

원자로 가상사고시(노심) 용융물 고압 분출 모의 실험 연구

정한원* · 김도형* · 이규정** · 김상백*** · 박래준*** · 김희동****
(2000년 2월 23일 접수)

Simulated Experiments on High Pressure Melt Ejection in the Reactor Cavity During Severe Accident

Han Won Jeong, Do Hyoung Kim, Kyu-Jung Lee,
Sang Baek Kim, Rae Jun Park and Hee Dong Kim

Key Words: High Pressure Melt Ejection(노심 용융물 고압분출), Released Fraction(방출분율), Ulchin 1&2 Nuclear Power Plant Cavity(울진 1,2호기 캐비티), Severe Accident(중대 사고)

Abstract

Simulated experiments of high pressure melt ejection(HPME) are performed to measure the released fraction of corium simulant from the French type PWR cavity. The experiments are carried out on a 1/20th linear scaled model of the Ulchin 1&2 cavity. Water or wood's metal and nitrogen is used as simulant of molten corium and steam, respectively. Experimental parameters are water mass, annulus area and breach size. It is shown that only breach size effect is very important while the mass and the annulus area do not affect the released fraction. It is found that the liquid film transport is much more dominant mechanism than the entrainment droplet transport, especially in linear scale down simulated HPME experiment.

1. 서 론

원자력 발전소에서 일어날 수 있는 최악의 사고로 일차계통 순환루프의 이상으로 냉각재가 상실되는 사고가 발생한 후 신속한 대응 조치가 수행되지 못할 경우 냉각성능의 저하로 인해 핵연료가 용융되는 사고를 가상하며 이런 사고를 중대사고(severe accident)라 한다. 핵연료의 용융에 의해 노심 용융물(corium)이 원자로 압력 용기

(reactor pressure vessel: RPV) 하부로 흘러내려 고압인 상태에서 파손되면 고온 고압의 노심 용융물이 하부에 있는 원자로 캐비티(cavity)를 통해 격납건물(containment)의 대기로 급격히 방출된다. 이때 용기 내부의 수증기와 개수도 같이 분출됨으로써 노심용융물은 수 mm 직경으로 작은 입자화(fragmentation)되어 대기 또는 수증기와 반응하여 격납건물의 내부 압력과 온도를 급격하게 상승시킬 뿐 아니라 수소생성으로 폭발의 위험성도 유발할 수 있다. 노심용융물이 빠른 속도로 캐비티로 분출되며 격납건물 하부의 구조물을 거쳐 상부 대기로 분산되는 현상을 노심 용융물 고압분출(high pressure melt ejection: HPME)이라 하고, 이와 같이 분출된 노심 용융물이 격납건물 대기의 온도와 압력을 높이는 현상을 격납건물 직접가열 현상(direct containment

* 고려대학교

** 회원, 고려대학교 기계공학과

E-mail : kjlee@korea.ac.kr

TEL : (02)3290-3359 FAX : (02)928-9768

*** 회원, 한국원자력연구소

**** 한국원자력연구소

heating: DCH)이라 한다. 이러한 일련의 현상은 격납건물의 파열을 초래하는 주요 요인으로 작용하고 원자력발전소 주변으로 방사능 유출을 유발할 수 있다. 미국의 원자력규제위원회(NRC)는 위와 같은 가능성을 인정하고 미국의 Zion과 Surry 원전을 중심으로 한 많은 연구 결과를 토대로 최근 실제 원전에서 DCH 압력 상승에 의한 파손 가능성은 희박하다고 결론짓고 있다. ^(1,2)

HPME의 유동 과정을 간략히 살펴보면 그림 1에서 원자로 압력 용기(RPV)가 파열되어 원자로 용기 하부의 노심용융물이 원자로 내부 압력에 의해 일차적으로 분출되고, 이어 원자로 용기 내의 고압의 수증기가 격납건물 하부 캐비티로 분출된다. 캐비티 내에서는 분출된 용융물과 빠른 속도를 가진 분출가스 간의 상호작용에 의한 분산(dispersion), 캐리오버(carry-over)와 액적이탈(entrainment)에 의해 용융물이 액막(liquid film)과 작은 입자(droplet)의 두 가지 형태로써 캐비티의 출구를 통해 격납건물 하부로 방출된다. 이때, 입자화되는 과정은 주로 캐비티에서 일어난다. 용융물이 캐비티를 통해 격납건물로 나오면 격납건물 내의 압력, 온도 상승 속도는 용융물과 대기의 접촉면적에 크게 의존한다. 즉 입자의 크기가 작으면 순간적 에너지 전달이 커 보다 빨리 압력 및 온도 상승이 이루어져 순간적 위험성을 초래할 수 있다.

노심용융물 고압분출 현상이 격납건물 압력 및 온도상승에 미치는 영향을 평가하기 위해서는 우선 사고조건 및 캐비티 특성에 따라 격납건물 대기로 방출되는 노심용융물의 양을 정량화 하는 것이 필요하다. 캐비티에 남아있는 용융물은 DCH에 거의 기여하지 않기 때문에 격납건물 대기로 방출되는 노심용융물의 방출량이 중요하며 캐비티의 기하학적 형상과 밀접한 관계가 있다. 그러므로 다양한 초기 사고 조건들에 대해 주어진 캐비티 형상에 따른 격납건물로 분산되는 용융물의 양을 파악하여야 한다. 따라서 DCH현상의 예측을 위해 초기 현상인 원자로용기의 여러 파손 형태에 따른 노심용융물의 방출 유동 형태와 방출되는 양에 대한 많은 연구가 수행되고 있다. 그러나, 각 원전의 캐비티 형상은 각기 달라 고압분출 현상이 서로 상이하므로 연구의 일반화가 힘들어 각 캐비티 형상에 대한 방출 형태의 연구가 필요하다.

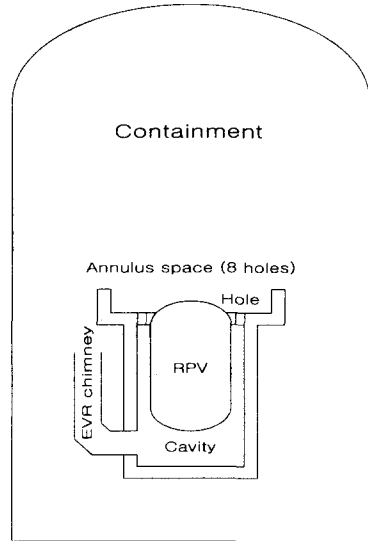


Fig. 1 Schematic Diagram of Ulchin 1&2 PWR Containment

DCH의 고온 용융물 실험의 대표적 실험으로는 SNL(Sandia national laboratories)의 IET (integrated effects test)⁽³⁾를 들 수 있다. 이들 실험은 12개로 구성되어 있다. Zion 1/10, Surry 1/6의 캐비티 축소 모형을 제작하고 써마이트(thermite)를 이용하여 여러 사고 조건에서 캐비티내 용융물의 고압 분출과 상호 작용 및 DCH 관련 실험을 수행하였다.

ANL(Argonne national laboratories)에서는 1/40의 선형비를 가진 Zion 에 대하여 실험⁽⁴⁾을 수행하여 두 결과를 비교하기도 하였다. 용융물의 액적이탈 현상, 액막의 형성과 이송에 대한 개별효과 실험이 꾸준히 수행되고 있으며 중요 미케니즘 파악에 중점을 두고 수행하고 있다. ⁽⁵⁻⁷⁾

국내에선 포항공과대학, 한국원자력연구소, 한국과학기술원이 노심용융물 고압분출시 국내 원전 캐비티의 특성을 평가하기 위하여 Westinghouse형 원전인 고리 1호기와 영광 1, 2호기 및 CE형 원전인 영광 3, 4호기 캐비티 모형에 대한 노심용융물 고압분출 실험을 수행하였다. ⁽⁸⁻¹⁰⁾ 이들 원전은 캐비티 수평통로를 통해 출구로 빠져나가 용융물의 방출이 이루어진다. 반면 프랑스 가압 경수형 원전인 울진 1, 2호기는 이들 원전과는 달리 캐비티 (Fig. 1) 내에 수평통로가 없고

높은 위치에 조그마한 공기환기통로(EVR chimney)가 있으며 원자로 주위에 환형 통로(annulus)가 존재한다. 실제 환기통로의 면적은 최소 단면을 기준으로 약 2.2 m^2 이며 환형통로의 면적은 구조가 복잡하고 내부에 원자로 단열 물질이 채워져 있어 실제 면적을 설정하기 어려우나 상부의 8개 홀을 기준으로 약 3.0 m^2 이다. 기존의 실험결과들을^(11~12) 통해 캐비티의 구조 차이에 의해 용융물 방출 특성이 큰 차이를 보인다는 것이 예측되고 있다.

본 실험에서는 울진 1,2호기의 캐비티 및 원자로 용기의 전체체적을 1/20의 선형비로 축소한 모형을 써서, 물과 우즈메탈(wood's metal)을 상사용융물로, 가압수증기를 질소(N_2)가스로 대체하여 고압분출실험을 수행한다. 실험인자로써 원자로 용기 외곽의 환형통로 면적, 파손 직경(breach diameter), 상사 용융물 질량, 상사 용융물의 밀도를 제어, 변화시키면서 원자로 용기의 분출 직후의 압력 변화와 방출분율(released fraction)을 측정한다. 실제 원자로에서 노심용융 및 용기의 파손은 초기 사고 경위에 따라 매우 다르기 때문에 용융물의 질량 및 파손 크기에 대한 매우 다양한 조건에서의 실험 결과를 필요로 한다. 아울러 캐비티 환형통로 면적의 불확실성을 고려하여 면적 변화에 따른 영향을 시험한다. 캐비티 내의 유동현상은 상당한 고압에서 매우 빠른 시간에 일어나는 천이과정이어서 상사 용융물의 퍼지는 속도, 액막의 두께, 입자의 형태 등과 같은 세부적인 현상에 대해서는 직접적인 측정이 매우 어려워 수행하지 않고 방출분율에 영향을 주는 중요한자 파악에 중점을 두고 수행한다.

2. 실험

2.1 실험 장치

Fig. 2에 실험장치의 개략도를 나타내었다. 실험장치는 캐비티, 모의 원자로용기, 가스탱크 및 배관 장치와 측정장비 등으로 이루어져 있다. 가스탱크는 원자로 용기 체적의 1/20 선형비로 설계되어졌으며, 질소를 주입하여 원하는 압력까지 유지시킬 수 있게 되어 있다.

모의 원자로 용기는 내부 압력 배관 하부에 알루미늄 호일로 파열 판(rupture disk)을 막아 시험 전 상사 용융물을 담고 있으며 외부에 있는

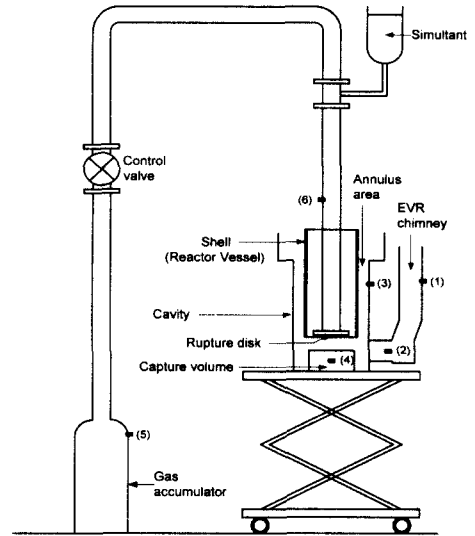


Fig. 2 Schematic of experimental apparatus for HPME

셸(shell)은 캐비티 내부에서의 원자로 용기의 외경을 모의하여 일정한 환형 통로를 유지시켜 준다. 가스탱크의 공기구동밸브(air actuator valve)가 열리면 고압의 가스가 배관을 따라 원자로 용기 하부에 도달하고 적정 압력에서 알루미늄 호일이 파손되어 용융물과 가스가 분출되도록 설계하였다. 캐비티는 좌우상하로 움직일 수 있는 리프트기 위에 설치되어 모의 원자로와 함께 시험부를 구성하며 분출실험을 수행한 후 떼어 내어 방출분율을 측정할 수 있도록 구성하였다.

캐비티는 울진 1,2호기 원전의 캐비티를 1/20 선형비로 축소한 것을 사용하였으며 환형통로를 통해 분출되는 양과 공기환기통로를 통해 분출되는 양을 구별하기 위해 공기 환기 통로에 따로 플라스틱 튜브와 통을 설치하여 방출량을 측정하였다.

2.2 실험 인자

실험에 상사 용융물로 쓴 물질은 물과 우즈메탈이다. 원자로 용융물은 UO_2 , ZrO_2 , Zr 과 같은 핵연료 물질과 Fe , Ag-In-Cd 과 같은 내부 구조물 및 제어봉 물질의 혼합체로 UO_2 가 주류를 이루고 있다. 우즈메탈과 물의 가장 큰 차이점은 밀도와 고화부착(solidification)이다. 고화부착이란 뜨거운 노심용융물이 분출에 의해 캐비티 벽을

지날 때 일부가 응고되어 캐비티 벽에 붙는 것을 말한다. 이 특징으로 우즈메탈은 노심용융물 고압분출실험에서 물보다 더 실제 용융물의 특성에 가까운 결과를 얻을 수 있으므로 선택하여 결과를 비교하였다. 방출분율만을 알 수 있는 물을 사용한 실험과는 달리 우즈메탈은 실험 후 캐비티를 관찰해 보면 분출 후 우즈메탈의 퍼진 과정과 고화부착의 영향을 알 수 있다. Table 1은 상사 용융물 각각의 밀도와 실험인자를 보여준다. 본 실험의 주요 실험인자는 상사 용융물의 밀도, 상사 용융물의 초기질량, 환형통로 면적, 파손직경 크기 등이며, 이들을 변화시켜 가며 압력용기의 압력 대 방출분율의 비를 그래프로 나타내어 각 실험인자들이 방출분율에 미치는 영향을 살펴 보았다. 상사 용융물의 질량은 원자로 하부에 용융물이 차 있는 높이에 따른 체적 기준으로 선형 비로 축소 한 값으로 정하였으며 파손 직경은 원자로 하부를 관통하는 배관 (guide tube)이 가장 취약하므로 그 중 하나가 파손되어 용융물이 분출되는 대표적인 경우를 선정하였다. 그러나 실제 원자로의 경우 고온 물질이 파손부를 통과하면서 심한 용발(ablation)을 일으키므로 파손 크기를 변화시키며 그 영향을 시험하였다.

2.3 실험방법

2.3.1 물을 이용한 실험

환형통로 면적을 먼저 결정하고 그에 알맞은 모의 원자로 압력용기를 용융물 지지대에 설치한다. 원하는 크기의 파손직경을 가진 디스크에 정적 압력에서 파손될 수 있도록 알루미늄 호일을 여러 겹 붙이고 용융물 지지대 하부의 오리피스에 설치한다. 전자 저울에 무게를 측정된 캐비티를 리프트기에 고정시키고 캐비티 내의 압력 변화가 있으리라 예상되는 6군데 (Fig. 2의 1번-6번)에 압력센서(pressure transducer: PT)를 달고 상승시켜 Fig. 2와 같이 구성한다. 물을 용기에 실험 조건에 따라 일정 량을 주입한 후 가스탱크에 압력 게이지를 보며 가스를 원하는 압력으로 만든 후 데이터수집기(data acquisition system: DAS)를 실행시키고 제어 밸브를 순식간에 열면 알루미늄 호일이 터져 고압분출이 시작된다. 가스가 모두 빠져 나간 후 DAS를 중지시키고 리프트기를 하강시켜 캐비티를 내린 후 무게를 측정하여 실험

전 캐비티의 무게와 비교한다. 캐비티의 물기를 제거한 후 1시간이 지난 후 완전히 마른 상태에서 다음 실험을 반복한다. 공기환기통로로 방출된 방출량과 캐비티에 남아 있는 양을 측정 후 환형통로를 통해 나간 방출량 및 방출분율을 계산한다.

2.3.2 우즈메탈을 이용한 실험

전체적으로 물을 이용한 실험과 과정이 거의 같으나 가열로에서 용융시킨 다음 시험용기로 주입하였으며 이때 가장 중요한 것은 우즈메탈이 실험하는 중에 굳지 않도록 하는 것이므로 우즈메탈이 통과하는 모든 부분을 RTD 타입의 센서와 PID 제어기를 사용하여 모두 150℃ 이상을 유지하도록 미리 히터로 가열한 후, 실험을 시작한다. 그 후의 과정은 물을 사용한 실험과 동일하다. 실험 후 다음 실험에 영향을 주지 않도록 우즈메탈 제거에 주의한다.

2.3.3 측정 및 유동가시화

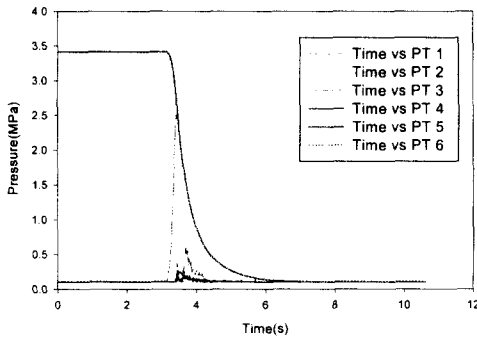
실험에서 측정된 요소는 실험시 주입하는 상사 용융물의 초기 질량과 실험 전후의 캐비티에 남은 질량, 공기환형통로로 방출된 질량, 캐비티의 각 부분의 압력 및 상사 용융물이 분출될 때의 압력, 가스탱크의 가압된 압력 등이다. 압력은 6개의 압력센서와 Visual Designer 프로그램으로 구성된 DAS를 통해 측정되고 PC에 저장된다. 압력이 측정되는 곳은 캐비티의 4곳과 가스탱크(PT 5)와 모의 원자로 용기(PT 6)이며, 캐비티에서는 나포체적(capture volume: PT 4), 환형통로 출구(PT 3), 공기환기통로 입구(PT 2)와 출구(PT 1)에 각각 압력센서를 설치하여 각 부분의 시간에 대한 압력의 변화를 측정할 수 있도록 하였다.

상사 용융물의 초기 질량에 대한 실험 전후의 캐비티의 질량의 차, 공기환기통로를 통해 방출된 양으로부터 용융물의 방출분율을 계산한다.

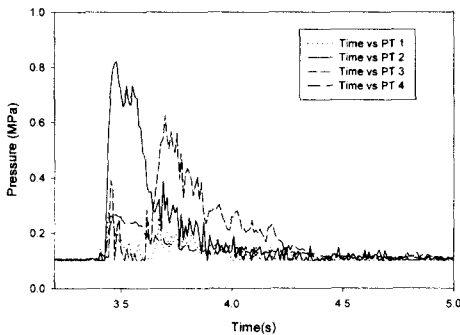
상사용융물이 우즈메탈인 경우 모의 원자로 압력용기에 고화 부착되는 양이 비교적 많으므로 압력용기에 고화부착된 우즈메탈의 질량을 캐비티에 남아있는 우즈메탈의 양에 더하는 방법으로 방출분율 값을 보정하였다. 또한 고속비디오카메라를 이용하여 고압분출 시 유동의 형태를 촬영하여, 방출 형태의 유동을 살펴보았다.

Table 1 Experimental test matrix

Simulant	Water	Wood's metal
density(kg/m^3)	1000	9200
mass(kg)	0.5 , 1 , 1.5 , 2	2
annulus area(cm^2)	150 , 75 , 56 , 32 , 24	150 , 56
breach diameter(mm)	10 , 12.5 , 15 , 17.5 , 20	10 , 20



(a) Overall pressure history



(b) Local cavity pressure history

Fig. 3 Overall pressure history during experiment (24cm² annulus area, 20mm breach dia., water)

3. 실험 결과

방출분율이란 주입한 전체 상사 용융물의 질량

에 대한 캐비티에 남겨지지 않고 밖으로 방출된 상사 용융물의 질량의 비를 나타내며, 방출분율에 영향을 줄 수 있는 인자로 상사 용융물의 질량, 상사 용융물의 밀도, 환형통로의 면적, 파손 직경 등을 선택하여 실험을 수행하였다. 각각의 인자들의 영향을 알아보기 위해 다른 인자들을 고정시킨 상태로 한 인자를 변화시키면서 분출압력에 대한 방출분율을 측정하여 각 인자의 방출분율에 대한 영향을 그래프로 나타내었다. 유동 가시화에 의해 관찰된 유동 방출 형태는 액막의 형태로 대부분 환형통로를 통해 이루어지며, 공기환기통로를 통해 방출되는 양은 매우 적음을 알 수 있다.

3.1 시간에 대한 각 부분의 압력의 변화

Fig. 3(a), 3(b)는 상사 용융물로 물을, 환형통로 24cm², 파손직경 20mm, 가스탱크의 압력을 3.5MPa인 실험조건에서 고압분출시 각 PT에서 시간에 대한 압력의 변화를 나타낸 그래프이다. DAS를 작동시킨 후 3초가 지난 다음 밸브를 열어 가스탱크의 질소가 원자로 용기로 진행함에 따라 가스탱크의 압력은 떨어지는 반면, 원자로 용기의 압력은 증가한다. PT 5는 가스탱크의 압력을 나타내고 PT 6은 모의 원자로 압력용기의 압력을 나타낸다. 디스크가 파손되는 2.5MPa 근처에서 두 압력은 같이 움직이며 줄어든다. Fig. 3(b)는 Fig. 3(a)에 작게 나타나는 캐비티에 부착된 4개의 PT의 압력을 확대하여 보여준다. 공기 환기 통로의 입구는 분출과 동시에 압력이 증대되었다 약화되어 바로 분출의 영향을 받음을 알 수 있는 반면, 환형통로 출구 PT의 압력은 분출 직후 약간(0.5초)의 시간 지연이 있는 후 압력이 최고로 증가되었다 없어 짐을 알 수 있다. 나포 체적과 공기환기통로의 출구에서의 압력은 위의 두 압력에 비해 미세한 값을 가짐으로써, 고압분

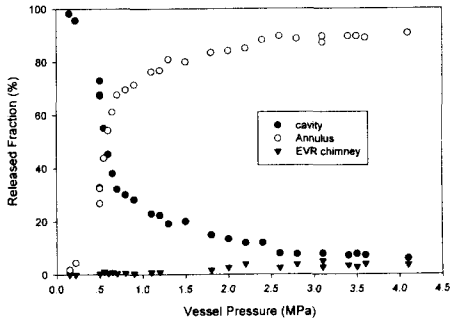


Fig. 4 Overall released fraction (150cm² annulus area, 20mm breach dia., 1kg water)

출이 영향을 미치고 있지 않음을 보여준다.

위의 두 그림에서 원자로 용기의 고압 분출시 주유동의 방향은 캐비티의 밑바닥에 전달된 후 환형통로를 통하여 유동이 대기로 나오게 되며, 나포체적 또는 공기환형통로는 그리 영향을 주지 못함을 알 수 있다.

여러 실험 조건에서도 이러한 현상은 일반적이며 단지, 파손직경이 작아지는 경우 가스의 방출 시간이 길어지며 환형통로의 면적을 좁은 경우 캐비티 내의 압력이 높아짐을 보이나, 전체적 압력변화의 경향은 비슷하다. 본 그래프에서는 환형통로 면적이 좁아 캐비티 내 압력이 높은 경우에 해당하며, 같은 조건에서 환형통로 면적이 넓어질수록 PT 1~4의 압력은 줄어든다. 이러한 압력 분포는 우즈메탈을 사용한 실험에서도 같은 경향을 나타낸다.

3.2 공기환기통로의 방출량

Fig. 4는 물을 이용하여 초기질량 1kg, 환형통로 면적 150cm², 파손직경 20mm로 인 경우 분출 압력에 따라 환형통로, 공기환기통로를 통해 방출되는 양과 캐비티에 잔존하는 양을 도시화 하였다. 0.2MPa 분출압력에서 물이 캐비티를 떠나 대기로 방출되며, 이 영역에서는 분출 압력 증가에 따라 방출분율은 급속히 증가하고 0.5MPa에서는 50%, 1MPa에서는 물의 70% 이상이 대기로 방출됨을 보여 준다. 이후 분출압력의 변화에 따라 완만한 방출분율을 보고 있으나, 이미 90% 이상의 물이 방출되어 1MPa 이상의 분출압력이 주어지면 DCH에 지대한 영향을 미침을 보여준다.

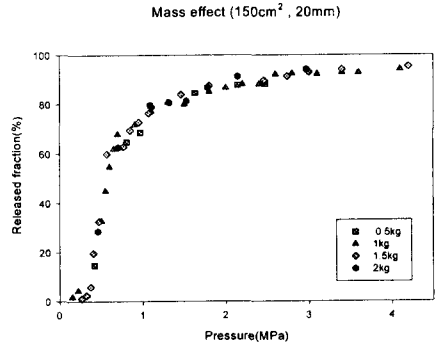


Fig. 5 Mass effect on released fraction (150cm² annulus area, 20mm breach dia., water)

그러나 공기환기통로로의 방출량은 4MPa에서 전체 질량의 3%정도로 미미하여 대다수의 방출이 환형통로를 통해 이루어 짐을 알 수 있다.

3.3 물 실험

방출분율에 영향을 미칠 수 있는 인자로 물의 초기질량, 환형통로 면적, 파손직경 크기, 분출 압력 등이 있다. 각각의 독립적 영향을 알아보기 위해 다른 인자들을 고정시킨 상태에서 하나의 인자를 변화시키면서 압력에 대한 방출분율을 구하여 방출분율에 대한 영향을 알아본다.

3.3.1 질량의 방출분율에 대한 영향

환형통로 면적을 150cm², 파손직경을 20mm로 고정시키고, 상사 용융물인 물의 질량을 0.5, 1, 1.5, 2 kg 등으로 변화시키면서 모의 원자로 용기 분출 압력에 대한 방출분율을 측정된 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 네 가지 경우 모두 그래프에서 보듯이 모든 범위의 압력에서 물의 질량의 변화에 관계없이 동일한 방출분율 값을 보인다. 앞서 언급한 바와 같이 1MPa 이상의 분출압력이 주어지면 70%이상의 질량이 대기로 방출되어 DCH에 지대한 영향을 미침을 보여준다. 본 그림에서는 물의 방출분율로 볼 때 분출 압력에는 밀접한 관계를 가지고 있고, 초기질량에는 별로 영향을 미치지 않는 것으로 나타나나, 절대 방출 질량으로 확산하면 초기질량이 증가함에 따라 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 따라서 용융물의 초기용융질량이 많으면 DCH의 위험성을 내재하

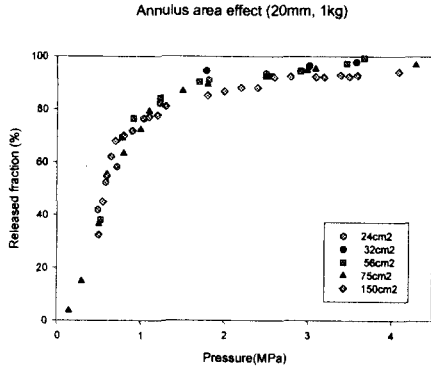


Fig. 6 Annulus area effect on released fraction (20mm breach diameter, water 1kg)

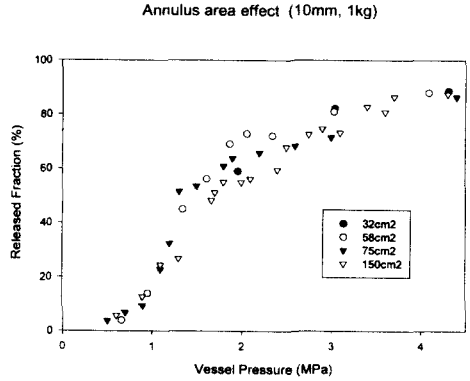


Fig. 7 Annulus area effect on released fraction (10mm breach diameter, water 1kg)

고 있다.

3.3.2 환형통로 면적의 방출분율에 대한 영향

Fig. 6은 질량을 1kg, 파손직경을 20mm로 고정시키고 환형통로 면적을 24, 32, 56, 75, 150 cm² 등으로 변화시키면서 측정된 방출분율을 보여준다. Fig. 5와 마찬가지로 1MPa 이상이 되면 방출량의 70% 이상이 대기로 방출되며 이 압력을 초과하면 방출량의 대다수가 대기로 방출됨을 보여준다. 환형통로면적에 따른 방출분율의 변화는 없는 것으로 나타난다. Fig. 5와는 다르게 Fig. 6 실험 조건은 일정 질량 1kg에 대한 실험을 실시하였기 때문에 절대 방출질량도 방출분율과 같은 경향을 가짐을 알아야 하고 이는 환형통로의 면적 변화는 방출량에 무관함을 보여준다.

Fig. 7은 1kg 질량에 대해 파손직경을 10mm로 변화시켰을 때 환형통로 면적 변화에 대한 측정된 방출분율을 보여준다. Fig. 6과는 다르게 분출압력이 0.5MPa이 되어야 방출이 시작되며 방출분율이 급속히 변하는 Fig. 6과는 다르게 완만히 방출되어, 3MPa에 이르러서야 80%의 방출분율을 나타내고 있다. 그러나 환형통로 면적 변화에 따른 방출 분율의 변화는 보이지 않으며, 절대량도 변화지 않는다.

환형통로 면적이 줄어들면 환형통로를 통과하는 가스의 속도가 급격히 빨라져 환형통로에서 가스의 속도에 의한 액적이탈이 증가하는 현상을 띄우나 증가량이 미미하고 액막 이탈의 감소로

전체 방출량은 같은 것으로 나타나고 있다. 따라서, 환형통로에서는 액막에 의해 상사용융물의 방출이 거의 이루어진 후 분출가스 속도의 증가에 의한 액적이탈 현상으로 인한 방출 영향이 거의 없는 것으로 나타나 결국 프랑스형 원전에서는 액막에 의한 방출이 지배적임을 보여주고 있다.

3.3.3 파손 직경의 방출분율에 대한 영향

Fig. 6과 7에서 파손직경이 방출에 미치는 영향을 간접적으로 보여주고 있다. 따라서 Fig. 8에서 질량을 1kg, 환형통로 면적을 56 cm²로 고정시키고 파손직경을 10, 12.5, 15, 17.5, 20mm로 변화시키면서 방출분율을 측정하였다. 같은 분출압력에서 파손 직경이 크면 대기 방출량 및 방출분율은 커지며 파손직경이 작아질수록 방출량이 적어짐을 알 수 있다. 이러한 현상은 12.5mm까 지는 두드러지지 않으나 10mm에서 잘 나타나고 있다. 따라서 이 영역 보다 작은 파손직경에 대해서는 방출분율에 현저한 영향이 있다고 생각된다. 그러나 고압의 방출압력에서는 (이 실험에서는 4MPa 이상) 파손 직경의 영향력의 초과하여 90%이상의 방출이 이루어짐을 보여준다. 이것은 Zion 및 Surry 원전 등 지금까지 실험된 대부분의 다른 모형의 캐비티의 고압분출 실험결과와 동일한 경향이며, 프랑스형 원전의 캐비티도 방출분율에 대해 파손직경의 영향이 매우 크게 나

타내고 있음을 알 수 있다. 파손 직경의 변화는 물의 방출속도에 영향을 주어 관 직경이 작아 질 수록 장시간 압력이 작용하나 단위시간 당 물에 관성력을 적게 작용하고 이어 나오는 가스의 액적이탈의 영향이 미미하여 캐비티에서의 방출을 어렵게 한다.

3.4 우즈메탈 실험

상사 용융물의 밀도의 변화에 따른 방출분율의 영향을 알아보기 위해 우즈메탈을 사용하여 실험을 수행하였다. 앞서 수행한 물 실험에서 채택한 실험 인자를 변화하여 방출분율을 측정하였다.

3.4.1 파손직경 및 환형통로 면적의 방출분율에 대한 영향

Fig. 9에 질량을 일정하게 유지하고 4가지 경우

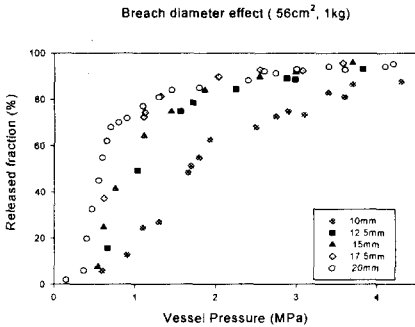


Fig. 8 Breach diameter effect on released fraction (56cm² annulus area, water 1kg)

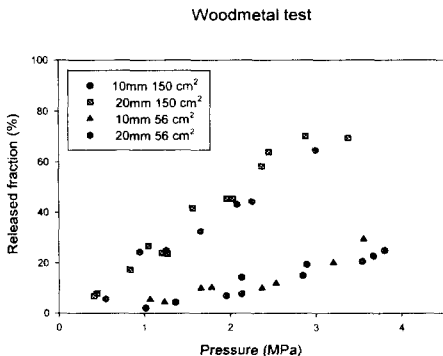


Fig. 9 Released fraction in variations of annulus area and breach diameter with wood's metal

(파손직경 10, 20mm, 환형통로면적 56, 150 cm²)에 대해 실험을 실시하였다. 분출압력에 따른 방출분율은 적게 형성되어 있지만, 물 실험에서 나타난 바와 같이 환형통로 면적의 영향은 작으며 파손직경의 영향이 큰 것으로 나타났다. 작동 유체의 물성치에 대한 영향을 배제하면 전반적 방출경향은 일정하게 나타난다.

3.4.2 밀도 및 고화부착의 방출분율에 대한 영향

보다 노심용융물에 가까운 밀도를 가진 우즈메탈을 이용하여 밀도와 고화부착의 영향을 살펴보았다. 우즈메탈은 밀도가 물보다 9배가 큰 물질이어서 같은 분출압력에서 방출분율은 크게 떨어진다. 이것은 캐비티 안에 우즈메탈이 많이 있음을 의미하며, 밀도의 영향이 중요함을 보여준다. 본 캐비티에는 중대사고시 노심용융물을 나포할 수 있는 나포체적이 있다. 물 실험과는 달리 우즈메탈은 상온에서 고화가 일어나므로 우즈메탈이 나포 체적에 모여 고화 부착됨을 보여준다. 실험이 실시된 후 캐비티에 우즈메탈이 붙어 있는 모양을 보면 캐비티 바닥과 벽면 보다는 나포체적에서 많은 우즈메탈이 나포된 것으로 보아 실제 노심용융물에 대한 나포체적의 영향은 크리라 생각된다. 환형통로의 면적이 작아지면 방출분율이 조금 작게 나타나는데, 이는 우즈메탈이 모의 원자로 용기에 고화부착되는 정도가 더 많아지기 때문이나 나포체적의 영향에 비해 작다.

3.5 유동가시화

상사 용융물이 캐비티에서 분출될 때 액막의 형태와 액막과 빠른 속도의 가스와의 상호작용에 의한 액적 이탈에 의한 액적의 두가지형태로 방출됨을 앞서 언급한 바 있다. 고속 비디오 카메라로 실험을 촬영한 후, 화면을 검토하면 캐비티에서 물이 방출될 때 대부분 액막의 형태로 방출되고 뒤이어 고압 분출된 가스가 나오는 것이 관찰된다. 환형통로의 면적을 150cm²에서 24cm²으로 다섯 단계로 줄이면서 실험을 수행한 바 각 경우의 방출유동의 형태는 거의 차이가 나지 않았다. 단지, 압력이 작을 때는 대부분 액막상태로 방출되고 액적 이탈에 의한 액적이 그다지 보이지 않으나, 상대적으로 고압일 때는 물과 질소가스의 유동 상호 작용에 의한 상대적으로 좀 더 많은 액적 이탈에 의한 분무를 볼 수 있다. 위의

사실로 미루어 축소모형에서 HPME 실험시 방출되는 상사 용융물은 대부분 액막 형태라고 가정하는 것이 바람직하다.

4. 결 론

물과 우즈메탈을 이용하여 상사용융물의 질량, 환형통로의 면적, 파손직경, 상사 용융물의 밀도 등을 변화시키면서 모의 원자로 용기 압력에 대한 방출분율을 구한 결과 다음의 결론을 내릴 수 있다.

(1) 울진 원전의 노심용융물 고압 분출에서는 환형통로가 매우 적은 경우를 제외하고는 공기환기통로로는 매우 적게 방출되며, 대부분 원자로 용기의 환형통로를 통해 방출된다.

(2) 상사 용융물의 초기 질량은 방출분율에 거의 영향을 주지 않으나 절대 방출량으로는 초기 질량에 비례하므로 HPME현상에는 중요한 요소이다.

(3) 환형통로면적은 방출분율에 거의 영향을 주지 않는 것으로 나타났으며 이것은 영광 1,2호기와 고리 1,2호기 등의 캐비티 모형의 고압 분출 실험결과와 차이가 남으로서 서로 다른 방출 메커니즘을 써야 함을 나타낸다.

(4) 원자로 용기의 파손직경은 방출분율에 중요한 요소이며, 파손직경을 작게 유지하여야 한다.

(5) 우즈메탈을 썼을 때, 물보다 높은 밀도와 고화부착의 영향으로 방출분율이 현저하게 줄어 드나, 전체적 방출유동의 경향은 일치한다.

(6) 고속비디오에 의한 유동가시화와 실험결과로부터 고압분출시 액막의 형태가 우세한 방출메커니즘으로 관찰되었다. 따라서 기존 캐비티 모형에 대한 액적이탈 방출 분출 상관식을 적용하는 것은 적합치 않으며 액막에 의한 분출을 반영한 새로운 상관식의 개발이 필요하다.

참고문헌

(1) Pilch, M. M., Yan, H. and Theofanous, T.G., 1994, "The Probability of Containment Failure by Direct Containment Heating in Zion," NUREG/CR-6075, SAND93-1535, Sandia National Laboratories.

(2) Pilch, M. M. et al., 1995, "The Probability of

Containment Failure by Direct Containment Heating in Surry," NUREG/CR-6109, SAND93-2078, Sandia National Laboratories.

- (3) Blanchat, T.K. and Allen, M.D., 1996, "Experiments to Investigate DCH Phenomena with Large-Scale Models of the Zion and Surry Nuclear Power Plants," *Nuclear Engng. and Design*, Vol. 164, pp. 147~174.
- (4) Binder, J.L. and Spencer, B.W., "Investigations into the Physical Phenomena and Mechanisms that Effect Direct Containment Heating Loads," *Nuclear Engng. and Design*, Vol. 164, pp. 175~199.
- (5) Lopez de Bertodano, M. et al., 1996, "DCH Dispersion and Entrainment Experiment in a Scaled Annular Cavity," *Nuclear Engng. and Design*, Vol. 164, pp. 271~285.
- (6) Wu, Q., Zhang, G.J., Ishii, M., Revankar, S.T. and Lee, R.Y., 1996, "Experimental Simulation of Corium Dispersion Phenomena in Direct Containment Heating," *Nuclear Engng. and Design*, Vol. 164, pp. 237~255.
- (7) Wu, Q., Kim, S., Ishii, M., Revankar, S.T. and Lee, R.Y., 1996, "High Pressure Simulation Experiment on Corium Dispersion in Direct Containment Heating," *Nuclear Engng. and Design*, Vol. 164, pp. 257~269.
- (8) Kim, M. H., Chung, C. Y., Kim, H. D. and Kim, S. B., 1992, "Experimental Study on Direct Containment Heating Phenomena," *Proceeding on the Third Workshop on Severe Accident in Japan*, Nov. 4-6, Tokyo, Japan, JAERI-memo 05-100.
- (9) Chun, M. H., So, D. S. and Lee, C. S., 1991, "A Experimental Parametric Study of the High Pressure Melt Ejection From Two Different Scale Reactor Cavity Models," *Int. Comm. Heat Mass Transfer*, Vol. 18, pp. 619~620.
- (10) Kim, S.-B. et al., 1995, "A Parametric Study of Geometric Effect on the Debris Dispersion from a Reactor Cavity during High Pressure Melt Ejection," *International Com. in Heat and Mass Transfer*, Vol. 22, No. 1, pp. 25~34.

- (11) 김도형, 이규정, 김상백, 박래준, 1997, “울진 1,2호기 원전에 대한 노심용융물 고압분출실험 연구,” 대한기계학회 '97 추계학술대회논문집, pp. 186~190.
- (12) 정한원, 이규정, 김상백, 박래준, 1998, “노심 용융물 고압 분출 모의 실험에 관한 해석적 연구,” 대한기계학회 1998년도 추계학술대회논문집 B, pp. 900~905.