2003 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

Steam Sparger 의 증기응축성능 실험계획 및 예비 실험결과

A Test Program for Steam Condensation Capability of Steam Sparger and Preliminary Test Results

박 춘경, 전 형길, 윤 영중, 김 연식, 송 철화, 강 형석

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150
E-mail: ckpark1@kaeri.re.kr

요약

한국원자력연구소는 APR1400 원자로에 사용될 Unit Cell Sparger 의 증기응축 성능을 평가하기 위한 실험을 수행하고 있다. 본 논문은 이러한 증기응축 실험계획 개요와 천이상태 증기응축 실험에 대한 예비분석 결과를 기술한다. 천이상태 증기응축 실험은 APR1400 에 사용될 원형 Sparger 의 증기응축 성능을 파악하기 위하여 수행되었으며, B&C Loop 의 가압기에 저장된 고압의 증기를 Quench Tank 내 물로 분사시켜 증기 응축과정을 조사하였다. 가압기 초기 압력은 15.0 *MPa*, 초기 증기 온도 343 ℃ 이었으며, Quench Tank 내 물의 온도는 20 – 95 *ºC* 의 범위에 있었다. 증기응축시 최대하중을 발생시키는 증기유속이 물온도의 함수로 도출되었으며, 이 유속은 기존 Hole 에 대한 증기응축실험에서 얻은 Condensation Oscillation 이 시작하는 증기유속 범위에 속하였다. 측정된 Quench Tank 바닥에서의 최대하중은, 항상 벽에서의 하중보다 컸으며, 특히 높은 물온도 조건에서, 벽보다 6 배 정도 크게 계측되었다.

Abstract

KAERI performs blowdown tests to assess the performance of the prototype sparger that will be used in a APR1400 reactor. This report presents overview of the unit cell sparger steam condensation test program and results of transient steam condensation tests. Transient steam condensation tests were performed to determine the influence of pool water temperature on the steam condensation characteristics. The tests were conducted at the B&C Loop in KAERI from an initial system pressure of 15.0 *MPa*, a steam temperature of 343 ℃, and pool temperature of 20 – 95 ℃. Steam mass flux that generate the maximum load to the quench tank structure during steam condensation are identified as a function of water temperature and the data trends are similar to the transition regime of oscillation condensation-stable condensation. The maximum load at the bottom of the quench tank is always bigger that that at the wall and is 6 times higher than that at the wall for higher pool temperature condition.

1. 서론

미래에 사용될 APR1400 원자로에는 안전성을 향상시키기 위한 여러 가지 안전계통이 설치될 예정이다. 설치가 고려되는 안전계통에는 IRWST (In-Containment Refueling Water Storage Tank) 와 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 원자로냉각재계통의 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 [1].

발전소 가압기에서 SDVS 배관을 통하여 방출되는 증기 또는 물은 Sparger 를 경유하여 IRWST 내부의 물로 방출된다. 가압기에서 증기가 배관으로 방출되면 배관에 급격한 압력 및 온도천이로 인하여 커다란 하중이 발생한다. 또한 배관내부에 존재하던 공기는 가압기의 증기에 의하여 IRWST 내부의 물로 방출되며 이 공기가 IRWST 내부 물속에서 팽창-수축되는 현상은 IRWST 경계면과 내부구조물에 막대한 하중을 가하게 된다 (Air Clearing 현상) [2]. 배관내 공기가 완전히 빠져 나가면 가압기내 증기는 IRWST 내부 물과 직접 접촉하여 증기 응축현상이 발생한다. 증기 응축현상에 의하여 발생되는 하중은 Air Clearing 현상에 의하여 발생하는 하중보다 일반적으로 작다. 그러나 증기 응축은 구조물이나 IRWST 벽과 바닥에 반복적으로 하중을 발생시켜 피로현상을 발생시킬 수 있으며, 고온에서는 불안정응축이 발생하여 구조물 등의 파괴를 유발할 수도 있다.

따라서 발전소에 사용될 Steam Sparger 는 이러한 하중을 최소한으로 유지할 수 있도록 설계되어야 한다. APR1400 에 사용될 Steam Sparger 의 Air Clearing 현상에 대한 안전성은 한국원자력 연구소에서 수행된 실험을 통하여 입증된 바 있다 [3,4,5]. 그러나 이 Sparger 의 증기 응축에 대한 특성과 불안정응축 발생여부 등 발전소 설계 및 안전성 해석과 입증에 필요한 자료는 충분하지 않은 실정이다.

원자력연구소에서는 APR1400 에 사용될 Sparger 의 증기응축에 관한 실험자료를 얻기 위한 실험을 진행하고 있다. 증기응축에 관한 실험은 원형 Sparger 와 동일한 Hole Pattern 을 갖는 Sparger 에 대한 정상상태 응축실험과 원형 Sparger 에 대한 천이상태 응축실험으로 나누어 진다. 두 실험은 한국원자력연구소의 Blowdown and Condensation (B&C) Loop [6] 에서 수행된다.

실험의 목적은 다음과 같다:

1) 증기 응축시 IRWST 내부에서의 증기응축 특성 분석 및 이에 따른 하중 해석방법론 검증에 필요한 실험자료 생산.
2) Condensation Regime Map 작성을 위한 실험자료 생산
3) 원형 Sparger 의 응축 특성자료 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 천이상태 응축실험이 수행되었으며 정상상태 응축실험이 진행중에 있다. 천이상태 응축실험에 대한 주요변수는 수조 물 온도이며 가압기 초기 증기압력 및 온도는 15.0 *MPa*, 353 ℃ 로 일정하다. 본 논문은 증기응축 실험계획 개요와 천이상태 응축실험에 대한 예비 분석 결과를 기술한다.

2. 실험장치 개요 및 실험절차

증기응축실험은 B&C Loop (그림 1) 에서 수행된다. 천이상태 응축실험에는 APR1400 에 사용될 Sparger (그림 2) 가 사용되었으며, 정상상태 응축실험에는 원형 Sparger 와 동일한 Hole Pattern 을 갖는 모의 Sparger (그림 3) 가 사용될 예정이다. B&C Loop 는 기본적으로 증기공급원인 가압기, IRWST를 모의하는 수조 (Quench Tank), 가압기와 수조를 연결하여 증기를 방출하기 위한 방출배관 및 밸브, 그리고 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 ℃ 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 ℃ 이다. 2 개의 방출밸브 (HV201, 202) 는 2 inch Gate 밸브이며, 열림속도는 0.6 1.9 초 사이에서 조절될 수 있다.

천이상태 응축실험에서 사용된 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 (16 Holes x 9 Rows) 뚫려있으며, 밑바닥에도 직경이 25 *mm* 인 분사구멍이 하나 뚫려있다. 또한 밑바닥에서 1,955 *mm* 상부에 Load Reduction Ring (LRR) 이 부착되어 있다 (그림 2) .

정상상태 응축실험에서 사용될 증기분사기는 차세대 원자로에 사용될 Sparger (M150) 와 동일한 Hole Pattern 을 갖는다. Sparger 는 6 인치 Sch. 40S Pipe 로 제작되었으며 Sparger 하부에는 10 *mm* 구경을 갖는 분사 Hole 이 총 64 개 (16 Holes x 4 Rows) 뚫려있다. 그러나 LRR 과 Bottom Hole 은 설치되지 않았다 (그림 3).

계측계통은 측정기기와 DAS (자료획득장치) 로 구성된다. 가압기, 배관 및 Sparger 에 장착된 측정기기는 그림 1 에 표시되어있다. 증기배관 및 Sparger 에 장착된 압력계는 Signal Delay를 방지하고 빠른 반응속도를 보장하기 위하여 DRUCK 사의 Strain Gage 형 압력계측기를 사용하였다. 유량은 벤튜리 튜브로 측정하였다. 동압계 (Dynamic Pressure Sensor) 는 KISTLER 사의 모델 7061B 이며, 수조벽면 및 내부에 총 9 개가 장착되었다 (그림 4). 천이상태 응축실험시 수조내부에는 총 23 개의 열전대가 설치되어 있어 증기방출시 수조내부의 물온도 분포를 측정한다.

동압계측기를 제외한 계측기에 대한 DAS 의 Channel 당 Sampling Rate 는 78 *Hz* 이며, 동압측정용 자료취득장치의 Sampling Rate 는 각 Channel 당 8333 *Hz* 이다. 자료처리 프로그램은 HP-VEE 를 사용하여 작성되었다.

천이상태 응축실험시 가압기 조건을 실험조건과 일치시키기 위하여 가압기 Heater 를 작동시켜 가압기내 물을 가열하며, 이 때 가압기와 수조는 2 개의 방출밸브로 격리시킨다. 배관의 온도는 Tracer Heater 를 사용하여 실험조건과 일치시킨다. Quench Tank 내부 물은 별도의 증기를 사용하여 가열시킨다. 실험조건이 만족되면 2 개의 방출밸브를 일정한 시간차이를 두고 연속적으로 개방시켜 실험을 시작한다. 공기 및 증기 방출은 40 초 지속되었으며, 방출밸브를 닫음으로 실험은 종료된다.

3. 테스트 매트릭스

응축실험은 천이상태 응축실험과 정상상태 응축실험으로 구성되며, B&C Loop 의 가압기, 증기방출배관 및 밸브, Quench Tank 와 증기방출 배관내 계측기, 및 Quench Tank 의 Dynamic Pressure Sensor 는 두가지 실험에서 공통적으로 사용된다. Sparger 는 실험에 따라 서로 달리 설치되며 Quench Tank 내 온도계도 실험에 따라 달리 설치된다. 실험시 Quench Tank 에서의 응축특성과 Quench Tank 내 열혼합현상이 동시에 측정된다.

천이상태 응축실험에서는 APR1400 에서 사용될 원형 Sparger 가 설치되었으며, Quench Tank 내 물 온도가 20 ℃ 에서 40, 60, 70, 80, 90, 및 95 ℃ 까지 변화되었다. 그러나 가압기 초기 증기압력 및 온도는 15.0 *MPa*, 353 ℃ 로 일정하였다.

정상상태 응축실험에서는 원형 Sparger 의 일부를 모의한 축소된 Sparger 가 사용되었다. 이 Sparger 에는 직경이 10 *mm* 인 Hole 이 총 64 개 (16 Holes x 6 Rows) 가공되어 있으며, 바닥에는 증기 방출구멍이 없고, LRR 도 설치되지 않는다. 이 실험에서 주요 실험인자는 Quench Tank 물온도와 증기 질량유속이며 가압기 초기 증기압력 및 온도는 15.0 *MPa*, 353 ℃ 로 일정하다. Quench Tank 물온도는 천이상태 응축실험과 동일하게 20 ℃ 에서 40, 60, 70, 80, 90, 및 95 ℃ 까지 변화시킬 예정이다. 한편 증기 질량유속은 약 150 $kg/m^2\text{-}s$ 에서 550 $kg/m^2\text{-}s$ 까지 50 $kg/m^2\text{-}s$ 씩 변화시킨다.

본 정상상태 응축실험에서 수행될 테스트 매트릭스는 표 1 과 같다. 증기 질량유속의 범위는 물 온도에 따라 서로 다르며, 이 값은 기 수행된 Single 및 Four Hole Sparger 실험결과와 ABB-ATOM 실험결과를 참고하여 작성되었다.

표 1. 정상상태 응축실험 Test Matrix

물 온도 (℃)	증기 질량유속 ($kg/m^2\text{-}s$)
20	150, 200, 250, 300, 350
40	150, 200, 250, 300, 350
60	150, 200, 250, 300, 350
70	250, 300, 350, 400, 450
80	250, 300, 350, 400, 450
90	300, 350, 400, 450, 500
95	350, 400, 450, 500, 550

4. 천이상태 응축실험 결과 예비분석

물온도 20 ℃ 인 천이상태 응축실험에서 얻어진 증기유량은 그림 5 와 같다. 증기유량은 밸브가 개방되면 즉각적으로 증가하며, 배관내 공기가 완전하게 방출될 때까지 진동하다가 최고 약 780 $kg/m^2\text{-}s$ 까지 증가한 후 서서히 감소하였다. 이러한 유량 변화는 물온도 조건과 상관없이 동일하게 발생하였다. 물온도가 20 ℃ 인 천이상태 응축실험에서 Quench Tank 벽에서 측정한 하중의 변화는 그림 6 과 같다. 그림에서 보는 바와 같이 초기 Air Clearing 현상에 의한 하중의 진동이 끝난 후 증기 응축에 의한 하중은 비교적 작은 진폭을 갖고 진동하였으며, 이러한 경향은 증기질량이 상당한 정도로 감소할 때까지 유지되었다.

약 23 초를 전후하여 증기 응축에 의한 하중은 급격하게 그 진폭이 증가하였다. 이러한 경향은 증기응축형태가 Stable Condensation (SC) 에서 Condensation Oscillation (CO) 로 변화하기 때문에 발생하는 것으로 추정된다. 증기응축시 최대 하중도 이 시기에 발생하였으며 Quench Tank 벽 (DPT3) 에서의 Maximum Peak to Peak 하중은 18.9 *kPa* 이었다. 한편 Quench Tank 바닥에서 측정한 하중 (DPT8: 그림 7) 은 그 경향이 벽에서 측정한 경향과 유사하나 진폭이 더 커지고 변화가 심하여진 것을 알 수 있다. 이러한 경향은 Air Clearing 하중을 감소시키기 위하여 Sparger 바닥에 가공한 25 *mm* Hole 을 통한 증기의 응

축현상 때문에 발생한 것으로 추정된다.

그림 8 은 물온도가 60 ℃ 인 천이상태 응축실험에서 Quench Tank 벽에서 측정한 하중의 변화를 나타낸 것이다. 물온도가 20 ℃ 인 천이상태 응축실험에서의 경향과 달리 CO 가 시작하는 지점이 명확하지 않으며 하중은 증기유속이 감소함에 따라 한동안 계속 증가하였다. 이러한 경향은 물온도가 60℃ 이상에서 공통적으로 발생하였다.

그림 9 는 천이상태 응축실험에서 Quench Tank 벽 및 바닥에서 측정한 Maximum Peak to Peak 하중을 온도의 함수로 표시한 그림이다. Quench Tank 벽에서의 최대 하중은 항상 바닥에서의 하중보다 작으며, 물온도가 60℃ 이상에서는 급격하게 감소하였다. 이에 반하여 바닥에서의 하중은 물온도가 90℃ 에서 최대 값 (61.5 *kPa*) 을 나타내며, 95 ℃ 가 되면 하중이 감소하였다. 바닥에서의 Maximum Peak to Peak 하중은 ABB-ATOM 에서 수행한 실험에서 얻어진 정상상태 하중 경향과 비교적 잘 일치하고 있다. ABB-ATOM 과 본 연구에서 사용된 실험장치의 주된 차이는 Sparger 바닥에서 Quench Tank 바닥까지의 길이이며 ABB-ATOM 의 경우 그 길이가 더 길었다 (1.87 *m* vs. 0.9 *m*).

본 연구소에서는 이 증기응축실험계획의 일환으로 Single 및 Four Hole Sparger 에 대한 실험을 수행하고 이러한 Sparger 에 대한 Condensation Regime 을 구분하였다. 그 결과 Hole 을 갖는 Sparger 와 Pipe 나 Nozzle 형태의 Sparger 에서의 Condensation Map [7,8] 에 차이가 있음을 발견하였다 [9]. 그림 10 는 이러한 Single 및 Four Hole Sparger 에 대한 Condensation Regime 을 보여준다. 본 천이상태 실험에서 얻어진 Maximum Peak to Peak 하중을 발생시키는 유속을 이 Condensation Regime Map 에 표시하였다 (그림 10). 그 결과 원형 Sparger 에서 최대 하중을 발생시키는 유속은 Single 및 Four Hole Sparger 에서 측정한 Condensation Oscillation-Stable Condensation 경계영역에 분포하고 있었다.

천이상태 응축실험 결과와 ABB-ATOM 정상상태 실험결과 [10] 를 비교하여 볼 때 Single 및 Four Hole Sparger 에서의 Condensation Regime Map 의 유효성이 근거가 있음을 알 수 있다. 다중 분사 Hole 을 갖는 Sparger 에서의 Condensation Regime Map 은 앞으로 수행될 정상상태 응축실험을 통하여 구체화될 것으로 기대된다.

5. 결론

한국원자력연구소는 APR1400 에 사용될 Unit Cell Sparger 의 증기응축성능을 평가하기 위하여 증기응축실험계획을 수립하고 실험을 진행하고 있다. 증기응축실험은 천이상태 응축실험과 정상상태 응축실험으로 나뉘어진다. 물온도가 각각 20, 40, 60, 70, 80, 90, 95 ℃ 인 경우에 대한 천이상태 응축실험이 완료되었으며 현재 정상상태 응축실험이 수행 중에 있다.

천이상태 응축실험 예비해석 결과는 다음과 같다.

1) Quench Tank 바닥에서의 Maximum Peak to Peak 하중은 벽에서의 하중보다 항상 크며, 90 ℃ 에서 바닥에서의 하중은 벽보다 6 배 크다.
2) Quench Tank 바닥에서의 Maximum Peak to Peak 하중은 물온도가 90 ℃ 까지는 물온도가 증가할수록 증가하며, 그 최대 값은 61.5 *kPa* 이다.
3) Maximum Peak to Peak 하중이 발생하는 유속은 Condensation Regime 이 Stable Condensation 에서 Condensation Oscillation 으로 천이하는 시점에서의 유속과 같은 수준이다.

앞으로 수행될 정상상태 응축실험을 통하여 다중 분사 Hole 을 갖는 Sparger 에서의 Condensation Regime Map 이 구체화될 것으로 예상된다.

후기

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

참고문헌

[1] 한국전력기술회사, “IRWST Thermal Hydraulic Load Analysis Report," N-001-END461-201, February 1999.

[2] 김환열 외, "차세대원자로 증기분사기 개발 방법론," KAERI/TR-1337, 1999.

[3] C.K. Park et al., “Unit Cell Sparger Test Program and Preliminary Test Results for APR1400,” ASME PVP 2002 Conf., 2002.

[4] C.K. Park et al., “Influence of Key Parameters on the APR1400 IRWST Pressure Loads,” NTHAS3, 2002.

[5] C.K. Park et al., “Hydrodynamic Loads Induced by Air Clearing during Rapid Depressurization through a Unit Cell Sparger in APR1400,” PBNC2002, 2002.

[6] 박춘경 외, “증기 방출 및 응축 실험장치의 구축," KAERI/TR-941/98, 1998.

[7] Y.S. Kim et al., “An Experimental Investigation of Direct Condensation of Steam Jet in Subcooled Water,” J. of the Korean Nuclear Society, 20(1), pp. 45-57, 1997.

[8] S. Cho et al., “An Experimental Investigation of Dynamic Pressure Pulse in Direct Condensation of Steam Jets Discharging into Subcooled Water,” NTHAS08, Pusan, Korea, pp. 291-298, 1998.

[9] 김연식 외, “GIRLS 장치 증기제트 응축실험 보고서,” KERI/TR-2476/2003, 2003.

[10] ABB-Atom, "Experimental Investigation of Steam Vent Clearing Phenomena at System Relief into a Condensation Pool of Water," AE-RL-1630, 1975.

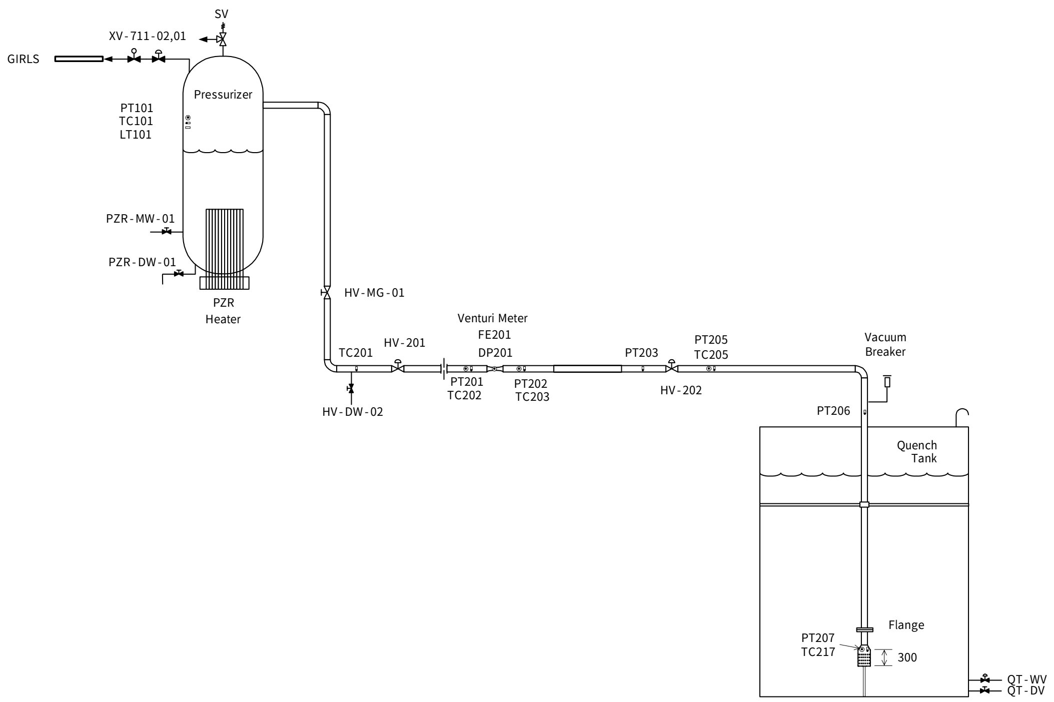

Fig. 1 Schematic Diagram of Blowdown and Condensation (B&C) Loop

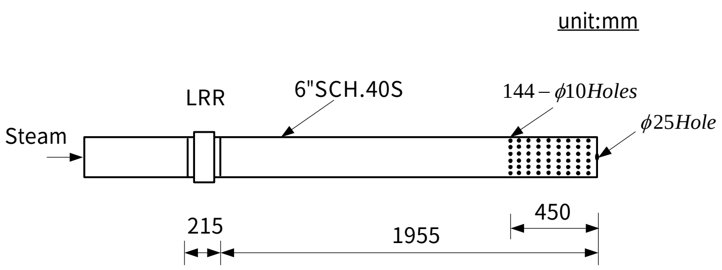

Fig. 2 Configuration of the APR1400 I-Sparger

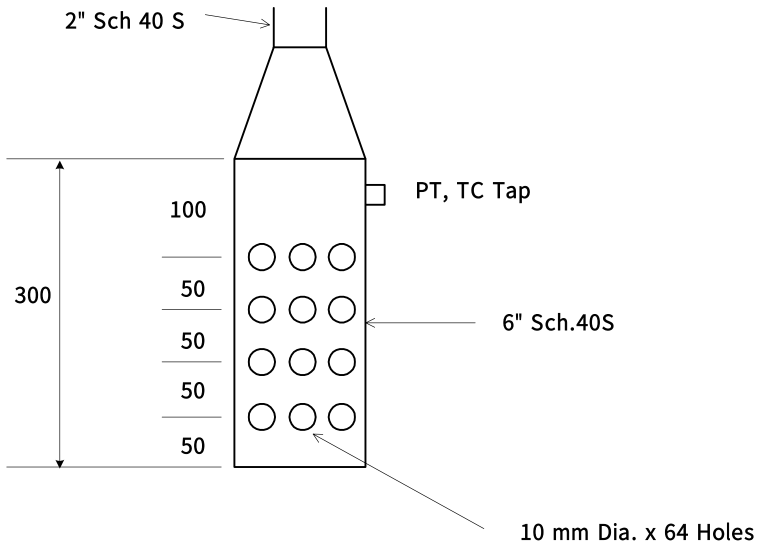

Fig. 3　Configuration of the Sparger Simulator

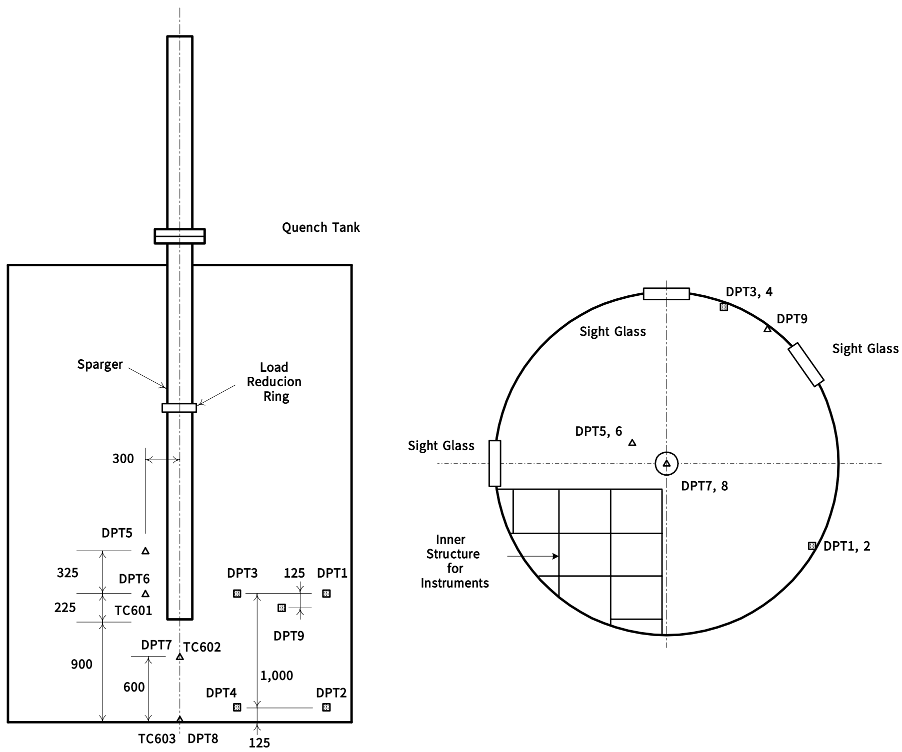

Fig. 4　Location of Dynamic Pressure Sensors in the Quench Tank

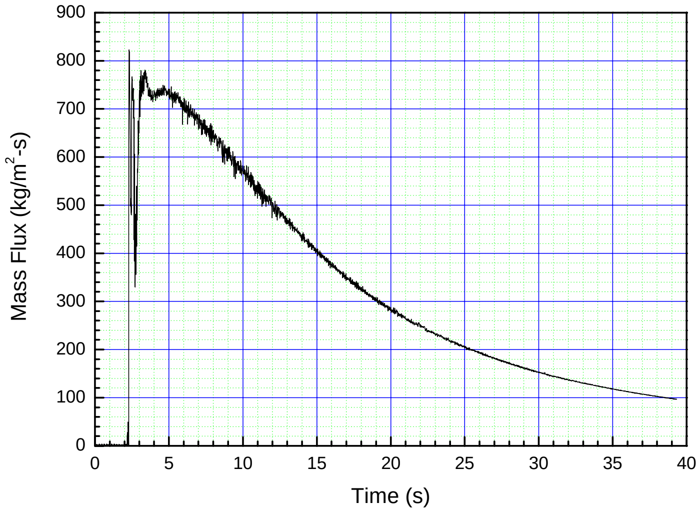

Fig. 5　Steam Mass Flow vs. Time for Transient Test (20 ℃ Pool Water)

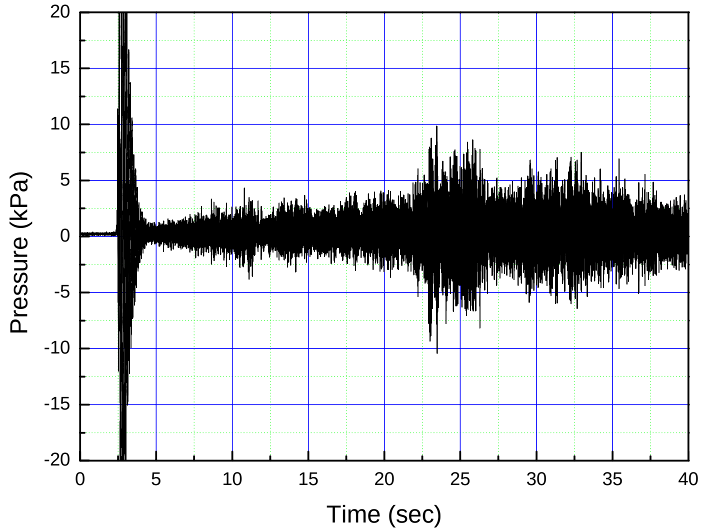

Fig. 6　Condensation Load (DPT3) vs. Time for Transient Test (20 ℃ Pool Water)

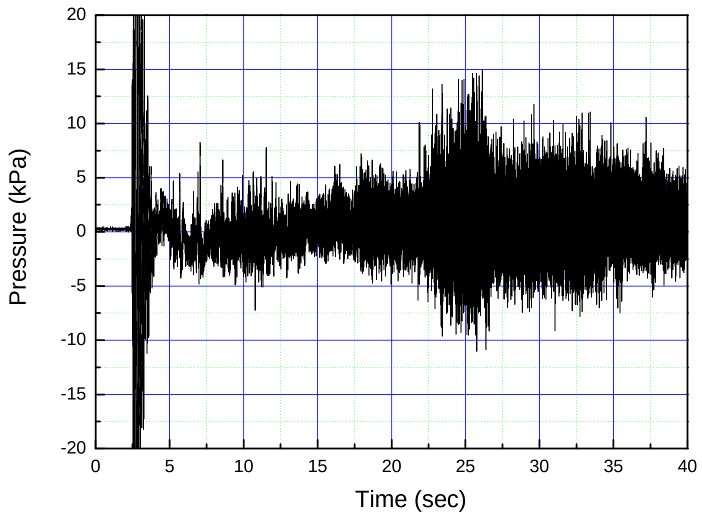

Fig. 7　Condensation Load (DPT8) vs. Time for Transient Test (20 ℃ Pool Water)

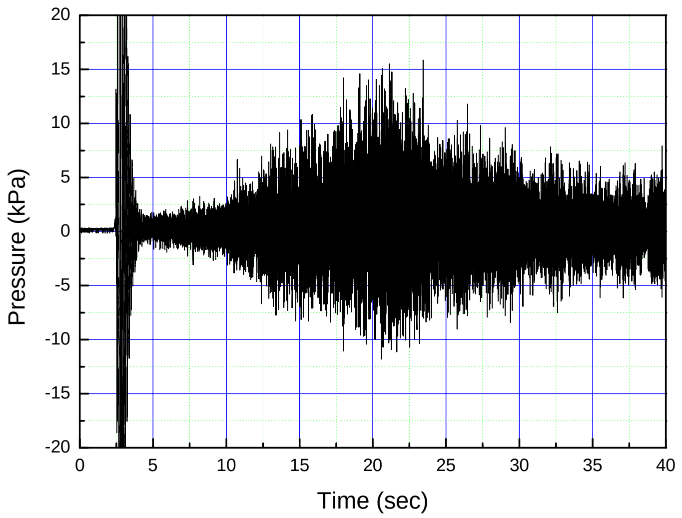

Fig. 8　Condensation Load (DPT3) vs. Time for Transient Test (60 ℃ Pool Water)

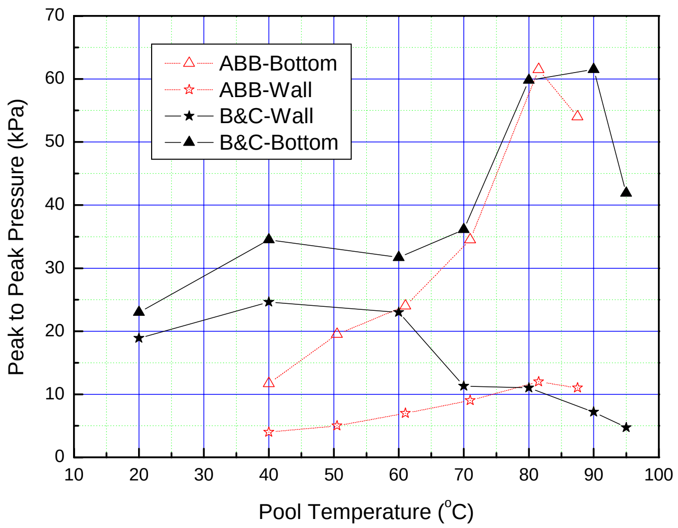

Fig. 9 Maximum Peak to Peak Load as a Function of Pool Temperature

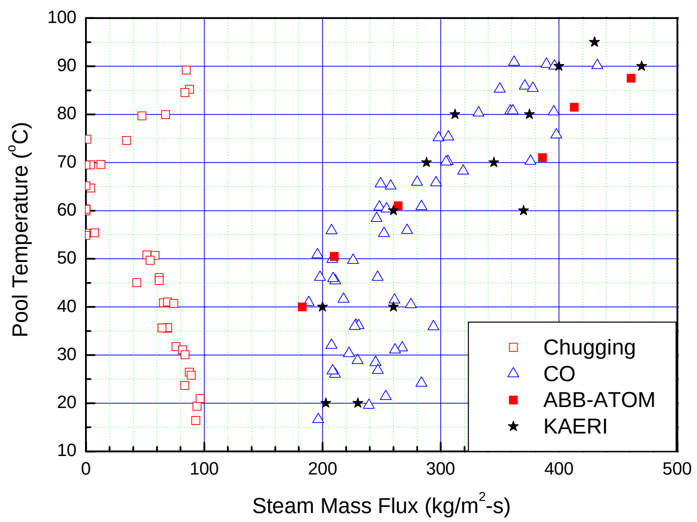

Fig. 10 Condensation Regime for Single & 4 Hole Spargers