2004 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

CANDU-6 원자로 감속재 열수력 개별영향실험설비 제작을 위한 축소화 기법 개발

Development of Scaling Laws on Thermal-Hydraulic Effect Test Facility for CANDU-6 Moderator

이재영, 정윤식, 김남석

한동대학교
경북 포항시 북구 흥해읍

김만웅, 김효정

한국원자력안전기술원
대전광역시 유성구 구성동 19번지

요 약

CANDU-6 원자로 칼란드리아 내 감속재의 열수력적 특성을 고찰하기 위해 축소화 법칙을 도출하고 이를 통하여 감속재 열수력 개별영향실험설비(HGU-KINS)를 제작하였다. 열수력적 특성을 모사하기 위하여 에너지 보존법칙을 만족하며 주요 열수력적 특성 무차원상수 Ar, Re의 상사성을 기준으로 축소화 법칙을 정립하였다. 제안된 축소화 법칙을 이용하여 캐나다에서 수행된 CANDU-6 원자로의 감속재에 대한 유사 열수력 개별영향실험설비인 SPEL(1/10 축소)과 STERN(1/4 축소)에 대한 축소화 분석을 수행하였다. 분석결과 SPEL실험설비의 경우, 핵연료채널에 대한 에너지 보존에 대해서만 축소 상사성을 만족하며, STERN실험설비의 경우, Ar에 대한 특성과 에너지 보존을 고려한 축소 상사성을 만족하는 것으로 분석되었다. 이에 본 연구에서 실험의 다양성과 실험결과에 대한 신뢰성을 제고하고자 정립된 축소화 법칙을 적용하여 1/8의 축소비를 가지는 CANDU-6 원자로의 감속재에 대한 열수력 개별영향실험설비를 개발하였다. 또한 축소에 따른 열수력적 신뢰성을 검증하기 위하여 상용 전산유체해석 코드인 CFX5를 이용하여 유동패턴과 축방향 효과에 대한 성능평가를 수행하였으며, 그 결과 제안모델의 적절성을 확인하였다.

ABSTRACT

The scaling laws on thermal-hydraulic effect test facility for CANDU-6 moderator (HGU-KINS) have been investigated and manufactured. The basic laws are the satisfaction of energy conservation and dimensionless number, Ar and Re, for the similarities of thermal-hydraulic properties. And then the thermal-hydraulic scaling analyses of test facilities, SPEL(1/10 scale) and STERN(1/4 scale), have been identified by the present method. As a result, in the case of SPEL, the energy conservation is confirmed, but the similarities of Ar and the heat density are not considered. In the case of STERN, the energy conservation and the characteristics of Ar were well defined. But the similarity of the heat density is unsatisfied, either. Therefore the present method was applied with 1/8 length scale. For the performance test, CFD analysis has been accomplished by CFX5. The results of flow pattern certifications and variation of axial properties with CANDU show that the present scaling method is acceptable.

1. 서 론

중수형 원자로에서 냉각재 상실사고로 인한 칼란드리아관과 압력관의 접촉으로 관 표면에서 dry-out이 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 20여년간 캐나다에서는 AECL과 COG의 주관 하에 SPEL(Koroyannaski et al, 1983), STERN(Hadaller, 1990)의 실험 연구를 수행하였다. 1983년 SPEL의 Koroyannaski는 Calandria-like cylindrical vessel 내에서 유체의 inlet jet과 internal heat에 의해 발생되는 유동현상에 대한 연구를 수행하였다. SPEL 실험은 축소모형은 아니지만 재순환 유동, 비등이 없는 유체의 가열, 칼란드리아 축에 평행하게 나열된 수평관들의 2차 배열 등 CANDU 원자로의 전형적인 특성을 반영하고 있다. 하지만 유동패턴에 대한 축소화는 충분히 되지 않았고, 단지 직경을 1/10로 축소화하여 수행된 실험이었다. 1990년에는 STERN의 Hadaller에 의하여 1/4 축소 비율의 실증 실험이 수행되었다. STERN의 실험은 칼란드리아 내부의 감속재 거동에 대하여, 입력노즐의 각도 변화와 열원의 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 우리나라에서도 KINS의 지원하에 새로운 실험을 하되 축소화 규칙에 대한 개발과 적용을 하는 것을 목표로 수행되었다.

축소화를 통한 실증 실험설비의 설계는 실험결과의 타당성 확보에 매우 중요한 사항이다. 수많은 무차원 상수들이 이에 사용되기 위해 제안되고 검토되어왔다. 가장 많이 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 Lee와 No(1990)의 방법과, BWR원자로를 1/4 길이 축소화를 달성한 Ishii(1994)의 방법이 있고, 현재 ATLAS 의 경우도 길이 축소화에 대하여 동일한 방법론적 접근을 하고자 한다. 칼란드리아의 경우도 선형축소화를 한다고 하여도 필연적으로 직경 감소에 따른 헤드 입장에서 길이 축소화가 이루어지는 상태이므로 축소화 규칙의 개발은 매우 중요한 설계작업이 된다.

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

2. 감속재 열수력 특성을 고려한 축소화 영향 평가

2.1 축소화 규칙

전역적 축소화 규칙(global scaling law)

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 380개의 칼란드리아 튜브에서 발생하는 총 열량은 칼란드리아 내부에서 보존되어야 한다. 열량 보존식은 다음과 같다.

$$\dot{Q} = \dot{m} C_p \Delta T \tag{1}$$

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

$$\dot{Q}^* = \dot{m}^* \Delta T^* \tag{2}$$

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

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

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

식(3)을 무차원화 하면 식(4)와 같이 정리된다.

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

둘째로, 유체의 흐름을 지배하는 힘이 제대로 축소되어야 한다. 칼란드리아 내의 주요한 힘은 크게 마찰력, 관성력, 부력이 있다. 이 세 가지 힘의 조합으로 무차원 수 Re와 Ar가 유도되며, Ar는 부력과 관성력의 비율을, Re는 관성력과 점성력의 비율을 나타낸다. Ar의 정의는 다음과 같다.

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

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.

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

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

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

그러나 Re를 결정짓는 변수인 입력노즐의 속도(U_{in})와 칼란드리아의 지름 (D_{cal})은 앞서 언급된 Ar의 결정에도 영향을 주는 변수이다. 따라서 Re 보다 Ar의 효과가 칼란드리아 내부의 유동패턴에 더 지배적으로 작용함을 고려하여, Re는 Ar의 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 열원밀도의 정의식에서 유도된다. 식(4)를 정리하면, 칼란드리아의 길이는 칼란드리아의 지름, 열원 및 열원 밀도에 대한 다음과 같은 식으로 표현된다.

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

질량유량 $(\dot{m})$, 입출구 온도차 (ΔT) , 입력노즐의 면적(A_{in}) 사이의 관계는 식(2)의 열전달 보존방정식에 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.

$$\Delta T^* = \frac{Q^*}{U_{in}^* A_{in}^*} \tag{9}$$

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

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

<u>지역적 축소화 규칙(local scaling law)</u>

칼란드리아의 전역적 축소화 인자들이 결정된 후, 내부의 열원의 지름(D_{pipe}), 피치(P), 개수(N)에 대한 축소화 인자를 도출하여야 한다. 그림 1은 칼란드리아 내부의 열원 다발의 개략도 이다.

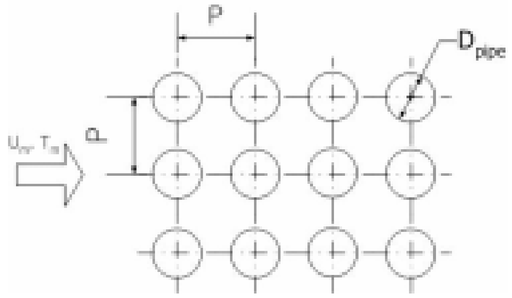


그림 1. 칼란드리아 내부 열원 다발의 개략도

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 축소되어야 한다. 이는 유체의 흐름에 대한 무차원수인 Re와, 대류 열전달에 대한 무차원수인 Nu가 고려되야함을 의미한다. 그러나, 칼란드리아 내부의 속도는 지역별로 매우 다른 분포를 가지므로, Re에 의한 축소화는 적용하기에 어려움이 있으며, 오히려 $Re_{D,max}$, Pr, Nu_D의 상관관계로 정의되는 Zhukauskas(1972)에 의해 제안된 식(11)이 축소화에 적합한 기준이된다. Zhukauskas에 의하면, 교차흐름(cross-flow)이 있을 때 튜브다발에서의 열전달은 다음과 같은 상관관계를 만족한다.

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

여기서, $\mathrm{Re}_{D,\max}^{m} = \frac{\rho U_{\max} D_{pipe}}{\mu}$, $U_{\max} = \frac{P}{P - D_{pipe}} U_m$, $\mathrm{Pr} = \frac{c_p \mu}{k}$, $\mathrm{Pr}_s = \mathrm{Pr}\big|_{at\ surface}$ 이다. 이때, 계수 C와 m은 튜브다발의 배열형상에 의하여 결정되는 값으로, CANDU6에서의 조건을 적용하면, 다음과 같이 정리된다.

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

칼란드리아 내부의 지역적 축소화는 위의 상관관계에 의해 계산되는 Nu_D의 상사성이 만족되도록, 열원의 지름(D_{pipe}), 피치길이(P), 개수(N)가 결정되어야한다.

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 무차원 수 Ar의 모사를 통한 부력효과 반영의 측면에서 축소화 분석을 하였다. 분석을 위하여 표 1에 원모델인 CANDU6와 SPEL, STERN의 축소화 인자를 정리해 놓았다.

첫째로, SPEL에 대한 열량 보존여부는 다음과 같이 계산된다.

$$\dot{Q}^* = \dot{m}^* \Delta T^* = \frac{1}{2023}\cdot\frac{1}{4.6} = \frac{1}{9306} \qquad (13)$$

결과를 보면, 열량 축소화는 1/9306으로 매우 근사하게 축소화 되었다. 그러나 열원 밀도는 1/3.9로서, 축소화 규칙을 따르지 않았음을 알 수 있다. 이것이 발생한 이유는 길이(L)을 길게 잡은 것에 기인하며, 이는 측정의 용이성을 추구한 결과이다.

표 1. CANDU6, SPEL, STERN의 축소화 인자의 정리

	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 ($^\circ C$)	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

둘째로, Ar의 축소화는 다음과 같다.

$$Ar^* = \frac{\beta^* \Delta T^* D_{cal}^*}{(U_{in}^*)^2} = \frac{\frac{1}{1.57} \cdot \frac{1}{4.6} \cdot \frac{1}{10.3}}{(\frac{1}{15.7})^2} = 3.3 \tag{14}$$

식(14)는 SPEL의 Ar값이 CANDU6의 약 3.3배가 되는 것을 보여주며, 이는 부력의 영향이 원 모델인 CANDU6 보다 커졌음을 의미한다. 따라서, SPEL에서 관찰된 유동패턴은 CANDU를 잘 반영하지 못한다. 이와 같이 축소화 규칙을 검토하지 않고 실험을 수행하면, 원 모델에서의 실제 현상을 잘 반영할 수 없음을 알 수 있다.

STERN의 축소화에 대하여도 열원과 Ar에 대한 검토를 해보았다. 먼저, STERN에 대하여 열량 보존 여부 및 열원 밀도의 축소화비를 살펴보면 다음과 같다.

$$\dot{Q}^* = \dot{m}^* \Delta T^* = \frac{1}{421.5} \cdot \frac{1}{2} = \frac{1}{843} \tag{15}$$

위의 계산 결과를 살펴보면 계산식 결과는 1/843으로 열원의 축소화 비율인 1/1000에 근사하고 있음을 알 수 있다. 약간의 오차가 발생하였지만, 이는 온도차나 질량유량의 측정에서 나온 값으로 판단된다. 즉, STERN은 SPEL과 마찬가지로 열전달 방정식에 대해서는 축소화가 적절하게 이루어졌음을 확인 할 수가 있다. 하지만 STERN 또한 열원의 밀도에 대한 축소화 비율이 1/2.3으로 올바른 축소화가 이루어지지 않았음이 확인된다.

둘째로, Ar는 STERN의 경우 다음과 같이 정리된다.

$$Ar^* = \frac{\beta^* \Delta T^* D_{cal}^*}{(U_{in}^*)^2} = \frac{\frac{1}{1.15} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{3.8}}{(\frac{1}{2.7})^2} = 1.2 \tag{16}$$

이는 1에 가까워 비교적 좋은 상사설계가 되었음을 의미한다. 즉, STERN은 열원과 Ar는 잘 축소화 되었으나 열원 밀도의 축소화에 다소 오류가 있으며, 이러한 오류는 길이 방향에 대한 축소화가 올바르게 이루어지지 않아 유동패턴의 생성 등에 부정확성을 주는 요인이 된다.

3. 감속재 열수력 개별영향실험설비(HGU-KINS) 개발

3.1 HGU-KINS 실험설비의 설계

CANDU-6 원자로 감속재 열수력 개별영향실험설비 설계, 제작을 위하여 그림 2와 같이 축소화 규칙을 도출하고 이를 토대로 축소화 및 상사성을 평가하여 축소화 실험설비를 설계하였다.

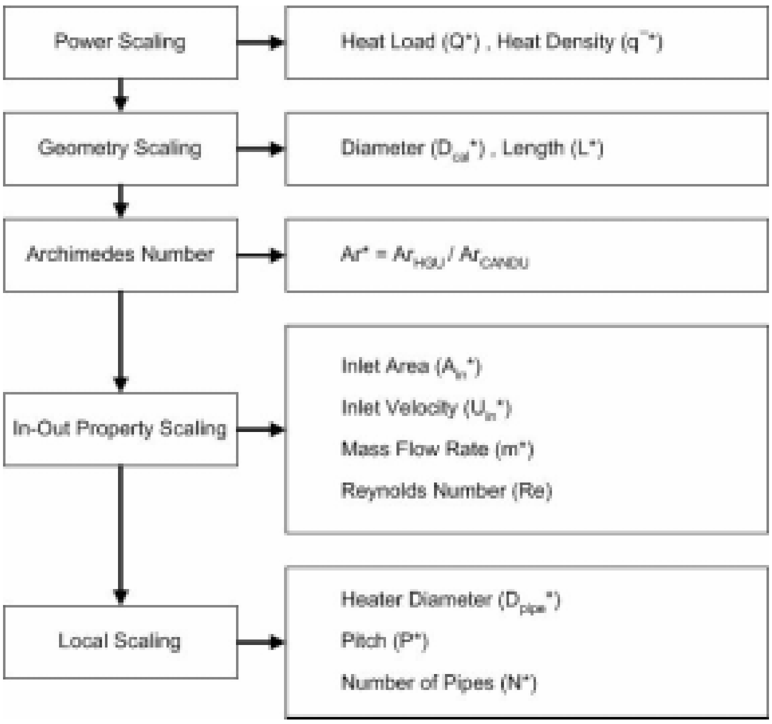


그림 2. 실험설비 설계의 절차

먼저 열원과 열원 밀도 축소화를 하기위해 열원의 최대 출력을 CANDU6의 1/10000인 10 kW로 정하였고, 열원 밀도는 CANDU6와 같은 비율로 하였다.

$$Q^* = \frac{10\ kW}{100000\ kW} = \frac{1}{10000} \tag{17}$$

$$q'''^* = 1 \tag{18}$$

부력 효과를 정확히 축소화 하기위해 Ar^*는 1로 하였고, Re는 Lee 등(2003)의 계산에 의하면, 유동패턴에는 큰 영향을 끼치지 않으므로, 난류조건을 만족시키도록 10000 정도의 값으로 정하였다. 이러한 축소화 전략을 통해 구체적인 설계치가 결정된다.

칼란드리아의 지름과 길이의 이상적인 축소화는 실제 CANDU 칼란드리아와의 aspect ratio(L/D)가 1인 원형 축소판(Xerox Copy)의 경우이다. 이를 고려하여 $(L/D)^*=1$인 축소화를 할 경우에는 칼란드리아의 지름은 원 모델의 1/21.5의 축소비($D_{cal}^*=1/21.5$)를 가지게된다. 이때의 지름은 0.35m로, 이는 열원 장착이 어려운 수치가 된다. 따라서 본 연구에서는 길이 방향의 축소화를 좀 더 많이하고, 칼란드리아 탱크의 직경은 크게하였다. 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.

$$D_{cal}^* = \frac{1}{8} \tag{19}$$

따라서 D_{cal}=0.95m가 된다. 이를 이용하여 길이 축소율을 구하면, 열원 축소식(식(7))에 의해 다음과 같이 결정된다.

$$L^* = \frac{Q^*}{D_{cal}^{*2}} = \frac{1}{156.3} \tag{20}$$

식(20)은 본 실험설비의 길이 L이 0.0384m임을 보인다.

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.

$$A_{in}^* = \frac{0.0006m^2}{0.4602m^2} = \frac{1}{767} \tag{21}$$

식(9)에 의하여, 입출구 온도차 축소화율을 다음과 같이 정리된다.

$$\Delta T^* = \frac{1}{2.8} \tag{22}$$

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

$$U_{in}^* = \frac{1}{4.7} \tag{23}$$

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

$$\dot{m}^* = \frac{1}{3571} \tag{24}$$

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

$$\mathrm{Re}_{in} = 11000 \tag{24}$$

제안모델의 열원이 전기히터임을 고려하여 대류계수(h)에 대한 축소화 작업은 수행하지 않았으며, 10kW의 열원 공급 및 제작의 용이성 등을 고려하여 히터의 지름, 피치에 대하여는 SPEL, STERN의 결과를 고려하여 1/4의 값으로, 열원의 개수에 대하여는 히터 배열을 고려하여 1/4.3로 결정하였다.

$$D_{pipe}^{*} = \frac{1}{4} \tag{25}$$

$$P^{*} = \frac{1}{4} \tag{26}$$

$$N^{*} = \frac{1}{4.3} \tag{27}$$

이러한 축소화 규칙에 CANDU6의 제원을 넣어 결정한 설계치를 표 2에 정리하였다. 중요한 축소화수인 Ar가 동일하게 축소화되어, 본 설계는 유동패턴을 잘 반영할 것이 예상되고 이것은 결과 및 토의 부분에서 검증하였다.

표 2. 제안 모델의 축소화 인자

		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)	0.3	1/3571
	U_{in} (m/s)	0.434	1/4.7
Reynolds	Re_{in}	11000	1/55
Archimedes	Ar	0.1806	1

그림 3에는 Ar^*와 다른 축소화 파라메터의 반영정도를 CANDU6, 그리고 SPEL, STERN에 대하여 도식하였다. 모든 경우에 본 연구와 STERN이 CANDU6를 잘 축소화 한것으로 나타났다. 따라서 추후 실험시 STERN과의 비교는 좋은 평가 방법이 될 것이다.

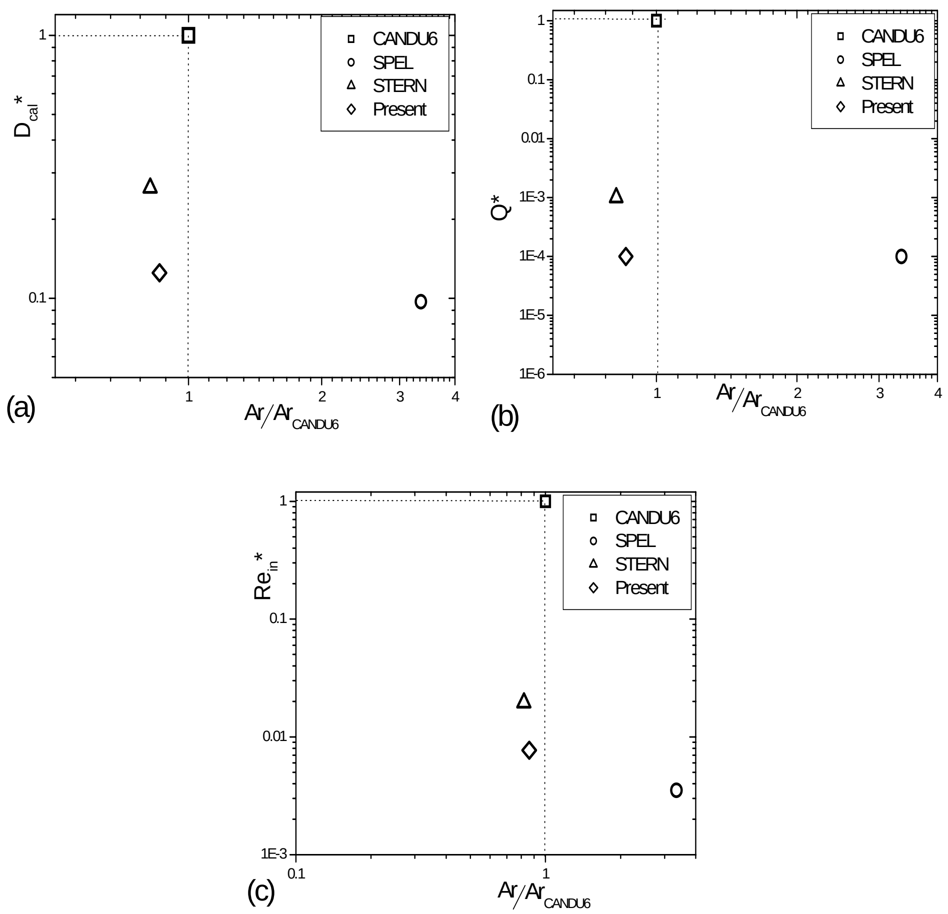


그림 3. (a) Ar^*와 D_{cal} *의 축소화 지도 (b) Ar^*와 Q^* 의 축소화 지도
(c) Ar^*와 Re^* 의 축소화 지도

3.2 HGU-KINS 실험설비의 열수력 성능검증

축소화된 실험설비의 열수력 성능검증을 위하여 상용전산유체해석 코드인 CFX5를 사용해 해석하였다. 그림 4에 나타난바와 같이 메쉬는 porous body 가정을 쓰지 않고 직접 모든 핵연료봉을 모델하였다. 일견 매우 얇아서 2차원적인 실험설비로 보이나, 충분히 축방향 모델이 되어있다.

생성된 메쉬를 이용하여 두가지 측면에서 제안모델의 성능을 평가하였다. 첫째로 제안모델이 원 모델과 같은 유동패턴을 보이는지의 여부를 확인하였으며, 둘째로, 제안모델의 축방향 길이가 기타 모델과 비교할 때 매우 작음을 고려하여 축방향의 효과가 올바르게 모사되는지의 여부를 확인하였다.

먼저 유동패턴의 확인을 위하여 그림 5와 같이 Ar와 Re_{in}에 의하여 구성되는 유동양식선도상의 두 패턴을 고려하였다. Ar와 Re_{in}은 칼란드리아 내부의 유동양식을 결정하는 중요 무차원 파라메터로 그림 4는 SPEL의 실험결과를 바탕으로 제안된 선도이다.(Lee et al, 2003)

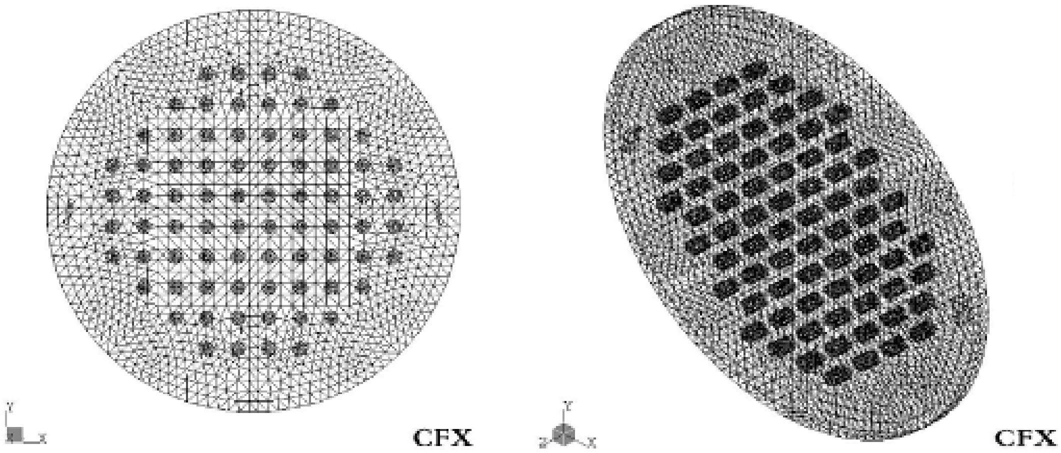


그림 4. CFX5 를 사용해 생성된 제안모델의 메쉬

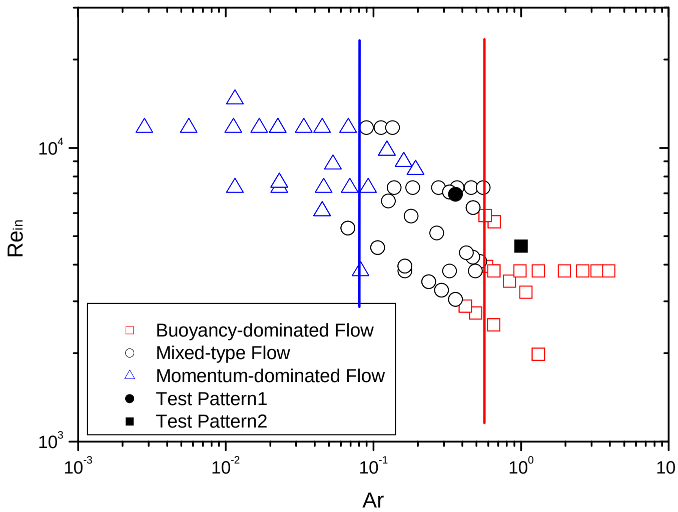
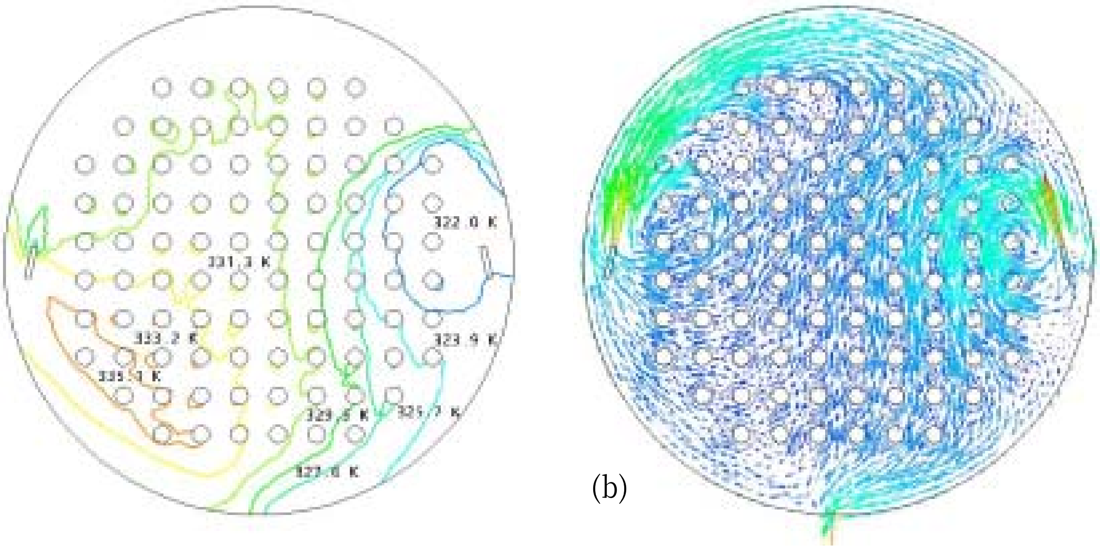


그림 5. 칼란드리아 내부의 유동에 대한 유동양식선도

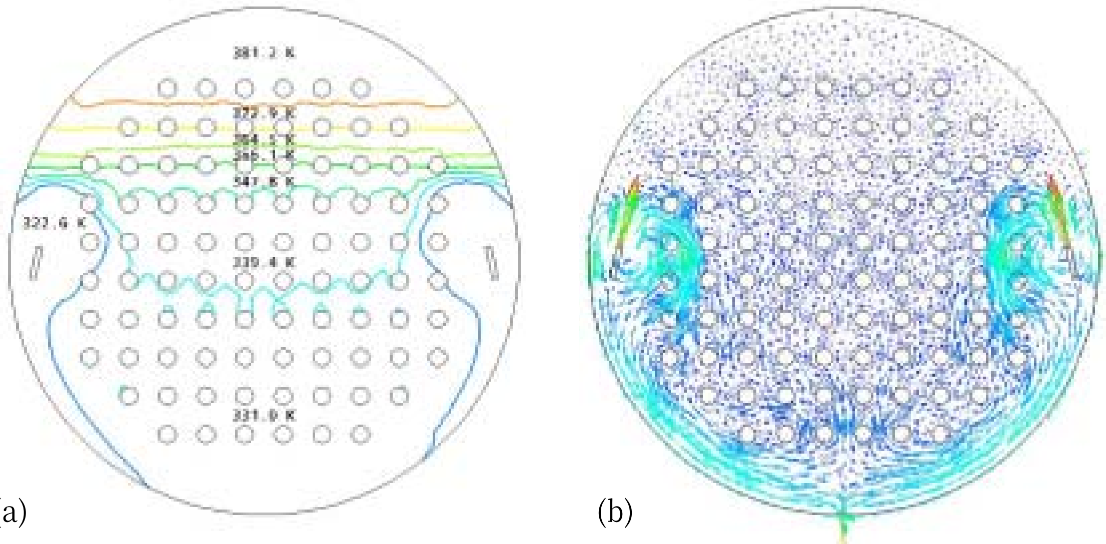
첫 번째 패턴의 유동조건은 U_{in} = 0.27 m/s, Re_{in} = 6940, Ar^{*} = 0.43과 같으며, 유동양식선도상에서 Mixed-type flow로 분류되는 영역에 위치한다. 제시된 유동조건에 대한 CFX5의 해석결과를 그림 6에 나타내었다. 그림 6(a)의 온도분포를 살펴보면, 입력노즐에서의 운동량과 부력효과가 중첩된 개형이 나타나는 것을 확인할 수 있다. (b)의 속도분포에서도 이러한 Mixed-type flow의 형상이 나타나고 있음이 확인된다.

두 번째 패턴의 유동조건은 U_{in} = 0.18 m/s, Re_{in} = 4630, Ar^{*} = 0.16과 같으며, 유동양식선도상에서 Buoyancy flow로 분류되는 영역에 위치한다. 첫 번째와 같은 방법에 의하여 CFX5의 해석을 수행하였으며, 해석결과는 그림 7과 같다. 그림 7(a)의 온도분포를 살펴보면, 입력노즐에서의 유체분사속도가 느려서 이에 따른 운동량의 효과가 거의 없고 온도에 의한 부력효과만이 강하게 나타나는 Buoyancy flow임을 알 수 있다. (b)의 속도분포에서 또한, 입력노즐에서 분사된 물이 상부로 뻗어가지 못하고 출구 방향으로 떨어지거나, 하단부에서 부력효과에 의하여 부분적으로 상승하는 Buoyancy flow의 형상이 확인된다.



(a) (b)

그림 6. 첫 번째 유동조건에서의 CFX5 해석결과 (a) 온도분포 (b) 속도분포



(a) (b)

그림 7. 두 번째 유동조건에서의 CFX5 해석결과 (a) 온도분포 (b) 속도분포

두 번째로, 제안 모델의 길이방향 축소값이 3.84cm의 작은 값임을 고려하여, 경계층에 의한 축방향 효과의 생성여부를 확인하였다. 검증을 위해 원 모델인 CANDU6에 대한 메쉬를 생성하여 축방향에 대한 온도, 속도분포를 확인하였으며, 이를 제안모델의 결과와 비교하였다. 그림 8에 나타난바와 같이 CANDU6의 축방향 온도분포와 압력분포, 속도분포는 대부분의 경우에 위치에 따른 변화가 없다. 따라서 상대적으로 얇은 축길이를 갖는 본 모델이 위와 유사한 분포를 갖는지 본 해석모델로 검토하는 것이 중요하다. 그림 9에 나타난 바와 같이 본 설계의 결과는 길이 축소 비율 그대로 매우 유사하게 온도, 압력, 속도장의 분포를 보여주고 있다. 따라서, 본 설계는 CANDU6를 잘 축소화 했음을 알 수 있다.

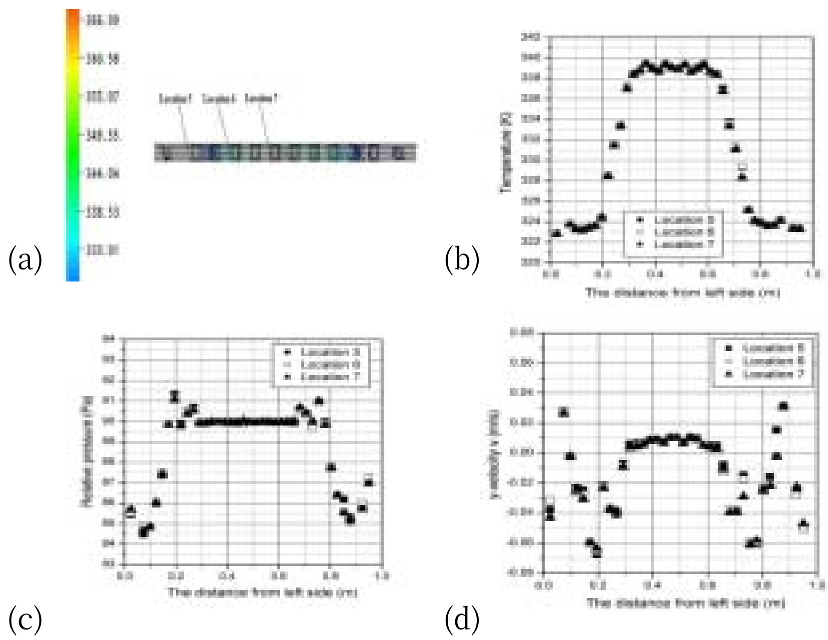


그림 8. CANDU6의 축방향에 대한 CFX5 해석결과 (a) 해석영역 (b) 온도분포 (c) y방향 속도분포 (d) 압력분포

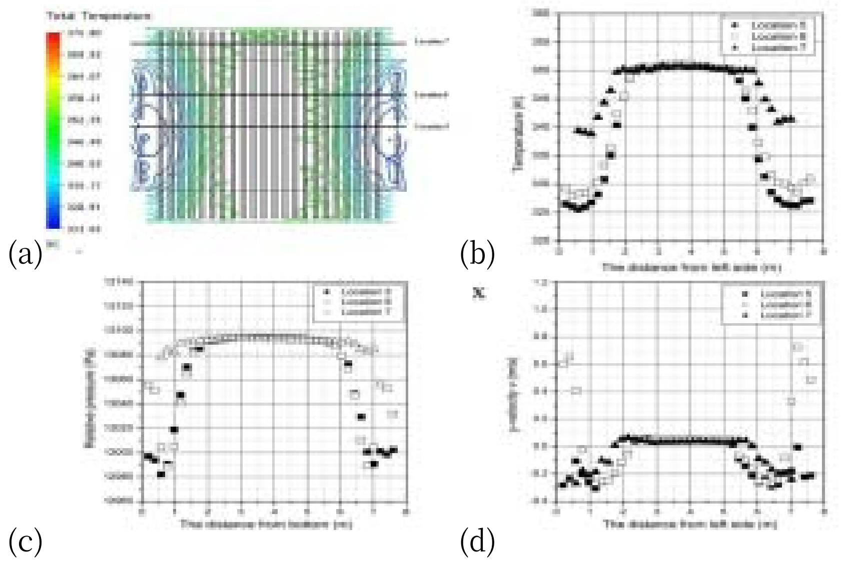


그림 9. 제안모델의 축방향에 대한 CFX5 해석결과 (a) 해석영역 (b) 온도분포 (c) y방향 속도분포 (d) 압력분포

3.3 HGU-KINS 실험설비 제작

앞 절의 결과를 바탕으로 1/8의 스케일비를 가지는 실험설비를 설계, 제작하였다. 작업유체(working fluid)는 물로서 이에 적합하도록 설계하였으며, 85℃이상의 온도범위와 대기압에서의 동작을 고려하였다. 그림 10에서 나타난 바와 같이 순환펌프가 유체를 순환시키고 칼란드리아 입력 노즐부에는 유량을 조절하기 위하여 벨브가 설치되었고, 칼란드리아 내부에서의 화학적 유동 가시화를 위하여 가시화물질 주입부가 칼란드리아 입력 노즐부와 루프의 순환부에 각각 설치되었다. 그림 11에서와 같이 칼란드리아 test section에는, 내부에서의 유동현상을 관측하기 위하여 전면부를 투명한 폴리카보네이트(polycarnate)로 제작하였다. 또한, 칼란드리아 입출구에서의 온도를 일정하게 유지하도록 루프의 순환부에 열교환기(heat exchanger)를 설치하였다.

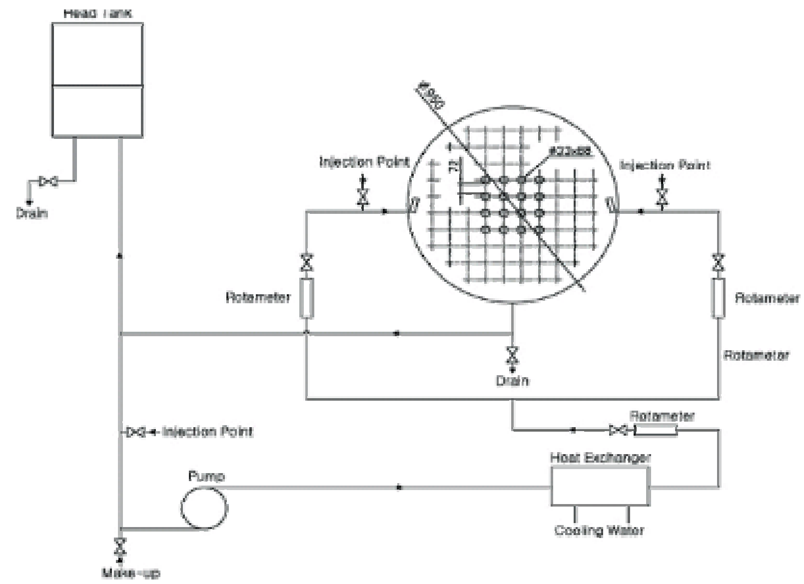


그림 10. 실험설비의 개념도

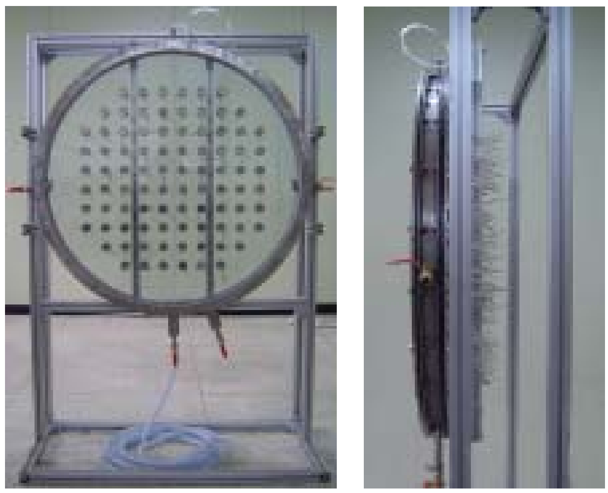


그림 11. 칼란드리아 테스트 섹션의 사진(전면부, 측면부)

이 실험설비는 1/8 축소화 실험설비로서, 향후 유체해석 코드의 검증과 현상이해, 특히 국지적 열 이상 누출 등의 상황에서의 실험 결과를 생산하게 될 것으로 기대된다.

4. 결 론

본 연구에서는 칼란드리아 내의 감속재의 유동장과 온도장에 대한 실험 설비제작을 위한 축소화 법칙의 도출 작업을 수행하였다. 열적 특성의 모사 및 보존법칙의 성립과 주요 무차원 상수 Ar, Re의 상사성 유지를 기본 법칙으로 하여 축소화 법칙을 정립하였다. 제안된 축소화 법칙을 이용하여 이전에 캐나다에서 만들어진 실험설비인 SPEL과 STERN에 대하여 열수력적 축소화를 검토하였다. 그 결과, SPEL의 경우는 열전달 방정식의 상사성에 대해서는 적절하게 축소화되었으나, 부력효과(Ar의 고려) 및

열원 밀도에 대한 축소화는 이루어지지 않았음을 확인할 수가 있었다. 이와는 달리 STERN의 경우 열전달 방정식의 상사성과 부력효과에 대한 축소화가 적절하게 이루어져 있었으나 열원 밀도에 대한 축소화는 이루어지지 않았음을 확인하였다.

정립된 축소화 법칙을 사용하여, 1/8의 축소비를 가지는 CANDU 칼란드리아의 축소 모델을 설계하였으며, 설계된 설비의 성능평가를 위해 상용 전산유체해석 코드인 CFX5를 이용하였다. 올바른 유동패턴의 생성여부와 축방향 효과를 검증하였으며, 이를 통해 제안모델이 올바른 축소화가 이루어졌음을 확인한 후, 실제 제작하였다. 제작된 실험설비는 향후 유체해석 코드의 검증과 현상이해, 특히 국지적 열 이상 누출 등의 상황에서의 실험 결과를 생산하게 될 것으로 기대된다.

감사의글

본 연구는 과학기술부가 주관하는 원자력 연구개발 중장기계획사업 지원의 일환으로 한국원자력안전기술원이 수행하는 “중수로 안전성 평가체제 수립 및 안전현안 검증기술개발 과제”의 위탁연구로 수행되었다.

참고문헌

Yoon C., Rhee B.W., 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.

Yoon C., Rhee B.W., Min B.J., 2002. CFD Simulation of the CANDU-6 Moderator Circulation under Normal Operating Conditions, Proceedings of ICONE10, April 14-18, Virginia, USA.

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

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

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

Lee J.Y., No H.C., 1990. Dynamic Scaling Method for Testing the Performance of the Water Level Controller of Nuclear Steam Generators, Nucelar Engineering and Design, 122, pp313 ~ 327

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

Yu S.O., 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.

Jung Y.S., 2003. Three-Dimensional Analysis of Moderator in Calandria Tank of Heavy Water Cooled Nuclear Reactor, Thesis for Master’s Degree, Handong Univ.

Bang K.H., Lee J.Y., Yu S.O., Kim M.W., Kim H.J., 2002. A Three-Dimensional Analyses of Fluid Flow and Heat Transfer for Moderator Integrity Assessment in PHWR," Proceedings of the KNS Spring Meeting, May, Gwangju.

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

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