

가동중 원전의 출력 증강 기술 변화

강기식

국제원자력기구(IAEA) 원자력발전국 수명관리 담당관



서론

가동중 원전의 출력 증강에 대하여 국제원자력기구(International Atomic Energy Agency; IAEA)는 한국과 기술 협력 사업으로 6월 14일부터 17일까지 5일간 한국수력원자력(주) 원자력교육원 국제회의실에서 한국원자력안전기술원 및 한국수력원자력(주), 한국전력기술(주), 한전 원자력연료(주) 관계자를 대상으로 기술 세미나를 개최하였다.

기술 세미나를 위하여 IAEA측에

서는 필자, 미국 Entergy 발전 기술사인 Clarless J. Richardson, 그리고 웨스팅하우스의 출력 증강 사업 책임자 Roy. F. Kim이 주 강사로 선정되어 출력 증강에 관한 미국 내의 현황을 사업자 및 주기기 공급자의 입장에서 각각 설명을 하였다.

또한 한국측에서는 관련 기관인 한국전력기술(주), 한국수력원자력(주), 한전원자력연료(주) 및 안전기술원에서 원전의 출력 증강과 관련하여 수행중인 과제에 대한 간략한 설명이 있었으며, 특히 한국원자력안전기술원의 박종석 박사는 미국 규제 기관의 출력 증강에 대한 상세한 동향, 기술적 요구 사항 등을 상세하게 설명하였다.

기술 세미나에서 발표된 출력 증강 내용을 간략하게 요약하여 소개하기 전 전세계 2030년까지 원자력 에너지 발전 단계를 예측하면, 2004년 현재 전 세계 31개국에서 가동중인 상용 원자로로는 모두 441

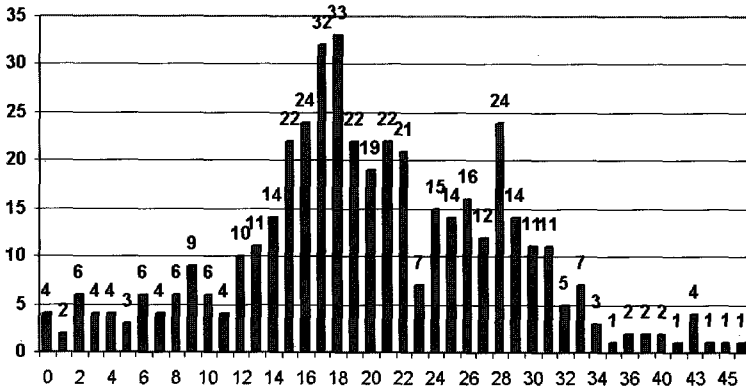
기로 세계 전력 에너지의 16%를 공급하고 있다.

가동 연수로 보면 20년 이상 운전된 원전이 220기에 이르고 25년 이상 운전한 원전은 160여기에 이르고 있다.

25년 이상 가동한 원전의 가장 중요한 관점은 안전 연속 운전(Safety Long Term Operation: SALTO)이다.

안전 연속 운전을 위하여 미국의 경우 인허가 갱신(Licensing Renewal Application : LRA), 유럽의 경우는 IAEA가 개발한 주기적 안전성 재평가(Periodic Safety Review : PSR) 제도를 이용하여 설계 수명이 지난 후에도 원전을 안전하게 운전하기 위하여 노력중에 있다.

원전의 건설 측면에서는 32기 원전이 건설되고 있으며, 2010년까지 예측하면 건설중인 원전과 운전 정지하는 원전의 기수가 거의 비슷하여 거의 같은 가동 원전의 기수인 440기가 2010년까지 운전될 것이



〈그림 1〉 가동중 원전의 운전 현황(2003년 12월 기준)

〈표 1〉 미국내 원전의 출력 증강 방법에 의한 분류

Type	Number	MWt	백분율(%)
Measurement Uncertainty Recapture	34	1,461.4	11
Stretch Power Uprate	55	7,041	56
Extended Power Uprate	12	4,035	33
Total	101	12,537.4	

며, 2010년 이후에 개량형 원전(Advanced PWR)이 미국에서 건설, 가동될 것으로 예상되고, 그 이후 원자력을 이용한 수소 생산(2020년), 그리고 미국을 중심으로 개발중인 4세대 원전(G4)이 2030년에 상용 운전될 것이며, 국제원자력기구에서 개발하고 있는 INPRO 원전이 2050년에 상용 운전을 목표로 하고 있다.

원자력발전소의 출력을 증강시키는 방법

출력 증강의 정의는 상업 운전중

발전소의 최대 출력을 증가시키는 과정이라고 미국 원자력위원회(NRC)는 규정하고 있다.

가동중 원자력발전소의 출력 증강을 통하여 원전의 경제성을 제고한다는 것은 이제 일반화된 기술이다.

출력 증강을 간단히 쉬운 우리 생활에 적용하여 기술해 본다.

1980년대에 지은 아파트는 2000년에 분양한 아파트에 비하여 공유 면적의 점유율이 크고, 실내 공간의 활용도가 낮다. 이러한 점의 불편한 점을 개선하기 위하여 앞 뒤 베란다를 거실화하는 작업을 수행하였다.

앞 베란다에 대형 창을 설치하여 조망권을 확보하고, 방 위주의 생활 개념에서 거실 위주의 생활 패턴의 변화에 따라 거실의 면적을 확대함으로써 보다 쾌적한 생활을 할 수 있을 것이다.

베란다를 거실화 하기 전에 안전 검사를 실시하여 새로운 창문의 설치, 하중의 증가 등에 대한 충분한 검토가 있어야 하는 것은 당연한 조치이다.

가동중 원전의 출력 증강은 이와 유사한 개념이다.

1 출력 증강 방법

원자력발전소의 출력을 증강시키는 방법은 일반적으로 3가지 방법이 있다.

가. Measurement Uncertainty Recapture Power Uprate (MUR)

발전소의 출력을 2% 이내로 증가시키는 방법으로 개선된 계측 기술을 사용하여 계측 기기의 불확실도를 제거함으로써 발전소의 출력을 증가시키는 방법으로 현재 가장 많이 사용되는 것은 첨단 계측 기기를 사용하여 급수량을 정확하게 측정하여 정확한 출력을 계산하여 출력을 증가시키는 방법이다.

나 Stretch Power Uprate (SPU)

7% 이내의 출력을 증가시키는 방법으로 발전소의 설계시 보수적

으로 책정된 설계 여유도를 실질적인 발전소의 운전 경험과 개선된 설계 코드를 사용하여 최적화함으로써 출력을 증가시키는 방법이다.

SPU는 계측 기기의 설정치를 변경하여야 되지만 대규모의 발전소의 보강 작업은 필요치 않다.

다. Extended Power Uprate (EPU)

발전소의 출력을 20%까지 증가시키는 대규모의 출력 증강 방법이다. 20%까지 출력을 증가시키기 위해서 2차 계통의 기기, 즉 고압 터빈, 복수 펌프 및 주발전기, 트랜스포머의 교체가 요구된다

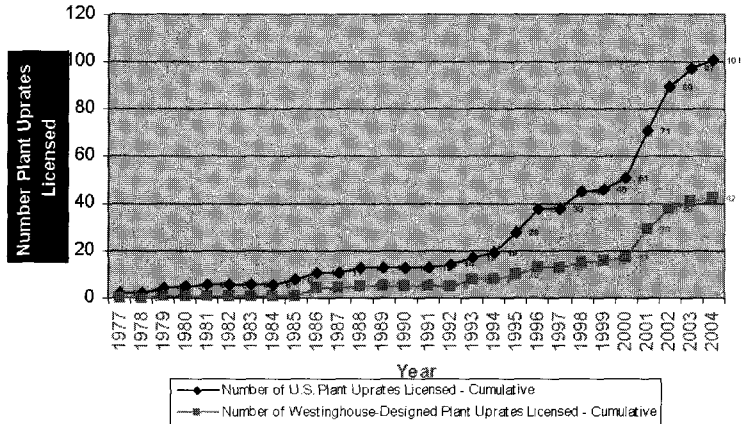
2. 미국의 가동 원전 출력 증강 현황

처음 출력 증강을 시도한 미국의 경우 1977년 Calvert Cliffs 1,2 호기가 5.5% 출력 증강을 한 후 현재까지 101개 원전이 출력 증강을 완료하여 12,537MWt(약4,000 MWe)을 추가로 획득하였다.

현재 3개 발전소가 미국원자력규제위원회(NRC)에 의하여 검토중에 있고 28기의 원전이 추가로 출력 증강을 추진할 예정이다.

출력 증강의 방법을 분류하면 <표 1>과 같다.

<그림 2>는 미국 가동 원전의 출력 증강과 웨스팅하우스 노형의 출력 증강을 도표로 표시한 것으로 1999년 이후 급격하게 출력 증강을



<그림 2> 연도별 미국의 가동 원전 출력 증강과 웨스팅하우스 노형 원전의 출력 증강

<표 2> 웨스팅하우스 노형 원전의 출력 증강 현황 및 방식

출력 증강 방식	원전 기수	Remark
Measurement Uncertainty Recapture (MUR)	22	미국 및 미국의 해외 원전 56기 대하여 출력 증강 사업 수행
Stretch Power Uprate (SPU)	22	
Extended Power Uprate (EPU)	0	
Total	44	

실시한 발전소가 증가하는 것을 알 수가 있다.

웨스팅하우스 노형 원전의 출력 증강 현황 및 방식은 주로 SPU 및 MUR 방법에 의하여 출력을 증강하였고, 노형에 따라 3단계에 걸쳐서 출력을 증강하고 실시하고 있다.

좀더 자세하게 웨스팅하우스 노형의 발전소로 출력 증강을 실시한 발전소는 <표 4>와 같다.

2. 유럽의 출력 증강 현황

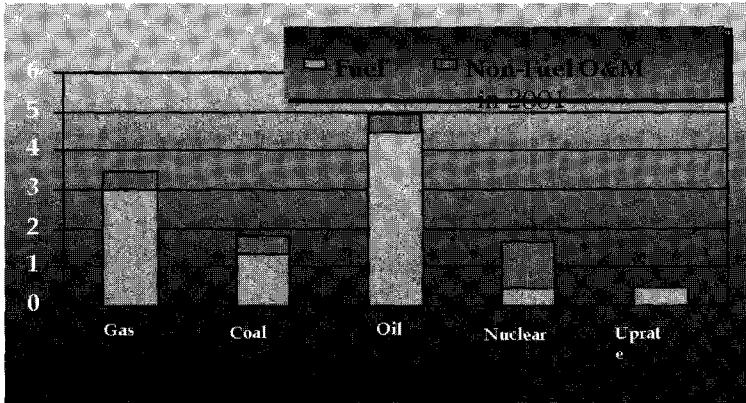
유럽의 경우 독일을 위시하여 <표 5>와 같이 많은 국가에서 출력 증강을 실시하였다.

스페인의 경우 원전 출력 증강 현황을 보다 자세히 살펴보면 <표 6>과 같이 단계적으로 운전중인 9기의 운전에 대하여 출력 증강 사업을 실시한 것을 알 수 있다.

3. 원전이 타원전보다 출력 증강을 선호하는 이유

원전을 운영하는 각국, 특히 미국에서 출력 증강을 선호하는 이유는 안전성을 유지하거나 증가시키면서 경제적인 효과를 거둘 수 있기 때문이다.

타원전의 경우, 특히 가스·화력(유류) 발전소의 경우는 거의 출력



〈그림 3〉 출력 증강에 따른 연료비 및 운전 보수 비용의 증감(미국의 경우)

〈표 3〉 웨스팅하우스 노형 원전의 3단계 출력 증강 방안

출력 증강 단계	212형 열출력(MWt)	312형 열출력(MWt)	412형 열출력(MWt)
1	1455	2150	3083
2	1650	2440	3250
3	1882	2785	3425

증강을 하지 않는다. 그 이유는 발전 단가의 많은 부분이 연료비에 해당하므로 출력을 증강하는 경우 많은 연료비가 필요할 것이다.

그러나 원자력 발전의 경우 발전 원가의 많은 부분이 연료비와 무관한 운전 및 보수 비용에 해당하므로 출력을 증강하더라도 별도의 운전 및 보수 비용이 필요치 않고, 단지 약간의 연료비만 증가하므로 경제적인 측면에서 타원료보다 원전의 출력 증강이 유리한 것을 알 수가 있다. 〈그림 3〉에서 보여주는 바와 같이 출력 증강의 경우 약간의 연료비 증가만 고려된 것을 알 수 있다.

출력 증강 사업 전 조치 사항

1. 출력 증강 사업의 타당성 조사

출력 증강의 사업을 시작하기 전 사업자는 아래의 사항에 대하여 정밀한 조사가 필요할 것이다.

- 출력 증강으로 증가된 전원이 언제 필요한지?
- 현재의 발전 단가는 얼마이며 출력 증강의 경우 어느 정도 발전 단가가 떨어질 것인지?
- 시장의 규모로 출력 증강으로 인한 경제적인 이득은?
- 출력 증강 사업이 가지는 위험도에 대한 분석
- 기술적/ 사업 관리 측면

- 인허가 측면
- 사회적 수용성 측면
- 시장의 요구
- 사업의 수행을 위하여 요구되는 재정적 규모
- 출력 증강으로 인한 원전 수거물에 대한 대책
- 운전 및 유지 보수에 대한 영향 성공적인 출력 증강 사업의 수행을 위해서는 전담 출력 증강팀이 필요하고 각 팀원은 아래의 기본적인 지식을 가지고 사업을 추진하여야 한다

- 설계 기준에 대한 지식
- 발전소 운전
- 핵연료의 영향 인자
- 원자로 용기에 구조 영향
- 2차 계통에 미치는 영향
- 송전시 그리드에 미치는 영향
- 인허가 사항 분석

11기의 원전을 운영하고, 출력 증강, 인허가 갱신(Licensing Renewal) 등을 미국에서 주도하고 있는 원전 사업자인 Entergy사는 출력 증강의 성공적인 사업 수행을 위하여 다음 요건을 추정하고 있다.

- 선행 호기의 출력 증강 경험을 후행 호기에 반영하도록 단계별로 출력 증강 실시
- 발전소 운전원과 출력 증강 전문가로 구성된 팀을 구성하여 현재의 발전소의 상황에 기반을 둔 타당성 조사 실시
- 각 공정에 출력 증강 업무를

〈표 4〉 웨스팅하우스 노형의 출력 증강 원자력발전소 현황

발전소	열출력	증가된 열출력	출력 증강 시기
Yankee Row	485	600	After Commercial Operation
San Onofre 1	1210	1351	During Design
Haddam Neck	1425	1800	After Commercial Operation
Point Beach 1	1395	1518	During Design
R.E. Ginna	1320	1520	After Commercial Operation
Turkey Point 3 & 4	2100	2200	During Design
H.B. Robinson 2	2200	2300	After Commercial Operation
D.C. Cook 2	3250	3403	During Design/Licensing
Sena	905	1040	After Commercial Operation
Salem 1	3350	3424	After Commercial Operation
North Anna 1 & 2	2785	2905	After Commercial Operation
Callaway	3425	3579	After Commercial Operation
Ringhals 2	2440	2660	After Commercial Operation
Kewaunee	1650	1772	After Commercial Operation
Indian Point	2758	3083	After Commercial Operation
Vogtle 1 & 2	3425	3579	After Commercial Operation
Wolf Creek	3425	3579	After Commercial Operation
Surry 1 & 2	2440	2554	After Commercial Operation
Tihange 1	2660	2875	After Commercial Operation
Virgil Summer	2787	2912	After Commercial Operation
Salem 1 & 2	3423	3471	After Commercial Operation
Vandellios 2	2900	2941	After Commercial Operation
Turkey Point 3 & 4	2208	2308	After Commercial Operation
Farley 1 & 2	2660	2785	After Commercial Operation
Vandellios 2	2785	2914	After Commercial Operation
Diablo Canyon 1	3350	3423	After Commercial Operation
Watts Bar 1	3425	3475	After Commercial Operation
Braidwood 1 & 2	3425	3600	After Commercial Operation
Shearon Harris	2787	2912	After Commercial Operation
South Texas 1 & 2	3821	3874	After Commercial Operation
Beaver Valley 1 & 2	2660	2697	After Commercial Operation
Indian Point 3	3025	3067.4	After Commercial Operation
Sequoyah 1&2	3423	3467	After Commercial Operation
Point Beach 1&2	1656	1679	After Commercial Operation
D.C. Cook 2	3403	3425	After Commercial Operation
Comanche Peak 1 & 2	3425	3475	After Commercial Operation
H.B. Robinson 2	2300	2339	After Commercial Operation
Asco 1 & 2	2696	2912	After Commercial Operation
Krsko	1882	2000	After Commercial Operation

〈표 5〉 유럽 원전의 출력 증강 현황 및 방식

나라	발전소명	% Uprate	승인년도	노형	출력 증강 방법
Belgium	Doel 3	10	1993	PWR 900	SPU
	Tihange 1	8	1996	PWR 870	SPU
	Tihange 2	10	2001	PWR 900	SPU
Finland	Olkiluoto	18.3	1998	BWR 700	EPU
	Loviisa	9.1	1998	VVER 440	SPU
France	Chinon 3,4	4.5	1987	PWR 900	SPU
Germany	Isar 2	2.6	1991	PWR 1300	MUR
	KKG	6		PWR 1300	SPU
	GKN 1,2	4	2000	PWR 1300	SPU
	KKU	4.4	1998	PWR 1300	SPU
Slovenia	Krsko	6.3	2000	PWR 630	SPU
Sweden	Ringhals 2	9	1989	PWR 900	EPU
	Ringhals 3	12	1995	PWR 900	EPU
Swiss	Leibstadt	14.7	1998	BWR 1000	EPU

위한 전담 직원 배치

- 경험있는 전문가를 이용한 철저한 사업 관리
- 발전소의 운전경험과 산업체의 경험을 이용하여 각 단계별 업무 검토
- 위험도 분석을 위하여 잠재적인 운전 영향 인자 분석 및 예상치 못한 사항에 대한 검토 및 설계상의 가정 사항과 발전소의 실제 상황 간의 차이 분석

또한 출력 증강 사업을 실시하기 전, 타당성 조사가 반드시 필요하다. 타당성을 조사하는 방법은 아래와 같이 분류할 수 있다.

- 주기기 공급자를 이용한 타당성 조사 방법
- 사업자가 직접 타당성 조사
- 주요한 문제점만 검토하는 방법

● 전문가 그룹을 이용한 타당성 조사 방법

현재 미국에서 타당성 조사를 위하여 사용되고 있는 가장 일반적인 경우는 주기기 공급자를 이용하여 타당성 조사를 하는 경우, 타당성 보고서의 많은 부분이 기본 설계 항목을 포함하여 약 300페이지 이상의 방대한 보고서를 작성하는 경우와 전문가 그룹을 이용하여 20~50 페이지 정도의 간략한 타당성 조사를 하는 경우가 있다.

미국 Entergy사의 경우에는 자체 설계팀을 보유하고 있는 관계로 사업자가 직접 타당성 조사를 하는 방법을 채택하고 있다.

전문가 그룹을 이용하여 타당성을 조사하는 방법의 예로 미국의 Indian Point Unit 3 원전의 경우

타당성 조사보고서의 목차는 〈표 7〉과 같고, 전체 25페이지 정도의 간략한 문서를 작성하여 출력 증강에 대한 타당성 보고서로 대체하였다.

미국의 Indian Point Unit 3 원전(PWR, 970MWe)의 타당성 보고서의 6장 출력 증강에 따른 투자비용의 비교 분석을 〈그림 4〉와 같이 수행하였다.

3,216MWt인 경우부터 3,537MWt까지 kWe당 투자 비용을 분석하여 비용 효과 분석의 기초 자료로 참조하였다.

2. 출력 증강 사업의 성공 인자

출력 증강 사업의 성공을 위하여 INPO에서는 출력 증강 사업을 전담하는 사업팀을 구성하고 타당성

〈표 6〉 스페인 원전의 출력 증강 현황

연도	발전소	정격 출력 (MWe)	증가 출력 (MWe)	설계 변경 사항
1995	Asco-1	930	17	저압 터빈 및 증기발생기 교체를 통하여 증기건도를 향상
1996	Vanderillos 2	1004	5	급수 제어 밸브를 교체하고, 2차 계통의 손실을 줄임
1996	Almaraz-1	930	53	고압, 저압 터빈 및 증기발생기 교체를 통하여 증기건도를 향상
1996	Asco-2	930	38	고압, 저압 터빈 및 증기발생기 교체를 통하여 Steam Quality를 향상
1997	Asco-1	947	21	저압 터빈 교체
	Almaraz-2	930	53	고압, 저압터빈 및 증기발생기 교체를 통하여 Steam Quality를 향상
	Cofrentes	990	35	원자로 출력을 105% 증가, 습분 분리기의 성능을 향상
1999	Vanderillos 2	1009	36	고압, 저압 터빈 교체 원자로 출력을 104.5%로 증가
	Asco-2	968	52	원자로 출력을 108%로 증가
2000	Asco-1	968	52	원자로 출력을 108%로 증가
	Almaraz-2	983	57	원자로 출력을 108%로 증가
	Cofrentes	1025	15	원자로 출력을 115%로 증가
2001	Almaraz-1	983	57	원자로 출력을 108%로 증가
	Cofrentes	1040	27	원자로 출력을 년 3% 증가하여 정격 출력이 1120MWe까지 출력 증가
2002	Cofrentes	1067	27	
2003	Cofrentes	1094	26	
2010	Cofrentes	1120	50	터빈 교체

조사 단계에서 실질적인 조건과 가정을 비교 검토하는 것을 강조하면서 성공 요인으로 〈표 8〉의 사항을 상세하게 지적하였다.

3. 출력 증강시 고려되어야 하는 사항

출력 증강에 영향을 미치는 주요 제한 조건은 다음과 같다.

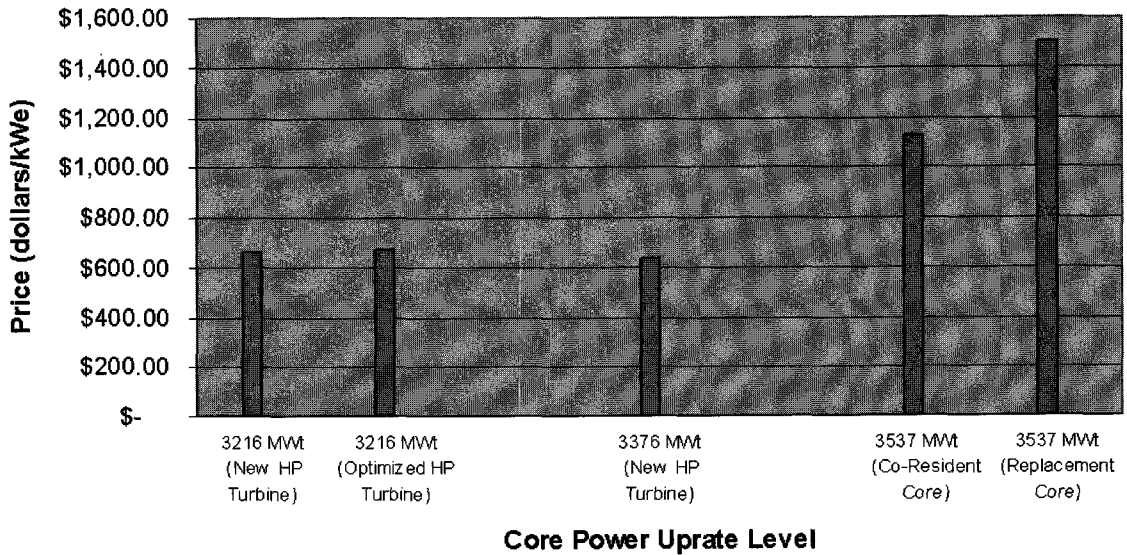
- 가. 원자로 냉각재 온도의 저하에 따른 재질의 부식
 - 증기발생기 세관 Degradation
 - 핵연료
 - Alloy 600
- 나. 증기발생기 튜브 막힘의 증가에 따른 열 전달 면적의 축소와

- 원자로 냉각재 유량의 감소
- 다. 고온관 온도와 전열 면적의 증가로 증기 압력에 영향을 미치고 증기 압력은 터빈의 특성, 습분의 전달 및 전기 출력과 관계
- 라. 발전소의 연속 운전시 고려되어야 하는 여유도는
 - 급수와 복수 계통의 여유도,
 - 출력과 유량의 제한,
 - 스위치 야드의 용량,
 - 급수 가열기 및 화학적 여유도를 확인하는 것이다.
- 마. 냉각재 평균 온도의 감소에 따른 증기 압력 감소

4. 출력 증강을 위한 분석 및 확인이 요구되는 계통

출력 증강시 고려되어야 하는 중요한 설계상의 관점은 아래와 같이 분류될 수 있다.

- 가. 주증기 시스템
 - 증기발생기의 건조기 상판부에 주증기량의 증가로 인하여 기대치 않은 공조 진공이 발행할 우려가 있다. 또한 주증기 압력의 설정치의 여유도 감소로 인하여 순간적으로 주증기 차단 신호를 발생할 우려가 있다.
- 나. 주급수 가열기 및 증기 추출 시스템
 - 주급수량의 증가로 인한 주급수



〈그림 4〉 Indian Point Unit 3 원전의 예상된 출력 증강에 따른 투자 비용 비교 분석

〈표 7〉 전문가 그룹에 의한 타당성 조사 보고서 목차

장	목차
1	서론
2	전문가 검토 절차 수립과 및 주요 검토 항목
3	3216, 3376 and 3537 MWt 출력 증강시 주요 기술 검토 항목, 인허가, 주기기 및 BOP 계통 기술 검토
4	예상된 출력 증강치에 대한 위험도 평가
5	출력 증강 사업의 공정 검토
6	예상된 출력 증강치에 대한 투자 비용 분석
7	전문가 그룹에 의한 주요 결정 사항
8	기타 권고 사항

가열기의 세관 마모, 추출관의 격리 판(Impingement plate)의 손상 그리고 가열기 용기의 마모로 인한 Thinning 현상

다. 터빈 제어 시스템

출력 증강에 따른 운전 조건 변화로 운전원은 변경된 운전 조건에 대

하여 충분히 교육을 받아야 한다. 많은 경우 운전 영역의 변화의 효과를 운전원이 정확하게 이해하지 못하는 경우가 많다.

라. 주급수 유량 및 주급수 온도의 변화

주급수 유량의 변화로 인한 온도

변화가 노심에 어떠한 영향을 미칠 것인지 검토가 없이 수행된 경우가 있다.

마. 발전기 고정자 제어 시스템

출력의 증가로 말미암아 발전기 고정자의 냉각 가스 온도가 최고점까지 증가할 수가 있다. 이러한 영향으로 발전기가 운전 영역의 한계 점에서 운전될 우려도 있다.

바. 트랜스 포머의 냉각 시스템

출력의 증가로 변압기의 냉각 오일의 온도가 최고점까지 올라갈 수가 있다. 미국에 있는 Vermont Yankee 발전소 (BWR, 506 MWe)에서 최근 출력 증강 사업 후 발전소의 주변압기가 화재로 손상되었다, 분명하게 원인이 밝혀지지

〈표 8〉 출력 증강 사업의 성공 요인(INPO에서 제시)

성공 요인	주요 인자	세부 사항
1	경영층의 절대적인 지지와 관심	경영층은 출력 증강 조직의 목표, 각 단계별 우선 사항, 안전의 중요성 강조. 사업에 참여하는 각 기관의 업무 분담에 대한 확실한 이해와 각 기관간의 업무 연계에 대하여 분명한 지침을 주어야 한다.
2	효율적인 사업 관리	출력 증강 사업은 여러 기관이 동시에 참여하여야 하는 사업이므로 각 기관간의 사업의 연계, 관리가 무엇보다도 중요하다. 사업의 규모, 각 사업 단계의 역무 범위, 예산 및 허용된 기간 등에 대하여 각 기관의 공통의 정보를 가지도록 하여, 공통의 인식을 가진 상태에서 사업 관리가 필요하다
3	현재 발전소 상태의 정확한 분석, 평가	현재 가동중 발전의 여유도, 성능 분석 등이 문서화되어, 발전소의 여유도 및 가정 사항을 검토한 결과를 출력 증강의 계획시 사용될 수 있다.
4	운전 경험의 반영	출력 증강 계획 및 주요 공정표 작성시 발전소의 운전 경험과 산업체의 경험이 고려되어야 한다.
5	출력 증강 후 검사 및 감시 계획	출력 증강 후 발전소의 성능 변화를 예상하여 주요 운전 인자의 변화를 설정하여 설정치의 변화를 각 단계별로 확인하여야 한다. 실질적으로 출력 증강 후 실제 운전 인자와 설계 인자 간의 차이가 발생한 경우 그 원인을 찾고 이해하는 데 많은 시간을 소모하였다. 따라서 예상되는 원인을 분석하므로 필요시 사용할 수 있다.
6	사업의 주체에 대한 분명한 이해와 주인 의식	출력 증강 사업은 일반적으로 주기기 공급자와 설계 회사가 수행한다. 그러나 출력 증강의 최종 사용자가 발전소의 운전원이라는 사실에 직시하여, 운전원은 주인 의식을 가지고 출력증강 사업에 적극적으로 참여하여야 하고, 설계자 및 주기기 공급자는 발전소와 긴밀한 유대 관계를 가져야 한다.
7	예상되는 설계 결함	출력 증강 사업시 예상되는 설계 결함을 분석하여 지속적인 설계 변경이 가능하여야 한다.
8	교육 훈련	출력 증강 후 적절한 교육 훈련이 필요하다. 운전원과 보수 요원의 교육이 필요하고, 특히 모의제어반의 내부 설계를 수정하여 운전치의 확인이 필요하다. 또한 설계 요원의 교육 등이 필요하다.
9	운전 변화에 대한 인식	전출력에서 각 단계별 출력 변화에 대한 천이, 계절별 운전에 대한 고려가 필요하고, 노심 패턴의 변화, 제어봉의 사용에 따른 출력의 운전에 대한 인식이 필요하다.

는 않았지만 출력 증강도 그 원인이 될 수 있다는 사실을 고려하여야 한다.

사. 그리드의 안전성

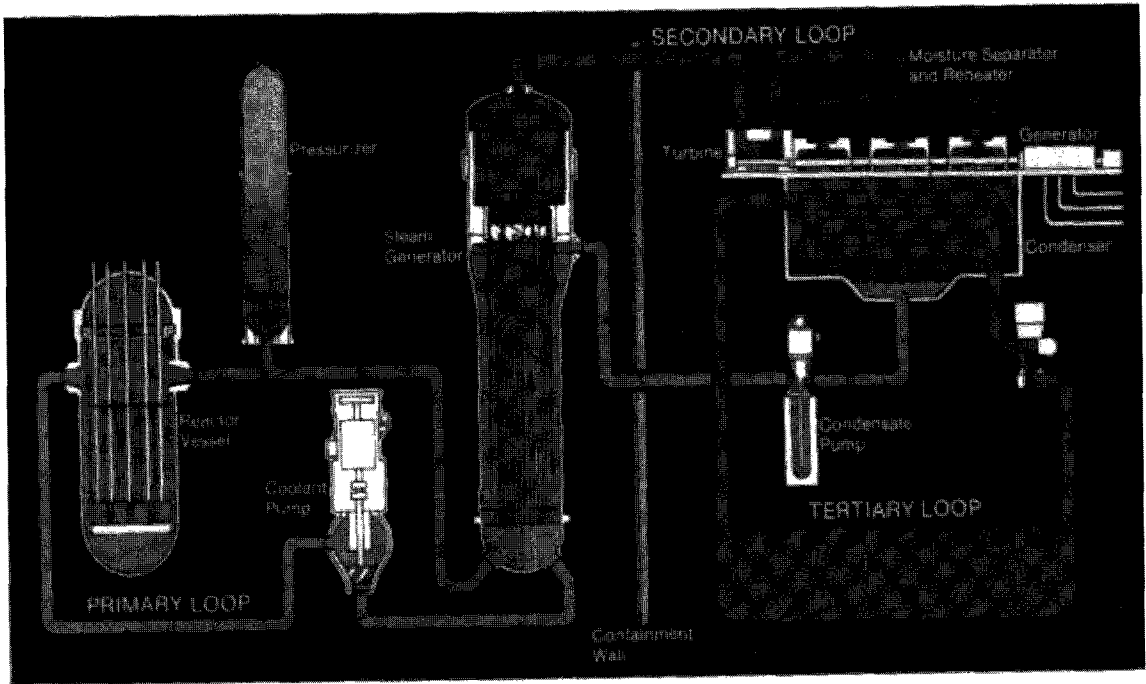
출력의 7% 이상 증가하는 EPU의 경우 증가된 출력이 그리드에 미치는 영향을 조사하여야 한다. 최근 2002년 6월 11~12일 INPO가 주관한 회의에서 증강된 출력이 그리드에 미치는 영향의 조사가 반드시

필요하고 특히 출력 상실의 경우 검토도 필요하다고 언급되었다.

재검토되어야 하는 각 계통 및 주요 검토 사항을 제시하면 다음과 같다.

- Setpoint analysis
- Safety injection system
- Auxiliary feedwater - system
- Pressurizer Safety valves

- Pressurizer relief and spray valves
- Steam generator relief valves
- Residual heat removal system
- Containment spray system flow capabilities
- Chemical and volume control system



(그림 5) 웨스팅하우스 노형의 1,2차 계통 간략도

- Reactor make-up water system
- Spent fuel pit cooling system
- Component cooling system
- Steam dump system
- Essential service water system
- Ventilation and air conditioning systems
- Turbine-generator system evaluation
- NSSS instrumentation recalibration

- Extraction steam system
- Turbine closed cycle cooling system
- Electrical system analysis work
- Bop instrumentation and controls
- Bop thermal/hydraulic analyses
- Bop piping

4. 출력 증강 실시 후 문제점의 분석

미국의 경우 지난 7년 동안 출력 증강 사업의 부적절한 안전 해석,

설계 수행 등으로 인하여 40건 이상의 문제점이 보고 되었다. 많은 경우 출력 증강 후 기기의 파손, 예상치 못한 발전소 계통의 반응 혹은 운전시 운전원이 당황하게 만든 경우가 보고되었다.

이러한 경우 출력 증강이 철저한 문서 관리, 통제된 시스템이 없는 경우 더욱 문제점의 해결을 어렵게 만들고 중요한 결과를 가져올 우려가 있다. 구체적인 예로서 출력 증강을 기실시한 PWR 및 BWR에서 현재까지 제기된 문제점은 다음과 같다.

- Quad Cities 원전 (BWR,

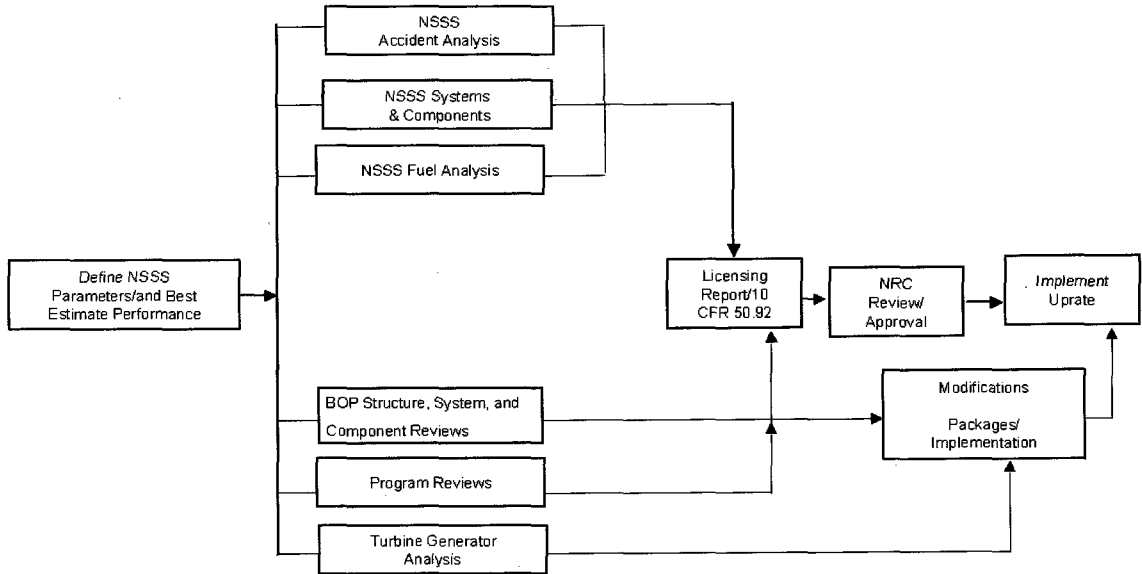
〈표 9〉 미국 Waterford 3 원전 출력 증강에 대한 위험도 분석

위험 분야	사업 초기 순위	현재 순위	위험 감소 방안	현황
Budget	High	High	Dedicated cost analyst assigned to EPU project team. Oversight structure with regular reporting to executives. Use of CPI and SPI and earned value indicators. Control of contingency funds via PIF process.	Need to increase contingency pool before outage implementation. Continued actions warranted to maintain under budget efforts for submittal report
Operational	Medium	High	Contingency readiness on Main Generator Rewind in RF12. Triggers on Generator rewind being monitored closely.	Main Generator Cooling concerns exist. Operations member on project full time. Main Generator Rotor potential shorting and Exciter banding degradation interface with EPU activities.
Contracts	Low	Low	Established an MOU for Turbine Services. Firm Price contracts for Generator and High Pressure turbine with agreements applicable to the fleet	All contract in place.
Regulatory	Medium	Medium	Work the project plan to successful completion. Communication with management through the oversight committees. Up front NRC interface. Using new standard review template. Allowed 18 months for approval.	Challenged to meet submittal milestone, 9/30/2003 due to calculations delayed
Technical-Equipment Limitations	Medium	High	Feasibility study and existing PUR documentation.	Emergent EPU issues - Main Generator Core Hot Spots, Main Transformer, SBLOCA HPSI flow margin, HPT retained component machining.
Technical - Project Execution	Medium	High	Integrated Project Team approach, Structured oversight	Added EN Project Director April 03. EOI critical resource turnover remains a concern.
Grid Connection	Medium	Low	Interface with Transmission & EMO	Determined to use WF bus as grid interconnection and de rate WF1 and 2 if needed to comply with thermal overloads. Generator Output Breaker installation plan resolved.

770 Mwe)의 증기 발생기 건조기 (Steam Dryer)의 파손
 ● Monticellc(BWR, 597Mwe)

원전의 주급수 유량의 측정기의 오동작으로 인한 100% 이상의 출력으로 운전

- Dresden (BWR, 787Mwe) 원전의 주급수 차단 신호의 작동
- Browns Ferry(BWR,1118



〈그림 6〉 원전 출력 증강에 대한 인허가 추진도(미국의 경우)

Mwe) 원전의 급수 가열기의 튜브의 손상과 Shell의 Thinning 현상

이러한 관점에서 보고된 중요한 사고 현황은 다음과 같다.

- 유체 진동, 증기발생기 습분 분리판 (비등 경수로 경우)의 고 주파 진동 등으로 인한 예상치 못한 발전소 장기 정지 기간을 가져올 수가 있다.
- 교육 훈련의 부족으로 인하여 2차 계통의 특성 변화를 충분히 인식치 못하여 발전소 천이 현상시 주요 기기의 손상이 우려된다.
- 기대치 않은 발전소의 운전으

로 인하여 기기의 성능 저하, 설계 여유도 및 운전 여유도의 감소가 우려될 수도 있다.

- 일부 원전에서 허가된 이상의 출력으로 운전된 경우가 있었다. 주된 원인은 열출력의 계산 착오와 이에 따른 2차 계통의 운전 특성의 이해 부족으로 허가된 이상의 전기 출력으로 운전한 경우가 있다.

또한 출력 증강 사업을 통하여 많은 원전에서 지난 경험으로부터 문제점 및 교훈을 발견할 수 있다.

- 새로운 설정치를 검토하는 동안 많은 설계 기준 문제점이 발견

- 기기 공급자가 사전의 작업을 통하여 기사용된 방법론이나 가정 사항 등을 확인
- 출력 증강과 핵연료의 파손과의 상관 관계를 이해
- 여유도의 변화에 대한 이해와 정확한 절차의 확립
- 실제 발전소의 값과 과정에 대하여 출력 증강시 요구되는 설계 요구 사항과 가정의 개발

5. 위험도 분석

사업을 수행하기 전 혹은 사업 수행중 항상 수행중인 사업에 대한 위험도 분석이 필요하다.

위험도 인자는 ● 예산 ● 운전

● 인허가 ● 계약 ● 기술적 문제점 ● 그리드 연결 ● 사업 관리 문제점 등이 주요한 위험도 분석 인자가 될 것이다.

각 인자에 대하여 사업 초기, 현재의 위험도 순위를 높음, 중간 및 낮음으로 분류하고, 위험도 감소 방안 및 현황을 분석하므로 위험도를 관리할 수가 있다.

미국의 Waterford 3 원전(CE PWR 2 loop 3441 MWt)의 경우 2002년 MUR 방법으로 1.5% 출력을 증가하고, 2005년 EPU 방법을 이용하여 8.0% 출력 증강을 수행하면서 <표 9>와 같이 위험도 분석을 수행하였다.

6. 미국 원자력규제위원회 (USNRC)의 출력 증강 인허가 과정 및 제반 법규

출력 증강을 위한 미국원자력위원회의 제반 법규는 10 CFR 50.90, 50.91, and 50.92.에 의해서 인허가 심사가 이루어지고 각 법규는 다음과 같이 구성되어 있다.

- 10CFR 50.90 Application for amendment of license or Construction permit
- 10CFR 50.91 Notice for public comment
- 10CFR 50.92 Issuance of amendment

인허가 과정에서 주요한 관점은 다음과 같다.

- 출력 증강에 따른 각 계통, 구조 및 기기의 건전성을 검토
- 운전 여유도와 안전 여유도의 확보
- 출력 증강에 따른 최종 안전성 보고서 개정 및 안전성 분석 방법론 검토

이러한 관점에서 비상 노심 냉각의 수행에 따른 가압 열충격(Pressurized Thermal Shock: PTS) 영향 분석 및 냉각에 따른 영향 완화 방안, 그리고 설정치 변경에 따른 위험도 증가 또한 급격한 운전 모드의 변경에 따른 기대치 않은 운전에 대한 운전원의 대처 방안 등이 고려된다.

<그림 6>은 미국의 경우 인허가 필요한 각종 과정 및 방안을 보여주고 있다.

결론

국내에서는 출력 증강이 처음 적용되는 기술로서 고리 3,4호기 및 영광 1,2호기(PWR, 980 Mwe)에 대해 5% 내외의 정격 출력 증강을 위한 기술 개발과 웨스팅하우스 노형 원전 설계 운영 기술 및 향후 가동 원전 출력 증강 설계 기술의 자립을 목표로 주관 기관인 한수원(주)를 비롯해 국내 위탁 기관(KOPEC, KNFC, KEPRI) 및 해외 설계사(Westinghouse, Becthel)가 공동으로 2002년 9월에 시

작하여 2007년 6월까지 기술 개발을 완료할 예정이며, 1단계 역무인 타당성 검토가 2003년 11월 30일 완료되어 현재 2단계 역무(상세 분석 및 평가)를 수행중에 있으며, 2단계 역무 종료 시점인 2005년 5월부터는 3 단계 역무인 인허가 업무를 수행하고자 추진중에 있다.

또한 안전기술원에서 2002년부터 기본 연구 과제로 출력 증강에 관한 안전성 검토에 관한 연구를 수행하였고, 그 연구 범위에 출력 증강 방법, 미국을 위시한 각국의 규제 방안, 안전 평가 평가 과정의 주요 쟁점 등을 연구하고 있다.

IAEA에서도 “Implications of Power Uprates on Safety Margins on Nuclear Power Plants” (2003년 10월, 비엔나) 제목으로 출력 증강에 대한 현황 및 안전 여유도에 정의 및 개념, 출력 증강 실시에 따른 각 회원국의 현황을 조사하였다.

필자가 근무하고 있는 원자력발전국(Nuclear Power Division)에서는 2006년 사업으로 출력 증강 사업을 위한 기본 지침서를 개발할 예정이다.

현재 한국수력원자력(주)를 중심으로 추진중인 출력 증강 사업에 본 논문이 조금이나마 도움이 되었으면 하는 것이 필자의 작은 바람이다. ☺