

## 원자력 발전소 급수계통 탈기기가 증기발생기에 미치는 영향

최영부, 김시문, 이은웅\*  
한전 전력연구원, 충남대\*

### Effects of Deaerator in Feedwater System on Steam Generator in Nuclear Power Plant.

Young Boo, Choi, Si Moon, Kim, Eun Woong, Lee\*  
KEPRI, Chungnam University\*

**Abstract** - Dissolved oxygen(DO) control by deaerator has a great effect on the integrity of S/G in nuclear power plant. The goal of this study based on the theoretical basis and the extensive surveys is to identify the effect of deaerator in feedwater system on steam generator to clear the need of installation of deaerator. In addition, this paper discusses the review to understand the mechanism of DO formation as well as removal. The conclusion is that the installation of deaerator improve the integrity of S/G and is contributed to the whole nuclear power plant safety.

#### 1. 서 론

원자력 발전소에서는 증기발생기의 건전성 확보를 위한 방안중의 하나로 증기발생기에 공급되는 급수의 용존산소량을 엄격히 제한하고 있으며 이를 위하여 급수계통에 탈기기를 설치하여 운용하고 있다[1]. 그러나 국내에서는 급수 계통 탈기기의 기능 및 증기 발생기에 미치는 영향에 대한 연구가 충분치 않아 발전소 건설시 탈기기 설치 여부에 관해 혼란을 겪고있다.

본 연구에서는 급수계통 탈기기가 증기 발생기에 미치는 영향을 명확한 이론적인 근거와 실용적인 증거를 제시하므로써 급수계통 탈기기 설치에 관한 혼란을 방지하고, 증기발생기 손상 원인을 분석하여 이에 대비하게 함으로써 원자력 발전소의 신뢰성 향상에 기여하고자 한다. 이를 위하여 증기발생기 건전성에 막대한 영향을 미치는 용존산소의 생성 및 제거 메카니즘과 급수계통 탈기기가 용존산소를 제거하는 원리와 기능을 이론적으로 규명한다. 또한, EPRI 자료 등 세계적으로 권위 있는 자료에 근거하여 급수계통 탈기기의 유무에 따른 증기발생기의 전열관 폐쇄율, 증기발생기 교체실적 등을 비교, 분석하므로써 급수계통 탈기기가 증기발생기에 미치는 영향을 실증적으로 규명하고자 한다.

#### 2 탈기기 설치에 따른 증기발생기 건전성 비교

##### 2.1 증기발생기 전열관 폐쇄율

원자력 발전소의 증기 발생기 전열관의 문제점은 증기 발생기 및 2차계통의 수질관리, 증기발생기 열수력 조건, 증기발생기 및 2차계통의 재질, 증기발생기 제작과정 및 증기발생기 운전이력 등의 복잡한 상관관계로부터 발생되는 부식과 기계적 원인이 주를 이루고 있다. 이러한 증기발생기의 문제점이 급수 계통 탈기기 설치 여부에 따라 어떠한 영향을 받는지를 실증적으로 검토하기 위하여 미국 전력 연구소 (EPRI)의 증기 발생기 전략 경영팀(Steam Generator Strategic Management Project)의 질의에 응답한 219개 원자력 발전소를 조사 대상으로 하여 검토하였다[2,3]. 219개 발전소 중에서 탈기기 미설치 발전소는 폐쇄된 3개 포함하여 123개,

설치발전소는 91개, 설치 여부를 확인할 수 없었던 발전소는 5개였다. 이렇게 조사된 탈기기 설치/미설치 발전소에 대해 증기 발생기 전열관 폐쇄율, 증기 발생기 교체 실적 등을 비교, 분석하였다.

##### 1) 연도별 관폐쇄율

탈기기 유무에 따른 증기발생기 전열관 폐쇄율을 상업 운전 개시 연도별로 그룹화하여 그림 1과 표 1에 나타내었다[4].

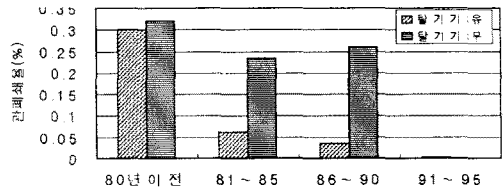


그림 1. 연도별 관폐쇄율

표 1. 탈기기 유무에 따른 연도별 관폐쇄율

	80년 이전	81~85	86~90	91~95
탈기기 : 유	0.3003	0.0619	0.0362	0.0034
탈기기 : 무	0.3212	0.2349	0.2603	0.0
유/무 비율	94%	26%	14%	-

앞서 언급한 바와 같이 증기발생기 전열관 손상은 다수의 인자에 의해 복합적으로 발생하지만 상기 조사결과에서 보는 바와 같이 급수계통 탈기기가 증기발생기 전열관 손상을 감소시키고 있음을 알 수 있다.

##### 2) 증기발생기 모델별 관폐쇄율

보다 객관적인 비교를 수행하기 위해 탈기기 설치 유무이외의 모든 조건, 즉, 제작 및 운영국가, 증기발생기의 형태 및 전열관 재질 등이 동일한 증기 발생기를 선정하여 비교 분석하여 표 2와 그림 2에 나타내었다.

표 2. 증기발생기 모델별 관폐쇄율

	F/F-51B	F/F-51B1	F/F-51M	W/W-D3
탈기기:유	0.0158	0.0155	0.1674	0.2930
탈기기:무	0.1754	0.1146	0.2069	0.5679
유/무 비율	9	14	81	52

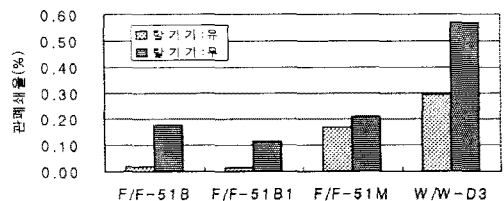


그림 2. 증기발생기 모델별 관폐쇄율

분석 결과 탈기기설치 발전소의 관폐쇄율이 미설치발전소에 비해 평균 39% 정도로 양호한 것으로 조사되었다.

## 2.2 증기발생기 교체실적 및 계획

전열관 폐쇄와는 비교할 수 없을 정도의 경제적 손실을 초래하는 증기발생기 교체는 통상 전열관 폐쇄율이 일정 한계(총 전열관수의 약 10%)를 초과하는 경우 이루어지는데, 발전소 수명기간 동안에 이 한계치에 도달할 확률이 탈기기 유무에 따라 어떠한 차이가 있는지를 알아보기 위하여 증기발생기 교체실적과 교체까지의 운전년수를 비교 분석하여 그림 3.4와 표 3에 나타내었다.

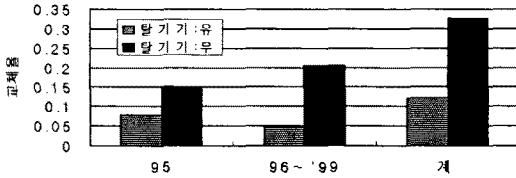


그림 3. 탈기기 설치 유무별 증기발생기 교체율

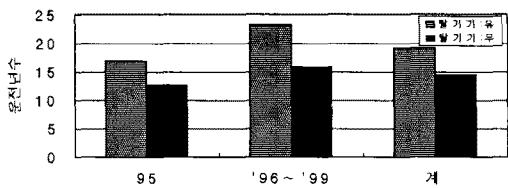


그림 4. 탈기기 설치 유무별 증기발생기 교체년수

표 3. 증기발생기 교체율 및 운전년수

	'95까지 교체		'96~99 교체예정		계	
	교체율	운전년수	교체율	운전년수	교체율	운전년수
탈기기:유	7/91	16.86	4/84	23.25	11/91	19.18
탈기기:무	18/120	12.67	21/102	15.85	39/120	14.38
유/무비율	51%	133%	23%	147%	37%	133%

분석 결과, 탈기기를 설치한 발전소는 미설치한 발전소에 비해 증기발생기 교체율과 교체까지의 운전년수가 상당히 양호한 것으로 조사되었다.

## 2.3 국가별 탈기기 설치 동향

실제적으로 원자력 발전소 운영경험이 풍부한 국외의 주요 원전 운영국의 사례를 파악함으로써 탈기기 설치여부가 증기발생기 신뢰성에 중요한 요소인지를 실증적으로 파악할 수 있다. 본 조사 대상국은 원전 선진국 6개국을 선정하였는데 6개국의 원전보유수가 전세계 원전의 90%이상을 차지한다. 국가별 탈기기 설치/미설치 원전은 표 4와 같다.

표 4. 국가별 탈기기 설치/미설치 원전 비교

설치유무	미국	프랑스	독일	일본	캐나다	한국
유	5	30	14	18	25	6
무	68	24	0	2	0	6
설치비율	7%	56%	100%	90%	100%	50%

표 4에서 보는 바와 같이 대부분의 원전보유국이 탈기기를 설치하고 있음을 알 수 있었다. 다만, 미국의 경우는 다른 나라와 달리 탈기기 설치비율이 10% 미만이었는 데 90년대 들어 원자력 발전소를 건설하지 않아 최근의 동향을 파악할 수는 없었다. 미국의 최근 동향을 파악하기 위해 현재 미국에서 설계개발중인 개량형 원전의 탈기기 도입여부를 조사한 결과 1,350MWe급 System 80+와 600MWe급 AP-600에서 탈기기를 채택하고 있었다. 이는 미국에서도 탈기기를 설치하는 쪽으로 방향을 전환했다는 것을 의미한다. 또한, 프랑스에서 개발 중인 1,455 MWe급 N-4 원전에서도 탈기기를 채택한 것으로 조사되었다.

## 3. 용존산소 생성과 증기발생기에 미치는 영향

### 3.1 용존산소의 생성

1) 공기접촉에 의한 산소유입  
증기발생기에 물을 공급하는 2차계통의 급수계통은 원수(raw water)를 처리하여 급수하는데 원수는 공기 중에 노출되어 있어 매우 높은 농도의 용존산소를 함유하고 있다. 여러 차례의 수처리 과정을 거쳐 복수저장탱크에 급수를 저장하고 있으나 탱크내 물의 용존산소 농도는 약 100ppb 정도나 된다[5,6] 특히 기동시에는 복수기에 급수공급이 많아 용존산소농도가 높게 된다.

2) 불용축성 가스형태의 산소유입  
복수기내에서 헨리의 법칙에 따라 많은 양의 증기가 응축되면서 복수기내에 존재하고 있던 산소등의 불용축성 가스가 급수에 녹아들게 된다.

$$ppb O_2 = 25.02 \times 10^6 [P_{air} / H_{O_2}]$$

단,  $ppb O_2$  : 용존산소 농도(ppb)

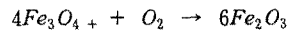
$P_{air}$  : 복수기 내의 공기 압력(psi)

$H_{O_2}$  : 헨리 상수(물의 온도가 높을수록 높다).

상기의 헨리법칙에서 알 수 있는 바와 같이 물에 녹는 산소의 양은 압력에 비례하고 헨리상수에 반비례하는데 헨리상수는 온도에 비례하므로 결국 용존산소량은 압력에 비례하고 온도에 반비례한다(5).

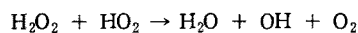
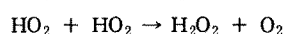
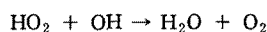
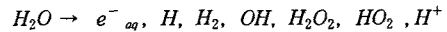
### 3) 산화물에 의한 산소유입

수질 관리가 철저하게 이루어지고 있는 정상 운전중에 철산화물이 마그네타이트(magnetite)라는 보호성 산화물 형태로 금속 표면에 생성되어 있지만 연차보수 등 휴식(outage)기간 동안에 공기와 접촉하여 헤릭 옥사이드(ferric oxide)라는 비보호성 산화물 형태로 변하여 이중 일부가 슬러지 또는 부유물질 형태로 급수계통과 증기 발생기에 유입되게 된다[7].



### 4) 물의 방사분해에 의한 산소생성

물의 방사분해에 의한 산소 생성은 원자력 발전소의 원자로 냉각재계통에서 발생하는 현상으로 핵분열시 생성되는 속중성자와 감마선이 물을 분해시켜 산소와 수소를 생성한다. 이렇게 생성된 산소는 계통재료의 부식을 촉진시킨다. 물의 방사분해 현상은 다음과 같다[8].



### 3.2 용존산소가 증기발생기에 미치는 영향

계통내에 유입된 용존산소는 거의 모든 종류의 부식손상의 원인이 되고 있으며 특히 증기발생기에 다음과 같은 유형의 손상을 초래한다.

1) 덴팅(denting) : 증기발생기 전열관과 지지판부근에 용존산소 농도가 증가하는 경우 전열관과 전열관지지판 사이의 틈새와 틈새가 없는 전열관 지지판과의 사이에 전위차가 발생하고 이러한 전위차를 없애려는 반응이 일어나는데 이때 생성된 마그네타이트( $Fe_3O_4$ )는 부피가 철(Fe)의 2배 가량으로 전열관의 변형을 초래한다.

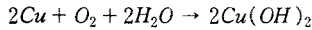
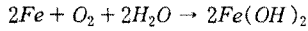


### 2) 피팅(pitting)

용존산소에 의하여 산화막이 형성되어 있던 금속표면

에 어느 일정 전위차 이상이 되면 금속 표면에 피팅 현상이 시작된다. 일단 피팅이 발생되면 피팅 현상이 발생된 내부의 용존산소와 외부의 용존산소 농도가 달라져 더 큰 전위차가 발생하게 되고 이 전위차에 의해서 피팅 현상이 가속화된다.

3) 손모(wastage), 감육(thinning), 결정입계 부식/용력 균열 손상(IGA/ SCC), 마손(fretting) 상기의 결합은 증기 발생기 내의 스러지가 쌓여 있는 부분에서 주로 발생되는데 이 스러지는 대부분 철과 구리의 산화물로 다음과 같이 용존산소에 의해 생성이 되고 부식율은 용존산소량에 비례한다.[9]



#### 4. 급수계통 탈기기 기능 및 장단점

##### 4.1 급수계통 탈기기 기능

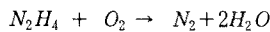
###### 1) 용존산소 제거

###### ○ 물리적 방법

헨리의 법칙에 의해 급수를 가열하면 물에 용해될 수 있는 산소의 양이 감소하여 산소가 배출되고, 급수를 교란시키면 산소의 배출이 가속된다. 탈기기는 고압급수가 열기 전단에서 배출된 산소를 가스추출기를 이용해 계통 밖으로 배출한다. 단, 이러한 기계적인 탈기방법은 전출력 운전중, 복수기 진공 30~50mm.Hg, 초기 공기 함유량 0.05%일때 5~10ppb까지가 한계로 알려져 있다 [7].

###### ○ 화학적 방법

급수중 녹아 있는 용존산소와 하이드라진(N<sub>2</sub>H<sub>4</sub>)을 화학반응시켜 용존산소를 제거한다.



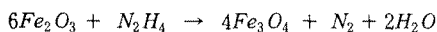
상기의 용존산소와 하이드라진의 반응에는 충분한 온도와 시간이 필요한데, 탈기기는 용존산소가 하이드라진과 충분히 반응할 수 있도록 저출력 운전중에도 급수온도를 80℃ 이상, 반응시간을 5분 이상 유지시킨다.

###### ○ 기타

실적용에는 많은 개선이 요구되고 있으나 현존하는 기타 용존산소 제거방법에는 하이드라진과 활성탄을 사용법, 촉매 고정층법, 중공사막 탈기장치 등이 있다.

###### 2) 비보호성 산화물 제거

전열관의 결정입계 부식/용력 균열 손상(IGA/SCC)을 유발시키는[9] 증기 발생기 전열관의 전기화학 부식 전위(ECP) 상승은 급수를 통한 용존산소의 유입이 아니라 헥틱 옥사이드와 같은 산화물의 유입에 의해서 발생하며, 급수온도가 낮은 발전소 기동시나 저출력 운전시 비보호성 산화물인 헥틱옥사이드(Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)를 하이드라진과 반응시켜 보호성 산화물인 마그네타이트(Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>)로 변화시켜 주어야 하는데, 이때 반응에 필요한 충분한 시간과 온도를 제공하는 설비가 급수계통 탈기기이다. 반응식은 다음과 같다.



###### 3) 급수저장능력 증대

탈기기의 탈기저장탱크는 가열, 탈기된 급수를 전부하 출력으로 최소 3.5분 동안 공급할 수 있는 용량을 가지고 있기 때문에 하이드라진이 용존산소나 헥틱 옥사이드와 반응할 수 있는 충분한 시간을 제공할 뿐 아니라, 복수계통의 과도현상 발생시 충분한 대처시간을 제공한다. 또한 복수펌프의 압력 및 유량이 직접 급수펌프에 영향을 미치지 않도록 하는 완충작용을 하여 사고과급을 억

제할 수 있다. 특히 기동 및 저출력운전시 탈기저장탱크에 의한 급수공급시간을 대폭 증대시킬 수 있기 때문에 수질을 관리할 수 있는 충분한 시간을 제공할 뿐 아니라 정지시에는 복수계통 이상에 대비하여 증기 발생기에 비상 냉각수를 공급하는 역할도 일부 수행한다.

#### 4.2 탈기기 설치 장단점

##### 1) 장점

- 기동/저출력 운전시 충분히 탈기된 급수를 증기발생기에 공급하므로 전열관 손상 억제
- 비보호성 산화물 제거를 위한 충분한 반응시간과 온도를 제공
- 비상시 3.5분 동안 전출력 급수설계유량 공급이 가능하여 사고 대처시간 제공
- 증기와 급수가 직접접촉 가열하여 열교환 효율 증대
- 복수계통과 급수계통의 완충 역할

##### 2) 단점

- 고가의 설치비용으로 초기투자비 증가
- 보조보일러 용량증대 및 터빈건물 크기 증대

### 5. 결 론

본 연구에서는 급수계통 탈기기가 증기 발생기에 미치는 영향을 실증적으로 규명하기 위하여 현장의 자료와 EPRI등 세계적으로 권위를 인정받고 있는 기관의 자료를 토대로 증기 발생기의 전열관 폐쇄율, 교체 실적 및 계획, 무고장 증기 발생기 등을 비교 분석한 결과 탈기기를 설치한 발전소가 탈기기를 미설치한 발전소에 비해 양호한 것으로 분석되었다. (년도별 전열관 폐쇄율: 약 50%, 증기 발생기 수명: 약 140%, 모델별 전열관 폐쇄율: 약 35%, 무고장 증기 발생기: 약 680%, 증기 발생기 교체율: 약 30%)

상기의 실증적 결과를 이론적으로 뒷받침하기 위하여 용존산소의 생성 메카니즘과 용존산소가 증기발생기에 미치는 영향을 규명하였으며, 또한, 급수계통 탈기기의 기능 및 장단점을 분석, 규명하였다.

연구결과 급수계통 탈기기는 증기 발생기 건전성에 상당한 영향을 미치고 있음을 규명하였다. 이러한 탈기기 기능을 감안하고, 현재 실용화된 용존산소 제거 기술중 탈기기를 대체할 수 있는 기술이 없음을 고려할 때 탈기기를 원자력 발전소에 설치해야 할 것으로 판단된다.

#### [참 고 문 헌]

- [1] 한국전력 원자력 건설처, 원자력 발전소 설비(BOP: balance of plant)개선 모음집, '95.9.
- [2] J. Peter N. Paine, Ulla E. Gustafsson, "Steam Generator Reference Book," Revision 1, EPRI TR-103824, Proj. 2859: 4044, Vol. 1, Dec. 1994.
- [3] B. L. Dow, Jr., "Steam Generator Progress Report," Revision 12, EPRI TR-106365, Oct. 1996.
- [4] 최영부, 이은웅, "급수 계통 탈기기 필요성 검토", 대한 전기 학회, '98 하계학술대회 논문집, pp.189-192, 1998.
- [5] Perry, "Chemical Engineers' Handbook," 4th ed., pp. 14-16, 1973.
- [6] S. W. W. Shor, E. E. Hanson, R. L. Lessley, P. B. Lindsay, J. Rios, "Guide to the Design of Secondary Systems and Their Components to Minimize Oxygen-Induced Corrosion," EPRI NP-2294, Proj. S189-1, Mar. 1982.
- [7] I. Olikier and D. Katsman, "Evaluation of Secondary-System Oxygen Control in PWR Power Plants," EPRI NP-2248, Proj. S104-2, June 1982.
- [8] 한전전력연구원, "월성 원자로 차폐체 냉각 계통내 용존산소 제거 연구", 전력연-단538, 1998.
- [9] H. Takamatsu, T. Kitera, and K. Arioka, "Corrosion Experience with the Secondary Side of Steam Generators in Japan", pp. 113-123 ibid