'2001 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

대형냉각재 상실 사고시 후기 재관수 기간 중 DVI 를 갖는 강수부에서의 물막 퍼짐에 관한 실험연구

Experimental Study on the Film Spreading Width of ECC Water in the Downcomer with DVI under Late Reflood Phase of LBLOCA

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

요약

차세대원자로 대형냉각재 상실사고 시 재관수 기간동안, 강수부내에서 발생하는 직접우회 현상에 대한 국소 척도해석을 위해 액막확장폭 측정 실험을 수행하였다. 1/7, 1/5, 1/1 길이 비의 강수부 배럴(barrel)을 모의한 시험대에서 DVI 노즐의 직경 및 안전주입수 주입속도를 변화시키며 실험을 수행하였다. 다양한 실험조건 하에서 DVI 노즐을 통해 주입되어 강수부 배럴을 따라 하강하는 액막의 형상을 관찰하였으며, 액막확장폭을 측정하여 상대 곡률 및 강수부 스케일의 효과를 파악하였다. 실험 결과에 대한 분석을 통해, 수정 선형척도법 적용 시 원형과 모형에서 액막확장폭을 보존하기 위한 DVI 노즐 직경을 도출하였고, 이를 바탕으로 1/7 물-공기 실험장치 및 1/5 물-증기 실험장치의 DVI 노즐 설계에 반영하였다.

Abstract

ECC (Emergeny Core Cooling) water spreading width is experimentally studied for a local scaling analysis of DVI(Direct Vessel Injection) nozzle under the reflood phase of LBLOCA(Large Break Loss of Coolant Accident) in KNGR downcomer geometry. For this, the spreading width of falling film on the outer wall of the core barrel is measured in the 1/5, 1/7 scaled and full (1/1) scale test facilities. The width of water film is obtained changing the diameter of the DVI nozzle for a given ECC water injection flow rate in the small scale test facility. The shape of falling film of ECC water and hydraulic phenomena are observed and the spreading width are measured by visual observations. From these, the scale and curvature effects on the spreading width of ECC water are analyzed. Using them, the diameters of DVI nozzle in the 1/7 scaled air-water and 1/5 scaled steam-water test facilities are determined to preserve the water film width.

1. 서론

한국형 차세대원자로(KNGR: Korea Next Generation Reactor)는 저온관 중심선으로부터 상단 2.1m 지점에 위치한 4 개의 노즐을 통해 강수부 내로 안전주입수를 직접 주입하는 원자로용기 직접주입 방식(DVI: Direct Vessel Injection)을 채택하고 있다. 이로 인해 대형 냉각재상실사고(LBLOCA: Large Break Loss of Coolant Accident) 시 강수부 내에서 발생하는 열수력 현상이 기존의 저온관 주입방식과 크게 다를 것이라 예측된다 [1]. 따라서 저온관 주입방식을 중심으로 개발된 열수력 안전해석 코드들이 DVI 방식 채택 시, 원자로 계통 내에서 발생하는 현상을 예측할 수 있는 지에 대한 검토가 요구되며, 이에 DVI 방식의 성능을 평가하고 KNGR 의 안전성에 대한 검증을 위해 LOCA 시 강수부 (downcomer) 내부에서의 열수력 현상에 대한 실험 연구가 필요하게 되었다 [2].

한국원자력 연구소에서는 DVI 방식의 안전 주입 계통 성능 평가를 위해, 저온관 양단 파단에 따른 대형냉각재 상실 사고 시 강수부에서의 증기-물의 열수력적 거동에 관한 개별효과 실험연구를 수행하고 있다. 이러한 연구의 예비 실험으로 윤병조 등 [3,4,5]은 대형 냉각재상실 사고 시 재관수 기간 동안 강수부에서 발생되는 수력현상의 이해를 위하여, 1/7 및 1/7.5 의 척도 비를 가지는 KNGR 및 UPTF counterpart 물-공기 가시화 실험을 수행하였다. 실험결과 강수부 내에 존재하는 다차원 수력 현상 및 안전주입수 우회 메커니즘을 파악하였으며, 개별 효과 실험을 통해 직접우회 특성을 파악하였다. 또한 가시화 실험 결과를 바탕으로, 다차원적 열수력 현상의 거동을 보존하고, 측정된 실험 데이타를 이용하여 원형에서의 안전주입수 우회량 비를 예측하기 위한 척도해석 방법론을 제시하였다.[6] 이는 시간 및 속도가 축소된 수정 선형척도법으로서, 표 1.에 기존의 선형척도법과 수정 선형척도법의 상사조건을 각각 요약하였다.

표 1. 속도 및 시간이 축소된 수정 선형척도법' 및 기존 선형척도법의 상사조건 비교

Parameter	Linear Scaling	Modified Linear Scaling
Length Ratio, l_R	l_R	l_R
Area Ratio, a_R	l_R^2	l_R^2
Volume Ratio, V_R	l_R^3	l_R^3
Time Ratio, t_R	l_R	$l_R^{1/2}$
Velocity Ratio, u_R	1	$l_R^{1/2}$
Flow Rate Ratio, $\dot{m}_R$	l_R^2	$l_R^{5/2}$
Pressure Drop Ratio, Δp_R	-	l_R
Gravity Ratio, g_R	l_R^{-1}	1
Pressure Ratio, p_R	1	1
Temperature Ratio, T_R	1	1
Void Ratio, a_R	1	1
Slip Ratio, S_R	1	1
Aspect Ratio, l_R / D_R	1	1

한편, 가시화 실험 중 직접우회에 대한 개별효과 실험결과를 통하여, 액막확장폭이 직접우회량에 크게 영향을 미치는 변수임이 파악되었다.[4,5] 그러나 강수부 배럴의 곡률 및 DVI 직경의 차이, 그리고 수정 척도법 적용으로 액체 주입 속도가 축소됨으로써, 원형과 모형에서 액막확장폭의 척도 왜곡이 초래될 수 있으며, 이로 인해 직접우회 비의 상사성이 유지되지 않을 수 있다.[6] 따라서 수정 선형 척도법의 보완으로, 원형과 모형의 직접우회 비의 보존을 위해 액막확장폭에 대한 국소 척도 해석이 필요하게 되었다.

DVI 노즐을 통해 주입되어 강수부 배럴을 따라 하강하는 액막의 형상 및 확장폭을 측정하기 위한 몇몇 연구가 수행되어 왔으며, 각 연구의 실험조건 및 척도 비를 표 2.에 요약하였다. Hwang[7] 과 Kwon et al.[8] 은 다양한 DVI 노즐 직경 및 강수부 간극에서 실험을 수행하였으며, 수평 기체 유동이 있을 때 하강하는 액막의 변화를 관측하고, 액막의 편향을 측정하는 실험을 수행하였다. 또한 실험결과를 바탕으로 액막확장폭을 예측할 수 있는 해석모델이 개발되었다.[7,9] 그러나 기존의 실험 및 해석 연구는 축소된 강수부에서 수행되었거나 강수부 배럴을 평판으로 모의하여, 곡률이 있는 실제 강수부에서의 액막확장폭을 예측함에는 어려움이 있다.

본 연구에서는 액막확장폭에 대한 국소 척도해석을 위해, 1/7, 1/5 그리고 1/1 의 길이 비를 갖는 KNGR 강수부 배럴을 모의한 시험대에서 액막확장폭을 측정하는 실험을 수행하였다. 다양한 곡률 및 DVI 노즐 직경 그리고 액체주입속도 조건에서 실험을 수행하여, 곡률의 효과가 고려된 액막확장폭 예측 모델개발의 기초자료를 제공하고자 하였다. 실험결과의 분석을 통해, 원형과 모형에서 액막확장폭의 상사성을 보존하기 위해 요구되어지는 DVI 노즐의 직경을 도출하였고, 이를 현재 수행중인 1/7 물-공기 가시화 실험장치 및 1/5 물-증기 실험장치의 DVI 노즐 설계에 각각 반영하였다.

표 2. DVI 주입 시, 액막확장폭에 대한 실험 연구

Authors	Parameter		비고
D.H. Hwang [7]	DVI Nozzle Size (m)	0.05, 0.075, 0.100, 0.125, 0.200(1/1.08)	Impinging Wall: Flat plate Blowing 효과 실험 수행 Film Thickness 측정
	Injection Velocity (m/s)	1.51~2.66	
T.S. Kwon et al. [8]	DVI Nozzle Size (Area Scale)	1/4.66, 1/9.52, 1/23.0, 1/51.68	Impinging Wall: Flat plate Blowing 효과 실험수행 Attachment Ratio 측정
	Injection Velocity (m/s)	1.0~2.5	
	Gap (Area Scale)	1/4.66, 1/9.52, 1/23.0, 1/51.68	
S.H. Yun et al. [9]	DVI Nozzle Size (m)	0.0125	Impinging Wall: Flat plate
	Injection Velocity (m/s)	0.42~1.24	

2. 실험장치 및 측정방법

차세대 원자로 대형 냉각재 상실사고 시, 재관수 기간 동안 강수부 내로 주입되어 강수부 배럴을 따라 하강하는 액막의 형상 및 확장폭에 대한 연구를 위해 실험장치를 제작하였다. 실험장치는 강수부 배럴 및 DVI 노즐로 구성된 시험대와 액체주입계통으로 이루어지며, 축소 실험장치와 1/1 척도 비의 실험장치가 각각 독립적으로 제작되었다. 실험장치의 시험대는 강수부 스케일의 효과를 파악하기 위해 각각 1/7, 1/5, 1/1 의 길이 비로 제작되었고, 강수부 내벽 만을 모의하여 개방유로를 형성하였다. 실험장치의 형상은 그림 1.에 도시하였다. 강수부 배럴은 각각 높이 3m 로 저온관 하단 0.2m ~ DVI 노즐 상단 0.7m 를 1:1 길이 비로 모의하여, 선형척도법 및 체적척도법 적용 시의 액막 형상 및 확장폭을 파악할 수 있게 설계하였다. 본 실험의 목적은 원형과 실험장치에서 동일한 액막확장폭을 유지하기 위한 DVI 노즐 직경을 도출하는 것으로, 이를 위해 동일한 척도비의 강수부에 대해 다양한 직경의 DVI 노즐을 제작하였다. 1/5 및 1/7 척도 비의 시험대에서 각각 1.2, 1.0, 0.85, 0.75, 0.6 배의 직경을 갖는 DVI 노즐을 이용하여 실험을 수행하였다. 강수부 배럴과 DVI 노즐 직경의 치수를 표 3.에 요약하였다.

DVI 노즐 직경 및 액체주입속도를 0.7m/s~2.5m/s 로 변화시키며 액막확장폭을 측정하였다. 본 실험의 측정변수는 액체주입유량, 액체온도 그리고 액막확장폭이며, 측정방법 및 측정오차를 표 4.에 요약하였다. 액막확장폭 측정을 위해 강수부 배럴에 0.01m 간격의 격자를 기입하였고, 비디오 카메라를 이용하여 액막을 촬영, 영상 처리를 통해 액막확장폭을 도출하였다. 그림 2.는 액막확장폭 측정에 이용된 영상으로서, 20~30 개의 데이터를 취득하여 측정값의 평균으로 액막확장폭을 정의하였다.

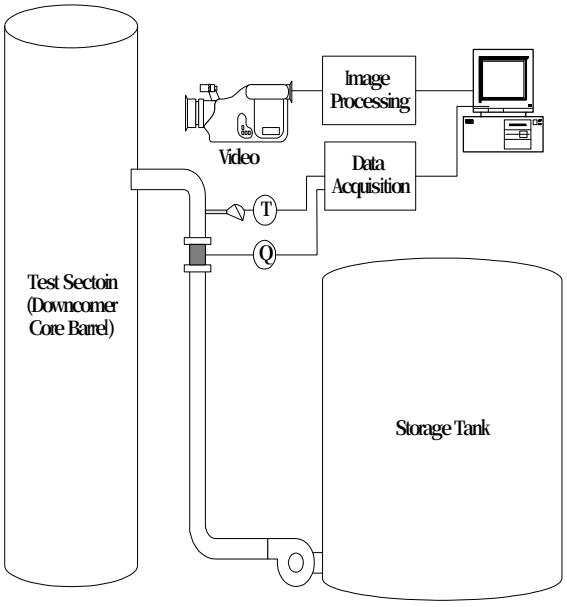


그림 2. 실험장치 개략도

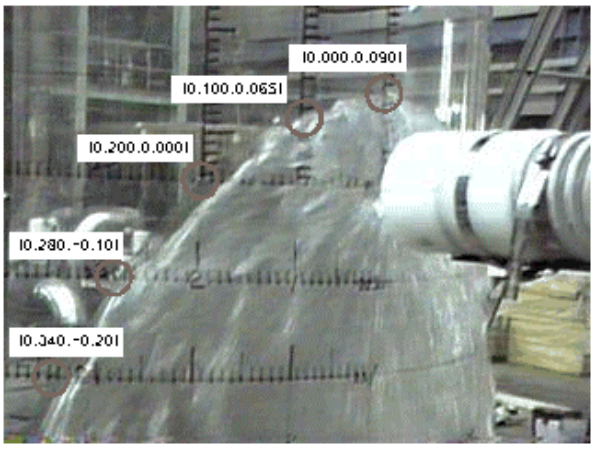


그림 3. 영상 처리 방법

한편, 액체주입속도가 약 1.3m/s 이상으로 증가하면, DVI 노즐을 통해 주입된 안전주입수가 벽면과 충돌한 뒤 액막 파열(liquid film break-up)이 발생하여 액막에서 분리된 액주가 다량 존재하게 된다. 이러한 액주는 벽면 전단력을 받지 않기 때문에 강수부 배럴을 따라 하강하는 액막과 상이한 거동을 보인다. 따라서 본 실험에서는 강수부에서 이탈된 액주를 제외하고 벽면에 수착되어 하강하는 액막을 기준으로 확장폭을 정의하였다. 그러나 액체주입속도가 높은 경우 및 액막이 가속되는 시험대 하부에서 액주와 액막의 구별이 용이하지 않은 영역이 관측되었으며, 본 실험의 경우 저온관 중심선 상단 약 0.6m 부근에서 이와 같은 영역이 나타나기 시작하여 이 영역의 측정 결과를 실험결과에서 제외하였다.

표 3. 실험장치 주요 치수 및 척도 비

Parameter	1/7 Test Section	1/5 Test Section	1/1 Test Section
Downcomer Barrel Diameter	0.582 m (1/7.07)	0.835 m (1/4.9)	4.115 m (1/1)
Downcomer Barrel Height	3.0 m (1/1)	3.0 m (1/1)	3.0 m (1/1)
Gap Size	0.0306 m (1/7.07)	0.052 m (1/4.9)	0.254 m (1/)
DVI Nozzle	기준 DVI 노즐 D_{Ref}=0.0306 m (1/7.07)	기준 DVI 노즐 D_{Ref}=0.0526 m (1/4.9)	0.2159 m (1/1)
	D_1=0.0372m (1.20*D_{Ref}) D_2=0.0306m (1.00*D_{Ref}) D_3=0.0264m (0.85*D_{Ref}) D_4=0.0233m (0.75*D_{Ref}) D_5=0.0186m (0.60*D_{Ref})	D_1=0.0526m (1.20*D_{Ref}) D_2=0.0438m (1.00*D_{Ref}) D_3=0.0372m (0.85*D_{Ref}) D_4=0.0329m (0.75*D_{Ref}) D_5=0.0263m (0.60*D_{Ref})	

표 4. 실험장치 내 측정 변수 및 오차

Parameter	1/7, 1/5 Test Section		1/1 Test Section	
Water Injection Velocity (m/s)	Type	Turbine Flow Meter	Type	Mass Probar
	Uncertainty	0.5%	Uncertainty	1.5%
Water Temperature (°C)	Type	Pt-100 Ω RTD	Type	Pt-100 Ω RTD
	Uncertainty	0.5°C	Uncertainty	0.5°C
Film Spreading Width (m)	Type	Video Recording	Type	Video Recording
	Uncertainty	5.5%	Uncertainty	10%

3. 액막확장폭 측정 실험 결과

3.1 액체 주입속도, DVI 노즐 직경 및 강수부 배럴 스케일의 효과

1/7 및 1/5, 그리고 원형과 동일한 스케일의 실험장치에서 다양한 액체주입속도 및 DVI 노즐 직경에 따른 액막확장폭의 변화를 측정하였다.

그림 4.와 그림 5.는 1.3m/ 및 2.2m/s 에서 1/5 및 1/1 시험대에서의 액막 형상을 비교한 결과이다. 그림 4.와 같이 축소된 실험장치에서는 액막의 경계에서 break-up 이 관측되며, 중앙에서는 벽면에 수착된 안정된 형태의 액막을 이루고 있다. 반편 동일한 속도로 주입되었을 때, 1/1 시험대에서의 경우 액주 이탈이 크게 증가하여, 전 영역에서 액막의 안정성이 깨어진다. 이는 표면장력 및 곡률에 의한 스케일 효과로, 액막확장폭에 주요한 영향을 미칠 것으로 판단된다.

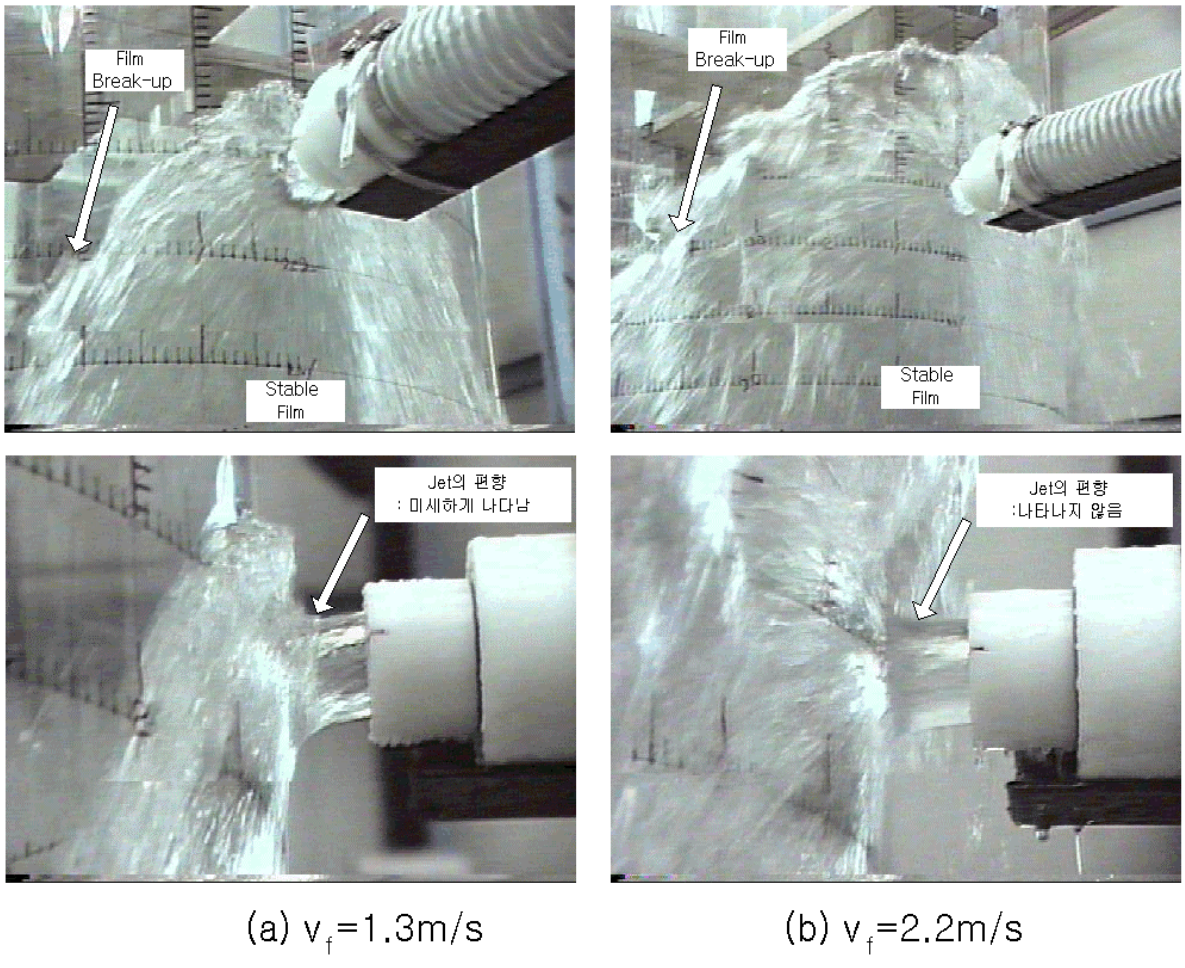
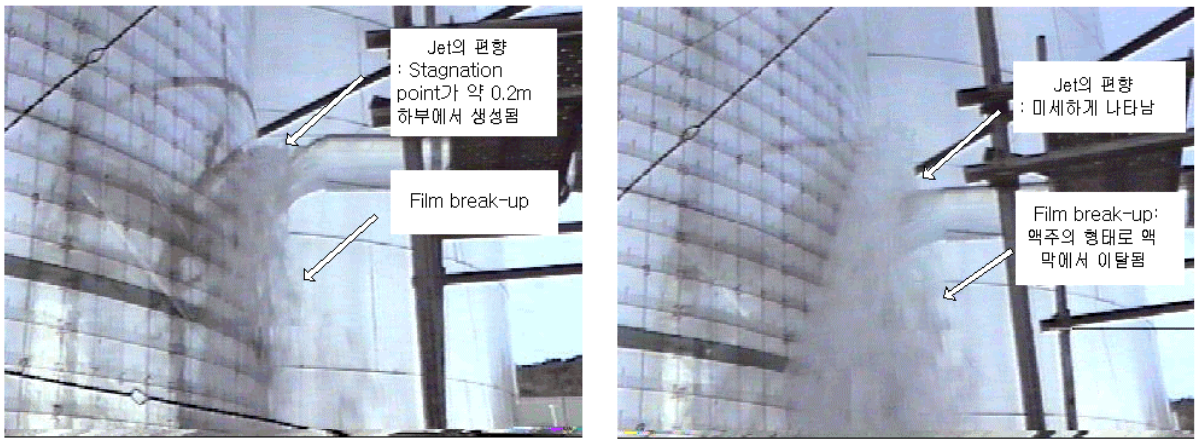


그림 4. 1/5 시험대에서 관측한 액막 및 liquid jet 의 형상

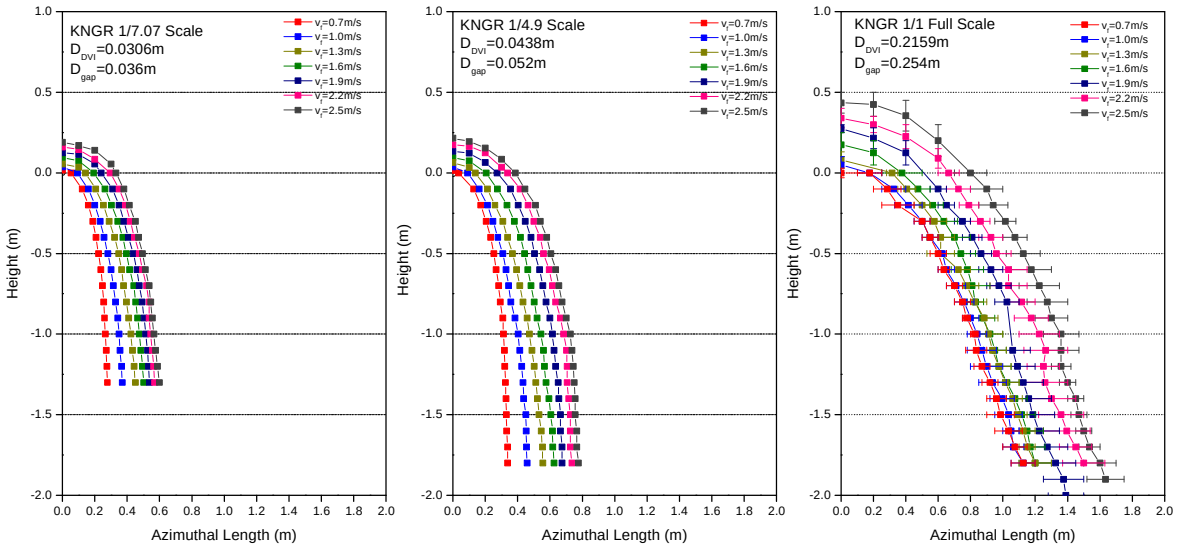


(a) v_f=1.3m/s (b) v_f=2.2m/s

그림 5. 1/1 시험대에서 관측한 액막 및 liquid jet 의 형상

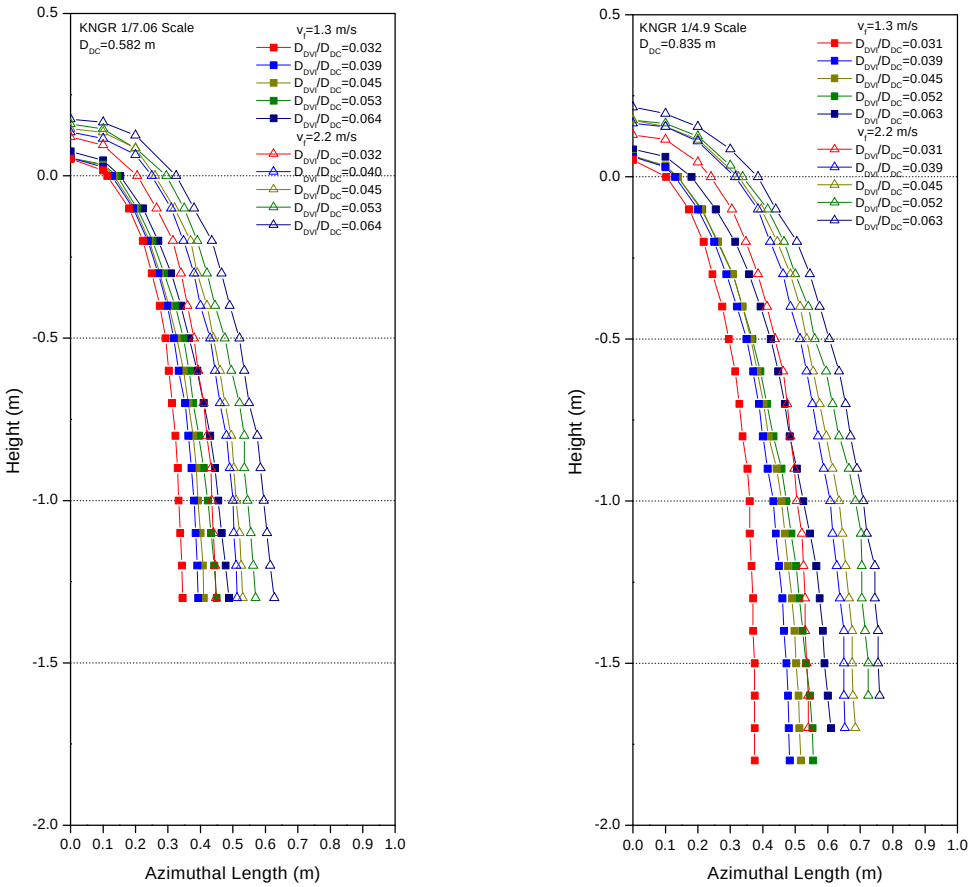
그림 6.은 각 스케일의 시험대에서 액체주입속도에 따른 액막확장폭을 측정한 결과로, 액막의 요동폭이 큰 1/1 시험대의 경우 error bar 로 액막의 요동폭을 나타내었다. 그림 6.-(a)와 그림 6.-(b)와 같이 축소된 실험장치에서는 액체주입속도가 증가함에 따라 증가폭이 다소 감소하는 것으로 나타났으나, 1/1 시험대에서는 그림 6.-(c)와 같이 주입속도가 낮은 0.7m/s~1.3m/s 의 영역에서는 액막확장폭의 증가가 작은 반면, 1.6m/s~2.2m/s 에서는 증가폭이 크게 관측되었다. 이러한 현상은 낮은 액체주입속도에서 DVI 노즐을 통해 분출되는 jet 이 중력에 의해 하부로 편향되는 현상 및 원형과 모형에서 break-up 되어 강수부 배럴에서 떨어지는 액주의 양의 차이에 의해 나타났을 것으로 판단된다. 액막형상 관측 결과, 1.6m/s 이상으로 액체주입속도가 증가하면, jet 이 하부로 편향되지 않고 round jet 의 형태로 강수부 배럴에 수직으로 충돌한다. 반면 1/1 시험대의 경우, 주입속도가 2.5m/s 일 때에도 jet 의 편향이 관측되었다. 이러한 jet 의 편향은 wall jet 의 시작점인 stagnation point 의 위치에 중요하게 작용하여, 액막확장폭에 영향을 주었으리라 판단된다.

그림 7.은 각각 1/7 및 1/5 시험대에서 노즐의 직경을 변화시키며 실험을 수행한 결과로, 안전주입수 주입속도가 각각 1.3m/s 와 2.2m/s 일 때의 결과를 나타내었다. 실험결과에 의하면 동일한 속도로 주입될 경우, DVI 노즐의 직경이 증가할수록 액막확장폭이 증가함을 알 수 있다. 이는 주입노즐의 직경이 증가함으로 인해 강수부 배럴의 상대곡률($=D_{DVI}/D_{DC}$)이 증가했기 때문으로, jet 이 강수부 배럴에 impinging 될 때 더 많은 원주방향 운동량을 갖게 되며, 실린더 표면을 따라 이동하는 wall jet 이 안정화되는 효과로 [10] 인해 액막확장폭의 증가가 나타났을 것이라 판단된다.



(a)1/7 Scale Test Section (b) 1/5 Scale Test Section (c) 1/1 Scale Test Section

그림 6. 액체주입속도에 따른 액막확장폭의 변화



(a) 1/7 Scale Test Section (b) 1/7 Scale Test Section

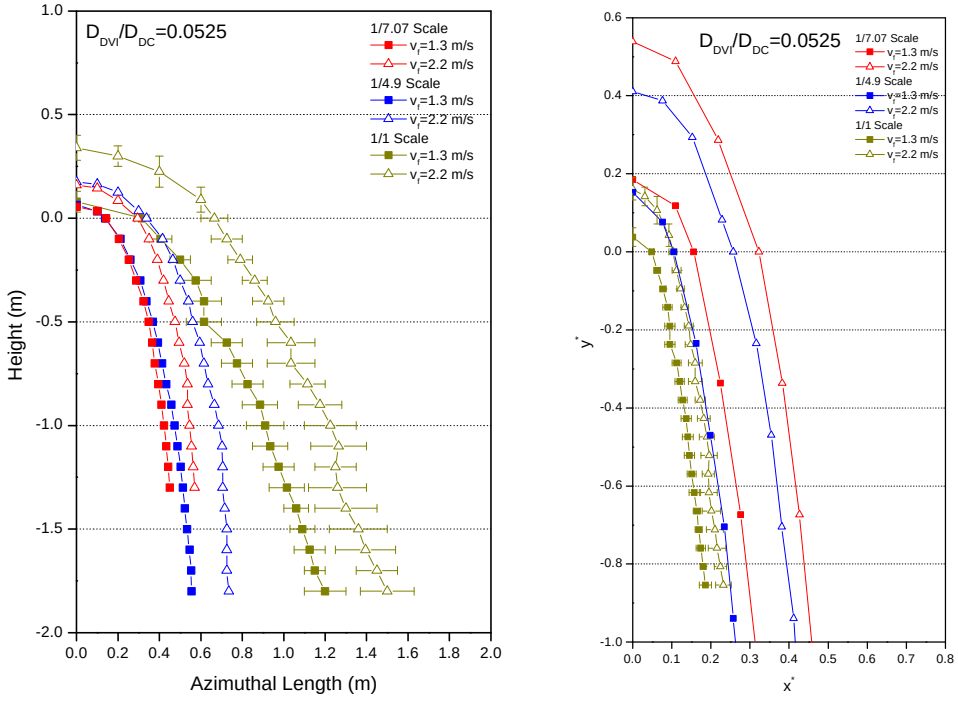
그림 7. DVI 노즐 직경에 따른 액막확장폭의 변화 ($u_f = 1.3$ m/s, $u_f = 2.2$ m/s)

한편, 그림 8.은 1/7 및 1/5 그리고 1/1 시험대에서 서로 동일한 상대곡률을 가지며, 동일한 액체주입속도를 갖을 때의 액막확장폭에 대한 실험결과로 스케일의 효과를 파악하기 위해 절대좌표계와 무차원 좌표계에 대해서 각각 나타내었다. 이때 정의된 무차원 길이는 각각 식(1)과 같다.

$$y^* = \frac{y}{L} \qquad L: \text{척도 비로 축소된 저온관 중심 ~ DVI 노즐의 거리}$$

$$x^* = \frac{x}{\frac{1}{2}\times W} \qquad W: \text{척도 비로 축소된 강수부 배럴의 원주길이} \tag{1}$$

실험결과에 의하면 동일한 상대곡률 및 액체주입속도를 갖는 경우, 척도비가 클수록 액막확장폭이 증가하지만 이를 무차원 좌표로 나타낼 경우, 그림 8–(b)와 같이 축소된 시험대에서의 확장폭이 상대적으로 크게 나타남을 볼 수 있다. 이러한 사실은 대형냉각재 상실사고 시 재관수 기간 동안의 열수력 현상을 모의하기 위한 실험에 있어서, 원형과 모형에서 동일한 액체주입속도로 안전주입수가 주입될 경우, 모형에서의 액막확장폭이 매우 크게 나타나 직접우회 및 계면 열전달 면적이 크게 왜곡될 수 있음을 의미한다.



(a) 절대좌표계 (b) 무차원좌표계

그림 8. 강수부 척도비에 따른 액막확장폭의 변화 ($u_f = 1.3$ m/s, $u_f = 2.2$ m/s)

3.2 수정 선형척도법 적용 시 DVI 노즐 직경의 결정

수정 선형척도법은 원형과 모형에서의 직접우회 비 보존에 적합한 척도해석 방법론으로, UPTF Test 21-D 의 결과 분석 과정에서 도출된 Wallis type parameter 를 이용하여 기체 및 액체 속도를 척도하는 방법론이다. 여기서 Wallis type parameter 의 정의는 식 (2)와 같다.

$$j_k^* = \frac{\dot{M}_k}{r_k \cdot A_{Flow}} \left[\frac{r_k}{(r_f - r_g) \cdot g \cdot L} \right]^{1/2} \tag{2}$$

여기서, $\dot{M}_k$: 기체 및 액체 질량 유속 ($k = g \text{ or } l$)

L : 강수부 특성길이 (m)

A_{Flow} : 원주방향 강수부 유로 (m^2)

r_k : 기체 및 액체 밀도 (kg/m^3)

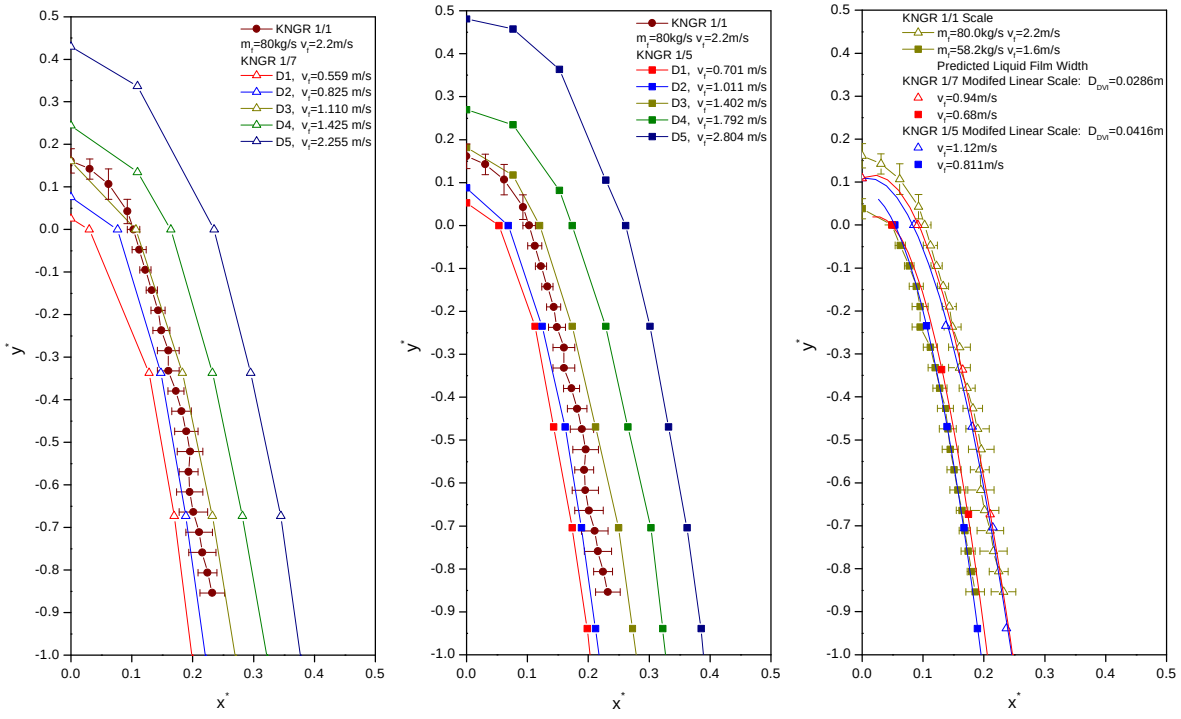
그러나 수정 선형척도법 적용 시, 액체주입속도가 $\sqrt{l_R}$ 로 감소되고 강수부 스케일이 축소됨으로 인해, 원형과 모형에서 액막확장폭의 상사성이 유지되지 않을 수 있다. 따라서 축소된 실험장치에서 수정 선형척도법 적용 시, 원형과 모형의 액막확장폭의 상사성을 위한 DVI 노즐 직경의 도출이 요구된다. 이와 같은 목적으로 DVI 노즐 직경에 대한 민감도 분석을 수행하였다. DVI 노즐 직경이 변하더라도 액체 질량 유속이 동일하면 Wallis type parameter 의 값이 변하지 않으므로, 표 5.와 같이 동일한 액체질량 유속에서 실험을 수행하였다. DVI 직경 변화에 따라 주입속도가 결정되며, 각 실험 결과를 그림 8.에 나타내었다.

그림 9-(a) 및 그림 9-(b)의 결과와 같이, 강수부 내의 다차원 영역이라 예측되는 $y^* = 0.0 \sim -1.0$ 의 영역에서, 1/1 시험대의 실험결과는 1/7 및 1/5 시험대의 D_2 와 D_3 노즐의 실험결과 사이에 위치하고 있음을 알 수 있다. 이러한 실험결과를 바탕으로 원형과 모형에서 액막확장폭의 차이가 최소가 되는 DVI 노즐 직경을 도출하기 위해, 최소자승법을 이용하여 실험결과를 분석하였다. 특정 y^* 에서 원형과 모형의 액막확장폭이 동일하게 나타나는 DVI 노즐 직경을 계산하였고, 이를 평균하여 최적 DVI 노즐 직경을 계산하였다. 그 결과 1/7 및 1/5 시험대에서 각각 0.0286m 와 0.0416m 를 최적 DVI 노즐 직경으로 도출하였다.

한편, 각 DVI 노즐에서 수행된 실험결과를 이용하여 수정된 DVI 노즐로 안전주입수가 주입되었을 때의 액막확장폭을 이차함수의 형태로 예측하였다. 1/7 및 1/5 시험대에서 재관수 기간 동안 안전주입수 주입 유속인 1.6m/s 와 2.2m/s 에 대한 결과를 분석하였으며, 그 결과를 그림 9-(c)에 나타내었다. 이때 모형과 원형에서 나타나는 액막의 면적차이는 1/7 및 1/5 시험대에서 2.2m/s 일 때 각각 –1.8%와 –5.9%로, 1.6m/s 일 때 -7.7%와 3.5%로 예측되었다. 그러나 이는 액막의 상단부분에서 발생하는 오차로서, 재관수 기간 동안의 직접우회 현상은 저온관 부근, 즉 $y^* = -1.0$ 인 영역을 중심으로 나타나기 때문에 직접우회에 큰 영향을 미치지 않을 것으로 판단된다.

표 5. 척도 비에 따른 DVI 노즐 직경 및 실험 조건

Parameter	KNGR	1/4.9 Scale		1/7.07 Scale	
		선형척도	수정 선형척도	선형척도	수정 선형척도
ECC Mass Flow Rate (kg/s)	80	3.29	1.51	1.6	0.602
Diameter (m)	0.2159	0.0438	0.0438	0.0306	0.0306
ECC Injection Velocity (m/s)	2.21	2.21	1.01	2.21	0.83
Test Conditions		Modified DVI Diameter (m)	ECC Injection Velocity (m/s)	Modified DVI Diameter (m)	ECC Injection Velocity (m/s)
		D_1=0.0526	0.70	D_1=0.0372	0.56
		D_2=0.0438	1.01	D_2=0.0306	0.83
		D_3=0.0372	1.40	D_3=0.0264	1.11
		D_4=0.0329	1.79	D_4=0.0233	1.43
		D_5=0.0263	2.80	D_5=0.0186	2.25



(a) 1/7 Scale Downcomer (b) 1/5 Scale Downcomer (c) Predicted Liquid Film Width

그림 9. 수정 선형척도법 적용 시, DVI 노즐 직경에 액막확장폭의 변화

4. 결론

KNGR 강수부 배럴을 모의한 1/7, 1/5 및 1/1 길이 비를 갖는 시험대에서 액막확장폭을 측정하는 실험을 수행하였다. 본 연구의 결론은 다음과 같다.

- 축소 시험대와 1/1 시험대에서 안전주입수 주입 시 나타나는 수력현상을 관찰하였다. 실험결과 jet 의 형상 및 액막 파열 현상의 스케일 효과를 파악하였다.
- 동일한 스케일의 강수부 배럴에서 상대 곡률이 증가에 따라 액막확장폭이 증가한다.
- 동일한 상대곡률 및 주입 속도를 갖는 실험에서 액막확장폭을 척도비로 무차원화하여 비교할 경우, 모형의 액막확장폭이 원형보다 상대적으로 크게 나타난다. 즉, 원형과 모형에서 액체주입속도가 동일할 경우, 액막확장폭의 왜곡이 발생할 수 있다.
- 액막확장폭에 대한 국소척도해석을 위해 실험을 수행하여, 수정 선형척도법 적용 시 원형과 모형에서 동일한 액막확장폭이 형성되는 DVI 노즐 직경을 도출하였다. 이를 1/7 물-공기 실험장치 및 1/5 물-증기 실험장치의 DVI 노즐 설계에 반영하였다.
- 향후 실험결과를 바탕으로 상대곡률 및 강수부 스케일의 효과가 고려된 액막확장폭 예측 모델의 개발을 위한 연구가 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, 1999.

[3] H.K.Cho et al., "Experimental Observation on the Hydraulic Phenomena in the KNGR Downcomer during LBLOCA Reflood Phase", KNS Spring Meeting, Korea Nuclear Society, 2000.

[4] 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, Korea Nuclear Society, 2000.

[5] B.J.Yun et al., “Air/Water Test on Direct ECC Bypass during LBLOCA Reflood Phase of KNGR “, KNS Autumn Meeting, Korea Nuclear Society, 2000.

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

[7] H.D. Hwang, “Air-Water Mixing Experiments for Direct Vessel Injection of KNGR”, Master Thesis, KAIST,

2000.
[8] T.S. Kwon et al., “ECC Water Spreading Width for Flat Plate”, KNS Autumn Meeting, Korea Nuclear Society, 2000.
[9] S.H. Yun et al., “Analysis of Direct Vessel Injection Impingement Flow”, KNS Autumn Meeting, Korea Nuclear Society, 2000.
[10] C.Cornaro et al., “Flow Visualization of a Round Jet Impinging on Cylindrical Surface”, Experimental Thermal and Fluid Science (20), 66-78, 1999