

## 원자로 미확인 누설감지 시스템 검증

김우식\*<sup>†</sup> · 권태순\*

### Performance Verification of Reactor Unidentified Leakage Detection System

Wooshik Kim\*<sup>†</sup>, Taesoon Kwon\*

Key Words : Nuclear Reactor(원자로), Leak Detection System(누설감지계통), Performance Verification(성능 검증)

#### ABSTRACT

The real time detection of small leak flow is very important for the nuclear reactor safety. The early perception of the malfunction of the nuclear system due to the coolant leak can give a sufficient time required for the operator action. In the present study, an improved concept of small leak detection system was proposed and an experimental facility to evaluate the performance of the system was constructed. In the small leak detection system, the leaked steam is sampled using porous type sampling devices which are installed on the air circulation loop and the time variation of the humidity on the down stream of the loop is measured in real time. The main concept of the system proposed in the present study is to achieve fast and obvious leak detection with the aid of suction mode during the air circulation loop operation. Using the test facility, high pressure saturated steam under the condition of real nuclear power plant operation could be supplied to the test section. The small leakage flow was simulated on the wall of the pipe system simulator and the time variation of the humidity due to the leakage was detected through the circulation loop. The effects of the suction time, the air circulation loop length, and the distance from the leak point to the porous sampling device on the humidity signal were investigated. And also the leak detection performance using suction mode operation was compared to that using diffusion mode operation, which showed that faster and clearer leak detection.

#### 1. 서론

가압경수로의 기존 냉각수 누설감지시스템은 격납건물 단위의 방사성 물질 감지나 습도의 변화 감지 및 원자로계통의 보충수계통 수위와 집수조 수위의 변화 계측 등 원자로계통의 체적 차이로 결정되는 누설량을 기준으로 운용된다<sup>(1,2)</sup>. 원자로계통에서 소량 미확인 누설이 발생하였을 경우에는 격납용기 내 공기의 습도 및 방사성 물질의 방사성 준위 변화가 매우 늦게 나타날 뿐만 아니라, 누설에 의한 대체적의 수위 변화를 명확하게 특징하는 데에는 많은 시간이 소요된다. 이러한 특징은 누설위치의 특징을 어렵게 하는 요인이 되며, 소량 미확인 누설의 감지 시간을 매우 크게 지

연시키는 요인이 된다. 냉각수의 소량 미확인 누설을 실시간으로 감지하는 것이 가능하면 단축된 시간만큼 운전원의 안전조치 시간을 앞당길 수 있고 운전원 조치 여유시간을 길게 확장시킬 수 있으므로, 원전의 안전성을 크게 향상시킬 수 있다<sup>(3)</sup>.

본 연구에서는 원전의 미확인 소량 냉각수 누설을 감지하는 시스템을 개발하였으며<sup>(3)</sup>, 이의 성능을 검증, 평가하기 위한 누설감지 성능 실험장치를 구축하였다. 본 실험장치를 활용하여 원자로 배관계통의 약 15 MPa, 320°C 고온고압 냉각수의 소량 미확인 누설을 모의할 수 있으며, 발생한 누설을 감지할 수 있는 원자로 누설 냉각수 습분공기 포집 시스템의 습도감지 성능을 확인할 수 있다. 본 논문에서는 실

\* 한국원자력연구원(Korea Atomic Energy Research Institute)

<sup>†</sup> 교신저자, E-mail : wooshik@kaeri.re.kr

험장치의 구축 내용 및 실험장치를 활용한 실험의 결과를 기술한다.

## 2. 원전 누설감지 모의 실험장치

원전 누설감지 모의 성능실험장치는 그림 1과 같이 크게 고압 증기 공급계통, 격납건물 모의 격실, 원자로 배관계통 및 누설 모의부, 공기 순환 루프 및 누설감지 센서부, 그리고 계측/제어 계통으로 구성된다. 고압 포화증기 공급계통의 설계조건은 압력 170기압, 온도 370°C이다.

본 연구에서는 15 MPa 조건에서 1 gpm 급 이하의 누설을 감지하는 것을 목표로 하고 있다. 파단부는 원형을 가지는 노즐로 모의하였으며, 노즐의 직경은 Henry-Fauske의 임계유동 모델<sup>(4)</sup>을 참조하여 설계되었다. 파단부를 통하는 임계 유량은 배관 내부의 포화 및 아냉 상태에 따라 달라진다. 그림 2 및 표 1은 포화 및 아냉 상태에서 1 mm 직경의 노즐을 통과하는 임계 유량을 계산한 것이다. 15 MPa 조건에서는 포화 및 아냉 상태에 따라 약 0.3 gpm에서 1 gpm 사이의 임계 유량이 발생될 것으로 예상되었으며, 7 MPa 조건에서는 약 0.1 gpm과 1.0 gpm 사이의 임계 유량이 생성될 것으로 예상되었다.

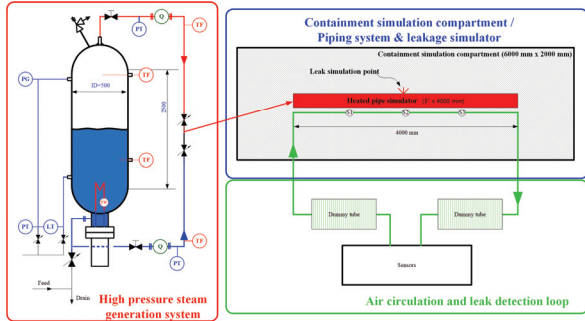


Fig. 1 Schematic of small leak detection test facility  
누설감지 시스템의 습분공기 감지 성능은 작은 누설량의

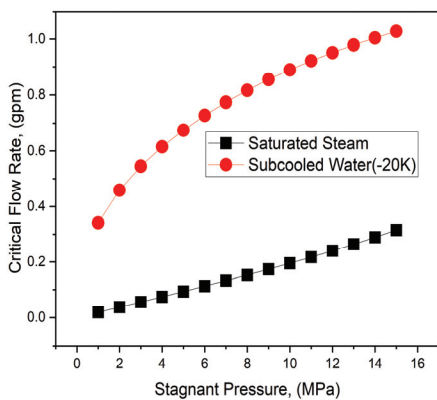


Fig. 2 Effect of pressure on critical flow rate

Table 1 Effect of pressure on critical flow rate

P0 (MPa)	-20K Subcooled Water Flowrate		Saturated Steam Critical Flowrate	
	[kg/s] <sup>*1</sup>	[gpm] <sup>*2</sup>	[kg/s] <sup>*1</sup>	[gpm] <sup>*2</sup>
3	0.03490	0.5548	0.00352	0.0559
4	0.03937	0.6259	0.00470	0.0747
5	0.04318	0.6865	0.00590	0.0938
6	0.04652	0.7396	0.00713	0.1133
7	0.04950	0.7870	0.00838	0.1332
8	0.05219	0.8297	0.00966	0.1536
9	0.05463	0.8685	0.01098	0.1746
10	0.05687	0.9040	0.01234	0.1961
11	0.05892	0.9367	0.01373	0.2184
12	0.06082	0.9669	0.01518	0.2414
13	0.06258	0.9949	0.01669	0.2653
14	0.06422	1.0209	0.01827	0.2904
15	0.06574	1.0452	0.01992	0.3167

감지가 가능할수록 뛰어나다고 판단할 수 있다. 본 연구에서는 1 mm 직경을 가지는 노즐을 제작하여 파단 모의부로 활용하였으며, 15 MPa 조건에 비해 상대적으로 적은 누설량을 모의할 수 있는 7 MPa 조건에서의 파단을 모의하여 실험이 진행되었다. 실험 중 실측된 누설량은 약 0.2 gpm 이다.

### 2.1 누설감지 루프

실험장치의 누설감지 루프는 그림 3과 같이 1/4 인치 튜브로 구성된 루프 구동기와 온도, 압력 및 습도 계측기로 구성되어 있다. 각 루프와 파단 배관부 사이에는 고온의 증

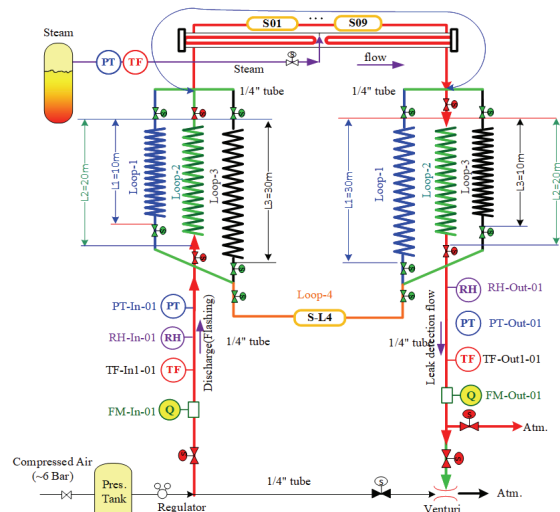


Fig. 3 Configuration of air circulation and leak detection loop

Table 2 Porous sampling device location

Track	Orientation	Distance from leak point	Sampling device ID
T (top)	0°	0 m	S01, 02, 03
B (bottom)	180°	+1.5 m	S09
L (left)	-90°	-0.5 m	S04, 05
R (right)	90°	0 m	S06, 07, 08

기조건을 견디면서 누설증기와 공기의 혼합 유체를 내부로 끌어들여 포집하는 다공성 포집센서(S01~09, S-L4)가 설치되어 있다. 다공성 포집센서는 스테인레스 316 금속 분말을 800°C에서 성형 소결하여 약 2 μm의 공극을 갖는 다공성 소결체를 원통형으로 구성한 것으로, 고온 및 고방사성 조건에서 원전수명과 동일하게 운전 수명을 보장한다. 포집 루프는 파단모의부의 상류 및 하류로 구분되며 누설수 습분 공기의 습도는 하류에 배치된 습도센서로 계측된다. 포집 루프의 상류 및 하류에는 각각 공기 유량계(FM-In-01, Out-01), 습도계(RH-In-01, Out-01), 온도계(TF-In-01, Out-01), 압력계(PT-In-01, Out-01)가 설치되어 있다. 포집 루프 측정기기와 격실 사이에 총 40 m의 더미 튜브를 통해 실제 시스템에서의 루프 배관 길이를 모의할 수 있도록 하였다.

더미 튜브는 포집부와 측정부간 길이 차이의 영향을 살펴 보기 위하여 다음과 같이 상류 및 하류의 상대 길이가 다른 3가지 조합을 선택하여 사용할 수 있도록 구성되었다.

- Loop-1: 상류길이 10 m, 하류길이 30 m
- Loop-2: 상류길이 20 m, 하류길이 20 m
- Loop-3: 상류길이 30 m, 하류길이 10 m

## 2.2 원자로 냉각재 배관 모의체 및 누설 모의부

고온고압 배관에서 소구경 파단 및 이를 통한 누설을 원하는 시점에 모의하는 것에는 어려움이 따르기 때문에, 본 연구에서는 정의된 직경으로 제작된 파단 모의 노즐을 별도로 제작하여 원자로 냉각재 배관 모의체에 설치하여 실험을 수행하였다. 원자로 냉각재 배관 모의체로는 3인치 파이프가 사용되었으며, 파단 모의 노즐의 직경은 1 mm이다.

배관 모의체 내부에는 히터를 설치하여 공기 가열을 통해 내부 온도를 일차계통 온도 조건인 300°C까지 올릴 수 있도록 제작되었다. 파단모의 노즐은 배관 모의체 표면에 설치되었으며, 노즐과 고압 포화증기 공급계통은 1/4인치 튜브로 연결되었다. 노즐과 인접한 튜브에 차단 밸브를 설치하여 원하는 시점에 파단이 발생하는 것을 모의할 수 있도록 하였다.

노즐이 위치한 파단 위치와 다공성 포집 센서 사이의 거리에 따른 누설 감지 성능을 평가하기 위하여 4 종류의 트

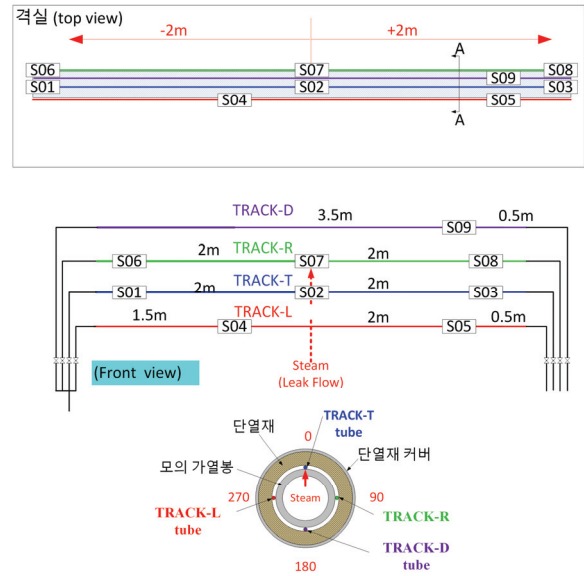


Fig. 4 Porous sampling device location

랙이 구성되었다. 포집기 배치 트랙은 그림 4 및 표 2에 나타낸 바와 같이 Top (T), Bottom (B), Left (L), Right (R)로 명명하였다. Track-T에는 3개의 포집센서가 모의배관 상부 (0°)에 설치되었다. 중간의 포집센서는 누설지점과 동일한 길이방향 지점에 위치하며, 나머지 두 개의 포집센서는 상하류로 각각 2 m씩 떨어진 곳에 위치한다. Track-B는 1개의 포집기만의 모의배관 하부 (180°)에 설치되었다. 포집기와 누설지점과의 길이방향 이격 거리는 1.5 m로 포집기가 누설지점으로부터 가장 멀리 떨어진 경우이다. Track-L과 R에는 모의배관의 양 측면 (-90°, 90°)에 각각 2개, 3개의 포집센서가 설치되었다.

포집된 증기가 포함된 공기의 습도 측정에는 본 연구에서 개발된 빠른 반응 속도를 가지는 습도센서가 사용되었다.<sup>(3)</sup> 온도센서는 마이크로 열전대급의 3-접점 열전대를 개발하여 적용하였다. 각 센서는 약 0.1초급의 계측반응 속도를 제공한다.

## 3. 누설 감지 성능 실험

### 3.1 실험 개요 및 포집 루프 운전 방식

본 연구에서 개발된 포집 센서 및 시험 장치를 이용하여 소량 누설 감지 성능 시험이 진행되었다. 본 시험은 7 MPa 포화 증기가 1 mm 파단 모의 홈에서 방출될 때 포집 센서를 통해 습공기를 포집하여 습도 변화 신호를 감지할 수 있는 운전 조건을 파악하는데에 목적이 있다.

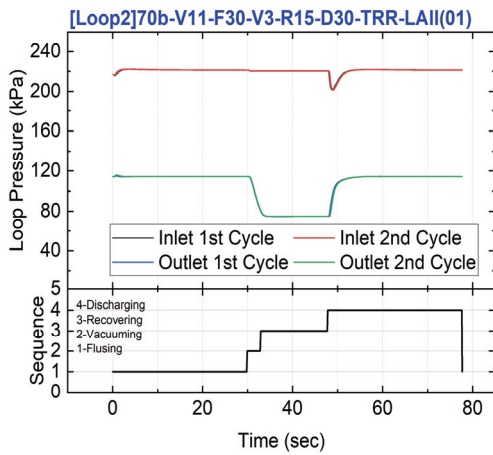
시스템 성능 파악을 위하여 건조상태 시험, 흡인 운전 시험, 확산 운전 시험의 총 3가지 시험이 이루어졌다.

건조상태 시험은 누설이 발생하지 않았을 때의 참조 데이

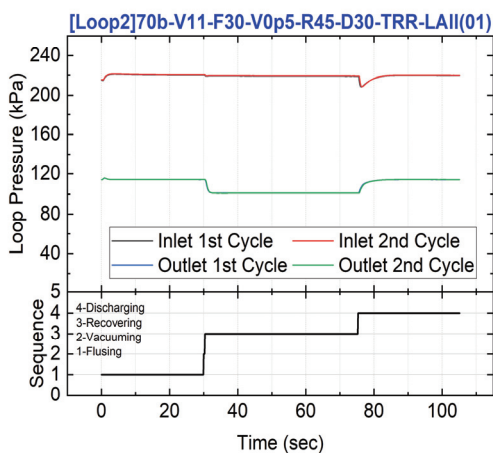
원자로 미확인 누설감지 시스템 검증

터를 확보하기 위하여 수행되었다. 흡인 운전은 벤투리 튜브를 활용한 부압을 이용하여 누설 증기를 포집하는 방식으로, 본 시스템에서 제안하는 주된 운전 방식이다. 확산 운전은 참조 시스템의 운전 방식으로, 대기 확산 방식으로 누설된 증기가 포집 센서 내부로 침투되기를 기다렸다가 공기를 순환시켜 감지하는 방식으로, 본 연구에서 제안한 흡인 운전과의 성능 비교를 위하여 수행되었다. 누설감지 성능 시험은 건조 상태 또는 증기가 누설되고 있는 상태에서 포집 루프에 설치된 솔레노이드 밸브의 시퀀스 운전을 통해 Flushing, Vacuuming, Pressure recovery, Discharging의 네 단계 모드를 반복하며 진행되었다. 그림 5(a)는 흡인 운전 시험에서 시퀀스 운전 중 순환 루프의 압력 변화에 대한 대표적인 결과를 나타낸다. 그림의 하단의 Sequence에 나타낸 1, 2, 3, 4는 각각 Flushing, Vacuuming, Pressure Recovery, Discharging 단계를 나타낸다. 그림의 상단에 나타낸 압력은 상류 계측기들이 위치한 지점과 하류 계측기들이 위치한 지점에서 측정되었다. 상류의 압력은 모든 단계

에서 변화가 나타나지 않았고, 하류의 압력은 Vacuuming 운전에서 대기압 이하 (약 100 kPa 이하)로 감소한 후, Pressure Recovery 단계가 종료될 때까지 유지되었다.

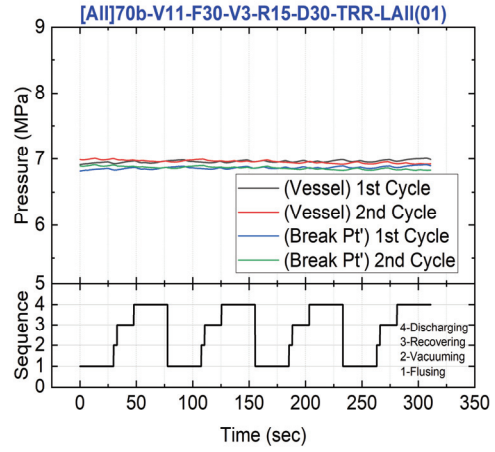


(a) Suction mode operation

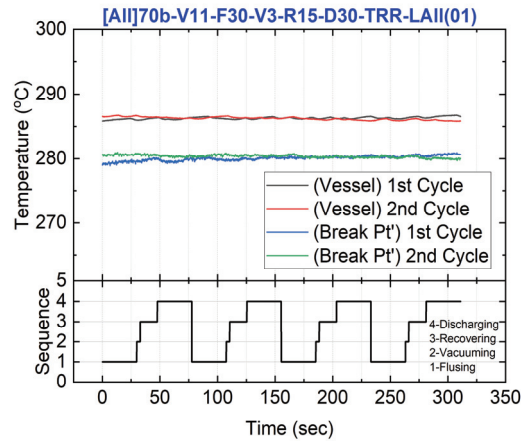


(b) Diffusion mode operation

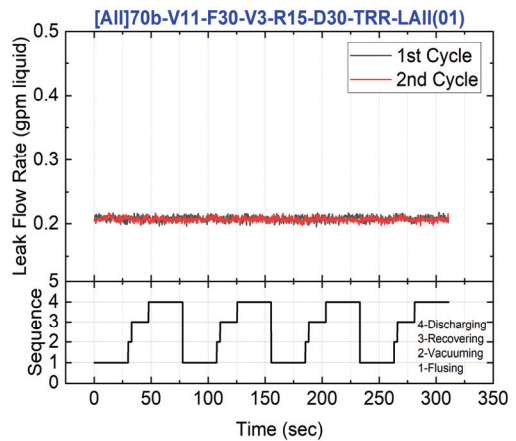
Fig. 5 Air circulation loop pressure



(a) Pressure



(b) Temperature



(c) Leak flow rate

Fig. 6 Experimental condition of high pressure steam supply system



Pressure Recovery 중, 하류 계측 지점에서의 압력 변화는 나타나지 않지만, 다공성 포집센서가 위치한 영역에서는 주변 누설 증기를 흡인하며 서서히 압력이 대기압 수준으로 회복되고 있을 것으로 예상된다. 그림 5(b)는 확산 운전 시험 중 포집 루프 상류와 하류에서의 압력의 변화를 나타낸다. 확산 운전 시험 중에는 포집 루프 내의 압력이 모두 대기압 이상으로 유지되었다.

### 3.2 고압 증기 누설량

흡인 운전 및 확산 운전 시험에서 고압 탱크 내 물의 압력 및 온도는 70 bar, 286°C로 유지되도록 하였다. 그림 6(a) 및 (b)는 대표적인 흡인 운전 시험 조건에서의 고압 탱크와 누설 지점에서의 압력 및 온도를 나타내며, 그림 6(c)는 누설량을 나타낸다. 누설량은 gpm (gallon per minute) 단위로, 배관에 설치된 질량 유량계로 계측된 질량 유량을 집수조 환경에서의 체적유량으로 환산한 값을 의미한다. 압력의 경우, 고압 탱크와 누설지점에서 유사한 상태를 유지한다. 온도는 누설지점에서 소폭 감소하는 경향을 나타내는데, 이는 탱크에서 배관 모의체로 이어지는 튜브에서의 열손실 때문으로 판단된다. 누설량은 그림 6에 나타난 시험 조건의 경우 0.2 gpm 수준으로, 여타 다른 시험 케이스를 종합하였을 때, 0.2~0.25 gpm 사이로 나타났다.

### 3.3 습도 감지 신호

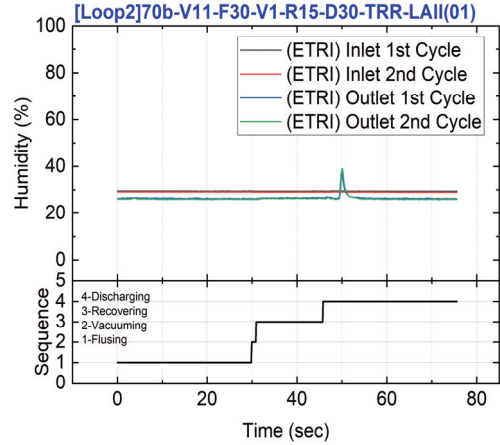
#### 3.3.1 Vacuuming 시간에 따른 습도 감지 신호의 변화

그림 7은 Track-R을 사용한 흡인 운전 시험의 Loop-2에 대하여 Vacuuming 시간 변화에 따른 습도 감지 신호를 나타낸다. Discharging 단계가 시작된 이후 일정 시간 후에 하류에 위치한 습도계에서 습도의 변화가 감지되었다. Vacuuming 시간이 증가할수록 습도의 변화폭은 커지는 경향을 나타내었다. Vacuuming 시간이 1초와 2초인 경우, Discharging 단계에서 습도 변화가 감지된 후에 다시 초기의 습도로 원활하게 회복되었다. 반면, 3초의 경우 회복되는 시간이 오래 걸리거나 Discharging 단계가 종료될 때까지 습도가 회복되지 않는 현상이 발생하였다.

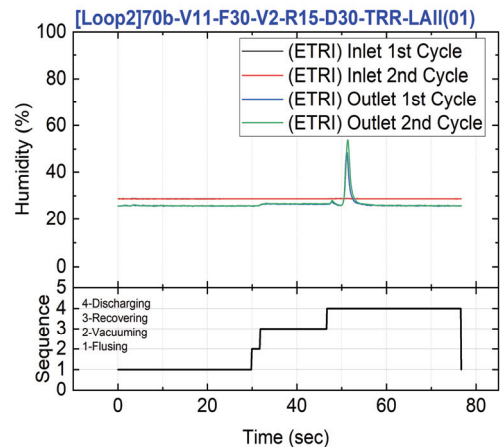
#### 3.3.2 포집기 상하류 길이에 따른 습도 감지 신호 변화

그림 8은 포집기 상하류 길이가 다른 경우 (Loop-1~3) 습도계의 감지 신호 변화를 나타낸다. 포집센서와 계측기의 거리가 짧아질수록 Discharging 단계 진입 후 습도 변화가 감지되기까지 소요되는 시간이 짧아지는 경향을 나타내었다. (각각 약 3.9, 3.4, 2.8초) 포집기와 계측부 사이 거리가 가장 짧은 Loop-3의 경우, 습도가 증가한 이후 일정 시간이 지날때까지 그 습도 신호가 유지되었다가 회복되는 특성

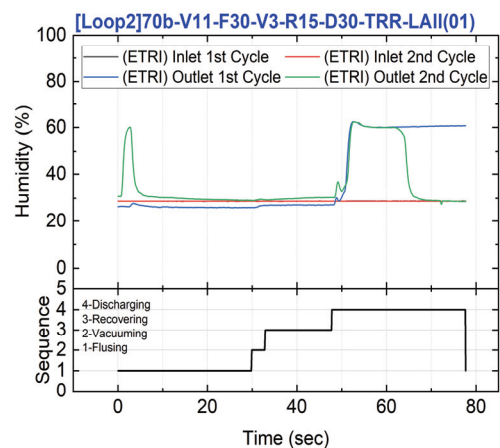
을 보였다. 여타의 경우, 피크 (peak)를 나타내는 습도 변화 커브의 형상이 계측되었다.



(a) Suction time = 1 sec

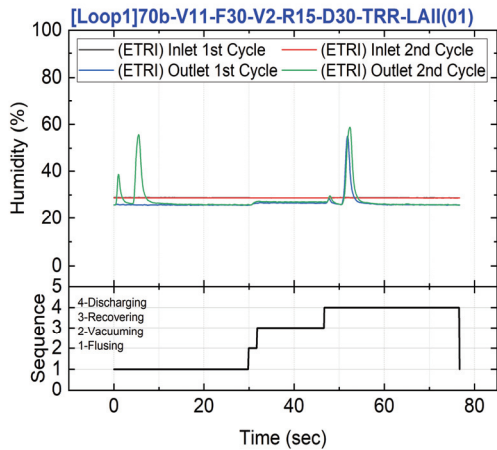


(b) Suction time = 2 sec

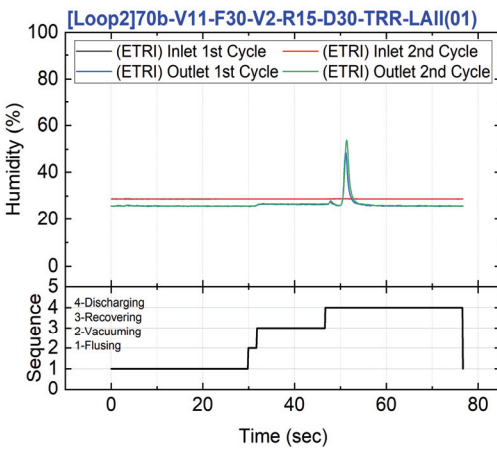


(c) Suction time = 3 sec

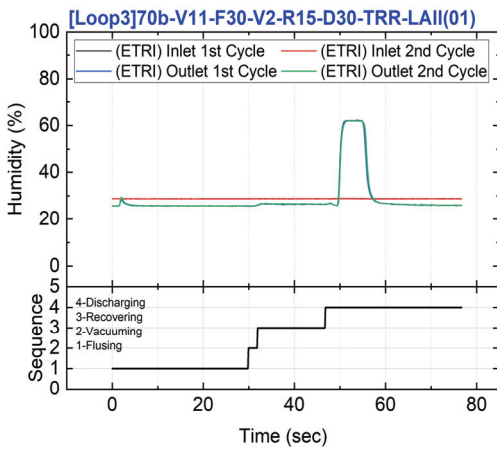
Fig. 7 Effect of suction time on humidity signal during suction mode operation



(a) Loop-1



(b) Loop-2



(c) Loop-3

Fig. 8 Effect of air circulation loop length on humidity signal during suction mode operation

### 3.3.3 누설지점으로부터 포집센서까지의 거리에 따른 습도 감지 신호 변화

그림 9는 Track-R, L, B를 사용하였을 때 습도 감지 신호 변화를 나타낸다. 누설부와 포집센서의 거리가 상대적으로 짧은 Track-R의 습도 변화가 Track-L에 비하여 크게 나타났다. 누설부에서 가장 먼 속에 포집센서가 위치한 Track-B의 경우, 그림 9(c)~(d)에 나타난 바와 같이, Vacuuming 시간을 3초로 증가시킨 경우에도 뚜렷한 습도 변화가 감지되지 않았다. Vacuuming 시간을 4초로 증가시켰을 때 선명한 습도의 변화가 감지되었다.

### 3.3.4 확산 운전 시험 결과

그림 10는 Track-R을 사용하였을 때 확산 시간에 따른 습도 감지 신호의 변화를 나타낸다. 확산 시간을 15초에서 60초로 증가하였을 때, 습도 신호의 피크치는 소폭 증가하였지만, 흡인 운전 시험과 비교하였을 때 상대적으로 그 변화폭이 적었다.

그림 11은 Track-B를 사용하여 확산 운전을 하였을 때의 습도 감지 신호 변화를 나타낸다. 누설부에서 가장 먼 곳에 포집센서가 위치한 Track-B의 경우 장시간 확산 시간을 설정하더라도 미세한 신호만이 감지되었다.

## 3.4 시험 결과에 대한 고찰

본 연구에서 제안하는 누설감지 성능향상을 위한 흡인 운전의 경우, 포집기를 자연상태에 방치하여 누설 증기를 확산 포집하는 기법보다는 상대적으로 누설을 빠르게 감지할 수 있는 장점을 가지고 있다. 신속한 누설을 감지하기 위하여서는 포집 루프에 음압을 인가시키는 Vacuuming 시간을 짧게 하는 것이 유리하지만, 과도하게 짧은 시간을 설정하는 경우 명확한 습도 변화의 감지가 불가능하였다. 본 연구에서 수행된 시험의 결과를 기반으로 하였을 때, 포집센서와 누설부가 가까운 곳에 위치하더라도 최소 2초 이상의 Vacuuming 시간을 설정하는 것이 필요하며, 포집센서로부터 1.5 m 정도 떨어진 곳에서 누설이 발생한 경우, 최소 4초의 Vacuuming 시간 설정이 필요하다. Vacuuming 시간은 사용되는 부압 설정 기기 (본 연구의 경우 벤투리 튜브)의 성능, 사용된 총 순환 루프 튜브의 길이에 따라 달라질 수 있다.

확산 운전의 경우, 흡인 운전에 비하여 상대적으로 루프 운전 시간이 오래 걸린다는 단점이 있지만, 취득되는 습도 신호가 루프 배관의 길이 및 확산 시간의 영향을 상대적으로 적게 받는 것으로 판단된다. 다만, 포집 센서와 누설 지점의 거리가 먼 경우에는 습도 변화 신호를 감지하는데에 한계를 보였다.

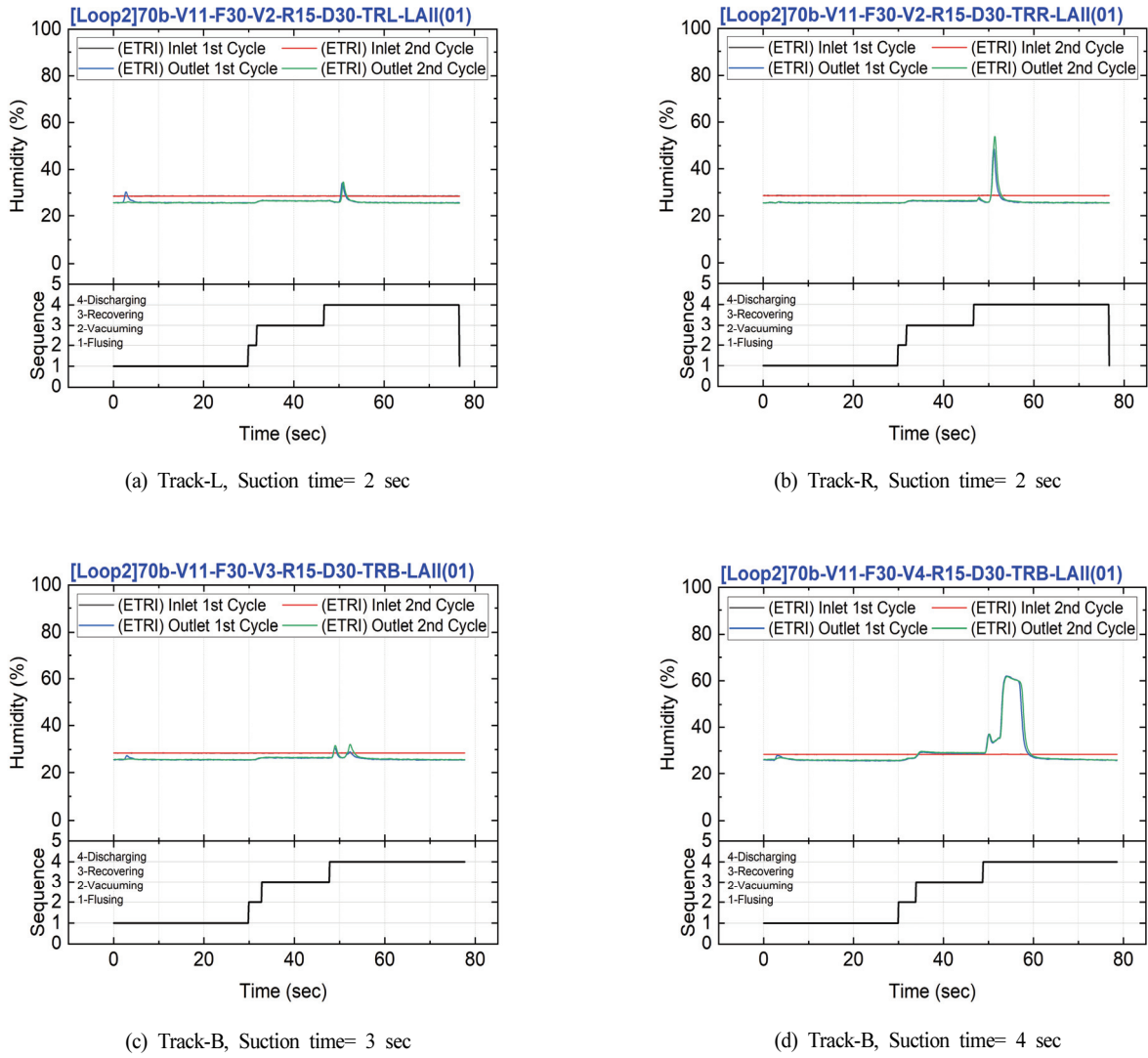


Fig. 9 Effect of distance between leak point and sampling device on humidity signal during suction mode operation

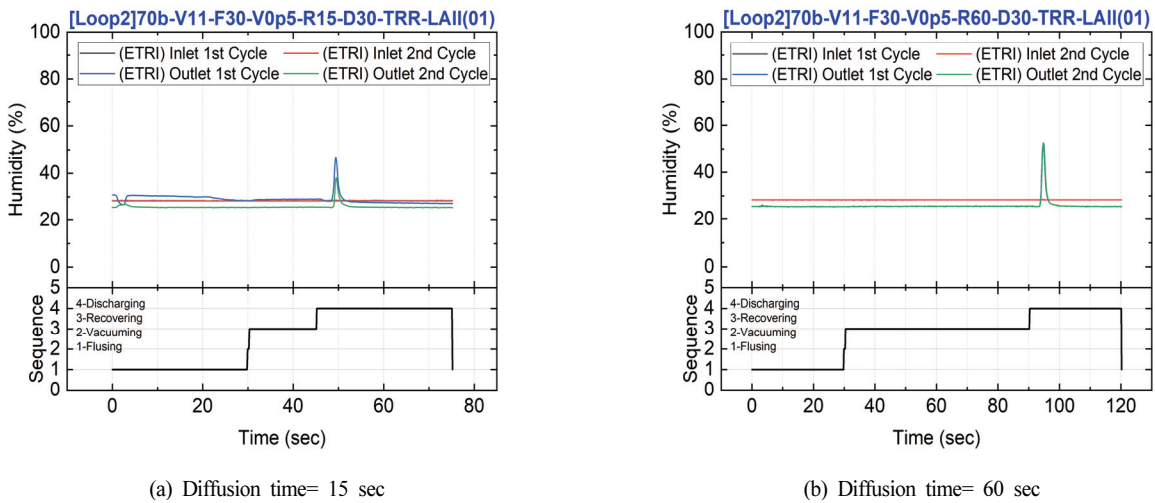


Fig. 10 Effect of diffusion time on humidity signal during diffusion mode operation (Track-R)

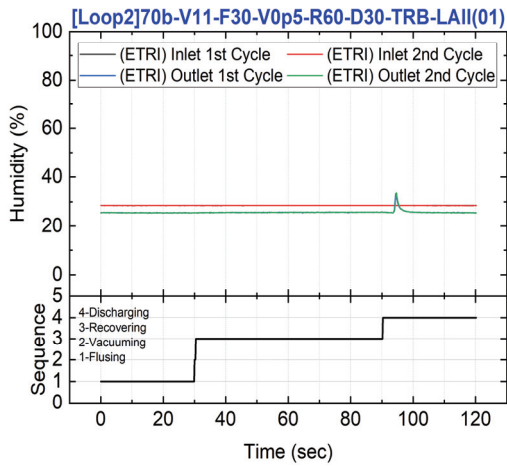


Fig. 11 Humidity signal during diffusion mode operation  
(Track=B, Diffusion time = 60 sec)

#### 4. 결론

본 연구에서는 원자로 미확인 누설을 감지하기 위해 고안된 시스템의 성능을 확인하기 위한 실험장치를 구축하고, 이를 활용한 일련의 실험이 수행되었다.

실험 결과 본 연구에서 제안한 흡인 운전 방식을 활용하여 약 0.2 gpm급 누설을 효과적으로 감지할 수 있음을 확인하였다. 본 시험 결과는 원자로냉각재계통 냉각수의 미확인

소량 누설을 조기감지하여 사고급 냉각수 누출 대형사고화를 미연에 방지하는 기술 혁신에 직접 기여하여 가동원전 및 신형원전의 안전성 향상에 크게 기여할 것으로 판단된다.

#### 후 기

본 연구는 산업자원부 기술혁신사업의 일환으로 연구 (과제번호:20211510100050)가 수행되었습니다. KETEP과 연구지원 관계자 여러분께 감사드립니다.

#### References

- (1) Regulatory Standards for Light-Water Reactor Nuclear Power Plants Chapter 6(Reactor Coolant System), 6.3.6(Leak Detection), Korea Institute of Nuclear Safety
- (2) Regulatory Guide 1.45, "Reactor Coolant Pressure Boundary Leakage Detection System", U.S.NRC
- (3) Kwon, T., Kim, J., Choi, C., Park, J., and Choi, C., 2021, "Development of a Unidentified RCS Leakage Detection Sensor System Less than 0.5 gpm", The KSFM Journal of Fluid Machinery, Vol. 24, No. 2, pp.13~19.
- (4) Kim, Y., Kim, J., and Kwon, T., 2021, "A review of meta-stable aspects on a subcooled critical flow in nozzles and orifices", Annals of Nuclear Energy 159, 108328