

Unit Cell 규모의 Sparger 성능 실험계획 및 예비 실험결과

Unit Cell Sparger Test Program and Preliminary Test Results

박 춘경, 조 석, 송철화, 윤 영증, 정 흥준, 천 세영
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요약

한국원자력연구소는 APR1400 원자로에 사용될 Unit Cell Sparger 의 성능을 평가하기 위하여 Blowdown 실험을 수행하고 있다. 본 논문은 이러한 Unit Cell Sparger Test Program 과 CPT-3 실험의 예비분석 결과를 기술한다. CPT-3 실험은 본 실험계획에서 3 번째로 수행된 실험으로 Safety Depressurization and Vent System (SDVS) 이 작동할 때, 배관내 공기량이 IRWST 하중에 미치는 영향을 평가하기 위하여 초기 압력 14.6 MPa, 초기 증기 온도 343 ℃, 배관내 공기량 3.31 lb 조건에서 수행되었다. Air Clearing 시 수조 바닥에서 최대 동하중이 발생하였으며, 압력과의 진동주파수는 6.4 Hz 보다 작았다.

Abstract

KAERI performs blowdown tests to assess the performance of the prototype sparger which will be used in a APR1400 reactor. This report presents overview of the unit cell sparger test program and results of a preliminary analysis of the data from CPT-3 Test. CPT-3 Test was the third blowdown experiment conducted to determine the influence of air mass in the piping on the IRWST (In-containment Refueling Water Storage Tank) boundary during an operation of Safety Depressurization and Vent System (SDVS). The test was conducted from an initial system pressure of 14.6 MPa, a steam temperature of 343 ℃, and an air mass of 3.31 lb. The maximum pressure was observed at the bottom of the IRWST, and the frequency of the pressure wave was less than 6.4 Hz.

1. 서론

미래에 사용될 APR1400 원자로에는 안전성을 향상시키기 위한 여러 가지 안전계통이 설치될 예정이다. 설치가 고려되는 안전계통에는 IRWST (In-Containment Refueling Storage Tank) 를 포함한 SDVS (Safety Depressurization and Vent System) 가 포함되어 있다. SDVS 는 격납용기 내부에 과냉각수를 저장하여 비상노심냉각계통에 물을 공급하며, 또한 가압기를 통하여 증기/물을 IRWST 로 방출하여 열을 제거하고 동시에 원자

로냉각재계통의 과압을 방지하여 비상노심냉각계통이 적절하게 운전될 수 있도록 도와주는 기능을 갖는다. 따라서 이 계통은 특히 Core Damage Frequency 를 낮추고, 중대사고 대처능력을 혁신적으로 높일 수 있는 장치이다.

발전소 가압기에서 SDVS 배관을 통하여 방출되는 증기 또는 물은 Sparger 를 경유하여 IRWST 내부의 물로 방출된다. 한편 가압기에서 증기가 배관으로 방출되면 배관은 급격한 압력 및 온도천이를 경험하게 되며 따라서 배관에 커다란 하중이 발생한다. 또한 배관내부에 존재하던 공기는 가압기의 증기에 의하여 IRWST 내부의 물로 방출되는데 이 공기가 IRWST 내부 물속에서 팽창-수축되는 현상은 IRWST 경계면과 내부구조물에 막대한 하중을 가하게 된다. 이때 하중의 크기는 Sparger 설계에 따라서 달라질 수 있다. 이러한 계통의 운전방식은 현재의 PWR 에는 도입되어 있지 않은 새로운 안전개념이며, 따라서 이러한 개념을 APR1400 에 도입하기 위하여는 해당 계통을 설계하기 위한 자료와 계통 해석방법이 요구된다.

원자력연구소에서는 APR1400 에 사용될 Sparger 의 성능을 평가하고 SDVS 설계를 위한 자료를 생산하기 위하여 Unit Cell Sparger 성능 실험계획을 수립하고 현재 실험을 진행중에 있다. Unit Cell Sparger 성능 실험은 총 22 개의 실험으로 구성되며, 한국원자력연구소의 Blowdown and Condensation (B&C) Loop [1] 에서 수행된다. 실험의 목적은 다음과 같다 [2]:

- 1) Air Clearing시 IRWST 내부에서의 공기방울 거동 분석 및 이에 따른 하중 해석방법론 검증에 필요한 실험자료 생산.
- 2) Vacuum Breaker 작동시 방출배관내 열수력 거동 확인자료 생산.

이 실험을 통하여 얻어진 자료는 Sparger 성능 확인, IRWST 및 내부구조물 설계와 배관 및 지지물 설계에 사용될 수 있다. 또한 실험자료는 발전소를 설계하는 데 사용할 전산코드의 검증용으로 사용될 수 있다.

이 실험계획에 의하여 현재까지 수행된 실험은 총 15 개이며 7 개의 실험이 예정되어 있다. 각 실험에 대한 주요변수는 배관내 공기량, 밸브 개방시간, 배관온도, 및 수조 물 온도 등이다 [3]. 본 논문은 CPT-3 실험에 대한 예비 분석 결과를 기술한다. CPT-3 실험은 Unit Cell Sparger 성능실험중 3 번째 실험으로 이 실험의 주목적은 정상적인 안전감압밸브 작동 조건에서 공기가 제일 많이 나가는 Sparger 에서의 Air Clearing 하중에 대한 자료를 얻는 데 있다. 이와 더불어 Air Clearing 에 영향을 미치는 주요인자의 영향을, 기 수행된 실험 결과를 토대로, 정성적으로 기술한다. 주요 인자에 대한 정량적 영향은 22 개의 실험이 모두 완료된 후 기술될 수 있다.

2. 실험장치 개요 및 실험절차

Unit Cell Sparger 성능실험은 기존의 B&C Loop 에서 수행된다. 실험을 위하여 B&C Loop 의 증기방출계통 일부를 수정하였으며, APR1400 에 사용될 Sparger 를 부착하였다. 실험장치는 기본적으로 증기공급원인 가압기, IRWST를 모의하는 수조 (Quench Tank), 가압기와 수

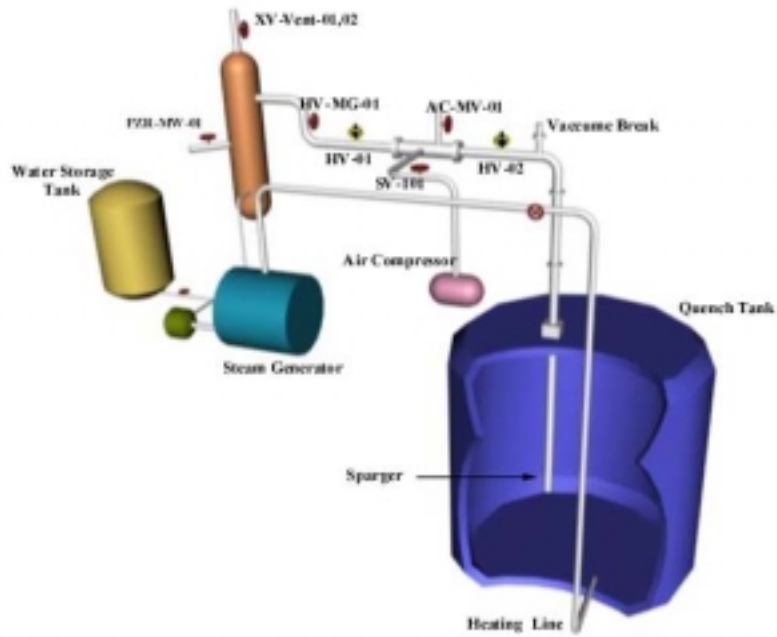


Fig. 1 Schematic Diagram of Blowdown and Condensation (B&C) Loop

조를 연결하여 증기를 방출하기 위한 방출배관 및 밸브, 증기발생기, 그리고 원형 증기분사기와 각종 계측장비로 구성된다. 실험장치의 개략적인 모습은 그림 1 과 같다.

가압기는 내부 지름이 0.6 m , 높이가 3 m 인 Cylinder 형태의 고압탱크로서 재질은 Stainless Steel 이다. 가압기의 설계 압력은 17.8 MPa 이며, 설계 온도는 $370\text{ }^{\circ}\text{C}$ 이다. 가압기에는 Heater, 증기방출배관이 장착되어 있고, 2 인치 배관을 통한 최대 16.0 MPa 의 증기/물의 방출 하중을 견딜 수 있도록 제작되었다.

수조는 가압기에서 방출된 증기 또는 포화수를 냉각시키기 위한 IRWST 모의설비로서, 내경이 3 m , 높이가 4 m 인 실린더형 저압 개방형 탱크이다. 수조의 중앙에는 가압기로부터의 고압 증기를 분사시키기 위한 Sparger 가 설치되어 있으며, 그 주변에는 증기의 응축현상을 관측하기 위한 관찰창과 계측기를 부착하기 위한 지지대가 설치되어 있다.

방출배관은 가압기에서 발생한 증기를 수조계통으로 보내주는 통로 역할을 하는 설비로서, 2 개의 방출밸브, 유량계 (Venturi-Meter), Vacuum Breaker, 및 배관과 계측기기로 구성되어 있다. 이 계통의 운전압력 및 온도는 각각 16.0 MPa , $370\text{ }^{\circ}\text{C}$ 이다. 2 개의 방출밸브 (HV201, 202) 는 2 inch Gate 밸브이며, 열림속도는 $0.6\sim 1.9$ 초 사이에서 조절될 수 있다. 두 개의 방출밸브사이에는 Air Chamber 가 설치되었다. Air Chamber 에는 고압의 공기가 축적되며, 발전소 배관내 공기량을 모의한다. 증기발생기는 수조내부의 물온도를 요구되는 값까지 가열시킨다.

본 실험에서 사용될 증기분사기는 차세대 원자로에 사용될 Sparger (M150) 와 동일한 규격으로 6 인치 Sch. 40S Pipe 로 제작되었다. Sparger 하부에는 10 mm 구경을 갖는 분사 Hole 이 총 144 개 뚫려있으며, 밑바닥에도 직경이 25 mm 인 분사구멍이 하나 뚫려있다. 또한 밑바닥에서 $1,950\text{ mm}$ 상부에 Load Reduction Ring 이 부착되어 있다.

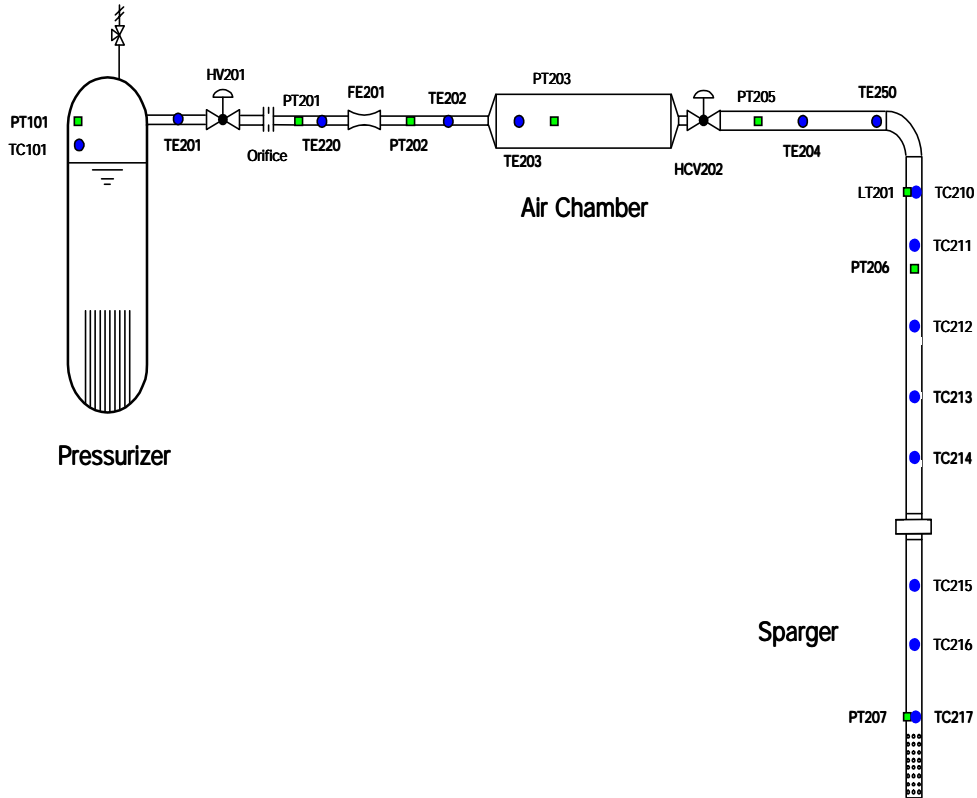


Fig. 2 Components and Instrumentations Arrangement of the B&C Loop

계측계통은 측정기와 DAS (자료획득장치) 로 구성된다. 가압기, 배관 및 Sparger 에 장착된 측정기기는 그림 2 에 표시되어있다. 증기배관 및 Sparger 에 장착된 압력계는 Signal Delay를 방지하고 빠른 반응속도를 보장하기 위하여 DRUCK 사의 Strain Gage 형 압력계측기를 사용하였다. 유량은 벤투리 튜브로 측정하였다. 동압계 (Dynamic Pressure Sensor) 는 KISTLER 사의 모델 7061B 이며, 수조벽면 및 내부에 총 9 개가 장착되었다 (그림 3). 수조내부에는 총 23 개의 열전대가 설치되어 있어 방출시 수조내부의 물온도 분포를 측정한다.

동압계측기를 제외한 계측기에 대한 DAS 의 Channel 당 Sampling Rate 는 156 Hz 이며, 동압계측용 자료취득장치의 Sampling Rate 는 각 Channel 당 8333 Hz 이다. 자료처리 프로그램은 HP-VEE 를 사용하여 작성되었다.

실험시 가압기 조건을 실험조건과 일치시키기 위하여 가압기 Heater 를 작동시켜 가압기내 물을 가열하며, 이 때 가압기와 수조는 2 개의 방출밸브로 격리시킨다. 한편 배관에 위치한 Air Chamber 에는 실험조건에 일치하는 무게의 공기가 Compressor 를 통하여 주입되며, 배관의 온도는 Tracer Heater 를 사용하여 실험조건과 일치시킨다. 실험조건이 만족되면 2 개의 방출밸브를 일정한 시간차이를 두고 연속적으로 개방시켜 실험을 시작한다. 공기 및 증기 방출은 7 초 정도 지속되며, 방출밸브를 닫음으로 실험은 종료된다.

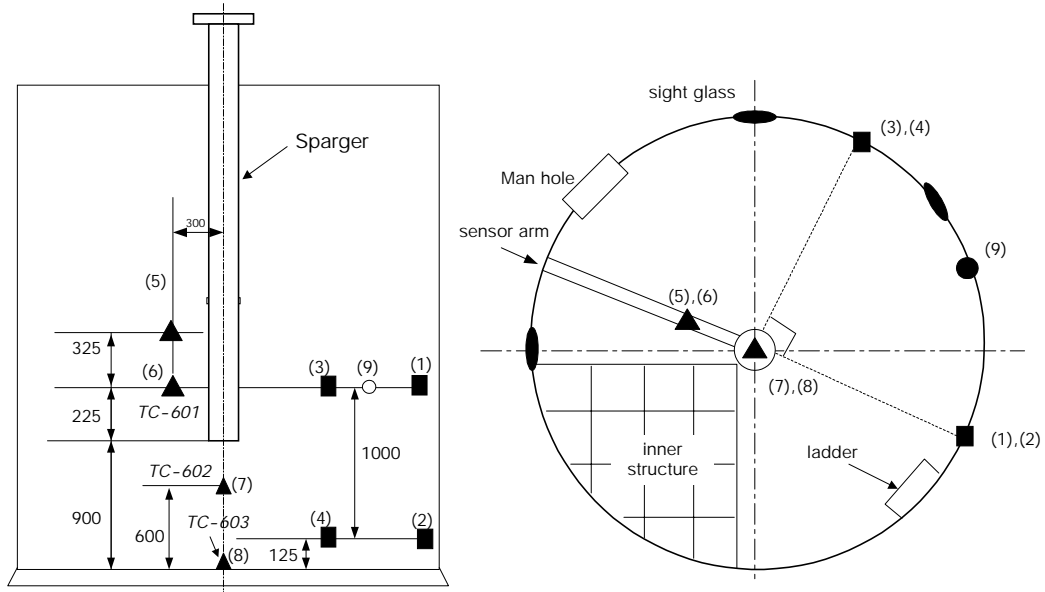


Fig. 3 Location of Dynamic Pressure Sensors and T/C in the Quench Tank

3. 테스트 매트릭스

Unit Cell Sparger 성능실험은 다음과 같이 2 종류의 실험으로 구성되며 실험을 한번 수행하면 두 가지 실험이 동시에 완료될 수 있다 [3]:

- 1) 공기방울 거동 실험
- 2) Vacuum Breaker 작동시 방출배관내 열수력 거동 실험.

“공기방울 거동 실험”은 APR1400 원자로 SDVS의 감압밸브가 개방될 때 배관에서 방출된 공기방울이 IRWST 내부에서 팽창, 압축, 및 소멸되는 과정을 모의하는 실험이다. 한편 Blowdown 과정에서 감압밸브가 닫히면 IRWST 내부 물이 Sparger를 통하여 방출배관으로 유입하게 되며 (Reflood 현상), 이때 Sparger 내부에 있는 물/증기 경계면에서 증기응축 현상이 발생하면 Water Hammer 현상이 발생할 수 있다. 이와 같이 Water Hammer 현상이 발생하면 심한 경우 배관이 파괴될 수 있다. 따라서 이를 방지하거나 그 결과를 완화하기 위한 장치 (예: Vacuum Breaker)를 설치할 필요가 있다.

Vacuum Breaker의 크기와 설치 위치는 Water Hammer 현상에 많은 영향을 미친다 [5]. “Vacuum Breaker 작동시 방출배관내 열수력거동 실험”에서는 Vacuum Breaker가 작동할 때 방출배관내의 유체의 열수력학적 거동을 조사하며, Vacuum Breaker의 적절한 크기를 정의할 수 있는 실험자료를 생산한다. 실험에는 하나의 실험규모 (6 인치) 원형 Sparger가 사용되며, Sparger는 IRWST 모의 수조 (Quench Tank) 중앙에 설치된다. Sparger와 수조 벽 및 바닥까지의 거리는 각각 1.5 m, 0.9 m이다.

공기방울 거동에 미치는 주요 인자로는 방출공기량, 밸브 개방시간, 증기유속 등이 있으며, Vacuum Break 관련 실험에서는 Vacuum Breaker 크기가 중요 인자가 된다. 이와

같은 인자에 대한 영향을 파악하기 위하여 표 1 과 같은 총 22 개의 실험을 계획하였다. 상기 인자중 공기량을 제외한 대표값은 알려져 있다. 공기량은 SDVS 작동시 각각의 Sparger 를 통하여 나가는 공기의 양으로 정의되며, Sparger 위치에 따라 서로 다른 값을 갖게 된다. 이 값의 범위는 KOPEC 이 계산한 RELAP 전산코드 결과를 이용하여 결정하였다. 즉 계산에 의하면 하나의 Sparger 에서 방출될 수 있는 공기의 양은 최소 1.89 lb 에서 최대 3.31 lb 사이에 있었다 [4]. 따라서 본 실험에서의 배관내 최대 공기량은 3.31 lb, 최소 공기량은 1.89 lb 로 설정하였다.

유로 단면적은 감압밸브의 흐름단면적 크기를 의미한다. 예로, 밸브가 하나만 열릴 경우 흐름단면적은 전체 밸브 흐름단면적 합 의 25 % 가 된다. 방출 밸브의 개방 및 폐쇄시간은 자동작동시 1.7 초, 수동작동시 0.7 초이다 [7]. 본 실험에서 밸브 개방시간은 1.7 초 및 0.7 초로 보존한다. 배관내 공기의 온도는 정상상태일 경우 50 ℃ 로 가정한다. 한편 감압밸브가 한번 작동한 다음 재작동할 경우에는 기존의 증기 배출로 인하여 50 ℃ 보다 높은 온도 (90 ℃) 로 증가하게 되며, 이에 대한 실험도 예정되어 있다. Sparger 잠김 깊이가 미치는 영향은 정상상태와 저수위 두 가지 조건에서 조사될 예정이다.

본 실험에서 수행될 테스트 매트릭스는 표 1 과 같다. 설정된 테스트 매트릭스 중에서 CPT-1 에서 5 까지의 실험은 가장 기본적인 실험으로 이 실험에서 나오는 결과는 차세대 원자로의 안전성 분석보고서의 참고자료로 사용될 수 있다 [3]. 또한 이 실험 결과는 실험방법 확립과 수조 강도 보강, 또는 계측기 선택에 대한 기초자료로 사용될 수 있다. 이러한 CPT Test Series 외에도 공기량, 밸브 개방시간, 배관내 공기 온도, 수조 물 온도, 수위 등이 Air Clearing 에 미치는 영향을 조사하기 위한 실험들이 각각 수행될 예정이다. 적절한 Vacuum Breaker 크기를 선정할 수 있는 자료는 VB-1에서 3 까지의 실험을 통하여 얻어질 수 있다. 또한 발전소에서 발생 가능한 최대 Air Clearing 하중은 ML-1 및 2 실험을 통하여 얻어진다.

4. 실험결과 예비 분석

4.1 B&C Loop 거동

CPT-3 실험은 초기 압력 14.6 MPa, 증기 온도 343 ℃, 배관내 공기량 3.31 lb 조건에서 수행되었다. HV201 은 실험 시작 후 1.78 초에 개방되기 시작하여 2.37 초에 완전히 개방되었으며, 이에 따라 가압기에서의 증기가 HV202 밸브 전단까지 진출하였다. 이와 같이 Air Chamber 로 증기가 유입됨에 따라 그림 4 및 5 에서 보는 바와 같이 배관내 압력 (PT201-203) 과 온도 (TC 201) 는 즉각적으로 증가하였다. 한편 Air Chamber 내의 유체온도 (TC203) 는 기존의 공기 때문에 비교적 서서히 증가하였으며, 최고온도도 TC201 에 비하여 낮았다.

그림 6 은 Loop 에 설치된 Venturi 유량계를 통한 증기유량의 변화를 보여준다. 그림에서 첫 번째 Peak 는 HV201 밸브 개방에 따라 8 인치 배관 (Air Chamber) 으로 증기가 급격히 흘러 들어가기 때문에 발생한 것이다. 한편 HV202 밸브는 배관과 수조사이를 격리시키고 있으므로 증기유량은 Peak 를 기록한 후 다시 영이 되었다.

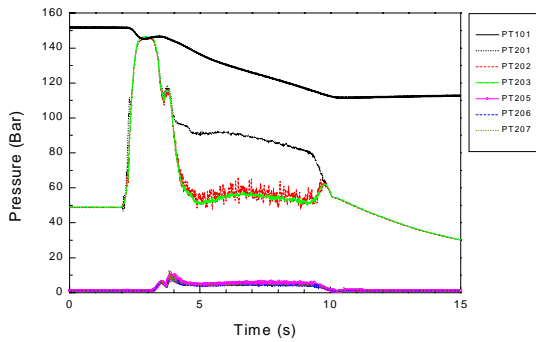


Fig. 4 Loop Pressure Variation during Blowdown (CPT-3 Test)

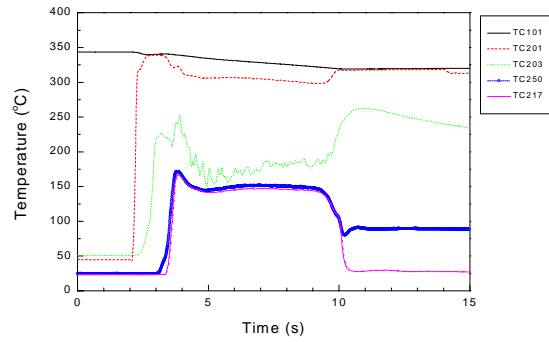


Fig. 5 Loop Temperature Variation during Blowdown (CPT-3 Test)

실험 시작 2.60 초에 HV202 가 개방되기 시작하였으며, 4.25 초에 완전히 개방되었다 (밸브 개방시간 1.65 초). HV202 가 개방되면 배관내 공기 (또는 공기/증기 혼합체) 는 Sparger 를 통하여 수조로 분출된다. Sparger 내부의 압력 (PT205, 207) 은 고온, 고압의 증기가 Sparger 로 흘러 들어가기 때문에 증가하였으며 (그림 4), Sparger 내부에 설치한 열전대 (TC217, 250) 의 온도도 증가하기 시작하였다 (그림 5).

Sparger 를 통한 배관내 공기 방출은 3.18 초에 시작하여 3.86 초에 완료된 것으로 추정된다. 3.18 초에 수조에 설치된 동압계가 압력파를 감지하였으며 (그림 7), 3.86 초에는 Sparger 제일 밑바닥의 유체 온도 (TC217) 가 최대치를 기록하고 감소하기 시작하였다. 수조내부에 설치한 열전대는 공기방출이 약 3.4 초부터 시작되었으며 3.75 초에 수조온도가 최대치를 기록하고 감소하다가 4.2 초 이후에 다시 증가하였다

3.22 초부터 HV202 밸브 전단의 압력이 급격하게 감소하였고, 3.6 초에 압력이 다시 증가하다가 3.72 초부터 다시 급격하게 감소하는 현상이 발생하였다. 실험 초기 급격한 압력 강하는 배관내 증기 유동때문에 발생하였고, 압력의 재 증가 및 감소 현상은 배관내

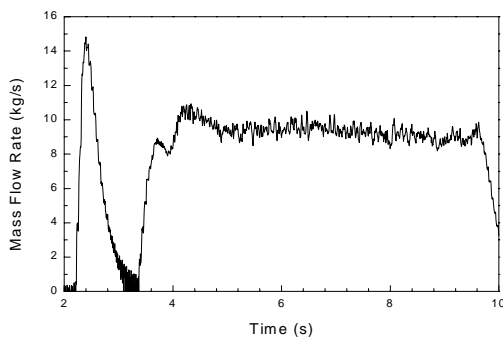


Fig. 6 Steam Mass Flow Rate vs. Time during Blowdown (CPT-3 Test)

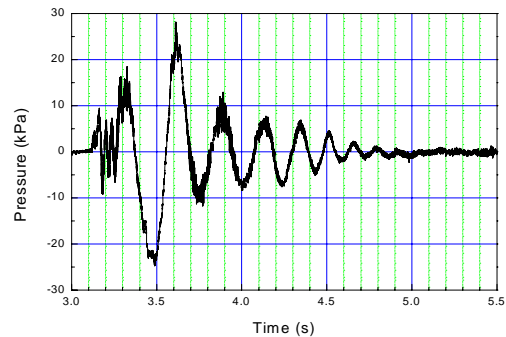


Fig. 7 Dynamic Pressure Variation at Quench Tank Wall (CPT-3 Test: DPT4)

잔여 공기의 방출시 Sparger 내의 공기의 저항으로 인하여 발생한 것으로 추정된다. 3.72 초부터는 Venturi 전후의 압력차가 급격하게 증가하다가 일정하게 유지되었다.

배관 내에서 압축된 공기는 Sparger를 통과한 후 압력이 매우 큰 공기방울 (Bubble)을 Sparger 외각에 형성하고 팽창-수축운동을 시작하여 수조안에 압력파를 발생시킨다 (그림 7). 공기방울의 팽창-수축 현상은 실험초기에 조그마한 진폭을 갖는 주기가 매우 짧은 진동파를 발생하다가 공기방울의 크기가 커지게 되면 매우 큰 진폭과 긴 주기를 갖는 진동파를 발생한 후 점차 진폭이 줄어들며, 5 초 이후에는 저주파수를 갖는 진동은 더 이상 발생하지 않았다.

공기 방출 초기의 비교적 주기가 짧고 진폭이 작은 진동파를 무시한다면, 공기방울에 의한 진동은 실험 시작 3.34 초에 시작하였으며, 2 번째 Peak 에 최대 압력 (28.0 kPa)을 발생하였다. 최대압력파가 발생한 이후에는 진폭이 급격히 감소하였으며, 5.51 초 후에는 저주파수를 갖는 진동파가 더 이상 관측되지 않았다. 3.34 초 와 5.51 초 사이에는 총 12 개의 진동파가 측정되었다. 따라서 Air Clearing 에 의한 공기 방울의 평균 진동 주기는 5.5 Hz 정도이다. 만약 초기의 비교적 작은 진동파를 포함한다면 공기방울의 평균 진동 주기는 6.4 Hz 가 된다.

Air Clearing 현상이 끝나면 증기가 수조내 물과 반응하여 응축되는 증기응축현상이 발생한다. 배관내 공기가 전부 방출되면 공기에 의한 배관내 저항이 없어지기 때문에 배관 및 Sparger 내부 압력이 비교적 일정하게 유지되었으며 (그림 4), 증기 유량도 거의 일정하게 유지되었다. 다만 가압기 내부 압력이 증기가 방출됨에 따라 감소하므로, 배관 및 Sparger 내부 압력은 전반적으로 서서히 감소하였다. 그러나 이 기간동안 Sparger 내부의 유체온도는 일정하게 유지된다 (그림 5). 이 기간동안 수조내부에서는 매우 작은 진폭을 갖고 주파수가 매우 빠른 형태의 압력파가 발생하였다.

9.15 초에 HV201 과 202 밸브가 닫히기 시작하여 10.19 초 및 10.33 초에 각각 완전히 닫혔다. 증기 방출이 감소하기 시작하면서 Sparger 내 유체온도는 감소하기 시작하였으며 (그림 8), Sparger 입구에 설치된 Vacuum Breaker 는 9.88 초와 10.15 초에 각각 열렸다 닫혔다. 이러한 현상은 Sparger 주위의 물이 방출배관 안으로 빨려 올라가는 Reflood 현상이 발생하였기 때문이다. 즉 증기 방출이 종료되면 수조내 물이 방출배관 안으로 유입하게 되며, 빨려 올라간 물과 배관내 증기의 경계면에서 증기 응축현상이 발생하여 주위 온도를 강하시키고 압력을 진공상태로 만든다. 배관에 진공이 생기면 Vacuum Breaker 는 진공을 방지하기 위하여 개방된다. 이러한 증기 응축현상이 급격히 발생하면 Water Hammer 현상이 발생할 수 있으며, 이에 의하여 방출배관이 파괴될 수도 있다.

9.88 초에 발생한 Vacuum Breaker 는 0.1 초 사이에 열렸다 닫혔으며, Loop 내 열수력 현상에 커다란 영향을 미치지 못하는 못하였다. 그러나 10.15 초에 Vacuum Break 는 약 0.35 초 정도 개방되었으며, 이러한 Vacuum Breaker 개방은 Sparger 내 유체 거동에 많은 영향을 미친 것으로 판단된다. 9.15 초에 HV201 및 202 밸브가 닫히기 시작하면서 Sparger 내부 유체의 온도는 감소하다가 밸브가 닫히기 직전 (10.0 초) 부터는 급격하게 감소하기 시작하였다. 그러나 10.15 초를 전후하여 Sparger 에서의 유체 온도는 그 위치에 따라 계

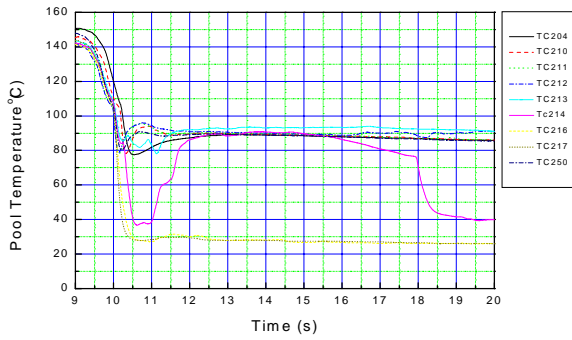


Fig. 8 Fluid Temperature in the Sparger vs. Time (CPT-3 Test)

열전대가 냉각을 멈추거나 경우에 따라서 다시 노출되어 가열되는 현상이 발생한다. 한편 Vacuum Breaker 가 다시 닫히면 증기의 응축으로 인하여 다시 진공이 생길 수 있으며, 따라서 물이 Sparger 내부로 다시 빨려 올라가거나 또는 아래 위로 진동하는 현상이 발생할 수 있다.

Sparger 밑바닥 근처, 즉 수조 바닥에서부터 높이 2.75 m 이하에 설치된 열전대 (TC216-217) 는 Vacuum Breaker 의 작동과 상관없이 주위온도까지 냉각되었다 (그림 8). 그러나 3.94 m 이상에 설치된 열전대 (TC204, 250, 210-213) 는 Vacuum Breaker 작동과 더불어 즉각적으로 냉각이 멈추었으며 실험 종료까지 그 온도를 유지하였다. 이 현상은 Sparger 내부로 물이 Sparger Header (5.91 m) 이상으로 올라갔었다는 사실을 간접적으로 말해준다. 3.44 m 에 설치된 열전대 TC214 는 Vacuum Breaker 작동과 더불어 즉각적으로 냉각이 잠시 멈추었다가 다시 냉각되었다. 그러나 10.5 초 이후에는 온도가 다시 상승하다가 15 초부터는 다시 냉각되는 현상을 보이고 있다. 이러한 현상은 수위가 Sparger 내부에서 진동하기 때문에 발생하는 것으로 추정된다. 18 초 이후 수위는 3.5 m 이상으로 유지된 것으로 판단된다.

4.2 Blowdown 시 수조내 하중 분포

수조내 공기방울 진동에 의하여 발생한 압력과 형태가 그림 7, 9, 10 에 표시되어 있다. 공기방울은 3.18 초부터 5.51 초 사이에 팽창-수축하다 소멸되었으며, 그 이후는 증기의 응축현상이 발생하였다. 수조 경계에서 측정된 최대 하중은 31.6/-32.0 kPa 로 수조 밑바닥에서 발생하였으며 (DPT8), 공기방울의 진동주기는 평균 6.4 Hz 이하로 추정된다.

수조 밑바닥에서 높이 12.5 cm 인 수조 벽에 부착된 동압계 (DPT4) 에서의 압력과 변화는 그림 7 과 같다. 약 3.18 초에 공기가 방출되기 시작하면 증기는 비교적 짧은 주기와 작은 진폭으로 3번 진동한 후 4 번째 진동 때 실험 최대의 부압 (-24.3 kPa) 과 5 번째 진동 시 최대 압력 (28.0 kPa) 을 기록하였다. 이어서 공기방울은 팽창과 수축을 반복하면서 점차 소멸하였다. 이와 같은 경향은 ABB-ATOM 사에서 수행한 수조내 압력과 거동과 약간의 차이가 있다. 즉 ABB-ATOM 의 실험결과는 첫번째 진동이나 2 번째 진

속 감소하거나 일정온도를 유지하였다 (그림 8).

이러한 현상은 Vacuum Breaker 의 작동에 따라 Sparger 내부의 물의 높이가 변하기 때문에 발생한 것으로 추정된다. 즉 Vacuum Breaker 가 작동하면 배관내로 공기가 유입되어 배관 내부의 진공이 파괴되며, 따라서 배관내 진공으로 인하여 Sparger 내부로 빨려 올라간 물이 다시 하강하게 되며, 이에 따라 물에 의하여 냉각되던

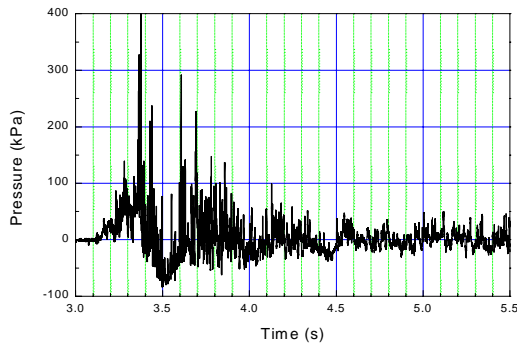


Fig. 9 Dynamic Pressure Variation at the Bottom of the Quench Tank (CPT-3 Test: DPT7)

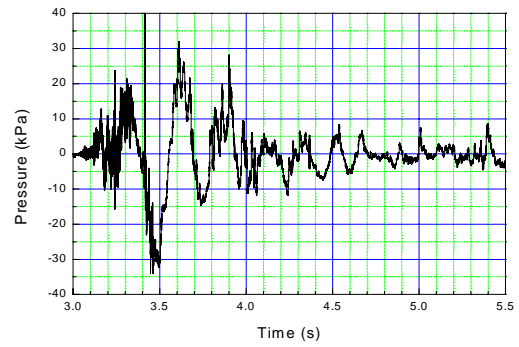


Fig. 10 Dynamic Pressure Variation at the Bottom of the Sparger (CPT-3 Test: DPT8)

동시 최대 동압이 발생하였다.

이와 같은 차이는 밸브의 개방속도와 많은 관계가 있는 것으로 추정된다. ABB-ATOM의 경우 밸브가 50 ms 이내에 개방되므로 배관내 공기가 순간적으로 하나의 공기방울을 형성하는 데 반하여, 본 실험에서는 밸브 개방시간이 길어 (1.65 초) 공기의 방출이 순간적으로 이루어지지 못하였기 때문에 이러한 결과가 발생한 것으로 생각된다. 4번째 진동시 Peak 발생시점과 5 번째 진동시 Peak 발생시점 차이는 약 0.31 초이다.

수조 밑바닥에서 높이 112.5 cm 인 수조 벽 (DPT3) 에서의 압력과 변화는 높이 12.5 cm 인 벽에서의 압력과 형태가 같으나 Peak 값은 약간 낮았다 (최대 22.4 kPa, 최소 -20.8 kPa). Sparger 바로 밑에서 30 cm 떨어지고, 그리고 수조 밑바닥에서 60 cm 높이에 설치된 동압력계 (DPT7) 는 그림 9 와 같이 매우 커다란 압력 Peak 값을 지시하고 있다. 수조 내부에서의 대체적인 압력과 형태는 수조 벽에서의 압력과 형태와 유사하나 순간적인 압력과의 Peak 값 (401 kPa) 은 벽에서의 Peak 값보다 18 배 크다. 그러나 지속시간이 7 ms 에 불과하여 Sparger 에 커다란 영향은 미치지 못한 것으로 판단된다.

한편 이 계측기 직하방으로 60 cm 밑, 즉 수조바닥에 설치된 계측기 (DPT8) 의 반응은 그림 10 과 같이 수조 벽에서의 하중 반응과 매우 유사하다. 즉 저주파수 진동과의 형태는 수조벽에서의 하중 형태와 같다. 그러나 저주파수 진동에 고주파수 진동과가 섞여 발생하며 고주파수 진동과의 Peak 값은 매우 크다.

Sparger 분사구멍에서 수평으로 22.5 cm 떨어진 수조 내부에서의 하중은 (DPT6) 벽에서의 하중보다 매우 크고 또한 순간적인 매우 큰 Peak 값을 지시하고 있다. 그러나 이 계측기에서 30 cm 위에 설치된 계측기 (DPT5) 나 벽에 설치된 계측기 (DPT 3, 4) 에서는 이보다 부드러운 형태의 압력파가 측정되었다. 이와 같은 결과로 볼 때 공기방울의 진동에 의한 하중은 거리가 멀어짐에 따라 급격하게 감소됨을 알 수 있으며, 거리가 150 cm 이상이 되면 순간적인 급격한 압력 Peak 값은 측정되지 않았다. 이러한 결과는 IRWST 내 구조물 설치 위치에 대한 Guideline 으로 사용될 수 있다.

4.3 공기량에 따른 하중 비교

발전소에서 Sparger 를 통하여 방출되는 공기의 양은 Sparger 위치에 따라 달라질 수 있다. 예로, KOPEC 에서 RELAP 코드로 계산한 APR1400 의 SDVS 작동시 Sparger 에서 방출되는 공기의 양은 최저 1.89 lb 에서 최대 3.31 lb 로 1.75 배 정도 차이가 난다 [4]. 따라서 IRWST 및 내부구조물에 대한 방출되는 공기의 양에 따른 Air Clearing 하중 변화를 정량화시킬 필요가 있다. 이를 위하여 본 실험계획에서는 공기량이 1.89 lb 에서 3.31 lb 로 변화할 때의 Air Clearing 하중을 측정하기 위한 실험을 수행하고 있다.

CPT-1, 2, 및 3 실험은 모든 조건이 정상적 발전소 운전 조건과 같으나 공기량만 다른 경우에 대한 실험이다. 실험시 DPT3 으로 측정된 압력파가 그림 11-13 에 표시되어 있다. Air Clearing 하중에 공기량이 미치는 영향은 거의 없는 것으로 추정된다. 예로 DPT3 계측기로 측정된 최대 하중은 25.3, 19.2, 22.4 kPa 로 공기량이 작을 때의 하중이 공기량이 클 때보다 오히려 더 큰 것으로 나타났다 (그림 14). 또한 최대 부하중은 -22.9, -21.2, -20.8 kPa 로 큰 차이를 보이지 않았으며, 압력파의 형태는 공기량과 상관없이 매우 유사하다.

첫번째 커다란 Positive Peak 이 발생한 후 각 진동에서의 최대 Peak 하중이 최대 Peak 하중의 10 % 에 달한 진동까지의 소요시간은 각각 1.58, 1.33, 및 1.5 초였다. 또한 그 진동과까지의 진동수는 각각 8, 6, 7 Cycle 이었으며 평균 주파수는 각각 5.1, 4.5, 및 4.7 Hz 로 뚜렷한 특성을 보여주지는 않는다. 다만 공기량이 작을수록 공기방울의 진동이 빠르고, 진폭의 감쇠가 서서히 이루어지는 특성이 관찰되었다. 한편 Fundamental Frequency (첫번째 및 두번째 주된 진동과의 Peak 치 사이의 시간의 역수) 도 공기량이 클수록 작아지는 경향을 보인다 (3.8 Hz, 3.0 Hz, 3.2 Hz).

4.4 밸브 개방속도에 따른 하중 비교

일반적으로 밸브의 개방속도는 Air Clearing 하중에 많은 영향을 미칠 것으로 예상된다. 즉 밸브가 아주 천천히 열리면 방출배관에 급격한 압력상승이 일어나지 않으며, 따

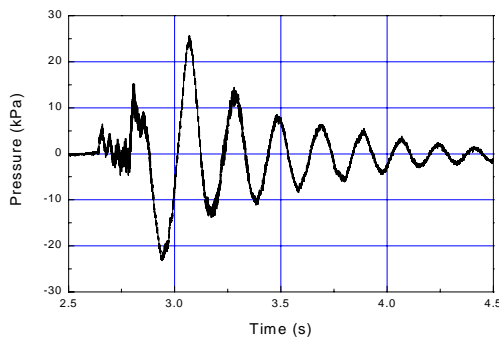


Fig. 11 Dynamic Pressure Variation during CPT-1 Test (DPT3)

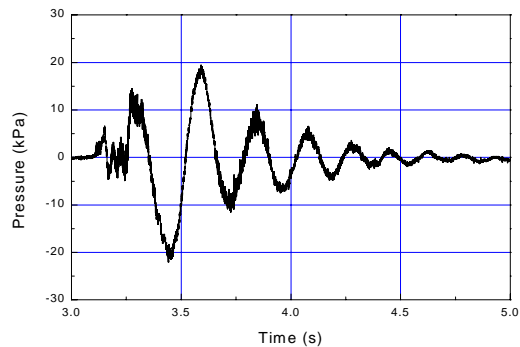


Fig. 12 Dynamic Pressure Variation during CPT-2 Test (DPT3)

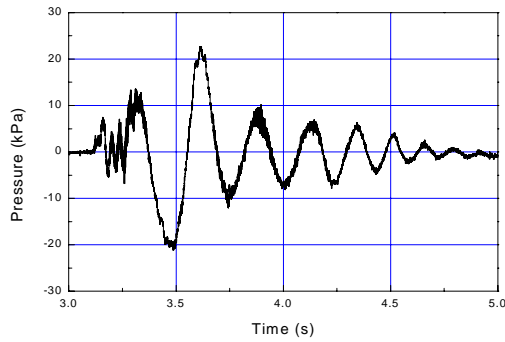


Fig. 13 Dynamic Pressure Variation during CPT-3 Test (DPT3)

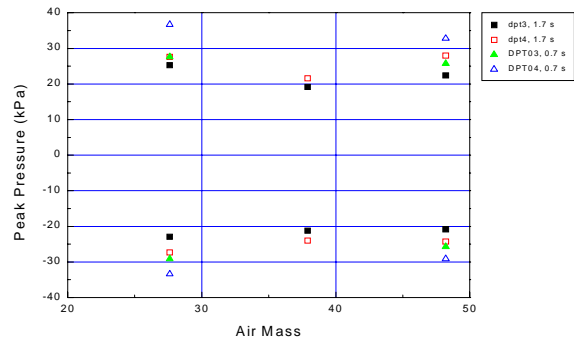


Fig. 14 Effect of Air Mass and Valve Opening Time on Maximum Peak Pressure

라서 Sparger를 통한 공기도 서서히 방출될 것으로 예상된다. 공기가 서서히 방출되는 경우의 공기방울 내부압력은 밸브가 급격하게 열리는 경우보다 매우 작게 된다. 따라서 Air Clearing 시 최대하중은 밸브개방속도가 늦을수록 작아질 것으로 판단된다.

본 실험계획에서 수행된 CPT-4 실험은 CPT-1 실험과 비교하여 밸브 개방속도가 0.7 초로 단축되었고, 밸브 유로 단면적이 1/4 로 축소된 것을 제외하면 나머지 인자는 다 같다. 마찬가지로 CPT-5 실험은 CPT-3 실험과 비교하여 밸브속도와 밸브 유로 단면적을 제외하고는 똑같은 조건에서 실험이 수행되었다. CPT-4 및 CPT-5 실험에서의 증기 유량은 CPT-1 및 CPT-3 실험에 비하여 약 절반이하로 감소되었음에도 불구하고 Air Clearing 시 최대 Positive 하중은 각각 33 %, 및 17 % 증가하였다 (그림 14). 또한 최대 Negative 하중도 각각 22 %, 및 20 % 증가하였다. 밸브의 유로 단면적이 같은 경우에 대한 밸브의 개방속도 영향에 대한 실험 결과가 없기 때문에 최종적인 결론을 내리기는 힘들다. 그러나 밸브 개방속도의 증가는 Air Clearing 시 하중을 상당히 증가시키는 요소로 판단된다.

5. 결론

한국원자력연구소는 APR1400 에 사용될 Unit Cell Sparger 의 성능을 평가하기 위하여 22 개의 Blowdown 실험으로 구성된 Unit Cell Sparger Test Program을 수립하고 실험을 진행하고 있다.

CPT-3 실험은 본 실험계획에서 3 번째로 수행된 실험으로 Safety Depressurization and Vent System (SDVS) 가 작동할 때, 배관내 공기량이 IRWST 하중에 미치는 영향을 평가하기 위한 가장 기본적인 실험이다. CPT-3 실험의 예비분석 결과는 다음과 같다.

Blowdown 초기에 배관에는 급격한 가압현상이 발생하였고, 수조에서는 커다란 공기방울의 팽창-수축 운동에 의하여 압력파가 발생하였다. 공기방울의 팽창-수축 운동은 2 초 이내에 완료되었으며, 이어서 증기응축현상이 발생하였다. Air Clearing 시 수조내에서 발

생한 최대 압력은 + 31.6 kPa, - 32.0 kPa 이었으며, Sparger 직하방, 수조 바닥에서 발생하였다. 또한 Air Clearing 현상에 의한 진동파의 진동주파수는 6.4 Hz 보다 작았다.

Air Clearing 시 발생하는 압력파의 크기는 거리에 반비례하며, 거리가 0.9 m 이하가 되면 순간적인 급격한 압력파가 발생할 수 있다. 따라서 구조물을 Sparger 로부터 1.5 m 이내에 설치할 때는 주의를 하여야 한다.

감압밸브가 닫힐 때에는 수조의 물이 Sparger Header (수면 위 2.4 m) 까지 올라갔을 것으로 판단된다. 한편 실험장치에 부착되어 있는 2.5 inch Vacuum Breaker (Sparger 유동면적의 17 % 상당) 는 Reflooding 에 의한 수위의 상승을 적절하게 완화할 수 있었다.

배관내 공기량의 대소가 Air Clearing 시 최대 하중에 미치는 영향은 거의 없었다. 다만 공기량이 많을 경우 공기방울의 팽창-수축운동이 느려지나 진폭의 감쇠는 오히려 빨라졌다. 밸브의 개방속도는 Air Clearing 시 최대 하중에 많은 영향을 미치는 것으로 보인다. 밸브 개방속도를 1.7 초에서 0.7 초로 감소시키면 최대하중이 증가한다.

후기

본 연구는 과학기술부 원자력 중장기 연구개발사업의 일환으로 이루어졌으며 이에 대하여 관계자 여러분께 감사드린다.

참고문헌

- [1] 박춘경 외, "고압증기 방출 및 응축 실험장치의 구축," KAERI/TR-941/98, 1998
- [2] 박춘경, "차세대원자로 Sparger 성능실험 요건서", 53381-SPGR-TR001, Rev. 0, 한국원자력연구소, 1999. 9.
- [3] 박춘경, "차세대원자로 Sparger 성능실험 Test Matrix", 53121-SPGR-TR002, Rev. 1, 한국원자력연구소, 2000. 11.
- [4] KOPEC, "Sparger 공기방출량 분석결과 통보," Memo, NES/RD-20000005M, 2000. 9
- [5] 김환열 외, "차세대원자로 증기분사기 개발 방법론," KAERI/TR-1337, 1999.
- [6] ABB-Atom, "Experimental Investigation of Steam Vent Clearing Phenomena at System Relief into a Condensation Pool of Water," AE-RL-1630, 1975.
- [7] 한국전력기술회사, "IRWST Thermal Hydraulic Load Analysis Report," N-001-END461-201, February 1999.
- [8] J.J. Holan et al., "MARK II Containment Supporting Program: Caorso Safety Relief Valve Discharge Test - Phase II Test Report," NEDO-24757, July 1980.
- [9] 조석 외, "Unit Cell 규모 Sparger 실험을 위한 실험절차서," 53121-SPGR-TP-001, 53221-UNICELL-TP-001, Rev. 0, 2001

Table 1. Test Matrix

	공기량	밸브 개방/ 폐쇄시간	가압기 압력	기온	수온	VB ID	밸브 면적	수위
CPT-1	최소	1.7초/1.0초	저압	50 ℃	20 ℃	Full	Full	3.5 m
CPT-2	중간							
CPT-3	최대							
CPT-4	최소	0.7초/1.0초					25 %	
CPT-5	최대							
QWT-1	최소	1.7초/1.0초	저압	50 ℃	60 ℃	Full	Full	3.5 m
QWT-2					80 ℃			
QWT-3					90 ℃			
QWT-4	최대				60 ℃			
QWT-5					80 ℃			
QWT-6					90 ℃			
VB-1	최소	0.7 초/1.0초	저압	50 ℃	20 ℃	3 %	Full	3.5 m
VB-2	중간					2.5 %		
VB-3	최대					2.0 %		
AT-1	최대	0.7초/1.0초	저압	고온	Worst	Optimal	Full	3.5 m
AT-2		1.7초/1.0초						
SMF-1	최대	0.7초/1.0초	고압	50 ℃	50 ℃	Optimal	Full	3.5 m
SMF-2		1.7초/1.0초						
WL-1	최대	0.7초/1.0초	저압	50 ℃	20 ℃	Optimal	Full	저수위
WL-2		1.7초/1.0초						
ML-1	최대	1.7초/1.0초	저압	Worst	Worst	Optimal	Full	Worst
ML-2		0.7초/1.0초						