2001 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

한국형 차세대 원자로의 증기분사기 성능에 관한 예비실험

Preliminary test on the performance of the KNGR unit cell sparger

조 석, 정흥준, 박춘경, 천세영

한국원자력연구소
대전 유성우체국 사서함 105 호, 305-600
전화 : +82-42-868-2719, Fax : +82-42-868-8362
전자우편 : scho@kaeri.re.kr

요 약

차세대원자로의 가압기 상부에 위치한 안전감압밸브(POSRV)의 개방시 증기는 안전감압배기계통을 통하여 격납용기내 재장전수 저장탱크로 분사된다. 이때 분사되는 증기에 의해 배관 및 증기분사기에 있던 물과 공기가 급격하게 압축되어 수조로 분사됨으로서 배관 및 수조의 내부구조물에 압력하중을 발생시킨다. 본 논문에서는 차세대원자로에서 사용될 12 개의 증기분사기중 1 개의 원형 증기분사기(Prototype Sparger)를 사용하고 초기 공기방출시의 성능검증을 위한 Unit Cell Test 의 예비실험결과 및 한계성과 이를 바탕으로 한 앞으로의 실험방향 및 대책에 대하여 논한다.

Abstract

Following POSRV actuation, steam enters the SDVS discharge line compressing the air within the line and expelling the water slug into the IRWST. During the successive discharging of water, air and steam, the jets entering the pool from the discharge device result in drag loads on submerged structures within the influence of the jets. In this paper, the preliminary test results of Unit Cell Test, the objectives of which are to investigate the performance of a prototype sparger during the air-clearing period, and its limitations are discussed. On the basis of the preliminary test results, the work scope of Unit Cell Test and the counter-measures are also discussed.

1. 서 론

1.1 연구배경 및 목적

2010 년의 상용운전을 목표로 개발중인 차세대원자로(KNGR, 4000MWt)에는 노심손상빈도를 낮추고 중대사고 대처능력의 향상 등을 고려한 원전의 안전성을 향상시키기 위하여 격납용기내 재장전수 저장수조(IRWST)를 포함한 안전감압배기계통(SDVS)과 같은 새로운 공학적 안전개념들이 도입될 예정이다. IRWST 는 가압기 안전감압밸브, 안전감압배기계통, 격납용기내 수저장계통(IWSS), 정지냉각계통(SCS), 안전주입계통(SIS), 그리고 격납용기내 스프레이계통(CSS)와 연결되어 있는 중요계통으로서 주요기능은 원자로의 정상운전 및 사고시 격납용기내부의 과냉각수에 대한 저장, 공급 기능과 열침원으로서의 역할이다. 증기발생기 이차측의 열제거 기능 불능과 동시에 소형 냉각재 상실사고 발생시 가압기 상부에 장착된 4 개의 POSRV 가 열려 RCS 의 과압을 방지하는 동시에 안전감압배기계통은 안전주입계통(SIS)과 더블어 주입 및 방출(Feed & Bleed) 기능을 제공하여 노심의 건전성을 유지한다. POSRV 의 개방으로 가압기로부터 IRWST 로의 공기 및 증기 등의 고 에너지 유동이 형성되는 데, 증기분사기를 통한 물, 공기, 증기의 방출은 IRWST 및 IRWST 내부 구조물에 열수력적 하중을 발생시킨다. 증기분사기를 통한 물, 공기, 증기방출 과정중 구조물에 가장 큰 하중을 발생시키는 것은 공기방출(Air Clearing)과정으로 알려져 있다.[1,2] 따라서 IRWST 구조물은 이러한 하중에 견딜 수 있도록 설계되어야 한다. 차세대원자로에서는 6 인치의 I 자형 증기분사기를 사용하도록 설계 되어있으며[3], IRWST 내부의 증기분사기의 개략적인 장착도를 그림 1 에 표시하였다.

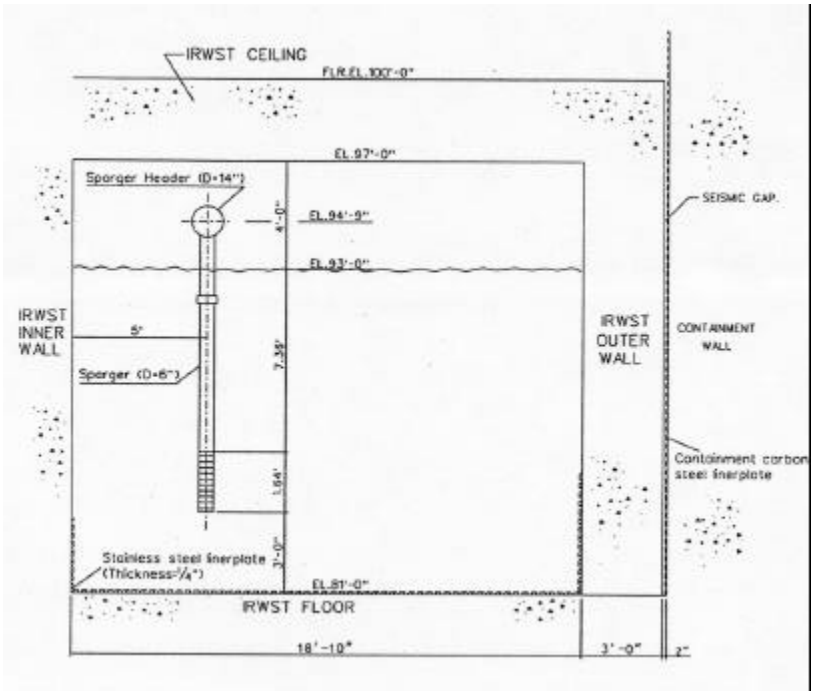

Fig. 1 Schematic Representation of KNGR IRWST Sparger

한국원자력연구소에서는 차세대원자로에서 사용할 원형 증기분사기의 초기 공기방출 및 응축성능과 방출배관 내부의 열수력적 거동을 평가하기 위하여 원형의 증기분사기 1 개를 사용하는 증기방출실험인 Unit Cell Test 를 수행중이다. Unit Cell Test 의 목적은 다음의 2 가지로 요약된다.

1) 초기의 공기방출시 IRWST 를 모의한 수조 내부의 동적하중 관찰
2) 증기방출배관 격리후 진공분쇄밸브(Vacuum Breaker) 작동시 방출배관내 열수력 거동 관찰

본 논문은 Unit Cell Test 를 위한 예비실험결과와 이를 토대로 진행될 향후 실험범위에 대하여 설명하고자 한다.

1.2 방출시의 열수력 현상

POSRV 가 열리면 고에너지의 증기가 감압배관에 존재하는 공기를 급격하게 압축하게 된다. 압축된 공기는 증기분사기의 잠김깊이 만큼 차있던 물을 밀어내면서 물방출(Water Clearing)이 된다. 물방출후 물과 증기사이에서 순간적으로 압축되었던 공기가 증기분사기를 통해 큰 모멘텀을 가지고 방출(Air Clearing)된다. 방출된 고압의 공기방울은 수조내부에서 급격히 팽창하려 하지만 주위의 과냉각수의 영향으로 수조내 자유수면위로 상승할 때까지 몇 번의 압축과 팽창을 반복하는 과정에서 방출시의 에너지를 수조내 과냉각수에 전달한다. 과냉각수에 전달된 에너지는 파동의 형태로 수조 및 내부구조물에 동적하중을 전달하게 된다. 공기방출이 끝나면 가압기로부터의 증기방출(Steam Discharging)이 시작된다. 증기방출은 수조의 온도에 따라서 안정응축과정과 불안정응축과정으로 구분된다.[4]

이상에서 설명한 물, 공기, 증기방출과정은 실제 실험시에는 명확하게 구분할 수 없으며 물/공기 혼합, 공기/증기 혼합등의 이상유동 형태로 분사되는 것으로 판단된다.

2. 실험장치

2.1 차세대원자로 안전감압계통

현재 차세대원자로 안전감압계통의 배관배치에 관한 설계는 확정되지 않았으나, 참고문헌 [5]에 의한 방출배관의 기본설계결과는 다음과 같다.

- POSRV 전단배관
  - Swan Neck 배관 : 6 인치, Sch.160 -> 4 인치, Sch.160
- POSRV 후단배관
  - 토러스배관 : 12 인치, Sch. 160
  - 2 개의 주방출배관 : 14 인치, Sch.80

- IRWST 상부가지배관 : 10 인치, Sch.80
- Sparger 에 연결된배관 : 6 인치, Sch.80

POSRV 전단의 swan neck 배관은 증기의 방출시 급격한 온도변화로 인한 밸브의 손상을 방지하기 위한 loop seal 의 역할을 위해 설치되었다. 밸브 후단의 토러스 관은 4 개의 POSRV 를 오각형의 loop 으로 연결하고 있으며, 2 개의 14 인치 주방출배관으로 연결된다. 각각의 주방출배관 에는 IRWST 상부가지배관을 통하여 6 개씩의 증기분사기와 연결된다. POSRV 후단 배관의 총 체적은 12.4m^3 이고, 공기온도 49°C, 대기압의 조건일 경우 계산된 공기의 질량은 12.2kg 이다. 증기분사기로 통하는 방출배관의 상이함으로 인해 방출시 각 증기분사기로 분사되는 공기양은 차이가 있으며, 해석결과에 의하면 증기분사기를 통해 분사되는 공기양은 약 1.48 ~ 1.92kg 정도이다.

POSRV 는 총 4 개가 가압기 상부헤드에 장착되며, 밸브의 최소직경인 throat 면적은 0.00385m^2 (d=70mm)이다. 밸브의 동작속도(stroke time)는 수동조작시 0.7 초, 자동조작(pilot operated)시 1.7 초이다.

증기분사기는 ABB Atom 사의 모델 M150, I 자형이며, 6 인치, Sch.40 (ANSI standard) 배관을 사용하였다. 끝부분에 원주방향으로 10mm, 144 개의 방출구와 축방향으로 25mm, 1 개의 방출구가 있다. 또한 끝부분과 자유수면사이에 지름 39mm, 8 개의 분사구를 갖춘 하중감쇄링(Load Reduction Ring)이 있어서 초기의 공기방출시 방출되는 공기의 일부가 끝부분까지 도달하기전에 이곳을 통해 방출되어 공기방출과 증기방출시에 발생하는 동적하중을 감쇄시킨다. 그림 2 에 증기분사기의 제작도면을 표시하였다.

2.2 성능실험요건 및 실험장치

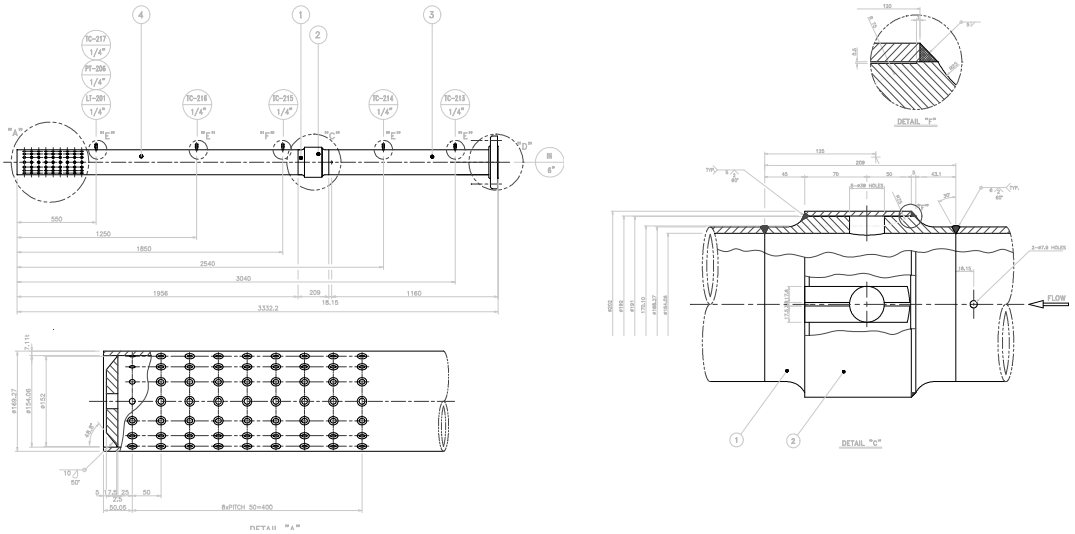

Fig. 2 Construction Drawing of the KNGR sparger

서론에서도 언급한 바와같이 Unit Cell Test 의 목적은 초기 공기방출시 수조내부에서의 동적압력하중에 대한 특성평가이다. 실험목적을 달성하기 위하여는 실제 발전소의 방출배관을 모사하고 배관내 공기양이 확보된 상태에서 고압의 증기가 배관내부의 공기를 급격 가압/방출할 수 있어야 한다. 이러한 조건을 만족하기 위해서는 가압기(또는 증기저장소), 밸브 및 방출배관, IRWST 모의용 수조, 증기분사기가 필요하다. 1.2 절에서 설명한 바와같이 초기의 공기방출시 수조내부에서의 동적하중을 모의하기 위해서는 고압의 증기가 정체상태의 공기를 순간적으로 압축하여 증기분사구를 통해 밀어내야 한다. 이러한 조건의 모의를 위하여 현재 한국원자력연구소에서 가동중인 증기방출 및 응축(Blowdown & Condensation)실험장치의 일부를 개조하였다. 공기량에 대한 요구조건을 만족하기 위해서는 밸브후단의 방출배관의 길이가 너무 길어져 현실성이 부족한 점과 현재 사용중인 가압기의 용량($0.85m^3$)을 고려하여 배관의 일부를 8 인치로 확장하여 이곳에 공기를 가압하여 총 공기량을 맞추는 방법이 강구되었다. 공기의 가압을 위하여 최대 60bar 까지 가압이 가능한 공기압축기(air compressor)가 배관에 연결되었으며, 공기가압배관의 전/후단에 2 인치 급속작동자동밸브(HV-201, HV-202)를 각각 설치하여 POSRV 의 역할을 수행토록 하였다. 급속작동밸브의 작동시간은 POSRV 와 같은 0.7/1.7 초를 만족하도록 설계되었다. 증기방출전후 가압기의 수위를 측정하기 위하여 식(1)을 사용하였다.

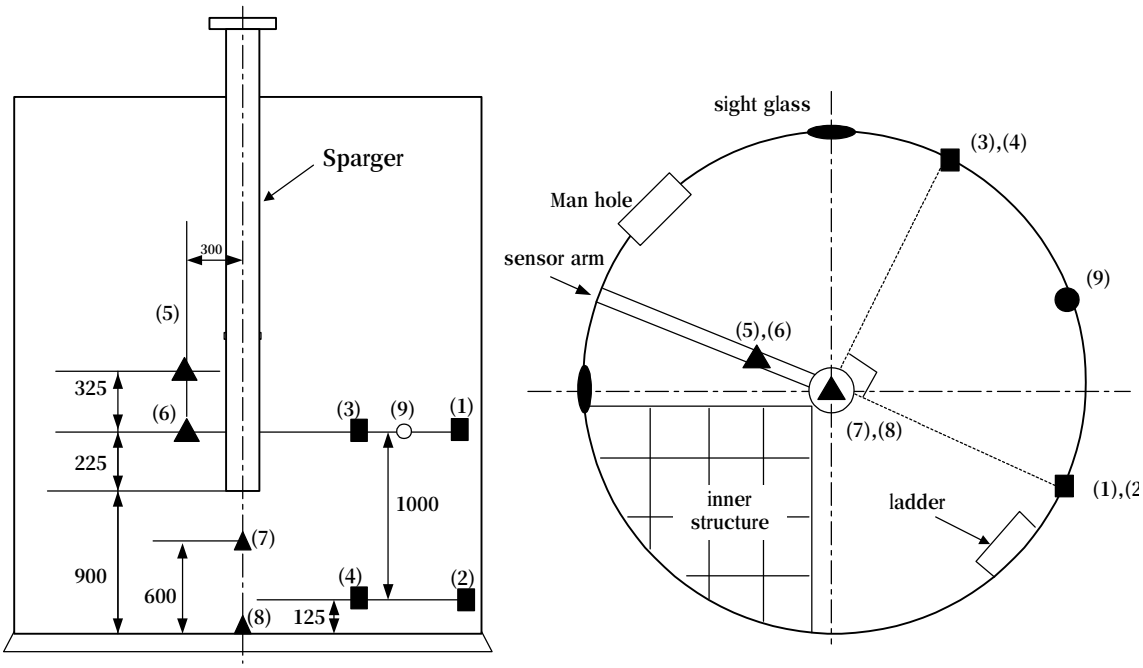

Fig. 3 Location of Dynamic Pressure sensor in Quench Tank

$$H = H_0 + \frac{(r_c - r_s)gH_1 - \Delta p}{(r_h - r_s)g} \quad (1)$$

식(1)에서 H_0 = 0.15m

H_1 = **압력탭 사이의 거리**, 2.7m

ρ_c = **계측기압력도관 내부의 과냉각수 밀도**(kg/m^3)

ρ_s = **가압기 내부 포화증기 밀도**(kg/m^3)

ρ_h = **가압기 내부 포화물의 밀도**(kg/m^3)

g = **중력가속도**, 9.798m/s^2

가압기로부터 공기배관까지는 2 **인치**, Sch.160 **배관으로 연결하였으며**, **중간에 증기유량 측정용** venturi-meter **가 설치되었다**. **증기유량은 다음의 식**(2)**에 의해 계산되었다**.[6]

$$q = \frac{C}{\sqrt{1-b^4}} e_1 \frac{p}{4} d^2 \sqrt{2\Delta p r_s} \quad (2)$$

식(2)에서 C = 0.995 (Discharge coefficient for machined case)

β = 0.6884 (d/D)

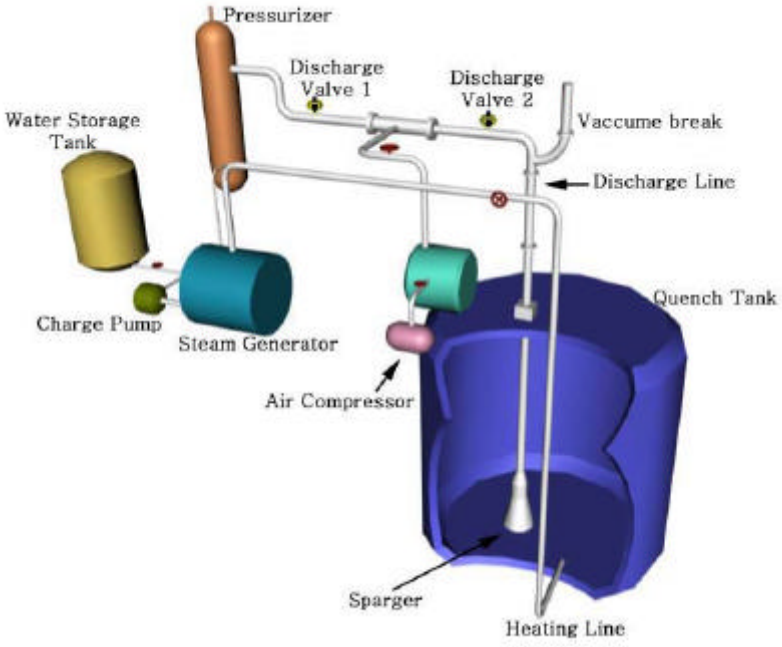

Fig. 4 Schematic Diagram of Unit Cell Test Facility

d = 0.0294m

ρ_s = 증기밀도 (venturi 전단의 온도와 압력을 측정하여 증기표로 부터 계산) (kg/m^3)

Δp = venturi 에서 측정된 압력강하량 (Pa)

ε_1 = expansion factor

HV-202 후단은 2 인치에서 6 인치로 확장되어 원형의 증기분사기까지 연결되었다. 수조의 내경은 3m 이고 높이는 4m 로서 총 $28.3m^3$ 의 물을 저장할 수 있도록 설계되었다. 실험시 수조내 최고 수위는 3.5m 이다. 수조내 동압의 측정을 위하여 총 9 개의 piezoelectric 형 동압센서가 설치되었으며 동압센서의 위치를 그림 3 에 표시하였다. 진공분쇄기는 HV-202 후단의 6 인치 배관에 설치되었다. 기타 부속설비로서 수조의 온도조절을 위하여 소형 증기발생기로부터 수조까지의 증기공급배관이 설치되어있다. 두개의 급속작동자동밸브간의 작동시간차이를 정밀 조절하기 위하여 정밀 타이머를 장착하여 밸브간 동작을 제어하였다. Unit Cell 실험장치의 개략적인 모습을 그림 4 에 표시하였다.

3. 실험결과

3.1 예비실험방법 및 결과

1.1 절에서 설명한 바와같이 Unit Cell Test 의 목적은 고압의 증기에 의해 순간적으로 가압된 공기가 증기분사기를 통해 분사되면서 수조내부에 발생시키는 열수력하중 특성연구이다. 실제 차세대원자로의 안전감압계통에 대한 적절한 모의에 많은 문제가 상존하여 실험장치는 실제 설계와 상이하게 제작되었다. 공기량을 조절하기 위하여 가압장치를 부착하였고, 주배관이 2 인치로 작게 제작되었다. 또한 공기의 가압을 위하여 두개의 자동밸브를 설치하여 증기방출시 밸브작동방식에 따른 현상의 변화로 인해 실험자료의 불확도를 증가시키게 되었다. 이러한 실험장치 고유의 한계성과 문재점에 대한 보완책으로서 또한 본실험 의 초기조건설정과 관련된 실험기법의 개발에 대한 필요성 때문에 예비실험을 수행하였다. 예비실험은 우선 두 밸브의 작동방식에 대한 방출현상의 실제적모의를 위해 밸브간 작동시간을 변화하면서 실험하였다. 두번째로는 가압기 수위변화에 대한 배관 및 수조에서의 압력변화 및 유량의 신뢰성 확인 실험을 수행하였고, 이어서 공기의 질량과 수조의 온도변화에 대한 실험을 수행하였다. 예비실험의 또다른 목적은 공기방출시 최대의 하중을 발생시키는 조건에 대한 대략적인 윤곽을 설정하는 것이다.

그림 5 에 예비실험에서 얻어진 전형적인 압력 및 증기유량 변화를 표시하였다. 실험중 밸브의 작동방식에 따라서 공기가압배관에서의 초기압력(PT-203)변화는 심한 차이를 보이고 있으나 이것은 밸브의 작동시간차이에 의한 당연한 결과로서 수조내에서의 압력하중변화에 영향을 미치는 것으로 판단된다. 이 부분에

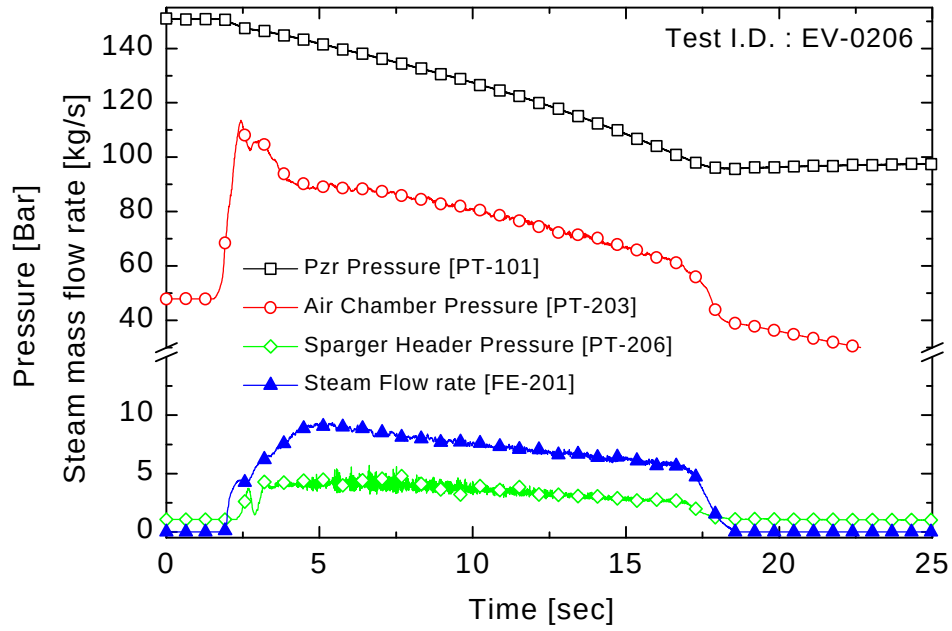

Fig. 5 Variation of pressure and steam flow rate during blowdown period.
(수조온도 : 60°C, 공기량 : 1.2kg, 밸브간 작동시간차(ΔT) : 0.60sec)

대해서는 다음절에서 설명하고자 한다. 증기유량 역시 밸브작동방식에 따라서 초기의 변화량에 차이를 보이고 있으며, 최고값은 7.95 ~ 8.83kg/s 의 범위에서 변화하였다. 코드해석을 통한 차세대원자로의 단일 증기분사기당 평균 증기유량은 약 25.3kg/s 정도이다. 증기분사기 공동구(Header)에서의 압력은 3.7 ~ 5.2bar 의 범위에서 변화를 보이고 있으며, 이값은 차세대원자로의 코드해석결과 공동구에서의 압력 약 8 ~ 12bar 에 비해 상당히 낮은 값이다.

3.1.1 밸브간 작동방식에 의한 효과

2.2 절에서 설명한 바와같이 Unit Cell Test 는 두개의 밸브를 조작하여 공기 및 증기를 방출하여야 한다. 전단밸브(HV-201)와 후단밸브(HV-202) 사이에는 가압된 공기가 있으므로 전단밸브와 후단밸브의 동시개방시 가압된 공기가 증기의 분풀과는 상관없이 증기발생기를 통해 분출됨으로서 실제적인 공기방출(air clearing)효과를 관찰할 수 없다고 판단되어 전단/후단밸브의 동작시간에 차이를 두어 실험을 수행하였다. 이때 각 밸브의 열림시간(stroke time)은 0.7sec 로 하였다. 그림 6 에 밸브간 작동시간의 차이에 의한 수조벽면에서의 동압하중변화를 표시하였다. 밸브간 작동시간차이가 감소할수록 압력파의 진폭은 증가하고 있음을 알 수 있다. 하지만 밸브의 동시 개방시에는 미약한 초기압력파가 발생한 후 시간이 지남에 따라서 압력파가 증가하는 형태로 관찰되었다. 예비실험결과 밸브간 작동시간차이가 약 0.4 ~ 0.6 초 정도에서 압력파가 가장크게 관찰되었다.

3.1.2 공기량에 의한 효과

POSRV 로부터 각 증기분사기까지의 거리는 차이가 있으며 배관내부의 공기

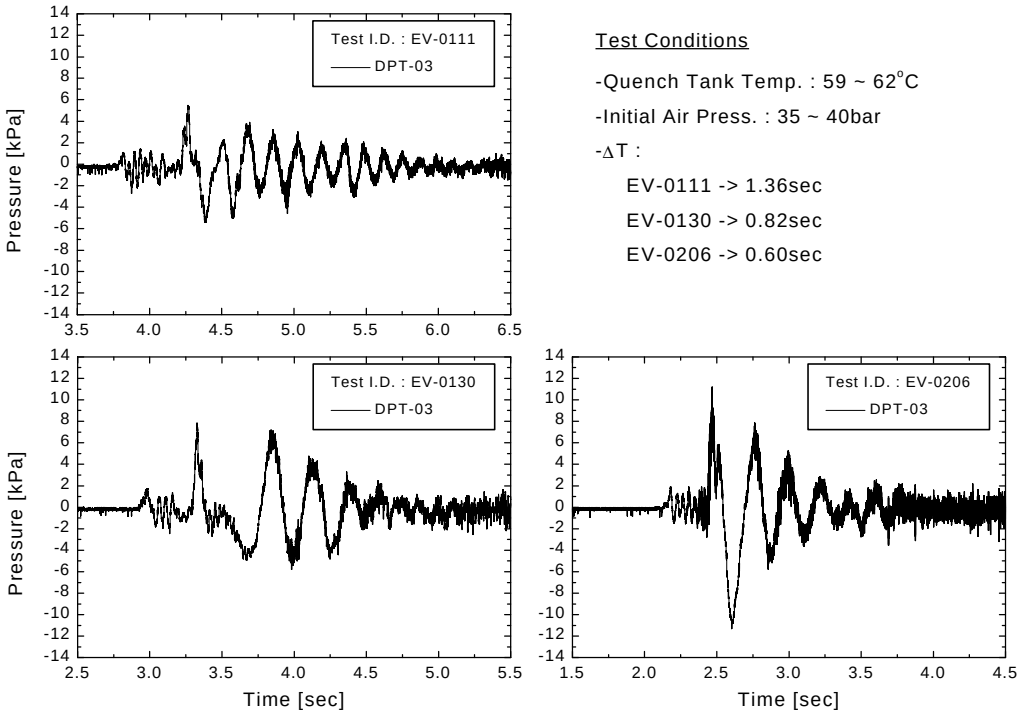

Fig. 6 Variation of pressure at the tank wall with the operating time difference of valves
(각 밸브의 열림시간 : 0.7 초)

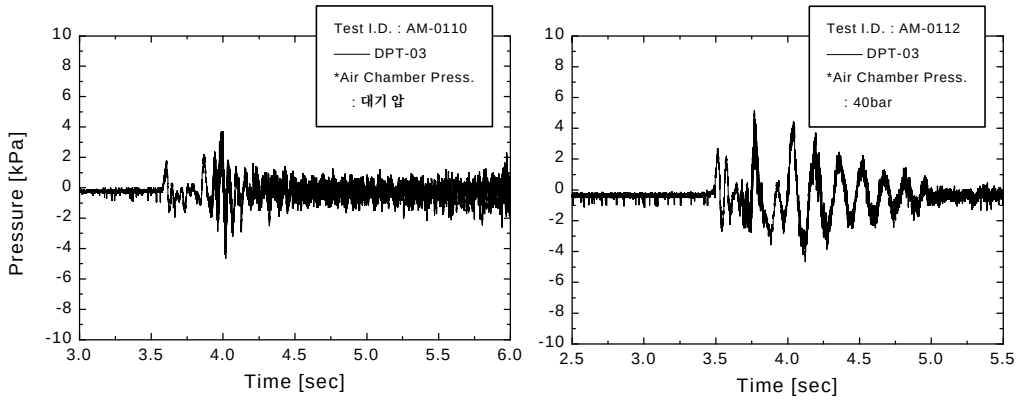

Fig. 7 Variation of pressure at the tank wall with the air chamber pressure
(수조온도 : 20 ~ 30°C, ΔT : 1.33sec)

량도 달라지게 된다. 배관내의 공기가 모두 증기분사기를 통해 분사되므로 서로 다른 양의 공기에 의해 발생된 공기방울의 크기와 내부압력의 차이가 발생한다. 이러한 차이는 수조내부의 압력하중에 영향을 미치게 되므로 공기량의 영향에 대한 실험이 필요하다. 그림 7 에 공기량에 따른 수조벽면에서의 압력파의 크기를 비교하였다. 대기압조건하에서 공기량은 약 0.03kg 이고 40bar 에서는 약 1.17kg 의 공기가 배관에 채워진다. 공기방출시 수조내부에서의 압력파는 근본적

으로 공기방울의 압축과 수축으로 인한 에너지소산 때문이다. 공가량이 많아질수록 공기방울의 크기는 커지게 되므로 진동주파수는 작아지고 진폭은 증가하게된다. 그림 7 에서는 공기량에 따른 압력파의 주파수 변화를 관찰할 수 있다. 진폭은 예상과는 달리 큰 차이가 없는 것으로 관찰 되었다.

3.1.3 수조온도에 의한 효과

수조온도의 영향은 증기유량과 더블어 압력하중에 큰 영향을 미치는 중요인자로서, 특히 증기의 방출시 열전달을 지배한다. 공기의 방출시에도 그림 8 에서 보듯이 압력하중에 큰 영향을 미치는 것으로 관찰되었다.

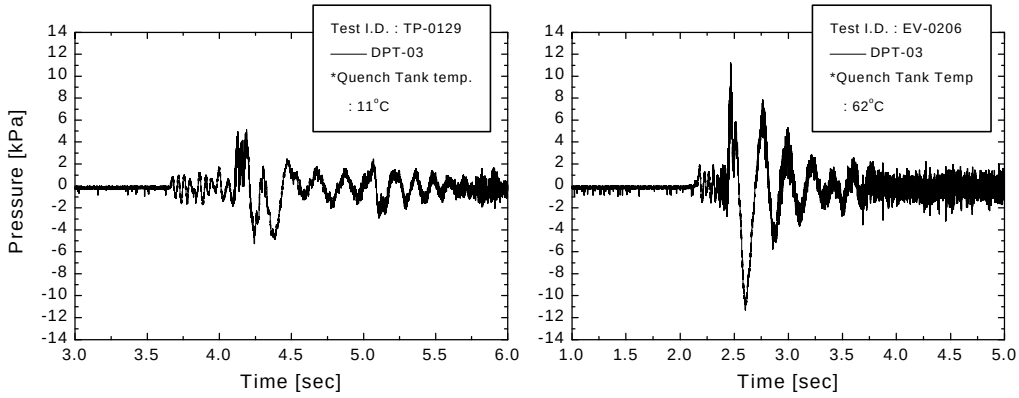

Fig. 8 Variation of pressure at the tank wall with the pool temperature
(Initial air pressure : 35 ~ 40bar, ΔT : 0.6sec)

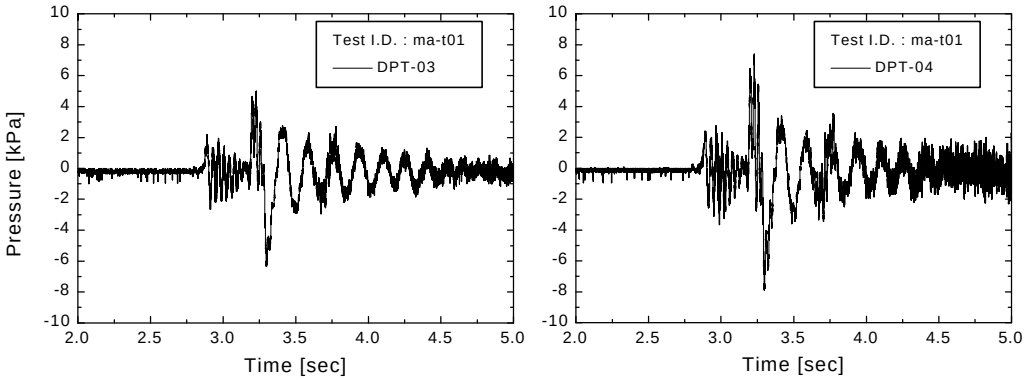

Fig. 9 Variation of pressure at the tank wall with the submergence depth
(Initial air pressure : 32bar, ΔT : 0.6sec, **밸브 열림시간** : 1.12sec,
Pool temp. : 20°C)

3.1.4 잠김깊이에 의한 영향

그림 9 는 잠김깊이에 따른 압력하중의 변화를 비교하였다. 주파수는 같으나 잠김깊이에 따라서 하중의 크기가 변화한 것을 알 수 있다. 압력센서의 위치는 그림 2 에 표시하였다. 잠김깊이에 따른 위의 효과는 수두에 의한 것으로 판단된

다. 즉, 공기방출시 공기방울의 압축과 팽창에 영향을 주는 인자로서 수두에 의한 수압을 생각할 수 있는 데, 이는 수압이 클수록 공기방울의 압축 압력을 증가시키기 때문이다.

3.2 향후 실험범위 및 대책

예비실험을 통하여 가압기의 초기 수위, 증기유량, 밸브작동방식, 여러 실험변수에 대한 기본적 동압거동등을 확인 할 수 있었고, 실험수행 기술등을 습득하였다. 이를 토대로 본격적인 실험이 수행될 것이다. 증기분사기 공동구에서의 압력과 증기유량이 코드해석치이 미치지 못한다는 점을 지적할 수 있으나, 이것은 밸브의 압력강하량을 낮추기 위하여 현재사용중인 자동밸브를 gate 형으로 바꾸고 venturi meter 의 유로면적 확장등으로 해결할 수 있으리라 판단된다. 향후 진행될 Unit Cell Test 의 실험 matrix 는 다음과 같이 정리할 수 있다.

- ■ 밸브의 개방시간(HV-202 기준) : 0.7/1.7sec
- ■ 방출공기량 : 0.7 ~ 1.9kg
- ■ 배관내 공기온도 : 50 ~ 90°C
- ■ 증기분사기 잠감깊이 : 저수위 ~ 3.5m
- ■ 수조온도 : 20 ~90°C
- ■ 진공분쇄밸브 크기 : 2 ~ 4%

4. 결 론

본 논문은 차세대원자로에서 채택한 6 인치, I 형 증기분사기 1 개를 사용하여 초기 공기방출과정에서 발생하는 수조내 압력하중의 특성을 평가하기 위한 Unit Cell Test 의 준비를 위한 실험방법, 초기조건, 실험장치의 성능등을 결정하기 위한 예비실험에 대하여 기술하였다. 본 논문의 결론은 다음으로 요약할 수 있다.

1) 밸브간의 작동시간차는 0.4 ~ 0.6 초가 가장 적합한 것으로 판단된다.
2) 증기유량과 이에따른 증기발생기 공동구의 압력이 일정하다고 할 때, 수조내 압력하중에 영향을 미치는 주요인자로는 수조온도, 공기량, 수조잠김깊이, 밸브열림시간등이 있다.
3) 실험시 일관성있는 자료를 얻기 위해서는 가압기 수위, 배관온도, 수조온도 및 잠김깊이, 밸브작동방식등의 초기조건의 설정이 매우 중요하다.

후 기

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

참고문헌

1. Nilsson L., “Experimental Investigation of Steam Vent Clearing Phenomena at System Relief into a Condensation Pool of Water,” AE-RL-1630, 1975.
2. J. Fredell, “Relief System: Theoretical Study of the Pressure Field in the Condensation Pool,” KVB 81-178, ABB Atom, June 29, 1981.
3. Korea Power Engineering Company, Inc., “IRWST Thermal Hydraulic Load Analysis Report,” N-001-END461-201, 1999.
4. Seok Cho et al., “Characteristics of Air Clearing Loads of Sparger,” Proceeding of 2000 KNS Fall meeting, Daejeon, Korea, 2000.
5. 한국전력기술주식회사, “메모-IRWST Sparger 성능실험관련 자료 송부,” NES/RD-20000004/M, 2000.
6. International Standard Organization, “Measurement of Fluid Flow by Means of Pressure Differential Devices, Part1:Orifice plates, Nozzles and Venturi tubes inserted in circular cross-section conduits running full,” ISO-5167-1:1991(E), 1991.