'2000 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

LBLOCA 재관수 기간동안 비상노심 냉각수의 직접우회 현상에 관한 물-공기 실험 : UPTF Test 21-D 비교실험

Air/Water Test on DVI ECC Direct Bypass during LBLOCA Reflood Phase : UPTF Test 21-D Counterpart Test

윤병조, 권태순, 송철화, 박종균

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150

조형규, 박군철

서울대학교

서울특별시 관악구 신림동 산 56-1

요약

원자로용기 직접주입방식을 채택하고 있는 원자로에서 LBLOCA 재관수 기간 동안 강수부내에서 발생하는 직접우회현상을 UPTF downcomer 를 모사한 1/7.5 투명아크릴 실험장치를 통해 연구하였다. 강수부내 다차원적 수력현상 관측 결과를 도시하였고, 다양한 액체 및 기체 주입 조건에서 직접우회율을 측정하였다. 강수부 내 수력현상 관측결과를 KNGR 강수부에서의 수력현상과 비교하였으며, DVI 노즐 높이에 의한 수력현상의 차이를 분석하였다. 직접우회율 측정결과, 강수부내 기하학적 형상 : DVI 노즐의 높이 및 강수부 상부유로 면적이 직접우회에 크게 영향을 미침을 파악하였다. 직접우회 실험결과를 바탕으로 직접우회율을 지배하는 척도해석 변수로 Wallis type 원주방향 무차원 기체속도를 적용하여, UPTF 원형의 실험결과와 비교하였다.

Abstract

The direct ECC bypass phenomena that occur in the DVI system during the reflood phase of a large break loss-of-coolant accident (LBLOCA) are studied using a transparent 1/7.5 model of a Upper Plenum Test Facility (UPTF). The separate effect tests were performed in order to clarify the mechanism of the direct bypass and to derive the scaling parameters affecting the ECC direct bypass rate. The various flow regimes and their distribution in the downcomer have been identified and mapped. And the direct ECC bypass rate has been measured under the various air and water injection conditions. From the counterpart tests of UPTF Test 21-D in this small scale UPTF geometry downcomer, the dimensionless gas velocity $j^*_{g,eff}$ was derived experimentally, which is believed to be a major scaling parameter of the direct ECC bypass. And in the UPTF air-water separate effect tests, it was found that the direct ECC bypass rate was

greatly affected by the liquid film spreading width and the geometry of the downcomer.

1. 서 론

현재 국내에서 개발되고 있는 한국차세대원자로(KNGR)는 표준원자로에 비해 용량이 증대되었을 뿐만 아니라, 노심 손상확률을 줄일 수 있도록 여러 가지 안전성 향상 조치들이 실계에 방영되어 있다. 그 중에서 비상노심냉각계통(ECCS : Emergency Core Cooling System)은 냉각재상실사고(LOCA) 발생 시 안전주입수(Safety Injection Water)를 강수부 내로 직접 주입하는 원자로용기 직접 주입 방식(DVI : Direct Vessel Injection)을 채택하고 있다[1]. 안전주입수가 원자로 용기 강수부로 직접 유입됨에 따라, 기존의 저온관 주입방식(CLI : Cold leg Injction)에서 나타나는 저온관에서의 증기 응축현상이 존재하지 않게 되며, 이에 따라 저온관을 통해 강수부로 유입되는 증기의 속도 및 과열도가 CLI 방식의 경우에 비해 크게 증가하게 된다. 또한 안전주입수 주입노즐이 저온관의 상부에 위치하고 강수부로 유입되는 증기의 속도가 증가함에 따라, 강수부에서 발생되는 안전주입수와 증기 사이의 상호작용이 증가하게 될 것으로 예측된다. 이러한 이유로 재관수 과정에서 DVI 방식 채택 시의 안전주입수 우회는 기존의 CLI 방식의 경우와 주요 현상 및 안전주입수 우회 메커니즘이 크게 다를 것으로 예상된다[2].

그림 1.은 LBLOCA 재관수 시 강수부내에 존재하는 안전주입수 우회를 도시한 그림으로 UPTF Test 21-D 실험결과 이와 같은 수력현상이 파악되었다[3]. 재관수 기간 동안 DVI 방식 원자로 강수부 내의 안전주입수 우회는 크게 두 가지 메커니즘으로 이루어지는데, 원주방향으로 형성된 고속의 증기유동에 의해 상부에서 주입되어 하강하는 안전주입수가 직접 파단부로 우회하는 직접우회 메커니즘과 파단 저온관 하단에서 높은 파고를 갖는 성층유동의 표면이 액체 슬러그(liquid slug 또는 liquid hold-up)의 형태로 파단부로 우회하는 sweep-out 메커니즘이다. 이 중 sweep-out 메커니즘은 저온관 주입 방식의 원자로에서도 발생하는 안전주입수 우회 메커니즘으로, UPTF에서 수행된 저온관 주입 실험을 이용하여 다음과 같은 저온관 주입방식의 원자로에 대한 sweep-out 모델이 개발되었다.

$$H_{v,top} = 0.35(j^*_{g,eff} / j^{*\ 1/4}_{l,ent})^2 \quad (1)$$

여기서,

$H_{v,top}$: top void gap

$j^*_{g,eff} = \frac{\dot{M}_{g,eff}}{\rho_g \cdot A_{Flow}} \left[\frac{\rho_g}{(\rho_l - \rho_g) \cdot g \cdot L_{DC}} \right]^{1/2}$: 원주방향 Wallis 무차원 기체속도

$$j_{l,ent}^{*} = \frac{\dot{M}_{l,ent}}{\rho_l \cdot A_{Flow}} \left[\frac{\rho_g}{(\rho_l - \rho_g) \cdot g \cdot L_{DC}} \right]^{1/2}$$: Entrainment Wallis 무차원 수

UPTF Test-21D 의 실험결과, DVI 방식의 원자로에서는 직접우회로 인해 sweep-out 은 상대적으로 작다고 보고되었다[4]. 따라서 직접우회는 DVI 시스템 내에서 LBLOCA 재관수 기간 동안 안전주입수 우회의 주요 메커니즘이며, 이에 대한 개별효과 실험 및 현상 파악이 선행되어야 재관수 기간 동안 나타나는 안전주입수 우회 및 강수부 수위, 안전주입수 과냉각도 그리고 재관수율을 예측할 수 있을 것이라 판단된다. 그러나 UPTF Test 21-D 의 주요 관심사항은 직접우회가 아닌 sweep out 이었기 때문에, 직접 우회률을 직접 측정하는 개별효과 실험은 수행되지 않았으며, 실험결과에 대한 해석적 분석을 통해 직접우회율을 계산하였다.

한편, LBLOCA 재관수 기간 동안 저온관 높이 부근의 강수부 중간영역에서 수직,하강하는 안전주입수와 저온관을 통해 유입되어 횡 방향으로 유동이 발생되는 증기 간의 상호작용에 의해 강수부 전 영역에 걸쳐 다차원적 유동현상이 발생된다. KNGR 강수부에서 수행된 수력현상 관측결과, DVI 노즐을 통해 유입된 안전주입수는 액막의 형태로 강수부 내벽을 타고 하강하며, 저온관 노즐높이에서 공기의 jet impingement 에 의한 액막파열로 안전주입수 직접우회가 야기됨이 밝혀졌다[5].

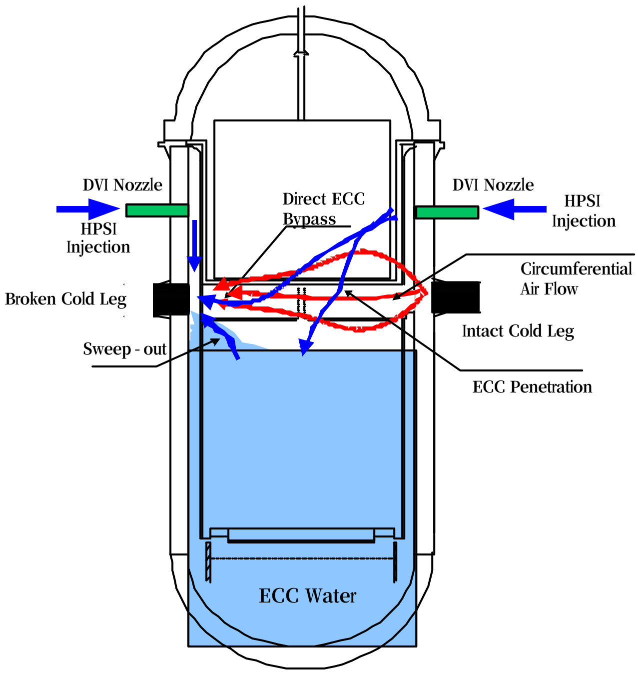


그림 1. 재관수 기간동안 안전주입수 우회 메커니즘

그러나 UPTF 강수부의 경우, DVI 노즐의 높이가 저온관 중심에서 상단 0.35m 로 저온관 부근에 형성되는 안전주입수의 impinging jet 영역에 존재하기 때문에, 수력현상에 있어서 KNGR 강수부와 큰 차이를 나타낸다. 따라서 UPTF 강수부에서의 직접우회 특성을 파악하기 위해서는, 수력현상의 관측이 수반되어야 한다.

이와 같은 이유로 본 연구에서는 KNGR 강수부에서의 직접우회에 대한 개별효과 실험의 전단계로, 직접우회에 영향을 주는 척도해석 변수를 도출하고 직접우회 특성을 파악하기 위해 비교, 분석이 가능한 1/7.5 UPTF 강수부 모형을 제작, 개별효과 실험 및 수력현상 관측을 수행하였다. 그 결과를 바탕으로 DVI 노즐의 높이 및 배열 등 강수부의 기하학적 형상의 차이가 직접우회에 어떻게 영향을 미치는지 파악하고자 하였다. 실험에서 강수부 내에 존재하는 유동양식을 관측하였고, DVI 노즐의 높이가 KNGR 에 비해 상대적으로 낮음으로 인해 발생되는 수력현상의 차이를 파악하였다.

2. 실험장치

안전주입방식으로 DVI 방식을 채택하고 있는 원자로에서 LBLOCA 재관수 시의 수력현상에 대한 연구를 위해 실험장치를 제작하였다. 실험장치는 4*4 loop PWR 을 모사한 UPTF Test 21-D 강수부의 1/7.5 축소 모델이며, 가시화를 용이하게 하기 위해 작동유체로 공기-물을 사용하였다. 본 실험장치는 강수부에서의 직접우회에 대한 개별효과 실험을 목적으로 하기 때문에, 노심은 모사하지 않았으며 고온관은 강수부내 유동 장애물로 모사하였다. 실험장치 시험부 주요 치수 및 척도비는 표 1.에 요약하였고, 주요 계통과 계측 부분 그리고 주요 시험부의 형상은 각각 그림 2.와 그림 3.에 도시하였다.

표 1. UPTF 강수부와 물-공기 실험장치의 주요 치수 및 척도 비

Parameter	UPTF	Air-water Test	Scale Ratio
Downcomer Outer Diameter (m)	4.79	0.654	7.324
Downcomer inner Diameter (m)	4.37	0.582	7.509
Downcomer Gap Size (m)	0.21	0.036	5.833
Hot Leg Diameter (m)	0.75	0.100	7.470
Cold Leg Diameter (m)	0.75	0.100	7.470
DVI Nozzle Diameter (m)	0.308	0.041	7.470
DVI Nozzle Elevation (m)	0.35	0.047 0.35	7.470 1.000

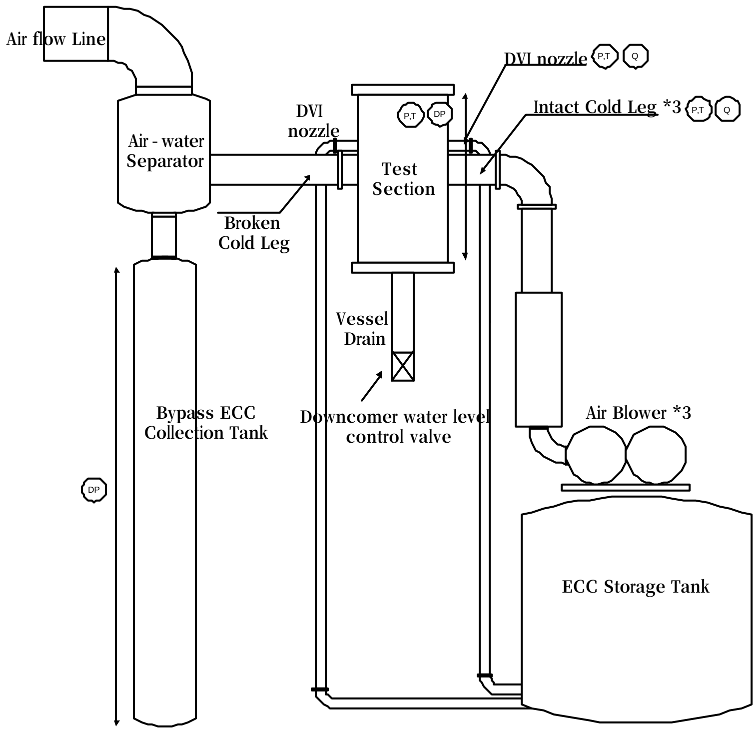


그림 2. UPTF 공기-물 실험장치 개략도

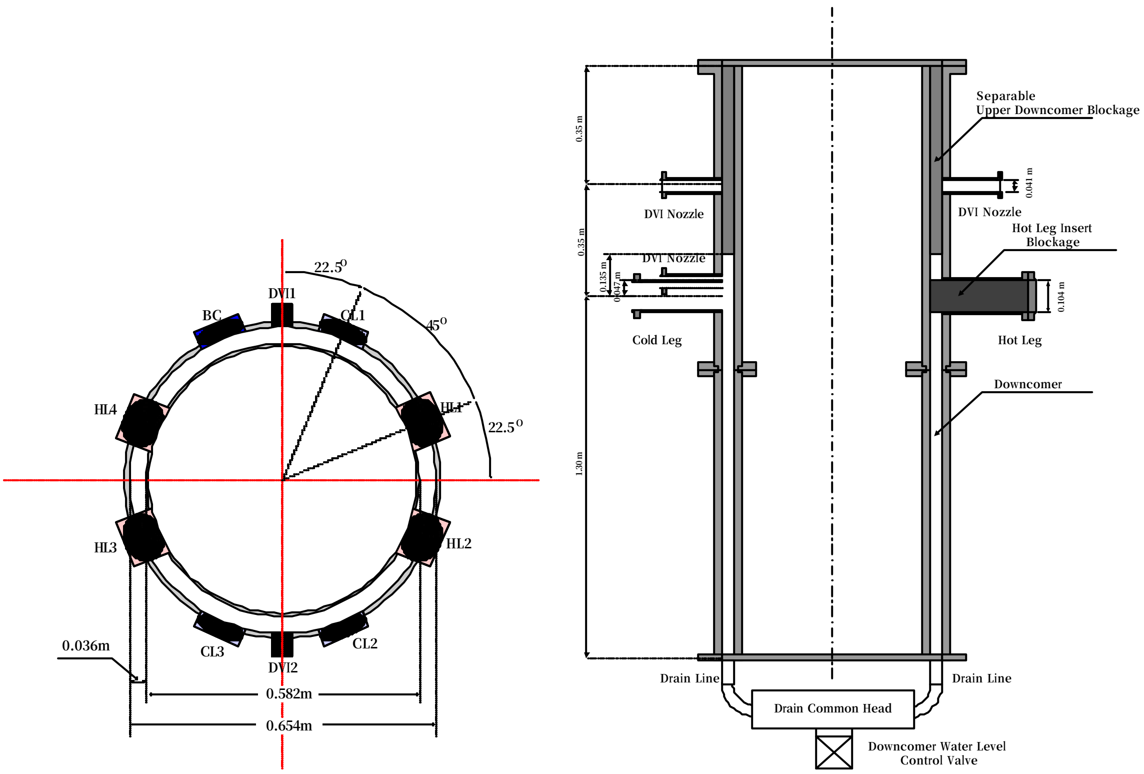


그림 3. UPTF 공기-물 실험장치 시험대 상세도

고온관과 저온관은 각각 45도 간격으로 균일하게 나열되어 있으며, 저온관과 저온관 사이, 저온관 중심선 상단 0.047m와 0.35m에 각각 2개의 DVI 노즐이 위치한다. DVI 노즐 높이는 각각 선형 척도법과 체적 척도법에 의해 그 위치를 결정 하였으며 적용 척도법에 따른 노즐의 높이 효과에 관한 개별효과 실험이 가능하도록 하였다. 한편 그림 4.와 같이 KNGR과 UPTF 강수부는 상부유로 횡 방향 단면적이 크게 다르다. 같은 노즐 배열을 가지는 강수부에서 상부유로 제한의 효과가 직접우회에 어떠한 영향을 미치는지 파악하기 위해, 분리가 가능한 블록을 이용하여 강수부유로 횡 방향 면적을 변화시킬 수 있게 설계하였다.

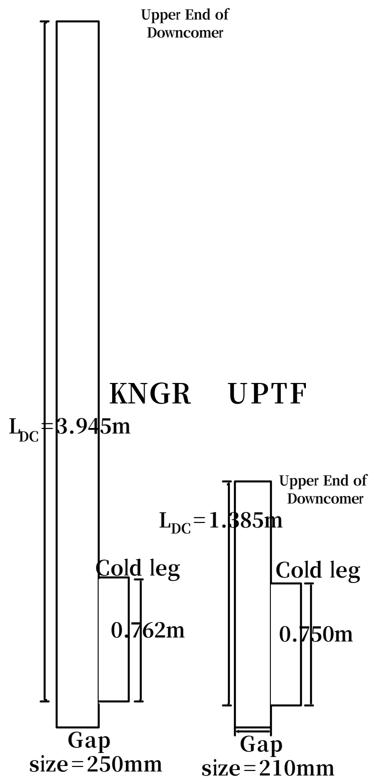


그림 4. KNGR과 UPTF의 상부 강수부의 형상

강수부 수위를 일정하게 유지하기 위해 하부공동 배수관(lower plenum drain)에 수위제어밸브를 설치하였고, 시험대(test section) 상,하단의 차압측정을 통해 강수부 수위를 계산하였다. 실험시작 후 약 60~120초 후에 실험조건이 정상상태에 도달하게 되고, 이후로 모든 측정 실험결과는 컴퓨터에 저장되어, 분석에 이용되었다.

실험조건으로 안전주입수는 DVI 노즐 당 0 ~ 2.2 kg/s으로 주입되었으며, 기체의 경우 저온관 노즐당 0 ~ 0.4 kg/s가 주입되었다. 파단 저온관에 연결된 물/공기 분리기의 압력은 대기압으로 유지되며, 강수부 압력은 실험 조건에 따라 1~1.7 bar로 다양하게 변화한다. 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. 한편 실험기간 동안 파단부로 우회한 액체질량을 측정하기 위해 우회 안전주입수 수집탱크를 설치하였고, 수집탱크 내 수위를 차압계를 이용하여 측정하였다. 수집탱크 내 수위 증가치를 이용하여 안전주입수 우회량을 계산한다. 실험에서 측정된 변수의 측정 오차는 표 2 에 정리되었다.

개별 효과 실험의 주요 실험변수는 안전주입 DVI 노즐, DVI 노즐의 높이, 상부유로 면적, 액체 주입유량 그리고 기체 주입유량이며, 주입 DVI 노즐 및 액체 주입유량을 고정시킨 뒤, 저온관에서 주입되는 공기유량을 점차 증가시키며 직접우회율을 측정하였다. 각 유동조건에서의 수력현상을 비디오 카메라로 촬영하여 이상유동 유동 양식도를 작성하였다.

표 2 실험장치내 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) 7%(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. 안전주입수 직접우회 시 유동양식

UPTF 강수부에서의 직접우회 현상시 강수부내 유동 분포 및 유동양식은 낮은 기체속도 조건과 높은 기체속도 조건에 대해 각각 그림 5.와 그림 6.에 도시되었다. 이때, 그림은 선형척도법을 적용하여 DVI-1 과 DVI-2 모두를 통해 안전주입수가 주입되는 실험조건을 도시한 것이며, 액체주입속도는 UPTF 원형과 동일한 1.6m/s 이고, 기체주입속도는 각각 8m/s 와 22m/s 이다. 각 실험조건에서 직접우회율은 각각 36.5%와 59.3% 이다.

3.1 낮은 기체유속 주입조건 (각 노즐 당 기체주입속도 : v_g =8m/s , 직접우회율 : 36.5%)

DVI-1 은 저온관-1 에서 주입된 공기가 가까이 인접한 파단저온관으로 향하여, 국부적으로 고속의 공기 속도 장이 형성되는 영역이다. DVI-1 은 저온관-1 과 파단저온관 사이에 위치하며, 노즐

의 높이 또한 저온관과 매우 인접하기 때문에, DVI-1을 통해 유입된 안전주입수는 강수부 벽면과 충돌 뒤, 곧바로 공기유동에 끌려 파단부로 편향된다. 유입된 많은 안전주입수가 액막의 형태로 확장되지 못하고 파단부로 우회함으로써, 파단부와 DVI-1 노즐사이 공간에 강수부 간극을 가득 채우는 매우 두꺼운 안전주입수 슬러그 유동이 형성된다. 따라서 이 영역에서의 유동양식은 횡방향 co-current wispy 유동으로 판단할 수 있다. 파단부로 형성된 액체슬러그의 하단에서 분리된 액적들은 강수부 내,외벽에 재수착(de-entrain)된 후, 횡방향으로 형성된 기체유동에 의한 계면전단력을 극복하고 얇은 액막의 형태로 강수부 하부로 수직, 하강한다. 즉, 하강하는 얇은 액막과 횡방향 공기유동이 존재하는 교차유동(cross flow)이 관측되었다.

한편 파단부 반대편 DVI-2 부근은 저온관-2와 저온관-3을 통해 공기가 유입되는 영역으로, 강수부 벽면과 충돌하여, 등 방향으로 퍼지는 공기가 이 영역에서 서로 충돌한다. 그로 인해 저온관-2와 저온관-3 사이의 공간에 상,하로 향하는 공기유동이 형성된다. 상부로 형성된 공기유동은 강수부상부가 제한됨으로 인해 곧 횡방향으로 방향을 전환하여 파단부로 향하며, 이에 상부의 안전주입수의 유동은 고온관 영역으로 향하게 된다. 그러나, 낮은 기체속도 조건에 의해 안전주입수는 파단부까지 도달하지 못하고 기체유동에서 분리되어, 고온관 영역에 도달하기 전에 액막의 형태로 모두 강수부로 하강한다. DVI-2 노즐에서 고온관까지의 영역에 걸쳐, 저온관 상단으로는 횡방향 co-current annular wispy 유동이 관측되었으며, 저온관 하단으로는 수직,하강하는 액막과 수평방향 공기가 존재하는 교차유동영역이 나타난다. 한편, 하부로 형성된 공기유동은 일부의 안전주입수에 하향방향 운동량을 전달하여, 종방향 co-current annular wispy 유동의 형태로 강수부 하부로 하강한다. 그러나 기체속도가 낮은 조건에서는 상대적으로 많은 양의 안전주입수가 횡 방향의 공기에 끌려 이동한다.

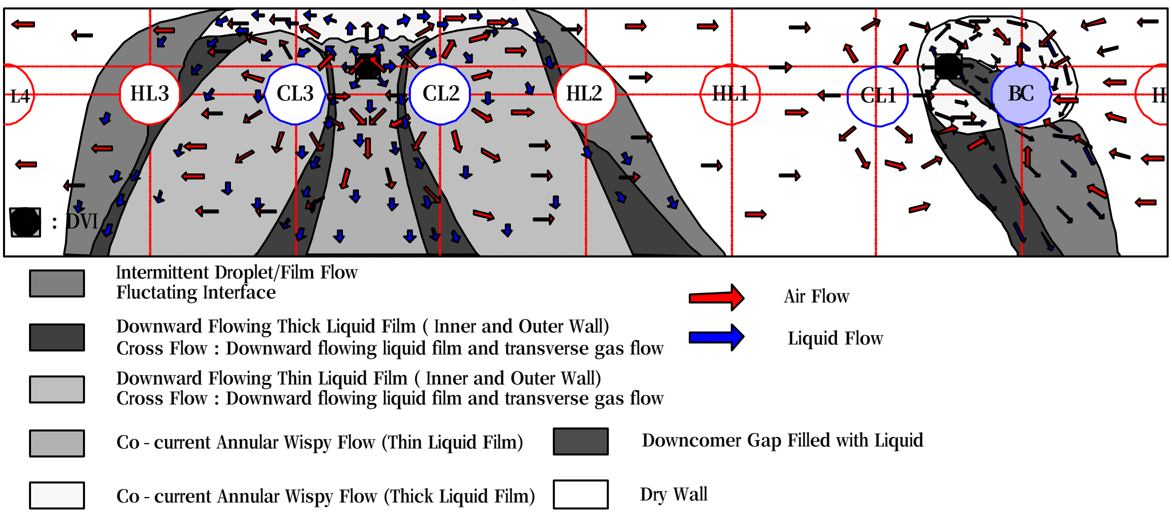


그림 5. 낮은 기체유속 조건에서의 유동 분포 및 유동 양식 : V_g =8m/s and V_l =1.6m/s

3.2 높은 기체 유속 주입조건 (각 노즐 당 기체주입속도 : V_g =22m/s , 직접우회율 : 59.3%)

높은 기체속도 조건에서는 DVI-1 부근에 형성되는 고속의 공기유동에 의해 DVI-1 로 유입된 모든 안전주입수가 파단부로 우회하며 저온관-1 과 파단저온관 사이 공간에 안전주입수 하강이 전혀 이루어지지 못하는 zero-penetration region 이 존재한다.

한편 파단부 반대편 DVI-2 노즐 부근에는, 저온관-2 와 저온관-3 을 통해 주입된 고속의 공기으름으로 인해 강수부 내벽에 액체가 존재하지 못하는 공기 impinging jet 영역이 존재한다. 이 지역에서는 미량의 냉각수가 강수부 외벽을 타고 하강한다. 주입된 안전주입수의 상당량이 공기막에 의해 강수부 상단에 정체된 후, 일부는 저온관 상단의 강수부 공간을 통해 파단부로 향하며, 일부는 강수부 하부로 형성된 공기유동에 이끌려 하강한다. 저온관 상단 강수부를 통해 횡 방향으로 향하는 안전주입수의 대부분은 고온관 영역에 이르러 하강하며, DVI-2 를 통해 주입된 안전주입수의 약 10%만이 파단부를 통해 방출된다. 안전주입수 하강은 하향 공기가 다량의 안전주입수를 하강시키는 저온관-2 와 저온관-3 사이 영역에서 가장 많이 나타나며, 그외 고온관-3 과 저온관-3 사이와 저온관-2 와 고온관-1 사이 공간에서 많은 안전주입수 하강이 관측되었다. 저온관-2 와 저온관-3 사이 영역에서는 종방향 co-current annular 유동이 관측되었고, 그 외 하강지역에서는 횡방향으로 움직이는 공기와 수직 하강하는 액막이 존재하는 교차유동이 관측되었다.

수력현상 관측결과, 파단부 부근 안전주입수의 우회는 고속으로 형성된 기체유동장 내로 주입된 액체가 액막으로 확장되지 못하고, 파단부로 편향된다. 반면, 파단부 반대편 부근에서의 안전주입수 우회는 공기의 jet impingement 가 액상과 기상의 혼합을 야기시키고, 그로 인해, 운동량 전달 면적이 크게 증가함에 따라 횡방향으로 안전주입수가 이동하게 된다.

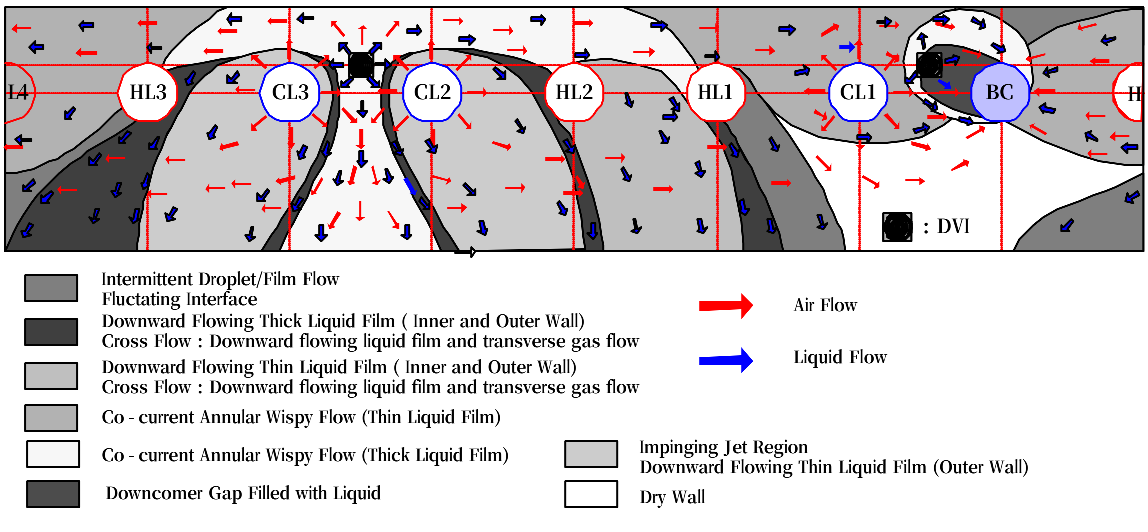


그림 6. 높은 기체유속 주건에서의 유동분포 및 유동양식 : V_g =22m/s and V_l =1.6m/s

UPTF 강수부에서 나타나는 직접우회 현상은 DVI 노즐의 높이 및 강수부 상부 높이 차이에 의해 KNGR 강수부에서 관측된 현상과 다소 차이가 있다. KNGR 강수부의 경우, 그림 7.과 같이 DVI 노즐을 통해 주입된 안전주입수가 액막의 형태로 확장되어 하강하며, 저온관 노즐 부근에는 jet impingement 에 의해 액막 파열이 발생하여 직접우회가 야기된다[5]. 그러나 UPTF 강수부의 경우 DVI 노즐이 저온관 노즐과 매우 근접하게 위치하여 DVI 노즐을 통해 유입된 안전주입수는 강수부 벽면과 충돌하여 액막을 형성하지 못하고, 주입과 동시에 공기유동과 혼합된다. 특히 파단부 반대편에서의 수력현상을 비교할 때, KNGR 의 경우 저온관-2 와 저온관-3 사이 영역에 넓게 공기막이 형성되어, 상단에서 액막이 정체되고 하강하지 못하는 현상이 나타난다. 반면, UPTF 강수부의 경우 impinging jet 영역 내로 안전주입수가 주입됨으로 인해, 하향하는 공기유동과 혼합되어 많은 양의 안전주입수 하강이 이 지역을 통해 이루어진다. 즉, KNGR 강수부의 경우 공기에 의한 jet impingement 가 안전주입수 직접우회에 크게 영향을 주지만, UPTF 강수부에서는 상대적으로 그 영향이 작게 나타나고 있다.

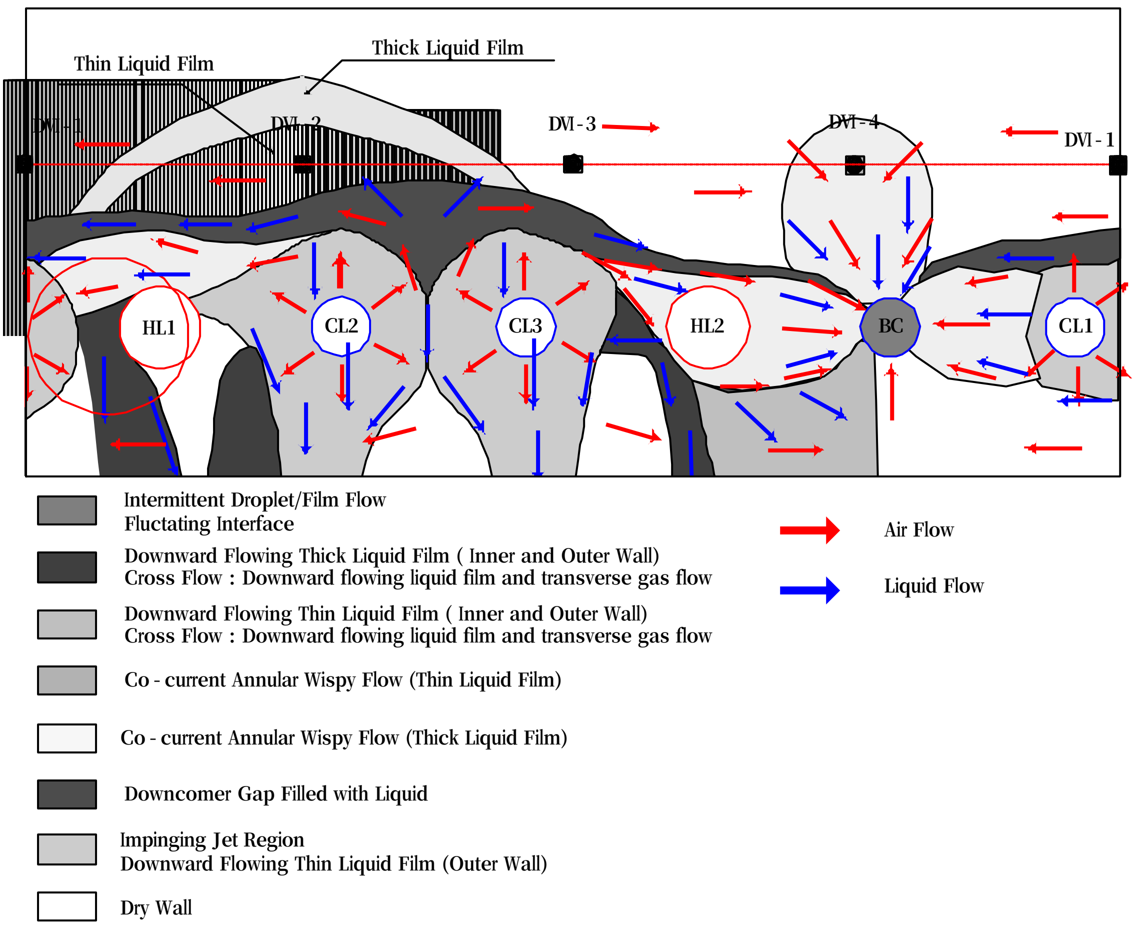


그림 7. KNGR 강수부 내의 유동분포 및 유동양식[5] : V_g =22 m/s and V_l =2.2 m/s

4. 안전주입수 직접우회 개별효과 실험결과

DVI 시스템 내에서 LBLOCA 재관수 동안 강수부 내에 나타나는 직접우회특성을 파악하기 위해 개별효과 실험을 수행하였다. 실험 변수는 기체주입속도, 액체주입속도, DVI 노즐의 높이, 강수부 상부 유로 면적 등이다.

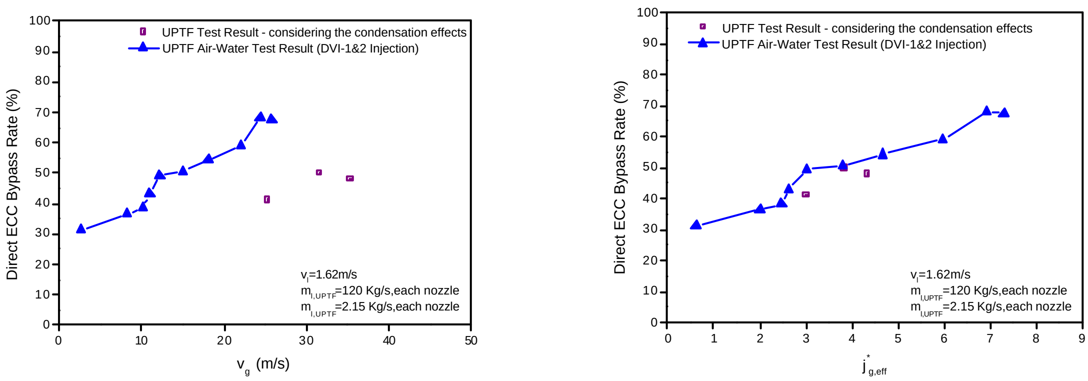
먼저, 원형과 모형의 스케일 차이에 의한 효과를 고려하기 위한 비교실험(Counterpart Test)을 수행하였다. 이를 통하여 직접우회에 지배적인 무차원 척도 변수를 도출하고자 하였다.

실험은 DVI 에서 UPTF 와 동일한 안전주입수 주입속도를 갖을 때, 기체 속도를 변화시켜가며 수행하였다. 선형척도법을 적용하고 원형과 모형에서 기체 및 액체 속도를 1:1 로 보존할 경우 그림 8.-(a)와 같이, 모형에서의 직접우회율이 원형의 결과보다 매우 크게 나타나고 있다. 이와 같은 비교실험 결과, 원형과 모형에서 직접우회율을 보존하기 위해, 스케일효과를 고려할 수 있는 무차원 기체주입속도의 필요성이 대두되었다. 실험결과에 대한 분석을 통해 변형된 무차원 기체속도 $j^*_{g,eff}$ 를 직접우회의 주요 변수로 도출하였다. 여기서 $j^*_{g,eff}$ 는 UPTF 재관수 실험에서 제시된 Wallis parameter 형태이나[3], 특성길이로 상부유로 높이가 아닌 저온관 직경으로 대신하였다. 저온관 직경을 특성길이로 사용한 이유는 저온관 상부유로의 길이가 커 유동의 상부 제한이 없는 KNGR 실험결과와 UPTF 실험결과를 비교하기 위해서 이다. 이와 관련된 KNGR 직접우회 실험은 현재 진행 중에 있다. 그림 8-(b)는 $j^*_{g,eff}$ 를 이용하여 원형과 모형에서 직접우회 실험결과를 비교한 것으로 원형과 모형에서 약 1~16%의 오차를 갖는다. 그러나 이와 같은 실험결과는 안전주입수의 주입속도 및 유량에 대한 척도해석이 적용되지 않은 실험결과이며, 향후, 이에 대한 보완이 필요하다.

안전주입수 주입속도/유량의 효과가 직접우회에 미치는 영향을 고려하기 위해 안전주입수의 주입 유량을 변화하며 개별효과실험을 수행하였다. 액체 주입속도가 각각 1.22m/s 와 1.6m/s 인 경우, 안전주입수가 주입되는 노즐을 변화시키며 직접우회율를 측정하였다. 실험결과는 그림 9 에 도시 되었다. 안전주입수 주입속도가 증가하면 액상의 원주방향 운동량이 증가하여 물막의 확장 폭이 증가된다. 파단부 부근의 DVI-1 에서 주입된 액상의 경우, 원주방향 운동량이 증가하는 것은, 물막의 폭이 증가되고, 파단부와 멀어지려는 관성이 커짐을 의미한다. 따라서 그림 9.의 DVI-1 주입 실험결과와 같이 액체주입속도가 증가할수록 안전주입수 직접우회는 감소한다. 반면 DVI-2 주입의 경우, 원주방향 운동량이 증가하게 되면 확장 폭이 증가 되어 파단부로 향하는 냉각수의 양이 증가한다. 따라서 액체주입속도가 증가할수록 안전주입수 직접우회는 증가한다. 한편 DVI-1&2 주입의 경우, $j^*_{g,eff}$ 가 3 보다 작은 경우, DVI-2 에서 주입된 안전주입수는 모두 하강하기 때문에 전체 직접우회는 DVI-1 에서 주입된 안전주입수의 거동에 의해 결정된다. 반면 $j^*_{g,eff}$ 가 3 보다 큰

경우, DVI-1 에서 주입된 안전주입수는 모두 우회하기 때문에 전체 직접우회는 DVI-2 에서 주입된 안전주입수의 거동에 의해 결정된다. 따라서, 낮은 기체속도에서는 액체주입속도가 클수록 직접우회가 작게 나타나는 반면, 높은 기체속도에서는 안전주입수 주입속도가 클수록 직접 우회량이 크게 나타난다.

한편 안전주입수 주입속도가 낮은 경우, 파단부 부근 DVI 노즐에서는 대부분의 안전주입수가 파단부로 누출되며, 파단부 반대편 DVI 노즐에서는 대부분 직접 우회하지 않는, 직접우회의 양극화 현상이 나타나며 이로 인해 전체 직접우회는 50%부근에서 일정하게 나타난다. 이러한 현상은 액체주입속도가 낮아지면 더 현저하게 나타날 것으로 예상된다.



(a) 공기속도에 따른 직접우회율 (b) 무차원 공기속도에 따른 직접우회율

그림 8. UPTF Test 21-D 비교실험 결과[DVI 높이: 선형척도법 적용]

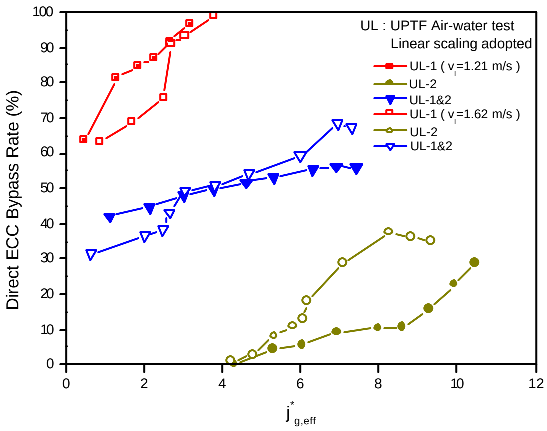


그림 9. 개별효과 실험결과 : 액체주입유속 효과[DVI 높이: 선형척도법 적용]

상부유로 제한의 효과가 직접우회에 미치는 효과를 파악하기 위해 상부 유로의 높이가 저온관 직경의 약 0.9 배인 경우와 저온관 직경의 약 6 배인 강수부에서 각각 실험을 수행하였다. 이때 DVI 노즐의 높이는 저온관 중심선 상단 0.047m 로 동일하며, 저온관 및 고온관의 배열도 두 강수부에서 동일하다.

각각의 강수부에서 수행된 실험결과는 그림 10.과 같다. 상부유로가 제한되면 저온관 노즐 높이에서의 횡방향 기체속도가 상대적으로 크게 증가하고, 이로 인해 직접우회가 10-30% 증가한다. 특히 그림 10.에서와 같이 파단부 부근에서 주입된 안전주입수의 직접우회가 크게 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 저온관-1 과 파단저온관 사이의 기체속도가 유로 확장으로 인해 상대적으로 감소하였기 때문이다..

상부유로 제한 실험에서 DVI-2 주입 실험결과, 특정 값 이상에서 기체속도가 증가하더라도 직접우회가 증가하지 않는 경향이 관측되었다. 이러한 결과는 두 공기막이 충돌하는 DVI-2 부근영역에서 횡 방향으로 이동하는 안전주입수의 우회양이 기체속도가 증가하더라도 크게 증가하지 않게 되는 것을 보여준다. 이는 공기 막에 의해 실제 안전주입수의 횡 방향 유로가 크게 감소하고 압력강하가 증가하기 때문으로 판단된다. 반면, 상부유로가 개방될 경우, 상부유로 면적이 크게 증가함으로써 압력강하의 원인이 제거되고, 안전주입수의 횡 방향을 통한 우회양의 제한이 감소하게 된다. 따라서, DVI-2 부근에서 강수부 상부로 이동하는 안전주입수의 양이 증가하고, 이로 인해 기체속도의 증가에 따라 직접우회도 선형적으로 증가한다.

마지막으로, DVI 노즐 높이가 직접우회에 미치는 효과를 파악하기 위한 실험을 수행하였다. 저온관 중심선에서 DVI 중심선까지의 높이가 0.047m 인 경우와 0.35m 인 강수부에서 각각 직접우회 실험을 수행하였다. 노즐 높이의 효과만을 비교하기 위해 모두 상부유로가 개방된 강수부에서 실험을 수행하였으며 각 실험결과를 그림 11.에서 비교하였다.

DVI 노즐의 위치가 높아짐으로 인해 impinging jet 영역의 상부에서 안전주입수가 주입된다. 따라서 주입된 안전주입수는 액막의 형태로 강수부 벽면을 따라 확장하며 하강한다. 하강하는 액막은 저온관에서 주입되는 공기에 의해 파열되며, 혼합된다. 이러한 수력현상의 차이가 직접우회 특성에 직접적으로 영향을 준다.

파단부 부근에서의 직접우회 실험결과를 비교해 보면, DVI 노즐의 높이가 증가할수록 직접우회가 감소하는 것을 볼 수 있다. 이는 안전주입수가 액막의 형태로 확장하며, 파단저온관과 멀어지게 되고, 기하학적으로 안전주입수 하강이 큰 지점으로 액막이 이동하기 때문이다. 그와 반대로 파단부 반대편 노즐 주입 시의 실험결과를 분석해보면, DVI 노즐의 높이가 증가할수록 직접우회가 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 액막확장 폭이 증가하여 안전주입수 물막과 파단 저온관의 거리가 가까워 지기 때문이다. 한편 DVI-1&2 가 동시에 주입되면 DVI 노즐의 높이가 높을수록 낮은 $j^*_{g,eff}$ 에서 더 작은 직접우회가, 높은 $j^*_{g,eff}$ 에서 더 많은 직접우회가 나타남을 알 수 있다.

이러한 실험결과는 액체주입속도와 관계된 개별효과 실험의 결과와 일치하는 경향으로서, 안

전주입수의 액막확장폭이 직접우회에 주요하게 작용함을 의미한다. 따라서 원형과 모형의 안전주입수 직접우회를 보존하기 위해서는 이러한 변수들에 대한 국부척도해석이 수행되어야 될 것으로 판단된다.

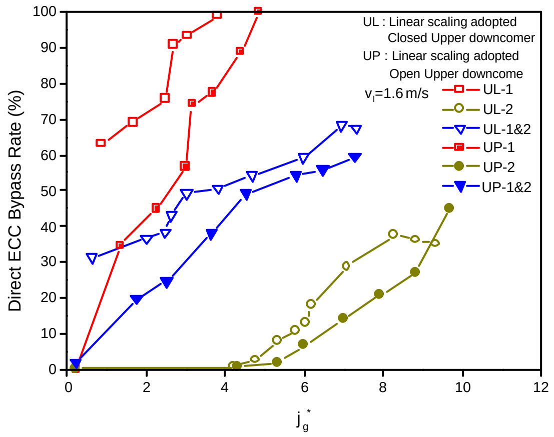


그림 10. 개별효과 실험 결과[DVI 높이-선형척도법 적용]:상부유로 면적 효과

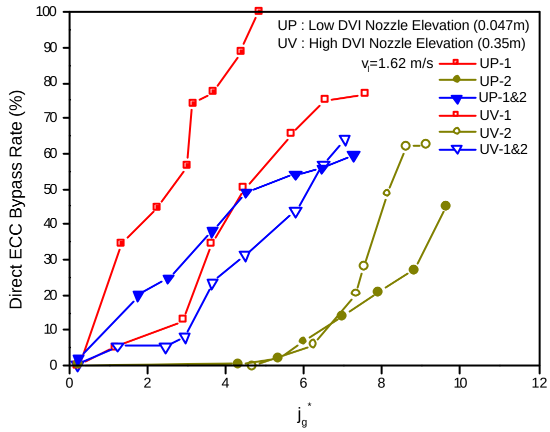


그림 11. 개별효과 실험 결과 : DVI 노즐 높이 효과

5. 결론

DVI 를 채택하고 있는 강수부 내에서 LBLOCA 재관수 동안 나타나는 수력현상 및 직접우회 특성을 파악하기 위한 연구를 수행하였다. 실험은 스케일 효과를 고려할 수 있는 UPTF 강수부의 1/7.5 실험장치에서 이루어졌다. 본 연구의 결론은 다음과 같다.

- 수력현상 관측결과,. 파단부로 우회하는 이상유체는 annular wispy 유동의 형태였으며, 액체 하강 지역에서는 수직,하강하는 액상과 수평으로 파단부로 향하는 기상이 존재하는 교차유동이 관측되었다.
- 저온관-2 와 저온관-3 사이 영역은 하향하는 기체에 의해 많은 양의 안전주입수가 끌려 하강하는 지역으로 관측되었다. 국부적으로 안전주입수 하강이 많이 나타나는 지역이 존재함을 파악하였으며, 저온관-2 와 저온관-3 사이가 최대하강지역으로 관측되었다.
- UPTF Test 21-D 비교 실험을 통해 직접우회율의 주요 척도해석변수로 무차원 기체속도 $j^*_{g,eff}$ 가 도출되었다.
- 개별효과 실험결과 강수부내 기하학적 구조가 직접우회에 크게 영향을 미침을 파악할 수 있었다. 상부유로 면적의 증가는 직접우회를 크게 감소시킨다. DVI 노즐 높이의 상승 및 액체주

입속도의 증가는 안전주입수의 확장폭을 증가시켜 안전주입수 직접우회에 크게 영향을 준다.

- **안전주입수 확장폭은 곡률반경 및 강수부 간극 그리고** DVI **노즐 직경의 차이에 의해 원형과 모형에서 큰 차이가 나타날 수 있다. 따라서 향후 이와 관련된 개별효과 실험이 수행되어야 할 것으로 판단된다.**

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구.개발사업의 일환으로 수행되었다.

Reference

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

[2] 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

[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] P.S. Damerell and J.W. Simons, "Reactor Safety Issues Resolved by the 2D/3D Program", NUREG/IA-0127, 1993.

[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