

〈특집해설〉

차세대 원자로 설계를 위한 실증시험

노 희 천
(한국과학기술원)

I. 머릿말

TMI와 체르노빌 사고 이후 PA문제가 심각하게 대두되면서, 기존 원자력 발전소의 안전성을 획기적으로 개선할 차세대 원자로 개발이 선진국에서 활발히 이루어지고 있다. 차세대 원자로의 기본특성으로 안전성 측면이 비약적으로 향상되어야 하며, 경제성 측면에서도 경쟁적인 에너지보다는 경제적이어야 한다는 것이다. 기존 원자력 발전소는 역사적으로 돌이켜 볼때, 핵잠수함의 일차계와 화력발전소의 이차계가 결합하여 이루어진 작품이라 해도 과언이 아니다. 시간이 흐르면서 문제가 대두될 때마다 종합적인 발전소 안전성 향상의 점검도 없이, 새로운 계통을 추가하여 왔기 때문에 발전소는 엄청나게 복잡한 구조가 되었다. 일단 붙여진 새 계통은 대부분 다음 발전소 설계시 그대로 반영되어, 기대했던 것만큼의 안전성 향상없이 경제성만 잃어가는 발전소가 되었다. 따라서 차세대 원자로개발에 있어서는 경제성을 갖는 안전성이 향상된 발전소를 개발하기 위한 안전계통의 단순화가 최대 관건이며, 이를 위해서 피동개념이 도입되었다. 피동개념을 이용한 안전시스템은 안전 향상 기대효과가 분명하지만은, 과연 그 시스템이 설계자가 생각하고 분석했던 것과 같이 작동하는가에 대한 의문에 대해서 실험적으로 실증할 필요가 있다. 설계자가 자기 설계의 타당성을 보이기 위해서 설계코드나 안전해석코드를 이용하지만, 그 코드에 사용된 모델이 새로 도입된 개념들을 잘 모사하고 있는지 의심이 되기 때문에, 실험적인 실증이 꼭 필요하다.

실험적인 실증은 대개 두단계로 나누어져 행해진다. 일단계 실증실험은 개념설계 단계에서 행해지며, 이 단계에서는 대부분의 경우 소형실험으로 행해지며, 다음 사항들이 연구된다.

1. 기본 열수력학적인 작동원리 확인
2. 중요한 물리적 현상 파악
3. 예견치 못한 설계문제 파악
4. 용량 적합성과 적용가능여부
5. 2단계 대규모 실증실험의 필요성 결성
6. 설계나 안전해석 코드 모델 개선 여부

일단계 실증실험을 통해 적용가능성 여부가 어느 정도가 확인되고 더 큰 규모의 실증실험의 필요성이 확인되면, 기본설계 과정을 거치면서 일단계 실증실험

을 기초로 이단계 실증실험이 이루어지며 다음 사항이 연구된다.

1. 설계요건 만족여부
2. 최종설계를 위한 수정과 확정
3. 설계나 안전해석 코드 모델 검증 데이터
4. 구조나 운전상 문제, 노화문제등 파악
5. 규제측 질문사항에 대한 답변자료

실증실험은 실증되는 시스템 단위에 따라 다음의 세 부분으로 나누어진다.

1. 부품 입증실험 : 타 산업체나 타 형태의 원자력 발전소에서는 입증되었지만, 적용하기를 원하는 발전소타입에서는 처음으로 사용되는 부품
2. 부분시스템 실증실험 : 부분시스템이 설계된 기능을 제대로 하는지를 테스트
3. 종합시스템 실증실험 : 부분시스템들이 종합적으로 모인 종합시스템내의 각 부분시스템들이 설계된 대로 제 기능을 다하는지 테스트

다음의 표1은 AP-600의 실험항목과 예정표를 보여준다. 표1에 나와 있는 항목중 Integral Extension, Large Term Cooling은 종합시스템 실증실험에 해당하며, 웨스팅하우스가 NRC와의 토의과정에서 일본의 ROSA-IV를 이용한 대규모 종합시스템 실증실험이 실험항목에 추가되었다. 여기에서는 실증실험을 경수로원자로의 피동개념 실증실험에만 논의를 한정하여 다음 사항을 고려해 보기로 하자.

1. 피동 격납용기 냉각장치

2. 피동 고압 안전주입장치
3. 피동 저압 안전주입장치
4. 피동 잠열 제거장치

II. 국내-외 차세대 원자로 설계를 위한 실증실험 동향

1. 피동 격납용기 냉각장치(PCCS) 실증실험

1) AP-600의 PCCS 실증실험

AP-600에서는 사고후 첫 3일동안에는 스테인레스 스틸 격납용기 외부벽면에 물을 공급하여 수막의 증발로 냉각하고, 3일후에는 공기의 자연순환에 의해서 격납용기내에 축적되어 있는 잠열을 제거하는 개념을 사용한다. 수막의 증발이나 공기의 자연순환의 냉각은 피동개념이기 때문에 피동격납용기 냉각장치라고 할 수 있다. 이 개념에 대해서 몇 가지 규제측면에서의 의문점이 제기되고 있다.

1. 물탱크의 물이 노즐에 의해서 스틸 격납용기 외 부분으로 분사될 때 수막이 어느 정도 균일하게 스틸 표면을 덮는가? 균일한 수막형성을 위해 해야 할 표면처리는 무엇인가?
2. 수막에 물공급시 수막의 흐름과 반대로 흐르는 공기와 증기의 흐름이 수막흐름을 불안정하게 하지 않는가?
3. 물탱크 고갈후 공기만의 자연순환에 의한 열제거가 격납용기를 충분히 냉각시킬 수 있는가? 설계 코드에 사용되는 열전달계수가 충분히 보수적인가?
4. 공기 주입구가 상단에 위치할 때 상단에 위치한 공기 출구를 빠져나간 뜨거운 공기가 공기 주입구로 재흡입될 가능성은 없는가?
5. 바람의 방향과 강도가 미치는 영향
6. PCCS의 물탱크의 내진 문제
7. 물내부 노즐의 관막힘현상(clogging)
8. 공기 배플의 구조적 안정성 문제
9. 불균일한 수막형성에 의한 스틸 격납용기의 열응력
10. 대규모 스틸 격납용기 제조 및 검사 문제

표 1. AP-600의 실증실험 예정표

AP600 TEST PROGRAMS	1991												1992												1993											
	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
SSAR SUBMITTAL/RESPONSES													Submittal												1st Response											
PCCS TESTS																																				
Integral Extension (Phase I Completed 8/88)																																				
Large Scale Heat Transfer																																				
Water Distribution																																				
Wind Tunnel																																				
PSS TESTS																																				
Core Makeup Tank																																				
Automatic Depressurization																																				
Long Term Cooling																																				
Check Valve																																				
DNB																																				
PRM (Completed 11/90)																																				
COMPONENT TESTS																																				
RCP/SG CH Air Flow																																				
RCP Water Hydraulic																																				
RCP High Inertia Rotor																																				
Incore FIV																																				
Flow Visualization																																				
1/7 Scale Vessel																																				

(1) 가열판 테스트 실험

이 실험은 앞의 첫 두가지 질문에 대답하기 위해서 행해진 일 단계 실증 실험이다. 이 실험에서는 두꺼운 스틸판이 한쪽에서는 열이 가해지고 다른 쪽에서는 물이 공급되며 아래로 부터 송풍기에 의해 5-40ft/s의 범위를 갖는 공기가 주입된다. 가열판은 두께가 1인치, 길이 6피트, 폭이 2피트인 스틸판이며 AP-600의 스틸 격납용기에 사용된 것과 같은 표면 처리를 했다. 가상사고시 실제 발전소에서 일어날 최고 온도까지 격납용기벽을 가열하기 위해서 UCNTM500이라는 고온 열전달매체를 사용하였는데 용량은 12kw이다. 판은 실제 격납용기 표면각도에서 시뮬레이션하기 위해 판의 각도를 조절하도록 했다. 쌓으로 6군데에서 측정되는 온도에 의해 판의 온도와 열속이 그리고 공기 주입구와 출구의 온도와 속도, 물의 출구량과 온도가 측정되었다.

실험은 물흐름이 없을 때에 전 범위의 물 유량에서, 실제 발전소에서 기대되는 공기유량에서, 그리고 3600Btu/hr-ft²의 열속에서 행하여 졌다. 이 실험에서 발견된 사항은 다음과 같다.

1. 물의 증발이 주요 열전달 현상이며 Colburn상관식에 의한 예측된 값보다 높은 열전달 계수를 가진다.
2. 공기 격막으로의 복사 열전달은 무시 못할 정도이다.
3. 표면 처리된 스틸 표면에서의 수막은 과동층류이며, 수막의 고갈은 일어나지 않으며, 최고속도 40ft/sec까지의 공기속도에서도 수막은 안정되었다.

(2) 소규모 종합 PCCS 실험

그림 1에서 보여주듯이 전 PCCS 열전달과정을 모사하기 위해 만들어 졌다. 이 실험에서 중요한 관점은 다음과 같다.

1. 격납용기 내부와 외부표면에서 일어나는 응축열전달현상
2. 격납용기 외부에서 공기를 통한 열전달량
3. 수막유량
4. 공기중 습도의 영향

실험장치는 3피트 외경과 24피트 높이의 고압 스틸 용기와 15인치 간격의 투명한 환형공간이 있고 3500CFM까지 공기유량을 낼 수 있는 4피트 외경의 팬으로 구성되어 있다. 고온 다습의 공기와 수막의 증발을 모사하기 위해 입구공기가 가열되고 증기가 첨가되어 고습도가 유지되게 한다. 측정되는 것으로는 내부 증기응축률, 외부 물 증발율, 격납용기 외-내부 온도, 수막온도, 공기온도, 습도, 공기속도가 있다. 실험결과 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. 습식과 건식조건에서의 실험 용기내부에서의 열전달율은 가열판 실험과 잘 일치한다.
2. 용기 윗부분의 열전달율은 용기 평균열전달율보다 상당히 더 높다.
3. 수막은 안정하며 간단한 맴을 사용하여 표면처리된 스틸 테스트 용기에 균일한 수막이 형성되었다.

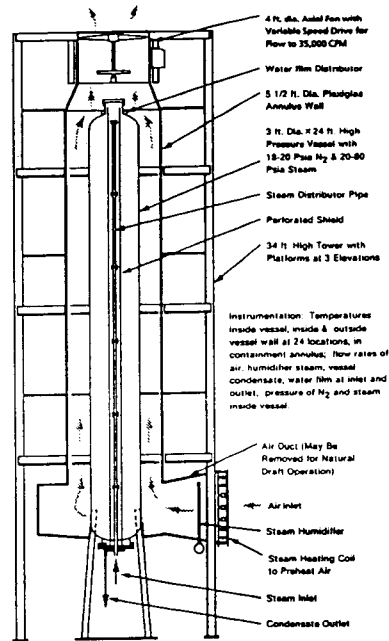


그림 1. 소규모 AP-600 PCCS 종합 실험장치 개략도

(3) 대규모 종합 PCCS 실험

1/8규모의 AP-600 격납용기 실험장치를 이용해 컴퓨터 코드 입증과 코드의 적용가능성을 보여주기

위해 실험이 행하여 졌다. 또한 내-외부 유량양상을 얻기 위해 격납용기 내-외부구조가 첨가되었다. 용기 스틸 쉘 내-외부 벽과 내부 온도 분포를 측정하고 내부의 공기와 증기 질량비, 응축률, 외부 증발률, 외부공기속도와 온도 상승을 측정하기 위해 계측기들이 배치되었다.

(4) PCCS 공기유류 저항 실험

공기유류 저항을 알아보고, 이의 개선을 위해 제안된 설계개념이 적합한지를 알아보기 위해 전 PCCS 공기유류를 모사하는 14°로 절단된 1/6규모의 실험이 행해졌다. 공기격막과 그의 구조물이 첨가되었으며 공기출구부분의 구조물이 충실히 모사되었다. 초기 실험결과에 의하면, 격납용기와 환형공간사이에 유류저항이 너무 큰 것으로 나타나 다음의 설계개선이 있었다.

1. 격납용기 환형공간 입구에 입구모양이 둥글도록 했다.
2. 격막의 지지대는 유류와 일치하게 했다.

(5) PCCS 물 분배 실험

1/8 절단크기를 가진 전 규모의 실험이 행해졌다. 기대되는 격납용기 용접과 표면면이등도 모사되었다 대부분의 물유량에서 불균일한 수막이 형성되었다. 이의 시정을 위해 물의 표면장력을 줄이는 세제등이 물에 첨가되었지만 별 효과가 없었다. 또한 격납용기 물의 골고른 분배를 위해 아래에 여러 물 통로의 구멍이 뚫린 물두이 격납용기 윗 부분에 설치되었는데, 수막을 균일하게 분배하는데 상당히 도움이 됐으며, 100gpm이하의 물 유량에서는 50%이상이 스트립되었다.

(6) PCCS 풍동실험

풍동실험이 캐나다의 Ontario에서 1단계와 2단계 실험으로 나누어 행해졌다. 이 실험에서는 적합한 공기입구위치와 바람이 격납용기 공기 흐름을 도울 것이라는 기대를 확증하기 위해 다음의 두 구조물을 통해 이루어졌다.

1. 격막과 방출구로만 구성된 구조물

2. 공기입구, 격막, 격납용기, 물저장탱크 지지구조물, 공기유량을 위해 팬을 가진 구조물
이 실험에 사용된 구조물은 360°로 돌릴 수 있는 직경이 10인치이고, 높이가 18인치이며 85ft/s의 균일한 풍동 공기 속도로 행해졌다. 이 실험에서 발견된 사항은 다음과 같다.

1. 공기입구가 차폐건물의 꼭대기에 위치할 때도 굴독효과가 생겼다.
2. 15°까지 아랫쪽으로의 바람각도까지는 격납용기 공기유량은 바람방향에 영향이 없지만, 15°의 윗쪽 바람각도까지는 공기유량이 증가했다.

(7) 서울대 PCCS 실험

서울대에서 행해진 PCCS실험은 그림2에서 보여 주듯이 원형의 1/36 규모로 높이 103cm, 반경 50cm인 스테인레스 스틸로 제작되었다. 격납용기 내부에 물을 주입한 후에 3kw용량을 가지는 전열봉2개로 가열하여 철재 격납용기의 벽면을 100°C의 일정한 온도로 유지한 상태에서 실험이 수행되었다. 공기유로

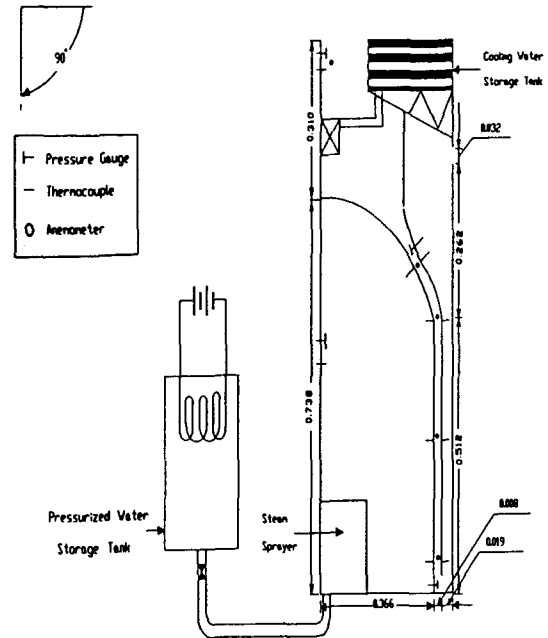


그림2. 서울대의 PCCS 실험장치 개략도

내에 가열되어 상승하는 공기의 속도와 온도를 측정하기 위해서 핫 와이어를 설치하였으며, 공기속도가 느린 경우 핫 와이어를 이용한 속도측정에 어려움이 많아 스모크 와이어를 사용한 유동가시화 방법을 병행하였다. 외부 풍속의 영향을 확인하기 위하여 각각의 측정시마다 제속 변화시키며 계속하였으며, 공기 유입구의 면적영향을 평가하기 위해 300×40mm와 240×14mm로 크기를 조절하여 계속하였다. 발견된 사항은 다음과 같다.

1. 공기 유입구가 위쪽에 위치할수록 굴뚝효과가 커 공기의 상승효과가 커 공기의 평균 상승 속도가 더 높아 냉각효과가 컸다.
2. 외부풍속이 증가함에 따라 유로내의 공기속도가 조금씩 증가하는 경향을 보여주었다.

2) SBWR의 피동 격납용기 냉각기(PCC) 실증시험

피동 격납용기 냉각기는 잠열에 의해 원자로 용기 내에 발생한 증기를 응축함에 의해서 장기간 일차 격납용기 압력을 제한하는 목적으로 개발되었다. PCC는 두 개의 모듈로 되어있고 각각은 상단 헤드, 수직

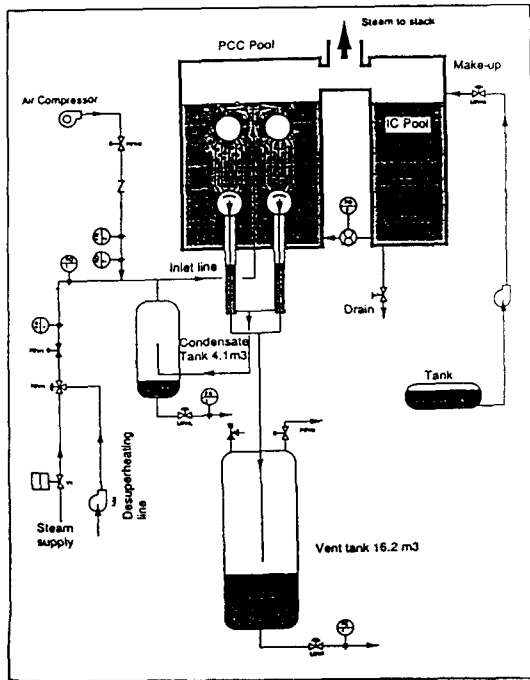


그림3. SBWR의 PCC 실험장치 개략도

튜브 다발, 하단 헤드로 구성되어 있다. 원자로 용기로부터 증기 공급관은 격납용기를 관통하여 일차 격납용기 외부에 위치하여 대기에 열려있는 PCC 풀내에 있는 증기 헤드와 연결되어 있다. PCC에서 응축된 물은 다시 격납용기를 관통하여 압력억제탱크로 연결되는 관을 따라서 탱크에 걸집된다. PCC거동실험은 이태리의 Piacenza에 위치한 SIET에서 행하여진다. 그림은 PCC실험장치의 상세도이다. SIET실험은 열제거 능력, 유량, 압력 강하, 안전한 운전, 비응축성 개스 배출등의 PCC의 기능과 주기적 응력, 응축유인진동의 구조 해석을 실증하는 것이 목적이다. 수집된 데이터는 풀거동의 열유체 모사 코드인 TRACG의 입증을 위해 사용될 것이다.

2. 피동 잠열 제거장치(PRRH) 실증시험

PRRH은 비 냉각재상실사고시 노심잠열을 제거하기 위한 시스템이다. 비안전등급 기동주급수장치 작동이 실패한 후 저 증기발생기 수위나 저 광역 증기 발생기 수위, 또는 1단계 자동안전감압장치 작동시 PRRH이 작동하도록 설계되었다. PRRH에서 제거된 열은 격납용기내 저장수탱크(IRWST)에서 가열과 비등, 격납용기 쉘의 PCCS에 의한 열제거를 통한 응축 그리고 IRWST로 되돌아 오면서 무한대 시간동안 열제거원이 되도록 설계되어 있다.

실험목적은 다음과 같다

1. IRWST의 섞임 특성
2. IRWST에서 격납용기내로 상당한 양의 증기를 방출하는데 요구되는 최소한의 시간
3. 개발된 열전달계수, 증기발생, 섞임특성을 판 설계에 적용여부
4. 튜브위의 IRWST수위가 IRWST로 부터 격납용기로 증기방출에 미치는 영향

실제 모형설계 열교환기는 길이는 20피트, 외경 0.75인치, 두께 0.065인치이며 304스테인레스 스틸 수직관이 서로 1.5인치 떨어져 있는 450개의 수직관으로 구성되어 있는데, 실험에서는 같은 제원을 가진 튜브가 3개가 사용된다. IRWST를 모사하는 탱크는 직경이 4피트이고 높이가 32피트 둥근 탱크이다. 실험에 사용되는 측정기기로는 튜브내와 벽, 이차측 탱크 물

속에 사용된 열전대, 일차측 압력계, 유량계, 물수위계, 탱크로 빠져나가는 증기유량계, 총열량계등이 있다.

이 실험에서는 다섯 가지의 테스트가 행해졌다.

1. 과도 테스트 : 다양한 튜브 유량과 입구 온도에 의해서 탱크 섞임에 대한 정보를 얻기 위해 행해졌다. 또한 탱크가 과냉상태일때 일어나는 자유대류 열전달계수를 개발하기 위해 행해졌다. 주어진 튜브유량과 입구 온도에 대해서 대기조건으로 부터 비등까지 과열시키면서 행해졌다.
2. 정상상태 테스트 : PRHR 열교환기의 열전달계수를 개발하기 위해 행해졌다. 탱크가 포화상태조건에서 실험이 행해졌다. 입구 온도는 250°F-650°F 범위내에서 50°단위로 변경되었다.
3. 플룸 테스트 : 열교환기 튜브 주위에 존재하는 물-증기 플룸의 특성을 결정하는 것이 테스트의 목적이다.
4. 기하학적 테스트 : 최종 PRHR 설계에 테스트결과적 적용성을 확증하기 위해 행해졌다. 테스트되는 설계변경요소로는 열교환기가 IRWST벽까지의 거리, 튜브사이의 거리, 튜브위의 물수위등이 있다.
5. 튜브 노출 테스트 : 열교환기 튜브의 0%, 25%, 50%, 75%, 100%의 노출까지 탱크 물 수위가 낮아질 때 열교환기의 열적 거동을 결정하기 위해 행해졌다.

실험결과는 다음과 같다.

다양한 구조에 대한 열전달 특성은 비슷하지만 격막의 첨가와 튜브를 뒷 벽에 더 가깝게 위치할수록 열전달 특성이 개선되었다. 이는 튜브 주위에 증가된 유체의 부력때문에 일어났고 탱크의 섞임이 증가되었지만 전비등까지의 시간이 줄었다. 플룸 테스트에서 각 튜브의 플룸이 다른 튜브에 영향을 주지 않아 튜브 피치선택이 적당함을 보였다. 부력이 튜브주위에 존재하고 현재 설계치인 튜브층의 간격이 2피트 정도면 서로 아무 영향을 미치지 않았다. 정상상태 테스트는 자유대류와 비등 열전달 영역에서 테이타가 얻어졌는데, 자유대류인 경우 Eckert나 Jackson 상관식, 비등인 경우는 Rohsenow, McAdams, Jens-Lottes와 비교될 때 열전달계수가 더 낮았다. 이 열

전달계수는 실험에 사용된 튜브수에 별 영향을 받지 않아서 튜브 피치를 증가해도 아무 이익이 없음을 보여주었다. 과도상태실험을 통해 PRHR 열교환기가 열펌프로 작동하며 열적 성층화 현상이 일어남을 알 수 있었다. 탱크 물은 튜브를 따라 처음에는 자연대류에 의해 나중에는 약한 비등에 의해 열전달이 되었다. 가열된 플룸은 튜브를 따라 탱크 꼭대기까지 윗부분으로 흘렀고 탱크 윗부분에서 뜨거운 물층같이 수평방향으로 퍼져 나가 열적 성층화현상을 일어켰다. 위로 흐르는 뜨거운 물을 대신한 찬 물은 탱크 아래로 흘러 가열되는 PRHR를 향해 흘렀다. 튜브노출 테스트는 이상유동의 수위위에서는 엔트레인먼트가 함유된 증기혼합물에 의해 풀 냉각이 일어나 낮은 냉각률을 보였다.

3. 피동 고압 안전 주입계통 실증실험

전 범위의 유량과 압력에 걸쳐 노심 보충 탱크(Core Makeup Tank)의 중력주입과 자동감압장치(Automatic Depressurization System)를 동작시키는 CMT내의 수위계측기의 작동을 검증하기 위해 행해졌다. CMT의 물이 원자로 일차측으로 수두에 의해서 주입될 때 저온관과 가압기로 부터 증기가 CMT의 꼭대기로부터 방출된다. 증기의 일부는 CMT로 들어갈 때 압력균형관과 CMT내에서 응축되어 탱크 주입거동에 영향을 미칠 수 있다. 이 테스트 목적은 탱크가 계산된 대로 주입됨을 검증하는 것이다.

1) 웨스팅 하우스의 실증 실험

직경이 1/6이고 높이가 1/3로 축소된 CMT가 설치되었고 코드 모델을 입증하기 위해 탱크내의 응축물을 얻기 위해 열전대가 설치되었다.

1. 실험 1 :

감압될 때의 CMT벽응축물을 알기 위해 CMT를 비우고 방출관을 잠그고 CMT내의 응축된 물은 CMT수위 제어 밸브를 통해 모아 CMT의 벽을 통한 응축량을 측정하여 코드의 응축모델을 입증한다.

2. 실험 2 :

감압시 CMT벽과 물표면 응축물을 알기 위해서 CMT의 수위를 유지하면서 실험 1과 같이 응축물을

수집 측정한다.

3. 실험 3 :

초기에 CMT와 증기관에 물을 채워 놓고 다양한 CMT주입 유량에 대해서 CMT거동을 알기 위해 실험이 행해진다.

2) 한국과학기술원의 CMT실증실험

CMT내에서의 응축현상과 열적성층화 현상을 실험적으로 규명하는 목적으로 한국과학기술원에서 소규모 실험장치가 설치되었다. 그림4에서 보듯이 실험장치는 1/127의 CMT용량과 1/6의 가압기와 CMT연결파이프 내경을 가지며 최대 열용량이 50Kw의 히터를 가지고 있다. CMT내의 현상을 보기 위해서 30cm직경의 원형유리관을 설치해 놓고 있으며, 증기연결관 일부를 14.7°정도의 경사를 둔 것은 증기연결관에서의 응축유량을 측정하기 위해서 인데, CMT연결부위에 그림과 같이 파이프 하부에 2cm 가량의 홈을 파서 응축냉수에 연결시켜두었다. 증기 유량 측정을 위하여 와류유량계를 설치하였고, CMT내의 이상유동수위측정을 위하여 HJTC(Heated Junction Thermocouple), 열적성층화 현상을 보기 위하여 탱크위로 부터 5cm간격으로 k-type열전대 32개를 다발형태로 설치하였다.

다음의 예비실험이 행하여졌다.

1. 실험1

채널8까지가 증기부분이고 그 이상은 물로 채워져 있는 상태에서 증기발생기의 연결밸브를 열어두고 5기압까지 계속 가열된 결과가 그림5에서 보여주는데 1500초 가량에서 증기부분과 물부분에서 열적 성층화가 일어나고 있음을 보여 주고 있다. 물과 증기표면에서 응축에 의해 발생된 열은 물내의 주로 전도에 의한 열전달에 의해 열이 전달됨을 보여준다.

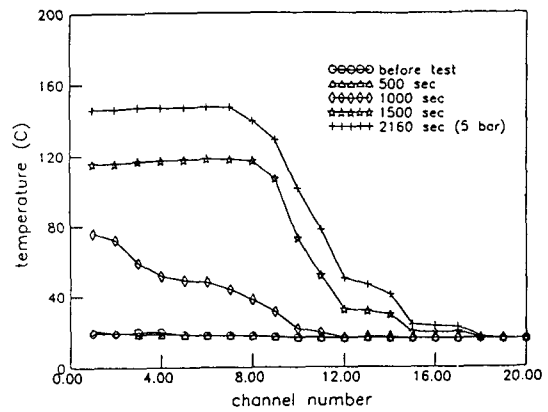


그림 5. CMT내의 물 온도에 대한 시간에 따른 변화

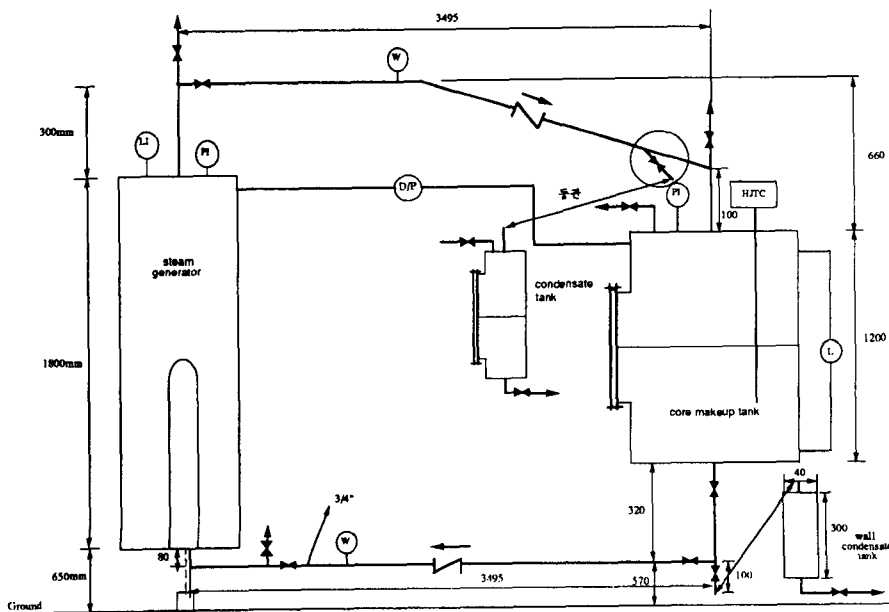


그림 4. 한국과학기술원의 CMT 실험장치 개략도

2. 실험2

CMT를 물로 가득 채우고 증기발생기가 5기압에 도달했을 때 증기연결밸브를 순간적으로 열어 실험을 했다. 밸브를 여는 순간에 증기 제팅이 CMT수위의 1/3까지 도달할 때까지 계속 제팅됨을 관찰할 수 있었다. 제팅이 물표면에 분사된 증기를 CMT높이의 반 이상의 물을 뿜는 작은 방울로 깨어져 응축됨을 볼 수 있다. 이 경우에는 증기제팅에 의해서 응축이 촉진되고 혼합시켜주는 효과때문에 열적 성층화가 거의 일어나지 않았다.

3. 실험3

CMT를 물로 반만 채우고 실험2와 같이 하였다. 증기가 방출될 때에 물표면이 몹시 출렁거리나 실험2처럼 증기가 물표면을 뚫지는 못했다. 실험3에서는 열적 성층화가 일어나나, 실험1에 비교하면 그 정도가 크지 않음을 알 수 있다.

이상의 관찰에서 실제 발전소의 CMT운전조건에 따라서 크게 세 가지 유형의 응축패턴이 있는 것을 알 수 있다.

- 증기 제팅 응축
- 교란된 표면 응축
- 열전도 응축

이 응축 패턴은 증기 유속과 CMT수위 그리고 열적 성층화정도에 의존한다.

4. 자동감압장치(Automatic Depressurization System) 실증실험

ADS는 원자로 일차측의 압력을 IRWST내의 물이 중력에 의해 주입될 정도까지 빠른 시간내에 강하시키는 역할을 맡는다. 이 실험은 이태리의 ENEA의 Casaccia에 위치한 VAPORE(Valve and Pressurizer Operation Related Experiment) 실험장치에서 행해졌다. AP-600의 ADS중에서 세 그룹의 ADS는 가압기에 연결되어 IRWST로 증기를 방출하게 되어 있고, 네번째 그룹의 ADS는 고온관에 연결되어 증기를 격납용기로 직접 방출하게 되어 있다. ADS를 통한 증기방출은 파이프나 물탱크내에 다양한 문제를 일으킨다. 동적 하중 강도는 원자로 일차측과 물탱크의 열유체 조건과 밸브 작동양식, 스파저 모양에 의존한다. VAPORE는 직경 8m 높이 10m의 콘크리트

물탱크안으로 수십톤으로부터 200kg/s까지의 다양한 증기량을 방출할 수 있는 실험장치이다.

ADS실험은 두 단계로 나누어 진다.

1. 1단계

물탱크내의 증기응축에 의해 발생된 동적 하중의 시간에 따른 변화량의 데이터를 얻고 새롭게 설계된 스파저 장치를 실증하는 것이다. 다양한 사고과정을 시뮬레이션하기 위해 증기 유량, 풀내의 물용량, 탱크내의 물의 온도가 조절된다.

2. 2단계

증기나 포화된 물이 실제 ADS밸브와 같은 밸브로 통과하도록 해서 데이터를 얻는 것이다.

VAPORE실험장치의 전개도가 그림6에 보여진다. 용기의 설계 압력과 온도는 19.7MPa과 365°C이며, 부피는 40m³ 이며, 1.6Mw 전기히터에 의해 증기가 공급될 수 있다. 용기로부터 증기는 두 증기선을 통해 제어 밸브와 정지 밸브가 있는 데스크 드럼으로 이동이 된다. 용기나 파이프에서 발생된 물은 습분 분리기에서 분리되어 용기로 되돌려 보내어 진다. 테스트 드럼으로 가는 증기유량은 노즐 유량계에 의해 측정된다. 실험준비 과정에서 초기 VAPORE실험장치의 여러 부분에서 수정되었다. 물탱크는 운전 열적 제한치가 60°C에서 100°C로 상향조정되고 압력 하중의 값과 주파수에 대한 제한치의 조정으로 물탱크 벽과 마루는 고온 레지스텐트 콘크리트로 강화 콘크리트 쉘을 가지고 라이너되어 있다. 12개의 온도 센서와 12개의 압력 센서가 탱크내에 각 축방향으로 수평되게 설치되었다. 압력, 온도, 변형률, 구조 가속 계이지가 방출관과 스파저에 설치되었다.

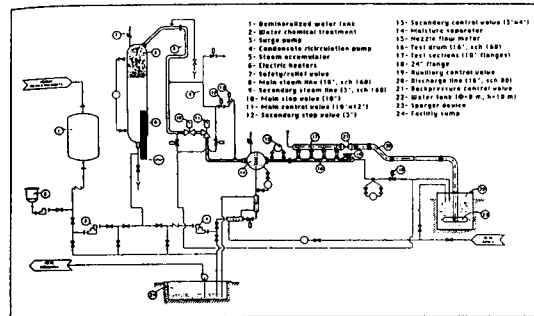


그림 6. 1단계 실험의 VAPORE 실험장치 개략도

2단계에서는 그림7에서 보여 주는 것과 같이 증기와 포화된 물을 분리하여 방출하도록 포화된 물 공급관이 따로 설치되어 있다. 8MPa의 압력과 70℃와 100℃의 물온도에서 두 실험결과가 그림7에서 보여진다. 70℃의 물온도에서 압력파동의 크기가 더 크고 주기가 훨씬 더 짧음을 알 수 있다. 100℃에서는 같은 압력에서 공기를 공급하는 것과 비교될 수 있는 저 주파수파동이 일어나, 이 경우에는 응축에 의한 열적 효과보다 동적 효과가 더 큼을 알 수 있다.

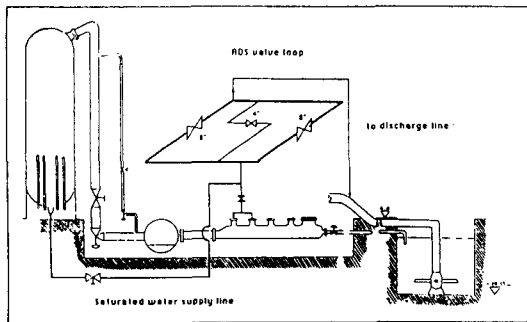


그림 7. 2단계 실험의 VAPORE 실험장치 개략도

Ⅲ. 맺음말

지금까지 차세대 원자로의 실증시험에 관한 전 세계적인 동향과 실험결과를 살펴보았다. 새로운 안전 개념이 원자력 발전에 도입될 때 안전개념의 타당성

여부나 설계요건 만족여부를 답하기 위해 얼마나 광범위한 실증시험이 필요한가를 살펴보았다. 2000년대의 차세대 원자로의 개발과 기술자립을 목표로 하는 한국의 원자력계를 볼 때, 이 분야를 너무 소홀히 하지 않나하는 생각이 든다. 실증시험분야는 엄청난 연구비와 경험을 필요로 하기 때문에 국제협력이 필수적이며, 국내에서 행해야 하는 실증시험 항목의 선정은 앞으로 국내 원자력계가 해야 할 일이라 생각이 된다.

참 고 문 헌

1. T. Venne et. al., "The Westinghouse AP600 Passive Containment Cooling Test Analysis Program," ANP'92 International Conference on Design and Safety of Advanced Nuclear Power Plants, Tokyo, (1992)
2. A. Villani et. al., "Blowdown Tests on the Automatic Depressurization System of the AP600 Reactor," *ibid.*
3. F. Magris et. al., "Design and Experimental Verification of Isolation Condenser and Passive Containment Cooler for SBWR," *ibid.*
4. 박 군철 외, "신형원자로의 피동 격납용기 냉각재 실증시험," 제1차 신형원자로 연구센터 연구발표회 논문집(1993)
5. 노희천 외, "신형원자로의 피동 고압안전주입계통 실증시험," *ibid.*