

하나로 핵연료 노내 조사 시험 설비 안전 등급 압력 배관의 가동 전 검사를 통한 건전성 평가

이정영 박수기 이종민 심봉식 지대영 안성호 김영기
한국원자력연구원 원자력기초과학연구본부 연구로공학부

서론

하나로 핵연료 노내 조사 시험 설비(Fuel Test Loop, FTL)는 핵연료의 노내 종합 성능 조사 시험을 위한 설비로서 설비의 활용성과 이용자의 조사 요건 등을 고려하여 노심 조사공(IR홀)에 최대 3-Pin 까지 조사 시험을 수행할 수 있는 설비이다.

하나로의 IR홀에 설치되는 핵연료 노내 조사 시험 설비에서의 핵연료 조사 시험은 상용 발전로에 비하여 높은 속중성자속과 선출력을 얻을 수 있어 개발중인 핵연료의 시험 요건을 충족시킬 수 있으며 시험 핵연료의 인허가 자료 확보에도 유리하다.

하나로 핵연료 노내 조사 시험 설비는 상용 원자로 조건을 모사하는 만큼 설계, 제작, 인허가 및 설치

시운전 등이 상용 원자로와 비교할 때 규모만 작을 뿐 기술적으로 모든 부분이 거의 유사하다.

따라서 핵연료 노내 조사 시험 설비 개발은 원자력발전소의 원자로 계통과 마찬가지로 각 분야의 공학 기술이 필요하다.

하나로 핵연료 노내 조사 시험 설비는 크게 노내 시험부와 노외 공정 설비로 구성되며 노내 시험부에 최대 3개의 핵연료봉까지 노내 시험이 가능하도록 노외 공정 설비를 구성하고 있다.

노내 시험부는 이중의 스테인리스 압력관으로 구성되어 있어 안전성을 확보하도록 제작되었다.

노외 공정 설비는 주냉각수 계통, 비상 냉각수 계통, 기기 냉각수 계통 등 다수의 공정 계통으로 구성되었다.

하나로 핵연료 노내 조사 시험

설비는 120kW의 열 제거 능력과 설계 압력 17.5Mpa, 설계 온도 350℃ 및 수화학 조건 등과 같은 계통 조건을 보유하고 있는 정상 상태 핵연료 조사 시험용 루프 시설로서, 2001년 말에 개념 설계에 착수하여

2002년 설계 요건 및 설계 개념을 확정하고, 2004년 기술 사양서 및 공정 계통도(P&ID) 작성 등 상세 설계를 완료하였다.

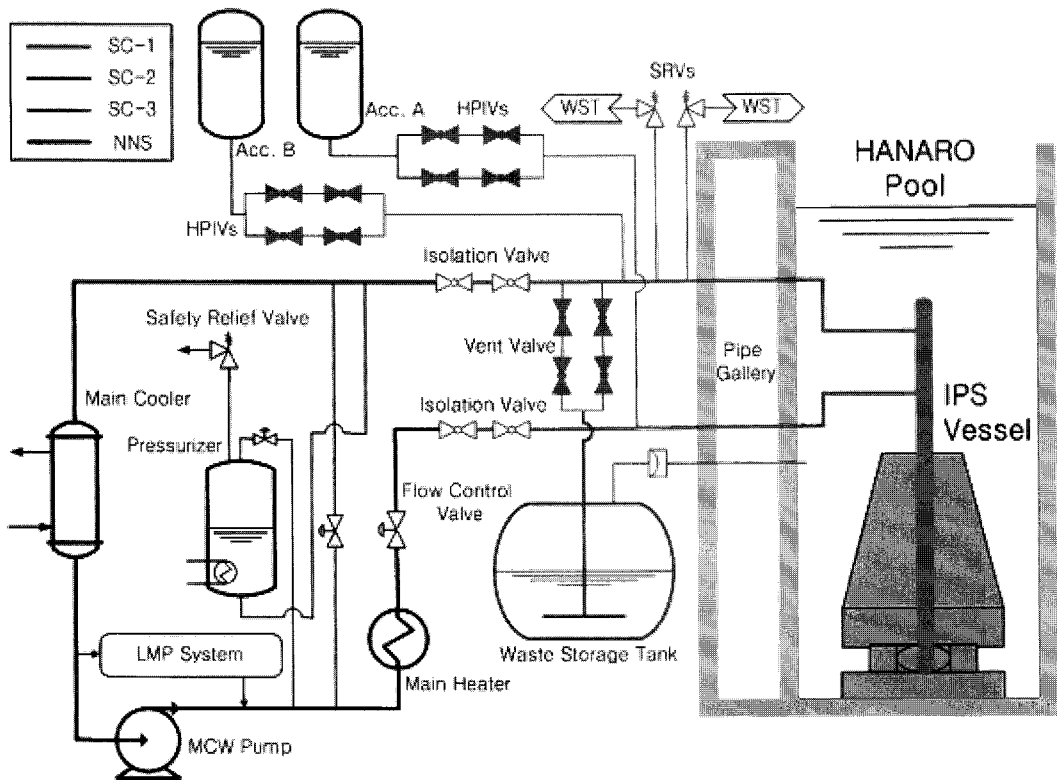
2006년에 설치 인허가를 획득하여 2007년에 설치를 완료하였으며, 현재 상온·상압에서의 시운전을 종료하고 고온·고압 운전을 위한 시운전을 수행 중에 있다.

설치 공사가 완료되어 시운전 중에 있는 핵연료 노내 조사 시험 설비의 안전 등급 압력 배관에 대한 건전성 평가를 위하여 가동 전 검사를 하나로 현장에서 수행하였으

〈표 1〉 검사 대상 현황

구분	배관/배관 지지대/방진기 NO.	NOMINAL DIAMETER (mm)	SAFETY CLASS	SEISMIC CLASS	QUALITY CLASS	PRESERVICE INSPECTION (Note)
안전배관	HAN-FL-210-40-L021-BS1	40	SC-1	I	Q	S
	HAN-FL-210-65-L022-BS1	65	SC-1	I	Q	U & S
	HAN-FL-210-80-L041-BS1	80	SC-1	I	Q	U & S
	HAN-FL-210-40-L042-BS1	40	SC-1	I	Q	S
	HAN-FL-210-15-L043-BS1	15	SC-1	I	Q	S
	HAN-FL-210-15-L044-BS1	15	SC-1	I	Q	S
	HAN-FL-220-15-L001-BS2	15	SC-2	I	Q	S
	HAN-FL-220-15-L002-BS2	15	SC-2	I	Q	S
	HAN-FL-220-15-L003-BS2	15	SC-2	I	Q	S
	HAN-FL-220-15-L011-BS1	15	SC-1	I	Q	S
	HAN-FL-220-15-L012-BS1	15	SC-1	I	Q	S
	HAN-FL-220-15-L014-BS1	15	SC-1	I	Q	S
	HAN-FL-220-15-L016-BS1	15	SC-1	I	Q	S
	HAN-FL-220-15-L021-BS2	15	SC-2	I	Q	S
	HAN-FL-220-15-L022-BS2	15	SC-2	I	Q	S
	HAN-FL-220-15-L023-BS2	15	SC-2	I	Q	S
	HAN-FL-220-15-L031-BS1	15	SC-1	I	Q	S
	HAN-FL-220-15-L032-BS1	15	SC-1	I	Q	S
	HAN-FL-220-15-L034-BS1	15	SC-1	I	Q	S
	HAN-FL-220-15-L036-BS1	15	SC-1	I	Q	S
	HAN-FL-220-20-L041-BS2	20	SC-2	I	Q	S
	HAN-FL-220-20-L042-BS2	20	SC-2	I	Q	S
	HAN-FL-220-15-L051-BS2	15	SC-2	I	Q	S
	HAN-FL-220-15-L052-BS2	15	SC-2	I	Q	S
	HAN-FL-220-20-L061-BS1	20	SC-1	I	Q	S
	HAN-FL-220-20-L062-BS1	20	SC-1	I	Q	S
	FL-210-04-L001(DN100)	100	SC-1	I	Q	U & S
	FL-210-25-L003(DN65)	65	SC-1	I	Q	U & S
	FL-210-25-L004(DN65)	65	SC-1	I	Q	U & S
	FL-210-25-L005(DN65)	65	SC-1	I	Q	U & S
	FL-210-04-L007(DN100)	100	SC-1	I	Q	U & S
배관 지지대	FL-200-PG-S001	100	SC-1	I	Q	V
	FL-200-PG-S002	100	SC-1	I	Q	V
		65				
	FL-210-PG-S001	100	SC-1	I	Q	V
	HAN-FL-1-210-S010	40	SC-1	I	Q	V
	HAN-FL-1-210-S011	80	SC-1	I	Q	V
	HAN-FL-1-210-S012	40	SC-1	I	Q	V
방진기	HAN-FL-1-210-S013	40	SC-1	I	Q	V
	220-S001	-	SC-1	I	Q	V
	220-S002	-	SC-1	I	Q	V
	210-S007	-	NNS	II	T	V
	210-S008	-	NNS	II	T	V
	210-S009	-	NNS	II	T	V
	210-S012	-	SC-1	I	Q	V
	210-S013	-	SC-1	I	Q	V
	220-S003	-	SC-3	I	Q	V
	210-S021	-	SC-1	I	Q	V
	210-S025	-	SC-1	I	Q	V

Note : Preservice Inspection
 U : Signifies volumetric preservice inspection required (UT)
 S : Signifies surface preservice inspection required (PT)
 V : Signifies visual preservice inspection required (VT)



〈그림 1〉 하나로 핵연료 노내 조사 시험 설비의 설계 기준

며 가동 전 검사에 계획된 점검 대상과 범위는 가동 전 검사 계획서에 따라 압력 배관, 배관 지지대 및 방진기가 포함되었다.

금번 가동 전 검사에서 추가 검사되었거나 검사가 제외된 부위 없이 전 부위에 대한 검사를 수행하였다.

핵연료 노내 조사 시험 설비의 가동 전 검사

1. 검사 대상 및 범위

핵연료 노내 조사 시험 설비의

가동 전 검사에 계획된 점검 대상과 범위는 향후 가동중 검사 결과와 비교하기 위한 자료 취득을 위해 ASME Section XI의 요구 조건에 따라서 안전 등급 배관, 배관 지지대, 방진기가 선정되었고, 수행된 점검 부위는 안전1등급 2"이상의 배관에 대한 체적 검사(UT) 20개소 및 안전 등급 배관에 대한 표면 검사(PT) 173개소가 포함되었으며, 또한 배관 지지대 7개소 및 방진기 11개가 포함되었다.

검사 대상 중 기량 검증(PD)을 필요로 하는 체적 검사는 외부의 비파괴 검사 업체에서 용역으로 별

도로 수행하였으며 방진기의 열변위 측정은 핵연료 노내 조사 시험 설비의 시운전 시험중 검사를 수행하였다.

기타 대상은 사용 전 검사 1단계 중 수행된 용접 검사서 및 설치 검사서로 대체하였다. 검사 대상 현황은 <표 1>에 나타내었다.

2. 검사 기준

안전 등급 배관, 배관 지지대 및 방진기는 「전력산업기술기준의 원자로시설 기술기준 적용에 관한 지침(KEPIC MN, MI, MO 2003년

〈표 2〉 방진기 열팽창 측정 시험 결과

SNUBBE NUMBER	PISTON POSITION (mm)		SNUBBER READINGS									
			운전정지		저온대기 1		저온대기 2		고온대기- 고온운전		운전정지	
	초기값	허용변위	위치	판정	위치	판정	위치	판정	위치	판정	위치	판정
210-S012A	67	-67 ~ +33	67	Pass	68	Pass	70	Pass	78	Pass	67	Pass
210-S012B	67	-67 ~ +33	67	Pass	67	Pass	63	Pass	52	Pass	65	Pass
210-S013	33	-33 ~ +67	33	Pass	33	Pass	30	Pass	28	Pass	30	Pass
210-S021	70	-70 ~ +30	70	Pass	70	Pass	69	Pass	65	Pass	70	Pass
210-S025	50	-50 ~ +50	50	Pass	50	Pass	50	Pass	43	Pass	50	Pass
220-S001	52	-52 ~ +48	52	Pass	52	Pass	53	Pass	53	Pass	52	Pass
220-S002	54	-54 ~ +46	54	Pass	54	Pass	54	Pass	57	Pass	53	Pass
220-S003	45	-45 ~ +55	45	Pass	45	Pass	45	Pass	43	Pass	44	Pass
210-S007	78	-78 ~ +22	78	Pass	78	Pass	78	Pass	75	Pass	78	Pass
210-S008	35	-35 ~ +65	35	Pass	35	Pass	35	Pass	37	Pass	35	Pass
210-S009	50	-50 ~ +50	50	Pass	50	Pass	50	Pass	51	Pass	50	Pass

판)」에 따른 원전 가동 전 검사 또는 이와 상응되는 기술 기준(ASME Code Sec. XI, 1998년판 2000년 추록)을 적용하였다.

하나로 핵연료 노내 조사 시험 설비의 안전 등급 1, 안전 등급 2 및 안전 등급 3의 배관은 〈그림 1〉과 같이 핵연료 노내 조사 시험 설비의 P&ID 및 안전성 분석 보고서에 따라 분류되었다.

안전 등급 1배관에 대한 검사는 ASME Section XI의 Article IWB-2200의 요구에 따라 안전 등급 1배관 중 공칭 직경 2" 이상은 100% 체적 검사 및 표면 검사를 수행하며 공칭 직경이 1"보다 크고 2" 미만은 100% 표면 검사를 수행한다.

IWB-1220의 제외 기준에 따라서 안전 등급 1배관 중 공칭 직경

1" 이하는 검사로부터 제외되었다.

안전등급 2배관에 대한 검사는 ASME Section XI의 Article IWC-2000의 요구에 따랐으며 IWC-1220의 제외 기준에 따라서 안전 등급 2배관 중 비상 냉각수 계통을 제외한 공칭 크기 4" 이하는 검사로부터 제외되었다.

따라서 비상 냉각수 계통의 안전 등급 2배관(공칭 직경 2" 이하)은

기기 및 밸브 연결 부위를 중심으로 용접부의 25% 이상에 대하여 표면 검사를 수행하였다.

안전 등급 3배관에 대한 검사는 ASME Section XI의 Article IWD-2000의 요구에 따라 수행하였으며, IWD-1220의 제외 기준에 따라서 공칭 직경 4" 이하의 배관과 Hanger 혹은 지지물은 검사로부터 제외되었다.

안전 등급 배관의 배관 지지대에 대한 검사는 ASME Section XI의 Article IWF-2000의 요구에 근거를 두었다.

IWF-1230의 제외 기준에 따라서 가동 전 검사가 면제되지 않는 배관 지지대(가동 전 검사 대상 안전 등급 배관에 설치된 지지대)의 검사를 IWF-2500에 따라 육안 검사(VT-3)를 수행하였다.

안전 등급 배관의 방진기에 대한 검사는 ASME Section XI의 Article IWF-5000의 요구에 근거를 두었으며, IWF-1230의 제외 기준에 따라서 가동 전 검사가 면제되지 않는 방진기의 검사를 IWF-5200에 따라 육안 검사 및 성능 검사를 수행하였다.

3. 검사 방법

하나로 핵연료 노내 조사 시험 설비의 가동 전 검사에서 적용한 비파괴 검사 방법에는 육안 검사, 액체 침투 탐상 검사, 기량 검증(PD)을

포함한 초음파 탐상 검사 등이 있으며, 이 검사 방법들은 ASME Code 요구 사항에 적합함이 입증된 절차서에 따라 수행되었다.

육안 검사는 배관 지지대, 방진기 등에 적용된 검사 방법으로 직접 또는 원격으로 수행하며, 비파괴 검사 절차서 HAN-FL-HD-WPP-W006에 따라 수행되었다.

액체 침투 탐상 검사는 압력 배관에 적용된 용접부 검사 방법으로 비기공성 오스테나이트 또는 탄소강의 표면 검사에 적용하며 비파괴 검사 절차서 HAN-FL-HD-KIT-PT-002 및 KIT-PT-401에 따라 수행하였다.

초음파 탐상 검사는 공칭 직경 2" 이상의 압력 등급 배관에 적용한 비파괴 검사 방법이며 비파괴 시험 절차서 및 기량 검증 절차서에 따라 수행되었다.

특히 초음파 탐상 검사는 가동 전 검사에서 안전 등급 배관의 건전성을 확인하기 위한 중요한 검사 방법으로 검사체에 대한 두께 및 형상 등을 사전에 조사하여 초음파의 빔 진행 방향을 예상하고 사각 횡파 검사에 필요한 내부 형상 등에 관한 정보를 확보하기 위해 수직 종파를 사용하였다.

접근 가능한 최소한의 각도인 사각 횡파 60°와 추가로 사각 횡파 70°를 이용하여 용접선과 평행한 지시들을 검사하였다.

가능한 용접선을 중심으로 양쪽

면에서 모두 수행되었다. 기하학적 형상으로 인해 한쪽 면에서 검사가 수행된 경우 70° 횡파를 추가로 적용하였으며 45° 횡파를 이용하여 용접선과 수직 방향으로 존재하는 결함들도 검사하였다.

4. 검사 결과

안전 등급 배관 및 관련 구조물의 표면 검사(PT) 결과에 따라 기록할 만한 지시가 있을 경우, 즉 결함으로 의심되는 모든 지시는 결함 지시 보고서로 작성되며, 체적 검사의 경우 배관 UT 절차서에 따라 결함으로 의심되는 모든 지시는 진폭과 관계없이 Wmax/Lmax 및 L1/L2를 기록하며, 기록된 지시는 Level III에 의해 평가되었다.

설치 공사가 완료되어 계통 성능 시험중에 있는 하나로 핵연료 노내 조사 시험 설비 중 안전 등급 배관 및 관련 구조물의 가동 전 검사에서는 기록할만한 지시가 발견되지 않았으며 가동 전 검사 부위는 모두 건전한 것으로 평가되었다.

하나로 핵연료 노내 조사 시험 설비의 시운전 시험 중 가동 전 검사의 일환으로 수행한 방진기의 열팽창 측정 결과는 <표 2>에 나타내었다.

하나로 핵연료 노내 조사 시험 설비(FTL) 안전 등급 배관 및 관련 구조물의 가동 전 검사에 대한 품질 보증 활동은 관련 품질 보증

계획서 및 절차서에 따라 검사 시 비파괴 시험 업체는 품질 검사 계획서를 작성하여 품질 보증 활동을 수행하였다.

금번 가동 전 검사에 대한 현장 품질 보증 활동은 설치 공사 검사 단계부터 가동 전 검사 종료 단계 시까지 사전에 수립된 품질 검사 계획서에 의거하여 유자격 품질검사자에 의해 수행되었으며, 가동 전 검사 품질에 영향을 끼치는 품질 위배 사항은 발견되지 않았다.

따라서 하나로 핵연료 노내 조사 시험 설비에 대한 가동 전 검사의 품질 보증 활동은 적용 기준, 품질 보증 계획서 및 절차서에 따라 적절히 수행된 것으로 판단되었다.

결론

하나로 핵연료 노내 조사 시험 설비의 가동중 검사는 안전 등급 배관의 체적 검사 20개소, 표면 검사 173개소, 배관 지지대 7개소, 그리고 방진기 11개로 총 211개소가 대상이 되었다.

이중 표면 검사와 배관 지지대 및 방진기의 육안 검사는 비파괴 검사 성적서를 포함한 설치 검사 성적서 등으로 대체하였다.

방진기에 대한 열팽창 측정 검사는 시운전 시험중에 수행하였다.

기량 검증을 포함한 체적 검사를 위하여 핵연료 노내 조사 시험 설비 안전 등급 배관 가동 전 검사 용역

계약에 의거하여 가동 전 검사 계획서에 따라 한국원자력연구원 하나로 원자로 현장에서 수행하였다.

금번에 수행한 가동 전 검사 결과 가동 전 검사 부위는 모두 건전한 것으로 판단되었다.

하나로 핵연료 노내 조사 시험 설비의 가동 전 검사 결과 자료는 가동중 검사의 기본 자료로 활용될 예정이며, 본 설비의 안전한 운전과 향후 본 시설을 활용한 신형 핵연료의 개발에 일익을 담당하게 되어 국내 원자력 기반 기술 확립에 기여하게 될 것이다.

후기

본 연구는 원자력연구개발 중장기계획사업에 의해서 수행되었다.

<참고 문헌>

1. 하나로 안전성분석보고서, KAERI/TR-710/96, 한국원자력연구소, 1996.
2. 핵연료노내조사시험설비 안전성분석보고서, 한국원자력연구소, 2006.
3. 과학기술부 고시 2002-17호, 전력산업기술기준 적용 규정
4. KEPIC MN-2000, 전력산업기술기준(원자력발전소 가동전검사)
5. ASME Code Sec. XI(1998년판 2000년 추록)
6. 하나로 핵연료노내조사시험설비 운영기술지침서
7. 하나로 핵연료노내조사시험설비 P&ID
8. HAN-FL-200-PD-S001, Rev.3
9. HAN-FL-200-PD-S002, Rev.3
10. HAN-FL-E-070-DM-H001_R1, Design Manual - 기계분야
11. 올진 5호기 가동전검사 계획서(기기,배관 및 구조물의 비파괴 검사(2004. 3))
12. 영광 원자력 발전소 1호기 제2주기 장기 가동중검사 계획서(1997. 5)
13. 용접문서절차서, HAN-FL-HD-WPP-W001, Rev.0
14. 육안검사절차서, HAN-FL-HD-WPP-W006, Rev.0
15. 비파괴시험절차서(PT), HAN-FL-HD-KIT-PT-002, Rev.0
16. 비파괴시험절차서(RT), HAN-FL-HD-KIT-RT-002, Rev.0
17. 오스테나이트계 배관용접부의 초음파탐상 검사절차서, KPD-UT-2, Rev.0