

## CCM을 이용한 관류형 증기발생기 유동진동 해석

### Once-Through Steam Generator Flow Oscillation Analysis Using the Coolant Channel Module(CCM)

강한옥, 윤주현, 김궁구  
한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150

Alois Hoeld  
Bernaysstr. 16A, D-80937 Munich, F.R. of Germany

#### 요 약

다양한 기하학적 조건에서 열수력학적 해석이 가능한 Coolant Channel Module(CCM)을 이용해 관류형 증기발생기 유동진동 현상을 해석하였다. CCM은 가열 또는 냉각되고 있는 단상/이상 채널의 유동 및 열전달을 해석하기 위한 drift-flux 모델에 기초한 코드이다. CCM에서 각각의 부채널은 단상 또는 이상 영역으로 구분되고 정확한 상 경계가 해석하는 동안 계속 추적되므로 유동진동해석에 적합하다. 튜브 내부에서 비등이 발생하는 관류형 증기발생기에서는 운전 영역에 따라 유동 진동이 발생할 수 있으며 출력운전 영역에서 유동 진동을 방지하기 위해 입구 오리피스가 설치된다. 본 연구에서는 CCM을 이용해 Nariai의 실험을 모사한 뒤 해석결과와 정상상태 및 불안정성 실험결과를 비교하였다. 정상상태에서의 비교 대상은 유량의 변화에 따른 상경계 및 채널 압력강하의 변화 경향이다. 또한 유동 진동을 방지하기 위해 설치되는 입구 오리피스의 크기를 비교하였다. 이후 밀도파 유동 진동이 발생하는 상태에서 각 변수들의 특징과 위상차를 분석하였다.

#### Abstract

An analysis on once-through steam generator (OTSG) flow oscillation has been performed with the coolant channel module package (CCM) developed by Hoeld. The CCM is a generalized drift-flux based 3-equation mixture model for the steady state and transient behavior of characteristic parameters of a single- and/or two-phase flow along a heated (or cooled) channel. The CCM subdivides basic coolant channels into a number of sub-channels according to their flow regimes. The exact phase

boundaries are traced all the time for both of them, which is the key feature for flow oscillation analysis. First, the steady results such as lengths and pressure drops for each flow regime are compared with Nariai's experimental data. And the calculated threshold inlet throttling coefficients are also compared with the experimental data. The result shows that a large value of inlet throttling coefficient is needed if the feedwater flow rate is low. The characteristics of the limit cycle such as phase difference between flow rate and pressure drop are studied.

## 1. 서론

한국원자력연구소에서는 안전성과 경제성이 향상된 새로운 개념의 원자로인 SMART(System-integrated Modular Advanced Reactor)를 개발하고 있다[1]. SMART에서는 증기발생기가 원자로 압력용기 안쪽에 위치하고 있으며 단위체적당 열전달 효율이 좋은 나선형의 관류형 증기발생기가 도입되었다. 관류형 증기발생기에서는 튜브 내에서 과냉각 영역, 이싱 영역, 과열 영역이 연속적으로 분포하여 운전 중에 정적/동적 요인에 의해 유동이 불안정해질 가능성이 존재한다. SMART 증기발생기 설계시 이러한 유동 불안정성이 생성된 증기의 건도, 튜브의 구조적 강도 등에 미치는 영향이 평가되어야 하며 아울러 출력운전시 유동 불안정성을 막기 위한 설계가 필요하다. 관류형 증기발생기의 유동 불안정성을 막기 위해 일반적으로 사용되는 방법은 입구에 오리피스를 첨가해 과냉각 영역의 압력강하를 증가시키는 것이다.

기존에 LMFBR 개발 또는 일체형원자로 개발과 관련하여 관류형증기발생기의 불안정성이 주요 연구 주제였으며 증기발생기에서 발생하는 불안정성의 현상적 이해, 다양한 운전조건에서 각 설계변수가 불안정성 시작점에 미치는 영향 평가, 그리고 불안정성 방지를 위해 필요한 입구 throttling을 결정하기 위한 실험 등이 수행된 바 있다. Unal은 Sodium 가열 관류형증기발생기의 이차측 불안정성 조건을 예측하고 진동의 특성을 연구하기 위한 실험을 수행하였으며 Belyakov, Nariai는 물에 의해 가열되는 관류형증기발생기의 유동 불안정성에 대한 실험을 수행하였다[2,3,4].

본 연구에서는 Hoeld에 의해 개발된 Coolant Channel Module(CCM)을 이용해 관류형 증기발생기 유동진동 현상을 해석하였다[5]. CCM은 가열 또는 냉각되고 있는 단상/이상 채널의 유동 및 열전달을 해석하기 위한 drift-flux 모델에 기초한 코드이다. 우선 CCM을 이용해 Nariai의 실험을 모사한 뒤 해석결과와 정상상태 및 불안정성 실험결과를 비교하였다. 정상상태에서의 비교 대상은 유량의 변화에 따른 상경계 및 채널 압력강하의 변화 경향이다. 또한 유동 진동을 방지하기 위해 설치되는 입구 오리피스의 크기를 비교하였다. 이후 밀도파 유동 진동이 발생하는 상태에서 각 변수들의 특징과 위상차를 분석하였다.

## 2. 해석 방법

### 2.1 Coolant Channel Module 개요

CCM은 가열 또는 냉각되고 있는 단상/이상 채널의 유동 및 열전달을 해석하기 위한 정상상태 및 과도상태 해석 프로그램 모듈이다. 열수력학 모델은 고전적인 3 혼합유동 방정식(질량, 운동량, 에너지)과 구성방정식(물과 수증기의 물성치, 열전달상관식, 마찰계수)에 기초하고 있다. CCM은 기본적으로 PWR 안전해석코드와 같은 큰 코드의 하부 모듈로서 활용되기 위해 개발되었다. CCM에서 채널내 단상/이상유동의 시간/위치 의존적인 유동 매개변수는 다음과 같은 방정식으로 표현된다.

#### 질량 보존

$$\frac{\partial}{\partial t} \{A[(1-a)\rho_w + a\rho_s]\} + \frac{\partial}{\partial z} G = 0 \quad (1)$$

#### 에너지 보존

$$\frac{\partial}{\partial t} \{A[(1-a)\rho_w h_w + a\rho_s h_s - P]\} + \frac{\partial}{\partial z} [G_w h_w + G_s h_s] = 0 \quad (2)$$

#### 운동량 보존

$$\frac{\partial}{\partial t} (G/A) + \left(\frac{\partial P}{\partial z}\right)_A + \left(\frac{\partial P}{\partial z}\right) = \left(\frac{\partial P}{\partial z}\right)_S + \left(\frac{\partial P}{\partial z}\right)_F + \left(\frac{\partial P}{\partial z}\right)_X \quad (3)$$

위의 식에서 일반적인 압력강하 항인  $\left(\frac{\partial P}{\partial z}\right)$  외에  $\left(\frac{\partial P}{\partial z}\right)_X$ 는 펌프 등에 의한 외부 교란량을 의미한다.  $\left(\frac{\partial P}{\partial z}\right)_A$ ,  $\left(\frac{\partial P}{\partial z}\right)_S$ ,  $\left(\frac{\partial P}{\partial z}\right)_F$ 는 각각 질량가속에 의한 압력변화, 정압, 그리고 단상/이상 유동의 마찰 압력강하를 의미하며 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\left(\frac{\partial P}{\partial z}\right)_A = \frac{\partial}{\partial z} [(G_w v_w + G_s v_s)/A] \quad (4)$$

$$\left(\frac{\partial P}{\partial z}\right)_S = -\cos(\Phi_z) g_c [a\rho_s + (1-a)\rho_w] \quad (5)$$

$$\left(\frac{\partial P}{\partial z}\right)_F = -\frac{1}{2} f_R |G|G / (d_{HW} \rho A^2) \quad (6)$$

위식에서 단상유동인 경우  $f_R$ 은 단상 마찰계수를 의미하며 이상유동인 경우 단상마찰계수에 two-phase multiplier가 곱해진 값을 의미한다. CCM에서는 매우 효율적인 drift-flux 프

로그래밍 모듈인 MDS가 사용된다. MDS는 Sonnenburg의 모델에 기초하고 있으며 drift velocity는 다음과 같이 일반적으로 표현된다.

$$v_D = f_{\text{diff}}(\alpha, C_0, v_{\text{SLIM}}, v_{\text{WLM}}, z_{\text{EL}}, P, \dots) \quad (7)$$

수직방향 채널의 경우 위의 식은 다음과 같은 기본적인 형태로 표현된다.

$$v_D = 1.5v_{\text{WLM}}C_0C_{\text{VD}}[(1+C_{\text{VD}}^2)^{3/2} - (1.5+C_{\text{VD}}^2)C_{\text{VD}}] \quad (8)$$

$$\text{위의 식에서 } C_{\text{VD}} = 2(1-C_0\alpha)v_{\text{SLIM}} / (3C_0\alpha v_{\text{WLM}})$$

MDS는 다양한 유동 조건에서 적합한 해를 계산하도록 코딩되어있으며 정체된 유동 또는 counter-current 유동 조건에서도 사용될 수 있다. CCM에서 대상이 되는 채널은 우선 몇 개의 기본 채널로 나누어지고 각각의 기본(basic) 채널은 단상 또는 이상이나에 따라 부(sub) 채널로 나누어진다. 각각의 부채널에서 과도 현상 해석 중에 상 경계의 위치는 변할 수 있다. CCM에서 채널은 각 노드는 단상 또는 이상 영역으로 구분되고 정확한 상 경계가 해석하는 동안 계속 추적된다. 질량, 에너지, 운동량 방정식은 modified finite volume method을 이용해 차분화된다. 차분화시 노드 평균값과 경계값간의 관계는 quadratic polygon approximation method(PAX procedure)를 통해 구해진다. CCM에서는 운동량방정식을 질량 및 에너지 방정식과 함께 풀 때 발생하는 수치해의 stiffness를 감소시키기 위해 우선 운동량 방정식의 해를 구한 뒤 여기서 얻어진 정보를 이용해 질량 및 에너지 방정식의 해를 구하는 방식을 사용한다.

## 2.2 마찰계수 및 열전달상관식

CCM에서는 일반적인 직관채널에서 사용될 수 있는 다양한 마찰계수 및 열전달상관식이 모델링되어있으나 나선형 튜브 형태의 증기발생기에 적합한 상관식은 포함되어있지 않다. 따라서 CCM의 마찰계수 및 열전달상관식 모듈을 수정하여 나선형 튜브 형태의 증기발생기를 모델링 할 수 있도록 하였다. 표 1은 CCM에 포함된 기본적인 마찰계수 및 열전달상관식과 본 연구에서 나선형 튜브 형태의 증기발생기를 모델링하기 위해 추가된 상관식을 함께 보여준다.

## 3. 결과

Nariai는 1970년대부터 일체형원자로의 관류형증기발생기 운전 특성을 연구하기 위해 0.8 MW 실험시설에서 다양한 실험을 수행해왔다[4]. 이들의 실험은 정상상태 실험, 과도 운전 제어특성, 다양한 조건에서 유동불안정성 특성 연구 등 다양한 방식으로 수행되어 관류형 증기발생기 설계 및 실험장치 설계에 유용한 정보를 제공한다. 그림 1은 출구 압

력 4.93 MPa 조건에서 얻어진 증기발생기 튜브 안쪽과 바깥쪽 온도/압력 분포를 보여준다. 그림에서 기호는 실험 결과이며 실선은 계산결과를 보여준다. 튜브 바깥쪽을 따라 흐르는 일차측 매질은 열전달에 의해 점차 온도가 내려간다. 반면 튜브 안쪽의 급수는 위로 올라가면서 일차측에 의해 가열되어 포화상태에 도달하고 좀 더 올라가서 과열영역으로 진입한다. 포화상태에서 온도는 거의 일정하게 유지된다. 튜브 안쪽의 압력은 비등 및 과열 영역을 지나면서 급격히 감소하여 전체적으로 약 1 MPa 정도 압력이 감소하였다.

그림 2는 급수 유량 변화에 따른 비등시작점과 과열영역 시작점의 위치 변화를 보여준다. 그림에서 기호들은 실험 데이터이며 선들은 계산에서 얻어진 것이다. 실험 데이터와 계산 결과는 거의 같은 경향을 보여주고 있다. 이 계산에서 Mori-Nakayama, 단상 마찰계수, Kozeki 이상유동 multiplier 및 열전달계수, Mori-Nakayama 단상 열전달계수가 사용되었다[4]. 한편 일차측 열전달계수는 Nariai가 자신의 실험에서 얻은 값인  $6,400 \text{ W/m}^2\text{K}$ 를 그대로 사용하였다. 그림에서 이상유동 영역의 길이는 입구 유속이 증가함에 따라 함께 증가함을 알 수 있다. 반면 입구 과냉각 온도의 비교적 큰 폭의 변화에도 불구하고 이상유동 영역의 길이는 별로 변하지 않았다. 그림 3은 입구유속의 변화에 따른 튜브 전체의 압력강하(오리피스에 의한 압력강하 제외)와 과열영역에서의 압력강하를 보여준다. 그림에서 튜브 전체의 압력강하는 양의 기울기를 가짐을 알 수 있으며 이는 튜브 내에서 발생하는 불안정성이 Ledinegg 유형이 아님을 나타낸다. 또한 입구 유속이 증가함에 따라 과열 영역에서의 압력강하 자체는 증가하나 튜브 전체의 압력 강하중 과열 영역에서의 압력강하가 차지하는 비율은 감소하였다.

그림 4는 다양한 압력 조건에서 이상 영역 길이의 함수로서 표현된 임계 입구 throttling 계수를 보여준다. 그림에서 안 채워진 기호들은 실험에서 얻어진 값들이고 채워진 기호들은 계산에서 얻어진 값들이다. 그림에서 계산된 값들은 실험치에 비해 좀 더 넓게 분포하였다.

그림 5는 limit cycle이 발생한 조건에서 튜브 입구 유량과 튜브 압력강하의 변화 경향을 보여준다. 그림에서 튜브 압력강하 값은 오리피스 압력강하 값을 뺀 값이며 만약 오리피스 값까지 포함할 경우 압력강하 값은 일정하게 유지된다. 그림에서 입구 유량과 튜브 압력강하 값은 거의  $180^\circ$ 의 위상차를 가지고 있음을 보여준다. 일반적으로 밀도파 진동이 발생하였을 때 입구 유량의 교란이 출구에서  $180^\circ$  out-of-phase의 압력 진동을 유발한다고 알려져 있다. 따라서 그림 5에서 발생한 유동 불안정성은 밀도파 진동이라고 판단된다. 그림 6은 limit cycle이 발생한 조건에서 비등시작점과 과열영역 시작점의 변화 경향을 보여준다. 두 값은 약  $90^\circ$ 의 위상차를 가지고 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 다양한 기하학적 조건에서 열수력학적 해석이 가능한 Coolant Channel

Module(CCM)을 이용해 관류형 증기발생기 유동진동 현상을 해석하였다. CCM은 가열 또는 냉각되고 있는 단상/이상 채널의 유동 및 열전달을 해석하기 위한 drift-flux 모델에 기초한 코드이다. 본 연구에서는 CCM을 이용한 해석결과와 Nariai의 정상상태 및 불안정성 실험결과와 비교하였다. 정상상태에서 상경계의 경향과 채널 압력강하를 비교하였다. 또한 유동 진동을 방지하기 위해 설치되는 입구 오리피스의 크기를 비교하였다. 이후 밀도 파 유동 진동이 발생하는 상태에서 각 변수들의 특징과 위상차를 분석하였다. 본 연구의 결과는 이후 SMART 증기발생기 입구 오리피스 사이징 및 증기발생기 전열관 열하중 평가에 활용될 수 있을 것이다.

## 감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발 중장기사업의 일환으로 수행 되었습니다.

## 참 고 문 헌

- [1] J.K. Seo, etc, "Advanced Integral Reactor(SMART) for Nuclear Desalination," IAEA-SM-347/40, Proceedings of a symposium on nuclear desalination of seawater, Taejon, Korea, May 26-30, 1997
- [2] H.C. Unal, "Density-Wave Oscillations in Sodium Heated Once-Through Steam Generator Tubes," Journal of Heat Transfer Vol. 103, 1981
- [3] I. I. Belyakov, V. I. Breus, D.A. Loginov, "Hydraulic Stability of Steam-Forming Elements in Convective Heating," Translated from Atomnaya Energiya, Vol. 65, No. 1, pp. 12-17, July, 1988
- [4] H. Nariai, M. Kobayashi, T. Matsuoka, Y. Ito, I. Aya, "Flow Instabilities in a Once-through Steam Generator," Boiler dynamics and control in nuclear power stations. BNES, London, 1979
- [5] A. Hoeld, 'A steam generator code on the basis of the general coolant channel module CCM,' PHYSOR 2002, Seoul, Korea, October 7-10, 2002

표 1 마찰계수 및 열전달 상관식

Empirical Correlations	Tube-side	Shell-side
Superheater		
Convective	Heineman (Mori-Nakayama)	Heineman (Zukauskas)
Evaporator		
Mist evaporation	Vojtek	
Xdryout	Biasi-Clerici-Garriba-Sala-Tozzi	
Stable film	Bishop-Sandberg-Tong	
Nucleate boiling	Chen (Kozeki)	Heineman (Zukauskas)
Economizer		
Subcooled nucleate boiling	Thom	
Convective	Sieder-Tate (Mori-Nakayama)	Heineman (Zukauskas)
Friction Factor		
	Moody (Mori-Nakayama)	Moody (Zukauskas)
	Martinelli-Nelson	Martinelli-Nelson

\* 괄호안의 상관식은 새로 OTSG 해석을 위해 추가된 것임

표 2 Nariai 실험의 구조 및 운전 조건

구조 변수	
튜브 높이	1.3 m
튜브 길이	61.2 m
튜브 내경	14 mm
튜브 외경	20 mm
코일 직경	595 mm
코일 개수	4
일차측 운전 조건	
압력	11 MPa
입구 온도	270 ~ 310 °C
유속	80 ton/h
이차측 운전 조건	
출구 압력	2, 3, 5 MPa
입구 과냉각온도	44, 114, 194 °C
feed water 유속	0.03 ~ 0.14 kg/sec
입구 throttling 계수	200 ~ 1500

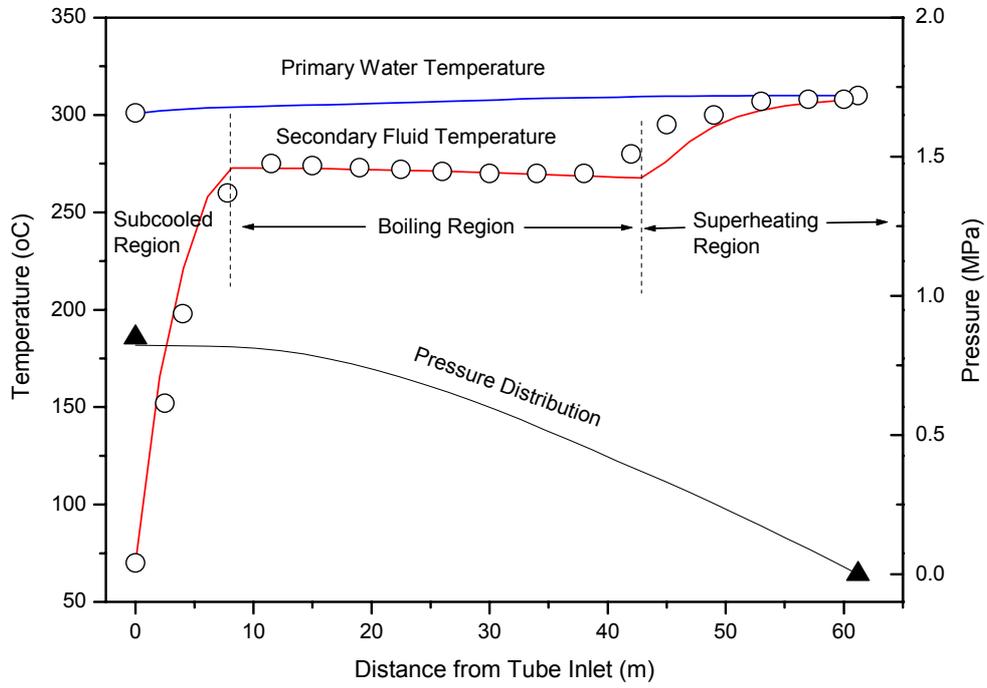


그림 1 관류형 증기발생기 온도 및 압력 분포

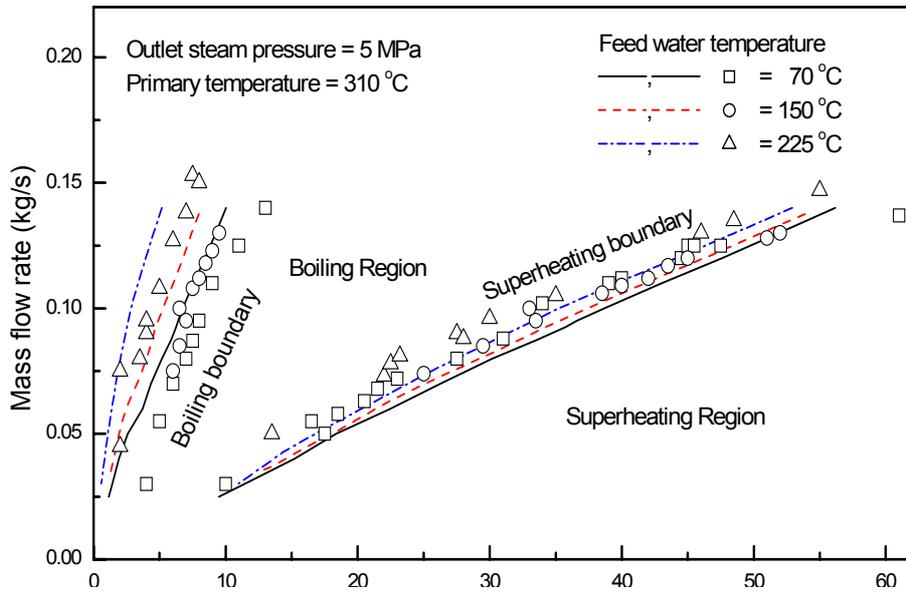


그림 2 입구 유량의 변화에 따른 비등 시작점과 과열영역 시작점의 변화

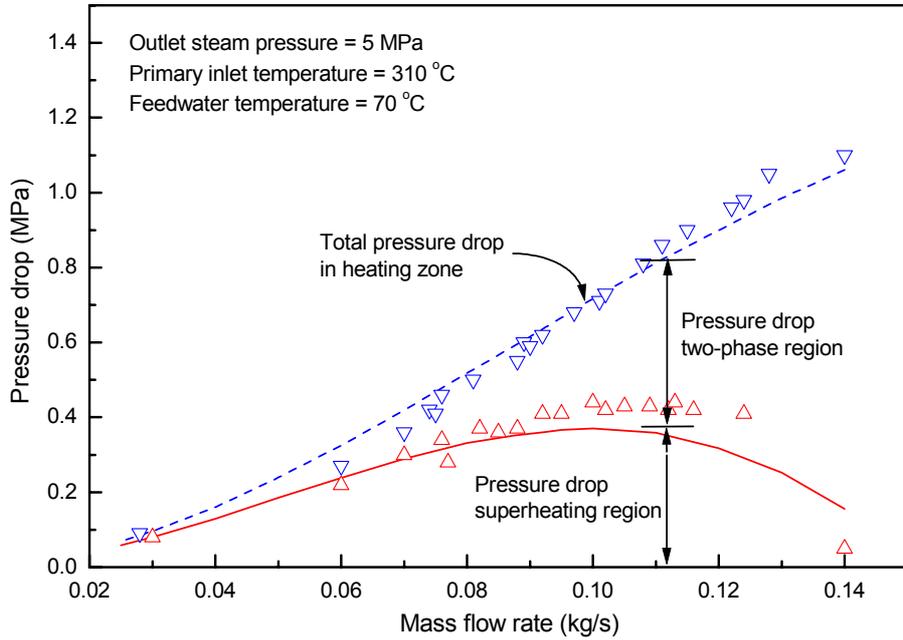


그림 3 입구 유량의 변화에 따른 이상, 과열 영역의 압력강하 변화

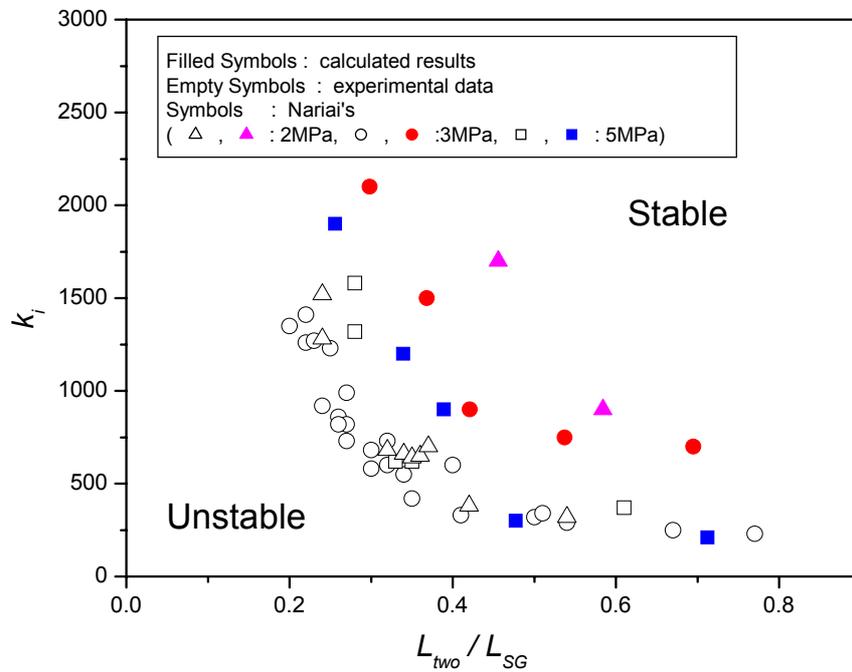


그림 4 비등영역 길이 변화에 따른 임계 입구 throttling 계수

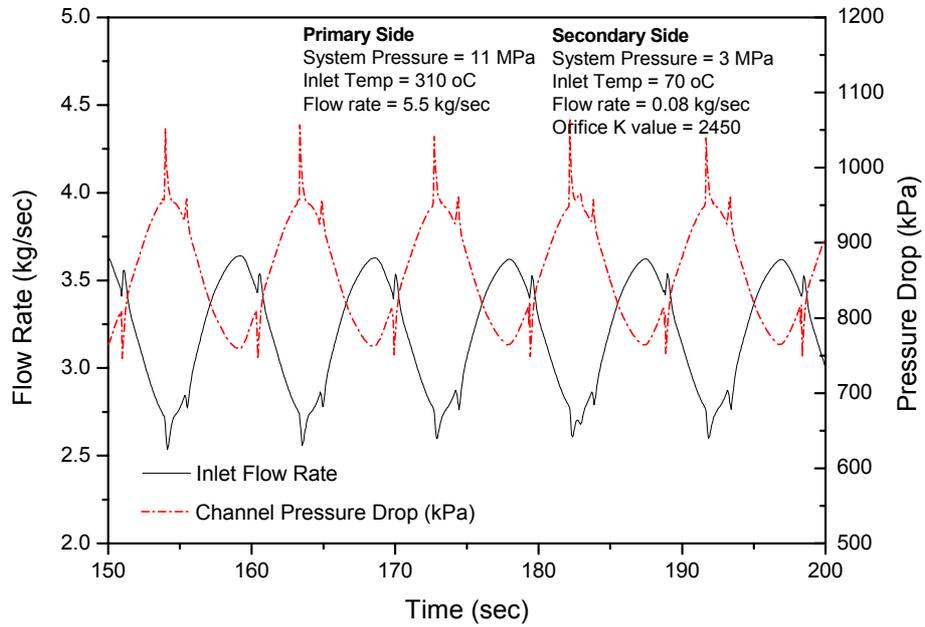


그림 5 입구유량과 압력강하의 변화

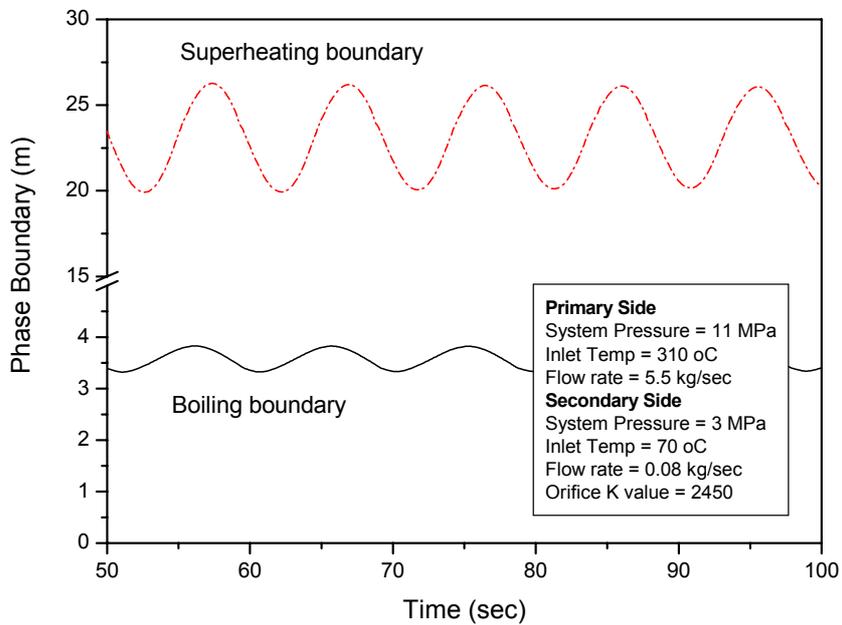


그림 6 비등시작점과 과열영역 시작점의 변화