

냉각재상실사고 해석을 위한 코드 개발 : LANCELOT

Code Development for LOCA Analysis : LANCELOT

이걸우, 이재훈, 박병서, 조창석

한국원전연료(주)
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

냉각재상실사고 해석을 위한 LANCELOT(Licensing Analysis Code for Evaluating Loss Of Coolant Transient) 코드의 기본 프레임을 구축하였다. LANCELOT 코드는 모듈화된 일차원, 이상유체 코드로서, 데이터 구조는 Fortran 90의 derived data 형태로 구성되어 있다. 개발된 코드의 성능을 평가하기 위해 DRAIN and FILL, U-Tube, Marviken Test 24 등에 대한 검증 작업을 수행하였으며, 그 결과는 적절한 것으로 확인되었다.

Abstract

A frame of LANCELOT(Licensing Analysis Code for Evaluating Loss Of Coolant Transient) code for Loss-of-Coolant Accident Analysis has been developed. The LANCELOT code, one dimensional two fluid code, has a modular structure and its data structure including thermo-hydraulic data is designed with Fortran 90 derived data types. Several testings, including FILL and DRAIN problem, and Marviken Test 24, have been performed for the assessment of the LANCELOT code. It predicted the results with reasonable accuracy.

1. 서 론

최근 KNFC에서는 TRAC-PF1 코드[1]를 이용한 FLECHT-SEASET 실험평가[2] 및 파단모델 개선[3]에 대한 연구들이 수행되었다. 이러한 실험평가나 요소 모델개발 시 코드 수정 상의 비효율성이 문제점으로 대두되었으며, 이를 개선하기 위한 작업이 필수적으로 요구되었다. 본 연구는 이런 필요성에 따라 코드 구조를 현대화하고 새로운 냉각재상실사고해석 코드개발을 위한 기본 코드를 제공하기 위해 수행되었다.

TRAC-PF1 코드는 비균질, 이상유체 모델의 6개 지배방정식 및 Modular 구조를 기초로 하고 있다. TRAC-PF1 코드는 지배방정식 해법뿐만 아니라, 입력과 출력까지 각 컴포넌트 모델별(PIPE, TEE 등)로 수행되며 전체 해석대상의 문제는 network solver에 의해 수행된다. 이러한 설계개념은 자료구조에서도 같은 방법으로 적용되고 있다. TRAC-PF1의 주메모리는 전체 해석문제의 모든 데이터를 갖고 있는 large-core memory (LCM) array와 해석 대상의 컴포넌트 데이터를 갖는 small-core memory(SCM) array 2개 부분으로 구성되어 있다. 각 컴포넌트의 데이터 구조는 4개의 block(fixed length table, variable-length table, pointer table, & array data)으로 구성되어 있으며, 해당

컴포넌트가 수행될 때에만 LCM array로부터 SCM array로 옮겨진다. 이러한 TRAC-PF1 코드의 컴포넌트 별 기능적 모듈과 데이터 구조는 효율적인 메모리 사용 및 특정 모델 개선, 개발을 용이하게 하지만 모델 개발자들은 전체 데이터 구성에 대한 상세한 이해를 갖고 있어야 하므로, 코드의 유지, 보수 측면에서 매우 불리하다. 이러한 TRAC-PF1 코드 데이터 구조의 개선은 COMMON 문과 EQUIVALENCE 문으로 구성된 각 컴포넌트의 pointer table 변수의 단순한 변수화나 array 선언으로써는 컴포넌트의 기능적 모듈의 장점을 살릴 수 없게 된다. 이는 TRAC-PF1 코드가 컴포넌트에 따른 독립적인 데이터 구조를 갖고 있으나, container arrays 및 EQUIVALENCE 문에 의해 컴포넌트에 구별 없이 동일한 지배방정식 solver를 사용하기 때문이다. 이런 container arrays 사용은 USNRC의 코드 통합 작업[4]에서도 문제점으로 대두되었으며, 이를 해결하기 위해 많은 노력을 기울이고 있다.

LANCELOT 코드는 TRAC-PF1의 상기 문제점을 극복하고 컴포넌트에 따른 기능적 모듈화 및 network solver 기능을 구현하기 위해 수정, 개발된 코드이다. 데이터 구조는 Fortran 90 언어를 사용하여 열수력 데이터 구조의 계층화 및 모듈화를 수행하였으며, 각 컴포넌트만에 특별히 적용되는 컴포넌트 변수에 대해서는 기능적인 모듈을 독립적인 데이터 모듈로 설계하였다. LANCELOT 코드는 새로운 데이터 구조 및 모듈화, 계층화를 통하여 container arrays, COMMON 문 및 EQUIVALENCE 문으로 운영되는 기존의 불필요한 메모리 이동 및 새로운 EQUIVALENCE 과정을 제거하여 원시코드의 해독성과 유지, 보수성을 높였다. 이를 통하여 LANCELOT 코드는 효율적인 냉각재상실사고 해석을 위한 코드개발의 기본 코드로서의 기능을 갖게 되었다. 또한 구조화, 모듈화된 데이터 구조에 의해 최신의 전산언어가 갖고 있는 장점을 손쉽게 구현할 수 있게 되었으며, 입력구조의 단순화를 포함하여 초기화 및 solution 과정의 부프로그램에 대한 모듈화 및 postprocessing을 보다 쉽게 적용할 수 있게 되었다.

2. LANCELOT 코드 모듈

LANCELOT 코드는 Fortran 90 언어로 작성되었으며, 데이터의 모듈화와 컴포넌트의 기능적인 모듈화를 통합적으로 수행할 수 있도록 설계되었다. LANCELOT 코드의 데이터 모듈은 전반적인 열수력 변수들을 표현하는 4개의 기초 모듈과 10개의 일차원 특정 컴포넌트 모듈, 그리고 network solution 변수 모듈로 구성되어 있다. 표 1은 각 모듈에 대한 기본적인 설명이다.

LANCELOT 코드의 기본 모듈은 열수력 변수들을 위한 4개의 기초모듈과 컴포넌트 및 network 변수의 index 등으로 구성된 다음과 같은 COMP_MODULE을 사용한다.

```

TYPE comp_type
  CHARACTER (LEN=CCTITLE)           :: title
  CHARACTER (LEN=CTYPE)             :: type
  INTEGER                           :: num, id, ncells, nodes, irst, &
                                     order, index, js11, js22, js33
  TYPE ( dualpt_type ) , DIMENSION(:), POINTER :: old, new           !! old & new time variables
  TYPE ( hydropt_type ) , DIMENSION(:), POINTER :: hydro             !! geometric data etc
  TYPE ( intpt_type ) , DIMENSION(:), POINTER  :: int                !! HT regime etc.
  TYPE ( heatpt_type ) , DIMENSION(:), POINTER :: heat               !! Wall heat transfer variables
END TYPE comp_type

TYPE(comp_type) , DIMENSION(:), ALLOCATABLE :: comp                !! structured component data

```

그러므로 각 컴포넌트는 계층화, 구조화된 COMP_MODULE과 컴포넌트 특정 모듈(예, PIPE_MODULE)을 사용하여 해석된다. 이를 pipe1 부프로그램에 대해 살펴보면 다음과 같다.

```

PRESSURE of n-th mesh cell at old time    : comp(comp_index)%old(n)%press
PRESSURE of n-th mesh cell at new time    : comp(comp_index)%new(n)%press
WATER HEIGHT of PIPE model                : pipe_data(index)%height

```

LANCELOT 코드의 10개 일차원 컴포넌트 모델과 관련된 변수들은 각 컴포넌트 모델을 위한 데이터 모듈로 작성되어 있으므로, 새로운 컴포넌트 모델 또는 특정 모델 개발, 개선을 보다 쉽게 적용할 수 있다. 또한 network solver를 위한 변수들은 컴포넌트 boundary 변수와 함께 모듈화 되어 있어 위의 구조화된 컴포넌트 데이터 구조와 연계하여 전체 해석이 수행되도록 설계되었다. LANCELOT 코드는 전체적으로 comp 변수와 각 컴포넌트(PIPE, FILL, TEE 등) 모듈, 그리고 Network solver를 위한 모듈로 구성되었다. 그러므로 데이터 구조를 일관되게 사용할 수 있으며, 각 컴포넌트 별로 각기 다른 컴포넌트 데이터 구조를 모듈화 함으로써 모델에 대한 확장성 및 기능성을 증대하였다.

또한 LANCELOT 코드에서는 모듈화, 구조화된 데이터를 부프로그램의 인수로 분명히 선언하여 사용함으로써 원시코드의 이해도를 증대하였으며, 각 컴포넌트 모델의 기능적인 모듈성과 관련된 변수들을 부프로그램의 인수로 명시적으로 선언하여 기능적인 모듈화를 높이도록 설계하였다. 이러한 총체적인 LANCELOT 코드의 데이터 구조에 대한 현대화는 원시코드의 유지, 보수성뿐만 아니라 입력루틴, 초기화 루틴, DUMP/RESTART 및 postprocessing 기능을 손쉽게 확장할 수 있게 한다.

3. LANCELOT 코드 평가

LANCELOT 코드의 새로운 데이터 구조 및 모듈화 적용에 대한 정당성을 확인하기 위해 여러 경우에 대한 평가작업이 진행 중에 있다. 이를 위한 평가 Matrix는 DRAIN and FILL, U-TUBE, Marviken Blowdown Tests, Flecht-Seaset Reflood Tests, LOFT L2-2 Integral Effect Test, 영광 3/4 LBLOCA로 구성되어 있다. 현재까지 다음의 3가지 경우에 대한 평가가 완료되었으며 다음의 3가지 평가에 대한 결과는 TRAC-PF1 결과와 일치하였다.

3.1 Drain and Fill

Drain and Fill 평가(그림 1.a)는 수직 원형관(15개 mesh cells)에서 하부에서 2/3 (10th cell) 까지는 물로 차있으며 위부분은 수증기로 채워져 있는 초기조건으로부터 FILL boundary condition을 이용하여 일정시간 DRAIN(1/3 지점, 5th cell)한 후 다시 일정시간 후에 초기 위치로 물을 채우는 평가시험이다. 각 cell의 기공율에 대한 결과는 그림 2에 나타나 있다. 각 cell의 기공율은 저속의 불연속적인 Drain & Fill에 의해 mesh cell 경계를 지나는 동안 압력에 대한 수치적인 불안정을 야기하지 않고 전반적인 현상을 예측할 수 있음을 확인하였다.

3.2 U-TUBE

U-TUBE 평가(그림 1.b)에서는 U-tube 형태의 단일 원형관에서 초기 서로 다른 수위를 갖고 있는 경우에 열수력 변수들에 대한 평가를 수행하였다. U-tube의 양쪽 끝을 BREAK 모델을 사용하여 일정한 압력경계를 갖도록 한 경우에 CELL 6, 10의 기공율은 그림 3과 같이 CELL 6, 10에서 일정한 주기를 갖는 성질을 보여주었다.

3.3 Marviken Test 24 (blowdown test)

방출시험에 대한 평가는 Marviken Full Scale Critical Flow Test[5]에 대해서 수행되었다. Marviken Test 24 평가는 TRAC-PF1 Critical Flow model 평가[3]에서 사용되었던 Test 24(two nodes)입력을 사용하여 수행되었다. 방출유량과 노즐 압력은 각각 그림 4, 5와 같다. Marviken Test 24 실험 결과와 비교하여 불 때 방출유량과 압력의 천이현상을 약간 낮게 예측하는 것으로 평가되었다. 이러한 LANCELOT 결과는 TRAC-PF1 Critical Flow model 평가[3]와 일치한다.

4. 결과 및 향후 LANCELOT 코드 개발

냉각재상실사고해석을 위해 개발 중인 LANCELOT 코드는 Fortran 90 전산언어를 사용하여 작성되었으며, 전체 데이터 구조는 계층화, 모듈화, 구조화하여 구성하였다. 각 컴포넌트 모델 별로 모듈화된 데이터 구조를 갖도록 구성하여 그 기능성을 높이도록 설계하였다. LANCELOT 코드 모듈의 시험, 평가 결과를 통하여 TRAC-PF1 코드와 동일한 결과를 얻을 수 있음을 확인하였다. 이러한 평가를 바탕으로 LANCELOT 코드에 Appendix K 모델, 새로운 수치해석 기법 등의 모델개발 연구가 수행될 예정이다.

참고문헌

- [1] TRAC-PF1: An Advanced Best-Estimate Computer Program for Pressurized Water Reactor Analysis, NUREG/CR-3567, LANL, 1984.
- [2] 이재훈 외, "TRAC-PF1을 이용한 FLECHT-SEASET 평가 계산," Proceedings of the Korean Nuclear Society Autumn Meeting, Vol.I, pp.627-632, 1997.
- [3] 황태석 외, "Incorporation of Henry-Fauske Critical Flow Model into TRAC- PF1," Proceedings of the Korean Nuclear Society Spring Meeting, Vol.I, pp.713-718, 1998.
- [4] J.L.Uhle, "NRC Thermal-Hydraulic Code Consolidation and Improvement Program," Twenty-Fifth Water Reactor Safety Information Meeting, NUREG/CP-0162, Vol.3, pp.213-222, 1997.
- [5] The Marviken Full-Scale Critical Flow Tests, EPRI-NP-2370, 1982.

표 1. LANCELOT 코드 모듈

LANCELOT 코드 모듈	설 명
기초 모듈 1. DUALPT 2. HYDROPT 3. INTPT 4. HEATPT	열수력 변수 (압력, 온도, 밀도, 기공율 등) 형상 및 state variable (mesh cell 면적, 부피, 전도도, 점도 등) heat transfer regime flags, material, friction 상관식 flags HTC, CHF, wall 점도도 등
컴포넌트 모듈	PIPE, FILL, BREAK, CORE, TEE, ACCUMULATOR, PRESSURIZER, VALVE, PUMP, STEAM GENERATOR
Network 모듈	boundary(junction) array values, network solution order & variables 등

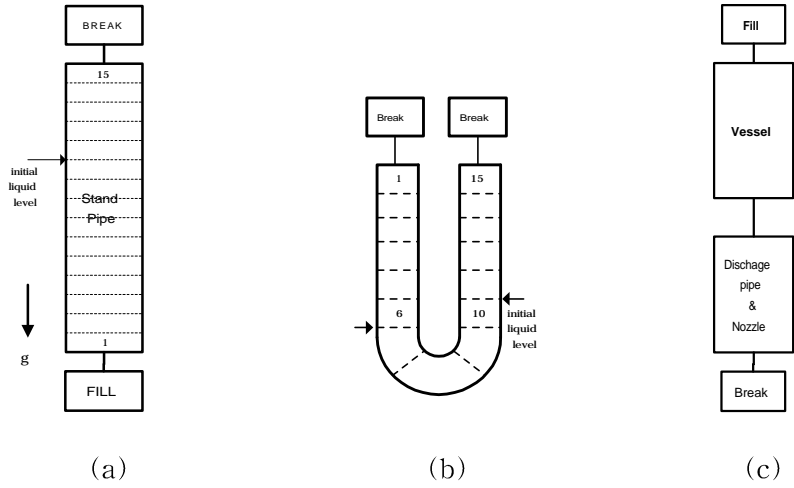
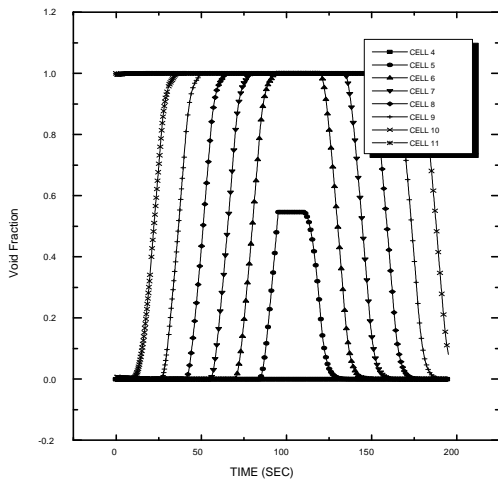
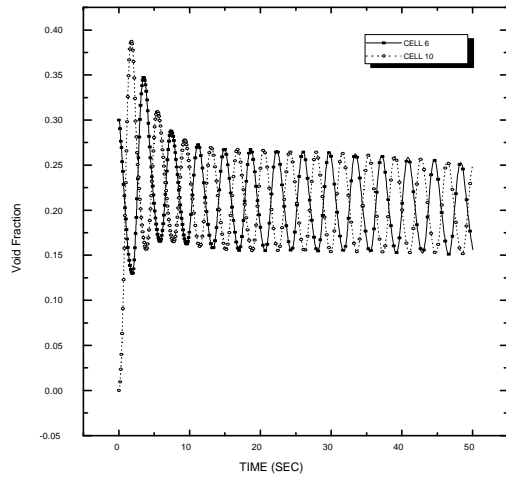


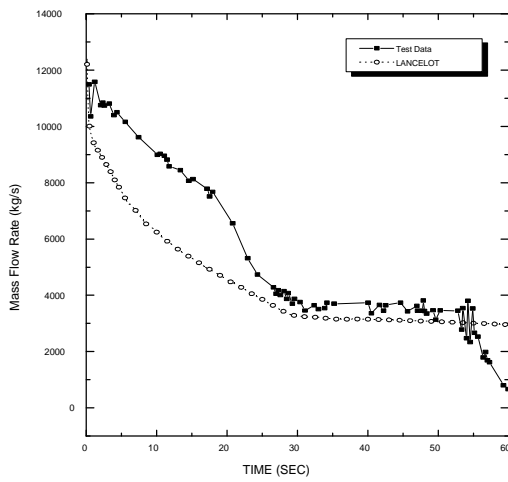
그림 1. LANCELOT 코드 평가 Schematic Diagram



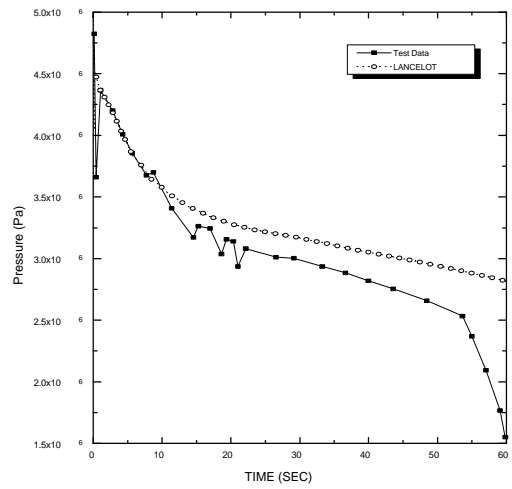
±x, 2. Drain & Fill 테스트



±x, 3. UTUBE 테스트



±x, 4. Marviken Test 24 테스트



±x, 5. Marviken Test 24 테스트