

蘇聯 VVER-1000 PWR SG의 문제점

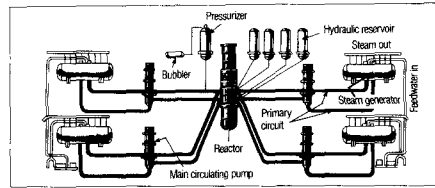
5년전까지만 해도 소련의 PWR에서 사용되고 있는 증기발생기는 우수한 실적을 올리고 있었으나 1986~89년 사이에 1000MW급 PWR 증기발생기의 Cold헤터에서 균열이 발견되어 광범위한 분석/개량/교체작업이 필요하게 되었다.

전세계 대부분의 PWR과는 달리 소련의 PWR는 수평형 증기발생기를 사용하고 있다. 1000MWe의 VVER-1000 PWR는 PGV-1000형 증기발생기를 사용하는데 이에 관한 데이터는 별표와 같다.

수직형 증기발생기(평탄한 튜브шит 사용)와는 대조적으로 소련의 수평형 증기발생기의 열교환기 튜브끝이 2개의 수직형 원통 chamber 벽과 입구(hot 쪽) 헤터와 출구(cold쪽) 헤터에 부착돼있다. 노심으로 부터의 1차 냉각재는 입구 헤터로 들어와 열교환기 튜브를 거쳐 출구 헤터를 통해 나간다. hot 헤터와 cold 헤터는 그 구조가 비슷하며 정상운전시의 온도는 각각 320°C, 290°C다.

PGV-1000 증기발생기 헤터 재료는 파라이트 스틸(소련호칭으로 10GN2MFA)로 이의 화학성분은 별표와 같다. 1차측 헤터는 耐蝕性 오스티나이트 스틸로 피복돼 있다.

1986~89년 사이에 PGV-1000증기발생기 cold 헤터의 열교환기 튜브 연결부분 구멍 사이에서 균열이 발견되었다(이 부분의 헤터 두께는 170mm다). 이 균열이 발생하기 시작했을 때의 운전시간수는 10,000~60,000시간이었다.

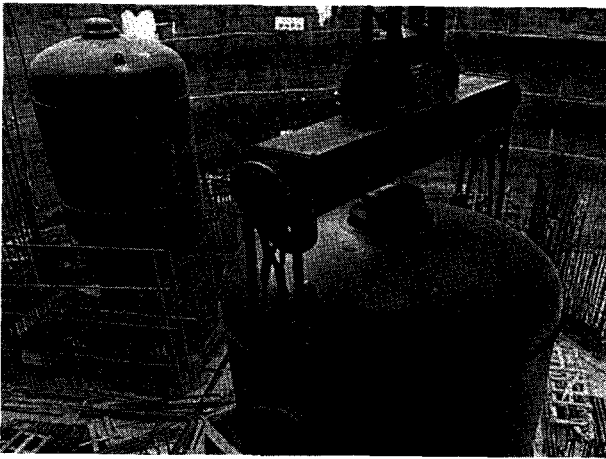


VVER-1000의 1차계통도. 증기발생기가 수평으로 표시돼있다.

Main data for a PGV-1000 steam generator

Characteristic	Value
Thermal power	750MW
Steam output	1470t/h
Operating pressure	
Primary circuit	16.0MPa
Secondary circuit	6.4MPa
Primary circuit coolant temperature	
SG inlet	320°C
SG outlet	290°C
Feedwater temperature	164-220°C
Materials for	
vessel	10GN2MFA steel
headers	10GN2MFA steel
heat exchanger tubes	08X18N10T
Number of exchanger tubes	11000
Mass	340t

균열의 길이는 여러가지로 일부는 피복재를 지나 내부 표면에까지 이르고 있었다. 이러한



cold헤터 균열은 그때까지는 알려지지 않았던 것이다. hot헤터에서는 이러한 균열은 발견되지 않았다.

cold헤터 균열은 남우크라이나 원전 원자로의 2차계통이 정상 보다 방사능 레벨이 높아 이를 조사하는 과정에서 처음 발견되었다. 이 것은 헤터 내부의 튜브와 피복재 사이의 용접부분이 파열돼 3개의 인접한 ligament에 깊은 균열이 생긴 것으로 밝혀졌다. 이로 인해 2차수의 방사능 레벨이 $10^{-7}\text{Ci}/\ell$ (정상치는 $10^{-8}\text{Ci}/\ell$)로 높아졌지만 이것은 증기를 통해 터빈으로 방출되지 않았다. 이러한 균열은 헤터 ligament를 검사하는 과정에서 다른 발전소에서도 발견되었다.

원인규명

균열이 생긴 헤터로 부터 시험편을 채취해 금속조직을 조사해본 결과 2차측에서 응력부식 균열이 발생한 것으로 밝혀졌다.

균열은 정적응력(주로 잔류응력)으로 인한 응력부식과 반복되는 응력(기계적 및 열적 요인에 의한)에 의해 점진적으로 진전된다. 헤터 재료의 응력이 降伏點을 초과하면 塑性變形이 일어난다. 헤터로의 열교환기 튜브의 rolling이

불충분해 생긴 틈에 2차계통 냉각수가 들어가면 부식을 가져오며 이러한 현상은 발전소가 설계조건 이외의 상황에서 운전될 때 더욱 심해진다.

이러한 문제를 해결하고 증기발생기의 신뢰성을 높이기 위해서는 다음과 같은 조치가 강구돼야 한다.

- 잔류응력을 결정짓는 제작기술과 실제 사용되고 있는 금속의 특성 분석.
 - 증기발생기 운전조건(압력, 온도, 냉각제 수위 변동)에 대한 철저한 점검.
 - 물처리조건이 균열의 발생과 확대에 미치는 영향 분석.
 - 잔류응력을 줄이고 헤터 재료의 특성을 살리기 위한 기술 개발
 - 헤터 ligament 점검장비의 개발과 이의 사용.
 - 증기발생기 보수방법 개발.
 - 잔류응력을 줄이고 증기발생기 손상을 방지하기 위한 기술 개발.
 - 증기발생기 구조 개선.
- 이외에 손상된 헤터를 가지고 있는 증기발생기의 교체절차도 개발해야 한다.

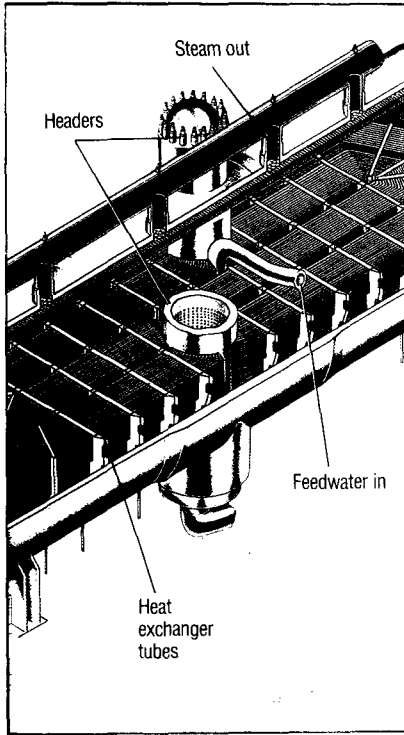
검사결과

여러가지 조사를 통해 발견된 사항은 다음과 같다.

- 증기발생기 손상은 폭약을 사용해서 열교환기 튜브를 헤터에 롤링 고정시킨 부위에서만 일어났다. 이 방법은 국부적인 변형이 누적되어 헤터의 변형을 가져왔다.
- 헤터의 perforated zone의 비대칭적인 구조로 인해 롤링방법이 잘 맞지 않아 헤터의 변형을 가져왔다.

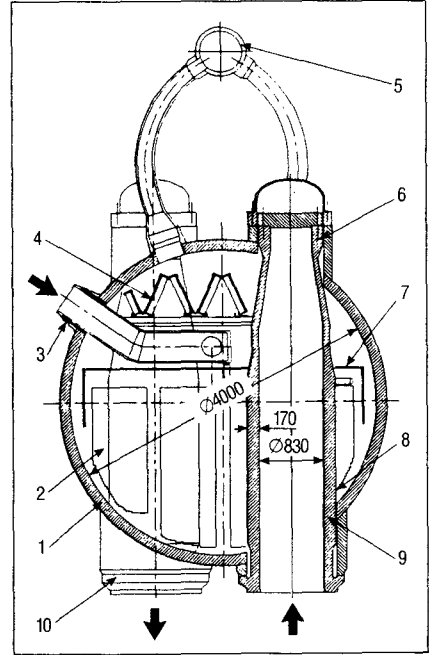
Chemical composition of 10GN2MFA steel (mass %)

Carbon	Silicon	Manganese	Chromium	Nickel	Molybdenum	Vanadium	Copper	Sulphur	Phosphorus
							not more than:		
0.08	0.17	0.80	not more	1.8	0.40	0.03			
to	to	to	than	to	to	to	0.30	0.020	0.020
0.12	0.37	1.10	0.30	2.3	0.70	0.07			



소련형 PWR의 열교환기튜브/ 헤더 기본배치도

- 튜브 롤링시의 헤더의 변형과 증기발생기 용기내에서의 조립과정에서 헤더는 현장도착전에 이미 높은 잔류응력(降伏点에 가까운)을 받고 있었다.
- perforated zone의 일반적인 塑性變形 외에 헤더에 구멍을 뚫어 폭약으로 튜브를 롤링하는 방법은 구멍 가까이의 ligament에 취성이 높은 금속층을 형성했다. 따라서 ligament 금속은 상당한 塑性 손실을 가져왔다.
- 冷間加工된 층은 크지 않은 스트레인을 받아도 균열과 pitting(点蝕)을 일으키는 경향이 있었다.
- 롤링 부족에서 생긴 crevice는 가장 심하게 부식되는 것으로 나타났으며 이로 인해 응력부식균열이 진전되었다.
- 10GN2MFA 헤더 재료는 290℃에서 스트레인에 의한 열화현상이 일어나기 때문에 cold 헤더의 운전온도는 만족스럽지 못했다. 이러한 현상은 hot 헤더온도(320℃)에서는 일어나지



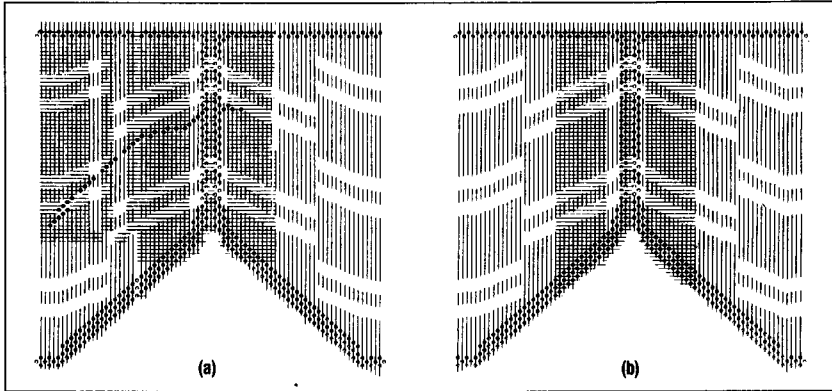
1 - steam generator vessel. 2- tube bundle. 3 - feedwater supply nozzle. 4 - steam separator. 5 - steam collection header. 6 - header seizure point (see text). 7 - submerged perforated region of header. 8 - non-perforated zone. 9 - inlet header. 10 - outlet header.

VVER-1000용 PGV-1000 증기발생기 단면도

- 않았다.
- 부식생성물과 침전물로 매워져 있던 rolling이 부족했던 부분에서는 부식이나 균열이 일어나지 않았다.
- 수질이 정상제한치를 벗어났을 때는 (특히 PH치 저하)헤더의 균열과정이 가속화되었다.

신뢰성 향상

- 앞서 말한 자료들은 이미 손상을 입은 헤더를 조사해서 얻은 결과이다. 그러나 불행히도 이미 수십개의 PGV-1000 증기발생기가 이미 제작 완료되었다.
- 앞으로 헤더의 신뢰성을 높이기 위해서는 다음과 같은 개선책이 강구되어야 한다.
- 응력 레벨을 수용할 수 있는 값까지 낮출 것.



PGV-1000 증기발생기 Cold 헷더의 손상부위 표시도. (a) Zaporozhe원전 증기발생기 제2호기. (b) 남우크라이나원전 증기발생기 4호기.

- perforated zone의 재질이 변하지 않도록 튜브 롤링과 헷더 드리링 방법을 개선할 것.
- rolling 부족으로 생기는 헷더와 튜브 사이의 crevice(틈)에서의 부식을 방지하지 위한 대책을 강구할 것.
- 수질을 개선할 것.
- 헷더의 perforated zone의 이상을 감시하기 위해 정기점검을 실시할 것.

헷더의 운전조건, 재료특성, 재질의 제작 및 운전조건에 따른 변화에 관한 자료를 통해 필요에 따라 헷더를 개조(증기발생기의 기본구조는 그대로 유지하면서)함으로써 증기발생기의 설계수명을 달성할 수 있을 것이다. 건설중인 발전소용으로 제작중인 증기발생기의 현상황을 재검토해 필요한 개조를 가해야 한다.

헷더문제를 일으키는 장애요인을 제거(신규 증기발생기의 경우)또는 경감(제작 또는 운전 중인 증기발생기의 경우)시키기 위한 시정사항이 강구되어야 한다.

이미 운전중인 증기발생기에는 다음과 같은 시정사항이 해당된다. 즉, 폭발식 rolling작업 중에 증기발생기 용기에 고착된 헷더의 upper neck를 풀을 것, perforated zone을 낮은 온도(450℃)로 열처리해서 헷더 재료의 원래의 靛性を 회복시킬 것, 2차계통 냉각수의 수질을 개선할 것(특히 급수의 PH치를 9 ± 0.2 로 유지

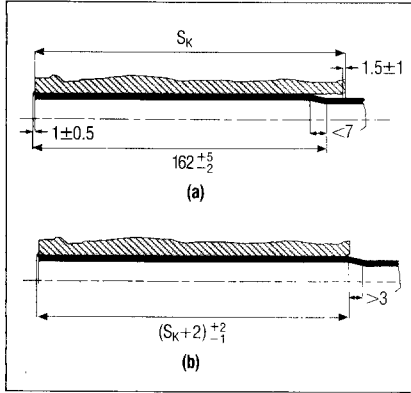
할 것).

이미 제작된 것으로 아직 사용하지 않고 있는 증기발생기에 대해서는 다음과 같이 시정해야 한다. 즉, 650℃의 열처리로 헷더의 내부응력을 완화할 것. 폭발식 대신에 유압식 롤링을 할 것. 헷더의 perforated zone과 non-perforated zone 사이의 transition zone의 재료조직의 불연속성으로 인한 영향을 줄일 것. 이에 대한 대책으로 헷더의 perforated zone에 사용되고 있는 10GN2MFA 재료 대신에 현재 440MWe급 VVER-110 원자로의 PGV-1형 증기발생기에서 사용되고 있는 OX18N10T 오스티나이트 스틸을 사용하는 방법도 시험중이다(440MWe급 VVER-110의 PGV-1형 증기발생기는 같은 수평형이지만 헷더문제는 일어나지 않고 있다).

상당기간 운전된 증기발생기는 앞에서 말한 보수방법이 제한된 범위내에서 적용된다.

손상된 헷더의 보수방법은 이미 개발이 끝나 실물 크기의 시험품을 통해 시험이 진행중이다. 이 보수방법의 요점은 결합있는 ligament 부분이 봉쇄되도록 플러그를 용접한다는 것이다. 그러나 이러한 보수방법의 효과는 아직 확인되지 않았다.

따라서 헷더 ligament 부분에 균열이 있는 증기발생기는 모두 교체하기로 결정을 내렸다.



열교환기 튜브의 cold헷더 벽에의 부착방법.
 (a) 폭발식 롤링/ 용접의 재래식방법에서는 틈이 생긴다.
 (b) 다시 롤링함으로써 틈이 없어진다.

증기발생기 교체작업은 이미 Novovoronezh-5호기, South Ukraina-1, 2호기, Zaporozhe-1 호기에서 시행되었고 이들 유닛에서는 하자가 발견되지 않은 것을 포함해 모든 증기발생기를 교체했다.

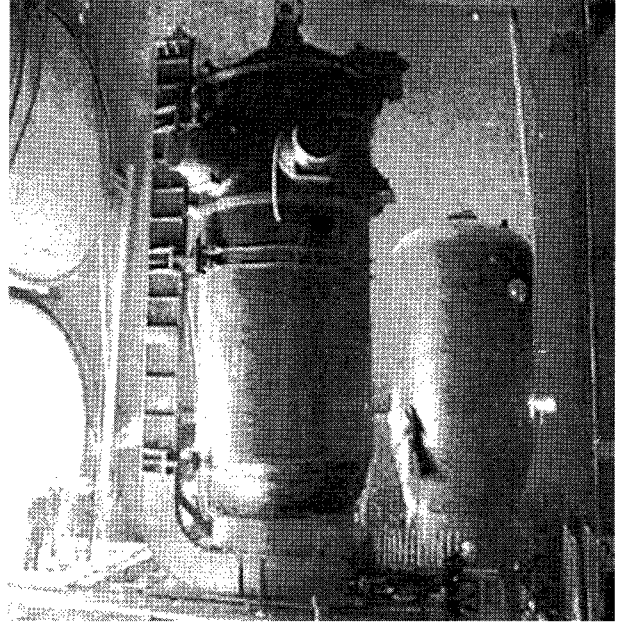
VVER-1000의 증기발생기를 교체하는데는 격납건물 벽에 특별한 출입구를 마련할 필요가 없다. 건설 당시에 사용했던 기존의 통로, 방, 기기운반 헛치를 이용해 모든 기기들의 반출입이 가능하다.

중앙 홀에는 건설 당시에 사용했던 10m × 5m 크기의 기기 반출입용 헛치가 마련돼있어 이것을 통해 기존의 증기발생기를 끄집어 내고 새 것을 넣으면 되며 중앙 홀에 있는 크레인도 이 인양작업에 사용된다. 증기발생기 용기에는 저탄소강의 lug이 3개 나와 있는데 여기에 trunnion과 행거가 용접된다. 특수한 traverse tie가 부착되고 인양작업은 polar크레인을 이용해 이루어진다.

헛치를 통과시킬 때 증기발생기는 수평에서 70도 각도로 기울려서 넣는다.

제거할 증기발생기에 연결된 배관이 절단되고 지지물도 되는데 이것을 새 증기발생기를 설치할 때 높이를 맞춰 재사용한다.

기존의 증기발생기를 격납설비로 부터 제거하기 전에 모든 헛치와 열려있는 곳을 밀폐한다. 용기표면에서 방출되는 방사선량은 0.5m



거리에서 약 6~10mrem/h다.

대체적으로 증기발생기 교체방법은 당초 발전소를 건설할 때의 방법과 크게 다를 것이 없다.

증기발생기 1대를 교체하는데 소요되는 시간은 2~3개월이다. 발전소의 증기발생기 4대를 모두 교체하는데는 약 6개월이 걸린다. 3~5년간 운전된 발전소의 4대의 증기발생기 전부를 교체하는 경우 받게 되는 피폭선량은 약 300rem이며 증기발생기 교체비용은 1대당 약 500만루블이다.

제거된 증기발생기 처리방안

제거된 증기발생기를 보관하기 위해 방사선 방호기준에 따라 발전소 구내에 임시보관설비가 가설된다. 제거된 증기발생기의 처리방법은 어려운 문제인데 현재 3가지 방안이 검토되고 있다.

- 재사용할 수 있게 보수한다.
- 해체해서 일부 부품을 재사용한다. (용기, 해체가능한 기기들)
- 절단, 용해해서 재료를 재사용한다.