'2000 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

비응축성 기체가 수조내부의 직접접촉응축 현상에 미치는 영향

The effect of the uncondensable gas on direct contact condensation in a pool

김 기영, 조 석, 송 철화, 권 태순, 정 문기

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

전 규동

한양대학교 원자력공학과
서울특별시 성동구 행당동 17

요약

본 연구는 물/증기의 직접접촉에 의한 응축현상시 발생되는 동압력에 대한 비응축성 기체의 영향을 알아보고자 수행되었다. 실험은 증기의 질량유속(180 460 $kg/m^2.s$), 수조내 물온도(30 90 °C), 비응축성 기체의 양(0 5 %)을 변화하며 수행되었으며, 특히 질량유속은 응축진동영역과 안정응축영역을 포함하도록 설정하였다. 수조벽면에서 측정되는 동압력은 R.M.S Pressure와 특성 진동 주파수로 나타내어 평가되었다. 일반적으로 특성 진동 주파수는 비응축성 기체의 양이 증가함에 따라 점점 감소하는 경향이 나타났다. 그리고 응축진동영역에서 수조내 과냉각수의 온도가 70 °C이하인 경우에는 비응축성 기체의 양이 증가함에 따라 압력하중(dynamic loading)은 증가하다가 비응축성 기체의 양이 일정양에 이르렀을때 서서히 감소하였으며 특히, 증기속에 비응축성 기체의 양이 1 2% 함유되어 있을 때 가장 높은 압력하중이 측정되었다. 그리고 과냉각수의 온도가 70 °C이상인 경우에는 비응축성 기체의 양이 증가함에 따라 압력하중은 서서히 감소하였다.

Abstract

An experimental study was carried out to investigate the effect of non-condensable gas on dynamic pressure induced by steam-water direct condensation. Experiments were performed in the range of pool temperature, 30 90℃, steam mass flux, 180 460 kg/m^2-s, and air fraction, 0 5%, respectively. Condensation regime investigated in this study covers both the stable condensation (SC) and the condensation oscillation (CO) regime. All experimental data on dynamic pressure measured at the quench tank wall were evaluated in terms of the pressure amplitude expressed by the R.M.S. value and its principal frequency defined as the peak frequency of power spectrum. The principal frequency tends to decrease with the increase of the mass fraction of non-condensable gas. In the CO regime, the pressure amplitude tends to increase at first, then it decreases as the mass fraction of non-condensable gas increases more than 1 2 % until the mean temperature of subcooled water pool reached 70℃. And the peak dynamic pressure amplitude is observed when the mass fraction of non-condensable gas is 1 2%. After that threshold pool temperature, the amplitude decreases slowly with pool temperature.

1. 서론

현재 원자력 발전소에서는 비상시 원자로 냉각재 계통의 압력을 낮추기 위해 가압기로부터 증기를 인출하여 IRWST (Incontainment Refueling Water Storage Tank) 또는 감압수조와 같은 폐쇄회로의 저온 용수속으로 분사하는 개념이 도입되고 있다. 그런데 이 증기는 고온, 고압인 관계로 수용탱크의 벽면에 과도한 동적하중을 야기시킬 우려가 있으므로 분사되는 증기의 모멘텀 및 직접접촉 응축등 제트류의 동적하중 특성에 영향을 미치는 주요인자에 대한 이해가 필요하다.

하지만 기존의 연구를 살펴보면, 대부분의 실험이 가압기로부터 방출되는 증기를 순수 증기만으로 가정하여 수행했기 때문에 실제 증기속에 함유된 비응축성 기체의 영향은 고려되지 않았다. 실제로 비응축성 기체의 존재를 예를 들어 설명하면, 가압기와 응축탱크는 배관으로 연결되어 있는데 이 배관속에는 비응축성 기체인 공기가 존재하고, 또한 원자로 냉각재 계통속에도 냉각수와 함께 공기가 함유되어 있다. 그리고 핵연료의 파손시 방출되는 헬륨가스도 비응축성 기체로서의 역할을 담당하게 된다.

따라서 본 연구에서는 이러한 직접접촉 응축에 관련하여 원자로 배수탱크(RDT)를 모의한 응축탱크내에 과냉각수를 채우고 가장 단순한 증기분사기 형태의 수평노즐을 통해 고온, 고압의 증기를 분사하여 증기Jet의 거동과 이에 따른 응축하중을 측정하였고, 더불어 비응축성 기체의 영향을 평가하고자 증기와 비응축성 기체를 혼합하여 분사시키는 실험을 수행하였다. 실험은 10mm 수평노즐을 사용하였으며, 응축수의 온도는 30 90 °C까지 10 °C간격으로 포화온도 이전까지 실험범위를 설정하였다. 그리고 질량유속은 크게 응축진동영역과 안정응축영역으로 나누어 각각 180, 250, 320 $kg/m^2.s$와 390, 460 $kg/m^2.s$에서 실험을 수행하였다. 그리고 비응축성 기체는 공기(Air)를 사용하였으며, 공기는 증기에 대한 질량비로서 각각 0, 1, 3, 5%를 주입하였다. 이러한 실험조건은 Fig. 1과 Table. 1에 잘 나타나 있다.

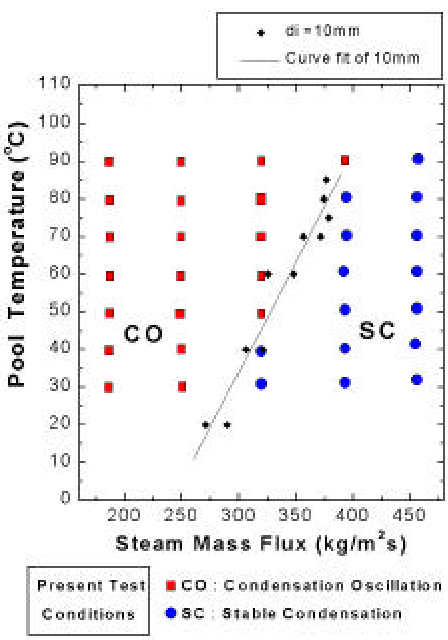


Fig. 1 Condensation Regime Map with Steam Mass Flux and Pool Temperature (Present Test Conditions)

Table. 1 Test condition

Nozzle Size (mm)	10	
Pool Temp. (°C)	30, 40, 50, 60, 70, 80, 90	
Steam Mass Flux ($kg/m^2.s$)	응축진동영역	180, 250, 320
	안정응축영역	390, 460
Air Fraction (%)	0, 1, 3, 5	

2. 실험장치

본 실험장치는 실제 발전소의 RDT (Reactor Drain Tank) 및 관련기기를 길이 기준으로 1/5로

축소하여 제작되었다. 이는 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 전체적으로 증기발생기(Steam Generator), 응축탱크(Quenching Tank), 증기분사기(Steam Sparger), 증기공급 배관(Steam Supply Line) 및 밸브, 그리고 각종 계측기기들로 구성되어 있다.

먼저 증기발생기는 300 kW급 용량의 전기히터가 내부에 설치되어 있고, 최대 10기압 조건에서 0.1 kg/sec의 증기를 발생시킬 수 있으며, 응축탱크는 직경 1m, 길이 1.5m의 원통형으로 탱크 내에는 냉각수로 채워져 있다. 이때 탱크내의 냉각수는 일정한 수위를 유지할 수 있도록 적절한 높이에 배수관을 설치하였으며, 노즐의 잠김깊이는 냉각수 수위로부터 30cm밑에 위치하도록 설치하였다. 또한 증기가 방출되면서 나타나는 응축형태를 고속 비디오 카메라로 촬영하기 위해서 탱크 전면에는 시창(Window)이 설치되었다. 그리고 증기발생기와 증기분사기를 연결하는 증기공급배관은 직경 1인치의 튜브로 되어 있으며, 증기발생기에서 생성되는 포화증기가 증기 공급배관을 거쳐 증기분사기를 통해 응축탱크 내로 분출된다. 응축탱크에는 냉각수 공급배관(Water Supply Line), 열전대(K-type T/C), 안전밸브 및 수위측정기(Level Transmitter), 압력계(Static Pressure Transmitter)등 각종 센서들이 설치되어 있다. 증기 공급배관에는 유량계 및 격리밸브, 유량조절밸브, 배수밸브, 혼합기(Mixing Chamber)등이 설치되어 있다. 이러한 압력계 및 온도계를 설치함으로써 공급되는 증기의 특성을 측정하게 되며, 이들 계기는 지시계(Indicator)를 통하여 측정값을 지시(PI, TI)함으로서 운전상황을 보여주게 된다. 또한 증기발생기 입구와 유량계 사이에는 배관 예열용 열선(Heat Tracing Cable)을 설치하여 증기공급배관과 유량계 후단을 예열시킴으로써, 실험초기에 격리밸브의 개방에 따른 급격한 온도변화로 인한 유량계의 손상을 방지하고, 실험시 포화증기의 건도를 유지할 수 있도록 하였다. 그리고 증기 공급배관 사이에는 혼합기가 설치되어 있어 공기 공급배관으로부터 나오는 공기와 증기가 균일하게 섞일 수 있도록 하였다. 또한 공기 공급배관 사이에는 압력조절기(Regulator), 공기유량계, 온도계가 설치되어 있다.

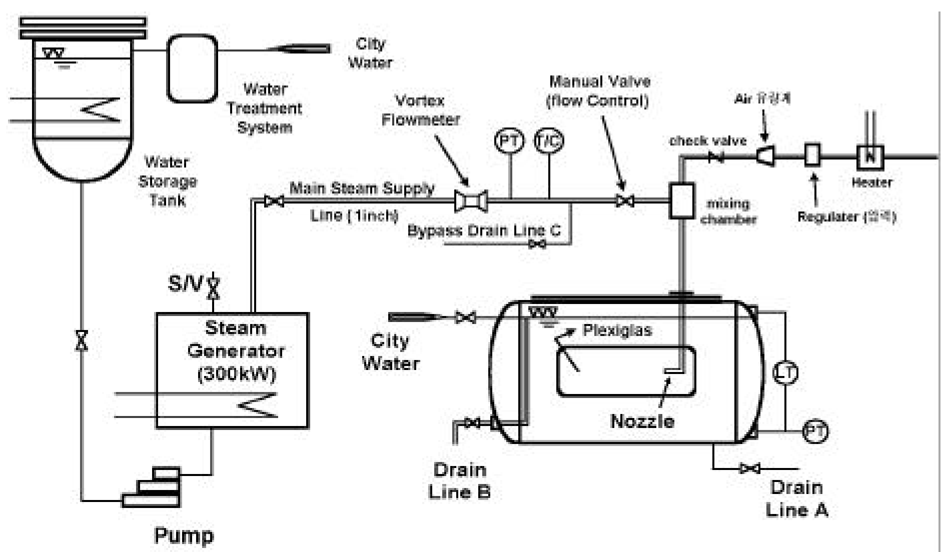


Fig. 2 Schematic Diagram of Condensation Test Facility

3. 실험결과 및 토론

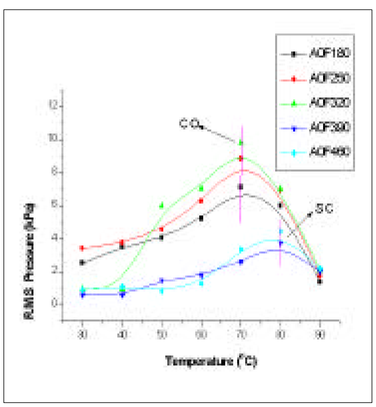
본 연구에서는 증기/물의 직접접촉에 의한 응축현상시 발생되는 수조 벽면에서의 동압력을 R.M.S. Pressure 관점과 특성 진동주파수(Principal Frequency)관점에서 분석하였다. 이는 기존에 수행되었던 실험이 비응축성 기체의 영향을 고려하지 않았다는 점에서 좀더 수조의 건전성을 평가하는데 근접한 실험이라 하겠다.

3.1 R.M.S Pressure 관점

기존의 문헌을 살펴보면 Chan(1978)등은 수직하방으로 방출되는 증기제트가 과냉각수와의 직접 접촉 응축시 발생하는 동압특성에서, 응축수의 온도가 70 °C이하에서는 비교적 낮은 압력하중이 발생되지만 70 °C이상에서는 큰 압력하중이 발생되면서, 어떤 일정온도에 이르면 급격하게 감소하게되는 한계온도의 존재를 제시하였다.

Fig. 3은 수조내 응축수의 온도변화에 따른 압력하중과 증기제트의 형상변화를 나타낸 그림이다. 먼저 응축진동영역에 해당되는 질량유속의 경우, 압력하중의 최대값을 나타내는 응축수의 온도, 즉 한계온도는 70 °C인 것으로 나타났다. 일반적으로 응축수의 온도가 증가함에 따라 압력하중은 한계온도 이하에서는 서서히 증가하는 반면, 한계온도 이상에서는 급격하게 감소하는 경향이 나타났다. 그리고 안정응축영역의 경우에는 압력하중의 최대값을 나타내는 한계온도가 80 °C인 것으로 측정되었으며, 응축진동영역에서와 마찬가지로 한계온도 이상에서 압력하중이 급격하게 감소한다는 사실을 알 수 있었다. 이러한 실험결과는 Fig. 3(a),(b)를 통해서 설명될 수 있다.

먼저 Fig. 3(a)는 응축진동영역에 해당되는 질량유속인 250 kg/m^2.s와 응축수의 온도가 60, 70, 80 °C일 때의 증기제트 형상을 나타낸 그림이다. 일반적으로 응축수의 온도가 한계온도 이하에서는 증기제트의 형상이 비교적 뚜렷하게 형성되었으며, 동시에 생성과 소멸이 빠른 속도로 반복되면서 큰 압력파가 발생하는 것으로 관측되었다. 반면 한계온도 이상에서는 증기제트를 이루는 대부분이 큰 증기방울로 이루어졌기 때문에 시간이 진행됨에 따라 생성과 소멸이 비교적 느리게 반복되었고 이로인해 낮은 압력하중이 발생되었다. 그리고 안정응축영역에 해당되는 질량유속의 경우에는 Fig. 3(b)에 나타난 바와 같이 증기제트의 형상이 비교적 일정한 형태로 유지되는 것이 관측되었다. 단지 한계온도 이상에서의 증기제트 형상은 중간부분에서 갑자기 확산하면서 방출되는 증기가 응축에 참여하지 못하고 수면위로 빠져나가기 때문에 압력파가 낮게 측정되었다.



T60F250A0 T70F250A0 T80F250A0

(a) Condensation Oscillation regime (250 kg/m^2.s)

Air 0%

CO : Condensation Oscillation regime

SC : Stable Condensation regime

T70F390A0 T80F390A0 T90F390A0

(b) Stable Condensation regime (390 kg/m^2.s)

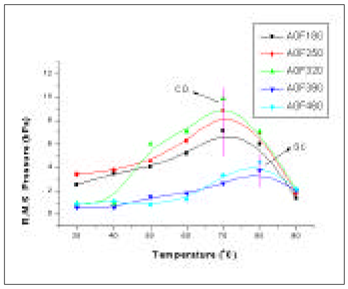
Fig. 3 Variation of Dynamic Pressure and Steam Jet Shape with Pool Temperature (Air 0 %)

(T : Pool Temperature, F : Steam Mass Flux, A : Air Fraction)

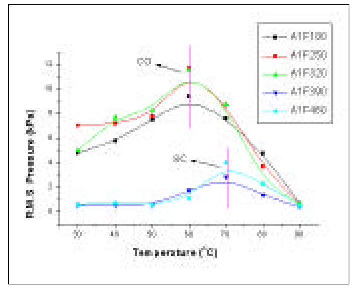
그리고 Fig. 4는 비응축성 기체의 양에 따른 한계온도를 나타낸 그림이다. 응축진동영역의 경우, 비응축성 기체의 양이 0, 1, 3, 5%로 증가함에 따라 최대값의 압력하중을 나타내는 한계온도는 각각 70, 60, 50, 40 50 °C로 감소되었다. 이는 비응축성 기체의 양이 증가함에 따라 분출되는 증기의 응축을 방해하고, 증기제트의 대부분이 증기방울로 이루어지면서 제트길이가 확산되어 증기제

트의 생성과 붕괴의 반복이 완화되기 때문이었다.

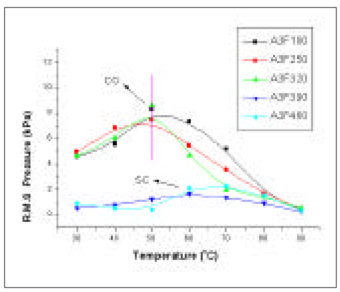
반면 안정응축영역의 경우에는 비응축성 기체의 양이 0, 1%일 때, 한계온도는 각각 80, 70 °C로 측정되었으나 비응축성 기체의 양이 3, 5%일 경우에는 응축수의 온도에 관계없이 압력하중은 거의 일정한 것으로 확인되었다. 이는 증기제트의 수축과 팽창이 비응축성 기체로 인해 완화되고, 높은 질량유속으로 많은양의 증기방울이 응축되지 못하고 수면위로 상승하기 때문으로 판단된다.



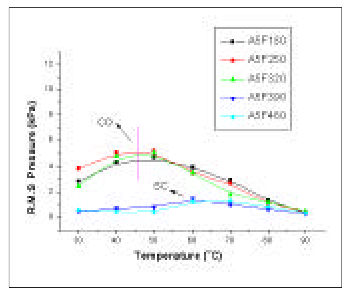
(a) Air 0%



(b) Air 1%



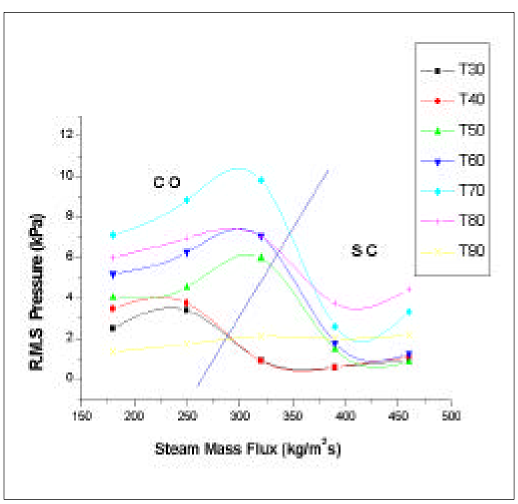
(c) Air 3%



(d) Air 5%

Fig. 4 Variation of Dynamic Pressure with Pool Temperature (Air 0,1,3,5 %)

Fig. 5는 응축진동영역과 안정응축영역에 따른 압력하중을 나타낸 그림이다. 실험에서 질량유속



Air 0 %

(a) T60F180A0

(b) T60F250A0

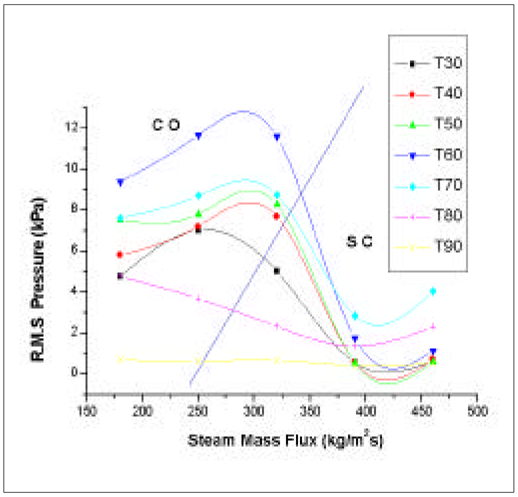
(c) T60F320A0

(d) T60F390A0

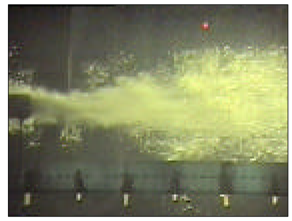
Fig. 5 Variation of Dynamic Pressure and Steam Jet Shape with Condensation regime (Pool Temp. 60 °C, Air 0 %)

* a,b,c : Condensation Oscillation regime, d : Stable Condensation regime

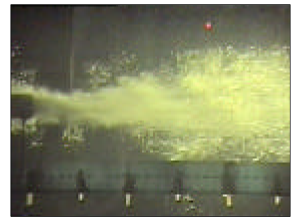
이 증가함에 따라 응축진동영역에서의 압력하중은 서서히 증가하는 반면, 안정응축영역에 이르면 급격하게 감소함을 알 수 있다. 이는 응축진동영역의 경우 증기제트의 형상이 생성과 붕괴를 빠르게 반복하면서 큰 압력하중을 야기시키기 때문이었으며, 단지 안정응축영역의 경우에는 증기제트의 형상이 비교적 일정한 형태를 유지하면서 증기/물 경계면에서의 수축과 팽창이 비교적 미세하기 때문에 낮은 압력하중이 나타난 것으로 확인되었다. 그리고 비응축성 기체가 존재할 경우에도 이와 비슷한 결과를 얻을 수 있었다. 이는 Fig. 6을 통해서 확인할 수 있다.



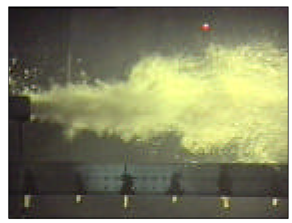
Air 1%



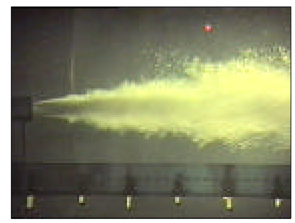
(a) T60F180A1



(b) T60F250A1



(c) T60F320A1

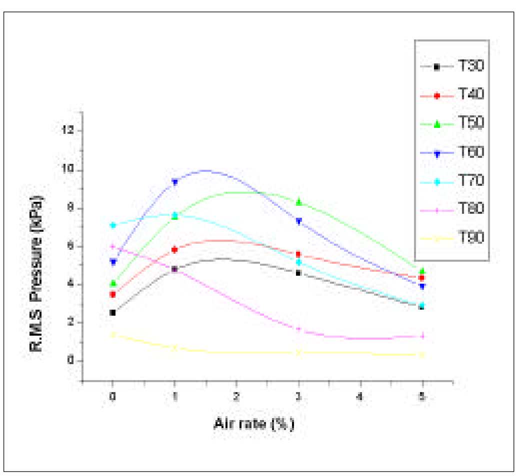


(d) T60F390A1

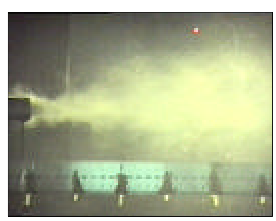
Fig. 6 Variation of Dynamic Pressure and Steam Jet Shape with Condensation regime (Pool Temp. 60 °C, Air 1 %)

* a,b,c : Condensation Oscillation regime, d : Stable Condensation regime

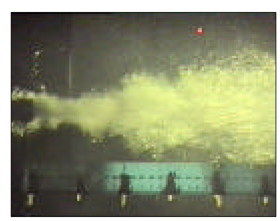
Fig. 7은 비응축성 기체의 양에 따른 압력하중(dynamic loading)을 나타낸 그림이다. 실험을 통해 응축진동 영역에서는 비응축성 기체의 양이 1 2%일 때 가장 높은 압력하중이 측정되었고, 비응축성 기체가 3%이상에서는 서서히 감소하는 경향이 나타났다. 이러한 원인은 일정양 이상의



$F180\ kg/m^2.s$

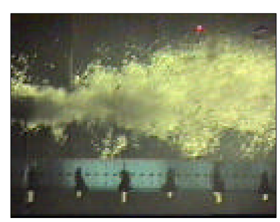


(a) T50F180A0



(b) T50F180A1

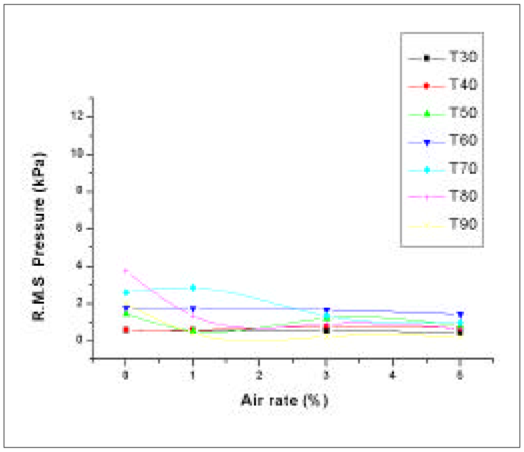
(c) T50F180A3



(d) T50F180A5

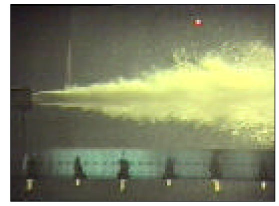
Fig. 7 Variation of Dynamic Pressure and Steam Jet Shape with Noncondensable Gas (Condensation Oscillation regime)

비응축성 기체가 존재할 경우 반복적인 증기제트의 생성과 소멸이 비교적 완만해지기 때문으로 판단된다.

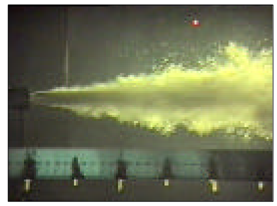


F390 kg/m²s

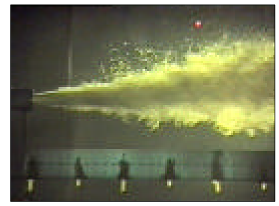
(a) T50F390A0



(b) T50F390A1



(c) T50F390A3



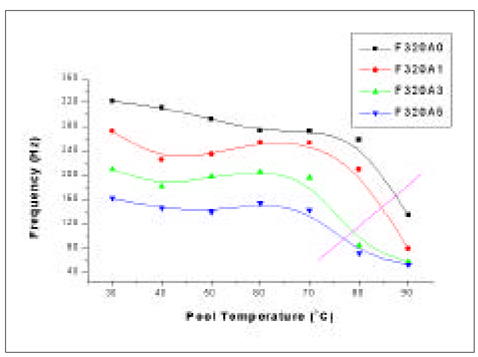
(d) T50F390A5

Fig. 8 Variation of Dynamic Pressure and Steam Jet Shape with Noncondensable Gas (Stable Condensation regime)

반면 Fig. 8에 나타난 바와 같이 안정응축영역에서는 비응축성 기체의 양이 증가함에 따라 압력하중은 감소하거나 거의 변화가 없는 것으로 측정되었다. 이는 비응축성 기체의 양이 증가하면서 증기의 응축을 방해하고 점점 더 많은 증기방울을 형성하여 수면위로 상승하기 때문으로 판단된다.

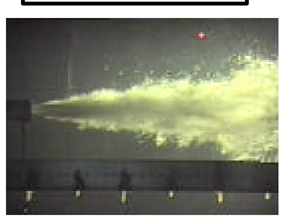
3.2 특성 진동 주파수 관점

Fig. 9는 응축수의 온도변화에 따른 특성 진동 주파수를 나타낸 그림이다. 먼저 응축진동영역의

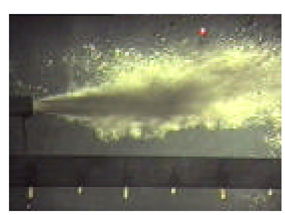


F320 kg/m².s

(a) T50F320A1



(b) T70F320A1

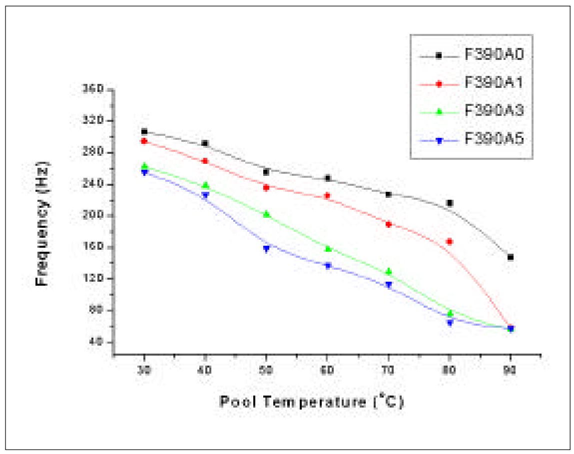


(c) T90F320A1

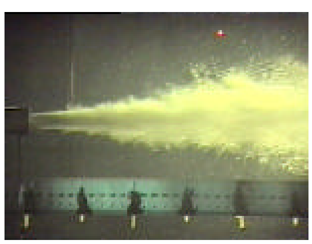
Fig. 9 Variation of Principal Frequency and Steam Jet Shape with Pool Temperature (Condensation Oscillation regime)

경우 응축수의 온도가 70 80 °C까지는 거의 일정하거나 또는 약간 감소하는 경향이 나타났지만, 그 이상의 온도에 이르면 급격하게 감소한다는 사실을 알 수 있었다. 이는 주파수가 급격히 감소하는 시점의 응축수온도의 경우, 그때의 증기제트 형상은 중간부분에서 갑자기 확산하여 많은 양의 큰 증기방울을 생성시키기 때문이었다. 이는 기존문헌을 통해서도 확인 할 수 있듯이 Chun등(1985)은 증기방울의 직경이 증가함에 따라 특성 진동 주파수는 감소하는 반면, 증기방울의 직경이 감소함에 따라 주파수는 증가하는 경향을 나타낸다고 보고한 바 있다.

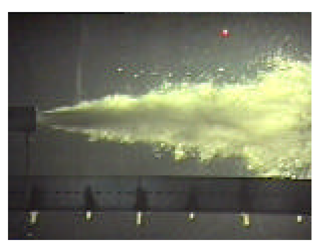
그리고 안정응축영역의 경우에는 Fig. 10에서도 알 수 있듯이, 응축수의 온도가 증가함에 따라 특성 진동 주파수는 응축진동영역의 비해 비교적 선형적으로 감소함을 알 수 있다. 이러한 원인은 응축수의 온도가 70°C이하에서도 증기의 유속이 크기 때문에 증기제트의 길이는 점점 증가하고, 증기/물의 경계면은 더 증가하여 증기방울을 더 많이 생성시키기 때문으로 판단된다.



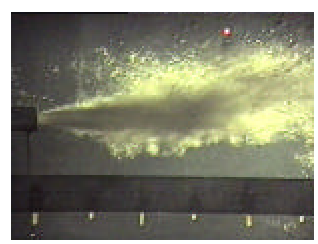
F390 kg/m^2.s



(a) T50F390A1



(b) T70F390A1

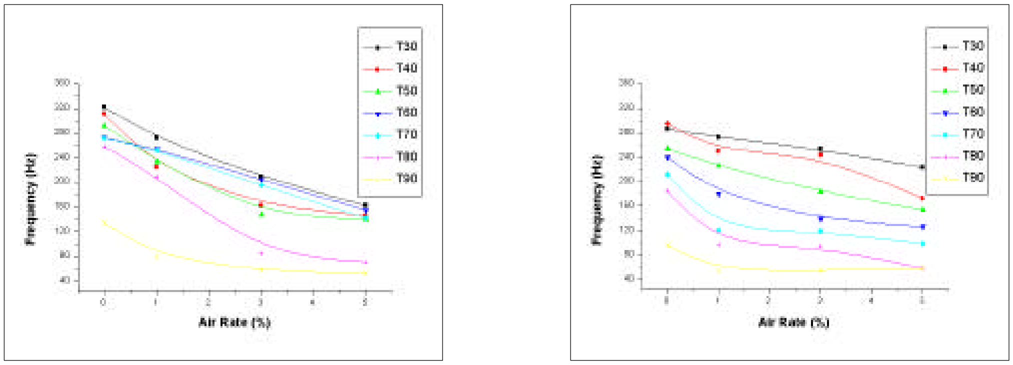


(c) T90F390A1

Fig. 10 Variation of Principal Frequency and Steam Jet Shape with Pool Temperature (Stable Condensation regime)

Fig. 11은 동적 하중을 야기시키는 증기/물의 직접접촉 응축현상에서 비응축성 기체의 양이 증가함에 따라 발생되는 특성 진동주파수를 나타낸 그림이다. 먼저 응축진동영역의 경우를 살펴보면, Fig. 11(a)에 나타난 바와같이 비응축성 기체의 양이 증가함에 따라 특성 진동주파수의 크기는 감소하는 경향을 볼 수 있다. 이는 앞에서도 언급했듯이 비응축성 기체의 양이 증가함에 따라 증기는 효과적인 응축이 이루어지지 않고, 또한 많은 증기방울의 생성을 촉진하기 때문에 주파수는 감소하는 것으로 판단된다. 그리고 Fig. 11(b)는 안정응축영역에서의 특성 진동주파수를 나타낸 그림이다. 그림에서도 알 수 있듯이 비응축성 기체의 양이 증가함에 따라 특성 진동주파수는

응축진동영역에서와 마찬가지로 감소하는 경향을 나타냈다.



(a) Condensation Oscillation regime (Steam Mass Flux : 320 kg/m^2.s)

(b) Stable Condensation regime (Steam Mass Flux : 460 kg/m^2.s)

Fig. 11 Variation of Principal Frequency with Noncondensable Gas

4. 결론

가압기로부터 방출되는 고온, 고압의 증기는 냉각수로 채워져 있는 수조내로 분출되면서 수조벽면에 큰 동적 하중을 야기시킨다. 따라서 본 실험에서는 발생되는 동적하중의 관점에서 수조벽면에서의 동압력을 측정하여 R.M.S Pressure 관점과 특성 진동 주파수관점으로 나누어 분석하였다. 또한 실제 가압기로부터 방출되는 증기속에는 비응축성 기체가 존재한다는 사실에 기인하여 이로인한 영향을 실험을 통해 보다 중점적으로 분석하였다.

<u>R.M.S Pressure 관점</u>

i) 가압기로부터 방출되는 증기속에 비응축성 기체의 양이 증가함에 따라 동압력의 최대값을 나타내는 한계온도는 점점 감소되는 경향이 측정되었다.

ii) 일반적으로, 비응축성 기체의 함유 여부에 관계없이 응축진동영역에서의 압력하중(dynamic loading)이 안정응축영역의 경우에 비해 상당히 크게 나타났다. 또한 응축진동영역의 경우에는 질량유속이 증가함에 따라 압력하중이 커지는 반면, 안정응축영역의 경우에는 거의 변화가 없는 것으로 확인되었다.

iii) 응축진동영역의 경우 비응축성 기체의 양이 1 2%일 때 최대값의 압력하중이 발생되었다. 그리고 비응축성 기체의 양이 3%이상 증가함에 따라 압력하중은 서서히 감소되었다. 안정응축영역의 경우에는 비응축성 기체의 양이 증가함에 따라 압력하중의 변화는 거의 미미한 것으로 측정되었다. 따라서 수조벽면에 미치는 동적하중의 측면에서, 안정응축영역에서는 비응축성 기체의 영향을 크게 고려할 필요가 없는 것으로 판단된다.

<u>특성 진동주파수(Principal Frequency)관점</u>

i) 일반적으로 증기속에 함유되어 있는 비응축성 기체의 양이 증가할수록 특성 진동주파수는

감소하는 경향이 나타났다. 이는 비응축성 기체가 증기의 응축을 방해하면서 많은 증기방울을 생성시키기 때문이었다.

ii) 응축진동영역의 경우, 비응축성 기체의 함유여부에 관계없이 응축수의 온도가 증가함에 따라 특성 진동주파수는 서서히 감소하거나 그 변화가 미미했으나, 80°C에 이르면 급격하게 감소하는 경향이 나타났다. 반면, 안정응축영역의 경우에는 응축수의 온도가 증가함에 따라 특성 진동주파수는 비교적 선형적으로 감소하는 경향이 나타났다.

iii) 본 실험결과는 대부분의 경우 60Hz이상에서 특성 주파수를 보였으며, 보통의 구조물의 공진 주파수인 30 Hz이하에서는 매우 작은 특성 진동주파수를 보이므로 구조물의 공진에는 영향을 미치지 않을 것으로 판단된다.

결론적으로, 본 실험결과를 토대로 한 비응축성 기체의 영향은 수조 내부구조물의 한계온도 설정시 주요한 인자로서 고려해야 할 것이다. 또한 증기의 질량유속이 작은 불안정한 응축진동영역의 경우, 수조벽면에 미치는 큰 동적 하중은 좀더 신중하게 검토할 필요성이 있다. 그리고 실제 원자력 발전소에서 사용되고 있는 RDT나 감압수조에 비해 본 실험장치는 그 규모에 있어 상당한 차이가 있으며, 또한 제한된 실험조건으로 인해 이에 따른 상사성 연구는 추가 보완되어야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 조 석 외, 1998, "직접접촉 응축에 관한기술현황분석", KAERI/AR-519/99
2. 박 춘경 외, 1998, "증기 제트 응축현상에서의 응축하중에 대한 실험적 연구", 한국원자력학회, 1998 춘계학술발표회 논문집, pp. 541-546
3. C. H. Song, S. Cho, H. Y. Kim, Y. Y. Bae, M. K. Chung, 1998, "Characterization of direct contact condensation of steam jets discharging into a subcooled water", IAEA TCM Meeting on Advanced Water Cooled Reactor, PSI, Villigen, Switzerland.
4. S. Cho, C. H. Song, H. Y. Kim, Y. Y. Bae, M. K. Chung, 1998, "Experimental study on the condensation characteristic of steam jet injected in subcooled water", Proc. of the Korea Nuclear Society Spring Meeting, Vol. 1, pp. 571-576.
5. S. Cho, C. H. Song, C. K. Park, S. K. Yang, M. K. Chung, 1998, "Experimental study on dynamic pressure pulse in direct conteact condensation of steam jets discharging into subcooled water", Proc. of NTHAS98, Pusan, Korea, pp. 291-298.
6. M. E. Simpson, C. K. Chan, 1982, "Hydraulics of a subsonic vapor jet in subcooled liquid, journal of heat transfer", Vol. 104, v271-278.
7. A.A. Sonin, 1984, "Suppression pool dynamics research at MIT", NUREG/CP-0048, pp. 400-421.
8. K. Chan, 1978, "Dynamic pressure pulse in steam jet condensation", Proc. of 6th Int. Heat Transfer Conf. Toronto, pp. 395-399.4.
9. M. Arinobu, 1980, "Studies on the dynamic phenomena caused by steam condensation in

water", Proc. of ANS-ASME-NRC Int. Tropical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics, Vol. 1, pp. 293-302.

10. Weimer, J.C., Faeth, G. M., and Olson, D.R., 1973, "Penetration of vapor jets submerged in subcooled liquids", AIChE J., Vol. 19, No. 3, pp. 552-558.
11. Fukuda, S., 1982, "Pressure variation due to vapor condensation in liquid (II): Phenomena at large vapor mass flow rate", J. Atomic Energy Soc. Japan, Vol. 24, No. 6, pp. 466-474
12. Chun, M. H., Kim, Y.S., 1996, "An investigation of direct condensation of steam jet in subcooled water", Int. Comm. Heat & Mass Transfer, Vol. 23, No. 7, pp. 947-958.
13. Chen, L.D. Faith, G.M., 1982,“"Condensation of submerged vapor jets in subcooled liquids", J. Heat Transfer, Vol. 104, pp. 774-780.
14. Chun, J. H., Sonin A. A., 1985, "Small scale modeling of steam relief into water pools", Nuclear Engineering and Design, pp. 353-362