

국내 WH형 원전의 출력증강에 따른 PSA 영향평가

이근성⁺, 임혁순*, 이은찬*

Assessment on Plant-Specific PSA for Power Uprates of Westing-House Type Nuclear Power Plants in Korea

Keun-Sung LEE, Hyuk-Soon LIM, Eun-Chan LEE

Key Words : Power Uprate(출력증강), CDF(노심손상빈도), LERF(대량조기방출빈도)

Abstract

Power uprate is the process of increasing the maximum power level at which a commercial nuclear power plant may operate. Power uprate applications(113 units) for NPPs(Nuclear Power Plants) were recently approved in the United States. Utilities have been using power uprates since the 1970s as a way of increasing the power output of their nuclear plants. To increase the power output of a reactor, typically more highly enriched uranium fuel and/or more fresh fuel is used. This enables the reactor to produce more thermal energy and therefore more steam, driving a turbine generator to produce electricity. In this paper, the propriety of power uprate is explained through the review on the power uprate method and the changes of the physical parameters due to power uprate. The analysis results showed that the CDF(Core Damage Frequency) and LERF(Large Early Release Frequency) are affected in the current probabilistic safety assessment (PSA) model.

1. 서론

원자력발전소 출력증강은 주요 설계변경 없이 잉여 가용 설계여유도 활용과 발전소 성능 향상 방법론을 이용하여 안전성이 전제된 허용범위 이내에서 인가출력을 증가시키는 것이다. 에너지 안보 및 경제적인 공급을 위하여 원자력 발전을 꾸준히 지속적으로 추진하고 있는 우리나라는 절대적으로 부족한 에너지자원을 극복하기 위해 출력증강을 추진하고 있다. 출력증강을 위해 설비를 개선하고, 경제적 측면에서 원전설비용량을 단기간 내에 증가시키는 효과를 거둘 수 있으며, 대규모 설비변경 없이 적은 비용으로 인가출력을 증가시킴으로써 운영효율성을 증대시켜 가동원전

의 경제성 향상에 기여하고, 동시에 기저부하 전원의 추가확보로 안정적인 전력수급에 기여할 수 있다. 이러한 목적으로 국내 웨스팅하우스형 원전의 인허가 열출력을 현재의 2,775MWt에서 2,900MWt로 4.5% 증가시키는 것을 수용할 수 있는 지에 대한 상세한 안전성 영향 평가가 수행되었다. 본 논문에서는 해외 출력증강 사례, 출력증강에 따른 안전성 영향분석 및 대체교류발전기 추가 설치의 민감도분석 등 원전의 안전성 영향 평가 결과를 기술하였다.

2. 출력증강 및 해외동향

2.1 개요

출력증강은 가동원전의 노심 최대출력을 증가시키기 위한 것으로, 측정 불확실도 감소, 설정치 변경, 발전소보조설비계통(Balance of Plant, BOP) 변경 등의 방법으로 노심 정격출력을 증가시키고 있다. 일반적으로 출력증강은 열출력 측정방법의 불확실도를 개선하여 가동원전의 출력

+ 한국수력원자력 주식회사(KHNP)

E-mail : gslee94@khnp.co.kr

TEL:(042)870-5544 FAX:(042)870-5579

* 한국수력원자력 주식회사(KHNP)

을 증가하는 MUR(Measurement Uncertainty Recapture Power Upgrading, 2% 이내), 대부분의 기존 설계기술을 활용하고 대규모 설계변경 없이 기존 안전여유도를 활용하여 출력을 증가하는 SPU(Stretch Power Upgrading, 7% 이내), 그리고 최신 설계기술을 활용하고 필요시, 대규모 설계변경을 수행하여 큰 폭으로 출력을 증가하는 EPU(Extended Power Upgrading, 20%까지)의 3가지 유형으로 가동원전의 출력증가를 수행하고 있다.

2.2 해외출력증강 동향

미국에서는 1977년 이후 Calvert Cliffs 1호기(5.5% 출력증강)부터 시작하여 최근 '07년 3월 Browns Ferry 1호기(5% 출력증강) 까지 총 113기 원전이 출력증강에 대해 미국 규제기관인 NRC로부터 인허가를 받았다. 2005년 4월 8% 출력증강이 승인된 Waterford 발전소를 비롯하여 각 발전소의 출력증강에 관련된 내부사건 분석에 대한 위험도 영향을 분석하였으며 CDF와 LERF에 대한 종합적인 영향 등 확률론적 위험도 평가를 수행하였다. 또한, 운전원 조치에 따른 민감도 분석 등에 대해서도 평가를 수행하였다.

3. 출력증강에 따른 안전성영향 평가

3.1 설계 변경사항 상세검토

국내의 출력증강 방법은 노심출력증가로 증기발생기 1차측 $\Delta T(Thot - Tcold)$ 증가, 2차측 증기유량 증가, 그리고 발전기 전기출력증가에 의한 것으로서 SPU에 해당된다. 국내 웨스팅하우스형 원전의 최종안전성분석보고서, 출력증강안전성분석보고서 등을 검토하여 4.5% 열출력증강에 의한 상세설계 변경내역을 파악하였다. 출력증강과 관련하여 변경사항을 검토한 결과, 주요한 사고해석관련 변경사항은 열설계유량의 감소, 증기유량 증가 및 증기압력 감소, 급수온도 증가, 그리고 핵분열생성물 재고량 증가 등이다. 또한 출력증강안전성분석보고서의 검토결과, 4.5% 출력증강 적용에 따른 핵증기 공급시스템의 설비 변경은 요구되지 않고, 2차 계통에서는 출력증강을 위해 일부 설비 변경(고압터빈 내장품 교체, 기기 냉각수열교환기 교체)이 요구되는 것으로 나타났다.[1]

3.2 1단계 확률론적 안전성 영향 평가

출력증강으로 인한 1단계 확률론적 안전성 평가결과, 출력증강에 의하여 초기사건빈도, 사건수목논리, 계통성공기준, 기기고장률 등의 변경사항은 없는 것으로 확인되었다. 그러나 일부 주요 사고경위에 대하여 MAAP4 열수력 재분석 결과 출력증강 후 노심잔열 증가로 인한 운전원 조치 여유시간이 감소되어 4개의 전원회복조치 기본사건 및 2개의 사고 후 인적오류 기본사건의 확률값이 증가된 것으로 분석되었다.[2]

Table-1 Changes of the Human Error Probabilities after Power Uprate

기본사건명	운전원 여유시간		확률값	
	증강전	증강후	증강전	증강후
B-101	17시간	16시간	1.00E-2	1.30E-2
B-103	10.9시간	10.6시간	4.00E-2	4.50E-2
B-201	9시간	8시간	6.30E-2	8.10E-2
B-203	2.9시간	2.6시간	3.30E-1	3.60E-1
HRTCFRPC1-10	42분	36분	4.48E-3	5.70E-3
HRS2FRPC1-10	42분	36분	1.31E-3	2.53E-3

위의 출력증강에 따른 변경된 값을 적용하여 1단계 PSA 내부사건 CDF 재분석결과 WH형 원전 경우 출력증강 전 8.38E-6/년에서 출력증강 후 8.88E-6/년으로 5.00E-7/년(약 5.97%) 증가된 것으로 분석되었다.

Table-2 CDF change before and after Power Uprate

출력증강(전)	출력증강(후)	Δ CDF
8.38E-6/년	8.88E-6/년	5.00E-7/년

4.5%의 출력증강은 위험도정보를 이용한 운영 변경허가 신청대상은 아니므로 RG 1.174의 위험도 증가 허용지침을 만족해야 할 사항은 아니나, RG 1.174 위험도정보 활용 인허가 기준과 비교한 결과 허용치를 충분히 만족함을 확인하였다.

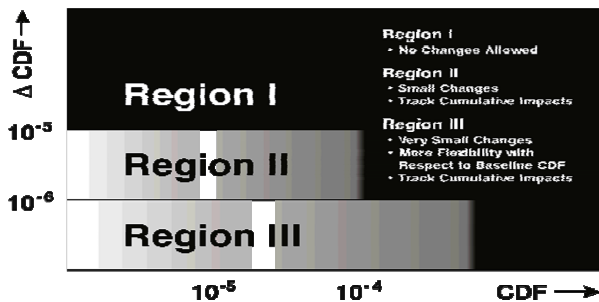


Fig-1 US NRC Acceptance Criteria for CDF change

3.2. 2단계 확률론적 안전성영향 평가

출력증강으로 인한 2단계 PSA 변경사항 분석 결과, 출력증강으로 인한 격납건물사건수목 및 분해사건수목 논리, 그리고 분기확률에 대한 2단계 PSA 변경사항은 없는 것으로 확인되었다. 따라서 출력증강에 의한 2단계 LERF 값 변경은 1단계 CDF 결과 변경에 의한 PDS(Plant Damage State : 발전소손상군) 확률값 변경에 의한 것으로 확인 되었으며, 2단계 내부사건 LERF는 WH형 원전의 경우 출력증강 전 1.05E-6/년에서 출력증강 후 1.08E-6/년으로 3.00E-8/년 (약 2.85%) 증가한 것으로 분석되었다.[4]

Table-3 LERF change before and after Power Uprate

출력증강(전)	출력증강(후)	Δ LERF
1.05E-6/년	1.08E-6/년	3.00E-8/년

출력증강에 의한 CDF 증가수준과 마찬가지로 LERF 증가수준을 RG 1.174 위험도정보활용 인허가 기준과 위험도 증가 허용치와 비교한 결과 각각의 허용치를 충분히 만족함을 확인하였다.

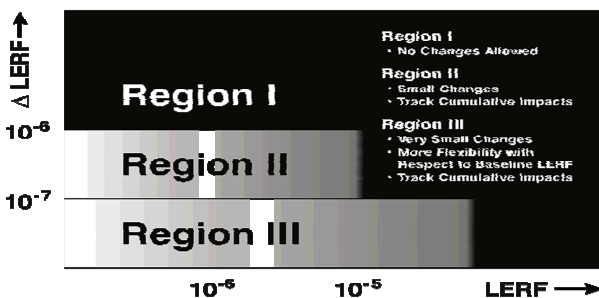


Fig-2 US NRC Acceptance Criteria for LERF change

3.3 민감도 분석결과

출력증강 4.5% 증가와 주요 설비개선 사항

인 대체교류전원을 추가('06. 3월 설치완료) 설치하여 민감도 분석을 수행한 결과, WH형 원전에 대해서 약 33% 정도의 CDF가 감소된 것으로 분석되었다.

Table-4 CDF Sensitivity with AAC installed

발전소	ΔCDF	비고
WH원전	5.00E-7/년	5.9% 증가
	1.00E-7/년	33.2% 감소 (AAC 설치)

또한 출력증강 후 대체교류전원의 설치에 따른 2단계 PSA 재평가 결과, 출력증강 전 대체교류전원을 설치하지 않았을 때에 비하여 대량조기방출 빈도가 12% 이상 감소된 것으로 분석되었다.

4. 결론

- 국내 최초의 원자력발전소 출력증강에 해당되는 WH형 원전의 출력증강의 안전성 영향에 대하여 확률론적안전성 영향평가를 수행하였다.
- 출력증강에 따른 PSA분석결과 CDF 및 LERF 증가 수준이 RG 1.174 리스크정보활용 인허가 신청에 관한 리스크 증가 허용치를 충분히 만족함을 확인하였다.
- 또한, 현재 국내원전에서 설치 완료 또는 계획 중인 대체교류전원을 고려한 민감도 분석 결과 전체적으로 안전성이 약 33% 정도 개선되는 것을 확인하였고 그에 따라 출력증강 전보다 안전성이 증대됨을 확인할 수 있었다.
- 결론적으로, WH형 원전의 출력증강에 따른 설계변경에 대한 확률론적 안전성 평가 결과, 정량적인 전체 안전성 목표와 주요 사건에 따른 정량적인 평가결과에 미치는 영향은 미미한 것으로 평가되었다.

참고문헌

- [1] "Safety Analyses for Kori 3&4 and Yonggwang 1&2 Power Uprates," KHNP, August, 2005
- [2] "Final Safety Analysis Report for Kori 3&4 Power Uprate," KHNP
- [3] "PSA Final Report for Kori 3&4", KHNP, 2003
- [4] "PSA Final Report for Yonggwang 1&2", KHNP, December, 2003