

원자로 비상노심냉각수 여과장치 개발 및 향후 전망



김창현
한국수력원자력(주) 중앙연구원 선임연구원

1. 개황

원자력발전소는 원자로 주배관이 양단으로 파단되어 냉각재가 완전히 상실되는 사고가 발생하더라도 안전하게 노심을 냉각할 수 있도록 비상노심냉각시스템이

구비되어 있다. 사고 초기에는 격납건물 외부에 설치된 재장전수조를 통해 냉각수를 공급하고, 재장전수조가 고갈되면 격납건물 바닥에 설치된 재순환집수조에 모인 물을 냉각수원으로 재활용하는 재순환운전을 통하여 지속적인 노심 냉각이 가능하도록 설계되어 있다.

그러나 최근 연구결과에서 원자력발전소에서 대규모의 냉각재 상실사고가 발생할 경우 고온의 증기제트의 하중 및 격납건물 환경조건에 의해 주변의 보온재, 도장재 등의 파편과 각종 화학반응에 의한 이물질이 생성되어 재순환순전 시 재순환집소를 막아 발전소 장기노심냉각능력을 저해할 가능성이 제기되었다. 이에 따라 미국 등 원전선진국에서는 비상노심냉각수 여과설비의 이물질 여과성능 개선을 위한 연구 및 이에 따른 설비개선이 진행 또는 계획 중이다¹⁾.

국내 규제기관의 경우에도 고리1호기 주기적 안전성평가 및 계속운전을 필두로 비상노심냉각계통 여과장치 설계에 최신 기술기준²⁾을 적용하여 가동 중 및 건설원전을 포함한 모든 원전의 비상노심냉각계통 여과장치의 성능개선을 요구하였다.

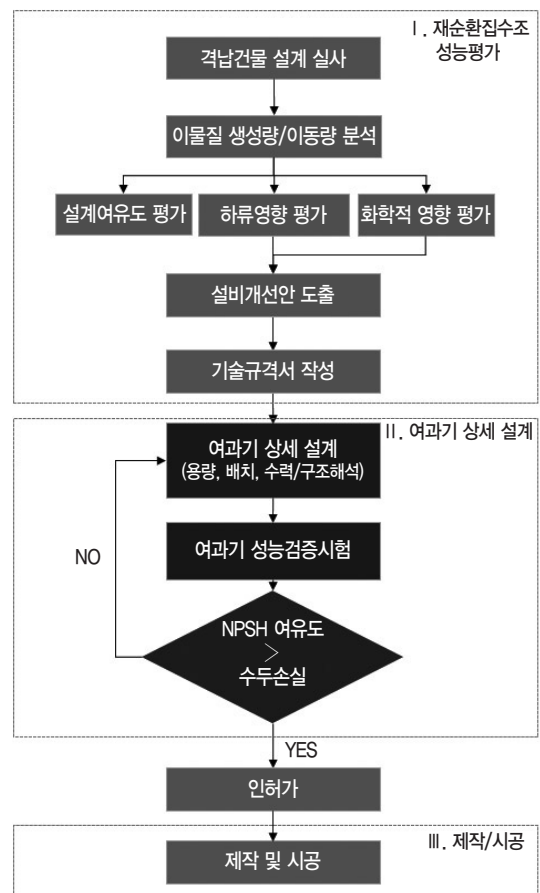
국내 가동 중 원전의 비상노심냉각계통의 재래식 여과장치의 성능을 진단한 결과, 발전소에 따라 기존 여과기 면적대비 17~200배 이상의 여과용량 증설이 필요한 것으로 평가되었다. 그러나 여과기가 설치되는 격납건물 바닥 층의 재순 집수조 주변 공간이 협소하여 기존의 평판형 여과기를 대체할 수 있는 고효율 여과기의 개발 필요성이 대두되었다. 이에 따라 한수원 중앙연구원은 지식경제부 원자력융합원천기술 개발사업의 일환으로 2008년 11월부터 2012년 4월까지 42개월의 기간 동안 ‘원자로 비상노심냉각계통 피동여과장치 개발’을 완료하였다.

2. 개발 현황 및 주요 성과

원자력발전소의 비상노심냉각수 여과장치의 개선은 재순환집수조 성능평가를 통해 사고 시 이물질 발

생량과 이동량 분석을 포함하여 기존 여과장치의 성능을 진단하고, 진단 결과에 따라 새로운 여과장치의 설계 및 성능검증 수행 여부를 포함한다. 그리고 규제기관의 인허가가 완료되면 여과장치의 제작 및 설치를 수행한다.

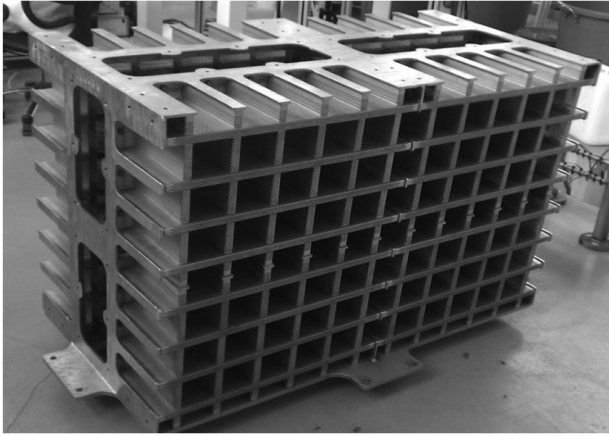
비상노심냉각계통 여과장치는 설비의 특성상 격납건물 내부의 좁은 공간에서 설치 가능하도록 단위체적당 여과면적이 기존 재래식 여과기에 비해 매우 커야 하며, 설치 및 정비가 용이하도록 모듈화로 설계되어야 한다. 또한 해당 발전소의 사고조건에서 다양



[그림 1] 비상노심냉각계통 여과장치 개선 절차

1) USNRC Generic Letter 2004-01 "Potential Impact of Debris Blockage on Emergency Recirculation During Design Basis Accidents at Pressurized Water Reactors"

2) USNRC Regulatory Guide 1.82 Rev.3 (2003) "Water Sources for Long-Term Recirculation Cooling Following a Loss of Coolant Accident"



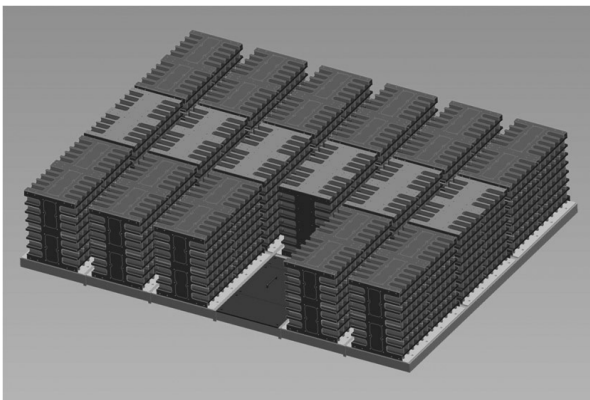
[그림 2] 여과장치 모듈 시작품

한 성능검증시험을 통해 그 성능을 입증하여야 한다.

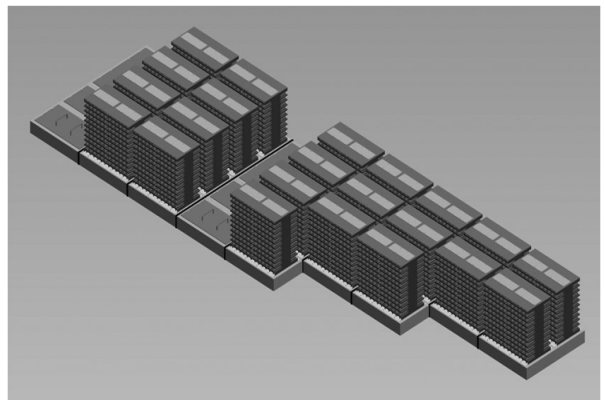
개발된 여과장치는 형상학적 관점에서 단위체적당 여과면적이 가장 큰 구조를 가지고 있을 뿐만 아니라 여과면을 구성하는 격자면이 서로 직교하여 끼워 맞추어 조립되는 구조를 가지고 있기 때문에 용접이 필요 없는 구조이다. 따라서 설치공간이 협소한 가동원전에 적용 시 기존 구조물의 설계변경 없이 자유롭게 모듈식으로 확장하여 설치하는 것이 가능하다. 또한 설치가 쉽기 때문에 향후 유지보수 측면에서도 큰 강점을 지닌다. 이러한 특성 때문에 해외 공급사 대비

동일 여과면적 조건에서 30% 정도 공간을 절약할 수 있고, 비용접 끼워 맞춤식 구조이기 때문에 제작 단가 측면에서도 크게 유리하다. 또한 개발된 여과기는 격자를 이루는 측면공간도 여과면으로 사용되기 때문에 이물질량이 많은 발전소나 화학적영향³⁾이 큰 발전소일 경우 수두손실 저감 능력이 해외사 대비 탁월하다.

발전소에 따라 이물질 및 재순환운전 조건이 상이하고, 이물질 막힘 현상은 이론적으로 평가가 불가능하기 때문에 발전소 운전조건에 따른 각종 성능검증



(1) OPR-1000



(2) 진산3단계 1,2호기 (중국)

[그림 3] 발전소 적용 배치설계(예)

3) 화학적 효과 (Chemical Effect) : 격납건물내 존재하는 알루미늄, 콘크리트 등의 물질이 발전소에서 사용되는 각종 화학첨가물과 반응하여 부차적인 이물질질을 생성하는 현상. 입자크기가 매우 작고 점성이 높아 수두손실에 악영향을 미치는 것으로 알려져 있다.



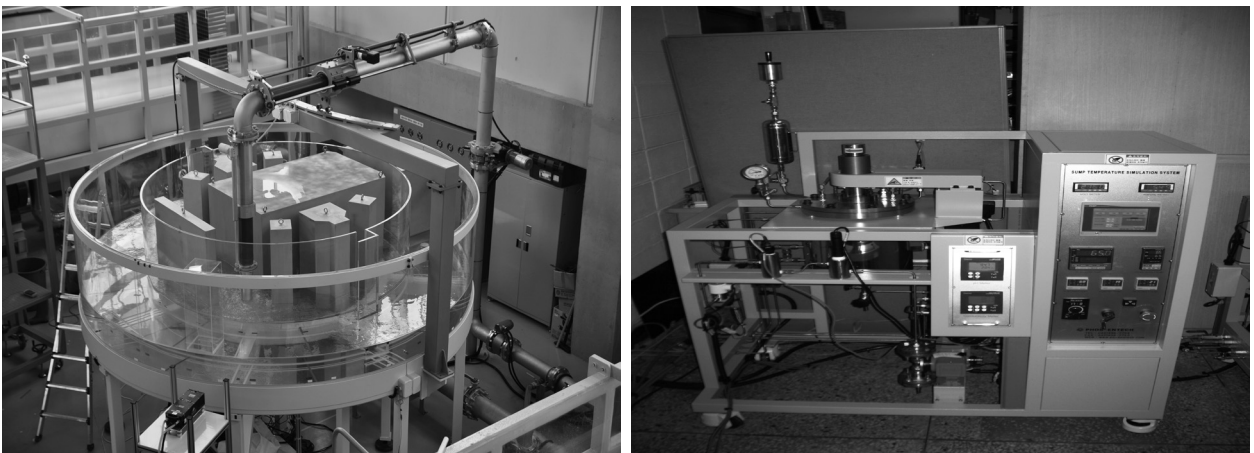
[그림 4] 여과장치 성능검증 시험설비(종합 수력 및 화학적 영향 시험)

시험능력의 확보가 중요하다. 이를 위해 세계 최대 규모의 종합 수력학 및 화학 검증시험 능력을 확보하였고, 수력 및 화학적 효과 개별효과 시험, 중간차단체 시험, 격납건물 바닥층 유동장 모사 장치, 핵연료 집합체 하류효과 시험설비 등 최신기술기준에서 요구하는 다양한 항목의 성능검증을 할 수 있는 성능검증시험체계를 구축하였다.

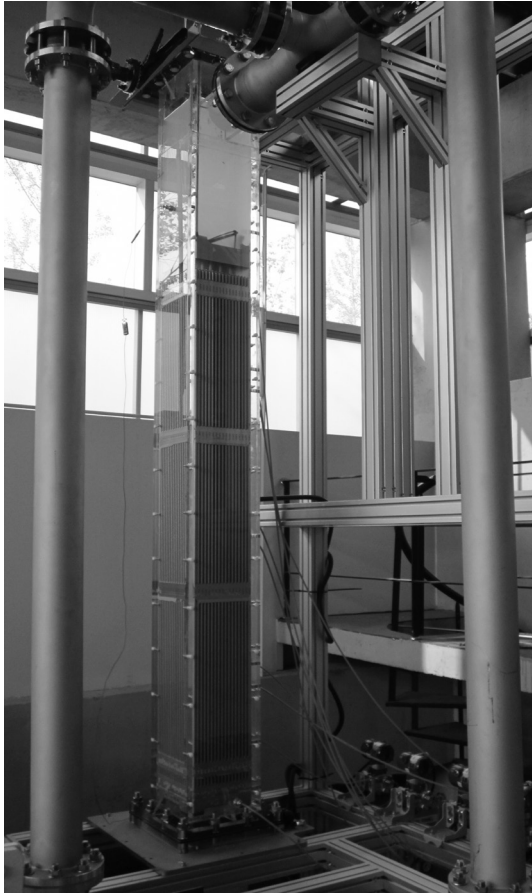
비상노심냉각수 여과장치 설계 및 성능검증 방법과 관련하여 6건의 국내특허 등록을 완료하였고, 해외시장 진출을 위해 미국, 중국, 일본, UAE 등에 총 12건의 국제특허를 출원하여 해당 출원국에서 심사

가 진행 중이다. 2012년 4월에는 지식경제부 주관 신기술인증(New Excellent Technology)을 취득하여 개발된 피동여과장치의 기술적 우수성을 인정받았다. 이러한 성과가 인정되어 과제 최종평가도 '혁신 성과'를 인정받았다.

또한 중국 진산3단계 1,2호기 재순환여과설비 성능평가 및 설비 개선사업에 본 과제를 통해 개발된 여과장치를 적용한 설계 및 성능검증 시험에 345만 불의 계약을 체결하여 발전소 적용 설계 및 성능검증을 완료하였다. 향후 인허가 비용 및 여과장치 하드웨어 추가 계약을 포함하면 80억 원 이상의 해외수출



[그림 5] 격납건물 바닥층 유동장 모의시험 및 개별 화학시험 설비



[그림 6] 핵연료집합체를 이용한 노심 하류효과 시험 장치

이 예정되어 있으며, 원자력 핵심기기 설계기술의 개발을 통해 안전성 향상 기술이 새로운 시장수요를 창출하였다는 측면에서 큰 의미를 부여할 수 있다.

3. 전망

국내 원전의 경우에도 개발된 여과장치의 적용을 위한 준비 작업이 진행 중에 있다. 본 여과장치의 국내 발전소 적용을 통해서 호기 당 45억 원의 수입 대체효과 및 비용절감 뿐만 아니라, 발전소의 설계기준 및 중대사고시 안정적인 비상노심냉각수 공급을 통해 발전소 안전성을 크게 향상 시킬 수 있다. 해외 시장의 경우 중국, 일본을 비롯한 아시아 시장은 자국내 원자력발전소의 비상노심냉각수 여과장치의 개선을 준비 중에 있다. 중국 진산원전의 경우처럼 설계 및 성능검증이 까다로운 원자력 핵심기기의 직접 수출을 통해 원자력 수출 포트폴리오의 다양화뿐만 아니라 원자력 선진국으로서의 기술능력을 재확인하는 기회가 될 것으로 기대된다. 