

# *Analysis of the Flow Characteristics of Debris in the Nuclear Power Plant and Development of Debris Transport Visualization Test Facility*

**2020. 12. 18**

**Min-Beom Heo<sup>a\*</sup>, Bum-Kyu Kim<sup>a</sup>, Dong-Seok Lim<sup>a</sup>, Yong-Jae Song<sup>a</sup>**

**<sup>a</sup> FNC Tech Co. Ltd, Heungdeok IT Valley, Heungdeok 1-ro, Giheung-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do, 446-908, Korea**



**[www.fnctech.com](http://www.fnctech.com)**



# CONTENTS

- I** 서론
- II** 시험 조건 및 시험 장치
- III** 시험 결과
- IV** 결론

# I. 서론

## ■ 연구개발 배경

### ▶ 1996년, NRC는 GSI-191을 통해 안전현안 제기

- 발전소 초기 사고 이후부터 비상노심냉각계통을 이용한 장기냉각모드 시 작은 이물질들이 여과기를 통과하여 노심에 전달되어 핵연료 냉각을 위한 유체의 흐름을 방해하고 노심 냉각 성능평가에 관한 이슈를 제기

### ▶ 이후 우리나라를 포함한 원전 보유 각국에서도 동일 안전현안을 해결하고자 주요 조치사항을 수행

- 문제를 야기하는 단열재 재료의 개선
- 침적물질을 형성할 수 있는 화학물질을 교체 등의 설계변경 수행
- 여과기 상단에 이물질 막이 설치 요구
- 사고 발생 시 재순환집수조에 이물질 축적에 의한 '막힘'현상의 잠재적 효과를 증명 요구

# I. 서론

## ■ 연구개발 배경

### ▶ GSI-191 해결을 위한 장기냉각 성능평가 시험

- 1개의 핵연료집합체를 이용하여 노심으로 유입된 모든 이물질이 Bottom Nozzle을 막는 상황을 모사한 실험
- 원자로 내부의 유동에 관한 해석, 핵연료 다발 간의 상관관계, 노심으로 실제 유입되는 이물질의 양 등을 정확히 모의하는데 한계 발생

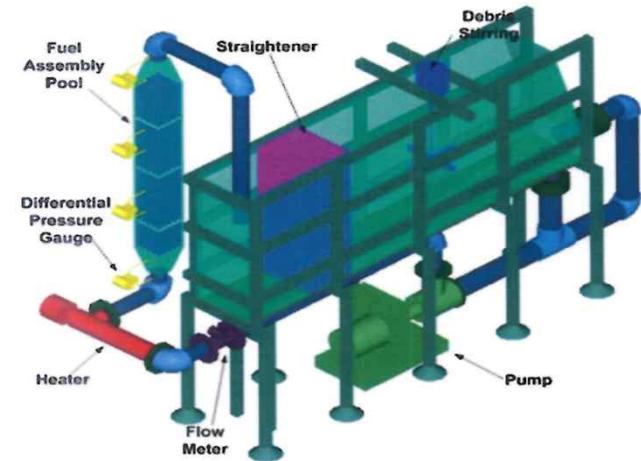


그림 1 : 장기냉각 성능평가 시험

실제 노심으로 유입된 이물질의 유동 분석 및 가시화를 통하여 이물질 이송 및 축적량을 정량화하는 역할을 기대할 수 있음

## II. 시험 조건 및 시험 장치

### ■ 시험 조건 구성

- ▶ 발전소 사고 이후 발생한 이물질의 원자로 내에서의 유동 특성 및 축적되는 이물질 양을 시험을 통해 조사하고 시험결과를 해석하여 발전소에 이물질 여유도를 제시하는 것을 목표
- ▶ 원자로 내에서 노심 열제거에 영향을 주는 이물질은 섬유형 이물질, 입자형 이물질, 화학적 이물질, 잠복 이물질 등이 있으며, 이 중에 섬유형 이물질만 사용 예정
- ▶ 섬유형 이물질은 원전에서 사용하는 보온재와 동일한 제품인 NUKON을 사용하였으며 약 3kg를 적용
- ▶ 재순환되는 섬유형 이물질을 포집하기 위하여 1um 필터를 이용
- ▶ 실험온도는 상온에서 실시하였으며, 유체는 물을 사용
- ▶ 실험 수행 시간은 5 Turnover Time 시간 동안 재순환을 유지

## II. 시험 조건 및 시험 장치

### ■ 시험 조건 구성

#### ▶ NUKON 및 필터



그림 2 : 섬유형 이물질(NUKON™)



그림 3 : 1um 필터

## II. 시험 조건 및 시험 장치

### ■ 시험 조건 구성

- ▶ 각 발전소에 대한 이물질 여유도를 제시하기 위하여 이물질 발생량, 발전소별 유량, 발전소의 온도 및 다수의 수력학적 조건과 기하학적 형상조건을 고려하여 시험 조건을 구성

표 1 : 시험 조건표

No.	Test ID	유량 (Water Level)	이물질 (Quantity)	온도	비고
1	DTV-A01	150 LPM (혼합 탱크 1,000L)	3 kg	상온	-
2	DTV-A02	300 LPM (혼합 탱크 1,500L)	3 kg	상온	-
3	DTV-A03	300 LPM (혼합 탱크 1,500L)	3 kg	상온	Flow skirt Bottom Plate

## II. 시험 조건 및 시험 장치

### ■ 시험 장치

#### ▶ 이물질 유동 가시화 실험 장치(전체 사진)



그림 4 : 이물질 유동 가시화 시험장치

## II. 시험 조건 및 시험 장치

### ■ 시험 장치

▶ 이물질 유동 가시화 실험 장치는 목적에 따라 3개 파트로 구분

- Debris Transport and Accumulation Model Test Part
- Debris Injection and Coolant System Part
- Auxiliary Instrument System Part

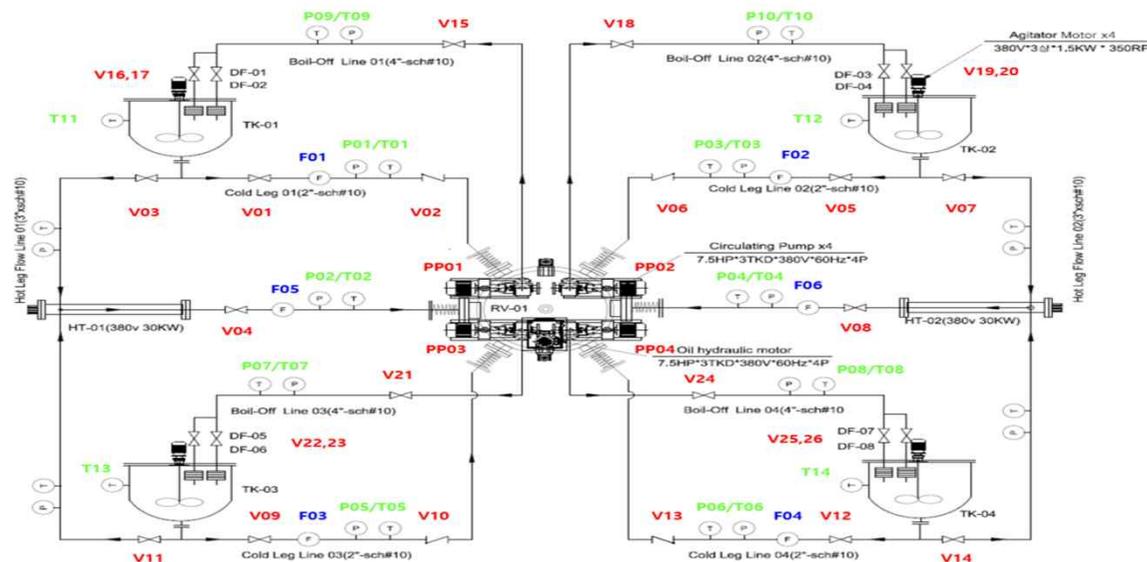


그림 5 : 이물질 유동 가시화 시험장치 P&ID

## II. 시험 조건 및 시험 장치

### ■ 시험 장치

#### ▶ Debris Transport and Accumulation Model Test Part

- 시험장치에서 가장 중요한 구성품으로 모의원자로용기를 포함

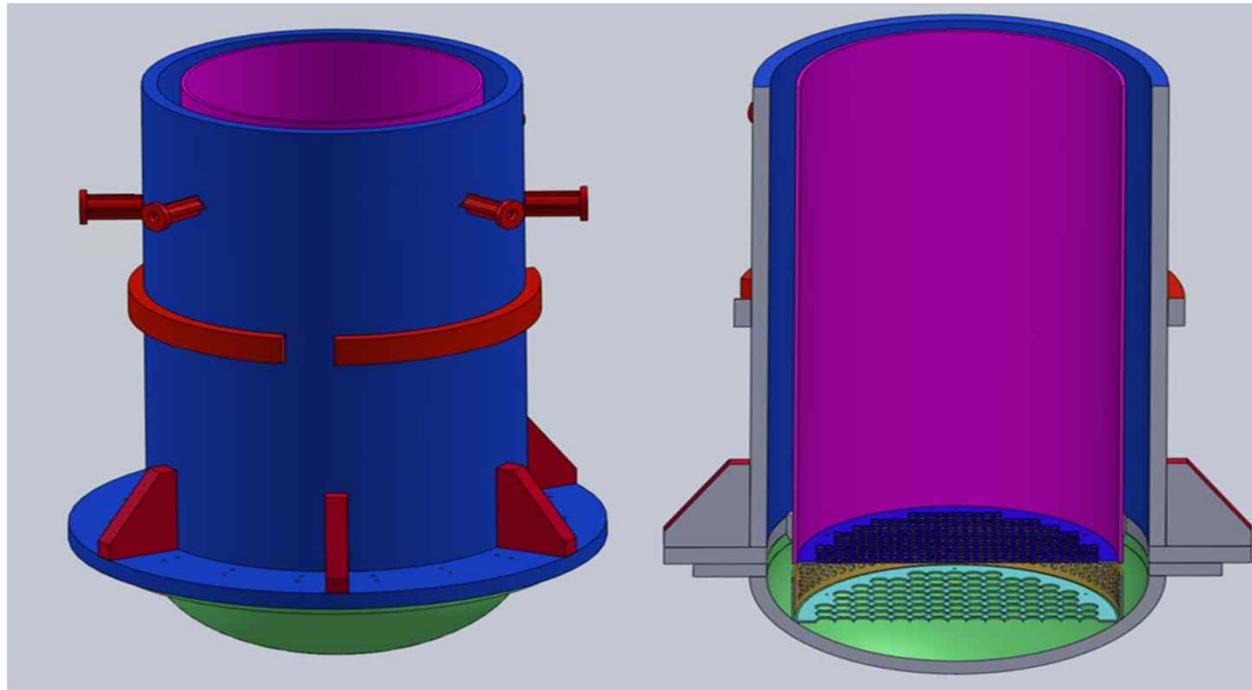


그림 6 : Debris Transport and Accumulation Model Test Part

## II. 시험 조건 및 시험 장치

### ■ 시험 장치

#### ▶ Debris Transport and Accumulation Model Test Part

- 실제 원전에 사용되는 원자로용기는 원자로 용기 상부헤드, 원자로용기 및 내부 구조물, 원자로 용기 하부헤드, 노즐로 구성
- 해당 모의 원자로용기는 원자로용기 상부헤드 및 제어봉집합체와 계측기기를 제외하여 설계
- 고온관 2개 노즐, 저온관 4개 노즐로써 구성하였으며, 60도 각도를 유지하여 배치되도록 설계
- 이물질의 유동 특성을 가시화 할 수 있도록 구성해야 하므로 모든 부분을 아크릴 재료를 이용하여 제작



그림 7 : 모의 원자로 용기

## II. 시험 조건 및 시험 장치

### ■ 시험 장치

#### ▶ Debris Injection and Coolant System Part

- 사고 이후 장기노심냉각 모드에서 펌프를 이용한 주입방식을 배제하고 보수적인 관점에서 자연 순환에 의해 노심을 냉각하는 시나리오를 모사할 수 있도록 설계
- Hot-leg break 시나리오와 Cold-leg break 시나리오를 모두 모사가 가능하도록 설계
- Hot-leg Piping Line은 3inch, Cold-leg Piping Line은 2inch, Boil-off Piping Line은 4inch로 설계
- 이물질의 투입이 용이하도록 상단부가 열려 있는 형태로 이물질 혼합탱크를 설계하였으며, 총 4개소로 구성
- Boil-off Line을 통해서만 이물질을 포함한 냉각수가 재순환이 되며 해당 배관에 필터를 설치하여 이물질을 포집

## II. 시험 조건 및 시험 장치

### ■ 시험 장치

#### ▶ Debris Injection and Coolant System Part



그림 8 : Debris Injection and Coolant System Part

## II. 시험 조건 및 시험 장치

### ■ 시험 장치

#### ▶ Auxiliary Instrument System Part

- 이물질 유동 가시화 시험장치의 보조 장치에 해당하는 부분으로 유량계, 열전대, 압력계 등의 계측장치와 PLC를 이용한 시험장치의 제어를 담당
- 유량계 2개소 (Hot-leg Line 1개, Cold-leg Line 1개), 열전대 3개소 (Hot-leg Line 1개, Cold-leg Line 1개, 모의 원자로 용기 1개)
- PLC에서는 실시간으로 측정값(유량, 온도 등)을 받아 모니터링 가능



그림 9 : Auxiliary Instrument System Part

## Ⅲ. 시험 결과

### ■ 시험 결과

- ▶ 30분간 재순환 유지 후에 이물질을 투입하고 모의 원자로용기 내에서 투입된 이물질이 Flood-up되어 Boil-off line을 통해 이물질 탱크로 이동함으로써 필터로 포집되는 것을 확인
- ▶ 시험은 총 3번 실시하였으며, 필터를 통하여 이물질을 포집 후 완전 건조하고 무게를 측정
- ▶ 투입한 이물질은 시간이 지남에 따라 모의 원자로용기 바닥층으로 축적됨



그림 10 : 섬유형 이물질 투입



그림 11 : 필터 건조

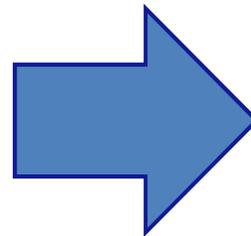
## Ⅲ. 시험 결과

### ■ 시험 결과

▶ 이물질 가시화 실험 장치 실험 결과(모의 원자로 용기 변화)



실험 전



5 Turnover Time



실험 후

## Ⅲ. 시험 결과

### ■ 시험 결과

표 2 : 이물질 축적량 결과표

	시험전 무게(g)	시험후 무게(g)	이물질 축적량(g)	비고(%)
DTV-A01	777.621	2,450.321	1,672.700	55.76
DTV-A02	813.016	1,468.174	655.158	21.84
DTV-A03	819.833	1,060.208	240.475	8.01

**이물질 축적량 DTV-A01 > DTVA02 > DTV-A03**

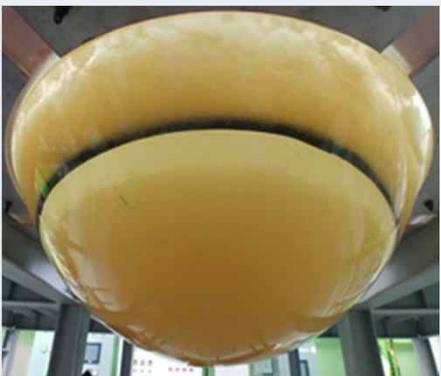
- ▶ 유량이 적은 실험에서 포집된 이물질의 축적량이 적음
- ▶ 내부 구조물이 추가된 실험에서 포집된 이물질의 축적량이 적음

## Ⅲ. 시험 결과

### ■ 시험 결과

▶ 이물질 유동 가시화 시험 결과 : 모의 원자로용기 하반구 영역

표 3 : 시험 결과 하반구 영역

	DTV-A01	DTV-A02	DTV-A03
시험 전			
시험 후			

## IV. 결론

### ■ 결론

- ▶ 혼합탱크로 투입된 섬유형 이물질은 모의원자로용기로 투입되어 초기에는 유량에 따라 이동하지만 점차 섬유형이물질 밀도에 따라 서서히 바닥층으로 축적되는 특성을 나타냄
- ▶ DTV-A01과 DTV-A02를 비교하였을 때, 유량에 의해 필터를 통하여 포집되는 이물질량이 차이가 발생하였으며 유량이 적을수록 모의원자로용기 바닥층으로 이물질이 더 많이 축적되는 것을 확인
- ▶ DTV-A01과 DTV-A03을 비교하였을 때, 내부구조물에 의해 필터를 통하여 포집되는 이물질량이 차이가 발생하였으며 내부구조물에 의해 이물질이 모의원자로용기 바닥층으로 더 많이 축적되는 것을 확인
- ▶ 기존에 관련 현안 해결을 위하여 수행하던 단일핵연료집합체 시험에서 적용하여 투입되는 이물질에 대하여 발전소 별로 안전 여유도를 제시할 수 있는 데이터를 확보

# Acknowledgement

- 이 논문은 한국에너지기술평가원의 에너지 기술 개발 사업으로 추진하는 “원전격납건물 라이너 플레이트 부식 손상 관리 기술 개발” 과제 (20181510102310)의 지원을 받아 수행되었습니다.

**THANK YOU**





[www.fnctech.com](http://www.fnctech.com)

본 사 : 경기도 용인시 기흥구 흥덕1로 13, 32층(영덕동, 흥덕아이티밸리 타워동) 우)16954  
TEL. 031-8065-5114 / FAX. 031-8065-5111

연구소 : 경기도 용인시 기흥구 탑실로 46 (주)미래와도전 부설 미래에너지기술연구소 우)17084  
TEL. 031-8005-6010 / FAX. 031-8005-6014

대전 지사 : 대전시 유성구 대덕대로 593, 10층 1004-2호(도룡동, 대덕테크비즈센터) 우)34112  
TEL. 042-867-5114 / FAX. 042-867-5110