

# LOCA이후 환경에서 원자로건물집수조 여과기의 수두손실에 대한 화학적 영향

구희권<sup>1</sup>, 정범영<sup>1</sup>, 홍광<sup>1</sup>, 정은선<sup>1</sup>, 정현준<sup>1</sup>, 박병기<sup>1\*</sup>, 이인형<sup>1</sup>, 박종운<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>순천향대학교 에너지환경공학과, <sup>2</sup>한국수력원자력주식회사

## Chemical Effects on Head Loss across Containment Sump Strainer under Post-LOCA Environment

Hee Kwon Ku<sup>1</sup>, Bum Young Jung<sup>1</sup>, Kwang Hong<sup>1</sup>, Eun Sun Jeong<sup>1</sup>,  
Hyun Jun Jung<sup>1</sup>, Byung Gi Park<sup>1\*</sup>, In Hyoung Rhee<sup>1</sup> and Jong Woon Park<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Energy & Environmental Engineering, Soonchunhyang University

<sup>2</sup>Korea Hydro and Nuclear Power Co. Ltd.

**요약** 냉각재상실사고이후 원전의 원자로건물집수조 여과기에서 화학적 영향을 고려한 수두손실을 종합적으로 평가하기 위한 시험장치를 개발하였다. 시험장치에서 원자로건물집수조와 시험장치에서 물 부피에 대한 여과기 면적의 비가 일치하도록 시험조건을 설정하고 시험을 수행하였다. TSP pH 조절제 조건에서 칼슘실리케이트는 시험 초기에 수두손실을 급격히 상승시켰기 때문에 원자로건물에서 모든 칼슘실리케이트를 제거하여야 함을 확인하였다. 비상노심 냉각계통 살수지속시간의 차이에 따른 시험결과는 장기살수조건이 단기살수조건에 비해 12배 정도 높은 수두손실을 보였다. 살수조건 시험결과를 화학적 영향이 없는 수두손실과 비교하면 단기살수와 장기살수의 각 조건에서 5.6배 및 60.8배 수두손실이 증가하는 결과를 보였다. 화학적 영향은 재순환수에 노출된 물질의 양에 따라 초기의 일정기간 동안 알루미늄 및 아연도금 판의 부식에 의해 급격히 증가하고 이들이 부동피막을 형성한 이후에는 NUKONTM 및 콘크리트 등에서 침출된 화학종의 침전에 기인하여 증가율이 감소하는 경향을 보였다. 실험결과는 TSP에 의한 알루미늄의 부동피막 형성이 살수시간이 길어지고 알루미늄의 양이 많을 경우 효과적이지 않다는 것을 보였다.

**Abstract** A test apparatus has been fabricated to simulate chemical effect on head loss through a strainer in a pressurized water reactor (PWR) containment water pool after a loss of coolant accident (LOCA). Tests were conducted under condition of same ratio of strainer surface area to water volume between the test apparatus and the containment sump. A series of tests have been performed to investigate the effects of spray, existence of calcium-silicate with tri-sodium phosphate (TSP), and composition of materials. The results showed that head loss across the chemical bed with even a small amount of calcium-silicate insulation instantaneously increased as soon as TSP was added to the test solution. Also, the head loss across the test screen is strongly affected by spray duration and is increased rapidly at the early stage, because of high dissolution and precipitation of aluminum and zinc. After passivation of aluminum and zinc by corrosion, the head loss increase is much slowed down and is mainly induced by materials such as calcium, silicon, and magnesium leached from NUKONTM and concrete. Furthermore, it is newly found that the spray buffer agent, tri-sodium phosphate, to form protective coating on the aluminum surface and reduce aluminum leaching is not effective for a large amount of aluminum and a long spray.

**Key Words** : Head Loss, Chemical Effects, Strainer, LOCA, Nuclear Power Plant

### 1. 서론

(LOCA, Loss of Coolant Accident)의 발생 후에 노심 냉각성능을 유지하여 안전성을 보장하기 위한 방안으로 비상노심냉각계통(ECCS, Emergency Core Cooling System)

원전에서 설계기준 가상사고인 냉각재상실사고

\*교신저자 : 박병기(byunggi@sch.ac.kr)

접수일 09년 07월 28일

수정일 09년 11월 07일

계재확정일 09년 11월 12일

을 가동하여 원전의 안전성을 보장한다. 그러나 LOCA는 파손된 배관 주변으로 고에너지의 유체를 방출하여 이것은 배관주변의 단열재를 비롯한 원자로건물 내부의 도장재 등을 파손시켜 다량의 이물질질을 발생시킨다. ECCS에 의한 재순환운전은 이물질이 유동을 따라 원자로건물집수조여과기로 이동하게 함으로써 여과기를 막히게 하여 ECCS의 냉각성능을 저하시키는 안전성 현안이 대두되었다.[1] 특히 원자로건물에서 비상노심냉각계통의 살수 및 재순환수에 노출된 물질의 부식 및 침출 반응에 의해 형성되는 침전물이 수두손실에 영향을 준다는 것이 알려지면서 규제기관은 화학적 영향이라 명명된 이 현상을 반영하여 수두손실을 재평가할 것을 요구하였다.[2] 이의 일환으로 화학적 영향에 의한 수두손실 증가를 정량화하고 이 영향을 완화시키기 위한 방안을 도출하기 위하여 다양한 연구가 수행되고 있다.

미국 NRC(Nuclear Regulatory Commission)의 주도로 수행된 ICET(Integrated Chemical Effects Testing)는 화학적 영향으로 생성되어 수두손실에 영향을 주는 대표적인 화학적 부산물은  $AlOOH$ ,  $NaAlSiO_4$ ,  $Ca_3(PO_4)_2$  이며 원자로건물 내부에 존재하는 물질 중에서 알루미늄이 수두손실에 가장 큰 영향을 줌을 보였다.[3] ICET 결과를 바탕으로 PWROG(PWR Owners Group)는 각 원전의 고유 환경에서 화학적 영향으로 발생하는 화학적 부산물의 생성량평가모델인 WCAP 방법론을 개발하였다.[5] ICET 결과와 WCAP 방법론은 원자로건물집수조에서 생성되는 화학적 부산물의 종류 및 생성량을 평가하는 방법을 제시하였으며 이를 바탕으로 원자로건물집수조 여과기에서 화학적 영향을 고려한 수두손실을 평가하는 다양한 방법이 개발되었다. 미국 NRC의 화학적 영향 심사지침 [5]은 현재 고려되는 다양한 평가방법에 대해 WCAP 방법론에 따라 화학적 부산물의 종류 및 양을 산정하고 이를 파손된 이물질과 동시에 사용하는 방법과 30일 동안 화학적 부산물을 발생시키는 환경을 모사하여 화학적 부산물이 시험기간동안 발생하도록 하여 수두손실을 평가하는 방법으로 구분하였다.

원자로건물집수조에서 파손된 이물질에 의한 수두손실은 ECCS 운전시작과 함께 나타나지만 화학적 영향은 30일 동안 LOCA 이후 원자로건물집수조에서 물의 pH, 온도, 용해된 이온의 종류 및 양 등과 같은 화학적 조건에 의해서 시간에 따라 1) 물질의 부식 및 침출, 2) 새로운 화합물 또는 침전물 생성, 3) 형성된 화합물 및 침전물의 여과기 이동 및 축적되는 일련의 과정을 거쳐 수두손실에 영향을 준다. 따라서 30일 동안 원자로건물 수화학 환경을 모사하며 시간에 따라 수두손실을 측정하는 방법은 화학적부산물을 별도로 생성시켜 사용하는 것보다 현

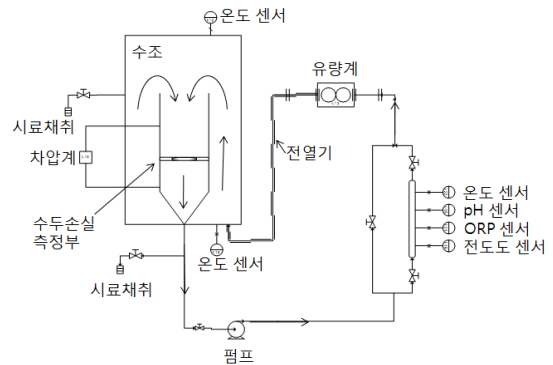
실성이 있다. 그러나 이 방법론을 적용할 경우 화학적 부산물을 생성시키는 환경조건 및 수두손실을 발생시키는 이물질 층에 대한 보수성을 보장하는 시험장치 및 방법의 개발이 필요하다.

본 연구에서는 화학적 영향을 고려한 수두손실시험에서 실제 현상을 대변할 수 있는 30일 동안 수두손실을 평가하는 방법을 적용하여 원자로건물집수조 여과기에서 LOCA이후 예상되는 물리적 현상과 화학적 현상이 결합되어 나타나는 수두손실을 평가할 수 있는 시험장치를 개발하고 보온재인 칼슘실리케이트의 영향과 수두손실에 대한 30일 동안의 살수 지속시간조건의 영향을 평가하였다.

## 2. 수두손실 평가방법

### 2.1 시험장치의 설계 및 제작

원자로건물에서 LOCA이후 여과기에 축적된 이물질층에서 화학적 영향을 고려한 수두손실을 평가하기 위한 시험장치를 개발하였다. 설계제작된 시험장치의 개략도는 그림 1과 같다. 시험장치에서 원자로건물집수조 환경에서 발생하는 수두손실과 유사성을 갖도록 여과기 면적대 물 부피가 일치하는 조건으로 설계하였다. 따라서 시험장치의 크기는 여과기 면적에 의해 결정된다. 시험장치의 크기를 고려하여 직경 3/32 인치의 구멍이 일정한 간격으로 판공된 직경 10 cm의 원형 스테인리스 판을 여과기로 선정하였다. 따라서 시험장치 설계의 기본인자인 여과기 면적은  $78.54 \text{ cm}^2$ 가 된다.



[그림 1] 시험장치의 개략도

그림 1에 나타낸 바와 같이 시험장치는 수두손실 측정부, 여과기, 수조, 펌프, 전열기, 및 수화학 환경 측정함으

로 구성된다. 시험장치는 다양한 pH에서 구성 재료가 부식되어 화학적 영향을 주지 않도록 제작하였으며 수조에 설치되는 시편 사이에서 Galvanic 부식이 발생하지 않도록 충분한 공간을 두었다. 시험장치는 30일 동안 수화학 환경조건을 방해하지 않아야 하도록 자료취득시스템은 자동화하여 수두손실, 유량, 각 위치에서의 물 온도, pH를 온라인으로 측정할 수 있도록 하였으며 정전에 대비하여 무정전전원장비를 갖추었다.

## 2.2 시험대상 물질의 종류

시험에 사용될 이물질의 특성과 원자로건물집수조에 존재하는 이물질 특성이 비슷하여야 동일한 수두손실 측정에서 물질의 특성 차이에 의한 영향을 배제할 수 있다. 일반적으로 국내 가동중원전의 원자로건물에 존재하는 물질은 NUKON, 칼슘실리케이트, 도장재, 콘크리트, 및 금속 등이다.

NUKON은 5~7 μm 직경이며 약 2인치 길이인 유리 섬유를 바인더로 고정하여 제작한다. 바인더는 450 °F (232.2 °C)보다 높은 온도에서 기체 상태로 분해되므로 고온 환경에서 NUKON의 열화에 의해 바인더는 분해되어 없어지고 유리섬유만 남는다. 냉각재상실사고는 NUKON을 작은 조각으로 파손시키므로 끓는 물을 사용하여 바인더를 제거하는 열화처리를 한 후 작은 조각으로 만들어 사용한다. 도장재는 LOCA에 의해 발생하는 고에너지 유체에 의해 파손되어 작은 입자 형태의 이물질을 발생시킨다. 수두손실에 동일한 효과를 주도록 하기 위하여 도장재 이물질의 대용품은 크기와 물질의 미시적 밀도를 비교하여 선정하였다. 입자형 도장재 이물질의 대용품으로 ground silica인 SAC사의 S-SIL 30 제품을 선정하였다. 조각형 도장재 대용품으로 SAC사의 Silica Sand(습사) 제품을 선정하였다. 잠복이물질에 대한 특성은 미국 NRC의 NEI 04-07에 대한 안전성평가보고서의 3.5.2.3에 주어져 있다.[5] 잠복이물질의 대용품으로 이 조건에 따라 제조된 PCI사 제품을 선정하였다.

ICET의 결과에 따르면 화학적 영향으로 여과기의 수두손실에 영향을 주는 물질은 알루미늄, 아연, 콘크리트, 칼슘실리케이트, NUKON 등이다. 이러한 물질이 원자로건물집수조 수위 아래에 있는 경우 ECCS에 의한 재순환 운전 동안 항상 물에 노출되어 있기 때문에 지속적으로 화학적 영향을 주지만 원자로건물집수조 수위 위에 있는 물질은 살수에만 노출되기 때문에 살수 지속기간 동안만 화학적 영향을 준다. 따라서 화학적 영향을 주는 물질의 양은 집수조 수위 위에 있는 양과 아래에 있는 양으로 구분하여 선정하였다.

원자로건물집수조에서 화학적 영향을 주는 물질과 동

일한 물질을 사용하는 것이 불가능하기 때문에 평가의 보수성을 보장할 수 있도록 ICET의 시험준비 절차에 따라 확립된 대용품[3]을 선정하였으며 표 2에 보인 바와 같다. 금속 시편은 순수한 알루미늄과 아연 판으로 두께 1.5 mm를 사용하였다. 아연의 경우 도장재 및 금속 구조물에 함유된 아연을 나타내지만 시험을 위하여 아연 판(Galvanized Steel)을 사용하였다. 아연이 도장재에 함유된 것에 비해 아연 판의 부식율이 높아 시험결과와 보수성을 보장할 수 있다. 알루미늄의 경우 발전소에서 사용되는 것은 합금 형태이지만 시험에서는 순수한 알루미늄으로 A1050을 사용하였다. 순수한 알루미늄은 합금형태로 존재하는 알루미늄보다 부식율이 높아 시험결과와 보수성을 보장할 수 있다. 금속 시편은 화학적 영향 시험을 위하여 ASTM G1[6]에 기술된 권고 방안에 따라 준비한다.

콘크리트의 경우 화학적 영향에 대해 콘크리트 규격보다는 노출된 면적이 중요한 것으로 알려져 있다.[4] 따라서 시험에서는 상용 등급 콘크리트 시편으로 KSL 5105 표준[7]에 따라 제작된 시편을 사용하였다.

## 2.2 시험대상 물질 양의 평가

화학적 영향을 고려한 수두손실 시험장치에서 수두손실 변화가 원자로건물집수조의 여과기에서 화학적 영향에 의한 수두손실 평가에 적용되도록 하기 위하여 화학적 환경뿐만 아니라 이물질의 종류 및 양에 대해서도 유사성을 유지하여야 한다. 유사성의 유지를 위하여 스케일링 변수(Scaling Factor, SF)로 물 부피 대 여과기 면적 비를 사용하였으며 정의는 다음과 같다.

$$SF = \frac{S_{\text{발전소}}}{V_{\text{발전소}}} = \frac{S_{\text{시험장치}}}{V_{\text{시험장치}}}$$

여기에서  $V_{\text{발전소}}$ 와  $S_{\text{발전소}}$ 는 원자로건물집수조 물 부피와 여과기 면적을  $V_{\text{시험설비}}$ 와  $S_{\text{시험장치}}$ 는 시험장치의 물 부피와 여과기 면적을 나타낸다.

화학반응이 매우 빠르다면 전체 물질이 빨리 소모되어 새로운 생성물로 모두 변환되기 때문에 물질 양으로 스케일링 하는 것이 바람직하지만 금속의 부식반응, NUKON과 같은 섬유형 이물질에서 침출 반응의 경우 반응 속도가 느리기 때문에 반응물질 소모가 빠르지 않고 볼 수 있다. 따라서 화학적 영향 시험을 위하여 금속 시편의 경우 30일 시험 동안 시편이 유지될 만큼의 양을 투입하고 반응하는 양을 결정하기 위하여 표면적을 고려하여 SF를 적용하였다. 그러나 NUKON의 경우 물질의

전체 부피가 고체로 구성된 것이 아니라 섬유가 묻혀 있는 구조로 물이 NUKON 보온재 내부로 침투하여 반응하는 경우이다. 따라서 전체 반응 면적을 계산할 수 없기 때문에 부피에 대해 SF를 적용하여 시험에 사용할 양을 계산하였다. 칼슘실리케이트의 경우 보온재가 구조적으로 가루 형태로서 물에 쉽게 용해된다고 가정하고 부피에 대해 SF를 적용하여 시험에 사용할 양을 평가하였다. LOCA에 의해 파손되어 여과기 표면에서 이물질 층을 형성하는 이물질은 무기에 대해 SF를 적용하여 평가하였다

### 3. 고리 1호기 시험조건

고리 1호기 원자로건물집수조에서 화학적 영향을 고려한 수두손실 시험은 pH 조절제로 TSP를 사용하는 경우에 칼슘실리케이트의 영향을 평가하는 시험과 30일 동안 화학적 영향이 수두손실에 미치는 영향을 평가하는 시험을 구분하여 실시하였다.

#### 3.1 시험물질의 종류와 양

원자로건물집수조에서 물에 잠겨 있는 물질의 양이 많으면 더 보수적이다. 따라서 화학적 영향 평가의 보수성을 보장하기 위하여 원자로건물 수조의 물 부피는 고리 1호기 비상노심계통 재순환집수조 성능평가에 따라 최대 물 부피인 37,917 ft<sup>3</sup>을 적용한다.[8] 성능평가의 결과에 따라 필요한 2,200 ft<sup>2</sup>의 여과기 면적[8]에 대해 여과기가 평면이라고 가정하였을 경우, 여과기로 향하는 재순환냉각수의 평균 접근속도는 비상노심냉각계통 재순환 유량인 7,300 GPM에서 0.0074 ft/s가 된다. 시험에서 여과기의 평균 접근속도, 여과기 표면적 대 물 부피비 및 물의 체류시간을 동일하게 설정하고 물 부피 및 유량을 결정하였으며 표 1에 정리하였다. 성능평가에서 LOCA이후 발생하여 여과기 표면에 쌓이는 이물질 양을 추정된 결과와 수두손실에 화학적 영향을 주는 물질의 양을 추정된 결과는 표 2에 주어지 있다. 고리 1호기 원자로건물과 시험장치에서 여과기 면적 대 물 부피 비를 일치시켰기 때문에 시험에 필요한 물질 양을 결정하기 위한 변수인  $SF_{deb}$ 와  $SF_{vol}$ 는 동일한 값인  $3.84 \times 10^{-5}$ 이 된다. 이 값을 이용하여 시험에 필요한 물질의 양을 계산하여 표 2에 정리하였다.

[표 1] 고리1호기 시험을 위한 유동 조건

변 수	고리1호기	시험장치	축소비
평균 접근속도	0.0074 ft/s	0.2256 cm/s	1:1
여과기면적 대 물부피 비	0.058 ft <sup>-1</sup>	0.002 cm <sup>-1</sup>	1:1
여과기 면적	2,200 ft <sup>2</sup>	78.54 cm <sup>2</sup>	1:3.84E-5
물 부피	37,917 ft <sup>3</sup>	41,239 cm <sup>3</sup>	1:3.84E-5
유량	16.25 ft <sup>3</sup> /s	1.06 lpm	1:3.84E-5
물의 수조 체류시간	39 min	39 min	1:1

[표 2] 고리1호기 시험에 필요한 물질 양

이물질 종류	고리1호기	시험장치	
여과기 표면에 쌓인 이물질			
NUKON™	376.2 ft <sup>3</sup>	15.726 g	
칼슘실리케이트	0 lbm	0 g	
입자형 도장재 이물질	763.1 lbm	13.292 g	
조각형 도장재 이물질	826.7 lbm	14.399 g	
잠복 이물질 - 입자형	255 lbm	4.442 g	
원자로건물에 위치하여 화학적 영향을 주는 물질			
NUKON	681.12 lbm	11.86 g	
알루미늄	침수된	268 ft <sup>2</sup>	9.56 cm <sup>2</sup>
	침수안된	7,034 ft <sup>2</sup>	280.55 cm <sup>2</sup>
아연	침수된	4,540 ft <sup>2</sup>	161.96 cm <sup>2</sup>
	침수안된	119,063 ft <sup>2</sup>	4247.54 cm <sup>2</sup>
콘크리트	침수된	14,262 ft <sup>2</sup>	508.79 cm <sup>2</sup>

#### 3.2 화학적 영향을 주는 환경조건

LOCA이후 고리 1호기 원자로건물집수조의 pH는 초기에 붕산의 영향으로 산성인 pH 4.5 정도까지 감소하고 pH 조절제인 TSP가 용해됨에 따라 24.7분경에 pH가 7.9에 도달하여 일정한 값을 가지는 것으로 평가하였다.[9] 이러한 pH 변화는 원자로건물집수조에 용해된 화학물질의 조성인 원자로냉각재계통 냉각수에 포함된 붕산 및 LiOH와 원자로건물 바닥에 설치된 살수첨가제인 TSP, ECCS의 재순환운전동안 방사화 반응에 의해 형성되는 염산과 질산의 농도에 영향을 받는다. 각 화학물질의 농도는 고리 1호기 ECCS 재순환수의 부피 조건에 따라 변화할 것이며 평가된 농도는 표 3과 같다.

[표 3] 고리 1호기 원자로건물집수조에서 pH에 영향을 주는 용해된 화학물질의 농도

화학물질	고리 1호기		시험장치
	최소	최대	
Boron (ppm)	1,247	2,756	2,756
Lithium (ppm)	0.013	0.550	0.7
TSP(Na <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> ) (mg/l)	1,233		1,233
HCl (ppm)	-		100

붕소는 착물 형성, 알루미늄 용해도, 알루미늄 침전물에 붕소의 흡착 현상 등으로 화학적 영향을 주는 것으로 알려져 있다.[10] 따라서 보수적인 화학적 영향 평가를 위하여 붕소는 최대 농도인 2,756 ppm을 사용하였다. 리튬은 Al과 Zn의 부식에 영향을 주는 화학종으로 알려져 있다. 원자로냉각재계통에서 리튬의 농도는 0.2~3.5 ppm 이지만 LOCA 이후 ECCS의 재순환수에서 리튬 농도는 고리 1호기의 ECCS 수원을 고려할 경우 0.013~0.55 ppm 사이에서 변한다. 미국 PWR형 원전의 조사 자료를 근거로 하는 ICET에서는 Li의 농도를 평균적으로 0.7 ppm 이하로 추정하고 있다.[3] Li 농도는 TSP의 농도에 비해 매우 낮아 pH에 주는 영향은 미미하지만 리튬에 의한 부식영향을 무시한다는 가정을 도입하는 것은 보수성을 침해할 수 있다. 따라서 ICET 시험조건을 참조하여 Li의 농도를 0.7 ppm으로 가정하여 LiOH를 시험에 첨가한다. 고리 1호기 원자로건물 집수조에서 살수첨가제인 TSP의 농도 1,233 mg/l을 동일하게 적용하였다. 고리 1호기 원자로건물에서 TSP가 모두 용해되는데 15.4분이 소요되는 것으로 평가[9]되었기 때문에 시험에서는 시험 시작과 동시에 용해된 TSP를 첨가하여 조건을 일치하도록 하였다.

LOCA이후 ECCS의 재순환수에는 이러한 화학물질 이외에도 전선 피복재의 열화 및 방사화에 기인하여 생성된 염산과 원자로건물 대기 중의 질소와 산소의 방사화에 의해 생성된 질산이 존재한다.[3] 염산과 질산은 살수첨가제 물질인 TSP의 양에 비해 상대적으로 적은 양이 생성되어 pH에 미치는 영향은 매우 작다. 따라서 본 시험에서는 ICET에서 적용한 100 ppm의 염산만 적용하고 질산은 포함시키지 않았다.

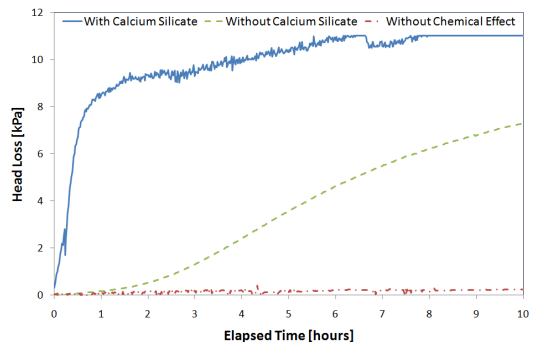
#### 4. 실험결과

##### 4.1 칼슘실리케이트의 영향

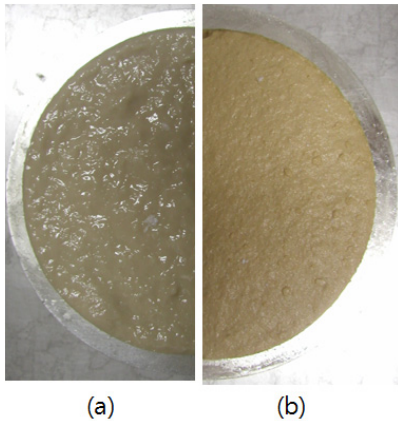
칼슘실리케이트가 포함된 이물질 층에서 원자로건물

집수조의 살수첨가제인 TSP의 영향을 평가하기 위한 시험을 수행하였다. 이물질 층을 형성하는 이물질의 종류에서 칼슘실리케이트를 포함한 경우와 포함하지 않은 경우에 대해 수두손실을 측정된 결과는 그림 2에 보인 바와 같다. 시험장치에서 이물질 층을 형성하고 온도를 90℃ 까지 상승시킨 후에 TSP를 주입하여 시험을 시작하자 칼슘실리케이트를 포함하는 이물질 층에서 수두손실이 급격히 증가하여 약 1시간 동안 8 kPa에 도달하였다. 이후에도 수두손실은 계속 증가하여 TSP 주입후 4시간 만에 10 kPa에 도달하여 계측기의 최대 한계를 초과하였다. 칼슘실리케이트를 포함하지 않은 이물질 층의 경우 TSP 주입후 시험을 시작한 후에 수두손실은 천천히 증가하여 약 10시간 경과 후 약 7 kPa에 도달하였다.

칼슘실리케이트의 성분인 칼슘과 TSP의 성분인 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> 이온은 즉시 반응하여 침전물 인산칼슘을 형성한다는 것은 ICET 결과에서 알려져 있다. 시험을 종료한 후 이물질 층을 육안으로 관찰한 결과는 그림 3(a),(b)와 같다. 그림 3(a)에 나타난 바와 같이 칼슘실리케이트가 존재하는 경우 이물질 층의 표면에 젤 형태의 침전물이 형성되었음을 관찰할 수 있다. 이러한 형태의 침전물이 여과기에 형성된 이물질 층의 기공을 막아 수두손실을 급격히 상승시킨 것으로 추정된다. 칼슘실리케이트가 없는 경우인 그림 3(b)를 보면 이러한 현상은 발생하지 않았지만 알루미늄 및 아연의 양이 상대적으로 많이 존재하여 시간이 경과함에 따라 대량의 화학적부산물을 생성함으로써 수두손실이 칼슘실리케이트가 없는 경우에 비해 상대적으로 천천히 상승하지만 화학적 영향이 없는 경우에 비해 매우 높은 값을 보임을 그림 2에서 확인할 수 있다.



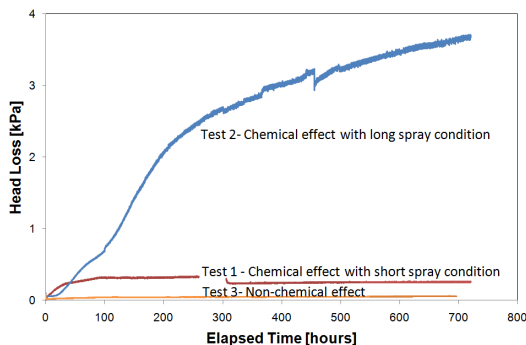
[그림 2] 칼슘실리케이트의 영향에 따른 수두손실 변화



[그림 3] 여과기 위에 형성된 이물질 층의 모양 (a)칼슘실리케이트가 있는 경우 (b)칼슘실리케이트가 없는 경우

### 4.3 살수 조건의 영향

원자로건물집수조의 pH 조절제로 TSP를 사용하는 환경에서 칼슘실리케이트의 존재는 수두손실을 급격히 상승시켜 시험장치에서 펌프 후단에 캐비테이션 현상이 발생하여 시험을 지속할 수 없었다. 원자로건물집수조에서도 동일한 현상이 발생가능하다고 판단하고 칼슘실리케이트의 영향평가 결과를 활용하여 원자로건물에 칼슘실리케이트가 없는 경우를 가정하고 화학적 영향을 주는 물질 양에 대한 재평가 결과를 근거로 30일 동안 화학적 영향을 고려한 수두손실 시험을 수행하였다. 시험은 스크린 위에 이물질 층을 형성한 후 물에 용해된 붕산과 LiOH 및 염산을 주입한 후 마지막으로 TSP를 넣고 시작하였다.



[그림 4] 원자로건물집수조 환경조건을 가정한 시험장치에서 여과기에 형성된 이물질 층에서의 수두손실 변화

그림 4에서 단기살수조건인 Test 1은 살수가 운전원

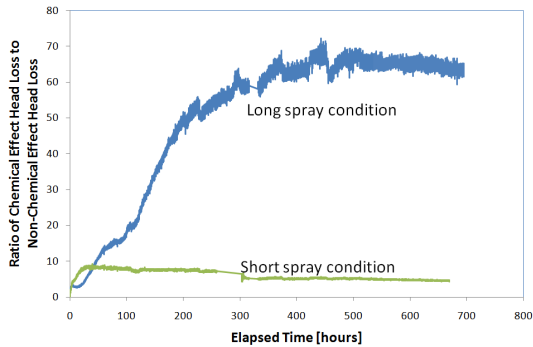
조작에 의해 재순환 운전이 시작된 후 1시간 후에 중지된다는 가정에 따라 살수에 노출되었다고 가정한 시편은 시험 시작 1시간 후에 시험설비에서 제거하였다. 그림 4에 보인 바와 같이 시험이 진행됨에 따라 96 시간까지는 수두손실이 증가하였고 이후 일정하게 유지되었다.

장기살수조건인 Test 2는 살수가 재순환 운전동안 지속된다는 가정에 따라 시험을 수행하였다. Test 1과 동일하게 이물질 층을 형성하고 화학물질을 주입하였다. 그림 4에 보여준 바와 같이 수두손실은 재순환 운전 시작 후 약 200시간까지 2 kPa에 도달한 후 이후 서서히 증가하여 재순환 운전 종료 시점인 720시간에서는 3.6 kPa의 값을 보였다. 재순환 운전 시작부터 200시간까지 수두손실의 증가는 여과기에 형성된 이물질 층에 화학적 영향에 의한 부산물이 이송되어 발생하는 것으로 추정할 수 있으며 이후 온도가 50℃로 유지되는 조건에서 서서히 증가하는 수두손실은 느리게 진행되는 화학반응에 의한 부산물에 의해 발생하는 것으로 추정된다. 이러한 현상은 화학적 영향을 주는 물질이 없는 경우에 수두손실을 측정된 Test 3의 시험결과에서도 확인 할 수 있다. 즉 온도가 일정하게 유지되고 있는 동안 느린 화학반응에 의해 지속적으로 화학적부산물이 생성되지만 온도 변화가 급격한 초기에 발생하는 것 보다 매우 적은 양의 화학적부산물이 생성되고 있다고 볼 수 있다.

화학적 영향을 주는 물질이 없는 경우인 Test 3에서 재순환 운전 시간에 따라 비화학적 이물질에 의한 수두손실의 변화를 측정하였다. 그림 6에 보인 바와 같이 온도가 90℃에서 45℃까지 감소하는 동안 수두손실은 0.016 kPa에서 0.04 kPa까지 증가하고 이후 온도가 일정하게 유지되는 동안 수두손실은 0.04 kPa에서 거의 일정하게 유지되다가 450 시간부터 서서히 증가하여 0.06 kPa에 도달함을 확인할 수 있었다. 초기 수두손실의 변화는 온도변화에 의한 물의 점성이 증가하여 발생하였으며 450 시간 이후의 수두손실 증가는 장기간 물에 노출된 NUKON에서 침출 반응이 일어나 화학적부산물이 발생하여 수두손실의 증가에 기인한다고 추정된다.

그림 4에서 보인 바와 같이 30일 경과 후 장기살수조건의 경우 단기살수조건에 비해 수두손실이 약 12배 정도 높은 값을 보였다. 이것은 시험기간 동안 노출된 화학적 영향을 주는 물질의 양이 알루미늄의 경우 29배, 아연의 경우 27배 정도 차이가 나기 때문에 발생한 화학적부산물의 양의 차이로 발생한 것으로 추정된다. 화학적 영향을 주는 물질이 없는 경우의 수두손실과 화학적 영향을 가지는 이물질 층에 의한 수두손실의 비를 그림 5에 도시하였다. 그림 5에 보인 바와 같이 단기살수조건의 경우 초기에 수두손실이 화학적 영향이 없는 경우에 비해

약 9 배 정도 높은 값을 가지지만 시간이 경과할수록 감소하여 약 5배 높은 값을 보인다. 이에 반하여 장기살수 조건의 경우 수두손실 비는 계속 증가하여 약 400시간이 경과한 후 65배의 값을 가지며 이후 안정화된 경향을 보였다.



[그림 5] 화학적 영향이 없는 수두손실에 대한 화학적 영향이 있는 수두손실 비의 변화

## 5. 결론

LOCA 이후 환경에서 원자로건물집수조 여과기의 화학적 영향을 고려한 수두손실을 평가하는 시험장치를 개발하였다. 시험장치는 국내 가동중원전에 적합하게 시험 변수를 조절할 수 있도록 제작하였으며 고리1호기의 경우에 대한 수두손실 변화를 시험하였다. 시험결과에 따르면 pH 조절제로 TSP를 사용하는 경우 칼슘실리케이트의 존재는 ECCS의 가동 초기에 수두손실을 급격하게 상승 시키기 때문에 원자로건물에서 화학적 영향에 의한 수두손실 상승을 억제하기 위하여 TSP를 사용하는 경우 칼슘실리케이트를 완전히 제거하여야 함을 확인하였다. 30일 동안 화학적 영향을 고려한 수두손실 시험은 살수조건이 여과기에서 수두손실 상승의 중요한 변수가 되므로 원자로건물에서 살수에 노출된 화학적 영향을 주는 물질의 양을 변경하기 어렵다면 원전의 안전성을 침해하지 않는 범위에서 살수시간을 조절하여 여과기에서 수두손실 상승을 억제하여야 한다.

## 참고문헌

[1] D.V. Rao, et al., "Knowledge Base for the Effect of Debris on Pressurized Water Reactor Emergency Core

Cooling Sump Performance", NUREG/CR-6808, U.S. Nuclear Regulatory Commission, 2003.

- [2] NRC Generic Letter 2004-02, "Potential Impact of Debris Blockage on Emergency Recirculation during Design Basis Accidents at Pressurized-Water Reactor", September 13, 2004
- [3] J. Dallman, J. Garcia, M. Klasky, B. Letellier, K. Howe, "Integrated chemical effects test project: Consolidated Data Report", NUREG/CR-6914. U.S. Nuclear Regulatory Commission, December 2006
- [4] R.D. Reid, K.R. Crytzer, A.E. Lane, "Evaluation of Post-Accident Chemical Effects in Containment Sump Fluids to Support GSI-191", WCAP-16530-NP-A, Westinghouse Electric Co. LLC, 2008.
- [5] USNRC Staff, R. Litman, W. Shack, "NRC Staff Review Guidance Regarding Generic Letter 2004-02 Closure in the Area of Plant-Specific Chemical Effect Evaluations", U.S. Nuclear Regulatory Commission, March 2008.
- [6] ASTM G1, 2003, "Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens", ASTM International, 2003
- [7] KSL 5105, "Testing Method of Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortar", Korean Standards Association, 2007.
- [8] 고리 1호기 비상노심냉각계통(ECCS) 재순환집수조 성능 평가, 한국수력원자력(주), 2006.
- [9] 고리 1,2호기 격납건물 살수첨가제 개선(최종보고서), 한국수력원자력(주), 2004.
- [10] W. J. Shack. Technical Letter Report on WCAP-16530-NP, Evaluation of Post-Accident Chemical Effects in Containment Sump Fluids to Support GSI-191. U.S. Nuclear Regulatory Commission., 2007.

구 희 권(Hee Kwon Ku)

[준회원]



- 2008년 3월 ~ 현재 : 순천향대학교 화학-환경공학과(석사과정)

<관심분야>  
수질관리, 수처리

정 범 영(Bum Young Jung)

[준회원]



- 2009년 3월 ~ 현재 : 순천향대학교 화학-환경공학과(석사과정)

<관심분야>  
수질관리, 수처리

정 현 준(Hyun Jun Jung)

[준회원]



- 2007년 3월 ~ 현재 : 순천향대학교 화학-환경공학과(공학석사)

<관심분야>  
수질관리, 수처리

홍 광(Kwang Hong)

[준회원]



- 2009년 3월 ~ 현재 : 순천향대학교 화학-환경공학과(석사과정)

<관심분야>  
수질관리, 수처리

박 병 기(Byung Gi Park)

[정회원]



- 1993년 2월 : 서울대학교 원자핵공학과 (공학석사)
- 1999년 2월 : 서울대학교 원자핵공학과 (공학박사)
- 2007년 3월 ~ 현재 : 순천향대학교 교수

<관심분야>  
수질관리, 원자력, 용융염

정 은 선(Eun Sun Jeong)

[준회원]



- 2008년 3월 ~ 현재 : 순천향대학교 화학-환경공학과(석사과정)

<관심분야>  
수질관리, 수처리

이 인 형(In Hyoung Rhee)

[정회원]



- 1990년 2월 : Cornell University 토목환경공학 (공학석사)
- 1996년 2월 : Carnegie Mellon University 토목환경공학 (공학박사)
- 1998년 3월 ~ 현재 : 순천향대학교 교수

<관심분야>  
수질관리, 수처리, 계면화학



박 종 운(Jong Woon Park)

[정회원]



- 1989년 2월 : KAIST 원자력 및 양자공학과 (공학석사)
- 1993년 2월 : KAIST 원자력 및 양자공학과 (공학박사)
- 1993년 3월 ~ 현재 : 한국수력 원자력(주) 책임연구원

<관심분야> 원자력