

증기분출시 수조내 열혼합 및 압력하중 특성 연구

Characteristics of Thermal Mixing and Pressure Load during Continuous Steam Discharging phase

조 석, 윤영중, 천세영, 송철화, 백원필

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

요 약

증기분사기를 통한 증기분사시 수조내 온도 및 유동분포를 고찰하고 수조온도에 따른 압력하중의 영향을 비교하기 위하여 실험을 수행하였다. 증기분사기는 APR1400의 원형증기분사기와 같은 크기로 제작하였고 수평 방출구의 개수를 64개(원형의 44%)로 축소하였다. 증기의 방출시 하중감쇄링은 수조내 열혼합 성능 향상과 동압크기 감소에 중요한 역할을 수행하고 있다. 수조내 주 유동은 증기분사기를 중심으로 수직하방으로 형성되어 수조바닥과 자유수면을 거쳐 증기분사기에 이르는 순환으로 열성층 현상은 발생하지 않았다.

Abstract

KAERI has performed a series of experiments to investigate a thermal-mixing and dynamic pressure behavior during the continuous steam discharge phase. Sparger has the same size as that of APR1400 except for the number of horizontal discharge hole reduced by a factor of 0.44. Load reduction ring has a great influence on the thermal mixing enhancement and dynamic pressure reduction during the steam discharge phase. Main flow pattern in the quench tank is due to vertical downward direction flow induced by LRR and a vertical discharge hole of sparger. Thermal stratification is not observed during the present study.

1. 연구배경 및 내용

비등경수로(Boiling Water Reactor)의 경우 사고시 격납용기의 압력은 비응축가스의 압력과 wet well 내부의 증기압에 의해 결정된다. 이때 suppression pool (SP) 내 물의 온도는 증기압에 영향을 미쳐 결국 격납용기 전체의 성능에 중요한 영향을 미친다[1]. 따라서 증기방출시 SP내에서의 열성층현상은 비등경수로의 설계시 중요한 관심사였고, 이에 대한 연구는 증기 및 비응축가스의 방출시 수조내 열성층현상 및 이로 인한 가압효과와 규명을 중심으로 이루어졌다[2, 3, 4].

APR1400에서는 자체의 안전성을 증진하기 위하여 IRWST와 같은 신안전개념을 도입 하였다. IRWST 내부에는 각종구조물과 안전감압 및 배기계통과 연결된 12개의 증기분사기(Sparger)가 설치될 예정이다. 증기분사기를 통한 방출현상은 초기의 물, 공기 방출과 증기의 지속적인 방출의 단계로 구분할 수 있다. 공기의 방출은 초기의 1-2초 이내에서 완료되는 반면 증기의 방출의 이후 장시간동안 지속된다. 공기의 방출시에는 공기의 갑작스런 압축과 팽창으로 인한 수조내 최대압력하중이 중요한 안전 현안이나, 지속적인 증기의 분출시에는 수조내 열혼합성능과 수조온도의 상승으로 인한 수조내 압력하중의 증가가 관심사항이다[5].

증기분사기를 통한 증기의 지속적인 방출시 수조내의 응축수의 온도는 지속적으로 증가하게 되는 데 이때 증기분사기의 분사성능에 따라서 수조내 직접접촉응축특성이 달라지고 이에따라 수조내 열혼합성능이 차이를 보인다. 열혼합성능이 나쁘면 수조내 응축수의 원활한 혼합이 되지않아 증기제트 주위의 응축수가 평균온도에 비해 높아지게 되고 과도한 응축하중의 발생과 더불어 수조내 열성층현상이 발생된다. 이러한 열성층현상은 증기의 응축효율을 감소시키고 수조내 가압효과를 촉진하여 압력을 상승시키게 된다. 원자로 배수탱크와 같은 가압용기의 경우 이러한 압력상승은 바람직하지 못하다. 제한된 용량의 수조내 압력상승폭을 제한하기 위해서는 증기분사기를 통한 증기의 분출시 수조내 열혼합성능 증진을 통한 직접접촉 응축효율의 증대가 필요하다.

방출구를 통해 분사되는 증기는 일정형태의 증기제트를 형성하게 되고 증기분사기의 경우 이러한 증기제트는 인접한 증기제트와 상호 간섭을 일으킨다[6]. 분사되는 증기제트는 주위 응축수와 직접접촉응축을 통해 응축되어 응축수의 온도를 상승시키는 역할 뿐만아니라 증기유속에 의한 momentum 전달을 통해 응축수를 수조내에서 순환시키는 역할도 수행함으로써 수조내 열혼합을 촉진시킨다. 이러한 열혼합성능은 증기분사기의 형상에 따라서 차이가 있으며 증기분사기의 성능평가지 포함되어야 한다.

증기분사기의 역할은 공기 및 증기 방출시의 압력하중을 감소시키고, 증기의 지속적인 분출시 수조내 응축수의 원활한 혼합을 통한 응축효율의 증대이다. 따라서 증기분

사기의 성능평가지 압력하중에 대한 평가와 더불어 수조내 열혼합성능의 평가가 필요하다. 본 연구에서는 증기의 지속적인 방출시 수조내 온도분포 및 수조에서의 압력을 측정하여 수조내 유동을 파악하고 온도 및 증기분사기 형상에 따른 압력하중 비교를 통해 증기분사기의 열혼합성능을 포함한 방출성능을 평가하였다.

2. 실험장치

실험을 위해 원자력연구소가 보유하고 있는 B&C 장치를 개조하여 사용하였다. 실험장치는 크게 가압기 증기공급배관, 수조 등으로 구성된다. 가압기는 내부 지름이 0.6 m, 높이가 3 m 인 Cylinder 형태의 고압탱크이다. 가압기에는 100kW Heater, 증기방출노즐이 장착되어 있고, 2 인치 배관을 통한 최대 16.0 MPa의 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.

본 실험에서 사용된 증기분사기는 차세대 원자로에 사용될 Sparger의 수평방출구 개수를 64개(원형의 44.4%)로 축소된 것을 제외하곤 원형 증기분사기와 동일한 규격으로 제작되었다. Sparger 하부 바닥에 직경 25 mm 분사구와 밑바닥에서 1,950 mm 상부에 Load Reduction Ring 이 부착되었다.

수조내 온도측정을 위하여 그림 1에 표시한 바와같이 수조내에 열전대를 장착하였고, 가압기의 증기공급용량을 고려하여 원형의 증기분사기의 반경방향 방출구의 개수를 축소하였다. 수조내 열전대의 위치는 수직위치에 따라 8부분으로 나누었으며 증기분사기로부터 반경방향 거리를 3부분으로 나누어 장착 하였다.

실험은 가압기 압력, 수조온도 등의 초기조건이 만족되면 HV-202밸브를 개방하면서 시작된다. HV-202 개방후 증기방출은 약 55 ~ 60 초 정도 계속된다. 자료취득은 방출밸브 개방 2초전부터 폐쇄 10초 후까지 계속된다. 실험변수는 수조온도(20~90℃), 가압기 압력(6~15MPa), 하중감쇄링 유무등의 3가지로 선정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

본 연구에서는 지속적인 증기분사시 증기분사기의 방출성능을 수조내 열혼합특성과

압력하중의 관점에서 비교하였다. 증기분사기를 통한 증기의 분사는 응축수에 순환을 위한 momentum을 제공할 뿐만아니라 온도를 상승시키는 열에너지원의 역할을 수행한다. 응축물이 일정하다고 하면, 증기가 가지고 있는 momentum의 응축수로의 전달효율은 부력(Buoyance force)과의 관계에 의해 결정된다. 즉, momentum에 비해 부력이 크면 증기는 응축수로 깊게 침투하지 못하고 자유수면위로 상승하게 되고 반대의 경우는 증기가 응축수내로 상당히 침투하는 과정에서 증기가 가지고 있던 momentum을 모두 응축수에 전달하게 되고 momentum을 전달받은 응축수는 결과적으로 수조내 열혼합을 위한 추진력으로 사용된다. 증기-물간의 momentum 전달률이 일정하다고 하면, 수조의 온도가 증가함에 따라서 증기의 응축효율은 감소하게 되고 증기제트의 크기는 증가하며 이와 더불어 수조내 압력하중도 증가한다. 동압은 일정온도에서 최대치를 이루며 포화온도에 근접하면 다시 감소하는 경향을 보인다[7, 8, 9].

증기의 momentum에 가장 큰 영향을 주는 변수는 증기유속에 의한 증기분사기 헤더에서의 압력이다. 그림 2와 3에 가압기 압력이 10MPa, 수조온도가 20℃경우에 증기 방출배관에서 측정된 증기유량과 헤더압력을 표시하였다. 증기분사기 헤더압력은 방출 밸브의 개방으로 급격하게 상승하였고 공기방출(Air clearing) 이후 감소하였다. 공기방출이후의 증기유량과 헤더의 압력은 가압기의 압력감소와 비례하여 감소하는 경향을 보였다.

3.1 수조내 열혼합

그림 4에 수조온도가 20℃일 경우 증기분사시 수조내 각 위치에서의 온도변화를 그림 1의 열전대 위치에 맞춰 표시하였다. 그림 1에서 보듯이 수조내에는 총 24개의 열전대가 장착되어 있다. 방출초기에는 방출구에서 가장 가까운 위치에있는 TC-636이 가장빠른 반응을 보였으나 방출이 진행됨에 따라 바닥면에서 5cm 떨어진 TC-638에서의 온도가 방출구 근처보다(TC-636) 높게 관찰되었다. 또한 방출구의 상부에 설치된 열전대(TC-631~635)와 하부에 위치한 열전대(TC-636~638)의 온도변화를 비교하면 하부에 설치한 열전대의 온도는 방출과 더불어 급격한 변화를 보이고 있는데 반해 상부의 온도는 큰 변화없이 평균온도의 상승에 따라 변화하고 있다. 이것은 방출초기에는 증기가 방출구로부터 수평방향으로 분사되나 이후 방출이 계속됨에 따라서 하중감쇄링(Load Reduction Ring)과 수직방향 방출구로부터 수직하방으로 분출된 증기가 방출구로부터 분출된 증기를 아래쪽으로 밀어 분출의 주흐름이 수직하방으로 형성된 때문이다. 따라서 하중감쇄링은 초기 공기방출시의 압력하중을 감쇄시키는 역할 뿐만아니라 증기분출시 증기가 수직하방으로 분사 되도록 조절하여 응축수가 바닥으로부터 수면까지 원활히 순환하도록 하는 역할을 수행함을 알 수 있다. 수직 하방으로의 유동이 형성되지 않으며 방출구의 상/하부에는 열성층대가 형성되어 국부적인 온도상승으

로 인한 증기의 응축효율 저하로 이어지게 됨을 생각할 때 하중감쇄링과 수직방출구의 역할은 매우 중요함을 알 수 있다. 수조바닥을 거쳐 벽면을 따라 순환하는 응축수의 이러한 유동은 수조내에 담겨진 전체 응축수에 영향을 미치게 되므로 열성층현상을 제한하고 열혼합성능을 높이게 되어 결국 증기의 응축효율을 증가시킨다.

그림 4에서 TC-636, TC-644, TC-652를 비교해보면 초기 방출시(공기방출시 까지; 밸브개방후 약 2초 이내) 방출구로부터 분사된 증기제트의 거동을 짐작할 수 있다. 즉, 증기분사기 중심으로부터 40cm 이격된 위치(TC-636)에서는 급격한 온도상승을 관찰할 수 있으나 이러한 온도상승폭은 이격거리가 증가할수록(TC-644) 작아지게 되고 140cm 이격된 곳(TC-652)에서는 초기방출로 인한 온도상승이 관찰되지 않았다. 이것은 초기 증기방출시 증기제트의 침투깊이는 증기분사기 중심으로부터 40 ~ 90cm 사이에 있음을 의미한다. 증기방출이 지속됨에 따라서 TC-644 보다는 오히려 TC-652에서의 온도 변화가 더욱 큰 것을 관찰할 수 있는 데 이것은 순환의 주흐름이 바닥면을 거쳐 벽면을 수직상방으로 형성됨을 보여주는 또 다른 결과이다.

이격거리가 140cm인 곳(TC-647~TC-654)에서의 온도를 같은 높이의 다른 온도와 비교해보면 온도가 다른 것에 비해 심하게 변동하고 있음을 관찰할 수 있다. 이것은 응축수의 주된 유동이 증기분사기의 수직하방에서 시작하여 수조 바닥면을 타고 벽쪽으로 진행되고 결국 수조벽면을 타고 수직 상방향으로 진행됨을 의미한다. 이러한 유동의 경향은 각 열전대의 최초반응시간을 비교하면 더욱 확연해진다. 그림 4에서 보듯이 바닥면에서 제일 가까운 위치인 TC-654에서 가장 먼저 온도상승이 발생하였으며 높이가 높아질수록 최초 반응시간은 느려져 TC-647은 TC-654에 비해 약 10초후에 반응하게 된다. 온도분포도 바닥근처에서 가장 높은값을 표시하고 있으며 높이에 따라 감소한다.

증기분사시 하중감쇄링의 영향을 고찰하기 위하여 그림 5에 하중감쇄링이 있는 경우와 없는 경우의 실험자료를 비교하여 표시하였다. 그림 5에서 각 그래프의 오른쪽에 표시된 곡선은 LRR이 있는 경우이고 왼쪽에 있는 곡선은 LRR이 없는 경우이다. LRR이 없는 경우는 수직하방 유동의 영향이 적고 수평방향의 유동이 성장함에 따라서 LRR이 있는 경우와는 다른 온도변화 양상을 보이고 있다. TC-631과 TC-638의 온도차이를 예로들면 LRR이 있을 경우에는 약 5.5℃ 정도였으나, LRR이 없는 경우에는 약 3℃의 차이를 보이고 있다. 즉, LRR이 없는 경우에는 수직하방으로의 유동은 증기분사기 밑면의 방출구에 의존하기 때문에 LRR이 있는 경우에 비하여 수평방향으로의 유동이 강하게 형성된다. 따라서 수조 바닥면에서의 온도(TC-638, TC-654)가 LRR이 없는 경우가 있는 경우에 비하여 현저히 낮다. 이와같이 수조내의 유동은 LRR에 의한 수직하방 유동에 크게 좌우됨을 알 수 있다.

이러한 고찰을 바탕으로 수조내 유동분포를 그림 6에 표시하였다. 유동을 이끄는

주유동은 증기분사기를 중심으로한 수직하방 유동으로 수조전체의 유동을 위한 momentum을 지배한다. 이러한 수직하방 유동은 LRR이 없거나 수조의 온도가 증가하는 경우 다소 약해지는 경향을 관찰하였다. 수조의 온도가 증가할수록 응축효율이 감소되어 증기는 응축수내로 침투하기보다는 자유수면으로 상승하게 되어 방출구 상부에 위치한 열전대의 온도가 오히려 하부의 온도보다 증가하는 경향을 보였다.

3.2 수조내 동압거동

증기의 분사시 물-증기의 직접접촉에 의한 압력파가 수조내에 발생한다. 증기분사는 일반 노즐에 비하여 이러한 압력하중이 현저히 감소하는 것으로 알려져있다[10]. 본 연구에서는 증기분사시 수조온도변화에 따른 수조내 동압크기를 비교하였다. 그림 7에 수조온도 변화에 따른 벽면에서의 동압크기변화를 표시하였다. 그림에서 보듯이 수조온도가 50℃까지는 동압크기에 큰 변화가 없으나 70℃에는 큰 폭의 상승을 관찰하였다. 동압크기는 이후 수조온도의 증가에 따라서 동압크기는 증가 하였으며, 90℃에서는 약간의 감소를 관찰할 수 있었다. 증기방출시 수조내 동압크기는 수조온도가 50 ~ 70℃ 사이에서 큰 폭의 증가를 보였으며, 수조온도 80℃ 근처에서 최대 동압크기를 보였다. 이것은 기존의 단일 노즐에 대한 결과와 유사하다[6, 7, 8, 9].

하중감쇄링의 영향을 관찰하기 위하여 그림 8에 하중감쇄링이 없는 증기분사기의 경우와 있는 경우의 결과를 비교하였다. 하중감쇄링이 없는 경우가 있는 경우에 비하여 보다 큰 동압크기를 보였다. 따라서 하중감쇄링은 초기의 공기방출시의 하중을 감소시킬 뿐만아니라 증기분사시에도 중요한 역할을 수행하고 있음을 알 수 있다. 증기분사시 하중감쇄링은 수조내 수직하방유동 형성과 동압크기의 감소에 중요한 역할을 수행한다.

4. 결 론 및 향후 연구

본 연구에서는 증기분사기를 통한 증기의 지속적인 방출시 수조내 유동분포를 확인하고 수조온도에 따른 동압크기의 변화를 관찰하기 위하여 실험을 수행하였다. 본 연구에서 얻어진 결론은 다음과 같다.

(1) 하중감쇄링은 증기분사시 수직하방유동을 유동하여 수조내 전체 응축수의 원활한 열혼합을 보장하고, 동압크기를 감소시키는 역할을 수행한다.

(2) 동압크기는 수조온도에 따라서 변화하며 수조온도가 50 ~ 70℃ 사이에서 큰 폭으로 증가한다.

(3) 수조내 주된 유동은 증기분사기를 중심으로 수직하방유동이 형성되고 하방유동은 수조의 바닥면을 타고 진행되다 벽면을 타고 자유수면까지 상승한다. 자유수면에 도달한 유동은 수면을 타고 증기분사기 방향으로 진행되어 다시 수직하방유동에 합류된다.

(4) 수조의 온도가 증가함에 따라서 수조내 주된 유동을 이루던 수직하방유의 momentum은 응축효율의 감소와 더불어 증가한 부력 효과 때문에 감소하게 되고 유동은 수조바닥면을 거치지 않고 직접 자유수면위로 상승하는 형태로 변화한다.

후 기

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

참고문헌

1. R. T. Lahey, Jr et al., "The thermal-hydraulics of a boiling water nuclear reactor," American Nuclear Society la Grange Park, Illinois USA, 1993.
2. Robert E. Gamble et al., "Pressure suppression pool mixing in passive advanced BWR plants," 9th international tropical meeting on nuclear thermal hydraulics (NURETH-9), San Francisco, California, Oct. 3 - 8, 1999.
3. P. Coddington, et al., "SBWR PCCS vent phenomena and suppression pool mixing," NUREG/CP-0142-Vol.2, pp. 1249-1271, 1995.
4. D. H. Cook, "Calculation of thermal mixing for the BWR MARK I containment pressure suppression pool," CONF-8410142-10, 1984.
5. S. Cho, et al., "Air clearing test to generate the forcing function of APR1400 reactor," KAERI/TR-1931/2001(restricted), 2001.
6. S. Cho, et al., " Multiple-hole effect on the performance of a sparger during direct contact condensation of steam," KSME International Journal, Vol. 15 No. 4, pp. 482 - 491, 2001.
7. Cumo, M., Farello, G. E., and Ferrari, G., 1978, "Direct Heat Transfer in Pressure-Suppression Systems," Proc. of 6th Int. Heat Transfer Conf., Toronto, Vol. 5, pp. 101 ~ 106.
8. Simpson, M. E., and Chan, C. K., 1982, "Hydraulics of a Subsonic Vapor Jet

in Subcooled Liquid," ASME J. of Heat Transfer, Vol. 104, pp. 271 ~ 278.

9. Sonin, A. A., 1984, "Suppression Pool Dynamics Research at MIT," NUREG/CP-0048, pp. 400 ~421.

10. Nilsson L., Experimental investigation of steam vent clearing phenomena at system relief into a condensation pool of water, AE-RL-1630, 1975.8.

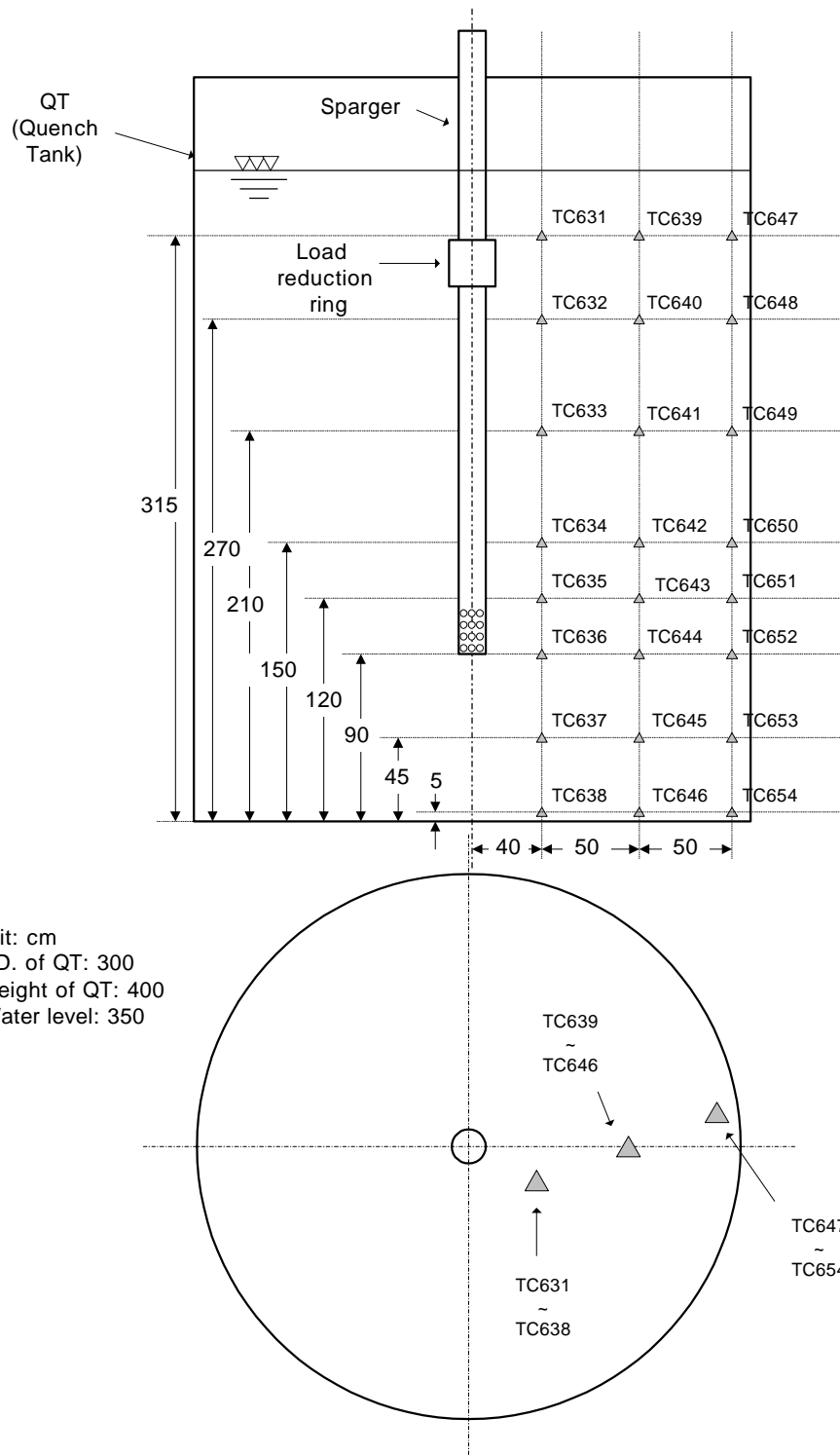


Fig. 1 Thermocouple location in the quench tank

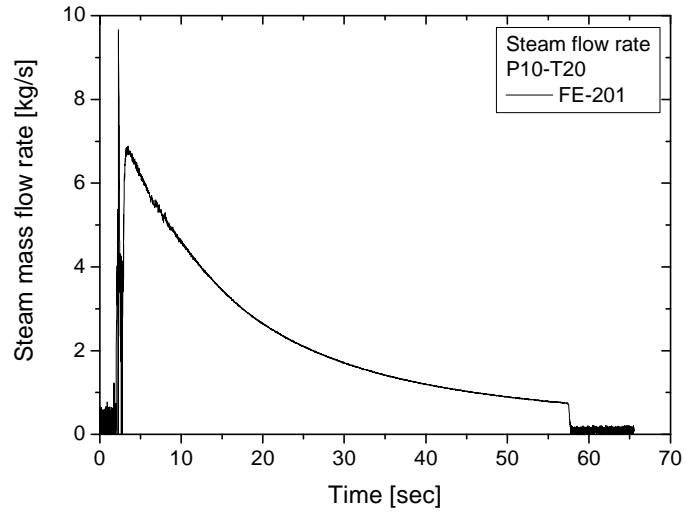


Fig. 2 Steam mass flow rate during blowdown
 ($P_{vzr}=10\text{MPa}$, $T_{\text{pool}} = 20^{\circ}\text{C}$, with LRR)

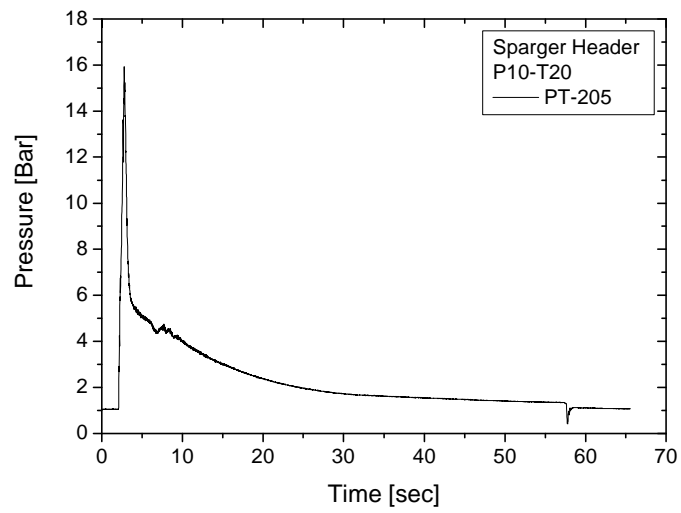


Fig. 3 Sparger header pressure during blowdown
 ($P_{vzr}=10\text{MPa}$, $T_{\text{pool}} = 20^{\circ}\text{C}$, with LRR)

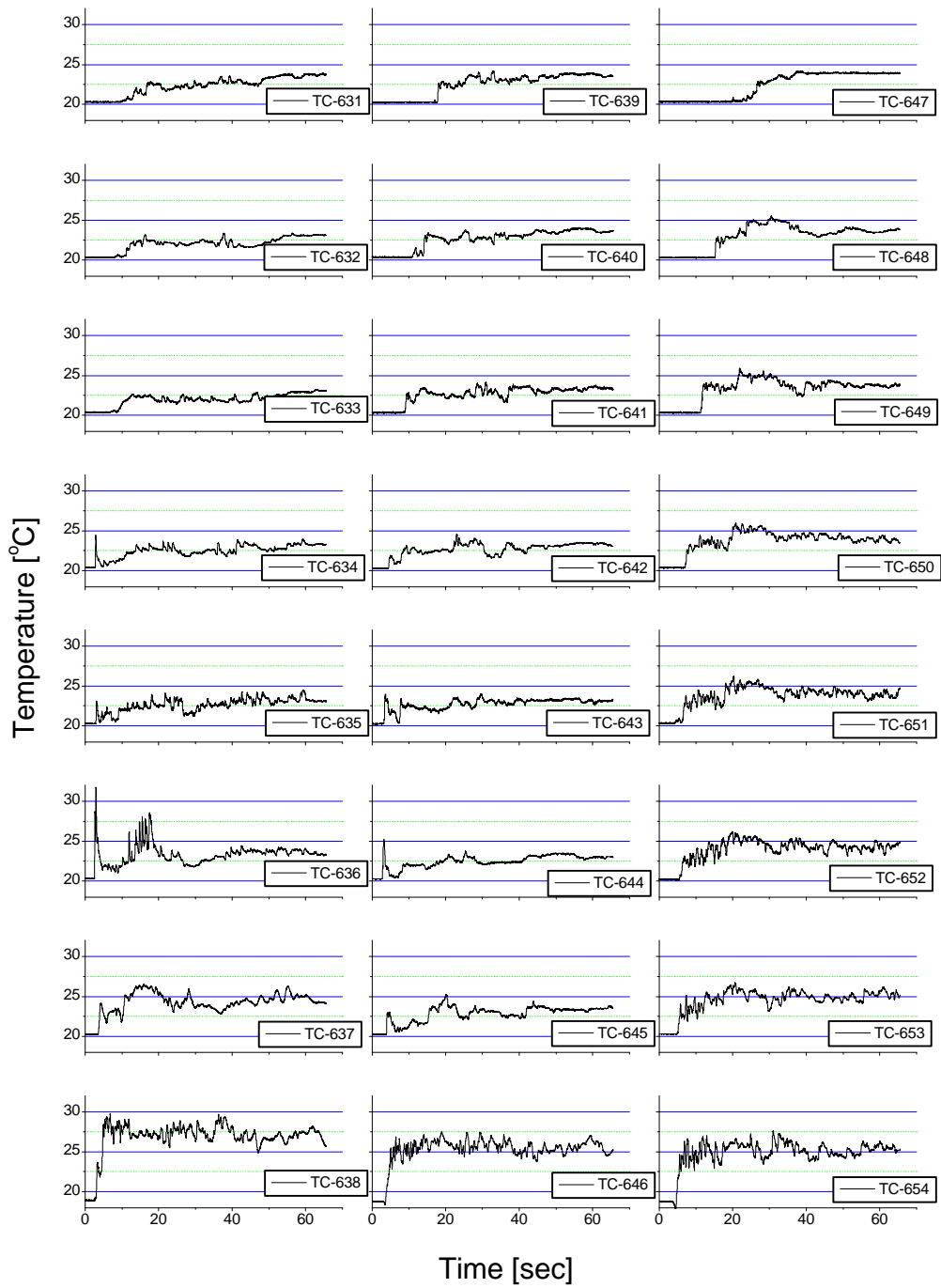


Fig. 4 Temperature distribution in the quench tank ($P_{pzt}=10\text{MPa}$, $T_{\text{pool}} = 20^\circ\text{C}$, with LRR)

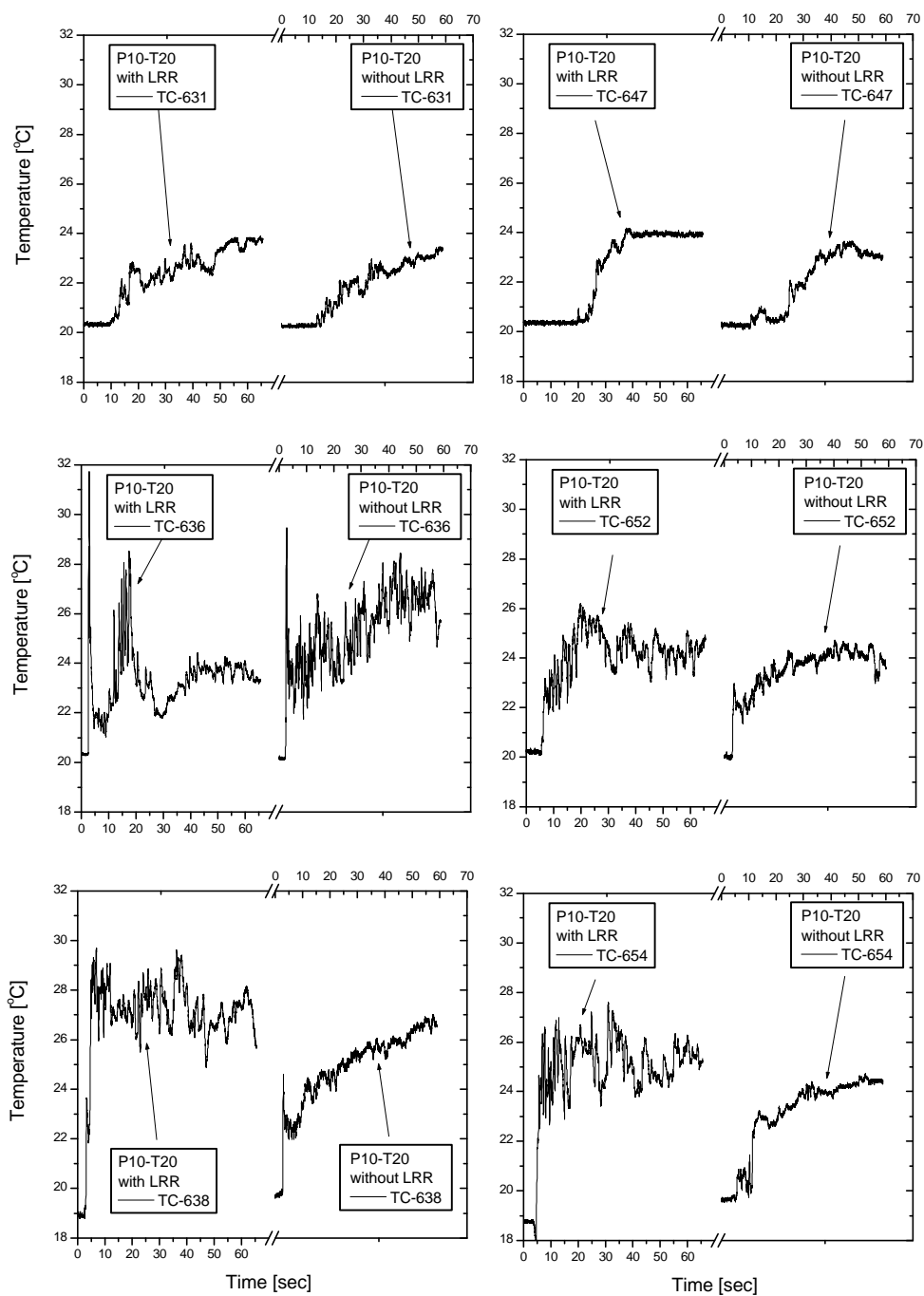


Fig. 5 Effect of LRR during continuous steam discharging period on the temperature distribution ($P_{DZT}=10\text{MPa}$, $T_{\text{dool}} = 20^\circ\text{C}$)

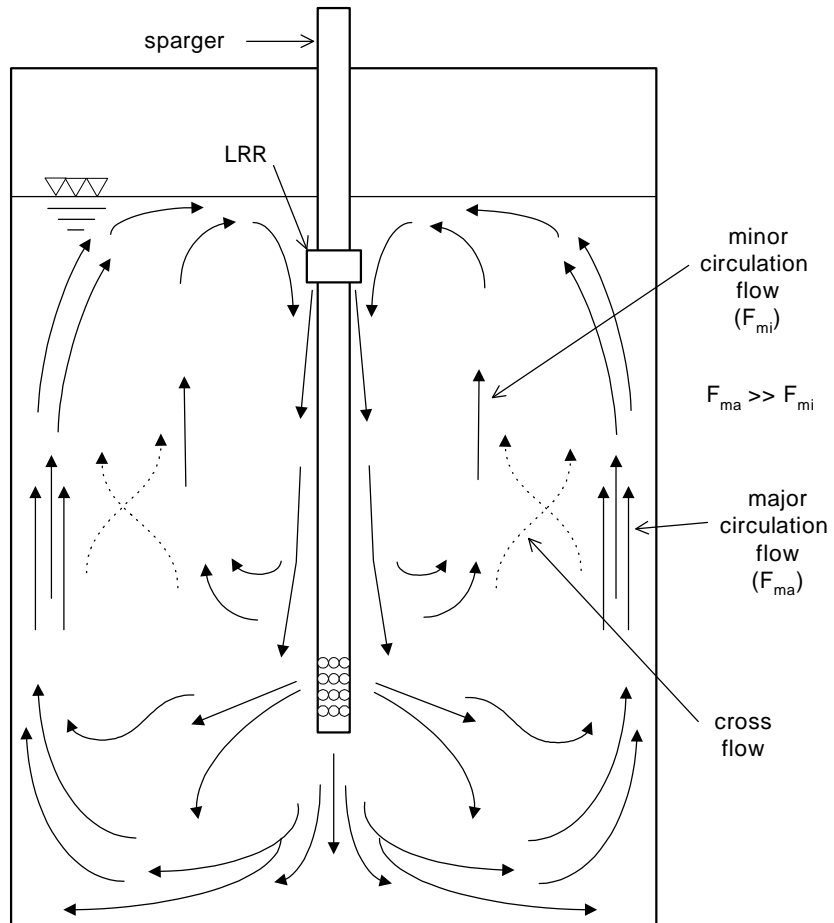


Fig. 6 Flow pattern in the quench tank

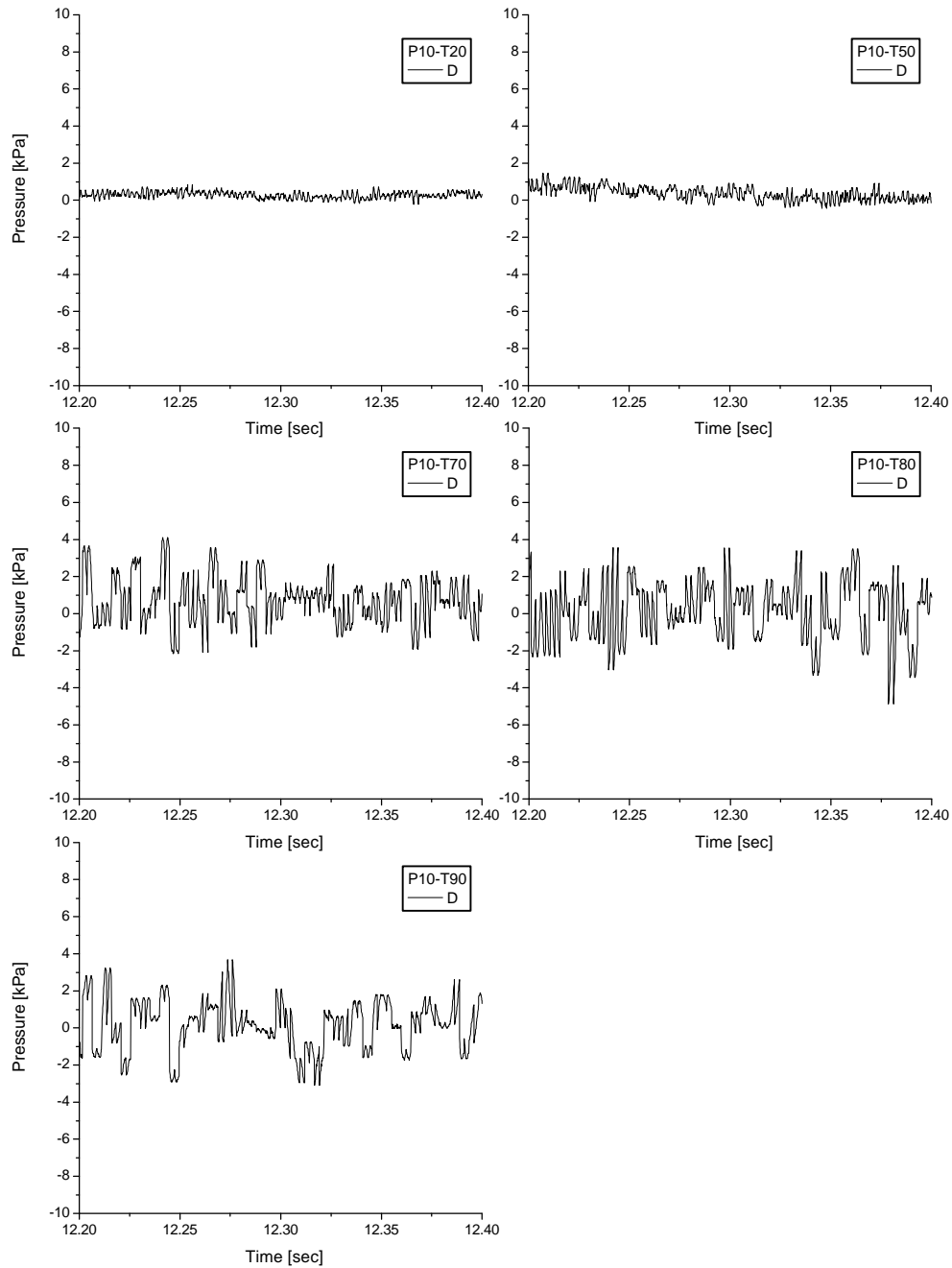


Fig. 7 Pressure at the wall with the variation of pool temperature
 $(P_{DZT}=10\text{MPa}, T_{\text{Dool}} = 20^\circ\text{C}, \text{ with LRR})$

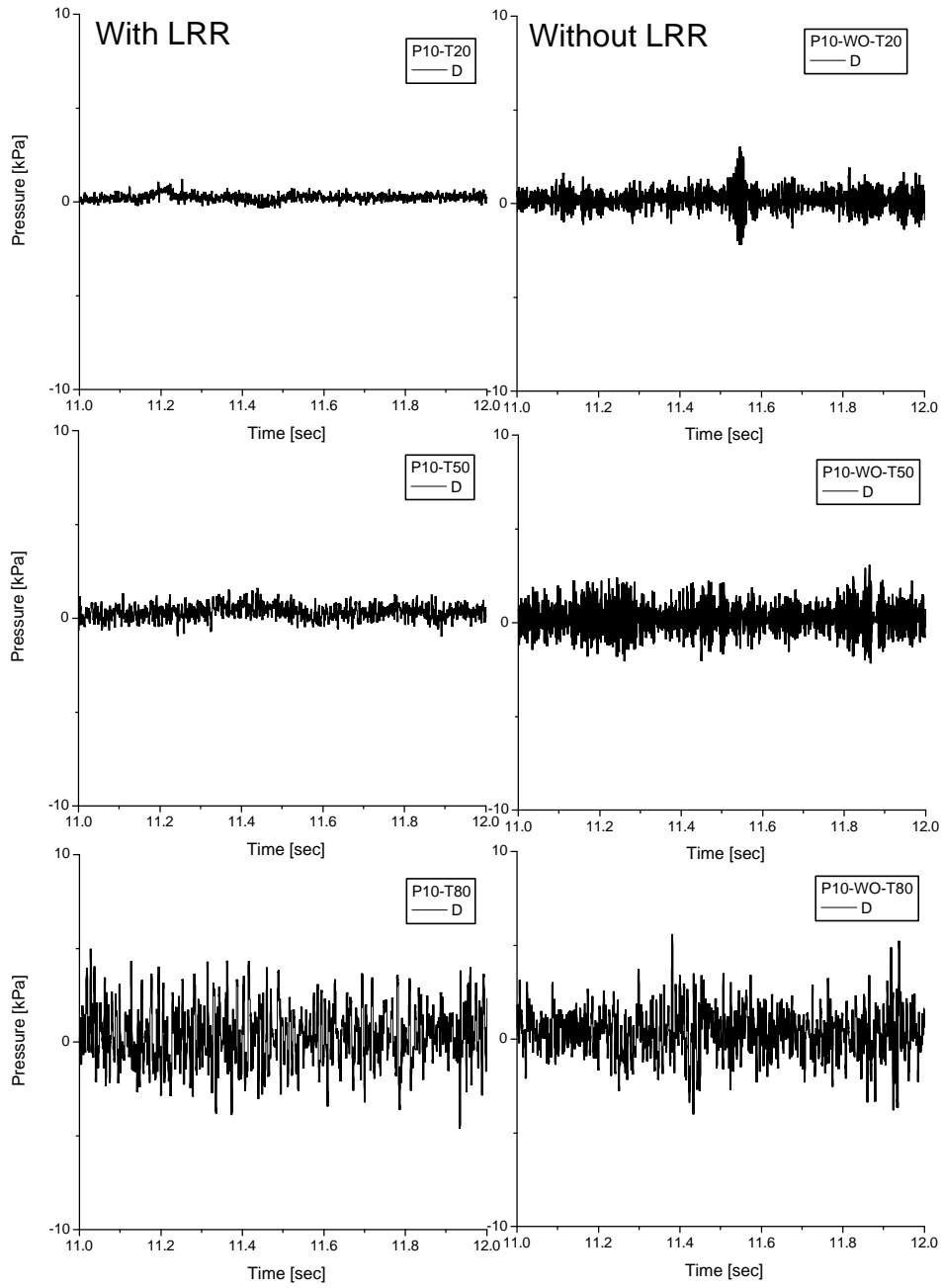


Fig. 8 Effect of Load Reduction Ring on the pressure at the wall
 $(P_{DZR}=10\text{MPa}, T_{\text{pool}} = 20^{\circ}\text{C})$