

고리 3/4호기 음의 중성자속 변화율 트립설정치 제거 연구

이재용, 이창섭, 송동수, 김종걸, 이동혁
전력연구원

요 약

이 연구의 목적은 고리 3/4호기 및 영광 1/2호기의 음의 중성자속 변화율에 의한 원자로 트립(NFRT) 설정치를 제거하여 불의의 제어봉 낙하 사고시에 원자로 트립을 방지하는 것이다. 현재의 인허가된 안전해석 방법론에 의하면 제어봉 낙하사고시에 NFRT에 의하여 원자로가 트립되고 결국 발전소의 이용율이 감소하게 되는데 본 연구에서 적용된 새로운 방법론으로는 이 NFRT 보호신호 없이도 제어봉 낙하사고시에 발전소의 안전성을 입증할수 있다.

안전분석은 주기별로 다른 핵설계 자료 즉, 냉각재 온도상수, 전출력에서의 제어봉가 및 제어봉 삽입한계 등을 이용하여 수행되었다. 웨스팅하우스형 연료인 OFA 및 V5H에 대하여 고리 4호기 6주기의 3개 주기에 대하여 분석되었다.

분석된 주기들에 대해서 NFRT 신호 없이도 핵비등 이탈률(DNBR) 설계기준을 모두 만족하였다. 그러므로 고리 3/4호기 및 영광 1/2호기의 NFRT 신호는 제거할수 있고 이로써 제어봉 낙하사고시의 발전소 불시정지를 방지할수 있다.

1. 서 론

제어봉이 기계적, 전기적 결함에 의하여 낙하되면 순간적으로 원자로 출력이 떨어지고 특히 낙하제어봉 근처의 국부출력은 더 감소하게 된다. 출력이 감소되면 온도가 감소되고 그에 따른 궤환효과(감속재 온도계수, 도플러 온도계수등)에 의하여 정반응도가 인가되어 출력은 다시 상승하게 된다. 이때 제어봉의 운전모드가 자동운전모드에 있으면 삽입되어 있던 다른 제어봉들이 신속하게 인출되어 원자로 출력은 상당히 상승하고 특히 낙하제어봉이 제어용 노외핵계측기 주변에 위치한 경우라면 노심의 평균 출력보다 더 작은 출력이 제어용 신호로 이용되어 제어봉이 필요

이상으로 인출되어 이전의 출력보다 높게 상승하는 과출력(Overshoot)에 도달할수 있다.

위와같은 우려사항이 1979년도에 미국에서 제기되었는데 웨스팅하우스사(WH)는 음의 중성자속 변화율 트립(Negative Flux Rate Trip; NFRT) 설정치를 5%/2초로 유지하고 있는 발전소에 대해서는 적어도 낙하제어봉가(Dropped Rod Worth ; DRW)가 500pcm 이상이면 발전소는 확실히 트립이 되며 DRW(Dropped Rod Worth)가 500pcm 이내에서 원자로 트립을 가정하지 않아도 DNB 설계기준이 만족됨을 보였다. 이후 WH 원전 소유자 그룹(Westinghouse Owners Group; WOG) 프로그램의 하나로 1985년부터 낙하제어봉에 의한 발전소 트립을 가정하지 않고도 낙하제어봉 사고시에 DNB 설계기준이 만족됨을 보이는 연구를 수행하여 그 방법론을 1989년도에 NRC의 허가를 획득하였다. 이후 Vogtle발전소의 4개발전소에서 위의 방법론에 따라 발전소 특성연구를 수행하여 NFRT신호를 제거하였고 Catawba 발전소의 약 17개 발전소에서 적용 연구중이다.

제어봉 낙하사고 평가는 과도상태 한계점에서의 과도계통 조건들을 계산하는 과도분석과 각각의 핵연료 형태에 따라 DNB가 발생하는 노심 출력과 입구온도와의 관계를 구하는 열수력 분석 및 원자로 계통 조건에 부합하는 고온수로 계수를 구하는 핵설계 분석으로 구성된다.

본 연구에서는 제어봉이 낙하되는 사고시 발전소를 트립시키지 않고도 발전소를 안전하게 운전할수 있음을 입증함으로써 경미한 제어봉 낙하에 의한 불필요한 발전소 트립을 방지하고자 한다. 즉, 제어봉 낙하 사고시 NFRT 신호 없이도 ANS 조건Ⅱ 사고의 허용조건인 계통 압력이 설계치의 110% 이내와 DNB가 발생하지 않음을 입증하는 것이다. 이를 위해 고리 3/4호기, 영광 1/2호기를 대상으로 OFA 연료 1개주기, V5H연료 3개주기에 대해 NFRT회로 제거의 타당성을 연구하였다.

2. 분석 방법

2.1 개 관

이 장에서는 낙하제어봉 안전평가에 이용되는 해석적 방법론을 기술한다. 이 평가에는 다음과 같은 세가지 분석이 필요하다.

- 1) 과도분석에서는 상태점들, 즉 과도상태시 가장 제한적인 시간에서의 원자로 출력, 온도및 압력계산을 수행한다.
- 2) 열수력분석에서는 입구온도및 압력에 따라 DNBR이 한계 DNBR에 달하는 출력준위를 결정한다. 이를 낙하제어봉 한계선(Dropped Rod Limit Line, DRLL)이라하며 통상 노심 한계선중 DNBR 보호선에 해당한다.

3) 핵설계분석에서는 1) 및 2)항에서 결정된 조건으로 낙하전 F_{DH} 제한치를 계산한다. 이 낙하전 F_{DH} 제한치가 설계제한치 이상을 유지하면 노심은 DNB 설계요건을 만족한다.

2.2 과도 분석

과도분석에서는 제어봉의 낙하에 따른 1차 계통 주요 변수의 변화를 계산하여, 제어봉 낙하에 의한 과도 현상중 DNB 측면에서 가장 불리한 점인 상태점(statepoint)을 찾는다. 제어봉 낙하 사고로 인한 출력 침두의 크기는 아래의 인자에 의해 결정된다.

- 제어봉 제어 시스템의 특성
- 노심 반응도 계수
- 낙하 제어봉 반응도
- 제어봉에 의한 반응도 투입량

제어봉을 자동제어모드에서 운전하는 경우가 출력이 더 높게 되므로 자동제어모드에 대한 안전 해석을 수행하면 수동제어모드에 대한 별도의 해석은 필요없다.

과도해석에는 웨스팅하우스에서 개발한 LOFTRAN 코드를 사용하였다. LOFTRAN(LOss of Flow TRANsient)은 웨스팅하우스형 다중 루프 가압경수로(multi-loop PWR) 시스템의 과도 상태 모사를 위해 개발된 전산 코드로, 비 냉각재 상실사고(non-LOCA)해석에 사용된다.

2.3 열수력 분석

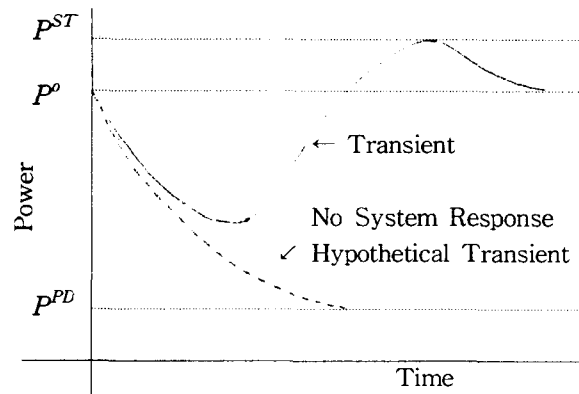
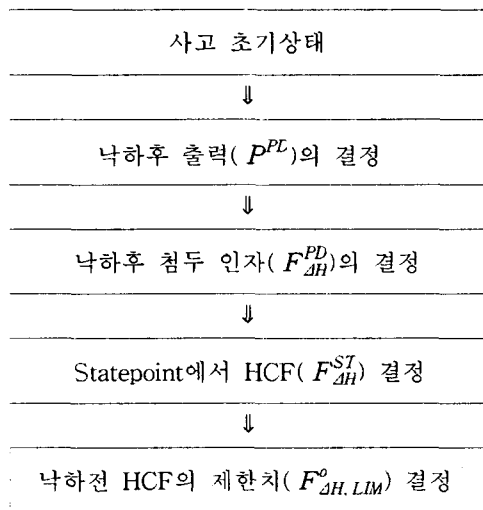
열수력설계 분야에서는 이 사고가 발생할 때 증가되는 노심의 출력침두치가 노심의 DNB 설계 기준을 만족하는지 입증한다. 즉 장전된 노심을 대상으로 각각의 계통 압력에서 출력준위에 따른 입구온도의 제한치를 계산하며 이를 낙하제어봉한계선 (DRLL)이라 한다. 본 연구에서는 OFA 연료 및 V5H 연료에 대하여 각각 낙하제어봉한계선을 생산하였다.

낙하제어봉한계선을 생산하기 위한 DNBR 계산에는 WH사에서 개발한 노심 열수력설계 코드인 THIN C IV 와 BANDIT을 사용하였다.

2.4 핵설계 분석

핵설계 분석에서는 낙하 제어봉 사고시 계통의 궤환효과를 무시한 가상의 출력을 구한다. 이를 낙하후 출력(P^{PL})이라 하며 이를 이용하여 낙하후 침두인자(F_{DH}^{PD})를 계산한다. 이 낙하후 출력과

낙하후 침투인자를 이용하여 사고시 DNBR 측면에서 최악 상태인 Statepoint 침투인자(F_{DH}^{ST})를 계산한다. 이 Statepoint 침투인자를 열수력 분석에서 구한 DNBR이 발생하는 침투인자 값과 같게 만드는 낙하전 침투인자 값을 구한다. 이 낙하전 침투인자 값은 DNB 설계기준을 여유도 없이 만족시키는 제한값으로서 이 값이 핵설계시 이용하는 침투인자 제한치 이상이면 DNB 설계기준이 만족되는 것이다. 계산의 흐름도 및 시간에 따른 출력단계를 아래에 간단히 나타냈다.



< 낙하제어봉 사고분석의 세 단계 >

핵설계 분석시 이용한 전산 코드로는 ANC 및 DRPROD이다. ANC 코드는 2차원 및 3차원 노심 계산을 할 수 있는 노달코드이다. 제어봉 낙하사고 분석시에는 호기/주기 특정 데이터, 즉 주기 연소도별 냉각재 온도 계수, 연소도별 D뱅크 제어봉가 및 설계 F_{DH} 를 계산하여 DRPROD 코드 입력으로 사용한다. DRPROD 코드는 제어봉 낙하 사고를 분석하기 위한 무차원 코드로서 낙하제어봉 한계선과 Statepoint 데이터등을 이용하여 낙하전 침투인자 제한치를 계산한다.

3. 결과 및 결론

2장에서 기술한 방법론은 낙하제어봉으로 인한 직접적인 발전소 트립을 가정하지 않은 모든 웨스팅하우스사 발전소에 적용된다. 그러나 발전소마다 고유의 노물리 특성(MTC 및 D뱅크값)

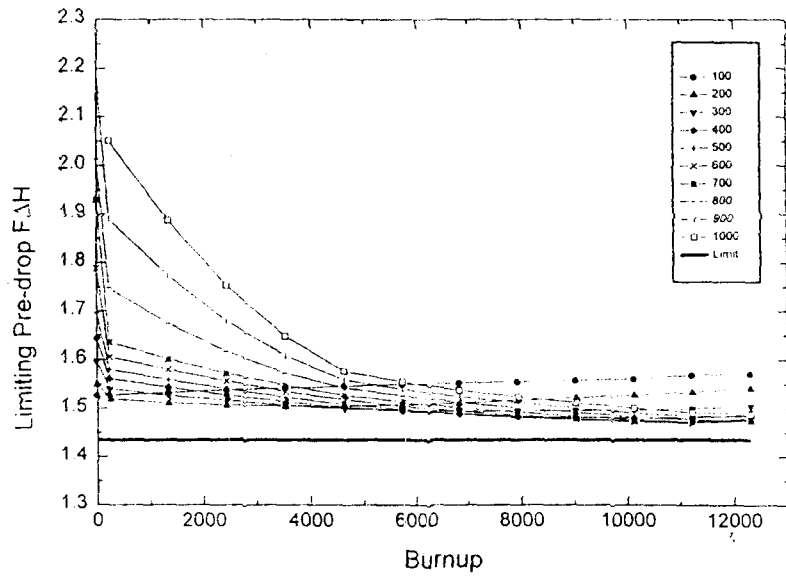
및 낙하제어봉 한계선 때문에 모든 발전소에 적용가능한 일반적인 안전분석을 수행하기는 어렵다. 그러므로 2장에서 기술한 분석방법을 발전소및 주기별로 시행해야 한다.

본 연구에서는 OFA 연료 및 V5H 연료를 대상으로 분석을 수행하였다. OFA 연료에 대한 결과를 <그림 1>에, V5H 연료에 대한 결과를 <그림 2>에 나타냈으며 그림에서 볼수있는바와 같이 모든 낙하전 침투인자의 제한치가 설계제한치보다 크게 나타나 DNB 설계 기준을 만족하였다.

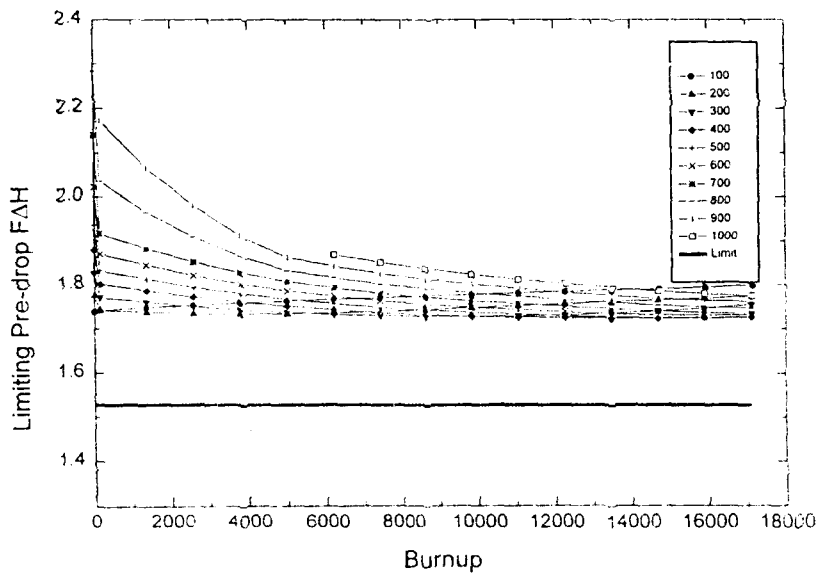
위의 결과들을 기본으로 이 방법을 V5H 연료를 사용하는 발전소에 주기별로 적용하여 낙하제어봉으로인한 직접적인 발전소 트립이 없이도 DNB 설계기준을 만족시킬수 있음을 입증하였다. 그러므로 낙하제어봉 사고를 완화하기위해 설치된 음의 중성자속 변화율 트립(NFRT) 회로는 WH형 3-LOOP 발전소에서 WH형 연료를 사용한다면 제거될수 있다.

참 고 문 헌

1. MORITA,T., et al., "DROPPED ROD METHODOLOGY FOR NEGATIVE FLUX RATE TRIP PLANTS", WCAP-10297-P-A, 1983.6
2. HAESSLER,R.L., et al., "METHODOLOGY FOR THE ANALYSIS OF THE DROPPED ROD EVENT", WCAP-11394-P-A, 1987.4
3. "SAFETY ANALYSIS STANDARDS" VOL.1, WESTINGHOUSE ELECTRIC CORP.
4. WCAP 12282, DROPPED ROD METHODOLOGY FOR NEGATIVE FLUX RATE TRIP PLANTS, 1983.6, WESTINGHOUSE ELECTRIC CORP.
5. THERMAL-HYDRAULIC ENGINEERING SERVICES MANUAL, 1990, WESTINGHOUSE ELECTRIC CORP.
6. THERMAL-HYDRAULIC DESIGN PROCEDURE MANUAL VOLUME 1 AND 2, 1990, WESTINGHOUSE ELECTRIC CORP.
7. 박종률, 고리 3/4호기 국산연료 노심에 대한 낙하제어봉한계선 계산, 1993.12, KAERI
8. 서중석외, 가압경수로 재장전 노심설계 기술확보(최종보고서), 1992.12, 한국전력공사
9. ANC CODE USER MANUAL, 1990, WESTINGHOUSE ELECTRIC CORP.
10. DRPROD CODE USER MANUAL, 1990, WESTINGHOUSE ELECTRIC CORP.



<그림 1> 연소도에 따른 낙하전 고온수로 계수 제한치 (고리4호기6주기, OFA)



<그림 2> 연소도에 따른 낙하전 고온수로 계수 제한치 (고리3호기9주기, V5H)