2003 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

LIBERTE/MASTER 핵설계 절차의 개발

김강석, 송재승, 이정찬, 지성균
한국원자력연구소
305-333 대전시 유성구 덕진동 150

요약

KAERI 에서 독자적으로 개발한 격자계산 중성자 수송 코드인 LIBERTE 와 노심분석 노달코드인 MASTER 를 결합하여 새로운 핵설계 절차를 완성하였다. LIBERTE 코드는 연소계산이 가능한 2 차원 중성자 수송코드로 핵연료집합체 계산 등을 통하여 노심계산에 사용되는 소수군 군정수를 생산하도록 만들어진 코드이다. MASTER 코드는 2 군 중성자 확산방정식을 사용하여 원자로심의 정상상태 및 천이상태를 3 차원으로 해석할 수 있도록 만들어진 코드이다. 이러한 LIBERTE/MASTER 핵설계 절차는 최초의 국산고유의 핵설계 절차이며 영광 1 호기를 대상으로 절차를 이용하여 노심추적계산을 수행한 결과 이 핵설계 절차가 적절하게 작동을 하고 있슴을 보여준다.

Abstract

New code package of nuclear design was developed in KAERI with the coupling of the transport lattice code called LIBERTE, and the nodal diffusion code MASTER. LIBERTE code is a two dimensional transport lattice code with the function of depletion to generate few group constants to be used in the reactor core analysis through the assembly calculation. MASTER code is a three dimensional nodal diffusion code using 2-group constants to perform the static and transient analysis. This new code package, LIBERTE/MASTER, is the first domestic and inherent nuclear design tool. The results of the core-follow calculations for YGN-1 show that this new code package works properly.

I. 서론

가압경수형 원자로의 노심핵설계절차는 크게 핵연료집합체 계산을 통한 소수군 군정수 계산 및 소수군 군정수 라이브러리를 이용한 3 차원 노심 계산으로 나눌 수 있다. 가압 및 비등경수형원자로의 설계에 사용되는 대표적인 핵설계 절차로는 미국 Westinghouse 사의 PHOENIX-P/ANC[1]와 현재는 Westinghouse 사에 합하여진 ABB-CE 의 DIT/ROCS,

Studsvik 사의 CASMO/SIMULATE 등을 들 수 있다. 이러한 핵설계 절차들은 국내의 가동중인 원자로의 노물리 분석과 연구 등에 사용되고 있다.

노물리 분석 코드의 개발과 관련하여 국내에서는 한국원자력연구소에서 3 차원 노심계산이 가능한 MASTER 코드[2]를 개발하여 상업용 가압경수로의 노물리분석 및 SMART 와 같은 중소형원자로의 개발 등에 사용하고 있다. 그러나 SMART 계산에 사용되는 소수군의 군정수 계산에 사용되는 격자계산용 코드는 CASMO-3[3] 또는 HELIOS[4] 등이 이용되고 있다. 이러한 코드들은 가압경수로와 비등경수로를 주 대상으로 작성되어 있는 까닭에 새로운 연료 또는 노심의 개발 시 목적에 맞도록 적절한 수정작업이 필요하다. 그러나 이러한 코드들은 국내에서 작성된 코드가 아니므로 코드의 내부를 수정하는 데는 한계가 있어왔다. 따라서 한국원자력연구소에서는 새로운 격자계산용 코드인 DENT-2D (Deterministic Neutral Particle Transport Code in 2-Dimensional Space)[5]를 개발하였다. 이러한 격자계산용 코드인 DENT-2D 의 코드명을 LIBERTE (Linear Boltzmann Transport Equation Solver for Reactor Physics and Engineering)로 변경하고 노심해석 코드인 MASTER 와 연결하여 고유의 핵설계 절차를 완성하였다.

이러한 고유의 핵설계 절차는 노물리 해석에 있어 독자적인 체계를 확보 함으로서 국내 가동중인 원자로의 노심거동 해석에 이용할 수 있을 뿐만 아니라 다양한 연구로의 연구개발에 이용할 수 있다. 새로운 연료 또는 개념의 원자로의 개발에서 노심의 노물리 분석에서 흔히 발생하는 해석코드상의 문제점을 적절하게 수정 또는 보완 할 수 있고 축적된 기술 및 노하우를 바탕으로 지속적으로 핵설계 절차를 개선 시켜나갈 수 있는 기반을 마련 하였다. 이러한 것을 바탕으로 핵연료 및 해석체계를 수출할 수 있는 교두보가 마련되었다고 할 수 있다.

제 2 장에서는 LIBERTE 와 MASTER 에서 사용된 방법론에 대하여 설명하고 3 장에서는 가압경수형 원자로인 영광 1 호기 노심 추적계산을 통하여 실측치 및 CASMO-3/MASTER 핵설계절차의 결과와 비교하였다.

II. 방법론

LIBERTE/MASTER 핵설계체계는 그림 1 에서 보여지는 바와 같다. 중성자 수송격자계산 코드인 LIBERTE 를 이용하여 핵연료 집합체에 대하여 연소계산을 수행하고 식(1)에 나타나는 각 변수의 변화에 따른 군정수표를 만들기 위하여 각 연소 지점에서 변화계산을 수행한다. PROLOG 를 이용하여 LIBERTE 의 계산결과를 MASTER 에서 사용할 수 있도록 군정수표를 작성한다. 이러한 군정수표를 입력으로 MASTER 를 이용하여 노심계산을 수행한다. 각 코드의 특성을 살펴 보면 다음과 같다.

II.1 LIBERTE 코드

LIBERTE 는 여러 세부모듈로 나눌 수 있는데 크게 입, 출력모듈, 기하학적 구조 취급모듈, 공명단면적 처리모듈, 수밀도 및 거시적단면 계산 모듈, 중성자수송계산 모듈, 임계중성자속 계산 모듈, 연소계산모듈, 가속계산모듈 등으로 구성되어 있다. 아직까지 LIBERTE 를 위한 다군 단면적 라이브러리와 연소계산을 위한 붕괴상수 및 핵붕괴 생성율등을 포함한 라이브러리는 별도로 준비되어 있지 않다. 현재 격자계산을 위하여서는 HELIOS 라이브러리를 그대로 이용하고 있고, 연소계산을 위해서는 연소사슬이 간략화된 ORIGEN-2[6] 라이브러리를 사용한다. LIBERTE 에 사용된 주요 방법론은 다음과 같다.

공간차분법은 characteristics 방법[7,8]을 사용하였는데 이 방법은 적분수송법과 S_N 방법의 장점을 동시에 지니고 있다. 적분수송법은 아주 복잡한 기하학적구조를 지닌 문제를 취급하는데 용이하다. S_N 방법은 심한 비등방성산란을 취급하는데 용이할 뿐만 아니라 메모리를 크게 필요로 하지 않기 때문에 기하적으로 큰 문제를 푸는데 장점이 있다. 따라서 전체 노심 계산을 characteristics 방법으로 푸는 것이 가능하다.

수치해석 방법론은 일반적으로 에너지 군별로는 산란선원반복법 (Source Iteration), 유효증배계수의 결정을 위하여서는 누승법 (Power Iteration)을 사용한다. 그러나 이러한 방법은 지나치게 많은 시간을 소요로 한다. 계산의 효율을 높이기 위하여 CMFD (Coarse Mesh Finite Difference) 방법[9]을 사용하여 계산시간을 절대적으로 줄였다.

공명단면적을 다루기 위하여 subgroup 방법[10,11]을 사용하였는데 이 방법에서 공명적분은 구적법에 의해 근사된다. 이 subgroup 방법에서 배경단면적을 계산하기 위해서 공명에너지 영역에서 고정선원 수송계산을 수행하여야 한다. LIBERTE 에서는 격자계산에 사용되는 characteristics 방법을 그대로 이용하여 고정선원 수송계산을 수행하였다. 이 경우 에너지 군별로 독립된 관계에 있으므로 CMFD 방법으로 가속화 시킬 필요가 없다. 두개 이상의 공명핵종이 공존하는 경우 공명핵종간의 영향을 고려하기 위하여 반복법을 사용하여 공명핵종들의 최종적인 미시적 흡수단면적을 결정한다.

격자계산에서는 전반사 경계조건의 계산을 수행하므로 핵연료집합체의 유효증배계수는 1.0 에서 크게 벗어난 값을 보여준다. 그러나 실제 노심에서는 원자로의 운전시 항상 임계를 유지하는 까닭에 전반사 경계조건에서 구한 중성자속으로 연소계산을 수행하는 경우 실제와 상당한 차이를 보여준다. 따라서 이러한 효과를 고려하기 위하여 버클링을 임의로 조절하여 임계중성자속을 계산한 후 이를 이용하여 연소계산을 수행해야 한다. LIBERTE 에서는 임계중성자속을 계산하기 위하여 B_1 근사방법[3]을 이용한다.

연소에 따른 구성물질의 변화는 행렬지수함수법 (Matrix Exponential Method)[6]을 통하여 계산한다. 이 방법에서 핵종들을 장수명핵종과 단수명 핵종으로 구분하여 장수명 핵종의 경우 행렬지수함수를 테일러시리즈로 수렴시키고, 단수명핵종의 경우 반복계산법을 통하여

계산한다. 이 방법은 핵종의 추가 또는 삭제가 자유롭다는 이점이 있다. 예측, 수정법을 통하여 연소에 따른 구성물질의 변화를 정확히 계산 할 수 있다.

II.2 PROLOG 코드

3 차원 확산코드인 MASTER 를 이용하여 노심계산을 수행하는데 필요한 중성자단면적 및 조형함수를 적절한 형태로 함수화 또는 규격화하는 과정은 LIBERTE 계산의 결과를 PROLOG 코드 [12]를 통하여 처리하는 것으로 이루어진다. 핵연료집합체의 기하구조 및 농축도를 포함한 조성물질이 결정 되면 전반사 경계조건하에서 단일 핵연료집합체에 대하여 LIBERTE 계산을 수행하여 집합체 고유의 군정수표를 작성한다. 2 군의 중성자단면적은 핵종별로 연소도, 핵연료온도, 감속재온도, 감속재밀도에 대한 함수를 표의 형태로 노심계산의 입력으로 사용된다. 노심에서의 유동적인 연소도, 핵연료온도, 감속재온도 및 감속재 밀도에 대한 영역을 확보하기 위하여 이러한 인자들에 대하여 군정수표는 다음 식으로 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned}\sigma(B, ppm, T_f, T_m, \rho_m) = \sigma(B, ppm_0, T_{f0}, T_{m0}, \rho_{m0}) + \frac{\partial\sigma}{\partial ppm}\Delta ppm \\ + \frac{\partial\sigma}{\partial\sqrt{T_f}}\Delta\sqrt{T_f} + \frac{\partial\sigma}{\partial T_m}\Delta T_m + \frac{\partial\sigma}{\partial\rho_m}\Delta\rho_m\end{aligned} \tag{1}$$

여기에서 σ 는 미시 중성자단면적, B 는 연소도, ppm 은 수용성 붕산농도, T_f 는 핵연료 온도, T_m는 감속재 온도, D_m는 감속재 밀도를 나타내고 아래첨자 ‘ 0’ 는 기준값을 나타낸다.

II.3 MASTER 코드

MASTER 는 2 군 중성자 확산방정식을 사용하여 원자로심의 정상상태 및 천이상태를 3 차원으로 해석할 수 있도록 만들어진 코드이다.[2] MASTER 의 주요 계산모듈에는 연소도 계산, 정상상태 중성자속 계산, 천이상태 중성자속 계산, 핵연료봉 출력 계산, 핵연료봉 연소도 계산, 제논 동특성 계산, 수반(adjoint) 중성자속 계산, 열수력 계산 등이 포함되어 있다.

MASTER 는 노달전개법(Nodal Expansion Method), 노달적분법(Nodal Integration Method), 소격격자 유한차분법(Coarse-mesh Finite Difference Method) 등 3 종류의 중성자거동 해석 모델을 가지고 있다.

핵연료집합체를 단위로 전반사경계조건을 사용하여 중성자수송 격자계산을 통하여 2 군 단면적이 결정된다. 비균질 격자세포 계산에서 얻어진 반응율, 중성자속 및 중성자류의 양이 보존되도록 MASTER 코드에서는 단순등가이론을 사용한다.[13] 반사체 단면적을 위한 균질화는 노심과 반사체의 경계면에서 강철재질의 노심격막 및 냉각수로 구성되어 있는 실제의 복잡한 비균질 기하구조에서 구한 반응행렬(response matrix)이 보존되도록 이루어진다.[14]

핵연료봉별 중성자속 분포의 재구성은 노드 내부의 균질화 중성자속 분포에 집합체의 비균질성을 나타내는 조형함수를 곱함으로써 노드 내부의 핵연료봉별 중성자속 분포를 구할 수 있으며, 이를 이용하여 핵연료봉별 출력분포도 구할 수 있게 된다.

MASTER는 CASMO-3에 근거한 미시 연소모델을 사용하고 있다.[15] 연소 방정식의 해는 완전 가중 예측-수정 기법(fully weighted predictor-corrector method) 또는 반 가중 예측-수정 기법(semi weighted predictor-corrector method)을 사용하여 구해진다.

MASTER 의 열수력 모델은 핵계산중 핵연료 및 냉각재의 온도궤환 계산 전용의 간이 열수력 모델과 궤환계산 및 특정 핵연료집합체의 열수력 성능해석에 사용되는 부수로(subchannel)해석 모델로 구성되어 있다. 간이 열수력 모델은 냉각재 엔탈피를 계산하는 열 균형모듈과 평균 핵연료온도를 계산하기 위한 모듈로 구성되어 있다. MASTER 에서 사용하고 있는 부수로해석 모델은 COBRA3-C/P 이며 핵계산 모듈과 밀착통합되어 정상 및 천이노심 상태에서의 핵연료집합체 상세 열수력 성능해석을 수행한다.[16]

MASTER 에서의 천이상태 중성자속 계산방법은 시간관련 사항을 제외하고는 정상상태 중성자속 계산방법과 동일하다. MASTER 에서 사용하고 있는 천이상태 계산시의 시간차분화(time discretization) 방법은 implicit first order Euler method 이며 시간단계 간의 수치해 가속은 진동수변환(frequency transformation)법을 사용하고 있다.

원자로는 부하추종운전 등과 같이 상대적으로 천천히 진행되는 천이상태에 놓일 수 있으며, MASTER에서는 이러한 제논 천이거동을 모사하기 위한 제논 동특성 모듈이 내장되어 있다. MASTER에는 위의 정상상태 및 천이상태 중성자속 계산모듈과 더불어 수반계산을 위한 모듈이 포함되어 있다. 수반중성자속은 정상상태 중성자속을 이용하여 구해지며, 수반중성자속을 활용하여 유효 지발중성자율, 지발중성자 모핵종의 붕괴상수, 즉발중성자 수명 등의 노심동특성인자를 생산할 수 있다.

III. 노심추적계산

국내의 가압경수로인 영광 1 호기를 대상으로 LIBERTE/MASTER 를 이용하여 1 주기 및 2 주기에 대하여 노심추적계산을 수행하였다. 연소도에 따른 임계 붕산농도, 출력분포, 영출력 노물리 실험에서 측정되는 등온온도계수, 제어봉가, 역붕산가, 임계붕산 농도 등을 실측치와 CASMO-3/MASTER 핵설계절차의 계산값과 비교하였다.

그림 2 과 3 는 연소도에 따른 임계붕산농도를 실측치와 CASMO-3/MASTER 의 계산결과와 비교한 것이다. 그림에서 보여주는 바와 같이 LIBERTE/MASTER 의 결과는 실측치와 CASMO-3/MASTER 의 계산결과와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 그러나 주기말에 노심의 반응도를 약간 높게 예측하는 경향이 있다. 그림 4 는 주기초에서 LIBERTE/MASTER 의 핵연료집합체의 출력분포를 CASMO-3/MASTER 의 것과 각각 비교한 것이다. 그림에서

보여지는 바와 같이 최대차이가 2.0%이나 출력이 낮은 노심의 외곽이어서 상대오차가 크다. 출력이 높은 노심 내부에서는 1.0% 이내에서 일치하고 있음을 보여준다.

표 1 에서 4 까지는 영출력 노물리 시험에서 측정한 값과 비교한 것이다. 표 1 은 영출력 노물리실험에서 측정되는 등온온도계수로 제어봉의 위치에 따라 측정된다. 표에서 보여주는 바와 같이 CASMO-3/MASTER 에 비하여 실측치와 더큰 차이를 보이나 약 4.5pcm/^{o}C 의 거의 일정한 편차를 가지고 있음을 보여준다. 이런 경우 보정인자의 도입 등을 통하여 실측치와 일치시킬 수 있다. 역붕산도가는 표 2 에 나타나 있다. 표에서 보여주는 바와 같이 CASMO-3/MASTER 에 비하여 실측치와 더 큰 차이를 보여주고 있다.

표 3 은 영출력 노물리실험에서 측정되는 제어봉가로 표에서 보여주는 바와 같이 실측치와 비교하여 CASMO-3/MASTER 에 비하여 약간 더 큰 차이를 보여주고 있다. 또한 제어봉가의 불확실도 10% 범위를 만족하고 있음을 알 수 있다.

표 4 는 영출력 노물리실험에서 측정되는 영출력 임계붕산농도로 제어봉의 위치에 따라 측정된다. 표에서 보여주는 바와 같이 실측치에 비하여 낮게 예측함을 보여주고 있으나 제어봉의 삽입에 따라 비교적 잘 일치하는 경향을 보여주고 있다.

본 계산에서는 영광 1 호기의 노심설계에 사용된 반사체의 단면적을 그대로 사용한 까닭에 중성자의 누출 정도 등의 변화에 따라 계산 값을 변화 시킬 여지가 있을 뿐만 아니라 대개의 핵설계 절차들은 실측치를 바탕으로 설계를 최적화 하는 과정을 거치게 되는데 LIBERTE/MASTER 핵설계체계는 그러한 과정 없이 계산하고 결과를 비교한 까닭에 현재 운용중인 핵설계절차에 비하여 실측치와의 차이가 크게 나타나고 있다. 이러한 차이는 설계절차의 최적화를 통하여 개선될 수 있다.

IV. 결론 및 토의

국내에서는 처음으로 완전한 형태를 갖춘 노심핵설계절차인 LIBERTE/MASTER 절차를 확립하였다. 가압 경수형원자로인 영광 1 호기 1, 2 주기를 대상으로 노심추적계산을 수행하여 연소도에 따른 임계붕산 농도, 출력분포, 그리고 영출력 노물리실험의 각종 측정치들을 비교하였다. 계산결과는 측정치 및 원자력연구소의 핵설계체계인 CASMO-3/MASTER 와 비교하여 거의 유사한 결과를 보여준다. MASTER 코드는 완전한 상업용 코드로서의 검증작업이 완료된 상태에 있으나 LIBERTE 코드는 아직까지 체계적인 검증작업이 제대로 수행되어 있지 않다. 임계실험 및 가동중인 가압경수로의 다양한 노심추적계산을 통하여 검증작업을 추가로 실시할 예정으로 있다. 또한 LIBERTE/MASTER 핵설계 체계를 이용하여 하나로 등과 같은 연구로를 포함하는 다양한 노심계산에 적절한 기능을 가질 수 있도록 추가적인 노력을 기울여야 한다.

참고문헌

1. T.Q. Nguyen et al., “ Qualification of PHOENIX-P/ANC Nuclear Design System for PWR Cores,” WCAP-11596-P-A, Westinghouse (1988)

2. B. O. Cho, et al., “ MASTER-2.0 : Multi-purpose Analyzer for Static and Transient Effects of Reactors,” KAERI/TR-1211/99 (1999)

3. M. Edenius et al., “ CASMO-3, A Fuel Assembly Burnup Program Methodology Version 4.4,” STUDSVIK/NFA-89/2 (1989)

4. R. J. Stamml’ er et al., “ HELIOS Methods,” Studsvik Scandpower (1998)

5. K.S. Kim, H.Y. Kim, S.Q. Zee, “ Development of DENT-2D Code Based on the Characteristics Method,” (Accepted to ANS 2002 Annual Meeting)

6. M. J. Bell, “ ORIGEN-The ORNL Isotope Generation and Depletion Code,” ORNL-4628 (1973)

7. J. R. Askew, “ A Characteristics Formulation of the Neutron Transport Equation in Complicated Geometries,” AEEW-M 1108, U.K. Atomic Energy Authority (1971)

8. M. J. Halsall et al., “ CACTUS, A Characteristics Solutions to the Neutron Transport Equations in Complicated Geometries,” AEEW-R-1291, U.K. Atomic Energy Authority (1980)

9. J.Y. Cho et al., “ Cell Based CMFD Formulation for Acceleration of Whole-core Method of Characteristics Calculations,” Proc. of KNS Autumn Mtg., Suwon, Korea (2001)

10. A. Khairallah and J. Recolin, “ Calcul de l'autoprotection resonnante dans les cellules complexes par la methode des sous-groupes,” *Proc. Seminar IAEA-SM-154 on Numerical Reactor Calculation*s, pp 305-317, I.A.E.A., Vienna (1972)

11. C. Notari and Z. Garraffo, “ Spatial self-shielding for heterogeneous cells,” *Ann. nucl. Energy,* **14**, 615-618 (1987)

12. J. S. Song, “ PROLOG 1.1 User’ s Manual,” KAERI/UM-4/99 (1999)

13. K. Koebke, "A New Approach to Homogenization and Group Condensation," IAEA Technical Committee Meeting on Homogenization Methods in Reactors Physics, IAEA-TECDOC-231, Lugano (1978)

14. H. J. Winter and K. Koebke, "Effective Cross Sections for the Radial and Axial Reflector in the Standard 79A Design Method," Siemens/KWU Technical Report R121-339/80, Dec. (1980)

15. M. Edenius and B. Forssen, "CASMO-3: A Fuel Assembly Burnup Program Methodology Version 4.4," STUDSVIK/NFA-89/2, November (1989)

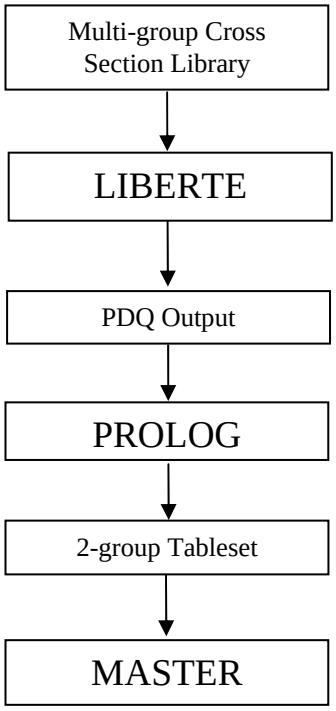

그림 1. LIBERTE/MASTER 계산 절차

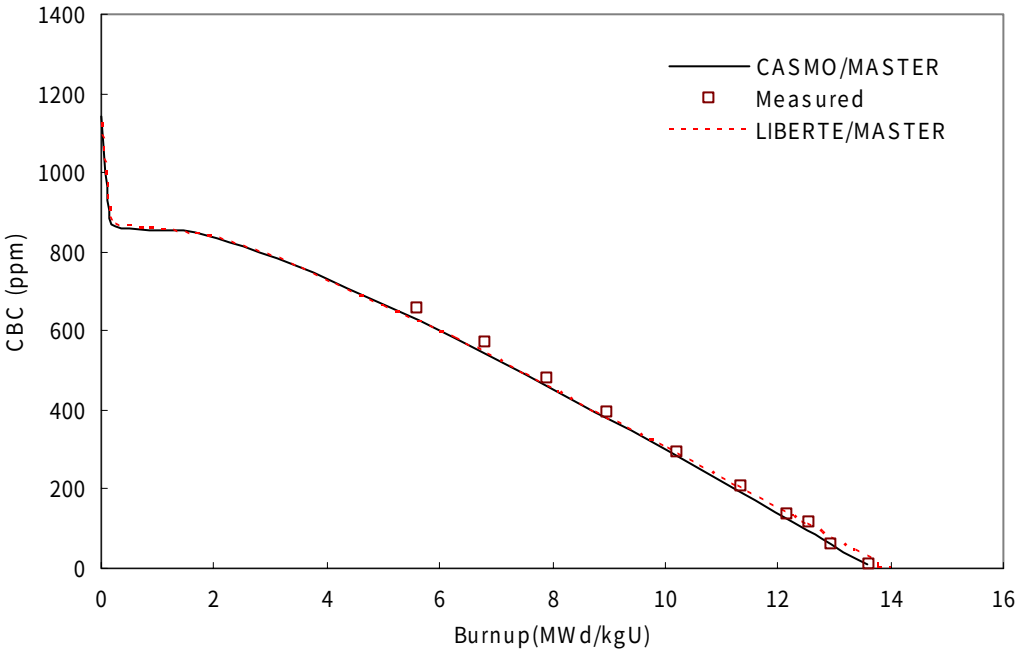

그림 2 임계붕산농도 비교 (영광 1 호기 1 주기)

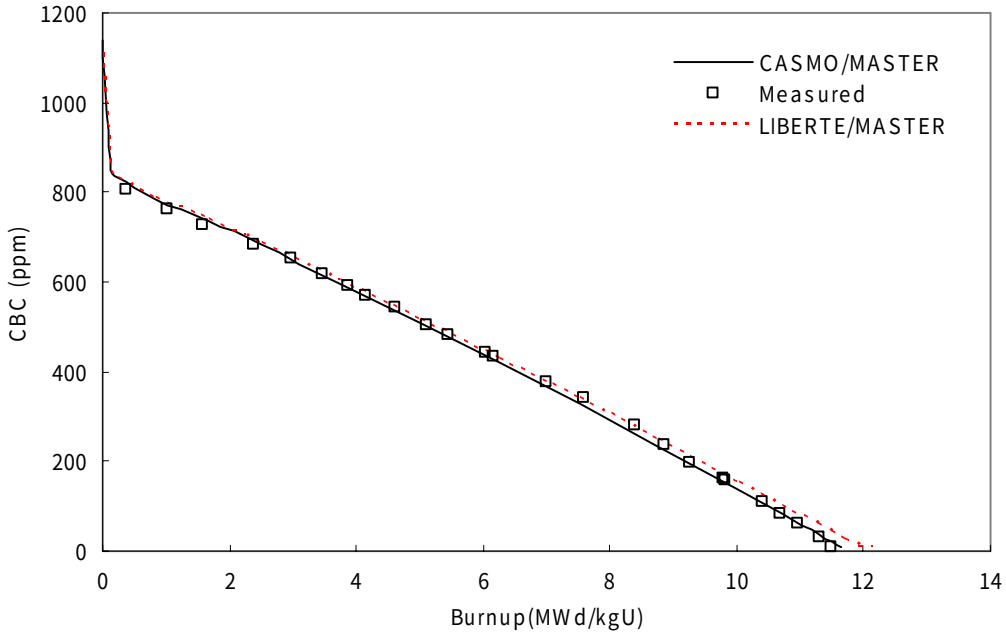

그림 3 임계붕산농도 비교 (영광 1 호기 2 주기)

0.996 0.991 0.50	1.196 1.188 0.67	1.017 1.012 0.49	1.187 1.183 0.34	0.985 0.985 0.00	1.127 1.130 -0.27	0.869 0.876 -0.81	0.824 0.826 -0.24
1.196 1.188 0.67	1.018 1.013 0.49	1.247 1.242 0.40	0.996 0.994 0.20	1.203 1.203 0.00	0.949 0.954 -0.53	1.124 1.130 -0.53	0.663 0.660 0.45
1.017 1.012 0.49	1.247 1.242 0.40	0.995 0.991 0.40	1.139 1.137 0.18	0.951 0.954 -0.32	1.090 1.100 -0.92	1.007 1.008 -0.10	
1.187 1.183 0.34	0.996 0.994 0.20	1.139 1.137 0.18	0.908 0.908 0.00	1.041 1.045 -0.38	1.204 1.214 -0.83	0.697 0.692 0.72	
0.985 0.985 0.00	1.203 1.203 0.00	0.951 0.954 -0.32	1.041 1.045 -0.38	0.775 0.772 0.39	0.741 0.726 2.02		
1.127 1.130 -0.27	0.949 0.954 -0.53	1.090 1.100 -0.92	1.204 1.214 -0.83	0.741 0.726 2.02			
0.869 0.876 -0.81	1.124 1.130 -0.53	1.007 1.008 -0.10	0.697 0.692 0.72				
0.824 0.826 -0.24	0.663 0.660 0.45						

[1]CASMO/MASTER
[2]LIBERTE/MASTER
[3]Difference (%) ([1]-[2])/[1]*100

그림 4 집합체출력분포 비교 (1 주기초)

표 1. 등온온도계수(ITC) 비교

Cycle	Rod	ITC (pcm/°C)			*Difference (pcm/°C)	
		Measured	CAS/MAS	LIB/MAS	CAS/MAS	LIB/MAS
1	ARO	6.75	7.17	11.50	0.42	4.75
	D in	7.25	7.87	12.30	0.62	5.05
	D+C in	-0.85	-1.33	3.48	-0.48	4.33
2	ARO	-1.73	-0.58	2.78	1.15	4.51
	D in	-1.72	-0.95	2.36	0.77	4.08

* Cal.-Meas.

표 2. 역붕산 가(IBW) 비교

Cycle	Rod	IBW (ppm/pcm)			*Difference (%)	
		Measured	CAS/MAS	LIB/MAS	CAS/MAS	LIB/MAS
1	D in	-0.0838	-0.0776	-0.0719	-7.4	-14.2
	D+C in	-0.0769	-0.0786	-0.0729	2.2	-5.3
	D+C+B in	-0.0766	-0.0786	-0.0732	2.6	-4.7
	D+C+B+A in	-0.0753	-0.0726	-0.0676	-3.6	-10.4
2	D in	NA	-0.0969	-0.0890	NA	NA
	C in	NA	-0.0982	-0.0903	NA	NA
	B in	NA	-0.0973	-0.0896	NA	NA
	A in	NA	-0.0965	-0.0887	NA	NA

* (Cal.-Meas.)/Meas.*100

표 3. 제어봉가 비교

Cycle	Rod	Rod Worth (pcm)			*Difference (%)	
		Measured	CAS/MAS	LIB/MAS	CAS/MAS	LIB/MAS
1	D in	489	514	496	-4.9	1.4
	C (D in)	1241	1237	1139	0.3	-8.2
	B (D+C in)	1664	1657	1561	0.4	-6.2
	A (D+C+B in)	1042	1099	1106	-5.2	6.1
	Total	4436	4507	4302	-1.6	-3.0
2	D	577	550	583	4.8	1.0
	C	818	814	739	0.4	-9.7
	B	1272	1279	1224	-0.6	-3.8
	A	841	818	878	2.8	4.4
	Total	3507	3461	3424	1.3	-2.4

* (Cal.-Meas.)/Meas.*100

표 4. 영출력 임계붕산농도 비교

Cycle	Rod	Critical Boron Concentration (ppm)			*Difference (ppm)	
		Measured	CAS/MAS	LIB/MAS	CAS/MAS	LIB/MAS
1	ARO	1208	1212	1174	4	34
	D in	1167	1171	1138	4	29
	D+C in	1075	1074	1055	-1	20
	D+C+B in	948	943	940	-5	8
	D+C+B+A in	874	863	865	-11	9
2	ARO	1249	1267	1207	18	56
	D in	NA	1213	1155	NA	NA
	C in	NA	1186	1141	NA	NA
	B in	NA	1141	1097	NA	NA
	A in	NA	1187	1129	NA	NA

* Cal.-Meas.