

# 가동원전 출력최적화에 따른 방사선안전관리 측면에서의 주요 고려사항에 대한 고찰

김희경, 김민수

(주)엑트알엠티, 대전시 유성구 테크노1로 11-3

[kimhphp@nate.com](mailto:kimhphp@nate.com)

## 1. 서론

가동원전 출력최적화(Power Update)는 한수원에 의해 2002년부터 계획되어 고리 3,4호기 및 영광 1,2호기를 시작으로 착실히 진행되었다. 출력최적화의 경우 각 관련 분야의 기술개발이 우선적으로 필요하며, 따라서 NSSS(Nuclear Steam Supply System), 핵연료, 노심, BOP(Balance of Plant) 분야에 대하여 각각 많은 기술이 개발되었다. 국내의 경우 45% 출력 증가를 목표로 한 SPU(Stretch Power Update) 기법이 도입되었고 (주)한수원의 KEPCO-ENC, KNF 및 한국원자력연구원도 출력최적화를 위한 해당분야에 참여하였었다. 외국의 경우 W/H 및 Bechtel도 각각 NSSS 분야 및 BOP 분야에 대하여 참여하였으며 Siemens도 T/G 분야에 있어 출력최적화 사업에 참여하였다. 본 논문은 가동원전 출력최적화에 따른 현재 방사선안전관리측면에서 어떠한 분야가 개선되어야하며 더 나은 방사선안전관리 활동을 위해 무엇이 심도 있게 고려되어야하는지에 대하여 검토하였다.

## 2. 본론

### 2.1 가동원전 출력최적화 사업 개요

가동원전 출력최적화는 3단계로 나뉘어 진행 되었는데 1차 단계는 2002년 9월부터 2003년 11월까지 진행되었다. 이때 출력최적화에 대한 목표출력, 출력최적화 타당성 조사 및 출력최적화 설계결정 및 운전변수 등이 충분히 검토되어 결정되었다. 출력최적화 타당성조사결과 2775MWt 출력을 45% 증가시킨 2900MWt 출력을 결정하였다(Table 1. 참조). 2차 단계는 2003년 12월부터 2005년 4월까지 진행되었고 NSSS, BOP 노심설계, T/G에 대하여 상세 안전성 평가가 이루어졌다. 본 평가를 통하여 안전여유도가 결정되었고 NSSS 분야에서는 장비의 개선이 불필요하다는 결론을 도출하였다. 그러나 BOP 분야는 노후 장비의 경우 저성능에 따라 장비교체가 필요하며,

Table 1. Comparisons of major design parameters as following Power Update.

항 목	출력증가 전	출력증가 후	변화사항	비고
출력, MWt	2775	2900	45%증가	고리 (K:3&4, Y:1&2)

MWe	K: 999.097 Y: 996.532	K: 1033.172 Y: 1046.172	K: 3.41% 증가 Y: 4.98% 증가	
주증기 압력, psia	K: 964 Y: 964	K: 922 Y: 938	K: 42psia 감소 Y: 26psia 감소	
주증기 온도, °F	K: 540 Y: 540	K: 534.9 Y: 536.9	K: 5.1°F 감소 Y: 3.1°F 감소	
유량율, lb/hr	K: 12.29×10 <sup>6</sup> Y: 12.29×10 <sup>6</sup>	K: 12.94×10 <sup>6</sup> Y: 12.95×10 <sup>6</sup>	K: 5.2% 증가 Y: 5.3% 증가	
주급수공급 / 핵수 온도, °F	K: 440 Y: 440	K: 446 Y: 446	K: 6°F 증가 Y: 6°F 증가	
복수유량, lb/hr	K: 8.29×10 <sup>6</sup> Y: 8.19×10 <sup>6</sup>	K: 8.73×10 <sup>6</sup> Y: 8.53×10 <sup>6</sup>	K: 5.3% 증가 Y: 5.1% 증가	
HDT 유량, lb/hr	K: 4.41×10 <sup>6</sup> Y: 4.17×10 <sup>6</sup>	K: 4.61×10 <sup>6</sup> Y: 4.42×10 <sup>6</sup>	K: 4.5% 증가 Y: 5.7% 증가	

또한 T/G도 고압터빈에 있어 구조적 개선이 필요하여 교체토록 결정되었다. 3차 단계는 2005년 5월부터 2007년 6월까지 진행되어 출력최적화를 위한 정부 승인을 얻기 위한 노력이 이루어졌고, 2006년 12월에 고리 3,4호기에 대하여 2007년 8월에 영광 1,2호기에 대한 출력최적화의 최종 정부 승인을 얻게 되었다.

### 2.2 가동원전 출력최적화 후속 업무 개요

고리 4호기는 2008년 12월부터 장비 개선이 이루어졌고 따라서 2009년 2월 13일에 출력증가가 가능하게 되었다. 고리 3호기도 2009년 10월 정기 보수기간에 장비 개선 사업을 수행하여 2009년 12월 6일부터 출력 증가가 가능하게 되었다. 고리 3,4호기의 경우 최초보다 34MWe 출력 증가를 이루게 되었다. 영광 1,2호기의 경우 정기 보수기간 동안 장비개선을 통해 2010년부터 출력최적화를 이룰 수 있게 되었다.

### 2.3 출력최적화 방법

출력최적화의 기본요소는 첫째 초기 설계여유도의 활용, 둘째 열설계 과정과 개선된 평가기법의 활용 및 마지막으로 주요장비의 개선이다. 따라서 출력최적화를 위한 주된 기술은 1차계통 및 2차계통에 따라 다르며 1차계통의 경우, 원자로냉각재 온도증가(ΔT) 즉, 평균온도(Tavg) 제어프로그램 변경이며, 2차계통의 경우, 주증기유량율 증가 터빈제어밸브 개폐제어 및 프로그램 변경이다. 이와는 별개로, 출력최적화를 위한 기본적 가정에 있어서는 다음 사항들이 고려되었다.

- 1) 45% 출력증가(2775 → 2900 MWt)
- 2) 열설계유량 1.5% 감소(95.600 → 94.200 gpm)
- 3) 주증기 평균온도는 580°F에서 537°F까지에서도 운전 가능
- 4) 증기발생기(SG)의 플러깅율(Plugging Rate)은

각 평균은도 시에 0%, 5% 및 7%를 기준  
다음(Table 2)은 출력최적화를 위한 NSSS계통의  
분야별 평가항목을 보여준다.

Table 2. Assessment items of NSSS for Power Update.

성능평가 분야	주요 장비의 진전성평가 분야	안전해석 분야
- PCWG <sup>1)</sup> 변수	- RCS	- 자연순환 냉각계통
- NSSS 설계	- 원자로	- 설계기준 초과 사고해석
* 과도상태		- FW 상실
- 원자로	- 원자로용기 내부구조물	- Mid Loop 운전에 있어 RHR 상실
- 가압기	- 증기발생기	- ATWS <sup>2)</sup> 사고해석
- 원자로용기 내부구조물	- 가압기	
- RCP / SG	- RCP	
- CVCS/ RHRS/SIS	- CRDM	
- NSSS/ BOP Interface	- RCS 배관및자재	
- 보조계통설계과도 상태 영향	- ECCS/ RHRS/ CVCS	

- 1) PCWG: Performance Capability Working Group
  - 2) ATWS: Acticipated Transient Without Scram
- BOP 분야에 대한 평가항목은 방사선관리 측면에서  
NSSS계통이 중요하므로 본 논문에서는 생략하였다.

### 2.4 방사선안전관리 측면에서의 주요 고려사항

각 분야에 있어 출력최적화의 결과와 이에 따른 방  
사선안전관리 측면에서의 주요 고려사항은 table 3과 같  
다. 방사선안전관리 측면에서는 출력최적화의 경우,  
계통 및 장비의 개선에 따른 작업지역 및 환  
경의 방사선준위 변화, 작업시간의 단축, 계통 및 장비  
개선에 따른 작업인원의 감소 등을 고려할 수 있다.

Table 3. Consideration in the radiation safety management  
as following Power Update.

주요장비 개선	조치 전 사항	개선사유 및 조치내용	방사선안전 관리 측면
1차냉각 열교환기	한 개계통	플러깅을 증가(K4 3.6%, Y1 6.0%로 교체)	막힘 현상대차에 따른 선량 감소
주증기 DVMP 밸브 용량	주증기 용량의 70%	주증기용량 증가에 따른 용량 감소 조치 (64%로 개선)	부하 감소 운전으로 선량 감소
주급수 공급펌프	3set 중 2set 가동	3set 중 1set 고장 시 90% 출력감소 운전 으로 100% 운전 조치	운전조건 변화에 따른선량 증가 (환경에 큰 영 향은 없음)
급수공급 하터 DRAW 펌프 (영광 1,2 호기의 경우)	1set 고장 시 65% 유량 공급	50% 유량으로 운전 되 어 복수기로 공급됨 에 따라 운전조건을 변경(65% 유량 유지)	운전조건 변화에 따른선량 증가 (환경에 큰 영향 은 없음)
가압기 및 주증기 안전밸브	Stellite Sheet 형태전진LOOP 에Drain Line 미설치	Setpoint 제조정정에 따 른 개선으로ValveSheet 플Flexible Disc 형태로 개선 및Drain Line 설치	전단 Line 신규 신설에 따른 피 폭(환경에 미미 한 영향 기여)
증성자 조사 측정장비	증성자 조사량 측정	증성자 조사량 증가에 따른 조사선량 평가	증성자 조사량 증가에 따른 피폭
저압터빈 건전성 평가	PT Test	각 Blade별 매 정기 점검 시 PT Test 추가	건전성 확인 강화로 방사선안 전관리 향상
가압기 입략	입략성을 제어	안전을 고려하여 안	안 전등급으로

출력개선	카드 위치를 비안전등급 캐비닛 위치 전 송 신호 캐비닛내 등급 사용	전등급 캐비닛으로 이동설치 및 신호 전송케이블을 비안 전등급에서 안전등 급으로 변경	상향하여 방 사선안전관리 향상
------	--	--	------------------------

### 3. 결론

국내 가동원전의 출력최적화는 2002년부터 4.5  
% 출력증가를 결정하여 영광 1,2 고리 3,4호기에 대  
해 성공리에 수행되었고 이에 따른 정비기술에 대  
한 획기적인 향상도 이루어 내었다. 향후 올진 1,2호기  
도 출력최적화가 조만간 이루어질 예정이다. 이와  
는 별개로 고리 3,4호기의 경우 원자로 열출력불확실도  
를 감소시켜 약 1.5 % 출력증가를 고려하는 MUR  
방식의 출력최적화를 분석중이고 2012년 9월 고리  
3호기 및 2013년 2월 고리 4호기에 각각 적용코자  
계획 중이다. 출력최적화의 경우 4.5 % 출력증가가  
발생되어 많은 경제적 이익을 창출할 수 있지만  
출력증가에 따른 방사선량 증가가 예측되어 방사  
선안전관리측면의 효율적 관리가 필요하나 증성자  
조사선량의 재평가에 따른 방사선안전관리 조치,  
장비개선에 따른 방사선 및 방사성물질의 유출 감소,  
운전조건 변화에 따른 미미한 선량증가 등을 고려 시  
출력최적화에 있어 가동원전의 경우 현재 완벽한  
방사선관리 측면에서는 큰 방사선관리 기법의 변화는  
예상되지 않으며, 출력최적화 전·후에 있어 고리  
3,4호기의 선량변화 추이는 표5와 같다. 따라서 피폭량  
의 증가나 오염확대의 경우가 없었다고 판단 된다.

Table 4. Trend of Kori unit 3, 4 radiation by year.

항 목	2006	2007	2008	2009	2010	2011
1인 피폭선량 (mSv/인)	1.22	0.59	0.65	1.00	0.52 (52%)	0.78 (78%)
집단 피폭선량 (man-mSv)	2,340	913	1,206	1,975	821 (42%)	1,787 (90%)

비고 1) 2009년 2월 출력 최적화 시행에 따라 2009년도  
피폭 선량은 상대적으로 높음

2) ( )안의 숫치는 2009년도 대비 피폭선량 변화율을 나타냄

### 4. 참고문헌

- [1] 제11회 원자력안전정보기술회의, 고리3,4호기 및 영광  
1,2호기 출력증강 현황 및 설비개선 계획, 2006.
- [2] 제14회 원자력안전정보기술회의, 고리4호기 출력증강  
적용현황, 2009.
- [3] 제15회 원자력안전정보기술회의, 고리3,4 및  
영광1,2호기 출력증강 기술개발 성과 및 향후계획, 2010.