

2001 추계 학술발표회 논문집  
한국원자력학회

**LBLOCA시 DVI를 갖는 강수부에서의 물막퍼짐과  
Sweep out 현상에 관한 실험적 연구**  
**Experimental Study on the Film Spreading and Sweep-out  
of ECC Water in the Downcomer with DVI under LBLOCA**

이동원, 노희천

한국과학기술원(KAIST), 대전 유성구 구성동 373-1

김한곤, 오승중

전력연구원(KEPRI), 대전 유성구 문지동 103-16

**요 약**

차세대 원자로 (APR1400)를 원형으로 1/7 스케일로 제작된 평판형의 실험장치를 이용하여, 대형냉각재 상실사고(LBLOCA) 시 강수부 내에서 발생하는 현상들에 대한 실험을 수행하였다. 특히, 안전주입수의 직접 우회 현상과 관련하여 DVI에서 주입되는 액막의 폭을 측정하는 실험을 공기의 유량을 증가시키며 수행하였고, 강수부 내에서 발생하는 Sweep-out 현상을 그 발생 시점과 파단 저온관으로 빠져나가는 물의 양 측정으로 나누어 실험을 수행하였다. 본 실험을 통해 안전주입수의 주입시 액막의 퍼짐 정도와 곡률 효과 등을 파악하였고, Sweep-out 현상의 관찰을 통해 강수부 내에서 견인되는 안전주입수의 수위와 직접 우회양을 측정하였다.

**Abstract**

Using the experimental facility of plane channel type which is scaled down as 1/7 ratio of prototype reactor (APR1400), some experiments related to the phenomena in downcomer under Large Break Loss of Coolant Accident (LBLOCA) are carried out. Especially, the experiment for the water film spreading is performed with an increase in the air flow rate, and the onset of sweep-out phenomenon and the amount of ECC bypass by sweep-out are also investigated for ECC direct bypass to the broken coldleg. In the present study, the degree of water film spreading and its curvature effect are observed. Also, from the observation of sweep-out phenomenon, the water height and the amount of ECC bypass by onset of sweep-out are measured in the downcomer.

# 1. 실험장치의 제작 및 구성

## 1.1. 혼합 실험 장치의 설계 및 제작

원형(APR1400)의 열수력 조건으로부터 계산된 물과 공기, 증기의 유량 등을 고려하여 test section의 크기 및 구조를 결정하고, 선행 실험[1,2]으로부터 얻어진 액막의 크기나 두께 등에 대한 정보와 문제점들을 실제 사용할 test section의 설계에 반영하였다. 그림 1은 이러한 설계요건을 반영하여 최종 설계된 test section의 개략도로, 실제 DVI를 약 1/7로 축소하여 직경이 0.03 m, 저온관의 직경이 0.109 m가 되도록 하였다. 또한, 액막의 전체 거동을 볼 수 있도록 너비와 폭을 고려하였고, 증기의 속도저하를 막기 위해 폭과 높이를 조절하여 제작하였다. 본 실험에서 중요한 과열증기와 과냉각수 사이의 열전달 측정을 위해 test section 에서 주입 및 배출되는 증기와 물의 온도 측정이 가능하도록 설계되어, bulk 열전달 측정이 가능하도록 하였다. test section내에서 발생할 수 있는 liquid entrainment, water bypass, water penetration, water condensation 등을 관찰할 수 있도록 투명한 재질로 제작하였고, 고온 및 일정 압력에도 견딜 수 있도록 하였다.

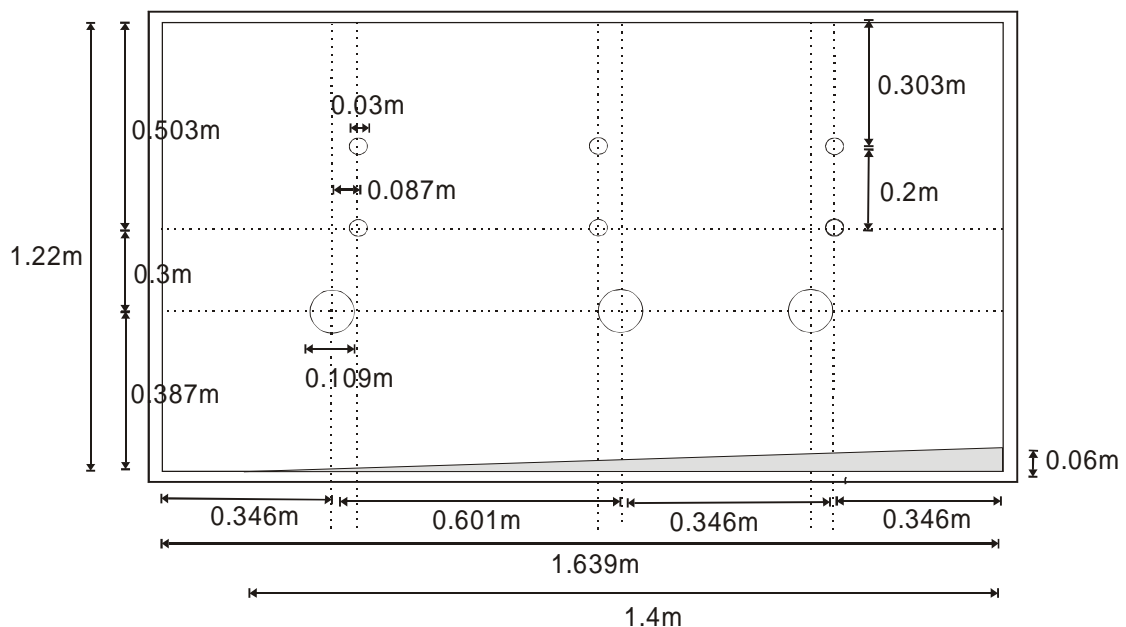


그림 1. 제작된 Test section의 개략도

## 1.2. 실험 장치 계통

실험 장치의 계통은 그림 2와 같이 제작, 설치되었다. 실험장치는 공기와 물 혼합실험을 위하여 blower를 설치하고, 증기와 물의 혼합실험을 위해 같은 배관 상에 증기발생기와도 연결하였다. 안전주입수로 사용하기 위한 물은 물탱크로부터 펌프를 이용해 주입하도록 하였고, 배출되는 물과 공기 혹은 증기는 steam dump 탱크 (separator)를 이용해 공기/증기와 물로 분리하여 각 배출량을 측정할 수 있도록 하였다. 이 separator의 경우, 내부의 격벽 등을 최소화하여 증기의 응축이나 공기/증기에 의한 압력 상승 효과를 최대한 억제할 수 있도록 하였다.

본 실험에서 사용될 주요 운전변수를 얻기 위해, 증기유량이 30 m/s까지 가능하도록 두 개의 증기발생기를 연결하여 사용할 수 있도록 하였고, 물 유량은 4 m/s까지 공급이 가능하도록 펌프 용량을 조절할 수 있도록 하였다. 또, 증기의 과열도를 위해, preheater를 설치하여 과열도를 50 ℃까지 얻을 수 있도록 하였다. 모든 유로에는 온도와 압력 센서를 부착하여 입구와 출구 및 전체적인 시스템 압력을 측정할 수 있도록 하였고, 각 배관에 유량계를 설치하여 체적유량을 측정할 수 있도록 하였다. 또한, test section의 전면부에 비디오시스템을 설치하여 실험시의 모든 현상을 촬영하고, 추후 분석에 사용할 수 있도록 하였다.

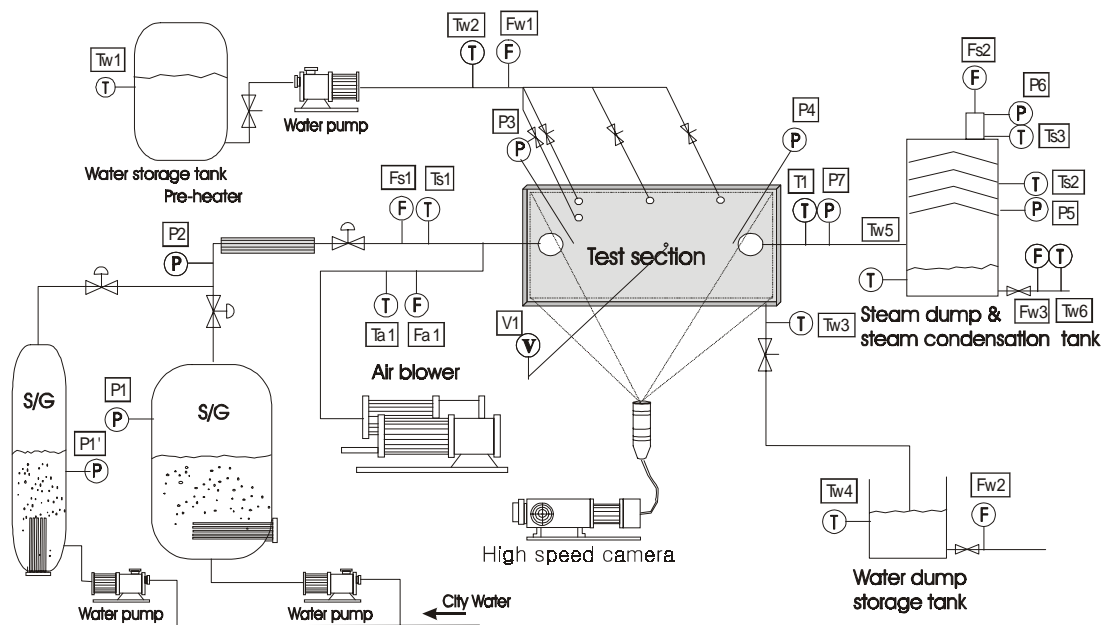


그림 2. 실험장치의 계통도

## 2. 실험 내용 및 결과

실제 대형냉각재 상실사고(LBLOCA)를 연구하기 위해서는 증기와 물의 혼합현상에 대한 연구가 수행되어야 하나, 본 실험에서는 증기와 물에 의한 응축과 같은 상호작용을 배제하고 안전주입수의 주입으로 형성되는 액막과 증기의 거동을 살펴보기 위해, 공기와 물을 이용한 실험을 선행적으로 수행하였다. 본 연구에서 수행된 공기와 물을 이용한 실험은 다음과 같다 ; (1) DVI를 통해 주입된 안전주입수에 의한 액막의 거동을 살펴보기 위해 그 폭과 nozzle 부착시의 차이점 등을 살펴보았고, 그 결과를 기존 실험결과들과 비교하였다. (2) 그리고, 강수부 내의 수위가 일정 높이 이상이 되어 발생하기 시작하는 sweep-out 현상의 발생시점과 그로 인한 안전주입수의 직접우회량을 측정하였다.

### 2.1. 액막 폭 실험

기존의 액막 실험 및 KAERI에서 수행된 실린더형의 실험장치로부터 얻어진 결과[3]와 비교하기 위해 액막 실험을 수행하였다. 본 실험은 공기나 증기의 주입 없이, 펌프를 이용해 DVI line에 물을 공급하여 액막이 퍼지는 정도를 측정하는 방법으로 수행하였다. 그림 3과 같이, DVI line으로부터 10cm, 40cm, 61cm 밑의 너비를 각각 W1, W2, W3로 나타내고, 각 부분에서의 너비를 측정하는 방법으로 실험이 수행되었다. 이러한 액막의 폭은 파단 저온관(broken coldleg)으로 빠져나가는 안전주입수의 양을 결정하는 중요한 인자 중의 하나로 파악되고 있으며, 따라서, 이러한 영향을 평가하기 위해 두 가지 크기의 노즐을 DVI line에 부착하고 물을 주입하는 실험을 부가적으로 실시하여 그 결과를 비교할 수 있도록 하였다. 이러한 노즐은 액막의 폭을 줄이는 역할을 하므로, 후에 이루어질 ECC bypass 실험에서 그 효과를 평가하기 위해 이 부분에서 실험이 선행되었다. 이러한 노즐은 그림 4에서 보는 바와 같이, 직경 15mm, 20mm로 각각 제작되어 실험에 사용되었다. 그림 5와 6은 펌프를 이용해 안전주입수를 DVI를 통해 주입하였을 때의 현상을 촬영한 것으로, 물유량은 각각 0.6, 1.3 kg/sec이다. 펌프를 이용해 물의 유량을 증가시키면서 액막의 폭을 측정한 실험 결과는 그림 7과 같다. 그림 7에서 보는 바와 같이, DVI line에 물을 주입하였을 때 발생하는 액막의 폭은 물의 유량이 증가할수록 증가하며, 기존의 실험들과 유사한 크기를 가지는 것으로 파악되었다. 또, 노즐을 사용한 실험 결과도 그림 7과 같으며, 노즐의 유무에 따라 액막의 폭이 현저하게 차이가 나며, 노즐의 크기는 액막의 폭에 크게 영향을 주지 못하는 것으로 나타났다. 또, 노즐의 방향이 강수부(downcomer)의 밑부분으로 향하고 있기 때문에, 액막이 강수부의 위로 퍼지는 현상도 방지할 수 있음을 알 수 있었다.

실제 원자로 용기와 같이 실린더형으로 제작된 KAERI의 실험장치에서 수행된 액막 실험 결과와 비교한 결과는 그림 8과 같다. KAERI의 실험장치에서 측정된 액막은 물이 주입되어 곡률이 있는 벽면에 분사(jetting)되므로, 본 실험장치와 같이 평판에 주입되는 상황과는 차이가 있다. 그러나, 그림 8에서 보는 바와 같이, 평판에 물이 분사되는 본 실험결과와 곡률이 있는 KAERI의 실험결과 사이에 거의 차이가 없이 액막이 형성되고 있음을 알 수 있었다. 이것은 곡률에 의해 액막의 끝부분이 어느 정도 분리해나가는 현상을 제외하면, 액막의 폭에는 거의 차이가 없다는 것을 보여주는 것으로, 액막의 폭에 관한 한 곡률 효과가 어느 정도는 배제될 수 있음을 보여주고 있다.

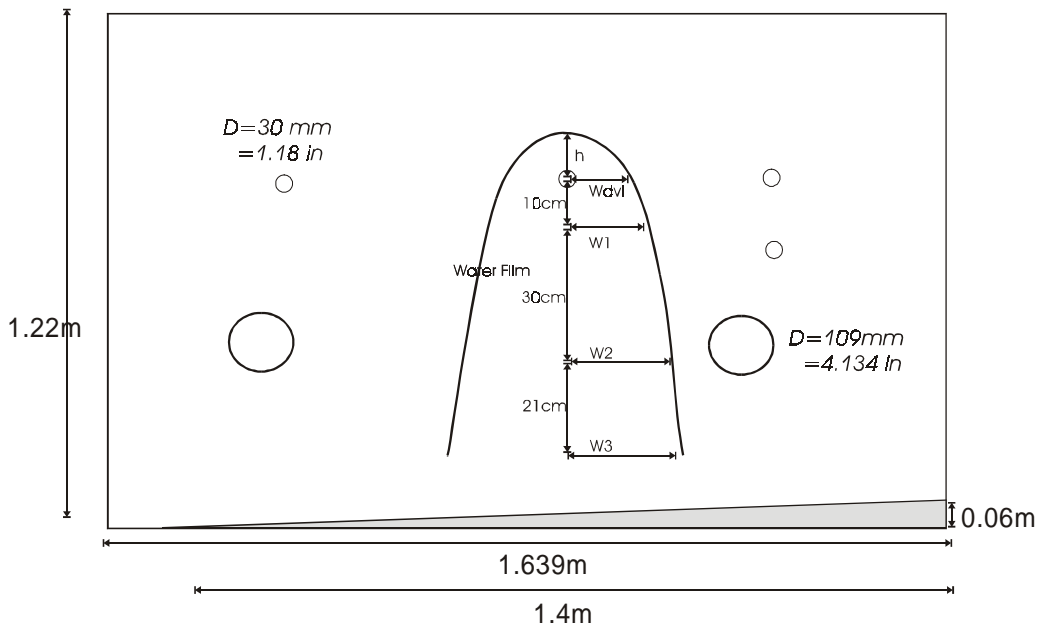


그림 3. 액막 폭 측정

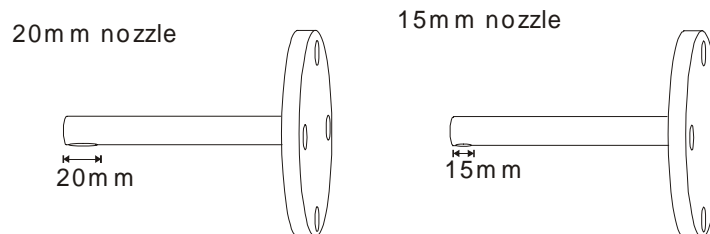


그림 4. 실험에 사용된 노즐의 구조

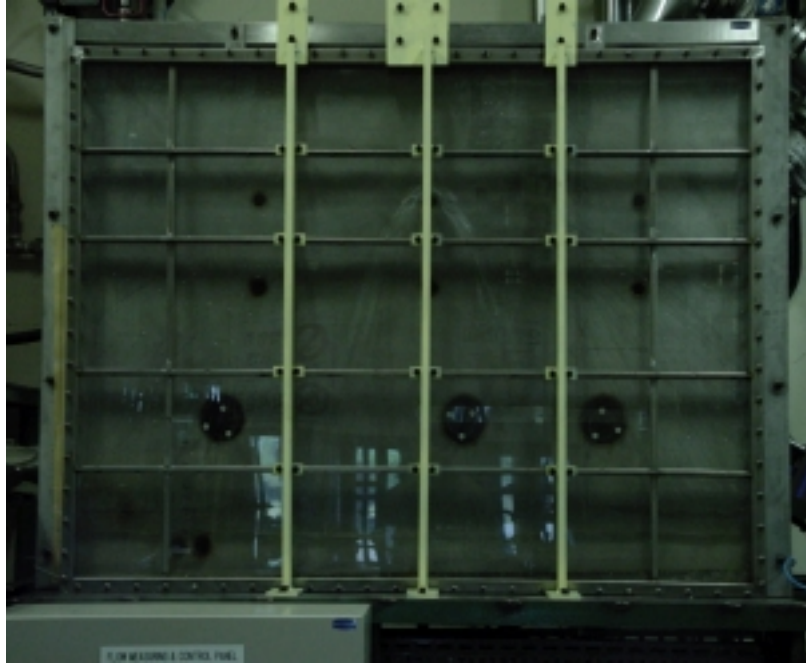


그림 5. 물유량이 0.6 kg/sec일때의 액막 형상



그림 6. 물유량이 1.3 kg/sec일때의 액막 형상

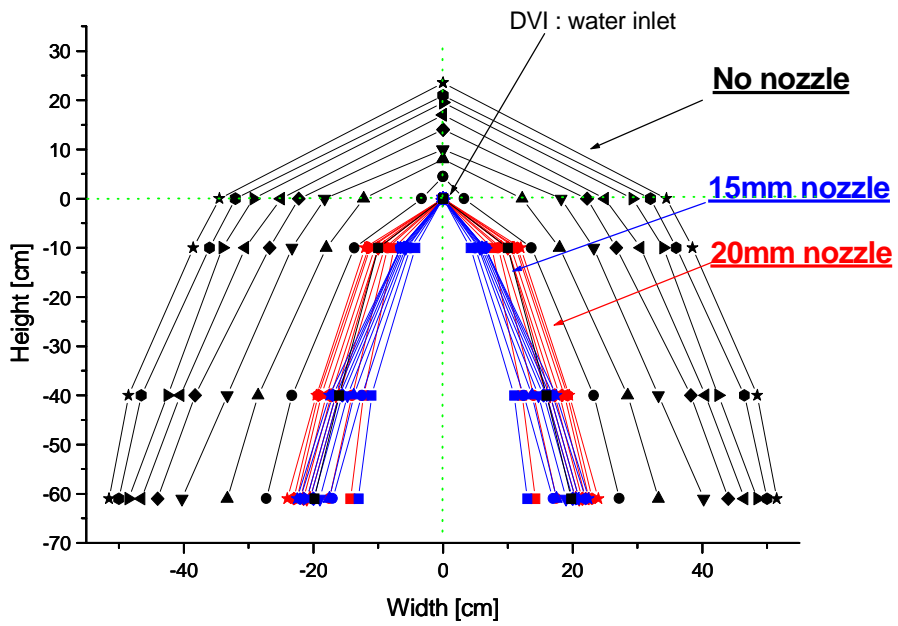


그림 7. 액막 폭 실험 결과

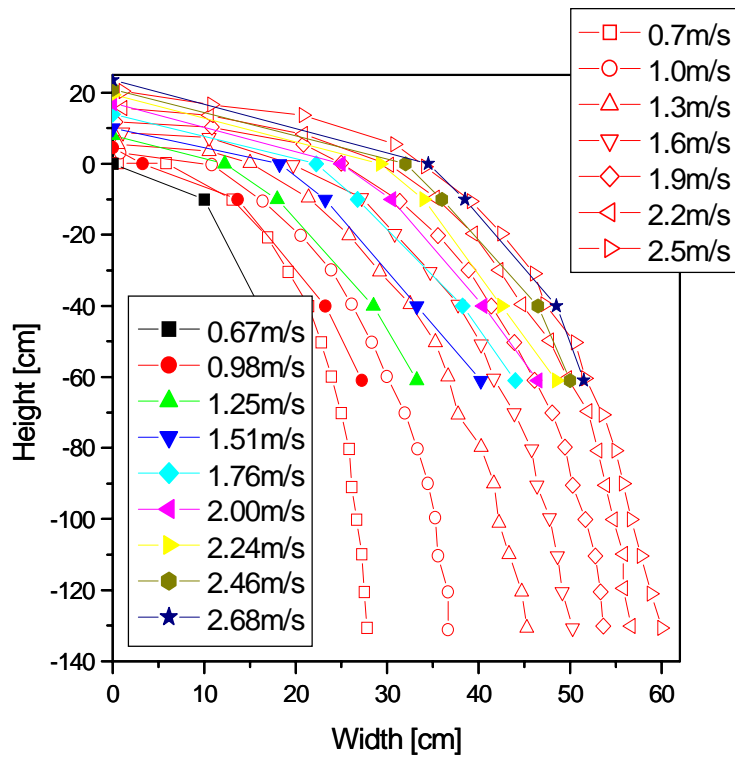


그림 8. 액막의 폭에 대한 KAERI 실험결과와의 비교

## 2.2. Sweep out 실험

강수부(Downcomer) 하부에 축적되는 액주 형태의 안전주입수는 저온관을 통해 고속으로 유입되는 증기에 의해 파단 저온관으로 쏠리게 된다. 이 과정에서 액주 표면에서 형성되는 파동 선단에서의 전단력에 의해 액적이 형성되고, 이는 고속의 증기 유동에 의해 대부분 파단 저온관을 통하여 유출된다. 또한 일부는 높은 파고를 갖는 성층유동의 표면이 액체 슬러그 (liquid slug) 형태로 분리되어 파단 저온관을 통해 유출된다. 이러한 안전주입수의 유출현상을 Sweep-out이라 하며, 안전주입수의 우회 (ECC bypass) 유량 및 강수부 수위를 결정하는 중요한 요인이 된다[2]. 본 연구에서는 이러한 Sweep-out 현상을 공기의 주입량과 물의 높이에 따른 발생시점(Onset of Sweep-out)과 일정 수위에서 발생하는 Sweep-out에 의한 ECC 배출량(Quality of Broken Coldleg)을 측정하는 방법으로 그 현상에 대해 분석하였다.

### (1) Sweep-out의 발생시점 (Onset of Sweep-out)

안전주입수의 주입시 발생하는 Sweep-out 현상은 냉각재 상실사고 해석시 배관 파단부위를 모사하는 T형 분기관 모델과 유사하다. 특히, 강수부(Downcomer) 내의 유동에서 파단 저온관 쪽으로 배출되는 공기와 물은 이러한 T형 분기관 모델에서 측향분기관의 거동과 비슷하며, 아래와 같은 물리적인 해석에 의해 그 현상을 추정할 수 있다. T형 분기관 모델에서 측향 분기관은 성층화된 이상유동을 갖는 수평관에서 작은 분기관을 통해 유량이 형성될 경우, 분기관 근처에서의 증기 가속, 액체의 증기화, 기포의 파열, 계면전단 등과 같은 현상들이 단독이나 혹은 결합되어 액체건인을 유발하는 것으로 알려져 있다. 이 모델은 A. Craya(1949)에 의해 유사한 관계식이 유도되었으며, P. Gariel (1949), Crowley 및 Rothe (1981)에 의해 실험적으로 입증되었다. 또한, Crowley와 Rothe는 이와 관련하여 액체건인의 발생조건에 대한 다음과 같은 관계식을 유도하였다[4].

$$Fr_g \left[ \frac{\rho_g}{\Delta\rho} \right]^{0.5} = A \left[ \frac{h_b}{d} \right]^{2.5} \quad (1)$$

$$\text{여기서 } Fr_g = \frac{G_g}{\rho_g \sqrt{dg}}$$

$G_g$  : Gas mass flux through branch

$\rho_g$  : Density of vapor

$\Delta\rho$  : Density difference between liquid and vapor



$d$  : Diameter of branch pipe

$h_b$  : Height of liquid for onset of vapor pull through

위의 Crowley와 Rothe에 의한 관계식을 본 실험에서 적용하여 그 결과를 다음과 같이 비교하였다. 여기서 branch pipe는 본 실험의 파단 저온관(Broken cold leg)을 나타내는 것으로  $D_{CL}$ 은 0.109m이며, 다른 변수들은 실험을 통해 측정하여 비교하도록 하였다.

그림 9는 본 실험에서 발생하는 sweep-out현상을 촬영한 사진으로 일정 높이에서 파단 저온관으로 견인되는 물의 모습을 나타내고 있다. 그림 10은 본 실험장치를 이용한 Sweep-out의 발생시점 (Onset of Sweep-out) 실험의 결과이다. 그림 10에서 보는 바와 같이, 식 (1)에서 A값은 약 0.82정도로 나타나, UCB나 KfK의 A값, 3.22나 3.25보다 작게 나타났다. 그림 11에서 비교된 UCB나 KfK의 실험결과보다 더 낮은 수위에서 액체 견인(Sweep-out) 현상이 발생하는 것을 의미한다. 기존의 UCB나 KfK의 실험은 원통형 배관에서 원통형 분기관으로 액체가 견인되는 현상을 모사하는 실험으로 그 기하학적 형상이나 실험조건이 본 실험과는 많은 차이가 있다. A값의 차이, 즉 Sweep-out의 발생시점은 그 기하학적 형상의 차이를 반영하는 것으로 보인다.



그림 9. Sweep-out 현상의 형상

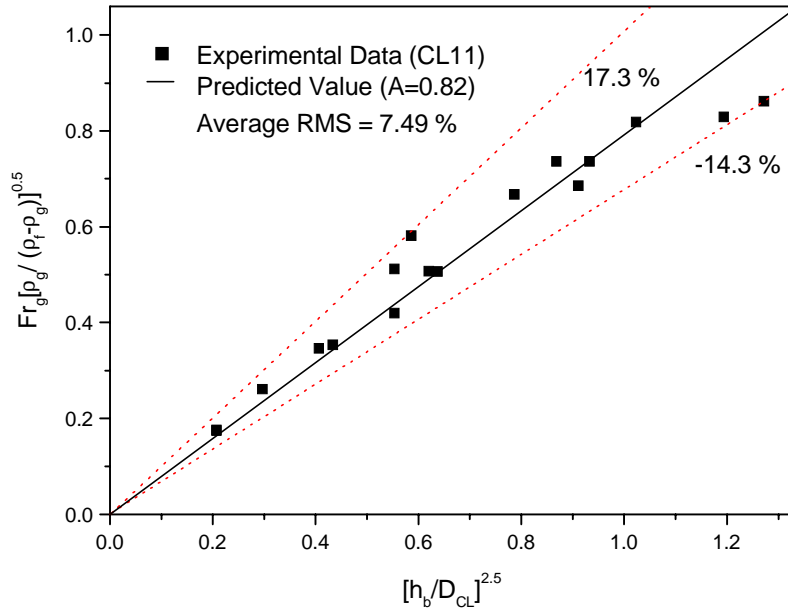


그림 10. Sweep-out 의 발생시점

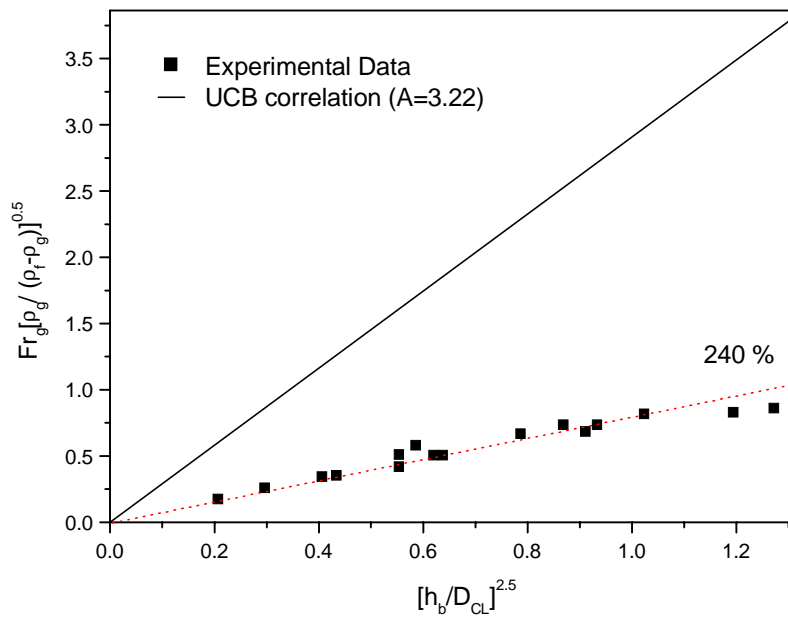


그림 11. Sweep-out 발생시점에 대한 실험결과의 UCB, KfK 결과와의 비교

Sweep-out의 발생시점에 대한 실험과 UCB 및 KfK의 실험결과와의 비교뿐 아니라, 공기가 주입되는 건전 저온관(Intact cold leg)의 위치에 따른 영향을 살펴보는 실험을 추가적으로 수행하였다. 그림 12에서 보는 바와 같이, Test Section에는 건전 저온관(Intact cold leg)을 모사하는  $CL_{11}$ ,  $CL_{12}$ 와 파단 저온관(Broken cold leg)을 모사하는  $CL_{broken}$ 가 설치되어 있고, Sweep-out의 발생시점이 공기의 주입위치에 따라 어떻게 달라지는 지를 살펴보기 위해,  $CL_{11}$ 과  $CL_{12}$ , 그리고,  $CL_{11}$ 와  $CL_{12}$ 에서 함께 공기를 주입하는 실험을 수행하였다. 이러한 실험에 대한 결과는 그림 13에 나타나 있다. 그림 13에서 보는 바와 같이, 공기의 주입위치는 sweep-out의 발생시점에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 이는 공기의 주입위치보다는 파단 저온관(Broken cold leg)에서의 공기 속도가 액체전인을 주도하고 있다는 것으로 기존의 상관식들이 Branch pipe, 즉 파단 저온관에서의 속도와 압력을 이용하는 것이 옳다는 것을 입증한다. 다만,  $CL_{11}$ 와  $CL_{12}$ 에서 함께 공기를 주입하는 경우는 sweep-out의 발생시점이 공기의 속도에 많은 영향을 받지 않고, 일정한 높이에서 이루어지고 있음을 알 수 있다. 이것은 공기를 나누어 주입하는 조건에서는 어느 정도 파동(wave)이 안정화되어 sweep-out의 발생시점을 낮추는 결과를 가져오는 것으로 볼 수 있다.

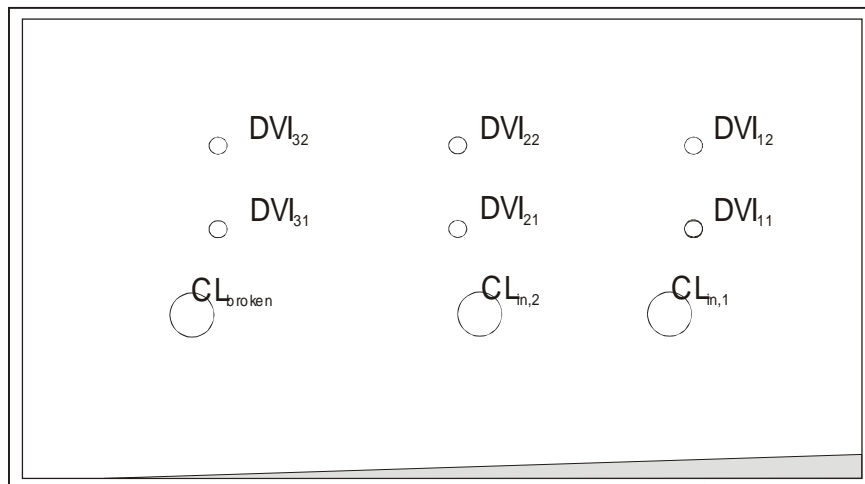


그림 12. Test Section에서의 DVI 및 Coldleg의 위치

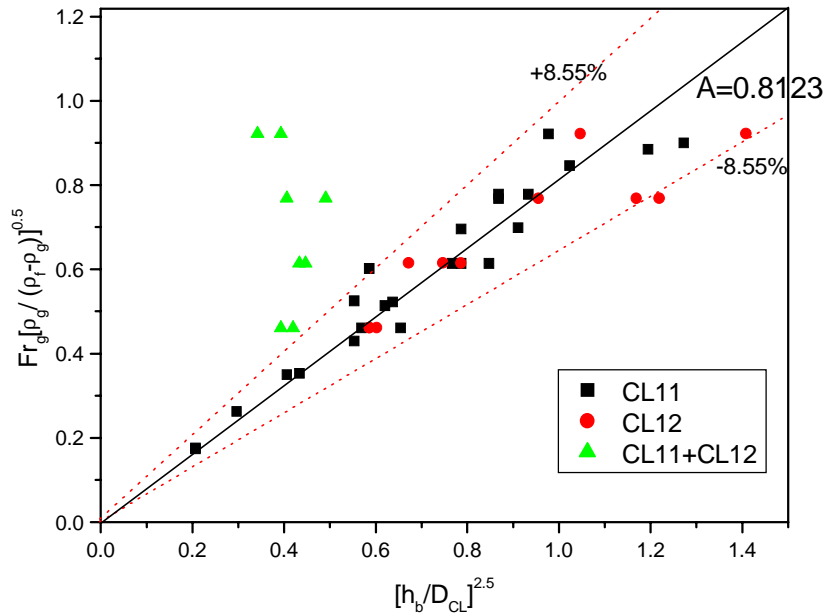


그림 13. Cold leg 위치에 따른 Sweep-out 실험결과

지금까지 건전 저온관(Intact cold leg)에서 공기를 주입시켰을 때, 파단 저온관(Broken cold leg)에서 발생하는 Sweep-out의 발생시점에 대한 연구를 정리하였다. 그러나, 이 Sweep-out의 발생시점은 Sweep-out 현상의 발생을 어떤 것으로 정의하느냐에 따라 많은 차이를 가져올 수 있다. 본 실험에서는 수면에서 발생하는 파동(wave)에 의한 간헐적인 액체건인 현상도 sweep-out의 범주에 포함시켜 실험을 수행하였다. 그러나, 이러한 간헐적인 액체건인 현상은 안전주입수가 파단 저온관으로 빠져나가는 전체 양에 많은 영향을 미치지 못하게 된다. 따라서, 본 실험에서는 이러한 영향을 반영하여 지속적인 액체건인 현상을 sweep-out의 발생시점으로 정의한 실험을 그림 14와 같이 수행하였다. 이 결과를 보면 기존 간헐적인 sweep-out의 발생을 onset으로 보는 결과와는 달리 A 값이 1.16정도로 높아졌고, 공기의 유입구에 따른 효과가 많이 줄어들어 있는 것을 볼 수 있다. 따라서, sweep-out의 발생시점은 간헐적인 액체건인 보다는 지속적인 액체건인 현상에 대해 정의되는 것이 바람직하다고 판단된다.

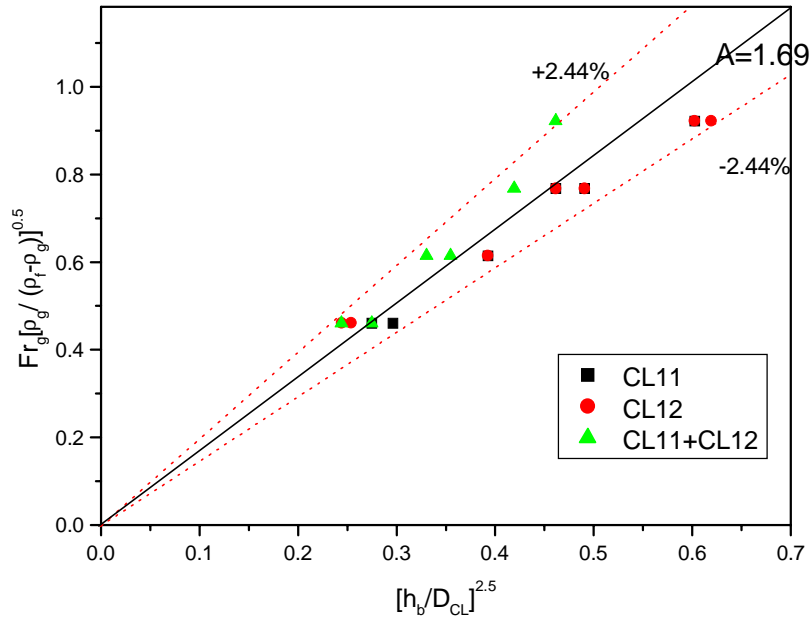


그림 14. 지속적인 sweep-out 현상의 발생시점

## (2) Sweep-out에 의한 ECC bypass 양

### (Quality of Sweep-out in broken cold leg)

Sweep-out 현상과 관련하여, 그 발생시점(Onset of Sweep-out)은 ECC bypass 현상이 시작되는 강수부에서의 수위를 나타내고, broken cold leg에서의 quality는 일정 수위에서의 ECC bypass 양을 나타내게 된다. 본 절에서는 이렇게 bypass 되는 안전주입수의 양을 측정하는 실험을 일부 수행하여 정리하였다. 그림 15은 이러한 건도(quality) 실험 결과를 나타낸다. 그림 15에서 나타난 바와 같이, 강수부에서의 수위가 높을수록, 즉  $h_b$ 가 작을수록 많은 안전주입수가 파단 저온관(broken cold leg) 쪽으로 bypass되는 현상을 볼 수 있으며, 그 양을 quality로 표현하였다. 여기서 나타난 quality는 식 (2)과 같이 표현되는 flow quality로, 단위시간당 배출된 물의 양으로 환산하여 그 값을 추정할 수 있다.

$$x = \frac{m_g}{m_g + m_f} \quad (2)$$

또한, 기존에 알려진 건도 상관식들과 비교하기 위해, KfK 상관식과 UCB 상관식을 그림 15와 같이 비교하였다. 이들 상관식과의 비교에서 비록 기하학적인 형상과 실험조건은 다르나 비슷한 경

향을 나타내는 것으로 판단되며, 이것은 기존의 상관식들이 온도나 압력, 유량과는 관계없이  $h/h_b$ 만을 상관식에 반영하고 있기 때문으로 보인다. 비교에 사용된 기존 상관식들은 다음과 같다;

KfK 상관식

$$x = x_o^{(1-h/h_b)} [1 + 0.5h/h_b(1-h/h_b)x_o^{(1+h/h_b)}]^{0.5} \quad (3)$$

UCB 상관식

$$x = x_o^{(1-h/h_b)^{0.7}} [1 - 0.5h/h_b(1+h/h_b)] \quad (4)$$

그림 16은 공기유량에 따른 과단저온관에서의 건도를 나타낸 결과로, 저온관에서의 건도는 공기 유량보다는 강수부 내에서의 수위에 더욱 많은 영향을 받는 것을 보여주고 있다. 앞에서 언급한대로, Sweep-out 실험에서의 건도는 ECC bypass 양을 추정하는 근거가 되므로 DVI를 이용한 안전 주입수의 주입량을 결정하는 중요한 변수 중의 하나이다. 본 절에서 수행된 실험에서도 Sweep-out의 발생시점(Onset of Sweep-out)인  $h_b$  값이 건도(quality)를 표현하는 무차원수에 사용되기 때문에,  $h_b$  값을 결정하는 Sweep-out에 대한 명확한 정의는 중요하다고 볼 수 있다.

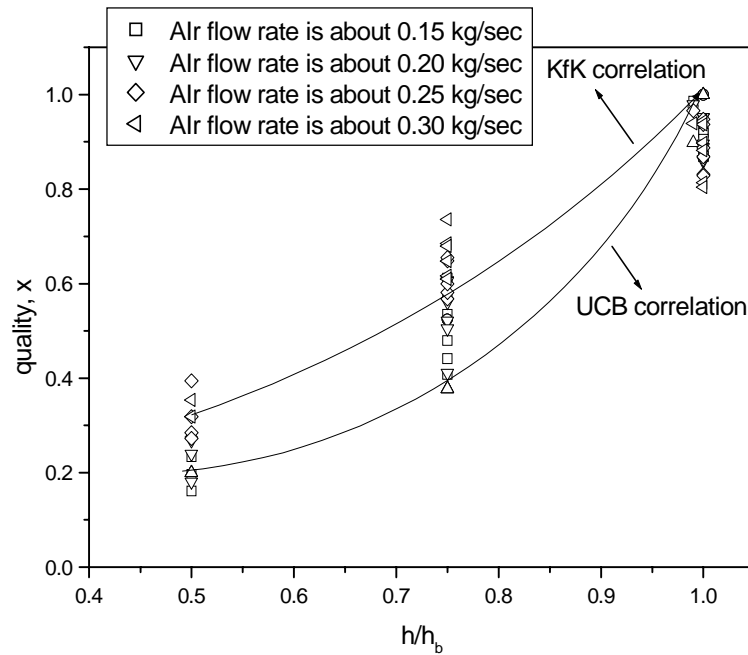


그림 15. sweep-out에 의한 건도 실험 결과 및 비교

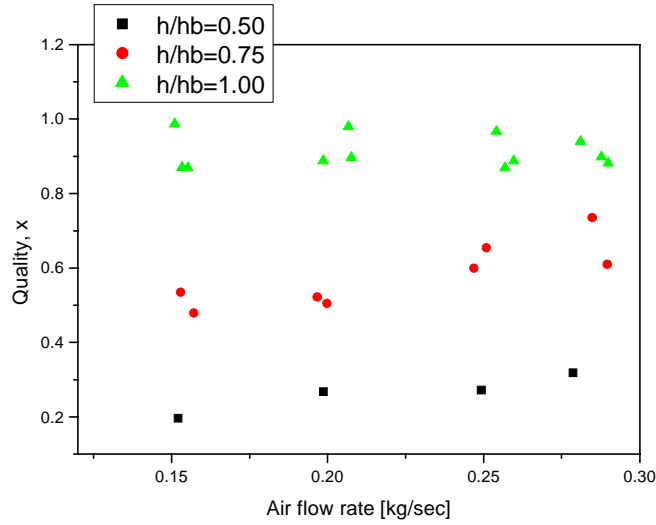


그림 16. 공기유량에 따른 건도실험 결과

### 3. 결론

차세대원자로의 DVI를 갖는 강수부내의 열수력 현상들과 관련하여, 안전주입수에 의한 액막퍼짐 현상과 sweep-out현상에 대한 실험을 수행하였다. 본 연구의 결론은 다음과 같다.

- 안전주입수의 액막 퍼짐 현상은 기존 실험들과 유사한 경향을 보이고 있으며, 곡률에 의한 영향은 미미한 것으로 판단된다.
- 노즐에 의한 액막 퍼짐 현상의 억제 효과는 상당히 크며, 이러한 액막 폭의 감소가 안전주입수 직접 우회에 미치는 영향은 추후 실험적 연구가 수행되어야 할 것으로 보인다.
- sweep-out의 발생시점은 기존 UCB, KfK의 결과보다 작게 나타났으며, 이러한 결과는 실험 장치의 geometry에 의한 영향으로 판단되며, 강수부 내에서의 sweep-out 발생시점에 대한 명확한 정의가 중요한 것으로 판단된다.
- sweep-out에 의한 안전주입수의 직접우회 양을 파단저온관에서의 건도로 표현하였고, 실험 결과는 UCB나 KfK 상관식과 그 경향이 비슷한 것으로 나타났다. 또한, sweep-out에 의한 분기관에서의 건도, 즉 안전주입수의 직접우회 양은 공기의 유량보다는 강수부 내에서의 수위에 더 많은 영향을 받는 것으로 판단된다.
- 추후 공기 및 증기의 주입 실험을 통해 안전주입수의 직접우회에 대한 연구가 더 수행되어야 할 것으로 판단된다.

## <참고문헌>

- [1] H.D. Hwang, "Air-Water Mixing Experiments for Direct Vessel Injection of KNGR", Master Thesis, KAIST, 2000
- [2] 한국원자력연구소, 차세대원자로 대형 냉각재 상실사고 모의를 위한 열수력 실험장치의 척도해석, KAERI
- [3] 윤병조 등, "대형냉각재 상실 사고시 후기 재관수 기간 중 DVI를 갖는 강수부에서의 물막퍼짐에 관한 실험연구", KNS Autumn Meeting, KNS 2000
- [4] 한국원자력연구소, 액적동반현상의 모델링 기법, KAERI/AR-450/96
- [5] B.J.Yun et al., "Air/Water Test on DVI ECC Direct Bypass during LBLOCA Reflood Phase:UPTF Test 21-D Counterpart Test", KNS Autumn Meeting, KNS, 2000