여반응도를 조절하였고, 노심의 반경방향 첨두출력계수(F_r)도

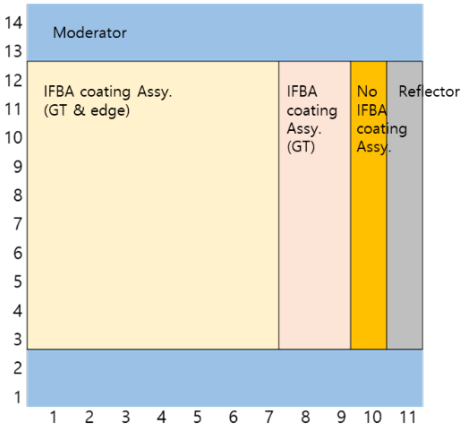
1.1496으로 개선하였다. 그림 11은 개선된 최종 노심의 배치 단면도와 반경방향 및 축방향 출력분포이다.



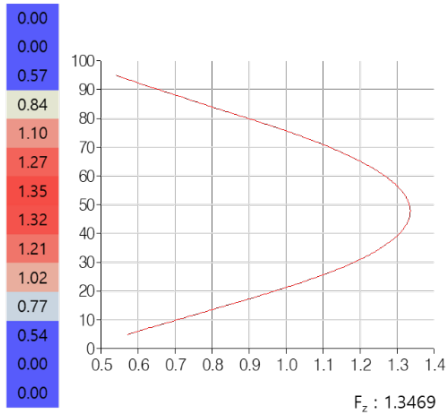
a) 원자로 내 핵연료 집합체 배치 단면도



b) 반경방향 출력분포



c) 원자로 측면도



d) 축방향 출력분포

그림 11. 최종 원자로 설계 단면도 및 반경방향, 축방향 출력분포

2. 제어봉 배치

잠수함용 원자로는 잉여반응도 제어를 위하여 붕소를 사용하지 않으므로 집합체 내에 포함된 가연성 독물질과 제어봉을 이용하여 원자로의 임계상태를 유지하여야 한다. 특히, 상용로에 비하여 높은 농축도의 우라늄 연료로 인하여 운전 기간중 지속적으로 높은 반응도를 가지는 잠수함용 원자로의 제어봉은 충분한 제어능을 가지는 것이 매우 중요하므로 집합체 설계 단계에서부터 충분한 제어봉 삽입 공간을 최대한 확보할 수 있도록 고려하였다.

제어봉에 사용된 물질은 일반적으로 가압경수로형 원자로에서 사용되는 탄화붕소(B_4C)이며, 유사한 수준의 제어능을 가지는 4개의 제어봉 집합체를 설계하였다. 잠수함용 원자로는 잉여반응도 제어를 위하여 붕산을 사용하지 않으므로 임계상태를 유지하기 위해서 최소 1개의 제어봉 집합체는 지속적으로 삽입되어 운용된다. 이로 인하여 제어봉이 삽입된 위치와 그렇지 않은 위치의 핵연료간 연소도 차이가 발생할 수 있으므로 4개의 제어봉 집합체를 노심내에 고르게 배치하여 핵연료간 연소도 차이와 노심내 반경방향 출력 불균형을 최소화 하였다. 제어봉 집합체의 배치는 그림 12와 같다.

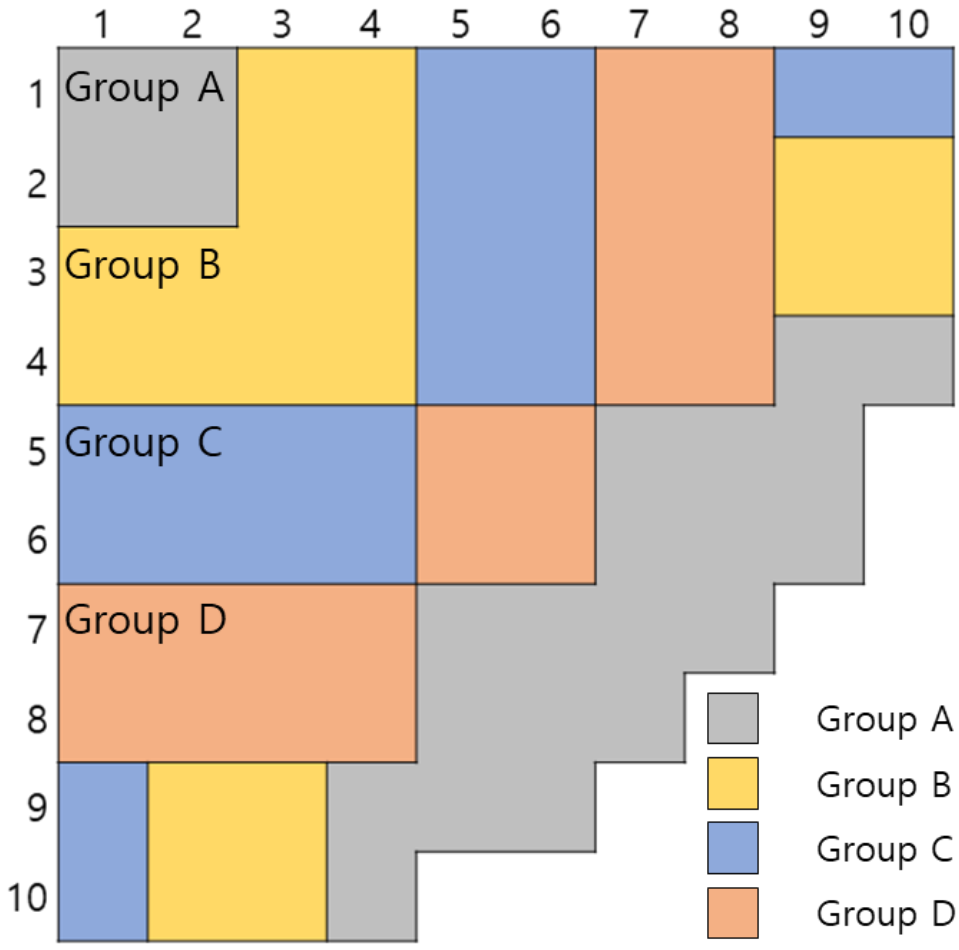


그림 12. 제어봉 집합체 배치도

제 5 장 원자로 성능 및 안전성 분석

지금까지 한국형 원자력 추진 잠수함의 요구성능을 설정하고 이를 충족하기 위한 새로운 원자로 노심을 설계하였다. 현존하는 최신 원자력 추진 잠수함들의 제원을 고려하여 임무 수행을 위하여 요구되는 한국형 원자력 잠수함의 적정 수중 배수량과 최대속력을 7,000톤, 35 kts로 설정하였으며, 요구되는 원자로의 출력은 150 MWt로 산출되었다. 저농축 우라늄을 사용하면서 발생하는 핵분열 물질 부족을 극복하기 위하여 고밀도 우라늄 합금을 연료로 사용하였으며 그 결과 노심 직경 1.1 m, 유효 노심높이 1m의 작은 크기를 유지하면서 충분한 연소주기를 가지는 원자로를 설계할 수 있었다. 이번 장에서는 nTRACER 전노심 수송계산 결과를 바탕으로, 설계된 원자로의 성능과 안전성을 분석한다.

nTRACER 계산 조건으로 중성자 추적선의 간격은 0.05cm, 추적선수는 방위각(Azimuthal angle) 방향으로 90° 당 16개, 극각(Polar angle) 방향으로 90° 당 4개를 설정하였다.

표 14. 새롭게 설계된 잠수함용 원자로 세부 제원

구 분	제 원	구 분		제 원
노심 폭	1.1 m	운전압력		15 MPa
유효 노심높이	1 m	냉각재 온도	입구측	290 ℃
집합체 피치	5 cm		출구측	320 ℃
집합체 수	332 개	핵연료 연소주기		35년
핵연료 농축도	20 %	가연성 독물질		IFBA(ZrB_2)
열출력	150 MWt	반사체		SS 304
선출력 밀도	13.75 kWt/m	제어봉		B_4C

제 1 절 초기노심의 반응도와 출력분포

가장 먼저 초기노심의 반응도와 출력분포의 안정성을 확인하였다. 분석은 nTRACER 계산을 통하여 저온영출력(CZP), 고온영출력(HZP), 고온전출력(HFP) 상태의 초기노심을 대상으로 유효증배계수를 산출하고, 안정적인 출력분포를 검증하는 방식으로 실시하였다.

일반적으로 원자로의 유효증배계수는 고온전출력(HFP)보다 고온영출력(HZP)에서, 고온영출력(HZP)보다 저온영출력(CZP)에서 더 높게 나타나는데 이러한 현상에 영향을 미치는 주요한 요인은 바로 노심의 온도 변화이다. 노심의 온도가 증가하게 되면 감속재 밀도가 감소하고 결과적으로 중성자의 감속효과가 저하되어 노심의 반응도가 줄어들게 된다. 이처럼 감속재의 온도에 따라 노심의 반응도가 변화하는 정도를 나타내기 위한 지표가 감속재 온도계수(MTC)인데, 정상적인 원자로의 경우 온도가 상승할수록 반응도가 감소하는 음의 반응도를 가진다. 노심의 출력이 영출력(Zero power)에서 전출력(Full power)로 변하는 경우에도 출력 상승으로 인하여 노심내 온도가 상승하면서 도플러 확장(Doppler Broadening)이 발생하게 되고 결과적으로 노심의 반응도가 더 낮아지게 된다. 이러한 현상은 정상적으로 설계된 원자로에서 보이는 일반적인 현상이므로 원자로 운전조건별 초기노심의 유효증배계수를 비교하는 것 만으로도 원자로의 정상 설계 여부를 가늠해 볼 수 있다. 표 15는 새롭게 설계된 원자로의 운전조건별 유효증배계수를 정리한 것이다. 원자로의 유효증배계수는 저온영출력(CZP)에서는 1.05818, 고온영출력(HZP)에서는 1.02017 그리고

고온전출력(HFP)에서는 1.01351로 산출되어 노심내 온도 상승에 따라 반응도가 감소하는 정상적인 원자로 특성을 나타냈다. 원자로의 출력과 온도에 따른 반응도 계수는 뒤에서 더 자세히 살펴보도록 하겠다.

표 15. 운전조건에 따른 초기노심의 유효증배계수 비교

	저온영출력 (CZP)	고온영출력 (HZP)	고온전출력 (HFP)
유효증배계수(k_{eff})	1.05818	1.02017	1.01351

다음으로 각 운전조건별 노심의 출력분포를 확인하였다. 반경방향 출력분포는 모든 운전조건에서 대체로 평탄하게 나타났다. 일반적으로 원자로의 반경방향 출력분포는 노심 외곽에서 발생하는 중성자의 누설로 인하여 외곽은 낮아지고 중심부는 높아지는 형태를 보이는데 새롭게 설계된 노심은 이러한 경향이 상당히 약하게 나타나고 있음을 그림 13을 통해서 확인할 수 있다. 이는 중성자 누설을 고려하여 노심의 중심부와 외곽부의 핵연료 집합체 종류를 달리함으로써 중성자의 누설로 인한 출력 불균형을 보완하였기 때문이다.

그 결과 노심의 반경방향 첨두출력(F_r)은 저온영출력(CZP)에서 1.3880, 고온영출력(HZP)에서 1.1343, 고온전출력(HFP)에서 1.1496으로 산출되었다. 우리나라의 대표적인 상용 경수로인 APR 1400의 초기 반경방향 첨두출력(F_r)이 1.42임을 고려하면[17] 새롭게 설계된 원자로의 반경방향 첨두출력(F_r)은 매우 낮음을 알 수 있다.

축방향 첨두출력(F_z)은 축방향을 기준으로 가장 온도가 높은 중간 위치에서 나타나며 모든 운전조건에서 약 1.35으로 산출되었다. 이 값 역시 APR 1400의 축방향 첨두출력(F_z) 1.71과 비교하면 충분히 낮은

수준임을 알 수 있다..

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0.7072	0.7267	0.7612	0.7970	0.8999	0.8315	0.8665	1.0161	1.0100	1.0964
2	0.7267	0.7610	0.8767	0.8895	0.8215	0.8381	0.8943	1.0400	1.0227	1.1000
3	0.7612	0.8767	0.8989	0.8171	0.8235	0.8715	1.0386	1.0924	1.0563	1.0987
4	0.7969	0.8895	0.8171	0.8190	0.8522	0.9215	1.0981	1.1401	1.3595	1.0727
5	0.8998	0.8214	0.8234	0.8521	0.9134	1.0799	1.1435	1.1502	1.3154	
6	0.8314	0.8379	0.8714	0.9214	1.0798	1.1380	1.1501	1.3880	1.1569	
7	0.8662	0.8941	1.0383	1.0978	1.1433	1.1500	1.0927	1.2261		
8	1.0157	1.0395	1.0920	1.1397	1.1499	1.3877	1.2260			
9	1.0095	1.0222	1.0558	1.3589	1.3149	1.1566				
10	1.0956	1.0992	1.0980	1.0721						

k_{eff} : 1.05818

F_r : 1.3880

a) 저온영출력(CZP) 조건에서 초기노심의 반경방향 출력분포

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1.0076	1.0155	1.0280	1.0315	1.0878	0.9706	0.9397	0.9928	0.9216	0.9269
2	1.0155	1.0394	1.1343	1.1117	1.0019	0.9633	0.9506	0.9985	0.9200	0.9196
3	1.0280	1.1342	1.1325	1.0183	0.9797	0.9684	1.0417	1.0143	0.9241	0.9015
4	1.0314	1.1117	1.0183	0.9857	0.9713	0.9767	1.0533	1.0179	1.1027	0.8681
5	1.0877	1.0018	0.9796	0.9713	0.9800	1.0594	1.0468	0.9918	1.0523	
6	0.9705	0.9632	0.9683	0.9766	1.0593	1.0538	1.0095	1.1152	0.9253	
7	0.9395	0.9504	1.0415	1.0531	1.0467	1.0095	0.9316	0.9862		
8	0.9925	0.9982	1.0140	1.0177	0.9916	1.1150	0.9861			
9	0.9212	0.9196	0.9237	1.1023	1.0520	0.9251				
10	0.9263	0.9190	0.9010	0.8677						

k_{eff} : 1.02017

F_r : 1.1343

b) 고온영출력(HZP) 조건에서 초기노심의 반경방향 출력분포

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1.0328	1.0390	1.0486	1.0486	1.0997	0.9821	0.9467	0.9909	0.9163	0.9181
2	1.0390	1.0603	1.1496	1.1252	1.0156	0.9741	0.9557	0.9949	0.9136	0.9101
3	1.0486	1.1496	1.1456	1.0330	0.9925	0.9764	1.0401	1.0068	0.9151	0.8912
4	1.0486	1.1252	1.0330	0.9991	0.9812	0.9806	1.0470	1.0065	1.0813	0.8580
5	1.0995	1.0155	0.9924	0.9812	0.9847	1.0548	1.0363	0.9780	1.0327	
6	0.9820	0.9740	0.9763	0.9805	1.0548	1.0439	0.9966	1.0916	0.9114	
7	0.9466	0.9555	1.0399	1.0468	1.0362	0.9965	0.9195	0.9706		
8	0.9906	0.9946	1.0066	1.0062	0.9779	1.0915	0.9706			
9	0.9160	0.9133	0.9147	1.0810	1.0324	0.9112				
10	0.9175	0.9097	0.8907	0.8576						

k_{eff} : 1.01351

F_r : 1.1496

c) 고온전출력(HFP) 조건에서 초기노심의 반경방향 출력분포

그림 13. 운전상태별 초기노심의 반경방향 출력분포

제 2 절 연소에 따른 노심의 반응도와 연소주기

이 연구에서 저농축 우라늄 연료를 사용하는 잠수함용 원자로를 설계함에 있어서 가장 중요한 목표 중 한가지가 바로 함정의 수명을 초과하는 핵연료 교체주기를 달성하는 것이었다. 이를 위해서 잠수함의 수명을 30년으로 가정하고 10%의 마진을 적용하여 33년의 핵연료 교체주기를 가지는 원자로를 목표로 설계를 수행하였으며, 목표 성능 달성을 확인하기 위해 전주기 연소계산을 수행하여 유효증배계수가 1이하로 감소하는 시점을 측정하였다.

그림 14에서 보여지는 바와 같이, 설계된 원자로의 유효 전출력 가동일수(EFPD)는 1,658일로 최대출력으로 계속 운전시 약 4.54년의 연소주기를 보였다. 연소초기 Xe^{135}, Sm 등 독물질의 생성으로 인해 반응도가 급격하게 감소하는 현상이 나타나면서 초기노심의 유효증배계수가 1.00675 까지 떨어졌으나, Xe^{135} 생성으로 인한 반응도 감소 현상이 안정화 된 후부터는 가연성 독물질이 연소되면서 유효증배계수가 점차 증가하는 모습을 보였다. 가연성 독물질이 완전히 연소되는 시기는 EFPD가 911일인 시점이었으며 이때 유효증배계수는 1.03637로 전체 연소주기에서 최대값을 보였다. 이후 핵연료의 연소로 유효증배계수가 지속적으로 감소하는 모습을 나타내며 EFPD 1,658일, 약 4.54년에 유효증배계수가 1미만으로 감소하였다. 이는 목표했던 핵연료 교체주기에 비하면 터무니 없이 부족한 기간 이지만 앞에서 언급하였듯 잠수함용 원자로는 최대 출력으로 지속적으로 운전되지 않으므로 목표 연소주기 달성을 확인하기 위해서는 잠수함의 가동율과

평균 운용 출력을 고려할 필요가 있다.

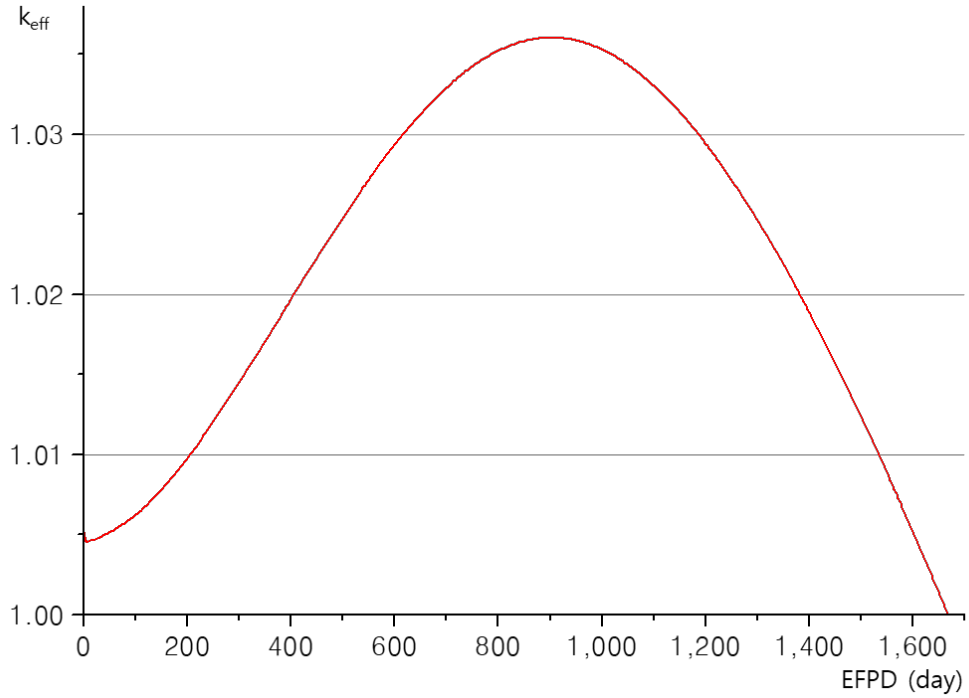


그림 14. 노심의 연소기간에 따른 유효증배계수(k_{eff}) 변화

앞서 제 3장에서 원자로의 최대 출력(150 MWt)과 목표 연소주기(33년), 정박 및 유지보수 일정을 고려한 가동률(50%), 실제 해상에서 운용되는 원자로의 평균 출력(30%)을 고려하여 연소주기 달성에 필요한 총 에너지량을 계산하였으며, 총 271,012.5 MWd의 에너지가 필요함을 확인하였다.

설계된 원자로에 탑재된 핵연료의 질량은 약 3.91톤이므로 여기에 노심 연소에 따른 연소도를 곱하면 실제 원자로에서 생산가능한 총 에너지량을 계산할 수 있다. 그림 15는 노심의 평균 연소도에 따른 유효증배계수 변화를 나타낸 것이다. 연소도에 따른 유효증배계수 역시 가연성 독물질이 연소되는 동안 증가하다가 가연성 독물질이 완전히 연소된 이후부터 감소하는데, 유효증배계수가 1미만으로 감소하는

연소주기 종료 시점의 평균 연소도는 약 73 MWd/kg 으로 나타났다. 이 값에 노심에 적재된 U_{235}의 질량인 3.91톤을 곱하여 산출된 총 에너지 생산량은 286,329.3 MWd 이다. 이 값은 원자력 추진 잠수함을 33년간 운용하기 위해서 필요한 총 에너지량인 271,012.5 MWd에 비하여 약 5% 가량 더 많은 에너지량이다. 해당 에너지량으로 잠수함을 운용할 수 있는 기간은 약 35년으로 설계 노심은 최초 설계 목표를 충분히 달성하였음을 알 수 있다.

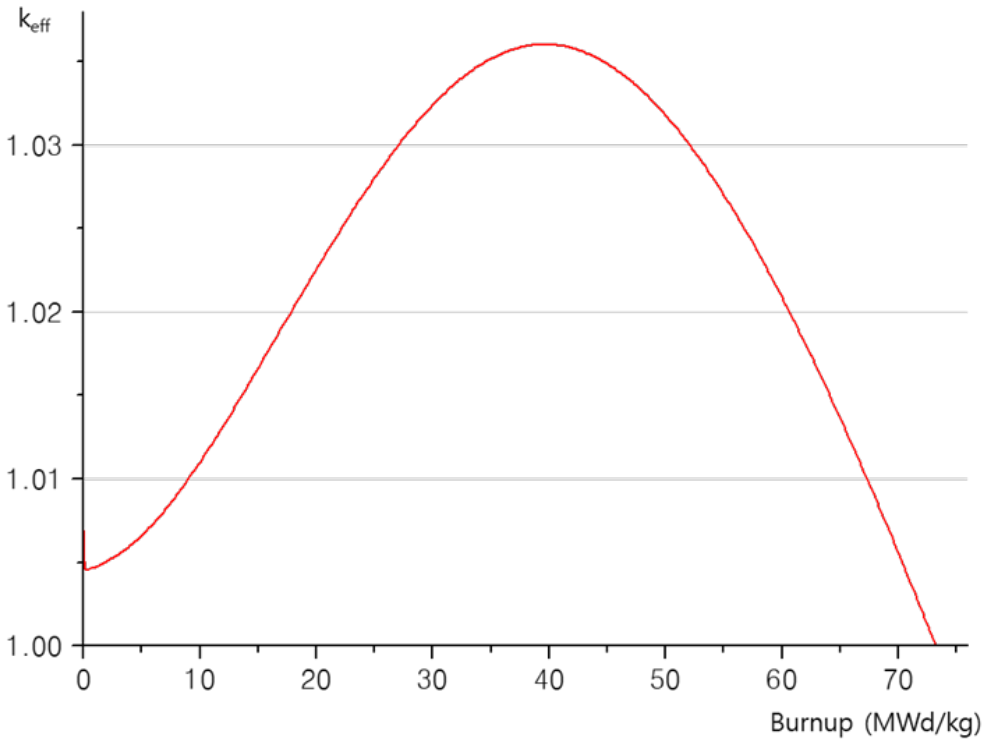


그림 15. 노심의 연소도에 따른 유효중배계수(k_{eff}) 변화

노심의 반경방향 출력분포는 연소가 진행됨에 따라 노심 중앙의 출력은 증가하고, 노심 외곽의 출력은 감소하는 경향이 나타나지만 대체로 평탄한 분포를 보였다. 잠수함용 원자로는 운용중에 연료를 재장전 또는 재배열 하지 않으므로 노심내 핵연료의 위치에 따른

불균형한 연소로 인하여 출력분포의 차이가 커지고 첨두출력이 높아질 위험이 있다. 새롭게 설계된 원자로는 전체 연소주기 동안 대체로 평탄한 출력분포를 보였다. 가연성 독물질이 모두 연소되는 시점의 반경방향 첨두출력(F_r)이 1.4001으로 가장 높게 나타났고 이후 점차 낮아져 연소주기가 종료되는 시점의 반경방향 첨두출력(F_r)은 1.3376까지 감소하였다.

그림 17은 연소가 시작되는 시점과 가연성 독물질이 모두 연소되는 시점, 그리고 노심의 연소주기가 종료되는 시점의 반경방향 출력분포를 나타낸 것이다. 초기 노심은 매우 평탄한 반경방향 출력분포를 보이고 있지만 가연성 독물질의 연소가 진행됨에 따라 노심의 중앙과 외곽부분의 출력분포 불균형이 점차 심해지다가 노심의 핵분열성 물질이 대부분 연소되는 주기 말이 되면 중앙과 외곽부분의 출력분포 불균형이 다소 완화되는 모습을 확인할 수 있다.

축방향 출력분포 역시 연소가 진행됨에 따라 점차 평탄해지는 경향을 보였다. 연소초기 축방향 첨두출력(F_z)은 1.36이었으나 연소가 진행됨에 따라 점차 감소하여 연소 종료시점에는 1.11까지 낮아졌는데, 이는 출력이 높은 중앙부분의 핵연료가 상하부에 비하여 더 많이 연소되기 때소되기 때문이다.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1.0328	1.0390	1.0486	1.0486	1.0997	0.9821	0.9467	0.9909	0.9163	0.9181
2	1.0390	1.0603	1.1496	1.1252	1.0156	0.9741	0.9557	0.9949	0.9136	0.9101
3	1.0486	1.1496	1.1456	1.0330	0.9925	0.9764	1.0401	1.0068	0.9151	0.8912
4	1.0486	1.1252	1.0330	0.9991	0.9812	0.9806	1.0470	1.0065	1.0813	0.8580
5	1.0995	1.0155	0.9924	0.9812	0.9847	1.0548	1.0363	0.9780	1.0327	
6	0.9820	0.9740	0.9763	0.9805	1.0548	1.0439	0.9966	1.0916	0.9114	
7	0.9466	0.9555	1.0399	1.0468	1.0362	0.9965	0.9195	0.9706		
8	0.9906	0.9946	1.0066	1.0062	0.9779	1.0915	0.9706			
9	0.9160	0.9133	0.9147	1.0810	1.0324	0.9112				
10	0.9175	0.9097	0.8907	0.8576						

EFPD : 0 day
Burnup : 0 MWd/kg
k_{eff} : 1.01351
F_r : 1.1496

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1.4001	1.3873	1.3599	1.3131	1.2785	1.1446	1.0382	0.9583	0.8116	0.6970
2	1.3873	1.3799	1.3900	1.3351	1.2212	1.1263	1.0281	0.9462	0.7984	0.6840
3	1.3599	1.3900	1.3567	1.2594	1.1806	1.0977	1.0401	0.9228	0.7737	0.6564
4	1.3131	1.3350	1.2594	1.1990	1.1304	1.0559	0.9993	0.8814	0.7988	0.6161
5	1.2785	1.2212	1.1806	1.1304	1.0729	1.0335	0.9382	0.8174	0.7400	
6	1.1445	1.1262	1.0977	1.0559	1.0335	0.9565	0.8543	0.7951	0.6428	
7	1.0381	1.0280	1.0401	0.9992	0.9382	0.8542	0.7488	0.6928		
8	0.9582	0.9461	0.9227	0.8813	0.8173	0.7950	0.6928			
9	0.8114	0.7982	0.7736	0.7987	0.7399	0.6427				
10	0.6967	0.6837	0.6561	0.6159						

EFPD : 911 day
Burnup : 40 MWd/kg
k_{eff} : 1.03637
F_r : 1.4001

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1.3376	1.3283	1.3085	1.2773	1.2509	1.1672	1.0800	0.9862	0.8368	0.6891
2	1.3283	1.3176	1.3154	1.2851	1.2200	1.1549	1.0673	0.9723	0.8223	0.6756
3	1.3086	1.3155	1.2949	1.2443	1.1964	1.1294	1.0606	0.9437	0.7929	0.6467
4	1.2773	1.2850	1.2443	1.2095	1.1582	1.0891	1.0171	0.8977	0.7805	0.6038
5	1.2509	1.2201	1.1963	1.1582	1.1045	1.0512	0.9544	0.8307	0.7203	
6	1.1672	1.1549	1.1294	1.0891	1.0512	0.9725	0.8697	0.7748	0.6263	
7	1.0800	1.0673	1.0605	1.0171	0.9544	0.8697	0.7630	0.6761		
8	0.9861	0.9723	0.9436	0.8976	0.8307	0.7748	0.6761			
9	0.8367	0.8222	0.7927	0.7804	0.7202	0.6262				
10	0.6889	0.6754	0.6465	0.6037						

EFPD : 1,668 day
Burnup : 73 MWd/kg
k_{eff} : 1.00000
F_r : 1.3376

그림 16. 연소시점별 반경방향 출력분포

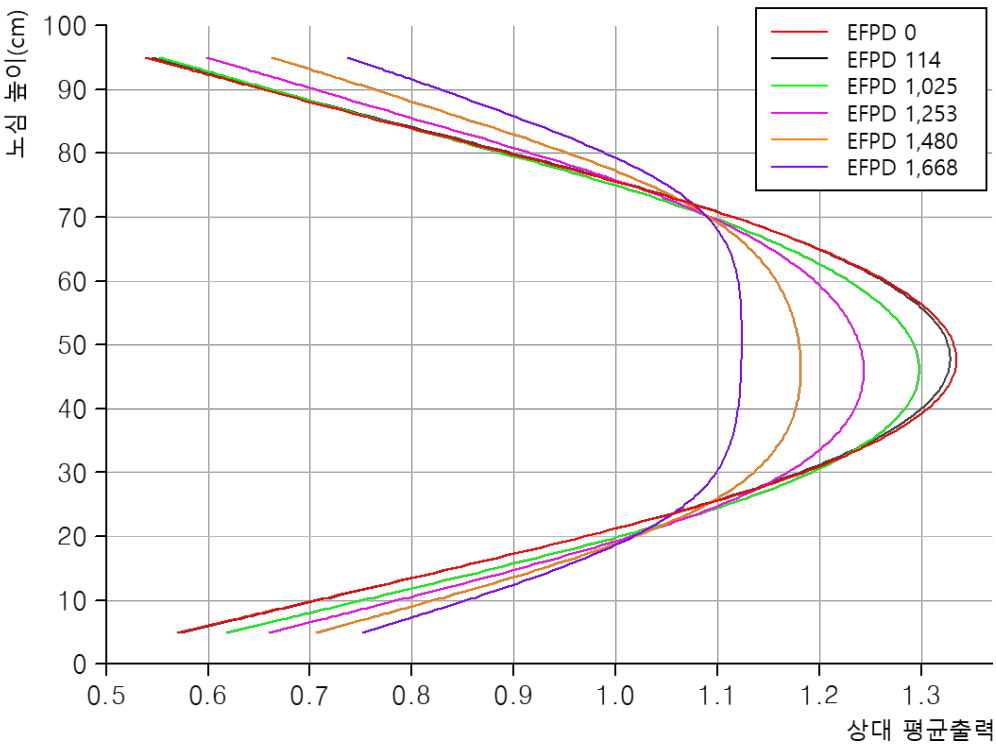


그림 17. 연소시점별 축방향 상대 평균출력분포

제 3 절 첨두출력계수(F_q)

평균 선출력밀도(q')은 노심에서 핵연료봉 1개가 1m당 발생시키는 평균출력 밀도를 뜻하며 식(12)와 같이 산출 할 수 있다.

$$< q' >= \frac{\gamma \dot{Q}_{th}}{N_p L} \qquad (12)$$

식에서 γ는 핵분열로 발생한 열에너지가 핵연료봉에 흡수되는 비율, $\dot{Q}_{th}$ 는 노심의 열출력, N_p 는 연료봉의 개수, L 는 유효 노심높이를 의미한다. γ으로 가압경수로형의 비율인 0.974[18] 를 적용하여 설계된 노심의 평균 선출력밀도(q')를 계산하면 설계된 잠수함용 노심의 평균 선출력밀도(q')는 13.75 kW/m로 산출되며, 이는 상용 가압경수로인 APR1400의 평균 선출력밀도(q') 17.92 kW/m에 비하여 충분히 작은 값이지만, 한국형 중소형 원자로(SMART)의 선출력밀도(q') 10.97 kW/m 보다는 다소 높은 수준이다. 노심의 평균 선출력밀도(q')와 최대 허용 선출력밀도(q'_{limit})를 이용하면 안전성을 판단하는 기준이 되는 첨두출력계수 제한치($F_{q.limit}$)를 구할 수 있는데, 일반적인 가압경수로의 최대 허용 선출력밀도(q'_{limit})는 46 kW/m이므로, 이를 식 (13)에 대입하면 설계된 잠수함용 노심의 첨두출력계수 제한치($F_{q.limit}$)가 3.34545임을 알 수 있다.

$$F_{q.limit} = \frac{q'_{limit}}{< q' >} \tag{13}$$

설계된 원자로의 첨두출력계수(F_q)가 제한치($F_{q.limit}$) 이하 수준을 만족하는 것을 확인하기 위하여 전체 연소주기에 대한 반경방향(F_r), 축방향(F_z) 출력계수 및 첨두출력계수(F_q)를 산출하였다. 반경방향(F_r)과 축방향(F_z) 출력계수는 각각 노심의 축방향과 반경방향의 출력분포를 평균한 값으로 계산되므로, 실제로 노심내 국부의 출력계수가 과도하게 높아짐을 확인하기 위해서는 첨두출력계수(F_q)를 확인하여야 한다. 설계 노심의 첨두출력계수(F_q)는 연소초기 1.70730으로 제한치($F_{q.limit}$)에 비하여 충분한 열적 여유도를 가지고 있었으며 연소가 진행됨에 따라

점차 높아져 가연성 독물질이 완전히 연소되는 시점에서 최대값을 보였다. 그러나 이때의 첨두출력계수(F_q) 역시 2.01546로 첨두출력 제한치($F_{q.limit}$)보다 충분히 낮게 산출 되었으며, 결과적으로 노심의 첨두출력계수(F_q)가 전체 연소주기동안 제한치($F_{q.limit}$)를 초과하지 않음을 확인 할 수 있었다. 그림 18은 전체 연소주기에 따른 노심의 출력계수(F_r, F_z, F_q) 변화를 그래프로 나타낸 것이다.

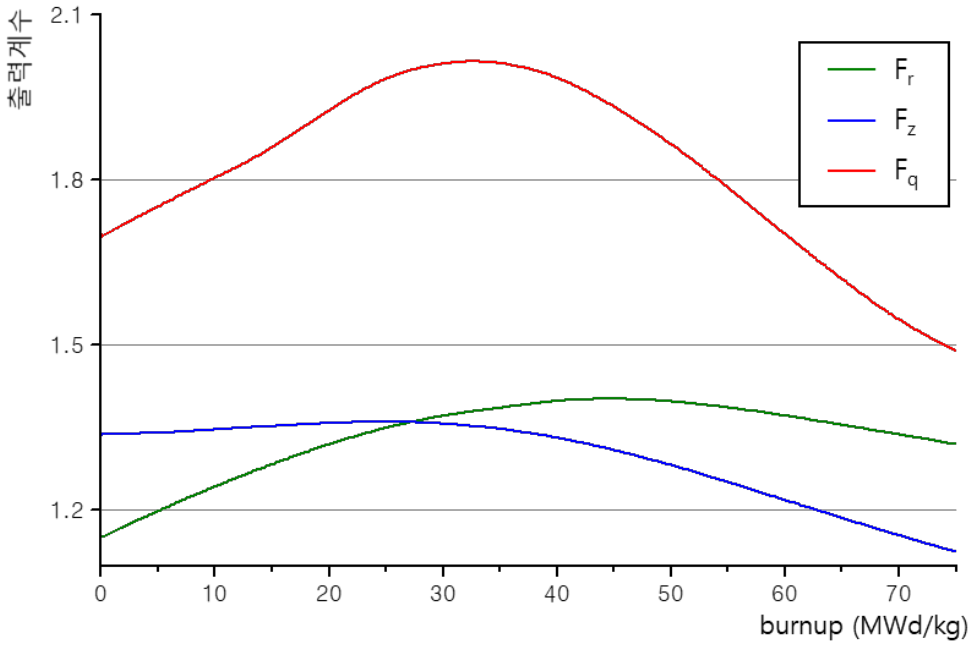


그림 18. 연소에 따른 출력계수 변화

제 4 절 반응도 계수

반응도 계수는 노심의 온도, 출력 등 조건이 변함에 따라 반응도가 변화하는 정도를 의미하는 지표이다. 원자로가 높은 안전성을 가지기

위해서는 사고로 인한 온도 또는 출력증가의 상황에서도 스스로 반응도가 낮아지는 음의 반응도 계수를 가져야 한다.

본 연구에서는 온도와 출력에 대한 반응도 계수를 확인하기 위하여 등온 온도계수(ITC)[19], 감속재 온도계수(MTC)[20], 핵연료 온도계수(FTC)[21], 출력계수(Power Coefficient)[22]를 측정하였다. 측정을 위하여 각 온도계수는 고온영출력(HZP)을 기준으로 ±10℃부터 ±30℃까지의 범위를 대상으로 산출하였으며, 출력계수는 고온전출력(HFP)을 기준으로 ±5%부터 ±15%까지 범위에서 출력을 변화시켜 산출하였다.

측정결과 4가지 반응도 계수는 모두 안전기준을 만족하는 음수로 측정되었으며, 새롭게 설계된 원자로가 사고 상황에서의 안전성을 충분히 갖추고 있는 것을 확인할 수 있었다.

표 16. 반응도 계수 측정 결과

구 분	안전 기준	측정 결과
등온 온도계수	음의 반응도 계수 (<0)	−28.23 pcm/K
핵연료 온도계수		−2.01 pcm/K
감속재 온도계수		−0.01 pcm/K
출력계수		−6.53 pcm/1%Power

19) 등온 온도계수(ITC, Isothermal Temperature Coefficient), 핵연료가 냉각재와 온도평형을 이룬 상태에서 온도가 1도 상승할 때의 반응도 변화량

20) 감속재 온도계수(MTC, Moderator Temperature Coefficient), 감속재의 온도가 1도 상승할 때의 반응도 변화량.

21) 핵연료 온도계수(FTC, Fuel Temperature Coefficient), 핵연료의 온도가 1도 상승할 때의 반응도 변화량

22) 출력계수(Power Coefficient), 노심 출력이 1% 상승할 때 반응도 변화량

제 5 절 제어봉 제어능

잠수함용 원자로는 잉여반응도 제어에 붕산을 사용하지 않으므로 제어봉의 제어능이 매우 중요하다. 특히, 잠수함용 원자로는 높은 반응도를 통제하기 위해서 연소기간 중 제어봉을 지속적으로 삽입한 상태에서 운전되므로 제어봉 삽입 위치의 핵연료와 나머지 핵연료간 연소도의 불균형이 발생하지 않도록 유의하여야 한다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 4개의 제어봉 집합체를 노심 전반에 걸쳐 고르게 배치하였으며 각각의 제어봉 집합체가 서로 유사한 수준의 제어봉가를 가지도록 설계하여 교호로 운용하는 것이 가능토록 하였다.

제어봉 집합체의 제어능을 확인하기 위하여 고온전출력(HFP), 고온영출력(HZP), 저온영출력(CZP)의 조건에서 전체 제어봉 집합체를 완전히 삽입할 경우의 증배계수 변화를 측정하였다. 표 17에서 볼 수 있듯이 제어봉을 완전히 삽입하였을 경우 모든 운전조건에서 노심을 정지할 수 있는 충분한 제어능력을 가지고 있음을 확인할 수 있었다.

표 17. 운전조건별 제어봉 제어능 측정결과

운전조건	제어봉 위치 (%)	유효증배계수 (k_{eff})	제어봉가 (pcm)
고온전출력	0	1.01351	13,669
	100	0.89019	
고온영출력	0	1.02017	13,577
	100	0.89606	
저온영출력	0	1.05818	12,702
	100	0.93280	

또한 제어봉 삽입으로 인하여 변화할 수 있는 노심의 반경방향 출력분포와 첨두출력계수(F_q)를 산출해 본 결과, 그림 19과 같이 제어봉 삽입 전에 비하여 대체로 노심 중앙부의 출력은 증가하고 외곽의 출력은 감소하는 경향을 보였으며 첨두출력계수 (F_q)는 1.93431로 첨두출력 제한치($F_{q.limit}$) 이하를 유지함을 확인 할 수 있었다.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1.1357	1.1388	1.1417	1.1310	1.1743	1.0313	0.9745	0.9964	0.8928	0.8246
2	1.1388	1.1572	1.2483	1.2118	1.0790	1.0190	0.9788	0.9955	0.8857	0.8137
3	1.1417	1.2483	1.2365	1.1038	1.0478	1.0129	1.0573	0.9966	0.8756	0.7894
4	1.1310	1.2118	1.1038	1.0580	1.0248	1.0051	1.0506	0.9800	0.9697	0.7552
5	1.1742	1.0790	1.0477	1.0248	1.0128	1.0666	1.0231	0.9348	0.9154	
6	1.0312	1.0189	1.0128	1.0050	1.0665	1.0358	0.9642	0.9759	0.8013	
7	0.9743	0.9787	1.0571	1.0504	1.0230	0.9641	0.8709	0.8624		
8	0.9961	0.9952	0.9963	0.9798	0.9347	0.9757	0.8623			
9	0.8925	0.8854	0.8753	0.9694	0.9151	0.8011				
10	0.8241	0.8133	0.7890	0.7548						

k_{eff} : 0.89019
F_q : 1.93431

그림 19. 초기노심(HFP)에서 전 제어봉 삽입 시 반경방향 출력분포

추가로 제어봉 삽입을 통한 원자로 비상정지 상황에서 특정 제어봉 집합체의 미작동 상황을 고려한 제어능력을 확인하였다. 표 16부터 18은 각각의 운전조건에서 제어봉 집합체 그룹을 하나씩 인출하면서 노심의 유효증배계수 변화를 측정한 결과이다.

고온전출력(HFP) 조건에서 초기 노심은 제어봉 집합체의 종류와 관계없이 단일 제어봉 집합체 만으로 노심의 반응도를 미임계 상태까지 떨어뜨리는 것이 가능했다. 이는 고장으로 인하여 일부 제어봉 집합체를 사용하지 못하는 상황에서도 노심을 비상 정지하는 것이 가능함을 의미하므로, 노심의 안전성 측면에서 매우 중요한 결과라고 할 수 있다.

표 18. 고온전출력(HFP) 조건에서 제어봉 집합체별 제어봉가

삽입된 제어봉 집합체	유효증배계수(k_{eff})	제어봉가(pcm)
A	0.98358	3,002
B	0.98793	2,863
C	0.98503	2,853
D	0.9861	2,743
A, B	0.95262	6,307
A, C	0.95151	6,429
A, D	0.95629	5,904
B, C	0.95716	5,809
B, D	0.95478	6,069
C, D	0.95798	5,719
A, B, C	0.92722	9,182
A, B, D	0.92057	9,961
A, C, D	0.92222	9,767
B, C, D	0.92458	9,490
A, B, C, D	0.89019	13,669

제어봉을 삽입하여 노심을 비상정지 하는 것이 충분히 가능함을 확인하였으므로 이어서 고온전출력 운전상황에서 노심의 임계상태를 유지하기 위한 제어봉 집합체의 위치를 확인하였다. 연소주기동안 반응도가 연속적으로 변화하는 것을 고려하여 고온전출력(HFP) 운전조건에서 주요 연소시점(연소초기 및 노심의 반응도가 가장 높은 시점)을 선정하여 임계상태 유지를 위한 제어봉 위치를 확인하였으며, 제어봉이 제어봉이 삽입된 상태에서의 반경방향 출력분포를 산출하여 노심의 안정성을 추가로 확인하였다.

앞에서 언급하였듯이 초기 노심의 유효증배계수는 1.01351로 모든 제어봉 집합체는 1개 제어봉 집합체만으로 임계상태를 유지할 수 있는 충분한 제어능을 가지고 있다. 따라서 각 제어봉 집합체를 이용하여 임계상태를 유지하기 위한 제어봉 집합체 삽입 길이를 산출 하였다. 표 19는 초기노심에서 임계상태 유지를 위하여 각 제어봉 집합체를 삽입하는 깊이와 첨두출력계수(F_q)를 정리한 것이며, 제어봉 삽입에 따른 반경방향 출력분포는 그림 20과 같다.

표 19. 초기 노심 임계상태 유지를 위한 제어봉 집합체 운용 현황

제어봉 집합체 종류	제어봉 삽입 깊이 (cm)	첨두출력계수(F_q)
Group A	44.38	1.90763
Group B	46.56	1.73318
Group C	46.73	1.70840
Group D	48.60	1.97503

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0.9238	0.9675	1.1430	1.1884	1.2580	1.1225	1.0726	1.1091	1.0146	1.0069
2	0.9675	1.0190	1.2631	1.2732	1.1549	1.1001	1.0644	1.0897	0.9859	0.9708
3	1.1429	1.2631	1.2835	1.1656	1.1122	1.0754	1.1176	1.0512	0.9211	0.8820
4	1.1884	1.2732	1.1656	1.1154	1.0726	1.0365	1.0538	0.9592	0.8648	0.6732
5	1.2579	1.1548	1.1121	1.0726	1.0380	1.0478	0.8810	0.7717	0.7418	
6	1.1224	1.1000	1.0753	1.0365	1.0478	0.9641	0.7759	0.7522	0.6146	
7	1.0724	1.0642	1.1174	1.0536	0.8809	0.7759	0.6648	0.6441		
8	1.1087	1.0894	1.0509	0.9590	0.7715	0.7521	0.6441			
9	1.0141	0.9855	0.9208	0.8645	0.7416	0.6144				
10	1.0063	0.9703	0.8815	0.6729						

EFPD : 0 day
Burnup : 0 MWd/kg
Inserted CR Group : A
k_{eff} : 1.00000
F_q : 1.90763

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0.9397	0.9252	0.8247	0.8497	1.0589	1.0049	0.9921	1.0353	0.9305	0.9076
2	0.9252	0.9284	0.9086	0.9216	0.9871	1.0052	1.0081	1.0328	0.8342	0.7599
3	0.8247	0.9086	0.9081	0.8582	0.9839	1.0247	1.1129	1.0605	0.8489	0.7541
4	0.8497	0.9216	0.8582	0.8732	1.0045	1.0531	1.1438	1.0962	1.1465	0.8852
5	1.0588	0.9870	0.9839	1.0045	1.0532	1.1604	1.1565	1.0943	1.1451	
6	1.0048	1.0051	1.0246	1.0531	1.1603	1.1708	1.1313	1.2424	1.0335	
7	0.9920	1.0079	1.1128	1.1437	1.1564	1.1313	1.0551	1.1162		
8	1.0351	1.0326	1.0603	1.0960	1.0942	1.2423	1.1162			
9	0.9302	0.8340	0.8487	1.1462	1.1448	1.0332				
10	0.9071	0.7595	0.7538	0.8849						

EFPD : 0 day
Burnup : 0 MWd/kg
Inserted CR Group : B
k_{eff} : 1.00000
F_q : 1.73318

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1.1027	1.0999	1.0890	1.0411	0.9412	0.8305	0.9244	0.9818	0.8116	0.7524
2	1.0999	1.1141	1.1878	1.1160	0.8683	0.8302	0.9435	1.0125	0.9218	0.9068
3	1.0889	1.1878	1.1711	1.0231	0.8542	0.8451	1.0445	1.0509	0.9652	0.9395
4	1.0411	1.1160	1.0231	0.9752	0.8647	0.8809	1.0788	1.0746	1.1672	0.9273
5	0.9411	0.8683	0.8541	0.8647	0.9811	1.0887	1.1064	1.0658	1.1336	
6	0.8305	0.8301	0.8450	0.8808	1.0886	1.1189	1.0895	1.2071	1.0125	
7	0.9242	0.9434	1.0444	1.0787	1.1063	1.0894	1.0197	1.0833		
8	0.9816	1.0122	1.0507	1.0744	1.0656	1.2069	1.0832			
9	0.8113	0.9215	0.9649	1.1669	1.1333	1.0123				
10	0.7520	0.9064	0.9391	0.9269						

EFPD : 0 day
Burnup : 0 MWd/kg
Inserted CR Group : C
k_{eff} : 1.00000
F_q : 1.70840

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1.2350	1.2324	1.2234	1.1923	1.2042	1.0099	0.8145	0.8323	0.8708	0.9024
2	1.2324	1.2473	1.3297	1.2700	1.1058	0.9960	0.8203	0.8362	0.8698	0.8965
3	1.2234	1.3297	1.3052	1.1491	1.0650	0.9875	0.8952	0.8497	0.8759	0.8817
4	1.1923	1.2700	1.1491	1.0814	1.0163	0.9677	0.9134	0.8729	1.0488	0.8540
5	1.2040	1.1057	1.0650	1.0163	0.8859	0.9324	0.9982	0.9587	1.0298	
6	1.0098	0.9959	0.9874	0.9676	0.9323	0.9213	0.9832	1.1022	0.9238	
7	0.8144	0.8202	0.8950	0.9132	0.9981	0.9832	0.9282	0.9892		
8	0.8321	0.8360	0.8495	0.8727	0.9585	1.1020	0.9891			
9	0.8705	0.8695	0.8756	1.0485	1.0295	0.9236				
10	0.9018	0.8960	0.8812	0.8536						

EFPD : 0 day
Burnup : 0 MWd/kg
Inserted CR Group : D
k_{eff} : 1.00000
F_q : 1.97503

그림 20. 초기 노심 제어봉 삽입에 따른 반경방향 출력분포

초기노심의 연소가 진행되고 가연성 독물질이 점차 감소하게 되면 노심의 반응도는 서서히 증가하게 된다. 연소가 약 911일 가량 진행되면 노심의 유효증배계수는 1.03637 까지 높아지는데 이때는 1개의 제어봉 집합체만으로 임계상태를 유지하는 것이 불가능하므로 추가적인 제어봉 집합체 삽입이 필요하다. 그러나 높은 잉여반응도 제어를 위해 삽입되는 제어봉의 양이 많아지면 노심내 출력분포의 불균형이 심해지면서 첨두출력계수(F_q)가 과도하게 높아지고, 결과적으로 노심의 안전성이 저하될 수 있다. 따라서 2개 그룹의 제어봉 집합체를 이용한 노심의 임계상태 유지 능력과 안전성을 확인하기 위하여 유효증배계수가 가장 높아지는 시점을 기준으로 제어봉 삽입량과 첨두출력계수(F_q)를 산출하였다. 연소 후 약 911일이 경과한 시점의 유효증배계수는 1.03637로 전체 연소주기 중 가장 높은 반응도를 가지므로 이 시점의 임계상태 유지를 위한 제어봉 삽입량을 확인하였다. 2개의 제어봉 집합체를 동시에 삽입하여 노심의 임계상태를 유지할 수 있는 제어봉 삽입 깊이를 확인하였으며, 총 4개의 제어봉 집합체를 서로 조합하여 6가지 경우의 수를 설계하였다. 각 상황에서 임계상태 유지를 위하여 제어봉 집합체를 삽입해야 하는 깊이와 첨두출력계수는 표 20에 정리하였으며, 각 상황별 출력분포는 그림 21과 같다.

표 20. 최대 반응도 시점에서 임계상태 유지를 위한 제어봉 집합체 운용 현황

제어봉 집합체 종류	제어봉 삽입 깊이 (cm)	첨두출력계수(F_q)
Group A+B	55.64	1.83225
Group A+C	54.59	1.98108
Group A+D	59.44	2.16894
Group B+C	60.41	2.08424
Group B+D	57.82	1.92599
Group C+D	61.36	2.06985

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0.8549	0.8744	0.9138	0.9818	1.2331	1.1677	1.1422	1.1775	1.0474	1.0117
2	0.8744	0.9048	1.0144	1.0612	1.1399	1.1514	1.1380	1.1467	0.9129	0.8212
3	0.9138	1.0144	1.0338	0.9820	1.1149	1.1398	1.2067	1.1165	0.8576	0.7453
4	0.9818	1.0612	0.9820	0.9841	1.1051	1.1190	1.1561	1.0479	0.9151	0.6898
5	1.2330	1.1398	1.1149	1.1051	1.1139	1.1547	0.9845	0.8642	0.8225	
6	1.1675	1.1512	1.1396	1.1189	1.1546	1.0818	0.8814	0.8573	0.6971	
7	1.1420	1.1378	1.2066	1.1559	0.9844	0.8814	0.7637	0.7419		
8	1.1772	1.1464	1.1162	1.0477	0.8640	0.8572	0.7418			
9	1.0471	0.9126	0.8573	0.9149	0.8222	0.6969				
10	1.0112	0.8208	0.7449	0.6895						

EFPD : 911 day
Burnup : 40 MWd/kg
Inserted CR Group : A, B
k_{eff} : 1.00000
F_q : 1.83225

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1.0102	1.0477	1.2128	1.2048	1.0982	0.9657	1.0621	1.1127	0.9081	0.8319
2	1.0477	1.0946	1.3330	1.2887	1.0060	0.9516	1.0628	1.1195	1.0019	0.9719
3	1.2128	1.3330	1.3395	1.1768	0.9726	0.9405	1.1296	1.1029	0.9750	0.9318
4	1.2048	1.2887	1.1768	1.1065	0.9553	0.9344	1.0865	1.0250	0.9345	0.7283
5	1.0981	1.0060	0.9725	0.9553	1.0379	1.0801	0.9383	0.8400	0.8146	
6	0.9656	0.9515	0.9404	0.9343	1.0801	1.0309	0.8464	0.8315	0.6829	
7	1.0620	1.0626	1.1295	1.0863	0.9382	0.8463	0.7364	0.7189		
8	1.1124	1.1192	1.1027	1.0248	0.8399	0.8313	0.7188			
9	0.9077	1.0015	0.9747	0.9342	0.8144	0.6827				
10	0.8314	0.9714	0.9313	0.7280						

EFPD : 911 day
Burnup : 40 MWd/kg
Inserted CR Group : A, C
k_{eff} : 1.00000
F_q : 1.98278

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1.1056	1.1483	1.3346	1.3549	1.3833	1.1600	0.9266	0.9322	0.9621	0.9867
2	1.1483	1.1996	1.4633	1.4420	1.2639	1.1313	0.9173	0.9153	0.9351	0.9519
3	1.3346	1.4633	1.4670	1.3034	1.2013	1.0945	0.9647	0.8836	0.8749	0.8661
4	1.3548	1.4420	1.3034	1.2159	1.1201	1.0290	0.9171	0.8217	0.8276	0.6634
5	1.3831	1.2638	1.2013	1.1200	0.9411	0.9265	0.8403	0.7454	0.7295	
6	1.1599	1.1311	1.0944	1.0289	0.9264	0.8430	0.7557	0.7502	0.6146	
7	0.9264	0.9171	0.9646	0.9169	0.8402	0.7557	0.6623	0.6480		
8	0.9319	0.9150	0.8834	0.8215	0.7453	0.7501	0.6480			
9	0.9617	0.9347	0.8746	0.8273	0.7293	0.6145				
10	0.9860	0.9513	0.8656	0.6630						

EFPD : 911 day
Burnup : 40 MWd/kg
Inserted CR Group : A, D
k_{eff} : 1.00000
F_q : 2.17700

그림 21. 최대 반응도 시점에서 제어봉 삽입에 따른 반경방향 출력분포(1/2)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0.9865	0.9629	0.8413	0.8254	0.8899	0.8440	0.9665	1.0252	0.8228	0.7405
2	0.9630	0.9592	0.9228	0.8955	0.8307	0.8526	0.9947	1.0517	0.8414	0.7552
3	0.8413	0.9228	0.9134	0.8360	0.8375	0.8859	1.1201	1.1104	0.8995	0.7995
4	0.8253	0.8955	0.8360	0.8421	0.8822	0.9494	1.1844	1.1767	1.2454	0.9636
5	0.8898	0.8306	0.8375	0.8821	1.0528	1.2045	1.2425	1.2002	1.2653	
6	0.8439	0.8526	0.8859	0.9493	1.2044	1.2631	1.2452	1.3830	1.1561	
7	0.9664	0.9945	1.1200	1.1842	1.2424	1.2452	1.1783	1.2544		
8	1.0250	1.0514	1.1102	1.1765	1.2000	1.3828	1.2543			
9	0.8226	0.8411	0.8993	1.2451	1.2650	1.1559				
10	0.7401	0.7548	0.7991	0.9633						

EFPD : 911 day
Burnup : 40 MWd/kg
Inserted CR Group : B, C
k_{eff} : 1.00000
F_q : 2.07139

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1.1300	1.1025	0.9643	0.9635	1.1540	1.0306	0.8552	0.8748	0.8916	0.9018
2	1.1025	1.0961	1.0522	1.0368	1.0698	1.0262	0.8683	0.8732	0.8003	0.7576
3	0.9643	1.0521	1.0335	0.9508	1.0519	1.0368	0.9639	0.9031	0.8214	0.7572
4	0.9634	1.0368	0.9508	0.9405	1.0379	1.0432	1.0085	0.9649	1.1301	0.8966
5	1.1538	1.0698	1.0519	1.0379	0.9495	1.0354	1.1309	1.0926	1.1641	
6	1.0305	1.0261	1.0367	1.0431	1.0353	1.0491	1.1368	1.2797	1.0697	
7	0.8551	0.8681	0.9637	1.0084	1.1308	1.1367	1.0870	1.1620		
8	0.8745	0.8730	0.9029	0.9647	1.0924	1.2795	1.1620			
9	0.8913	0.8000	0.8211	1.1298	1.1638	1.0694				
10	0.9013	0.7571	0.7569	0.8962						

EFPD : 911 day
Burnup : 40 MWd/kg
Inserted CR Group : B, D
k_{eff} : 1.00000
F_q : 1.92599

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1.3356	1.3211	1.2859	1.1971	1.0380	0.8506	0.7880	0.8181	0.7650	0.7358
2	1.3211	1.3266	1.3895	1.2725	0.9511	0.8449	0.8027	0.8462	0.8733	0.8898
3	1.2859	1.3895	1.3477	1.1475	0.9202	0.8499	0.8917	0.8840	0.9217	0.9274
4	1.1970	1.2725	1.1475	1.0609	0.8949	0.8636	0.9366	0.9313	1.1315	0.9222
5	1.0379	0.9511	0.9202	0.8949	0.8780	0.9588	1.0650	1.0451	1.1308	
6	0.8505	0.8448	0.8499	0.8635	0.9588	0.9878	1.0757	1.2197	1.0271	
7	0.7879	0.8026	0.8916	0.9365	1.0649	1.0757	1.0305	1.1052		
8	0.8178	0.8459	0.8838	0.9311	1.0449	1.2195	1.1051			
9	0.7647	0.8730	0.9214	1.1311	1.1304	1.0268				
10	0.7353	0.8892	0.9270	0.9218						

EFPD : 911 day
Burnup : 40 MWd/kg
Inserted CR Group : C, D
k_{eff} : 1.00000
F_q : 2.06985

그림 22. 최대 반응도 시점에서 제어봉 삽입에 따른 반경방향 출력분포(2/2)

제 6 장 결 론

지금까지 고농축 우라늄을 이용한 핵연료를 대체할 수 있는 저농축 고밀도 우라늄 핵연료에 대한 연구를 기반으로 한국형 잠수함에서 사용할 수 있는 새로운 원자로를 설계하였다.

핵연료의 선정부터 노심을 구성하는 기본 단위인 핵연료 집합체 및 전 노심의 설계를 위해서 서울대학교 원자로물리 연구실에서 개발한 직접 전노심 수송계산 코드인 nTRACER를 이용하였으며, 동일 코드를 이용하여 노심의 연소주기 및 반응도, 첨두출력계수(F_q)의 변화 등을 살펴본 결과 향후 한국형 원자력 추진 잠수함에서 요구하는 성능을 충분히 만족시킴을 확인할 수 있었다.

최종적으로 설계된 원자로는 노심의 지름 1.1 m, 유효 노심 높이가 1m인 소형 잠수함용 원자로이다. 대부분의 잠수함용 원자로가 90% 이상의 고농축 우라늄을 핵연료로 사용하는 것과 달리 20%의 저농축 우라늄을 핵연료로 사용하는 이 원자로는 부족한 핵분열성 물질을 보충하기 위하여 고밀도 우라늄을 핵연료로 사용한다. 연료로 사용된 물질은 10%의 몰리브덴(Mo)이 함유된 $U-10_{wt\%}Mo$ 금속 합금연료이며, 해당 물질은 기존의 고농축 우라늄 핵연료 물질에 비하여 8 ~ 9배의 밀도를 가진다. 이는 곧 핵연료에 포함된 우라늄의 양이 증가함을 의미하므로 결과적으로 낮은 농축도로 인해서 감소된 핵분열성 물질을 충분히 보완할 수 있었다.

잠수함용 노심을 설계함에 있어서 가장 우선적으로 고려한 설계 목표는 고농축 우라늄 핵연료를 저농축 우라늄 핵연료로 대체하면서

잠수함의 임무수행에 필요한 충분한 출력과 선체수명을 초과하는 핵연료 교체주기를 달성하는 것이었다. 저농축 고밀도 핵연료는 이를 가능토록 하는 핵심이었으며, 결과적으로 7,000 톤급 잠수함을 수중 최대속력 35 kts로 항해할 수 있는 열출력으로 잠수함의 선체 수명 30년을 초과하는 충분한 핵연료 교체주기를 가지는 노심을 설계할 수 있었다.

150 MWt의 열출력을 가지는 새로운 잠수함용 노심의 유효 전출력 가동 일수는 약 4.54년 이었으나 노심에서 생산 가능한 총 에너지량은 286,329.3 MWd 였다. 잠수함의 가동률과 해상에서 원자로가 운용되는 평균출력률을 고려할 때 노심을 33년간 운용하기 위해 요구되는 에너지량은 271,012.5 MWd 이므로 새롭게 설계된 잠수함용 노심은 함정 운용에 필요한 에너지량에 비하여 약 5% 초과된 에너지를 생산할 수 있었으며, 결과적으로 약 35년의 충분한 핵연료 교체 주기를 가진다.

뿐만 아니라 연소기간 전반에 걸친 노심의 첨두출력계수(F_q)를 확인해본 결과 최대 첨두출력계수(F_q)는 2.01546로 나타났으므로 첨두출력 제한치인 3.34545에 비하여 충분한 열적 여유도를 가지고 있음을 확인할 수 있었다.

잉여반응도 제어를 위하여 붕산을 사용하지 않는 잠수함용 노심의 경우, 제어봉 삽입으로 인한 노심 내 국부적인 출력 분포 변화로 노심의 안정성을 해칠 가능성이 있다. 그러나 전체 연소주기에 대하여 임계상태 유지를 위한 제어봉 운용 계산 결과 노심의 출력분포가 안정적으로 나타났으며 첨투출력계수 역시 제한치 이하를 유지하였다.

결과적으로 새롭게 설계된 잠수함용 노심은 잠수함의 임무수행을 위하여 필요한 충분한 출력을 만족하면서 선체 수명을 초과하는 핵연료 교체주기를 달성하였을 뿐만 아니라 전 주기에 있어서 높은 안전성을

가지는 우수한 노심이라 할 수 있다.

그러나, 본 연구는 봉상형 노심의 설계에 집중되어 있으므로 추가적으로 연구 되어야 할 부분이 적지 않게 남아있는 것이 사실이다.

그 첫번째는 장전되는 핵연료 재료와 집합체 구조에 대한 연구이다. 노심은 집합체의 형상에 따라 봉상형과 판형으로 구분할 수 있는데, 판형 노심은 봉상형 연료에 비하여 감속재와 핵연료가 열교환 할 수 있는 면적이 더 크기 때문에 소형 잠수함용 원자로에서는 판형 노심이 더 효율적인 구조라 할 수 있다. 그럼에도 불구하고 본 연구에서 봉상형 원자로를 적용한 이유는 봉상형 핵연료 집합체가 판형 집합체에 비하여 합금 핵연료에서 발생하는 핵분열 생성 기체의 압력을 견디는 능력이 우수하기 때문이다. 그러나 구체적인 핵분열 생성 기체의 발생량과 이로인하여 증가하는 내부 압력, 핵연료를 둘러싸는 클래딩의 재질 등을 고려하여 합금 핵연료가 적용된 판형 집합체를 설계한다면 기존의 봉상형 집합체에 비하여 더욱 개선된 노심 설계가 가능할 것으로 예상된다.

두 번째는 운전 상태에 대한 노심에 대한 연구이다. 잠수함용 원자로는 상용 원자로와 달리 빈번하고 급작스러운 출력변화 운전이 요구된다. 물론 소량의 출력 조정은 추진용 가스터빈을 지나는 증기를 바이패스 시킴으로써 가능하지만, 긴급상황에서 저출력 운전에서 급격한 전출력 운전 또는 전출력 운전에서의 비상정지 등 잠수함용 원자로에는 상용 원자로에서는 고려되지 않는 가혹한 운전이 요구되며, 이러한 상황에서도 충분한 안전성과 신뢰도를 보장할 수 있어야 한다. 따라서, 잠수함용 원자로에서 발생할 수 있는 우발적 운전 상황을 가정하고, 상황에 따른 원자로의 과도상태를 분석하여 설계에 반영하는 것은 향후

원자력 추진 잠수함을 실제로 운용할 대한민국 해군에게 중요한 연구자산이 될 것이다.

오랜 시간 한국 해군의 염원으로 존재하던 한국형 원자력 추진 잠수함이 이제야 비로소 서서히 실체를 드러내는 듯 하다. 이에 발 맞춰 앞으로 더욱 다양하고 구체적인 관련 연구들이 계속된다면, 보이지 않는 가장 깊은 힘으로써 우리의 원자력 추진 잠수함이 우리 바다를 지키는 그 날이 더욱 앞당겨 질 것이라 확신한다.

참고 문헌

[1] John Pike, “Federation of American Scientists, Nuclear Propulsion”, February 29, 2000, URL https://fas.org/man/dod-101/sys/ship/eng/reactor.html.

[2] Director, Naval Nuclear Propulsion, “Report on Use of Low Enriched Uranium in Naval Nuclear Propulsion”, June, 1995.

[3] Sebastien Roblin, “This New Submarine Could Be a Real Killer(And No, Its Not American)”, October 13, 2019, URL https://nationalinterest.org/blog/buzz/new_submarine_could_be_real_killer_and_no_its_not_american_87421.

[4] Director, Naval Nuclear Propulsion, “Conceptual Research and Development Plan for Low-Enriched Uranium Naval Fuel”, January, 2014.

[5] Nuclear Engineering Division at Argonne, “Currently-Qualified Fuels : HEU Fuels in Use when the RERTR Program Began in 1978”, URL http://www.rertr.anl.gov/QualFuel.html.

[6] Brendan Patrick Hanlon, “Validation of the Use of Low Enriched Uranium as a Replacement for Highly Enriched Uranium in US Submarine Reactor”, Massachusetts Institute of Technology, 2015.

[7] 대한조선학회, “조선기술-배 만들기의 모든 것”, 지성사, 2011.

[8] Oregon Department of Energy, “Naval Nuclear Reactor Compartment Shipments on the Columbia River”, 2013.

[9] Cameron McCord, “Examination of the Conversion of the U.S. Submarine Fleet from Highly Enriched Uranium to Low Enriched Uranium”, Massachusetts Institute of Technology, May, 2014.

[10] A.B. Robinson, D.M. Perez, D.L. Porter, G.L. Chang, D.D. Keiser, Jr., D.M. Wachs, G.Hofman, “Irradiation Performance of U-Mo Alloy Base Monolithic' Plate-Type Fuel - Design Selection Update”, August, 2009.

[11] Samuel Miller and Hakan Ozaltun, “Evaluation of U10Mo Fuel

Plate Irradiation Behavior via Numerical and Experimental Benchmarking", ASME, November, 2012.

[12] Thomas Dominic Ippolito Jr., "Effects of Variation of Uranium Enrichment on Nuclear Submarine Reactor Design", Massachusetts Institute of Technology, 1990.

[13] Kauhn, Albert F., "Nudear Reactor Fuel Elements, Metallurgy and Fabrication", John Wiley & Sons. N.Y., 1962.

[14] D. Burkes, G. Mickum, and D. Wachs, "Thermophysical Properties of U-10Mo Alloy", November, 2010.

[15] Andrew T.Godfrey, "VERA Core Physics Benchmark Progression Problem Specifications", Physics Integration Oak Ridge National Laboratory, Revision 4, August 29, 2014.

[16] Seunghwan Jun, Jinsun Kim, Do Ik Chang, Kibong Seong, "The Effects of Reflector on Core Reactivity for Conceptual Soluble Boron Free SMR", ANS, 2017.

[17] Korea electric power corporation, Korea Hydro & Nuclear Power Co., "APR1400 Design Control Document Tier 2", chapter 4 reactor, REVISION 0, December, 2104

[18] Neil E.Todres and Mujid S.Kazimi, "Nuclear Systems Volume 1 : Thermal Hydraulic Fundamentals", CRC press, 2011.

Abstract

Nuclear Core Design of Soluble Boron Free Water-cooled Reactor for Submarines Using Low Enriched Uranium Alloy Fuel

Kim Seongbae
Nuclear Engineering
The Graduate School
Seoul National University

In this study, a small reactor for the Korean nuclear proplusion submarine is designed and its performance and safety are verified. The core's output is set at 150 MWt, with the goal of a 7,000 ton nuclear propulsion submarine maneuvering up to 35 kts maximum underwater. And the main design focus is on using LEU(Low Enriched Uranium) to make nuclear reactors longer than 30 years of lifetime. For this purpose, U-$10_{wt\%}$Mo, a low enriched & high density fuel, is applied. As a result, it is possible to design a core that does not require refueling of nuclear fuel for the entire ship life.

For the core design, nTRACER, a direct whole core transport calculation code developed by Seoul National University, is used, and the core design is carried out in order from the selection of nuclear fuel material, the determination of the geometry of the fuel rod and

assembly, the arrangement of the entire core and control rod assembly.

The new core for submarine consists of the total of 332 fuel assemblies. The fuel assembly is 5cm width and 1m height, reducing the size to 1/16 compared to commercial fuel assemblies, which can increase the space utilization of the core. Also, the fuel assembly optimized for 20% low enriched fuel consists of eight fuel rods and one guide tube by the 6x6 array. To control the high excess reactivity, an IFBA(Integrated Fuel Burnable Absorber) is used that coats ZrB2 directly on the nuclear fuel pellets, which can reduces the initial high excess reactivity to the appropriate level.

For the performance and safety analysis of the new core, nTRACERs is used as well as the design and it is confirmed that the new core achieves sufficient power of output, lifetime and safety. The core's EFPY(Effective Full Power Year) is 4.54 years, and the total amount of energy produced during this lifetime is more than 5% higher than the total energy required for the operation during the ship life. In addition, the maximum peaking factor of the core is calculated as 2.01546 during the entire core lifetime. Considering that the limit of the core peaking factor is 3.34545, the new core has sufficient thermal stability.

Submarine reactors do not use soluble boron to control excess reactivity, so the ability to maintain critical state using control rods is also an important safety requirement. So, in order to confirm the

controllability of the control rod, it is checked whether emergency stop is possible by inserting the control rod under the conditions of HFP(Hot Full Power), HZP(Hot Zero Power), and CZP(Cold Zero Power). And it is confirmed that the core can be emergency stopped even if 50% of control rod assembly is not used under all operating conditions.

Through these procedures of the research, new submarine reactor is designed which has the thermal output of 150MWt and longer lifetime than ship life. And verify that the reactor not only achieves the goal of design criteria but also has sufficient safety.

Keywords : Reactor for nuclear propulsion submarine
Low enriched & high density nuclear fuel
Metal alloy nuclear fuel
nTRACER

Student Number : 2018-25185