

사이펀 차단기 시뮬레이션 프로그램의 개발 및 활용

이권영^{*}, 김완수¹

¹한동대학교 기계제어공학부

Development and Application of Siphon Breaker Simulation Program

Kwon-Yeong Lee^{*}, Wan-Soo Kim¹

¹School of Mechanical and Control Engineering, Handong Global University

요약 일부 연구용 원자로의 설계조건상 사이펀 현상은 배관 파단 사고 시 수조수의 지속적인 방출을 유발할 수 있다. 사이펀 차단기는 이러한 현상을 효과적으로 제한하기 위한 안전장치로, 유체역학적인 특성상 사이펀 차단 현상 해석을 위해 고려해야 할 변수가 많고 계산이 복잡하다. 이에 사이펀 차단 현상을 쉽게 분석할 수 있는 프로그램을 개발하게 되었다. 윈도우 8 운영체제에서 비주얼 스튜디오 2012를 이용하여 MFC 프로그래밍으로 개발되었으며, 사용자가 쉽게 사용할 수 있도록 GUI 형식으로 개발되었다. 개발된 프로그램은 사용자가 입력한 값으로부터 유체역학적 관계식을 통해 3단계의 연산과정을 거쳐 시뮬레이션을 진행한다. 베르누이 방정식으로부터 유속과 유량을 구하여 수위, 언더슈팅, 압력, 손실계수, 그리고 이상 유동과 관계된 값들을 연산한다. 프로그램에 적용된 이상유동 해석모델은 Chisholm 모델이며, 실제와 유사하게 시뮬레이션이 가능함을 확인하였다. 시뮬레이션 결과는 그래프를 통해 나타나기 때문에 사용자는 전체적인 차단 현상을 쉽게 파악하는 것이 가능하며, 시뮬레이션 데이터의 저장 또한 가능하다. 따라서 사용자는 사이펀 차단기 시뮬레이션 프로그램의 사용을 통해 사이펀 차단 현상을 쉽게 확인할 수 있으며, 사이펀 차단기의 실제 설계에도 이용할 수 있을 것으로 기대된다.

Abstract In the design conditions of some research reactors, the siphon phenomenon can cause continuous efflux of water during pipe rupture. A siphon breaker is a safety device that can prevent water efflux effectively. However, the analysis of the siphon breaking is complicated because many variables must be included in the calculation process. For this reason, a simulation program was developed with a user-friendly GUI to analyze the siphon breaking easily. The program was developed by MFC programming using Visual Studio 2012 in Windows 8. After saving the input parameters from a user, the program proceeds with three steps of calculation using fluid mechanics formulas. Bernoulli's equation is used to calculate the velocity, quantity, water level, undershooting, pressure, loss coefficient, and factors related to the two-phase flow. The Chisholm model is used to predict the results from a real-scale experiment. The simulation results are shown in a graph, through which a user can examine the total breaking situation. It is also possible to save all of the resulting data. The program allows a user to easily confirm the status of the siphon breaking and would be helpful in the design of siphon breakers.

Keywords : Loss of Coolant Accident, Research Reactor, Siphon, Siphon Breaker, Siphon Breaker Simulation Program(SBSP)

1. 서론

최근에는 요르단과 부산 기장군에 건설 중인 연구용

원자로(이하 연구로)와 같이 판형핵연료를 사용하는 연구로가 많이 설계되고 있으며, 원자로의 설계 과정에서 판형핵연료 체결에 용이하도록 노심하향유동을 설계조

본 연구는 한동대학교 교내연구지원사업 제20150122호에 의한 것임.

*Corresponding Author : Kwon-Yeong Lee(Handong Global Univ.)

Tel: +82-54-260-1176 email: kylee@handong.edu

Received March 2, 2016

Revised (1st April 6, 2016, 2nd April 26, 2016)

Accepted May 12, 2016

Published May 31, 2016

건으로 갖는 경우가 있다. 노심하향유동 특성을 갖는 연구로는 일차계통 펌프의 유효흡입수두를 고려하여 펌프 등의 일부 기기들이 노심보다 낮은 위치에 설치되어야 한다. 일차계통 배관에서 과단현상이 발생하면 사이펀(siphon)현상으로 인해서 누수현상이 발생하고 원자로수조의 수위는 빠지는 물의 유량만큼 낮아진다. 만약 노심보다 아래쪽에 위치한 배관에서 과단현상이 발생하면 지속적인 누수현상으로 인해 노심이 공기 중에 노출될 수 있는데, 이는 노심의 잔열제거를 불가능하게하기 때문에 중대사고로 이어질 위험이 있다. 따라서 배관 과단으로 인해 냉각재상실사고(Loss of Coolant Accident)가 발생하더라도 큰 사고로 이어지지 않도록 누수현상을 제한할 수 있는 안전장치가 필요하다. 사이펀 차단기는 이러한 안전장치의 하나로, 공기 유입을 통해 사이펀 현상을 효과적으로 제한하여 원자로 수조의 수위가 위험수위 이하로 낮아지는 것을 방지하는 역할을 한다.

사이펀 현상 차단을 통한 연구로 안전성 향상 모색은 몇몇 연구를 통해 진행되었다. 우선 Neill과 Stephens[1]는 소구경 배관사이즈에서 피동형 사이펀 차단기에 대한 실험을 진행하였다. Sakurai[2]는 분리이상유동모델을 적용하여 사이펀 차단기의 실험 결과를 해석하기 위한 모델을 제안하였다. 국내에서는 Kang 등[3][4]이 실규모의 연구로 설계조건을 모사하여 사이펀 현상 차단의 실증실험을 진행하였는데, 기존 실험들이 상대적으로 소구경 배관에서의 사이펀 차단기에 대하여 중점적으로 다룬 것과는 달리 사이즈가 매우 큰 배관(16인치)에서의 사이펀 현상 차단에 대하여 실험을 진행하였다. 또한, Seo 등[5]은 전산유체해석을 활용하여 사이펀 현상 차단의 실험결과와 부합하는 유동모델과 조건을 알아보기 위한 연구를 진행하였다.

사이펀 현상의 차단은 유체역학적인 특성상 고려해야 할 인자들이 많고 계산이 복잡하기 때문에 기존 연구에서는 이것에 대해 이론적 설명을 충분히 제시하지 못하였다. 이에 사이펀 차단 현상을 간단한 조작을 통하여 자동적으로 시뮬레이션을 할 수 있는 프로그램 개발의 필요성이 있다고 판단하였다. 사이펀 차단기 시뮬레이션 프로그램을 개발하기 위해 이론적 관계식의 유도과 알고리즘 및 프로그래밍 과정을 거쳤으며, 최종적으로 사용자의 편의성을 고려하고 직관적으로 사용할 수 있는 시뮬레이션 프로그램을 개발하고자 하였다. 따라서 프로그램은 사이펀 차단 현상을 해석할 수 있는 이론적 수식을

내장해야 하며, 수식으로부터 연산된 결과는 사용자들에게 다양한 방법으로 출력이 가능해야 한다. 또한 직관적으로 프로그램의 기능을 이해할 수 있도록 GUI(Graphic User Interface) 형식으로 개발하였다.

2. 프로그램 개발

Fig. 1은 사이펀 차단기의 모식도이다. 여기서 각각의 숫자는 위치를 의미하는데, 지점 0은 사이펀 차단 라인 입구 위치, 지점 1은 수조수의 높이, 지점 2는 사이펀 차단기와 일차계통배관의 연결부분, 지점 3은 배관과단 위치이다. 사이펀 차단 현상은 누수가 시작된 후, 수위가 지점 0에 이를 때까지 물만 흐르는 단상 유동이 진행된다. 누수현상이 지속되어 수위가 지점 0보다 낮아진 직후부터 공기가 유입되기 시작하고 이후 공기가 완전히 누수현상을 제한할 때까지 이상유동이 진행된다.

사이펀 차단 현상은 조건에 따라 상이한 결과를 나타낸다. 따라서 사용자로부터 직접 설계 조건을 입력 받을 필요가 있다. 시뮬레이션에서 필요한 입력값을 Table 1에서 확인 할 수 있으며 참고문헌[4]의 실험조건을 반영하여 16인치의 배관과단, 2.5인치의 사이펀 차단 라인을 초기 입력값으로 적용하였다. 지점 1~2 구간에서의 압력손실계수12와 지점 2~3 구간에서의 압력손실계수23은 참고문헌[6]을 통해 실험 장치의 설계를 반영하여 계산된 값이다. Chisholm coefficient B는 이상유동 해석을 위한 모델에 포함되는 계수로, 질량유속 범위에 따라 그 값이 달라지므로 사용자로부터 입력을 받도록 개발하였다.

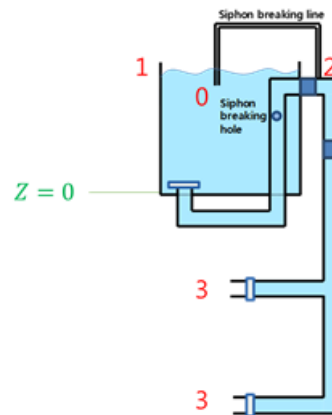


Fig. 1. Schematic diagram

Table 1. Input parameters

List	Default	List	Default
Density of water	998.2 kg/m ³	Gravity	9.81m/s ²
Density of air	1.204 kg/m ³	Position 0	3.3m
Viscosity of water	0.001002 Ns/m ²	Position 2	3.3m
Viscosity of air	0.000018 Ns/m ²	Position 3	-8.3m
Main pipe diameter	390.6mm	Loss coefficient 12	0.6
Break diameter	390.6mm	Loss coefficient 23	2.517
Siphon line diameter	69mm	Siphon line length	6.74m
Initial water level	4m	Number of elbows	2
Tank area	14.22m ²	Number of valves	1
Air pressure	101.3kPa	Time step	0.05sec
Chisholm coefficient B	2.0		

2.1 유체역학적 해석

사용자에게 입력받은 조건들로부터 사이펀 차단 현상을 해석 할 수 있다. 계산 가능한 결과는 유속, 유량, 수위, 언더슈팅(undershooting), 압력, 진도, 기포율, 혼합 밀도, 이상유동 마찰손실배수, 압력손실계수, 마찰계수, 레이놀즈(Reynolds) 수이며 총 15가지의 결과를 도출한다. 이와 같은 결과값은 이론적인 계산식으로부터 도출되는데 각 계산식은 아래와 같다. 아래의 계산식에서 P는 압력, V는 유속, Q는 유량, K는 압력손실계수, Z는 높이, g는 중력, ρ는 밀도, Φ²는 이상유동 마찰손실배수, A는 면적, f는 마찰계수, D는 배관 내경을 의미한다.

유속은 베르누이 방정식으로부터 유도된다. 구간에 따라 아래 베르누이 방정식을 따른다. 이 때 이상유동 마찰손실배수는 Chisholm모형을 적용한다.

$$\frac{(P_1 - P_2)}{\rho_w} + g(Z_1 - Z_2) - \frac{1}{2} V_{12}^2 (1 + K_{12}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{(P_0 - P_2)}{\rho_a} = \frac{1}{2} V_{02}^2 K_{02} \quad (2)$$

$$\frac{(P_2 - P_3)}{\rho_{mix}} + g(Z_2 - Z_3) - \frac{1}{2} V_{23}^2 (K_{23}\Phi^2 + (\frac{A_2}{A_3})^2 - 1) = 0 \quad (3)$$

위의 베르누이 식으로부터 유속 V에 대해 이상유동을 고려하여 정리한 결과는 아래와 같다.

$$V_{12} = V_{23} (1 - \alpha) \quad (4)$$

$$V_{02} = \sqrt[3]{\frac{2 \times 1000 \times (P_{atm} - P_2)}{\rho_g \times K_{02}}} \quad (5)$$

$$V_{23} = \sqrt[3]{\frac{2\rho_w g(Z_1 - Z_2) + 2\rho_{mix} g(Z_2 - Z_3)}{\rho_w (1 + K_{12})(1 - f)^2 + \rho_{mix} (K_{23}\Phi^2 + (\frac{A_2}{A_3})^2 - 1)}} \quad (6)$$

위의 유속으로부터 배관 면적을 각각 곱해주면 유량을 구할 수 있다.

$$Q_{12} = V_{12} \times A_2 \quad (7)$$

$$Q_{02} = V_{02} \times A_0 \quad (8)$$

물의 수위는 빠져나가는 유량(Q₁₂)으로부터 구할 수 있다. 실제 물의 누수는 시간 연속적으로 발생하지만 단계적 연산 수행 과정에서 이를 계산 하는 것은 불가능하므로 time step이라는 변수를 두어 일정시간 단위마다 계산이 진행 되도록 하였다.

$$water\ level = previous\ water\ level - \frac{Q_{12}}{A_{tank}} \times time\ step \quad (9)$$

또한 언더슈팅은 구해진 물의 수위로부터 구할 수 있다. 언더슈팅은 사이펀 차단 라인의 입구 위치와 현재 수위의 차이를 의미하는 것으로 사이펀 차단기를 해석하는 과정에서 가장 중요한 요소 중 하나이다.

$$undershooting = water\ level - Z_0 \quad (10)$$

본 프로그램에서 이상유동을 해석하기 위하여 Chisholm모형을 적용하였다[7]. Chisholm모형과 균질 유동모형(homogeneous model)을 각각 적용한 시뮬레이션 결과와 실제실험 결과를 비교하여 분석해 보았는데, 균질유동모형은 이상유동 구간에서 작은 이상유동 마찰손실배수 값을 가지며 과도한 언더슈팅을 보인 반면 Chisholm모형은 더 정확한 값을 예측하였다. Chisholm모형에 따른 이상유동 마찰손실배수는 아래와 같다. 여기서 B는 사용자에게 입력받는 값으로 주어진 조건에서 질량유동에 따라 변하는 계수이다.

$$\Phi^2 \equiv 1 + \left(\frac{\rho_w}{\rho_a} - 1\right)(B \times X(1 - X) + X^2) \quad (11)$$

공기와 물의 이상유동에 대한 다른 관계식은 아래와 같다.

$$\text{void quality: } X \equiv \frac{\rho_a V_{02} A_0}{\rho_a V_{02} A_0 + \rho_w V_{12} A_2} \quad (12)$$

$$\text{void fraction: } \alpha \equiv \frac{A_0 V_{02}}{A_0 V_{02} + A_2 V_{12}} \quad (13)$$

$$\text{mixture density: } \rho_{mix} \equiv (1 - \alpha)\rho_w + \alpha\rho_a \quad (14)$$

레이놀즈 수와 마찰계수의 관계식은 아래와 같다. 마찰계수의 경우 이론 관계식은 Idelchik 공식을 적용하였다[8].

$$\text{Reynolds number} = \frac{V_{02} \times D_{siphon}}{1000 \times \mu_a} \quad (15)$$

$$\text{Friction factor} = \frac{1}{(1.8 \log(\text{Reynolds number}) - 1.64)^2} \quad (16)$$

마찰계수로부터 압력손실계수를 계산할 수 있다. 공기측 압력손실계수는 배관에서의 마찰손실과 구성요소의 형상손실을 고려한다. 마찰손실은 배관의 지름에 대한 길이의 비에 마찰계수를 곱한 형태로 나타난다. 형상손실은 구조적으로 압력손실에 영향을 줄 수 있는 elbow와 valve의 숫자, 그리고 inlet과 outlet에 대하여 고려한다. 해당 관계식은 아래와 같으며 inlet=0.78, outlet=1의 값과 나머지 상수는 참고문헌[7]에서 발췌하여 사용하였다.

$$K_{02} = \left(\frac{L_{siphon}}{D_{siphon}} \times f\right) + (0.78 + 1 + 14f \times \text{number of elbow} + 55f \times \text{number of valve}) \quad (17)$$

각 지점에서의 압력은 0, 1, 3지점은 항상 대기압(101.3kPa)인 것과는 달리 2지점의 압력은 가변적이다. 2지점에서 압력을 구하는 식은 아래와 같다.

$$P_2 = [P_{atm} \times 1000 + \rho_{mix} g(Z_3 - Z_2) + 0.5 \times \rho_{mix} V_{23}^2 (K_{23} \Phi^2 + \left(\frac{A_2}{A_3}\right)^2 - 1)] / 1000 \quad (18)$$

위의 식을 통해 사이펀 현상 차단에 대한 유체역학적 이론적 해석이 가능하며, 위의 식들을 이용하여 입력값들로부터 결과 값들을 도출하게 된다.

2.2 프로그래밍 과정

프로그램은 Windows8 환경에서 Microsoft Visual Studio 2012(Professional version) 툴을 사용하였으며 MFC(Microsoft Foundation Class)프로그래밍 방법을 사용하여 제작되었다. 사용자가 프로그램을 사용하여 종료까지 진행되는 과정과 연산알고리즘은 Fig. 2에 나타내었다.

먼저 프로그램을 실행하고, 사용자는 설계조건에 해당하는 입력값을 입력한다. 입력된 조건으로부터 총 3단계에 걸쳐 연산을 수행한다. 연산 1단계는 누수현상 연산이며 연산시작과 동시에 자동적으로 진행된다. 누수현상이 계속되어 수위가 사이펀 차단 라인 입구까지 낮아지면 공기의 유입이 시작된다. 수위와 사이펀 차단 라인 입구의 위치수두차이를 나타내는 Zu(언더슈팅)으로 공기의 유입을 판단할 수 있으며, 이 값이 0보다 커지는 순간부터 공기의 유입이 시작된다고 판단한다. 공기의 유

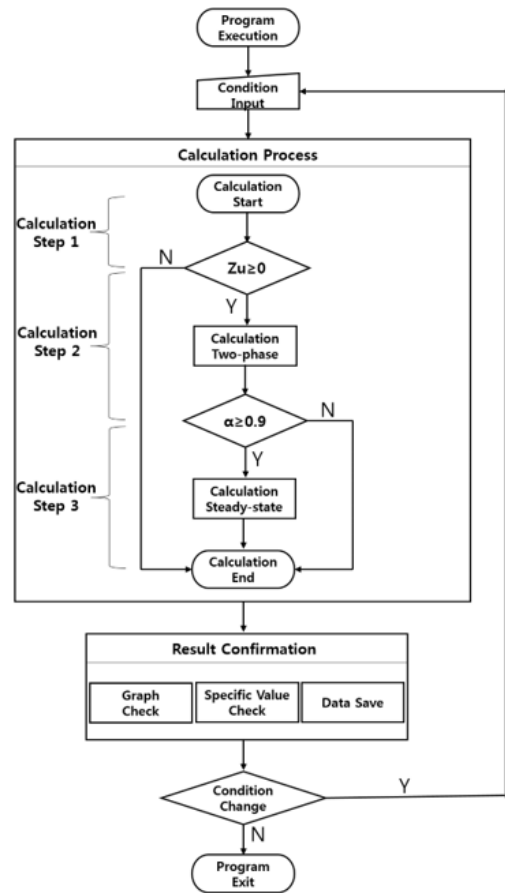


Fig. 2. Program algorithm

입이 시작되면 물과 공기가 같이 흐르는 연산 2단계가 진행된다. 이상유동 연산은 기포율(α)이 0.9가 될 때까지 진행된다. 0.9 이상의 값을 만족하는 시점부터 사이펀 현상의 차단이 완료되었다고 판단하여 정상상태 (차단이 완료되어 결과 값들이 불변인 상태)연산으로 넘어 간다. 정상상태연산은 사용자가 입력한 시간까지 진행된 후 종료된다. 만약 이전의 조건들에서 각각의 조건을 만족하지 못하면 정상적으로 사이펀 차단이 이루어지지 못하는 경우라고 판단할 수 있으며, 연산은 다음 단계로 넘어가지 않은 채로 종료된다. 연산이 종료된 후, 사용자는 다양한 방법으로 결과를 확인한다. 결과를 통해 주어진 설계조건에서의 사이펀 차단 가능성, 차단과정, 특이점등을 파악할 수 있다.

여기서 이론적으로 사이펀 차단 현상이 완료되는 기준은 공기만 흐르는 경우이기 때문에 기포율 값이 1이지만 이론 계산식을 코딩으로 구현하는 과정에서 $\alpha=1$ 의 조건 설정 시 발생할 수 있는 오류를 방지하기 위해 0.9로 설정하였다. 따라서 시뮬레이션 결과 중 일부 데이터의 손실이 불가피하다. 하지만 손실로 인해 발생하는 오차는 매우 작은 것으로 확인되었다. Table 1에서 주어진 초기 값으로 시뮬레이션을 진행할 시 $\alpha=1$ 의 조건에서 사이펀 차단이 완료되는 시간은 69.69초로 계산되었고 $\alpha=0.9$ 의 조건에서 시뮬레이션 결과는 69.45초로 0.24초의 오차가 존재한다. 이것은 전체과정 69.69초와 비교하여 약 0.34%의 오차로 매우 작은 오차이기 때문에 결과에는 큰 영향을 주지 못하는 것으로 판단된다.

2.3 프로그램 인터페이스와 기능

위의 알고리즘을 구현한 프로그램을 개발하였다. 목표대로 사용자가 직관적으로 프로그램을 이해할 수 있도록 GUI(Graphic User Interface)형식으로 개발하였으며, 개발한 프로그램의 초기화면은 Fig. 3과 같다.

프로그램을 실행하면 4개의 주요버튼(Show parameter, Manual, Run, Exit)로 프로그램을 조작한다. Show parameter는 조건입력을 위한 버튼으로 입력된 값들을 확인 및 수정할 수 있다. Show parameter 버튼 클릭 시 나타나는 커맨드 윈도우 창은 Fig. 4와 같다.

Run 버튼은 저장된 파라미터 값으로부터 연산을 수행하는 버튼이다. 앞서 서술한 관계식들로부터 결과를 도출하며, 그 결과는 Fig. 5와 같이 그래프의 형태로 표시된다. 사용자는 그래프를 통해 사이펀 차단 가능성과

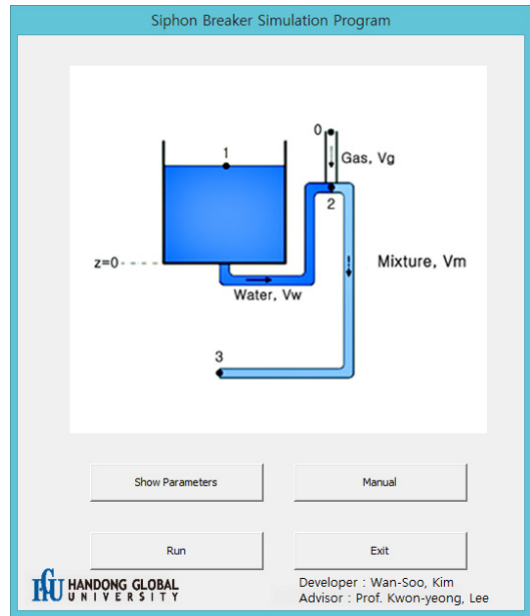


Fig. 3. Initial screen

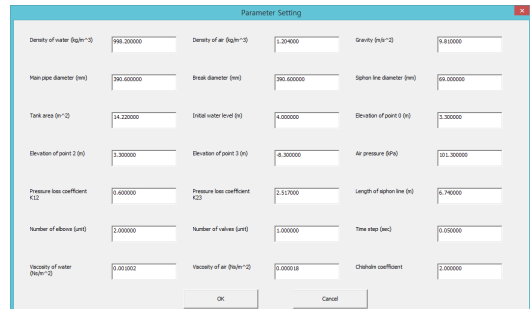


Fig. 4. 'Show parameter' window

불가능을 직관적으로 확인할 수 있으며, 차단 진행 상황을 시간에 따라 전체적으로 파악하기 용이하다. 사용자는 보기 원하는 결과를 체크박스를 통해 선택할 수 있으며, 중복선택 또한 가능하다. 모든 그래프에서 x축은 시간이며 y축은 사용자의 선택에 따라 종류가 달라진다. Fig. 5에서 검은색 그래프는 수위, 빨간색 그래프는 언더슈팅 그래프이다.

또한 결과 확인 창에서 'Calculate in specific time'버튼을 통해 그래프에서는 확인하기 어려운 정확한 값들을 확인할 수 있다. 버튼을 클릭한 후 결과 값들을 확인하고 싶은 시간을 입력하면 해당시간의 모든 결과 값들을 출력하여 보여준다. 출력화면은 Fig. 6과 같다.

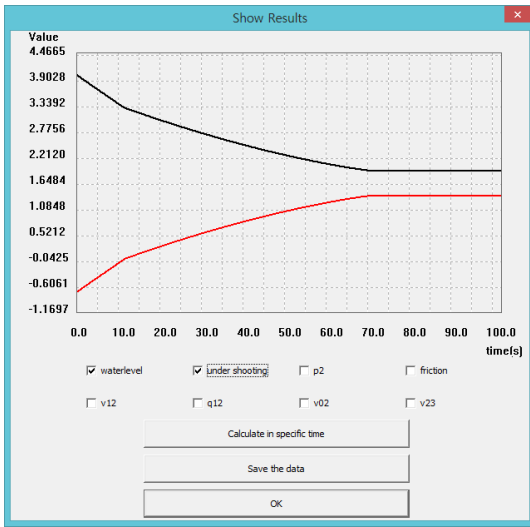


Fig. 5. 'Show result' window

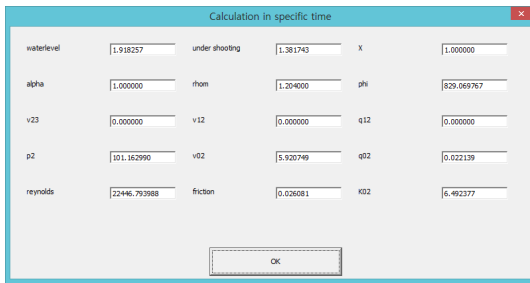


Fig. 6. 'Calculate in specific time' window

연산된 데이터는 'Save the data'버튼으로 저장할 수 있다. 결과는 텍스트 파일형태로 저장되며 상단에는 시뮬레이션의 조건, 하단에는 시뮬레이션 결과데이터를 저장한다.

3. 프로그램 활용

3.1 압력손실계수 검증

사이펀 차단 현상에서 문헌을 이용한 이론적 계산 과정에서 포함되는 압력손실계수는 이론에 근거하는 예상 값이다. 따라서 정확한 손실 계수의 결정은 실험 결과를 참고하여 결정해야 한다. 시뮬레이션 결과와 실험 결과의 상호 비교를 통해 결정할 손실계수는 압력손실계수 12(K₁₂)와 압력손실계수 23(K₂₃)이며, 이를 위해 참고한 실험 결과는 참고문헌[4]의 XN01과 XN03의 경우이다. 두 실험은 사이펀 차단기가 작동되지 않은 사이펀 실험

의 경우로, 누수 시간을 비교하여 손실계수를 결정하였다. 누수 시간의 측정은 수위 압력계로부터 계산된 결과가 수조바닥면으로부터 1m 높이까지 낮아지는데 걸린 시간이다. 수위 압력계로부터 수위를 계산하였으며 아래의 식(19)을 사용하였다[4].

$$\text{수위}(cm) = 1030 \times \text{압력}(bar) - 989 \quad (19)$$

XN에 대한 실험 조건 및 실험 결과와 시뮬레이션 결과는 Table 2와 같다. 문헌을 통해 계산된 압력손실계수를 설정한 시뮬레이션 결과가 실제실험과 비슷한 결과를 나타내는 것을 보아 계산된 결과가 타당한 것을 확인할 수 있었다.

Table 2. XN result

Case	XN01	XN03
LOCA size	16inch	12inch
K12	0.6	0.6
K23	2.517	3.048
Initial water level	3.81m	3.85m
Experiment	49.5s	54.2s
Simulation	46.7s	58.85s

3.2 사이펀 차단 현상 분석

사이펀 차단기의 내경은 언더슈팅 결과에 영향을 주는 주요 요인 중의 하나이다. 실제 실험에서는 사이펀 차단기 배관 내경을 각각 2.5인치, 3인치, 4인치로 변경하여 진행하였으며 그에 따른 언더슈팅 결과를 측정하였다. 참고한 실험 데이터는 참고문헌[4]의 LN21(2.5인치), LN31(3인치), LN41(4인치)이다. Fig. 7은 실험데이터와 시뮬레이션 결과를 나타낸 그래프이다. 실험에서 사이펀 차단기의 내경이 증가할수록 공기의 유입량이 증가하여 언더슈팅이 작아지는 경향성을 보였으며, 시뮬레이션 프로그램은 이러한 경향성을 잘 예측하는 것으로 보인다. 다만, 사이펀 차단기의 내경이 2.5인치일 때는 프로그램이 실험에서 얻은 언더슈팅을 정확히 예측하나 내경이 3인치, 4.5인치로 증가할수록 실험결과보다 작게 예측하고 있다. 이러한 오차는 Chisholm 계수 B에 일괄적으로 '2'를 적용했기 때문에 나타나는 것으로, 3인치와 4인치의 경우 증가하는 공기의 유량을 고려하여 더 작은 Chisholm 계수를 필요로 한다. 또한, Chisholm 계수의 조절을 통해 실험결과와 동일하게 예측하는 것이

가능함을 확인하였다. 따라서 Fig. 7을 통해 얻을 수 있는 결론은, 프로그램을 통해 결과를 실제와 비슷하게 잘 예측할 수 있음을 확인했으며, 동시에 공기의 유량을 고려한 Chisholm 계수 조절 모델이 개발되어야 함을 확인할 수 있었다.

사이펀 차단기 시뮬레이션 프로그램이 실제 차단기의 결과 값뿐만 아니라, 진행상황 또한 정확하게 예측하는지 알아보기 위해, LN21의 경우에 대해 실험적으로 측정된 유량과 압력의 변화를 시뮬레이션의 결과와 비교해 보았다.

Fig. 8은 LN21 실험케이스의 유량 변화를 비교한 것으로, 실험결과와 유량 측정은 수조의 단면적을 알고 있기 때문에 수조 수위에 대한 가시화 영상으로부터 수위가 5cm만큼 낮아지는 시간을 얻어 역계산을 통해 얻은 값이다. 이는 실험에서 배관파단 발생 후 초기의 급격한 유동발달 시간동안 초음파 유량계가 잘 측정하지 못한 관계로, 이에 대한 대안으로 사용한 방법이다. 초기의 단상유동 구간에서 짧은 시간 동안의 급격한 수위 변화가 있었는데, 가시화 영상을 통한 유량 측정방법의 오차로 인해 거의 동일한 유량으로 계산되었다. 하지만, 초기 단상유동에서의 실제현상은 수위가 점차 감소하기 때문에 베르누이 식을 따를 때 시뮬레이션과 같이 점진적으로 감소하는 것이 올바르다고 볼 수 있으며, 실험결과와 위와 같은 오차로 인하여 실제보다 약간 작게 계산되었을 것으로 예상된다. 나머지 다른 구간에서 시뮬레이션 그래프의 양상은 베르누이 방정식으로부터 구한 유량의 변화를 이론적으로 올바르게 예측하며 그 값 또한 실제 결과와 동일한 양상을 보이는 것을 확인할 수 있다. 유량 변화를 실제 양상과 비슷하게 예측할 수 있기 때문에 수위와 언더슈팅 값 또한 실제 실험값과 유사하게 예측할 수 있는 것으로 판단된다.

Fig. 9는 LN21 실험케이스의 지점 2의 압력 변화를 비교한 결과이다. 실제 실험값과 시뮬레이션 결과 값이 작은 오차는 존재하지만 그래프의 형태는 거의 유사한 것을 확인할 수 있다. 다만, 시뮬레이션은 짧은 시간동안 압력의 급격한 변화가 있는 실험에서의 천이구간을 잘 따라가지 못하는 결과를 보였다. 이는 정상상태의 베르누이 식을 적용했기 때문인 것으로 판단된다. 하지만, 이 짧은 시간의 차이가 최종 목표로 하는 언더슈팅 예측에 큰 영향을 미치지 않는다. 특히, 60~70초 사이의 사이

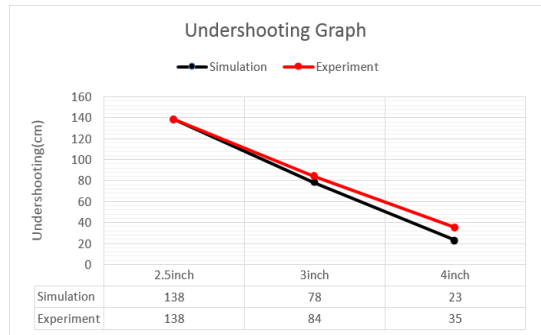


Fig. 7. 'Undershooting' comparison graph

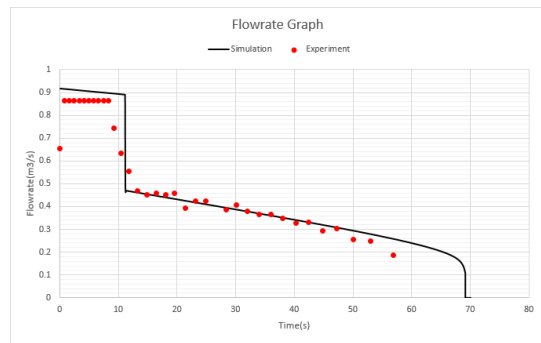


Fig. 8. 'Flowrate' comparison graph

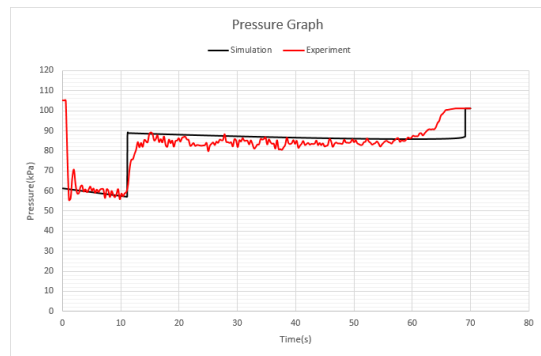


Fig. 9. 'Pressure' comparison graph

펀 차단 후반부에서 물의 빠른 유동으로 인해 발생되었던 부압이 유동이 약해지며 대기압으로 서서히 회복되는 구간을 시뮬레이션이 잘 따라가지 못하지만, 이 구간에서 물의 유량이 작아서 큰 단면적을 가지는 수조의 수위 변화는 매우 작으며, 최종적으로 이 구간이 언더슈팅에 미치는 영향은 무시할 수 있는 것으로 생각된다.

결국 유량과 압력의 비교를 통해 개발된 프로그램이 주어진 조건으로부터 실제 현상과 유사하게 모사하는 것

을 확인하여 프로그램의 타당성을 확인하였으며, 시뮬레이션 결과를 바탕으로 사이펀 차단 현상 해석이 가능함을 확인하였다.

4. 결론

본 연구를 통하여 연구로에서 사이펀 현상을 차단하여 중대사고를 방지할 수 있는 사이펀 차단기 시뮬레이션 프로그램을 개발하고 활용해보았다. 개발된 프로그램은 사이펀 차단 현상을 이론적으로 해석하여 사용자들에게 정보를 제공하는 것을 목표로 한다. 프로그램을 활용하여 압력손실계수의 검증이 가능하였으며, 실제 사이펀 현상의 차단을 분석하였다. 시뮬레이션 결과와 실험 결과를 비교하였을 때, 프로그램은 실제 사이펀 현상 차단을 잘 해석하는 것으로 보이며, 시간에 따른 차단의 경과를 실제와 유사하게 예측한다.

결론적으로, 본 연구를 통해 개발된 사이펀 차단기 시뮬레이션 프로그램은 연구로의 사이펀 차단기 설계와 현상 분석에 도움을 줄 수 있으며, 원자로의 안전성 평가에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

Reference

- [1] D. T. Neill, A. G. Stephens, "Siphon Breaker Design Requirements - Final Report", USA DOE/ER/128020-T1, 1993.
- [2] F. Sakurai, "Study for Improvement of Performance of the Test and Research Reactors", JAERI-Research 99-016, 1999.
- [3] S. H. Kang, M. H. Kim, K. W. Seo, K. Y. Lee, D. Y. Chi, "Final report of experimental studies on siphon breaker", Korea Atomic Energy Research Institute, 2011.
- [4] S. H. Kang, K. C. Lee, M. H. Kim, K. Y. Lee, K. W. Seo, S. H. Kim, J. H. Yoon, "Experimental Study of Siphon breaker" Korea Atomic Energy Research Institute, 2013.
- [5] K. Seo, S. H. Kang, J. M. Kim, K. Y. Lee, N. Jeong, D. Y. Chi, J. Yoon, M. H. Kim, "Experimental and numerical study for a siphon breaker design of a research reactor", Annals of Nuclear Energy, vol. 50, pp. 94-102, 2012.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.anucene.2012.06.005>
- [6] CRANE Co., "Fluid of fluids through valves, fittings and pipes", 1988.
- [7] M. Fossa, G. Guglielmini, "Pressure drop and void fraction profiles during horizontal flow through thin and

thick Orifices", Experimental Thermal and Fluid Science, 2002.

DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0894-1777\(02\)00156-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0894-1777(02)00156-5)

- [8] I. E. Idelchik, Handbook of Hydraulic Resistance, Third edition, CRC Press, Inc. 1993.

이 권 영(Kwon-Yeong Lee)

[정회원]



- 2002년 2월 : 포항공과대학교 기계공학 (공학사)
- 2008년 2월 : 포항공과대학원 기계공학 (공학박사)
- 2008년 8월 ~ 2010년 6월 : 삼성엔지니어링 과장
- 2010년 7월 ~ 2015년 2월 : 한국원자력연구원 선임연구원

• 2015년 3월 ~ 현재 : 한동대학교 교수

<관심분야>

열유체

김 완 수(Wan-Soo Kim)

[정회원]



- 2006년 3월 ~ 현재 : 한동대학교 기계제어공학부 졸업예정

<관심분야>

기계공학, 전자제어공학