1999 추계학술발표회 논문집
한국원자력 학회

# NEM 기반의 비선형 유한차분법에 적용한 노심-반사체 경계조건의 과도상태 모사 능력 평가

An Performance test of Core-Reflector Boundary Conditions on Transient Non-Linear Coarse Mesh Finite Different Method Based on the NEM

이은기, 김용배, 이덕중

한국전력 전력연구원
대전 광역시 유성구 문지동 103-16

김창효

서울대학교
서울특별시 관악구 신림동 산 56-1

요 약

최근 Nodal Expansion Method (NEM), Analytic Nodal Method(ANM) 등에 기반한 비선형 유한 차분법에 적용하기 위한 노심-반사체 경계조건 처리 알고리즘이 개발되어 빠른 계산이 필요한 장전모형 탐색코드에서 성공적으로 적용된 바 있다. 본 논문에서는 NEM을 기반한 비선형 유한차분법을 과도상태 모사가 가능하도록 확장하고 해석적 노심-반사체 경계조건과 함수형 노심-반사체 경계조건을 적용하였을 때 과도상태 해에 미치는 영향을 살펴보고자 전산코드를 개발하고 Nuclear Energy Agency Nuclear Science Committee에서 개발한 Fast Transient 문제 6개와 Slow Transient 문제 3개에 대해 각기 적용하여 참고값과 비교하였다. 그 결과 명시적 반사체 모델을 쓴 노달전개법에 비해 최대 65%의 핵적 계산 시간이 감소되었고 해석적 노심-반사체 경계조건이 보다 정해에 가까움을 알 수 있었다. 이들 결과로부터 비선형 유한차분법을 이용한 과도상태 모사에 있어 노심-반사체 경계조건이 유용한 해석도구가 될 수 있음을 알 수 있었다.

ABSTRACT

Recently an algorithm for non-linear coarse mesh finite difference method (CMFD) coupled with that the core-reflector boundary models with a transverse leakage approximation (BCMTL) was set up and successfully demonstrated its capabilities by applying to loading pattern scooping code. In this paper, the performance of BCMTLs, analytic model and polynomial expansion model, on transient non-linear CMFD was investigated for total nine of fast and slow transient problems designed by NEACRP. The numerical results show that the average reduction of CPU time was up to ~65% compared to NEM with explicit reflector model , and analytic BCMTL shows better results than polynomial expansion model does. From these results, we concluded that the BCMTLs work well and may be used as good tools for LWR core transient analysis.

## 1. 개 요

1980 년대 이후로 노심 출력분포 계산에 소요되는 전산시간은 해석방법론과 전산기의 발달로 인해 문제가 되지 않을 정도로 감소하였다. 그럼에도 불구하고 장전모형 탐색이나 과도상태 해석과 같은 문제를 해결하고자 할 때는 여전히 적잖은 전산시간이 요구된다. 이런 문제를 해결하기 위해 최근에 주목받은 방법이 비선형 유한차분법(Non-linear Coarse Mesh Finite Difference Method, CMFD)을 이용한 출력분포 계산 방법[1,2,3]이다. 이 방법을 사용하면 기저로 하는 노달 방법론의 계산 정확도와 동일한 정도의 정확성을 가지면서도 최소 50% 이상 계산 소요시간을 단축시킬 수 있기 때문에 특히 장전모형 탐색을 위한 노심계산이나 과도사고 해석[3]시 매우 유용하게 사용되고 있다. CMFD 방법이 방법론적인 면의 노심 계산소요시간 단축 방안이라면, 반사체를 계산노드에서 제거하는 것도 또 다른 계산시간 단축을 위한 접근법이라 할 수 있다. 통상 노달방법에서는 노심으로 재 입사하는 중성자를 보다 정확하게 계산에 반영하기 위해 반사체를 계산노드에 포함하여 노심계산을 수행하는데, 출력이 발생하지 않는 곳이기 때문에 적절한 조건으로 대치할 수 도 있다. 미세격자 유한차분법(Fine Mesh FDM)에서는 반사체를 제거하는 경우 보통 albedo 경계조건을 사용하는데 계산정확성에 문제가 되지 않는다. 반면 노달방법의 경우는 계산 노드수가 대폭 감소한 반면 해를 구하기 위한 변수가 늘어나 albedo 경계조건만으로는 계산 정확성을 기대 할 수 없다. 즉, 반사체를 대신할 수 있는, 노달방법론에 적합한 경계조건이 주어지지 않으면 반사체를 제거한 노심계산의 정확성은 기대하기 어려운 것이다. 따라서 새로운 노심-반사체 경계조건의 도출이 요구되었다.

최근 주형국(1994), 이은기(1995)등은 기존의 albedo 경계조건과는 달리 횡방향 적분을 기초한 노달 전개법(Nodal Expansion Method, NEM)의 특성을 반영하기 위해 반사체에서 횡방향 중성자 누설분포와 시간에 따른 중성자속 변화에 대한 가정을 도입하고, 이로부터 노심노드의 횡방향 중성자 누설항 정보와 이웃 노드의 순중성자류 정보를 반영하는 노심-반사체 경계조건[4,5](Core-Reflector Boundary Condition Model with a Transverse Leakage Approximation)을 개발하였다. 개발된 노심-반사체 경계조건은 다양한 정상상태 모사, 실제 발전소를 대상한 연소도 계산 및 과도상태 모사용 벤치마크를 통해 그 적용 타당성을 입증하였다. 그리고 김창효, 이은기는 횡방향 적분형 노달방법에 기초한 비선형 유한차분법에서 동 경계조건을 사용할 수 있도록 하는 알고리즘도 개발하여 정상상태 노심모사에 적용하고 노달전개법에 적용하였을 때와 동일한 결과를 나타냄을 보임[6]으로써 과도상태에 적용할 수 있는 가능성을 보였다.

따라서 본 논문은 개발된 두 가지 노심 반사체 경계조건(해석적 모델과 함수전개식 모델)을 NEM 을 기초한 비선형 유한차분법에 적용하고 NEACRP(Nuclear Energy Agency Nuclear Science Committee) 3 차원 경수형 과도상태 벤치마크 문제[7,8]에 적용하여 계산 결과를 비교함으로써 횡방향 적분형 노달방법에 기초한 CMFD 에 있어서도 노심-반사체 경계조건이 효과적으로 계산 소요시간을 단축할 수 있음을 입증하는 데 그 목적을 두었다.

제 2 장은 개발된 BCMTL 을 CMFD 에 적용하기 위한 방법에 대해서 기술하고, 제 3 장은 9 개 과도상태 해석용 벤치마크 문제에 대한 결과 및 결론에 대하여 논한다.

## 2. 방법론

과도해석을 위해 시간에 따른 반사체 중성자속 변화율을 지수함수형태로 가정한 노심-반사체 경계조건은 노심 노드 경계면의 순중성자류로 표현되는데 수식으로 나타내면 다음과 같다.[5]

$$\mathbf{J}_{ur}^{M}(t) = \underline{\underline{\mathbf{R}}}(t)\mathbf{f}_{br}^{M}(t) + \underline{\underline{\mathbf{P}}}(t)\mathbf{L}_{ur}^{M}(t) + \underline{\underline{\mathbf{Q}}}(t)\mathbf{J}_{vr}^{M}(t) \qquad (1)$$

여기서 $\underline{\underline{\mathbf{R}}}$, $\underline{\underline{\mathbf{Q}}}$, $\underline{\underline{\mathbf{P}}}$ 는 2x2 행렬로 반사체의 핵단면적과 노심-반사체 경계면의 중성자류 변화율로만 구성되어 있다. 해석적 모델과 함수전개 모델은 이들 행렬의 요소만 변경될 뿐 형태는 식 (1)과 동일하다. 상기한 반사체 경계조건을 이용하려면 우선 횡방향 중성자 누설항을 처리해야 하고, 경계면에서 중성자류 연속조건과 중성자속 연속조건을 적용하여 경계면의 순 중성자류를 식 (1)의 제반 항으로 표현해야 한다. 뿐만아니라

CMFD 에서 2-node NEM 문제로 넘어갈 때 CMFD 인자만으로 평균 횡방향 중성자 누설을 계산할 수 있도록 해야 한다.

우선 경계면 순중성자류는 경계면 중성자속 연속조건 및 중성자류 연속조건을 적용하면 쉽게 구할 수 있는데, 노심 노드를 4 차 다항식으로 근사하므로 중성자속 연속조건이 이미 적용된 중성자류 연속조건은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} &-2\mathrm{b}_u^M\left(\mathbf{C}_{1u}^M(t)-3\mathbf{C}_{2u}^M(t)-3\mathbf{C}_{3u}^M(t)-3\mathbf{C}_{4u}^M(t)\right) \\ &=\underline{\underline{\mathbf{R}}}(t)\left(\overline{\mathrm{f}}^M(t)+\mathbf{C}_{1u}^M(t)-\mathbf{C}_{2u}^M\right)+\underline{\underline{\mathbf{P}}}(t)\mathbf{L}_{ur}^M(t)+\underline{\underline{\mathbf{Q}}}(t)\mathbf{J}_{vr}^M(t) \end{aligned} \tag{2}$$

여기서 NEM 기반의 비선형 유한차분법에 따라 식 (2)의 좌변 항의 $C_2$, $C_4$는 노심 노드 자체만으로 구해지고, $C_1$과 $C_3$는 가중잔여법에 따라 의존성이 결정되므로 이들을 모두 대입한 뒤 정리하면 $C_1$에 대해 다음과 같은 관계식을 유도할 수 있다. (편의상 시간 $t$ 표기는 생략함)

$$\mathbf{C}_{1u}^M=\left(\underline{\underline{\mathbf{R}}}+2\underline{\underline{\mathbf{X}}}_{11u}\right)^{-1}\left(2\mathbf{Z}_u+6\mathrm{b}_u^M\mathbf{S}_{ou}-\underline{\underline{\mathbf{R}}}\left(\overline{\mathrm{f}}^M-\mathbf{C}_{2u}^M\right)-\underline{\underline{\mathbf{P}}}\cdot\mathbf{L}_{ur}^M-\underline{\underline{\mathbf{Q}}}\cdot\mathbf{J}_{vr}^M\right) \tag{3}$$

여기서 2x2 행렬 $\underline{\underline{\boldsymbol{X}}}_{11u}$와 벡터 $\boldsymbol{Z}$, $\boldsymbol{S}_{ou}$ 등은 노심노드의 핵단면적과 시간에 따른 중성자속 변화율로만 구성된다.(행렬요소에 대한 자세한 내역은 참고문헌 9 참조) $\mathbf{C}_3$는 $\mathbf{C}_1$으로부터 구해지므로 식 (2)의 좌변, 즉 경계면 순중성자류는 쉽게 계산된다.

이제는 CMFD을 적용하기 위한 보정확산계수를 계산하여야 한다. 노심 노드가 하나밖에 없는 셈이므로 이때의 보정확산계수는 경계면의 중성자속과 노드 평균 중성자속과의 관계로 나타낼 수 있다. 즉,

$$\mathbf{J}_{ur}^M=-\frac{2}{a_u}\left[\underline{\underline{\mathbf{D}}}^M\left(\mathrm{f}_b-\overline{\mathrm{f}}^M\right)+\underline{\underline{\tilde{\mathbf{D}}}}^M\left(\mathrm{f}_b+\overline{\mathrm{f}}^M\right)\right] \tag{4}$$

식 (4)로부터 보정확산계수를 구하는 경우는 통상의 2-node 문제나 경계조건이 주어지는 1-node 문제와는 달리 경계면 중성자속을 식 (1)을 이용하여 결정해야 한다. 이때 식 (1)과 식 (4)가 등식관계가 있음을 적용하면 되는데 문제는 식 (1)의 우변 두번째, 세번째 항이 그대로 남아 있을 경우 경계면 중성자속을 노심노드의 평균중성자속과 확산계수만으로 나타낼 수 없다는 데 있다. 따라서 식 (1)을 다음과 같이 간단히 표현한다.

$$\mathbf{J}_{ur}^M(t)=\left[\underline{\underline{\mathbf{R}}}(t)+\begin{pmatrix}\phi_{ur,1}^{-1,M} & 0\\ 0 & \phi_{ur,2}^{-1,M}\end{pmatrix}\left(\underline{\underline{\mathbf{P}}}(t)\mathbf{L}_{ur}^M(t)+\underline{\underline{\mathbf{Q}}}(t)\mathbf{J}_{vr}^M(t)\right)\right]\mathrm{f}_b^M(t)=\underline{\underline{\mathbf{S}}}(t)\mathrm{f}_b^M(t) \tag{5}$$

식 (5)와 식 (4)를 풀면 경계면 경계면 중성자속을 얻을 수 있으므로 결국 CMFD에서 노심-반사체 경계면의 순중성자류는 식 (4), (5)의 해를 적용하여 다음과 같이 간단히 표현할 수 있게 된다.

$$\mathbf{J}_{ur}^M(t)=\left(\underline{\mathbf{I}}-\underline{\underline{\mathbf{D}}}^{M+}\underline{\underline{\mathbf{W}}}^M\right)\underline{\underline{\mathbf{D}}}^{M-}\overline{\mathrm{f}}^M \tag{6}$$

여기서 $\underline{\underline{\boldsymbol{D}}}^{M+}$, $\underline{\underline{\boldsymbol{W}}}^M$, $\underline{\underline{\boldsymbol{D}}}^{M-}$ 는 2x2 행렬로서 노심노드 확산계수, 경계면 보정확산 계수 및 2x2 행렬 $\underline{\underline{\boldsymbol{S}}}$만으로 표현된다.

## 3. 과도상태 모사 결과 비교 및 결론

NEACRP(Nuclear Energy Agency Nuclear Science Committee)에서 개발한 3 차원 노심과도사고 벤치마크 문제는 여러 기관들이 소유하고 있는 원자로 동특성해석 전산코드들의 계산정확성을 비교 분석하려는 목적에서 만들어진 것으로 핵적동특성 관련자료는 주어지고, 열수력 모델과 핵연료봉 모델은 고유의 것을 사용하도록 되어 있다.

1991 년에 확정된 문제는 급격한 제어봉인출 사고를 다루는 것으로 PWR 6개 문제, BWR 2개 문제가 제시되었다. PWR 용 문제는 다시 Hot Zero Power 상태에서 0.1 초만에 제어봉이 완전 인출되는 것과 HFP 에서 역시 0.1 초만에 제어봉이 인출되는 사고를 해석토록 되어 있다. 6개 문제 중 4 개는 1/8 노심을 다루

고 2개문제는 전노심을 다룬다. 1997년 확정된 4개 문제는 제어봉이 분당 72 STEP씩 인출되고 35%출력준위를 지나는 순간 0.6초 후에 전 제어봉이 낙하되는 것을 모사하는 slow transient 문제이다. Fast transient 문제가 1개의 제어봉 다발이 인출되는 데 반해 이 문제는 여러 개의 제어봉 다발이 인출되는 사고를 모사한다. Fast transient 문제는 짧은 시간에 반응도가 주입되므로 완전 인출 후에 노심 첨두 출력이 발생하고 노심 각 부분의 출력변동율이 거의 유사하지만, slow transient 는 인출도중에 노심 첨두출력이 발생하고 fast transient 에 비해 상대적으로 제어봉 인출 주위의 노드가 노심출력 상승을 주도한다. 특히 slow transient 문제는 오랜 시간동안 제어봉이 노드 내에 머물기 때문에 제어봉이 들어있는 노드의 핵단면적 처리에 따라 해석결과에 큰 차이를 가져온다.

CMFD와 노심-반사체 경계조건을 처리하기 위해 노심동특성 해석코드, RAST-K (Reactor Analysis code for Steady and Transient states – KEPRI)를 개발하고 이를 이용하여 9개 NEACRP 벤치마크 문제를 해석하였다. RAST-K 전산코드는 매크로 연소에 따른 연소계산을 수행할 수 있어 임의의 연소도에서도 동특성 해석이 가능하며 핵연료봉 모델 및 drift flux model을 사용한 3-eq을 EICE (Extended Implicit Continuous-fluid Eulerian) 기법으로 푸는 열수력모델을 사용한다. 열수력 특성은 steam table을 계산하는 h2o 프로그램[10]을 수정하여 사용한다.

표 1은 fast transient 에 대한 계산결과 중 C1 케이스에 대하여 총 6개 결과를 놓고 중요한 몇 가지 인자를 서로 비교한 것이다. 반사체 경계조건을 사용한 CMFD의 경우 반사체를 사용한 노달전개법에 비하여 약 60%가량 핵적 계산시간이 감소하였음을 볼 수 있다. 특히 해석적 모델이 참고값에 보다 가까운 해를 산출하였는데 Slow Transient 를 다룬 표 2에서도 그 경향을 볼 수 있다. 전반적으로 3차원 첨두출력, 보론 농도, 최대 출력 발생 시점 및 최대 출력 등에 있어 해석적 경계조건의 결과가 함수전개 경계조건보다 참고값에 가깝게 나타났다. 그리고 이러한 경향은 9개 노심모사 결과에서 모두 관찰할 수 있었다. 그림 1은 slow transient 의 A 케이스에 대하여 시간별 출력변동 현황을 몇 가지 참고값과 함께 나타낸 것이다. 그림 2는 역시 slow transient 의 D 케이스에 대한 노심 출력 변화를 살펴본 것이다. 함수전개 경계조건은 명시적 반사체를 사용한 NEM 혹은 CMFD 계산결과와 잘 일치하고 있음을 볼 수 있다.

계산 결과를 통해

1. CMFD에서 사용할 수 있도록 조정한 노심-반사체 경계조건은 정상상태 뿐 아니라 과도상태에서 있어서도 NEM에 적용하였을 때와 동일한 결과를 보임으로써 CMFD에서 노심-반사체 경계조건을 처리하는 알고리즘이 올바르게 개발되었음을 확인하였고,
2. 노심반사체 경계조건의 계산결과가 명시적으로 반사체를 사용한 NEM 혹은 NEM 기반의 CMFD에서 계산한 과도상태 해석 결과와 참고값 사이에 놓임으로써 2가지 노심-반사체 경계조건이 계산정확성에 해를 끼치지 않으며
3. 핵적 동특성 계산 소요시간을 평균 50%이상 최대 68%가까이 감소시킬 수 있음을 보였다.

향후 노심노드는 NEM으로, 반사체 노드는 ANM으로 모사하는 방법을 적용함으로써 반사체 영역에 있어 중성자속 거동에 대한 정성적, 정량적인 분석을 수행하고 이로부터 해석적 노심-반사체 경계조건의 성질을 보다 명확히 밝혀 낼 필요가 있다고 판단된다. 그리고 MSLB 벤치마크 문제, 노내 고정 핵 계측기를 이용한 3차원 출력분포 예측, OFF-LINE 운전 모드 해석 등에 RAST-K 전산코드를 적용하여 노심-반사체 경계조건의 적용 타당성을 검증해 나갈 예정이다.

## 참고문헌


1. Han Gyu Joo, Guobing Jiag and Thomas J. Downar, "Stabilization Techniques for the Nonlinear Analytic Nodal Method," *Nucl. Sci. Eng.*, **130** (1998)
2. K. S. Smith, "Nodal Storage Reduction by Nonlinear Iteration," *Trans. Am. Nucl. Vol.* 44, 265 (1983)
3. K. S. Smith, A. F. Henry, and R. A. Loretz, "The Determination of Homogenized Diffusion Theory Parameters for Coarse-Mesh Nodal Analysis," *Proc.. Adv. Reactor Physics and Shielding* , Sun Valley, Idaho (1980)

4. Hyung Gook Joo, et. al., "A New Approach to Core-Reflector Boundary Conditions for Nodal Reactor Calculations," *Nucl. Sci. Eng.*, **116**, 300 (1994).
5. E. K. Lee, C. H. Kim, and H. K. Joo, "New Core-Reflector Boundary Conditions for Transient Nodal Reactor Calculations," *Nucl. Sci. Eng.*, **121**, 114 (1995)
6. C. H. Kim, E. K. Lee and S. M. Bae, "Coarse Mesh Finite Difference Computation with Replacement of Reflectors by Core-Reflector Boundary Conditions," *Proc. Int. Conf. On Phys. Nucl. Sci. and Tech.*, **2**, pp 1213-1219, Long Island, NY, USA, Oct. (1998)
7. R. Fraikin and H. Finnemman, "NEACRP 3-D LWR Core Transient Benchmark – Final Specifications," NEACRP-L-335, Oct. (1991)
8. R. Fraikin, "PWR Benchmark on Uncontrolled Withdrawal of Control Rods at Zero Power," NEA / NSC / DOC(96)20, Sep. (1997)
9. **이은기 외**, "**최적화이론을 이용한 최적노심장전모형 선정코드 개발(최종보고서)**," TR.97NJ22.J1999.205, **한전 전력연구원**, May (1995)
10. PROPATH GROUP, "PROPATH: A program Package for Thermophysical Properties," Version 5.1 , June (1998)

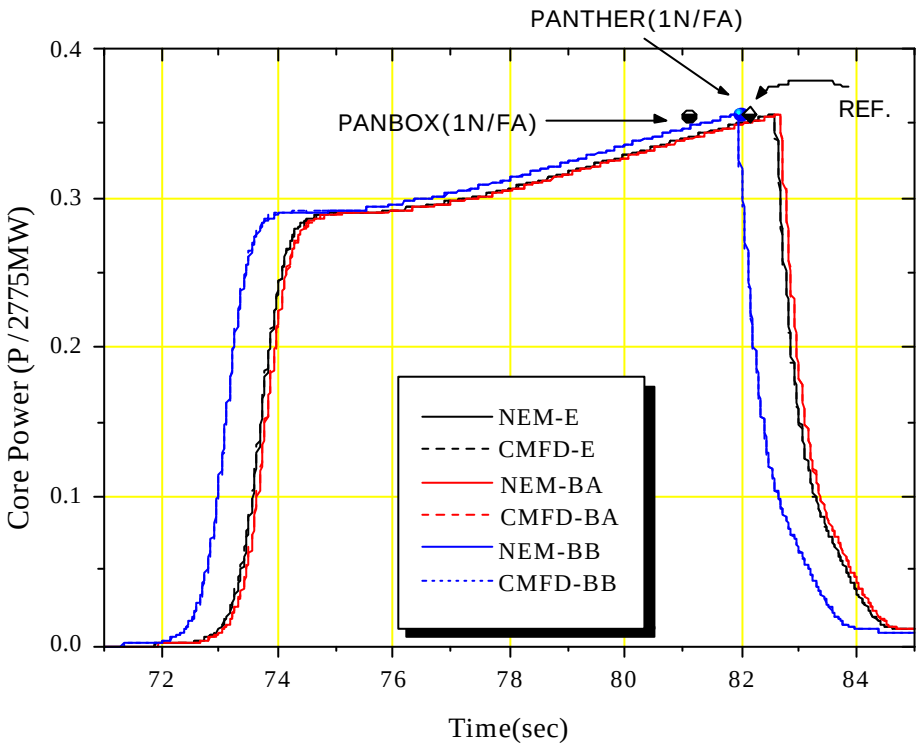


그림 1. SLOW TRANSIENT CASE A 에 있어 노심-반사체 경계조건에 따른 노심 출력변동 비교

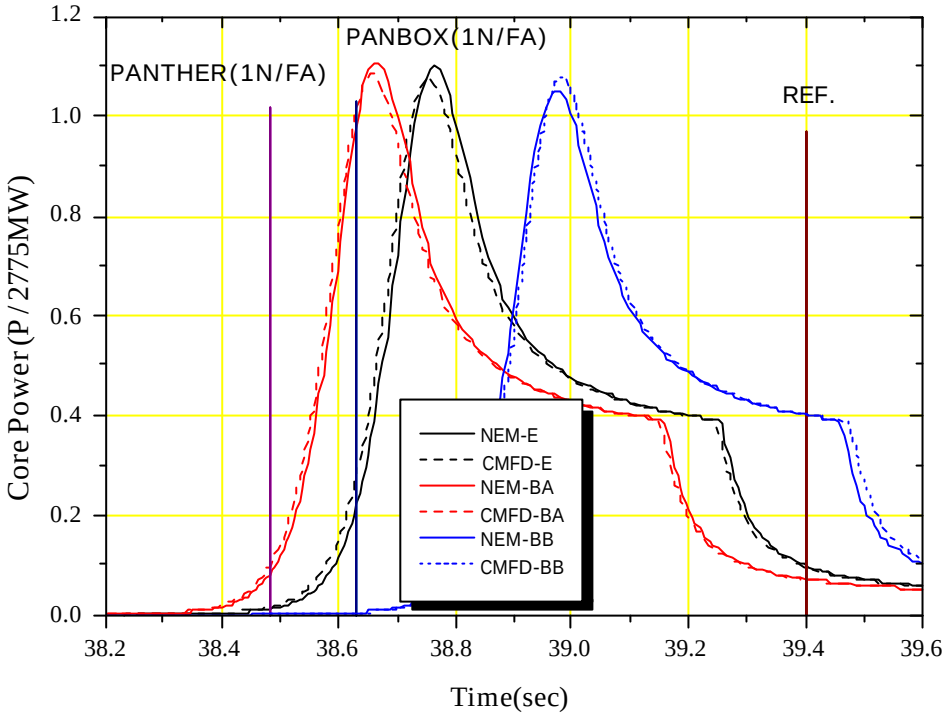


그림 2. SLOW TRANSIENT CASE D 에 있어 노심-반사체 경계조건에 따른 노심 출력변동 비교

TABLE 1. HZP FAST TRASIENT 계산 결과 비교

| FAST TRANSIENT(HZP) | | CASE A1 | | | | | | | CASE C1 | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Parameters | | REF.* | NEM-E | CMFD-E | NEM-BA | CMFD-BA | NEM-BB | CMFD-BB | REF.* | NEM-E | CMFD-E | NEM-BA | CMFD-BA | NEM-BB | CMFD-BB |
| Steady state | C. S. B.(PPM) | 567.7 | 566.1 | 566.1 | 567.1 | 567.1 | 565 | 565 | 1135.3 | 1140.1 | 1140.1 | 1141.5 | 1141.5 | 1133.7 | 1133.7 |
| | 3D Nodal Peak(Fq) | 2.874 | 2.845 | 2.844 | 2.833 | 2.832 | 2.86 | 2.859 | 2.187 | 2.173 | 2.173 | 2.172 | 2.171 | 2.183 | 2.183 |
| | Radial Peak(Fxy) | - | 1.892 | 1.892 | 1.885 | 1.884 | 1.902 | 1.902 | - | 1.437 | 1.437 | 1.436 | 1.436 | 1.443 | 1.443 |
| | ASI | - | 0.0121 | 0.0122 | 0.0121 | 0.0122 | 0.0122 | 0.00122 | - | 0.00556 | 0.00568 | 0.00554 | 0.00567 | 0.0057 | 0.0057 |
| Transient | Peak Time(sec) | 0.56 | 0.636 | 0.639 | 0.675 | 0.675 | 0.601 | 0.604 | 0.27 | 0.265 | 0.266 | 0.262 | 0.262 | 0.265 | 0.267 |
| | Peak Power | 1.179 | 0.9124 | 0.9084 | 0.8145 | 0.8102 | 1.0327 | 1.0271 | 4.773 | 4.9681 | 4.9342 | 5.0822 | 5.059 | 4.773 | 4.753 |
| | Nodal Peaking Factor(Fq) | - | 5.177 | 5.177 | 5.154 | 5.154 | 5.202 | 5.202 | - | 7.363 | 7.358 | 7.388 | 7.386 | 7.426 | 7.423 |
| | Avg. Doppler Temp. at Peak | - | 294.52 | 294.53 | 294.44 | 294.43 | 294.97 | 294.98 | - | 301.5 | 301.7 | 301.1 | 301.2 | 299.6 | 299.6 |
| t=5.0sec | Power | 0.196 | 0.197 | 0.197 | 0.196 | 0.196 | 0.198 | 0.198 | 0.146 | 0.151 | 0.151 | 0.152 | 0.152 | 0.152 | 0.151 |
| | Nodal Peaking Factor(Fq) | - | 4.777 | 4.777 | 4.759 | 4.759 | 4.801 | 4.801 | - | 6.04 | 6.04 | 6.046 | 6.046 | 6.043 | 6.043 |
| | Max. Centerline Temp | 673.3 | 669.1 | 669.2 | 663 | 663 | 675.9 | 676 | 676.1 | 697.6 | 697.5 | 699.9 | 699.9 | 696.3 | 696.3 |
| | Doppler Temp. | 324.3 | 324.7 | 324.7 | 324.3 | 324.3 | 325.1 | 325.1 | 315.9 | 317.6 | 317.6 | 317.7 | 317.8 | 317.5 | 317.5 |
| | Moderator Temp. | 293.1 | 293.1 | 293.1 | 293 | 293 | 293 | 293.2 | 291.5 | 291.8 | 291.8 | 291.8 | 291.8 | 291.8 | 291.8 |
| | Water Density(kg/cm$^3$) | - | 740.3 | 740.3 | 740.5 | 740.5 | 740.2 | 740.2 | - | 742.8 | 742.8 | 742.8 | 742.8 | 742.8 | 742 |
| CPU | Steady State(N + TH) | - | 4.6 | 1.8 | 4.1 | 1.1 | 3.9 | | - | 40.9 | 13.6 | 30.3 | 8.01 | 30.2 | 8.15 |
| | Neutronic(Total) | - | 239 | 106.5 | 187.7 | 86.03 | 189.2 | 84.5 | - | 1960.7 | 1137.6 | 1454.5 | 815.9 | 1463.3 | 838.9 |
| | Others(Total) | - | 1202.3 | 1204.3 | 1207.5 | 1264.4 | 1218 | 1297.1 | - | 8156.7 | 8186.7 | 8169.8 | 8199.5 | 8324.9 | 8210 |
| CPU Time Ratio (Neutronic) | | | 1 | 0.45 | 0.79 | 0.36 | 0.79 | 0.35 | | 1 | 0.58 | 0.74 | 0.42 | 0.77 | 0.43 |

* Ref. = Results of 4 Node/Assembly Calculations by PANTHER Code [H.Finnemann, H.Bauer, A.Galati and R. Martinelli, "Results of LWR Core Transient Benchmark," NEA/NSC/DOC(93)25 (Oct. 1993)]

NEM-E: NEM + EXPLICIT REFLECTOR NEM-BA: NEM + POLYNOMIAL EXPANSION BCMTL NEM-BB: NEM + ANALYTIC BCMTL

CMFD-E: CMFD+EXPLICIT REFLECTOR CMFD-BA: CMFD + POLYNOMIAL EXPANSION BCMTL CMFD-BB: CMFD+ANALYTIC BCMTL

TABLE 2. HZP SLOW TRASIENT **계산 결과 비교**

| SLOW TRANSEINTS(HZP) | | CASE A | | | | | | | CASE D | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Parameters | | REF. | NEM-E | CMFD-E | NEM-BA | CMFD-BA | NEM-BB | CMFD-BB | REF. | NEM-E | CMFD-E | NEM-BA | CMFD-BA | NEM-BB | CMFD-BB |
| Steady state | C. S. B.(PPM) | 1268 | 1273.8 | 1273.8 | 1275 | 1275 | 1267.4 | 1267.4 | 793.6 | 797.6 | 797.6 | 798.4 | 798.4 | 798.4 | 796.15 |
| | 3D Nodal Peak(Fq) | 1.88 | 1.856 | 1.855 | 1.856 | 1.856 | 1.866 | 1.866 | 2.886 | 2.862 | 2.861 | 2.857 | 2.856 | 2.857 | 2.856 |
| | Radial Peak(Fxy) | 1.242 | 1.226 | 1.226 | 1.227 | 1.227 | 1.234 | 1.234 | 1.912 | 1.898 | 1.898 | 1.894 | 1.894 | 1.894 | 1.894 |
| | Axial Peak(Fz) | 1.513 | 1.512 | 1.512 | 1.512 | 1.512 | 1.512 | 1.512 | 1.507 | 1.506 | 1.506 | 1.506 | 1.506 | 1.506 | 1.506 |
| Transient | Peak Time(sec) | 82.14 | 82.582 | 82.57 | 82.677 | 82.675 | 81.94 | 81.95 | 39.4 | 38.760 | 38.757 | 38.669 | 38.650 | 38.67 | 38.653 |
| | Peak Power | 0.356 | 0.3562 | 0.3561 | 0.3562 | 0.3561 | 0.3563 | 0.3563 | 0.9685 | 1.1017 | 1.0735 | 1.1075 | 1.0830 | 1.1075 | 1.083 |
| | Nodal Peaking Factor(Fq) | 2.395 | 2.373 | 2.373 | 2.372 | 2.372 | 2.387 | 2.387 | 3.718 | 3.687 | 3.685 | 3.678 | 3.682 | 3.678 | 3.667 |
| | Doppler Temp. at Peak | - | 298.7 | 298.7 | 298.7 | 298.7 | 298.7 | 298.7 | - | 296.4 | 296.6 | 296.8 | 296.0 | 296.8 | 296 |
| | Max. Fuel Doppler Temp. | 358.7 | 358.7 | 358.7 | 358.7 | 358.7 | 358.6 | 358.6 | 312.6 | 314.8 | 314.7 | 314.9 | 314.9 | 31.9 | 314.9 |
| | Max.Coolant Outlet Temp. | 295.3 | 298.9 | 298.9 | 298.9 | 298.9 | 298.7 | 298.7 | 290.0 | 292.0 | 292.0 | 292.0 | 292.0 | 292 | 292 |
| | Max.Fuel.CenterLine Temp. | - | 625.7 | 625.6 | 665.5 | 625.5 | 626.9 | 626.9 | - | 463.2 | 462.9 | 463.8 | 463.4 | 463.8 | 463.4 |
| CPU | Steady State(N + TH) | - | 4.55 | 1.5 | 4 | 1.16 | 3.9 | 1.1 | | 4.75 | 1.55 | 4.01 | 1.07 | 4.01 | 1.15 |
| | Neutronic | - | 936.4 | 591.4 | 757.4 | 475.8 | 754 | 473.7 | | 800 | 440.2 | 620.6 | 345.6 | 624.4 | 344.9 |
| | Others | - | 4038.1 | 4046.2 | 4207.3 | 4721.3 | 4170 | 4162.4 | | 2590.2 | 2595.8 | 2618.3 | 2643.4 | 2628.6 | 2611.7 |
| CPU Time Ratio (Neutronic) | | - | 1 | 0.63 | 0.81 | 0.51 | 0.81 | 0.51 | | 1.00 | 0.55 | 0.78 | 0.43 | 0.78 | 0.43 |

* REF. = Results of 4 Node/Assembly Calculations by PANTHER Code [Ref. 8]