

2001 추계 학술발표회 논문집

한국원자력학회

노심내 사분출력 경사도 모사를 위한 사분출력 유발 인자 모델링

Forcing Function Modeling for In-core Quadrant Power Tilt Simulation

성기봉, 조범진, 김선두

한전원자력연료주식회사

대전광역시 유성구 덕진동 150번지

배한경, 유명중, 이정재

한국수력원자력발전주식회사

부산광역시 기장군 장안읍 고리 216번지

요약

노심 내 냉각재 유량 및 온도의 비대칭이 IQPT에 미치는 영향을 평가하기 위하여 노심 설계의 연소 코드로 사용되는 ANC를 이용하여 고리3호기에 대한 Forcing Function Modeling을 수행하였다. Forcing Function에 의한 IQPT의 위험도를 줄이기 위해서는 장전모형 선정 시 연소된 연료의 shuffle category가 균형을 이루도록 하거나 Safe Zone을 설정하는 것이 필요함을 본 연구 결과로 알 수 있었다. 또한 운전중인 plant에서 forcing function에 의한 IQPT 발생시, 후속 주기의 장전 모형은 연소된 연료의 shuffle rotation이 180°가 되지 않도록 하면 후속주기의 IQPT를 현저하게 줄일 수 있는 것으로 나타났다. 본 연구 결과에서는 Forcing Function Model의 결과와 측정 IQPT가 그 크기나 위치가 다소 상이하게 나타났다. Forcing Function에 의한 IQPT를 효과적으로 모사하기 위해서는 원자로 냉각재 온도 및 유량 분포의 정확한 모델링, 측정 열수력 자료의 불확실도 및 Flux Mapping 결과의 정확도를 제고해야 하며, 이는 지속적으로 연구해야 할 과제이다.

Abstract

The forcing function model for Kori Unit 3 by using the ANC which is a depletion code for core design was generated for assessment of flow and temperature asymmetry effects. As a result of this study, burned fuel for the upcoming cycle should be evenly distributed among the core quadrants or establishment of "Safe Zone" should be needed for reducing the IQPT risk due to the forcing function. If the IQPT due to forcing function is detected at currently operating cycle, the preventing 180° shuffle of burned fuel loading pattern showed the remarkably reduced IQPT of the subsequent cycle. In this study,

the results of forcing function model are not exactly corresponded with measurement IQPT in terms of the magnitude and the location of the core quadrant. For successful simulation of the IQPT due to forcing function, uncertainty of measured TH data and Flux Mapping quality should be enhanced. Also forcing function modeling by RCS flow and temperature distribution in core should be accurate. This subject is being studied and developed continuously.

1. 서론

최근에 재장전 노심설계의 안전성 평가에 노심의 유량 비대칭을 고려해야 할 필요성이 대두되고 있다. 고리3호기의 경우 11주기에서 14주기까지의 원자로 냉각재 유량 및 온도 측정 결과를 분석해 보면 유로 별 주기평균에 대한 최대 편차는 유량의 경우 +3.75%, 입구온도는 -0.34 °F, 출구온도는 -1.67 °F로 나타났다. 유로 별 경향을 보면 Flat 쪽으로 유입되는 유로 C의 경우 유량이 작고, 출구온도가 높으며, Flat과 Corner 사이로 유입되는 유로 A는 반대의 결과를 보여주고 있다. 또한 11주기에서 14주기까지의 Incore Flux Mapping 결과는 크지는 않지만 주기 초에서 IQPT가 발생한 위치에서 주기말까지 IQPT가 발생함을 보여 주고 있다. 따라서 고리 3호기의 경우 어느 정도 냉각재 유량 및 온도의 노심 내 비대칭으로 인한 IQPT가 있는 것으로 예상되었다. Forcing Function은 냉각재 온도 및 유량 비대칭과 같은 노심내 사분 출력 편차를 유발시키는 인자를 말하며, Forcing Function Modeling은 이러한 인자를 노심 모사에 포함시키는 것이다. 따라서 측정 유량 및 온도 분포를 기준으로 Forcing Function을 Modeling하여, 이에 의한 노심내 출력편차의 영향을 분석하고 Modeling 결과와 Flux Mapping 결과를 비교함으로써, 측정된 IQPT와 Forcing Function과의 관계를 평가할 필요가 있다. 또한 Forcing Function이 감지될 경우 연소된 연료의 Shuffle 기준을 제시하면 미연에 IQPT에 대한 위험도를 최소화시킬 수 있다.

2. 본론

2.1 IQPT(Incore Quadrant Power Tilt) 발생 원인

IQPT는 Incore flux mapping에 의한 방법으로 계산된 사분 출력의 편차로 정의되며, 통상적인 발생원인으로는 As-Built 농축도/밀도, As-Built 가연성 흡수봉 농도, 대칭 위치 연소연료의 연소도 편차, 유량 비대칭, Map Quality, 계측 Bias등이 있다. 이중 IQPT에 주로 영향을 미치는 것으로는 대칭 위치 연소연료의 연소도 편차와 유량 비대칭을 들 수 있다. 고리3호기의 경우, 13주기 초반에 전출력, 평형 지논에서 IQPT가 1.5%가량이 발생하였고, 유로 별 측정 냉각재 유량 및 온도가 Forcing Function의 가능성을 보여 주었다.

2.2 고리3호기 측정 냉각재 열수력 자료 분석

표 2.2.1은 고리 3호기 11주기에서 14주기 까지 주기초 유로 별 열수력 자료를 정리한 것이며, 그림 2.2.1은 측정 자료 및 실제 입구 유로 위치를 기준으로 노심 내 열수력 분포를 그려본 것이다.⁽¹⁾ 이에 의하면 Flat에서 유입되는 유로 C가 유량은 평균 2.4% 가량 낮게, 출구온도는 0.8 °F 높게 나타났으며, Flat과 Corner사이로 유입되는 유로 A는 유량은 2.7% 높게, 출구온도는 0.9 °F 낮게 나타났으며, 열 출력은 유로 C가 1.1% 낮게 유로 A가 1.0% 높게 나타났다. Corner로 유입되는 유로 B는 대체로 평균에 가까운 결과를 보여 주고 있다. 이러한 측정 결과에 의하면 고리 3호기는 어느 정도 Forcing Function이 존재하는 것으로 보여 진다.

그림 2.2.1. 고리3호기 노심 내 냉각재 유량 및 온도 분포

고리3호기11주기 냉각재 유량 및 온도 측정 자료

유로	유량(gpm)	입구온도 (° F)	출구온도 (° F)	열출력(MWth)
A	99630 (+1.48%)	555.71 (-0.04° F)	618.02 (-0.32° F)	932.74 (+1.01%)
B	99108 (+0.95%)	555.72 (-0.03° F)	617.79 (-0.55° F)	923.54 (+0.01%)
C	95780 (-2.44%)	555.81 (+0.06° F)	619.20 (+0.86° F)	914.04 (-1.02%)
평균	98173	555.75	618.34	923.44
합	294518	-	-	2770.32

고리3호기12주기 냉각재 유량 및 온도 측정 자료

유로	유량(gpm)	입구온도 (° F)	출구온도 (° F)	열출력(MWth)
A	102120 (+3.75%)	556.58 (+0.28° F)	616.70 (-1.67° F)	925.16 (+0.15%)
B	97270 (-1.18%)	556.25 (-0.05° F)	618.86 (+0.49° F)	922.01 (-0.19%)
C	95900 (-2.57%)	556.08 (-0.22° F)	619.56 (+1.19° F)	924.21 (+0.05%)
평균	98430	556.30	618.37	923.79
합	295290	-	-	2771.38

고리3호기13주기 냉각재 유량 및 온도 측정 자료

유로	유량(gpm)	입구온도 (° F)	출구온도 (° F)	열출력(MWth)
A	99780 (+1.89%)	556.47 (-0.17° F)	618.34 (-0.72° F)	932.92 (+0.88%)
B	98070 (+0.14%)	556.60 (-0.04° F)	619.50 (+0.44° F)	933.92 (+0.99%)
C	95940 (-2.03%)	556.85 (+0.21° F)	619.35 (+0.29° F)	907.57 (-1.86%)
평균	97930	556.64	619.06	924.80
합	293790	-	-	2774.40

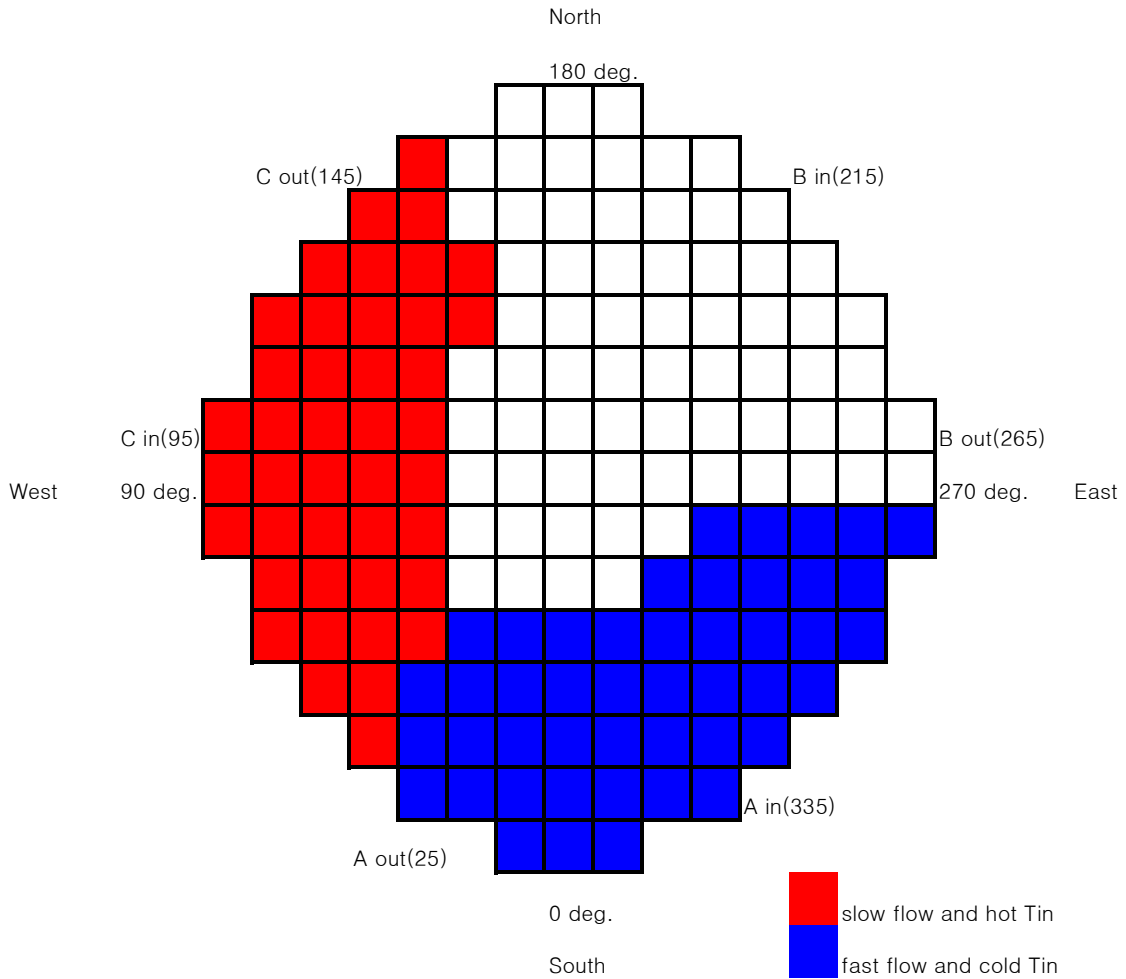
고리3호기14주기 냉각재 유량 및 온도 측정 자료

유로	유량(gpm)	입구온도 (° F)	출구온도 (° F)	열출력(MWth)
A	101663 (+3.54%)	556.59 (+0.05° F)	618.15 (-0.93° F)	940.28 (+1.78%)
B	97257 (-0.94%)	556.20 (-0.34° F)	619.25 (+0.17° F)	923.09 (-0.08%)
C	95634 (-2.60%)	556.84 (+0.30° F)	619.85 (+0.77° F)	908.06 (-1.70%)
평균	98185	556.54	619.08	923.81
합	294554	-	-	2771.43

고리3호기 유로별 냉각재 유량 및 온도 측정 자료 분석 결과

유로	유량(gpm)	입구온도 (° F)	출구온도 (° F)	열출력(MWth)
A	100798 (+2.67%)	556.12 (-0.05° F)	617.80 (-0.91° F)	932.77 (+0.95%)
B	97926 (-0.26%)	556.06 (-0.11° F)	618.85 (+0.14° F)	925.64 (+0.18%)
C	95814 (-2.41%)	556.33 (+0.16° F)	619.49 (+0.78° F)	913.47 (-1.14%)
평균	98179	556.17	618.71	923.96

그림 2.2.1. 고리3호기 노심 내 냉각재 유량 및 온도 분포



2.3 고리3호기 Flux Mapping 결과

고리3호기 11-13주기 Flux Mapping 결과에 의한 사분 출력 분포를 그림 2.3.1-3로 나타내었다. 이에 의하면 11주기와 12주기는 최대 사분 출력 편차가 1% 이내로 안정적으로 나타났으며, 13 주기는 N-E 위치에서 주기초 1.5%가량의 사분 출력 편차가 확인되었다. 대체적으로 측정 냉각재 유량 및 온도에 의한 분포가 유로 별 일정한 방향의 편차를 보이는 것에 비하여 IQPT는 그렇지 못한 결과를 보여주었다. 그러나 13주기의 결과는 IQPT 위험도가 무시할 수 없는 수준임을 나타내 주고 있으며, Forcing Function에 의한 IQPT 위험도를 최소화 할 필요성을 보여준다.

그림 2.3.1 고리 3호기 11주기 연소도 별 IQPT 측정 결과

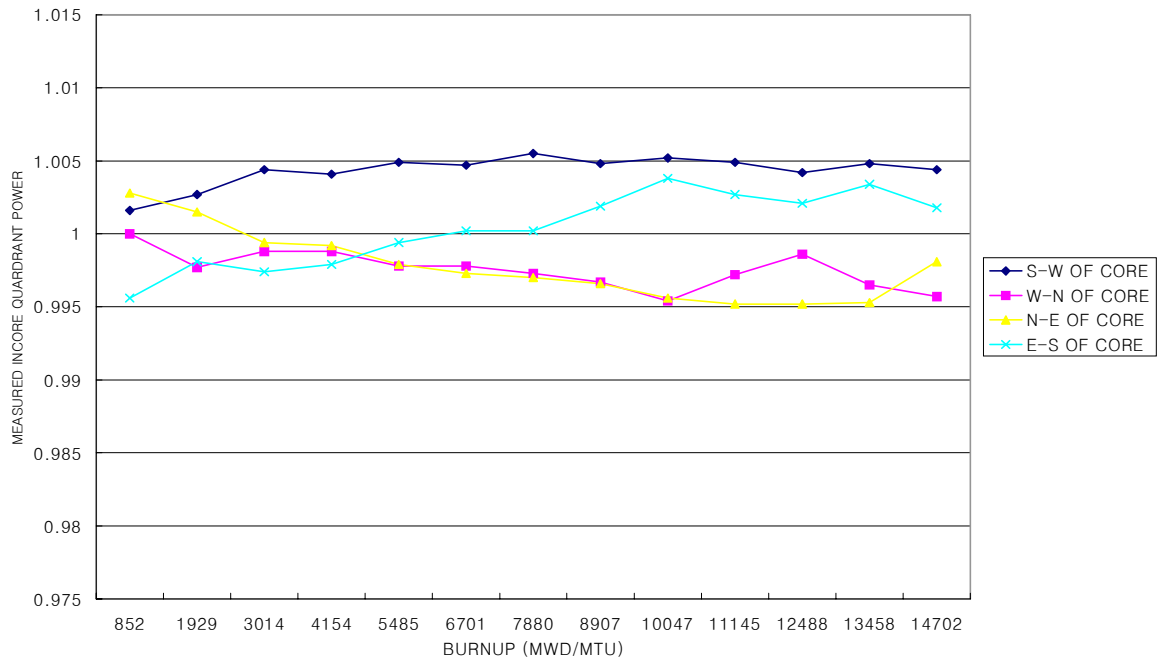


그림 2.3.2 고리 3호기 12주기 연소도 별 IQPT 측정 결과

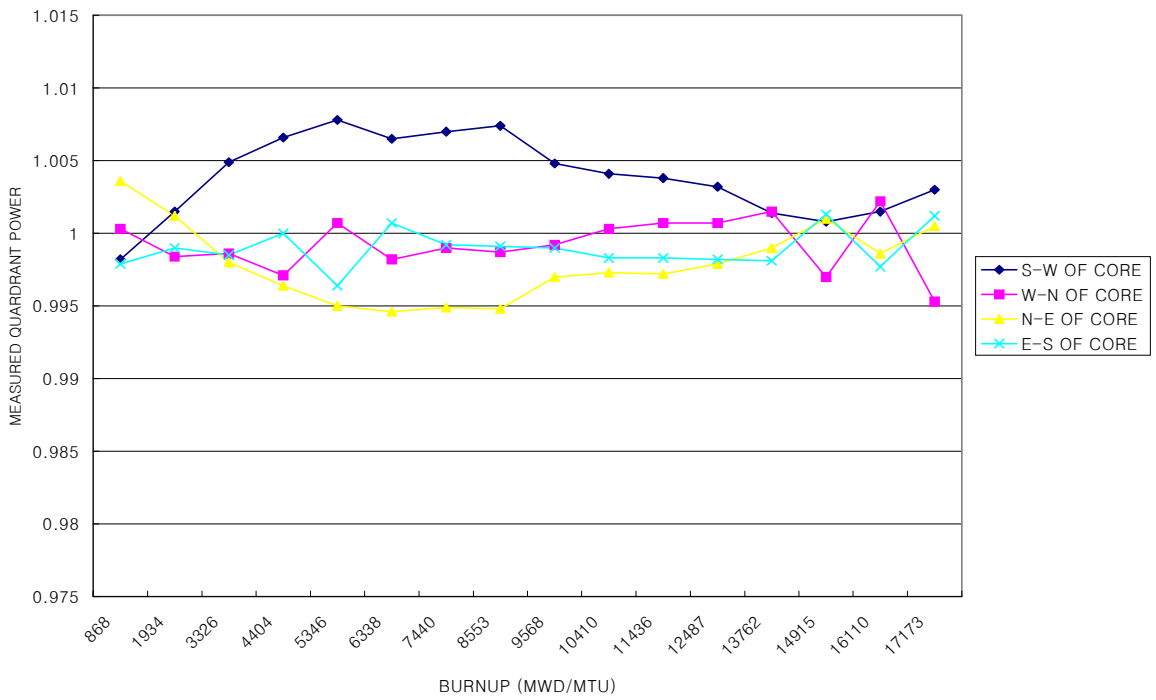
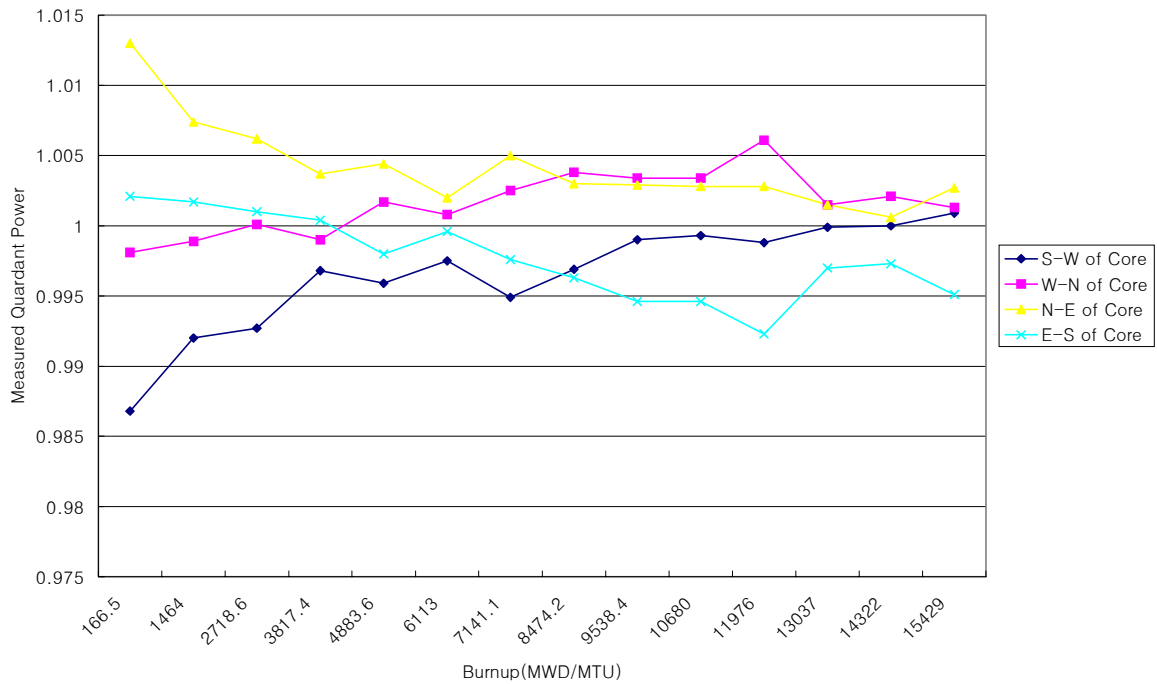


그림 2.3.3 고리 3호기 13주기 연소도 별 IQPT 측정 결과



2.4 Forcing Function Modeling

2.2장의 고리 3호기 측정 열수력 자료를 근거로 하여, 재장전 설계의 연소 모델로 사용중인 ANC 코드⁽²⁾를 이용하여 Forcing Function 모델을 생산하였다. 모델에 고려한 유량 및 온도 분포는 그림 2.4.1과 2로 나타냈는데, 유량은 평균을 기준으로 $\pm 3\%$ 편차가 있는 것을 가정하였으며, 온도는 전출력에서 평균 입구온도 $556.5\text{ }^{\circ}\text{F}$ 를 기준으로 $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{F}$ 편차가 있도록 하였다. 12주기 및 13주기는 기 연소된 사분면 대칭위치 연료의 연소도 편차에 의한 영향을 고려하기 위하여, 발전소의 측정 핵연료 집합체 연소도를 연소된 연료의 주기초 연소도로 입력하였다.

그림 2.4.1 Forcing Function Model 유량 분포

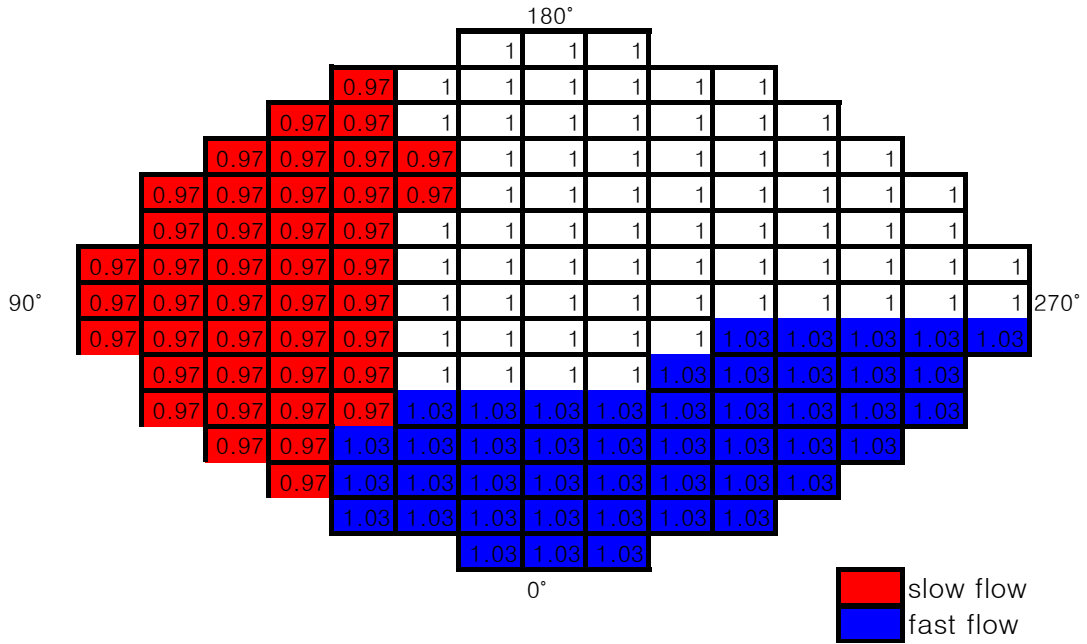
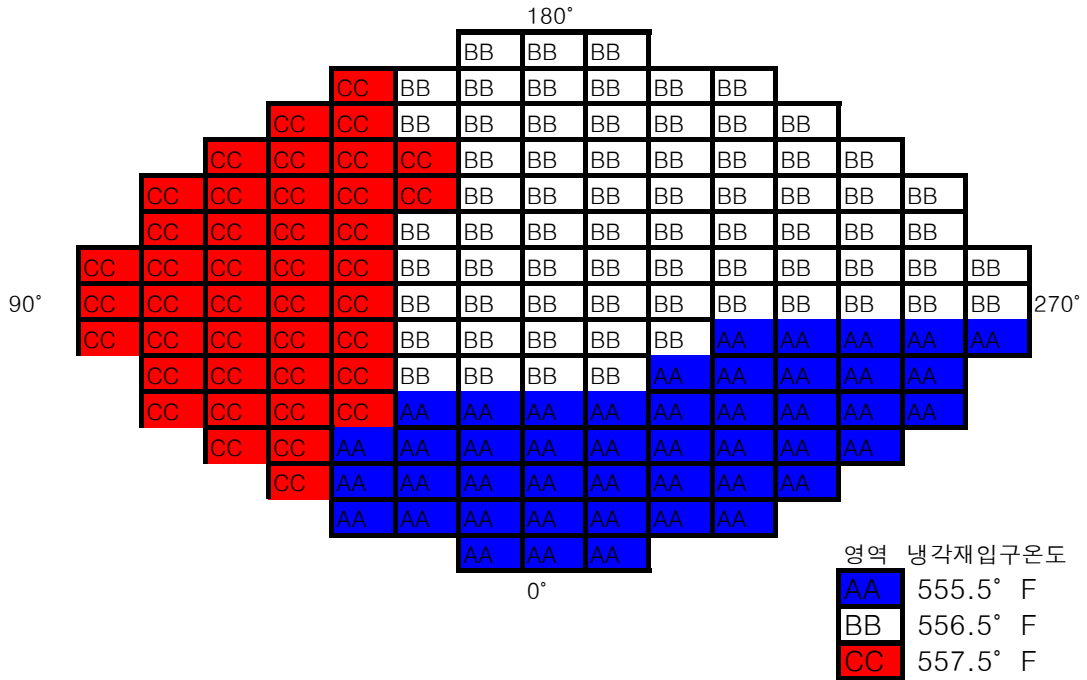


그림 2.4.2 Forcing Function Modeling 온도분포



2.5 계산 결과

2.4장의 유량과 온도 분포를 기준으로 forcing function model을 구성한 연소계산 결과를 그림 2.5.1에서 그림 2.5.5 까지 나타내었다. 결과에 의하면 높은 유량과 낮은 온도 분포를 가지는 E-S 위치에서 사분 출력이 높게 나타나고 있음을 보여 주고 있다. 특히 14주기와 15주기 장전모형을 연소 된 핵연료 집합체에 대한 Shuffle을 180°rotation으로 구성하였을 경우, 그림 2.5.3과 그림 2.5.4에 의하면 사분출력경사도가 14주기는 1.5%, 15주기는 2%가 주기 초에 나타남을 보여 준다. 또한 14주기에 Forcing Function에 의한 IQPT가 발생한 것을 가정하여 15주기 장전모형에서 Shuffle rotation 0°로 구성하여 연소 된 연료의 장전 위치를 전주기 사분 위치와 동일하게 하였을 경우, 그림 2.5.5에 나타난 것처럼 주기 전반에 걸친 사분출력 경사도가 0.5% 이내가 됨을 알 수 있다. 그림 2.5.4는 현재 운전 중인 고리 3호기 14주기의 Flux Mapping 결과와 연소 된 연료의 사분 대칭 위치에서의 연소도 편차 영향을 고려하기 위해 측정 연소도를 사용한 Forcing Function Modeling 결과를 나타낸 것이다. 측정치와 Modeling 결과와는 영역별 출력의 크기가 정확하게 일치하지는 않지만 유량이 크고 온도가 낮은 영역인 E-S위치에서 동일하게 사분 Tilt를 보여주어, Forcing Function에 의한 약간의 Tilt가 감지됨을 알 수 있다. 12,13,14주기의 주기 초 전출력에서 Forcing Function Modeling과 Flux Mapping에 의한 IQPT를 비교한 것을 표 2.5.1로 나타내었다. 표 2.5.1에 의하면 Tilt 크기와 위치가 Forcing Function Model의 결과와 Flux Mapping 결과가 다소 상이하게 나타났다. 14주기는 다른 주기에 비해서는 두 결과가 유사하게 나타났다. 표 2.5.2는 Forcing Function 을 적용한 모델과 적용하지 않은 모델과의 주기초 반경방향 침투 출력(FΔ H)을 비교한 것이다. 이 결과에 의하면 Forcing Function에 의한 FΔ H는 1.2~1.9% 가량 높게 나타났으며, 이것은 계산 불확실도 4%를 고려할 때 크지 않은 것으로 판단된다. 또한 Flux Mapping에 의해 얻은 FΔ H 결과와 비교하여, Forcing Function을 적용한 모델의 결과가 Forcing Function을 적용하지 않은 모델보다 작은 오차를 보여 주었다. 표 2.5.1과 2의 재장전 집합체 연소도는 측정 값을 사용하였다. 표 2.5.3은 냉각재 유량 및 냉각재 입구온도 편차에 따른 QPTR 민감도를 표시한 것이다. 표에 의하면 냉각재 입구온도 1 °F의 편차에 QPTR은 0.004가 증가하였고, 유량은 1% 증가에 0.002증가하는 것으로 나타났으며, 유량 1%와 온도 1 °F를 조합하였을 경우 0.006이 증가하였다. 이는 QPTR 1.02이상이면 냉각재 입구온도 편차만으로는 5 °F이상, 유량만으로는 10% 이상 그리고 유량 3%이상과 입구온도 3 °F 이상이 조합될 경우에 가능함을 보여준다.

그림 2.5.1 K3C12 FORCING FUNCTION MODELING RESULTS WITH MEASURED BURNUP

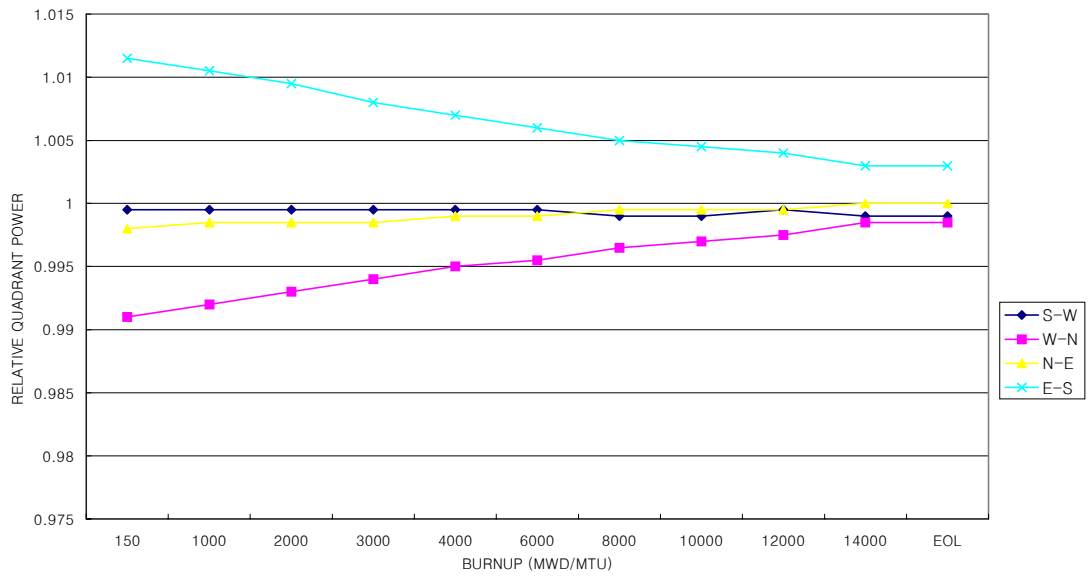


그림 2.5.2 K3C13 FORCING FUNCTION MODELING RESULTS WITH MEASURED BURNUP

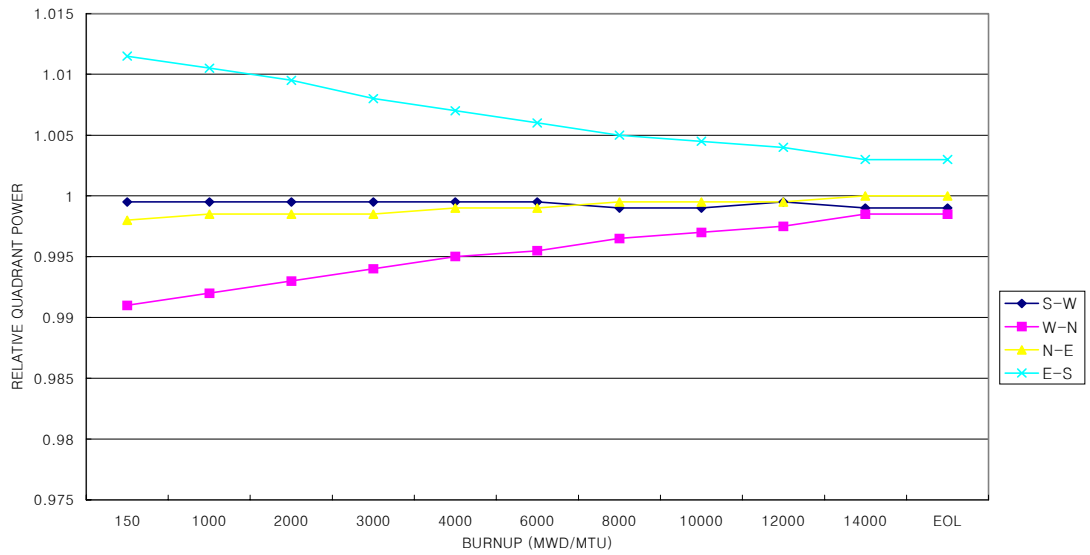


그림 2.5.3 K3C14 FORCING FUNCTION MODELING RESULTS WITH 180° SHUFFLE

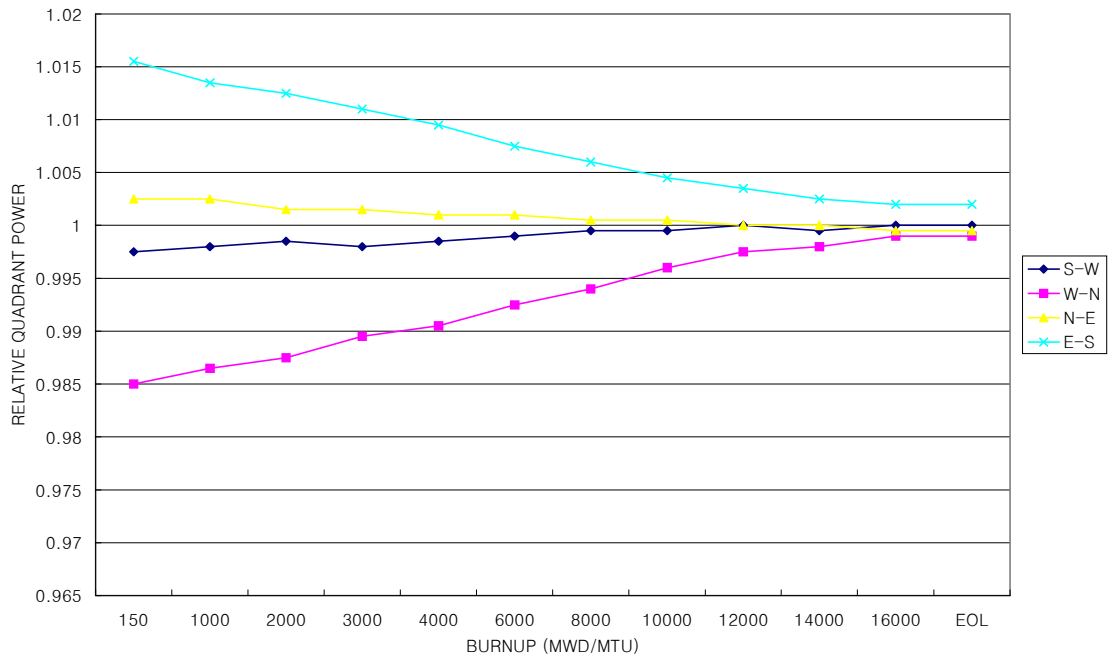


그림 2.5.4 K3C15 FORCING FUNCTION MODELING RESULTS WITH 180° SHUFFLE

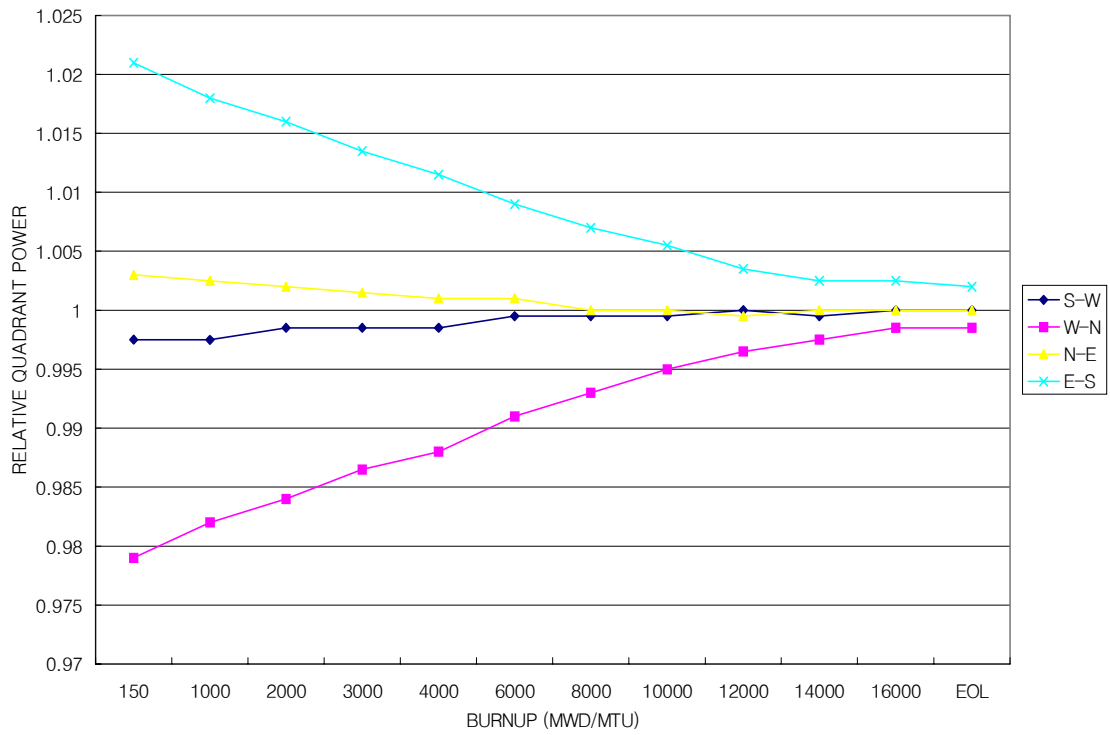


그림 2.5.5 K3C15 FORCING FUNCTION MODELING RESULTS WITH 0° SHUFFLE

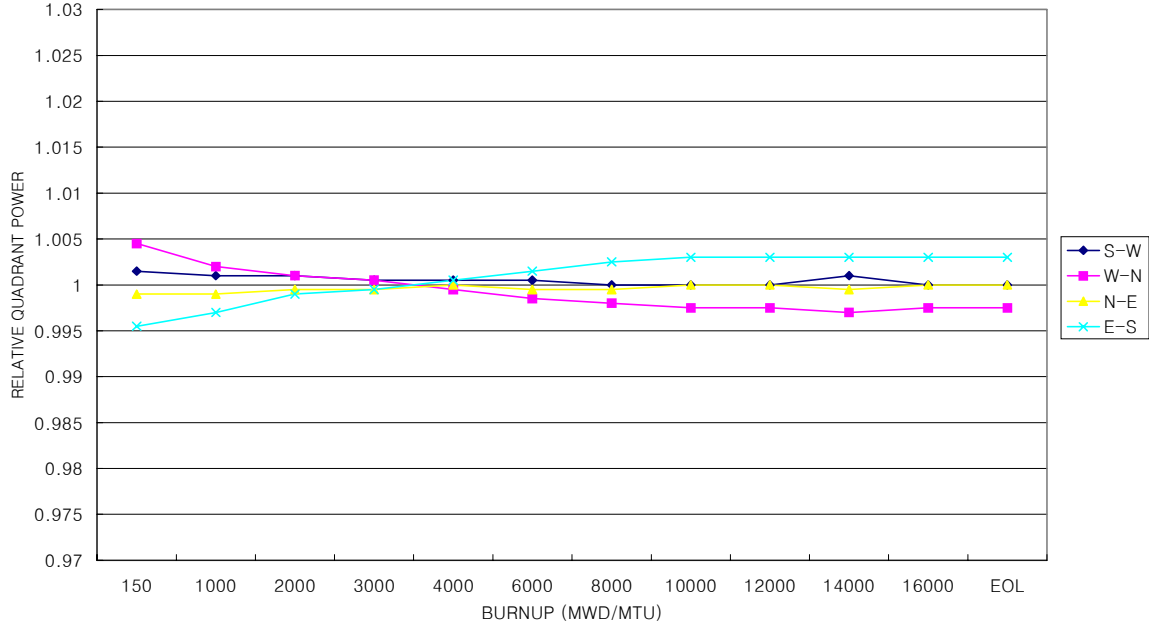


그림 2.5.6 K3C14 FF Model with Measured Burnup 과 Incore Flux Mapping 결과 비교

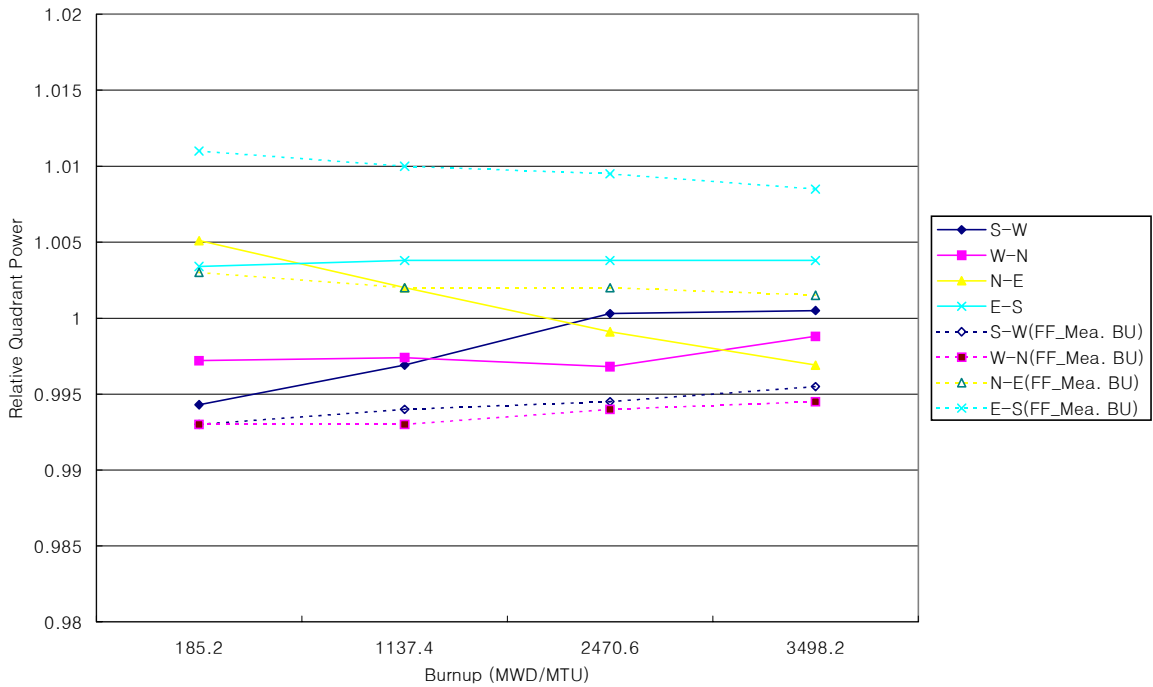


표 2.5.1. 고리 3호기 FF Model과 Incore Flux Mapping의 주기초 전출력 QPTR 비교

Location	K3C12 FF Model	K3C12 IQPT	차이 (%)
S-W	0.99	0.996	-0.60
W-N	0.999	1.0016	-0.26
N-E	1.004	1.0052	-0.12
E-S	1.008	0.9972	1.08

Location	K3C13 FF Model	K3C13 IQPT	차이 (%)
S-W	1	0.9868	1.34
W-N	0.991	0.9981	-0.71
N-E	0.998	1.013	-1.48
E-S	1.012	1.0021	0.99

Location	K3C14 FF Model	K3C14 IQPT	차이 (%)
S-W	0.993	0.994	-0.10
W-N	0.993	0.997	-0.40
N-E	1.003	1.005	-0.20
E-S	1.011	1.004	0.70

표 2.5.2 고리 3호기 FF model과 NDR^(3,4,5) model 및 MAPPING 결과와의 주기초 FΔH 비교

주기	NDR (A)	Mapping (B)	FF MODEL (C)	차이 % ((C-A)/A)	차이 % ((C-B)/B)	차이 % ((A-B)/B)
K3C12	1.467	1.473	1.485	1.23	0.81	-0.41
K3C13	1.469	1.514	1.489	1.36	-1.65	-2.97
K3C14	1.455	1.475	1.483	1.92	0.54	-1.36

표 2.5.3 유량 및 입구온도 변화에 따른 주기초 전출력 QPTR 민감도 평가

유량 편차	1%	2%	3%	4%	5%
QPTR	1.002	1.004	1.006	1.007	1.009
입구온도 편차	1 °F	2 °F	3 °F	4 °F	5 °F
QPTR	1.004	1.008	1.012	1.016	1.02
유량+입구온도 편차	1% + 1 °F	2% + 2 °F	3% + 3 °F	4% + 4 °F	5% + 5 °F
QPTR	1.006	1.011	1.017	1.023	1.029

3. 결론

고리3호기의 주기초 열수력 측정결과는 유로 C와 유로 A에서 냉각재의 유량 및 출구 온도가 동일한 방향성을 가지고 편차를 보이고 있으며, 노심 내 Forcing Function이 존재하는 것으로 예측되었다. 따라서 웨스팅하우스형 3-Loop 발전소인 고리 3호기에 대하여 유량 편차 ± 3%, 입구온도 편차 ± 1 °F가 되도록 Forcing Function Model을 구성하여 사분 출력 분포를 평가하였다. 실제 고리3호기 11주기부터 14주기까지의 IQPT는 13주기초 외에는 우려할 만한 결과를 나타내지는 않았다. Modeling 결과는 Forcing Function에 의해 1% 정도 주기초 Tilt가 발생하는 것으로 평가되었다. 연소 된 연료의 Shuffle이 14주기와 15주기에 연속적으로 180° 만으로

rotation되었을 경우는 14주기 1.5%, 15주기는 주기초 전출력에서 2%를 초과하는 Tilt가 발생될 것으로 예상되었다. 그러나 Forcing Function이 있음을 예상하여 15주기 재장전 연료의 rotation이 가급적 0°로 Shuffle 되도록 하였을 경우 주기 전반에 걸친 Tilt가 0.5% 이내로 감소됨을 알 수 있었다. Forcing Function에 의한 FΔH는 1.2~1.9% 가량 높게 나타났는데, 이것은 측정 불확실도 4%를 고려할 때 크지 않은 것으로 판단되며, Flux Mapping에 의해 얻은 FΔH 결과와 비교하여, Forcing Function을 적용한 모델의 결과가 Forcing Function을 적용하지 않은 모델보다 작은 오차를 보여, 유량 및 입구온도 편차에 따른 민감도 분석 결과 냉각재 입구온도 1°F 편차에 QPTR 0.004, 유량 1% 편차에 0.002 증가하는 것으로 나타났다.

Forcing Function에 의한 IQPT의 위험도를 줄이기 위해서는 장전모형 선정 시 재장전 연료의 shuffle category를 가급적으로 균등하게 분포하도록 하거나 IQPT가 우려되지 않는 rotation 분포를 결정하여 연소된 연료의 rotation 분포가 이를 벗어나지 않도록 하는 Safe Zone을 설정하는 것이 필요함을 본 연구 결과로 알 수 있었다. 또한 운전중인 발전소에서 forcing function에 의한 IQPT 발생시, 후속 주기의 장전 모형은 재장전 연료의 shuffle rotation이 180°가 되지 않도록 하면 후속주기의 IQPT를 현저하게 줄일 수 있는 것으로 나타났다. 본 연구에서는 Forcing Function Model의 결과와 측정 IQPT가 그 크기나 위치가 다소 상이하게 나타났다. 이는 고리 3호기의 Tilt가 유량 및 온도 비대칭 만의 Forcing Function으로 발생하는 것이 아님을 의미한다. Forcing Function에 의한 IQPT를 효과적으로 모사하기 위해서는 노심 내 냉각재 온도 및 유량 분포의 정확한 모델링, 측정 열수력 자료의 uncertainty 및 Mapping 결과의 Quality등을 제고해야 하며, 이는 지속적으로 연구해야 할 과제이다.

4. 참고문헌

- [1] Brian Beebe, "Forcing Function Modeling," Westinghouse Technology User's Group Spring 2001 Meeting (Feb. 2001)
- [2] Y.S. Liu et al., "ANC - A Westinghouse Advanced Nodal Computer Code," WCAP-10965-P-A (Sep. 1986)
- [3] Seong, K. B., et. al., "The Nuclear Design and Core Physics Characteristics of the Kori Nuclear Power Plant Unit 3 Cycle 12," KNF-K3C12-98015 (Jun. 1998)
- [4] Seong, K. B., et. al., "The Nuclear Design and Core Physics Characteristics of the Kori Nuclear Power Plant Unit 3 Cycle 13," KNF-K3C13-99032 (Jan. 2000)
- [5] Seong, K. B., et. al., "The Nuclear Design and Core Physics Characteristics of the Kori Nuclear Power Plant Unit 3 Cycle 14," KNF-K3C14-01013 (Apr. 2001)