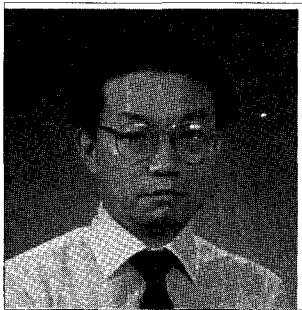


원자로 중대사고 심층방어 프로젝트

SONATA-IV

서 균 렬

한국원자력연구소 응용연구그룹
위해도 및 신뢰도 Lab 책임자



원전의 중대사고 가운데 대표적인 경우는 TMI 원전의 사례와 같은 노심용융사고로서, 이에 대한 지금까지의 개념은 높은 온도로 녹아내린 핵연료물질이 원자로 밑바닥에 내려앉아 원자로벽을 뚫고 나감으로써 또 다른 방사능 누출이 되지 않겠느냐는 이론이었다. KAERI의 徐鈞烈 박사팀은 최근 이러한 종래의 이론을 뒤집는 새로운 개념을 개발했는데, 이는 높은 온도의 핵연료 물질과 원자로 용기 사이의 물성 차이로 핵연료 물질과 용기 표면 사이에 좁은 간격이 생겨 이 틈새로 냉각수가 스며들어 원자로를 식힌다는 개념이다. 徐박사팀은 이런 현상을 컴퓨터 모델링을 통해 세계 원자력계 최초로 그 이론적인 뒷받침을 제공했다. SONATA-IV로 이름 붙인 이 프로젝트의 내용과 이에 대한 OECD의 다국공동연구 추진 경위, 향후 계획 등을 들어본다.

P WR(가압경수로) 원자력발전소 정상 운전 상태에서는 원자로내의 핵연료가 핵분열을 하면서 방출해 내는 고열을 고압 냉각수가 제거하여 열교환기를 통해 2차계통에 증기를 발생시켜 터빈을 돌림으로써 전기를 생산하게 된다.

또한 원자로는 화력이나 수력 발전과는 달리 원자로가 정지된 다음에도 약간의 방사성 붕괴열을 방출하게 되므로, 이러한 소위 잔열을 제거하기

위해서도 일정량의 냉각수 공급이 필수적이다.

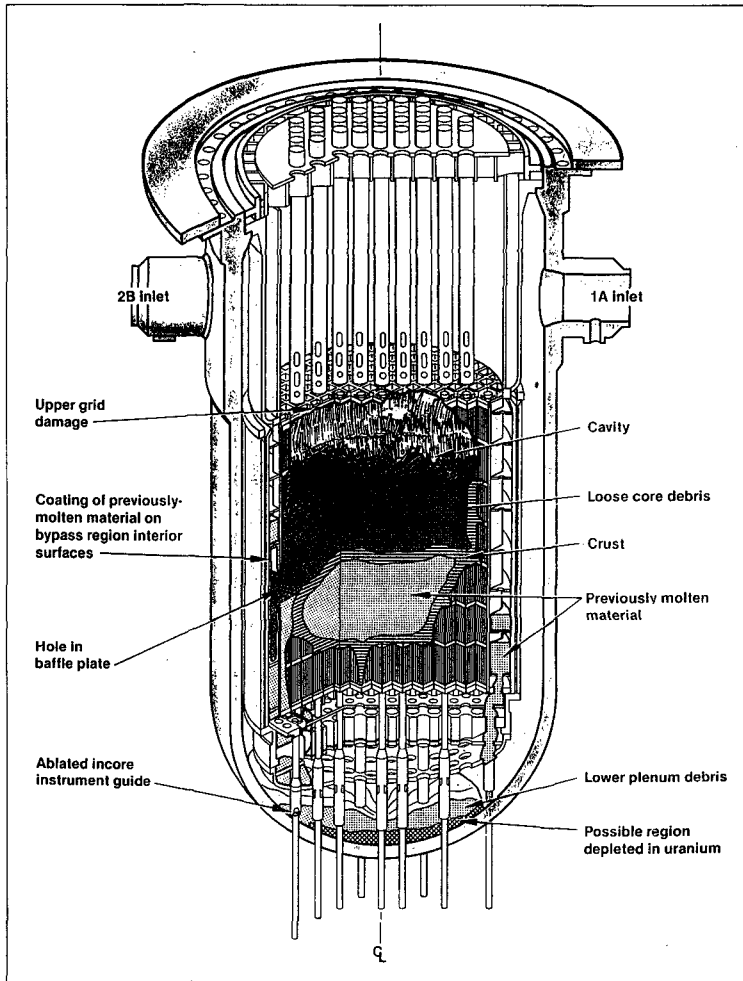
따라서 정상 운전이나 정지시 인적·기계적 요인으로 이러한 냉각수의 공급이 제대로 이루어지지 않는 경우 원자로 핵연료가(경우에 따라서는 대량) 녹아 내릴 수 있으며, 이를 원자력계에서는 중대사고라 일컫고 있다.

이러한 대형 원자력 사고는 그 빈도는 일반적으로 대단히 낮지만, 방사능

오염 등으로 인한 결말이 인간 및 생태계, 나아가서는 환경 및 경제 전반에 지대한 영향을 미칠 수 있다.

이러한 중대사고의 실례로서 79년에 일어났던 미국 TMI-2와, 86년에 발생한 옛 소련 체르노빌(Chernobyl) 원전을 들 수 있다.

물론 체르노빌 원전은 원자로심의 설계가 한국 원전과 판이하게 다르기 때문에 우리와 직접적인 상관이 없다고 할 수 있다. 그러나 TMI-2는 우리



(그림 1) TMI-2 노심 손상 조감도

원자로의 대부분을 차지하는 PWR형 이었다.

TMI-2에서는 운전원의 실수, 기기의 오작동, 조직상의 문제 등이 결부된 복잡한 사고가 일어나 원자로심(핵연료 집합체 부분)에 냉각수가 제때에 공급이 되지 않아 심각한 노심 손상이 초래되었다(그림 1).

TMI-2 원전 사고 이후 세계 각국에서는 이러한 중대사고를 예방 내지는 완화하기에 필요한 연구를 다방면에 걸쳐 심도 있게 수행해 왔다.

이러한 노력에도 불구하고 TMI-2 사고의 후기(사고 발발 3시간45분 이후) 경과에 대한 현상학적 이해는 다소 피상적이었다.

이에 OECD(경제협력개발기구)에서는 1990년 다국 공동 연구 프로그램을 주관하여 TMI-2 원자로의 내부 시편 재료 조사에 착수하게 되었다.

이 프로그램의 가장 중요한 성과로서, 전체 원자로심 물질 100여 톤(ton) 중 20톤 가까이 가 하부로 녹아 내려 원자로 바닥에 쌓였으며, 이 20톤의 용융물에서 붕괴열이 계속 발생하는 상태에서도 원자로 하부 용기가 단시간(수십분)내에 급격히 냉각되었다는 연구 결과가 93년에 발표되었다.

이는 사고 당시 냉각수의 열제거 능력이 지극히 제한되어 원자로 하부의 건전성이 고온 용융물에 의해 대단히 위험 받아 파손 상태에 가까이 갔으리라는 기존의 원전 안전 전문가들의 통념을 뒤바꾸는 새로운 사실이었다.

SONATA-IV 프로젝트

이렇듯 TMI-2에서 자연적으로 발생한 원자로 냉각 현상을 이론적으로 규명하고 실험적으로 입증하게 되면, 이는 기존 원자로의 실제 중대사고에 대한 안전 여유도가 기존의 통설보다 훨씬 더 높다는 것을 입증하게 된다.

나아가서는 이를 달성하는 데 필요한 사고 예방 및 완화 전략을 도출해냄으로써, 불필요한 운영 보수 및 설계 변경 등을 지양하고 원전 발전 단가를 절감하는 데에도 기여를 하게 된다.

또한 이러한 연구의 결과는 국민의 원자력 발전에 대한 확고한 신뢰도 확

득은 물론, 공공 수용 분위기 조성 및 원전 건설 부지 확보에도 큰 보탬이 될 것이다.

지난 1년여에 걸쳐 한국원자력연구소에서는 세계 원자력계 최초로 근본 원리를 창안해내고, 컴퓨터 모델링을 통해 TMI-2 사고시 원자로의 비교적 급격한 자연 안전 냉각 현상을 규명하기에 이르렀다(그림 2).

이러한 우리의 연구 결과는 국내외 학술 잡지, 학술 대회 및 전문가 워크숍 등에서의 발표를 통해 기술적 타당성을 긍정적으로 평가 받고, 대형 다

국 공동 연구 프로젝트와의 당위성을 인정 받았다.

SONATA-IV(Simulation Of Naturally Arrested Thermal Attack In Vessel) 프로젝트는 세계 초유의 대형 핵연료 용융물 자연 냉각 실험이다.

근본 원리는 <그림 2>에 도시된 바와 같이 고온의 핵연료 용융물이 원자로 바닥에 흘러내려와 바닥에 닿게 되면 냉각수가 순간적으로 수증기로 변하며 용융물을 원자로 용기 바닥으로부터 밀어내게 된다.

또한 핵연료(주로 도자기 재료와 같은 요업 재료)와 원자로 용기(강철과 같은 금속 재료) 간의 물성 차이로 말미암아, 핵연료 용융물은 수축하고 반면에 원자로는 가열되며, 내압과 용융물 무게에 의해 팽창하게 된다.

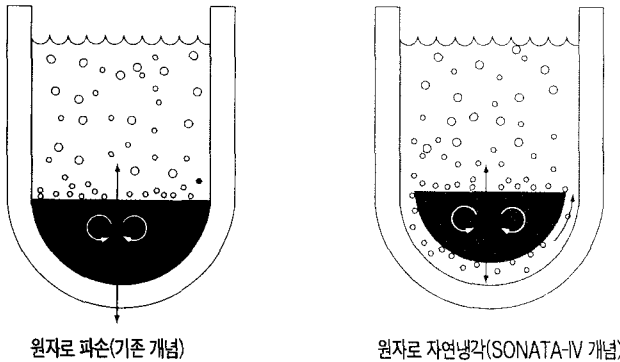
이러한 과정에서 핵연료 용융물과 원자로 사이에 좁은 간격이 생기게 되는데, 이 틈새로 냉각수가 스며들어 원자로를 식히게 된다는 이론이다.

SONATA-IV의 고유한 모성 자연에 의한 안전 냉각 개념이 바로 여기에 있다.

종래의 통념은 원자로의 이러한 열적·기계적 팽창은 곧바로 원자로 하부 용기의 파손으로 이어진다는 것이었다.

신이론의 관점은 전혀 반대이다. 모성 자연에 의한(즉 상기한 바 두 물성 차이에 의해 자연적으로 발생하는) 용융물과 원자로 용기 사이의 간격은 물로 채워지게 되고 비등하게 된다.

어느 시점에 이르러서 국부적으로 냉각수가 고갈되면 원자로가 가열되



(그림 2) 원자로 용기 자연 냉각 기구



확대간극비등(간극=50mm)

협소간극비등(간극=1mm)

(그림 3) 임계열속 가시화 실험

고 열점이 생기게 되는데, 이는 더 큰 간격을 유발하게 되어 진공이 형성됨으로써 상부로부터 냉각수가 다시 빨려들게 된다.

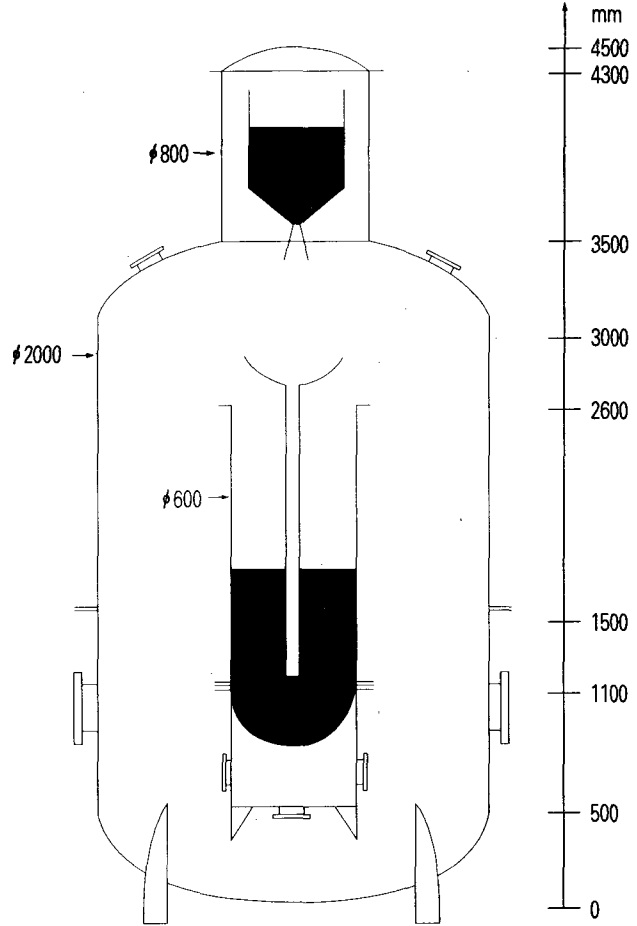
예전에 주된 파손 기구라고 간주되던 국부적인 고온 고압 퍼즐림 현상이 실제로는 원자로를 파손에서 구해내는 절대절명의 자연 냉각을 유발한다는 것이다.

이처럼 자연적으로 발생하는 대단히 효과적인 냉각 기구는 이전에 알려지지 않았던 전혀 새로운 현상으로 국내의 학계는 물론, 원자력 규제 기관 및 산업체 전반에 걸쳐 지대한 관심을 모으고 있다(그림 3).

이러한 이론을 제기함으로써 국제적으로는 OECD 원자력 안전 분과가 이 방면으로 생기고, 미국 NRC(원자력규제위원회)가 한국원자력연구소와 공동 연구를 제의하는 등 세계 원자력 안전 연구 전반의 흐름을 뒤바꿀 정도로 지대한 영향을 미치고 있다.

프로젝트 규모는 총과제 기간이 1996년~2002년으로서 총예산 200억원(US\$ 25M)이 소요될 예정이며, 재원은 국내 100억원, 국외(OECD 회원국 분담) 100억원을 예상하고 있다.

현재 한국원자력연구소에서는 기초 열수력 실험과 동시에 고온(3,000K) 용융물 자연 간극 냉각 실험 LAVA (Lower Plenum Arrested Vessel Attack)를 수행 및 설계 중에 있다(그림 4).



(그림 4) 고온 용융물 냉각 실험장치 LAVA

SONATA-IV를 OECD의 다국 공동 대형 프로젝트로 수행하게 되면 이는 동양권 초유의 쾌거로서, 그간 줄곧 미국과 유럽에서 독점해오던 원자력 기술 시장의 중심이 동양권으로 움직이게 되는 발판을 마련하는 것임은 물론, OECD 프로젝트 종주국으로서 한국의 원자력 위상을 제고하고 안전을 위시한 전반적 기술 수준을 국제

사회에 알리는 결정적인 계기를 마련하는 것이다.

국내적으로는 또한 안전 문화 정착의 국민적 인식 제고에 큰 몫을 담당하게 될 것이다.

OECD 다국 공동 연구 추진 경위

한국원자력연구소에서는 SONA-

TA-IV 프로젝트의 OECD 후원 다국 공동 대형 연구 과제 상정을 목표로, 미국 NRC 주관 국제 공동 중대사고 연구회의(CSARP) 발표, 프랑스 IPSN(원자력방호연구소)과의 공동 연구팀 JRT(Joint Research Team) 결성, OECD 주제 발표 등을 통하여 다방면에 걸친 기초 및 정지 작업을 추진해오고 있다.

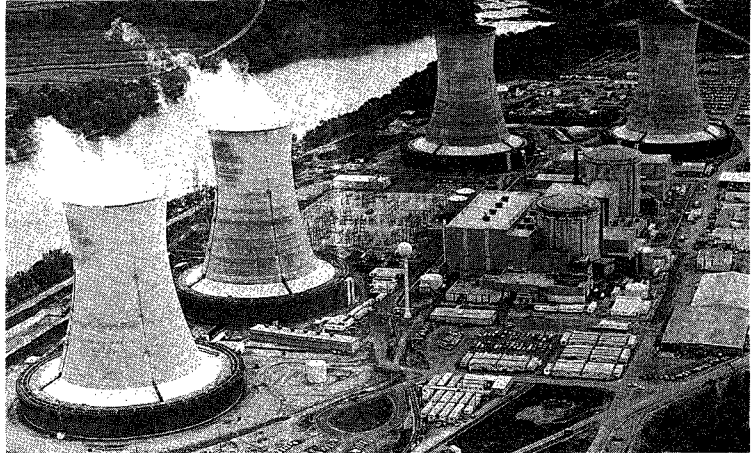
OECD 다국 SONATA-IV 프로젝트 제안 발표는, 현재 중대 사고 종결 계획의 최우선 중점 연구 분야에 초점을 맞추으로써 기술적인 측면에서 대단히 긍정적인 반응을 얻었다.

일례로서 스위스의 PSI(Paul Scherrer Institut) 연구소 주관 국제 공동 원자로 파손 실험 과제 CORVIS 연구진들이 SONATA-IV와 CORVIS를 동시에 OECD 다국 연구 과제로 제안하자는 의사를 표명하였다.

이 제안서에는 한국원자력연구소의 SONATA-IV와 스위스의 CORVIS 및 러시아 원자력연구소 Kurchatov Institute가 주도하는 OECD 다국 공동 RASPLAV 프로젝트와의 공학 기술적 상호 보완 관계가 상세히 밝혀져 있다.

또한 미국 NRC와 스웨덴 SKI, 캐나다 AECB 등의 규제 기관 등이 관심을 표명하였으며, 재정 지원 가능성에 대한 예비 협의를 가진 바 있다.

이어서 OECD 회의에서 정식 의제로 채택하여 RASPLAV 및 CORVIS의 연구 기술진이 참석한 가운데,



미국 TMI 원전의 모습. KAERI에서는 세계 원자력계 최초로 자연 냉각의 근본 원리를 창안해 내고, 컴퓨터 모델링을 통해 TMI-2 사고시 원자로의 급격한 자연안전 냉각현상을 규명하였다.

SONATA-IV의 기술적 타당성 및 프로젝트 주도국으로서의 기술·재원·인력 확보 및 참가 예상국의 범위·재정 및 업무 분담 가능성을 폭넓게 논의하였다.

이외에도 한국원자력연구소에서는 SONATA-IV 프로젝트 실험 해석 및 데이터 분석 작업에 필수적인 컴퓨터 코드 LILAC(Lower-Plenum Integral Analysis Code) 개발을 목표로, 연구소와 프랑스 IPSN 간의 공동 연구팀에 기초한 양 기관간의 상호 협력 체제를 구축하였다.

명실상부 한국원자력연구소와 IPSN 간의 기술 인력면에서 대등한 입장에서의 공동 연구 과제의 창출은 연구 분야의 국제화·특화는 물론, 효율적이고 심도 깊은 연구 풍토 조성에 결정적으로 기여하게 될 것이다.

향후 계획 및 전망

현재 국내 유관 원자력 기관 등을 중심으로 SONATA-IV 기초 단계 합

동 연구 체제를 구축중에 있다.

특히 연구소에서 수행중인 고온 용융물 실험 연구 결과와 대학에서 추진 중인 열수력 및 재료 변형 연구 결과 등을 토대로 세계 각국 공동 출자 연구의 기술 방향을 설정하고 대규모 과제로 발전시켜, 세부 연구 과제 공모 등 유용 가능한 국내외 인력과 시설·설비를 최대한 활용하며, 전문 공학 연구동 실험 시설 확보, 전산화 및 정보화를 추진할 계획이다.

한국원자력연구소의 주관하에 국내 기술 수준 제고와 아울러, 거국적인 협력 체제를 증진시키기 위하여 국내외 전문가들을 모아 SONATA-IV 워크숍을 97년 5월에 연구소에서 개최할 예정이다.

이 워크숍에는 국내 산·학·연 전문가 및 관련 인사들은 물론, OECD 회원국 전문가 및 산업계·규제기관 인사들도 대거 참여시켜 OECD 연례회의의 상정을 위한 광범위한 토론을 가질 예정이다. ☼