

급수계통 탈기 필요성 검토

최영부*, 이은웅**
전력연구원 신형원전개발센터*, 충남대학교**

Study on the Need of Deaerator Installation in Nuclear Power Plant

Young-Boo Choi*, Eun-Woong Lee**
Korea Electric Power Research Institute*, Chungnam National University**

Abstract - This paper presents the basis for the need of feed-water deaerator installation in nuclear power plant and has been conducting reviews to understand the mechanism of dissolved oxygen(DO) formation as well as removal. DO is produced by feedwater make-up, air inleakage in vacuum system and condensation in condenser, etc. and removed by mechanical method and chemical method. DO has an influence on S/G in the form of denting, pitting, fretting, etc. DO control by deaerator has an great effect on the integrity of S/G in nuclear power plant.

1. 서 론

원자력발전소에서는 증기 발생기를 이용하여 증기를 발생시켜 전기를 생산한다. 증기 발생기는 수천개의 세관으로 구성되어 있는데 원자력발전소(이하원전으로 칭함)에서는 급수의 용존산소량을 엄격히 제한하여 세관을 보호하기 위해 노력하고 있다.

이에 대한 방안의 하나로 급수계통 탈기(Deaerator)를 설치하여 운영하고 있는데, 98.5월 현재 국내 상업운전 중인 원전 총 12기중 탈기 설치발전소가 6기이고 미 설치 발전소가 6기로서 탈기 설치에 대한 명확한 이론적인 뒷받침이 없는 상태에서 설치/운영되고있는 실정이다.

본 연구에서는 용존산소의 생성과 제거 메카니즘을 이론적으로 고찰하고, 용존산소가 증기발생기 세관에 미치는 영향을 Denting, Piting 등 증기발생기 세관 손상 원인별로 분석하였다. 궁극적으로는 탈기기의 기능을 정립하고 탈기 설치에 관한 세계적인 동향을 분석함과 더불어 EPRI 자료를 이용하여 전세계 원전의 탈기 설치여부에 따른 증기발생기 건전성과 관계패을 등을 분석하여 급수계통 탈기 설치에 관한 근거와 원칙을 제시하고자 한다.

2. 용존산소의 생성 및 제거

2.1 용존산소의 생성

원자력 발전소의 용존산소 생성은 주로 다음과 같은 과정중에서 발생된다.

① 충수(make up)

2차계통 급수의 근간이 되는 원수(raw-water)는 매우 높은 농도의 용존산소를 함유하고 있어 복수저장탱크내의 급수는 약 100ppb 정도의 용존산소가 잔존한다.복수기에는 복수저장탱크의 급수가 직접 공급되기 때문에 복수기에 급수를 많이 하게되는 기동중에는 특히 용존산소 농도가 매우 높게된다.

② 진공시스템에서 공기누입

(air inleakage in vacuum system)

발전소 기동전 복수기에 진공을 형성하는데 이때 진공도가 절대진공에 가까워서 복수기와 접촉하는 모든 부분

에서 공기가 유입될 가능성이 있다. 100% 출력운전중 복수기내 공기량이 0.05%라면 진공도가 2~4 In.Hg 인 경우 용존산소 농도는 약 5~10ppb를 유지하게 된다. 용존산소농도 증가는 복수기내 공기량 즉 복수기내로의 공기유입량에 크게 영향을 받는다.

③ 복수기 응축(condensation in condenser)

많은 양의 증기가 복수기 내부에서 응축되면서 불응축 가스(특히, 산소)가 복수기 내에 존재하며 특히 복수기는 Tube Bundle에서 불응축 가스의 밀집도가 증가한다[1]. 응축수는 Hotwell로 떨어지는 과정에서 복수기 Tube에 의해서 냉각이 되고 또한 응축이 되지 않고 복수기 내에 존재하는 증기에 의해서 가열된다. 냉각이 되면서 더욱 많은 양의 산소를 흡수하고 가열이 되면 산소를 방출하기 때문에 냉각 또는 가열 정도에 따라 Hotwell로 떨어지는 응축수의 용존산소 농도가 결정된다. Hotwell의 용존산소 농도가 COP(Condensate Operating Pump)에 유입되는 급수의 용존산소 농도가 된다.

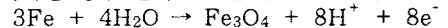
④ 복수기 배수(Orain to condenser)

기동중에 LP Heater에서 생긴 응축수가 Vent를 통해서 빠져나가지 못한 공기와 서로 접촉하므로 복수기로 유입되는 응축수의 용존산소 농도가 높게되며, LP Heater로 부터 복수기로 유입되는 증기도 많은 공기를 함유하고 있다.

2.2 용존산소가 증기발생기 튜브에 미치는 영향

① Denting

증기 발생기 support plate 부근에 용존산소 농도가 증가하는 경우 tube와 support plate 사이의 틈새와 틈새가 없는 support plate와의 사이에 전위차가 발생한다. 이러한 경우 전위차를 없애려는 반응,



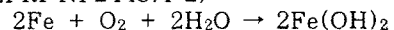
이 일어나게 되는데 이때 생성된 Fe₃O₄(magnetite)는 Fe 상태보다 부피가 2배 가량으로서 tube의 변형을 초래하여 denting을 일으키게 된다.

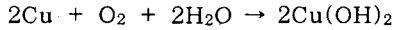
② Pitting

금속 표면에서 용존산소에 의하여 어느 일정한 전위 이상이 되면 산화막을 형성했던 금속 표면에 Pitting이 시작된다. 일단 Pitting이 발생되면 Pit 내부의 용존산소와 외부의 용존산소 농도가 달라져서 전위차가 발생하게 되고 이 전위차에 의해서 Pitting 현상이 가속화하여 진행된다.

③ Wastage(thinning), IGA(intergranular at secondary induced), SCC(stress corrosion cracking), Fretting

Denting이나 Pitting과 같이 용존산소가 직접적인 원인이 되지는 않는다. 단, 상기의 결합은 증기 발생기 내의 sludge가 쌓여 있는 부분에서 주로 발생되는데 이 sludge는 대부분 철과 구리의 산화물로 다음과 같이 용존산소에 의해 생성된다. (부식율은 용존산소량에 비례한다. EPRI-NP2448.4-2)





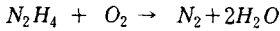
2.3 용존산소의 제거

① 기계적 방법(가열/교란/취출)

Henry's law를 이용하여 급수를 가열하면 물에 녹아 있는 산소의 양이 줄어들기 때문에 산소가 배출되고, 급수를 교란시키면 급수 밖으로 산소의 배출이 가속된다. 이렇게 배출된 산소를 ejector 등을 이용하여 취출하는 방법이 기계적 탈기방법인데, 기계적 방법에 의한 복수기내의 용존산소제거는 5~10 ppb까지가 한계로 알려져 있다. 기계적 탈기에는 한계가 있으며 이 이상의 용존산소제거는 화학적 방법에 의해 이루어진다.

② 화학적 방법

급수 중에 녹아 있는 용존산소와 Hydrazine(N_2H_4) 화학 반응시켜 용존산소를 제거하는 방법이다.



이 반응은 급수온도, 반응시간 및 Hydrazine 농도와 상관관계를 갖는데 일반적으로 80℃ 이상의 온도에서 5분 이상의 반응시간이 있어야 충분히 반응할 수 있는 것으로 밝혀져 있다(at pH : 9.5, N_2H_4 : O_2 Ratio : 2 : 90% removal). 화학반응을 원활히 하기 위해서는 높은 급수온도와 반응시간이 필요한데 탈기기는 기동 및 저출력시 급수가열기에 취출증기가 공급되기전 보조증기를 이용하여 급수를 80℃ 이상으로 가열하고, 탈기 저장탱크를 이용하여 최소 35분의 반응시간을 증가시켜주므로 화학반응이 원활히 일어날 수 있는 수단을 제공한다.

3. 탈기기 설치관련 각 기관 의견

① ALWR URD

- 탈기기 저장 탱크는 최소 3.5분 동안 급수를 공급할 수 있어야 한다.
- 탈기기는 급수를 가열, 탈기하므로서 부식과 침전물 생성을 억제하고 각 운전 mode에서 계통의 안정성을 향상시킨다.
- 탈기기는 발전소 기동 및 저출력시 급수를 가열하므로서 급수 배관의 cracking을 감소시킨다.

② ABB-CE

- 탈기기 설치 비용과 급수 가열기 설치 비용을 단순 비교하는 것은 무의미하다. 경제성은 증기 발생기 부식을 최소화 방안 내에서 비교되어야 한다.
- 프랑스, 일본 그리고 독일 및 소련에서는 대부분의 원전이 탈기기를 설치하였으며, 이 결과 증기 발생기의 부식 문제가 현저하게 감소되었다.
- EPRI와 SGOG에서는 운전중인 발전소까지 탈기기 설치를 권고하고 있다.
- 추후 미국에 건설될 원자력 발전소는 모두 탈기기를 설치하게 될 것이다.

③ SGOG

- 증기 발생기 신뢰성 향상 및 수명 연장을 위하여 탈기기를 설치할 것을 권고한다.

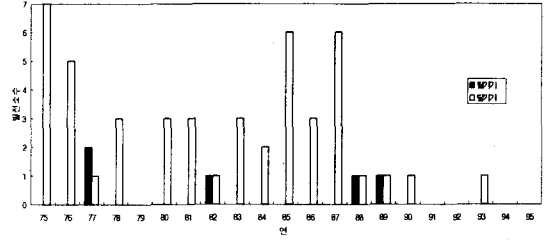
④ Burns and Roe, Inc.

- 용존산소를 제거하는 방법은 모든 운전 형태에서 가장 효과적인 탈기기를 설치하는 것이다.
- PWR 발전소에 급수가열기 대신 탈기기 설치가 기술적, 경제적으로 가장 현명한 방법이다.
- 탈기기를 설치하여 용존산소를 감소시킴으로써 증기 발생기의 운전 수명을 연장할 수 있다.

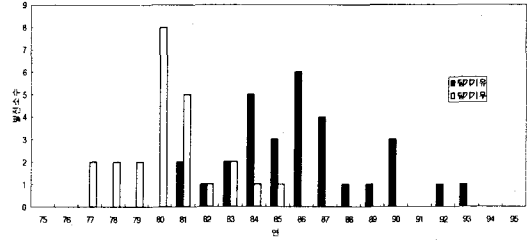
4. 탈기기 설치 동향

대상국으로는 미국, 프랑스 등 6개국을 선정하였으며, 이들 나라의 원전 보유수는 전세계의 90% 이상을 점하고 있어 세계적인 추세를 살펴 보는데 무리가 없을 것으로 생각된다. 조사대상 원자력 발전소는 PWR을 기준으로 하였으며 캐나다와 한국은 PHWR 발전소를 포함하였다.

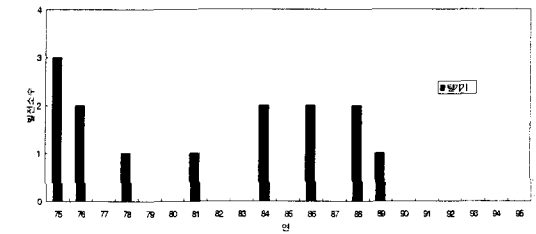
① 미국



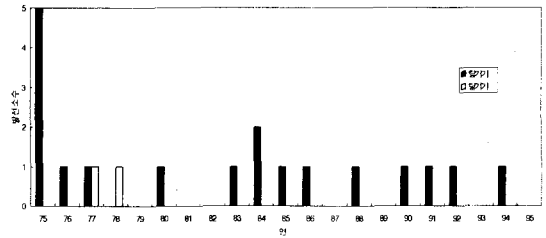
② 프랑스



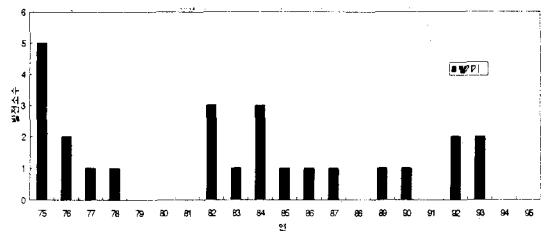
③ 독일



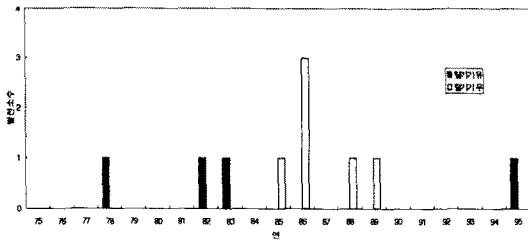
④ 일본



⑤ 캐나다



⑥ 한국



현재 세계 각 지역에서 개발중에 있는 원자력 발전소의 탈기기도입 여부를 조사하여 보았다. 조사결과 SYS. 80+ (미국 1350 MWe급), AP-600 (미국 600 MWe급), N-4(프랑스 1455 MWe급)와 같이 차세대 원전은 모두 탈기기가 설치되어 있었다. 이것은 한국의 차세대 원전과 같은 맥락에서 개발되고 있는 점을 고려 할 때 좋은 참고 자료가 될 것으로 판단된다.

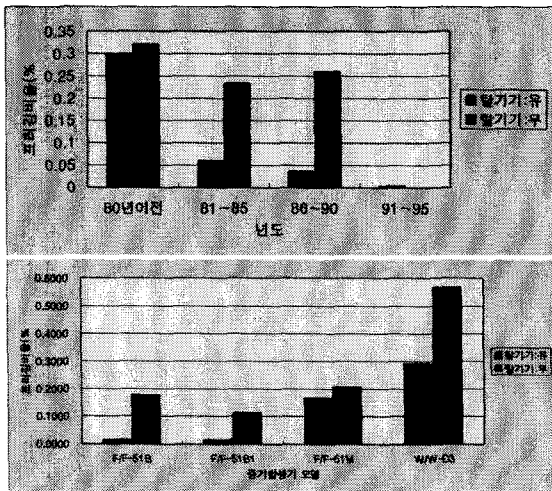
5. 증기발생기 건전성 비교

EPRI 보고서(4,5)에서 발췌한 사항으로 조사대상 발전소는 EPRI steam generator strategic management project에 응답한 219개며 이 중에서 탈기기를 설치하지 않은 발전소는 폐쇄된 3개 포함하여 123개, 설치한 곳은 91개 그리고 설치 여부를 확인하지 못한 발전소는 5개가 있다.

5.1 증기발생기 전열관 폐쇄율

증기발생기는 부식과 기계적 원인의 다양한 문제점을 내포하고 있는데 이들 문제는 증기발생기 및 2차계통의 수질관리, 증기발생기 열수력 조건, 증기발생기 및 2차계통의 재질선정, 증기발생기 제작과정 및 증기발생기 운전이력등의 복잡한 상관관계로부터 발생된다.

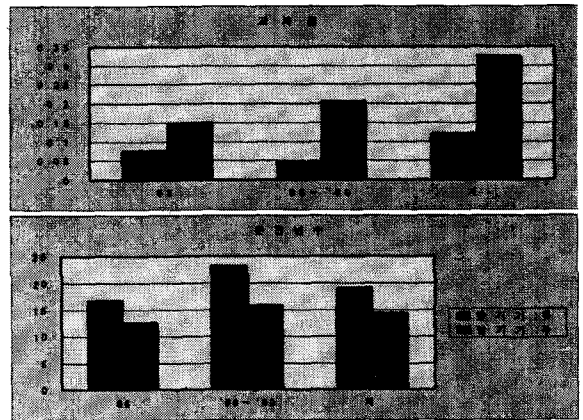
증기발생기 제작 및 운영기술이 동일한 수준에서 탈기기 유무에 따른 결함 정도를 비교하기 위하여 탈기기 유무외의 다른 조건이 동일한 증기발생기를 선정하여 비교하였다. 즉, 동일국가, 동일형태 및 동일 전열관 재질을 가진 증기발생기중 상업운전 개시년도가 비슷한 발전소를 선정하여 비교하였다.



탈기설치 발전소의 관폐율이 미설치발전소 대비 평균 39% 정도로 상당히 양호한 것으로 조사되었다.

5.2 증기발생기 교체실적 및 계획

증기발생기 교체는 전열관폐쇄와는 비교할 수 없을 정도의 막대한 경제적 손실을 초래하는 이유에서 별도로 탈기기유무에 따른 교체 실적 및 계획과 교체까지의 운전년수를 비교하여 제시하였다.



탈기기를 설치 발전소는 미설치 발전소에 비해 증기발생기 교체율은 약 37%, 운전년수는 약 133%로서 탈기기 설치한 발전소의 증기발생기 교체정도가 훨씬 적은 것으로 나타났다.

5.3 탈기기 설치 장단점 비교

탈기기 설치시 장단점을 미설치시와 상대적으로 비교하여 유리하면 장점, 불리하면 단점으로 분류하여 표 1에 요약하였다.

표 1. 탈기기 설치 장단점 비교

	장점	단점	사 유
계통유지관리	○		- 송입펌프, 탈기기, 탈기저장탱크 추가설치 - 보조보일러 용량증대, 터빈건물 크기증대 * #4 가열기, 가열기배수펌프, 가열기 배수탱크가 삭제되나 추가설치 효과가 큼
급수수질	○		- 정상운전중은 변화가 없으나 기동 및 저출력운전시는 차이가 있음 * EPRI의 시험값 이용
계통안전성	○		- 급수저장능력 증대 - 복수계통과 급수계통의 완충작용
증기발생기 건전성	○		- 관 폐쇄율 : 39% - 증기발생기 교체율 : 37% - 교체증기발생기 평균 운전연수 : 133% - 증기발생기 무고장율 : 684%
경제성	○		- 증기발생기 교체비용 : 852억원 (고리 #1 기준) 탈기설치비용(44억)보다 효과가 큼.

6. 결 론

탈기기는 증기발생기 건전성에 지대한 영향을 미치고 있으며 원자력 발전과 관련한 세계 여러 기관에서 증기발생기 건전성을 이유로 탈기기 설치를 권고하고 있다. 세계 각국의 원전 건설 동향에서도 탈기기 설치경향은 명백히 나타나고있으며본연구에서EPRI TR - 106365 (Oct. 1996)의 자료를 근거로 조사한 바에 의하면 동종의 증기 발생기일 경우 관 폐쇄율은 탈기기 설치시, 그렇지 않은 발전소의 39%로 현저하게 양호한 상태를 유지하고 있음을 알 수 있다. 증기 발생기 교체율도 탈기기 설치시 미설치 대비 37%로 양호하며, 교체시까지 운전한 기간도 133%로 탈기기를 설치한 경우가 양호한 것으로 나타나고 있다. 또한 상업 운전 개시 5년 후의 증기 발생기 무결함율도 684% 정도 양호한 것으로 조사되고 있다. 탈기기가 증기발생기 건전성 향상에 지대한 영향을 미치고 있음을 볼 때 탈기기를 설치해야 할 것으로 판단된다.

[참고 문헌]

- [1] I. Olikier and D. Katsman, "Evaluation of Secondary- System Oxygen Control in PWR Power Plants," EPRI NP-2248, Proj. S104-2, June 1982.
- [2] Perry, "Chemical Engineers' Handbook," 4th ed., pp 14-16
- [3] 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.

[4] J. Peter N. Paine, Editor & Ulla E. Gustafsson, Associate Editor, "Steam Generator Reference Book, Revision 1, EPRI TR-103824, Proj. 2859: 4044, Vol. 1, Dec. 1994.

[5] B. L. Dow, Jr., "Steam Generator Progress Report," Revision 12, EPRI TR-106365, Proj. WO3580-06, Oct. 1996.