

핵연료 건전성 관점에서의 증기관 파단사고 해석 방법에 대한 고찰

김철우, 이병일, 백승수, 서성기, 김희철
한국원자력연구소

요 약

• 1000 MWe 국내 표준발전소의 증기관 파단사고에 대한 초기 노심 유량의 영향과 감속재 반응도 값의 영향을 증기관 파단사고시의 핵연료 건전성 관점에서 고찰하였다. 최대 핵연료 손상은 원자로 정지 후 약 2.5초 정도에 발생하였으며, 초기 노심 유량이 클수록 더 많은 핵연료 손상이 예측되었다. 또한, 감속재 반응도 값에 대한 분석 결과, 최소 핵비등이탈률 발생 시점에서의 감속재 반응도 계수를 사용한 해석 방법이 타당한 것으로 나타났다.

1. 서 론

증기관 파단사고 (SLB)는 과도한 원자로냉각재의 냉각으로 인하여 RCS의 온도와 압력이 감소하는 사고로서 초기의 과도한 출력 증가로 인하여 원자로 정지 시점에서 핵연료의 손상이 발생할 수 있다. 핵연료 건전성 관점에서의 증기관 파단사고에 대한 사고해석 방법을 검토하여 그 타당성을 평가하고자 한다.

증기관 파단사고 해석에서는 사고시 핵연료 손상으로 인한 고농도의 방사능이 증기발생기를 통하여 외부로 누출되어 외부 환경에 미칠 수 있는 방사능 피폭량을 평가한다. 증기관 파단사고는 주로 사고 초기에 많은 양의 핵연료 손상이 발생하므로 원자로 정지 시점에서의 노심 상태가 핵연료의 손상 정도를 평가하는데 매우 중요하다. 따라서 가장 제한적인 초기조건을 사용하여 사고 해석을 수행한다. 핵연료 건전성 관점에서의 증기관 파단사고에서 가정된 사고는 소외전원이 공급되는 조건에서 전출력시 격납건물 외부의 증기관이 파단되는 사고로서 주요 변수에 대한 제한

적인 조건은 표 1에 주어진 바와 같다.

기존의 사고해석에서는 다음과 같은 가정에 근거하여 초기조건으로 최소 노심 유량을 사용하였다. 즉, 초기 노심 유량이 작을수록 원자로냉각재의 초기 노심 평균온도가 증가하기 때문에 증기관 파단사고가 발생하면 더 높은 온도에서 냉각되므로 감속재에 의한 부반응도 삽입이 증가하여 노심 출력이 증가하고 노심 유량이 작기 때문에 핵비등이탈률(DNBR)이 감소한다는 가정에 근거하여 최소 노심 유량을 초기조건으로하여 핵연료 손상을 해석하였다. 그러나 CE형 원자력 발전소에서는 COLSS (Core Operating Limit Supervisory System)가 있기 때문에 POL (Power Operation Limit)에서 초기 조건을 결정하는데, 이때 초기 DNBR은 초기 유량조건에 따라 큰 차이가 없다. 또한, 초기 유량이 클수록 증기발생기를 통한 이차측으로의 열전달이 증가하여 노심에 미치는 영향이 달라지며 이에 따라 RCS의 압력도 초기 유량이 증가함에 따라 감소하는 정도가 달라진다. 그러므로 초기 노심 유량에 대한 민감도 분석이 필요하다.

감속재 반응도 계수는 핵연료 손상에 큰 영향을 미치는 인자로서 노심 조건 및 상태에 따라 온도에 따른 반응도의 변화율 (반응도 온도계수)이 달라진다. 본 연구에서는 감속재 반응도 계수의 변화가 증기관 파단사고시의 핵연료 손상정도에 미치는 영향을 평가하기 위하여 원자로 정지 후 정지 제어봉의 삽입 위치에 따른 사고 분석을 수행하였으며, 제어봉 낙하속도의 영향도 분석하였다.

2. 초기 노심 유량 조건의 영향

앞에서 기술한 바와 같이 초기 DNBR이 거의 같기 때문에 초기 노심 유량이 증가하게 되면 RCS의 냉각이 증가하게 되어 감속재에 의하여 부반응도 삽입이 증가하여 노심 출력이 증가하고 RCS의 압력 감소로 인하여 DNBR이 감소하게 된다. 따라서 초기 노심 유량의 영향을 정량적으로 평가하기 위하여 116%, 110%, 105%, 100% 및 95%의 초기 노심 유량에 대하여 민감도 분석을 수행하였다.

증기관 파단사고시의 열·수력학적 거동은 Non-LOCA 해석 전산코드인 CESEC-III[1]를 사용하였으며, DNBR 계산에서는 CETOP-D[2] 전산코드를 사용하였다. 분석시 사용된 감속재 반응도 계수는 최소 DNBR이 발생하는 시점의 제어봉 삽입 상태에서의 온도계수를 사용하였다.

표 2는 각 유량 조건에 대한 초기 DNBR, 원자로 정지 시간 및 최소 DNBR을 나타내고 있다. 표 2에서 보는 바와 같이 초기 노심 유량이 클수록 RCS의 냉각에 의해 노심 반응도가 증가하여 출력 상승이 빠르므로 원자로 정지가 빨라지나 더 낮은 최소 DNBR이 발생하였다. 유량 조건에 따른 DNBR의 변화는 그림 1에 주어진 바와 같다. 따라서 핵연료 건전성 관점에서의 증기관 파

단사고 해석에서는 최대 노심 유량을 초기 조건으로 사용하는 것이 더 보수적으로 나타났다.

3. 감속재 반응도 계수의 변화에 따른 영향

감속재 온도에 따른 반응도 온도계수 (moderator temperature coefficient; MTC)는 사고시의 압력 변화에 의한 감속재의 밀도 변화 및 제어봉이 삽입될 때의 중성자속 분포와 중성자 누설을 고려하여 온도에 대한 감속재 반응도 계수를 나타내면 그림 2와 같이 정지 제어봉의 위치에 따라 다르다. 핵연료 건전성 관점에서의 증기관 파단사고는 전출력일 때가 가장 제한적이므로 실제 감속재 반응도 계수는 전제어봉 인출 (all-rods-out; ARO) 상태로 유지되다가 원자로 정지 후에는 정지 제어봉이 삽입됨에 따라 증가한다. 본 연구에서는 정지 제어봉 위치에 따른 감속재 반응도 계수의 변화가 증기관 파단사고시의 핵연료 손상에 미치는 영향을 평가하기 위하여 모든 제어봉이 삽입 상태에 있을 때의 감속재 온도계수 (ARI MTC), 최소 DNBR이 발생하는 시점의 제어봉 삽입 상태에 대한 감속재 온도계수 (MDNBR MTC) 및 모든 제어봉이 인출 상태에 있을 경우의 감속재 온도계수 (ARO MTC)를 사용하여 증기관 파단사고를 분석하였다.

그림 2는 울진 3,4호기 기술지침서[3]에 명시된 전출력시의 가장 큰 음의 반응도 온도계수 ($-35 \text{ pcm}/^\circ\text{F}$ 또는 $-3.5 \times 10^{-4} \Delta\rho/^\circ\text{F}$)를 기준으로하여 제어봉 위치에 따른 반응도 온도계수를 나타낸 것이다. 정지 제어봉 위치에 따른 감속재 반응도 계수는 그림 2에서 보는 바와 같이 정지 제어봉이 삽입됨에 따라 부반응도의 온도계수가 커진다. 표 3은 감속재 반응도 계수에 따른 원자로 정지 시간, 최소 DNBR 및 최소 DNBR이 발생하는 시간을 나타낸 것이다. 표 3에서 보는 바와 같이 최소 DNBR은 원자로 정지 후 약 2.5초 정도에서 발생하므로 'ARI MTC'를 사용하여 DNBR을 계산하게 되면 매우 보수적인 결과를 초래하게 된다. 최소 DNBR이 발생할 때까지의 MTC 변화 중 가장 보수적인 MTC는 최소 DNBR이 발생하는 시점에서의 감속재 온도계수이다.

그림 3은 정지 제어봉 삽입 위치에 따른 감속재 반응도 계수를 고려한 경우에 대한 사고해석 결과 중 최소 DNBR의 변화를 허용핵연료설계제한치(SAFDL, DNBR=1.3)와 비교하여 도시한 것이다. 제어봉이 완전 삽입 상태에 있을 때 즉, 부반응도 온도계수가 큰 'ARI MTC'를 사용한 경우가 'ARO MTC'나 'MDNBR MTC'를 사용한 경우보다 더 낮은 최소 DNBR이 발생하였다.

원자로 정지 후 최소 DNBR이 발생하는 시점을 검토하기 위하여 'ARI MTC'를 가정하여 제어봉 낙하속도가 가장 빠른 경우 (2.0 초)에 대한 사고해석을 수행하였다. 제어봉 낙하속도에 대한 분석에서는 제어봉 삽입속도가 빠른 경우가 기존 해석에서 가정하고 있는 늦은 경우 (4.0 초)에 비해 더 높은 최소 DNBR을 나타내었다. 원자로 정지 지연시간은 낙하속도에 관계없이 0.5초로 가정하였으며, 낙하속도가 빠른 경우의 최소 DNBR이 발생하는 시점은 원자로 정지 후 약 1.5초

정도로서 낙하속도가 늦은 경우 (2.5초)에 비하여 더 빨리 발생하였다 (표 3). 이 시점에서 제어봉 삽입 위치는 낙하속도가 늦은 경우의 정지 제어봉 삽입 위치와 유사하다. 즉, 제어봉 낙하속도에 관계없이 최소 DNBR이 발생하는 시점의 제어봉 삽입 위치는 거의 일정하다. 이는 제어봉 삽입속도가 빠를수록 정지 제어봉에 의한 부반응도가 더 빨리 삽입되어 DNBR이 빠르게 회복되기 때문이다. 표 3에서 보듯이 제어봉 낙하속도가 빠른 경우에는 'ARI MTC'를 가정하였음에도 불구하고 최소 DNBR은 낙하속도가 늦은 경우의 'MDBNR MTC'의 결과보다 더 높게 나타났다.

따라서 'MDNBR MTC'를 사용한 증기관 파단사고의 해석 방법은 기존 해석 방법('ARI MTC')에 비해 덜 보수적인 결과를 나타내었으나 적절한 보수성을 확보하고 있으므로 타당한 방법으로 평가된다.

4. 결 론

초기 노심 유량에 따른 핵연료 건전성 관점에서의 증기관 파단사고의 분석에서는 초기 노심 유량이 클수록 최소 DNBR이 낮게 나타나서 핵연료 손상이 더 많이 발생하는 것으로 나타났다. 따라서 최대 초기 노심 유량을 가정하는 것이 사고해석에서 보수적이다.

감속제 반응도 계수에 대한 분석에서는 최소 DNBR이 발생하는 시점에서의 제어봉 삽입 위치에 따른 감속제 반응도 계수를 사용하는 방법은 기존 해석에서 가정한 방법인 제어봉 완전삽입 상태에서의 감속제 반응도 계수를 사용하는 방법에 비해 덜 보수적인 결과를 나타내었으나 적절한 보수성을 확보하고 있으므로 핵연료 건전성 관점에서의 증기관 파단사고에 적용할 수 있는 것으로 나타났다.

참고 문헌

- [1] "CESEC Digital Simulation of a Combustion Engineering Nuclear Steam Supply System," CE-CES-78-REV O-P, May 1987.
- [2] "CETOP-D COde Structure and Modeling Methods for Arkansas Nuclear One - Unit 2," CEN-214(A)-NP, July 1982.
- [3] "Preliminary Safety Analysis Report for UCN 3 &4 Chapter 16," KOPEC.

표 1 증기관 파단사고 해석에 사용된 변수 값

변수	가정된 값
초기 노심 출력, MWt	2871.3 ¹⁾
초기 노심입구 냉각재 온도, °F	570
초기 노심 유량, gpm	191400 ²⁾
초기 가압기 압력, psia	2325
Doppoler 계수	Least Negative
감속재 온도계수	Most Negative
축방향 출력 편차	+0.3
정지시 제어봉 반응도가, %Δρ	-10.0
노심 연소도	주기말
각 증기관 방출면적, ft ²	0.94

표 2 초기 노심 유량 조건에 따른 증기관 파단사고 분석 결과

초기 노심 유량 조건	초기 DNBR	원자로 정지 시간, 초	최소 DNBR 발생 시간, 초	최소 DNBR
116%	1.6100	6.81	9.36	1.0679
110%	1.6279	7.21	9.66	1.0962
105%	1.6439	7.41	9.86	1.1540
100%	1.6633	7.71	10.20	1.2131
95%	1.6853	8.11	10.50	1.2271

표 3 감속재 반응도계수의 변화에 따른 증기관 파단사고 분석 결과

감속재 반응도 계수	원자로 정지 시간, 초	최소 DNBR 발생 시간, 초	최소 DNBR
ARI MTC	6.61	9.16	1.0132
MDNBR MTC	6.81	9.36	1.0679
ARO MTC	7.21	9.56	1.1453
Fast Trip Speed with ARI MTC	6.61	8.11	1.1791

1) 정적 출력의 102%. 2) 정적 유량의 116% 임.

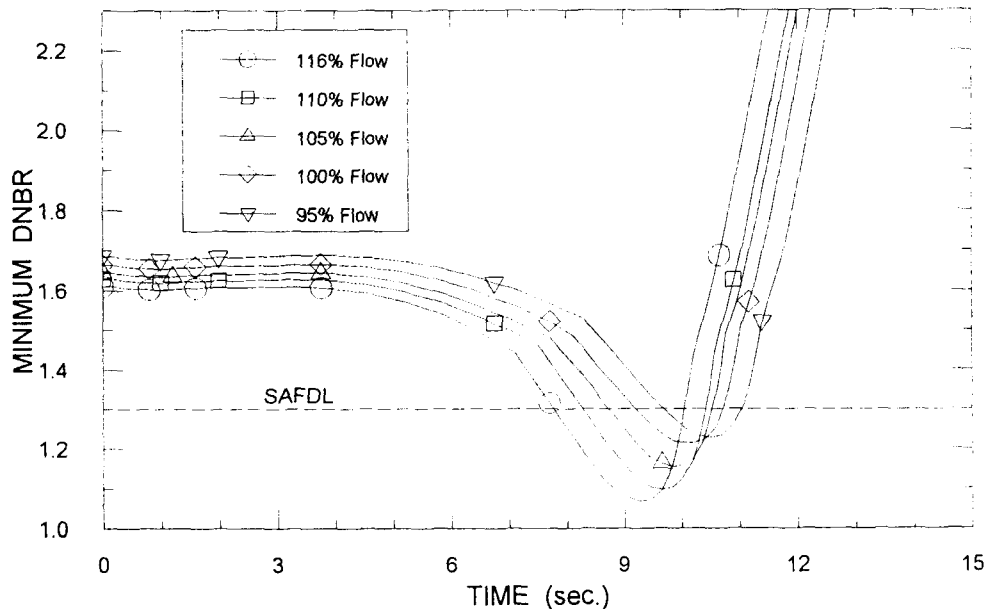


그림 1. 초기 노심유량 조건에 따른 DNBR의 변화

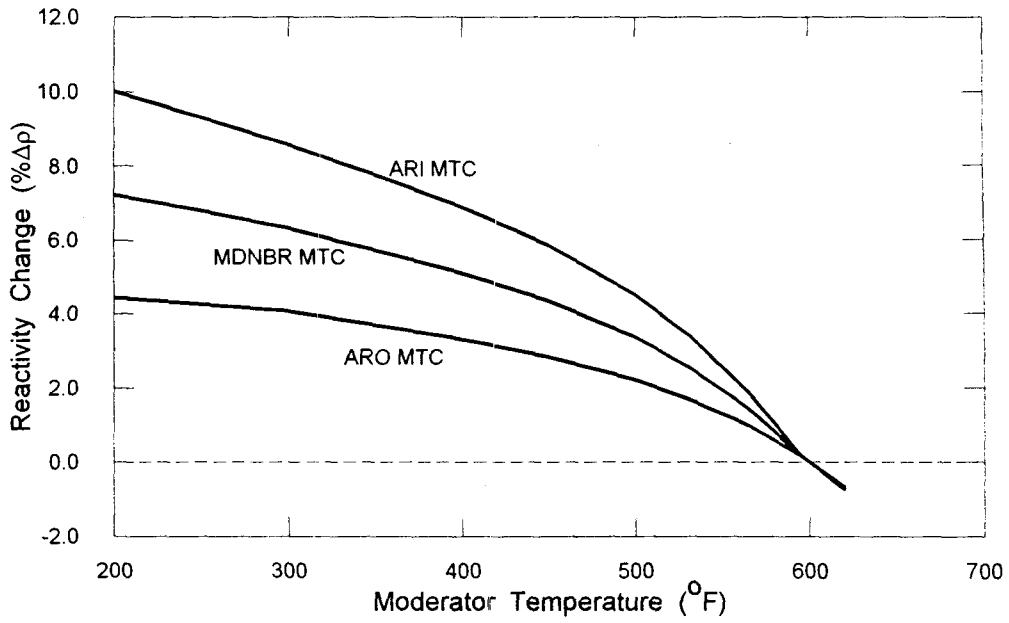


그림 2. 정지 제어봉 삽입 위치에 따른 감속재 반응도 계수

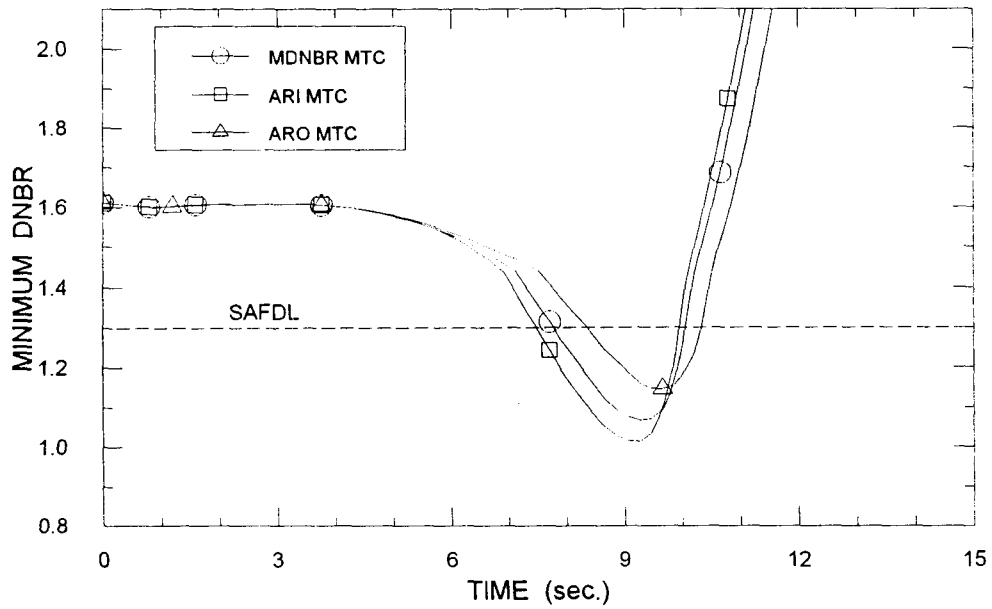


그림 3. 감속재 반응도 계수에 따른 DNBR의 변화