

RETRAN을 이용한 울진 3/4호기 원자로 냉각재 펌프 축 고착 사고 분석

A Safety Analysis of the Locked Rotor Event for Ulchin Unit 3/4 Using RETRAN Code

윤혜정, 김요한, 이동혁, 성장경
한전전력연구원
대전광역시 유성구 문지동 103-16

요 약

한국표준형원전인 울진 3,4호기를 대상으로 원자로냉각재 펌프 (Reactor Coolant Pump, RCP) 축 고착 사고 분석을 수행하였다. 펌프 축이 고착되면 유량이 급속하게 감소하고, 원자로냉각재계통(Reactor Coolant System, RCS) 압력이 증가한다. 이로 인해 최소 핵비등이탈율이 감소되어 연료봉에 손상이 일어날 수 있는 사고이다. 본 연구에서는 RETRAN 코드를 이용하여 원자로냉각재 펌프 축 고착 해석 방법론을 개발하였으며, RETRAN 분석 결과를 CESEC-III 코드 결과 비교하였다. 두 코드의 결과는 유사한 경향으로 나타났다.

Abstract

Safety analysis of RCP locked rotor event were performed for Ulchin unit 3/4. When a RCP rotor locks up RCS flowrate decreases rapidly and RCS pressure increases. Rapid decrease in RCS flow could lead to low DNBR and fuel failure. RETRAN code is used for analysis of locked rotor. The results using RETRAN are compared with results from CESEC-III. The results of these codes show similar trend.

1. 서 론

원자로냉각재 펌프 축 고착 사고는 펌프 축이 순간적으로 고착되어 회전이 멈추는

사고로, 고착으로 냉각재 계통 루프의 유량이 급속하게 감소하는 사고이다. 본 연구에서는 미국 EPRI에서 개발한 최적계통열수력 해석 코드인 RETRAN 코드를 이용하여 원자로냉각재 펌프 축 고착 사고에 대한 안전해석을 수행하였다. 해석 대상 호기로는 한국 표준형 원전인 울진 3/4호기를 선정하였다. 또한, RETRAN 해석결과를 CESEC-III 코드로 계산한 결과와 비교하여 그 차이점을 평가하였다.

2. 계통 모델링

1) 사고 개요

펌프 축 고착 사고는 노심에서 생성되는 열을 제거시키지 못하는 사고이다. 원자로냉각재계통 루프에서의 유동 상실을 유발하는 RCP 축 고착은 상단부 또는 하단부 베어링 고착 및 펌프 축의 과도한 열팽창에 의해서 발생할 수 있다. 임펠러 고착과는 독립적으로 펌프 축 전단도 가상할 수 있으나, 일반적으로 펌프 축 전단에 대한 해석결과가 회전자 고착에 대한 해석결과보다 심각하지 않으므로 펌프 축 전단에 대해서는 해석하지 않는다. 펌프 축이 고착되면 원자로 정지에 따라 터빈 발전기 트립이 일어나고, 이 트립에 의하여 외부전력 급전망이 완전 상실됨으로서 소외전원상실이 발생할 수 있다. 소외전원이 상실되면 소내 부하에 전기 공급이 안되어서 주급수 유량상실, 복수기 작동 불능, 그리고 모든 원자로냉각재 펌프들의 유량 감소 등이 동시에 발생한다.

펌프 축 고착이 순간적으로 발생하면, 고착이 발생한 냉각재 루프의 유량이 급속하게 감소하고 원자로는 저유량 신호에 의해 정지된다. 핵연료 봉에 저장된 열은 냉각재로 계속 전달되어 냉각재를 팽창시킨다. 증기발생기에서의 열전달 감소 및 RCS 냉각재의 급격한 팽창은 가압기로의 냉각재 유입을 유발하며 RCS 전체 압력은 증가한다. 가압기로의 냉각재 유입은 가압기 압력을 증가시켜 자동살수계통 작동, 연속적인 가압기안전밸브 개방을 유발한다. 고온관 저유량에 의해 원자로를 트립시키며, 최소핵비등이탈율은 사고 후 초기 수 초 이내에 발생한다. 한편, 터빈 트립과 소외전원 상실 관점에서는 터빈 트립이후 3초 지연이 있으므로 최소핵비등이탈율에 대한 영향은 없는 것으로 본다.

2) 사고 모델링 및 주요 입력 변수

KEPRI 방법론을 이용하여 원자로 냉각재 펌프 축 고착 사고를 해석하기 위해 계통해석코드인 RETRAN으로 그림 1.에 나타낸 계통 분할도와 같이 울진 3/4호기를 모델링하였다. 펌프 특성 곡선을 반영한 RCP는 각각 트립 카드에 의해 기동·정지되

도록 모델링하였다. 원자로 냉각재 펌프 축 파손 사고를 모사하기 위하여 사고가 시작된 시점에서 RCP #1의 축이 고착되고 RCP #2, #3과 #4는 정상적으로 작동한다고 가정하였다.

초기 조건은 현행 울진 3/4호기의 최종안전성분석보고서에 사용된 값을 이용하였다. 주요 초기 조건은 표 1.과 같다. 노심 출력은 102%를 사용하였다. 또한 초기 노심 유량은 최소값을 사용하였으며, 초기 노심 입구 냉각재 온도는 560°F, 축방향 출력분포는 ASI=-0.317을 사용하였다.

루프의 저유량 설정치는 루프 유량의 80%로 설정하였으며, RCS 저유량에 의해 원자로정지까지의 지연 시간은 1.2초로 가정하였고, 터빈트립과 소외전원 상실 사이에 3초 동안의 지연을 가정하였다.

유량 감속 특성은 일차적으로 계통 루프 저항 (압력손실) 및 펌프 고유 특성, 플라이휠 관성력 및 펌프 토크에 의해 결정되며, 원자로냉각재 펌프 당 82,500gpm의 유량과 80%의 펌프 관성 모멘트를 적용하였다.

이러한 초기조건과 함께 안전해석을 수행할 때에는 안전등급 계측설비 및 계통만을 고려하므로, 어떠한 제어계통도 이 과도상태를 완화시킬 수 없다고 가정하였다. 최대 RCS 압력 관점에서 보수적으로 가압기 살수가 작동되지 않는다고 가정하였다.

표 1. 원자로냉각재 펌프 축 고착 사고 해석의 초기 조건

인 자	초 기 값
노심 열출력 (MWt)	2871.3
원자로용기 평균온도 (°F)	560
가압기 압력 (psia)	2325
전체 원자로 냉각재 유량 (10 ⁶ lbm/hr)	112.7
감속재온도계수 (pcm/°F)	0.0
노심 초기 핵비등 이탈율	1.731
트립시 제어봉 반응도가, %Δρ	-9.0

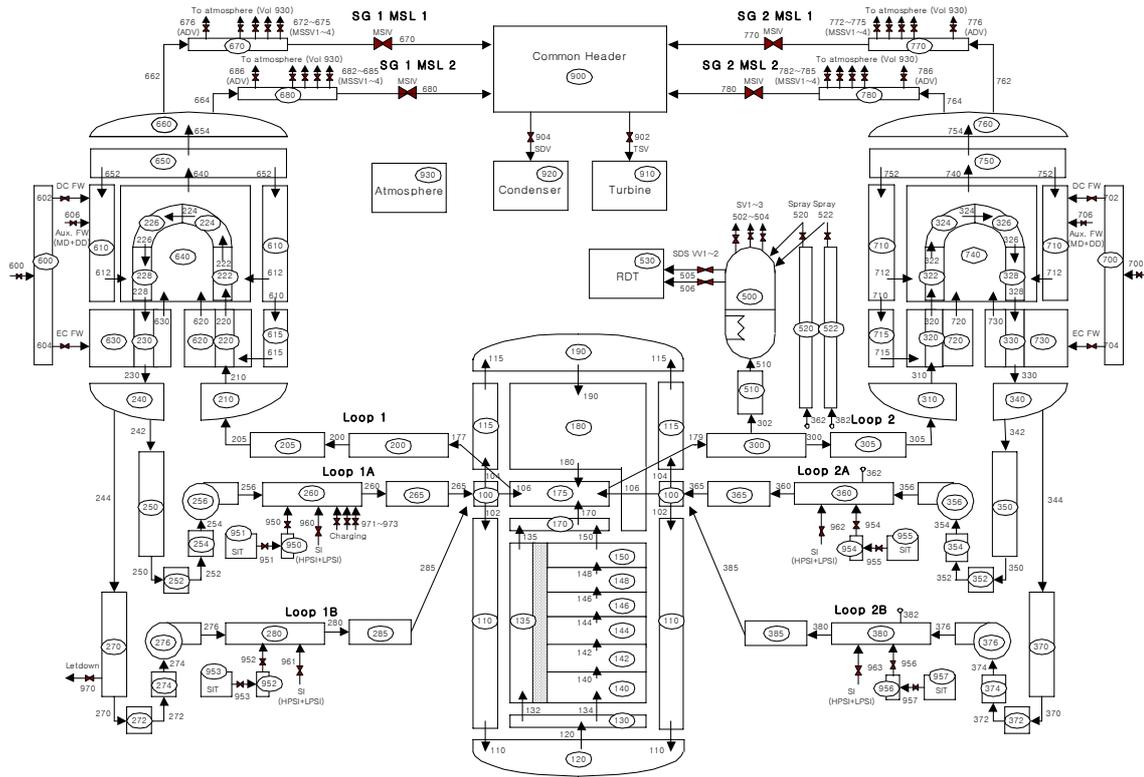


그림 1. RETRAN 코드 해석에 사용한 울진 3,4 계통 분할도

3. 해석 결과

원자로냉각재 펌프 축 고착 사고를 분석하고 사건의 경위를 표 2.에 나타내었다. RETRAN의 경우 0.0초에 RCP #1 축이 고착되면, 0.2초에 손상된 루프에서 원자로냉각재 유량의 0.8에 도달하며 1.2초 지연 후 1.4초에 저유량 신호에 의해 원자로가 정지된다. 2.1초에 1.30의 최소 핵비등이탈율에 도달하였다. 원자로 트립이후 핵연료에 저장된 열은 냉각재로 전달되어 냉각재의 팽창이 일어난다. 동시에 증기 발생기의 쉘측으로의 열전달이 감소하게 되는데 이것은 유량이 감소하여 튜브 측면의 열전달 계수가 감소하기 때문이며, 튜브의 냉각재가 차가워지는 반면 쉘 측면 온도는 증가하게 된다. 일차측 냉각재의 급속한 팽창으로 가압기와 원자로냉각재 계통의 압력이 증가하게 된다. 터빈트립이후 소외전원 상실까지 3.0초의 지연 시간이 있으며 4.6초에 소외전원상실이 발생한다. 이후 5.1초에 원자로 냉각재 계통 최대 압력치(2490 psia)에 달하며, 10.4초에 주증기안전밸브가 열린다.

그림 2. ~ 그림 5.는 RETRAN과 CESEC-III 코드로 해석한 결과를 나타낸 그래

프이다. 원자로냉각재 펌프 축 고착이 발생하면 그림 6.과 같이 유량이 급격하게 감소한다. 이러한 거동은 원자로 냉각재 유량 완전 상실이 발생했을 때와 다른데, 이는 원자로냉각재 펌프 축 고착이 일어나는 순간 RCP가 정지하며 유동이 급격히 감소하기 때문이다. 초기 유량은 급격히 감소하고 이후는 서서히 감소하며 이것은 그림 7.과 그림 8.에 나타낸 바와 같이 소외전원상실에 의해 정지한 나머지 RCP는 플라이휠 관성에 의해 유량이 서서히 감소하기 때문이다. 그림 2.와 그림 3.은 노심에서 발생하는 핵출력 및 열출력을 나타낸 것이다. RCP 축 고착 이후 핵출력 및 열출력이 감소하는 것을 볼 수 있다.

그림 4.는 시간에 따른 RCS 압력 변화를 나타내었으며, 펌프 축 고착이 발생한 직후에 유량이 갑자기 감소하므로 압력이 증가함을 보인다. 그림 5.는 증기발생기 압력 변화를 나타내었다.

그림 10.은 최소 핵비등이탈율을 나타는 것으로 RETRAN 코드와 CESEC-CET OP을 연계하여 최소 핵비등이탈율을 계산하였다. RETRAN의 경우 2.1초에 1.30에 CESEC-CETOP의 경우 1.72초에 1.27의 최소 핵비등이탈율에 달하였다.

위 해석에서 RETRAN 결과와 CESEC-III 결과는 유사한 경향을 나타내었으며, 최대 압력이 설계 안전 조건인 110%인(2750psia, 1397psia) 이하로 나타났다.

표 2. 원자로냉각재 펌프 축 고착 사건 경위

발생시간		설정치 또는 값	사고 경과
RETRAN	CESEC-III		
0.0 (초)	0.0 (초)	-	RCP #1 펌프 축 고착
0.2	0.21	0.80	저유량 설정치에 도달(loop1)
1.4	1.45	-	저유량 신호에 의한 원자로정지(1.2초 지연)
2.1	1.72	1.30	최소 핵비등이탈율
4.6	-	-	소외전원상실(3.0초 지연)
4.6	-	-	소외전원상실에 의한 RCP#2,3,4 트립
5.1	6.6	2490	최대 원자로냉각재계통 압력
8.9	-	0.80	저유량 설정치에 도달(loop2)
10.4	10.0	1277	주증기안전밸브 열림
20.0	20.0		계산종료

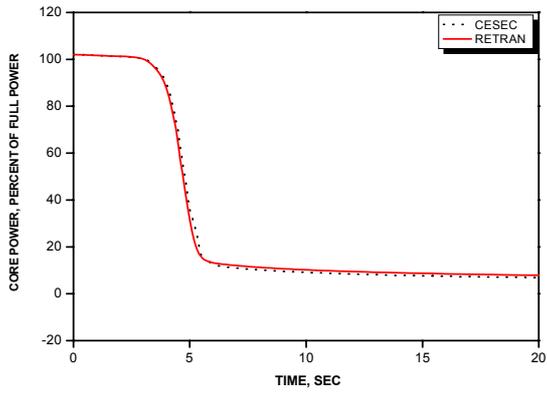


그림 2. 노심 출력

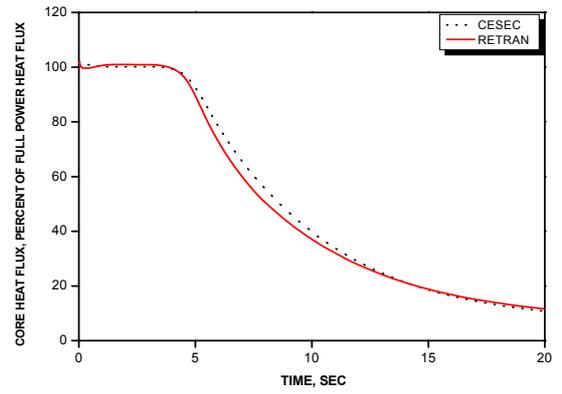


그림 3. 노심 열출력

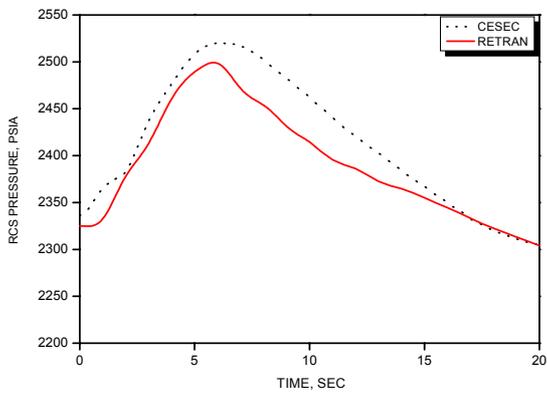


그림 4. 최대 RCS 압력

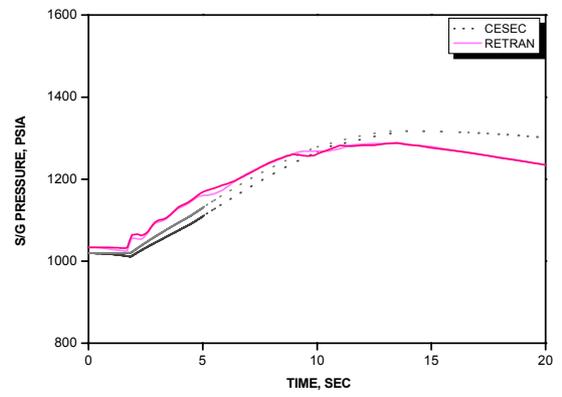


그림 5. 증기발생기 압력

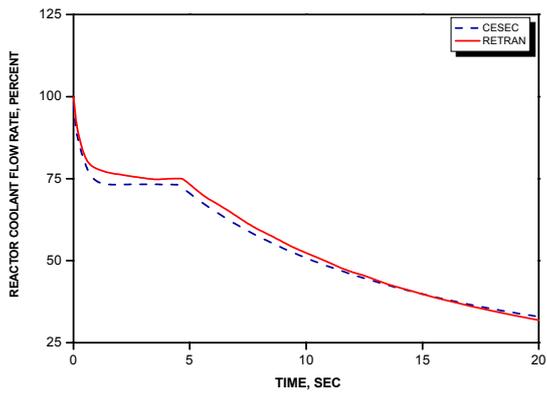


그림 6. RCS 유량 변화

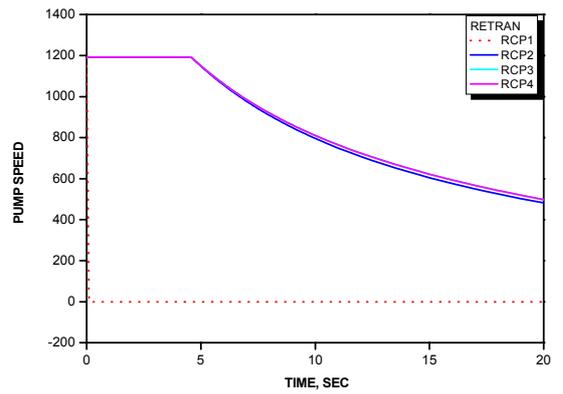


그림 7. RCP 속도

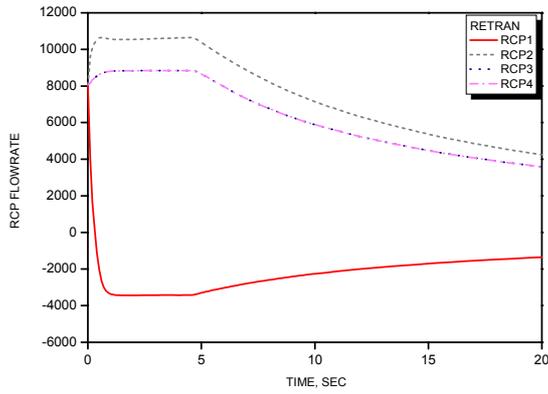


그림 8. RCP 유량

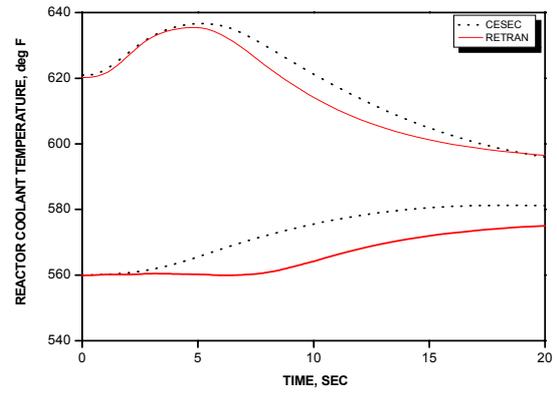


그림 9. 원자로 냉각재 온도

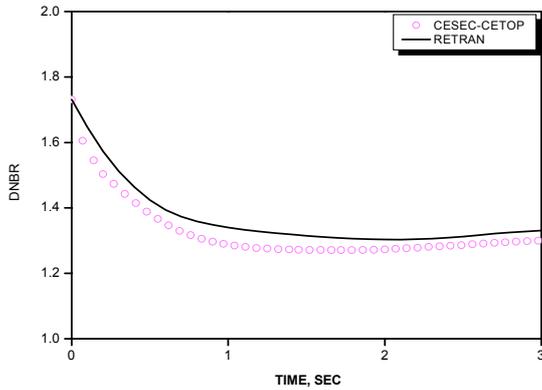


그림 10. 최소 핵비등이탈율

4. 결론

KEPRI 방법론을 이용하여 RETRAN 코드로 원자로냉각재 펌프 축 고착 해석을 수행하였으며 해석 결과를 CESEC-III 코드의 결과와 비교하여 그 차이점을 살펴보았다. 두 결과는 유사한 경향을 보였으며, 최대 압력이 설계 안전 조건인 110% (2750psia, 1397psia) 이하로 나타났고, 최소 핵비등이탈율은 RETRAN의 경우 1.30, CESEC-CETOP을 연계하여 계산한 경우 1.27로 나타났다. 향후, DNBR 측면과 방사선 측면에서 분석할 예정이다.

References

- [1] L. J. Agee, et al., "The Reactor Analysis Support Package (RASP), NP-4498, Vol. 3, May 1986, EPRI
- [2] J. G. Shatford, et al., "RETRAN-3D User's Manual", NP-7450, Vol. 3, Oct. 1996, EPRI
- [3] UCN 3&4 FSAR, 한국전력공사
- [4] "과도 및 사고분석(I)", 안전담당-4, 1996. 4, 한국전력공사
- [5] "Generation of the RETRAN-3D Basedeck for Ulchin 3&4", April 2003, FNC Technology Co.