2004 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

하나로 핵연료조사시험설비의 고압주입탱크 오리피스 민감도 분석

Study on the Accumulator Orifice of HANARO 3-Pin Fuel Test Loop

지대영, 박수기, 박국남, 심봉식, 안성호, 이종민, 이정영, 김영진
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

하나로 노심 내의 조사공에 3봉 규모의 핵연료 조사시험에 대한 사용자 요구가 대두되어 3-Pin 핵연료조사시험설비 과제가 착수하게 되어 하나로의 IR 1 조사공 내에서 3 봉의 시험핵연료의 조사 시험을 수행할 수 있도록 시험 설비의 인허가와 건설을 위한 설계를 진행 중이다. 핵연료조사시험설비는 가압경수로 핵연료와 중수로 핵연료의 시험을 목적으로 함에 따라 두 가지 운전 모드로 설계되고 있다. 시험설비는 발전소의 운전 조건과 유사한 조건에서 운전되며 예상과도운전이나 배단파단 사고 시 고압주입탱크(accumulator)의 유출 유량으로 초기 사고를 진정 시키도록 된다. 본 논문은 가압경수로 운전 모드에 대하여 대형냉각수상실사고 및 소형냉각수상실사고에 대한 고압주입탱크 오리피스의 민감도 특성을 도출하기 위한 사고해석을 수행하였다. 계산 코드는 MARS 1-D 2.2(RELAP5/MOD3.3)를 사용하였다.

Abstract

As the test fuel capacity has been planned to be less than 3-pin in the HANARO IR 1 irradiation hole that is the users' request, the design of the 3-pin Fuel Test Loop(FTL) has been performing to archive licensing and construction. The FTL has PWR and CANDU operation modes as the test fuels. The operation condition of this facility is similar that of the power plant and the injection flow from the Accumulators relieves the Anticipated Operational Occurrence or Loss of Coolant Accident. This paper describes the characteristics and sensitivity of the Accumulators orifice under the LBLOCA and SBLOCA for the PWR operation mode. MARS 1-D 2.2(RELAP5/MOD3.3) code has been used to analyze these accidents.

1. 서 론

하나로 노심 내의 조사공에 핵연료 조사시험에 대한 사용자 요구가 대두되어 3-Pin 규모의 핵연료조사시험설비 과제가 착수하게 되었다. 3-Pin FTL은 개발된 핵연료봉을 하나로 노심 내에서 조사시험을 실시하기 위한 시설이다. 시험설비는 가압경수로 및 중수로 시험핵연료를 조사 시험 하도록 두 가지 운전모드를 갖으며 노내시험부와 노외공정계통으로 구성된다. 노내시험부의 주요 구성은 유동분리관, 내부압력관 및 외부압력관으로 나누어 볼 수 있으며 그림 1은 길이방향의 노내시험부 형상을 나타낸다. 노내시험부는 정상운전상태의 원자력발전소와 유사한 환경조건에서 시험핵연료의 노내 조사를 통하여 핵연료 연소, 기계적 건전성 및 부식시험 등을 수행하며 최대 3개의 핵연료 봉을 시험할 수 있도록 설계한다. 노외공정계통의 주요 계통은 다음과 같다.

- 주냉각수계통
- 비상냉각수계통
- 관통부냉각수계통
- 취출, 보충, 정화계통
- 폐기물저장 및 이송계통
- 시료채취계통
- 중간냉각수계통

상기 계통들은 두개의 격실에 나뉘어서 설치되며 격실 1은 주로 고온, 고압의 운전 조건에서 작동하는 기기로 구성되어 있고 격실 2는 상온, 상압의 기기로 구성된다. 주냉각수계통은 시험에서 요구되는 노내시험부의 입구 및 출구측에서의 유량, 압력, 온도조건을 유지하는 하나의 폐회로 냉각계통으로서 주냉각기, 가압기, 주냉각펌프, 주가열기 등으로 구성된다. 주냉각수계통은 두 대의 냉각펌프를 설치하여 정상운전시 한 대의 펌프가 운전되고 다른 한 대는 대기하는 대리 기능성 개념을 갖도록 하였다. 비상냉각수계통은 비상시 주냉각수계통에 냉각수를 공급하여 붕괴열을 제거하도록 설계한다. 비상냉각수계통은 별도의 비상펌프 없이 사고 시 고압주입탱크 내의 냉각수를 이용하여 사고를 진압한다. 비상냉각수계통은 고압주입탱크, 감압배기밸브로 구성되며 이들은 모두 다중화 되어있다. 관통부냉각수계통은 하나로 수조와 격실 1 사이의 주냉각수계통의 배관이 통과하는 콘크리트 관통부에 냉각기능을 제공한다. 취출, 보충 및 정화계통은 주냉각수 체적, 순도 및 화학적 특성을 제어한다. 폐기물 저장 및 이송계통은 방사성액체 또는 기체폐기물을 수집하여 액체폐기물은 하나로 액체폐기물계통으로 보내고, 기체폐기물은 하나로 환기계통으로 이송하는 역할을 한다. 시료 채취 계통은 핵연료 노내조사시험설비 유체의 수질을 주기적으로 감시하는데 사용한다. 중간냉각계통은 주냉각수계통 및 취출, 보충 및 정화계통에서 열을 제거하여 이를 하나로 이차 냉각계통으로 전달하는 기능을 수행하는 계통이다.

예상운전과도 및 냉각수상실사고 시의 잔열의 제거는 고압주입탱크 내에서 유출되는

냉각수를 이용하여 사고를 진정 시키도록 설계 된다. 이때 사고초기의 고압주입탱크의 주입 유량 및 잔열의 냉각특성은 고압주입탱크의 후단에 설치되는 오리피스의 면적에 좌우된다. 본 논문은 가압경수로 운전모드에서 격실 및 하나로 수조 내에서의 대소형냉각수상실사고에 대한 오리피스의 민감도 분석을 수행하였다.

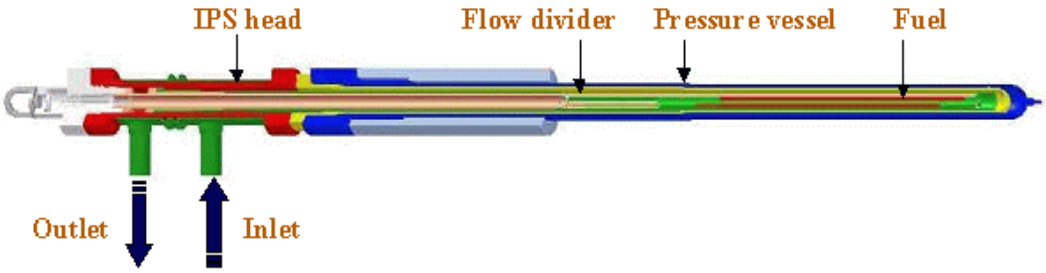

그림 1 노내시험부의 주요 구성

2. 해석방법

2.1 해석코드

대소형냉각수상실사고에 대한 열수력 해석은 한국원자력연구소에서 개발한 MARS (Multi-dimensional Analysis of Reactor Safety) 코드를 사용하였다. MARS는 RELAP5/Mod3에 기반한 1차원 계통해석 코드와 3차원 원자로해석 코드인 COBRA-TF를 주축으로 개발된 코드이다. 본 논문은 MARS 1-D 2.2를 사용하여 사고해석을 수행하였다.

2.2 모델링

시험설비 중 본 해석에 사용된 부분은 노내시험부, 주냉각수계통 및 비상냉각수계통으로 사고해석을 위한 노드 다이아그램은 그림 2와 같다. 표 1은 사고해석에 사용된 주요 입력 변수로서 증기배기관의 오리피스 면적을 $9.50\times10^{-6}m^2$로 일정하게 유지시키고 고압주입탱크 오리피스의 면적을 변화시켜 가면서 해석을 수행하였다. 수행된 사고해석 범위는 각 사고 별 가장 위해한 경우로 하여 다음의 경우에 대하여 수행되었다. 하나로 수조 내에서의 대형냉각수상실사고 시에는 계산 결과 heat-up이 되지 않으므로 본 해석에는 다루지 않았다.

- 격실 1에서의 대형냉각수상실사고(파단 크기 : 0.33 DEGB, 파단 위치 : V120)
- 격실 1에서의 소형냉각수상실사고(파단 면적 : 6%, 파단 위치 : V120)
- 하나로 수조 내에서의 소형냉각수상실사고(파단 면적 : 6%, 파단 위치 : V180)

표 1 사고해석 주요 입력 변수

입력 변수	사고해석 입력 값	설계값 대비 (%)
시험핵연료의 핵분열 출력 (kW)	66.15	105
압력관 내부구조물의 감마 열출력 (kW)	47.04	105
노내시험부 유량 (kg/s)	1.52	95
노내시험부 압력 (MPa)	15.288	98
노내시험부 입구 온도 (K)	306.3	102
고압주입탱크 압력 (MPa)	15.794	95
증기배기관 오리피스 면적 (m^2)	9.50×10^{-6}	

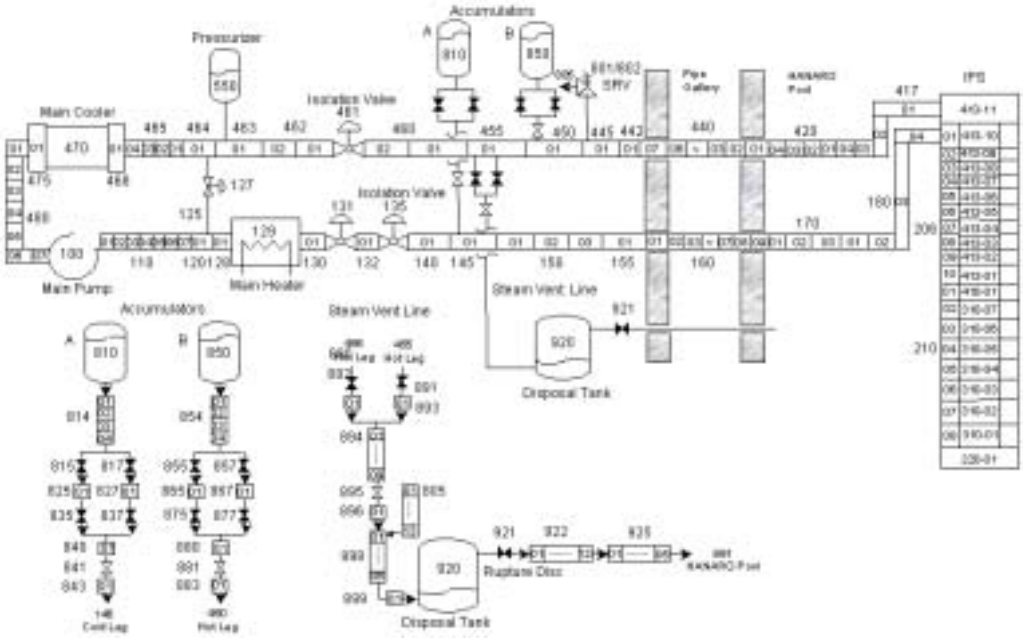

그림 2 배관 파단 사고해석을 위한 노드 다이아그램

3. 해석결과

2.1 오리피스 민감도

사고해석에 사용된 고압주입탱크 오리피스의 면적은 다음과 같다.

- $3.0\times10^{-6}m^2$
- $6.0\times10^{-6}m^2$
- $1.2\times10^{-5}m^2$
- $2.4\times10^{-5}m^2$
- $4.8\times10^{-5}m^2$

앞 절에서 설명한 사고 유형에 대하여 오리피스 면적에 따라서 최대피복관 온도의 거동은 그림 3과 같이 나타난다.

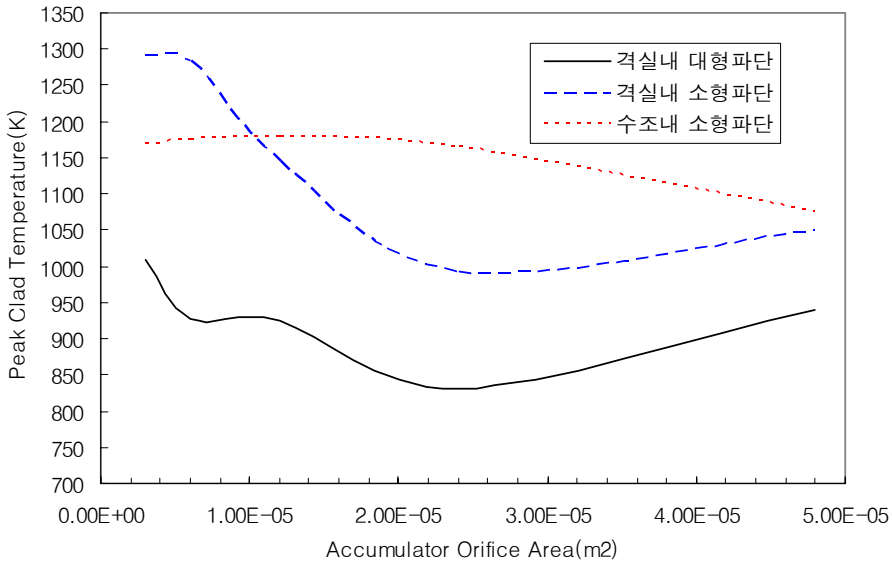

그림 3 고압주입탱크 오리피스 면적에 대한 사고 유형 별 최대피복관 온도

그림 3에서와 같이 격실 내에서의 파단 사고는 오리피스 면적이 $1.0\times10^{-5}m^2$에서 $3.5\times10^{-5}m^2$ 영역에서 최대피복관 온도는 최소가 됨을 알 수 있다. 수조 내에서의 소형냉각수상실사고 시에는 오리피스 면적의 증가에 따라 최대피복관 온도는 감소하였으나 그 정도는 크지 않았다. 그러나 모든 경우에 대하여 최대피복관 온도는 설계 기준 온도인 2200°F(1477K)에 미치지 못하였다.

2.2 임계유동 모델의 특성

임계유동 특성은 두 가지 모델에 대하여 조사되었다. 모델 1은 sub-cooled quality를 1.0, two phase quality를 0.14를 하였으며, 모델 2는 sub-cooled quality 및 two phase quality를 1.0으로 한 경우이다. 그림 4는 각 모델에 대한 최대피복관온도 결과를 나타낸다.

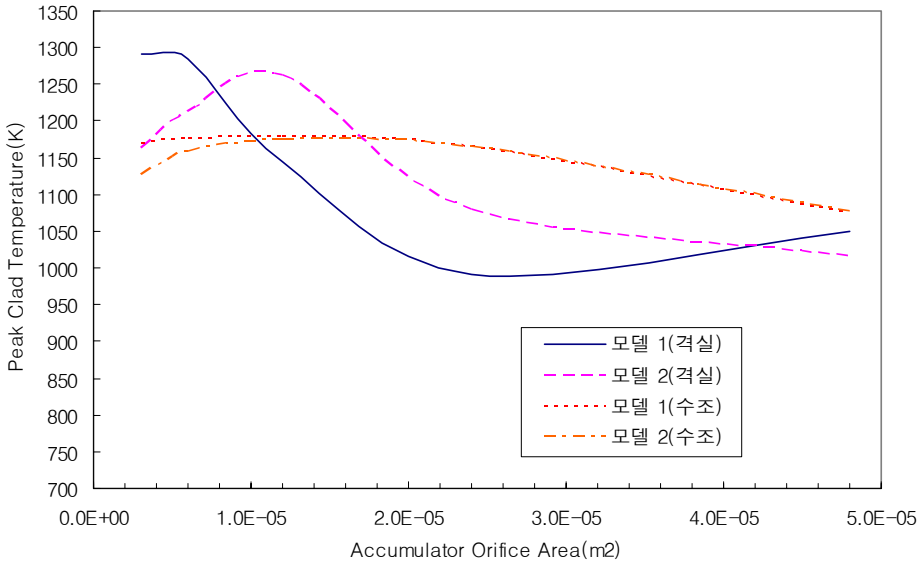

그림 4 고압주입탱크 오리피스 면적에 대한 임계유동 모델 별 최대피복관 온도

그림 4에서 최대피복관 온도의 거동이 수조 내에서는 유사하게 나타났으나 격실 내에서는 모델 2의 최대피복관 온도가 일반적으로 더 크게 나타나고 있다.

2.3 설비의 냉각능력 및 열수력 특성

그림 5, 6, 7은 격실 내에서 대형냉각수상실사고에 대한 최대피복관온도, 노내시험부 유량 및 격실 내에서의 압력을 시간에 따라서 계산한 결과이다. 최대피복관 온도는 오리피스 면적이 $2.4\times10^{-5}m^2$일 때 가장 작게 나타난다. 그러나 $2.4\times10^{-5}m^2$일 때와 $4.8\times10^{-5}m^2$일 경우의 노내시험부 유량이 초기에 다소 불안정을 나타내기도 한다. 비상냉각수계통의 냉각 능력은 확보됨을 알 수 있다. 배관 파단에 의하여 격실 내로 전달되는 압력은 오리피스 면적에 관계없이 모두 유사한 거동을 나타낸다.

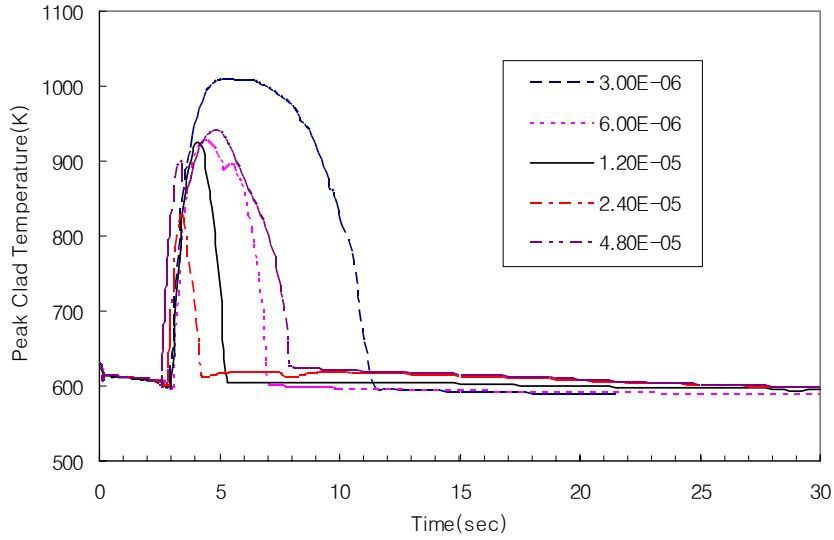

그림 5 격실 내의 대형냉각수상실사고 시
오리피스 면적에 대한 최대피복관온도

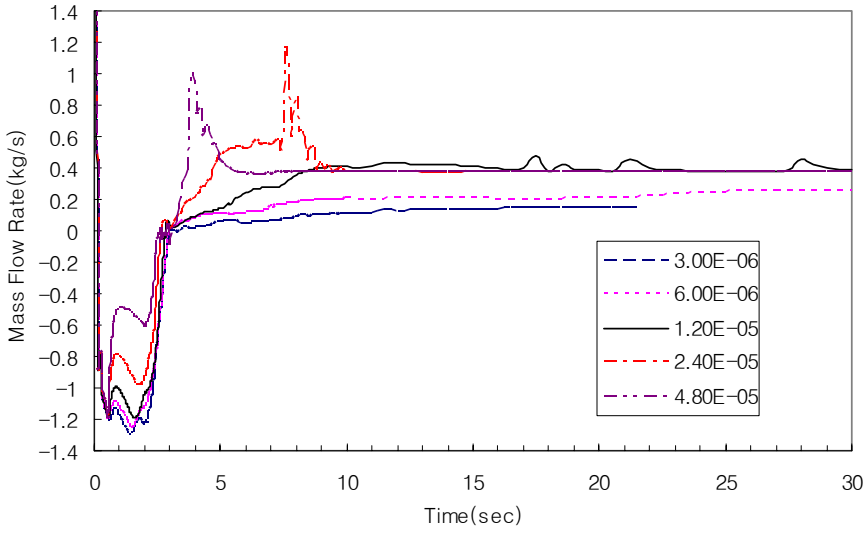

그림 6 격실 내의 대형냉각수상실사고 시
오리피스 면적에 대한 노내시험부 유량

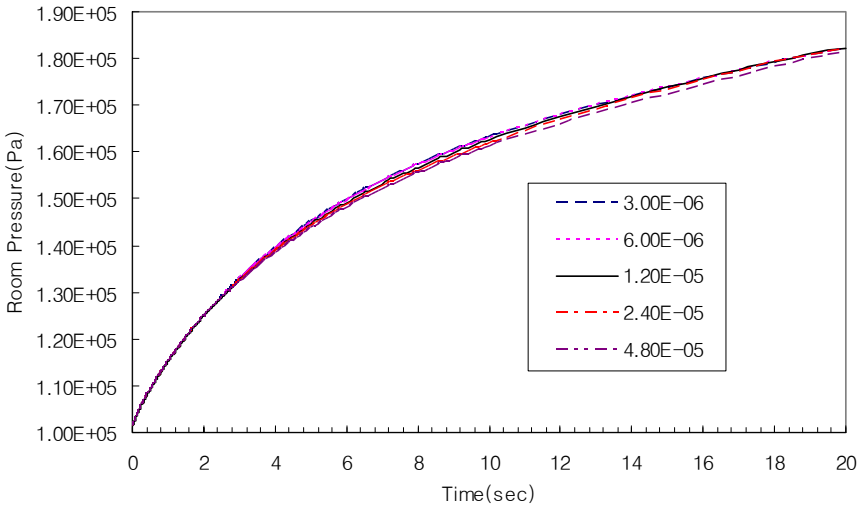

그림 7 격실 내의 대형냉각수상실사고 시
오리피스 면적에 대한 격실 내 압력

4. 결론

핵연료조사시험설비의 가압경수로 운전 모드에 대하여 격실 및 하나로 수조 내에서의 대소형냉각수상실사고 시 고압주입탱크 오리피스 면적에 대한 민감도 분석을 수행하였다. 해석 결과 격실 내에서의 배관 파단사고는 오리피스 면적이 $1.0\times10^{-5}m^2$에서 $3.5\times10^{-5}m^2$ 영역에서 최대피복관 온도가 최소로 됨을 알 수 있었다. 수조 내 소형냉각수상실사고에서는 오히려 이 영역에서 최대피복관 온도가 증가하였으나 큰 변화를 보이지는 않았다. 최대피복관 온도는 모든 경우에 대하여 핵연료 설계 기준 온도인 2200°F(1477K)에는 미치지 못하였다. 이것은 본 시험설비의 비상냉각수 계통이 사고 초기에 잔열을 제거하기 위하여 적절히 대응하고 있음을 나타낸다. 본 해석은 냉각수 상실 사고에 대하여 수행된 고압주입탱크 오리피스 민감도 분석이며 필요 시 증기 배기관 오리피스의 특성 연구가 있어야 할 것이다. 또한 예상운전과도에 대한 특성 연구와 해석의 불확실성에 대한 연구가 계속적으로 수행되어야 할 것이다.

후기

본 논문은 과학기술부의 원자력중장기 연구개발사업의 재정을 지원 받아 수행한 연구 결과입니다.

참고문헌

1. “하나로 안전성분석보고서”, KAERI/TR-710/96, 한국원자력연구소, 1996.
2. C. G. Seo, "Linear Heat Generation Rate of PWR 3-Pin at In-Pile Test Section in IR1 Hole," Memorandum, HAN-RR-CR-031-03-016, 2003.
3. W. J. LEE et. al., "Development of a Multi-dimensional Realistic Thermal Hydraulic System Analysis Code, MARS 1.3 and Its Verification," KAERI/TR-1108/98, Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon, 1998.
4. 지대영 외, “핵연료노내조사시험설비의 사고해석을 위한 배관 입력자료”, KAERI/TR-2622/2003, 2003.
5. 지대영 외, “예상운전과도와 배관파단 사고 시 3-Pin FTL 고압주입탱크의 냉각 능력 평가를 위한 연구”, IFM-P01-WS2003, 하나로 Workshop, 2003.