

## Zion 원전 Cavity 및 상부 격실에 대한 노심용융물 고압분출 실험 연구

박래준, 김상백, 조영로, 김희동

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150

### 요약

Zion 원전의 cavity 및 상부 격실을 1/20로 선형 축소 모의하여 상부 격실에 의한 노심용융물 나포 특성을 규명하기 위한 노심용융물 고압분출 실험 연구를 수행하였다. 본 연구에서는 원자로용기 외곽에 환형통로가 있는 경우와 없는 경우로 구분하여 원자로용기 파손 때의 용융물 양, 파손 면적에 따라 원자로용기 압력변화에 대한 실험을 물과 질소기체를 이용하여 수행하였다. 실험결과 환형통로가 없는 경우는 대부분의 노심용융물이 상부 격실에 나포되었으나 환형통로가 있는 경우는 환형 통로를 통하여 많은 양이 방출되었다. 환형 통로를 통한 용융물의 직접 방출은 격납용기 상부 대기와 열전달이 직접 이루어지기 때문에 격납용기 직접가열 효과가 크게 나타날 수 있다. Cavity내 노심용융물 방출분율은 원자로용기 파손때 용융물양보다는 파손면적의 영향이 더 크게 나타났다.

### 1. 개요

원전의 과도상태에 의한 노심물질 용융사고시 원자로 냉각재 계통이 고압인 상태에서 원자로용기가 파손되면 노심용융물이 원자로용기 하부 cavity를 통하여 격납용기로 방출되게 되며 이때 노심용융물이 작은 입자화되어 격납용기 대기와의 열전달로 격납용기 내부 압력과 온도를 급격하게 상승시킨다. 이와 같은 현상을 격납용기 직접가열 현상(Direct Containment Heating: DCH)이라 하며 이 현상의 초기상태인 원자로용기 파손에 따른 용융물의 유동현상을 용융물 고압분출(High Pressure Melt Ejection; HPME)이라 한다.

노심용융물 고압분출 현상은 격납용기 상부 대기로 방출되는 용융물의 양을 결정하게 되므로 격납건물 압력상승에 직접적인 영향을 미치게 된다. 따라서 원전의 격납용기 직접가열 현상 영향 평가를 위해서는 사고조건 및 cavity 특성에 따라 격납용기 대기로 방출되는 노심용융물의 양을 정량화하는 것이 필요하며 이를 위하여 가동중 원전의 cavity 모형에 대한 실험이 수행되어 왔다. 일반적으로 대기로 방출되는 용융물의 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. 최근에는 새로운 cavity 설계와 관련하여 지금까지의 cavity 모형을 개선하여 대부분의 용융물을 캐비티 하부에 나포(trapping)함으로써 상부 대기로의 방출량을 최소화하는 격납용기 직접가열 완화 방안에 대한 연구도 수행되고 있다.

노심용융물 고압분출 현상에 대하여 기존에 수행된 연구는 미국의 SNL과 ANL을 중심으로 Zion 원전과 Surry 원전의 cavity 모형에 대한 실험[1]이 수행되었다. 영국 AEA는 Winfrith 연구소의 SizeWell-B cavity 모형에 대한 실험[2]을 수행하였다. 국내의 경우 포항공과대학교 한국원자력연구소는 고리 1호기와 영광 3,4호기 cavity 모형에 대한 실험[3]을 수행하였고 과학기술원은 영광 1,2호기 cavity 모형에 대한 실험[4]을 수행하였다. 미국의 Purdue 대학에서는 cavity내 용융물과 생성기체의 상호작용과 부격실에서의 용융물의 나포 효과를 규명하는 종합실험을 수행하였다. 이 실험에서는 용융물의 액적이탈 현상, 액막(liquid film)의 형성과 이송에 대한 상세한 측정을 시도하여 해석모델 개발에 활용하였으며 상사물로 물과 공기를 이용한 실험과 저온용융 합금물과 공기를 이용한 실험 수행을 완료하였다[5, 6]. 이들 국내외 외국의 실험들은 특정 원전의 cavity 모형을 중심으로 용융물의 고압분출에 따른 cavity내 주요 현상 및 용융물의 방출분율에 중점을 두고 연구를 수행하였다.

미국의 Zion 원전 cavity 모형에 대해서는 그동안 많은 연구가 수행되었지만 cavity 상부의 격실(subcompartment)에 의한 노심용융물의 나포 특성을 규명하는 연구는 몇차례 대형 종합 실험에서 제한적으로 수행되었을 뿐이다. SNL에서 수행된 IET 실험에서는 cavity에서 방출된 노심용융물이 상부 격실에서 나포됨으로써 격납용기 직접가열 효과가 크게 나타나지 않았다. 본 연구에서는 국내 원전과의 비교, 목적을 위하여 미국의 Zion 원전을 대상으로 원자로용기 파손 때의 다양한 조건에 따라 노심용융물의 고압분출시 cavity 모형의 기하학적 인자와 cavity 상부 격실이 용융물의 방출 분율에 미치는 영향을 규명하여 원전의 격납용기 직접가열 평가에 필요한 방출분율을 결정하고자 하였다. 특히 원자로용기 외곽의 환형 통로(annulus)를 고려하여 환형 통로가 있는 경우와 없는 경우에 대하여 원자로용기 파손 때의 용융물양과 파손면적에 따라 원자로용기 압력 변화에 대한 실험을 수행하였다. 환형 통로를 통한 노심용융물의 방출은 격납용기내 격실을 통하지 않게 되기 때문에 격실의 용융물 나포효과가 최소화되어 격납용기 직접가열 효과가 크게 나타나게 된다.

## 2. 실험장치 및 수행절차

본 연구에서 수행한 실험의 실험장치는 고압용기, 고압배관, 질소 기체 공급 배관, 물 주입 용기 및 배관, 실험장치 지지대, cavity 모형, 격실 모형, cavity 설치판과 lift기 등으로 구성하였다. 또한 실험에서 측정된 인자를 처리하기 위한 data acquisition system과 전원공급장치 등을 장착한 control panel이 있다. 본 실험장치에서 가장 중요한 부분인 Zion 원전의 cavity와 상부 격실은 1/20 선형비로 축소된 모형을 제작하였다. Zion 원전의

노심용융물 고압분출 실험에서 대기로의 방출분율에 중요한 영향을 미치는 격실은 실제 구조가 매우 복잡하여 체적과 유로를 기준으로 간략화하는 원칙에 따라 미국 Purdue 대학의 Zion 원전 격납용기 직접가열 실험에서 사용한 모델을 이용하여 제작하였다. Cavity와 상부 격실은 실험수행시 유동을 가시화하기 위하여 투명재질인 아크릴을 사용하여 제작하였다. 본 실험에서 노심용융물은 물을 사용하여 모의하였고 증기는 질소기체를 사용하여 모의하였다.

본 실험에서의 주요 측정인자는 실험용기, cavity, 격실 등에 설치한 PT(Pressure Transducer)로부터 측정된 압력이며, 이들은 PC를 기초로한 data acquisition system에 처리되어 저장된다. 또한 실험 전과 후의 cavity와 격실의 질량을 측정하여 용융물의 방출분율을 정확하게 계산하였다. 실험은 환형통로의 영향을 평가하기 위하여 그림 1에서 보는 바와 같이 환형통로가 있는 경우와 없는 경우로 구분하고 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 50번의 실험을 수행하였다. 실험은 먼저 cavity와 격실의 질량을 측정후 실험용기에 장착하고 물 주입구를 이용하여 질량이 측정된 물을 주입하고 질소 가압 탱크를 이용하여 원자로용기를 실험인자 만큼 가압하면서 실험준비를 완료한다. 실험은 가압된 용기의 슬레노이드 밸브를 개방하여 rupture disc를 터뜨리면서 실험을 수행한다. 실험 수행 후에는 cavity와 격실을 실험용기와 분리하고 질량을 측정하여 cavity, 격실, 대기로의 방출 분율을 정확히 계산한다.

### 3. 실험결과 및 고찰

그림 2는 Zion 원전의 환형통로가 있는 경우 파손직경이 20 mm, 상사용융물 양이 1.0 kg인 경우의 상사용융물 방출분율에 대한 실험결과를 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 원자로용기 압력이 1.0 MPa보다 낮으면 상사 용융물의 대부분이 cavity에 나포되었으나 1.0 MPa보다 높으면 상사용융물이 격실에서 나포되거나 환형통로를 통하여 대기로 방출된다. 또한 격실에 나포된 상사 용융물 양보다는 환형통로를 통하여 대기로 방출되는 양이 더 많이 나타나 환형통로의 노심용융물 고압분출에 미치는 영향을 확인하였다. 환형통로가 있고 파손직경이 10 mm인 경우의 상사용융물 방출분율에 대한 실험결과인 그림 3에서 보는 바와 같이 파손 직경이 작으면 파손직경이 큰 경우보다 더 많은 상사 용융물이 cavity에 나포된 것으로 나타났다. 이는 파손직경이 작을수록 격납용기 직접가열 발생을 방지하는 원자로용기 cut-off 압력이 높아지는 것을 알 수 있다.

그림 4는 환형통로가 없고 파손직경이 20 mm인 경우의 상사용융물 방출분율에 대한 실험결과를 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 원자로용기 압력이 0.8 MPa보다 낮으면 상사 용융물의 대부분이 cavity에 나포되었으나 0.8 MPa보다 높으면 대부분이 격실에 나포되어 격실을 통과하여 대기로 방출되는 양은 아주 작은 것으로 나타났다. 즉 환형통로가 있는 경우는 대부분의 상사 용융물이 cavity와 격실에 나포된 것으로 나타나 cavity 상부의 격실이 노심용융물 고압분출에 미치는 영향을 확인하였다. 환형 통로가 없는 경우 파손직경이 10 mm인 경우의 상사용융물 방출분율에 대한 실험결과인 그림 5에서 보는 바와 같이 파손 직경이 작으면 더 많은 상사 용융물이 cavity에 나포된 것으로 나타나 환형통로가 있는 경우와 같은 경향을 보여 주었다. 그림 6은 환형통로가 없고

파손직경이 20 mm, 사용 상사 용융물양이 1.5 kg인 경우의 상사용융물 방출분율에 대한 실험결과를 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 상사 용융물 양의 증가는 방출분율에 별 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 따라서 노심용융물의 고압분출에는 노심용융물 양보다 파손 면적이 더 많은 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었다. 또한 환형통로를 통하여 대기로 방출되는 노심용융물 양은 많게 나타났으나 상부 격실을 통과하여 격납용기 대기로 방출되는 노심용융물 양은 적게 나타났다.

#### 4. 결론 및 차후 연구과제

Zion 원전의 cavity 상부 격실에 의한 노심용융물 나포 특성을 규명하기 위한 노심용융물 고압분출 실험을 수행하였다. 본 연구에서는 원자로용기 외곽의 환형통로가 노심용융물 고압분출에 미치는 영향을 분석하기 위하여 환형통로가 있는 경우와 없는 경우로 구분하고 용융물양, 파손면적에 따라 원자로용기 압력을 변화시키면서 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- Zion 원전의 환형통로가 있는 경우 파손직경이 20 mm이고 원자로용기 압력이 1.0 MPa보다 낮으면 상사 용융물의 대부분이 cavity에 나포되었다. 그러나 압력이 1.0 MPa보다 높으면 약 40 %가 상부 격실에서 나포되고, 약 50 %가 환형통로를 통하여 대기로 방출되는 것으로 나타났다.
- 환형통로가 없는 경우는 대부분의 상사 용융물이 cavity 상부의 격실에서 나포되어 격실이 노심용융물 고압분출에 미치는 영향을 확인하였다. 그러나 환형통로가 있는 경우는 이 통로를 통하여 많은 양이 격납용기 대기로 방출되어 환형통로가 노심용융물 고압분출에 많은 영향을 미치는 것으로 나타났다.
- Zion 원전의 노심용융물 고압분출에는 원자로용기 파손때 용융물양보다 파손면적이 용융물 방출 특성에 더 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.
- 본 실험연구에서는 용융물로 물을 사용하여 실험하였기 때문에 실제 노심용융물과는 다소 차이가 있어 금속용융물을 사용하는 추가적인 실험이 필요하며 기존에 수행된 실험 결과들과 정량적으로 비교 분석하는 노력이 필요하다.

#### 참고문헌

1. Tarbell, et al., High-Pressure Melt Ejection and Direct Containment heating Research, SAND88-2977C, Sandia National Laboratories, 1989.
2. Macbeth, P.W. Rose and D.J. Mogford, Experimental Modelling of Core Debris Dispersion from the Vault under a PWR Pressure Vessel : Part 3, AEEW-R 2426, AEE Winfrith, 1989
3. 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
4. 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
5. Ishii, et al., Air-Water Simulation of Phenomena of Corium Dispersion in Direct Containment Heating, NUREG/CR-6267, PU NE-93/1, Purdue University, Oct. 1994.
6. Ishii, et al., Experimental Simulation of Corium Dispersion Phenomena in Direct Containment Heating, Nuclear Engineering & Design, 164, pp.237-255, 1996

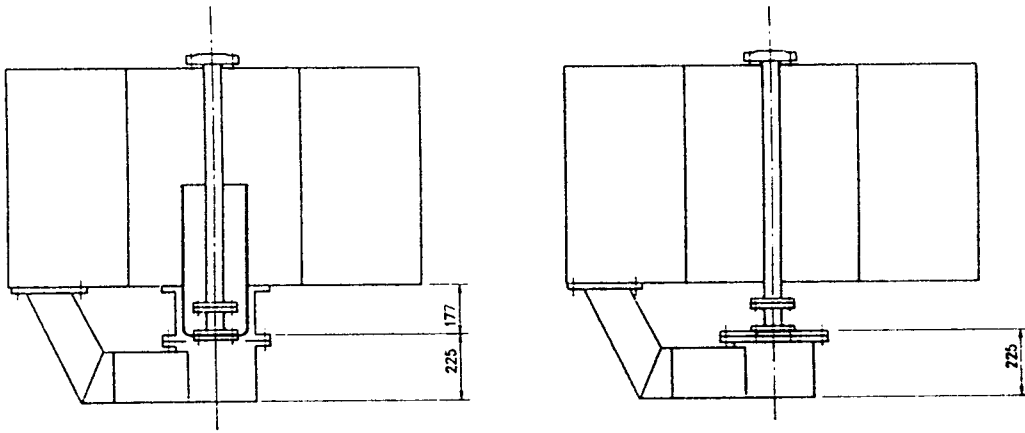


그림 1. 환형통로가 있는 경우와 없는 경우에 대한 Zion 원전 Cavity의 실험 모형.

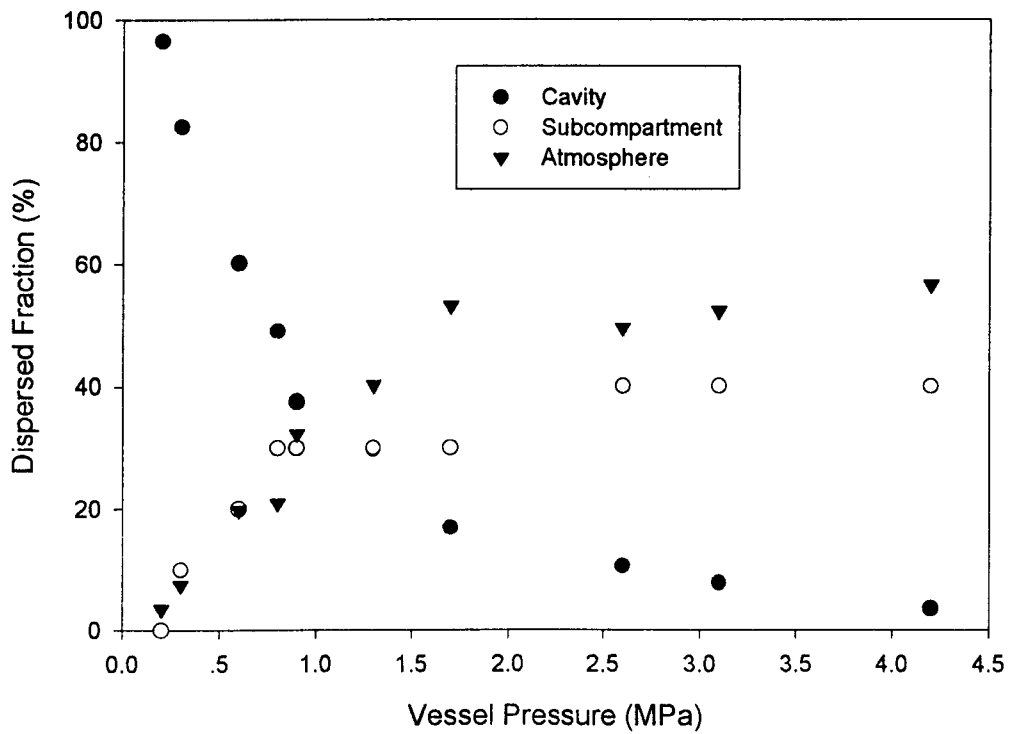


그림 2. 환형통로가 있는 Zion 원전 Cavity 모형에 대한 노심용융물 고압분출 실험결과 (과손직경 = 20 mm, 상사용융물 양 = 1 kg).

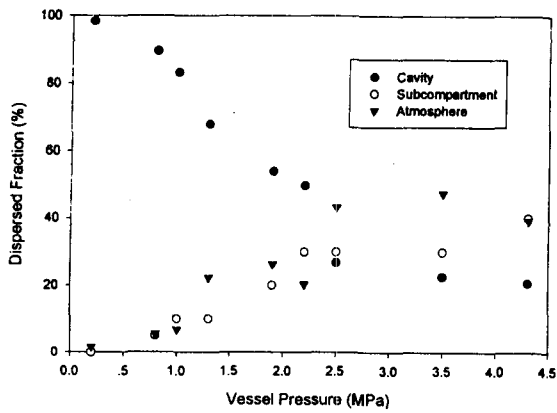


그림 3. 환형통로가 있는 Zion 원전 Cavity 모형에 대한 노심용융물 고압분출 실험결과 (파손직경= 10 mm, 상사용융물양= 1 kg).

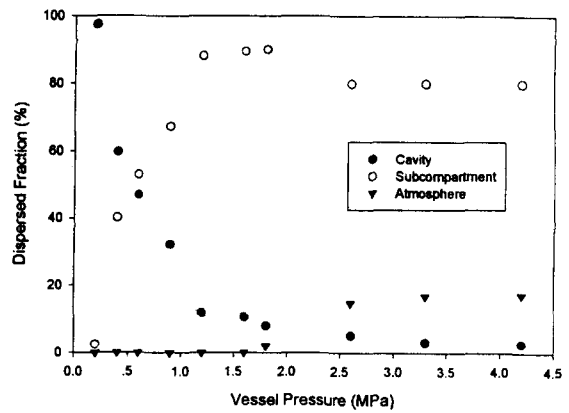


그림 4. 환형통로가 없는 Zion 원전 Cavity 모형에 대한 노심용융물 고압분출 실험결과 (파손직경=20 mm, 상사용융물양= 1 kg).

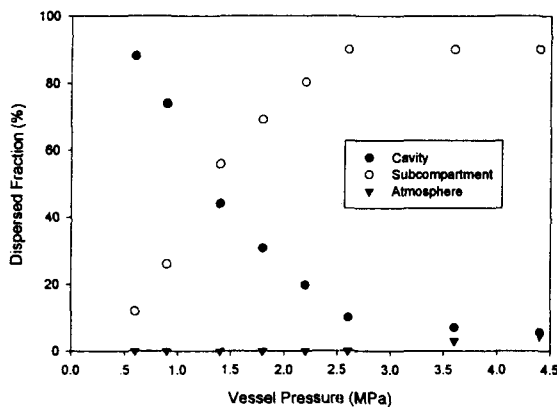


그림 5. 환형통로가 없는 Zion 원전 Cavity 모형에 대한 노심용융물 고압분출 실험결과 (파손직경= 10 mm, 상사용융물양= 1 kg).

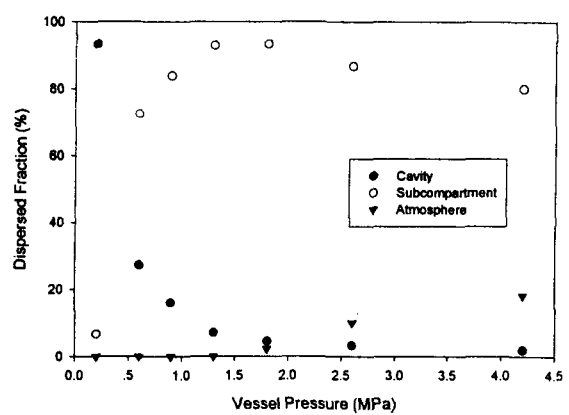


그림 6. 환형통로가 없는 Zion 원전 Cavity 모형에 대한 노심용융물 고압분출 실험결과 (파손직경= 20 mm, 상사용융물양= 1.5 kg).