

'99 춘계학술발표회 논문집

한국원자력학회

HELIOS/MASTER 핵설계체계의 반응도 및 첨두출력인자 불확실도 평가

Reactivity and Peaking Factor Uncertainty Evaluation of HELIOS/MASTER Nuclear Design System

김 종 채, 송 재 승, 김 하 용, 조 병 오, 지 성 균

한국원자력연구소

요 약

중성자 수송해석 코드인 HELIOS의 노심핵설계예의 적용 타당성을 확인하기 위하여 한국 원자력연구소에서 개발된 3차원 노심해석코드 MASTER 2.0 과의 연계체계를 수립하고 이 핵설계체계의 반응도 및 첨두출력인자에 대한 불확실도를 평가하였다. 불확실도의 평가는 영광 원자력 1호기 및 3호기의 임계봉산농도 및 출력분포 실측치를 기준값으로 하여 노심추적계산 결과와의 차이를 통계적으로 분석하는 방법으로 수행하였다. 반응도 불확실도 평가에서는 임계봉산농도 편차로부터 봉산반응도가 계산값을 이용하여 반응도 차이를 산출하여 분석하였는데 95/95 신뢰도에서 362 pcm으로 평가되었다. 출력분포에 대한 불확실도 평가에서는 영광 1호기의 경우 50개의 이동식 계측기, 3호기의 경우 45개의 노내 계측기에서 발생된 계측신호를 사용하였으며, 보수적인 평가를 위하여 각 주기별로 가장 분산이 큰 출력분포를 기준으로 95/95 신뢰도의 불확실도 평가를 적용한 결과 3차원 첨두출력인자, 축방향 적분 반경방향 첨두출력인자, 평면별 반경방향 첨두출력인자의 불확실도는 각각 0.048, 0.034, 0.044로 평가되었다. 이러한 평가결과는 기존의 상용 노심 핵설계체계나 CASMO-3/MASTER 핵설계체계의 불확실도 평가결과와 유사한 것으로 HELIOS/MASTER 핵설계체계도 가압경수로의 핵설계 및 해석에 적용이 가능하다는 결론을 얻을 수 있다.

ABSTRACT

A nuclear design system HELIOS/MASTER was established and its uncertainties of reactivity and peaking factors were evaluated. The uncertainty evaluations were performed by statistical analyses with differences between core follow calculation results and measured data of Yonggwang units 1 and 3. The reactivity uncertainty of 362 pcm was evaluated from differences of critical boron concentrations between calculations and measurements combined with calculated boron worths. In the evaluation of peaking factors, measurements from 50 and 45 incore instruments were used for Yonggwang units 1 and 3, respectively. The power distribution with maximum deviation for each cycle was used in the comparisons for conservatism. The uncertainties of 3-dimensional, axially integrated radial, and planar peaking factors were evaluated by 0.048, 0.034, and 0.044 in relative power unit, respectively. These results are comparable to other nuclear design systems and it is concluded that the HELIOS/MASTER nuclear design system can be used for the nuclear design and analysis of domestic pressurized water reactors.

1. 서론

국내 발전용 원자로는 정방형 핵연료집합체로 구성된 가압경수로를 중심으로 발전되어 왔다. 그러나 장주기 운전 및 이용을 증대를 목표로 하는 신형원자로에 대한 연구가 활발히 진행되면서 정방형 격자 노심에서 벗어나 새로운 형태의 격자 노심에 대한 연구 필요성이 대두되고 있음에도 불구하고 국내 노심핵설계 분야에서는 새로운 형태의 격자 노심에 대한 해석체계가 아직 확립되지 않은 실정이다. 안전해석에 근간이 되는 자료를 생산하는 노심핵설계 코드체계는 상용 원자로에 적용하기 전에 주요 설계인자에 대한 예측능력이 입증되어야 한다. 이러한 예측능력은 기준계산이나 불확실도 평가를 통하여 이루어지는데 이 불확실도는 안전해석의 보수성을 확보하기 위한 기초 자료로서 핵설계체계의 능력을 평가하는 기준이다.

이 연구에서는 다양한 형태의 핵연료집합체에 대한 균정수 생산이 가능한 HELIOS^[1,2]를 핵연료집합체 격자계산 코드로 사용하고 노심해석에는 정방형 및 육방형 기하구조에 대한 3차원 해석이 가능한 MASTER 2.0 코드^[3,4]를 사용하는 핵설계체계를 수립하고, 국내 원자로에 대한 측정치를 사용하여 불확실도를 평가함으로써 HELIOS/MASTER 핵설계체계의 가압경수로 설계 및 해석에 대한 적용 타당성을 검토하였다. 불확실도 평가는 영광 1호기 1 ~ 7주기, 한국표준형 발전소인 영광 3호기 1주기의 노심추적계산을 통하여 수행되었는데 핵설계절차의 수립을 위하여 반응도와 침투출력인자에 대한 분석만을 우선 수행하였다.

2. 노심분석체계

HELIOS는 직선, 원 및 원호로 구성된 임의의 2차원 기하구조를 취급할 수 있는 중성자 수송 해석 코드이다. HELIOS에 대해서 수행된 민감도 분석^[5]에 의하면 계산결과에 영향을 미치는 주요 인자는 다군균정수 라이브러리, 표면중성자향류(surface angular current) 각분할 방법 및 공명영역을 가진 핵종들의 공명영역 적분방법 등이다. 본 연구에서는 UO₂ 핵연료에 적용이 가능하고 가장 경제적인 계산을 수행할 수 있는 34군 중성자 라이브러리와 이를 약간 변형시킨 35군 중성자 라이브러리를 사용하였으며, 표면중성자향류를 π 의 입체각을 가진 4개의 각으로 분할하는 방법을 채택하였다. HELIOS는 UO₂ 핵연료를 중심으로 개발된 1.4 version과 MOX 핵연료 계산의 정확성을 향상시키기 위하여 공명영역 에너지군의 분할을 보강한 1.5 version이 입수되어 사용중이며 1.4에서는 34군 중성자 라이브러리가, 1.5에서는 35군 중성자 라이브러리가 사용 가능하다.

MASTER 2.0은 가압경수로의 정상 및 과도상태 해석을 수행하는 다차원 노심해석 코드

로써 정방형 및 육방형 격자 노심에 대한 해석이 가능하다. 이 코드는 CASMO-3^[6]나 HELIOS 등을 사용한 격자계산에서 생산된 핵종별 중성자단면적 및 조형함수를 XFORM^[7]을 통하여 적절한 양식으로 공급받게 되는데 그림1에 HELIOS에서 MASTER 코드로 연결되는 핵설계체계를 나타내었다. 이 중 HOPE^[8]는 거시 단면적, 각 핵종별 미세 단면적, 핵연료집합체 내의 열출력, 연소도, 중성자속 분포 및 불연속인자 등의 자료가 수록된 HELIOS 출력파일을 XFORM의 입력형태에 적합하도록 전환해 주는 편집용 프로그램이다.

HELIOS에서는 공명영역의 중성자단면적 적분방법을 다양하게 선택할 수 있는데 1.4 version에서는 공명적분을 일반 핵종과 중핵종으로 구분하는 방법(resonance option 2)을 사용할 것을 권고하고 있으며, 1.5 version에서는 공명적분을 일반핵종과, U^{238} 및 U^{235} 을 제외한 중핵종의 3가지로 구분하는 방법(resonance option 4)이 권고되고 있다. 영광 원자력 1호기 1~7주기 및 영광 3호기 1주기 노심에 대하여 이 두가지 방법으로 생산된 중성자단면적을 사용하여 계산된 임계봉산 농도의 실측치에 대한 차이를 그림 2에 나타내었는데 주기초에서는 대체적으로 유사한 차이를 나타내고 있으나 노심의 연소가 진행되면서 1.4 version은 실측치보다 높게, 1.5 version은 실측치보다 낮게 임계봉산농도를 예측하고 있음을 알 수 있다. 한편 그림 3은 HELIOS 1.4 version에서 공명적분방법으로 option 4를 선택한 노심추적계산의 실측치에 대한 임계봉산농도 차이를 나타내고 있는데, 위의 두가지 방법에 비하여 노심의 연소에 따른 차이가 비교적 일정하고 그 평균값도 0에 근접하여 HELIOS/MASTER 핵설계체계에 가장 적합한 방법으로 평가되고 있다.

3. 불확실도 평가

노심 핵설계체계의 임계봉산농도 즉, 노심반응도 예측능력 평가는 모든 계산결과의 신뢰성을 가능하는 가장 중요한 척도중의 하나이다. 반응도 예측오차는 임계봉산농도의 계산값과 실측치 차이에 측정 연소시점에서 계산된 봉산반응도와의 곱으로 다음과 같이 계산되었다.

$$\Delta\rho = BW \cdot \Delta PPM \quad (2.1)$$

여기서 BW 는 봉산반응도가 계산값이며 ΔPPM 은 임계봉산농도 계산값과 실측치의 차이를 의미한다. 그림 4는 그림 3의 임계봉산농도 차이를 식 2.1을 이용하여 반응도 차이로 환산된 결과를 나타낸 것인데 주기초에서 반응도에 대한 HELIOS/MASTER 핵계산체계의 계산

결과가 실측치보다 50 ~ 400 pcm 정도 높게 평가하는 것을 제외하고는 전체적으로 반응도 차이가 0에 대하여 대칭적으로 분포하고 있음을 알 수 있다. 이를 근거로 한 공차한도의 설정은 χ^2 시험결과 표본이 정규분포를 이루고 있지 않은 것으로 평가되었기 때문에 95/95 신뢰도에 대하여 non-parametric 통계분석법을 사용하였다. 이 방법에 의하면 N 개의 표본을 크기 순으로 배열했을 때 표본 X_j 가 j 번째에 위치한 표본 X_i 보다 크지 않을 확률은 95%의 신뢰도로 다음과 같이 산출된다.

$$P(X_j \leq X_i) = \sum_{k=0}^{j-1} {}^N C_k 0.95^k 0.05^{N-k} \quad (2.2)$$

여기서 95/95 신뢰도 구간의 공차한도는 $P(X_j \leq X_i)$ 가 0.95보다 크게 되는 X_i 가 되는데, 반응도 차이의 공차한도는 이와 같은 방법으로 상한값 302 pcm, 하한값 -345 pcm, 평균 17 pcm으로 산출되었으며 노심설계에서 보정값의 적용을 배제하고 보수적인 평가체계를 유지하기 위하여 최종 불확실도는 평균과 하한값의 차이인 362 pcm으로 평가되었다.

첨두출력인자는 노심설계는 물론 안전해석과 운전여유도의 평가에 가장 중요한 인자이다. 노심설계에서는 3차원 노심출력인자, 축방향 적분 반경방향 첨두출력인자 및 평면별 반경방향 첨두출력인자 등의 첨두출력인자를 다음과 같이 정의하여 사용한다.

$$F_q = \text{Max}[P(x, y, z)] \quad (2.3)$$

$$F_r = \text{Max} \left[\frac{\int P(x, y, z) dz}{\int dz} \right] \quad (2.4)$$

$$F_{x,y} = \text{Max}[\bar{P}(x, y)_z] \quad (2.5)$$

여기서 $P(x, y, z)$ 는 위치 (x, y, z) 에서의 상대출력밀도이며 $\bar{P}(x, y)$ 는 축방향으로 계측기가 위치한 구간에서의 평면별 상대출력밀도를 의미한다. 실측 출력분포는 영광 1호기의 경우 50개의 핵연료집합체에 장전되는 이동식 측정기의 반응률로부터 얻을 수 있고 영광 3호기의 경우 축방향으로 5개씩의 계측신호를 보내주는 45개의 노내 계측기 정보로부터 얻을 수 있다. 첨두출력인자에 대한 불확실도 평가는 계측기가 위치한 핵연료집합체의 출력분포

만을 대상으로 하여 전노심의 출력분포를 대상으로 할 때 발생하는 노심계산체계 자체의 영향을 배제하였는데 보수적인 평가를 위하여 각 주기별로 출력분포 차이의 분산이 가장 큰 출력분포를 해당 주기의 대표적인 분산으로 정하였다. 표 1은 각 주기별 최대 분산과 자유도를 나타내고 있는데 제시된 값을 근거로 평가된 불확실도는 95/95 신뢰도 구간에서 F_{α} , F_{β} , $F_{\alpha\beta}$ 에 대하여 각각 0.048, 0.034, 0.044로 평가되었다. 영광 1호기의 실측자료는 축방향적분 반경방향 침투출력인자의 불확실도 평가에만 사용하였으며, 출력분포 대신 반응률을 그대로 사용하였다.

4. 결과 및 논의

HELIOS/MASTER 핵설계체계를 수립하고 영광원자력 1호기 1 ~ 7주기, 3호기 1주기 노심 추적계산에 적용하여 노심반응도, 3차원 노심출력인자, 축방향 적분 반경방향 침투출력인자 그리고 평면 반경방향 침투출력인자 등에 대한 불확실도 평가를 수행하였다. 표 2에 불확실도 평가 결과를 요약하여 CASMO-3/MASTER 핵설계체계의 불확실도와^[10] 비교하여 수록하였는데 HELIOS/ MASTER 핵설계체계는 반응도 및 출력분포에 대한 보정값을 사용하지 않고도 현재 국내 가압경수로 노심의 설계 및 해석에 사용되고 있는 핵설계체계와 유사한 불확실도를 갖고 있는 것으로 평가되었다. 또한 HELIOS는 비등형경수로에 대한 적용^{[11][12]}에서도 CASMO-3와 유사한 노심계산 결과를 나타내고 있으므로, 국내 가압경수로의 핵설계 및 해석에 적용할 수 있음은 물론 육방형 노심설계나 무봉산운전 노심 설계 등 신형원자로의 설계 연구에도 적용할 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 지금까지 수행된 불확실도 평가결과가 영광 1호기, 3호기만에 국한된 것이므로 아직 더 많은 원전에 대한 평가가 수행되어야 할 것이며 온도계수, 출력계수, 봉산반응도가 및 제어봉 반응도가 등 기타 주요 핵특성 변수에 대한 불확실도 분석도 병행되어야 할 것이다.

후 기

이 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발 사업의 일환으로 수행되었음.

참고문헌

1. HELIOS version 1.4, TN19/41.16.15, Scandpower, July 3, 1996.
2. Release Notes for HELIOS System 1.5, TN36/41.16.15, Scandpower, October 31, 1998.
3. C. H. Lee, et al., "MASTER 2.0 User's Manual," KAERI/UM-3/98, 1998.
4. 조병오 외, "MASTER-2.0 코드 방법론," KAERI/TR-1211/99, 1999.
5. T. K. Kim, et al., "Evaluation of General 2D Geometric Transport Code, HELIOS," Proc. of the KNS Spring Mtg. Cheju, May 1996.
6. M. Edenius et al., "CASMO-3, A Fuel Assembly Burnup Program User's Manual," STUDEVIK/ NFA-89/3, 1989.
7. C. H. Lee, et al., "XFORM 1.0 User's Manual," KAERI/TR-707/96, 1996.
8. 김하용, "HOPE 코드 및 사용설명서," 일체형원자로 노심설계기술개발과제 내부 메모, IM-99-01, 1999.
9. D. B. Owen, "Factors for One-Sided Tolerance Limits and for Variables Sampling Plans," SCR- 607, Sandia Corporation, 1963.
10. J. S. Song et al., "Verification and Uncertainty Evaluation of CASMO-3/MASTER Nuclear Analysis System," KAERI/TR-806/97, 1997.
11. H. G. Hager, et al., "Neutronics Studies for the Nuclear Power Plant Leibstadt Using Advanced Methods," *Proceedings of International Conference on the Physics of Nuclear Science and Technology*, October 5-8, 1998, Long Island, New York.
12. A. A. Ferri, et al., "Application of the Advanced Methods of HELIOS & PRESTO-2 to BWR," *Proceedings of International Conference on the Physics of Nuclear Science and Technology*, October 5-8, 1998, Long Island, New York.

표 1. 주기별 최대 분산과 불확실도

	Fxy		Fr		Fq	
	Max. Sd	자유도	Max. Sd	자유도	Max. Sd	자유도
YGN-3 Cy-1	0.026	2200	0.019	440	0.028	2240
YGN-1 Cy-1			0.018	216		
YGN-1 Cy-2			0.017	429		
YGN-1 Cy-3			0.024	413		
YGN-1 Cy-5			0.023	357		
YGN-1 Cy-6			0.020	373		
YGN-1 Cy-7			0.017	447		
전체	0.026	2200	0.020	2675	0.028	2240
K ^{pl}		1.7		1.696		1.7
KSd	0.044			0.034	0.048	

표 2. 불확실도 평가 결과 요약

	Reactivity		Power Distribution		
	Uncertainty(pcm)	Bias	Fq	Fr	Fxy
HELIOS/MASTER	362	Nil	0.048(2200*)	0.034(2675)	0.044(2240)
CASMO/MASTER	366	Nil	0.050(12424)	0.032(4521)	0.040(12240)

* 불확실도 평가를 위한 자유도

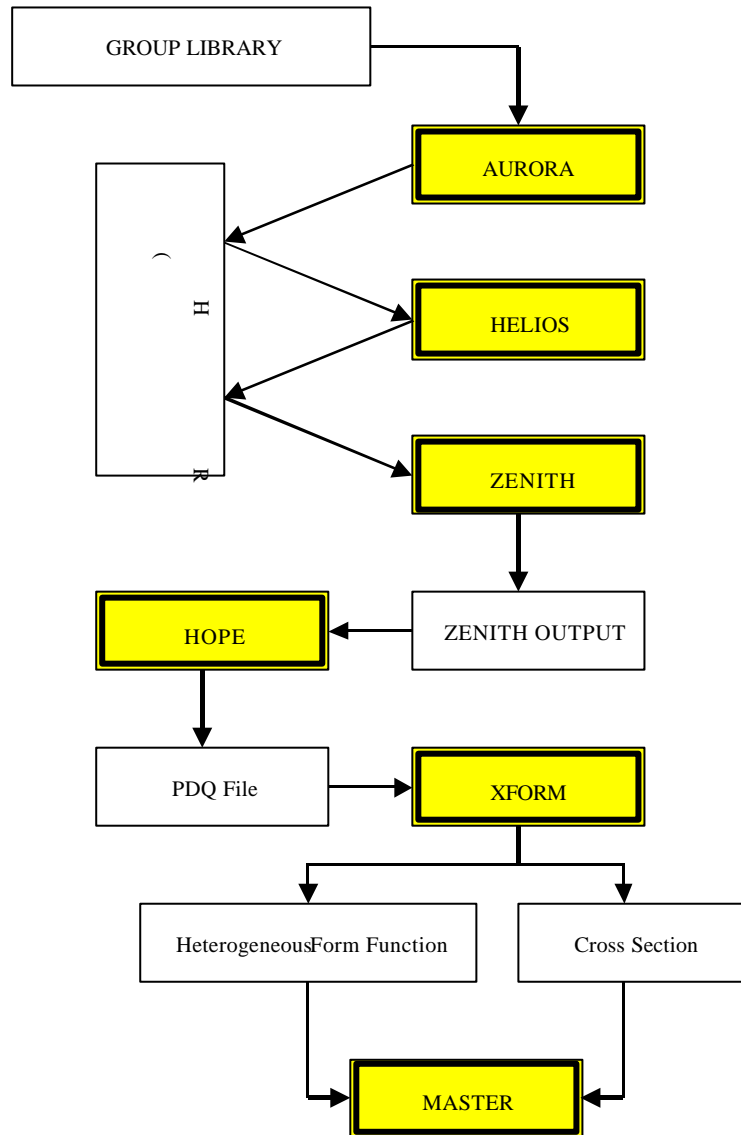


그림 1. HELIOS/MASTER 핵설계체계 흐름도

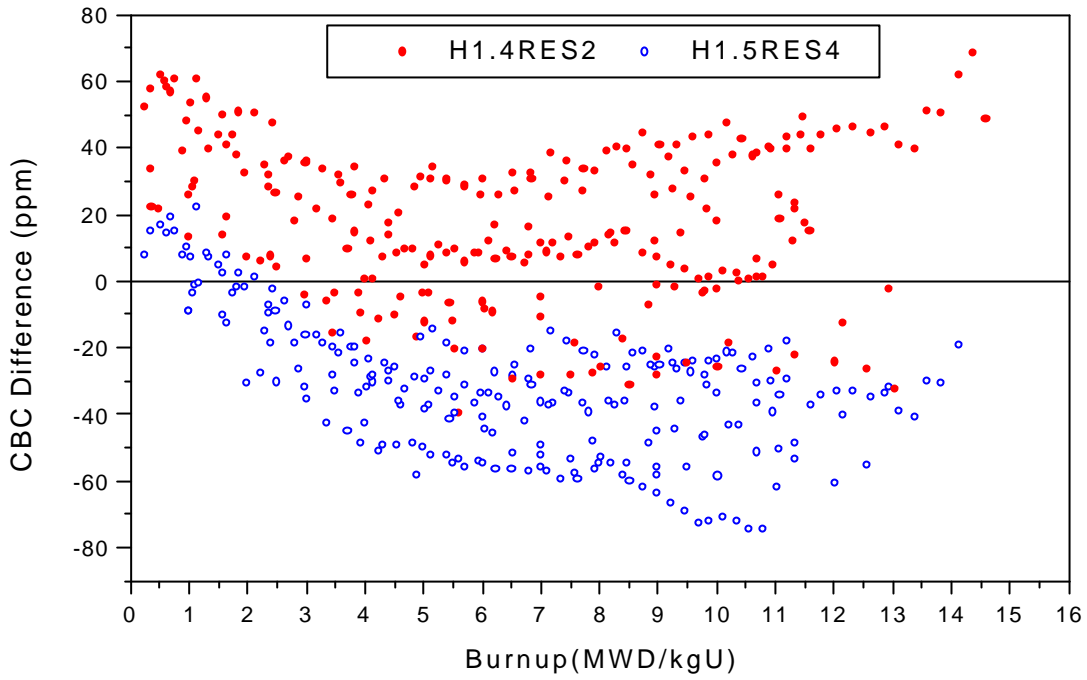


그림 2. HELIOS 라이브러리에 따른 임계붕산농도 계산값과 실측치의 차이

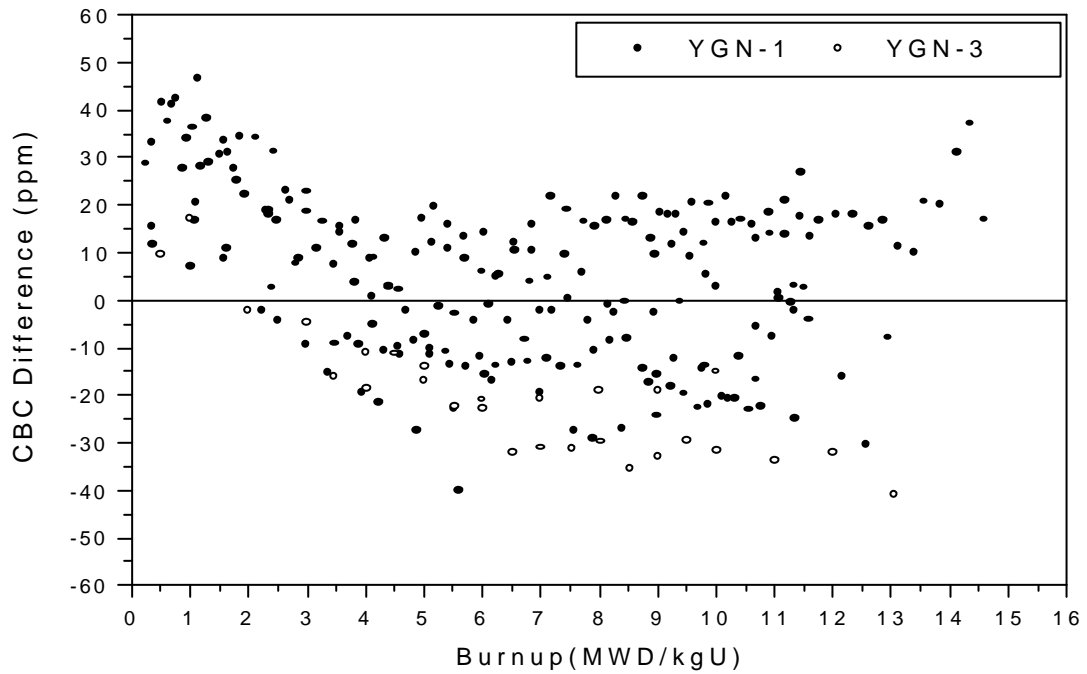


그림 3. 임계붕산농도 계산값과 실측치의 차이

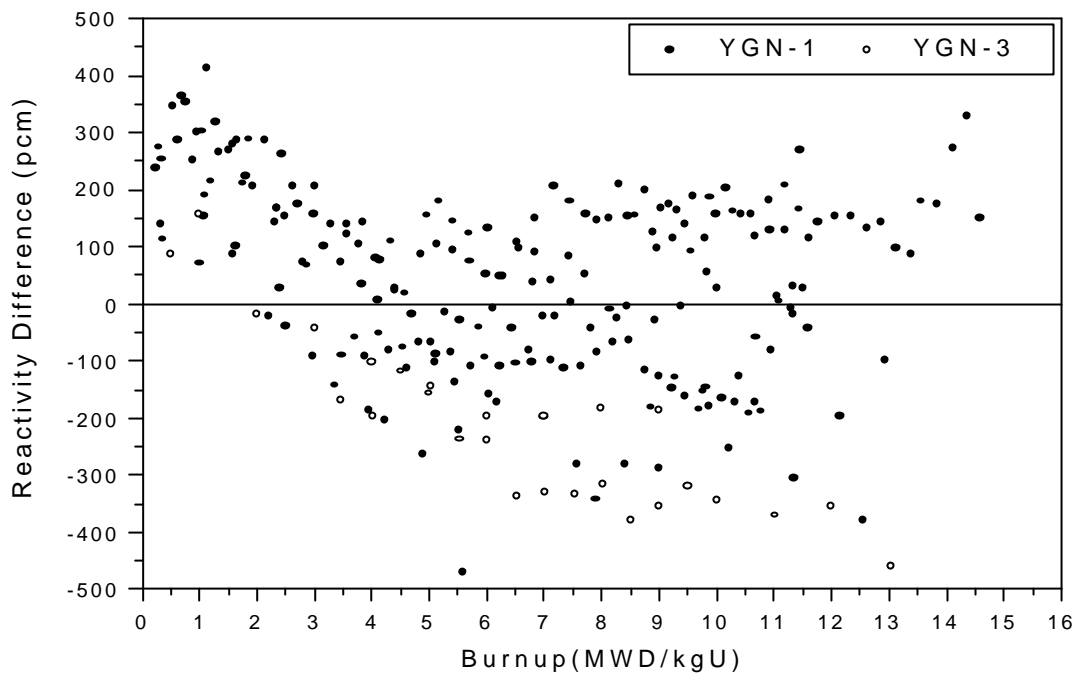


그림 4. HELIOS/MASTER 체계의 반응도 예측오차