’2000 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

차세대원자로 LBLOCA 재관수 기간동안 비상노심냉각수 직접우회현상에 관한 물-공기 실험

Air/Water Test on Direct ECC Bypass during LBLOCA Reflood Phase of KNGR

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

요약

차세대원자로 LBLOCA 재관수 기간동안 강수부내에서 발생하는 직접우회 현상을 체적척도법이 적용된 1/50 투명아크릴 실험장치를 통해 연구하였다. 강수부내 다차원 유동영역에 대한 정량적인 분석을 위해 sweep-out 시작(on-set of sweep-out)에 대한 실험을 수행하였고, T 자 분기관에서 액체 견인 시작점을 예측하는 모델을 이용하여 실험결과를 분석하였다. 다양한 유동조건 및 가동 DVI 노즐을 변화시키며 직접우회 실험을 수행하였다. 직접우회 실험결과, 각 DVI 노즐의 직접우회 특성을 파악할 수 있었다. 직접우회에 대한 액체주입속도의 효과를 파악하였으며, 실험결과로부터 액막확장폭이 척도해석의 주요 변수로 도출되었다. 또한, 직접우회현상을 교차유동제한(cross flow limitation)의 관점에서 분석하였고, 그 결과를 도시하였다.

Abstract

ECC direct bypass phenomena during LBLOCA reflood phase is studied experimentally in the 1/50 volume scaled visualizization test facility, which simulates the KNGR. To analyze the multi-dimensional phenomena in the downcomer, the separated sweep out test is carried out and the void height is correlated using the on-set of entrainment model of T junction. And, the ECC direct bypass test is also performed in the various flow conditions and changed DVI elevations. In the test results, the characteristics of each DVI nozzle and the effect of ECC injection velocity to the ECC direct bypass are quantified. From the results, it is founded that the width of falling water film is one of the most important parameter in the ECC direct bypass. The ECC direct bypass is analyzed in the point of air/water cross flow limitation .

1. 서 론

한국형 차세대원자로(KNGR)는 저온관 중심선으로부터 상단 2.1m 지점에 위치한 4개의 노즐을 통해 강수부 내로 안전주입수를 직접 주입하는 원자로용기 직접주입방식(DVI)을 채택하고 있다. 이로 인해 대형 냉각재상실사고(LBLOCA)시 강수부 내에서 발생하는 열수력 현상이 기존의 저온관 주입방식과 크게 다를 것이라 예상된다[1]. 따라서 저온관 주입방식을 중심으로 개발된 열수력 안전해석 코드들이 DVI 방식 채택 시, 원자로 계통 내에서 발생하는 현상을 예측할 수 있는지에 대한 검토가 요구되며, 이에 DVI 방식의 성능을 평가하고 KNGR의 안전성에 대한 검증을 위해 LOCA 시 강수부(downcomer) 내부에서의 열수력 현상에 대한 실험 연구가 필요하게 되었다[2].

UPTF Test 21-D의 실험결과에 의하면 LBLOCA 재관수 동안 DVI 방식 원자로에서는 그림 1.과 같이 직접우회(direct bypass)와 sweep-out의 안전주입수 우회메커니즘이 나타나며, 그 중 안전주입수 우회의 주요 메커니즘은 직접우회로 보고되었다[3]. 직접우회는 기존의 저온관 방식의 원자로에서는 나타나지 않는 열수력 현상으로, 수직,하강하는 액막과 횡방향으로 이동하는 증기간의 상호작용에 의해 야기된다. 직접 우회를 발생시키는 증기의 jet impingement는 액막파열을 일으켜 강수부내 직접접촉응축을 증가시키며, 이는 안전주입수의 과냉각도를 감소시킨다. 또한 직접우회량의 크기에 따라 강수부 하부에 형성되는 액주의 높이가 달라지게 되고, 이에 따라 재관수 현상이 달라질 수 있다[4].

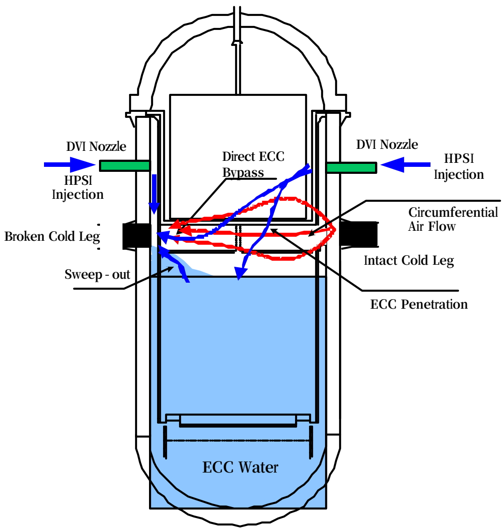


그림 1. 재관수 기간동안 안전주입수 우회 메커니즘

한편, 직접우회 시 수력현상에 대한 연구가 UPTF와 KNGR 강수부에 대해 각각 수행되었는데, 수력현상 관측 결과에 의하면 UPTF 강수부와 KNGR 강수부에서 서로 다른 수력현상이 관측되었다[5],[6]. 이는 강수부 상부유로 면적과 DVI 노즐 높이등 기하학적 형상에 기인한 것이며, 이와 같은 수력현상의 차이로 UPTF 직접우회 실험결과를 KNGR에 직접 적용함에 어려움이 있다.

따라서, LBLOCA 재관수 동안 KNGR 강수부 내의 직접우회 및 열수력 현상을 파악하고 KNGR의 안전성 평가를 위한 안전해석 수행시의 기초자료를 제공하고자 1/24.3 증기-물 실험을 계획하고 있다. 이의 예비실험으로 유동가시화를 통한 강수부 내 수력현상을 파악하고, 직접우회 및 sweep-out의 특성을 파악하기 위해 1/50 체적비 또는 1/7 선형비를 갖는 공기-물 실험장치를 구축하였으며, 표 1.과 같은 개별효과실험을 구성하였다. 본 연구에서는 1/50 체적비로 축소된 KNGR 강수부에서 직접우회에 대한 개별효과 실험을 수행하였다. 각 DVI 노즐에서 주입되는 안전주입수의 거동을 분석하고자 하였으며, 교차유동(cross flow)의 특성을 파악하고자 하였다. 또한 저온관 노즐 높이에서 형성되는 다차원 유동영역의 크기에 대한 정량적인 정보를 제공하기 위해, sweep-out 시작점을 측정하는 실험을 수행하였다.

작동 유체로 공기-물을 사용함으로써 실제 원자로에서 발생될 증기/물 간의 직접 접촉 응축현상이 배제 되었으나, 이러한 실험 결과의 분석을 통하여 차세대원자로에서 발생될 직접우회의 특성 및 모델 개발의 기반이 될 것으로 기대된다.

표 1. DVI Air-Water 예비 실험 Test Matrix

실험목적	시험대 형상		비고
Onset of Sweep-out Test	KNGR		
	UPTF		
Sweep-out Separate Effects Test	KNGR		
	UPTF		
실험목적	강수부	척도해석 방법론	비고
Direct ECC Bypass Test	KNGR	1/50 Volume Scaling	체적척도법 적용 Full height
		1/7 Linear Scaling	선형척도법 적용 Reduced height
	UPTF	1/43.5 Volume Scaling	
		1/7.47 Linear Scaling Closed Downcomer	상부유로 제한 원형 UPTF 강수부와 동일
		1/7.47 Linear Scaling Open Downcomer	상부유로 개방

2. 실험장치

재관수 동안 KNGR 강수부 내에서 나타나는 수력현상을 실험적으로 모사하기 위해 그림 2.와 같은 실험 장치를 제작하였다. 실험장치의 시험대(test section)는 체적척도법을 적용하여 DVI 노즐과 저온관까지의 거리가 2.108m 로 원형과 동일하며, 저온관 하단 1.3m 와 DVI 노즐 상단 0.6m 를 모사하였다. 본 실험은 재관수 동안 강수부내의 직접우회에 대한 개별효과실험을 목적으로 하기 때문에, 시험대는 강수부만을 모의하였고 노심은 모사하지 않았다. 따라서 고온관은 유동의 장애물로써, 강수부내에 설치되었다. 실험장치 주요 계통과 주요 시험부의 형상을 각각 그림 2.-(a)와 그림 2.-(b)에 각각 도시하였고, 시험부 주요 치수 및 척도비는 표 2.에 요약하였다.

시험대에는 4 개의 저온관과 2 개의 고온관 그리고 4 개의 DVI 노즐이 부착되어 있으며, 노즐의 배열 각도는 KNGR 과 동일하다. 4개 중 한 개의 저온관은 LBLOCA 시의 파단 저온관을 모사하고 있으며, 시험대 하부 배수관에는 자동제어밸브를 설치하여 강수부 내부의 수위를 제어하게 된다. LBLOCA 재관수동안 노심에서 생성된 증기가 증기발생기와 건전 저온관을 통해 강수부로 유입되는 상황을 모사하기 위해 3 대의 블로워(roots blower)가 설치되었고, 고압주입펌프(HPSI)에 의해 주입되는 안전주입수를 모사하기 위해 4 대의 수직 펌프가 설치되었다. 최대 주입유량은 각각 895㎥/hr 와 10.5㎥/hr 이다.

네 개의 저온관 중 송풍기와 연결되지 않은 하나의 저온관은 LBLOCA 시 파단 저온관을 모사하도록 하였다. 파단부를 통해 우회하는 이상유체는 물/공기 분리기(separator)로 유입되며, 이때 무거운 물은 하부 출구로, 가벼운 공기는 상부 출구를 통해 대기로 방출된다. 파단부로 방출되는 안전주입수는 물/공기 분리기의 하부출구를 통해 우회 안전주입수 수집탱크에 저장되어 안전주입수 우회량 측정에 사용된다. 수집탱크는 높이 6m, 직경 0.5m 의 원통형 탱크로 상,하단에 압력탭이 설치되어 차압계를 통하여 수집탱크 내의 수위를 측정하게 된다.

표 2. KNGR 강수부와 물-공기 실험장치의 주요 치수 및 척도 비

Parameter	KNGR	Air-water Test	치수 척도비
Downcomer Outer Diameter (m)	4.623	0.582	1/7.07
Downcomer inner Diameter (m)	4.115	0.654	1/7.07
Downcomer Gap Size (m)	0.254	0.036	1/7.07
Cold Leg Diameter (m)	0.762	0.108	1/7.07
Hot Leg Diameter (m)	1.067	0.160	1/7.07
DVI Nozzle Diameter (m)	0.216	0.031	1/7.07
DVI Nozzle Elevation (m)	2.108	2.108	1/1

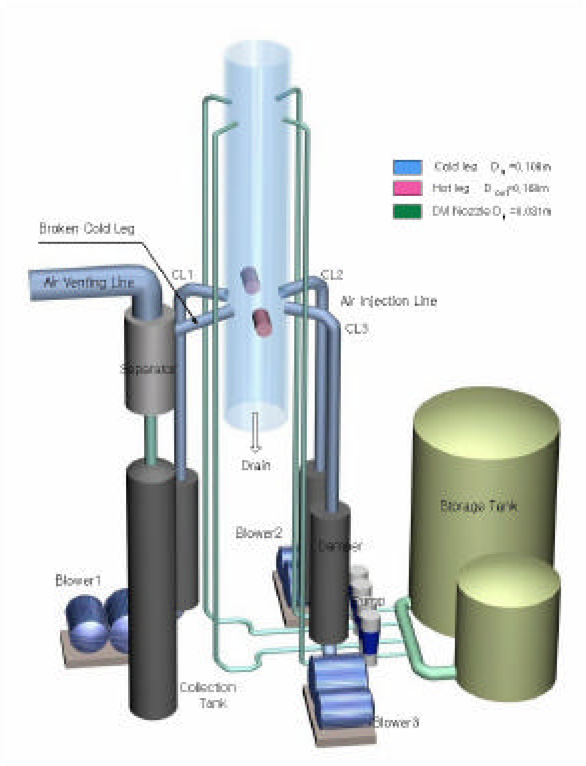


그림 2.-(a) KNGR 공기-물 실험장치 개략도

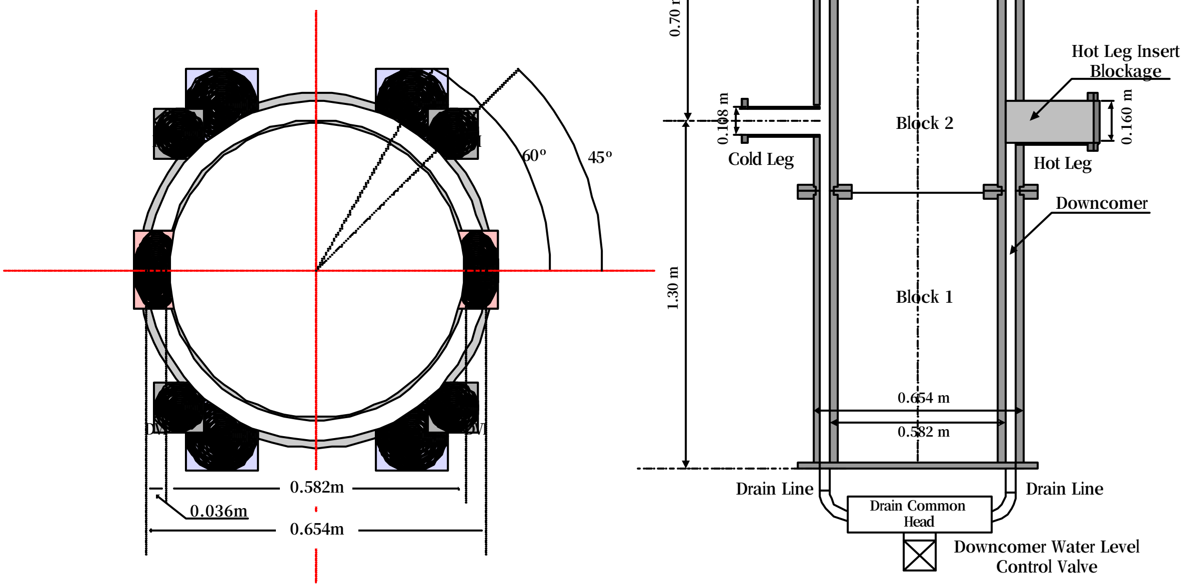


그림 2.-(b) UPTF 공기-물 실험장치 시험대 상세도

실험조건은 액체의 경우 DVI 노즐 당 0 ~ 1.6 kg/s 이며, 기체의 경우 저온관 노즐당 0 ~ 0.4 kg/s 이다. 파단부 압력은 대기압으로 유지되며, 시스템 압력은 실험 조건에 따라 1~1.7 bar 로 다양하게 나타난다. 직접우회 특성을 얻기 위해 기체 주입 유량, 액체 주입유량, 기체 밀도, 파단부 우회 액체 질량이 측정되었다. 기체 주입 질량은 와 유량계(vortex flow meter)를 통하여 측정하며, 액체 주입유량은 터빈 유량계(turbine flow meter)를 이용하여 측정하였다. 기체의 밀도를 측정하기 위해 공기가 주입되는 저온관과 강수부 상단에서 각각 압력과 온도를 측정하였다.

개별 효과 실험의 주요 실험변수는 가동 DVI 노즐, 액체 주입유량 그리고 기체 주입유량이며, 가동 DVI 노즐 및 액체 주입유량을 고정시킨 뒤, 저온관에서 주입되는 공기유량을 점차 증가시키며 직접우회율을 측정하였다. 실험시작 후 약 60~120 초 후에 실험조건이 정상상태에 도달하게 되고, 이후로 모든 측정 실험결과는 PC-base data acquisition system 에 저장되어, 분석에 이용되었다. 한편, 실험의 측정오차는 표 3 에 요약하였다.

표 3. 실헙장치내 측정 변수, 측정 위치 및 측정 오차

Instrumentation Type	Location	Uncertainty(of Reading)
Air Flow Rate(kg/s)	Cold Leg	1.1 %
Water Flow Rate(kg/s)	DVI	0.3 %
Break Flow(kg/s)	Collection Tank	3%(more than 1.0 kg/s) 8%(less than 1.0 kg/s)
Differential Pressure(Pa)	Downcomer	0.2 %
Absolute Pressure(Pa)	Downcomer, Cold Leg	0.2 %
Temperature(°C)	Cold Leg, DVI	1.0 °C
Water Level	Downcomer	0.2 %

3. On-set of Sweep-out 실험결과

KNGR 강수부에서의 수력현상 관측결과, 저온관 노즐 높이에서 강수부 벽면을 타고 하강하는 액막 및 액적 형태의 안전주입수는 저온관을 통해 유입되는 고속의 기체와 상호작용을 일으키며 다차원적인 수력거동을 보이게 된다. 이때, 다차원 유동영역의 분포는 파단부 방향으로 유출되는 증기의 속도에 의해 크게 영향을 받을 것으로 판단된다. 한편, 본 연구에서는 UPTF Test 21-D 의 비교 실험으로 수행된 공기-물 실험결과[6]와 직접우회에 대한 척도해석을 통해[7] 도출된 무차원 원주방향 기체속도를 주요 척도해석 변수로 가정하여 실험을 수행하였다. 이때, 무차원 원주방향 기체속도는 식(1)과 같이 정의되었으며, 실험장치에서의 공기주입속도는 식(1)에 의해 결정되었다.

$$j^*_{g,eff} = \frac{\dot{M}_{g,eff}}{\rho_g \cdot A_{Flow}} \left[\frac{\rho_g}{(\rho_l - \rho_g) \cdot g \cdot D_{CL}} \right]^{1/2} \qquad (1)$$

여기서,

D_{CL} : 저온관 직경 (m)

A_{Flow}: 원주방향 강수부 유로 (m^2) (강수부 Gap × 저온관 직경)

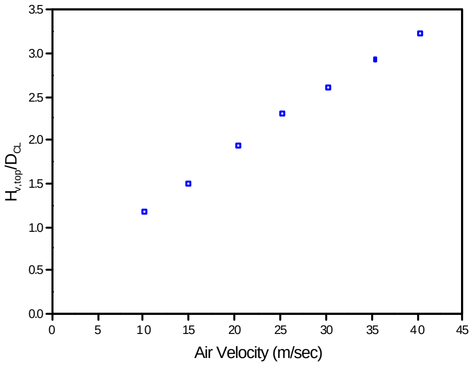
ρ_k : 기체 및 액체 밀도 (kg/m^3) ($k = g$ or l)

다차원 유동영역의 크기는 액막의 거동에 영향을 줄 수 있는 국부 속도를 갖는 지점에서 결정되기 때문에, 본 연구에서는 entrainment 가 시작 되는 기체의 속도에서 sweep-out 이 발생된다고 정의하여 이를 다차원 유동영역의 경계 속도로 간주하였다. 이러한 경계면을 알아 내기 위하여 강수부의 저온관 하단 영역을 물로 가득 채운 뒤, 저온관을 통해 공기를 주입한 후 entrainment 가 발생하는 영역을 실험으로 측정하였다. 실험에 의하면 공기 주입과 동시에 강수부 수면에서 많은 양의 안전주입수가 파단부로 우회하며, 강수부 수위가 감소한다. 실험이 진행되어 정상상태에 이르면, 더 이상 강수부 수위가 감소하지 않고 sweep-out 이 나타나지 않게 되며, 이 때의 강수부 수위를 sweep-out 시작점으로 간주하였다. 공기주입속도에 따른 sweep-out 시작점을 식 (2)과 같이 정의되는 무차원 void height 의 형태로 그림 3.에 나타내었다.

$$H^*_v = \frac{H_v}{D_{CL}} \qquad (2)$$

여기서,

H_v : Void height, 저온관 하단에서 강수부 수면까지의 거리 (m)



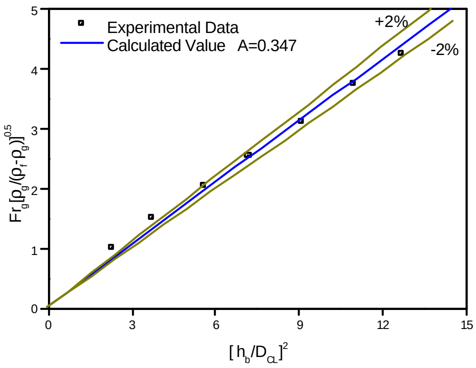


그림 3. 공기 속도에 따른 top void gap　**그림 4. On-set of Sweep-out 상관식**

그림 3.과 같이, 기체주입속도가 증가함에 따라 무차원 void height 이 선형적으로 증가하는 것을 볼 수 있다. 이러한 실험결과를 기존의 SBLOCA 시의 T-junction entrainment 모델을 통해 분석하고자 하였다. Sweep-out 시작점을 예측하기 위한 연구는 주로 SBLOCA 시 가압기 밀림관에서 나타나는 현상의 파악에 적용되었다. LBLOCA 와는 달리 수평 배관에서 SBLOCA 가 발생했을 경우 계통의 감압이 느리기 때문에 성층화 유동을 형성하게 된다. 이때 파단부가 관의 측면부 또는 상부인 경우 기상과 액상의 계면 전단력에 의해 액상의 일부가 견인되어 파단부로 방출되는, 재관수 동안 sweep-out 과 유사한 현상이 나타난다. 이와 관련된 연구 결과를 표 4.에 요약하였다[8].

T 자 분기관에서 수행된 sweep-out 모델 중, Crowley and Rothe 모델을 적용하여 실험결과를 분석하였으며, 그 결과는 그림 4.와 같다. 이를 바탕으로 식 (3)과 같이 KNGR 강수부에서 sweep-out 시작점을 예측할 수 있는 모델을 개발하였다.

$$Fr\left[\frac{\rho_g}{\Delta\rho}\right]^{0.5} = 0.347\left[\frac{h_b}{D_{CL}}\right]^2 \qquad (3)$$

여기서, $Fr = \dfrac{\dot{m}_g}{\rho_g A_g \sqrt{D_{CL}\, g}}$: Froude Number

h_b : 저온관 중심선에서 강수부 수면까지의 거리 (m)

본 실험을 통해 개발된 sweep-out 시작점 모델을 이용하여, KNGR 강수부 원형과 면적비 a_R 로 체적 축소된 모형에 대해 척도 해석을 수행하였고 그 결과는 식(4)와 같다.

$$\frac{H^*_{v,top,m}}{H^*_{v,top,p}} = \left(\frac{1}{a_R}\right)^{1/8}\left(\frac{v_m}{v_p}\right)^{1/2} \qquad (4)$$

여기서, 액상과 기상의 밀도는 실험조건에서 동일하다고 가정하였다.

표 4. Entrainment 시작점에 관한 실험 연구 결과[8]

AUTHOR	CORRELATION	파단 위치
Craya	$h_b = K_l \left[\frac{r_g Q^2}{g \Delta r} \right]^{0.2}$	측면 파단
Rouse	$Fr_g \left[\frac{r_g}{\Delta r} \right]^{0.5} = 5.67 \left[\frac{h_b}{d} \right]^2$	측면 파단
Crowley & Rothe [13]	$Fr_g \left[\frac{r_g}{\Delta r} \right]^{0.5} = 3.25 \left[\frac{h_b}{d} \right]^2$	측면 파단
Smogile 등	$Fr_g \left[\frac{r_g}{\Delta r} \right]^{0.5} = 0.35 \left[\frac{h_b}{d} \right]^2$	상부 파단
	$Fr_g \left[\frac{r_g}{\Delta r} \right]^{0.5} = 3.22 \left[\frac{h_b}{d} \right]^2$	측면 파단
Schrock 등	$Fr_g \left[\frac{r_g}{\Delta r} \right]^{0.5} = 0.395 \left[\frac{h_b}{d} \right]^{2.5}$	상부 파단
	$Fr_g \left[\frac{r_g}{\Delta r} \right]^{0.5} = 3.25 \left[\frac{h_b}{d} \right]^{2.5}$	측면 파단

Sweep-out 시작점에 대한 국부척도해석 결과, 원형과 모형에서 동일한 무차원 void height 을 갖기 위해서는 실험장치에서 $a_R^{1/4}$ 로 축소된 기체주입속도가 유지되어야 함을 알 수 있다. 한편, 직접우회의 주요 변수인 무차원 원주방향 기체속도는 원형과 모형에서 식(5)와 같은 관계를 갖는다. 무차원 기체주입속도를 원형과 모형에서 보존할 경우 실험장치에서 $a_R^{1/4}$ 로 축소된 기체주입속도가 유지되어야 하며, 이는 sweep-out 시작점에 대한 척도해석 결과와 동일하다. 즉, 직접우회에 대한 척도해석을 수행하여 실험장치의 유동 조건을 결정할 경우에도 다차원 유동영역의 크기는 원형과 모형에서 상사성을 유지함을 의미한다.

$$\frac{j^*_{g,eff,m}}{j^*_{g,eff,p}} = \left(\frac{1}{a_R} \right)^{1/4} \left(\frac{v_{g,m}}{v_{g,p}} \right) \qquad (5)$$

4. 직접우회 개별효과 실험결과

DVI 시스템 내에서 LBLOCA 재관수 동안 강수부 내에 나타나는 직접우회특성을 파악하기 위해, 1/50 체적척도비를 갖는 KNGR 강수부 모델에서 개별효과 실험을 수행하였다. 실험 변수는 기체주입속도, 액체주입속도 그리고 가동 DVI 노즐이다.

안전주입수의 주입속도를 2.2m/s 로 고정시킨 뒤 안전주입수를 특정 DVI 노즐로만 주입하여, 각 DVI 노즐에서 주입된 안전주입수의 우회율을 측정하였다. 이러한 개별효과 실험을 통하여 각 DVI 노즐을 통해 유입된 안전주입수의 직접우회 특성을 분석하고자 하였다. 여기서 저온관 및 고온관 그리고 DVI 노즐의 상대적 배열은 그림 5.와 같으며, 실험결과는 그림 6.에 나타내었다.

실험 결과에 의하면 기체 속도가 증가할수록 안전주입수의 우회가 증가하는 것을 볼 수 있고, DVI-1 노즐 주입 경우를 제외하고는 파단 저온관과의 거리가 가까울수록 안전주입수 우회량이 증가하는 것으로 나타나 있다. DVI-1 노즐 주입의 경우, 그 위치의 기하학적 특이성에 의해 다른 DVI 노즐에서의 결과와는 상이한 결과가 나타나고 있다.

KNGR 강수부에서의 수력현상 관측결과에 의하면 DVI-1 노즐의 위치는 최대 하강 영역이 존재하는 지역으로[6], DVI-1 노즐에서 주입된 후 파단부와 반대 방향으로 퍼져나가는 안전주입수의 대부분이 비교적 높은 기체 속도 영역에서도 우회하지 않고 하강하는 것을 관측할 수 있었다. 즉 $j^*_{g,eff}$ 가 4.0 이상인 영역에 이르면 파단부 방향으로 향한 안전주입수는 거의 모두 우회하고 파단부와 반대 방향으로 퍼져나가는 안전주입수는 거의 대부분이 하강하므로, 기체주입속도가 증가하더라도 파단부로의 우회율이 50%정도로 일정하게 나타나는 것이다.

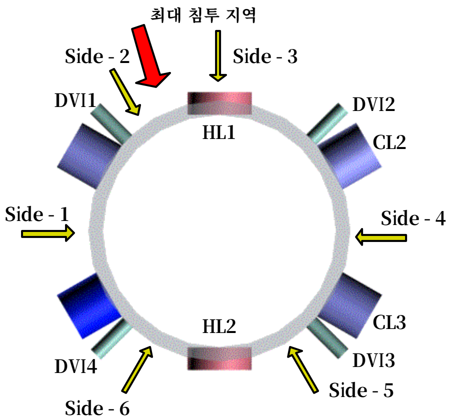


그림 5. 각 노즐의 위치 및 배열

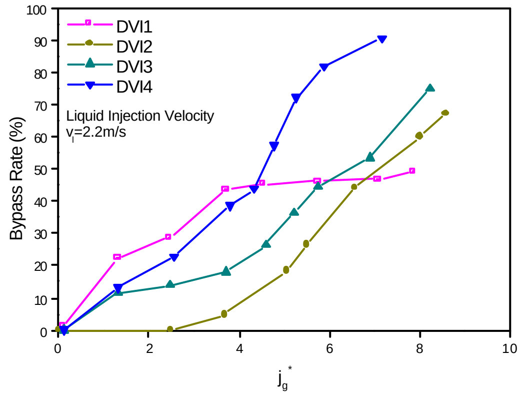


그림 6. 액체 주입 위치에 따른 우회율

한편 $j^*_{g,eff}$ 가 4.0 이하인 영역에서 DVI-1 의 직접우회율이 파단부와 가장 가까운 DVI-4 노즐 주입시 보다 더 크게 나타나고 있다. 이와 같은 현상은 아래와 같이 액막이 퍼져나가는 방향의 차이로 설명된다. DVI-4 주입의 경우 안전주입수가 강수부 내벽과 충돌한 뒤 파단부와 멀어지는 방향으로 확장되는 반면, DVI-1 주입의 경우 액막이 파단부 쪽을 향하여 확장된다. 따라서 DVI-1 주입의 경우, 저온관-1 과 파단저온관 사이에 형성되는 고속의 공기 유동장과 동일한 방향으로 두꺼운 액막층이 확장되는 반면, DVI-4 노즐 주입의 경우 그와 반대방향으로 액막층이 확장되기 때문에 상대적으로 DVI-1 주입 시 더 많은 직접우회가 나타나게 된다. 이와 같은 결과는 기체 속도가 증가하여 파단부로부터 멀어진 안전주입수가 기체유동에 끌려 우회하기 시작할 때 까지 계속된다. 하지만 이러한 결과는 액막확장폭과 공기막의 위치 등 기하학적 요건에 큰 영향을 받을 것이라 예측되며, 보다 다양한 액체주입조건의 실험이 수행되어야 할 것으로 판단된다.

DVI-3 주입의 경우 파단부로 액막이 향한다 할지라도 저온관-1 과 파단저온관 사이 영역같이 매우 빠른 공기 유동을 형성하는 지역이 존재하지 않고, 또한 고온관-2 의 장애물 효과에 의해 안전주입수 우회는 DVI-1 주입과 DVI-4 주입시 보다 상대적으로 작게 나타나고 있다.

또한, 기체 속도가 높은 영역에서 파단부와 가장 멀리 떨어져 있는 DVI-2 주입의 경우가 DVI-1 주입의 경우보다 더 많은 우회가 나타나게 된다. DVI-1 주입의 경우, 최대하강지역인 저온관-1 과 고온관-1 사이의 영역에 액막의 형태로 안전주입수가 하강한다. 따라서 다차원유동영역 내로 액막이 하강하였을 때, 경계면의 면적이 작기 때문에 기상으로부터의 운동량전달이 원활히 이루어지지 않으며, 저온관-1 에서 주입된 공기막의 장애물 효과에 의해 강수부 하부로 하강한다. 반면 DVI-2 주입 시, 저온관-2 와 저온관-3 에서 주입된 공기의 jet impingement 로 액막파열이 발생하고, 액상으로의 운동량 전달이 크게 증가한다. 따라서 최대하강지역에 안전주입수가 이르렀을 때 파단부 방향으로 충분히 가속되어 있고, 그로 인해 공기막에 의한 장애물을 극복하고 파단부로 우회하게 된다. 따라서 높은 기체속도 조건에서 DVI-2 주입 시의 직접우회가 DVI-1 주입 보다 상대적으로 크게 나타난다.

결과에 의하면 저온관-1 과 고온관-1 사이에 나타나는 최대 하강 지역의 존재 그리고 고온관의 장애물 효과 등에 의해 노즐별로 크게 상이한 안전주입수 우회가 발생하며, 특히 파단부와 가장 근접한 DVI 노즐과 가장 멀리 있는 DVI 노즐의 경우 우회율에 있어서 큰 차이를 보이는 것을 알 수 있다.

액체의 유량을 1.0m/s, 1.6m/s 그리고 2.2m/s 로 변화시키며, 기체주입속도에 따른 안전주입수 우회량을 측정하는 실험을 수행하였으며 그 결과는 그림 7.에 나타내었다. 가동 DVI 노즐로는 원자력 발전소 인허가 시 사용되어지는 단일고장사고(single failure)를 가정하여 파단부와 가장 가까운 DVI-4 노즐과 파단부와 가장 멀리 위치한 DVI-2 노즐을 사용하였고, 각 각 한 곳으로 안전주입수가 주입될 때와 두 곳 모두 주입될 때에 대해 실험을 수행하였다.

DVI-2 주입의 경우 액체 주입 속도가 증가할수록 안전주입수 우회량이 증가하는 경향이 나타나는 반면, DVI-4 주입의 경우 액체 주입 속도가 증가할수록 안전주입수 우회량이 감소하는 것을 볼 수 있다. 이는 액막이 강수부 내벽과 충돌 후 퍼져나가는 방향과 밀접한 관계가 있다. 즉 DVI-2 주입 시 액체 주입 속도가 증가할수록 액막이 퍼지는 정도가 커지게 되어 파단부와 가까운 방향으로 접근하게 되고, 따라서 안전주입수의 우회가 증가하게 된다. 반면 DVI-4 주입 시 액체 주입 속도가 증가할수록 액막의 퍼지는 정도가 커지고 파단부 멀어지게 되어, 안전주입수의 우회는 감소된다. DVI-4 주입의 경우 기체 속도가 증가하여 j_g^*가 5.0 정도에 이르면 파단부로 대부분의 안전주입수가 우회되기 때문에 액막이 퍼지는 정도에 관계없이 직접우회율이 일정하게 나타남을 확인할 수 있다.

한편 DVI-2&4 노즐 주입시 기체 주입 속도가 작은 경우, 안전주입수 우회가 파단부와 근접한 DVI-4 노즐로부터 이루어진다. 따라서 DVI-4 노즐 주입시의 경향과 동일하게, 액체주입속도가 낮은 경우에 안전주입수의 우회가 더 크게 나타난다. 기체 속도가 점차 증가하여 DVI-2 노즐로부터의 우회가 일어나기 시작하면, 이와 같은 경향은 역전된다. DVI-4 노즐에서의 우회는 액체 주입 속도에 관계없이 일정한 반면, DVI-2 노즐에서의 우회는 액체 주입 속도 감소에 따라 크게 감소하여 결과적으로 액체 주입 속도가 작을수록 전체 안전주입수 우회량이 작아지는 것을 볼 수 있다.

실험 결과에 의하면 강수부 내부 기하학적 형상의 비대칭성에 의해 액체 주입 속도, 액막이 확장 정도가 직접우회율에 중요하게 작용하고 있으며, 이러한 관점에서 강수부 내벽과 충돌 뒤 액막의 확장폭이 주요 척도 해석 변수가 될 것이라 판단된다. 즉, 원형에서의 곡률이 실험장치에서의 곡률보다 작고 full height를 채택하였기 때문에, 본 실험 장치에서 나타나는 액막 확장 폭이 상대적으로 증가하게 된다. 이러한 이유로 KNGR 원형과 비교했을 때, 실험 장치에서 DVI-2&4 노즐 주입 시, 속도가 작은 영역에서는 더 작은 안전주입수 우회가, 속도가 큰 영역에서는 더 많은 안전주입수 우회가 나타났을 것이라 판단된다.

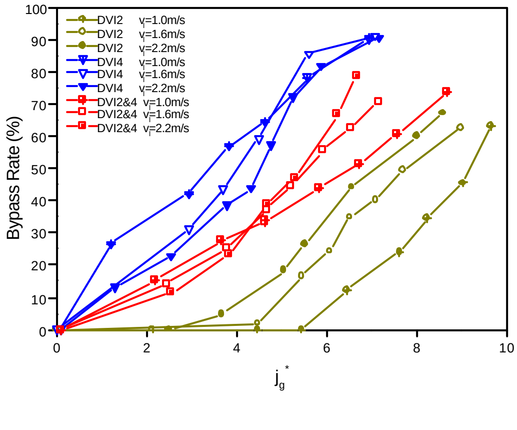


그림 7. 액체 주입 속도에 따른 우회율

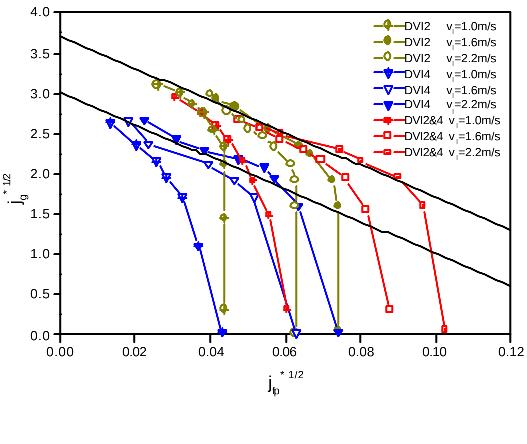


그림 8. 직접 우회 현상의 최대 우회 특성

LBLOCA 후기 재관수 동안 나타나는 안전주입수의 직접 우회는 서로 수직으로 교차하는 기체와 액체에 의해 나타나는 우회현상으로, 재충수 기간 동안 나타나게 되는 플러딩(flooding)과는 상이한 현상이다. 하지만 고속의 기체에 의해, 하강하는 안전주입수의 유량에 제한이 생긴다는 점에서 그 의미가 유사하며, 공학적 적용의 편의를 위해 기존에 많은 연구가 이루어졌던 플러딩에 대한 해석 방법을 재관수 동안의 직접 우회 현상에 적용하였다.

그림 8.은 실험 결과를 Wallis parameter로 도시한 것으로서, 이때 여기서 $j^*_{l,p}$의 정의는 식(6)과 같다.

$$j^*_{l,p} = \frac{\dot{M}_{l,p}}{\rho_l \cdot A_{DC}} \left[\frac{\rho_l}{(\rho_l - \rho_g) \cdot g \cdot D_{Gap}} \right]^{1/2} \quad (6)$$

여기서,

D_{Gap} : 강수부 간극 (m)

A_{DC} : 강수부 유로 면적 (m^2) (강수부 Gap × 저온관 직경)

$\dot{M}_{l,p}$: 하강 액체 질량유속 (kg/m)

그림 8.에서와 같이 DVI-2 주입과 DVI-2&4 주입의 경우 각각의 결과가 기체 속도가 증가함에 따라 하나의 직선으로 수렴해감을 볼 수 있다. 이는 강수부 내로 주입되는 안전주입수의 양이 증가 하더라도, 횡방향 기체유동을 극복하고 하강할 수 있는 액체의 양은 기체 속도에 의해 제한을 받게 됨을 의미하며, 이러한 현상은 플러딩과 개념적으로 유사하다. 한편, DVI-2&4 주입의 경우 기체 속도가 어느 정도 이상 증가하면, DVI-4 노즐로 주입된 안전주입수의 대부분이 파단부로 우회하므로 DVI-2 주입의 경우와 유사한 직접우회 특성을 갖게 된다. 한편 DVI-4 주입의 직접우회 특성은 그림 8. 과같이 DVI-2 주입의 경우보다 낮은 영역에서 나타나며, 이는 하강하는 액체 유량에 더 많은 제한을 받고 있음을 의미한다.

실험 결과 나타나고 있는 교차유동에서의 우회특성은 직접우회에 의한 안전주입수 우회량을 예측하기에 용이한 개념이지만, 액막확장폭 및 노즐의 위치 등 여러 변수에 크게 의존하는 현상이라 판단되며, 이에 대한 보완 연구가 차후 수행되어야 할 것이다.

5. 결 론

KNGR 강수부를 모사한 1/50 면적비를 가지는 실험 장치에서 공기-물의 이상 유체를 이용, LBLOCA 재관수 동안 강수부 내에서 나타나는 직접우회현상에 대한 개별효과실험을 수행하였고, 실험결과를 강수부 내 수력현상을 이용하여 설명하였다. 본 연구의 결론은 다음과 같다.

- Sweep-out 시작점을 예측하는 모델을 제시했으며, 그 결과를 이용, 다차원유동영역의 크기에 대한 척도해석을 수행하였다.
- DVI 노즐별로 수행된 실험결과, DVI-1 주입시를 제외하고는 파단저온관과의 거리가 가까울수록 더 많은 직접우회가 발생한다.
- DVI-1 노즐은 그 기하학적 위치의 특이성으로 다른 DVI 노즐과는 상이한 실험결과가 나타난다. 그 원인은 DVI-1 노즐 위치에 존재하는 공기막의 에어커튼 효과에 의한 것으로 판단된다.
- 액체주입속도에 따른 직접우회실험결과 액막확장에 의한 안전주입수의 파단저온관과의 상대적 위치가 직접우회에 중요한 인자임을 파악하였다. 따라서 원형과 모형에서 직접우회를 보존하기 위해서는 액막확장폭에 대한 국부척도해석이 수행되어야 할 것이다.
- 실험결과를 바탕으로 교차유동으로 존재할 수 없는 영역이 있음을 확인하였고, 이는 플러딩과 유사하다. 그러나 교차유동제한에 대한 정확한 특성을 파악하기 위해서는 이와 관련된 보완실험이 수행되어야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

- 본 연구는 과학기술부의 원자력 연구.개발사업의 일환으로 수행되었다.

Reference

[1] 차세대원자로 기술개발사업단, "차세대원자로 기술개발(II) – NSSS 기초기반 R&D (Vol. 7.1)", 1999.

[2] H.R. Choi et al., " Large Break LOCA Analysis for KNGR using R5V322Beta", The 12th CAMP Working Group Meeting,June 24,1999.

[3] MPR 1329, " Summary of Results from the UPTF Downcomer Injection/Vent Valve Separate Effects Tests, Comparison to Previous Scaled Tests, and Application to Babcock & Wilcox Pressurized Water Reactors",1992.

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

[5] Yun. B.J. et al., "Experimental Observation on the Hydraulic Phenomena in the KNGR Downcomer during LBLOCA Reflood Phase", 2000 Spring KNS Conference, 2000

[6] Yun. B.J. et al., "Air/Water Test on DVI ECC Direct Bypass during LBLOCA Reflood Phase : UPTF Test 21-D Counterpart Test", to be presented in 2000 Autumn KNS Coference, 2000

[7] Yun, B.J. et al., "Scaling Analysis of the KNGR DVI Test Facility", 53121-DVI-FS0-DA001, Rev. 01, DS-3, KAERI, 2000

[11] 정재준, "액적동반현상의 모델링 기법", KAERI/AR-450/96,1996.