

'97 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

울진 1,2호기 Cavity에 대한 노심용융물 고압분출 실험 연구

김상백, 박래준, 김희동
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

김도형, 이규정
고려대학교
서울시 성북구 안암동 5가 1번지

요약

프랑스 가압경수형 원전인 울진 1,2호기 cavity의 격납용기 직접가열에 대한 특성을 분석하기 위하여 노심용융물 고압분출 실험 연구를 수행하였다. 울진 1,2호기 격납건물은 국내의 Westinghouse와 CE형 원전과 달리 원자로용기 하부 cavity내 수평통로에 의한 출구가 없어 원자로용기 외곽의 환형통로를 통해 cavity와 격납건물 상부 대기와 직접 연결되어 있는 특성을 가지고 있다. 본 연구에서는 환형통로 면적, 파손 직경, 용융물 질량 등에 따라 원자로용기 압력을 변화시키면서 용융물을 물, 증기를 질소기체로 각각 모의하여 실험을 수행하였다. 실험결과, 노심용융물 고압분출에는 원자로용기 파손 직경이 많은 영향을 미치는 것으로 나타났고 환형통로 면적과 용융물 질량은 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 또한 환형통로 면적의 감소는 노심용융물 고압 분출시 cavity의 압력을 다소 상승시키는 결과를 보여주었다. 본 실험 연구에서 노심용융물 고압분출에 많은 영향을 미치지 않는 것으로 나타난 환형통로 면적에 대해서는 종합적으로 분석하는 추가 실험이 필요하다.

1. 개요

원전에서 핵연료가 용융하는 중대사고 발생시 원자로 냉각재 계통이 고압인 상태에서 원자로용기가 파손될 때 발생하는 노심용융물 고압분출(High Pressure Melt Ejection; HPME) 현상은 격납용기 상부 대기로 방출되는 노심용융물의 양을 결정하게 되므로 격납건물 압력상승에 직접적인 영향을 미치게 된다. 따라서 노심용융물 고압분출 현상이 격납용기 압력 및 온도상승에 미치는 영향을 평가하기 위해서는 사고조건 및 cavity 특성에 따라 격납용기 대기로 방출되는 노심용융물의 양을 정량화하는 것이 필요하며 이를 위하여 가동중 원전의 cavity 모형에 대한 많은 실험이 국내외에서 수행되어 왔다. 일반적으로 격납용기 대기로

방출되는 노심용융물의 양은 cavity의 기하학적 형상과 밀접한 연관 관계를 가지므로 cavity 설계특성에 따라서 용융물 방출 분율은 큰 차이를 보이기 때문에 서로 다른 cavity 모형에 대한 연구가 필요하다.

국내의 포항공과대학, 한국원자력연구소, 한국과학기술원은 노심용융물 고압분출시 국내 원전 cavity의 특성을 평가하기 위하여 Westinghouse형 원전인 고리 1호기와 영광 1,2호기 및 CE형 원전인 영광 3,4호기 cavity 모형에 대한 노심용융물 고압분출 실험을 수행하였다[1, 2]. 국내 프랑스 가압경수형 원전인 울진 1,2호기는 cavity 내에 수평통로가 없어 원자로용기 외부의 환형 통로를 통해 용융물의 방출이 이루어지는 경우로서 노심용융물 고압분출시 cavity의 특성을 평가하는 노력이 국내외적으로 아직 수행되지 않았다. 따라서 본 연구에서는 울진 1,2호기에 대하여 노심 용융물의 고압분출시 cavity 모형의 기하학적 인자가 노심용융물의 방출 분율에 미치는 영향을 규명하여 원전의 격납용기 직접가열 평가에 필요한 방출분율을 결정하고자 하였다. 이를 위하여 울진 1,2호기의 cavity 및 원자로 냉각재 계통의 전체 체적을 1/20의 선형비로 축소한 모형을 제작하여 실험을 수행하였다. 본 연구에서는 노심용융물 고압분출에 많은 영향을 미칠수 있는 원자로용기 외곽의 환형통로(annulus) 면적, 파손 직경, 상사 용융물 질량 등의 인자에 따라 원자로용기 압력을 변화시키면서 실험을 수행하였다.

2. 실험장치 및 수행절차

본 연구에서 수행한 실험의 실험장치 사진 및 cavity 모형을 보여주는 그림 1에서 보는 바와 같이 실험장치는 고압용기, 고압 배관, 질소 기체 공급 배관, 물 주입 용기 및 배관, 실험장치 지지대, cavity 모형, cavity 설치판과 lift기 등으로 구성하였다. 본 실험장치에서 가장 중요한 부분인 cavity는 실제 울진 1,2호기 원전의 cavity를 1/20 선형비로 축소하여 아크릴을 사용하여 제작하였으며, 원자로 냉각재 계통의 전체 체적을 고려하여 1/20 선형비로 축소하여 stainless steel 고압용기를 제작하였다. 본 실험에서는 노심용융물의 상사물로 물을 사용하였고, 증기로는 질소기체를 사용하여 cavity 내에서의 고압분출을 모의하였다.

본 실험에서의 주요 측정인자는 실험용기와 cavity에 설치한 PT(Pressure Transducer)로 측정되는 압력이었으며, 이들은 PC에서 Burr-Brown사 제품의 Visual Designer 프로그램을 이용하여 처리하고 저장하였다. 실험수행 시에는 환형통로와 공기 환기통로를 통하여 대기로 방출되는 상사 용융물을 구분하여 측정하기 위하여 공기 환기통로에 플라스틱 튜브와 통을 설치하였다. 또한 실험전과 실험후의 cavity와 플라스틱 튜브 및 통의 질량을 측정하여 용융물의 방출분율을 정확하게 계산하였다. 환형통로는 원자로용기 주변의 절연제 및 복잡한 구조로 불확실성이 상존하여 면적이 150 cm^2 과 75 cm^2 인 두 경우에 대하여 실험을 수행하였으며, 상사 용융물양(1kg, 1.5 kg)과 파손직경(10 mm, 20mm)에 따라 원자로용기 압력을 변화(0.2 Mpa부터 4.3 Mpa 까지)시키면서 총 137번의 실험을 수행하였다. 실험은 먼저 cavity와 플라스틱 튜브 및 통의 질량을 측정한후 실험용기에 장착하고 물 주입구를 이용하여 질량을 측정한 물을 주입하고 질소 가압 탱크를 이용하여 원자로용기를 일정 압력까지

가압하면서 준비를 완료한다. 실험은 가압된 용기의 솔레노이드 밸브를 개방하여 rupture disc를 터뜨리면서 실험을 수행한다. 실험 수행 후에는 cavity와 플라스틱 튜브 및 통을 실험용기와 분리하고 질량을 측정하여 cavity 및 환형통로와 공기 환기통로를 통하여 대기로 방출되는 분율을 계산한다. 또한 실험수행 과정은 Video 촬영을 하였고 고속 Video 카메라를 이용하여 cavity에서의 유동을 초당 1000 frame의 속도로 촬영하였다.

3. 실험결과 및 고찰

그림 2는 울진 1,2호기 원전의 원자로용기 외부 환형 통로 면적이 150 cm^2 , 상사 용융물 질량이 1.0 kg, 파손 직경이 20 mm 인 경우에 용융물 방출분율에 대한 실험결과를 보여주고 있다. 그림은 cavity에 나포된 분율 및 환형통로와 공기 환기통로를 통하여 대기로 방출되는 분율을 각각 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 원자로용기 압력이 0.5 MPa보다 낮으면 상사 용융물의 50 % 이상이 cavity에 나포되었으나 압력이 0.5 MPa보다 높으면 상사 용융물의 50 % 이상이 환형 통로를 통하여 대기로 방출된다. 그러나 원자로용기 압력이 증가하여도 공기 환기통로를 통하여 대기로 방출되는 상사 용융물의 양은 아주 작은 것으로 나타났다. 따라서 울진 원전의 노심용융물 고압분출 시에는 많은 노심용융물이 원자로용기 외곽의 환형 통로를 통하여 격납용기로 방출될 수 있다는 것을 규명하였다. 그림 3은 울진 1,2호기 원전의 환형 통로 면적이 150 cm^2 , 상사용융물 질량이 1.0 kg 일때 파손 직경이 변화함에 따라 cavity에 나포된 상사용융물 분율에 대한 실험결과를 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 파손 직경이 10 mm인 경우는 원자로용기 압력 증가에 따라 cavity에 나포된 상사 용융물이 거의 선형적으로 감소하였으나 파손 직경이 20 mm인 경우는 압력이 약 0.5 MPa 근처에서 cavity에 나포된 상사용융물 분율이 급격히 감소한 것으로 나타났다. 따라서 파손직경이 노심용융물 고압분출에 많은 영향을 미침을 알수 있다.

그림 4는 울진 1,2호기 원전의 환형 통로 면적이 150 cm^2 , 파손직경이 20 mm 일때 사용한 상사용융물 질량을 변화함에 따라 cavity에 나포된 상사 용융물 분율에 대한 실험결과를 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 상사 용융물 양을 1 kg과 1.5 kg을 사용한 경우 cavity에 나포된 상사용융물 분율은 거의 같게 나타나 노심용융물 고압분출에 노심용융물양이 미치는 영향이 미미함을 알 수 있다. 그림 5는 울진 1,2호기 원전의 파손직경이 20 mm, 상사용융물 질량이 1.5 kg일때 환형 통로 면적을 변화함에 따라 cavity에 나포된 상사용융물 분율에 대한 실험결과를 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 사용한 환형 통로 면적을 1/2로 축소하여도 cavity에 나포된 상사용융물 분율이 거의 같게 나타나 노심용융물 고압분출에 환형 통로 면적이 미치는 영향이 미미함을 알 수 있다. 그러나 환형 통로 면적을 1/2로 축소하면 노심용융물 고압분출이 발생할 때 cavity의 압력을 약간 증가시키고 노심용융물 방출시간을 조금 증가시키는 것으로 나타났다.

4. 결론 및 차후 연구과제

울진 원전의 cavity 및 원자로 냉각재 계통의 전체 체적을 1/20 선형비로 축소한 실험장치를 제작하여 노심용융물 고압분출 실험을 수행하였다. 본 연구에서는 원자로용기 외곽의 환형통로

면적, 파손 직경, 용융물 질량 등에 따라 원자로용기 압력을 변화시키면서 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 울진 원전의 노심용융물 고압분출시 노심용융물은 원자로용기 외곽의 환형 통로를 통하여 대부분 대기로 방출되었으며 공기 환기통로를 통하여 대기로 방출되는 양은 아주 작게 나타났다.
- Cavity내 노심용융물 고압분출의 실험인자로 원자로용기 파손 직경은 용융물 방출분율에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 그러나 용융물 양과 환형 통로 면적은 노심용융물 고압분출에 거의 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 특히 환형통로 면적의 변화에 따라 방출분율이 큰 차이가 없음은 기존의 수평통로가 있는 영광 1,2호기와 고리1,2호기 cavity 모형 실험결과와 차이가 남으로 cavity 모형 차이에 따라 방출 기구 차이를 시사해 준다.
- 본 실험 연구에서는 용융물로 물을 사용하여 실험하였기 때문에 실제 노심용융물과는 다소 차이가 있어 금속용융물을 사용하는 추가적인 실험이 필요하며 기존에 수행된 실험 결과들과 정량적으로 비교·분석하는 노력이 필요하다. 또한 본 연구에서 노심용융물 고압분출에 영향을 미치지 않는 것으로 나타난 환형통로 면적에 대해서는 종합적인 분석 실험이 더 필요하다.

참고문헌

1. M.H. Kim, C.Y. Chung, H.D. Kim and S.B. Kim, Experimental Study on Direct Containment Heat in Phenomena, The First Korea-Japan Joint Workshop on PSA, Nov. 30-Dec. 2, Seoul 1992
2. M.H. Chun, D.S. So, and C.S. Lee, A Parametric Study of the High Pressure Melt Ejection From Two Different Scale Reactor Cavity Models, Int. Comm. Heat Mass Transfer, Vol.18, p.619, 1991

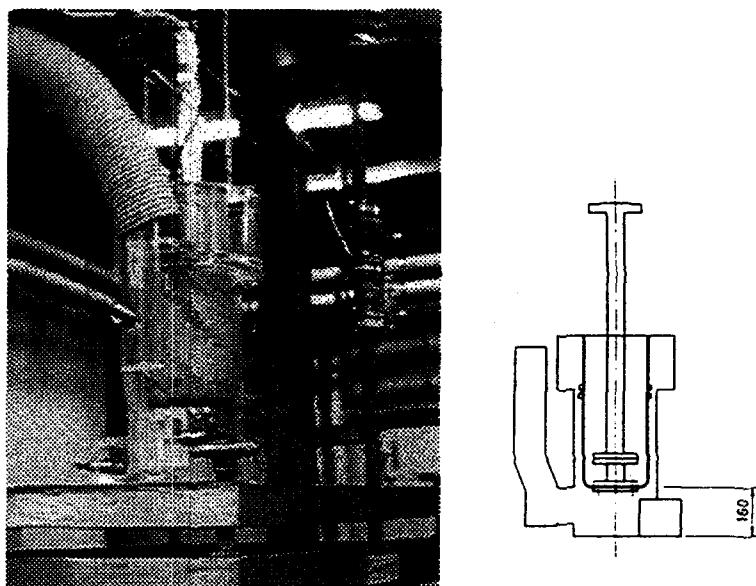


그림 1. 울진 1,2호기 노심용융물 고압분출 실험을 위한 실험장치 사진 및 Cavity 모형.

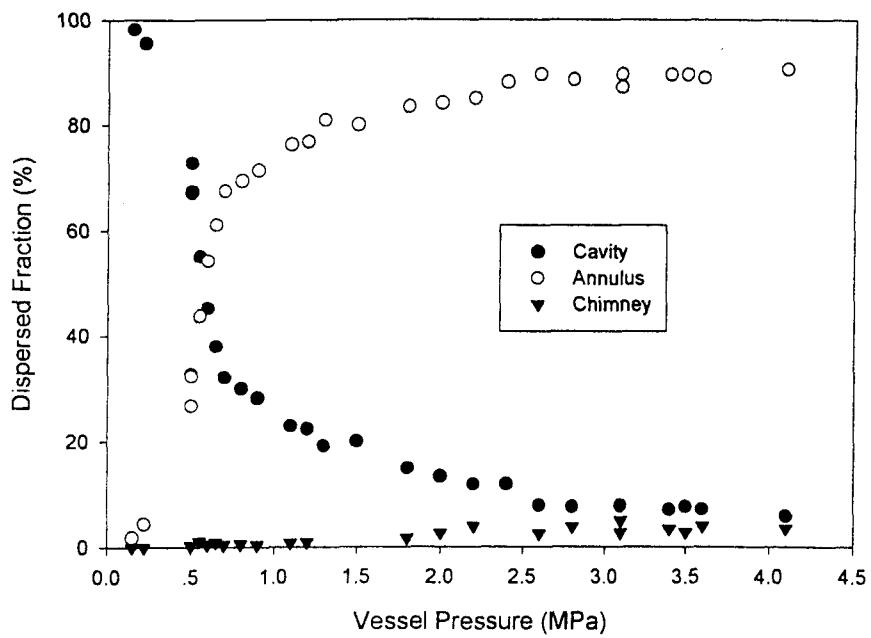


그림 2. 울진 1,2호기 원전 Cavity 모형에 대한 노심용용물 고압분출 실험결과
(파손직경 = 20 mm, 상사용용물 양 = 1 kg, 환형통로면적 = 150 cm²).

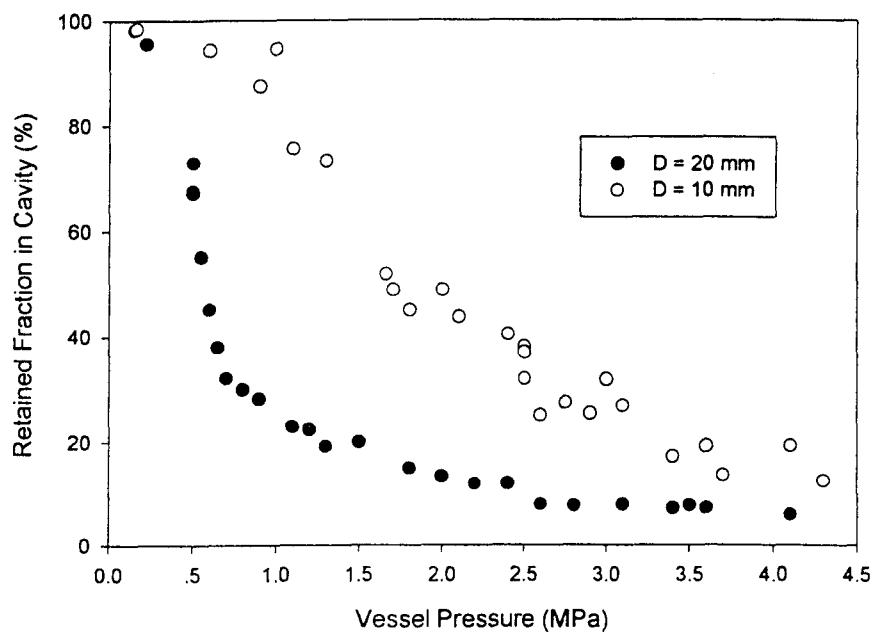


그림 3. 파손직경 변화에 따라 Cavity에 나포된 상사용용물 분율에 대한 실험결과
(상사용용물 양 = 1 kg, 환형통로면적 = 150 cm²).

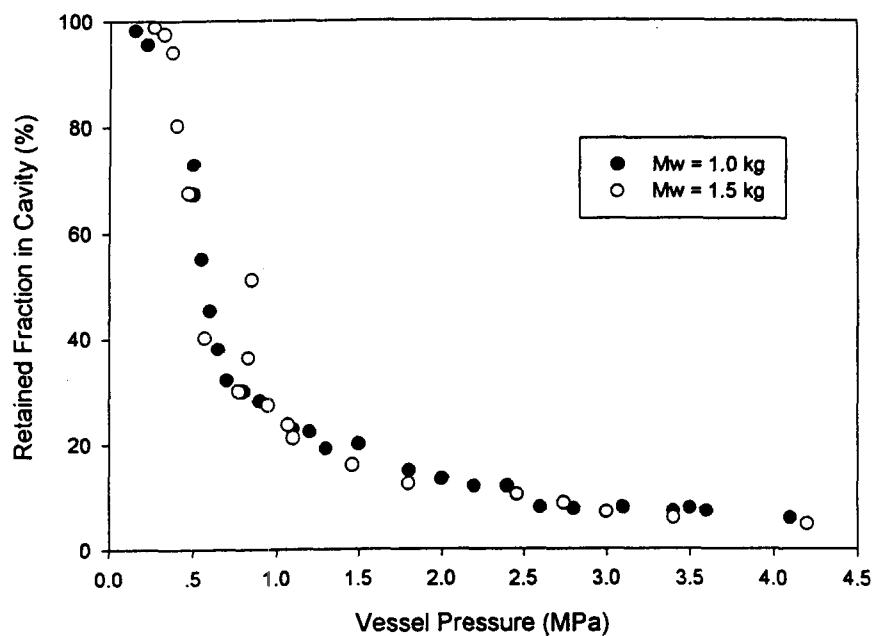


그림 4. 상사용용물 양 변화에 따라 Cavity에 나포된 상사용용물 분율에 대한 실험결과
(파손 직경 = 20 mm, 환형통로면적 = 150 cm^2).

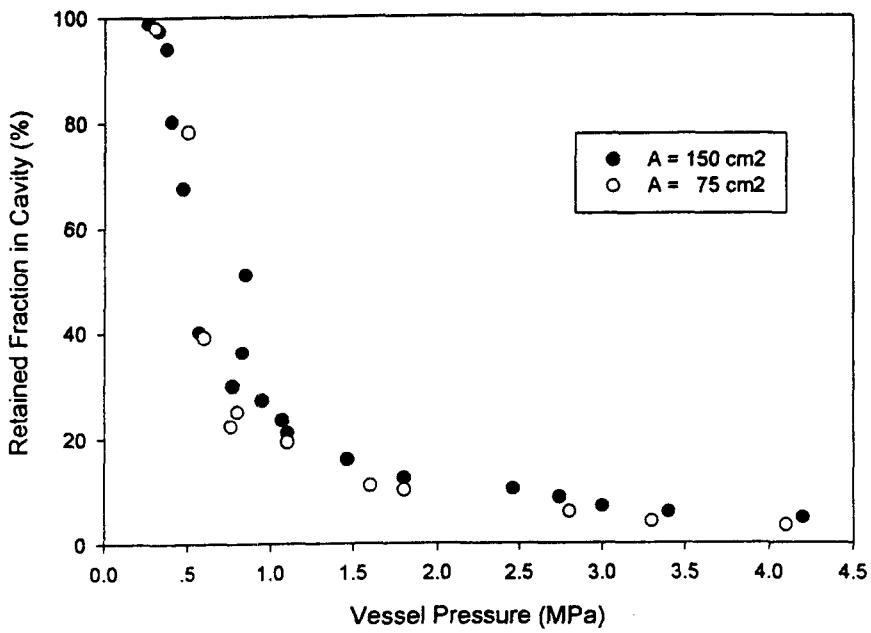


그림 5. 환형통로면적 변화에 따른 Cavity에 나포된 상사용용물 분율에 대한 실험결과
(파손 직경 = 20 mm, 상사용용물 양 = 1.5 kg).