’2002 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

# 수정형 선형척도법의 검증을 위한 UPTF TEST 21-D 물-공기 비교 실험

# Experimental Results of UPTF TEST 21-D Counter-part Air/Water Test for the Validation of Modified Linear Scaling Methodology

**조형규, 박군철**
서울대학교
서울특별시 관악구 신림동 산 56-1

**윤병조, 권태순, 송철화**
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

## 요약

수정형 선형척도법은 대형 원자로 냉각재 상실사고 (LBLOCA) 재관수 기간 동안, 강수부 내에서 발생하는 안전주입수의 직접우회 현상을 재현하기 위해 개발되었다. 본 척도해석 방법론은 이차원 이유체 방정식으로부터 유도되었으며, 시간 및 속도 스케일이 축소되는 특징을 갖는다. 본 연구에서는 안전주입수 우회현상의 보존을 위해 개발된 수정형 선형척도법을 검증하기 위한, UPTF Test 21-D 물-공기 비교실험을 1/4 및 1/7.3 스케일 강수부에서 수행하였다. 직접우회의 주요 척도해석 변수인 액막확장폭 및 직접우회율에 대한 개별효과 실험결과, 본 척도해석 방법론이 강수부 내의 다차원 유동 현상을 적절히 재현함을 확인하였다.

## ABSTRACT

From the two dimensional two-fluid model a new scaling methodology, named the “modified linear scaling”, is suggested for the scientific design of a scaled-down experimental facility and data analysis of the direct ECC bypass under LBLOCA reflood phase. The characteristics of the scaling law are its velocity is scaled by a Wallis-type parameter and the aspect ratio of experimental facility is preserved with that of prototype. For the experimental validation of the proposed scaling law, the air-water tests for direct ECC bypass were performed in the 1/4.0 and 1/7.3 scaled UPTF downcomer test section. The obtained data are compared with those of UPTF Test21-D. It is found that the modified linear scaling methodology is appropriate for the preservation of multi-dimensional flow phenomena in downcomer annulus, such as direct ECC bypass.

# 1. 서 론

한국원자력 연구소에서는 차세대원자로에 채택된 압력용기 직접주입(DVI) 방식의 안전 주입계통 성능 평가를 위해, 저온관 양단 파단에 따른 대형냉각재 상실 사고 시 강수부에서의 증기-물의 열수력적 거동에 관한 개별효과 실험연구를 수행하고 있다. 이러한 연구의 예비 실험의 일환으로, 윤병조 등[1]은 대형 냉각재상실 사고 시 재관수 기간 동안 강수부에서 발생되는 수력현상의 이해를 위하여, 1/7 및 1/7.5의 척도 비를 갖는 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 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 한다.

DVI방식의 원자로에서 발생하는 다차원 열수력 현상을 기존의 척도해석 방법론이 적절히 모의하는지를 평가하기 위해, 현재까지 개발되어 널리 사용되는 대표적인 척도법인 체적 척도법 및 선형 척도법을 적용한 실험장치에서 UPTF Test 21-D 비교 실험을 수행하였다.

## 1.1 체적 척도법 (Volume Scaling Methodology)

체적 척도법은 Nahavandi등에 의해 개발되었다[2]. 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 체적척도법 적용 시, 소형 실험장치는 원형과 동일한 높이로 설계되어야 하며, 이는 횡방향 증기유동의 유로면적이 크게 증가함을 의미한다. 이로 인해 횡방향 증기의 거동이 원형과 모형에서 크게 왜곡될 것이라 판단된다. 따라서, 안전주입수의 직접우회와 같이 횡방향 증기유동이 중요한 현상을 재현함에는 높이가 보존되는 체적 척도법은 적절치 않으며, 실험 장치의 종횡비(aspect ratio)가 원형과 모형에서 동일하게 유지되도록 실험장치가 설계되어야만 직접우회 현상이 적절히 보존될 것이라 판단된다.

## 1.2 선형 척도법 (Volume Scaling Methodology)

선형 척도법은 Nahavandi[2] 등과 Carbiener/Cudnik[3]에 의해 서로 다른 방정식을 사용하여 독립적으로 개발되었으나, 결과적으로 동일한 상사화 요건이 도출되었다. 선형 척도법은 실험장치의 종횡비가 원형과 동일하게 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 모의 시 심각한 척도왜곡을 유발한다.

윤병조 등[4]은 선형척도법을 적용한 1/7.5 scale 강수부에서 UPTF Test 21-D 비교실험을 수행하였다. 실험결과는 그림 1.과 같다. 실험결과에 의하면 축소된 실험장치에서의 직접우회율이 원형에서의 직접우회율에 비해 과도하게 나타났다. 이는 선형척도법이 적용되어 원형과 모형의 속도 스케일이 보존될 경우, 직접우회율의 척도왜곡이 크게 나타남을 의미하며, 이러한 실험결과로부터 원형과 모형에서 직접우회율을 보존하기 위한 무차원 속도의 필요성이 대두되었다. 본 연구에서는 UPTF Test 21-D의 실험결과 분석 시 사용된, Wallis type parameter를 이용하여 척도해석을 수행하였다[5].

한편, 직접우회의 주요 척도해석 변수를 도출하기 위해, 다양한 유동 및 기하학적 조건에서 개별효과 실험을 수행하였다[6]. 그 중, 안전주입수 주입 속도 및 DVI 노즐 직경 효과에 대한 실험결과에 의하면, 강수부 배럴과 충돌 후 하강하는 액막의 확장폭이 직접우회에 직접적으로 영향을 미치는 인자로 밝혀졌다. 액막확장폭은 강수부 내에서 안전주입수와 파단저온관 사이의 거리를 의미하는 변수로서, 그림 2.와 같이 안전주입수가 주입되는 DVI 노즐의 위치에 따라, 직접우회 곡선이 서로 다른 경향을 갖게 된다. 즉, 안전주입수가 파단부와 멀리 위치한 DVI 노즐로 주입될 경우, 액막확장폭이 증가하면 안전주입수와 파단저온관 사이의 거리가 가까워지며, 직접우회율은 증가한다. 반면, 파단부와 근접한 DVI 노즐을 통해 안전주입수가 주입될 경우, 액막확장폭의 증가는 파단저온관과 안전주입수 사이의 거리가 증가함을 의미하며, 직접우회율은 감소한다.

이러한 실험결과로부터, 직접우회현상의 보존을 위해서는 파단저온관과 안전주입수의 상대적 거리를 의미하는 무차원 액막확장폭이 원형과 모형에서 동일하게 유지되어야 할 것이라 판단된다.

본 연구에서는, 직접우회 현상의 재현을 위해 도출된 수정형 선형 척도법을 소개하고, UPTF Test 21-D 물-공기 실험을 통해 이를 검증하고자 한다. 국소 척도 해석의 관점에서, 수정형 선형척도법 적용 시 액막확장폭의 보존 여부를 1/1, 1/4 및 1/7.3 크기의 강수부 배럴을 모의한 시험대를 이용하여 확인하고자 하였다. 또한 1/4 및 1/ 7.3 크기의 UPTF Test 21-D 비교 실험을 통해, 제안된 척도해석 방법론을 검증하고자 하였다.

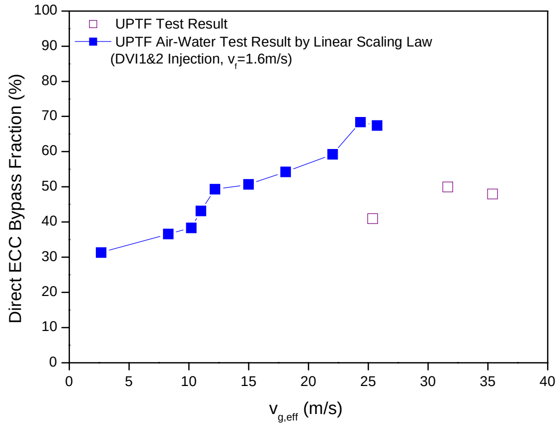



그림 1. 선형척도법 적용 UPTF Test 21-D 물-공기 비교실험 결과

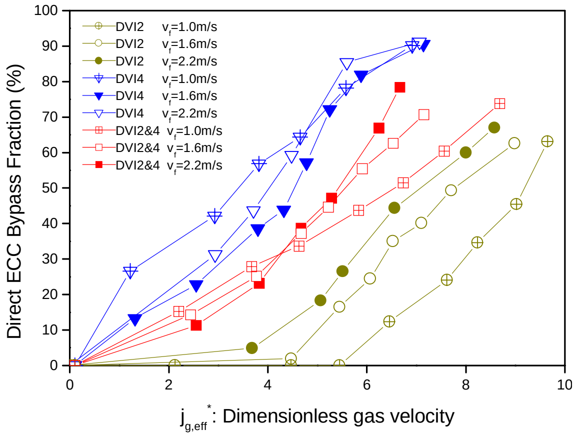



그림2. 액체주입속도에 따른 직접우회율 변화

## 2. 수정형 선형 척도법 (Modified Linear Scaling Methodology)

윤병조 등[7]은 이차원 이유체 모델로부터 시간 및 속도가 축소되며, 종횡비는 보존되는 수정형 선형척도법을 개발하였다. 이때 사용된 가정은 다음과 같다.

- 이차원 유동
- 비압축성 유체
- 직접우회 시, 강수부 내 유동양식은 annular 또는 annular mist flow이다.
- 단열 조건을 가정한다 즉, 상간의 열전달은 고려하지 않는다.

제어체적에서 수직방향 및 횡방향의 모멘텀 보존식은 다음과 같이 유도된다[8].

x-방향(수직방향) 모멘텀 보존식

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

y-방향(횡방향) 모멘텀 보존식

$$\frac{\partial \rho_k \alpha_k \upsilon_k}{\partial t} + \frac{\partial \rho_k \alpha_k \upsilon_k \upsilon_k}{\partial y} + \frac{\partial \rho_k \alpha_k \upsilon_k u_k}{\partial x} = -\alpha_k \frac{\partial p}{\partial y} - \frac{\alpha_k}{2D_{hy}} f_{wyk} \rho_k \upsilon_k^2 + \frac{1}{2D_{hy}} f_{iy} \rho_g (\upsilon_g - \upsilon_f)^2 \quad (2)$$

여기서, $\rho_k$ : k상의 밀도 $\alpha_k$ : k상의 void fraction

$u_k, \upsilon_k$ : k상의 x-방향, y-방향 속도

$D_{hx}, D_{hy}$ : x-방향, y-방향 수력직경

$f_{wxk}, f_{wyk}$ : x-방향, y-방향 벽면 마찰계수,

$f_{ix}, f_{iy}$ : x-방향, y-방향 계면 마찰계수.

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

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

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

여기서, $j_{xk}, j_{yk}$ : k 상의 x-방향, y-방향 겉보기 속도 $(=\alpha_k u_k, \alpha_k \upsilon_k)$,

$S_x, S_y$ : k 상의 x-방향, y-방향 슬립률

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.

$$\begin{aligned}
& t/t_o = t/(\frac{x_o}{j_{kxo}}) = t^*,\ x/L_o = x^*,\ y/L_o = y^*,\ D_h/L_o = D_h^x, \\
& j_{xk}/j_{xko} = j_{xk}^* \quad , \quad j_{yk}/j_{yko} = j_{yk}^* \\
& j_{xk}/j_{xko} = j_{xk}/(\frac{g_o D_{xo}(\rho_{fo}-\rho_{go})}{\rho_{ko}})^{1/2} = j_{xk}^*, \\
& j_{yk}/j_{yko} = j_{yk}/(\frac{g_o D_{yo}(\rho_{fo}-\rho_{go})}{\rho_{ko}})^{1/2} = j_{yk}^* \\
& \rho_k/\rho_{ko} = \rho_k^* \ ,\ \alpha_k/\alpha_{ko} = \alpha_k^* \ ,\ g/g_o = g^*, \\
& p/\Delta p_{xo} = p/(\rho_{go} j_{xgo}^2/\alpha_{go} + \rho_{fo} j_{xfo}^2/\alpha_{fo}) = p^* \\
& f_i/f_{io} = f_i^* \ ,\ f_{wxk}/f_{wxko} = f_{wxk}^* \ ,\ f_{wyk}/f_{wyko} = f_{wyk}^*
\end{aligned} \tag{5}$$

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

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

$$\frac{\partial \rho_k^* j_{yk}^*}{\partial t^*} + \pi_1 \frac{\partial \rho_k^* \alpha_k^{*-1} j_{yk}^* j_{yk}^*}{\partial y^*} + \pi_2 \frac{\partial \rho_k^* \alpha_k^{*-1} j_{xk}^* j_{yk}^*}{\partial x^*}$$

$$= -\pi_7 \alpha_k^* \frac{\partial p^*}{\partial y^*} - \pi_8 \frac{1}{2D_{hy}^*} f_{wyk}^* \rho_k^* \frac{j_{yk}^{*\,2}}{\alpha_k^*} + \pi_9 \frac{1}{2D_{hy}^*} f_{iy}^* \rho_g^* \left(1 - \frac{1}{S_y}\right)^{*2} \frac{j_{gy}^{*\,2}}{\alpha_g^{*\,2}}. \qquad (7)$$

식(6)과 식(7)에서 계수로 정의된 무차원 변수 π는 표 1에 정리되었다. 이때, 표에 정리된 무차원 수가 다음과 같이 원형과 모형에서 같아지면, 원형과 모형의 모멘텀 방정식이 같아져 동일한 수력학적 거동을 나타낸다.

$$\pi_m / \pi_p = 1 \qquad (8)$$

각 π 변수들을 분석하기 위해 원형과 모형의 길이 비를 다음과 같이 정의하였으며, 원형과 모형의 압력이 동일하게 유지될 경우를 고려하였다.

$$l_R = (L_o)_m / (L_o)_p \qquad (9)$$

$\pi_1$의 상사 조건은 식 (10)과 같이, 다음의 시간, 속도 및 기포율 관계로 나타난다..

$$\frac{(\pi_1)_m}{(\pi_1)_p} = \frac{(t_o)_m}{(t_o)_p} \frac{(j_{xko})_m}{(j_{xko})_p} \frac{(\alpha_{ko})_p}{(\alpha_{ko})_m} \frac{(L_o)_p}{(L_o)_m} = 1 \qquad (10)$$

원형과 모형에서의 가상속도 비는 Wallis 무차원수의 비에 의해 다음과 같이 축소된다.

$$\upsilon_R \equiv \frac{(j_{xko})_m}{(j_{xko})_p} = \left(\frac{(D_{xo})_m}{(D_{xo})_p}\right)^{1/2} = l_R^{1/2} \qquad (11)$$

원형과 모델의 기포계수는 고속의 증기와 물의 혼합 유동영역인 '다차원 유동영역에'서 다음의 Drift-flux 관계식으로 근사할 수 있다.

$$\alpha_{go} = \frac{j_{go}}{C_o (j_{go} + j_{fo}) + \overline{V}_{gho}} \qquad (12)$$

여기서, $C_o$ 와 $\overline{V}_{gho}$ 유동조건의 함수로서, Mishima et al. [9]은 annular or annular-mist flow에 적합한 다음과 같은 상관식을 제시하였다.

$$C_0 = 1, \quad \overline{V_{gho}} = \frac{(1-\alpha)\left[ j_0 + \sqrt{\frac{\Delta\rho\, g\, D_h (1-\alpha)}{0.015 \rho_l}} \right]}{\alpha + 4\sqrt{\rho_g / \rho_l}} \qquad (13)$$

**표 1 상사 조건을 위한 무차원 변수 그룹**

| | |
|---|---|
| $\pi_1$ | $t_o j_{xko} / \alpha_{ko} L_o$ |
| $\pi_2$ | $t_o j_{yko} / \alpha_{ko} L_o$ |
| $\pi_3$ | $\alpha_{ko} t_o g_o / j_{xko}$ |
| $\pi_4$ | $\alpha_{ko} t_o \Delta p_{xo} / j_{xko} \rho_{ko} L_o$ |
| $\pi_5$ | $f_{wxko} j_{xko} t_o / L_o \alpha_{ko}$ |
| $\pi_6$ | $(f_{ixo} \rho_{go} j_{xgo}^2 t_o / L_o \alpha_{ko}^2 \rho_{ko} j_{xko})(1-1/S_x)_0^2$ |
| $\pi_7$ | $\alpha_{ko} t_o \Delta p_{yo} / j_{yko} \rho_{ko} L_o$ |
| $\pi_8$ | $f_{wyko} j_{yko} t_o / L_o \alpha_{ko}$ |
| $\pi_9$ | $(f_{iyo} \rho_{go} j_{ygo}^2 t_o / L_o \alpha_{ko}^2 \rho_{ko} j_{yko})(1-1/S_y)_0^2$ |

한편, 높은 void fraction 및 높은 증기 유속 조건에서는 $\overline{V}_{gho}$ 가 $j_0$ 에 비하여 작아져 무시될 수 있다. 이 경우, 기준 void fraction은 다음과 같이 표현된다.

$$\alpha_{go} \cong \frac{j_{go}}{j_{go} + j_{fo}} \tag{14}$$

이와 같은 관계식에 의해 원형과 모형의 void fraction은 다음과 같이 동일하게 유지된다.

$$\alpha_{goR} = \frac{(\alpha_{go})_m}{(\alpha_{go})_p} = \frac{j_{gom}}{(j_{jom} + j_{fom})} \Big/ \frac{j_{gop}}{(j_{jop} + j_{fop})} = 1 \tag{15}$$

식 (10),(15)의 관계와 길이 비를 적용하면 다음의 시간 척도비가 구해진다.

$$t_R = \frac{(t_o)_m}{(t_o)_p} = \frac{(j_{xko})_p}{(j_{xko})_m} \frac{(\alpha_{ko})_m}{(\alpha_{ko})_p} \frac{(L_o)_m}{(L_o)_p} = l_R^{-1/2} \cdot 1 \cdot l_R = l_R^{1/2} \tag{16}$$

즉, 실험장치와 원형의 속도가 Wallis 무차원수에 의해 척도될 경우, 상사 조건을 만족시키기 위해 시간 척도비가 길이 비의 제곱근에 의해 축소되어야 된다. 한편, $\pi_1$과 $\pi_2$ 동일한 척도비를 가진다.

$\pi_3$ 는 중력 항으로, 모형과 원형에서 다음의 관계가 성립해야 한다.

$$\frac{(\pi_3)_m}{(\pi_3)_p} = \frac{(\alpha_{ko})_m}{(\alpha_{ko})_p} \frac{(t_o)_m}{(t_o)_p} \frac{(j_{xko})_p}{(j_{xko})_m} \frac{(g_o)_m}{(g_o)_p} = 1 \tag{17}$$

식 (11),(15),(16)을 식(17)에 대입하면 원형과 모형에서 다음과 같이 중력 가속도가 보존된다.

$$\frac{(g_o)_m}{(g_o)_p} = \frac{(\alpha_{ko})_p}{(\alpha_{ko})_m} \frac{(t_o)_p}{(t_o)_m} \frac{(j_{xko})_m}{(j_{xko})_p} = 1 \cdot l_R^{-1/2} \cdot l_R^{1/2} = 1 \tag{18}$$

$\pi_4$ 는 $\pi_7$ 과 동일한 척도비를 갖는다. 이때 $\pi_4$ 는 다음과 같이 원형과 모형에서 그 값이 동일해진다.

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

$$= 1\cdot l_R^{1/2}\cdot l_R \cdot l_R^{-1/2}\cdot 1\cdot l_R^{-1} = 1 \quad (19)$$

$\pi_5$ 는 벽면 마찰을 나타내는 무차원 변수로서, $\pi_8$ 과 동일한 척도비를 가진다. 벽면에서의 마찰계수는 Reynolds number와 벽면 조도의 함수로 표현되지만, 고속 증기 유동 조건 및 annular 또는 annular mist flow 조건에서는 이를 상수($\approx 0.005$)로 가정할 수 있다. 따라서 다음과 같이 $\pi_5$ 는 원형과 모형에서 동일한 값을 가진다고 근사할 수 있다.

$$\frac{(\pi_5)_m}{(\pi_5)_p} = \frac{(f_{wxko})_m}{(f_{wxko})_p}\frac{(j_{xko})_m}{(j_{xko})_p}\frac{(t_o)_m}{(t_o)_p}\frac{(\alpha_{ko})_p}{(\alpha_{ko})_m}\frac{(L_o)_p}{(L_o)_m} \cong 1\cdot l_R^{1/2}\cdot l_R^{1/2}\cdot 1\cdot l_R^{-1} = 1 \quad (20)$$

$\pi_6$ 는 상 경계면에서의 마찰을 나타내는 무차원수로서, $\pi_9$ 와 동일한 척도비를 가진다. 상계면 마찰계수는 Wallis [10]가 제시한 상관식을 이용하였다.

$$f_i = 0.005[1 + 75(1-\alpha)] \quad (21)$$

여기서, 액막 두께와 강수부 간극 간의 비, $\delta/S$ 는 강수부 내에서의 void fraction을 의미한다. 즉, 상 경계면 마찰계수는 기포계수의 함수로서, 원형과 모형에서 기포계수가 보존되면 동일한 값을 가진다. 따라서 $\pi_6$ 및 $\pi_9$ 는 다음과 같이 원형과 모형에서 동일한 값을 가진다.

$$\frac{(\pi_6)_m}{(\pi_6)_p} = \frac{(f_{ixo})_m}{(f_{ixo})_p}\frac{(\rho_{go})_m}{(\rho_{go})_p}\frac{(j_{ixo})^2{}_m}{(j_{ixo})^2{}_p}\frac{(t_o)_m}{(t_o)_p}\frac{(L_o)_p}{(L_o)_m}\frac{(\alpha_{ko}^2)_m}{(\alpha_{ko}^2)_p}\frac{(\rho_{ko})_p}{(\rho_{ko})_m}\frac{(j_{iko})_p}{(j_{iko})_m}\frac{(1-1/S_x)_{om}^2}{(1-1/S_x)_{op}^2}$$

$$\cong 1\cdot 1\cdot l_R \cdot l_R^{1/2}\cdot l_R^{-1}\cdot 1\cdot 1\cdot l_R^{-1/2}\cdot 1 = 1 \quad (22)$$

한편, 식 (22)는 annular flow 유동을 가정하고 있기 때문에, mist flow인 경우에는 구에 대한 계면 마찰 계수를 이용하여야 한다. 고속의 난류유동에서는 이를 상수($\approx 0.44$) 로 가정할 수 있다. 이 경우, $\pi_6$ 및 $\pi_9$ 는 식 (22)와 동일한 결과로 나타난다.

척도해석 과정을 통하여 도출된 상사조건은 표 2에 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 2 '속도 및 시간이 축소된 수정 선형척도법' 및 기존 선형척도법의 상사조건 비교**

| Parameter | Scaling Ratio | |
|---|---|---|
| | 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, $\upsilon_R$ | 1 | $l_R^{1/2}$ |
| Flow Rate Ratio, $\dot{m}_R$ | $l_R^2$ | $l_R^{5/2}$ |
| Pressure Drop Ratio, $\Delta p_R$ | - | $l_R$ |
| Gravity Ratio, $g_R$ | $l_R^{-1}$ | 1 |
| Pressure Ratio, $p_R$ | 1 | 1 |
| Temperature Ratio, $T_R$ | 1 | 1 |
| Void Ratio, $\alpha_R$ | 1 | 1 |
| Slip Ratio, $S_R$ | 1 | 1 |
| Aspect Ratio, $l_R / D_R$ | 1 | 1 |

# 3. 수정형 선형 척도법의 검증

수정형 선형 척도법을 실험적으로 검증하기 위해, 원형 크기의 실험장치인 UPTF Test 21-D의 비교 실험을 수행하였다. 검증 실험은 직접우회의 주요 척도해석 변수로 도출된 액막확장폭과 직접우회율에 대해서 수행되었다.

## 3.1 액막확장폭에 대한 개별효과 실험

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 DVI노즐로 구성된 시험대와 액체주입계통으로 이루어지며, 축소 실험장치와 1/1 척도 비의 실험장치가 각각 독립적으로 제작되었다. 실험장치의 시험대는 강수부 스케일의 효과를 파악하기 위해 각각 1/7.3, 1/4, 1/1의 길이 비로 제작되었고, 강수부 내벽 만을 모의하여 개방유로를 형성하였다. 실험장치의 형상은 그림 3.에 도시하였다. 강수부 배럴은 각각 높이 3m로 저온관 하단 0.2m ~ DVI노즐 상단 0.7m를 1:1 길이 비로 모의하여, 선형척도법 및 체적척도법 적용 시의 액막 형상 및 확장폭을 파악할 수 있게 설계하였다.

본 실험의 측정변수는 액체주입유량, 액체온도 그리고 액막확장폭이며, 액막확장폭 측정을 위해 강수부 배럴에 0.01m 간격의 격자를 기입하였고, 비디오 카메라를 이용하여 액막을 촬영, 영상 처리를 통해 액막확장폭을 도출하였다. 그림 4.는 액막확장폭 측정에 이용된 영상으로서, 20~30개의 데이터를 취득하여 측정값의 평균으로 액막확장폭을 정의하였다.

액막확장폭 측정 실험은 각각 선형 척도법 적용 시와 수정형 선형 척도법 적용 시에 대해 수행되었다. 그림 5. 는 1/1 및 1/4 그리고 1/7.3 크기의 시험대에서의 액막확장폭을 무차원화 하여 도시한 결과이다.

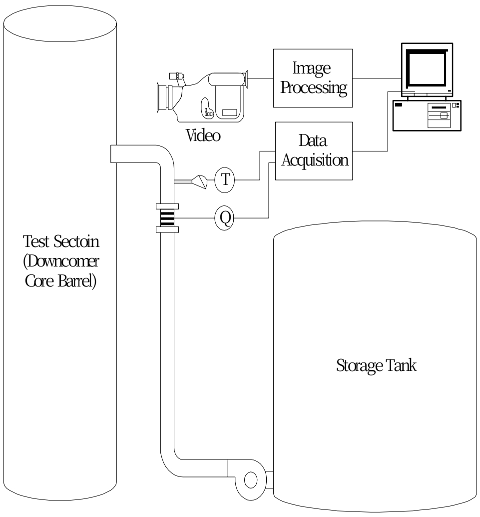



그림 3. 실험장치 개략도

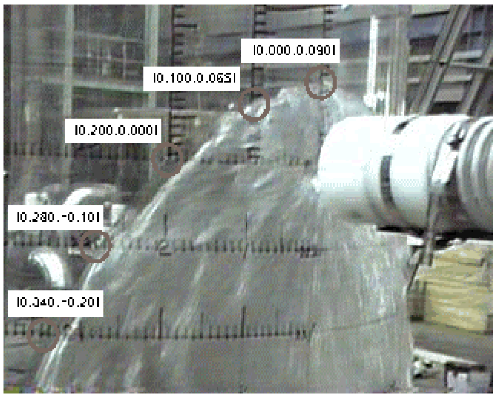



그림 4. 영상 처리 방법

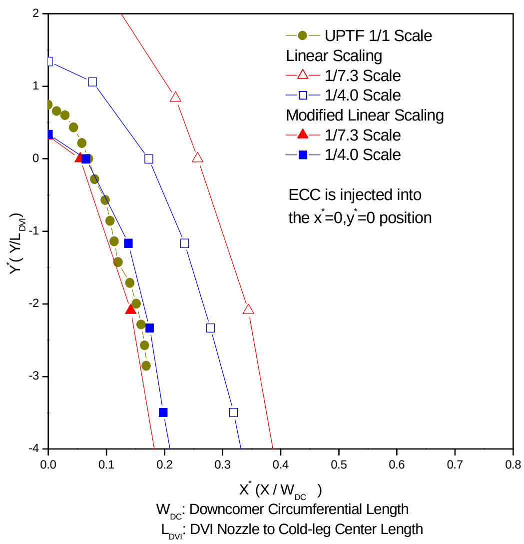



그림 5. 액막확장폭 측정 실험결과

실험결과에 의하면 선형척도법 적용 시, 원형과 모형에서의 액막확장폭이 크게 다르게 나타남을 알 수 있다. 즉, 크기가 작은 시험대일수록 더 넓은 액막확장폭이 나타나며, 소형 실험장치에서 액막확장폭의 척도 왜곡이 존재함을 알 수 있다.

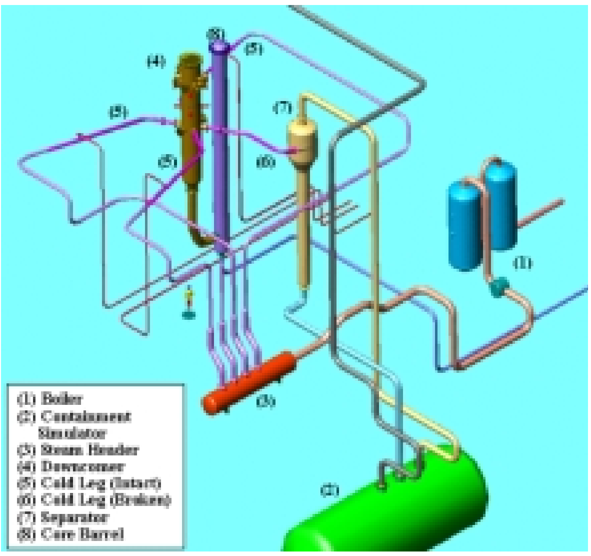
한편, 수정형 선형 척도법 적용 시, 강수부 크기에 무관하게 거의 유사한 무차원 액막확장폭이 나타남을 볼 수 있다. 제안된 척도법의 고유한 특성에 의해 액막확장폭이 원형과 모형에서 보존되며, 따라서 이에 대한 추가적인 국소 척도해석이 필요하지 않게 된다.

## 3.2 직접 우회에 대한 개별효과 실험

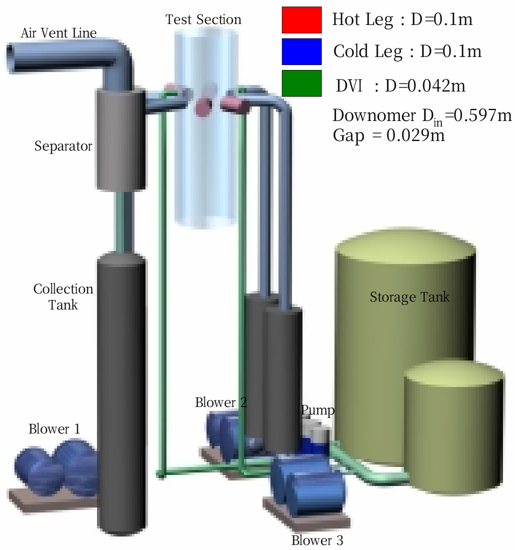
본 척도해석 방법론은 축소된 실험장치에서 직접우회 현상을 적절히 재현하고, 안전주입수 우회율을 보존하는데 그 목적이 있다. 이를 검증하기 위해 물-공기 이상유체를 이용하여, UPTF Test 21-D 비교 실험을 수행하였다. 시험대는 각각 1/4 및 1/7.3 크기의 강수부이며, 원형과 모형의 안전주입수 우회율을 비교함으로써 척도해석 방법론을 검증하고자 하였다.

본 연구에 사용된 1/4 실험장치는 MIDAS (Multi-dimensional Investigation in Downcomer Annulus Simulation) 실험장치로서 물-증기 실험을 위해 제작된 실험 장치이다[11]. MIDAS 실험장치의 증기 주입부에 공기주입시스템을 연결하여, 물-공기 실험이 가능하도록 변경하였다. 1/4 실험장치의 형상은 그림 6-(a).에 도시하였다.

1/7.3 실험장치는 DIVA(Downcomer Injection Visualization and Analysis) 실험장치로서, 그림 6-(b).와 같은 기하학적 형상을 갖는다[4]. 한편, 본 실험의 주요 측정변수 및 그 오차는 표 3.에 요약하였다.




**(a) 1/4.0 scale MIDAS test facility**




**(b) 1/7.3 scale DIVA test facility**

**그림. 6 실험장치 개략도**

표 3. 주요 측정 변수 및 오차

| Parameter | Instrument | Uncertainty |
|---|---|---|
| Air Flow Rate(kg/s) | Vortex Flow Meter | 1.1 % |
| Water Flow Rate (kg/s) | Turbine Flow Meter | 0.3 % |
| Bypass Fraction (%) | Differential Pressure Transmitter | 4% (more than 10 %)<br>10% (less than 10 %) |
| Penetration Fraction (%) | Coriolis meter | 2.5 % |
| Pressure (Pa) | Pressure Transmitter | 0.2 % |
| Temperature ($^{o}$C) | PT-100Ω RTD | 1.0 $^{o}$C |

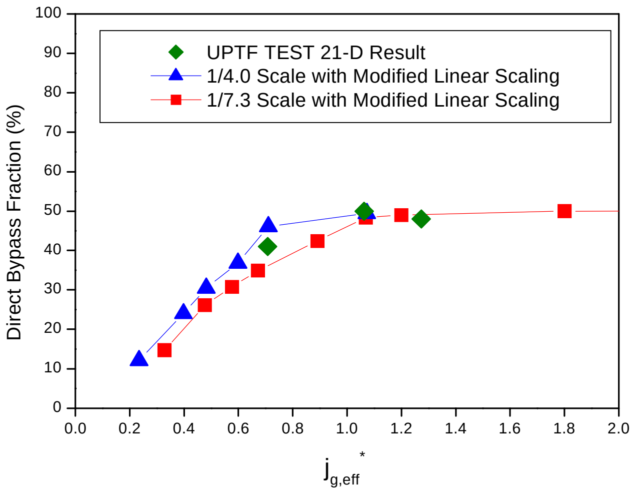



**그림 7. 수정형 선형척도법 적용 시, UPTF Test 21-D 비교실험 결과**

한편, 물-공기 실험결과를 물-증기 실험결과와 비교하기 위해, 다음과 같이 증기응축량을 고려하였다.

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[5]. 본 실험에서 증기응축량 효과를 고려하기 위하여 다음의 Ja 무차원수 및 Wallis 무차원수에 의해 정의된 경험식을 사용하였다[5,12].

$$j^*_{g,cond} = \frac{C_p \Delta T}{h_{fg}} \left( \frac{\rho_f}{\rho_f} \right)^{1/2} j^*_{f,ECC} \quad (23)$$

식 (23)과 같은 증기 응축량이 배제된 effective Wallis parameter를 이용하여 본 실험결과를 비교하였다. 이때, effective Wallis parameter의 정의는 다음과 같다.[5]

$$j^*_{g,Eff} = j^*_{g,tot} - (f \cdot j^*_{g,cond}) \tag{24}$$

여기서, $C_p$: 강수부내 평균 압력에서의 정압 비열
$h_{fg}$: 강수부내 평균 압력에서의 증기와 물의 엔탈피 차이
$\Delta T$: 강수부 평균 압력에서 계산된  안전주입수 미포화도

한편, 증기 응축 효율 (condensation efficiency)는 다음과 같이 정의된다.

$$f = \frac{\Delta T_{in} - \Delta T_{out}}{\Delta T_{in}} \tag{25}$$

여기서, $\Delta T_{in}$: 강수부 주입지점에서의 안전주입수 미포화도
$\Delta T_{out}$: 강수부 바닥 또는 파단 저온관에서의 안전주입수 미포화도

그림 7.은 UPTF Test -21D 실험결과 [4,13,14] 와 축소된 실험장치에서 수행된 물-공기 실험데이터를 무차원 기체 주입 속도를 이용하여 비교한 결과이다. 속도가 낮은 영역, $j^*_{g,Eff} < 1$, 에서는 실험결과 간의 차이가 나타나지만, 강수부 스케일에 무관하게 유사한 우회특성을 보이고 있다. 한편, $j^*_{g,Eff} \geq 1$ 인 높은 속도영역에서는 원형과 모형에서의 직접우회율이 동일하게 보존되는 결과를 보인다. 이는 파단부 부근의 안전주입수는 모두 우회하고, 파단부와 멀리 위치한 DVI노즐로 주입된 안전주입수는 모두 하강하는 다차원 유동 현상을 적절히 재현하고 있다고 판단된다.

이와 같은 비교 실험 결과로부터, 본 척도해석 방법론이 LBLOCA 재관수 기간동안 나타나는 직접우회현상의 척도해석에 적용 가능함을 검증하였다.

## 4. 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 선형 척도를 가지나, 시간 척도 및 속도 척도는 길이 비에 의해 축소되는 특징을 보여준다.

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, 물과 증기의 두 상이 혼합되어 있는 기포, 슬러그 유동양식에서는 기포계수 및 혼합수위의 심각한 척도 왜곡이 발생될 수 있다.

제시된 척도해석 방법론을 검증하기 위해, 직접우회의 주요 척도해석 변수인 액막확장폭 및 직접우회율에 대한 개별효과 실험을 수행하였다. 검증 실험결과, 액막확장폭 및 안전주입수 우회가 모형과 원형에서 적절히 재현됨을 확인할 수 있었다.

한편, 도출된 척도해석 방법론의 성공적인 적용을 위해서는, 높은 미포화도를 갖는 안전주입수와 과열된 증기간에 발생하는 계면 열전달에 대한 척도해석이 향후 수행되어야 할 것이다.

## 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] B.J.Yun, H.K.Cho, T.S.Kwon, C.H.Song, J.K.Park and G.C.Park, “Air-Water Test on the Direct ECC Bypass During LBLOCA Reflood Phase with DVI : UPTF Test 21-D Counterpart Test” , Journal of KNS, Vol. 33, No. 3, p. 315, 2001.

[5] 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.

[6] B.J.Yun, H.K.Cho, T.S.Kwon, C.H.Song, J.K.Park and G.C.Park, “Air/Water Test on Direct ECC Bypass during LBLOCA Reflood Phase of KNGR “, 2000 KNS Autumn Meeting, Korea Nuclear Society (2000)

[7] B.J.Yun et al., “Development of Scaling Law for the Direct ECC Bypass during LBLOCA Reflood Phase with DVI Safety System", 2001 KNS Spring Meeting, Korea Nuclear Society (2001)

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

[9] K.Mishima and T.Hibiki, "Some Characteristics of Air/Water Two-phase Flow in Small Diameter Vertical Tubes", Int.J. Multiphase Flow Vol.22 No4, pp.703-712. (1996)

[10] G.B. Wallis."One Dimensional Two-Phase Flow", Mcgraw-Hill Book Company, New York,(1969)

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

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

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

[14] P.S. Damerell and J.W. Simons, “ 2D/3D Program Work Summary Report ”, NUREG/IA-0126 (1993)