

## RETRAN-3D를 사용한 고리 4호기 다차원 주증기관 파단사고 분석

### Multidimensional Main Steam Line Break Analysis for Kori Unit 4 Using RETRAN-3D Code

성송기, 장찬수, 류석희, 황순택  
한전원자력연료(주). 대전광역시 유성구 덕진동 150번지

#### 요 약

본 연구의 목적은 전형적인 과도해석 문제에 대한 안전성 여유도 증가와 설계절차의 통합화를 목표로 기존 과도해석 방법론의 개선 가능성을 고찰하는 것이다. 한 접근으로써, RETRAN-3D의 다차원 동특성 모델을 적용하여 고리 4호기 주증기관 파단사고에 대한 해석을 수행하였으며, 분석은 두가지 다른 초기 조건에 대한 Plenum-to-plenum 모델 경우와 증기발생기의 상세모델과 원자로냉각재계통 모델을 결합한 계통 통합모델 경우에 대하여 수행하였다. Plenum-to-plenum 모델 경우는 원자로 노심과 노심의 경계조건 표현에 필요한 입출구로 구성되며, 경계조건으로 현행 고리 4호기 FSAR 주증기관 파단사고 분석시 사용된 LOFTRAN 계통코드(일점 동특성 모델)로 생산 자료를 사용했다. 통합모델의 경우는 증기발생기의 상세모델을 포함하는 전체 계통 모델에 Plenum-to-plenum모델을 노심부분에 통합한 경우로 이는 계통 전체의 최적 거동을 파악하기 위함이다. 평가 결과, 노심에 인가된 총 반응도면에서 LOFTRAN과 RETRAN-3D 계산결과는 거의 비슷한 경향 및 크기를 보이는 반면, 노심 최대 출력은 RETRAN-3D에 의한 계산결과가 LOFTRAN 계산 결과에 비해 약 3분의 1 정도이다. 이러한 계산값의 차이는 일점 동특성 모델에서 고려하지 못하는 반경방향 및 축방향 출력 재분포의 영향인 것으로 사료된다.

#### Abstract

The objective of this study is to examine the feasibility of improving the existing Non-LOCA analysis methodology with the goal of achieving integrations in a design process and increases in the safety margin for the typical transient problem. As an approach, Three analyses of a Kori Unit 4 steam line break utilizing the multidimensional kinetic model have been performed using RETRAN-3D, two plenum-to-plenum model cases with different initial conditions and one integrated case with a detailed SG(steam generator) and RCS loop model. Plenum-to-plenum cases represent the core and enough of the core inlet and outlet to supply a set of boundary conditions that come from the LOFTRAN run with a point kinetics core model used for the current Kori Unit 4 FSAR analysis. The integrated model case incorporates the plenum-to-plenum multidimensional kinetics core model into the complete system model with a detailed SG model to investigate best estimate integral system behavior. The RETRAN-3D and LOFTRAN calculations for the total core reactivity in the plenum-to-plenum cases show good agreement. However, the RETRAN-3D core peak power is much lower which is about one third of the LOFTRAN calculation. The difference in the RETRAN-3D and LOFTRAN power response was traced to radial and axial power redistribution in the core.

## 1. 서론

가압경수로에서 주증기관 파단사고는 주증기관의 양단이 파단되어 증기 유량이 증가하고 증기 발생기세관에서 1차/2차 열전달에 따라, 1차측 냉각재의 온도는 감소하고 밀도는 증가하게 되어 노심의 음의 냉각재 온도 반응도 계수(Negative Moderator Temperature Reactivity Coefficient) 특성으로 중성자 감속효과가 증가하게 되며, 이에 따라 노심에 정반응도가 인가되어 노심 출력이 증가하게 되는 사고이다. 이 사고는 결국 안전주입계통 작동으로 봉산수가 노심내로 유입되고 이로 인하여 출력 증가는 멈추게 된다.

현재 원자력발전소 최종안전성평가보고서(FSAR) 작성시 수행되는 주증기관 파단사고 분석은 최대 제어봉가를 갖는 제어봉이 완전 인출 위치에서 고착되어 있는 것으로 가정하며 파단된 주증기관에 해당하는 1차측 노심 유로에 상대적으로 많은 정반응도가 삽입되게 하는 방법으로 노심반경방향 비대칭적 반응도 궤환(Feedback)을 모사한다. 이러한 비대칭적 반응도 궤환으로 기존 일점동특성(Point Kinetics) 방법론에서는 반응도 삽입 거동의 타당성이 3차원 노심 분석코드<sup>[4]</sup>로 확인되어야 한다. 또한 DNBR 분석을 위한 노심내 출력분포 역시 기존 단순화된 일점 동특성 노심 모델에서는 국부적인 출력분포 계산이 불가능해 별도의 3차원 핵설계 코드를 사용한다. 이때 노심 경계조건으로는 계통 분석코드의 결과물인 노심 입구의 유량, 온도, 압력등을 사용한다. 이 과정에서 설계분야간의 연계자료 생산이 이루어지며 부가적인 보수성이 주어지고 각각 분리된 별개의 설계과정이 필요하게 된다.

현재 웨스팅하우스형 원전<sup>[3]</sup> 및 한국표준형 원전 설계 방법론의 노심해석에 있어서 중성자 일점동특성 모델을 적용하고 있으며, 앞에서 언급한대로 일점 동특성 모델의 한계로 노심의 비대칭적 특성에 따른 노심 반응도 계수를 매우 보수적으로 고려하고 있다. 따라서 다차원 노심 모델을 개발하여 주증기관 파단사고 분석에 적용할 경우 상당한 이득이 있을 것으로 판단된다.

본 연구에서는 RETRAN-3D<sup>[1]</sup> 코드를 사용하여 다차원 노심 모델을 생산하였으며, 필요한 경계값으로는 기존 일점 동특성 모델에서 생산된 시간에 따른 노심 입출구 경계조건을 사용하여 반응도 투입양과 출력변화를 검토하였다(Case 2, 3). 또한 이와 별도로, 통상적인 계통모델에 증기발생기 상세 모델과 위 Case 2, 3의 다차원 노심 모델을 결합시킨 최적 통합모델(Case 4)을 사용하여 반응도 투입양과 출력변화를 검토하였다.

## 2. 본론

### 2.1 분석가정

본 사고를 해석하기 위하여 현재 참조발전소(고리 4호기)의 인허가 설계용으로 사용되고 있는 LOFTRAN<sup>[2]</sup> 코드와 미국전력연구원(EPRI)에서 개발하였으며 다차원 노심 모형 및 상세 증기발생기 모형등을 모사할 기능을 갖고 있는 RETRAN-3D 계통코드를 사용하였다. 본 사고해석시 적용된 RETRAN-3D 다차원 노심모형은 열수력적 유사성이 있는 유로별로 그림 1과 같이 구성되었으며 모두 24 개 유형의 유로로 이루어진다. 본 사고해석시 노심 다차원 모델의 반응도계수 상수(RETRAN-3D Input Data Tape 67) 작성을 위하여 적용된 원자력 발전소의 노심은 157 다발의 핵연료 집합체가 장전되는 고리 4호기 원자력발전소이다. 본 사고해석시 1번 유로는 제어봉이 고착된(Stuck rod) 핵연료 집합체를 나타내며, 23번과 24번 유로는 핵연료 집합체가 장전되지 않은 반사체 등의 구조물을 모사한다.

통합모델(Case 4)에서 상세 증기발생기 모델(그림 7)은 1차 습분분리기 모델을 포함한다. 이 모델 Case의 노심모델(그림 8)은 노심 분리(Core Split)모델을 적용하였다.

본 연구에서는 다차원 노심모형을 기본으로 하고 다음 2 가지 노심 입출구 경계조건의 결정 방

법으로 크게 구분하여 해석을 수행하고 결과를 기존 모델과 비교/분석하였다.

(1) LOFTRAN을 이용한 경계조건 적용(Case 1, 2, 3)

노심의 Lower Plenum과 Upper Plenum에서의 원자로냉각재의 압력, 온도, 질량유속(Mass Flux), Enthalpy 등의 물성치를 LOFTRAN 코드를 이용하여 시간에 대한 함수로 경계조건을 결정한다.

(2) 1차측 및 2차측의 세밀 모사 통한 경계조건 적용(Case 4)

다차원 원자로 노심과 더불어 원자로냉각재 계통 및 증기발생기를 포함한 NSSS계통 전체를 통합한 모델을 사용하여 노심 경계조건을 결정한다.

## 2.2 계산결과

본 연구에서는 다음 4가지 경우에 대해 비교 분석하였다.

- Case 1: LOFTRAN 코드를 이용한 고리 3&4호기 Point Kinetics 모델 (LOFTRAN Existing Model, 15.87 MW 노심출력)
- Case 2: 노심출력 10.0MW의 다차원 노심해석 모델(RETRAN-3D Plenum to Plenum Model, 상기 Case 1에서 생산된 노심 입출구 경계조건 사용)
- Case 3: 노심출력 15.87MW의 다차원 노심해석 모델(RETRAN-3D Plenum to Plenum Model, 상기 Case 1에서 생산된 노심 입출구 경계조건 사용)
- Case 4: 1,2차 계통 모델과 다차원 노심해석 모델을 결합한 통합모델(RETRAN-3D Integrated Model, 27.75 MW 노심출력)

그림 2와 그림3은 사고 초기 및 최대 노심출력 시점에서의 반경방향 노심 출력분포를 보여주며, 그림 4, 그림 5, 그림 6에서는 사고시 삽입되는 시간에 따른 노심 총반응도, 노심출력 및 각 반응도인자에 대한 천이거동을 각각 보여주고 있다. 그림 4에서 보면, 초기 원자로심은 정지여유도  $-1.77\% \Delta\rho$ 를 만족하며, 이후 반응도 케환에 의해 반응도가 증가된다. Point Kinetics 모델을 사용한 LOFTRAN결과와 다차원 모델을 사용한 RETRAN-3D의 결과가 반응도 측면에서 거의 비슷한 양상을 갖고 변화됨을 볼 수 있다. 또한 다차원 모델에서 초기 노심 출력의 차이에 따른 천이기간 중 투입된 반응도 총량의 증가 정도는 무시할 만하며, 1차측과 2차측을 통합하여 다차원 모델을 적용한 결과 시간에 따른 반응도 증가량이 임계에 도달하지 않음을 볼 수 있다.

그림 4를 참조하여 그림 5의 시간에 따른 노심출력 변화를 살펴보면, 우선 Point Kinetics 모델을 이용한 LOFTRAN의 계산결과가 다차원모델을 적용한 RETRAN-3D 결과 보다 훨씬 큰 출력 증가를 보여 주고 있음을 확인할 수 있고, 다차원 모델을 적용한 결과 중 1차측과 2차측을 통합하여 모델링한 경우는 반응도가 임계에 도달하지 못함에 의해 노심 출력 변화가 없음을 알 수 있다.

15.87MW 초기출력의 Plenum-to-Plenum 모델 (Case 3)의 감속재 온도계수(그림 9)는 초기에  $0.255 \rho/g/cc$ 를 유지하다 13초이후  $0.452 \rho/g/cc$ 로 증가한다(평균  $0.353 \rho/g/cc$ ). 이 기간중 기존 모델(Case 1)은 감속재 밀도가  $0.746 \sim 0.78$  (0초 $\sim$ 13초) 및  $0.78 \sim 0.80$  (13초 $\sim$ 34초) 을 가지며 이에 해당하는 감속재 온도계수는  $0.365 \sim 0.343 \rho/g/cc$  및  $0.343 \sim 0.330 \rho/g/cc$  이다(평균  $0.347 \rho/g/cc$ ). 평균 감속재 밀도의 반응도 계수는 비슷한 경향을 보여주고 있으며 이에 대한 결과는 그림 4에서 보여주듯이 총반응도 삽입량이 Case 1과 Case 3이 거의 동일한 결과를 가지는 것으로 나타났다. 그림에도 불구하고 노심 최대 출력은 다차원 노심 모델(Case 3)이 기존 Point Kinetics 모델(Case 1)에 비해 약 1/3 정도이다. 이러한 경향은 같은 노심 반응도 삽입에 Point Kinetics

모델에서 계산이 불가능한 반경방향 및 축방향 출력 재분포의 영향인 것으로 판단된다.

통합모델(Case 4, Integrated Model)과 기존 모델의 계통인자 비교는 그림 10 및 그림 11에서 보여주며 특히, 증기발생기의 압력강하는 세부 증기발생기 모델링을 갖고 있기 때문에 Case 4가 보다 완만한 경향을 보여주고 있으며 증기발생기 열전달율은 사고직후 급격한 증가는 기존모델의 1/4 수준이며 이후 지속적인 증가하는 거동을 보여준다. 이는 기존 모델(Case 1)이 증기발생기 이차측이 한 개의 Volume으로 모사되기 때문에 사고기간 중 증기발생기 각 부분의 국부적 천이거동 영향을 고려할 수 없어 사고 초기부터 총체적인 비등을 수반하는 것에 기인하는 것으로 해석할 수 있다. 이에 따라 통합모델의 결과적인 반응도 삽입은  $1.4\% \Delta\rho$ 에 그쳐  $-0.37\% \Delta\rho$ 의 노심 최대 반응도를 유지하며 노심의 출력복귀(Return-to-Power)는 없다.

### 3. 결론

본 계산에서 일점 동특성(Point Kinetics) 모델과 다차원 모델을 적용한 노심의 거동에 대해 분석하였으며, 분석 결과에 따르면 다차원 모델을 적용할 경우 기존의 Point Kinetics 모델을 적용한 경우에 비해 노심 출력 측면에서 1/3 수준으로 상당한 여유도를 확보할 수 있음을 확인하였으며 상세 증기발생기 모형을 포함한 다차원 노심모형을 적용할 경우 출력복귀(Return-to-Power)가 발생하지 않음을 보여준다. 이는 결국 기존 분석모델에서 설계분야간에 연계자료생산 및 단순화된 분석모형의 배제를 통하여, 불필요한 설계의 보수성을 감소시켜 설계여유도를 확보하고 이를 발전소의 정지여유도 감소 등에 적용할 경우 운전 경제성 향상에 크게 기여할 수 있을 것으로 사료된다. 그리고, 다차원모델을 적용할 경우 계산의 용량이 많아 계산 시간이 많이 소요되나 이는 추후 보다 효율적인 전산기설치 및 분석 모형작성, 계산공정 변경(예, Parallel Computing)을 통하여 개선이 가능하리라 판단되며 향후 연구항목으로 남겨둔다.

### REFERENCES

1. NP-7450, Volume 3, Rev. 2, "RETRAN-3D - A Program for Transient Thermal-Hydraulic Analysis of Complex Fluid Flow Systems, Volume 3 : User's Manual," 1996. 10., Computer Simulation & Analysis, Inc. & EPRI.
2. WCAP-7878, Rev. 5, "LOFTRAN Code Description and User's Manual," 1989. 11.
3. Westinghouse Safety Analysis Standard 12, Rev. 3, "Steamline Rupture-Core Response," 1984. 6. 22.
4. WCAP-10956-P-A, "ANC : A Westinghouse Advanced Nodal Computer Code," Y.S. Liu et. al., September, 1986.



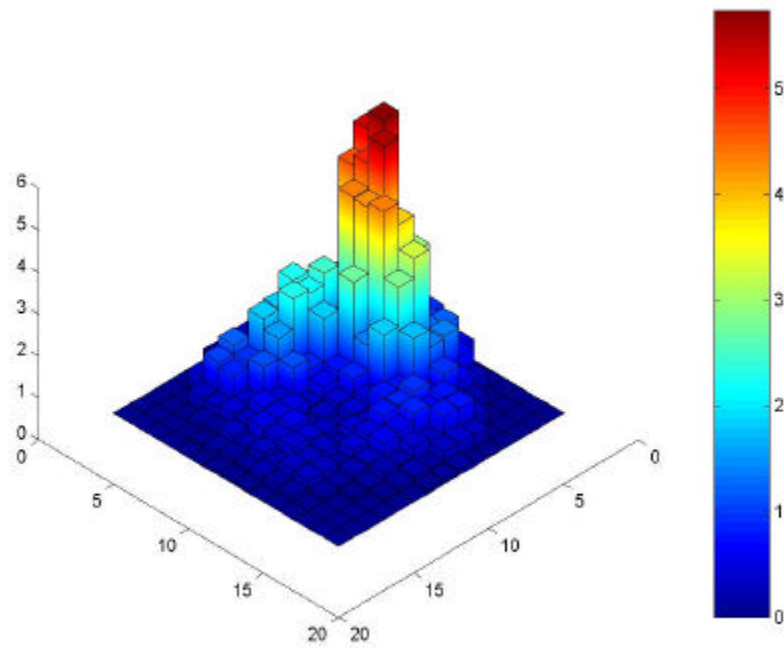


그림 3. RETRAN-3D Peak Radial Relative Power Distribution

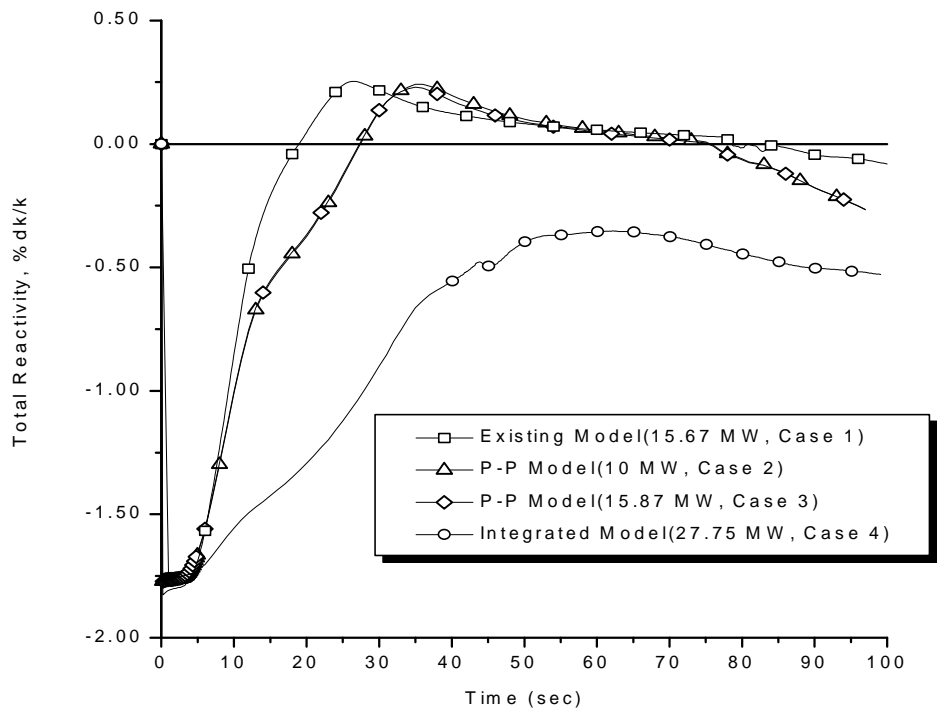


그림 4. RETRAN-3D Results (Total Reactivity)

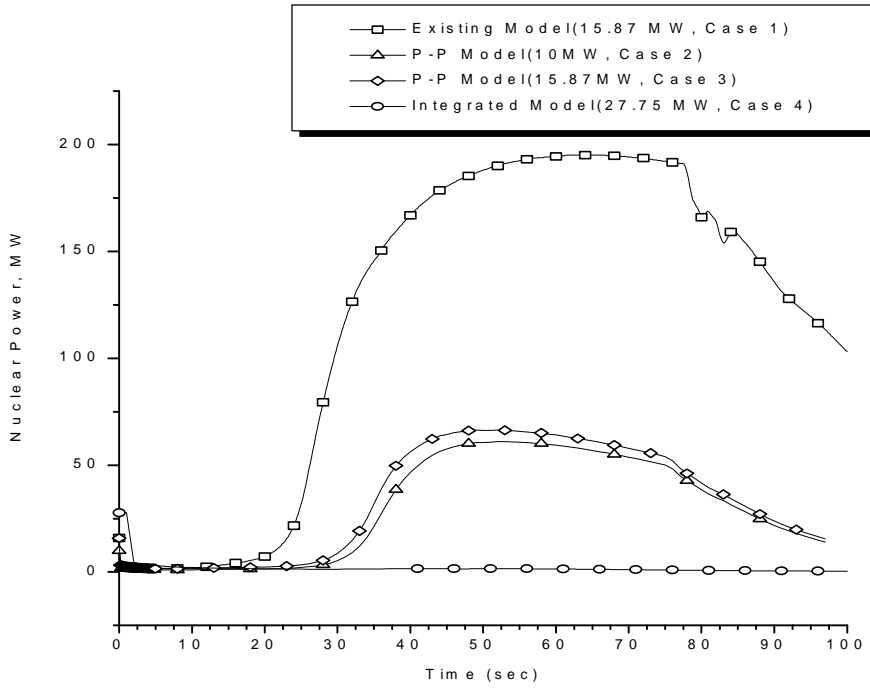


그림 5. RETRAN-3D Results (Total Core Power)

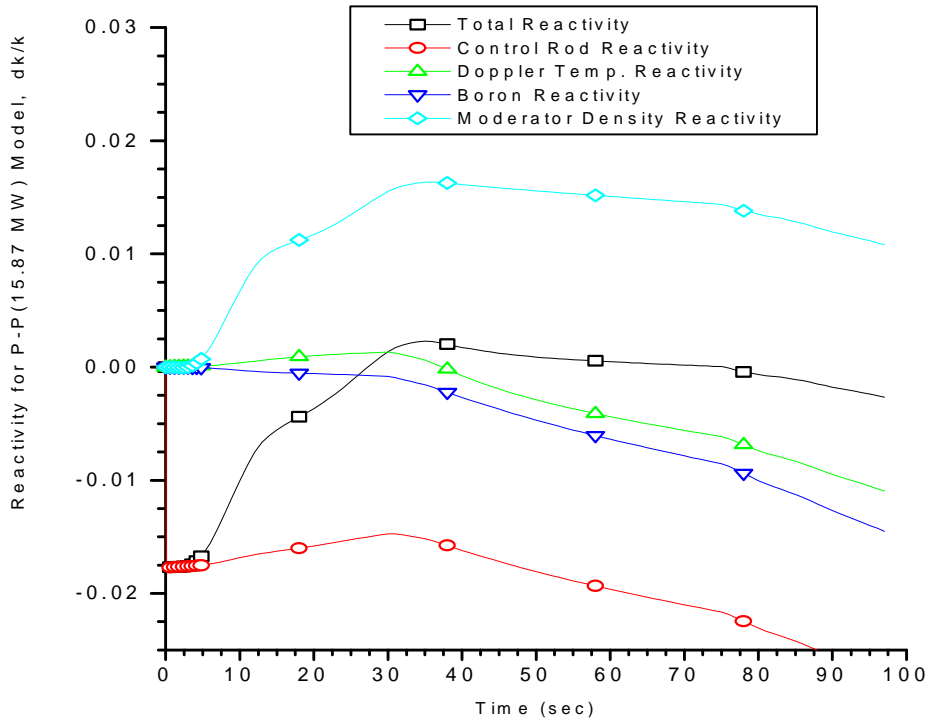


그림 6. RETRAN-3D Results (Reactivity Attributes)

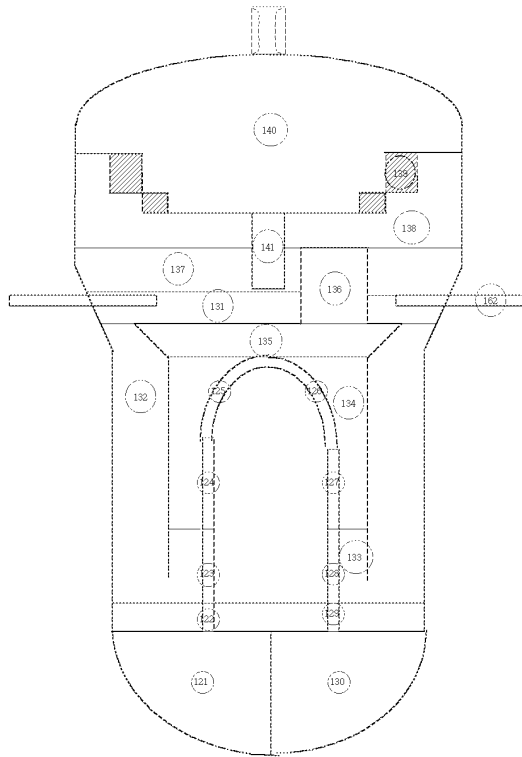


그림 7. 상세 증기발생기 모델링

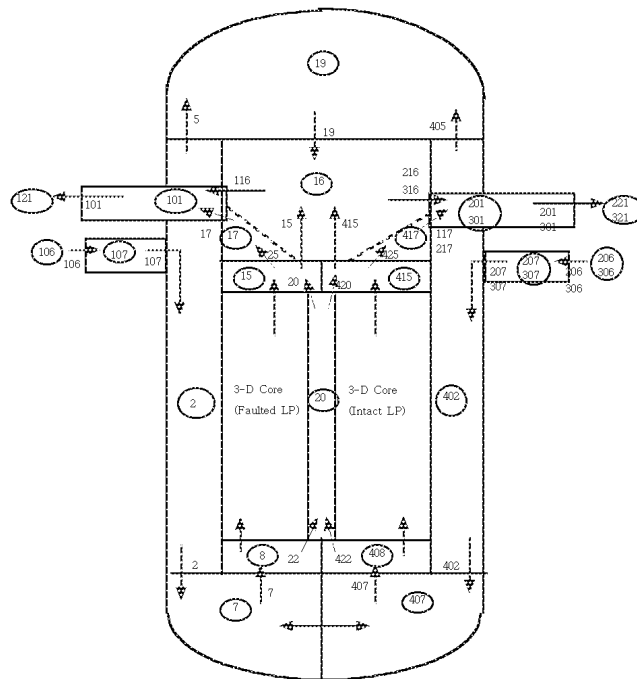


그림 8. 노심 모형 - 분리모델(Core Split Model)



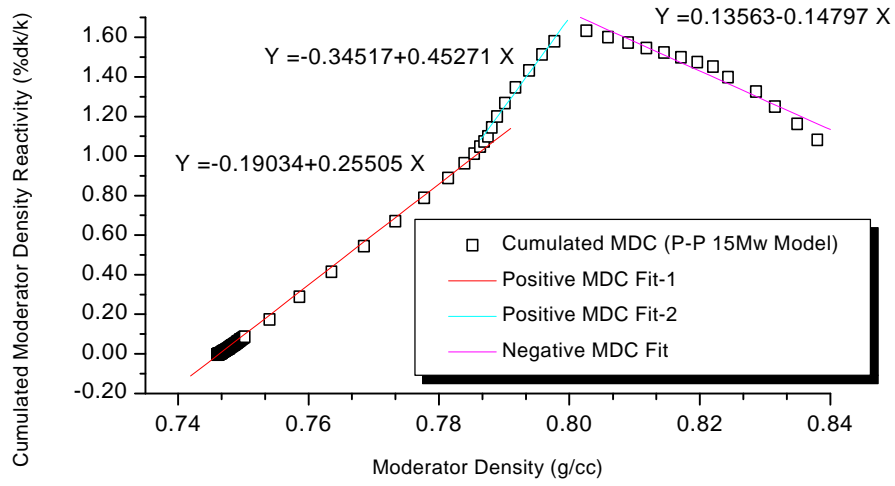


그림 9. SLB-3D Moderator Density Coefficient - Case 3

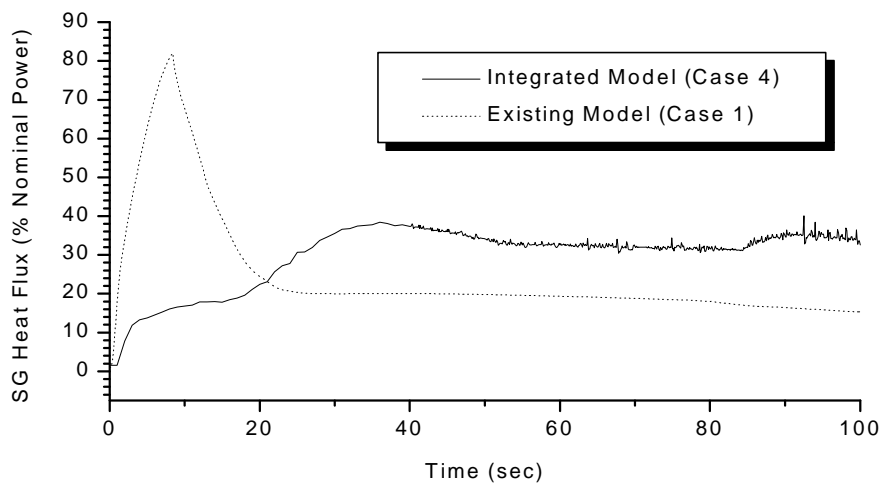


그림 10. SLB-3D SG Heat Flux Rate Comparison

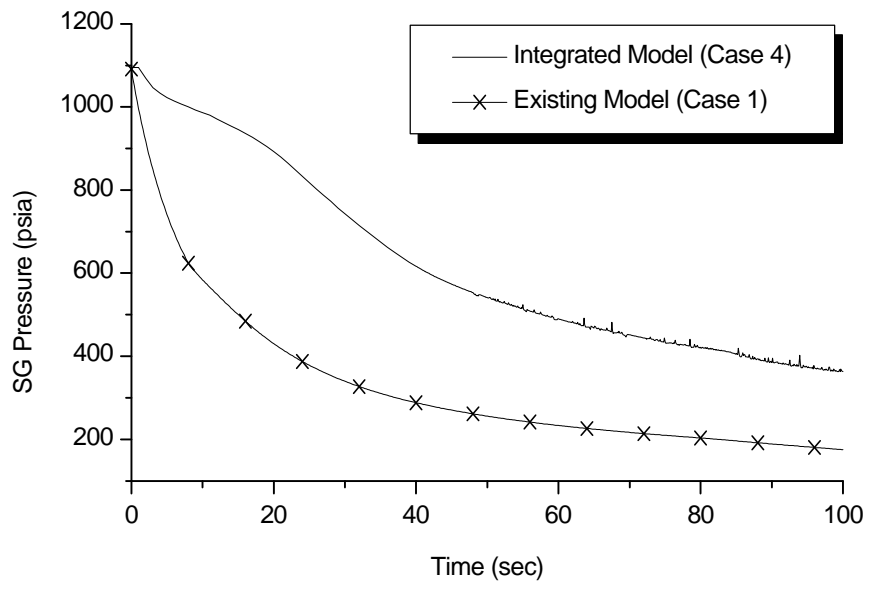


그림 11. SLB-3D SG Pressure Comparison