

원자력발전소 ECCS계통의 재순환집수조 및 중간차단체 연계 성능평가

허민범*, 임동석*

*(주)미래와도전

hmbnet@fnctech.com

Performance Evaluation in Connection with the Recirculation Sump and Interception of the ECCS in the Nuclear Power Plant

Min-Beom Heo*, Dong-Seok Lim*

*FNC Technology Co., Ltd.

요약

원자력발전소 내부에서 냉각재상실사고 등을 포함하는 설계기준사고 시 비상노심냉각계통과 격납건물살수계통을 통해 원자로의 냉각이 이루어지며, 장기냉각으로 이어질 경우 격납건물의 바닥층에 위치한 재순환집수조에서 냉각수를 사용한다. 하지만 설계기준사고 시에 발생한 데브리들에 의해 재순환집수조여과기 외벽에 침적되어 수두손실을 유발할 수 있으며, 여과기를 통과한 데브리가 핵연료다발, 하류 구조물 그리고 핵심기기에 침적되어 손상을 유발할 수 있다. GSI-191에서는 설계기준사고 시 재순환 모드에서의 비상노심냉각계통과 격납건물살수계통의 기동에 관한 다양한 현안을 다루고 있으며, 해당 현안을 해결하기 위해 국내 가동 중인 모든 원전에 대하여 NEI 04-07 방법론을 이용하여 재순환집수조 성능평가를 수행하였다. 본 연구에서는 재순환집수조 성능평가 중 이물질 우회시험에 대한 시험을 진행하며, 재순환집수조 성능평가 설비에 중간차단체를 설치하고 최신 기술요건을 적용하여 시험변수와 시험방법을 산정한다. 최종적으로 해당 중간차단체의 유/무에 따른 이물질 차단율에 대하여 비교/분석을 통해 성능평가를 실시한다.

1. 서론

원전 내부에서 냉각재상실사고(Loss of Coolant Accident, LOCA) 등을 포함하는 설계기준사고(Design Based Accident, DBA) 시 일반적으로 재장전수탱크(Refueling Water Storage Tank, RWST)에 저장된 냉각수를 사용하여 비상노심냉각계통(Emergency Core Cooling System, ECCS)과 격납건물살수계통(Containment Spray System, CSS)을 통해 원자로 냉각이 이루어진다. 장기냉각으로 이어질 경우 격납건물의 바닥층에 위치한 재순환집수조에 사고 후 축적된 냉각수를 사용하게 되며, 재순환 유량을 제공하는 ECCS와 CSS의 기기들은 해당 기능이 저하하지 않도록 LOCA 시 발생하는 데브리가 재순환 냉각수 내에 유입이 최소화되도록 해야 한다.

Generic Safety Issue 191(GSI-191)에서는 설계기준사고 시 재순환 모드에서의 ECCS와 CSS의 기동에 관한 다양한 현안에 대해 다루고 있다. 이러한 다양한 현안들에는 LOCA 시 장기재순환모드에서 데브리의 이동과 재순환집수조여과기를 통과한 데브리의 원자로(Reactor) 내 핵연료다발과 하류 구조물(Downstream Components) 그리고 핵심기기에 침적으로 인한 영향 등과 같은 사고 시의 데브리 이동에 의한 복합적

인 영향에 관한 내용들을 포함한다.[1] LOCA 시 발생한 데브리들은 여과기의 외벽에 박막형태로 침적되어 여과기의 수두손실(Head Loss)을 초래하며 다른 화학적 데브리와의 결합으로 다양한 이물질 형태를 만들게 되어 비화학적/화학적 조합의 데브리는 여과기에 축적되어 수두손실을 더욱 증가시킬 가능성이 발생한다. 이러한 데브리의 물리적, 화학적 영향에 의해 원전의 바닥층에 설치된 HPSI(High Pressure Safety Injection) 및 CCS 펌프의 유효 흡입 수두(Net Positive Suction Head, NPSH)가 감소하여 결국 펌프의 성능 및 건전성에 영향을 주게 된다.

따라서 재순환집수조 성능평가 설비를 이용하여 발전소의 바닥층에서의 데브리의 유동과 물리적, 화학적 영향 등의 복합적인 데브리의 영향을 고려하여 성능평가를 실시한다. 본 연구에서는 재순환집수조에 설치되는 여과기에 대해서 데브리에 의한 수두손실차를 측정하기 위한 재순환집수조 성능평가 중 데브리 우회시험에 대해 실시한다. 데브리 우회시험이란 재순환집수조에 설치된 여과기를 통과한 데브리들이 재순환 모드에 사용되는 중요기기나 노심 내 연료봉 다발 부분에 침적되어 부식 및 손상을 야기할 가능성이 있으므로, 여과기를 통과한 데브리의 양과 크기 및 우회율을 평가하는 것이다. 추가적으로 재순환집수조 성능평가 설비 내에 중간차단체를 설

치함으로써 해당 장치에 의해 차단되는 이물질의 양을 측정하기 위하여 재순환집수조 성능평가 설비와 중간차단체를 연계하여 시험을 진행한다. 최종적으로 중간차단체 유/무에 따른 이물질 차단율을 비교하여 해당 기기의 성능평가를 실시한다.

2. 시험 조건

2.1 시험설비 개요

원자력발전소 격납건물의 다양한 형상과 구조물은 이물질의 이동에 많은 영향을 끼치며 파단사고의 형태와 위치에 따라서도 이물질의 이동에 많은 영향을 미친다. 격납건물의 다양한 형상과 구조물에 의한 영향과 예상 가능한 파단 사고의 영향을 모두 모의한 시험을 불가능하기 때문에 격납건물의 형상과 구조물 효과를 최소화 할 수 있는 시험장치의 설계가 이뤄져야 한다.[2] 그러므로 여과기까지의 냉각수의 접근 경로를 단일 유로로 가정하며 여과기로 접근하는 냉각수의 속도도만 영향을 끼친다고 가정한다. 그림 1은 본 연구의 시험장치인 재순환집수조 성능평가 설비를 보여주며, 수조, 펌프, 유량계, 히터, 각종 센서들 그리고 시험설비를 제어하고 데이터를 획득할 수 있는 데이터 획득장치(DAS)로 구성되어 있다.



그림 1. 재순환집수조 성능평가 설비

2.2 중간차단체 설계

본 시험 설비에 추가로 구축하기 위한 중간차단체는 LOCA 시 재순환 운전조건에서 발생하는 이물질(섬유형, 입자형, 화학적)이 재순환집수조로 이송될 때 이물질의 일정 부분을 사전에 차단하기 위한 장치이다. 기존에는 별도의 설비를 이용하여 평가를 수행하였으나 재순환집수조 성능평가 설비와 함께 해당 중간차단체를 구축함으로써 사고 시나리오와 부합한 시험 결과를 확인할 수 있을 것으로 예상된다. 해당 중간차단체는 실제 발전소의 설비 조건을 고려하여 그림 2와 같이 설계 및 구축한다. 중간차단체는 Filter, Support, Up/Bottom Plate, Base Plate로 구성되어 있으며 시험 도중 높은 유량과 이물질에 의해 해당 설비의 손상을 방지하기 위해 용접하여 제작하였다.

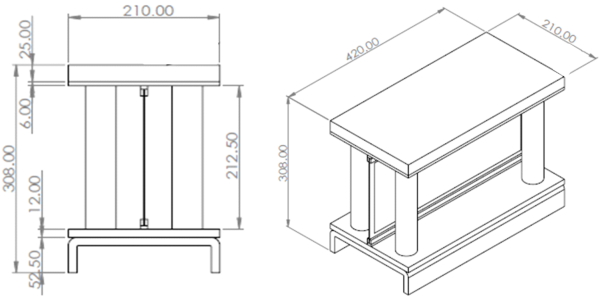


그림 2. 중간차단체 설계 도면

2.3 시험 변수

2.3.1 시험 유량 및 온도

본 연구에서 적용한 유량은 NEI Guidance (draft) “Generic Guidance, Revised Draft 12/7/2011, Strainer Fiber Bypass Test Protocol” 시험 요건에 따라서 시험 스트레이너 크기 및 시험 유량을 고려하여 시험 수행에 적합한 스케일링 인자를 사용하여 결정한다.[3] 발전소의 여과기 면적, 시험용 여과기 면적, Sticker/Label 면적을 적용하여 스케일링 인자를 도출하였으며, NEI 04-07의 방법론에 따라 Sticker/Label 면적 수치 중 75%에 해당하는 값을 적용하여 아래와 같은 계산식으로 계산한다. 기수행되었던 발전소의 시험조건을 참조하여 계산식에 사용하였으며 시험 유량은 801.5LPM을 기준으로 수행한다.

$$\begin{aligned} \text{시험유량(LPM)} &= \frac{\text{시험용여과기면적}(m^2)}{\text{발전소여과기면적}(m^2) - (\text{Sticker/Label 면적}(m^2) \times 0.75)} \times \text{발전소유량(LPM)} \\ &= \frac{6.3(m^2)}{195.5(m^2) - (8.6(m^2) \times 0.75)} \times 24056.3(LPM) = 801.5(LPM) \end{aligned}$$

기수행되었던 발전소의 장기 재순환 시 집수조 물온도를 참조하면 해당 집수조 물온도는 최소 130°F(55°C) 이상이다. 다만 테브리 시험은 유체의 온도가 낮을수록 점도 및 밀도, 용해도와 같은 재료의 고유물성치의 변화로 동일한 테브리양이 여과기에 축적되는 경우라도 수도손실이 크기 때문에 보수적이므로 시험은 40°C를 기준으로 수행한다.

표 1. 시험 유량 및 온도

시험 유량(LPM)	물 온도 (°C)
801.5	40

2.3.2 테브리 종류 및 양

발전소 LOCA시 재순환운전이 시작될 때 일부 섬유형 테브리 는 여과기 표면을 통과하여 원자로 노심 입구 노즐의 막힘, 안전관련 펌프 및 열교환기의 손상을 야기할 가능성이 있다. 본 연구에서는 이러한 여과기 표면을 통과하는 섬유형 테브리를 시험에 투여하는 이물질로 선정한다. 발전소마다 보유하고 있는 고유의 테브리양을 참조하여 시험에 투여하는 테브리의 양

을 산출해야하나 본 연구에서는 기수행되었던 발전소 조건을 적용하여 아래의 식을 통해 산출한다.

$$\begin{aligned} & \text{시험이물질양}(kg) \\ &= \frac{\text{시험용여과기면적}(m^2)}{\text{발전소여과기면적}(m^2) - (\text{Sticker/Label 면적}(m^2) \times 0.75)} \times \text{발전소 이물질양}(kg) \\ &= \frac{6.3(m^2)}{195.5(m^2) - (8.6(m^2) \times 0.75)} \times 816.5(kg) = 27.3(kg) \end{aligned}$$

NEI 04-07 Table 3-2 보온재별 특성자료에서 밀도가 2.4lbm/ft³이며 실제 발전소에서 사용 중인 NUKON™ 보온재를 사용한다.

표 2. 시험에 적용된 데브리류의 종류 및 양

데브리 종류	데브리 양
Fiber Debris	27.3kg

2.3.3 시험 매트릭스

표 3은 시험 매트릭스를 나타내며, 총 2회를 시험할 예정이며 중간차단체의 유/무에 따른 이물질 차단율에 대한 성능평가를 직접적으로 비교/분석하기 위해 온도, 유량, 이물질 양을 동일하게 구성하였다.

표 3. 시험 매트릭스

Test No.	Flow Rate(LPM)	Temp(°C)	Debris(kg)	Interception (O/X)
BP-1	801.5	40	27.3	X
BP-2	801.5	40	27.3	O

2.4 시험 방법

2.4.1 섬유형 데브리 준비

본 연구에서 사용할 섬유형 데브리는 총 27.3kg이며 25%의 Fine Debris와 75%의 Small Debris로 준비한다. 각 Debris를 담은 용기 8개를 준비하고, 섬유형 데브리 시트를 10 X 10 cm크기로 절단한다. 절단이 완료된 섬유형 데브리 조각들은 물을 채운 스테인레스 스틸 용기에 넣고 10분 동안 가열 후 100의 드라이오븐에서 1시간 동안 건조시킨다. 건조가 완료된 섬유형 데브리 조각의 무게를 측정 후 준비된 용기 8개에 나누어 담고 모두 약 30분간 전기키퍼를 이용하여 분쇄한다. 그리고 8개 용기 중 2개 용기는 Fine Debris를 제작하기 위해 따로 실험용 믹서기를 사용하여 한번 더 분쇄를 통해 Fine Debris를 제작한다. 2통의 Fine Debris와 6통의 Small Debris를 준비완료 한다.

2.4.2 시험 절차

상단의 섬유형 데브리 준비가 완료되면 시험에 사용될 메쉬 5 μm 이하의 백필터 9개(예비 1개)를 준비하고 각각의 무게를 측정하여 기록한다. 재순환집수조 성능평가 설비 내에 물을 설정치 만큼 채우고 유량과 온도를 시험조건까지 설정한다. 그리고 해당 설비의 순환을 유지하고 차압계의 High와 Low

의 Vent를 수행하여 안정화가 완료되면 초기 수두손실 값을 확인함으로써 시험 준비를 완료한다.

시험 준비가 완료되면 미리 준비해둔 백필터를 A유로와 B유로 모두 설치하고 데브리 투입 준비를 한다. 데브리 투입 시에는 재순환 되는 냉각수 대비 투입되는 데브리의 농도가 실제 발전소에서의 LOCA 시 데브리의 농도(0.0018 lb/gal)를 유지할 수 있도록 1회 투입 시 3.5kg을 넘지 않도록 한다. 데브리의 투입 지점은 스트레이트너 약 1m 이상 앞쪽이며, 첫 번째로 A유로의 밸브만 열고 B유로의 밸브를 닫은 상태로, Fine Debris 1통을 투입하고 5 turn over time(1시간 30분) 동안 설치된 A유로의 백필터를 통해 냉각수를 재순환 한다. 다음 Fine Debris 1통을 투입하고 B유로의 밸브를 열린 상태에서 A유로의 밸브를 닫고, A유로의 설치된 백필터를 제거하고 새로운 백필터를 설치한다. 다시 5 turn over time 동안 설치된 B유로의 백필터를 통해 재순환한다. 그리고 위의 방법과 동일하게 Small Debris 1통을 투입하고 A유로의 밸브를 열린 상태에서 B유로의 밸브를 닫고, B유로의 설치된 백필터를 제거하고 새로운 백필터를 설치한다. 이러한 방법으로 반복적으로 8번째 여과 백필터까지 시험을 진행하고 마지막으로 8번째 백필터를 통해 5 turn over time 동안 재순환한다. 그리고 최종 수두손실 값까지 기록이 완료되면 펌프를 종료하고 데이터수집 프로그램에서 수집된 데이터를 저장하고 시험을 종료한다. 시험을 종료 후에 사용된 백필터 8개를 완전히 건조시킨 후에 무게를 측정하고 기록한다. 각각의 백필터의 무게 측정량을 통해 섬유질 데브리의 여과기 통과에 의한 우회율을 계산한다.

3. 시험 결과

3.1 시험 결과

본 연구에서의 목적은 중간차단체로 인한 이물질 차단율에 대해 성능을 평가하는 것이다. 성능을 평가하기 위하여 실시한 해당 시험은 기존의 재순환집수조 성능평가 설비를 이용한 우회시험에 연계하여 진행하였으며, 섬유형 데브리(NUKON™)만을 사용하였다. 시험에 사용되는 섬유형 데브리의 투입량은 기수행되었던 발전소의 시험조건을 참조하여 산정하였으며, 시험조건도 동일하게 기수행되었던 발전소의 시험조건을 참조하여 산정하였다. 투입된 섬유형 데브리는 시험 장치에 설치한 백필터를 이용하여 포집하였으며, 시험 중 재순환 되는 모든 유량은 설치된 백필터를 통과한다. 기수행되었던 우회 시험에서는 섬유형 데브리의 우회율만 고려하고 수두손실 값에 대한 데이터를 따로 분석하지 않았지만 본 연구에서는 중간차단체의 영향을 확인하기 위하여 수두손실값도 비교 분석하였다.

표 4. BP-1 시험 전/후의 백필터 무게 측정 결과

BP-1	Filter 1	Filter 2	Filter 3	Filter 4	Filter 5	Filter 6	Filter 7	Filter 8
시험 전 중량(g)	358.582	360.293	362.238	360.608	370.586	366.386	360.104	358.693
시험 후 중량(g)	460.196	382.817	366.365	362.323	371.957	368.147	362.181	358.226
포집 데브리양(g)	102.61	22.92	4.43	2.32	1.97	2.16	2.18	0.67
Total Fiber Mass(g)	139.26							

표 5. BP-2 시험 전/후의 백필터 무게 측정 결과

BP-2	Filter 1	Filter 2	Filter 3	Filter 4	Filter 5	Filter 6	Filter 7	Filter 8
시험 전 중량(g)	324.674	326.831	329.542	329.679	326.12	322.507	319.284	326.796
시험 후 중량(g)	405.769	333.439	332.473	331.747	328.316	324.353	319.964	327.046
포집 데브리양(g)	81.10	6.61	2.93	2.07	2.20	1.85	0.68	0.25
Total Fiber Mass(g)	97.67							

그림 3은 BP-1/BP-2 온도, 유량, 차압에 대한 결과 그래프이며, 중간차단체가 설치되지 않은 BP-1에서 차압의 최대값은 약 20 mbar 정도이며 중간차단체가 설치된 BP-2에서 차압의 최대값은 약 12mbar 정도 측정되었다. 결과 그래프를 보면 중간차단체의 존재로 인해 여과기의 수두손실 값이 확연하게 줄어든 것을 확인하였다.

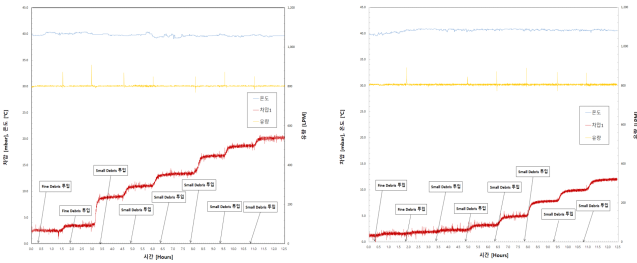


그림 3. BP-1/BP-2 결과 그래프

여과기를 통과하는 섬유형 데브리의 우회율은 백필터의 시험 전/후의 무게차를 이용하여 계산하였으며 각 단계별로 충분한 포집시간을 가질 수 있도록 NUREG/CR-6224 요건에 따라서 백필터 1개당 5turn over time(1시간 30분)의 시간동안 포집하였다. 표 4와 표 5는 BP-1과 BP-2의 시험 전/후의 백필터 무게를 측정된 결과이며, 포집된 데브리의 총량은 BP-1과 BP-2는 각각 139.26g과 97.67g 측정 결과를 보여주었다. 중간차단체의 유/무로 인한 포집된 데브리의 양은 약 41.59g 정도 확연하게 차이가 발생하였으며, Filter 1 ~ Filter 8번까지 전체적으로 포집된 데브리양이 줄어든 것을 확인하였다. 특히 Filter 1번과 Filter 2번에서 포집된 데브리양이 차이가 많이 발생하였으며 뒤로 갈수록 크게 차이가 나지 않는 것을 확인하였는데, 데브리의 양이 과도하게 많다면 중간차단체의 영향이 줄어들 것으로 예상된다.

4. 결론

본 연구에서는 재순환집수조 성능평가 설비에 실제 발전소 설비조건을 고려하여 중간차단체를 구축하였다. 그리고 재순환집수조 성능평가 설비와 중간차단체를 연계하여 이물질 우회

시험을 실시함으로써 중간차단체에 대한 이물질 차단율에 대해 성능평가를 실시하였다.

해당 성능평가의 결과는 여과기를 통과한 섬유형 데브리의 우회율과 수두손실 값으로 비교 분석하였으며, 섬유형 데브리의 우회율의 경우 BP-1 대비 BP-2의 포집된 이물질의 총량이 41.59g 감소하였으며 중간차단체로 인해 약 30%의 이물질이 차단되는 결과가 도출되었다. 또한 수두손실 값의 경우 BP-1 대비 BP-2의 차압 값이 약 8mbar 정도 감소하였으며 약 40%의 수두손실 값이 감소하는 결과가 도출되었다. 해당 결과를 통해 중간차단체가 재순환집수조로 이동되는 데브리를 차단 성능을 확인 할 수 있었다. 다만 본 연구에서는 섬유형 이물질만 사용하였기 때문에 더 정확한 성능평가를 확인하기 위해서는 추후에 발전소 조건을 명확하게 설정하여 화학적/비화학적 데브리도 함께 시험을 진행함으로써 중간차단체의 성능평가를 진행할 필요가 있다. 또한 재순환집수조 성능평가 설비와 중간차단체를 연계한 우회시험 결과를 토대로 노심 내 하류효과 시험을 수행하기 위해 투입되는 섬유형 데브리의 양에 대해서 여유도를 제시할 수 있을 것으로 판단된다.

ACKNOWLEDGMENTS

이 논문은 한국원자력산업협회가 지원한 ‘원자력생태계 지원사업’ 으로 지원을 받아 수행된 연구 결과입니다

참고문헌

- [1] Generic Safety Issue, GSI-191, “Potential of PWR Sump Blockage Post-LOCA” , 1998.
- [2] NRC Regulatory Guide 1.82, Rev.3, Water Sources for Long-Term Recirculation Cooling Following a Loss of Coolant Accident.
- [3] NEI Guidance (draft) “Generic Guidance, Revised Draft 12/7/2011, Strainer Fiber Bypass Test Protocol.