

증기 제트 응축현상에서의 응축하중에 대한 실험적 연구

박춘경, 조석, 송철화, 양선규, 천세영, 정문기

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150

요약

증기 제트 응축에서 발생하는 응축하중을 실험적으로 고찰하였다. 네 가지 서로 다른 직경의 노즐 (5, 10, 15, 20 mm) 과 증기분사기를 응축실험에 사용하였으며, 증기 질량유속과 물 온도를 변화하면서 동압을 측정하였다. 실험결과에 의하면 압력파의 진폭은 노즐 직경이 작을수록 작았다. 한편 압력파의 진폭은 일반적으로 물온도가 증가할수록 증가하나 물온도가 어느 한도 이상으로 증가하면 오히려 감소하는 경향을 보였다. 그러나 물온도가 아주 높고 증기 질량유속이 큰 경우에는 불안정한 압력파가 발생할 가능성이 관찰되었다.

1. 서론

고압의 증기가 찬 물과 직접 접촉하여 냉각되는 직접접촉 응축 (Direct Contact Condensation: DCC) 현상은 복잡한 기기 없이 고온의 증기를 효과적으로 냉각시키는 경제적인 열전달기구이다. 따라서 이 현상은 여러 산업시설에 이용되고 있으며, BWR 을 비롯한 원자력발전소에서도 증기나 고온의 액체를 냉각시키는 데 사용되고 있다.

일반적으로 고온의 증기가 저온의 물과 접촉할 때 물온도가 해당 포화온도보다 많이 적은 경우 (과냉각도가 큰 경우) 직접접촉에 의한 응축현상은 매우 안정적으로 발생하며 따라서 수력적 하중은 매우 적다 [1]. 그러나 과냉각도가 적은 경우 증기가 물로 즉각적으로 응축되지 못하여 진동하거나 증기 Bubble 이 붕괴되는 경우에는 극심한 압력파를 발생시킬 수 있다. 이러한 압력파는 증기분사기 자체나 물속에 존재하는 구조물, 또는 물을 수용하는 용기 자체를 파괴시킬 수도 있다. 예로 독일의 Würgassen 발전소에서 발생한 직접접촉 응축 현상에 의한 압력파는 격납용기 일부를 파손시켜 냉각재 일부를 방출시키기도 하였다 [2].

이와 같은 이유로 미국 NRC 는 증기를 분사하는 증기분사기에서의 증기 질량유속과 물 온도를 제한하는 설계기준을 NUREG-0783 [2] 에 제시하였다. 그러나 이 기준은 특정 Hole Pattern 과 일치하게 제작한 증기분사기에 국한되며 이 Hole Pattern 과 일치하지 않은 증기 분사기에 대하여는 이 기준을 적용할 수 없음을 명시하고 있다. 한편 한국은 차세대 원자로에 IRWST 를 도입하고 이 탱크에 증기분사기를 설치할 예정이다. 이 발전소에서의 증기

분사기를 통한 증기 질량유속 및 압력은 BWR 발전소에서의 그들보다 더 클 것으로 예상된다. 또한 증기분사기에서의 Hole Pattern 도, 증기 질량유속 범위가 BWR 가 차이가 나기 때문에, 미국 NRC 가 명시한 Hole Pattern 과 다른 것을 사용하여야 될지도 모른다. 따라서 우리 발전소 조건에 합당한 증기분사기 개발이 요구되며, 특히 압력과 진폭이 최소화된 Hole Pattern 의 개발이 필요하다.

한국원자력연구소에서는 최적 증기분사기를 개발하고 감압계통 설계자료를 생산하기 위하여 Blowdown and Condensation (B&C) Loop 를 건설하였고 [3] 이 시설에서 증기응축실험을 수행하고 있다. 이 논문에서는 이 시설에서 이미 수행된 증기응축실험에서의 결과를 동압력 하중의 입장에서 기술한다.

2. 실험 개요

증기 응축실험은 B&C Loop 에서 수행되고 있다. 이 시설은 원자력발전소의 가압기, 감압계통, 및 IRWST 를 모의한 실험시설로 원자력발전소의 운전조건과 같은 조건으로 운전된다. 이 시설에는 압력, 수위, 온도등을 계측할 수 있는 계측기와 DCC 시 발생하는 압력파를 측정할 수 있는 동압계가 여러 곳에 설치되어 있다. 한편 이 시설에는 저압의 증기를 이용한 각종 실험을 수행할 수 있도록 저압용 증기발생기 (300 kW, 1.0 MPa) 와 소형 Quench Tank 가 본 시설에 부가하여 설치되어 있다 (그림 1).

지금까지의 증기응축실험에는 4 가지 직경 (5, 10, 15, 20 ϕ) 의 단일노즐과 직경 5 mm 인 구멍이 7 개 뚫린 I 형 증기분사기가 사용되었으며, 주 실험 인자는 탱크의 물온도와 증기 유량이다. 소형 및 대형 Quench Tank 에는 시각적 관찰을 위한 관찰창이 설치되어 있으며 이를 통하여 응축현상을 관찰 및 촬영할 수 있다. 탱크에는 물 온도와 수위, 그리고 동압을 측정하는 계측기가 부착되었으며, 노즐이나 증기분사기는 탱크내에 적당한 곳에 설치될 수 있도록 장치가 설계되어 있다. 실험시 증기 유량은 Vortex 유량계로 측정되며, 실제 유량은 일정체적방법으로 보정한다 [4]. 유량계와 노즐 사이에는 증기의 온도 및 압력을 측정하기 위한 측정기가 설치되어 있으며, 탱크는 대기와 개방되어 있다 (그림 2).

3. 실험 결과 및 토론

단일 노즐은 소형 Quench Tank 중앙부에 설치되었으며 노즐의 잠김 깊이는 30 cm 로 고정되었다. 또한 동압측정기는 노즐과 일직선상에 설치되었으며 그 거리는 75 cm 이었다. 단일 노즐에 대한 실험시 탱크내 물의 온도는 최저 20 °C 에서 최대 98 °C 까지 변화시켰고, 직경이 작은 경우 (5 mm) 고 증기 질량유속 (780 kg/m²-s 이상) 으로 실험이 수행되었으며, 직경이 큰 경우는 (20 mm) 증기발생기 용량 때문에 저 증기 질량유속 (250 kg/m²-s 이하) 으로 실험이 수행되었다.

그림 3 은 직경이 5 mm 인 노즐에서 증기 질량유속을 990 kg/m²-s 로 고정하였을 때 측정된 동압력 변화를 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 동압력은 물온도가 60 °C 까

지 증가하여도 그 진폭이 별로 증가하지 않고 있다. 그러나 물온도가 80 °C 가 되면 진폭이 급격히 증가하며, 그후는 물온도가 증가하여도 진폭은 감소하기 시작하고 95 °C 에서는 진폭이 아주 작은 안정된 응축현상을 보여준다. 이와 같은 현상은 직경이 다른 경우에서도, 비록 물온도와 증기 질량유속은 약간씩 차이가 나지만, 비슷하게 발생하고 있다. Chan 은 이와 같이 진폭이 물온도의 증가와 함께 증가하다가 어느 온도 이상에서는 오히려 진폭이 감소하는 현상을 목격한 바 있다 [5]. 그러나 최대 진폭과 그 진폭이 발생한 온도는 직경에 따라 서로 달랐다.

이러한 현상은 또한 B&C Loop 에서의 증기분사기 실험에서도 목격되었다. 증기분사기는 대형 Quench Tank 중앙에 설치되었으며 잠김 깊이는 100 cm 이다. 그림 4 는 Quench Tank 하부에서 측정된 동압 진폭을 보여주고 있다. 응축에 의한 진폭은, 비록 증기 질량유속에 따라 변화는 있지만, 물온도가 60 °C 까지는 아주 적다. 그러나 70 °C 부터는 진폭이 증가하여 증기 질량유속에 따라 80 내지 90 °C 에 최대값을 기록한 후 급감소하여 95 °C 에는 진폭이 저온의 경우와 비교될 정도로 감소하고 있다.

그림 5 는 4 가지 직경의 단일 노즐을 통한 증기응축시 측정된 진폭을 물온도 및 증기 질량유속의 함수로 표현한 그림이다. 직경이 5 mm 인 경우 진폭은 물온도가 60 °C 보다 커지면, 증기 질량유속과 상관 없이, 급격히 증가한다. 이렇게 진폭이 비선형적으로 증가하는 온도 및 증기 질량유속은 증기분사기 설계에서 매우 주요한 인자이다. 즉 이러한 조건은 증기응축현상에서 Instability 가 발생할 수 있는 기준이 된다 [2]. 따라서 증기분사기 Hole Pattern 은 이러한 Instability 가 발생하지 않거나 또는 가능한 높은 온도 및 고 증기 질량 유속에서 이러한 Instability 가 발생하는 것이 바람직한 것이다.

직경이 10 mm 인 노즐에서 측정된 동압력 거동은 5 mm 노즐에서의 거동과 전반적으로 유사하다. 즉 그림에서 보는 바와 같이 진폭은 물온도가 80 °C 에서 최대를 기록하고 그 이후는 감소하고 있음을 알 수 있다. 그러나 직경이 10 mm 인 노즐에서는 진폭이 물온도가 40 °C 부터 증가하기 시작하며 최대 진폭도 5 mm 노즐보다 큰 것을 알 수 있다. 직경이 15 mm 인 노즐에서 측정된 동압력 진폭 거동은 5 mm 나 10 mm 노즐에서의 거동과 차이가 있다. 즉 진폭은 물온도의 영향을 상당히 받고 있으나 증기 질량유속에 따라 진폭 변동에 많은 차이가 나고 있다. 최대 진폭은 물온도 60 °C, 증기 질량유속 250 kg/m²-s 에서 발생하였으며 그 크기가 다른 노즐에 비하여 매우 컸다 (20 kPa). 한편 증기 질량유속이 150 kg/m²-s 인 경우 진폭은 온도와 상관없이 상당히 높은 수준을 (8 kPa) 유지하고 있으며, 고 증기 질량유속에서는 (350 kg/m²-s 이상) 직경이 10 mm 이하인 노즐에서의 응축거동과 유사한 거동이 목격되었다.

직경이 20 mm 인 노즐에서의 응축거동은 다른 크기의 노즐에서의 응축거동과 많은 차이가 있다. 그림 5 에서와 같이 진폭은 80 °C 까지는 물온도와 그리 큰 상관 없이 거의 일정한 값으로 유지되고 있다. 그러나 물온도가 90 °C 에서는 매우 큰 압력파가 발생하고 있다. 그림 6 은 물온도가 90 °C 일때의 동압력 변화로, 특히 증기 질량유속이 70 kg/m²-s 및 250 kg/m²-s 일 때 특이한 응축현상이 발생함을 보여주고 있다. 즉 저 증기 질량유속 (70

kg/m^2-s) 에서는 Chugging 과 유사한 현상이 발생하였으며, 상대적으로 고 증기 질량유속 ($250 kg/m^2-s$) 에서는 진폭이 매우 큰 ($24 kPa$) 응축이 주기적으로 발생하고 있다. 이 현상은 매우 큰 진폭을 유발하므로, 증기 질량유속과 물온도를 보다 세밀하게 구분하여 실험을 수행할 필요가 있다. 특히 $90^\circ C$ 이상에 대한 응축실험이 필요하다고 생각된다.

네 가지 서로 다른 직경의 노즐에 대한 응축실험 결과를 동압력 측면에서 비교하여 보면 직경이 작을수록 진폭이 작어진다는 사실을 알 수 있다. 이러한 결과는 기존의 연구결과 [5,6] 와 일치한다. 그러나 직경이 커질수록 진폭이 반드시 커지지는 않았다. 즉 $20 mm$ 노즐에서의 압력파 진폭은 $15 mm$ 노즐에서의 진폭보다 반드시 크지는 않으며, 특정 증기 질량유속에서는 $15 mm$ 노즐에서의 진폭이 훨씬 큰 것을 알 수 있다. 그러나 물온도가 $90^\circ C$ 이상에서는 $20 mm$ 노즐에서의 진폭이 $15 mm$ 노즐에서의 진폭보다 훨씬 큰 경우도 발생하고 있다.

압력파의 진폭과 증기 질량유속과의 관계는 일반적으로 명확하지 않다. 예로 특정 직경의 노즐에서의 압력파 진폭은 특정한 증기 질량유속에서 최대치를 갖으며 증기 질량유속이 크다고 반드시 진폭이 증가하지는 않는다. 이러한 현상은 응축현상에서의 Flow Regime 이 증기 질량유속과 온도에 따라 달라지기 때문에 발생하는 것으로 추측된다. 따라서 각각의 노즐에 대한 세밀한 Flow Regime Map 을 구축하는 작업이 우선적으로 수행되어야 할 필요가 있다.

4. 결론

직경이 서로 다른 4 가지 노즐에서의 증기응축현상을 물온도 및 증기 질량유속을 변화하면서 조사하였다. 증기 질량유속의 범위가 한정되었고 물온도 변화가 세분화되지 않은 조건에서 실험이 수행되었지만 대체적인 증기응축 거동은 파악되었다. 이 연구에서 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. 같은 물온도 조건에서 노즐의 직경이 작을수록 응축은 안정적으로 발생하며 압력파의 진폭이 적다.
2. 최대의 진폭을 발생시키는 물 온도는 직경의 크기와 증기 질량유속에 따라 변한다.
3. 직경이 아주 커지고 물온도가 포화온도에 가까워지면 불안정한 응축현상이 발생할 가능성이 커진다.
4. 노즐 크기에 따라 압력파의 거동이 달라지기 때문에 각각의 노즐 직경에 따른 Flow Regime Map 의 구축이 최적 Hole Pattern 을 개발하기 위하여 필요하다.

References

1. 김연식, “과냉각수에 분사된 증기제트의 응축에 관한 연구,” 박사학위논문, KAIST, 1996
2. USNRC, “Suppression Pool Temperature Limits for BWR Containments,” NUREG-0783, 1981
3. 박춘경 외, “고압증기방출 및 응축 실험장치의 구축,” KAERI/TR-941/98, 1998

4. 송철화 외, "원자로 배수탱크내의 열수력현상 실험," KAERI/TR-961/98, 1998
5. C.K. Chan, "Dynamic Pressure Pulse in Steam Jet Condensation," 6th International Heat Transfer Conference, pp. 395-399, 1978
6. M.E. Simpson and C.K. Chan, "Hydrodynamics of a Sonic Vapor Jet in Subcooled Liquid," J. Heat Transfer, Vol. 104, pp. 271-278, 1982

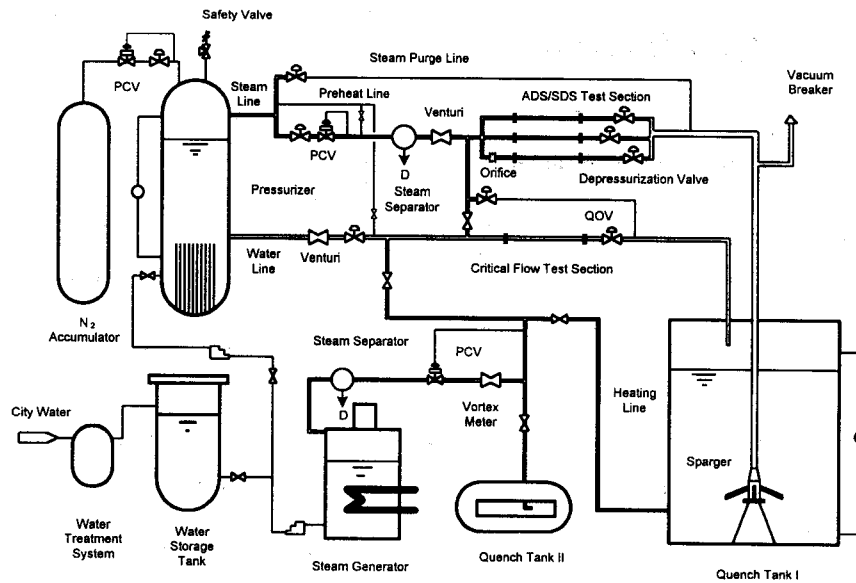


Fig. 1 Schematic Diagram of Blowdown and Condensation (B&C) Loop

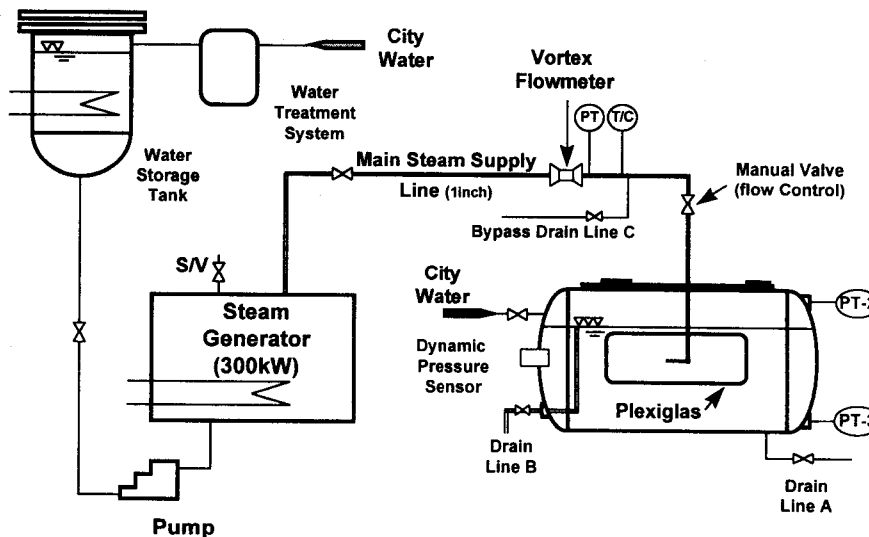


Fig. 2 Schematic Diagram of Steam Jet Condensation Experimental Facility

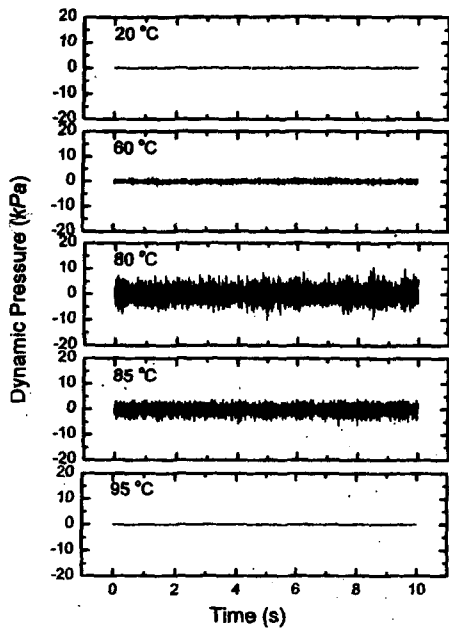


Fig. 3 Dynamic Pressure Variation in the 5 mm Diameter Nozzle

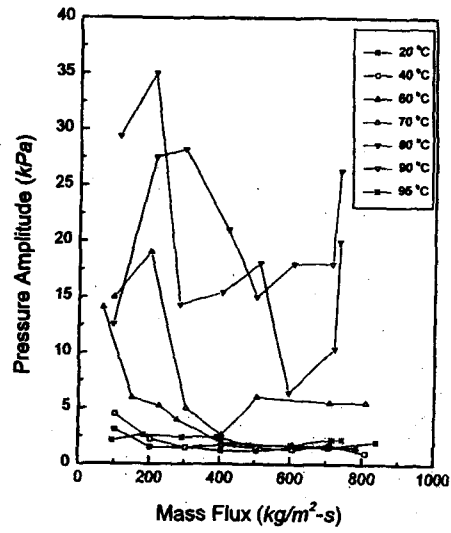


Fig. 4 Pressure Amplitude vs. Steam Mass Flux in the Sparger

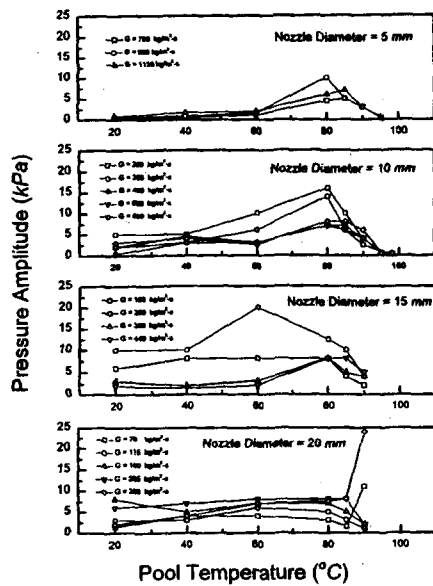


Fig. 5 Pressure Amplitude vs. Pool Temperature in Four Different Diameter Nozzles

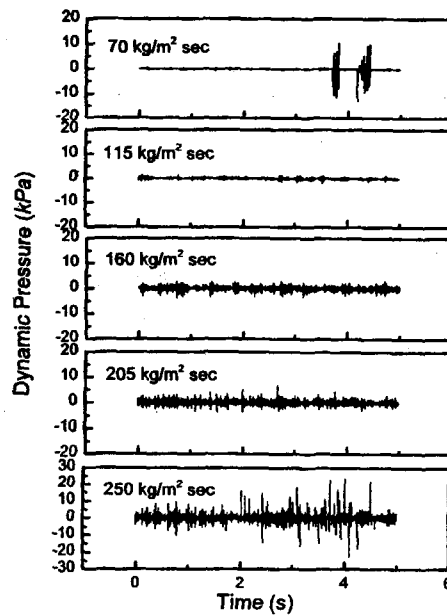


Fig. 6 Dynamic Pressure Variation in the 20 mm Diameter Nozzle