

반구형 간극에서의 비등 가시화 실험

정지환, 이성재, 김종환, 김상백

한국원자력연구소

요 약

반구형 간극에서의 비등시 이상 유체의 유동 가시화 실험을 수행하였다. 가시화를 위해 투명한 유리로 제작한 외부 용기는 내부의 가열 용기와 1mm 간격을 이루도록 하였으나 외부 용기가 완전한 반구 형태를 이루지 못하여 간극의 크기가 균일하지 못하였다. 열속이 높아짐에 따라 간극이 좁은 부분에서는 밖으로 빠져 나오려는 증기와 상부의 물이 역류유동제한 현상을 일으켜 물이 공급되지 못하였고 간극이 큰 부분에서는 물이 다수의 유로를 형성하며 증기와 분리되어 간극 내부로 공급되었다. CCFL 을 일으켜 물이 공급되지 못한 부분에서는 히터 표면이 건조되어 국부적인 CHF (Critical Heat Flux) 가 발생하였다.

1. 개요

1979년 미국의 TMI-2 원자력발전소는 원자로 노심이 용융되는 중대사고를 일으켰으나 원자로 압력용기는 손상 받지 않았다. 기존의 중대사고 해석 코드 들의 예측과 달리 원자로 압력용기가 중대사고에도 건전성을 유지한 데에는 지금까지 생각하지 못했던 냉각 기구가 존재한다는 것을 의미한다. 노심용융물이 충분히 냉각되도록 작용을 한 냉각 기구로서 세 가지 유형의 냉각 기구를 생각할 수 있다. 첫째는 노심용융물의 열이 압력용기에 전달되어 압력용기가 늘어나거나 혹은 용융물이 냉각되면서 수축함으로써 노심용융물과 압력용기 사이에 간극이 형성되고 이 간극을 통하여 물이 공급되어 냉각되는 경우이다. 둘째는 용융물이 고화되면서 그 사이에 크랙(crack)이 형성되고 이 크랙은 냉각수 유입로의 역할을 함으로써 용융물이 냉각되는 경우이다. 셋째는 용융물이 고화될 때 부피 수축이 일어나는데 상부 표면이 함몰되는 형태를 이룸으로써 열전달 면적이 증가하는 효과를 보는 경우이다. 이 세가지 유형의 열전달 기구는 가정일 뿐 TMI-2 원자로 사고시 실제로 어느 기구가 얼마 만큼 용융물 냉각에 기여했는 지는 아직까지 밝혀지지 않았다. Rempe et al.[1] 은 대략적으로 계산하여 고화된 용융물과 압력용기 사이에 형성된 간극을 통한 냉각 효과가 이 중 가장 크게 기여했을 것이라고 평가하였다. 고화된 용융물과 압력용기 사이에 형성된 간극을 통한 냉각기구는 Henry 와 Dube[2]에 의해서도 제시되었으며 MAAP-4 코드의 원자로용기 냉각기구 해석에 사용되고 있다. 간극을 통한 잔열 제거가 효과적이기 위해서는 간극을 통해서 냉각수가 계속 공급되고 또한 냉각수 비등이 지속적으로 유지되어야 한다. 간극을 통해 제거할 수 있는 열량의 최대치가 임계열유속(CHF) 이므로 간극에서의 냉각 가능성을 평가하기 위해서는 일차적으로 간극에서의 CHF에 대한 연구가 필요하다.

Kutateladze[3]는 CHF 가 수력학적 현상(hydrodynamic phenomena) 이라고 생각하였고 이 생각은 현재 널리 받아들여지고 있다. 따라서 CHF 현상을 이해하고 실험식을 개발할 때 대상 계통에서 일어나는 수력학적 현상을 이해하는 것이 필요하다. 현재까지 발표된 문헌에서 반구형

간극에서의 CHF 에 관한 자료는 찾을 수 없으며 이러한 구조에서 일어나는 비등 현상 그리고 CHF 를 일으키는 기구 등을 연구한 문헌은 없었다. 반구형 간극과 유사한 형태로서 Sudo & Kaminaga [4] 는 직사각형 유로에서, Chang & Yao[5] 는 환형관에서 그리고 Monde et al.[6] 과 Katto & Kosho [7]는 원판 사이의 간극에서 CHF 실험을 수행하였다. 따라서 본 실험에서는 반구형 간극에서 일어나는 이상 유체의 거동을 관찰하여 CHF 를 일으키는 구동 기구가 무엇인지를 밝히는 것을 목적으로 하였다. 이를 위하여 반구형 히터와 투명한 파이렉스 글라스로 반구형 용기를 제작하여 가시화 실험을 수행하였다.

2. 실험 장치 및 수행 절차

그림 1은 실험 장치 개략도를 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 실험 장치는 반구형 히터, 히터 출력 제어용 SCR, 히터 출력 검출을 위한 전류/전압계, 반구형 투명 용기, 열전대 측정용 기판을 내장한 컴퓨터 그리고 지지대 등으로 구성되어 있다. 또한 반구형 간극에서 일어나는 이상유체의 거동을 촬영하기 위한 조명, 반사 거울 및 비디오 카메라가 설치되어 있다. 파이렉스 글라스로 만든 투명 용기는 내부의 히터 반구와 1mm 간극을 형성하도록 제작하였으나 약간의 공차가 있어서 균일한 두께의 간극을 만들지는 못했다. 그림 2는 히터를 포함한 실험부를 자세히 보여준다. 반구형 히터는 두께 20mm, 외경 238mm 의 Copper 용기 안에 정격 출력 6KW 의 히터를 두고 70° C 에서 녹는 Wood's metal 을 채웠다. 본 실험 장치에는 적은 체적에 큰 열용량을 가진 히터를 이용해야 한다. 히터는 단위체적 당 발열량이 크므로 냉각이 제대로 이루어지지 않으면 과열로 인하여 열선이 녹게 된다. 이러한 문제를 해소하기 위하여 열전달이 매우 잘되는 Wood's metal 을 열전달 매체로 이용하기로 하였다. CHF 를 감지하고 열속을 측정하기 위해 구리 용기 내벽면을 따라 4 곳에 K-형 열전대(0.5mm) 쌍을 설치하고 세 곳에 단일 열전대를 설치하였다. 이들의 위치는 그림 3 에 나타나 있다. 열전대는 Keithley 사의 PC 용 DAS-TC 카드를 이용하여 5Hz 속도로 측정하여 PC 화면에 보이고 1초 당 1회 씩 기록하였다. 측정부의 아래쪽을 가시화하기 위해 거울을 45° 로 설치하고 삼성전자의 Hi-8 가정용 비디오 카메라로 촬영하였다.

실험은 예정된 출력에 히터를 조절한 후 계통이 정상 상태에 도달할 때까지 기다린다. 이 후 히터 출력을 계획된 만큼 높여 앞의 과정을 반복한다. 실험을 1 회 수행하기 위해서는 4 시간 이상의 시간이 소요된다. 본 실험 장치는 개방형이어서 기화된 증기가 대기중으로 배출된다. 따라서 기화되어 사라진 양 만큼의 물을 계속적으로 공급해서 수위를 일정하게 유지시켜야 한다. 이를 위해 반구형 히터 중심축에 위치한 열선 및 열전대 보호관 바깥 면에 급수관을 부착하여 증류수를 연속적으로 공급하였다. 히터 출력과 이상유체 유동이 정상 상태에 이르면 비디오 카메라로 2분씩 촬영하였고 온도는 실험 시작부터 끝까지 기록하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

그림 4-6 은 히터 출력이 2.9KW, 4.2KW, 5.0KW 일 때 반구형 간극에서의 유동 형태를 보여준다. 히터 출력이 작을 때는 여러 개의 작은 증기 기포가 존재하나 출력이 커짐에 따라 기포의 크기가 커져서 넓은 기포로 존재한다. 그림에 나타난 기포 들이 차지하고 있는 부분은 그 면적이 넓을지라도 유동의 속도가 빨라 순식간에 물로 교체된다. 따라서 이 유동 형태는 막비등처럼 보일지라도 유로 구조가 좁은 간극이기 때문에 나타나는 걸보기 현상일 뿐, 안정된 막비등 영역이 아니라 핵비등 영역으로 보아야 한다. 히터에 의해서 기화된 증기는 곡면을 따라 위로 흐르게 된다. 이때 아래로 들어오는 물과 역류유동(counter-current)을 이룬다. 이 역류유동은 격렬한 움직임을 보이는데, 이 영역은 히터 상단 즉,

히터가 직각으로 꺾인 부분까지 해당한다. 히터 상단의 간극에서는 들어오려는 물과 나가려는 증기가 서로 반대 방향으로 움직이므로 불규칙한 유로를 형성하여 각각 분리되어 흐르게 된다. 그림 7 이 이러한 모습을 보여준다. 각각의 유로는 매우 불규칙하게 임의의 위치에 형성되고 또 짧은 시간 안에 사라진다. 이러한 구조에서 증기의 속도가 특정 값보다 커지면 물이 더이상 간극을 뚫고 아래로 흐를 수 없게 되는 역류유동제한 현상(Counter-Current Flow Limit: CCFL)이 나타난다. 이러한 구조에서 발생하는 CCFL 은 entrance flooding[8] 이다. 이 경우 히터 상단 간극 주변의 조건이 CCFL 발생 여부를 결정하며 그 아래쪽의 반구형 유로에서는 영향을 미치지 않는다. CCFL 은 간극의 크기에도 영향을 받는데, 이 실험 장치에서는 간극의 크기가 작은 부분에서 먼저 일어나게 된다. 히터의 열출력이 일정 값에 이르면 간극이 큰 부분에서는 격렬한 역류유동 형태를 이루며 물이 아래로 공급되면서도 간극이 작은 부분에서는 국부적인 CCFL 현상이 나타난다. CCFL 이 나타나는 부분의 히터 상단 바로 아래는 국부적으로 dryout 되며 히터 출력이 커질 수록 그 영역이 넓어진다. 그림 8 은 히터 출력이 5.5KW 일 때 dryout 된 부분을 보여준다. 사진에 보이는 반구의 왼쪽 반은 물이 채워져 있고 오른쪽은 dryout 되어 있다.

본 실험에서는 육안 관찰 이외의 방법으로 CHF(dryout) 발생 여부를 판단하는 것이 어려웠다. 이것은 본 실험 장치에서 채택한 히터의 열전달 방식 때문이다. 열전달이 충분히 이루어지지 않을 경우 열선이 과열되어 손상되는 것을 막기 위하여, 열선에서 발생된 열을 Wood's metal 을 매체로 copper 반구에 전달토록 하였다. 용융된 Wood's metal 은 전도와 대류를 통하여 열을 전달 시키는데 대류에 의한 전달량 비율이 매우 컸던 것으로 판단된다. 그림 9 와 10 은 구리 반구에서 측정된 각 위치의 온도와 열속을 나타낸다. 온도는 구리 반구 바깥 표면으로부터 7mm 안쪽에서 측정된 값이고 열속은 이보다 10mm 더 안쪽에서 측정된 온도를 함께 이용하여 계산한 값이다. 출력 증가와 함께 온도와 열속이 증가하는 것이 보이지만 급격한 증가나 감소는 보이지 않는다. 이는 Wood's metal 이 자연 대류를 잘 일으키고 있기 때문이다. 즉, 구리 반구 안쪽면의 온도가 자연 대류 되는 Wood's metal 때문에 급격히 증가하지 않는 것이다. Wood's metal 의 자연 대류는 그림 10 에 보인 열속 측정 값으로부터 알 수 있다. 반구 바닥 근처에 위치한 1번 표면 열속이 약 20 KW/m² 인 반면 반구 상단 근처인 4번 표면 열속은 120 KW/m² 을 내고 있다. 표면 열속이 이처럼 위치에 따라 크게 변하는 것은 Wood's metal 의 자연 대류 때문이다. 그림 4-8 에서 열속대신 히터 출력을 변수로 나타낸 이유도 이 때문이다.

그림 9에 보인 구리 반구의 온도는 그림 3에 보인 열전대 2, 4, 6, 8 에서 측정된 값 들이다. 히터 출력은 t=0, 500, 1150, 2400, 4000, 5300 일 때 각각 2.9KW, 3.6KW, 4.2 KW, 4.6KW, 5.0 KW, 5.5 KW 로 변경되었다. 네 쌍의 열전대가 일렬로 설치된 부분이 간극이 좁아 국부적인 dryout을 보인 부분에 위치하였다. 온도는 열전대 2번에서 8번으로 감에따라 증가하였고, 히터 출력이 커짐에따라 높게 나타나고 또한 변화폭이 커졌다. 그러나 특이할만큼 변화폭이 커지거나 온도가 급격히 증가하는 지점은 보이지 않는다. t=500 일 때 8번 열전대의 온도가 급격히 증가한 것처럼 보이지만 이는 히터 출력이 큰 폭으로 증가하여 나타난 현상일 뿐이다. 그림 10에 보인 반구 표면에서의 열속 1, 2, 3, 4는 각각 열전대 쌍 (1,2), (3,4), (5,6), (7,8) 에서 측정된 온도로부터 구리 반구가 평판이라는 가정하에 계산한 값이다. 이 그림에서도 CHF 발생의 구분자로 쓰일 수 있는 갑작스런 열속 감소는 보이지 않는다. 그러나 4번 열속이 500초 부근에서 120 KW/m² 에 이른 후 크게 변하지 않고 있으며 3번 열속도 약 1300 초에 120 KW/m² 에 이른 후 증가하지 않는다. 이 때부터 각 열전대 쌍이 설치된 위치에서 구리반구 표면이 dryout 된 것으로 생각된다. 즉, 3.6KW 출력에서는 (7,8)번 열전대 쌍의 위치만 dryout 되었으나, 4.2KW

출력에서는 (7,8) 및 (5,6) 번 열전대 쌍의 위치 까지 dryout 된 지역이 넓어진 것이다. 그림 10 에는 본 실험과 유사한 간극에서 CHF 실험을 수행한 Monde et al.[6] 와 Chang & Yao[5] 의 실험식 값이 비교되었다. Monde et al.[6] 은 수직 평판 사이에 형성된 간극에서 실험을 수행하였고 Chang & Yao[5] 는 수직 환상관에서 실험을 수행하여 각각 아래의 관계식을 구하였다.

$$\frac{q_{CHF}''}{\rho_g h_{fg}} \cdot \sqrt{\frac{\rho_g}{gD\Delta\rho}} = \frac{0.38}{(1 + \sqrt{\rho_g / \rho_l})^2 \cdot (L/S)} \quad (1)$$

$$\frac{q_{CHF}''}{\rho_g h_{fg}} \cdot \sqrt{\frac{\rho_g^2}{g\sigma\Delta\rho}} = \frac{0.16}{1 + 6.7 \times 10^{-4} (\rho_l / \rho_g)^{0.6} (L/S)} \quad (2)$$

비교를 위하여 위 실험식에 본 실험장치의 규격을 대입하였다. Monde et al. 와 Chang & Yao 는 본 실험에서 측정된 120 KW/m² 보다 큰 174.2 KW/m² 와 195.7 KW/m² 를 각각 예측하고 있다.

4. 결론

원자로 압력용기와 노심 용융물 사이에 형성될 수 있는 간극을 모사하는 장치를 제작하여 실험을 수행하였다. 반구형 히터는 노심용융물을 대신하며 압력용기는 파이렉스 글라스로 모의하였다. 실험의 목적은 이 둘 사이에 형성된 반구형 간극에 존재하는 이상유체의 유동 형태를 관찰하고 비등 열전달의 한계인 CHF 가 일어날 때 주변의 물리적 현상을 가시화 함으로써 CHF 발생 기구를 이해하는 것이었다.

본 실험에서는 CHF 발생시 급격한 온도의 증가나 열속의 감소를 관찰할 수 없었다. 이는 실험에 사용된 히터를 채우고 있는 Wood's metal 이 자연 대류를 일으켜 히터 내부에서 열을 잘 분산시켰기 때문이다. 파이렉스 글라스로 만든 외부 용기의 단면은 완전한 원이 아니었기 때문에 히터와의 간격이 일정하지 않았다. 간극이 좁은 부분에서는 같은 히터 출력에도 다른 부분보다 먼저 역류유동제한 현상이 나타났고, 이 부근은 역류유동제한 현상 때문에 물이 공급되지 않아 구리반구 표면이 dryout 되었다. 즉, 이러한 구조의 장치에서는 CHF 가 역류유동제한 현상 때문에 시작되는 것임을 확인하였다.

5. 참고문헌

1. Rempe, J.L., Wolf, J.R., Chavez, S.A., Condie, K.G., Hagrman, D.L., Carmack, W.J., Investigation of the coolability of a continuous mass of relocated debris to a water-filled lower plenum, EG&G Idaho Report, EGG-RAAM-11145, 1994
2. Henry, R.E., Dube, D.A., Water in the RPV : a mechanism for cooling debris in the RPV lower head, OECD-CSNI specialists meeting on accident management, Stockholm, Sweden, 1994
3. Kutateladze, S.S., Heat transfer in condensation and boiling, USAEC Rep-tr 3770, 1952
4. Sudo, Y., Kaminaga, M., A CHF characteristic for downward flow in a narrow vertical rectangular channel heated from both sides, Int. J. Multiphase Flow 15(5), pp.755-766, 1989
5. Chang Y., Yao, S., Critical heat flux of narrow vertical annuli with closed bottoms, J. of Heat Transfer Vol.105, pp.192-195, 1983
6. Monde, M., Kusuda, H., Uehara, H., Critical heat transfer during natural convective boiling in vertical rectangular channels submerged in saturated liquid, J. Heat Transfer 104, pp.300-303, 1982
7. Katto, Y., Kosho, Y., Critical heat flux of saturated natural convection boiling in a space bounded by two horizontal co-axial disks and heated from below, Int. J. Multiphase Flow 5, pp.219-224, 1979
8. Jeong, J.H., No, H.C., Experimental study of the effect of pipe length and pipe-end geometry on flooding, Int. J. Multiphase Flow 22(3), pp.499-514, 1996

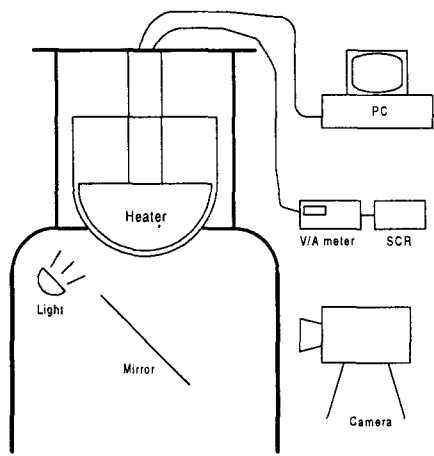


그림 1. 실험장치의 개략적 구성

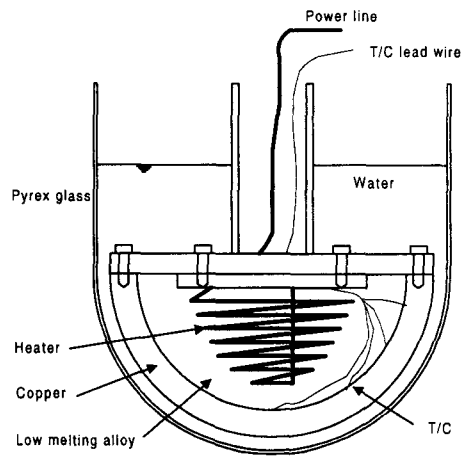


그림 2. Test section 상세도

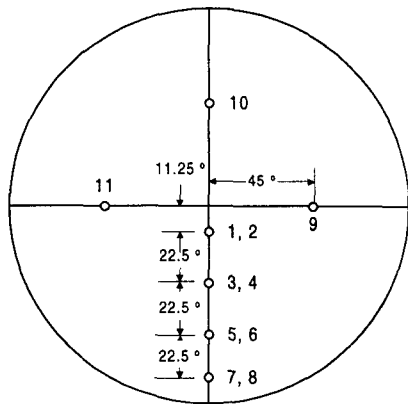


그림 3. 열전대 배치도



그림 4 q=2.9KW 일 때 유동 형태



그림 5 q=4.2KW 일 때 유동 형태



그림 6 q=5.0KW 일 때 유동 형태

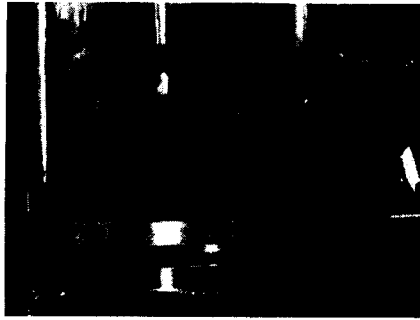


그림 7 히터 상단에서의 유동



그림 8 dryout 이 일어난 반구

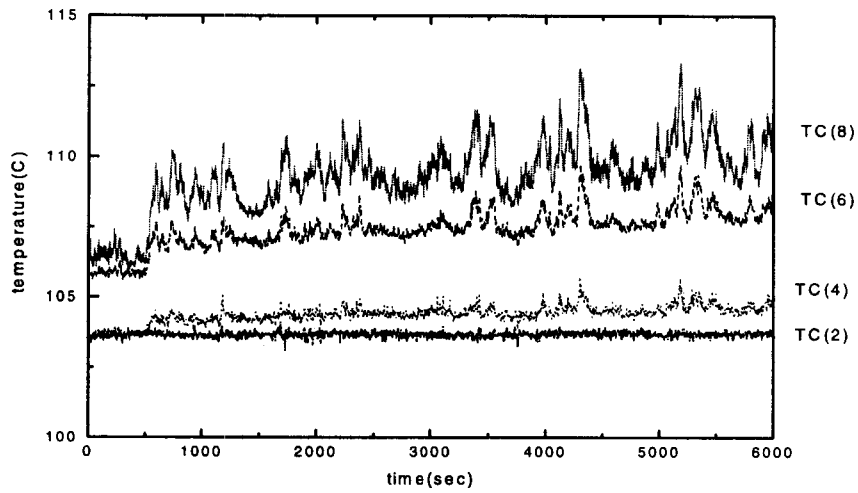


그림 9 반구 각 위치의 온도

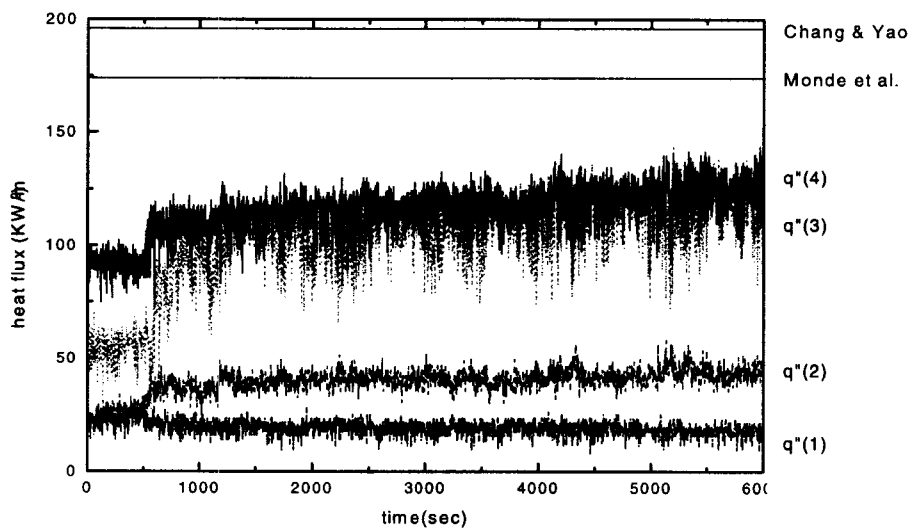


그림 10 반구 각 위치의 열속