

과냉각수에 분사된 증기제트의 응축특성에 관한 실험

조 석, 김환열, 송철화, 배운영, 정문기

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

고온의 증기가 과냉각 상태의 물과 직접접촉에 의해 발생하는 응축현상(DCC : Direct Contact Condensation)을 실험적으로 고찰하였다. 본 연구는 두단계로 나누어 수행하였다. 1단계 연구에서는 간단한 원형관 형태의 수평 노즐을 통하여 증기제트가 대기압 상태의 과냉각수로 분출될 때 증기제트 및 주위의 거동을 측정·분석하였다. 수조의 온도와 증기유량의 변화에 따른 증기제트의 축방향과 반경방향 온도분포와 수조 벽면에서의 동압을 측정하였으며, 고속 비디오 카메라를 사용하여 각각의 경우에 대하여 증기제트의 분출이미지를 촬영하였다. 벽면에서의 동압은 노즐의 분출구직경과 응축수의 온도에 비례하여 증가하였다. 2단계 연구에서는 몇가지 형태의 증기 분사기 축소 모형에 대한 응축성능을 비교하였다. 이때에는 수조의 온도상승으로 인해 수조가 가압되는 정도를 알아보기 위해 수조를 밀봉한 상태로 실험을 수행하였다. 실험시 수조의 압력은 시간의 경과에 따라 계속적으로 증가하였으나, 이는 방출된 증기의 불완전한 응축에 의한 것은 아니고 증기의 분출과 응축으로 인한 응축수의 부피팽창과 수조 온도의 상승으로 인한 증기압의 상승 때문인 것으로 판단된다.

1. 서 론

물/증기의 직접접촉에 의한 응축현상은 그 공학적 중요성 때문에 이론적으로 혹은 실험적으로 많은 연구가 수행되었다. 특히, BWR의 감압수조와 PWR의 원자로배수탱크(RDT : Reactor Drain Tank) 또는 차세대원자로(KNGR)에 도입될 예정인 재장전수탱크(IRWST : In-Containment Refueling Water Storage Tank)의 최적설계를 위해서는 응축탱크(quenching tank)안에서 발생하는 직접접촉 응축(DCC)현상에 대한 이해와 관련 실험자료의 확보가 선행되어야 한다. 특히 RDT와 같이 제한된 크기를 갖는 응축탱크의 경우에는 증기가 방출되는 동안에 일어날 수도 있는 순간적인 RDT의 과압에 대한 해석도 포함되어야 하며, 또한 이를 위해서는 2상유동에서의 열전달 현상, 특히 증기 jet의 응축과 이동현상에 대한 해석이 선행되어야 한다[1]. 따라서 관련 계통의 안전성 확보를 위해서는 증기의 거동과 응축현상에 대한 이해를 바탕으로 하여 과도현상에 의한 영향을 포함한 설계계산이 이루어져야 하며, 이를 위해서는 응축탱크내로 분사되는 증기기포의 거동과 응축현상을 규명할 필요가 있다.

최근까지의 DCC현상에 관한 연구는 응축수의 과냉각도, 증기 질량유속(mass flux), sparger 잠김깊이등의 변화에 따른 증기제트 응축현상의 특성에 집중되어졌고, 이를 통하여 증기 제트의 길이, DCC에 의한 열전달계수, 응축체제도(condensation regime map)등을 계산하였다. 본 연구에서는 응축탱크내로 분사되는 증기기포의 거동과 응축시 발생하는 압력과의 영향을 알아보기 위하여 소형의 응축실험장치를 구성하여, 2단계로 나누어 실험을 수행하였다. 1단계 연구에서는 간단한 원형관 형태의 수평 노즐을 통하여 증기제트가 대기압 상태의 과냉각수로 분출될 때 증기제트 및 주위의 거동을 측정·분석하였다. 특히, 수조의 온도와 증기유량의 변화에 따른 증기 제트의 축방향과 반경방향 온도분포와 수조 벽면에서의 동압을 측정하였으며, 고속 비디오 카메라를 사용하여 각각의 경우에 대하여 증기제트의 분출이미지를 촬영하였고, 대표적인 증기제트의 분출이미지를 그림 1에 표시하였다. 2단계 연구에서는 몇가지 형태의 증기분사기 축소 모형에 대한 응축성능을 비교하였다. 이때에는 수조의 온도상승으로 인해 수조가 가압되는 정도를 알아보기 위해 수조를 밀봉한 상태로 실험을 수행하였다.

2. 실험장치

본 실험장치는 그림 2에 나타낸 바와 같이 증기발생기, 응축탱크, 증기분사기, 배관과 밸브 들 그리고 각종 계측기들로 이루어진다. 증기발생기는 300kW 용량의 heater가 설치되어 있고, 10 기압조건에서 최대 0.1kg/sec의 증기를 발생시킬 수 있다. 응축탱크는 지름 1m, 길이 1.5m의 원통형으로 제작되었으며, 원통형 벽면에는 제트 및 주위유동장의 관찰과 비디오 촬영을 위한 관찰창을 설치하였다. 증기공급배관은 공칭 1 in, sch.40 관을 사용하였다. 공급되는 증기의 포화상태유지와 유량계의 파손을 방지하기 위하여 증기공급배관에 예열용 열선(heat tracing)을 설치하였다. 공급되는 증기의 유량측정을 위하여 vortex 형 유량계를 증기공급배관에 설치하였으며, 응축수와 증기제트의 온도측정을 위하여 K-형 열전대를 사용하였다. 탱크내 수위와 증기제트의 압력 측정을 위하여 smart-형 압력측정기를 응축탱크와 노즐에 각각 설치하였고, 증기제트의 분출시 발생하는 동압(dynamic pressure)의 영향을 관찰하기 위하여 응축탱크의 벽면에 동압계를 설치하였다.

1단계실험에서는 노즐로부터 분출되는 증기제트의 유동을 방해하지 않고 축방향과 반경방향 온도분포를 측정하기 위하여 유선형으로 특별히 제작된 열전대 집합체를 사용하였다. 노즐은 분출구 직경이 5, 7, 10, 15, 20mm의 5가지를 사용하였다. 2단계실험에서는 ABB-CE사의 I-자형 분사기(분출구 직경 3mm, 6mm), KWU사의 T-자형 분사기(분출구직경 3mm, 6mm), 그리고 영광 원전 RDT용 삼발이형 분사기등의 5종류를 사용하여 증기제트의 분출에 따른 탱크의 압력과 온도 상승 특성을 측정하였다. 실험에 사용된 증기분사기를 그림 3에 표시하였다. 또한 증기분사기의 형상이 대칭인 점을 고려하여 응축탱크의 중앙에 증기분사기의 위치를 고정하여 실험하였다. 자료 취득장치는 PC에 연결된 자료취득전용 변환기(DT-2839 A/D converter board, DT-2896 channel expander board)를 사용하였으며, 총 27 채널의 신호를 동시에 취득할 수 있도록 구성하였고, 자료취득 프로그램을 별도로 구성하였다.

유량계는 질량보존법칙을 기본으로 한 일정체적방법을 사용하여 보정하였다. 그림 2의 배출관(drain line-B)을 이용하여 보정실험 초기의 응축수의 체적을 일정하게 유지하고 충분한 시간동안 일정유량의 증기를 분사시킨후 배출관을 통하여 배출된 물의 질량을 측정하였다. 실험 전·후 응축수의 온도변화로 인한 밀도변동분을 고려한 식(1)을 사용하여 유량을 계산하여 유량계로부터

의 측정치와 비교하였다. 유량계의 보정결과를 그림 4에 나타내었는데, 대부분의 실험치는 보정곡선으로부터 5% 편차 이내에 있음을 확인할 수 있다.

$$\dot{m} = \frac{M_{\text{drain}} - (\rho_i - \rho_f)V}{\Delta t} \quad (1)$$

3. 증기제트의 온도분포 및 벽면에서의 동압변동

실험중 노즐의 잠김깊이는 탱크내 자유수면으로부터 30cm로 고정하였다. 또한 그림 5에 나타낸 바와같이 수평노즐의 상부와 하부에서의 온도분포가 거의 대칭성을 이루고 있으므로, 본 실험에서는 증기제트의 부력효과는 고려하지 않았다.

그림 6은 7mm 노즐 사용시 축방향거리와 응축수의 온도변화에 따른 증기제트 중심축에서의 온도변화를 표시하였다. 이때의 증기의 질량유속은 $920\text{kg/m}^2 \cdot \text{sec}$ 로 일정하게 유지하였다. 증기제트 중심축에서의 온도분포는 노즐선단에서 최고치를 보이고 있으나, 5mm 떨어진 곳에서의 중심축온도는 급격하게 감소하여 10mm인 곳에서의 온도보다 더욱 낮게 측정되었고, 응축수의 평균온도가 증가할수록 온도차는 더욱 증가하였다. 이러한 증기제트의 온도변화 경향은 그림 7에서도 확인할 수 있다. 그림 7은 15mm 노즐을 사용할 때 노즐의 반경방향에 대한 제트와 그 주위유동장에서의 온도 분포를 나타낸 것이다. 이때의 질량유속은 $350\text{kg/m}^2 \cdot \text{sec}$ 이고, 응축수 평균온도는 35°C 이다. 제트 중심축($z = 0$)에서의 온도변화는 앞부분에서의 설명과 같은 경향을 보이고 있으며, 특히 노즐선단으로부터 축방향 8mm까지는 중심축에서의 온도보다 반경방향으로 3.65mm 떨어진 곳의 온도가 더욱 높음을 확인할 수 있다. 그림 1-(b)에서 관찰할 수 있는 바와같이 이때의 제트형상은 원추형으로서, 그림 5(타원형, 그림 1-(a) 참조)에서와 같은 큰 폭의 온도변화를 관찰할 수는 없었다. 그림 8은 10mm 노즐을 사용하고 질량유속이 $600\text{kg/m}^2 \cdot \text{sec}$ 일 때 응축수 온도가 20°C 인 경우 축방향 거리변화에 따른 온도변화를 나타낸 것으로서, 노즐 선단으로부터 5mm 떨어진 곳까지는 노즐 중심축의 온도에 비해 반경방향으로 1.8mm 떨어진 곳에서의 온도가 높게 관찰되었다. 이와 같은 현상은 노즐내의 vena contracta를 통과하면서 가속된 증기가 급격한 팽창과정을 거쳐 응축수로 분출되면서 발생하는 팽창압력파(expansion shock wave) 현상으로 설명될 수 있다. 즉 응축수로 분사된 증기는 일정구간동안 팽창하게 되고, 팽창과정이 끝나면 응축수와의 열전달로 인해 응축되어 결국 타원형의 제트모양을 이루게 된다. 팽창과정중 증기는 주로 제트의 외곽부분에 집중하게 되어, 상대적으로 증기밀도가 낮은 중심부의 온도가 제트의 외곽부에 비해 낮은 온도를 나타낸다. 본 실험에서는 응축수의 온도와 증기의 질량유속에 따라 원추형(conical), 타원형(ellipsoidal), 확산형(divergent)등의 제트모양이 관찰 되었고, 주로 타원형, 확산형에서 위의 팽창압력파의 영향을 관찰할 수 있었다.

그림 9에는 5mm, 15mm, 그리고 20mm 노즐을 사용할 때 응축수 평균온도의 변화에 따른 벽면에서의 동압변동폭을 표시하였다. 벽면에서의 동압은 Rayleigh 식에 의해 L/D (동압계로부터 노즐까지의 거리/노즐 분출구직경)에 반비례한다[3, 4]. 본 실험에서는 노즐로부터 동압계까지의 거리(130cm)는 일정하게 고정하였으므로 동압은 노즐 분출구직경에 영향을 받게 되며, 그림 9에서도 이러한 경향을 관찰할 수 있다. 또한 응축수의 온도가 50°C 이하에서는 그 변화가 작지만, 50°C 이상에서는 동압이 급격히 증가함을 알 수 있다. 특히 20mm의 경우 동압의 최대치는 응축수

온도가 70℃ 근처에서 관찰되었고, 온도증가에 따라 동압은 다시 감소하는 경향을 보였다. Chan[4]은 응축수가 포화온도에 접근할수록 동압이 작아짐을 보고한 바 있다. 이에 대한 상세한 실험과 해석적 연구가 더욱 필요하리라 생각된다.

4. 증기분사기 특성실험

5가지 종류의 증기분사기를 사용하여 증기응축에 따른 응축탱크의 온도와 압력 상승특성을 비교하였다. 증기분사기 3번(KWU T-형, $d = 3\text{mm}$)을 제외한 모든 증기분사기의 탱크내 응축특성은 비슷한 경향을 보였다. 그림 10과 11에 증기분사기 1번(ABB-Atom, I-형, $d = 3\text{mm}$)과 3번(sp-1, sp-3)을 사용한 실험결과를 표시하였다. 분출되는 증기의 유량(320kg/hr)이 동일한 상태에서 응축탱크의 압력은 270kPa (sp-1경우)과 285kPa (sp-3경우)로 약간의 차이를 보이고 있다. 이는 탱크바닥에서의 응축수온도(TC-01)와 옆면에서의 온도(TC-03)를 비교해보면 알 수 있듯이, 분출되는 증기와 탱크하부의 응축수와 열적 혼합도의 차이에 기인한 것으로 판단된다. 이러한 경향을 보이는 주요 원인은 분출구의 직경과 증기의 유량에 따라 달라지는 각각의 분출구에서의 증기 제트의 길이와 관계된다. Sp-3과 sp-4는 같은 종류의 T-형 분사기이고, 총 증기 분출면적은 증기 공급라인 단면적의 1.6배와 1.3배로 각각 설계 되었고, 분출구의 직경이 다름으로 인해 분출되는 증기제트의 길이에 차이를 보이게 된다(응축수온도가 40℃ 경우 sp-3의 증기분출구에서의 증기제트 길이는 7mm이고, sp-4의 경우에는 16mm이다). 제트의 길이는 응축수로의 침투길이를 결정하게 되는데 특히, sp-3, 4와 같은 T-형 분사기는 증기를 수직방향으로 분출하게 되므로 증기제트의 침투길이는 곧 증기와 응축수간의 열적 혼합도에 큰 영향을 미치게 된다. 따라서 T-형 증기분사기 설계시 분출구에서의 증기유속 관점에서 신중한 고려가 필요하다고 판단된다.

5. 결 론

증기의 직접접촉에 의한 응축특성을 알아보기 위하여 증기의 응축에 영향을 미치는 주요변수인 응축수의 온도, 증기의 질량유속등을 변화하여 실험을 수행하였으며, 본 연구를 통해 얻어진 결론은 다음과 같다.

- (1) 증기제트의 형상은 증기의 질량유속, 응축수의 평균온도에 따라 원추형, 타원형, 확산형의 3가지 형상이 관찰되었고, 원추형과 확산형의 제트에서는 underexpanded jet에서의 Prandtl - Mayer expansion에 의한 제트내부의 온도구배를 확인하였다.
- (2) 벽면에서의 동압은 약 50℃까지는 거의 일정하였으나, 이후 응축수의 온도상승에 따라 급격하게 증가하였고, 노즐 분출구직경이 증가함에 따라 벽면에서의 동압은 증가하였다.
- (3) T-형 증기분사기의 설계시 증기제트의 길이와 열혼합성능에 대한 신중한 고려가 필요하다.

참고문헌

- [1] 배운영, " 응축수조 설계변수의 고찰, " 한국원자력연구소, 1994.
- [2] P. J. Kerney, Faeth G. M., and Olson D. R., " Penetration Characteristics of a Submerged Steam Jet, " AIChE J., Vol. 18, No. 3, pp. 548 - 553, 1972.

[3] M. E. Simpson, C. K. Chan, " Hydrodynamics of a Subsonic Vapor Jet in Subcooled Liquid, " J. of Heat Transfer, Vol. 104/271, May 1982.

[4] Chan, C. K., " Dynamical Pressure Pulse in Steam Jet Condensation, " 6th International Heat Transfer Conf., Vol. 2, Totonto, pp. 395 - 400, 1978.

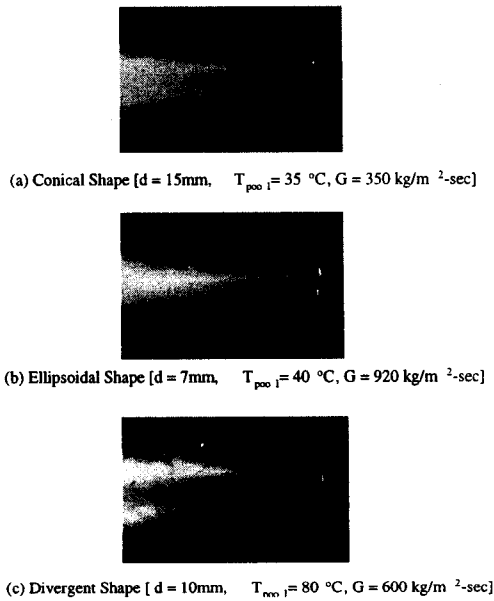


Fig. 1 Shapes of Steam Plume

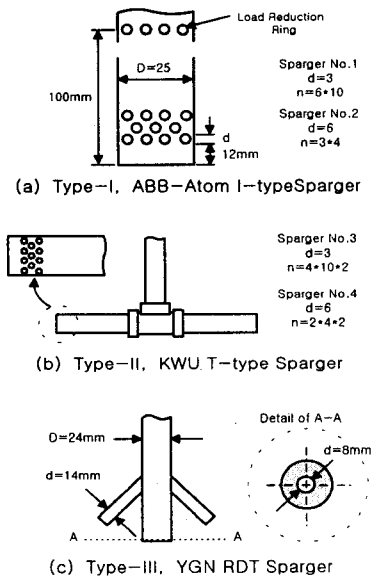


Fig. 3 Configuration of Sparger_I, II, III

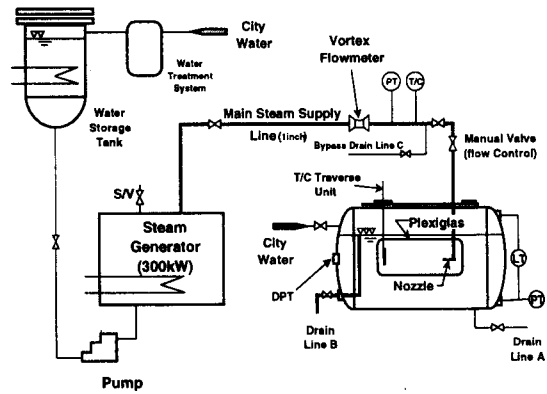


Fig. 2 Schematic Diagram of Experimental Facility

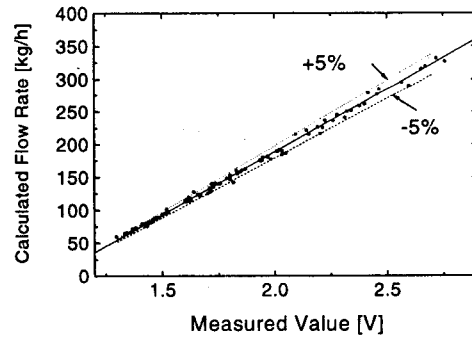


Fig. 4 Calibration Results of Flow Meter

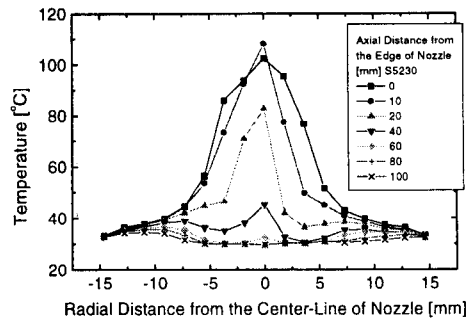


Fig. 5 Radial Temp. Distribution of Steam Jet

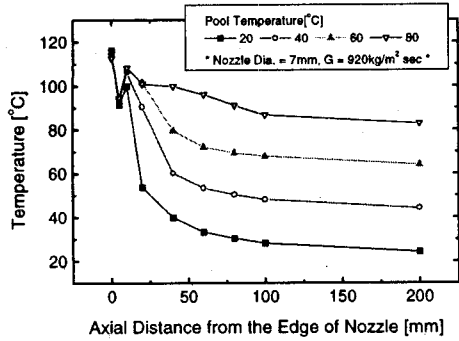


Fig. 6 Axial Temp. Distribution of Steam Jet

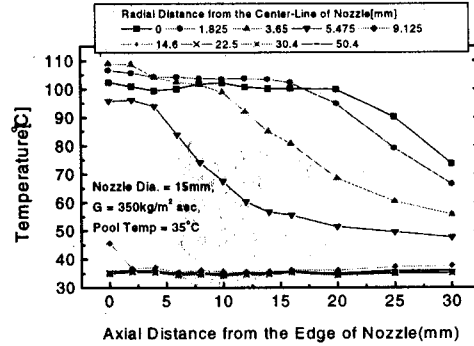


Fig. 7 Variation of Axial Temp. Distribution

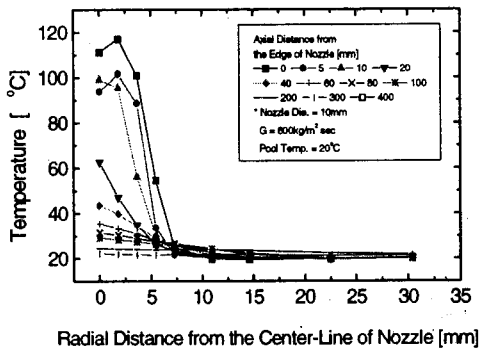


Fig. 8 Variation of Radial Temp. Distribution

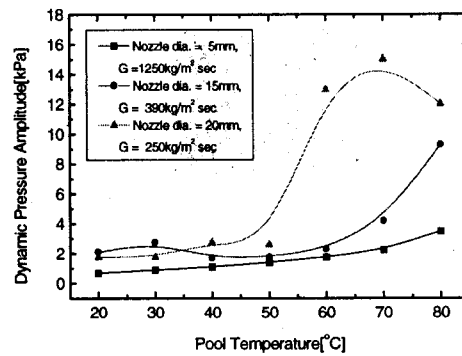


Fig. 9 Dynamic Pressure Amplitude

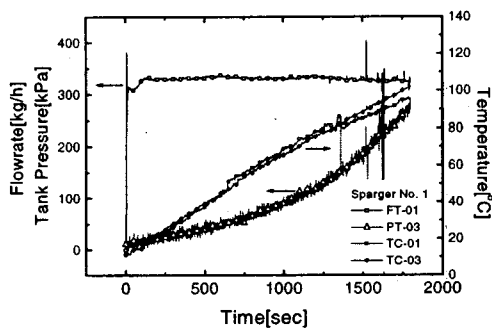


Fig. 10 Test Results of SP-1
($\dot{m} = 320\text{kg/hr}$)

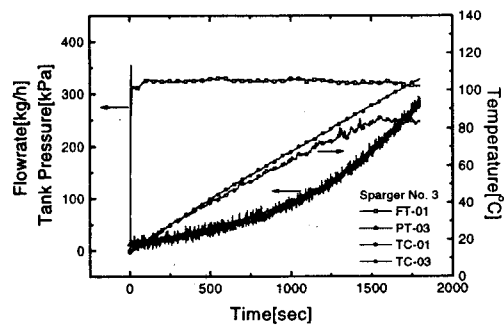


Fig. 11 Test Results of SP-3
($\dot{m} = 320\text{kg/hr}$)