

## 대형냉각재상실사고 시 강수부에서 발생하는 Sweepout에 영향을 미치는 인자에 대한 실험적 연구

### An Experimental Study of Parameters Affecting Sweepout in the Downcomer at Large Break LOCA

배병언, 김용수, 박군철, 서균렬, 이은철  
서울대학교, 서울 관악구 신림9동 산56-1

#### 요 약

Sweepout은 대형냉각재상실사고 시 건전 저온관으로부터 유입되는 증기의 운동량이 강수부 내 냉각재로 전달되어 냉각재가 물 덩어리(Water Slug) 및 물방울(Droplet) 형태로 파단부로 방출되면서 원자로용기 냉각재 재고량 감소시키는 현상이다. 본 연구에서는 APR1400의 강수부를 1/5로 선형 축소된 평판형 실험장치를 제작하여 Sweepout을 유발하는 수력학적 매커니즘을 고찰하였다. 또한, 건전 저온관 공기유량, 건전 저온관과 파단 저온관 사이의 거리, 원형의 강수부 내에서 발생하는 중첩효과 및 고온관에 의한 영향 등 Sweepout 관련 주요 인자들에 대한 개별 실험을 수행하였다. 실험결과에 따르면 Sweepout 현상은 주입구 근처에서 냉각재와 공기의 상호작용에 의해 지배되는 현상임을 확인하였다.

#### Abstract

Sweepout discharges the coolant in the downcomer into broken cold leg in water slug and droplet, which plays an important role in depleting the coolant inventory in a large-break loss-of-coolant-accident (LBLOCA) in nuclear reactors. This study intends to investigate the mechanism and the amount of sweepout depending on the injected gas flow from intact cold leg, the distance between intact and broken cold legs, the superposition effect of air and coolant near to broken cold leg, and the blockage effect by hot leg in the downcomer utilizing the experimental apparatus scaled down to 1/5 of the APR1400 (Advanced Power Reactor 1400 MWe). The

experiment showed that the amount of discharged flow the critical void height were affected by the gas flow at more dominantly the inlet rather than the outlet.

## 1. 서론

국내에서 대형냉각재상실사고와 관련된 주요한 열수력 현상에 대한 실험 및 해석 연구는 매우 광범위하게 수행되어 왔으나 강수부 다차원 현상에 대한 연구는 APR1400 (Advanced Power Reactor 1400 MWe)[1]에 원자로용기 직접주입 방식(DVI : Direct Vessel Injection)을 채택한 후 활발히 진행되기 시작하였다. 강수부 다차원 현상의 하나인 Sweepout은 건전 저온관으로부터 유입되는 증기와 강수부 내 냉각재의 상호작용으로 파단부로의 냉각재 방출을 증가시켜 원자로용기 냉각재 재고량 감소를 유발한다. 특히, 안전주입계통 고장에 의해 설계기준사고에서 중대사고로 천이되는 과정에서 Sweepout에 의해 노심 냉각재 재고량이 급격히 감소되어 중대사고 초기 핵연료 온도 변화에 큰 영향을 준다. 설계기준사고와 중대사고의 연계 해석 체계 개발의 일환으로 수행되는 본 연구에서는 Sweepout에 대한 수력학적인 메카니즘을 고찰하고 건전 저온관으로부터 유입되는 공기유량, 건전 저온관과 파단 저온관사이의 거리, 원형의 강수부 내에서 발생하는 냉각재의 중첩효과 및 고온관에 의한 영향 등 Sweepout관련 주요 인자들에 따른 방출량 변화를 실험적으로 평가하고자 한다.

## 2. 실험장치

### 2.1. 기하학적 구조

Sweepout 실험장치는 표. 1 및 그림. 1에서 보는 바와 같이 APR1400의 강수부를 1/5로 선형 축소된 평판형으로 제작하였다. Test Section은 강수부 둘레의 길이의 1/2로 제작하였으며 그림. 2에서 보는 바와 같이 파단 저온관 하나를 사이에 두고 양쪽 저온관으로 증기가 주입되는 상황을 모사하여 강수부의 중첩효과를 평가하도록 하였다. 저온관 이하의 높이는 Sweepout 현상에 왜곡이 생기지 않도록 충분한 높이를 확보하도록 설계하였다. 그림. 2의 실험장치 구성도에서 보는 바와 같이 CL-1과 CL-4는 건전 저온관에 해당하고 CL-2는 파단 저온관에 해당한다. 이들 사이의 길이비는 원형인 APR1400에서와 같이 2:1에 해당한다. 건전 저온관과 파단 저온관사이의 거리에 따른 방출량 평가 및 원형의 강수부에서 발생하는 중첩 효과를 모사할 수 있도록 CL-1 및 CL-2는 밸브 조작에 의해 건전 저온관 및 파단 저온관으로 사용할 수 있도록 하였다. 또한, 고온관에 의한 방출량 변화 영향을 평가하기 위해 CL-3에는 고온관 모사용 Plug를 설치할 수 있도록 제작하였다.

### 2.2. 측정계통

실험 시 측정되는 주요변수로는 냉각재 수위, 공기유량 및 유동 유체의 물성치를 계산하

기 위한 온도 및 압력이다. 유동 불안정에 인한 냉각재 수위 계측 오차가 발생하지 않도록 그림. 2에서 보는 바와 같이 Rosemount 사의 차압식 수위계를 주입구 및 방출구에서 충분히 떨어진 3개 위치에 설치하였다. 공기 주입량 측정에는 Orifice Flowmeter를 사용하였으며 유체의 물성치 결정을 위해 압력계 및 온도계를 각 각의 공기 주입구, 방출구 및 Test Section에 각각 설치하였다.

표. 1 APR1400과 실험장치 주요 설계변수

설계변수	APR1400[1]	실험장치
강수부 상부 - DVI 높이	1233.0mm	245.0mm
DVI - 저온관 높이	2102.0mm	420.0mm
Gap	257.4mm	50.0mm
총 길이	6908.0mm	1380.0mm
저온관 내경	762.0mm	152.4mm

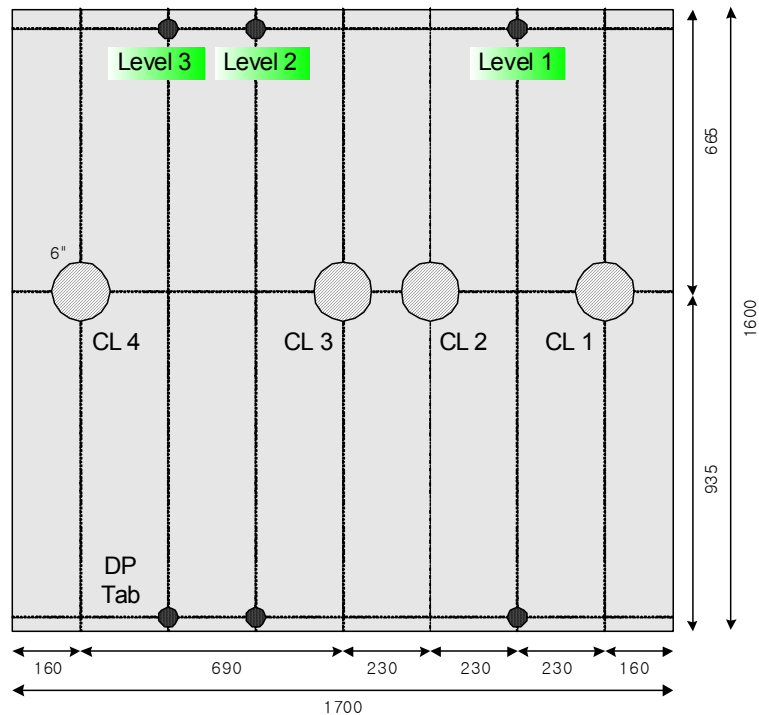


그림. 1 Test Section 정면도

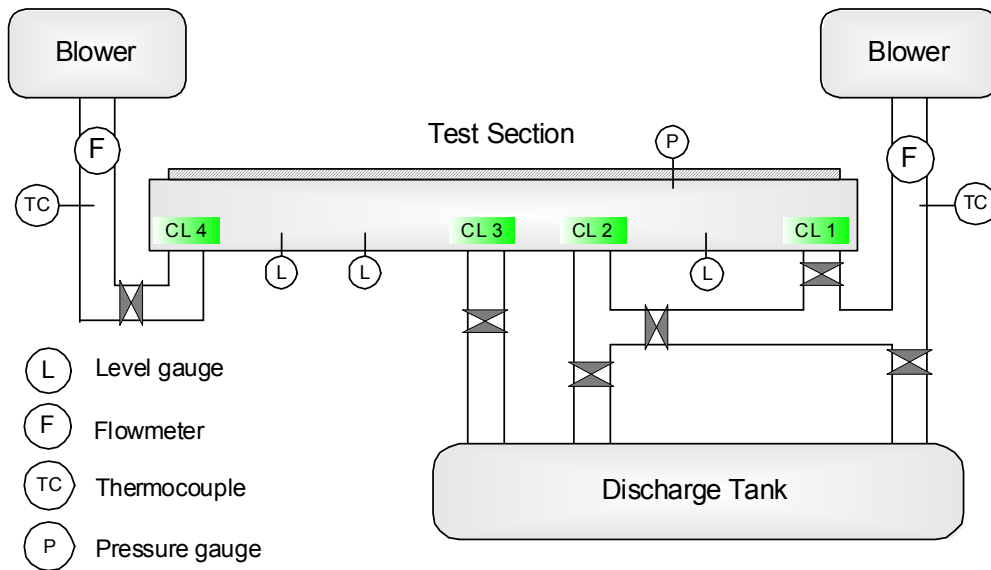


그림. 2 실험장치 구성도

### 3. 실험수행

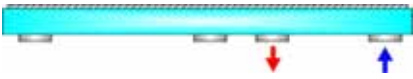
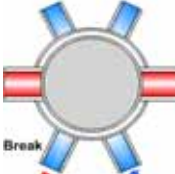
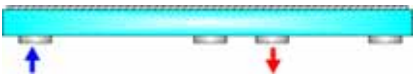
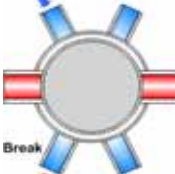
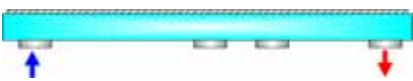
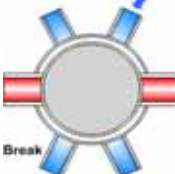
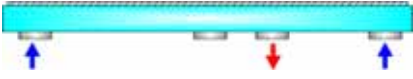
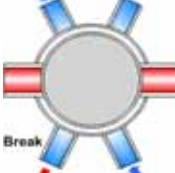
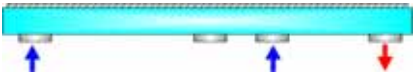
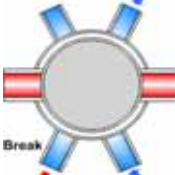
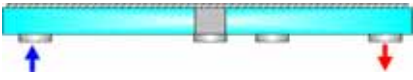
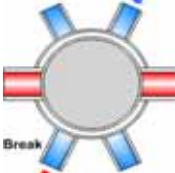
#### 3.1. 실험조건

Sweepout 발생에 대한 수력학적인 매카니즘을 고찰하고 건전 저온관으로부터 유입되는 공기유량, 건전 저온관과 파단 저온관사이의 거리, 원형의 강수부에서 발생하는 중첩 효과 및 고온관에 의한 영향에 의한 방출량 변화를 평가하기 위해서 표. 2에 제시된 조건에 대해 실험을 수행하였다.

#### 3.2. 실험절차

과도상태 실험 수행 전 각각의 실험조건에서 정상상태를 유지하였다. 주입구를 통해 각각의 실험조건에서 요구하는 공기유량이 공급되는 상태에서 Test Section 하부에 냉각재를 공급하여 Test Section의 수위 및 압력을 일정한 상태로 유지하였다. 정상상태 도달을 확인하고 100.0초 정도의 안정상태를 유지한 후 냉각재 공급을 차단하여 과도상태 실험을 수행하였다.

표. 2 실험조건

주요변수	실험조건			강수부 내 유동방향
주입구 공기속도	9.2m/s ~ 22.4m/s			-
주입구 및 파단부 구성	거리 영향	S1 (460mm)		
		S2 (920mm)		
		S3 (1380mm)		
	중첩 영향	D1		
		D2		
	고온관 영향	-		

## 4. 실험결과

### 4.1. Sweepout의 수력학적 매카니즘

Sweepout에 의한 냉각재의 방출은 크게 세 단계로 나누어져 설명된다. 첫 번째로, 주입된 공기가 강수부 벽면에 충돌하여 퍼지면서 주입구 근처의 수면에 액적 및 파동을 형성하게 된다. 두 번째 단계에서 액적 및 액막이 강수부 내 공기유동에 의해서 파단부로 전달되는 과정에서 중력에 의해 수면으로 떨어지는 양을 제외하고는 방출구까지 도달하게 된다. 마지막 단계는 방출구에서의 현상으로 설명된다. 주입구 근처에서 생성된 파동은 방출구까지 전파되고 파동의 마루가 방출구 배관 바닥보다 높이 위치하고 있으면 방출구로 빠져나가는 공기에 의해 물 덩어리(Water Slug) 형태의 방출이 발생한다. 반면 파동의 마루가 방출구 바닥보다 낮게 위치하고 있을 때에는, 가속된 공기에 의해 파동이 파쇄되면서 액적의 형태로 방출이 된다. 과도상태 후기에 수위가 낮아지면 방출구로 나가는 공기가 더 이상 물덩어리 형태의 방출을 발생시키지 못하게 되며, 입구로부터 생성 및 전달된 액적에 의해서만 방출이 발생한다.

### 4.2 주요인자 개별 영향

#### A. 공기 주입유량 효과

그림. 3과 그림. 4는 표. 2의 실험조건에 제시된 S1과 S2의 경우에 공기유량에 따른 수위 감소 결과를 나타낸 것이다. 공기유량이 클수록 냉각재의 방출이 더욱 빨리 일어나는 것을 볼 수 있다. S1의 경우 초기 50초간의 수위감소율의 평균값을 비교해 보면  $v_g=9.2\text{m/s}$  일 때와  $22.4\text{m/s}$ 일 때 각각  $0.66\text{mm/s}$ 와  $2.38\text{mm/s}$ 로 나타나고 있다. 특히 공기속도가 높을 때에는 대부분의 방출이 과도상태 초기에 발생하게 되는데, 이는 높은 유속에 의해 입구 근처에서 생성되는 액적 및 파동의 높이가 크기 때문이다.

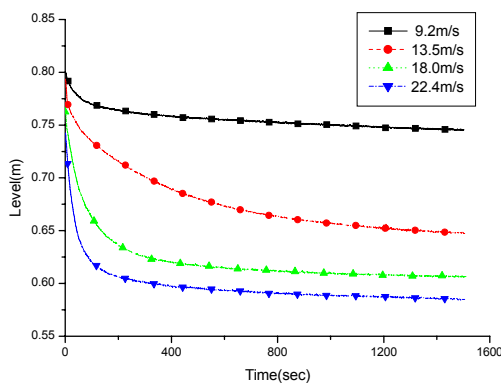


그림. 3 유량별 수위감소(S1)

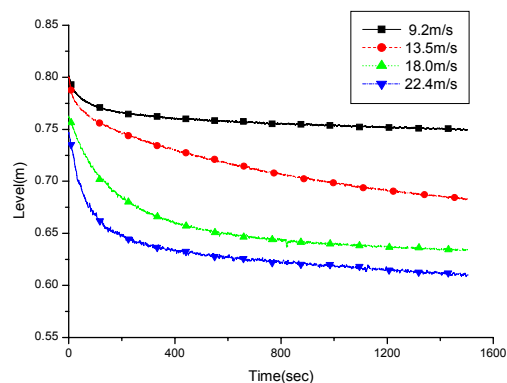


그림. 4 유량별 수위감소(S2)

### B. 주입구와 방출구 사이의 거리 효과

그림. 5와 그림. 6은 표. 2의 실험조건에 제시된 주입구와 방출구 사이의 거리영향을 평가하기 위한 S1, S2 및 S3의 실험결과를 비교하고 있다. 같은 공기유량에서 비교해 봤을때, 거리가 커지면서 Sweepout 방출량이 줄어들고 있음을 볼 수 있다.  $v_g=22.4\text{m/s}$ 인 경우 거리가 세 배가 차이가 나는 S1( $l=460\text{mm}$ )과 S3( $l=1380\text{mm}$ )인 경우를 비교해 보면, 초기 50초의 수위감소율이  $2.38\text{mm/s}$ 에서  $1.09\text{mm/s}$ 로 감소한 것을 볼 수 있다. 이는 방출구가 주입구와 멀리 위치하면서 액적들이 방출구까지 전달되지 못하고 중력에 의해 수면으로 떨어지기 때문이다.

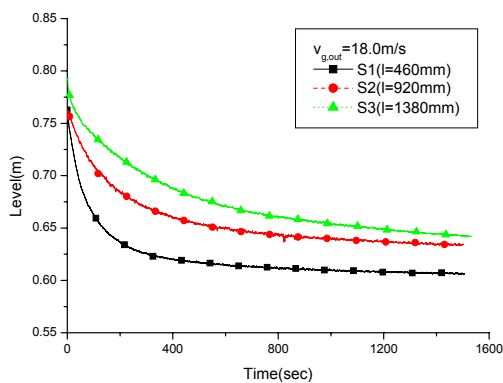


그림. 5 거리효과( $v=18.0\text{m/s}$ )

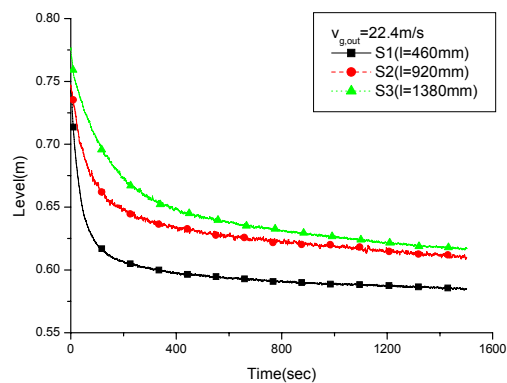


그림. 6 거리효과( $v=22.4\text{m/s}$ )

### C. 중첩 효과

그림. 7은 표. 2의 실험조건에 제시된 중첩효과를 평가하기 위해 공기가 양쪽의 주입구 (CL-1 및 CL-4)에서 주입되는 D1의 실험결과를 나타내고 있다. 이를 동일한 입구속도를 가진 S1 및 S2의 결과와 비교하였다. S1+S2는 S1과 S2의 실험결과로부터 방출량을 합산하여 계산한 결과이다. 공기가 중첩되는 경우(D1)가 그렇지 않은 경우(S1 및 S2)보다 더욱 빨리 수위가 감소하고 있으며, S1+S2의 결과보다도 더 많은 방출을 발생시키는 것을 볼 수 있다. 이는 양쪽 주입구로부터 전파되어 온 냉각재의 파동이 방출구 근처에서 중첩되어 파고가 커지게 되고, 방출구에서 공기속도가 두 배가 되면서 더 많은 액적이 견인되기 때문이다.

표. 2의 실험조건에 제시된 D2의 실험에서는 원자로 내 파단 저온관 반대편에 위치한 건진 저온관에 의한 영향을 평가하였다. 이 저온관의 경우(CL-4) 실제 강수부 내 현상과 유사하도록 방출구와 제일 가까운 주입구(CL-2) 공기유량의 1/2을 주입하였다. 이 실험결과를 CL-2에서만 공기가 주입된 S1의 경우와 비교하였다. 그림. 8에서 보듯이 과도상태 초기에는 방출구 유속이 큰 D2의 경우 다소 빠른 수위감소율을 보이지만, 이후에는 S1보다 낮은 방출량을 나타내고 있다. 이는 수위가 낮을 경우 멀리 떨어진 CL-4에서 주

입되는 공기에 의해서 CL-2에서 주입되는 공기의 유동장이 영향을 받아, 수면에 전달되는 운동량이 줄어들고 액적 생성량이 감소하기 때문이다.

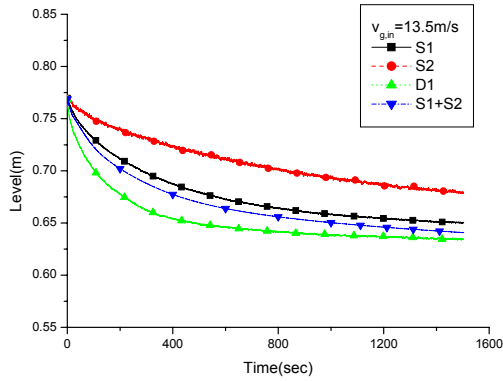


그림. 7 중첩효과 (D1)

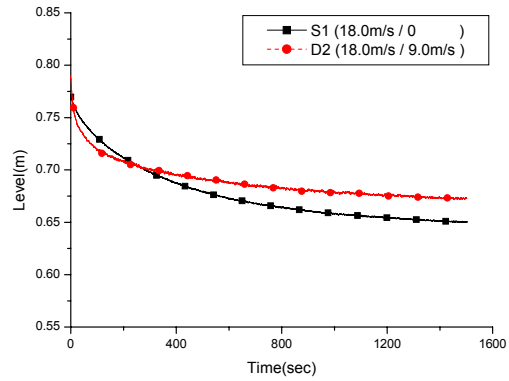


그림. 8 중첩효과 (D2)

#### D. 고온관 효과

강수부 내 건전저온관과 파단저온관 사이에 위치하고 있는 고온관의 존재유무에 따른 수위감소의 차이를 그림. 9와 그림. 10에 나타내었다. 공기유량이 높아서 수위가 낮은 상태에 있는 경우, 액적이 이동하는 경로에 고온관이 위치함으로 인해 방출량의 차이가 약간 발생하는 것을 볼 수 있으나 전반적으로 고온관의 영향은 크게 나타나지 않음을 알 수 있다.

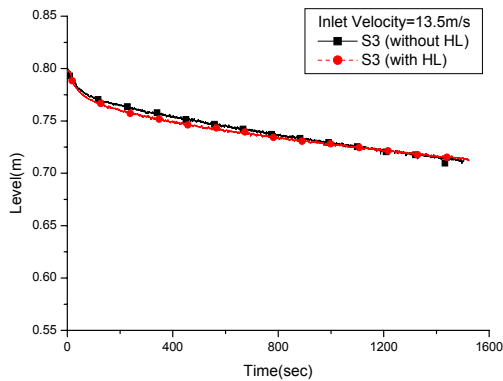


그림. 9 고온관 효과(v=13.5m/s)

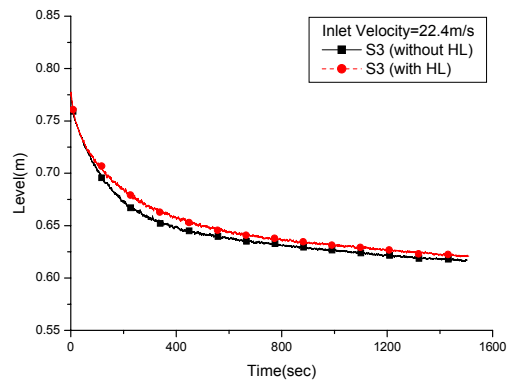


그림. 10 고온관 효과(v=22.4m/s)



### 4.3 Critical Void Height

Critical void height( $h_c$ )는 Sweepout에 의한 방출이 더 이상 발생하지 않을 때, 저온관 중심으로부터 수면까지의 거리로 정의된다. 이는 Off-take 모델[2]에서 식(1)과 같이 저온관 직경  $D$  및 Froude 수를 통해 무차원화된다.

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

여기서  $Fr_g = v_g / \sqrt{gD}$ 로서 방출구에서의 속도가 쓰이게 된다. RELAP5[3]에서 수평배관 측향분기관 방출량 계산에 쓰이는 Smoglie[4] 모델의 경우 비례상수  $A$ 는 3.22에 해당한다.

그림. 11과 그림. 12는 실험결과로부터 도출된 Critical Void Height를 식(1)의 형태로 비교한 것이다. 여기에서 보듯이 모든 실험결과에 대해서 식(1)의 형태보다는 다음과 같은 식의 경향을 알 수 있다.

$$Fr_g \left[ \frac{\rho_g}{\Delta\rho} \right]^{0.5} = A \left[ \frac{h_c}{d} \right]^{2.5} + B \quad (2)$$

여기서 계수  $B$ 는 임계 Froude 수에 해당한다. 즉 냉각재에 작용하는 중력 및 표면장력으로 인해, Sweepout을 발생시키기 위해서는 임계공기유량이 존재함을 알 수 있다.

각 실험에 대한 식(2)의 계수들이 표. 3에 정리되어 있다. 계수  $A$ 의 경우 Smoglie 모델과 10배에서 30배 정도의 차이를 보여주고 있는데, 이는 같은 공기유량에서 Critical Void Height를 낮게 예측하는 것을 의미한다. 따라서 강수부 내 Sweepout 현상을 더욱 정확하게 보수적으로 계산하기 위해 Smoglie 모델은 수정되어야 할 필요가 있다.

계수  $B$ , 즉 임계 Froude 수의 경우, 거리가 멀어질수록 증가하고 있는데, 이는 방출구가 멀리 위치할수록 Sweepout을 발생시키기 위한 공기유량이 더 커져야 함을 의미한다. 또한 공기가 중첩되어 주입되었을 경우(D1) 그렇지 않은 경우(S1~S3)에 비해  $B$  값이 더 크게 나타나고 있다. 이는 식(1)에서 언급했듯이 Froude 수는 방출구 속도를 기준으로 하고 있으므로, Sweepout을 일으킬 수 있는 입구 유량을 충족시키기 위해서는 방출구의 Froude 수가 약 두 배가 되어야 하기 때문이다.

그림. 12와 표. 3에선 KAERI의 3차원 환형 강수부 실험장치에서 수행한 결과도 포함하고 있다. KAERI의 실험장치 역시 APR1400을 1/5로 축소하였으며, 실제 강수부와 동일한 형상을 가지고 있고 사고 시와 마찬가지로 건전 저온관 세 개에서 동시에 공기가 주입되었다. 그 결과 그림. 12 및 표. 3에서 보듯이 Critical Void Height에 대한 주요 차이점이 계수  $A$ 에서 발생하였으며 그 차이는 약 세 배에 달하고 있다. 이러한 차이는 Froude 수가 주입구 유량과는 무관하게 방출구 유량만 고려하고 있기 때문에 나타나게 된다.

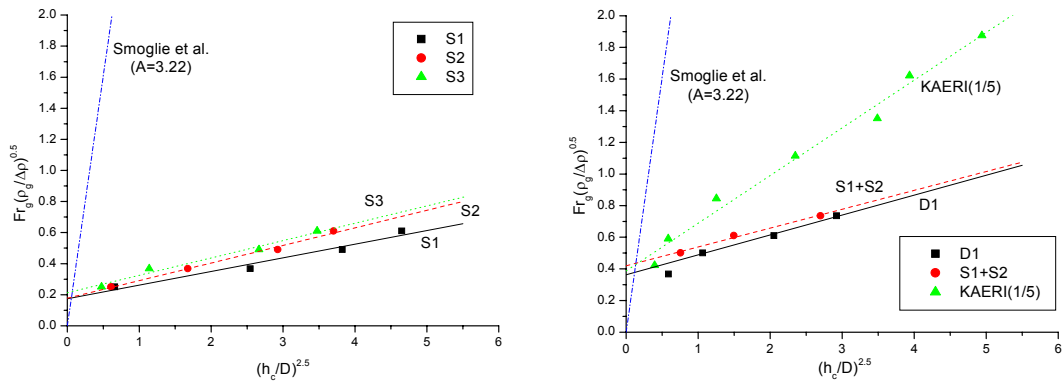


그림. 11 Critical Void Height(거리 영향) 그림. 12 Critical Void Height(중첩 영향)

표. 3 식(2)의 계수 비교

구분	형상	A	B	
Smoglie	측향분기관	3.22	0	
SNU	거리 영향 (단일주입)	S1	0.0878	0.1738
		S2	0.1132	0.1778
		S3	0.1117	0.2135
	중첩 영향 (이중 주입)	D1	0.1258	0.3629
	S1+S2	0.1191	0.4196	
KAERI	환형강수부	0.3014	0.3874	

Sweepout 현상은 주입구 유량의 크기에 크게 의존하므로 Froude 수를 주입구 속도로 계산하여 비교할 수 있다. 즉 본 연구의 중첩 영향 평가실험(D1)과 KAERI의 결과[5]를 저온관 한개에서의 속도( $v_{g,in}$ )를 사용하여 그림. 13에서와 같이 비교하였다. 그림. 12에서는 차이를 보였던 두 결과가 다음과 같은 식(3)으로 일치되는 것을 볼 수 있다.

$$Fr_g \left[ \frac{\rho_g}{\Delta\rho} \right]^{0.5} = 0.0983 \left[ \frac{h_c}{d} \right]^{2.5} + 0.1271 \quad (3)$$

또한 이러한 일치는 파단 저온관 반대편에 위치하고 있는 건전저온관이 Sweepout의 Critical Void Height에 미치는 영향이 거의 없음을 말해주고 있다. 이는 4.2-C절에서 언급했듯이, 주입된 공기가 양쪽으로 나뉘어지는 동시에 파단 저온관 가까이 있는 저온관에 의한 유동의 간섭을 받기 때문이다.

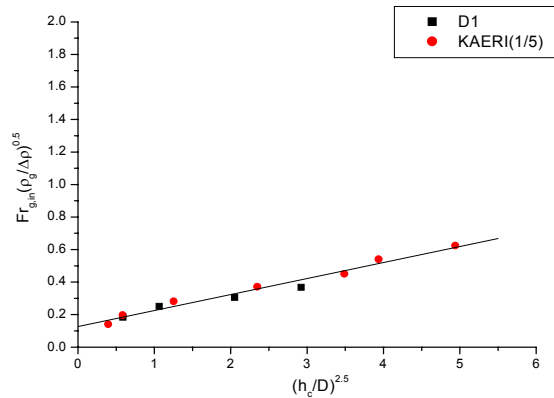


그림. 13  $Fr_{g,in}$ 을 이용한 Critical Void Height

## 5. 결론

본 연구에서는 강수부 내 발생하는 Sweepout 현상의 매카니즘 및 Critical Void Height에 대한 실험적 고찰을 수행하였다. 그 결과 Sweepout 현상은 주입구 및 방출구 효과가 복합되어 나타났다. 주입구 근처에선 공기의 운동량 전달에 의해 액적 및 파동이 생성되었으며 방출구에선 공기의 가속 및 파동의 중첩으로 인해 방출량이 증가하였다.

Sweepout 현상에 미치는 주요 인자들에 대한 평가를 수행하여, 공기유량, 주입구와 방출구 간 거리, 중첩 영향 등이 방출량에 영향을 미치는 것으로 나타났으며 고온관의 영향은 중요하지 않음이 확인되었다. 또한 Critical Void Height를 Off-take 모델과 비교해 본 결과 임계 Froude 수의 존재로 인해 상관식의 형태를 변화시켜야 할 필요성이 제기되었으며, 주입구의 속도를 사용하여 비교할 경우엔 3차원 장치의 실험결과와도 유사한 결과를 보이고 있다. 이러한 수력학적인 거동으로부터 Sweepout 현상은 주입구 근처에서 냉각재와 공기의 상호작용에 의해 지배되는 현상임을 확인하였다.

## 참고문헌

- [1] Korea Hydro & Nuclear Power Co., 2002, Standard Safety Analysis Report for Advanced Power Reactor 1400, Seoul, Korea.
- [2] "액적 동반현상의 모델링기법", 기술현황 분석보고서, KAERI/AR-450/96, 1996
- [3] U.S. NRC, 1999, RELAP5 Code Manual, Bethesda, MD, USA
- [4] C. Smoglie et al., 1987, Two phase flow through small breaks in a horizontal pipe with stratified flow, Nuclear Engineering and Design, vol. 99, pp. 117-130.
- [5] B.J. Yoon et al., 2000, Air/Water Test on Direct ECC Bypass during LBLOCA Reflood Phase of KNGR, Proceedings of KNS 2000 Spring Meeting.