

제어봉방출사고의 3차원 노심해석 방법론 적용성 평가 연구  
- 최대 엔탈피 증가 관점 -

Applicability of Multi-Dimensional Reactor Kinetics Models  
to Rod Ejection Accident - Maximum Enthalpy Rise -

양채용, 장창선, 정훈영, 김인구  
한국원자력안전기술원  
대전광역시 유성구 구성동 19번지

요약

본 연구에서 제어봉방출사고의 허용기준 중에 하나인 핵연료의 엔탈피증가 관점에서 3차원 노심 동특성 해석방법론의 적용 타당성을 분석하였으며, 3차원 노심동특성 해석을 위해서 PARCS 코드를 사용하였다. 제어봉방출사고에 중요하게 영향을 미치는 노심변수를 도출하고, 중요한 몇몇 노심변수에 대해 민감도 분석을 수행하였다. 복잡하고 다양한 3차원적 노심 운전조건에 대한 제어봉방출사고 각각의 해석결과를 ' $\rho_{rod}$ (방출제어봉가)- $\beta$ (지발중성자분율)'에 대한 '최대 엔탈피 증가'값으로 표현할 때, 선형 비례 곡선 (Linear Curve)으로 나타낼 수 있음이 본 연구에서 밝혀졌다. 따라서 특정 노심주기에 대해 충분한 해석을 통해 타당성이 인정되는 이와 같은 선형 비례 곡선을 분석한다면, 규제 검토시 보수성 또는 타당성을 평가할 수 있는 중요한 척도로 사용될 수 있을 것으로 보인다.

Abstract

The applicability of a 3-dimensional reactor kinetics model to the rod ejection accidents was examined in the view of the enthalpy rise in the fuel rod. PARCS code was used for the 3-dimensional reactor kinetics model. As a result of the various parametric analyses, the values of 'maximum enthalpy rise' for ' $\rho_{rod}$ (ejected rod worth)- $\beta$ (delayed neutron fraction)' were obtained, and it could be expressed as a linear curve for the complicated and various reactor design and operation conditions. If the theoretical basis of this linear curve can be verified for all the loading patterns and the operation conditions, it will be an index in the regulatory evaluation for the validation of the 3-dimensional reactor kinetics analysis for the rod ejection accidents

I. 서론

제어봉방출사고는 제어봉 구동 메커니즘의 손상에 의해 순간적으로 제어봉집합체가 노심에서 이탈된다는 가정으로 해석이 수행된다. 현재의 사고해석 허용기준으로 핵연료 펠렛의 반경방향 평균 엔탈피 (Radially Averaged Enthalpy) 제한치와 핵비등이탈 (DNB)이 발생하는 핵연료로부터 방출되는 방사선 또는 방사성물질을 기준으로 계산되는 제한구역 (Exclusion Area Boundary)에서

의 방사선량 제한치를 사용하고 있다 [1].

제어봉방출사고 해석의 허용기준 중에 하나인 핵연료 펠렛 (Pellet)의 반경방향 평균 엔탈피에 대한 제한치 280 cal/g의 타당성 연구는 현재 고연소도핵연료에 대해서 활발히 진행되고 있으며, 추후 고연소도핵연료에 대해서 현재값보다 하향되게 설정될 것으로 보인다. 이와 같이 새로이 하향 설정되는 허용기준 하에서는 기존의 보수적인 사고해석 기법으로 계산을 수행할 경우에 현재와 같은 충분한 안전 여유도 (Safety Margin)를 확보하는데 어려움이 있을 수 있어, 사고해석시 노심의 다차원적 출력분포를 고려하는 최적해석 기법이 적용될 것으로 보인다 [2]. 그러나 다차원 노심동특성 해석 기법의 실제 인·허가 사고해석 적용에는 해결해야 할 많은 현안들이 남아 있다. 특히 3차원 노심 출력분포를 계산하기 위해 고려되는 변수가 아주 많아, 이에 대한 분명한 불확실도 처리 방법들이 파악되지 않고는 적용성에 많은 논란을 가져올 것으로 보인다.

앞선 연구에서는 다차원 노심동특성 방법론을 사용한 제어봉방출사고 해석시 노심의 각종 변수들에 대한 민감도 분석이 요구되며, 특정 변수에 대해서는 불확실도 평가를 수행하여 사고해석 결과에 고려되어야 함을 강조하였다 [3]. 참고문헌 [2]에서는 제어봉방출사고에 대한 여러 노심변수에 대한 다양한 민감도 분석을 통하여 출력 Pulse의 특성을 파악하여, 제어봉방출 실험 수행시 적절한 출력 Pulse에 대한 연구를 수행하였다. 본 연구에서는 제어봉방출사고의 허용기준 중 핵연료의 엔탈피 증가 관점에서 3차원 노심동특성 방법론을 적용하여 사고해석을 수행하였다. 특히 중요한 노심변수에 대해 민감도 분석을 수행함으로써 그 특성을 파악하여, 사고해석시 각 변수들의 고려 방법을 제시하고, 인·허가 계산결과의 타당성을 평가할 수 있는 규제 방안을 제시하고자 한다.

본 연구에서 3차원 노심동특성 해석을 위해 PARCS 코드 2.3Beta 버전 [4,5]을 사용하였다. PARCS 코드는 미국 NRC 주도로 개발된 3차원 노심동특성 방법론을 적용한 규제검증 해석 코드로써 노달 방법 (Nodal Method)을 사용한 2군 확산방정식 모델을 도입하고 있다. PARCS는 RELAP5 또는 TRAC-M 열수력 코드와 연계하여 사용될 수 있으나, 본 연구에서의 제어봉방출사고는 열수력 모델에 덜 민감한 특성을 가지고 있어 PARCS 코드 단독으로 사용되었다. 따라서 노심 열수력 계산은 PARCS 코드에 내재되어 있는 단순한 열수력 모델을 사용한다.

## II. 민감도 변수

노심 3차원 동특성 방법론에서 고려되는 변수는 점동특성모델 (Point-Kinetics Model)에 비해 상당히 많기 때문에, 우선 민감도 분석을 수행해야 할 주요 변수를 PIRT (Phenomena Identification and Ranking Table) 해석을 통해 도출하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 제어봉방출사고에 중요하게 영향을 미치는 변수들을 초기조건 (Initial Conditions)과 모델 (Model) 두 부류로 나누어 대표적인 민감도 변수를 도출하였다. 주요 민감도 변수는 다음과 같다:

### 모델 (Model)

- 핵연료집합체 축방향 노드 수
- 핵연료집합체 반경방향 노드 수
- 균정수 생산 모델
- Pin 출력 계산 모델 등

### 초기조건 (Initial Conditions)

- 지발중성자분율 (Delayed Neutron Fraction)
- 방출제어봉가 (Ejected Rod Worth)
- 연소도
- 축방향 연소도

- 노심출력
- 궤환반응도계수
- 핵연료, 갭 (Gap), 피복재의 열전달 계수
- 방출 제어봉
- 주위 제어봉 위치 등

제어봉방출사고에 가장 민감한 변수는 지발중성자분율 ( $\beta$ )과 방출제어봉가 ( $\rho_{rod}$ )로 알려져 있다. 본 연구에서는 지발중성자분율과 방출제어봉가를 독립변수 (Independent Variables)로 고려하여 각각의 민감도 변수에 대해 그 영향을 파악한다. 또한 본 연구에서는 위의 민감도 변수 중 중요한 몇몇 변수에 대해서만 그 영향을 분석한다.

### III. 기본모델에 대한 제어봉방출사고 해석

#### PARCS 기본모델

본 연구를 위해 고리 1호기 19주기 노심을 선정하였다. 고리 1호기 19주기 노심에 대해서는 RELAP/PARCS 연계 코드를 사용하여 주증기관 파단사고 해석을 수행함으로써 그 적용성 평가를 수행한 바 있다 [6]. 민감도 분석은 우선 기본모델을 설정하여 기본적인 특성을 파악한 후에 중요한 민감도 변수에 대해 영향을 분석한다. 따라서 기본모델은 단순하고 용이하게 설정하였다.

제어봉방출사고는 주기초 (BOC)와 저출력 운전조건이 보수적인 것으로 알려져 있다. 따라서 기본모델로써 0 MWD/MTU 연소도와 1.0E-4 %FP 노심출력을 선정하였다. 또한 노심의 Nodalization은 가장 단순하게 핵연료집합체를 하나의 노드로 구성하고 축방향으로는 18개의 노드로 구성하였다. 노심모델에 대한 상세 내용과 고리 1호기 19주기 노심설계 및 운전변수는 참고문헌 [7]에 제시되어 있다. 단순한 모델을 위해 축방향 연소도는 고려되지 않았으며, 핵연료집합체에 대해 평균 연소도로 일괄적으로 고려하였다. 기본모델의 주요 내용은 표 1에 나타나 있다.

핵연료의 농축도와 연소도에 따른 핵연료 분류는 그림 1에 제시되어 있다. 핵연료 22개와 반사체 4개를 포함하여 핵연료집합체는 모두 26 종류로 구성되어 있다. 또한 PARCS에 사용되는 균정수 생산을 위해 붕소농도, 핵연료온도, 냉각재온도 및 냉각재밀도에 대한 기준값과 변화값에서 균정수가 요구된다. 기본모델에서 계산된 기준값과 변화값은 다음과 같다:

- |          |                             |                             |
|----------|-----------------------------|-----------------------------|
| - 붕소농도:  | 기준값 1000ppm                 | 변화값 2000ppm                 |
| - 핵연료온도: | 기준값 870K                    | 변화값 1070K                   |
| - 냉각재온도: | 기준값 575K                    | 변화값 595K                    |
| - 냉각재밀도: | 기준값 0.7225g/cm <sup>3</sup> | 변화값 0.7703g/cm <sup>3</sup> |

#### 기본모델 사고해석

기본모델에서는 노심 중앙의 핵연료집합체에 있는 제어봉집합체 (이하 중앙 제어봉이라 함)의 방출을 고려한다. 중앙 제어봉의 반응도가는 다른 제어봉이 완전히 삽입되어 있는 조건에서 가장 크게 나타났으며, 약 1.25 Dollars로 계산되었다. 실제로 어떤 제어봉의 원하는 반응도가를 산출하기 위해서는 여러 노심의 운전조건과 핵연료 장전 형태 등 다양한 조건을 모두 고려해야 하기 때문에 많은 시간과 노력이 수반된다. 따라서 본 연구에서는 중앙 제어봉 균정수의 흡수단면적을 증가/감소시켜 방출제어봉가를 임의로 조정하여 쉽게 원하는 값을 설정할 수 있도록 하였다.

또 다른 중요한 독립변수인 지발중성자분율 변화는 6 그룹에 대해서 일괄적으로 같은 비율로써 증가 또는 감소시켜 조정하였다. 일괄적으로 같은 비율로 조정된 경우와 특정 지발중성자 그룹만을 조정된 경우에 대해서 전체 지발중성자분율을 같게 하여 사고해석을 수행한 결과, 사고해석 결과는 거의 동일한 것으로 나타났다.

지발중성자분율과 방출제어봉가에 대한 최대 엔탈피 증가 (Maximum Enthalpy Rise)가 그림 2와 3에 제시되어 있다. 지발중성자분율이 감소하면 최대 엔탈피 증가 값은 증가하고, 방출제어봉가가 증가하면 최대 엔탈피 증가 값도 증가하고 있음을 보여주고 있다. 그리고 그림 2와 3의 데이터를  $(\rho_{rod} - \beta)$  값으로 환산한 값에 대한 최대 엔탈피 증가 변화량이 그림 4에 제시되어 있다.  $(\rho_{rod} - \beta)$  값이 300 pcm 이하에서는 최대 엔탈피 증가 값들이 산재되어 있으나, 300 pcm 이상에서는 일차 선형함수로 증가하고 있음을 보여주고 있다.

#### IV. 민감도 분석

##### 축방향 및 반경방향 노드 수

기본모델의 축방향 노드는 WABA, 정지봉/제어봉 삽입위치, 핵연료 위치 등을 고려하여 18개의 노드로 분할하였다. 축방향 노드 수를 28개로 증가하여 분석한 결과, 모든 결과는 기본모델의 해석결과와 동일하였다. 결과적으로 어느 정도 세분화된 축방향 모델에서 같은 연소도의 노드 내에서 축방향 노드 수는 해석결과에 별로 영향을 미치지 않고 있다는 결론을 도출하였다.

기본모델에서는 핵연료집합체의 핵설계노드 (Neutronic Node)를 1x1로 모델하였다. 반경방향 노드 수에 대한 민감도 분석에서는 두 방출제어봉가에 대해 핵연료집합체당 핵설계노드를 4x4로 모델하였다. Case 1과 Case 2는 핵설계노드를 제외한 기본모델의 노심 구성을 가지고 있으며, Case 1 (기본모델)은 방출제어봉가가 728.5 pcm인 경우이다. Case 1의 1x1 모델에서는 방출제어봉가가 728.5 pcm 이고, Case 2의 4x4 모델에서는 886.2 pcm 이다. 이에 대한 최대 엔탈피 증가가 그림 5에 제시되어 있다. 두 경우에 대해서 방출제어봉가는 약 2% 차이가 났으며, 최대 엔탈피 증가는 약 6.5% 차이가 났다. 그러나 방출제어봉가에 대한 최대 엔탈피 증가는 일차 선형함수 위에 놓여있어, 방출제어봉가 (혹은  $\rho_{rod} - \beta$ )에 대한 최대 엔탈피 증가 값에 있어서 반경방향 노드 수는 영향이 적다는 결론을 내릴 수 있다.

##### 균정수 생산시 기본붕소농도 변화

PARCS 균정수 고려 방법론은 붕소농도, 핵연료온도, 냉각재온도 및 밀도의 기본값에서 균정수 세트가 계산되고, 기본값과 다른 변화값에서 균정수 세트를 구하여, 그 기울기로써 내삽/외삽하는 선형이론에 근거하고 있다. 따라서 기본값과 변화값 선택이 사고해석에 영향을 미칠 것으로 예상되어, 본 분석에서는 붕소농도와 핵연료온도의 기본값을 변화시켜 민감도 평가를 수행한다.

기본모델에서는 붕소농도와 핵연료온도의 기본값은 각각 1000 ppm와 870 K 이며, 변화값으로 2000 ppm과 1070 K에서 각각 균정수를 생산하여, 붕소농도와 핵연료온도의 변화량에 대한 균정수 변화량을 계산하여, 기본 균정수와 변화량에 대한 기울기가 PARCS 입력자료에 사용되었다. 본 민감도 분석에서는 붕소농도 기본값으로 500 ppm과 1400ppm 두 경우와 핵연료온도 기본값으로 570 K를 사용하여 PARCS 균정수를 생산하였다. 붕소농도에 대한 결과가 그림 6과 7에 제시되어 있으며, 핵연료온도에 대한 결과가 그림 8에 제시되어 있다. 붕소농도 기본값이 감소할수록 주어진 방출제어봉가에 대해 증가하는 것으로 나타났으며, 그 영향이 아주 큰 것으로 나타났다. 그리고 그림 8과 그림 4 (기본모델)를 비교하면, 핵연료온도 기본값 변화는 사고해석 결과에 미치는 영향이 미미함을 보여주고 있다.

##### 연소도

기본모델의 운전조건은 BOC, 0 MWD/MTU 연소도 조건을 사용하였다. 본 민감도 분석에서는 12,000 MWD/MTU의 EOC 조건을 사용하여 분석하였다. EOC 12,000 MWD/MTU 노심의 임계붕소농도는 200 ppm 이하로써, 방출제어봉가에 대한 민감도 분석을 위한 방출제어봉가의 가상적인 큰 값에서 초기 임계붕소농도 설정이 불가능하다. 따라서 초기 제어봉뱅크 B의 완전 인출

조건을 가정하였다.

EOC 조건에 대한 제어봉방출사고 해석결과는 그림 9에 제시되어 있다. 그리고 최대 엔탈피 증가 데이터를 포함하는 선형함수에 대한 비교가 그림 10에 제시되어 있다.  $(\rho_{rod} - \beta)$  값에 대한 최대 엔탈피 증가는 EOC 조건이 BOC 조건보다 낮게 나타났다.

## V. 결론 및 추후 연구

본 연구에서는 고리 1호기 19주기 노심에 대해 3차원 노심동특성 최적 해석코드인 PARCS를 사용하여 제어봉방출사고의 최대 엔탈피 증가값을 분석하였다. 또한 주요 몇몇 노심변수에 대해 민감도 분석을 수행하여 그 경향을 파악하였다. 특히 노심 모델과 균정수 고려 방법 그리고 노심 연소도에 따른 민감도 분석을 수행하여, 이 변수에 대한 특성과 사고해석 영향을 분석하였다.

사고에 중요하게 영향을 미치는 민감도 변수 값들은 전체 운전주기 그리고 전체 출력범위 등 모든 운전범위 내에서 광범위하게 변하기 때문에, 일괄적인 경향으로 보수적임을 평가할 수 있는 값 또는 조건을 찾는 데 많은 시간과 경비가 소요된다. 다른 모든 노심 운전조건에서 방출제어봉가와 지발중성자분율은 다른 값을 가지지만, 제어봉방출사고시  $(\rho_{rod} - \beta)$  값에 대한 최대 엔탈피 증가는 선형 비례 곡선으로 나타낼 수 있음이 본 연구결과에서 밝혀졌다. 따라서  $(\rho_{rod} - \beta)$  값에 대한 최대 엔탈피 증가의 선형 비례 곡선이 모든 운전조건을 포함할 수 있도록 설정할 수 있다면, 사고해석의 보수성 또는 타당성을 평가할 수 있는 중요한 척도로 사용될 수 있을 것이다.

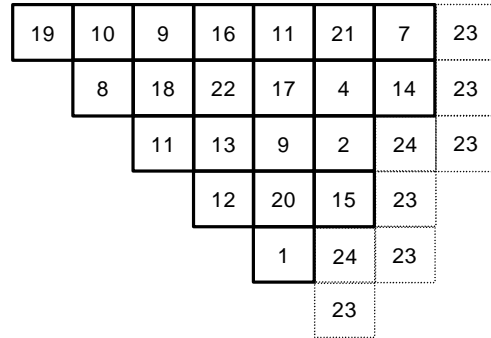
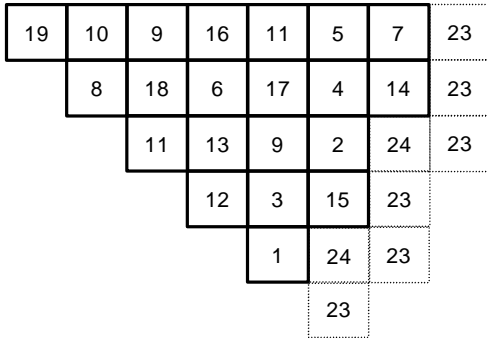
본 연구에서 단지 몇몇 변수에 대해서만 민감도 분석을 수행하였다. 총체적인 결론을 위해서는 추후 연구에서 위에 제시된 축방향 연소도, 노심출력, 궤환반응도계수, 핵연료/궤/ 피복재의 열 전달 계수, 방출 제어봉, 주위 제어봉 위치 등에 대한 민감도 분석이 필요하다. 또한 제어봉방출사고에 대한 상세 PIRT를 개발하여 추가적으로 필요한 민감도 변수를 도출하여야 한다. 그리고 제어봉방출사고시  $(\rho_{rod} - \beta)$  값에 대한 최대 엔탈피 증가의 선형 비례 곡선에 대한 기초 이론을 연구한다면 3차원 노심동특성 방법론의 사고해석 적용에 대한 인·허가 규제시 타당성을 평가할 수 있는 기초를 마련할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 본 분석은 3차원 노심동특성 방법론의 제어봉방출사고 해석 적용시 엔탈피 관점에서 분석되었으나, 추후 핵비등이탈 (DNB) 관점에서 그 적용성을 평가할 필요가 있다.

## 참고문헌

- [1] Standard Review Plan - 15.4.8 Spectrum of Rod Ejections (PWR), NUREG-0800, U.S. Nuclear Regulatory Commission, 1981.
- [2] D. J. Diamond, et al., *Studies of the Rod Ejection Accident in a PWR*, Brookhaven National Laboratory, Jan. 2002.
- [3] 양채용 외, 다차원 노심동특성 해석방법론의 사고해석 적용성, 2002 한국원자력학회 춘계학술발표회, 조선대학교, 2002. 5.
- [4] H. G. Joo et al., *PARCS: A Multi-Dimensional Two-Group Reactor Kinetics Code Based on the Nonlinear Analytic Nodal Method*, PU/NE-98-26, Purdue University, 1998.
- [5] PARCS Version 2.3 (Beta), Chapter 9: User Manual for the PARCS-v2.3Beta Kinetics Core Simulator Module-, USNRC, Mar. 2002.
- [6] 양채용 외, RELAP5/PARCS 코드를 이용한 주증기관 파단사고의 3차원 노심 및 열수력 거동 분석, 2002 한국원자력학회 추계학술발표회, 경희대학교, 2001. 10
- [7] 양채용 외, 3차원 노심동특성/계통 열수력 연계 검증기술 개발 - 고리 1호기 주증기관 파단 사고 분석 -, KINS/RR-046, 한국원자력안전기술원, 2001. 2.

표 1 제어봉방출사고를 위한 고리 1호기 19주기 PARCS 기본모델

| 기본 모델 및 운전변수                 | 값                |
|------------------------------|------------------|
| Fuel Cycle                   | BOC, 0 MWD/MTU   |
| 축방향 연소도                      | 고려 안됨 (평균연소도 사용) |
| 노심출력                         | 1.0E-4 %FP       |
| 반경방향 핵설계 노드 수(핵연료 집합체당 노드 수) | 177(1x1)         |
| - 핵연료집합체                     | 121              |
| - 반사체                        | 56               |
| 반경방향 열수력 노드 수                | 177              |
| 축방향 핵설계 노드 수                 | 18               |
| 축방향 열수력 노드 수                 | 18               |
| 제어봉 그룹 위치                    |                  |
| - A, B, C, D                 | 완전 삽입            |
| 정지봉 그룹 위치                    |                  |
| - SA, SB                     | 완전 인출            |
| 방출 제어봉집합체                    | 노심 중앙핵연료집합체      |



| 분류 | 연소도<br>(MWD/MTU) | U235<br>(w/o) | 분류 | 연소도<br>(MWD/MTU) | U235<br>(w/o) |
|----|------------------|---------------|----|------------------|---------------|
| 1  | 0                | 3.798         | 14 | 33,700           | 3.793         |
| 2  | 0                | 3.793         | 15 | 34,400           | 3.797         |
| 3  | 0                | "             | 16 | 28,400           | "             |
| 4  | 0                | "             | 17 | 30,300           | "             |
| 5  | 0                | "             | 18 | 32,600           | "             |
| 6  | 0                | "             | 19 | 39,500           | 3.798         |
| 7  | 16,200           | 3.798         | 20 | 0 (8 WABA)       | 3.793         |
| 8  | 11,700           | "             | 21 | 0 (12(WABA))     | "             |
| 9  | 13,500           | 3.797         | 22 | 0 (12(WABA))     | "             |
| 10 | 16,300           | 3.798         | 23 | I-Type 반사체       | -             |
| 11 | 16,200           | "             | 24 | L-Type 반사체       | -             |
| 12 | 16,100           | "             | 25 | Top 반사체          | -             |
| 13 | 18,200           | "             | 26 | Bottom 반사체       | -             |

그림 1 고리 1호기 19주기 0 MWD/MTU 노심의 PARCS 입력모델 (1/8 대칭 노심)

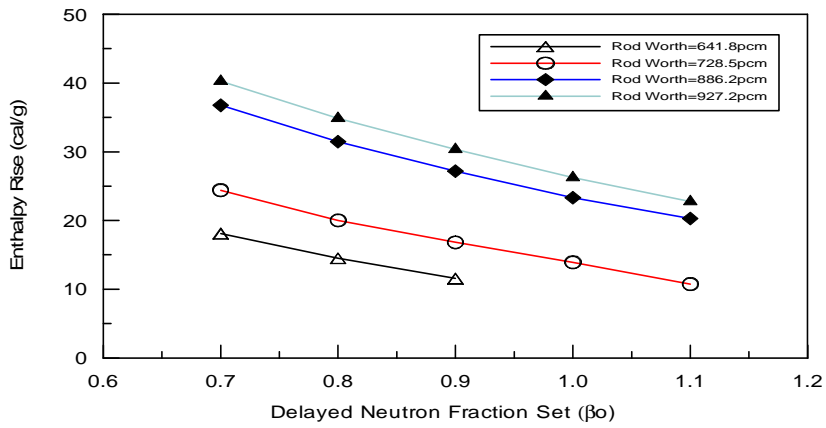


그림 2 지발중성자분율에 대한 엔탈피 증가 (기본모델)

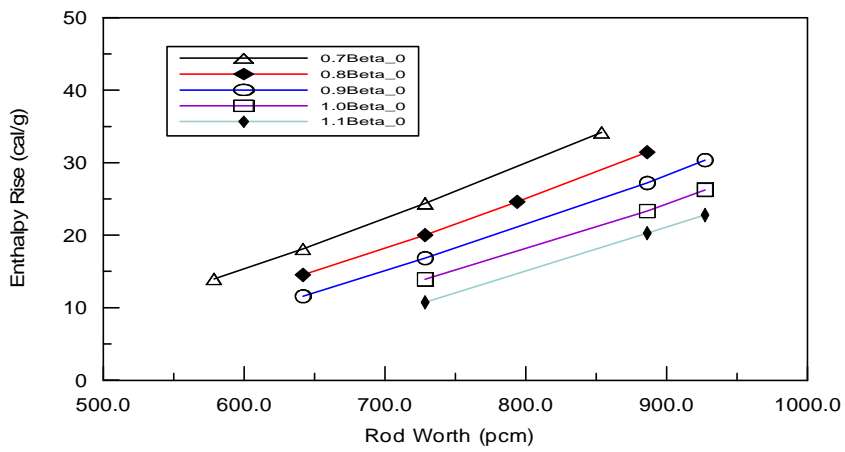


그림 3 방출제어봉가에 대한 최대 엔탈피 증가 (기본모델)

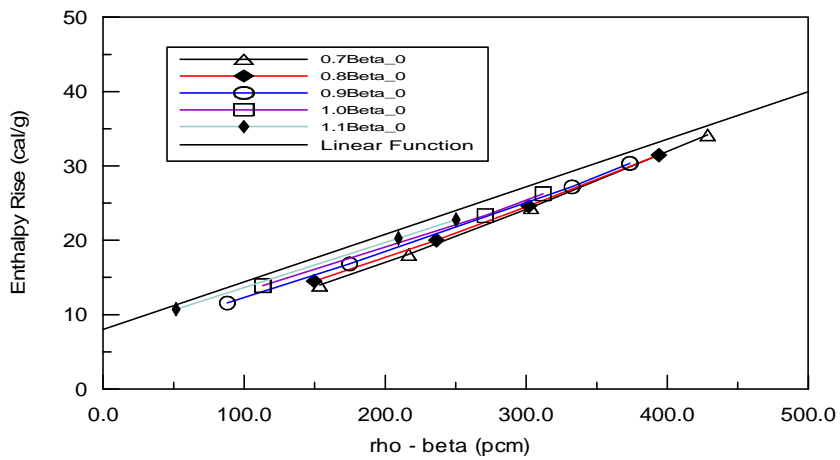


그림 4 ( $\rho_{rod} - \beta$ )에 대한 최대 엔탈피 증가 (기본모델)

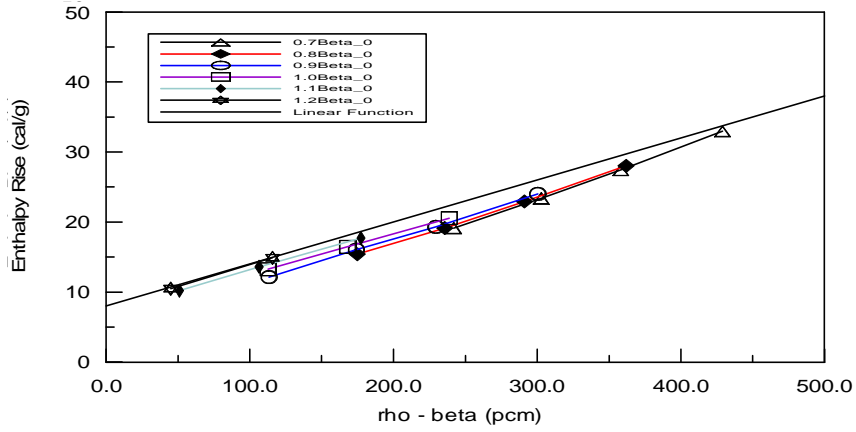


그림 5 핵연료집합체당 핵설계노드 수에 대한 엔탈피 증가 ( $\beta = \beta_0$ )

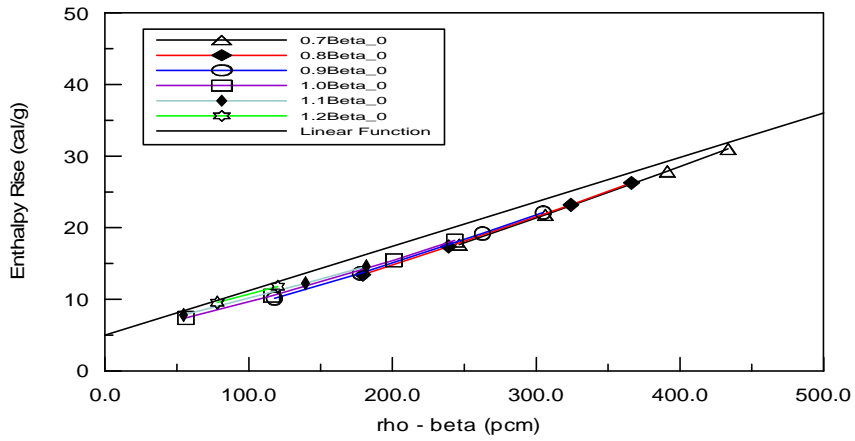


그림 6 ( $\rho_{rod} - \beta$ )에 대한 최대 엔탈피 증가(기본붕소농도 500 ppm)

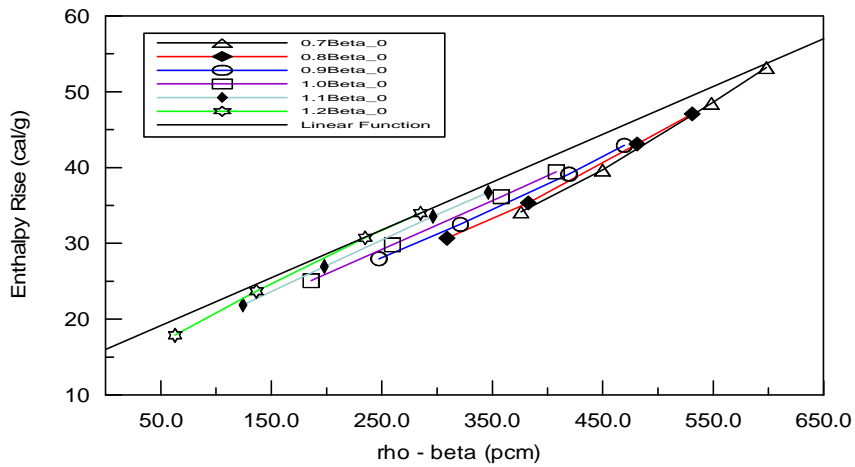


그림 7 ( $\rho_{rod} - \beta$ )에 대한 최대 엔탈피 증가 (기본붕소농도 1400 ppm)



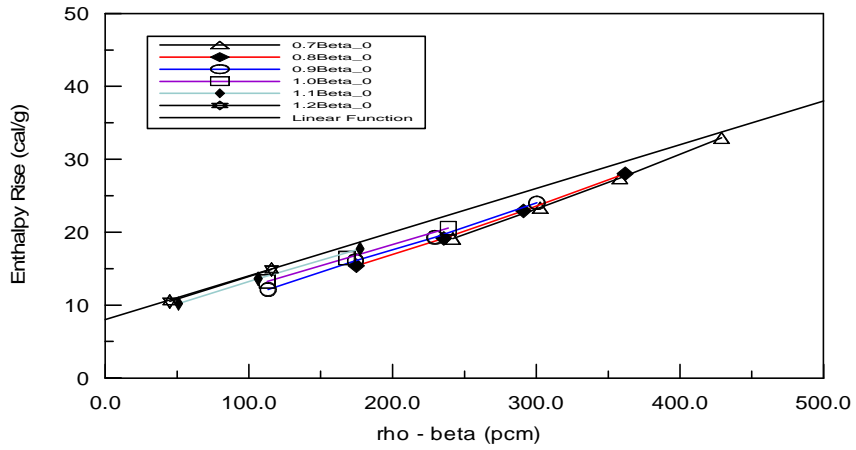


그림 8 ( $\rho_{rod} - \beta$ )에 대한 최대 엔탈피 증가 (기본핵연료온도 300°C)

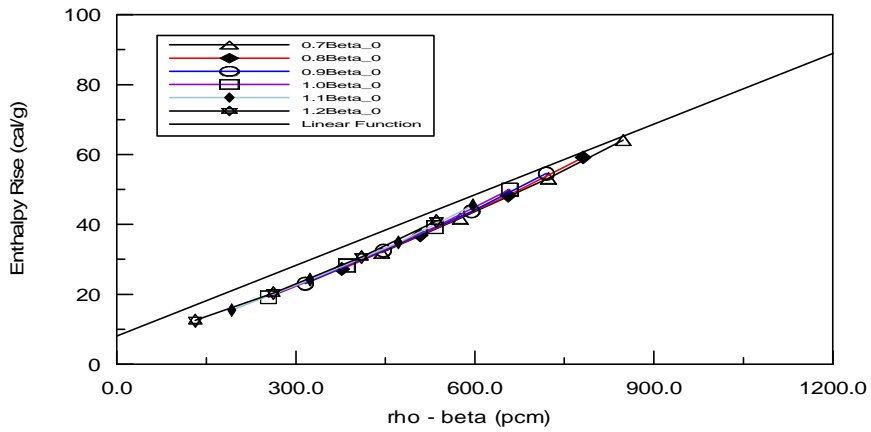


그림 9 ( $\rho_{rod} - \beta$ )에 대한 최대 엔탈피 증가 (EOC)

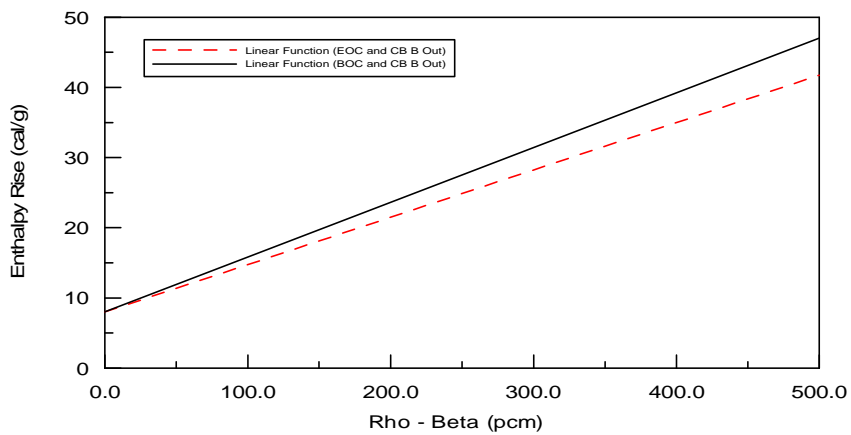


그림 10 선형함수 비교 (BOC와 EOC)