2002 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

MIDAS 실험장치에서 수행된 UPTF Test 21D 비교 검증 실험

UPTF Test 21D Counterpart Test in the MIDAS Test Facility

윤병조, 어동진, 주인철, 권태순, 박원만, 송철화
한국원자력연구소
대전시 유성구 덕진동 １５０번지

요 약

APR1400 의 대형 냉각재 상실사고를 모의하는 MIDAS 실험장치에 적용된 “수정형 선형척도법” 및 이를 적용한 실험결과의 평가 및 검증을 위하여 1:1 척도비를 갖는 UPTF Test 21D 에 대한 비교 검증 실험을 수행하였다. 실험은 물-증기 유동조건에서 수행되었으며, 안전주입수 직접 우회 현상 및 Void Height 현상의 정량적 고찰을 위하여 각각 별도의 실험으로 수행되었다. 실험에서의 유동조건은 UPTF Test 21D 실험조건에서 도출되었으며, 특히, 건전 저온관에 주입되는 증기 유량을 광범위하게 변화 시킴으로써 안전주입수 직접우회비 및 void height 현상의 변화를 관찰하고자 하였다. 실험에서 안전주입수 주입 노즐 선택에 따른 안전주입수 우회비를 얻기 위해 DVI 1 및 DVI 2 의 단일주입 조건과 DVI 1 및 DVI 2 의 동시주입 조건에서 실험이 수행되었다.

UPTF Test 21D 실험결과의 분석에 따르면 1/4 규모의 MIDAS 장치에서 얻어진 실험결과는 실규모 UPTF 실험결과와 잘 일치함을 보여준다. 이는 본 실험에 적용된 “수정형 선형척도법”이 대형 냉각재 상실사고 재관수 과정에 대한 강수부의 주요 열수력 현상을 소형 실험장치에서 잘 재현됨을 보여주는 것이다.

Summary

This paper describes the experimental results of UPTF Test 21D counterpart tests in the downcomer during the late reflood phase of LBLOCA. The experiments have been performed in the MIDAS test facility using superheated steam and water. The test condition was determined, based on the test results of UPTF Test 21D, by applying the “modified linear scaling method” of 1/4.077 length scale. The tests of ECC direct bypass and void height are performed separately to estimate each phenomena quantitatively.

The tests were carried out by varying the injection steam flow rate of intact cold legs widely to investigate the effect of steam flow rate on the direct bypass fraction and void height. In the tests, separate effect tests have been performed in cases of DVI-1, DVI-2 and DVI-1&2 injections to see the direct bypass fraction according to the DVI nozzle combination.

From the tests, we found that the fraction of direct ECC bypass and the void height observed in the MIDAS test facility reasonably well agree with those of UPTF test 21-D. It confirms that the applied “modified linear scaling law“ reproduces major thermal hydraulics phenomena in the downcomer during the LBLOCA reflood phase.

1. 서론

본 논문에서는 UPTF Test 21D[1]의 비교 실험의 일환으로 수행된 직접용기(DVI) 주입 방식의 안전 주입 계통 비상노심 냉각수의 직접 우회(Direct ECC Bypass)현상 및 Void Height 에 관한 개별효과 실험결과를 기술하였다. 이는 한국형 차세대원자로(APR1400)를 대상으로 MIDAS 실험장치에서 기 수행된 실험데이터의 Scale-up 가능성 및 적용 척도법의 기술적 타당성에 대한 실험적 검증을 위해 수행되었다.

실험은 MIDAS 실험장치 환형 강수부 상단에 위치한 UPTF 강수부 모의부에서 수행되었으며, 차세대원자로를 대상으로 수행한 실험과 동일하게 Void Height Test 와 Direct ECC Bypass Test 로 나누어 각각 수행하였다.

Void Height Test 는 강수부 상단에서 주입되어 강수부 하단부로 침투한 안전 주입수가 저온관 하부에서 축적되어 고속의 횡방향 증기 유동에 의해 파단 저온관으로 끌려나가는 Sweep-Out 현상을 관측하고자 수행한 실험이다. 이는 강수부내 수위를 적절하게 제어하여 수위를 저온관 하단부에 일정하게 유지하거나 노심 하부에서 실험장치 외부로 배출되는 유량(drain flow rate)을 조절하여 모의한다.

안전주입수 직접우회 현상 실험은 저온관 하부에서의 우회메커니즘중 하나인 이러한 Sweep -Out 현상을 배제시키고, 주입된 안전주입수가 강수부 하단으로 하강하며 횡방향의 증기유동과 교차하며 파단 저온관으로 직접 끌려나가는 직접 우회 현상만을 모의하고자 수행된 실험이다. 따라서 실험은 강수부 수위를 저온관 하부에서 발생되는 액적 이탈 시작지점(Onset of Entrainment)보다 충분히 낮게 유지하여 Sweep Out 에 의한 안전주입수 우회 현상을 배제시키고 수행한다. Void Height Test 에서는 이러한 강수부 상단에서의 Direct Bypass 현상 및 저온관 하부에서의 우회 현상도 동시에 발생된다.

상기 두가지 실험항목의 구성과 적절한 해석기법의 도입을 통하여 강수부에서의 안전주입수 총 우회율에 기여하는 Sweep-Out 현상 및 Direct ECC Bypass 현상을 구분하여 수행함으로써 UPTF Test 21-D 의 실험 결과와 정량적으로 비교 분석이 가능하게 하였다.

실험장치에 적용된 척도법은 '수정형 선형 척도법이다'[2]. UPTF 비교실험은 기존의 MIDAS 실험장치의 강수부에 UPTF 를 모의한 저온관 및 고온관 그리고 DVI 노즐을 장착하여 수행하였다. 이때, 강수부에 장착된 각 노즐들 및 강수부 갭은 1/4.077 의 선형척도비를 가지게 설계되었으나, 강수부의 외경 및 내경은 1/5.1 및 1/5.23 으로 설계되어 횡방향 유동이 발생되는 유로의 길이에 척도 왜곡이 가해졌다. 이는 MIDAS 실험장치의 대상 원전인 APR1400 과 UPTF 의 강수부 외경의 차이에서 발생되어 불가피하게 발생된 기하학적 척도 왜곡이다. 실험은 각 DVI 노즐에서 주입된 안전주입수의 우회률을 정량적으로 분석하기 위해 파단부에서 가까운 노즐 및 파단부에서 멀리 떨어진 노즐의 단독주입 조건, 그리고 양 노즐에서의 동시주입 조건에서 수행하였다.

실험에서 원자로용기 강수부와 노심 사이의 열수력적 간섭 및 상호반응, 그리고 원자로용기 벽면가열 효과는 본 실험장치를 이용한 모의대상에서 배제되었다.

2. 실험장치 개요[3]

UPTF Test 21-D 비교 실험은 기존의 MIDAS 실험장치 강수부 상부에 UPTF 실험장치 모의를 위한 별도의 고온관, 저온관 그리고 DVI 노즐을 설치하여 수행하였다.

MIDAS 실험장치는 환상형 강수부, 노심 모의기, 건전 저온관(3), 파단 저온관(1), 물-증기 분리기, 격납건물 모의기, 증기공급장치, 비상노심 냉각수 공급장치 등으로 구성되어 있다[3]. 전체 계통의 구성은 그림 1 에 도시 되었다. 강수부의 주요 형태 및 높이 기준은 그림 2 에, 각 노즐의 각도는 그림 3 에 각각 도시되었다.

UPTF Test 21D 비교 실험을 위하여 기존의 APR1400 저온관에 연결된 증기공급 배관 및 DVI 노즐 1&2 에 연결된 안전주입수 주입 배관이 각각 강수부 상단부에 위치한 UPTF 시험대의 저온관 및 DVI 노즐 1&2 에 연결되었다. 이는 기 설치된 배관의 밸브 조작을 통하여 이루어 졌다. 저온관은 저온관 꺽임각 및 길이를 보존한 APR1400 모의용 저온관과 달리 UPTF 실험장치의 저온관 주입 직경만 보존하였다.

본 실험을 위하여 Fig. 2 와 같이 강수부와 노심모의기 사이는 차단벽을 설치하여 강수부와 노심 사이의 열수력적 상호작용을 의도적으로 차단시켰다. 본 장치에서 수위 및 각 계통간 상대 고도의 기준점은 수위의 하부 압력탭의 위치를 고려하여 Fig.2 의 점선으로 표시한 바와 같이 강수부와 노심모의기 연결 파이프의 바닥으로 하였다.

실험장치 강수부의 냉각수 입출력 지점에는 강수부내로 유입되거나 강수부에서 배출되는 질량 및 에너지 출입을 계측할 수 있게 유량계 및 압력계 그리고 열전대가 설치되었다. 즉, 안전주입수가 주입되는 DVI 노즐에는 터어빈 유량계 및 SMART 형 정압계 그리고 열전대가 설치되었다. 3 개의 건전 저온관 및 물-증기 습분기의 증기유로에는 볼텍스 유량계 및 SMART 형 정압계 그리고 열전대가 설치되어 증기의 질량유량을 계측한다. 강수부 하단부 드레인 및 물-증기 습분기의 하부에는 기본적으로 Coriolis 질량 유량계가 설치되었으며, 측정범위별로 오차를 감소 시키기 위해 낮은 유량에서의 계측을 목적으로 터어빈 유량계 및 SMART 형 정압계 그리고 열전대가 동시에 설치되어 강수부에서 누출되는 질량 유량의 계측에 사용된다. 강수부 및 물증기 습분기의 냉각수 수위를 계측하기 위해 차압계가 설치되었으며, 특히, 강수부에는 횡방향으로 4 분된 지점에 각각 차압계를 설치하여 횡방향의 수위 변화를 계측하게 된다.

강수부에서의 물 또는 증기 분포를 계측하기 위해 다수의 열전대가 횡방향으로 22.5 도 간격으로 높이 방향으로 496mm 간격으로 다수 설치되었다. 각 계측지점에서 증기-물 혼합 지역의 유체 온도 계측을 위해 반경방향(깊이 방향)으로 각각 3 개를 배열하였으며, 액상이 예상되는 하부 쪽과 상시 증기에 노출되는 상부쪽은 강수부 간극의 가운데에 1 개의 열전대를 배치하였다. 그림 4 에는 강수부에 설치된 열전대의 배치 현황을 도시하였다. 본 실험에 적용된 열전대는 K-type 열전대이다. 계측된 각 변수의 측정오차는 각 그림에 도시되었다.

본 실험에서의 실험조건은 “수정형 선형 척도법”에 의해 도출되었다[2]. 이는 선형 척도법과 동일한 기하학적 상사조건을 요구하나, 안전주입수 및 증기의 주입속도는 길이비의 2.5 승에 비례하여 축소된다. 표 1 은 “수정형 선형척도법”의 주요 척도비 및 설계된 실험장치의 주요 척도비를 정리하였다. 실험이 이루어진 유동조건은 UPTF Test 21D 의 실험결과를 기준조건으로 이러한 척도비를 적용하여 결정하였다.

실험은 실험장치 구조물 벽면의 예열을 위하여 충분한 시간 동안 저온관을 통하여 강수부에 증기 주입을 실시하였다. 벽면 가열은 포화온도에 도달될 때까지 수행한다. 구조물의 예열이 완료되면 증기온도, 증기유량, 안전주입수 주입유량, 강수부 벽 온도, 강수부 물 온도, 강수부 수위 등이 실험조건과 유사하게 도달되도록 운전한다. 상기 변수들이 실험조건에 근접하게 되면 각 제어 변수들에 대한 정확한 제어를 수행하여 실험조건에 도달시킨다. 모든 변수들이 실험조건에 도달되면 DAS 에 실험데이터를 저장한다. 실험은 정상 상태의 경우 각 실험조건에 대하여 300 초 동안 수행하여 기록한다. 실험에서 얻어진 각 계측값의 300 초 동안의 평균값을 계산하여 각종 2 차 측정변수의 계산에 사용한다.

3. 안전 주입수 직접 우회 현상 실험 결과[4]

안전주입수 직업 우회 현상실험을 위하여 강수부 하단부에서의 sweep out 현상을 배제시키고자 강수부 수위를 의도적으로 낮게 유지하였다. 실험에서 강수부 수위는 저온관 중심을 기준으로 0.4-0.7m 하부에 유지하였다.

3.1 질량 및 에너지 보존

실험에서 측정된 주요 변수로 건전 저온관의 주입 증기 및 안전주입수 질량유량, 강수부에서의 온도 분포, 파단부 방출 증기 및 물의 질량유량 그리고 강수부 하부의 드레인 유량 등이다. 이러한 기본 측정변수로부터 질량 및 에너지의 보존 유무, 그리고 증기 응축률 및 안전주입수 우회율등의 2 차 변수가 계산된다. 본 실험과 같이 정상상태 조건에서 수행된 실험에서 계통 내에 유입되거나 배출되는 질량 및 에너지 보존 오차률은 실험의 성공여부를 판단하는 주요 척도가 된다.

계통에 유입되는 증기, 비상노심냉각수와 계통으로 배출되는 파단류 사이의 질량 보존에 대한 정의는 식 (1) 과 같다. 이때, 강수부 및 Separator 에서의 Water Accumulation 이 질량유량 계산에 고려되었으며, 파단 물 유량은 수위의 변화의 값으로 계산하였다.

$$\text{Mass Balance Error} = \frac{m_{Total,in}(t) - m_{Total,out}(t)}{m_{Total,in}(t)} \tag{1}$$

그림 5 에는 이러한 질량 보존 오차를 다음과 같이 정의된 Wallis 무차원수에 대하여 나타내었다. 그림에서 각 실험 데이터의 질량보존 오차는 최대 3%내외이다

$$j^*_{g,eff} = \frac{m_{g,eff}}{\rho_g \cdot A_{Flow}} \left[\frac{\rho_g}{(\rho_f - \rho_g) \cdot g \cdot L_{DC}} \right]^{1/2} \tag{2}$$

계통에 유입되는 증기, 비상노심냉각수와 계통으로 배출되는 파단류 사이의 에너지 보존에 대한 정의는 식 (3) 과 같다.

$$\text{Energy Balance Error} = \frac{e_{Total,in}(t) - e_{Total,out}(t)}{e_{Total,in}(t)} \tag{3}$$

계산에서 사용된 유체의 온도는 저온관 하부 및 파단 저온관의 온도계측 값을 사용하여 강수부 하단부 및 습분 분리기에서 발생되는 열손실 및 상변화 값을 최소화하였다. 실험에서 에너지 오차률은 그림 6 에서와 같이 증기 속도가 낮은 경우를 최대 8% 증기 속도가 증가하면 최대 4% 내외의 오차를 갖는다.

3.2 증기 응축율(Steam Condensation Fraction)

강수부내에 주입된 증기는 안전주입수와 증기의 상 경계면을 통해 발생되는 직접접촉 열전달 현상에 의해 증기 응축이 발생된다. 이러한 증기 응축은 안전주입수가 포화온도에 도달될 때까지 발생된다. 이를 이론적으로 도달 가능한 최대 증기 응축률로 정의할 수 있다. 실험에서 계측된 증기 응축률은 강수부 및 파단 저온관에서 계측된 안전주입수의 온도 계측값과 압력, 그리고 파단 저온관 및 강수부의 배출 유량을 이용하여 식(4)와 같이 계산한다.

$$\text{Steam Condensation Fraction} = 1 - \frac{m_{FT-CL-401}(t)}{m_{FT-CL-101}(t) + m_{FT-CL-201}(t) - m_{FT-CL-301}(t)} \tag{4}$$

그림 7 은 상기 식에 의해 계산된 증기 응축률과 이론적으로 도달 가능한 증기 응축률을

비교 도시한 그림이다. 그림에서와 같이 강수부내 증기 응축은 최대 증기 응축률이 낮은 경우 이론적으로 도달 가능한 최대 응축량까지 발생되나, 그 반대의 경우 과냉각도가 유지됨을 보여준다. 이는 저온관에서 주입된 증기에 의해 발생되는 jet impingement 에 의한 물막의 파열이 증기 응축에 크게 영향을 미침을 보여준다.

3.3 안전 주입수 우회율 (ECC Bypass Fraction)

강수부에 주입된 비상노심냉각수 및 계산된 증기 응축량의 합산량(액상) 대비 비상노심냉각수의 강수부의 하부에서 측정된 배출유량 값으로부터 다음과 같이 계산될 수 있다

$$\text{Bypass Fraction} = 1 - \frac{m_{FT-LP-02}(t)}{m_{Total,ECC,in}(t) + m_{FT-CL-1,2,3}(t) - m_{FT-CL-401}(t)} \quad (5)$$

그림 8 에는 이러한 안전 주입수 우회율을 식(5)에 의해 계산하여 도시하였다. 그림에서와 같이 파단관에서 멀리 떨어진 DVI-2 노즐로부터 단독 주입된 안전 주입수는 증기 유량이 크게 증가해도 강수부 하단부로 침투하는 안전주입수가 많음을 보여준다. 반면, 파단 저온관에 근접한 DVI-1 노즐에서 단독 주입된 안전 주입수는 파단관에서 증기 질량에 비례하여 민감하게 증가함을 보여준다. DVI-1 와 DVI-2 에서 동시 주입된 안전 주입수의 우회율은 이러한 DVI-1 및 DVI-2 의 안전주입수 우회 경향에 의해 그 우회비가 결정됨을 보여준다.

그림 8 에서는 UPTF Test 21D 의 실험 결과가 비교 도시되었다. 그림에서와 같이 안전주입수 직접 우회 비는 UPTF Test 21D 와 잘 일치하고 있음을 보여준다. 이는 본 실험에 적용된 “수정형 선형 척도법”이 축소규모 실험장치에서의 안전주입수 직접우회 현상을 잘 재연함을 보여준다.

4. Void Height 현상 실험 결과[5]

Void Height 실험은 강수부 하단부를 통해 노심으로 유입되는 재관수 유량을 냉각수 배출용 제어밸브를 통해 모의함으로써 수행한다. 이때, 배출되는 재관수 유량은 UPTF Test 21D 의 실험결과로부터 얻는다. 실험은 UPTF Test 21D 에서 모의된 4 가지 증기유량에 대해서 수행되었다.

4.1 질량 및 에너지 보존

Void Height Test 에서의 질량 및 에너지 보존 오차는 상기 식 (1)과(3)에 의해 계산된다. 그림 9 와 그림 10 에는 Void Height 실험에서의 질량 및 에너지 보존 오차를 도시하였다. 그림에서와 같이 최대 질량오차는 2% 최대 에너지 오차는 3%로 실험에서 정상상태가 잘 유지되었음을 보여준다.

4.2 증기 응축율(Steam Condensation Fraction)

그림 11 에는 실험에서 얻어진 강수부 냉각수 온도의 과냉각도와 UPTF Test 21D 에서 측정된 강수부내 안전주입수의 과냉각도를 비교 도시하였다. 그림에서와 같이 UPTF Test 21D 의 실험결과는 저온관 증기 주입 유량의 차이에 의해 4 개 구간으로 나뉜다. 그러나 그림에서와 같이 냉각수 과냉각도는 본 비교 실험과 달리 특정한 경향을 보여 주지 못하거나 반대의 경향을 보여준다. 일반적으로 증기유량이 증가 하면 물막 파열이 증가되어 상 계면 면적밀도가 증가되고 따라서 증기 응축이 많이 발생된다. UPTF 실험의 이러한 결과는 UPTF Test21D 의 실험조건이 정상상태에 도달되지 못해 구조물에서의 열에너지 전달이

과냉각도에 영향을 준 것으로 보여진다. 또한 본 실험에서 ECC 주입 온도가 UPTF Test21D 보다 3-4 도 정도 낮으며, 이는 결국 본 실험의 과냉각도를 3-4 도 정도 증가시킨 것으로 생각된다.

4.3 강수부 수위

강수부 수위는 노심으로 재관수를 촉진 시키는 수두로 작용한다. 본 실험에서는 강수부에 축방향으로 설치된 차압계로부터 측정된 차압값을 수두로 환산하였다. 강수부 수위는 차압계로부터 얻어진 수위를 평균하여 계산하였다. 그림 12 에는 이러한 강수부 수위 값이 도시되었다. 그림에서는 건전 저온관의 증기 유량이 증가하면 강수부 수위는 감소한다. 이는 증기 유량의 증가에 따라 횡방향의 유동장 영역이 증가되고 또한 파단 저온관으로의 우회률이 증가 되기 때문이다. 그림에서는 UPTF Test 21D 에서의 수위와 본 비교 실험시의 수위가 동시에 비교되었다. 그림에서와 같이 본 실험과 같이 소형 실험장치의 강수부내 수두는 낮은 주입증기유량 조건에서 1:1 크기의 실험장치 보다 근소하게 높게 형성됨을 보여준다. MIDAS 에서 수행된 비교 실험에서는 강수부에 주입된 비상노심 냉각수 온도가 UPTF Test21-D 의 실험 값보다 3-4 도 정도 낮다. 이러한 MIDAS 의 주입 비상 노심 냉각수의 낮은 온도는 강수부내 증기 응축율을 증가시켜 증기 유량을 감소시키고, 이는 강수부 수위를 증가시키게 된다.

5. 결 론

실험장치의 길이 축척효과와 적용된 척도해석 방법론의 타당성을 검증 하기 위해 MIDAS 실험장치를 이용하여 1:1 크기의 실험장치인 UPTF 에서 수행된 Test 21-D 실험의 비교 검증 실험을 수행하였다. 실험은 기 수행된 APR1400 실험에서와 같이 안전주입수 직접 우회 실험(Direct ECC Bypass)과 Void Height 가 있는 경우의 실험으로 나뉘어 수행되었다.

실험에 적용된 척도법은 '수정형 선형 척도법'으로서, 이는 기하학적으로 선형척도법의 특성을 갖으나, 속도 및 질량속도가 길이비에 의해 축소되었다. 실험을 수행한 결과, 실험의 초기조건 및 경계조건은 충분히 안정적으로 잘 유지되었다. 그리고 계통에 유입 및 유출되는 질량 유량의 최대 오차는 약 3%로 추정되며, 계통에 유입 및 유출되는 에너지의 비는 약 5% 범위 내에서 유지되고 있다.

안전주입수 직접 우회율은 파단 저온관에서 인접한 DVI-1 과 멀리 떨어진 DVI-2 단독 주입조건, 그리고 DVI-1&2 동시 주입조건에서 각각 측정되었다. 실험결과 비상노심 냉각수 직접우회율 비는 주입 증기의 질량유량에 크게 의존함을 보여주었다. 파단 저온관에 가까이 위치한 노즐(DVI-1) 주입 실험에서 관찰된 비상노심 냉각수 우회율 비는 낮은 증기 속도에도 대부분의 안전 주입수가 우회됨을 보여준다. 그러나 멀리 떨어진 노즐(DVI-2)의 주입실험에서는 비교적 많은 양의 주입 냉각수가 강수부 하단부로 침투하는 실험결과를 보여주었다. 두개의 주입 노즐을 통한 비상노심 냉각수 동시주입(DVI-1&2) 조건 실험에서는 이러한 각각의 주입 노즐의 특성을 반영하는 주입 특성곡선을 보여준다. 계측된 안전주입수 직접우회률 결과를 UPTF Test21D 의 실험결과와 비교한 결과 상호 잘 일치함을 보여준다.

Void Height 실험에서 안전 주입수 온도가 UPTF Test 21D 의 온도 보다 3-4 낮게 유지되었다. 이때, 강수부내 과냉각도는 UPTF 보다 크게 유지됨을 보여 주고 있으며, 강수부 수위는 UPTF 보다 근소하게 크게 유지됨을 보여준다. 이러한 근소한 불일치는 주입된 안전주입수의 온도 차이에도 영향을 받은 것으로 판단되며, 이에 대한 보강 연구는 추후 수행되어야 된다.

NOMENCLATURE

A: Flow area
e: Power (J/s)
g: Gravity Constant
l_R: Length ratio
m: Mass Flow Rate (kg/s)
$m_{g,eff}$: Effective steam flow rate (kg/s)
L_{DC} : Characteristic length of downcomer
t : Time

Subscript

CL: Cold leg
f: Water
FT: Flow meter
g: Steam
in: In-flow
out: Out-flow

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구.개발사업의 일환으로 수행되었다.

References

[1] MPR-1329, "Summary of Results From the UPTF Downcomer Injection/Vent Valve Separate Effects Tests: Comparison to Previous Scaled Tests, and Application to Babcock & Wilcox Pressurized Water Reactors" (1992)

[2] 윤병조 외, "차세대원자로 대형 냉각재상실사고 모의를 위한 열수력 실험장치의 척도해석 (Scaling Analysis of the Thermal-Hydraulic Test Facility for the Large Break LOCA of KNGR)", KAERI/TR-1878/2001, 한국원자력연구소 (2001)

[3] 권태순 외, "차세대 원자로 DVI 안전주입 성능평가 실험장치(MIDAS) 구축 보고서", KAERI/TR-2069/2002 (2002)

[4] 윤병조 외 "MIDAS 실험장치에서 수행된 UPTF Test 21-D 직접우회현상 비교 실험결과", KAERI/TR-2095/2002(2002)

[5] 윤병조 외, "MIDAS 실험장치에서 수행된 UPTF Test 21-D Void Height 현상 비교 실험결과",KAERI/TR-2096/2002 (2002)

Table 1. Scaling Ratio of “ Modified Linear Scaling Law"

Parameter	Modified Linear Scaling Scaling Ratio	
	Ratio	MIDAS-UPTF 축소비
Length Ratio, l_R	l_R	1/4.077
Time Ratio, t_R	$l_R^{1/2}$	1/2.019
Velocity Ratio, v_R	$l_R^{1/2}$	1/2.019
Flow Rate Ratio, $\dot{m}_R$	$l_R^{5/2}$	1/33.56
Temperature Ratio, T_R	-	1/1

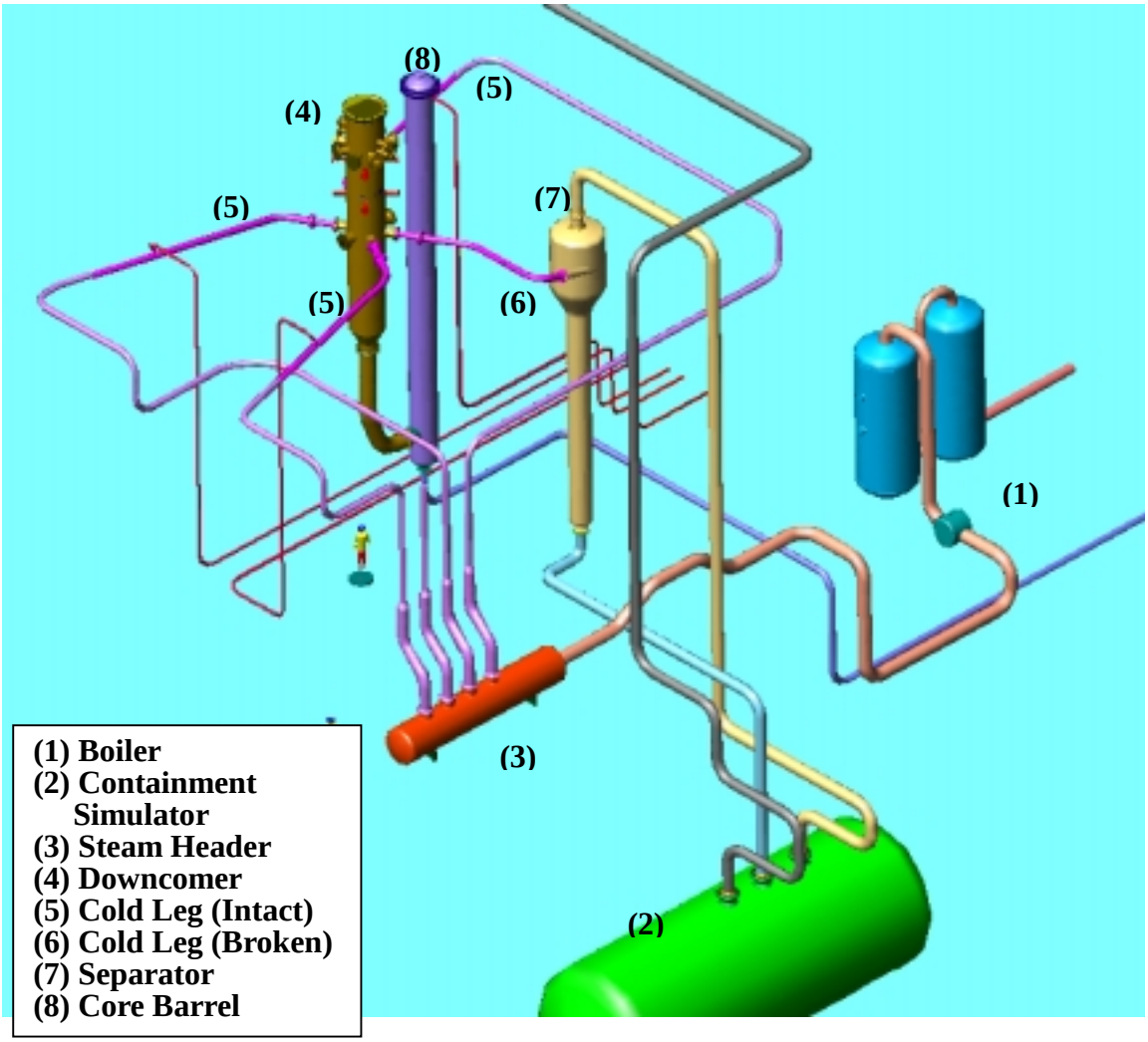

Fig. 1 Isometric View of the MIDAS Facility

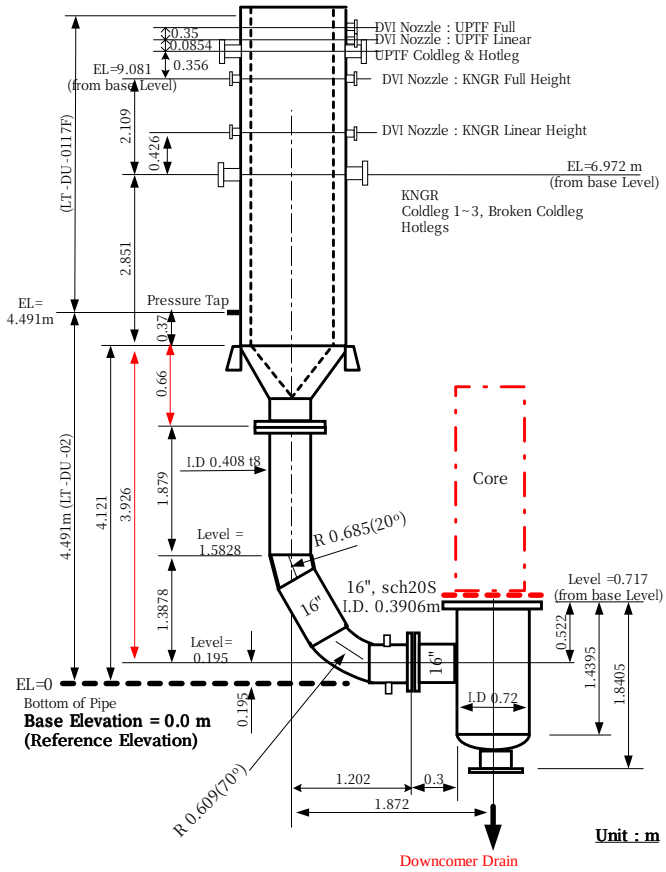

Fig. 2 Schematic Diagram of Downcomer

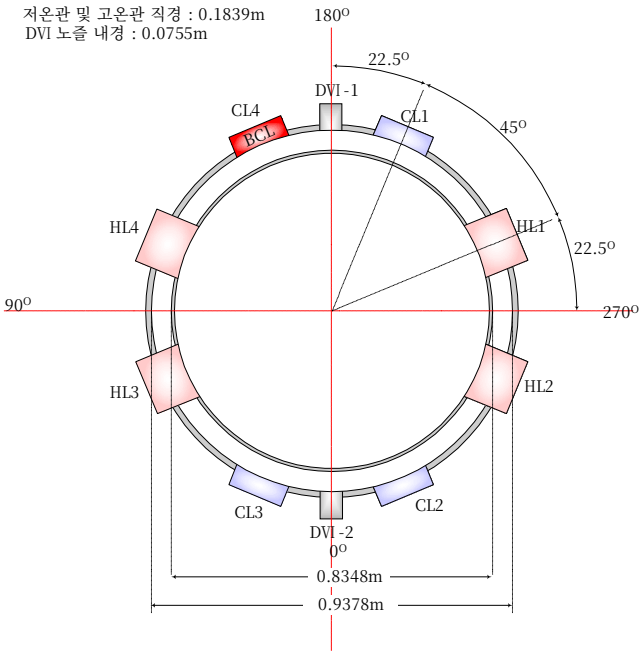

Fig. 3 UPTF Nozzle Configuration in the MIDAS Facility

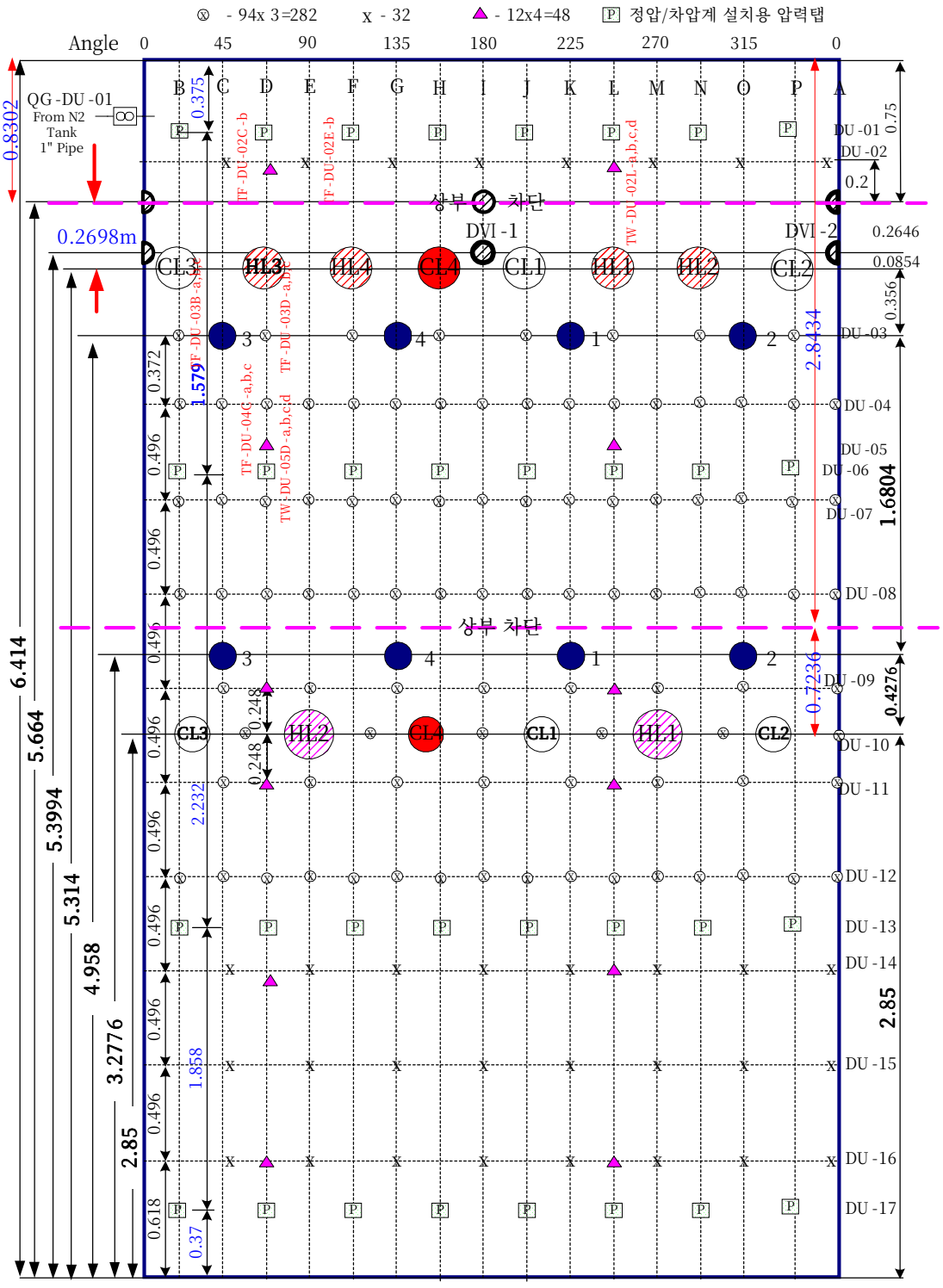

Fig. 4 Location of Thermocouples and Pressure Transmitters in the D/C

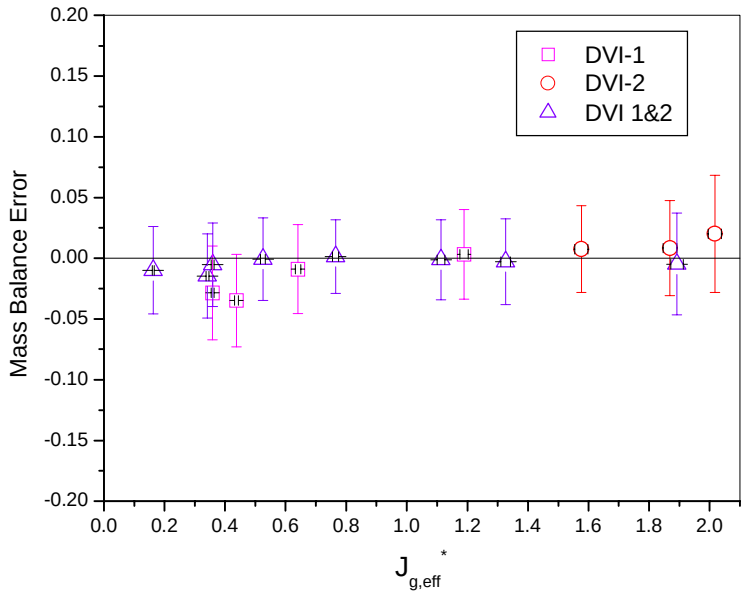

Fig. 5 Mass Balance Error in the ECC Direct Bypass Test

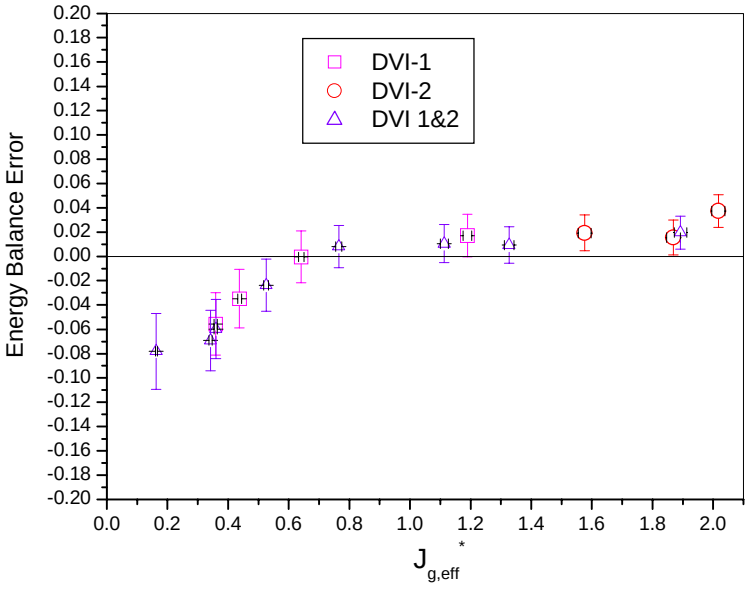

Fig. 6 Energy Balance Error in the ECC Direct Bypass Test

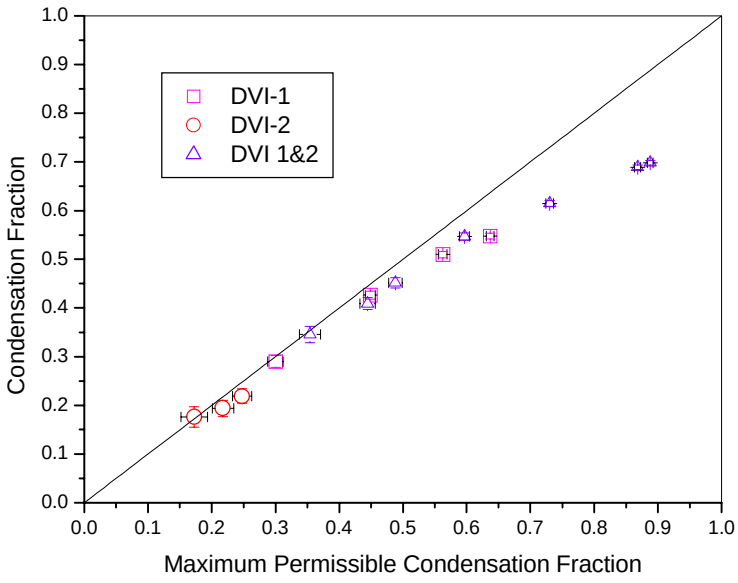

Fig. 7 Steam Condensation Fraction in the ECC Direct Bypass Test

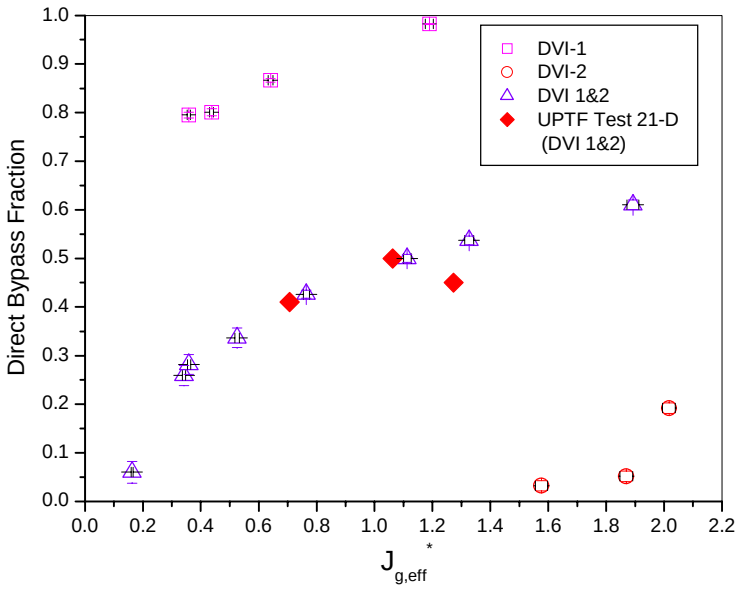

Fig. 8 ECC Direct Bypass Fraction vs. Effective Steam Wallis Parameter

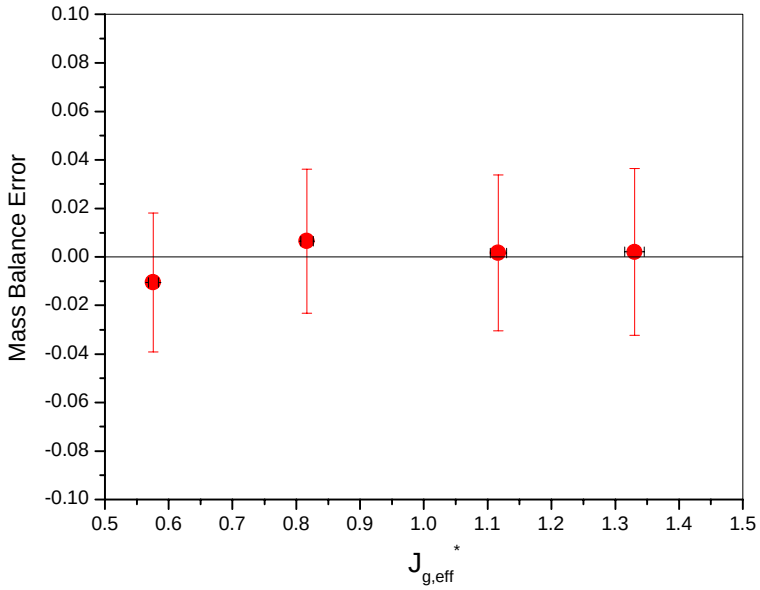

Fig. 9 Mass Balance Error in the Void Height Test

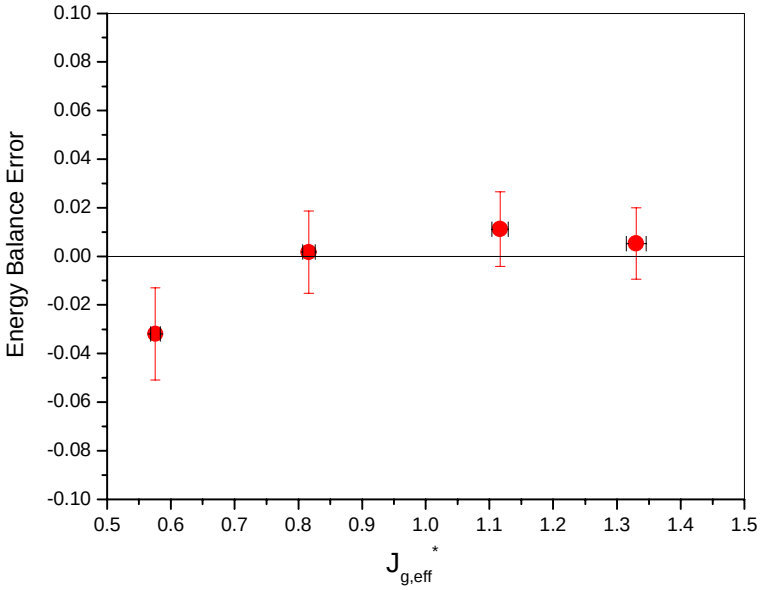

Fig. 10 Energy Balance Error in the Void Height Test

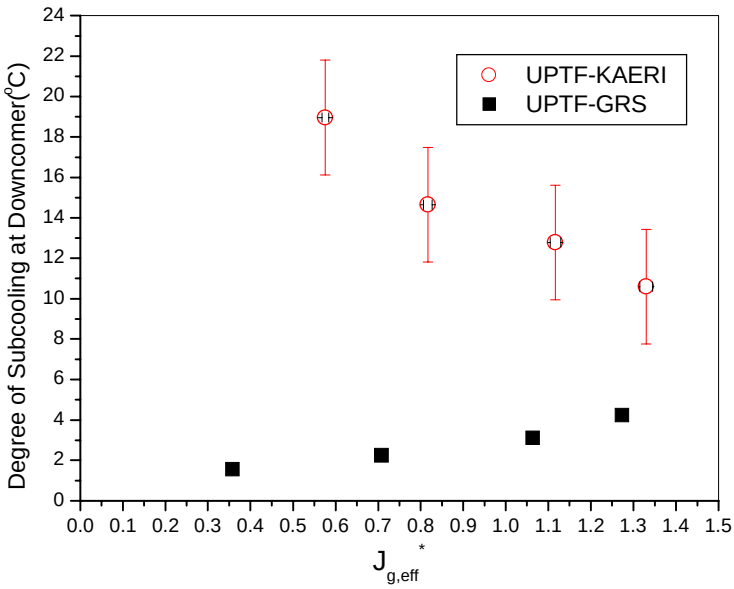

Fig. 11 Comparison of the Degree of Subcooling in the Void Height Test

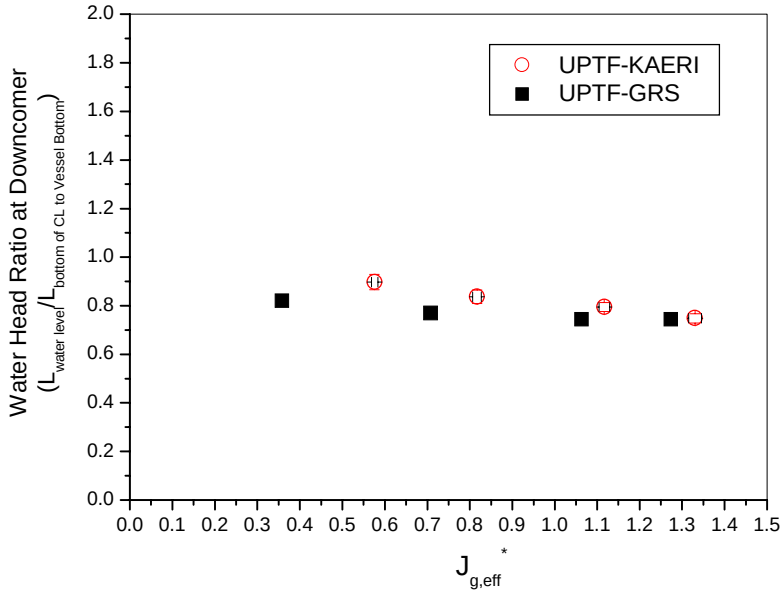

Fig. 12 Comparison of the Downcomer Water Level in the Void Height Test