2003 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

제어봉방출사고에 대한 3차원 노심동특성 모델의 민감도 분석

Sensitivity Analysis of the Rod Ejection Accident to 3-Dimensional Reactor Kinetics Models

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

요약

3차원 노심동특성 모델의 주요 변수에 대하여 제어봉방출사고의 민감도 분석을 수행하였으며, 3차원 노심의 과도해석을 위해 PARCS 코드를 사용하였다. 본 연구에서는 사고해석의 허용기준 중의 하나로 사용되고 있는 핵연료 축적 엔탈피량 관점에서 분석하였으며, 민감도 결과들은 'ρ_{rod}(방출제어봉가)-β(지발중성자분율)' 변화에 대한 '최대 엔탈피 증가' 값으로 평가하였다. 3차원 출력계산 모델과 열수력 모델에 사용되는 주요 원자로변수에 대해서 상당히 민감한 것으로 나타나고 있어, 제어봉방출사고의 3차원 거동 분석시 주요 변수들에 대한 다양한 민감도 분석을 통해 보수성 또는 타당성이 규명되어야 한다.

Abstract

The sensitivities for the reactor parameters and variables to the 3-dimensional kinetics analysis of the rod ejection accident are examined. PARCS code is used for their analyses on the calculations of fuel enthalpy rise which is being currently used as one of the fuel failure criteria. The sensitivities are evaluated as the maximum enthalpy rise for the variation of 'ρ_{rod}(ejected rod worth)-β(delayed neutron fraction)'. The results show that most of the parameters and variables in the 3-dimensional models are highly sensitive to the maximum fuel enthalpy and thus their trend should be verified for the application.

1. 서론

과도상태 동안 노심출력 변화는 핵연료 소결체 용융, 핵연료 손상, DNBR, 방사선량 방출 등의 안전해석 기술요건에 상당한 영향을 미칠 수 있기 때문에 노심출력 계산 방법은 중요하게 고려되고 있다. 그러나 중성자 거동의 복잡성과 노심계통의 다양한 구조물로 인해 현재까지는 사고해석시 보수적인 노심출력 계산 방법이 사용되고 있다. 예를 들면, 점동특성 모델(Point Kinetics Model)은 노심 전체를 하나의 점(Point)으로 인식하는 단순하고 쉬운 방법으로써 가장 널리 사용되고 있는 보수적인 기법이며, 축방향 출력 분포를 고려하는 1차원 모델도 종종 사용되고 있다.

핵설계 기술이 발달되고 컴퓨터의 성능이 향상됨에 따라 현재는 노심계통을 다차원으로 모델하여 노심출력 변화를 계산할 수 있는 기술적 수준에 이르렀다. 점(Point) 또는 1차원적 노심

동특성 모델에서 사용되는 변수는 몇 개 안 되고 적용이 용이한 반면, 다차원 동특성 모델에서는 고려해야 할 변수가 아주 많을 뿐만 아니라 그 추이가 복잡하기 때문에 그의 적용 타당성을 검토하는데 많은 노력이 수반될 수 있다.

다차원 노심동특성 방법론의 사고해석 적용에 있어서 최대 장점은 운전여유도 확보를 통한 경제적 이득이라고 할 수 있다. 예를 들면, 제어봉방출사고와 주증기관 파단사고 등 출력변화가 중요한 사고의 해석에서 노심출력을 실제 중성자 거동에 가깝게 계산하여 최적해석에 기반을 두고 노심설계를 수행할 수 있다. 그러나 최적해석 기법의 적용을 위해서는 많은 노심변수에 대한 다양한 민감도 분석과 불확실도 규명이 선행되어야 한다는 특징을 가지고 있다.

단순한 점동특성 또는 1차원적 노심동특성 모델과는 달리, 다차원 노심동특성 모델의 타당성 평가는 규제자의 경험에 의존하는 검토만으로는 한계가 있으며, 절차화된 지침서에 따라 체계적으로 검토하고 필요시 독립적인 검증계산을 수행하여, 분석방법 및 결과의 타당성을 평가하는 것이 바람직하다. 본 연구의 최종 목적은 제어봉방출사고 다차원 노심동특성 방법론의 타당성 검토를 위한 규제검토지침서의 개발이며, 이를 위해서 이번 연구에서는 3차원 원자로심 모델에서 사용되는 주요 변수에 대한 민감도 분석을 수행한다. 3차원 과도 노심의 거동을 위해 PARCS 코드 [1]를 사용하였다.

참고문헌 [2]는 PARCS 코드를 사용하여 고리 1호기의 주증기관 파단사고를 분석하였으며, PARCS 코드의 군정수 고려 모델은 넓은 냉각재 온도 변화에 적절하게 보정되지 않은 것으로 평가되어 군정수 모델 개선을 제언한 바 있다. 그리고 참고문헌 [3]에서는 제어봉방출사고 3차원 노심동특성 해석에 대해 핵연료집합체의 핵설계 노드 수, 군정수 모델 그리고 운전연소도(Life of Cycle)에 따른 민감도 분석을 수행하여, 'ρ_{rod}(방출제어봉가)-β(지발중성자분율)' 변화에 대한 '최대 엔탈피 증가' 추이곡선이 주어진 변수의 보수성 또는 타당성을 평가하는데 좋은 척도로 사용될 수 있음을 보여주고 있다.

본 연구는 핵연료 축적 엔탈피 관점에서 제어봉방출사고를 분석한다. 민감도 해석을 위해 계산된 핵연료 축적 엔탈피는 하나의 핵설계 노드에 해당되는 핵연료집합체의 평균값이다.

2. 민감도 해석

참고문헌 [3]에 제어봉방출사고의 노심 3차원 동특성 방법론에서 고려되는 주요 민감도변수가 제시되어 있다. 참고문헌 [3]에서 핵설계 노드 수, 군정수 모델 그리고 운전연소도에 대한 민감도 분석이 수행되었다. 본 연구에서는 다음의 변수에 대한 민감도 분석을 수행한다.

- 원자로심 초기출력
- 방출제어봉
- 방출제어봉 이외의 제어봉 초기 위치

민감도 분석을 위해 고리 1호기 19주기 노심을 선정하였다. 원자로심 계통의 기본 Nodalization과 3차원 모델은 참고문헌 [2]와 [3]에 제시된 모델과 동일하게 설정되었다.

가. 원자로심 초기출력

제어봉방출사고 해석시 초기 노심출력과 그 조건에 대응되는 임계붕소농도는 사고해석에 중대한 영향을 끼친다. 민감도 분석은 0%FP(=1×10^{-4}%FP), 20%FP, 40%FP, 80%FP에 대해 수행되었다. <표 1>은 초기 노심출력에 대한 방출제어봉의 반응도가를 나타내고 있다. <표 1>은 동일한 제어봉 및 정지봉 위치에서 계산되었으며, 단지 임계붕소농도만 다른 값에서 얻어졌다. 제어봉과 정지봉의 기술지침서 운전제한조건을 고려하지 않고, 완전 삽입된 하나의 제어봉 방

출을 가정하였다. <표 1>에서는 초기 노심출력이 증가할수록 방출반응도가는 증가하고 있음을 보여주고 있다.

<그림 1>은 0%FP, 20%FP, 40%FP, 80%FP 초기 노심출력에 대한 핵연료 축적 최대 엔탈피 증가량의 추세곡선을 보여주고 있다. '$\rho_{rod} - \beta$' 값이 적은 영역에서는 초기 노심출력이 클수록 최대 엔탈피 증가량은 크며, '$\rho_{rod} - \beta$' 값이 큰 영역에서는 초기 노심출력이 작을수록 최대 엔탈피 증가량이 큰 현상을 보여주고 있다. 초기 노심출력에 따라 일괄적인 경향보다는 다양한 경향을 보여주고 있음을 알 수 있다.

나. 방출제어봉

제어봉방출사고에서 방출제어봉 선정은 상당히 중요하다. 특히 방출 반응도가가 제일 큰 제어봉을 선정해야 하며, 노심에 가장 큰 영향을 끼치는 제어봉을 선정하는 것이 중요하다. 본 연구의 기본모델에서는 노심 중앙에 위치하고 있는 핵연료집합체 내의 제어봉집합체의 방출을 고려하였다. 방출제어봉 선정에 대한 민감도 분석으로 여러 제어봉집합체를 포함하고 있는 제어봉뱅크 C의 방출과 노심의 하단 오른쪽에 위치하고 있는 핵연료집합체 분류 2번 (참고문헌 [4] 참조)의 제어봉집합체 방출을 분석하였다.

- 원자로심 중앙 핵연료집합체의 제어봉 방출
- 제어봉뱅크 C 전체 방출
- 우하단 핵연료집합체의 제어봉 방출

위의 제어봉의 방출에 대한 민감도 분석결과가 <그림 2>에 제시되어 있다. <그림 2>에서 제어봉뱅크 C와 우하단 제어봉 방출은 같은 결과를 보이며, 중앙 제어봉 방출과 비교하면 약 10%의 최대 엔탈피 증가량의 차이를 보여주고 있다. 결과적으로 큰 방출제어봉가를 가지는 제어봉의 선정도 중요하지만, 핵연료 축적 에너지 증가량을 크게 하는 방출제어봉의 선정 또한 중요하다.

다. 방출제어봉 이외의 제어봉 초기 위치

원자로심의 제어봉과 정지봉의 초기 위치에 따라 방출제어봉의 반응도가와 출력분포 등이 달라지기 때문에 정지봉과 제어봉의 초기 위치가 사고결과에 영향을 미칠 수 있다. 일반적으로 출력 운전중에는 기술지침서에서 정지봉이 모두 인출되도록 제한하고 있으며, 제어봉뱅크에 대해서는 출력준위에 따라 삽입 한계위치를 규정하고 있다. 따라서 실제 계산에서는 초기 제어봉들의 삽입한계 위치에서 그 영향을 평가하는 것이 적절하지만, 본 연구에서는 민감도에 관심이 있기 때문에 제어봉의 임의 위치를 고려하였다. 민감도 분석은 다음의 세 가지 초기조건에 대해 수행되었다. 이때 정지봉은 모두 완전 인출되어 있다.

- 모든 제어봉 완전 삽입
- 제어봉뱅크 B 완전 인출 및 그 외 완전 삽입
- 제어봉뱅크 D 완전 인출 및 그 외 안전 삽입

<표 2>는 세 경우에 대한 방출제어봉의 반응도가를 보여주고 있다. 방출제어봉의 반응도가는 주위 제어봉의 위치에 따라 큰 차이를 보여주고 있다. 초기 제어봉뱅크 B만 완전 인출 경우에 방출제어봉의 반응도가는 가장 크게 나타났다. 그리고 동일조건에서 엔탈피 계산의 예를 살펴보면, 초기 제어봉뱅크 D만 완전 인출 경우의 최대 엔탈피증가량은 약 30cal/g이지만, 초기 제어봉뱅크 B만 완전 인출 경우의 최대 엔탈피증가량은 약 100cal/g으로 큰 차이가 나는 것으로 분석되었다.

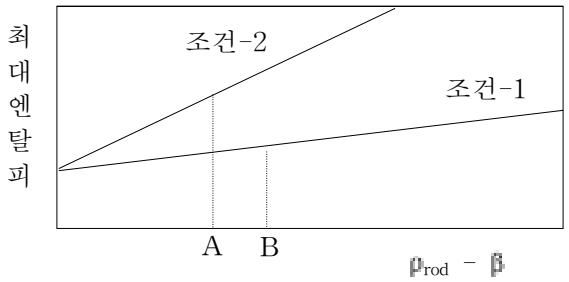
위의 세 경우에 대하여 '$\rho_{rod} - \beta$' 값에 대한 최대 엔탈피증가량 추세곡선이 <그림 3>에

제시되어 있다. 방출제어봉이외의 초기 제어봉의 위치에 따라 다양한 분포를 하고 있어, 제어봉 방출사고 해석시 초기 방출제어봉이외의 제어봉의 위치가 중요한 인자로 작용함을 알 수 있다.

3. 결론

원자로심 초기출력, 방출 제어봉, 방출제어봉 이외의 제어봉 위치 등에 대하여 제어봉방출사고 3차원 노심동특성 해석의 민감도 분석을 수행하였다. 민감도 결과들은 'ρ_{rod}(방출제어봉가)-β(지발중성자분율)' 변화에 대한 '최대 엔탈피 증가' 값으로 평가하였다. 이들 변수 값에 따라 사고해석 결과에 상당한 영향을 미치기 때문에 3차원 노심동특성 방법론을 적용하기 위해서는 충분한 민감도 분석결과를 토대로 정당성이 규명되어야 한다.

점동특성모델에 대한 이론 상관식을 보여주는 Nordheim-Fuchs 모델 [5]과 같이 본 연구의 3차원 연구에서도 주어진 조건에서 최대 엔탈피 축적량은 '$\rho_{rod} - \beta$'에 비례하는 경향을 보여주고 있다. 이것은 특정 조건에서 '$\rho_{rod} - \beta$' 값의 보수성만으로 제어봉방출사고 해석의 타당성을 평가한다는 것을 의미하지 않는다. 주어진 '$\rho_{rod} - \beta$'에 대해서 초기/경계조건 또는 수치해석 조건이 변화되면 최대 엔탈피 축적량도 변한다. 다음 그림은 '$\rho_{rod} - \beta$'에 대한 최대 엔탈피 축적량의 개념도를 보여주고 있다.



조건-1 또는 조건-2 각각에서는 최대 엔탈피는 '$\rho_{rod} - \beta$'에 비례하지만, 조건-1과 조건-2를 각각 상호 비교한 B점과 A점에서의 결과를 살펴보면, '$\rho_{rod} - \beta$'의 작은 값인 A가 더 큰 최대 엔탈피를 제공하고 있다. 따라서 조건-2가 조건-1보다 더 보수적인 곡선임을 알 수 있다. 따라서 '$\rho_{rod} - \beta$'의 타당성은 물론 조건-1과 조건-2와 같은 추이를 토대로 타당성을 규명하는 것이 바람직하다.

참고문헌

[1] 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.

[2] 양채용 외, "3차원 노심동특성/계통 열수력 연계 검증기술 개발 - 고리 1호기 주증기관 파단사고 분석," KINS/RR-046, 한국원자력안전기술원, 2001. 2.

[3] 양채용 외, "제어봉방출사고의 3차원 노심해석 방법론 적용성 평가 연구 - 최대 엔탈피 증가 관점," 2002 한국원자력학회 추계학술발표회, 용평리조트, 2002. 10.

[4] 양채용 외, "제어봉방출사고 3차원 노심동특성 해석 규제검증 기술 개발," KINS/RR-184, 한국원자력안전기술원, 2003. 3.

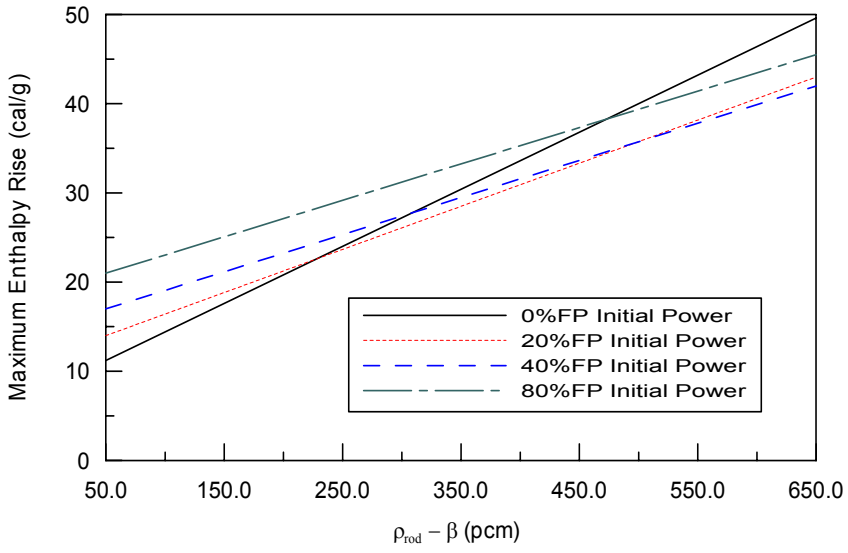
[5] David L. Hetrick, "Dynamics of Nuclear Reactors," The University of Chicago Press, 1971.

<표 1> 초기 노심출력에 따른 방출제어봉가

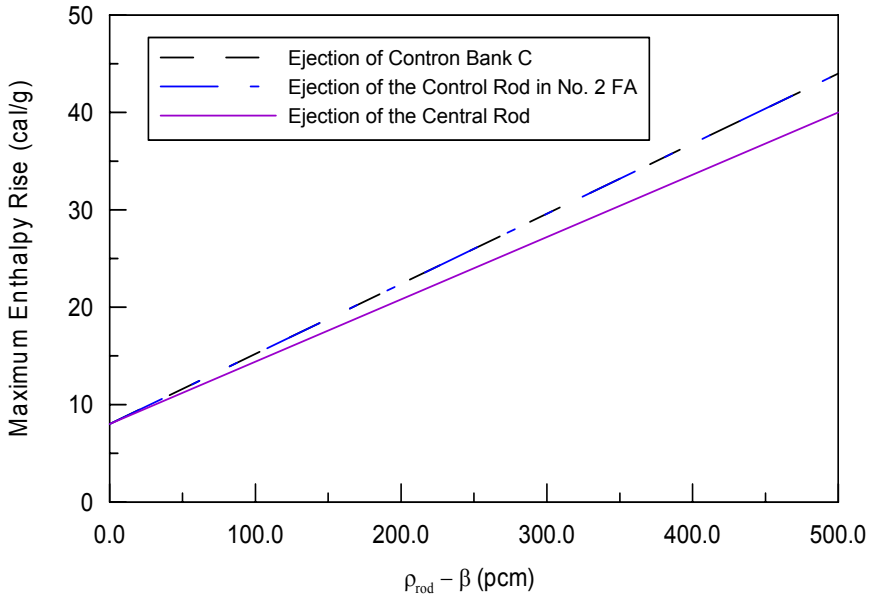
	0%FP (1×10^{-4}%FP)	20%FP		40%FP		80%FP	
	ρ_{rod} (pcm)	ρ_{rod} (pcm)	차이(%)	ρ_{rod} (pcm)	차이(%)	ρ_{rod} (pcm)	차이(%)
Case 1	728.5	767.0	+5.3	799.8	+9.8	856.6	+17.6
Case 2	641.8	669.5	+4.3	692.2	+7.9	727.7	+13.4
임계붕소농도 (ppm)	865.9	817.9	-	763.9	-	633.2	-

<표 2> 방출제어봉 이외의 제어봉뱅크 위치에 따른 방출제어봉가

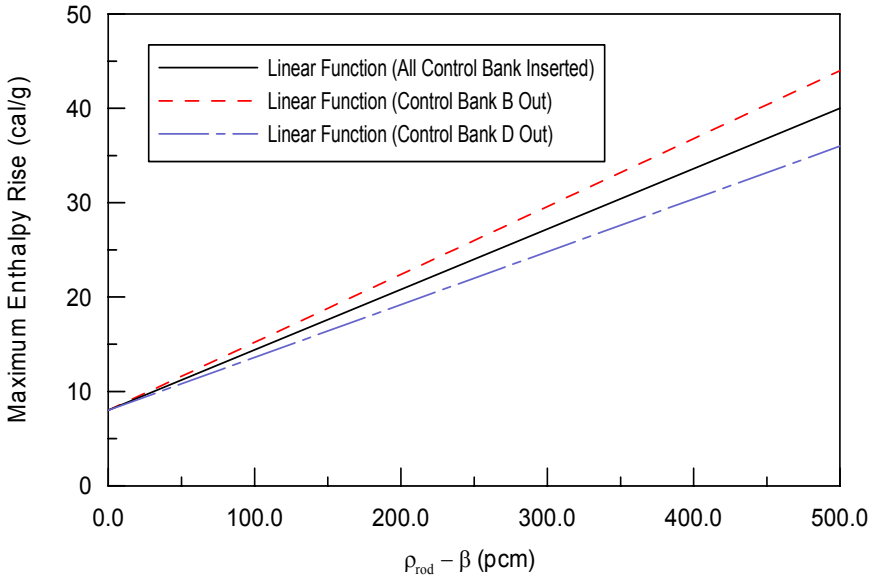
	모든 제어봉뱅크 삽입	제어봉뱅크 B 완전 인출		제어봉뱅크 D 완전 인출	
	ρ_{rod} (pcm)	ρ_{rod} (pcm)	차이 (%)	ρ_{rod} (pcm)	차이 (%)
Case 1	728.5	1344.0	+84.5	581.1	-20.2
Case 2	641.8	1150.6	+79.3	507.8	-20.9



<그림 1> 초기 노심출력에 대한 핵연료 축적 엔탈피증가량 추이



<그림 2> 방출제어봉에 따라 핵연료 축적 엔탈피증가량 추이



<그림 3> 방출제어봉이외의 제어봉 위치에 따른 핵연료 축적 엔탈피증가량 추이