

## 원전 출력증가 기술개발 현황

이재용, 이창섭, 김지인\*  
한국전력공사 전력연구원, 한국수력원자력(주)\*

### Status of Power Uprate Technology for Operating Nuclear Power Plants

Lee Jae Yong, Lee Chang Sup, Kim Ji In\*

Korea Electric Power Research Institute, Korea Hydro & Nuclear Power Co.\*

#### 1. 서론

원전출력증가는 기존 가동 원전의 경제성을 향상시키고 기저부하 전원의 추가 확보를 통한 전력수급 여건을 개선하며, 관련 설계 및 운영기술의 능력을 제고하기 위하여 미국을 중심으로 세계적으로 활발히 추진되고 있다. 출력증가는 가동중인 발전소에 대해 주요 설계변경 없이 잠재된 가용 설계 여유도 활용 또는 진보된 설계방법론을 이용하여, 안전성이 전제된 허용범위 이내에서 인가출력(MWt)을 증가시키는 것으로서, 미국에서는 이미 1970년대에 개발되어 규제기관(NRC)에 의해 안전성이 입증된 상용화 기술로서 가동원전 104기중 101기 원전에서 적용중이며, 5기 원전에서 인허가를 신청 중에 있고, 24개 원전에서 출력증가를 계획중이다. 출력증가 적용을 유형 별로 살펴보면 소규모 출력증가(SPU/Stretch Power Uprate) 유형이 55기, 미세출력증가(MUR/Measurement Uncertainty Recapture) 유형은 34기, 대규모 출력증가(EPU/Extended Power Uprate) 유형은 12기에서 적용된 것으로 확인되었다. 이로써 총 4173 MWe의 전기출력을 추가로 얻었다[그림1,2참조]. 유럽의 경우, 미국 보다는 출력증가를 적용한 원전이 상대적으로 적은 편이나 벨기에, 독일, 스페인, 스위스, 핀란드, 슬로베니아, 프랑스 등에서 약 30기에 출력증가가 적용되었다. 국내에서는 1990년대 중반부터 기술동향 분석 및 예비검토 등 기획 연구를 수행한 바 있으나 출력증가 기술개발을 위한 체계적인 연구가 수행된 적은 없다.

#### 2. 출력증가 유형

##### 2-1. 미세 출력증가(MUR/Measurement Uncertainty Recapture)

MUR은 1999.10월 미국 NRC에서 10CFR50 Appendix K, "ECCS Evaluation Model" 를 개정하여 기존의 보수적인 출력 불확실도 2.0%를 의무적으로 사용하는 대신에 실제적인 출력 불확실도를 사용할 수 있다는데서 출발하였다. MUR은 주로 2차측 주급수 유량측정방법을 기존의 Venturi 방법에서 초음파를 이용한 방법으로 개선하면서 주급수 유량측정 불확실도를 획기적으로 저감시켰기 때문에 가능하게 되었다. 1999년 Comanche Peak 2호기 인허가를 필두로 2004.1월 Fort Calhoun 발전소까지 총 34기가 MUR을 수행하였으며 출력증

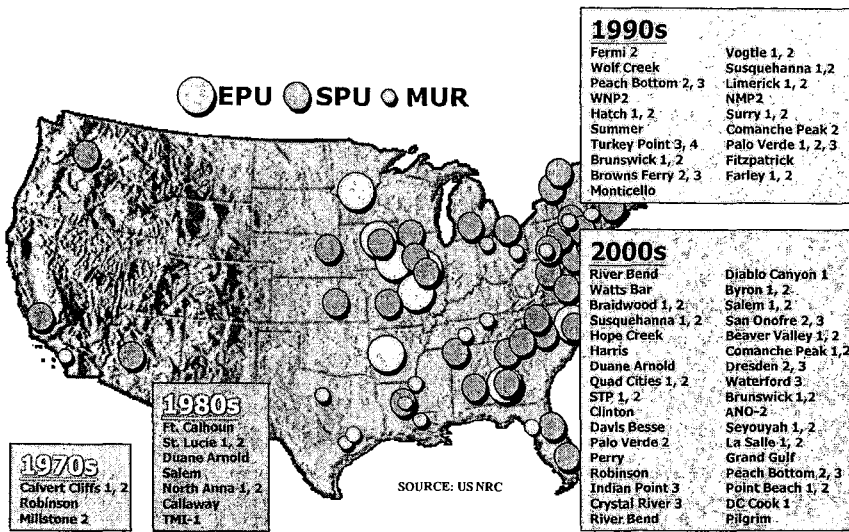


그림 1 미국내 원전 출력증가 현황

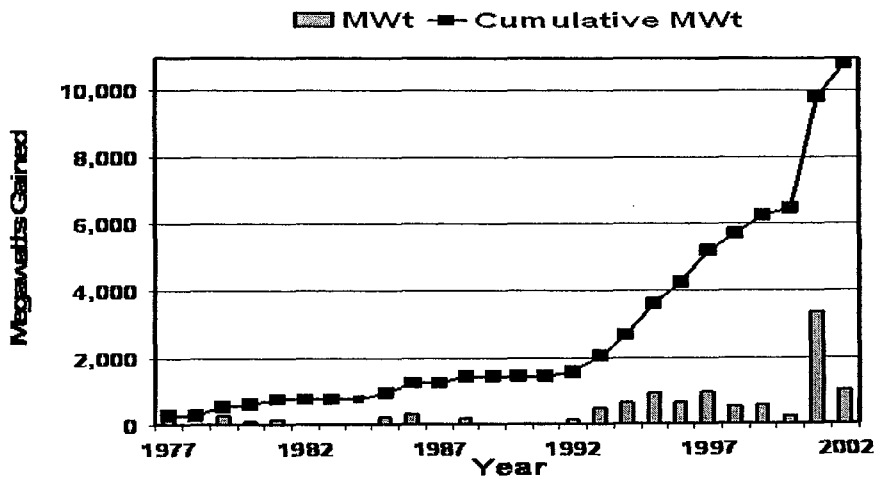


그림 2 미국내 원전 출력증가로 인한 열출력 증가량

가량은 정격출력의 1.3%~1.7% 정도이다.

현재까지 MUR을 위해서 상업적으로 개발된 주급수유량 계측계통은 미국 Caldon사 제품인 LEFM과 캐나다 AMAG사 제품인 CROSSFLOW가 있으며 두 제품 모두 초음파를 이용하여 유량을 측정한다. 이들 제품을 이용하면 기존의 열출력 오차인 2.0%를 0.5% 이하로 줄일 수 있다. 여기서 얻어진 여유도를 이용하여 출력증가를 이루는 것이다. 출력증가시 평가해야할 항목으로는 아래와 같은 것들이 있으며 MUR에서는 평가 깊이가 깊지 않을 따름이다.

- 안전해석
- 핵증기발생계통(NSSS) 및 기기들
- 보조계통(Balance of plant)
- T/G(Turbine Generator) 용량
- 핵연료 관련 고려사항

#### (1) 안전해석

안전해석에 영향을 끼치는 요소로는 원자로의 온도차가 0.6°F 증가하는 정도이므로 일반적으로 영향이 적으며 결정론적 분석에서는 이미 2%의 출력 불확실도를 고려했기 때문에 추가의 평가가 필요없으며 여기에 해당하는 사고로는 Appendix K 소형 LOCA(Loss of Coolant Accident), 일부 Non-LOCA 과도해석, 장기 주증기관파단/LOCA시 질량 및 에너지 방출사고, SG(Steam Generator) 세관파열사고등이다. 통상 104.5% 출력에서 수행하는 방사선원 계산도 재평가가 필요없다. 한편, Non-LOCA 과도사고중 DNB(Departure Nucleate Boiling) 관련 분석, 보조계통 설정치 분석, 최적 LOCA등 확률론적으로 분석을 수행한 사고들은 재평가가 필요하다.

#### (2) NSSS 계통 및 기기들

새로운 출력에서 재평가해야 하며 설계기준 성능 및 피로/스트레스가 허용기준에 부합하는지 새로운 출력에서 확인해야 한다. 주요 설계 입력으로는 설계변수 및 설계과도상태 등이며 평가해야할 계통은 유체계통, NSSS/BOP 연계계통, 일차 및 보조계통등이다. 평가해야할 주요 기기로는 원자로 용기, 원자로용기 내장품, 제어봉구동장치, 루프 배관, 원자로 냉각재펌프, SG, 가압기 및 보조기기들이다.

#### (3) BOP 고려사항

T/G 용량이 주요 타겟이며 전기공급계통 능력, 복수기, 복수 및 급수계통 성능, 열평형 평가, 습분분리재열기, 배관/지지물, 계장계통등을 주로 평가해야 한다.

#### (4) 핵연료 관련 고려사항

핵연료는 원자로 평균온도(Tavg) 운전전략에 매우 민감하다. 핵설계에 미치는 영향은 출력증가 1%는 약 5EFPD(Effective Full Power Day)의 주기감소를 가져오며 이는 주기말의 출력감소운전 혹은 공급핵연료 농축도를 약간 올림으로써 만회한다. 정지여유도나 첨두인자(F<sub>0</sub>) 여유도도 주요 평가 대상이다. 열수력설계시 고려할 요소로는 출력증가량과 DNB 제한치를 평가하여야 한다. 연료봉 설계시는 연료봉 내압 및 부식이 검토 대상이며 발전소별, 연료형태별로 평가 결과가 상이하다. 운전 측면으로는 축방향 출력편차 이상현상, 불안전한 제어봉 삽입등이 검토되어야 한다.

#### (5) 다른 여유도 향상 과제와의 시너지

기존의 Tavg 운전전략은 운전점이 한 점으로 고정되어 있었으나 출력증가 과제를 통하여 온도 운전범위를 확장할 수 있다. 또한 SG 관막음을 증가, 주급수 온도 감소, ECCS 유량 여유도등 발전소의 다른 애로사항을 한꺼번에 출력증가 과제를 통하여 해결할 수 있다.

### 2-2. 소규모 출력증가(SPU/Stretch Power Uprate)

SPU는 가용 설계여유도를 활용하여 출력을 증가시키는 것으로 통상 2.0%~7.0% 출력을 증가시킨다. 최근에 Kewaunee 발전소가 6.0% SPU를 허가받은 것을 포함하여 미국내 55개 발전소가 인허가를 획득하였다. 출력증가량은 ESDR(Engineered Safeguard Design Rating) 이내에서 결정되며 전형적인 웨스팅하우스형 원전의 ESDR은 104.5%이다. SPU에서는 비등경수로(BWR)에서는 계장의 설정치만을 재조정할 뿐 발전소 주요설비의 설비개선은 없다. 그러나 가압경수로(PWR)에서는 터빈계통의 설비개선이 수반되는 경우가 종종 있다. 평가해야할 항목은 상기 2-1의 MUR과 유사하나 그 분석 깊이가 더 깊다.

### 2-3. 대규모 출력증가(EPU/Extended Power Uprate)

최근들어서 EPU가 활발히 추진되고 있다. 이것은 이차측의 주요설비 개선을 통하여 20% 까지 출력을 올리는 것으로 설계여유도가 충분한 비등경수로에서 주로 추진되나 가압경수로인 Waterford 3호기에서도 8% EPU에 대해 현재 인허가 심사중이다. 미국 NRC에서는 EPU에 대한 표준 심사지침서인 RS-001[5]을 발간하여 EPU수행에 도움을 주고 있다. 미국에서는 현재 대부분의 운전중인 원전이 SPU는 수행 완료한 상태라서 신규 건설 없이 추가의 전력을 얻기 위하여 향후에는 EPU가 활발히 진행될 전망이다.

## 3. 국내 출력증가 연구 동향

국내에서도 2002년도부터 산업자원부 지원으로 고리3/4 및 영광1/2호기를 대상으로 현재 인가출력 대비 4.5%의 출력증가를 목표로 연구 추진중이다. 한수원(주)가 주관기관으로 국내외 원자력 관련 기관이 표1과 같은 업무범위로 연구에 참여하고 있다

표 1 고리3/4 및 영광1/2 출력증가과제 기관별 업무분장

참여기관	수행업무
한수원(주)	과제 총괄
한국전력기술(주)	NSSS 계통/기기평가, BOP 평가
한전연료(주)	연료 및 안전해석
전력연구원	설정치평가, T/G 평가
Westinghouse	NSSS 기술지원
Bechtel	BOP 기술지원
Siemens	영광1/2 T/G 평가
Alstom	고리3/4 T/G 평가

고리3/4, 영광1/2호기 4.5% 출력을 증가시키는데 아래와 같은 신기술을 적용하고 있다.

- RFA 연료를 사용함으로써 기존의 연료에 부과되었던 DNBR 벌점을 해소함
- DNBR 제한치 결정에 RTDP(Revised Thermal Design Procedure) 적용
- 대형 LOCA 해석시 국내에서 개발 인증된 최적 해석방법론(KREM) 사용 |
- 방사선 쏘임량 계산시 기존의 수작업에서 전산코드 활용

또한 출력증가와 더불어 시너지 효과를 거두기 위하여 아래와 같은 운전성 향상을 도모하고 있다

- 일차측 냉각 유량 제한치를 1.5% 내림으로써 유량여유도 추가 확보
- 일차측 전출력 운전범위가 기존의 한 점(588.5°F)에서 범위(580°F ~587°F)로 확장 |
- 제어봉제어계통 설치치를 완화함으로써 정상운전중 부적절한 제어봉 움직임 방지

현재까지의 연구 결과로는 NSSS 기기 및 계통에 대해서는 4.5% 출력을 올리더라도 아무런 설비변경없이도 안전성 입증의 가능성을 확인하였다. 아래 그림3에 KREM을 이용한 대형 LOCA 분석 결과를 나타냈다. 여러 가지 조건에서도 제한치인 1477°K에 여유가 있음을 알 수 있다. 한편 이차측 계통 및 기기 평가 결과는 주급수펌프 두 대로 전출력 운전하기는 용량이 약간 부족하여 설비개선이 필요하며 터빈의 경우도 블레이드 교체등의 설비개선이 필요하다고 검토되었다. 한수원(주)에서는 고리3/4 터빈에 대해서는 최소한의 설비변경을, 영광1/2호기에 대해서는 기존의 터빈 블레이드 침식등 문제점도 해결하고 최대의 전기출력을 얻기 위해서 터빈 내장품 교체(Retrofit)등을 고려하고 있다.

본 고리3/4 및 영광1/2 출력증가 과정은 해당호기의 정격출력을 4.5% 올림으로써 원전의 경제성 제고를 도모함과 동시에 다수의 Westinghouse 설계용 전산코드/방법론을 도입함으로써 Westinghouse형 원전의 원천 설계기술을 확보하는데 또한 의의가 있다.

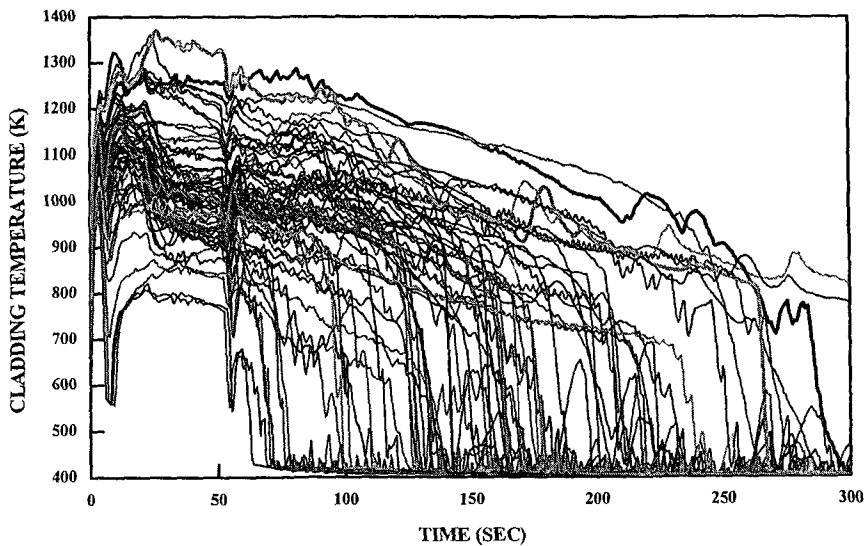


그림3 대형냉각재상실사고시 피복관 온도

#### 4. 출력증가 경제성 평가

1,000MWe급 원전의 건설비는 1,800\$/kWe 이며 500MWe급 화력발전소 건설비는 1,000\$/kWe 인데 반하여 출력증강 소요비용은 설비개선비용을 포함하여 300\$/kWe로 조사되었다. [6] 즉, 신규 원전건설비의 1/6 비용으로 동일한 효과를 거둘 수 있는 것이다. 미국 규제기관인 USNRC에서는 출력증가의 경제성을 표 2로 정리하였다.

표 2 출력증가의 비용/이득평가[1] (단위 USD)

조 건	발전소 숫자	비 용			이 득	
		전력사	규제기관	총 합	연간	수명기간
규정변경 하지 않음	50	754M	5.3M	759M	50M~135M	488M~1.3B
인가출력과 ECCS분석출력사이 의 여유도를 감소시킬수 있음	50	754M	4.3M	758M	50M~135M	488M~1.3B
인가출력과 ECCS분석출력사이 의 여유도요건 삭제	50	754M	5.6M	760M	50M~135M	488M~1.3B
전반적인 규정개정시	50	1.5B	10M	1.51B	250M~675M	2.4B~6.6B

#### 5. 결 론

본 출력증가 기술개발은 원전의 가용 여유도를 이용하여 대규모 설비 변경 없이 적은 비용으로 인가출력을 증가시킴으로써 운영 효율성을 증대시키고, 발전원가 저감을 통한 원전의 경제성 향상에 기여할 수 있다. 또한, 가동원전 출력증가는 원전 설비용량을 단기간 내에 증가하는 효과뿐만 아니라, 기저부하 전원의 추가 확보로 안정적인 전력수급에 기여할 수 있으며, 국내 원전 건설을 위한 대규모 투자재원 및 신규부지 확보가 어려운 상황에서 가동원전의 출력증가 기술자립은 타 가동원전에 대한 적용확대를 통해 국가자원의 효율적인 활용과 국가 기술경쟁력 증진에 기여할 것이다.

이와같이 경제적 타당성은 이미 입증되었으므로 현재 추진되고 있는 고리3/4 및 영광 1/2호기 출력증가를 시발점으로 향후 국내 전 가동원전에 대한 출력증가 연구가 진행되리라 판단된다.

#### 6. 참고문헌

1. SECY-00-0057, "Final Rule : Revision of Part 50, Appendix K, ECCS Evaluation Models", USNRC (2000)
2. SECY-04-0104, "Status Report on Power Uprates", USNRC (2004)
3. 가동원전 출력증강 기술개발(I) 최종보고서, 한국수력원자력(주) (2004)
4. A. Cheung, "Cost Effective Implementation of up to 1.7% Mini Power Uprates for Westinghouse PWR (2001)
5. RS-001 (Draft), "Review Standard for Extended Power Uprates", USNRC (2003)
6. 2004 원전기술고도화 워크샵자료 "가동원전 출력증강 기술개발 추진현황", 한수원(주)(2004)