

## POSRV 개방/닫힘 시 IRWST내 I-Sparger에 미치는 하중 분석

### Analysis for the Loads on I-Sparger in IRWST following POSRV Open/Closure

라 인 식, 고 희 진, 이 세 원

한국전력기술(주)

경기도 용인시 구성면 마북리 360-9번지

#### 요 약

차세대원전의 경우 POSRV(Pilot Operated Safety Relief Valve)가 개방되면 원자로냉각재가 방출 배관으로 유입되며 물, 공기, 증기 순으로 IRWST(In-Containment Refueling Water Storage Tank)내부로 방출되며, POSRV가 닫히면 IRWST 물이 Sparger내부로 유입된다. 상기 현상으로 Sparger에 발생 가능한 열수력하중은 크게 방출배관에서 물이 방출될 때의 Thrust 하중, IRWST 내부에 존재하는 공기기포의 거동으로 인한 압력하중, 물의 재침수시 물과 엘보우의 충돌로 야기 되는 충돌하중으로 구분된다. Thrust 하중은 ANSI/ANS 58.2의 방법론을 이용하여 평가하였고, 압력하중은 형상함수를 이용하여 Sparger 양단의 압력차를 구해 평가하였으며, 재침수시 충돌하중은 간단한 Water Hammer 평가 방정식을 이용하여 평가하였다. 한국원자력연구소에서 수행 중인 I-Sparger 성능실험이 종료되면 실험결과와의 비교 검토를 통해 분석 방법론의 검증 및 수정을 계속할 예정이다.

#### ABSTRACT

Following POSRV actuation in KNGR (Korean Next Generation Reactor), the water, air, and steam in POSRV discharge line are released into IRWST. After POSRV closure, the water in IRWST enter the POSRV discharge line. The thermo-hydraulic loads on I-Sparger generated due to these phenomena are classified into the thrust load due to water discharge from POSRV discharge line, the pressure load induced by the oscillation of air bubbles in IRWST, and the impact load generated by the collision in the entered water with the elbow of POSRV discharge line. The thrust load was evaluated by the methodology of ANSI/ANS 58.2, the pressure load was analyzed using the shape function for the pressure distribution in IRWST, the impact load was calculated by the simple evaluated equation for water hammer. After the I-Sparger performance test by KAERI is conducted, the methodology to evaluate the loads on I-Sparger will be verified and modified comparing the results in this paper with the test results.

#### 1. 서론

차세대 원전은 안전성 향상을 위해 많은 설계 개선이 이루어지고 있으며, 그 중 주요 특성중의 하나가 격납건물내 핵연료재장전수조(IRWST: In-containment Refueling Water Storage Tank)이다. IRWST의 기능 중 하나가 설계기준사고, 전급수상실사고(TLOFW) 등이 발생하였을 때 원자로의 과압을 방지하기 위해 POSRV(Pilot Operated Safety Relief Valve)를 통해 방출된 일차측 증기를

구조물에 과도한 하중을 주지 않으면서 응축시키는 것이다. POSRV 방출배관 끝단에는 I-Sparger가 설치되어 있다.

POSRV 작동이전에 POSRV 방출배관내부에는 공기와 물(IRWST 침수부분)이 존재한다. POSRV 작동시 가압기내 증기는 방출배관내부로 유입되어 배관내부의 공기를 가압하여 배관 압력을 상승시킨다. 배관내부 압력과 IRWST 압력차에 의해 배관내부에 존재하였던 물은 IRWST로 방출된다. 물이 방출되면, 배관내 가압공기가 IRWST내로 방출되어 고압의 공기기포를 형성한다. 뒤이어 증기가 Sparger를 통해 IRWST로 방출되어 응축된다. 증기는 POSRV가 닫힐 때까지 계속 방출된다. POSRV가 닫히면, 배관내 압력은 IRWST 압력보다 낮아지게 되고 IRWST 물이 Sparger를 통해 배관내부로 유입된다.

방출배관내부의 물, 공기, 증기가 방출되고(POSRV 작동시), IRWST 물이 배관내부로 유입될 때(POSRV 잠김시), IRWST와 방출배관에 열수력학 현상이 발생하며, IRWST 침수벽체, 침수구조물, Sparger, 방출배관 등은 이러한 현상에 의해 발생하는 열수력 하중에 영향을 받는다.

물이 방출될 때, 방출배관과 Sparger는 천이압력하중과 배관내 운동량 방향변화에 의해 야기되는 Thrust 하중에 영향을 받는다. IRWST내에 형성된 공기기포의 압력진동에 의해 Sparger는 압력하중을 받는다. POSRV가 닫혀 IRWST 물이 배관내로 유입되면, 유입되는 물의 진행에 방해되는 엘보우와 같은 장애물이 존재할 경우 유입 물과 엘보우의 충돌로 인해 하중이 발생된다.

차세대원전에서는 상기 하중들을 반영하여 Sparger 및 방출배관 설계를 진행시키고 있다. 차세대원전에서 채택한 I-Sparger(그림 2)는 ABB-Atom에서 개발하여 BWR에 기 채택되어 사용되고 있다. 그러나, 차세대원전과 BWR은 밸브의 작동시간, 일차측 압력, 방출배관의 길이, Sparger의 배치 등의 차이로 I-Sparger의 성능이 다소 차이가 보일 수 있다. 따라서, 차세대원전 운전조건 하에서 I-Sparger의 성능을 검증하기 위해 KAERI에서 I-Sparger 성능실험을 수행하고 있다. 성능실험이 종료된 후 I-Sparger에 대한 주요 설계자료가 결정된다. POSRV 방출배관 및 Sparger 설계는 I-Sparger 성능실험이 완료된 후 확정될 것이다.

본 논문은 POSRV 작동시 Sparger에 영향을 주는 하중들의 종류와 평가 방법에 대해 기술한다.

## 2. POSRV 방출배관 개요

차세대원전 POSRV 방출배관의 개략도를 그림 1에 나타내었다. 4 대의 POSRV가 1 개의 torus에 연결되어 있고, torus로부터 두 개의 분기 배관이 연결되어 있다. 각 분기 배관은 다시 두 개로 분기되고, 분기된 배관에서 다시 3 개로 분기되며, 각 분기 배관의 끝단에 Sparger가 설치되어 있다. 각 Sparger는 IRWST에 침수되어 있다. 상기 배관배치는 POSRV의 지지, POSRV 작동시 공기방출하중의 최소화, POSRV 닫힘시 Water Hammer 방지 등 여러 인자들을 고려한 배관 배치이다.

## 3. Sparger 하중 분석

POSRV 작동이전에 POSRV 방출배관은 대기압을 갖는 공기와 배관의 침수부분은 물로 채워져

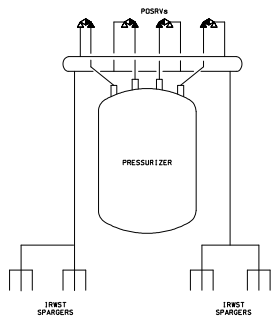


그림 1 POSRV 방출배관 개략도

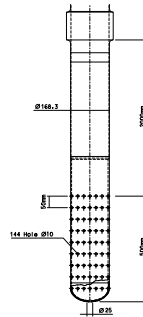


그림 2 I-Sparger

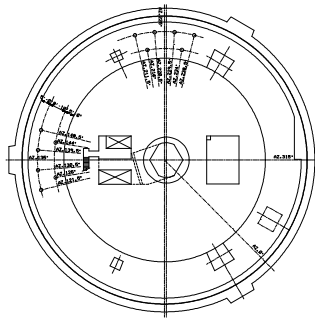


그림 3 IRWST내 Sparger 위치

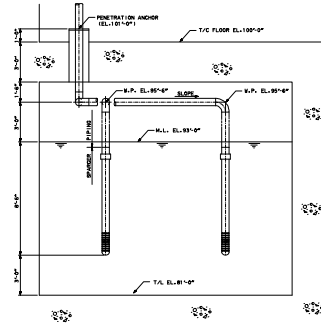


그림 4 IRWST내 Sparger 위치(측면)

있다. POSRV 작동시 증기가 방출배관으로 유입되어 공기를 가압시켜 배관내부의 물을 IRWST로 방출시킨다. 방출배관에서 물이 방출될 때, 방출배관은 천이 압력하중에 영향을 받는다. 배관의 침수부분은 배관과 Sparger에서의 운동량 방향 변화로 인해 야기된 Thrust 하중에 영향을 받는다. 물이 방출될 때의 측면방향 하중은 Sparger Holes 및 Load Reduction Ring(LRR)이 축방향 대칭이기 때문에 무시할 수 있다. Sparger에 미치는 축방향 하중은 Sparger 바닥 Hole과 LRR을 통해 방출되는 유체에 의해 발생된다.

물이 방출된 후 압축 공기가 IRWST로 방출되어 고압 공기기포를 형성한다. 고압의 공기기포는 팽창하여 주위의 물을 공기기포의 중심의 바깥 방향으로 가속시킨다. 물의 관성으로 인해 공기기포는 과도하게 팽창하여 공기압력이 주위의 압력보다 낮아진다. 이러한 부압은 물의 운동방향을 반대방향으로 바꾸게되어 공기기포를 가압시킨다. 이 때에도 물의 관성으로 공기압력은 주위의 압력보다 높아진다. 공기기포의 팽창과 수축운동은 부력에 의해 공기기포의 표면이 IRWST 자유표면과 맞닿을 때까지 반복된다. 공기기포의 반복운동에 의해 IRWST내부는 압력장과 유동장이 발생한다. 압력장이 형성되면 Sparger의 양 측면사이의 압력차가 발생하며, 압력차에 의해 Sparger는 압력하중에 영향을 받는다.

공기가 방출배관에서 방출된 후 증기가 방출되며, 증기는 POSRV가 닫힐 때까지 계속 방출된다. POSRV가 닫힌 후에도 POSRV 방출배관내부 증기가 IRWST로 계속해서 방출되기 때문에 방출배관내부 압력은 주위의 압력보다 낮아져 방출배관내부로 IRWST 물이 유입된다. IRWST 물은 LRR과 Sparger Holes을 통해 배관내부로 분사되어 심한 난류를 형성한다. 이때 배관내부의 증기는 유입된 물과의 직접접촉에 의해 응축되며, 증기 응축률은 매우 높다. 증기 응축으로 배관압력은 더욱 낮아지게 되고, 배관내로의 물의 유입속도를 가속시킨다. 배관내부의 압력이 vacuum breaker 작동 압력 이하로 떨어지면, vacuum breaker가 작동하며 격납건물 대기가 vacuum breaker를 통해 방출배관내부로 유입된다. 유입된 공기는 방출배관의 압력을 증가시킨다. 방출배관내부 압력의 증가는 IRWST 물의 유입속도를 감속시켜 물의 유입을 멈추게 한다. 방출배관내부로 유입된 물은 유동을 방해하거나 유동 방향을 변화시키는 배관내 구조물과 만날 때 충돌하중을 발생시킨다.

### 가. 물의 방출로 인한 Thrust 하중

물 방출시 보수적이면서 단순하게 Thrust 하중을 평가하기 위해서 아래 가정을 평가에 사용한다.

- (1) Sparger 내부 초기압력은 물이 방출이 끝나는 시점에서의 Sparger 압력이며, 물이 완전히 방출될 때까지 Sparger 내부압력의 변화는 없다.
- (2) Sparger Holes과 LRR의 마찰 손실은 무시한다.
- (3) Sparger를 통한 물의 방출은 동일한 면적을 갖는 배관과단으로 모사한다.
- (4) 과단면적은 Sparger 바닥 Hole과 LRR의 면적과 동일하다.

상기 가정하에서 ANSI/ANS 58.2[2]에 기술된 방법을 사용하면 물의 방출로 인한 Thrust 하중을 아래의 식으로 계산할 수 있다.

#### 초기 Thrust 하중

$$T_{ss} = P_{sp}A$$

정상상태 Thrust 하중

$$T_{ss} = C_T P_{sp}A$$

여기서  $C_T$ 는 ANSI/ANS 58.2에서 정의한 정상상태 Thrust 계수이다. 냉수(대기압보다 큰 압력에서 온도가 212 °F 이하인 물)가 방출될 때 마찰 손실을 무시하면  $C_T$ 는 2가 된다. 결과는 표1에 나타내었다.

표1 물 방출시 Sparger에 미치는 Thrust 하중

Sparger 압력	파단면적	$C_T$	초기 Thrust 하중	정상상태 Thrust 하중
145 psid	0.037 ft <sup>2</sup>	2	750 lbf	1500 lbf

POSRV가 작동되면, 방출배관의 압력이 증가하여 방출배관내부 물이 Sparger를 통해 IRWST로 방출하게 된다. Sparger 내부 압력의 증가속도는 POSRV 작동속도에 의존하며, 물이 방출될 때까지 계속 증가한다. 물이 모두 방출된 후에는 정상상태 압력으로 감소하게 된다. 따라서, Sparger 내부압력을 물의 방출이 끝나는 시점에서의 압력이 방출배관의 최대압력이므로 (1)의 가정은 Thrust 하중관점에서 보수적이다. (1)의 가정하에서는 Sparger를 동일한 손실계수와 동일한 면적의 배관과단으로 모사할 수 있다. (1)과 (2)의 가정은 물이 방출될 때의 Thrust 하중을 보수적으로 평가하기 위해 사용하였으며 (3)의 가정을 (1)과 (2)의 가정으로부터 쉽게 유추할 수 있다. 또한, Sparger Holes과 LRR이 축대칭이므로 물의 방출로 인한 측면하중은 무시하였다. 그러나, 실제 현상에서는 물이 방출될 때 배관내부의 공기-물 경계면이 완전한 수평이 아니므로 측면하중이 발생할 수 있으나 크기는 나.항에 기술된 IRWST내부 공기기포 거동으로 인한 측면하중에 비해 훨씬 작을 것으로 판단된다. 위의 논의에서 알 수 있듯이 물 방출로 Sparger에 미치는 Thrust 하중은 실제보다 과대평가할 것으로 판단된다. 그러나, 본 하중을 고려하여 Sparger나 방출배관설계에 큰 영향을 주지 않을 것으로 판단된다.

## 나. 공기기포 진동으로 인한 Sparger 측면 하중

물 방출 후 POSRV 방출배관내부의 압축공기가 방출된다. 방출된 공기는 공기기포를 형성하며 공기기포가 부력에 의해 IRWST 자유표면에 도달할 때까지 수축과 팽창 운동을 반복한다. Sparger에 미치는 압력하중을 평가하기 위해서는 공기기포 압력에 대한 시간이력과 IRWST의 압력장을 계산하여야 한다. 공기기포의 진동운동으로 인해 Sparger에 미치는 하중은 Sparger의 양쪽 측면의 압력차에 Sparger의 침수면적의 곱으로 계산할 수 있다.

공기기포의 거동은 아래의 식으로 평가할 수 있다.

질량보존 : 방출배관내부의 공기가 전부 방출될 때까지는 공기기포의 질량이 증가하고 그 이후에는 공기기포의 질량은 변하지 않는다.

$$\text{운동 방정식 : } R \frac{d^2R}{dt^2} + \frac{3}{2} \left( \frac{dR}{dt} \right)^2 + \frac{4\nu_L}{R} \frac{dR}{dt} + \frac{2S}{\rho_L R} = \frac{P_b(t) - P_\infty}{\rho_L}$$

$$\text{에너지 방정식 : } \dot{U} = \dot{m}h_o - p_b \dot{v} + \dot{Q}_v$$

부력에 의한 공기기포 중심의 위치 변화는 아래의 식으로 계산한다.

$$\frac{d^2z}{dt^2} = \frac{-\pi\rho_L C_D R^2 \left( \frac{dz}{dt} \right)^2 \frac{1}{2} + \pi\rho_L g R^3 \frac{4}{3} - m_{BG}}{\frac{2\pi\rho_L R^3}{3} + m_B}$$

상기 방정식으로 평가한 공기기포의 거동은 그림 5에서 8에 나타내었다.

만약, 열전달을 무시하고, 공기의 방출이 진동주기의 절반의 시간내에 모두 방출된다면, 기포의 압력의 크기는 공기기포로의 에너지 유입률에 비례한다. 방출배관내의 공기의 엔탈피가 일정하다면, 질량 유입률에 의해 결정된다. 일반적으로, 공기 유입률이 작으면, 압력은 낮아진다. 따라서, 공기기포의 압력을 감소시키기 위해서는 공기기포로 유입되는 질량유동률을 감소시켜야 한다. 질

랑유입률은 밸브의 작동시간, 방출배관의 길이, Sparger의 형태에 따라 달라진다. Sparger가 상기 기능을 잘 수행할 것으로 판단되나, 해석적으로 정확히 평가하기는 매우 힘들다. 기존 BWR의 경우에도 실험자료를 근거로 공기기포의 압력을 결정하였다. 차세대원전의 운전조건을 모사하여 수행 중인 KAERI의 I-Sparger 성능실험이 완료되면, 차세대원전 I-Sparger에서 방출되는 공기기포의 압력을 정확히 예측할 수 있을 것으로 판단된다,

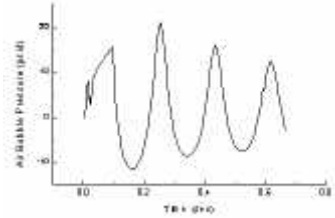


그림 5 공기기포의 압력추이

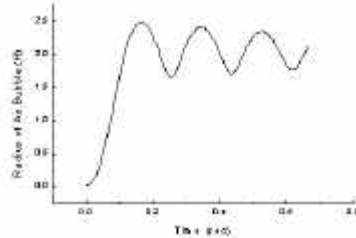


그림 6 공기기포의 반경변화

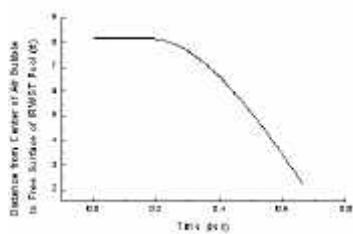


그림 7 공기기포 중심과 자유표면의 거리

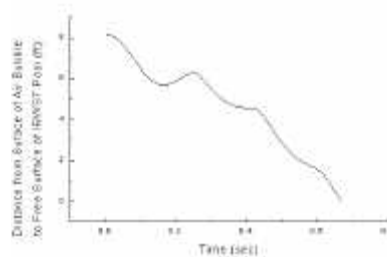


그림 8 공기기포 표면과 자유표면의 거리

IRWST내부의 압력장을 예측하는 것은 매우 어렵다. 왜냐하면, 공기기포의 형태, 공기기포들의 진동 위상차, Sparger별 방출 공기량 등을 정확히 아는 것이 불가능하기 때문이다. 계산을 단순화하기 위해 압력분포에 대한 형상함수(shape function)를 가정한다. 두 개의 공기기포사이의 압력은 두 개의 공기기포의 압력들의 중간 값임은 명백한 사실이다. 따라서, 두 개의 공기기포사이에 최소 값/최대 값이 존재하는 함수를 형상함수로 사용할 수 없다. 형상함수 중 가장 간단한 형태는 두 개의 공기기포사이의 압력이 선형으로 변화하는 형상함수를 선택하는 것이다. GE는 공기기포의 압력이 pool내로 전파될 때 압력은 공기기포의 중심에서의 거리에 반비례한다는 가정 아래 벽체의 압력하중을 구하였다. 가정할 수 있는 다른 형태는 두 개의 공기기포사이의 압력이 1/L로 변하는 형상함수를 가정하는 것이다. 일반적으로 strength는 선원이 존재하는 곳으로부터의 거리의 제곱에 반비례한다. 가정할 수 있는 또 다른 형태는 두 개의 공기기포사이의 압력분포가 1/L<sup>2</sup>로 변하는 형상함수를 가정하는 것이다. 본 논문에서는 5 개의 형상함수(Linear, 1/L, 1/L<sup>2</sup>, Superposition 1/L, Superposition 1/L<sup>2</sup>)를 가정하였다. 각 형상함수의 형태는 그림 9에 나타내었다. IRWST내부에는 공기기포가 단 두 개만 존재하고, 두 공기기포사이의 거리는 10 ft이고, 한 개의 공기기포 표면과 Sparger의 한쪽 측면은 접해 있다고 가정하였다(그림 10). 보수적 평가를 위해 두 개의 공기기포는 그림 11에 나타난 것같이 정반대의 위상을 갖는 것으로 가정하였다. 두 개의 공기기포가 정반대의 위상을 갖는다는 가정은 매우 보수적이며, 발생할 확률은 거의 없다. RELAP5/MOD3로 각 Sparger로 방출되는 공기량을 계산한 결과를 표2에 나타내었다.

표2 Sparger별 공기방출량

Sparger 번호	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
방출 공기량(lbm)	2.80	2.13	2.93	2.43	1.89	1.90	2.72	2.02	2.45	3.18	2.59	3.30

표2에서 알 수 있듯이 각 Sparger를 통해 방출되는 공기량은 Sparger마다 서로 다르다. 따라서, 각 공기기포의 특성들이 서로 다름을 알 수 있고 두 개의 공기기포가 정반대의 위상을 갖을 확률은 매우 미미하다. 그러나, 두 개의 공기기포들의 진동 위상차, Sparger별 방출 공기량 등을 정확

히 아는 것이 불가능하기 때문에 두 개의 공기기포가 정반대의 위상차 가정은 발생 가능한 모든 경우를 bounding할 것으로 판단된다.

Sparger 양단의 압력차는 그림 12에 나타내었다.

형상함수를 가정하여 Sparger 양단의 압력을 평가하는 것이 비록 정확한 압력 값을 예측할 수는 없으나, 발생할 수 있는 거의 모든 경우의 값을 bounding 할 수 있을 것으로 판단된다. 왜냐하면, 가정한 형상함수에 큰 무리가 없다고 판단되며, 평가에 사용된 가정이 매우 보수적이기 때문이다. 그러나, 이의 타당성을 검증하기 위해 POSRV 작동시 CFD코드를 사용한 IRWST내 압력 분석을 수행할 필요는 있다고 판단된다.

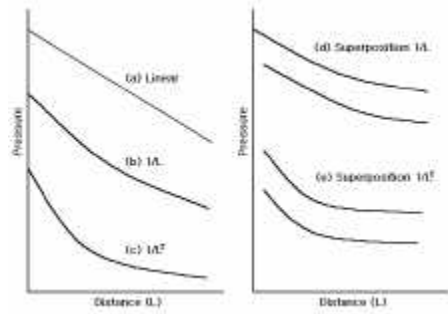


그림 9 압력 형상함수

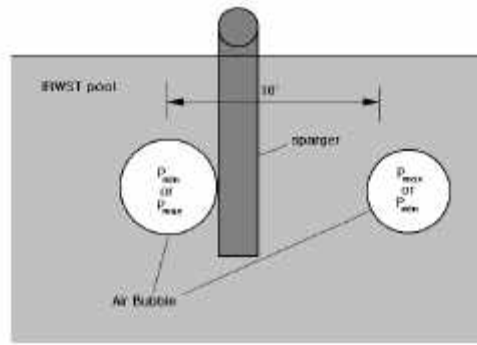


그림 10 공기기포 및 Sparger의 위치

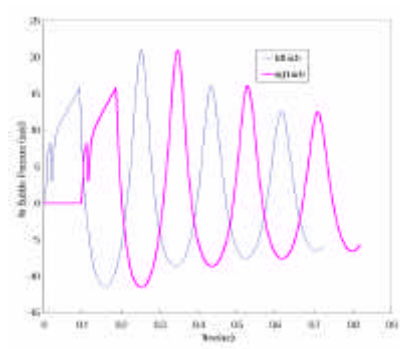
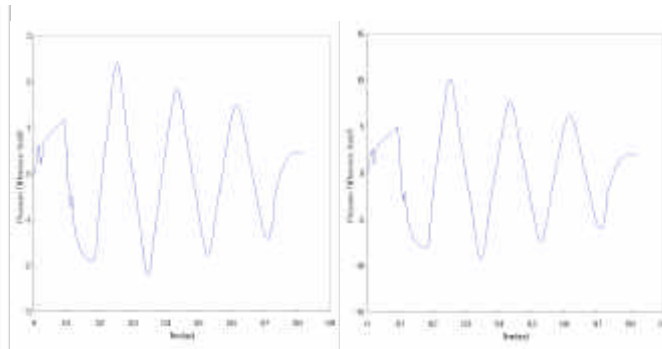


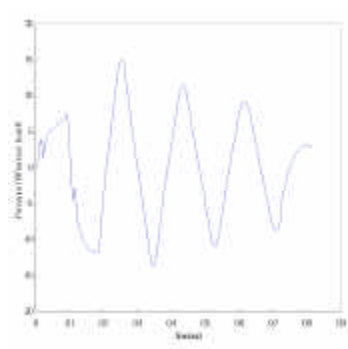
그림 11 공기기포 압력



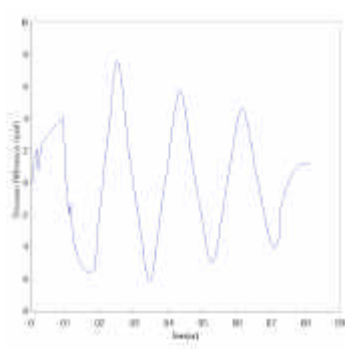
(가) 형상함수 (a)

(나) 형상함수 (b)

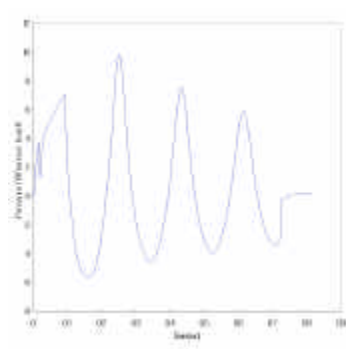
그림 12 Sparger 양단의 압력차



(다) 형상함수 (c)



(라) 형상함수 (d)



(마) 형상함수 (e)

그림 12 Sparger 양단의 압력차 (계속)

다. 방출배관 재침수(Reflooding) 하중

POSRV가 닫힌 후 방출배관의 압력이 주위의 압력보다 낮아져 IRWST 물이 방출배관으로 유입하게 된다. 유입된 물의 진행을 방해하는 엘보우와 만나면, 엘보우는 유입된 물과 충돌하게 된다. IRWST 물의 재침수 하중을 평가하기 위해서는 재침수 수위를 먼저 결정하고 재침수 수위보다 낮은 곳에 위치한 엘보우에 미치는 충돌하중을 계산하여야 한다.

재침수 수위를 계산하기 위해 아래의 모델[8]들을 사용하였다.

#### Pipe Gas Flow Model

$$m_i = 0.525Yd^2\sqrt{\Delta P\rho_1/K}$$

#### Pipe Water Flow Model

$$\frac{d\dot{m}_w}{dt} = \left[ g_c(P_1 - P_2)144 - \frac{\dot{m}_w^2}{2\rho_w} \left( \frac{1}{A_2^2} - \frac{1}{A_1^2} + \sum \frac{K}{A^2} \right) - H\rho_w g \right] / \sum \frac{L}{A}$$

#### Pipe Gas Mass and Energy Balance

i 번째 노드의 공기의 질량변화률 = 인접노드에서의 공기유입률 - 인접노드로의 공기방출률  
+ vacuum breaker에서의 공기유입률

i 번째 노드의 증기의 질량변화률 = 인접노드에서의 증기유입률 - 인접노드로의 증기방출률  
+ vacuum breaker에서의 증기유입률 - 증기 응축률

i 번째 노드의 에너지변화률 = 인접노드에서의 에너지유입률 - 인접노드로의 에너지방출률  
+ vacuum breaker에서의 에너지유입률 - 증기응축 에너지감소률

#### Condensation Model

$$\dot{q}_{us} = h_{us}A(T_{sat} - T_{wat})$$

#### Vacuum Breaker Model

$$\dot{m}_{vb} = AP_{dw} \sqrt{\frac{kg_c}{RT_{dw}} \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}}}$$

상기 모델들을 사용하여 재침수 수위를 평가하였으며 재침수 수위는 대략 20 ft이다.

Sparger에 연결된 첫 번째 엘보우는 재침수 수위 아래에 위치하고 있으므로 방출배관으로 유입된 물과의 충돌하중을 유발한다. 배관은 유입된 물의 유동 방향으로 움직인다. 충돌하중은 아래의 방정식[7]으로 결정한다.

$$F = \rho AV^2$$

배관계통에서 충돌하중이 발생하였을 때 발생하는 최대하중은 충돌인자(IF)를 사용하여 아래의 식으로 구할 수 있다.

$$IF = F_{max}/F$$

IF의 최대 값은 2이다.

상기 식으로 평가한 재침수 하중은 표2에 나타내었다.

BWR의 SRV 방출배관에서 반복되는 Water Hammer가 발생하였다[7]. 이에 대한 평가가 수행되었으며 그 결과도 표2에 기술하였다. BWR의 SRV 방출배관과 차세대원전 POSRV 방출배관은 기능면에서 동일하다. 발생하중의 차이는 운전조건이나 Sparger의 형태, 방출배관의 크기 및 배치에 기인한다. Sparger의 형태의 차이를 무시한다면(마찰손실계수 무시), 방출배관의 압력과 배관의 크기만이 충돌하중의 크기를 결정하는 인자가 된다. 차세대원전 POSRV 방출배관 단면적이 BWR SRV 방출배관의 단면적의 30% 정도임을 감안한다면, BWR의 하중값에 비해 상당히 큰 값을 갖는다. 이는 물의 유입 속도를 과대 평가하여 발생한 결과이다. 그러나, 하중의 크기가 POSRV 방출시 발생하는 Thrust 하중의 방향과 동일하고 크기가 비슷하기 때문에 POSRV 방출배관 및 Sparger 설계에 큰 영향을 주지 않을 것으로 판단된다.

표3 방출배관 재침수시 충돌하중

	배관 단면적	물의 속도	충돌하중	충돌인자	전환 정하중
차세대원전	0.181 ft <sup>2</sup>	52 ft/sec	1000 lbf	2	2000 lbf
BWR[7]	0.498 ft <sup>2</sup>	33 ft/sec	1030 lbf		

## 4. 결론 및 토의

POSRV 작동이전에 POSRV 방출배관내부에는 공기와 물이 존재한다. POSRV가 작동되면 가압기내 증기는 방출배관내부로 유입되어 배관내부의 공기를 가압하여 배관 압력을 상승시킨다. 방출배관내부 압력의 상승으로 방출배관내 물, 공기, 증기가 순차적으로 IRWST로 방출된다. 증기는 POSRV가 닫힐 때까지 계속 방출된다. POSRV가 닫히면, 배관내 압력은 IRWST 압력보다 낮아지게 되고 IRWST 물이 Sparger를 통해 배관내부로 유입된다. 상기현상으로 Sparger에 발생 가능한 하중은 크게 방출배관에서 물이 방출될 때의 Thrust 하중, IRWST내부에 존재하는 공기기포의 거동으로 인한 압력하중, 물의 재침수시 물과 엘로우의 충돌로 야기되는 충돌하중으로 구분되며, IRWST 침수벽체, 침수구조물, Sparger, 방출배관 설계에 반영하여야 한다. 본 논문은 POSRV 작동시/잠김시 Sparger에 미치는 하중분석을 평가하였다.

첫째, Sparger를 통해 물이 방출될 때 상당히 큰 하중이 발생할 것으로 예측하였으나, 1500 lbf 정도로 예상치보다 작았다. 이는 상당량의 물이 Sparger 측면에 있는 Holes을 통해 Sparger로 방출되기 때문인 것으로 판단된다. 현재 원자력연구소에서 I-Sparger 성능실험이 수행중에 있으며, 밸브 작동시 Sparger Segment의 하중을 측정할 계획이다. 현 분석 방법론은 보수적 가정을 사용하여 실험치보다 과대평가할 것으로 판단되지만, 추후 실험자료와 비교 검토하여 분석방법론을 검증하고 보완하여야 하여야 한다.

둘째, 공기기포의 진동으로 Sparger에 작용하는 압력하중은 여러 기포의 진동 위상차에 의해 발생한다. 원자력연구소에서 단일 I-Sparger를 사용하여 실험을 수행하기 때문에 동 방법론의 검증이 불가능하다. 따라서, 차선책인 CFD코드를 이용하여 IRWST내 압력분석을 수행하여 어떤 형상함수가 두 개의 기포사이의 압력분포를 보다 정확히 예측하는지를 결정하여야 하고 형상함수를 보완하여야 한다.

셋째, 방출배관의 재침수 충돌하중평가는 BWR의 결과와 비교하였을 경우 지나치게 보수적으로 평가한 것으로 판단된다. I-Sparger 성능실험시 방출배관 재침수시 Sparger Segment의 충돌하중을 측정할 계획이며, 추후 실험자료와 비교 검토하여 분석방법론을 검증하고 보완하여야 할 것으로 판단된다.

## 5. 참고문헌

- [1] U.S. NRC, "Safety/Relief Valve Quencher Loads : Evaluation for BWR Mark II and III Containments", NUREG-0802, October 1982
- [2] "design basis for protection of light water nuclear power plants against the effects of postulated pipe rupture", ANSI/ANS 58.2, 1980
- [3] Comision Federal De Electricidad, "Laguna Verde Nuclear Power Plant Station 1&2 - Final Design Assessment Report", 1979
- [4] GE, "NEDO-21061 : Mark II Containment Dynamic Forcing Functions Information Report", Rev. 3, June 1978
- [5] GE, "NEDO-20942 : Safety-Relief Valve Discharge Analytical Model", May 1975
- [6] "System 80+ SDS Flow Calculation", SYS 80P-KOAKE-FS-C-012, Rev. 0, 7/31/96
- [7] "Water Hammer Handbook for Nuclear Plant Engineers and Operators", EPRI TR-106438, Final Report, May 1996
- [8] GE, "NEDO-23898 : Mark I Containment Program Analytical Model for Computing Water Rise in a Safety-Relief Valve Discharge Line Following Valve Closure", Aug. 1979