

향상된 蒸氣發生器 交替技術

지난 10년간 실시된 증기발생기 교체공사는 개선된 기술과 짧은 공기 및 낮은 피폭선량을 보여주었다. 따라서 일부 전력회사들은 이러한 증기발생기 교체 경험을 살려 이를 앞으로의 발전소설계에 반영해야 한다고 생각하고 있다.

PWR 증기발생기가 발전소 수명기간중 유지될 것이라는 예상은 지난 10년간 잘못된 것으로 나타났다. 구형 증기발생기는 튜브 denting, pitting, 마모, 응력부식균열, 입자간 침식, 튜브진동 등 많은 문제를 일으켰다. 더구나 점검회수가 늘어나고 점검해야 할 튜브의 수도 많아졌다. 튜브 플러징 및 슬리빙작업은 연료장전작업이 있을 때마다 실시되는 상례적인 보수작업이 되었다.

응력제거, shotpeening, AVT로의 전환, 발전소운전중의 2차측 수화학에 대한 감시강화, 발전소정지중의 증기발생기 보관 등의 대응책이 이같은 문제들을 완화 내지 늦추기 위해 강구되었다.

이러한 문제때문에 증기발생기가 결국 100% 출력을 낼 수 없을 것이라는 판단아래 전력회사들은 증기발생기 교체를 필연적인 선택으로 보고 있다.

증기발생기 교체

〈표 1〉은 이미 교체를 끝냈거나 현재 계획단계에 있는 증기발생기를 표기한 것이다. 기존

의 증기발생기의 평균수명은 약 14년으로 당초 예상했던 30~40년 보다 훨씬 못미치는 것이다.

여기에 표기한 교체용 증기발생기의 공급업자로는 대부분 당초의 공급업자가 선정되었다. 교체용 증기발생기는 과거의 문제점을 해소할 수 있도록 개조되었는데 그 내용을 보면 다음과 같다.

- 튜브시트의 팽창공간을 확대하고 십자(quatrefoil)형 또는 계란상자(egg-crate)형의 튜브지지판을 설치하고 있다.

- denting을 방지하기 위해 튜브지지판을 탄소강에서 스테인레스강으로 바꿨다.

- 튜브부식을 방지하기 위해 WH사와 Framatome사에서는 교체용 증기발생기에 Inconel-600 대신에 Inconel-690TT를 사용하고 있다. Incoloy-800 재질은 실적이 좋은 것으로 밝혀져 Siemens/KWU사에서는 이것을 계속하고 있고 Inconel-690TT의 튜브로 공급하고 있다.

교체용 증기발생기 가격은 발표된 것이 별로 없으나 대충 다음과 같은 것으로 추정된다.

〈표 1〉 증기발생기 교체 실적

발전소명	용량(MWe)	루프 수	舊 SG 사용연수	교체년도	원SG공급자 /교체SG 공급자	교체공사 업자	교체작업 일 수	전체피복 선량 (man/rem)
Surry 2	824	3	10	1979/80	W/W	Utility	303	2140
Surry 1	824	3	11	1981	W/W	Utility	209	1758
Turkey Point 3	728	3	11	1981/82	W/W	Utility	210	2151
Turkey Point 4	728	3	10	1982/83	W/W	Utility	183	1305
Obrigheim	357	2	14	1983	*KWU/KWU	KWU	74	690
Point Beach 1	524	2	13	1983/84	W/W	W	117	590
H.B.Robinson 2	739	3	12	1984	W/W	Utility	225	1207
D.C.Cook 2	1133	4	10	1988	W/W	U/MKF	202	561
Indian Point 3	1013	4	13	1989	W/W	U/B	105	540
Ringhals 2	870	3	15	1989	W/KWU	KWU/U	72	290
Dampierre 1	890	3	10	1990	Fra/Fra	Fra/U	99	220
Palisades	805	3	19	1990	CE/CE	B/KWU	121	487
Millstone 2	870	3	16	1991	CE/B&W	U/F-D		
Indian Point 2	873	3	19	1992	W/W	?		
North Anna 1	907	3	14	1992	W/W	?		
Beznau 1	350	2	23	1993	W/Fra	KWU/S		
Doel 3	897	3	11	1993	Fra/KWU	KWU		

*= Westinghouse design W= Westinghouse KWU= Siemens /KMU Fra= Framatome CE= Combusion Engineering
MKF=M.K.Ferguson B&W=Babcock & Wilcox Canada S=Sulzer U=Utility B=Bechtel F-D=Fluor Daniel

- Dampierre-1호기 : 3,500만달러(증기발생기 3대) - 39.3달러/kW
- Indian Point-3호기 : 3,300만달러(증기발생기 4대) - 32.6달러/kW
- North Anna-1호기 : 2,800만달러(증기발생기 3대) - 30.9달러/kW

Dampierre-1호기와 Indian Point-3호기에는 증기발생기 완제품이 공급되었으나 North Anna-1호기에는 하부만 교체할 예정이다.

교체기술

· 부분교체와 전체교체

전력회사들은 증기발생기를 완전히 교체하던가, 증기발생기를 격납용기내에서 절단해서 증기분리기를 개조하고 증기발생기 하부만 교체(lower head, 튜브시트, 튜브다발)하고 나서 현장에서 교체된 부분을 기존의 steam dome 과 용접하는 부분교체로 하던가 선택하게 된다.

증기발생기를 전체교체하려면 대부분의 경우 격납용기에 마련돼있는 대형기기 운반용 출입구의 위치와 크기가 맞지 않기 때문에 증기발생기를 넣기 위해서는 격납용기에 임시용 출입구를 내지 않으면 안된다.

격납용기내에서 증기발생기를 절단, 용접하는 작업이 작업공정상 많은 작업과 시간이 소요되지만 미국회사들은 지금까지 기존의 기기 운반용 해치가 적합치 않으면(Indian Point-3호기) 부분교체를 해왔다. 이렇게 하는 이유는 격납용기벽을 잘라내 임시용 출입구를 내는데 대한 허가문제 때문이고 또다른 이유로는 부분교체용 증기발생기를 사용함으로써 구입비용이 낮아지고 제거한 증기발생기의 매장시설도 소형으로 할 수 있어 비용이 줄어들기 때문이다.

〈표 2〉에 지금까지 전체교체 또는 부분교체를 한 발전소를 표기했다. Ringhal-2호기에서 최초로 격납용기벽에 운반용 출입구를 내는 작업이 실시되었다. 이 방법은 Palisade 원전에서도 사용되었고 일부의 구형 프랑스 원전과 Beznau-1호기에서도 사용될 예정이다.

〈표 2〉 증기발생기 교체사양

	Surry 1	Surry 2	Turkey Point 3	Turkey Point 4	Obrigheim	Point Beach 1	H.B. Robinson 2	D.C. Cook 2	Indian Point 3	Ringhals 2	Dampierre 1	Palisades
전체 / 부분 교체	Lower section	Lower section	Lower section without channel head	Lower section without channel head	Entire SG	Lower section	Lower section without channel head	Lower section	Entire SG	Entire SG	Entire SG	Entire SG
교체 SG 튜브재질	Inconel 600TT	Inconel 600TT	Inconel 600TT	Inconel 600TT	Inconel 800	Inconel 690TT	Inconel 690TT	Inconel 690TT	Inconel 690TT	Inconel 690TT	Inconel 690TT	Inconel 600
구SG보관장소	At site	At site	At site	At site	At site	At site	At site	At site	At site	At site	At site	At site
격납용기 벽 반입구 콘크리트 차폐체 구분	No	No	No	No	No	No	No	No	No	Yes	No	Yes
SG 반출입 난이도	Medium	Medium	Medium	Medium	Easy	Medium	Medium	Medium	Medium	Difficult	Medium	Difficult
1차측 배관제염	Electro-polishing	Electro-polishing	Grit blasting	Grit blasting	Electro polishing	Brushing	Grit blasting	Brushing	Grit blasting	Electro-polishing	Electro-polishing*	Grit blasting
1차측배관 절단개소수	5	5	-	-	4	2	-	2	2(3)	4	2	5§
절단방법	Plasma	Plasma	-	-	Machining	Plasma	-	Plasma	Plasma	Machining	Machining	Machining
결합용 접	Template	Template	-	-	†	Template	-	Template	Template	†	≠	†
Root pass 수동	x	x	-	-	-	x	-	x	x	-	x	-
자동 접	x	x	-	-	x	x	-	x	x	x	x	x
신규부대 설비규모	Medium	Medium	Medium	Medium	Small	Medium	Medium	Medium	Medium	Small	Medium	Medium

*Chemical decontamination in one SG. † Photogrammetry + optical survey ≠Electronic theodolites + template § Cold legs 2 cuts each, hot leg 1 cut.

증기발생기교체작업

대부분의 경우 격납용기내에서 플라크레인으로 증기발생기를 들어올린다. 일반적으로 크레인 용량을 늘릴 필요가 있다. 증기발생기를 운반하기 위해 Point Beach-1호기와 Obrigheim 및 Ringhals 원전에서는 특별한 rig가 필요했다.

기기운반용 해치 또는 임시 운반구 앞에서 증기발생기를 rig에 건다. 이 rig는 증기발생기를 수평으로 한 다음 운반대위로 올려놓는다. 증기발생기 출입구 높이에 따라 격납용기 밖에 특별한 지지물을 설치한다. Ringhals-2호기에서는 유압식 인양장비가 사용되었다.

격납용기내로서 증기발생기를 이동시키기 위

해 많은 발전소에서 증기발생기 주위의 차폐벽과 기기운반용 해치에 가까운 곳에서 콘크리트를 제거했다. 〈표 2〉를 통해 여러 발전소에서 시행된 이 작업의 규모를 알 수 있을 것이다. 특히 D.C. Cook-2호기(아이스 콘텐서 격납용기)에서는 많은 양이 콘크리트를 제거한 다음 재주입되었다.

· 1차측 배관 제염작업

파이프가 절단된 부분의 1차측 배관의 제염 작업에는 대부분 electropolishing 법을 사용한다. Dampierre-1호기에서는 3대의 증기발생기중에서 2대는 electropolishing법으로 나머지 1대는 화학제염방식으로 제염작업을 했다. 이 2가지 방법은 비교검토되었는데 화학제염방

식이 좀 나은 것으로 나타났다.

· 1차측 배관 절단 및 용접

1차측 파이프절단작업은 이 작업을 시행하는 회사에 따라 다르다. 첫번째 방법은 Turkey Point와 H.B.Robinson원전에서 한 것과 같이 1차측 파이프를 전혀 절단하지 않는 방법이다. 공간의 제약때문에 증기발생기의 채널 헤드를 잘랐다. 두번째 방법은 미국회사와 (Surry원전 제외)와 Framatome사에서 하고 있는 방법으로 증기발생기 1대당 2군대를 절단하는 것이다. 이 방법은 재결합할 때 상당히 정밀한 측정을 요한다. 세번째 방법은 Siemens /KWU사의 방법으로 4군대를 자르고 엘보로 대치하는 것이다. 이 방법은 비용이 많이 들지만 상당히 융통성이 있다. 정단방식은 기계식 절단 (Siemens /KWU) 또는 플라즈마·야크 절단 (미국회사와 Framatome사)의 2가지가 있는데 두가지 모두 만족스러운 결과를 얻고 있다.

1차측 파이프 용접을 수동으로 root용접을 한 다음 자동용접기로 마무리한다(미국회사와 Framatome사). 또한가지 방법은 Siemens /KWU사에서 1차측 파이프 용접을 위해 개발한 narrow-gap자동용접기술을 이용하는 것인데 재래식 용접방법보다 몇가지 장점이 있다.

· 새 증기발생기와 1차측 파이프의 결합

1차측 파이프와 새 증기발생기를 결합시키는 데는 2가지 방법이 사용된다. Photogrametry와 광학시계 측정(Siemens /KWU사)또는 전자 theodolite(Framatome 사)를 사용하는 방법과 template(미국회사와 Framatome 사)를 사용하는 방법이다. Framatome사는 Dampierre-1호기에서 처음 교체공사를 할 때 이 2가지 방법을 모두 사용했다. 2가지 방법은 모두 만족할만한 결과를 가져오지만 template를 사용하는 쪽이 더 어렵다.

작업계획과 교육훈련

모든 교체작업이 시행되기 전에 광범위하고

새부적인 계획을 세워야 한다. 모든 전력회사에서는 교체공사를 성공적으로 마치려면 이것이 필수적인 것으로 보고 있다. 1~2년의 계획 기간이 필요할 것으로 생각된다. 또한 교육훈련에도 힘써야 한다. 증기발생기 교체공사 작업원은 훈련을 받아야 한다. 이 훈련은 지명된 사람이나 지원인원 모두가 받아야 한다. 모형 훈련도 가급적 많이 해야 한다. 모의훈련도 증기발생기 운반, 1차측 파이프 절단 및 용접과 같은 주요작업에 대해 실시해야 한다. 이러한 훈련방법은 대체로 모든 발전소에서 실시했었다.

격납용기에 출입할 수 있는 별도의 출입구, 창고, 공작실, 식당 등의 추가시설이 필요했다. 연구용으로 사용될 기존 증기발생기를 제외하고 나머지는 발전소 구내의 특설건물에 보관되었다.

교체공사의 비용, 공사일정 및 피폭선량

· 교체공사비

교체공사비에 대해서는 별로 발표된 자료가 없다. <표 1>에 표시한 데이터 정도가 교체공사와 관련된 다른 개조공사를 비교검토할 수 있는 자료다. 교체공사와 관련된 개조공사로는 復水polishing설비 콘덴서 튜브교체, 高pH 급수화학처리에 적합한 재료로 콘덴서와 급수가 열기의 튜브를 교체하는 것 등을 들 수 있다.

· 공사일정

<표 1>은 증기발생기 교체공사 공기가 급격히 향상된 것을 보여주고 있다. 앞으로도 공기는 더 단축될 것으로 보인다.

· 피폭선량

피폭선량에서도 개선이 이루어졌다 (표1 참조). 과거의 공사경험을 살려 더욱 개선된 기술과 계획 및 훈련이 가능할 것으로 보인다.