

고리 2호기 노심분석 모형 및 통계적 열설계 방법론 적용성 평가

김강훈, 김홍주, 양승근, 전경락

한국원전연료주식회사
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

국내 WH 형 발전소의 노심 DNB 분석에 사용되고 있는 THINC-IV 코드에 대한 이해와 분석체제에 대한 개선의 일환으로 고리 2호기를 대상으로 하여 노심 분석모형에 대한 민감도 조사 및 이에 따른 설계 한계 DNBR의 변화를 각 열설계 방법론에 대하여 평가하였다. 적용된 열설계 방법론은 웨스팅하우스사의 STDP, ITDP, RTDP, 그리고 Mini-RTDP 등이며, 노심분석 모형은 경계면에서의 대칭을 가정하고 있는 기존모형(Old Model)과 개선된 모형(Improved Model)을 비교분석 하였다.

평가결과 두 분석모형은 부수로내 질량유속 거동과 통계적 열설계 방법론의 설계한계 DNBR에서 유사한 결과를 보여주었으며, 고출력 영역에서는 개선된 분석모형의 적용이 보다 타당한 것으로 평가되었다. 따라서 운전영역 전반에 걸친 제한적 조건에 대한 민감도 분석을 수행할 경우, 원자로 출력증강이나 첨두치의 증가, 운전전략의 변경등으로 발생할 수 있는 여러가지 불리한 조건에 대하여 열적 여유도를 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

1. 서 론

국내 웨스팅하우스형 노심 열수력 분석에 사용되고 있는 THINC-IV 코드는 가압 경수로의 개방유로에 대하여 국부 물성치의 예측과 이에 따른 노심의 DNBR 분포를 계산한다. 코드에 사용된 중요 상관식들은 표 1에 제시되어 있으며, 개략적인 해법 순서는 그림 1과 같다(1). THINC-IV 코드는 지배 방정식을 단순화하기 위하여 섭동 기법(Perturbation Technique)을 사용하고 있으며, 축방향이 유동에 비해 상대적으로 미소한 측면으로의 유동을 가정하고 있다. THINC-IV의 노심 분석 모형은 다단계 모형을 채택하고 있으며, 그림 2에는 현재 고리 2호기 노심 분석에 적용되고 있는 구모형의 1단계와 2단계 계산의 배열이다(1,2). 구모형에서는 1단계 전체노심 분석, 2단계 고온 집합체 분석, 그리고 3단계 고온 부수로 분석의 절차로 노심분석을 수행하며 1단계 분석에서 계산된 비섭동 물성치가 다음 단계들의 입력으로 사용된다. 이에 비해 그림 3에 제시된 개선된 분석 모형에서는 구모형의 1단계와 2단계 분석사이에 새로운 분석 단계를 추가하고 각 단계 별로 물성치를 갱신하여 다음 단계의 입력으로 제공한다. 그림 4에서 두 분석 모형이 동일한 부수로 모형을

사용하고 있으나, 기존의 분석모형에서는 고온 전형적 수로와 고온 안내관 수로에 대한 DNBR 계산을 독립적으로 수행하는데 반해 개선된 분석모형에서는 전형적 수로와 안내관수로의 DNBR 계산을 동시에 수행한다. 따라서 개선된 분석모형의 적용은 섭동 불성치의 크기를 감소시켜 방법론상의 정확도를 증가시키고 코드 실행 시간의 감소를 가져올 것으로 기대된다.

본 분석에서는 두 노심 분석 모형간의 축방향 질량 유속 거동과 이에 따른 DNBR의 거동을 이해하고 통계적 열설계 방법론에서의 설계한계 DNBR에서의 차이를 정량화 하여 향후 원자로 출력증강이나 첨두치의 증가, 운전전략의 변경등으로 발생할 수 있는 여러가지 불리한 조건에 대비하고자 한다.

2. 열설계 방법론

부수로 코드의 분석에 의한 노심 최소 DNBR 은 계산에 사용되는 변수들 및 예측 방법에서의 불확실도등으로 인하여 확률분포를 갖는 난변수가 되며, 이 최소 DNBR 의 불확실도를 DNB 설계기준에 반영하는 방법이 노심 열설계 방법이다(3). 노심 열설계 방법은 불확실도 처리방법에 따라 결정론적인 방법과 통계론적인 방법으로 구분할 수 있다. 결정론적 방법에서는 노심의 최고온 연료봉의 DNB 발생 확률을 정량적으로 평가하지 않고 단지 5% 이하인 것 만을 입증하는데 비해, 통계론적 열설계 방법에서는 연료봉의 DNB 발생확률을 정량적으로 평가하여 DNB 발생확률이 5% 이하가 되는 설계 한계 DNBR (Design Limit DNBR)을 설정하고 있다. 웨스팅하우스는 전자의 예로 STDP (Standard Thermal Design Procedure)를 적용하고 있으며 후자의 예로는 ITDP, RTDP, 그리고 mini-RTDP 등을 설계에 적용하고 있다(4). 설계한계 DNBR은 열설계 방법론에 따라 다르게 설정되며, 최소 DNBR 평가 방법은 설계한계 DNBR 설정 방법에 따라 달라질 수 있다. 통계적 열설계 방법에서의 최소 DNBR은 설계한계 DNBR 설정시의 불확실도가 고려된 모든 변수의 정격치를 사용하여 평가한다. 즉 최소 DNBR = $f(X_j : X_j = \mu_j)$ 이다. 방법론에 따른 특성은 그림 5에 나타난 바와 같다(5).

3. 부수로내 질량유속 거동 및 설계한계 DNBR 분석

두 노심 분석 모형간의 차이가 설계한계 DNBR에 미치는 영향을 파악하기 위하여 웨스팅하우스의 표준 열설계 방법론(STDP)과 통계론적 열설계 방법론(ITDP, RTDP, Mini-RTDP)을 각각 적용하여 설계한계 DNBR을 계산하였다. DNBR 민감도 분석대상 운전조건은 표 2과 같이 설정하였으며, 변수별 불확실도 자료는 표 3과 같다(6). 또한 노심분석 모형간 민감도 조사를 위하여 고리 2호기의 현재의 분석모형과 개선된 분석 모형에 대하여 표 4와 같은 조건에서 부수로내 질량유량 분포 및 이에 따른 W-3 R 그리드 상관식의 DNBR 분포를 비교하였다.

노심분석 모형과 열설계 방법론에 따른 설계 한계 DNBR 은 기존분석 모형에 대하여 표 5와 같이 결정되었으며, 개선된 분석모형에 대하여 표 6과 같이 결정되었다. 한편 정상운전 조건에서의 부수로내 질량유속 분포는 그림 6에서와 같으며, 과출력조건과 유량감소사고시의 부수로내 유량분포는 그림 7 및 그림 8과 같다. 유량의 분포만을 고려할 경우 정상운전 조건과 유량상실 조건에서는 기존의 분석체제가 보수적인 것으로 나타났으나, 과출력 조건에서는 개선된 분석모형이 보수적인 경향을 보이는 것으로 나타났다. 이에 따른

DNBR 거동은 표 5 및 표6에 제시된 바와 같으며, 정상운전 조건과 유량상실 조건에서는 기존의 분석 모형이 보수적인 결과를 나타내고 있으나, 고출력 조건에서는 개선된 분석 모형에서 보수적인 결과를 보이고 있다. 그러나 고출력 조건의 안내관 수로에서의 최소 DNBR은 기존의 분석체제의 결과가 보수적인 것으로 나타났는데, 개선된 분석 모형에서의 유량이 기존 분석 모형에서의 유량보다 작아지는 지점이 최소 DNBR 발생 위치보다 하류에 위치하고 있다. 이는 부수로의 형상에 따른 유동 분포의 특성과 관련이 있는 것으로 생각된다.

4. 결 론

두 노심분석 모형에 대하여 부수로내 질량유속 및 DNBR 거동을 분석하고 통계론적 열설계 방법론의 설계한계 DNBR을 계산하였다. 기존의 분석 모형은 고출력 조건에서, 개선된 분석모형은 정상운전 조건이나 저유량 조건에서 상대적으로 DNBR을 크게 평가하는 것으로 나타났으나 그 차이는 크지 않았다. 한편 DNBR 민감도 분석에 의한 통계적 열설계 방법론의 설계한계 DNBR은 유사하였으나, 기존의 분석모형이 약간 보수적인 결과를 보였다. 발전소 운전조건의 변경 또는 연료의 개량등으로 국부 출력이 증가하거나 침투치가 증가하는 경우와 출력 과도상태 분석시에는 개선된 모델의 적용이 보다 적절할 것으로 생각된다.

참고문헌

- (1) Chelemer, H., Chu, P.T., Hochreiter, L.E., "THINC-IV - An Improved Program for Thermal Hydraulic Analysis of Rod Bundle Cores," WCAP-7956-A (1989).
- (2) Friedland, A.J., Ray, S., "Improved THINC-IV Modeling for PWR Core Design," WCAP-12330-A (1991).
- (3) 박종률, "원자로 노심 열설계 방법론," KAIST 하계산학협동 공개 강좌 (1995).
- (4) "Thermal Hydraulic Engineering Service Manual," Westinghouse (1992).
- (5) 김강훈, "가압경수로 원전연료 설계 자립 보고서 - 열수력설계 분야," KNFC (1996).
- (6) Kori Unit 2 Replacement Core Licensing Report, Westinghouse-KEPCO (1992).

표 1 THINC-IV 중요 상관식

Axial Friction Single-Phase Two-Phase	Novendstern-Sandberg Owen's, with modification on friction terms only $\propto G, q'', x$
Lateral Friction Flow Mixing	Idel'chik $f = C Re^{-0.2}$ Momentum Equation
Thermal Mixing *	$Q_{TD} = TDC \times G \times A_L \times \Delta H_L$
Void Fraction Inception Highly Subcooled	Thom's $T_{th} = T_{sat} + 4.32 \sqrt{q''} \exp(-P_s/1260) - q''/h$ Maurer $\alpha = \frac{4 \{ q'' - h(T_{sat} - T_b) \} \times k \times Pr}{1.07 h^2 D_s \Delta T_{sub}}$
Detaching Point Slightly Subcooled	$\Delta T_{sub} = 0.2 \Delta T_{fbm}$ from Maurer Bowring's $\alpha = \frac{1}{1 + x \rho_f / \{ (1-x) \rho_g \}}$
Bulk Boiling	Thermodynamic Equilibrium $\alpha_{th} = \frac{1}{1 + x_{th} \rho_f / \{ (1-x_{th}) \rho_g \}}$

* $TDC = Pe \frac{D_s}{a}$, $Pe = \frac{\epsilon}{VD_s}$

표 2 민감도 분석대상 운전조건

변수	노심한계선		과도상태	
	과출력고압	저출력저압	LOF	SRM
출력 (FON)	1.30	1.10	.98	1.0
임구온도 (°F)	550.0	553.0	550.85	550.85
압력 (psia)	2400	1795	2270	2270
유량 (GPM)	195600	195600	127140	195600
F_{DH}	1.49	1.49	1.49	1.88
F_{DH}^{EI}	1.0	1.0	1.0	1.0

표 3 고리 2호기 변수 불확실도

변수	평균	불확실도
출력 (FON)	1.0	± 2.0 %
임구온도 (°F)	550.85	± 4.5 °F
압력 (psia)	2270	± 35 psi
유량 (FON)	1.0	± 3.5 %
우회유량 (%)	3.0	1.5 %
F_{DH}	1.49	4.0 %
F_{DH}^{EI}	1.0	3.0 %

표 4 분석모델 비교조건

변수	정상운전	과출력	LOF
출력 (%)	100	120	90
임구온도 (°F)	550.85	570.0	552.85
압력 (psia)	2270	2400	2270
유량 (GPM)	195600	195600	156480
우회유량 (%)	3.0	3.0	3.0
F_{DH}	1.49	1.49	1.49

표 5 기존 분석모형에서의 열설계 방법론에 따른 한계 DNBR

	STDP	ITDP	RTDP	MINI-RTDP
설계한계 DNBR (인내관/전형적)	1.28/1.28	1.45/1.53	1.35/1.38	1.33/1.36
출구건도 (%)	15	11	11	12
DNBR 별점 RBP RWAP Tin Bias	1.2 2.7 3.0	좌동	좌동	좌동
최소요구 DNBR	1.38/1.38	1.56/1.63	1.45/1.48	1.43/1.46
노심최소 DNBR 정상운전 과출력 LOF	1.730/2.508 1.086/1.040 1.729/1.845	2.115/2.651 1.329/1.441 2.046/2.308	좌동	1.920/2.305 - -

표 6 개선된 분석모형에서의 열설계 방법론에 따른 한계 DNBR

	STDP	ITDP	RTDP	MINI-RTDP
설계한계 DNBR (인내관/전형적)	1.28/1.28	1.45/1.52	1.33/1.37	1.32/1.34
출구건도 (%)	15	11	11	12
DNBR 별점 RBP RWAP Tin Bias	1.2 2.7 3.0	좌동	좌동	좌동
최소요구 DNBR	1.38/1.38	1.56/1.63	1.43/1.47	1.42/1.44
노심최소 DNBR 정상운전 과출력 LOF	1.789/2.155 1.061/0.9735 1.746/1.859	2.191/2.788 1.342/1.425 2.093/2.376	좌동	1.986/2.430 - -

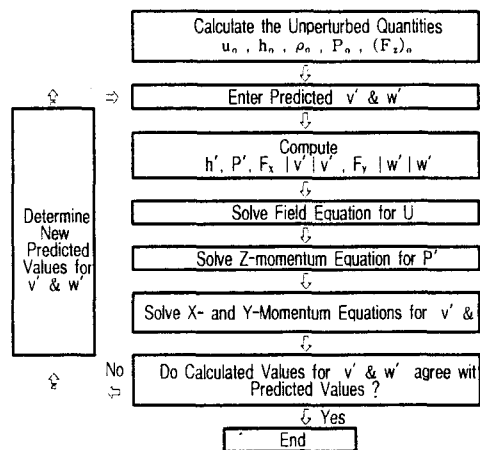
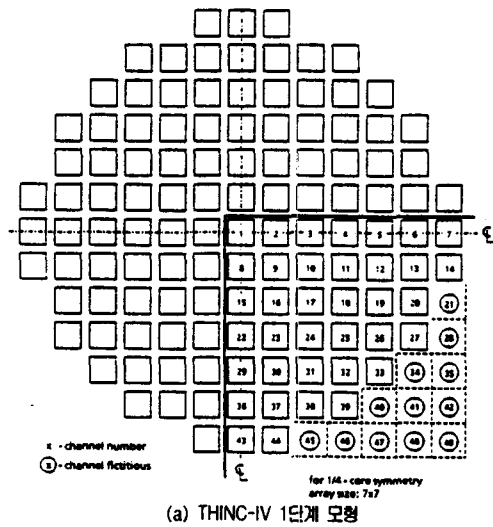
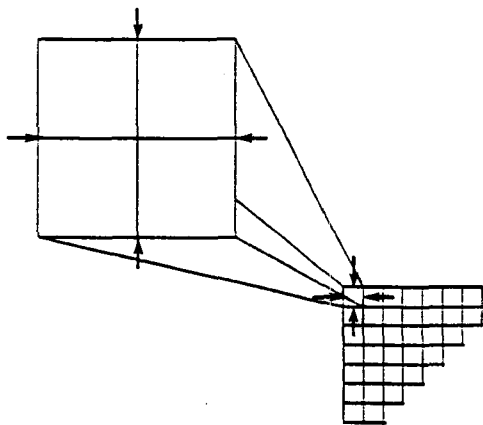


그림 1 THINC-IV 해법 순서도



(a) THINC-IV 1단계 모형



(b) THINC-IV 2단계 모형

그림 2 기존 노심 분석 모형 1단계와 2단계 (고리 2호기)

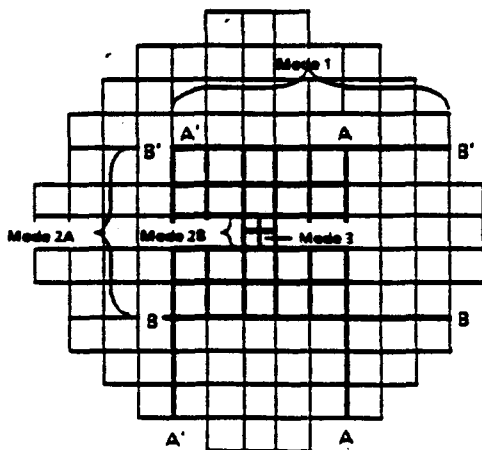


그림 3 개선된 노심분석 모형개요 (고리2호기)

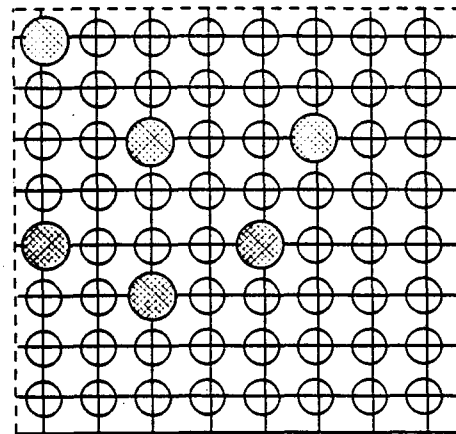
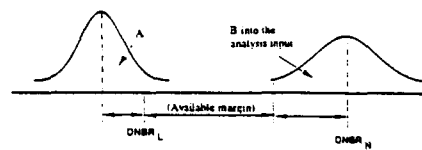
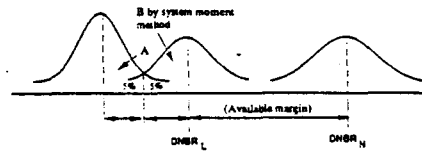


그림 4 16×16 연료 집합체 부수로 분석모형

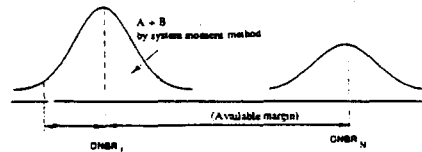
(a) 결정론적방법 (STDP)



(b) Improved Thermal Design Procedure (ITDP)

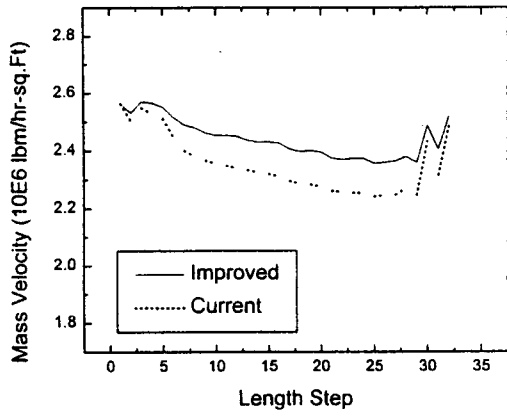


(c) Revised Thermal Design Procedure (RTDP)

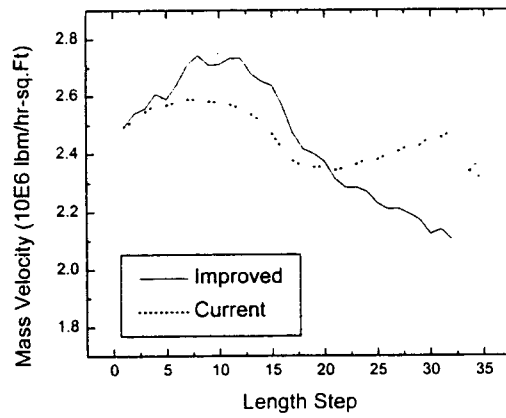


A : CHF correlation uncertainty B : DNBR uncertainty due to system parameters

그림 5 열설계 방법론 비교

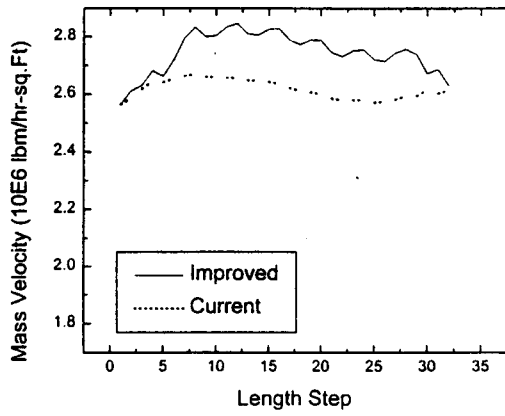


(a) 인내관 수로



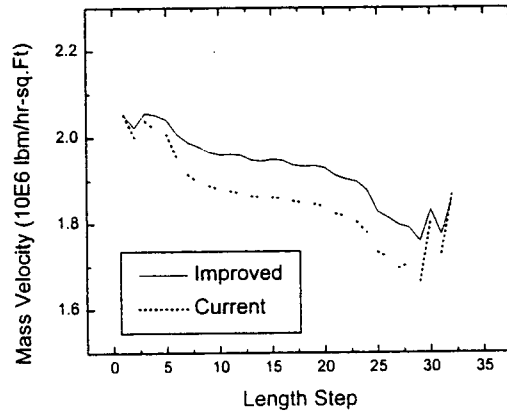
(b) 전형적 수로

그림 7 과출력 조건에서의 질량유량 분포

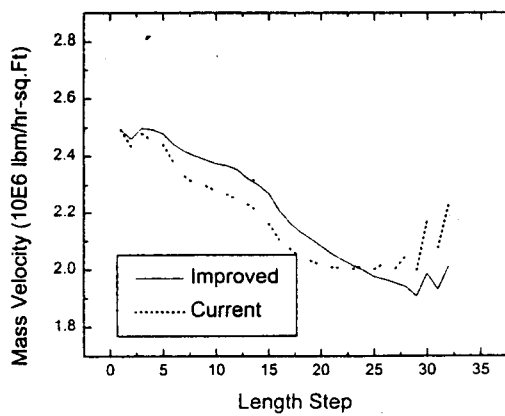


(a) 인내관 수로

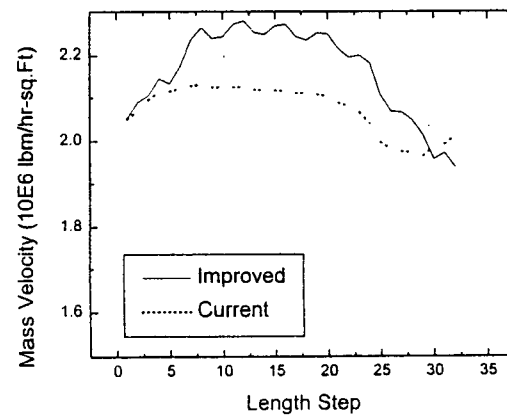
그림 6 정상운전 조건에서의 질량유량 분포



(b) 전형적 수로



(a) 인내관 수로



(b) 전형적 수로

그림 8 유량감소 조건에서의 질량유량 분포