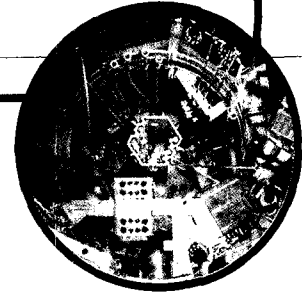


# 하나로의 안전성 관련 가동 중 검사

## In-Service Inspection for Safety Related Piping in HANARO



글 / 朴 龍 哲

(Park, Yong Chul)  
유체기계기술사, 공학박사,  
한국원자력 연구소 책임기술원.  
E-mail: ycpark@nanum.kaeri.re.kr

The primary cooling piping of HANARO is classified as safety class 3, seismic class 1 and quality class Q. This piping as safety related feature has been designed, manufactured and tested in accordance with ASME SEC. III, DIV. 1, Class 3. In October of 2000, the first step of the in-service inspection for this piping was carried out in accordance with ASME SEC. XI. This describes the results of the inspection including the preparation of in-service inspection plan and inspection method. It is verified through the results that the safety related piping is maintained the mechanical and structural integrities.

### 1. 서론

30MW의 연구용 원자로인 하나로는 1980년 초에 개념설계를 시작하여 1995년 2월에 초임계에 도달하고 현재 출력상승시험 중에 있다. 연구용 원자로는 상업용 원자로와 달리 핵반응을 이용하여 원자로 물리실험, 노 재료의 물성시험, 핵연료 성능시험 및 동위원소를 생산하며 그 때 발생하는 열은 1차 냉각계통의 열교환기를 통해 2차 냉각계통의 냉각탑에 의해 냉각된다.

이 1차 냉각계통은 순환펌프와 열교환기 및 배관으로 구성되며 원자로 가동 중에는 노심을 냉각하고, 정지 중에는 노심의 잔열을 자연대류현상에 의해 제거하며 방사선에 오염된 1차 냉각수를 취급하므로 원자로를 안전하게 유지하기 위해 계통의 건전성이 확보되어야 한다.

이를 위해 이 계통을 안전등급 3급, 내진등급 1

급 및 품질등급 Q등급으로 분류하였고, ASME SEC. III, Div. 1, Class 3에 따라 설계, 제작 및 검사를 하였으며 가동 중에는 ASME SEC. XI에 따라 10년 주기로 가동 중 검사를 하여야 한다.

하나로는 1차 냉각계통에 대해 가동 중 검사 계획서를 수립하고 이 검사를 수행하기 위해 준비하였으며 1차분 가동 중 검사를 2000년 10월에 실시하였다.

본 논문에서 가동 중 검사 계획서 개발과정과 1차분 검사과정 및 결과를 기술하였으며 안전성 관련 배관에 일체형으로 부착되어 있는 지지대는 기계적으로나 구조적으로 큰 결함 없이 건전성을 유지하고 있음을 확인하였다.

그리고 이 검사자료는 하나로의 건전성 확인뿐만 아니라 향후 발전될 수 있는 사고의 판단기준이 되고 하나로의 노화관리 기준이 되므로 기술적

가치가 있다.

## 2. 본 론

### 2.1 안전성 관련 기기

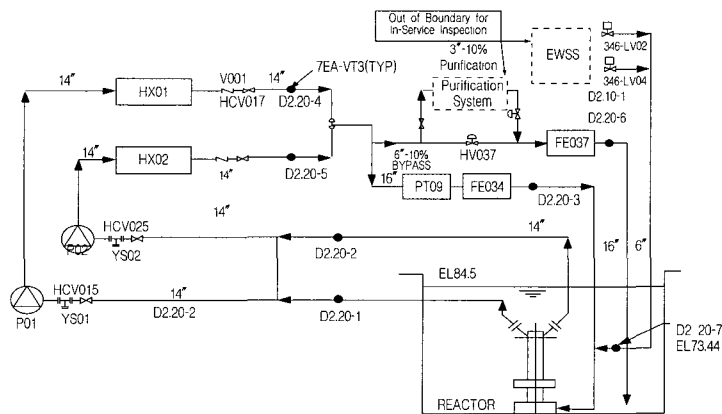
안전성 관련기기는 원자로 사고 시 안전하게 원자로를 정지시키기 위해 필요한 장치로서 기계적 구조적 건전성이 확보되어야 한다. 하나로에 경우 안전성에 관련되는 주요기기들은 원자로, 원자로 제어계통, 원자로 정지계통, 1차 냉각계통의 기기들이며 원자로 사고 시에도 기능을 유지하기 위해 안전등급 3급, 내진등급 1급 및 품질등급 Q등급으로 설계 제작되었다.

그 중 1차 냉각계통은 50% 용량의 순환펌프와 열교환기를 병렬로 설치하여 수조깊이 12.5m에 설치되어 있는 원자로와 배관으로 연결되어 있다. 순환펌프에 의해 1차 냉각수가 순환되면서 노심에서 발생하는 열을 흡수하여 열교환기를 통해 2차 냉각수와 열교환되고, 2차 냉각수에 흡수된 열은 냉각탑을 통해 외부 공기로 냉각된다. 냉각수 상실사고시 1차 냉각수를 유지하기 위해 1차 냉각계통과 1차 냉각계통에 연결된 배기와 배수관

및 계기류의 초기 밸브를 포함하여 안전등급으로 분류하였다.

이 1차 냉각수의 90%는 노심을 지나면서 열을 흡수하여 노심을 냉각하지만 나머지 10%는 노심을 우회하여 원자로 수조에 공급되어 원자로의 외부를 냉각하고 노심상부의 냉각수 흐름을 유도하기 위한 침니에서 순환펌프에 흡입되어 노심냉각수가 침니 상부로 솟구쳐 오르는 것을 억제한다. 이 유량의 일부는 1차 정화계통의 병렬로 설치된 여과기와 이온 교환기를 거치면서 냉각수에 포함된 방사성 이물질이 여과되고 흡착되어 냉각수를 정화한다. 1차 정화계통 고장으로 인한 1차 냉각수의 유출을 막기 위해 경계 밸브까지를 안전등급으로 분류하였다.

1차 냉각수 상실사고 시 냉각수를 보충하기 위해 비상보충수 계통은 100톤의 냉각수를 확보하여 비상대기상태에 있다. 냉각수 상실사고 시 원자로의 수위가 위험 수위(극저수위)에 도달하면 비상보충수 밸브가 자동으로 개방되어 냉각수를 공급하고, 수위가 회복되면 정지한다. 비상보충수는 1차 냉각수의 16인치 공급관에 연결되어 있으며 고장이 나는 경우 1차 냉각수를 확보하기 위해



〈그림 1〉 System Boundary of Safety Related Piping

1차 냉각계통에 연결되는 첫째 밸브까지를 안전 등급으로 분류하였다.

1차 냉각계통과 주변 기기와의 안전등급 경계는 비상보충수 공급밸브 및 1차 정화계통 경계밸브를 포함하여 <그림 1>과 같이 구획된다.

## 2.2 가동 중 검사계획

하나로에 적용되는 안전성 관련 기기들은 ASME SEC. XI에 따라 가동 중에도 건전성을 확인하기 위해 가동 중 검사를 실시하여야 한다. ASME SEC. XI는 DIV. 1, 2 및 3으로 구성되어 있으며 각각 경수로, 가스냉각로 및 액금로에 대한 가동 중 검사사항을 기술하고 있다. 하나로의 경우 경수로에 해당하므로 DIV. 1을 적용하였다.

그리고 DIV. 1은 세부항목으로 구분되어 있으며 IWA에서 IWF까지는 검사 일반사항, 안전등급별 검사사항, 기기부품과 수조라이너 및 지지대의 검사사항을 기술하고 있으며 IWL, IWP, IWV는 경수로의 콘크리트 부품, 펌프 및 밸브에 대한 검사요건을 기술하고 있다. 하나로의 경우 안전등급 3에 해당하므로 IWD를 적용하였으며 펌프 및 밸브에 대해서는 각각 IWP와 IWV에 따라 3개월 단위로 점검하고 있다.

IWD는 검사범주에 따라 적용방법을 달리하고 있으며 그 범주는 D-A, D-B 및 D-C로 분류된다. 검사범주 D-A는 원자로를 안전하게 정지시키는 계통, D-B는 비상시 노심냉각 및 잔열을 제거하는 계통 그리고 D-C는 사용 후 핵연료 저장조의 잔열을 제거하는 계통에 각각 해당한다. 하나로 1차 냉각계통은 운전시 노심의 열을 제거하므로 D-B 범주로 분류하였다.

가동 중 검사방법은 육안검사, 표면검사, 체적검사 및 이 방법을 조합한 대안 검사가 있고, 육안검사는 다시 VT-1, VT-2, VT-3 검사로 분

류된다. VT-1 육안검사는 부품표면의 균열, 마모, 부식 침식 및 물리적 손상상태를 결정하기 위해 수행되고, VT-2 육안검사는 계통의 수압 또는 기능시험 중에 누설을 찾기 위해 수행된다. VT-3 육안검사는 부품의 기계적 구조적 건전성을 확인하기 위해 수행되며 VT-1 육안검사와 유사하여 통합되어 관리되고 있다. 하나로의 안전성 관련 배관은 검사범주가 D-B에 해당하므로 VT-2와 VT-3 육안검사를 수행하여야 한다.

VT-2 육안검사는 계통기능시험, 계통가동 중 시험 및 계통수압시험으로 구분된다. 계통기능시험은 원자로의 정상운전 중에는 작동하지 않고 비상시를 대비해 있는 계통의 기능을 확인하고 누수상태를 확인하는 시험이다. 하나로 1차 비상보충수 공급계통 전체가 안전등급으로 분류된 것은 아니지만 비상보충수 공급관이 원자로 흡입관과 일체형으로 되어 있어 이 관을 운전조건으로 가압하여 누수상태를 확인할 수 없기 때문에 비상보충수를 10분간 공급하고 그 때 안전성 관련 배관의 누수상태를 확인하도록 검사 번호 D2.10-1로 지정하여 <그림 1>에 표시하였다. 한편으로 비상보충수 계통은 시험루프를 통해 18개월 주기로 계통기능시험을 실시하여 모든 기능이 항상 운전상태로 유지되고 있다.

계통수압시험은 1차 계통과 관련 계통의 경계 밸브까지를 포함하여야 한다. 1차 냉각계통은 개방형 배관이므로 밀폐하여 압력시험을 수행할 수 없으므로 정상압력 및 유량 하에서 4시간 운전하고 누수상태를 확인하도록 하였으며 검사 번호 D2.10-2로 지정하여 <그림 1>에 표시하였다.

그리고 계통가동 중 검사는 검사범주가 D-B인 경우에는 적용되지 않으므로 하나로의 안전성 관련 배관에는 적용하지 않았다.

VT-3는 안전등급 3급인 경우 4인치 이상의 가압배관에 일체형으로 부착된 지지대에 대하여

표면검사를 하도록 규정하고 있다. 하나로의 안전성 관련 배관의 경우 해당하는 일체형 배관 지지대는 총 7개이며 검사 번호 D2.20-1에서 7까지 지정하여 <그림 1>에 나타내었다. 이 중에서 검사번호 D2.20-6과 7은 수중에 있어 접근이 불가능하여 수중카메라를 이용한 간접육안검사를, 나머지는 접근이 용이하므로 직접육안검사를 각각 수행한다.

이러한 검사점들은 10년 주기로 1회 완료하여야 하며 약 30%씩 분할하여 순차적으로 검사하도록 규정하고 있다. 이러한 것은 원자력 발전소의 경우 일시에 검사하는 경우 많은 시간이 소요되어 정지기간이 길어지므로 효율적인 관리 측면에서 분할하는 것으로 판단된다. 하나로의 경우 VT-2 검사 2가지와 VT-3 검사 7가지이며 이들을 분할하여 <표 1>에 10년 주기의 검사일정을 나타내었다.

그리고 VT-3 육안검사는 가동 전에 육안검사를 실시하여 가동 중의 검사결과와 비교하여 결합의 발전추이를 예측하도록 하고 있으나 검사범주가 D-B인 경우 이를 면제하고 있어 하나로의 경우 제외되었다.

<표 1> In-service Inspection Schedule for Safety Related Piping

ITEM NO	EXAMINATION POINT	METHOD	INSPECTION SCHEDULE(year)												
			0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
D2.10-1	EWSS	Functional test												X	
D2.10-2	PCS	Hydrostatic test													X
D2.10-3	PPS	Hydrostatic test													X
D2.20-1	14" suction pipe anchor	VT-3						X							
D2.20-2	14" suction pipe anchor	VT-3						X							
D2.20-3	16" discharge pipe anchor	VT-3						X							
D2.20-4	14" discharge pipe support	VT-3						X							
D2.20-5	14" discharge pipe support	VT-3													X
D2.20-6	6" bypass pipe anchor	VT-3													X
D2.20-7	6" bypass pipe support	VT-3													X

### 2.3 1차분 가동 중 검사

하나로의 가동중 검사 기준일은 최초 임계시점인 1995년 2월 8일이며 첫검사는 5년차에 해당하는 2000년 2월 8일로 정하고 원자로 운전계획과 그 유효기간을 고려하여 2000년 10월 8일에서 15일까지 1주간을 계획하였다.

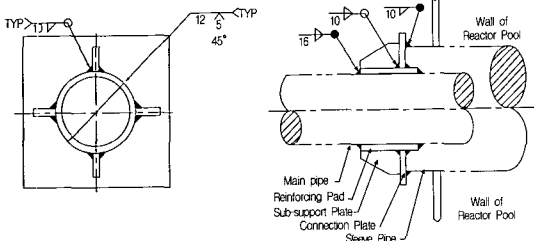
가동 중 검사를 실시하기 위해서는 ASME SEC. XI에 따른 2급 육안 검사자를 확보하여야 하고, 검사 절차를 준비하여야 한다. 하나로의 경우 해당 검사자가 없으므로 전문업체에 용역계약을 체결하였다. 이 용역계약에는 안전성 관련 배관에 대하여 검사 절차서 작성, VT-3 육안검사 실시 및 평가와 원자로 구조물 및 주변기기에 대한 육안검사도 포함하였다. 그리고 향후 하나로의 검사요원을 확보하기 위해 육안 검사자 자격취득 및 유지관리 절차를 작성하고 하나로 요원들의 자격취득을 위해 교육과 자격시험을 실시하도록 계약에 포함하였다.

검사 전에 준비할 사항으로 검사원 및 검사절차서가 확보되어야 하므로 검사일정 및 검사 절차를 규제기관(원자력 안전기술원)에 송부하고 규제기관 검사자의 입회를 요청하였다. 검사일은 10월 9일과 10일로 정하고 원자로는 10월 7일에 정지되었다.

1차 분 검사는 <표 1>과 같이 1차 냉각계통의 16인치 공동 송출관 1개와 14인치 흡입관 두 개에 대한 각각의 고정 지지대와 14인치 펌프 송출관의 수직배관 지지대 1개이며 검사범위는 주배관과 일체형을 이루고 있는 용접부의 주배관 두께를 폭으로 하는 구간까지이다.

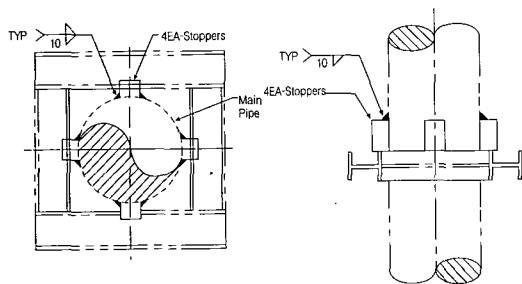
고정 지지대는 1차 냉각배관이 원자로 수조를 관통하는 부분에 설치되며 냉각수 순환에 따른 수평방향의 응력을 지지하고 수조 벽 관통시의 누수를 방지하기 위해 연결판, 보강판 및 보조 보강판의 용접 구조물이다. 연결판은 수조 벽을 관통하

기 위한 슬리브 관에, 보강관은 주배관에 <그림 2>와 같이 각각 용접되어 있다.



<그림 2> Configuration of Pipe Anchor Support

그리고 14인치 냉각수 송출관의 지지대는 냉각 펌프와 열교환기를 연결하는 수직배관에 설치되며 유동에 의한 수직응력과 그 자중을 지지하기 위해 4개의 지지판(stopper)이 원주방향으로 90도 간격으로 설치되었다. 각 지지판은 스테인리스강으로 만들어진 사각 바이며 <그림 3>과 같이 상부와 좌우측면이 주 배관과 용접되어 보조지지대에 의해 자중과 수직응력을 받치고 있다



<그림 3> Configuration of Pipe Under Support

VT-3 육안검사는 용접부 검사로서 검사자가 직접 눈으로 틈새, 설정치, 물리적 변위, 헐거운 부분, 빠진 부분, 파편, 부식, 마모, 침식확인 또는 볼트 연결부위, 용접 연결부위의 건전성 상실 여부 등을 결정하기 위해 수행되었다. 고정지지

대는 용접구조물이므로 용접부의 부식 유무에 대해 주로 관찰하였으며 각 용접부는 결함 없이 건전하게 유지되고 있었다. 수직배관 지지대의 경우 보조 지지대 위에 지지판이 정 위치에 놓여있었고, 용접부위의 부식상태를 관찰하였으며 모든 용접부위는 결함 없이 건전한 상태를 유지하고 있었다.

### 3. 결론

하나로의 안전성 관련 배관에 대하여 1차분 가동 중 검사를 수행하면서 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 가동 중 검사 계획서를 개발하여 10년 주기의 하나로 안전성 관련 배관에 대한 검사계획을 수립하고, VT-3 육안검사 절차서를 개발하여 검사방안을 확립하였으며 그 외에도 VT-2 육안검사의 압력시험절차서도 동기간에 개발하였다.
- 2) 안전성 관련 배관의 VT-3 육안검사 1차분을 실시하였으며 모든 검사부위는 기계적 구조적 건전성을 유지하고 있음을 확인하였다. 이로 인하여 하나가 1995년 2월에 초임계에 도달한 이후 출력상승시험을 수행하며 안전하게 유지되는 것으로 판단하였다.
- 3) 이 검사자료는 하나의 건전성 확인뿐만이 아니라 향후 발전될 수 있는 사고의 판단기준이 되고, 하나로 노화관리의 기준이 되므로 기술적 가치가 있다.

(원고 접수일 2001. 3. 21)