

CANDU 칼란드리아 열수력적 축소화 기법 및 유동영역 지도 연구

정윤식, 김남석, 이재영  
경북 포항시 북구 흥해읍 남송리 3번지 한동대학교

Development of Scaling Laws and Flow Regime Map for  
Thermal-Hydraulic Analysis of Calandria in CANDU Reactor

Jung Yun Sik, Kim Nam Seok, Lee Jae Yong,  
Handong Grobal University, Heunghae-eup, Buk-gu, Pohang, Kyoung-buk, S. Korea

1. 서론

중수형 원자로에서 냉각재 상실 사고로 인해 칼란드리아관(CT : Calandria Tube)과 압력관(PT : Pressure Tube)의 접촉(CT/PT contact)으로 관 표면에서 dry-out이 발생할 경우 핵연료 채널이 파손될 수 있기 때문에, 감속재는 충분한 과냉각도를 유지하는 것이 매우 중요하다. 이러한 압력관 건전성에 관한 해석은 몇몇 전산코드에 의해 수행되었으며, 캐나다원자력안전위원회(CNSC)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.

이에 대한 연구의 일환으로 지난 20여년동안 캐나다에서는 SPEL(1983)[1], STERN(1990)[2,3,4]과 같은 실험을 수행해 왔으며 여러 전산코드[6,7,8,9]에 의해서 그 결과를 검증하였다. 본 연구에서는 기존 실험 장치인 SPEL, STERN에 대해서 열수력적 축소화 분석을 수행하였으며 새로운 실험장치를 설계하기 위해 적절한 축소화 기법을 개발하였다. 그리고 SPEL 실험장치를 상용 열유체 코드인 CFX 5로 모사한 후  $Ar^*$ 와  $Re_\epsilon$ 의 변화에 따른 유동 영역지도를 작성하였다.

2. 기존 실험 장치 열수력적 축소화 분석

본 연구에서 열수력적 축소화 분석은 크게 두 가지 방법으로 수행하였다. 첫째 칼란드리아 내부에서의 에너지 보존여부의 성립이며, 둘째 칼란드리아 내부에서의 유동 패턴을 결정하는 무차원 함수인  $Ar^*$  상사성의 성립이다.

칼란드리아 내부에서의 에너지 방정식은 아래와 같다.

$$\dot{Q} = \dot{m}C_p(T_{out} - T_\epsilon) \quad \text{식 1.}$$

식 1을 무차원하면 아래와 같이 구할 수 있다.

$$\dot{Q}^* = \dot{m}^* \Delta T^* \quad \text{식 2.}$$

일반적으로  $Ar$ 는 식 3과 같이 정의된다. 하지만  $Ar$ 에서 정의된 대로 감속재의 평균속도를 현실적으로 구할 수 없기 때문에 새로운 무차원 함수가 필요하다. 수정된  $Ar^*$ 는 칼란드리아 내부의 평균속도  $u_m$  대신에 입구 노즐에서의 속도  $u_i$ 에 대하여 식 4와 같이 정의된다.

$$Ar = \frac{\text{buoyancy}}{\text{inertia}} = \frac{g\beta\Delta T D}{u_m^2} \quad \text{식 3.}$$

$$Ar^* = \frac{g\beta\Delta T D}{u_i^2} = \frac{g\beta \dot{Q} D}{\rho A_i C_p u_i^3} \quad \text{식 4.}$$

$$\text{where } \dot{Q} = \dot{m} C_p \Delta T = \rho A_i C_p u_i \Delta T$$

### 2.1 SPEL 열수력적 축소화 분석

첫째, SPEL에 대해서 열전달 방정식에 대한 축소화를 살펴보면

$$\dot{Q}^* = \dot{m}^* \Delta T^* = \frac{1}{2023} \cdot \frac{1}{4.6} = \frac{1}{9306} \approx \frac{1}{10000}$$

열전달 방정식에 대한 축소화는 잘 이루어졌음을 알 수 가 있다.

둘째,  $Ar^*$ 에 대한 CANDU와 SPEL의 상사성을 살펴보면

$$Ar^* = \frac{\Delta T^* D^*}{(u_i^*)^2} = \frac{\frac{1}{4.6} \cdot \frac{1}{10.3}}{\left(\frac{1}{15.7}\right)^2} = \frac{1}{3} \neq 1$$

위에서 살펴보듯이  $Ar^*$ 에 대한 상사성은 제대로 이루어지지 않았음을 알 수 있다.

즉 열전달 방정식에 대한 축소화는 잘 이루어졌으나  $Ar^*$ 에 대한 상사성 즉 칼란드리아 내에서의 부력효과에 대해서는 축소화가 이루어지지 않았다.

### 2.2 STERN 열수력적 축소화 분석

첫째, STERN에 대해서 열전달 방정식에 대한 축소화를 살펴보면,

$$\dot{Q}^* = \dot{m}^* \Delta T^* = \frac{1}{421.5} \cdot \frac{1}{2} = \frac{1}{843} \approx \frac{1}{1000}$$

STERN은 SPEL과 마찬가지로 열전달 방정식에 대해서는 축소화가 적절하게 이루어졌음을 확인 할 수 가 있다.

둘째,  $Ar^*$ 에 대한 CANDU와 STERN의 상사성을 살펴보면

$$Ar^* = \frac{\Delta T^* D^*}{(u_i^*)^2} = \frac{\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{3.8}}{\left(\frac{1}{2.7}\right)^2} = \frac{1}{1.04} \approx 1$$

STERN은 SPEL과는 달리  $Ar^*$ 에 대한 상사성이 이루어져 있음을 알 수 가 있다.

STERN은 열전달 방정식과  $Ar^*$  두 관점에서 축소화가 적절하게 이루어져 있음을 확인 할 수 가 있었다.

### 3. 실험장치 설계를 위한 축소화 인자 도출

본 연구에서는 새로운 실험장치의 length scale은 다른 실험장치(SPEL : 1/10, STERN : 1/4)과의 차별성을 확보하기 위해서 1/8로 결정하였고, power scale은 실험실 환경을 고려하여 1/10000로 결정하였다. 표 1,2 에서 알 수 있듯이 SPEL과 STERN은 열원 밀도에 대해서 축소화가 이루어지지 않았지만 새로운 실험장치에서는 열원 밀도의 상사성을 고려하였다. 실험장치에 대한 축소화는 그림 1과 같은 방법으로 진행되었고 표 3에서 구체적인 실험장치의 제원을 설정하였다. 그리고 그림 2,3,4 에서 SPEL, STERN과 새로운 실험장치의 축소화 Map을 각각 표시하였다.

#### 4. Flow regime map 작성

$Ar^*$ 는 주입된 감속재의 운동량과 열 발생으로 인한 감속재의 부력과의 관계를 나타내는 무차원 함수이다. 입구 노즐에서 들어간 유량이 칼란드리아 내부에서 균등하게 분포한다고 가정하게 되면 아래와 같은 continuity equation 식 5을 만족하게 된다. 그리고  $Ar$ 와  $Ar^*$ 는 식 5에 의해서 식 6와 같은 관계를 얻을 수 있다.

$$\rho A_{cal} u_m = \rho A_i u_i \quad u_m = \frac{A_i}{A_m} u_i \quad \text{식 5.}$$

$$Ar \left( \frac{A_i}{A_{cal}} \right)^2 = Ar^* \quad \text{식 6.}$$

즉  $Ar^*$ 는 입구 노즐의 면적에 관계있다.  $A_{cal}$ 는 칼란드리아의 형상으로 고정되어 있는 값이며  $A_i$ 는 노즐형상을 변화시킬 수 있다. 즉  $A_i$ 의 변화에 따라  $Ar^*$ 도 영향을 미치게 된다. 또 다른 무차원 함수  $Re_{\epsilon}$ 는 아래와 같이 정의된다.

$$Re_{\epsilon} = \frac{\rho D_{\epsilon} u_i}{\mu} \quad \text{식 7.}$$

칼란드리아 내부에서의 유동 패턴을 결정할  $Ar^*$ 는 입구 노즐의 면적에 관계된  $Re_{\epsilon}$ 와 함수 관계를 가지게 된다.

$$Ar^* = Ar f(Re_{\epsilon}) \quad \text{식 8.}$$

그리고 SPEL 실험장치를 상용 열유체 코드인 CFX 5로 모사한 후  $Ar^*$ 와  $Re_{\epsilon}$ 의 변화에 따른 유동 영역지도(그림 5)를 작성하였다.

#### 5. 결론

본 연구에서는 칼란드리아 내의 감속재의 유동장과 온도장에 대한 실험으로 일환으로 제작된 SPEL과 STERN에 대해서 각각 열수력적 축소화를 검증하였다. SPEL의 경우는 열전달 방정식의 상사성에 대해서는 적절하게 축소화되었으나,  $Ar^*$ 에 대한 축소화는 이루어지지 않았음을 확인할 수 가 있었다. 이와는 달리 STERN의 경우 열전달 방정식의 상사성과  $Ar^*$ 에 대한 축소화가 적절하게 이루어져 있었다. 하지만 두 실험장치 모두 열원 밀도에 대한 축소화는 이루어지지 않았다. 기존 실험장치와의 차별성을 두기 위해 새로운 실험장치엔 1/8를 수행하였으며 열전달 방정식,  $Ar^*$ 에 대한 축소화와 더불어 열원 밀도에 대해서도 축소화를 수행하였다.

그리고 SPEL 실험장치를 상용 열유체 코드인 CFX 5로 모사한 후  $Ar^*$ 와  $Re_{\epsilon}$ 의 변화에 따른 유동 영역지도를 작성하였다. 이 유동 영역지도를 바탕으로 SPEL, STERN과 CANDU에 대한 일반적인 유동 영역 지도 작성의 가능성을 확인하였다.

#### 6. 참조문헌

- [1] D. Koroyannakis, R. D. Hepworth and G. Hendrie, "An Experimental Study of Combined Natural and Forced Convection Flow in a Cylindrical Tank," TDVI-382, AECL, 1983.
- [2] G.I. Hadaller, R.A. Fortman "Moderator Temperature Distribution Experiments, Phase 1: Unobstructed and Obstructed; Adiabatic and Diabatic with Resistance Heating", COG

R&D Commercial, Mach, 1990

- [3] G.I. Hadaller, R.A. Fortman "Moderator Temperature Distribution Experiments, Phase 2: "Obstructed Diabatic Tests with Electrolytic and Resistance Heating", COG R&D Commercial, June, 1990
- [4] R.A. Fortman, G.I. Hadaller "Moderator Temperature Distribution Experiments, Modified Inlet Port Tests : Results and Comparison", COG R&D Commercial, Nov, 1990
- [5] K. H. Bang, J. Y. Lee, S. O. Yu, M. W. Kim, and H. J. Kim, "A Three-Dimensional Analyses of Fluid Flow and Heat Transfer for Moderator Integrity Assessment in PHWR," Proceedings of the KNS Spring Meeting, May, Gwangju, 2002.
- [6] C. Yoon, B. W. Rhee and B. J. Min, "Validation of a CFD Analysis Model for Predicting CANDU-6 Moderator Temperature Against SPEL Experiments," Proceedings of ICONE10, April 14-18, Virginia, USA, 2002.
- [7] M.S. Quraishi. "Experimental Verification of 2DMOTH Computer Code Temperature Predictions", TDAI-353, AECL, Feb. 1985.
- [8] W.M. Collins, "Simulation of the SPEL Small Scale Moderator Experiments Using the General Purpose Fluid-Flow, Heat Transfer Code PHOENICS, "TTR-213, AECL, March 1988
- [9] W.M. Collins, "PHOENICS Model Report for Wolsong 2/3/4 Moderator Circulation Analysis", AECL, Feb. 1995

	SPEL	
	Value	Scale
Q (kW)	10	1/10000
$q'''$ (W/m <sup>3</sup> )	107526	1/3.9
D <sub>cal</sub> (m)	0.737	1/10.3
L (m)	0.254	1/23.62
A <sub>in</sub> (m <sup>2</sup> )	0.00387	1/118.9
U <sub>in</sub> (m/s)	0.13	1/15.7
$\dot{m}_in$ (kg/s)	0.5	1/2023
$\Delta T$ (°C)	4.4	1/4.6

표 1. SPEL의 축소화 인자

	STERN	
	Value	Scale
Q (kW)	100	1/1000
$q'''$ (W/m <sup>3</sup> )	181488	1/2.3
D <sub>cal</sub> (m)	2	1/3.8
L (m)	0.2	1/30
A <sub>in</sub> (m <sup>2</sup> )	0.0032	1/143.75
U <sub>in</sub> (m/s)	0.761	1/2.7
$\dot{m}_in$ (kg/s)	2.4	1/421.5
$\Delta T$ (°C)	10	1/2

표 2. STERN의 축소화 인자

		HGU	
		Value	Scale
Geometry	D <sub>cal</sub> (m)	0.95	1/8
	L (m)	0.0384	1/156.3
	V <sub>cal</sub> (m <sup>3</sup> )	0.0272	1/10000
	V <sub>pipe</sub> (m <sup>3</sup> )	0.000033	1/10000
	P (m)	0.072	1/4
	D <sub>pipe</sub> (m)	0.033	1/4
	N	88	1/4.3
	A <sub>in</sub> (m <sup>2</sup> )	0.0006	1/767
	A <sub>out</sub> (m <sup>2</sup> )	0.0006	1/767
Energy	Q (kW)	10	1/10000
	$q'''$ (W/m <sup>3</sup> )	414130	1
	$q''$ (W/m <sup>2</sup> )	1154.5	1/92.3
	$\Delta T$ (°C)	2.5	1/8
Dynamic	$\dot{m}_in$ (kg/s)	0.81	1/1249
	$\dot{m}_out$ (kg/s)	0.81	1/1249
	U <sub>in</sub> (m/s)	0.255	1/8
Reynolds	Re <sub>in</sub>	1.2e4	1/100

표 3. 새로운 실험 장치의 축소화 인자

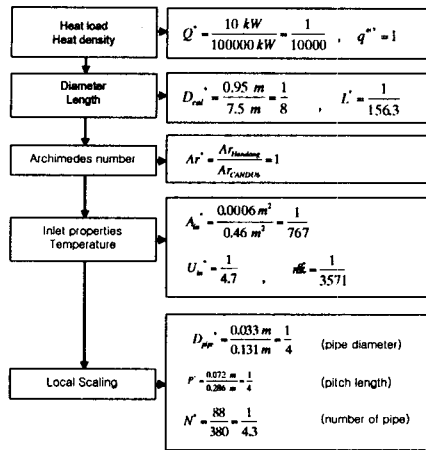


그림 1. 축소화 인자 도출

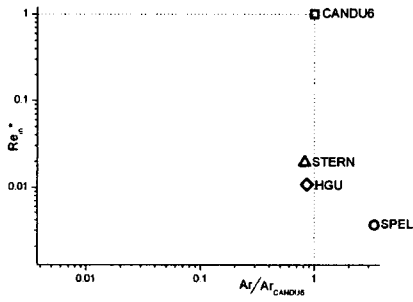


그림 2.  $Ar^*$  와  $Re_{in}^*$ 의 축소화 지도

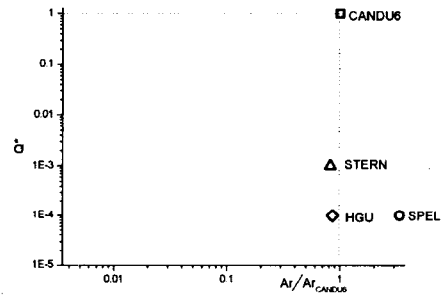


그림 3.  $Ar^*$  와  $Q^*$ 의 축소화 지도

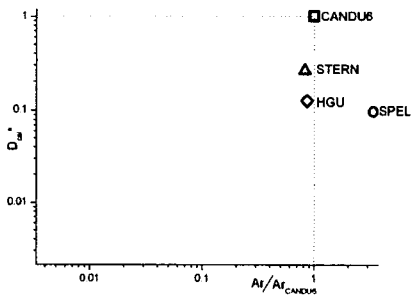


그림 4.  $Ar^*$  와  $D_{cab}^*$ 의 축소화 지도

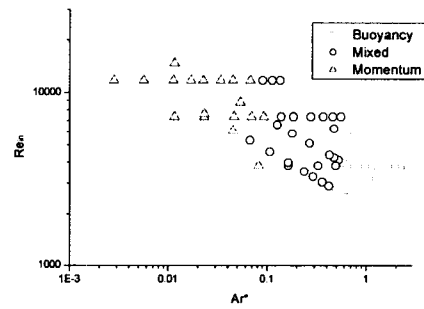


그림 5. SPEL의 Flow Regime Map