

저온 용융 합금물을 이용한 울진 1,2호기 원전 캐비티에 대한 노심용융물 고압분출 실험 연구

박래준, 김상백, 김희동

한국원자력연구소

김찬수
서울대학교

이규정
고려대학교

요약

국내 프랑스 가압경수형 원전인 울진 1,2호기 캐비티의 격납건물 직접가열에 대한 특성을 분석하기 위하여 노심용융물 고압분출 실험을 수행하였다. 본 연구에서는 환형통로 면적과 파손 직경에 따라 원자로용기 압력을 변화시키면서 용융물을 저온 용융 합금물인 Wood's Metal, 증기를 질소기체로 각각 모의하여 실험을 수행하였으며, 실험결과는 물을 용융물 상사물로 사용한 전년도 실험결과[1]와 비교·분석하였다. 실험결과, 밀도가 물보다 큰 저온 용융 합금물을 사용한 경우는 물을 사용한 실험결과보다 밀도와 용융물의 벽면 고화고착 영향 때문에 격납건물로 방출되는 용융물 양이 작게 나타났다. 물을 상사물로 사용한 경우와 같이 노심용융물 고압분출에는 원자로 용기 파손직경이 많은 영향을 미치고 환형통로 면적은 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 노심용융물 고압분출 실험에 중요한 영향을 미치는 실험 상사물의 밀도와 용융물의 벽면 고화부착에 대해서는 종합적으로 분석하는 추가 연구가 필요하다.

1. 개요

원전에서 핵연료가 용융하는 중대사고 발생시 원자로 냉각재 계통이 고압인 상태에서 원자로용기가 파손될때 발생하는 노심용융물 고압분출(High Pressure Melt Ejection; HPME) 현상은 격납건물 상부 대기로 방출되는 노심용융물의 양을 결정하기 때문에 격납건물 압력상승에 직접적인 영향을 미치게 된다. 따라서 노심용융물 고압분출 현상이 격납건물 압력 및 온도상승에 미치는 영향을 평가하기 위해서는 사고조건 및 캐비티 특성에 따라 격납건물 대기로 방출되는 노심용융물의 양을 정량화하는 것이 필요하며, 이를 위하여 가동중 원전의 캐비티 모형에 대한 많은 실험이 국내외에서 수행되었다. 일반적으로 격납건물 대기로 방출되는 노심용융물의 양은 캐비티의 기하학적 형상과 밀접한 연관 관계를 가지므로 캐비티 설계특성에 따라서 용융물 방출 분율은 큰

차이를 보이기 때문에 서로 다른 캐비티 모형에 대한 연구가 필요하다.

국내의 포항공과대학, 한국원자력연구소, 한국과학기술원은 노심용융물 고압분출시 국내 원전 캐비티의 특성을 평가하기 위하여 **Westinghouse**형 원전인 고리 1호기와 영광 1,2호기 및 **CE**형 원전인 영광 3,4호기 캐비티 모형에 대한 노심용융물 고압분출 실험을 수행하였다[2, 3]. 국내 프랑스 가압경수형 원전인 울진 1,2호기는 캐비티 내에 수평통로가 없어 원자로용기 외곽의 환형 통로를 통해 용융물의 방출이 이루어질 수 있다. 한국원자력연구소는 울진 1,2호기 캐비티에 대하여 상사물로 물과 질소기체를 사용하여 노심용융물 고압분출 실험을 수행하였다. 그 결과 원자로용기 파손 직경은 용융물 방출분율에 큰 영향을 미치지만 환형통로 면적과 용융물 양은 거의 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서는 울진 1,2호기에 대하여 실제 노심용융물과 밀도가 비슷한 저온 용융 합금물인 **Wood's Metal**을 사용하여 노심용융물의 고압분출시 캐비티 모형의 기하학적 인자가 노심용융물의 방출 분율에 미치는 영향을 규명하여 원전의 격납건물 직접가열 평가에 필요한 방출분율을 결정하고자 하였다. 이를 위하여 울진 1,2호기 캐비티 및 원자로 냉각재 계통의 전체 체적을 1/20의 선형비로 축소하여 제작한 전년도 실험모형에서 저온용융 합금물과 질소를 이용하여 원자로 용기 파손면적과 환형통로 면적 변화에 따라 용기 내부압력을 변화시키면서 실험을 수행하였으며, 실험결과와 전년도의 물과 질소 기체를 사용하여 실험한 결과와 비교,분석하였다.

2. 실험장치 및 수행절차

울진 1,2호기 노심용융물 고압분출 실험을 수행하기 위한 실험장치 개략도를 그림1이 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 실험장치는 고압용기, 제어밸브, 고압탱크 및 배관, 질소기체 공급 배관, 용융물 주입 용기 및 배관, 실험장치 지지대, 울진 1,2호기 캐비티 모형, 캐비티를 설치하여 상,하부로 움직일 수 있는 **Lift**기 등으로 구성되어 전년도 실험장치와 거의 동일하다. 저온용융 합금물을 이용한 실험수행을 위하여 용융물 주입구와 용기에 **heating tape**를 설치하였으며, 저온용융 합금물을 용융할 수 있는 히터와 온도 측정 및 제어 장치를 추가로 설치하였다. 캐비티 모형은 울진 1,2호기 원전 캐비티를 1/20 선형비로 축소하여 아크릴로 제작하였으며, 고압용기를 원자로 냉각재 계통의 전체 체적을 고려하여 1/20 선형비로 축소하여 **stainless steel**로 제작하였다. 공기 환기통로에는 플라스틱 튜브와 배기통을 설치해 공기 환기통로를 통해 분출된 양을 측정할 수 있게 하였다.

본 실험에서는 노심용융물의 상사물로 용융온도가 **70°C**이고 밀도가 실제용융물과 비슷한 저온 용융 합금물인 **Wood's Metal**을 사용하였고, 용융물이 고화되지 않도록 용융물 주입구와 원자로용기 내부 온도를 **100°C** 이상으로 유지시켰다. 본 실험에서 주요 측정 인자인 압력은 **PT(Pressure Transducer)**로 측정하였고, 실험결과 처리장치는 **Visual Designer**를 사용하여 **PT**로 1초에 약 90번 정도 측정된 압력 결과를 **PC**에 저장하였다. 방출분율은 캐비티 모형과 플라스틱 튜브 및 배기통의 실험 전후 질량을 측정하여 계산하였다. 환형통로는 원자로 용기 주변의 복잡한 구조 때문에 불확실성이 상존하여 면적이 **150 cm²**와 **56 cm²**인 두 경우에 대해 실험을 수행하였고, 파손직경(**10**

mm, 20 mm)에 따라 원자로 용기의 압력을 변화시키면서 총 32회의 실험을 수행하였다.

실험은 먼저 캐비티와 플라스틱 튜브 및 배기통의 질량을 측정 후 실험용기에 장착하고 용융물 주입구를 통해 약 2 kg의 저온용융 합금물을 주입하고, 질소 가압 탱크를 이용하여 원자로용기를 일정압력까지 가압한다. 모든 준비가 끝난 후 가압용기의 솔레노이드 밸브를 개방하면서 실험을 수행하였다. 실험 수행 후에는 캐비티와 플라스틱 튜브 및 배기통을 실험용기와 분리하고 질량을 측정하여 캐비티 및 환형통로와 공기 환기통로를 통하여 대기로 방출되는 분율을 계산하였다.

3. 실험결과 및 고찰

그림 2는 울진 1, 2호기 원전의 원자로용기 외부 환형 통로 면적이 150 cm^2 , 파손직경이 20 mm인 경우의 방출분율에 대한 실험결과를 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 압력증가에 따라 환형통로를 통한 방출량이 거의 선형적으로 증가하고 공기 환기통로를 통하여 방출되는 양은 거의 없는 것으로 나타났다. 따라서 울진 원전의 고압분출시에는 대부분의 용융물이 원자로용기 외곽의 환형통로를 통하여 격납건물로 방출되게 된다. 그림 3은 외부 환형 통로 면적이 150 cm^2 , 파손직경이 20 mm인 경우에 용융 상사물로 물을 사용한 실험결과와 저온용융 합금물을 사용한 실험결과를 비교하여 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 물을 사용한 경우는 압력이 약 0.6 MPa에서 캐비티에 남은양이 급격히 줄어들고 있으나 저온용융합금물을 사용한 경우는 압력증가에 따라 거의 선형적으로 감소하는 것을 보여주고 있다. 이와 같은 실험결과의 차이는 실험상사물의 밀도와 용융물의 벽면 고화 부착 때문에 발생하였다.

그림 4는 외부 환형 통로 면적이 150 cm^2 일때 파손직경 변화에 따라 캐비티에 남은 상사용융물 분율에 대한 실험결과를 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 압력이 낮을 때는 큰 차이를 보이지 않으나 압력증가에 따라 많은 차이를 보여주고 있다. 즉, 파손직경이 클때 대부분의 용융물이 격납건물로 방출되게 된다. 그림 5는 파손직경이 20 mm일때 외부 환형 통로 면적이 변화에 따라 캐비티에 남은 용융물 분율에 대한 실험결과를 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 외부 환형통로 면적 감소는 실험결과에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타나 전년도의 물을 사용한 실험결과와 일치하였다.

4. 결론 및 차후 연구과제

울진 원전의 캐비티에 대한 노심용융물 고압분출 특성을 규명하기 위하여 저온 용융 합금물을 사용하여 실험을 수행하였다. 원자로용기 파손 직경과 원자로 용기 외곽의 환형통로 면적 변화에 따라 용기 압력을 변화시키면서 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

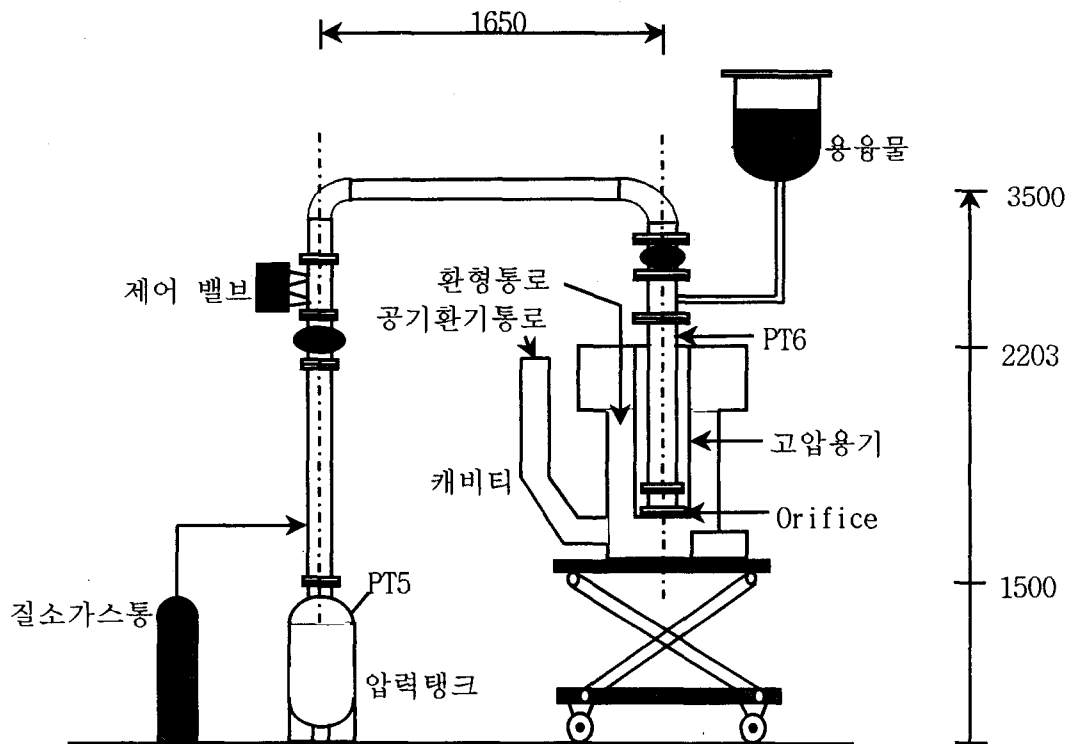
- 울진 원전의 고압분출시에는 대부분의 용융물이 원자로용기 외곽 환형통로를 통하여 격납건물로 방출되며, 공기 환기 통로를 통해 방출되는 양은 아주 작게 나타났다.
- 원자로용기 압력증가에 따른 방출분율을 같은 조건에서 비교했을 때 저온 용융 합금물을 사용한

실험결과가 밀도 및 용융물의 벽면 고화부착 때문에 물을 사용한 실험결과보다 캐비티에 나포되는 분율이 더 크게 나타났다.

- 노심용융물 고압분출에 원자로 용기 파손직경은 용융물 방출분율에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났으나 환형통로 면적은 노심용융물 고압분출에 거의 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.
- 본 실험에서 노심용융물 고압분출에 중요한 영향을 미치는 인자로 밝혀진 실험 상사물의 밀도와 용융물의 벽면 고화부착에 대해서는 종합적으로 분석하는 추가 연구가 필요하며, 노심용융물 고압분출에 영향을 미치지 않는 것으로 나타난 환형통로 면적에 대해서는 종합적인 분석 실험이 더 필요하다.

참고문헌

1. 김상백, 박래준, 김희동, 김도형, 이규정, 울진 1,2호기 Cavity에 대한 노심용융물 고압분출 실험 연구, '97 한국원자력학회 춘계학술발표회 논문집, pp. 569-574, 조선대학교, 1997년 5월 30-31일
2. M.H. Kim, C.Y. Chung, H.D. Kim and S.B. Kim, Experimental Study on Direct Containment Heating Phenomena, The First Korea-Japan Joint Workshop on PSA, Nov.30-Dec.2, Seoul 1992
3. 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



● : Expansion Joint

그림 1. 울진 원전 캐비티의 노심용융물 고압분출 실험을 위한 실험장치 개략도(단위 mm).

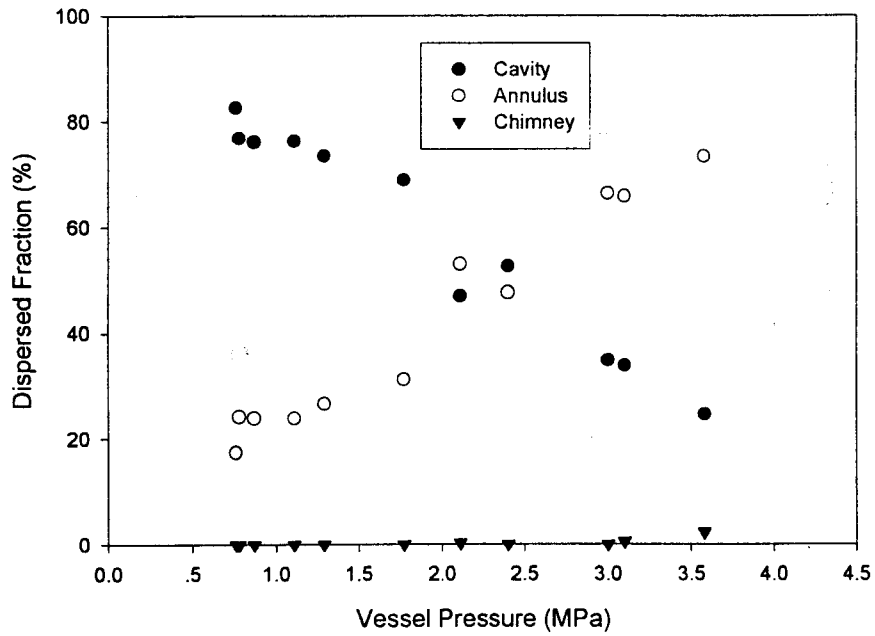


그림 2. 울진 1.2호기 원전 캐비티에 대한 노심용융물 고압분출 실험결과
(파손 직경 = 20 mm, 환형 통로면적 = 150 cm²).

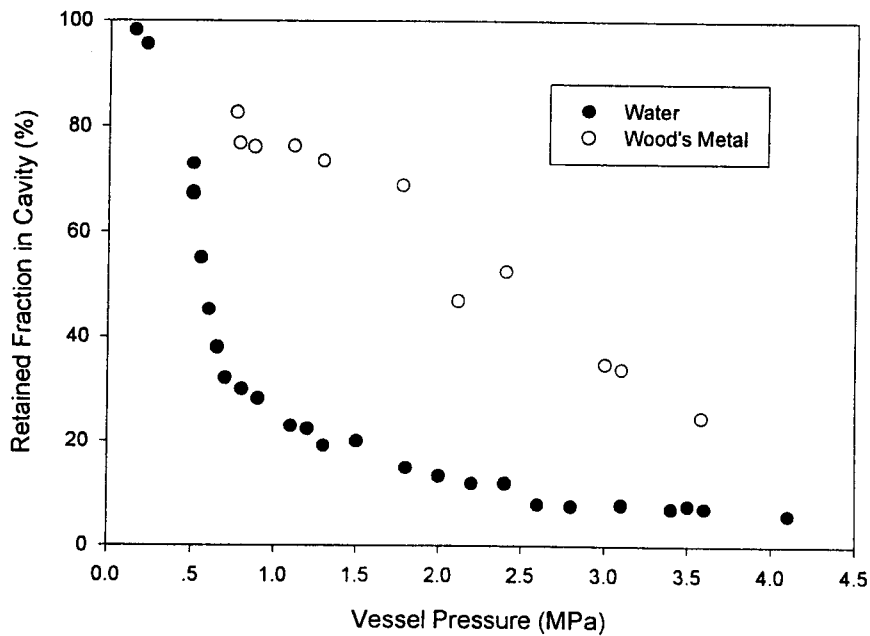


그림 3. 상사 용융물에 따라 캐비티에 나포된 용융물 비율
(파손 직경 = 20 mm, 환형 통로면적 = 150 cm²).

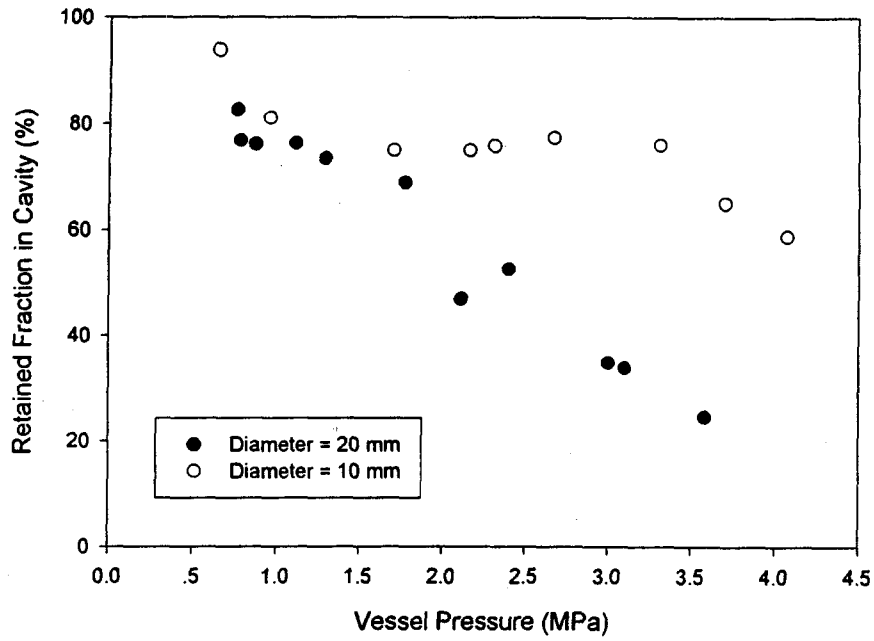


그림 4. 파손 직경에 따라 캐비티에 나포된 용융물 분율(환형 통로면적 = 150 cm²)

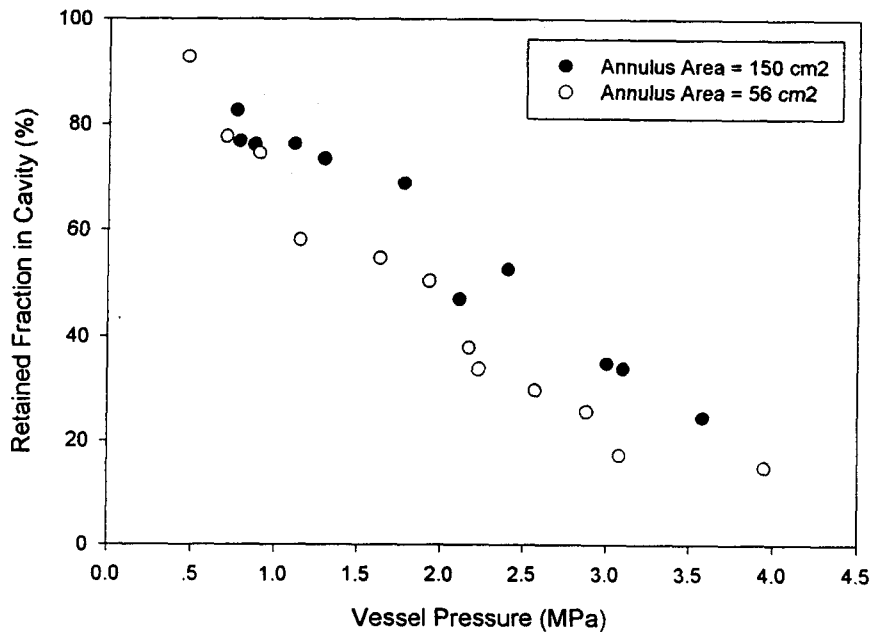


그림 5. 환형 통로 면적에 따라 캐비티에 나포된 용융물 분율(파손 직경 = 20 mm).