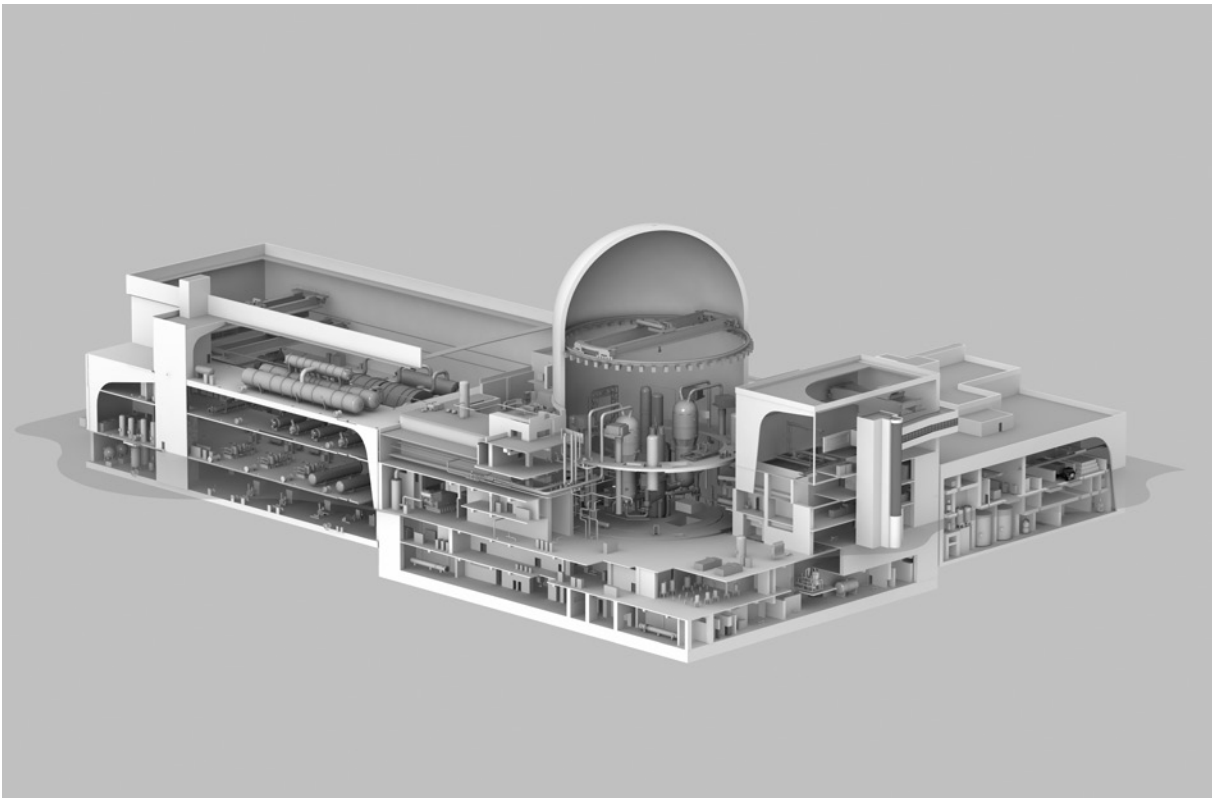


원자력발전소의 냉각재 상실사고 이물질이 노심에 미치는 영향



서정관
한수원 중앙연구원 선임연구원

1. 개황

원자력발전소에서 냉각재상실사고가 발생하면 고에너지 유체가 방출되고, 이 유체는 섬유탄 보온재 및 도장재 등을 파손하게 된다. 이렇게 발생한 이물질은 유체와 함께 이동하여 원자로건물 집수조에 모이게 되며, 집수조 입구에는 여과기가 설치되어 있어 이물질이 유입되는 것을 방지한다.

집수조에 모인 물은 비상노심냉각계통을 통해 다시 노심으로 들어가서 냉각기능을 수행하며, 이때 여과기 입도보다 작은 크기의 이물질은 여과기를 통과하고 노심영역으로 유입될 수 있다. 이러한 이물질은 노심입구에 쌓여서 유동을 방해하거나

핵연료봉에 침적되어 장기노심냉각을 저해할 우려가 있다.

미국에서는 원자력에너지협회(NEI) 및 가압경수로소유자그룹(PWROG)을 중심으로 이러한 안전현안(GSI-191)에 대응하기 위한 시험 및 해석연구를 수행하여 왔으며, 원자력규제위원회(NRC)는 2012년 7월 정책성명(SECY-12-0093)을 발표하여 이물질이 여과기 성능에 미치는 영향평가에 대한 종결방안을 세 가지로 제시하였다.

첫 번째 방안은 섬유형 이물질 발생량이 적은 발전소가 선택할 수 있는 방법으로 섬유형 이물질 발생량이 핵연료집합체당 15g 이하인 경우 ‘청결 발전소(Clean plant)’ 요건을 적용하는 것이다. 청결 발전소 요건을 적용하면 기존의 시험 및 해석 결과를 사용하여 여과기 수두손실 시험 및 노심영향 평가 시험을 면제받을 수 있다. 청결 발전소 요건을 만족하기 위해서는 1차 측 주요기기 및 배관 보온재로 금속형(RMI)을 사용하고 발전소 청결 프로그램을 적용해야 한다. 신규 개발되는 노형은 이러한 요건을 적용하며, 가동원전의 경우 보온재 교체를 위한 피폭의 문제가 있다.

두 번째 방안은 결정론적 방법 및 완화조치를 수행하거나 위험도정보를 활용하는 것이다. 결정론적 방법은 시험을 통해 허용치 만족을 입증하는 것으로서 국내 가동원전이 선택한 방법이다. 세 번째 방안은 여과기 평가 및 노심영향 평가를 분리하는 방법으로 여과기 평가는 결정론적 방법을 수행하고 노심영향 평가는 위험도정보를 활용하는 것이다.

2. 연구 현황

가. 미국 가동원전

PWROG는 냉각재상실사고 후 발생하는 이물질이 노심영역에 유입되어 장기노심냉각에 미치는 영향을 평가한 종합보고서(WCAP-16793)를 2011년 10월

NRC에 제출하였다. NRC는 동 보고서에 대한 최종 안전성평가 결과를 2013년 4월에 발행함에 따라, 사업자는 적용방안을 포함한 GSI-191 종결 이행계획을 제출하게 되었다.

WCAP-16793에는 이물질에 의한 노심입구 막힘, 그리드 및 연료봉에 이물질 침적, 연료봉표면에 도장재 및 화학적 침전물 침적 등을 평가한 결과가 수록되어 있다. 이러한 이물질 존재시 장기노심냉각이 유지됨을 입증하는 허용기준은 최대 피복재온도가 800°F(426.7°C) 이하이고, 피복재 산화 및 이물질 침적 두께는 모든 노심영역에서 0.05inch(1.27mm) 이하이다.

NRC는 냉각재 상실사고 이물질에 의한 노심 영향을 평가하기 위해 사업자가 제출해야 하는 사항을 제시하였다. 사업자 평가보고서는 저온관 및 고온관 파단시 집수조 여과기를 통과하는 이물질 양을 핵연료집합체 당 계산하여야 한다.

또한, LOCADM(LOCA Deposition Model) 프로그램을 사용하여 침투피복재온도(PCT)와 핵연료봉에 침적되는 이물질 두께를 계산하여야 한다. 그리고 고온관 파단시 허용차압, 허용요건 불만족 시 조치 계획 또는 이행사항(섬유형 이물질 저감방안 등), WCAP-16793에 대한 최종안전성평가 보고서에서 허용된 것과 다른 사항에 대한 설명 및 근거를 제시하여야 한다.

사업자가 WCAP-16793 방법론을 적용할 경우 주요 제한사항 및 허용조건은 다음과 같다.

개별 발전소에서 사용하는 핵연료집합체가 PWROG 시험에 사용된 종류에 포함되어야 하고, 고온관 파단시 허용차압 및 유량은 시험조건 범위에 포함되어야 한다. 고온관 파단시 노심에 유입되는 섬유형 이물질 양은 핵연료집합체 당 15g 이하여야 한다.

고온관 파단시 허용차압, 비상노심냉각 유량, LOCADM 결과, 핵연료집합체 형태, 노심에 유입되

는 핵연료집합체 당 섬유형 이물질 양을 기술해야 한다. 또한 노심에 유입되는 섬유형 이물질 양이 핵연료집합체 당 15g 이상일 경우 개별 발전소 조건에서 장기노심냉각이 유지됨을 입증해야 한다.

나. 국외 신규개발 원전

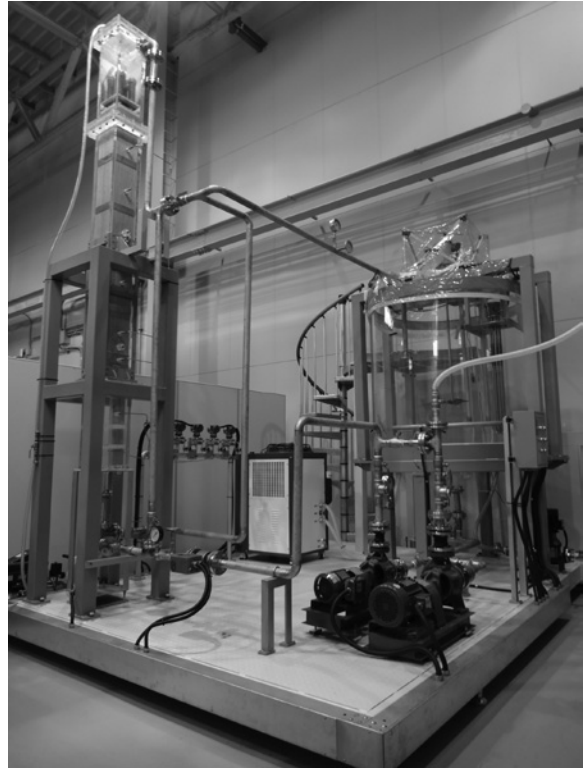
일본 미츠비시는 US-APWR을 개발하여 NRC에 설계인증을 추진하고 있으며, GSI-191 안전현안 해결을 위해 1차 축 주요기기 및 배관 보온재로 RMI를 적용하고 있다. 이 경우 'Clean plant' 요건을 만족하므로 냉각재상실사고 이물질이 노심에 미치는 영향을 실험적으로 입증할 필요는 없으나, 미츠비시는 'Clean plant' 요건이 발표되기 전에 실험을 수행하였다.

섬유형 보온재를 사용하지 않는 발전소는 잠재 이물질로서 격납건물 내에 존재하는 섬유형 이물질 양을 가정하게 되는데, 미츠비시가 허용치로 가정한 섬유형 이물질 양은 핵연료집합체 당 15g을 초과하여 NRC는 추가적인 해석을 요구하고 있다.

프랑스 아레바는 U.S.EPR을 개발하여 NRC에 설계인증을 추진 중이며 GSI-191 안전현안 해결을 위한 방법론은 US-APWR과 유사하다. 아레바가 제출한 GSI-191 해결관련 설계특성 보고서(ANP-10293)에 대하여 NRC는 안전성평가보고서를 발행하였으며, 허용차압 관련 미해결 현안이 남아 있다.

다. 국내 신형원전

APR1400 노형으로 건설되는 신고리 3,4호기 및 UAE 바라카 원전은 PLUS7 핵연료집합체를 사용하는 신형원전이다. 신형원전은 핵연료집합체 형태, 이물질 종류 및 양, 그리고 비상노심냉각 유량에 따라 노내 이물질 영향평가를 위한 시험이 요구된다. 한국수력원자력 중앙연구원에서는 냉각재상실사고 시 발생한 이물질이 노심에 미치는 영향을 평가하기 위한 시험연구를 수행하고 있다.



[그림 1] 노내 이물질 평가 시험장치

시험설비는 PLUS7 핵연료집합체를 높이방향으로 1/2 크기로 모의하였다. 시험용 이물질에는 입자형, 섬유형 및 화학물 등이 있으며, 도장재를 모의한 입자형 이물질로는 실리콘파우더(SiO_2)가 사용된다. 섬유형 이물질은 보온재로 사용되는 NUKON을 표준 분포를 갖는 크기로 잘라서 사용한다. 그리고 화학적 이물질은 노심에서 가장 큰 차압을 유발하는 알루미늄산화합물(ALOOH)이 사용된다.

시험조건은 냉각재상실사고 후 발전소 조건을 모의하기 위하여 유량 및 이물질 종류에 따른 양이 설정된다. 시험은 보수적인 조건에서도 허용치를 만족함을 보이는 것이 목적이므로, 시험 유량은 고온관 파단 및 저온관 파단 조건에서 최대 유량을 가정하여 설정한다. 유량이 많은 경우 차압이 크게 발생하고, 큰 차압은 노심으로 투입되는 유량의 감소를 의미하



[입자형]

[섬유형]

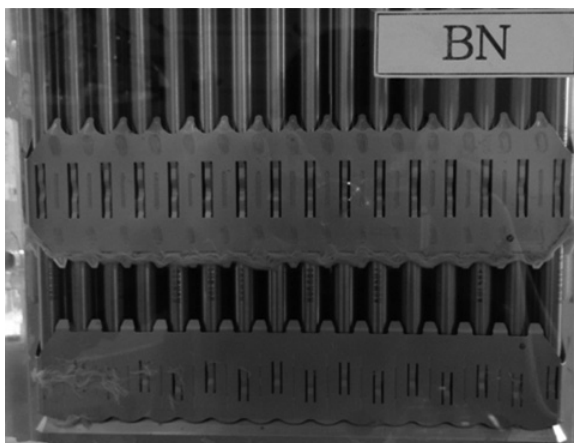
[화학물]

[그림 2] 시험용 이물질

기 때문이다.

고온관 파단시 노심으로 주입되는 최대 비상노심 냉각 유량은 4대의 안전주입 펌프가 작동할 때이며, 시험에서는 1개의 핵연료집합체를 사용하므로 시험 유량은 전체 안전주입 유량을 노심에 장전된 핵연료 집합체 수로 나눈 값이 적용된다.

저온관 파단을 모의한 시험에서 사용하는 유량은 다소 복잡한 과정을 통하여 계산된다. 저온관 파단시 원자로용기로 주입된 비상노심냉각수는 대부분 파단 부위로 빠져 나가고 노심으로 들어가는 유량은 노심에서 비등에 의해 감소한 물량을 보충하는 양이 된다. 따라서 노심 붕괴열 곡선에 따라 시간이 지나면서 비등유량이 감소하므로, 시험에 적용할 보수적인 시간을 선정하고 그 때의 노심 비등량을 계산해야 한다.



[그림 3] 시험 후 쌓인 이물질

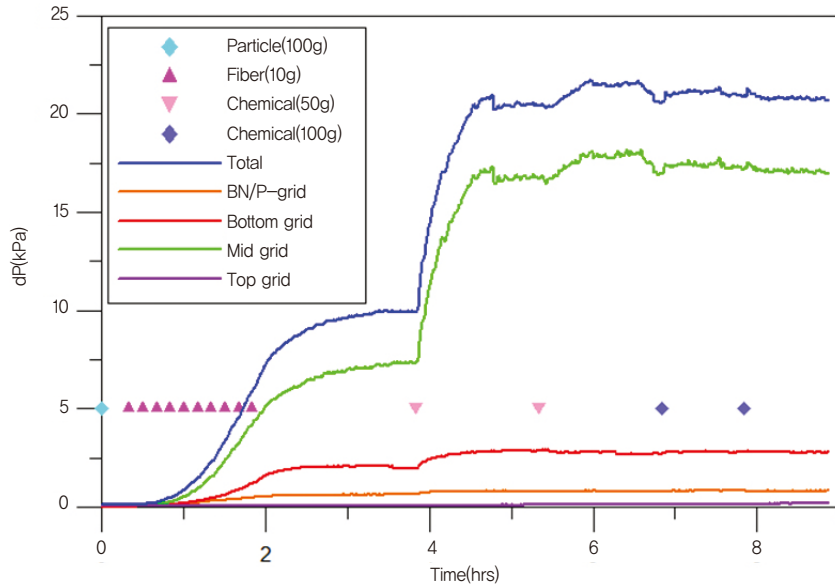
시험에서 사용하는 이물질 양은 발전소 조건에서 계산한 최대 이물질 양을 노심에 장전된 핵연료집합체 수로 나눈 값이 적용된다. 이때 주의할 사항은 이물질 종류에 따라 최대 차압을 나타내는 이물질 양이 다르므로 이를 고려하여 시험조건을 설정하여야 한다.

시험 결과 이물질 존재시 최대 차압이 나타나는 경우는 고온관 파단 및 저온관 파단 모의조건에서 각각 다르게 나타났다. 고온관 파단조건에서는 입자형 및 섬유형 이물질 비가 1:1이고, 섬유형 이물질 양이 많은 경우 차압이 크게 나타났다. 화학물은 일정량 이상 투입되는 경우 더 이상의 차압 증가를 유발하지 않았다.

저온관 파단조건에서는 입자형 및 섬유형 이물질 비가 10:1이고, 섬유형 이물질 양이 많은 경우 차압이 크게 나타났다. 화학물은 최대량일 때 최대 차압을 유발하는 것으로 나타났다.

고온관 파단 및 저온관 파단을 모의한 시험에서 이물질에 의한 차압은 모두 허용치를 충분히 만족시키는 것으로 나타났다.

신고리 3,4호기 및 UAE 바라카 원전의 냉각재상실사고를 모의한 조건에서 수행한 노심 이물질 영향 평가 시험은 국내 규제기관(KINS)이 입회하였고, UAE 규제기관(FANR)이 시험장치를 방문하여 시험 설비의 건전성을 확인하였다.

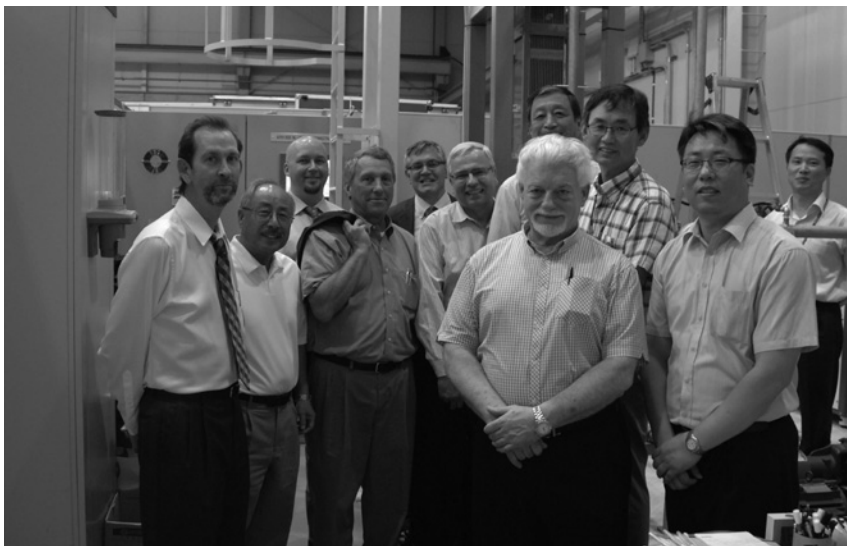


[그림 4] 이물질 투입 시 차압

라. 국내 설계원전

한국수력원자력은 APR1400 원전에 대하여 NRC의 설계인증을 추진하고 있으며, GSI-191 안전현안 대응을 위해 1차 측 주요기기 및 배관의 보온재로 RMI를 적용한다. 'Clean plant' 요건을 적용하므로 핵연료집합체를 사용한 시험이 면제될 수 있으나

NRC는 인허가 용이성 및 신규원전임을 고려하여 시험을 수행할 것을 권고하였다. 이에 따라 2013년 11월 NRC가 입회하는 시험을 수행하였으며, 시험시 도출된 보완사항을 반영하여 2014년 4월부터 시험을 수행할 예정이다.



[그림 5] FANR 실험실 방문



[그림 6] NRC의 실험 입회

3. 향후 계획

GSI-191 안전현안은 지난 10여년의 연구결과를 통해 주요현안이 해결되었으며, 신규원전은 해결방법론이 정립되었다. 가동원전은 집수조 여과기 면적을 늘리고, 노심으로 유입되는 이물질의 영향을 실험적으로 평가하였다. 실험결과는 냉각재상실사고 이물질이 노심으로 유입되어도 충분한 여유도를 갖는 것으로 나타났으나, 허용차압 계산과 관련하여 추가적인 해석이 요구된다.

한수원 중앙연구원에서는 냉각재상실사고 시 안전 해석 결과를 활용하여 허용차압을 상세 분석할 예정이다. 이를 통해 장기 안전현안으로 관리된 냉각재상실사고 시 발생한 이물질에 의한 영향평가 결과, 비상노심냉각 기능이 건전하게 유지되어 장기노심냉각이 입증될 예정이다. 