



KR0101293

KAERI/TR-1814/2001

안전감압계통의 공기방출시 하중에 관한 실험
연구(I)

Experimental Study on the Air/steam discharging load
of Safety Depressurization System(I)

2001. 4

한국원자력연구소

32 / 48

제 출 문

한국원자력연구소장 귀하

본 보고서를 2000 연도 “원전안전계통 실증실험” 과제의 기술보고서로 제출합니다.

2001. 4. 20.

주 저 자 : 조 석

공 저 자 : 정홍준
윤영중
천세영

요 약 문

I. 제 목

안전감압계통의 공기방출시 하중에 관한 실험 연구(I)

II. 연구개발의 목적 및 필요성

차세대원자로(KNGR)에는 안전감압계통과 같은 새로운 안전개념들이 설치될 예정이다. 안전감압계통은 가압기 안전밸브의 작동시 고압의 증기를 감압배관과 증기분사기(sparger)를 통하여 containment 내부의 재장전수 저장탱크(IRWST)로 분사한다. 이 과정중 증기분사기 및 감압배관 내부의 물과 공기가 먼저 분사되고, 연이어 고온/고압의 증기가 분사된다. 물, 공기, 그리고 증기의 연속적인 분사과정중 IRWST 및 내부구조물에 최대의 하중을 발생시키는 과정은 공기방출과정(air clearing)으로 알려져 있다. 차세대원자로에서는 12개의 6인치 I-형 증기분사기를 채택하여 설계가 진행되고 있고, 이에 대한 실험적 검증이 필요하다. 본 연구에서는 6인치 증기분사기 실험의 전단계로서 2인치 I-형 증기분사기를 사용하여 공기방출시 탱크벽면에서의 하중 특성을 실험적으로 규명하고자, 4종류의 증기분사기를 사용하여 실험을 수행하였다.

III. 연구개발의 내용 및 범위

본 연구에서는 2인치의 I-형 증기분사기의 분사구직경(d)과 P/d 의 변화에 따른 압력하중특성을 비교하기 위하여 분사구직경(5mm, 10mm)과 P/d 율(3.2, 4.7)을 변화하여 총 4가지 종류의 증기분사기를 사용하여 응축수의 평균온도를 30 ~ 95℃까지 변화하여 실험을 수행하였다. 본 보고서에서는 실험장치와 공기방출시 응축수 탱크벽면에서의 압력거동에 대하여 중점적으로 설명하였고, 모의 가압기 및 감압배관에서의 열수력적 변화에 대한 논의는 제외하였다.

IV. 연구개발결과

증기분사기의 기하학적 형상특성(d , P/d 등의 영향)은 벽면에서의 압력에 영향을 주는 것으로 판단된다. 분사구직경이 큰 경우($d=10\text{mm}$)가 작은 경우($d=5\text{mm}$)보다 큰 하중이 관찰되었고, 특성주파수는 P/d 의 영향에 따라 변화하였다.

V. 연구개발결과의 활용계획 및 건의사항

본 연구는 차세대원자로에서 사용될 원형의 증기분사기를 사용하게될 Unit cell실험을 예비실험성격으로 본 실험을 통하여 공기방출시 하중의 기본 특성과 경향예측, 그리고 압력측정기술등을 습득하였고, unit cell 실험 자료와의 비교를 통하여 증기분사기의 크기효과에 대한 비교가 가능하리라 생각된다.

SUMMARY

I. Project Title

Experimental Study on the Air/steam discharging load of Safety Depressurization System(I)

II. Objective and Importance of the Project

In the Korea Next Generation Reactor (KNGR) design, the Safety Depressurization System (SDS) plays a great role in reducing the core damage frequency and improving the severe accident performance of the KNGR. The actuation of POSRVs results in a time-varying high-energy flow of air, steam, two-phase, and liquid from the pressurizer into the Incontainment Refueling Water Storage Tank (IRWST). The successive discharge of water, air, and steam induces thermal hydraulic phenomena such as a water jet, air clearing and steam condensation, and these phenomena impose the relevant hydrodynamic forces on the IRWST structures. In the KNGR design, totally twelve 6inch I-type spargers will be installed in the IRWST. Therefore, an understanding of the related phenomena such as the characteristics of dynamic pressure loads is a prerequisite for the design of the sparger and IRWST structure to withstand the pressure loads. In the present study, four 2inch I-type spargers test were performed to characterize the pressure loads at the quench tank wall as a pre-stage of a unit cell test which will be performed by using prototype sparger of the KNGR.

III. Scope and Contents of Project

To investigate the pressure loads behavior in the quench tank during the air clearing period, four different spargers whose P/d ratios and discharging hole diameters are 3.2, 4.7 and 5mm, 10mm respectively were tested with the variation of pool temperature in the range of 30 to 95°C. In the present report, the main description is focused on the test facility and the pressure loads behavior on the quench tank wall. Thermal-hydraulic behaviors in the depressurization line are not included

here.

IV. Result of Project

The geometric configuration of sparger such as the P/d ratio and discharging hole diameter, d , affect the characteristics of pressure loads at the quench tank wall. The peak pressures of discharging hole diameter 10mm are greater than those of 5mm. The dominant frequencies are increased with the pool subcooling temperature and P/d ratio.

V. Proposal for Applications

The present test is a pre-stage test of a scheduled unit cell test which will be carried out by using a 6inch prototype sparger of the KNGR in KAERI. By the present test, the basic behavior and measuring technique of pressure load can be derived. Moreover, by comparing the unit cell test data with the present data, the effect of the size of sparger will be evaluated.

CONTENTS

SUMMARY(in Korean)	ii
SUMMARY(in English)	iv
CONTENTS(in English)	vi
CONTENTS(in Korean)	vii
List of Table	viii
List of Figure	viii
Chapter 1 Introduction	1
Section 1 Background	1
Section 2 Phenomena during blowdown	1
Section 3 Objectives	3
Chapter 2 Test facility and method	4
Section 1 Mechanical system	4
Section 2 Instrumentation and control system	6
Chapter 3 Results	15
Section 1 Phenomena description	15
Section 2 Dynamic pressure	16
Chapter 4 Conclusions	30
References	31

목 차

요 약 문	ii
SUMMARY	iv
CONTENTS	vi
목 차	vii
표 목차	viii
그림목차	viii
제 1 장 서 론	1
제 1 절 연구배경	1
제 2 절 증기방출시 유동현상	1
제 3 절 연구목적 및 성과	3
제 2 장 실험장치 및 실험방법	4
제 1 절 기계 계통	4
제 2 절 계측 및 제어계통	6
제 3 장 실험결과	15
제 1 절 방출시 가압기 및 배관의 열수력거동	15
제 2 절 수조내 동압거동	16
제 4 장 결 론	30
참고문헌	31

표 목차

Table 3.1 Test matrix and technical specifications of sparger

Table 3.2 Test Conditions and Results

그림 목차

Fig. 2.1 Flow Diagram of the SDS (Safety Depressurization System)

Fig. 2.2 Schematic diagram of test facility and locations of temperature and pressure sensors in the piping

Fig. 2.3 Sparger's Dimensions and Set-Up in the Water Pool Tank

Fig. 2.4 Thermocouples' Locations in the Water Pool Tank

Fig. 3.1 Detailed drawing of KNGR sparger

Fig. 3.2 Temperature trend in the piping during blowdown period

Fig. 3.3 Pressure trend in the piping during blowdown period

Fig. 3.4 Image of water/air/steam discharging stages (Sp_2 , $T_p=84^\circ\text{C}$, $P_{PZR}=117\text{bar}$)

Fig. 3.5 Typical pressure signal induced from successive discharging of water, air, and steam

Fig. 3.6 Trends of the maximum positive amplitude with a variation of the sparger and the temperature of pool water

Fig. 3.7 Variation of the dominant frequencies with the P/d ratio of the sparger

제 1 장 서 론

제 1 절 연구배경

2010년의 상용운전을 목적으로 설계가 진행중인 차세대원자로에는 자체의 안전성을 높이기 위하여 여러 가지의 안전개념들이 도입 될 예정이다. 이러한 안전개념들중의 하나로 원자로 내부의 재장전수 저장탱크(IRWST, In-containment Refueling Water Storage Tank) 및 증기분사기(sparger)를 포함한 안전감압계통이 있다. 안전감압계통은 원자로심의 손상빈도를 낮추고, 중대사고의 가능성을 낮추는 데 결정적인 역할을 수행하리라 생각된다[1]. IRWST는 원자로 정상운전중이나 사고진행중 containment 내부의 열제거원, 응축수 공급원, 그리고 열에너지 저장원으로서의 역할을 수행한다. 예를 들어 이차측 열제거불능 상태에서의 과도 소형냉각재 상실사고시, 가압기 상부에 장착된 네 개의 안전밸브(POSRV : Pilot Operated Safety Relief Valve)가 열려 일차계통의 과압을 방지하고 안전감압 및 배기시스템(Safety Depressurization and Vent system)이 제공하는 안전주입계통과의 주입 및 방출 운전(Feed and Bleed operation)을 통해 노심 및 일차계통의 안정성을 유지한다. POSRV가 열리면 고에너지의 물, 공기, 증기-물등의 유체가 감압계통과 증기분사기를 통해 IRWST로 분사되게 되는 데, 이 과정중 분사되는 유체에 의해 발생하는 열수력학적 하중이 배관, IRWST 및 내부구조물에 영향을 미치게 된다. 물방출(water clearing), 공기방출(air clearing), 그리고 증기방출(steam discharging)의 과정중 구조물에 가장 큰 하중을 발생시키는 과정은 고압의 공기가 순간적으로 방출되는 공기방출과정으로 알려져 있다. 따라서 IRWST를 포함한 안전감압계통의 건전성과 안정성을 유지하기 위해서 증기분사기를 통해 각종 유체가 분사되는 동안, 특히 공기방출과정중 구조와 내부구조물에 미치는 하중을 예측하는 작업은 계통의 설계를 위하여 반드시 선행되어야 한다. 하지만 증기분사기에서 방출되는 공기, 물, 증기에 의한 하중을 정확히 예측하는 것은 분사되는 증기방출의 상호작용 때문에 복잡한 현상이 발생하므로 해석적 방법을 통한 분석은 어려우며 실증실험을 통하여 확인하여야 한다.

제 2 절 증기방출시 유동현상

가압기 안전밸브가 열리면 증기가 방출되기 시작하면서 밸브 후단에 충격파가 발생한

다. 이어서 물 속에 잠겨있는 증기분사기 내부에 채워져 있던 물과 배관 내부의 공기(또는 질소)가 고압의 증기에 의해 밀려나온다. 물이 water jet를 형성하면서 분출(water clearing)된 이후 고압으로 압축된 공기가 순간적으로 분출(air clearing)되고 증기분사기 외부에서 방울을 형성하여 낮은 주파수로 진동한다. 물과 공기가 분사된 이후에 증기가 증기분사기를 통해 수조로 분사(steam discharging)된다. IRWST 수조의 온도가 낮을 경우, 방출되는 증기는 비교적 안정적인 고갈모양의 제트를 형성하면서 응축된다. 증기의 방출이 계속되어 수조의 온도가 상승하면 증기제트의 형상의 불안정해지고 제트의 길이가 상대적으로 길어지게 된다. ABB-Atom에서는 증기분사기를 통해 유체가 방출되는 전후의 과정을 초기과정(initiation process), 정상상태 방출과정(steady-state discharge process), 그리고 최종과정(termination process) 등으로 구분하였다. 이 중에서 수조에 최대의 하중을 유발하는 과정은 초기에 배관에 있는 공기 등의 비응축성 기체가 방출되어 수조내에서 진동하면서 커다란 동적하중을 일으키는 과정으로서 초기과정 중에 발생한다[2].

1. 초기과정(initiation process)

초기과정은 수초동안 지속되며 전 방출과정동안 발생하는 압력의 최대치가 이 과정에서 일어나기 때문에 아주 중요한 과정으로 생각될 수 있는 과정이다. 이 과정 중에는 배관 내부에 존재하던 물과 고압으로 방출되는 증기에 의해 압축된 공기(또는 질소)가 차례로 밀려나며 수조 및 구조물에 최대의 하중을 발생시킨다. 초기과정은 배관내의 물이 방출되는 과정과 배관내의 공기가 방출되어 수조내부에 저주파 진동이 일어나는 과정으로 세분된다.

2. 정상상태 방출과정(steady-state discharging process)

초기과정 이후에 발생하는 정상상태 방출과정에서는 실제적인 증기응축이 일어나 IRWST 수조 물온도가 올라간다. 이 과정 중에 발생하는 압력은 초기과정 중의 압력에 비해 작다. 증기분사기가 장착된 상태에서 수행된 ABB-Atom Forsmark 1 실험결과에 의하면 이 과정 중의 압력은 최대 압력의 10% 이하인 것으로 나타났다. 정상상태 방출과정은 처깅(chugging)과 응축진동(condensation oscillation) 등으로 세분된다.

3. 최종과정(termination process)

최종과정은 정상상태 방출과정 이후의 과정으로서 증기발출밸브가 닫힌 후 수초동안 진행된다. 이 과정 중에 발생하는 압력은 초기과정 중의 압력에 비해 매우 작다. 최종과정에서는 배관 주위의 물이 배관 내부로 빨려 올라가는 reflood 현상이 일어난다.

제 3 절 연구목적 및 성과

차세대 원자로의 안전감압계통에 총 12개의 증기분사기가 2개의 헤더에 6개씩 나뉘어져 IRWST에 분포될 예정이다. 장착될 증기분사기는 6인치(Schedule 40S, ANSI standard)의 상용 배관에 원주방향에 10mm의 증기방출구 144개, 바닥면에 25mm의 증기방출구 1개 그리고 하중감쇄링(LRR, load reduction ring)이 장착된다. 본 연구에서는 원형의 증기분사기를 사용하게 될 unit cell test의 전 단계로서 초기과정중 발생하는 열수력 하중에 대한 기본이해와 벽면에서의 압력 측정기술을 습득하고자 2인치의 배관에 5, 10mm의 증기방출구가 설치된 상대적으로 소형규모의 증기분사기를 사용하여 초기과정중 발생하는 열수력 하중을 관찰하였다. 본 연구에서 얻어진 결과 및 실험기술은 앞으로 진행될 unit cell test에 응용될 수 있고 증기분사기의 크기에 따른 압력변화를 비교하는 데 도움이 될 것으로 판단된다.

제 2 장 실험장치 및 실험방법

고압증기 방출 및 응축실험장치(B&C (Boltdown and Condensation) test facility)를 구성하는 주요계통은 다음과 같다.

1. 가압기 계통
2. 수조 계통
3. 증기 계통
4. 증기공급 계통
5. 계측/제어 및 자료처리계통

그림 2.1과 2.2에 차세대 원자로의 안전감압계통 개략도와 고압증기 방출 및 응축실험 장치의 대략적인 모습을 각각 표시하였고 실험장치의 상세기술사양은 참고문헌 [4]에 자세히 기술되었다.

제 1 절 기계 계통

실험장치는 기본적으로 증기공급원인 가압기, IRWST를 모의한 수조(quench tank), 가압기와 IRWST를 연결하고 감압기능을 수행하는 배관 및 밸브, 그리고 증기분사기와 각종 계측장비로 구성된다.

1. 가압기 계통

가압기 계통은 가압기 본체, 내부 heater, 계측용 열전대 지지대, 가압기 상부의 안전 밸브 등으로 구성된다. 이 계통은 가압기 내부의 물을 내부 heater를 사용하여 원하는 온도, 압력으로 가열 및 유지 시키며, 포화증기를 증기계통을 거쳐 SDS 성능실험 계통으로 방출시킨다.

가압기는 내부 지름이 600mm, 내부 높이가 3000mm인 cylinder 형태의 고압탱크로서 재질은 stainless steel로 제작되었다. 하부에는 heater 장착을 위한 flange가 설치되어 있다. 가압기의 상세 도면은 참고문헌 [4]에 상세히 표시되었다. 가압기의 설계 압력은 17.8MPa 이며, 설계 온도는 370℃ 이고, shell 및 cover flange 재질은 각각 A240-304 및 A182-F304로 제작되었으며, 제작 후 Radiography test(RT)를 통하여 그 건전성을 확인하였다. 가압기에는 heater, 물 계통, 증기 계통, 보조설비와 연결되는 각종 flange가 장착되어있고, 2인치 배관을 통한 최대 16.0MPa의 증기/물의 방출 하중을 견딜 수 있도록 설

계/제작되었고, 겉 표면은 단열재로 외부 대기와 단열되어 있다.

2. 수조 계통

이 계통은 가압기에서 방출된 증기 또는 포화수를 냉각시키기 위한 설비로서, 수조와 Sparger, 계측장치 지지대, Sump Pump 및 증기공급용 Spray 장치로 구성되어 있다. 수조의 중앙에는 증기를 분사시키기 위한 Sparger가 설치되어 있으며, 그 주변에는 증기의 응축현상을 관측하기 위한 계측장치를 부착하기 위한 지지대가 설치되어 있다. 수조는 내경이 3m, 높이가 4m의 실린더형 저압/대기 개방형 탱크로서 윗부분에는 네 개의 뚜껑을 여닫을 수 있도록 설계되었다. 또한 수조의 벽에는 4개의 View Port가 장착되어 있어, 증기가 응축되는 현상을 관찰 또는 촬영할 수 있다. 수조의 상부에는 보온을 위하여 간단한 구조로 된 Cover가 설치되어 있다. 수조의 냉각수 온도는 증기발생기의 증기를 수조 하부에 설치된 Spray를 통하여 수조내로 분사시켜 증기와 기존의 물이 혼합되어 일정 온도로 유지되며, 이를 위하여 Spray 장치가 수조 하부에 설치되어 있다. 수조 벽은 단열재로 외부와 단열되었다. 수조내부에는 증기계통과 연결된 증기분사기가 장착되었다. 증기분사기는 방출시 발생하는 유동하중을 견딜 수 있도록 수조 바닥에 설치된 지지대에 고정되어 설치되었다. 그림 2.3에 수조내 증기분사기 및 동압계측기의 위치를 표시하였다. 수조내부의 온도 측정을 위한 열전대의 위치 및 지지대의 모양을 그림 2.4에 표시하였다.

3. 증기 계통

이 계통은 가압기에서의 증기를 SDS 성능시험 계통으로 보내주는 통로 역할을 하는 설비로서, 2개의 Globe type Pressure Control Valve (PCV), Moisture Separator, 유량계 (Venturi), Isolation Valve, Vacuum breaker 및 배관과 계측기기로 구성되어 있다. 이 계통의 예열은 Heat Tracing과 Preheat Line에서의 증기로 조절될 수 있으며, 계통의 외벽은 단열재로 외부와 단열되어 있다. 이 계통의 운전압력 및 온도는 각각 16.0 MPa, 370 °C 이다. 증기방출을 급작히 중단하면 수조의 물이 배관안으로 급격히 밀려 들어와 수격현상이 발생할 위험이 있다. 이러한 현상은 심하면 배관을 파괴시킬 수도 있다. 이를 방지하기 위하여 증기방출 Line에 Vacuum Breaker를 설치하였다. 이 밸브의 직경은 2.5 inch 이며, 작동압력은 63 mbar 이다. 이 밸브는 Non Return Valve 형식으로 독일 GESTRA사 제품이다. 2개의 PCV는 정상 닫힘특성의 밸브를 사용하였다. 가압기의 가압을 통한 실험초기 조건이 만족할 때까지 수동격리밸브와 2개의 PCV는 닫혀있게 되고 실험시작 직전 수동격리밸브를 열어 배관을 실험준비상태로 만든 후 2개의 PCV를 동시에 개방하여 실험을 시작한다. 방출은 보통 6 ~ 8초간 진행되며 밸브의 닫힘으로 실험은 종료된다.

4. 증기공급 계통

이 계통은 수처리계통, Water Storage Tank, Feed Pump, 증기발생기, Vortex 유량계, PCV, 격리 밸브 및 배관과 계측기기로 구성되며, 이 계통의 기능은 다음과 같다.

- 실험에 사용되는 물을 처리하여 이를 가열 및 보관하며, 또한 이 물을 가압기 및 증기발생기에 공급한다.

- 수조에 증기를 공급하여 수조내 물온도를 일정 온도로 가열한다.

증기발생기는 최대 1.0 MPa 의 포화 증기를 연속적으로 0.108 kg/s 로 공급할 수 있다. 증기발생기와 수조 또는 실험계통과 연결된 배관은 단열재로 외부와 단열되어 있으며, 이 부분에 대한 설계압력은 2.0 MPa 이다. 기타 배관은 상온,상압의 조건으로 설계되었으며, Water Storage Tank를 제외하고는 단열되어 있지 않다.

제 2 절 계측 및 제어계통

계측 및 제어계통은 본 장치의 운전조건의 조작, 조작상태의 감시, 그리고 실험 및 그 결과의 해석에 쓰이는 Data를 생산할 수 있도록 설계, 제작하였다. 측정 현장에서의 각종 Sensor 및 계측기로부터의 신호는 제어반(control panel)으로 보내지는 신호와 DAS(Data Acquisition System)으로 보내지는 신호로서 구분할 수 있다. 제어반으로 보내지는 신호에는 장치의 운전 조작, 조작상태의 감시에 필요한 Controller 입력, Indicator 입력, Alarm 입력 신호등을 배치하였고, DAS로 보내지는 신호는 Multi-Connection Box 를 거쳐 2개의 Scanning A/D변환기 (HP E1413B)와 8개의 Digitizer(HP E1429A) 입력 등이 있다. 또한 제어반의 Indicator 입력신호는 원칙적으로 모두 제어반 지시로 하며, 제어반에 지시되는 계측항목은 모두 Digital 표시로 하였다.

1. 계측 계통

계측계통은 측정기기와 자료획득장치(DAS)로 구성된다. 사용되는 측정기기는 측정변수에 따라 온도계, 압력계, 차압계, 수위계, 유량계, 동압계등으로 분류된다.

온도계로 사용되는 Thermocouple (T/C)은 냉점보상기를 거쳐 Multi-Connection Box 와 Control Box로 연결하였고, T/C 전용선을 사용하여 시공함으로써 접점부의 전위차로 인한 오측정의 가능성을 낮추었다. 또한 압력계, 차압계 및 수위계는 Smart형 기기를

사용하였으며, 발생하는 4~20mA의 신호는 자료획득장치의 입력단 직전에 설치된 신호분배기에서 1~5V의 전압신호로 변환되어 자료획득장치 및 제어반으로 입력된다.

증기라인(Steam Line)에는 벤츄리 튜브(FE-201)를 설치하였다. 동압계(dynamic pressure sensor)는 KISTLER사의 모델 7061B를 사용하였으며, 이는 Quench Tank 벽면에 1개를 장착하였다. 동압계는 별도의 Signal Conditioner를 사용하였으며, 이로 부터의 신호(0~10V)는 현장에 별도로 설치된 동압계측용 자료취득장치로 입력된다. 동압계용 자료취득장치는 고속측정용 DSP 보드를 내장한 A/D converter를 사용하였다.

DAS의 입력 채널수는 약 42 채널이며, 그 항목은 다음과 같다.

- ▶ 온도 : 31 Channels
- ▶ 압력 : 7 Channels
- ▶ 유량 : 1 Channel
- ▶ 동압 : 1 Channels
- ▶ 수위 : 2 Channels

T/C의 신호를 제외한 각 측정기로부터의 출력신호는 0~5Vdc 또는 0~10Vdc의 전압신호로 통일되어 자료획득장치로 입력되고, T/C 신호는 냉점보상기를 거쳐 0~40mV 신호로 입력된다.

2. 제어 계통

제어계통은 지시/제어계, 지시계, 기록계, 현장지시계 그리고 경고계통 등으로 나뉘어진다. 지시/제어계는 제어반에 설치되는데, 이는 실험장치의 각 계통내 압력, 온도, 수위등을 지시한다. 또한 지시/제어계의 신호는 가압기 전열관(Heater) 전력 제어기, 각종 자동밸브, 경고계통 등과 연동되어 있어서, 실험 장치의 고온 가압시 급격한 가압으로 인한 실험 장치의 손상 및 사고를 막을 수 있도록 하였다. 경고계통(Alarm)은 제어반에 설치되어 가압기 내의 압력 및 수위 이상시 경고를 발하게 된다.

실험장치의 Interlock은 다음과 같이 구성하였다.

- ▶ 가압기의 과압 또는 압력상승 이상시 가압기 압력계의 Hi-Hi신호시에는 가압기 Heater의 전원공급이 차단되고, 증기 Bypass Line이 개방되도록 하였고, Hi-신호시에는 Alarm이 작동되도록 하였다. 또한 가압기 Heater의 재가동 및 증기 Bypass Line의

Close 작동은 Hi-신호 설정치보다 10% 낮은 값에서 이루어 지도록 하였으며, Hi-Hi 및 Hi-신호 설정치는 실험조건에 따라 달리 설정 가능하도록 하였다. 가압기 Heater전력은 전력제어기에 의해서도 조절이 가능하도록 하였다.

▶ 가압기 저수위시 수위계의 Lo-Lo신호에 따라 가압기 Heater가 차단되고, 배관상의 자동밸브가 닫혀 증기라인이 차단되도록 하였다.

3. 자료처리 계통

본 실험을 위한 자료획득장치(DAS)는 HP-VXI 콘트롤러에 의해 HP-UX 환경하에서 운영된다. 자료획득장치는 Scanning A/D변환기, Workstation등으로 구성되며, 자료획득 프로그램은 HP-VEE 3.0 W/S를 사용하였다.

가. 자료처리장치

본 실험장치는 고온,고압의 증기를 순간적으로 분출시킬 때 발생하는 유동현상을 모의하는 장치로서, 실험 성격상 여러 종류의 센서 즉, 온도, 압력, 차압, 동압, 진동, 응력 등의 센서로부터 다양한 형태의 신호가 발생되고, 최소 130개 이상의 센서로부터 신호가 발생된다. 또한 실험시 발생하는 유동현상들이 매우 급격히 일어나기 때문에 이에 연결되어 사용되는 자료처리장치는 130개 이상의 센서로부터 발생하는 여러 가지 형태의 신호를 고속으로 처리/분석하는 능력을 갖추도록 구성되어 있다. 본 DAS 장비는 VXI system을 채택하여 실험자료를 고속으로 처리하고, 하나의 콘트롤러를 사용하여 다양한 종류의 신호를 일괄 처리할 수 있다. 각종 측정기로 부터의 신호는 VXI bus를 통해 컨트롤러에 입력되고, 이 입력된 신호는 H/W와 S/W를 연결해주는 입/출력 프로그램인 SICL(Standard Instrument Control Library)에 의해 S/W에 연결되고, 주어진 data는 계기언어(Instrument Language)인 SCPI(Standard Commands for Programmable Instruments)에 의해 수집 및 해석되어, HP VEE 프로그램에 의해 화면에 출력된다.

나. 자료처리 프로그램

프로그램은 기본적으로 HP-VEE를 사용하여 작성되었으며, 성능을 높이고 VXI와의 인터페이스를 원활히 하기위하여 각종 계산 모듈을 포함한 Source 프로그램을 ANSI-C로 작성하여 사용하였다. 프로그램의 동작중 반복되는 주요 기능들은 subroutine화 또는 function 화하여 각 프로그램에서 공유할 수 있도록 하였다. 각종 자료 획득/처리 프로그램은 HP VEE상의 시작버튼("START")을 누름으로서 구동되며, 이때 HP VEE는 자료 획득/처리에 필요한 모든 작업을 수행한다. 즉 VEE는 C-언어로 구성된 각종 source 프로그램

램을 사용하여 Scanning A/D 변환기의 초기화 및 구동을 제어하고, Scanner로부터 획득된 자료를 원하는 물리단위로 변환하여 각종 물리량(유량, 수위, 밀도) 계산에 필요한 subroutine의 입력 및 계산 결과의 출력과 저장등을 담당한다. 프로그램 제어자는 실험조건에 따라서 원하는 조건에 도달한 후 Scanner에 Trigger 신호를 주면 자료획득을 시작하게 된다. 일단 자료획득 단계가 시작되면 Scanner는 VEE에서의 조작에 따라서 언제라도 종료가능하도록 하였다.

증기라인에 설치된 Venturi tube의 전·후단 사이에는 유량에 관계되는 정압차가 발생하게 되고, 측정된 압력차와 유동 유체에 대한 특성 변수를 사용하여 유량을 계산할 수 있다. Venturi tube의 설치요건은 ISO 5167-1의 규정에 따랐으며 압축성 유체의 유량 계산시 필요한 Expansibility factor, ϵ , 는 $P_2 / P_1 = [(PT202) / (PT201)] \geq 0.75$ 의 조건을 만족해야만 계산 routine에 입력되도록 하였다.

증기의 질량유량은 다음의 식을 사용하였다.

$$q_m = \frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}} \epsilon_1 \frac{\pi}{4} d^2 \sqrt{2\Delta p \rho_1} \quad (\text{kg/s}) \quad (5-1)$$

$$= 0.0010881 \epsilon_1 \sqrt{\Delta p \rho_1}$$

위 식에서 각 변수는 다음과 같다.

- $\beta = 0.6884$ ($\beta = \text{diameter ratio} = d/D$)
- $\kappa = 1.3$ (Isentropic exponent, C_p/C_v)
- $d = 0.0294$ m
- $D = 0.0429$ m
- $C = 0.995$ (Discharge coefficient for machined case)

$$\epsilon_1 = \left[\left(\frac{\kappa \tau^{\frac{2}{\kappa}}}{\kappa - 1} \right) \left(\frac{1 - \beta^4}{1 - \beta^4 \tau^{2/\kappa}} \right) \left(\frac{1 - \tau^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}}{1 - \tau} \right) \right]^{1/2}$$

$$= \left[\left(\frac{1.0081 \tau^{1.53846}}{0.3 - 0.067359 \tau^{1.53846}} \right) \left(\frac{1 - \tau^{0.230769}}{1 - \tau} \right) \right]^{1/2}$$

$$\tau = P2 / P1 = (PT202) / (PT201) \quad [\tau \geq 0.75]$$

$$\Delta P = P1 - P2 = (DP201) \quad (\text{in Pa} = \text{kg/m sec}^2)$$

$$\rho_1 = \text{TI201, PT201로 부터 증기표 프로그램에서 계산 (kg/m}^3)$$

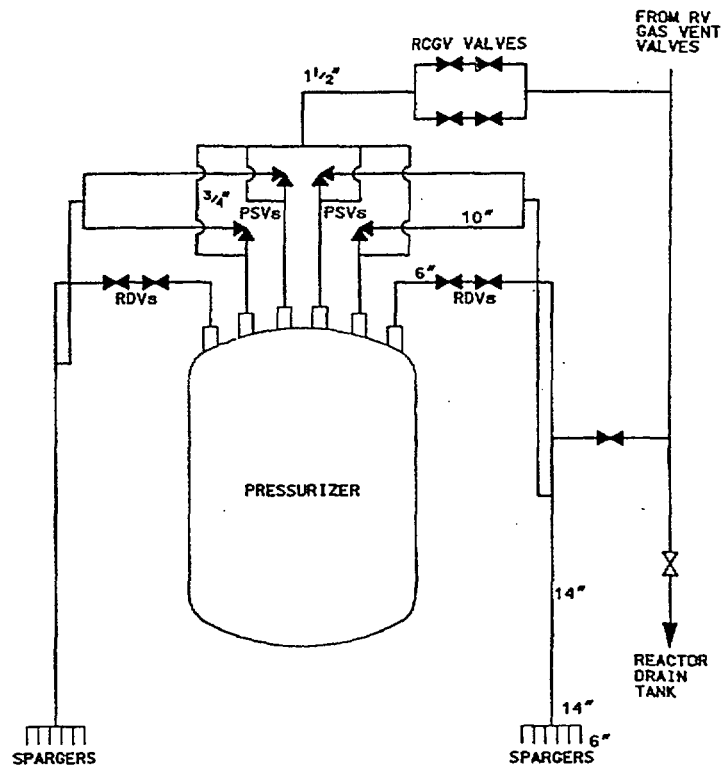


Fig. 2.1 Flow Diagram of the SDS (Safety Depressurization System)

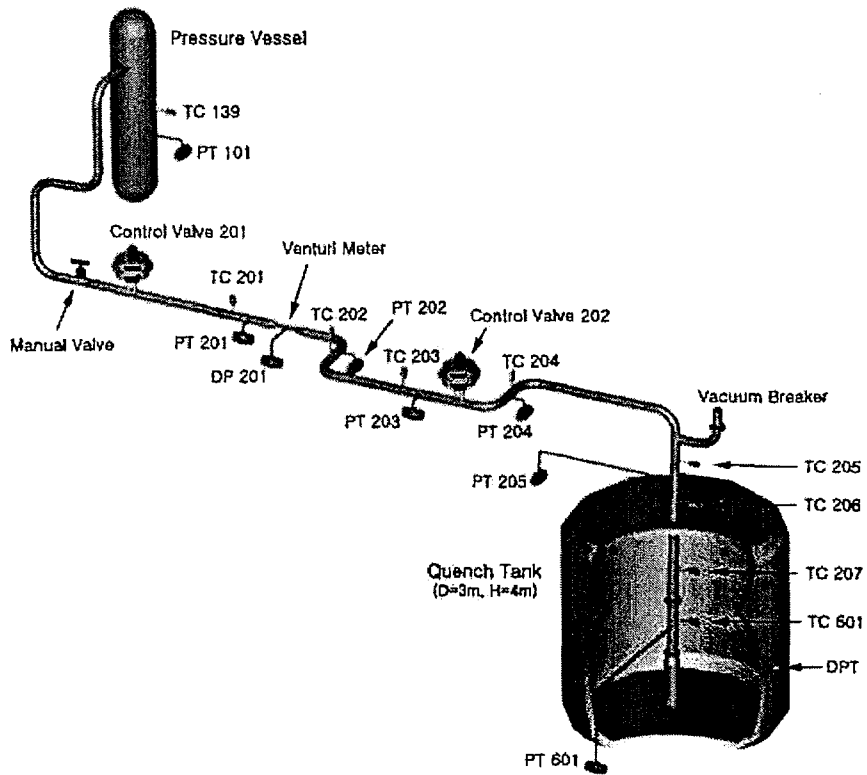


Fig. 2.2 Schematic diagram of test facility and locations of temperature and pressure sensors in the piping

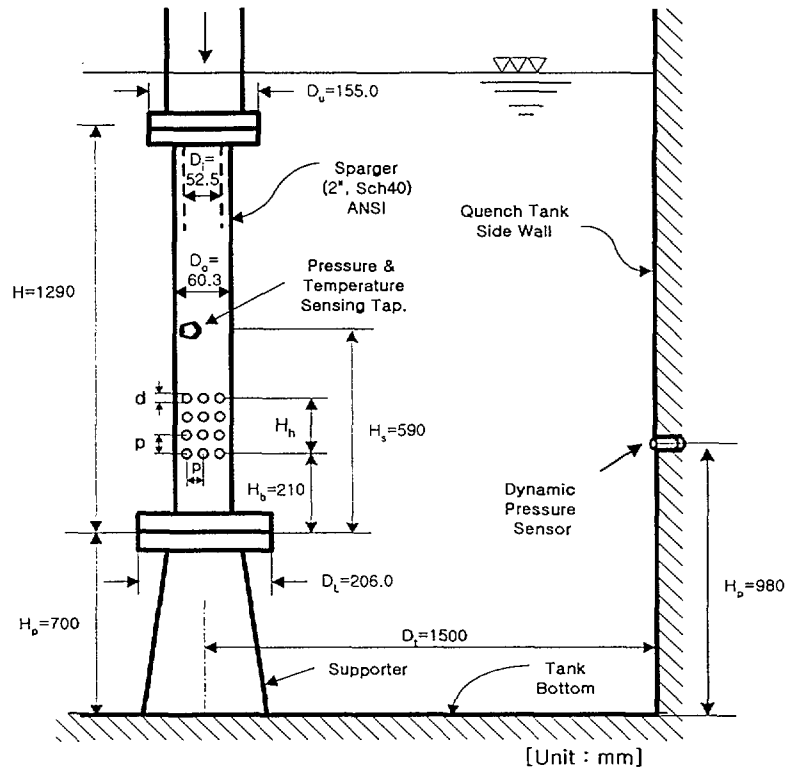


Fig. 2.3 Sparger's Dimensions and Set-Up in the Water Pool Tank

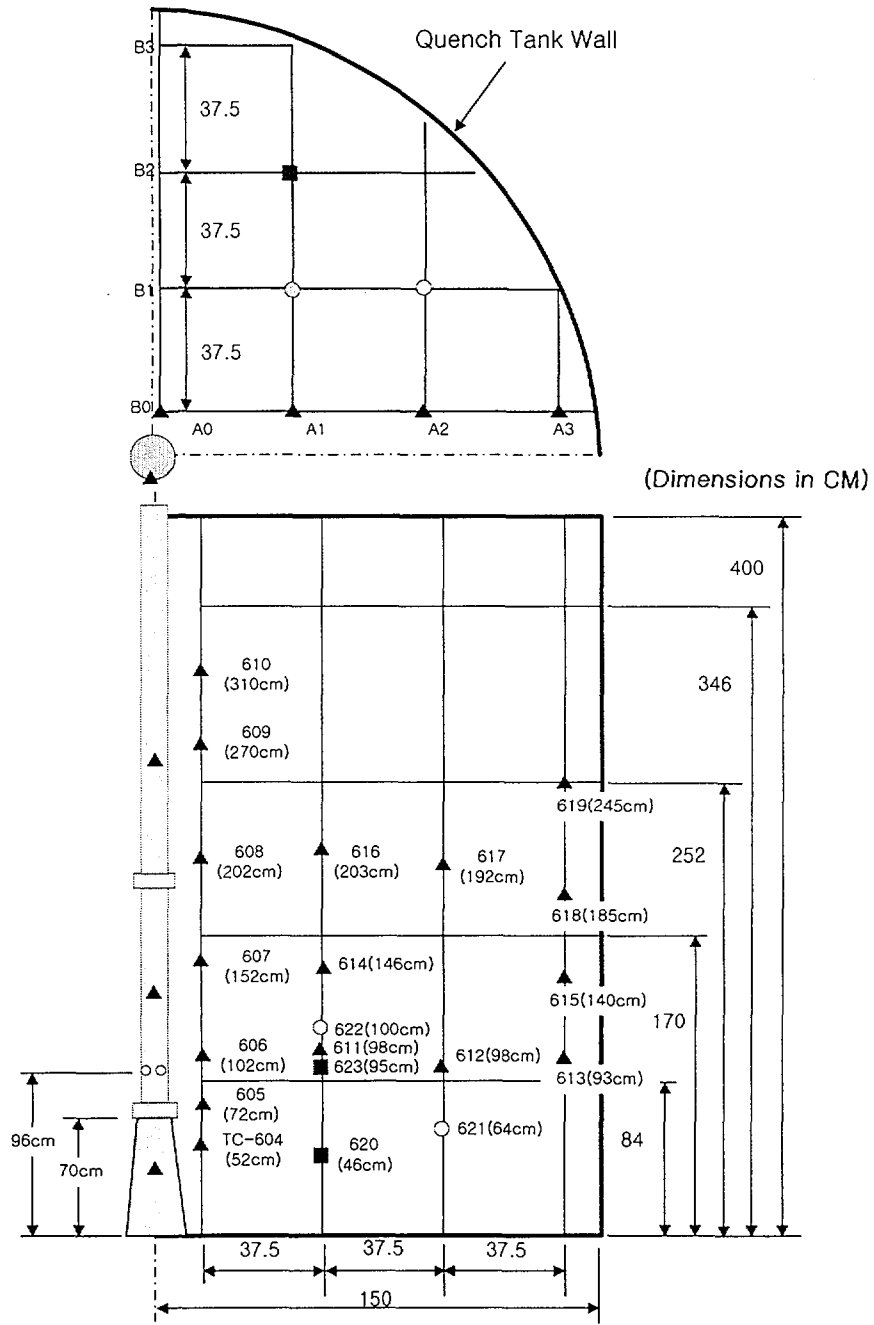


Fig. 2.4 Thermocouples' Locations in the Water Pool Tank

제 3 장 실험결과

제 1장에서 설명한 바와같이 본 실험의 목적은 안전감압밸브의 작동에 의한 증기의 급격방출과정중 수조내에서 발생하는 동압하중에 대한 실험적 검증이다. 차세대원자로의 증기방출기는 6인치의 배관에 10mm, 144개의 수평 방출구와 25mm, 1개의 수직방출구를 가공하였고 중간부에 하중감쇄링(Load reduction ring)을 장착하였다. 본 실험에서는 2인치의 배관에 5mm와 10mm의 수평방출구만을 가공하였고, 하중감쇄링은 장착하지 않은 간단한 형태의 증기분사기 4개를 사용하여 실험을 수행하였다. 그림 3.1에 차세대원자로의 증기분사기를 표시하였고, 표 3.1에 본 실험에 사용한 증기분사기의 기술사양 및 실험 matrix를 표시하였다.

실험은 다음의 사항에 주안점을 두고 수행되었다.

- 공기 및 증기분출과정중 발생하는 수조내 동압하중의 크기 및 진동 주파수
- 방출시 배관 및 가압기 거동
- 방출로 인한 수조내 열섞임(thermal mixing) 현상

제 1 절 방출시 가압기 및 배관의 열수력거동

가압기 및 배관의 초기 압력과 온도는 실험의 초기조건을 결정하고 수조내 동압거동에도 밀접한 영향이 있다. 특히, 배관에 포함되어있는 공기량과 배관온도등은 수조내의 동압거동에 큰 영향을 주는 변수로 알려져 있다.[5, 6] 그림 3.2와 3.3에 방출시 가압기 및 배관에서의 전형적인 온도 및 압력변화를 시간축으로 나타내었다. 본 실험에서는 방출되는 증기량 및 수조의 온도를 중심으로 실험을 수행하였다. 배관내 포함되어있는 공기량 및 배관온도와 동압하중과의 관계는 차세대원자로의 원형 증기분사기실험 (Unit Cell test)에서 관찰하게 될 것이다. 그림 3.2와 3.3에서 보듯이 가압기의 압력은 최초 157bar인 상태에서 2개의 PCV를 열어 방출을 시작한다. PCV사이 배관의 초기압력이 45bar까지 상승한 이유는 첫 번째 밸브의 leakage 때문으로 globe type 밸브에서는 피할 수 없는 현상이다. 증기분사기 헤더에서의 압력 (PT-205)은 최대 18bar정도로 측정되었다. 가압기 및 배관에서의 유체는 포화증기 상태이고 최대유량은 4.3kg/s로 계산되었다.

제 2 절 수조내 동압거동

자동밸브의 개방으로 가압기의 증기가 배관으로 방출되면 배관에 있던 공기가 급격하게 압축되어 수조내 증기분사기의 잠김깊이에 존재하던 물을 밀어낸다. 따라서 방출 초기에는 물이 방출 (water clearing) 되고 이어서 압축된 공기가 순간적으로 수조내로 분사 (air clearing)된다. 방출 마지막 단계로 가압기내부의 포화증기가 수조내로 분사된다.이상의 과정을 정리하면 다음과 같다.

- 1) 물방출 (water clearing) - 증기분사기의 잠김깊이에 있던 물이 공기에 의해 밀려 수조내로 방출
- 2) 공기방출 (air clearing) - 증기에 의해 가압된 배관내 공기가 증기분사기를 통해 수조내로 방출
- 3) 증기방출 (steam clearing) - 초기에는 가압기내 포화증기가 배관을 통해 방출되거나 지속적인 분출이 있을경우 가압기내부의 포화액체가 증기에 의해 쓸려 분사됨으로 물-증기의 이상유동이 형성됨. 안정응축상태가 진행된 후 유량의 감소시에는 chugging과 같은 불안정상태가 발생함.

수조내의 최대하중은 air clearing때 발생하는 것으로 알려져 있으며, 이는 비응축가스인 공기가 수조로의 급격방출로 인한 압축과 팽창운동과 관련이 있다. 즉, 고압의 공기가 수조내로 순간적으로 분사되면 공기가 가지고 있던 상당량의 에너지의 일부(혹은 전부)가 수조내에서 소산 (dissipation)하게 된다. 에너지의 소산은 공기방출의 압축과 팽창으로 인한 수조내 급격압력변동으로 나타나게 된다. 그림 3.4에 전형적인 방출모습을 표시하였다. 초기의 물방출상태는 육안으로 관찰이 용이하지 않으며(그림 3.4a), 공기(그림 3.4b) 및 증기방출(그림 3.4d) 모습과 중간의 천이과정(그림 3.4c)을 관찰할 수 있다. 본 실험에서는 2개의 방출밸브를 사용하였고 밸브의 leakage로 인해 밸브사이 배관내에 증기 및 응축수가 채워지는 등의 이유로 공기방출로 인한 전형적인 압력변동특성을 얻지 못하였다. 따라서 본 논문에서는 공기방출로 인한 동압력특성 보다는 물, 공기, 그리고 증기의 연속적인 방출과정중 수조내의 동압특성과 이를 통한 증기분사기의 종류별 압력특성을 비교하고자 한다. 동압특성은 증기분사기의 종류에 따른 최대하중과 방출시 발생하는 수조내 압력파의 진동 주파수 관점에서 설명하고자 한다.

그림 3.5에 가압기 초기 압력이 137bar, 수조내 과냉각수 온도가 40℃, 4번 증기분사기 (Sp4)를 사용했을 경우 실험을 통해 얻어진 수조내 동압변동곡선을 표시하였다. 그림 3.5에 표시된 바와같이 공기 및 증기의 방출시 각각 peak 압력을 관찰할 수 있었다. 이것은 본 실험장치의 구성상 2개의 방출밸브를 사용한 데 기인한 것으로 보이며, 최대하중은 주로 증기방출시에 관찰되었다. 방출밸브의 동시개방으로 인해 증기가 배관내 공기를 급격 가압 하지못한 상태에서 배관내 공기는 증기분사기를 통해 예상보다 천천히 분사되고 상대적으로 고압의 증기가 연이어 분사됨으로서 공기방출시보다 상대적으로 큰 하중을 발생하게 된다. 공기의 방출과정중 관찰되는 순간적인 멈춤현상도 증기가 배관내 공기를 급격하게 가압하지 못함을 설명한다. 증기의 방출과정중 발생하는 주기적인 동압과의 흔들림은 분사된 증기의 내부압력변화와 이미 분사되어 자유수면위로 상승하던 공기방출이 증기의 방출과 동시에 증기와 혼합되어 증기의 응축을 방해하는 동시에 증기와 함께 수축/팽창됨으로서 발생하는 것으로 관찰되었다.[7]

1. 수조내 동압하중 - 최대 동압하중

그림 2.4에 표시된 바와같이 수조에는 1개의 동압계측용 센서가 장착되었다. 본 실험에서는 수조내의 압력분포 보다는 방출시 발생하는 벽면에서의 하중거동에 중점을 맞추어 실험하였기 때문에 증기분사기의 평균 분사구높이에 동압계측기를 1개 장착하여 실험을 수행하였다. 그림 3.5에 표시한 바와같이 실험중 측정된 전형적인 동압변화는 물 및 공기의 분출시 발생하는 1st peak와 증기의 방출시 발생하는 2nd peak으로 구분할 수 있다. 일반적으로 본 실험에서는 2nd peak이 1st peak보다 크게 관찰되었다. 따라서 수조내 최대 동압하중을 2nd peak으로 생각하여 그림 3.6에 정리하여 표시하였다. 실험에 사용된 4개의 증기분사기의 종류별/가압기압력별 동압특성으로 구분하여 4개의 그래프를 표시하였고, 하중변화는 수조내 평균온도로서 표시하였다. 그림 3.6에서 보듯이 가압기의 초기압력은 수조내 동압하중에 미약한 영향을 나타내고 있다. 또한 수조온도가 80℃이상 상승할 경우 10mm 방출구(Sp1, Sp2)인 경우는 5mm(Sp3, Sp4)의 경우보다 동압하중이 크게 관찰되었다. 전체적으로 수조내 동압하중은 수조온도가 80℃근처에서 최대로 나타났다.

2. 수조내 동압하중 - 주 진동수

본 실험에서 수조내 동압의 진동 주파수는 그림 3.5에 표시한 바와같이 2nd peak과 연이은 peak 사이의 시간의 역수($1/\Delta T$)로 표시하였다. 그림 3.7에 수조의 subcooling에 따른 동압하중의 변화를 표시하였다. 주파수는 5 ~ 30Hz의 범위내에서 변화하고 있으며 수조의 온도가 상승할수록 주파수는 감소하는 것으로 관찰되었다. 특히, 방출구의 간격/방출구크기 비 (P/d)에 따라서 주파수는 약간의 차이를 보이고 있다. 본 실험에서 사용한

증기분사기의 P/d는 3.2와 4.7의 두가지를 사용하였으며 P/d=4.7의 경우가 3.2의 경우보다 약간 높은 주파수를 보이고 있다. 이것은 방출구의 간격에 따른 방출증기의 상호작용에 의한 것으로 판단된다. 즉, 방출구의 간격이 작을수록 방출된 공기 및 증기의 혼합가능성이 높아지게 되고 결과적으로 간격이 큰 경우보다 상대적으로 큰 공기 및 증기방울을 형성하게 된다. 수조내 진동 주파수는 방출된 공기 및 증기방울의 압축과 팽창으로 인한 에너지 소산 과정으로서 압축 및 팽창의 주기는 방출된 유체의 크기가 클수록 길어지게 된다. 결국, 수조내 동압의 진동 주파수는 방출된 유체의 크기와 관련이 있고 이 크기는 증기분사기의 기하학적인 형상과 관련되어있다. 표 3.2에 실험조건 및 결과를 정리하여 표시하였다.

Table 3.1 Test matrix and technical specifications of sparger

	Sp1	Sp2	Sp3	Sp4
Quantity of Hole (EA)	24	24	96	96
Length (H_h , mm)	94.8	237.0	260.7	110.6
Pitch (P, mm)	31.6	47.4	23.7	15.8
Hole diameter (d, mm)	10		5	
Size of sparger (mm)	2inch, Sch 40S			
Hole/Total flow area (%)	87.1			
Steam mass flux ($\text{kg}/\text{m}^2\text{-s}$)	1,230 ~ 2,380			
Pool temperature ($^{\circ}\text{C}$)	36 ~ 95			

Table 3.2 Test Conditions and Results (1/4)

No.	K	C	Max. Flow Rate		Initial Condition								Positive Pressure at the Wall		
			FE201	FE201	PT101	PT205	PT601	TC203	TC206	TC503	TC601	1st Peak	2nd Peak	Freq.	
			[kg/s]	[kg/m ² -s]	[Bar]	[Bar]	[Bar]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[kPa]	[kPa]	[Hz]	
1	1	E	2.814	1492.8	110.73	-0.02	0.29	144.13	75.98	43.26	46.81	27.6	18.0	25.0	
2	1	A	2.824	1498.1	116.98	0.04	0.31	38.65	18.65	42.66	39.30	11.8	8.2	19.2	
3	1	H	3.880	2058.4	149.95	-0.05	0.24	165.44	92.61	41.40	49.22	29.1	14.2	26.3	
4	1	A	3.380	1793.1	156.46	-0.09	0.22	85.99	44.10	41.26	39.53	22.9	21.1	21.7	
5	1	E	2.869	1522.0	110.77	0.09	0.38	148.69	88.84	63.87	63.97	13.9	7.0	21.7	
6	1	A	2.986	1584.1	116.98	-0.15	0.18	61.52	25.21	63.97	63.27	11.4	17.4	17.9	
7	1	E	4.100	2175.1	150.85	-0.14	0.23	146.55	83.28	63.41	64.89	32.6	20.3	24.4	
8	1	A	3.056	1621.2	157.14	-0.13	0.23	72.39	42.61	62.72	61.16	36.7	30.8	16.1	
9	1	E	2.753	1460.5	110.38	0.09	0.40	128.19	79.24	81.68	82.32	43.6	62.5	17.5	
10	1	H	3.865	2050.4	150.28	0.02	0.36	167.24	97.82	81.90	82.59	62.2	24.1	20.0	
11	1	E	4.135	2193.6	156.93	0.01	0.34	99.39	55.21	81.40	80.11	33.7	51.1	12.0	
12	1	H	2.813	1492.3	110.49	0.03	0.36	145.60	91.55	90.54	90.68	26.6	-	11.9	
13	1	A	2.999	1591.0	117.32	-0.04	0.29	68.02	40.84	90.27	89.58	21.0	26.2	10.2	
14	1	H	3.273	1736.3	130.30	0.02	0.29	197.46	102.72	93.34	102.17	26.6	-	8.1	

No. of Sparger (K)	1	2	3	4
No. of Hole in a row	6	4	8	12
Total no. of Hole	24	24	96	96
Pitch / Diameter	3.16	4.74	4.74	3.16
Hole Dia.	10	10	5	5

Temp. of TC206	
A	15~50°C
E	50~90°C
H	90~100°C

Table 3.2 Test Conditions and Results (2/4)

No.	K	C	Max. Flow Rate		Initial Condition								Positive Pressure at the Wall		Freq.
			FE201	FE201	PT101	PT205	PT601	TC203	TC206	TC503	TC601	1st Peak	2nd Peak		
			[kg/s]	[kg/m ² ·s]	[Bar]	[Bar]	[Bar]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[kPa]	[kPa]	[Hz]	
1	2	E	2.37	1257.3	100.87	-0.02	0.20	110.95	84.94	40.75	42.38	-	15.0	26.5	
2	2	H	2.63	1395.2	91.45	0.03	0.23	129.59	101.33	41.49	42.33	-	10.8	28.8	
3	2	E	3.54	1878.0	129.81	-0.07	0.19	100.96	76.21	41.59	43.78	10.3	5.0	24.3	
4	2	H	3.47	1840.8	131.96	-0.01	0.22	156.80	101.98	38.23	40.61	32.1	-	28.6	
5	2	E	4.03	2137.9	150.53	-0.06	0.20	106.47	80.02	37.06	37.81	19.6	13.7	24.3	
6	2	E	2.97	1575.6	111.31	-0.03	0.21	97.82	67.60	60.00	63.74	8.1	4.5	23.0	
7	2	A	3.20	1697.6	115.75	0.01	0.22	25.63	22.46	59.91	51.76	-	-	-	
8	2	H	2.89	1533.2	111.84	0.07	0.24	141.59	103.37	60.97	66.78	33.5	4.8	22.9	
9	2	E	3.45	1830.2	129.77	-0.05	0.23	98.23	76.85	60.05	60.65	12.3	9.0	21.3	
10	2	A	3.76	1994.7	135.73	-0.01	0.25	18.88	18.03	59.73	58.30	4.6	6.8	21.2	
11	2	E	4.01	2127.3	150.40	-0.05	0.20	148.92	79.38	60.88	62.86	41.3	-	21.6	
12	2	A	4.48	2376.7	157.49	0.01	0.23	53.09	25.63	60.56	50.65	9.7	9.8	20.9	
13	2	H	3.40	1803.7	130.14	0.06	0.22	154.81	103.23	81.26	83.88	31.0	15.4	16.8	
14	2	E	4.14	2196.3	150.59	0.01	0.25	106.84	69.17	80.34	83.47	8.4	6.6	18.0	
15	2	A	-	-	155.67	-0.04	0.20	23.60	19.84	80.39	74.69	11.8	29.5	18.3	
16	2	H	2.76	1464.2	110.43	0.12	0.30	192.89	103.04	82.41	96.52	-	27.7	19.6	
17	2	E	3.39	1798.4	130.00	-0.03	0.25	99.39	75.93	81.63	81.81	21.4	16.6	17.2	
18	2	A	3.77	2000.0	136.85	-0.10	0.16	20.03	17.55	81.31	80.11	-	19.7	16.1	
19	2	E	2.82	1496.0	110.77	-0.01	0.26	148.59	81.17	80.39	84.66	11.8	8.9	22.1	
20	2	A	3.10	1644.6	117.37	-0.06	0.21	54.48	31.41	80.07	76.81	13.8	15.0	18.3	
21	2	H	3.35	1777.2	131.26	0.04	0.24	199.75	102.17	91.87	96.20	62.5	-	10.3	
22	2	E	4.01	2127.3	151.02	-0.07	0.22	113.73	78.32	91.23	91.51	28.8	44.4	10.7	
23	2	A	4.31	2286.5	157.28	-0.02	0.22	28.61	23.84	90.96	86.04	9.9	54.6	11.1	
24	2	H	2.82	1496.0	110.94	-0.01	0.22	214.00	102.21	92.47	95.46	39.5	-	12.1	
25	2	E	3.43	1819.6	130.38	-0.03	0.25	115.35	80.16	91.83	92.15	19.2	43.4	11.3	
26	2	A	3.72	1973.5	137.28	-0.03	0.24	26.05	21.55	91.46	85.95	8.7	39.7	12.7	
27	2	E	2.82	1496.0	110.96	0	0.248	139.197	76.621	92.884	93.941	16.9	60.1	11.4	
28	2	A	3.11	1649.9	116.93	-0.012	0.223	35.193	26.608	92.93	91.966	9.7	42.4	10.5	
29	2	A	2.97	1576.7	117.88	0.03	0.32	47.70	28.52	85.17	82.96	11.2	24.4	14.3	
30	2	E	3.39	1796.3	130.81	-0.09	0.27	143.70	81.31	82.78	83.47	56.7	17.2	22.7	
31	2	A	3.54	1875.3	137.63	-0.01	0.34	58.81	37.53	82.41	81.26	23.8	24.6	13.9	

Table 3.2 Test Conditions and Results (3/4)

No	K	C	Max. Flow Rate		Initial Condition								Positive Pressure at the Wall		
			FE201	FE201	PT101	PT205	PT601	TC203	TC206	TC503	TC601	1st Peak	2nd Peak	Freq.	
			[kg/s]	[kg/m ² -s]	[Bar]	[Bar]	[Bar]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[kPa]	[kPa]	[Hz]	
1	3	E	2.83	1501.3	110.12	-0.042	0.192	155.947	77.264	41.211	53.048	-	7.8	28.8	
2	3	A	3.06	1623.3	117.08	-0.03	0.181	51.712	20.028	41.025	32.253	9	7.8	29.6	
3	3	A	4.32	2291.8	156.95	-0.01	0.19	28.05	19.46	40.14	34.59	16.5	14.3	24.1	
4	3	E	4.01	2127.3	150.14	-0.03	0.19	113.22	75.20	40.70	42.94	21.4	13.2	25.2	
5	3	E	3.4	1803.7	130.10	-0.06	0.15	95.27	79.42	42.14	42.98	11.2	4.5	28.2	
6	3	A	3.73	1978.8	137.26	0.02	0.19	16.83	15.21	41.63	37.25	15.6	10.1	27.8	
7	3	A	3.67	1946.9	138.10	0.06	0.30	76.94	41.07	60.46	58.67	25.7	15.7	25.0	
8	3	E	2.851	1512.5	110.22	0.01	0.23	132.68	74.42	60.65	59.82	19.9	16.4	22.9	
9	3	E	4.02	2132.6	150.22	0.00	0.26	124.72	79.56	61.57	63.18	25.4	37.2	21.3	
10	3	A	4.31	2286.5	155.95	-0.05	0.24	38.41	24.93	60.69	57.56	19.4	30.2	20.0	
11	3	H	2.93	1554.4	115.46	0.03	0.23	217.33	103.46	82.04	100.45	-	9.6	16.9	
12	3	H	3.47	1840.8	131.43	-0.08	0.20	152.06	90.59	81.49	81.58	26.7	11.5	19.2	
13	3	A	3.73	1978.8	137.39	0.00	0.24	59.50	33.37	80.94	79.01	14.2	23.0	16.8	
14	3	H	3.33	1766.6	130.86	0.10	0.25	228.30	103.97	80.53	104.25	-	11.3	16.1	
15	3	E	4	2122.0	149.85	-0.07	0.18	136.48	79.01	79.79	81.12	27.2	50.2	18.3	
16	3	A	4.32	2291.8	157.43	0.01	0.24	61.57	33.33	79.01	77.36	21.6	33.8	16.8	
17	3	H	2.55	1352.8	100.35	-0.05	0.22	169.15	101.01	81.90	81.86	-	35.3	20.4	
18	3	E	2.9	1538.5	110.14	-0.03	0.22	94.81	81.40	81.35	81.68	12.3	12.0	17.2	
19	3	A	3.25	1724.1	117.73	-0.02	0.25	18.41	16.12	80.99	78.37	-	38.4	16.7	
20	3	E	2.78	1474.8	109.69	-0.04	0.24	160.93	86.59	90.63	91.51	40.0	15.3	-	
21	3	A	3	1591.5	116.96	0.03	0.27	58.16	25.82	90.36	88.98	9.6	15.8	12.0	
21	3	H	3.3	1750.7	130.32	0.03	0.21	244.25	104.11	91.51	104.11	-	15.3	10.0	
23	3	E	3.94	2090.2	150.04	-0.02	0.22	139.85	82.50	90.86	91.09	26.6	36.3	-	
24	3	A	4.247	2253.1	156.97	0.05	0.27	56.13	31.83	90.54	88.66	15.4	24.7	9.4	
25	3	E	3.372	1788.9	129.79	-0.02	0.27	141.87	83.05	90.36	91.46	-	20.2	8.6	
26	3	A	3.736	1982.0	137.55	0.04	0.29	48.99	28.38	89.94	87.79	10.5	29.6	10.2	

Table 3.2 Test Conditions and Results (4/4)

No.	K	C	Max. Flow Rate		Initial Condition							Positive Pressure at the Wall		Freq.
			FE201	FE201	PT101	PT205	PT601	TC203	TC206	TC503	TC601	1st Peak	2nd Peak	
			[kg/s]	[kg/m ² -s]	[Bar]	[Bar]	[Bar]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[kPa]	[kPa]	
1	4	E	3	1591.5	117.08	0.03	0.27	138.07	83.01	42.10	44.57	15.7	15.6	24.7
2	4	A	3.616	1918.3	136.38	0.02	0.25	50.70	26.84	41.59	39.30	9.8	11.4	20.0
3	4	E	3.914	2076.4	149.81	-0.01	0.27	148.07	83.79	41.77	43.73	24.2	24.4	25.0
4	4	A	4.207	2231.8	156.40	-0.06	0.16	49.41	30.71	40.89	33.28	18.5	15.2	22.7
5	4	H	2.494	1323.1	100.06	-0.08	0.20	188.06	101.19	42.10	42.52	10.3	11.6	22.5
6	4	E	2.745	1456.2	110.24	0.03	0.29	149.97	81.63	41.31	43.54	20.1	16.2	26.7
7	4	A	3.028	1606.4	116.28	0.02	0.29	17.93	11.11	40.65	37.43	10.6	11.6	22.5
8	4	E	3.84	2037.1	150.04	-0.02	0.24	140.93	80.39	61.75	66.18	26.7	22.1	21.3
9	4	A	4.138	2195.2	156.83	0.07	0.30	61.52	35.10	61.20	59.04	18.0	12.9	17.5
10	4	H	3.248	1723.1	129.73	0.06	0.28	170.87	101.56	61.16	66.41	-	10.1	25.6
11	4	A	3.54	1878.0	136.77	-0.03	0.22	57.98	36.17	60.51	53.92	30.2	28.3	18.7
12	4	E	2.759	1463.7	109.71	-0.04	0.24	129.26	75.52	60.74	65.67	30.6	12.4	-
13	4	A	3.051	1618.6	116.24	-0.05	0.22	26.47	19.22	60.14	57.61	12.0	11.0	19.8
14	4	A	4.105	2177.7	156.42	0.04	0.29	78.00	44.24	80.94	79.93	27.3	20.6	12.3
15	4	H	3.26	1729.4	129.71	0.03	0.32	161.69	101.06	80.99	87.19	-	-	-
16	4	A	3.492	1852.5	136.96	-0.04	0.26	72.53	40.84	80.53	79.61	22.5	25.5	12.7
17	4	E	2.693	1428.6	109.79	0.01	0.34	138.92	80.48	80.80	83.51	31.8	24.5	17.4
18	4	A	3.019	1601.6	116.81	-0.02	0.29	41.68	27.08	80.48	79.33	12.2	26.1	14.1
19	4	H	3.206	1700.8	130.28	0.09	0.31	236.77	104.39	92.79	104.71	-	-	-
20	4	E	3.807	2019.6	150.20	0.07	0.33	142.43	89.53	91.74	90.54	16.1	-	7.3
21	4	A	4	2122.0	156.83	0.03	0.33	47.46	27.68	91.55	90.82	19.0	19.8	6.7
22	4	H	3.279	1739.5	129.61	-0.02	0.26	189.64	102.35	92.43	97.54	-	-	10.6
23	4	E	3.532	1873.7	136.87	0.01	0.31	102.72	55.31	91.60	89.71	18.4	18.3	6.9
24	4	E	2.692	1428.1	109.83	0.05	0.36	147.55	87.65	91.41	92.93	38.1	62.5	8.1
25	4	A	2.945	1562.3	116.49	-0.02	0.30	54.02	33.51	90.17	89.30	16.5	13.5	10.4

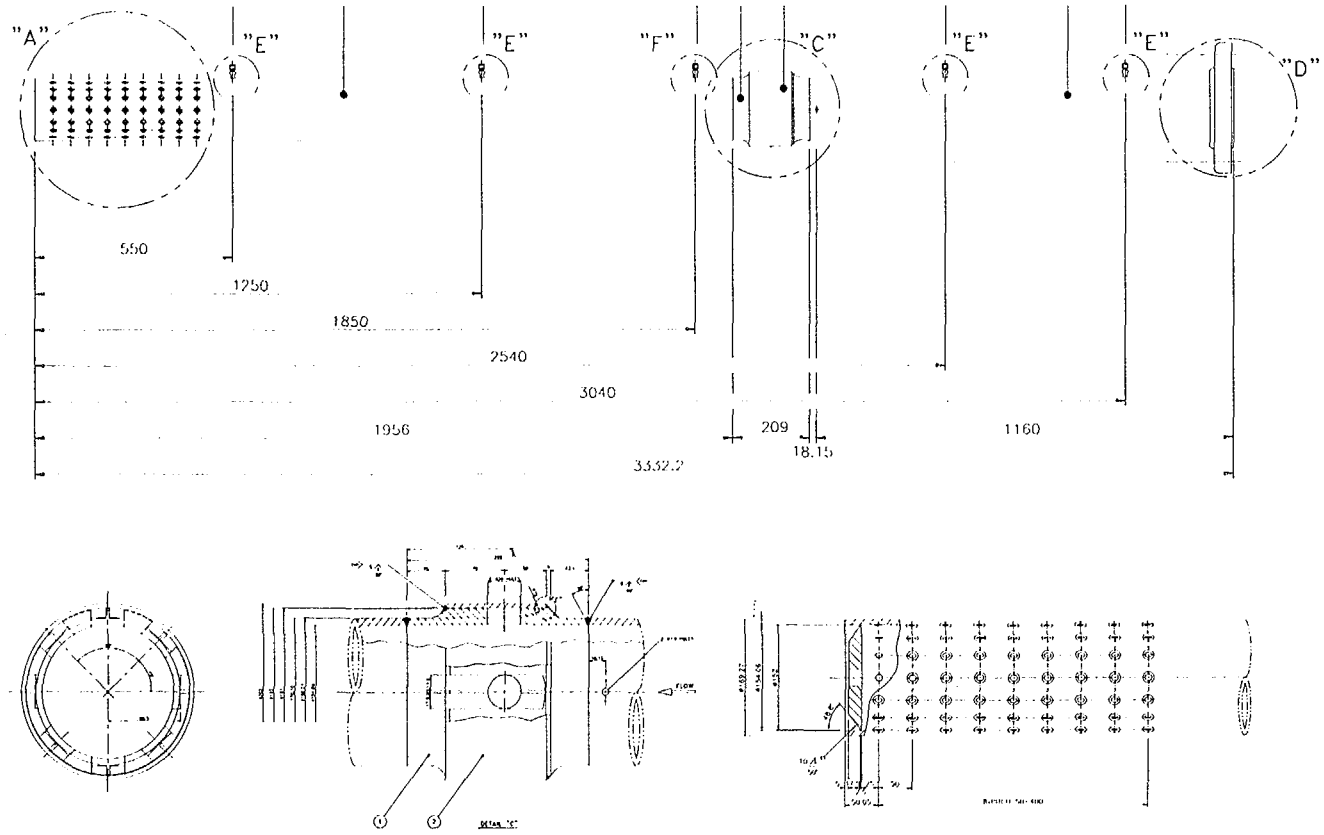


Fig. 3.1 Drawing of KNGR Sparger

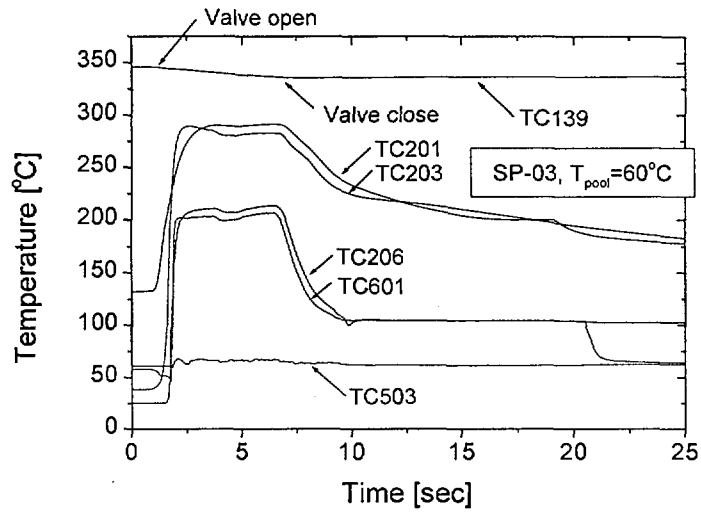


Fig. 3.2 Temperature trend in the piping during blowdown period

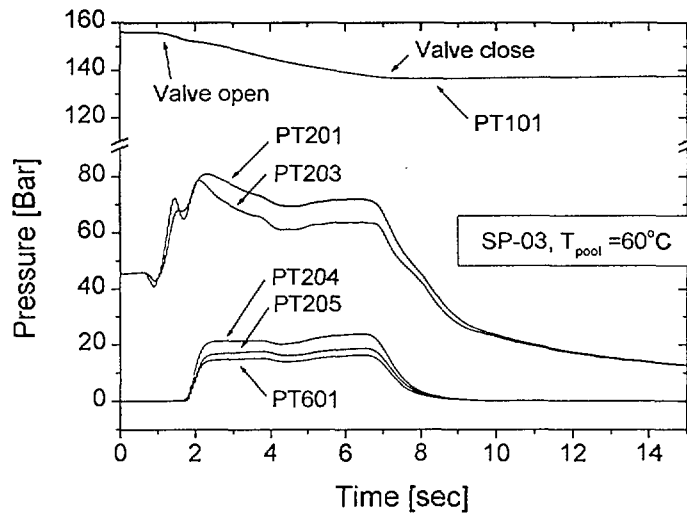
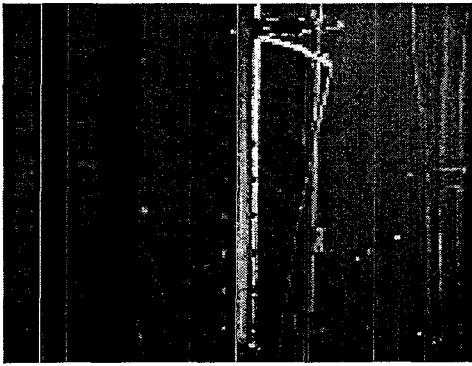
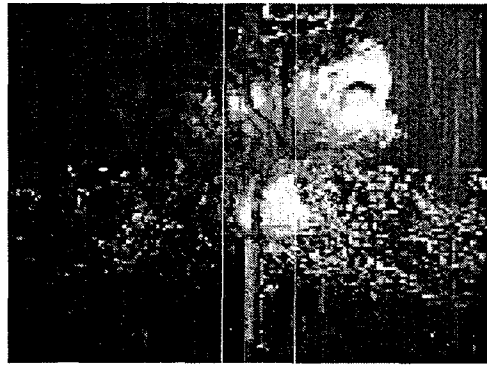


Fig. 3.3 Pressure trend in the piping during blowdown period



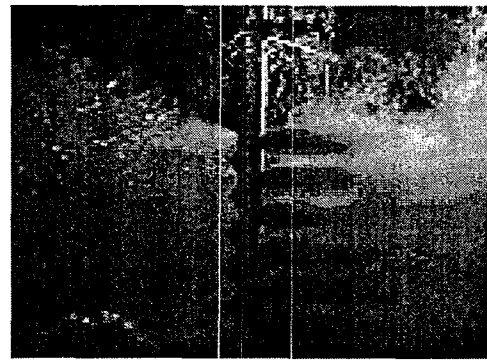
(a) Initial water Clearing



(b) Air Clearing



(c) Air/Steam Clearing



(d) Steam Discharging

Fig. 3.4 Image of water/air/steam discharging stages (Sp_2 , $T_p=84^\circ\text{C}$, $P_{PZR}=117\text{bar}$)

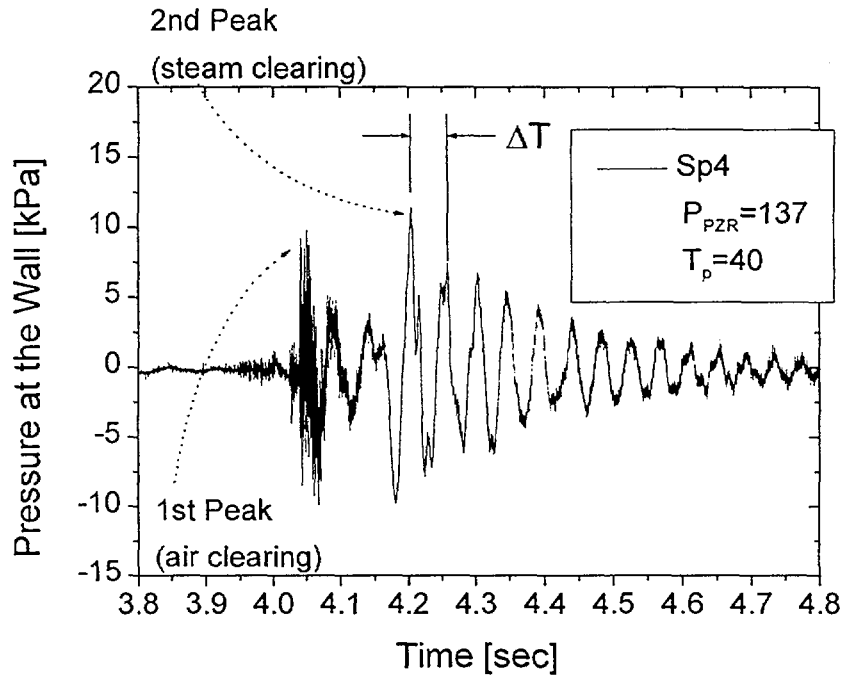


Fig. 3.5 Typical pressure signal induced from successive discharging of water, air, and steam

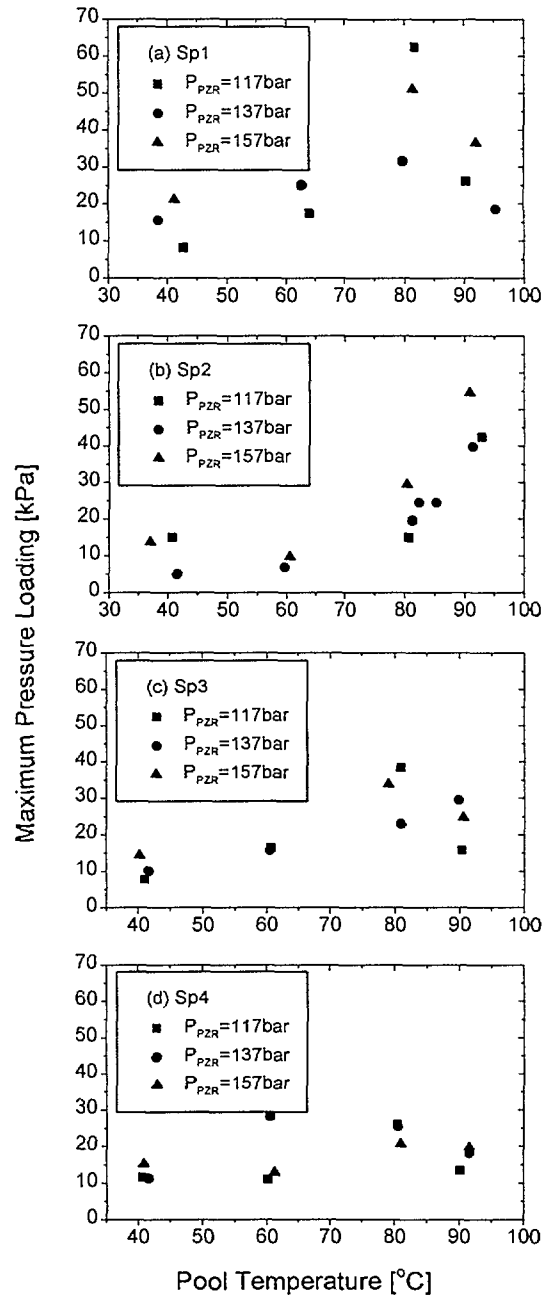


Fig. 3.6 Trends of the maximum positive amplitude with a variation of the sparger and the temperature of pool water

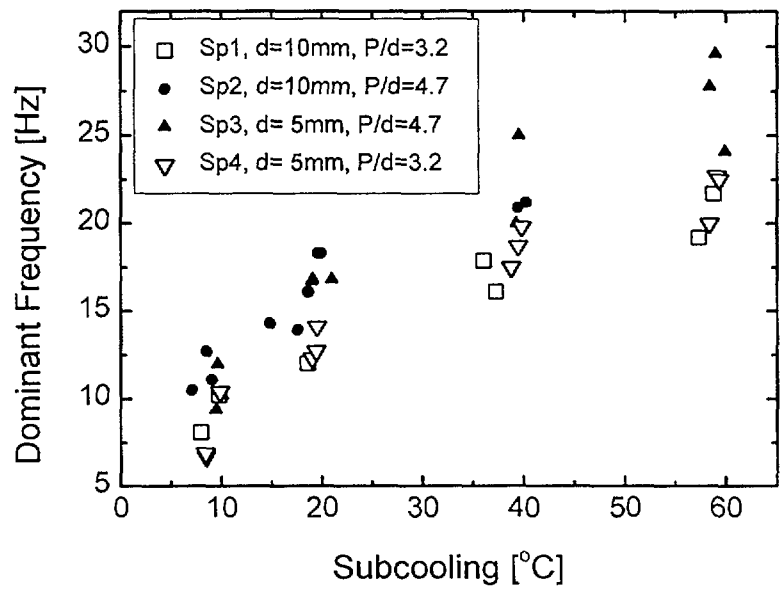


Fig. 3.7 Variation of the dominant frequencies with the P/d ratio of the sparger

제 4 장 결 론

본 연구에서는 2인치의 증기분사기를 사용하여 고압의 증기분출시 수조내에서의 동압 특성에 대한 실험을 수행하였다. 증기분사기의 형상이 동압에 미치는 영향을 판단하기 위하여 4가지 종류의 증기분사기를 사용하였으며, 수조의 온도를 36 ~ 95°C 까지 변화하였다. 본 실험은 1.2절에서 설명한 바와같이 차세대원자로의 원형 증기분사기를 사용한 Unit Cell Test의 수행과 연결하여 증기분사기의 크기 및 형상이 수조내 열수력학적 거동에 미치는 영향에 대한 data base 구축에 기여했으며, 양질의 data 생성을 위한 실험기술 및 방법연구라는 차원에서도 소기의 연구목적에 달성했다고 판단된다.

본 실험을 통해 얻어진 결론은 다음과 같다.

- (1) 물, 공기, 그리고 증기의 연속방출과정중 수조내에서의 최대동압하중은 증기의 분사시 발생하였다.
- (2) 수조내 동압하중에 영향을 미치는 주요변수는 수조내 평균온도와 가압기 압력등이며, 실험장치의 밸브배열과 작동방식등에 의해서도 동압은 다르게 관찰되었다.
- (3) 수조내 동압의 진동 주파수는 5 ~ 30Hz 정도로 관찰되었으며, 주파수는 증기분사기의 P/d와 같은 기하학적 형상변수에 따라서도 약간씩 변화하는 것으로 관찰되었다. 주파수에 가장 큰 영향을 미치는 변수는 수조의 평균온도이다.
- (4) Unit Cell Test와같은 공기의 방출시 수조내 하중거동에 대한 실험에 있어서 가장 중요한 점은 공기를 급격하게 가압시킬 수 있는 증기의 원활한 공급이며, 이를 위해서는 증기의 유로를 막지않고 급속하게 작동할 수 있는 밸브의 선정이 우선되어야 한다.

참고문헌 [5], [6]에의하면 방출배관의 온도에 따라서 수조내 동압거동이 변화하는 것으로 관찰되었으며, 향후 이에 대한 연구도 수행되어져야 한다고 판단된다.

서 지 정 보 양 식

서 지 정 보 양 식					
수행기관보고서번호		위탁기관보고서번호		표준보고서번호	
KAERI/TR-1814/2001					
제목 / 부제		안전감압계통의 공기방출시 하중에 관한 실험연구(I)			
연구책임자 및 부서명 (AR,TR 등의 경우 주저자)		조 석 (열수력안전연구팀)			
연구자 및 부서명		정홍준, 윤영중, 천세영 (열수력안전연구팀)			
출판지	대전	발행기관	한국원자력연구소	발행년	2001/4
페이지	31p.	도표	있음(O), 없음()	크기	Cm.
참고사항					
비밀여부	공개(O), 대외비(), — 급비밀		보고서종류	기술보고서	
연구위탁기관			계약번호		
<p>초록 (15-20줄내외)</p> <p>차세대원자로(KNGR)에는 안전감압계통과 같은 새로운 안전개념들이 설치될 예정이다. 안전감압계통은 가압기 안전밸브의 작동시 고압의 증기를 감압배관과 증기분사기(sparger)를 통하여 containment 내부의 재장전수 저장탱크(IRWST)로 분사한다. 이 과정중 증기분사기 및 감압배관 내부의 물과 공기가 먼저 분사되고, 연이어 고온/고압의 증기가 분사된다. 물, 공기, 그리고 증기의 연속적인 분사과정중 IRWST 및 내부구조물에 최대의 하중을 발생시키는 과정은 공기방출과정(air clearing)으로 알려져 있다. 차세대원자로에서는 12개의 6인치 I-형 증기분사기를 채택하여 설계가 진행되고 있고, 이에 대한 실험적 검증이 필요하다. 본 연구에서는 6인치 증기분사기 실험의 전단계로서 2인치 I-형 증기분사기를 사용하여 공기방출시 탱크벽면에서의 하중 특성을 실험적으로 규명하고자, 4종류의 증기분사기를 사용하여 실험을 수행하였다.</p>					
주제명키워드 (10단어내외)		안전감압계통, 증기분사기, 공기방출과정, 하중특성			

BIBLIOGRAPHIC INFORMATION SHEET

Performing Org. Report No.		Sponsoring Org. Report No.		Standard Report No.		INIS Subject Code	
KAERI/TR-1814/2001							
Title / Subtitle		Experimental study on the Air/Steam discharging load of safety depressurization system (I)					
Project Manager and Department (or Main Author)		Seok Cho (T/H safety research Team)					
Researcher and Department		Heung Jun Chung, Young Jung Youn, Se Young Chun (T/H safety research Team)					
Publication Place		Daejon		Publisher		Publication Date	
				KAERI		2001/4	
Page		31p.		Ill. & Tab.		Size	
				Yes(O), No ()		Cm.	
Note							
Classified		Open(O), Restricted(), Class Document		Report Type		Technical Report	
Sponsoring Org.				Contract No.			
Abstract (15-20 Lines)		<p>In the Korea Next Generation Reactor (KNGR) design, the Safety Depressurization System (SDS) plays a great role in reducing the core damage frequency and improving the severe accident performance of the KNGR. The actuation of POSRVs results in a time-varying high-energy flow of air, steam, two-phase, and liquid from the pressurizer into the Incontainment Refueling Water Storage Tank (IRWST). The successive discharge of water, air, and steam induces thermal hydraulic phenomena such as a water jet, air clearing and steam condensation, and these phenomena impose the relevant hydrodynamic forces on the IRWST structures. In the KNGR design, totally twelve 6inch I-type spargers will be installed in the IRWST. Therefore, an understanding of the related phenomena such as the characteristics of dynamic pressure loads is a prerequisite for the design of the sparger and IRWST structure to withstand the pressure loads. In the present study, four 2inch I-type spargers test were performed to characterize the pressure loads at the quench tank wall.</p>					
Subject Keywords (About 10 words)		Safety Depressurization System, Sparger, Air clearing, characterize the pressure loads					