'2003 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

APR 1400 의 DVI 배관 파단 사고 시 강수부 상부에서 발생되는 수력 현상에 대한 가시화 실험 연구

Experimental Observations of the Hydraulic Phenomena in the APR-1400 Downcomer during the DVI Line Break Accident

윤병조, 송철화, 민경호
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150
조형규, 박군철
서울대학교
서울특별시 관악구 신림동 산 56-1

요약

APR-1400의 DVI 배관이 파단되는 소형 냉각재 상실사고(SBLOCA) 발생 시, loop seal clearing이 이루어진 직후에 강수부에서 발생하는 수력현상을 파악하기 위한 실험연구를 수행하였다. 1/5 물-공기 실험장치에서 실험을 수행하였으며, 주요 무차원 변수에 대한 척도해석을 통해 실험조건을 도출하였다. 실험결과, 저온관 내부에 stratified flow가 형성되면서 기체가 강수부로 내로 원활히 유입되었으며, 강수부로 유입된 기체의 impinging jet으로 인해 안전주입수가 상승하게 되어 안전주입수 우회가 이루어진다. 다양한 실험조건에서 강수부 수위를 측정하였고, 그 결과 저온관 하단에서 저온관 직경의 0.9~1.8배 되는 위치에 강수부 수위가 위치하였다.

ABSTRACT

The hydraulic phenomena in the downcomer annuls was investigated in 1/5 scale air-water model of APR-1400 during the DVI line break accident, especially, at the time of the end of loop seal clearing. To preserve the hydraulic phenomena in proto and model, scaling analysis for non-dimensional parameter was performed to decide the experimental conditions. From the observation of the hydraulic phenomena, it is found that the flow regime in the cold leg is stratified flow and the oscillation of the water level in the downcomer and cold leg is observed. After impinging on the downcomer wall, the gas flows upward with ECC water and it makes the bypass of the accumulated water. The downcomer collapsed level is measured under the various conditions of gas and water flow rate and the results shows that the water level is 0.9~1.8 times of the cold leg diameter from the bottom of cold leg.

1. 서론

한국형 차세대 원자로(APR-1400)는 안전주입수를 강수부 내로 직접 주입하는 원자로 용기 직접주입방식(DVI: Direct Vessel Injection)을 안전주입 방식으로 채택하고 있다.[1] 이는 저온관 중심으로부터 2.108m 상부에 위치한 4개의 DVI노즐을 통해 안전주입수를 주입하는 방식으로, 저온관이 파단되는 냉각재상실사고 발생 시, 종전의 안전주입 펌프보다 작은 용량의 펌프로도 효과적이고 신뢰성 있게 비상냉각수를 노심으로 주입할 수 있다. 그러나, 이와 같은 새로운 개념의 안전주입 방식을 채택함으로써 DVI 배관 파단에 따른 소형 냉각재 상실 사고가 발생될 수 있으며, 이때 강수부 상부에는 기존의 저온관 주입 방식에서 관찰되지 않는 비상냉각수 혼합 및 파단부로의 유동 현상등 새로운 열수력 현상들이 나타날 것으로 예상된다.[2] 따라서 그 동안 저온관 주입방식의 원자로 안전해석에 사용된 안전해석코드를 DVI 방식을 채택한 APR-1400의 DVI 배관 파단 사고에 대한 안전 해석에 적용하기 위해 안전해석 코드에 적용된 각종 모델들에 대한 성능 평가 및 보완을 위한 연구가 필요 하게 되었다.[3]

APR-1400의 설계를 위한 주요 참고 사항인 EPRI URD(Utility Required Document)에 의하면 6” SBLOCA (파단면적 0.2ft^2)의 경우 노심이 노출되지 않을 것을 권고하고 있다.[4] 그러나 최근에 한국원자력연구소에서 한국형 표준형 원전 의 설계에 적용한 최적 열수력 설계코드인 CEFLASH-4AS(REM)을 사용하여 APR-1400 DVI관 파단에 대한 SBLOCA를 해석한 결과, 파단면적이 0.2ft^2 이상인 경우 노심이 노출 되는 것으로 해석되었다.[4] 해석 결과에 의하면 차세대 원자로의 DVI관 파단 시 노심에서 생성된 증기는 고온관과 증기발생기, 중간관 및 저온관을 통해 강수부로 유입된 증기는 강수부 상부에 설치된 DVI 파단관으로 방출된다. 이러한 증기방출 유로를 통하여 증기가 파단부로 방출되는 과정에서 강수부 상부에서 이상유체에 의한 hydraulic head가 증가되어 파단부로의 증기 이탈시 기존의 저온관 주입방식의 loop seal clearing에 필요한 구동력(driving force) 보다 증가된 구동력을 필요로 한다. 이렇게 증가된 구동력은 일차계통내 노심의 압력 상승에 의해 얻어진다. 이때, 노심 내 압력이 상승하게 되면 노심내 냉각수가 강수부쪽으로 밀려가게 되어 노심의 수위가 낮아지며 이에 따라 노심이 노출되는 현상이 발생되는 것으로 예측된다.

본 연구에서는 물-공기를 이용한 LBLOCA용 가시화 실험장치 DIVA(Direct Vessel Injection Visualization and Analysis)를 이용하여 [5], DVI관이 파단되는 SBLOCA 발생 시, 강수부에서 나타나는 수력현상을 모의하고자 하였다. 실험장치에서 원형의 수력현상을 적절히 재현하기 위해, 주요 현상을 보존할 수 있을 것으로 기대되는 무차원 변수를

이용하여 척도해석을 수행, 실험조건을 도출하였다. 본 실험에서는 강수부 상부에서 발생되는 유동양식을 파악하고, 저온관을 통해 주입되는 기체의 방출 경로 및 안전주입수의 우회메커니즘을 파악하고자 하였다. 또한, 다양한 실험조건에서 형성되는 강수부 수위에 대한 실험결과를 제시하였다.

본 연구를 통하여 DVI 배관 파단 사고에 따른 소형 냉각재 상실 사고시 강수부 상부에서 발생되는 수력 현상을 이해하고 이를 예측 할수 있는 물리적 모델링을 위한 기초자료 및 해석코드의 검증자료를 제공하고자 하였다.

2. 실험장치

본 연구에서는 APR-1400 DVI관이 파단되는 SBLOCA 발생 시, 강수부에서 발생하는 수력현상의 유동 가시화를 위한 물-공기 실험장치 (DIVA)를 제작하였다. DIVA 실험장치는 DVI 방식의 원자로에서 발생할 수 있는 저온관 파단사고 및 DVI관 파단사고를 모의하기 위해 설계된 장치로서, 본 연구에서 사용한 시험대는 1/5 길이비를 갖는 APR-1400의 모형이다. 그림 1.은 DIVA 실험장치의 개략도이며 그림 2.는 1/5 SBLOCA 시험대의 그림 및 주요 부분의 수치이다.

실험장치의 계통은 3개의 건전 DVI관, 1개의 파단 DVI관 그리고 4개의 저온관으로 구성되어있다. 3개의 건전DVI관을 통해 안전주입수가 주입되며, 4개의 저온관을 통해 공기가 주입된다. 물과 공기의 주입은 각각 3대의 펌프와 4대의 roots 블로워에 의해 이루어진다. 주입된 안전주입수와 공기는 파단 DVI관을 통해 외부로 방출되며, 방출된 이상혼합체는 물-공기 분리기를 거쳐 물은 하부 안전주입수 저장탱크로 들어가 순환하며, 공기는 분리기 상부로 방출된다. 강수부 하부에는 강수부 수위를 조절할 수 있는 수위조절 밸브가 설치되어 있으나, 본 연구에서는 하부 방출배관을 막고 실험을 수행하였다. 본 연구는 강수부내에서 발생하는 수력현상을 모의하기 위한 것으로, 노심은 모의하지 않았으며, 따라서 고온관은 강수부내에 유동의 장애물로서 설치되었다.

주요 측정변수는 공기 유량, 안전주입수 유량, 강수부 수위 그리고 강수부 압력이다. 3개의 DVI 관에 설치된 터빈 유량계 (turbine flow meter)를 이용하여 안전주입수 유량을, 4개의 저온관에 설치된 볼텍스 유량계 (vortex flow meter)를 이용하여 공기 유량을 측정하였다. 강수부 수위는 강수부 상단과 하단의 차압을 측정하여 얻게 되며, 강수부 상부에서 정압계를 이용하여 강수부 압력을 측정하였다. 현상 관측결과, 강수부 내의 수위가 국부적으로 다르게 나타나기 때문에 네 곳에서 강수부 수위를 측정하여 이를 평균하였다. 차압에 의해 수위를 계산하기 때문에 측정되는 강수부 수위는

collapsed level이며 그림 3.은 수위 측정 지점이다. 한편, 안전주입수 및 공기의 밀도를 계산하기 위해 각각의 온도와 압력을 측정하였다.

하부 방출구를 막은 상태에서 강수부 수위를 저온관 하단까지 이르게 한 뒤, 안전주입수와 공기를 동시에 주입하고, 주요 실험 변수들이 정상상태에 이르게 되면, 이때 형성되는 강수부 수위를 측정하는 방식으로 실험이 수행되었다. 모든 측정 실험결과는 PC-base data acquisition system에 저장되어, 분석에 이용되었다. 한편, 실험의 측정오차는 표 1.에 요약하였다.

3. 실험조건의 도출

본 연구는 DVI 배관이 파단되는 SBLOCA 발생 시, 강수부에서 발생하는 수력현상을 1/5 물-공기 실험장치를 통해 파악하는데 일차적 목적이 있으며, 강수부 내부에서의 유동양식을 이해하고, 저온관을 통해 강수부로 유입되는 기체의 우회 경로를 파악하고자 하였다. 이를 위해서는, 원형에서 발생하는 수력현상을 소형 실험장치에서 재현시키기 위해서 적절한 무차원변수를 선정하고 이를 보존하는 척도해석이 수행되어야 한다. 적절한 무차원 변수를 도출하기 위해서는 원형에서 발생할 수 있는 현상에 대한 이해가 필요하다. 본 연구에서는 원자력연구소에서 수행된 SBLOCA 안전해석 결과[6]를 바탕으로 실험조건을 도출하고자 하였으며, SBLOCA 사고 진행 과정 중 loop seal clearing이 이루어지고 난 직후의 시점이 주요 관심 영역이었다.

앞에서 기술한 바와 같이 SBLOCA가 발생하고 안전주입수가 유입되면, 강수부 수위는 저온관 상단 이상에 이르게 된다. 한편 노심에서 생성된 증기는 증기발생기 U 튜브를 거쳐 저온관을 통해 강수부로 유입된다. 유입된 증기는 강수부에 축적되어 있는 안전주입수를 거쳐, 상부에 위치한 파단 DVI 배관을 향해 상승한다. 이때, 건전 DVI 배관에서 주입되어 수직 하강하는 안전주입수와 역류유동(counter-current flow)을 이루게 된다. 이와 같이 SBLOCA 시 발생하는 수력현상은 mixture level 과 저온관 사이의 구역 및 DVI 노즐 위치와 mixture level 사이의 구역으로 크게 구분된다. 전자의 경우, 증기의 이동경로, 상승 속도 및 응축율 등에 크게 영향을 주는 유동양식이 주요 관측대상이며, 후자의 경우 역류유동 제한과 같은 안전주입수 우회 메커니즘이 주요 관측대상이 된다.

본 연구에서는 이와 같은 주요 관측대상의 재현을 위한 적절한 무차원 변수로 Wallis 수를 이용하였다. Wallis 수의 정의는 다음과 같다.

$$j_x^* = \frac{a_x u_x}{\left[g(r_f - r_g) D / r_x \right]^{1/2}} \quad \text{:Wallis number} \tag{1}$$

Wallis 수는 유동양식의 천이 및 flooding 조건과 밀접한 관계가 있는 무차원 변수로써 [7], Taitel et al. [8] 및 McQuillan and Whalley[9]는 다음과 같은 slug to annular transition 상관식을 제시하였으며, 이는 Relap5/MOD3의 유동양식 천이 모델로 사용되고 있다. [10]

$$j_{g,crit}^* \geq 1 \ or \ Ku_{g,crit} \geq 3.2 \tag{3}$$

한편, Wallis [11]는 다음과 같은 잘 알려진 CCFL 상관식을 제시하였다.

$$j_g^{*1/2} + m\, j_f^{*1/2} = C \tag{4}$$

이와 같이 Wallis 를 주요 무차원 변수로써 고려하였으며, 본 연구에서는 도출된 무차원 변수가 원형과 동일하게 유지되는 실험영역을 다음과 같은 과정을 통해 설정하였다.

$$\frac{j_{x,m}^*}{j_{x,p}^*} = \frac{j_{x,m}}{j_{x,p}} \left(\frac{r_{x,m}}{r_{x,p}} \right)^{1/2} \left(\frac{(r_f - r_g)_m}{(r_f - r_g)_p} \right)^{-1/2} \left(\frac{D_m}{D_p} \right)^{-1/2} = 1 \tag{5}$$

$$\frac{j_{g,m}}{j_{g,p}} = \frac{1}{2.22} \left(\frac{(r_f / r_g)_m - 1}{(r_f / r_g)_p - 1} \right)^{1/2} \quad and \quad \frac{j_{f,m}}{j_{f,p}} = \frac{1}{2.22} \left(\frac{1 - (r_f / r_g)_m}{1 - (r_f / r_g)_p} \right)^{1/2} \tag{6}$$

한편, parametric study의 일환으로 체적유량을 길이 비에 따라 선형 축소하여 기체 및 액체 유량이 증가했을 경우에도 추가적인 실험을 수행하였다. 본 실험에서 기체주입 속도를 1m/s~5m/s로 변화시켰으며, 액체주입유량은 노즐 당 0.17m/s 와 0.36 m/s로 변화시키며 실험을 수행하였다.

4. 강수부내의 수력 현상

DVI 배관이 파단되는 SBLOCA 발생 시, 강수부에서 발생하는 수력현상을 1/5 물-공기 실험장치에서 관측하였다. 주요 관심현상은 저온관을 통해 유입되는 기체의 우회경로 및 유동양식, 그리고 안전주입수의 우회메커니즘이다.

앞에서 기술한 바와 같이, CEFLASH-4AS(REM)를 이용한 SBLOCA 해석 결과에 의하면, 강수부 수위는 저온관 위치 이상에 이르게 된다. 강수부내의 hydraulic head가 증가함에 따라, 노심에서 생성된 증기가 저온관을 거쳐 강수부로 원활히 빠져나가지 못하고 노심압력이 증가하여, 노심의 일부가 노출되는 것으로 예측되었다.

그러나 본 실험을 통해 관측된 현상은 이와는 달리 저온관에서 stratified flow가 관측되었으며, 이로 인해 기체가 강수부에서 파단부를 통해 원활히 방출되는 유로가 형성되었다. 그림 4.는 저온관에서의 유동양식을 보여주고 있다. 이와 같이 저온관 내에 stratified flow가 형성되어 주입된 기체가 간헐적이지만 원활히 파단부로 방출된다. 그림 4.와 같이 저온관 내 수위는 증가와 감소를 반복하며, 저온관 내의 수위가 증가하면 저온관 내 기체유로 면적이 감소하고, 기체의 방출이 방해 받게 되어 압력과 기체속도가 증가한다. 어느 정도 압력이 증가하면, 저온관에 축적된 안전주입수를 밀어내며 저온관 내 수위는 다시 감소한다. 이때 저온관을 빠져 나온 기체는 벽면과 충돌하면서 impinging jet에 의해 많은 양의 안전주입수를 상승시키고, droplet entrainment가 발생하면서 안전주입수의 우회가 이루어진다. 상승했던 mixture level은 공기가 파단부로 방출되면서 다시 하강하고 저온관 내의 수위는 다시 증가한다. 이와 같이 저온관과 강수부에서의 수위 요동이 반복적으로 나타난다. 강수부 상부에서 발생하는 수위요동 및 droplet entrainment는 그림 5. 및 그림6.과 같다. 저온관 수위가 감소하면서 강수부 수위는 증가하고, 저온관 수위가 증가하면서 다시 강수부 수위가 감소하는 모습을 볼 수 있다.

요동하는 mixture level의 상부에서는 하강하는 안전주입수와 상승하는 기체 간의 역류유동이 발생된다. 그러나 하강하는 액막은 상승 기체 유동에 의해 크게 영향을 받지 않았으며, 대부분의 안전주입수 우회는 강수부 수위표면에서 강수부 벽면과 충돌한 뒤 상승하는 기체에 의한 droplet entrainment에 의해 발생되었다.

본 실험의 유동조건인 기체속도 1~5m/s, 액체속도 0.17~0.36 m/s의 범위에서 mixture level이 형성되는 위치와 진동폭 등에서의 차이는 크게 나타나지만, 국부적인 현상은 적용된 척도법이나 실험조건에 관계없이 유사하게 나타났다.

5. 실험결과

DVI관이 파단되는 SBLOCA를 모의한 물-공기 실험장치에서, 다양한 유동조건에 따라 형성되는 collapsed level을 측정하였다. 2절에서 기술한 바와 같이 강수부 하부의 안전주입수 배수관을 막은 상태에서 실험을 수행하였으며, 따라서 정상상태에 도달했을 경우 안전주입수 우회율은 100%이며, 이때 강수부에 형성되는 수위를 측정하였다. 실험도중 강수부 수위는 간헐적인 기체유동의 상승으로 크게 요동하였으며, 본 연구에서 제시하는 실험값은 측정된 수위의 평균값을 의미한다. 각 실험조건에 따른 강수부 수위측정결과는 그림 7.에 나타내었다. 강수부 수위는 각각 다음과 같은 정의의 무차원수

D^*와 H^*로 표현하였다.

$$D^* = \frac{h}{D_{CL}} \quad , \quad H^* = \frac{h}{H_{DVI}} \tag{11}$$

여기서, h : 저온관 하단에서 강수부 수위까지의 거리

D_{CL}: 저온관 직경

H_{DVI}: 저온관 하단에서 DVI노즐 중심까지의 거리

실험결과, 안전주입수 주입량이 증가할수록 강수부 수위는 증가하며 기체 속도가 빠를수록 정상상태에 도달하는 강수부 수위가 낮게 나타났다. 이 때, 강수부 수위는 저온관 상단으로부터 저온관 직경의 0.9배에서 1.8배 되는 영역에 위치하였다. 또한 그림과 같이 저온관 하단에서 DVI관 중심선의 길이를 이용하여 무차원시켰을 경우, 약 1/1.8~1/3.5 정도의 위치에 강수부 수위가 나타남을 알 수 있다.

6. 결론

본 연구에서는 APR-1400 DVI 배관 파단 시, 강수부에서 발생하는 수력현상을 1/5 물-공기 실험장치를 이용하여 모의하였다. 실험이 이루어진 유동고건은 Wallis를 이용한 척도해석을 통해 도출하였다. 본 연구의 결론은 다음과 같다.

- DVI배관이 파단되는 SBLOCA 발생 시, 저온관 내의 유동양식은 stratified flow이다. 이로 인해 증기가 원활히 강수부 내로 유입된다.
- 강수부 내로 유입된 공기는 강수부 벽면과 충돌하여 impinging jet을 이루며 파단부로 상승한다. 이로 인해 많은 양의 안전주입수가 상승하며, 이는 안전주입수 우회의 주요 메커니즘으로 작용한다.
- 저온관 수위 및 강수부 수위는 크게 요동한다.
- 증기속도가 증가할수록, 안전주입수 주입유량이 감소할수록 강수부 수위는 감소한다.
- 실험결과 저온관 직경의 0.9배~1.8배, DVI 노즐높이의 1/1.8~1/3.5 정도 되는 위치에서 강수부 수위가 형성되었다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구.개발사업의 일환으로 수행되었다.

참고문헌

[1] Standard Safety Analysis Report for Korean Next Generation Reactor, KEPCO (1999)

[2] C.H. Song et al., "Thermal Hydraulic Test Program for Evaluating or Verifying the Performance of New Design Features in KNGR", 2000 KNS Autumn Meeting, Korea Nuclear Society (2000)

[3] T.S. Kwon et al., "Basic Design of the KNGR DVI Test Facility (a): Fluid System", 53121-DVI-GEN-RT002(a), Rev. 01, DS-3, KAERI (2000)

[4] K.H. Bae et al., "Best Estimate Small Break Loss of Coolant Accident Analyses for Korean Next Generation Reactor with DVI ECCS", KAERI/TR-1235/99 (1999)

[5] B.J.Yun et al., "Construction of the DIVA (Direct Vessel Injection Visualization and Analysis) Test Facility for the LBLOCA of KNGR", KAERI/TR-2102/2002 (2002)

[6] B.D. Chung, SBLOCA Safety Analysis using MARS Code, Private Communication (2003)

[7] B.J. Yun et al., "Scientific Design of the Test Facility for the KNGR DVI Line Small Break LOCA", KAERI/TR-1258/99 (1999)

[8] Taitel et al., "Modeling Flow Pattern Transitions for Steady Upward Gas-Liquid Flow in Vertical Tubes, Int. J. Multiphase Flow 3, 517-532 (1980)

[9] K.W. Mcquillan and P.B. Whalley, "Flow Patterns in vertical Two-Phase Flow using Differential Pressure Fluctuations", Int. J. Multiphase Flow 10, 711-720 (1985)

[10] K.E. Carlson et al.,"Relap5/MOD3 Code Manual Volume 1: Code Structure, System Models, and Solution Methods" (1990)

[11] G.B. Wallis, "One-Dimensional Two-Phase Flow", McGraw-Hill, New York (1969)

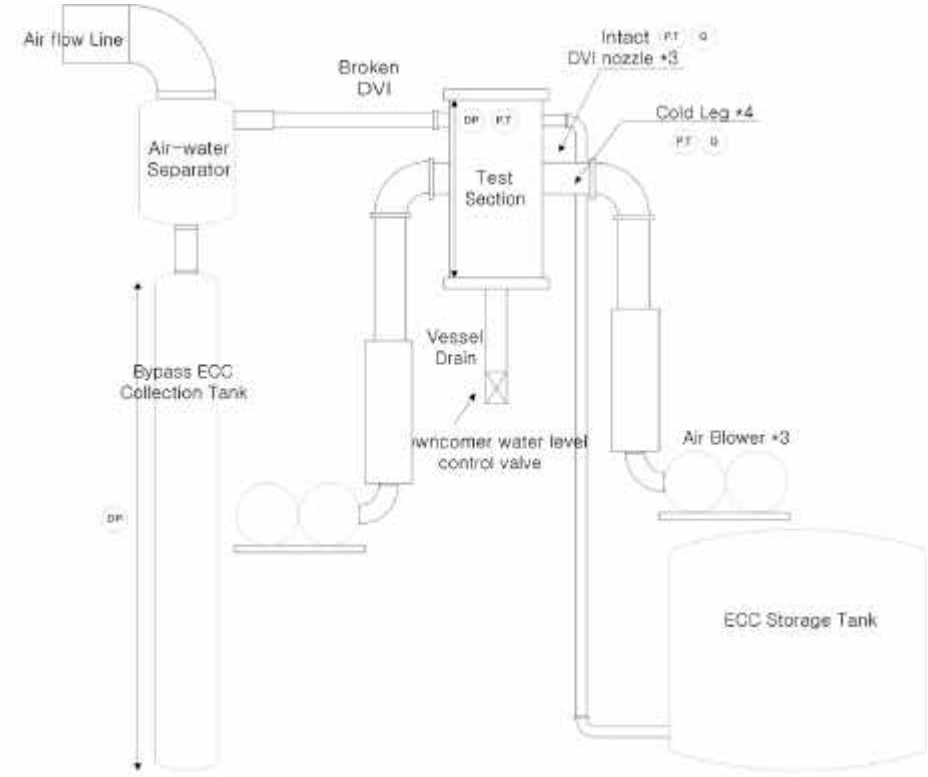


그림 1. DIVA SBLOCA 실험장치 개략도

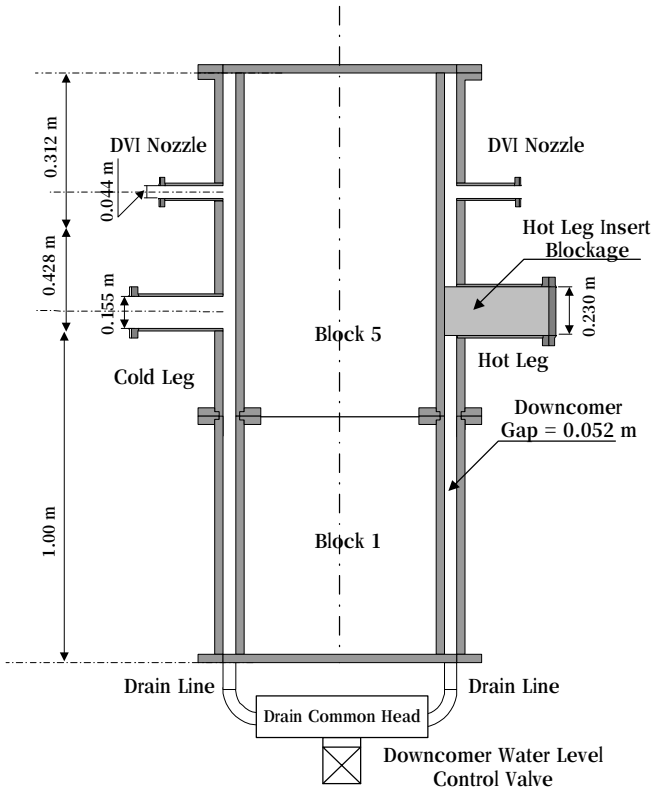


그림 2. 1/5 SBLOCA 시험대 개략도

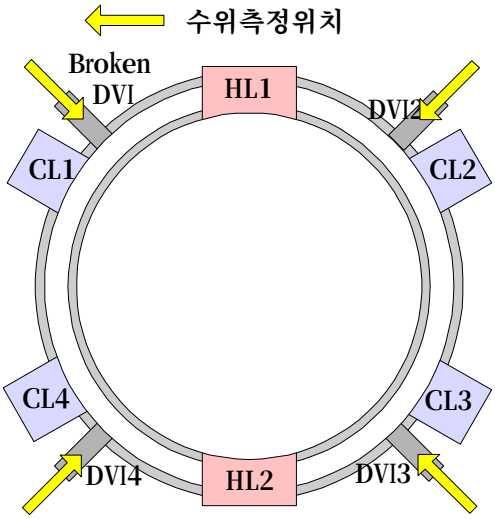
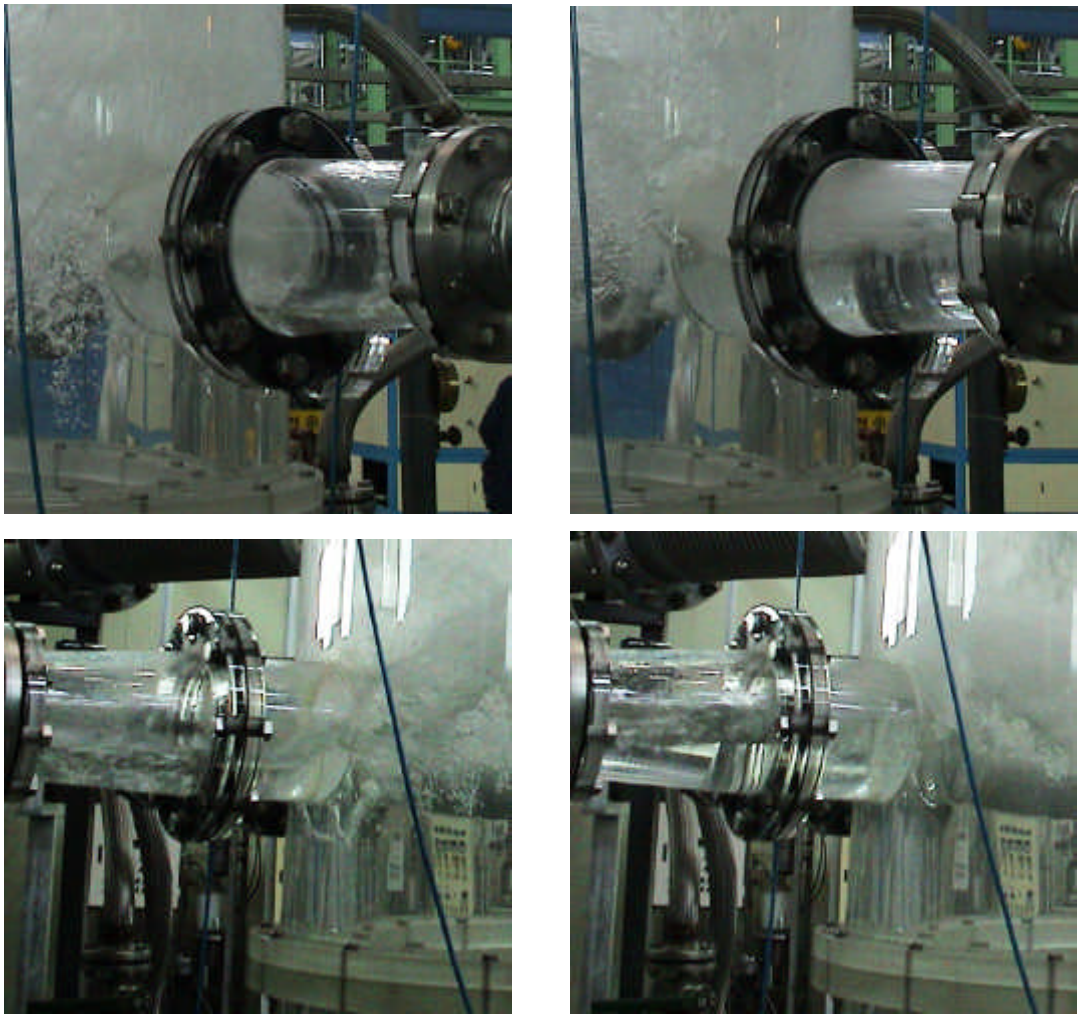
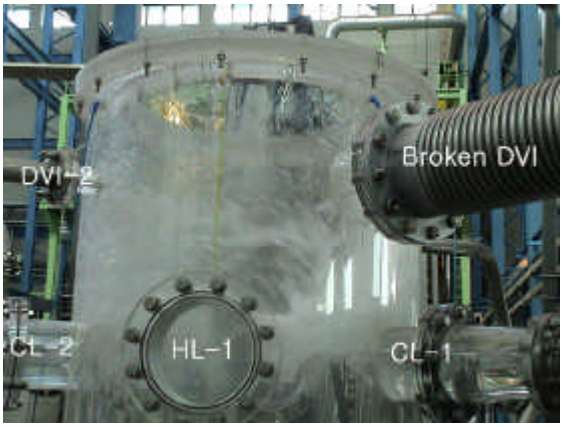


그림 3. 강수부 수위측정 지점

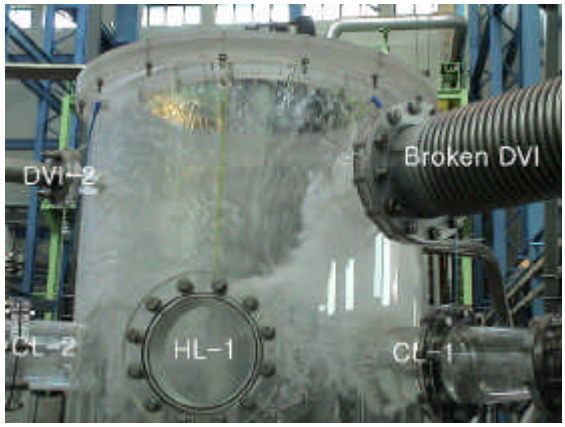


(a) 수위가 감소했을 때 (b) 수위가 증가했을 때

그림 4. 저온관 부근의 유동양식

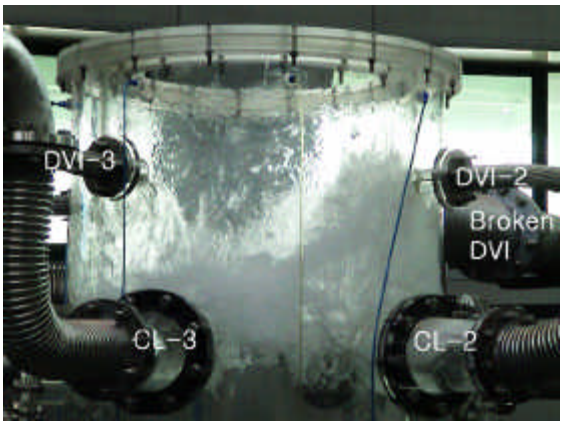


(a) 강수부 수위 하강 시

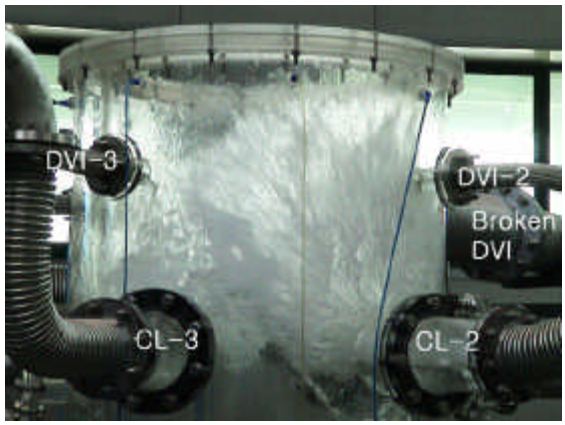


(b) 강수부 수위 상승 시

그림 5. 파단 DVI관 부근의 수력현상 (v_g= 3 m/s, v_f= 0.17 m/s)

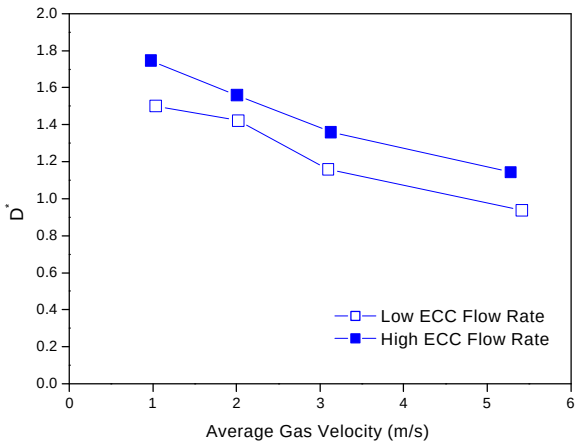


(a) 강수부 수위 하강 시

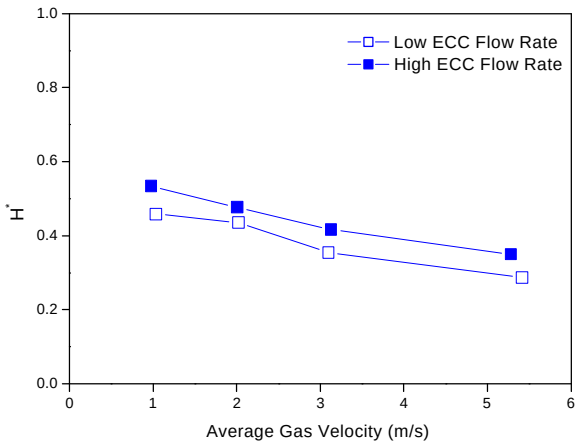


(b) 강수부 수위 상승 시

그림 6. 파단 DVI관 반대부근의 수력현상 (v_g= 3 m/s, v_f= 0.17 m/s)



(a) 특성길이: 저온관 직경



(b) 특성길이: 저온관 하단~DVI중심

그림 7. 기체속도에 따른 무차원 강수부 수위

표 1. 주요 측정 변수, 측정 위치 및 측정 오차

Instrumentation Type	Location	Uncertainty(of Reading)
Air Flow Rate(kg/s)	Cold Leg	3.0 %
Water Flow Rate(kg/s)	DVI	0.5 %
Absolute Pressure(Pa)	Downcomer, Cold Leg	1.0 %
Temperature(°C)	Cold Leg, DVI	1.0 °C
Water Level	Downcomer	2.5 %