

고리 4호기, 국내 최초로 출력증강에 성공

한국수력원자력(주) 정비기획처 설비기술팀장
하수영

지난 2월 13일 오후 3시, 고리4호기 주제어실에 모인 약 40여 명의 직원들은 긴장 속에 한국 원자력발전사에 기록될 역사적 순간을 지켜보고 있었다. 고리4호기가 새로운 인허가 열출력인 2,900MWt에 도달하고, 발전기의 출력은 1,042MWe에 다다랐을 때 직원들은 너나할 것 없이 환한 웃음을 띠며 축하의 박수를 쳤다. 고리4호기가 국내 최초로 출력증강을 적용하여 새로운 인허가 출력에 도달한 순간이었다.

출력증강 개요

출력증강은 가동원전의 발전설비가 보유하고 있는 설계상의 안전여유분을 연구개발을 통해 상세하게 평가하여 가동원전의 성능을 종합적으로 향상시키는 기술을 말한다. 안전성이 허용하는 범위 내에서 원자로와 터빈발전기의 출력을 높여 원자력발전소의 경제성을 증대시키는 기술로 가동 중인 발전소의 안전성을 최신 설계기술로 재평가함은 물론, 성능 및 효율이 저하된 설비를 보강하기 때문에 안전성 향상에 긍정적인 효과가 있다.

발전소 안전성을 유지하면서 원전 건설비용보다 낮은 단

가로 정격출력을 안전하게 증가시킴으로써 원자력발전의 경제성을 더욱 향상시킬 수 있기 때문에 가동원전의 출력증강은 미국 등 원자력 선진국에서 이미 1980년대부터 활발하게 추진되고 있으며 국내에서도 2002년도부터 기술개발을 추진하여 마침내 2009년 2월 13일 고리4호기에 최초로 적용하게 된 것이다.

출력증강 방법

출력증강은 방법 및 출력증가량에 따라 미세 출력증강(MUR, Measurement Uncertainty Recapture Power Uprating), 소규모출력증강(SPU, StretchPower Uprating) 및 대규모 출력증강(EPU, Extended Power Uprating) 등으로 구분된다.

미세 출력증강은 정격출력의 2% 미만의 출력을 증가시키는 방법이다. 출력 측정의 핵심 장비인 급수유량 측정기를 정밀도가 높은 최신 장비로 교체하여 출력측정 정밀도가 향상된 범위 내에서 출력을 더 증가시키는 것이다. 미국의 경우 2000년대 들어서 활발히 추진되고 있다.

소규모 출력증강은 입증된 설계기술로 안전여유도를 분

석하고 필요시 2차 계통 일부 설비를 보강하여 정격출력의 7% 내에서 출력을 증가시키는 방법이다.

대규모 출력증강은 정격출력의 7~20% 정도를 증가시키는 방법으로서 증기발생기 교체 등 대규모 설비개선이 수반된다.

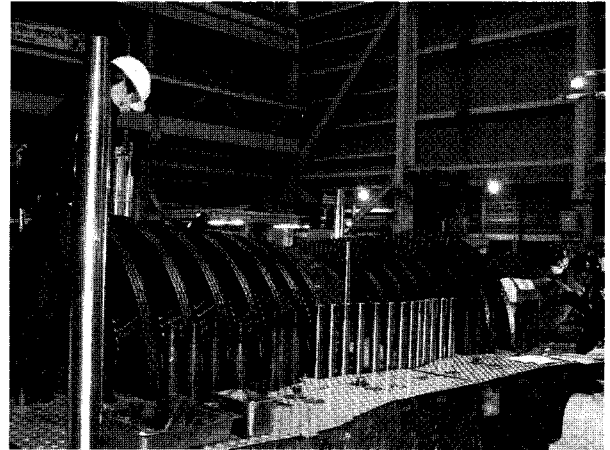
국내·외 추진 현황

1977년 미국 Calvert Cliffs 2호기는 세계 최초로 출력증강을 적용하여 출력을 5.5% 증가시켰다. 이후 미국에서는 1980년대부터 출력증강이 활발하게 적용되어 2008년 3월말 현재 미국 내 가동원전 총 104기 중 88기에 출력증강이 적용되었으며 유럽에서도 벨기에 Tihange 1,2호기를 비롯하여 30여기 이상의 원전에서 출력증강을 적용하고 있다.

세계적인 추세에 따라 국내에서도 가동원전 출력증강 기술개발에 대한 필요성이 제기되었고, 한국수력원자력(주)에서는 관련 기술개발과제를 2002년 9월부터 추진하였다.

고리3,4호기 출력증강

국내에서 추진 중인 출력증강은 소규모 출력증강 방식으로 고리3,4호기 및 영광1,2호기의 정격 열출력을 4.5% 증가시키는 것을 목표로 시행되었다. 원 설계에 부여된 여유도, 발전설비의 여유도, 운영여유도 등을 종합적으로 평가하여 설비개선을 최소화하고 변경된 운전조건에 맞게 일부 계통의 설정치 및 운전변수를 조정하는 방식으로 추진되었다.



[고리 4호기 고압터빈 개선 사진]

가동원전 출력증강은 지식경제부가 주관하는 전력산업 연구개발과제로 채택되어 한국수력원자력(주)이 총괄하고 한국전력기술(주) 등 국내 대형 설계사들이 각 전문분야의 기술개발에 참여하였다. 출력증강 경험이 풍부한 해외 원 설계사를 참여시켜 출력증강 기술을 전수받고 출력증강 안전성분석에 필요한 원 설계자료를 제공받았으며 국내사가 독자 수행할 수 없는 분야의 설계역무는 해외사와 국내사가 함께 수행함으로써 국내 기술진이 선진 기술을 습득하게 하였다.

국내 설계사로는 한국전력기술(주), 한전원자력연료(주) 및 한전 전력연구원이 참여하여 각각 핵증기공급계통(NSSS) 및 보조설비계통(BOP), 노심설계 및 안전해석, 터빈발전기(T/G) 분야의 기술개발을 담당하였으며, 해외 설계사로는 웨스팅하우스가 NSSS 분야, 벡텔사가 BOP 분야, 알스톰과 지멘스가 각각 고리3,4호기 및 영광1,2호기 T/G 분야 기술개발에 참여하였다.

출력증강은 2단계로 나누어 추진되었다. 1단계(2002.9~2003.11)에서는 타당성 평가, 발전설비의 진단과 평가를 토대로 출력증가 범위, 주요 설계 및 운전변수를 결정하였다. 연구결과 영광1,2호기 및 고리3,4호기의 노심 열

출력을 2,775MWt에서 2,900MWt로 4.5% 증가시키는 데 대한 기술적 타당성을 확인하였다. 2단계(2003.12~2005.4)에서는 안전해석, NSSS 분야, BOP 분야, 원자로 노심설계 및 안전해석 분야, 터빈발전기 분야의 상세 분석을 수행하였다.

그 결과 NSSS 분야에서는 장비, 계통, 부품들의 잉여 여유도를 확인하였으며, 개선된 원전연료의 사용 및 노심설계 기술의 향상으로 인해 가용 여유도가 증가하여 4.5% 출력 증가에 따른 별도의 설비개선은 필요하지 않았다. BOP 계통에서는 사용연한 증가에 따라 성능이 저하된 일부 설비의 개선이 필요한 것으로 평가되었다. 터빈 발전기 계통에서는 출력증강에 따라 증가한 증기유량

을 수용하기 위해 고압터빈의 구조개선이 필요하였다.

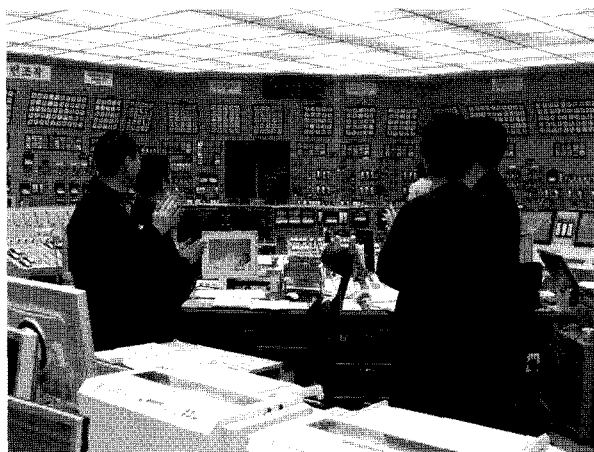
한국수력원자력(주)은 1, 2단계 평가결과를 근거로 인허가 보고서를 2005년 9월 교육과학기술부에 제출하여 고리3,4호기는 2006년 12월, 영광1,2호기는 2007년 8월에 각각 출력증강을 위한 운영변경허가를 취득하였다. 출력증강 전후로 고리3,4호기의 주요 운전변수의 변화는 아래 표와 같다.

고리4호기는 2008년 12월 27일부터 착수된 제 18차 계획예방정비 기간 동안에 고압터빈 개선, 각종 운영 설정치 변경 및 노후 발전기 교체 등 설비개선공사를 마치고 2009년 2월 13일 최초로 출력증강 목표출력에 도달하여

표1. 고리3,4호기 주요 운전 변수 변화

운전변수		현행	출력증강후	증감(률)
원자로열출력(100%), MWt		2,775	2,900	4.5% ↑
발전기출력, MWe		999	1,033	3.4% ↑
원자로냉각재계통 압력, kg/cm ² a		158.2	158.2	
냉각재온도, °C	■ T(평균)	309.2	307.8	1.4°C ↓
	■ T(고온) - T(저온)	326.6 - 291.7	326.7 - 288.9	
	■ ΔT	34.9	37.8	2.9°C ↑
주증기	■ 압력, kg/cm ²	67.77	64.82	2.8°C ↓
	■ 온도, °C	282.2	279.4	
	■ 유량, kg/hr	5.575E+6	5.874E+6	
주급수	■ 압력, kg/cm ²	83.5	82	3.3°C ↑
	■ 온도, °C	226.6	229.9	
	■ 유량, kg/hr	5.575E+6	5.874E+6	

운영되고 있으며, 고리3호기는 출력증강 설비개선을 2009년 10월에 착수할 예정이다. 영광1,2호기는 제반 여건을 고려하여 추진시기를 검토중이다.



[고리 4호기 주제어실]

출력증강 기술개발 효과

출력증강 성공은 기술적, 경제적으로 중요한 의미를 가진다. 기술적 측면에서는 후속기 출력증강을 국내 자체 기술로 수행할 수 있는 기술력을 갖추게 되었을 뿐 아니라 국내 웨스팅하우스형 3루프 원전에 대한 원천설계기술을 확보함으로써 국내 기술능력을 한 단계 향상시켰다.

경제적 측면에서는 본 출력증강을 통하여 원전 4기의 출력이 증가되면 약 170 MWe의 전력공급용량이 증대되고 전기판매 연간 수익은 약 480억원으로 예상된다.

저탄소 녹색성장을 위한 현실적인 에너지 대안으로 원자력발전이 새롭게 평가됨에 따라 세계적으로 원자력 르네상스 시대를 맞고 있다. 이에 따라 원전 핵심기술에 대한 보호 장벽이 나날이 심화되고 있는 가운데 출력증강을 통하여 획득한 기술은 우리나라가 세계 수준의 원전 설계 및 운영기술을 확보하는 바탕이 될 것이며 향후 원전 수

출에도 긍정적 영향을 줄 것으로 기대된다.

한국수력원자력(주)은 가동원전 출력증강 기술개발 과제를 통하여 확보한 기술력을 바탕으로 올진1,2호기와 한 국표준형원전의 출력증강 추진을 검토하고 있다. 출력증강 기술경험이 국내 기술진과 규제기관에 축적된 만큼 해외사에 대한 의존을 최소화하고 국내사 주도로 안전성분석 및 인허가 취득업무를 수행할 계획이다.

