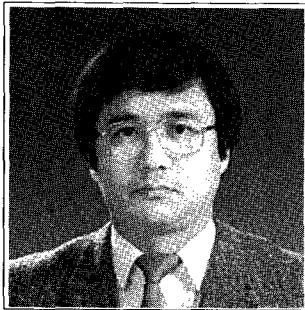


# 원자로 격납용기실험 용역사업 수주

## 프랑스, 연구비 지원 · KAERI, 실험 수행 원전 안전성 연구의 국제 신뢰도 획득

김 희 동

한국원자력연구소 안전성향상연구팀  
중대사고해석분야 책임자



한국원자력연구소는 최근 원자력 선진국인 프랑스로부터 원자로 격납 용기 실험 용역 사업을 국내 최초로 수주, 그동안 꾸준히 수행해 온 중대 사고에 대한 원전 안전성 확보를 위한 연구 성과를 국외에서 인정받게 되었다. 본 실험의 목적은 프랑스 900MWe 표준 원전 캐비티 모형에 대한 중대 사고시 고압 방출에 의해 캐비티 밖으로 방출되는 용융 노심 파편물의 방출량을 측정하고, 방출 분율을 예측하는 상관식의 검증과 캐비티의 구조 특성을 고려할 수 있는 상관식을 개발하는 것으로서, 금년 2월부터 내년 1월까지 수행한다.

**에**너지 부존자원이 빈약한 우리나라는 70년대 초 오일 쇼크를 겪으면서 에너지의 안정적인 공급과 기술집약적인 에너지의 확보를 위해 원자력산업의 적극적인 진흥을 추진하여 왔다.

영광원자력 3·4호기 및 후속기의

건설사업을 통하여 원전 핵심기술에 대한 기술 자립과 핵심부품의 국산화를 상당한 수준 달성하였으며, 이를 바탕으로 한국 표준원전 건설과 북한 경수로의 한국형 경수로 건설지원 및 해외 원전기술 수출을 도모하는 등 한국의 원자력산업은 세계적으로 주목

을 받고 있다.

또한 경제성 및 안전성이 획기적으로 향상된 차세대 원자로 개발도 추진 중에 있어, 우리 나라는 머지 않아 국제 경쟁력이 있는 원자력산업 선진국 대열에 진입할 것으로 전망된다.

그러나 이러한 원자력산업의 진흥

과 국제 경쟁력의 획득은 원전 안전성에 대한 기술능력 제고와 기술을 바탕으로 한 안전성 확보가 필수 전제조건임은 새삼 부연할 필요가 없다.

원자력발전소에서 안전성 확보를 위해 설정된 안전개념은, 여러 겹의 물리적 장벽을 설치하여 만약의 사고가 발생하더라도 방사능 물질이 외부로 누출되는 것을 방지하는 다중방호 개념과, 사고예방단계에서부터 사고완화·억제단계에 이르기까지 다단계 안전장치를 설정하여 사고 진전상황에 따라 적절히 대응할 수 있도록 시설과 절차를 확보하는 심층방어전략의 개념으로 이루어져 있으며, 이들은 안전성 확보개념의 기본틀을 이루고 있다.

이러한 심층방어전략은 원자력발전소의 설계에 고려된 사고 뿐만 아니라, 중대한 노심손상을 야기시킬 수 있는 사고까지 미연에 방지하여 주는 전략이다.

만일 사고가 발생하더라도 발전소 내 및 소외에 대한 완화조치가 가능하도록 하여 종합적인 안전성 확보가 가능하게 한다.

격납용기는 원자력발전소의 핵심 설비인 원자로용기·증기발생기 등을 외부에서 둘러싸고 있는 건물을 말한다.

그 기본적인 역할은 만약의 사고가 발생하더라도 방사능 물질의 외부 누출을 방지하여 주변주민과 환경을 방사능 피해로부터 안전하게 보호하는

최후의 보루 역할을 수행하는 것이라고 할 수 있다.

따라서 사고시 원전의 안전성 확보에 있어서 격납용기의 파손을 방지하고 건전성을 유지하는 것은 매우 중요하다.

미국의 TMI 원전사고와 옛 소련의 체르노빌 원전사고 등 두 차례의 원전 사고는, 원자력발전소의 설계시 고려된 설계기준사고를 넘어 노심이 손상되고 용융에 이르는 중대 사고가 실제로 발생할 수 있음을 보여줌으로써 세계인에게 원전 안전성에 대한 새로운 경각심을 불러 일으켰다.

특히 체르노빌 사고를 통하여 원전 사고시에는 국제협력하에 공동으로 대처해야겠다는 인식이 확산되었으며, 격납용기의 중요성이 더욱 부각되었다.

중대사고 현상을 규명하여 사고를 예측하고 대처하기 위한 연구는, 이러한 사고 이후 미국을 중심으로 독자적으로 혹은 국제공동연구의 형태로 활발히 수행되어 왔다.

그 중에서도 격납용기 건전성을 위협하고 격납용기 조기파손을 유발하는 격납용기 직접가열현상·증기폭발현상·수소연소현상 등은 주요 쟁점 현안으로 현재까지 실험연구와 해석연구가 꾸준히 수행되고 있다.

또한 안전성 및 경제성이 획기적으로 향상된 차세대 원전에 있어서 격납용기는, 더욱 강화된 안전성 목표에 따라 기본요건으로 설계기준사고를

넘어 노심이 손상된 중대 사고시에도 기본적인 역할인 방사능 물질의 외부 누출을 방지하는 기능을 충분히 수행할 수 있도록 요구되고 있어, 격납용기 건전성 평가 및 관련 연구는 계속 수행될 전망이다.

**격납용기 건전성 확보 연구**

**1. 격납용기 조기파손**

격납용기는 설계기준사고에 기초하여 이러한 사고발생으로 인한 하중에 견딜 수 있도록 설계된다.

그러나 발생 빈도는 매우 낮으나 설계시 고려하였던 최악의 사고보다 사고가 더 악화되어 노심이 손상되고 용융되는 중대사고로 발전하면, 노심용융물 파편들에 의해 격납용기 내의 온도와 압력이 급격하여 증가하여 격납용기가 조기에 파손될 위험이 있다.

격납용기 조기파손(Early Containment Failure)이란 중대 사고가 발생하여 노심이 손상·용융되고 원자로용기가 파손되는 시점을 전후하여 격납용기가 파손되는 것을 일컫는다.

원자로용기의 파손과 더불어 격납용기가 조기 파손하게 되면 원자로용기로부터 방출된 많은 양의 방사능 물질이 격납용기 내에서 침전되지 않고 바로 주변으로 방출되기 때문에 방사능 피해가 매우 커질 위험성이 있다.

격납용기 조기 파손을 일으키는 주

요 현상으로는 격납용기 직접가열, 증기폭발, 수소연소 등으로, 중대 사고 현상연구에 있어 쟁점 사항으로 다루어지고 있다.

## 2. 직접가열현상과 캐비티내 현상

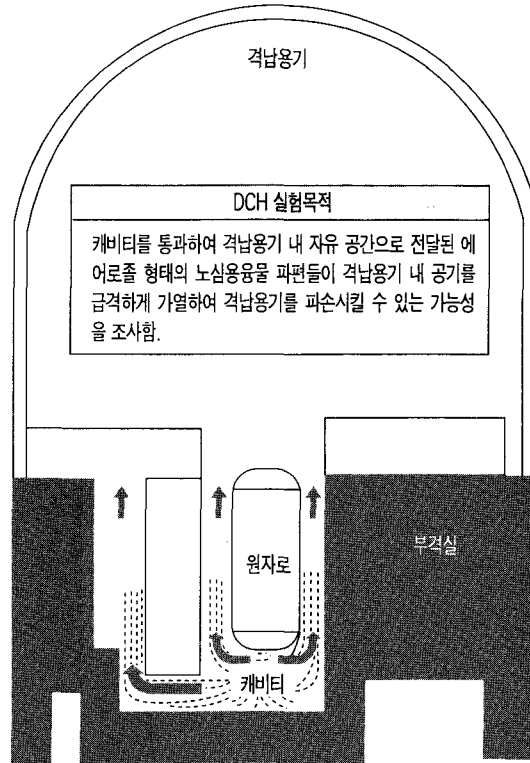
중대한 노심손상사고 중에서도 소형 냉각재상실사고나 전원상실사고와 같은 사고의 경우에는 1차계통이 고압을 유지하는 상태에서 원자로용기가 파손될 가능성이 있다.

만약 고압 상태에서 원자로용기가 파손되면 용융된 노심 파편물들이 작은 입자 형태로 원자로 하부 캐비티를 거쳐 격납용기 내로 분출되고, 용융된 노심 파편물들이 가지고 있는 고온의 열에너지가 격납용기 내로 급격하게 전달되어 격납용기 대기를 직접 가열하게 된다(그림 1).

이때 지르코늄이나 철과 같은 금속성 물질은 대기중의 산소 또는 수증기와 산화반응을 하여 수소를 생성하게 되며 수소연소가 일어나기도 한다.

노심 파편물과 격납용기 대기와의 에너지 교환은 노심 파편물과 대기와의 열 전달, 노심 파편물과 수증기의 화학반응, 노심 파편물과 대기 중의 산소와의 산화반응, 수소연소 등을 통해서 일어나며 그 결과, 격납용기 대기가 가열되고 급격히 팽창하여 격납용기의 건전성을 위협하고 조기 파손 가능성을 증가시킨다.

격납용기 직접가열에 의해 증가하



〈그림 1〉 격납용기 직접가열현상 개략도

는 압력하중과 격납용기 조기 파손 가능성의 정확한 예측을 어렵게 하면서 불확실성이 큰 부분은, 격납용기 직접가열현상의 초기조건을 결정하는 원자로 하부 캐비티 내에서의 현상으로, 압력하중의 정확한 예측을 위해서는 이들 현상의 정확한 규명이 필요하다.

즉 원자로 하부 캐비티 내에서의 열수력적인 거동, 노심 파편물이 원자로 하부 캐비티를 통과하여 부격실로 이송하여 가는 과정, 그리고 이와 수반

하는 수소연소현상 등을 정확하게 규명하여야 한다.

또한 이러한 초기조건은 노심 손상 과정과도 직결되어 있어, 용융되어 원자로용기 하부에 쌓이는 노심 파편물의 양과 구성성분, 원자로용기 파손 부분의 크기, 분출되는 용융노심 파편물의 분출률 등에 따라 격납용기 내의 압력이 달라지므로 이들 현상을 정확하게 예측할 수 있어야 한다.

그러나 캐비티 내에서 일어나는 열수력학적 현상은, 수증기·용융노심

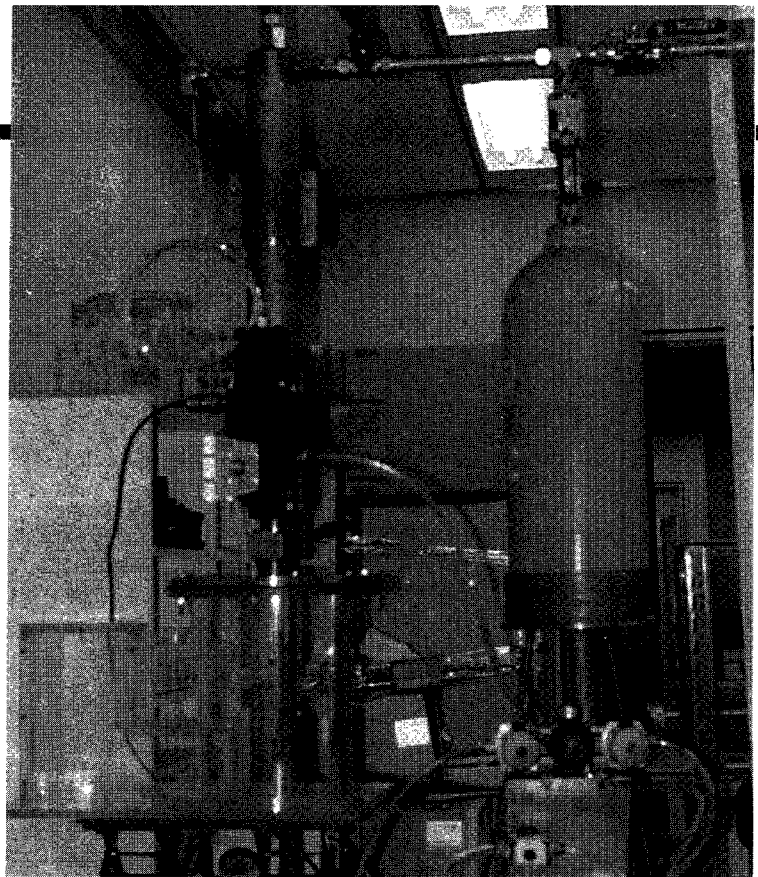
파편물·가스 등으로 이루어진 다상(Multi-phase) 혼합물이 서로 화학반응을 일으키거나 압축성 난류유동을 하는 등 현상이 매우 복잡하기 때문에, 중대사고시 캐비티 내 현상에 대한 이해는 현재까지 소규모의 실험이나 단순화한 모델을 이용한 간단한 계산에 의존하는 등 극히 제한되어 있다.

용융 노심 파편물이 가지고 있는 열에너지가 격납용기 대기로 전달되는 비율은 캐비티 내에서의 현상에 따라 크게 영향을 받는 것으로 알려져 있으며, 이러한 것을 결정하는 주요 인자로는 용융노심 파편물 입자의 크기와 분포, 가스의 질량유속 및 캐비티 밖으로 빠져 나오는 노심 파편물의 양 등을 들 수 있다.

또한 노심용융물 파편들은 복잡한 캐비티 구조를 통과하여 격납용기 대기 내로 분출되므로, 분출되는 동안 캐비티 벽에 부딪치거나 되튀어 나오는 등 구조물의 영향으로 노심 파편물 방출분율이 영향을 받을 것으로 예측할 수 있다.

이것은 캐비티 모형을 이용한 실험 결과를 살펴보면 알 수 있는데, 캐비티에서 방출되는 노심 용융물 파편의 방출특성이 캐비티의 기하학적 구조에 따라 큰 차이를 보이고 있어, 방출 특성이 캐비티 형태와 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다.

그러나 아직 이러한 것을 예측하는 방법론은 완전히 개발되어 있지 않으며, 다만 미국 Sandia 국립연구소에



격납용기 직접가열현상 완화를 위한 캐비티 고압분출 실험장치·아크릴은 캐비티 모형이며, 오른쪽 용기는 원자로계통을 모의한 용기이다.

서 개발한 격납용기 종합해석 전산코드인 CONTAIN 코드에서는, 사용자가 노심 파편물의 나포율을 임의로 결정, 이를 매개변수로 하여 해석하도록 되어 있다.

따라서 CONTAIN 코드에서는 격실에 부유하고 있는 노심 파편물 중 입력으로 주어진 나포율 만큼은 격실 바닥으로 침전되며, 이를 제외한 나머지 노심 파편물이 격납용기 직접가열에 참여하도록 되어 있다.

### 국내의 연구현황

#### 1. 국외 연구현황

격납용기 직접가열현상은 중대사고 연구분야 중 가장 집중적인 연구가 이

루어진 분야 중의 하나로, 주로 미국 국립연구소를 중심으로 일련의 고온 용융 금속상사물을 이용한 종합 실험과 해석코드 개발이 이루어졌다.

초기의 실험 연구로는 노심 용융물의 고압방출현상 연구를 위해 Sandia 국립연구소에서 SPIT(System Pressure Injection Test), HIPS(High Pressure Melt Streaming) 등의 실험이 수행되었다.

그 실험에서 노심파편물에 의한 예측하지 못한 공기의 가열로 실험시설이 손상되어, 그 때까지 간과하였던 고압방출에 의한 격납용기 직접가열 현상에 대한 중요성을 새롭게 인식하게 되었으며, 이로 인해 격납용기 대기압력이 급격하게 상승할 수도 있음

을 알게 되었다.

노심 파편물 방출분율을 결정하기 위한 저온 상사물질을 이용한 소규모 개별효과실험으로는, Brookhaven 국립연구소에서 Zion·Surry·Watts Bar 캐비티를 대상으로 수행한 실험과 영국 AEA에서 수행한 Sizewell-B 실험이 있으며, Argonne 국립연구소에서 코륨(Corium)을 이용하여 수행한 CWTI(Corium Water Thermal Interaction) 실험이 있다.

이들 실험결과 1차계통 압력이 약 4MPa 이상이면 캐비티 구조와 상관없이 대부분의 노심 파편물이 캐비티 밖으로 방출되지만, 그 이하의 저압에서는 캐비티 구조가 방출분율에 크게 영향을 미치는 것으로 나타났다.

또한 이러한 실험결과를 토대로 Ginsberg-Tutu 상관식, Levy 상관식 등이 개발되었으나, 이들 상관식은 특정한 캐비티 형태에서만 적용이 가능하여 일반적으로는 적용할 수 없는 단점이 있다.

한편, Sandia 국립연구소에서는 실제 격납용기 크기의 1/10 크기인 SURTSEY 실험시설을 이용하여, 종합효과실험(Integral Effect Test, IET)을 Zion 및 Surry 캐비티 모형에 대해 수행하였으며, 최근에는 CE사의 캐비티 모형에 대해, 환형형태인 원자로 주변 공간 사이로 방출되는 노심 파편물의 분율특성에 대한 실험을 수행하였다.

또한 Argonne 국립연구소에서도

같은 Zion 및 Surry 캐비티에 대해 1/40 크기의 소규모 실험을 수행하여, 크기가 다른 같은 형태의 모형에서 수행된 실험결과를 비교함으로써 모형크기가 실험결과에 미치는 영향을 비교·연구하였다.

실험 연구와 더불어 격납용기 직접 가열에 의한 격납용기 하중을 예측하기 위해 많은 전산코드가 개발되었다.

그 중 국내에 널리 알려져 있는 격납용기 해석 종합전산코드로는 CONTAIN 코드가 있다.

Control Volume 코드인 미국 NRC의 CONTAIN 코드는 격납용기를 여러 격실로 나누어 해석할 수 있다.

분할된 격실의 수를 달리한 민감도 해석결과에 의하면, 격납용기 내의 격실은 용융 노심 파편물을 분산하여 격납용기 대기와 상호작용을 제한함으로써 격납용기 직접가열현상을 완화하는 효과가 있음을 보여 주었으며, 또한 열전달 및 물질전달, 수소연소, 원자로용기 파손부위의 크기 등의 영향이 중요함을 알 수 있었다.

CONTAIN 코드보다 자세한 해석 코드로는, 입자의 추적계산이 가능하며 주로 실험해석을 위해 사용하는 KIVA 코드를 격납용기 직접가열현상 해석용으로 개선한 코드가 있다.

확률론적 안전성평가(PSA) 연구 활용을 목적으로 Sandia 국립연구소에서 개발된 중대사고 종합 해석코드인 MELCOR 코드도 격납용기 직접 가열현상을 해석할 수 있는 모델을 포

합하고 있으며, 사용자가 선정한 매개변수를 이용하여 주요현상을 해석할 수 있도록 되어 있다.

영국에서는 원자로용기와 캐비티 내에서의 거동을 보다 자세히 모사할 수 있는 CORDE 코드를 개발하여 CONTAIN 코드와 연계하여 사용하였으며, 이탈리아에서도 CONTAIN 코드에서 사용한 모델과 유사한 모델을 사용한 FUMO 코드를 개발하여 격납용기 해석에 사용하고 있다.

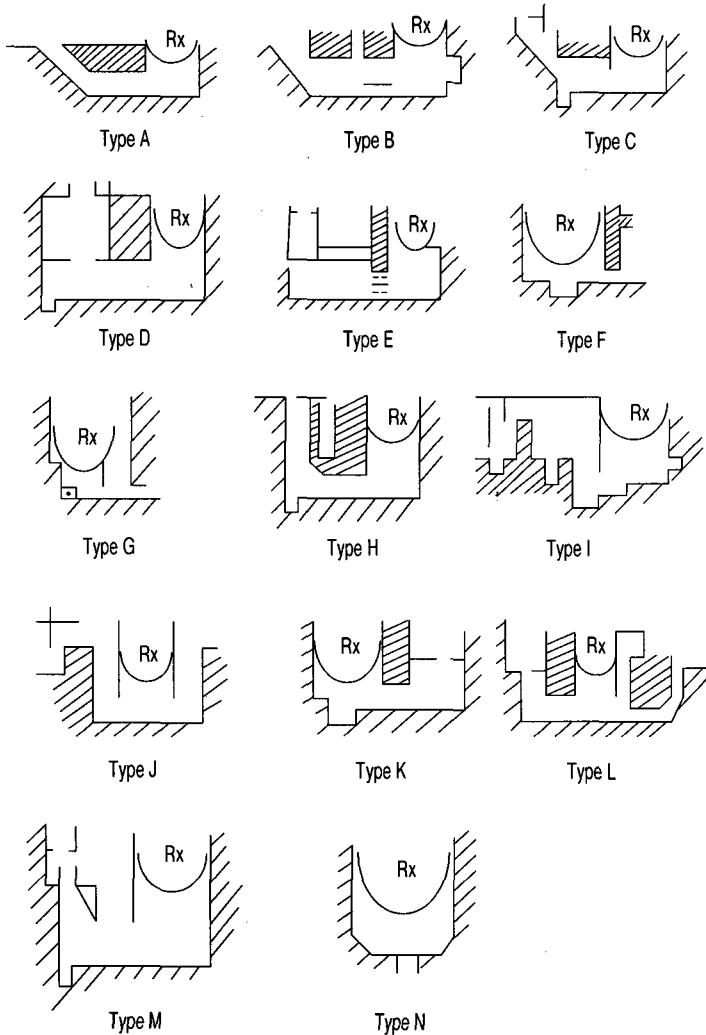
## 2. 국내 연구현황

국내에서의 격납용기 관련 현상연구는 국내 원전의 중대사고 평가와 관련하여 CONTAIN 코드를 활용한 해석적 연구를 주로 수행해 왔다.

실험 연구는 격납용기 직접가열현상의 초기조건인 캐비티 밖으로 방출되는 노심 파편물의 방출분율 특성과 캐비티 구조에 대한 설계개선 및 검증 등을 목적으로, 소규모 개별효과실험이 고리 1호기, 영광 3·4호기, 울진 3·4호기 등을 대상으로 수행되었다.

캐비티 모형은 1/20 및 1/30 크기의 축소모형을 사용하였으며, 원자로용기 파손부위의 크기, 1차계통의 압력, 캐비티 출구면적 및 통로면적 등을 달리하여 캐비티 구조가 노심 파편물 방출특성에 미치는 영향을 규명하고 상관식을 개발하였다.

특히 이러한 연구는 캐비티 설계개선을 통한 중대사고시 격납용기 직접 가열현상의 완화를 목표로, 미국의



(그림 2) IDCOR의 캐비티 모형분류

EPRI(Electric Power Research Institute)가 캐비티 형태로 권고한 캐비티 형태를 참고하여, 캐비티 내 노심 파편물이 쉽게 나포될 수 있는 나포체적을 만들고 캐비티 구조개선

에 따른 영향을 실험하였으며, 캐비티의 기하학적 구조를 고려한 새로운 무차원 변수를 도입하여 보다 일반적으로 적용할 수 있는 상관식을 개발하였다.

그의 국내 실험연구로는 한국과학기술원에서 영광 1·2호기 캐비티를 대상으로 물 및 Wood Metal을 이용하여 수행한 실험이 있다.

**캐비티 설계개선**

국내에서 가동중인 원자로와 같은 가압경수로의 원자 용기 밑바닥 아래 쪽에는 노내 계측설비를 위한 안내관이 설치되어 있으며, 케이블로 외부와 연결되어 있다.

캐비티는 원자로용기 아래 쪽에 케이블이 통과하고 있는 공간을 지칭하는 것으로, 그 구조는 발전소 특성에 따라 케이블의 설치와 외부로부터의 접근이 용이하도록 설계되어 있으며, (그림 2)에서 볼 수 있는 것과 같이 발전소 마다 다르며 매우 다양한 형태를 가지고 있다.

캐비티의 구조가 사고시 격납용기 건전성에 미치는 영향에 대해서는 TMI 사고와 같은 중대한 노심손상사고 이전에는 거의 고려하지 않았으나, 중대 노심손상사고 이후 원자로용기 파손 후 용융노심 파편물의 고압 분출로 인한 격납용기 직접가열에 대한 우려와 함께 이에 관한 연구가 활발히 진행되었다.

미국의 산업체는 IDCOR (Industry Degraded Core Rule-making)을 통해 미국내 주요 발전소를 (그림 2) 및 <표 1>에서와 같이 유형별로 Type A부터 Type N 까지 분

〈표 1〉 IDCOR 캐비티 모형 분류

유형	발 전 소
Type A	Braidwood 1&2, Byron 1&2, Zion 1&2
Type B	Seabrook, Indian Point 2&3, Trojan
Type A	Sequoyah 1&2, Catawaba 1&2, McGuire 1&2, Watts Bar
Type B	Millstone 3, Beaver Valley 1&2, Surry
Type A	South Texas 1&2
Type B	Calvert Cliffs 1&2, Arkansas 2, Millstone 2
Type A	Oconee 1&2&3
Type B	Summer 1, Main Yankee, Palo Verde 1, 2&3
Type A	St. Lucie 1&2, Point Beach 1&2, Waterford 3
Type B	San Onofre 2&3
Type A	Arkansas Nuclear 1, WNP 1
Type B	Bellefonte 1&2
Type A	Callaway 1, Comanche Peak 1&2, Wolf Creek
Type B	Yankee Rowe

〈표 2〉 BNL의 캐비티 유형분류

Group 1	Group 2	Group 3	Group 4
Large Debris Dispersal	Medium Debris Dispersal	Small Debris Dispersal	Non/Little Debris Dispersal
Type A Type B Type F Type J Type N	Type L	Type C Type K Type M	Type D Type E Type G Type H Type I

〈표 3〉 실험계획

초기조건	프랑스형 캐비티(1/20)	Zion 캐비티(1/20)
1차계통 압력	0.3MPa에서 4MPa	0.3MPa에서 4MPa
Corium 상시물질의 질량	0.5kg, 1.0kg	0.5kg, 1.0kg
파손 부위 크기	10mm, 20mm	10mm, 20mm
총 실험 횟수	60	40

류하였으며, Brookhaven 국립연구소에서는 이를 다시 노심 용융물 방출 가능성 정도에 따라 4개의 그룹으로

가하고, 더 나아가 이러한 평가결과를 바탕으로 캐비티 설계개선이 이루어져야 한다.

나누어 캐비티 특성을 기술하고 있다(표 3).

이러한 분류는 그룹 4에 속하는 캐비티 형태의 예와 같이 일반적으로 캐비티 바닥 출구 끝에 Sump가 설치되어 있거나, 콘크리트벽 등으로 구조가 복잡한 경우 노심용융물 파편의 방출이 어려울 것으로 예상하여 분류한 것으로, 분류에 대한 명확한 근거

최근 차세대원자로 설계에서는 중대사고시 격납용기 직접가열사고의 위험을 줄이기 위한 방안으로 캐비티 설계개선이 고려되고 있다.

이러한 방안은 원자로 파손에 따라 분출되는 용융물을 캐비티 구조의 개선을 통하여 최대한 캐비티 내에서 나포하고자 하는 것으로, 격납용기 상부 대기와 용융물의 직접적인 접촉을 줄임으로써 격납용기 압력과 온도의 급격한 상승을 방지하고자 하는 것이다.

EPRI는 차세대 원자로 설계요건으로 노심 용융물을 쉽게 나포할 수 있도록 캐비티 출구 쪽 벽면에 집수구를 설치할 것을 권고하고 있고, 이러한 개념은 울진 3·4호기 설계에 일부 반영되었다.

한편 Brookhaven 국립연구소에서는 용융노심 파편물을 나포하여 집적하는 별도의 격실을 가진 캐비티 설계를 제시하고 특허를 출원한 바 있다.

캐비티 설계개선을 위해서는 먼저 캐비티 구조에 따른 유동해석을 하여야 하며, 기존 캐비티 모형에 대한 실험과 기존 실험결과들을 종합하여 표준 캐비티 모형을 선정하는 작업이 따라야 한다.

이어 이들 모형을 변화시켜 가며 실험과 해석을 수행하여, 궁극적으로 격납용기 직접가열현상을 최소화하는 설계안을 도출하여야 한다.

그러나 캐비티 구조에 따른 유동해석과 실험은 캐비티 내의 현상이 매우

복잡하여 많은 어려움이 있다.

예를 들면 캐비티 내 용융물의 분출 현상은 복잡한 구조물 내 입자와 기체의 이상유동의 과도현상에 의해 지배됨에 따라, 유동해석을 위해서는 다차원 다상 유동해석 모델을 사용하여 과도현상을 모의하여 하기 때문에 매우 어려운 연구결과가 별로 알려져 있지 않다.

다만 1차원 다상 유동모델이나 2차원 단상 유동모델 등을 이용한 단순화한 모델을 사용한 결과가 일부 발표되었다.

캐비티 내 유동특성을 규명하기 위한 실험 또한 2상(Two Phase) 간에 작용하는 입자의 Entrainment, 용융물 액막 흐름, 입자의 크기 등의 측정에는 많은 제한이 따른다.

따라서 캐비티 특성실험은 주로 캐비티 밖으로 방출되는 노심용융물 방출분을 측정실험을 수행하고 실험 결과로부터 상관식을 개발하였으나, 현재까지 실험결과로부터 개발된 상관식들은 이러한 캐비티의 구조특성을 고려하지 않았기 때문에 모양이 다른 캐비티에 상관식을 일반적으로 적용하기에는 문제가 있다.

그러므로 새로운 캐비티 모형의 용융물 방출분율을 구하기 위해서는 해당 모형에 대한 실험자료가 필요하며 독자적인 실험이 이루어져야 한다.

격납용기 직접가열현상에 대한 연구를 주도적으로 수행해 온 미국의 경우, 원자력산업의 침체로 아직 현상에

대해 많은 부분이 규명되지 않고 예측에 있어 불확실성이 여전히 남아 있지만 실질적인 면에서 문제를 종결하려고 하고 있으며, 유럽의 경우도 프랑스를 제외하고는 적극적인 연구활동을 벌이지 않고 있다.

그러나 원자력산업의 지속적인 진흥을 추구하고 있으며 차세대 원전을 개발 중인 우리나라는, 격납용기 건전성 확보를 위한 연구의 일환으로 캐비티 관련 연구가 계속 수행될 전망이다.

더욱이 프랑스 900MWe 표준원전 캐비티에 대한 실험 용역을 수주함으로써, 같은 형인 울진 1·2호기 원전의 평가와 서로 다른 캐비티 모형에 적용할 수 있는 일반적인 상관식을 도출하여 국내 원전의 격납용기 직접 가열 현상 평가에도 사용하는 등, 기존 원전 및 신형원전의 설계·검증을 위한 기술개발과 안전성 확보 연구는 지속적으로 수행될 것으로 보인다.

### 직접가열현상 실험용역

#### 1. 배경

한국원자력연구소에서는 그 동안 「발전용 원자로의 중대사고에 관한 연구」 등 원자력발전소의 중대사고에 대한 안전성 확보를 위한 연구를 지속적으로 수행해 왔으며, 중대사고 연구협력을 위한 미국 NRC와의 CSARP (Cooperative Severe Accident Research Program), 1차계통 및 격납용기 내에서의 핵분열 생성물 거동

실험 연구인 프랑스의 PHEBUS-FP 프로그램 등 국내 공동연구에도 활발히 참여해 오고 있다.

최근에는 정부 주도 원자력 연구개발 중장기과제의 일환으로 「원자력안전성 향상연구」 과제에서 중대사고 해석을 위한 분석코드 개발 및 격납용기 조기파손 요인이 되는 주요쟁점 현상 규명을 위한 소규모 개별효과 실험을 수행하고 있다.

특히 캐비티 설계개선을 통한 격납용기 직접가열사고 완화를 목적으로 캐비티 구조에 따른 노심 파편물의 방출분을 측정과 캐비티 구조개선에 따른 효과 등을 실험하고 기하학적 특성을 고려한 상관식을 개발하였으며, 이러한 현상을 해석할 수 있는 모델개발에도 노력을 기울이고 있다.

한국원자력연구소와 프랑스원자력방호 및 안전연구소(IPSN) 간 중대사고분야의 연구협력은 92년부터 IPSN이 주관하는 핵분열 생성물 거동 실험인 PHEBUS-FP 프로그램에 참여함으로써 지속적으로 이루어져 왔으며, 근년에 이르러 국제공동연구 협력이 강화되고 있는 추세에 따라 연구분야의 확대와 전산코드 개발을 위한 공동연구팀(Joint Research Team : JRT)의 구성 등을 합의하였다.

한국원자력연구소와 이러한 협력관계를 유지하고 있는 프랑스 측은 900MWe 표준원전에 대한 2단계 PSA(격납용기 성능에 대한 안전성 평가) 수행에 따라, 프랑스형 캐비티



에 대한 용융노심 파편물의 방출분을 특성결정과 이미 개발된 상관식의 적용 타당성의 검증이 필요하게 되어, 프랑스형과 같은 원전인 울진 1·2호기를 보유하고 있을 뿐만 아니라, 이 분야에 팔목할 만한 연구성과를 내고 있는 한국원자력연구소에 실험용역을 의뢰하기에 이르렀다.

## 2. 실험목적

본 실험의 목적은 프랑스 900MWe 표준원전 캐비티 모형에 대해 중대사고시 고압방출에 의해 캐비티 밖으로 방출되는 용융노심 파편물의 방출량을 측정하고 방출분율을 예측하는 상관식의 검증과 캐비티 구조특성을 고려할 수 있는 상관식을 개발하는 것이다.

## 3. 실험내용

KAERI-IPSN 실험용역기간은 96년 2월 1일부터 97년 1월 31일까지 1년간으로, KAERI는 실험수행에 필요한 인력·시설·재료를 제공하여 다음과 같은 실험과 해석을 수행한다.

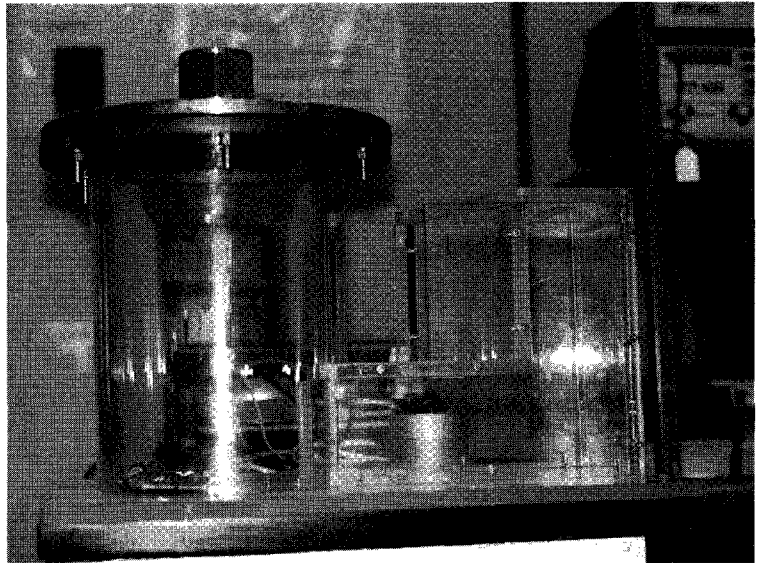
### 가. 실험장치 및 캐비티 모형의

#### 설계제작

- ① 1/20 크기의 Zion 캐비티 설계 제작 및 기존 실험장치 개선
- ② 1/20 크기의 900MWe 프랑스형 캐비티 설계제작

나. 각 격실에 방출되는 노심파편물의 분율 및 압력 측정(표 3)

### 다. 실험결과 분석



고리 1·2호기 1/20 크기의 캐비티 모형. 스테인리스 철판으로 덮여있는 부분이 반대편의 출구이다.

기 수행된 ANL에서 캐비티 모형에 대한 고온 용융물 실험결과와 본 실험 결과의 비교 분석

- ① ANL의 Sweep-out 모델의 검증
- ② Zion 모형 실험결과와 프랑스 캐비티 모형 실험 결과 비교 분석
- ③ 상관식을 이용한 실험결과 해석

## 4. 추진방법

이 연구는 한국원자력연구소와 프랑스원자력방호 및 안전연구소(IPSN/CEA) 간의 원자력 안전 및 방호에 관한 기술협력협약에 의거하여 프랑스측에서 실험을 의뢰해 오며 따라 수행되는 것이다.

프랑스 IPSN측에서는 연구비를 지

원하고, KAERI에서는 실험을 수행하는 것으로 되어 있다.

연구는 긴밀한 상호 협력체제 아래 진행하며, IPSN은 KAERI가 수행한 모든 실험자료를 공유하고, 필요에 따라 실무자를 파견하여 실험에 참가한다.

연구수행과 진행상황은 양측 대표로 구성된 위원회를 두어 검토하며, 실무자 간에는 기술적인 협력과 협의를 거친다.

두 기관은 또한 실험결과를 해석하여 그 경험과 자료를 상호 교환한다.

이러한 협력관계는 본 실험 이후에도 계속될 전망이다. 1차적으로 실험자료 생산에 역점을 두면서 추후 후속과제로 수행을 계속해 나간다.

## 5. 의의와 전망

이번 한국원자력연구소에서 프랑스 IPSN으로부터 격납용기 직접가열현상실험 용역을 수주하게 된 것은, 중대사고연구분야, 특히 실험연구분야에서 원자력선진국인 프랑스와 한국 원자력연구소가 대등한 입장에서 연구협력을 수행할 수 있음을 보여 주는 것으로, 그 동안 꾸준히 수행해 온 중대사고에 대한 원전 안전성 확보를 위한 연구성과를 국외에서 인정받는 계기가 되었으며, 국내 안전연구 수준이 제도에 올라 있음을 입증하는 것이다.

그 동안 한국원자력연구소는 기술 축적을 위하여 미국·프랑스 등이 주도하는 국제공동연구에 참여하여, 주로 최신자료 및 전산코드 도입, 정보 교환, 연구현황 파악 등을 수행해 왔으며, 전산코드 및 실험결과 자료 활용 측면에 치중해 왔다.

그러나 이번 실험용역의 수주로 연구 결과물의 사용자인 피동적인 입장이 아니라 대등한 협력자로서 실질적인 공동 연구프로그램을 추진할 수 있게 된 것에 의의를 찾을 수 있다.

이는 원전 안전성 연구에 대한 국제적인 신뢰도의 획득과 국제 협력이 강조되고 강화되고 있는 시점에서 한국이 주도적인 역할을 담당할 수 있음을 보여 주는 것이다.

지금 우리 나라는 차세대 원전의 개발과 신형원자로 등 새로운 개념의 원자로 설계를 추진하고 있으며, 원자로의 기술자립과 더불어 원전기술의 해

외수출을 구상하고 있다.

이러한 새로운 개념의 원자로 설계·건설을 위해서는 검증을 위한 실증실험이 반드시 필요하며, 원전기술의 해외수출 또한 실험을 통한 안전성의 검증이 반드시 수반되어야 한다.

따라서 실험분야의 연구성과의 인정을 의미하는 실험용역은 원자로 기술 자립, 원자로 기술수출을 위한 도약의 장을 마련한 것이라고 할 수 있다.

현재 한국원자력연구소에서는 중대사고현상 규명과 사고 관리실증실험을 우리의 주관하에 국제공동연구로 추진하려 하고 있어, 이번 실험용역을 계기로 주도적 입장에서 공동연구팀의 구성 등 국제공동연구를 이끌어 나갈 수 있는 발판을 마련하였으며, 정부의 시책인 세계화에 더욱 다가서게 되었다.

### 결 언

TMI 사고 이후 미국은 중대사고연구를 활발히 수행해 왔으나 원자력산업계의 침체로 그 규모가 대폭 축소되었으며, 유럽의 경우도 프랑스를 제외하고는 활발한 연구가 수행되고 있지 못한 반면, 한국은 차세대 원전개발 등 원전산업에 대한 활발한 투자로 세계의 주목을 받고 있다.

이러한 시점에서 중대사고실험연구를 통한 안전기술의 확보를 의미하는 실험 용역은 매우 의미가 크다.

캐비티 설계개선을 통한 노심용용

물의 방출을 억제하고 격납용기 직접가열현상을 완화하여 격납용기 건전성을 확보하기 위한 본 실험연구는, 비교적 소규모 모형에서 물과 질소가스를 상사물로 사용하여 수행된다.

그렇기 때문에 실제 크기의 원전에 실험결과를 적용하기 위해서는 상사법칙과 크기에 대한 영향을 충분히 고려하여야 한다.

또한 상사물질도 실제 노심용용물과 큰 차이가 있으며, 열수력학적 측면만 고려되었으므로 열전달·화학반응 등의 영향도 고려한 실험이 수행되어야 할 것으로 판단되며, 추후 Wood metal 등을 사용한 실험도 계획하고 있다. 국내의 중대사고실험 연구는 프랑스로부터 연구의 성과를 인정받음으로써 한 단계 도약의 발판을 마련하였다.

그러나 실험용역을 수주하였음에도 불구하고 중대사고 연구분야에서의 기술수준은 이들과 비교할 때 많은 차이가 있음을 인정하지 않을 수 없다.

따라서 중대사고연구가 사안의 중요성과 복잡성, 대형 실험의 필요 등 많은 부분이 국제공동연구 협력 형태로 수행되고 있는 추세에 따라, 이러한 국제공동연구 협력을 통하여 기술수준의 차이를 극복하고, 우리 연구활동의 수준을 더욱 향상시켜 국제적 신뢰를 쌓아 나가야 할 것이며, 이를 위해서 장기적이며 지속적인 투자와 전문인력의 양성이 필요하다고 하겠다. 