

## SDVS/IRWST 최적설계를 위한 공기방출율분석

### Evaluation of Air Flow Rates through Spargers for Optimization of KNGR IRWST and SDVS Design

정재식, 라인식, 장영식, 고희진, 박종남, 이세원

한국전력기술(주)

경기도 용인시 구성면 마북리 360-9

#### 요 약

IRWST 설계개념을 채택한 차세대원전의 경우 POSRV 개방시 IRWST로 방출되는 물, 공기, 증기는 IRWST 벽체 및 침수구조물에 동하중을 부과한다. 이중 가장 큰 하중은 공기방출로 인한 하중이며, 공기방출 하중에 영향을 주고 방출계통과 관련이 있는 인자는 증기유속, 배관압력, 배관내 공기량 등이 있다. 차세대원전 Sparger는 한 개의 수평헤더에 여러 개의 Sparger가 달려 있기 때문에 모든 Sparger의 공기방출질량유속을 동일하게 설계하는 것은 어렵다. IRWST 열수력학 하중을 최소화하는 IRWST 및 급속감압배기계통 설계최적화를 위해 RELAP5/MOD3 전산코드를 이용하여 방출 밸브의 개방시간 및 Sparger 배열을 변경시키면서 방출배관 압력 및 공기방출질량유속을 분석하였다. 분석 결과, 밸브개방시간이 길어지면 배관내 압력은 감소하고 각 Sparger를 통해 방출되는 공기량과 질량유속은 보다 균등하게 되며, 각 수평헤더에 6개 보다는 3개의 Sparger를 배치하는 것이 보다 좋음을 알 수 있었다.

#### Abstract

In KNGR in the event of POSRVs actuation water, air and steam discharged from the RCS impose the dynamic loads on IRWST walls and submerged structures. The largest load is air clearing load. The main factors having an effect on the air clearing load are steam mass flux, the pressure and air volume in the POSRV discharge line. It is practically difficult to make the amount of air mass and its flow rates discharged through each sparger evenly distributed because several spargers are branched from one horizontal header. For an optimization of KNGR IRWST and SDVS design to minimize the T/H loads, the pressure in the discharge pipe and the air mass flow rates through spargers are evaluated using RELAP5/MOD3 code with changing the POSRV opening time and line and sparger arrangement. It is shown that as the opening time is the longer, the pressure in the discharge line is decreased and difference of the amount of air mass between spargers is reduced. And sparger headers with three spargers show better performance rather than those with six ones.

#### 1. 서론

차세대원전 안전감압배기계통(SDVS)의 POSRV(Pilot Operated Safety Relief Valve)가 개방되면 방출된 원자로냉각재계통(RCS) 유체에 의해 방출배관계통 내부에 있는 공기가 가압되어 Sparger를 통해 IRWST 물로 방출된다. IRWST 물로 방출된 가압공기는 고압의 기포들을 형성하여 Air Clearing 현상을 일으키며 Air Clearing 하중을 IRWST 침수 경계면 및 침수구조물

에 전달한다. 고압의 기포들은 주위의 압력과 차이로 인해 팽창하게 되며 이로 인해 IRWST 내의 물은 기포를 중심으로 바깥쪽으로 유동한다. 이렇게 가속된 물의 관성으로 기포들은 과다하게 팽창하여, 기포압력이 주위 물의 압력보다 낮아지게 된다. 부압의 크기는 초기 기포의 압력, 반경, 방출시간, 기포내로의 에너지 유동률 등에 따라 달라진다. 부압의 기포는 물의 유동 방향을 반대로 바꾸어 압축된다. 이 때에도 물의 관성으로 인해 기포압력이 주위 물의 압력보다 높게 된다. 기포는 부력으로 인해 IRWST 표면으로 상승하게 되며 다양한 방법으로 에너지를 소모하게 된다. 따라서 기포 압력의 크기는 감소하게 되고 기포가 IRWST 표면에 도달하면 무시할 수 있게 된다. 기포가 진동함에 따라 IRWST 내부에 유동장을 형성시켜 침수구조물에 Drag Load를 부과한다. 또한 기포 압력 변화는 IRWST 침수 경계면에 주기적 압력하중을 부과하며, 압력하중은 거리와 시간에 따라 감소한다.

본 분석에서는 Air Clearing 현상 및 하중에 큰 영향을 미치는 각 Sparger별 공기방출량을 RELAP5/MOD3.1 전산코드를 이용하여 계산하였다. Torus를 포함한 POSRV를 적용한 방출배관계통에 대한 설계변경이 진행중이므로 본 분석에서는 가압기안전밸브(Pressurizer Safety Valve : PSV)를 적용하여 설계가 완료된 방출배관계통을 대상으로 하였다. 또한 현재 공기방출량 계산에 대한 분석방법론을 확정하고 있는 단계이므로 배관계에 작용하는 동하중 값을 보수적으로 계산하기 위한 목적으로 작성된 RELAP Input Deck을 이용하였다. 따라서 본 분석결과는 각 Sparger를 통해 방출되는 공기방출량의 정확한 수치보다는 그 경향을 판단하고 방출배관 및 Sparger 배치설계에 유용하게 이용될 것으로 사료된다. 향후 POSRV를 적용한 설계변경이 완료되고 각종 민감도분석을 포함한 공기방출량 분석방법론이 확정되면 실제 입력자료로서의 각 Sparger별 공기방출량을 계산할 예정이다.

## 2. 본문

### 2.1 급속감압배기계통 (SDVS) 설명

차세대원전 SDVS는 RCS의 과압보호 및 비응축성기체 배기, 가압기살수계통불능시 RCS 감압, 설계기준초과사고(BDBA)시 취출 및 주입운전을 위한 RCS 급속감압, 중대사고시 RCS 급속감압을 수행할 수 있도록 설계되어 있다. 동 계통은 RCS에서 방출되는 유체를 IRWST로 이송할 수 있는 경로를 제공한다.

POSRV가 작동하는 주요 설계기준사고(DBA)로는 주급수관파단사고(FLB), 복수기진공상실사고(LOCV) 및 POSRV 오작동(IOPOSRV) 등이 있으며, 설계기준초과사고로는 완전급수상실사고(TLOFW)가 있다. 이러한 사고시 POSRV가 작동하여 RCS 압력을 감소시키며, 방출된 RCS 유체는 SDVS를 통해 IRWST로 방출된다. SDVS는 POSRV 작동시 발생하는 배관 열수력하중 뿐만 아니라 IRWST 벽체 및 침수구조물에 부과되는 열수력하중을 최소화하도록 설계되어야 한다. 차세대원전의 감압밸브를 Pilot Operated Safety Relief Valves(POSRV)로 변경함에 따라 SDVS 배관의 설계변경이 진행중에 있으므로 기존의 PSV/SDV 밸브채택시의 SDVS 계통설명으로 대체한다.

SDVS는 트레인 A, B 등 2 개의 트레인으로 구성되어 있으며, 각 트레인은 2 대의 PSV, 1 대 안전감압밸브(SDV), 방출배관, Sparger 헤더 및 6 개의 Sparger로 구성되어 있다. 트레인 A의

경우 그림 1에서 보는 바와 같이 2 대의 PSV는 가압기 상부 El. 191'-0"에서 직경 8"(Sch. 40) 배관에 각각 연결되어 있으며, El. 170' 정도에서 14"(Sch. 80) 배관으로 확장 통합된다. 14" 배관은 가압기격실과 격납건물 환형공간을 통과하고 IRWST 내부 El. 96'에서 Sparger 헤더(14" Sch.80)와 연결된다. 각 Sparger는 10 ft 간격을 두고 헤더와 수직 연결되어 있으며, Sparger 하단은 El. 84'-0"이고 Sparger의 침수수위는 8.5 ft이다. 14" 주방출배관은 Sparger #1과 Sparger #2사이의 중앙 지점에서 헤더와 연결된다.

## 2.2 분석 방법 및 Case

POSRV 개방시 방출배관내 열수력 거동을 평가하기 위해 본 분석에서는 열수력 분석 코드인 RELAP5/MOD3.1코드를 사용하였다. SDVS 방출배관내 열수력 인자 계산에서는 PIPE 및 Single Junction, Valve 및 Time Dependent Volume (TMDP) 등과 같은 Component를 사용하여 방출배관계통을 모델링하였다. 체적 및 Junction에 대한 비균질 유동 모델, 배관의 축소 및 팽창 부분에서 갑작스런 면적 변화는 고려하지 않았다. 밸브 전후단에 큰 압력차가 존재하므로 밸브에서의 Choking 모델을 사용하였다. RELAP5/MOD3.1 결과로는 Sparger 출구 Junction에 방출되는 공기량을 직접 계산할 수 없으므로, 다음과 같은 방법으로 Sparger 출구에서의 공기 방출량을 계산할 수 있다. 우선 Sparger 출구에서 방출되는 기체(증기+공기)의 유량을 계산하고, 동 계산값에 출구 Junction에서의 비음축성기체의 질량분율을 곱하면 Sparger끝단에서 방출되는 공기량을 계산할 수 있다. 공기방출량 계산식은 다음과 같다.

- 공기 방출유량 계산 ( $\dot{m}_{air}^j$ )

$$\dot{m}_{air}^j = x_{air}^j \dot{m}_{gas}^j = x_{air}^j \alpha (\rho v) A_j$$

$$x_{air}^j = \frac{\dot{m}_{air}^j}{\dot{m}_{gas}^j} = \frac{\dot{m}_{air}^j}{\dot{m}_{air}^j + \dot{m}_{steam}^j}$$

- 여기서  $\alpha$  : Gas void fraction  
 $\rho$  : Sparger 출구에서의 기체 밀도(lbm/ft<sup>3</sup>)  
 $v$  : Sparger 출구에서의 기체 속도(ft/sec)  
 $A_j$  : Sparger 출구 면적(ft<sup>2</sup>)  
 $\dot{m}_{air}^j$  : Sparger출구에서의 비음축성기체 질량 유량(lbm/sec)  
 $x_{air}^j$  : Sparger 출구에서의 비음축성기체 질량 분율

Sparger 헤더 배치와 POSRV 개방시간에 따른 Sparger별 공기방출량 및 Sparger 내부 압력 경향을 파악하기 위해 다섯 가지 분석 Case를 선정하여 비교 평가하였다. Case 1은 기존의 PSV를 적용한 Base Case로서 그림 1의 배관 및 Sparger 배치와 7 msec의 밸브 개방시간을 적용하였다. 차세대원전의 Sparger는 I-형이며 상부에 면적이 0.04 ft<sup>2</sup>인 압력감소링(LRR : Load Reduction Ring)을 가지고 있다. Case 2는 LRR이 방출 공기량과 Sparger 내부압력에 미치는 영향을 평가하기 위해 Case 1에 LRR 모델링만 추가하였다. Case 3과 Case 4는 밸브 개방시간이 공기 방출량과 Sparger 내부압력에 미치는 영향을 평가하고자 선정되었다. 현재 차세대원전의 POSRV는 RCS 과압방지를 위해 RCS 압력이 밸브 개방설정치(2,480 psia)에 도달하면 자동

으로 작동되고, 밸브개방시간은 1.7 sec이다(Case 4). 또한 TLOFW 사고시 운전원은 유출 및 흡수운전을 위해 POSRV를 수동 개방하며 이때의 밸브개방시간은 0.7 sec이다(Case 4). Case 5는 Sparger 방출 공기량을 균등하게 하기 위한 방안으로서 3개의 Sparger가 한 개의 헤더에 연결된 배치가 공기 방출량 및 Sparger 내부 압력경향에 미치는 영향을 평가하기 위해 선정하였다. 분석 Case별 주요 모델링 내용은 표 1에 기술되어 있다.

## 2.3 가정사항 및 초기/경계조건

한 트레인에 연결된 2 대의 POSRV는 동일한 개방설정압력에서 동시 개방되며, 동 밸브의 개방면적은 시간에 따라 선형적으로 증가한다. 방출배관과 격납건물 대기와의 열전달은 무시하였다. 배관내 초기 온도 및 압력과 상대습도는 각각 120 °F, 14.7 psia, 100%로 가정하였고, 배관의 조도(Roughness)는 0.00015 ft 값을 사용하였다. Sparger의 침수수위는 8.5 ft이며, Sparger 내부에 있는 물의 초기 압력은 수두를 고려하여 계산하였으며, IRWST 수온과 동일한 120 °F로 가정하였다. 1대의 POSRV의 설계 방출질량유량은 630,000 lbm/hr이지만, 본 분석에서는 질량유량이 클수록 배관내 압력 및 열수력 상태량에 미치는 영향이 크므로 보수적으로 20% 증가한 값을 사용하였다.

## 2.4 분석결과

### 1) 방출배관내 압력 변화

우선 배관내 압력파(Pressure Wave) 전파에 따른 배관내 압력 변화 경향을 살펴보고자 한다. 밸브 개방시 생성된 압력파가 배관을 통과하면 그림 2에서 보는 바와 같은 압력파 전후단의 압력차가 발생한다. 압력파는 방출배관을 통해 Sparger 헤더에 도달하고 초기 밀도가 크고 정지 상태에 있는 Sparger 내부 물에 이르게 된다. 이때 Sparger 내부 물은 압력파의 전파를 막는 장애물로 작용하기 때문에 물이 빠지기까지 Sparger에서의 압력이 급격하게 증가함을 알 수 있다. 또한 이러한 압력의 증가는 IRWST로 방출되는 공기 압력 증가를 의미한다.

### 2) 밸브개방시간에 따른 압력파 전후단의 경향

일반적으로 밸브 개방시간이 길고 배관 길이가 길어지면 압력파의 전후단의 압력차 크기는 줄어든다. Moody가 제안한 배관 길이(L), 음속(C<sub>∞</sub>), 밸브 개방시간(τ)을 이용한 압력파 전파 상관관계식(τC<sub>∞</sub>/L)을 이용하여 압력파 전파특성을 예상할 수 있다. τC<sub>∞</sub>/L <<1.0 이면 순간적이 밸브개방으로 간주되며 이때 압력파 전후단의 압력은 연속적이 아니라 압력차가 큰 압력의 불연속 지점이 생성된다. τC<sub>∞</sub>/L < 1.0 이거나 τC<sub>∞</sub>/L ≥ 1.0일 경우 압력파 전후단의 압력차가 급격하지 않고 완만하게 증감하는 경향을 보인다. Moody 압력파 전파 상관관계식을 차세대 원전에 적용하였을 경우 결과는 다음과 같다.

$$\frac{\tau C_{\infty}}{L} = \frac{0.007 * 340}{80} = 0.02975 \rightarrow \text{PSV 개방시간 } 7 \text{ msec (Case 1과 Case 2)}$$

$$\frac{\tau C_{\infty}}{L} = \frac{1.7 * 340}{80} = 7.225 \rightarrow \text{POSRV 자동개방시간 } 1.7 \text{ sec (Case 3)}$$

$$\frac{\tau C_{\infty}}{L} = \frac{0.7 \times 340}{80} = 2.975 \quad \rightarrow \text{POSRV 수동개방시간 } 0.7 \text{ sec (Case 4와 Case5)}$$

여기서 L : 배관길이(m), 차세대원전 SDVS의 경우 약 80 m  
 $C_{\infty}$ : 공기중에서 음속(m/sec), 약 340 m/sec  
 $\tau$  : 밸브 개방시간 (sec)

따라서 PSV 적용시에는 압력과 전후단의 압력차가 크고 POSRV 적용시에는 압력차가 적은 것으로 예상된다.

### 3) 주요 분석결과

Case 1의 분석결과는 그림 3부터 그림 8에, Case 2의 분석결과는 그림 9와 10에, Case 3의 분석결과는 그림 11부터 그림 13에, Case 4의 분석결과는 그림 14부터 그림 16에, Case 5의 분석결과는 그림 17부터 그림 19까지 나타나 있다. 밸브 개방시간, 하중감소링, Sparger 배치가 Sparger 압력과 각 Sparger별 공기방출량에 미치는 영향은 다음과 같다.

#### 밸브 개방시간의 영향

밸브개방시간의 영향을 평가하기 위해 밸브 개방시간이 각각 0.7 msec, 1.7 sec, 0.7 sec인 Case 1, Case 3, Case 4의 분석결과를 검토하였다. 밸브 개방시간이 가장 긴 Case 3의 Sparger 압력이 Case 1과 Case 4의 경우 보다 낮게 나타났으며(그림 7, 13, 16), 이는 압력파의 세기가 차이가 나기 때문인 것으로 판단된다. 각 Sparger별 공기방출량은 Case 1의 경우 최대 6.40 lbm, 최소 0.33 lbm, Case 3의 경우 최대 4.71 lbm, 최소 0.73 lbm, Case 4의 경우 최대 5.40 lbm, 최소 0.59 lbm로 계산되었다(표 3, 4). Sparger 압력이 가장 낮은 Case 3가 가장 균등한 공기방출 특성을 보이고 있다. 따라서 밸브 개방시간이 길어질수록 Sparger 압력이 낮아지고 각 Sparger별 공기방출량이 균등해짐을 알 수 있다.

#### 하중감소링의 영향

하중감소링(LRR, 0.04 ft<sup>2</sup>)의 영향을 평가하기 위해 LRR을 제외한 모델링이 동일한 Case 1과 Case 2의 분석결과를 검토하였다. LRR이 고려된 Case 2의 Sparger 압력이 Case 1보다 약간 낮았고, 각 Sparger별 공기방출량은 Case 1의 경우 최대 6.40 lbm, 최소 0.33 lbm, Case 2의 경우 최대 6.03 lbm, 최소 0.39 lbm로 계산되었다(표 3). Case 1의 경우 Sparger 끝단을 통해 물이 방출될 때까지 Sparger 압력이 증가하지만, Case 2의 경우 LRR이 Sparger 상부에 있으므로 물이 Sparger 끝단을 통해 완전히 방출되기 전에 LRR을 통해 공기가 방출되기 때문이다.

#### Sparger 배치의 영향

그림 1에서 보는 바와 같이 두 방출배관이 Sparger 헤더의 중앙에서가 아닌 Sparger #1과 Sparger #2 사이에서 Sparger 헤더와 연결되어 있다. 이런 배치를 기준으로 하여 Sparger 배치의 영향을 검토하였다. Case 1의 경우 Sparger #1의 공기방출량은 Sparger 헤더에 압축된 공기

중 Sparger #1과 Sparger #2 사이의 헤더 공간의 절반에 해당하는 (약 5 ft) 공기량(1.26 lbm)이 Sparger #1으로 방출된다. Sparger #1과 Sparger #2 사이의 헤더 공간의 절반에 해당하는 공기량(1.26 lbm)중 일부는 Sparger #2와 Sparger #3 사이의 헤더로 이동되며, 나머지인 약 0.33 lbm만이 Sparger #2로 방출된다. 따라서 Sparger #2로 방출되는 공기량이 가장 적으며, Sparger #6로 방출되는 공기량이 가장 많음을 예측할 수 있다. 또한 분석결과도 표 3, 4에서 보는 바와 같이 Sparger #2의 공기방출량이 가장 적고 Sparger #6의 공기방출량이 가장 많음을 보여주고 있다.

Sparger 배치의 영향을 평가하기 위해 Case 5에서는 주 배관의 연결 위치와 Sparger 헤더 배치를 변경하였다. 길이가 50 ft인 1 개의 Sparger 헤더를 20 ft인 2개의 헤더로 분리하고 연결 위치를 헤더의 중앙으로 변경하였으며, Sparger의 간격은 10 ft로 다른 Case와 동일하다. Sparger 배치를 제외한 모델링이 동일한 Case 4과 Case 5의 분석결과를 검토하였다. 각 Sparger별 공기방출량은 Case 4의 경우 최대 5.40 lbm, 최소 0.59 lbm로, Case 5의 경우 최대 2.53 lbm, 최소 1.12 lbm로 계산되었다(표 4, 5). Case 5의 경우 배치대칭성으로 Sparger #1, #3, #4, #6로 방출되는 공기량이 동일하고, Sparger #2, #5로 방출되는 공기량이 동일하였다. Case 5와 같이 Sparger를 배치하면 최대 공기방출량은 약 절반이상 감소시킬 수 있음을 알 수 있다

### 3. 결론

POSRV 개방시 배관 내부 압축공기는 Sparger를 통해 IRWST로 방출되며 IRWST 구조물에 동하중을 부과한다. SDVS/IRWST 설계최적화를 위해서는 이러한 동하중을 최소화하여야 한다. 본 연구를 통해 동하중을 감소시키는 균등한 공기 방출 및 Sparger 압력감소방안 등을 다음과 같이 도출하였다. 첫째, Sparger 배치를 최적화하여 각 Sparger별 공기방출량을 균일하게 할 수 있다. 둘째, 해석 측면에서는 하중감소링을 모델링하여 밸브 개방으로 인한 배관내 열수력 과도현상시 배관 내 압력을 감소시키고 방출되는 공기량을 보다 균일하게 할 수 있다. 셋째, POSRV 개방시간을 증가시켜 배관에 작용하는 압력의 크기를 감소시킬 수 있다. 공기 방출시 Sparger 압력은 밸브 개방시간을 길게 함으로써 줄일 수 있지만 차세대원전의 경우 POSRV가 채택된 상태이므로 밸브 개방시간 변경은 현실적으로 불가능하다. 따라서 Sparger 및 헤더의 배치를 최적화하여 가능한한 각 Sparger별 공기방출량을 균일하게 하는 방법을 모색할 예정이다.

### 참고 문헌

- [1] EPRI "Application of RELAP5/MOD1 for Calculation of Safety and Relief Valve Discharge Piping Hydrodynamic Loads", EPRI NP-2479, Final Report, December 1982.
- [2] "Introduction to Unsteady Thermofluid Mechanics" Frederick J. Moody
- [3] "RELAP5/MOD3 Code Manual" NUREG/CR-5535, INEL-95/0174, Vol1, 2, 3
- [4] EPRI "BWR Suppression Pool Pressures During Safety Relief Valve Discharge" EPRI NP-4008, Final Report, April 1985
- [5] "Hydraulic Analysis of Unsteady Flow in Pipe Networks" J.A. FOX

표 1. 분석 경우별 주요 계통 모델 내용

Case 1	작동 밸브 수	밸브개방시간	LRR 모델링	헤더 갯수	헤더당 Sparger 수
1	2	7 msec	×	1	6
2	2	7 msec	○	1	6
3	2	1.7 sec	×	1	6
4	2	0.7 sec	×	1	6
5	2	0.7 sec	×	2	3

표 2. 각 분석 Case에 대한 초기 공기량 계산(lbm)

분석 경우	초기 공기량(lbm)
Case 1	12,96
Case 2	12,96
Case 3	12,96
Case 4	12,96
Case 5	12,96
Case 6	12,21

표 3. Case 1 및 Case 2의 경우 밸브 개방시 Sparger를 통해 방출되는 공기량

Sparger No.	공기 방출량(lbm)			
	Case 1		Case 2	
	Sparger Exit	LRR	Sparger Exit	LRR
1	1,25	0	0,59	0,70
2	0,33	0	0,24	0,15
3	0,61	0	0,38	0,32
4	1,24	0	0,67	0,84
5	3,09	0	1,69	1,83
6	6,40	0	2,52	3,50
방출된 공기 총량(lbm)	12,95	0	6,10	6,91

표 4. Case 3 및 Case 4의 경우 밸브 개방시 Sparger를 통해 방출되는 공기량

Sparger No.	공기 방출량(lbm)			
	Case 3		Case 4	
	Sparger Exit	LRR	Sparger Exit	LRR
1	1.47	0	1.42	0
2	0.73	0	0.59	0
3	1.10	0	0.89	0
4	1.88	0	1.52	0
5	3.06	0	3.10	0
6	4.70	0	5.40	0
방출된 공기 총량(lbm)	12.96	0	12.94	0

표5. Case 5의 경우 밸브 개방시 Sparger를 통해 방출되는 공기량

Sparger No.	공기 방출량(lbm)	
	Case 5	
	Sparger Exit	Load Reduction Ring
1	2.53	0
2	1.12	0
3	2.53	0
4	2.53	0
5	1.12	0
6	2.53	0
방출된 공기 총량(lbm)	12.38	0



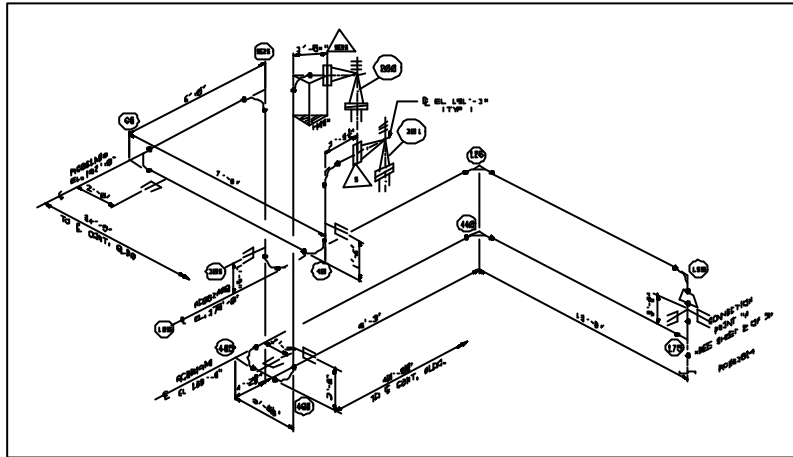


그림 1. 차세대원전 SDVS 방출배관 배치(Train 1) (1/3)

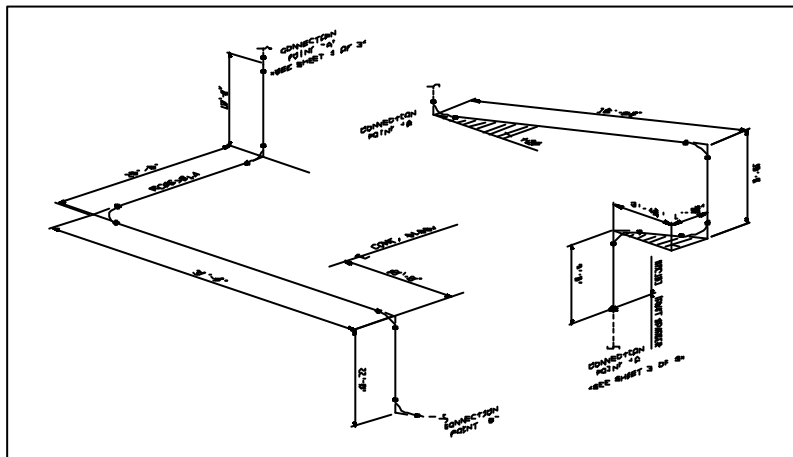


그림 1. 차세대원전 SDVS 방출배관 배치(Train 1) (2/3)

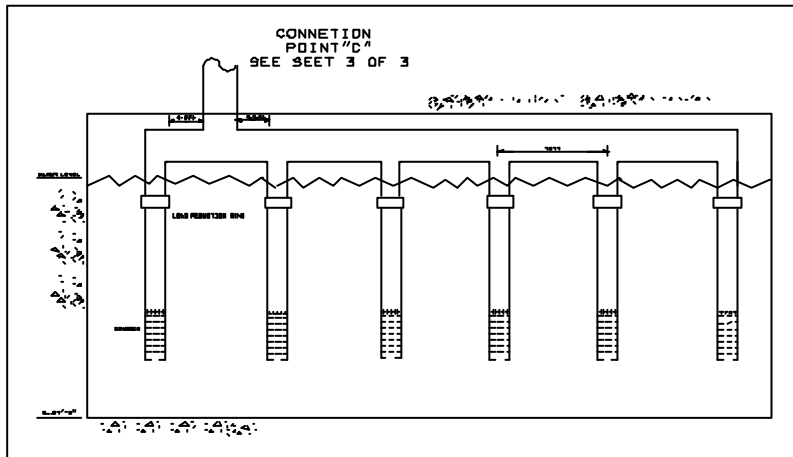


그림 1. 차세대원전 SDVS 방출배관 배치(Train 1) (3/3)

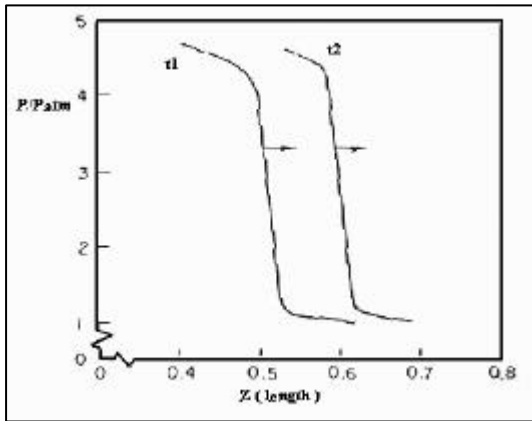


그림 2. 전형적인 압력파의 전파

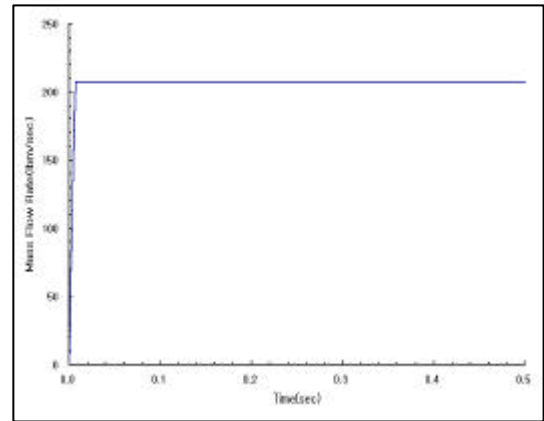


그림 3. 시간에 따른 PSV 질량 유량  
( Case 1 and Case 2)

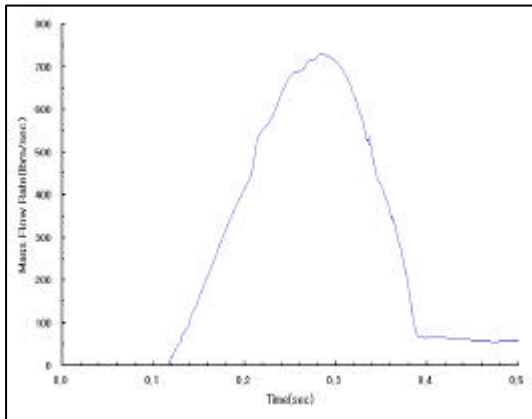


그림 4. Sparger 1에서의 유량 ( Case 1)

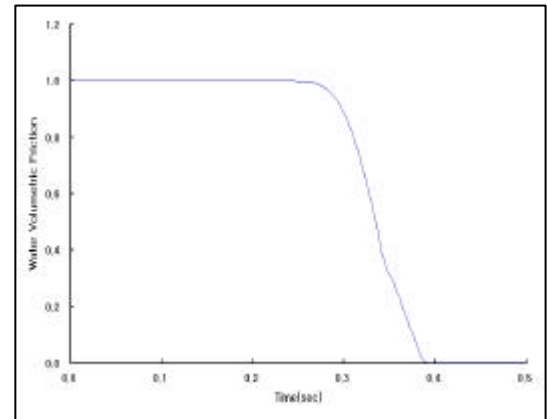


그림 5. Sparger #1에서의 물체적 분율  
( Case 1)

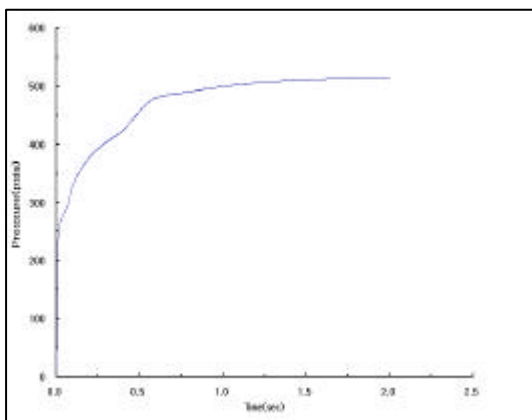


그림 6. 밸브 후단에서의 압력 (Case 1)

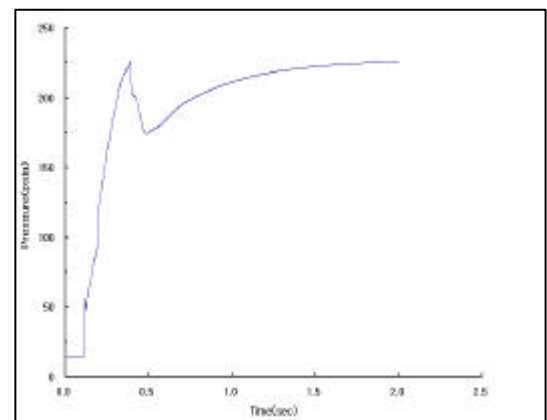


그림 7. Sparger #1에서의 압력 (Case 1)

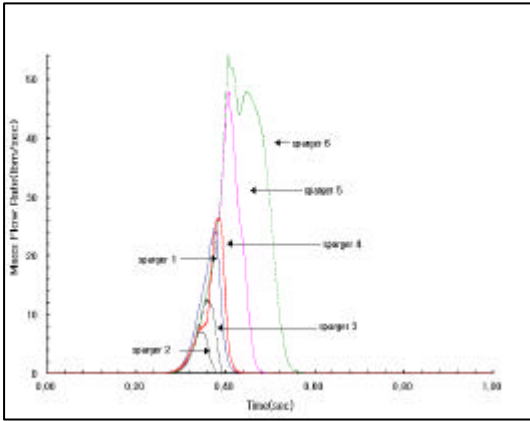


그림 8. Sparger에서 공기 유량 (Case 1)

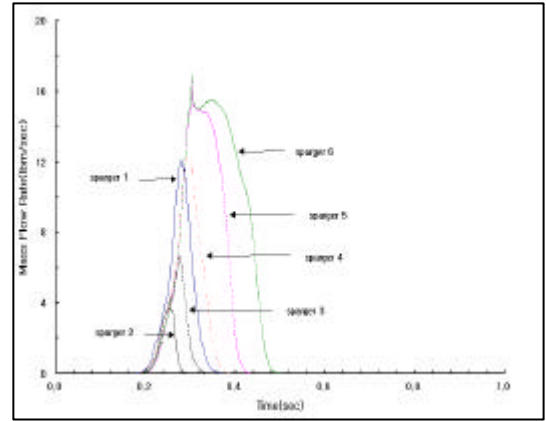


그림 9. Sparger Hole에서 공기 유량 (Case 2)

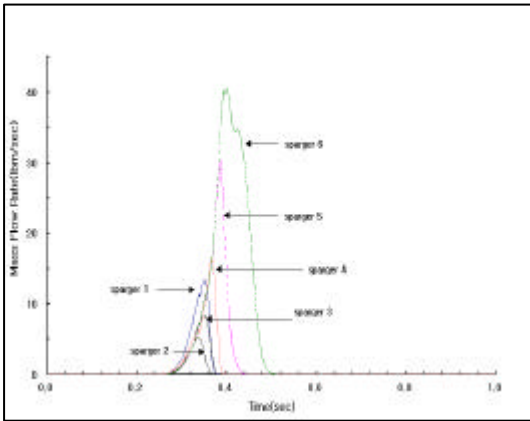


그림 10. Load Reduction Ring에서의 공기 유량 (Case 2)

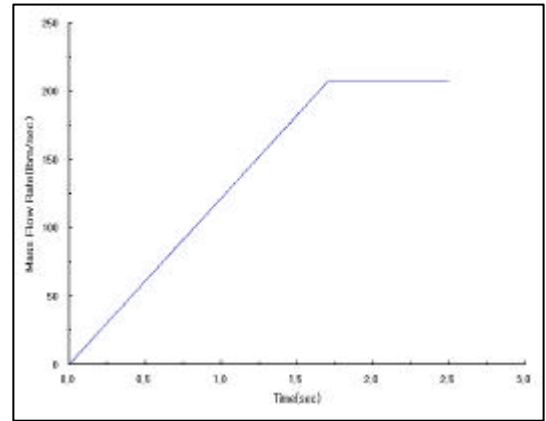


그림 11. 밸브를 통한 질량 유량 (Case 3)

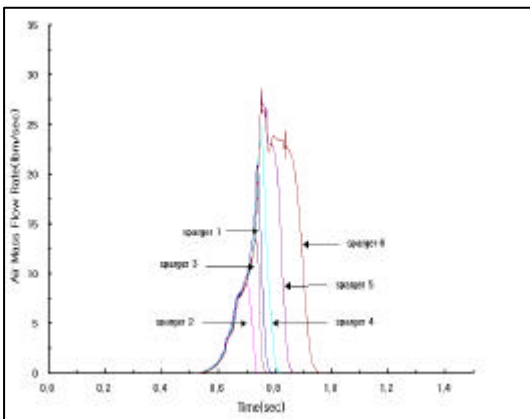


그림 12. Sparger에서 공기 유량 (Case 3)

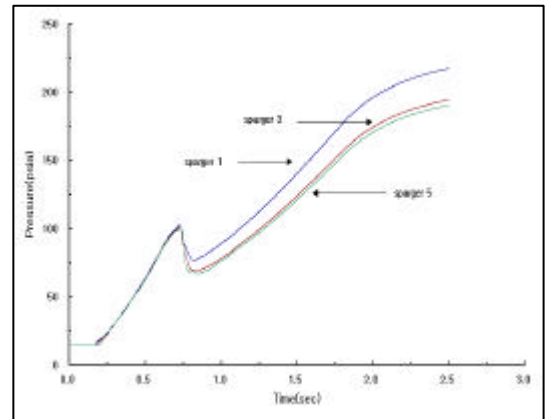


그림 13. Sparger에서의 압력 (Case 3)

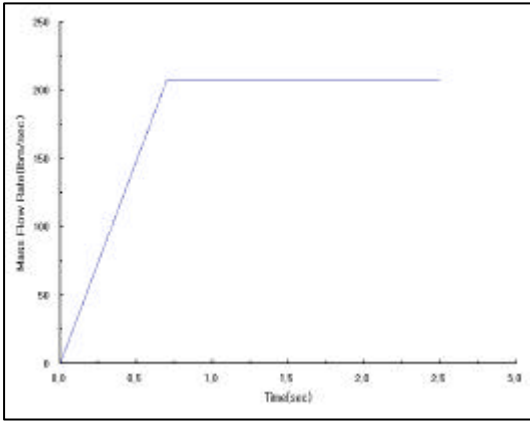


그림 14. 밸브를 통한 질량 유량 (Case 4)

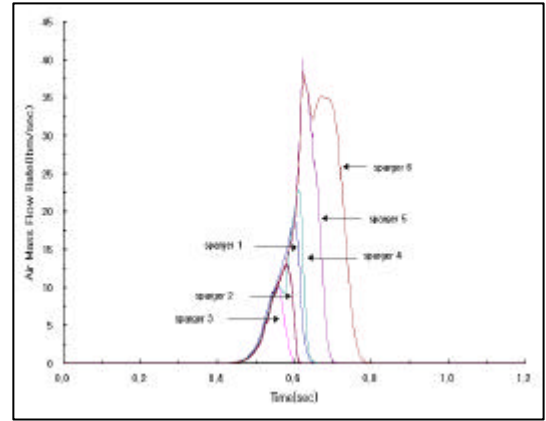


그림 15. Sparger에서의 공기 유량 (Case 4)

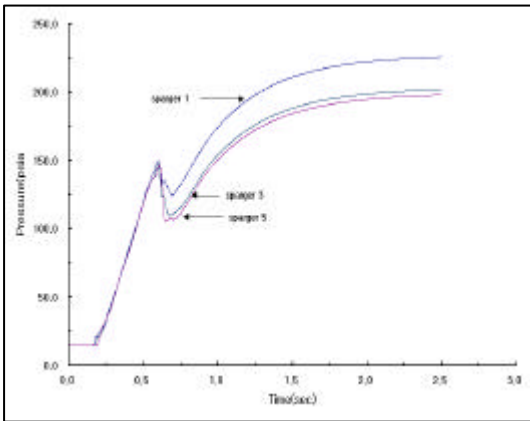


그림 16. Sparger에서의 압력 (Case 4)

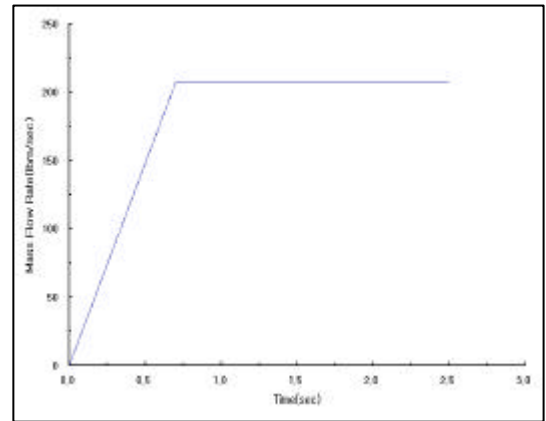


그림 17. 밸브를 통한 질량 유량 (Case 5)

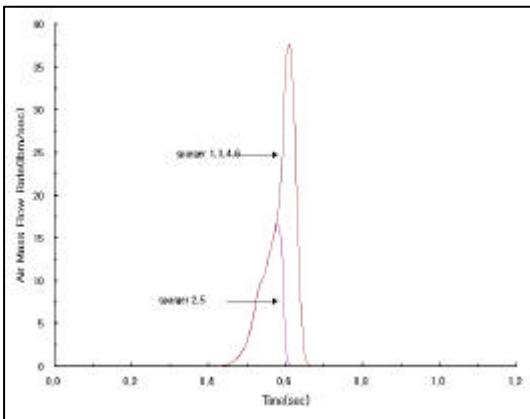


그림 18. Sparger에서의 공기 유량 (Case 5)

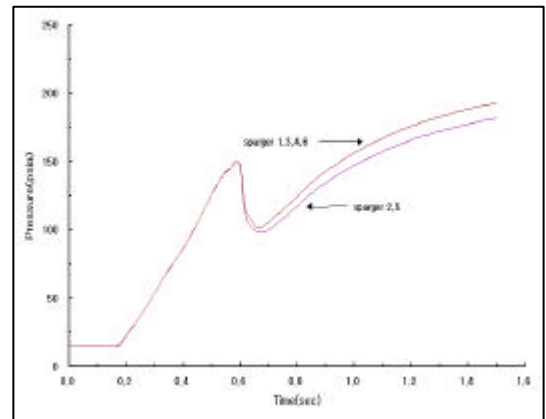


그림 19. Sparger에서의 압력 (Case 5)