2003 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

원자로용기 외벽냉각시 원자로공동에서의 냉각수 순환유동에 대한 대형 공기주입 실험 예비 해석

Preliminary Analysis of Large Scale Air Injection Experiment on Coolant Circulation Flow in the Reactor Cavity under External Vessel Cooling

박래준, 하광순, 조영로, 김상백

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

APR 1400 원전의 원자로용기 외벽냉각시 원자로 공동에서의 장기 열수력 거동에 대한 연구의 일환으로서 RELAP5/MOD3 전산코드를 사용하여 차후 수행할 대형공기 주입 실험에 대한 예비해석을 수행하였으며, 실제 원전을 평가하기 위한 예비해석을 병행하여 수행하였다. 본 예비해석에서는 원자로용기 외벽냉각시 원자로용기와 단열재 사이 공간에서 냉각수 순환량을 평가하기 위하여 정상상태 계산을 수행하였다. 대형공기 주입 실험에 대한 예비해석 결과, 원자로용기 하반구로의 공기주입 분포는 냉각수 순환량에 거의 영향을 미치지 않았으며, 공기를 주입하는 경우가 열속을 입력하는 경우보다 냉각수 순환량이 약 4배 증가하는 것으로 나타났다. 냉각수 순환구 위치를 하부로 이동함에 따라 냉각수 순환량이 증가하였으나 그 증가폭이 점점 작아지는 것으로 나타났으며, 이 결과를 APR 1400 원전에 대한 검증 예비해석 결과, 냉각수 순환구 위치를 하부로 이동함에 따라 냉각수 순환량에 차이가 나타났으나 일관성 있는 결과를 보여주지는 않았다.

Abstract

As part of study on thermal hydraulic behavior in the reactor cavity under external vessel cooling in the APR 1400, preliminary analysis of steady state on further large scale experiment using air injection method and analysis on the actual plant have been performed to investigate coolant circulation flow rate between the reactor vessel and the insulation material using the RELAP5/MOD3 computer code. The RELAP5/MOD3 results of preliminary analysis on the air injection experiment have shown that air injection distribution is not effective on coolant circulation rate between reactor vessel and insulation material. The coolant circulation flow rate of the air injection case is four times higher than that of heat flux input condition. The change of coolant exit to lower position leads to increase in coolant circulation mass flow rate, but increasing rate is decreases. In preliminary analysis on the APR 1400, the change of coolant exit to lower position is effective on coolant circulation flow rate, but the variation trend is not same as the air injection experimental case.

1. 개요

원전에서 노심물질이 용융하는 중대사고 발생시 원자로용기가 파손(reactor vessel failure)되기 전에 원자로용기 외벽을 냉각(external vessel cooling)함으로써 노심용융물을 원자로용기 내에

가두어 두어 (IVR: In-Vessel corium Retention) 원자로용기 건전성을 유지하여 격납건물 관련 중대사고 현상을 미연에 방지하는 방안이 세계적으로 고려되고 있다[1]. 이와 같은 중대사고 관리 방안은 핀란드의 Loviisa 원전과 미국의 AP 600 원전에 반영이 되었고[2, 3] 국내의 APR 1400 원전에서도 이를 반영하였다[4]. 원자로용기 외벽냉각을 수행하였을 때 원자로용기가 건전성을 유지하기 위해서는 원자로용기 하반구에 형성된 노심용융물로부터 원자로용기로 전달되는 열량이 원자로용기 외벽에서 충분히 제거되어야 한다. 따라서 노심용융물에서 원자로용기 외벽으로 전달되는 열량을 결정하기 위한 연구[5, 6]와 원자로용기 외벽에서 냉각수로의 열전달 최대값인 임계열유속(Critical Heat Flux: CHF)에 대하여 많은 연구가 수행되었다[7, 8].

원전의 정상운전시 원자로용기 외벽에는 열손실을 최소화하기 위하여 절연물질을 설치하고 있다. 기존 원전에서 중대사고 발생시 원자로용기 건전성을 유지하기 위하여 원자로용기 외벽냉각을 수행하면 원자로공동(reactor cavity)에 공급된 냉각수가 절연물질을 통하여 원자로용기 외벽과 절연물질 사이의 공간으로 충분히 공급되고 원자로용기 외벽에서 생성된 증기가 방출되어야 한다. 또한 원자로 설계 때부터 원자로용기 외벽냉각을 고려하고 있는 원전에서도 원자로공동에 냉각수를 공급하였을 때 절연물질에 설치되는 냉각수 주입구, 원자로용기 외벽과 절연물질 사이의 공간, 절연물질에 설치되는 증기 방출구를 통하여 냉각수가 충분히 순환되는 순환유동이 형성되어야 한다. 따라서 중대사고시 원자로용기 외벽냉각으로 원자로용기 건전성을 유지하는 방안을 채택한 APR 1400 원전도 원자로공동에서 원자로용기 외벽과 절연물질 사이의 공간으로 충분한 냉각수 순환유동이 형성되는 가를 평가되어야 한다. 이와 같이 APR 1400 원전의 원자로용기 외벽냉각시 냉각수 장기 열수력 거동을 평가하기 위한 연구를 한국원자력연구소에서 진행하고 있다. 본 실험은 소형 가열실험과 공기주입 실험 및 대형공기 주입 실험으로 구분하여 진행하고 있다. 소형가열 실험은 이미 수행을 완료하였고 소형 공기주입 실험은 현재 실험을 수행하고 있으며, 대형 공기 주입 실험은 실험장치를 제작하고 있다.

본 연구에서는 APR 1400 원전의 원자로용기 외벽냉각시 원자로 공동에서의 열수력 거동에 대한 연구의 일환으로서 RELAP5/MOD3 전산코드[9]를 사용하여 차후 수행할 대형 공기 주입 실험을 예비 해석하였으며, 예비해석 결과를 APR1400 원전에 대한 예비해석으로 평가해 보았다. 본 해석에서는 원자로용기 외벽냉각시 원자로용기 외벽과 단열재 사이의 공간에서 형성될 수 있는 냉각수 자연순환 유량을 결정하기 위한 정상상태 계산을 수행하였다. 본 계산에서는 대형공기 주입 실험의 실험인자들 상세 실험영역을 결정하기 위하여 공기 주입 분포, 냉각수 주입구 면적, 냉각수 출구 면적 및 위치 등을 변화시키면서 순환 유동량 변화와 기포 분율 변화를 평가하였다. 또한 냉각수 출구 위치가 미치는 영향에 대한 공기주입 실험 예비 해석결과를 실제 원전에 대하여 검증하기 위해서 APR 1400 원전에 대한 예비해석도 병행하여 수행하였다.

2. 실험내용 및 방법

원자로용기 외벽냉각을 채택한 APR 1400 원전에서 원자로공동에 냉각수를 주입하였을 때

원자로용기 외벽과 단열재 사이의 공간에서 냉각수 거동을 평가하는 본 연구의 실험은 소형실험과 대형실험의 두 실험을 진행하고 있다. 소형실험은 APR 1400 원전의 원자로용기를 약 1/22로 축소 모의한 실험용기에 히터를 설치하여 가열하는 실험과 원자로용기 외벽에서 생성되는 증기 만큼의 공기를 주입하는 공기주입 실험으로 분리하여 진행하고 있다. 대형 공기주입 실험은 APR 1400 원전의 원자로용기 실제 높이를 1/2로 축소 모의하고 전체 1/2 sector를 모의하는 실험장치를 제작하고 있다.

그림 1-3은 대형 공기 주입 실험장치의 도면을 보여주고 있다. 본 실험장치에서 원자로용기는 APR 1400 원전을 기본으로 모의하였고 APR 1400 원전의 원자로용기 단열재는 아직 설계되지 않았기 때문에 울진 5,6호기 원자로용기 단열재를 기준으로 실험장치를 모의.설계하였다. 본 대형 공기 주입 실험은 APR1400 원전의 원자로용기와 외부 단열재 1/2을 실제 높이(원자로용기 하부부터 고온관과 저온관 설치 위치까지)의 1/2로 모의하는 실험장치를 제작하여 대기압에서 물과 공기를 사용하여 실험을 수행할 예정이다.

본 실험장치는 공기 주입 장치와 원자로용기 반구부분, 원자로용기 실린더 부분, 원자로용기 외부 단열재부분, 물 주입 탱크 및 관련배관, ICI(In-Core Instrumentation) 노즐과 shear key 부분, 계측 장치 등으로 구분할 수 있다. 공기 주입부는 원자로용기 하반구에서 원자로용기 외부로 공기를 주입하는 부분으로서 공기 주입 탱크와 공기 주입관 및 공기 분사장치로 분류할 수 있다. 원자로용기 하부 반구와 연결된 원자로용기 실린더 부분은 stainless steel로 제작하며 원기둥의 1/2(180 °)을 나타낸다. 원자로용기 외부 단열재 부분은 원자로용기 외벽과 단열재 사이의 물과 공기의 이상유동을 관찰하기 위하여 투명 Poly-carbonate로 제작하고 있다. 냉각수 주입장치는 냉각수 주입탱크와 관련 배관 및 유량계 등으로 구성할 예정이다. APR 1400 원전의 원자로용기 하부에 있는 총 61개의 ICI 노즐 중에서 32개의 노즐을 실제 크기의 1/2로 모의하고 4 개의 shear key 중에서 2개를 1/2 크기로 아크릴을 사용하여 제작할 예정이다. 본 실험에서의 주요 측정장치는 물과 공기 유량, 원자로용기 외벽과 단열재 사이 공간의 기포분율(void fraction)과 국소 압력, 이상유동의 가시화 등이다. 본 실험의 주요 실험인자는 공기 주입양, 냉각수 주입구 위치(중앙부분, 가장자리 부분)와 면적, 공기 배출구 면적, 냉각수 순환구 위치와 면적 등이다. 본 실험에서의 냉각수는 외부에서 공급되어 공기와 같이 이상유동으로 간극을 통하여 유동한 후 공기 배출구와 냉각수 순환구를 통하여 배출되도록 할 예정이다.

3. RELAP5/MOD3 해석 모델 및 내용

그림 4는 대형공기 주입 실험장치와 APR 1400 원전을 해석하기 위하여 설정한 RELAP5/MOD3 입력모델을 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 대형공기 주입 실험을 모의하기 위한 RELAP5 입력모델은 외부와 냉각수 유로가 형성되기 때문에 냉각수가 순환되지 않고 빠져나간 냉각수만큼 외부에서 보충하는 것으로 모의하였고 원자로용기 하반구를 통하여 공기를 주입할 수 있게 모의하였다. 공기 배출구와 냉각수 순환구를 모의하였고 하부 냉각수 순환구는 실험장치에서와 같이 이동이 가능하도록 모의하였다. 본 RELAP5/MOD3 해석에서는 공기주입과

증기주입 및 열속 입력의 차이를 평가하기 위하여 원자로용기 하반구는 이들을 모두 해석할 수 있게 모의하였다. 즉, 원자로용기 하부면 열속 분포에 대하여 증기 주입량과 공기 주입량을 표 1과 같이 변화하여 입력하였다. 또한 본 예비해석에서는 실험 인자들의 상세 실험 영역을 결정하기 위하여 실험 냉각수 주입 온도, 공기 주입량 분포변화, 냉각수 주입구 면적, 공기 배출구 면적, 냉각수 배출구 면적 및 위치 등에 따른 민감도 해석을 수행하였다.

그림 4에서 보는 바와 같이 APR 1400을 모의하기 위한 RELAP5 입력모델은 공기주입 실험을 모의하기 위한 입력과는 조금 다르다. 본 입력에서는 실제 냉각수가 순환되는 것을 모의할 수 있게 하였고 증기로 빠져 나가는 냉각수만큼 외부에서 냉각수를 보충하도록 하였다. 원자로용기 vessel은 반구분분과 실린더 부분으로 구분하여 heat structure로 모의하여 volume과 열이 전달되도록 모의하였다. 원자로용기 부분은 APR 1400 원전의 geometry를 입력하였으며, APR 1400 원전의 단열재 부분은 아직 상세 설계가 되지 않았기 때문에 울진 5,6호기 단열재 geometry를 입력하였다. APR 1400 원전에서는 아직 냉각수 주입구 면적과 냉각수 방출구 면적이 결정되지 않았기 때문에 RELAP5 입력에서는 이들 면적에 대한 예비 민감도 해석을 수행하고 이 결과를 이미 발표하였다[13]. 본 연구에서는 RELAP/MOD3를 이용한 공기주입 실험 예비해석 결과, 냉각수 하부 배출구의 위치가 냉각수 순환량에 영향을 미치는 것으로 나타났기 때문에 이것을 실제 APR 1400 원전에 대상으로 평가하는 예비해석을 수행하였다.

RELAP5/MOD3 계산의 초기조건은 공기주입 실험과 APR 1400 원전 모두 대기압으로 모의하였고 냉각수의 초기 유량은 없다고 가정하였다. 본 해석은 초기 유동이 없는 상태에서 공기와 증기를 주입하거나 가열 부분에 출력을 주입하여 원자로용기와 단열재 사이의 공간에 형성되는 냉각수 순환유동과 열수력 상태를 결정하기 위한 정상상태 계산을 수행하였다.

4. 해석결과 및 고찰

표 2는 대형공기 주입 실험에서 원자로용기 하반구로 주입되는 공기 주입 분포를 균일하게 한 경우와 하부에는 작고 상부에는 많은 분포를 가진 경우에 대하여 냉각수 순환량에 대한 RELAP5/MOD3 예비 계산결과를 보여주고 있다. 본 계산에서 냉각수 주입구 면적은 0.5 m^2, 공기 배출구 면적은 0.25 m^2, 냉각수 순환구 면적은 0.25 m^2, 냉각수 순환구 위치는 수위로부터 0.56 m, 보충 냉각수 온도는 95 °C였다. 표에서 보는 바와 같이 공기 주입 분포는 냉각수 순환량에 큰 영향을 미치는 않는 것으로 나타났다. 표 3과 그림 5는 원자로용기 하반구로 주입되는 열속에 해당하는 증기와 공기를 주입하는 경우에 대하여 냉각재 순환량에 대한 RELAP5/MOD3 예비 계산결과를 보여주고 있다. 본 계산에서 냉각수 주입구 면적은 0.5 m^2, 공기와 증기 배출구 면적은 0.25 m^2, 냉각수 순환구 면적은 0.25 m^2, 냉각수 순환구 위치는 수위로부터 0.56 m였다. 표에서 보는 바와 같이 증기를 주입하는 경우는 열속을 주입하는 경우보다 냉각수 순환량이 약 2배 증가하는 것으로 나타났고 공기를 주입하는 경우는 증기를 주입하는 경우보다 약 2배 증가되는 것으로 나타났다. 즉, 공기를 주입하는 경우는 열속을 입력하는 경우보다 냉각수 순환량이 약 4배 증가되는 것으로 나타났다. 외부에서 공급되는

냉각수 온도는 온도가 낮을수록 밀도가 크기 때문에 냉각수 순환량이 증가되는 것으로 나타났다.

표 4는 대형공기 주입 실험에서 냉각수 주입구 면적과 공기 주입구와 냉각수 순환구 면적을 변화시킬 때 냉각수 순환량에 대한 RELAP5/MOD3 예비 계산결과를 보여주고 있다. 본 계산에서 냉각수 순환구 위치는 수위로부터 0.56 m, 보충 냉각수 온도는 20 °C였다. 표에서 보는 바와 같이 냉각수 주입구 면적 및 공기 배출구와 냉각수 순환구 면적을 증가시킬수록 냉각수 순환량이 증가되는 것으로 나타났다. 표 5와 6은 대형공기 주입 실험에서 냉각수 순환구 위치를 하부로 이동할 때 냉각수 순환량과 국소 압력 변화에 대한 RELAP5/MOD3 예비 계산결과를 보여주고 있다. 본 계산에서 냉각수 주입구 면적은 0.15 m^2, 공기 배출구 면적은 0.15 m^2, 냉각수 순환구 면적은 0.15 m^2, 보충 냉각수 온도는 20 °C였다. 표 5에서 보는 바와 같이 냉각수 하부 배출구 위치를 하부로 이동할 때마다 냉각수 순환량이 증가되는 것으로 나타났으나 그 증가폭이 점점 작아지는 것으로 나타났다. 표 6에서 보는 바와 같이 냉각수 순환구를 하부로 이동함에 따라 간극부분의 하부 국소 압력이 증가하는 것으로 나타났다. 즉, 냉각수 순환구 위치를 하부로 이동함에 따라 국소압력이 증가하여 냉각수 순환량이 증가하는 것으로 나타났다. 이와 같은 RELAP5/MOD3 예비 해석 결과를 APR 1400 원전에 대하여 평가하기 위한 해석을 수행하였다. 표 7은 APR 1400 원전에서 냉각수 순환구 위치를 하부로 이동함에 따라 냉각수 순환량 변화에 대한 RELAP5/MOD3 예비 계산결과를 보여주고 있다. 본 계산에서 냉각수 주입구 면적은 0.5 m^2, 공기 배출구 면적은 0.5 m^2, 냉각수 순환구 면적은 0.5 m^2, 보충 냉각수 온도는 95 °C였다. 표에서 보는 바와 같이 냉각수 하부 배출구 위치를 하부로 이동함에 따라 냉각수 순환량이 변화하였으나 공기 주입 실험 해석과 같은 일관성 있는 결과를 보여주지는 않았다.

그림 6은 대형공기 주입 실험에서 국소 기포분율 변화에 대한 RELAP5/MOD3 예비 계산결과를 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 반구 부분의 기포분율은 낮게 나타났으나 실린더 상부부분은 0.5 이상을 나타나 심한 진동현상을 보여주고 있다. 그림 7과 8은 대형공기 주입 실험과 APR 1400 원전에서 국소 기포분율 변화에 대한 RELAP5/MOD3 에비 해석결과를 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 국소 압력은 APR 1400 원전이 실험보다 약 0.3 기압 정도 높게 나타나 순환량을 증가시키는 것으로 나타났다.

5. 결론

APR 1400 원전의 원자로용기 외벽냉각시 원자로공동에서의 장기 열수력 거동에 대한 연구의 일환으로서 RELAP5/MOD3 전산코드를 이용하여 차후 수행할 대형 공기주입 실험과 실제 원전에 대한 해석을 수행하였다. 대형 공기주입 실험에 대한 RELAP5/MOD3 예비해석 결과, 원자로용기 하반구를 통하여 주입되는 공기 주입 분포는 냉각수 순환량에 큰 영향을 미치는 않는 것으로 나타났다. 대형실험에서 하반구로 증기를 주입하는 경우는 열속을 주입하는 경우보다 냉각수 순환량이 약 2배 증가되는 것으로 나타났고 공기를 주입하는 경우는 증기를 주입하는 경우보다 순환량이 약 2배 증가되는 것으로 나타났다. 외부에서 공급되는 냉각수 온도는 온도가 낮을수록 냉각수 순환량이 증가되는 것으로 나타났다. 냉각수 주입구 면적 및

공기 배출구와 냉각수 순환구 면적을 증가시킬수록 냉각수 순환량이 증가되는 것으로 나타났다. 냉각수 순환구 위치를 하부로 이동함에 따라 냉각수 순환유량이 증가하였으나 그 증가폭이 점점 작아지는 것으로 나타났으며, 이 결과를 APR 1400 원전에 대한 검증 예비해석 결과, 냉각수 순환구 위치를 하부로 이동함에 따라 냉각수 순환량에 차이가 나타났으나 일관성 있는 결과를 보여주지는 않았다. 본 RELAP5/MOD3 예비 해석결과는 차후 실험을 통하여 검증할 예정이고 대형 공기주입 실험의 scaling 관점에서 정밀하게 재분석할 예정이다. 차후 APR 1400 원전의 원자로용기 외벽냉각시 원자로공동에서의 냉각수 장기 열수력 거동은 본 연구에서 사용한 RELAP5 전산코드를 이용할 뿐만 아니라 FLUENT 등과 같은 3차원 유동해석 전산코드를 사용하여 정밀하게 분석할 예정이다.

후기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발 중장기 사업 일환으로 수행하였습니다.

참고문헌

1. T. G. Theofanous et al., "In-Vessel Coolability and Retention of a Core Melt," DOE/ID-10460, July 1995
2. T. G. Theofanous et al., "In-Vessel Coolability and Retention of a Core Melt," Nuclear Engineering & Design 169, pp. 1-48, 1997
3. O. kymalainean et al., "In-Vessel Retention of Corium at the Loviisa Plant," Nuclear Engineering & Design 169, pp. 109-130, 1997
4. 한국전력공사 전력연구원, "차세대원전 중대사고 관리를 위한 In-Vessel Retention 워크샵", 한국전력공사 전력연구원 발간, 1998년
5. T. N. Dinh and R. R. Nourgaliev, "Turbulence Modeling for Large Volumetrically Heated Liquid Pools," Nuclear Engineering & Design 169, pp. 131-150, 1997
6. T. N. Dinh, R. R. Nourgaliev, and B. R. Sehgal, "On Heat Transfer Characteristics of Real and Simulant Melt Pool Experiments," Nuclear Engineering & Design 169, pp. 151-164, 1997
7. S. H. Yang et al., "An Experimental Study of Pool-Boiling CHF on Downward Facing Plates," J. of KNS, V. 26 (4), pp. 493-501, 1994
8. 박래준 외, "원자로용기 파손방지를 위한 원자로공동 범람방안 평가," 1994 한국원자력학회 추계학술발표회 논문집 pp. 501-506, 한국전력공사 서울 연수원, 1994년 10월 29일
9. The RELAP5 Development Team, "RELAP5/MOD3 Code Manual," NUREG/CR-5535, INEL95/0174, August 1995
10. 하광순 외, "벽면의 가열조건에 따른 반구형 소형 간극 내에서의 냉각과정에 대한 실험 연구," 대한기계학회 춘계학술대회 논문집, 용평리조트, 2002년 5월 22-24일
11. 박래준 외, "Analysis of Coolant Flow in the Reactor Cavity under External Vessel Cooling," 한국원자력학회 '02 추계학술대회, 용평, 2002년10월 24일

표 1. 대형공기 주입 실험에서 원자로용기 하부 반구면을 통해 주입되는 열속과 공기 주입량 비교

Degree	Heat Flux (MW/m^2)	Area (m^2)	Heat Flux*Area (MW)	Steam Mass Flow Rate (m^3/hr)	Air mass Flow Rate (kg/s)
0-10	0.045	0.0788	0.0050	130.95	0.0423
10-20	0.083	0.2340	0.0219	388.86	0.1255
20-30	0.105	0.3821	0.0516	634.96	0.2050
30-40	0.166	0.5186	0.1263	861.77	0.2782
40-50	0.321	0.6394	0.2599	1062.39	0.3429
50-56.6	0.492	0.4788	0.2524	795.63	0.2568
56.6-70	0.563	1.0814	0.6974	1796.80	0.5800
70-80	0.727	0.7880	0.6224	1309.25	0.4226
80-90	1.272	0.8324	1.0585	1383.07	0.4464
SUM		5.0345	3.0964	8365.16	2.7001

표 2. 대형공기 주입 실험에서 공기 주입 분포를 변화시킬 때 냉각수 순환량 변화에 대한 RELAP5/MOD3 예비 계산결과

	Water Circulation Mass Flow Rate (kg/s)
Non-uniform Injection Case	366.9
Uniform Injection Case	359.6

표 3. 대형 실험에서 공기와 증기 주입 및 열속 입력을 하였을 때 냉각수 순환량 변화에 대한 RELAP5/MOD3 예비 계산결과

Conditions	Supplied Water Injection Temps (° C)	Water Circulation Mass Flow Rate (kg/s)
Air Injection	20	627.7
Air Injection	80	534.2
Air Injection	100	184.6
Steam Injection	20	308.6
Steam Injection	80	252.5
Steam Injection	100	58.4
Heat Flux	20	154.1
Heat Flux	80	134.2
Heat Flux	100	44.6

표 4. 대형공기 주입 실험에서 냉각수 주입구 및 공기 배출구와 냉각수 순환구 면적을 변화시켰을 때 냉각수 순환량 변화에 대한 RELAP5/MOD3 예비 계산결과

Water Inlet Area (m^2)	Air Outlet Area (m^2)	Water Outlet Area (m^2)	Water Circulation Mass Flow Rate (kg/s)
0.5	0.25	0.25	627.7
0.125	0.25	0.25	360.7
0.0625	0.25	0.25	264.6
0.5	0.125	0.125	432.0
0.5	0.0625	0.0625	134.3
0.125	0.125	0.125	240.0
0.15	0.15	0.15	253.3
0.1	0.1	0.1	203.9
0.0625	0.0625	0.0625	174.6
0.15	0.15	0.15	253.3
0.05	0.05	0.05	121.9
0.1	0.15	0.15	300.0
0.05	0.15	0.15	199.7
0.15	0.1	0.1	209.8
0.15	0.05	0.05	135.5

표 5. 대형공기 주입 실험에서 냉각수 순환구 위치를 하부로 이동할 때 냉각수 순환량 변화에 대한 RELAP5/MOD3 예비 계산결과

Water Outlet Position from the Water Level (m)	Water Circulation Mass Flow Rate (kg/s)
0.56	253.3
0.84	327.5
1.12	415.8
1.40	520.1
1.68	524.1
1.82	524.1
2.24	530.3
2.48	533.4

표 6. 대형공기 주입 실험에서 냉각수 순환구 위치를 하부로 이동할 때 국소 압력 변화에 대한 RELAP5/MOD3 계산결과

Water Outlet Position from the Water level (m)	Bottom of Gap (MPa)	Bottom of Pool (MPa)	Top of Gap (MPa)	Top of Pool (MPa)
0.56	0.1228	0.1323	0.1066	0.1020
0.84	0.1254	0.1292	0.1033	0.1003
1.12	0.1291	0.1346	0.1045	0.0987
1.40	0.1334	0.1419	0.1061	0.0998
1.68	0.1333	0.1419	0.1057	0.0998
1.82	0.1333	0.1420	0.1054	0.0998
2.24	0.1333	0.1421	0.1051	0.0998
2.48	0.1333	0.1422	0.1047	0.0999

표 7. APR 1400 원전에서 냉각수 순환구 위치를 하부로 이동할 때 냉각수 순환량 변화에 대한 RELAP5/MOD3 계산결과

Water Outlet Position From the water level (m)	Water Circulation Mass Flow Rate (kg/s)
0.6	564.2
1.52	567.3
2.44	535.9
3.36	714.3
4.28	618.6
4.74	594.4

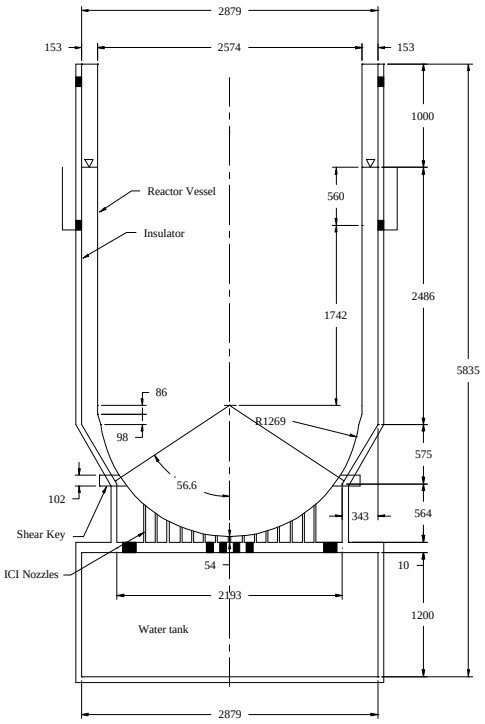


그림 1. 대형공기 주입 실험장치 정면도

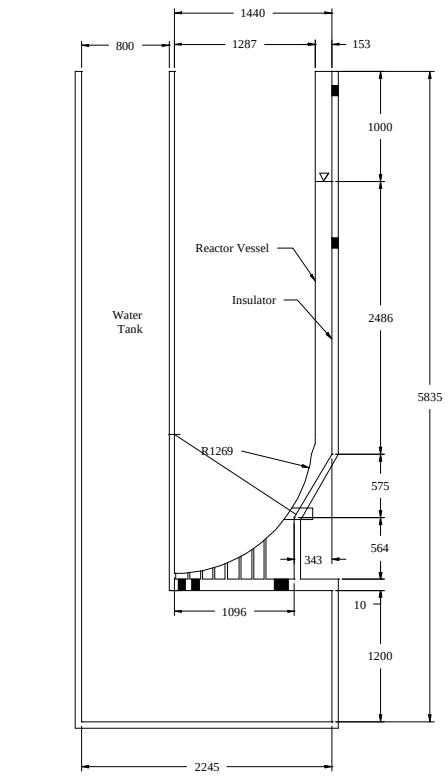
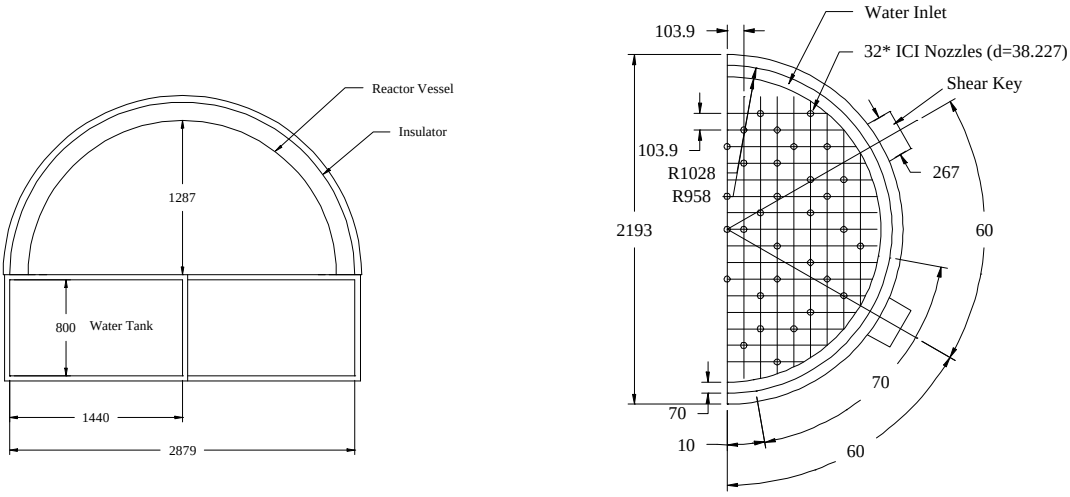
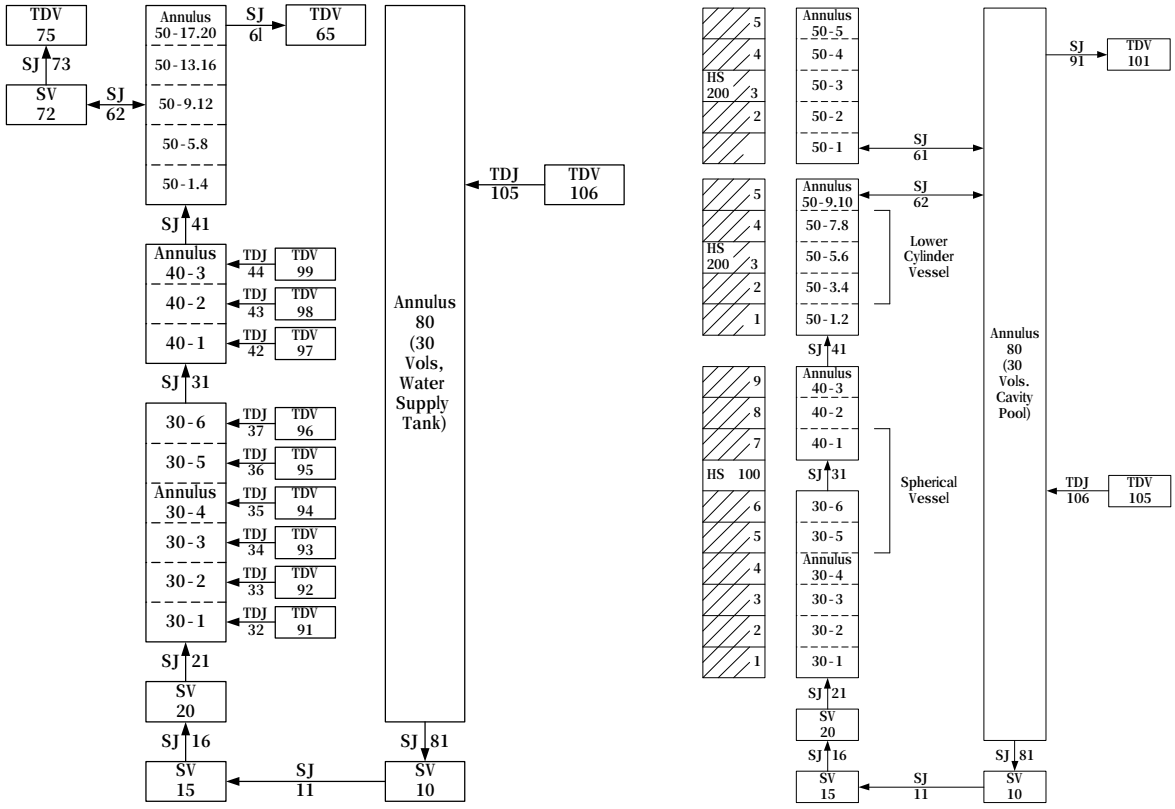


그림 2. 대형공기 주입 실험장치 측면도



(평면도) (ICI 노즐과 shear key 설치 위치)

그림 3. 대형공기 주입 실험장치 평면도와 ICI 노즐과 shear key 설치 위치



(대형공기 주입 실험) (APR 1400)

그림 4. 대형공기 주입 실험과 APR 1400을 해석하기 위한 RELAP5/MOD3 입력모델

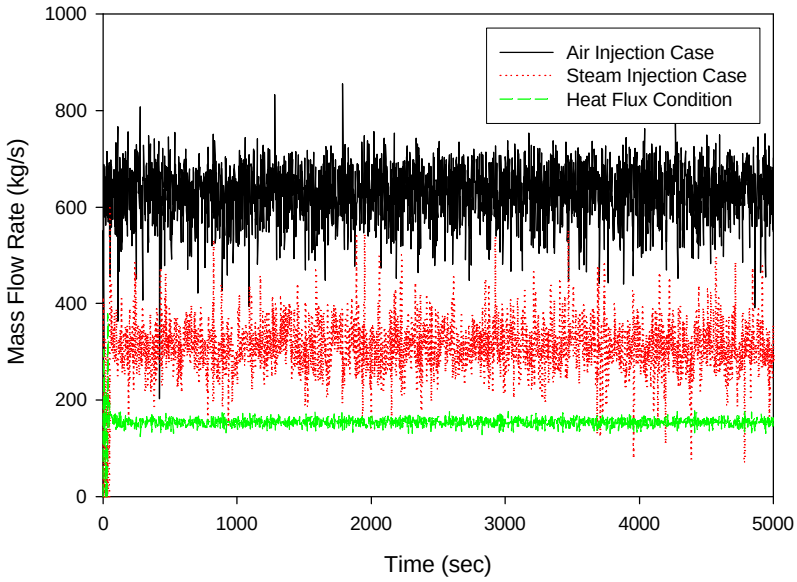


그림 5. 대형 실험에서 냉각수 순환량에 대한 RELAP5/MOD3 예비 계산결과
(보충 냉각수 온도 = 20 °C, 수위로부터 냉각수 순환구 위치= 0.56 m)

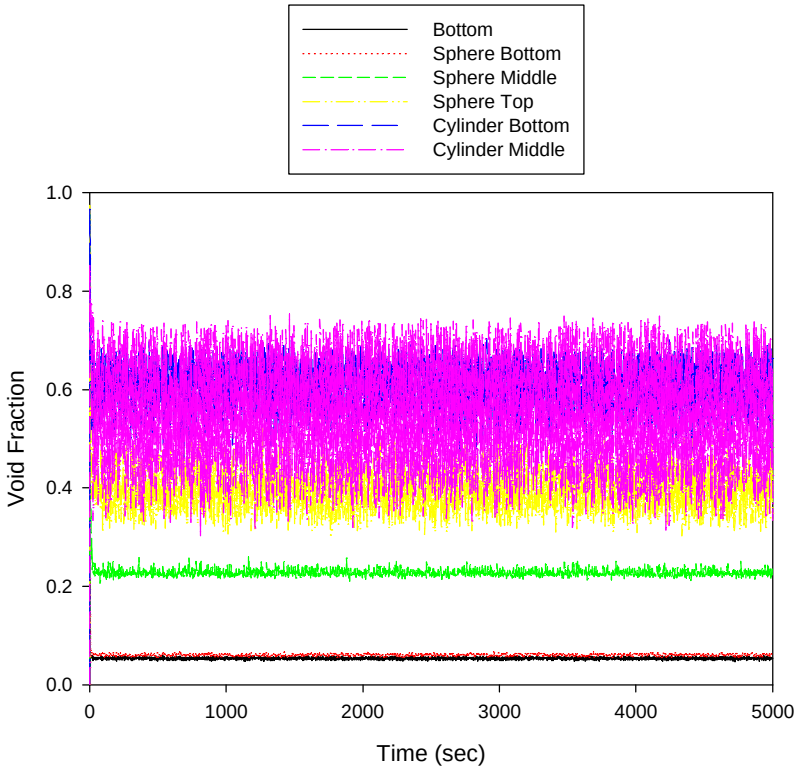


그림 6. 대형공기 주입 실험에서 국소 기포분율 변화에 대한 RELAP5/MOD3 예비 계산결과
(보충 냉각수 온도 = 100 °C, 수위로부터 냉각수 순환구 위치= 0.56 m)

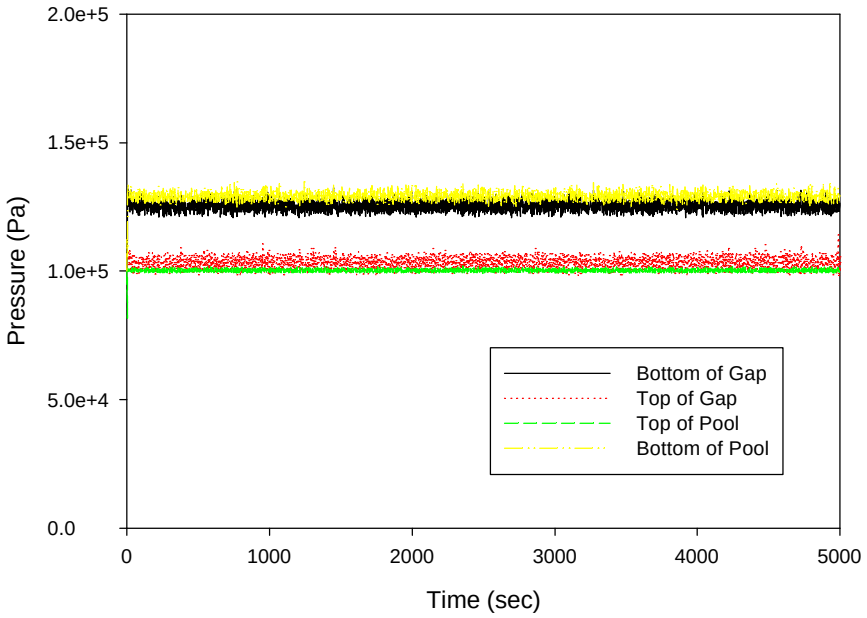


그림 7. 대형 공기주입 실험에서 국소 압력 변화에 대한 RELAP5/MOD3 예비 계산결과
(보충 냉각수 온도 = 100 °C, 수위로부터 냉각수 순환구 위치= 0.56 m)

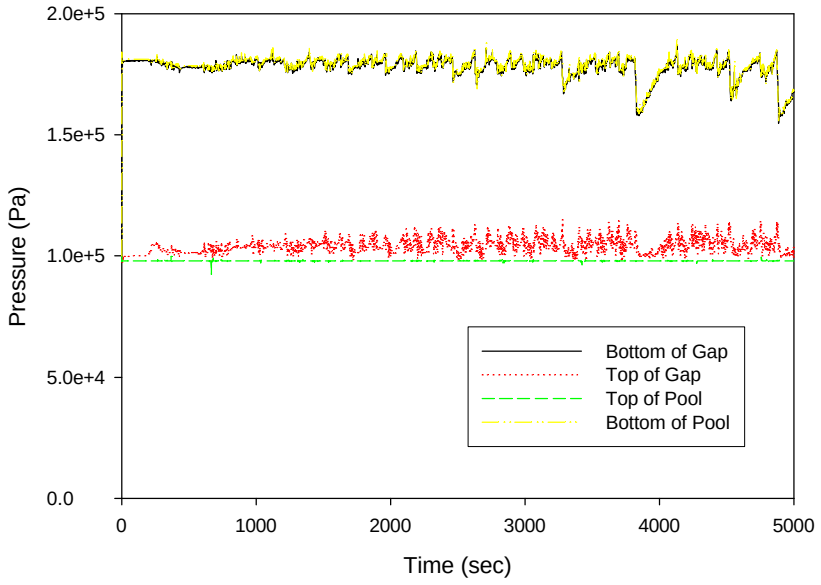


그림 8. APR 1400 원전에서 국소 압력 변화에 대한 RELAP5/MOD3 예비 계산결과
(수위로부터 냉각수 순환구 위치= 0.6 m)