

6인치 저온관 파단사고 및 DVI 배관 파단사고에 대한 종합효과
실험장치의 열수력 상사성 검증을 위한 MARS-1D 예비계산

Pre-Test Analysis of an Integral Effect Test Facility for Thermal
Hydraulic Similarities of 6 inches Cold Leg Break and DVI Line
Break using MARS-1D

어동진, 박현식, 최기용, 권태순, 백원필
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

한국원자력연구소에서 제작예정인 원자로 열수력 종합효과 실증 실험장치가 참조발전소인 APR1400과 상사성을 유지하는지 고찰하기 위하여 저온관 파단 소형냉각재 상실사고와 DVI배관 파단사고에 대한 예비분석을 수행하였다. 현재 KAERI-ITL은 APR1400 (한국 차세대 원전) 대비 Full-height 및 1/310의 체적척도비로 축소 설계되어 있다. 동일한 제어논리와 사고 시나리오를 적용하여 KAERI-ITL과 APR1400 사이의 상사성을 최적 다차원 코드인 MARS 해석코드를 이용하여 평가하였다. 분석결과 KAERI-ITL과 APR1400은 SBLOCA와 DVI 배관 파단사고에 대해 각각 비슷한 열수력적 거동을 보임을 알 수 있었다. 또한, KAERI-ITL 설계에 적용된 체적척도법이 APR1400과 실험장치사이의 상사성을 유지하는 결과를 보임을 확인하였다.

Abstract

Pre-test analyses of a small-break loss-of-coolant accident(SBLOCA) and a DVI line break accident, have been performed for the integral effect test loop of Korea Atomic Energy Research Institute (KAERI-ITL), the construction of which will be started soon. The KAERI-ITL is being designed with a full-height and 1/310 volume scale based on the design features of the APR1400 (Korean Next Generation Reactor). Based on the same control logics and accident scenarios, the similarity between the KAERI-ITL and the prototype plant, APR1400, is evaluated using the MARS code. It is found that the KAERI-ITL and APR1400 have similar thermal hydraulic responses during the transients under the identical accident scenarios. It is also verified that the volume scaling law, applied to the design of the KAERI-ITL, gives reasonable results to keep the similarity between APR1400 and KAERI-ITL.

1. 서 론

참조발전소인 APR1400을 1/310의 체적축소비로 설계한 종합실증실험장치(KAERI-ITL)가 중-소형 냉각재상실사고시 발전소와 열수력적 상사성을 유지하는지 고찰하기 위하여, 6인치 저온관 파단사고와 8.5 인치 DVI 배관 가상 파단 사고에 대한 해석을 수행하였다. 사고해석을 위해서 최적분석코드인 MARS(Lee et al., 1999, Jeong et al., 1999)의 1-D 모듈을 이용하였으며, 동일한 사고 시나리오에 대해서 APR1400과 KAERI-ITL에 대해 독립적으로 해석을 수행하여 비교 분석하였다. MARS 2.0 코드는 RELAP5/MOD3.2.1의 일차원적인 모듈(INEL, 1998)과 COBRA-TF의 삼차원적 모듈(Thergood et al., 1983)을 통합하면서 내부 구조가 개선된 사고해석 코드로서 한국원자력연구소에서 개발되었다. 코드개발과정에서 많은 개선된 모델들이 코드에 삽입되어 코드의 예측능력이 증가하였고, 사용자로 하여금 보다 친숙하게 접근할 수 있도록 하였다. 현재 MARS 2.0 버전에는 RELAP5/MOD3.2.2-version 9(Sciencetech, 1999)의 새로운 개선 사항이 보완되어 있다. MARS코드는 경수로의 과도상태 동안 일차원 혹은 삼차원적인 열수력 현상과 핵연료의 반응을 분석할 수 있는 능력을 가지고 있다. 본 예비해석에서는 RELAP5/MOD3의 개선된 모델을 반영하고 있는 MARS 일차원 모듈을 사용하였다. 강수부내에서의 다차원적 현상을 모의하기 위해서, 세 방향의 유로구조에 대한 정보를 입력하여 각 방향으로 일차원적인 운동량 방정식을 적용하도록 하였다. 이러한 형태는 해당방향으로의 속도에 의해 이송되는 운동량을 취급할 수 있는 장점을 가진다(Sciencetech, 1999).

본 연구에서는 대상사고로서 SBLOCA와 DVI 배관 파단사고를 선정하여 참조발전소와 축소모의 실험장치의 사고해석을 비교 수행하였다. 참조발전소의 경우, (1) 저온관의 펌프 토출구측에 6" 크기의 파단과 (2) DVI 8.5" 배관의 파단을 각각 가정하였고, KAERI-ITL에는 참조발전소 해당 파단 크기의 1/310의 면적축소비를 동일한 위치에 적용하였다. 모의 결과를 토대로 두 계통, 즉 참조발전소와 KAERI-ITL의 열수력적 상사성을 고찰하였다. 주요 비교대상인자로서 노심의 압력, 파단유량, 피복재 온도, 노심, 강수부의 수위와 안전주입유량을 고려하였다. 열수력적 상사성 비교의 관점은 비교대상인자가 사고의 경과에 따른 천이 거동의 추종성과 각 사고시점 및 주요 변화 시점에서의 참조원자로의 예측치와 비교되는 상대적 크기이다.

2. 계통해석 모의 방법

원자로 용기

그림 1은 KAERI-ITL의 노심 및 강수부를 나타내고 있다. 그림 3 과 그림 4에서 보듯이 APR1400의 강수부는 6개의 수직파이프로 구성된 병렬 채널로 모의되었으며, 각각은

원주방향으로 60° 씩 절단한 강수부 수직 유로 단면적을 갖는다. 각 강수부 모의 수직 파이프는 다시 10개의 수직노드로 구분되며, 강수부에서의 다차원현상을 모의하기 위하여 각 수직파이프를 원주와 접선 방향으로 Cross-Flow-Junction을 이용하여 횡적으로 연결하였다. 원주 방향으로 첫 번째, 세 번째, 네 번째, 그리고 여섯 번째 수직 파이프에는 4개의 저온관과 4개의 DVI 배관이 연결되고, 두 번째와 다섯 번째 수직파이프에는 2개의 고온관 노즐이 설치되어 있는 공간을 가지고 있다. 이러한 노드 구성시 강수부의 각 채널은 수직과 수평의 이차원 공간을 구성하여 축 방향과 횡유동의 거동을 모의하게되나 반경 방향을 포함하는 3 차원적 강수부 거동을 모의하는 것은 아니다. 4개의 저온관과 4개의 DVI 노즐은 강수부 외벽에 수직방향으로 연결되었다. 원자로의 노심부는 4개의 수직 채널로 분리하여 각 각 평균 노심채널, 고온노심 채널, 노심 Shroud 우회채널, 그리고 노심 안내관 채널로 모의하였다. 노심입구에서 분리되어 노심 영역을 경유한 각 채널의 냉각수는 원자로 용기의 상부 플레넘에서 다시 모여져 두 개의 고온관으로 방출된다.

한편, KAERI-ITL 원자로 용기의 설계는 참조발전소인 APR1400의 그것과 다소 차이가 있으며, 특히 강수부 영역에서는 그 차이가 두드러진다. 그림 1과 같이 KAERI-ITL은 축소모의 설계과정에서 줄어든 강수부 유동단면적에 따른 상사성 왜곡현상을 완화하기 위해 외장형 강수부로 설계되었다. 본 분석에서는 DVI배관과 저온관이 연결되어 있는 강수부 영역에는 참조발전소 분석과 유사하게 원주방향으로 60°로 구분된 6개의 수직 파이프 모델을 적용하였고, 각 수직 파이프는 다시 5개의 수직 노드로 나누었다. 강수부의 상부 및 하부영역은 각각 단일관으로 모의하였다. 현재 KAERI-ITL 설계에는 노심 Shroud 우회 채널이 고려되고 있지 않고, 해당부분 체적은 강수부에 편입되어 있다. 노심 유동은 크게 평균 노심 채널과 안내관의 유동으로 구분하였다. 따라서 현재 KAERI-ITL 설계에서는 노심우회유동을 안내관과 Key Alignment 모의관으로 단순화하였고, 이러한 설계특성을 분석방법론에 그대로 적용하였다. 전체 노심 유량대비 우회유량비는 우회유로의 유동손실계수를 변화하면서 참조발전소에서의 우회율비가 보존되도록 하였다.

증기발생기와 증기관

APR1400은 두 개의 동일한 형태의 증기발생기를 가지고 있고, 각각의 증기발생기에서 생성된 증기는 공동구에 모여져서 터빈으로 전달된다. 코드모의를 위한 증기발생기 모델은 강수부와 Economizer, 가열부와 상승부, 증기건조부, 그리고 증기돔을 포함하고 있다. 그림 2는 KAERI-ITL의 증기발생기 개념도이다. 강수부가 외장형으로 되어있고, 증기건조부가 제거된 사항을 제외하고는 APR1400의 설계 특성을 그대로 유지하였다. 따라서 증기발생기 모의를 위한 모델도 참조발전소의 그것과 유사하다.(그림 3, 4참조) KAERI-ITL의 증기배관은 전체 시스템의 축소비인 1/310보다 작은 직경을 가진다. 이는 노심의 출력이 축소비에 따른 전체 출력에 대해서 15%에 대비한 설계이기 때문인데, 본 분석에서는 실험장치와 APR1400의 상사성을 분석하는 것을 일차적인 목적으로 하고 있으므로, 노심출력은 축소비에 따른 최대 열출력을, 그리고 증기배관의 직경은 참조발전소의 1/310을 가정하였다.

일차계통 배관

APR1400의 일차계통배관은 크게 고온관, 저온관과 중간관의 세 영역으로 구분할 수 있다. KAERI-ITL의 설계형태는 참조발전소와 동일하므로 각각의 분석은 동일한 모델을 적용하였다. (그림 3, 4참조) 수평관 부분은 Froude Number를 보존하고, 수직관 부분은 CCFL을 적용하여 설계하여 각 배관은 체적축소비의 단면적 축소비와는 다르다.

안전주입계통

APR1400의 안전주입계통은 4개의 기계적으로 독립된 트레인을 가지며, 각각은 원자로 용기에 직접 주입방식을 채택하고 있다. 각 각의 트레인은 하나의 고압 안전주입펌프와 안전주입탱크로 구성되어 있으며, 원자로 용기의 저온관 상부에 직접 주입된다. KAERI-ITL 역시 4개의 트레인과 DVI 노즐 직접 주입방식으로 설계되어 있다. 따라서 본 분석에서는 APR1400과 KAERI-ITL에 대해서 같은 사고제어 방법론을 적용하였다. 안전주입계통은 단일 고장 가정을 적용하여 저온관 파단사고시는 4 개의 안전주입탱크와 2 개의 고압안전주입 펌프가 작동하고, DVI 파단 사고시는 3개의 안전주입탱크와 1 개의 고압 안전주입 펌프가 작동되는 ECCS 계통을 적용하였다.

초기 및 경계조건

KAERI-ITL은 APR1400정상출력에 대한 축소비에 대하여 15% 출력을 최대 출력으로 하고 있다. 이것은 발전소에서의 저출력운전동안 붕괴열(Decay Heat) 혹은 그 외 추가적인 조건에 의해 유발되는 과도현상을 모의하기에 충분하다. 그러나 본 연구에서는 두 시스템, 즉 APR1400과 KAERI-ITL사이의 유사성을 평가하는 데에 초점을 두고 있기 때문에 실험장치를 위해 축소한 노심출력은 참조발전소 정상상태 출력에 기준하였다. APR1400의 과도현상을 모의하기 위해 정상출력의 102%와 ANS73의 decay heat의 1.2배를 적용하였고, KAERI-ITL의 모의에서는 원자로 동력학을 고려할 수 없기 때문에 참조발전소의 과도상태 출력을 입력으로 받아서 이 출력커브를 축소비에 따라 조정하여 직접적으로 계산에 반영하였다. 그 외 다양한 KAERI-ITL의 초기조건은 정상상태 모의 결과 부분에 자세히 기술하기로 한다.

정상상태와 저온관 파단 LOCA를 모의하기 위한 파단부 모델은 그림 5에 도시하였다. 저온관 파단 SBLOCA에서의 파단 부위는 펌프 토출구를 고려하였다. 파단유량을 계산하기 위하여 파단배관의 펌프측과 용기측으로부터 격납건물 체적으로의 두 개의 연결을 구성하였다. 과도해석을 위해서 격납건물 압력은 참조발전소와 KAERI-ITL경우 모두 대기압으로 고정하였다. SBLOCA동안 파단부위에서 기존의 저온관을 통한 정상적 방향의 유동이 클 것으로 예상할 수 있기 때문에 기존의 저온관 연결은 그림 5와 같이 그대로 유지하였다.

구조물 축적 에너지 모의

배관의 파이프 및 각 압력 용기의 벽면에 축적된 에너지는 계통의 냉각시 계통내의 유체로 역열전달이 발생한다. KAERI-ITL은 참조발전소와 동일한 설계 온도-압력으로 작동되므로 축소된 파이프의 벽 두께비가 증가하여 구조물의 축적에너지 비가 증가한다. 본

연구에서는 파이프를 Schedule 160의 파이프 두께를 갖는 구조물 모델과 해석적으로 구조물의 두께가 zero 인 열구조물 축적에너지 완전 배제 모델을 비교하였다.

3. 분석결과

정상상태 분석 결과

과도상태 분석을 위해서는 계통의 정상상태 조건이 초기조건으로 제공되어야 한다. KAERI-ITL 정상상태 주요 코드계산 결과를 표 3에 정리하였다. 이 표에서 KAERI-ITL 설계값은 APR1400의 해당값을 이론적인 척도비를 적용하여 얻어진 값이다. KAERI-ITL의 설계값과 그 척도비는 표 2와 1에 각각 정리하였다. 노심 우회유량은 노심 Shroud 유동, 안내관 유동, 용기 출구노즐의 갭 유동, 그리고 Alignment Key를 통한 유동으로 구분할 수 있다. 본 계산에서는 안내관 우회유량에 노심 Shroud 우회유량을 포함시켰고, Alignment Key를 통한 우회유량에는 노심 출구노즐 갭을 통한 우회유량이 포함되었다. 각각의 우회유량은 설계값과 최대 1.7%의 오차를 가진다. 원자로 용기내에서 주 냉각재 유로를 따라 발생하는 전체 압력강하는 참조발전소와 KAERI-ITL에서 거의 일치하도록 하였으며 세부 압력강하분포는 다소의 불일치가 존재한다. KAERI-ITL에서 노심상류측과 핵연료다발부분에서의 압력강하는 참조발전소의 그것보다 각각 7.2%와 10.3% 큰 반면, 노심 출구측의 압력강하는 참조발전소에 비해 22% 작은 값을 가진다. 이러한 압력강하 분포상의 차이는 체적척도법에 의해 축소된 실험장치가 강수부와 핵연료다발부에서 작은 갭 크기로 인해 상대적으로 큰 마찰압력을 느끼기 때문이다. KAERI-ITL의 일차측 압력은 가압기 상부기준으로 참조발전소의 그것과 동일하다. 정상상태 계산결과는 KAERI-ITL의 증기발생기에서 열전달량이 참조발전소의 1/310로 축소된 그것과 잘 일치하고 있음을 보여주고 있고, 따라서 증기발생기 출구에서의 증기 방출량이 급수량과 같은 값으로 일정하게 유지되었다. 실험장치에서의 증기발생기 재순환비는 설계치에 비해 다소 작은 값을 가지는데, 증기발생기 내부의 구체적인 설계가 지금 현재 진행중이기 때문에 상세 설계를 반영하여 추후에 수정될 것이다. 일차측 냉각수 유량과 온도는 설계값과 잘 일치하며 그 오차는 각각 1.6%, 0.2%이다. 전반적으로 KAERI-ITL 정상상태 계산결과는 설계값과 잘 일치하는 결과를 보여주고 있다.

6" 저온관 파단 SBLOCA 분석 결과

참조발전소와 KAERI-ITL의 상사성을 분석하기 위하여 참조발전소에서 원자로 동력학을 이용하여 계산된 출력곡선을 계통축소비에 따라 축소하여 KAERI-ITL의 히터출력으로 가정하였다. KAERI-ITL은 참조발전소에 대해서 1/310의 축소비를 가지므로 두 시스템의 각종 열수력 인자의 비교는 아래와 같은 축소비에 따라 수행하였다.

출력, 유량 : 1*(ITL): 1/310*(참조발전소)

수위, 온도, 압력 : 1*(ITL): 1*(참조발전소)

SBLOCA가 발생한 후, 참조발전소의 일차측 압력은 급격히 감소하여 포화상태에 도달

하였다. 이 기간을 Subcooled Blowdown 기간이라고 하며, 이후 포화상태 조건하에서 Two-Phase Blowdown을 유지하였다. 그림 6에서 보듯이 일차 냉각수가 계속 방출되면서 압력곡선은 점차적으로 감소하는 경향을 보이며 약 3 MPa 근처에서 두 번째 평탄한 곡선형태를 보였다. 시간에 따른 KAERI-ITL에서의 압력곡선은 참조발전소의 그것과 유사하게 진행되었다. 다만, 300초 이후의 기간동안 KAERI-ITL에서의 압력감소율이 참조발전소의 그것에 비해 다소 작은 결과를 보였다. 이는 다음과 같이 분석할 수 있다. KAERI-ITL의 운전압력은 참조발전소의 그것과 동일하기 때문에 고압장치에서의 운전을 위해 계통을 구성하는 요소들이 참조발전소와 같은 등급으로 설계되어야 한다. 따라서 KAERI-ITL에서의 구조물이 가지는 질량은 참조발전소에 대비해 산출되는 값에 비해 크다. 두 시스템의 압력감소율이 사고 후 차이를 보이는 이유는 KAERI-ITL 일차계통내에서의 저장에너지가 참조발전소의 축소비에 따른 값에 비해 크기 때문으로 분석될 수 있다. 이는 열구조물을 완전히 배제한 No-Heat Structure 모델의 결과가 300초 이후의 압력이 더 낮게 유지되고 있음에서 알 수 있다. 이러한 결과는 KAERI-ITL 일차계통의 열구조물의 축적에너지의 크기를 과도하게 크게 모의하였음을 의미하며, 실험장치 구조물의 두께 축소비가 계통 축소비에 비해 크기 때문에 나타나는 현상이다.

그림 7은 두 시스템에서의 파단유량을 비교한 결과이다. 그림에서 보듯이 KAERI-ITL에서의 파단유량곡선은 참조발전소와 거의 일치하고 있음을 알 수 있다. 임계유량은 파단상류노드의 압력, 온도와 건도조건에 의존하기 때문에 이러한 파단유량 결과는 실험장치에서 일차계통의 열수력적 조건이 참조발전소의 그것과 비교적 잘 일치하고 있음을 반증하는 것이다. 적산파단유량은 그림 8에 제시하였으며 두 시스템 결과가 잘 일치하고 있다.

KAERI-ITL 모델에서는 Hottest Rod에 대한 모의를 하지 않았기 때문에 연료봉 피복재 온도에 대한 비교는 평균 연료봉에 대해 수행하였다. 그림 9는 두 시스템에서 핵연료봉을 모의하는 노드 중 밑에서 14번째의 피복재 온도를 비교한 결과로서 분석결과 두 시스템 모두 수직방향으로 상기 위치에서 최대의 피복재 온도가 도출되었다. 참조발전소에서는 국부적인 침투 피복재온도가 사고 약 260초 후에서 발생하였고, 그 온도는 665K 이었는데 반하여 KAERI-ITL에서는 침투값이 나타나지 않았다. 이의 원인으로 이 시간 근방에서 KAERI-ITL의 경우 노심의 노출 상태가 미미하였고,(그림 10) 이러한 현상이 피복재온도의 상승을 막은 것으로 분석된다. 상기 시간대를 제외한 전 분석기간동안 참조발전소의 피복재 온도는 KAERI-ITL과 거의 일치하는 경향을 보이고 있다.

KAERI-ITL에서의 노심수위는 참조발전소와 유사한 경향을 보이고 있지만 수위회복이 참조발전소에 비해 느리게 나타나고 있다. 이러한 현상은 축소 설계된 실험장치가 가지는 상대적으로 큰 저장에너지가 사고 후기 기간동안 주요하게 작용하고 있기 때문으로 고려할 수 있다. 구조물의 저장에너지를 완전 배제한 경우, 노심의 수위회복이 빨라지는 결과를 보이고 있다.(그림 10) 따라서 실제 설계시에는 실험장치의 저장에너지를 줄이는 방안이 강구되어야 할 것으로 판단된다. 노심수위 회복의 시점은 600 초 근방으로 나타나고 있으며 안전주입탱크로부터의 냉각수 유입시점에 해당한다.

강수부의 체적은 참조발전소에 비해 1/221.07의 축소비를 가진다. 이 값은 전체적인 축소비인 1/310보다 큰 값이다. 따라서 KAERI-ITL에서의 수위변화는 참조발전소의 그것에 비해 완만하게 이루어 질 것으로 예상할 수 있고, 그림 11에 그 현상이 잘 나타나고 있다. APR1400에서 안전주입탱크에 의한 유량은 KAERI-ITL에 비해 빨리 형성되고 있다. 이는 전술한 바 있는 시스템 압력경향에 따른 것으로서 그림 11과 그림 12를 연결지어 보면, 강수부 수위가 안전주입탱크 주입시점으로부터 급격히 상승하고 있음을 보여주고 있다. 또한 강수부 수위변화곡선으로부터 안전주입탱크가 주입되기 시작하는 이후 발생하는 응축진동현상을 발견할 수 있다. 구조물 축적에너지의 효과에 의한 안전주입탱크 작동개시 압력의 도달 시간이 300 초 이후의 완만한 계통 감압의 경향에 의해 약 60~70 초 정도 지연시키거나 앞당길 수 있음을 보여 주고 있다. 즉, 강수부의 수위 회복시점 및 수위가 구조물 축적에너지를 포함 여부에 따라 크게 영향을 받고 있다.

안전주입 탱크는 주입지점의 압력이 4MPa이하로 떨어지는 시점부터 주입이 되며 계산결과 참조발전소에서는 460초, KAERI-ITL에서는 620초로 나타났다. 이러한 주입시점의 차이는 계통의 압력이 설정치 이하로 떨어지는 시점이 차이가 나기 때문이다. 그림 12에서 보듯이, 두 시스템에서 안전주입탱크 주입이 시작되면서 상당한 응축진동이 발생하고 있으며 참조발전소에서 더 왕성하게 나타났다.

그림 13의 Loop Seal Void Fraction 곡선은 소형배관의 축소 실험장치에서도 Loop Seal Clearing 현상이 발생하고 있음을 보여주고 있다. 150초와 약 300초에서 발생하는 이러한 현상은 참조 발전소 보다는 다소 빠르게 나타나고 있다.

DVI 배관 파단사고 분석 결과

DVI 배관 파단사고의 주요 결과를 그림 14부터 19까지에 나타내었다. 그림 14와 같이 계통의 압력 거동은 참조원자로와 비교적 잘 일치하고 있다. 노심은 사고 후 약 300초 근방에서 최대의 노출을 보인 후 참조원자로와 비교하여 매우 완만한 수위증가를 보이고 있다. 그리고 열구조물을 배제시킨 경우에는 훨씬 빠른 노심수위 회복이 발생하고 있다. 그림 16의 강수부 수위도 노심 및 강수부의 수위가 열구조물의 축적 에너지를 모의하는 지 여부에 더욱 민감한 결과를 보여주고 있다. Loop Seal Clearing 현상은 6인치 저온관 파단 사고보다는 더 큰 대유량의 증기 유동을 갖는 DVI 배관 파단 사고가 보다 선명하게 발생하고 있다. 그림 17을 보면 약 100초 근방에서 기포율이 거의 1로 되고 Loop Seal이 완전히 건조되고 있다. 그림 18 및 그림 19에 나타낸 바와 같이 파단류와 안전주입수의 유동은 비교적 잘 일치하는 것으로 판단된다.

3. 결 론

전반적으로 1/310의 체적축소비로 설계된 KAERI-ITL 실험장치에서 발생하는 과도 열수력 특성들이 참조 발전소에서 발생하는 주요 열수력 거동과 잘 일치하고 있음을 알 수 있었다. 따라서 KAERI-ITL의 설계는 참조발전소와의 열수력적 유사성을 유지하고 있다고 결론지을 수 있다. 그러나 노심의 수위 및 강수부에서의 수위는 참조원자로보다 훨씬

낮게 유지되었다. 이러한 현상은 구조물의 축적에너지에 의한 왜곡현상으로 분석되고 있으며 이에 대한 심도 있는 검토가 요구된다.

REFERENCES

1. KEPCO, Standard Safety Analysis Report for Korean Next Generation Reactor, KEPCO report (1999)
2. Y. J. Chung et al. Test Requirements for the KNGR DVI ECCS Performance Test, KAERI report, SA-DVI-99008 (1999)
3. C. H. Song et al., Scaling Analysis of the Integral Test Loop to Simulate Korean PWR Plants, KAERI/TR-1783/2001, KAERI (2001)
4. C. H. Song et al., Test Requirements for the Integral Test Loop to Simulate Korean PWR Plants, KAERI/TR-1771/2001, KAERI (2001)
5. W. J. Lee et al. Improved features of MARS 1.4 and verification, KAERI report, KAERI/TR-1386-99 (1999)
6. J. J. Jeong et al., Development of a multi-dimensional Thermal-hydraulic System Code, MARS 1.3.1 , Annals of Nuclear Energy, 26(18), 1611-1642 (1999)
7. INEL, RELAP5/MOD3.2.1 Code Manual, USNRC report, NUREG/CR-5535. (1998)
8. M. J. Thurgood et al., COBRA/TRAC: A Thermal-hydraulics Code for Transient Analysis of Nuclear Reactor Vessels and Primary Coolant Systems, USNRC report, NUREG/CR-3046 (1983)
9. Scientech, Inc., RELAP5/MOD3.2.2GAMMA Code Manual , USNRC report, Formerly NUREG/CR-5535 (1999)
10. H. S. Park et al., MARS input data for steady-state calculation of ITL, 53222-ITL-SA-2001001, KAERI Internal Report (2001)
11. C. H. Song et al., Specific Design of the KAERI Integral Test Loop (ITL) Facility , Proceedings of the Korean Nuclear Society Spring Meeting, Cheju, Korea, May (2001)

1. 주요 변수의 척도비

항 목	APR1400	KAERI-ITL
Pressure, Temperature	1	1
Volume, Height	1	1/310
Area	1	1/310
Diameter	1	$(1/310)^{0.5}$

2. APR1400 대비 KAERI-ITL의 주요치수

Design Parameter	APR1400	KAERI-ITL	Ratio
Normal Power, MWt	3983	1.93	2066.67
Primary System Pressure, MPa	15.51	15.51	1
Core Inlet Coolant Temperature, K	569.8	569.8	1
Core Outlet Coolant Temperature, K	598.2	598.2	1
Primary Loop Flow, kg/s	20992	67.71	310
Core Flow, kg/s	20362	65.95	308.72
Core Bypass Flow, kg/s	630	1.76	357.8
Total Pressure Drop in R. V., kPa	399.9	399.9	1
Number of SGs	2	2	1
Max. Heat Transfer Rate(MWt)/SG	1964	6.34	310
Number of U Tubes	12580	41	1
Steam/Feedwater Flow Rate/SG (kg/s)	801	3.648	307
Saturated Steam Pressure(MPa)	6.89	6.89	1
Saturated Steam Temperature(K)	558.2	558.2	1
Averaged U Tube Length(m)	19.48	19.12	0.982
Loop Flow (kg/s)	10495	33.86	310
Hot Leg Temperature (K)	323.89	323.89	1
Cold Leg Temperature (K)	290.56	290.56	1

표 3 KAERI-ITL의 정상상태 주요 결과

Parameter		Cal. Results	Design Value	Relative Deviation (%)	Remark
Reactor Vessel					
Flow (kg/s)	Total Core Flow	67.05	65.95	1.7	
	To Hot Legs	68.8	67.71	1.6	
	Guide Tube	0.5	0.5	0	Including Core Shroud Flow
	Alignment Keys	1.282	1.261	1.7	Including Outlet Nozzle Gap Flow
Temperature(K)	Vessel Inlet	564.7	563.8	0.2	
	Vessel Outlet	598.1	598.2	0	
	Temperature Rise	33.4	34.4	-2.9	
Pressure Drop (kPa)	Vessel Inlet - Core inlet	171.9	160.4	7.2	
	Core	129.5	117.4	10.3	
	Core Outlet - Vessel Outlet	95.2	122.1	-22.0	
	Total Pressure Drop	396.6	399.9	-0.8	
Steam Generator					
Flow (kg/s)	Feedwater Flow	3.648	3.648	0.0	SG A
	Steam Flow	3.62	3.648	-0.8	SG A
	To Downcomer	9.92			SG A
	Riser	13.57			SG A
	Recirculation Ratio	3.75	3.9	-3.8	SG A
Temperature(K)		555.03	558.2	-0.6	
Pressure(MPa)		6.61	6.89	-4.1	
Primary Piping					
Flow (kg/s)	Hot Leg	34.4	33.86	1.6	Loop A
	Cold Leg	17.2	16.93	1.6	Loop A
Pressure (MPa)		15.5	15.5	0.0	
Temperature (K)	Hot Leg	597.3	598.2	-0.2	
	Cold Leg	564.8	563.8	0.2	

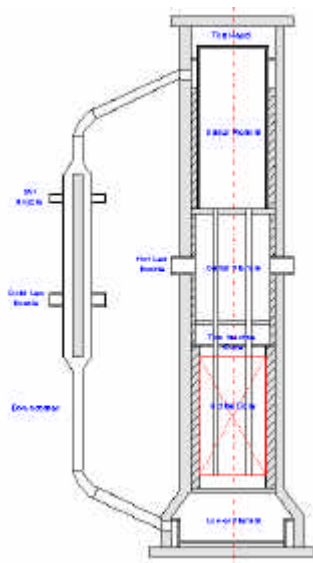


그림 1 KAERI-ITL
일차측 용기

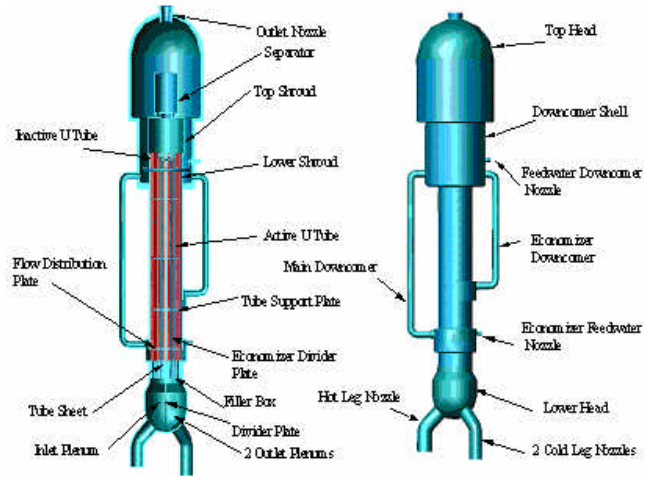


그림 2 KAERI-ITL 증기발생기

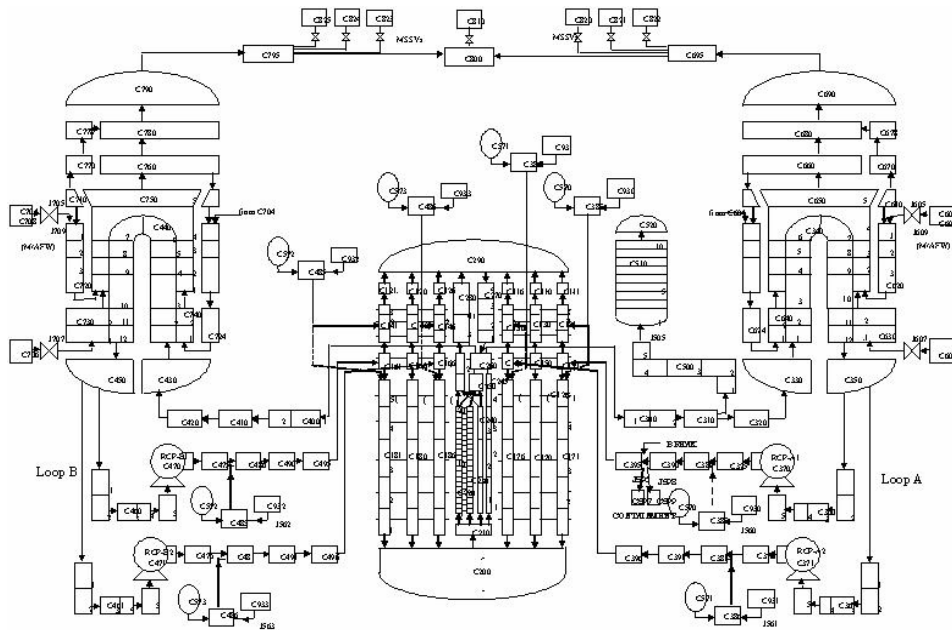


그림 3. APR1400을 위한 MARS 1-D Nodalization

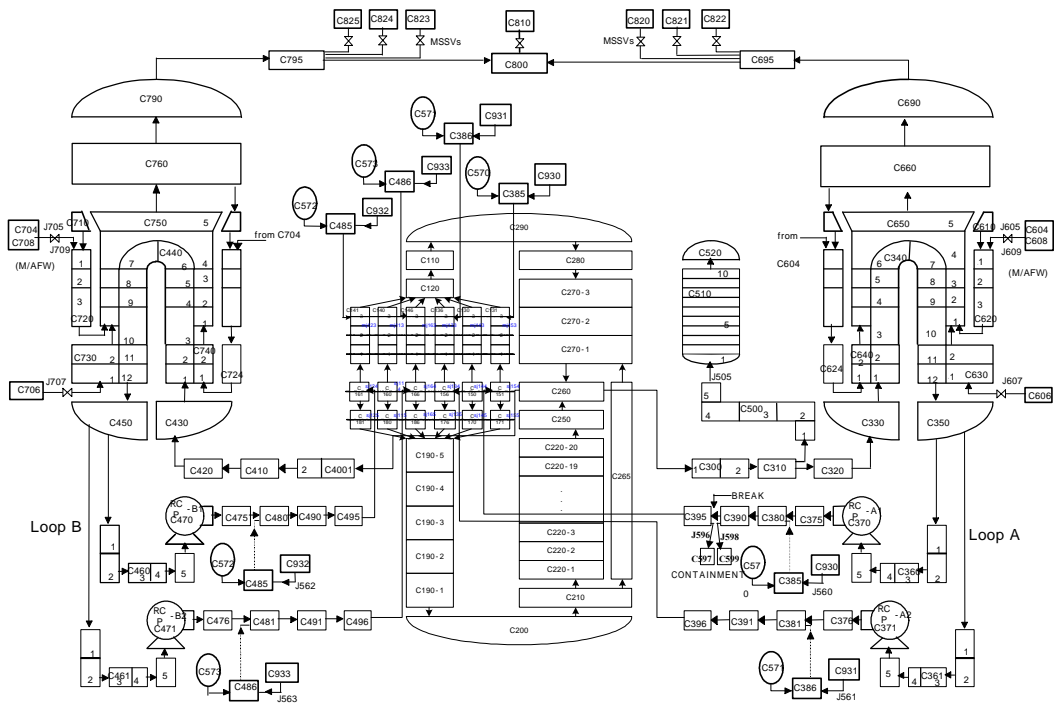


그림 4 KAERI-ITL를 위한 MARS 1-D Nodalization

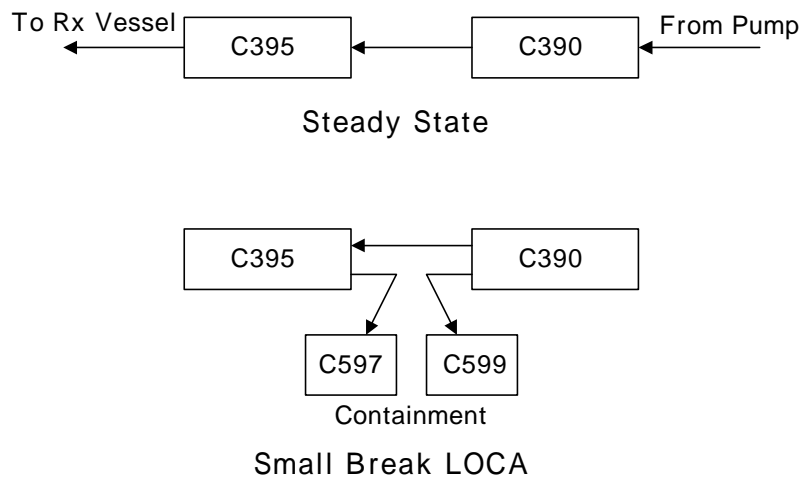


그림 5. 파단면을 위한 MARS 1-D Nodalization

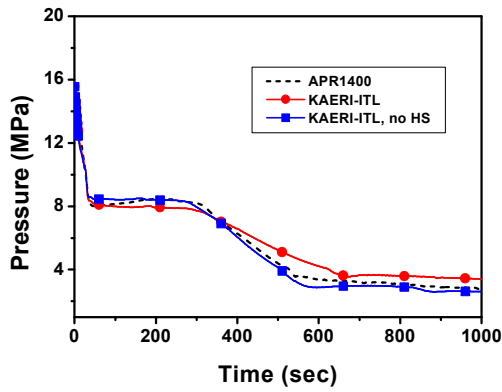


그림 6 가압기 압력 (6"저온관 파단)

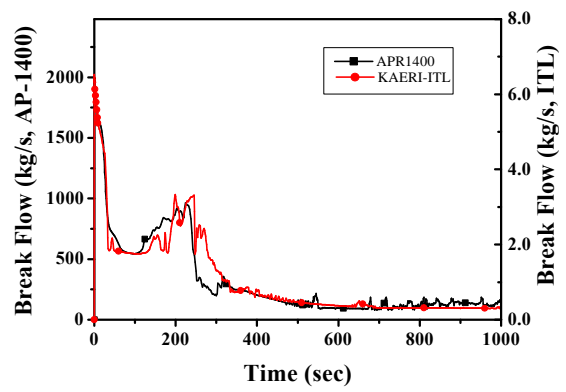


그림 7. 파단유량 (6" 저온관 파단)

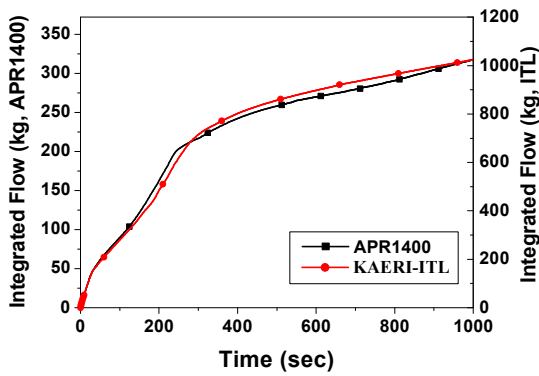


그림 8. 총 누적 파단질량 (6" 저온관 파단)

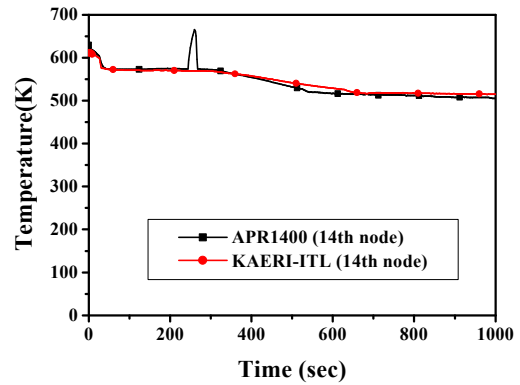


그림 9. 피복재 온도 (6" 저온관 파단)

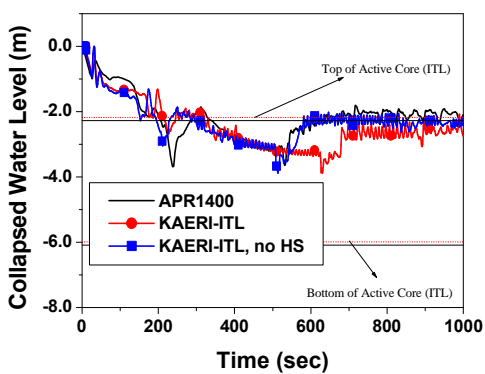


그림 10. 노심 수위 (6" 저온관 파단)

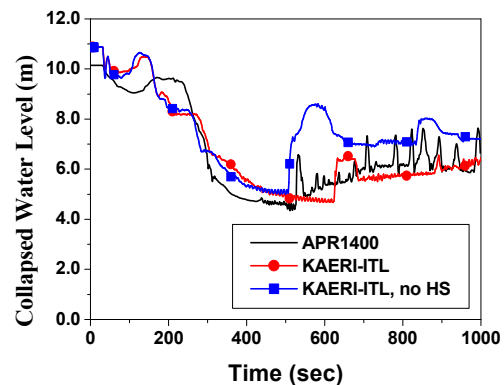


그림 11. 강수부 수위(6" 저온관 파단)

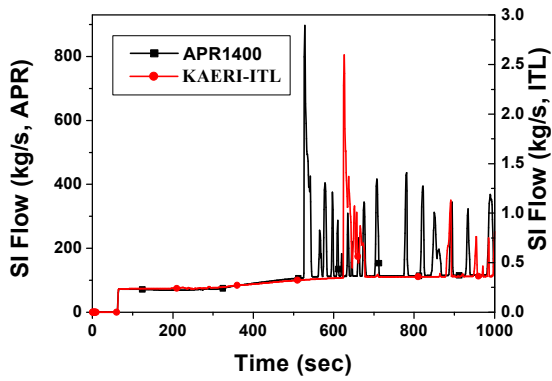


그림 12. 비상노심 냉각수 주입유량 (6" 저온관 파단)

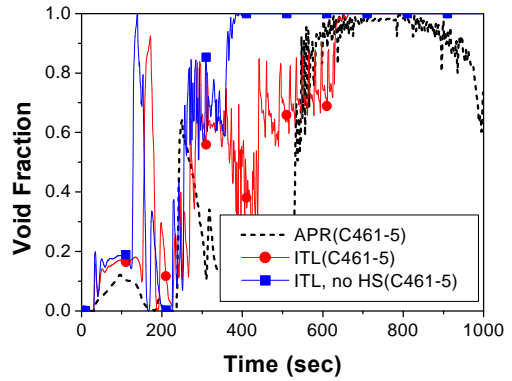


그림 13. Loop Seal 기포율 (6" 저온관 파단)

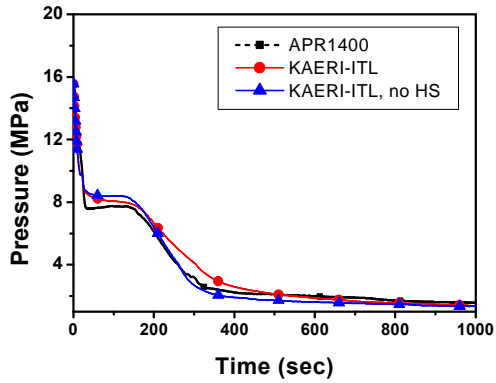


그림 14. 가압기 압력 (DVI배관 파단)

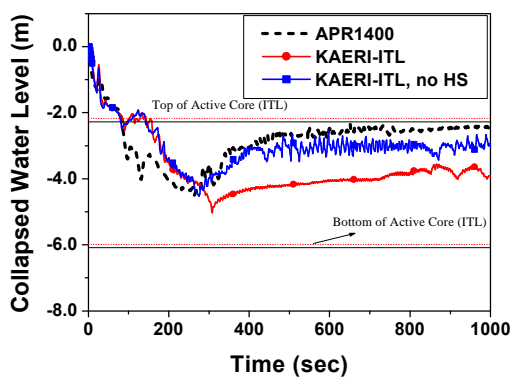


그림 15. 노심수위 (DVI배관 파단)

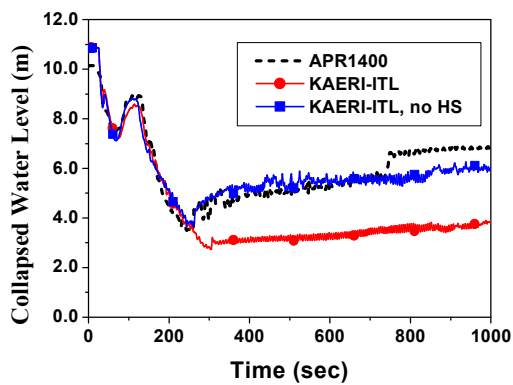


그림 16. 강수부 수위(DVI 배관 파단)

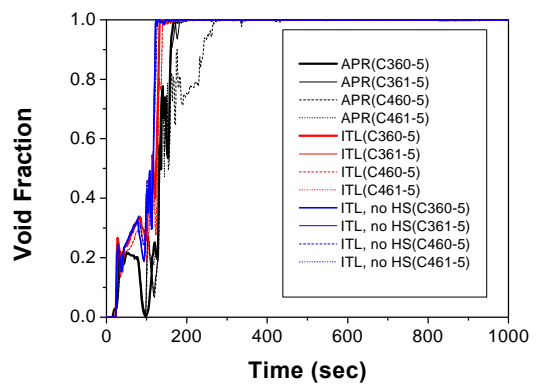


그림 17. Loop Seal 기포율(DVI배관 파단)

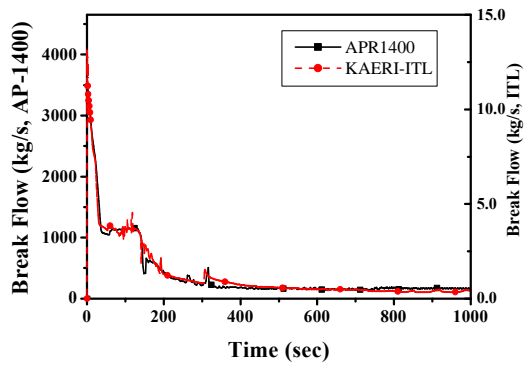
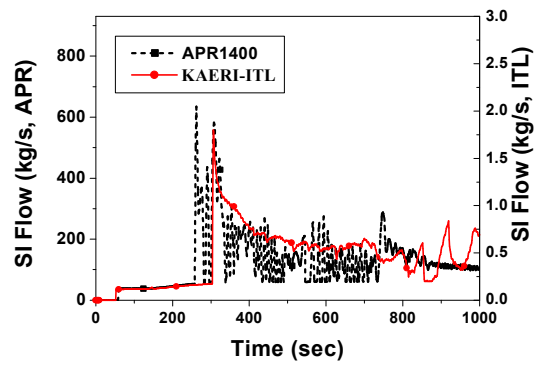


그림 18. 파단 유량
(DVI 배관 파단)



19.
(DVI 배관파단)