〈 논문 〉

CANDU-6 원자로 감속재 열수력 개별영향실험을 위한 축소화 기법에 따른 1/8 축소형 HU-KINS 설계

이재영† · 김만웅** · 김남석*

(2005 년 9 월 12 일 접수, 2006 년 6 월 18 일 심사완료)

Design of the 1/8 Scaled HU-KINS Based on the Scaling Laws for the Experimental Investigation of Thermal-Hydraulic Effect of CANDU-6 Moderator

Jae Young Lee, Manwoong Kim and Nam Seok Kim

Key Words : Scaling Laws(축소화 기법), Moderator Cooling System(감속재 냉각 시스템), CANDU(중수형 원전), Calandria(칼란드리아), Archimedes Number(아르키메데스 수)

Abstract

To investigate the moderator coolability for CANDU-6 reactors, a test facility (HU-KINS) has been manufactured as a 1/8 scaled-down of a calandria tank. In the design of the test facility, a scaling law was developed in such a way to consider the thermal-hydraulic characteristics of a CANDU-6 moderator. The proposed scaling law takes into consideration of the energy conservation, the dynamic similitude such as dimensionless numbers, Archimedes number (Ar) and Reynolds number (Re), and thermal-hydraulic properties similitude. Using this proposed scaling law, the thermal-hydraulic scaling analyses of similar test facilities such as the SPEL (1/10 scale) and the STERN (1/4 scale), have been identified. As a result, in the case of the SPEL, while the energy conservation is well defined, the similarities of Ar and the heat density are not well considered. As for the similarity of the STERN, while both the energy conservation and the characteristics of Ar are well defined, the heat density is not. In the meanwhile, the HU-KINS test facility with 1/8 length scaled-down is well similitude in compliance with all similarities of the energy conservation, the fluid dynamics and thermal-hydraulic properties. To verify the adequacy of the similarities in terms of thermal-hydraulics, a computational fluid dynamic (CFD) analysis has been conducted using the CFX-5 code. As the results of the CFD analyses, the predicted flow patterns and variation of axial properties inside the calandria tank are well consistant with those of previous studies performed with FLUENT and this implies that the present scaling method is acceptable.

기호설명

A : 면적
Ar : Archimedes 수
C_p : 비열
D : 칼란드리아 지름
g : 중력가속도
L : 축방향 길이
$\dot{m}$: 질량유량
N : 열원의 개수
Nu : Nusselt 수
P : 열원 피치길이
Pr : Proude 수
$\dot{Q}$: 열량
q''' : 열원밀도
Re : Reynolds 수
T : 온도
U : 속도
V : 체적

† 책임저자, 회원, 한동대학교 기계제어공학부
E-mail : jylee7@ handong.edu
TEL : (054)260-1392 FAX : (054)260-1392
* 회원, 한동대학교 일반대학원 기계제어공학부
** 회원, 한국원자력안전기술원

그리스문자
β : 열확산계수
ρ : 밀도
μ : 점성계수

하첨자
cal : 칼란드리아
in : 입구노즐부

1. 서 론

중수형 원자로에서 냉각재 상실사고로 인한 칼란드리아관과 압력관의 접촉으로 관 표면에서 건조(dry-out)가 발생할 경우 핵연료 채널의 파손이 생길 수 있다. 따라서 최후의 열침원으로서 감속재는 충분한 과냉각도를 유지하는 것이 매우 중요하다. 이러한 압력관 건전성에 관한 해석은 몇몇 전산코드에 의해 수행되었으며, 캐나다원자력안전위원회(CNSC: Canadian Nuclear Safety Commission)는 현재의 안전여유도가 매우 빈약한 상황을 고려할 때 칼란드리아 내의 감속재 온도해석은 적절한 검증을 거치지 않고 있다는 입장을 가지고 있어, 감속재 온도 해석에 대하여 많은 관심을 보이고 있다.

냉각재 상실 사고시의 감속재 과냉각도를 평가하기 위해서는 칼란드리아 내에 흐르는 감속재의 온도 정보가 필요하다. 하지만 운전중인 실제 원자로에서는 칼란드리아 내의 감속재의 온도 측정은 불가능하며, 칼란드리아의 입, 출구 온도만을 측정할 수 있다. 그러므로 일반적으로 축소 모델에 대한 실증 실험과 전산유체해석(CFD)을 통하여 칼란드리아 내의 감속재의 유동패턴과 온도를 계산하게 된다.

이에 대한 연구의 일환으로 지난 20 여년간 캐나다에서는 캐나다 에너지공사(AECL:Atomic Energy Cananda, Ltd)과 중수형 원자로 소유자 그룹(COG:CANDU Owner's Group)의 주관 하에 스펠(SPEL)라고 명명된 실험[Koroyannaski et al.[1]]과 스턴(STERN)으로 명명된 실험[Stern Laboratory Inc., Hadaller[2-4]]이 수행하되었다. 1983 년 SPEL 의 Koroyannaski 는 칼라드리아 형태의 원통(Calandria-like cylindrical vessel) 내에서 유체의 유입 제트(inlet jet)와 내부 열(internal heat)에 의해 발생되는 유동현상에 대한 연구를 수행하였다. SPEL 실험은 축소모형은 아니지만 재순환 유동, 비등이 없는 유체의 가열, 칼란드리아 축에 평행하게 나열된 수평관들의 2 차 배열 등 캔두(CANDU) 원자로의 전형적인 특성을 반영하고 있다.[1] 하지만 유동패턴에 대한 축소화는 충분히 되지 않았고, 단지 직경을 1/10 로 축소화하여 수행된 실험이었다. 1990 년에는 스턴(STERN)의 Hadaller 에 의하여 1/4 축소 비율의 실증 실험이 수행되었다. 스턴(STERN)의 실험은 칼란드리아 내부의 감속재 거동에 대하여, 입력노즐의 각도 변화[2]와 열원[3,4]의 삽입여부에 따른 유동패턴변화와 온도측정을 수행하였다. 또한, 최근 캐나다에서는 이에 관한 새로운 실험을 하고 있으나 현재 데이터를 확보할 수 없는 상황이다. 이러한 일련의 실험설비 설계의 보고서를 보면, 축소화 규칙이 제대로 유도되거나 입증되지 않은 것을 알 수 있다. 따라서 본 연구는 이에 대한 축소화 규칙에 대한 개발과 적용을 하는 것을 목표로 수행되었다.

축소화를 위해 현상에 대한 이해와 이를 대표하는 무차원 수의 발굴과 설계인자 결정이 필요하다 주로 사용되어온 축소화의 인자는 기하학적 규모, 온도, 압력 등이고, 기하학적 규모는 열원에 따른 선형축소화가 주를 이루나, 수두를 고려하여 높이는 유지하는 전길이(full length) 축소화가 주를 이루었다. 그러나 계통의 동특성을 잘 표현할 경우, 길이 축소도 가능함을 보인 연구는 핵증기발생기의 1/10 축소화를 달성한 Lee 와 No[5]의 방법과, BWR 원자로를 1/4 길이 축소화를 달성한 Ishii[6]의 방법이 있고, 원자력 연구소에서 건립중인 종합원자력 열수력 실증 실험 장치도 길이 축소화에 대하여 동일한 방법으로 접근하였다. 칼란드리아의 경우 단순한 선형 축소화를 시도한다 할지라도 직경이 감소할 경우, 칼라드리아 탱크의 하단부와 상단부 사이의 정압 차이가 두개의 시스템에서 상이하게 나타날 것이다. 위치에 따른 정압이 변하게된다. 또한 이것이 내부 대류유동장에 영향을 끼치는 노즐을 통해 유입되는 감속재의 제트와 칼란드리아 튜브에 의해 가열된 감속재의 부력효과에 영향을 주어, 유동장을 변화 시킨다. 따라서 칼란드리아 탱크의 축소화는 수두 측면에서 길이 축소효과가 강하게 유발되는 축소화로서 합리적인 축소화 규칙 개발이 절대적으로 필요하다.

2 절에서는 이러한 축소화 법칙의 정립과 관련하여 전역적인 측면과 지역적인 측면에 대하여 논의하였으며, 또한 유사 실험 설비인 스펠실험(SPEL)과 스턴실험(STER)에 대한 열수력적 축소화 영향을 분석하였다. 3 절에서는 축소화 과정을 통해 제안된 모델에 대하여 유동패턴과 축방향 효과를 검증하였으며, 이를 토대로 실험설비를 제작하였다.

2. 감속재 열수력 특성을 고려한 축소화 영향 평가

CANDU-6 원자로 칼란드리아내 감속재 열수력 특성모델의 축소화에 있어서 고려되어야 하는 중요한 요소는 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 첫째로, 칼란드리아 내부에서의 에너지 보존법칙이 성립하여야 한다. 즉, 칼란드리아 내부를 검사체적으로 설정하였을 때, 입력과 출력에서의 열량이 보존되어야 한다. 즉, 칼란드리아 내의 380 개의 칼

란드리아 튜브에서 발생하는 총 열량은 칼란드리아 내부에서 보존되어야 한다. 열량 보존식은 다음과 같다.

$$\dot{Q} = \dot{m} C_p \Delta T \quad (1)$$

위에서 $\dot{Q}$은 열량, $\dot{m}$은 유량, C_p는 비열, ΔT는 온도차(T_{out}-T_{in})을 의미한다. 식 (1)을 무차원화 하면 다음의 식 (2)로 정리된다.

$$\dot{Q}^* = \dot{m}^* \Delta T^* \quad (2)$$

여기서 $\dot{Q}^* = \dot{Q} / \dot{Q}_{ref}$, $\dot{m}^* = \dot{m} / \dot{m}_{ref}$, $\Delta T^* = \Delta T / \Delta T_{ref}$ 이다.

또한 원 모델의 열적특성에 대한 모사와 관련하여 칼란드리아 내부에서의 열원 밀도에 대한 상사성이 고려되어야 한다. 열원 밀도는 다음과 같다.

$$q''' = \frac{Q}{V} = \frac{Q}{0.25\pi D_{cal}^{\ 2} L} \quad (3)$$

식 (3)을 무차원화 하면 식 (4)와 같이 정리된다.

$$(q''')^* = \frac{Q^*}{D_{cal}^{*\,2} L^*} \quad (4)$$

둘째로, 유체의 흐름을 지배하는 힘이 제대로 축소되어야 한다. 칼란드리아 내의 주요한 힘은 크게 마찰력, 관성력, 부력이 있다. 이 세 가지 힘의 조합으로 무차원 수 *Re* 와 *Ar* 가 유도되며, Ar 는 부력과 관성력의 비율을, *Re* 는 관성력과 점성력의 비율을 나타낸다. *Ar* 의 정의는 다음과 같다.

$$Ar_{ori} = \frac{g\beta \Delta T D_{cal}}{U_m^{\ 2}} \quad (5)$$

그러나 식 (5)에서 칼란드리아 내부의 속도는 지역별로 매우 다른 분포를 가지므로, 식 (5)의 정의를 축소화 규칙에서 사용할 수 없다. 오히려, 가장 신뢰할 수 있는 관성력인 노즐 입구의 제트와의 비율로 구한 다음식이 축소화에 적합하다.

$$Ar = \frac{g\beta \Delta T D_{cal}}{U_{in}^{\ 2}} \quad (6)$$

또한 칼란드리아 내부에서의 평균속도를 구할 수 없음을 고려하여 입력노즐에서의 *Re* 만을 정의하였다.

$$\mathrm{Re}_{in} = \frac{\rho U_{in} D_{cal,in}}{\mu} \quad (7)$$

그러나 *Re*를 결정짓는 변수인 입력노즐의 속도 (U_{in}) 와 칼란드리아의 지름(D_{cal})은 앞서 언급된 *Ar* 의 결정에도 영향을 주는 변수이다. 따라서 *Re* 보다 *Ar* 의 효과가 칼란드리아 내부의 유동 패턴에 더 지배적으로 작용함을 고려하여, *Re*는 *Ar*의 상사성을 해치지않는 범위에서 난류거동을 만족시키는 값이 되어야 한다.

앞에서 정의된 기본적인 축소화 인자들이 결정되면, 이를 기준으로하여 칼란드리아의 지름(D_{cal}), 길이(L), 및 입출구 온도차(ΔT) 등의 파라미터들을 도출하여야 한다.

먼저 칼란드리아의 지름(D_{cal})과 길이(L)에 대한 축소화비는 앞서 정의된 식 (4)의 무차원화된 열원 밀도의 정의식에서 유도된다. 식 (4)를 정리하면, 칼란드리아의 길이는 칼란드리아의 지름, 열원 및 열원 밀도에 대한 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$L^* = \frac{1}{D_{cal}^{*2}} \left(\frac{Q^*}{q'''^*} \right) \quad (8)$$

질량유량 ($\dot{m}$) , 입출구 온도차 (ΔT) , 입력노즐의 면적(A_{in}) 사이의 관계는 식 (2)의 열전달 보존 방정식에 의하여 유도된다. 여기서 $\dot{m} = \dot{m}_{in} = \rho U_{in} A_{in}$, $\rho^* = 1$ 의 관계가 성립하므로, 열원식에서 온도차에 대한 축소화 규칙을 다음과 같이 정할 수 있다.

$$\Delta T^* = \frac{Q^*}{U_{in}^* A_{in}^*} \quad (9)$$

무차원수 *Ar* 은 입출구 온도차 (ΔT) , 입력속도 (U_{in}), 칼란드리아 지름(D_{cal})을 나타내므로, β^*=1을 가정하면 입력속도는 다음과 같이 정리된다.

$$U_{in}^* = \sqrt{\frac{\Delta T^* D_{cal}^*}{Ar^*}} \quad (10)$$

2.1 지역적 축소화 규칙(local scaling law)

칼란드리아의 국지적 유동과 열전달을 모사하기 위한 축소화 규칙 개발은 주의를 요한다. 그 이유는 실제 원자로에서 감속재가 가열되는 형태가 칼란드리아 튜브의 표면의 온도에 의해 전달되는 열전달 보다 중성자와 고에너지 방사선이 감속재에서 감속되면서 발생하는 직접 가열 효과가 크기 때문이다. SPEL 의경우는 이를 묘사하기 위해 전기 영동 방식을 사용하기도 햇으나, 계측기 설치 및 누전 가능성등의 이유로 본실험에서는 봉히터를 사용하기로 하였다. 이러한 상황에서 국지적 축소화는 중성자속의 분포를 묘사한 각 열원의 열량 조절이 중요하고, 오히려 표면의 대류 열전달은 억제하는 설계를가 필요하다.

그러나 열원의 열전달을 고려하기 위해 대루대루 열전달에 대하여 분석하고 이를 통해 축소화 인자를 도출하며, 축소화 정도를 판정하고자 한다. 칼란드리아의 전역적 축소화 인자들이 결정된 후, 내부의 열원의 지름(D_{pipe}), 피치(P), 개수(N)에 대한 축소화 인자를 도출하여야 한다. Fig. 1 은 칼란드리아 내부의 열원 다발의 개략도이다.

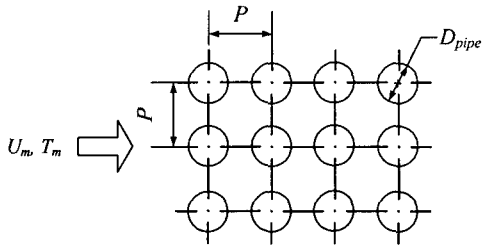

Fig. 1 Schematics for the Calandria heat sources (Calandria tubes)

그림에서 열원의 지름은 D_{pipe}, 피치길이는 P, 열원 주위를 통과하는 유체의 속도를 U_m, 온도를 T_m으로 각각 정의하였다.

칼란드리아 내부 형상에 대하여는 유체의 흐름에 대한 힘과, 열원과 주변 유체사이의 열전달 현상이 올바르게 축소되어야한다. 이는 유체의 흐름에 대한 무차원수인 Re와, 대류 열전달에 대한 무차원수인 Nu가 고려되야함을 의미한다. 그러나, 칼란드리아 내부의 속도는 지역별로 매우 다른 분포를 가지므로, Re에 의한 축소화를 적용하기 어렵다. 또한 혼합 대류 유동의 경우뿐만 아니라 Rayleigh수가 참여하는 관계식을 갖게된다. 이 경우 히터의 표면 온도와 매질 온도의 차이가 중요한 변수가 된다. 따라서 국지적 축소화의 여부가 유동의 양상을 변화 시킬 소지가 많다. 본 연구에서는 비교적 안정한 유동 영역이면서 Ar 수의 많은 영역을 점유하는 강제 대류 열전달의 경우를 대표적 유동 패턴으로 선정하여 국지적 축소화를 시도하였다. 이를 위해 $Re_{D,max}$, Pr, Nu_D의 상관 관계로 정의되는 Zhukauskas[7]에 의해 제안된 식 (11)이 축소화에 적합한 기준이된다. Zhukauskas에 의하면, 교차흐름(cross-flow)이 있을 때 튜브다발에서의 열전달은 다음과 같은 상관관계를 만족한다.

$$Nu_D = C\,\mathrm{Re}_{D,\max}^{m}\,\mathrm{Pr}^{0.36}\left(\frac{\mathrm{Pr}}{\mathrm{Pr}_s}\right)^{1/4} \tag{11}$$

여기서, $\mathrm{Re}_{D,\max}^{m} = \dfrac{\rho U_{\max} D_{pipe}}{\mu}$, $U_{\max} = \dfrac{P}{P-D_{pipe}} U_m$, $\mathrm{Pr} = \dfrac{c_p \mu}{k}$, $\mathrm{Pr}_s = \mathrm{Pr}\big|_{at\ surface}$ 이다. 이때, 계수 C 와 m 은 튜브다발의 배열형상에 의하여 결정되는 값으로, CANDU6 에서의 조건을 적용하면, 다음과 같이 정리된다.

$$Nu_D = 0.021 \cdot \mathrm{Re}_{D,\max}^{0.84}\,\mathrm{Pr}^{0.36}\left(\frac{\mathrm{Pr}}{\mathrm{Pr}_s}\right)^{1/4} \tag{12}$$

칼란드리아 내부의 지역적 축소화는 위의 상관관계에 의해 계산되는 Nu_D의 상사성이 만족되도록, 열원의 지름(D_{pipe}), 피치길이(P), 개수(N)가 결정되어야한다. 따라서 열전달 계수는 다음과 같이 무차원수로 표현된다.

$$h^* = (D_{eq}^*)^{-0.16}(U_{\mathrm{m}}^*)^{0.84} \tag{13}$$

또한 국지적 열밀도(power density)는 다음과 같은 열전달 보존식에 의해 동일하게 결정되어야 한다. 이과정에서 국지적 설계 변수들이 결정된다.

$$(q''')^* = \frac{Q}{V} = \frac{N^* h^* D_{pipe}^* L^* (T_{wall} - T_f)^*}{(D_{cal}^*)^2 L^*} = \frac{N^* (D_{eq}^*)^{-0.16} (D_{pipe}^*)(U_{\mathrm{m}}^*)^{0.84} (T_{wall} - T_f)^*}{(D_{cal}^*)^2} \tag{14}$$

위의 방정식을 살펴보면 물론 강제 대류 열전달과 자연대류 열전달에 따라 식이 달라 지는 점을 고려해야하나, 기본적으로 참여하는 축소화 인자의 모양의 유사성이 있고, 관계식의 다양성과 넓은 오차 범위를 고려할 때, 이를 국지 축소화 규칙으로 본 연구에서는 사용하고자 한다.

Table 1 The summary of scale parameters for CANDU-6, SPEL and STERN

	CANDU6		SPEL		STERN	
	Value	Scale	Value	Scale	Value	Scale
D_{cal} (m)	7.6	1	0.737	1/10.3	2	1/3.8
L (m)	6.0	1	0.254	1/23.62	0.2	1/30
Q (kW)	100000	1	10	1/10000	100	1/1000
q''' (W/m^3)	414130	1	107526	1/3.9	181488	1/2.3
ΔT(℃)	20	1	4.4	1/4.6	10	1/2
U_{in} (m/s)	2.04	1	0.13	1/15.7	0.761	1/2.7
$\dot{m}$ (kg/s)	1011.6	1	0.5	1/2023	2.4	1/421.5

2.2 유사 실험설비의 축소화 특성 분석

본 절에서는 기존 실험설비인 SPEL(1983)과 STERN(1990)에 대하여 올바른 축소화의 여부를 확인하였다. 앞서 언급한대로, 내부에서의 열량 보존 및 열원 밀도에 대한 상사성 고려와 무차원수 Ar 의 모사를 통한 부력효과 반영의 측면에서 축소화 분석을 하였다. 분석을 위하여 Table 1 에 원모델인 CANDU6 와 SPEL, STERN 의 축소화 인자를 정리해 놓았다.

첫째로, SPEL 에 대한 열량 보존여부는 다음과 같이 계산된다.

$$\dot{Q}^* = \dot{m}^* \Delta T^* = \frac{1}{2023} \cdot \frac{1}{4.6} = \frac{1}{9306} \tag{15}$$

결과를 보면, 열량은 10KW 로 표준대상인 CANDU 에 비해 1/10000 축소화 되었다.

식 (15)에서 보면 유량과 입출구 온도 차이에 대한 축소화를 한 값을 대입할 경우 축소화는 1/9306 으로 원래 의도인 1/10000 에 비교하여 매우 근사하게 축소화 되었다. 그러나 열원 밀도(q''')는 1/3.9 로서, 축소화 규칙을 따르지 않았음을 알 수 있다. 이는 국지적 열전달 모델에 영향을 주어 현상을 왜곡할 소지가 많다. 이것이 발생한 이유는 길이(L)을 길게 잡은 것에 기인하며, 이는 측정의 용이성을 추구한 결과이다.

둘째로, Ar 의 축소화는 다음과 같다.

$$Ar^* = \frac{\beta^* \Delta T^* D^*_{cal}}{(U^*_{in})^2} = \frac{\frac{1}{1.57}\cdot\frac{1}{4.6}\cdot\frac{1}{10.3}}{(\frac{1}{15.7})^2} = 3.3 \qquad (16)$$

식 (14)는 SPEL 의 Ar 값이 CANDU6 의 약 3.3 배가 되는 것을 보여주며, 이는 부력의 영향이 원 모델인 CANDU6 보다 커졌음을 의미한다. 따라서, SPEL 은 높은 Ar, 낮은 열밀도를 갖게 되어 원래의 CANDU 의 특성을 반영하기 어렵다. STERN 역시 검토해 보면 에너지 보존에 대하여는 역시 양호한 설계를 하였다. 이는 선형축소화의 결과이다. 즉 열 축소화는 다음과 같다.

$$\dot{Q}^* = \dot{m}^* \Delta T^* = \frac{1}{421.5}\cdot\frac{1}{2} = \frac{1}{843} \qquad (17)$$

이 결과인 1/843 으로 열원의 축소화 비율인 1/1000 에 근사하고 있음을 알 수 있다. 약간의 오차가 발생하였지만, 이는 온도차나 질량유량의 측정 에서 나온 값으로 판단된다. 그러나, STERN 또한 열원의 밀도에 대한 축소화 비율이 1/2.3 으로 적게 축소화 되었다. 이것은 모두 계측기의 장입등의 실제적 문제를 고려하여 설계하는 과정에서 발생하였다. 반면 Ar 은 식 (18)에 나타난 바와 같이 비교적 합당한 축소화를 이루었다.

$$Ar^* = \frac{\beta^* \Delta T^* D^*_{cal}}{(U^*_{in})^2} = \frac{\frac{1}{1.15}\cdot\frac{1}{2}\cdot\frac{1}{3.8}}{(\frac{1}{2.7})^2} = 0.83 \qquad (18)$$

이런 관점에서 STERN은 SPEL보다 양호하게 설계 되었음을 알 수있다.

3. 감속재 열수력 개별영향실험설비 (HU-KINS) 개발

3.1 HU-KINS 실험설비의 설계

CANDU-6 원자로의 감속재 열수력 개별영향 실험설비 설계, 제작을 위하여 Fig. 2와 같이 축소화 규칙을 도출하고 이를 토대로 축소화 및 상사성을 평가하여 축소화 실험설비를 설계하였다.

먼저 열원과 열원 밀도 축소화를 하기위해 열원

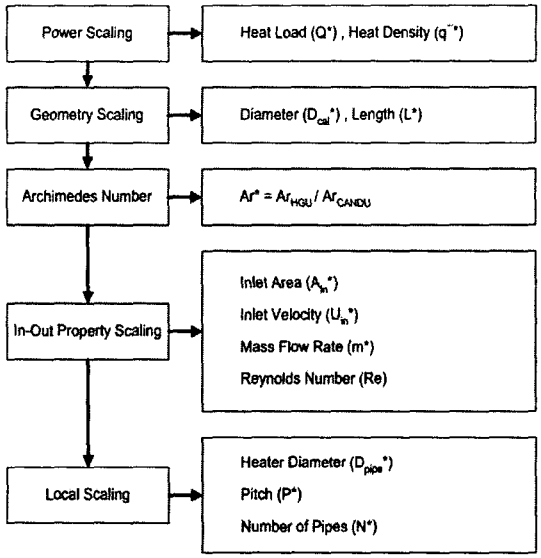

Fig. 2 Design procedure for HUKINS experimental facility

의 최대 출력을 CANDU6의 1/10000인 10 kW로 정하였고, 열원 밀도는 CANDU6와 같은 비율로 하였다.

$$Q^* = \frac{10\ kW}{100000\ kW} = \frac{1}{10000} \qquad (19)$$

$$q'''^* = 1 \qquad (20)$$

부력 효과를 정확히 축소화 하기위해 Ar^*는 1로 하였고, Re, 일단 10000 정도의 값으로 정하였다. 이러한 축소화 전략을 통해 구체적인 설계치가 결정된다.

칼란드리아의 지름과 길이의 이상적인 축소화는 실제 CANDU 칼란드리아의 길이 비율을 갖게 하는 원형 축소판(Xerox Copy)의 경우이다. 이를 고려하여 $(L/D)^*$= 1인 축소화를 할 경우에는 칼란드리아의 지름은 원 모델의 1/21.5의 축소비(D_{cal}^*=1/21.5)를 가지게 된다. 이때의 지름은 0.35m로, 이는 열원 장착에 문제가 발생한다.

따라서 본 연구에서는 길이 방향의 축소화를 좀 더 많이하고, 칼란드리아 탱크의 직경은 크게 하였다. 이의 검증을 위해, 토의 부분에 길이 방향의 유동장 분석을 하여 이것이 큰 영향이 없음을 입증하였다. 칼란드리아 지름을 결정함에 있어서, SPEL이 1/10, STERN이 1/4인 점을 감안하여 이와 차별성을 유지하며, 내부의 유동 가시화 및 설비 제작의 용이성, 센서설치를 고려하여 축소화비를 1/8로 결정하였다.

$$D^*_{cal} = \frac{1}{8} \qquad (21)$$

따라서 D_{cal}= 0.95m가 된다. 이를 이용하여 길이

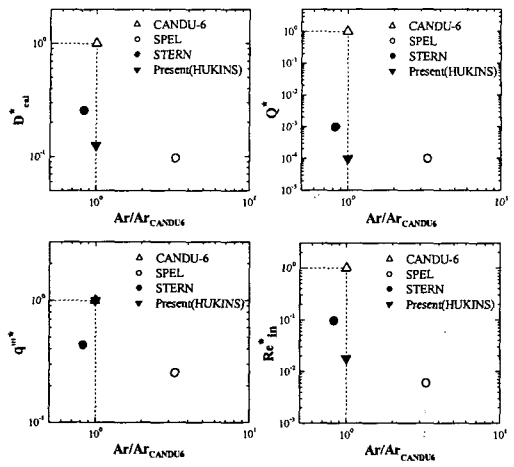

Fig. 3 Scaling effects of (a) diameter (b) power (c) power density (d)Reynolds number with respect to the Archimedes number

축소율을 구하면, 열원 축소식 식 (7)에 의해 다음과 같이 결정된다.

$$L^* = \frac{Q^*}{D^{*2}_{cal}} = \frac{1}{156.3} \tag{22}$$

식 (22)는 본 실험설비의 길이 L이 0.0384 m임을 보인다. 이부분에 대한 축소화 근거로서 채택할 수 있는 것은 경계층 이론이 될 것이다.

Table 2 에 정리되었고 Fig. 3에 도식한 바와 같이 HUKINS가 설계된 내용과 다른 실험장치의 축소화율을 비교하였다. 그림에서 알 수 있듯이 전역변수에서 아르키메데스 수와 열원밀도에서 좋은 상사성을 이루었음을 알 수 있다.

질량유량 ($\dot{m}$) , 입출구 온도차(ΔT), 입력속도(U_{in}) 및 입력노즐의 면적(A_{in})에 대한 축소화비는 앞서 유도된 온도축소화변수 ΔT^*, 식 (9), 와 입구유속변수 U_{in}^*, 식 (10)을 사용함에 있어 입력노즐의 면적이 설계 입력변수로 정의되어야 한다. 본 설계에서는 입력노즐의 면적을 0.0006 m^2로 결정하였으며, 면적 축소화율은 다음과 같다.

$$A^*_{in} = \frac{0.0006m^2}{0.4602m^2} = \frac{1}{767} \tag{23}$$

식 (9)에 의하여, 입출구 온도차 축소화율을 다음과 같이 정리된다.

$$\Delta T^* = \frac{1}{2.8} \tag{24}$$

따라서 실험의 온도차는 7.14 $^\circ C$ 로 결정된다. 또한 입구노즐의 유속은 식 (10)에 의하여

$$U^*_{in} = \frac{1}{4.7} \tag{25}$$

이되고, 이는 0.434 m/s가 된다. 이로부터 결정된 질량유량 축소화는 다음과 같다.

$$\dot{m}^* = \frac{1}{3571} \tag{26}$$

따라서, 입력노즐에서의 레이놀즈수가 이로부터 결정되는 데 이것이 난류유동의 조건만 만족하면, 본 축소화에서 유동패턴은 Ar 에만 의존하므로 충분한 축소화가 된것으로 판단된다. Re는 11000으로 계산되므로 충분한 축소화가 이루어 졌으며, 이때의 축소화비는 1/55이다.

$$\mathrm{Re}^*_{in} = 1/55 \tag{27}$$

축방향 길이에 대한 경계층의 축소화는 다음식에 나타난 바와 같이 경계층 이론에 의거하여 1/8로 길이 축소율을 반영한다.

$$\left(\frac{\delta}{L}\right)^* = \frac{1}{\mathrm{Re}^*} = \sqrt{\frac{1}{55}} \approx \frac{1}{8}.$$

국지적 축소를 위해서는 각 열원을 냉각하는 감속재의 평균속도를 구해야 하나, 이는 지역에 따라 매우 달라지므로, 상기 노즐 출구에서의 제트 속도의 상사율을 사용하기 보다는 유량의 산포 면적을 고려하여 다음과 같이 결정하였다.

$$U^*_m = \frac{m^*_{in}}{D^*_{ca1}L^*} = \frac{1/3571}{(1/8)(1/156.3)} = 0.35 \tag{28}$$

국지적 축소를 위해 10kW의 열원 공급 및 제작의 용이성 등을 고려하여 히터의 지름, 피치에 대하여는 SPEL, STERN의 결과를 고려하여 히터파이프 직경축소 D^*_{pipe} , 피치축소 P^* , 히터수 축소 N^*를 다음과 같이 정했다.

$$D_{pipe}{}^* = \frac{1}{4} \tag{29}$$

$$P^* = \frac{1}{4} \tag{30}$$

$$N^* = \frac{1}{4.3} \tag{31}$$

따라서 대응직경(D^*_{eq}) 1/4로 축소화됨을 알 수 있다. 상기 식 (29)~(31)의 축소율을 이용하여, 식 (14)에 제시된 국지적 축소화의 규칙에서 열원밀도를 1로 상사한다면 온도차이에 대한 축소화 정도를 다음과 같이 확인할 수 있다.

$$(T_{wall} - T_f)^* = \frac{(D^*_{cal})^2 (D^*_{eq})^{0.16}}{N^* D^*_{pipe} (U^*_m)^{0.84}} = \frac{(1/8)^2 (1/4)^{0.16}}{(1/4.3)(1/4)(0.35)^{0.84}} = 0.519 \tag{32}$$

Table 2 The summary of scale parameters for HUKINS

		Present	
		Value	Scale
Geometry	D_{cal} (m)	0.95	1/8
	L (m)	0.0384	1/156.3
	P(m)	0.072	1/4
	D_{pipe} (m)	0.033	1/4
	N	88	1/4.3
	A_{in} (m^2)	0.006	1/767
	A_{out} (m^2)	0.006	1/767
Energy	Q (kW)	10	1/10000
	q''' (W/m^3)	414130	1
	ΔT (°C)	7.14	1/2.8
Dynamic	$\dot{m}_{in}$ (kg/s)	0.3	1/3571
	$\dot{m}_{out}$ (kg/s)	0.6	1/3571
	U_{in} (m/s)	0.434	1/4.7
Reynolds	Re_{in}	11000	1/55
Archimedes	Ar	0.1806	1

따라서 이를 통해 볼 때, 국지적 축소화는 실제 온도차이에 비해 약 1/2로 축소화 되었음을 알 수 있다. 이는 입출구 온도 축호화 율 ΔT^* 이 1/2.8로서 이루어진 점을 감안하면, ΔT^* 에 대하여 45% 열원온도를 높게 축소화 하였다.

사실 본 실험 장치에서 자연대류 효과는 시스템의 축소과정에서 상당히 위축되게 설계 될 수밖에 없다. 즉 레일리수 $Ra^* = (T_{wall} - T_f)^* D^3_{pipe}$ 가 0.0081로 나타난다. 이로 볼때 본 실험장치는 히터에 의한 자연대류 발생을 극도로 억제한다. 실제 칼란드리아의 감속재가 가열되는 양식은 튜브 표면을 통한 대류 열전달 보다 고에너지의 중성자와 방사선이 감속되면서 발생하는 직접적인 가열에 80% 이상 의존하므로, 이런 관점에서는 좋은 축소화 전략으로 받아들일 수 있다. 따라서 스펠(SPEL)과 같이 전기 영동 방식으로 가열하지 않으면서, 히터를 이용하여 이상황을 구현하기 위한 최적의 방식은, 레일리수를 최소로 하여, 국지적 열전달에 의한 부력 효과를 억지하고, 히터의 출력 조절을 통한 열밀도의 국지적 차이를 유발하여 실제 시스템을 모사한다.

3.2 HU-KINS 실험설비의 열수력 성능검증

축소화된 실험설비의 열수력 성능검증을 위하여 상용전산유체해석 코드인 CFX5 를 사용해 해석하였다. Fig. 4 에 나타난 바와 같이 메쉬는 기존의 여러 연구자들이 사용한 다공매체(porous body) 가정을 쓰지 않고 직접 모든 핵연료봉을 모델하였다. 이러한 방식은 물론 시험장치를 제작하여 실증하기 전에 기초적으로 본 축소화 기법의 건전성을 검토하기 위한 것이다. 이를 통해 보이고자하는

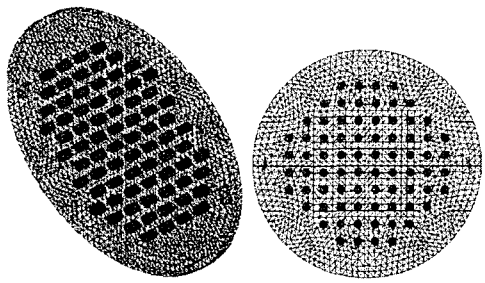

Fig. 4 Mesh generation for HUKINS

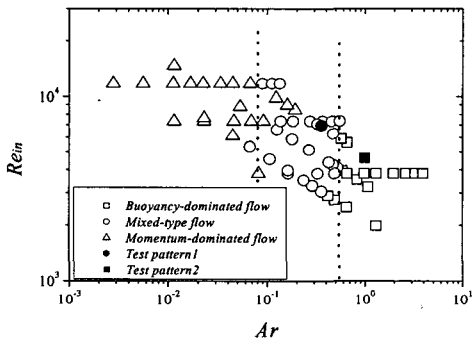

Fig. 5 Flow regime map based on the Archimedes number and the Reynolds number by the experimental data of SPEL with FLUENT simulation [Yu et al.[11]]

것은 혼합 유동, 부력유동이 나타나는 지 여부와, 길이 방향 축소화에 의해 3 차원적인 효과가 소멸하는 것에 대한 검토를 위함이었다.

시뮬레이션 조건을 정하기 위해 기존의 연구자들이 수행한 유동패턴맵을 활용하였다. 이는 Fig. 5 에 나타난 바와 같이 다양한 시뮬레이션을 통해 *Ar* 와 *Re* 의 평면에 FLUENT.[8,9]를 이용하여 Yoo 등이 작성한 것으로 유동 패턴이 레이놀드수에 크게 영향을 받지 않고 아르키메데스 수에 크게 의존한다고 한다. 이에 대한 사실 여부는 추후 연구를 통해 규명할 것이고, 혼합 유동과 부력유동영역에 해당하는 검은 점에 해당하는 조건에 대하여 CFX 를 이용하여 시뮬레이션 하였다.

첫 번째 패턴의 유동조건은 U_{in} = 0.27 m/s, Re_{in} = 6940, Ar^* = 0.43 과 같으며, 유동양식선도상에서 Mixed-type flow 로 분류되는 영역에 위치한다. 제시된 유동조건에 대한 CFX5 의 해석결과를 Fig. 6 에 나타내었다. Fig. 6(a)의 온도분포를 살펴보면, 입력노즐에서의 운동량과 부력효과가 중첩된 개형이 나타나는 것을 확인할 수 있다. (b)의 속도분포에서도 이러한 혼합유동(Mixed-type flow)의 형상이 나타나고 있음이 확인된다.

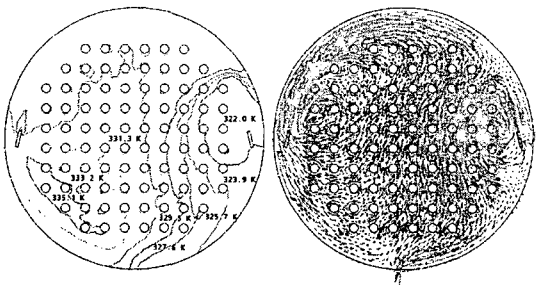

Fig. 6 The simulation results of the first test condition as in the mixed flow regime (a) temperature field (b) velocity profile

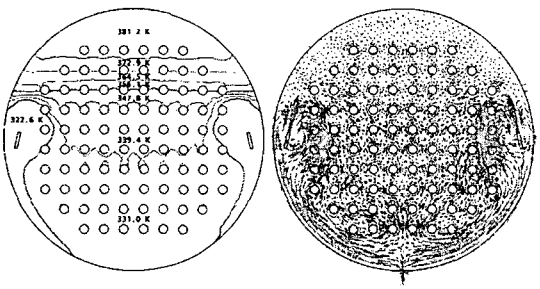

Fig. 7 The simulation results of the second test condition as in the buoyancy driven flow regime (a) temperature field (b) velocity profile

두 번째 패턴의 유동조건은 U_{in} = 0.18 m/s, Re_{in} = 4630, Ar=1.0 과 같으며, 유동양식선도상에서 부력유동(Buoyancy flow)로 분류되는 영역에 위치한다. 첫 번째와 같은 방법에 의하여 CFX5 의 해석을 수행하였으며, 해석결과는 Fig. 7 과 같다. Fig. 7(a)의 온도분포를 살펴보면, 입력노즐에서의 유체분사속도가 느려서 이에 따른 운동량의 효과가 거의 없고 온도에 의한 부력효과만이 강하게 나타나는 부력유동임을 알 수 있다.

속도분포를 보면, 입력노즐에서 분사된 물이 상부로 뻗어가지 못하고 출구 방향으로 떨어지거나, 하단부에서 부력효과에 의하여 부분적으로 상승하는 Buoyancy flow 의 형상이 확인된다. 이를 통해 반경 방향의 다양한 감속재 유동장이 적절하게 표현되고 있음을 시뮬레이션을 통해 확인 할 수잇었다.

두 번째로, 제안 모델의 길이방향 축소화 에 대하여 비교하였다. 앞절에서 결정한 것처럼 HUKINS 의 경계층이 1/8 로 축소화 되었으므로 축방향의 유동거동이 CANDU -6 와 유사하게나타날 것이 예상된다.

검증을 위해 원 모델인 CANDU-6 에 대한 메쉬를 생성하여 축방향에 대한 온도, 속도분포를 확인하였다. Fig. 8 과 Fig. 9 에 현재의 HU-KINS 설계와 CANDU 6 의 설계를 CFX 로 계산한 결과를 나타내었다.

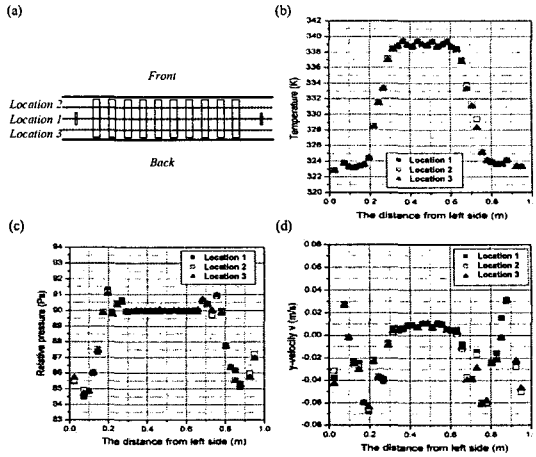

Fig. 8 The simulation results of HUKINS for the axial locations; (a) test locations (b) temperature (c) y-directional velocity (d) pressure profile

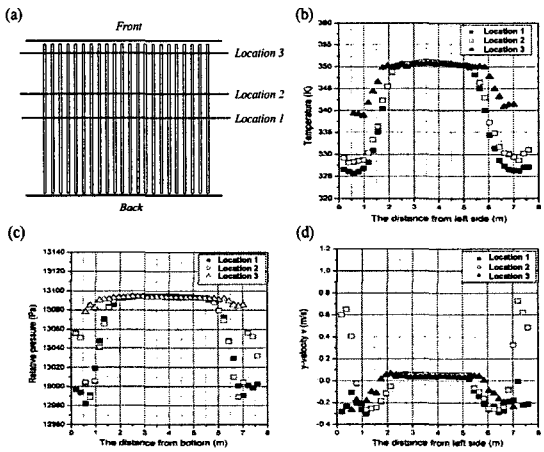

Fig. 9 The simulation results of CANDU-6 for the axial locations; (a) test locations (b) temperature (c) y-directional velocity (d) pressure profile

서로 대응되는 관측점은 중앙부로서 위치 1 (Location 1)번으로서, 온도장의 경우 Fig. 8(b), Fig. 9(b)에서 나타나는 봐와 같이 유사한 분포를 보여준다. 하지만 압력장이나 유체 속도장은 그 규모에 있어 큰 차이를 준다. 그것은 속도와 용기 크기차이에 의한 정압의 차이에서 비롯된다. 또한 관측 위치는 다르나 Fig. 9 의 (c)와 (d)에서 나타난 바와 같이 축방향으로 이들 변수가 고르게 분포한다. 이는 실제 CANDU 6 가 축방향으로 세군데의 입력 노즐이 분포하여 있기 때문이다. 따라서 이를 통해 축방향의 유동이 균일성이 있음을 확인할 수는 있다.

Fig. 10에 축소화 규칙을 통하여 설계된 실험설비의 개념도를 나타내었다.

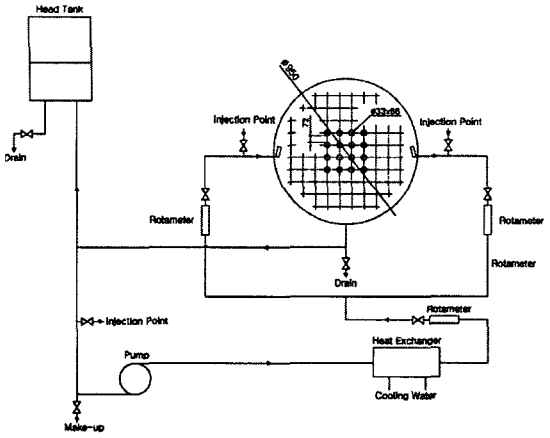

Fig. 10 Schematics for the test loop(HUKINS)

4. 결과 및 토의

본 연구에서는 칼란드리아 내의 감속재의 유동장과 온도장에 대한 실험 설비제작을 위한 축소화 법칙의 도출 작업을 수행하였다. 전역적 축소화를 위해서, 출력에 대하여 1/10000 축소화를 하고 반경에 대하여 기존의 실험 설비와와의 차별화를 위해 1/8 축소화를 하였다. 아르키메데스 수, 레이놀드수, 열출력 밀도등을 상요하여, 입출구 유량과 온도차이를 정의하였고, 국지적 열전달을 축소화 하기 위해, 봉다발 열원에서의 강제 대류열전달 계수에서 무차원 스를 찾아 국지적 축소화를 하였으며, 본 축소화는 작은 레일리 수를 초래하여, 열원표면 열전달 모드에 민감하기 보다는 지역적 중성자속의 분포를 고려한 열량의 차이를 통한 실제 원자로를 모사하는 것에 충실하도록 하였다. 이전에 캐나다에서 만들어진 실험설비인 SPEL 과 STERN 에 비하여 많은 변수가 적절히 축소화된 설계를 얻을 수 있었다. 실험장치 제작에 앞서, 3 차원 열수력 해석 코드인 CFX 를 이용하여, 모든 열원을 실제로 모델한 메쉬를 사용하여 계산한 결과, 부력유동, 혼합 유동, 강제 유동등이 적절하게 나타남을 확인하였으며, 축방향으로 유동장 역시 작은 경계층 두께로 말미암아 적절한 영역 비율로 균일 유동이 형성 되고 있음을 확인할 수 잇었다. 실험설비는 현제 실제 제작중이고, 향후 실험을 통한 축소화에 대한 실증을 할 예정이다.

후 기

본 연구는 원자력 기초연구소 사업과 중장기 사업에서 부분적인 지원을 받았다.

참고문헌

(1) Koroyannakis, D., Hepworth, R.D. and Hendrie, G., 1983, "An Experimental Study of Combined Natural and Forced Convection Flow in a Cylindrical Tank," TDVI-382, AECL.

(2) Fortman, R.A. and Hadaller, G.I., 1990, "Moderator Temperature Distribution Experiments, Modified Inlet Port Tests: Results and Comparison," COG R&D Commercial, Nov.

(3) Hadaller, G. I. and Fortman, R. A., 1990, "Moderator Temperature Distribution Experiments, Phase 1: Unobstructed and Obstructed; Adiabatic and Diabatic with Resistance Heating," COG R&D Commercial, Mach.

(4) Hadaller, G. I. and Fortman, R. A., 1990, "Moderator Temperature Distribution Experiments, Phase 2: Obstructed Diabatic Tests with Electrolytic and Resistance Heating," COG R&D Commercial, June.

(5) Lee, J.Y. and No, H.C., 1990, "Dynamic Scaling Method for Testing the Performance of the Water Level Controller of Nuclear Steam Generators," *Nucelar Engineering and Design*, Vol. 122, pp. 313~327.

(6) Ishii, M. and Revankar, S.T., 1994, "Scientific Design of Purdue University Multi-Dimensional Integral Test Assembly (PUMA) for GE SBWR," NUREG/CR-6390.

(7) Zhukauskas, A., 1972, "Heat Transfer from Tubes in Cross Flow," in J.P.Hartnett and T.F.Irvine, Jr., Eds., *Advances in Heat Transfer*, Vol. 8, Academic Press, New York.

(8) Yoon, C., Rhee, B.W. and Min, B.J., 2002, "Validation of a CFD Analysis Model for Predicting CANDU-6 Moderator Temperature Against SPEL Experiments," *Proceedings of ICONE10*, April 14-18, Virginia, USA.

(9) Yu, S.O. and Kim, M.W., 2002, "Assesment of Moderator Integrity Using Realistic Model and Parametric Studies on Thermal-Hydraulic Characteristics in SPEL," *Proceedings of the KNS Fall Meeting.*

(10) Jung, Y.S., Lee, J.Y. and Kim, M.W., 2004, "The Transition Criteria of Circulating Flow Pattern of Moderator in the Calandria Tank of CANDU Nulcear Power Plant," N6P141, Proceedings of NUTHOS-6: 6th International Topical Meeting on Nucelar Reactor Thermal Hydraulics, Operation and Safety, October 4-8(2004)Nara, Japan.