'99 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

PWR 노심 설계용 CASMO-3/MASTER-α 전산 체계의 코드 검증 연구

Computer Code Validation Study of PWR Core Design System, CASMO-3/MASTER-α

이경훈, 김명현

경희대학교
449-701 경기도 용인시 기흥읍 서천리 1

우승웅

한국원자력안전기술원
305-338 대전광역시 유성구 구성동 19

요 약

CASMO-3/MASTER-α 핵설계 계산체계의 설계 적용 가능성을 상업용 가압경수로심에 대하여 검토하였다. 검증 계산에 있어서, 선형궤환모델을 사용하는 군정수표 생산 방법의 정확성을 먼저 평가하였고, CASMO-3/NESTLE 5.02 핵설계 체계를 구축해서 결과를 서로 비교하였다. 군정수표를 이용해서 계산된 군정수들은 CASMO-3의 결과 값과 큰 오차가 없었다. 검증 문제의 비교에서는 두 코드 체계의 계산 결과에 약간의 차이가 있었다. 또한, 영광 3호기 1주기 노심을 대상으로 여러 가지 핵특성 인자들의 재생산 결과를 핵설계 보고서와 한국원자력연구소에서 수행한 불확실도 평가 계산 결과와 비교하였다. 계산 결과들이 한국원자력연구소의 계산 결과와 일치하였으며, 불확실도 분석 결과는 충분히 신뢰할 수 있음을 확인하였다. 따라서, CASMO-3/MASTER-α 핵설계 체계는 상업용 가압경수로의 설계 및 해석에의 적용에 충분한 타당성을 갖는다고 보았다.

Abstract

In this paper, the feasibility of CASMO-3/MASTER-α nuclear design system was investigated for commercial PWR core. Validation calculation was performed as follows. Firstly, the accuracy of cross section generation from table set using linear feedback model was estimated. Secondly, the results of CASMO-3/MASTER-α was compared with CASMO-3/NESTLE 5.02 for a few benchmark problems. Microscopic cross sections computed from table set were almost the same with those from CASMO-3. There were small differences between calculated results of two code systems. Thirdly, the repetition of CASMO-3/MASTER-α calculation for YoungGwang Unit-3, Cycle-1 core was done and their results were compared with nuclear design report(NDR) and uncertainty analysis results of KAERI. It was found that uncertainty analysis results were reliable enough because results were agreed each other. It was concluded that the use of nuclear design system CASMO-3/MASTER-α was validated for commercial PWR core.

1. 서론

현재 국내에서 운전되고 있는 상업용 가압경수로의 초기 노심 및 교체 노심에 대한 노심 핵설계는 DIT/ROCS(ABB-CE), PHOENIX/ANC(Westinghouse), FASER/MEDIUM(KWU) 등과 같은 외국의 핵설계 전산체계를 이용하여 수행되고 있다. 이와 같이 외국에 의존하였던 노심 해석 전산체계를 독자적으로 개발하여 국내 고유 핵설계 코드 시스템을 갖추기 위해서 한국원자력연구소에서는 MASTER-α를 개발하였고, 군정수 생산용 코드인 CASMO-3와 연결해서 국내 고유의 CASMO-3/MASTER-α 핵설계 전산체계를 개발하였다. 그러나 CASMO-3/MASTER-α 핵설계 전산체계를 가압경수로심의 설계 및 해석에 적용하기 위해서 객관적인 검증 절차가 필요하였기 때문에, 본 연구를 통해 CASMO-3/MASTER-α 핵설계 전산체계에 대한 검증 계산을 수행하였다.

CASMO-3/MASTER-α 핵설계 전산체계를 사용해서 가압경수로심의 핵설계 적용에의 타당성을 검증하기 위해서, CASMO-3/MASTER-α 핵설계 전산체계의 설계 방법론을 평가하고, 검증 문제에 대한 계산 결과를 다른 코드와 직접 비교·평가하고자 하였다. 또 중요한 핵설계 특성 인자들을 재생산하여 보고서와 비교하여 보고된 계산 결과의 정확성을 평가하고, 계산 값의 정확성이 보장되는 범위를 설정함으로써 상업용 대형 가압경수로심 핵설계 및 해석에의 활용 가능성을 검토하고자 하였다.

2. CASMO-3/MASTER-α 핵설계 체계의 특징

CASMO-3/MASTER-α 핵설계 전산체계는 다군 군정수 생산용 코드인 CASMO-3와 다차원 노심 핵계산 코드인 MASTER-α 그리고 CASMO-3에서 생산한 핵연료집합체별 균질화 군정수 및 비균질 보정계수 관련 출력물들을 MASTER-α에서 요구하는 형식으로 Table Set화하는 연결 코드 XFORM으로 구성된다.

2.1. CASMO-3

CASMO-3 코드는 미국의 Studsvik 사가 경수로 노심 해석에 필요한 군정수를 생산하기 위하여 개발한 2차원 다군 중성자 수송이론을 사용하여 경수로의 단위 핵연료봉 또는 핵연료집합체의 연소계산을 수행하는 코드이다.[1][2]

CASMO-3 에서는 다양한 방식의 계산을 선택적으로 사용할 수 있으며 CASMO-3/MASTER-α 핵설계 전산체계에서는 Pu 관련 핵종의 단면적이 보강된 40 에너지군의 K-Library를 사용하고, 중성자 누설효과를 고려하기 위한 Fundamental Mode를 계산에 적용하며, 7 에너지군의 핵연료집합체 2차원 계산 및 핵연료와 반사체 사이의 불연속인자를 적용하는 기본 절차를 사용한다.

2.2. XFORM

군정수는 여러 가지 상태변수들에 따라서 달라지고, 이 상태변수들은 연소도에 따라 혹은 노심의 위치에 따라서 다양하게 변화한다. 따라서, 다양하게 변화하는 상태변수들에 대한 군정수를 생산하기 위해서는 상태변수가 변할 때마다 군정수 생산 코드를 이용하여야 하지만 이런 방법은 계산 시간상 매우 비효율적이기 때문에 MASTER-α 코드는 다른 핵설계 코드들과 마찬가지로 CASMO-3 코드에서 계산한 핵연료집합체의 군정수를 상태변수들의 함수로 나타내는 군정수표(Cross Section Table Set)를 만들고 임의의 군정수 값을 내삽 또는 외삽 하여 사용한다. 군정수표는 먼저 핵연료 농축도, 독봉의 개수, 제어봉 장전 여부에 따라 여러 종류로 나눈 뒤, 각 종류별로 기준상태(수용성 붕산농도(C_{SB}), 핵연료 온도(T_f), 감속재 온도(T_m), 감속재 밀도(ρ_m))에서 연

소도(BU)에 대한 군정수 값을 주요 동위원소(16종의 중핵종과 15종의 핵분열 생성물)별로 모든 군정수 종류에 대해서 정리하고, MASTER 코드는 단순등가이론을 사용하기 때문에 모든 군정수를 노드 외곽의 불연속인자로 나눈 값을 사용해서 군정수표를 작성한다. 그 다음 각 군정수별로 기준상태의 변화에 따른 군정수의 변화 값인 1차 함수 기울기를 계산하여 첨부한다. 이와 같이 MASTER-α 코드는 이 네 가지 변수에 대해서는 단면적이 선형적으로 변한다는 가정을 전제로 하는 선형궤환모델을 사용한다. 하지만, 감속재 온도 변화의 경우에는 고온 영출력 상태에서 저온 영출력 상태까지의 넓은 온도 범위에서 선형궤환모델의 1차 미분변화항 만으로 감속재 온도 변화에 따른 미시단면적의 변화를 효과적으로 고려할 수 없기 때문에 감속재 온도 변화에 대해서는 비선형 거시단면적 보정 방법을 사용하고 있다. 또한, 감속재 밀도의 변화에 대한 미시단면적의 미분변화량은 실제로 정상상태 계산에서 사용되지 않고, LOCA와 같은 과도상태 계산의 사고 해석에만 사용된다. 정상상태 계산에서는 감속재 온도에 대해서 MASTER-α 코드에 자체적으로 내장되어 있는 수증기표를 이용해서 그 때의 밀도를 계산하고, 감속재 온도 변화에 대한 밀도 변화를 고려한 미시단면적을 계산한다.[3][4]

2.3. MASTER-α

MASTER-α는 한국원자력연구소에서 가압경수로의 노심 설계 및 해석에 적용하기 위하여 개발한 다목적 다차원 노심 핵계산 코드이다. MASTER-α는 노달 전개법, 노달 적분법, 소격격자 유한차분법의 세 가지 중성자 거동 해석 방법론을 기본으로 계산 정밀도 및 효율 제고를 위하여 핵종별 핵연료 연소모형 및 단순등가이론에 근거한 집합체 균질화 모형 등을 채택하고 있으며, Vectorized Red-Black Gauss-Seidal 및 다중격자 재균형법과 점근외삽법 등의 수치해 가속 모형을 사용하고 있다. MASTER-α에서는 정상상태 및 과도상태의 노심 해석을 별도의 연계과정 없이 자유로이 수행하게 하는 기능과 부수로 열수력 해석모형인 COBRA-C/P를 핵계산 모듈과 밀착 통합시켜 사용자 선택에 의하여 보다 정교한 열수력 성능해석을 수행하게 하는 등 여러 가지 기능들이 복합화 되어 있다. MASTER-α의 주요 계산 모듈에는 연소도 계산, 정상상태 중성자속 계산, 천이상태 중성자속 계산, 핵연료봉 출력 계산, 핵연료봉 연소도 계산, Xenon 동특성 계산, 수반 중성자속 계산, 열수력 계산 등이 있다.[5]

MASTER-α 코드의 특징을 살펴보면 0차원, 2차원 및 3차원 노심을 1/4, 1/2 및 전체 노심에 대하여 계산할 수 있다. 핵연료집합체를 한 개 또는 네 개의 노드로 할당해서 1×1 혹은 2×2 노드로 나누어 계산이 가능하며, 주요 출력으로는 핵연료 온도, 감속재 온도, 감속재 밀도, 연소도 분포, 중성자속 분포, Xenon/Samarium의 수밀도 분포 및 거시단면적의 분포를 각 노드별로 출력할 수 있으며, 반경 및 축방향 상대 출력분포를 출력할 수 있다.[6]

3. 군정수표의 정확성 평가

영광 3호기 1주기 노심에 장전되고, 농축도가 2.87 w/o, 2.36 w/o인 두 종류의 핵연료와 4 w/o로 농축된 8개의 가돌리니아로 구성되는 C1-type 핵연료집합체를 군정수표의 정확성 평가 대상으로 선정하였다. 계산은 CASMO-3 코드를 이용해서 수용성 붕산농도, 핵연료 온도, 감속재 온도 변화에 대해서 연소도 0MWD/MTU에서 수행하였고, U-235와 U-238의 두 핵종에 대해서 각각 2개군의 9개 미시단면적을 평가하였다.

CASMO-3 계산에서 수용성 붕산농도는 1 ppm부터 1500 ppm까지 변화시키고, 핵연료 온도는 300.95 K부터 1560.95 K까지 변화시키고, 감속재 온도는 295.35 K부터 620.35 K까지 변화시켜서 미시단면적을 생산하였다. CASMO-3 코드로 계산한 미시단면적들을 XFORM 코드가 계산한 미시단면적과 비교하였고, XFORM 코드가 계산한 기울기를 확인하였다. 군정수표의 정확성에 대한

평가는 CASMO-3 코드로 계산한 미시단면적과 XFORM 코드가 계산한 미시단면적의 상대오차를 구해서 오차 범위를 평가하였다. 선형궤환모델을 적용했을 때 수용성 붕산농도 및 핵연료 온도 변화에 대한 모든 미시단면적은 선형적으로 변화하였지만, 감속재 온도 변화에 대해서는 선형적으로 변화하지 않았다. 수용성 붕산농도 변화에 대한 미시단면적은 선형궤환모델을 적용할 경우 ±0.1 %의 최대 오차 범위에서 정확히 계산되었고, 핵연료 온도 변화에 대해서는 -1.0 % ~ 0.2 %의 최대 오차 범위에서 정확히 계산되었다. 감속재 온도 변화에 대해서는 -2.0 % ~ 10.0 %의 최대 오차 범위로 실제 값과 크게 다르게 계산되었고, 특히 저온 영역에서 오차가 컸다. 하지만, 추가적으로 5개의 변화된 상태의 감속재 온도를 사용하는 비선형 거시단면적 보정 방법을 사용하는 경우에는 ±0.5 %의 최대 오차 범위에서 정확하게 계산되었다. 세 가지 상태변수에 대해서 총 54개의 미시단면적을 비교하였고, 그 중 오차가 비교적 크고 중요한 U-235의 σ_{f2}에 대해서 균질화된 군정수와 CASMO-3 결과에 대한 상대오차를 그림 1 ~ 6에 나타내었다.

선형궤환모델에서 상태변수의 변화에 대한 미시단면적의 변화량으로 정의되는 1차 함수의 기울기가 실제 XFORM 코드가 만든 미분변화량과 같은지를 비교하였다. 주기초에서 핵분열 생성물들의 영향으로 미분변화량의 변화가 심하기 때문에 XFORM 코드는 연소도 0 MWD/MTU에서의 미분변화량은 생산하지 않고, 다음 연소도 구간에서의 기울기들을 이용해서 외삽해서 사용한다. 계산은 연소도 500 MWD/MTU에서 생산된 U-235의 $\nu\sigma_{f1}$, σ_{f2}, σ_{rem}에 대해서만 비교하였다.

먼저 불연속인자로 나눈 기준 상태에서의 미시단면적을 군정수표에 있는 미시단면적과 비교하였고, 기준 상태에서의 미시단면적은 정확히 일치하였다. 두 번째로, 1차 함수의 기울기를 계산하고, 군정수표에서의 미분변화량과 비교하였다. 비교 결과 이유를 알 수는 없지만 군정수표에서의 미분변화량과 손으로 계산한 기울기가 일치하지 않았다. 세 번째로, 기준 상태에서의 미시단면적과 군정수표에서의 미분변화량을 사용해서 변화된 상태의 미시단면적을 계산하고, 실제 변화된 상태에서의 미시단면적과의 상대오차를 계산하였다. 변화된 상태에서 미시단면적의 오차는 표 1, 2, 3에서 볼 수 있듯이 0.015 ~ 0.223 %로 큰 차이는 나지 않았다.

선형궤환모델을 감속재 온도 변화에 대한 보정 방법과 함께 사용해서 생산한 군정수표는 모든 상태변수의 변화에 대해서 대부분의 미시단면적들을 ±0.5 %의 오차 범위에서 정확하게 계산할 수 있음을 알 수 있었다.

4. CASMO-3/NESTLE 5.02 평가시스템 구축과 비교계산

CASMO-3/MASTER-α 핵설계 체계를 직접 평가하기 위해서 비교 검증 체계가 필요하였다. 현재 국내에서 노심 설계에 사용하고 있는 외국의 핵설계 전산체계는 사용이 제한되어 있어서 이 코드 시스템들을 이용한 평가 계산이 불가능하였고, CASMO-3/MASTER-α 핵설계 전산체계의 Source Program은 일반에 공개되어 있지 않기 때문에, 코드 자체로 신뢰성과 정확성 등을 검토할 방안이 없었다. 따라서, 공개된 코드인 NESTLE 코드를 채택하여 MASTER와 비교하고자 하였다. NESTLE 코드는 NCSU와 INEL이 공동 개발한 노심 해석 코드로서 OECD/NEA DataBank로부터 NESTLE 5.02 코드를 입수해서, CASMO-3/NXSGEN/NESTLE 5.02 전산체계를 개발하였다. MASTER-α와 NESTLE 5.02 코드는 표 4에서 볼 수 있듯이 서로 다른 방법론을 사용해서 같은 노심의 분석 결과가 크게 다를 수 있기 때문에 먼저 두 코드간의 차이점에 대해서 비교하였다.[7]

가장 간단하고 이상적인 조건의 벤치마크 문제를 만들기 위해 노심은 177개의 핵연료집합체와 64개의 반사체로 구성되는 ABB-CE형 노심이고, 1/8 노심 대칭을 이루고 있다. 노심 전체가 한 가지 종류의 핵연료집합체로 구성되며, 노심 내에 제어봉은 없다고 가정한다. 핵연료집합체는 단일 농축도(1.28w/o)로 구성되고, 가연성 흡수체는 없다고 가정해서 노심 내에서 핵연료 이외의 다른 물질이 반응도에 주는 영향은 없도록 하였다. 비교계산은 하나의 핵연료집합체를 4개의 노드로

할당하는 방법을 사용하고 1/4 대칭 노심에 대해서 유효증배계수, 반경방향 출력분포, 축방향 출력분포 등의 계산을 수행하였다. 노심 상태는 영출력, No-Xe 상태로 모든 조건을 단순화 시켰다.

HZP 상태에서 열수력 궤환 효과를 제거한 벤치마크 계산에서는 MASTER 코드의 열수력 궤환 효과를 직접 제어 할 수 없어서, 두 코드의 계산 결과를 비교 할 수 없었다. HZP, HFP 상태에서 군정수표의 계수들을 영으로 만들어서 실질적인 열수력 궤환 효과를 제거한 벤치마크 계산을 수행하였다. HZP, HFP 상태에서 열수력 궤환 효과를 적용한 상태의 벤치마크 계산을 수행하였다. 위의 다섯 가지 벤치마크 계산에서 출력 분포는 큰 차이 없이 일치했지만, 유효증배계수 값이 약 100 pcm 이상의 차이가 나서 MASTER와 NESTLE 코드는 이상적인 조건의 문제에 대해서도 계산 결과에 차이가 있었다. 이 차이는 두 코드간의 군정수 모델의 차이에서 오는 것으로 판단하였다. 두 코드의 비교 계산 결과는 표 5에 나타내었다.

두 코드간의 계산 결과의 차이에 대해 군정수 모델의 정확성을 평가를 하기 위해서 MASTER 코드에서만 가능한 0차원 계산을 통해서 실제 군정수를 제대로 읽어서 사용했는지를 평가하였다. 0차원 계산은 핵종의 수밀도와 미시단면적을 곱해서 만든 거시단면적을 Current Zero 경계조건을 사용해서 무한증배계수 값을 계산한다. CASMO-3 코드에서 계산된 무한증배계수 값은 0.98958이고, 0차원 계산에서 계산된 무한증배계수 값은 0.989585로 CASMO-3의 계산 결과와 0.5 pcm 차이로 정확히 일치하였다. NESTLE 코드에서는 이런 계산을 수행할 수가 없기 때문에 확인은 불가능했다. 따라서, MASTER의 0차원 계산만으로는 MASTER 코드 자체의 군정수 모델에서의 문제는 없었다.

5. CASMO-3/MASTER-α 핵설계 체계의 검증계산

한국원자력연구소에서는 CASMO-3/MASTER-α 핵설계 전산체계를 가압경수로심 설계에 적용하기 위해 코드를 검증하고 불확실도를 평가하였다. 검증은 각종 정상상태 및 천이상태의 벤치마크 계산으로 수행하였고, 불확실도 평가에 사용된 총 14개 주기의 노심에 대해 노심 추적 계산을 수행하여 임계 붕산 농도, 첨두출력인자, 등온온도계수, 출력계수, 역붕산반응도가, 제어봉반응도가 등 각종 핵설계 특성 인자들을 계산하고 실측자료와의 비교를 통해서 불확실도를 평가하였다. 이 검증 및 불확실도 평가 결과 CASMO-3/MASTER-α 핵설계 체계는 여러 가지 가압경수로심의 노심 핵설계 및 해석에 적용 가능한 것으로 자체 평가하였다.

이 불확실도 분석 결과를 토대로 CASMO-3/MASTER-α 핵설계 전산체계의 가압경수로심 설계 적용에의 타당성을 검증하기 위해서 14개 노심 중 영광 3호기 1주기 노심 한 가지만을 선택해서 반복계산을 수행하고, 중요 계산 결과를 재생산해서 오차를 평가하였다. 반복계산의 결과는 불확실도 분석 보고서의 결과와 영광 3호기 1주기 노심의 핵설계 보고서(Nuclear Design Report, NDR)를 상호 비교하여 평가하였다.[8][9]

임계붕산농도는 실제 노심 조건과 같도록 ARO, HFP, Eq-Xe, Tr-Sm로 고정하고 계산하였다. 계산 결과 그림 7에서 볼 수 있듯이 주기초에서 주기말까지 전체적으로 핵설계 보고서에 수록된 임계붕산농도에 비해서 낮게 계산되었고, 비공식적인 확인 결과 영광 3호기의 임계붕산농도가 실제보다 낮게 계산되는 것을 확인하였다. 표 6에 임계붕산농도의 비교 결과를 나타내었다. 따라서, 임계붕산농도의 계산 결과는 노심에 따라 정확성의 차이가 있었다.

평면출력분포는 핵설계 보고서에 수록된 출력분포와 비교하고, 각각의 핵연료집합체 상대출력에 대한 오차의 평균값인 Root Mean Square Error(RMSE)를 사용해서 평가하였다. 계산 결과 그림 8, 9에서 볼 수 있듯이 핵연료집합체에 대한 상대오차는 최대 5.75%의 값을 가졌다. 특히 주기초에서는 노심의 중앙에서 최대 오차가 발생하고, 주기말로 갈수록 노심 외곽에서 최대 오차가 발생했다. 노심 전체의 출력분포에 대한 평균오차는 주기초에서 2.1331%, 주기말에서 1.1656%로 계산

되었다. 따라서, 노심 전체의 평균 오차는 약 2% 내외의 값으로서 평면출력분포의 계산은 비교적 정확하였다.

노심의 첨두출력인자 계산 결과 축방향 적분 반경방향 첨두출력인자는 연소도에 따라서 핵설계 보고서에 수록된 결과와 큰 차이 없이 정확하게 일치하였다. 표 7에 첨두출력인자의 비교 결과를 나타내었다.

등온온도계수는 특정한 12개의 상태에서 한국원자력연구소에서 수행한 계산 결과와 큰 차이 없이 정확히 일치하였다. 하지만 한국원자력연구소의 계산 결과와 마찬가지로 등온온도계수의 측정치와는 약간의 차이가 있었고, 표 8에 등온온도계수의 비교 결과를 나타내었다. 따라서, 등온온도계수의 계산은 실측치와 약간의 오차는 있지만 무시할 만 하고, 사용자에 따른 계산 결과의 차이가 없기 때문에 비교적 정확하였다.

20, 50% 출력에서 계산된 출력계수는 한국원자력연구소의 계산 결과와 측정치 모두 정확히 일치했지만, 80, 95% 출력에서 계산된 출력계수는 본 연구에서의 계산 결과와 한국원자력연구소의 계산 결과와 각각 1.14, 1.38 pcm/%P의 차이가 났다. 표 9에 출력계수의 비교 결과를 나타내었다. 따라서, 사용자에 따라서 결과가 약간 다를 수는 있지만 그 차이는 절대적인 영향을 미칠 정도의 오차는 아니기 때문에 계산 결과는 신뢰할 수 있었다.

역 붕산 반응도가는 저온 영출력, 고온 영출력 상태에서 한국원자력연구소의 계산 결과와 실측치 모두 정확히 일치하였고, 표 10에 역 붕산 반응도가의 비교 결과를 나타내었다. 따라서, 역 붕산 반응도가 계산의 경우 사용자에 따른 계산 결과의 차이 없이 정확히 일치하였다.

제어봉 반응도가의 계산에서는 실제 측정방법이 그대로 고려되었으며 측정 당시의 노심 조건을 가능한 한 계산에 반영하도록 하였고, 노심 내에 부분강 제어봉(Part Strength Control Rod)을 제외하고 계산하였다. 계산 결과는 한국원자력연구소에서 수행한 계산 결과와 제어봉 반응도가는 약 3 pcm 이하의 오차를 가졌고, 그때의 임계붕산농도 계산 결과도 약 2 pcm 이하의 오차를 가졌다. 하지만 한국원자력연구소의 계산 결과와 본 연구의 결과 모두 실측치와는 약간의 차이를 보였다. 표 11에 제어봉 반응도가의 비교 결과를 나타내었다. 따라서, 제어봉 반응도가의 계산은 사용자에 따라서 계산 결과에 차이가 없기 때문에 계산 결과는 신뢰할 수 있었다.

6. 결론

CASMO-3/MASTER-α 핵설계 전산체계에서 사용하는 군정수표의 정확성을 검토한 결과 수용성 붕산농도, 핵연료 온도 변화에 대한 군정수의 변화는 선형적이었고, 감속재 온도변화에 대해서는 보정 방법과 함께 선형궤환모델을 적용한 결과 정확한 미시단면적을 계산할 수 있는 군정수표를 생산할 수 있었고, 현재의 군정수표 작성 방법은 타당함을 확인하였다.

CASMO-3/NESTLE5.02 핵설계 전산체계를 이용한 이상적인 문제의 비교 계산에서는 두 코드 체계의 결과에 약 100 pcm의 차이가 있었고, 이는 두 코드간의 군정수 모델의 차이에서 오는 것으로 판단하였다. 군정수 모델의 정확성을 확인하기 위해서 MASTER-α의 0차원 계산 결과 MASTER-α 코드 자체의 군정수 모델에는 문제가 없는 것을 알 수 있었다.

영광 3호기 1주기 노심을 CASMO-3/MASTER-α 핵설계 전산체계를 사용해서 계산한 결과 사용자에 따른 계산 결과의 차이가 없기 때문에 계산 결과의 정확성을 신뢰할 수 있었다.

CASMO-3/MASTER-α 핵설계 전산체계는 앞에서 열거한 여러 가지 검증계산 결과로 볼 때 계산 결과는 신뢰성이 있음을 알 수 있었고, 가압경수로의 설계 및 해석에의 적용은 충분히 타당하다고 판단하였다. 그러나, 본 검증 연구는 고농축도의 핵연료나 고농축도의 가연성 독물질 등을 사용하는 신형원자로에 대한 계산을 고려하지 않았기 때문에, 신형원자로에 대해서는 CASMO-3/MASTER-α 핵설계 전산체계의 검증 및 불확실도 분석 결과의 타당성은 없다고 보아야 하며,

추후 별도로 수행되어야 할 것이다. 또한, CASMO-3/MASTER-α 핵설계 전산체계의 검증 및 불확실도 분석 보고서에서 계산한 불확실도는 이상의 검증계산을 바탕으로 충분히 신뢰할 수 있었다.

참고문헌

1. M. Edenius, et al., "CASMO-3, A Fuel Assembly Burnup Program, User's Manual Version 4.4," Studsvik/NFA-89/3, Rev. 1, January, 1991.
2. M. Edenius and C. Grägg, "MICBURN-3, Microscopic Burnup in Burnable Absorber Rods, User's Manual Version 1.5," Studsvik/NFA-89/12, November, 1991.
3. C. H. Lee, et al., "Nuclear Design Manual for Generation of Cross Section and Heterogeneous Form Function for CASMO-3/MASTER," KAERI/TR-782/96, December, 1996.
4. C. H. Lee and B. O. Cho, " XFORM 1.0 User's Manual," KAERI/TR-707/96, June, 1996.
5. C. H. Lee and B. O. Cho, "MASTER-α Methodology Manual," KAERI/TR-686/96, June, 1996.
6. C. H. Lee and B. O. Cho, "MASTER-α User's Manual," KAERI/TR-560/95, August, 1996.
7. Paul J. Turinsky, "NESTLE(V5.02) User's Manual," NCSU and LANL, August, 1996.
8. J. S. Song, "Verification and Uncertainty Evaluation of CASMO-3/MASTER Nuclear Analysis System," KAERI/TR-806/97, January, 1997.
9. Nuclear Design Report for YoungGwang Nuclear Power Plant Unit 3(Cycle 1).

표 1. U-235의 1군 미시 핵분열단면적($\nu\sigma_{f1}$)에 대한 기울기와 미분변화량의 비교

$\nu\sigma_{f1}$	붕산농도	핵연료 온도	감속재 온도
기준상태에서의 미시단면적	0.1804454E+02	0.1804454E+02	0.1804454E+02
변화된 상태에서의 미시단면적	0.1814217E+02	0.1804048E+02	0.1808122E+02
기울기	0.195260E-03	-0.244985E-02	-0.183400E-02
군정수표에서의 미분변화량	0.211334E-03	-0.608851E-03	-0.169983E-02
군정수표에서의 미분변화량으로 계산된 변화된 상태에서의 미시단면적	0.1815021E+02	0.1804555E+02	0.1807854E+02
두 가지 변화된 상태에서의 미시단면적간의 상대오차(%)	+0.044	+0.028	-0.015

표 2. U-235의 2군 미시핵분열단면적(σ_{f2})에 대한 기울기와 미분변화량의 비교

σ_{f2}	붕산농도	핵연료 온도	감속재 온도
기준상태에서의 미시단면적	0.2143777E+03	0.2143777E+03	0.2143777E+03
변화된 상태에서의 미시단면적	0.2113293E+03	0.2144530E+03	0.2182252E+03
기울기	-0.609680E-02	-0.454369E-01	-0.192375E+00
군정수표에서의 미분변화량	-0.515625E-02	-0.117719E+00	-0.214732E+00
군정수표에서의 미분변화량으로 계산된 변화된 상태에서의 미시단면적	0.2117996E+03	0.2145728E+03	0.2186723E+03
두 가지 변화된 상태에서의 미시단면적간의 상대오차(%)	+0.223	+0.056	+0.205

표 3. U-235의 미시 제거단면적(σ_{rem})에 대한 기울기와 미분변화량의 비교

σ_{rem}	붕산농도	핵연료 온도	감속재 온도
기준상태에서의 미시단면적	0.2756599E-01	0.2756599E-01	0.2756599E-01
변화된 상태에서의 미시단면적	0.2774168E-01	0.2758777E-01	0.2788764E-01
기울기	0.351380E-06	-0.131423E-04	-0.160825E-04
군정수표에서의 미분변화량	0.375975E-06	-0.178217E-04	-0.158754E-04
군정수표에서의 미분변화량으로 계산된 변화된 상태에서의 미시단면적	0.2775398E-01	0.2759553E-01	0.2788350E-01
두 가지 변화된 상태에서의 미시단면적간의 상대오차(%)	+0.044	+0.028	-0.015

표 4. MASTER와 NESTLE 코드간의 방법론상의 차이점 요약

	CASMO-3/MASTER-α	CASMO-3/NESTLE 5.02
XS Table Set	Microscopic Macroscopic for Radial Reflector	Macroscopic (or Microscopic)
Nodal Method	NEM for Core NIM for Boundary	NEM or FDM
XS Generation (Xenon Treatment)	No Equilibrium Xenon (Buildup Chain)	No Xenon
Discontinuity Factor	Single Value (Simplified Equivalent Theory)	Six Different Values
Axial Reflector	Hydrogen + Boron + Structure Material	Single Material
T/H Calculation	T_{inlet} & ΔT_m 입력 Mass Flow Rate 자체보정	T_{inlet} & Mass Flow Rate 입력 ΔT_m 계산

표 5. MASTER와 NESTLE의 여러 가지 비교계산 결과의 요약

	k-effective 값 비교		
	MASTER	NESTLE	차이
0-D. Calculation	CASMO와 같음	계산 불가	
HZP, No T/H Feedback	계산 불가	0.972331	
HZP/HFP, T/H Feedback with Zero Coefficient	0.970634	0.972331	-169.7 pcm
HZP, T/H Feedback	0.981487	0.980518	+96.9 pcm
HFP, T/H Feedback	0.966597	0.967856	-125.9 pcm

표 6. 임계붕산농도에 대한 MASTER 계산 결과와 핵설계보고서의 비교

연소도 (MWD/MTU)	임계붕산농도(ppm)		NDR과의 차이
	NDR	KHU	
49	790	765.79	-24.21
495	755	723.59	-31.41
993	778	740.16	-37.84
1,991	804	761.75	-42.25
2,986	820	778.65	-41.35
3,978	818	776.37	-41.63
4,969	768	731.21	-36.79
5,958	702	662.91	-39.09
6,945	622	584.01	-37.99
7,932	537	499.05	-37.95
8,919	447	411.06	-35.94
9,904	352	322.41	-29.59
10,889	259	234.36	-24.64
11,873	165	147.54	-17.46
12,857	78	62.14	-15.86
13,650	15	9.96	-5.04

표 7. 첨두출력인자에 대한 MASTER 계산 결과와 핵설계 보고서의 비교

연소도 (MWD/MTU)	첨두출력인자			
	F_Δ		F_Q	
	NDR	MASTER	NDR	MASTER
49	1.28	1.2849	-	1.7004
495	1.26	1.2751	-	1.6901
993	1.27	1.2915	-	1.7294
1,991	1.28	1.2999	-	1.7496
2,986	1.28	1.2942	-	1.7627
3,978	1.27	1.2857	-	1.6955
4,969	1.26	1.2766	-	1.5326
5,958	1.26	1.2753	-	1.5074
6,945	1.26	1.2717	-	1.5027
7,932	1.26	1.2656	-	1.4794
8,919	1.27	1.2591	-	1.4509
9,904	1.27	1.2587	-	1.4281
10,889	1.27	1.2578	-	1.4282
11,873	1.27	1.2575	-	1.4248
12,857	1.27	1.2564	-	1.4232
13,650	1.26	1.2551	-	1.4201

표 8. 등온온도계수에 대한 MASTER 계산치와 실측치의 비교

연소도 (MWD/MTU)	출력	냉각재 입구온도(℃)	붕산농도 (ppm)	제어봉상태	ITC (pcm/℃)		
					측정치	KAERI	KHU
0	CZP	160.0	1134	ARO	-0.02	-0.69	-0.72
0	CZP	160.0	893	54321	-4.92	-6.95	-7.02
0	HZP	296.1	1117	ARO	-1.49	-0.21	-0.24
0	HZP	296.1	978	543	-5.57	-4.54	-4.58
114	20%	296.1	923		-3.40	-3.71	-3.75
135	20%	296.1	910		-3.65	-3.90	-3.99
313	50%	296.1	828		-5.61	-6.36	-6.54
318	50%	296.1	828		-5.73	-6.36	-6.52
911	80%	296.1	782		-6.69	-8.00	-8.01
925	80%	296.1	778		-8.41	-8.11	-8.10
1792	95%	296.1	777		-7.26	-7.79	-7.80
1802	95%	296.1	776		-7.59	-7.79	-7.82

표 9. 출력계수에 대한 MASTER 계산치와 실측치의 비교

연소도 (MWD/MTU)	출력	붕산농도 (ppm)	제어봉상태	출력계수 (pcm/%P)		
				측정치	KAERI	KHU
135	20%	910	NA	-13.76	-13.24	-13.42
318	50%	828	NA	-11.69	-11.41	-11.94
925	80%	778	NA	-9.73	-9.99	-11.13
1802	95%	776	NA	-9.47	-9.01	-10.39

표 10. 역붕산 반응도가에 대한 MASTER 계산치와 실측치의 비교

연소도 (MWD/MTU)	출력	붕산농도 (ppm)	제어봉상태	IBW (ppm/pcm)		
				측정치	KAERI	KHU
0	CZP	893	54321	-0.0723	-0.0702	-0.070274
0	HZP	978	543	-0.0841	-0.0835	-0.083473

표 11. 제어봉반응도가에 대한 MASTER 계산치와 실측치의 비교

제어봉상태	임계붕산농도 (ppm)			제어봉가 (pcm)		
	측정치	KAERI	KHU	측정치	KAERI	KHU
ARO	1134	1137	1135.64			
5			1126.13	146.3	127.7	128.0
5+4			1097.95	392.1	381.3	380.2
5+4+3			1030.00	956.9	936.7	934.1
5+4+3+2			950.26	1117.8	1142.6	1141.0
5+4+3+2+1	890	903	902.09	760.9	682.3	683.2
ARO	1117	1137	1135.83			
5			1106.68	368.1	331.2	331.9
5+4			1061.68	506.7	515.0	514.7
5+4+3	974	993	991.78	835.7	835.5	834.5
5+4+3+2			930.36	757.0	773.6	772.3
5+4+3+2+1			813.69	1504.8	1416.4	1418.9

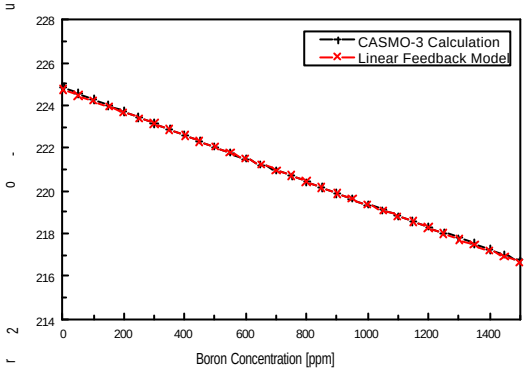

그림 1. 붕산농도 변화에 대한 2군 미시핵분열단면적의 변화

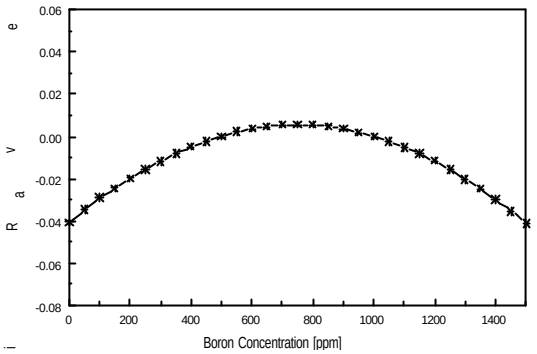

그림 2. 선형궤환모델 적용시 붕산농도 변화에 대한 2군 미시핵분열단면적의 상대오차

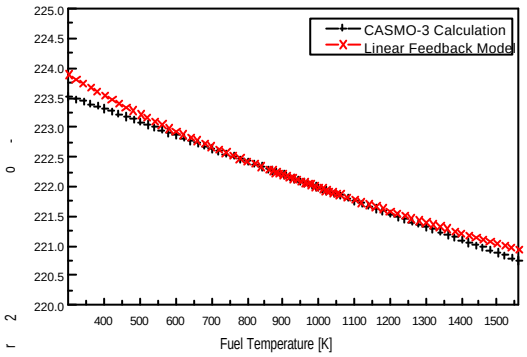

그림 3. 핵연료온도 변화에 대한 2군 미시핵분열단면적의 변화

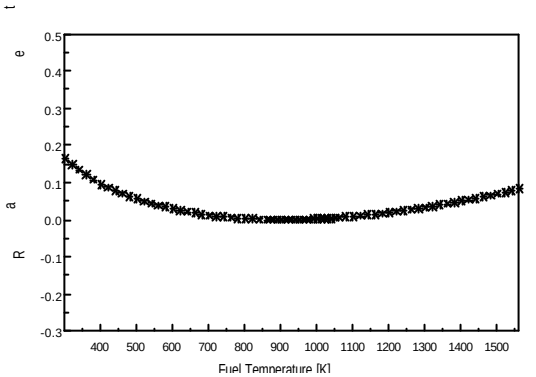

그림 4. 선형궤환모델 적용시 핵연료온도 변화에 대한 2군 미시핵분열단면적의 상대오차

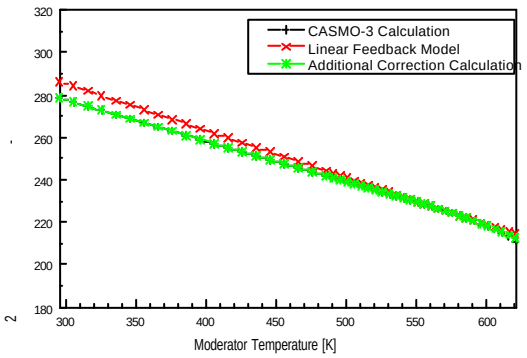

그림 5. 감속재온도 변화에 대한 2군 미시핵분열단면적의 변화

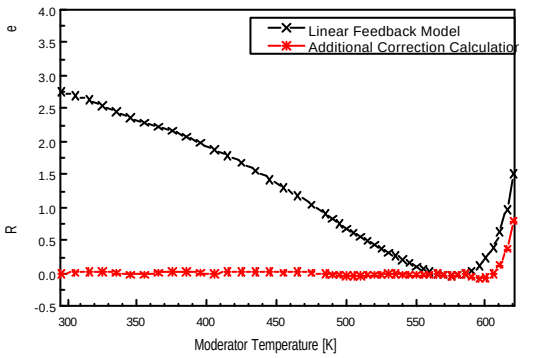

그림 6. 선형궤환모델 적용시 감속재온도 변화에 대한 2군 미시핵분열단면적의 상대오차

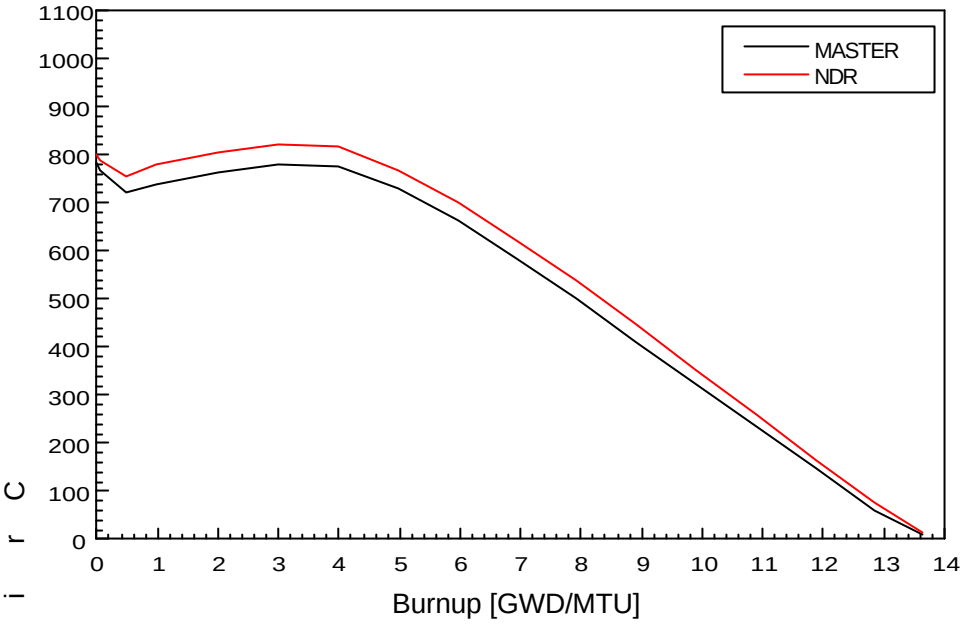

그림 7. 영광 3호기 1주기 노심에서 MASTER의 임계붕산농도 계산치와 NDR 자료 비교

NDR MASTER Error(%)							
					0.59 0.588 -0.34	0.89 0.877 -1.46	1.05 1.022 -2.67
			0.60 0.596 -0.67	1.05 1.021 -2.76	1.16 1.138 -1.90	1.21 1.184 -2.15	1.25 1.223 -2.16
		0.71 0.696 -1.97	1.13 1.105 -2.21	1.28 1.249 -2.42	0.86 0.864 0.47	1.22 1.215 -0.41	1.06 1.063 0.28
	0.60 0.596 -0.67	1.14 1.105 -3.07	1.17 1.160 -0.86	0.82 0.835 1.83	1.15 1.163 1.13	0.83 0.852 2.65	1.18 1.198 1.53
	1.05 1.021 -2.76	1.28 1.249 -2.42	0.83 0.835 0.60	1.12 1.131 0.98	0.79 0.812 2.79	1.23 1.247 1.38	0.82 0.848 3.42
0.59 0.588 -0.34	1.17 1.138 -2.74	0.86 0.864 0.47	1.15 1.163 1.13	0.79 0.812 2.79	1.12 1.148 2.50	0.82 0.848 3.42	1.15 1.173 2.00
0.89 0.877 -1.46	1.21 1.184 -2.15	1.22 1.215 -0.41	0.83 0.852 2.65	1.23 1.247 1.38	0.82 0.848 3.42	1.18 1.197 1.44	0.98 1.007 2.76
1.05 1.022 -2.67	1.25 1.223 -2.16	1.06 1.063 0.28	1.18 1.190 1.53	0.82 0.848 3.42	1.15 1.173 2.00	0.98 1.007 2.76	0.78 0.812 4.10

RMSE(%) = 2.1332

그림 8. 49 MWD/MTU에서의 평면출력분포

NDR MASTER Error(%)							
					0.55 0.565 2.73	0.75 0.766 2.13	0.84 0.853 1.55
			0.57 0.588 3.16	0.90 0.914 1.56	1.07 1.067 -0.28	1.11 1.107 -0.27	1.14 1.132 -0.70
		0.68 0.695 2.21	1.09 1.085 -0.46	1.20 1.188 -1.00	0.93 0.933 0.32	1.13 1.125 -0.44	1.08 1.094 0.37
	0.57 0.588 3.16	1.09 1.085 -0.46	1.18 1.169 -0.93	0.96 0.957 -0.31	1.19 1.186 -0.34	0.95 0.954 0.42	1.13 1.131 0.09
	0.90 0.914 1.56	1.20 1.188 -1.00	0.96 0.957 -0.31	1.20 1.194 -0.50	0.97 0.964 -0.62	1.26 1.252 -0.64	0.96 0.958 -0.21
0.55 0.565 2.73	1.07 1.067 -0.28	0.93 0.933 0.32	1.19 1.186 -0.34	0.97 0.964 -0.62	1.21 1.197 -1.07	0.96 0.959 -0.10	1.14 1.136 -0.35
0.75 0.766 2.13	1.11 1.107 -0.27	1.12 1.125 -0.44	0.95 0.954 0.42	1.26 1.252 -0.64	0.96 0.959 -0.10	1.15 1.139 -0.96	1.10 1.090 -0.91
0.84 0.853 1.55	1.14 1.132 -0.70	1.09 1.094 0.37	1.13 1.131 0.09	0.96 0.958 -0.21	1.14 1.136 -0.35	1.10 1.090 -0.91	0.95 0.950 0.00

RMSE(%) = 1.1656

그림 9. 13,650 MWD/MTU에서의 평면출력분포