

# 원자로건물내 재장전수탱크 여과기 육안점검용 수륙양용 로봇개발



김종석  
한수원 중앙연구원 기기성능그룹장

## 1. 개황

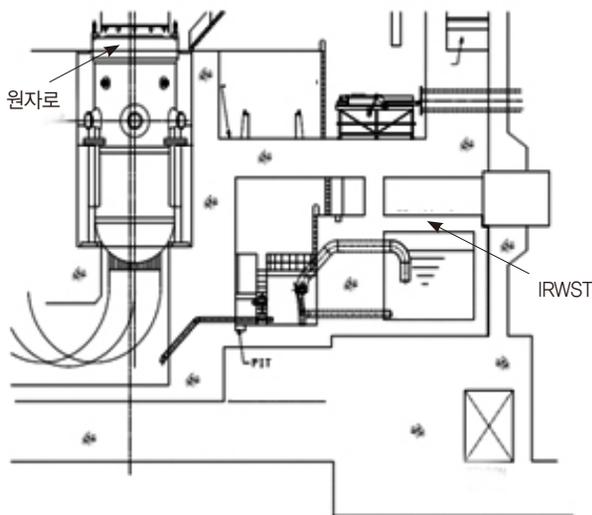
IRWST(In-Containment Refueling Water Storage Tank)는 APR1400 원전에서 사용되는 원자로 건물 내 재장전수 탱크이며, 원자로 비상냉각수를 저장하고 있다. IRWST는 내부에 설치된 여과기 집합체를 통해 원자로 비상냉각수의 이물질을 여과

하도록 설계되어 있다. NRC는 Reg. Guide 1.82에 따라 랙, 스크린, 저수조 토출구 등은 핵연료 재장전 주기마다 구조물의 노화 감쇠 혹은 부식 여부에 대한 검사를 요구하고 있으며 국내 원전에도 본 규정이 적용되고 있다. IRWST는 도넛형 콘크리트 탱크와 스테인리스 스틸 라이너 플레이트로 구성되어 있으며, 바닥에 원주방향으로 4개의 여과기 집합체가 설치되

어 있어 냉각수의 이물질질을 여과한다. IRWST 냉각수는 핵연료와 접하여 순환되며 고 방사선 입자를 포함하게 되므로 내부는 높은 방사선 구역이 된다. 작업자가 여과기 육안점검을 수행할 경우 방사선 피폭이 우려되며, 여과기 집합체 검사를 위해 IRWST를 비우는 기간도 비교적 제한적인 관계로 4개의 여과기 집합체 점검을 위해서는 수중 다이버를 동원해야 하는 문제점을 안고 있다. 1개의 여과기 집합체에는 3.2m(길이)×1.5m(높이)의 여과기 핀 36개가 0.15m의 좁은 간격에 수직으로 설치되어 있어 수중에서 다이버가 랜턴을 이용하여 여과기 반대쪽의 이상여부를 확인하거나 사진 촬영하는 것이 매우 어렵다. 이러한 이유로 여과기 핀들의 좁은 틈에 카메라를 삽입하여 육안 점검을 수행하는 전용 검사장비의 도입이 필요하였다.

## 2. 현황

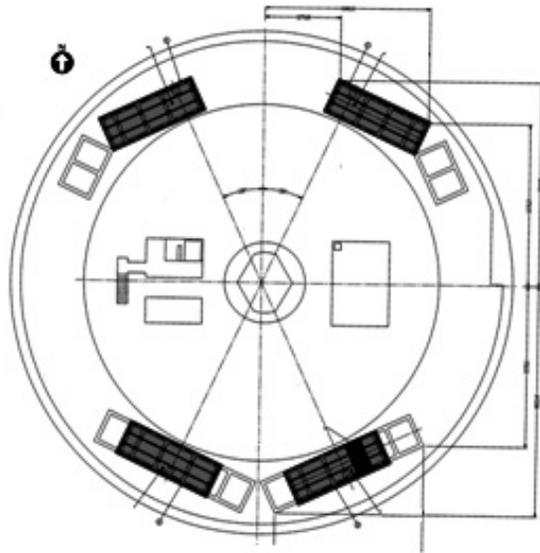
그림 1, 2는 APR1400형 원전의 IRWST 형상을 수직 및 수평단면으로 나타낸 것이며, 그림 3은 IRWST



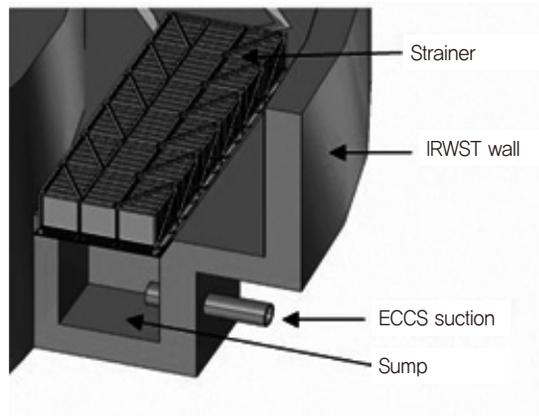
[그림 1] IRWST 수직단면

여과기 설치 형상을 나타낸 그림이다. IRWST 여과기에 접근하려면 1.2m의 사각형 맨홀을 통하여 수심 5.4m의 바닥까지 내려가야 한다. 여과기 육안점검을 위해 잠수부가 투입될 경우 사다리를 타고 내려가야 하며, 잠수정과 같은 장비를 이용할 경우 윈치를 이용하여 IRWST 수 표면에 안착시킨 후 부력과 추진력으로 이동이 가능하다.

한수원은 IRWST 여과기의 육안점검을 위해 표 1



[그림 2] IRWST 수평단면



[그림 3] IRWST여과기 설치 형상

과 같이 여러가지 대안을 조사한 결과 전용 검사 장비를 개발하여 원격으로 점검하는 방법이 가장 적합한 것으로 결정하였다.

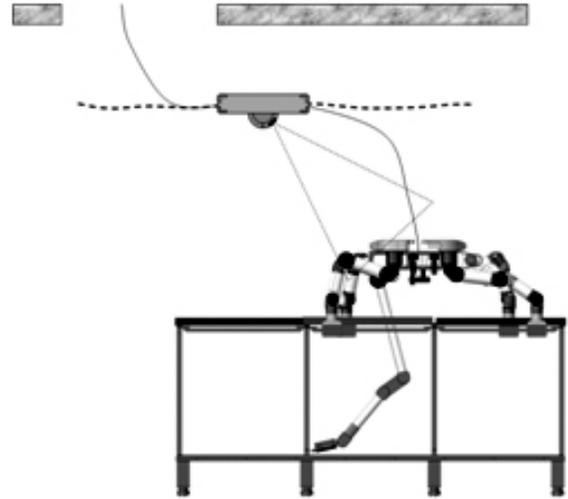
[표 1] IRWST 여과기 육안 점검

배수 후 육안점검	내용	IRWST 냉각수 배수 후 작업자가 직접 점검
	장점	점검절차가 간단하고 비용이 적음
	단점	작업자 과 피폭 우려, 운전 부담
잠수부 육안점검	내용	잠수부 채용 후 수중에서 점검
	장점	IRWST 배수 불필요, 운전부담 없음
	단점	잠수부 과피폭 우려, 수중 사진촬영 어려움
검사장비 원격 점검	내용	원격 육안검사 장비를 개발하여 원격점검
	장점	계획예방정비 공정에 영향이 없음, 작업자 피폭 없음, 기술수출 가능
	단점	전용 장비개발 필요

IRWST 여과기 원격점검에 적합한 장비를 개발하기 위해서 필요한 기능 요건들을 표 2와 같이 조사하였으며, 그 결과 수륙양용형 4족 로봇이 가장 적합한 것으로 결정되었다.

[표 2] IRWST 여과기 원격 점검기능 요건

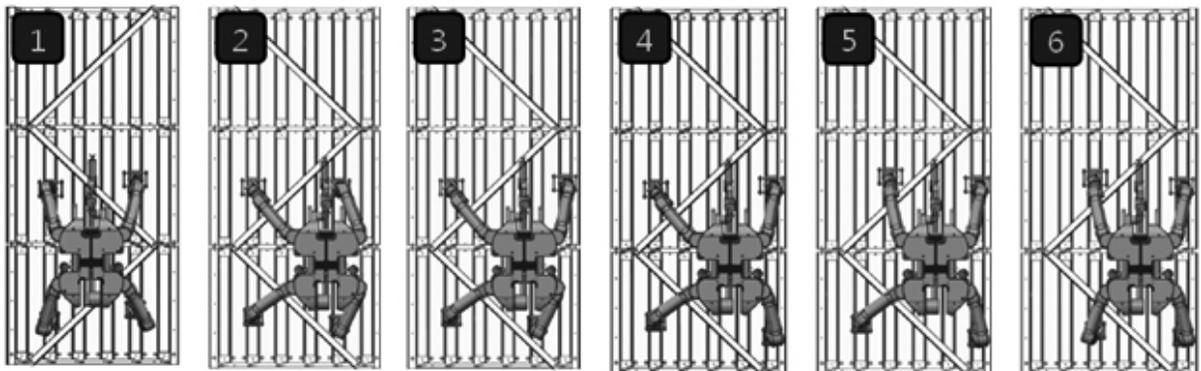
기능 요건	필요한 기능
맨홀 → 여과기 이동	수중 부력 및 전·후진 추진체
여과기 핀 이동	4족 다리를 이용하여 여과기 핀과 핀 사이를 이동
여과기 틈새 사진촬영	카메라가 장착된 로봇팔



[그림 4] IRWST 여과기 로봇 안착형태

수륙양용 4족 로봇이 맨홀을 통하여 IRWST 수조에 투입되면 몸체에 부착된 부력체와 프로펠러 추진체를 이용하여 여과기 상부에 도달한다. 그림 4는 점검로봇의 IRWST 여과기 안착 상태를 나타낸 것이다. 로봇의 수중 위치 파악을 위해 수면에 별도의 부력체가 설치된다. 로봇의 전력공급 및 통신라인은 IRWST 외부와 유선으로 연결된다.

로봇이 여과기 상부에 도달하게 되면 4족을 이용하여 여과기 상부를 이동하면서 카메라가 부착된 로봇팔로 여과기 핀 표면을 사진 촬영하게 된다. 그림 5는 로봇이 IRWST 여과기 상부에 안착되어 여과기 핀과



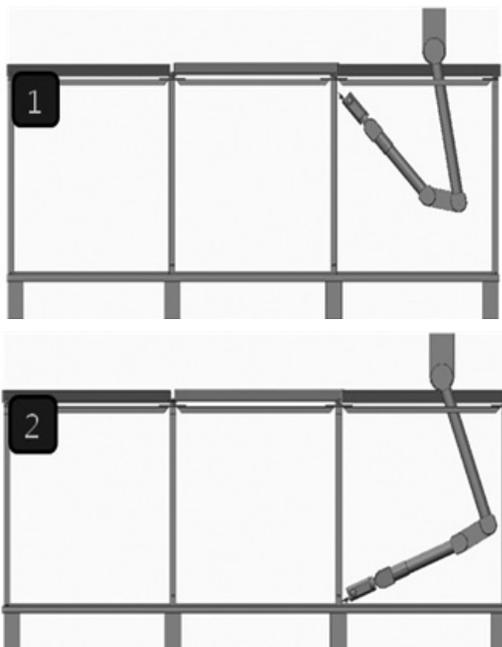
[그림 5] IRWST여과기 점검 로봇의 4족 이동 개념

핀 사이를 이동하는 개념도를 나타낸 것이다.

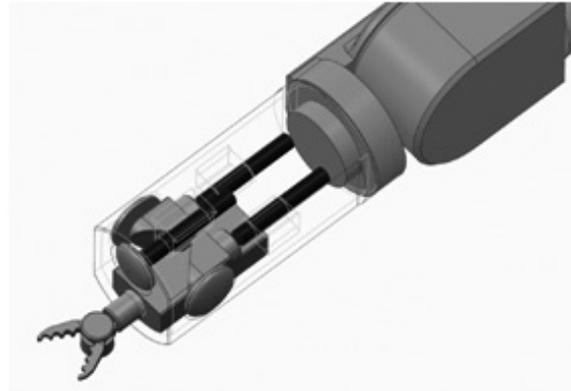
로봇은 4족 이동시 여과기 상부 크로스 바를 피해서 다리를 이동하게 된다. 점검로봇이 여과기 상부로 이동하면서 검사점에 도달하게 되면 카메라가 장착된 로봇팔을 여과기 핀 틈새로 삽입한다.

로봇팔은 관절을 이용하여 1.2m×1m의 영역을 스캐닝할 수 있다. 3.2m(길이)×1.5m(높이)의 여과기 앞뒤를 로봇다리로 이동하면서 여과기 전체를 스캐닝하고 사진 촬영하는 구조로 설계되어 있다. 그림 6은 로봇팔의 여과기 핀 스캐닝 개념도이다.

카메라는 로봇팔의 앞뒤 좌우 양쪽에 장착되어 여과기 양면을 동시에 촬영할 수 있으며, 랜턴이 장착되어 어두운 곳에서도 사진촬영이 가능하다. 로봇팔의 끝단에는 집게가 장착되어 검사 중 이물질이 발견되면 즉시 제거할 수 있다. 그림 7은 로봇팔의 끝단에 부착된 카메라 및 집게의 개념도이다. 검사 중 촬영되는 사진은 온라인으로 모니터링 및 로봇 제어용 컴퓨터의 하드디스크에 저장된다.



[그림 6] 로봇팔 여과기 핀 스캐닝 개념도

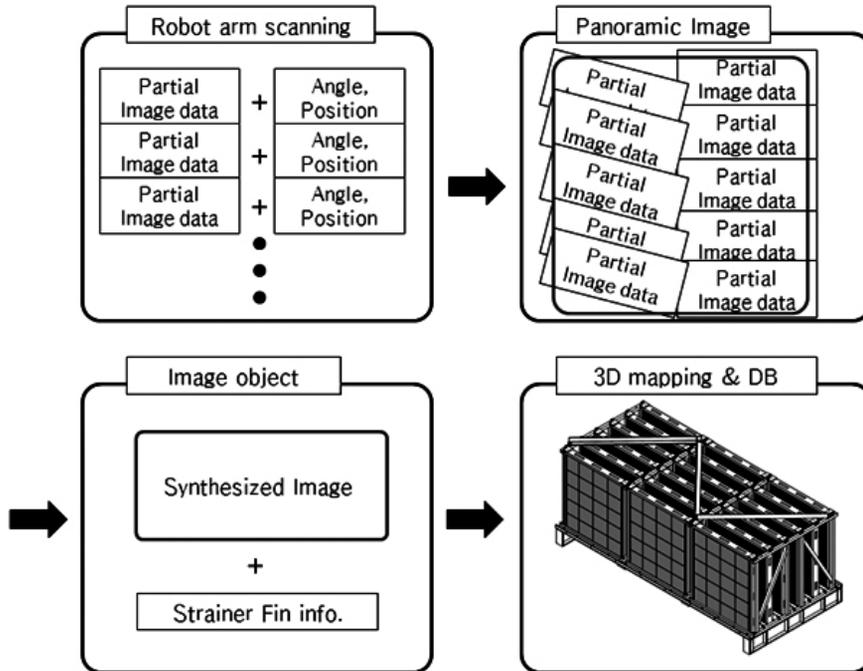


[그림 7] 카메라 및 집게 개념도

검사되어야 할 여과기 핀 영역에 비해 카메라가 한번에 촬영할 수 있는 범위가 좁으므로 나중에 검사자가 여과기 전체영역을 검사할 때를 대비하여 조각조각 촬영된 사진들을 하나의 파노라믹 이미지로 합성하는 것이 필요하다. 그림 8은 이미지 합성 절차를 나타내었다. 로봇팔의 카메라가 사진을 촬영한 후 이 사진들은 이미지와 함께 촬영위치 정보를 가지게 된다. 촬영된 이미지들은 카메라의 촬영 각도에 따라 비틀어진 형태로 촬영될 수 있어 이는 촬영사진을 검사하는데 애로사항이 될 수 있다.

IRWST 로봇에서는 이렇게 비틀어진 사진들을 수평으로 바로잡고, 여러 개의 사진들을 파노라믹 이미지 형태로 합성하여 한 개의 사진처럼 볼 수 있는 프로그램이 사용된다. 사용자가 사진을 통한 여과기 핀 세트의 검사를 수행할 때 여과기 핀 번호별로 파노라믹 이미지를 제공하며, 합성된 이미지는 그림 9의 파노라믹 이미지 관리 DB에 저장된다. 사용자는 프로그램에서 줌인아웃, 회전보기를 수행할 수 있고, 검사 후 상세 분석 및 데이터 유지관리를 위해 사진별 주석은 수정될 수 있다.

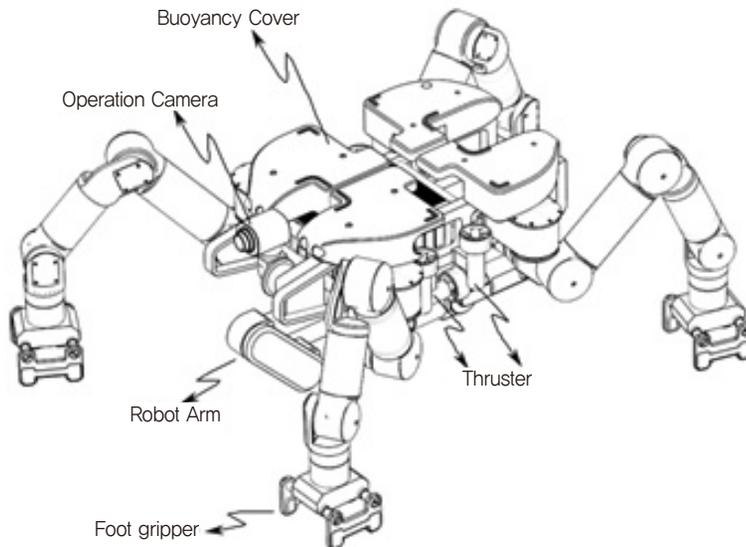
IRWST 여과기 검사 로봇은 4개의 다리와 1개의 팔로 구성된 알루미늄 바디로 제작되었으며, 바디의



[그림 8] 여과기 촬영 사진의 파노라믹 이미지 프로세싱 절차

내부에는 컨트롤러, 상부에는 수중 부력체, 양 옆쪽에는 수중 전후진용 프로펠러가 장착되어 있다. 알루미늄 바디는 보론수에서 견딜 수 있도록 코팅되어 있

고, 로봇에 내장된 컨트롤러는 임베디드 PC와 전력 변환기로 구성되어 있다. 로봇 다리는 5개의 자유도를 가지고 IRWST 여과기 상부를 걸어 다닐 수 있도

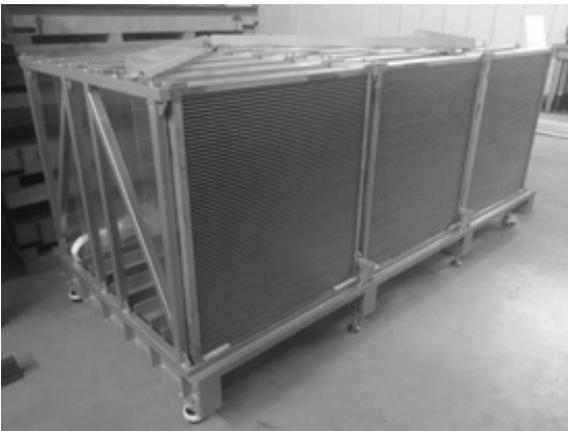


[그림 9] 로봇 바디의 기계적 구성

록 설계되었다. 그림 9는 로봇의 기계적 구성을 나타낸 것이다. 로봇의 다리에 부착된 발 부분에는 그리퍼가 설치되어 있어 여과기 구조물을 집을 수 있도록 설계되었다. 발바닥에는 소형 카메라가 설치되어 있어 로봇 발바닥이 여과기 구조물에 정확히 안착되는지를 확인할 수 있다. 다리의 조인트들은 BLDC 모터, 기어박스, 로타리 엔코더, 모터 증폭기 및 방수형 션으로 구성되어 있다. 로봇이 물속에서 상하로 전진하기 위해 6개의 프로펠러 추진기가 사용된다.

수륙양용형 로봇을 개발하는데 있어 최고의 난제는 4족 로봇의 방수작업이었다. 로봇의 다리 부분에 모터와 컨트롤러를 설치한 후 다리 관절이 움직여야 하기 때문에 일반적인 오링으로는 방수가 어려워, 움직임 중에도 밀봉이 유지되는 메카니컬 씰을 사용하였다. 로봇의 모든 조인트들은 10m 방수에 견딜 수 있도록 설계되어 있다.

IRWST 여과기 검사로봇의 발전소 현장 투입 전에 모의시험 틀을 통한 로봇 학습이 필요하며, 이를 위



[그림 10] 로봇 학습용 모의 시험 틀

해 여과기 모의시험 틀을 제작하였다. 그림 10은 학습용으로 제작된 IRWST 여과기 모의시험 틀을 나타낸 것이다. 모의시험 틀은 메인 프레임 및 상부 크로스바를 스테인레스강으로 제작하였으며, 부자재는 알루미늄으로 제작하였다.

### 3. 전망

IRWST 여과기의 육안점검을 위해 수륙양용형 로봇을 개발하여 수중실험을 진행 중이다. 현재의 로봇은 방수를 고려한 제작으로 로봇 다리와 팔이 부피가 커지는 문제가 있다. 이에 장기적으로는 좀 더 가볍고 부피가 작은 생체모방형 로봇의 개발이 필요할 것으로 보인다.

로봇이 GPS를 쓸 수 없는 격납건물 내부에서 IWST 여과기를 자동으로 찾아가는 기술을 개발하는 것도 필요하다. 현재는 카메라를 통한 원격 조정으로 여과기 위에 안착한 뒤 로봇다리를 이용해 이동하지만, 맨홀 투입 후 스스로 헤엄쳐가는 로봇의 개발이 필요할 것이다.

또한 고용량 전력공급 및 통신을 위해 상용 유선케이블을 사용 중이다. 보다 부드러운 케이블을 개발하면 로봇의 휴대 및 이동이 더욱 편리할 것으로 판단된다.

한수원 중앙연구원은 원자력발전소에 접목이 가능한 로봇기술을 꾸준히 개발 중이다. 발전소의 대형밸브 손잡이를 운전원이 조작하기 힘들어 수동밸브 조작로봇을 만들어 달라는 요구도 있다. 머지않아 힘센 직원을 대신할 수 있는 로봇의 개발도 기대되고 있다. 