2000 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

LBLOCA 재관수과정에서 DVI방식의 안전주입수 직접우회 현상을 위한 척도해석 방법론의 개발

Development of Scaling Law for the Direct ECC Bypass during LBLOCA Reflood Phase with DVI Safety System

윤병조, 권태순, 송철화, 어동진, 주인철, 박종균
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

조형규, 박군철
서울대학교
서울특별시 관악구 신림동 산 56-1

초록

한국형 차세대원자로는 DVI(Direct Vessel Injection) 방식의 안전주입 계통을 채택하였다. 본 연구에서는 이러한 안전주입 계통의 성능 평가 실험의 일환으로, 대형냉각재 상실사고 시 재관수 기간에 적용하여 안전주입수 직접 우회량을 예측할 수 있는 시간 및 속도가 축소된 선형 척도법을 제시하였다. 척도법은 2차원 2유체 방정식을 사용하여 유도되었다. 이때, 증기 및 안전 주입수 주입 속도는 강수부에서 새로이 정의된 Wallis 무차원수에 의해 척도 되었다. 개발된 시간 및 속도 축소 수정형 선형 척도법은 종횡비가 원형에 잘 보존되어 대형냉각재 상실사고시 재관수 기간의 강수부 유동현상과 같이 다차원 현상이 지배적인 사고의 재현에 적합하다.

Abstract

The KNGR(Korea Next Generation Reactor) adopted DVI(Direct Vessel Injection) system instead of conventional cold leg injection system. In this paper, time and velocity reduced linear scaling law is suggested to be used in the prediction of ECC direct bypass flow rate during LBLOCA reflood phase. The new scaling law is derived from 2-dimensional 2-fluid momentum equations. The velocity is nondimensionalized by Wallis dimensionless parameters. The newly developed scaling law is appropriate to be used in the prediction of multi-dimensional thermal hydraulic phenomena such as in the downcomer during LBLOCA reflood phase because the aspect ratio is preserved as in the prototype.

1. 서 론

한국원자력 연구소에서는 차세대원자로에 채택된 압력용기 직접주입(DVI) 방식의 안전 주입계통 성능 평가를 위해 저온관 양단 파단에 따른 대형냉각재 상실 사고시 강수부에서의 증기-물의 열수력적 거동에 관한 개별효과 실험연구를 수행하고 있다. 이러한 연구의 예비 실험의 일환으로 윤병조등[1]은 대형 냉각재상실 사고시 재관수 기간 동안 강수부에서 발생되는 수력현상의 이해를 위하여 1/7 및 1/7.5의 척도비를 가지는 KNGR 및 UPTF counterpart 물-공기 가시화 실험을 수행하였다. 가시화 실험 결과에 의하면 강수부에서 안전주입수의 액막 형성 및 액막 확장폭, 안전주입수 유동분포 그리고 증기에 의한 안전주입수 액막의 파손 등이 안전 주입수 직접 우회 현상에 직접적으로 영향을 주는 주요 인자들임이 밝혀졌다[1]. 또한, 안전주입수의 우회가 발생되는 주요영역은 상하 방향의 안전주입수 유동과 횡방향의 증기 유동이 상존하는 '다차원 유동영역'으로 정의되며, 이는 대상 원자로 및 실험장치의 기하학적 형상에 크게 의존하는 유동 현상임이 확인되었다. 실험장치를 설계 하기 위해서는 이러한 다차원적 열수력 현상의 거동을 보존하고, 측정된 실험 데이타를 이용하여 원형에서의 안전주입수 우회량 비를 예측할 수 있는 척도법이 선정되어야 된다.

현재까지 개발되어 널리 사용되는 대표적인 척도법으로 체적 척도법, 선형 척도법 그리고 Ishii의 3단계 척도법을 들 수 있다.

체적 척도법은 Nahavandi[2]등에 의해 개발되었다. 체척 척도법의 특징은 시간, 높이 및 속도 척도가 원형과 동일하게 1:1로 보존되므로, 중력효과 및 시간 척도가 중요한 실험에 주로 적용된다. 특히, 체적 척도법은 flashing이 발생되는 사고 모의에 적합하며, 각 계통에서의 기포 계수 및 안전주입수 수위의 보존이 용이하여 냉각재 상실사고를 모의하는 실험장치의 설계에 널리 사용되고 있다. 그러나 크기가 비교적 작은 실험장치에 체적척도법을 적용하면 압력강하 및 열손실, 그리고 실험장치 구조물의 축적열이 과도해짐에 따라 주요 열수력 현상의 왜곡(scaling distortion)이 불가피하게 된다. 또한 높이에 대한 횡방향의 길이 비(aspect ratio, l_{oR}/d_{oR})가 감소하여 다차원적 현상이 지배적인 열수력 현상의 모의에는 적절하지 않다.

선형 척도법은 Nahavandi[2] 등과 Carbiener/Cudnik[3]에 의해 서로 다른 방정식을 사용하여 독립적으로 개발되었으나, 결과적으로 동일한 상사화 요건이 도출되었다. 선형 척도법은 횡 방향에 대한 길이비가 원형에 보존되는 특성을 가지는 척도법으로, 속도 척도는 원형과 동일하게 1:1로 보존되나 시간 척도가 길이 비로 축소되어 과도한 가속도를 요구한다. 따라서 단상유동 또는 냉각재 상실 사고의 blowdown시 파단 유량이 중요한 계통에서는 유용하나, flashing이나 상분리(phase separation)현상 등 중력의 영향이 중요한 현상의 모의시 심각한 척도왜곡을 유발한다. 특히, 과도상태 모의 실험시 축소된 시간에 따른 사고의 모의가 실험장치 제어 관점에서 불가능 할 수 있으며, 실험장치 모의 노심부의 전열기에서 단위 길이당 열 생성량이 과도해져 노심 열전달 현상이 중요한 실험의 수행시 척도왜곡이 발생될 수 있다.

Ishii[4]에 의해 개발된 3단계 척도법은 거시적 척도 (integral 또는 global scaling) 단계, 각 계통의 경계면에서의 질량 및 에너지 출입 보존을 위한 단계, 그리고 각 계통에서 발생 가능한 주요 국소 현상의 재현을 위한 국소 척도법 적용 단계로 구분된다. Ishii의 3단계 척도법의 특징으

로는 높이에 대한 제약의 완화를 들 수 있다. 즉, 축소된 길이 개념을 도입함으로써 체적척도법에서 발생 가능한 척도왜곡을 최소화시킬 수 있는 방안이 제시되었다. 이는 적절한 척도의 선택에 의해 실험장치의 종횡비(aspect ratio)가 원형에 가까워지게 되므로, 비교적 작은 크기의 실험장치에서 다차원적 현상을 보존할 수 있다. 그러나 작동유체의 유속이 보존되지 않고, 또한 길이의 축소에 따른 중력의 영향 및 시간척도의 변화가 발생됨에 따라 국소적 열수력 현상의 왜곡을 초래할 수 있으므로, 이의 적용시 신중한 평가를 필요로 한다. 표 1에는 체적 척도법, 선형 척도법 그리고 Ishii의 3단계 척도법에 의해 도출된 상사화 요건이 정리되었다.

실험장치 설계를 위한 이러한 척도법의 선택은 통상 재현하고자 하는 현상의 이해를 기반으로 재현하고자 하는 현상의 중요도에 따라 선택/적용된다. UPTF counterpart 실험결과에 의하면 주입된 안전주입수의 우회 유량은 강수부에서 횡방향으로 정의된 무차원화된 Wallis 수에 의해 예측 될 수 있음을 보여준다[5]. 기존의 척도법들은 이러한 Wallis 무차원수에 근거한 속도 축소비에 따른 안전주입수 우회 현상을 설명할 수 없다. 따라서, 강수부에서 발생될 다차원적인 효과를 보존하고, Wallis형태의 무차원수에 근거해 길이비에 따라 축소된 속도비를 가지는 새로운 시간 및 속도가 축소된 선형 척도법의 개발의 필요성이 대두되었다.

본 논문에서는 압력용기 직접주입 방식을 채택한 원자로의 대형냉각재 상실 사고시 재관수 시간동안 원형의 원자로 강수부에서 발생될 다차원 현상을 재현하고, 안전주입수 우회율을 예측할수 있는 척도법의 개발을 시도하였다. 이를 위해 2차원 2유체 모멘텀 모델을 선정하여, 각 상의 속도를 Wallis 형태의 무차원수로 무차원화 하였다. 이때, 도출된 무차원 계수 그룹으로부터 척도법의 상사화 조건이 도출되었다.

표 1. 척도법에 따른 주요 상사조건 비교 [2,3,4]

Parameter	Symbol	Parameter Ratio (model/prototype)		
		Volume scaling	Linear scaling	3-Step Scaling
Length	l_{oR}	1	l_{oR}	l_{oR}
Diameter	d_{oR}	d_{oR}	l_{oR}	d_{oR}
Area	a_{oR}	d_{oR}^2	l_{oR}^2	d_{oR}^2
Volume	V_{oR}	d_{oR}^2	l_{oR}^3	$l_{oR}\ a_{oR}$
Core ΔT	ΔT_{oR}	1	-	1
Velocity	u_{oR}	1	1	$l_{oR}^{1/2}$
Time	t_R	1	l_{oR}	$l_{oR}^{1/2}$
Gravity	g_R	1	$1/l_{oR}$	1
Power / volume	q_{oR}'''	1	$1/l_{oR}$	$l_{oR}^{-1/2}$
Heat Flux	q_{oR}''	1	$1/l_{oR}$	$l_{oR}^{-1/2}$
Core power	q_{oR}	d_{oR}^2	l_{oR}^2	$a_{oR}\ l_{oR}^{1/2}$
Rod diameter	RD_R	1	1	1
Number of rods	n_R	d_{oR}^2	l_{oR}^2	a_{oR}
Flow rate	$\dot{m}_{oR}$	d_{oR}^2	l_{oR}^2	$a_{oR}\ l_{oR}^{1/2}$
Δi subcooling	$\Delta i_{sub\ R}$	1	1	1
ΔT subcooling	$\Delta T_{sub\ R}$	1	1	1

2. 속도 및 시간이 축소된 수정형 선형척도법

안전주입수 직접우회(ECC direct bypass) 현상의 분석에 적용하기 위하여 개발한 '수정 선형척도법'을 유도하기 위해 2차원 2유체 모멘텀 방정식을 유도하였다. 이때 사용된 주요 가정은 다음과 같다.

○ 제어체적내 유체의 거동은 상부에서 액막 형태로 하강하는 안전주입수와 증기의 횡방향 유동이 지배적인 2차원적 거동을 한다.

○ Turbulent shear stress는 무시한다.

○ 제어체적내의 에너지 전달은 없다고 가정한다. 이때 증기속도는 총 주입 증기량에서 증기응축에 의해 발생된 상 변화량을 제외한 값으로 정의한다.

○ 벽면의 wall shear stress와 상간의 interfacial shear stress가 존재한다.

○ 증기와 물의 유동시 횡방향으로는 동방향(co-current) 유동이 발생되며, 수직방향으로는 반류(counter current)유동이 발생된다.

○ 직교 좌표계를 적용하여 수직방향의 상하 유동은 x-방향으로, 횡방향 유동은 y-방향으로 정의한다. 이때 속도는 각각 u, v로 정의한다.

○ 비 압축성 유체를 가정한다.

제어체적에서 수직방향 및 횡방향의 모멘텀 보존식은 다음과 같이 유도된다[6].

<u>x-방향(수직방향) 모멘텀 보존식</u>

$$\frac{\partial \rho_k \alpha_k u_k}{\partial t} + \frac{\partial \rho_k \alpha_k u_k u_k}{\partial x} + \frac{\partial \rho_k \alpha_k u_k v_k}{\partial y} = -\alpha_k \rho_k g - \alpha_k \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{\alpha_k}{2D_{hx}} f_{wxk}\, \rho_k\, u_k^2 + \frac{1}{2D_{hx}} f_{ix} \rho_g (u_g + u_f)^2 \tag{1}$$

<u>y-방향(횡방향) 모멘텀 보존식</u>

$$\frac{\partial \rho_k \alpha_k v_k}{\partial t} + \frac{\partial \rho_k \alpha_k v_k v_k}{\partial y} + \frac{\partial \rho_k \alpha_k v_k u_k}{\partial x} = -\alpha_k \frac{\partial p}{\partial y} - \frac{\alpha_k}{2D_{hy}} f_{wyk}\, \rho_k\, v_k^2 + \frac{1}{2D_{hy}} f_{iy} \rho_g (v_g - v_f)^2 \tag{2}$$

여기에서

ρ_k : 상-k의 밀도

α_k : 상-k의 분률

u_k, v_k : 상-k의 수직방향 및 횡방향 실제 속도

D_{hx}, D_{hy} : 수직방향 및 횡방향의 수력학적 직경

f_{wxk}, f_{wyk} : 상-k의 수직방향 및 횡방향의 벽면 마찰계수

f_{ix}, f_{iy} : 수직방향 및 횡방향 유동시 상 경계면에서의 마찰계수

식(1),(2)는 증기 겉보기 속도(j) 및 속도 비에 의해 각각 식(3)과 (4)와 같이 변환될 수 있다.

$$\frac{\partial \rho_k j_{xk}}{\partial t} + \frac{\partial \rho_k \alpha_k^{-1} j_{xk} j_{xk}}{\partial x} + \frac{\partial \rho_k \alpha_k^{-1} j_{xk} j_{yk}}{\partial y} = -\alpha_k \rho_k g - \alpha_k \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{1}{2D_{hx}} f_{wxk}\, \rho_k\, \frac{j_{xk}^2}{\alpha_k} + \frac{1}{2D_{hx}} f_{ix} \rho_g \left(1 + \frac{1}{S_x}\right)^2 \frac{j_{gx}^2}{\alpha_g^2} \tag{3}$$

$$\frac{\partial \rho_k j_{yk}}{\partial t} + \frac{\partial \rho_k \alpha_k^{-1} j_{yk} j_{yk}}{\partial y} + \frac{\partial \rho_k \alpha_k^{-1} j_{yk} j_{xk}}{\partial x} = -\alpha_k \frac{\partial p}{\partial y} - \frac{1}{2D_{hy}} f_{wyk}\, \rho_k\, \frac{j_{yk}^2}{\alpha_k} + \frac{1}{2D_{hy}} f_{iy} \rho_g \left(1 - \frac{1}{S_y}\right)^2 \frac{j_{gy}^2}{\alpha_g^2} \tag{4}$$

여기에서

j_{xk} : 상-k의 x-방향 겉보기 속도 $(=\alpha_k u_k)$

j_{yk} : 상-k의 y-방향 겉보기 속도 $(=\alpha_k v_k)$

S_x : x-방향 슬립률 $(=u_g/u_f)$

S_y : y-방향 슬립률 $(=v_g/v_f)$

식 (3)과 (4)를 무차원화 하기 위해서 다음과 같이 무차원 변수를 정의 할 수 있다. 이때, 하첨자 o는 기준이 되는 값이고, 상첨자 *는 무차원화된 변수이다.

$$t/t_o = t/\left(\frac{x_o}{j_{kxo}}\right) = t^*,\ \ x/L_o = x^*,\ \ y/L_o = y^*,\ \ D_h/L_o = D_h^*\ ,$$

$$j_{xk}/j_{xko} = j_{xk}^*\ ,\ \ j_{yk}/j_{yko} = j_{yk}^*$$

$$j_{xk}/j_{xko} = j_{xk}/\left(\frac{g_o D_{xo}(\rho_{fo} - \rho_{go})}{\rho_{ko}}\right)^{1/2} = j_{xk}^*,$$

$$j_{yk}/j_{yko} = j_{yk}/\left(\frac{g_o D_{yo}(\rho_{fo} - \rho_{go})}{\rho_{ko}}\right)^{1/2} = j_{yk}^*$$

$$\rho_k/\rho_{ko} = \rho_k^* \ , \ \ \alpha_k/\alpha_{ko} = \alpha_k^*, \ \ g/g_o = g^*,$$

$$p/\Delta p_{xo} = p/(\rho_{go} j_{xgo}^2/\alpha_{go} + \rho_{fo} j_{xfo}^2/\alpha_{fo}) = p^*$$

$$p/\Delta p_{yo} = p/(\rho_{go} j_{ygo}^2/\alpha_{go} + \rho_{fo} j_{xyo}^2/\alpha_{fo}) = p^*$$

$$f_i/f_{io} = f_i^*, f_{uxk}/f_{uxko} = f_{uxk}^*, f_{wyk}/f_{wyko} = f_{wyk}^* \tag{5}$$

식(5)를 식 (3), (4)에 대입하면 각각 식(6) 과(7)의 무차원화된 모멘텀 보존식이 얻어진다.

$$\frac{\partial \rho_k^* j_{xk}^*}{\partial t^*} + \pi_1 \frac{\partial\, \rho_k^* \alpha_k^{*^{-1}} j_{xk}^* j_{xk}^*}{\partial x^*} + \pi_2 \frac{\partial\, \rho_k^* \alpha_k^{*^{-1}} j_{xk}^* j_{yk}^*}{\partial y^*}$$
$$= -\pi_3 \alpha_k \rho_k^* g^* - \pi_4 \alpha_k^* \frac{\partial p^*}{\partial x^*} - \pi_5 \frac{1}{2D_{hx}^*} f_{uxk}^* \ \rho_k^* \ \frac{j_{xk}^{*^2}}{\alpha_k^*} + \pi_6 \frac{1}{2D_{hx}^*} f_{ix}^* \rho_g^* \ (1 + \frac{1}{S_x})^{*^2} \ \frac{j_{gx}^{*^2}}{\alpha_g^{*^2}} \tag{6}$$

$$\frac{\partial \rho_k^* j_{yk}^*}{\partial t^*} + \pi_2 \frac{\partial\, \rho_k^* \alpha_k^{*^{-1}} j_{yk}^* j_{yk}^*}{\partial y^*} + \pi_1 \frac{\partial\, \rho_k^* \alpha_k^{*^{-1}} j_{xk}^* j_{yk}^*}{\partial x^*}$$
$$= -\pi_7 \alpha_k^* \frac{\partial p^*}{\partial y^*} - \pi_8 \frac{1}{2D_{hy}^*} f_{wyk}^* \ \rho_k^* \ \frac{j_{yk}^{*^2}}{\alpha_k^*} + \pi_9 \frac{1}{2D_{hy}^*} f_{iy}^* \rho_g^* \ (1 - \frac{1}{S_y})^{*^2} \ \frac{j_{gy}^{*^2}}{\alpha_g^{*^2}} \tag{7}$$

식(6)과 식(7)에서 계수로 정의된 무차원 변수 π는 표 2에 정리되었다. 이때, 표에 정리된 무차원 수가 다음과 같이 원형과 모형에서 같아지면, 원형과 모형의 모멘텀 방정식이 같아져 동일한 수력학적 거동을 나타낸다.

$$\pi_m/\pi_p \ = \ 1 \tag{8}$$

표 2 상사조건을 위한 무차원 변수 그룹

Similarity Parameter Groups	
π_1	$t_o j_{xko} / \alpha_{ko} L_o$
π_2	$t_o j_{yko} / \alpha_{ko} L_o$
π_3	$\alpha_{ko} t_o g_o / j_{xko}$
π_4	$\alpha_{ko} t_o \Delta p_{xo} / j_{xko} \rho_{ko} L_o$
π_5	$f_{uxko} j_{xko} t_o / L_o \alpha_{ko}$
π_6	$(f_{ixo} \rho_{go} j_{xgo}^2 t_o / L_o \alpha_{ko}^2 \rho_{ko} j_{xko})(1+1/S_x)_o^2$
π_7	$\alpha_{ko} t_o \Delta p_{yo} / j_{yko} \rho_{ko} L_o$
π_8	$f_{wyko} j_{yko} t_o / L_o \alpha_{ko}$
π_9	$(f_{iyo} \rho_{go} j_{ygo}^2 t_o / L_o \alpha_{ko}^2 \rho_{ko} j_{yko})(1-1/S_y)_o^2$

실험장치와 원형의 상사법칙은 표 2에 정리된 무차원 계수를 식(8)에 적용하여 도출할 수 있다. 원형과 모형에서 온도 및 시스템 압력 등이 동일하다고 가정하고, 길이 축소비를 적용하면 π_1 으로 부터 다음의 시간, 속도 및 기포율 관계를 구하게 된다.

$$\frac{(\pi_1)_m}{(\pi_1)_p} = \frac{(t_o)_m}{(t_o)_p} \frac{(j_{xko})_m}{(j_{xko})_p} \frac{(\alpha_{ko})_p}{(\alpha_{ko})_m} \frac{(L_o)_p}{(L_o)_m} = 1 \tag{9}$$

식(9)에서 속도 비는 Wallis 무차원수의 비에 의해 다음과 같이 축소된다.

$$v_R = \frac{(j_{xko})_m}{(j_{xko})_p} = (\frac{(D_{xo})_m}{(D_{xo})_p})^{1/2} = l_R^{1/2} \tag{10}$$

이때, 원형과 모델의 기포계수는 고속의 증기와 물의 혼합 유동영역인 ‘다차원 유동영역에’서 다음의 Drift-flux 관계식으로 근사할 수 있다. 이때, drift-velocity는 밀도에 의해 결정된는 속도로 고속의 물, 공기 유동에서는 무시될 수 있다.

$$\alpha_{go} = \frac{j_{go}}{C_o(j_{go}+j_{fo}) + \overline{V_{gho}}} \cong \frac{j_{go}}{C_o(j_{go}+j_{fo})} \tag{11}$$

식(11)의 증기 및 물의 겉보기 속도가 모델에서 동일한 비율로 축소되고, void distribution parameter(C_o)는 압력 및 온도만의 함수이므로, 원형과 모형에서의 기포계수는 다음과 같이 동일해 진다.

$$\alpha_{goR} = \frac{(\alpha_{go})_m}{(\alpha_{go})_p} = \frac{j_{gom}}{C_{om}(j_{gom}+j_{fom})} / \frac{j_{gop}}{C_{op}(j_{gom}+j_{fop})} = 1 \tag{12}$$

식 (10),(12)의 관계와 길이 비를 적용하면 다음의 시간 척도비가 구해진다.

$$t_R = \frac{(t_o)_m}{(t_o)_p} = \frac{(j_{xko})_p}{(j_{xko})_m}\frac{(\alpha_{ko})_m}{(\alpha_{ko})_p}\frac{(L_o)_m}{(L_o)_p} = l_R^{-1/2}\ l_R = l_R^{1/2} \tag{13}$$

즉, 실험장치와 원형의 속도가 Wallis 무차원수에 의해 척도 되면 시간 척도비가 다음의 길이비에 의해 축척되어야 된다. 이때, π_2는 π_1과 동일한 척도비를 가진다.

π_3는 중력 항으로, 모형과 원형에서 다음의 관계가 성립해야 한다.

$$\frac{(\pi_3)_m}{(\pi_3)_p} = \frac{(\alpha_{ko})_m}{(\alpha_{ko})_p}\frac{(t_o)_m}{(t_o)_p}\frac{(j_{xko})_p}{(j_{xko})_m}\frac{(g_o)_m}{(g_o)_p} = 1 \tag{14}$$

식(10),(12),(13)을 식(14)에 대입하면 원형과 모형에서 다음과 같이 중력이 보존된다.

$$\frac{(g_o)_m}{(g_o)_p} = \frac{(\alpha_{ko})_p}{(\alpha_{ko})_m}\frac{(t_o)_p}{(t_o)_m}\frac{(j_{xko})_m}{(j_{xko})_p} = l_R^{-1/2}\ l_R^{1/2} = 1 \tag{15}$$

π_4는 π_7과 동일한 척도비를 가진다. 이때, π_4는 다음과 같이 원형과 모형에서 그 값이 동일해진다.

$$\frac{(\pi_4)_m}{(\pi_4)_p} = \frac{(\alpha_{ko})_m}{(\alpha_{ko})_p}\frac{(t_o)_m}{(t_o)_p}\frac{(\rho_{go}j_{xgo}^2/\alpha_{go}+\rho_{fo}j_{xfo}^2/\alpha_{fo})_m}{(\rho_{go}j_{xgo}^2/\alpha_{go}+\rho_{fo}j_{xfo}^2/\alpha_{fo})_p}\frac{(j_{xko})_p}{(j_{xko})_m}\frac{(\rho_{ko})_p}{(\rho_{ko})_m}\frac{(L_o)_p}{(L_o)_m}$$
$$= l_R^{1/2}\ l_R\ l_R^{-1/2}\ l_R^{-1} = 1 \tag{16}$$

식(16)에서 원형과 모형의 압력 강하비는 속도의 제곱의 비가 되어 길이비와 동일하게 척도된다. 이는 실험장치의 압력강하가 길이비로 축소됨을 의미한다.

π_5 는 벽면 마찰을 나타내는 무차원 변수로서, π_8과 동일한 척도비를 가진다. 벽면에서의 마찰계수는 난류 유동에서 상수로 둘 수 있다. 따라서 다음과 같이 π_5는 원형과 모형에서 동일한 값을 가진다고 근사할 수 있다.

$$\frac{(\pi_5)_m}{(\pi_5)_p} = \frac{(f_{wxko})_m}{(f_{wxko})_p}\frac{(j_{xko})_m}{(j_{xko})_p}\frac{(t_o)_m}{(t_o)_p}\frac{(\alpha_{ko})_p}{(\alpha_{ko})_m}\frac{(L_o)_p}{(L_o)_m} \cong l_R^{1/2}\ l_R^{1/2}\ l_R^{-1} = 1 \tag{17}$$

π_6는 상 경계면에서의 마찰을 나타내는 무차원수로서, π_9와 동일한 척도비를 가진다. 상 경계면 마찰계수는 기포계수의 함수로서, 원형과 모형에서 기포계수가 보존되면 동일한 값을 가진다. 따라서 π_6 및 π_9는 다음과 같이 원형과 모형에서 동일한 값을 가진다.

$$\frac{(\pi_6)_m}{(\pi_6)_p} = \frac{(f_{ixo})_m}{(f_{ixo})_p}\frac{(\rho_{go})_m}{(\rho_{go})_p}\frac{(j_{xgo})^2{}_m}{(j_{xgo})^2{}_p}\frac{(t_o)_m}{(t_o)_p}\frac{(L_o)_p}{(L_o)_m}\frac{(\alpha_{ko}{}^2)_p}{(\alpha^2_{ko})_m}$$

$$\cdot\frac{(\rho_{ko})_p}{(\rho_{ko})_m}\frac{(j_{xko})_p}{(j_{xko})_m}(\frac{(1+1/S_x)^2_{o\,m}}{(1+1/S_x)^2_{o\,p}} \cong l_R\, l_R^{1/2}\, l_R^{-1}\, l_R^{-1/2} = 1 \qquad (18)$$

척도해석 과정을 통하여 도출된 상사조건은 표 3에 정리되어 기존의 선형 척도법과 비교되었다. 개발된 선형 척도법은 기하학적인 상사비는 기존의 선형 척도법과 동일하나 시간 및 속도 척도비가 길이의 비에 의해 척도 됨을 보여준다. 표 2의 Ishii 척도법에 축소된 길이비를 대입하면 수정형 척도법과 동일한 척도비를 얻게된다. 즉, 개발된 시간 및 속도가 축소된 수정 선형 척도법은 Ishii 척도법에서 종횡비가 1:1 로 보존되는 특수한 경우에 해당된다.

표 3 '속도 및 시간이 축소된 수정 선형척도법' 및 기존 선형척도법의 상사조건 비교

Parameter	Scaling Ratio	
	Modified Linear Scaling	Standard Linear Scaling
Length Ratio, l_{oR}	l_R	l_R
Area Ratio, a_{oR}	l_R^2	l_R^2
Volume Ratio, V_{oR}	l_R^3	l_R^3
Time Ratio, t_{oR}	$l_R^{1/2}$	l_R
Velocity Ratio, v_{oR}	$l_R^{1/2}$	1
Flow Rate Ratio, $\dot{m}_{oR}$	$l_R^{5/2}$	l_R^2
Pressure Dop Ratio, Δp_{oR}	l_R	-
Gravity Ratio, g_{oR}	1	$1 / l_R$
Pressure Ratio, p_{oR}	1	1
Temperature Ratio, T_{oR}	1	1
Void Ratio, α_{oR}	1	1
Slip Ratio, S_{oR}	1	1
Aspect Ratio, l_{oR}/D_{oR}	1	1

3. 증기 응축량 척도해석

강수부에서는 고온의 증기와 차가운 안전주입수간의 직접접촉 응축현상에 의한 열전달이 발생된다. 직접접촉 응축현상에 의한 상간의 에너지 및 질량 전달은 반류유동 flooding 상관식에서 널리 사용되는 증기 응축식에 의해 고려될 수 있다. UPTF실험 결과에 의하면 이러한 상관식이 재충전(refill) 및 재관수 기간의 증기 응축에 성공적으로 사용될 수 있다[7]. 본 실험에서 증기응축량 척도해석을 위하여 다음의 Ja 무차원수 및 Wallis 무차원수에 의해 정의된 경험식을 사용하였다

[7,8].

$$j^*_{g,cond} = \frac{C_p \Delta T}{h_{fg}} \left(\frac{\rho_f}{\rho_g} \right)^{1/2} j^*_{f,ecc} \tag{19}$$

여기에서

C_p : 강수부내 평균 압력에서의 정압 비열

h_{fg} : 강수부내 평균 압력에서의 증기와 물의 엔탈피 차이

ΔT : 강수부 평균 압력에서 계산된 안전주입수 미포화도

이때, 다차원 유동 영역에서의 순 증기겉보기 속도는 다음 식에 의해 계산된다.

$$j^*_g = j^*_{g,tot} - (f \cdot j^*_{g,cond}) \tag{20}$$

$$f = \frac{\Delta T_{in} - \Delta T_{out}}{\Delta T_{in}} \tag{21}$$

여기에서

ΔT_{in} : 강수부 주입지점에서의 안전주입수 미포화도

ΔT_{out} : 강수부 바닥 또는 파단 저온관에서의 안전주입수 미포화도

UPTF실험에 의하면 DVI를 통한 안전주입수 주입시 재관수 기간의 증기 응축효율계수 f는 1의 값을 가진다[7]. 실험장치 설계에서 안전주입수의 주입 온도가 원형과 동일하고 비상노심 냉각수 주입량이 Wallis 무차원수에 의해 척도되어 주입되면, 증기 응축효율계수는 원형과 모형에서 동일한 값을 가질 것으로 예상된다. 이때, 식(19), (20)에 의하면 실험장치와 원형의 증기 응축률의 비는 1:1로 보존된다.

4. 시간 및 속도가 척도된 '수정 선형척도법'의 적용성

길이 및 시간이 축소된 수정 선형척도법은 안전주입수의 직접우회 (direct bypass) 현상에 의한 파단 방출량의 척도해석에 적용될 수 있다. 특히, 본 척도해석법에 따르면 원형과 모형간의 종횡비(aspect ratio)가 일치하여 다차원적 유동현상이 지배적인 사고에 용이하게 적용될 수 있다. 그러나 축소된 시간비는 과도사고 모의시 시간에 따른 실험조건 변화의 제어에 어려움을 줄 수 있다. 또한, 물과 증기의 두 상이 혼합되어 있는 기포, 슬러그 유동양식에서는 기포계수 및 혼합수위의 심각한 척도 왜곡이 발생될 수 있다. 이는, 기포 속도가 길이 비에 의해 축소되어야 되나, 이상유동이 발생되는 유로에서 기포 속도는 밀도차에 의해 결정되어 기포 속도를 제어할 수 없기 때문이다. 또한, 개발된 척도법은 길이에 의해 축소된 속도 비를 특징으로 하여, 안전주입수 주입

시 축소된 주입 속도로 인해 강수부 배럴에서의 안전주입수 액막 확장 폭의 척도 왜곡을 초래할 수 있다. 차후 본 척도법의 적용시 이러한 액막 폭의 보존을 위하여 액막 확장 폭에 관한 국소 척도 해석이 수행하여 안전주입 노즐의 직경을 결정하여야 한다.

5. 결 론

본 연구에서는 원자로 용기 직접 주입 방식의 안전주입 계통을 채택한 차세대 원자로의 저온관 파단에 따른 대형 냉각재 상실사고 재관수 기간동안의 안전주입수 직접 우회 현상 예측을 위한 실험 장치 척도 해석 방법론이 제시되었다. 개발된 척도법은 실험장치의 기하학적 설계는 선형척도를 가지나 시간 척도 및 속도 척도는 길이 비에 의해 축소되는 특징을 보여준다. 특히, 속도척도는 Wallis형의 무차원수에 의해 척도 되어 반류 유동의 flooding 현상 및 UPTF실험 데이터 분석에 널리 사용된 Wallis 무차원수 적용성의 이론적 근거를 확인할 수 있었다. 제시된 시간 및 속도가 척도된 수정형 선형 척도법은 다차원 현상이 지배적인 강수부의 안전주입수 직접 우회 현상에 적용될 수 있으나, 성공적인 적용을 위해서는 향후 물막의 퍼짐에 관한 국소 척도 해석이 수행되어야 된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구.개발사업의 일환으로 수행되었다.

참고문헌

[1] 윤병조, 조형규, 권태순, 송철화, 박종균, 박군철, "Experimental Observation on the Hydraulic Phenomena in the KNGR Downcomer during LBLOCA Reflood Phase", 2000 춘계학술발표회, 한국원자력학회 (2000)

[2] A.N. Nahavandi, F.S. Castellana & E.N. Moradkhanian, "Scaling Laws for Modeling Nuclear Reactor Systems", Nucl. Sci. & Eng., Vol. 72, pp.75-83 (1979)

[3] W.A. Carbiener & R.A. Cudnik, "Similitude Considerations for Modeling Nuclear Reactor Blowdowns", Trans. Am. Nucl. Soc., Vol. 12, p.361 (1969)

[4] M. Ishii & I. Kataoka, "Similarity Analysis and Scaling Criteria for LWR's Under Single-Phase and Two-Phase Natural Circulation", NUREG/CR-3267 (1983)

[5] 윤병조, 조형규, 권태순, 송철화, 박종균, 박군철,“LBLOCA 재관수 기간동안 비상노심 냉각수의 직접우회 현상에 관한 물-공기 실험 : UPTF Test 21-D 비교실험“, 2000 추계학술발표회,한국원자력학회(2000)

[6] M. Ishii, Thermo-Fluid Dynamic Theory of Two-Phase Flow, Eyrolles (1975)

[7] 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.

[8] M. Osakebe & Y. Kawasaki, "Top Flooding in Thin Rectangular and Annular Passages", Int. J. Multiphase Flow. Vol. 15 (1989)