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

해양부유식 무붕산 소형모듈형 원자로 노심 설계 고도화

Advanced Core Design of Soluble Boron Free Small Modular Reactor for Marine Applications

2021년 2월

서울대학교 대학원

에너지시스템공학부 원자핵공학전공

김 도 균

해양부유식 무붕산 소형모듈형 원자로 노심 설계 고도화

Advanced Core Design of Soluble Boron Free Small Modular Reactor for Marine Applications

지도교수 심 형 진

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함

2021년 2월

서울대학교 대학원

에너지시스템공학부 원자핵공학전공

김 도 균

김도균의 석사 학위논문을 인준함

2021년 2월

위 원 장 주 한 규 (인)

부위원장 심 형 진 (인)

위 원 서 종 태 (인)

초 록

해양부유식 소형모듈형원자로(SMR : Small Modular Reactor)는 선박 추진용, 원격지 전력생산 및 공급, 해수 담수화 등의 목적으로 연구개발이 진행되고 있으며, 계통의 단순화와 운전성 향상을 위해 무붕산 운전 기술 적용을 고려하고 있다. 최근 한국전력기술(주)은 열출력 200MWt의 해양부유식 SMR인 Bandi-60을 개발 중이며, 본 연구에서는 이를 위한 무붕산 SMR 최적노심을 설계하였다.

선행연구에서 농축도 4.95 w/o의 UO_2 핵연료를 장전한 열출력 200MWt, 주기길이 5년의 예비노심을 설계하였으나, 실제 무붕산 운전 SMR 노심의 운전조건을 고려한 최적노심 개발의 필요성이 제기되었다. 이에, 본 연구는 개념 설계된 예비노심이 열수력 궤환 효과를 고려하였을 때 요구하는 상위요건을 만족하는지 확인하고 기준이 되는 최적노심 설계를 개발하는 것이 목적이며, 개발된 최적노심에 대하여 실제 무붕산 운전조건에서 제어봉 만을 사용하여 원자로 임계를 유지할 수 있는지 확인한 후 원자로 안전해석 및 계통설계에 필요한 노심특성 계산을 수행하였다.

본 연구에서 개발하여야 하는 최적노심의 기준은 주기길이 4~5년, 잉여반응도 5,000pcm 이하에 첨두출력계수를 최소화하고 저온정지 조건에서 제어봉만으로도 충분한 정지여유도를 제공할 수 있는 반응도 제어설비를 갖추어야 한다. 따라서, 총 52개의 웨스팅하우스사형의 17×17 핵연료집합체를 사용하며, 잉여반응도 제어를 위해 각 핵연료집합체에 24개의 Pyrex 가연성흡수봉을 사용하되 Pyrex의

B_2O_3 함유량을 달리하는 총 5종의 핵연료집합체로 노심을 구성하였다.

노심설계를 위하여 서울대학교에서 개발한 몬테칼로 입자수송해석 코드인 McCARD(Monte Carlo Code for Advanced Reactor Design)를 이용하였으며, McCARD 코드로 열수력 궤환 효과를 고려하여 설계요건을 만족하는 최적노심을 개발하였다. 개발된 노심이 주기초 저온영출력 조건에서의 제한치인 '유효증배계수 < 0.95'를 만족하며 미임계가 가능하도록 반응도 제어설비를 최적화하였고, 주기길이는 4.92 ± 0.23년, 제논평형 이후 최대 잉여반응도는 2,366 ± 12pcm, 최대첨두출력계수(F_q)는 2.29 ± 0.10, 최대선출력밀도는 16.67 ± 0.73kW/m로 설계요건을 모두 만족하였다.

또한, 실제 무붕산 운전 조건인 제어봉만을 사용하여 원자로 임계를 유지한 연소계산을 수행하여 약 4.79년까지 출력 운전이 가능한 것을 확인하였다. 전 운전주기 동안 최대첨두출력계수(F_q)는 3.09 ± 0.23, 최대선출력밀도는 22.54 ± 1.56kW/m로 제한치(41.38kW/m) 대비 충분한 여유도가 있음을 확인하였으며, 최적노심의 안전해석 및 계통설계에 필요한 노심의 동특성인자, 반응도계수, 온도분포 등 각종 핵특성인자를 계산하였다. 따라서, 반응도 제어설비가 임계운전 능력과 충분한 정지여유도를 제공하여 원자로의 운전성 및 안전성을 보장할 수 있음을 확인함으로써 해양부유식 무붕산 SMR 노심설계 고도화를 달성하였다.

아울러 몬테칼로 노심 설계코드에 열수력 궤환 효과를 고려한 전 주기동안의 제어봉 임계운전을 모의하는 노심설계 방법론을 무붕산

노심핵설계에 적용함으로써 향후 개발될 원자로의 노심설계에 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

주요어 : 소형모듈형원자로
무붕산 운전
열수력 궤환 효과
임계운전모의
몬테카를로
McCARD

학 번 : 2019-20525

목 차

제 1 장 서 론 ····· 1

제 1 절 연구배경 및 목적 ····· 1

제 2 절 연구범위 ····· 2

제 3 절 연구의 구성 ····· 3

제 2 장 해양부유식 무붕산 SMR 노심설계 사양 ····· 4

제 1 절 해양부유식 무붕산 SMR 노심의 기본 설계요건 ····· 4

제 2 절 해양부유식 SMR 노심 잉여반응도 제어 요건 ····· 7

제 3 장 해양부유식 무붕산 SMR 노심배치 최적화 ····· 14

제 1 절 기존노심 특성 계산 및 분석 ····· 14

제 2 절 노심배치 및 반응도 제어설비 설계 최적화 ····· 32

제 4 장 열수력 궤환효과를 고려한 최적노심 연소계산 ·· 41

제 1 절 임계도 계산 ····· 41

제 2 절 출력분포 계산 ····· 43

제 5 장 원자로 임계운전모의 연소계산 ····· 50

제 1 절 임계도 계산 ····· 52

제 2 절 원자로 임계 제어봉 위치 계산 ····· 53

제 6 장 원자로 노심특성 계산 및 분석 ····· 55

제 1 절 첨두출력계수 계산 ····· 55

제 2 절 출력분포 계산 ····· 60

제 3 절 온도분포 계산 ····· 74
제 4 절 제어봉 제어능 계산 ····· 83
제 5 절 반응도계수 계산 ····· 85
제 6 절 동특성인자 계산 ····· 89
제 7 절 제논 반응도 계산 ····· 90

제 7 장 종합 및 결론 ····· 91
제 1 절 종 합 ····· 91
제 2 절 결 론 ····· 93

참 고 문 헌 ····· 95

Abstract ····· 97

표 차례

[표 1] 해양부유식 SMR 노심 기본 설계요건 ····· 8
[표 2] 웨스팅하우스 17×17 핵연료집합체 기본 제원 ····· 9
[표 3] 원자로 기본 제원 ····· 10
[표 4] 해양부유식 SMR 노심의 최대첨두출력 제한치 ····· 13
[표 5] 핵연료집합체(6종) 구성 및 정보사항 ····· 15
[표 6] 제어봉 정보사항 ····· 16
[표 7] 반응도제어 설비 집합체 정보사항 ····· 17
[표 8] 감속재/핵연료 평균온도별 McCARD 연소계산 조건 ····· 18
[표 9] 주기길이 계산 결과 ····· 20
[표 10] 감속재 및 핵연료 온도계수 계산 결과 ····· 21
[표 11] 무붕산 SMR 노심 열수력 조건 ····· 23
[표 12] BOC 연소계산 조건 및 유효증배계수 계산 결과 ····· 24
[표 13] 원자로 상태별(초임계/임계) 주기초 T/H 연소계산 조건 및 결과 ····· 26
[표 14] 반응도 제어설비 구성 및 배치도 ····· 26
[표 15] 원자로 상태별(초임계/임계) 주기초 선출력밀도 계산결과 ····· 31
[표 16] BOC 임계상태 원자로 동특성 인자 ····· 32
[표 17] 노심 조건별(CZP/HZP/HFP) McCARD 계산조건 ····· 32
[표 18] 제어봉 상태별 유효증배계수 및 잉여반응도(HFP) ····· 33
[표 19] 반응도 제어설비들의 제어봉가(HFP) ····· 34
[표 20] 제어봉 상태별 유효증배계수 및 잉여반응도(HZP) ····· 34
[표 21] 반응도 제어설비들의 제어봉가(HZP) ····· 34
[표 22] 제어봉 상태별 유효증배계수 및 잉여반응도(CZP) ····· 35
[표 23] 반응도 제어설비들의 제어봉가(CZP) ····· 35
[표 24] 주기초 McCARD 계산조건 및 결과[기존 vs. 변경(안)] ····· 37
[표 25] 변경(1안)의 상태별 유효증배계수 및 잉여반응도(CZP) ····· 40
[표 26] 변경(1안)의 상태별 유효증배계수 및 잉여반응도(HZP) ····· 40
[표 27] 변경(1안)의 상태별 유효증배계수 및 잉여반응도(HFP) ····· 40
[표 28] 변경(2안)의 상태별 유효증배계수 및 잉여반응도(CZP) ····· 42
[표 29] 변경(2안)의 상태별 유효증배계수 및 잉여반응도(HZP) ····· 42
[표 30] 변경(2안)의 상태별 유효증배계수 및 잉여반응도(HFP) ····· 42
[표 31] 최적노심 정보사항 ····· 43

[표 32] 변경 전 / 후 노심 주기길이 비교 ····· 44
[표 33] McCARD 연소계산 조건 ····· 45
[표 34] 특정 연소도에서의 유효증배계수 비교 ····· 46
[표 35] 특정 EFPD에서의 Fr, RMS, Max. 상대오차 비교 ····· 48
[표 36] 특정 EFPD에서의 Axial Offset 비교 ····· 53
[표 37] McCARD 계산 조건 ····· 55
[표 38] 특정 연소도에서의 유효증배계수 ····· 57
[표 39] EFPD에 따른 원자로 임계 제어봉 위치 ····· 58
[표 40] 전체 EFPD에서 Fr 비교(without CPS vs. with CPS) ····· 60
[표 41] 전체 EFPD에서 Fq 비교(without CPS vs. with CPS) ····· 62
[표 42] 전체 EFPD에서 선출력밀도 비교(without CPS vs. with CPS) ····· 63
[표 43] McCARD 계산 조건 및 유효증배계수 계산 결과 ····· 69
[표 44] 점대칭 그룹별 반응도 제어설비 집합체 평균 상대출력 ····· 71
[표 45] 전체 EFPD에서 Axial Offset 비교(without CPS vs. with CPS) ····· 73
[표 46] 특정 EFPD에서의 감속재 평균온도 ····· 81
[표 47] 특정 EFPD에서의 핵연료 평균온도 ····· 81
[표 48] 축방향 감속재 온도분포 (초임계) ····· 84
[표 49] 축방향 감속재 온도분포 (임계) ····· 85
[표 50] 축방향 핵연료 온도분포 (초임계) ····· 86
[표 51] 축방향 핵연료 온도분포 (임계) ····· 86
[표 52] 반응도 제어설비 정보사항 ····· 87
[표 53] 제어봉 제어능 계산 (BOC) ····· 88
[표 54] 특정 EFPD에서의 제어봉가 계산 결과(HFP 조건) ····· 89
[표 55] EFPD별 감속재 및 핵연료 온도계수 계산 결과 ····· 90
[표 56] 특정 EFPD에서의 출력결손(Power Defect) 계산결과 ····· 92
[표 57] 특정 EFPD에서의 정지여유도 계산결과 ····· 92
[표 58] McCARD 계산조건 및 임계 제어봉 위치(동특성인자 계산시) ····· 93
[표 59] 특정 EFPD에서의 동특성인자 계산결과 (with CPS) ····· 94
[표 60] 제논 반응도 계산 결과 (BOC) ····· 94
[표 61] 최종장전 모형 및 반응도 제어설비 구성 ····· 95
[표 62] 무붕산 운전 해양부유식 SMR 최적노심(안) 설계결과 ····· 96

그림 차례

[그림 1] 핵연료집합체 단면도 ····· 9
[그림 2] 원자로 단면도 ····· 10
[그림 3] SMR 노심의 핵연료 연소도에 따른 유효증배계수 변화 ····· 11
[그림 4] 핵연료집합체 내 핵연료봉/가연성흡수봉 배치도 ····· 14
[그림 5] SMR 노심 장전모형(선행연구 개념설계 결과) ····· 15
[그림 6] 노심 내 반응도 제어설비 배치도 ····· 17
[그림 7] 감속재·핵연료 평균온도별 유효증배계수 변화 ····· 19
[그림 8] EFPD에 따른 감속재 및 핵연료 온도계수 변화 ····· 21
[그림 9] 반경방향 출력분포 ····· 22
[그림 10] 축방향 출력분포 ····· 23
[그림 11] 반경방향 출력분포 비교 (with vs without T/H) ····· 24
[그림 12] 축방향 출력분포 비교 (with vs without T/H) ····· 25
[그림 13] BOC 반경방향 출력분포 비교(초임계 vs. 임계) ····· 27
[그림 14] BOC 축방향 출력분포 비교(초임계 vs. 임계) ····· 28
[그림 15] 반경방향 감속재 온도분포 ····· 29
[그림 16] 반경방향 핵연료 온도분포 ····· 29
[그림 17] 축방향 감속재 온도분포 ····· 30
[그림 18] 축방향 핵연료 온도분포 ····· 30
[그림 19] 노심배치 변경 전/후 비교 ····· 37
[그림 20] 주기초 반경방향 출력분포[기존노심 vs. 변경노심(안)] ····· 38
[그림 21] 반응도 제어설비 설계 비교[기존 vs. 변경(1안)] ····· 39
[그림 22] 반응도 제어설비 설계 비교[변경(1안) vs. 변경(2안)] ····· 41
[그림 23] 기존노심 vs. 최적노심 임계도 비교 ····· 44
[그림 24] 연소도에 따른 유효증배계수 비교 ····· 46
[그림 25] EFPD별 Fr 비교 (without T/H vs. with T/H) ····· 47
[그림 26] 반경방향 출력분포 비교(BOC) ····· 48
[그림 27] 반경방향 출력분포 비교(IOC) ····· 49
[그림 28] 반경방향 출력분포 비교(MOC1) ····· 50
[그림 29] 반경방향 출력분포 비교(MOC1) ····· 50
[그림 30] 반경방향 출력분포 비교(EOC) ····· 51
[그림 31] 특정 EFPD에서의 축방향 출력분포 비교 ····· 52

[그림 32] EFPD별 Axial Offset 비교 (without T/H vs. with T/H) ····· 53
[그림 33] CPS(Critical Position Search) 계산 흐름도 ····· 55
[그림 34] 연소도에 따른 유효증배계수 변화 ····· 56
[그림 35] EFPD에 따른 Fr 비교 (without CPS vs. with CPS) ····· 60
[그림 36] EFPD에 따른 Fq 비교 (without CPS vs. with CPS) ····· 61
[그림 37] BOC 반경방향 출력분포 비교(초임계 vs. 임계) ····· 64
[그림 38] IOC 반경방향 출력분포 비교(초임계 vs. 임계) ····· 65
[그림 39] MOC1 반경방향 출력분포 비교(초임계 vs. 임계) ····· 66
[그림 40] MOC2 반경방향 출력분포 비교(초임계 vs. 임계) ····· 67
[그림 41] EOC 반경방향 출력분포 비교(초임계 vs. 임계) ····· 68
[그림 42] 독립된 100개 계산 결과의 반경방향 평균 상대출력 분포 ····· 69
[그림 43] FA index에 따른 독립된 100개 계산 결과의 집합체 평균 상대출력 70
[그림 44] 점대칭 그룹별 독립된 100개 계산 결과의 집합체 평균 상대출력 ···· 70
[그림 45] 특정 EFPD에서의 축방향 출력분포(without CPS vs. with CPS) ··· 72
[그림 46] EFPD에 따른 Axial Offset(without CPS vs. with CPS) ····· 73
[그림 47] BOC 축방향 출력분포 비교(초임계 vs. 임계) ····· 74
[그림 48] IOC 축방향 출력분포 비교(초임계 vs. 임계) ····· 75
[그림 49] MOC1 축방향 출력분포 비교(초임계 vs. 임계) ····· 75
[그림 50] MOC2 축방향 출력분포 비교(초임계 vs. 임계) ····· 76
[그림 51] EOC 축방향 출력분포 비교(초임계 vs. 임계) ····· 77
[그림 52] McCARD 핵연료봉 열수력 궤환 모델 ····· 78
[그림 53] 반경방향 감속재 온도분포(초임계 vs. 임계) ····· 82
[그림 54] 반경방향 핵연료 온도분포(초임계 vs. 임계) ····· 83
[그림 55] 축방향 감속재 온도분포 종합(초임계 vs. 임계) ····· 84
[그림 56] 축방향 핵연료 온도분포 종합(초임계 vs. 임계) ····· 85
[그림 57] 감속재 온도계수 ····· 91
[그림 58] 핵연료 온도계수 ····· 91

제 1 장 서 론

제 1 절 연구배경 및 목적

소형모듈형원자로(SMR)는 안정성, 기술성, 활용성 등의 여러 측면에서 주목을 받고 있으며, 특히, 해양부유식 SMR은 선박 추진용, 원격지 전력 생산 및 공급, 해수 담수화 등의 목적으로 연구개발[1)]이 활발히 진행되고 있다. 해양부유식 SMR은 계통 단순화, 건전성 및 안전성 보장과 운전성 향상을 위하여 무붕산 운전 기술을 적용하고 있다. 무붕산 운전은 1차 계통 기기의 부식을 줄여 계통의 건전성을 유지 및 안전성을 향상시킬 수 있으며, 액체 폐기물 발생량을 줄이고, 화학 및 체적 제어계통의 붕산 관련 시설을 단순화할 수 있는 등의 장점이 있다.

이에, 한국전력기술(주)은 열출력 200 MWth의 무붕산 운전 해양부유식 SMR인 Bandi-60를 개발 중에 있으며 [1], 서울대 몬테칼로연구실에서는 '해양부유식 SMR 노심설계'수행을 통하여 예비노심을 설계한 바 있다 [2]. 선행연구 결과, 농축도 4.95 w/o의 UO_2 핵연료, 유효노심높이 2m, 웨스팅하우스사의 17×17 핵연료집합체가 52다발을 장전하여 열출력 200MWt, 주기길이 5년, 최대잉여반응도 5,000pcm 이하를 충족하는 노심을 설계하였다.

실제 해양부유식 무붕산 SMR 노심의 운전조건을 고려한 노심 설계가 필요함에 따라, 본 연구는 개념 설계된 노심이 열수력 궤환 효과를 고려했을 때 상위요건을 만족하는지 확인하고 검증한 뒤 기준이 되는 최적노심을

1) 미국의 NuScale(60MWe, 가압경수로), 영국의 UK-SMR(443MWe, 가압경수로), 프랑스의 Flexblue(160MWe, 가압경수로), 아르헨티나의 CAREM(27MWe, 가압경수로), 일본의 4S(10MWe, 소듐냉각고속로), 러시아의 KLT-40S(35MWe, 가압경수로) 등 세계적으로 여러 나라에서 다양한 소형원자로가 개발되고 있다.

설계하는 것이 목적이다. 또한, 최종적으로 선정된 최적노심에 대하여 제어봉 만을 사용하여 원자로 임계를 유지한 연소계산을 수행하여 실제 무붕산 SMR 노심의 운전 가능성을 평가하였다. 아울러 최적노심이 요구되는 노심의 성능요건들을 만족하는지 확인한 후 계통설계 및 안전해석에서 필요로하는 운전주기별(BOC, IOC, MOC, EOC) 노심특성 인자 계산을 수행하였다.

제 2 절 연구범위

원자로 내의 출력분포를 균일하게 유지하면서 잉여반응도를 제어할 수 있는 붕산수 반응도 제어방법에 비해서 무붕산 운전 원자로는 제어봉과 가연성흡수봉 만을 이용하여 반응도를 제어하기 때문에 핵연료 연소 및 제어봉 삽입 정도에 따라 노심내 출력 분포의 변화가 상대적으로 크게 나타날 수 있다. 또한, 무붕산 운전 노심은 붕산수를 사용하는 노심에 비하여 큰 값의 감속재 온도계수(음수)를 가지므로 저온정지조건에서 나타나는 큰 양의 반응도 궤환효과에 대비한 추가적인 반응도 제어설비가 필요하다. 따라서, 무붕산 SMR에서는 원자로의 최대출력인자를 설계 제한치 이내로 유지 시키면서 주기길이가 최대가 되는 가연성흡수봉 집합체의 설계 및 장전모형의 최적화가 필수적이며, 저온정지조건에서 충분한 음의 반응도를 제공할 수 있는 제어봉 설계가 중요하다.

본 연구에서 개발하는 최적노심의 기준은 주기길이 4~5년, 잉여반응도 5000pcm 이하에 첨두출력계수를 최소화하고 저온정지조건에서 충분한 음의 반응도를 제공할 수 있는 반응도 제어설비를 갖추어야 한다. 최적화 과정에서 선행연구와 동일하게 24개의 Pyrex 가연성흡수봉을 한 핵연료집합체 내에 사용하되, Pyrex의 B_2O_3 함유량을 최적화한 핵연료집합체를 배치하여 최적노심을 찾는다. 최종적으로 선정된 최적노심에 대하여 열수력 궤환효과를 고려하면서 제어봉 만을 사용하여 원자로 임계를 유지한 연소계

산(임계운전 모의 연소계산)을 수행한다. 실제 무붕산 SMR 노심의 운전을 확인한 후 계통설계 및 안전해석에 필요한 운전주기별(BOC, IOC, MOC, EOC) 노심특성 변수 계산을 수행하고 해석한다.

본 연구는 몬테칼로 중성자 수송해석 코드[2]인 McCARD(Monte Carlo Code for Advanced Reactor Design)[3]를 이용하여 열수력 궤환 효과를 적용한 노심설계 및 원자로 임계운전모의 연소계산을 통해 해양부유식 무붕산 SMR 노심설계 고도화를 목표로 한다.

제 3 절 연구의 구성

본 논문의 제2장에서는 해양부유식 무붕산 SMR 노심의 기본 설계요건을 확인하고 관련 연구들을 참고하여 무붕산 SMR 노심의 잉여반응도 제어요건을 평가한다. 제3장에서는 선행연구에서 설계된 기존노심에 대한 연소계산을 통해 상위요건 만족 여부를 확인하고 노심배치 및 반응도 제어설비 설계 최적화를 통해 최적노심을 선정한다. 제4장에서는 선정된 최적노심에 대해 열수력 궤환효과를 고려한 연소계산을 수행하여 임계도, 주기길이, 출력분포, 첨두출력계수 등을 계산한다. 제5장에서는 최적노심에 대해 실제 무붕산 SMR노심의 운전조건과 동일하게 제어봉을 운용하여 원자로 임계를 유지한 상태로 연소계산을 수행한 '원자로 임계운전모의'를 통하여 주기길이, 임계 제어봉 위치를 계산하고, 제6장에서는 임계운전모의 연소계산 결과와 제어봉 미사용 연소계산 결과에 대하여 첨두출력계수, 출력분포, 온도분포를 비교하며, 주요 노심특성 인자를 계산한다. 마지막 제7장에서는 이 연구의 결과를 종합하여 결론을 도출하였다.

---

2) 몬테칼로 중성자 수송해석 코드는 구조물에 대한 정확한 입력과 연속에너지 핵반응 단면적 라이브러리를 사용함으로써 대상 시스템의 정확한 핵특성인자들을 계산할 수 있어 새로운 개념의 원자로를 설계할 경우 몬테칼로 방법론을 적용한 코드를 사용하는 것이 유리하다.

제 2 장 해양부유식 무붕산 SMR 노심설계 사양

제 1 절 해양부유식 무붕산 SMR 노심의 기본 설계요건

이 연구에서 설계되는 SMR 노심의 열출력은 200MWth이고, 핵연료 교체 없이 약 5년간 운전이 가능해야 하며, 핵연료의 형태는 Zr-Alloy 피복재를 사용하는 봉형의 UO_2 이고 핵연료 농축도는 4.95 w/o이다. 총 52개의 핵연료집합체가 장전되며, 무붕산 운전 조건에 따라 노심의 잉여반응도 제어를 위한 수용성 중성자 흡수재는 사용되지 않아야 한다. 무붕산 운전 노심의 경우 노심의 잉여반응도 대부분은 가연성흡수봉을 이용해 제어되어야 하며, 운전 주기동안의 최대 잉여반응도는5,000 pcm 이하여야 하는 등 기본 설계요건은 선행연구와 동일하다. 표 1에는 해양부유식 SMR 노심의 기본 설계요건을 요약하였다.

구 분	내 용
원자로 종류	가압경수형
열출력	200 MWt
설계 압력	17.2 MPa
핵연료 형태	UO_2
핵연료집합체 장전수	52개
핵연료 농축도	4.95 w/o
수용성 중성자 흡수체	사용안함
재장전주기	4 ~ 5년
최대 잉여반응도	5,000pcm 이하

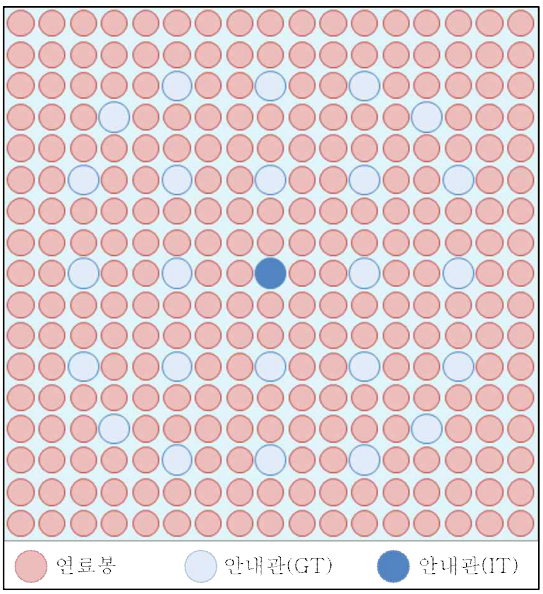
[표 1] 해양부유식 SMR 노심 기본 설계요건

해양부유식 SMR의 노심설계를 위해서는 우선 핵연료 형식이 선정되어야 하므로 선행연구에서 같이 웨스팅하우스형 17×17 봉형 핵연료집합체를 채택하였다[4]. 핵연료봉 및 안내관 수가 많은 웨스팅하우스형 17×17 핵연료집합체는 충분한 제어봉가를 제공할 수 있고 가연성흡수봉 사용에 융통

성이 있으며, 인허가 관점에서 기 검증된 핵연료라는 장점이 있다. 핵연료 집합체의 제원 및 단면도를 표 2 및 그림 1에 나타내었다.

[표 2] 웨스팅하우스 17×17 핵연료집합체 기본 제원

구 분		내 용	
연료봉 (264개)		소결체 외경	0.8192cm
		피복재 내경	0.8360cm
		피복재 외경	0.9500cm
안내관 (25개)	Guide Tube (24개)	내 경	1.1220cm
		외 경	1.2040cm
	Instrument Tube (1개)	내 경	1.1180cm
		외 경	1.2100cm
핵연료집합체 pitch		21.50cm	
핵연료봉 pitch		1.26cm	



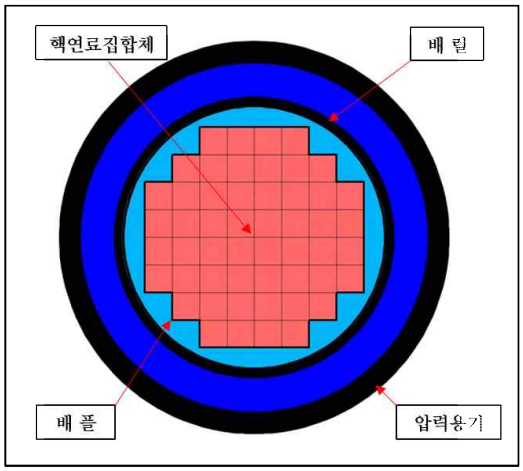
[그림 1] 핵연료집합체 단면도

표 3과 그림 2에 나타낸 바와 같이 원자로 압력용기의 외경은 2.78m, 배럴 외경은 2.21m이며, 배플의 두께는 2.86cm으로 선행연구와 동일하다. 선

행연구에서 SMR 설계 목표인 200MWth의 출력으로 4~5년의 장주기 운전을 위해 유효 노심 높이 1.8m의 경우 가연성흡수봉을 사용하지 않은 상태에서의 임계도 계산 결과 목표주기 5년에 도달하지 못함을 확인하였고, 유효 노심 높이가 2.0m인 경우 가연성흡수봉을 사용하지 않은 상태에서 5년보다 210일을 더 운전 할 수 있는 것으로 확인되어 유효노심높이는 2.0m로 선정되었다. 또한, 핵연료의 유효 노심 높이가 1.8m인 경우에는 D/H Ratio가 0.97로서 2.0m인 경우의 0.87보다 1.0에 가까워 중성자 누설량 측면에서는 유리하나, 선출력 밀도가 8.09kW/m로 2.0m의 7.28kW/m 보다 높아 안전성 측면에서는 유효 노심 높이 2.0m가 유리한 것으로 확인되었다.

[표 3] 원자로 기본 제원

구 분	재 질	내 용	
배 플	스테인리스 스틸	두 께	2.86cm
원자로 배럴	스테인리스 스틸	내 경	209cm
		외 경	221cm
원자로 압력 용기	카본 스틸	내 경	251cm
		외 경	278cm
유효 노심 높이	-	200cm	

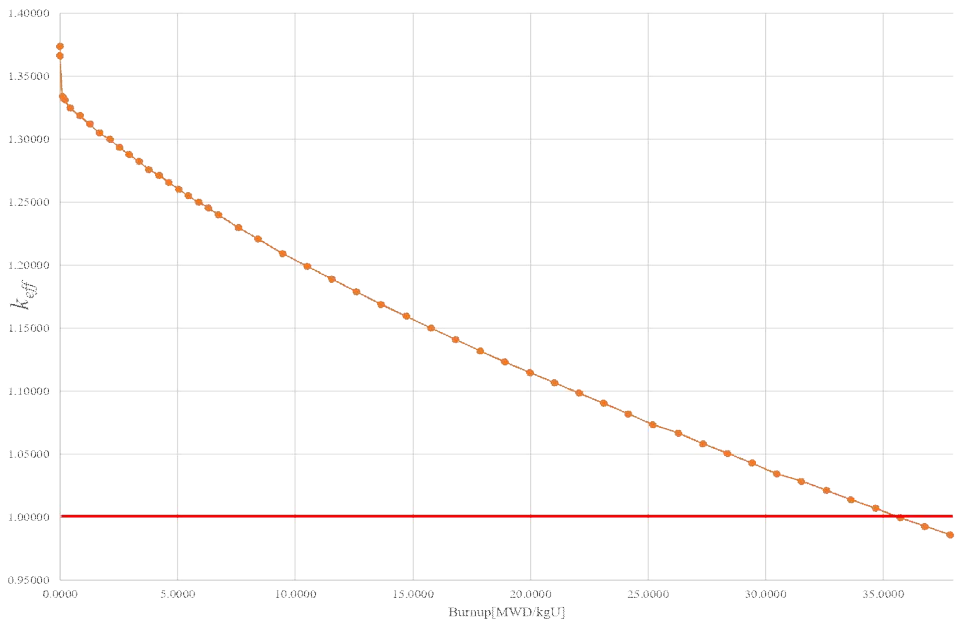


[그림 2] 원자로 단면도

제 2 절 해양부유식 SMR 노심 잉여반응도 제어 요건

1. 잉여반응도 제어

기존 상용 원자력발전소의 경우 통상 연료 재장전을 위한 운전주기는 18~24개월이지만, 본 해양부유식 SMR의 경우 핵연료 교체 없이 최대한 장기간 원자로를 운전하기 위해서는 주기초에 충분한 잉여반응도를 가지고 있어야 한다. 따라서 제 1절에 제시된 해양부유식 SMR 노심에 대해서 가연성흡수봉 없이 4.95 w/o로 농축된 우라늄 핵연료만 장전하였을 경우 노심의 유효증배계수를 평가하여 그림 3에 나타내었다. 임계점인 1.0에 도달할 때까지 운전 가능한 최대 연소도는 35.62MWD/kgU이며 약 5년 이상의 운전주기가 가능한 것으로 나타났다. 주기초 유효증배계수는 1.36695 ± 0.00038로서 잉여반응도는 26,844 ± 20pcm이므로 제어봉과 가연성흡수봉을 적절히 이용하여 이를 제어할 수 있어야 한다.



[그림 3] SMR 노심의 핵연료 연소도에 따른 유효증배계수 변화

2. 출력분포 및 첨두출력인자

가압경수형 상용로는 대부분의 운전기간 동안 제어봉이 완전 인출되어 있는 상태에서 붕산수의 농도 조절로 임계운전을 하지만, 무붕산 SMR 노심에서는 수용성 붕산을 사용하지 않으므로 제어봉과 가연성흡수봉만 사용하여야 하고, 노심의 임계를 유지하기 위해서는 제어봉이 삽입된 상태로 운전되어져야 하므로 축방향 출력분포에 직접적인 영향을 미치게 된다. 따라서 무붕산 SMR 노심의 경우에는 반경방향 뿐만 아니라 축방향 출력분포도 주요 고려사항 중 하나이고 이를 확인하는 인자가 Axial Offset(AO)이며 다음과 같이 정의된다 [5].

$$AO = (P_B - P_T)/(P_B + P_T)$$

P_B = POWER OF THE BOTTOM HALF OF CORE

P_T = POWER OF THE TOP HALF OF CORE

참고로, 오레곤 대학에서의 무붕산 SMR 타당성 연구논문에 따르면, AO에 대한 요구사항으로 ± 0.4를 제시한 바 있으므로 [6], 본 연구에서는 이를 준용하기로 한다.

인허가 요건에 따르면 연료봉의 표면열속은 최소핵비등이탈률(Minimum Departure from Nucleate Boiling Ratio; MDNBR)을 넘어서는 안된다고 요구하며 [7], MDNBR은 국부최대열속에 대한 임계열속의 비로 정의되고, 임계열속에 도달하면 피복재 손상이 발생한다고 가정하여야 한다. 따라서, MDNBR은 불확실도를 고려하여 다음과 같이 정의된다.

$$MDNBR = (q''_{crit})/(q''_{max} \times f)$$

여기서 q''_{crit}와 q''_{max}는 각각 임계열속과 국부최대열속을 나타내고, f는

불확실도를 나타낸다. f는 출력에 대한 불확실도와 노심거동을 모사하기 위한 해석방법론상의 불확실도로 이루어지는 일반적인 공학적 불확실도이다. 과거 연구에서 [8] 1.05의 출력불확실도와 1.15의 공학적 불확실도를 적용하면 충분하다고 평가하였고, Groenveld의 임계열속표에 따라 무붕산 SMR의 임계열속을 2579kW/m^{2}로 계산한 값을 적용하는 것을 추천하므로 본 연구에서는 이들을 사용하기로 한다. 따라서, 첨두출력인자(F_q)의 제한치(최대값)는 아래 식에 의해 계산할 수 있다.

$$
\begin{aligned}
F_q &= q''_{max} / q''_{avg} \\
&= q''_{crit} /(\mathrm{f}\times \mathrm{MDNBR}) / q''_{avg} \\
&= 2579.0\mathrm{kW/m^2} / (1.05 \times 1.15 \times \mathrm{MDNBR}) / q''_{avg} \\
&= 2135.8\mathrm{kW/m^2} / (q''_{avg} \times \mathrm{MDNBR})
\end{aligned}
$$

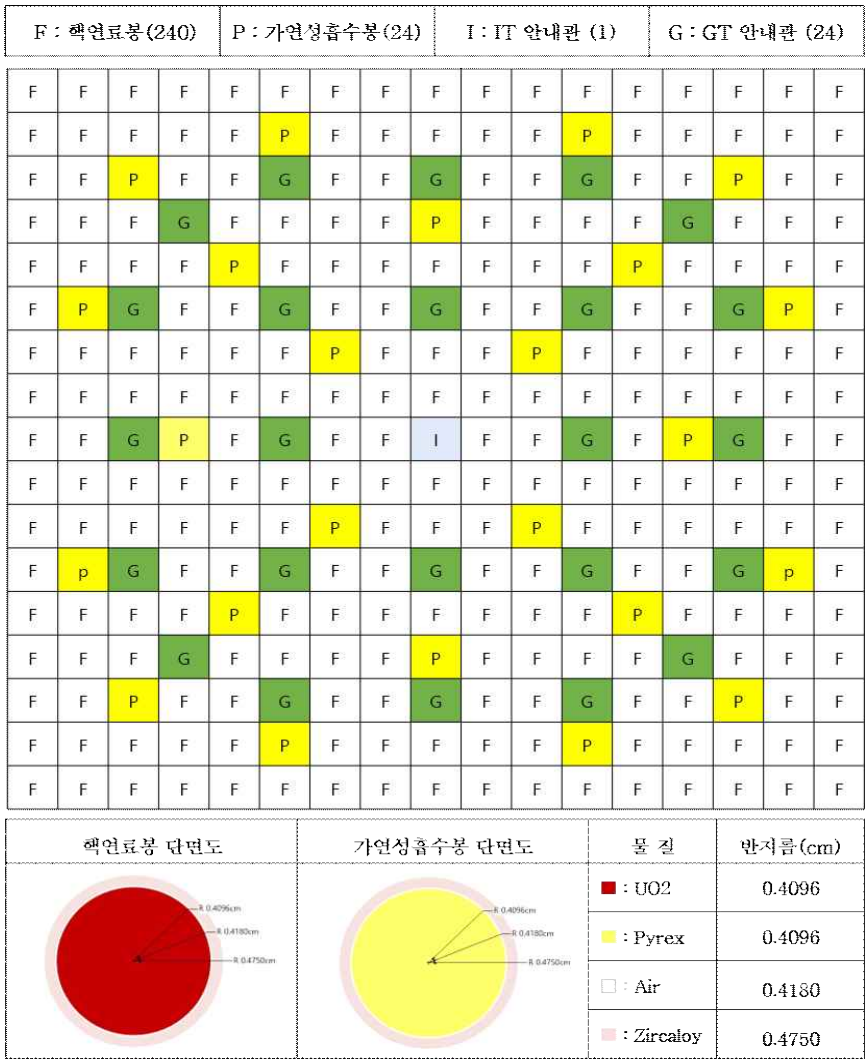
여기서 q''_{avg}는 노심의 평균열속을 나타낸다. 위 식에 따라, 유효 노심 높이 2m인 핵연료집합체 52다발의 열전달면적과 노심 열출력 200MWt를 고려하여 MDNBR 1.3 과 1.4에 따른 첨두출력인자 제한치를 계산하면 표 4에 나타낸 바와 같다. MDNBR을 보수적으로 1.4로 가정할 경우, 첨두출력인자는 5.68로 평가되며, 상용로의 첨두출력인자 제한치가 약 2.6임을 고려할 때, 무붕산 SMR 노심은 첨두출력인자 측면에서는 비교적 큰 여유를 가진다고 볼 수 있다.

[표 4] 해양부유식 SMR 노심의 최대첨두출력 제한치

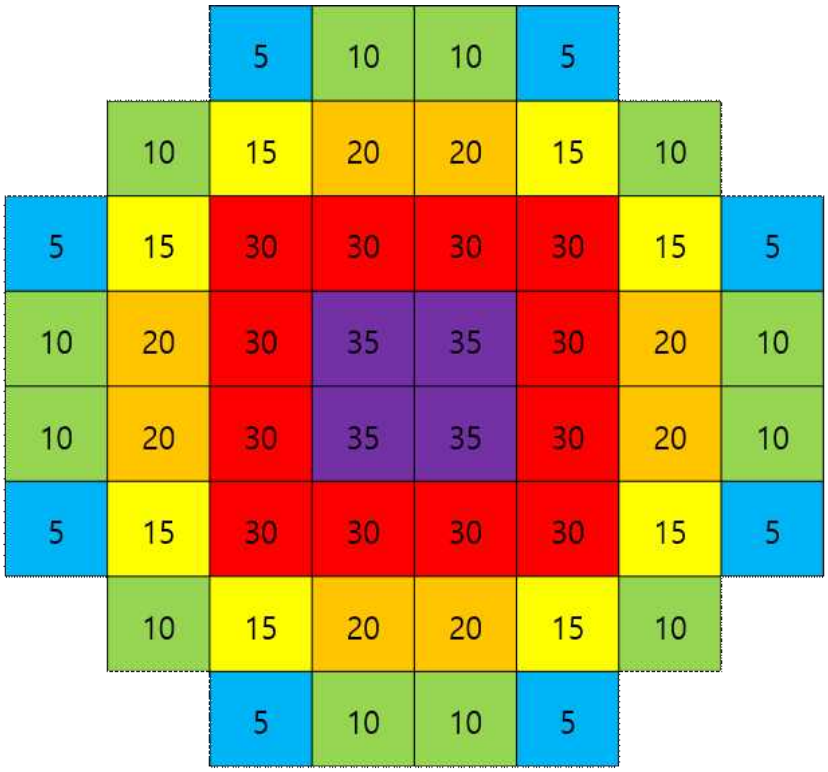
MDNBR	열출력 (MWt)	최대열속	열전달면적 (17×17, 9.5mm rod)	평균열속	첨두출력인자
		q''_{max} = 2135.8/MDNBR	π×D×H×240×52	q''_{avg} = 열출력(kWt)/열전달면적	Fq = q''_{max} / q''_{avg}
1.3	200	1642.92	774.93	268.48	6.12
1.4		1525.56			5.68
* D(핵연료봉 외경) : 9.5 mm / H(유효노심높이) : 2 m / 240 : 핵연료봉 수 / 52 : 핵연료집합체 수					

3. 잉여반응도 제어를 위한 SMR 노심개념 설계(선행연구) 결과

선행연구에서 잉여반응도 제어를 위해 Pyrex 가연성흡수봉을 각 핵연료 집합체 내에 24개씩 장전하고, B_2O_3 함유량을 달리하는 총 6종의 핵연료 집합체를 혼합 배치하여 주기길이 5년, 최대잉여반응도 5,000pcm 이하를 만족하는 노심을 개념설계 하였다. 그림 4는 선행연구에서 설계된 노심의 Pyrex 가연성흡수봉을 사용한 핵연료집합체 단면도이고, 그림 5와 표 5에는 노심 장전모형 및 장전된 6종의 핵연료집합체 정보사항을 요약하였다.



[그림 4] 핵연료집합체 내 핵연료봉/가연성흡수봉 배치도



* 가연성흡수봉 내 B_2O_3 함유량(w/o) : 5 / 10 / 15 / 20 / 30 / 35

[그림 5] SMR 노심 장전모형(선행연구 개념설계 결과)

[표 5] 핵연료집합체(6종) 구성 및 정보사항

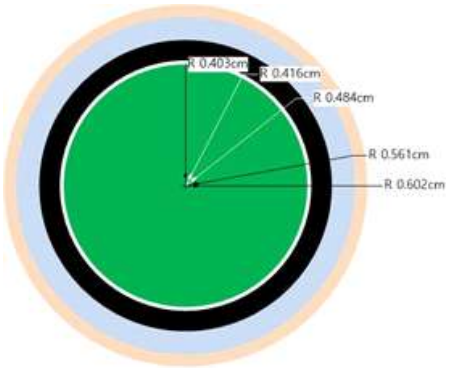
핵연료 집합체 종류	Pyrex 내 B_2O_3 함유량 (w/o)	노심 내 핵연료집합체 개수	집합체 내 핵연료봉 개수	집합체 내 가연성흡수봉 개수
35	35	4	240	24
30	30	12	240	24
20	20	8	240	24
15	15	8	240	24
10	10	12	240	24
5	5	8	240	24
합 계		52	12480	1248

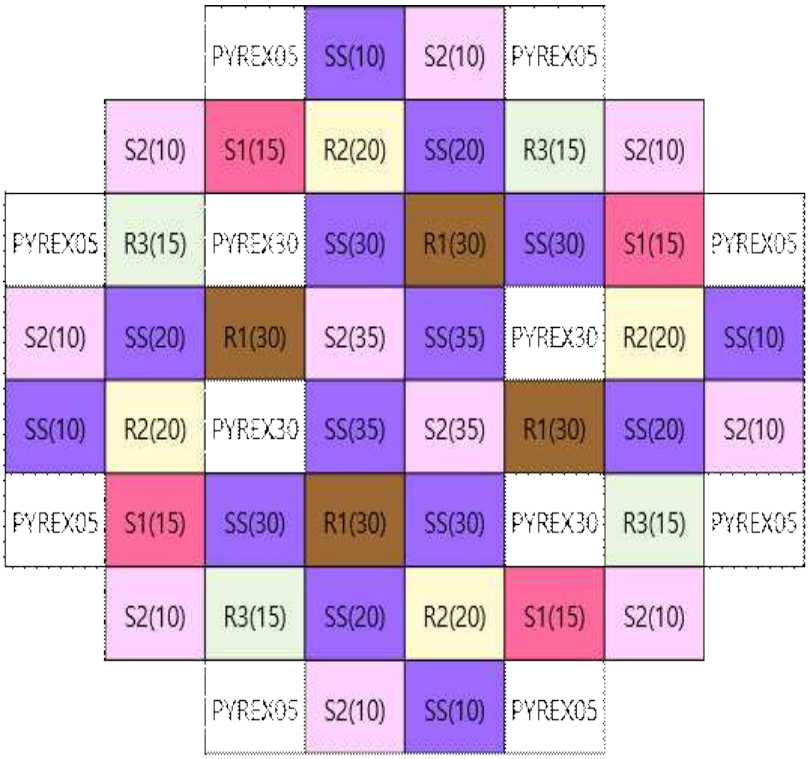
* UO_2 밀도 : 10.257 g/cm^3 * 총 핵연료봉 개수 : 12480 * 총 우라늄 질량 : 11,893kg

* Pyrex 밀도 : 2.3 g/cm^3 * 총 Pyrex 개수 : 1248

또한, 선행연구 결과, 제어봉은 표 6에 요약한 바와 같이 B_4C를 사용하였고, 잉여반응도 제어 및 정상 운전을 위한 반응도 제어설비의 구성과 노심 내 배치는 그림 6과 같다. 반응도 제어설비는 일반적으로 원자로 출력 및 미세 반응도 제어를 위한 조절용 반응도 제어계통(Regulating bank : 조절계통) 12개와 가동 정지 및 가동 정지 유지를 위한 정지용 반응도 제어계통(Shut down bank : 정지계통) 14개가 사용되었다. 더불어 ATWS(Anticipated Transient Without Scram) 대처 및 무붕산 노심의 반응도 제어계통 다양성 확보를 위한 제2의 정지계통(Secondary shut down bank : 2차 정지계통) 14개를 포함하는 총 40개의 제어봉 집합체로 구성되어 있다. 반응도제어 설비 세부 정보사항은 표 7에 요약하였다. 개념설계된 SMR 노심에 대한 열수력 궤환 효과를 고려한 반응도 제어설비에 대한 반응도가 계산에 대한 세부 내용은 제3장에 기술하였다.

[표 6] 제어봉 정보사항

제어봉 단면도	물 질	반지름(cm)
	■ : B4C	0.403
	□ : Air	0.416
	■ : SS304	0.484
	■ : H20	0.561
	■ : Zircaloy Cladding	0.602



[그림 6] 노심 내 반응도 제어설비 배치도

[표 7] 반응도제어 설비 집합체 정보사항

구 분	반응도 제어설비 종류	핵연료집합체 종류	노심 내 제어설비 집합체 개수
조절계통 (12개)	R1(30)	30	4
	R2(20)	20	4
	R3(15)	15	4
정지계통 (14개)	S1(15)	15	4
	S2(10)	10	8
	S2(35)	35	2
2차 정지계통 (14개)	SS(35)	35	2
	SS(30)	30	4
	SS(20)	20	4
	SS(10)	10	4
반응도 제어설비 총 개수			40

제 3 장 해양부유식 무붕산 SMR 노심배치 최적화

제 1 절 기존노심 특성 계산 및 분석

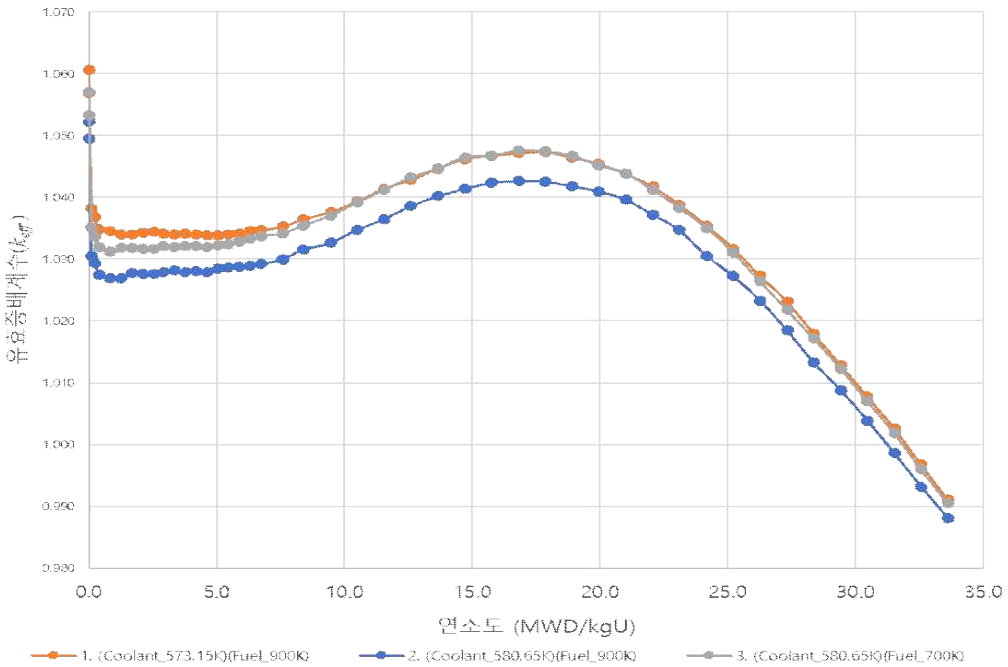
기존노심(선행연구에서 선정된 개념설계 노심)에 대한 열수력 궤환효과를 고려한 연소계산을 수행하기 전에 핵연료 및 감속재의 평균온도를 적용한 연소계산을 수행하여 기본적인 핵특성 인자를 계산하였다. 개념설계에서는 열수력 궤환효과를 고려하지 않고 단일 값의 핵연료 평균온도(900K) 및 감속재 평균온도(600K)를 적용하여 보수적인 계산을 수행하였으나, 본 연구에서는 실제 핵연료 및 감속재 온도를 계산하여 연소계산을 수행하였으며 McCARD 계산조건은 표 8에 요약하였다. 이 표에서'①'은 계통설계로 부터 제공받은 열수력 자료인 감속재 입구온도 548.15K, 출구온도 598.15K를 고려하여 감속재 평균온도 573.15K를 적용한 계산이고, '②'는 최종 확정된 감속재 입구온도 578.15K, 출구온도 598.15K을 고려한 감속재 평균온도 580.65K을 적용한 계산이다. '③'은 감속재 평균온도 580.65K와 핵연료 평균온도 700K을 적용한 계산이다.

[표 8] 감속재/핵연료 평균온도별 McCARD 연소계산 조건

구분	핵단면적데이터	중성자원모의개수	활성주기	수렴주기	핵연료평균온도 [K]	감속재평균온도 [K]	감속재밀도 [g/cm^3]
①	ENDF/B-VII.1	100,000	300	150	900	573.15	0.727
②		50,000	300	150	900	580.65	0.710
③		50,000	300	150	700	580.65	0.710

1. 연소계산 결과

감속재 및 핵연료 평균온도별 연소도에 따른 유효증배계수 변화를 그림 7과 같이 도출하였다. 이 그림에 나타난 바와 같이 출력운전 시작 직후 제논의 증가로 초기 잉여반응도는 급격히 감소하고 제논 평형상태에 도달한 이후는 우라늄 연소에 따라 잉여반응도는 감소하게 된다. 하지만, 우라늄 연소와 함께 가연성흡수체인 붕소도 동시에 연소되므로 노심의 잉여반응도는 오히려 서서히 증가하다가 주기 말에 이르러 붕소 연소가 줄어드는 시점부터 빠르게 감소하게 된다.



[그림 7] 감속재・핵연료 평균온도별 유효증배계수 변화

그림 7의 유효증배계수 결과를 바탕으로 계산한 주기길이는 표 9에 나타낸 바와 같다. 감속재 평균온도가 가장 낮은 573.15K을 적용한 '①' 연소계산 결과가 가장 긴 주기길이인 5.21년(1902.8±0.1일)으로 나타났고, 감속재 평균온도 580.65K, 핵연료 평균온도 900K을 적용한 '②' 연소계산 결과가

가장 짧은 주기길이인 5.09년(1858.5±0.2일)으로 확인되었다. 이 결과를 바탕으로 실제 열수력 궤환효과를 적용하여 계산 할 경우에도 유효전출력가동일수(EFPD : Effective Full Power Day)는 5년 이상 수준이 될 것으로 판단된다.

[표 9] 주기길이 계산 결과

구 분	①		②		③	
	감속재 온도	핵연료 온도	감속재 온도	핵연료 온도	감속재 온도	핵연료 온도
	573.15K	900K	580.65K	900K	580.65K	700K
일 (SD)	1902.8 (0.11)		1858.5 (0.17)		1894.4 (0.72)	
연 (SD)	5.2131 (0.0003)		5.0917 (0.0005)		5.1903 (0.0020)	

2. 감속재 온도계수(MTC) 및 핵연료 온도계수(FTC) 계산 결과

감속재 온도계수(MTC) 및 핵연료 온도계수(FTC)는 다음과 같이 정의된다.

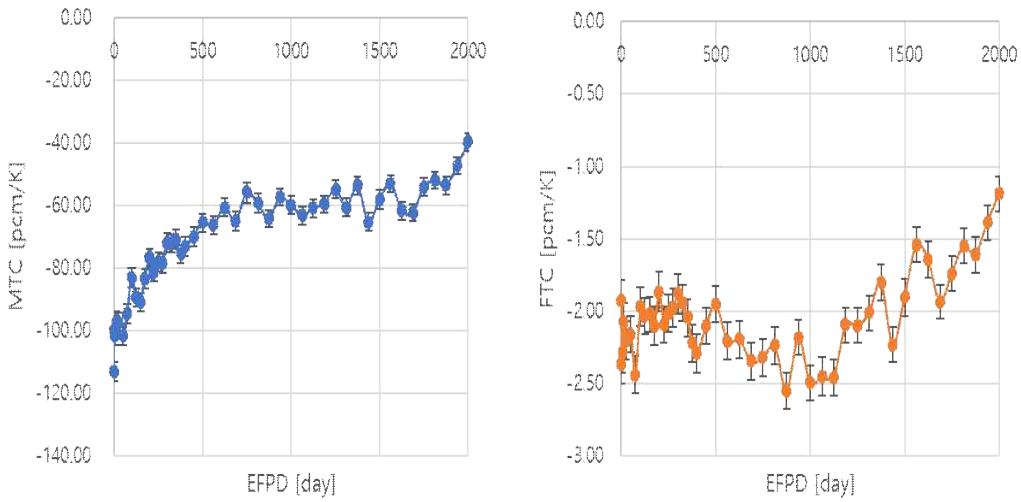
$$\text{MTC} : \alpha_{MTC} = \frac{d\rho}{dT_M},\ \text{FTC} : \alpha_{FTC} = \frac{d\rho}{dT_F}$$

온도계수는 감속재 및 핵연료 온도변화에 따른 반응도 변화로 정의되므로, 온도차에 따른 반응도 변화를 선형으로 가정하여 온도계수는 두 온도에 대한 반응도 차이를 통해 계산할 수 있다. 감속재/핵연료 평균온도별 연소도에 따른 유효증배계수 계산 결과를 바탕으로 감속재 온도계수 및 핵연료 온도계수를 계산하였다. 표 10은 특정 연소도에서 감속재 및 핵연료 온도계수를 계산한 값이다.

[표 10] 감속재 및 핵연료 온도계수 계산 결과

연소도 [MWD/kgU]	유효전출력가동일수 [day]	MTC	SD	FTC	SD
		[pcm/K]		[pcm/K]	
0.00	0	-112.93	3.15	-2.36	0.13
0.84	50	-101.60	2.85	-2.16	0.13
16.82	1000	-59.87	2.85	-2.50	0.12
23.12	1375	-53.60	2.88	-1.80	0.12
29.43	1750	-54.00	2.77	-1.74	0.12
31.53	1875	-53.47	2.88	-1.61	0.12

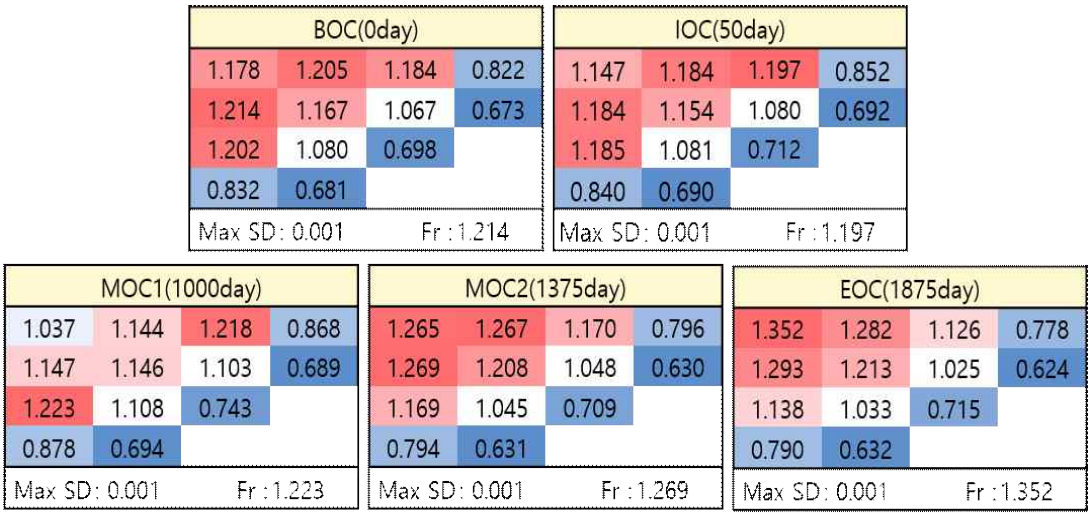
감속재 온도계수는 기존 상용로에 비해 더 큰 음의 값을 가지며, 주기초(BOC)에서 -112.93 ± 3.15 pcm/K으로 가장 크고 주기말로 갈수록 양의 방향으로 증가한다. 이는 가연성흡수물질의 연소로 인한 영향 때문이다. 핵연료 온도계수는 일반 상용로와 비슷한 값을 가지며, 주기 중반인 EFPD 1000일에서 -2.50 ± 0.12 pcm/K으로 가장 큰 값을 보인다. 그림 8에는 EFPD에 따른 감속재 및 핵연료 온도계수의 변화를 나타내었다.



[그림 8] EFPD에 따른 감속재 및 핵연료 온도계수 변화

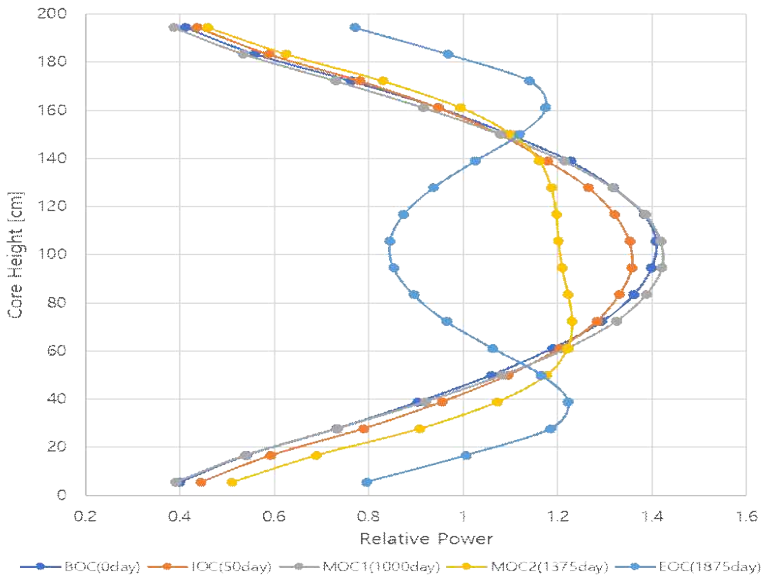
3. 출력분포 계산 결과

기존노심에 대한 출력분포는 실제 열수력 궤환효과를 고려한 경우와 가장 유사한 조건인 감속재 평균온도 580.15K과 핵연료 평균온도 700K을 적용한 연소계산에 대한 결과를 분석하였다. 그림 9에서 볼 수 있듯이 반경방향 상대출력은 주기말(1875일)에 노심 중앙 핵연료집합체에서 1.352 ± 0.001로 가장 높고 노심 최외곽 핵연료집합체에서 0.624 ± 0.001로 가장 낮게 계산되었다.



[그림 9] 반경방향 출력분포

그림 10에 나타낸 바와 같이 축방향 출력분포는 기존 상용로 대비 cosine 형태가 주기 중반까지 나타나며, 이는 상대적으로 B_2O_3의 함유량이 높은 가연성흡수봉을 사용하였기 때문이다. 가연성흡수체의 연소가 진행되어 붕소 연소가 줄어드는 시점 전까지는 cosine형태를 유지하다가 그 이후에 중앙 부분이 평탄해지는 것을 확인할 수 있다.



[그림 10] 축방향 출력분포

4. 주기초(BOC) 연소계산 비교(열수력 궤환효과 적용 vs. 미적용)

열수력 궤환효과(T/H)를 고려한 전 주기 노심 연소계산을 수행하기 전에 주기초(BOC)에서 열수력 궤환효과 적용(with T/H) 및 미적용한(without T/H) 경우에 대하여 연소계산을 수행하고 비교하였다. 무붕산 SMR 노심의 열수력 조건 자료는 표 11과 같으며, McCARD 계산조건 및 유효증배계수 계산 결과를 표 12에 요약하였다. 표 12에 나타낸 바와 같이 without T/H의 유효증배계수가 with T/H보다 268pcm 정도 높은 것으로 확인되었다.

[표 11] 무붕산 SMR 노심 열수력 조건

구 분	내 용	비 고
설계압력 [MPa]	17.2	-
감속재 입구온도 [K]	563.15	* 물 밀도 : 0.66653 g/cm^3
감속재 출구온도 [K]	598.15	* 물 밀도 : 0.74622 g/cm^3
감속재 평균온도 [K]	580.65	* 물 밀도 : 0.71045 g/cm^3
입·출구 온도차 [K]	35	-
유량 [kg/s]	997.5	-

[표 12] BOC 연소계산 조건 및 유효증배계수 계산 결과

구분	핵단면적 데이터	중성자원 모의개수/ 활성/수렴주기	감속재 온도 (입구/출구)	핵연료 온도	유효 증배계수 (SD)	차이 [pcm]
without T/H	ENDF/ B-VII.1	50,000/300/150	580.15K	700K	1.05693 (0.00019)	268
with T/H		50,000/300/150	563.15K / 598.15K	-	1.05425 (0.00018)	

그림 11에는 BOC에서의 반경방향 출력분포 결과를 비교하여 나타내었으며, without T/H의 최대상대출력은 1.214 ± 0.001, 최소상대출력은 0.673 ± 0.001이며, with T/H의 최대상대출력은 1.189 ± 0.001, 최소상대출력은 0.698 ± 0.001로써 열수력 궤환효과를 적용한 계산 결과가 상대적으로 평탄한 출력분포를 보여주고 있다. 두 계산의 RMS 오차는 2.76%이며, 최대 오차는 노심 최외곽 집합체에서 4.45%의 차이를 보인다.

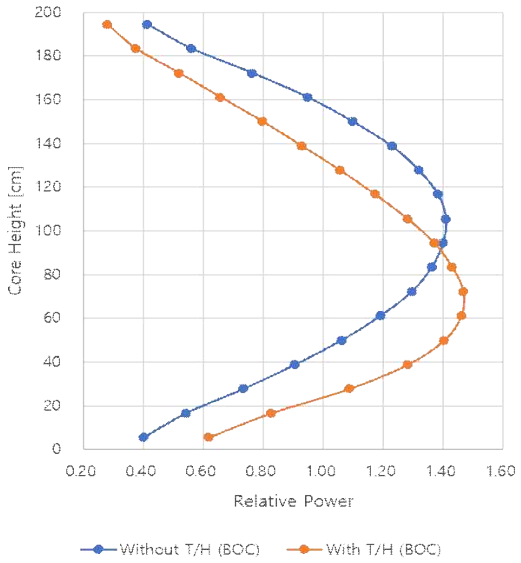
Without T/H (BOC)			
1.178	1.205	1.184	0.822
1.214	1.167	1.067	0.673
1.202	1.080	0.698	
0.832	0.681		
Max SD : 0.0014		Fr : 1.214	

With T/H (BOC)			
1.143	1.179	1.189	0.860
1.178	1.125	1.079	0.703
1.181	1.071	0.715	
0.854	0.698		
Max SD : 0.0014		Fr : 1.189	

Comparison of Radial Power Distribution					
1.178	1.205	1.184	0.822		
1.143	1.179	1.189	0.860		
3.05%	2.17%	-0.47%	-4.45%		
1.214	1.167	1.067	0.673		
1.178	1.125	1.079	0.703		
3.06%	3.66%	-1.18%	-4.35%		
1.202	1.080	0.698			
1.181	1.071	0.715			
1.70%	0.86%	-2.40%			
0.832	0.681		Without T/H		
0.854	0.698		With T/H	RMS diff.	Max diff.
-2.56%	-2.38%		Rel. Diff.	2.76%	4.45%

[그림 11] 반경방향 출력분포 비교 (with vs without T/H)

그림 12는 BOC에서의 축방향 출력분포 비교 결과를 보여주고 있으며, with T/H 그래프가 상대적으로 노심 하부 쪽으로 cosine 형상이 치우쳐짐을 알 수 있고, Axial Offset도 열수력 궤환효과에 의해 그 값이 -0.0130(without T/H)에서 0.2157(with T/H)로 더 커짐을 확인할 수 있다.



Comparison of Axial Power Distribution					
Height [cm]	Without T/H (SD)		With T/H (SD)		Rel. Err.
6	0.400	(0.001)	0.617	(0.001)	-35%
17	0.541	(0.001)	0.826	(0.001)	-35%
28	0.732	(0.001)	1.087	(0.002)	-33%
39	0.905	(0.001)	1.281	(0.002)	-29%
50	1.060	(0.001)	1.404	(0.002)	-24%
61	1.189	(0.002)	1.459	(0.002)	-18%
72	1.294	(0.002)	1.467	(0.002)	-12%
83	1.361	(0.002)	1.429	(0.002)	-5%
94	1.399	(0.002)	1.369	(0.002)	2%
106	1.409	(0.002)	1.280	(0.002)	10%
117	1.383	(0.002)	1.172	(0.002)	18%
128	1.318	(0.002)	1.055	(0.001)	25%
139	1.227	(0.002)	0.927	(0.001)	32%
150	1.098	(0.002)	0.797	(0.001)	38%
161	0.947	(0.001)	0.656	(0.001)	44%
172	0.762	(0.001)	0.518	(0.001)	47%
183	0.560	(0.001)	0.375	(0.001)	50%
194	0.412	(0.001)	0.278	(0.001)	48%
Axial offset	-0.0130		0.2157		RMS : 32%

[그림 12] 축방향 출력분포 비교 (with vs without T/H)

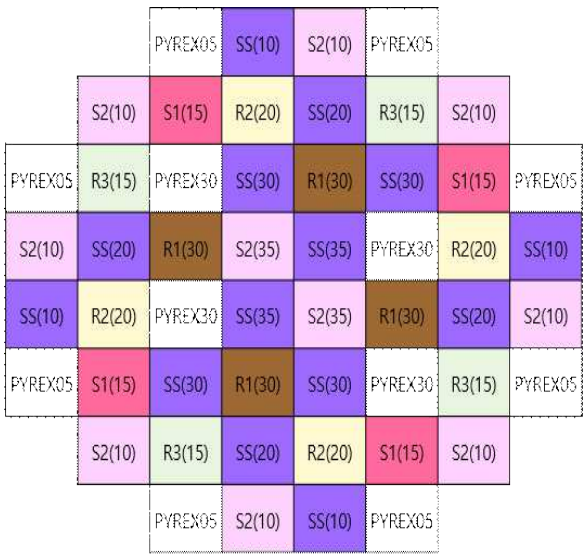
5. 주기초(BOC) 원자로 임계 운전모의 계산 결과(열수력 궤환효과 적용)

원자로 임계 운전모의 계산을 위해 우선 주기초(BOC)에서 제어봉을 미삽입한 노심(이하 “초임계”로 칭함)과 제어봉을 삽입한 임계상태 노심에 대하여 열수력 궤환효과(T/H)를 적용한 연소계산을 수행하여 각종 핵특성인자를 계산하였다. McCARD 계산조건과 유효증배계수, 제어봉 위치, 제어봉가 계산결과를 표 13에 요약하였으며, 노심 내 반응도 제어설비 구성은 표 14에 나타낸 바와 같다. 계산 결과, 주기초 임계를 위해서는 R1, R2 조절계통은 모두 삽입되어야 하고 R3 조절계통이 75cm 까지 삽입되어져야 하며, 이때 총 제어봉가는 5146 ± 29 pcm으로 나타났다.

[표 13] 원자로 상태별(초임계/임계) 주기초 T/H 연소계산 조건 및 결과

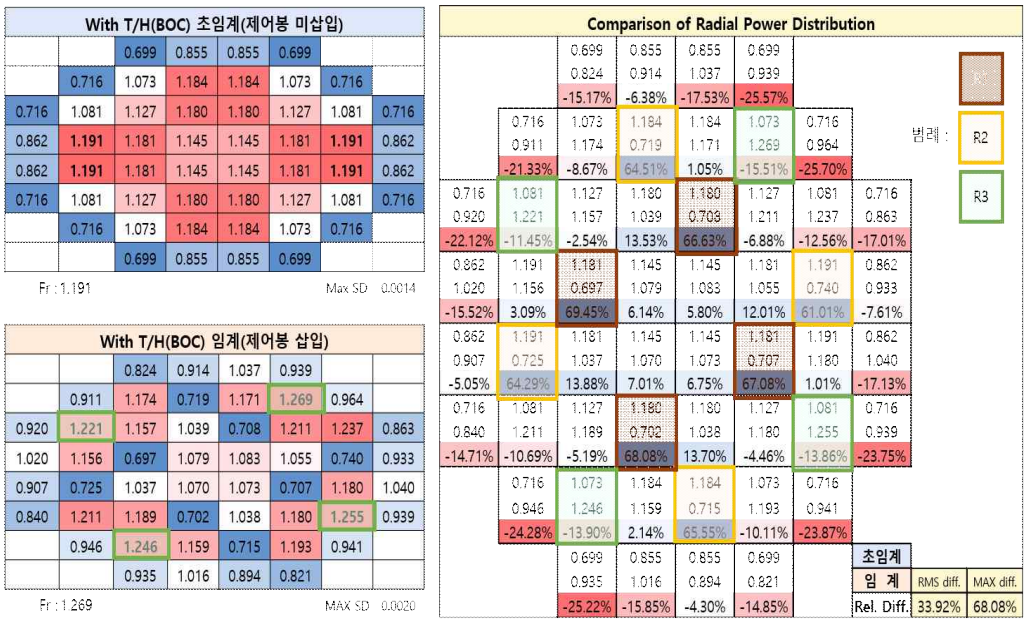
원자로 상태	핵단면적 데이터	중성자원 모의개수/ 활성/수렴주기	유효 증배계수 (SD)	제어봉 위치	제어봉가 [pcm] (SD)
초임계	ENDF/B -VII.1	50,000/300/150	1.05425 (0.00018)	-	-
임계		100,000/300/150	1.00000 (0.00013)	• R1/R2: 완전삽입 • R3 : 75cm 삽입	5146 (29)

[표 14] 반응도 제어설비 구성 및 배치도

구분	반응도 제어설비 종류 (핵연료집합체 종류)	반응도 제어설비 개수	노심 내 반응도 제어설비 배치도
조절 계통 (12개)	R1(30)	4	
	R2(20)	4	
	R3(15)	4	
정지 계통 (14개)	S1(15)	4	
	S2(10)	8	
	S2(35)	2	
2차 정지 계통 (14개)	SS(35)	2	
	SS(30)	4	
	SS(20)	4	
	SS(10)	4	
반응도 제어설비 총 개수		40	

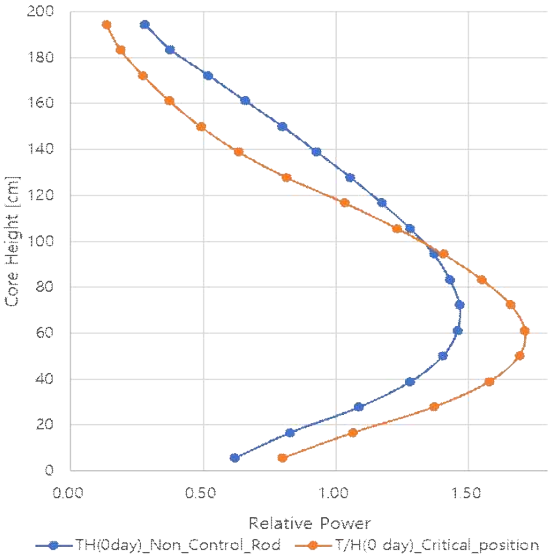
가. 출력분포

그림 13에는 원자로 상태별(초임계/임계) 주기초 T/H 연소계산 반경방향 출력분포를 비교하였다. 임계상태 원자로의 경우 R3 조절계통의 제어봉이 삽입된 핵연료집합체에서 최대 상대출력이 (1.269 ± 0.002) 나타나며 이는 R3 조절계통의 제어봉이 75cm 삽입되어 축방향 출력분포 불균형에 의한 원인으로 판단된다. 또한, 제어봉이 완전히 삽입된 R1, R2 조절계통의 핵연료집합체에서 가장 큰 출력차이(64.29 ~ 68.08%)를 보인다.



[그림 13] 주기초(BOC) 반경방향 출력분포 비교(초임계 vs. 임계)

축방향 출력분포는 그림 14에 나타낸 바와 같이 임계상태 원자로의 경우 R3 조절계통이 상부에서부터 75cm가 삽입됨에 따라 노심 상부에서 큰 출력분포 차이(63 ~ 107%)를 보이며, Axial Offset 값도 제어봉 삽입에 따른 출력분포 불균형에 의해 0.2157(제어봉 미삽입)에서 0.4259(제어봉 삽입)으로 증가함을 확인할 수 있다.

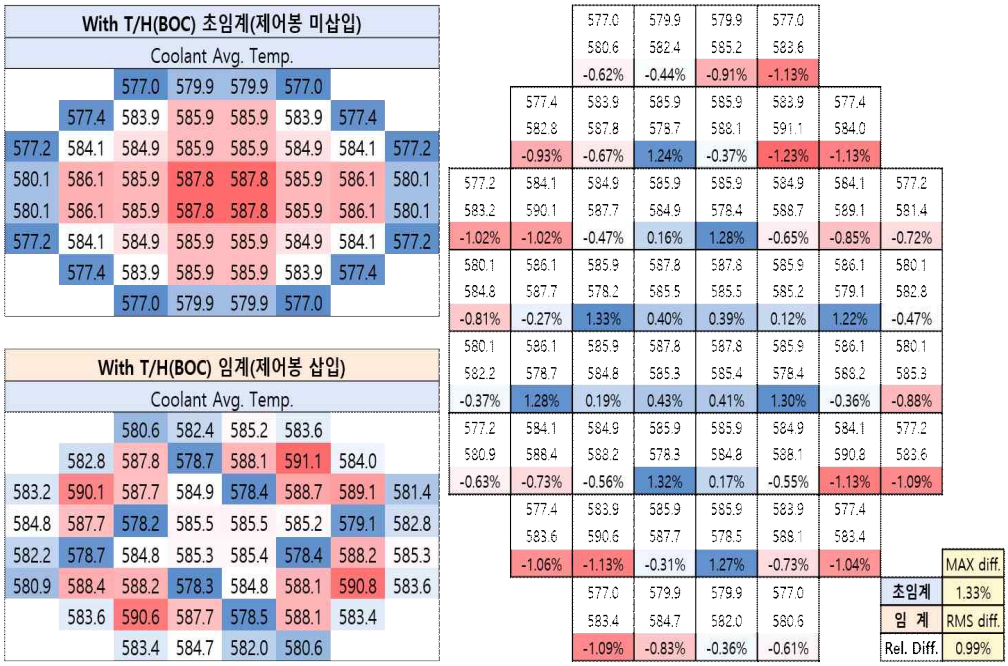


Comparison of Axial Power Distribution			
Height (cm)	Supercritical	Critical	Rel. Diff.
6	0.617	0.798	-23%
17	0.826	1.065	-22%
28	1.087	1.369	-21%
39	1.281	1.579	-19%
50	1.404	1.692	-17%
61	1.459	1.714	-15%
72	1.467	1.661	-12%
83	1.429	1.551	-8%
94	1.369	1.406	-3%
106	1.280	1.231	4%
117	1.172	1.033	13%
128	1.055	0.814	30%
139	0.927	0.633	46%
150	0.797	0.490	63%
161	0.656	0.371	77%
172	0.518	0.273	90%
183	0.375	0.188	100%
194	0.278	0.135	107%
Axial Offset	0.2157	0.4259	RMS : 50%

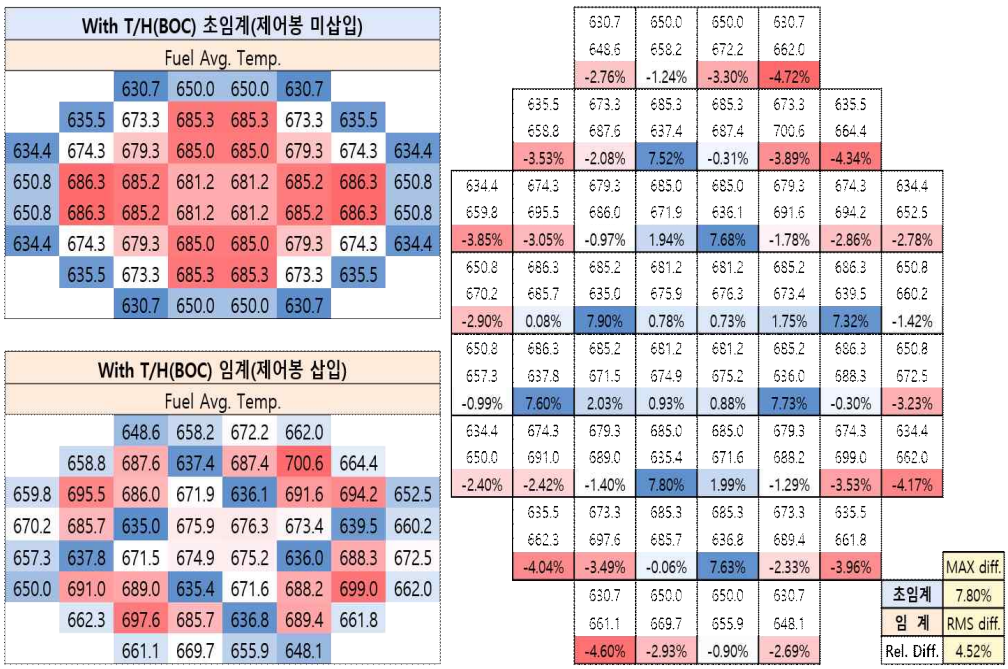
[그림 14] 주기초(BOC) 축방향 출력분포 비교(초임계 vs. 임계)

나. 온도분포

초임계상태 원자로의 감속재 평균온도는 582.6±0.10K, 핵연료 평균온도는 665.6±0.55K이며, 임계상태 원자로의 감속재 평균온도는 584.4±0.25K, 핵연료 평균온도는 668.3±1.08K이다. 반경방향 감속재 온도분포의 경우, 그림 15에 나타낸 바와 같이 R1, R2 조절계통이 완전히 삽입된 핵연료집합체에서 상대적으로 큰 감속재 온도 차이(1.24 ~ 1.33%)를 보이며, R3가 75cm 삽입된 핵연료집합체에서 가장 높은 감속재 온도(590.1 ~ 590.8K)를 나타낸다. 그림 16에 나타낸 반경방향 핵연료 온도분포는 R1, R2가 완전히 삽입된 핵연료집합체에서 큰 온도 차이(7.80%)를 보이며, R3가 75cm 삽입된 핵연료집합체에서 가장 높은 핵연료 온도(694.2 ~ 700.6K)를 나타내고, 온도분포는 출력분포와 유사한 분포를 가진다.



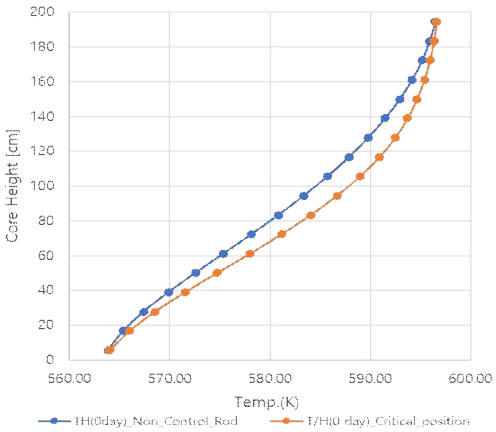
[그림 15] 반경방향 감속재 온도분포



[그림 16] 반경방향 핵연료 온도분포

그림 17에 나타낸 축방향 감속재 온도분포에서 확인할 수 있듯이 임계상태 원자로의 감속재 온도는 초임계상태의 원자로에 비해 노심 하부에서 더 빨리 증가하며, 이는 그림 14에 나타낸 축방향출력분포 차이에 의한 것이다.

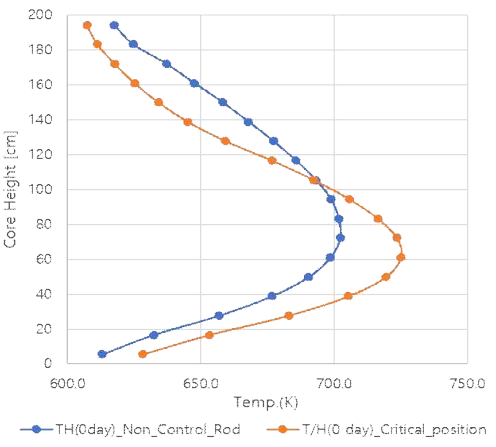
Height (cm)	With T/H(BOC) 초임계 (제어봉 미삽입)		With T/H(BOC) 임계 (제어봉 삽입)	
	Coolant Avg. Temp.(K)	Max SD	Coolant Avg. Temp.(K)	Max SD
6	563.82	(0.006)	564.01	(0.006)
17	565.37	(0.017)	566.00	(0.028)
28	567.42	(0.028)	568.53	(0.046)
39	569.86	(0.040)	571.52	(0.063)
50	572.56	(0.052)	574.75	(0.087)
61	575.36	(0.064)	578.01	(0.105)
72	578.14	(0.076)	581.15	(0.129)
83	580.83	(0.088)	584.06	(0.148)
94	583.37	(0.100)	586.68	(0.161)
106	585.72	(0.112)	588.98	(0.179)
117	587.87	(0.118)	590.92	(0.192)
128	589.79	(0.131)	592.49	(0.205)
139	591.48	(0.137)	593.72	(0.211)
150	592.94	(0.150)	594.67	(0.217)
161	594.18	(0.156)	595.40	(0.230)
172	595.17	(0.162)	595.95	(0.236)
183	595.93	(0.169)	596.36	(0.242)
194	596.50	(0.175)	596.64	(0.254)
Avg. Temp(K)	582.6	(0.099)	584.4	(0.254)



[그림 17] 축방향 감속재 온도분포

축방향 핵연료 온도분포(그림 18)는 임계상태 원자로의 경우 R3 조절계통이 상부에서부터 75cm가 삽입됨에 따라 축방향 출력분포에 비례하여 노심 하부에서 상대적으로 더 높은 핵연료 온도분포를 보인다.

Height (cm)	With T/H(BOC) 초임계 (제어봉 미삽입)		With T/H(BOC) 임계 (제어봉 삽입)	
	Fuel Avg. Temp.(K)	Max SD	Fuel Avg. Temp.(K)	Max SD
6	613.1	(0.363)	628.33	(0.649)
17	632.3	(0.426)	653.31	(0.769)
28	656.9	(0.508)	682.96	(0.913)
39	676.7	(0.568)	705.40	(1.008)
50	690.6	(0.605)	719.36	(1.052)
61	698.6	(0.633)	724.97	(1.088)
72	702.3	(0.645)	723.44	(1.082)
83	701.7	(0.652)	716.31	(1.062)
94	698.9	(0.648)	705.68	(1.019)
106	693.2	(0.633)	692.24	(0.959)
117	685.8	(0.617)	676.62	(0.872)
128	677.3	(0.594)	659.21	(0.785)
139	668.0	(0.571)	645.14	(0.739)
150	658.3	(0.549)	634.14	(0.679)
161	647.5	(0.511)	625.16	(0.622)
172	637.0	(0.475)	617.71	(0.581)
183	624.5	(0.467)	611.23	(0.523)
194	617.4	(0.439)	607.30	(0.487)
Avg. Temp(K)	665.6	(0.550)	668.3	(1.088)



[그림 18] 축방향 핵연료 온도분포

다. 선출력밀도

주기초(BOC) 초임계 및 임계상태 원자로의 최대 선출력밀도 계산결과를 표 15에 요약하였다. 제어봉이 삽입되지 않은 초임계상태 원자로의 최대첨두출력인자는 1.9187이며, 평균선출력 밀도가 7.2844kW/m이므로 최대선출력밀도는 13.9765kW/m이다. 제어봉을 삽입한 임계상태 원자로의 최대첨두출력인자는 2.5633이며, 최대선출력밀도는 18.6721kW/m이다. 제어봉을 삽입하여 임계상태로 운전 시 최대첨두출력이 커지지만, 제2절에서 언급한 MDNBR 1.4에서 최대첨두출력인자 제한치가 5.68임을 고려할 때, 선출력밀도 기준치 41.3754kW/m를 충분한 여유도를 가지고 만족함을 확인하였다.

[표 15] 원자로 상태별(초임계/임계) 주기초 선출력밀도 계산결과

구 분	제어봉 미삽입 (초임계)	제어봉 삽입 (임계)
최대선출력밀도[kW/m]	13.9765	18.6721
평균선출력밀도[kW/m]	7.2844	
최대첨두출력(Fq)	1.9187	2.5633
선출력밀도 제한치[kW/m] (MDNBR=1.4 기준, Fq = 5.68)	41.3754	

라. 임계상태 원자로 동특성 인자

주기초(BOC) 제어봉을 삽입한 임계상태 원자로의 동특성 인자를 계산한 결과는 표 16에 요약하였다.

[표 16] BOC 임계상태 원자로 동특성 인자

그룹	β_i (SD)		λ_i (SD)	
1	2.2287E-04	(9.5697E-06)	1.3357E-02	(1.4692E-08)
2	1.2145E-03	(2.3489E-05)	3.2640E-02	(7.0212E-08)
3	1.1660E-03	(2.4186E-05)	1.2096E-01	(1.2793E-07)
4	2.7068E-03	(3.5161E-05)	3.0426E-01	(1.0469E-06)
5	1.2250E-03	(2.3966E-05)	8.5347E-01	(2.8225E-06)
6	5.2737E-04	(1.5224E-05)	2.8668E+00	(9.7797E-06)
$\beta_{eff.}$	7.0625E-03 (5.6287E-05)			
즉발중성자 수명 [sec] (Prompt Neutron Lifetime)	2.2576E-05 (9.9159E-09)			

6. 주기초(BOC) 제어봉 제어능 계산

제어봉 제어능 계산을 위해서 주기초(BOC) 노심 조건에 따라 유효증배계수를 계산하였으며, McCARD 계산조건은 표 17에 정리하였다. 고온전출력(HFP) 조건에서는 실제 원자로 운전 조건인 T/H를 적용하였고, 고온영출력(HZP) 조건에서는 감속재 온도 및 핵연료 온도를 감속재 입구온도인 563.15K을 사용하였으며, 저온영출력(CZP) 조건에서는 상온인 300K을 적용하였다.

[표 17] 노심 조건별(CZP/HZP/HFP) McCARD 계산조건

구분	핵단면적 데이터	중성자원 모의개수/ 활성/수렴주기	감속재온도 (밀도)	핵연료온도
저온영출력	ENDF/ B-VII.1	50,000/300/150	300K ($1.00336 g/cm^3$)	300K
고온영출력			563.15K ($0.7462 g/cm^3$)	563.15K
고온전출력 (T/H 적용)			입구 : 563.15K ($0.7462 g/cm^3$) 출구 : 598.15K ($0.6665 g/cm^3$)	-

가. 고온전출력(HFP) 조건

HFP 조건에서 반응도 제어설비 상태별 유효증배계수 및 잉여반응도와 반응도 제어설비들의 제어봉가 계산결과를 표 18과 표 19에 정리하였다. 조절계통이 모두 삽입되었을 경우 유효증배계수는 0.97684 ± 0.00019이며 총 반응도가는 -7,517 ± 22 pcm으로 조절계통만으로도 미임계 유지가 가능한 것으로 확인되었고, 각각의 조절계통은 약 2,000pcm 내외의 반응도가를 가지는 것으로 나타났다. 또한, 제2정지계통을 제외한 모든 반응도 설비가 삽입되었을 경우 유효증배계수는 0.90521 ± 0.00019이며 총 반응도가는 -15,617 ± 26pcm이므로 원자로 정지시 충분한 정지여유도를 제공할 수 있을 것으로 판단된다. 제2정지계통의 반응도가는 -7,466 ± 28pcm으로 제2정지계통 만 삽입 시 유효증배계수는 0.97732 ± 0.00021으로도 미임계 달성이 가능한 것으로 나타났다.

[표 18] 제어봉 상태별 유효증배계수 및 잉여반응도(HFP)

제어봉 상태	유효증배계수	SD	잉여반응도 [pcm]	SD [pcm]
전 제어봉 인출	1.05425	0.00018	5146	16
R1_Full_In	1.03292	0.00017	3187	16
R1_R2_Full_In	1.00491	0.00019	489	19
R1_R2_R3_Full_In	0.97684	0.00018	-2371	19
R1_R2_R3_S1_Full_In	0.95364	0.00019	-4861	21
R1_R2_R3_S1_S2_Full_In	0.90521	0.00019	-10472	23
R1_R2_R3_S2_Full_In	0.93441	0.00019	-7019	22
R1_R3_Full_In	1.01079	0.00019	1067	19
R2_Full_In	1.03173	0.00019	3075	18
R2_R3_Full_In	1.00851	0.00020	844	20
R3_Full_In	1.03699	0.00020	3567	19
S1_Full_In	1.03755	0.00018	3619	17
S1_S2_Full_In	0.99937	0.00019	-63	19
S2_Full_In	1.02124	0.00019	2080	18
SS_Full_In	0.97732	0.00021	-2321	22

[표 19] 반응도 제어설비들의 제어봉가(HFP)

구 분		제어봉가 [pcm]	SD [pcm]
조절계통	R1	1959	25
	R1_R2	4657	26
	R1_R2_R3	7517	25
조절+정지계통	R1_R2_R3_S1	10007	26
	R1_R2_R3_S1_S2	15617	26
	R1_R2_R3_S2	12165	26
정지계통	S1	1527	25
	S1_S2	5209	26
	S2	3066	26
제2정지계통	SS	7466	28

나. 고온영출력(HZP) 조건

HZP 조건에서 감속재 입구온도 563.15K를 적용하여 계산한 결과 (표 20, 21 참조), 조절계통만 삽입 시 유효증배계수 0.99775 ± 0.00019, 총반응도가 -7,296 ± 27pcm으로 미임계가 가능하지만 여유도가 -226 ± 19pcm으로 작게 나타났다. 따라서, 조절계통과 더불어 정지계통을 삽입하여야 충분한 정지여유도를 제공할 수 있는 것으로 확인되었다.

[표 20] 제어봉 상태별 유효증배계수 및 잉여반응도(HZP)

제어봉 상태	유효증배계수	SD	잉여반응도 [pcm]	SD [pcm]
전 제어봉 인출	1.07609	0.00019	7071	16
R1_R2_R3_Full_In	0.99775	0.00019	-226	19
R1_R2_R3_S1_Full_In	0.97700	0.0002	-2354	21
R1_R2_R3_S1_S2_Full_In	0.93011	0.0002	-7514	23

[표 21] 반응도 제어설비들의 제어봉가(HZP)

구 분		제어봉가 [pcm]	SD [pcm]
조절계통	R1_R2_R3	7296	27
조절+정지계통	R1_R2_R3_S1	9425	28
	R1_R2_R3_S1_S2	14585	28

다. 저온영출력(CZP) 조건

무붕산 노심은 수용성 붕소를 사용하는 일반 상용로에 비해 큰 음의 감속재온도계수(MTC)를 가진다. 따라서, MTC와 FTC 등을 합친 효과로 CZP 조건에서 노심의 잉여반응도는 HFP 조건에서 보다 크게 증가한다. 계산결과 표 22 및 23에 나타낸 바와 같이 CZP 조건에서 잉여반응도는 14,193 ± 14pcm으로 HZP 조건의 잉여반응도인 5,146 ± 16pcm보다 약 9,000pcm 크게 나타났다. 따라서, CZP 조건에서 조절계통의 집합체를 모두 삽입하였을 경우 노심의 유효증배계수는 1.09558 ± 0.00019로서 임계점을 훨씬 초과하게 된다. 또한, 조절계통 및 정지계통을 모두 삽입하여도 유효증배계수는 1.03440 ± 0.00019로 미임계가 불가능하며, 조절계통, 정지계통 및 제2정지계통을 모두 삽입하여야 유효증배계수가 0.94510 ± 0.00021로 되어 핵연료 재장전 운전 시 정지여유도 요건인 'keff < 0.95'을 만족시킬 수 있는 것으로 나타났다. 따라서, 무붕산 노심의 반응도 제어계통 다양성 확보를 위해 설계된 제2정지계통의 역할을 고려하여 반응도 제어설비에 대한 재검토가 필요한 것으로 확인되었다.

[표 22] 제어봉 상태별 유효증배계수 및 잉여반응도(CZP)

제어봉 상태	유효증배계수	SD	잉여반응도 [pcm]	SD [pcm]
전 제어봉 인출	1.16540	0.00019	14193	14
R1_R2_R3_Full_In	1.09558	0.00019	8724	16
R1_R2_R3_S1_Full_In	1.07813	0.00019	7247	16
R1_R2_R3_S1_S2_Full_In	1.03440	0.00020	3326	19
전 제어봉 삽입 (R1_R2_R3_S1_S2_SS_Full_In)	0.94510	0.00021	-5809	24

[표 23] 반응도 제어설비들의 제어봉가(CZP)

구 분		제어봉가 [pcm]	SD [pcm]
조절계통	R1_R2_R3	5468	27
조절+정지계통	R1_R2_R3_S1	6946	27
	R1_R2_R3_S1_S2	10867	28
조절+정지+제2정지계통	R1_R2_R3_S1_S2_SS	20001	28

제 2 절 노심배치 및 반응도 제어설비 설계 최적화

1. 노심배치 및 반응도 제어설비 설계 최적화 전략

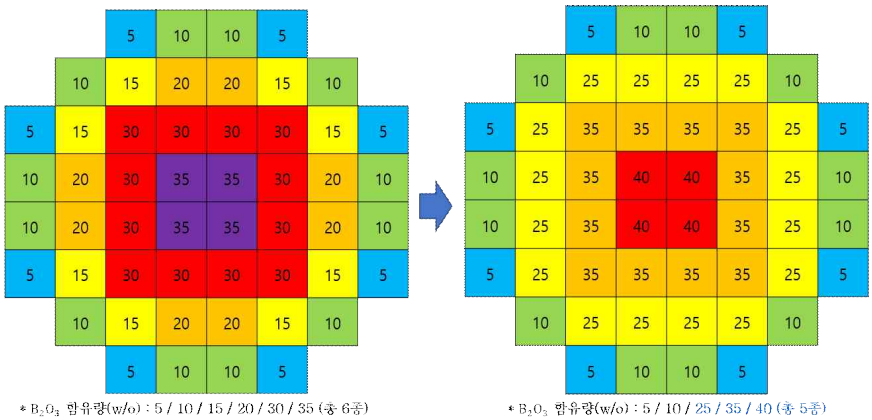
제1절에서 기존노심에 대한 임계계산 결과, 주기초(BOC) 저온영출력(CZP) 조건에서 조절계통 및 정지계통만으로는 미임계 유지가 불가능하며, 무붕산 노심의 반응도 제어계통 다양성 확보를 위해 설계된 제2정지계통까지 모두 삽입하여야만 핵연료 재장전 운전 시의 정지여유도 요건인 'keff < 0.95'를 만족시킬 수 있음을 확인함에 따라, 노심 배치의 재검토 및 반응도 제어설비 설계의 최적화가 필요한 것으로 판명되었다.

우선, 노심배치는 주기길이 5년 이상의 목표를 4~5년으로 낮추고, B_2O_3 함유량이 높은 가연성흡수봉을 사용한 핵연료집합체를 노심에 장전하여 초기반응도와 최대 잉여반응도를 줄여야 한다. 반응도 제어설비의 경우, 제2정지계통을 조절계통 및 정지계통으로 전환하여 CZP 조건에서 핵연료 재장전 운전 시의 정지여유도 요건인 'keff < 0.95'을 만족하도록 하여야 한다. 다만, ATWS(Anticipated Transient Without Scram) 대처 및 무붕산 노심 반응도 제어계통의 다양성 확보를 위해 설계되었던 제어봉 타입의 제2정지계통을 대체하여 Emergency Boron System 등을 뱔도로 고려하여야 한다.

2. 노심배치 최적화

기존노심은 B_2O_3 함유량에 따른 총 6종의 핵연료집합체를 사용하였다. 변경노심(안)은 기존노심 대비 핵연료집합체 종류는 6종에 5종으로 줄이고, 노심 최외곽에 배치된 핵연료집합체를 제외하고 모든 핵연료집합체의 B_2O_3 함유량을 높여 초기반응도와 최대 잉여반응도를 줄이고 반경방향 출력분포가 상대적으로 평탄하도록 구성하였다. 그림 19는 기존노심과 변경

노심(안)을 비교하여 나타내었다.



[기존 노심] [변경 노심(안)]

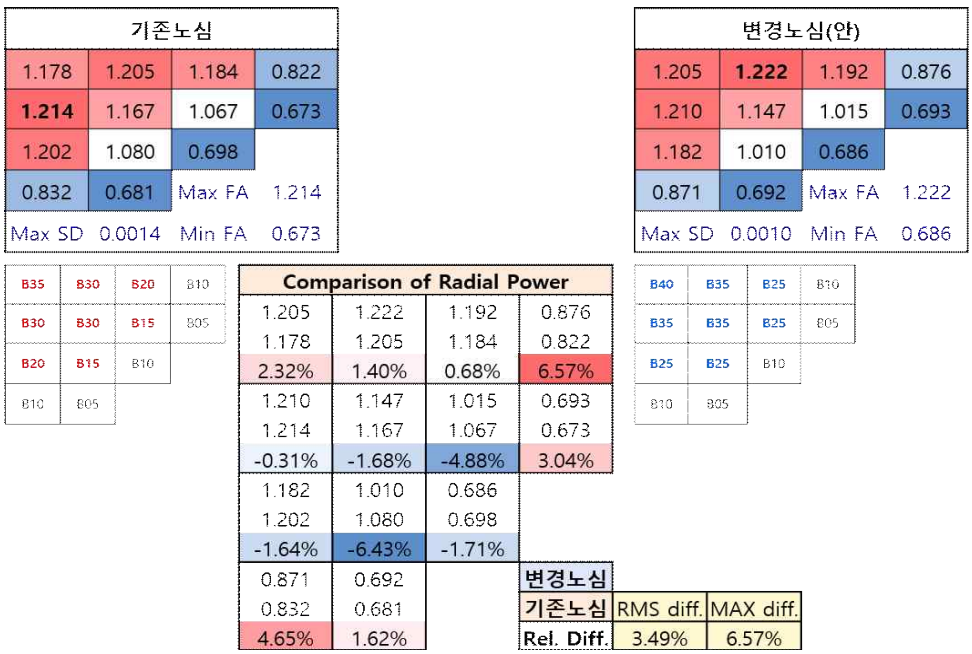
[그림 19] 노심배치 변경 전/후 비교

기존노심과 변경노심(안)의 주기초(BOC) 연소계산을 통해 초기반응도 및 출력분포를 비교하였다. McCARD 계산조건 및 유효증배계수 계산결과는 표 24에 요약하였으며 BOC에서 기존노심의 유효증배계수 1.05693 ± 0.00019은 변경노심(안)에서 1.03939 ± 0.00015으로 감소되었다. 따라서, 노심 재배치를 통해 주기초 약 1,750pcm의 반응도 여유를 확보할 수 있음을 확인하였다.

[표 24] 주기초 McCARD 계산조건 및 결과[기존 vs. 변경(안)]

구분	핵단면적 데이터	중성자원 모의개수/ 활성/수렴주기	감속재 평균온도 [K]	핵연료 평균온도 [K]	유효 증배계수 (SD)	차이 [pcm] (SD)
기존 노심	ENDF/ B-VII.1	50,000/300/150	580.15	700	1.05693 (0.00019)	1,754 (24)
변경 노심 (안)		100,000/300/150			1.03939 (0.00015)	

그림 20에는 주기초(BOC) 반경반향 출력분포를 비교하였으며 기존노심의 경우 반경방향 최대상대출력은 1.214 ± 0.0014, 최소상대출력은 0.673 ± 0.0014이고, 변경노심(안)의 경우 최대상대출력 1.222 ± 0.0010, 최소상대출력은 0.686 ± 0.0010으로 서로 유사한 수준의 출력분포를 가지는 것으로 나타났다.



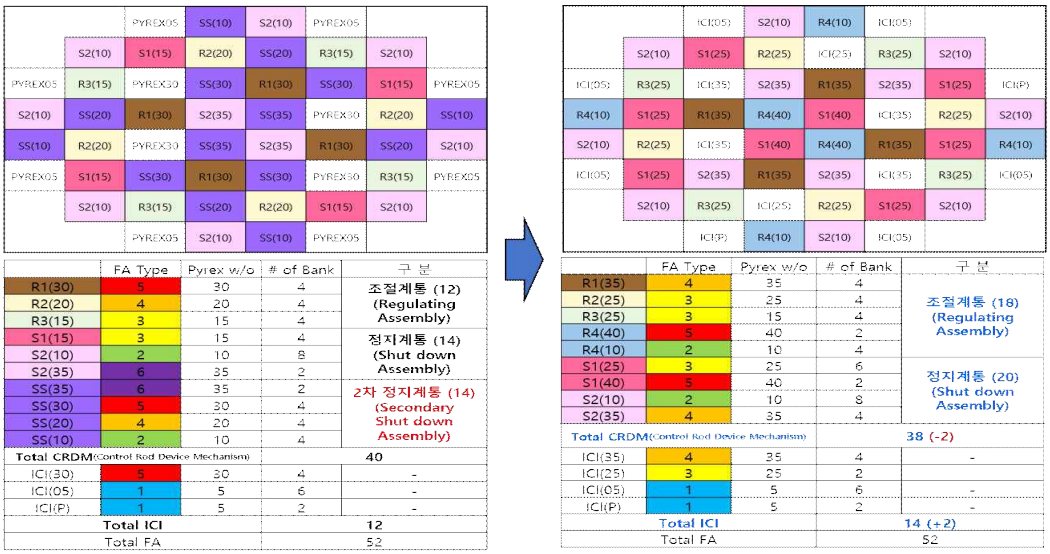
[그림 20] 주기초 반경방향 출력분포[기존노심 vs. 변경노심(안)]

3. 반응도 제어설비 설계 최적화

가. 반응도 제어설비 설계 변경(1안)

노심배치 최적화를 통하여 초기 잉여반응도를 약 1,700pcm이상 감축시킨 결과를 바탕으로 제어봉 집합체는 기존의 40개를 38개로 줄이고, ICI 집합체 2개를 추가로 확보하는 방안이다. 기존의 제2정지계통 개념을 없애고 조절계통을 기존 3개 그룹 총 12개에서 4개 그룹 총 18개로 증가시키고, 정지계통은 기존 2개 그룹 총 14개에서 20로 증가시켜 정지여유도를 확보

하고자 하였다. 변경 전과 후의 반응도 제어설비 설계를 그림 21에 요약하였다.



	FA Type	Pyrex w/o	# of Bank	구 분
R1(30)	5	30	4	조절계통 (12) (Regulating Assembly)
R2(20)	4	20	4	
R3(15)	3	15	4	
S1(15)	3	15	4	정지계통 (14) (Shut down Assembly)
S2(10)	2	10	8	
S2(35)	6	35	2	
SS(35)	6	35	2	2차 정지계통 (14) (Secondary Shut down Assembly)
SS(30)	5	30	4	
SS(20)	4	20	4	
SS(10)	2	10	4	
Total CRDM(Control Rod Device Mechanism)			40	
ICI(30)	5	30	4	-
ICI(05)	1	5	6	-
ICI(P)	1	5	2	-
Total ICI			12	
Total FA			52	

[기존 제어설비]

	FA Type	Pyrex w/o	# of Bank	구 분
R1(35)	4	35	4	조절계통 (18) (Regulating Assembly)
R2(25)	3	25	4	
R3(25)	3	15	4	
R4(40)	5	40	2	
R4(10)	2	10	4	
S1(25)	3	25	6	정지계통 (20) (Shut down Assembly)
S1(40)	5	40	2	
S2(10)	2	10	8	
S2(35)	4	35	4	
Total CRDM(Control Rod Device Mechanism)			38 (-2)	
ICI(35)	4	35	4	-
ICI(25)	3	25	2	
ICI(05)	1	5	6	-
ICI(P)	1	5	2	-
Total ICI			14 (+2)	
Total FA			52	

[변경(1안)]

[그림 21] 반응도 제어설비 설계 비교[기존 vs. 변경(1안)]

반응도 제어설비 최적화의 중점사항은 CZP 조건에서 핵연료 재장전 운전 시의 정지여유도 요건인 'keff < 0.95'을 만족하는 것이다. 따라서, McCARD 계산 정확도 향상을 위해 CZP 조건에서는 중성자모의 개수 100,000개, 활성주기 300, 비활성주기 150으로 계산하였으며, HZP와 HFP 조건은 중성자모의 개수 10,000개, 활성주기 300, 비활성주기 150으로 계산하였다. 변경(1안)의 조건별(CZP/HZP/HFP), 반응도 제어설비 상태별 유효증배계수 및 잉여반응도 계산 결과를 표 25, 26, 27에 요약하였으며, HFP 및 HZP 조건에서는 조절계통(R1/R2/R3/R4)만으로도 충분히 미임계가 가능한 것으로 확인되었다. 다만, CZP 조건에서 전 제어봉 인출 시 유효증배계수 1.15059 ± 0.00012로 'keff < 0.95'을 충족하기 위해서는 총 제어봉 반응도가가 최소 19,000pcm이 필요하지만, 변경(1안) 제어설비의 경우 전 제어봉 삽입 시 유효증배계수 0.95201 ± 0.00014로 'keff < 0.95'를 충족하지 못하며 총 제어봉 반응도가는 18,129 ± 18pcm으로 나타났다. 따

라서, 제어봉 집합체를 추가하여 총 제어봉 반응도가를 증가시키는 것이 필요한 것으로 드러났다.

[표 25] 변경(1안)의 상태별 유효증배계수 및 잉여반응도(CZP)

제어봉 상태	유효 증배계수	SD	잉여반응도 [pcm]	SD [pcm]	제어봉가 [pcm]	SD [pcm]
전 제어봉 인출	1.15059	0.00012	13088	9	-	-
R1_R2_R3_R4 Full_In	1.05918	0.00013	5587	12	7501	18
R1_R2_R3_R4_S1 Full_In	1.01100	0.00015	1088	15	12000	19
R1_R2_R3_R4_S1_S2 Full_In	0.95201	0.00014	-5041	15	18129	18

[표 26] 변경(1안)의 상태별 유효증배계수 및 잉여반응도(HZP)

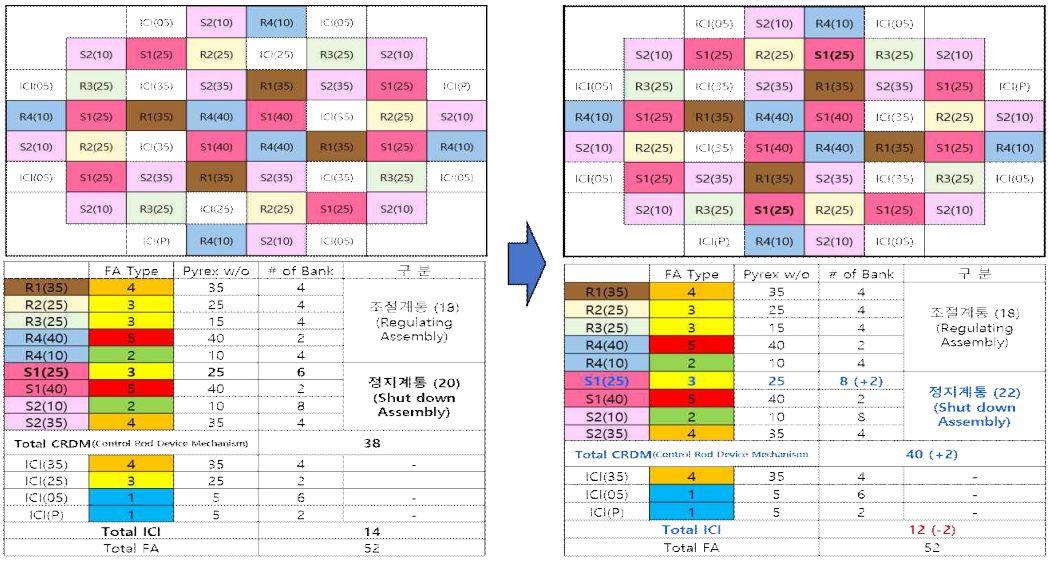
제어봉 상태	유효 증배계수	SD	잉여반응도 [pcm]	SD [pcm]	제어봉가 [pcm]	SD [pcm]
전 제어봉 인출	1.05743	0.00046	5431	41	-	-
R1_R2_R3_R4 Full_In	0.95593	0.00041	-4610	45	10041	62
R1_R2_R3_R4_S1 Full_In	0.90406	0.00042	-10612	51	16043	62
R1_R2_R3_R4_S1_S2 Full_In	0.84052	0.00041	-18974	58	24405	62

[표 27] 변경(1안)의 상태별 유효증배계수 및 잉여반응도(HFP)

제어봉 상태	유효 증배계수	SD	잉여반응도 [pcm]	SD [pcm]	제어봉가 [pcm]	SD [pcm]
전 제어봉 인출	1.03852	0.00043	3709	40	-	-
R1_R2_R3_R4 Full_In	0.93144	0.00046	-7361	53	11070	63
R1_R2_R3_R4_S1 Full_In	0.88009	0.00041	-13625	53	17334	59
R1_R2_R3_R4_S1_S2 Full_In	0.81500	0.00040	-22699	60	26409	59

나. 반응도 제어설비 설계 변경(2안)

앞서 논의한 바와 같이 CZP 조건에서 정지여유도 요건인 'keff < 0.95'를 충족하기 위해서는 총 제어봉 반응도가가 최소 19,000pcm이 필요하다. 따라서, 변경(1안)에서 확보하였던 2개의 ICI 집합체를 정지계통 집합체로 변경하여, 총 40개의 반응도 제어설비 집합체로 구성하였다. 그림 22에는 변경(1안)과 변경(2안)을 요약하여 비교하였다.



[그림 22] 반응도 제어설비 설계 비교[변경(1안) vs. 변경(2안)]

McCARD 계산조건은 CZP/HZP/HFP 모두 중성자모의 개수 100,000개, 활성주기 300, 비활성주기 150으로 계산하였으며, 표 28, 29, 30에 변경(2안)에 대한 조건별(CZP/HZP/HFP), 반응도 제어설비 상태별 유효증배계수 및 잉여반응도 계산 결과를 나타내었다. CZP 조건에서의 계산결과, 전 제어봉 삽입 시 유효증배계수 0.93515 ± 0.00014로 'keff < 0.95'를 만족하며, 총 제어봉 반응도가가 20,023 ± 18pcm으로 충분한 정지여유도를 제공할 수 있는 것으로 나타났다. HZP 조건에서는 모든 조절계통 삽입 시, 유효증배계수가 0.95538 ± 0.00013으로 조절계통만으로도 충분히 미임계가

가능하다. HFP 조건에서는 조절계통의 R1, R2 bank만으로도 유효증배계수가 0.98753 ± 0.00013이 되므로 미임계가 가능하고, 제어봉을 사용한 무붕산 SMR 노심의 임계운전 시 R1, R2 bank만 운용하여도 임계를 유지할 수 있을 것으로 판단된다.

[표 28] 변경(2안)의 상태별 유효증배계수 및 잉여반응도(CZP)

제어봉 상태	유효 증배계수	SD	잉여반응도 [pcm]	SD [pcm]	제어봉가 [pcm]	SD [pcm]
전 제어봉 인출	1.15059	0.00012	13088	9	-	-
R1_R2_R3_R4 Full_In	1.05888	0.00014	5561	12	7527	18
R1_R2_R3_R4_S1 Full_In	0.99829	0.00013	-171	13	13259	18
R1_R2_R3_R4_S1_S2 Full_In	0.93515	0.00014	-6935	16	20023	18

[표 29] 변경(2안)의 상태별 유효증배계수 및 잉여반응도(HZP)

제어봉 상태	유효 증배계수	SD	잉여반응도 [pcm]	SD [pcm]	제어봉가 [pcm]	SD [pcm]
전 제어봉 인출	1.05725	0.00014	5415	13	-	-
R1_R2_R3_R4 Full_In	0.95538	0.00013	-4670	14	10085	19
R1_R2_R3_R4_S1 Full_In	0.89077	0.00014	-12262	18	17677	20
R1_R2_R3_R4_S1_S2 Full_In	0.82474	0.00013	-21250	19	26665	19

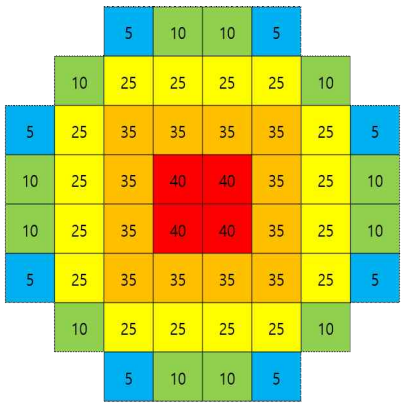
[표 30] 변경(2안)의 상태별 유효증배계수 및 잉여반응도(HFP)

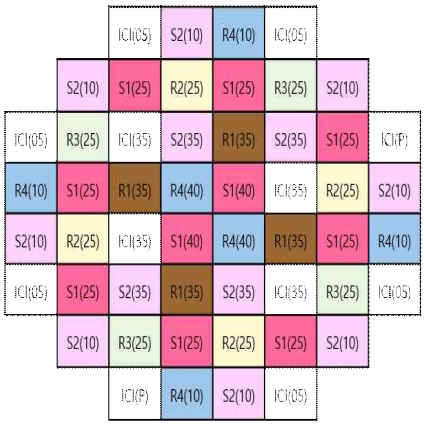
제어봉 상태	유효 증배계수	SD	잉여반응도 [pcm]	SD [pcm]	제어봉가 [pcm]	SD [pcm]
전 제어봉 인출	1.03852	0.00043	3709	40	-	-
R1_R2_R3_R4 Full_In	0.93144	0.00046	-7361	53	11070	63
R1_R2_R3_R4_S1 Full_In	0.88009	0.00041	-13625	53	17334	59
R1_R2_R3_R4_S1_S2 Full_In	0.81500	0.00040	-22699	60	26409	59

4. 최종노심 선정

앞서 논의한 노심배치 및 반응도 제어설비 설계 최적화 계산 결과를 바탕으로 최적노심을 표 31에 나타낸 바와 같이 선정하였다.

[표 31] 최적노심 정보사항

<table>
<tr><th>구 분</th><th colspan="4">내 용</th></tr>
<tr><td>노심
장전
모형</td><td colspan="2"> 

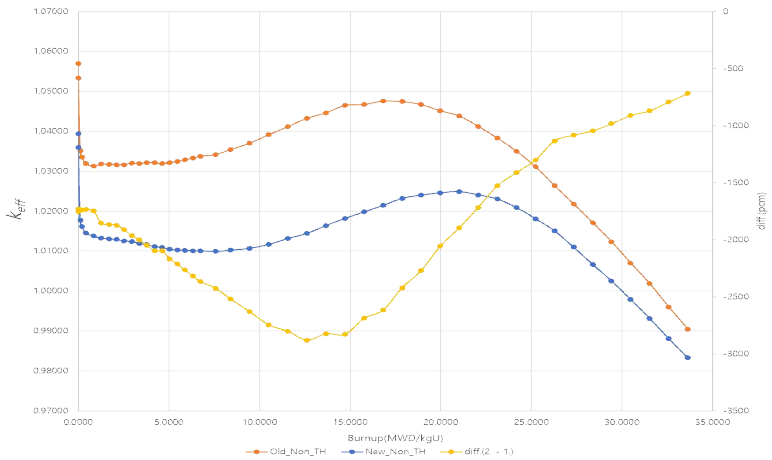
* B_2O_3 함유량(w/o) : 5 / 10 / 25 / 35 / 40 (총 5종)</td><td colspan="2"><table>
<tr><th>구분</th><th>B_2O_3 함유량 (w/o)</th><th>FA 내 핵연료봉 개수</th><th>FA 내 BA 개수</th><th>노심 내 FA 개수</th></tr>
<tr><td>40</td><td>40</td><td>240</td><td>24</td><td>4</td></tr>
<tr><td>35</td><td>35</td><td>240</td><td>24</td><td>12</td></tr>
<tr><td>25</td><td>25</td><td>240</td><td>24</td><td>16</td></tr>
<tr><td>10</td><td>10</td><td>240</td><td>24</td><td>12</td></tr>
<tr><td>5</td><td>5</td><td>240</td><td>24</td><td>8</td></tr>
<tr><td colspan="2">합 계</td><td>12480</td><td>1248</td><td>52</td></tr>
</table></td></tr>
<tr><td>반응도
제어
설비
구성</td><td colspan="2"> 
</td><td colspan="2"><table>
<tr><th>구분</th><th>제어설비 종류</th><th>FA 종류</th><th>제어 설비 개수</th></tr>
<tr><td rowspan="6">조절 계통
(Regulating Bank)</td><td>R1(35)</td><td>35</td><td>4</td></tr>
<tr><td>R2(25)</td><td>25</td><td>4</td></tr>
<tr><td>R3(25)</td><td>15</td><td>4</td></tr>
<tr><td>R4(40)</td><td>40</td><td>2</td></tr>
<tr><td>R4(10)</td><td>10</td><td>4</td></tr>
<tr><td rowspan="4">정지 계통
(Shut Down Bank)</td><td>S1(25)</td><td>25</td><td>8</td></tr>
<tr><td>S1(40)</td><td>40</td><td>2</td></tr>
<tr><td>S2(10)</td><td>10</td><td>8</td></tr>
<tr><td>S2(35)</td><td>35</td><td>4</td></tr>
<tr><td colspan="3">Total CRDM
(Control Rod Device Mechanism)</td><td>40</td></tr>
<tr><td rowspan="3">계측 설비</td><td>ICI(35)</td><td>35</td><td>4</td></tr>
<tr><td>ICI(05)</td><td>5</td><td>6</td></tr>
<tr><td>ICI(P)</td><td>5</td><td>2</td></tr>
<tr><td colspan="3">Total ICI</td><td>12</td></tr>
<tr><td colspan="3">Total FA</td><td>52</td></tr>
</table></td></tr>
<tr><td colspan="2">* UO_2 밀도 : 10.257 g/cm^3
* Pyrex 밀도 : 2.3 g/cm^3</td><td>* 총 핵연료봉 개수 : 12480
* 총 Pyrex 개수 : 1248</td><td colspan="2">* 총 우라늄 질량 :
11,893kg</td></tr>
</table>

열수력 궤환효과를 고려한 최적노심의 노심특성 계산 수행에 앞서 감속재 평균온도 580.65K, 핵연료 평균온도 700K을 적용하여 연소계산을 수행하였다. 표 32에 요약한 계산 결과와 같이 주기길이는 기존노심의 5.1903 ± 0.0006 년에서 4.8864 ± 0.0009 년으로 약 3.7개월 감소하였지만 새로운 노심설계 요건의 주기길이인 4~5년을 충분히 만족하는 것으로 나타났다.

[표 32] 변경 전 / 후 노심 주기길이 비교

구 분	기존 노심		최종 노심	
	일 (SD)	연 (SD)	일 (SD)	연 (SD)
주기길이	1894.44 (0.22)	5.1903 (0.0006)	1783.55 (0.34)	4.8864 (0.0009)

그림 23에는 기존노심과 최적노심의 임계도 계산 결과를 비교하였다. 출력운전 시작 직후 제논의 증가로 초기 잉여반응도는 급격히 감소하고 제논 평형상태에 도달한 이후는 우라늄 연소에 따라 핵연료에 의한 잉여반응도는 서서히 감소하게 된다. 하지만, 우라늄 연소와 함께 가연성흡수체인 붕소도 동시에 연소되므로 노심의 총 잉여반응도는 오히려 서서히 증가하다가 EFPD 3년 전 후에 최고값에 도달한 후 주기 말로 갈수록 붕소 연소가 줄어들면서 빠르게 감소하는 것을 알 수 있다.



[그림 23] 기존노심 vs. 최적노심 임계도 비교

제 4 장 열수력 궤환효과를 고려한 최적노심 연소계산

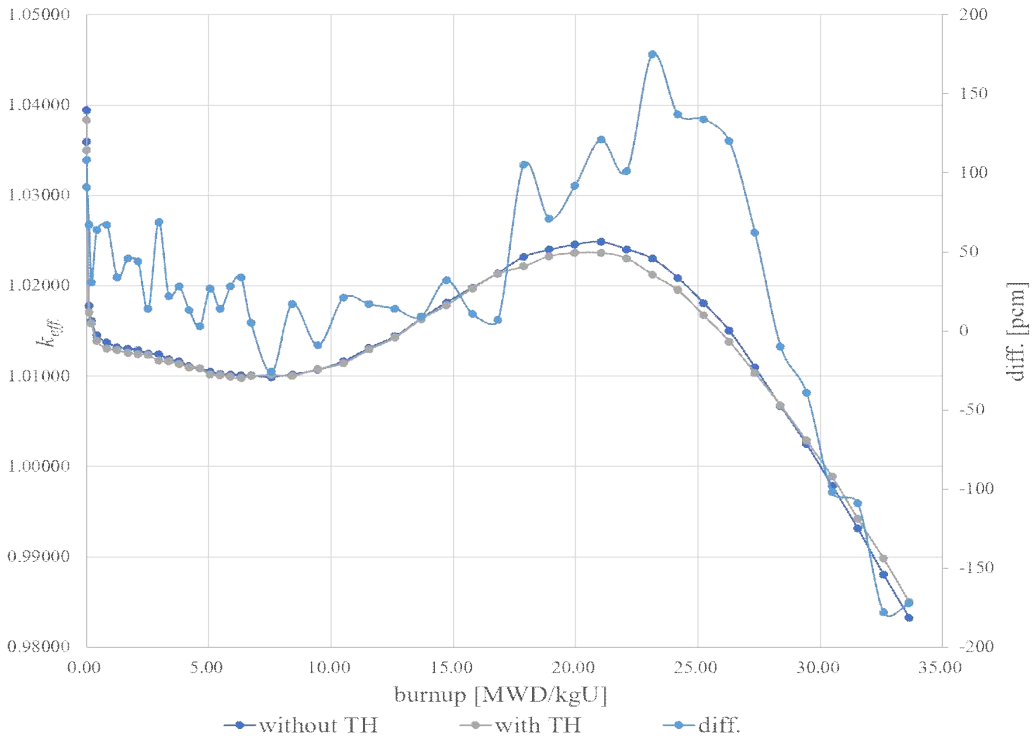
무붕산 SMR 노심의 열수력 조건을 바탕으로 표 33에 제시된 바와 같이 열수력 궤환효과를 고려한 McCRAD 연소계산[11, 12]을 수행하였다.

[표 33] McCARD 연소계산 조건

구분	핵단면적 데이터	중성자원 모의개수/ 활성/수렴주기	감속재 온도 (입구/출구)	핵연료 온도
without T/H	ENDF/ B-VII.1	100,000/300/150	580.15K	700K
with T/H		100,000/300/150	563.15 / 598.15K	-

제 1 절 임계도 계산

그림 24는 열수력 궤환효과 미적용 연소계산(without T/H)과 이를 적용한 연소계산(with T/H)의 연소도에 따른 유효증배계수 변화를 보여준다. 두 계산 결과 모두 유사한 경향을 나타내며 without T/H의 경우 주기길이는 4.8864 ± 0.0009년이고 with T/H의 경우 4.9177 ± 0.0006년으로 약 10일 정도 with T/H가 길게 계산되었다. 주기초 유효증배계수는 without T/H의 경우는 1.03939 ± 0.00015이고 with T/H의 경우는 1.03831 ± 0.00013으로 모두 최대 잉여반응도가5,000pcm 미만으로 계산되었으며, 표 34에는 특정 연소도에서의 유효증배계수 값을 비교하였다.



[그림 24] 연소도에 따른 유효증배계수 비교
(without T/H vs. with T/H)

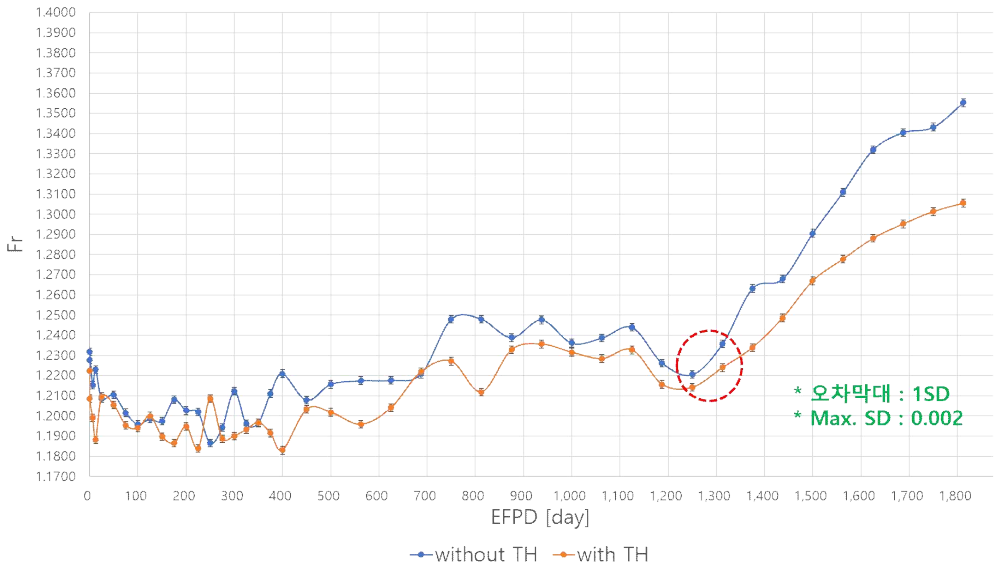
[표 34] 특정 연소도에서의 유효증배계수 비교

구분		without T/H	with T/H	Diff. [pcm]
연소도 [MWD/kgU]	EFPD [일]	유효증배계수 (SD)	유효증배계수 (SD)	
0	0 (BOC)	1.03939 (0.00015)	1.03831 (0.00013)	108
0.84	50 (IOC)	1.01373 (0.00014)	1.01306 (0.00013)	67
16.82	1000 (MOC1)	1.02140 (0.00013)	1.02133 (0.00012)	7
23.12	1375 (MOC2)	1.02301 (0.00012)	1.02126 (0.00012)	175
29.43	1750 (EOC)	1.00248 (0.00012)	1.00287 (0.00012)	-39

제 2 절 출력분포 계산

1. 반경방향 출력분포

그림 25에는 EFPD별 반경방향 상대출력(Fr)값을 나타내었다. 이 그림에서 보여주는 것 처럼 주기말로 갈수록 Fr값이 커지는 경향을 확인할 수 있다. 또한, 연소가 시작되고 Fr값은 증가·감소를 반복하다가 1300일경부터 빠르게 증가함을 확인할 수 있다. 이는 가연성흡수봉의 붕소 연소가 줄어드는 시점(1300일경)부터 우라늄 연소가 빠르게 시작되면서 Fr값이 증가하는데 영향을 준 것으로 판단된다.



[그림 25] EFPD별 Fr 비교 (without T/H vs. with T/H)

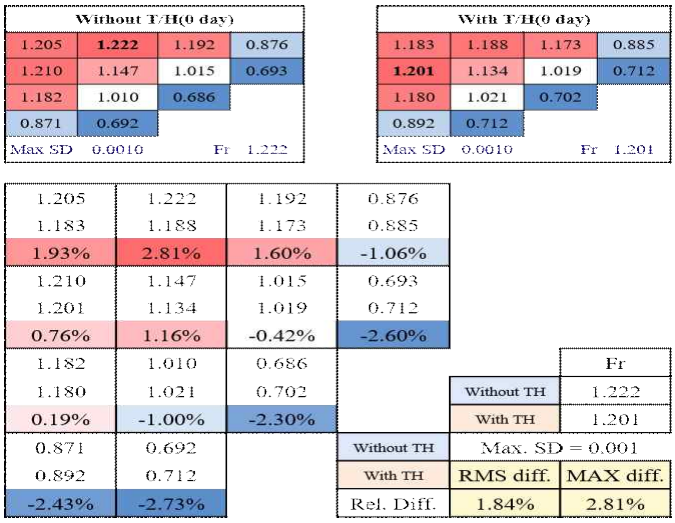
표 35에는 특정 EFPD에서의 Fr 및 RMS 오차, 최대상대오차를 비교하였다. Fr의 가장 큰 값 1.334 ± 0.001은 without T/H 경우의 EFPD 1750일(EOC)에서 나타났고, Fr의 가장 작은 값 1.179 ± 0.001은 with T/H 경우의 EFPD 50일(IOC)에서 나타났다. RMS 차이는 최소 0.94%에서 최대 3.04% 차이가 있었다.

[표 35] 특정 EFPD에서의 Fr, RMS, Max.상대오차 비교

구분		유효전출력가동일수 [일]				
		0 (BOC)	50 (IOC)	1000 (MOC1)	1375 (MOC2)	1750 (EOC)
Fr	without T/H(SD)	1.222 (0.001)	1.190 (0.001)	1.229 (0.001)	1.249 (0.001)	1.334 (0.001)
	with T/H(SD)	1.201 (0.001)	1.179 (0.001)	1.211 (0.001)	1.218 (0.001)	1.297 (0.001)
RMS 차이		1.84%	1.45%	0.94%	2.24%	1.84%
Max. 상대오차		2.81%	3.04%	1.74%	3.35%	2.86%

가. BOC

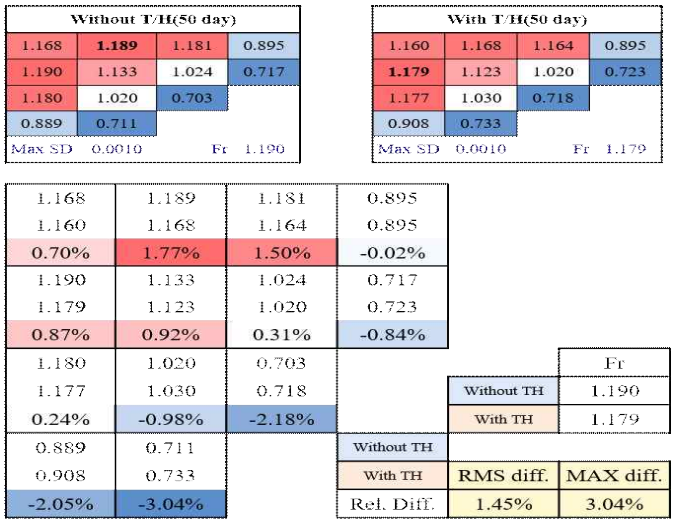
그림 26에는 BOC에서의 반경방향 출력분포를 비교하였으며, without T/H 경우의 최대상대출력은 1.222 ± 0.001, 최소상대출력은 0.692 ± 0.001이고, with T/H 경우의 최대상대출력은 1.201 ± 0.001, 최소상대출력은 0.702 ± 0.001로써 열수력 궤환 효과를 적용한 계산 결과가 상대적으로 평탄한 출력분포를 보여주고 있다. 두 계산의 RMS 오차는 1.84%이며, 최대오차는 노심 중앙 집합체에서 2.81%의 차이를 보이고 있다.



[그림 26] 반경방향 출력분포 비교(BOC)

나. IOC (EFPD : 50일)

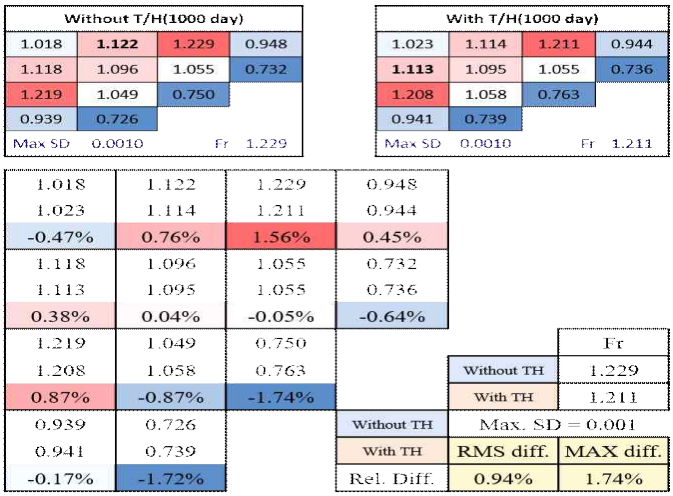
그림 27에는 IOC에서의 반경방향 출력분포를 비교하였으며, without T/H 경우의 최대상대출력은 1.190 ± 0.001, 최소상대출력은 0.703 ± 0.001 이고, with T/H 경우의 최대상대출력은 1.179 ± 0.001, 최소상대출력은 0.718 ± 0.001로써 BOC와 마찬가지로 열수력 궤환효과를 적용한 계산결과가 상대적으로 평탄한 출력분포를 보여주고 있으며, 5개의 특정 EFPD 결과 중에서 가장 낮은 Fr 값을 보이고 있다.



[그림 27] 반경방향 출력분포 비교(IOC)

다. MOC1 (EFPD : 1000일)

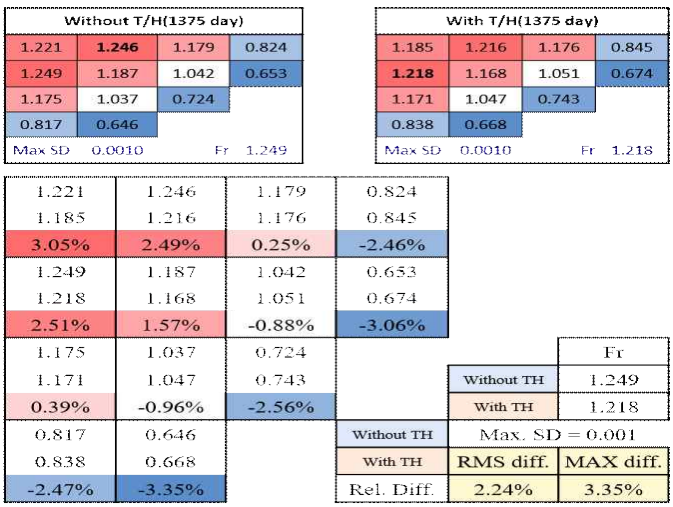
BOC/IOC에서의 최대상대출력 핵연료집합체는 노심 중앙의 바로 옆 핵연료집합체(B_2O_3 농축도 35 w/o)에서 나타났으나, 그림 28에 나타낸 MOC1 시점에서는 첨두출력의 위치가 노심 외곽으로 이동하는 현상을 확인할 수 있다. 또한, IOC 이후 반경방향 Fr이 상대적으로 증가하는 것을 알 수 있다.



[그림 28] 반경방향 출력분포 비교(MOC1)

라. MOC2 (EFPD : 1375일)

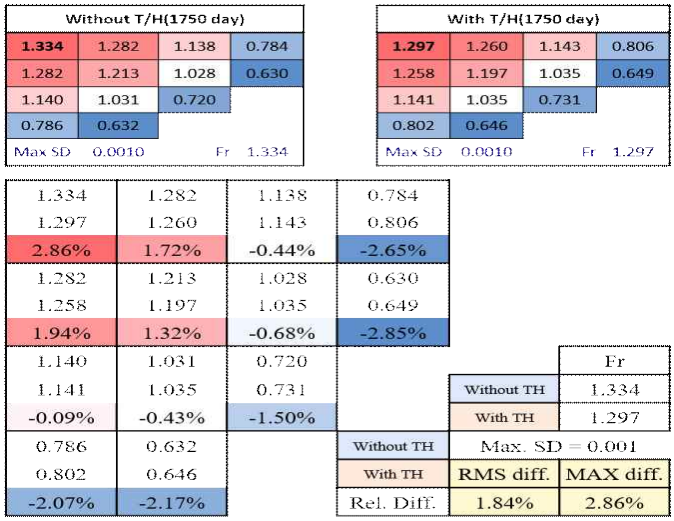
그림 29에 나타낸 바와 같이, MOC1에서 노심 외곽으로 이동했던 첨두출력 위치가 다시 노심 내부로 이동함을 알 수 있다. 또한, without T/H 경우의 최대상대출력은 1.246 ± 0.001, 최소상대출력은 0.646 ± 0.001이고, with T/H 경우의 최대상대출력은 1.218 ± 0.001, 최소상대출력은 0.674 ± 0.001으로 점점 출력분포 평탄함이 감소되고 있다.



[그림 29] 반경방향 출력분포 비교(MOC1)

마. EOC (EFPD : 1750일)

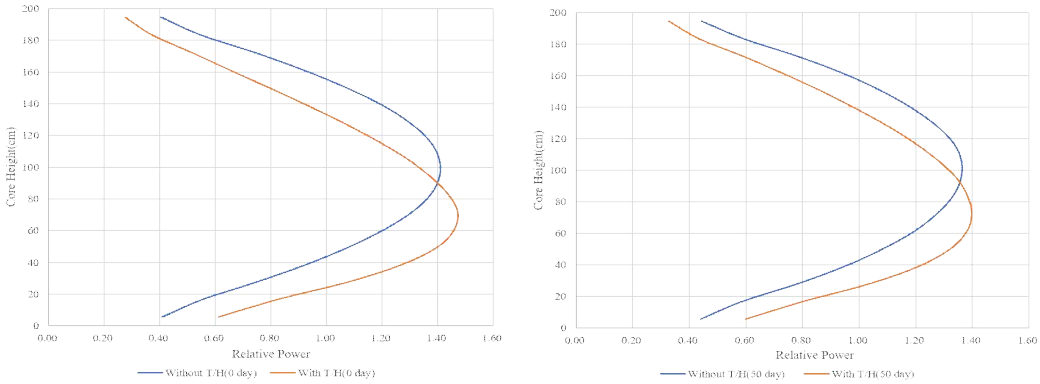
그림 30에 나타낸 바와 같이, EOC에서는 두 가지 경우 모두 가장 큰 반경방향 최대상대출력 값인 1.334 ± 0.001(Without T/H), 1.279 ± 0.001(with T/H)이 나타나고 첨두출력 위치도 노심 중앙으로 이동하였다.



[그림 30] 반경방향 출력분포 비교(EOC)

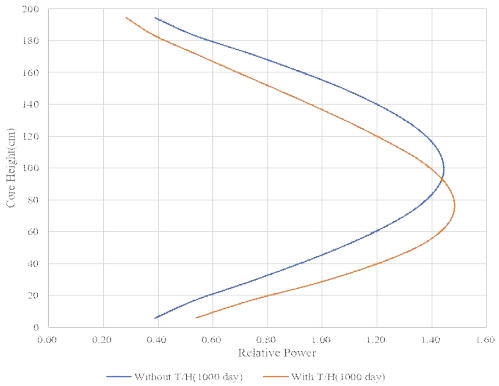
2. 축방향 출력분포

그림 31에는 EFPD별 축방향 출력분포를 비교하였으며, BOC에서 MOC1까지 with T/H 경우의 cosine 형상 그래프가 상대적으로 노심 하부 쪽으로 더 많이 치우쳐짐을 알 수 있다. 특이한 점은 일반 상용로 대비 cosine 형상의 출력분포가 상대적으로 주기 중반 이후까지 길게 유지되는 것으로 나타났다. 이는 상대적으로 높은 함량의 B_2O_3 가연성흡수체가 주기 말까지 우라늄 연소와 함께 동시에 연소되다가 주기 말에 이르러 붕소 연소가 줄어지는 시점인 MOC2부터 축방향 중심 부분에 평탄한 출력분포가 나타나는 것을 알 수 있다.

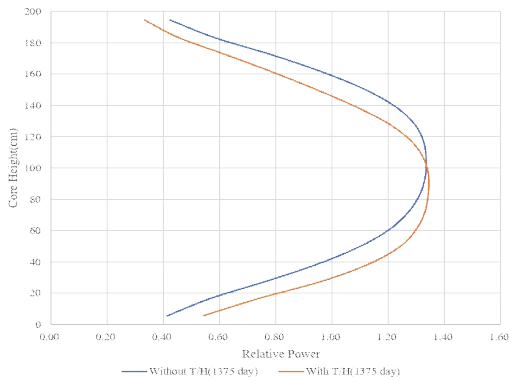


(a) BOC (0 day)

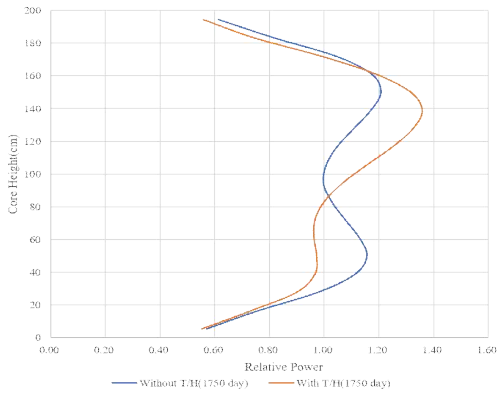
(b) IOC (50 day)



(c) MOC1 (1000 day)



(d) MOC2 (1375 day)

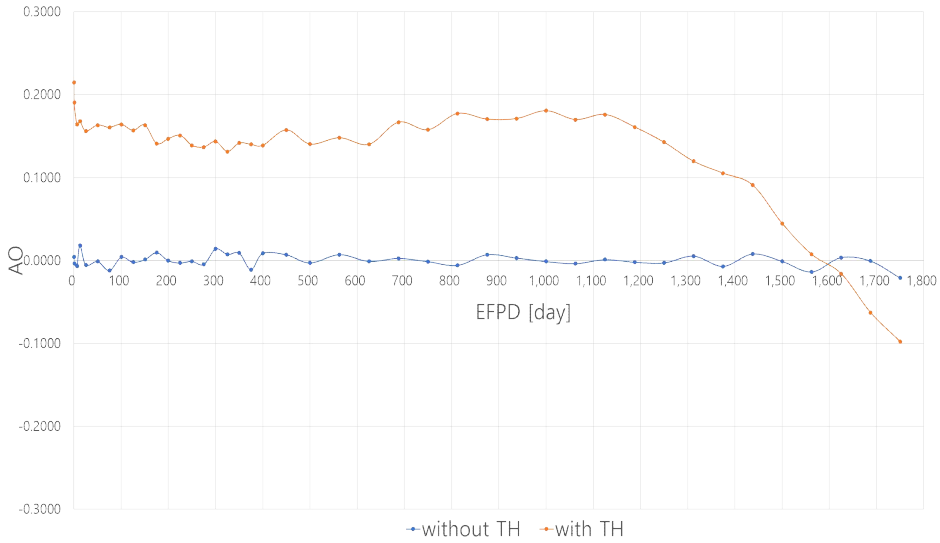


(e) EOC (1750 day)

[그림 31] 특정 EFPD에서의 축방향 출력분포 비교

그림 32는 EFPD별 Axial Offset(AO) 값을 비교하였으며, with T/H의 경우 열수력 궤환효과에 의해 축방향 출력 분포가 아래쪽으로 치우쳐 있는 것을 확인할 수 있다. 연소가 진행됨에 따라 출력이 높은 노심 하부의 핵연료가 상대적으로 많이 연소되어 축방향 출력분포가 주기 말로 갈수록

상부로 치우쳐지는 것을 확인할 수 있다. without T/H의 경우 EOC에서 가장 큰 AO 값 -0.0210이 나타났으며, with T/H의 경우 BOC에서 가장 큰 값 0.2149이 나타났다. 표 36에는 특정 EFPD에서의 AO 값을 정리하였다.



[그림 32] EFPD별 AO 비교 (without T/H vs. with T/H)

[표 36] 특정 EFPD에서의 Axial Offset 값 비교

구분		without T/H	with T/H
연소도 [MWD/kgU]	유효전출력 가동일수 [일]	AO (SD)	AO (SD)
0	0 (BOC)	0.0044 (0.0011)	0.2149 (0.0011)
0.84	50 (IOC)	-0.0012 (0.0011)	0.1632 (0.0011)
16.82	1000 (MOC1)	-0.0013 (0.0011)	0.1806 (0.0011)
23.12	1375 (MOC2)	-0.0071 (0.0011)	0.1052 (0.0011)
29.43	1750 (EOC)	-0.0210 (0.0011)	-0.0979 (0.0011)

기타 최적노심에 대한 온도분포, 첨두출력계수, 기타 핵특성인자 계산 결과는 '제6장 원자로 임계운전모의에 따른 노심특성 계산'에서 논의할 예정이다.

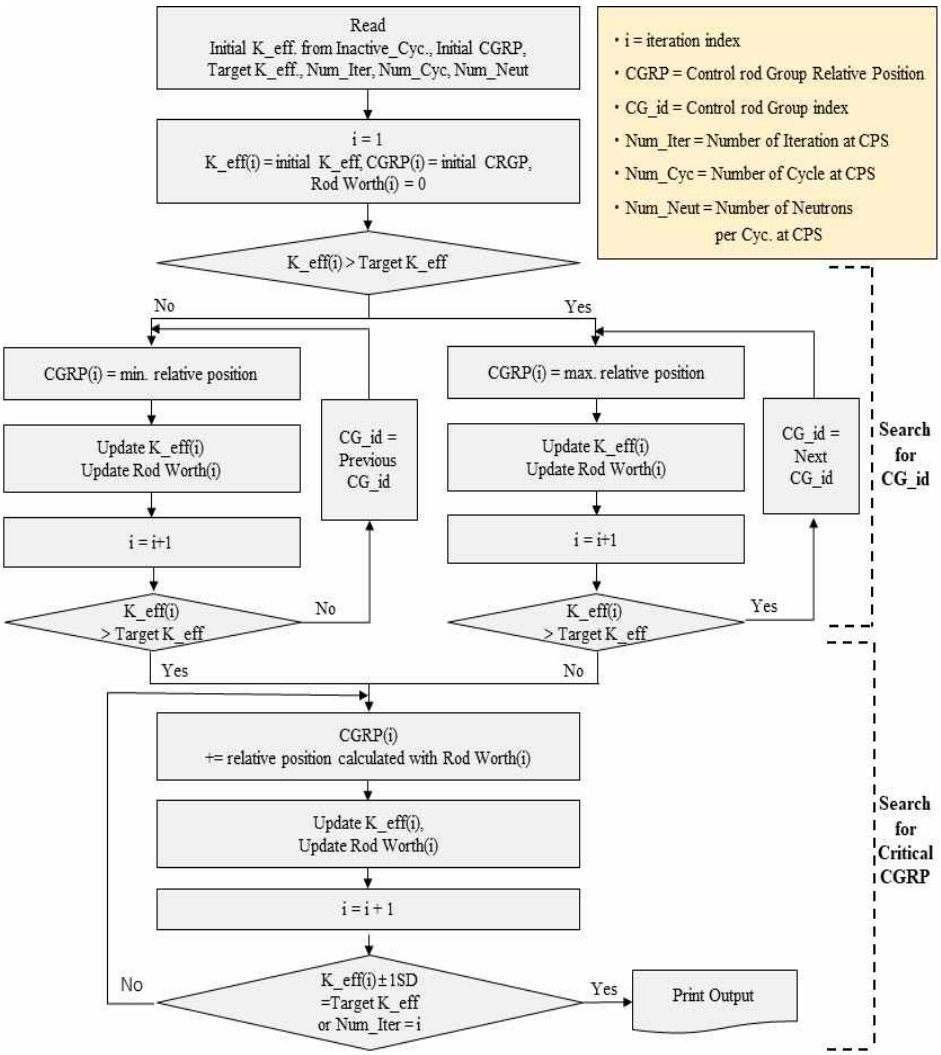
제 5 장 원자로 임계운전모의 연소계산

무붕산 SMR노심의 경우 실제 원자로 운전 시 임계를 유지하는 수단은 제어봉이 유일하다. 따라서, 실제 무붕산 SMR노심의 운전조건과 동일하게 제어봉을 운용하여 원자로 임계를 유지한 상태로 연소계산을 한 '원자로 임계운전모의' 계산을 통해 주기길이, 출력분포, 각종 핵적 특성인자에 대한 계산이 필요하다. 따라서, McCARD 연소계산에 'CPS(Critical Position Search)' 기능을 구현하여 임계운전모의 연소계산이 가능하도록 하였다.

CPS 기능은 McCARD 고유치(유효증배계수) 계산에서 수렴 주기가 끝나면, 수렴된 유효증배계수 값(Initial K_eff from Inactive Cycle)과 목표 유효증배계수(Target K_eff)를 비교하여 임계를 맞추기 위해 사용되는 제어봉 그룹(CG_id)을 선정하는 단계(Search for CG_id)를 우선 수행한다. Initial K_eff가 Target K_eff보다 클 경우를 예로 들면, 제어봉 그룹의 상대위치(CGRP : Control rod Group Relative Position)를 완전 삽입한 상대위치(max. relative position)로 하여 K_eff 및 제어봉가(Rod Worth)를 업데이트한다. 업데이트된 K_eff가 Target K_eff보다 클 경우, CG_id를 다음 제어봉 그룹(Next CG_id)으로 변경하여 위 단계를 다시 수행하고, 업데이트된 K_eff가 Target K_eff보다 작을 경우, 현재 CG_id에서 임계 제어봉 위치를 찾는 단계(Search for Critical CGRP)로 넘어간다.

Search for Critical CGRP 단계에서는 위 단계에서 업데이트된 Rod Worth로 Tartget K_eff를 맞추기 위한 CGRP를 계산하여 K_eff와 Rod Worth를 업데이트 한다. 업데이트된 K_eff가 Target K_eff와 비교하여 표준편차(1SD) 이내로 들어오거나, 반복 인자(iteration i)가 총 반복횟수(Number of Iteration at CPS)와 같아지면 CPS 계산을 종료하고 활성주기

계산을 진행한다. 그림 33에 McCARD에 구현된 CPS 계산 알고리즘을 도식화하였고 표 37은 CPS McCARD 계산 조건을 요약하였다.



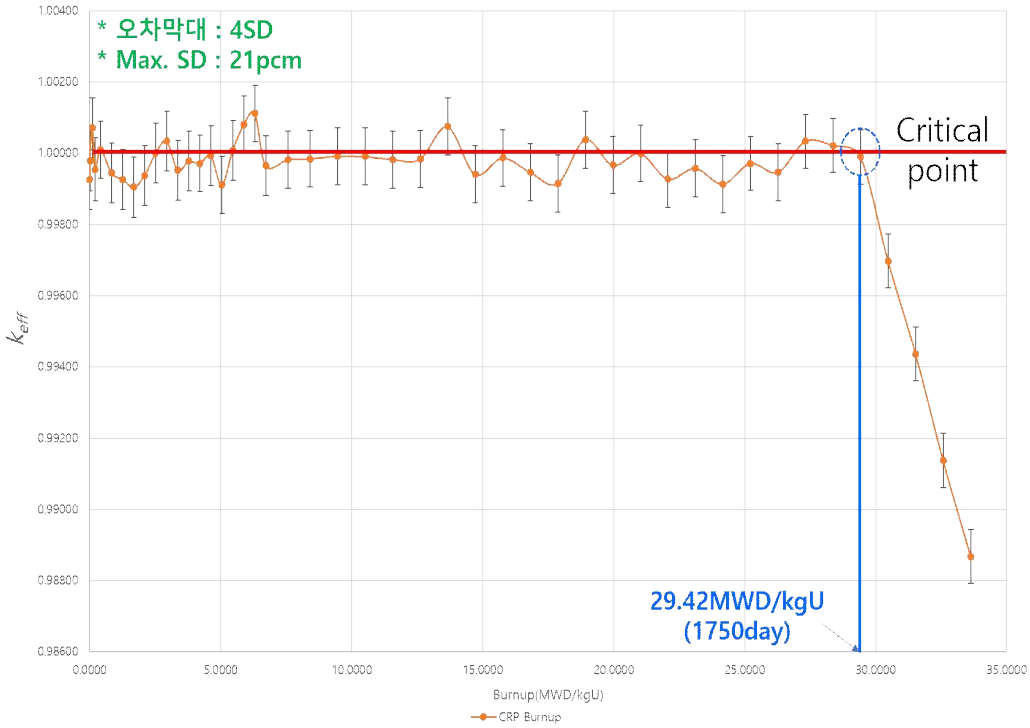
[그림 33] CPS(Critical Position Search) 계산 흐름도

[표 37] McCARD 계산 조건

구분	핵단면적데이터	중성자원모의개수/ 활성/수렴주기	T/H 계산	CPS 계산
without CPS	ENDF/B-VII.1	100,000/300/150	적용	미적용
with CPS		4,000/3,000/200	적용	적용

제 1 절 임계도 계산

그림 34에는 임계운전모의 연소계산에서 산출된 연소도에 따른 유효증배계수 변화를 나타내었다. 계산시간을 고려하여, CPS계산 결과에서 산출한 유효증배계수 값이 '1.0'을 기준으로 4×SD(표준편차) 이내까지 허용하였으며, 총 42개의 연소도에서 수행된 연소계산 결과 5개의 연소계산 결과가 4×SD를 초과하였나, 대부분의 계산 결과가 임계값에 근접함을 확인하였다.



[그림 34] 연소도에 따른 유효증배계수 변화

제어봉을 운용하여 연소계산을 수행할 경우, 그림 34에 나타난 바와 같이 EFPD 1750일 경에 모든 제어봉이 인출되어 유효증배계수는 0.99990 ± 0.00019로 임계가 유지되며 이 결과를 토대로 주기길이를 추정할 수 있다. 최적노심을 실제 조건처럼 제어봉을 운용하여 임계를 유지하여 운전할 경

우 주기길이는 약 4.79년(1750일)으로 계산된다. 이는 제어봉을 운용하지 않았을 경우의 주기길이인 4.9176 ± 0.0006년(1794.96 ± 0.23일)보다 약 45일 짧아진다. 이는 출력운전 중 제어봉이 삽입된 핵연료집합체에서 가연성흡수봉의 붕소 대신 제어봉의 붕소가 연소되어 주기말의 연소되지 않은 가연성흡수봉 내 붕소가 많아져 주기길이가 짧아지는 것으로 판단된다. 표 38에는 특정 연소도에서의 유효증배계수를 비교하였다.

[표 38] 특정 연소도에서의 유효증배계수

구분		without CPS	with CPS	Diff. [pcm]
연소도 [MWD/kgU]	EFPD [일]	유효증배계수 (SD)	유효증배계수 (SD)	
0	0 (BOC)	1.03831 (0.00013)	0.99926 (0.00021)	3905
0.84	50 (IOC)	1.01306 (0.00013)	0.99945 (0.00021)	1361
16.82	1000 (MOC1)	1.02133 (0.00013)	0.99947 (0.00021)	2186
23.12	1375 (MOC2)	1.02126 (0.00013)	0.99958 (0.00021)	2168
29.43	1750 (EOC)	1.00287 (0.00013)	0.99990 (0.00021)	297

제 2 절 원자로 임계 제어봉 위치 계산

표 39에 나타낸 바와 같이, 제논평형 이전까지(1~2step)는 약 3,500pcm 이상의 잉여반응도로 인해 조절계통 그룹의 R1, R2 Bank가 동시에 삽입되어 임계를 유지하지만, 제논평형 이후(EFPD : 6.25일 이후)에는 R1 Bank 삽입만으로도 임계유지가 가능하다. 이후 주기말까지 R1 Bank만으로 임계를 유지하며, EFPD 1750일에는 모든 제어봉이 인출됨을 알 수 있다.

[표 39] EFPD에 따른 원자로 임계 제어봉 위치

Step	EFPD	without CPS		with CPS		Excess Reactivity (Rod worth) [pcm]	R2 Bank	R1 Bank
		keff	S/D	keff	S/D		insert [cm]	insert [cm]
1	**0.00**	**1.03831**	**0.00013**	**0.99926**	**0.00021**	**3905**	**125.6**	**200.0**
2	**0.25**	**1.03503**	**0.00014**	**0.99978**	**0.00021**	**3525**	**108.0**	**200.0**
3	6.25	1.01705	0.00014	1.00071	0.00021	1634	0	136.8
4	12.50	1.01585	0.00014	0.99955	0.00022	1630	0	131.4
5	25.00	1.01389	0.00014	1.00011	0.00020	1378	0	122.4
6	**50.00**	**1.01306**	**0.00013**	**0.99945**	**0.00021**	**1361**	**0**	**120.6**
7	75.00	1.01288	0.00014	0.99927	0.00021	1361	0	120.6
8	100.00	1.01260	0.00014	0.99905	0.00021	1355	0	122.4
9	125.00	1.01244	0.00012	0.99938	0.00021	1306	0	118.8
10	150.00	1.01235	0.00013	1.00001	0.00021	1234	0	113.4
11	175.00	1.01172	0.00012	1.00034	0.00021	1138	0	113.4
12	200.00	1.01166	0.00014	0.99953	0.00021	1213	0	117.0
13	225.00	1.01136	0.00013	0.99978	0.00021	1158	0	115.2
14	250.00	1.01096	0.00012	0.99972	0.00020	1124	0	115.2
15	275.00	1.01086	0.00014	0.99993	0.00021	1093	0	109.8
16	300.00	1.01019	0.00013	0.99912	0.00020	1107	0	113.4
17	325.00	1.01013	0.00013	1.00009	0.00021	1004	0	109.8
18	350.00	1.00991	0.00013	1.00081	0.00020	910	0	104.4
19	375.00	1.00975	0.00013	1.00112	0.00020	863	0	106.2
20	400.00	1.01001	0.00013	0.99965	0.00021	1036	0	113.4
21	450.00	1.01015	0.00014	0.99982	0.00020	1033	0	115.2
22	500.00	1.01004	0.00013	0.99985	0.00020	1019	0	117.0
23	562.50	1.01079	0.00013	0.99992	0.00020	1087	0	120.6
24	625.00	1.01143	0.00013	0.99991	0.00020	1152	0	127.8
25	687.50	1.01296	0.00012	0.99983	0.00020	1313	0	133.2
26	750.00	1.01427	0.00014	0.99984	0.00020	1443	0	142.2
27	812.50	1.01627	0.00012	1.00075	0.00020	1552	0	144.0
28	875.00	1.01784	0.00013	0.99941	0.00020	1843	0	154.8
29	937.50	1.01969	0.00013	0.99987	0.00020	1982	0	154.8
30	**1000.00**	**1.02133**	**0.00012**	**0.99947**	**0.00020**	**2186**	**0**	**154.8**
31	1062.50	1.02215	0.00012	0.99915	0.00020	2300	0	154.8
32	1125.00	1.02328	0.00012	1.00039	0.00020	2289	0	145.8
33	1187.50	1.02365	0.00012	0.99967	0.00020	2398	0	142.2
34	1250.00	1.02366	0.00012	1.00000	0.00020	2366	0	133.2
35	1312.50	1.02305	0.00012	0.99928	0.00020	2377	0	127.8
36	**1375.00**	**1.02126**	**0.00012**	**0.99958**	**0.00020**	**2168**	**0**	**118.8**
37	1437.50	1.01951	0.00013	0.99914	0.00020	2037	0	108.0
38	1500.00	1.01675	0.00012	0.99972	0.00019	1703	0	90.0
39	1562.50	1.01384	0.00012	0.99947	0.00020	1437	0	75.6
40	1625.00	1.01034	0.00013	1.00034	0.00019	1000	0	54.0
41	1687.50	1.00676	0.00012	1.00022	0.00019	654	0	30.6
42	**1750.00**	**1.00287**	**0.00012**	**0.9999**	**0.00019**	**297(0)**	**0**	**0.0**

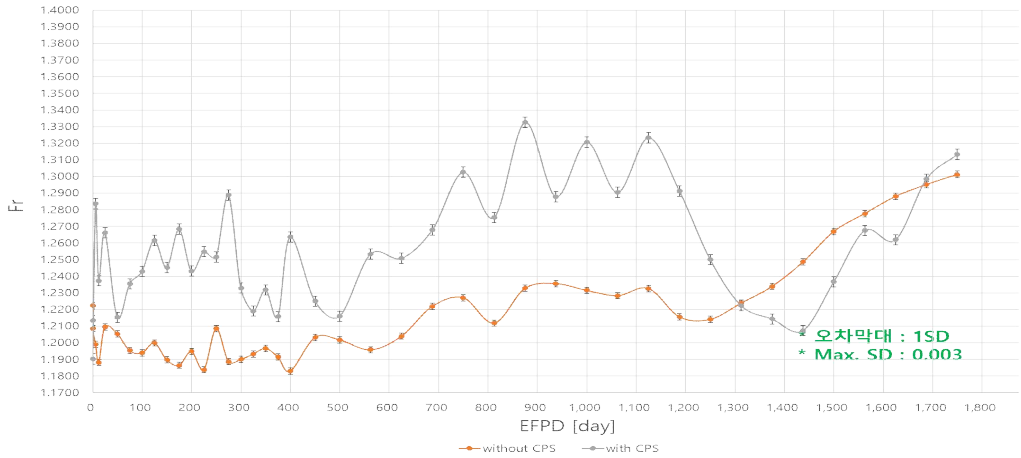
제 6 장 원자로 노심특성 계산 및 분석

본 6장에서는 임계운전모의 연소계산에 따른 노심특성을 계산하고 분석하였다. 제1절(첨두출력계수), 제2절(출력분포 계산), 제3절(온도분포 계산)은 전체 연소도에 대한 연소계산 결과에서 도출하였다. 제4절(제어봉 제어능 계산)에서 6절(동특성인자 계산)까지 계산은 CPS 옵션을 적용한 연소계산으로 얻은 각 연소도별 핵연료 조성정보(McCARD STD file)를 바탕으로, 특정 연소도(BOC/IOC/MOC/EOC)에서 McCARD Restart 옵션을 이용해 임계상태 원자로의 주요 핵특성 인자를 계산하였다.

제 1 절 첨두출력계수 계산

1. 반경방향 첨두출력계수(Fr)

그림 35에는 EFPD에 따른 Fr값을 나타내었다. 이 그림에서 보여주는 바와 같이 with CPS 연소계산(임계상태)의 Fr값은 BOC부터 1100일경까지 큰 값으로 유지되다가 감소하기 시작하지만 1450일경부터 주기말까지는 증가하는 경향을 보인다. 반면 without CPS(초임계상태) 결과에서는 핵연료집합체 내 가연성흡수봉의 붕소 연소가 줄어드는 시점(1300일경)부터 우라늄 연소가 빠르게 시작되면서 Fr값이 증가한다. 하지만 with CPS (임계상태)의 경우, 연소기간 중 제어봉 사용에 따른 제어봉 내 B_4C 흡수물질의 연소로 핵연료집합체 내 가연성흡수봉의 붕소 연소가 줄어드는 시점이 1450일경까지 늦춰지는 것으로 추정된다. 표 40에는 전체 EFPD에서 초임계 및 임계상태 노심의 반경방향 첨두출력계수(Fr) 값을 정리하였다.



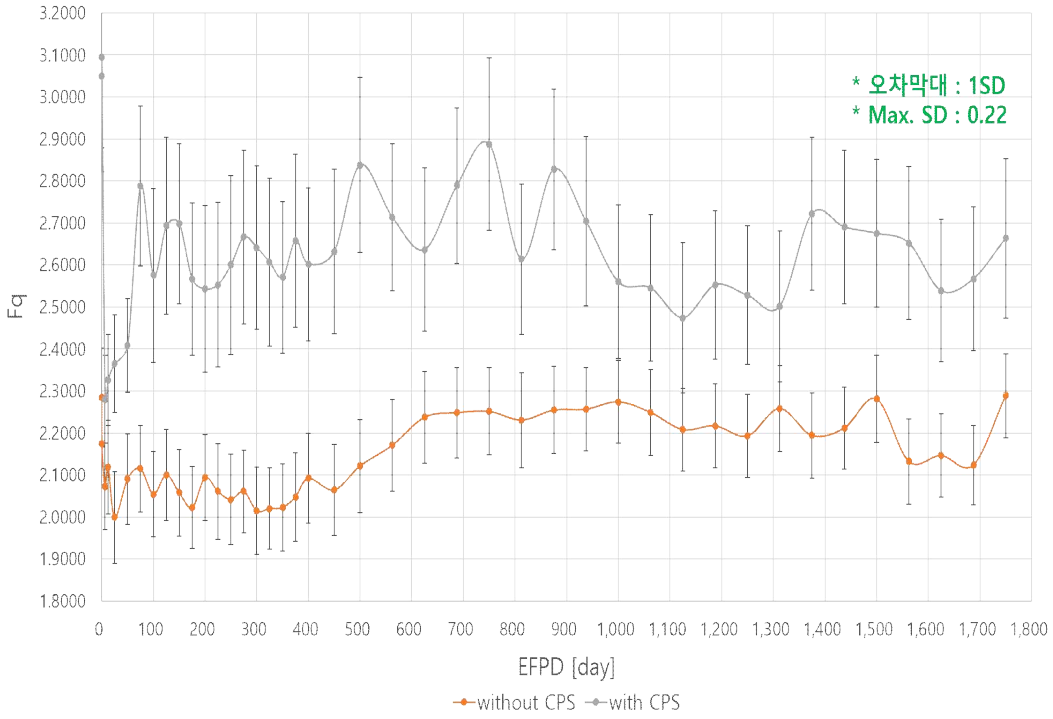
[그림 35] EFPD에 따른 Fr 비교 (without CPS vs. with CPS)

[표 40] 전체 EFPD에서 Fr 비교(without CPS vs. with CPS)

Step	EFPD	without CPS		with CPS	
		Fr	S/D	Fr	S/D
1	0.00	1.2223	0.0019	1.2133	0.0031
2	0.25	1.2086	0.0019	1.1903	0.0031
3	6.25	1.1991	0.0019	1.2837	0.0032
4	12.50	1.1882	0.0019	1.2374	0.0031
5	25.00	1.2095	0.0019	1.2662	0.0031
6	50.00	1.2055	0.0019	1.2153	0.0031
7	75.00	1.1953	0.0019	1.2354	0.0031
8	100.00	1.1940	0.0019	1.2429	0.0031
9	125.00	1.1999	0.0019	1.2616	0.0031
10	150.00	1.1898	0.0019	1.2453	0.0031
11	175.00	1.1865	0.0019	1.2683	0.0031
12	200.00	1.1948	0.0019	1.2432	0.0031
13	225.00	1.1838	0.0019	1.2548	0.0031
14	250.00	1.2086	0.0019	1.2516	0.0031
15	275.00	1.1887	0.0019	1.2887	0.0031
16	300.00	1.1901	0.0019	1.2330	0.0031
17	325.00	1.1932	0.0019	1.2191	0.0031
18	350.00	1.1967	0.0019	1.2319	0.0031
19	375.00	1.1915	0.0019	1.2158	0.0031
20	400.00	1.1830	0.0019	1.2636	0.0031
21	450.00	1.2033	0.0019	1.2250	0.0031
22	500.00	1.2018	0.0019	1.2160	0.0030
23	562.50	1.1958	0.0019	1.2534	0.0031
24	625.00	1.2040	0.0019	1.2508	0.0031
25	687.50	1.2219	0.0019	1.2679	0.0031
26	750.00	1.2271	0.0019	1.3026	0.0032
27	812.50	1.2118	0.0019	1.2753	0.0031
28	**875.00**	1.2328	0.0019	**1.3327**	**0.0032**
29	937.50	1.2356	0.0019	1.2879	0.0032
30	1000.00	1.2315	0.0019	1.3206	0.0032
31	1062.50	1.2284	0.0019	1.2904	0.0032
32	1125.00	1.2327	0.0019	1.3234	0.0032
33	1187.50	1.2156	0.0019	1.2913	0.0032
34	1250.00	1.2142	0.0019	1.2500	0.0031
35	1312.50	1.2239	0.0019	1.2224	0.0031
36	1375.00	1.2339	0.0019	1.2143	0.0030
37	1437.50	1.2486	0.0019	1.2074	0.0030
38	1500.00	1.2670	0.0019	1.2367	0.0030
39	1562.50	1.2777	0.0019	1.2675	0.0031
40	1625.00	1.2881	0.0019	1.2620	0.0031
41	1687.50	1.2952	0.0019	1.2984	0.0031
42	**1750.00**	**1.3013**	**0.0020**	1.3133	0.0031

2. 첨두출력계수(Fq)

Fq는 McCARD 계산 시 핵연료봉을 축방향으로 18개로 나누어 1개의 cel 단위로 정하였고, 전체 cel 중 가장 크게 계산된 값과, 전체 cel의 평균값을 통해 계산하였으며, 그림 36에는 EFPD에 따른 Fq 값을 나타내었다. 이 그림에서 보여주는 바와 같이 with CPS 연소계산(임계상태)의 Fq값은 without CPS(초임계상태)의 Fq값보다 전체적으로 높게 계산되었다. 이는 임계유지를 위해 운용되는 제어봉에 의해 축방향 출력분포 불균형에 의한 것으로 추정되며, Fq 최대값은 without CPS 경우는 EOC에서 2.2886 ± 0.1178로 확인되었고, with CPS 경우는 BOC에서 3.0938 ± 0.2280으로 나타났다. 표 41에는 전체 EFPD에서 초임계 및 임계상태 노심의 첨두출력계수(Fq) 값을 정리하였다.



[그림 36] EFPD에 따른 Fq 비교 (without CPS vs. with CPS)

[표 41] 전체 EFPD에서 Fq 비교(without CPS vs. with CPS)

Step	EFPD	without CPS		with CPS	
		Fq	S/D	Fq	S/D
1	**0.00**	2.2843	0.1178	**3.0938**	**0.2142**
2	0.25	2.1751	0.1055	3.0494	0.2280
3	6.25	2.0729	0.1032	2.2805	0.1043
4	12.50	2.1188	0.1120	2.3266	0.1087
5	25.00	1.9989	0.1091	2.3649	0.1158
6	50.00	2.0904	0.1075	2.4078	0.1114
7	75.00	2.1149	0.1032	2.7881	0.1910
8	100.00	2.0544	0.1020	2.5749	0.2069
9	125.00	2.1007	0.1083	2.6935	0.2100
10	150.00	2.0576	0.1032	2.6979	0.1901
11	175.00	2.0221	0.0975	2.5664	0.1816
12	200.00	2.0937	0.1018	2.5428	0.1980
13	225.00	2.0608	0.1142	2.5531	0.1955
14	250.00	2.0420	0.1072	2.5997	0.2132
15	275.00	2.0611	0.0981	2.6663	0.2063
16	300.00	2.0146	0.1034	2.6414	0.1938
17	325.00	2.0203	0.0963	2.6061	0.1996
18	350.00	2.0227	0.1036	2.5705	0.1808
19	375.00	2.0475	0.1050	2.6579	0.2058
20	400.00	2.0922	0.1067	2.6018	0.1822
21	450.00	2.0644	0.1090	2.6320	0.1954
22	500.00	2.1213	0.1111	2.8381	0.2087
23	562.50	2.1708	0.1090	2.7137	0.1745
24	625.00	2.2375	0.1093	2.6366	0.1948
25	687.50	2.2483	0.1081	2.7890	0.1849
26	750.00	2.2514	0.1039	2.8877	0.2050
27	812.50	2.2308	0.1130	2.6140	0.1788
28	875.00	2.2544	0.1037	2.8278	0.1914
29	937.50	2.2567	0.0987	2.7043	0.2011
30	1000.00	2.2743	0.0978	2.5598	0.1826
31	1062.50	2.2490	0.1024	2.5453	0.1745
32	1125.00	2.2082	0.0984	2.4741	0.1791
33	1187.50	2.2170	0.0995	2.5522	0.1769
34	1250.00	2.1927	0.0991	2.5278	0.1650
35	1312.50	2.2582	0.1017	2.5014	0.1791
36	1375.00	2.1941	0.1010	2.7220	0.1819
37	1437.50	2.2116	0.0973	2.6903	0.1828
38	1500.00	2.2813	0.1041	2.6753	0.1759
39	1562.50	2.1323	0.1014	2.6523	0.1821
40	1625.00	2.1465	0.0995	2.5386	0.1696
41	1687.50	2.1235	0.0939	2.5667	0.1708
42	**1750.00**	**2.2886**	**0.0997**	2.6634	0.1902

위에서 계산된 Fq를 바탕으로 표 42에 나타낸 바와 같이 특정 EFPD에서의 최대선출력밀도를 산출하였다. 계산 결과, without CPS 경우의 최대선출력밀도는 16.6714 ± 0.7260kW/m이며, with CPS 경우의 최대선출력밀도는 22.5367 ± 1.5602kW/m로써 두 값 모두 MDNBR = 1.4 기준 최대선출

력밀도 제한치 41.3754kW/m 이하를 만족한다.

[표 42] 전체 EFPD에서 선출력밀도 비교(without CPS vs. with CPS)

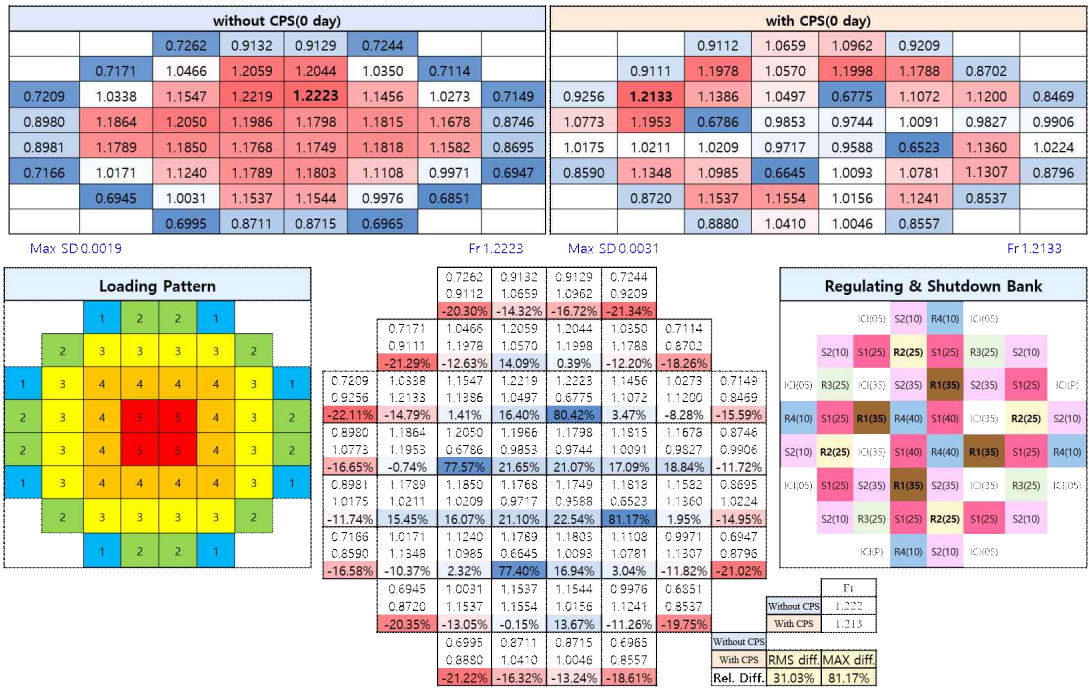
Step	EFPD	without CPS		with CPS	
		최대선출력밀도[kW/m]	S/D	최대선출력밀도[kW/m]	S/D
1	0.00	16.6398	0.8583	22.5367	1.5602
2	0.25	15.8440	0.7684	22.2128	1.6611
3	6.25	15.1000	0.7517	16.6120	0.7598
4	12.50	15.4343	0.8162	16.9482	0.7918
5	25.00	14.5605	0.7944	17.2266	0.8436
6	50.00	15.2275	0.7830	17.5394	0.8112
7	75.00	15.4058	0.7518	20.3093	1.3916
8	100.00	14.9651	0.7429	18.7567	1.5073
9	125.00	15.3022	0.7887	19.6202	1.5298
10	150.00	14.9886	0.7518	19.6522	1.3845
11	175.00	14.7301	0.7100	18.6948	1.3227
12	200.00	15.2516	0.7418	18.5225	1.4423
13	225.00	15.0119	0.8321	18.5975	1.4242
14	250.00	14.8745	0.7809	18.9374	1.5527
15	275.00	15.0138	0.7150	19.4227	1.5031
16	300.00	14.6754	0.7533	19.2412	1.4117
17	325.00	14.7164	0.7017	18.9838	1.4542
18	350.00	14.7340	0.7544	18.7247	1.3171
19	375.00	14.9151	0.7651	19.3615	1.4992
20	400.00	15.2401	0.7769	18.9523	1.3272
21	450.00	15.0381	0.7942	19.1722	1.4235
22	500.00	15.4525	0.8091	20.6737	1.5203
23	562.50	15.8128	0.7940	19.7674	1.2710
24	625.00	16.2988	0.7959	19.2057	1.4187
25	687.50	16.3776	0.7876	20.3161	1.3466
26	750.00	16.4002	0.7565	21.0353	1.4935
27	812.50	16.2499	0.8231	19.0414	1.3024
28	875.00	16.4223	0.7556	20.5989	1.3939
29	937.50	16.4385	0.7190	19.6989	1.4652
30	1000.00	16.5671	0.7124	18.6463	1.3299
31	1062.50	16.3824	0.7457	18.5408	1.2713
32	1125.00	16.0851	0.7171	18.0221	1.3044
33	1187.50	16.1496	0.7246	18.5915	1.2889
34	1250.00	15.9727	0.7216	18.4138	1.2021
35	1312.50	16.4495	0.7407	18.2211	1.3048
36	1375.00	15.9824	0.7358	19.8280	1.3253
37	1437.50	16.1100	0.7085	19.5975	1.3318
38	1500.00	16.6182	0.7586	19.4879	1.2815
39	1562.50	15.5322	0.7386	19.3204	1.3267
40	1625.00	15.6356	0.7247	18.4924	1.2353
41	1687.50	15.4684	0.6839	18.6970	1.2443
42	1750.00	16.6714	0.7260	19.4014	1.3856
평균선출력밀도 [kW/m]				7.2844	
선출력밀도 제한치 [kW/m] (MDNBR=1.4 기준, Fq = 5.68)				41.3754	

제 2 절 출력분포 계산

1. 반경방향 출력분포

가. BOC(임계 제어봉 위치 : R1 모두 삽입, R2 125.6cm 삽입)

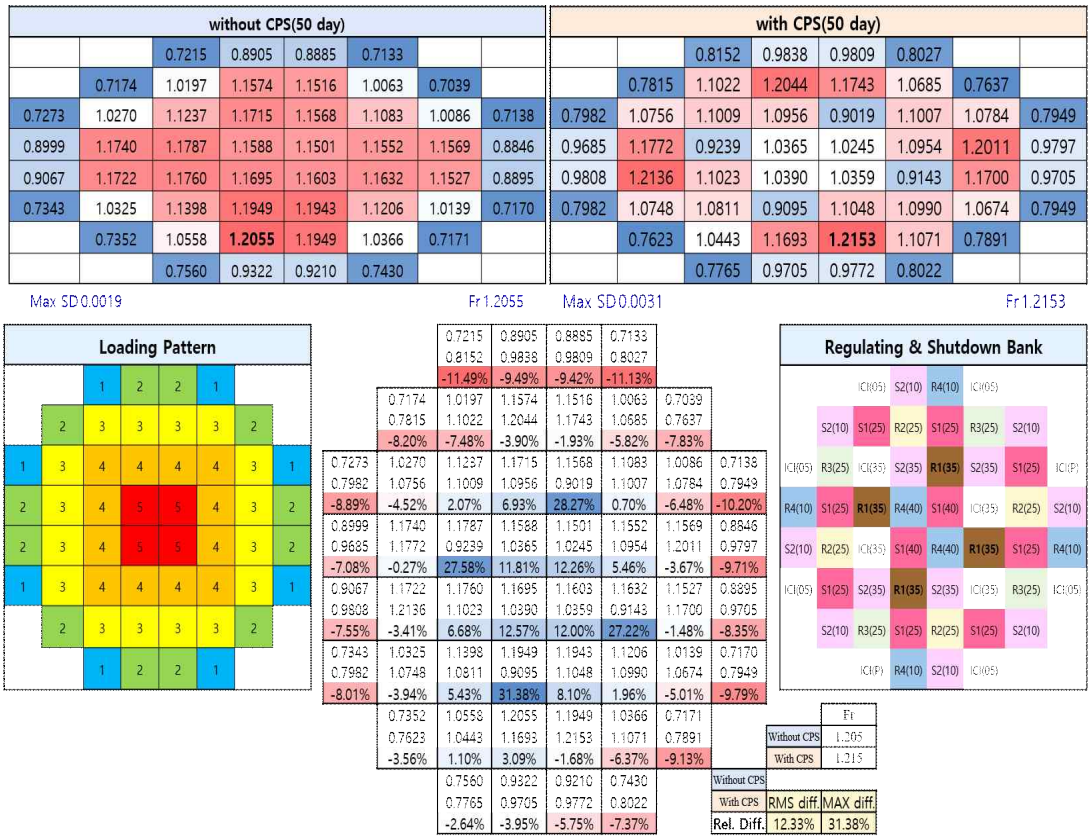
그림 37에 나타낸 바와 같이 BOC의 임계상태일 경우 Fr 값은 1.2133 ± 0.0031으로 초임계상태의 Fr 값인 1.2223 ± 0.0019 보다 상대적으로 작은 값을 가진다. 초기반응도 제어를 위해 R1 bank가 모두 삽입된 핵연료집합체에서 노심 외곽의 핵연료집합체 보다 낮은 상대출력 값(0.6523 ~ 0.6786 ± 0.0031)을 보이며, 제어봉이 삽입된 핵연료집합체(R1, R2) 주변의 핵연료집합체(R3, S1)에서 높은 상대출력을 보인다. RMS 차이는 31.03%이며, R1 bank가 모두 삽입된 핵연료집합체에서 77.40 ~ 81.17%의 최대 상대오차를 보인다.



[그림 37] BOC 반경방향 출력분포 비교(초임계 vs. 임계)

나. IOC (EFPD : 50일 / 임계 제어봉 위치 : R1 120.6cm 삽입)

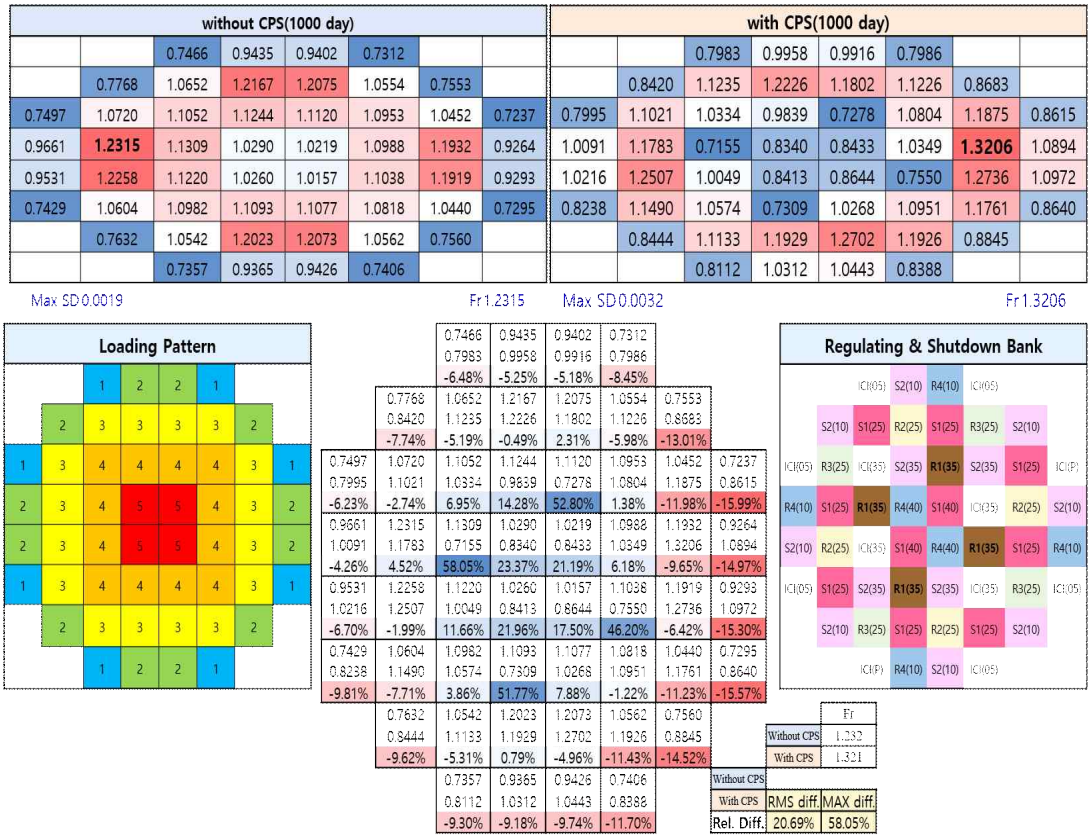
그림 38에 나타낸 바와 같이 IOC에서는 초기반응도 제어를 위해 R1 bank가 완전히 삽입되었다가 부분 인출된 핵연료집합체에서 상대출력값이 BOC에 비해 증가하며(0.6523 ~ 0.6786 ± 0.0031 → 0.9019 ~ 0.9239 ± 0.0031), 첨두출력은 R3 핵연료집합체에서 R2 핵연료집합체로 이동하였고, 제어봉이 삽입된 핵연료집합체(R1) 주변의 핵연료집합체(R2, S1)에서 높은 상대출력을 보인다.



[그림 38] IOC 반경방향 출력분포 비교(초임계 vs. 임계)

다. MOC1 (EFPD : 1000일 / 임계 제어봉 위치 : R1 154.8cm 삽입)

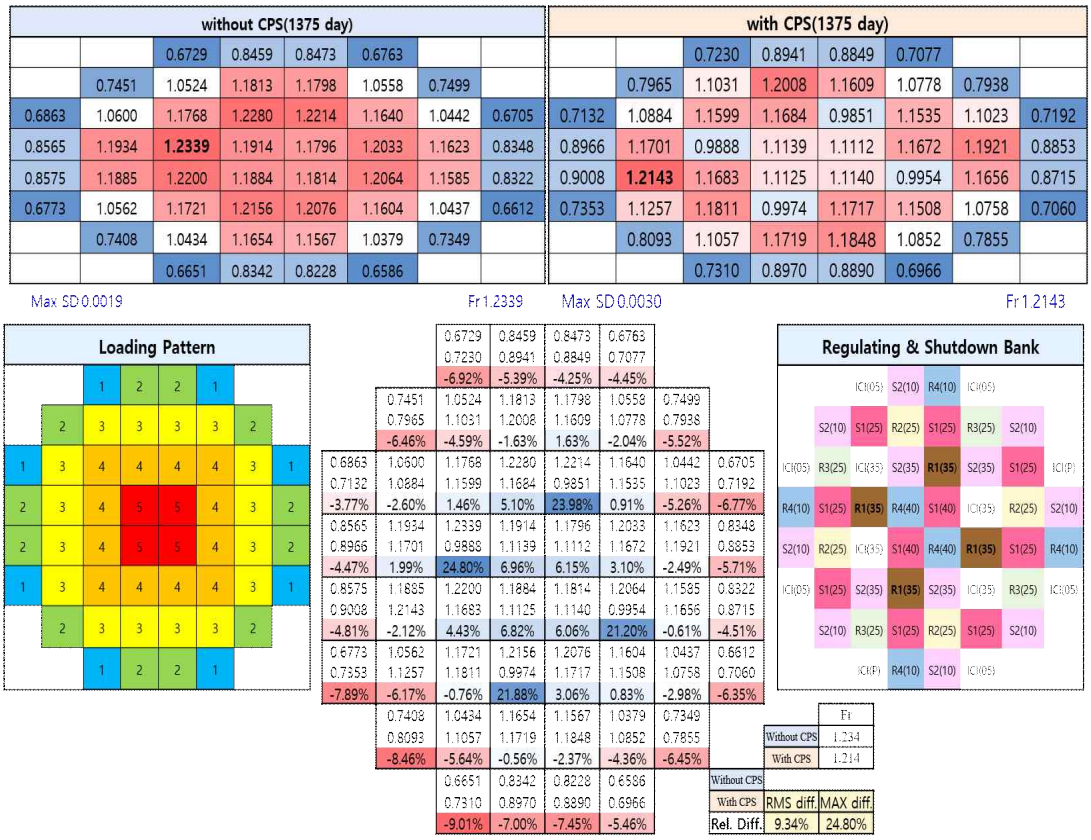
그림 39에 나타낸 바와 같이 MOC1에서는 첨두출력이 제어봉이 삽입된 핵연료집합체(R1) 주변의 핵연료집합체(R2, S1)에서 나타나고 제어봉이 삽입된 핵연료집합체의 상대출력은 낮게 나타났다.



[그림 39] MOC1 반경방향 출력분포 비교(초임계 vs. 임계)

라. MOC2 (EFPD : 1375일 / 임계 제어봉 위치 : R1 118.8cm 삽입)

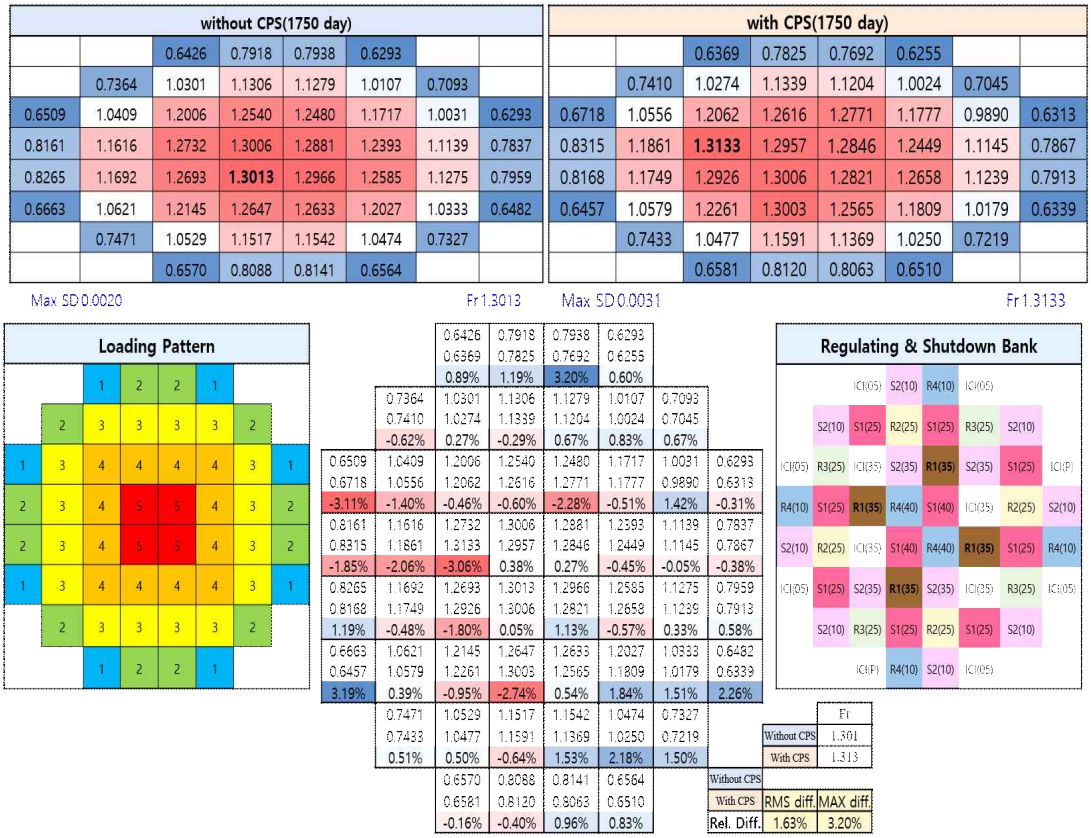
그림 40에 나타낸 바와 같이 제어봉이 삽입된 핵연료집합체(R1) 주변의 핵연료집합체(R2, S1)에서 높은 상대출력이 나타나지만, 그 값은 MOC1에 비해 상대적으로 낮아졌다 (1.3206 ± 0.002 → 1.2143 ± 0.0002). 또한, R1 bank가 삽입된 핵연료집합체의 가연성흡수봉의 연소에 의한 붕소량 감소로 상대출력이 MOC1에 비해 커지는 것을 확인할 수 있다.



[그림 40] MOC2 반경방향 출력분포 비교(초임계 vs. 임계)

마. EOC (EFPD: 1750일 / 전 제어봉 인출)

그림 41에 나타낸 바와 같이 핵연료집합체 내 가연성흡수봉의 연소로 붕소량이 감소하여 노심 중앙 쪽으로 첨두출력이 이동하며, Fr값도 가장 큰 값을 나타낸다.



[그림 41] EOC 반경방향 출력분포 비교(초임계 vs. 임계)

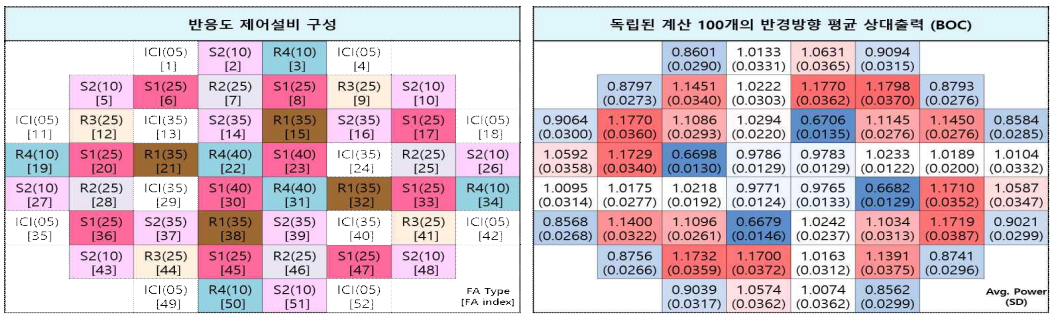
바. 반경방향 출력분포의 점대칭성 확인(주기초 기준)

최적노심의 반응도 제어설비는 반경방향 출력분포의 대칭성 확보를 위해 점대칭으로 배치되었다. 따라서, 출력분포의 점대칭성 확인을 위해 주기초 임계상태에서 앞서 계산과 동일한 McCARD 계산조건으로 난수발생기 시드값의 초기값을 바꾸어가며 100개의 독립된 McCARD 고유치 계산을 수행하였다. 표 43은 McCARD 계산조건 및 유효증배계수 계산결과를 나타내었다.

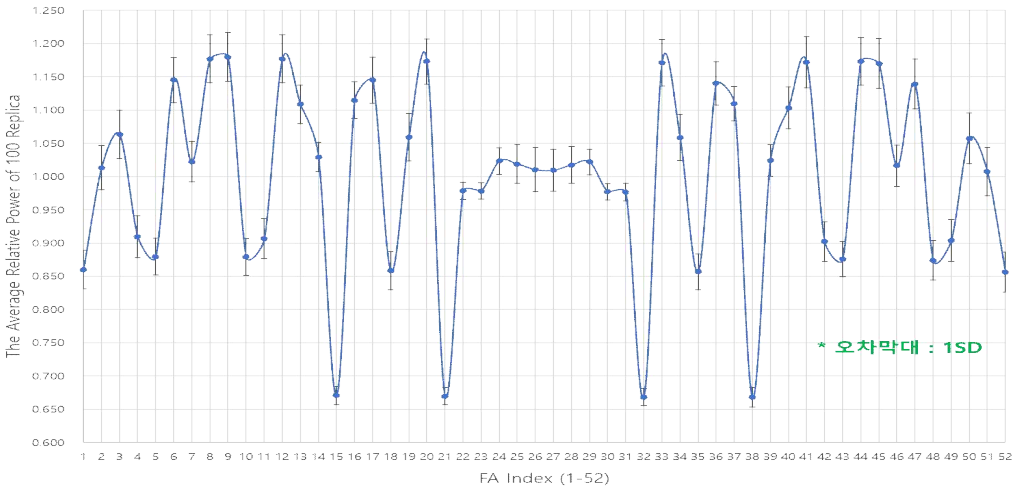
[표 43] McCARD 계산조건 및 유효증배계수 계산결과

계산 횟수	임계제어봉 위치	중성자원모의개수 /활성/수렴주기	T/H 계산	유효 증배계수	진 표준편차
100회	• R1 모두 삽입 • R2 125.6cm 삽입	4,000/3,000/200	적용	0.99922	0.00024

그림 42에 나타난 바와 같이 독립된 100개 계산 결과의 반경방향 평균 상대출력은 집합체별로 표준편차 이내에서 점대칭성을 보이며, 이때 진 표준편차(Max. Real SD : 0.0387)는 독립된 McCARD 계산 1개의 핵연료집합체 상대출력의 겉보기 표준편차(Max. Real SD : 0.0031)보다 약 10배 정도 크게 관찰된다. 이는 McCARD에서 계산되는 핵연료집합체단위 출력 값의 진 표준편차와 겉보기 표준편차의 비(real-to-apparent SD ratio)가 크기 때문이다 [14]. 그림 43은 FA index에 따른 반경방향 평균 상대출력을 나타내었다.

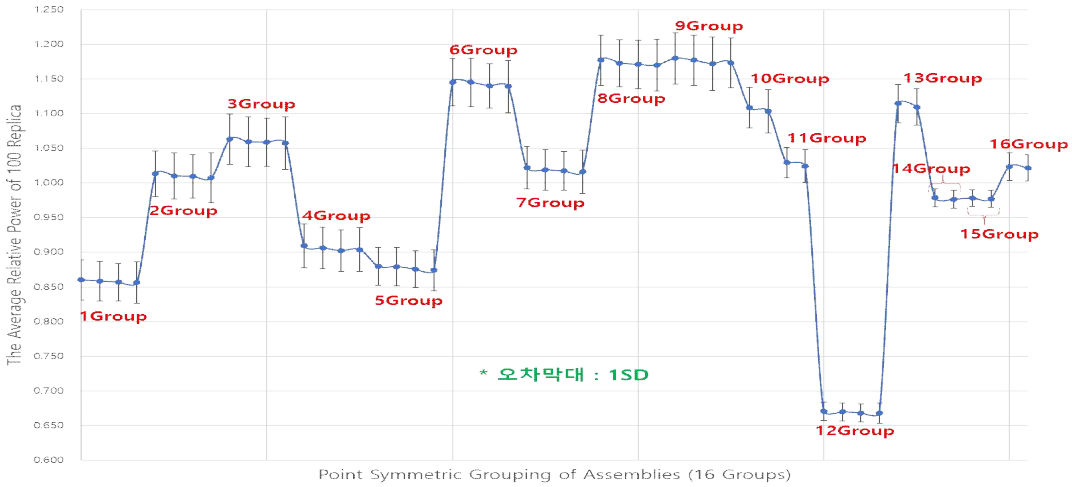


[그림 42] 독립된 100개 계산 결과의 반경방향 평균 상대출력 분포



[그림 43] FA index에 따른 독립된 100개 계산 결과의 집합체 평균 상대출력

점대칭되는 집합체별로 평균 상대출력을 시각적으로 확인하기 위해서 총 16개 점대칭되는 그룹으로 핵연료집합체를 구분하여 그림 44와 같이 나타내었다. 그림에서 나타난 바와 같이 그룹별로 표준편차 범위 내에서 평균 상대출력을 보임에 따라, 반경방향 출력분포의 점대칭성을 확인할 있다. 표 44는 점대칭되는 반응도 제어설비 집합체를 총 16개로 그룹화하여 평균 상대출력을 정리하였다.



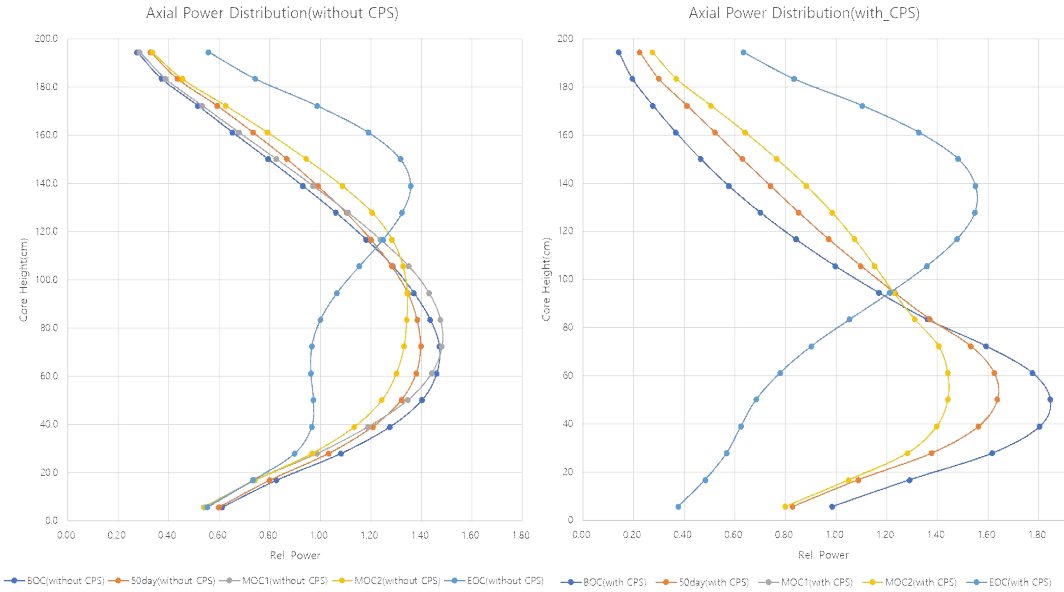
[그림 44] 점대칭 그룹별 독립된 100개 계산 결과의 집합체 평균 상대출력

[표 44] 점대칭 그룹별 반응도 제어설비 집합체 평균 상대출력

점대칭 그룹	집합체 종류	집합체 index	평균 상대출력	표준편차
1	ICI(05)	1	0.8601	0.0290
	ICI(05)	18	0.8584	0.0285
	ICI(05)	35	0.8568	0.0268
	ICI(05)	52	0.8562	0.0299
2	S2(10)	2	1.0133	0.0331
	S2(10)	26	1.0104	0.0332
	S2(10)	27	1.0095	0.0314
	S2(10)	51	1.0074	0.0362
3	R4(10)	3	1.0631	0.0365
	R4(10)	19	1.0592	0.0358
	R4(10)	34	1.0587	0.0347
	R4(10)	50	1.0574	0.0381
4	ICI(05)	4	0.9094	0.0315
	ICI(05)	11	0.9064	0.0300
	ICI(05)	42	0.9021	0.0299
	ICI(05)	49	0.9039	0.0317
5	S2(10)	5	0.8797	0.0273
	S2(10)	10	0.8793	0.0276
	S2(10)	43	0.8756	0.0266
	S2(10)	48	0.8741	0.0296
6	S1(25)	6	1.1451	0.0340
	S1(25)	17	1.1450	0.0348
	S1(25)	36	1.1400	0.0322
	S1(25)	47	1.1391	0.0375
7	R2(25)	7	1.0222	0.0303
	R2(25)	25	1.0189	0.0292
	R2(25)	28	1.0175	0.0277
	R2(25)	46	1.0163	0.0312
8	S1(25)	8	1.1770	0.0362
	S1(25)	20	1.1729	0.0340
	S1(25)	33	1.1710	0.0352
	S1(25)	45	1.1700	0.0372
9	R3(25)	9	1.1798	0.0370
	R3(25)	12	1.1770	0.0360
	R3(25)	41	1.1719	0.0387
	R3(25)	44	1.1732	0.0359
10	ICI(35)	13	1.1086	0.0293
	ICI(35)	40	1.1034	0.0313
11	S2(35)	14	1.0294	0.0220
	S2(35)	39	1.0242	0.0237
12	R1(35)	15	0.6706	0.0135
	R1(35)	21	0.6698	0.0130
	R1(35)	32	0.6682	0.0129
	R1(35)	38	0.6679	0.0146
13	S2(35)	16	1.1145	0.0276
	S2(35)	37	1.1096	0.0261
14	R4(40)	22	0.9786	0.0129
	R4(40)	31	0.9765	0.0133
15	S1(40)	23	0.9783	0.0122
	S1(40)	30	0.9771	0.0124
16	ICI(35)	24	1.0233	0.0200
	ICI(35)	29	1.0218	0.0192

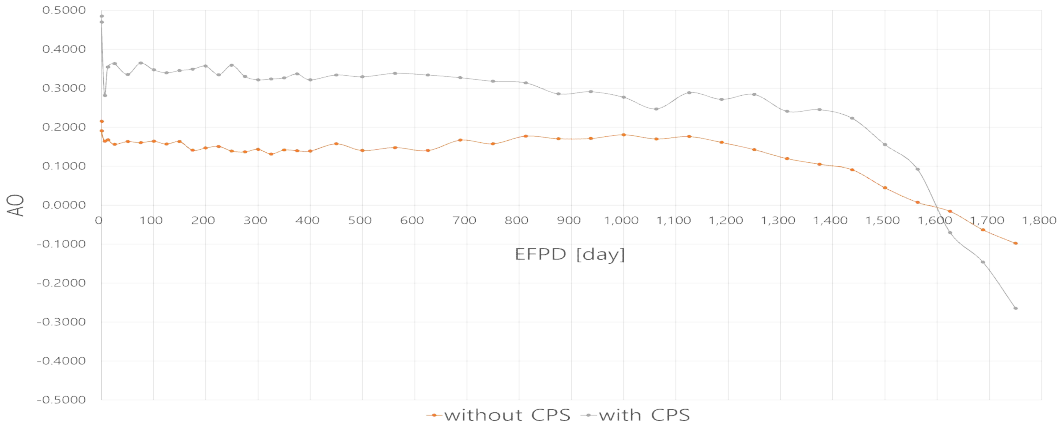
2. 축방향 출력분포

그림 45에는 임계와 초임계상태의 특정 EFPD에서의 축방향 출력분포를 나타내었다. 두 경우 모두 축방향 출력분포는 주기 중반까지 하부로 치우쳐져 있다가 MOC2 (1375일 / 23.12 MWD/kgU)가 지나면서 서서히 상부로 이동함을 알 수 있다. 임계상태의 경우 제어봉이 노심 상부에 부분 삽입되어 운전됨에 따라 상대적으로 더 큰 출력분포 차이를 보인다.



[그림 45] 특정 EFPD에서의 축방향 출력분포(without CPS vs. with CPS)

그림 46에는 임계와 초임계상태의 EFPD에 따른 Axial offset(AO) 값을 비교하였다. 두 그래프 모두 축방향 출력분포가 아래쪽으로 몰려 있는 것을 확인할 수 있으며 제어봉 삽입에 따른 출력분포 불균형으로 인해 그림에 나타난 바와 같이 임계상태의 AO 절대값이 초임계상태보다 더 큰 값을 확인할 수 있다. 특히, BOC 임계상태의 AO는 0.4856 ± 0.0019로 AO에 대한 요구사항인 ± 0.4를 초과하는 것으로 나타났다. 표 45에는 전체 AO 값을 정리하였다.



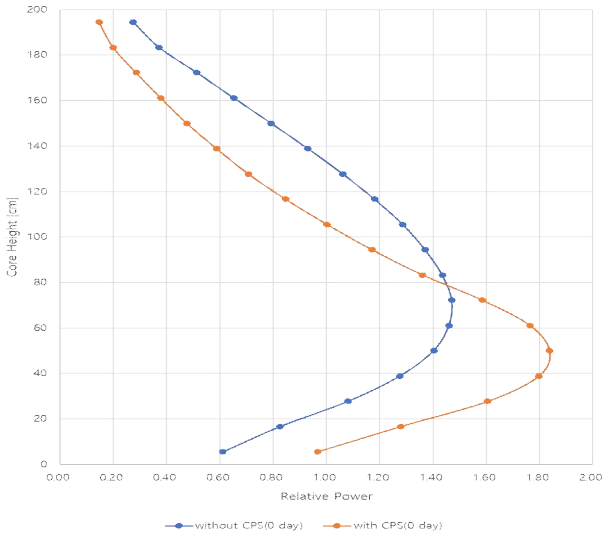
[그림 46] EFPD에 따른 Axial Offset(without CPS vs. with CPS)

[표 45] 전체 EFPD에서 Axial offset 비교(without CPS vs. with CPS)

Step	EFPD	without CPS		with CPS	
		AO	S/D	AO	S/D
1	**0.00**	0.2149	0.0011	**0.4856**	**0.0019**
2	**0.25**	0.1906	0.0011	**0.4704**	**0.0019**
3	6.25	0.1640	0.0011	0.2815	0.0018
4	12.50	0.1681	0.0011	0.3546	0.0018
5	25.00	0.1559	0.0011	0.3633	0.0018
6	50.00	0.1632	0.0011	0.3353	0.0018
7	75.00	0.1604	0.0011	0.3648	0.0018
8	100.00	0.1642	0.0011	0.3476	0.0018
9	125.00	0.1567	0.0011	0.3398	0.0018
10	150.00	0.1632	0.0011	0.3456	0.0018
11	175.00	0.1410	0.0011	0.3492	0.0018
12	200.00	0.1469	0.0011	0.3568	0.0018
13	225.00	0.1508	0.0011	0.3348	0.0018
14	250.00	0.1387	0.0011	0.3594	0.0018
15	275.00	0.1367	0.0011	0.3303	0.0018
16	300.00	0.1435	0.0011	0.3219	0.0018
17	325.00	0.1314	0.0011	0.3240	0.0018
18	350.00	0.1416	0.0011	0.3264	0.0018
19	375.00	0.1399	0.0011	0.3369	0.0018
20	400.00	0.1388	0.0011	0.3218	0.0018
21	450.00	0.1574	0.0011	0.3342	0.0018
22	500.00	0.1403	0.0011	0.3295	0.0018
23	562.50	0.1479	0.0011	0.3385	0.0018
24	625.00	0.1400	0.0011	0.3342	0.0018
25	687.50	0.1668	0.0011	0.3273	0.0018
26	750.00	0.1575	0.0011	0.3180	0.0018
27	812.50	0.1773	0.0011	0.3141	0.0018
28	875.00	0.1704	0.0011	0.2857	0.0018
29	937.50	0.1711	0.0011	0.2912	0.0018
30	1000.00	0.1806	0.0011	0.2770	0.0018
31	1062.50	0.1699	0.0011	0.2472	0.0018
32	1125.00	0.1760	0.0011	0.2889	0.0018
33	1187.50	0.1610	0.0011	0.2716	0.0018
34	1250.00	0.1425	0.0011	0.2841	0.0018
35	1312.50	0.1196	0.0011	0.2408	0.0018
36	1375.00	0.1052	0.0011	0.2452	0.0018
37	1437.50	0.0909	0.0011	0.2230	0.0017
38	1500.00	0.0447	0.0011	0.1557	0.0017
39	1562.50	0.0073	0.0011	0.0921	0.0017
40	1625.00	-0.0160	0.0011	-0.0704	0.0017
41	1687.50	-0.0630	0.0011	-0.1460	0.0017
42	1750.00	-0.0979	0.0011	-0.2644	0.0018

가. BOC(임계 제어봉 위치 : R1 모두 삽입, R2 125.6cm 삽입)

그림 47에 나타낸 바와 같이 BOC의 경우 가장 큰 RMS 차이인 11.82%를 나타냈고, 특히 제어봉이 부분 삽입된 노심 상부에서 큰 상대오차(88.13%)를 보인다. 초임계상태 및 임계상태 모두 BOC에서 가장 큰 Axial offset 값인 0.2149 ± 0.0011과 0.4856 ± 0.0019를 보였다.

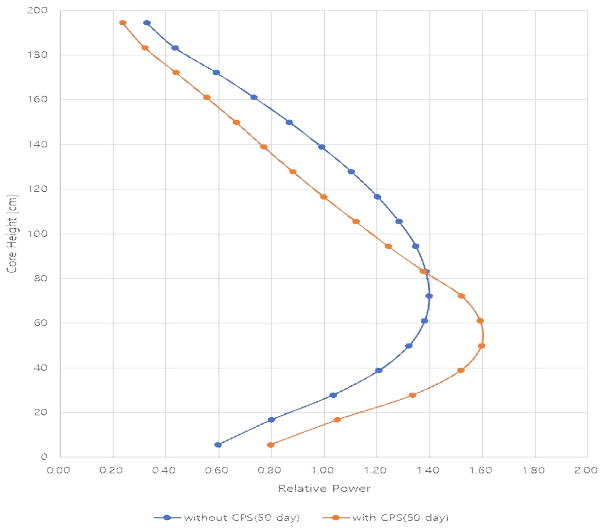


Height (cm)	without CPS	with CPS	SD	Rel. diff
6	0.612	0.967	0.001	-36.77%
17	0.826	1.278	0.001	-35.42%
28	1.081	1.606	0.001	-32.68%
39	1.276	1.798	0.001	-29.04%
50	1.403	1.838	0.001	-23.69%
61	1.461	1.765	0.001	-17.22%
72	1.471	1.586	0.001	-7.23%
83	1.435	1.362	0.001	5.41%
94	1.370	1.171	0.001	17.03%
106	1.287	1.003	0.001	28.37%
117	1.181	0.846	0.001	39.50%
128	1.062	0.707	0.001	50.14%
139	0.930	0.588	0.001	58.36%
150	0.793	0.476	0.001	66.66%
161	0.652	0.378	0.001	72.32%
172	0.514	0.286	0.001	80.05%
183	0.372	0.200	0.001	85.97%
194	0.275	0.146	0.001	88.13%
Axial offset	0.21490	0.485605	RMS	11.82%

[그림 47] BOC 축방향 출력분포 비교(초임계 vs. 임계)

나. IOC (EFPD : 50일 / 임계 제어봉 위치 : R1 120.6cm 삽입)

그림 48에 나타낸 바와 같이 IOC의 경우 RMS 차이인 5.76%로 BOC에 비해 상대적으로 차이 줄었고, 노심 상부에서 상대오차(88.13% → 38.83%)가 감소하였다. 초임계상태 및 임계상태 모두 BOC에서 비해 Axial offset 값이 감소하였다.

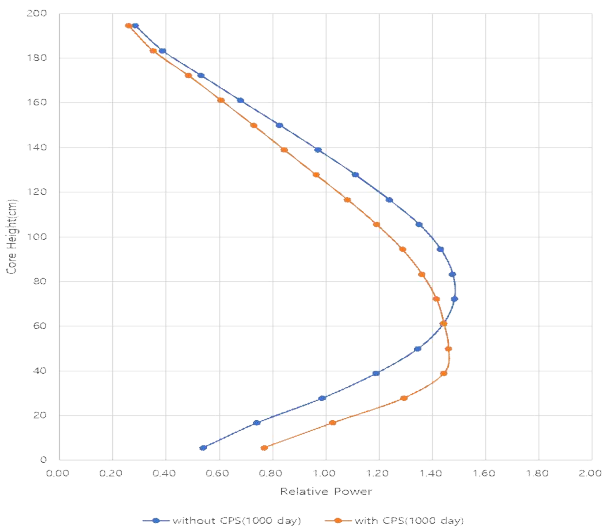


Height (cm)	without CPS	with CPS	SD	Rel. diff
6	0.598	0.795	0.001	-24.81%
17	0.800	1.049	0.001	-23.74%
28	1.032	1.334	0.001	-22.59%
39	1.208	1.518	0.001	-20.42%
50	1.322	1.595	0.001	-17.17%
61	1.381	1.590	0.001	-13.19%
72	1.398	1.519	0.001	-7.97%
83	1.384	1.376	0.001	0.58%
94	1.347	1.242	0.001	8.46%
106	1.283	1.119	0.001	14.63%
117	1.201	0.997	0.001	20.49%
128	1.103	0.882	0.001	25.09%
139	0.990	0.771	0.001	28.43%
150	0.868	0.665	0.001	30.48%
161	0.734	0.554	0.001	32.54%
172	0.591	0.438	0.001	34.75%
183	0.434	0.320	0.001	35.58%
194	0.328	0.236	0.001	38.83%
Axial offset	0.16321	0.335336	RMS	5.76%

[그림 48] IOC 축방향 출력분포 비교(초임계 vs. 임계)

다. MOC1 (EFPD : 1000일 / 임계 제어봉 위치 : R1 154.8cm 삽입)

그림 49에 나타낸 바와 같이 RMS 차이는 연소가 진행될수록 줄어들고 있으나, 제어봉이 노심 하부까지 깊게 삽입됨에 따라 노심 하부에서 상대오차가 -29.86%으로 가장 큰 값을 나타내고 Axial Offset도 감소하였다.

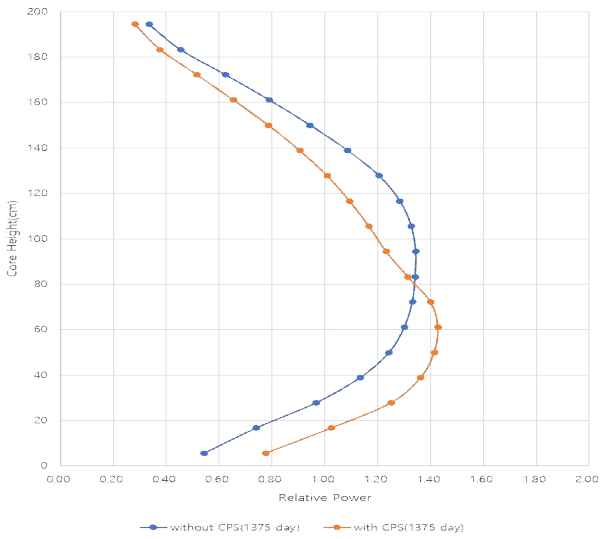


Height (cm)	without CPS	with CPS	SD	Rel. diff
6	0.538	0.767	0.001	-29.86%
17	0.740	1.025	0.001	-27.78%
28	0.986	1.292	0.001	-23.65%
39	1.188	1.443	0.001	-17.64%
50	1.346	1.461	0.001	-7.87%
61	1.440	1.444	0.001	-0.24%
72	1.481	1.415	0.001	4.69%
83	1.475	1.361	0.001	8.43%
94	1.430	1.287	0.001	11.16%
106	1.350	1.190	0.001	13.40%
117	1.237	1.081	0.001	14.41%
128	1.110	0.963	0.001	15.31%
139	0.971	0.844	0.001	15.07%
150	0.826	0.727	0.001	13.60%
161	0.677	0.607	0.001	11.68%
172	0.532	0.484	0.001	9.91%
183	0.387	0.351	0.001	10.18%
194	0.285	0.260	0.001	9.42%
Axial offset	0.18059	0.277001	RMS	3.63%

[그림 49] MOC1 축방향 출력분포 비교(초임계 vs. 임계)

라. MOC2 (EFPD : 1375일 / 임계 제어봉 위치 : R1 118.8cm 삽입)

그림 50에 나타낸 바와 같이 초임계상태의 경우 노심 중심부에서 출력이 평탄해지기 시작한다. 하지만, 임계상태의 경우 여전히 제어봉이 노심 중심부까지 삽입되어 노심 하부에서 큰 상대오차인 29.99%를 보인다.

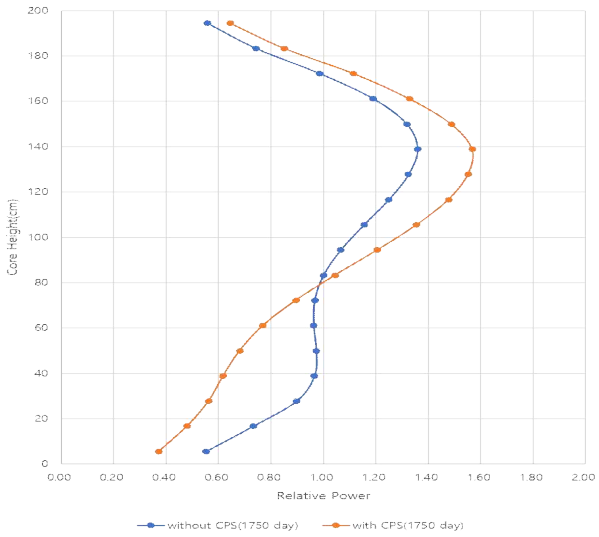


Height (cm)	without CPS	with CPS	SD	Rel. diff
6	0.543	0.776	0.001	-29.99%
17	0.741	1.025	0.001	-27.68%
28	0.967	1.251	0.001	-22.72%
39	1.134	1.363	0.001	-16.79%
50	1.244	1.415	0.001	-12.09%
61	1.301	1.428	0.001	-8.94%
72	1.331	1.400	0.001	-4.95%
83	1.342	1.314	0.001	2.06%
94	1.344	1.233	0.001	9.02%
106	1.327	1.167	0.001	13.68%
117	1.284	1.094	0.001	17.39%
128	1.205	1.009	0.001	19.44%
139	1.087	0.905	0.001	20.02%
150	0.945	0.788	0.001	20.01%
161	0.791	0.655	0.001	20.80%
172	0.625	0.517	0.001	20.92%
183	0.454	0.377	0.001	20.32%
194	0.335	0.281	0.001	19.03%
Axial offset	0.10521	0.245158	RMS	4.34%

[그림 50] MOC2 축방향 출력분포 비교(초임계 vs. 임계)

마. EOC (EFPD: 1750일 / 전 제어봉 인출)

그림 51에 나타낸 바와 같이 EOC에서는 두 경우 모두가 노심 상부에서 상대적으로 큰 출력분포를 보이고있다. 이는 열수력궤환 효과에 의해 노심 상부에서 상대적으로 덜 연소된 우라늄이 연소되면서 노심하부에 비해 큰 출력분포를 보인다. 또한, 임계상태의 경우에는 열수력 궤환효과와 더불어 운전기간 중 제어봉이 노심 상부에 장기간 삽입되어 운전됨으로써 덜 연소된 우라늄이 연소되면서 초임계상태보다 노심하부와 상부의 출력분포의 편차가 크게 나타난다.

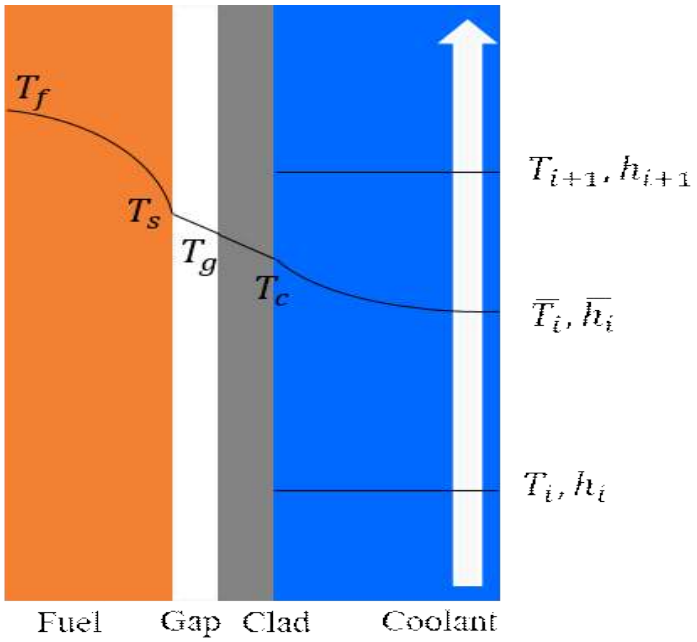


Height (cm)	without CPS	with CPS	SD	Rel. diff
6	0.553	0.371	0.001	49.28%
17	0.733	0.479	0.001	53.07%
28	0.898	0.561	0.001	60.01%
39	0.966	0.617	0.001	56.58%
50	0.972	0.680	0.001	42.99%
61	0.963	0.769	0.001	25.25%
72	0.966	0.894	0.001	8.07%
83	1.000	1.044	0.001	-4.22%
94	1.066	1.205	0.001	-11.54%
106	1.155	1.355	0.001	-14.78%
117	1.250	1.477	0.001	-15.41%
128	1.325	1.552	0.001	-14.63%
139	1.359	1.568	0.001	-13.34%
150	1.317	1.487	0.001	-11.44%
161	1.190	1.328	0.001	-10.44%
172	0.986	1.116	0.001	-11.61%
183	0.743	0.851	0.001	-12.74%
194	0.558	0.645	0.001	-13.53%
Axial offset	-0.09791	-0.26439	RMS	7.10%

[그림 51] EOC 축방향 출력분포 비교(초임계 vs. 임계)

제 3 절 온도분포 계산

McCARD는 간단한 열수력 모델을 이용한 열수력 궤환효과 계산능을 갖추고 있으며, 모든 핵연료봉은 상호간에 영향을 미치지 않는다고 가정하고 핵연료봉과 냉각재는 평형상태로 핵연료로부터 생성된 열은 모두 냉각재로 전달된다고 가정한다. 그림 52는 McCARD에서 사용하고 있는 핵연료봉에 대한 반경방향 및 축방향의 열수력궤환 모델을 나타낸 것이다.



[그림 52] McCARD 핵연료봉 열수력 궤환 모델

반경방향의 온도구배는 아래의 수식 (1) ~ (4)의 열전달 방정식으로 계산된다. 수식에서 L와 k는 각각 열전달계수와 열전도도이고 R은 열저항이며 $\dot{q}$은 핵연료봉에서 생성된 열생성율을 나타낸다. H는 축방향으로 나눈 각 셀의 높이를 의미한다.

$$T_c = \overline{T_i} + \frac{1}{h(2\pi r_c H)}\dot{q} = \overline{T_i} + R_w\dot{q} \qquad (1)$$

$$T_g = T_c + \frac{\ln(r_c/r_g)}{2\pi k_c H}\dot{q} = T_c + R_c\dot{q} \qquad (2)$$

$$T_s = T_g + \frac{1}{h_g(2\pi r_f H)}\dot{q} = T_g + R_g\dot{q} \qquad (3)$$

$$T_f = T_s + \frac{1}{4\pi k_f H}\dot{q} = T_s + R_f\dot{q} \qquad (4)$$

축방향의 냉각재 열수송은 수식 (5)의 에너지 보존방정식으로 계산된다. 수식에서 i 는 축방향 셀의 순서를 나타내며 h와 $\dot{m}$은 각각 비엔탈피(specific enthalpy)와 질량유량이며, A는 유량이 흐르는 단면적을 의미한다. 에너지 보존방정식에 사용되는 비엔탈피는 주어진 온도에 대한 3차 다항식인 식 (6)으로 표현되며, 온도는 비엔탈피에 관한 3차 다항식인 식 (7)을 통해 비엔탈피를 온도로 변환할 수 있다. McCARD에서는 두 3차 다항식의 계수로 DeCART 코드에 사용되는 값을 레퍼런스로 사용하고 있다.

$$h_{i+1} = h_i + \frac{1}{\dot{m}A}\dot{q}_i = h_i + R_i\dot{q}_i \qquad (5)$$

$$h_i = \sum_{n=0}^{3} a_n T_i^n \qquad (6)$$

$$T_{i+1} = \sum_{n=0}^{3} b_n h_{i+1}^n \qquad (7)$$

위의 수식들에서 $\overline{T}$ 를 제외한 온도들은 경계면에서의 온도이다. 각 셀에서 물질들의 평균온도는 아래와 같이 계산된다.

$$\overline{T_i} = f(\overline{h_i}),\ \overline{h_i} = \frac{h_{i+1} + h_i}{2} \tag{8}$$

$$\overline{T_c} = \frac{T_c + T_g}{2} \tag{9}$$

$$\overline{T_g} = \frac{T_g + T_s}{2} \tag{10}$$

$$\overline{T_f} = 0.3T_f + 0.7T_s \tag{11}$$

McCARD의 단순 열수력 궤환 효과 계산에서 온도와 비엔탈피에 대한 열저항 값은 사용자가 입력으로 주게 된다. SMR 계산에 적용할 열전달계수 및 열전도도 값은 NEACRP의 경수로 과도해석 벤치마크문제[13] 에 사용된 수식들을 사용하였으며 이를 정리하면 아래와 같다.

$$k_{f(UO_2)}[\frac{W}{mK}] = 1.05 + \frac{2150}{T - 73.15} \tag{12}$$

$$k_{c(Zr-4)}[\frac{W}{mK}] = 7.51 + 2.09 \times 10^{-2} T - 1.45 \times 10^{-5} T^2 + 7.67 \times 10^{-9} T^3 \tag{13}$$

$$h_g[\frac{W}{m^2 K}] = 10000 \tag{14}$$

$$h_w[\frac{W}{m^2 K}] = \sum_{n=0}^{3} a_n T^n \tag{15}$$

표 46와 47에는 특정 EFPD에서의 감속재 평균온도와 핵연료 평균온도 계산 결과를 각각 요약하였다. 열수력 궤환효과를 통해 핵연료 온도를 산출한 결과, 일반 상용로의 핵연료 온도인 850K에 비해 약 190K 정도 낮은

약 665K로 계산되었다. 이는 SMR 열출력밀도(7.28㎾/m)가 일반 상용로 열출력밀도(17.3㎾/m) 대비 낮으므로 핵연료 온도도 낮음을 알 수 있다.

[표 46] 특정 EFPD에서의 감속재 평균온도

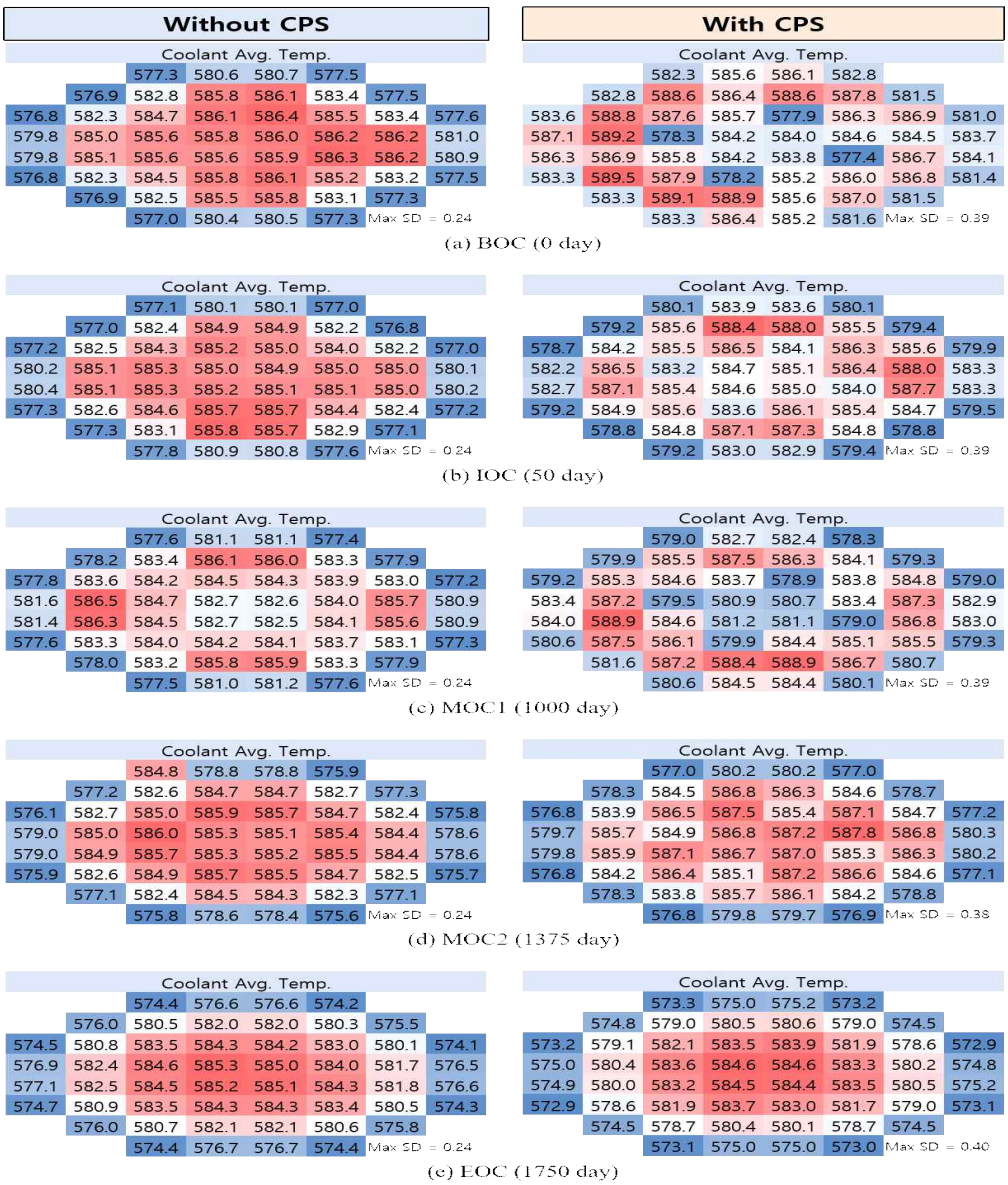
유효전출력 가동일수 [일]	0 (BOC)		50 (IOC)		1000 (MOC1)		1375 (MOC2)		1750 (EOC)	
	평균 온도	SD	평균 온도	SD	평균 온도	SD	평균 온도	SD	평균 온도	SD
without CPS	582.50	0.25	582.13	0.25	582.13	0.25	581.75	0.24	580.02	0.25
with CPS	584.83	0.39	583.82	0.39	583.26	0.40	583.05	0.39	578.65	0.40
차이 [without CPS - with CPS]	-2.33	0.46	-1.69	0.46	-1.13	0.47	-1.30	0.46	1.37	0.47

[표 47] 특정 EFPD에서의 핵연료 평균온도

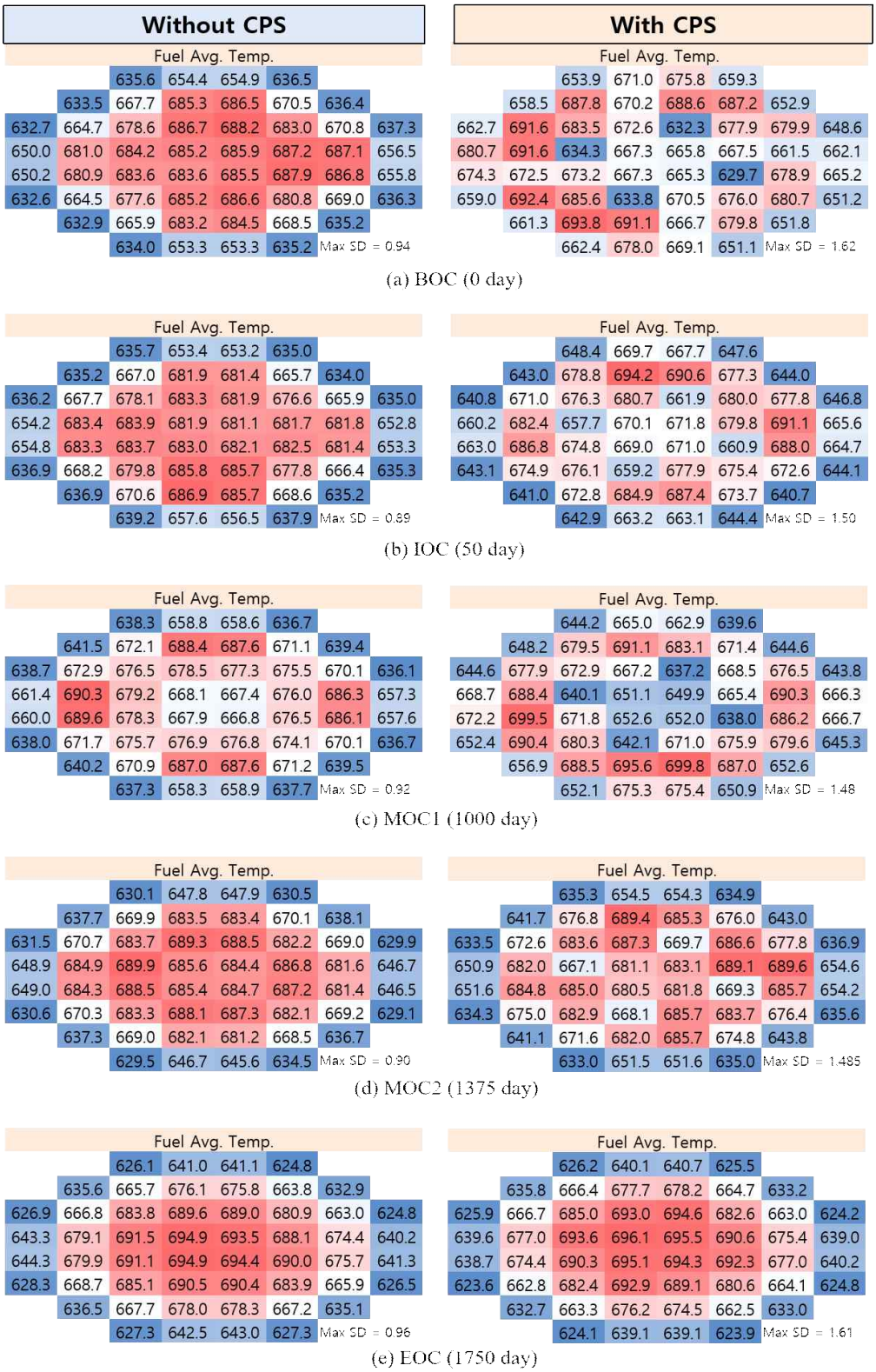
유효전출력 가동일수 [일]	0 (BOC)		50 (IOC)		1000 (MOC1)		1375 (MOC2)		1750 (EOC)	
	평균 온도	SD	평균 온도	SD	평균 온도	SD	평균 온도	SD	평균 온도	SD
without CPS	665.63	0.91	665.06	0.89	665.06	0.89	664.30	0.91	662.81	0.96
with CPS	668.57	1.62	667.13	1.50	666.32	1.48	666.19	1.48	661.95	1.61
차이 [without CPS - with CPS]	-2.94	1.86	-2.08	1.75	-1.26	1.73	-1.89	1.74	0.87	1.88

1. 반경방향 온도분포

그림 53과 54에는 감속재와 핵연료의 반경방향 온도분포를 각각 나타내었다. 모든 경우에 있어서 온도분포는 노심의 출력분포에 비례해서 나타나는 것을 알 수 있다.



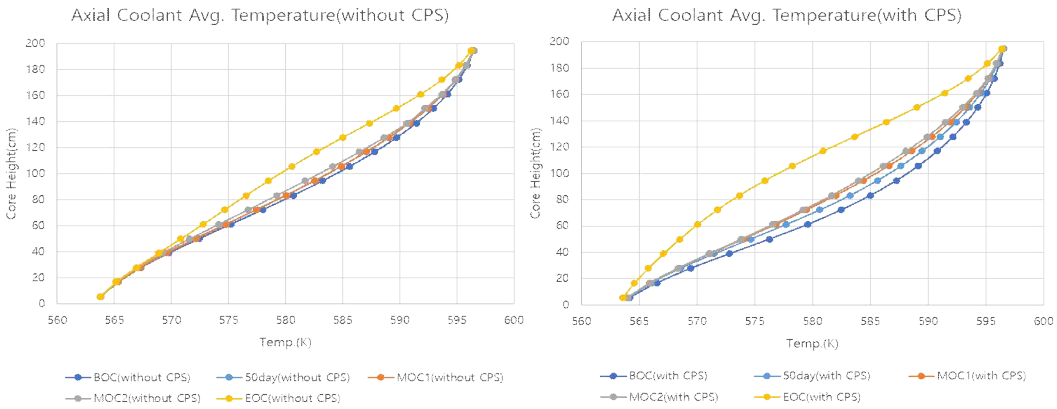
[그림 53] 반경방향 감속재 온도분포(초임계 vs. 임계)



[그림 54] 반경방향 핵연료 온도분포(초임계 vs. 임계)

2. 축방향 온도분포

축방향 감속재 온도분포는 그림 55와 같으며, 특정 EFPD에서의 축방향 세부온도는 표 48(초임계) 및 표 49(임계)에 요약하였다.



[그림 55] 축방향 감속재 온도분포 종합(초임계 / 임계)

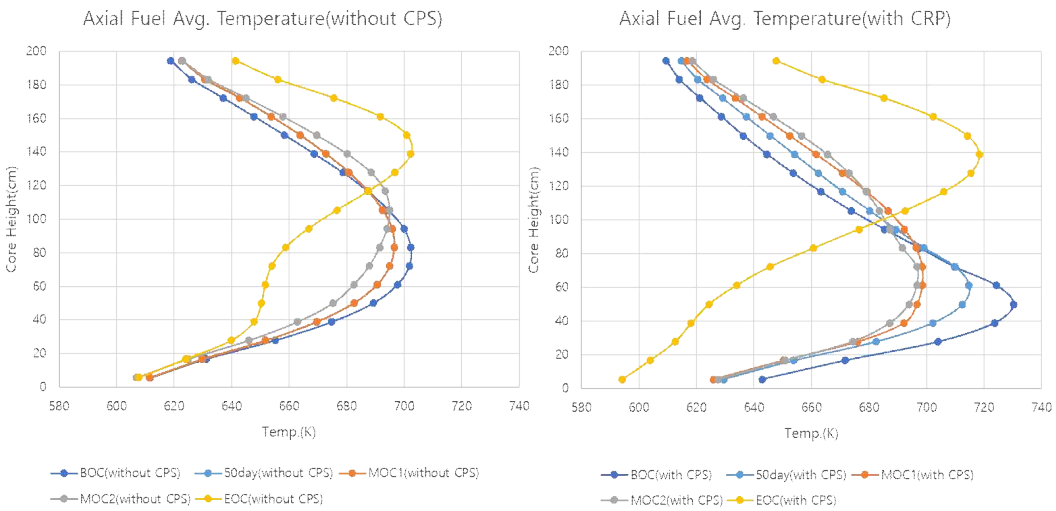
[표 48] 축방향 감속재 온도분포 (초임계)

Core Height (cm)	BOC (without CPS)	Max SD	50day (without CPS)	Max SD	MOC1 (without CPS)	Max SD	MOC2 (without CPS)	Max SD	EOC (without CPS)	Max SD
5.6	563.81	0.01	563.81	0.01	563.81	0.01	563.76	0.01	563.77	0.01
16.7	565.35	0.02	565.33	0.02	565.33	0.02	565.17	0.02	565.17	0.02
27.8	567.34	0.03	567.27	0.03	567.27	0.03	567.00	0.03	566.92	0.03
38.9	569.74	0.05	569.59	0.05	569.59	0.05	569.20	0.05	568.86	0.05
50.0	572.41	0.07	572.14	0.07	572.14	0.07	571.63	0.07	570.85	0.06
61.1	575.20	0.09	574.80	0.09	574.80	0.09	574.16	0.09	572.78	0.08
72.2	577.98	0.10	577.46	0.10	577.46	0.10	576.71	0.10	574.67	0.10
83.3	580.68	0.12	580.05	0.12	580.05	0.12	579.24	0.12	576.55	0.11
94.4	583.24	0.14	582.54	0.13	582.54	0.13	581.72	0.13	578.49	0.12
105.6	585.62	0.15	584.90	0.15	584.90	0.15	584.14	0.15	580.53	0.14
116.7	587.80	0.17	587.08	0.17	587.08	0.17	586.46	0.17	582.71	0.15
127.8	589.75	0.18	589.07	0.18	589.07	0.18	588.64	0.18	585.00	0.17
138.9	591.46	0.20	590.87	0.19	590.87	0.19	590.63	0.19	587.36	0.18
150.0	592.94	0.21	592.45	0.20	592.45	0.20	592.20	0.20	589.68	0.20
161.1	594.17	0.22	593.81	0.22	593.81	0.22	593.68	0.22	591.84	0.22
172.2	595.17	0.23	594.93	0.23	594.93	0.23	594.88	0.22	593.69	0.23
183.3	595.93	0.23	595.80	0.23	595.80	0.23	595.80	0.24	595.16	0.24
194.4	596.50	0.25	596.45	0.25	596.45	0.25	596.48	0.24	596.26	0.25
Avg.[K]	582.50	0.25	582.13	0.25	582.13	0.25	581.75	0.24	580.02	0.25

[표 49] 축방향 감속재 온도분포 (임계)

Core Height (cm)	BOC (with CPS)	Max SD	50day (with CPS)	Max SD	MOC1 (with CPS)	Max SD	MOC2 (with CPS)	Max SD	EOC (with CPS)	Max SD
5.6	564.18	0.01	564.03	0.01	563.99	0.01	564.00	0.01	563.60	0.01
16.7	566.54	0.05	566.03	0.04	565.91	0.04	565.95	0.04	564.60	0.03
27.8	569.47	0.07	568.56	0.06	568.34	0.06	568.36	0.06	565.79	0.05
38.9	572.82	0.11	571.50	0.09	571.13	0.09	571.05	0.09	567.12	0.07
50.0	576.27	0.14	574.62	0.12	574.00	0.12	573.82	0.12	568.53	0.09
61.1	579.56	0.17	577.72	0.15	576.80	0.15	576.56	0.15	570.06	0.11
72.2	582.50	0.19	580.64	0.18	579.49	0.18	579.20	0.18	571.77	0.14
83.3	585.04	0.22	583.28	0.21	582.03	0.21	581.68	0.21	573.70	0.17
94.4	587.25	0.24	585.61	0.23	584.40	0.23	583.97	0.22	575.87	0.19
105.6	589.15	0.27	587.67	0.25	586.59	0.26	586.10	0.25	578.28	0.22
116.7	590.78	0.29	589.47	0.28	588.57	0.28	588.08	0.27	580.89	0.25
127.8	592.17	0.31	591.06	0.30	590.34	0.30	589.89	0.29	583.63	0.27
138.9	593.33	0.32	592.43	0.32	591.89	0.32	591.53	0.31	586.38	0.30
150.0	594.31	0.34	593.61	0.34	593.21	0.34	592.96	0.32	589.03	0.32
161.1	595.10	0.36	594.60	0.35	594.33	0.36	594.17	0.34	591.44	0.34
172.2	595.73	0.37	595.40	0.37	595.23	0.37	595.16	0.36	593.50	0.36
183.3	596.20	0.38	596.02	0.38	595.93	0.39	595.92	0.37	595.15	0.38
194.4	596.54	0.39	596.49	0.39	596.44	0.40	596.49	0.39	596.39	0.40
Avg.[K]	584.83	0.39	583.82	0.39	583.26	0.40	583.05	0.39	578.65	0.40

축방향 핵연료 온도분포는 그림 56과 같으며, 특정 EFPD에서의 축방향 세부온도는 표 50(초임계) 및 표 51(임계)에 요약하였다.



[그림 56] 축방향 핵연료 온도분포 종합(초임계 / 임계)

[표 50] 축방향 핵연료 온도분포 (초임계)

Core Height (cm)	BOC (without CPS)	Max SD	50day (without CPS)	Max SD	MOC1 (without CPS)	Max SD	MOC2 (without CPS)	Max SD	EOC (without CPS)	Max SD
5.6	611.70	0.51	611.47	0.51	611.47	0.51	606.94	0.47	607.69	0.48
16.7	631.07	0.60	629.86	0.59	629.86	0.59	624.88	0.57	624.05	0.57
27.8	655.13	0.71	651.81	0.69	651.81	0.69	646.09	0.67	639.89	0.65
38.9	674.87	0.79	669.65	0.76	669.65	0.76	663.06	0.74	647.80	0.71
50.0	689.33	0.85	682.52	0.83	682.52	0.83	675.34	0.80	650.47	0.73
61.1	697.75	0.88	690.63	0.86	690.63	0.86	682.60	0.84	651.68	0.75
72.2	701.86	0.90	695.05	0.87	695.05	0.87	687.96	0.87	653.98	0.77
83.3	702.33	0.91	696.56	0.89	696.56	0.89	691.48	0.89	658.90	0.79
94.4	699.92	0.91	695.82	0.88	695.82	0.88	694.16	0.90	666.74	0.83
105.6	694.44	0.90	692.51	0.87	692.51	0.87	695.04	0.91	676.76	0.87
116.7	687.40	0.87	687.48	0.87	687.48	0.87	693.46	0.90	687.56	0.93
127.8	678.67	0.84	680.89	0.85	680.89	0.85	688.60	0.87	696.84	0.96
138.9	668.74	0.81	672.85	0.81	672.85	0.81	680.17	0.86	702.42	0.96
150.0	658.46	0.77	663.91	0.79	663.91	0.79	669.61	0.83	701.04	0.95
161.1	647.76	0.72	653.78	0.74	653.78	0.74	657.89	0.77	691.76	0.92
172.2	637.00	0.67	642.84	0.70	642.84	0.70	645.15	0.71	675.60	0.87
183.3	626.11	0.61	630.73	0.64	630.73	0.64	631.93	0.65	655.99	0.78
194.4	618.86	0.57	622.66	0.60	622.66	0.60	622.95	0.60	641.50	0.72
Avg.[K]	665.63	0.91	665.06	0.89	665.06	0.89	664.30	0.91	662.81	0.96

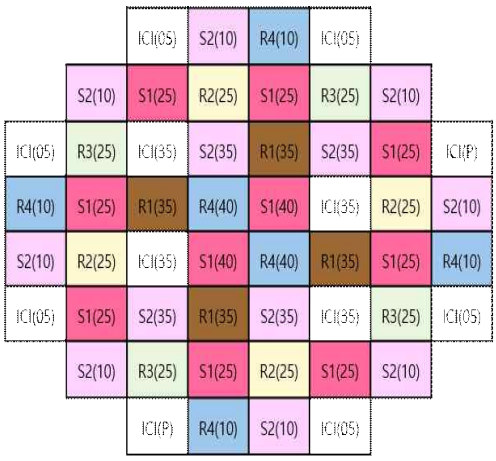
[표 51] 축방향 핵연료 온도분포 (임계)

Core Height (cm)	BOC (with CPS)	Max SD	50day (with CPS)	Max SD	MOC1 (with CPS)	Max SD	MOC2 (with CPS)	Max SD	EOC (with CPS)	Max SD
5.6	642.79	1.12	629.53	0.95	625.82	0.91	627.53	0.93	594.22	0.64
16.7	671.61	1.28	653.95	1.09	650.14	1.10	650.97	1.09	603.85	0.77
27.8	703.93	1.49	682.42	1.26	676.05	1.28	674.22	1.27	612.56	0.88
38.9	723.56	1.62	702.06	1.40	692.11	1.35	687.16	1.39	618.22	0.94
50.0	730.28	1.62	712.45	1.46	696.69	1.43	693.85	1.46	624.29	1.01
61.1	724.37	1.56	714.78	1.49	698.52	1.45	696.58	1.48	633.83	1.10
72.2	709.76	1.53	709.91	1.50	698.48	1.47	696.63	1.47	645.59	1.24
83.3	697.71	1.50	699.15	1.46	696.44	1.47	691.65	1.43	660.74	1.36
94.4	685.45	1.46	689.36	1.41	692.35	1.48	687.30	1.36	676.41	1.48
105.6	673.75	1.37	680.20	1.39	686.61	1.44	683.57	1.38	692.42	1.54
116.7	663.23	1.29	670.89	1.31	679.23	1.42	678.96	1.39	706.14	1.57
127.8	653.58	1.22	662.38	1.25	670.72	1.35	673.08	1.36	715.36	1.61
138.9	644.55	1.15	654.04	1.21	661.56	1.29	665.58	1.31	718.32	1.58
150.0	636.29	1.09	645.67	1.15	652.41	1.24	656.63	1.24	714.19	1.58
161.1	628.74	1.01	637.33	1.08	642.78	1.16	646.74	1.18	702.32	1.52
172.2	621.22	0.95	629.08	1.03	633.39	1.09	636.26	1.09	685.24	1.44
183.3	614.03	0.88	620.53	0.94	623.57	0.99	626.04	1.00	663.64	1.30
194.4	609.47	0.83	614.70	0.90	616.82	0.92	618.61	0.93	647.68	1.20
Avg.[K]	668.57	1.62	667.13	1.50	666.32	1.48	666.19	1.48	661.95	1.61

제 4 절 제어봉 제어능 계산

표 52에 나타낸 바와 같이 최적노심의 반응도 제어설비는 4개 Bank 총 18개 집합체의 조절계통과 2개 Bank 총 22개 집합체의 정지계통으로 구성되어 있다. 조절계통은 R1 → R2 → R3 → R4 Bank 순으로 삽입되며, Bank 간의 중첩은 유효 노심 높이의 10%(20cm)로 가정하였다. 즉, R1 Bank가 180cm 삽입되면, R2 Bank의 삽입이 시작되는 방식이며, 20cm의 중첩 구간은 추후에 변경이 가능하다.

[표 52] 반응도 제어설비 정보사항

반응도 제어설비 구성도	구분	제어설비 종류	FA 종류	노심 내 제어설비 개수
	조절계통 (Regulating Bank)	R1	35	4
		R2	25	4
		R3	15	4
		R4	40	2
			10	4
	정지계통 (Shut Down Bank)	S1	25	8
			40	2
		S2	10	8
			35	4
	Total CRDM (Control Rod Device Mechanism)			40
	계측설비	ICI	35	4
			5	6
		ICI(P)	5	2
	Total ICI			12
	Total FA			52

주기 초 CZP/HZP/HFP 조건별 제어봉 제어능 계산은 '제3장 제2절 노심 배치 및 제어봉 설계 최적화' 부분에서 논의하였고, 그 결과를 표 53에 재정리하였다. CZP에서 조절계통의 제어봉가는 7,527 ± 18pcm이고 정지계통의 제어봉가는 12,496 ± 18pcm이며, HZP에서 조절계통의 제어봉가는 10,085 ± 18pcm이고 정지계통의 제어봉가는 16,580 ± 18pcm이다. HFP에서 조절계통의 제어봉가는 10,085 ± 18pcm이고 정지계통의 제어봉가는 10,902 ± 19pcm으로 주기 초 원자로 가동 시 충분한 정지여유도 제공이 가능하다.

[표 53] 제어봉 제어능 계산 (BOC)

조건	제어봉 조합	잉여반응도 [pcm]	SD [pcm]	적분제어봉가 [pcm]	SD [pcm]
CZP	전 제어봉 인출	13088	9	-	-
	R1+R2+R3+R4	5561	12	7527	18
	R1+R2+R3+R4+S1	-171	13	13259	18
	R1+R2+R3+R4+S1+S2	-6935	16	20023	18
HZP	전 제어봉 인출	5415	13	-	-
	R1+R2+R3+R4	-4670	14	10085	19
	R1+R2+R3+R4+S1	-12262	18	17677	20
	R1+R2+R3+R4+S1+S2	-21250	19	26665	19
HFP	전 제어봉 인출	3709	40	-	-
	R1	1441	13	2273	18
	R1+R2	-1263	14	4977	19
	R1+R2+R3	-3882	15	7596	19
	R1+R2+R3+R4	-7188	16	10902	19
	R1+R2+R3+R4+S1	-15306	19	19019	19
	R1+R2+R3+R4+S1+S2	-25263	20	28977	18

HFP 조건의 특정 EFPD에서의 제어봉가를 표 54에 정리하였다. 주기 말로 갈수록 조절계통 및 정지계통의 적분제어봉가가 증가하는 경향을 보이며 충분한 정지여유도를 제공할 수 있는 것으로 확인되었다.

[표 54] 특정 EFPD에서의 제어봉가 계산 결과(HFP 조건)

EFPD [일]	제어봉 조합	잉여반응도 [pcm]	SD [pcm]	적분제어봉가 [pcm]	SD [pcm]
0 (BOC)	전 제어봉 인출	3709	40	-	-
	R1+R2+R3+R4	-7188	16	10902	19
	R1+R2+R3+R4+S1+S2	-25263	20	28977	18
50 (IOC)	전 제어봉 인출	1391	14	-	-
	R1+R2+R3+R4	-9621	17	11013	20
	R1+R2+R3+R4+S1+S2	-27791	21	29182	19
1000 (MOC1)	전 제어봉 인출	1875	13	-	-
	R1+R2+R3+R4	-9981	17	11856	19
	R1+R2+R3+R4+S1+S2	-30370	22	32245	18
1375 (MOC2)	전 제어봉 인출	1457	13	-	-
	R1+R2+R3+R4	-10903	30	12360	27
	R1+R2+R3+R4+S1+S2	-32011	40	33469	26
1750 (EOC)	전 제어봉 인출	-10	19	-	-
	R1+R2+R3+R4	-12693	30	12683	31
	R1+R2+R3+R4+S1+S2	-34501	49	34491	33

제 5 절 반응도계수 계산

1. 온도계수

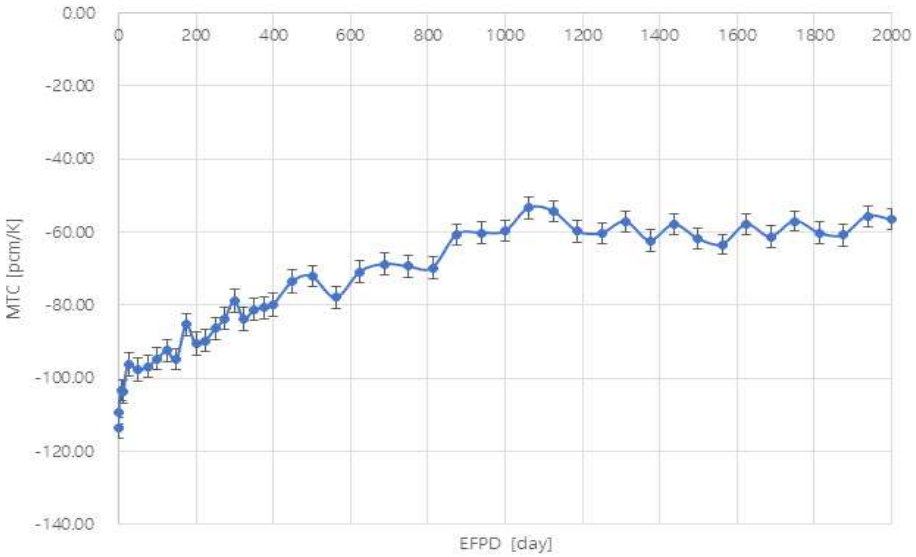
감속재 온도계수(MTC) 및 핵연료 온도계수(FTC) 계산은 온도 차에 따른 반응도 변화를 선형으로 가정하여 두 온도에 대한 반응도 차이를 통해 계산하였다. 계산에 사용된 감속재 온도는 기존 580.65K와 여기에서 7.5도를 뺀 573.15K를 사용하였고, 핵연료 온도는 기존 700K와 여기에서 200K를 더한 900K를 사용하였다. 각각의 감속재/핵연료 평균 온도별 연소도에 따른 유효증배계수 계산 결과를 바탕으로 EFPD별 감속재 온도계수 및 핵연료 온도계수를 계산하여 표 55에 나타내었다.

[표 55] EFPD별 감속재 및 핵연료 온도계수 계산 결과

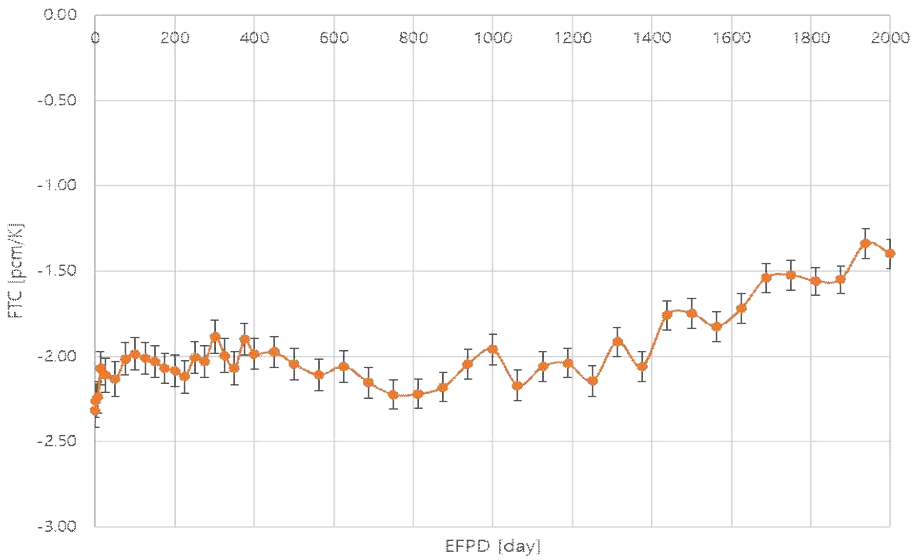
Burnup [MWD/kgU]	EFPD [day]	MTC	SD	FTC	SD
		[pcm/K]		[pcm/K]	
0.0000	**0.00**	**-113.60**	**2.88**	**-2.32**	**0.10**
0.0042	0.25	-109.20	3.26	-2.26	0.10
0.1051	6.25	-103.20	2.85	-2.24	0.09
0.2102	12.50	-103.73	3.18	-2.07	0.10
0.4204	25.00	-96.13	3.15	-2.11	0.10
0.8408	50.00	-97.60	3.12	-2.14	0.10
1.2612	75.00	-96.80	3.04	-2.01	0.10
1.6816	100.00	-94.67	2.96	-1.99	0.10
2.1020	125.00	-92.40	2.96	-2.01	0.09
2.5224	150.00	-94.80	2.96	-2.03	0.09
2.9428	175.00	-85.33	2.96	-2.07	0.09
3.3631	200.00	-90.53	3.07	-2.08	0.09
3.7835	225.00	-89.60	2.94	-2.12	0.10
4.2039	250.00	-86.40	3.18	-2.01	0.09
4.6243	275.00	-83.60	2.96	-2.03	0.09
5.0447	300.00	-78.80	3.15	-1.88	0.10
5.4651	325.00	-83.73	3.15	-1.99	0.10
5.8855	350.00	-81.20	3.07	-2.07	0.10
6.3059	375.00	-80.67	3.07	-1.90	0.09
6.7263	400.00	-79.87	3.07	-1.99	0.09
7.5671	450.00	-73.47	3.07	-1.97	0.09
8.4079	500.00	-72.00	2.85	-2.05	0.09
9.4588	562.50	-77.87	2.96	-2.11	0.09
10.5098	625.00	-70.80	3.04	-2.06	0.09
11.5608	687.50	-68.67	3.00	-2.16	0.09
12.6118	750.00	-69.33	3.00	-2.23	0.08
13.6628	812.50	-69.73	2.88	-2.22	0.08
14.7138	875.00	-60.67	3.00	-2.18	0.08
15.7647	937.50	-60.13	3.07	-2.05	0.09
16.8157	1000.00	-59.73	2.85	-1.96	0.09
17.8667	1062.50	-53.33	3.07	-2.17	0.09
18.9177	1125.00	-54.27	2.85	-2.06	0.09
19.9687	1187.50	-59.73	2.88	-2.04	0.08
21.0197	1250.00	-60.27	2.96	-2.14	0.09
22.0706	1312.50	-57.07	2.88	-1.92	0.08
23.1216	1375.00	-62.27	2.85	-2.06	0.09
24.1726	1437.50	-57.87	2.77	-1.76	0.08
25.2236	1500.00	-61.73	2.77	-1.75	0.09
26.2746	1562.50	-63.33	2.75	-1.82	0.09
27.3256	1625.00	-57.87	2.96	-1.72	0.09
28.3765	1687.50	-61.20	2.88	-1.54	0.08
29.4275	1750.00	-56.93	2.75	-1.53	0.09

그림 57는 EFPD에 따른 감속재 온도계수를 나타내었다. 무붕산 SMR의 감속재 온도계수는 상용로에 비해 더 큰 음의 값을 가지는 것을 확인할 수 있다. 주기 초(BOC)에서 -113.60 ± 2.88 pcm/K으로 가장 큰 음의 값을 가지며, EFPD 1125일까지 감속재 온도계수는 양의 방향으로 증가하다가

가연성흡수물질의 연소로 인한 영향으로 약 -60pcm/K으로 수렴하는 경향을 보인다. 핵연료 온도계수는 그림 56에 나타낸 바와 같이 일반 상용로와 비슷한 값을 가지며, BOC에서 -2.32 ± 0.10 pcm/K으로 가장 큰 음의 값을 가지고 주기 말로 갈수록 양의 방향으로 증가한다.



[그림 57] 감속재 온도계수



[그림 58] 핵연료 온도계수

2. 출력결손 (Power Defect)

특정 EFPD별 출력결손 계산을 수행하였다. 표 56에 나타난 바와 같이 고온전출력(HFP) → 고온영출력(HZP) 조건의 출력결손은 BOC에서 최대 1,725 ± 17 pcm이며, 고온전출력(HZP) → 저온영출력(CZP) 조건의 출력결손은 BOC에서 최대 7,673 ± 15 pcm이다.

[표 56] 특정 EFPD에서의 출력결손(Power Defect) 계산결과

Power Defect	BOC (0일)		IOC (50일)		MOC1 (1000일)		MOC2 (1375일)		EOC (1750일)	
	Reactivity [pcm]	SD [pcm]	Reactivity [pcm]	SD [pcm]	Reactivity [pcm]	SD [pcm]	Reactivity [pcm]	SD [pcm]	Reactivity [pcm]	SD [pcm]
HFP → HZP	1725	17	1672	22	1351	20	1433	20	1638	19
CZP → CZP	7673	15	7437	23	5717	22	5519	22	5508	21

3. 정지여유도(Shutdown Margin)

표 57은 정지여유도를 나타낸 표이다. 정지여유도는 전 제어봉 삽입(All Rods In) 상태의 제어봉가에서 출력결손(Power Defect)과 주기초의 최대 잉여반응도를 빼서 계산하였다. 주기초 고온영출력(HZP) 정지여유도는 14,608 ± 28 pcm이며, 주기말 저온영출력(CZP) 정지여유도는 7,134 ± 34pcm으로 충분한 정지여유도를 가지는 것을 확인하였다.

[표 57] 특정 EFPD에서의 정지여유도 계산결과

구 분		[1] Power Defect		[2] Rods Worth (All Rods In)		[3] Maximum Excess Reactivity		[4] Shutdown margin ([4] = [2]-[1]-[3])	
		Reactivity [pcm]	SD [pcm]	Reactivity [pcm]	SD [pcm]	Reactivity [pcm]	SD [pcm]	Reactivity [pcm]	SD [pcm]
BOC (0일)	HZP	1725	17	26665	18	3690	12	21250	28
	CZP	7673	15	20023	19			8660	27
EOC (1750일)	HZP	1638	19	30319	29			24991	35
	CZP	5508	21	16332	27			7134	34

제 6 절 동특성인자 계산

특정 EFPD별 노심 동특성인자 계산을 위해 임계운전모의 연소계산(with CPS)를 통해 계산된 임계 제어봉 위치 결과(표39)를 바탕으로 McCARD 입력 값에 임계 제어봉 위치를 설정하여 특정 EFPD별 연소계산을 수행하였다. 표 58에 나타난 바와 같이 표 39의 임계 제어봉 위치 계산 결과를 바탕으로 임계를 재설정함에 따라 유효증배계수 및 임계 제어봉 위치의 미세한 차이가 발생하지만, 동특성인자 계산결과에는 큰 영향이 없을 것으로 판단된다.

[표 58] McCARD 계산조건 및 임계 제어봉 위치(동특성인자 계산시)

구분	유효증배계수 (SD)			제어봉 삽입 [cm]		제어봉가 [pcm]
EFPD [일]	without CPS	with CPS (표39)	without CPS 임계설정	R2 Bank	R1 Bank	
0 (BOC)	1.03831 (0.00013)	0.99926 (0.00021)	0.99944 (0.00013)	125	200	3887 ± 18
50 (IOC)	1.01306 (0.00013)	0.99945 (0.00021)	0.99952 (0.00013)	0	122.4	1354 ± 18
1000 (MOC1)	1.02133 (0.00012)	0.99947 (0.00021)	0.99999 (0.00013)	0	154	2134 ± 17
1375 (MOC2)	1.02126 (0.00012)	0.99958 (0.00021)	0.99957 (0.00012)	0	118	2169 ± 18
1750 (EOC)	1.00287 (0.00012)	0.99990 (0.00019)	1.00009 (0.00013)	0	0	-

계산조건	핵단면적데이터	중성자원모의개수/활성/수렴주기	T/H 계산	CPS 계산
	ENDF/B-VII.1	100,000/300/150	적용	미적용

* 표 3C의 임계 제어봉 위치 계산 결과를 바탕으로 임계를 재설정함에 따라 임계 제어봉 위치의 미세한 차이가 발생
* BOC : 119→125cm / IOC : 122→122.4cm / MOC1 : 158→154cm / MOC2 : 112→118cm

EFPD [일]	유효증배계수 (SD)		제어봉 삽입 [cm]	
	CPS 적용 임계설정	CPS 미적용 임계설정	CPS 적용 임계설정	CPS 미적용 임계설정
0 (BOC)	0.99926 (0.00021)	0.99944 (0.00013)	R2 119 cm 삽입 R1 200 cm 삽입	R2 125 cm 삽입 R1 200 cm 삽입
50 (IOC)	0.99945 (0.00021)	0.99952 (0.00013)	R1 122 cm 삽입	R1 122.4 cm 삽입
1000 (MOC1)	0.99947 (0.00021)	0.99999 (0.00013)	R2 158 cm 삽입	R2 154 cm 삽입
1375 (MOC2)	0.99958 (0.00021)	0.99957 (0.00012)	R2 112 cm 삽입	R2 118 cm 삽입

노심의 동특성인자는 실제 원자로 운전조건인 with CPS 계산조건에서 특정 EFPD에서 계산하였다. 표 59에 나타낸 바와 같이 지발중성자 분율($\beta_{eff.}$)은 주기말로 갈수록 감소하며, EOC에 최소값인 0.005518 ± 0.00049를 나타낸다. 즉발중성자 수명은(Prompt Neutron Life Time) 22.37 ± 0.01 ~ 24.23 ± 0.01μsec이며, 상용로의 제한값인 15μsec 보다 큰 값을 가지고 35μsec 보다 작은 값을 가진다.

[표 59] 특정 EFPD에서의 동특성인자 계산결과 (with CPS)

유효전출력 가동일수 [일]	지발중성자 분율 ($\beta_{eff.}$)	SD	즉발중성자 수명 (ℓ^*) [μsec]	SD [μsec]
0 (BOC)	0.007078	0.000057	23.24	0.01
50 (IOC)	0.006998	0.000058	22.37	0.01
1000 (MOC1)	0.005800	0.000049	23.99	0.01
1375 (MOC2)	0.005649	0.000051	24.23	0.01
1750 (EOC)	0.005518	0.000049	23.94	0.01

제 7 절 제논 반응도 계산

제논 반응도 계산은 McCARD의 Equilibrium Xenon(평형제논) 옵션을 적용한 주기초 연소계산 결과와 적용하지 않은 연소계산 결과를 비교하여 표 60과 같이 계산하였다. 계산결과 제논 반응도는 -1,811 ± 19pcm으로 확인되었다.

[표 60] 제논 반응도 계산 결과 (BOC)

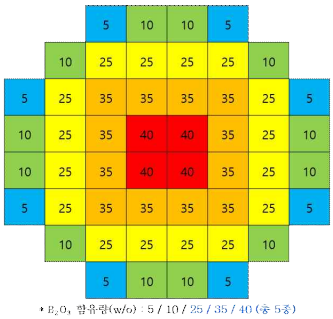
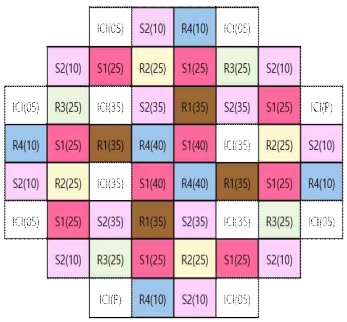
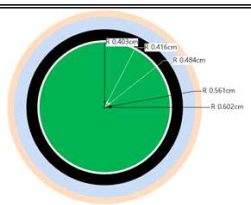
평형제논 옵션 적용여부	with TH(without CPS)			
	유효증배계수	SD	잉여반응도 [pcm]	SD [pcm]
미적용	1.03850	0.00014	3707	13
적 용	1.01933	0.00014	1896	13
제논 반응도			- 1811	19

제 7 장 종합 및 결론

제 1 절 종 합

해양부유식 무붕산 SMR에 대한 최적노심을 개발하였으며 최종장전 모형 및 반응도 제어설비 구성을 표 61에 나타내었고, 주요 노심설계 인자 및 특성자료를 표 62에 정리하였다.

[표 61] 최종장전 모형 및 반응도 제어설비 구성

<table>
<tr><th>구 분</th><th colspan="5">내 용</th></tr>
<tr><td>노심
장전
모형</td><td colspan="2"> 
</td><td colspan="3"><table>
<tr><th>구분</th><th>B2O3 함유량 (w/o)</th><th>FA 내 핵연료봉 개수</th><th>FA 내 BA 개수</th><th>노심 내 FA 개수</th></tr>
<tr><td>40</td><td>40</td><td>240</td><td>24</td><td>4</td></tr>
<tr><td>35</td><td>35</td><td>240</td><td>24</td><td>12</td></tr>
<tr><td>25</td><td>25</td><td>240</td><td>24</td><td>16</td></tr>
<tr><td>10</td><td>10</td><td>240</td><td>24</td><td>12</td></tr>
<tr><td>5</td><td>5</td><td>240</td><td>24</td><td>8</td></tr>
<tr><td colspan="2">합 계</td><td>12480</td><td>1248</td><td>52</td></tr>
</table></td></tr>
<tr><td>반응도
제어
설비
구성</td><td colspan="2"> 
</td><td colspan="3"><table>
<tr><th>구분</th><th>제어설비 종류</th><th>FA 종류</th><th>제어설비 개수</th></tr>
<tr><td rowspan="5">조절계통 (Regulating Bank)</td><td>R1(35)</td><td>35</td><td>4</td></tr>
<tr><td>R2(25)</td><td>25</td><td>4</td></tr>
<tr><td>R3(25)</td><td>15</td><td>4</td></tr>
<tr><td>R4(40)</td><td>40</td><td>2</td></tr>
<tr><td>R4(10)</td><td>10</td><td>4</td></tr>
<tr><td rowspan="4">정지계통 (Shut Down Bank)</td><td>S1(25)</td><td>25</td><td>8</td></tr>
<tr><td>S1(40)</td><td>40</td><td>2</td></tr>
<tr><td>S2(10)</td><td>10</td><td>8</td></tr>
<tr><td>S2(35)</td><td>35</td><td>4</td></tr>
<tr><td colspan="3">Total CRDM(Control Rod Device Mechanism)</td><td>40</td></tr>
<tr><td rowspan="3">계측설비</td><td>ICI(35)</td><td>35</td><td>4</td></tr>
<tr><td>ICI(05)</td><td>5</td><td>6</td></tr>
<tr><td>ICI(P)</td><td>5</td><td>2</td></tr>
<tr><td colspan="3">Total ICI</td><td>12</td></tr>
<tr><td colspan="3">Total FA</td><td>52</td></tr>
</table></td></tr>
<tr><td>제어봉
정보</td><td colspan="2"> 
</td><td colspan="3"><table>
<tr><th>물 질</th><th>반지름(cm)</th></tr>
<tr><td>■ : B4C</td><td>0.403</td></tr>
<tr><td>□ : Air</td><td>0.416</td></tr>
<tr><td>■ : SS304</td><td>0.484</td></tr>
<tr><td>■ : H20</td><td>0.561</td></tr>
<tr><td>■ : Zr-Alloy</td><td>0.602</td></tr>
</table></td></tr>
</table>

[표 62] 무붕산 운전 해양부유식 SMR 최적노심(안) 설계결과

노심 설계 인자			
구 분	내 용	구분	내용
원자로 종류	가압경수형	핵연료집합체 종류	웨스팅하우스사 17×17
핵연료집합체 장전수	52개	핵연료봉/가연성흡수봉/안내관 수	240/24/25개
열출력	200MWt	핵연료 형태	UO_2
설계 압력	17.2MPa	UO_2 밀도	10.257 g/cm^3
고온관 온도	598.15K(325.0℃)	핵연료 농축도	4.95 w/o
평균 온도	580.65K(307.5℃)	총 우라늄 질량	11,893kg
저온관 온도	563.15K(290.0℃)	가연성흡수봉 정류	Solid Pyrex
유량	997.5kg/s	Pyrex 밀도	2.3 g/cm^3
유효노심높이	2m	가연성흡수봉 내 B_2O_3 함유량 종류	5/10/25/35/40 w/o
출력밀도	41.59W/cc	제어봉 물질	B_4C

노심 설계 제한치				
주기길이	최대잉여반응도	최대첨두출력인자(Fq)	최대선출력밀도	Axial Offset(AO)
4~5년	5,000pcm 이하	5.68 이하	41.38kW/m 이하 * 평균선출력밀도 : 7.28	- 0.4 < AO < +0.4

노심 설계 결과				
구 분		초임계상태	임계상태	비 고
주기길이[연]		4.92 ± 0.23	약 4.79	충족
최대잉여반응도[pcm]		2366 ± 12	-	충족
최대첨두출력인자(Fq)		2.29 ± 0.10	3.09 ± 0.23	충족
최대선출력밀도[kW/m]		16.67 ± 0.73	22.54 ± 1.56	충족
최대 Axial Offset(AO)		0.2149 ± 0.0011	0.4856 ± 0.0019	부분 충족
감속재 온도계수[pcm/K]		-113.60 ± 2.88 ~ -53.33 ± 3.07		-
핵연료 온도계수[pcm/K]		- 2.32 ± 0.10 ~ -1.13 ± 0.08		-
주기초 CZP조건 전 제어봉 삽입시 유효증배계수(k_{eff})		0.93515 ± 0.00014		'k_{eff} < 0.95' 충족
HFP조건 적분제어봉가 [pcm]	조절계통	11013 ± 20 ~ 12683 ± 31		-
	정지계통	29182 ± 19 ~ 34491 ± 33		
출력결손 [pcm]	HFP→HZP	1725 ± 17 ~ 1351 ± 33		
	HZP→CZP	7673 ± 15 ~ 5508 ± 22		
정지 여유도 [pcm]	BOC HZP	21250 ± 28		
	BOC CZP	8660 ± 27		
	EOC HZP	24991 ± 27		
	EOC CZP	7134 ± 34		
제논반응도 [pcm]		-1,811 ± 19		-
동특성 인자	지발중성자 분율 ($\beta_{eff.}$)	0.005518 ± 0.00049 ~ 0.007078 ± 0.00057		-
	즉발중성자 수명 (ℓ^*) [μsec]	22.37 ± 0.01 ~ 24.23 ± 0.01		

제 2 절 결 론

McCARD 코드를 이용하여 열수력 궤환 효과를 고려한 200MWth 출력의 무붕산 운전 SMR의 설계요건을 만족하는 최적노심을 개발하였다. 선행연구에서 개념설계한 기존노심의 특성을 분석하여 제한사항을 확인하고, 목표 주기길이를 '4~5년'으로 조정하여 변경된 설계요건을 만족하는 노심을 설계하였다. 핵연료집합체에 장전되는 Pyrex의 B_2O_3 함유량을 변경하고 총 5종의 핵연료집합체로 노심을 구성하여 최적화하였다. 또한, 주기초 저온영출력 조건 제한치인 '유효증배계수 < 0.95'를 만족하며, 미임계가 가능한 반응도 제어설비를 최적화하였다.

최적노심은 열수력 궤환 효과를 적용한 제어봉 미삽입(초임계상태) 시의 계산 결과에서 주기길이 4.92 ± 0.23년, 제논평형 이후 최대 잉여반응도 2,366 ± 12pcm, 첨두출력계수(F_q) 2.29 ± 0.10, 최대선출력밀도 16.67 ± 0.73kW/m으로 설계요건을 모두 만족하였다. 온도분포 계산 결과, SMR 최적노심의 핵연료 온도는 최대 약 700K로 상용로의 핵연료 온도에 대비 약 200K 낮게 계산되었다. 이는 상용로 대비 노심 크기가 작고 열출력 밀도가 낮아 상대적으로 핵연료 온도가 낮게 계산된 것으로 판단된다.

무붕산 운전 SMR 노심에 대한 실제 운전상황을 분석하기 위해 McCARD 코드로 임계운전모의 연소계산을 수행하였다. 최적노심의 원자로 임계운전모의 연소계산을 통해 약 4.79년까지 무붕산 운전 SMR의 운전이 가능한 것으로 나타났다. 제어봉 운용 시 최대첨두출력계수(F_q) 3.09 ± 0.23, 최대선출력밀도 22.54 ± 1.56kW/m로 제한치(41.38kW/m)보다 충분한 열적 여유도가 있음을 확인하였으며, 원자로 계통설계 및 안전해석에 필요한 특정 유효전출력가동일수별 동특성인자, 반응도계수 등 각종 핵특성인자를 계산하였다. 또한, 반응도 제어설비가 충분한 정지여유도를 제공하여 원자로의 운전성 및 안전성을 보장할 수 있음을 확인함으로써 해양

부유식 무붕산 SMR 노심설계 고도화를 달성하였다.

본 연구에서 설계한 무붕산 운전 SMR 노심은 주기초 잉여반응도를 제어함과 동시에 충분한 주기길이를 확보하는데 목적을 두고 있다. 하지만, 무붕산 운전 SMR 노심은 본 연구에서 도출된 바와 같이 기존 상용로와 비교하여 큰 음의 감속재 온도계수(-113.60 ± 2.88 ~ -53.33 ± 3.07) 때문에 노심의 축방향 출력분포가 상대적으로 노심 하부로 치우치는 경향이 있다. 또한, 반응도 조절을 위해 장기간 노심 상부에 제어봉이 삽입되어 운전되어야 하므로 축방향 출력분포가 하부로 치우치는 것을 확인하였다. 그 결과 Axial Offset(AO)는 출력분포 불균형에 의해 BOC에서 0.4856 ± 0.0019으로 최대값을 보이며, AO의 참고값으로 선정한 ±0.4를 초과함을 확인하였다.

따라서, 축방향 출력분포를 평탄화하고 주기길이 더 확보하기 위해 제어봉 및 가연성흡수봉의 축방향 영역별 붕소 함유량을 조정하는 등 반응도 제어계통 설계 최적화에 대한 연구가 추가로 필요한 것으로 판단된다. 또한, 무붕산 운전 SMR에서 제어봉이 삽입되는 핵연료집합체의 영향으로 기존 상용로보다 불균형한 반경방향 출력분포를 보임에 따라 제어봉 삽입에 따른 출력분포를 고려한 노심배치를 통해 더욱 개선된 노심 설계가 가능할 것으로 예상된다.

참 고 문 헌

[1] KEPCO E&F, Development of Boron Free Operational Reactor System Design and Marerial Selection Technology, 2016.

[2] Seulki Lim, Design of a Small Modular Reactor Core for Marine Floating Application, Master thesis, Seoul National University, 2020.

[3] Hyung Jin Shim, Beom Seok Han, Jong Sung Jung, Ho Jin Park, Chang Hyo Kim, “McCARD: Monte Carlo Code for Advanced Reactor Design and Analysis,” Nucl. Eng. Technol., 44[2], 161~176 (2012).

[4] Barsic JA, Conner ME, Everhard AM, Grover JL,Huegel DS, Keiser KE, Monahan EM, Neubert KB, Nissley ME, Risher DH, Schoff RR, Secker JR, Sung YX. 17 × 17 next generation fuel (17 × 17 NGF) reference core report. WCAP-16498-NP, Westinghouse Electric Company LLC 2008.

[5] Boroushaki, Mehrdad, Mohammad B. Ghofrani, Caro Lucas, Mohammad J. Yazdanpanah, and Nasser Sadati. "Axial offset control of PWR nuclear reactor core using intelligent techniques.", Nuclear Engineering and Design 227, no. 3 (2004): 285-300.

[6] Justin RM, Feasibility study on a soluble boron-free small modular reactor, Master thesis, Oregon State University, 2013.

[7] “가압경수로 핵설계를 위한 KARMA/ASTRA 체계 검증 및 불확실도 평가,” KNF-TR-CDT-10005/N, Rev. 2, 2011.3.

[8] KEPCO E&F, Development of Boron Free Operational Reactor System Design and Material Selection Technlogy, 2018.

[9] IAEA, Status of Small and Medium Sized Reactor Designs, 2012.

[10] Choe Jiwon, Youqi Zheng, Deokjung Lee, and Ho Cheol Shin, Boron free small modular pressurized water reactor design with new burnable absorber, International Journal of Energy Research 40, No. 15, p.2128-2135, 2016.

[11] Shim, Hyung Jin, Beom Seok Han, and Chang Hyo Kim, Numerical Experiment on Variance Biases and Monte Carlo Neutronics Analysis with Thermal Hydraulic Feedback, In International Conference on Supercomputing in Nuclear Application, SNA03, Paris, France. 2003.

[12] Soomin Kang, Hyung Jin Shim, Monte Carlo T/H Feedback with On-The-Fly Doppler Broadening for the VERA 3D HFP Assembly Benchmark Problem, Reactor Physics Asia2015, Jeju-si, Korea, September16 18, 2015.

[13] Finnemann, H. and Galati, A.: "NEACRP 3-D LWR Core Transient Benchmark. Final Specifications", 1992.

[14] Park, Ho Jin, et al. "Real variance analysis of Monte Carlo eigenvalue calculation by McCARD for BEAVRS benchmark." Annals of Nuclear Energy 90 (2016): 205-211.

Abstract

Advanced Core Design of Soluble Boron Free Small Modular Reactor for Marine Applications

Kim Dokyun

Nuclear Engineering

The Graduate School

Seoul National University

There are many studies about marine floating small modular reactor (SMR) for ship propulsion, power supply to remote locations, and seawater desalination. The SMR design is considering applying the soluble boron-free operation, which can simplify the system and improve operability. Recently, KEPCO E&C is developing Bandi-60, the SMR with thermal power of 200 MW, and in this study, the optimal core of soluble boron-free SMR is designed for this purpose.

As a result of the previous study, the core with thermal power of 200MW and a cycle length of 5 years was designed using UO2 fuel material with enrichment of 4.95 w/o loaded with a total of 52 fuel assemblies. However, it is required to design the SMR, considering

the condition of a thermal-hydraulic feedback effect and the soluble boron free operation.

The purpose of this study is to confirm whether the previous core satisfies the design requirements when considering a thermal-hydraulic feedback effect and to design the optimal core. The burn-up calculation of the optimum core is performed under critical-state conditions using a control rod in soluble boron-free conditions. The core characteristics are calculated by the results of the burn-up calculation under critical-state conditions.

In this paper, core design requirements are selected to be 4 to 5 years of cycle length, excess reactivity of less than 5,000, and minimizing peaking factor. In addition, the purpose is to design a reactivity control system that can provide sufficient negative reactivity in cold zero power (CZP). The fuel assembly (FA) *is based on* the Westinghouse 17 ×17 FA, and 52 FAs are loaded in the core. The fuel material is UO_2 with an enrichment of 4.95 w/o. Pyrex is used as burnable absorber (BA) for reactivity control. The core is composed of a combination of 5 types of FA with different concentrations of B_2O_3 in Pyrex.

Monte Carlo Code for Advanced Reactor Design (McCARD), a Monte Carlo particle transport analysis code developed by Seoul National University, is used for the core design of SMR. The SMR meeting the design criteria is designed by McCARD burn-up calculation with T/H feedback. The core has enough control rod to maintain subcritical-state below the effective multiplication factor ($k_{eff.}$) of 0.95 at cold zero power in the beginning of the cycle (BOC). The

estimated cycle length is 4.92 ± 0.23 years, the maximum excess reactivity after equilibrium Xenon is 2,366 ± 12 pcm, the maximum Fq is 2.29 ± 0.10, and the maximum linear power density is 16.67 ± 0.73 kW/m, which meets the design requirements.

In addition, by performing the McCARD burn-up calculation maintaining the reactor criticality, this study shows that the SMR can operate up to about 4.79 years in soluble boron-free conditions. During the entire core lifetime, the maximum Fq is 3.09 ± 0.23, and the maximum linear power density is 22.57 ± 1.56 kW/m, which meets the design parameters with sufficient thermal stability. Various nuclear characteristic factors such as the core dynamic characteristics, the reactivity coefficients, and the temperature profiles required for safety analysis and system design of the core are calculated.

This study shows that the core has a sufficient reactivity control system to ensure the shutdown margin and operate in soluble boron-free conditions. Therefore, it proposes the advanced core design of soluble boron-free SMR for marine applications.

keywords : Small Modular Reactor
Soluble Boron Free
Thermal Hydraulic Feedback
Critical Position Search
Monte Carlo
McCARD

Student Number : 2019-20525

감사의 글

우선, 부족한 저에게 배움의 기회를 준 해군과 지금 이 순간에도 조국 해양수호의 숭고한 사명을 위해 묵묵히 맡은 바 임무를 다하고 있을 해군 전우들에게 감사의 마음을 전합니다. 당신들의 희생과 수고 덕분에 2년간의 학위과정을 무사히 마칠 수 있었습니다. 또한, 원자핵공학이라는 학문에 기초 지식도 없이 군 위탁생으로서 의욕과 열정밖에 없던 저를 넓은 마음으로 받아주시고 큰 가르침과 지도를 해주신 심형진 교수님께 진심으로 감사의 인사를 드립니다. 그리고 논문 심사를 맡아주시고 연구에 많은 조언과 격려를 해주신 서종태 박사님과 주한규 교수님께도 감사드립니다.

사관학교를 졸업하고 해군 장교로서 임관 10년 차에 원자핵공학이라는 학문을 새롭게 시작할 때 많은 두려움과 기대가 있었습니다. 학위과정을 걸어가는 동안 저에게 배움의 기회를 준 해군과 학문의 길을 열어준 교수님에게 누가 되지 않고 조금이나마 보탬이 되기 위해 노력하였습니다. 지난 2년을 돌이켜 보면, 원자핵공학 학문의 기반이 없던 제가 성공적으로 연구를 마무리할 수 있었던 이유는 매 순간 저의 손을 놓지 않고 함께 해준 연구실 동료들이 있었기 때문입니다.

먼저, 학교생활의 시작을 잘 이끌어 준 'MCL 군위탁생 1·2호 졸업생' 공군의 김지선 선배와 사랑하는 동기 임슬기 소령에게 감사의 인사를 전합니다. 그리고 방장으로서 연구실 동생들을 다독이며 항상 수고해준 상훈이, 연구실의 길잡이이자 나의 연구의 시작과 끝을

함께한 영원한 나의 사수 동혁이, 항상 옆자리에서 부족한 형을 하나부터 열까지 다 챙겨준 대학원 동기 재국이, 생글생글 웃으며 모든 일을 친절하게 도와준 교성이, 사소한 질문과 부탁에도 자기 일을 제쳐두고 도와준 연구실 살림꾼 영인이, 다양한 분야에 관심이 넘치는 MCL 송중기 재성이, 조용히 할 일을 다하는 성정이, 학부 연구생임에도 누구보다 열심히 하는 연구실 막내 헌우, 어려운 여건에서도 열심히 노력하는 군 위탁생 후배인 성재까지 누구 한사람 감사의 인사를 빼놓을 수 없습니다. 여러분과 함께 나누었던 그 순간들이 있었기에 오늘의 결과를 만들어 낼 수 있었습니다.

마지막으로, 부족한 남편 때문에 혼자서 출산과 육아를 감당해야 했던 사랑하는 나의 아내 수민이와 내 삶의 기쁨이자 보람인 아들 이안이에게 그 어떠한 말로도 마음을 다 표현할 수는 없지만, 이 짧은 글로써 고마움과 미안함을 전합니다. 또한, 멀리서 묵묵히 응원하고 아껴주시는 아버지와 어머니, 기도와 사랑으로 지켜주신 장인어른과 장모님에게도 감사의 마음을 전합니다. 2년간 제가 이루었던 모든 것들은 항상 곁에서 사랑으로 함께 해준 가족들이 있었기에 가능하였습니다. 고맙고 사랑합니다.

다시 한번, 부족한 저에게 기회를 주신 조국과 해군에 감사드리며, 2년간 제가 쌓은 지식과 경험이 국가와 해군을 위해 주어진 사명을 감당할 수 있도록 앞으로 더 노력하고 정진하겠습니다. 감사합니다.