

## 東歐圈 小型 PWR의 運轉實績

本稿는 Comecon 국가에서 運轉되고 있는 小型 PWR 발전소의 운전실적을 서방의 것과 비교 분석한 것으로 NEI誌 11月號에서 발췌한 것이다.

체르노빌사고는 소련의 원자력발전사업과 전반적인 기술분야에 큰 충격을 주었다. 더구나 최근 소련과 기타 동구권 국가간의 결속이 와해됨에 따라 소련의 주변국들은 소련으로부터 받은 기술에 불만을 나타내기 시작했고 특히 발전용 원자로의 결함을 폭로하기도 했다.

그러나 원자력발전은 이들 나라에서는 단·중기적으로 불가결한 것이다. 동구권 5개국은 원자력발전소를 가동하고 있는데 그 발전량은 전체발전량의 10~50%에 이르고 있다(표1).

환경문제로 논란이 되고 있는 다른 종류의 발전소(특히 갈탄발전소)를 가동하고 있음에도 불구하고 동유럽에서는 벌써부터 심한 전력난을 겪고 있다. 이런 점으로 미루어 보아 운전가

능한 어떠한 형태의 발전소를 정지한다는 것은 심각한 결과를 가져올 것이다.

이들 국가는 서방국가들에게 원자력사업을 지원해줄 것을 바라고 있다. 기존 발전소에 대해서도 그들은 이를 폐쇄시킬 것인지 아니면 개선할 것인지를 결정해야 하고 이와 함께 운전·보수의 개선방안도 마련해야 한다. 또한 건설중인 발전소에 대해서도 공사를 중도에 포기할 것인지 아니면 완성할 것인지, 설계변경을 할 것인지, 서방국 회사들에게 지원을 요청할 것인지, 어디에 주문할 것인지에 대해 결정을 내리지 않으면 안된다.

이것은 매우 복잡한 문제로 이러한 결정을 내리기 위해서는 전력수요예측, 전략적인 발전

〈표1〉 원자력 발전 점유율

	Nuclear capacity	Total capacity	Nuclear gen(Twh)	1988 %	of total gen (1987)
Bulgaria	2760	9677	16.0	35.6	(28.6)
Czechoslovakia	3434	18834	21.7	26.7	(25.9)
German DR	1835	21293	10.4	9.5	(10.0)
Hungary	1760	6305	12.6	48.9	(39.2)
USSR	36056	310066	215.7	12.6	(11.2)
USA	101885	670950	526.9	19.5	(17.7)
Japan	28966	169399	167.8	23.4	(31.2)

계획, 국제적인 채무관리 등을 검토해야 한다. 가장 중요한 것은 현재 가지고 있는 발전소 설계, 건설, 보수 및 운전에 관한 기술을 서방국의 것과 비교검토하는 일이다. 과거에는 가장 기초적인 자료를 서방의 것과 비교검토하는데도 운전성능, 건설비, 건설기간 등에 관한 신빙성있는 자료를 동유럽으로 부터 입수할 수 없어 어려움을 겪었다.

그러나 소련의 개방정책이 큰 변화를 가져다 주어 소련은 1987년부터 IAEA의 연차보고서 작성용으로 발전용 원자력에 관한 모든 운전기록을 제공해오고 있다. Comecon 국가들도 마찬가지여서 동독을 제외한 모든 국가들이 IAEA에 자료를 제공하게 되었다. 이에 따라 동유럽 원자력발전소의 모든 운전기록을 조사하고 이를 서방의 것과 비교할 수 있게 되었다.

### 동구권의 원자로

현재 가동중인 Comecon 국가들의 원자로는 모두 소련형으로 PWR 또는 RBMK형으로 되어 있는데 RBMK형은 소련내에서만 건설되고 있다. 이 2가지 노형은 각각 2가지 용량으로 나오는데 PWR은 440MWe와 1,000MWe로 되어있다(표2참조). 현재 건설중인 대부분의 유니트들은 1,000MWe급의 PWR인데 실제로 어떤 프로젝트가 완전히 수행될지는 아직 분명치 않다. 지금까지 많은 프로젝트가 발주단계에서 취소되었으며 그외의 것도 서방의 기술과 공급업자들에 의해 완성될 것이라는 추측도 나

돌고 있다.

RBMK의 특징은 PWR에서와 같은 매우 전문적인 제작기술을 요하는 압력용기같은 설비가 필요하지 않다는 것이다. 이러한 특성 때문에 소련의 원자력시설은 단시일내에 건설할 수 있었는데 실제로 최초의 1,000MWe급 RBMK의 건설기간이 같은 용량의 PWR보다 7년이나 빨랐다. 그러나 체르노빌사고 이전에도 PWR는 계속 주문이 늘어나고 있었다. 현재 건설중인 RBMK는 1기 뿐이고 가동중인 체르노빌의 나머지 유니트들도 2,3년내에 폐쇄될 예정이어서 다른 RBMK도 설계수명을 다 할 것으로는 보이지 않는다.

### 운전성능

동유럽 원자로의 성능을 비교 평가하는데 기준이 되는 것은 일본과 미국의 원자로인데 이 두 나라는 성능비교표에서 각각 비교적 높고 낮은 것으로 나타나 있다. WH사형 PWR이 소련형 PWR를 평가하는데는 특히 좋은 기준이 될 것이다.

〈표3〉을 보면 원자로의 형식 및 용량 등을 감안한 기준으로 볼 때 소련형의 원자료가 일본과 미국 것의 중간에 위치하고 그외의 동유럽 것은 매우 좋은 것으로 나타나 있다. 그러나 부하율에 큰 비중을 두면 전체적인 성능수준을 알 수 없고 기술수준과 유니트 용량간에 상당한 차가 나는지에 대해서도 파악하기가 어렵다.

〈표2〉 Comecon 국가의 운전중인 발전소

	Reactor type	No of units	Year first commercial service
USSR	RBMK 1000	14	1974-90
USSR	RBMK 1500	2	1985-88
USSR	PWR 440	9	1970-84
USSR	PWR 1000	16	1981-90
Bulgaria	PWR 440	4	1974-82
Bulgaria	PWR 1000	1	1988
Czechoslovakia	PWR 440	8	1979-87
German DR	PWR 440	4	1974-79
Hungary	PWR 440	4	1983-87

〈표3〉 발전소 운전실적(1988~89)

Country	Load factor (no of units)	
	1987	1988
USSR	69.4(32)	70.6(35)
Bulgaria	80.1(4)	76.1(4)
Czechoslovakia	76.4(6)	78.2(8)
Hungary	86.6(3)	88.1(4)
USA	59.5(91)	62.9(97)
Japan	78.1(31)	70.3(34)
Finland	93.0(2)	90.0(2)
Yugoslavia	77.3(1)	70.9(1)

BWR와 WH형이 아닌 PWR를 제외하고 IAEA 자료를 적용하면 출력손실과 정지빈도의 원인을 파악하는데 큰 도움이 된다. 〈표4〉에서 원자로를 형식과 용량에 따라 구분하고 출력손실을 발전소의 완전정지, 용량축소 및 출력제한(여기서는 운전손실로 표기했다)의 3가지 손실로 구분했다. 조사분석을 통해 440MWe급 소련형 PWR의 성능이 압력용기 등의 안전성을 고려하지 않는다면 전지역을 통해 고루 좋다는 것을 알 수 있다. 이 성능수준은 최상급은 아니더라도 국제기준으로 보아서는 좋은 편이다.

소련의 원자력기술이 우수하다던지 동유럽국가들이 높은 부하율로 발전소를 가동시키고 있다던지 하는 것은 놀라운 일이 못된다. 핀란드에 건설된 2기의 소련형 440MWe PWR는 좋은 기록을 남기고 있고 동구권에서 가동되고

있는 유일한 서방형 원자로인 WH사의 600MWe급 원자로도 유고에서 좋은 부하율로 가동되고 있다. 일반적으로 말해 많은 동유럽 회사들, 특히 헝가리, 체코, 폴란드 회사들은 역사상 전기공학이 시작된 초기부터 重電機 분야에 참여한 긴 역사와 함께 명성을 얻고 있는 업체들이다.

그러나 소련형의 1,000MWe급 PWR의 성능은 크게 떨어지는데 이는 소형/대형 PWR 간에 성능차가 많이 나고 있는 미국의 경우와 같다. 그 원인은 대형의 PWR은 설계·건설·운전과정에서 소형의 경우 보다 해야할 일이 많기 때문이다. 이것은 모든 회사에 해당되는 말은 아니지만 일부 전력회사 및 메이커에서 이러한 현상이 엿보인다.

RBMK의 운전성능은 놀랄만하다. 체르노빌 사고가 아직도 기억에 생생한데 이 유니트들은 사고전에 매우 조심스럽게 운전되었고 각 유니트는 안전설비를 강화하기 위해 보수공사가 시행되기도 했다. 이러한 상황에서 그 만큼 높은 부하율을 달성했다면 적어도 정상적인 운전 하에서는 RBMK는 우수한 성능을 가지고 있다고 볼 수 있다.

### 정지원인

발전소의 완전정지는 출력의 손실을 가져오는데 정지시간을 더 세분해보면 연료장전을 위

〈표4〉 Comecon 국가의 원자로 출력손실(%)원인(1987~88)

	Reactor type / size	Reactor years	Load factor	Shutdown losses	Derating losses	Operating losses
USSR	PWR 1000	17	65.0	30.3	0.1	4.5
USSR	RBMK 1000	26	74.6	20.5	1.1	3.8
USSR	PWR 440	22	77.9	16.4	0.5	5.2
Bulgaria	PWR 440	8	78.1	12.2	-0.7	10.4
Czechoslovakia	PWR 440	14	77.6	20.4	-2.6	4.7
Hungary	PWR 440	7	87.4	14.1	-1.3	-0.2
All Comecon	PWR 440	51	77.9	16.4	0.5	5.2
USA	PWR <700	12	85.3	11.6	3.2	-0.1
USA	PWR >700	67	62.4	31.0	1.0	5.6
Japan	PWR <700	12	76.6	22.9	0.0	0.5
Japan	PWR >700	19	72.5	27.1	0.0	0.3

한 정기적인 정지시간과 보수작업을 위한 시간이 대부분으로 되어 있다. 어떠한 발전소도 각종 설비의 고장에서 벗어날 수 없다. 이중에서 증기발생기 문제는 예외적인 것으로 이것은 모든 나라의 모든 용량의 PWR에서 일어나고 있다. 소련의 1,000MWe급 PWR도 예외는 아니어서 증기발생기 고장만으로 7%의 출력손실을 내고 있다. 이것은 앞으로 2,3년내에 소련내의 모든 증기발생기를 교체 내지 보수하기로 한 그들의 결정을 잘 말해주고 있다.

〈표5〉를 보면 노형간의 정지빈도 차를 잘 알 수 있는데 계획정지가 不時정지 보다 훨씬 적은 것으로 나타나 있다. 또 이 표를 통해 소형 PWR(WH사형, 소령형 모두)와 RBMK의 우수한 성능과, 일본 유니트의 뛰어난 신뢰성을 엿볼 수 있다. 예를 들어 일본의 소형 PWR의 불시정지 빈도 0.15는 이러한 유니트가 9년에 한번 불시정지를 한다는 것을 의미한다.

### 조사결과 분석

이 조사결과는 동유럽 원자력분야의 전체적인 기술수준과 안전성 및 경제성을 평가하는데 있어 중요한 의미를 갖는다. 운전성능과 경제성의 상관관계는 가장 다루기 쉬운 일이며 이를 3가지로 요약할 수 있다.

- 첫째, 발전소 출력이 클수록 발전소 건설을 위한 투자의 보수율이 높다.

- 둘째, 원자력발전소를 가동시킬 수 없을 때는 이 발전소가 발전하고 있던 전력을 다른 발전소에서 대신 해야 한다. 대체 전원이 원자력발전소의 발전원가 보다 높아지는 것은 불가피하다. 대체 전력비는 원자력발전소 정지비용 중에서 가장 큰 비중을 차지한다.

- 셋째, 정지되었던 발전소를 복귀시킬 때 발생하는 운전보수비용(보수 및 연료장전 비용)을 고려해야 한다.

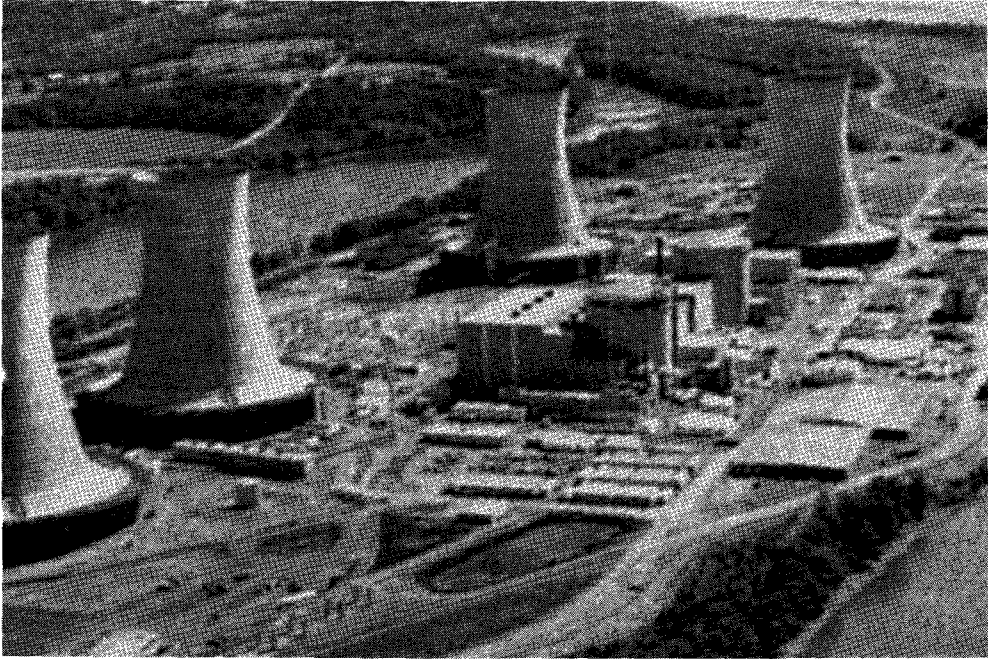
미국에서는 운전보수비용이 높아지고 있기 때문에 일부 발전소는 폐쇄될 가능성도 있다. 부하율이 낮으면 많은 설비고장을 일으키기 때문에 운전보수비용의 상승을 가져온다. 따라서 우수한 운전성능은 원자력발전소의 경제성을 위해서 필요한 조건이기는 하지만 충분한 조건은 되지 못한다.

운전성능 특히 신뢰성과 안전성의 연관성은 비교적 분명하지가 않다. 발전소의 안전성은 발전소의 기본설계 특성, 즉 발전소 이상시의 대응능력과 운전원 과실을 카버할 수 있는 능력 등에 의해 많이 좌우되는 것이다. 발전소의 안전성은 또 발전소관리자의 운전관리방식, 즉 부하운전중에 허용되는 비정상적인 운전절차 등에 의해서도 많이 좌우된다.

체르노빌사고의 경우에는 RBMK 원자로와 운전관리방식이 이런 점에서 결함이 있었고 훌륭한 원자로의 기준과 숙련된 운전원도 이러한 결함을 일부 밖에 카버하지 못했다. 또 설계상

〈표5〉 Comecon 국가 원자로의 연간 정지 회수(1987~88)

Country	Reactor type /size	Reactor years	Overall frequency	Forced frequency
USSR	RBMK 1000	26	3.93	1.72
USSR	PWR 1000	17	11.13	8.68
USSR	PWR 440	22	3.86	2.13
Bulgaria	PWR 440	8	4.21	3.21
Czechoslovakia	PWR 440	14	4.07	2.34
Hungary	PWR 440	7	3.48	2.32
All Comecon	PWR 440	51	3.92	2.38
USA	PWR <700	12	4.43	2.70
USA	PWR >700	67	12.22	9.29
Japan	PWR <700	12	1.14	0.15
Japan	PWR >700	19	1.86	0.75



의 안전성도 중요한데 이것은 특히 사고시의 손상을 방지하기 위한 효과적인 안전설비와 그 특성을 의미한다. TMI사고 당시 주변환경에 방사능 누출이 거의 없었다는 것도 서방의 철저한 안전방식이 주효했던 것으로 보인다.

기본설계 요소들은 대부분 발전소 건설때 고정되는 것이지만 일부 요소들은 시간이 경과함에 따라 변동되는데 이것은 주로 건설·운전·보수 등의 품질과 관계가 있다. 특히 건설과정에서의 품질관리, 효과적인 보수절차, 운전원의 숙련도 및 훈련 등은 발전소의 안전에 큰 영향을 미친다. 체르노빌, TMI, Browns Ferry(화재사고)의 사고를 포함한 모든 원전사고는 이러한 요소들이 큰 영향을 주었다.

보수절차가 부실하면 설비고장을 일으킨다. 안전성과 신뢰성의 연관성이 절대적인 것은 아니어서 신뢰성이 낮은 발전소가 반드시 불안정한 것은 아니고 신뢰성이 높은 발전소가 반드시 안전하다고는 할 수 없다. 즉, 이 두가지 요소가 모두 좋으려면 모든 요소들이 조화를 이루어야 한다.

이 조사분석에서 관심을 끈 것은 동유럽에서

달성한 높은 부하율과 신뢰성이 발전소설비 및 절차와 어느 정도 연관성이 있느냐 하는 것이었다. 왜냐하면 동유럽의 발전소설비와 절차는 서방의 것 보다 더 융통성이 부여돼 있기 때문이다. 체르노빌사고 발생 직후에 운전원과 관리자들이 고의적으로 비상상태를 소홀히 다룬 것 같지는 않다. 이 발전소의 설비와 개선내용을 서방의 기준과 비교해본바 소련형 발전소가 서방의 것보다 더 빈번하게 자동 또는 수동정지한 것으로 나타났는데 이것이 전체적인 운전 성능에 상당히 나쁜 영향을 미친 것 같다. 더 연구해볼 일이다.

Comecon 국가 원자력발전소의 첫번째 개선 사항은 기본설계 및 운전관리면의 안전성문제다. 체르노빌사고를 비롯한 그외의 대형사고에 관한 보고서들은 발전소 설계와 운전의 결함을 지적하고 있지만 소형 PWR와 같은 운전성능을 보면 원자로의 설계기준이 다 나쁘다고는 할 수 없다. 따라서 서방국들은 운전원의 숙련도를 바탕으로 안전성과 신뢰성을 높이도록 노력해야 할 것이다.